

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ &
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη φασματογράφων για τη μελέτη Μεταβατικών
Φωτεινών Εκλάμψεων (TLEs) στην ατμόσφαιρα**

Διπλωματική εργασία

της

Χαρίση Ελευθερίας

Επιβλέπων: Μαλτέζος Σταύρος

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....
Χαρίση Ελευθερία

Διπλωματούχος Φυσικός Εφαρμογών ΣΕΜΦΕ-ΕΜΠ

©2017, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται 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 τη συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας , θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους οι οποίοι με βοήθησαν και με στήριξαν ώστε να διευρύνω τις επιστημονικές μου γνώσεις. Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Μαλτέζο Σταύρο, τον Ομ. Καθηγητή Φωκίτη Μανώλη και τον Διδάκτορα Νίκο Μαραγκό για την βοήθεια, την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε με κάθε τρόπο και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία στόχο έχει τη μελέτη και την ανάλυση του αποτυπώματος που δημιουργεί η ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από διάφορα φωτεινά φαινόμενα πάνω σε έναν ανιχνευτή. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται τα φωτεινά φαινόμενα (TLEs) που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και οι μηχανισμοί δημιουργίας τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά και τα είδη των διατάξεων με τα οποία μπορούμε να ανιχνεύσουμε τα TLEs και να υπολογίσουμε τις ενέργειές τους. Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Trace Pro, προσομοιώνεται το φασματόμετρο με το οποίο μπορούμε να καταγράψουμε την πορεία των δεσμών των ακτινών που εκπέμπονται από μία πηγή και πως αυτές ανιχνεύονται πάνω στην κάμερα. Απώτερος σκοπός της εργασίας είναι να συνεισφέρει σε μελλοντικά πειράματα.

Abstract

The present aims to study and analysis of the imprint created by the radiation energy emitted into the atmosphere from various luminous phenomena onto a detector. Initially, the first chapter describes the luminous phenomena (TLEs) occurring in the atmosphere and their creation mechanisms. The second chapter analyzes the characteristics and types of devices with which we can detect the TLEs and calculate their actions. Finally, the third chapter with the help of computational program TracePro we simulate spectrometer with which we can record the path of the beam emitted by a source and how they are detected on the camera. The ultimate goal of the project is to contribute in future experiments.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Τα μεταβατικά φωτεινά φαινόμενα ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (TLEs)	1
1.1 Γενικά στοιχεία των TLEs.....	1
1.2 Ιστορική αναδρομή των μελετών.....	2
1.3 Μηχανισμοί δημιουργίας των TLEs και διάφορα χαρακτηριστικά τους	5
1.3.1 Μηχανισμοί δημιουργίας	5
1.3.2 Χαρακτηριστικά των TLEs.....	7
1.4 Επιπτώσεις των TLEs στην ατμόσφαιρα.....	8
Κεφάλαιο 2. Φασματοσκοπία των TLEs.....	11
2.1 Το φάσμα εκπομπής των TLEs και ανάλυση του [13].....	11
2.2 Είδη φραγμάτων και φασματόμετρων	14
2.2.1 Φράγμα περίθλασης [14]	14
2.2.2 Κλιμακωτά φράγματα.....	15
2.2.3 Συμβολόμετρα Fabry-Perot [15].....	18
2.2.4 Κοίλα φράγματα.....	19
2.2.5 CCD (Charge-Coupled Device).....	20
2.2.6 Φωτοπολλαπλασιαστές [17]	25
2.3 Τα μέρη ενός φασματοσκοπίου	35
Κεφάλαιο 3. Προσομοίωση με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου TracePro	37
3.1 Γενικές προδιαγραφές της διάταξης.....	37

3.2	Τι είναι το TracePro[18].....	38
3.2.1	Το στερεό μοντέλο (Solid Model)	41
3.2.2	Ορισμός οπτομηχανικών συστημάτων.....	42
3.2.3	Ιδιότητες πηγής και αντικειμένων	44
3.2.4	Δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση	45
3.3	Σχεδίαση και αποτελέσματα προσομοίωσης.....	45
3.3.1	Σχεδίαση πηγής.....	45
3.3.2	Σχεδίαση περιθλαστικής ανακλαστικής επιφάνειας ..	47
3.3.3	Γεωμετρική σχεδίαση φασματογράφου	50
3.3.4	Προσομοίωση και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	51
3.3.5	Αλλαγή παραμέτρων και επαναπροσδιορισμός της ισχύος	57
	Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα για τη διάταξη και προτάσεις για βελτίωση και πιθανές εφαρμογές.....	61
	Βιβλιογραφία	63

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Οι διάφοροι τύποι TLEs στη γήινη ατμόσφαιρα.[2].....	2
Εικόνα 1.2 Χωρική κατανομή των διαφόρων TLEs σε σχέση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας βάσει των δεδομένων του πειράματος ISUAL.[4]	4
Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού δημιουργίας Sprite. [7].....	7
Εικόνα 2.1 Φάσμα εκπομπής ενός sprite. [13].....	11
Εικόνα 2.2 Διαφορική κατανομή γεγονότων ανά αριθμό φωτονίων για UV (μαύρο) και IR (κόκκινο). [13].....	13
Εικόνα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση κλιμακωτού φράγματος....	16
Εικόνα 2.4 βΣχηματική αναπαράσταση διάταξης με φασματόμετρο Fabry-Perot	18
Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση ενός pixel.....	21
Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση ενός CCD με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζονται για την λειτουργία του	22
Εικόνα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση ενός frame (πάνω) και ενός interline transfer CCD	23
Εικόνα 2.8 Κβαντική απόδοση CCD συναρτήσει του μήκος κύματος για διάφορες θερμοκρασίες	24
Εικόνα 2.9 Τυπική καμπύλη κβαντικής απόδοσης CCD συναρτήσει του μήκος κύματος	25
Εικόνα 2.10 Ένας τυπικός φωτοπολλαπλασιαστής	26

Εικόνα 2.11 Συντελεστής διαπερατότητας για διάφορα υλικά του παραθύρου.	27
Εικόνα 2.12 Κβαντική απόδοση διάφορων υλικών της φωτοκαθόδου.....	28
Εικόνα 2.13 Φωτοευαισθησία της φωτοκαθόδου.....	29
Εικόνα 2.14 Το δ συναρτήσει της τάσης V για διάφορα υλικά της δυνόδου.	31
Εικόνα 2.15 Κύκλωμα μετατροπής παλμού ρεύματος σε τάσης. .	32
Εικόνα 2.16 Κύκλωμα διαιρέτη τάσης για AC λειτουργία.	32
Εικόνα 2.17 Σχηματική διάταξη ενός φασματοσκοπίου.	36
Εικόνα 3.1 Σχέδιο οπτικών εξαρτημάτων της διάταξης.	37
Εικόνα 3.2 Το GUI του TracePro.	40
Εικόνα 3.3 Παράθυρο εισαγωγής ενός στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος.....	41
Εικόνα 3.4 Ιδιότητες της πηγής.....	46
Εικόνα 3.5 Γραφική αναπαράσταση των διανυσμάτων β και β_0 . .	49
Εικόνα 3.6 Γεωμετρική αναπαράσταση της διάταξης.....	51
Εικόνα 3.7 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων. Το μπλε αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μήκος κύματος και το κόκκινο στο μικρότερο.....	52
Εικόνα 3.8 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων μήκους κύματος 800 nm (IR).....	52
Εικόνα 3.9 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων μήκους κύματος 700 nm.	53

Εικόνα 3.10 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων μήκους κύματος 600 nm.....	53
Εικόνα 3.11 Κανονικοποιημένη χωρική κατανομή της απορροφούμενης ισχύς στην επιφάνεια εξόδου.....	54
Εικόνα 3.12 Γράφημα Candela.....	55
Εικόνα 3.13 Γράφημα Candela.....	56
Εικόνα 3.14 Γράφημα Candela.....	56
Εικόνα 3.15 Μήκος οπτικού δρόμου ακτίνων με αντίστοιχη ισχύ. 57	
Εικόνα 3.16 Χρωματική αναπαράσταση της ανάλυσης της δέσμης (αριστερά) και χωρική κατανομή της έντασης (δεξιά).....	58
Εικόνα 3.17 Χρωματική αναπαράσταση της ανάλυσης της δέσμης (δεξιά) και χωρική κατανομή της έντασης (αριστερά).....	59
Εικόνα 3.18 Χωρική κατανομή της έντασης (αριστερά) και χρωματική αναπαράσταση της ανάλυσης της δέσμης (δεξιά).	60

Κατάλογος Πινάκων

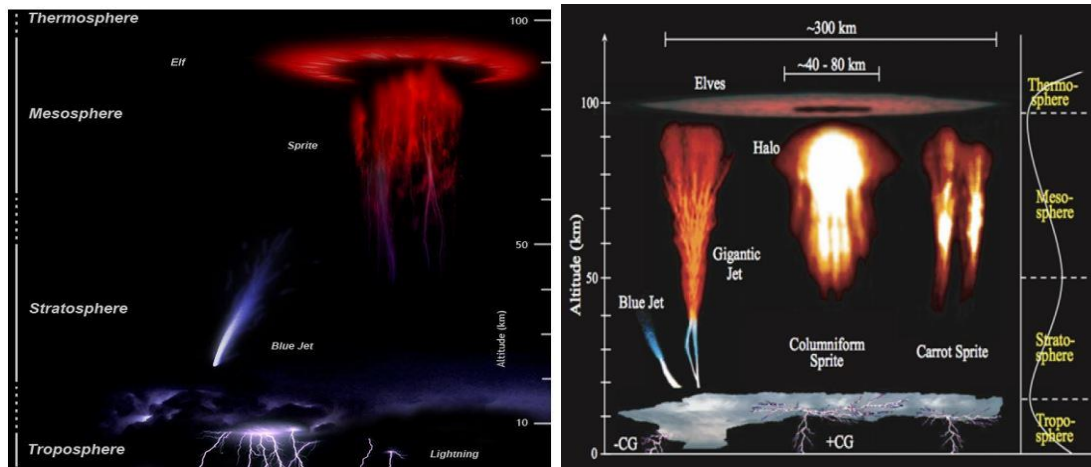
Πίνακας 3.1 Πίνακας τιμών για το K	42
Πίνακας 3.2 Πίνακας συντελεστών βάρους και αντίστοιχης ροής ενέργειας ανά μήκος κύματος.....	46

Κεφάλαιο 1. Τα μεταβατικά φωτεινά φαινόμενα ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (TLEs)

1.1 Γενικά στοιχεία των TLEs

Μεταβατικά Φωτεινά Φαινόμενα (Transient Luminous Events – TLEs) είναι μια οικογένεια βραχύβιων ηλεκτρικών φαινομένων που συμβαίνουν πολύ πάνω από το ύψος που εμφανίζονται διάφορα καιρικά φαινόμενα όπως οι αστραπές (τροπόσφαιρα). Τα φαινόμενα αυτά, που συμβαίνουν στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, οφείλονται σε ηλεκτρικά επαγόμενο πλάσμα και ονομάζονται παροδικά διότι οι διαφόρων τύπων ηλεκτρικές εκκενώσεις στερούνται πολλών χαρακτηριστικών με παρόμοια φαινόμενα που συμβαίνουν στην τροπόσφαιρα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι TLEs, με πιο συνηθισμένα τα sprites, τα ELVES και τα jets [1].

Το 1920 ο Σκωτσέζος φυσικός C.T.R Wilson προέβλεψε την δημιουργία ηλεκτρικών εκκενώσεων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, πάνω από μεγάλες καταιγίδες αλλά η πρώτη άμεση παρατήρηση τέτοιων φαινομένων έγινε το 1989 και οι μελέτες πάνω στα φαινόμενα αυτά ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 90.



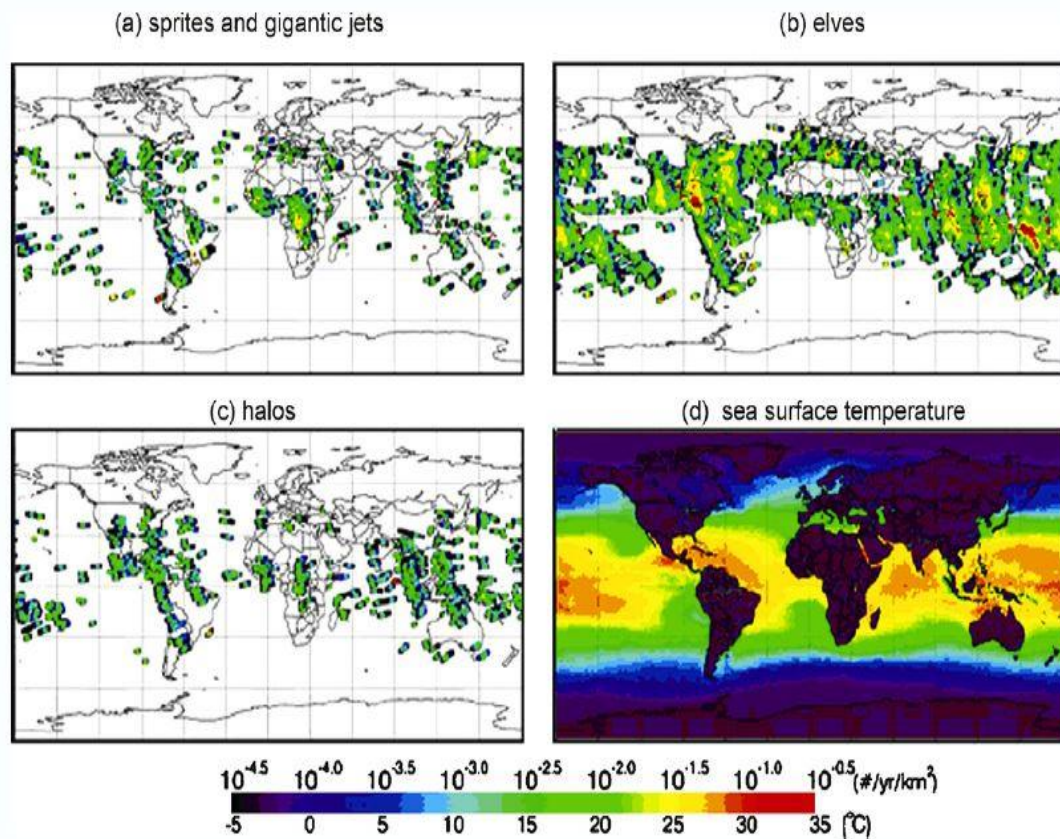
Εικόνα 1.1 Οι διάφοροι τύποι TLEs στη γήινη ατμόσφαιρα.[2]

1.2 Ιστορική αναδρομή των μελετών

Μία από τις πρώτες ερευνητικές αποστολές που ασχολήθηκε με την παρατήρηση των TLEs ήταν στα πλαίσια του πειράματος Mediterranean Israel Dust Experiment (MEIDEX) που διεξήχθη στο διαστημικό λεωφορείο Columbia κατά την τελευταία αποστολή του και τα αποτελέσματά της παρουσιάστηκαν τον Ιανουάριο του 2003. Η αποστολή διήρκησε 16 μέρες σε ύψος 280 km από την επιφάνεια της θάλασσας σε γεωγραφικό πλάτος 39° πάνω από τις περιοχές του Ατλαντικού και της Μεσογείου. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια κάμερα ραδιομετρικού τύπου Xybion η οποία χρησιμοποιείται και για επίγειες παρατηρήσεις. Οι ελιγμοί του διαστημικού λεωφορείου και οι αλλαγές προσανατολισμού της κάμερας επέτρεψαν τη διεξαγωγή των βέλτιστων δυνατών παρατηρήσεων.

