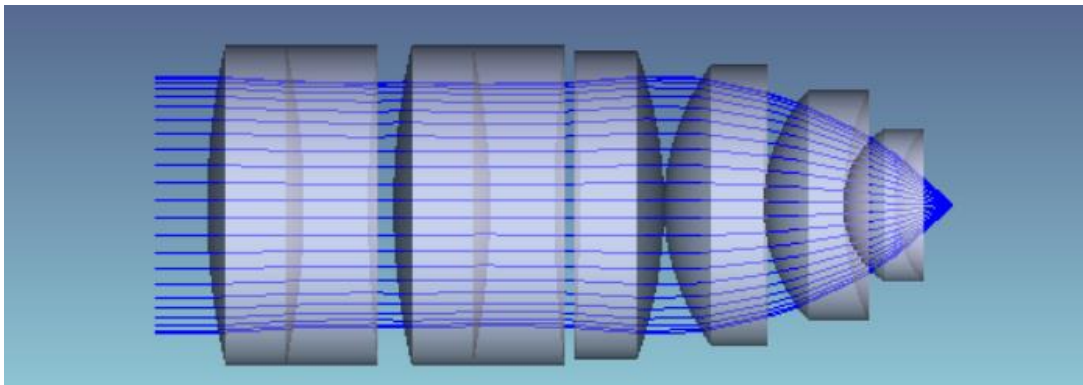




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

ΟΠΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ LASER
(LIFT TECHNIQUE)



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του Σλαβικόβσκι Βλαντισλάβ

Ιωάννα Ζεργιώτη, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Δημήτρης Παπάζογλου, Συνεργαζόμενος Ερευνητής ΙΤΕ και Αναπληρωτής Καθηγητής Παν. Κρήτης

Ιωάννης Ραπτης, Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα αναφερθούμε στην οπτική σχεδίαση συστήματος μικρό-εκτύπωσης με τη μέθοδο της εμπρόσθιας, επαγόμενης με *laser* μεταφοράς (*LIFT technique*). Συγκεκριμένα η μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την οπτική σχεδίαση και ανάλυση τεσσάρων συστημάτων άμεσης μικρό-εκτύπωσης με *laser*. Παρουσιάζεται ενδελεχώς η μεθοδολογία της οπτικής σχεδίασης έχοντας ως παραδείγματα τα επιμέρους οπτικά συστήματα (*achromat lens, beam expander & objective lens*) αλλά και τα τελικά συστήματα της μικρό-εκτύπωσης. Το βασικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την οπτική σχεδίαση και ανάλυση είναι το *zemax* ενώ επιπροσθέτως αξιοποιήθηκαν το λογισμικό EXCEL καθώς και οι γλώσσες προγραμματισμού ZPL (*Zemax Programming Language*) και *Python*. Σε κάθε επί μέρους παράδειγμα γίνεται έμφαση τόσο στο θεωρητικό υπόβαθρο όσο και στην επεξήγηση της χρήσης του *zemax* υπό το πρίσμα της οπτικής σχεδίασης και ανάλυσης. Το αποτέλεσμα της εργασίας είναι η παρουσίαση και χαρακτηρισμός τεσσάρων συστημάτων μικρό-εκτύπωσης με *laser*, κάθε ένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο αναγνώστης είναι σε θέση να κατανοήσει ορισμένες κρίσιμες παραμέτρους στην σχεδίαση των εν λόγω συστημάτων και εν τέλει να επιλέξει είτε το σύστημα το οποίο του αρμόζει είτε την πορεία την οποία πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να σχεδιαστεί το κατάλληλο σύστημα.

Λέξεις Κλειδιά.

Οπτική σχεδίαση, οπτική ανάλυση, *zemax*, *Laser Induced Forward Transfer (LIFT)*, Μικρό-εκτύπωση με *laser*, αχρωματικός φακός, αντικειμενικός φακός, *beam expander*

Abstract

In the present master's thesis, we will write about the optical design of a micro-printing system with the method of laser induced forward transfer (LIFT). Specifically, the master's thesis deals with the optical design and analysis of four laser micro-printing systems. The methodology of optical design is presented in detail, having as examples the individual optical systems (achromat lens, beam expander & objective lens) but also the final systems of micro-printing. The main software we used for optical design and analysis is ZEMAX and in addition EXCEL software was used as well as the ZPL (Zemax Programming Language) and Python programming languages. Each individual example emphasizes both the theoretical background and the explanation of the use of zemax by the point of optical design and analysis. The result of the work is the presentation and characterization of four micro-printing laser systems, each of which is characterized by advantages and disadvantages. The reader can understand some critical parameters in the design of these systems and ultimately choose either the appropriate system for him or the path to be followed in order to design the appropriate system.

Keywords.

Optical design, optical analysis, zemax, Laser Induced Forward Transfer (LIFT), laser micro-printing, achromat lens, objective lens, beam expander

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου, τους συνεργάτες μου, όλα τα μέλη της ομάδας της κυρίας Ζεργιώτη και όλους τους εμπλεκόμενους φορείς οι οποίοι μου έδωσαν τη δυνατότητα να αποκτήσω γνώσεις και δεξιότητες οι οποίες εν τέλει με οδήγησαν στη συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Ιδιαίτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ιωάννα Ζεργιώτη και τον Δημήτρη Παπάζογλου για την υποστήριξή τους όσον αφορά την οπτική σχεδίαση.

Επίσης θα ήθελα να αναφέρω ότι η οπτική σχεδίαση ξεκινάει από την ιδέα μιας εφαρμογής η οποία μετά από πολύπλευρη έρευνα δίνει τις προδιαγραφές αλλά και ένα νόημα στην οπτική σχεδίαση. Έτσι λοιπόν θα ήθελα να τονίσω ότι η έρευνα στον κλάδο της μικρό-εκτύπωσης με *laser*, η οποία διεξάγεται από την κυρία Ζεργιώτη και την ομάδα της, είναι αξιοθαύμαστη και αξίζει πολλά συγχαρητήρια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία παροχής λογισμικού οπτικής σχεδίασης *Zemax OpticStudio* για την εκπαιδευτική άδεια στα πλαίσια της οποίας κατάφερα να εκπονήσω τη μεταπτυχιακή εργασία.

Ευχαριστώ ...

τη γη και τον αιθέρα
του παιδιού το βλέμμα
τη άνοιξη και την οχιά
που με σπαθί στο αίμα
με οδήγησαν στην λευτεριά

Βλαντισλάβ Σλαβικόβσκι

© (2021) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Απαγορεύεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

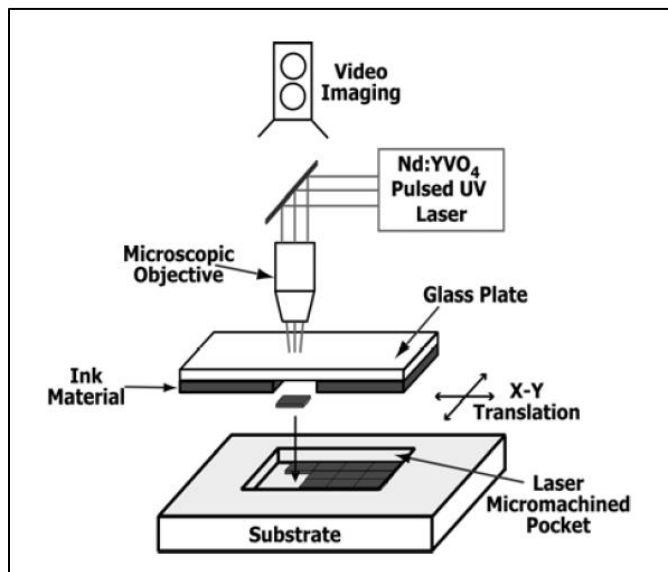
Περιεχόμενα

1	Άμεση πρόσθια μεταφορά (εκτύπωση) με <i>laser</i> - <i>LIFT (Laser Induced Forward Transfer)</i>	6
2	Προδιαγραφές του συστήματος	9
3	Προσχέδιο του συστήματος.....	11
4	Αχρωματικός φακός - (<i>achromat</i>).....	14
4.1	Θεωρία - <i>Achromatic cemented doublet lens</i>	14
4.2	Παράδειγμα σχεδίασης ενός <i>achromat</i> φακού.....	19
4.3	Ανάλυση σχεδίου.....	26
5	<i>Laser Beam expander</i> (Διευρυντής δέσμης <i>laser</i>).....	28
5.1	Θεωρία	28
5.2	<i>Achromat beam expander</i> - σταθερής μεγεθυντικής ισχύς	30
5.3	<i>Variable beam expander</i>	40
5.4	<i>Variable beam expander</i> PNP-80-20-120-EP1.5-MP1.3-3.3	41
5.5	<i>Variable beam expander</i> PNP-400-100-600-EP5.0-MP1.0-4.0	47
5.6	<i>Variable beam expander</i> με μηχανισμό ζουμ	52
5.7	<i>VH σημασία των variable beam expanders</i>	59
6	Αντικειμενικός φακός (<i>objective lens</i>)	61
6.1	Αντικειμενικός φακός EP3-FL15-A-1.....	61
6.2	Αντικειμενικός φακός EP3-FL4-0	66
6.3	Αντικειμενικός φακός EP2-FL1.5-SA-1	69
6.4	Αντικειμενικός φακός EP10-FL7-F-0	73
6.5	Σύνοψη αποτελεσμάτων	76
7	Σύστημα μικρό-εκτύπωση με <i>laser</i> (<i>LIFT technique</i>).....	77
7.1	Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A1»	77
7.2	Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A2»	87
7.3	Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A3»	90
7.4	Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A4»	93
7.5	Σύνοψη αποτελεσμάτων	103
8	Προτάσεις για την εξέλιξη των συστημάτων	105
9	Βιβλιογραφία	106
10	Παράθεμα.....	108

Κεφάλαιο 1^ο

Άμεση πρόσθια μεταφορά (εκτύπωση) με *laser* - *LIFT* (*Laser Induced Forward Transfer*)

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην οπτική σχεδίαση συστήματος μικρό-εκτύπωσης με *laser* και συγκεκριμένα ενός συστήματος το οποίο εφαρμόζει την τεχνική η οποία στην αγγλόφωνη βιβλιογραφία ονομάζεται *Laser Induced Forward Transfer* (*LIFT*). Προφανώς η σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί μεταξύ των άλλων και τη κατανόηση της ίδιας της τεχνικής μαζί με ορισμένες κρίσιμες παραμέτρους τις οποίες θα πρέπει να προσέξουμε στον σχεδιασμό. Ωστόσο θα πρέπει να είναι ξεκάθαρο ότι η μεταπτυχιακή εργασία δεν αποσκοπεί στην ενδελεχή μελέτη της μεθόδου *LIFT* και ως εκ τούτου στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μόνον μια συνοπτική αναφορά στην εν λόγω μέθοδο. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μέθοδο *LIFT* δίνονται ενδεικτικές βιβλιογραφικές αναφορές [1], [2], [3] και [4].



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος μικρό εκτύπωσης με τη τεχνική *LIFT*. (1)

Προκειμένου να αναφερθούμε στην τεχνική *LIFT* θα πρέπει πρώτα να αναφερθούμε στην τεχνική *LIT* (*Laser Induced Transfer*) η οποία αποτελεί γενικευμένη μέθοδο η οποία εξειδικεύεται τις τεχνικές *LIFT* (*Laser Induced Forward Transfer*) και *LIBT* (*Laser Induced Backward Transfer*). Έτσι λοιπόν η μέθοδος της επαγόμενης μεταφοράς με *laser* (*Laser Induced Transfer*) ή με άλλα λόγια η μέθοδος άμεσης εκτύπωσης με *laser* αναφέρεται στη μεταφορά μιας ποσότητας ενός υλικού από ένα υπόστρωμα σε ένα άλλο υπόστρωμα με τη βοήθεια ακτινοβολίας *laser* (εν γένει χρησιμοποιείται παλμικό *laser*).

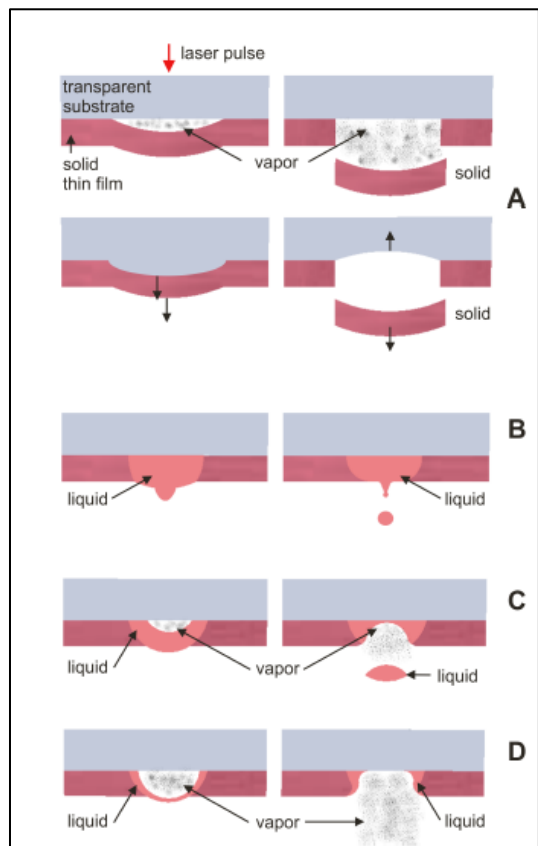
Η ειδική περίπτωση της εμπρόσθιας επαγόμενης μεταφοράς με *laser* (*Laser Induced Forward Transfer*) ή εναλλακτικά η

εμπρόσθια άμεση εκτύπωση με *laser* αναφέρεται στην περίπτωση κατά την οποία το υλικό της εκτύπωσης μεταφέρεται από ένα υπόστρωμα σε ένα άλλο υπόστρωμα, ακολουθώντας την πορεία της ακτινοβολίας *laser* (ή της υποτιθέμενης πορείας της δέσμης *laser*, εφόσον η ακτινοβολία της έχει απορροφηθεί από το υλικό της εκτύπωσης). Πιο αναλυτικά η ακτινοβολία *laser* συγκεντρώνεται σε ένα λεπτό στρώμα (τάξης μανομέτρων ή μικρομέτρων) του υλικού το οποίο πρόκειται να εκτυπωθεί και το οποίο βρίσκεται στο κάτω μέρος ενός διαφανούς υποστρώματος (*fused silica* ή *quartz*). Έχοντας απορροφήσει την ακτινοβολία, το υλικό της εκτύπωσης μεταφέρεται προς το υπόστρωμα το οποίο βρίσκεται μπροστά και σε κοντινή απόσταση από το στρώμα του υλικού της εκτύπωσης. Η μεν επίστρωση του υλικού της εκτύπωσης ονομάζεται δότης ενώ το υπόστρωμα του υλικού της εκτύπωσης ονομάζεται υπόστρωμα του δότη (*donor substrate*). Από την άλλη το υπόστρωμα στο οποίο μεταφέρεται το υλικό

της εκτύπωσης ονομάζεται αποδέκτης ή στόχος (*receptor, acceptor, receiving & target substrate*). Εάν το υλικό της εκτύπωσης δεν μπορεί να απορροφήσει αρκετή από την ενέργεια της ακτινοβολίας προκειμένου να είναι εφικτή η εκτύπωση, τότε μεταξύ του υποστρώματος του δότη και του στρώματος του υλικού της εκτύπωσης, τοποθετείται ένα στρώμα δυναμικής απελευθέρωσης (*Dynamic release layer -DRL*) το οποίο απορροφά την ακτινοβολία και οδηγεί στην εκτύπωση μαζί με το υλικό του δότη.

Εν γένει η τεχνική *LIFT* είναι μια τεχνική άμεσης εκτύπωσης η οποία χρησιμοποιείται για την εναπόθεση διαφόρων υλικών υγρής ή στερεής φάσης, συμπεριλαμβανομένων νάνο (μικρό) σωματίδια μετάλλων, οργανικά υλικά, βιολογικά υλικά(πχ. *DNA*), υλικά του άνθρακα (πχ. γραφένιο) και διηλεκτρικά υλικά. Την ίδια στιγμή πέραν της μεγάλης ποικιλίας των εκτυπωμένων υλικών παρέχεται η δυνατότητα εκτύπωσης σε ποικίλα υποστρώματα, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και εύκαμπτα υποστρώματα και άρα παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας ευκάμπτων ηλεκτρονικών.

Οι παράγοντες οι οποίοι διαδραματίζουν ρόλο στην μεταφορά του υλικού στο υπόστρωμα του αποδέκτη περιλαμβάνουν τόσο τα χαρακτηριστικά του ίδιου του υλικού όσο και της ακτινοβολίας του *laser*. Μια κρίσιμη παράμετρος είναι η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) στην περιοχή του δότη όπου εστιάζεται η ακτινοβολία του *laser*. Έτσι λοιπόν όταν ο δότης βρίσκεται υπό τη μορφή επίστρωσης σε στερεά φάση τότε για σχετικά μικρές ενέργειες (περίπτωση A) ανά μονάδα επιφάνειας ο μηχανισμός της μεταφοράς χαρακτηρίζεται από μεταφορά τμήματος της επίστρωσης του δότη χάριν της ώθησης ενός θύλακα αερίου ο οποίος δημιουργείται είτε από τη αέριο ή υγρό το οποίο μπορεί να υπάρχει στη διεπιφάνεια δότη/υποστρώματος είτε από το ίδιο το υλικό του δότη. Από την άλλη εφόσον η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) είναι επαρκής τότε το υλικό του υποστρώματος υγροποιείται και ως εκ τούτου η μεταφορά γίνεται μέσω ρευστής σταγόνας του υλικού του δότη (περίπτωση B). Για μεγαλύτερη ροή ενέργειας σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις εν γένει ο μηχανισμός της μεταφοράς είναι υβριδικός περιλαμβάνοντας την υγροποίηση και την εξάτμιση του υγροποιημένου υλικού του δότη. Σε αυτή τη περίπτωση το προϊόν της μεταφοράς μπορεί να είναι υγρή σταγόνα (περίπτωση C) ή ατμοί (περίπτωση D) οι οποίοι υγροποιούνται στην επιφάνεια του υποστρώματος του αποδέκτη. Ομοίως αν το υλικό του δότη είναι ένα υγρό ή μια διασπορά σωματιδίων σε υγρό μέσο τότε ο μηχανισμός περιλαμβάνει την εξάτμιση και τη δημιουργία θύλακα αερίου στο σημείο της εστίασης του *laser* σε μικρή περιοχή του υλικού του δότη με την επακόλουθη εκτίναξη σταγόνας ή αερίου του υλικού του δότη προς το υπόστρωμα του αποδέκτη.



Εικόνα 2. Σχηματιστικές αναπαραστάσεις διαφορετικών μηχανισμών *LIFT*. (2)

Συνοπώς γίνεται αντιληπτό ότι η ενέργεια της ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) στην περιοχή του δότη επηρεάζει το μηχανισμό της άμεσης εμπρόσθιας εκτύπωσης με *laser* και ως εκ τούτου

είναι αναμενόμενο να επηρεάζει και το τελικό αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Ενδεικτικά, βασιζόμενοι στις βιβλιογραφικές πηγές [5] και [6] αναφέρουμε ότι μια παράμετρος στην οποία έχει επίδραση το *fluence* είναι η διάμετρος του μεταφερόμενης (εκτυπωμένης) σταγόνας.

Αν και η μελέτη των μηχανισμών της άμεσης μεταφοράς με *laser* (*LIFT*) έχει ενδιαφέρον, δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Αυτό το οποίο πρέπει να κρατήσουμε είναι το γεγονός ότι τόσο το μέγεθος της περιοχής στην οποία εστιάζει το *laser* (*spot size*) όσο και η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας σε αυτή τη περιοχή διαμορφώνουν το τελικό αποτέλεσμα. Άρα είναι επιθυμητή η ρύθμιση τόσο του *spot size* όσο και του *fluence*. Επιπλέον δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι κάθε υλικό εν γένει χρήζει διαφορετικές συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η εκτύπωσή του. Σε εναλλακτική διατύπωση, διαφορετικά υλικά, εν γένει απαιτούν διαφορετική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) για την ενεργοποίηση ενός συγκεκριμένου μηχανισμού της άμεσης εμπρόσθιας εκτύπωσης με *laser*. Αυτό συνεπάγεται με την επιθυμία να μεταβάλλουμε το *fluence* για τον έλεγχο της διαδικασίας ακόμα και αν εκτυπώνουμε μόνο ένα συγκεκριμένο υλικό.

Παρόμοια με την μέθοδο *LIFT* είναι και η μέθοδος ανάστροφης επαγόμενης μεταφοράς με *laser* (*Laser Induced Backward Transfer*) ή εναλλακτικά η μέθοδος της ανάστροφης άμεσης εκτύπωσης με *laser* στην οποία η ακτινοβολία του *laser* διαπερνάει ένα διαφανές υπόστρωμα και εστιάζει σε περιοχή του υλικού εκτύπωσης το οποίο βρίσκεται υπό μορφή επίστρωσης σε ένα υπόστρωμα. Σε αυτή τη περίπτωση δημιουργείται πίδακας του υλικού της εκτύπωσης, το οποίο εκτινάσσεται σε υγρή φάση προς την ανάστροφη κατεύθυνση με αυτή που έχει η δέσμη του *laser*. Το αποτέλεσμα είναι η μεταφορά μικρής ποσότητας του δότη στο υπόστρωμα του στόχου. Σε αντίθεση με τη τεχνική *LIFT* η τεχνική *LIBT* υπόσχεται μεταφορά ύλης με διαστάσεις μικρότερης από τις διαστάσεις της ακτινοβολίας στη υλικό του δότη. Για καλύτερη γνωριμία με τη τεχνική δίνονται ενδεικτικές αναφορές σχετικά με τη μέθοδο *LIBT* [7] και [8].

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός των συστημάτων *LIFT* και *LIBT* εν γένει δεν διαφέρει. Ωστόσο τόσο ορισμένες προδιαγραφές (πχ *working distance of objective lens*) όσο και η ανάλυση (πχ. η ενεργειακή ανάλυση) των δυο συστημάτων εν γένει διαφέρουν μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο ακόμα και αν κάποια από τα συστήματα τα οποία παρουσιάζονται στη μεταπτυχιακή εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις δυο μεθόδους (*LIFT* & *LIBT*), η σχεδίαση και ανάλυση γίνεται με γνώμονα την δημιουργία συστήματος τύπου *LIFT*.

Κεφάλαιο 2^ο

Προδιαγραφές του συστήματος

Όπως συμβαίνει κάθε φορά στην σχεδίαση, ένα εκ των αρχικών και βασικών σταδίων της σχεδίασης είναι ο προσδιορισμός των προδιαγραφών του συστήματος το οποίο πρόκειται να σχεδιαστεί. Ομοίως και στη περίπτωση μας πρωτίστως απαιτείτε να κατανοήσουμε το αντικείμενο του σχεδίου μαζί με τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς που πρέπει να τηρεί και μόνον στη συνέχεια να προχωρήσουμε στην υλοποίησή του.

Έτσι λοιπόν αυτό το ζητούμενο από εμάς είναι να σχεδιάσουμε ένα πρωτότυπο σύστημα μικρο-εκτύπωσης αγώγιμων μελανιών ή άλλων υλικών (πχ. βιολογικής προέλευσης) με τη μέθοδο *Laser-Induced Forward Transfer* (για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη τεχνική βλέπε το αντίστοιχο κεφάλαιο). Τα βασικά μέρη του συστήματος είναι ένα παλμικό *laser* στερεάς κατάστασης και ένας αντικειμενικός φακός με τον οποίο θα προβάλλονται ή θα εστιάζονται οι παλμοί του *laser* στην κάτω επιφάνεια, ενός πλακιδίου *quartz* πάχους 1.0mm, στην οποία θα βρίσκεται το υλικό της εκτύπωσης. Το *laser* στην έξοδό του έχει διάμετρο 1.5mm και εκπέμπει ακτινοβολία στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm. Η ενέργεια ανά παλμό στα 532nm ισούται με $170 \pm 10 \mu\text{J}$ ενώ η μέγιστη συχνότητα επανάληψης των παλμών βρίσκεται στα 1000Hz. Δυστυχώς διευκρινήσεις ή άλλες κρίσιμες πληροφορίες όπως είναι η γωνία διεύρυνσης των παλμών (*divergence angle*) δεν ήταν δυνατό να είναι γνωστά. Για αυτό υποθέτουμε ότι η ενέργεια ανά παλμό στα 1064nm δεν είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ανά παλμό στα 532nm, ενώ θεωρούμε ότι οι παλμοί του *laser* χαρακτηρίζονται από *divergence angle* της τάξεως των 1.5mrad*. Επιπλέον με βάση τα προηγούμενα δεδομένα και θεωρώντας ότι έχουμε τη μέγιστη συχνότητα επαναλήψεων των παλμών του *laser* υπολογίζουμε ότι η ισχύς (*Watt* ή *Joule/second*) του *laser* για το κάθε ένα από τα δύο εκπεμπόμενα μήκη κύματος, είναι ίση με 0.17 ± 0.01 (*Joule/second*). Συνεπώς η μέγιστη ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και για τα δυο μήκη κύματος είναι ίση με 0.34 ± 0.02 (*Joule/second*). Εννοείται ότι για εάν η ενέργεια ανά παλμό στο μήκος κύματος των 1064nm είναι μικρότερη από την ενέργεια στον παλμό των 532nm, τότε το η συνολική ισχύς την οποία αναφέρουμε προηγούμενος ενδέχεται να είναι μακριά από την πραγματικότητα. Παρομοίως αν η συχνότητα επανάληψης των παλμών είναι μικρότερη των 1000Hz, τότε πάλι θα πέσουμε έξω στην εκτίμηση της ισχύος της ακτινοβολίας του *laser*.

Το ίδιο το σύστημα ιδανικά θα πρέπει είναι *achromatic* στο ζεύγος των μηκών κύματος 532nm και 1064nm. Ο αντικειμενικός φακός θα πρέπει να έχει ελάχιστη απόσταση εργασίας (*working distance*) ίση ή μεγαλύτερη του 1.0mm. Το σύστημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα ρύθμισης των διαστάσεων της δέσμης στην επιφάνεια εργασίας ξεκινώντας από την ελάχιστη διάμετρο του 1μm και φτάνοντας στα 100μm με διαδοχικά βήματα του 1μm. Για τον έλεγχο των διαστάσεων της δέσμης στο επίπεδο εργασίας (κάτω επιφάνεια του πλακιδίου *quartz*) συνίσταται η σχεδίαση ενός συστήματος προβολής (*Projection*) το οποίο θα έχει τη δυνατότητα ελέγχου των διαστάσεων του ειδώλου προβολής μέσα από την μεταβολή των διαστάσεων του αντικειμένου προβολής (άνοιγμα μάσκας) ή/και της απόστασης του αντικειμένου και ειδώλου από τον αντικειμενικό φακό. Η μάσκα (το αντικείμενο) μπορεί έχει τετραγωνικό προφίλ διαστάσεων 2x2mm ενώ μικρότερες διαστάσεις ενδέχεται να μην είναι εφικτές. Ενδεικτικά αναφέρεται

πως στόχος είναι η σχεδίαση ενός *achromat* αντικειμενικού φακού, με εστιακή απόσταση περίπου ίση με 1.0mm, σε συνδυασμό με έναν *beam expander* ο οποίος θα έχει μεγεθυντική ισχύ ίση με 2.

Οι διαστάσεις δεν είναι μείζον θέμα και δεν δίνονται περιορισμοί ως προς αυτές, ενώ το περιβάλλον εργασίας χαρακτηρίζεται από εξαιρετική μικρή διακύμανση στη θερμοκρασία του.

Επιπλέον θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι έχουν τεθεί αρκετά απαιτητικές προδιαγραφές και για αυτό ακόμα και η προσέγγισή τους θα είναι ένα πολύ καλό αποτέλεσμα. Επιπλέον είναι ολοφάνερο πως ακόμα και οι παραμικρή αλλαγή των απαιτήσεων σε συνδυασμό με τις είδη οριακές προδιαγραφές μπορεί να απαιτεί διαφορετική προσέγγιση στην αντιμετώπιση του προβλήματος.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα της εκτύπωσης θα περιλαμβάνει μηχανική τράπεζα οποία θα επιτρέπει την μετατόπιση της επιφάνειας εργασίας στο επίπεδο της εστίασης (ή προβολής) και ως εκ τούτου δεν εξετάζεται το ενδεχόμενο σχεδίασης φακών τύπου F-θ.

Πίνακας 2.1. Σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών τα οποία θα πρέπει να πληροί το σύστημα.

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου	Σχόλια & επεξήγηση
Είδος συστήματος	«Projection»	Ενδεικτικά
Εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού	$\approx 1.0mm$	Ενδεικτικά
Διάμετρος δέσμης <i>laser</i>	1.5mm	
Μήκη κύματος	532nm & 1064nm	<i>Achromat at 532nm & 1064nm</i>
Διαστάσεις μάσκας	2x2mm	
<i>Numerical aperture</i>	-	
<i>F#</i>	-	
<i>Depth of Focus (DOF)</i>	-	
Μέγεθος ειδώλου προβολής	1.0 – 100.0 μm	
<i>Working distance</i>	$\geq 1.0 mm$	
Απόσταση μεταξύ του επιπέδου εστίασης και του επιπέδου απεικόνισης (βλέπε x_i)	$\geq 1.0 mm$	Προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν ανεπιθύμητα φαινόμενα από την εστίαση της δέσμης <i>laser</i> στο πλακίδιο χαλαζία στο κάτω μέρος του οποίου θέλουμε να βρίσκεται το επίπεδο απεικόνισης
Θερμοκρασία λειτουργίας	$\theta. \Delta. \mp 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	
Διαστάσεις	Δεν υπάρχουν οδηγίες	Εννοείται σχετικά μικρές
Μάζα	Δεν υπάρχουν οδηγίες	Εννοείται σχετικά μικρές
Κόστος	Φθηνό σύστημα	Ενδείκνυται φθηνό σύστημα δίχως πολύπλοκα και ακριβά οπτικά και μηχανικά στοιχεία

*Μετά από επισκόπηση διαφόρων εταιρειών κατασκευαστών *laser*, συμπεραίνω ότι η ελάχιστη τιμή της μέγιστης γωνίας διεύρυνσης (*divergence angle*) των παλμών ενός *laser* στερεάς είναι τα 1.5mrad.

Κεφάλαιο 3^ο

Προσχέδιο του συστήματος

Έχοντας σκιαγραφήσει τις προδιαγραφές του συστήματος το οποίο ζητείται να σχεδιάσουμε, προχωράμε στο επόμενο στάδιο το οποίο δεν είναι άλλο από τη διερεύνηση των τρόπων με τους οποίους μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημά μας. Όπως είδαμε μια βασική απαίτηση από το σύστημα είναι η αποτύπωση της ακτινοβολίας του *laser*, στο επίπεδο του στρώματος του υλικού εκτύπωσης, σε ελάχιστο μέγεθος της τάξης του 1μm.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος η πρώτη σκέψη αφορά την δημιουργία ενός οπτικού συστήματος το οποίο θα εστιάζει την δέσμη διαμέτρου D σε δέσμη διαμέτρου x στο επίπεδο εστίασης. Η διάμετρος του δίσκου του *Airy* δίνεται από την ακόλουθη σχέση και αντικατοπτρίζει την ελάχιστη εφικτή διάμετρο μιας δέσμης στο επίπεδο εστίασης από έναν φακό στον οποίο οι σφαιρικές και λοιπές εκτροπές είναι αμελητέες έναντι των φαινομένων περίθλασης [9].

$$x \approx \frac{1.22\lambda f}{D} \quad (3.1)$$

Έστω ότι έχουμε μήκος κύματος (λ) ίσο με 1.064μm και διάμετρο (D) της δέσμης εισόδου ίση με 1.5mm. Τότε εφόσον επιθυμούμε η διάμετρος (x) του σποτ να είναι ίση με 1μm, υπολογίζουμε ότι η εστιακή απόσταση (f) του φακού θα πρέπει ισούται περίπου με 1.155mm. Έτσι λοιπόν φαίνεται και ο λόγος για τον οποίο ο αντικειμενικός φακός στις προδιαγραφές του συστήματος ενδείκνυται να έχει εστιακή απόσταση κοντά στο 1.0mm. Ομοίως αν η διάμετρος (D) της εισερχόμενης δέσμης ισούται με 3.0mm, η εστιακή απόσταση θα πρέπει να ισούται με 2.311mm. Ενδεικτικό της δυσκολίας στην σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι μόνον η πολύ μικρή εστιακή απόσταση αλλά και ο λόγος της εστιακής απόστασης ως προς τη διάμετρο της εισερχόμενης δέσμης, ο οποίος και για τις δυο περιπτώσεις ισούται με 0.77.

$$F\# = \frac{f}{D} \quad (3.2)$$

Ένας φακός με μικρό αριθμητικό άνοιγμα ($F\#$) χαρακτηρίζεται από σφαιρικές εκτροπές οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν το σύστημα σε αποτέλεσμα αρκετά διαφορετικό από αυτό το οποίο προβλέπει η σχέση (1). Εμπειρικά ένα *diffraction limited* σύστημα στο οποίο έχουμε περιορίσει τις εκτροπές και στο οποίο ισχύει η πρώτη σχέση, μπορεί να θεωρηθεί ένα σύστημα του οποίου το $F\#$ είναι μεγαλύτερο του 12. Συνεπώς η σχεδίαση ενός φακού με μικρό αριθμητικό άνοιγμα είναι απαιτητική, ακριβώς εξαιτίας των σφαιρικών εκτροπών τις οποίες και πρέπει να περιορίσουμε.

Ωστόσο δεν αρκεί οι διαστάσεις του σποτ να αγγίζουν το ελάχιστο του 1μm αλλά συγχρόνως θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής αύξησής του έως και στα 100μm (ή και σε μεγαλύτερες διαστάσεις). Με γνώμονα τη πρώτη σχέση και προκειμένου να αυξήσουμε της διαστάσεις του σποτ θα πρέπει είτε να αυξήσουμε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ή/και την εστιακή απόσταση του φακού, είτε να μειώσουμε την διάμετρο της εισερχόμενης δέσμης (*entrance pupil*). Προφανώς αν αυξήσουμε το μήκος κύματος τότε ναι μεν θα αυξήσουμε τις διαστάσεις του σποτ αλλά για να τις μειώσουμε μετέπειτα, θα

πρέπει να μειώσουμε το μήκος κύματος. Επιπλέον το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί σε δυο συγκεκριμένα και σταθερά μήκη κύματος. Συνεπώς η λύση της μεταβολής του μήκους κύματος απορρίπτεται. Από την άλλη η ρύθμιση της εστιακής απόστασης μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου των διαστάσεων του σποτ. Ωστόσο η αλλαγή της εστιακής απόστασης συνεπάγεται με αλλαγή της απόστασης του φακού από την επιφάνεια στην οποία εστιάζουμε. Επιπλέον η μεταβολή της εστιακής απόστασης ενός φακού απαιτεί είτε την αντικατάσταση του φακού είτε της δημιουργίας ενός συστήματος φακών με ρυθμιζόμενη εστιακή απόσταση (πχ. σύστημα ζουμ). Τέτοιο σύστημα χαρακτηρίζεται ως πολύπλοκο και ακριβό και ως εκ τούτου αποτελεί μη ορθολογική λύση του προβλήματος. Τέλος απομένει το προφανές της αλλαγής των διαστάσεων της προσπίπτουσας στον φακό δέσμης. Ωστόσο εδώ έχουμε περιορισμένες δυνατότητες καθώς η αύξηση της διαμέτρου της προσπίπτουσας δέσμης στον φακό, συνεπάγεται με όξυνση των σφαιρικών εκτροπών. Μερικούς από τους τρόπους ελαχιστοποίησης των σφαιρικών εκτροπών καθώς και τις δυνατότητες στον σχεδιασμό συστημάτων με μικρό αριθμητικό άνοιγμα θα εξετάσουμε στο κεφάλαιο των αντικειμενικών φακών.

Πέραν όμως από την μεταβολή των παραμέτρων της σχέσης (1) θα μπορούσαμε απλώς να φέρουμε την επιφάνεια εργασίας σε διαφορετική απόσταση από το επίπεδο εστίασης. Καθώς απομακρυνόμαστε από το επίπεδο εστίασης αυξάνουμε τις διαστάσεις της δέσμης ενώ ταυτόχρονα μειώνουμε την πυκνότητα της ακτινοβολίας. Έτσι αυτός ο τρόπος ελέγχου των διαστάσεων του σποτ στο επίπεδο εργασίας αδυνατεί να διατηρήσει σταθερή την ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) του σποτ. Εάν αυτό μας προβληματίζει, θα πρέπει να έχουμε τρόπο ελέγχου της ενέργειας του παλμού η οποία προσπίπτει στον φακό είτε να καταφύγουμε σε άλλες λύσεις.

Εναλλακτικά μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα σύστημα οπτικής προβολής (απεικόνισης) στο οποίο το ρόλο του ειδώλου θα κατέχει μια ίριδα ή μάσκα της οποίας το άνοιγμα θα είναι τετραγωνικής διατομής (το προφίλ του ανοίγματος της μάσκας εν γένει θα μπορούσε να λάβει οποιοδήποτε σχήμα). Σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα μεταξύ των άλλων χαρακτηρίζεται και από τη εγκάρσια (M_T) μεγέθυνση και στην παραξονική προσέγγιση περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις. [10]

$$M_T \triangleq \frac{y_i}{y_o} \quad (3.3)$$

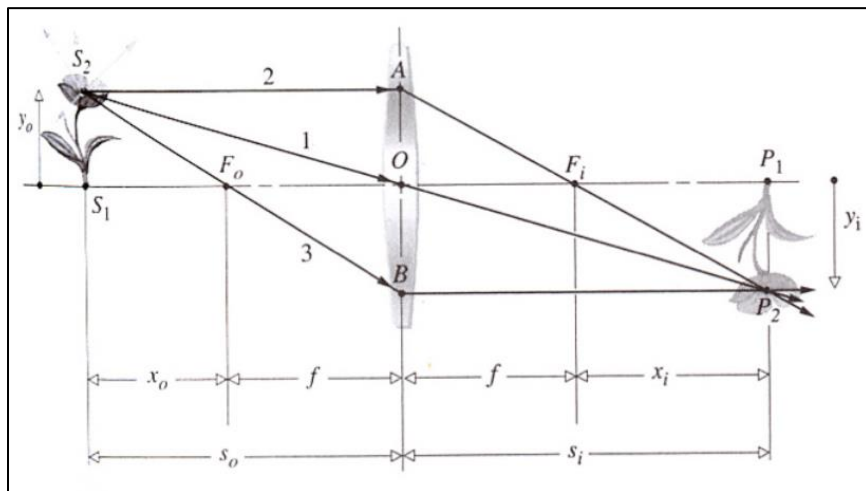
$$M_T = -\frac{x_i}{f} = -\frac{f}{x_o} \quad (3.4)$$

$$f^2 = x_o x_i \quad (3.5)$$

Έστω ότι έχουμε άνοιγμα μάσκας ίσο με 2.0x2.0mm και επιθυμούμε να απεικονίσουμε το είδωλό της με διαστάσεις 1.0x1.0μm. Σε αυτή τη περίπτωση η εγκάρσια μεγέθυνση (M_T) ισούται με μείον 0.0005. Εάν η εστιακή απόσταση (f) ισούται με 1.0mm, τότε από τις πιο πάνω σχέσεις βρίσκουμε ότι οι αποστάσεις x_o και x_i ισούνται με 2000mm και 0.0005mm αντίστοιχα. Επομένως θεωρητικά, έχοντας έναν αντικειμενικό φακό εστιακής απόστασης 1.0mm και μια μάσκα ανοίγματος 2.0x2.0mm, μπορούμε να απεικονίσουμε το αντικείμενο σε είδωλο διαστάσεων μόλις 1.0x1.0μm. Ωστόσο το σύστημα χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο μήκος το οποίο είναι μεγαλύτερο των 2 μέτρων και πολύ μικρή απόσταση (x_i) μεταξύ του επιπέδου απεικόνισης και του επιπέδου εστίασης. Εάν το μήκος δεν είναι ιδιαίτερα τρομακτικό, η εξαιρετικά μικρή απόσταση x_i πολύ πιθανόν να μην είναι επιτεύξιμη. Αν από τη άλλη αυξήσουμε την εστιακή απόσταση στα 2.0mm θα βρούμε ότι οι αποστάσεις x_o και x_i ισούνται με 4000mm και 0.001mm αντίστοιχα. Ομοίως για εστιακή απόσταση ίση με 3.0mm θα βρούμε τις αποστάσεις x_o και x_i ίσες με 6000mm και 0.0015mm αντίστοιχα. Είναι σαφές ότι αφενός το μήκος του

συστήματος θα είναι σχετικά μεγάλο και αφετέρου θα πρέπει να εξασφαλίσουμε υψηλή ακρίβεια στον έλεγχο της απόστασης του υποστρώματος με τον δότη από τον αντικειμενικό φακό.

Ωστόσο έχουμε τη δυνατότητα να μεταβάλουμε τις διαστάσεις του ειδώλου (σποτ) y_i μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του αντικειμένου (άνοιγμα μάσκας) y_o . Δηλαδή αν αυξήσουμε τις διαστάσεις του αντικειμένου (y_o) στα $3.0 \times 3.0 \text{mm}$ και διατηρήσουμε σταθερή τη μεγέθυνση, θα βρούμε ότι οι διαστάσεις του ειδώλου θα αυξηθούν και θα είναι ίσες με $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$.



Εικόνα 3.1. Σχεδιάγραμμα ενός συστήματος απεικόνισης-προβολής.

Εάν λοιπόν θεωρήσουμε ότι έχουμε φακό εστιακής απόστασης 2.0mm και συνάμα οι διαστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου ισούνται με $1.0 \times 1.0 \text{mm}$ και $2.0 \times 2.0 \mu\text{m}$ αντίστοιχα, τότε οι αποστάσεις x_o και x_i ισούνται με 1000mm και 0.004mm αντίστοιχα. Επομένως αν μειώσουμε τις προσδοκίες μας για το ελάχιστο δυνατό σποτ και ταυτόχρονα μειώσουμε τις διαστάσεις του αντικειμένου, μπορούμε να πετύχουμε σχετικά ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Ομοίως αν αυξήσουμε τις διαστάσεις του αντικειμένου, διατηρώντας σταθερή τη μεγέθυνση, θα αυξήσουμε τις διαστάσεις του ειδώλου. Συγκεκριμένα αν υποθέσουμε ότι αυξάνουμε τις διαστάσεις του ανοίγματος της μάσκας στα $5.0 \times 5.0 \text{mm}$, τότε οι διαστάσεις του σποτ θα γίνουν ίσες με $0.01 \mu\text{m}$. Λογικό, διότι η μεταβολή των διαστάσεων του αντικειμένου κατά n φορές οδηγεί στην μεταβολή των διαστάσεων του ειδώλου επίσης κατά n φορές.

Οπότε με βάση τα προηγούμενα παραδείγματα αντιλαμβανόμαστε ότι χρειαζόμαστε ένα σύστημα με όσο το δυνατόν μικρότερη εστιακή απόσταση και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάμετρο έτσι ώστε μέσω του ανοίγματος της μάσκας να ρυθμίζουμε τις διαστάσεις του σποτ. Πρακτικά θα μας ενδιέφερε ένας αντικειμενικός φακός μπροστά από τον οποίον μια ίριδα θα είχε πολύ μεγάλο λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη διάμετρο του ανοίγματός της.

Κεφάλαιο 4^ο

Αχρωματικός φακός- (*achromat*)

4.1 Θεωρία - *Achromatic cemented doublet lens*

Όπως είδαμε στις προδιαγραφές του συστήματος το σύστημά μας πρέπει να είναι αχρωματικό στο ζεύγος μηκών κύματος 532nm και 1064nm. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από χρωματικές εκτροπές ή χρωματικά σφάλματα χρωματικών εκτροπών σε συγκεκριμένο ζεύγος μηκών κύματος.

Έτσι λοιπόν αξονικό διάμηκες χρωματικό σφάλμα (*Longitudinal Chromatic aberration: LCA*) αναφέρεται στην εκτροπή των ακτίνων φωτός στον κύριο άξονα μεταξύ διαφορετικών μηκών κύματος. Εξαιτίας της εξάρτησης του συντελεστή διάθλασης του υλικού ενός φακού από το μήκος κύματος, κάθε μήκος κύματος διαθλάται σε διαφορετική γωνία και παρά την καμπύλη επιφάνεια ενός φακού δεν εστιάζει στο ίδιο επίπεδο επάνω στον οπτικό άξονα μαζί με το κάθε άλλο μήκος κύματος. Αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς είναι η υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας και οι εγκάρσιες χρωματικές εκτροπές. Δηλαδή αν πάρουμε μια κάθετη τομή ως προς τον οπτικό άξονα στην περιοχή της εστίασης θα δούμε πως διαφορετικά μήκη κύματος έχουν διαφορετική διάμετρο σε αυτή την τομή.

Το διάμηκες χρωματικό σφάλμα ενός ιδανικού φακού, το οποίο προκύπτει από την διαφορά στον δείκτη διάθλασης του υλικού του φακού για διαφορετικά μήκη κύματος, μπορεί να εκφραστεί μέσα από τη διαφορά των οπτικών δυνάμεων του ιδανικού φακού για δυο διαφορετικά μήκη κύματος (έστω στις φασματικές γραμμές *F* & *C* όπως ορίζονται από το ISO 7944).

$$\Delta\Phi_{F-C} = \Phi_F - \Phi_C \quad (4.1)$$

Αντικαθιστώντας τον γνωστό τύπο των κατασκευαστών των φακών για τον ιδανικό φακό στην προηγούμενη σχέση και μετά από πράξεις καταλήγουμε στην σχέση (5):

$$\Delta\Phi_{F-C} = (n_F - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - (n_C - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.2)$$

$$\Delta\Phi_{F-C} = (n_F - n_C) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.3)$$

$$\Delta\Phi_{F-C} = \frac{(n_F - n_C)}{(n_d - 1)} (n_d - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.4)$$

$$\Delta\Phi_{F-C} = \frac{\Phi_d}{V_d} \quad (4.5)$$

Όπου $V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$ είναι ο αριθμός *Abbe* ο οποίος αναφέρεται σε συγκεκριμένο υλικό και μήκη κύματος. Φ_d είναι η οπτική ισχύς του φακού στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη φασματική γραμμή d , τα n_F , n_C και n_d είναι οι δείκτες διάθλασης για τις φασματικές γραμμές F (486.13nm), C (656.27nm) και d (587.56nm). Ενώ R_1 και R_2 είναι οι ακτίνες καμπυλότητας του ιδανικού φακού στον οποίο αναφερόμαστε.

Ομοίως η διαφορά στην εστιακή απόσταση δυο διαφορετικών μηκών κύματος Δf_{F-C} εκφράζεται ως:

$$\Delta f_{F-C} = f_F - f_C \quad (4.6)$$

$$\Delta f_{F-C} = \frac{1}{(n_F - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} - \frac{1}{(n_C - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} \quad (4.7)$$

$$\Delta f_{F-C} = \frac{(n_C - 1) - (n_F - 1)}{(n_F - 1)(n_C - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} = - \frac{(n_F - n_C)}{(n_F - 1)(n_C - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} \quad (4.8)$$

Προσεγγιστικά ισχύει ότι $(n_F - 1)(n_C - 1) \approx (n_d - 1)^2$ και κατά συνέπεια ισχύει πως:

$$\Delta f_{F-C} = - \frac{f_d}{V_d} \quad (4.9)$$

Όπου f_d είναι η εστιακή απόσταση του φακού και V_d είναι ο αριθμός *Abbe* του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο φακός. Θέλουμε να εκφράσουμε την απόσταση μεταξύ δυο επιπέδων εστίασης τα οποία προέρχονται από ακτίνες φωτός διαφορετικού μήκους κύματος και στην προκειμένη περίπτωση από F (486.13nm) και C (656.27nm). Με άλλα λόγια προσπαθούμε να εκφράσουμε την αξονική χρωματική εκτροπή ενός φακού μεταξύ δυο μηκών κύματος. Τότε προσέχουμε έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε το κατάλληλο αριθμό *Abbe* και την οπτική ισχύς για το κατάλληλο μήκος κύματος το οποίο υποδεικνύεται από τον δείκτη του αριθμού *Abbe*.

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο του διεθνούς οργανισμού τυποποίησης (ISO 7944) ο αριθμός *Abbe* ορίζεται σύμφωνα με τους δυο ακόλουθους τύπους [11].

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, F (486.13\text{nm}), d (587.56\text{nm}), C (656.27\text{nm}), (ISO 7944)$$

$$V_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}, F' (479.99\text{nm}), e (546.07\text{nm}), C' (643.85\text{nm}), (ISO 7944)$$

Οι δυο προηγούμενοι αριθμοί εκφράζουν διασπορά του δείκτη διάθλασης στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Εάν επιθυμούμε να επεκτείνουμε τον αριθμό *Abbe* και σε άλλες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τότε καταφεύγουμε στη γενικευμένη μορφή του αριθμού *Abbe*.

$$V = \frac{n_{central} - 1}{n_{short} - n_{long}} \quad (4.10)$$

Όπου $n_{central}$, n_{short} και n_{long} είναι οι δείκτες διάθλασης του υλικού οι οποίοι αντιστοιχούν στα μήκη κύματος $\lambda_{central}$, $\lambda_{short} = \lambda_{central} - \Delta\lambda$, και $\lambda_{long} = \lambda_{central} + \Delta\lambda$, με $\Delta\lambda = (\lambda_{long} - \lambda_{short})/2$

Εφόσον επιθυμούμε να σχεδιάσουμε έναν φακό δίχως αξονική χρωματική εκτροπή στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm τότε χρειάζεται να υπολογίσουμε το επονομαζόμενο *V number* για τα αντίστοιχα μήκη κύματος.

$$V_{532-1064} = V = \frac{n_{798} - 1}{n_{1064} - n_{532}} \quad (4.11)$$

Από την σχέση (9) περί της αξονικής χρωματικής εκτροπής είναι φανερό ότι είτε μειώνοντας την οπτική ισχύ του φακού και άρα αυξάνοντας την εστιακή του απόσταση, είτε αυξάνοντας τον αριθμό *Abbe*, μπορούμε να μειώσουμε τα σφάλματα χρωματικής εκτροπής. Συνεπώς αν έχουμε δυο ή περισσότερους φακούς ίδιας οπτικής ισχύος, προκειμένου να περιορίσουμε τα σφάλματα αξονικής χρωματικής εκτροπής, τείνουμε να επιλέξουμε τον φακό ο οποίος είναι φτιαγμένος από υλικό με μεγαλύτερο αριθμό *Abbe*.

Ωστόσο αυτή η προσέγγιση στον περιορισμό των σφαιρικών εκτροπών μπορεί να μην είναι η καλύτερη λύση διότι ενδέχεται να υποβαθμιστούν άλλα χαρακτηριστικά του φακού. Για παράδειγμα η αύξηση του αριθμού *Abbe* έχει ως επακόλουθο την μείωση του δείκτη διάθλασης του υλικού. Οπότε από τον τύπο κατασκευαστών των φακών αντιλαμβανόμαστε ότι για την διατήρηση σταθερής της οπτικής ισχύος του φακού, θα πρέπει να αντισταθμίσουμε την συνεισφορά του δείκτη διάθλασης με την αύξηση του πάχους του φακού και ενδεχομένως και με την μείωση της μίας ή και των δυο ακτίνων καμπυλότητας. Αυτές οι επεμβάσεις ενδέχεται να οξύνουν το πρόβλημα των σφαιρικών εκτροπών. Παρόλα αυτά το κύριο πρόβλημα αυτής της τακτικής για τον περιορισμό των σφαλμάτων χρωματικής εκτροπής εντοπίζεται στο ότι οι τιμές των δεικτών διάθλασης των κοινών εμπορικών γυαλιών του ορατού φάσματος της ακτινοβολίας, όπως το N-BK7, κυμαίνονται μεταξύ 1.50-1.55 και δεν έχουν σημαντικό περιθώριο μείωσης. Για αυτό σε πρώτη αντιμετώπιση του προβλήματος των χρωματικών εκτροπών συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε αχρωματικούς φακούς.

Για την απάλειψη σφαλμάτων αξονικής χρωματικής εκτροπής μεταξύ δύο μηκών κύματος μπορούμε να χρησιμοποιήσω δύο φακούς L_1 και L_2 με οπτική ισχύ Φ_1 και Φ_2 αντιστοίχως και αριθμούς *Abbe* V_1 και V_2 αντιστοίχως. Στην προκειμένη περίπτωση οι αριθμοί *Abbe* αναφέρονται στους αριθμούς $V_{532-1064}$ του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο κάθε φακός.

Γνωρίζουμε ότι η συνολική οπτική ισχύς Φ_T του ζεύγους των δυο ιδανικών φακών θα είναι ίση με το άθροισμα της οπτικής ισχύος των επιμέρους ιδανικών φακών [12].

$$\Phi_T = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4.12)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση (5) λαμβάνουμε τη σχέση:

$$\Delta\Phi_{total} = -\frac{\Phi_1}{V_1} + \left(-\frac{\Phi_2}{V_2}\right) \quad (4.13)$$

Θα πρέπει να ισχύει ότι: $\Delta\Phi_{total} = 0$

Από τις δυο προηγούμενες εξισώσεις και εφόσον οι αριθμοί *Abbe* είναι πάντα θετικές ποσότητες, γίνεται σαφές ότι προκειμένου να εξαλείψουμε τη χρωματική διαφορά μεταξύ δυο μηκών κύματος σε ένα

σύστημα δυο φακών, θα πρέπει ο ένας εκ των φακών να είναι θετικός ($\Phi > 0$) ενώ ο άλλος φακός θα πρέπει να είναι αρνητικός ($\Phi < 0$).

Οπότε:

$$-\frac{\Phi_1}{V_1} - \frac{\Phi_2}{V_2} = 0 \rightarrow \frac{\Phi_1}{V_1} = -\frac{\Phi_2}{V_2} \rightarrow \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = -\frac{V_1}{V_2} \quad (4.14)$$

Επιλύοντας το σύστημα των δυο εξισώσεων (12) και (14) ως προς Φ_1 και Φ_2 βρίσκουμε πως:

$$\Phi_1 = \frac{V_1}{V_1 - V_2} \Phi_T \quad \text{και} \quad \Phi_2 = \frac{V_2}{V_2 - V_1} \Phi_T \quad (4.15), (4.16)$$

Έχουμε βρει τις αναλυτικές σχέσεις για την οπτική ισχύ δυο ιδανικών φακών, οι οποίοι όντας σε μεταξύ τους επαφή ισοδυναμούν με έναν αχρωματικό φακό του οποίου η οπτική ισχύς είναι ίση με Φ_T .

Προκειμένου να βρούμε τις ακτίνες καμπυλότητας τις οποίες πρέπει να έχουν οι δυο ιδανικοί φακοί, χρησιμοποιούμε την εξίσωση των κατασκευαστών των φακών του ιδανικού φακού [13].

$$\Phi = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.17)$$

Όπου Φ η οπτική ισχύς, f η εστιακή απόσταση, n ο δείκτης διάθλασης για το μήκος κύματος $\lambda_{central}$, R_1 και R_2 οι ακτίνες καμπυλότητας του φακού. Από την εφαρμογή της συνάρτησης (17) στις συναρτήσεις (12) και (13) προκύπτουν δυο εξισώσεις με τέσσερις αγνώστους (R_1, R_2, R_3, R_4). Για να λύσουμε το σύστημα των εξισώσεων ως προς τις ακτίνες καμπυλότητας των φακών κάνουμε παραδοχές συσχετίζοντας τις ακτίνες καμπυλότητας μεταξύ τους ή θεωρώντας τις άπειρες (επίπεδες επιφάνειες).

Για παράδειγμα μπορούμε να θεωρήσουμε πως $R_2 = R_3 = -R_1$

Σε αυτή τη περίπτωση

$$R_1 = 2(n_1 - 1) \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \frac{1}{\Phi_T} \quad (4.18)$$

$$R_4 = \frac{R_1}{2 \left(\frac{n_1 - 1}{n_2 - 1} \right) \left(\frac{V_2}{V_1} \right) - 1} \quad (4.19)$$

Ωστόσο αν το σκεφτούμε καλύτερα γίνεται αντιληπτό το ότι οι παραδοχές τις οποίες μπορούμε να κάνουμε για να λύσουμε το σύστημα των δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους μπορούν να είναι άπειρες. Επιπλέον δεν είναι βέβαιο ότι κάθε δυνατή λύση του συστήματος των εξισώσεων, πέραν της αξονικής χρωματικής διόρθωσης πληροί και άλλες προϋποθέσεις όπως η προϋπόθεση ο λόγος *Strehl* να είναι μεγαλύτερος του 0.82 ή η δυνατότητα κατασκευής των φακών (εξαιρετικά μεγάλες και μικρές ακτίνες καμπυλότητας ενδέχεται να μην μπορούν να κατασκευαστούν σε έναν πραγματικό φακό). Για αυτό απαιτείται μια διερεύνηση μεταξύ διαφορετικών λύσεων όπου αρκεί η μια από αυτές να δίνει ένα υλοποιήσιμο και αποδεκτό αποτέλεσμα. Ευτυχώς η διερεύνηση ορισμένων λύσεων για διαφορετικές παραδοχές στη συσχέτιση μεταξύ των ακτίνων καμπυλότητας των φακών έχει είδη πραγματοποιηθεί

από τον Igor Nesterenko και περιλαμβάνεται στο άρθρο του με τίτλο «*The Initial Approximations for Achromatic Doublets of the XVIII Century*» [14].

Σε αυτή τη περίπτωση για τους σκοπούς της εργασίας έχει δημιουργηθεί ένα αρχείο σε μορφή excel, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις της άνωθεν μελέτης των αχρωματικών φακών, έτσι ώστε να απλοποιηθεί και να επιταχυνθεί η διαδικασία σχεδιασμού των αχρωματικών φακών. Σαφώς θα πρέπει επίσης να διαλέγουμε κάθε φορά τη κατάλληλη λύση η οποία ανταποκρίνεται στο εκάστοτε πρόβλημα.

$$\Delta\Phi_{\omega-C,F} = \Phi_{\omega} - \Phi_C = \Phi_{\omega} - \Phi_F \quad (4.20)$$

Εφόσον σε έναν αχρωματικό φακό οι οπτικές δυνάμεις του φακού σε δυο μήκη κύματος εξισώνονται ($\Phi_C = \Phi_F$)

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{\omega-C,F} = & (n_{\omega 1} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + (n_{F1} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \\ & - \left[(n_{\omega 2} - 1) \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) + (n_{F2} - 1) \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \right] \quad (4.21) \end{aligned}$$

$$\Delta\Phi_{\omega-C,F} = (n_{\omega 1} - n_{F1}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + (n_{\omega 2} - n_{F2}) \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{\omega-C,F} = & (n_{\omega 1} - n_{F1}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{(n_{d1} - 1)(n_{F1} - n_{C1})}{(n_{d1} - 1)(n_{F1} - n_{C1})} \\ & + (n_{\omega 2} - n_{F2}) \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \frac{(n_{d2} - 1)(n_{F2} - n_{C2})}{(n_{d2} - 1)(n_{F2} - n_{C2})} \quad (4.23) \end{aligned}$$

$$\Delta\Phi_{\omega-C,F} = \frac{\Phi_1}{V_1} P_1 + \frac{\Phi_2}{V_2} P_2 \quad (4.24)$$

Από την σχέση (24) σε συνδυασμό με τις σχέσεις (13) και (14) βρίσκουμε πως:

$$\Delta\Phi_{\omega-C,F} = \Phi_T \frac{P_1 - P_2}{V_1 - V_2} \quad (4.25)$$

Από τη σχέση (25) μπορούμε να βγάλουμε τρία σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτο συμπέρασμα είναι ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η οπτική δύναμη του αχρωματικού φακού και άρα όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση του αχρωματικού φακού, τόσο πιο μεγάλο θα είναι το *secondary spectrum* ($\Delta\Phi_{\omega-C,F}$). Δεύτερο συμπέρασμα είναι πως η ελαχιστοποίηση του *secondary spectrum* επιτυγχάνεται από την αύξηση της διαφοράς μεταξύ των αριθμών *Abbe* των υλικών των δυο φακών. Τέλος βλέπουμε ότι για πολύ κοντινές τιμές μεταξύ των *relative partial dispersion* έχουμε πρακτικά κοινή περιοχή εστίασης και για τα τρία μήκη κύματος (ω , F & C).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η αντιμετώπιση του προβλήματος των χρωματικών εκτροπών είναι μόνο ένα από τα προβλήματα που μας απασχολούν και αυτό διότι υπολείπονται και άλλες εκτροπές

του συστήματος με σημαντικότερη αυτή των σφαιρικών σφαλμάτων εκτροπής. Για αυτό δύναται η μέθοδος *Smith* στην οποία μαζί με τις αξονικές χρωματικές εκτροπές συνυπολογίζονται τα σφαιρικά σφάλματα και σφάλματα κόμης στην προσέγγιση λεπτών φακών. Αναλυτικότερα κάποιος μπορεί να ενημερωθεί μεταξύ των άλλων και στον οδηγό του *Max J. Riedl* με τίτλο «*Optical Design Applying the Fundamentals*», στις σελίδες 39-48 [15]. Για εμάς η αρχική μας προσέγγιση σε συνδυασμό με τον κατάλληλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης δεν θα επιφέρει αλλαγή στο τελικό αποτέλεσμα.

4.2 Παράδειγμα σχεδίασης ενός *achromat* φακού

Σχεδιάζοντας έναν *achromat* φακό το πρώτο που κάνουμε, όπως άλλωστε και σε κάθε οπτικό σύστημα το οποίο σχεδιάζουμε, είναι να προσδιορίσουμε τις επιθυμητές προδιαγραφές του φακού με βάση το εκάστοτε πρόβλημα. Έτσι λοιπόν στο παράδειγμά μας θέλουμε να σχεδιάσουμε έναν φακό τον οποίο μετέπειτα θα χρησιμοποιήσουμε σε έναν *beam expander* του συστήματός μας. Η διαδικασία με την οποία σχεδιάζουμε έναν *beam expander* περιγράφεται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο για τους *beam expanders*.

Στην προκειμένη περίπτωση ο φακός τον οποίο θέλουμε να σχεδιάσουμε θα πρέπει να είναι ένας *achromat* φακός στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm. Αυτός ο φακός πρέπει να είναι θετικός με εστιακή απόσταση (*effective focal length*) 80mm και διάμετρο εισερχόμενης δέσμης 3.0mm. Ο φακός προορίζεται εντός θερμοκρασιακά ελεγχόμενου περιβάλλοντος ($\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$) και θα λειτουργεί σαν τελευταίος φακός ενός *beam expander*. Πέραν αυτών των απαιτήσεων σημειώνω ότι η διάμετρός του καλό θα ήταν να είναι μια διαδεδομένη εμπορική διάμετρος (πχ 12.0mm, 12.7mm) και το *edge thickness* κατ' ελάχιστο 2.0 mm. Οπότε επιλέγουμε να σχεδιάσουμε έναν φακό με διάμετρο 12.0 mm μιας και πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Μετά τον καθορισμό των προδιαγραφών του φακού καλούμαστε να διερευνήσουμε τα διαθέσιμα οπτικά υλικά για τους φακούς και από αυτά να επιλέξουμε τα καλύτερα ως προς την εφαρμογή μας. Για αυτό το λόγο παρακάτω δίνεται πίνακας με ορισμένα υλικά μαζί με τα βασικά τους χαρακτηριστικά και τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του φακού. Η επιλογή των συγκεκριμένων φακών ανάμεσα σε όλους τους άλλους διαθέσιμους φακούς έγινε με κριτήριο η εσωτερική διαπερατότητα (*internal transmittance*) ακτινοβολίας των 500nm και 1060nm σε υλικό πάχους 10mm να είναι πολύ μεγάλη (>0.997). Αν και δεν αναφέρεται στα στοιχεία του πίνακα, η εσωτερική διαπερατότητα των 1060nm στα 10mm δεν είναι μικρότερη από αυτή των 500nm στα 10mm. Οι εν λόγω απαιτήσεις προκύπτουν από την χρήση του φακού μετά από *laser*, η ακτινοβολία του οποίου εν γένει μπορεί να θερμάνει τον φακό και κατά συνέπεια να αλλάξει τα χαρακτηριστικά και ειδικά εάν το υλικό του φακού έχει σχετικά μεγάλη απορρόφηση. *

Πίνακας 4.1. Ορισμένα από τα οπτικά γυαλιά μαζί με κάποια χαρακτηριστικά τους.

Υλικό	Εταιρεία	n_{798}	$V_{532-1064}$	Εσωτερική διαπερατότητα 10mm @ 500 nm	Σχετικό κόστος *
F2	SCHOTT	1.608456781	25.49790066	0.999	1.2
F2HT	SCHOTT	1.608456781	25.49790066	0.999	-
F5	SCHOTT	1.592531788	26.39175698	0.998	1.8
FK5HTi	SCHOTT	1.482554212	44.33731810	0.998	-
LAFN7	SCHOTT	1.735508426	25.01040219	0.998	3.9

LF5	SCHOTT	1.571663156	28.22226327	0.998	2.1
LF5HTi	SCHOTT	1.571672081	28.24401893	0.999	-
LLF1	SCHOTT	1.539824700	31.04779507	0.998	2.1
LLF1HTi	SCHOTT	1.539848453	31.09889060	0.999	-
N-BAK2	SCHOTT	1.533389615	38.50965442	0.998	1.2
N-BAK4	SCHOTT	1.561619299	36.84245793	0.998	1
N-BAK4HT	SCHOTT	1.561619299	36.84245793	0.998	-
N-BASF2	SCHOTT	1.651623153	24.80477108	0.988	1.7
N-BK7	SCHOTT	1.510970857	40.46602930	0.998	1
N-BK7HT	SCHOTT	1.510970857	40.46602930	0.999	-
N-BK7HTi	SCHOTT	1.510970857	40.46602930	0.999	-
N-FK51A	SCHOTT	1.481751823	49.57592215	0.998	10.2
N-FK58	SCHOTT	1.451391207	49.92600423	0.998	8.6
N-FK9	SCHOTT	1.516216432	33.95926401	0.998	2.1
N-LAK34	SCHOTT	1.720244088	37.02355274	0.998	0.6
N-LAK8	SCHOTT	1.704103341	36.29866489	0.998	3.3
N-PK52A	SCHOTT	1.492286773	50.64449382	0.998	7.0
N-SK11	SCHOTT	1.557256710	39.59558764	0.998	1.4
N-SK2HT	SCHOTT	1.599722316	37.33404524	0.998	-
N-SK5	SCHOTT	1.582349085	39.96209650	0.998	1.6
P-BK7	SCHOTT	1.510583255	40.31305690	0.998	-
P-SK57	SCHOTT	1.579885031	38.26612837	0.998	-
P-SK57Q1	SCHOTT	1.578905373	38.26620095	0.998	-
P-SK60	SCHOTT	1.602797743	37.40902258	0.999	-
H-FK61	CDGM	1.492543275	52.60884947	0.998	71
H-FK61B	CDGM	1.492543275	52.60884947	0.998	71
H-FK95N	CDGM	1.434394343	60.33697796	0.998	112
H-QK1	CDGM	1.465181805	40.83928914	0.998	64
H-K9LGT	CDGM	1.510832502	39.98903096	0.998	19
F2	CDGM	1.601650396	25.92804194	0.999	10
S-FPL51	OHARA	1.492554161	52.56721379	0.998	?
S-FSL5	OHARA	1.482278170	42.85699699	0.999	?
S-NSL36	OHARA	1.510377387	34.41379149	0.998	?
S-BAL12	OHARA	1.533375078	38.36571068	0.999	?
S-BAL35	OHARA	1.582089448	38.95713352	0.998	?
S-LAL7	OHARA	1.643505663	37.58337231	0.998	?
S-LAL7Q	OHARA	1.643410418	36.80420239	0.998	?
S-LAL14	OHARA	1.687658731	35.44884681	0.998	?
S-LAL19	OHARA	1.719390873	34.81664511	0.999	?
S-LAH97	OHARA	1.744613888	34.03720572	0.999	?

*Κάθε εταιρεία μπορεί να συσχετίζει το κόστος με ένα δικό της διαδεδομένο οπτικό γυαλί, όπως για παράδειγμα στην εταιρεία SCHOTT το υλικό αναφοράς είναι το N-BK7. Επίσης ο τρόπος της συσχέτισης (ποσοστό ή πόσες φορές είναι μεγαλύτερη η τιμή) μπορεί να διαφέρει από εταιρεία σε εταιρεία.

Έχοντας συγκεντρώσει τα οπτικά γυαλιά τα οποία ικανοποιούν το κριτήριο της διαπερατότητας, μπορούμε να συνεχίσουμε την διαλογή με βάση τα επόμενα κριτήρια τα οποία στην περίπτωση μας είναι

η διαθεσιμότητα του προϊόντος, το σχετικό κόστος και φυσικά ο αριθμός $V_{532-1064}$. Εφόσον δεν υπάρχει ένδειξη επαναληψιμότητας της παραγωγής του γυαλιού, κοιτάζουμε το σχετικό κόστος του κάθε γυαλιού. Όταν υπάρχει ένδειξη για το σχετικό κόστος του γυαλιού, θεωρούμε ότι το γυαλί είναι διαθέσιμο. Εννοείται ότι κατά την σχεδίαση ενός συστήματος το οποίο πρόκειται να υλοποιηθεί, η διαθεσιμότητά του θα πρέπει να επαληθευτεί μετέπειτα από επικοινωνία με τον κατασκευαστή του φακού ή την εταιρεία προμήθειας των γυαλιών.

Όσον αφορά τον αριθμό $V_{532-1064}$, επισημαίνουμε με σομόν χρώμα τα υλικά με μικρό αριθμό *Abbe* (*flint glass*) και με πράσινο χρώμα τα υλικά με μεγάλο αριθμό *Abbe* (*crown glass*). Αρκεί να διαλέξουμε ένα ζεύγος γυαλιών με μικρό και μεγάλο αριθμό *Abbe* και κατά προτίμηση με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των αριθμών αυτών, προκειμένου να μειώσουμε τις χρωματικές εκτροπές στα μήκη κύματος μεταξύ των 532nm και nm 1064nm. Ένα κάλο ζεύγος υλικών φαίνεται πως είναι το N-BASF2 και το H-FK95N με διαφορά μεταξύ των αριθμών *Abbe* να βρίσκεται περίπου στο 35.5.

Ωστόσο επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το N-PK52A (εναλλακτικά θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε H-FK61 ή H-FK61B ή S-FPL51 τα οποία είναι ακόμα καλύτερα) σε συνδυασμό με το γυαλί SF6 της SCHOTT, το οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται στο προηγούμενο πίνακα καθώς η εσωτερική διαπερατότητα (για 500nm και στα 10mm) είναι μικρότερη των 0.998 και συγκεκριμένα βρίσκεται στα 0.996. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγω το συγκεκριμένο υλικό (SF6) είναι διότι προτιμώ να χρησιμοποιήσω υλικά με μεγαλύτερους δείκτες διάθλασης, έτσι ώστε οι φακοί να έχουν μεγαλύτερες ακτίνες καμπυλότητας και άρα να είναι λιγότερο επιρρεπείς στο πρόβλημα των σφαιρικών εκτροπών και ταυτόχρονα να μην είναι εξ 'αναγκασμού πολύ μικρής διαμέτρου. Επιπροσθέτως, όπως άλλωστε μπορούμε να δούμε στο *zemax/analysis/glass and gradient index/internal transmission vs. wavelength*, η εσωτερική διαπερατότητα (των 532nm στα 10mm) του SF6 είναι μεγαλύτερη του 0.997, ενώ το σχετικό κόστος είναι συγκρίσιμο με το σχετικό κόστος του N-BASF2.

Έτσι λοιπόν διαλέγουμε το N-PK52A με μεγαλύτερες τιμές του δείκτη διάθλασης σε σχέση με το H-FK95N για τον λόγο που αναφέρεται προηγουμένως. Αν ωστόσο διαλέξουμε το N-PK52A σε συνδυασμό με το N-BASF2 τότε η διαφορά στους μεταξύ τους αριθμούς *Abbe* γίνεται πολύ μικρή (25.8). Για αυτό έναντι του N-BASF2 χρησιμοποιούμε το SF6 με αριθμό *Abbe* στα 18.63 και ταυτόχρονα μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης. Εν τέλει το ζεύγος N-PK52A/ SF6 έχει διαφορά μεταξύ των αριθμών *Abbe* στα 32.0 η οποία δεν είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή για το ζεύγος N-BASF2/H-FK95N.

Πίνακας 4.2. Τα επιλεγθέντα οπτικά γυαλιά για τον σχεδιασμό ενός *achromat* φακού.

<i>Υλικό</i>	<i>Εταιρεία</i>	n_{798}	$V_{532-1064}$	<i>Εσωτερική διαπερατότητα 10mm @ 500 nm</i>	<i>Σχετικό κόστος *</i>
SF6	SCHOTT	1.784437831	18.63176986	0.996	1.9
N-PK52A	SCHOTT	1.492286773	50.64449382	0.998	7.0

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειώσω ότι υπάρχουν και άλλες εταιρείες οπτικών γυαλιών με διαθέσιμα και κατάλληλα γυαλιά με βάση το κριτήριο της διαπερατότητας, τα οποία ωστόσο δεν συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα 1. Αφενός διότι αυτά τα γυαλιά έχουν παρόμοια ή χειρότερα χαρακτηριστικά με αυτά του πίνακα 1 και αφετέρου εφόσον δεν έχω επιλέξει να χρησιμοποιήσω κάποιο από αποφεύγουμε να επεκτείνουμε άσκοπα τον πίνακα. Επιπλέον είναι σημαντικό το γεγονός ότι τα

προϊόντα των τριών εταιρειών (SCHOTT, CDGM, OHARA) είναι πιο διαδεδομένα και οι παραγωγοί φακών (Ευρώπη και Κίνα) είναι πιο εξοικειωμένοι με αυτά καθώς και με τη συνεργασία με αυτές τις εταιρείες.

Στο επόμενο βήμα της σχεδίασης του φακού υπολογίζουμε τις αρχικές ακτίνες καμπυλότητας, ανατρέχοντας στο αρχείο excel στο οποίο έχουμε συμπεριλάβει όλες τις λύσεις για τον *achromat* φακό από το άρθρο του *Igor Nesterenko*. Κατά την επιλογή της καταλληλότερης λύσης αφενός κοιτάζουμε το *Strehl ratio* που δίνει η κάθε λύση (ενδεικτικά από την μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί στο άρθρο του *Igor Nesterenko*) και αφετέρου τις ακτίνες καμπυλότητας των δυο φακών που μπορεί να δώσει η κάθε λύση. Συγκεκριμένα επιθυμούμε ένα μεγάλο *Strehl ratio* (>0.95) και οι ακτίνες καμπυλότητας να είναι υλοποιήσιμες για τις διαμέτρους των φακών μας. Εάν οι ακτίνες καμπυλότητας είναι πολύ μικρές τότε αναγκαστικά θα πρέπει να μειώσουμε την διάμετρο του φακού μιας και σε διαφορετική περίπτωση ο φακός ενδέχεται να μην μπορεί να κατασκευαστεί. Ομοίως αν οι ακτίνες καμπυλότητας είναι πολύ μεγάλες, πολύ πιθανόν να υπάρχει δυσκολία στην κατασκευή του φακού και για αυτό θα πρέπει να αυξηθεί το πάχος και η διάμετρος του.

Επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τη λύση τη λύση (2) όμοια με λύση του παραδείγματός μας για σύστημα όπου $R_2 = R_3 = -R_1$. Επιπλέον διαλέγουμε ο φακός μας να είναι τύπου *crown/flint*, δηλαδή να προηγείται το γυαλί τύπου *crown* έναντι του γυαλιού τύπου *flint*.

Στη συνέχεια εισάγουμε τις ακτίνες καμπυλότητας, τις ημιδιάμετρούς, τα πάχη στο κέντρο των φακών, τις μεταξύ τους αποστάσεις και τα υλικά των φακών. Σε διαφορετικούς φακούς ή οπτικά στοιχεία μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε και άλλα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα η κωνική σταθερά στην περίπτωση των μη σφαιρικών καμπυλοτήτων στους φακούς.

Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο «*Lens Data Editor*» του *zemax*, στο οποίο έχουμε ορίσει τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Βλέπουμε ότι η στήλη *Thickness* έχει μηδενικές τιμές εκτός από τη γραμμή η οποία αντιστοιχεί στο αντικείμενο (OBJ) 1 και STO. Οι μη μηδενικές τιμές, στο συγκεκριμένο παράδειγμα αντιπροσωπεύουν το μήκος των ακτίνων πριν και μετά τον φακό. Εννοείται ότι μπορούμε να αλλάξουμε αυτές τις τιμές και να θεωρήσουμε ότι μια παράλληλη δέσμη εισέρχεται στην πρώτη επιφάνεια για παράδειγμα από απόσταση 10mm έναντι των 2mm. Η γραμμές 2 και 3 της στήλης *Thickness* αντιστοιχούν στα πάχη στο κέντρο των αντίστοιχων φακών ενώ η γραμμή 3 της ίδιας στήλης αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ των πλησιέστερων ακραίων επιφανειών των φακών στο κέντρο τους. Επειδή έχουμε ορίσει τις ακτίνες καμπυλότητας που αντιστοιχούν στην θεωρητική προσεγγιστική λύση του ιδανικού φακού, κρατάμε και τα πάχη των φακών μηδενικά. Πρέπει να προσέξουμε ότι δεξιά από κάθε ακτίνα καμπυλότητας αντιστοιχίζεται ένα γράμμα *V* ή *P*. Η σημασία αυτής της επισήμανσης οφείλεται στο ότι με το γράμμα *V* (*Variable*) ορίζουμε μια ποσότητα ως προς την οποία επιθυμούμε να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Δηλαδή η ποσότητα με την επισήμανση *V* θα μεταβάλλεται κατά τη βελτιστοποίηση προκειμένου το σύστημα να εκπληρώσει τα κριτήρια της βελτιστοποίησης. Αν από την άλλη δεν ορίζεται κάποιο γράμμα, τότε η ποσότητα διατηρείται σταθερή. Υπάρχουν και άλλες δυνατότητες μεταξύ των οποίων είναι και η επιλογή της ποσότητας να είναι ορισθείσα ως προς μια άλλη ποσότητα της ίδιας στήλης και συμβολίζεται με το γράμμα *P* (*Pickup*). Για παράδειγμα έχουμε θέσει ακτίνες καμπυλότητας των γραμμών 3 και 4 να είναι ίσες με το αρνητικό της πρώτης ακτίνας καμπυλότητας (γραμμή 2). Έτσι όταν θα μεταβάλλεται η τιμή της πρώτης ακτίνας καμπυλότητας θα μεταβάλλονται και οι σχετιζόμενες ως προς αυτήν ακτίνες καμπυλότητας.

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter															
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000															
1	Standard	Infinity	2.000		1.500															
2*	Standard	49.788	V	0.000	N-PK52A	6.000	U													
3*	Standard	-49.788	P	0.000		6.000	U													
4*	Standard	-49.788	P	0.000	SF6	6.000	U													
5*	Standard	-92.501	V	0.000		6.000	U													
STO	Standard	Infinity	80.063		1.500															
IMA	Standard	Infinity	-		9.794E-004															

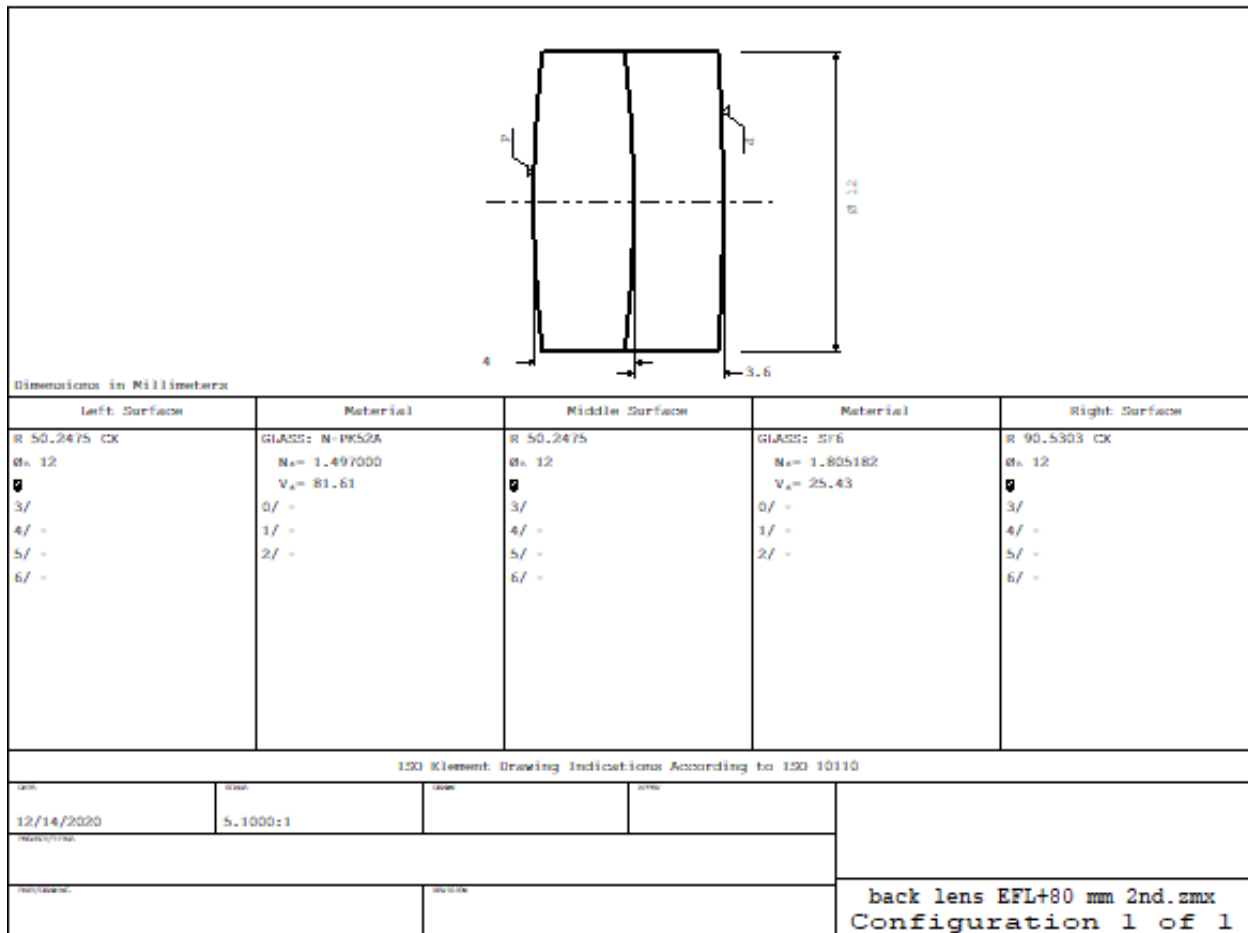
Εικόνα 4.1. Το παράθυρο «Lens Data Editor» του zemax.

Στον πίνακα 3, μπορούμε να βρούμε τις θεωρητικές καμπυλότητες για τον ιδανικό φακό καθώς και τα χαρακτηριστικά του φακού (*effective focal length, axial color focal shift, Strehl ratio, total Seidel spherical aberration coefficient*) όπως τα βρίσκουμε μέσω του zemax. Διαπιστώνουμε ότι η θεωρία λειτουργεί πολύ καλά καθώς ο φακός μας έχει την επιθυμητή εστιακή απόσταση, είναι *diffraction limited* και έχει σχετικά μικρή αξονική χρωματική εκτροπή. Ωστόσο αυτός ο φακός είναι ένας ιδανικός φακός στον οποίο τα υλικά δεν έχουν καθόλου πάχος. Αν προσθέσουμε πάχος στον φακό μας, θα διαπιστώσουμε ότι όλα αυτά τα χαρακτηριστικά παύουν να υφίστανται. Αυτή είναι και η αναμενόμενη συμπεριφορά του φακού, μιας και οι ακτίνες καμπυλότητας έχουν υπολογιστεί για έναν ιδανικό άπαχο φακό. Επίσης αν προσθέσουμε το επιθυμητό πάχος στον φακό και προβούμε στην βελτιστοποίηση του φακού μέσα από το λογισμικό του zemax, εν γένει θα διαπιστώσουμε ότι το τελικό αποτέλεσμα είναι μακριά από αυτό επιθυμούμε. Συνεπώς για να φτάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα θα πρέπει να ακολουθήσουμε ενδεδειγμένη ορθή διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία περιγράφεται παρακάτω.

Πίνακας 4.3. Ο φακός με εστιακή απόσταση 80mm στην αρχική προσέγγιση και μετά από βελτιστοποίηση.

Achromat lens, 532nm & 1064nm, N-PK52A/SF6, EFL 80 mm, 3.0 mm entrance pupil			
Initial quest (thin lens)			
R_1	R_2	R_3	R_4
49.7884	-49.7884	-49.7884	-92.5010
Effective focal length (mm)	Axial color focal shift (mm)	Strehl ratio	Total Seidel Spherical aberration coefficient
80.121	-0.091	0.999	0.000013
Upon zemax optimization (4.0mm N-PK52A & 3.6mm SF6)*			
R_1	R_2	R_3	R_4
50.248	-50.248	-50.248	-90.530
Effective focal length (mm)	Axial color focal shift (mm)	Strehl ratio	Total Seidel Spherical aberration coefficient
80.000	-7.912E-9	1.000	0.000014

*τιμές μπροστά από τα υλικά αναφέρονται στο *central thickness*



Εικόνα 4.2. Διάταξη και χαρακτηριστικά ενός achromat φακού σύμφωνα με ISO 10110.

Για την βελτιστοποίηση ενός φακού το πρώτο που κάνουμε είναι να ορίσουμε μια συνάρτηση/κριτήριο βελτιστοποίησης (*merit function*) του συστήματος που προσπαθούμε να σχεδιάσουμε. Για να το κάνουμε αυτό ανατρέχουμε στο παράθυρο *merit function* όπου και επιλέγουμε τις παραμέτρους ως προς τις οποίες θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε το σύστημα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούμε την είδη υπάρχουσα επιλογή ως προς τη βελτιστοποίηση της παραμέτρου *RMS wavefront* και επιπροσθέτως θέτουμε τρεις νέες παραμέτρους τις οποίες επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Η μια εκ των οποίων είναι η εστιακή απόσταση (*EFL*) την οποία θέτουμε να είναι ίση με 80.0 στη στήλη του *Target*. Αυτό σημαίνει ότι κατά την λειτουργία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης η τιμή της εστιακής απόστασης θα τείνει να γίνει 80.0 (mm εφόσον οι μονάδες μήκους έχουν ορισθεί στα mm). Η επόμενη παράμετρος είναι οι αξονικές χρωματικές εκτροπές (*AXCL*) μεταξύ των δυο μηκών κύματος (532nm & 1064nm) τα οποία ορίσαμε στις ρυθμίσεις του συστήματος. Επειδή δεν επιθυμούμε χρωματικές εκτροπές ορίζουμε την επιθυμητή τιμή (*Target*) για τις χρωματικές εκτροπές να είναι ίση με μηδέν. Τέλος επιλέγουμε να βελτιστοποιήσουμε το *Strehl ratio* αποσκοπώντας την ιδανική τιμή του ενός.

Αν μετά από όλα αυτά πατήσουμε του κουμπί της βελτιστοποίησης εν γένει δεν θα δούμε το επιθυμητό αποτέλεσμα στον φακό μου. Η αιτία σε αυτό βρίσκεται στη βαρύτητα (στήλη *Weight*) κάθε παραμέτρου ως προς την οποία βελτιστοποιούμε το σύστημα. Προκειμένου να παρατηρήσουμε βελτίωση του αρχικού συστήματος θα πρέπει να ορίσουμε τιμή βαρύτητας πάνω από μηδέν η οποία τυπικά μπορεί να

είναι μονάδα. Ωστόσο και σε αυτή τη περίπτωση η βελτιστοποίηση δεν θα δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για να το ξεπεράσουμε ορίζουμε μεγαλύτερη βαρύτητα στις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν και στις οποίες θέλουμε να δούμε βελτίωση. Προφανώς αν δώσουμε πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα σε κάποιες παραμέτρους σε σχέση με κάποιες άλλες παραμέτρους τότε μπορεί να υποβαθμίσουμε τις τελευταίες. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε δώσει αρκετά μεγάλη βαρύτητα στις τρεις πρώτες παραμέτρους. Αυτό δεν σημαίνει ότι με μικρότερη βαρύτητα σε αυτές τις παραμέτρους δεν θα μπορούσαμε να κάνουμε εξίσου καλά τη δουλειά μας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να προσθέσουμε πως πέραν των επιλεγέντων κριτηρίων βελτιστοποίησης θα μπορούσαμε να επιλέξουμε και επιπλέον κριτήρια. Ακόμα και αν ένα κριτήριο δεν υπάρχει ή δεν μας βολεύει στη χρήση του, είναι εφικτό να δημιουργήσουμε εξειδικευμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης μέσω της επέκτασης των δυνατοτήτων του *zemax* με τη χρήση της *ZPL Macros (Zemax Programming Language)*. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δίνεται στο κεφάλαιο το οποίο είναι αφιερωμένο στους *beam expanders*.

Oper #	Type					Target	Weight	Value	% Contrib
1: EFFL	EFFL		1			80.000	1.000E+004	80.000	0.038
2: AXCL	AXCL	1	2	1.000		0.000	1.000E+006	-7.912E-009	2.324E-004
3: STRH	STRH	2	0		1	1.000	1.000E+006	1.000	98.792
4: DMFS	DMFS								
5: BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms							
6: BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constraints.							
7: BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.							
8: BLNK	BLNK	Operands for field 1.							
9: OPDX	OPDX		1	0.000		0.000	0.436	6.088E-004	0.600
10: OPDX	OPDX		1	0.000		0.000	0.698	-2.778E-004	0.200
11: OPDX	OPDX		1	0.000		0.000	0.436	-1.642E-004	0.044
12: OPDX	OPDX		2	0.000		0.000	0.436	3.811E-004	0.235
13: OPDX	OPDX		2	0.000		0.000	0.698	-1.529E-004	0.061
14: OPDX	OPDX		2	0.000		0.000	0.436	-1.365E-004	0.030

Εικόνα 4.3. Το παράθυρο «Merit function» του λογισμικού *zemax* μετά από επιλογή κριτηρίων βελτιστοποίησης και μετά από την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Οι τρεις πρώτες γραμμές αντιστοιχούν στις τρεις παραμέτρους που με ενδιαφέρει να γίνει η βελτιστοποίηση του συστήματος και ότι βρίσκεται από την τέταρτη γραμμή και έπειτα αφορά την προκαθορισμένη συνάρτηση βελτιστοποίησης την οποία έχω επιλέξει (πάνω μπάρα του παραθύρου -> Design -> RMS wavefront) να είναι ως προς το RMS wavefront.

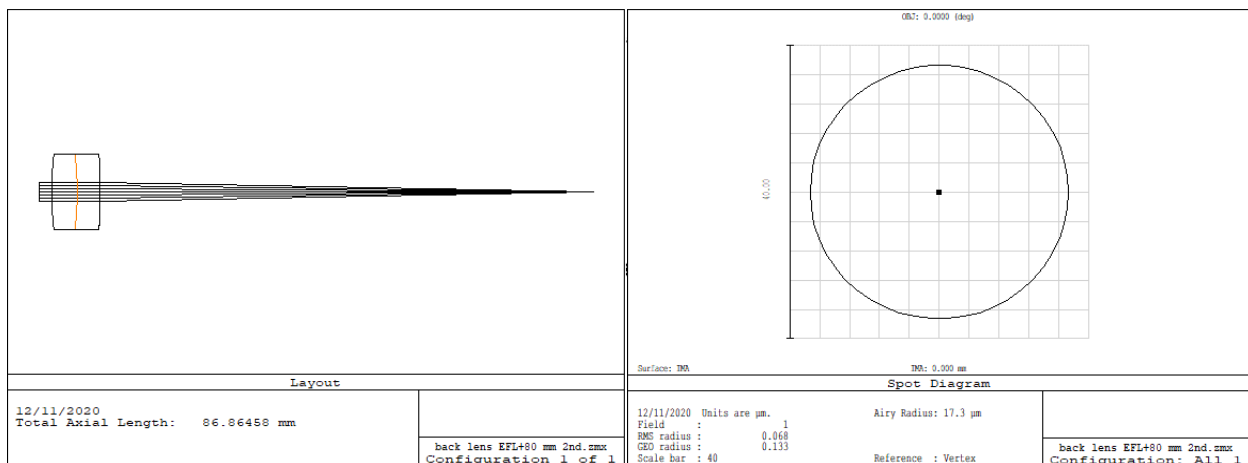
Έχοντας υπολογίσει τις αρχικές συνθήκες (ακτίνες καμπυλότητας φακών) και μετέπειτα έχοντας επιλέξει τα κριτήρια για την βελτιστοποίηση των αρχικών συνθηκών απομένει η ίδια η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Όπως και στα δυο προηγούμενα στάδια δίνουμε έμφαση στις τυχόν λεπτομέρειες οι οποίες καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα, έτσι και στο τελευταίο στάδιο πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί.

Έτσι λοιπόν αν προχωρήσουμε στη βελτιστοποίηση του συστήματος του φακού θα βρούμε σαφώς καλύτερο ή και ενδεχομένως το ιδανικό αποτέλεσμα που θέλουμε. Ωστόσο αυτός ο φακός παραμένει ένας φακός δίχως πάχος και αυτό όπως είναι αναμενόμενο δεν ανταποκρίνεται σε ένα ρεαλιστικό σύστημα. Για αυτό θα πρέπει να προσθέσουμε πάχος στους δυο επιμέρους φακούς του *achromat* φακού. Η απότομη προσθήκη πάχους θα αλλάξει σημαντικά το αποτέλεσμα καθώς και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δεν θα καταφέρει να βρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνεπώς βασική αρχή την οποία πρέπει να ακολουθήσουμε κατά την βελτιστοποίηση ενός χρωματικού φακού είναι η προσθήκη πάχους σε δόσεις με διαδοχικές βελτιστοποιήσεις, έως ότου φτάσουμε σε ένα αποδεκτό πάχος για τον φακό μας. Πρακτικά μπορούμε να αυξάνουμε το πάχος σε κάθε επιμέρους φακό κατά 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm ή παραπάνω ανάλογα με τον ίδιο τον φακό. Όσο πιο μικρό είναι το αριθμητικό άνοιγμα του φακού τόσο πιο

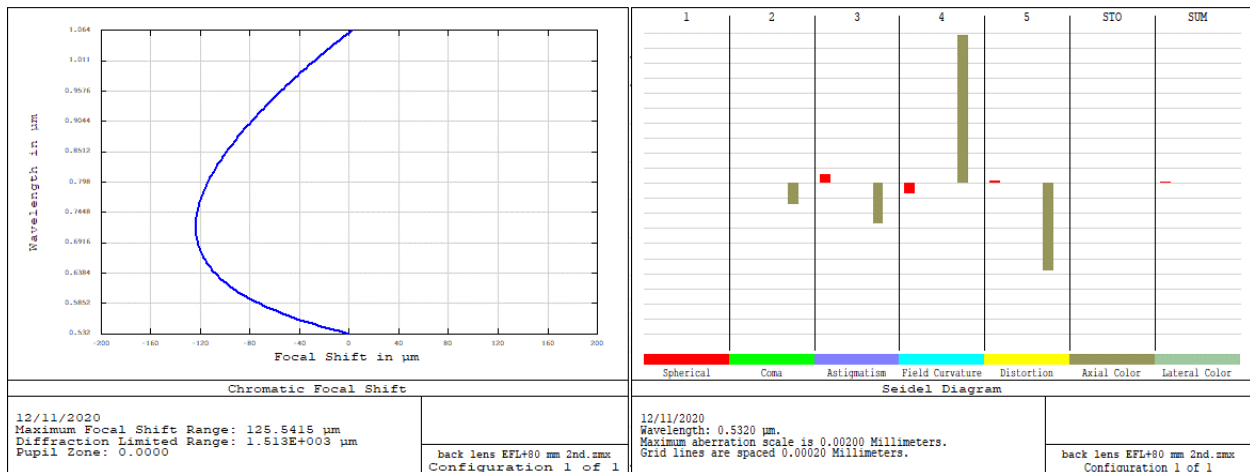
μικρό το βήμα της προσαύξησης του πάχους συνίσταται. Επιπλέον είναι πάρα πολύ σημαντικό κάθε φορά που προσθέτουμε πάχος και πατάμε το κουμπί της βελτιστοποίησης (*Opt or Local Optimization -> Automatic*) να εστιάζουμε (*Tools -> Design -> Quick Focus*) και να ανανεώνουμε (*Merit function Tools -> Update*) το παράθυρο *Merit function*. Μόνο μετά από αυτές τις δυο κινήσεις προχωράμε στην εκ νέου βελτιστοποίηση ή στην προσθήκη επιπλέον πάχους στους φακούς και μετέπειτα βελτιστοποίηση. Τέλος και πολύ σημαντικό είναι να γνωρίζουμε ότι κατά τη βελτιστοποίηση κατά πάσαν πιθανότητα δεν θα βρούμε το ιδανικό αποτέλεσμα. Για αυτό και ειδικά στην τελευταία βελτιστοποίηση (εφόσον έχουμε προσθέσει το επιθυμητό πάχος στους φακούς μας) μπορούμε να ξανακάνουμε βελτιστοποίηση, συμπεριλαμβανομένης της εστίασης και ανανέωσης, μερικές φορές έως ότου φτάσουμε στο ιδανικό για εμάς αποτέλεσμα. Το τονίζουμε ότι δεν έχει νόημα να κάνουμε βελτίωση στο σύστημα αν πρώτα δεν προχωρήσουμε στην εστίασή του και στην ανανέωση του παραθύρου *Merit function*. Μόνο τότε, έχοντας προσθέσει σταδιακά το πάχος και εκτελώντας στο τελευταίο στάδιο διαδοχικές βελτιστοποιήσεις (με εστίαση και ανανέωση) μπορούμε να φτάσουμε να λάβουμε τις τιμές των παραμέτρων ακριβώς όσο τις έχουμε ορίσει στο παράθυρο *Merit function*.

4.3 Ανάλυση σχεδίου

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα παράθυρα ανάλυσης του φακού από τα οποία μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο φακός τον οποίο σχεδιάσαμε πληροί τις προδιαγραφές τις οποίες θέσαμε και πρέπει να έχει προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα σε έναν *beam expander*. Η μόνη παρατήρηση έχει να κάνει με την ύπαρξη σφαιρικών σφαλμάτων. Ωστόσο τα σφαιρικά σφάλματα του φακού είναι αμελητέα και δεν πρέπει να μας ανησυχούν.



Εικόνες 4.4 & 4.5 Ο φακός μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης και ο Airy disk με τη διάμετρο της εστιασμένης δέσμης να βρίσκεται εντός του Airy disk (diffraction limited design).



Εικόνες 4. 6 & 4.7. Στην εικόνα υπ' αριθμόν 5 βλέπουμε το χαρακτηριστικό διάγραμμα της αξονικής χρωματικής εκτροπής ενός *achromat* φακού συναρτήσει του μήκους κύματος. Παρατηρούμε ότι η αξονική χρωματική εκτροπή μηδενίζεται σε δυο μήκη κύματος τα 532 nm και τα 1064 nm όπως και θέλουμε. Στην εικόνα 6 βλέπουμε τους συντελεστές Seidel για διάφορα σφάλματα όπως η αξονικές χρωματικές εκτροπές (καφέ) και σφαιρικές εκτροπές (κόκκινο) για τις επιμέρους επιφάνειες του φακού και στο συνολικό τους άθροισμα.

Επιπροσθέτως αναφέρουμε ότι ένας φακός τύπου *achromat cemented doublet* είναι μόνον μία από τις πολλές λύσεις στο θέμα της ελαχιστοποίησης των χρωματικών εκτροπών. Πέραν από τον εν λόγω τύπου φακών υπάρχουν οι *apochromats* φακοί, οι οποίοι διορθώνουν τις σφαιρικές εκτροπές για τρία διαφορετικά μήκη κύματος. Αυτοί οι φακοί κατά κανόνα σχεδιάζονται από τρία διαφορετικά υλικά. Μετά ακολουθούν οι *superapochromats* φακοί οι οποίοι αποτελούνται από τέσσερα υλικά και διορθώνουν τις χρωματικές εκτροπές σε τέσσερα μήκη κύματος. Πέραν αυτών των φακών υπάρχουν οι υβριδικοί διαθλαστικοί/περιθλαστικοί (*hybrid refractive diffractive*) φακοί, αποτελούμενοι από ένα υλικό με καμπύλη επιφάνεια στην οποία έχει δημιουργηθεί δομή περίθλασης η οποία και επιτρέπει την εξάλειψη των χρωματικών σφαλμάτων. Ένας άλλος τύπος φακών που αντιμετωπίζουν τις χρωματικές εκτροπές είναι οι φακοί *GRIN* (*Gradient Refractive Index*) οι οποίοι αποτελούνται από υλικό με μεταβαλλόμενο δείκτη διάθλασης κάθετα ως προς τον οπτικό άξονα του φακού. Δεν ξεχνάμε και την ύπαρξη των κατοπτρικών συστημάτων απαλλαγμένων πλήρως από τις χρωματικές εκτροπές. Επιπλέον νέα τάση, διαθέσιμη στο εμπόριο είναι οι αχρωματικοί φακοί ενός υλικού αλλά με ιδιαίτερο και πολύπλοκο σχήμα χάριν του οποίου αντιμετωπίζονται οι χρωματικές εκτροπές. Παρόλα αυτά υπάρχουν και άλλοι φακοί και σχετικά θέματα με τους φακούς όπως η φακοί τύπου *athermats*, η διόρθωση των εκτροπών από το επίπεδο εστίασης εξαιτίας θερμικών φαινομένων και ούτε καθεξής.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι το οπτικό γυαλί SF6 ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα με χαμηλή ενέργεια της ακτινοβολίας (532nm) δεν ενδείκνυται σε απευθείας (χωρίς επίστρωση) ή μη απευθείας χρήση υπό ακτινοβολία *laser* (532nm) υψηλής ενέργειας, καθώς τότε προξενείτε φθορά στην επιφάνεια του φακού. Συνεπώς ένα επιπλέον βήμα στον σχεδιασμό οπτικών συστημάτων με χρήση *laser* θα πρέπει να είναι ο έλεγχος του *LDT* (*Laser Damage Threshold*) πριν την επιλογή του υλικού, ακόμα και αν το υλικό αυτό διατηρεί υψηλή διαπερατότητα στο εφαρμοζόμενο μήκος κύματος. Στη δική μας περίπτωση η ενέργειες των παλμών του *laser* στα 532nm είναι μικρές και η φθορά της επιφάνειας δεν προβλέπεται. Παρόλα αυτά συνίσταται η αντικατάσταση του SF6 με κάποιο άλλο υλικό και ιδίως στον *beam expander*. Επιπλέον συνίσταται η επικοινωνία με τον παραγωγό του υλικού για εντελεχής διερεύνηση των συνθηκών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μεν ή το δε υλικό.

Κεφάλαιο 5^ο

Laser Beam expander (Διευρυντής δέσμης laser)

5.1 Θεωρία

Beam expander ονομάζουμε το ανεστιακό οπτικό σύστημα το οποίο αυξάνει την διάμετρο μιας δέσμης ακτινών φωτός, ενώ παράλληλα μειώνει την γωνιακή απόκλιση των ακτινών από τον οπτικό άξονα.

Χαρακτηριστικό μέγεθος ενός *beam expander* είναι η μεγεθυντική ισχύς ή μεγεθυντική δύναμη (*magnifying power*) η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεγέθυνσης (*magnification*). [1]

$$\text{Lateral Magnification (M)} = \frac{\text{Incidence Height}}{\text{Output Height}} \quad (5.1)$$

$$\text{Longitudinal Magnification (M)} = \frac{\text{Incidence Distance}}{\text{Output Distance}} \quad (5.2)$$

$$\text{Magnifying Power (MP)} \equiv \frac{1}{M} \quad (5.3)$$

$$\text{Magnifying Power (MP)} = \frac{\theta_{In}}{\theta_{Out}} = \frac{D_{Out}}{D_{In}} \quad (5.4), (5.5)$$

$$\text{Magnifying Power (MP)} = -\frac{f_{Out}}{f_{In}}, \text{ Galilean} \quad (5.6)$$

$$\text{Magnifying Power (MP)} = \frac{f_{Out}}{f_{In}}, \text{ Kepler} \quad (5.7)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις και δεδομένου ότι η μεγεθυντική ισχύς ενός *beam expander*, είναι θετική μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αφενός μια εισερχόμενη δέσμη διαμέτρου D_{In} στην έξοδο αυξάνεται κατά MP φορές σε μια διάμετρο D_{Out} , ενώ αφετέρου μια δέσμη εισόδου η οποία διαδιδόμενη στον οπτικό άξονα διευρύνεται με μια γωνία θ_{In} θα μειώσει στην έξοδο τη γωνία διεύρυνσης θ_{Out} κατά MP .

Τα προηγούμενα συμπεράσματα αρκούν για να καταλάβουμε τους πιθανούς λόγους χρήσης των *beam expanders*. Ένας από αυτούς είναι για την μείωση την διεύρυνση της διαμέτρου της δέσμης. Παράδειγμα αν θέλουμε μειώσουμε την ένταση την ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στην μονάδα του χρόνου του παλμού laser ώστε να φτιάξουμε ένα ασφαλές για το μάτι σύστημα. Ενώ ένας άλλος σημαντικός λόγος είναι την μείωση της γωνίας θ_{In} (*divergence angle*) ή με απλά λόγια για την επίτευξη πιο παράλληλης δέσμης ως προς τον οπτικό άξονα. Για παράδειγμα για την αποφυγή μεγάλης διεύρυνσης της δέσμης σε μεγάλη απόσταση στα συστήματα LIDAR και κατά συνέπεια για την βελτίωση των αποδόσεων αυτού του συστήματος.

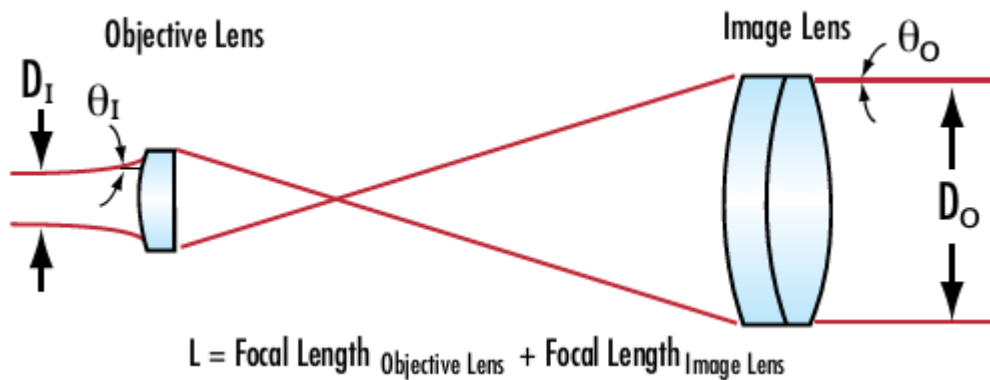
Επιπλέον η απόσταση L μεταξύ των δυο φακών θα πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των εστιακών αποστάσεων των φακών. [16]

$$L = f_1 + f_2 \quad (5.8)$$

Οι *beam expanders* κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες.

Κέπλερ (Keplerian)

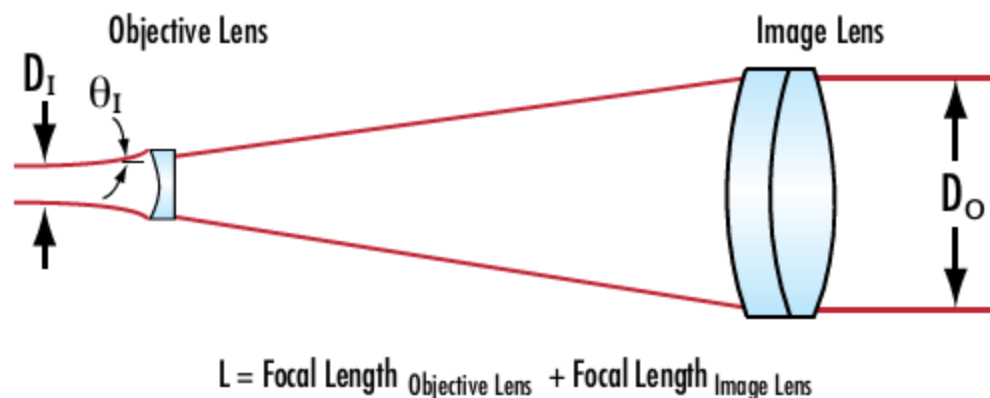
Οι μεν *beam expanders* τύπου Κέπλερ αναλύονται σε δυο θετικούς φακούς και χαρακτηρίζονται από περιοχή εστίασης μεταξύ των φακών του *beam expander*.



Εικόνα 5.1. Σχηματική αναπαράσταση ενός *beam expander* τύπου Κέπλερ. (3)

Γαλιλαίου (Galilean)

Οι δε *beam expanders* τύπου Γαλιλαίου χαρακτηρίζονται από απουσία περιοχής εστίασης στο ενδιάμεσο μεταξύ των φακών του, και αναλύονται σε έναν αρνητικό (στην είσοδο) και ένα θετικό (στην έξοδο) φακούς. Η απουσία περιοχής εστίασης στο ενδιάμεσο μεταξύ των φακών, είναι επιθυμητή σε εφαρμογές με laser υψηλών ενεργειών, για αποφυγή τυχόν προβλημάτων όπως ο ιονισμός των μορίων του αέρα στο εσωτερικό του *beam expander* από την εστιασμένη δέσμη του laser.



Εικόνα 5.2. Σχηματική αναπαράσταση ενός *beam expander* τύπου Γαλιλαίου. (3)

5.2 Achromat beam expander - σταθερής μεγεθυντικής ισχύς

Σχεδιάζοντας έναν *beam expander* όπως και σε κάθε άλλο σχέδιο, ξεκινάμε με το καθορισμό των προδιαγραφών τις οποίες θα πρέπει να πληροί ένας *beam expander* και οι οποίες θα πρέπει να ανταποκρίνονται στην εκάστοτε εφαρμογή.

Έτσι λοιπόν θεωρούμε ότι θέλουμε έναν *beam expander* ο οποίος είναι *achromat* στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm και ο οποίος θα διευρύνει μια δέσμη εισόδου με διάμετρο 1.5 mm σε μια δέσμη εξόδου με διάμετρο 3.0mm. Συνεπώς από τη σχέση (5) βρίσκουμε πως η μεγεθυντική δύναμή του *beam expander* είναι ίση με 2.

Έχοντας τις προαναφερθείσες πληροφορίες προτρέχουμε στην επιλογή του είδους του *beam expander* και ακολούθως καθορίζουμε τα χαρακτηριστικά των φακών του. Για την αποφυγή πιθανόν ανεπιθύμητης εστίασης της δέσμης του *laser* στο εσωτερικό του *beam expander* αποφεύγω τον τύπο του Κέπλερ και επιλέγω τον τύπο του Γαλιλαίου. Έπειτα χρησιμοποιώ τη σχέση (6) και για δεδομένη μεγεθυντική δύναμη βρίσκω τις εστιακές αποστάσεις που πρέπει να έχουν οι δύο φακοί. Στη περίπτωση που είχα κάποιον περιορισμό όσον αφορά τις διαστάσεις του *beam expander* θα δούλευα με το σκεπτικό να διαλέξω ένα ζεύγος φακών που θα ικανοποιεί τον περιοριστικό παράγοντα στη μεταξύ τους απόσταση. Ωστόσο στη περίπτωση μας δεν υπάρχει κάποια απαίτηση όσον αφορά τις διαστάσεις του *beam expander*, γεγονός το οποίο μου επιτρέπει να θεωρήσω αυθαίρετα ότι τα 200 mm είναι το μέγιστο μήκος του *beam expander* το οποίο δεν πρέπει να ξεπεράσω προκειμένου να θεωρηθεί σύστημα ικανοποιητικών διαστάσεων.

Δεδομένου ότι δεν κατασκευάζουμε τους δικούς μας φακούς και το ότι δεν αναφερόμαστε σε παραγωγή μεγάλης κλίμακας, δεν έχει τόσο νόημα να σχεδιάσουμε τον δικό μας φακό όσο το να αναζητήσουμε τους κατάλληλους φακούς οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Ωστόσο αφενός επειδή με μια σύντομη έρευνα δεν βρέθηκαν φακοί οι οποίοι να είναι *achromat* ακριβώς στα 532nm και 1064nm και αφετέρου για λόγους εκπαίδευσης στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας επιλέγω κάθε φορά να γίνεται ο σχεδιασμός των ζητούμενων φακών.

Έτσι λοιπόν ανατρέχω στο αρχείο *excel* με τις λύσεις για τους *achromat* φακούς. Για τα υλικά τα οποία έχω διαλέξει (βλέπε κριτήρια επιλογής υλικών στο κεφάλαιο της σχεδίασης των *achromat* φακών) δοκιμάζω διάφορες τιμές της εστιακής απόστασης για τον εμπρόσθιο (αρνητικό) φακό του *beam expander* ο οποίος είναι αυτός με την μικρότερη κατά απόλυτη τιμή εστιακή απόσταση ανάμεσα στους δυο φακούς. Προσπαθώ να βρω μια τιμή εστιακής απόστασης αρκετά μικρή ώστε το μήκος του *beam expander* να είναι και αυτό μικρό, ενώ ταυτόχρονα κοιτάζω τις θεωρητικές ακτίνες καμπυλότητες να μην είναι πολύ μικρές ώστε και η διάμετρος του φακού να μην είναι πολύ μικρή. Με αυτή τη διαδικασία καταλήγω να επιλέξω την εστιακή απόσταση f_1 του εμπρόσθιου φακού ίση με -40mm και από τη σχέση (6) υπολογίζω ότι η εστιακή απόσταση f_2 πρέπει να είναι ίση με 80mm. Από τη σχέση (8) εύκολα υπολογίζουμε το μήκος του *beam expander* στα 40mm, κάτι το οποίο εντάσσεται στις προδιαγραφές μας.

Επιπλέον προτού σχεδιάσουμε τους επιμέρους φακούς ενός συστήματος, είναι προτιμητέο να προσομοιώσουμε το οπτικό σύστημα με στο *zemax* (ή σε ανάλογο λογισμικό) με χρήση ιδανικών άπαχων φακών (στο *zemax* αναγράφονται ως *paraxial*). Έτσι θα μπορούμε να πειστούμε για την ορθότητα της θεωρητικής προσέγγισης και να σχεδιάσουμε απλά και γρήγορα το αρχικό σύστημα δίχως να μπερδευτούμε με την σχεδίαση πραγματικών φακών. Επιπλέον αν κάνουμε κάποιο λάθος θα

μπορέσουμε να το διορθώσουμε προτού προχωρήσουμε στη σχεδίαση των φακών και άρα δεν θα χρειαστεί να τους ξανασχεδιάσουμε.

Στη συνέχεια προχωράμε στο σχέδιο των επιμέρους φακών, οι οποίοι εφόσον ο *beam expander* πρέπει να είναι *achromat* θα πρέπει και αυτοί με τη σειρά τους να είναι *achromat*. Στην ενότητα περί των αχρωματικών φακών παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος σχεδίασης του ενός εκ των δυο φακών του *beam expander* αυτής της παραγράφου. Για αυτό από εδώ και ύστερα δεν θα γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο σχεδίασης των φακών, παρά μόνο θα παρουσιάζονται σε πίνακα τα βασικά χαρακτηριστικά για το αρχικό σχέδιο (θεωρητικό) και τελικό σχέδιο (μετά την βελτιστοποίηση) καθώς ορισμένα διαγράμματα από το zemax εφόσον αυτά κριθούν απαραίτητα.

Πίνακας 5.1. Ο εμπρόσθιος achromat φακός με εστιακή απόσταση -40 mm του «beam expander».

Achromat lens, 532nm & 1064nm, N-PK52A/SF6, EFL 80 mm, 1.5 mm entrance pupil			
Initial quest (thin lens)			
R_1	R_2	R_3	R_4
-24.894	24.894	24.894	46.257
Effective focal length (mm)	Axial color focal shift (mm)	Strehl ratio	Total Seidel Spherical aberration coefficient
-40.061	0.046	0.997	-0.000007
Upon zemax optimization (4.0mm N-PK52A & 4.0mm SF6)*			
R_1	R_2	R_3	R_4
-25.942	25.942	25.942	46.793
Effective focal length (mm)	Axial color focal shift (mm)	Strehl ratio	Total Seidel Spherical aberration coefficient
-40.000	-1.487E-9	1.000	-0.000008

Πίνακας 5.2. Ο οπίσθιος achromat φακός με εστιακή απόσταση +80 mm του «beam expander».

Achromat lens, 532nm & 1064nm, N-PK52A/SF6, EFL 80 mm, 3.0 mm entrance pupil			
Initial quest (thin lens)			
R_1	R_2	R_3	R_4
49.7884	-49.7884	-49.7884	-92.5010
Effective focal length (mm)	Axial color focal shift (mm)	Strehl ratio	Total Seidel Spherical aberration coefficient
80.121	-0.091	0.999	0.000013
Upon zemax optimization (4.0mm N-PK52A & 3.6mm SF6)*			
R_1	R_2	R_3	R_4
50.248	-50.248	-50.248	-90.530
Effective focal length (mm)	Axial color focal shift (mm)	Strehl ratio	Total Seidel Spherical aberration coefficient
80.000	-7.912E-9	1.000	0.000014

*τιμές μπροστά από τα υλικά αναφέρονται στο *central thickness* το οποίο αντιστοιχεί στο πάχος στο κέντρο του φακού.

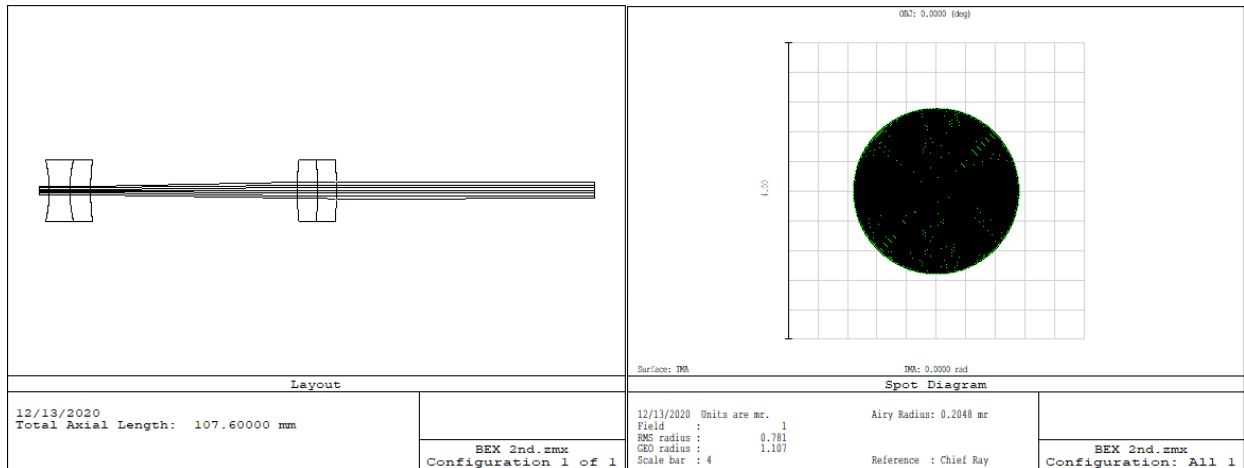
Απομένει να ολοκληρώσουμε το σχέδιο, δημιουργώντας νέο αρχείο στο zemax με τους δυο φακούς στην κατάλληλη μεταξύ τους απόσταση (40mm). Κατά τη σχεδίαση ενός ανεστιακού συστήματος όπως είναι ένας *beam expander* φροντίζουμε να το δηλώσουμε στο zemax, ανατρέχοντας στην πάνω μπάρα (*System* -> *General* -> *click on Afocal Image Space*), όπως μας συνιστά το εγχειρίδιο του zemax. Αν ξεχάσουμε να το δηλώσουμε, ακόμα αν και έχουμε δηλώσει τα σωστά κριτήρια βελτιστοποίησης με τις κατάλληλες παραμέτρους βελτιστοποίησης, η βελτιστοποίηση του συστήματος εν γένει θα αποτύχει και το αποτέλεσμα της θα είναι μακριά από ένα ανεστιακό σύστημα.

Παρακάτω βλέπουμε τους το παράθυρο «*Lens Data Editor*» όπου έχουμε δηλώσει τους βελτιστοποιημένους φακούς των πινάκων 1 και 2, στην θεωρητικά προβλεπόμενη μεταξύ τους απόσταση των 40mm.

Surf:	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000
1	Standard	Infinity	2.000		0.750
2*	Standard	-25.942	4.000	N-PK52A	6.000
3*	Standard	25.942	0.000		6.000
4*	Standard	25.942	4.000	SF6	6.000
5*	Standard	46.732	40.000		6.000
6*	Standard	50.248	4.000	N-PK52A	6.000
7*	Standard	-50.248	0.000		6.000
8*	Standard	-50.248	3.600	SF6	6.000
9*	Standard	-90.530	0.000		6.000
STO	Standard	Infinity	100.000		1.588
IMA	Standard	Infinity	-		1.478

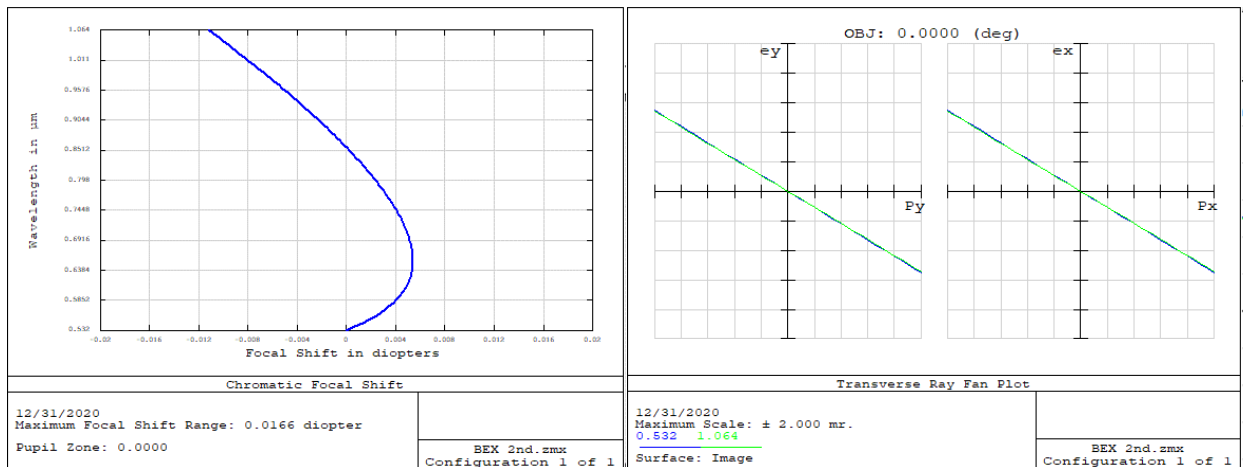
Εικόνα 5.3. Το παράθυρο «*Lens Data Editor*» για τους δυο φακούς στην προβλεπόμενη μεταξύ τους απόσταση (40 mm).

Αν ανατρέξουμε στην τέταρτη εικόνα θα δούμε ένα φαινομενικά ικανοποιητικό *beam expander* ο οποίος διευρύνει μια δέσμη εισόδου κατά δυο φορές στη διάμετρο. Ωστόσο από το *spot diagram* (εικόνα 5) παρατηρούμε ότι ναι μεν έχουμε ένα σχετικά αχρωματικό σχέδιο (πράσινο και μαύρο αλληλεπικαλύπτονται), ωστόσο το σχέδιό μας δεν είναι *diffraction limited*, καθώς το *spot* της δέσμης ακτίνων ξεπερνάει τον δακτύλιο του επονομαζόμενου *Airy disc*. Στην περίπτωση κατά την οποία σχεδιάζουμε ένα ανεστιακό σύστημα όπως ένας *beam expander*, η προαναφερθείσα περίπτωση υποδηλώνει ότι το σύστημά μας απέχει αρκετά από το ιδανικό ανεστιακό σύστημα και άρα δεν μπορεί να θεωρηθεί ως *beam expander*.



Εικόνες 5.4 & 5.5. Ο beam expander με τους φακούς τους οποίους σχεδιάσαμε σε απόσταση 40 mm και το παράθυρο «Spot Diagram».

Ακολουθως ανατρέχουμε στο διάγραμμα της αξονικής χρωματικής εκτροπής (εικόνα 6) σε συνάρτηση με το μήκος κύματος, όπου βλέπουμε ότι ο beam expander δεν είναι αχρωματικός στο ζεύγος των μηκών κύματος του ενδιαφέροντος μας (532nm και 1064nm) αλλά σε ένα διαφορετικό ζεύγος. Έπειτα στρεφόμαστε στην έβδομη με τα «Ray Fan Plots». Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των κανονικοποιημένων εκτροπών, στο επίπεδο της απεικόνισης, μεταξύ του σημείου απεικόνισης της ακτίνας η οποία προέρχεται από μια σημειακή πηγή στο επίπεδο του αντικειμένου και η οποία διέρχεται από το κέντρο του φακού (chief ray) και των σημείων απεικόνισης των ακτινών οι οποίες προέρχονται από την ίδια σημειακή πηγή αλλά διέρχονται από διαφορετικά σημεία του φακού κατά τον άξονα των τετμημένων (sagittal, δεξι γράφημα) και κατά των άξονα των τεταγμένων (tangential, αριστερό γράφημα). Βέβαια θα πρέπει να προσέξουμε στη περίπτωση όπου επιλέγουμε να σχεδιάσουμε ανεστιακό σύστημα (το δηλώνουμε μέσω της επιλογής Afocal Image Space) οι εν λόγω εκτροπές αναφέρονται σε γωνιακή απόσταση (σε μονάδες γωνίας) και όχι σε απόσταση μήκους όπως συμβαίνει στον σχεδιασμό εστιακών συστημάτων (απλώς παραλείπουμε την επιλογή της λειτουργίας Afocal Image Space). Αυτό το οποίο γνωρίζουμε είναι το ότι σε ένα σύστημα ελεύθερο από πάσης φύσεως εκτροπές η καμπύλη της κάθε γραφικής παράστασης (sagittal & tangential) πρέπει να είναι ένα ευθύγραμμο τμήμα όπως και φαίνεται ότι συμβαίνει στη περίπτωση μας. Εάν το εν λόγω ευθύγραμμο τμήμα είναι παράλληλο και εφαπτόμενο στον οριζόντιο άξονα τότε γνωρίζουμε ότι όλες οι ακτίνες εστιάζουν σε ένα σημείο, γεγονός το οποίο συμβαίνει στο επίπεδο εστίασης του φακού. Στη δική μας περίπτωση η κλίση της ευθείας υποδηλώνει ότι το επίπεδο απεικόνισης του «φακού» βρίσκεται μπροστά και μάλιστα μακριά από το επίπεδο εστίασης και άρα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το σύστημά μας αναλύεται σε έναν θετικό φακό με σχετικά μεγάλη εστιακή απόσταση. Αυτό είναι κάτι που μπορούμε να επαληθεύσουμε και από την τιμή η οποία αντιστοιχεί στην εστιακή απόσταση του συστήματος και εντοπίζεται στο παράθυρο της συνάρτησης βελτιστοποίησης (εικόνα 8) στο κελί της γραμμής EFFL και κα της στήλης Value. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο beam expander, μόνο beam expander δεν είναι μιας και έχει εστιακή απόσταση ίση με 688.348 mm αντί της εστιακής απόστασης να τείνει στο άπειρο.



Εικόνες 5.6 & 5.7. Τα διαγράμματα της αξονικής χρωματικής εκτροπής σε σχέση με το μήκος κύματος (6) και «Ray Fan».

Oper #	Type	Surf	Wave	Hx	Px	Py	Target	Weight	Value	% Contrib	
1:	EFFL	EFFL	1				0.000	0.000	688.348	0.000	
2:	RAED	RAED	11	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.091	0.606	
3:	RAED	RAED	11	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.090	0.591	
4:	REAR	REAR	11	0.000	0.000	1.000	1.500	1.000	1.474	0.049	
5:	REAR	REAR	11	0.000	0.000	1.000	1.500	1.000	1.478	0.034	
6:	AXCL	AXCL	1	2	1.000		0.000	1.000	-0.011	9.415E-003	
7:	STRH	STRH	2	0	1	0	0	1.000	0.042	66.892	
8:	DMFS	DMFS									
9:	BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms								
10:	BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constraints.								
11:	BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.								
12:	BLNK	BLNK	Operands for field 1.								
13:	OPDX	OPDX	1	0.000	0.336	0.000	0.000	0.436	-0.633	12.744	
14:	OPDX	OPDX	1	0.000	0.707	0.000	0.000	0.698	-1.168E-003	6.948E-005	
15:	OPDX	OPDX	1	0.000	0.942	0.000	0.000	0.436	0.635	12.820	
16:	OPDX	OPDX	2	0.000	0.336	0.000	0.000	0.436	-0.313	3.118	
17:	OPDX	OPDX	2	0.000	0.707	0.000	0.000	0.698	-5.792E-004	1.708E-005	
18:	OPDX	OPDX	2	0.000	0.942	0.000	0.000	0.436	0.314	3.137	

Εικόνα 5.8. Merit function για τον μη βελτιστοποιημένο beam expander. Δεν έχουμε εφαρμόσει τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, απλά παρατηρούμε τις τιμές των παραμέτρων βελτιστοποίησης (Target) πριν τον εφαρμόσουμε.

Όπως αναφέραμε νωρίτερα προκειμένου χαρακτηρίσουμε το σύστημά μας ή προκειμένου να επαληθεύσουμε τα συμπεράσματά μας μπορούμε να ανατρέξουμε στο παράθυρο *Merit function* και να ορίσουμε ορισμένα μεγέθη – κριτήρια βελτιστοποίησης τα οποία είναι ικανά να χαρακτηρίσουν το σύστημά μας. Έτσι λοιπόν ορίζουμε τις παραμέτρους *EFFL* (εστιακή απόσταση), *RAED* (γωνία σε μοίρες μιας εξερχόμενης δέσμης κάθετης ως προς την επιφάνεια από την οποία εξέρχεται), *REAR* (ακτινική θέση ή ακτίνα της δέσμης), *STRH* (*Strehl ratio*), *AXCL* (αξονικές χρωματικές εκτροπές) και την προκαθορισμένη παράμετρο *DMFS*. Οι παράμετροι *RAED* και *REAR* αναφέρονται στην τελευταία επιφάνεια του συστήματος, η οποία σύμφωνα με την εικόνα 3 απέχει 100 mm από την τελευταία επιφάνεια του τελευταίου φακού του *beam expander*. Από τις τιμές στη στήλη *Value* μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το σύστημα είναι μακράν από ιδανικό και χρήζει βελτιστοποίησης ως προς αυτές τις παραμέτρους. Έτσι λοιπόν έχοντας τα συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης ανατρέχω στο παράθυρο «*Lens Data Editor*» (εικόνα 9) και επιλέγω την/τις παράμετρο/παραμέτρους οι οποίες θα μεταβληθούν προκειμένου να ικανοποιηθεί η συνάρτηση βελτιστοποίησης. Για αρχή αυτό το οποίο κάνω είναι να καθορίσω μόνο μία παράμετρο, την απόσταση μεταξύ των δυο φακών. Από τις επόμενες εικόνες (9 & 10) βλέπουμε την επίπτωση τόσο στην παράμετρο βελτιστοποίησης όσο και στις τιμές των κριτηρίων βελτιστοποίησης, έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

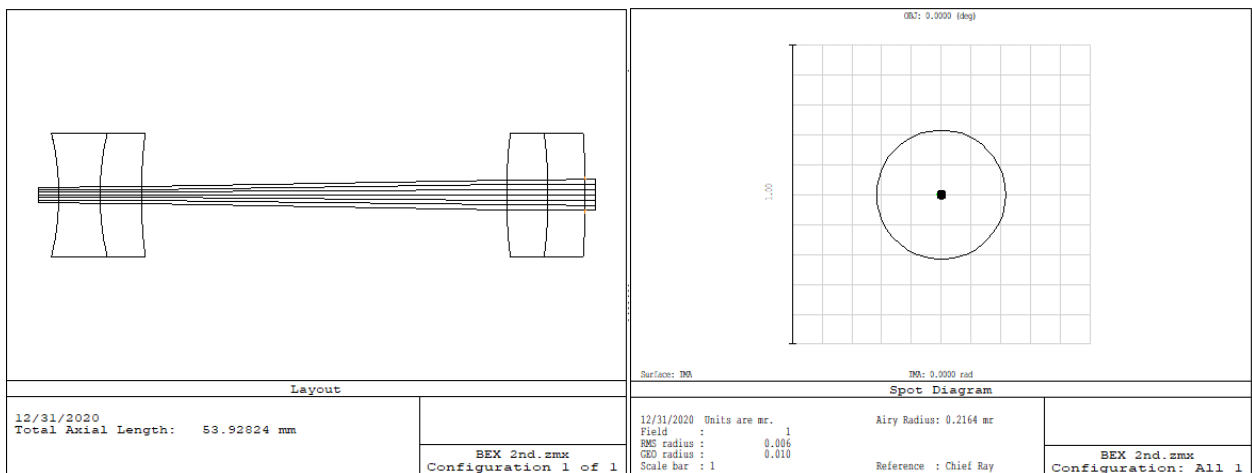
		Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter																
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000																
1	Standard	Infinity	2.000		0.750																
2*	Standard	-25.942	4.000	N-PK52A	6.000	U															
3*	Standard	25.942	P 0.000		6.000	U															
4*	Standard	25.942	P 4.000	SF6	6.000	U															
5*	Standard	46.732	35.328	V	6.000	U															
6*	Standard	50.248	4.000	N-PK52A	6.000	U															
7*	Standard	-50.248	P 0.000		6.000	U															
8*	Standard	-50.248	P 3.600	SF6	6.000	U															
9*	Standard	-90.530	0.000		6.000	U															
STO	Standard	Infinity	10.000		1.503																
IMA	Standard	Infinity	-		1.503																

Εικόνα 5.9. Παράθυρο «Lens Data Editor» μετά από βελτιστοποίηση ως προς την απόσταση μεταξύ των δυο φακών. Η εν λόγω παράμετρος είναι μεταβλήθηκε και καθώς είναι μεταβλητή αναγράφεται στα δεξιά με το γράμμα V (Variable).

Oper #	Type	Surf	Wave	Hx	Fx	Fy	Target	Weight	Value	% Contrib
1: RAED	RAED	11	1	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	2.018E-003	3.324
2: RAED	RAED	11	2	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	8.006E-004	0.523
3: REAR	REAR	11	1	0.000	0.000	1.000	1.500	1.000	1.500	0.026
4: REAR	REAR	11	2	0.000	0.000	1.000	1.500	1.000	1.503	6.734
5: AXCL	AXCL	1	2	1.000			0.000	1.000	-9.843E-003	79.085
6: STRH	STRH	2	0	1	0	0	1.000	1.000	1.000	6.264E-003
7: DMFS	DMFS									
8: BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms								
9: BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constraints.								
10: BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.								
11: BLNK	BLNK	Operands for field 1.								
12: OPDX	OPDX		1	0.000	0.336	0.000	0.000	0.436	-4.755E-004	0.081
13: OPDX	OPDX		1	0.000	0.707	0.000	0.000	0.698	-8.881E-004	0.450
14: OPDX	OPDX		1	0.000	0.942	0.000	0.000	0.436	1.897E-003	1.281
15: OPDX	OPDX		2	0.000	0.336	0.000	0.000	0.436	3.764E-003	5.045
16: OPDX	OPDX		2	0.000	0.707	0.000	0.000	0.698	-4.370E-004	0.109
17: OPDX	OPDX		2	0.000	0.942	0.000	0.000	0.436	-3.064E-003	3.345

Εικόνα 5.10. Παράθυρο «Merit Function Editor» μετά από βελτιστοποίηση ως προς την απόσταση μεταξύ των δυο φακών.

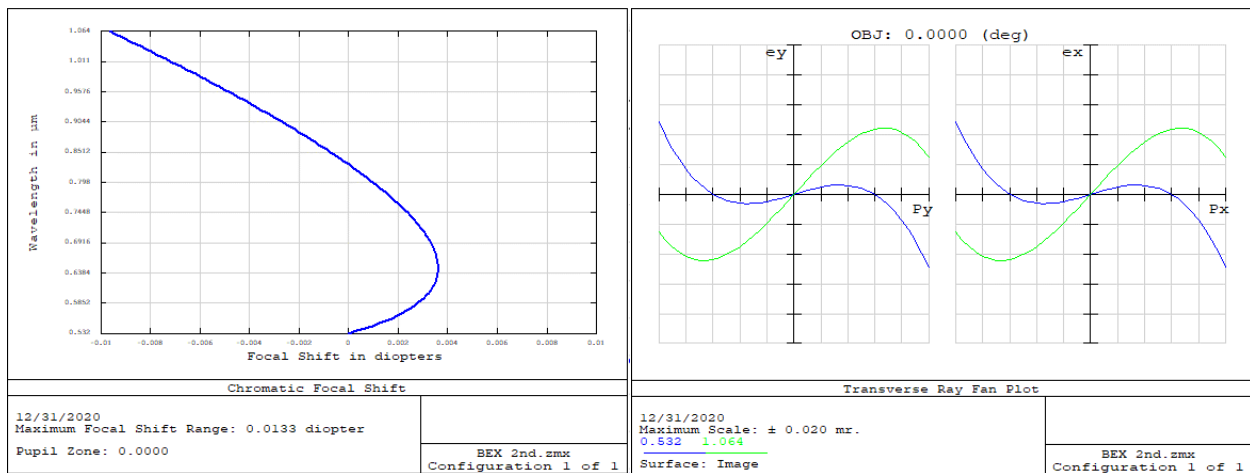
Από τις εικόνες 5.3 και 5.9 παρατηρούμε ότι η απόσταση μεταξύ των δυο φακών μεταβλήθηκε, μειώθηκε στα 35.328 mm από τα 40.000 mm στα οποία ήταν εξαρχής.



Εικόνες 5.11 & 5.12. Το προφίλ του beam expander και το παράθυρο «Spot Size» για το σύστημα έπειτα από τη βελτιστοποίηση ως προς την απόσταση μεταξύ των δυο φακών.

Σε συνέπεια από αυτή την μεταβολή παρατηρούμε σημαντική βελτίωση του *beam expander* ο οποίος πλέον μπορεί να αποκαλείται έτσι. Στις επόμενες τέσσερις εικόνες θα βρούμε το «*Spot Diagram*» (εικόνα 12), όπου παρατηρούμε ότι ο *beam expander* είναι *diffraction limited* και συνεπώς το σχέδιο τείνει να έχει περιορισμένες εκτροπές και να είναι πολύ κοντά σε ένα ανεστιακό σύστημα (πρακτικά ανεστιακό σύστημα).