Μια ασυνήθιστη παρατήρηση που έγινε στο συγκεκριμένο πείραμα είναι το φαινόμενο TIGER (Transient Ionospheric Glow Emission in Red) που οφείλεται σε διεργασίες παρόμοιες με αυτές που συμβαίνουν στη γήινη μαγνητόσφαιρα.

Κατά τα έτη 2001-2004 διεξήχθη το πείραμα Lightning and Sprites Observations (LSO) στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS) σε ύψος 400 km και γεωγραφικό πλάτος 51,68°. Το πείραμα εισήγαγε μια πρωτοποριακή μέθοδο παρατήρησης που επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή όλων των συμβάντων στον χώρο πάνω από τις καταιγίδες. Τον Μάιο του 2004 τέθηκε σε τροχιά, ύψους 891 km, ο δορυφόρος FORMOSAT-2 στον οποίο ήταν εγκατεστημένο το πείραμα ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning), το οποίο διήρκησε 5 χρόνια. Τα όργανα μέτρησης αποτελούνταν από μια κάμερα, ένα φασματοφωτόμετρο με κατάλληλα φίλτρα και μια συστοιχία φωτόμετρων για μετρήσεις σε διαφορετικά υψόμετρα και φασματικές περιοχές. Οι παρατηρήσεις του πειράματος έδειξαν ότι τα TLEs συμβαίνουν κυρίως σε περιοχές που παρατηρούνται περισσότερες καταιγίδες, αλλά με διαφορές στις χωρικές κατανομές μεταξύ των διάφορων τύπων TLEs.[3]



Εικόνα 1.2 Χωρική κατανομή των διαφόρων TLEs σε σχέση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας βάσει των δεδομένων του πειράματος ISUAL.[4]

Τέλος, κατά την χρονική περίοδο 2005-2010 τέθηκαν σε λειτουργία πειράματα στους δορυφόρους “Tatiana” και “Universitetsky-Tatiana-2” σε τροχιές ύψους 950 και 820-850 km και γεωγραφικά πλάτη 81° και $98,8^{\circ}$ αντίστοιχα. Ο κύριος στόχος και των δύο επιστημονικών προγραμμάτων ήταν η μελέτη του διαστήματος πλησίον της Γης μετρώντας τις ροές φορτισμένων σωματιδίων, που προέρχονται από τον ηλιακό άνεμο, καθώς επίσης και την ακτινοβολία που εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα, κυρίως στην περιοχή του υπεριώδους [5,6].

1.3 Μηχανισμοί δημιουργίας των TLEs και διάφορα χαρακτηριστικά τους

1.3.1 Μηχανισμοί δημιουργίας

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα TLEs είναι φαινόμενα που εκδηλώνονται πάνω από υπάρχουσες καταιγίδες. Παρ' όλα αυτά δεν εμφανίζονται πάντα πάνω από αυτές. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές παράμετροι που παίζουν ρόλο για την εκδήλωση ή όχι των TLEs και αφορούν τις καταιγίδες, με πιο γνωστές την πολικότητα της αστραπής (+/- CG¹), το μέγιστο ρεύμα της και η συχνότητα εμφάνισής του, η ύπαρξη M-components (παροδικές εξάρσεις ή διακυμάνσεις στη φάση του συνεχούς ρεύματος), το μέγεθος και η διάρκεια του συνεχούς ρεύματος και η επακόλουθη στιγμιαία αλλαγή φορτίου (CMC – Charge Moment Change).

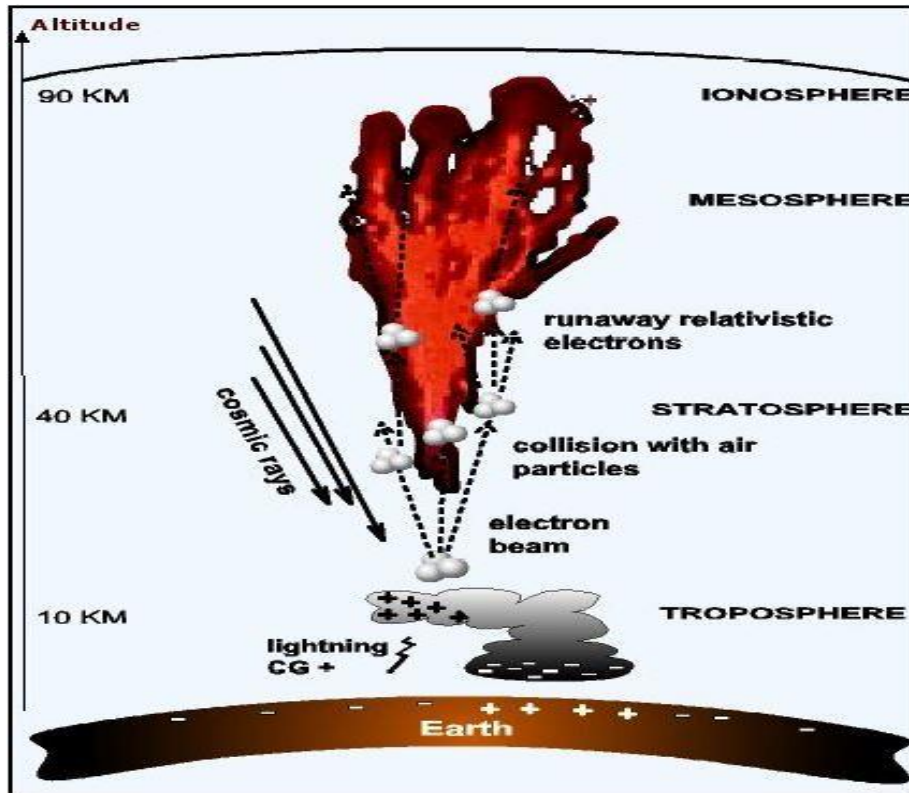
Έχει εξακριβωθεί ότι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την παραγωγή τους είναι το μέγεθος της κατακόρυφης στιγμιαίας αλλαγής φορτίου, η οποία ορίζεται ως το γινόμενο του φορτίου (Q) και της υψομετρικής διαφοράς (h_c) που φτάνει η αστραπή. Ένα παρόμοιο μέτρο σύγκρισης είναι το επαγόμενο CMC (iCMC) το οποίο ορίζεται ως η συνολική αλλαγή φορτίου εντός των πρώτων 2 ms από την εκδήλωση της αστραπής. Η μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης εντοπίζεται για τιμές της κατακόρυφης CMC μεταξύ 600 και 1300 Ckm [5].

Οι μηχανισμοί για την παραγωγή των TLEs που έχουν προταθεί είναι 3 (με μικρές παραλλαγές για τα διάφορα είδη των TLEs). Ο

¹ Cloud-to-Ground

πρώτος οφείλεται στην διέγερση στοιχείων της ατμόσφαιρας από σκεδάσεις ελευθέρων ηλεκτρονίων που έχουν την απαιτούμενη ενέργεια. Οι πρώτες παρατηρήσεις υποδεικνύαν ότι εκπομπή γινότανε από μόρια αζώτου (N_2 1p) και απουσίαζε η εκπομπή από το φάσμα Meinel του N_2^+ λόγω αποσβέσεων στην ατμόσφαιρα. Ο δεύτερος μηχανισμός περιλαμβάνει τον ιονισμό ουδέτερων στοιχείων της ατμόσφαιρας από καταιγισμό κατάρρευσης (breakdown cascades) από την πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από τα σύννεφα που ακολουθεί μία +CG εκκένωση. Η κατάρρευση συμβαίνει όταν σχηματίζονται δέσμες μεγάλης χωρικής πυκνότητας φορτίου. Τέλος, ο τρίτος μηχανισμός σχετίζεται με ηλεκτρόνια ενέργειας $E > 5$ keV, που δημιουργούνται λόγω ιονισμού της ατμόσφαιρας από κοσμική ακτινοβολία. Σε αυτό το μηχανισμό το πεδίο κατωφλίου² είναι μικρότερο κατά δέκα φορές από ότι στους άλλους μηχανισμούς [7].

² Πεδίο κατωφλίου είναι η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που χρειάζεται για να εκδηλωθεί κάποιο φαινόμενο.



Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού δημιουργίας Sprite. [7]

1.3.2 Χαρακτηριστικά των TLEs

Ένας από τους διάφορους τύπους TLEs είναι τα sprites, τα οποία συνήθως έχουν χρώμα κοκκινωπό-πορτοκαλί ή πράσινο-μπλε, χωρίζονται σε διάφορες υποκατηγορίες ανάλογα με τη μορφή τους (πχ C-sprites, Carrot sprites) και εκδηλώνονται σε ύψη από 50 έως 90 km πάνω από την επιφάνεια της Γης με χρονική διάρκεια της τάξης μεγέθους των ms.

ELVES είναι το ακρωνύμιο για τις εκπομπές φωτός και πολύ μικρής συχνότητας διαταραχών λόγω ηλεκτρομαγνητικών παλμών (Emissions of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources). Τις περισσότερες φορές εμφανίζονται ως μια ασθενής λάμψη κόκκινης απόχρωσης και έκτασης 400 km σε διάμετρο, που διαρκεί περίπου 1 ms.

Εκδηλώνονται στην ιονόσφαιρα σε ύψος 100 km από το έδαφος, με μεγαλύτερη συχνότητα από τα sprites και το CMC κατωφλίου κυμαίνεται από 350 έως 600 C [8].

Επιπλέον, υπάρχουν τα jets που διακρίνονται σε blue jets, blue starters και gigantic jets. Εμφανίζονται πάνω από τα σύννεφα με αρνητική πολικότητα (-CG), έχουν ανοδική κίνηση φτάνοντας σε υψόμετρο 10 έως 50 km, δεν έχουν άμεση συσχέτιση με την εκδήλωση κεραυνών και είναι πιο φωτεινά και σπάνια από τα sprites. Τα blue starters σχετίζονται με τα jets μόνο που είναι μικρότερα (φτάνουν μόνο τα 20 km) και πιο φωτεινά από αυτά. Τέλος, τα gigantic jets φτάνουν μέχρι τα 70 km ύψος και εκδηλώνονται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα (έως και 40000 km/s) [9].

1.4 Επιπτώσεις των TLEs στην ατμόσφαιρα

Γενικά, τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα εκκένωσης (TLEs, αστραπές κλπ.) προκαλούν διάφορες επιπτώσεις στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε χημικές, ηλεκτρικές και ενεργειακές-θερμικές. Όσον αφορά τις χημικές επιπτώσεις, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή μορίων NO_x (NO και NO_2) στις περιοχές της τροπόσφαιρας και μέσης ατμόσφαιρας, που με τη σειρά τους συντελούν στην παραγωγή όζοντος (O_3) και ριζών υδροξυλίου (OH). Για τον υπολογισμό των παραγόμενων ποσοτήτων NO_x πρέπει να είναι γνωστές η συχνότητα των φαινομένων, οι χημικές αντιδράσεις που