Ωστόσο από την εικόνα 13 παρατηρούμε ότι το σύστημα συνεχίζει να μην είναι αχρωματικό στο ζεύγος των μηκών κύματος 532nm και 1064nm. Ενώ από την διπλανή εικόνα, παρατηρούμε τις καμπύλες να έχουν μια «κυματιστή» μορφή ή οποία αποδίδεται σε ύπαρξη εκτροπών του συστήματος. Ωστόσο περιστροφή γύρω από τους οριζόντιους άξονες (*Py* & *Px*) υποδηλώνει ότι έχουμε προσεγγίσει την ελαχιστοποίηση των σφαιρικών εκτροπών. Δυστυχώς οι καμπύλες των δυο χρωμάτων δεν συμπίπτουν, κάτι τι οποίο για άλλη μια φορά υποδηλώνει τον μη αχρωματικό χαρακτήρα στα μήκη κύματος τα οποία μας ενδιαφέρου.



Εικόνες 5.13 & 5.14. Η χρωματική εκτροπή από το επίπεδο εστίασης (χρωματική αξονική εκτροπή) σε συνάρτηση με το μήκος κύματος μαζί με το δεξί παράθυρο «*Ray Fan*». Και οι δυο εικόνες αναφέρονται στο σύστημα μετά την βελτιστοποίηση ως προς την απόσταση μεταξύ των δυο φακών.

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000
1	Standard	Infinity	2.000		0.750
2*	Standard	-29.616 V	4.000	N-PK52A	6.000 U
3*	Standard	29.616 P	0.000		6.000 U
4*	Standard	29.616 P	4.000	SF6	6.000 U
5*	Standard	48.724 V	38.200 V		6.000 U
6*	Standard	54.907 V	4.000	N-PK52A	6.000 U
7*	Standard	-54.907 P	0.000		6.000 U
8*	Standard	-54.907 P	3.600	SF6	6.000 U
9*	Standard	-96.044 V	0.000		6.000 U
STO	Standard	Infinity	10.000		1.500
IMA	Standard	Infinity	-		1.500

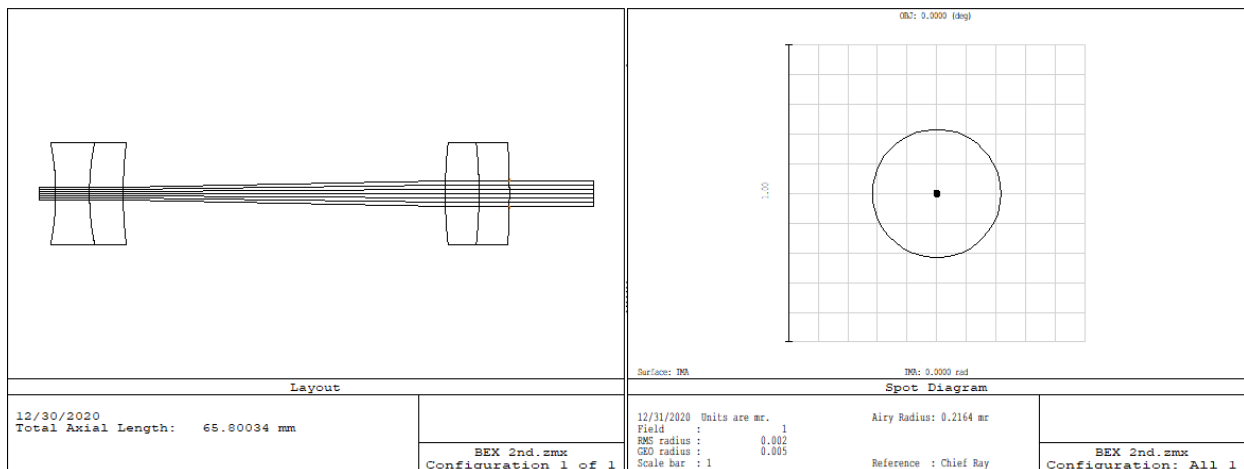
Εικόνα 5.15. «*Lens Data Editor*» για το σύστημα μετά την βελτιστοποίηση ως προς την απόσταση μεταξύ των φακών αλλά και ως προς τις ακτίνες καμπυλότητάς τους.

Για αυτό προχωράμε σε περεταίρω βελτίωση του συστήματός μας, ορίζοντας περισσότερες παραμέτρους βελτιστοποίησης. Όπως φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα πέρα από την απόσταση μεταξύ των δυο φακών έχουμε διαλέξει και τις ακτίνες καμπυλότητας των φακών να είναι μεταβλητές παράμετροι. Μάλιστα αυτό το οποίο βλέπουμε στην προκειμένη εικόνα, είναι οι νέες τιμές των παραμέτρων μετά από «τρέξιμο» του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Προφανώς και βλέπουμε αλλαγές σε σύγκριση με τις προηγούμενες τιμές, ωστόσο σε γενική γραμμή η απόσταση μεταξύ των φακών και οι ακτίνες καμπυλότητας δεν απέχουν πολύ από τις αρχικές τιμές.

Στο παράθυρο της συνάρτησης βελτιστοποίησης παρατηρούμε ιδιαίτερη μείωση όσον αφορά την τιμή της αξονικής χρωματικής εκτροπής μεταξύ των μηκών κύματος του ενδιαφέροντος μας. Πράγματι αυτή η αλλαγή είναι ευδιάκριτη στην εικόνα 19, όπου βλέπουμε πως πλέον έχουμε το αχρωματικό σύστημα το οποίο επιθυμούμε.

Oper #	Type	Surf	Wave	Hx	Px	Py	Target	Weight	Value	% Contrib
1: RAED	RAED	11	1	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	3.102E-004	10.397
2: RAED	RAED	11	2	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	3.100E-004	10.382
3: REAR	REAR	11	1	0.000	0.000	1.000	1.500	1.000	1.500	0.284
4: REAR	REAR	11	2	0.000	0.000	1.000	1.500	1.000	1.500	0.582
5: AXCL	AXCL	1	2	1.000			0.000	1.000	-2.282E-006	5.629E-004
6: STRH	STRH	2	0	1	0	0	1.000	1.000	1.000	0.035
7: DMFS	DMFS									
8: BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms								
9: BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constraints.								
10: BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.								
11: BLNK	BLNK	Operands for field 1.								
12: OPDX	OPDX		1	0.000	0.336	0.000	0.000	0.436	6.971E-004	22.914
13: OPDX	OPDX		1	0.000	0.707	0.000	0.000	0.698	-6.704E-004	33.901
14: OPDX	OPDX		1	0.000	0.942	0.000	0.000	0.436	3.754E-004	6.646
15: OPDX	OPDX		2	0.000	0.336	0.000	0.000	0.436	3.126E-004	4.609
16: OPDX	OPDX		2	0.000	0.707	0.000	0.000	0.698	-3.284E-004	8.134
17: OPDX	OPDX		2	0.000	0.942	0.000	0.000	0.436	2.127E-004	2.134

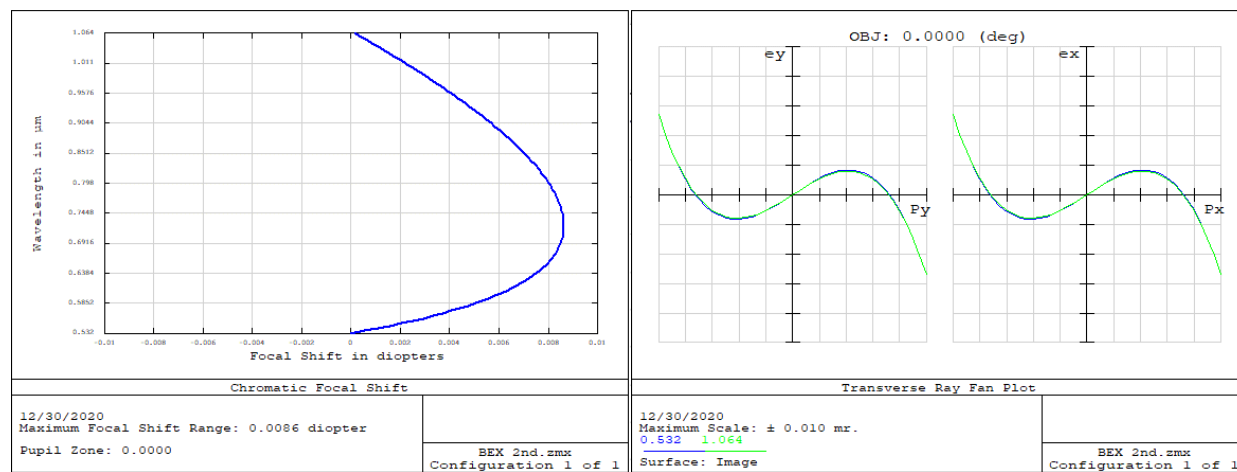
Εικόνα 5.16. «Merit Function Editor» έπειτα από γενικευμένη βελτιστοποίηση ως προς τις καμπυλότητες των φακών και την μεταξύ τους απόσταση.



Εικόνες 5.17 & 5.18. «Layout» & «Spot Diagram» παράθυρα για το σύστημα έπειτα από τη βελτιστοποίησή του ως προς τις ακτίνες καμπυλότητας και την απόσταση μεταξύ των φακών.

Από την εικόνα 20 μπορούμε και με βάση το σχήμα των καμπυλών θα μπορούσαμε να πούμε ότι το σύστημα έχει σφαιρικές εκτροπές. Ωστόσο αυτό δεν θα ρέπει να μας τρομάζει καθώς η κλίμακα είναι κατά πολύ μειωμένη (0.010 mrad) σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις και πρακτικά έχουμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Μάλιστα αν ανατρέξουμε στον συντελεστή Seidel (Analysis->Aberration Coefficients->Seidel Coefficients) για τις σφαιρικές εκτροπές ολόκληρων των συστημάτων, τότε θα δούμε ότι το αρχικό σύστημα έχει συντελεστή ίσο με 0.000054, το δεύτερο σύστημα, το οποίο προήλθε από

βελτιστοποίηση τις απόστασης μεταξύ των φακών, έχει συντελεστή ίσο με 0.000045, ενώ το τρίτο σύστημα, το οποίο προήλθε από βελτιστοποίηση και των καμπυλοτήτων των φακών, έχει τον μικρότερο συντελεστή, ίσο με 0.000034 και άρα έχει τις λιγότερες σφαιρικές εκτροπές από τα τρία συστήματα.



Εικόνες 5.19 & 5.20. «Focal Shift» & «Ray Fan» παράθυρα ύστερα από τη δεύτερη βελτιστοποίηση του συστήματος, με παραμέτρους βελτιστοποίησης τις ακτίνες καμπυλότητας και την απόσταση μεταξύ των φακών.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσω ότι καθώς έχω επιλέξει ως παραμέτρους βελτιστοποίησης τις ακτίνες καμπυλότητας και την απόσταση μεταξύ των φακών, η βελτιστοποίηση μπορεί να μας οδηγήσει σε ανεπιθύμητο αποτέλεσμα και συγκεκριμένα στην μεγάλη ή πολύ μεγάλη αύξηση της απόστασης μεταξύ των φακών. Η μείωση των σφαιρικών εκτροπών μπορεί να επιτευχθεί μεταξύ των άλλων και με την μείωση της καμπυλότητάς των φακών (αύξηση ακτίνας καμπυλότητας), με συνέπεια την αύξηση της εστιακής απόστασης. Αυτό με τη σειρά του, όπως φαίνεται από τη σχέση (8) θα οδηγήσει στην αύξηση του μήκους του *beam expander*. Για αυτό στην προκειμένη περίπτωση έχω σταματήσει τη διαδικασία βελτιστοποίησης χωρίς να περιμένω το βέλτιστο μεν αλλά μακρύ δε αποτέλεσμα. Εν γένει συνίσταται η βελτιστοποίηση να γίνεται για το σταθερό μήκος και μεταβλητές τις ακτίνες καμπυλότητας των φακών.

Έχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα από την βελτιστοποίηση ως προς τις ακτίνες καμπυλότητας των φακών και την μεταξύ τους απόσταση, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε πως αυτό είναι το τελευταίο μας σχέδιο. Παρόλα αυτά πρέπει να αναλογιστούμε ότι τα παραπάνω σχέδια έχουν υλοποιηθεί με την παραδοχή του ότι ο *beam expander* λαμβάνει στην είσοδό του μια παράλληλη δέσμη ακτίνων (μεταξύ τους και μεταξύ με τον οπτικό άξονα). Συνεπώς προκύπτει το ερώτημα για το τι θα γίνει αν το σύστημά μας δέχεται μια ελαφρώς αποκλίνουσα δέσμη ακτίνων, όπως και περιμένουμε να γίνει στην πραγματικότητα, μιας και το *laser* εκπέμπει παλμούς οι οποίοι διευρύνονται (*diverging system*) στην διάμετρό τους καθώς η δέσμη χαρακτηρίζεται από μια γωνία θ (*divergence angle*).*

*Προσοχή διότι υπάρχουν *laser* τα οποία εκπέμπουν παλμούς οι οποίοι τείνουν να ελαττώνουν την διάμετρο τους κατά την διάδοσή τους (*converging system & convergence angle*).

Για την μελέτη του προβλήματος, μπορούμε να προσθέσουμε ακτίνες με μικρή κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα του συστήματος (άξονας z). Έτσι λοιπόν έστω ότι έχουμε ένα *laser* με «full divergence angle θ » ίση με 3.0mrad (διπλάσιο από ότι θα θεωρήσουμε μετέπειτα στην σχεδίαση και ανάλυση των αντικειμενικών φακών). Σε αυτή τη περίπτωση ανατρέχουμε στο παράθυρο «Field Data», όπου προσθέτουμε (ή αλλάζουμε το υπάρχον) δέσμη ακτίνων ή όπως μπορούμε να πούμε εναλλακτικά ένα

πεδίο κυμάτων. Στην εικόνα 21 βλέπουμε πως έχουμε προσθέσει μια νέα δέσμη ακτίνων, όπου $X\text{-Field}$ ίσο με 0.085943669° και $X\text{-Field}$ είναι ίσο με μείον 0.085943669° (και συν να ήταν δεν θα άλλαζε η ουσία). Η δέσμη ακτίνων την οποία μόλις προσθέσαμε αντιστοιχεί σε μια δέσμη ακτίνων παράλληλων μεταξύ τους αλλά υπό γωνία 3.0mrad (το μισό των 3.0mrad , δηλαδή τα 1.5mrad , αντιστοιχούν σε 0.085943669°) ως προς τον άξονα z. Οπότε στη εικόνα 22 παρατηρούμε δυο διαφορετικά πεδία κυμάτων (ή δυο διαφορετικές δέσμες ακτίνων) ως προς την γωνία σε σχέση με τον άξονα z. Τα δυο πεδία διακρίνονται με τα διαφορετικά χρώματα (μπλε και πράσινο).

Πρέπει να αναφέρουμε ότι έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε την αντιστοιχία των χρωμάτων στο είδος της απεικόνισης. Έτσι στα προηγούμενα διαγράμματα τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος, ενώ στην προκειμένη περίπτωση τα χρώματα υποδεικνύουν δυο διαφορετικά πεδία κυμάτων, το κάθε ένα από τα οποία μπορεί να είναι πολυχρωματικό ή να αποτελείτε από περισσότερα μήκη κύματος.

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	0.085943669	-0.085943669	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Εικόνες 5.21 & 5.22. Παράθυρο «Field Data» στα αριστερά και η διάταξη του beam expander στα δεξιά.

Παρακάτω ακολουθεί το παράθυρο των κριτηρίων βελτιστοποίησης όπου έχουμε προσθέσει την παράμετρο $RANG$, η τιμή της οποίας αντιπροσωπεύει την γωνία εισόδου (σε radians) ως προς την επιφάνεια η οποία δηλώνεται στη στήλη $Surf$. Έχουμε διαλέξει την αρχική επιφάνεια από την οποία προέρχεται η δέσμη ($Surf=1$) και την τελική επιφάνεια ($Surf=12$) η οποία βρίσκεται μετά τον beam expander. Παρατηρούμε ότι η γωνία εισόδου αντιστοιχεί στα 3.0mrad , ενώ η γωνία εξόδου αντιστοιχεί στα 1.5mrad , γεγονός το οποίο υποδεικνύει την ορθή λειτουργία του beam expander.

Oper #	Type	Wave	Hx	Hy	Target	Weight	Value	% Contrib
1: RANG	RANG	2	1.000	1.000	0.000	0.000	3.000E-003	0.000
2: RANG	RANG	12	1.000	1.000	0.000	0.000	1.501E-003	0.000
3: RAED	RAED	12	1.000	1.000	0.000	1.000	0.086	17.421
4: RAED	RAED	12	2	1.000	1.000	0.000	0.086	17.424
5: REAR	REAR	12	1.000	1.000	1.500	1.000	1.618	32.550
6: REAR	REAR	12	2	1.000	1.000	1.500	1.618	32.603
7: AXCL	AXCL	1	2	1.000	0.000	1.000	-2.283E-006	1.227E-008
8: STRH	STRH	2	0	1	1.000	1.000	1.000	1.255E-006
9: DMFS	DMFS							

Εικόνα 5.23. Απόσπασμα από το παράθυρο «Merit Function Editor» για πεδίο υπό γωνία 3.0mrad .

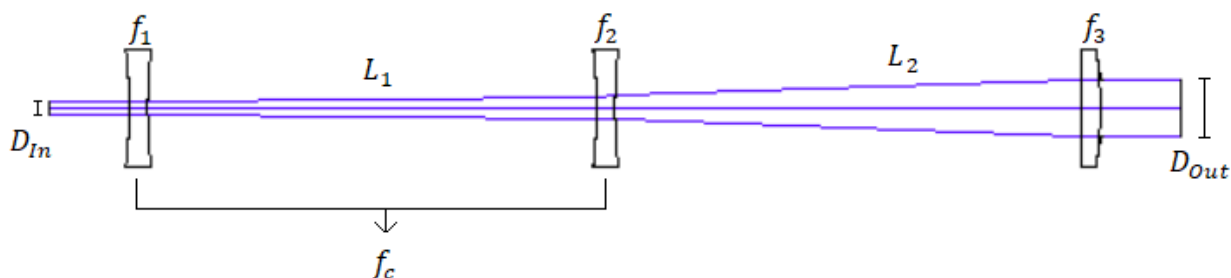
Ομοίως στις τιμές των παραμέτρων $RAED$ βλέπουμε τις γωνίες (σε μοίρες) με τις οποίες εξέρχονται οι ακτίνες από την τελευταία επιφάνεια του συστήματος για τα δυο μήκη κύματος. Αυτές οι γωνίες είναι ίσες με 0.086 μοίρες και άρα ίσες με τα 1.5mrad . Οπότε συμπεραίνουμε ότι αν έχουμε μια παράλληλη

δέσμη ακτίνων στην είσοδο του *beam expander*, σε ορισμένη γωνία ϕ ως προς τον άξονα z , τότε μετά την διεύρυνση της δέσμης, η γωνία εκτροπής της δέσμης θα μειωθεί κατά 2 φορές (εφόσον μεγεθυντική ισχύς ίση με 2).

5.3 Variable beam expander

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφερθήκαμε στον σχεδιασμό ενός «*beam expander*» με σταθερή μεγεθυντική ισχύ (συγκεκριμένα $M=2$). Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου θα θέλαμε η μεγεθυντική ισχύς ενός *beam expander* να μπορεί να ρυθμίζεται, λαμβάνοντας διαφορετικές τιμές. Για παράδειγμα, στη δική μας εφαρμογή θα μας ενδιέφερε να έχουμε έναν φακό με σταθερή εστιακή απόσταση f και μεταβλητή διάμετρο της δέσμης εισόδου (*entrance pupil*) προκειμένου να μεταβάλλουμε την διάμετρο της εστιασμένης δέσμης (*spot diameter*). Εναλλακτικά θα μας ενδιέφερε να μεταβάλλουμε τις διαστάσεις του αντικειμένου το οποίο προβάλλεται στην επιφάνεια εργασίας, ώστε να μεταβάλλουμε τις διαστάσεις του ειδώλου και μάλιστα δίχως να είναι απαραίτητη η αλλαγή των αποστάσεων μεταξύ ειδώλου-φακού και αντικειμένου-φακού. Για αυτούς και όχι μόνο, λόγους, στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στη σχεδίαση μεταβλητών (*variable*) *beam expander* μέσω της παρουσίασης τριών εκδοχών των εν λόγω διατάξεων.

Στο επόμενο σχήμα αναπαρίσταται ενδεικτικά ένας μονοχρωματικός *variable beam expander* ο οποίος αποτελείται από δυο αρνητικούς αμφίκυλινδρους φακούς (με εστιακές αποστάσεις f_1 και f_2) και έναν επιπεδόκυρτο θετικό φακό (εστιακή απόσταση f_3). Η εστιακή απόσταση του ισοδύναμου φακού των φακών με εστιακές αποστάσεις f_1 και f_2 είναι ίση εστιακή απόσταση f_c . Ενώ οι αποστάσεις μεταξύ των φακών 1-2 και μεταξύ των φακών 2-3 είναι αντίστοιχα οι αποστάσεις L_1 και L_2 .



Εικόνα 5.24. Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα ενός *variable beam expander*. Οι φακοί με εστιακές αποστάσεις f_1 και f_2 αντιστοιχούν σε ισοδύναμο φακό με εστιακή απόσταση f_c .

Η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι μόνο ενδεικτική μιας και ένας *variable beam expander* μπορεί να είναι αρκετά πιο πολύπλοκος και να αποτελείτε από τέσσερις ή περισσότερες ομάδες φακών.

Ένας *variable beam expander* χαρακτηρίζεται από το ότι δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίζεται η δύναμη της μεγέθυνσής του. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια δέσμη ακτίνων διαμέτρου 1.5 mm στην είσοδο ενός *beam expander* και θέλουμε να την διευρύνουμε ξεκινώντας στα 3.0 mm ($M=2$) και μεταβάλλοντας την μεγεθυντική δύναμη να φτάσουμε έως τα 5.0 mm ($M=3.3$) με βήμα 0.5 mm. Θέλοντας να μεταβάλλουμε την μεγεθυντική δύναμη ενός *beam expander*, αρκεί να αλλάξουμε την

οπτική δύναμη του ενός από τους φακούς και συγχρόνως να μεταβάλουμε την μεταξύ τους απόσταση. Ωστόσο για να αυξήσουμε κλιμακωτά την μεγεθυντική δύναμη σε πέντε διαδοχικές θέσεις, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πέντε συν ένα διαφορετικά είδη φακών. Προφανώς είναι πιο εύκολο να αντικαταστήσουμε τον ένα από τους δυο φακούς του *beam expander* (έστω ότι είναι ο εμπρόσθιος φακός) με ένα ζεύγος φακών ώστε με την μεταξύ τους κίνηση να μεταβάλουμε την εστιακή απόσταση του ισοδύναμου φακού τον οποίον συνθέτουν. Έτσι ρυθμίζοντας τις αποστάσεις μεταξύ των φακών μπορούμε να πετύχουμε μια συνεχόμενη ή κλιμακωτή μεταβολή της μεγεθυντικής δύναμης ενός *beam expander*.

5.4 Variable beam expander PNP-80-20-120-EP1.5-MP1.3-3.3

Η σχεδιαστική πορεία ενός *variable beam expander* δεν διαφέρει κατά πολύ από τη σχεδιαστική πορεία ενός *fixed magnifying power beam expander*.

Ένας τρόπος προκειμένου να επιλέξουμε τους φακούς μας είναι με βάση ένα μεγάλο $F\#$ έτσι ώστε οι φακοί να είναι *diffraction limited*. Εμπειρικά εάν το $F\#$ είναι τουλάχιστον ίσο με 14 τότε ο φακός θα μπορούσε να είναι *diffraction limited*. Ωστόσο αυτή είναι μια αυστηρή τοποθέτηση την οποία δεν υπάρχει ανάγκη να εφαρμόσουμε καθώς δεν έχουμε περιορισμούς ως προς το μήκος. Έναντι του 14 προτιμάμε το ελάχιστο $F\#$ να είναι λίγο μεγαλύτερο (πχ 16, 18) διότι έτσι είναι πιο εύκολα να σχεδιάσουμε τους φακούς και να πετύχουμε ένα *diffraction limited design*. Έτσι λοιπόν ο τελευταίος φακός έχει εστιακή απόσταση 120mm και για είσοδο 5.0mm (τόσο θα έχουμε μετά τη διεύρυνση των 1.5mm κατά 3.3 φορές) το $F\#$ του φακού είναι ίσο με 24.

Κάτι άλλο το οποίο θα πρέπει να προσέξουμε είναι ελάχιστη απόσταση μεταξύ των φακών (ιδιαίτερα μεταξύ του πρώτου ζεύγους φακών) να μην είναι αρνητική για τις ακρότατες τιμές των εστιακών αποστάσεων που θέλουμε να έχουμε στο ζεύγος των φακών προκειμένου να έχουμε τις ακρότατες τιμές της μεγεθυντικής ισχύος του συστήματος. Εύκολα για την παραξονική προσέγγιση μπορούμε να αποδείξουμε ότι:

Προκειμένου η απόσταση $L_1 > 0$ θα πρέπει $-f_1 f_2 < (f_1 + f_2)|f_c|$ ή $|f_1 f_2| > |f_1 f_2| |f_c|$, όπου $f_1, f_2, f_c < 0$

Ενώ όταν $f_1, f_c < 0$ και $f_2 > 0$ (ή εναλλακτικά $f_1 > 0$ και $f_2, f_c < 0$), αρκεί $|f_{positive}| > |f_{negative}|$ ώστε $L_1 > 0$

Οπότε με γνώμονα τις προηγούμενες συμβουλές και προκειμένου να σχεδιάσουμε τον *beam expander* θα πρέπει να επιλέξουμε τους φακούς οι οποίοι τον απαρτίζουν καθώς επίσης να καθορίσουμε τις μεταξύ τους αποστάσεις. Ένας τρόπος για να το πετύχουμε, είναι να επιλέξουμε πρώτα τους φακούς (τις εστιακές αποστάσεις των φακών) με και στη συνέχεια να υπολογίσουμε τις μεταξύ τους αποστάσεις για την ελάχιστη και μέγιστη μεγεθυντική ισχύ του συστήματος. Προφανώς ενδέχεται οι φακοί τους οποίους επιλέξαμε να αποτυγχάνουν να δημιουργήσουν το επιθυμητό σύστημα. Για αυτό βολεύει και συνιστάται η χρήση *excel* όπου θα γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί και θα μπορούμε με ευκολία να εξετάσουμε διαφορετικές περιπτώσεις.

Έτσι λοιπόν έχουμε $f_1 = 80mm$, $f_2 = -20mm$ και $f_3 = 120mm$

MP $\in [1.\bar{3}, 3.\bar{3}]$, EP=1.5mm

Για $f_3 = 120 \text{ mm}$ και $MP = 1.3 \text{ mm}$ έχουμε: $MP = -\frac{f_3}{f_c} \rightarrow 1.\bar{3} = -\frac{120}{f_c} \rightarrow f_c = -90 \text{ mm}$

Οπότε από ξεκινώντας από τη σχέση (6.8) της αναφοράς [17]: $\frac{1}{f_c} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L_1}{f_1 f_2}$, έχουμε

$$L_1 = f_1 + f_2 - \frac{f_1 f_2}{f_c} \rightarrow L_1 = 80 + (-20) - \frac{(80)(-20)}{(-90)} \rightarrow L_1 = 42.222 \text{ mm}$$

Από τη σχέση (5.37) της πηγής [18] υπολογίζουμε το *back focal length (BFL)* των δυο πρώτων φακών.

$$BFL_C = \frac{f_c(f_1 - L_1)}{f_1} = \frac{(-90)(80 - 42.222)}{80} = -42.5 \text{ mm}$$

$$\text{Και } L_2 = f_3 - |BFL_C| = 120 - |-42.50025| = 77.49975 \text{ mm}$$

Ένα σημείο το οποίο πρέπει να προσέξουμε είναι ότι για να προσεγγίσουμε την απόσταση L_2 , μεταξύ του ζεύγους των δυο πρώτων φακών και του τρίτου φακού, θα πρέπει να αφαιρέσουμε από την εστιακή απόσταση του τρίτου φακού όχι την εστιακή απόσταση f_c αλλά την εστιακή απόσταση BFL_C (*Bach Focal Length*). Σε διαφορετική περίπτωση το αποτέλεσμα ενδέχεται να είναι μακριά από την πραγματικότητα.

Ομοίως για $f_3 = 120 \text{ mm}$ και $MP = 3.3 \text{ mm}$ έχουμε: $MP = -\frac{f_3}{f_c} \rightarrow 3.\bar{3} = -\frac{120}{f_c} \rightarrow f_c = -36.0 \text{ mm}$

$$\text{Οπότε } L_1 = f_1 + f_2 - \frac{f_1 f_2}{f_c} \rightarrow L_1 = 80 + (-20) - \frac{(80)(-20)}{(-36)} \rightarrow L_1 = 15.555 \text{ mm}$$

$$\text{Υπολογίζουμε το } BFL_C = \frac{f_c(f_1 - L_1)}{f_1} = \frac{(-36)(80 - 15.555)}{80} = -29.0 \text{ mm}$$

$$\text{Και } L_2 = f_3 - |BFL_C| = 120 - |-36| = 91.0 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τους φακούς σύμφωνα με τις οδηγίες του κεφαλαίου περί των *achromat* φακών. Ακολούθως δημιουργούμε στο *zemax* το αρχείο του *beam expander* όπου και εισάγουμε τους φακούς με τις μεταξύ τους αποστάσεις να προκύπτουν από τους προηγούμενους υπολογισμούς. Ύστερα ορίζουμε τα κριτήρια βελτιστοποίησης (όμοια με τις περιπτώσεις των προηγούμενων *beam expanders*) και επιλέγουμε τις παραμέτρους βελτιστοποίησης να είναι οι αποστάσεις μεταξύ των φακών. Έπειτα εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ως προς την μια εκ των δυο ακροτάτων τιμών της μεγεθυντικής ισχύος. Εφόσον η βελτιστοποίηση επιστρέφει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα φροντίσουμε να κάνουμε το ίδιο και την δεύτερη ακρότατη τιμή της μεγεθυντικής ισχύος. Αν για όλο το φάσμα της μεγεθυντικής ισχύος (από $1.\bar{3}$ έως $3.\bar{3}$) έχουμε ικανοποιητική λειτουργία, τότε δεν χρειάζεται να κάνουμε περαιτέρω βελτιστοποίηση και μπορούμε να προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια της σχεδίασης/κατασκευής.

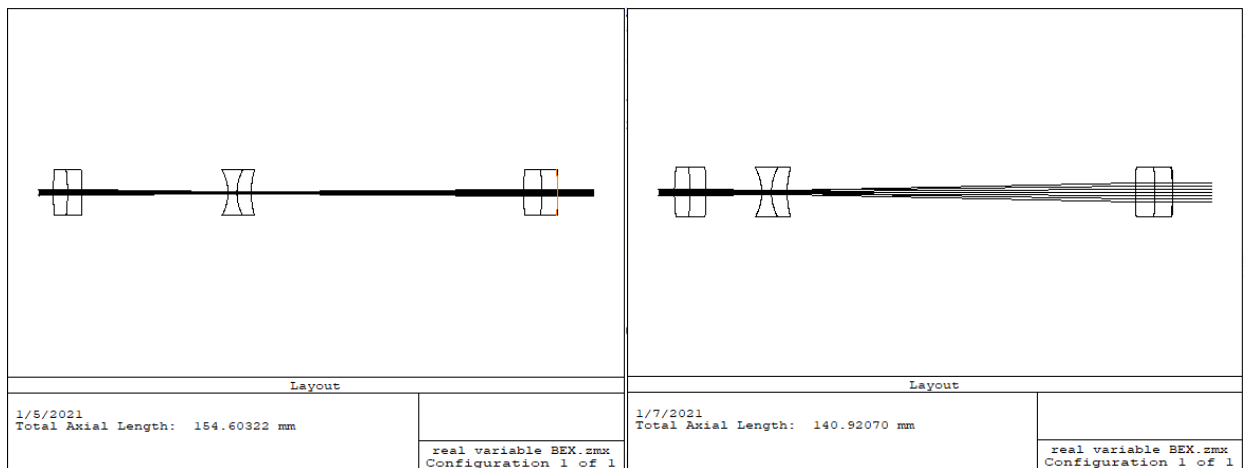
Από την βελτιστοποίηση ως προς την ελάχιστη και μέγιστη μεγεθυντική ισχύ, διαπιστώνουμε ότι οι προσεγγιστικές αποστάσεις L_1 και L_2 για την μέγιστη και ελάχιστη μεγεθυντική ισχύ του συστήματος είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες πραγματικές αποστάσεις. Οι διαφορές που υπάρχουν δικαιολογούνται από τα ότι στους υπολογισμούς μας δεν συμπεριλάβαμε το πάχος των φακών, θεωρώντας ότι είναι ιδανικοί φακοί. Συγκεκριμένα για μεγεθυντική ισχύ $1.\bar{3}$ οι αποστάσεις L_1 και L_2 είναι ίσες αντίστοιχα με 40.689mm και 75.914mm. Ενώ για μεγεθυντική ισχύ ίση με $3.\bar{3}$ οι αποστάσεις παίρνουν τιμές 14.222mm και 88.699mm.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter															
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000															
STO	Standard		Infinity	2.000		0.750															
2	Standard		Infinity	2.000		0.750															
3*	Standard		50.628	4.000	N-PK52A	6.350	U														
4*	Standard		-50.628	P 0.000		6.350	U														
5*	Standard		-50.628	P 4.000	SF6	6.350	U														
6*	Standard	14.222-40.689..	-94.264	40.689	V	6.350	U														
7*	Standard		-13.058	2.500	N-PK52A	6.350	U														
8*	Standard		13.058	P 0.000		6.350	U														
9*	Standard		13.058	P 4.000	SF6	6.350	U														
10*	Standard	88.7-75.914 mm	22.828	75.914	V	6.350	U														
11*	Standard		75.399	5.000	N-PK52A	6.350	U														
12*	Standard		-75.399	P 0.000		6.350	U														
13*	Standard		-75.399	P 4.500	SF6	6.350	U														
14*	Standard		-137.849	0.000		6.350	U														
15*	Standard		-49.290	10.000		6.350	U														
IMA	Standard		Infinity	-		0.000	U														

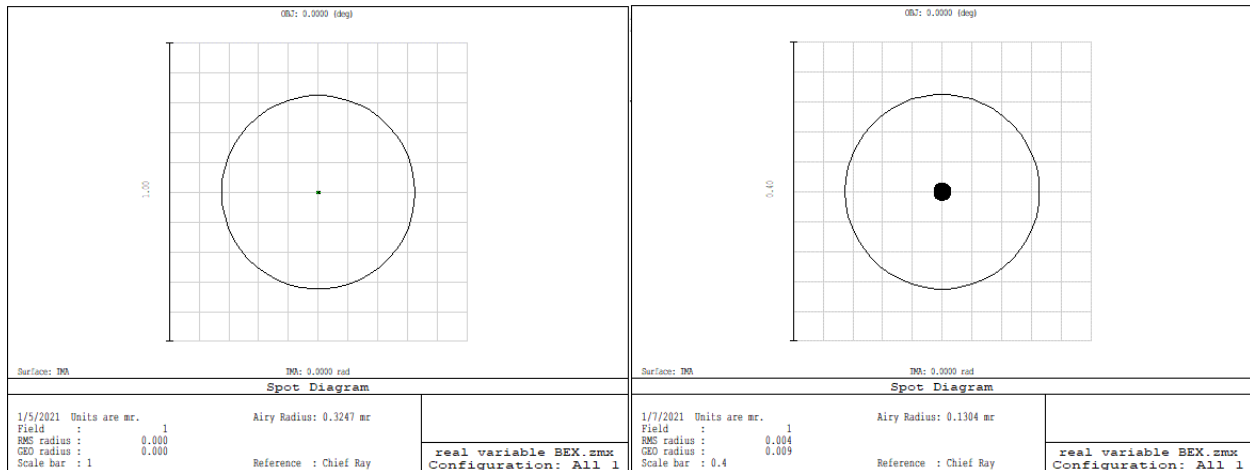
Εικόνα 5.25. Παράθυρο «Lens Data Editor» για τον PNP-80-20-120-EP1.5-MP1.3-3.3 μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με στόχο η μεγεθυντική ισχύς να είναι 1.3.

Oper #	Type	Surf	Wave	Hx	Px	Py	Target	Weight	Value	% Contrib	
1: RAED	RAED	16	1	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	4.040E-005	1.267E-012	
2: RAED	RAED	16	2	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	4.760E-005	1.759E-012	
3: REAR	REAR	16	1	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	4.316E-012	
4: REAR	REAR	16	2	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	4.275E-012		
5: STRH	STRH	1	0	1	0	0	1.000	1.000	1.000	4.662E-020	
6: AXCL	AXCL	0	0	0.000			0.000	1.000	-1.872E-005	2.721E-013	
7: DMFS	DMFS										
8: BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 5 rings 10 arms									

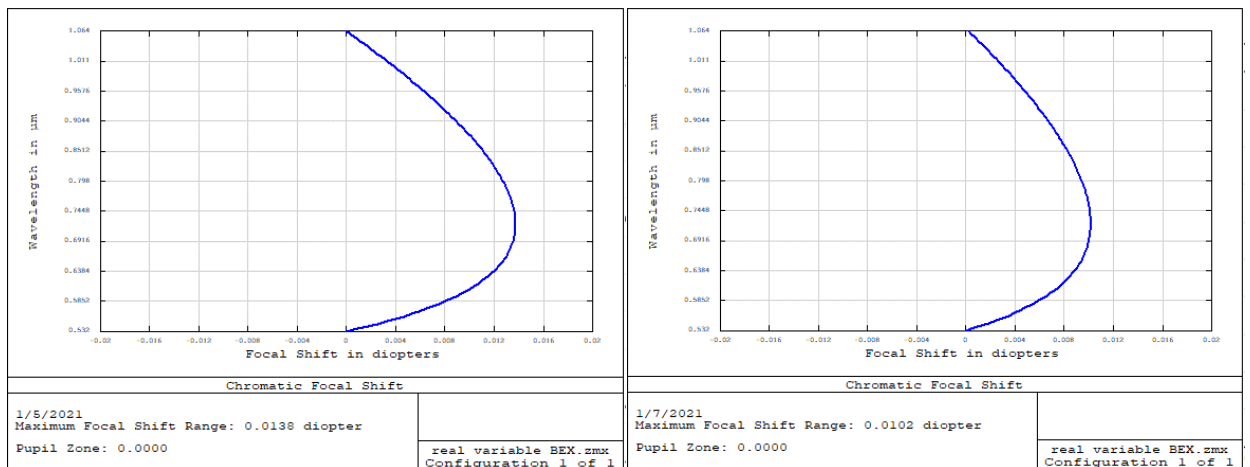
Εικόνα 5.26. Παράθυρο «Merit Function Editor» για τον PNP-80-20-120-EP1.5-MP1.3-3.3.



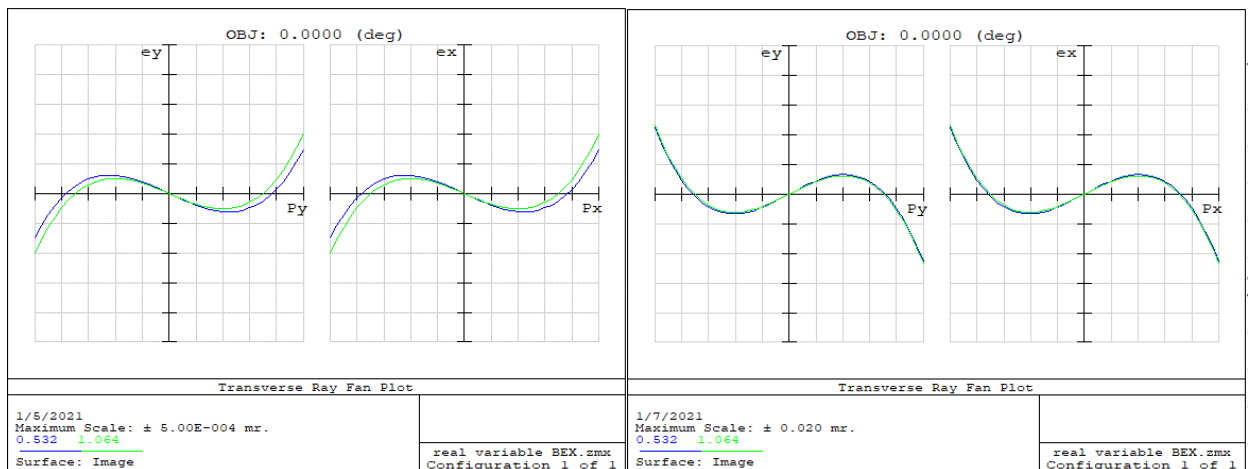
Εικόνες 5.27 & 5.28. Αριστερά απεικονίζεται η διάταξη του beam expander για μεγεθυντική ισχύ ίση με 1.3 ενώ δεξιά απεικονίζεται πάλι η διάταξη του beam expander αλλά για μεγεθυντική ισχύ ίση με 3.3.



Εικόνες 5.29 & 5.30. Παράθυρα «Spot Diagram», αριστερά για $MP=1.3$ και δεξιά για $MP=3.3$.



Εικόνες 5.31 & 5.32. Παράθυρα «Focal Shift», αριστερά για $MP=1.3$ και δεξιά για $MP=3.3$.



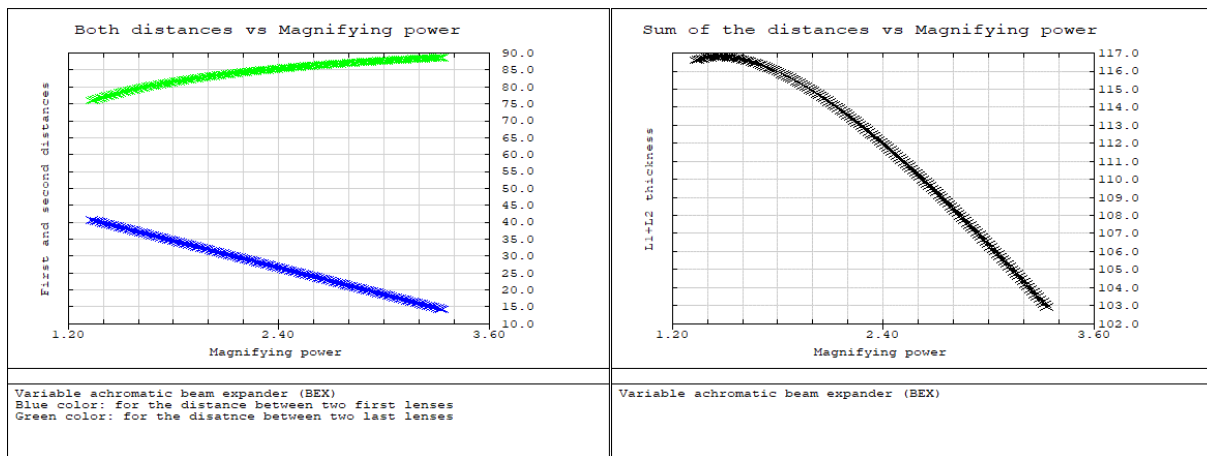
Εικόνες 5.33 & 5.34. Παράθυρα «Ray Fan», αριστερά για $MP=1.3$ και δεξιά για $MP=3.3$.

Παρατηρώντας τις πιο πάνω εικόνες μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τον *beam expander* ως *diffraction limited* τόσο για την ελάχιστη όσο και για τη μέγιστη μεγεθυντική ισχύ. Το ίδιο διαπιστώνουμε και τις

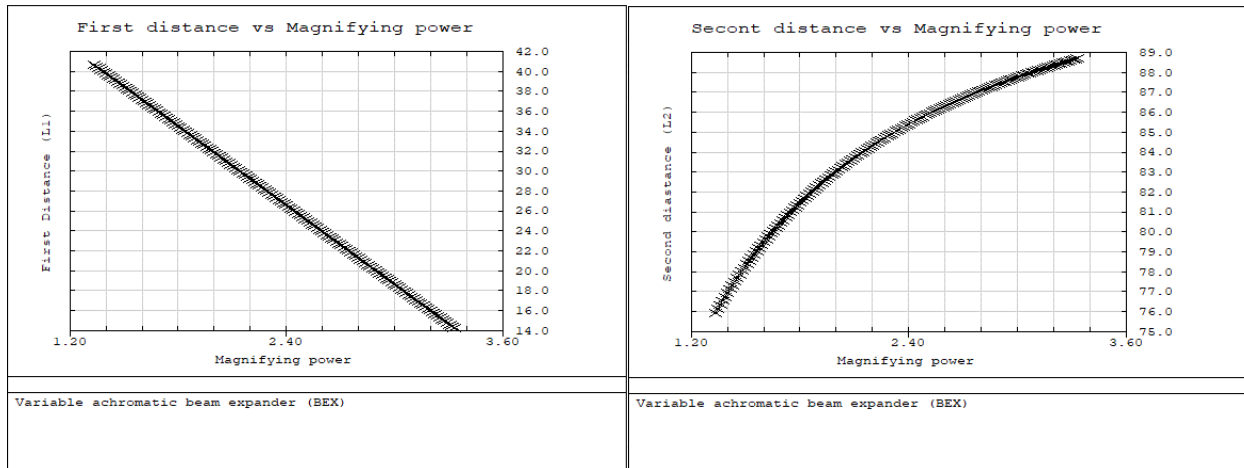
ενδιάμεσες τιμές της μεγεθυντικής ισχύς εφόσον προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση και μελέτη του συστήματος. Επιπλέον ο *beam expander* χαρακτηρίζεται ως «*achromat*» για τα μήκη κύματος 532nm και 1064nm. Κάτι άλλο το οποίο παρατηρούμε είναι το ότι η μεγαλύτερη μεγεθυντική ισχύς επιφέρει υποβάθμιση του συστήματος. Αυτό δεν επηρεάζει την απόδοση του *beam expander* όμως αποτελεί ξεκάθαρη ένδειξη ότι το παρόν σύστημα θα δυσκολευτεί αν παρέχει μεγαλύτερη μεγεθυντική ισχύ.

Προκειμένου να μελετήσουμε το σύστημα για τις ενδιάμεσες μεγεθυντικές δυνάμεις αλλά και προκειμένου το σχέδιο να είναι πλήρες και ολοκληρωμένο έχει νόημα να δώσουμε τις τιμές των αποστάσεων μεταξύ των φακών σε συνάρτηση με την μεγεθυντική δύναμη του *beam expander* και να ορίσουμε τις αντίστοιχες συναρτήσεις που περιγράφουν τις εν λόγω σχέσεις. Για να μελετήσουμε την μεταβολή των αποστάσεων L_1 και L_2 σε συνάρτηση με την μεταβολή της διεύρυνσης της διαμέτρου της δέσμης εισόδου, αξιοποιούμε την δυνατότητα επέκτασης εντολών στο *zemax* μέσω της ZPL Macros (*Zemax Programming Language*). Δηλαδή προγραμματίζουμε μια ακολουθία εντολών μέσω της ZPL Macros και την καλούμε στο *zemax* ώστε να την εκτελέσει. Συγκεκριμένα προγραμματίζουμε να εκχωρήσουμε σταδιακά τριακόσιες διαδοχικές τιμές της επιθυμητής ακτίνας της δέσμης στην έξοδο του *beam expander* από 1.0 mm έως 2.5 mm με βήμα τα 0.005 mm. Η εν λόγω τιμή καταχωρείται στο κελί του στόχου (*Target*) για την παράμετρο της ακτίνας εξόδου (*REAR*) στο παραθύρου όπου ορίζουμε την συνάρτηση βελτιστοποίησης (*Merit function*). Κάθε φορά που το κελί λαμβάνει μια νέα τιμή, έχουμε δώσει την εντολή στο πρόγραμμα να ακολουθήσει την διαδικασία βελτιστοποίησης, προκειμένου με την κατάλληλη ρύθμιση των μεταβλητών παραμέτρων να φέρουμε την ακτίνα της δέσμης εξόδου στην επιθυμητή τιμή. Στη περίπτωση μας, οι μεταβλητές παράμετροι για την βελτιστοποίηση του συστήματος, είναι οι αποστάσεις L_1 και L_2 μεταξύ των φακών και οι οποίες κάθε φορά καταγράφονται σε αρχείο της επιλογής μας. Παράλληλα υπολογίζουμε και καταγράφουμε άλλες χρήσιμες ποσότητες όπως η μεγεθυντική δύναμη του *beam expander* και δημιουργούμε τις αντίστοιχες επιθυμητές γραφικές παραστάσεις.

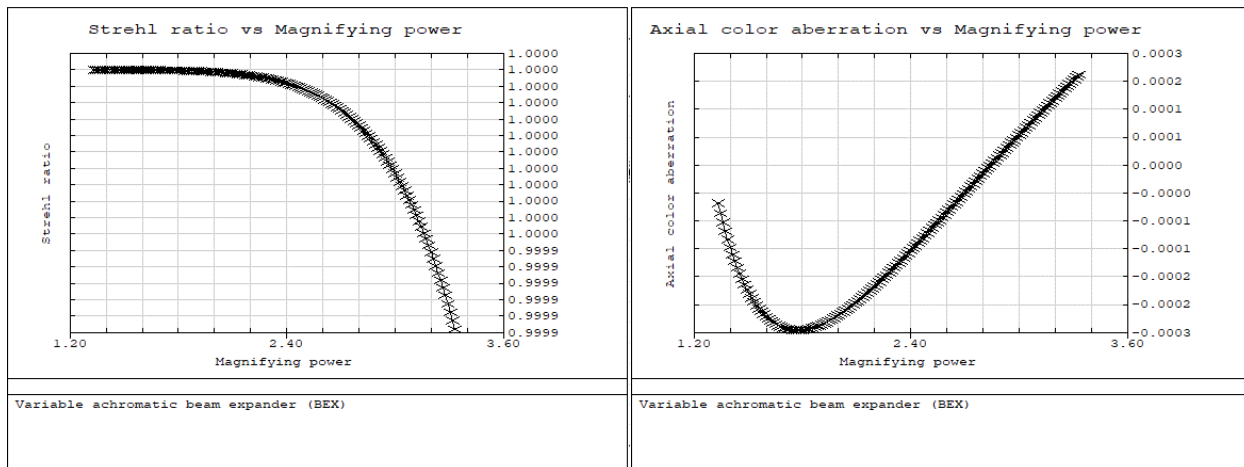
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας διερεύνησης.



Εικόνες 5.35 & 5.36. Αριστερά έχουμε τις γραφικές παραστάσεις των αποστάσεων L_1 (Μπλε) και L_2 (Πράσινο) ως προς την μεγεθυντική ισχύ ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση του αθροίσματος των δυο αποστάσεων σε σχέση με τη μεγεθυντική ισχύ.



Εικόνες 5.37 & 5.38. Η μεταβολή της απόστασης L_1 (αριστερά) και τις απόστασης L_2 (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της μεγεθυντικής ισχύος.



Εικόνες 5.39 & 5.40. Η μεταβολή του λόγου Strehl (αριστερά) και της αξονικής χρωματικής εκτροπής (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της μεγεθυντικής ισχύος.

Όπως διακρίνουμε από τα πιο πάνω αποτελέσματα η σχέση της απόστασης L_2 με τη μεγεθυντική ισχύ αναπαρίσταται ως ευθύγραμμο τμήμα το οποίο εύκολα περιγράφουμε μέσα από την συνάρτηση της ευθείας $y = slope \cdot x + intercept$

Ωστόσο η απόσταση L_2 μεταβάλλεται με μη γραμμικό τρόπο ως προς την μεγέθυνση. Προκειμένου να ορίσουμε την συνάρτηση η οποία θα περιγράψει τη σχέση των δυο μεγεθών, καταφεύγουμε να κάνουμε πρόβλεψη για το είδος της συνάρτησης που μπορεί να περιγράψει τα συγκεκριμένα ζεύγη τιμών. Μια τέτοια συνάρτηση θα μπορούσε να είναι η $y = \frac{a}{x}$, όπου a σταθερά. Μάλιστα μπορούμε να πάρουμε ένα ζεύγος τιμών (x, y) και να υπολογίσουμε τη σταθερά a . Για να επαληθεύσουμε αν έχουμε βρει την κατάλληλη συνάρτηση για την περιγραφή της καμπύλης μας, αρκεί να χρησιμοποιήσουμε ένα διαφορετικό ζεύγος τιμών (x, y) και να λύσουμε την εξίσωση ως προς a . Θα διαπιστώσουμε ότι η σταθερά a η οποία βρέθηκε με τα δυο διαφορετικά ζεύγη τιμών (x, y) είναι διαφορετική και άρα δεν έχουμε βρει την συνάρτησή μας. Ωστόσο η απόκλιση μεταξύ των τιμών δεν είναι μεγάλη και για αυτό μπορούμε να θεωρήσουμε ως της συνάρτησή μας την $y = \frac{a}{x} + \frac{b}{x^2}$, όπου a και b σταθερές. Επιλύουμε το σύστημα των

δυσω εξισώσεων και επαληθεύουμε την καταλληλότητα της συνάρτησης. Διαπιστώνοντας ότι η συνάρτηση εξακολουθεί να μην ικανοποιεί όλα τα των ζεύγη τιμών της καμπύλης, την επεκτείνουμε με επιπλέον όρους $y = \frac{a}{x} + \frac{b}{x^2} + \frac{c}{x^3}$ και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία έως ότου να προσεγγίσουμε όλα τα ζεύγη τιμών της καμπύλης με μικρή απόκλιση.

Προφανώς η διαδικασία που περιγράφεται πιο πάνω, είναι χρονοβόρα και δεν αποκλείει τα αριθμητικά λάθη (εφόσον εκτελούμε τις πράξεις με ημιαυτόματο τρόπο). Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε διαθέσιμα λογισμικά με είδη ανεπτυγμένους και επαληθευμένους αλγορίθμους για την εύρεση των παραμέτρων μιας πολυωνυμικής συνάρτησης. Στην δική μας περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού *python* και η συνάρτηση *numpy.polyfit(x, y, polynomial degree)* ή οποία επιστρέφει τους συντελεστές a_n , για δεδομένο βαθμό n της ακόλουθης πολυωνυμικής συνάρτησης, ξεκινώντας από αυτούς που αντιστοιχούν στην μεγαλύτερη τάξη.

$$P(x) = y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$$

Όπου $P(x)$ αντιστοιχεί στην απόσταση L_2 με το x να είναι η μεγεθυντική ισχύς (MP) ενώ οι συντελεστές a_n της συνάρτησης η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ της απόστασης L_2 και της μεγεθυντικής ισχύς, για τιμές τις μεγεθυντικής ισχύς μεταξύ του $1.\bar{3}$ και $3.\bar{3}$, είναι οι ακόλουθοι: $a_8 = -0.0194210989$, $a_7 = 0.4.10761941$, $a_6 = -3.82224381$, $a_5 = 20.5296218$, $a_4 = -70.1133254$, $a_3 = 157.834988$, $a_2 = -234.123737$, $a_1 = 220.582387$, $a_0 = -22.4304147$

5.5 Variable beam expander PNP-400-100-600-EP5.0-MP1.0-4.0

Ακολουθώντας την μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου στην σχεδίαση των *variable beam expanders* σχεδιάζουμε έναν παρόμοιο *beam expander*. Ο PNP-400-100-600-EP5.0-MP1.0-4.0 χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη διάμετρο δέσμης εισόδου (EP=5.0) και δίνει την δυνατότητα να διευρύνει την δέσμη από μια φορά (1x) έως και τέσσερεις φορές (4x).

Έτσι λοιπόν έχουμε $f_1 = 400\text{mm}$, $f_2 = -100\text{mm}$ και $f_3 = 600\text{mm}$

MP \in [1.0, 4.0], EP=5.0mm

Για $f_3 = 600\text{mm}$ και MP = 0.5 mm έχουμε: $MP = -\frac{f_3}{f_c} \rightarrow 1.0 = -\frac{600}{f_c} \rightarrow f_c = -600\text{mm}$

Οπότε $L_1 = f_1 + f_2 - \frac{f_1 f_2}{f_c} \rightarrow L_1 = 400 + (-100) - \frac{(+400)(-100)}{(-600)} \rightarrow L_1 = 233.333\text{mm}$

Υπολογίζουμε το $BFL_C = \frac{f_c(f_1 - L_1)}{f_1} = \frac{(-600)(400 - 233.333)}{400} = -250.0\text{mm}$

Και $L_2 = f_3 - |BFL_C| = 600 - |-250| = 350.0\text{mm}$

Ομοίως για $f_3 = 120\text{mm}$ και MP = 4.0 mm έχουμε: $MP = -\frac{f_3}{f_c} \rightarrow 4.0 = -\frac{600}{f_c} \rightarrow f_c = -150.0\text{mm}$

Οπότε $L_1 = f_1 + f_2 - \frac{f_1 f_2}{f_c} \rightarrow L_1 = 400 + (-100) - \frac{(400)(-100)}{(-150)} \rightarrow L_1 = 33.333\text{mm}$

Υπολογίζουμε το $BFL_C = \frac{f_c(f_1 - L_1)}{f_1} = \frac{(-150)(400 - 33.333)}{400} = -137.5\text{mm}$

Και $L_2 = f_3 - |BFL_C| = 600 - |-137.5| = 462.5\text{mm}$

Όπως και στο προηγούμενο σχέδιο έτσι και τώρα αρχικά σχεδιάζουμε τους *achromat* φακούς και ύστερα εφαρμόζουμε την διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτό το οποίο θα διαπιστώσουμε είναι ότι ενώ έχουμε καταφέρει να σχεδιάσουμε έναν *diffraction limited variable beam expander* και μάλιστα πολύ κοντά στις θεωρητικές αποστάσεις L_1 και L_2 για τις μέγιστες και ελάχιστες μεγεθυντικές δυνάμεις. Ωστόσο σε αντίθεση με τον πρώτο *variable beam expander*, ο δεύτερος είναι *achromat* ως προς διαφορετικό ζεύγος μηκών κύματος από αυτό το οποίο ζητάμε (532nm & 1064nm). Για αυτό προχωράμε σε περαιτέρω βελτιστοποίηση με περισσότερες μεγαλύτερη ελευθερία στις παραμέτρους των οποίων θα αλλάξουν οι τιμές προκειμένου να πληρούνται τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα βελτιστοποιούμε και ορισμένες εκ των ακτινών καμπυλότητας των φακών. Τελικά καταλήγουμε στο παρακάτω αποτέλεσμα.

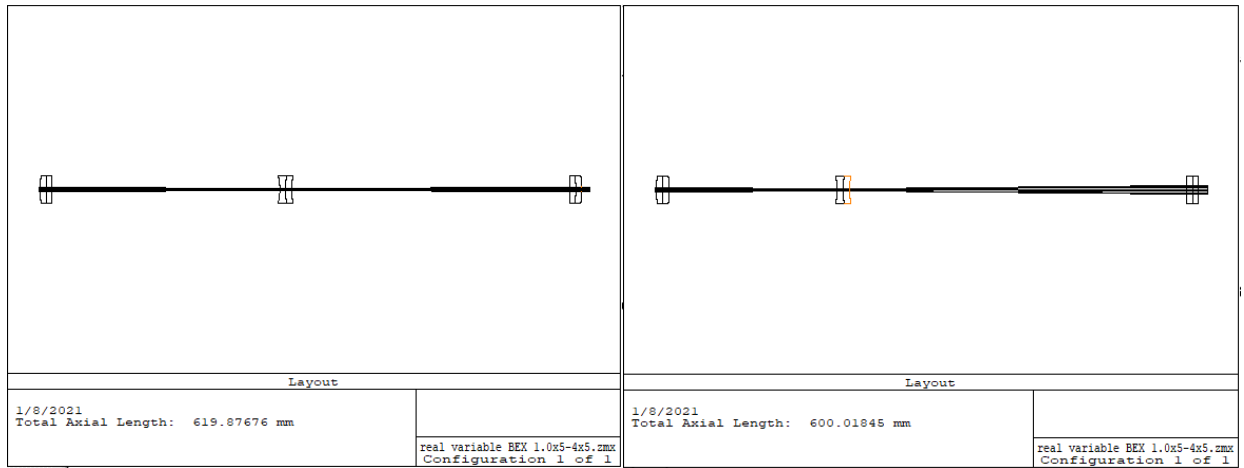
Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter																
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000															
1	Standard		Infinity	0.000		2.500															
2	Standard		Infinity	2.000		2.500															
3*	Standard		271.933	7.000	N-PK52A	15.000	U														
4*	Standard		-271.933	P	0.000	15.000	U														
5*	Standard		-271.933	P	6.000	SF6	U														
6*	Standard	256.223-182.984	-484.615		256.223	V	U														
7*	Standard		-59.747		6.000	N-PK52A	U														
8*	Standard		59.747	P	0.000	15.000	U														
9*	Standard		59.747	P	7.500	SF6	U														
10*	Standard	312.153-365.533	101.109		312.153	V	U														
11*	Standard		328.500		7.000	N-PK52A	U														
12*	Standard		-328.500	P	0.000	15.000	U														
13*	Standard		-328.500	P	6.000	SF6	U														
14*	Standard		-585.618		0.000	15.000	U														
STO	Standard		Infinity	100.000		2.500															
IMA	Standard		Infinity	-		2.501															

Εικόνα 5.41. Παράθυρο «Lens Data Editor» για τον PNP-400-100-600-EP5.0-MP1.0-4.0 μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με στόχο η μεγεθυντική ισχύ να είναι 1.3.

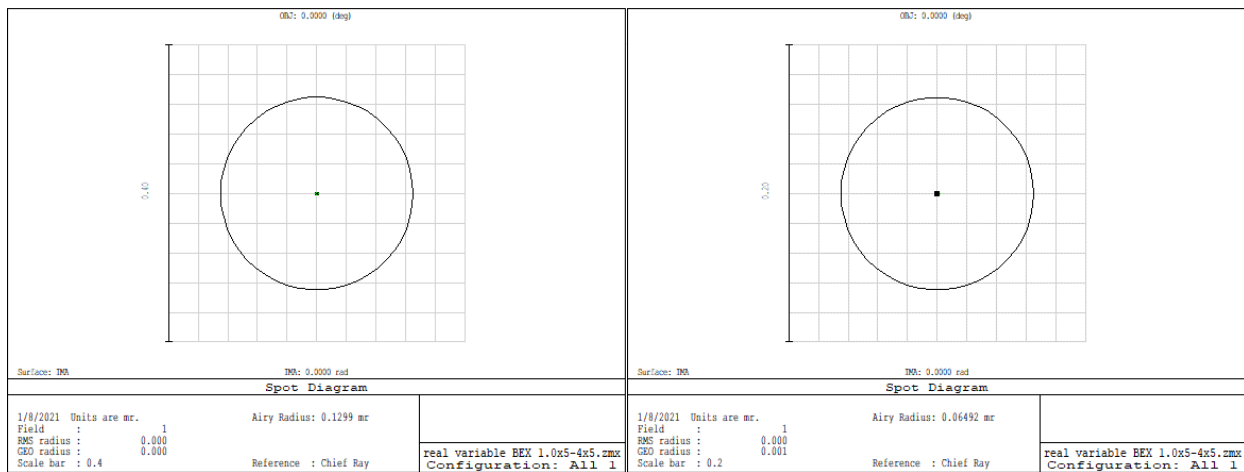
Oper #	Hx	Hy	Fx	Fy	Target	Weight	Value	% Contrib
1: RAED	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.570E-005	0.048
2: RAED	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	2.646E-005	0.136
3: REAR	0.000	0.000	0.000	1.000	2.500	1.000	2.499	49.321
4: REAR	0.000	0.000	0.000	1.000	2.500	1.000	2.501	49.414
5: STRH	1		0	0	1.000	1.000	1.000	1.451E-007
6: AXCL	1.000				0.000	1.000	-5.247E-005	0.535
7: DMFS								
8: BLNK Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms								

Εικόνα 5.42. Παράθυρο «Merit Function Editor» για τον PNP-400-100-600-EP5.0-MP1.0-4.0.

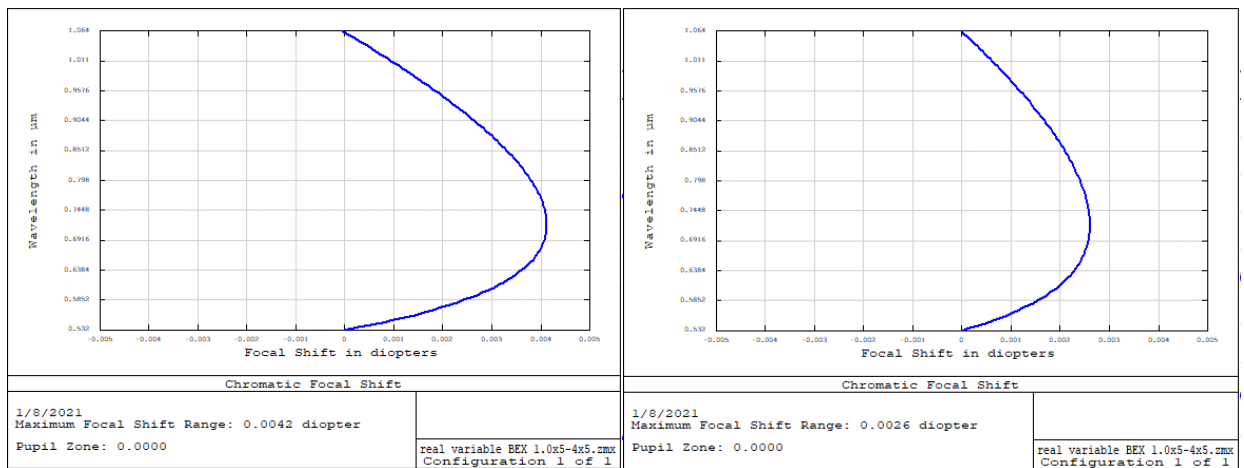
Όπως και σε όλες τις άλλες περιπτώσεις παρουσιάζονται αποσπάσματα από ορισμένα εργαλεία ανάλυσης του *zemax*. Έτσι στα επόμενα τέσσερα ζεύγη εικόνων παρατηρούμε το σύστημα αφενός στην ελάχιστη μεγεθυντική ισχύ (MP=1, αριστερά) και αφετέρου στην μέγιστη μεγεθυντική ισχύ (MP=4.0, δεξιά). Διαπιστώνουμε ότι το σύστημα είναι *diffraction limited* και *achromat* στο ζεύγος 532nm και 1064nm των μηκών κύματος. Από τα διαγράμματα των πλευρικών εκτροπών (εικόνες 49 & 50) έχουμε αποδεκτά αποτελέσματα αν και όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις το σύστημα «δυσκολεύεται» στο να τις διατηρήσει στην ίδια τάξη μεγέθους για τη μικρότερη και μέγιστη μεγεθυντική ισχύ του *beam expander*



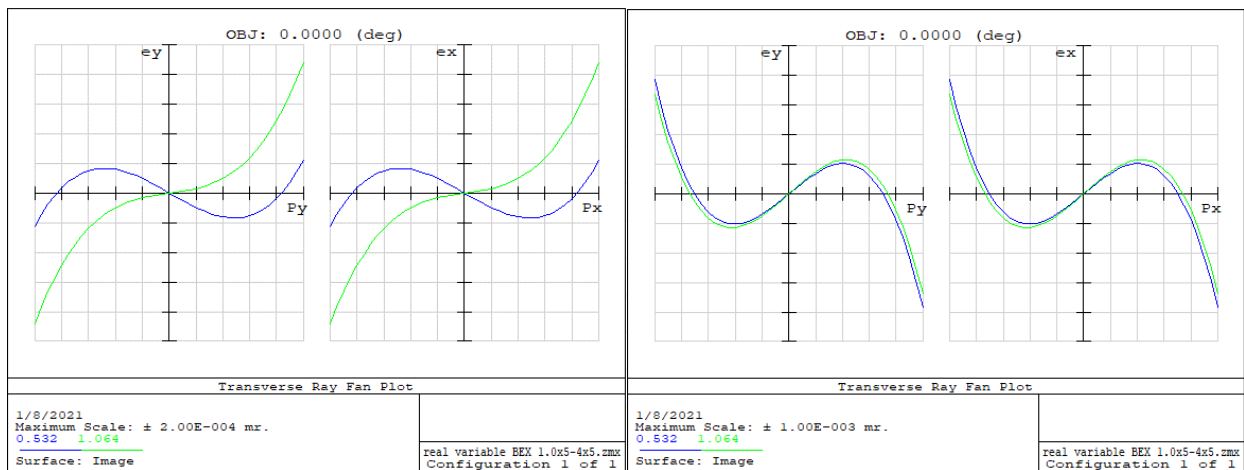
Εικόνες 5.43 & 5.44. Αριστερά απεικονίζεται η διάταξη του beam expander για μεγεθυντική ισχύ ίση με 1.0 ενώ δεξιά απεικονίζεται πάλι η διάταξη του beam expander αλλά για μεγεθυντική ισχύ ίση με 4.0.



Εικόνες 5.45 & 5.46. Παράθυρα «Spot Diagram», αριστερά για MP=1.0 και δεξιά για MP=4.0.

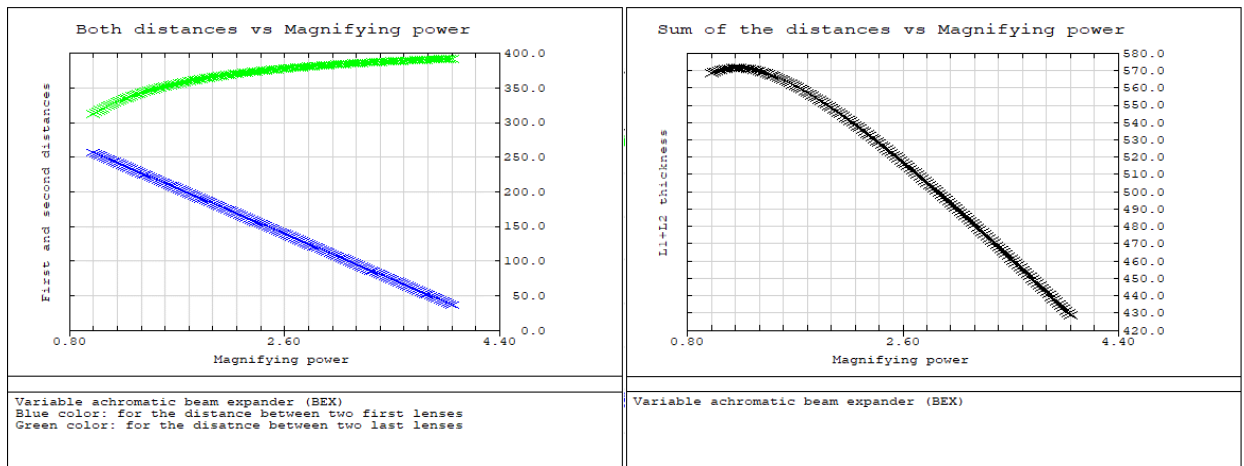


Εικόνες 5.47 & 5.48. Παράθυρα «Focal Shift», αριστερά για MP=1.0 και δεξιά για MP=4.0.