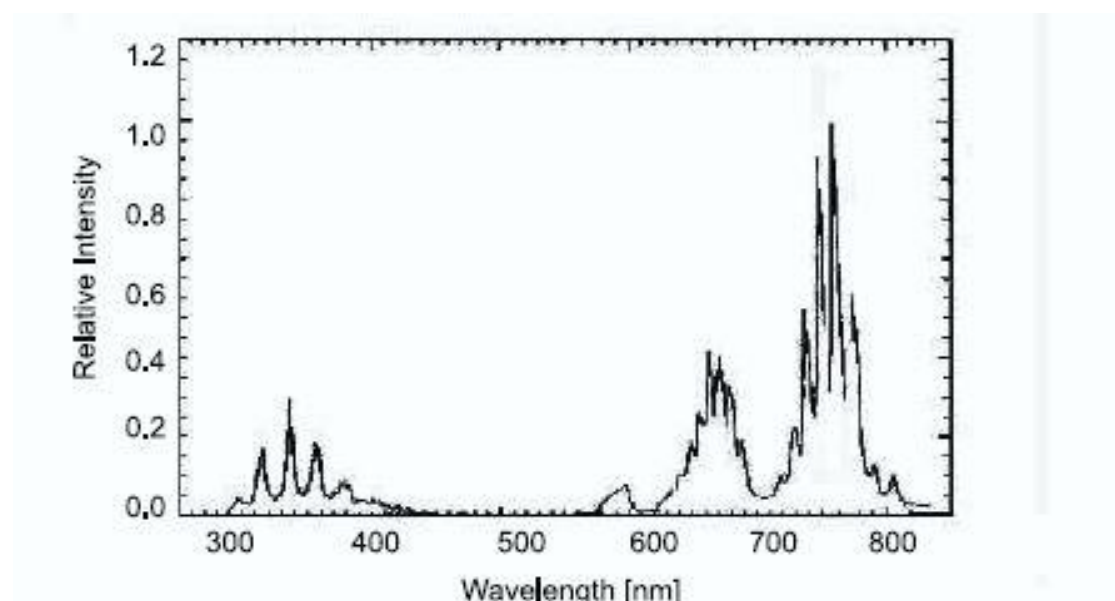
συμμετέχουν στην δημιουργία τους και το πόσο ενέργειας που αυτές απαιτούν. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες και προσομοιώσεις με σκοπό να κατανοηθεί ποιοι είναι οι μηχανισμοί και οι αντιδράσεις που έχουν σημαίνοντα ρόλο. Από τα παραπάνω έχει εκτιμηθεί ότι σε παγκόσμια κλίμακα η ποσότητα NO_x που οφείλεται σε TLEs είναι $7 \times 10^{23} - 2 \times 10^{28}$ μόρια ανά δευτερόλεπτο. Επιπλέον, λόγω των TLEs είναι δυνατή η μεταφορά ενέργειας από την τροπόσφαιρα στην μέση ατμόσφαιρα και ιονόσφαιρα [10]. Ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται ενέργεια είναι μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (UV, ορατή, IR, ακτίνες X και γ) η οποία εκπέμπεται από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια. Η μεταβολή της κινητικής τους κατάστασης οφείλεται στα ισχυρά ηλεκτροστατικά πεδία που δημιουργούνται σε μεγάλα υψόμετρα από τα TLEs. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή ταλαντώσεων ή διεγέρσεων των μορίων, ή εναποτίθεται ως θερμότητα. Παρ' όλο που δεν μπορεί ακόμα να γίνει μια πολύ αξιόπιστη ποσοτική μέτρηση, η συνολική ενέργεια που εκλύεται εκτιμάται ότι είναι της τάξης των GJ. Τέλος, τα διάφορα φαινόμενα εκκένωσης δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά ραδιοκύματα, με εύρος συχνοτήτων από μερικά Hz (ELF/VLF³) έως μερικά εκατοντάδες MHz (UHF), τα οποία διαδίδονται για μεγάλες αποστάσεις στον κυματοδηγό Γης-Ιονόσφαιρας. Αυτά τα ραδιοσήματα αποτελούν τον φυσικό ατμοσφαιρικό θόρυβο και συμβάλουν στην μελέτη και ανίχνευση των TLEs αφού μπορούμε να λάβουμε χρήσιμες πληροφορίες από αυτά [11, 12].

³ Extreme Low Frequency/Very Low Frequency

Κεφάλαιο 2. Φασματοσκοπία των TLEs

2.1 Το φάσμα εκπομπής των TLEs και ανάλυση του [13]

Γενικά, το εύρος των τιμών του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται φάσμα εκπομπής. Τα διάφορα είδη των TLEs εκπέμπουν διαφορετικού μήκους κύματος ακτινοβολία, που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως θα δούμε παρακάτω, αν και σε γενικές γραμμές εκτείνονται από την περιοχή των ραδιοκυμάτων έως και την περιοχή των ακτίνων-γ.



Εικόνα 2.1 Φάσμα εκπομπής ενός sprite. [13]

Από τα φάσματα εκπομπής μπορούμε να εκτιμήσουμε την συνολική ενέργεια που ακτινοβολείται κατά την εκδήλωση του φαινομένου. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας τον αριθμό φωτονίων που εκπέμπονται σε κάθε περιοχή μήκους κύματος. Ο συνολικός αριθμός φωτονίων που εκπέμπονται σε στερεά γωνία 4π δίνεται από τον τύπο

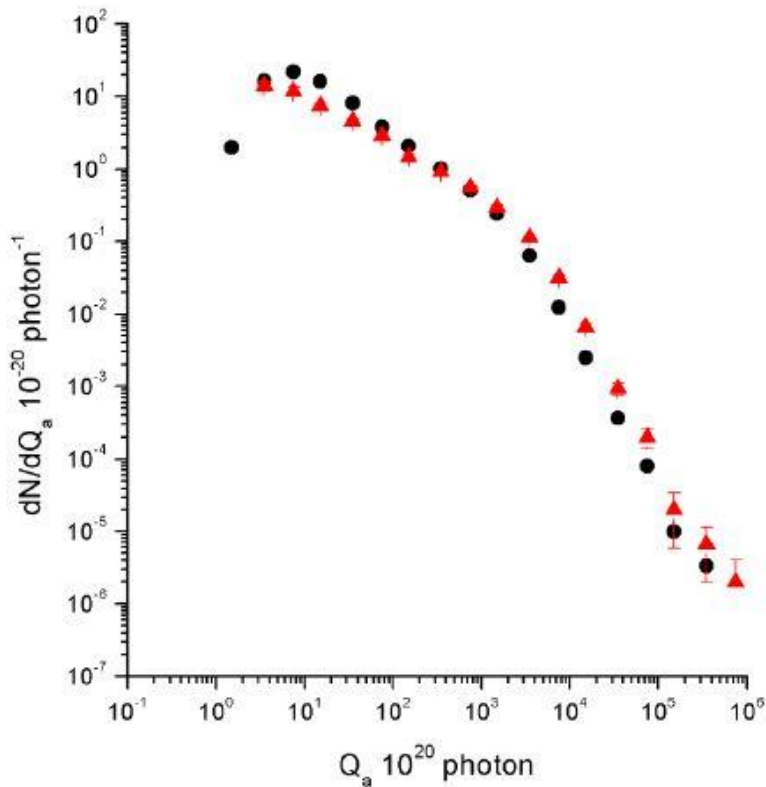
$$Q_{tot} = Q_{exp} \frac{4\pi R^2}{S}, \quad (2.1)$$

όπου Q_{exp} είναι ο αριθμός φωτονίων που προσπίπτουν στην κάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή, S η επιφάνεια αυτής και R η απόσταση μεταξύ φωτοπολλαπλασιαστή και τις περιοχής εκδήλωσης του φαινομένου. Έτσι η ενέργεια υπολογίζεται μέσω του τύπου

$$E_{tot} = \sum_i \varepsilon_i \cdot Q_{tot,i}, \quad (2.2)$$

όπου ε_i είναι η μέση ενέργεια κάθε φασματικής περιοχής και το άθροισμα είναι πάνω στον αριθμό φασματικών περιοχών (κορυφών) του φάσματος εκπομπής⁴.

⁴ Η Σχ. 2.2 είναι προσεγγιστική. Πιο ακριβής υπολογισμός θα απαιτούσε τον υπολογισμό ολοκληρώματος πράγμα που είναι αρκετά δύσκολο μιας και θα έπρεπε να βρούμε συναρτησιακή μορφή για την πυκνότητα του φάσματος εκπομπής.



Εικόνα 2.2 Διαφορική κατανομή γεγονότων ανά αριθμό φωτονίων για UV (μαύρο) και IR (κόκκινο). [13]

Επίσης, από το φάσμα εκπομπής λαμβάνουμε πληροφορίες για τους μηχανισμούς δημιουργίας που συμμετέχουν στην εμφάνιση των TLEs. Για παράδειγμα η υπεριώδης και η υπέρυθη ακτινοβολία των sprites υποδηλώνει τον μηχανισμό της διέγερσης, ενώ οι ακτίνες Χ και γ υποδηλώνουν τη δημιουργία των φαινομένων από υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια που διεγείρονται από την κοσμική ακτινοβολία. Επιπλέον παίρνουμε δεδομένα για τα χημικά στοιχεία που βρίσκονται στην περιοχή της ατμόσφαιρας και συμμετέχουν στους μηχανισμούς εκδήλωσης των TLEs, όπως στην περίπτωση των sprites, όπου η πιο έντονη κορυφή στα 762.7 nm στην περιοχή των υπέρυθρων σχετίζεται με τη γραμμή 1P του N_2^5 .

⁵ N_2 ($B^3\Pi_g - A^3\Sigma^+_u$) (3-1)

Το σημαντικό με αυτήν την κορυφή είναι ότι παρατηρείται μόνο από το διάστημα που η πυκνότητα του μοριακού οξυγόνου είναι μικρότερη μιας και αυτό έχει μια κορυφή απορρόφησης γύρω από τα 761.9 nm.

2.2 Είδη φραγμάτων και φασματομέτρων

2.2.1 Φράγμα περίθλασης [14]

Το φράγμα περίθλασης είναι το πρωτεύον μέσο ανάλυσης του φωτός στα περισσότερα φασματομέτρα κυρίως λόγω της καλύτερης ανάλυσης που παρέχει σε σχέση με ένα πρίσμα παρόμοιου μεγέθους. Έχουν μεγάλη ποικιλία όσον αφορά το μέγεθος, τον αριθμό των χαραγών και την απόδοσή του σε διάφορα μήκη κύματος από τις ακτίνες Χ ως το βαθύ υπέρυθρο γεγονός που τα καθιστά πολύ ισχυρό εργαλείο ανάλυσης. Η εξίσωση του φράγματος δίνεται από την σχέση

$$m\lambda = d(\sin\alpha \pm \sin\beta), \quad (2.3)$$

όπου m είναι η τάξη περίθλασης, d η σταθερά του φράγματος και α , β οι γωνίες πρόσπτωσης και περίθλασης του φωτός. Η γωνιακή διασπορά προκύπτει παραγωγίζοντας τη Σχ. 2.3 και δίνεται από τον τύπο

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos\beta} = \frac{\sin\beta + \sin\alpha}{\lambda \cdot \cos\beta}. \quad (2.4)$$

Η φασματική αναλυτική ισχύς στο όριο της διακριτικής ικανότητας ενός φράγματος δίνεται από τη σχέση

$$R_0 = \frac{mW}{d} = \frac{W}{\lambda} \cdot (\sin\alpha + \sin\beta), \quad (2.5)$$

όπου W το ολικό πλάτος του φράγματος. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι αυτή του ελεύθερου φασματικού εύρους. Για δύο μήκη κύματος λ και λ' σε διαδοχικές τάξεις ισχύει η σχέση

$$m\lambda' = (m + 1)\lambda. \quad (2.6)$$

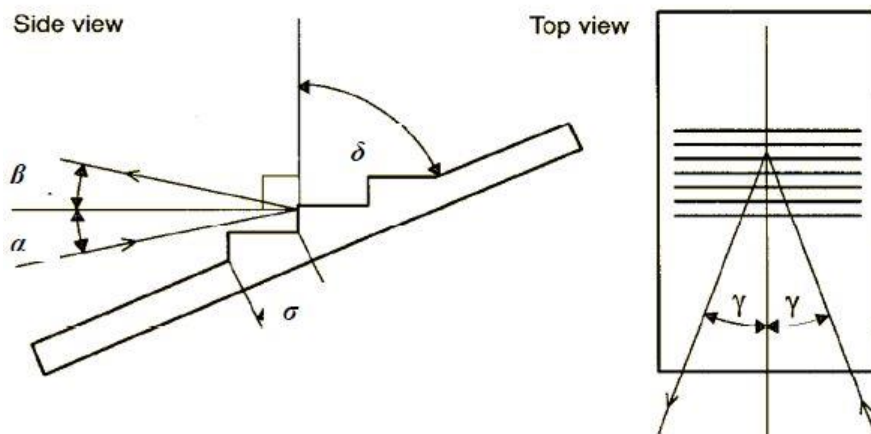
Η διαφορά μήκους κύματος (ελεύθερο φασματικό εύρος) είναι ίση με

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{\lambda}{m}. \quad (2.7)$$

Τα δύο μήκη κύματος περιθλώνται στην ίδια κατεύθυνση με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται. Για το διαχωρισμό τους χρησιμοποιούνται διάφορα φίλτρα.

2.2.2 Κλιμακωτά φράγματα

Τα κλιμακωτά φράγματα (echelle gratings) είναι ένας τύπος φραγμάτων περίθλασης με μικρό αριθμό χαραγών αλλά με τέτοιο σχήμα που είναι ιδανικό για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης και άρα για μεγάλες τάξεις περίθλασης. Η απόσταση μεταξύ των χαραγών είναι της τάξης των 10 μm και γωνία φωτοβολίας (Εικ. 2.3 δ) γύρω στις 60°.



Εικόνα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση κλιμακωτού φράγματος

Η εξίσωση που περιγράφει την συμπεριφορά του κλιμακωτού φράγματος είναι

$$m\lambda = \sigma(\sin\alpha + \sin\beta)\cos\gamma. \quad (2.8)$$

Για σταθερή γωνία πρόσπτωσης α και για σταθερή γωνία γ η γωνιακή διασπορά είναι

$$A = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{\sigma \cdot \cos\gamma \cdot \cos\beta}, \quad (2.9)$$

που είναι κάθετο στο φράγμα. Είναι φανερό ότι η μεγάλη γωνιακή διασπορά του κλιμακωτού φράγματος προέρχεται κυρίως από τον μεγάλο αριθμό της τάξης περίθλασης και όχι από την απόσταση μεταξύ των χαραγών. Το γωνιακό άνοιγμα για μια τάξη δίνεται από τη σχέση

$$\delta\beta = \frac{\lambda}{\sigma \cdot \cos\gamma \cdot \cos\beta}. \quad (2.10)$$

Ένα φασματόμετρο που χρησιμοποιεί κλιμακωτό φράγμα για να λειτουργήσει ικανοποιητικά χρειάζεται τα εξής οπτικά στοιχεία:

- ένα δευτερεύων φράγμα ή πρίσμα μικρής διασποράς το οποίο διαχωρίζει τις τάξεις που προκύπτουν από το κλιμακωτό

φράγμα (στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως cross disperser). Συνήθως τοποθετείται μετά ώστε η γωνία γ να είναι σχεδόν μηδενική

- ένα φακό ή κάτοπτρο για να κάνει την δέσμη παράλληλη πριν προσπέσει στο κλιμακωτό φράγμα
- ένα φακό ή κάτοπτρο για να εστιάζει τη δέσμη στον ανιχνευτή.

Με γνωστή την εστιακή απόσταση f_2 του φακού εστίασης της δέσμης μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος στο οποίο θα απεικονίζεται κάθε τάξη στο εστιακό επίπεδο όπου θα τοποθετηθεί ο ανιχνευτής καθώς και την αντίστροφη γραμμική διασπορά της συγκεκριμένης τάξης. Το μήκος l μιας συγκεκριμένης τάξης υπολογίζεται από τον τύπο

$$l = f_2 \cdot \delta\beta \quad (2.11)$$

ενώ η αντίστροφη γραμμική διασπορά από τη σχέση

$$P = \frac{1}{f_2 \cdot A} \cdot \quad (2.12)$$

Η απόσταση δύο διαδοχικών τάξεων στο επίπεδο του ανιχνευτή δίνεται από τον τύπο

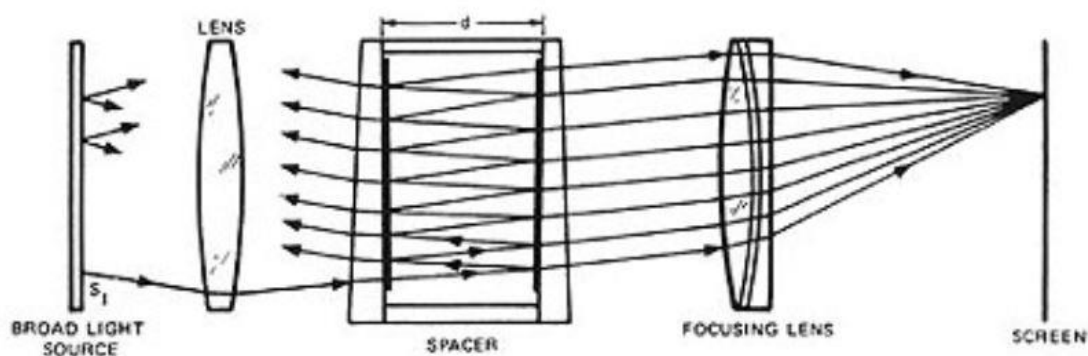
$$\Delta y = f_2 \Delta\lambda \frac{d\beta}{d\lambda}, \quad (2.13)$$

όπου η γωνιακή διασπορά είναι του δευτερεύοντος φράγματος.

Εν κατακλείδι, στα προτερήματα των κλιμακωτών φραγμάτων είναι η καλή διακριτική ικανότητα, το μεγάλο εύρος φάσματος που μπορούν να ανιχνεύσουν και η ευκολία με την οποία συνδυάζονται με άλλα οπτικά στοιχεία σχετικά μικρής εστιακής απόστασης.

2.2.3 Συμβολόμετρα Fabry-Perot [15]

Τα συμβολόμετρα Fabry-Perot είναι σημαντικά όργανα για οπτικές μετρήσεις που απαιτούν πολύ υψηλή διακριτική ικανότητα σε καθορισμένο φασματικό εύρος ή και μεγάλο γωνιακό άνοιγμα με μέτρια διακριτική ικανότητα.



Εικόνα 2.4 βΣχηματική αναπαράσταση διάταξης με φασματόμετρο Fabry-Perot

Για ένα συμβολόμετρο Fabry-Perot, με υλικό που έχει δείκτη διάθλασης n_0 μεταξύ των κατόπτρων του, τα οποία απέχουν απόσταση d μεταξύ τους, η κανονικοποιημένη ένταση του διαδιδόμενου φωτός σε γωνία α δίνεται από τη σχέση

$$I = \left(\frac{T}{1-R} \right)^2 \cdot \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (2.14)$$

όπου T και R το κλάσμα της προσπίπτουσας ενέργειας που διαδίδεται και ανακλάται σε κάθε επιφάνεια και δ η διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών διαδιδόμενων ακτίνων η οποία δίνεται από τον τύπο

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_0 d \cdot \cos \alpha. \quad (2.15)$$

Το αντίστροφο της ποσότητας μέσα στις αγκύλες είναι η συνάρτηση Airy. Η εν λόγω συνάρτηση μεγιστοποιείται για

$$\delta = 2m\pi,$$

όπου m ακέραιος, οπότε τα μήκη κύματος διαδίδονται με μέγιστη ένταση όταν

$$m\lambda = 2n_0d \cdot \cos\alpha. \quad (2.16)$$

Επειδή το συμβολόμετρο έχει αξονική συμμετρία, στο εστιακό επίπεδο τοποθέτησης του ανιχνευτή μιας μονοχρωματικής πηγής, εμφανίζονται ομόκεντροι δακτύλιοι όπου έκαστος αντιστοιχεί σε μία τάξη. Το ελεύθερο φασματικό εύρος για το συμβολόμετρο είναι

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2n_0d \cdot \cos\alpha} \cong \frac{\lambda^2}{2n_0d}, \quad (2.17)$$

όπου υποθέσαμε ότι η γωνία α είναι αρκετά μικρή. Συνήθως, λόγω του μεγάλου m απαιτείται κάποιο φίλτρο για την απομόνωση των επιθυμητών τάξεων. Η αναλυτική φασματική ισχύς του συμβολόμετρου δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{N\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2Nn_0d}{\lambda}, \quad (2.18)$$

όπου ο παράγοντας N (finesse) εξαρτάται από την ποιότητα των κατόπτρων και την ανακλαστικότητά τους.

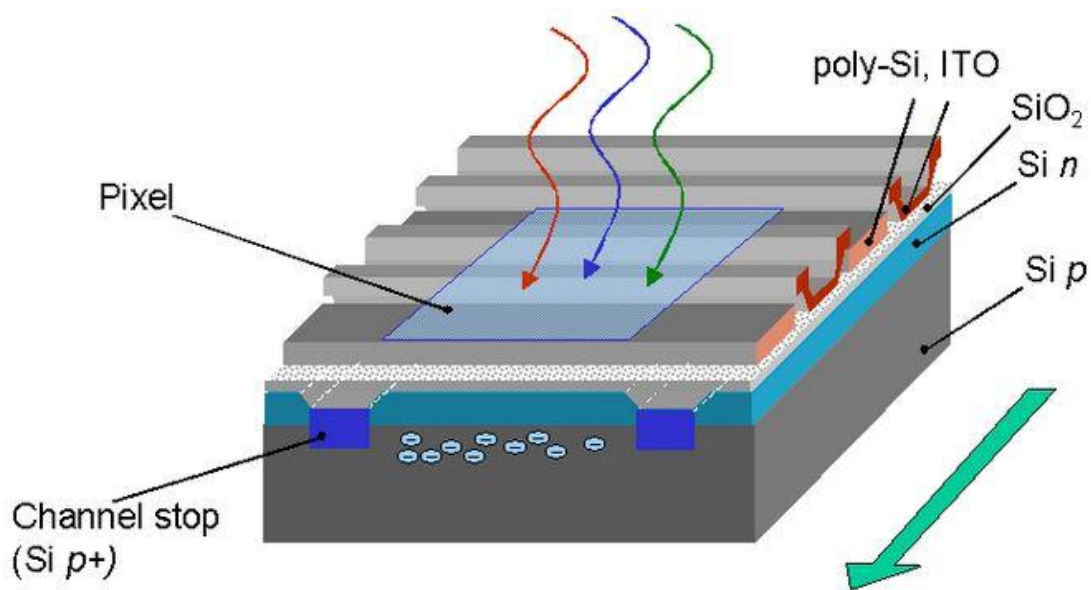
2.2.4 Κοίλα φράγματα

Τα κοίλα φράγματα μπορούν να θεωρηθούν κοίλα κάτοπτρα που διασπείρουν το φως. Έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα αν τα συγκρίνουμε με τα επίπεδα φράγματα, αυτό της εστίασης της περιθλώμενης δέσμης μετά από αυτά, κάτι το οποίο στις διατάξεις με επίπεδα φράγματα επιτυγχάνεται με ξεχωριστά οπτικά στοιχεία.

Ένα φράγμα είναι κοίλο, όταν η επιφάνειά του είναι κοίλη ανεξάρτητα από το πρότυπο των χαραγών. Τα κοίλα φράγματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτά με σφαιρικό υπόστρωμα των οποίων η επιφάνεια είναι μέρος μιας σφαίρας και ορίζονται από μία ακτίνα και σε αυτά με τοροϊδές υπόστρωμα που ορίζονται από δύο. Τα σφαιρικά υποστρώματα είναι ο πιο κοινός τύπος κοίλων φραγμάτων καθώς είναι εύκολο να κατασκευαστούν και να αντιγραφούν.

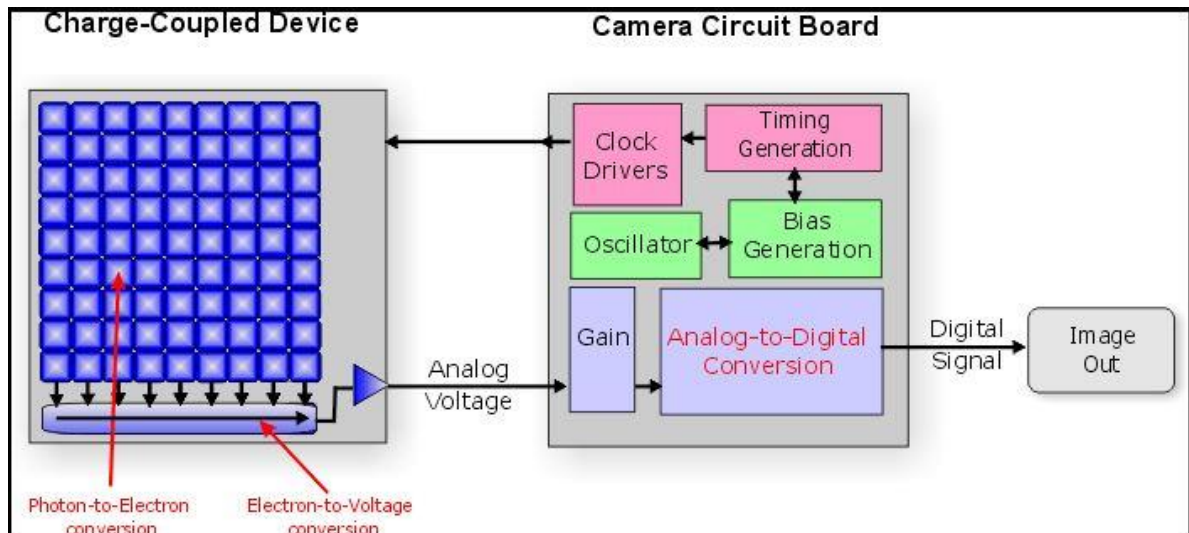
2.2.5 CCD (Charge-Coupled Device)

Το CCD είναι μια ψηφιακή συσκευή λήψης εικόνων που μετατρέπει τα φωτόνια σε ψηφιακό σήμα. Βασικό λειτουργικό στοιχείο του CCD είναι το pixel, το οποίο στην ουσία είναι ένας μικρός πυκνωτής που αποθηκεύει φορτία (MOS capacitors). Το CCD αποτελείται από συστοιχίες τέτοιων pixels τοποθετημένα πολύ κοντά μεταξύ τους ώστε να είναι δυνατή η διέλευση των φορτιών από το ένα στο άλλο. Τα pixels αποτελούνται από την φωτοενεργό περιοχή, όπου παράγονται ηλεκτρόνια από τα προσπίπτοντα φωτόνια και την περιοχή διέλευσης όπου βρίσκεται ο καταχωρητής ολίσθησης (shift register). Η φωτοενεργός περιοχή είναι συνήθως ένα επιταξιακό στρώμα πυριτίου το οποίο είναι ελαφρώς ντοπαρισμένο με βόριο (p-doped). Τα ηλεκτρόνια παράγονται μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου όπου παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Στο πυρίτιο το ενεργειακό κενό μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας είναι $E_g = 1.14 \text{ eV}$, οπότε φωτόνια μέχρι και 10 eV (μαλακές ακτίνες-X) μπορούν να ανιχνευθούν από τα CCDs. Τα ηλεκτρόνια παγιδεύονται σε ένα πηγάδι δυναμικού και μεταφέρονται από το ένα στο άλλο, μέσω ενός n-καναλιού που δημιουργείται εμφυτεύοντας φώσφορο μεταξύ του οξειδίου και του πυριτίου.



Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση ενός pixel

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση κατά τη μεταφορά των ηλεκτρονίων. Ηλεκτρόνια παράγονται και στην διεπιφάνεια οξειδίου-πυριτίου και στο υπόστρωμα, λόγω θερμιονικής εκπομπής και συμβάλλουν στο θόρυβο του σήματος (dark current). Ο συνολικός αριθμός ηλεκτρονίων που αποθηκεύονται (well depth) είναι της τάξης των 10^5 ανά pixel. Μετά τη συλλογή του φορτίου σε κάθε «πηγάδι» αρχίζει η μεταφορά από το ένα στο άλλο μέσω εφαρμογής τάσης σε κάθε πύλη, κυκλικά. Επίσης, οι στήλες είναι συνδεδεμένες παράλληλα οπότε η μετατόπιση του φορτίου γίνεται ταυτόχρονα. Η μεταφορά γίνεται προς την περιοχή εξόδου (shift register) όπου το φορτίο μετατρέπεται σε τάση, μετά ψηφιοποιείται και τέλος αποθηκεύεται. Η ανακατασκευή της εικόνας γίνεται μέσω ειδικών προγραμμάτων από τα δεδομένα.