Εικόνες 5.49 & 5.50. Παράθυρα «Ray Fan», αριστερά για $MP=1.0$ και δεξιά για $MP=4.0$.

Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα βρίσκουμε τις σχέσεις που περιγράφουν την μεγεθυντική ισχύ με τις αποστάσεις L_1 και L_2 .

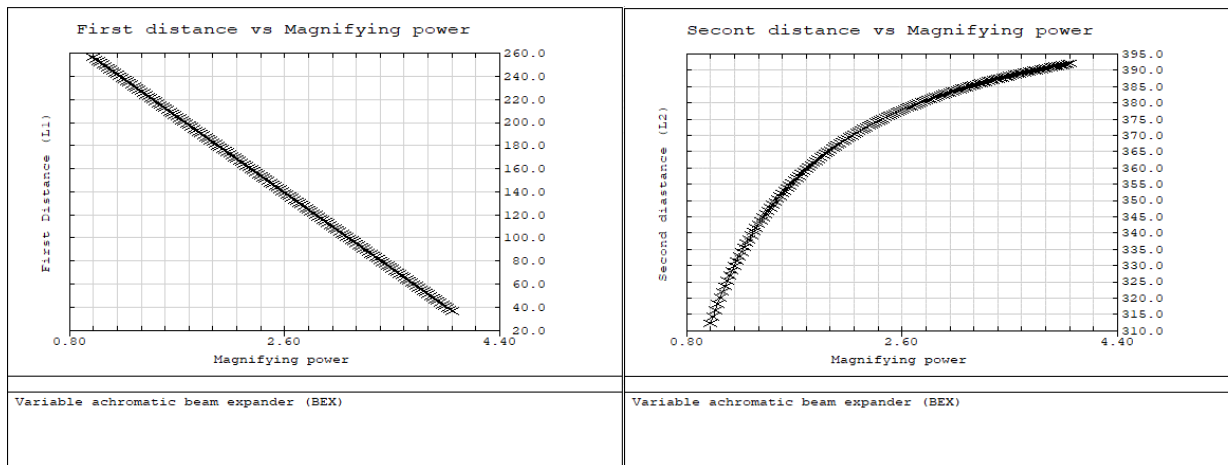


Εικόνες 5.51 & 5.52. Αριστερά έχουμε τις γραφικές παραστάσεις των αποστάσεων L_1 (Μπλε) και L_2 (Πράσινο) ως προς την μεγεθυντική ισχύ ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση του αθροίσματος των δυο αποστάσεων σε σχέση με τη μεγεθυντική ισχύ.

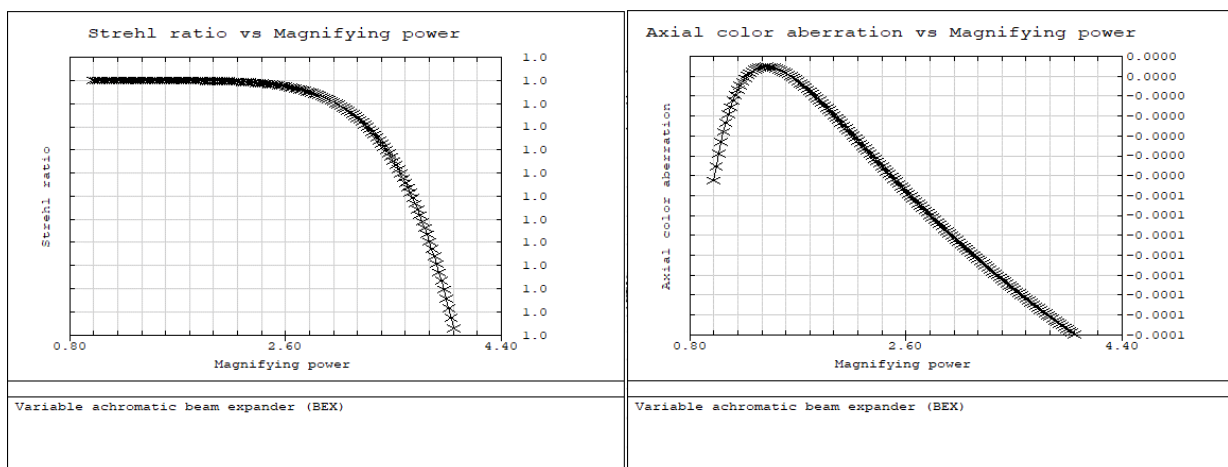
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις υπολογίζουμε τους συντελεστές του πολυωνύμου όγδου βαθμού, το οποίο περιγράφει την σχέση με μεταξύ της μεγεθυντικής ισχύος του *variable beam expander* και της απόστασης L_2 .

$$P(x) = y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$$

Όπου $P(x)$ αντιστοιχεί στην απόσταση L_2 με το x να είναι η μεγεθυντική ισχύς (MP) ενώ οι συντελεστές a_n της συνάρτησης η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ της απόστασης L_2 και της μεγεθυντικής ισχύς, για τιμές της μεγεθυντικής ισχύς μεταξύ του $1.\bar{3}$ και $3.\bar{3}$, είναι οι ακόλουθοι: $a_8 = -0.0771799317$, $a_7 = 1.71745839$, $a_6 = -16.6113719$, $a_5 = 91.5240657$, $a_4 = -316.118465$, $a_3 = 708.836155$, $a_2 = -1030.59665$, $a_1 = 935.879541$, $a_0 = -62.3606572$



Εικόνες 5.53 & 5.54. Εικόνες 37, 38. Η μεταβολή της απόστασης L_1 (αριστερά) και τις απόστασης L_2 (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της μεγεθυντικής ισχύος.



Εικόνες 5.55 & 5.56. Η μεταβολή του λόγου Strehl (αριστερά) και της αξονικής χρωματικής εκτροπής (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της μεγεθυντικής ισχύος.

Ο χρήση των δυο προηγούμενων *beam expander* σε ακολουθία του πρώτου από τον δεύτερο, δίνει την δυνατότητα εφαρμογής ποικίλων μεγεθυντικών δυνάμεων με την ελάχιστη να ξεκινάει από τα $1.\bar{3}$ και τη μέγιστη να φτάνει τα $13.\bar{3}$. Αν λοιπόν 1.5mm διάμετρο της δέσμης laser στην είσοδο του πρώτου *beam expander* στην έξοδο του δεύτερου *beam expander*, ο οποίος βρίσκεται αμέσως μετά τον πρώτο, θα έχουμε ελάχιστη και μέγιστη διάμετρο ίσες αντίστοιχα με 2.0mm και 20.0mm. Ωστόσο κάτι τέτοιο αποτελεί δύσκολη πρόκληση εξαιτίας του μεγάλου μήκους των δύο συστημάτων σε συνδυασμό, των δυσκολιών στην ευθυγράμμιση των δυο *beam expanders*, της ανάγκης υλοποίησης δυο μηχανολογικών σχεδίων (εφόσον έχουμε δυο διευρυντές δέσμης) αλλά και φυσικά του κόστους (αν θεωρήσουμε ότι δυο συστήματα είναι πιο ακριβά από ένα ισοδύναμο σύστημα).

Αν από την άλλη εξετάσουμε ξεχωριστά τα σχέδια των δυο προηγούμενων *beam expanders*, μπορούμε να επισημάνουμε ότι από οπτικής σκοπιάς το κάθε σχέδιο είναι απλό και επιτελεί την λειτουργία του στο εύρος των μεγεθυντικών δυνάμεων για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Ωστόσο παρά την απλότητά των σχεδίων, δεν πρέπει να παραλείψουμε τα ελαττώματά τους. Τα προηγούμενα σχέδια βασίζονται στη μεταβολή των αποστάσεων μεταξύ των φακών. Το σύστημα των τριών φακών μπορεί να αναχθεί σε ένα

σύστημα δυο φακών εκ των οποίων ο πρώτος φακός αποτελεί το ζεύγος των δυο πρώτων φακών του αναλυτικού συστήματος. Η αλλαγή μεταξύ της απόστασης L_1 οδηγεί στην αλλαγή της εστιακής απόστασης του ισοδύναμου φακού (f_c) ενώ ακολουθεί η μεταβολή της απόστασης L_2 προκειμένου να ικανοποιείται η σχέση (8). Εν γένει οι μεταβολές των αποστάσεων μεταξύ των φακών οδηγούν στην μεταβολή του μήκους ολόκληρου του συστήματος καθώς ρυθμίζουμε την μεγεθυντική του ισχύ. Αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα του *beam expander* μιας και δεν σχετίζεται με την λειτουργία του, παρά μόνο με τις διαστάσεις του ή την «κομψότητά» του. Αυτό το οποίο είναι πιο ανησυχητικό είναι το ότι ο λόγος της μεγαλύτερης προς την μικρότερη εστιακή απόσταση (*zoom factor*), του ζεύγους των δυο πρώτων φακών σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις, είναι σχετικά μικρός.

$$\text{zoom factor} = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (5.9)$$

Για να έχουμε μεγάλη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και μικρότερης μεγεθυντικής ισχύς του *beam expander*, ο παράγοντας ζουμ στο ζεύγος των δυο πρώτων φακών θα πρέπει να είναι τόσοσ όσο ο λόγος μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης μεγεθυντικής ισχύς. Αυτό όμως είναι δύσκολο να επιτευχθεί ή εναλλακτικά χρειάζεται μεγάλη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης απόστασης L_1 . Συνεπώς τα παραπάνω συστήματα πάσχουν από μικρό ζουμ και ταυτόχρονα από σχετικά μεγάλο μήκος, το οποίο στη παρούσα περίπτωση δεν μας νοιάζει, αλλά εν γένει αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο σχεδίασης των *beam expanders*.

Ένα άλλο πρόβλημα έρχεται στην αδυναμία του συστήματος να διατηρήσει ακλόνητη την συμπεριφορά του για την μέγιστη και ελάχιστη μεγεθυντική ισχύ. Όπως παρατηρήσαμε, η αύξηση της μεγεθυντικής ισχύς είχε ως επακόλουθο την ελαφρώς χειρότερη απόδοση του συστήματος, δίχως όμως να είναι κρίσιμη η αυτή η διαφορά. Επιπλέον το γεγονός ότι πρώτος φακός των δυο προηγούμενων σχεδίων είναι θετικός, έχει σαν αποτέλεσμα την σμίκρυνση της διαμέτρου της δέσμης στην είσοδο του δεύτερου φακού. Εν γένει αυτό είναι κάτι το οποίο είναι προτιμότερο να αποφύγουμε για να αποφύγουμε τυχόν προβλήματα από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα υλικά του φακού.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι για να γίνει μια πλήρης αξιολόγηση του συστήματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν το συνολικό σύστημα συμπεριλαμβανομένου της μηχανολογικής σκοπιάς και των κατασκευαστικών ατέλειών.

Για αυτούς και όχι μόνο λόγους στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται διαφορετική προσέγγιση στην σχεδίαση ενός *variable beam expander*.

5.6 Variable beam expander με μηχανισμό ζουμ

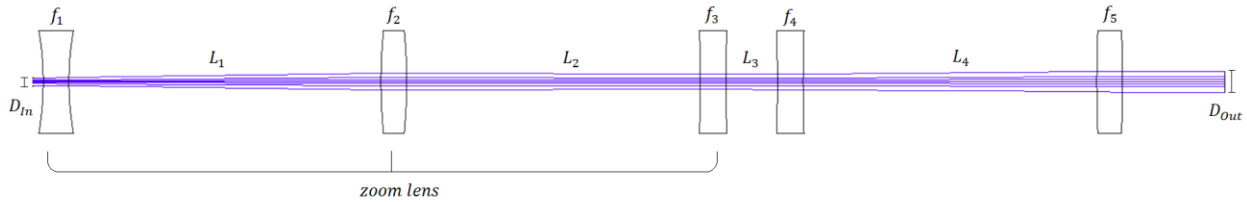
(MP2-10,EP1.5-2N120-2P240-2N250-400)

Όπως αναφέρεται πιο πάνω η αδυναμία του προηγούμενου σχεδίου να παρέχει μεγάλο λόγο μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης μεγεθυντικής ισχύς, σε συνδυασμό με το σχετικό μεγάλο μήκος των προηγούμενων σχεδίων, μας οδηγούν σε αυτή τη παράγραφο όπου καλούμαστε να παρουσιάσουμε νέο σχέδιο για τον *variable beam expander*.

Θέλοντας να αυξήσουμε το παράγοντα ζουμ της ομάδας των πρώτων φακών, σκεφτόμαστε ότι θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιήσουμε τρεις φακούς. Μάλιστα επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τρεις φακούς

το ισοδύναμο των οποίων μας δίνει έναν φακό με αρνητική εστιακή απόσταση και τον οποίον αποκαλούμε φακό ζουμ (*zoom lens*). Αυτός ο φακός αποτελείται από δυο αρνητικούς φακούς στα άκρα και έναν θετικό φακό ενδιάμεσα. Με την αλλαγή των αποστάσεων L_1 και L_2 μεταξύ αυτών των τριών φακών επιτυγχάνουμε μεταβολή της εστιακής απόστασης του ισοδύναμου φακού (φακός ζουμ).

Έπεται ένα ενδεικτικό σχήμα του συγκεκριμένου *beam expander*. Παρατηρούμε ότι αρχικά βρίσκονται τρεις φακοί (f_1, f_2, f_3) οι οποίοι απαρτίζουν τον ισοδύναμο φακό ζουμ (f_{zoom}) και στη συνέχεια ακολουθούν δυο ακόμα φακοί (f_4 και f_5).



Εικόνα 5.57. Η διάταξη ενός ενδεικτικού *variable beam expander*, ο οποίος περιλαμβάνει μηχανισμό ζουμ.

Στη περίπτωση μας. Έχουμε θέσει στόχο να μεταβάλλουμε τη μεγεθυντική ισχύ από 2 έως 10 με εισερχόμενη διάμετρο δέσμης να ισούται με 1.5mm. Ένα σύστημα το οποίο ικανοποιεί τις προϋποθέσεις μας έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Εστιακές αποστάσεις: $f_1 = -60mm, f_2 = 120mm, f_3 = -250mm, f_4 = -250mm, f_5 = 400mm$

Αποστάσεις για $MP = 2$: $L_1 = 104.168mm, L_2 = 218.913mm, L_3 = 5.000mm, L_4 = 121.918mm$

Αποστάσεις για $MP = 10$: $L_1 = 5.000mm, L_2 = 107.969mm, L_3 = 34.319mm, L_4 = 302.713mm$

Το συνολικό μήκος είναι σταθερό και ίσο με 450mm (για ιδανικούς-άπαχους φακούς).

Κατά την επιλογή των φακών έχουμε προσέξει να διαλέξουμε φακούς με σχετικά μεγάλο $F\#$ ώστε να είναι *diffraction limited*. Το σύστημα εν γένει είναι ικανοποιητικό από την οπτική πλευρά. Ωστόσο δεν πρέπει να ξεχνάμε και την μηχανολογική υπόσταση του σχεδίου η οποία ακολουθεί σε συνέχεια του οπτικού. Έτσι λοιπόν ένα ζήτημα το οποίο μας απασχολεί ιδιαίτερα είναι η απόκλιση της πραγματικής συμπεριφοράς του σχεδίου από την ιδανική συμπεριφορά καθώς σε ένα πραγματικό σύστημα εισάγονται αποκλίσεις των χαρακτηριστικών του συστήματος από τις ιδανικές τιμές. Τα πάχη, οι ακτίνες καμπυλότητας, οι δείκτες διάθλασης, η διαπερατότητα και η επιφανειακή σιλπνότητα όσο και αν δεν το θέλουμε, θα αποκλίνουν και μαζί με αυτά θα αποκλίνουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φακού όπως η εστιακή απόσταση. Κατ' επέκταση θα αποκλίνουν και τα χαρακτηριστικά του συνολικού συστήματος των φακών. Ένα επιπλέον σημαντικό μέγεθος το οποίο θα πρέπει να προσέξουμε είναι οι αποστάσεις μεταξύ των φακών ή οι θέσεις των φακών. Προφανώς και αυτή η παράμετρος δεν μπορεί να είναι ιδανική. Ωστόσο η λειτουργία του *variable beam expander* στηρίζεται στη μετατόπιση των φακών και για αυτό το σφάλμα στη θέση των φακών διαδραματίζει ακόμα πιο σημαντικό ρόλο. Για αυτό επιλέγουμε το σύστημα και τους φακούς με γνώμονα την εκτροπή της συμπεριφοράς του συστήματος από την ιδανική τιμή σε περίπτωση μη ακριβής τοποθέτησης των φακών.

Κάπως έτσι είναι σημαντικό να καταλάβουμε πως ένας οπτικά ισχυρός φακός (μικρή εστιακή απόσταση) έχει μεγάλη επίδραση στο σύστημα και ακόμα μια μικρή απόκλιση της θέσης του από τη προβλεπόμενη

θα μπορούσε να έχει μεγάλο αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά του συστήματος. Για αυτό το λόγο προτιμάμε να χρησιμοποιούμε φακούς μικρότερης οπτικής δύναμης. Για αυτό επιλέξαμε τον πρώτο φακό να έχει εστιακή απόσταση μείον 60mm και όχι μικρότερη (κατά απόλυτη τιμή). Ωστόσο μείωση της οπτικής δύναμης του πρώτου φακού απαιτεί τροποποιήσεις των άλλων φακών αλλά και την αύξηση του συνολικού μήκους του συστήματος. Συνεπώς για την περαιτέρω βελτιστοποίηση επιλέγουμε να «σπάσουμε» τους φακούς με μικρές εστιακές αποστάσεις (μεγάλες οπτικές δυνάμεις). Δηλαδή αντικαθιστούμε τον οπτικά ισχυρό φακό με δυο φακούς λιγότερα οπτικά ισχυρούς σε μια μικρή απόσταση μεταξύ τους (ή σε επαφή). Αναλυτικότερα αντί των εμπρόσθιων φακών ($f_1 = -60mm$) χρησιμοποιούμε δυο φακούς ($f_{1,2} = -120mm$) σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση των 5.0mm. Ομοίως αντικαθιστούμε τον δεύτερο φακό ($f_2 = 120mm$) με δυο φακούς ($f_{3,4} = 240mm$) σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση των 5.0mm. Βέβαια μπορεί ο κάθε ένας φακός να έχει μικρότερη οπτική δύναμη ωστόσο το ζεύγος των δυο φακών έχει σχεδόν την ίδια οπτική δύναμη με αυτή του ενός φακού που αντικαταστάθηκε. Πρακτικά δεν αναμένεται κάποια βελτίωση του συστήματος ως αφορά στις ανοχές στις θέσεις των φακών. Ωστόσο αναμένω ότι το σύστημα θα είναι λιγότερο επιρρεπές ως προς τις παραμέτρους των ίδιων των φακών καθώς η ατέλειες του ενός φακού θα προστίθεται στις ατέλειες του δεύτερου φακού και είναι πιθανόν το ισοδύναμο σύστημα των δυο φακών να έχει μικρότερη ποσοστιαία απόκλιση σε σύγκριση με έναν και μόνο φακό ισοδύναμης οπτικής δύναμης, χάριν τις αλληλοαναίρεσης μεταξύ των αποκλίσεων που τείνουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Επιπλέον δεν ξεχνάμε ότι η μείωση των οπτικών δυνάμεων των φακών επιφέρει συνεπάγεται με αύξηση των ακτίνων καμπυλότητας και άρα και από μείωση των σφαλμάτων σφαιρικής εκτροπής.

Οπότε το σύστημα απέκτησε επιπλέον δυο φακούς και συνολικά αποτελείται από επτά φακούς, τους οποίους σχεδιάζουμε ξεχωριστά και στη τους ενσωματώνουμε σε ένα σύστημα το οποίο βελτιστοποιούμε. Εν τέλει λαμβάνουμε τον παρακάτω *variable & achromatic beam expander* με την ονομασία MP2-10,EP1.5-2N120-2P240-2N250-400.

Αποστάσεις για $MP = 2$: $L_2 = 93.418mm, L_4 = 224.828mm, L_5 = 5.000mm, L_6 = 111.754mm$

Αποστάσεις για $MP = 10$: $L_2 = 59.385mm, L_4 = 98.585mm, L_5 = 25.912mm, L_6 = 251.118mm$

Ενώ οι αποστάσεις L_1 και L_3 παραμένουν σταθερές και ίσες με 5.0mm. Το συνολικό μήκος του *beam expander* ανεξαρτήτως από τη μεγεθυντική ισχύ (2.0 έως 10.0) διατηρείται σταθερό και ίσο με 513mm.

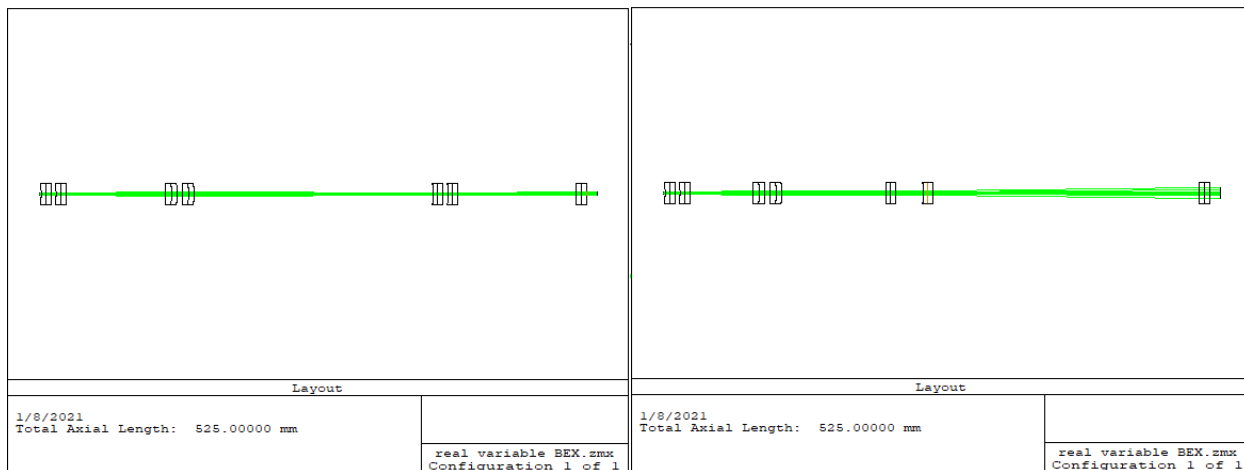
Ακολουθούν εικόνες-αποσπάσματα από διάφορα παράθυρα του *zemax* με τα χαρακτηριστικά και μερική ανάλυση του *beam expander* (MP2-10,EP1.5-2N120-2P240-2N250-400).

Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter															
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000														
STO	Standard		Infinity	0.000		0.750	U													
2*	Standard		-76.619	4.000	N-PK52A	10.000	U													
3*	Standard		76.619	P	0.000	10.000	U													
4*	Standard		76.619	P	5.000	SF6	10.000	U												
5*	Standard	L1	138.600		5.000		10.000	U												
6*	Standard		-76.619	P	4.000	N-PK52A	10.000	U												
7*	Standard		76.619	P	0.000		10.000	U												
8*	Standard		76.619	P	5.000	SF6	10.000	U												
9*	Standard	L2	138.600	P	93.418	V	10.000	U												
10*	Standard		151.569		6.000	N-PK52A	10.000	U												
11*	Standard		-151.569	P	0.000		10.000	U												
12*	Standard		-151.569	P	5.000	SF6	10.000	U												
13*	Standard	L3	-273.229		5.000		10.000	U												
14*	Standard		151.569	P	6.000	N-PK52A	10.000	U												
15*	Standard		-151.569	P	0.000		10.000	U												
16*	Standard		-151.569	P	5.000	SF6	10.000	U												
17*	Standard	L4	-273.229	P	224.828	V	10.000	U												
18*	Standard		-159.285		4.000	N-PK52A	10.000	U												
19*	Standard		159.285	P	0.000		10.000	U												
20*	Standard		159.285	P	5.000	SF6	10.000	U												
21*	Standard	L5	287.303		5.000	V	10.000	U												
22*	Standard		-159.285		4.000	N-PK52A	10.000	U												
23*	Standard		159.285	P	0.000		10.000	U												
24*	Standard		159.285	P	5.000	SF6	10.000	U												
25*	Standard	L6	287.303	P	111.754	T	10.000	U												
26*	Standard		253.408		5.000	N-PK52A	10.000	U												
27*	Standard		-253.408	P	0.000		10.000	U												
28*	Standard		-253.408	P	5.000	SF6	10.000	U												
29*	Standard		-456.345		0.000		10.000	U												
30	Standard		Infinity		0.000		1.500													
IMA	Standard		Infinity		-		1.500													

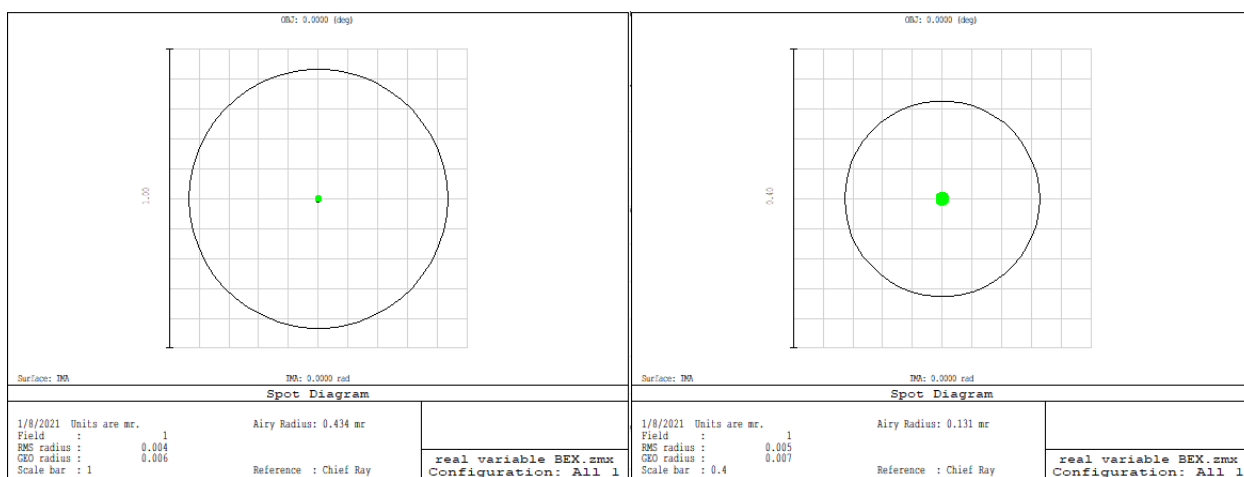
Εικόνα 5.58. Παράθυρο «Lens Data Editor» για τον MP2-10,EP1.5-2N120-2P240-2N250-400 μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με στόχο η μεγθυντική ισχύς να είναι 2.0.

Oper #	Type	Wave						Target	Weight	Value	% Contrib
1: EFFL	EFFL		1					-50.000	0.000	-6.837E+004	0.000
2: RAED	RAED	31	1	0.000	1.000	1.000		0.000	1.000	1.613E-011	3.986E-014
3: RAED	RAED	31	1	0.000	1.000	1.000		0.000	1.000	1.613E-011	3.986E-014
4: REAR	REAR	31	1	0.000	0.000	1.000		1.500	1.000	1.500	2.916E-014
5: REAR	REAR	31	1	0.000	0.000	1.000		1.500	1.000	1.500	2.916E-014
6: MNCT	MNCT	9	9					5.000	1.000	5.000	0.000
7: MNCT	MNCT	17	17					0.000	0.000	0.000	0.000
8: MNCT	MNCT	21	21					5.000	1.000	5.000	0.000
9: MNCT	MNCT	25	25					5.000	1.000	5.000	0.000
10: MNCT	MNCT	9	9					105.000	1.000	105.000	0.000
11: AXCL	AXCL	1	2	1.000				0.000	1.000	8.081E-004	100.000
12: STRH	STRH	2	0		1	0		1.000	0.000	1.000	0.000

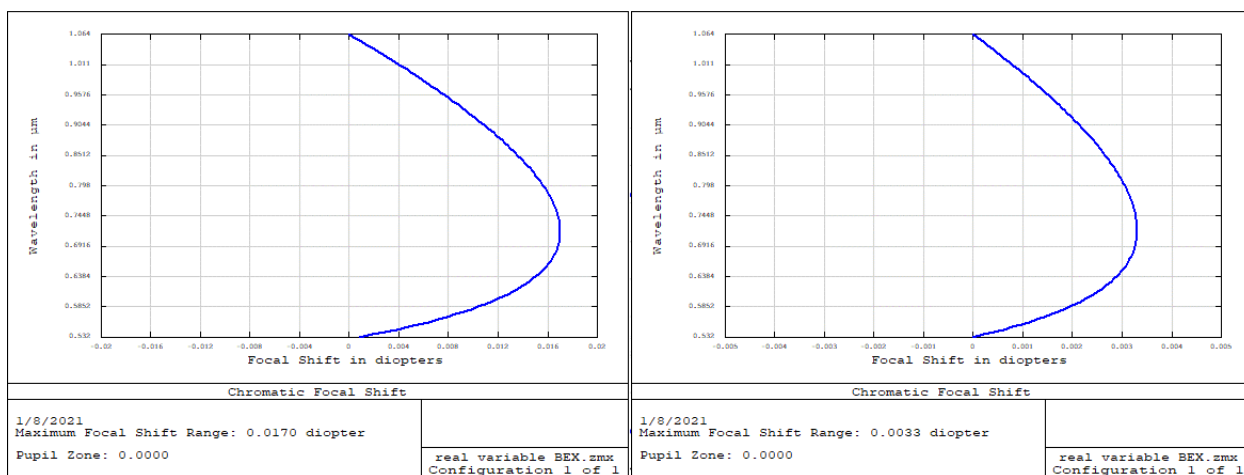
Εικόνα 5.59. Παράθυρο «Merit Function Editor» για τον MP2-10,EP1.5-2N120-2P240-2N250-400.



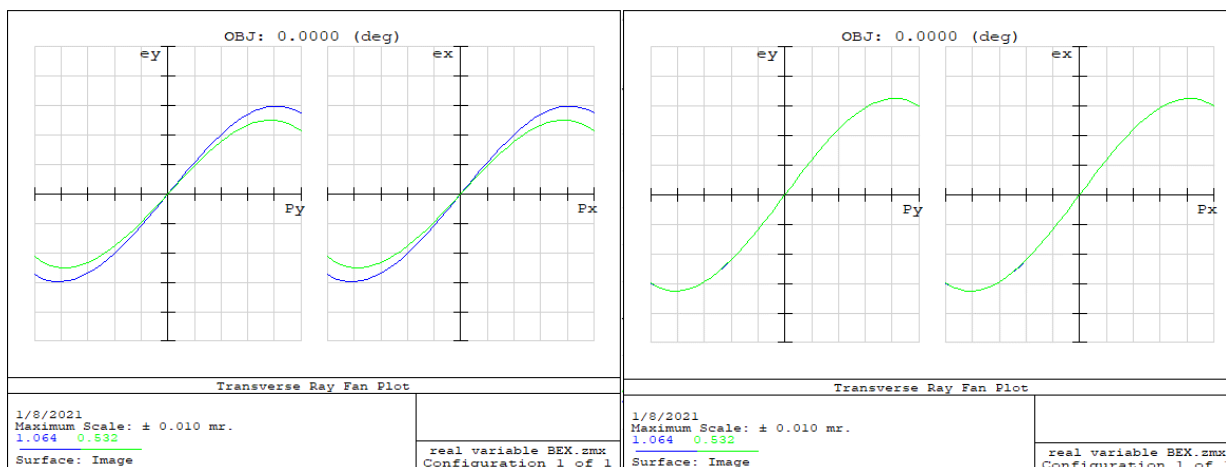
Εικόνες 5.60 & 5.61. Αριστερά απεικονίζεται η διάταξη του beam expander για μεγθυντική ισχύ ίση με 2.0 ενώ δεξιά απεικονίζεται πάλι η διάταξη του beam expander αλλά για μεγθυντική ισχύ ίση με 10.0.



Εικόνες 5.62 & 5.63. Παράθυρα «Spot Diagram», αριστερά για MP=2.0 και δεξιά για MP=10.0.



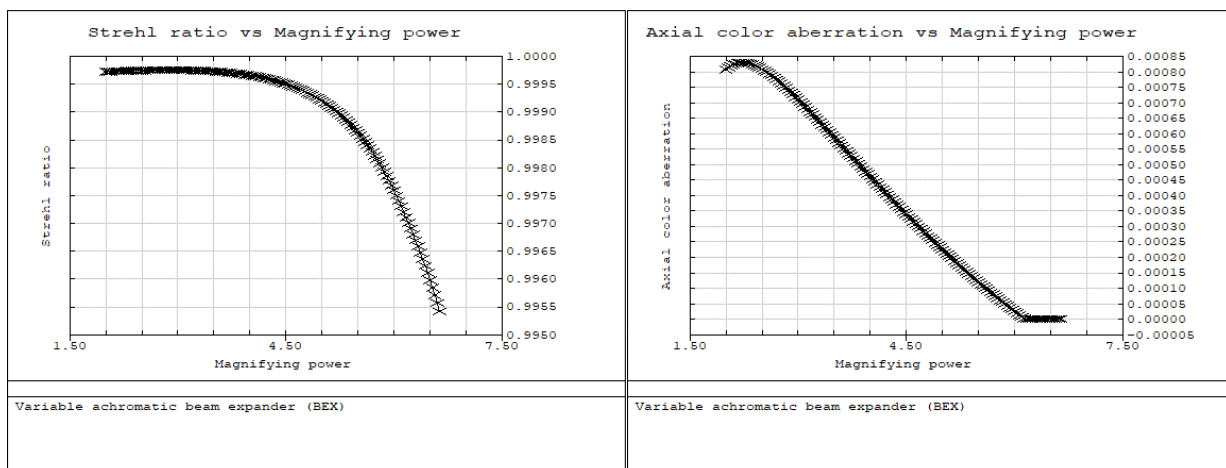
Εικόνες 5.64 & 5.65. Παράθυρα «Focal Shift», αριστερά για MP=2.0 και δεξιά για MP=10.0.



Εικόνες 5.66 & 5.67. Παράθυρα «Ray Fan», αριστερά για $MP=2.0$ και δεξιά για $MP=10.0$.

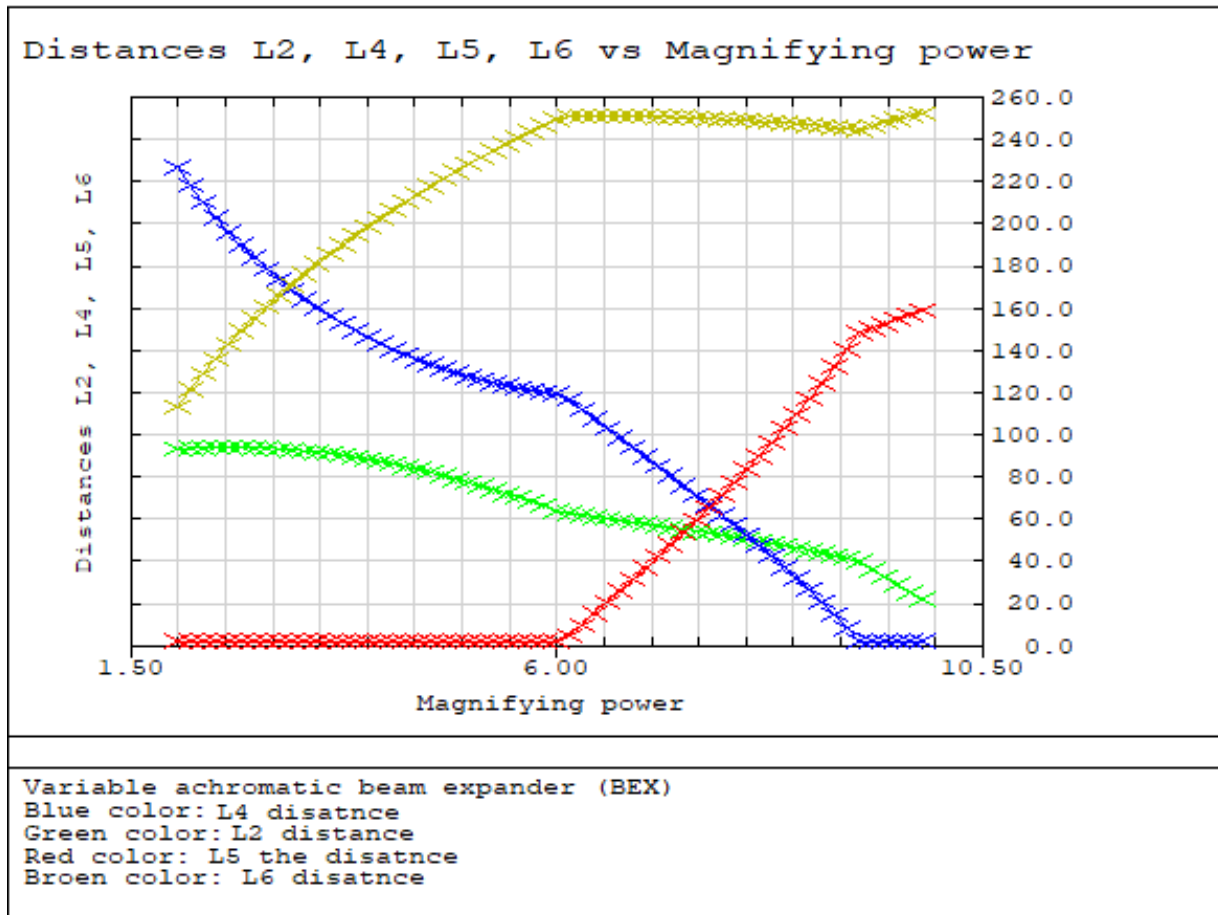
Από τις προηγούμενες εικόνες αντιλαμβανόμαστε ότι ο *beam expander* είναι *diffraction limited* και *achromat* στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm, τόσο για την ελάχιστη (2.0) όσο και για τη μέγιστη (10.0) μεγεθυντικές δυνάμεις. Περαιτέρω ανάλυση θα δείξει ότι το ίδιο ισχύει και για τις ενδιάμεσες τιμές της μεγεθυντικής δύναμης του *beam expander*. Επιπλέον παρατηρούμε ότι στις δυο ακραίες τιμές της μεγεθυντικής δύναμης οι γραφικές παραστάσεις των πλευρικών εκτροπών (εικόνες 66 & 67) παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτες, ενδεικτικό της ορθής διαδικασίας βελτιστοποίησης και του σταθερού χαρακτήρα στο εύρος των μεγεθυντικών δυνάμεων.

Στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις καταγράφουμε τη μεταβολή του λόγου του *Strehl*, της χρωματικής εκτροπής των μηκών κύματος 532nm και 1064nm από την εστία σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μεγεθυντικής δύναμης του *beam expander*. Οι εικονιζόμενες καμπύλες μοιάζουν με τις εκείνες των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων των δυο προηγούμενων *beam expanders*. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις οι αύξηση της μεγεθυντικής ισχύος επιφέρει μείωση του λόγου *Strehl* του *beam expander* και της χρωματικής εκτροπής μεταξύ των δυο μηκών κύματος. Ωστόσο οι αλλαγές των δυο παραμέτρων είναι απειροελάχιστες και πρακτικά δεν έχουν σημασία για την ποιότητα του συστήματος.



Εικόνες 5.68 & 5.69. Η μεταβολή του λόγου *Strehl* (αριστερά) και της αξονικής χρωματικής εκτροπής (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της μεγεθυντικής ισχύος.

Στη συνέχεια παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις των μεταβλητών αποστάσεων μεταξύ των φακών του *beam expander* σε σχέση με τη μεγεθυντική του ισχύ.



Εικόνα 5.70. Οι μεταβολή των αποστάσεων L_2 , L_4 , L_5 , και L_6 σε συνάρτηση με την μεγεθυντική ισχύ.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα, παρατηρούμε πιο πολύπλοκες περιπτώσεις καθώς σε κάθε καμπύλη διακρίνονται τρεις περιοχές. Η πρώτη εντοπίζεται ενδιάμεσα των μεγεθυντικών δυνάμεων 2.0 και 6.0, η δεύτερη από ξεκινάει από 6.0 έως φτάνει περίπου έως το 9.0, ενώ η οριστική περιοχή τερματίζει στη μέγιστη μεγεθυντική ισχύ ίση με 10.0. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το κάθε τμήμα της κάθε καμπύλης μπορεί να χαρακτηριστεί από αναλυτική μαθηματική έκφραση (συνάρτηση). Ωστόσο δεν υπάρχει λόγος αλλά και χρόνος προκειμένου να γίνει και εδώ αυτός ο χαρακτηρισμός. Το μόνο το οποίο θα πρέπει να επισημάνουμε είναι πως ο εν λόγω beam expander μπορεί να αποτελέσει πρόκληση όσον αφορά τον μηχανολογικό του σχεδιασμό, εφόσον σκοπεύουμε να φτιάξουμε ένα κλειστό αυτόματα ή ημιαυτόματο σύστημα.

Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι ο εν λόγω *variable beam expander* σε αντίθεση με τους προηγούμενους *variable beam expanders*, χαρακτηρίζεται από σταθερό μήκος για όλο το εύρος των μεγεθυντικών δυνάμεων (2.0 έως 10.0) για τις οποίες και προορίζεται η λειτουργία του. Επιπλέον το συνολικό του μήκος (513mm) είναι μεν μεγαλύτερο από τη μέγιστη τιμή του συνολικού μήκους (150mm κατά προσέγγιση) του πρώτου *variable beam expander* αλλά είναι μικρότερο από τη μέγιστη τιμή του μήκους (600mm κατά προσέγγιση) του δεύτερου *variable beam expander*. Την ίδια στιγμή ο λόγος της μέγιστης ως προς την ελάχιστη μεγεθυντική ισχύ ισούται με 5.0 και είναι μεγαλύτερος από τους

αντίστοιχους λόγους (2.5 και 4.0) στους δυο προηγούμενους *beam expanders*. Τέλος ο *variable beam expander* ο οποίος εμπεριέχει τον μηχανισμό ζουμ, αν λάβουμε κατά νου τις γραφικές παραστάσεις των πλευρικών εκτροπών (εικόνες 66 & 67) παρουσιάζει σταθερή απόδοση σε όλο το εύρος των μεγεθυντικών δυνάμεων (2.0 έως 10.0).

Ταυτόχρονα ο τελευταίος *beam expander* παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η πολυπλοκότητα στην οπτική, στην μηχανική σχεδίαση και στην κατασκευή του. Πέραν από αυτό ο τελευταίος *beam expander* αποτελείται από περισσότερους φακούς και κατά συνέπεια για την ίδια μεγεθυντική ισχύ προβλέπεται πως το σύστημα της άμεσης εκτύπωσης με *laser* θα έχει μικρότερη ενεργειακή απόδοση.

5.7 Η σημασία των *variable beam expanders*

Σχεδιάζοντας ένα *variable beam expander* είναι εύλογο να αναρωτηθεί κάποιος για ποιο λόγο το σχεδιάζουμε και κατά πόσο μας είναι χρήσιμο σε ένα σύστημα μικρό-εκτύπωσης με *laser* (*LIFT technique*). Πόσο μάλλον όταν θα μπορούσαμε να επικεντρωθούμε σε ποικίλα άλλα σχεδιαστικά θέματα τόσο των αντικειμενικών φακών (πχ *planar objective lens*) όσο και περιφερειακών συστημάτων φακών όπως προσοφθάλμιοι (*eyepiece*), *camera lenses*, *f-θ* φακοί και ούτε καθεξής.

Έτσι λοιπόν ο σχεδιασμός ενός *variable beam expander* συμβάλει στην εκμάθηση τόσο του *zemax* και της γλώσσας προγραμματισμού *ZPL Macros* όσο και των μηχανισμών ζουμ οι οποίοι αποτελούν σημαντικό κομμάτι της οπτικής σχεδίασης. Άλλωστε όπως είδαμε ο σχεδιασμός ενός *variable & achromatic beam expander* ελλοχεύει ορισμένες δυσκολίες και προκλήσεις, η αντιμετώπιση των οποίων οδηγούν τον σπουδαστή σε μεγαλύτερη ευχέρεια του λογισμικού σχεδίασης και σε εμπλουτισμό της εμπειρίας και των γνώσεων του. Εκτός όμως από τον προφανή λόγο της σχεδίασης για την εκμάθηση, υπάρχουν και άλλοι λόγοι.

Όπως θα δούμε ένα σύστημα προβολής, το οποίο αποτελεί μια λύση στον σχεδιασμό ενός συστήματος μικρό-εκτύπωσης με *laser*, χρησιμοποιεί έναν φακό (τον αντικειμενικό φακό) μέσω του οποίου ένα αντικείμενο προβάλλεται στο επίπεδο του ειδώλου. Στόχος μας είναι να προβάλλουμε ένα μεγάλο αντικείμενο (μάσκα τετραγωνικής διατομής), το οποίο είναι τοποθετημένο σε σχετικά μικρή απόσταση από τον αντικειμενικό φακό (για να μην έχουμε σύστημα μεγάλων διαστάσεων), σε ένα αρκετά μικρότερο είδωλο. Ωστόσο ακόμα μεγαλύτερο ζήτημα είναι η αλλαγή των διαστάσεων του ειδώλου ιδανικά από 0.001mm έως 0.1mm. Προκειμένου να αλλάζουμε τις διαστάσεις του ειδώλου θα πρέπει είτε να μετακινούμε την απόσταση του αντικειμένου από τον φακό και ταυτόχρονα την απόσταση του φακού από το είδωλο, είτε να αλλάζουμε τις διαστάσεις του ειδώλου (χωρίς να μετακινούμε τις θέσεις του αντικειμένου/ειδώλου ως προς τον φακό), είτε και τα δυο ταυτόχρονα. Επειδή όμως μας ζητείται κατά προτίμηση να μην μεταβάλλουμε την απόσταση του αντικειμενικού φακού από το επίπεδο απεικόνισης και επειδή ιδανικά θέλουμε πολύ μεγάλο λόγο της μεγαλύτερης ως προς την μικρότερη μεγέθυνση, αποφασίζουμε να σχεδιάσουμε έναν φακό με σχετικά μεγάλο άνοιγμα εισόδου και ταυτόχρονα σχεδιάζουμε έναν *variable beam expander* με τον οποίο μπορούμε να ρυθμίζουμε την διάμετρο της εισερχόμενης δέσμης στον αντικειμενικό φακό. Σε αυτό το σημείο κάποιος μπορεί να πει ότι θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε έναν *beam expander* μεγάλης αλλά σταθερής μεγεθυντικής ισχύς. Ωστόσο με αυτόν τρόπο η μάσκα μικρών διαστάσεων εκτίθεται στην ακτινοβολία, ένα μέρος της οποίος απορροφάει. Για φωτόνια με σχετικά χαμηλές ενέργειες (ορατό και υπέρυθρο φάσμα) αναμένουμε την θέρμανση της μάσκας με πιθανή αλλαγή των διαστάσεών της, κάτι το οποίο θα οδηγούσε στην εξάρτηση

του αποτελέσματος της εκτύπωσης με το χρόνο. Από την άλλη αν είχαμε φωτόνια σχετικά μεγάλης ενέργειας (υπεριώδες φάσμα) θα αναμέναμε όχι μόνο η θέρμανση αλλά η καταστροφή της μάσκας μετά από κάποιο χρόνο έκθεσης στην ακτινοβολία. Συνεπώς αν και δεν τίθενται περιορισμοί ως προς τον χρόνο λειτουργίας του συστήματος και ως προς τη σταθερότητά του, εν γένει η χρήση ενός *variable beam expander* ενδέχεται να βοηθήσει στην αντιμετώπιση ενός πιθανού προβλήματος. Αυτό όμως είναι και το λιγότερο ανησυχητικό πιθανό πρόβλημα εφόσον το *laser* είναι μικρής ισχύος, εκπέμπει σε μήκη κύματος σχετικά μικρής ενέργειας και επιπλέον δίχως πειραματική εξακρίβωση δεν μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η πιθανή θέρμανση και αλλαγή του ανοίγματος της μάσκας θα επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα της εκτύπωσης.

Αυτό το οποίο πραγματικά μας απασχολεί είναι η ενεργειακή απόδοση του συστήματος του συστήματος και η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο του σποτ. Έχοντας σχετικά μεγάλη μεγεθυντική ισχύ του *beam expander* σε συνδυασμό με μια μάσκα σχετικά μικρού ανοίγματος, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος είναι σχετικά μικρή. Δηλαδή από το 100% της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του *laser*, μόνο ένα μικρό ποσοστό φτάνει στην επιφάνεια του δότη. Όπως και στην περίπτωση του χρόνου λειτουργίας του συστήματος έτσι και όσον αφορά την ενεργειακή του απόδοση δεν υπάρχουν προδιαγραφές εκ μέρους του πελάτη. Ωστόσο η ενεργειακή απόδοση αποτελεί είτε λιγότερο είτε περισσότερο σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης οποιοδήποτε ενεργειακού συστήματος. Στην προκειμένη περίπτωση μικρότερη ενεργειακή απόδοση οδηγεί τόσο σε μεγαλύτερα λειτουργικά έξοδα όσο και στην ανάγκη προμήθειας *laser* με μεγαλύτερη ενέργεια στον εκπεμπόμενο παλμό. Αυτό είναι πιθανό να συνεπάγεται με μεγαλύτερο κόστους του *laser* αλλά και με μεγαλύτερες διαστάσεις, ιδίως αν απαιτείται ψύξη με υγρό μέσο. Για αυτό το λόγο έχοντας έναν *variable beam expander* έχουμε τη δυνατότητα α επέμβουμε στη λειτουργία του συστήματος μικρό εκτύπωσης μειώνοντας η αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση και το *fluence* στο σποτ με την ρύθμιση της μεγεθυντικής ισχύς του *beam expander*. Για παράδειγμα αν έχουμε μια μάσκα σταθερού ανοίγματος και μετατοπίσουμε την απόσταση μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του πλακιδίου με το υλικό της εκτύπωσης, τότε εφόσον οι διαστάσεις του σποτ της ακτινοβολίας του *laser* αυξηθούν, ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) του σποτ θα μειωθεί ενώ η ενεργειακή απόδοση θα διατηρηθεί σταθερή. Αν πάλι επιθυμούμε να έχουμε μεγαλύτερο *fluence* θα πρέπει να αυξήσουμε την ενέργεια στον παλμό του *laser* κάτι το οποίο συνεπάγεται με το ότι εξαρχής το *laser* πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει παλμούς μεγάλης ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται με το ότι η ενεργειακή απόδοση του συστήματος θα αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι διαστάσεις του σποτ (δεδομένου ότι οι διαστάσεις της μάσκας διατηρούνται σταθερές). Εναλλακτικά μπορούμε να μειώσουμε την μεγεθυντική ισχύ του *beam expander*, αυξάνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση και το *fluence* στο αυξημένων διαστάσεων σποτ. Πάλι η ενεργειακή απόδοση αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι διαστάσεις του σποτ. Ωστόσο σε αντίθεση με τη προηγούμενη περίπτωση, στη νυν περίπτωση εν γένει παύει να ισχύει η απαίτηση για *laser* με δυνατότητα εκπομπής παλμών μεγαλύτερης ενέργειας προκειμένου η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης να πραγματοποιηθεί με την αύξηση της ενέργειας στον παλμό του *laser*. Συνεπώς η μεταβολή της μεγεθυντικής δύναμης του *beam expander* μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα περαιτέρω μέσω ρύθμισης του αποτελέσματος από το σύστημα.

Τέλος οι ποικίλοι συνδυασμοί ανοίγματος μάσκας και μεγεθυντικής δύναμης ενός *variable beam expander* επιτρέπουν τη διερεύνηση διαφόρων περιπτώσεων και την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων ενός συστήματος.

**Παράλληλη δέσμη* ορίζεται ως μια δέσμη ακτινών φωτός, οι οποίες διαδίδονται παράλληλα ως προς τον οπτικό άξονα

Κεφάλαιο 6^ο

Αντικειμενικοί φακοί (*objective lenses*)

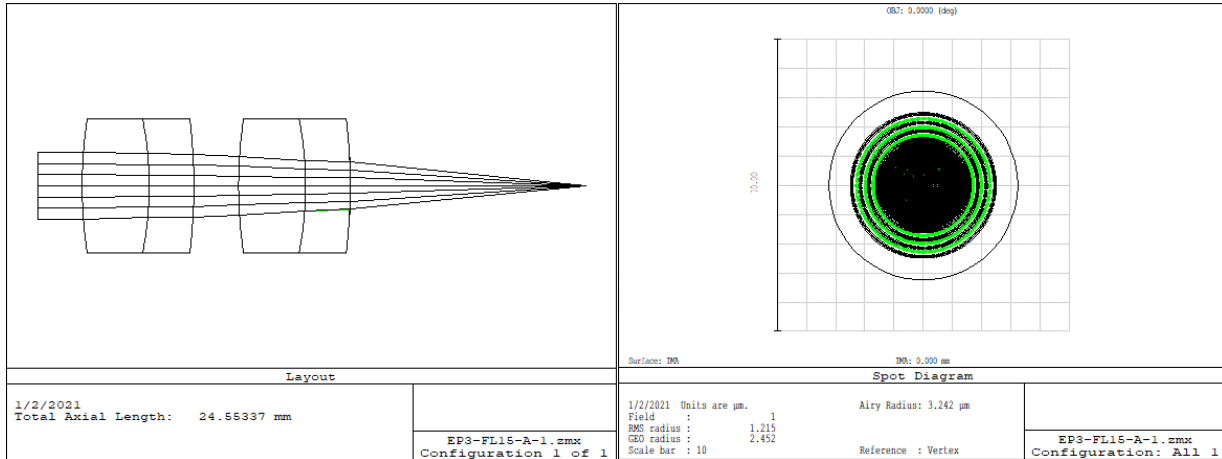
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση τεσσάρων αντιπροσωπευτικών αντικειμενικών φακών τύπου *achromat*, μέσα από τους οποίους φανερώνονται ορισμένοι τρόποι περιορισμού των σφαιρικών εκτροπών. Ο κάθε φακός παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καλύπτοντας περισσότερο ή λιγότερο τις μεν οι τις δε προδιαγραφές τις οποίες ζητείται να πληροί. Εν τέλει με βάση τον σκοπό, τους χωρικούς, οικονομικούς και άλλων ειδών περιορισμούς, ο αναγνώστης μπορεί να επιλέξει τον αντικειμενικό φακό ο οποίος αρμόζει περισσότερο για την εκάστοτε εφαρμογή.

6.1 Αντικειμενικός φακός EP3-FL15-A-1

Ο πρώτος αντικειμενικός φακός είναι ο πιο απλός φακός από όλους τους αντικειμενικούς φακούς οι οποίοι παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Ο συγκεκριμένος αντικειμενικός φακός αποτελείται από δυο επιμέρους όμοιους *achromat* φακούς. Για είσοδο 3.0mm και εστιακή απόσταση 15.0mm, ο φακός χαρακτηρίζεται από $F\#$ ίσο με 5 και από αριθμητικό άνοιγμα (NA) ίσο με 0.1. Είναι οριακά *diffraction limited* και πρακτικά *achromat* στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm, με απόκλιση των επιπέδων εστίασης μεταξύ αυτών των μηκών κύματος να βρίσκεται περίπου στα 0.5μm.

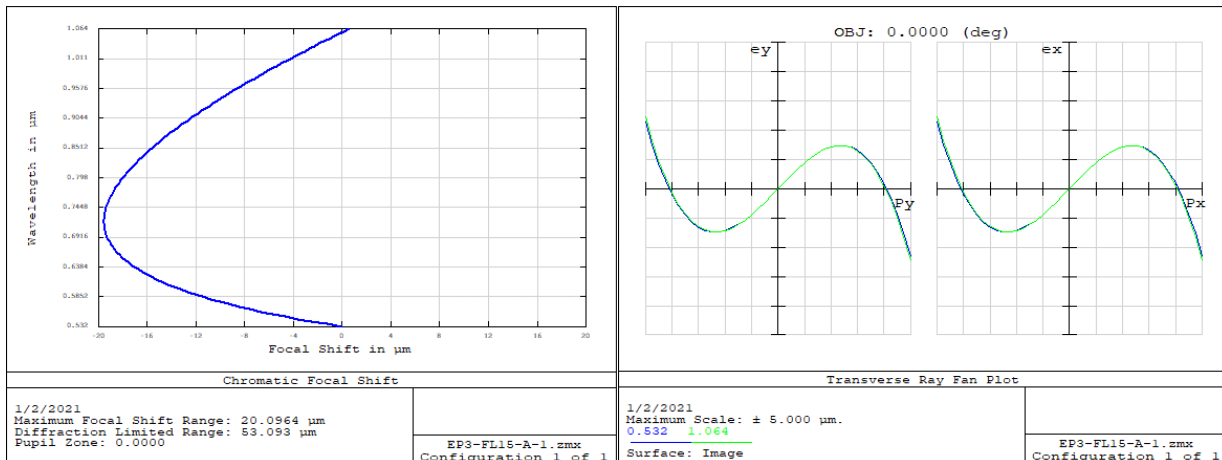
Σχεδιάζοντας αυτόν τον φακό έχουμε κατά νου ότι επιθυμούμε έναν φακό με εστιακή απόσταση κοντά στο 1.0mm ενώ ταυτόχρονα θέλουμε το *entrance pupil diameter* να είναι 3.0mm, κάτι το οποίο συνεπάγεται με $F\#$ ίσο με 0.33. Προφανώς αν προσπαθήσουμε να σχεδιάσουμε αυτόν τον φακό θα διαπιστώσουμε ότι, προκειμένου ο φακός μας είναι «*achromat*» και ταυτόχρονα να έχει ελάχιστες σφαιρικές εκτροπές, η ακτίνες καμπυλότητας του φακού θα πρέπει να είναι εξαιρετικά μικρές. Μάλιστα αυτές οι ακτίνες καμπυλότητας δεν θα επιτρέπουν στον φακό να δέχεται δέσμη ακτίνων με διάμετρο 3.0mm, καθώς ο φακός προκειμένου να είναι κατασκευάσιμος θα πρέπει να έχει διάμετρο πολύ μικρότερη των 3.0mm. Συνεπώς για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα θα πρέπει να συνδυάσουμε δυο ή περισσότερους φακούς με τον καθένα να έχει μεγαλύτερη εστιακή απόσταση (άρα και $F\#$) από αυτή του ισοδύναμου φακού. Ένας τρόπος για να επιλέξουμε τους φακούς μας, είναι να σχεδιάσουμε τον φακό με το μικρότερο δυνατό $F\#$ ενώ ταυτόχρονα θα είναι ένας *diffraction limited* φακός. Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι θέλουμε $F\#$ τουλάχιστον 14 και οπότε για διάμετρο εισερχόμενης δέσμης ίση με 3.0mm θα πρέπει να σχεδιάσουμε έναν φακό ο οποίος θα έχει εστιακή απόσταση ίση με 42.0mm. Ωστόσο αν τοποθετήσουμε δυο φακούς με αυτήν εστιακή απόσταση με την μεταξύ τους απόσταση να είναι 1.0mm τότε, από την εξίσωση *Gullstrand* θα διαπιστώσουμε ότι ο ισοδύναμος φακός έχει εστιακή απόσταση σχεδόν ίση με 21.25mm. Επομένως η επόμενη σκέψη που μπορούμε να κάνουμε είναι πως θα ήταν πιο αποτελεσματικό να συνδυάσουμε 3 ή περισσότερους φακούς στη σειρά, προκειμένου να λάβουμε εστιακή απόσταση κοντά στο 1.0mm. Ωστόσο αυτή η ιδέα εύκολα αποκρύπτεται όταν δοκιμάσουμε να συνδυάσουμε πάνω από δυο φακούς, καθώς είτε η απόσταση εργασίας (*working distance*) θα είναι μικρότερη του 1.0mm είτε ακόμα χειρότερα το επίπεδο εστίασης θα εντοπίζεται μέσα ή ανάμεσα σε κάποιους από τους τρεις φακούς. Έτσι λοιπόν αυτό το οποίο καταλήγουμε να κάνουμε είναι να προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε δυο φακούς με $F\#$ μικρότερο του 14 και ταυτόχρονα να μειώσουμε τις προσδοκίες μας για την ελάχιστη εστιακή απόσταση του 1.0mm του ισοδύναμου φακού. Έτσι λοιπόν

ξεκινάμε με δυο φακούς εστιακής απόστασης 28.0mm ($F\#=9.3$) και προσπαθούμε να πετύχουμε ένα οριακά ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Οπότε αφού σχεδιάσουμε τους επιμέρους φακούς (βλέπε ενότητα *achromat* φακών), τοποθετούμε τους δυο φακούς κοντά ο ένας στον άλλον και εφόσον καθορίσουμε τις παραμέτρους και τα κριτήρια βελτιστοποίησης, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του *zemax*. Εν τέλει μετά από μερικές προσπάθειες μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα αποτέλεσμα όπως αυτό του φακού EP3-FL15-A-1 του οποίου τη διάταξη μπορούμε να δούμε στην πρώτη εικόνα.



Εικόνες 6.1 & 6.2. Η διάταξη και το «Spot Diagram» του φακού EP3-FL15-A-1.

Από την εικόνα 2, καταλαβαίνουμε ότι ο αντικειμενικός φακός είναι οριακά *diffraction limited* ενώ από την εικόνα 3 είναι σαφές ότι έχουμε καταφέρει πρακτικό το σύστημά μας να έχει κοινό επίπεδο εστίασης στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm. Από την διπλανή εικόνα 4, παρατηρούμε τις γραφικές παραστάσεις των κανονικοποιημένων εκτροπών, στο επίπεδο της απεικόνισης, μεταξύ του σημείου απεικόνισης της ακτίνας η οποία προέρχεται από μια σημειακή πηγή στο επίπεδο του αντικειμένου και η οποία διέρχεται από το κέντρο του φακού (*chief ray*) και των σημείων απεικόνισης των ακτινών οι οποίες προέρχονται από την ίδια σημειακή πηγή αλλά διέρχονται από διαφορετικά σημεία του φακού κατά τον άξονα των τετμημένων (*sagittal*, δεξί γράφημα) και κατά των άξονα των τεταγμένων (*tangential*, αριστερό γράφημα).



Εικόνες 6.3 & 6.4. Διαγράμματα «Focal Shift» και «Ray Fan» του φακού EP3-FL15-A-1.

Σε ένα ιδανικό σύστημα το οποίο είναι εστιασμένο και ταυτόχρονα απαλλαγμένο των πλευρικών εκτροπών, οι καμπύλες των γραφικές παραστάσεων θα πρέπει να είναι ευθύγραμμα τμήματα εφαπτόμενά στον οριζόντιο άξονα. Οι συγκεκριμένες καμπύλες, κάμπτονται γύρω από τον οριζόντιο άξονα, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι έχουμε επιτύχει μερικό περιορισμό των πλευρικών σφαιρικών εκτροπών.

Ακολουθούν τα σχήματα 5 και 6 με το πρώτο από αυτά να απεικονίζει τη δισδιάστατη υπόσταση της τρισδιάστατης συνάρτησης μεταφοράς διαμόρφωσης (*Modulation Transfer Function* ή *MTF*). Η συνάρτηση μεταφοράς αντικατοπτρίζει την ικανότητα ενός οπτικού συστήματος να αναπαράγει (μεταφέρει) την αντίθεση (*contrast/modulation*) ή με άλλα λόγια τη διαμόρφωση από το επίπεδο του αντικειμένου στο επίπεδο του ειδώλου (ή στο επίπεδο της εστίασης όπως συμβαίνει στην περίπτωση μας) σε συνάρτηση με την χωρική συχνότητα (*spatial frequency*) των αντικειμένων. Η αντίθεση (*contrast/modulation*) του κατακόρυφου άξονα ορίζεται από τη σχέση (1) και περιγράφει το πόσο μεγάλη ή μικρή είναι η διαφορά μεταξύ της έντασης ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από ένα είδωλο και της έντασης της ακτινοβολίας που προέρχεται από περιοχή κοντά στο είδωλο. Για μεγάλη αντίθεση, ίση με τη μονάδα, παρατηρούμε «απότομα» ή ευκρινώς καθορισμένα όρια του αντικειμένου σε σχέση με το περιβάλλον του. Σε διαφορετική περίπτωση όταν η αντίθεση είναι χαμηλή, τα όρια μεταξύ του αντικειμένου και του περιβάλλοντός του δεν είναι απολύτως σαφή. Ενώ όταν η αντίθεση είναι μηδενική, τότε η εικόνα είναι θολή και δεν μας επιτρέπει να διακρίνουμε τις λεπτομέρειες του συστήματος.

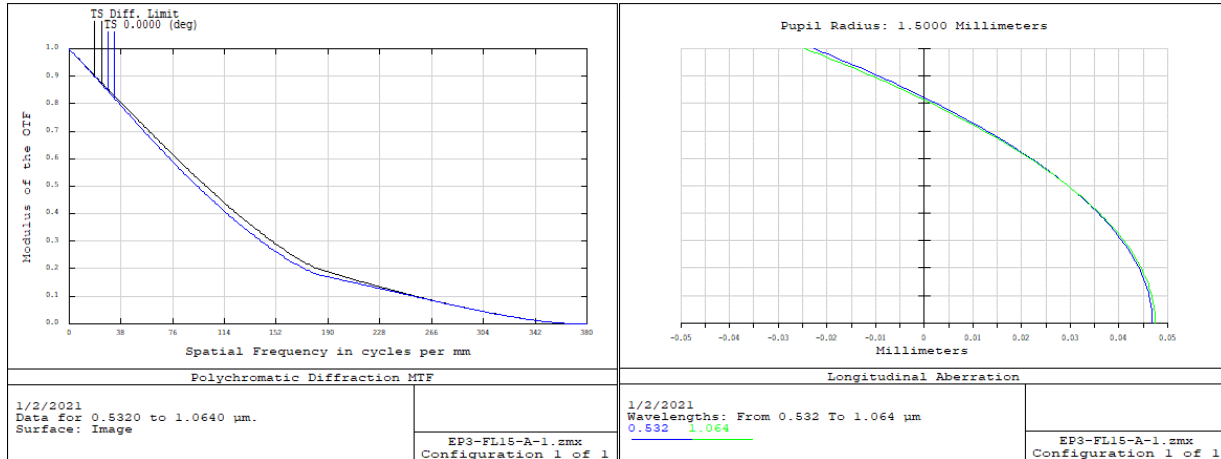
$$MTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (6.1)$$

Για να κατανοήσουμε την έννοια της αντίθεσης ας πάρουμε για παράδειγμα δυο λευκά φύλλα χαρτιού και ας τα τοποθετήσουμε το ένα πάνω στο άλλο, θεωρώντας ότι το από πάνω φύλλο είναι μικρότερων διαστάσεων από το κάτω φύλλο και δεν το καλύπτει εξολοκλήρου. Τότε θα διαπιστώσουμε ότι θα δυσκολευτούμε να διακρίνουμε τα δυο φύλλα χαρτιού μεταξύ τους. Εάν όμως το ένα εκ των δυο φύλλων είναι μαύρο και το άλλο λευκό, τότε εύκολα θα διακρίνουμε τα δυο φύλλα μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει διότι το μαύρο χρώμα απορροφάει την ορατή ακτινοβολία και επιστρέφει ελάχιστη προς τον οφθαλμό μας, ενώ το λευκό φύλλο δεν απορροφά και επιστρέφει την μέγιστη ποσότητα ορατής ακτινοβολίας στον οφθαλμό μας. Έτσι η αντίθεση μεταξύ των δυο φύλλων γίνεται πολύ υψηλή και μπορούμε να διακρίνουμε ξεκάθαρα τα μεταξύ τους όρια.

Τώρα ας φανταστούμε ότι έχουμε ένα αντικείμενο το οποίο αποτελείται από παράλληλες γραμμές πάχους x και οι οποίες βρίσκονται σε μεταξύ τους απόσταση x . Έστω ότι το πάχος και οι αποστάσεις είναι αρκετά μεγάλες και η αντίθεση των αντικειμένων στο φόντο τους είναι εξαιρετικά μεγάλη. Ωστόσο όταν μεταφέρουμε το αντικείμενο στο επίπεδο απεικόνισης, εξαιτίας εκτροπών από τους φακούς και φαινομένων περίθλασης στα άκρα των στοιχείων που απαρτίζουν το αντικείμενο, η αντίθεση την οποία βλέπαμε, κοιτώντας απευθείας το αντικείμενο, εν γένει για μικρά αντικείμενα είναι μεγαλύτερη από αυτή θα δούμε στο είδωλο του αντικειμένου το οποίο σχηματίζεται με χρήση ενός οπτικού συστήματος (έστω ο αντικειμενικός μας φακός). Συνεπώς η αντίθεση των ειδώλων εν γένει είναι υποβαθμισμένη σε σχέση με την αντίθεση των αντικειμένων. Αν όμως μειώσουμε τα πάχη x και τις αποστάσεις x μεταξύ των παράλληλων γραμμών τότε μετά την απεικόνιση των αντικειμένων, η αντίθεση των ειδώλων θα είναι ακόμα μικρότερη. Για αυτό το λόγο μελετάμε την αντίθεση του συστήματος ως προς την χωρική συχνότητα η οποία αντικατοπτρίζει το πλήθος των αντικειμένων ανά μονάδα μήκους. Όσο μεγαλύτερη

είναι η χωρική συχνότητα τόσο περισσότερα αντικείμενα χωράνε στην ίδια επιφάνεια και άρα τόσο μικρότερες οι μεταξύ τους αποστάσεις αλλά και οι διαστάσεις τους.