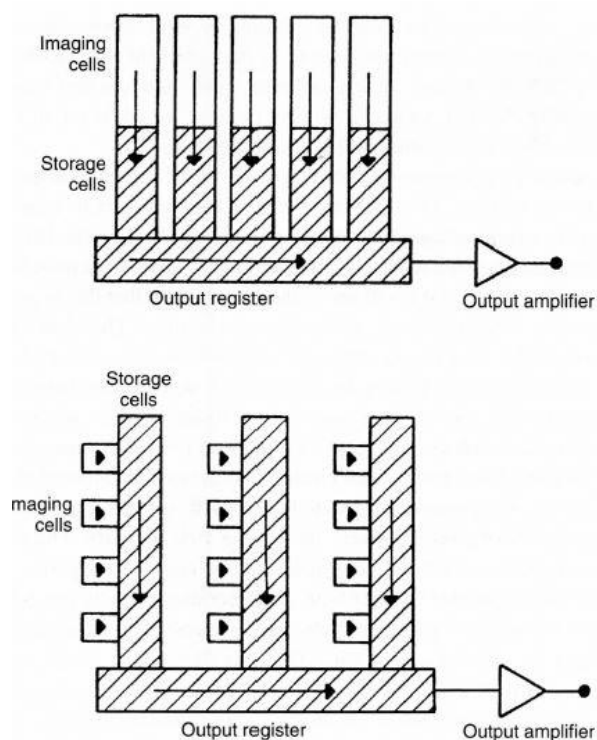


Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση ενός CCD με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζονται για την λειτουργία του

Ανάλογα με τον τρόπο πρόσπτωσης του φωτός τα CCDs διακρίνονται σε εμπρόσθιας και οπίσθιας ακτινοβολήσης. Στα πρώτα, η ακτινοβολία διέρχεται πρώτα από τα επιφανειακά στρώματα, με τις ανάλογες απώλειες και στη συνέχεια απορροφάται από το πυρίτιο, ενώ στο δεύτερο το φως προσπίπτει απευθείας στο πυρίτιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα οπίσθιας ακτινοβολήσης CCDs να έχουν μικρότερο πάχος, αλλά η διαδικασία της λέπτυνσης και της τοποθέτησης αυξάνει το κόστος του, ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται ανομοιομορφίες.

Επιπλέον, υπάρχουν διαφορετικών ειδών αρχιτεκτονικές για τα CCDs σχετικά με τον τρόπο έκθεσης στο φως. Για παράδειγμα στα interline CCDs κάθε στήλη ενεργών pixel διαδέχεται μία φωτοστεγανή στήλη ανενεργών pixel που χρησιμεύουν για αποθήκευση. Μετά το τέλος της έκθεσης τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τα ενεργά pixel στα ανενεργά μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα της τάξης των μs. Έτσι τα δεδομένα μπορούν να οδηγηθούν στα ηλεκτρονικά ανάγνωσης ενώ οι ενεργές στήλες

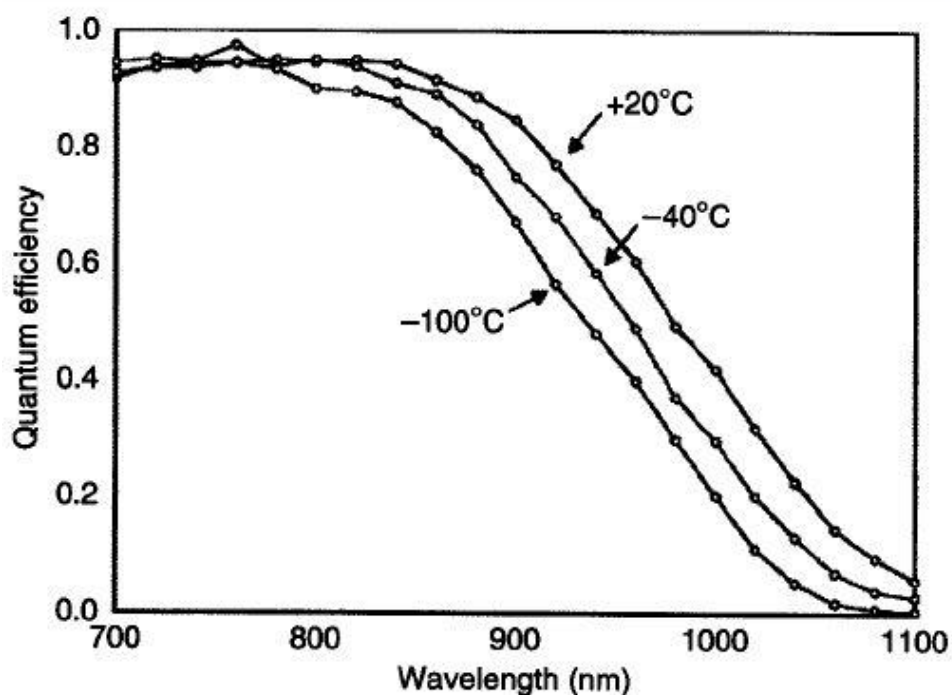
μπορούν να συνεχίσουν να συλλέγουν φως γεγονός που συμβάλει στην ταχύτερη καταγραφή και επεξεργασία της εικόνας. Αντίθετα, τα frame transfer CCDs λειτουργούν σαν δύο ξεχωριστά CCD καλυμμένα μεταξύ τους. Το ένα μέρος της συσκευής εκτίθεται στο φως και καταγράφει την εικόνα, ενώ το άλλο μισό είναι ανενεργό και χρησιμοποιείται ως αποθηκευτική συσκευή. Στο τέλος της συλλογής ηλεκτρονίων, αυτά μεταφέρονται γρήγορα από το ενεργό μέρος στο αποθηκευτικό για να αρχίσει μια νέα καταγραφή. Αυτού του είδους οι διατάξεις βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις περισσότερες βιντεοκάμερες όπου η εικόνα διαβάζεται με ρυθμό 30 fps (frames per second).



Εικόνα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση ενός frame (πάνω) και ενός interline transfer CCD

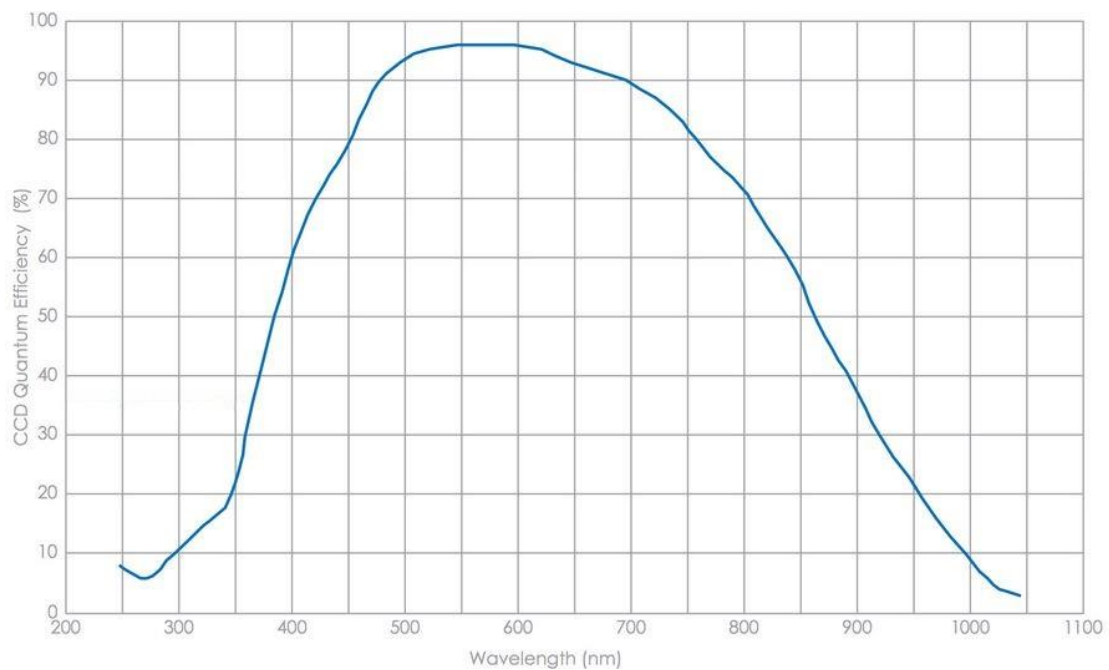
Ένα βασικό χαρακτηριστικό των CCDs είναι η κβαντική απόδοση (quantum efficiency) που μας δείχνει το ποσοστό της απορροφούμενης ενέργειας από την προσπίπτουσα ακτινοβολία

που μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Παράγοντες που επηρεάζουν την κβαντική απόδοση είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το πάχος του ανιχνευτή.



Εικόνα 2.8 Κβαντική απόδοση CCD συναρτήσει του μήκους κύματος για διάφορες θερμοκρασίες

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας επηρεάζει την κβαντική απόδοση λόγω τη σύνθεσης του CCD από το πυρίτιο, το οποίο εμφανίζει διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης για διαφορετικά μήκη κύματος. Το πάχος του CCD σχετίζεται με το αν είναι εμπρόσθιας ή οπίσθιας ακτινοβολήσης. Τα πρώτα επειδή έχουν μεγαλύτερο πάχος είναι περισσότερο ευαίσθητα στο ερυθρό φάσμα αλλά έχουν μικρότερο ποσοστό απορρόφησης διότι η ακτινοβολία απορροφάται ή ανακλάται στα ανώτερα στρώματα. Αντίθετα, στα οπίσθιας ακτινοβολήσης CCD τα μεγάλα μήκη κύματος διαπερνούν το στρώμα πυριτίου ανεπηρέαστα.

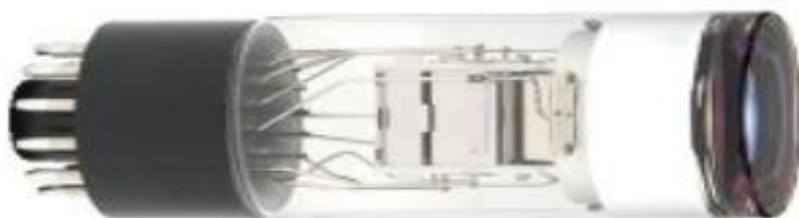


Εικόνα 2.9 Τυπική καμπύλη κβαντικής απόδοσης CCD συναρτήσει του μήκος κύματος

2.2.6 Φωτοπολλαπλασιαστές [17]

Ο φωτοπολλαπλασιαστής (photomultiplier tube ή PMT) είναι ένα ευαίσθητο όργανο για την ανίχνευση και μέτρηση του φωτός. Παρέχει στην έξοδό του ένα ηλεκτρικό σήμα (τάση) ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος σε αυτόν φωτός. Τα κύρια πλεονεκτήματά του ως προς τα άλλα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης φωτός είναι η ικανότητά του να ανιχνεύει πολύ χαμηλές εντάσεις φωτός, που φθάνει μέχρι και την ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων και να ενισχύει σημαντικά το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται εντός του δοχείου κενού, με μεγάλη ταχύτητα. Είναι επιπλέον, μικρός σε μέγεθος και δεν χρειάζεται πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα για τη λειτουργία του και την ανάλυση του σήματος εξόδου. Για αυτούς του λόγους βρίσκει εφαρμογή σε

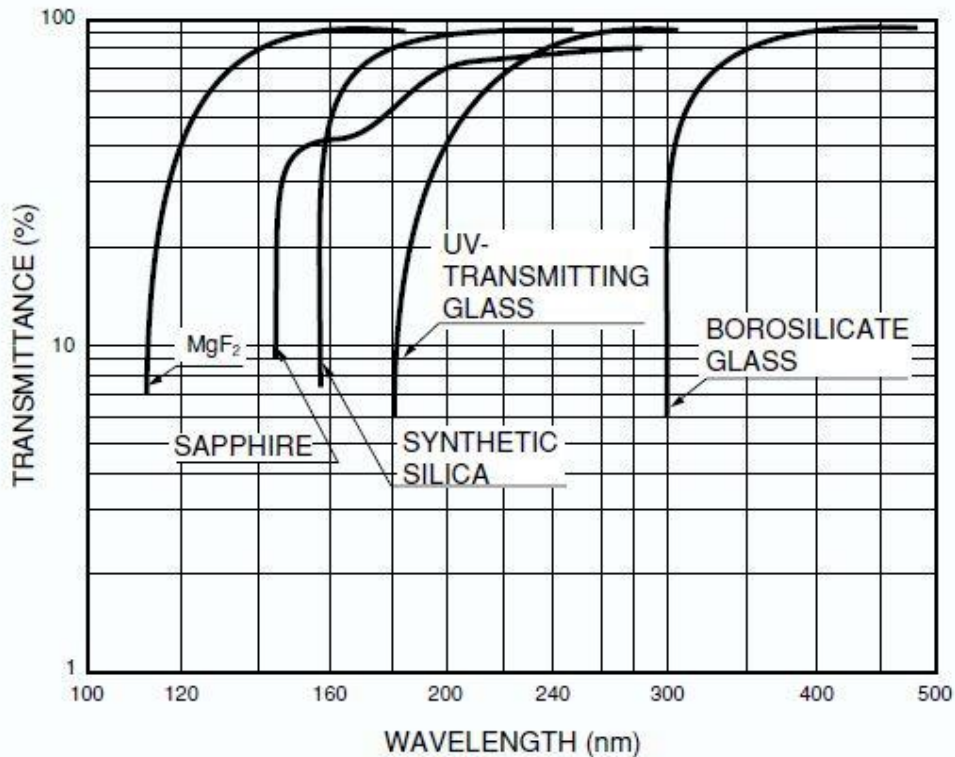
πολλούς κλάδους της φυσικής όπως η οπτική φασματοσκοπία, στην αστρονομία, στην σωματιδιακή και ιατρική φυσική.



Εικόνα 2.10 Ένας τυπικός φωτοπολλαπλασιαστής

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένας γυάλινος σωλήνας υψηλού κενού, όπου το φως περνάει από ένα παράθυρο και προσπίπτει στη μία από τις δύο επίπεδες επιφάνειές του, τη φωτοκάθοδο. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το παράθυρο χρησιμεύει ως φίλτρο και είναι τέτοιο ώστε να έχει υψηλό δείκτη διέλευσης για τα μήκη κύματος που θέλουμε να ανιχνεύσουμε (Εικ. 2.11). Συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε οξείδιο του πυριτίου (quartz) ή πυρίτιο με προσμίξεις άλλων στοιχείων όπως το βόριο. Η φωτοκάθοδος από την άλλη πλευρά, κατασκευάζεται από κάποιο υλικό με μικρό έργο εξόδου, συνήθως κάποιον ημιαγωγό ή αλκαλικές ενώσεις, με σκοπό τα φωτόνια που θα προσπέσουν σε αυτή να δημιουργήσουν ηλεκτρόνια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Λόγω του μικρού έργου εξόδου στη φωτοκάθοδο συντελείται και θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων, που συμβάλει στο

θόρυβο της διάταξης και αντιμετωπίζεται με την ψύξη της φωτοκαθόδου.



Εικόνα 2.11 Συντελεστής διαπερατότητας για διάφορα υλικά του παραθύρου.

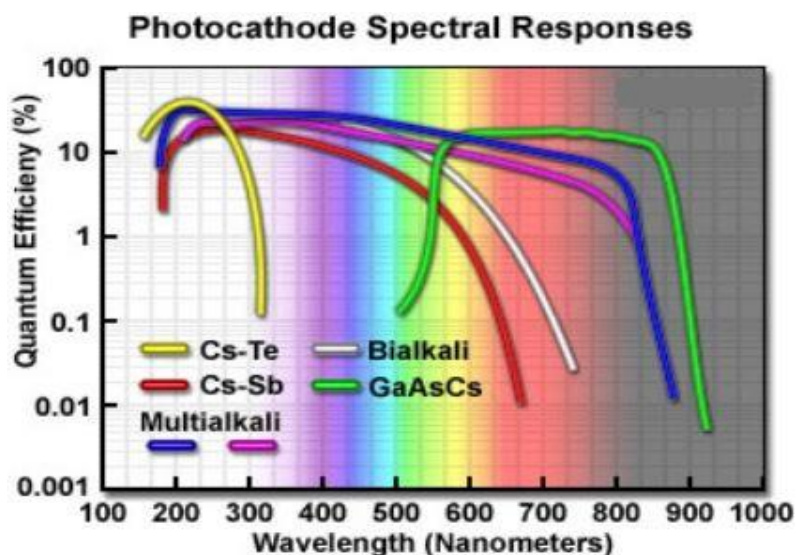
Δύο σημαντικά χαρακτηριστικά της φωτοκαθόδου είναι η φωτοευαισθησία και η κβαντική απόδοση. Ως φωτοευαισθησία (Sk) ορίζεται το ρεύμα που εκπέμπεται από τη φωτοκάθοδο (I_p) ως προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (P_{flux}) για συγκεκριμένο μήκος κύματος λ , δηλαδή ισχύει η σχέση

$$Sk(\lambda) = \frac{I_p}{P_{flux}} \quad (A/W) \quad (2.19)$$

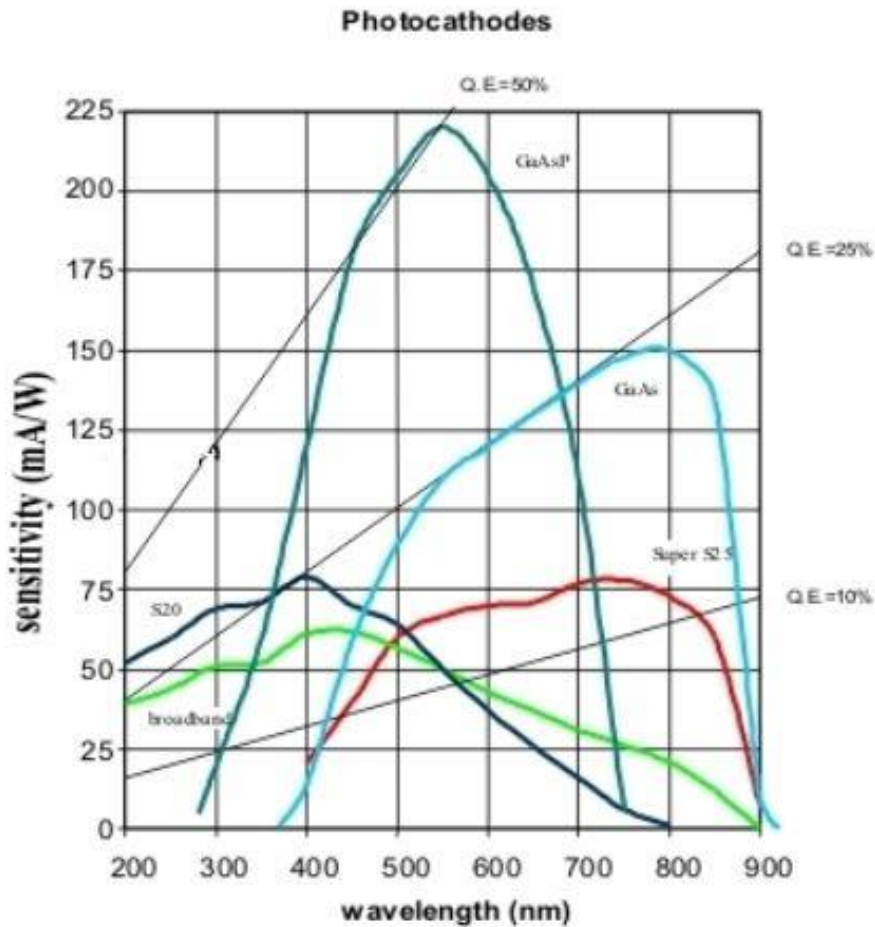
Η κβαντική απόδοση της φωτοκαθόδου ορίζεται ως ο μέσος αριθμός φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την φωτοκάθοδο ανά προσπίπτον φωτόνιο μήκους κύματος λ . Η κβαντική απόδοση λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου δίνεται από τον τύπο

$$\eta(\lambda) = (1 - R) \frac{p_v}{k} \frac{1}{1 + \frac{1}{kL}} p_s \quad (2.20)$$

όπου R είναι ο συντελεστής ανάκλασης του υλικού της φωτοκαθόδου, k είναι συντελεστής απορρόφησης του φωτός (σε τι μήκος μπορεί να ταξιδέψει ένα φωτόνιο εντός του υλικού πριν απορροφηθεί), p_v η πιθανότητα το απορροφούμενο φωτόνιο να διεγείρει ηλεκτρόνιο πέρα από τη στάθμη κενού (vacuum level), p_s η πιθανότητα ηλεκτρόνιο κοντά στην επιφάνεια της φωτοκαθόδου να διαφύγει στο κενό και L το μέσο μήκος διαφυγής των διεγερμένων ηλεκτρονίων.



Εικόνα 2.12 Κβαντική απόδοση διάφορων υλικών της φωτοκαθόδου.



Εικόνα 2.13 Φωτοευαισθησία της φωτοκαθόδου.

Η σχέση που συνδέει φωτοευαισθησία και κβαντική απόδοση είναι η

$$Sk(\lambda) = \frac{\lambda e}{hc} \eta(\lambda) 100\% = 0.81 \eta(\lambda) \lambda \quad (2.21)$$

Μετά τη φωτοκάθοδο, τα ηλεκτρόνια (πρωτεύοντα) εστιάζονται και επιταχύνονται προς μεταλλικά ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται σε θετικό δυναμικό ως προς την φωτοκάθοδο (δύνοδο). Οι επιφάνειες αυτών των ηλεκτροδίων είναι επιστρωμένες με υλικό χαμηλού

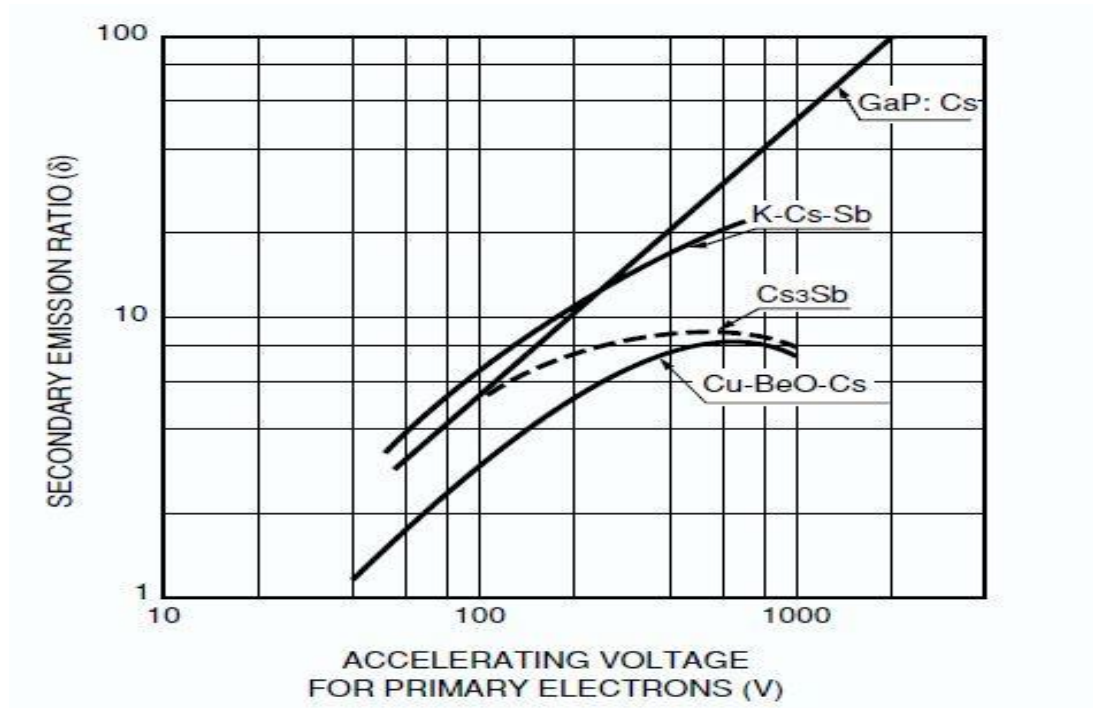
έργου εξαγωγής ώστε για κάθε προσπίπτων ηλεκτρόνιο να αποβάλλονται από αυτά περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια (δευτερεύοντα). Έτσι επιτυγχάνεται ένας πολλαπλασιασμός του αριθμού των ηλεκτρονίων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες και ο αριθμός n των δυνόδων ($n=9-13$ συνήθως) με αποτέλεσμα ο τελικός αριθμός των ηλεκτρονίων που προκύπτουν να είναι μεγάλος και άρα το σήμα ενισχυμένο και εύκολα μετρήσιμο. Ο λόγος δευτερογενούς εκπομπής δ , εξαρτάται από τον συντελεστή συλλογής α , που εκφράζει την πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να προσπέσει στην ενεργή περιοχή της δυνόδου, την σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυνόδων και το υλικό αυτών και δίνεται από τον τύπο

$$\delta = \alpha \Delta V^{\kappa} \quad (2.22)$$

όπου το κ εξαρτάται από το υλικό και έχει τιμές από 0.7-0.8. Το κέρδος ορίζεται ως το ρεύμα της ανόδου προς το ρεύμα της φωτοκαθόδου και για την περίπτωση που η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυνόδων είναι ίση, το κέρδος ως προς την τάση που τροφοδοτεί τον φωτοπολλαπλασιαστή δίνεται από τη σχέση

$$G \equiv \frac{I_{an}}{I_p} = \delta^n = (\alpha \Delta V^{\kappa})^n = \frac{\alpha^n}{(n+1)^{\kappa n}} V^{\kappa n} \quad (2.23)$$

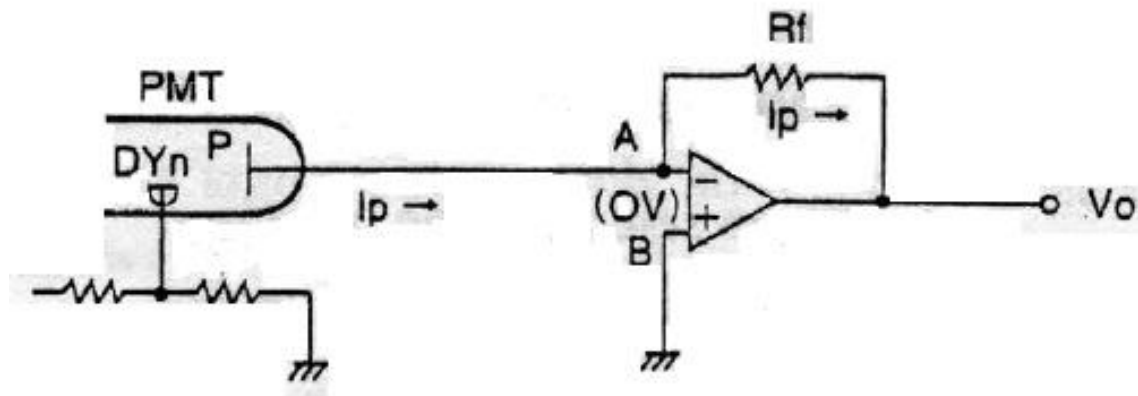
όπου V είναι η υψηλή τάση της φωτοκαθόδου.



Εικόνα 2.14 Το δ συναρτήσει της τάσης V για διάφορα υλικά της δυνόδου.