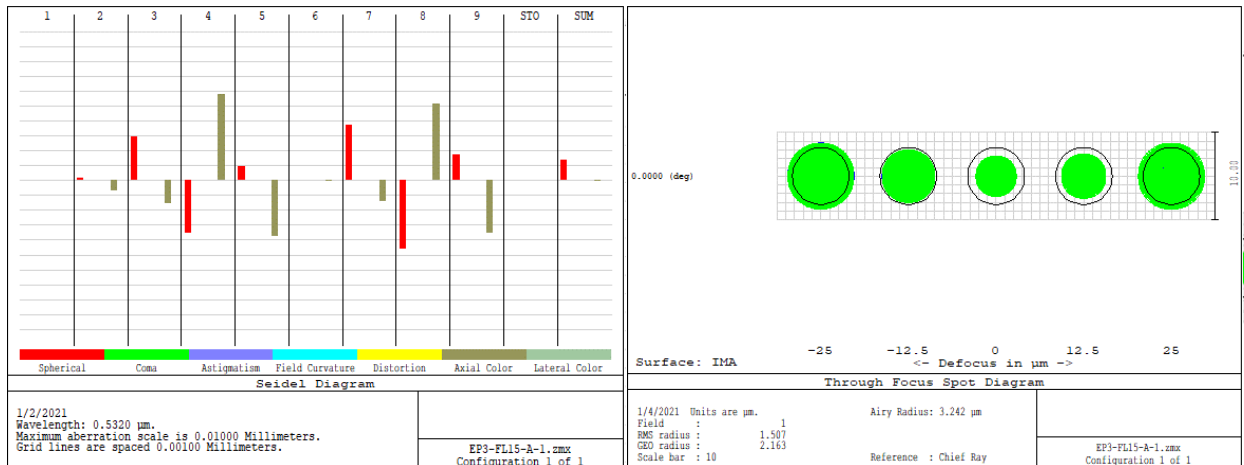
Έτσι λοιπόν από το πέμπτο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η αντίθεση μειώνεται καθώς αυξάνεται η χωρική συχνότητα ή με άλλα λόγια η αντίθεση μειώνεται καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των αντικειμένων. Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι έχουμε σχετικά φτωχό σύστημα ως προς τη σχέση αντίθεσης/χωρικής συχνότητας.



Εικόνες 6.5 & 6.6. Διαγράμματα «FFT MTF» και «Longitudinal Aberration» του φακού EP3-FL15-A-1.

Στην αμέσως διπλανή γραφική παράσταση του έκτου σχήματος έχουμε τις λεγόμενες *longitudinal aberration* σε συνάρτηση με την ημιδιάμετρο της δέσμης εισόδου στον φακό. Το εν λόγω είδος αξονικών εκτροπών ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του επιπέδου απεικόνισης, στο οποίο απεικονίζεται μια παράλληλη προς τον κύριο άξονα ακτίνα εισόδου, και του κάθετου επιπέδου προς τον κύριο άξονα στον οποίο η συγκεκριμένη ακτίνα τέμνει τον κύριο άξονα (εστιάζει). Αυτές οι αξονικές εκτροπές εξαρτώνται από το ύψος της εισερχόμενης ακτίνας και για αυτό, ενώ στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος εμφανίζονται οι αξονικές εκτροπές, στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τα ύψη των εισερχόμενων ακτίνων τα οποία ξεκινάνε στην βάση από το μηδέν (εφαπτόμενες στον κύριο άξονα) και καταλήγουν στην κορυφή στην ημιδιάμετρο της δέσμης εισόδου. Για τον υπό μελέτη φακό παρατηρούμε ότι οι εν λόγω εκτροπές δεν έχουν περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό.

Αμέσως μετά ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις 7 και 8. Στην πρώτη από τις δυο εικόνες μπορούμε να δούμε τη συνεισφορά της κάθε επιφάνειας του συστήματος σε συγκεκριμένο είδος εκτροπών του συνολικού συστήματος (άθροισμα των επιμέρους συνεισφορών στη στήλη *SUM*). Παρατηρούμε ότι το σύστημα δεν είναι πλήρως διορθωμένο των σφαιρικών εκτροπών δίχως όμως να είναι προβληματικό το σφάλμα τους καθώς η κλίμακα του γραφήματος είναι πολύ μικρή (0.001mm).



Εικόνες 6.7 & 6.8. Παράθυρα των «Seidel Diagram» και «Through Focus Spot Diagram» του φακού EP3-FL15-A-1.

Στην δεύτερη εκ των δυο εικόνων αντιμετωπίζουμε τις γραφικές παραστάσεις τύπου «Spot Diagram» σε αποστάσεις -25μm, -12.5μm, 0μm, 12.5μm και 25.0μm από το επίπεδο εστίασης. Το αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό αλλά και αναμενόμενο μιας και το βάθος εστίασης (*Depth of Focus*) είναι αντίστροφος ανάλογο του αριθμητικού ανοίγματος το οποίο στη περίπτωση μας είναι αρκετά μικρό (0.1).

$$DOF = \frac{\lambda}{2(NA)^2} \quad (6.2)$$

Για $NA=0.1$ και $\lambda=1.064\mu m$ υπολογίζουμε ότι το βάθος εστίασης (*DOF*) πρέπει να είναι περίπου $\pm 25\mu m$. Όπως βλέπουμε στην εικόνα 8, η σχέση (2) δίνει πολύ καλή προσέγγιση του πραγματικής τιμής του βάθους εστίασης.

Τέλος έχουμε τις εικόνες 9 και 10. Στην πρώτη εικόνα έχουμε το παράθυρο «Lens Data Editor» όπου ορίζουμε τα χαρακτηριστικά των φακών του συστήματος, μαζί με τις μεταβλητές τις οποίες θα μεταβάλλουμε για την κατά τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Από κάτω στην εικόνα 10, έχουμε το παράθυρο «Merit Function Editor» όπου ορίζουμε τα κριτήρια βελτιστοποίησης ως προς τα οποία θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε το σύστημα.

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000
1	Standard	Infinity	2.000		1.500
2*	Standard	20.189	V 3.000	N-PK52A	3.000
3*	Standard	-15.480	V 0.000		3.000
4*	Standard	-15.480	P 2.000	SF6	3.000
5*	Standard	-24.365	V 2.000		3.000
6*	Standard	20.189	P 3.000	N-PK52A	3.000
7*	Standard	-15.480	P 0.000		3.000
8*	Standard	-15.480	P 2.000	SF6	3.000
9*	Standard	-24.365	P 0.000		3.000
STO	Standard	Infinity	10.553		1.059
IMA	Standard	Infinity	-		2.452E-003

Εικόνα 6.9. Παράθυρο «Lens Data Editor» του φακού EP3-FL15-A-1.

Oper #	Type					Target	Weight	Value	% Contrib
1:	EFFL			1		15.000	1.000	15.001	0.027
2:	AXCL	1	2	1.000		0.000	1.000	-1.794E-003	0.049
3:	STRH	1	0	1		1.000	1.000	0.942	50.519
4:	ISNA					0.000	0.000	0.099	0.000
5:	EFNO	3	1	1		0.000	0.000	5.892	0.000
6:	SPCH	1	2	1.000		0.000	0.000	-2.379E-003	0.000
7:	DMFS								
8:	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms							
9:	BLNK	No default air thickness boundary constraints.							
10:	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.							
11:	BLNK	Operands for field 1.							
12:	OPDX			1	0.000	0.000	0.436	0.066	28.786
13:	OPDX			1	0.000	0.000	0.698	-0.027	7.832
14:	OPDX			1	0.000	0.000	0.436	-0.022	3.332
15:	OPDX			2	0.000	0.000	0.436	0.032	6.776
16:	OPDX			2	0.000	0.000	0.698	-0.014	2.059
17:	OPDX			2	0.000	0.000	0.436	-9.705E-003	0.621

Εικόνα 6.10. Παράθυρο «Merit Function Editor» του φακού EP3-FL15-A-1.

Παρόλα τα μειονεκτήματα του φακού, αδιαμφισβήτητα υπάρχουν και ορισμένα πλεονεκτήματά με βασικότερο να είναι αυτό του σχετικά μικρού κόστους. Μάλιστα θα πρέπει να βάλουμε υπόψη το ότι ο φακός περιλαμβάνει δυο όμοιους φακούς με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για την μεμονωμένη και μικρής κλίμακα παραγωγή η παραγγελία ενός φακού και μάλιστα ενός σχετικά φθηνού φακού όπως οι επιμέρους φακοί του EP3-FL15-A-1, δεν είναι σχεδόν ποτέ εφικτή για ένα ή δυο κομμάτια. Η τιμή του φακού εξαρτάται από την ποσότητα των φακών της παραγγελίας αλλά ταυτόχρονα συνηθίζεται να υπάρχει και μια ελάχιστη ποσότητα αποδεκτής παραγγελίας η οποία μπορεί να ξεκινάει από 5-10 φακούς και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως του είδος του φακού ή την κατασκευάστρια εταιρεία. Έτσι λοιπόν για ελάχιστη παραγγελία των 10 επιμέρους *achromat* φακών, θα φτιάξουμε 5 αντικειμενικούς φακούς. Αν όμως είχαμε δυο επιμέρους φακούς διαφορετικούς μεταξύ τους, τότε για ελάχιστη παραγγελία 10 φακών, θα έπρεπε συνολικά να παραγγείλουμε 20 φακούς. Πλέον θα φτιάχναμε 10 αντικειμενικούς φακούς, τους οποίους πιθανώς και να μην χρειαζόμασταν.

Πέραν των οικονομικών κριτηρίων στα θετικά του φακού συγκαταλέγονται ο αχρωματικός χαρακτήρας και το σχετικά μεγάλο *DOF* (*Depth of Focus*) καθώς και το ότι για σφαιρικές καμπυλότητες του φακού έχουμε *diffraction limited design* με σχετικά μικρό *F#*.

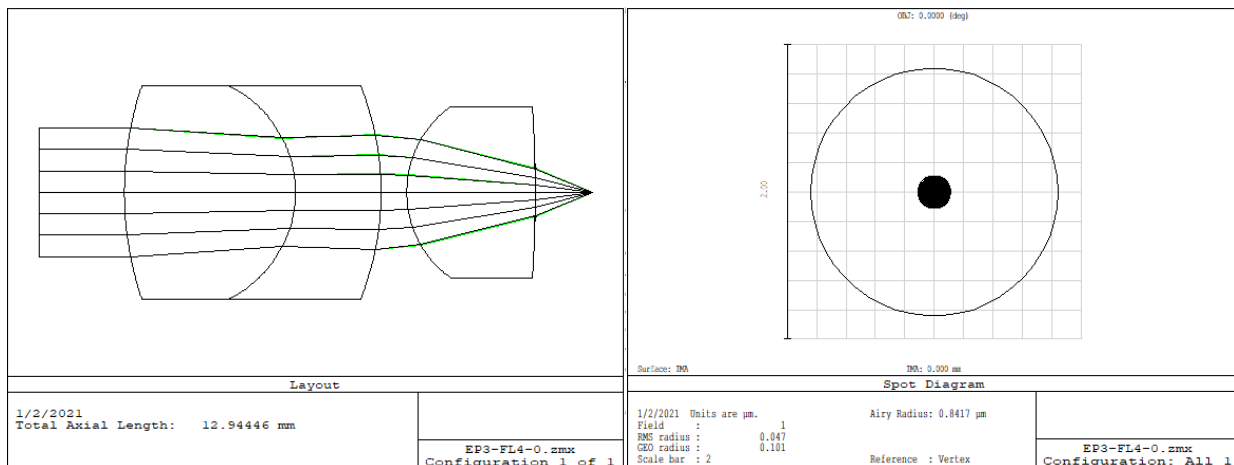
6.2 Αντικειμενικός φακός EP3-FL4-0

Σε μετεξέλιξη του φακού EP3-FL15-A-1 έρχεται ο φακός EP3-FL4-0 με σημαντικά μικρότερη εστιακή απόσταση από τον συγγενή του. Ο φακός EP3-FL4-0 χαρακτηρίζεται από εστιακή απόσταση 4.0mm για διάμετρο δέσμης εισόδου ίση με 3.0mm και *F#* ίσο με 1.3. Ο φακός είναι *diffraction limited*, έχει αριθμητικό άνοιγμα (*NA*) ίσο με 0.35 ενώ ταυτόχρονα είναι πρακτικά *achromat* στα μήκη κύματος 532nm και 1064nm με διαφορά μεταξύ των επιπέδων εστίασης των δυο μηκών κύματος να είναι περίπου στο 1.0μm. Η απόσταση εργασίας είναι 1.344mm, οριακά πιο πάνω από 1.0mm και άρα εντός των προδιαγραφών. Ο συγκεκριμένος φακός είναι ένας σχετικά φθηνός και απλός αντικειμενικός φακός, καθώς αποτελείται από δυο επιμέρους φακούς, ο ένας εκ των οποίων είναι *achromat* ενώ ο δεύτερος φακός είναι φτιαγμένος από N-BK7.

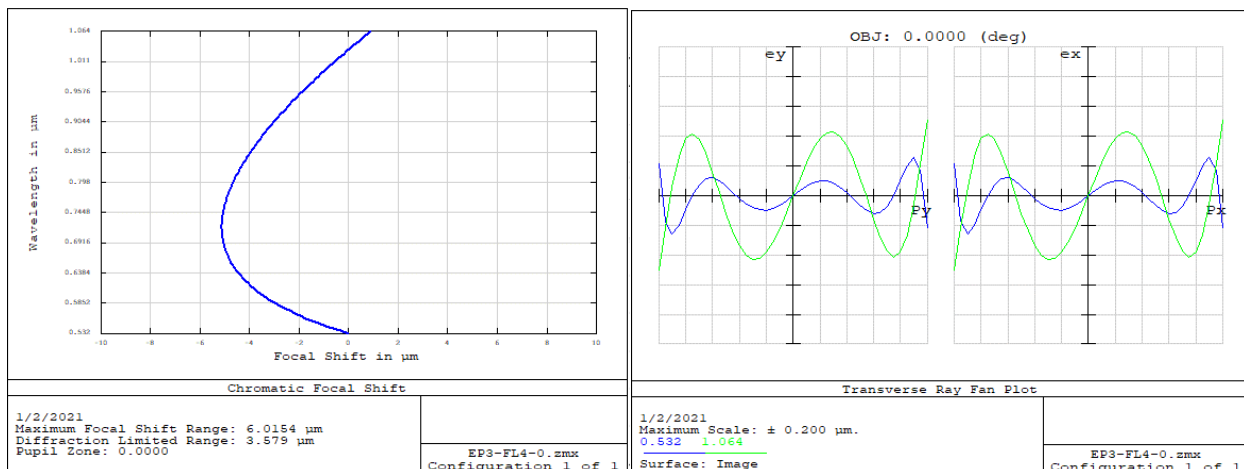
Η σχεδίαση του παρόντος φακού έγινε στη βάση του EP3-FL15-A-1 με την αντικατάσταση του δεύτερου *achromat* φακού από έναν απλό φακό από οπτικό γυαλί N-BK7. Από την εικόνα (17) μπορούμε να δούμε

ότι η επιτυχία του φακού οφείλεται στην εξισορρόπηση των σφαιρικών εκτροπών από τη μέσο-επιφάνεια των υλικών του *achromat* φακού, δίχως να απαιτείται η ύπαρξη μη σφαιρικής καμπυλότητας.

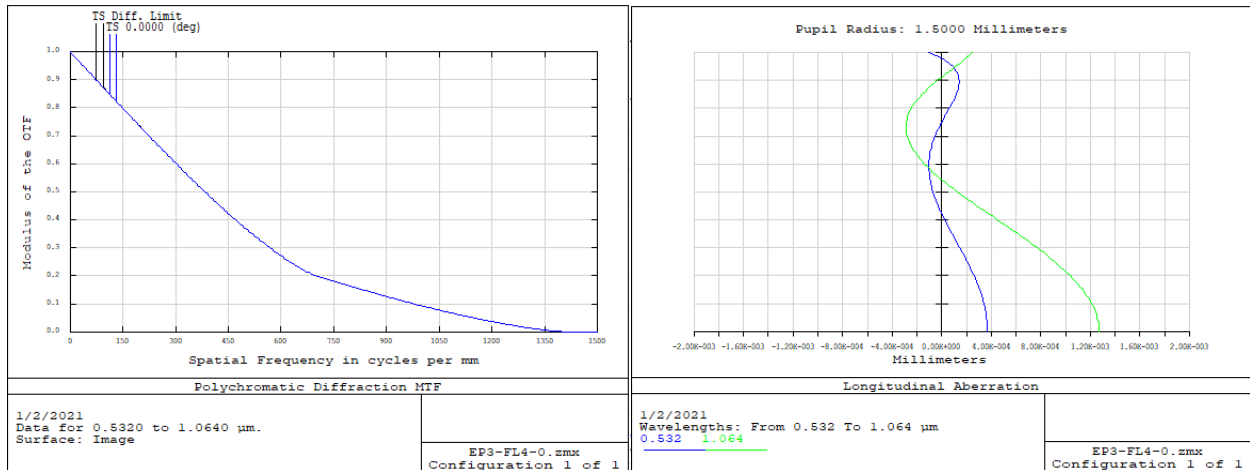
Από τη γραφική παράσταση «*Ray Fan*» της εικόνας 14 παρατηρούμε εμφανή βελτίωση του φακού σε σχέση με τον προηγούμενο φακό, καθώς η περιστροφή των καμπυλών γύρω από τους οριζόντιους άξονες σε συνδυασμό με την πολύ μικρή κλίμακα υποδηλώνει ότι έχουμε καταφέρει να ελαχιστοποιήσουμε τις πλευρικές εκτροπές του συστήματος. Στη συνέχεια από την εικόνα 15 παρατηρούμε δυο θετικά στοιχεία του φακού μας. Το πρώτο αφορά τις δυο καμπύλες (μπλε και μαύρη) οι οποίες αντιστοιχούν στο σύστημά μας και στο βέλτιστο *diffraction limited* σύστημα το οποίο αποτελεί το ανώτατο όριο το οποίο μπορούμε να προσεγγίσουμε. Από ότι βλέπουμε οι δυο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, κάτι το οποίο σημαίνει ότι έχουμε καταφέρει να φτιάξουμε ένα *diffraction limited* φακό του οποίου η απόδοση περιορίζεται από φαινόμενα περίθλασης και όχι από τις εκτροπές του φακού. Επιπροσθέτως παρατηρούμε ότι έχουμε επεκτείνει το *modulation* σε μεγαλύτερες χωρικές συχνότητες με 0.5 *modulation* να βρίσκεται πλέον στους 383.1c/mm.



Εικόνες 6.11 & 6.12. Η διάταξη και το «*Spot Diagram*» του φακού EP3-FL4-0.



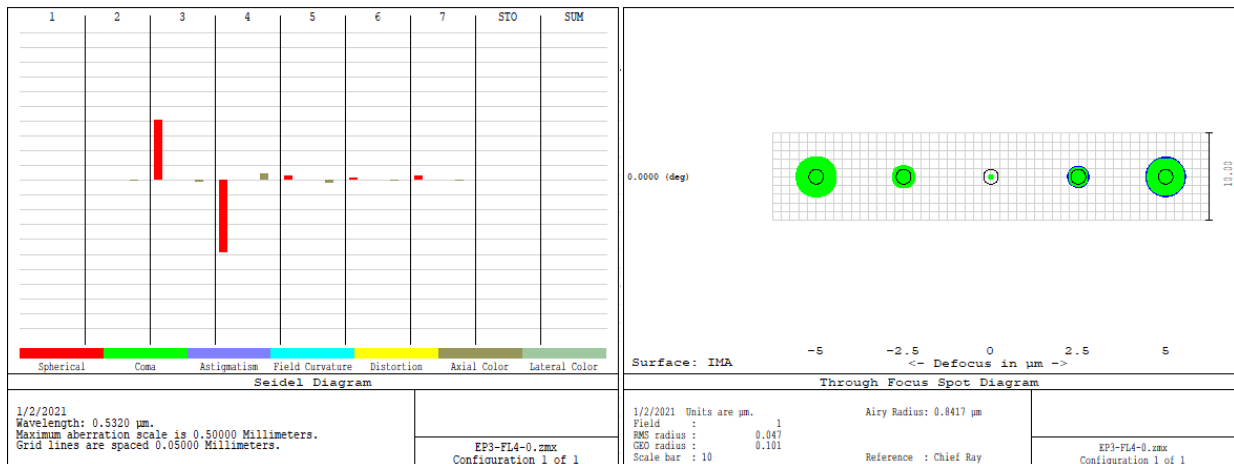
Εικόνες 6.13 & 6.14. Διαγράμματα «*Focal Shift*» και «*Ray Fan*» του φακού EP3-FL4-0.



Εικόνες 6.15 & 6.16. Διαγράμματα «FFT MTF» και «Longitudinal Aberration» του φακού EP3-FL4-0.

Καθώς περνάμε στην εικόνα 16 παρατηρούμε και πάλι σημαντική βελτίωση του συστήματος σε σχέση με τον πρώτο φακό, αυτή τη φορά ως προς τις διαμήκης εκτροπές (*longitudinal aberration*) τις οποίες έχουμε ελαχιστοποιήσει.

Φτάνοντας στην εικόνα 18 διακρίνουμε τη διάμετρο της δέσμης στην εστία και σε αποστάσεις των $\pm 2.5\mu\text{m}$ και $\pm 5.0\mu\text{m}$ γύρω από αυτή. Τόσο από το διάγραμμα όσο και από την θεωρητική προσέγγιση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το βάθος εστίασης (*DOF*) είναι περίπου ίσο $\pm 2\mu\text{m}$ και σαφώς πολύ μικρότερο από την τιμή των $\pm 25\mu\text{m}$ του πρώτου φακού.



Εικόνες 6.17 & 6.18. Παράθυρα των «Seidel Diagram» και «Through Focus Spot Diagram» του φακού EP3-FL4-0.

Τέλος έχουμε τις εικόνες 19 και 20 με τα παράθυρα «*Lens Data Editor*» και «*Merit Function Editor*».

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter																
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000																
1	Standard	Infinity	2.000		1.500																
2*	Standard	7.786	V 4.000	N-PK52A	2.500	U															
3*	Standard	-2.773	V 0.000		2.500	U															
4*	Standard	-2.773	P 2.000	SF6	2.500	U															
5*	Standard	-6.817	V 0.600		2.500	U															
6*	Standard	2.475	V 3.000	N-BK7	2.000	U															
7*	Standard	-31.798	0.000		2.000	U															
STO	Standard	Infinity	1.344		0.562																
IMA	Standard	Infinity	-		1.009E-004																

Εικόνα 6.19. Παράθυρο «*Lens Data Editor*» του φακού EP3-FL4-0.

Oper #	Type	Wave	Target	Weight	Value	% Contrib
1: EFFL	EFFL	1	4.000	1.000	4.000	63.189
2: AXCL	AXCL	1 2 1.000	0.000	1.000	3.507E-004	32.137
3: STRH	STRH	1 0 1	1.000	1.000	1.000	4.674
4: ISNA	ISNA		0.000	0.000	0.351	0.000
5: DMFS	DMFS					
6: BLNK	BLNK	contrast s+t S Wgt = 1.0000 T Wgt = 1.0000 Contrast at 150 lp/MM GQ 5 rings 10 arms				
7: BLNK	BLNK	No air or glass constraints.				
8: BLNK	BLNK	Operands for field 1.				

Εικόνα 6.20. Παράθυρο «*Merit Function Editor*» του φακού EP3-FL4-0.

Στη τελευταία εικόνα (20) θα δούμε ότι η βελτιστοποίηση έγινε με βασικό κριτήριο το «*contrast*» σε αντίθεση με τα βασικά κριτήρια των υπολοίπων περιπτώσεων όπου το κριτήριο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το *RMS wavefront*. Εν γένει συνιστάται το κριτήριο της αντίθεσης για την βελτιστοποίηση του συστήματος καθώς συμβάλει στην επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Αδιαμφισβήτητα αυτός ο φακός συνδυάζει πολλά θετικά στοιχεία με κυριότερα ένα *diffraction limited & achromatic design* για σχετικά μικρό $F\#$ ($=1.3$) και σχετικά μεγάλο NA ($=0.35$), έχοντας διάμετρο εισερχόμενης δέσμης ίση με 3.0mm και εστιακή απόσταση ίση με 4.0mm. Παράλληλα αυτός ο φακός αποτελείται μόνο από δυο επιμέρους φακούς και διαθέτει *DOF (Depth of Focus)* αν όχι ικανοποιητικό τότε σίγουρα πιο ικανοποιητικό από αυτά των ακόλουθων φακών. Προσωπικά θεωρώ ότι ο συγκεκριμένος φακός είναι ο καλύτερος ως προς τη σχέση απλότητας (και κατά συνέπεια κόστους)/απόδοσης σε σχέση με τους άλλους φακούς που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

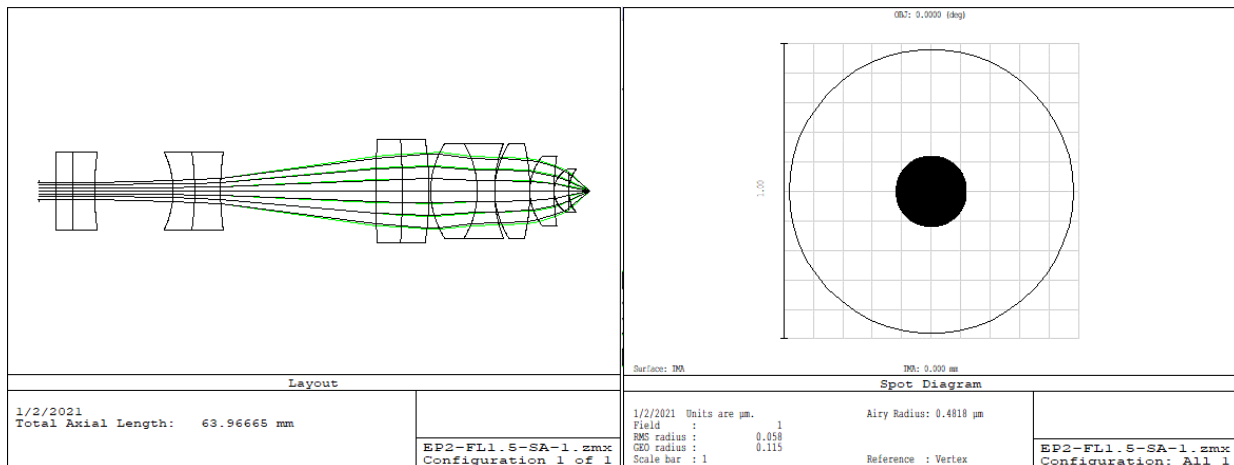
6.3 Αντικειμενικός φακός EP2-FL1.5-SA-1

Ακολουθεί ο φακός EP2-FL1.5-SA-1 ο οποίος δεν αποτελεί εξέλιξη των προηγούμενων φακών αλλά αντιπροσωπεύει μια νέα προσέγγιση στην σχεδίαση των αντικειμενικών φακών (νέα προσέγγιση σε σχέση τους προηγούμενους φακούς και σε καμία περίπτωση όχι καθολικά στην παγκόσμια κλίμακα). Ο φακός με *entrance pupil diameter* 2.0mm χαρακτηρίζεται από εστιακή απόσταση ίση με 1.5mm, $F\#$ ίσο με 0.5 και αριθμητικό άνοιγμα (NA) ίσο με 0.555. Είναι *diffraction limited* και *achromatic* με διαφορά μεταξύ των επιπέδων εστίασης των 532nm και 1064nm να είναι περίπου στα 0.5μm. Η απόσταση εργασίας παραμένει εντός των προδιαγραφών ($>1.0mm$) και βρίσκεται περίπου στα 1.5mm. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σχέδια, έχουμε μικρότερη διάμετρο της εισερχόμενης δέσμης, περισσότερους

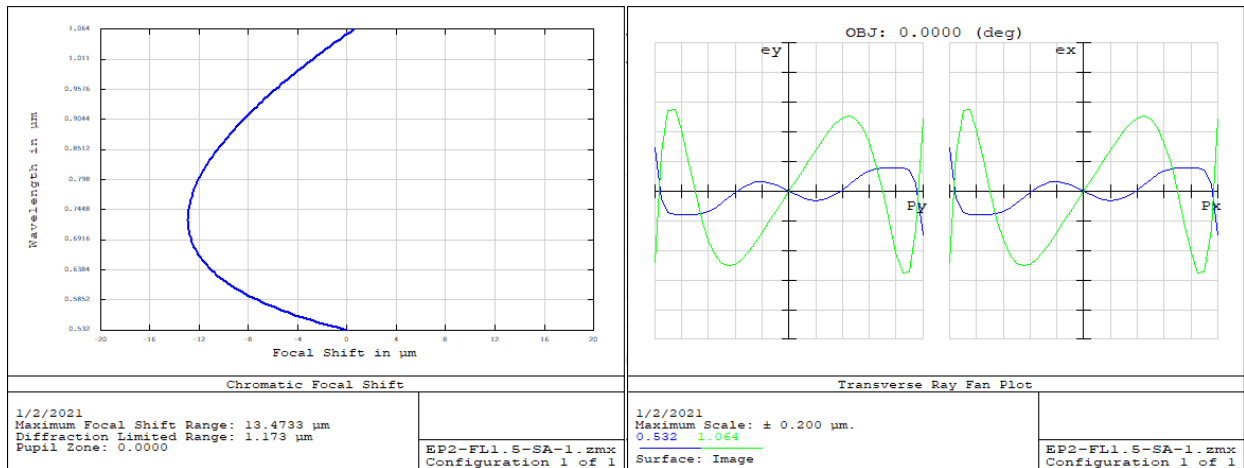
φακούς, μεγαλύτερο μήκος του φακού καθώς και έναν επιμέρους φακό με σφαιρική καμπυλότητα. Είναι προφανές ότι ο εν λόγω φακός είναι πιο απαιτητικός στην κατασκευή των επιμέρους φακών αλλά και στην μετέπειτα συναρμολόγηση τους στο σύστημα του αντικειμενικού φακού. Συνεπώς αυτός ο φακός αναμένεται να έχει αρκετά μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τους δυο προηγούμενους φακούς. Αυτό είναι και αναμενόμενο καθώς ο φακός είναι πιο απαιτητικός στις προδιαγραφές του και μάλιστα ικανοποιεί τις προδιαγραφές, κάτι το οποίο είναι και το ζητούμενο της εργασίας.

Για τον σχεδιασμό του φακού ακολουθήθηκε η λογική σύμφωνα με την οποία αρχικά διευρύνουμε την εισερχόμενη δέσμη και έπειτα εστιάζουμε με χρήση ισχυρών μηνίσκων. Για την διόρθωση των χρωματικών εκτροπών χρησιμοποιούνται *achromat* φακοί ενώ για την διόρθωση των σφαιρικών εκτροπών ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζουν οι επιφάνειες 15, 16, 17 αλλά και η μη σφαιρική επιφάνεια 18 του συστήματος. Ο λόγος για τον οποίο η δέσμη αρχικά διευρύνθηκε, είναι προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση αυτού του τύπου των συστημάτων και ιδιαίτερα όσον αφορά τη βοήθειά τους στην επίτευξη πολύ μικρού *F#* με ταυτόχρονη διατήρηση της εργασιακής απόσταση (*working distance*) μεγαλύτερης του 1.0mm. Επιπλέον είναι πιθανό η διεύρυνση της δέσμης να κάνει το σύστημα λιγότερο επιρρεπές σε τυχόν αποκλίσεις των ακτίνων φωτός από τον κύριο άξονα του συστήματος.

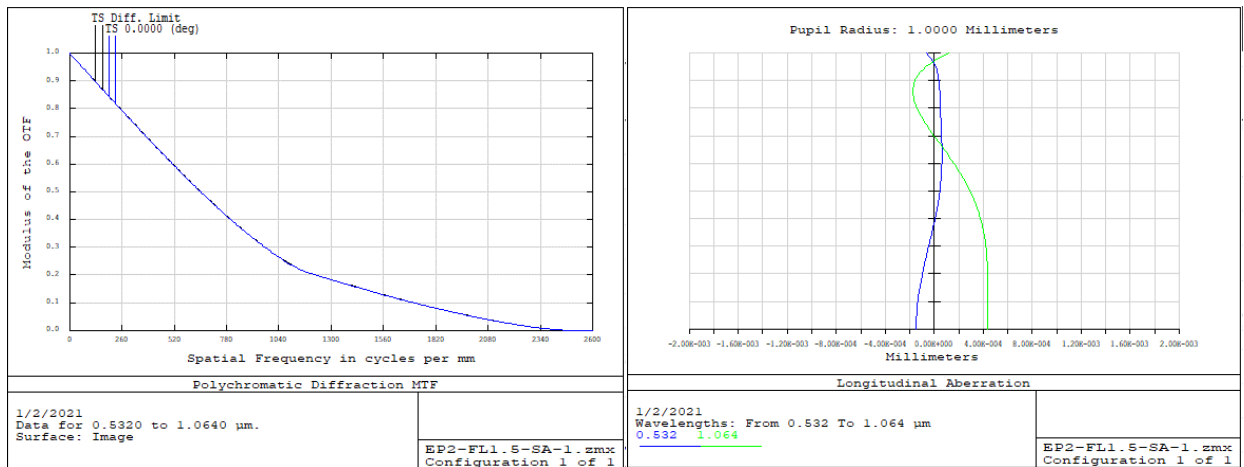
Στα διαγράμματα που ακολουθούν μπορούμε να δούμε ότι έχουμε *diffraction limited & achromatic design* για τα μήκη κύματος 532nm και 1064nm. Όπως βλέπουμε στα διαγράμματα των εικόνων 24 και 26 έχουμε ελαχιστοποιήσει τις πλευρικές και διαμήκης εκτροπές και βρισκόμαστε στα επίπεδα του δεύτερου αντικειμενικού φακού. Παράλληλα από τη συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης (*MTF*) καταλαβαίνουμε ότι σε σχέση με τον δεύτερο και πόσο μάλλον με τον πρώτο αντικειμενικούς φακούς έχουμε αυξήσει σημαντικά την απόδοσή του συστήματος όσον αφορά την αναπαραγωγή της αντίθεσης σε υψηλότερες χωρικές συχνότητες. Μάλιστα έχουμε 651c/mm να αντιστοιχούν σε 0.5 *modulation*.



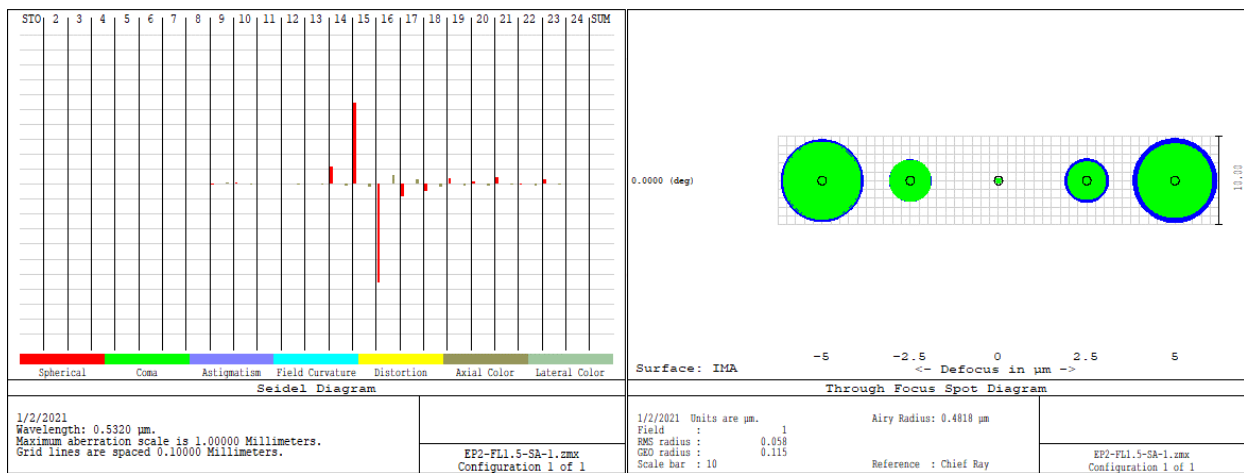
Εικόνες 6.21 & 6.22. Η διάταξη και το «Spot Diagram» του φακού EP2-FL1.5-SA-1.



Εικόνες 6.23 & 6.24. Διαγράμματα «Focal Shift» και «Ray Fan» του φακού EP2-FL1.5-SA-1.



Εικόνες 6.25 & 6.26. Διαγράμματα «FFT MTF» και «Longitudinal Aberration» του φακού EP2-FL1.5-SA-1.



Εικόνες 6.27 & 6.28. Παράθυρα των «Seidel Diagram» και «Through Focus Spot Diagram» του φακού EP2-FL1.5-SA-1.

ώστε η απόκλιση της απόστασης αντικειμενικού φακού/επιφάνειας εργασίας να μην ξεπερνάει στη χειρότερη περίπτωση τα $\pm 0.5\mu\text{m}$. Προφανώς απαιτείται μεγαλύτερης ακρίβειας διαστάσεων και κινήσεων μηχανολογικός εξοπλισμός ο οποίος θα επιτρέπει τη ρύθμιση της απόστασης του επιπέδου εστίασης από την επιφάνεια εργασίας.

Oper #	Type	Wave	Target	Weight	Value	% Contrib	
1: EFFL	EFFL	1	1.500	1.000	1.500	2.670E-006	
2: AXCL	AXCL	1 2	0.000	1.000	1.820E-004	0.026	
3: STRH	STRH	2 0	1.000	1.000	0.998	1.844	
4: ISNA	ISNA		0.000	0.000	0.555	0.000	
5: DMFS	DMFS						
6: BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms					
7: BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constraints.					
8: BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.					
9: BLNK	BLNK	Operands for field 1.					
10: OPDX	OPDX	1	0.000	0.000	0.000	0.436	
11: OPDX	OPDX	1	0.000	0.000	0.000	0.698	
12: OPDX	OPDX	1	0.000	0.000	0.436	-8.670E-003	
13: OPDX	OPDX	1	0.000	0.000	0.000	0.436	
14: OPDX	OPDX	1	0.000	0.000	0.000	0.698	
15: OPDX	OPDX	1	0.000	0.000	0.436	-8.670E-003	

Εικόνα 6.30. Παράθυρο «Merit Function Editor» του φακού EP2-FL1.5-SA-1.

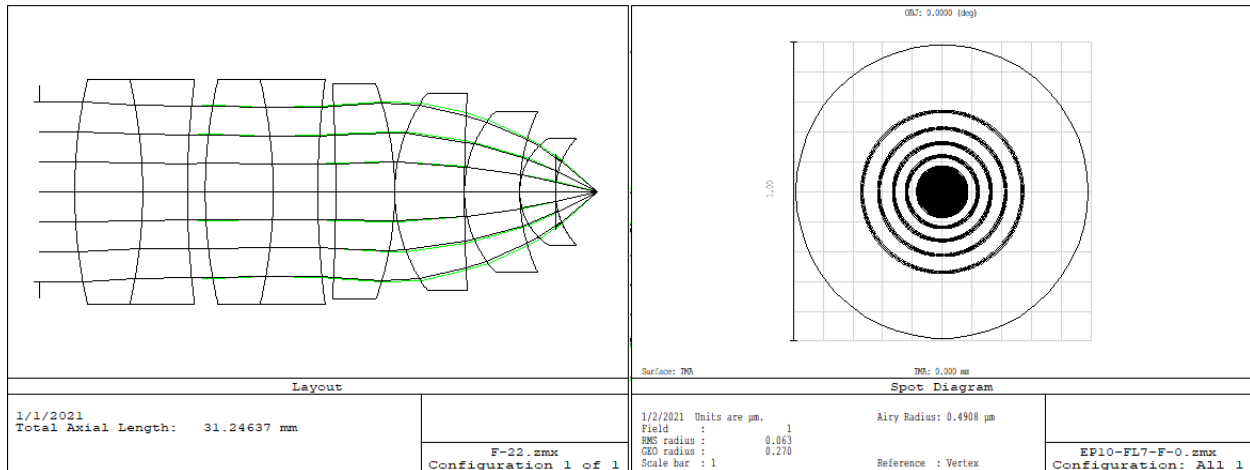
Εν κατακλείδι ο φακός EP2-FL1.5-SA-1 είναι ένας φακός ο οποίος πρακτικά πληροί όλες τις αρχικές προδιαγραφές και αξιολογείται ως ένας ικανοποιητικός φακός με βάση τα πιο πάνω ευρήματα.

6.4 Αντικειμενικός φακός EP10-FL7-F-0

Ο τελευταίος φακός του κεφαλαίου (EP10-FL7-F-0) σχεδιάστηκε με αρκετά αυξημένη διάμετρο εισερχόμενης δέσμης ενώ ταυτόχρονα διατηρεί υψηλό αριθμητικό άνοιγμα. Η ιδέα πίσω από αυτόν τον φακό έρχεται από την ανάγκη δημιουργίας ενός συστήματος προβολής το οποίο ενώ θα πρέπει να έχει σχετικά μικρές διαστάσεις ταυτόχρονα θα πρέπει να επιτρέπει την μεταβολή της μεγέθυνσης (ή σμίκρυνσης) με τον λόγο μεταξύ των διαστάσεων του μικρότερου και του μεγαλύτερου ειδώλων να ισούται με 50 (0.002mm έως 0.1mm). Παράλληλα υπάρχει η απαίτηση το σύστημα να παρέχει διαφορετική μεγέθυνση (σμίκρυνση) δίχως να μεταβάλλουμε την απόσταση του αντικειμενικού φακού από το επίπεδο απεικόνισης και άρα δίχως να μπορούμε να μεταβάλλουμε την απόσταση του αντικειμένου από τον αντικειμενικό φακό. Το τελευταίο κριτήριο είναι εφικτό μόνο αν μεταβάλλουμε τις διαστάσεις του αντικειμένου. Επιπλέον οι διαστάσεις μιας ίριδας (τετραγωνικής διατομής) δεν μπορεί να είναι πολύ μικρές. Συνεπώς ο μόνος τρόπος προκειμένου να επιτευχθεί ένα τέτοιο σύστημα είναι να έχουμε μεταβαλλόμενη δέσμη εισόδου (μεταβαλλόμενες διαστάσεις αντικειμένου) με σχετικά μεγάλες διαστάσεις σε συνδυασμό με αντικειμενικό φακό μικρής εστιακής απόστασης.

Ο φακός EP10-FL7-F-0 εν γένει θα μπορούσε να ανταποκριθεί στο δύσκολο κάλεσμα των απαιτήσεων από το σύστημα και να δώσει ένα σύστημα προβολής με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της πιο πάνω παραγράφου. Ο φακός χαρακτηρίζεται ως *diffraction limited* και σχεδόν ιδανικός *achromat* για τα μήκη κύματος 532nm και 1064nm. Ταυτόχρονα ο φακός έχει εστιακή απόσταση ίση με 7.0mm, $F\#$ ίσο με 0.7 και το μεγαλύτερο από τους τέσσερις φακούς αριθμητικό άνοιγμα ίσο με 0.581. Επιπροσθέτως το βάθος εστίασης (*DOF*) είναι περίπου $\pm 0.5\mu\text{m}$, δηλαδή όσο είναι και το βάθος εστίασης του φακού EP2-FL1.5-SA-1.

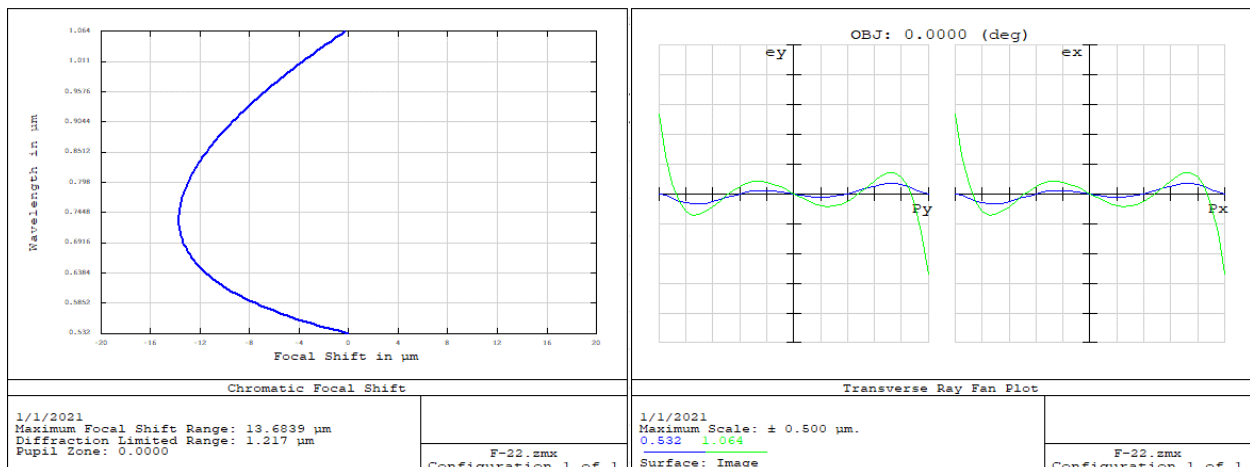
Όπως και ο φακός EP2-FL1.5-SA-1 έτσι και ο φακός EP10-FL7-F-0 χρησιμοποιεί φακούς *achromat* αλλά και φακούς από N-BK7, έναν φακό με μη σφαιρική καμπυλότητα στη μια του επιφάνεια και ισχυρούς μηνίσκους στο τέλος. Ωστόσο σε αντίθεση με τον φακό της προηγούμενης παραγράφου, ο νυν φακός δε διευρύνει τη δέσμη εισόδου.



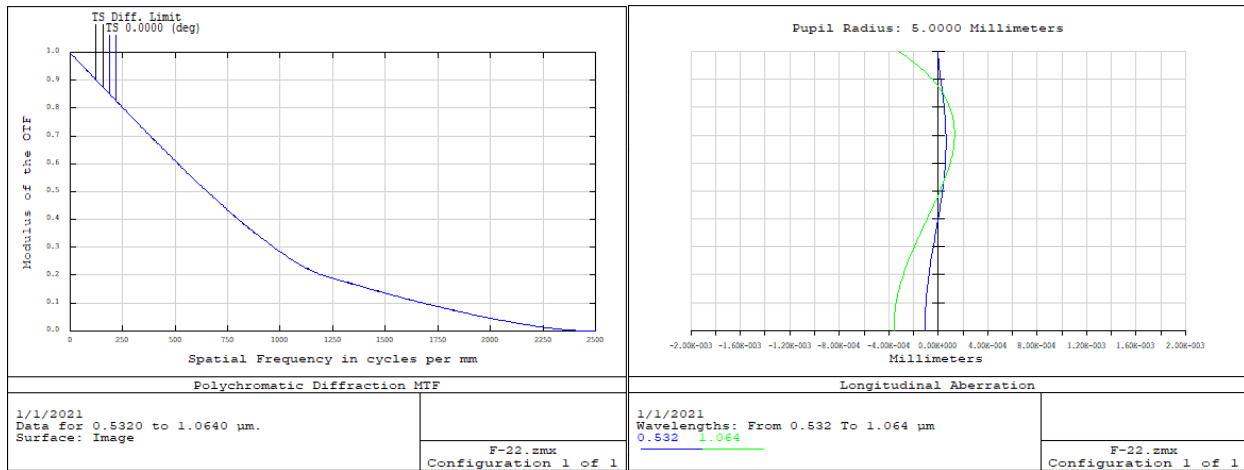
Εικόνες 6.31 & 6.32. Η διάταξη και το «Spot Diagram» του φακού EP10-FL7-F-0.

Το διάγραμμα της εικόνας 33 μας αποδεικνύει ότι έχουμε έναν «achromat» φακό για τα μήκη κύματος 532nm και 1064nm ενώ το διάγραμμα της διπλανής εικόνας 34 είναι ενδεικτικό ενός συστήματος στο οποίο έχουμε ελαχιστοποιήσει τις πλευρικές εκτροπές. Την ίδια στιγμή από το διάγραμμα της εικόνας 36 συμπεραίνουμε ότι οι διαμήκης εκτροπές (*longitudinal aberrations*) έχουν αμελητέες τιμές.

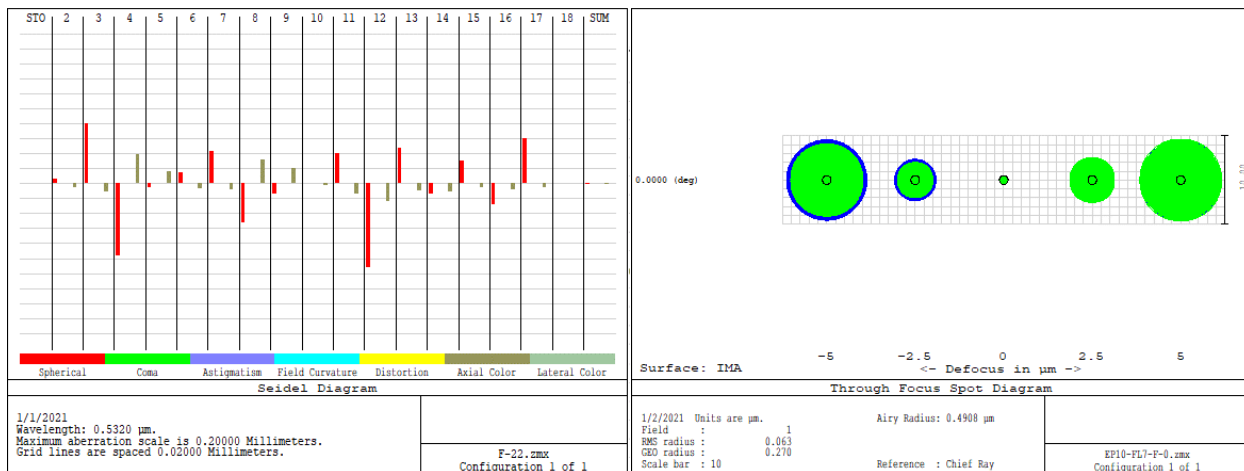
Από το διάγραμμα της συνάρτησης μετάβασης διαμόρφωσης (MTF) βλέπουμε ένα αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα αφενός διότι η καμπύλη του σχεδίου (μπλε χρώμα) σχεδόν ταυτίζεται με τη καμπύλη του *diffraction limited* συστήματος (μαύρο χρώμα). Ενώ αφετέρου έχουμε υψηλό *contrast/modulation* για υψηλές χωρικές συχνότητες. Συγκεκριμένα έχουμε 0.5 *modulation* στους 952.5cycles/mm αρκετά υψηλή τιμή σε σχέση με τους δυο πρώτους φακούς και σχεδόν ίδια με αυτήν του τρίτου φακού. Ομοίως συγκρίσιμο με τον τρίτο φακό και ταυτόχρονα μικρό είναι το βάθος εστίασης (*DOF*) το οποίο είναι περίπου ίσο με $\pm 0.5\mu\text{m}$.



Εικόνες 6.33 & 6.34. Διαγράμματα «Focal Shift» και «Ray Fan» του φακού EP10-FL7-F-0.



Εικόνες 6.35 & 6.36. Διαγράμματα «FFT MTF» και «Longitudinal Aberration» του φακού EP10-FL7-F-0.



Εικόνες 6.37 & 6.38. Παράθυρα των «Seidel Diagram» και «Through Focus Spot Diagram» του φακού EP10-FL7-F-0.

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000	0.000
STO	Standard	Infinity	2.000		5.000	0.000
2*	Standard	27.584 V	3.800	N-PK52A	6.250 U	0.000
3*	Standard	-27.584 P	0.000		6.250 U	0.000
4*	Standard	-27.584 P	2.500	SF6	6.250 U	0.000
5*	Standard	48.075 V	1.000		6.250 U	0.000
6*	Standard	27.584 P	3.800	N-PK52A	6.250 U	0.000
7*	Standard	-27.584 P	0.000		6.250 U	0.000
8*	Standard	-27.584 P	2.500	SF6	6.250 U	0.000
9*	Standard	48.075 P	1.000		6.250 U	0.000
10*	Standard	-97.611 V	3.300	N-BK7	6.000 U	0.000
11*	Standard	-17.644 V	0.000		6.000 U	0.000
12*	Standard	8.684 V	3.900	N-BK7	5.500 U	-0.557 V
13*	Standard	91.337 V	0.000		5.500 U	0.000
14*	Standard	6.644 V	3.100	N-BK7	4.500 U	0.000
15*	Standard	10.525 V	0.000		4.500 U	0.000
16*	Standard	3.564 V	2.000	N-BK7	3.000 U	0.000
17*	Standard	4.422 V	0.000		3.000 U	0.000
18	Standard	Infinity	2.346		2.068	0.000
IMA	Standard	Infinity	-		2.695E-004	0.000

Εικόνα 6.39. Παράθυρο «Lens Data Editor» του φακού EP10-FL7-F-0.

Από το παράθυρο της εικόνας 39 βλέπουμε ο τέταρτος φακός από την αρχή, διαθέτει μη σφαιρική αλλά ελλειπτική καμπυλότητα επιφάνειας δεύτερης τάξης με κωνική σταθερά ίση με -0.557.

Oper #	Type					Target	Weight	Value	% Contrib
1: EFFL	EFFL		1			7.000	1.000	7.000	3.824E-008
2: AXCL	AXCL	1	2	1.000		0.000	1.000	-3.195E-004	0.199
3: STRH	STRH	2	0	1		1.000	1.000	0.999	1.872
4: ISNA	ISNA					0.000	0.000	0.581	0.000
5: EFNO	EFNO	10	1	1		0.000	0.000	0.787	0.000
6: DMFS	DMFS								
7: BLNK	BLNK	Sequential merit function: RMS wavefront centroid GQ 3 rings 6 arms							
8: BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constraints.							
9: BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constraints.							
10: BLNK	BLNK	Operands for field 1.							
11: OPDX	OPDX		1	0.000		0.000	0.436	6.904E-003	40.537
12: OPDX	OPDX		1	0.000		0.000	0.698	-4.498E-005	2.754E-003
13: OPDX	OPDX		1	0.000		0.000	0.436	-6.832E-003	39.696
14: OPDX	OPDX		2	0.000		0.000	0.436	3.227E-003	8.857
15: OPDX	OPDX		2	0.000		0.000	0.698	-2.463E-006	8.256E-006
16: OPDX	OPDX		2	0.000		0.000	0.436	-3.223E-003	8.836

Εικόνα 6.40. Παράθυρο «Merit Function Editor» του φακού EP10-FL7-F-0.

6.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Όπως είδαμε στις περιγραφές των αντικειμενικών φακών, ο κάθε φακός χαρακτηρίζεται από θετικά και αρνητικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά. Για αυτό τον λόγο στον πιο κάτω πίνακα συγκεντρώνονται ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των αντικειμενικών φακών του κεφαλαίου.

Πίνακας 6.1. Σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών των τεσσάρων αντικειμενικών φακών.

Παράμετρος	EP3-FL15-A-1	EP3-FL4-0	EP2-FL1.5-SA-1	EP10-FL7-F-0
Entrance pupil	3.0mm	3.0mm	2.0mm	10.0mm
Focal length	15.0mm	4.0mm	1.5mm	7.0mm
Strehl ratio	0.942	1.0	0.998	0.999
Numerical aperture	0.099	0.351	0.555	0.581
F#	5.0	1.3	0.75	0.7
Airy Disk Diameter	6.484μm	1.6834	0.9636	0.9816
Depth of Focus	±25μm	±2μm	±0.5μm	±0.5μm
Focal shift (532 & 1064nm)	0.585μm	0.902μm	0.585μm	0.250μm
Working Distance	10.553mm	1.344mm	~1.59mm	~1.17mm
Spatial frequency at 0.5 modulation	94.05c/mm	383.1c/mm	651c/mm	652.5c/mm

*Αναφερόμενοι στις εστιακές αποστάσεις στην πραγματικότητα σε όλα τα κεφάλαια και τις ενότητες αναφερόμαστε στις ενεργές εστιακές αποστάσεις. Όπου ενεργή εστιακή απόσταση (*Effective Focal Length*) ορίζεται η απόσταση της εστίας από το τελευταίο *principal plane* του φακού.

*Στη παρούσα εργασία ορίζουμε την απόσταση εργασίας (*Working Distance*) ως την απόσταση του επιπέδου εστίασης από το κάθετο στον κύριο άξονα επίπεδο το οποίο διέρχεται από το πιο τελευταίο σημείο της τελευταίας επιφάνειας του τελευταίου φακού του συστήματος.

Κεφάλαιο 7^ο

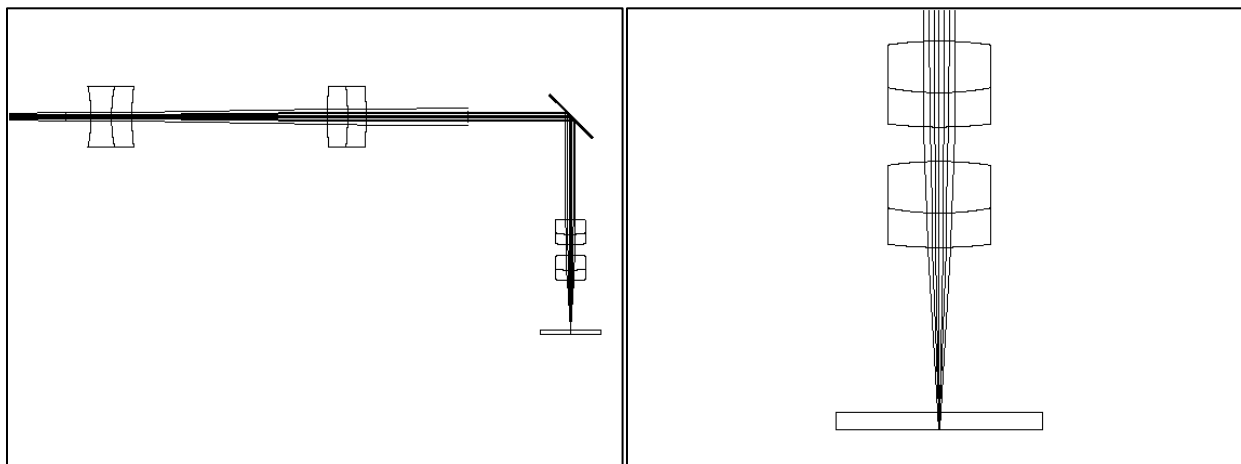
Σύστημα μικρό-εκτύπωση με *laser* (*LIFT technique*)

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί λογική συνέχεια του προηγούμενου κεφαλαίου όπου έγινε η παρουσίαση και ανάλυση τεσσάρων αντικειμενικών φακών οι οποίοι προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε σύστημα μικρό-εκτύπωσης με *laser* (τεχνική *LIFT*). Συγκεκριμένα στο νυν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των τεσσάρων συστημάτων μικρό εκτύπωσης με *laser* στη βάση των τεσσάρων αντικειμενικών φακών. Το κάθε σύστημα αποτελείται από έναν *beam expander*, μία ίριδα (μάσκα), καθρέπτη σε γωνία 45° ως προς τον κύριο άξονα και φυσικά από έναν αντικειμενικό φακό. Η πηγή φωτός είναι ένα *laser* στα 532nm και 1064nm με *divergence angle* 1.5mrad και *gaussian* προφίλ. Η συνολική ισχύς ορίζεται στη 0.34W ενώ η διάμετρος της δέσμης στην είσοδο του *beam expander* ισούται με 1.5mm. Τέλος το σύστημα εστιάζει (ή προβάλλει) στο κάτω μέρος ενός πλακιδίου από *fused silica* και πάχους 1mm.

Πέραν από την κάθε αυτού παρουσίαση των τεσσάρων συστημάτων μικρό-εκτύπωσης με *laser* δίνεται έμφαση στην μελέτη τους όσον αφορά τη δυνατότητα μεταβολής της αποτυπώματος εστίασης (ή προβολής) σε συνάρτηση με την ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*). Βασικό μέλημα είναι η διερεύνηση των περιπτώσεων για τις οποίες είναι εφικτή η μεταβολή του «*spot size*» με διατήρηση σταθερής της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας στο σποτ.

7.1 Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A1»

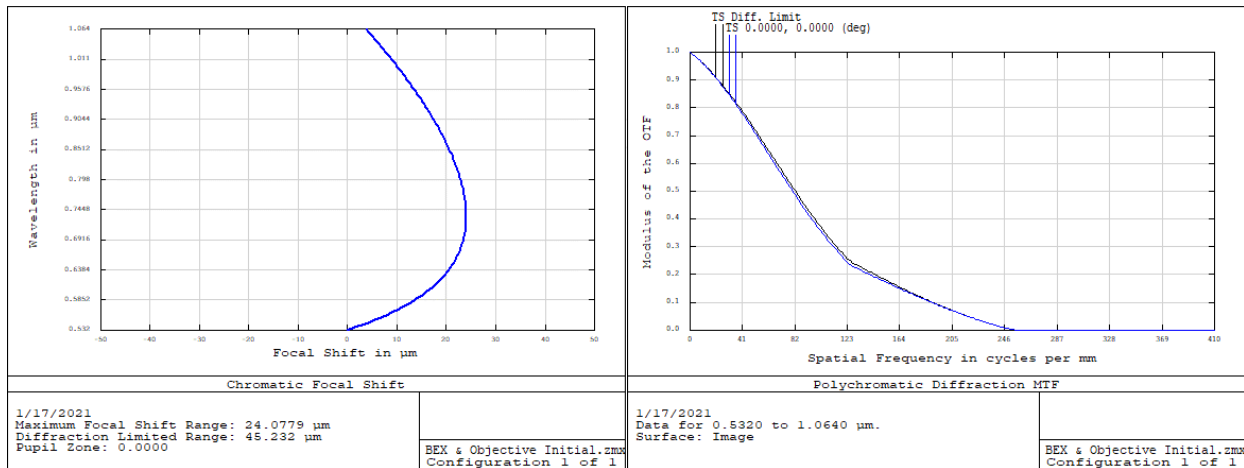
Το πρώτο σύστημα (*SYSTEM A1*) περιλαμβάνει τον *beam expander* με σταθερή μεγεθυντική ισχύ (MP=2) και τον αντικειμενικό φακό EP3-FL15-A-1. Στα πρώτα σχήματα βλέπουμε τη διάταξη του συστήματος.



Εικόνες 7.1 & 7.2. Η διάταξη του συστήματος A1 και η μεγέθυνση στον αντικειμενικό φακό. Στην δεύτερη εικόνα παρατηρούμε ότι το σύστημα εστιάζει στη κάτω πλευρά του πλακιδίου όπου και πρόκειται να υπάρχει το υλικό της εκτύπωσης.

Στα ακόλουθα σχήματα παρατηρούμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης αφενός προσεγγίζει το *diffraction limited* όριο και αφετέρου δεν παρουσιάζει εμφανείς αλλαγές σε σχέση με την αντίστοιχη συνάρτηση για τον αντικειμενικό φακό δίχως τον διευρυντή δέσμης. Ωστόσο τα επίπεδα εστίασης των μηκών κύματος 532nm και 1064nm έχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους σε σχέση με το σύστημα

του αντικειμενικού φακού χωρίς τον *beam expander*. Για αυτό έγινε προσπάθεια για τη βελτιστοποίηση του συστήματος, δίχως όμως να στεφθεί με επιτυχία και κατά συνέπεια ο φακός του συστήματος είναι ο φακός τον οποίο παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνες 7.3 & 7.4. Διαγράμματα «Focal Shift» & «MTF» στο επίπεδο εστίασης.

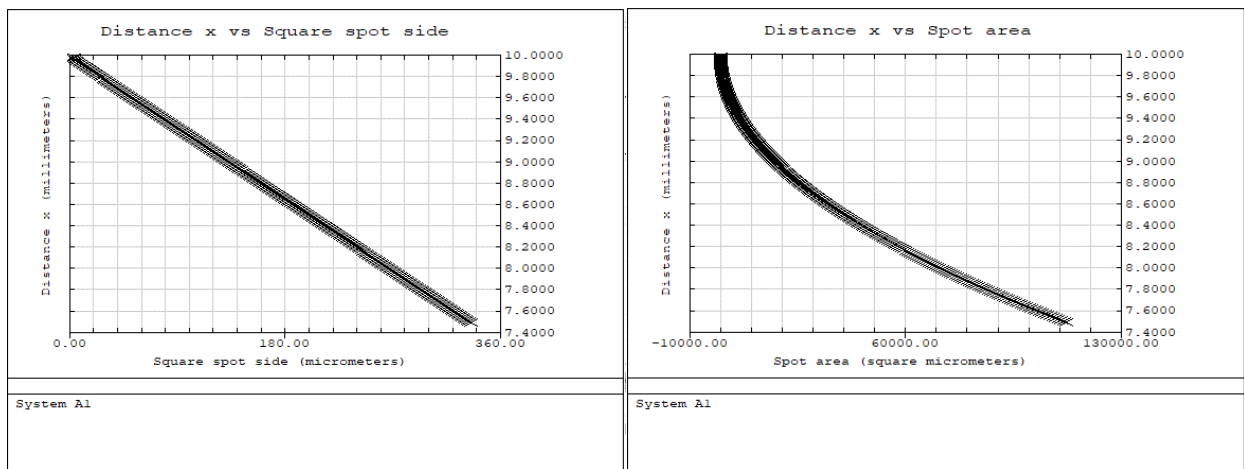
Όσον αφορά τις διαστάσεις του παλμού στο επίπεδο εστίασης, αυτές δεν διαφέρουν σημαντικά από τις διαστάσεις του παλμού στο επίπεδο εστίασης στη περίπτωση του αυτούσιου αντικειμενικού φακού (χωρίς τον *beam expander*). Μάλιστα εφόσον το σύστημα εξακολουθεί να είναι *diffraction limited* οι διαστάσεις του παλμού στο επίπεδο εστίασης θα περιορίζονται από τον «*Airy disk*». Στην συγκεκριμένη περίπτωση, εάν τοποθετήσουμε την άνω επιφάνεια του πλακιδίου *fused silica* σε απόσταση 9.980mm από το κέντρο της επιφάνειας του τελευταίου φακού και εφόσον η ίριδα μετά τον *beam expander* θα έχει διάμετρο 2.0mm τότε ο παλμός θα έχει διάμετρο όχι μικρότερη από 5.984μm.

Αν θέλουμε να προβάσουμε το αντικείμενο (μάσκα) στο επίπεδο προβολής (κάτω επιφάνεια του πλακιδίου *fused silica*) έτσι ώστε το επίπεδο προβολής να έπεται του επιπέδου της εστίασης, τότε θα πρέπει να αυξήσουμε την απόσταση των 9.980mm με αποτέλεσμα το επίπεδο εστίασης να βρεθεί εντός του πλακιδίου *fused silica*. Αν θεωρήσουμε ότι η ενέργεια ανά παλμό για το κάθε μήκος κύματος (532nm & 1064nm) ανέρχεται στα 180μJ, τότε η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο της εστίασης θα ανέλθει περίπου στα 1.6 Joule/cm² για το κάθε μήκος κύματος. Ακόμα και αν δεν γνωρίζουμε τη διάρκεια του κάθε παλμού, από σχετική έρευνα [19] καταλαβαίνουμε η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι αρκετά μικρότερη από τη χειρότερη τιμή του *laser damage threshold* για το υλικό τύπου *fused silica* και εμπορικής ονομασίας *Suprasil*. Όμως θα πρέπει να λάβουμε κατά νου ότι αφενός δεν διαθέτουμε τις πληροφορίες για όλες της μάρκες *fused silica* όπως επίσης δεν γνωρίζω τη μάρκα την οποία χρησιμοποιείται από την ομάδα μας. Αφετέρου είναι λογικό πως για την μείωση του κόστους λειτουργίας του συστήματος είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατόν φθηνότερων υλικών ακόμα και αν έχουν υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά. Επιπλέον ακόμα και αν είναι εφικτή η εστίαση στο εσωτερικό του γυάλινου πλακιδίου, δεν είναι απαραίτητη καθώς το σύστημα δεν έχει την απαίτηση της αναπαραγωγής της όψης ενός πολύπλοκου αντικειμένου. Αρκεί να αναπαράγομε ένα είδωλο στο σχήμα της μάσκας (τετραγωνική ή κυκλική) και σε διαστάσεις αρκετά μικρότερες από αυτή. Επίσης αν θεωρήσουμε ότι κάθε σημείο του αντικειμένου εκπέμπει ακτίνες παράλληλες στον κύριο άξονα, τότε μπορούμε λάβουμε το ίδιο είδωλο (απλώς αναποδογυρισμένο) σε ίσες αποστάσεις, σε δυο επίπεδα απεικόνισης, μπροστά και πίσω από το επίπεδο εστίασης.

Συνεπώς απλοποιούμε το πρόβλημα και καταλήγουμε σε ένα απλό εστιακό σύστημα το οποίο εστιάζει στο κάτω μέρος του γυάλινου πλακιδίου και προκειμένου να αυξήσουμε τις διαστάσεις του *spot* φέρνουμε το πλακίδιο πιο κοντά στον αντικειμενικό φακό. Έτσι καταφέρνουμε να έχουμε ένα σύστημα στο οποίο για να μεταβάλλουμε τις διαστάσεις του *spot* αλλάζουμε μόνο την απόσταση του πλακιδίου από τον αντικειμενικό φακό. Σε αντίθετη περίπτωση αν είχαμε ένα σύστημα προβολής/απεικόνισης θα έπρεπε να μεταβάλλουμε ταυτόχρονα τις αποστάσεις φακού/πλακιδίου και φακού/μάσκας. Το ίδιο αποτέλεσμα με τη μεταβολή των δυο αποστάσεων θα το παίρναμε αν μεταβάλλαμε τις διαστάσεις του αντικειμένου (μάσκας), ωστόσο το παρόν σύστημα δεν επιτρέπει την μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας σε μεγάλο εύρος τιμών, ώστε και το είδωλο να λαμβάνει μεγάλο εύρος διαστάσεων.