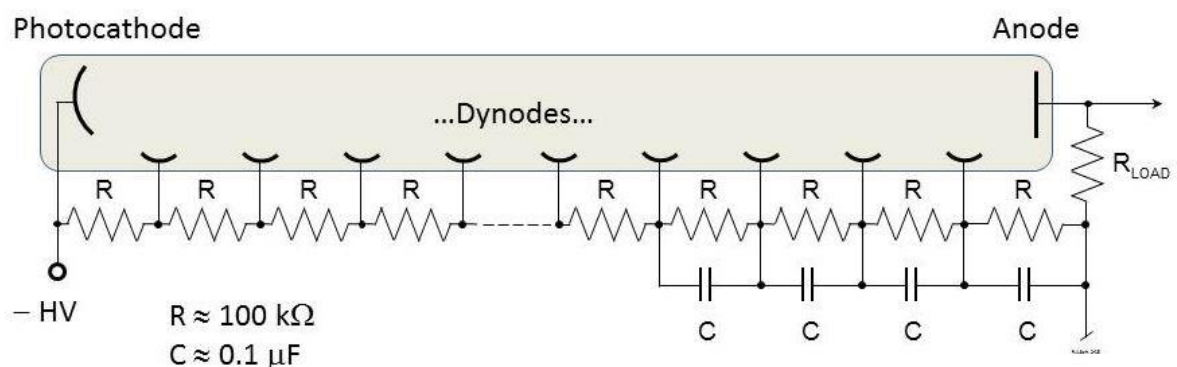
Μετά τον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων στις δυνόδους, τα φορτία συλλέγονται από την άνοδο και έχουμε σαν εξερχόμενο σήμα το ρεύμα των φορτίων. Επειδή στην επεξεργασία των σημάτων χρησιμοποιούνται σήματα τάσης, μεταξύ του φωτοπολλαπλασιαστή και των ηλεκτρονικών ανάγνωσης παρεμβάλλεται ένα κύκλωμα μετατροπής από σήμα ρεύματος σε τάσης με τη χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή συνήθως (Εικ. 2.15). Η σχέση που συνδέει τα δύο σήματα είναι η

$$V_0 = -i_p \cdot R_f \quad (2.24)$$



Εικόνα 2.15 Κύκλωμα μετατροπής παλμού ρεύματος σε τάση.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως η τάση μεταξύ των δυνόδων πρέπει να διατηρείται σταθερή, ώστε να επιταχύνονται τα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Η άνοδος πρέπει να βρίσκεται σε θετικότερο δυναμικό από αυτό της φωτοκαθόδου, της τάξης των μερικών kV. Το απλούστερο κύκλωμα κατανομής της τάσης είναι αυτό του διαιρέτη τάσης, με μικρές παραλλαγές ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή⁶.



Εικόνα 2.16 Κύκλωμα διαιρέτη τάσης για AC λειτουργία.

⁶ Οι τρόποι λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή χωρίζονται σε DC, AC και Photon Counting αναλόγως της έντασης και την ταχύτητα του προς ανίχνευση φαινομένου.

Κάποια από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του φωτοπολλαπλασιαστή είναι η μέγιστη ενίσχυση που επιτυγχάνεται, η χρονική απόκριση που έχει, η γραμμικότητά της, το ρεύμα σκότους, ο λόγος θόρυβος προς σήμα, η ευστάθεια και η υστέρηση. Η ενίσχυση εξαρτάται από τη δομή του φωτοπολλαπλασιαστή και την απόσταση μεταξύ των δυνόδων.

Η απόκριση του φωτοπολλαπλασιαστή εξαρτάται από τις τροχιές των ηλεκτρονίων εντός του σωλήνα κενού. Τα φωτοηλεκτρόνια που δημιουργούνται από τον παλμό φωτός ακολουθούν διαφορετικές τροχιές με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικούς χρόνους άφιξης στην άνοδο και να εμφανίζεται ένας παλμός σήματος στην έξοδο. Τα χρονικά χαρακτηριστικά αυτού του παλμού είναι ο χρόνος ανόδου t_r , που ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ο παλμός για να φτάσει από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του και έχει τυπικές τιμές από 1,5 - 15 ns, το χρονικό διάστημα t_{fwhm} που έχει τυπικές τιμές 2 – 20 ns και ο χρόνος διέλευσης t_t , που είναι το χρονικό διάστημα από τη στιγμή πρόσπτωσης του φωτός στη φωτοκάθοδο μέχρι να φτάσει στο μέγιστο το σήμα εξόδου και έχει τυπικές τιμές 20 – 100 ns. Παράγοντες που επηρεάζουν την χρονική απόκριση είναι ο αριθμός των δυνόδων, η εφαρμοζόμενη υψηλή τάση και η διάμετρος της φωτοκαθόδου.

Ο θόρυβος προκαλεί διασπορά στο ύψος των παλμών της τάσης εξόδου και οφείλεται κυρίως στο ρεύμα σκότους (dark current) και στα φαινόμενα στατιστικού θορύβου (shot noise). Οι κυριότερες αιτίες του ρεύματος σκότους είναι:

- a) το ρεύμα θερμοϊονικής εκπομπής από την φωτοκάθοδο και τις δυνόδους

- b) τα ωμικά ρεύματα διαρροής μεταξύ των ανόδων και άλλων ηλεκτροδίων μέσα στο σωλήνα κενού
- c) ρεύμα φωτοκαθόδου που οφείλεται στην ακτινοβολία περιβάλλοντος (κοσμικές ακτίνες, ακτινοβολία από ραδιοϊσότοπα).

Τέλος, το ρεύμα σκότους εξαρτάται από την υψηλή τάση που εφαρμόζεται στον φωτοπολλαπλασιαστή. Ο στατιστικός θόρυβος προέρχεται από τις διακυμάνσεις στον αριθμό των ηλεκτρονίων που παράγονται στην φωτοκάθοδο και στον αριθμό των δευτερογενών ηλεκτρονίων από τις δυνόδους. Ο λόγος σήμα προς θόρυβο (signal to noise ratio) για την περίπτωση των δευτερογενών ηλεκτρονίων είναι

$$S/N = \sqrt{\frac{I_p}{2e\Delta f \cdot \left(\frac{\delta}{\delta-1}\right)}} \quad (2.25)$$

όπου I_p το ρεύμα της φωτοκαθόδου, Δf το εύρος ζώνης συχνοτήτων του φωτοπολλαπλασιαστή και δ ο λόγος δευτερογενούς εκπομπής. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά του θορύβου της φωτοκαθόδου αλλά και από το κύκλωμα για την ενίσχυση του σήματος έχουμε ότι

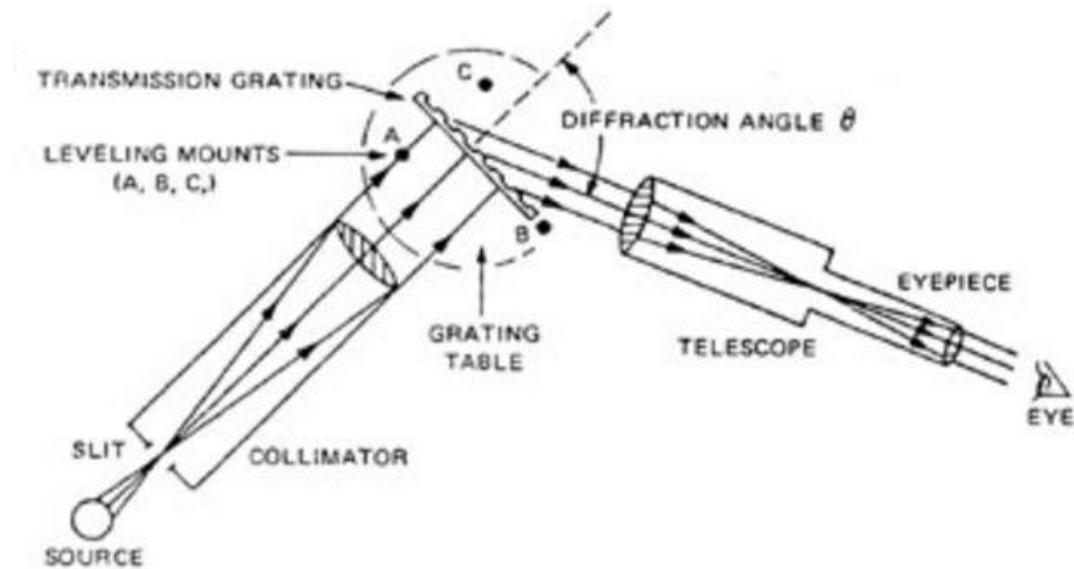
$$S/N = \frac{I_p}{\sqrt{2e\Delta f \cdot \left(\frac{\delta}{\delta-1}\right) \cdot (I_p + 2I_d) + N_A^2}} \quad (2.26)$$

όπου I_d το ρεύμα σκότους και N_A^2 ο θόρυβος από το κύκλωμα ενίσχυσης. Μπορούμε να επιτύχουμε μείωση του θορύβου με χρήση φωτοκαθόδου μικρής επιφάνειας, με ψύξη του φωτοπολλαπλασιαστή για να περιοριστεί το ρεύμα θερμιονικής εκπομπής και με κατάλληλη επιλογή των υλικών του.

Τέλος, η ευστάθεια ενός φωτοπολλαπλασιαστή μεταβάλλεται με το χρόνο, με τις εναλλαγές της υψηλής τάσης και τις αλλαγές περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία, το εξωτερικό ηλεκτρικό/μαγνητικό πεδίο και τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

2.3 Τα μέρη ενός φασματοσκοπίου

Το φασματοσκόπιο είναι ένα σύνθετο σύστημα οπτικών οργάνων για την παρατήρηση του φωτός. Στην πιο απλή του μορφή αποτελείται από μια σχισμή για την είσοδο του φωτός, έναν εστιακό φακό, ένα οπτικό μέσο διασποράς, όπως αυτά που αναλύσαμε παραπάνω, με σκοπό την ανάλυση του φωτός στις επιμέρους συχνότητες που το αποτελούν, ένα επιπλέον εστιακό φακό που συγκεντρώνει τις συνιστώσες του φωτός στο οπτικό όργανο που τις ανιχνεύει, όπως ένας φωτοπολλαπλασιαστής ή μια CCD κάμερα αναλόγως το σκοπό της διάταξης.



Εικόνα 2.17 Σχηματική διάταξη ενός φασματοσκοπίου.

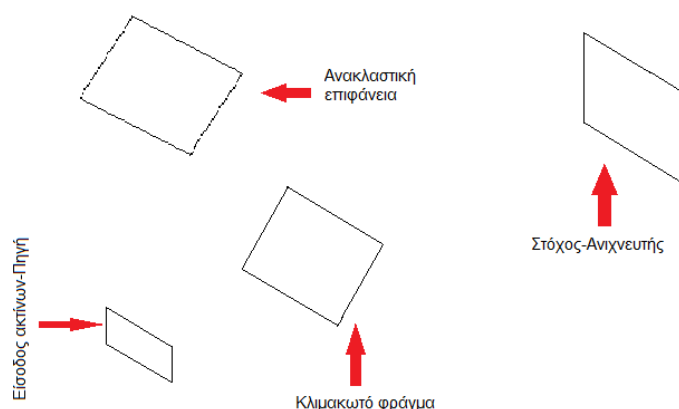
Τα φασματοσκόπια ανάλογα με το οπτικό όργανο για την ανάλυση του φωτός που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε πρισματικά, αν χρησιμοποιούν πρίσμα ώστε να διαθλούν το φως ή περιθλαστικά όταν χρησιμοποιούν κάποιο φράγμα περίθλασης. Επίσης, ανάλογα με το ανιχνευτικό όργανο που διαθέτουν, τα φασματοσκόπια χρησιμοποιούνται είτε για την καταγραφή οπτικών φαινομένων, είτε για πιο σύνθετες φασματικές αναλύσεις όπως τη μέτρηση έντασης του φωτός ή την ενεργειακή ανάλυσή του.

Συχνά για την πιο αποτελεσματική κατασκευή των φασματοσκοπίων πρώτα χρησιμοποιούνται διάφορα προγράμματα προσομοίωσης που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Στα επόμενα θα παρουσιαστεί η προσομοίωση φασματογράφου με τη χρήση του προγράμματος TracePro.

Κεφάλαιο 3. Προσομοίωση με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου TracePro

3.1 Γενικές προδιαγραφές της διάταξης

Στην παρούσα εργασία έχουμε στόχο να σχεδιάσουμε φασματογράφο, όσο το δυνατόν μικρότερων διαστάσεων, για την ανάλυση οπτικών φασμάτων και μέτρηση της ισχύος ακτίνων από φαινόμενα TLEs. Η διάταξη θα περιλαμβάνει την πηγή, μια πλήρη ανακλαστική επιφάνεια, ένα κλιμακωτό φράγμα και μια επιφάνεια-στόχο που θα παίζει το ρόλο του ανιχνευτή. Το εκτιμώμενο κόστος της διάταξης είναι 400-500 \$.



Εικόνα 3.1 Σχέδιο οπτικών εξαρτημάτων της διάταξης.