Στο επόμενο στάδιο της διερεύνησής μας θα πρέπει μελετήσουμε τη μεταβολή των διαστάσεων του αποτυπώματος στην επιφάνεια εργασίας (κάτω επιφάνεια πλακιδίου από *fused silica*) σε συνάρτηση με την απόσταση x του άνω μέρους του πλακιδίου από το κέντρο της επιφάνειας του τελευταίου φακού. Για αυτό το σκοπό καταφεύγουμε στη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού ZPL (*Zemax Programming Language*) με την οποία δημιουργούμε ένα σύμπλεγμα εντολών με τις οποίες θα μεταβάλλουμε την απόσταση x ενώ ταυτόχρονα θα καταγράφουμε τις διαστάσεις του παλμού στο επίπεδο εργασίας.

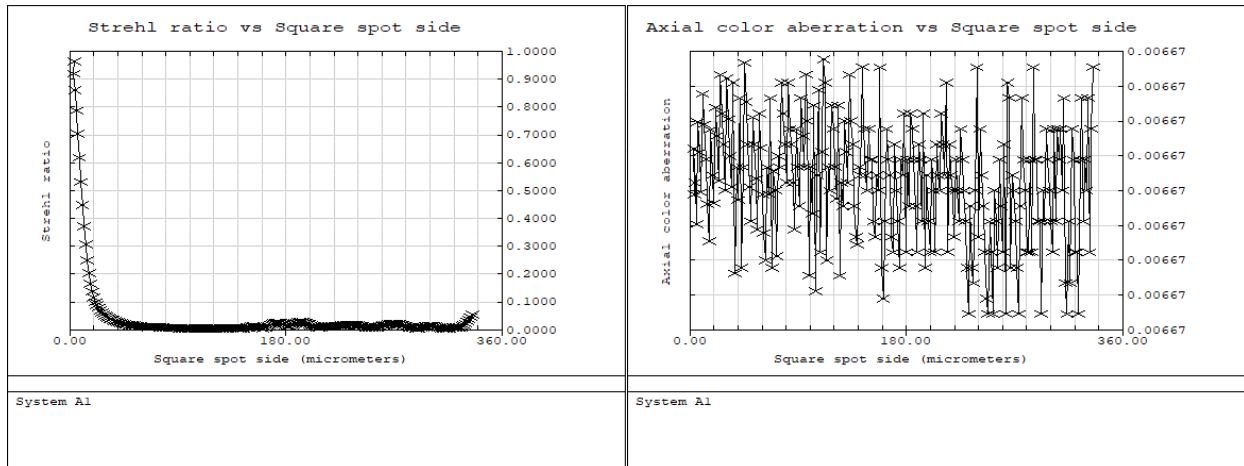
Παρακάτω ακολουθούν οι σχετικές γραφικές παραστάσεις για το σύστημα A1 με διαστάσεις μάσκας 2.0x2.0mm (εικόνες 5,6,7,8) και 1.0x1.0mm (εικόνες 9,10). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για διαστάσεις του *spot* οι οποίες είναι μικρότερες του *Airy disc diameter* ισχύει το ότι το *spot* είναι εντός του *Airy disk* και οι πραγματικές του διαστάσεις δεν μπορεί να είναι μικρότερες τους *Airy disk*. Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι οι διαστάσεις του *spot* μεταβάλλονται γραμμικά με την μεταβολή της απόστασης x . Ωστόσο το εμβαδόν του *spot* σε σχέση με την απόσταση x εν γένει μεταβάλλεται με μη ομαλό τρόπο και αντί αυτού θυμίζει την καμπύλη της υπερβολής. Παρόλα αυτά από ένα εμβαδόν και έπειτα η μεταβολή του σε σχέση με τη μεταβολή της απόστασης x μπορεί να προσεγγιστεί ως γραμμική.



Εικόνες 7.5 & 7.6. Γραφικές παραστάσεις της απόστασης x ως προς το μήκος της πλευράς του *spot* σε συνάρτηση με το μήκος της πλευράς του τετραγωνικού *spot* (αριστερά) και ως προς το εμβαδόν επιφάνειας του τετραγωνικού *spot* (δεξιά), για το σύστημα A1 με μάσκα 2.0x2.0mm.

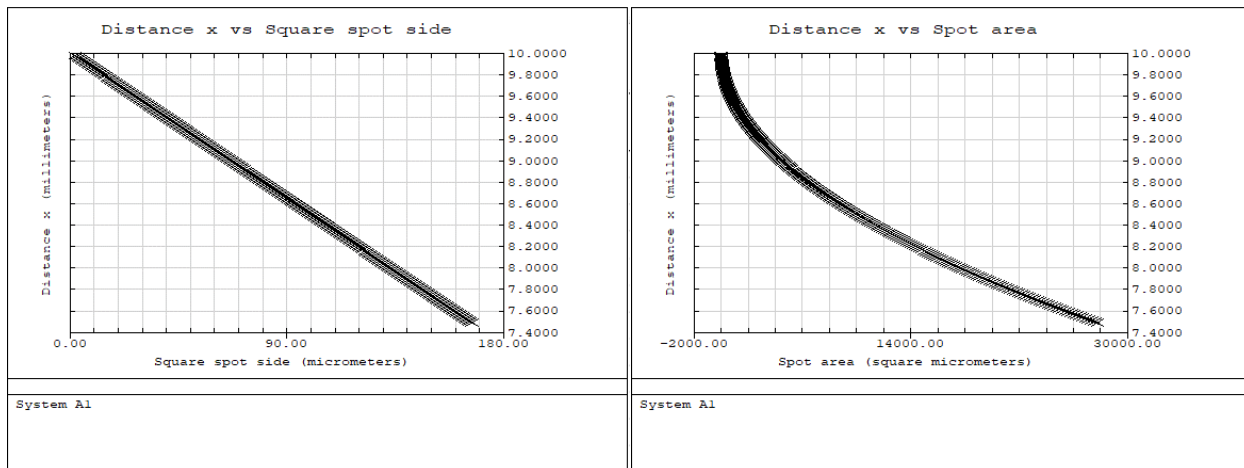
Στη συνέχεια στις εικόνες 7 και 8 βλέπουμε την απόσταση x σε συνάρτηση με τον λόγο *Strehl* και τις αξονικές χρωματικές εκτροπές. Από τη μία ο λόγος *Strehl* μειώνεται απότομα και λαμβάνει χαμηλές τιμές με την αύξηση της απόστασης x . Λογικό εφόσον το σύστημα απομακρύνεται από την εστία του και ολόένα και περισσότερη ενέργεια του *spot* εντοπίζεται εκτός της περιοχής που περικλείεται από τον

δίσκο του Airy. Από την διπλανή εικόνα παρατηρούμε ότι οι χρωματικές εκτροπές είναι ανεξάρτητες από την απεστίαση, καθώς οι τιμές των εν λόγω εκτροπών εξαιρετικά χαμηλή διακύμανση.



Εικόνες 7.7 & 7.8. Η μεταβολή της απόστασης x σε συνάρτηση με το Strehl ratio (αριστερά) και τις αξονικές χρωματικές εκτροπές (δεξιά), για το σύστημα A1 με μάσκα 2.0x2.0mm.

Ακολουθούν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για το σύστημα A1 αλλά με διαστάσεις μάσκας να είναι αυτή τη φορά ίσες με 1.0x1.0mm. Μια διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση εντοπίζεται στο ότι μικρότερη μάσκα επιφέρει μικρότερες οι διαστάσεις του spot και κατά συνέπεια μικρότερο εμβαδόν του. Επιπροσθέτως μια μάσκα με μικρότερες διαστάσεις συνεπάγεται με μεγαλύτερη κλίση της ευθείας του συνάρτησης της απόστασης x και του μήκους της πλευράς του spot. Με άλλα λόγια μια μικρή μάσκα επιφέρει μικρότερο spot στην ίδια απόσταση επιπέδου προβολής/φακού σε σχέση με μια μεγαλύτερη μάσκα στην ίδια απόσταση.



Εικόνες 7.9 & 7.10. Γραφικές παραστάσεις της απόστασης x ως προς το μήκος της πλευράς του spot σε συνάρτηση με το μήκος της πλευράς του τετραγωνικού spot (αριστερά) και ως προς το εμβαδόν επιφάνειας του τετραγωνικού spot (δεξιά), για το σύστημα A1 με μάσκα 1.0x1.0mm.

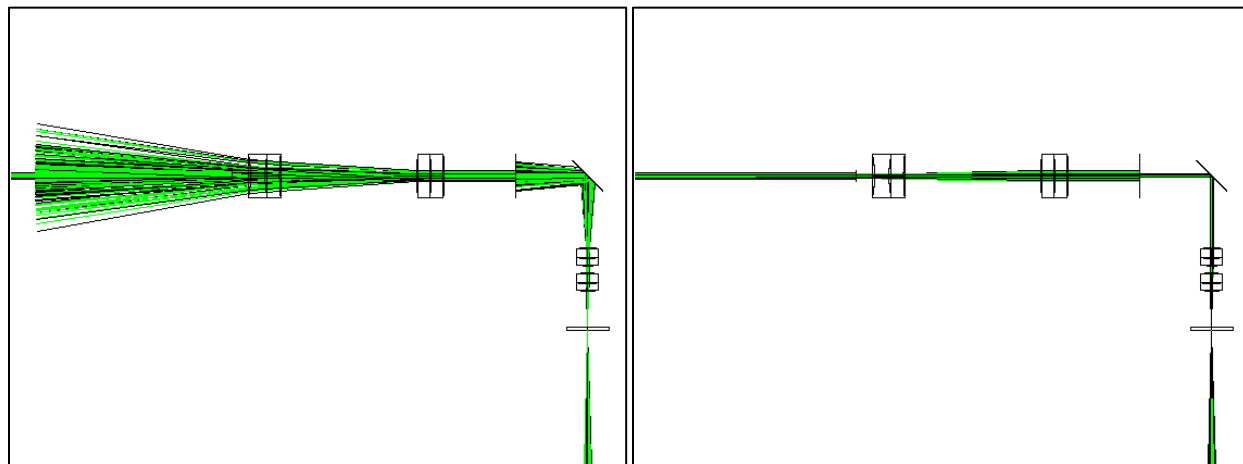
Οι γραφικές παραστάσεις του λόγου Strehl και των χρωματικών εκτροπών δεν διαφέρουν ποιοτικά από σύστημα σε σύστημα και για αυτό δεν υπάρχει λόγος παρουσιάσής τους.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως πέραν από τις διαστάσεις του «spot» μας ενδιαφέρει και η ενέργεια η οποία περιέχεται σε αυτό καθώς η ενέργεια να μονάδα επιφάνειας αποτελεί κρίσιμο

παράγοντα στην μικρό εκτύπωση με *laser* (*LIFT technique*). Ωστόσο προκειμένου να είναι αξιόπιστη η ενεργειακή μελέτη του του συστήματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράμετροι μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η απορρόφηση των της ακτινοβολίας από τους φακούς αλλά και οι ανακλάσεις της ακτινοβολίας από τις επιφάνειες των φακών. Η αλήθεια είναι ότι αν παραβιάσουμε τις ανακλάσεις της ακτινοβολίας από τις επιφάνειες των φακών τα αποτελέσματα της ενεργειακής μελέτης θα είναι αρκετά διαφορετικά από την πραγματικότητα. Ωστόσο η λειτουργία *zemax* στο *sequential mode* το οποίο και χρησιμοποιούμε δεν μας επιτρέπει να συμπεριλάβουμε στην ανάλυσή μας τις ανακλάσεις της ακτινοβολίας στις επιφάνειες των φακών. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το *non sequential mode* του λογισμικού *zemax* όπου και είναι εφικτό να συμπεριλάβουμε τις ανακλάσεις της ακτινοβολίας από όποιες επιφάνειες μας ενδιαφέρουν.

Για να μετατρέψουμε το σύστημά μας σε ένα σύστημα του *non sequential mode* μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα καινούργιο αρχείο και να ορίσουμε εκ νέου το κάθε έναν φακό/στοιχείο του συστήματος στο αρχείο ή πιο εύκολα μπορούμε να αυτόματα να κάνουμε την μετατροπή του συστήματος σε «*non sequential*» ανατρέχοντας στην επιλογή «*Convert To NSC Group...*».

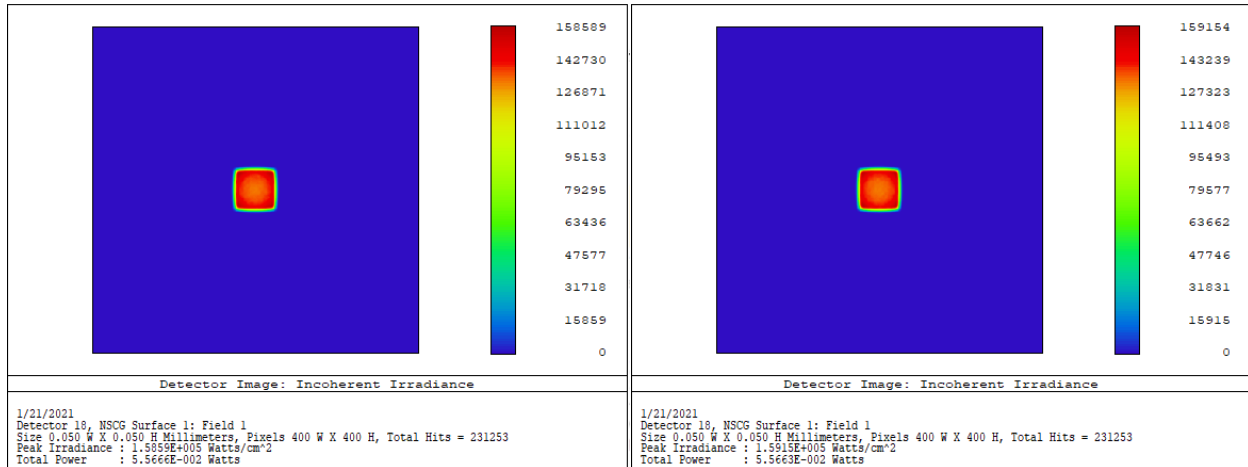
Παρακάτω φαίνονται οι διατάξεις του ίδιου συστήματος (A1) στο *non sequential mode* του *zemax*.



Εικόνες 7.11 & 7.12. Η διάταξη του συστήματος A1 στο «non sequential mode» με «Minimum Relative Ray Intensity» στα 0.001 (αριστερά) και στα 0.1 (δεξιά).

Αν επιλέξουμε την επιλογή «*Split Rays*» τότε μπορούμε να διακρίνουμε μια εικόνα παρόμοια με την εικόνα 11 όπου κάθε ακτίνα του συστήματος, όταν φτάσει σε μια επιφάνεια χωρίζεται σε δυο ακτίνες με την μια εκ των δυο να ανακλάται. Ο λόγος για τον οποίο αναφέρω ότι η εικόνα του συστήματος θα είναι παρόμοια με την εικόνα 11, είναι διότι το σύστημα της πέμπτης εικόνας προκύπτει μετά από κάλυψη των επιφανειών των φακών (εμπρόσθιες και πισινές) με αντανακλαστικές (*Anti-Reflection*) επιστρώσεις ανακλαστικότητας 2%. Χωρίς την εφαρμογή των αντί-ανακλαστικών επιστρώσεων οι ανακλώμενες ακτίνες θα ήταν περισσότερες και το σύστημα θα ήτα πιο χασοτικό. Από την άλλη στην εικόνα 12 διακρίνουμε το ίδιο ακριβώς σύστημα (με αντί- ανακλαστικές επιστρώσεις) αλλά με διαφορετική τιμή της παραμέτρου «*Minimum Relative Ray Intensity*». Το λογισμικό παύει να ανιχνεύει την ακτινοβολία των οποίων η ενέργεια είναι μικρότερη από τη τιμή της προαναφερθείσας παραμέτρου επί την ενέργεια της αρχικής ακτινοβολίας. Έτσι στην Πέμπτη εικόνα το λογισμικό εντοπίζει ακτίνες με ενέργεια μεγαλύτερη από 0.1% της αρχικής ενέργειας του συστήματος ενώ στην έκτη εικόνα το ανιχνεύει ακτίνες με ενέργεια μεγαλύτερη από 10% της αρχικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι η ανακλώμενη

ακτινοβολία τόσο στο μία όσο και στην άλλη περίπτωση δεν επηρεάζει το επίπεδο της εστίασης καθώς δεν ανακλάται προς αυτό. Αυτό είναι κάτι που μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε αν εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο «Ray Trace» στις δυο περιπτώσεις και παρατηρήσουμε τις εικόνες από τον αισθητήρα ο οποίος βρίσκεται στο επίπεδο εστίασης και σε απειροελάχιστη απόσταση από το κάτω μέρος του πλακιδίου από *fused silica*.



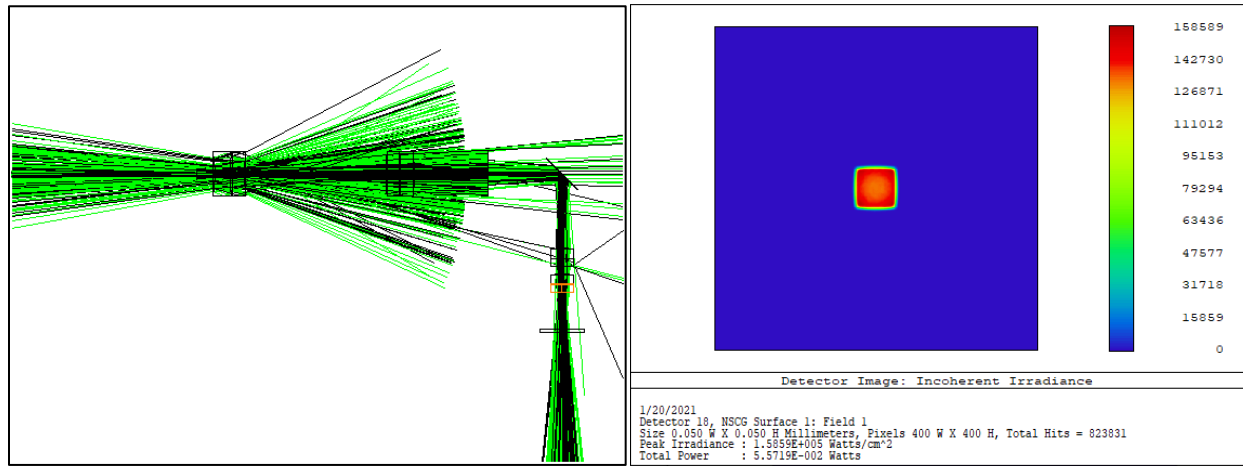
Εικόνες 7.13 & 7.14. Η εικόνα στον αισθητήρα όταν το «Minimum Relative Ray Intensity» έχει οριστεί ως 0.1 (αριστερά) και 0.001 (δεξιά). Η πλευρά της μάσκας έχει μήκος 1.0mm και απόσταση του πάνω μέρους του πλακιδίου *fused silica* από το κέντρο της τελευταίας επιφάνειας του αντικειμενικού φακού είναι ίση με 9.865mm. Η μάσκα έχει διαστάσεις 1.0x1.0mm.

Αν όμως μειώσουμε την παράμετρο «Minimum Relative Ray Intensity» στο 0.0001 τότε από την διάταξη του σχήματος 13, θα διαπιστώσουμε ότι υπάρχουν ακτίνες οι οποίες κατευθύνονται και προς τον αισθητήρα. Ωστόσο οι εν λόγω ακτίνες αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό από την συνολική ακτινοβολία και όπως εξακριβώνουμε από την αντίστοιχη εικόνα (14) του αισθητήρα, δεν υπάρχει αλλαγή στην ανιχνευόμενη ακτινοβολία.

Κάτι το οποίο θα πρέπει να σημειώσουμε είναι ότι έχουμε επιλέξει η ανάλυση να γίνεται με ένα εκατομμύριο ακτίνες (μεγαλύτερη ανάλυση οδηγεί σε εξαιρετικά αργή διεργασία «Ray Trace») ενώ στις εικόνες των διατάξεων χρησιμοποιούμε χίλιες αρχικές ακτίνες από την πηγή ακτινοβολίας (κάθε ακτίνα θα χωριστεί σε δυο όταν θα συναντήσει επιφάνεια φακού στην οποία η μια ακτίνα θα ανακλαστεί και η άλλη θα διαθλαστεί).

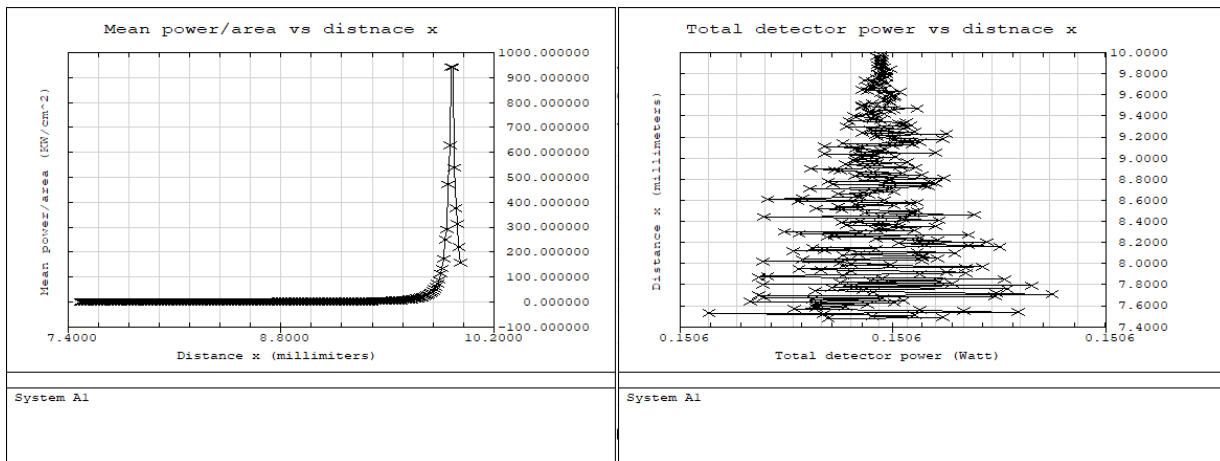
Ακόμα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι διαδικασία ανίχνευσης της πορείας των ακτίνων (*Ray Trace*) είναι εξαιρετικά αργή για μικρές τιμές της παραμέτρου «Minimum Relative Ray Intensity». Επομένως, εφόσον δεν παρατηρούμε διαφορές στην ενεργειακή καταγραφή για διαφορετικές τιμές της «ελάχιστης σχετικής έντασης ακτινοβολίας», εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο έχοντας την εν λόγω τιμή ίση με 0.1. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι για μικρές τιμές (πχ 0.0001) της παραμέτρου «Minimum Relative Ray Intensity» ο αισθητήρας θα δέχεται αν κατά ελάχιστο αλλά και πάλι περισσότερες ακτίνες και μάλιστα στην περιοχή γύρω από το *spot*. Κατά συνέπεια η μέση τιμή της ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι αρκετά μικρότερη από την πραγματική τιμή της μέσης ισχύος ανά την μονάδα επιφάνειας του κάθε αυτού *spot*. Για αυτό το λόγο ενώ ο υπολογισμός της μέσης τιμής ανά μονάδα επιφάνειας θα πρέπει να γίνεται σε σχετικά μεγάλες τιμές της παραμέτρου «Minimum Relative Ray Intensity» προκειμένου να αντιστοιχεί στην περιοχή του *spot* και όχι σε μια ευρύτερη περιοχή του αισθητήρα με μη μηδενική ένταση ακτινοβολίας. Τέλος στις ρυθμίσεις είναι σημαντικό να εφαρμόσουμε κάποιο αλγόριθμο εξομάλυνσης

(smoothing) του σήματος στον ανιχνευτή (detector) έτσι ώστε το εξομαλύνουμε το σήμα της προσομοίωσης και να αποφύγουμε τις μεγάλες διακυμάνσεις στην έντασή του. Στην περίπτωση των άνω αισθητήρων έχει γίνει η επιλογή για «smoothing» ίσο με 4.

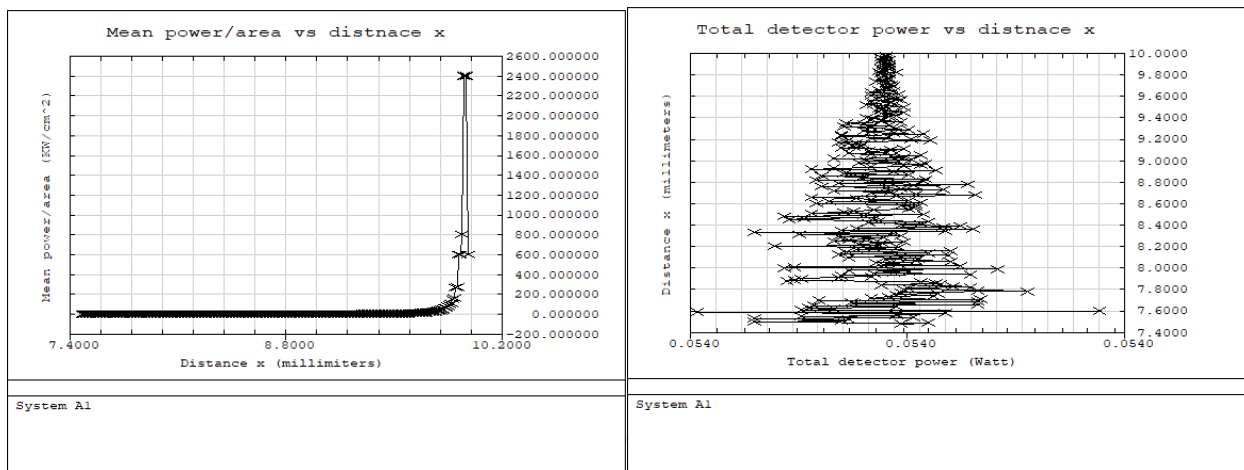


Εικόνες 7.15 & 7.16. Αριστερά απεικονίζεται η διάταξη του συστήματος A1 και δεξιά το αποτύπωμά της στο αισθητήρα, για τη τιμή 0.0001 της παραμέτρου «Minimum Relative Ray Intensity». Η μάσκα έχει διαστάσεις 1.0x1.0mm.

Έχοντας ορίσει το σύστημα, μπορούμε να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο ο οποίος έχει γραφεί στη ZPL (Zemax Programming Language) ειδικά για τη καταγραφή των ενεργειακών παραμέτρων όπως η ισχύς της ακτινοβολίας που φτάνει στον αισθητήρα και η μέση ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του αισθητήρα με μη μηδενική ακτινοβολία (θεωρούμε ότι είναι η επιφάνεια του spot) σε συνάρτηση με τη μεταβολή της απόστασης x



Εικόνες 7.17 & 7.18. Αριστερά έχουμε τη γραφικά παράσταση της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (KW/cm²) στο spot σε συνάρτηση με την απόσταση x ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση της συνολικής ισχύς στον αισθητήρα σε συνάρτηση με την απόσταση x. Οι γραφικές παραστάσεις αναφέρονται στο σύστημα A1 με μάσκα διαστάσεων 2.0x2.0mm.



Εικόνες 7.19 & 7.20. Αριστερά έχουμε τη γραφικά παράσταση της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (KW/cm²) στο spot σε συνάρτηση με την απόσταση x ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση της συνολικής ισχύς στον αισθητήρα σε συνάρτηση με την απόσταση x. Οι γραφικές παραστάσεις αναφέρονται στο σύστημα A1 με μάσκα διαστάσεων 1.0x1.0mm.

Από τη γραφική παράσταση του σχήματος 17 παρατηρούμε ότι η μέση ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του spot, αυξάνεται μαζί με την απόσταση μεταξύ του αντικειμενικού φακού από το γυάλινο πλακίδιο έως ενός σημείου πέραν από το οποίο μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο αυξήθηκε. Σε εναλλακτική διατύπωση λέμε ότι η ενέργεια ανά την επιφάνεια του παλμού αυξάνεται όταν ο πλησιάζουμε στην εστία και ο παλμός μειώνει τις διαστάσεις του. Η συνάρτηση μοιάζει σε ορισμένο βαθμό με την εκθετική συνάρτηση ενώ η κορυφή της καμπύλης αποδίδεται στη περιοχή εστίασης πέρα από την οποία οι διαστάσεις του παλμού αυξάνονται (δεξιά και αριστερά της κορυφής) και για σταθερή ενέργεια στον παλμό η ενέργεια ανά τη μονάδα επιφάνειας μειώνεται. Επίσης μπορούμε να καταλάβουμε ότι απόσταση x ίση με 9.980mm βρίσκεται πολύ κοντά στην εστιακή απόσταση αλλά δεν είναι ακριβώς αυτή καθώς η κορυφή βρίσκεται στη περιοχή μεταξύ 9.930-9.915mm. Συνεπώς γίνεται ολοφάνερο ότι η περιοχή εστίασης ενός φακού μπορεί να βρεθεί μέσω μετρήσεων της ενεργειακής πυκνότητας γύρω από την περιοχή εστίασης. Επιπροσθέτως στη γραφική παράσταση 18 παρατηρούμε ότι η διακύμανση της συνολικής ισχύς του παλμού αυξάνεται συνολική ισχύς του συστήματος καθώς το απομακρύνεται από την περιοχή εστίασης αλλά ταυτόχρονα η διακύμανση αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή και πρακτικά η ισχύς διατηρείται σταθερή.

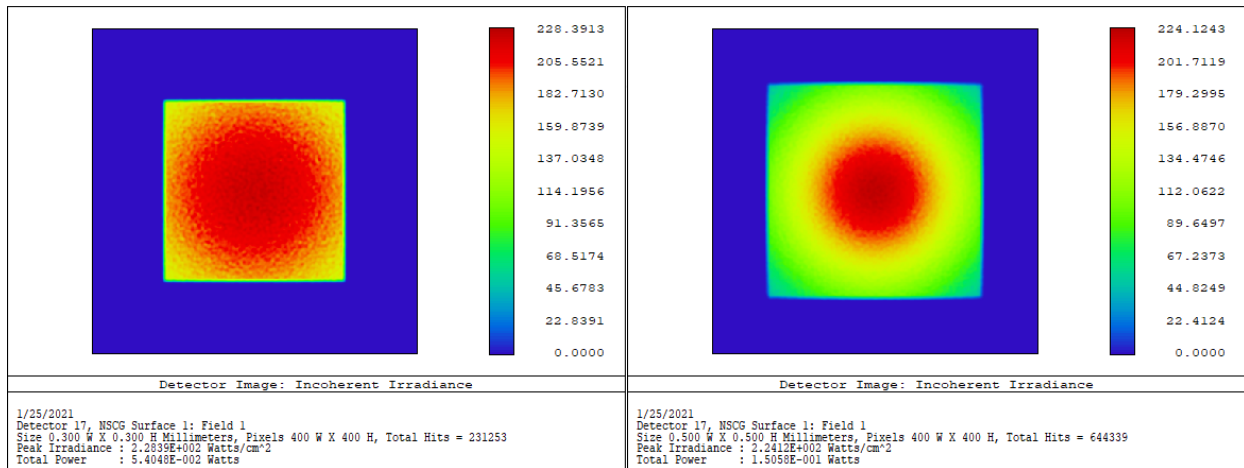
Εφόσον η αύξηση των διαστάσεων του παλμού στο επίπεδο εργασίας συνεπάγεται με μείωση του fluence τότε φυσικό επακόλουθο είναι να θέλουμε να αυξήσουμε την ενέργεια ανά παλμό. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι εφικτό από την ίδια την πηγή ακτινοβολίας, ή εναλλακτικά από έναν μηχανισμό του οποίου η λειτουργία θα βασίζεται στη πόλωση του φωτός. Σε κάθε περίπτωση γνωρίζοντας την ισχύ ή την ενέργεια του παλμού στο επίπεδο προβολής αλλά και τις διαστάσεις του spot σε συνάρτηση με την απόσταση από τον φακό, έχουμε την δυνατότητα να υπολογίσουμε το fluence στο spot. Θέλοντας να μειώσουμε ή να αυξήσουμε την ενέργεια να την επιφάνεια του παλμού μπορούμε να ρυθμίσουμε αντίστοιχα την ενέργεια του παλμού στην είσοδο του beam expander. Αρκεί επιπλέον να γνωρίζουμε την απόδοση του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας στον παλμό στην επιφάνεια εργασίας από τη συνολική ποσότητα ενέργειας στην είσοδο του συστήματος. Εύκολα μπορούμε να βρούμε ότι για μάσκα διαστάσεων 2.0x2.0mm ενώ ξεκινάμε στα 0.34Watt (532nm & 1064nm για 1000Hz) καταλήγουμε να έχουμε 0.15058Watt στο spot. Συνεπώς η απόδοση του συστήματος για άνοιγμα μάσκας 2.0x2.0mm

υπολογίζεται στα 44.29%. Ομοίως για άνοιγμα μάσκας ίσο με 1.0x1.0mm, η ισχύς η οποία φτάνει στον παλμό είναι ίση με 0.054045Watt και άρα η απόδοση του συστήματος ισούται με 15.90%.

Για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος μπορούμε να κάνουμε τα εξής. Πρώτον μειώσουμε την ανακλαστικότητα των επιφανειών των φακών από τα 2.0% σε 1.5%-0.05% με την εφαρμογή αντί ανακλαστικών επιστρώσεων μεγαλύτερης διαπερατότητας (μικρότερης ανακλαστικότητας). Δεύτερο μέλημα είναι η μείωση του πλήθους των φακών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διαφορετικού *beam expander* ή/και αντικειμενικού φακού είναι εφικτή η αντικατάσταση του ενός εκ των δυο *achromat* φακών στη κάθε περίπτωση με έναν απλό φακό (μη *achromat*) δίχως να αλλάξει ο αχρωματικός χαρακτήρας του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή αντί ανακλαστικών στρωμάτων στο πλακίδιο από «*fused silica*. Για παράδειγμα ένα αντί ανακλαστικό στρώμα στην άνω επιφάνεια του πλακιδίου, με ανακλαστικότητα 2.0% μπορεί να αυξήσει την απόδοση έως τα 44.95% και 16.13% αντίστοιχα για μάσκα με άνοιγμα 1.0x1.0mm και 2.0x2.0mm. Από κει και έπειτα μας μένει να εξετάσουμε τη χρήση υλικών με μικρότερη απορρόφηση, τη μείωση του πάχους των φακών, τη τροποποίηση των καμπυλοτήτων των φακών και φυσικά τη μείωση της μεγεθυντικής δύναμης του *beam expander* ή/και την αύξηση του ανοίγματος της μάσκας. Ωστόσο οι τελευταίες επιλογές δεν μας δίνουν πολλά περιθώρια βελτίωσης καθώς είδη αυτοί οι παράγοντες προσεγγίζουν τα όριά τους.

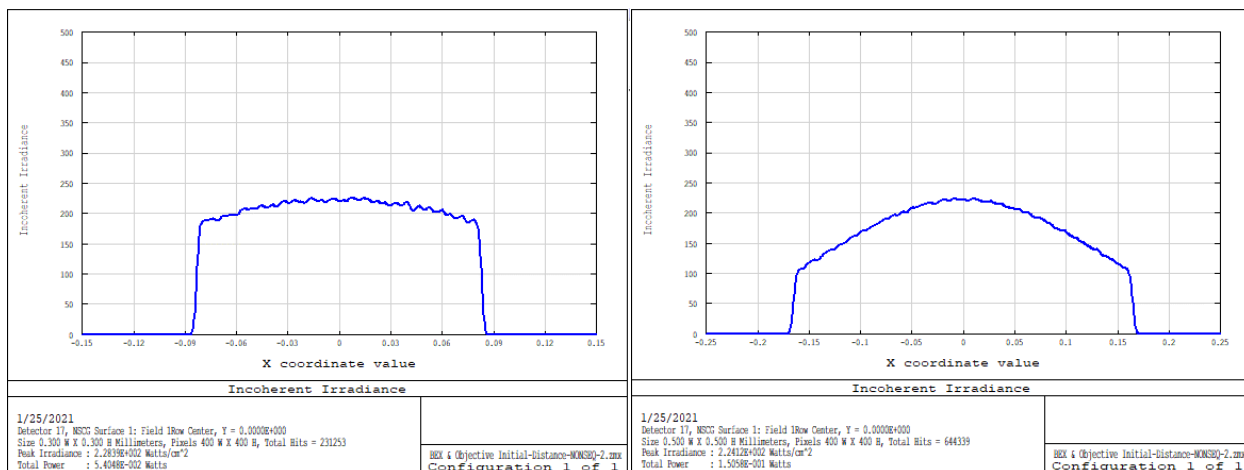
Τέλος όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψιν το υλικό της εκτύπωσης, το οποίο βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια του υάλινου πλακιδίου. Για υλικά με μεγάλους δείκτες διάθλασης η ανάκλαση της ακτινοβολίας από το κάτω μέρος του πλακιδίου προβλέπεται ότι θα είναι ε γένει ισχυρή και η ενεργειακή απόδοση του συστήματος θα μειωθεί περαιτέρω. Στη μελέτη της μεταπτυχιακής εργασίας δεν έχει ληφθεί υπόψιν αυτός ο παράγοντας και θεωρείται ότι κάτω από το γυάλινο πλακίδιο βρίσκεται αέρας. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε το παράδειγμα όπου θα θεωρούμε ότι ο δείκτης διάθλασης του υλικού προς εκτύπωση είναι ίσος και στα δυο μήκη κύματος). Τότε για άνοιγμα μάσκας 1.0x1.0mm οι αποδόσεις για τους δείκτες διάθλασης 1.2, 1.5, 2.0 και 2.5 είναι αντίστοιχα 16.16%, 16.45%, 15.65% και 14.24%. Ομοίως για άνοιγμα μάσκας 2.0x2.0mm και δείκτες διάθλασης 1.2, 1.5, 2.0 και 2.5 οι απόδοση του συστήματος φτάνει αντίστοιχα το 45.02%, 45.84%, 43.62% και 39.69%. Από ότι βλέπουμε ο δείκτης διάθλασης δεν μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Το ζήτημα απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση με πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή ανάκλασης για το κάθε υλικό το οποίο εκτυπώνεται, στην φάση την οποία βρίσκεται επάνω στο πλακίδιο από *fused silica*.

Βλέπουμε ότι μεγαλύτερο άνοιγμα της μάσκας (ίριδας) υπό σταθερή μεγεθυντική ισχύ του *beam expander* οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Κατά συνέπεια μια μάσκα με μεγαλύτερο άνοιγμα επιδρά θετικά στο σύστημα με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μείωση των λειτουργικών δαπανών. Ωστόσο η αύξηση του ανοίγματος της μάσκας μπορεί να είναι ανεπιθύμητη και ο λόγος είναι φανερός στις εικόνες 21 και 22. Από την εικόνα 21 βλέπουμε ότι η κατανομή της ενέργειας στην επιφάνεια του *spot* είναι σχετικά ομοιόμορφη όταν η μάσκα έχει διαστάσεις 1.0x1.0mm. Ωστόσο από την εικόνα 22, η οποία αντιστοιχεί σε εικόνα από τον αισθητήρα για μάσκα ανοίγματος 2.0x2.0mm, παρατηρούμε εύκολα την ανομοιογενή κατανομή της ακτινοβολίας στο *spot*. Ιδιαίτερα εμφανές είναι το ότι ενώ έχουμε υψηλή πυκνότητα ενέργειας στο κέντρο, η πυκνότητα ενέργειας είναι σημαντικά μειωμένη στα άκρα και ιδιαίτερα στις ακμές του τετραγωνικού *spot*.



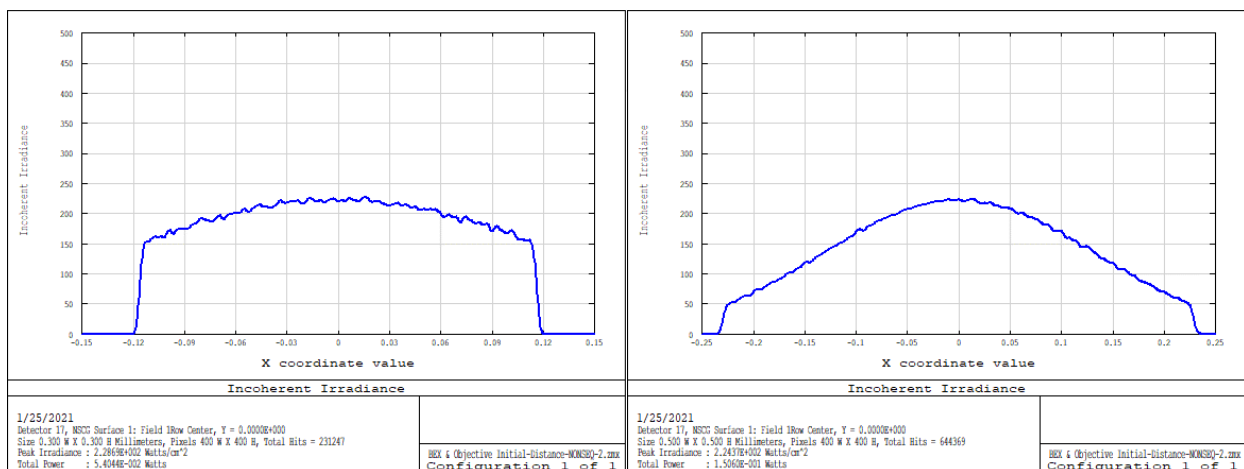
Εικόνες 7.21 & 7.22. Εικόνες από τον αισθητήρα για το spot του συστήματος A1 με μάσκα 1.0x1.0mm (αριστερά) και 2.0x2.0mm (δεξιά). Οι διαστάσεις του αισθητήρα της αριστερής εικόνας είναι 0.3x0.3mm ενώ της δεξιάς εικόνας 0.5x0.5mm ενώ και στις δυο περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί *smoothing* ίσο με 4. Η απόσταση x ισούται με 7.480mm.

Οι παρατηρήσεις μας επιβεβαιώνονται και από το προφίλ της ακτινοβολίας στον αισθητήρα.



Εικόνες 7.23 & 7.24. Τα αντίστοιχα προφίλ της καταγραφόμενης από τον αισθητήρα ακτινοβολίας για το σύστημα A1 με μάσκα 1.0x1.0mm (αριστερά) και 2.0x2.0mm (δεξιά).

Από τις εικόνες 23 και 24 βρίσκουμε πως η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής (ακριβώς πριν την απότομη πτώση) της ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας είναι περίπου ίση με 83% και 46% για το σύστημα A1 με μάσκα ανοίγματος 1.0x1.0mm και 2.0x2.0mm αντίστοιχα. Ενώ από τις εικόνες 25 και 26 βρίσκουμε πως η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας είναι περίπου ίση με 68% και 22% για το σύστημα A1 με μάσκα ανοίγματος 1.0x1.0mm και 2.0x2.0mm αντίστοιχα. Γίνεται ολοφάνερο ότι η διαστάσεις του ανοίγματος της μάσκας ή/και εναλλακτικά η μεγεθυντική ισχύς του *beam expander* έχουν μεγάλη σημασία αν το ζητούμενο είναι η ομοιογενής κατανομή της ενέργειας στο παλμό. Συνεπώς όταν έχουμε *gaussian* προφίλ της ακτινοβολίας στον παλμό και επιθυμούμε να αποφύγουμε τις μεγάλες αποκλίσεις της κατανομής ενέργειας σε αυτόν, συνίσταται το μέγιστο της άνοιγμα της μάσκας να μην ξεπερνάει το 1/3 της διαμέτρου του εισερχόμενου στη μάσκα παλμού (1.0x1.0mm άνοιγμα μάσκας και 3.0mm διάμετρος παλμού μετά από την διεύρυνσή του).



Εικόνες 7.25 & 7.26. Διαγώνια προφίλ της καταγραφόμενης από τον αισθητήρα ακτινοβολίας για το σύστημα A1 με μάσκα 1.0x1.0mm (αριστερά) και 2.0x2.0mm (δεξιά)

Επιπλέον εμφανίζεται η ανάγκη και πιθανό αντικείμενο μελλοντικής μελέτης σχετικά με τη διαμόρφωση του προφίλ του παλμού από *gaussian* σε *top hat* ώστε αφήνοντας να διέλθει μεγάλο μέρος του παλμού από τη μάσκα να έχουμε ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας στην επιφάνεια του παλμού και ταυτόχρονα υψηλή ενεργειακή απόδοση.

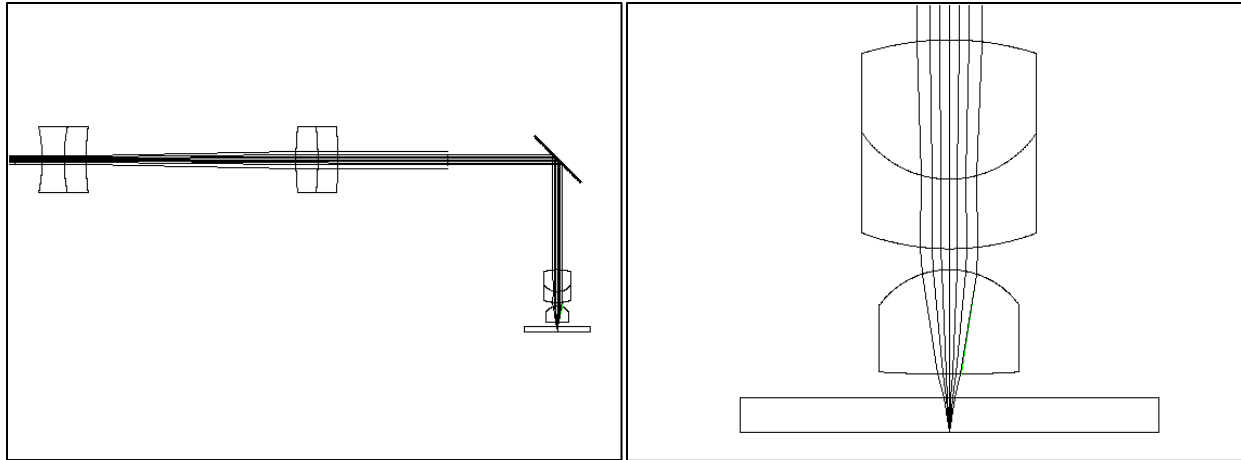
7.2 Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A2»

Σε συνέχεια του συστήματος A1 έρχεται το σύστημα A2 το οποίο είναι εξίσου απλό και συμπαγές. Ωστόσο αρχικός (βλέπε κεφάλαιο αντικειμενικών φακών) αντικειμενικός φακός του συστήματος τροποποιήθηκε μέσω του αλγορίθμου βελτιστοποίηση του *zemax* ώστε να είναι *diffraction limited* και *achromat* στα μήκη κύματος 532nm & 1064nm. Ακολουθεί τμήμα του παραθύρου «*Lens Data Editor*» με τα στοιχεία του αντικειμενικού φακού όπως προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση.

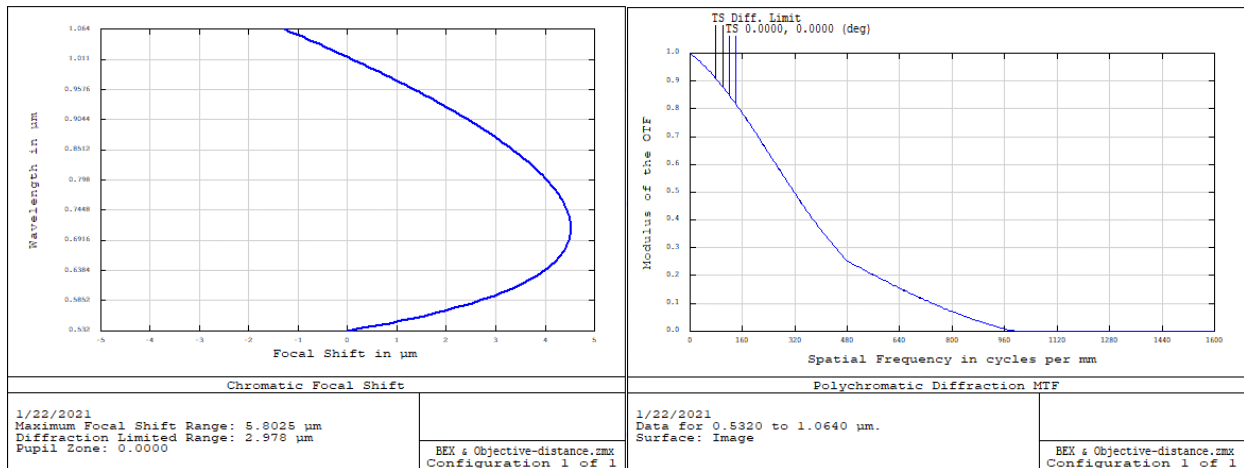
14*	Standard	Objective	-8.144	-4.000	N-PK52A	2.500	U	0.000
15*	Standard		3.012	0.000		2.500	U	0.000
16*	Standard		3.012	P	SF6	2.500	U	0.000
17*	Standard		7.116	-0.600		2.500	U	0.000
18*	Standard		-2.484	-3.000	N-BK7	2.000	U	0.000
19*	Standard		31.798	0.000	V	2.000	U	0.000
20	Standard		Infinity	-0.680		0.619		0.000
21*	Standard		Infinity	-1.000	F_SILICA	6.000	U	0.000
22	Standard		Infinity	0.000		3.054E-004		0.000
IMA	Standard		Infinity	-		3.054E-004		0.000

Εικόνα 7.27. Ο αντικειμενικός φακός του συστήματος A2 όπως ορίζεται στο παράθυρο «*Lens Data Editor*» του *zemax*.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες με την διάταξη του συστήματος A2 καθώς και τα διαγράμματα «*Chromatic focal shift*» και «*MTF*». Διαπιστώνουμε ότι το σύστημα είναι *diffraction limited* ενώ η χρωματική εκτροπή από την εστία για τα μήκη κύματος 532nm και 1064nm δεν ξεπερνάει τα 1.5μm.

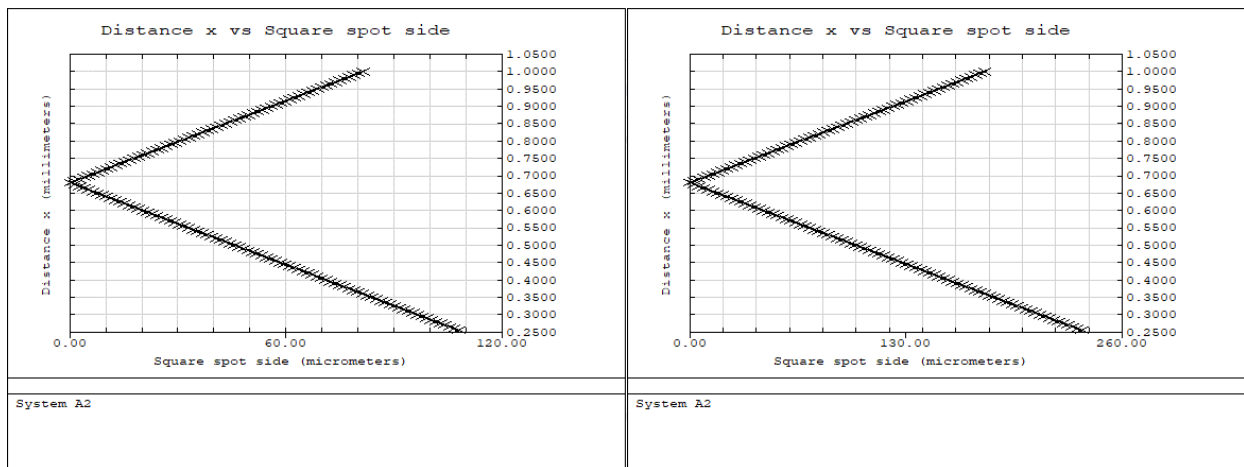


Εικόνες 7.28 & 7.29. Η διάταξη του συστήματος A2 και η μεγέθυνση στον αντικειμενικό φακό. Στην δεύτερη εικόνα παρατηρούμε ότι το σύστημα εστιάζει στη κάτω πλευρά του πλακιδίου όπου και πρόκειται να υπάρχει το υλικό της εκτύπωσης.



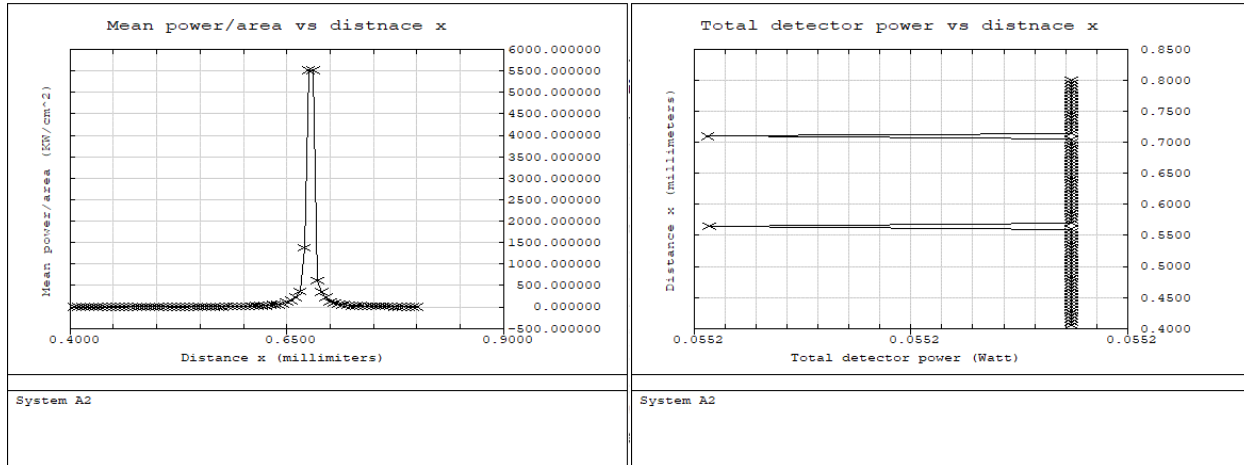
Εικόνες 7.30 & 7.31. Διαγράμματα «Focal Shift» & «MTF» στο επίπεδο εστίασης.

Παρακάτω βλέπουμε τη μεταβολή των διαστάσεων του *spot* σε συνάρτηση με την απόσταση (x) του πλακιδίου από τον τελευταίο φακό του αντικειμενικού φακού, για μάσκες με άνοιγμα 1.0x1.0mm και 2.0x2.0mm. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σύστημα η απόσταση ξεκινάει να μεταβάλλεται από σημείο εκτός της περιοχής εστίασης και για αυτό παρατηρούμε το λατινικό γράμμα V έναντι απλώς ενός ευθύγραμμου τμήματος. Το σημείο καμψής υποδεικνύει την απόσταση (x) στην οποία εστιάζει ο αντικειμενικός φακός. Από τα διαγράμματα βρίσκουμε πως αυτή η απόσταση είναι ίση με 0.680mm. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με το πρώτο σύστημα τόσο το δεύτερο σύστημα όσο και το τρίτο και το τέταρτο δεν έχουν πολλά περιθώρια στην κίνηση του γυάλινου πλακιδίου από την περιοχή εστίασης προς τον αντικειμενικό φακό. Ωστόσο επειδή τα εν λόγω συστήματα έχουν μικρές εστιακές αποστάσεις ακόμα και οι μικρές μετατοπίσεις από τη περιοχή εστίασης αλλάζουν σημαντικά τις διαστάσεις του παλμού στην επιφάνεια εργασίας. Οπότε υπάρχει η δυνατότητα αύξησης των διαστάσεων του *spot* έως τα 100μm, κάτι το οποίο είναι και ένα από τα ζητούμενα των προδιαγραφών οι οποίες έχουν ορισθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο.



Εικόνες 7.32 & 7.33. Γραφικές παραστάσεις της απόστασης x ως προς το μήκος της πλευράς του spot σε συνάρτηση με το μήκος της πλευράς του τετραγωνικού spot για μάσκα διαστάσεων $1.0 \times 1.0 \text{mm}$ (αριστερά) και $2.0 \times 2.0 \text{mm}$ (δεξιά).

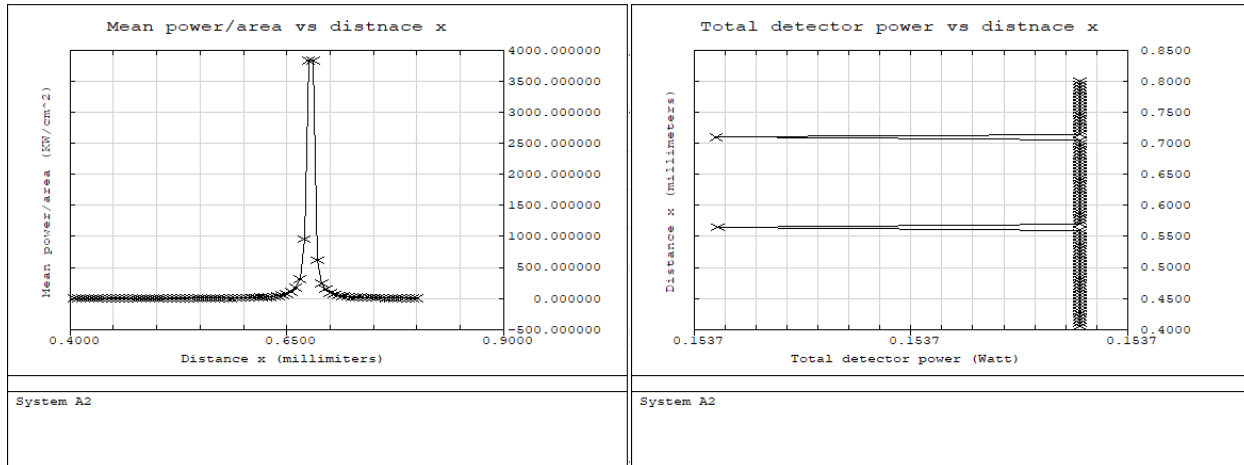
Στη συνέχεια εντοπίζονται οι γραφικές παραστάσεις της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας στο spot και της συνολικής ισχύς στον αισθητήρα (πρακτικά συνολική ισχύς στο spot). Όπως και στο προηγούμενο έτσι και σε αυτό η παράμετρος «Minimum Relative Ray Intensity» έχει ορισθεί ίση με 0.1. Στις γραφικές παραστάσεις 34 και 36 παρατηρούμε κορυφές οι οποίες αντιστοιχούν στη μέγιστη συγκέντρωση ενέργειας ανά την επιφάνεια του spot. Ως επακόλουθο αυτές οι κορυφές κατατοπίζουν την απόσταση (x) για την περιοχή εστίασης. Συγκεκριμένα η περιοχή εστίασης βρίσκεται για απόσταση (x) ίση με 0.675-0.680mm.



Εικόνες 7.34 & 7.35. Αριστερά έχουμε τη γραφικά παράσταση της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (KW/cm^2) στο spot σε συνάρτηση με την απόσταση x ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση της συνολικής ισχύς στον αισθητήρα σε συνάρτηση με την απόσταση x . Οι γραφικές παραστάσεις αναφέρονται στο σύστημα A2 με μάσκα διαστάσεων $1.0 \times 1.0 \text{mm}$.

Οι εικόνες 35 και 37 καταγράφουν την συνολική ισχύ την οποία ανιχνεύει ο αισθητήρας για διαφορετικές αποστάσεις (x) για τις περιπτώσεις. Όταν το άνοιγμα της μάσκας είναι ίσο με $1.0 \times 1.0 \text{mm}$ η καταγραμμένη ισχύς ισούται με 0.0553Watt και κατά συνέπεια η ενεργειακή απόδοση του συστήματος υπολογίζεται στα 16.26%. Ομοίως για μάσκα ανοίγματος $2.0 \times 2.0 \text{mm}$ η καταγραμμένη ισχύς είναι ίση με 0.1537Watt και η ενεργειακή απόδοση του συστήματος ανέρχεται στο 45.20%. Παρατηρούμε μικρή αύξηση της απόδοσης του συστήματος A2 σε σχέση με την απόδοση του συστήματος A1. Αυτό μπορεί να αποδοθεί

στο ότι το δεύτερο σύστημα διαθέτει έναν φακό λιγότερο από το πρώτο σύστημα (το σύστημα A1 αποτελείται από τέσσερις αχρωματικούς φακούς ενώ το σύστημα A2 αποτελείται από τέσσερις φακούς εκ των οποίων μόνο οι τρεις είναι αχρωματικοί), με αποτέλεσμα να είναι λιγότερες οι ανακλάσεις οι οποίες προέρχονται από τις επιφάνειες των φακών. Παρόλα αυτά πρακτικά η απόδοση του συστήματος A2 είναι ίση με την απόδοση του συστήματος A1.



Εικόνες 7.36 & 7.37. Αριστερά έχουμε τη γραφικά παράσταση της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (KW/cm^2) στο spot σε συνάρτηση με την απόσταση x ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση της συνολικής ισχύς στον αισθητήρα σε συνάρτηση με την απόσταση x . Οι γραφικές παραστάσεις αναφέρονται στο σύστημα A2 με μάσκα διαστάσεων $2.0 \times 2.0mm$.

Όπως και στο αρχικό σύστημα έτσι και στο παρών σύστημα ένα μεγαλύτερο άνοιγμα της μάσκας οδηγεί όχι μόνο σε μεγαλύτερη ενεργειακή απόσταση αλλά και σε μεγαλύτερη ανομοιογένεια στην πυκνότητα ενέργειας στον παλμό. Επειδή τα δυο συστήματα μοιάζουν μεταξύ τους, είναι περιττό να συμπεριληφθούν οι εικόνες των αισθητήρων μαζί με τα προφίλ των ενεργειακών κατανομών στα spots.

7.3 Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A3»

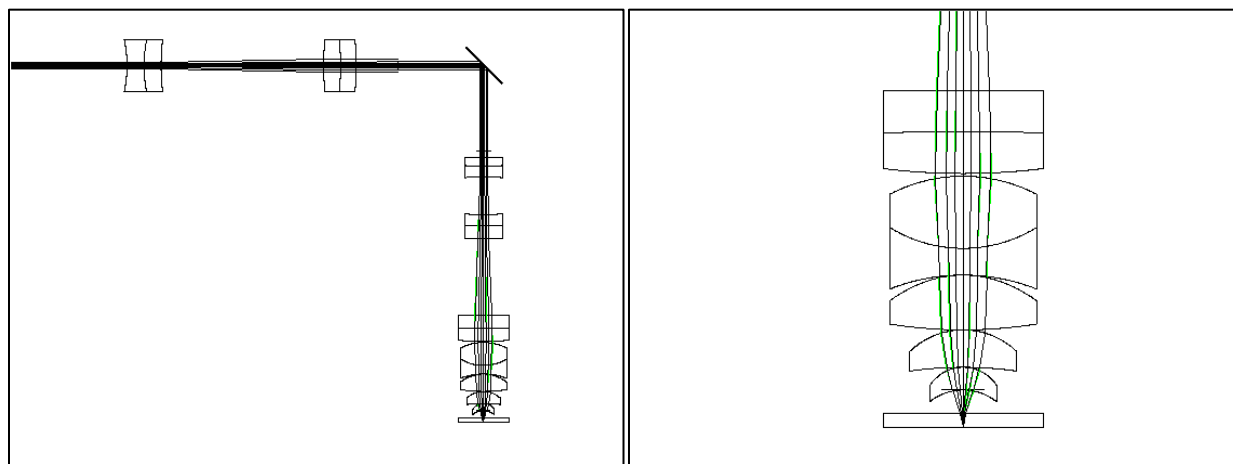
Το παρόν σύστημα έχει ως βάση τον αντικειμενικό φακό EP2-FL1.5-SA-1 με εστιακή απόσταση 1.5mm. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα για τα οποία οι αντικειμενικοί φακοί είχαν σχεδιαστεί για δέσμη διαμέτρου 3.0mm το νυν σύστημα περιορίζεται σε διάμετρο εισερχόμενης δέσμης των 2.0mm. Για αυτό θεωρούμε ότι η διαγώνιος της τετραγωνικής μάσκας δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 2.0mm και κατά συνέπεια οι πλευρές της τετραγωνικής μάσκας δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 1.4mm. Οπότε μελετάμε μόνο την περίπτωση όπου η μάσκα έχει άνοιγμα $1.0 \times 1.0mm$ (αφήνουμε την απέξω την μάσκα με άνοιγμα 2.02.0mm). Επιπλέον όπως και στο προηγούμενο σύστημα A2 έτσι και στο σύστημα A3 ο αρχικός αντικειμενικός φακός τροποποιήθηκε, κυρίως ώστε να είναι αχρωματικός στο ζεύγος των μηκών κύματος 532nm και 1064nm. Τα διαγράμματα «Focal shift» και «MTF» μας αφήνουν ικανοποιημένους και φανερώνουν πως η βελτιστοποίηση πέτυχε το σκοπό της. Το σύστημα πέρα από «achromat» είναι και diffraction limited.

Έπεται απόσπασμα του παραθύρου «Lens Data Editor» με τα χαρακτηριστικά (ακτίνες καμπυλότητας, κωνική σταθερή, ημιδιάμετροι και πάχη) των φακών μετά από τη βελτιστοποίηση του συστήματος.

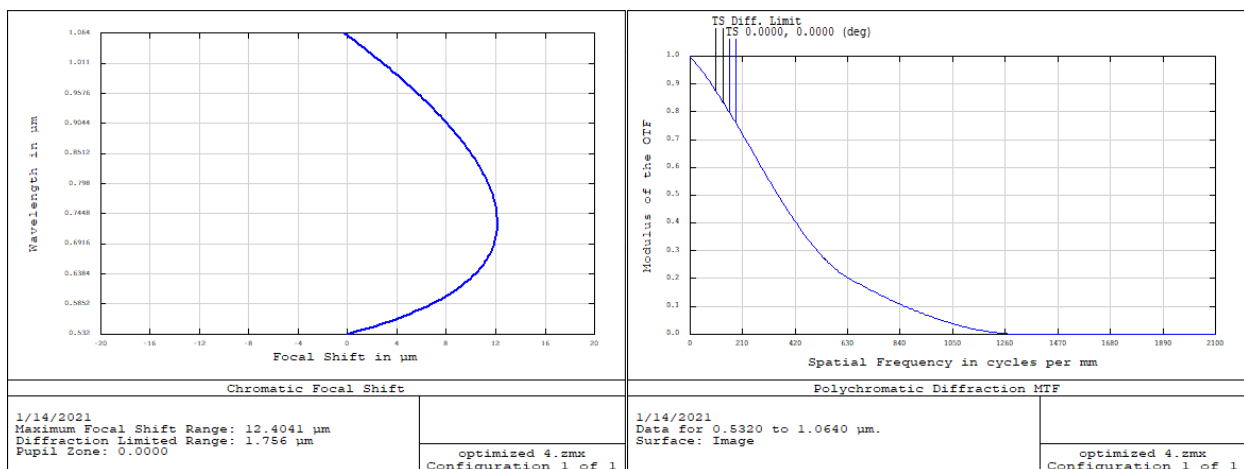
11*	Standard	Infinity		20.000			1.595	0.000					
12	Coordinat..			0.000		-	0.000		0.000	0.000	45.000		
13*	Standard	Infinity		0.000		MIRROR	6.000	U	0.000				
14	Coordinat..			-20.000		-	0.000		0.000	0.000	45.000	F	
15	Standard	Infinity		-1.500			1.625	0.000					
16*	Standard	-166.074		-2.000		N-PK52A	4.500	U	0.000				
17*	Standard	166.074	P	0.000			4.500	U	0.000				
18*	Standard	166.074	P	-2.500		SF6	4.500	U	0.000				
19*	Standard	-33.207		-9.100			4.500	U	0.000				
20*	Standard	23.774	V	-2.500		N-PK52A	4.500	U	0.000				
21*	Standard	-177.527	V	0.000			4.500	U	0.000				
22*	Standard	-177.527	P	-3.000		SF6	4.500	U	0.000				
23*	Standard	177.527	P	-18.000			4.500	U	0.000				
24*	Standard	500.000		-3.100		N-PK52A	6.000	U	0.000				
25*	Standard	-500.000	P	0.000			6.000	U	0.000				
26*	Standard	-500.000	P	-3.100		SF6	6.000	U	0.000				
27*	Standard	49.177	V	-0.200			6.000	U	0.000				
28*	Standard	-11.828	V	-5.400		N-PK52A	5.500	U	0.000				
29*	Standard	10.432		0.000			5.500	U	0.000				
30*	Standard	10.432	P	-2.000		SF6	5.500	U	0.000				
31*	Standard	-15.000		0.000			5.500	U	0.000				
32*	Standard	-8.113	V	-4.100		N-BK7	5.500	U	-0.771	V			
33*	Standard	34.697	V	0.000			5.500	U	0.000				
34*	Standard	-5.764	V	-2.800		N-BK7	4.000	U	0.000				
35*	Standard	-28.488	V	0.000			4.000	U	0.000				
36*	Standard	-2.966	V	-1.700		N-BK7	2.500	U	0.000				
37*	Standard	-4.000		0.000			2.500	U	0.000				
38	Standard	Infinity		-1.774			1.576	0.000					
39*	Standard	Infinity		-1.000		F_SILICA	6.000	U	0.000				
40	Standard	Infinity		0.000			2.331E-004	0.000					
IMA	Standard	Infinity		-			2.331E-004	0.000					

Εικόνα 7.38. Ο αντικειμενικός φακός του συστήματος A3 όπως ορίζεται στο παράθυρο «Lens Data Editor» του zemax.

Οι δυο επόμενες εικόνες δείχνουν την διάταξη του συστήματος A3. Ειδικά από την εικόνα 40 φαίνεται ότι το περιθώριο κίνησης του υάλινου πλακιδίου από τη περιοχή εστίασης προς τον αντικειμενικό φακό είναι μικρά. Όμως όπως και στην περίπτωση του συστήματος A2 έτσι και εδώ το σύστημα έχει μικρό $F\#$ (μεγάλο NA) και ακόμα οι μικρές μετατοπίσεις από το σημείο εστίασης επιδρούν σημαντικά στις διαστάσεις του spot.

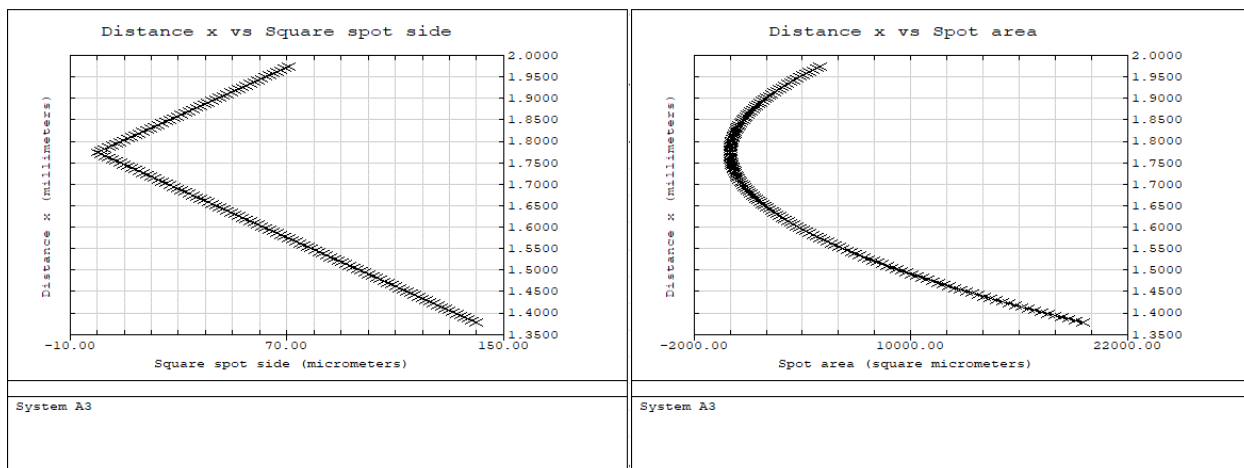


Εικόνες 7.39 & 7.40. Η διάταξη του συστήματος A3 και η μεγέθυνση στον αντικειμενικό φακό. Στην δεύτερη εικόνα παρατηρούμε ότι το σύστημα εστιάζει στη κάτω πλευρά του πλακιδίου όπου και πρόκειται να υπάρχει το υλικό της εκτύπωσης.



Εικόνες 7.41 & 7.42 . Διαγράμματα «Focal Shift» & «MTF» στο επίπεδο εστίασης.

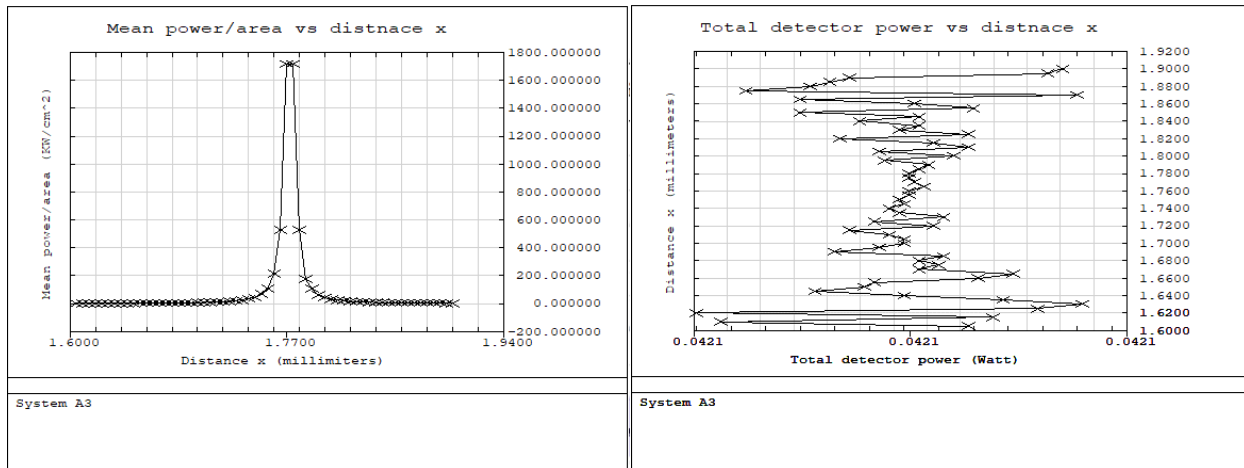
Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν την μεταβολή των διαστάσεων του spot κατά τη μετατόπιση του πλακιδίου γύρω από την περιοχή εστίασης.



Εικόνες 7.43 & 7.44. Γραφικές παραστάσεις της απόστασης x ως προς το μήκος της πλευράς του spot σε συνάρτηση με το μήκος της πλευράς του τετραγωνικού spot (αριστερά) και ως προς το εμβαδόν επιφάνειας του τετραγωνικού spot (δεξιά), για το σύστημα A3 με μάσκα 1.0x1.0mm.

Παρατηρούμε ότι και στο υπό εξέταση σύστημα οι διαστάσεις του spot φτάνουν και υπερβαίνουν τα 100 μm .

Για την ενεργειακή ανάλυση του συστήματος ομοίως με τις περιπτώσεις των υπολοίπων συστημάτων έχει θεωρηθεί ότι οι επιφάνειες όλων των φακών διαθέτουν αντί-ανακλαστικές επιστρώσεις ανακλαστικότητας 2.0%. Ενώ η παράμετρος «Minimum Relative Ray Intensity» έχει ορισθεί ίση με 0.1 για τους ίδιους λόγους με το σύστημα A1. Παρακάτω βλέπουμε τις σχετικές γραφικές παραστάσεις.



Εικόνες 7.45 & 7.46. Αριστερά έχουμε τη γραφικά παράσταση της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (KW/cm²) στο spot σε συνάρτηση με την απόσταση x ενώ δεξιά έχουμε τη γραφικά παράσταση της συνολικής ισχύς στον αισθητήρα σε συνάρτηση με την απόσταση x. Οι γραφικές παραστάσεις αναφέρονται στο σύστημα A3 με μάσκα διαστάσεων 1.0x1.0mm

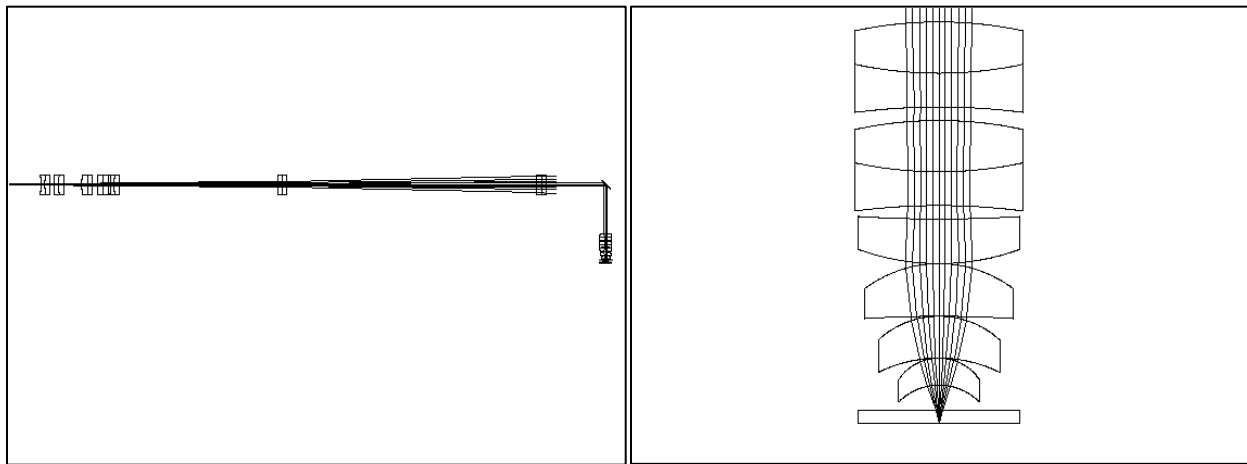
Από τη πρώτη γραφική παράσταση καθορίζουμε ότι η περιοχή της εστίασης βρίσκεται στην απόσταση (x) ίση με 1.770mm (συμπεριλαμβάνοντας το πλακίδιο από *fused silica*). Ενώ από το διάγραμμα της συνολικής ισχύος στον αισθητήρα βλέπουμε ότι ο αισθητήρας καταγράφει συνολική ισχύ 0.0421Watt και για αρχική δέσμη του *laser* στα 0.34Watt υπολογίζουμε την απόδοση του συστήματος στα 12.38%. Η απόδοση είναι μικρότερη από αυτή των δυο προηγούμενων περιπτώσεων για την αντίστοιχη μάσκα, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς το σύστημα διαθέτει περισσότερους φακούς στις επιφάνειες των οποίων ανακλάται ένα τμήμα της ακτινοβολίας. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, με ότι συνεπάγεται αυτό (πχ μείωση λειτουργικού κόστους), θα πρέπει να αποφύγουμε τη χρήση πολλών φακών ή εναλλακτικά οι αντί-ανακλαστικές επιστρώσεις θα πρέπει να είναι καλύτερες ώστε να οδηγούν σε μικρότερη ανακλαστικότητα.

7.4 Σύστημα μικρό-εκτύπωσης «SYSTEM A4»

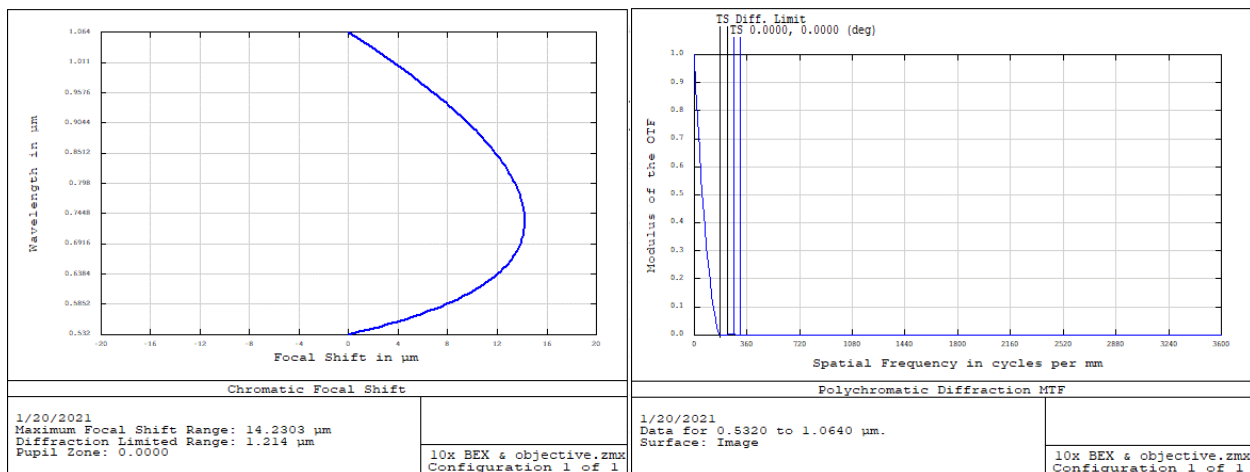
Το τελευταίο σύστημα του κεφαλαίου είναι το σύστημα A4 το οποίο σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα χρησιμοποιεί έναν *variable beam expander* με ρυθμιζόμενη μεγεθυντική ισχύ από 2X έως 10X. Ξεκάθαρα το σύστημα έχει μεγαλύτερες διαστάσεις, είναι πιο πολύπλοκο στον οπτικό σχεδιασμό και ακόμα πιο απαιτητικό στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Ωστόσο το παρών σύστημα έχει μια σημαντική διαφοροποίηση και πλεονέκτημα έναντι των προηγούμενων συστημάτων. Όπως είδαμε, τα πιο πάνω συστήματα δίνουν τη δυνατότητα της ρύθμισης των διαστάσεων του *spot* μέσω της μεταβολής της απόστασης (x) μεταξύ του τελευταίου φακού και του πλακιδίου από *fused silica* όπου και εντοπίζεται το *spot*. Αυτή η προσέγγιση αφενός απαιτεί την κίνηση του αντικειμενικού φακού ή του γυάλινου πλακιδίου και αφετέρου επιφέρει την αλλαγή στην ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (*fluence*) του *spot*. Το τελευταίο είναι και αυτό το οποίο μας απασχολεί κατά κόρον διότι η μικρό-εκτύπωση με *laser* (*LIFT technique*) καθορίζεται μεταξύ των άλλων και από την ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του *spot*. Για αυτό θα προτιμούσαμε αν η ενέργεια ανά την επιφάνεια διατηρούνταν σταθερή και να μην μειώνονταν καθώς αυξάνεται το *spot*, κάτι το οποίο συμβαίνει στις άνωθεν περιπτώσεις. Για αυτό το λόγο το σύστημα A4 διαθέτοντας έναν *variable beam expander* με μέγιστη μεγεθυντική ισχύ ίση με 10X δίνει εν μέρη τη δυνατότητα της μεταβολής των διαστάσεων του *spot* δίχως να μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ του

αντικειμενικού φακού και του γυάλινου πλακιδίου αλλά με την ρύθμιση του ανοίγματος της μάσκας. Λογικό επακόλουθο είναι πως αν οι διαστάσεις της μάσκας μειώνονται και ταυτόχρονα μειώνονται οι διαστάσεις του *spot*, τότε αναμένεται πως η ενέργεια η οποία διέρχεται από τη μάσκα θα μειώνεται έτσι ώστε η ενέργεια ανά τη μονάδα επιφάνειας στο *spot* να διατηρείται σταθερή. Συνάμα η ρύθμιση της μεγεθυντικής ισχύς από 2X έως 10X δίνει τη δυνατότητα μελέτης διαφόρων συνδυασμών ανοίγματος μάσκας και μεγεθυντικής ισχύς για την εύρεση του πιο ικανοποιητικού αποτελέσματος.

Παρακάτω βλέπουμε την διάταξη του συστήματος A4 μαζί με τον αντικειμενικό της φακό. Αμέσως μετά ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις «*Chromatic Focal Shift*» και «*MTF*». Από τη πρώτη είμαστε πλήρως ικανοποιημένοι καθώς το σύστημα είναι αχρωματικό στο ζεύγος των μηκών κύματος 532nm και 1064nm. Από τη δεύτερη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι η καμπύλη της MTF σε σχέση με τη καμπύλη του αρχικού αντικειμενικού φακού παρουσιάζει αρκετά μικρότερη μέγιστη χωρική συχνότητα για μη μηδενική αντίθεση. Αυτό οφείλεται στο ότι ο φακός δέχεται δέσμη εισόδου διαστάσεων 1.0x1.0mm έναντι δέσμη διαμέτρου 10.0mm στην οποία παρουσιάζει μη μηδενική αντίθεση σε πολύ πιο υψηλές συχνότητες..



Εικόνα 7.47 & 7.48. Η διάταξη του συστήματος A4 (αριστερά) και ο αντικειμενικός της φακός (δεξιά).

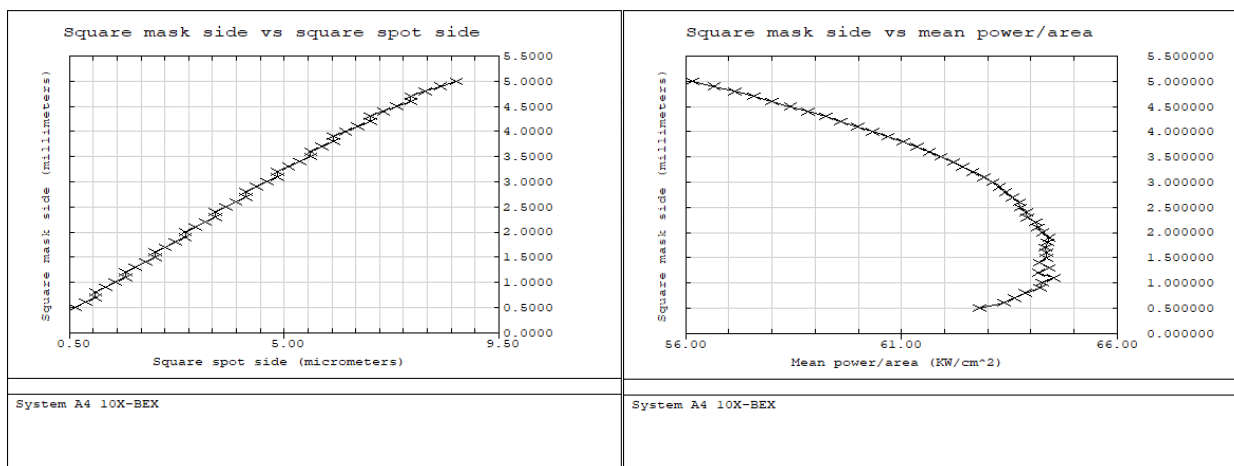


Εικόνες 7.49 & 7.50. Διαγράμματα «*Focal Shift*» & «*MTF*» στο επίπεδο εστίασης.

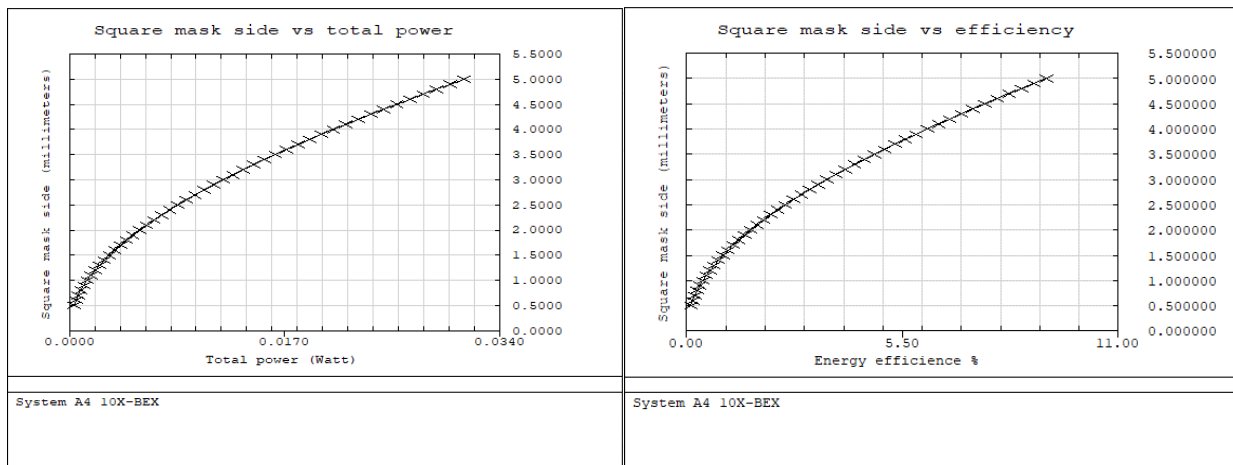
31*	Standard	Mask	Infinity	50.000		6.000	U	0.000	
32	Coordinat..			0.000	-	0.000			
33*	Standard		Infinity	0.000	MIRROR	6.000	U	0.000	
34	Coordinat..			-50.000	-	0.000			
35*	Standard	Objective	-29.518	V	-3.800	N-PK52A	6.250	U	0.000
36*	Standard		29.518	P	0.000		6.250	U	0.000
37*	Standard		29.518	P	-2.500	SF6	6.250	U	0.000
38*	Standard		-48.189	V	-1.000		6.250	U	0.000
39*	Standard		-29.518	P	-3.800	N-PK52A	6.250	U	0.000
40*	Standard		29.518	P	0.000		6.250	U	0.000
41*	Standard		29.518	P	-2.500	SF6	6.250	U	0.000
42*	Standard		-48.189	P	-1.000		6.250	U	0.000
43*	Standard		94.108	V	-3.300	N-BK7	6.000	U	0.000
44*	Standard		17.513	V	0.000		6.000	U	0.000
45*	Standard		-8.812	V	-3.900	N-BK7	5.500	U	-0.333
46*	Standard		-87.754	V	0.000		5.500	U	0.000
47*	Standard		-6.641	V	-3.100	N-BK7	4.500	U	0.000
48*	Standard		-10.068	V	0.000		4.500	U	0.000
49*	Standard		-3.605	V	-2.000	N-BK7	3.000	U	0.000
50*	Standard		-4.196	V	-1.860		3.000	U	0.000
51*	Standard		Infinity	-1.000	F_SILICA	6.000	U	0.000	
52*	Standard		Infinity	0.000		6.000	U	0.000	
IMA	Standard		Infinity	-		0.089		0.000	

Εικόνα 7.51. Ο αντικειμενικός φακός του συστήματος A4 όπως ορίζεται στο παράθυρο «Lens Data Editor» του zemax.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα στο τέταρτο σύστημα γίνεται έμφαση στην μελέτη της μεταβολής των διαστάσεων του παλμού στο επίπεδο εργασίας όχι τόσο μέσω της μεταβολής της απόστασης (x) όσο της μεταβολής των διαστάσεων της μάσκας. Για αυτό το σκοπό διαλέγουμε τρεις αποστάσεις μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του υάλινου πλακιδίου, οι οποίες είναι τα 1.850mm, 1.793mm και 1.723mm. Στη συνέχεια διαλέγουμε τη μέγιστη μεγθυντική ισχύ (10X) του *beam expander* του συστήματος και μεταβάλλουμε τις διαστάσεις της μάσκας.



Εικόνες 7.52 & 7.53. Η μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας σε συνάρτηση με τη μεταβολή των διαστάσεων του spot (αριστερά) και σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας στο spot (δεξιά). Η απόσταση x ισούται με 1.850mm ενώ η μεγθυντικής ισχύς του «beam expander» είναι ίση με 10X.



Εικόνες 7.54 & 7.55. Η μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας σε συνάρτηση με τη μεταβολή της συνολικής ισχύος στο spot (αριστερά) και σε συνάρτηση με της ενεργειακής απόδοσης (αριστερά). Η απόσταση x ισούται με 1.850mm ενώ η μεγθυντικής ισχύς του «beam expander» είναι ίση με 10X.

Όπως και στα υπόλοιπα συστήματα έτσι και στο εν λόγω σύστημα η παράμετρος «Minimum Relative Ray Intensity» έχει ορισθεί ίση με 0.1 ενώ κάθε επιφάνεια των φακών διαθέτει αντί-ανακλαστική επίστρωση ανακλαστικότητας 2.0%.

Από τις γραφικές παραστάσεις 52 και 53 παρατηρούμε ότι το μέγεθος του spot αλλάζει σχεδόν γραμμικά με την αλλαγή των διαστάσεων της μάσκας ενώ η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο spot παρουσιάζει σχετικά μικρή αλλαγή όταν αλλάζουν οι διαστάσεις της μάσκας. Πρακτικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για άνοιγμα της μάσκας στο εύρος από 1.0x1.0mm έως 3.0x3.0mm η ενέργεια να μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο του spot διατηρείται σταθερή. Προχωρώντας στην εικόνα 54, παρατηρούμε την αύξηση της συνολικής ισχύος τον αισθητήρα με των διαστάσεων της μάσκας και άρα με την αύξηση των διαστάσεων του spot. Αυτό έχει ως συνέπεια την διατήρηση σχεδόν σταθερής του fluence και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος με την αύξηση των διαστάσεων του ανοίγματος της μάσκας.

Για καλύτερη κατανόηση του τρόπου μεταβολής της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο του spot παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας. Ωστόσο εκτός από τη μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τι συμβαίνει όταν οι διαστάσεις του ανοίγματος της μάσκας διατηρούνται σταθερές ενώ μεταβάλλεται η μεγθυντική ισχύς του beam expander. Αναλυτικότερα παρατηρούμε ότι όταν φτάσουμε σε άνοιγμα μάσκας ίσο με 5.0x5.0mm παύουμε να αυξάνουμε το άνοιγμα της μάσκας και αντί αυτού μειώνουμε τη μεγθυντική ισχύ του beam expander. Το αποτέλεσμα είναι η μικρή αύξηση στις διαστάσεις του spot και συνάμα σχετικά μεγάλη αύξηση της ενέργειας (ή ισχύος) ανά μονάδα επιφάνειας στο spot. Έτσι λοιπόν, παρά το ότι η ποσότητα fluence δεν διατηρείται σταθερή αλλά αυξάνεται με την αύξηση των διαστάσεων του spot, έχουμε έναν νέο τρόπο επέμβασης στη διαδικασία μικρό-εκτύπωσης με Laser (LIFT). Προφανώς η μείωση της μεγθυντικής ισχύς μπορεί να γίνει και όταν το άνοιγμα της μάσκας είναι μικρότερο των 5.0x5.0mm. Συνεπώς έχουμε τη δυνατότητα μέσω του συνδυασμού μεγθυντικής δύναμης του beam expander και του ανοίγματος της μάσκας να οδηγηθούμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα διαστάσεων και fluence του spot. Εννοείται ότι η μετατόπιση των φακών στο εσωτερικό του variable beam expander είναι απαιτητική ως προς τη ακρίβεια των θέσεων των φακών και εν γένει είναι προτιμότερο ένα σύστημα με σταθερή μεγθυντική ισχύ και ακίνητους φακούς. Παρόλα αυτά αν το σύστημα του variable beam expander ολοκληρωθεί μέσω ενός

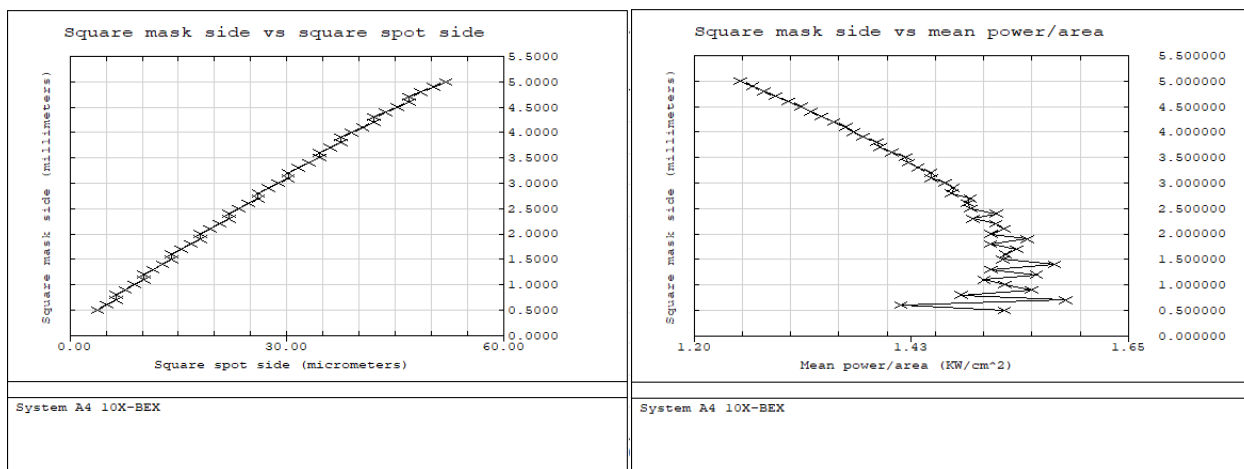
μηχανολογικού σχεδίου, τότε μέσω της στροφής κοχλιών ή δακτυλίων θα είναι εφικτή η γρήγορη και απλή ρύθμιση της μεγεθυντικής ισχύος του *beam expander* προσφέροντάς μας έναν επιπλέον παράγοντα επέμβασης στην μικρό-εκτύπωση.

Πίνακας 7.1. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος όπως η μεγεθυντική ισχύς του *beam expander* και οι διαστάσεις του ανοίγματος της μάσκας σε συσχέτιση με τα χαρακτηριστικά του *spot* όπως οι διαστάσεις του και η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας. Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύστημα A4 με την απόσταση x να ισούται με 1.850mm.

BEX Magnifying Power	Mask dimensions (mm x mm)	Distance x (mm)	Approximate spot dimensions (μm)	Peak value of irradiance power/cm² after smoothing 5 ($10^3 \frac{\text{Joule}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2}$)	Mean value of irradiance power/cm² after smoothing 5 ($10^3 \frac{\text{Joule}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2}$)	Total power ($10^{-2} \frac{\text{Joule}}{\text{sec}}$)
10X	0.5x0.5	1.850	<i>dif. limited</i>	68.444	62.80	0.0350
10X	1.0x1.0	>>	1.5x1.5	69.329	64.26	0.1402
10X	1.5x1.5	>>	2.2x2.2	70.989	64.35	0.3142
10X	2.0x2.0	>>	3.0x3.0	72.277	64.27	0.5535
10X	2.5x2.5	>>	3.8x3.8	72.013	63.75	0.8549
10X	3.0x3.0	>>	4.6x4.6	72.979	63.11	1.2146
10X	3.5x3.5	>>	5.4x5.4	73.121	61.91	1.6268
10X	4.0x4.0	>>	6.2x6.2	72.527	60.33	2.0856
10X	4.5x4.5	>>	7.1x7.1	72.380	58.42	2.5849
10X	5.0x5.0	>>	7.9x7.9	72.375	56.16	3.1181
9X	5.0x5.0	>>	8.0x8.0	86.523	64.45	3.7360
8X	5.0x5.0	>>	8.2x8.2	103.64	74.44	4.5057
7X	5.0x5.0	>>	8.6x8.6	126.59	86.97	5.5276
6X	5.0x5.0	>>	9.0x9.0	158.24	101.5	6.8894
5X	5.0x5.0	>>	9.7x9.7	201.23	116.3	8.6920

Στη συνέχεια εκτελούμε την ίδια διερεύνηση αλλάζοντας μόνον την απόσταση του αντικειμενικού φακού από το πλακίδιο από *fused silica* κάνοντάς την αυτή τη φορά ίση με 1.793mm. Ο λόγος για τον οποίο φέρνουμε το υάλινο πλακίδιο πιο κοντά στον αντικειμενικό φακό είναι διότι θέλουμε να αυξήσουμε τις διαστάσεις του *spot*. Πράγματι επιτυγχάνουμε τις διαστάσεις του *spot*, ωστόσο μαζί με αυτό, οδηγούμαστε σε μικρότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο του *spot*. Πλέον το κατά πόσο ικανοποιητικό είναι το σύστημα εξαρτάται από τις απαιτήσεις της μικρό-εκτύπωσης σε κάθε εφαρμογή. Εάν η ενέργεια ανά τη μονάδα επιφάνειας του παλμού στο επίπεδο του *spot* δεν επαρκεί για την εκάστοτε εφαρμογή τότε θα πρέπει να επανεξετάσουμε το σχέδιο ή/και την αρχική ενέργεια στον παλμό. Επιπλέον η μείωση της μεγεθυντικής ισχύς είναι σε θέση να αυξήσει το *fluence* στο επίπεδο του *spot* ενώ παράλληλα θα οδηγήσει σε μικρή αύξηση των διαστάσεών του.

Στην επόμενη σελίδα βρίσκονται οι αντίστοιχες εικόνες και πίνακας.

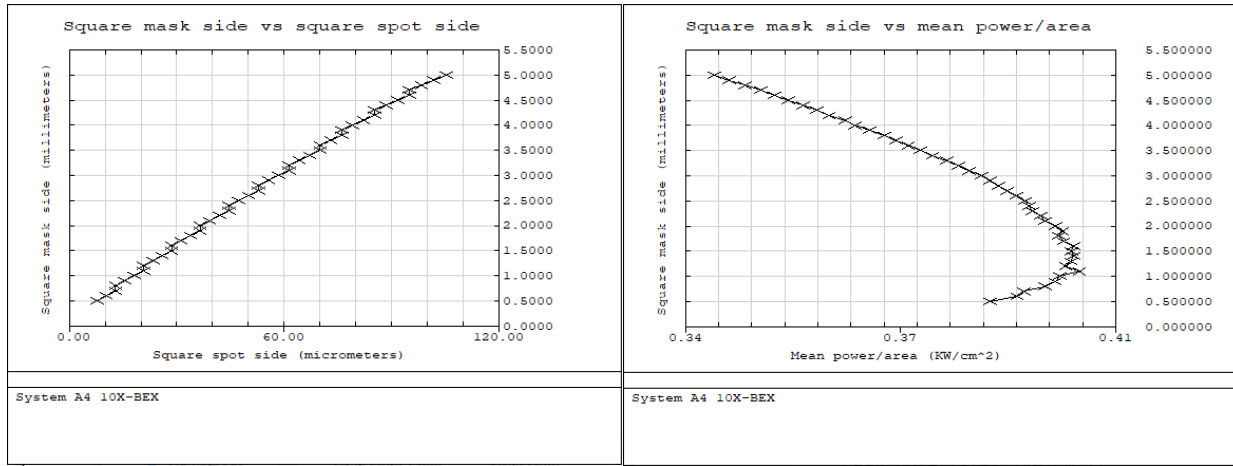


Εικόνες 7.56 & 7.57. Η μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας σε συνάρτηση με τη μεταβολή των διαστάσεων του spot (αριστερά) και σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας στο spot (δεξιά). Η απόσταση x ισούται με 1.793mm ενώ η μεγεθυντική ισχύς του «beam expander» είναι ίση με 10X.

Πίνακας 7.2. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος όπως η μεγεθυντική ισχύς του beam expander και οι διαστάσεις του ανοίγματος της μάσκας σε συσχέτιση με τα χαρακτηριστικά του spot όπως οι διαστάσεις του και η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας. Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύστημα A4 με την απόσταση x να ισούται με 1.793mm

BEX Magnifying Power	Mask dimensions (mm x mm)	Distance x (mm)	Approximate spot dimensions (μm)	Peak value of irradiance power/cm ² after smoothing 5 ($10^3 \frac{\text{Joule}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2}$)	Mean value of irradiance power/cm ² after smoothing 5 ($10^3 \frac{\text{Joule}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2}$)	Total power ($10^{-2} \frac{\text{Joule}}{\text{sec}}$)
10X	0.5x0.5	1.793	4.4x4.4	1.7551	1.5214	0.0350
10X	1.0x1.0	>>	8.9x8.9	1.7728	1.5217	0.1402
10X	1.5x1.5	>>	13.5x13.5	1.7602	1.5198	0.3142
10X	2.0x2.0	>>	18.9x18.9	1.7686	1.5077	0.5535
10X	2.5x2.5	>>	23.6x23.6	1.8190	1.4864	0.8548
10X	3.0x3.0	>>	29.0x29.0	1.7848	1.4600	1.2145
10X	3.5x3.5	>>	34.0x34.0	1.8123	1.4192	1.6268
10X	4.0x4.0	>>	39.0x39.0	1.7922	1.3648	2.0853
10X	4.5x4.5	>>	44.0x44.0	1.7721	1.2105	2.5844
10X	5.0x5.0	>>	48.8x48.8	1.7761	1.2476	3.1184
9X	5.0x5.0	>>	49.0x49.0	2.1815	1.6234	3.7362
8X	5.0x5.0	>>	49.4x49.4	2.6654	1.8962	4.5051
7X	5.0x5.0	>>	50.0x50.0	3.3876	2.2673	5.5277
6X	5.0x5.0	>>	50.0x50.0	4.4600	2.7626	6.8890
5X	5.0x5.0	>>	51.0x51.0	6.1635	3.4108	8.6918

Κατά αναλογία με τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις μειώνουμε περαιτέρω την απόσταση μεταξύ του υάλινου πλακιδίου και του αντικειμενικού φακού στα 1.723mm ώστε να λάβουμε *spot* μεγαλύτερων διαστάσεων.



Εικόνες 7.58 & 7.59. Η μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας σε συνάρτηση με τη μεταβολή των διαστάσεων του *spot* (αριστερά) και σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μέσης ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας στο *spot* (δεξιά). Η απόσταση x ισούται με 1.723mm ενώ η μεγεθυντική ισχύς του «*beam expander*» είναι ίση με 10X.

Πίνακας 7.3. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος όπως η μεγεθυντική ισχύς του *beam expander* και οι διαστάσεις του ανοίγματος της μάσκας σε συσχέτιση με τα χαρακτηριστικά του *spot* όπως οι διαστάσεις του και η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας. Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύστημα A4 με την απόσταση x να ισούται με 1.723mm

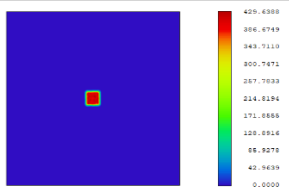
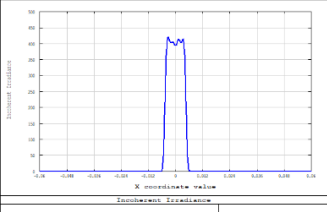
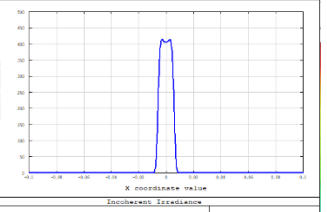
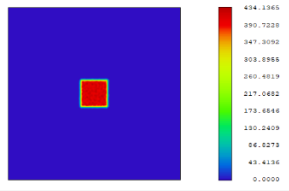
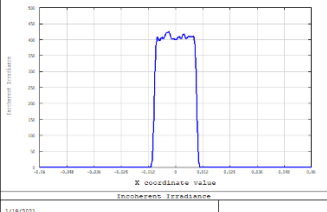
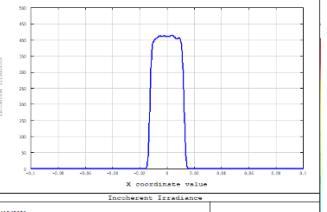
BEX Magnifying Power	Mask dimensions (mm x mm)	Distance x (mm)	Approximate spot dimensions (μm)	Peak value of irradiance power/cm² after smoothing 5 ($10^3 \frac{\text{Joule}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2}$)	Mean value of irradiance power/cm² after smoothing 5 ($10^3 \frac{\text{Joule}}{\text{sec} \cdot \text{cm}^2}$)	Total power ($10^{-2} \frac{\text{Joule}}{\text{sec}}$)
10X	0.5x0.5	1.723	9.0x9.0	0.41817	0.3860	0.0351
10X	1.0x1.0	>>	18.0x18.0	0.42471	0.3965	0.1402
10X	1.5x1.5	>>	27.2x27.2	0.43564	0.3983	0.3142
10X	2.0x2.0	>>	38.5x38.5	0.45008	0.3960	0.5536
10X	2.5x2.5	>>	48.0x48.0	0.43755	0.3913	0.8551
10X	3.0x3.0	>>	57.4x57.4	0.44096	0.3848	1.2145
10X	3.5x3.5	>>	67.2x67.2	0.44028	0.3754	1.6266
10X	4.0x4.0	>>	79.2x79.2	0.43525	0.3656	2.0854
10X	4.5x4.5	>>	89.0x89.0	0.43648	0.3555	2.5845
10X	5.0x5.0	>>	99.0x99.0	0.43262	0.3443	3.1180
9X	5.0x5.0	>>	99.0x99.0	0.52394	0.3945	3.7357
8X	5.0x5.0	>>	100.0x100.0	0.65149	0.4606	4.5054
7X	5.0x5.0	>>	100.5x100.5	0.82729	0.5515	5.5281
6X	5.0x5.0	>>	100.5x100.5	1.09340	0.6745	6.8893
5X	5.0x5.0	>>	101.0x101.0	1.52560	0.8391	8.6920

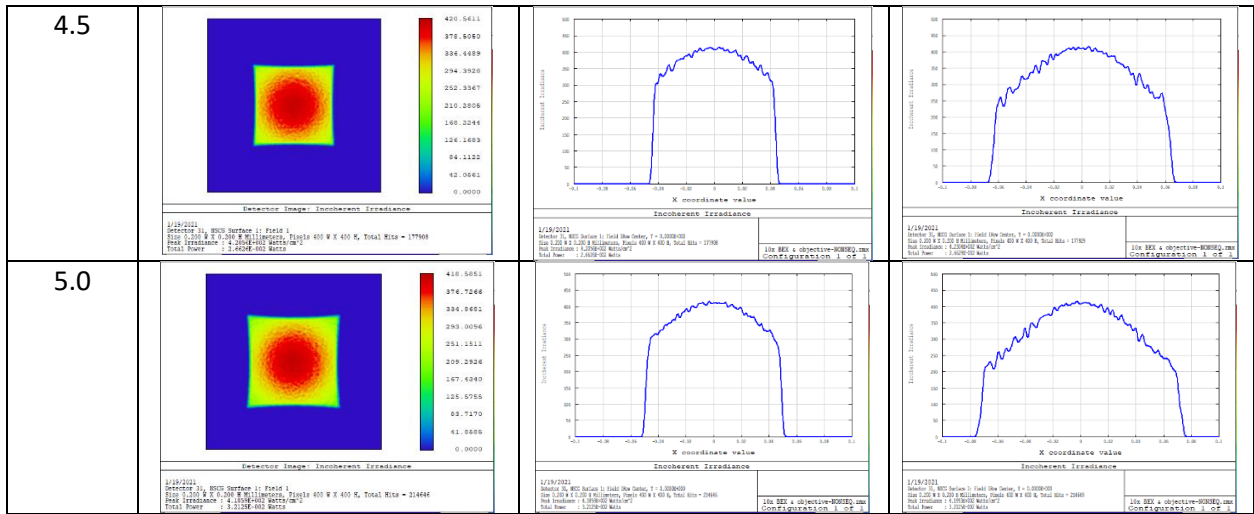
Όπως διαπιστώνουμε από τους προηγούμενους πίνακες και γραφικές παραστάσεις το σύστημα A4 είναι σε θέση να παρέχει μεταβολή των διαστάσεων του *spot* ξεκινώντας περίπου από 1.5μm και φτάνοντας περίπου στα 100μm. Δυστυχώς σε όλο αυτό το εύρος δεν είναι εφικτή η διατήρηση σταθερή τιμής του *fluence*. Ωστόσο αν μειώσουμε το εύρος των διαστάσεων του *spot* και κρατήσουμε την απόσταση x σταθερή, τότε είναι εφικτό να λάβουμε διαφορετικές διαστάσεις του *spot* με το *fluence* να διατηρείται σταθερό. Για παράδειγμα στην απόσταση x των 1.793mm είναι εφικτό να λάβουμε *spot* διαστάσεων 5.0x5.0mm έως και 25.0x25.0mm και με το *fluence* να κυμαίνεται μεταξύ 1.52-1.48 Joule/cm². Την ίδια στιγμή η μόνη παράμετρος την οποία μεταβάλλουμε είναι οι διαστάσεις της μάσκας. Οι αποστάσεις μεταξύ της μάσκας και του αντικειμενικού φακού και μεταξύ του γυάλινου πλακιδίου και του αντικειμενικού φακού διατηρούνται σταθερές. Ομοίως η μεγεθυντική ισχύς του *beam expander* διατηρείται και αυτή σταθερή, αν και με την αυξομείωσή της είναι εφικτή η περαιτέρω ρύθμιση του συστήματος ώστε να έχουμε ακόμα μικρότερη διακύμανση του *fluence* στο ίδιο ή μεγαλύτερο εύρος διαστάσεων του *spot*.

Εν τούτοις είδη από το πρώτο σύστημα A1 διαπιστώσαμε ότι ένα μεγάλο άνοιγμα της μάσκας, σε συνδυασμό με το γκαουσιανό προφίλ του παλμού, συντελεί στην ανομοιογενή κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του παλμού στο επίπεδο του *spot*. Έτσι και σε αυτή τη περίπτωση διαπιστώνουμε ότι το άνοιγμα της μάσκας σε συνδυασμό με τη μεγεθυντική ισχύ επηρεάζουν την κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του *spot*.

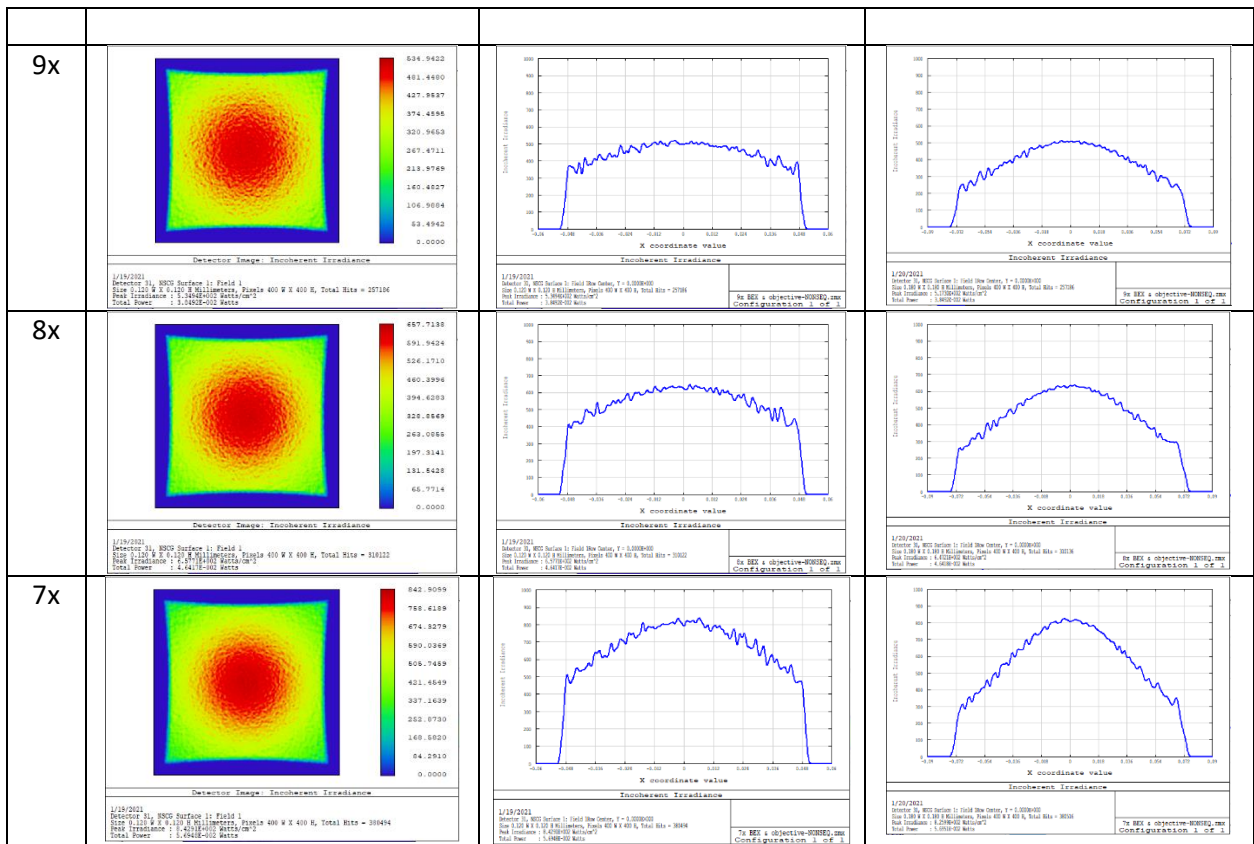
Στους δυο επόμενους πίνακες συγκεντρώνονται οι εικόνες των *spot* και μαζί με τα προφίλ τους ώστε να είναι κατανοητό πως οι διαστάσεις μάσκας και μεγεθυντική ισχύς του beam expander επηρεάζουν την κατανομή της ενέργειας στο *spot*.

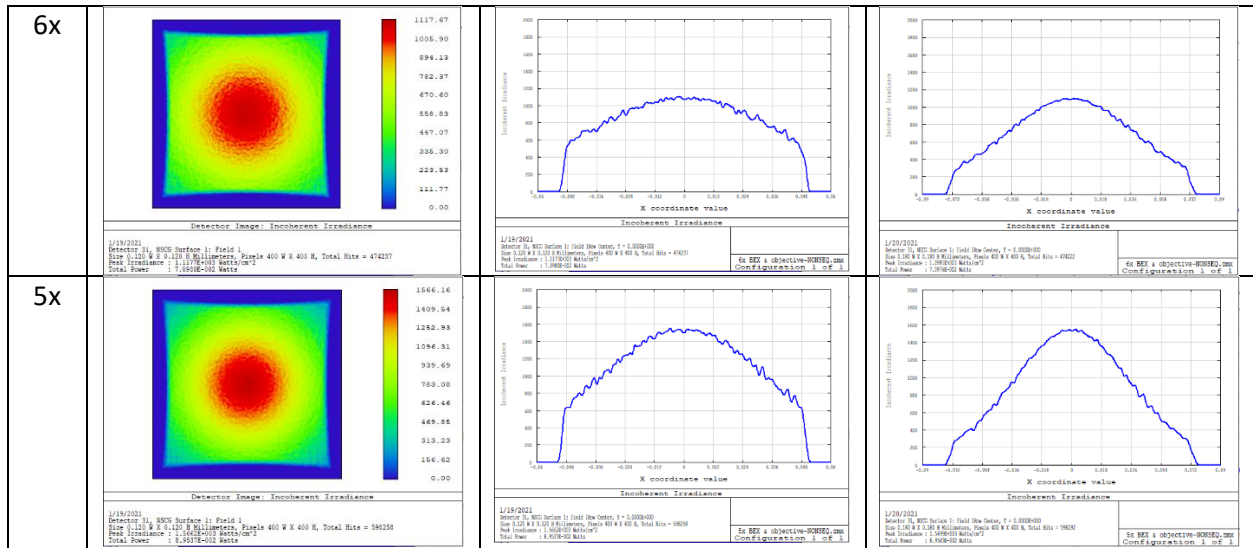
Πίνακας 7.4. Ενδεικτικές εικόνες από τον αισθητήρα μαζί με τα προφίλ των *spot* για διαφορετικά ανοίγματα μάσκας και σταθερή μεγεθυντική ισχύ ίση με 10X.

Άνοιγμα μάσκας	Εικόνα αισθητήρα (<i>spot</i>)	Οριζόντιο προφίλ	Διαγώνιο προφίλ
0.5	 <p>Detector Image - Incident Irradiance</p> <p>1/18/2021 Detector #: 805 Surface #: Field 1 Size: 0.120 X 0.120 X 0.111mmeters, Pixels: 400 X 400 X, Total Bits = 2413 Pixel Irradiance: 1.4124000 Watts/cm² Total Power: 1.4124000 Watts</p>	 <p>1/18/2021 Detector #: 805 Surface #: Field 1, Total Bits: 2413 Size: 0.120 X 0.120 X 0.111mmeters, Pixels: 400 X 400 X, Total Bits = 2413 Pixel Irradiance: 1.4124000 Watts/cm² Total Power: 1.4124000 Watts</p> <p>1.0000000000000000 Configurati3on_1_of_1</p>	 <p>1/18/2021 Detector #: 805 Surface #: Field 1, Total Bits: 2413 Size: 0.120 X 0.120 X 0.111mmeters, Pixels: 400 X 400 X, Total Bits = 2413 Pixel Irradiance: 1.4124000 Watts/cm² Total Power: 1.4124000 Watts</p> <p>1.0000000000000000 Configurati3on_1_of_1</p>
1.0	 <p>Detector Image - Incident Irradiance</p> <p>1/18/2021 Detector #: 805 Surface #: Field 1 Size: 0.120 X 0.120 X 0.111mmeters, Pixels: 400 X 400 X, Total Bits = 9450 Pixel Irradiance: 1.4124000 Watts/cm² Total Power: 1.4124000 Watts</p>	 <p>1/18/2021 Detector #: 805 Surface #: Field 1, Total Bits: 9450 Size: 0.120 X 0.120 X 0.111mmeters, Pixels: 400 X 400 X, Total Bits = 9450 Pixel Irradiance: 1.4124000 Watts/cm² Total Power: 1.4124000 Watts</p> <p>1.0000000000000000 Configurati3on_1_of_1</p>	 <p>1/18/2021 Detector #: 805 Surface #: Field 1, Total Bits: 9450 Size: 0.120 X 0.120 X 0.111mmeters, Pixels: 400 X 400 X, Total Bits = 9450 Pixel Irradiance: 1.4124000 Watts/cm² Total Power: 1.4124000 Watts</p> <p>1.0000000000000000 Configurati3on_1_of_1</p>



Πίνακας 7.5. Ενδεικτικές εικόνες από τον αισθητήρα μαζί με τα προφίλ των spot για διαφορετικές μεγεθυντικές δυνάμεις του heat expander υπό σταθερό άνοιγμα μάσκας ίσο με 5.0x5.0mm.





Από τους πιο πάνω πίνακες είναι φανερό ότι η κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του παλμού στο επίπεδο του *spot* είναι σχετικά ομοιόμορφη για μεγάλη μεγεθυντική ισχύ (*magnifying power*) του *beam expander* ίση με 10X σχετικά μικρό άνοιγμα της μάσκας το οποίο φτάνει έως τα 2.5-3.0mm. Ενώ για μεγάλες διαστάσεις μάσκας (πχ 5.0x5.0mm) η κατανομή της ακτινοβολίας είναι ολοφάνερα ανομοιογενής. Επιπλέον η κατάσταση επιδεινώνεται όταν κρατώντας μεγάλο άνοιγμα μάσκας μειώνουμε τη μεγεθυντική ισχύ του *beam expander*.

Για την επίτευξη ομοιογενής κατανομής της έντασης τύπου *top hat* ή *π-shape* του παλμού *laser*, προτείνεται η χρήση κατάλληλης οπτικής διάταξης τύπου *π-shaper*. Οι εν λόγω διατάξεις υπάρχουν εν γένει διατίθενται και στο εμπόριο δίχως αυτό να σημαίνει ότι υπάρχει διαθέσιμη και κατάλληλη διάταξη για την εφαρμογή μας. Δυστυχώς ο χρόνος δεν ήταν επαρκής ώστε να γίνει ενδελεχής μελέτη και παρουσίαση οπτικών συστημάτων τύπου *π-shaper*.

7.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο νυν κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση και ανάλυση των τεσσάρων συστημάτων στη βάση των τεσσάρων αντικειμενικών φακών του προηγούμενου κεφαλαίου. Είδη από το προηγούμενο κεφάλαιο είναι φανερό ότι ο χαρακτηρισμός των φακών και εν γένει ενός οπτικού συστήματος περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους για τις οποίες κάθε σύστημα χαρακτηρίζεται ως λιγότερο ή περισσότερο ικανοποιητικό με βάση τις αρχικές προδιαγραφές. Ωστόσο είναι αρκετά δύσκολο να κατανοήσουμε ποιες από τις παραμέτρους έχουν τη μεγαλύτερη σημασία προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα σύστημα. Για αυτό στο συγκεκριμένο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται νέα κριτήρια αξιολόγησης (πχ. ενεργειακή απόδοση) με βάση των οποίων ο πελάτης μπορεί να καταλάβει καλύτερα κατά πόσο το σύστημα ικανοποιεί ή δεν ικανοποιεί τις ανάγκες του.

Στους δυο επόμενους πίνακες συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων συστημάτων μικρό-εκτύπωσης με laser (LIFT technique).

Πίνακας 7.6. Σύνοψη βασικών ενεργειακών χαρακτηριστικών των συστημάτων A1, A2 και A3. Η αρχική ισχύς του laser ισούται με 0.34Watt κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε 170μJ στα 532nm και 170μJ στα 1064nm με συχνότητα επανάληψης παλμών να βρίσκεται στα 1000Hz.

Παράμετρος	Σύστημα A1		Σύστημα A2		Σύστημα A3	
	1.0x1.0mm	2.0x2.0mm	1.0x1.0mm	2.0x2.0mm	1.0x1.0mm	2.0x2.0mm
Άνοιγμα μάσκας	1.0x1.0mm	2.0x2.0mm	1.0x1.0mm	2.0x2.0mm	1.0x1.0mm	2.0x2.0mm
Απόδοση	15.90%	44.29%	16.26%	45.20%	12.38%	-
Συνολική ισχύς (Watt) στο spot	0.054045	0.15058	0.0553	0.1537	0.0421	-

Πίνακας 7.7. Σύνοψη βασικών ενεργειακών χαρακτηριστικών του συστήματος A4. Η αρχική ισχύς του laser ισούται με 0.34Watt κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε 170μJ στα 532nm και 170μJ στα 1064nm με συχνότητα επανάληψης παλμών να βρίσκεται στα 1000Hz.

Μεγεθυντική ισχύς του beam expander	Άνοιγμα μάσκας (mm)	Συνολική ισχύς (10^{-2} Watt)	Ενεργειακή απόδοση (%)
10X	0.5x0.5	0.0351	0.10
10X	1.0x1.0	0.1402	0.41
10X	1.5x1.5	0.3142	0.92
10X	2.0x2.0	0.5536	1.63
10X	2.5x2.5	0.8551	2.52
10X	3.0x3.0	1.2145	3.57
10X	3.5x3.5	1.6266	4.78
10X	4.0x4.0	2.0854	6.13
10X	4.5x4.5	2.5845	7.60
10X	5.0x5.0	3.1180	9.17
9X	5.0x5.0	3.7357	10.99
8X	5.0x5.0	4.5054	13.25
7X	5.0x5.0	5.5281	16.26
6X	5.0x5.0	6.8893	20.26
5X	5.0x5.0	8.6920	25.56

Ολοκληρώνετε τη κεφάλαιο πρέπει να δώσουμε ενδεικτικές βιβλιογραφικές αναφορές [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26] & [27], οι οποίες θα βοηθήσουν τόσο στην χρήση του zemax όσο και στην σχεδίαση οπτικών συστημάτων μεταξύ των οποίων είναι και οι αντικειμενικοί φακοί.

*spot : Το αποτύπωμα λόγω εστίασης ή απεικόνισης στην επιφάνεια εργασίας (κάτω επιφάνεια ενός πλακιδίου από fused silica).

*Απόσταση x : Ορίζεται η απόσταση της κάτω επιφάνειας του πλακιδίου από fused silica από το κέντρο της επιφάνειας του τελευταίου φακού του αντικειμενικού φακού.

Κεφάλαιο 8^ο

Προτάσεις για την εξέλιξη των συστημάτων

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε τα αρχικά βήματα στη σχεδίαση και ανάλυση οπτικών συστημάτων όπως οι αχρωματικοί φακοί (*achromats*), οι διευρυντές παλμών *laser* (*laser beam expanders*), οι αντικειμενικοί φακοί (*objective lenses*) αλλά και συστήματα άμεσης εμπρόσθιας μεταφοράς/εκτύπωσης με *laser* (*Laser Induced Forward Transfer-LIFT*). Σίγουρα έχουμε ορισμένα αποτελέσματα, όπως τα σχέδια των αντικειμενικών φακών, τα οποία ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής μπορούν να χαρακτηρισθούν ως λιγότερο, περισσότερο ή καθόλου ικανοποιητικά. Επιπλέον επειδή κάθε εφαρμογή και κάθε πελάτης μπορεί να χαρακτηρίζεται από διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης, αφήνουμε στη κρίση του αναγνώστη τα επιτεύγματα της εργασίας. Για αυτό κλείνουμε την μεταπτυχιακή εργασία εστιάζοντας σε μερικά σημεία τα οποία χρήζουν περισσότερη επιμέλεια αλλά και σε προτάσεις για την εξέλιξη των συστημάτων.

Είδη από στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώσαμε, ότι για την ομοιογενή κατανομή της ακτινοβολίας στο προφίλ του παλμού του *laser* στο επίπεδο της εστίασης, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε *π-shaper*. Άρα λοιπόν θα πρέπει να σχεδιαστεί και να μελετηθεί ενδελεχώς τουλάχιστον μια εν λόγω διάταξη. Ομοίως θα μπορούσαμε να προσθέσουμε κάμερα ή/και ενδοφθάλμιο σύστημα, μαζί με κατάλληλη πηγή φωτισμού, για την καταγραφή/παρατήρηση του εκτυπωμένου σχηματισμού. Προφανώς υπάρχουν πολλές παραλλαγές και δυνατότητες (πχ. μηχανισμοί ζουμ) για σχεδίαση σε αυτό το τομέα. Ακόμα θα μπορούσαμε να προσθέσουμε *diode laser* χαμηλής ισχύος, για την καθοδήγηση της κύριας δέσμης *laser*.

Ωστόσο προτού προσθέσουμε περιφερειακά συστήματα, θα πρέπει να επιλέξουμε το ή τα συστήματα τα οποία χρειαζόμαστε. Συγκεκριμένα είδαμε τέσσερα διαφορετικά συστήματα κάθε ένα με μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων. Εάν λάβουμε κατά νου τις αρχικές προδιαγραφές τις οποίες πρέπει να πληροί το σύστημα, τότε θα διαπιστώσουμε ότι η λύση του προβλήματός μας βρίσκεται κοντά στο τέταρτο σύστημα του προηγούμενου κεφαλαίου. Παρόλα αυτά δεν αποκλείεται να γίνει αναθεώρηση των προδιαγραφών με βάση τις παρατηρήσεις που έχουν καταγραφεί. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των συστημάτων. Αν επιλέξουμε έναν αντικειμενικό φακό στη λογική του τέταρτου αντικειμενικού φακού, τότε θα πρέπει να ασχοληθούμε με την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων τύπου *distortion* τα οποία φανερώνονται αν αυξήσουμε την διάμετρο της δέσμης εισόδου έως τα 10.0mm. Από κει και έπειτα ενδέχεται να έχει νόημα να αυξήσουμε την διάμετρο της δέσμης εισόδου (*entrance pupil*) στον φακό, προκειμένου να εξασφαλίσουμε μεγαλύτερο εύρος διαστάσεων του *spot* από τη μεταβολή των διαστάσεων της μάσκας μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής. Εκτός των αντικειμενικών φακών ιδιαίτερο νόημα έχει η βελτίωση των *beam expanders*, κυρίως μέσω της αύξησης της ενεργειακής τους απόδοσης. Δεν είναι μυστικό ότι οι εμπορικοί *achromat* και *apochromat beam expanders* στον μπροστινό φακό (υποδοχή του παλμού) έχουν έναν απλό και όχι αχρωματικό φακό. Επιπροσθέτως όπως είδη έχει σημειωθεί, συνίσταται η αντικατάσταση του SF6 με υλικά τα οποία έχουν υψηλές τιμές *laser damage threshold*.

Τέλος πέραν της βελτίωσης των σχεδίων απαιτείται να γίνει και πιο λεπτομερής εξέταση και μελέτη των συστημάτων όπως είναι το τελευταίο στάδιο της οπτικής σχεδίασης το οποίο είναι η μελέτη των ανοχών του συστήματος (*tolerance analysis*).

Βιβλιογραφία

- [1] N. Seifert, G. Betz Institut fur Allgemeine Physik, “Computer simulations of laser-induced ejection of droplets”, TU Wien, Wiedner Hauptstr, 8–10, A-1040 Wien, Austria Received 1 September 1997; accepted 27 December 1997
- [2] Ralph Pohl, LASER-INDUCED FORWARD TRANSFER OF PURE METALS, TOWARDS 3D PRINTING
- [3] Nagel, M., & Lippert, T. (2012). “Laser-induced forward transfer for the fabrication of devices”. In S. C. Singh, H. Zeng, C. Guo, & W. Cai (Eds.), *Nanomaterials: processing and characterization with lasers* (pp. 255-316). Wiley-VCH
- [4] I. Zergioti, S. Mailis, N. Vainos, “Microdeposition of metal and oxide structures using ultrashort laser pulses”, *Appl. Phys. A*, 66 (1998) 579
- [5] Vahit Sametoglu, Vincent T. K. Sauer, and Ying Y. Tsui, “Production of 70-nm Cr dots by laser-induced forward transfer”, *Optics Express* Vol. 21, Issue 15, pp. 18525-18531 (2013)
- [6] V. Sametoglu, V. Sauer, and Y. Y. Tsui, “Nanoscale laser-induced forward transfer through patterned Cr films,” *Appl. Phys., A Mater. Sci. Process.* 110(4), 823–827 (2013)
- [7] A.I. Kuznetsov*, J. Koch, and B.N. Chichkov, “Laser-induced backward transfer of gold nanodroplets”, *Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithalle 8, 30419 Hannover, Germany*
- [8] A.I. Kuznetsov · J. Koch · B.N. Chichkov, “Nanostructuring of thin gold films by femtosecond lasers”, Received: 22 July 2008 / Accepted: 1 August 2008 / Published online: 15 August 2008 © Springer-Verlag 2008
- [9] E. Hecht, “Optics”, 4th edition, Addison Wesley, New York, 2002, p. 470
- [10] E. Hecht, “Optics”, 4th edition, Addison Wesley, New York, 2002, p. 163
- [11] ISO 7944 (Spectrum lines and Abbe number definition)
- [12] E. Hecht, “Optics”, 4th edition, Addison Wesley, New York, 2002, p. 169
- [13] E. Hecht, “Optics”, 4th edition, Addison Wesley, New York, 2002, p. 159
- [14] Igor Nesterenko, “The Initial Approximations for Achromatic Doublets of the XVIII Century”, FRIB/NSCL, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA
- [15] Max J. Riedl, “Optical Design Applying the Fundamentals”, SPIE PRESS, USA, 2009, p. 45
- [16] Edmund optics, Knowledge Center, Application Notes, Lasers , Laser Beam Expanders, (edmundoptics.com)
- [17] E. Hecht, “Optics”, 4th edition, Addison Wesley, New York, 2002, p. 246, rel. (6.8)

-
- [18] E. Hecht, "Optics", 4th edition, Addison Wesley, New York, 2002, p. 169, rel. (5.37)
- [19] Ralf Jedamzik, Volker Dietrich, Thomas Rossmeier, "Bulk Laser Damage Threshold of Optical Glasses", SCHOTT AG, Advanced Optics, 55122 Mainz, 2012
- [20] Zemax OpticStudio 19.8, User Manual, October 2019
- [21] Zemax OpticStudio 19.8, Getting Started, October 2019
- [22] Joseph M. Geary, "Introduction to Lens Design with practical Zemax examples", Willmann-Bell Inc. 2002
- [23] Brian J. J. Thomson, "LENS DESIGN", 4th edition, by Taylor & Francis Group, LLC, 2006
- [24] Yueqian Zhang and Herbert Gross, "Systematic design of microscope objectives. Part I: System review and analysis", Advanced Optical Technologies, De Gruyter, 2019
- [25] Yueqian Zhang and Herbert Gross, "Systematic design of microscope objectives. Part II: Lens modules and design principles", Advanced Optical Technologies, De Gruyter, 2019
- [26] Yueqian Zhang and Herbert Gross, "Systematic design of microscope objectives. Part III: miscellaneous design principles and system synthesis", Advanced Optical Technologies, De Gruyter, 2019
- [27] Jeremy Sanderson, "Understanding Light Microscopy", John Wiley & Sons Ltd, 2019

ΕΙΚΟΝΕΣ

(1) Alberto Piqué¹, Heungsoo Kim¹ and Craig B. Arnold², "LASER FORWARD TRANSFER OF ELECTRONIC AND POWER GENERATING MATERIALS",¹U.S. Naval Research Laboratory, Washington DC; ²Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, Princeton, NJ.

(2) P. Serra, M. Duocastella, J.M.Fernandez-Pradas, and J.L. Morenza, Cell and organ printing, ch. Laser-induced forward transfer: a laser-based technique for biomolecules printing, Dordrecht: Springer Netherlands 2010, pp.53-80.

(3) Edmund optics knowledge-center, <https://www.edmundoptics.com>

Παράθεμα

Έπειτα από τη προτροπή των καθηγητών της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας, έγινε η προσθήκη του παραθέματος. Συγκεκριμένα προστέθηκαν “*prescription data*” των τεσσάρων συστημάτων εκτύπωσης, όπως ελήφθησαν από το *zemax (analyze/reports/prescription data)*. Η προσθήκη έγινε προκειμένου να βοηθηθεί όποιος θελήσει να αναπαράγει (σε λογισμικό ή στην παραγωγή) τα συστήματα της μεταπτυχιακής εργασίας.

Σύστημα A1

System/Prescription Data

File : E:\Thesis laser printers\A1\BEX & Objective Initial-Distance.ZMX

Title:

Date : 2/25/2021

GENERAL LENS DATA:

Surfaces : 25

Stop : 1

System Aperture : Float By Stop Size = 0.75

Fast Semi-Diameters : On

Field Unpolarized : On

Convert thin film phase to ray equivalent : On

J/E Conversion Method : X Axis Reference

Glass Catalogs : SCHOTT INFRARED

Ray Aiming : Off

Apodization : Gaussian, factor = 1.00000E+00

Reference OPD : Exit Pupil

Paraxial Rays Setting : Ignore Coordinate Breaks

Method to Compute F/# : Tracing Rays

Method to Compute Huygens Integral : Auto

Print Coordinate Breaks : On

Multi-Threading : On

OPD Modulo 2 Pi : Off

Temperature (C) : 2.00000E+01

Pressure (ATM) : 1.00000E+00
Adjust Index Data To Environment : Off
Effective Focal Length : 7.501544 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length : 7.501544 (in image space)
Back Focal Length : 0.06347131
Total Track : 98.80034
Image Space F/# : 5.001029
Paraxial Working F/# : 4.616182
Working F/# : 4.61039
Image Space NA : 0.1076848
Object Space NA : 0.001499998
Stop Radius : 0.75
Paraxial Image Height : 0
Paraxial Magnification : 0
Entrance Pupil Diameter : 1.5
Entrance Pupil Position : 0
Exit Pupil Diameter : 0.2699375
Exit Pupil Position : -1.286495
Field Type : Angle in degrees
Maximum Radial Field : 0
Primary Wavelength [μm] : 0.532
Angular Magnification : 0
Lens Units : Millimeters
Source Units : Watts
Analysis Units : Watts/cm²
Afocal Mode Units : milliradians
MTF Units : cycles/millimeter
Include Calculated Data in Session File : On
Include Calculated Data in Session File : On

Fields : 1

Field Type : Angle in degrees

#	X-Value	Y-Value	Weight
1	0.000000	0.000000	1.000000

Vignetting Factors

#	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN		
1	0.000000		0.000000		0.000000	0.000000	0.000000

Wavelengths : 2

Units: μm

#	Value	Weight
1	0.532000	1.000000
2	1.064000	1.000000

Predicted coordinate ABCD matrix:

A = 7.149
B = 0
C = 0
D = 7.149

SURFACE DATA SUMMARY:

Surf Diam	Type	Radius Conic	Thickness Comment	Glass	Clear Diam	Chip Zone	Mech
OBJ 0	STANDARD	Infinity	500			0 0	0
STO 1.5	STANDARD 0	Infinity	5			1.5	0
2 12	STANDARD 0	-29.61582 BEX	4	N-PK52A		12	0
3 12	STANDARD 0	29.61582	0			12	0

4	STANDARD	29.61582	4	SF6	12	0	
12	0						
5	STANDARD	48.72389	38.20034		12	0	
12	0						
6	STANDARD	54.90655	4	N-PK52A	12	0	
12	0						
7	STANDARD	-54.90655	0		12	0	
12	0						
8	STANDARD	-54.90655	3.6	SF6	12	0	
12	0						
9	STANDARD	-96.04409	20		12	0	
12	0						
10	STANDARD	Infinity	20		3.205505	0	
3.205505	0	Mask					
11	COORDBRK	- 0		-	-	-	-
12	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	12	0	
12	0						
13	COORDBRK	- -20		-	-	-	-
14	STANDARD	-20.18936	-3	N-PK52A	6	0	6
0	Objective						
15	STANDARD	15.47977	0		6	0	6
0							
16	STANDARD	15.47977	-2	SF6	6	0	6
0							
17	STANDARD	24.36456	-2		6	0	6
0							
18	STANDARD	-20.18936	-3	N-PK52A	6	0	6
0							
19	STANDARD	15.47977	0		6	0	6
0							
20	STANDARD	15.47977	-2	SF6	6	0	6
0							
21	STANDARD	24.36456	0		6	0	6
0							
22	STANDARD	Infinity	-9.98		2.317213	0	
2.317213	0						

23 12	STANDARD 0	Infinity	-1	F_SILICA	12	0
24 12	STANDARD 0	Infinity	0		4.234308	0
IMA 0	STANDARD	Infinity		0.01062146	0	0.01062146

SURFACE DATA DETAIL:

Surface OBJ STANDARD

Surface STO STANDARD

Surface 2 STANDARD BEX

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 3 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 4 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 5 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 6 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 7 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 8 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 9 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 10 STANDARD Mask

Aperture : Rectangular Aperture

X Half Width : 0.5

Y Half Width : 0.5

Surface 11 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 12 STANDARD

Mirror Substrate : Curved, Thickness = 2.40000E-01

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 13 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 14 STANDARD Objective

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 15 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 16 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 17 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 18 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 19 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 20 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 21 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 22 STANDARD

Surface 23 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 24 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.1171542

Surface IMA STANDARD

EDGE THICKNESS DATA:

Surf	X-Edge	Y-Edge
OBJ	500.000000	500.000000
STO	4.385849	4.385849
2	5.228302	5.228302
3	0.000000	0.000000
4	3.756689	3.756689

5	38.158310	38.158310
6	3.342371	3.342371
7	0.000000	0.000000
8	3.741217	3.741217
9	20.187597	20.187597
10	20.000000	20.000000
11	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000
13	-20.224134	-20.224134
14	-2.482382	-2.482382
15	0.000000	0.000000
16	-2.108084	-2.108084
17	-2.409534	-2.409534
18	-2.482382	-2.482382
19	0.000000	0.000000
20	-2.108084	-2.108084
21	-0.185400	-0.185400
22	-9.980000	-9.980000
23	-1.000000	-1.000000
24	0.000000	0.000000
IMA	0.000000	0.000000

SOLVE AND VARIABLE DATA:

Semi Diameter 1 : Fixed

Semi Diameter 2 : Fixed

Curvature of 3 : Solve, Pickup from surface 2 scaled by -1

Semi Diameter 3 : Fixed

Curvature of 4 : Solve, Pickup from surface 3 scaled by 1

Semi Diameter 4 : Fixed

Semi Diameter 5 : Fixed

Semi Diameter 6 : Fixed
Curvature of 7 : Solve, Pickup from surface 6 scaled by -1
Semi Diameter 7 : Fixed
Curvature of 8 : Solve, Pickup from surface 7 scaled by 1
Semi Diameter 8 : Fixed
Semi Diameter 9 : Fixed
Semi Diameter 12 : Fixed
Parameter 3 Surf 13 : Solve, Pickup from surface 11 scaled by 1, offset by 0
Semi Diameter 14 : Fixed
Semi Diameter 15 : Fixed
Curvature of 16 : Solve, Pickup from surface 15 scaled by 1
Semi Diameter 16 : Fixed
Semi Diameter 17 : Fixed
Curvature of 18 : Solve, Pickup from surface 14 scaled by 1
Semi Diameter 18 : Fixed
Curvature of 19 : Solve, Pickup from surface 15 scaled by 1
Semi Diameter 19 : Fixed
Curvature of 20 : Solve, Pickup from surface 19 scaled by 1
Semi Diameter 20 : Fixed
Curvature of 21 : Solve, Pickup from surface 17 scaled by 1
Thickness of 21 : Variable
Semi Diameter 21 : Fixed
Semi Diameter 23 : Fixed
Semi Diameter 24 : Fixed

INDEX OF REFRACTION DATA:

System Temperature: 20.0000 Celsius

System Pressure : 1.0000 Atmospheres

Absolute air index: 1.000273 at wavelength 0.532000 μm

Index data is relative to air at the system temperature and pressure.

Wavelengths are measured in air at the system temperature and pressure.

Surf	Glass	Temp	Pres	0.53200000	1.06400000	
0		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
1		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
2	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
3		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
4	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
5		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
6	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
7		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
8	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
9		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
10		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
11	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
12	MIRROR	20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
13	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
14	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
15		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
16	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
17		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
18	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
19		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
20	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
21		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
22		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
23	F_SILICA	20.00	1.00	1.4607063446	1.4496309898	source: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook V. III
24		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
25		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	

THERMAL COEFFICIENT OF EXPANSION DATA:

Surf	Glass	TCE * 10E-6	
0		0.0000000000	
1		0.0000000000	
2	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
3		0.0000000000	
4	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
5		0.0000000000	
6	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
7		0.0000000000	
8	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
9		0.0000000000	
10		0.0000000000	
11	<CRD BRK>	0.0000000000	
12	MIRROR	0.0000000000	
13	<CRD BRK>	0.0000000000	
14	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
15		0.0000000000	
16	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
17		0.0000000000	
18	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
19		0.0000000000	
20	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
21		0.0000000000	
22		0.0000000000	
23	F_SILICA	0.5100000000	source: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook V.
III			
24		0.0000000000	
25		0.0000000000	

GLOBAL VERTEX COORDINATES, ORIENTATIONS, AND ROTATION/OFFSET MATRICES:

Reference Surface: 24

Surf	R11	R12	R13	X	Tilt X
	R21	R22	R23	Y	Tilt Y
	R31	R32	R33	Z	Tilt Z
0	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-5.988003352E+02	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
1	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-9.880033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
2	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	BEX	0.0000000000	1.0000000000	-9.380033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
3	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-8.980033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
4	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-8.980033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
5	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-8.580033518E+01	0.000000000E+00

	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
6	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.760000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
7	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.360000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
8	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.360000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
9	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.000000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
10	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	Mask				
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-2.000000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	4.298000000E+01	0.000000000E+00
11	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-4.500000000E+01
	0.0000000000	0.7071067812	0.7071067812	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	-0.7071067812	0.7071067812	4.298000000E+01	0.000000000E+00
12	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-4.500000000E+01
	0.0000000000	0.7071067812	0.7071067812	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	-0.7071067812	0.7071067812	4.298000000E+01	0.000000000E+00

	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	1.298000000E+01	0.000000000E+00
21	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	1.098000000E+01	0.000000000E+00
22	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	1.098000000E+01	0.000000000E+00
23	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	1.000000000E+00	0.000000000E+00
24	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
25	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00

GLOBAL SURFACE CENTER OF CURVATURE POINTS:

Reference Surface: 24

Surf	X	Y	Z
0	-	-	-
1	-	-	-
2	0.0000000000	-123.4161522126	42.9800000000 BEX 123

3	0.0000000000	-60.1845181536	42.9800000000	
4	0.0000000000	-60.1845181536	42.9800000000	
5	0.0000000000	-37.0764435444	42.9800000000	
6	0.0000000000	7.3065459268	42.9800000000	
7	0.0000000000	-98.5065459268	42.9800000000	
8	0.0000000000	-98.5065459268	42.9800000000	
9	0.0000000000	-136.0440888650	42.9800000000	
10	-	-	-	Mask
11	-	-	-	
12	-	-	-	
13	-	-	-	
14	0.0000000000	0.0000000000	2.7906433573	Objective
15	0.0000000000	0.0000000000	35.4597727285	
16	0.0000000000	0.0000000000	35.4597727285	
17	0.0000000000	0.0000000000	42.3445582917	
18	0.0000000000	0.0000000000	-4.2093566427	
19	0.0000000000	0.0000000000	28.4597727285	
20	0.0000000000	0.0000000000	28.4597727285	
21	0.0000000000	0.0000000000	35.3445582917	
22	-	-	-	
23	-	-	-	
24	-	-	-	
25	-	-	-	

ELEMENT VOLUME DATA:

For centered elements with plane or spherical circular faces, exact volumes are computed by assuming edges are squared up to the larger of the front and back radial aperture.

For all other elements, approximate volumes are numerically integrated

to 0.1% accuracy. Zero volume means the volume cannot be accurately computed.

Single elements that are duplicated in the Lens Data Editor for ray tracing purposes may be listed more than once yielding incorrect total mass estimates.

	Volume cc	Density g/cc	Mass g
Element surf 2 to 3	0.521606	3.700000	1.929941
Element surf 4 to 5	0.438725	5.180000	2.272595
Element surf 6 to 7	0.415239	3.700000	1.536383
Element surf 8 to 9	0.415121	5.180000	2.150326
Element surf 14 to 15	0.077524	3.700000	0.286841
Element surf 16 to 17	0.058067	5.180000	0.300786
Element surf 18 to 19	0.077524	3.700000	0.286841
Element surf 20 to 21	0.058067	5.180000	0.300786
Element surf 23 to 24	0.113097	2.200000	0.248814
Total Mass:		9.313312	

F/# DATA:

F/# calculations consider vignetting factors and ignore surface apertures.

	Wavelength:	0.532000	1.064000			
#	Field	Tan	Sag	Tan	Sag	
1	0.0000 (deg):	4.6104		4.6104	4.6287	4.6287

CARDINAL POINTS:

Object space positions are measured with respect to surface 1.

Image space positions are measured with respect to the image surface.

The index in both the object space and image space is considered.

	Object Space	Image Space
W = 0.532000	(Primary)	
Focal Length :	-7.501544	-7.501544
Focal Planes :	41.684638	0.063471
Principal Planes :	49.186182	7.565015
Anti-Principal Planes :	34.183094	-7.438073
Nodal Planes :	34.183094	-7.438073
Anti-Nodal Planes :	49.186182	7.565015

W = 1.064000		
Focal Length :	-7.533019	-7.533019
Focal Planes :	41.726758	0.068144
Principal Planes :	49.259778	7.601163
Anti-Principal Planes :	34.193739	-7.464876
Nodal Planes :	34.193739	-7.464876
Anti-Nodal Planes :	49.259778	7.601163

PHYSICAL OPTICS PROPAGATION SETTINGS SUMMARY:

OBJ STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

STO STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

2 STANDARD BEX

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

3 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

4 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

5 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

6 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

7 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

8 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

9 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

10 STANDARD Mask

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

11 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

12 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

13 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

14 STANDARD Objective

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

15 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

16 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

17 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

18 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

19 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
20 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
21 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
22 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
23 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

24 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

IMA STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

FILES USED:

Zemax File

E:\Thesis laser printers\A1\BEX & Objective Initial-Distance.ZMX

Glass Catalogs

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\SCHOTT.AGF

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\INFRARED.AGF

Coating Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\COATINGS\COATING.DAT

ABg Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\ABG_DATA\ABG_DATA.DAT

Σύστημα A2

System/Prescription Data

File : E:\Thesis laser printers\A2\BEX & Objective-distance.ZMX

Title:

Date : 2/25/2021

GENERAL LENS DATA:

Surfaces : 23

Stop : 1

System Aperture : Float By Stop Size = 0.75

Fast Semi-Diameters : On

Field Unpolarized : On

Convert thin film phase to ray equivalent : On

J/E Conversion Method : X Axis Reference

Glass Catalogs : SCHOTT INFRARED

Ray Aiming : Off

Apodization : Gaussian, factor = 1.00000E+00

Reference OPD : Exit Pupil

Paraxial Rays Setting : Ignore Coordinate Breaks

Method to Compute F/# : Tracing Rays

Method to Compute Huygens Integral : Auto

Print Coordinate Breaks : On

Multi-Threading : On

OPD Modulo 2 Pi : Off

Temperature (C) : 2.00000E+01

Pressure (ATM) : 1.00000E+00

Adjust Index Data To Environment : Off

Effective Focal Length : 1.999358 (in air at system temperature and pressure)

Effective Focal Length : 1.999358 (in image space)

Back Focal Length : 0.007285805

Total Track : 98.80034

Image Space F/# : 1.332906

Paraxial Working F/# : 1.224006

Working F/# : 1.182913

Image Space NA : 0.3781601
 Object Space NA : 0.001499998
 Stop Radius : 0.75
 Paraxial Image Height : 0
 Paraxial Magnification : 0
 Entrance Pupil Diameter : 1.5
 Entrance Pupil Position : 0
 Exit Pupil Diameter : 0.06741543
 Exit Pupil Position : -0.08257273
 Field Type : Angle in degrees
 Maximum Radial Field : 0
 Primary Wavelength [μm] : 0.532
 Angular Magnification : 0
 Lens Units : Millimeters
 Source Units : Watts
 Analysis Units : Watts/cm²
 Afocal Mode Units : milliradians
 MTF Units : cycles/millimeter
 Include Calculated Data in Session File : On
 Include Calculated Data in Session File : On

Fields : 1

Field Type : Angle in degrees

#	X-Value	Y-Value	Weight
1	0.000000	0.000000	1.000000

Vignetting Factors

#	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Wavelengths : 2

Units: μm

#	Value	Weight
1	0.532000	1.000000
2	1.064000	1.000000

Predicted coordinate ABCD matrix:

A = 1.837
B = 0
C = 0
D = 1.837

SURFACE DATA SUMMARY:

Surf Diam	Type Conic	Radius Comment	Thickness	Glass	Clear Diam	Chip Zone	Mech
OBJ 0	STANDARD	Infinity	500			0 0	0
STO 1.5	STANDARD 0	Infinity	5			1.5	0
2 12	STANDARD 0	-29.61582	4	N-PK52A		12	0
3 12	STANDARD 0	29.61582	0			12	0
4 12	STANDARD 0	29.61582	4	SF6		12	0
5 12	STANDARD 0	48.72389	38.20034			12	0
6 12	STANDARD 0	54.90655	4	N-PK52A		12	0
7 12	STANDARD 0	-54.90655	0			12	0
8 12	STANDARD 0	-54.90655	3.6	SF6		12	0
9 12	STANDARD 0	-96.04409	20			12	0

10	STANDARD	Infinity	20		3.205505	0	
3.205505		0	Mask				
11	COORDBRK	-	0		-	-	-
12	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	12		0
12	0						
13	COORDBRK	-	-20		-	-	-
14	STANDARD	-8.143657	-4	N-PK52A	5	0	5
0	Objective						
15	STANDARD	3.012311	0		5	0	5
0							
16	STANDARD	3.012311	-2	SF6	5	0	5
0							
17	STANDARD	7.116126	-0.6		5	0	5
0							
18	STANDARD	-2.484065	-3	N-BK7	4	0	4
0							
19	STANDARD	31.79836	0		4	0	4
0							
20	STANDARD	Infinity	-0.68		1.238298		0
1.238298		0					
21	STANDARD	Infinity	-1	F_SILICA	12		0
12	0						
22	STANDARD	Infinity	0		0.0006108198		0
12	0						
IMA	STANDARD	Infinity		0.0006108198		0	0.0006108198
0							

SURFACE DATA DETAIL:

Surface OBJ STANDARD

Surface STO STANDARD

Surface 2 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 3 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 4 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 5 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 6 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 7 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 8 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 9 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 10 STANDARD Mask

Aperture : Rectangular Aperture

X Half Width : 1

Y Half Width : 1

Surface 11 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 12 STANDARD

Mirror Substrate : Curved, Thickness = 2.40000E-01

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 13 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 14 STANDARD Objective

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.5

Surface 15 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.5

Surface 16 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.5

Surface 17 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.5

Surface 18 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2

Surface 19 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2

Surface 20 STANDARD

Surface 21 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 22 STANDARD

Surface IMA STANDARD

EDGE THICKNESS DATA:

Surf	X-Edge	Y-Edge
OBJ	500.000000	500.000000
STO	4.385849	4.385849
2	5.228302	5.228302
3	0.000000	0.000000
4	3.756689	3.756689
5	38.158310	38.158310
6	3.342371	3.342371
7	0.000000	0.000000
8	3.741217	3.741217
9	20.187597	20.187597
10	20.000000	20.000000
11	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000
13	-20.393228	-20.393228
14	-2.274943	-2.274943
15	0.000000	0.000000
16	-2.878229	-2.878229
17	-2.064377	-2.064377
18	-1.926265	-1.926265
19	-0.062959	-0.062959
20	-0.680000	-0.680000
21	-1.000000	-1.000000
22	0.000000	0.000000
IMA	0.000000	0.000000

SOLVE AND VARIABLE DATA:

Semi Diameter 1 : Fixed

Semi Diameter 2 : Fixed

Curvature of 3 : Solve, Pickup from surface 2 scaled by -1
Semi Diameter 3 : Fixed
Curvature of 4 : Solve, Pickup from surface 3 scaled by 1
Semi Diameter 4 : Fixed
Semi Diameter 5 : Fixed
Semi Diameter 6 : Fixed
Curvature of 7 : Solve, Pickup from surface 6 scaled by -1
Semi Diameter 7 : Fixed
Curvature of 8 : Solve, Pickup from surface 7 scaled by 1
Semi Diameter 8 : Fixed
Semi Diameter 9 : Fixed
Semi Diameter 12 : Fixed
Parameter 3 Surf 13 : Solve, Pickup from surface 11 scaled by 1, offset by 0
Semi Diameter 14 : Fixed
Semi Diameter 15 : Fixed
Curvature of 16 : Solve, Pickup from surface 15 scaled by 1
Semi Diameter 16 : Fixed
Semi Diameter 17 : Fixed
Semi Diameter 18 : Fixed
Thickness of 19 : Variable
Semi Diameter 19 : Fixed
Semi Diameter 21 : Fixed

INDEX OF REFRACTION DATA:

System Temperature: 20.0000 Celsius

System Pressure : 1.0000 Atmospheres

Absolute air index: 1.000273 at wavelength 0.532000 μm

Index data is relative to air at the system temperature and pressure.

Wavelengths are measured in air at the system temperature and pressure.

Surf	Glass	Temp	Pres	0.53200000	1.06400000	
0		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
1		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
2	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
3		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
4	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
5		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
6	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
7		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
8	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
9		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
10		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
11	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
12	MIRROR	20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
13	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
14	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
15		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
16	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
17		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
18	N-BK7	20.00	1.00	1.5194725831	1.5066348016	step 0.5 available
19		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
20		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
21	F_SILICA	20.00	1.00	1.4607063446	1.4496309898	source: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook V. III
22		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
23		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	

THERMAL COEFFICIENT OF EXPANSION DATA:

Surf	Glass	TCE * 10E-6
0		0.0000000000

1		0.0000000000	
2	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
3		0.0000000000	
4	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
5		0.0000000000	
6	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
7		0.0000000000	
8	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
9		0.0000000000	
10		0.0000000000	
11	<CRD BRK>	0.0000000000	
12	MIRROR	0.0000000000	
13	<CRD BRK>	0.0000000000	
14	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
15		0.0000000000	
16	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
17		0.0000000000	
18	N-BK7	7.1000000000	step 0.5 available
19		0.0000000000	
20		0.0000000000	
21	F_SILICA	0.5100000000	source: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook V.
III			
22		0.0000000000	
23		0.0000000000	

GLOBAL VERTEX COORDINATES, ORIENTATIONS, AND ROTATION/OFFSET MATRICES:

Reference Surface: 22

Surf	R11	R12	R13	X	Tilt X
	R21	R22	R23	Y	Tilt Y

	R31	R32	R33	Z	Tilt Z
0	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-5.988003352E+02	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
1	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-9.880033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
2	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-9.380033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
3	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-8.980033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
4	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-8.980033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
5	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-8.580033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
6	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.760000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
7	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01

	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.360000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
8	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.360000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
9	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-4.000000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
10	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
Mask	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-2.000000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
11	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-4.500000000E+01
	0.0000000000	0.7071067812	0.7071067812	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	-0.7071067812	0.7071067812	3.128000000E+01	0.000000000E+00
12	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-4.500000000E+01
	0.0000000000	0.7071067812	0.7071067812	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	-0.7071067812	0.7071067812	3.128000000E+01	0.000000000E+00
13	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	3.128000000E+01	0.000000000E+00
14	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
Objective	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00

	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
23	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00

GLOBAL SURFACE CENTER OF CURVATURE POINTS:

Reference Surface: 22

Surf	X	Y	Z	
0	-	-	-	
1	-	-	-	
2	0.0000000000	-123.4161522126	31.2800000000	
3	0.0000000000	-60.1845181536	31.2800000000	
4	0.0000000000	-60.1845181536	31.2800000000	
5	0.0000000000	-37.0764435444	31.2800000000	
6	0.0000000000	7.3065459268	31.2800000000	
7	0.0000000000	-98.5065459268	31.2800000000	
8	0.0000000000	-98.5065459268	31.2800000000	
9	0.0000000000	-136.0440888650	31.2800000000	
10	-	-	-	Mask
11	-	-	-	
12	-	-	-	
13	-	-	-	
14	0.0000000000	0.0000000000	3.1363430542	Objective
15	0.0000000000	0.0000000000	10.2923113773	
16	0.0000000000	0.0000000000	10.2923113773	
17	0.0000000000	0.0000000000	12.3961264081	

18	0.0000000000	0.0000000000	2.1959352956
19	0.0000000000	0.0000000000	33.4783591595
20	-	-	-
21	-	-	-
22	-	-	-
23	-	-	-

ELEMENT VOLUME DATA:

For centered elements with plane or spherical circular faces, exact volumes are computed by assuming edges are squared up to the larger of the front and back radial aperture.

For all other elements, approximate volumes are numerically integrated to 0.1% accuracy. Zero volume means the volume cannot be accurately computed.

Single elements that are duplicated in the Lens Data Editor for ray tracing purposes may be listed more than once yielding incorrect total mass estimates.

	Volume cc	Density g/cc	Mass g
Element surf 2 to 3	0.521606	3.700000	1.929941
Element surf 4 to 5	0.438725	5.180000	2.272595
Element surf 6 to 7	0.415239	3.700000	1.536383
Element surf 8 to 9	0.415121	5.180000	2.150326
Element surf 14 to 15	0.062873	3.700000	0.232630
Element surf 16 to 17	0.046704	5.180000	0.241926
Element surf 18 to 19	0.031493	2.510000	0.079049
Element surf 21 to 22	0.113097	2.200000	0.248814
Total Mass:		8.691663	

F/# DATA:

F/# calculations consider vignetting factors and ignore surface apertures.

	Wavelength:	0.532000		1.064000		
#	Field	Tan	Sag	Tan	Sag	
1	0.0000 (deg):	1.1829		1.1829	1.2063	1.2063

CARDINAL POINTS:

Object space positions are measured with respect to surface 1.

Image space positions are measured with respect to the image surface.

The index in both the object space and image space is considered.

	Object Space	Image Space
W = 0.532000	(Primary)	
Focal Length :	-1.999358	-1.999358
Focal Planes :	44.485059	0.007286
Principal Planes :	46.484418	2.006644
Anti-Principal Planes :	42.485701	-1.992073
Nodal Planes :	42.485701	-1.992073
Anti-Nodal Planes :	46.484418	2.006644

W = 1.064000		
Focal Length :	-2.031525	-2.031525
Focal Planes :	44.525343	0.006244
Principal Planes :	46.556867	2.037768
Anti-Principal Planes :	42.493818	-2.025281
Nodal Planes :	42.493818	-2.025281
Anti-Nodal Planes :	46.556867	2.037768

PHYSICAL OPTICS PROPAGATION SETTINGS SUMMARY:

OBJ STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

STO STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

2 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

3 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

4 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

5 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

6 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

7 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

8 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

9 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

10 STANDARD Mask

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

11 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

12 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

13 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

14 STANDARD Objective

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

15 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

16 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

17 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

18 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

19 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

20 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

21 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

22 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

IMA STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

FILES USED:

Zemax File

E:\Thesis laser printers\A2\BEX & Objective-distance.ZMX

Glass Catalogs

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\SCHOTT.AGF

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\INFRARED.AGF

Coating Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\COATINGS\COATING.DAT

ABg Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\ABG_DATA\ABG_DATA.DAT

Σύστημα A3

System/Prescription Data

File : E:\Thesis laser printers\A3\optimized 4.ZMX

Title:

Date : 2/25/2021

GENERAL LENS DATA:

Surfaces : 41

Stop : 2

System Aperture : Float By Stop Size = 0.75

Fast Semi-Diameters : On

Field Unpolarized : On

Convert thin film phase to ray equivalent : On

J/E Conversion Method : X Axis Reference

Glass Catalogs : SCHOTT INFRARED

Ray Aiming : Off

Apodization : Gaussian, factor = 1.00000E+00

Reference OPD : Exit Pupil

Paraxial Rays Setting : Ignore Coordinate Breaks

Method to Compute F/# : Tracing Rays

Method to Compute Huygens Integral : Auto

Print Coordinate Breaks : On

Multi-Threading : On

OPD Modulo 2 Pi : Off

Temperature (C) : 2.00000E+01

Pressure (ATM) : 1.00000E+00

Adjust Index Data To Environment : Off

Effective Focal Length : 1.500001 (in air at system temperature and pressure)

Effective Focal Length : 1.500001 (in image space)

Back Focal Length : 0.00388699

Total Track : 93.80034

Image Space F/# : 1.000001

Paraxial Working F/# : 0.9139754

Working F/# : 0.908399

Image Space NA : 0.4799377

Object Space NA : 0.001499998
 Stop Radius : 0.75
 Paraxial Image Height : 0
 Paraxial Magnification : 0
 Entrance Pupil Diameter : 1.5
 Entrance Pupil Position : 5
 Exit Pupil Diameter : 0.04780912
 Exit Pupil Position : -0.04392226
 Field Type : Angle in degrees
 Maximum Radial Field : 0
 Primary Wavelength [μm] : 0.532
 Angular Magnification : 0
 Lens Units : Millimeters
 Source Units : Watts
 Analysis Units : Watts/cm²
 Afocal Mode Units : milliradians
 MTF Units : cycles/millimeter
 Include Calculated Data in Session File : On
 Include Calculated Data in Session File : On

Fields : 1

Field Type : Angle in degrees

#	X-Value	Y-Value	Weight
1	0.000000	0.000000	1.000000

Vignetting Factors

#	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Wavelengths : 2

Units: μm

#	Value	Weight
1	0.532000	1.000000
2	1.064000	1.000000

Predicted coordinate ABCD matrix:

A = 1.378
 B = 0
 C = 0
 D = 1.378

SURFACE DATA SUMMARY:

Surf Diam	Type Conic	Radius Comment	Thickness	Glass	Clear Diam	Chip Zone	Mech
OBJ 0	STANDARD	Infinity	495			0 0	0
1 1.485	STANDARD 0	Infinity	5		1.485		0
STO 1.5	STANDARD 0	Infinity	5		1.5		0
3 12	STANDARD 0	-29.61582	4	N-PK52A	12		0
4 12	STANDARD 0	29.61582	0		12		0
5 12	STANDARD 0	29.61582	4	SF6	12		0
6 12	STANDARD 0	48.72389	38.20034		12		0
7 12	STANDARD 0	54.90655	4	N-PK52A	12		0
8 12	STANDARD 0	-54.90655	0		12		0
9 12	STANDARD 0	-54.90655	3.6	SF6	12		0

10 12	STANDARD 0	-96.04409	10		12	0	
11 3.190659	STANDARD 0	Infinity	20		3.190659	0	
12	COORDBRK	- 0		- - -			
13 12	STANDARD 0	Infinity	0	MIRROR	12	0	
14	COORDBRK	- -20		- - -			
15 3.250041	STANDARD 0	Infinity	-1.5		3.250041	0	
16 0	STANDARD	-166.0739	-2	N-PK52A	9	0	9
17 0	STANDARD	166.0739	0		9	0	9
18 0	STANDARD	166.0739	-2.5	SF6	9	0	9
19 0	STANDARD	-33.20722	-9.1		9	0	9
20 0	STANDARD	23.774	-2.5	N-PK52A	9	0	9
21 0	STANDARD	-177.5274	0		9	0	9
22 0	STANDARD	-177.5274	-3	SF6	9	0	9
23 0	STANDARD	177.5274	-18		9	0	9
24 12	STANDARD 0	500	-3.1	N-PK52A	12	0	
25 12	STANDARD 0	-500	0		12	0	
26 12	STANDARD 0	-500	-3.1	SF6	12	0	
27 12	STANDARD 0	49.17687	-0.2		12	0	
28 11	STANDARD 0	-11.82812	-5.4	N-PK52A	11	0	

29 11	STANDARD 0	10.4318	0		11	0	
30 11	STANDARD 0	10.4318	-2	SF6	11	0	
31 11	STANDARD 0	-15	0		11	0	
32 11	STANDARD -0.7710028	-8.113056	-4.1	N-BK7	11	0	
33 11	STANDARD 0	34.69692	0		11	0	
34 0	STANDARD	-5.764332	-2.8	N-BK7	8	0	8
35 0	STANDARD	-28.48814	0		8	0	8
36 0	STANDARD	-2.966258	-1.7	N-BK7	5	0	5
37 0	STANDARD	-4	0		5	0	5
38 3.152631	STANDARD 0	Infinity	-1.774		3.152631	0	
39 12	STANDARD 0	Infinity	-1	F_SILICA	12	0	
40 12	STANDARD 0	Infinity	0		0.0004661152	0	
IMA 0	STANDARD	Infinity			0.0004661152	0	0.0004661152

SURFACE DATA DETAIL:

Surface OBJ STANDARD

Surface 1 STANDARD

Surface STO STANDARD

Surface 3 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 4 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 5 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 6 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 7 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 8 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 9 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 10 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 11 STANDARD

Aperture : Rectangular Aperture

X Half Width : 0.5

Y Half Width : 0.5

Surface 12 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 13 STANDARD

Mirror Substrate : Curved, Thickness = 2.40000E-01

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 14 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 15 STANDARD

Surface 16 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 17 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 18 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 19 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 20 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 21 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 22 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 23 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 24 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 25 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 26 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 27 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 28 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 5.5

Surface 29 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 5.5

Surface 30 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 5.5

Surface 31 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 5.5

Surface 32 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 5.5

Surface 33 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 5.5

Surface 34 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4

Surface 35 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4

Surface 36 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.5

Surface 37 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 2.5

Surface 38 STANDARD

Surface 39 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 40 STANDARD

Surface IMA STANDARD

EDGE THICKNESS DATA:

Surf	X-Edge	Y-Edge
OBJ	495.000000	495.000000
1	5.000000	5.000000
STO	4.385849	4.385849
3	5.228302	5.228302
4	0.000000	0.000000
5	3.756689	3.756689
6	38.158310	38.158310
7	3.342371	3.342371
8	0.000000	0.000000
9	3.741217	3.741217
10	10.187597	10.187597
11	20.000000	20.000000
12	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000
14	-20.000000	-20.000000
15	-1.560978	-1.560978
16	-1.878044	-1.878044
17	0.000000	0.000000
18	-2.867294	-2.867294
19	-8.363914	-8.363914
20	-2.986813	-2.986813
21	0.000000	0.000000
22	-2.885915	-2.885915

23	-18.021041	-18.021041
24	-3.172003	-3.172003
25	0.000000	0.000000
26	-2.696601	-2.696601
27	-1.923917	-1.923917
28	-2.475791	-2.475791
29	0.000000	0.000000
30	-4.612404	-4.612404
31	-0.871379	-0.871379
32	-1.745216	-1.745216
33	-2.052418	-2.052418
34	-1.468490	-1.468490
35	-1.087581	-1.087581
36	-1.207703	-1.207703
37	0.877501	0.877501
38	-1.774000	-1.774000
39	-1.000000	-1.000000
40	0.000000	0.000000
IMA	0.000000	0.000000

SOLVE AND VARIABLE DATA:

Semi Diameter 2 : Fixed
Semi Diameter 3 : Fixed
Curvature of 4 : Solve, Pickup from surface 3 scaled by -1
Semi Diameter 4 : Fixed
Curvature of 5 : Solve, Pickup from surface 4 scaled by 1
Semi Diameter 5 : Fixed
Semi Diameter 6 : Fixed
Semi Diameter 7 : Fixed
Curvature of 8 : Solve, Pickup from surface 7 scaled by -1

Semi Diameter 8 : Fixed

Curvature of 9 : Solve, Pickup from surface 8 scaled by 1

Semi Diameter 9 : Fixed

Semi Diameter 10 : Fixed

Semi Diameter 13 : Fixed

Parameter 3 Surf 14 : Solve, Pickup from surface 12 scaled by 1, offset by 0

Semi Diameter 16 : Fixed

Curvature of 17 : Solve, Pickup from surface 16 scaled by -1

Semi Diameter 17 : Fixed

Curvature of 18 : Solve, Pickup from surface 17 scaled by 1

Semi Diameter 18 : Fixed

Semi Diameter 19 : Fixed

Semi Diameter 20 : Fixed

Semi Diameter 21 : Fixed

Curvature of 22 : Solve, Pickup from surface 21 scaled by 1

Semi Diameter 22 : Fixed

Curvature of 23 : Solve, Pickup from surface 21 scaled by -1

Semi Diameter 23 : Fixed

Semi Diameter 24 : Fixed

Curvature of 25 : Solve, Pickup from surface 24 scaled by -1

Semi Diameter 25 : Fixed

Curvature of 26 : Solve, Pickup from surface 25 scaled by 1

Semi Diameter 26 : Fixed

Semi Diameter 27 : Fixed

Semi Diameter 28 : Fixed

Semi Diameter 29 : Fixed

Curvature of 30 : Solve, Pickup from surface 29 scaled by 1

Semi Diameter 30 : Fixed

Semi Diameter 31 : Fixed

Semi Diameter 32 : Fixed

Semi Diameter 33 : Fixed

Semi Diameter 34 : Fixed
 Semi Diameter 35 : Fixed
 Semi Diameter 36 : Fixed
 Thickness of 37 : Variable
 Semi Diameter 37 : Fixed
 Semi Diameter 39 : Fixed

INDEX OF REFRACTION DATA:

System Temperature: 20.0000 Celsius

System Pressure : 1.0000 Atmospheres

Absolute air index: 1.000273 at wavelength 0.532000 μm

Index data is relative to air at the system temperature and pressure.

Wavelengths are measured in air at the system temperature and pressure.

Surf	Glass	Temp	Pres	0.53200000	1.06400000	
0		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
1		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
2		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
3	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
4		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
5	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
6		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
7	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
8		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
9	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
10		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
11		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
12	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
13	MIRROR	20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
14	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	

15		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
16	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
17		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
18	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
19		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
20	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
21		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
22	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
23		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
24	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
25		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
26	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
27		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
28	N-PK52A	20.00	1.00	1.4990233564	1.4896777459	suitable for precision molding
29		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
30	SF6	20.00	1.00	1.8156567220	1.7736845479	lead containing glass type
31		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
32	N-BK7	20.00	1.00	1.5194725831	1.5066348016	step 0.5 available
33		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
34	N-BK7	20.00	1.00	1.5194725831	1.5066348016	step 0.5 available
35		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
36	N-BK7	20.00	1.00	1.5194725831	1.5066348016	step 0.5 available
37		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
38		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
39	F_SILICA	20.00	1.00	1.4607063446	1.4496309898	source: The Infrared & Electro- Optical Systems Handbook V. III
40		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
41		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	

THERMAL COEFFICIENT OF EXPANSION DATA:

Surf	Glass	TCE * 10E-6	
0		0.0000000000	
1		0.0000000000	
2		0.0000000000	
3	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
4		0.0000000000	
5	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
6		0.0000000000	
7	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
8		0.0000000000	
9	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
10		0.0000000000	
11		0.0000000000	
12	<CRD BRK>	0.0000000000	
13	MIRROR	0.0000000000	
14	<CRD BRK>	0.0000000000	
15		0.0000000000	
16	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
17		0.0000000000	
18	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
19		0.0000000000	
20	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
21		0.0000000000	
22	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
23		0.0000000000	
24	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
25		0.0000000000	
26	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
27		0.0000000000	
28	N-PK52A	13.0100000000	suitable for precision molding
29		0.0000000000	

30	SF6	8.1000000000	lead containing glass type
31		0.0000000000	
32	N-BK7	7.1000000000	step 0.5 available
33		0.0000000000	
34	N-BK7	7.1000000000	step 0.5 available
35		0.0000000000	
36	N-BK7	7.1000000000	step 0.5 available
37		0.0000000000	
38		0.0000000000	
39	F_SILICA	0.5100000000	source: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook V.
III			
40		0.0000000000	
41		0.0000000000	

GLOBAL VERTEX COORDINATES, ORIENTATIONS, AND ROTATION/OFFSET MATRICES:

Reference Surface: 40

Surf	R11	R12	R13	X	Tilt X
	R21	R22	R23	Y	Tilt Y
	R31	R32	R33	Z	Tilt Z
0	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-5.888003352E+02	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	8.377400000E+01	0.000000000E+00
1	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-9.380033518E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	8.377400000E+01	0.000000000E+00
2	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01

10	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-3.000000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	8.377400000E+01	0.000000000E+00
11	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-9.000000000E+01
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	-2.000000000E+01	0.000000000E+00
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	8.377400000E+01	0.000000000E+00
12	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-4.500000000E+01
	0.0000000000	0.7071067812	0.7071067812	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	-0.7071067812	0.7071067812	8.377400000E+01	0.000000000E+00
13	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	-4.500000000E+01
	0.0000000000	0.7071067812	0.7071067812	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	-0.7071067812	0.7071067812	8.377400000E+01	0.000000000E+00
14	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	8.377400000E+01	0.000000000E+00
15	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	6.377400000E+01	0.000000000E+00
16	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	6.227400000E+01	0.000000000E+00
17	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	6.027400000E+01	0.000000000E+00

41	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00

GLOBAL SURFACE CENTER OF CURVATURE POINTS:

Reference Surface: 40

Surf	X	Y	Z
0	-	-	-
1	-	-	-
2	-	-	-
3	0.0000000000	-113.4161522126	83.7740000000
4	0.0000000000	-50.1845181536	83.7740000000
5	0.0000000000	-50.1845181536	83.7740000000
6	0.0000000000	-27.0764435444	83.7740000000
7	0.0000000000	17.3065459268	83.7740000000
8	0.0000000000	-88.5065459268	83.7740000000
9	0.0000000000	-88.5065459268	83.7740000000
10	0.0000000000	-126.0440888650	83.7740000000
11	-	-	-
12	-	-	-
13	-	-	-
14	-	-	-
15	-	-	-
16	0.0000000000	0.0000000000	-103.7999282657
17	0.0000000000	0.0000000000	226.3479282657
18	0.0000000000	0.0000000000	226.3479282657
19	0.0000000000	0.0000000000	24.5667776101
20	0.0000000000	0.0000000000	72.4479965037

21	0.0000000000	0.0000000000	-131.3534242859
22	0.0000000000	0.0000000000	-131.3534242859
23	0.0000000000	0.0000000000	220.7014242859
24	0.0000000000	0.0000000000	525.1740000000
25	0.0000000000	0.0000000000	-477.9260000000
26	0.0000000000	0.0000000000	-477.9260000000
27	0.0000000000	0.0000000000	68.1508728907
28	0.0000000000	0.0000000000	6.9458803942
29	0.0000000000	0.0000000000	23.8057995759
30	0.0000000000	0.0000000000	23.8057995759
31	0.0000000000	0.0000000000	-3.6260000000
32	0.0000000000	0.0000000000	3.2609439051
33	0.0000000000	0.0000000000	41.9709207615
34	0.0000000000	0.0000000000	1.5096679534
35	0.0000000000	0.0000000000	-24.0141360803
36	0.0000000000	0.0000000000	1.5077423735
37	0.0000000000	0.0000000000	-1.2260000000
38	-	-	-
39	-	-	-
40	-	-	-
41	-	-	-

ELEMENT VOLUME DATA:

For centered elements with plane or spherical circular faces, exact volumes are computed by assuming edges are squared up to the larger of the front and back radial aperture.

For all other elements, approximate volumes are numerically integrated to 0.1% accuracy. Zero volume means the volume cannot be accurately computed.

Single elements that are duplicated in the Lens Data Editor
for ray tracing purposes may be listed more than once yielding
incorrect total mass estimates.

	Volume cc	Density g/cc	Mass g
Element surf 3 to 4	0.521606	3.700000	1.929941
Element surf 5 to 6	0.438725	5.180000	2.272595
Element surf 7 to 8	0.415239	3.700000	1.536383
Element surf 9 to 10	0.415121	5.180000	2.150326
Element surf 16 to 17	0.123355	3.700000	0.456415
Element surf 18 to 19	0.170711	5.180000	0.884283
Element surf 20 to 21	0.174486	3.700000	0.645599
Element surf 22 to 23	0.187223	5.180000	0.969815
Element surf 24 to 25	0.354673	3.700000	1.312291
Element surf 26 to 27	0.327816	5.180000	1.698087
Element surf 28 to 29	0.377555	3.700000	1.396954
Element surf 30 to 31	0.311585	5.180000	1.614008
Element surf 32 to 33	0.278632	2.510000	0.699367
Element surf 34 to 35	0.109467	2.510000	0.274763
Element surf 36 to 37	0.029538	2.510000	0.074141
Element surf 39 to 40	0.113097	2.200000	0.248814
Total Mass:		18.163784	

F/# DATA:

F/# calculations consider vignetting factors and ignore surface apertures.

	Wavelength:	0.532000	1.064000			
#	Field	Tan	Sag	Tan	Sag	
1	0.0000 (deg):	0.9084		0.9084	0.9415	0.9415

CARDINAL POINTS:

Object space positions are measured with respect to surface 1.

Image space positions are measured with respect to the image surface.

The index in both the object space and image space is considered.

	Object Space	Image Space
W = 0.532000	(Primary)	
Focal Length :	-1.500001	-1.500001
Focal Planes :	52.061190	0.003887
Principal Planes :	53.561191	1.503888
Anti-Principal Planes :	50.561188	-1.496114
Nodal Planes :	50.561188	-1.496114
Anti-Nodal Planes :	53.561191	1.503888

W = 1.064000		
Focal Length :	-1.550107	-1.550107
Focal Planes :	52.230682	0.003908
Principal Planes :	53.780788	1.554015
Anti-Principal Planes :	50.680575	-1.546198
Nodal Planes :	50.680575	-1.546198
Anti-Nodal Planes :	53.780788	1.554015

PHYSICAL OPTICS PROPAGATION SETTINGS SUMMARY:

OBJ STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

1 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

STO STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

3 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

4 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

5 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

6 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

7 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

8 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

9 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

10 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

11 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

12 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

13 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

14 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

15 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

16 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

17 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

18 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

19 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

20 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

21 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

22 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

23 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

24 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

25 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

26 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

27 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

28 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

29 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

30 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

31 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

32 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

33 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

34 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

35 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

36 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

37 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

38 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

39 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

40 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

IMA STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit

FILES USED:

Zemax File

E:\Thesis laser printers\A3\optimized 4.ZMX

Glass Catalogs

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\SCHOTT.AGF

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\INFRARED.AGF

Coating Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\COATINGS\COATING.DAT

ABg Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\ABG_DATA\ABG_DATA.DAT

Σύστημα A4

System/Prescription Data

File : E:\Thesis laser printers\A4\10x BEX & objective.ZMX

Title:

Date : 2/25/2021

GENERAL LENS DATA:

Surfaces : 53
Stop : 2
System Aperture : Float By Stop Size = 0.75
Fast Semi-Diameters : On
Field Unpolarized : On

Convert thin film phase to ray equivalent : On
 J/E Conversion Method : X Axis Reference
 Glass Catalogs : SCHOTT INFRARED MISC
 Ray Aiming : Off
 Apodization : Gaussian, factor = 1.00000E+00
 Reference OPD : Exit Pupil
 Paraxial Rays Setting : Ignore Coordinate Breaks
 Method to Compute F/# : Tracing Rays
 Method to Compute Huygens Integral : Auto
 Print Coordinate Breaks : On
 Multi-Threading : On
 OPD Modulo 2 Pi : Off
 Temperature (C) : 2.00000E+01
 Pressure (ATM) : 1.00000E+00
 Adjust Index Data To Environment : Off
 Effective Focal Length : 0.7447973 (in air at system temperature and pressure)
 Effective Focal Length : 0.9682365 (in image space)
 Back Focal Length : -0.0003535529
 Total Track : 583
 Image Space F/# : 0.4965316
 Paraxial Working F/# : 0.4305604
 Working F/# : 0.5339818
 Image Space NA : 0.8660541
 Object Space NA : 0.001499998
 Stop Radius : 0.75
 Paraxial Image Height : 0
 Paraxial Magnification : 0
 Entrance Pupil Diameter : 1.5
 Entrance Pupil Position : 5
 Exit Pupil Diameter : 0.01458274
 Exit Pupil Position : -0.009766568
 Field Type : Angle in degrees
 Maximum Radial Field : 0
 Primary Wavelength [μm] : 1.064
 Angular Magnification : 0
 Lens Units : Millimeters
 Source Units : Watts
 Analysis Units : Watts/cm^2
 Afocal Mode Units : milliradians
 MTF Units : cycles/millimeter
 Include Calculated Data in Session File : On
 Include Calculated Data in Session File : On

Fields : 1
 Field Type : Angle in degrees

#	X-Value	Y-Value	Weight
1	0.000000	0.000000	1.000000

Vignetting Factors

#	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Wavelengths : 2

Units: μm

#	Value	Weight
1	1.064000	1.000000
2	0.532000	1.000000

Predicted coordinate ABCD matrix:

A =	0.7728
B =	0
C =	0
D =	0.7728

SURFACE DATA SUMMARY:

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Clear Diam	Chip Zone	Mech
Diam	Conic	Comment					
OBJ	STANDARD	Infinity	495			0 0	0
0							
1	STANDARD	Infinity	5		1.485		0
1.485	0						
STO	STANDARD	Infinity	5		1.5		0
1.5	0						
3	STANDARD	-76.61858	4	N-PK52A	20		0
20	0						
4	STANDARD	76.61858	0		20		0
20	0						
5	STANDARD	76.61858	5	SF6	20		0
20	0						
6	STANDARD	138.6	5		20		0
20	0	L1					
7	STANDARD	-76.61858	4	N-PK52A	20		0
20	0						
8	STANDARD	76.61858	0		20		0
20	0						
9	STANDARD	76.61858	5	SF6	20		0
20	0						
10	STANDARD	138.6	18.48123		20		0
20	0	L2					
11	STANDARD	151.5695	6	N-PK52A	20		0
20	0						
12	STANDARD	-151.5695	0		20		0
20	0						
13	STANDARD	-151.5695	5	SF6	20		0
20	0						
14	STANDARD	-273.2286	5		20		0
20	0	L3					
15	STANDARD	151.5695	6	N-PK52A	20		0
20	0						
16	STANDARD	-151.5695	0		20		0
20	0						
17	STANDARD	-151.5695	5	SF6	20		0
20	0						
18	STANDARD	-273.2286	2		20		0
20	0	L4					

19	STANDARD	-159.2852	4	N-PK52A	20	0
20	0					
20	STANDARD	159.2852	0		20	0
20	0					
21	STANDARD	159.2852	5	SF6	20	0
20	0					
22	STANDARD	287.3033	160.968		20	0
20	0	L5				
23	STANDARD	-159.2852	4	N-PK52A	20	0
20	0					
24	STANDARD	159.2852	0		20	0
20	0					
25	STANDARD	159.2852	5	SF6	20	0
20	0					
26	STANDARD	287.3033	253.5507		20	0
20	0	L6				
27	STANDARD	253.4079	5	N-PK52A	20	0
20	0					
28	STANDARD	-253.4079	0		20	0
20	0					
29	STANDARD	-253.4079	5	SF6	20	0
20	0					
30	STANDARD	-456.3453	10		20	0
20	0					
31	STANDARD	Infinity	50		12	0
12	0	Mask				
32	COORDBRK	-	0	-	-	-
33	STANDARD	Infinity	0	MIRROR	12	0
12	0					
34	COORDBRK	-	-50	-	-	-
35	STANDARD	-29.51833	-3.8	N-PK52A	12.5	0
12.5	0	Objective				
36	STANDARD	29.51833	0		12.5	0
12.5	0					
37	STANDARD	29.51833	-2.5	SF6	12.5	0
12.5	0					
38	STANDARD	-48.18865	-1		12.5	0
12.5	0					
39	STANDARD	-29.51833	-3.8	N-PK52A	12.5	0
12.5	0					
40	STANDARD	29.51833	0		12.5	0
12.5	0					
41	STANDARD	29.51833	-2.5	SF6	12.5	0
12.5	0					
42	STANDARD	-48.18865	-1		12.5	0
12.5	0					
43	STANDARD	94.10799	-3.3	N-BK7	12	0
12	0					
44	STANDARD	17.51257	0		12	0
12	0					
45	STANDARD	-8.811768	-3.9	N-BK7	11	0
11	-0.3327548					

46	STANDARD	-87.75392	0		11	0	0
11	0						
47	STANDARD	-6.64075	-3.1	N-BK7	9	0	9
0							
48	STANDARD	-10.06771	0		9	0	9
0							
49	STANDARD	-3.605237	-2	N-BK7	6	0	6
0							
50	STANDARD	-4.19589	-1.86		6	0	6
0							
51	STANDARD	Infinity	-1	F_SILICA	12		0
12	0						
52	STANDARD	Infinity	0	1.000000, 0.000000		12	0
12	0						
IMA	STANDARD	Infinity	1.300000, 0.000000		0.1778055		0
12	0						

SURFACE DATA DETAIL:

Surface OBJ STANDARD

Surface 1 STANDARD

Surface STO STANDARD

Surface 3 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 4 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 5 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 6 STANDARD L1

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 7 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 8 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 9 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 10 STANDARD L2

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 11 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 12 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 13 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 14 STANDARD L3

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 15 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 16 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 17 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 18 STANDARD L4

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 19 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 20 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 21 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 22 STANDARD L5

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 23 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 24 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 25 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 26 STANDARD L6

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 27 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 28 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 29 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 30 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 10

Surface 31 STANDARD Mask

Aperture : Rectangular Aperture

X Half Width : 0.5

Y Half Width : 0.5

Surface 32 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0

Tilt About X : 45

Tilt About Y : 0

Tilt About Z : 0

Order : Decenter then tilt

Surface 33 STANDARD

Mirror Substrate : Curved, Thickness = 2.40000E-01

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 34 COORDBRK

Decenter X : 0

Decenter Y : 0
Tilt About X : 45
Tilt About Y : 0
Tilt About Z : 0
Order : Decenter then tilt

Surface 35 STANDARD Objective
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 36 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 37 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 38 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 39 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 40 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 41 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 42 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6.25

Surface 43 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6

Surface 44 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 6

Surface 45 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 5.5

Surface 46 STANDARD
Aperture : Floating Aperture
Maximum Radius : 5.5

Surface 47 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 48 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 4.5

Surface 49 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 50 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 3

Surface 51 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface 52 STANDARD

Aperture : Floating Aperture

Maximum Radius : 6

Surface IMA STANDARD

EDGE THICKNESS DATA:

Surf	X-Edge	Y-Edge
OBJ	495.000000	495.000000
1	5.000000	5.000000
STO	4.344614	4.344614
3	5.310772	5.310772
4	0.000000	0.000000
5	4.705835	4.705835
6	3.983393	3.983393
7	5.310772	5.310772
8	0.000000	0.000000
9	4.705835	4.705835
10	18.450246	18.450246
11	5.339517	5.339517
12	0.000000	0.000000
13	5.147183	5.147183
14	5.513300	5.513300
15	5.339517	5.339517
16	0.000000	0.000000
17	5.147183	5.147183
18	1.868846	1.868846
19	4.628425	4.628425
20	0.000000	0.000000
21	4.859873	4.859873
22	160.479735	160.479735

23	4.628425	4.628425
24	0.000000	0.000000
25	4.859873	4.859873
26	253.574045	253.574045
27	4.605226	4.605226
28	0.000000	0.000000
29	5.087808	5.087808
30	10.109579	10.109579
31	50.000000	50.000000
32	0.000000	0.000000
33	0.000000	0.000000
34	-50.669252	-50.669252
35	-2.461496	-2.461496
36	0.000000	0.000000
37	-3.576279	-3.576279
38	-1.262225	-1.262225
39	-2.461496	-2.461496
40	0.000000	0.000000
41	-3.576279	-3.576279
42	-0.401509	-0.401509
43	-2.431557	-2.431557
44	-2.905296	-2.905296
45	-2.227138	-2.227138
46	-1.584622	-1.584622
47	-2.404519	-2.404519
48	-0.544135	-0.544135
49	-1.656575	-1.656575
50	-0.597622	-0.597622
51	-1.000000	-1.000000
52	0.000000	0.000000
IMA	0.000000	0.000000

SOLVE AND VARIABLE DATA:

Semi Diameter 2 : Fixed
 Semi Diameter 3 : Fixed
 Curvature of 4 : Solve, Pickup from surface 3 scaled by -1
 Semi Diameter 4 : Fixed
 Curvature of 5 : Solve, Pickup from surface 4 scaled by 1
 Semi Diameter 5 : Fixed
 Semi Diameter 6 : Fixed
 Curvature of 7 : Solve, Pickup from surface 3 scaled by 1
 Semi Diameter 7 : Fixed
 Curvature of 8 : Solve, Pickup from surface 7 scaled by -1
 Semi Diameter 8 : Fixed
 Curvature of 9 : Solve, Pickup from surface 8 scaled by 1
 Semi Diameter 9 : Fixed
 Curvature of 10 : Solve, Pickup from surface 6 scaled by 1
 Semi Diameter 10 : Fixed
 Semi Diameter 11 : Fixed
 Curvature of 12 : Solve, Pickup from surface 11 scaled by -1
 Semi Diameter 12 : Fixed
 Curvature of 13 : Solve, Pickup from surface 12 scaled by 1

Semi Diameter 13 : Fixed
Semi Diameter 14 : Fixed
Curvature of 15 : Solve, Pickup from surface 11 scaled by 1
Semi Diameter 15 : Fixed
Curvature of 16 : Solve, Pickup from surface 15 scaled by -1
Semi Diameter 16 : Fixed
Curvature of 17 : Solve, Pickup from surface 16 scaled by 1
Semi Diameter 17 : Fixed
Curvature of 18 : Solve, Pickup from surface 14 scaled by 1
Semi Diameter 18 : Fixed
Semi Diameter 19 : Fixed
Curvature of 20 : Solve, Pickup from surface 19 scaled by -1
Semi Diameter 20 : Fixed
Curvature of 21 : Solve, Pickup from surface 20 scaled by 1
Semi Diameter 21 : Fixed
Semi Diameter 22 : Fixed
Semi Diameter 23 : Fixed
Curvature of 24 : Solve, Pickup from surface 20 scaled by 1
Semi Diameter 24 : Fixed
Curvature of 25 : Solve, Pickup from surface 24 scaled by 1
Semi Diameter 25 : Fixed
Curvature of 26 : Solve, Pickup from surface 22 scaled by 1
Thickness of 26 : Solve, Total length from 7, held at 489
Semi Diameter 26 : Fixed
Semi Diameter 27 : Fixed
Curvature of 28 : Solve, Pickup from surface 27 scaled by -1
Semi Diameter 28 : Fixed
Curvature of 29 : Solve, Pickup from surface 28 scaled by 1
Semi Diameter 29 : Fixed
Semi Diameter 30 : Fixed
Semi Diameter 31 : Fixed
Semi Diameter 33 : Fixed
Parameter 3 Surf 34 : Solve, Pickup from surface 32 scaled by 1, offset by 0
Curvature of 35 : Variable
Semi Diameter 35 : Fixed
Curvature of 36 : Solve, Pickup from surface 35 scaled by -1
Semi Diameter 36 : Fixed
Curvature of 37 : Solve, Pickup from surface 36 scaled by 1
Semi Diameter 37 : Fixed
Curvature of 38 : Variable
Semi Diameter 38 : Fixed
Curvature of 39 : Solve, Pickup from surface 35 scaled by 1
Semi Diameter 39 : Fixed
Curvature of 40 : Solve, Pickup from surface 39 scaled by -1
Semi Diameter 40 : Fixed
Curvature of 41 : Solve, Pickup from surface 40 scaled by 1
Semi Diameter 41 : Fixed
Curvature of 42 : Solve, Pickup from surface 38 scaled by 1
Semi Diameter 42 : Fixed
Curvature of 43 : Variable
Semi Diameter 43 : Fixed
Curvature of 44 : Variable
Semi Diameter 44 : Fixed

Curvature of 45 : Variable
 Semi Diameter 45 : Fixed
 Conic of 45 : Variable
 Curvature of 46 : Variable
 Semi Diameter 46 : Fixed
 Curvature of 47 : Variable
 Semi Diameter 47 : Fixed
 Curvature of 48 : Variable
 Semi Diameter 48 : Fixed
 Curvature of 49 : Variable
 Semi Diameter 49 : Fixed
 Curvature of 50 : Variable
 Semi Diameter 50 : Fixed
 Semi Diameter 51 : Fixed
 Semi Diameter 52 : Fixed

INDEX OF REFRACTION DATA:

System Temperature: 20.0000 Celsius

System Pressure : 1.0000 Atmospheres

Absolute air index: 1.000269 at wavelength 1.064000 μm

Index data is relative to air at the system temperature and pressure.

Wavelengths are measured in air at the system temperature and pressure.

Surf	Glass	Temp	Pres	1.06400000	0.53200000	
0		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
1		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
2		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
3	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
4		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
5	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
6		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
7	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
8		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
9	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
10		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
11	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
12		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
13	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
14		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
15	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
16		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
17	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
18		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
19	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
20		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
21	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
22		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
23	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
24		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
25	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
26		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
27	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding

28		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
29	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
30		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
31		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
32	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
33	MIRROR	20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
34	<CRD BRK>			1.0000000000	1.0000000000	
35	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
36		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
37	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
38		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
39	N-PK52A	20.00	1.00	1.4896777459	1.4990233564	suitable for precision molding
40		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
41	SF6	20.00	1.00	1.7736845479	1.8156567220	lead containing glass type
42		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
43	N-BK7	20.00	1.00	1.5066348016	1.5194725831	step 0.5 available
44		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
45	N-BK7	20.00	1.00	1.5066348016	1.5194725831	step 0.5 available
46		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
47	N-BK7	20.00	1.00	1.5066348016	1.5194725831	step 0.5 available
48		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
49	N-BK7	20.00	1.00	1.5066348016	1.5194725831	step 0.5 available
50		20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
51	F_SILICA	20.00	1.00	1.4496309898	1.4607063446	source: The Infrared & Electro-
Optical Systems Handbook V. III						
52	<MODEL>	20.00	1.00	1.0000000000	1.0000000000	
53	<MODEL>	20.00	1.00	1.3000000000	1.3000000000	

THERMAL COEFFICIENT OF EXPANSION DATA:

Surf	Glass	TCE * 10E-6
0		0.0000000000
1		0.0000000000
2		0.0000000000
3	N-PK52A	13.0100000000 suitable for precision molding
4		0.0000000000
5	SF6	8.1000000000 lead containing glass type
6		0.0000000000
7	N-PK52A	13.0100000000 suitable for precision molding
8		0.0000000000
9	SF6	8.1000000000 lead containing glass type
10		0.0000000000
11	N-PK52A	13.0100000000 suitable for precision molding
12		0.0000000000
13	SF6	8.1000000000 lead containing glass type
14		0.0000000000
15	N-PK52A	13.0100000000 suitable for precision molding
16		0.0000000000
17	SF6	8.1000000000 lead containing glass type
18		0.0000000000
19	N-PK52A	13.0100000000 suitable for precision molding
20		0.0000000000
21	SF6	8.1000000000 lead containing glass type

```

22          0.0000000000
23      N-PK52A      13.0100000000 suitable for precision molding
24          0.0000000000
25          SF6      8.1000000000 lead containing glass type
26          0.0000000000
27      N-PK52A      13.0100000000 suitable for precision molding
28          0.0000000000
29          SF6      8.1000000000 lead containing glass type
30          0.0000000000
31          0.0000000000
32      <CRD BRK>      0.0000000000
33      MIRROR      0.0000000000
34      <CRD BRK>      0.0000000000
35      N-PK52A      13.0100000000 suitable for precision molding
36          0.0000000000
37          SF6      8.1000000000 lead containing glass type
38          0.0000000000
39      N-PK52A      13.0100000000 suitable for precision molding
40          0.0000000000
41          SF6      8.1000000000 lead containing glass type
42          0.0000000000
43          N-BK7      7.1000000000 step 0.5 available
44          0.0000000000
45          N-BK7      7.1000000000 step 0.5 available
46          0.0000000000
47          N-BK7      7.1000000000 step 0.5 available
48          0.0000000000
49          N-BK7      7.1000000000 step 0.5 available
50          0.0000000000
51      F_SILICA      0.5100000000 source: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook V.
III
52      <MODEL>      0.0000000000
53      <MODEL>      0.0000000000

```

GLOBAL VERTEX COORDINATES, ORIENTATIONS, AND ROTATION/OFFSET MATRICES:

Reference Surface: 53

Surf	R11			R12			R13			X		Tilt X
	R21	R22	R23	R21	R22	R23	R21	R22	R23	Y	Tilt Y	
	R31	R32	R33	R31	R32	R33	R31	R32	R33	Z	Tilt Z	
0	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000E+00	0.0000000000E+00	0.0000000000E+00	-9.000000000E+01	0.000000000E+00	
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	-1.078000000E+03	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	7.976000000E+01	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	
1	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	-9.000000000E+01	0.000000000E+00	
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	-5.830000000E+02	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	7.976000000E+01	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	
2	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	-9.000000000E+01	0.000000000E+00	
	0.0000000000	0.0000000000	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	-5.780000000E+02	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	
	0.0000000000	-1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	7.976000000E+01	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	

GLOBAL SURFACE CENTER OF CURVATURE POINTS:

Reference Surface: 53

Surf	X	Y	Z	
0	-	-	-	
1	-	-	-	
2	-	-	-	
3	0.0000000000	-649.6185829551	79.7600000000	
4	0.0000000000	-492.3814170449	79.7600000000	
5	0.0000000000	-492.3814170449	79.7600000000	
6	0.0000000000	-425.4000254796	79.7600000000	L1
7	0.0000000000	-635.6185829551	79.7600000000	
8	0.0000000000	-478.3814170449	79.7600000000	
9	0.0000000000	-478.3814170449	79.7600000000	
10	0.0000000000	-411.4000254796	79.7600000000	L2
11	0.0000000000	-379.9493192354	79.7600000000	
12	0.0000000000	-677.0882297029	79.7600000000	
13	0.0000000000	-677.0882297029	79.7600000000	
14	0.0000000000	-793.7474198146	79.7600000000	L3
15	0.0000000000	-363.9493192354	79.7600000000	
16	0.0000000000	-661.0882297029	79.7600000000	
17	0.0000000000	-661.0882297029	79.7600000000	
18	0.0000000000	-777.7474198146	79.7600000000	L4
19	0.0000000000	-661.8039502718	79.7600000000	
20	0.0000000000	-339.2335986651	79.7600000000	
21	0.0000000000	-339.2335986651	79.7600000000	
22	0.0000000000	-206.2154500964	79.7600000000	L5
23	0.0000000000	-491.8359184059	79.7600000000	
24	0.0000000000	-169.2655667992	79.7600000000	
25	0.0000000000	-169.2655667992	79.7600000000	
26	0.0000000000	-36.2474182305	79.7600000000	L6
27	0.0000000000	183.4079225909	79.7600000000	
28	0.0000000000	-318.4079225909	79.7600000000	
29	0.0000000000	-318.4079225909	79.7600000000	
30	0.0000000000	-516.3452947554	79.7600000000	
31	-	-	-	Mask
32	-	-	-	
33	-	-	-	
34	-	-	-	
35	0.0000000000	0.0000000000	0.2416662032	Objective
36	0.0000000000	0.0000000000	55.4783337968	
37	0.0000000000	0.0000000000	55.4783337968	
38	0.0000000000	0.0000000000	-24.7286521545	
39	0.0000000000	0.0000000000	-7.0583337968	
40	0.0000000000	0.0000000000	48.1783337968	
41	0.0000000000	0.0000000000	48.1783337968	
42	0.0000000000	0.0000000000	-32.0286521545	
43	0.0000000000	0.0000000000	109.2679873314	
44	0.0000000000	0.0000000000	29.3725706243	
45	0.0000000000	0.0000000000	3.0482318158	

46	0.0000000000	0.0000000000	-79.7939166850
47	0.0000000000	0.0000000000	1.3192496545
48	0.0000000000	0.0000000000	-5.2077145639
49	0.0000000000	0.0000000000	1.2547625450
50	0.0000000000	0.0000000000	-1.3358903125
51	-	-	-
52	-	-	-
53	-	-	-

ELEMENT VOLUME DATA:

For centered elements with plane or spherical circular faces, exact volumes are computed by assuming edges are squared up to the larger of the front and back radial aperture.

For all other elements, approximate volumes are numerically integrated to 0.1% accuracy. Zero volume means the volume cannot be accurately computed.

Single elements that are duplicated in the Lens Data Editor for ray tracing purposes may be listed more than once yielding incorrect total mass estimates.

	Volume cc	Density g/cc	Mass g	
Element surf	3 to 4	1.462238	3.700000	5.410280
Element surf	5 to 6	1.524712	5.180000	7.898007
Element surf	7 to 8	1.462238	3.700000	5.410280
Element surf	9 to 10	1.524712	5.180000	7.898007
Element surf	11 to 12	1.781245	3.700000	6.590606
Element surf	13 to 14	1.593900	5.180000	8.256403
Element surf	15 to 16	1.781245	3.700000	6.590606
Element surf	17 to 18	1.593900	5.180000	8.256403
Element surf	19 to 20	1.355317	3.700000	5.014674
Element surf	21 to 22	1.548799	5.180000	8.022777
Element surf	23 to 24	1.355317	3.700000	5.014674
Element surf	25 to 26	1.548799	5.180000	8.022777
Element surf	27 to 28	1.508793	3.700000	5.582535
Element surf	29 to 30	1.584586	5.180000	8.208155
Element surf	35 to 36	0.384515	3.700000	1.422704
Element surf	37 to 38	0.372644	5.180000	1.930294
Element surf	39 to 40	0.384515	3.700000	1.422704
Element surf	41 to 42	0.372644	5.180000	1.930294
Element surf	43 to 44	0.324732	2.510000	0.815077
Element surf	45 to 46	0.293334	2.510000	0.736267
Element surf	47 to 48	0.177305	2.510000	0.445036
Element surf	49 to 50	0.052808	2.510000	0.132549
Element surf	51 to 52	0.113097	2.200000	0.248814
Element surf	52 to 53	0.000000	0.000000	0.000000
Total Mass:		105.259921		

F/# DATA:

F/# calculations consider vignetting factors and ignore surface apertures.

Wavelength:	1.064000	0.532000				
#	Field	Tan	Sag	Tan	Sag	
1	0.0000 (deg):	0.5340		0.5340	0.5237	0.5237

CARDINAL POINTS:

Object space positions are measured with respect to surface 1.
Image space positions are measured with respect to the image surface.
The index in both the object space and image space is considered.

	Object Space (Primary)	Image Space
W =	1.064000	
Focal Length :	-0.744797	-0.968237
Focal Planes :	81.610798	-0.000354
Principal Planes :	82.355595	0.967883
Anti-Principal Planes :	80.866000	-0.968590
Nodal Planes :	80.642561	-0.745151
Anti-Nodal Planes :	82.579034	0.744444

W =	0.532000	
Focal Length :	-0.725807	-0.943549
Focal Planes :	81.667380	-0.000421
Principal Planes :	82.393187	0.943128
Anti-Principal Planes :	80.941573	-0.943970
Nodal Planes :	80.723831	-0.726228
Anti-Nodal Planes :	82.610929	0.725386

PHYSICAL OPTICS PROPAGATION SETTINGS SUMMARY:

OBJ STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

1 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

STO STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

3 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off

Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
4 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
5 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
6 STANDARD L1

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
7 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
8 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
9 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
10 STANDARD L2

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

11 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

12 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

13 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

14 STANDARD L3
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

15 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

16 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

17 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

18 STANDARD L4
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off

Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
19 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
20 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
21 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
22 STANDARD L5
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
23 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
24 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
25 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
26 STANDARD L6

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

27 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

28 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

29 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

30 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

31 STANDARD Mask

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

32 COORDBRK

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

33 STANDARD

Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off

Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
34 COORDBRK
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
35 STANDARD Objective
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
36 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
37 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
38 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
39 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
40 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
41 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off

Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
42 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
43 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
44 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
45 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
46 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
47 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
48 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off

Output Pilot Radius : Best Fit
49 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
50 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
51 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
52 STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit
IMA STANDARD
Use Rays To Propagate To Next Surface : Off
Recompute Pilot Beam : Off
Do Not Rescale Beam Size Using Ray Data: Off
Use Angular Spectrum Propagator : Off
Use X-Axis Reference : Off
Output Pilot Radius : Best Fit

FILES USED:

Zemax File

E:\Thesis laser printers\A4\10x BEX & objective.ZMX

Glass Catalogs

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\SCHOTT.AGF

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\INFRARED.AGF

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\GLASSCAT\MISC.AGF

Coating Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\COATINGS\COATING.DAT

ABg Data

C:\Users\Vlad\Documents\Zemax\ABG_DATA\ABG_DATA.DAT