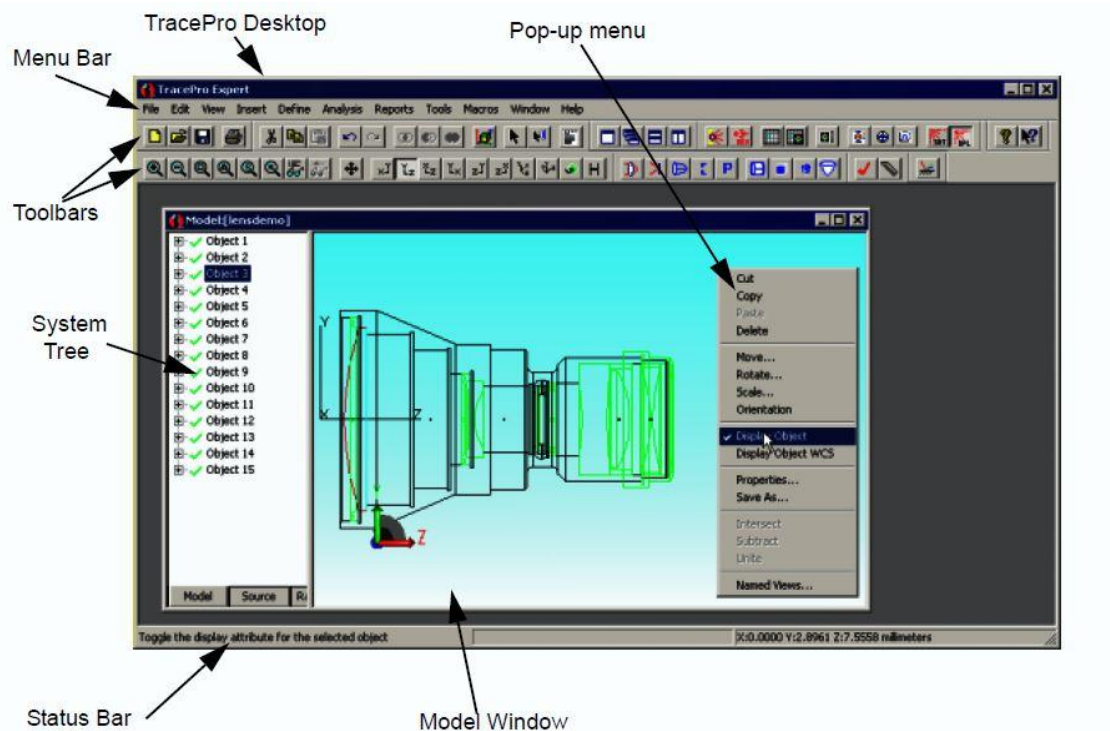
Η ανακλαστική επιφάνεια έχει συντελεστή ανάκλασης $R = 1$ και το κλιμακωτό φράγμα έχει $d = 2 \mu\text{m}$ (απόσταση μεταξύ χαραγών). Το φασματικό εύρος των ακτίνων είναι από 600 έως 800 nm. Οι λοιπές προδιαγραφές και χαρακτηριστικά της διάταξης (π.χ. διαστάσεις των οπτικών μερών) εξαρτώνται από τον κατασκευαστή, τους πιθανούς τρόπους χρήσης της διάταξης και τις απαιτήσεις αυτών, δηλαδή είναι μεταβλητά και προσδιορίζονται αναλόγως. Παρακάτω, όπου χρειάζεται, θα προσδιορίζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

3.2 Τι είναι το TracePro[18]

Το TracePro είναι ένα λογισμικό της Lambda Research Corporation με σκοπό την καταγραφή φωτεινών ακτίνων σε ένα στερεό μοντέλο (solid model). Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εκπέμπει ακτίνες από μια πηγή και να αλληλοεπιδρά με διάφορες επιφάνειες στις οποίες μπορεί να υπόκεινται σε απορρόφηση, ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση και σκέδαση. Το στερεό μοντέλο είναι μια τεχνική που σου επιτρέπει να κατασκευάζεις υπολογιστικά γεωμετρικά μοντέλα χρησιμοποιώντας “στερεά” εικονικά αντικείμενα. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης είναι σίγουρος ότι δημιουργεί ένα μοντέλο το οποίο είναι δυνατό να κατασκευαστεί στην πραγματικότητα. Χρησιμοποιείται σε πολλά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων καθώς και σε προγράμματα CAD.

Στο TracePro χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte Carlo για την προσομοίωση της σκέδασης και της περίθλασης του φωτός και την δειγματοληψία της κατανομής των ακτίνων που εκπέμπονται από την πηγή. Όταν μια ακτίνα φωτός σκεδάζεται από μια επιφάνεια, δημιουργείται μια συνεχής κατανομή φωτός. Κάποιος θα μπορούσε να υπολογίσει τη διάδοση του φωτός ακριβώς, μέχρις ότου η ακτινοβολούμενη ισχύς να είναι τόσο χαμηλή ώστε να μπορεί να αγνοηθεί. Για το μοντέλο διάδοσης του φωτός με αυτόν τον τρόπο απαιτείται ένα πάρα πολύ περίπλοκο υπολογιστικό πρόγραμμα. Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια υπολογιστική τεχνική για τον υπολογισμό στοχαστικών διαδικασιών και χρησιμοποιείται ευρέως για την μοντελοποίηση κβαντικών διαδικασιών. Η σκέδαση και η περίθλαση των ακτίνων αντιμετωπίζονται ως στοχαστικές διαδικασίες, όπου αντί για την διάδοση μιας συνεχούς κατανομής φωτός διαδίδονται διακριτά δείγματα αυτής. Η δειγματοληψία γίνεται τυχαία θεωρώντας την κατανομή σκέδασης ως κατανομή πυκνότητας πιθανότητας και έτσι επιτυγχάνεται η προσομοίωση αυτών των φαινομένων.

Το πρόγραμμα επίσης παρέχει ένα αρκετά εύκολο στη χρήση γραφικό περιβάλλον διεπαφής (Graphical User Interface) με το οποίο μπορείς να σχεδιάσεις διάφορα αντικείμενα και πηγές και να τους προσδώσεις διάφορες ιδιότητες

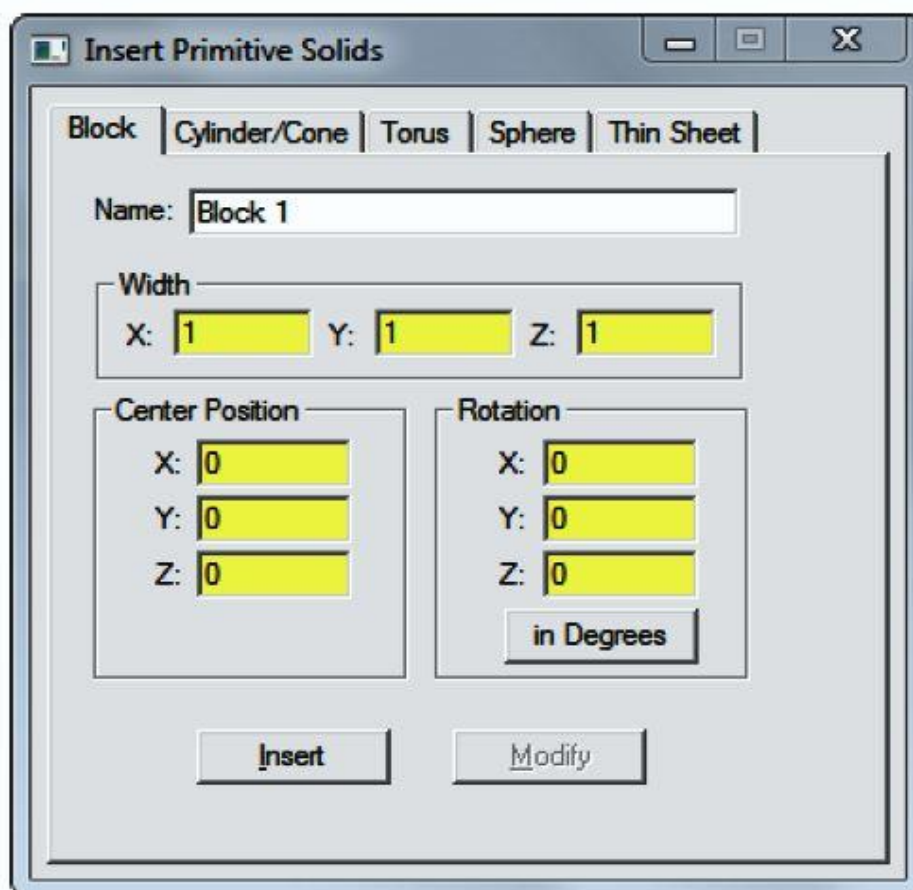


Εικόνα 3.2 Το GUI του TracePro.

Οι ιδιότητες που μπορείς να προσδώσεις είτε στα αντικείμενα είτε στις επιμέρους επιφάνειές τους μπορεί να είναι οπτικές αλλά και μηχανικές ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Πέρα από τις ήδη υπάρχουσες ιδιότητες μπορεί ο χρήστης να διαμορφώσει τις δικές του ανάλογα με τις απαιτήσεις του. Επίσης σου παρέχει την δυνατότητα μαθηματικών υπολογισμών διαφόρων ιδιοτήτων μέσω γνωστών συναρτήσεων, ενώ παράλληλα μπορείς να εισάγεις δεδομένα ή να εξάγεις τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε διαφορετικές μορφοποιήσεις πράγμα που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη αν θέλει να επεξεργαστεί τα δεδομένα και σε άλλα υπολογιστικά πακέτα.

3.2.1 Το στερεό μοντέλο (Solid Model)

Με το στερεό μοντέλο κάποιος μπορεί να κατασκευάσει διάφορα γεωμετρικά τρισδιάστατα σχήματα, όπως κώνους, κυλίνδρους, σφαίρες και άλλα, καθώς και αντικείμενα που χρησιμοποιούνται σε οπτικά συστήματα όπως ανακλαστήρες, φακούς, αλλά και πιο σύνθετα αντικείμενα με τη βοήθεια των δυνατοτήτων που σου παρέχει το πρόγραμμα. Τα αντικείμενα μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορα μεγέθη (βασική μονάδα μέτρησης του μήκους για το πρόγραμμα είναι το mm) και με διαφορετικούς προσανατολισμούς και αρχικές θέσεις.



Εικόνα 3.3 Παράθυρο εισαγωγής ενός στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος.

Βέβαια το πρόγραμμα εκτός από τρισδιάστατα σχήματα το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα και για σχεδίαση δισδιάστατων σχημάτων (Thin Sheet).

3.2.2 Ορισμός οπτομηχανικών συστημάτων

Στο TracePro σε κάθε στερεό σχήμα που δημιουργείται μπορεί να δοθεί η ιδιότητα ενός οπτικού συστήματος, όπως ενός φακού ή μιας ανακλαστικής επιφάνειας.

Όσον αφορά τους φακούς (Lens), μπορούν να σχεδιαστούν διάφορα είδη. Η επιφάνεια του φακού δημιουργείται βάση της σχέσης

$$Z = \frac{c_v \rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c_v^2 \rho^2}} + \sum_{i=1}^{30} A_i \rho^i \quad (3.1)$$

όπου, $\rho^2 = X^2 + Y^2$, c_v η καμπυλότητα της επιφάνειας, K η κωνική σταθερά και A_i οι ασφαιρικοί συντελεστές. Τα X , Y , Z είναι οι τοπικές συντεταγμένες της επιφάνειας. Ο χρήστης ορίζει την καμπυλότητα, το μέγεθος, τη θέση και τον προσανατολισμό του φακού, το διάφραγμα αν υπάρχει, και το υλικό του. Ανάλογα με την τιμή του K ο φακός έχει το αντίστοιχο σχήμα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.1 Πίνακας τιμών για το K

Κωνική Σταθερά	Τύπος Σχήματος
$K < -1$	Υπερβολοειδές
$K = -1$	Παραβολοειδές
$-1 < K < 0$	Ελλειψοειδές
$K = 0$	Σφαιροειδές
$K > 0$	Πεπλατυσμένο Σφαιροειδές

Ένα άλλο είδος φακού που προσομοιώνεται στο πρόγραμμα είναι ο φακός Fresnel. Σε αυτούς, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τον αριθμό των αυλακώσεων ανά μονάδα μήκους, το πάχος και την ακτίνα του υποστρώματος που υπάρχουν οι αυλακώσεις, οι εστιακές αποστάσεις και το υλικό του φακού. Οι γωνίες όψεως υπολογίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε όταν το φως από την εστιακή απόσταση του αντικειμένου, που προσπίπτει στο φακό υπό γωνία θ_1 και φεύγει από αυτόν υπό γωνία θ_2 , να απεικονίζεται σε απόσταση ίση με την εστιακή του ειδώλου, μέσω της σχέσης

$$\tan\beta = \frac{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}{\sqrt{(n^2 - \sin^2\theta_1)} - \cos\theta_2}. \quad (3.2)$$

Τέλος, στο πρόγραμμα μπορούν να σχεδιαστούν μια πληθώρα ανακλαστικών αντικειμένων (Reflectors) αλλά και συγκεντρωτικών (Concentrators). Υπάρχουν πολλές επιλογές τόσο ως προς το είδος – αν θα είναι Κωνικό (Conic), ή Τρισδιάστατος Σύνθετος συγκεντρωτής (3D Compound) κ.α. – όσο και ως προς το σχήμα (ελλειψοειδή, παραβολοειδή κ.α.). Μπορούν να ορισθούν και άλλες παράμετροι, όπως η εστιακή απόσταση, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάχος, μήκος, ακτίνα καμπυλότητας) καθώς και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο του αντικειμένου, όπως τα μήκη εισόδου/εξόδου των εστιακών σημείων (front/back length).

3.2.3 Ιδιότητες πηγής και αντικειμένων

Το TracePro δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσδώσει διάφορες ιδιότητες στα αντικείμενα του μοντέλου του, είτε στο σύνολο του όγκου ενός αντικειμένου, είτε σε συγκεκριμένες επιφάνειές του. Μπορούν να ορισθούν το υλικό του αντικειμένου, η θερμοκρασία του, καθώς επίσης και οι συντελεστές διέλευσης και ανάκλασης. Τις περισσότερες φορές οι ιδιότητες των αντικειμένων εξαρτώνται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης. Το πρόγραμμα διαθέτει μια μεγάλη λίστα από διάφορα υλικά μεταλλικά, ημιαγώγιμα και οργανικά, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να δοθούν στα υλικά οι επιθυμητές ιδιότητες από τον χρήστη. Τέλος μπορούν να δημιουργηθούν οπτικά φράγματα ορίζοντας την πυκνότητα των σχισμών στις επιλεγμένες επιφάνειες.

Επίσης, το πρόγραμμα μπορεί να δημιουργήσει διαφόρων τύπων πηγές. Μπορεί ο χρήστης να ορίσει της διαστάσεις της πηγής και τον αριθμό των σημείων εκπομπής, τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας, καθώς επίσης και την ένταση ή τον αριθμό των εκπεμπόμενων ακτίνων. Επιπρόσθετα, μπορεί να ορισθεί η χωρική κατανομή της έντασης (γκαουσιανή ή ομοιόμορφη) και η γωνιακή απόκλιση των ακτίνων από τον κύριο άξονα εκπομπής, αλλά και η πόλωση του φωτός.

Τέλος να αναφερθεί ότι μπορεί ο χρήστης να ορίσει ιδιότητες απορρόφησης και φθορισμού από το υλικό.

3.2.4 Δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση

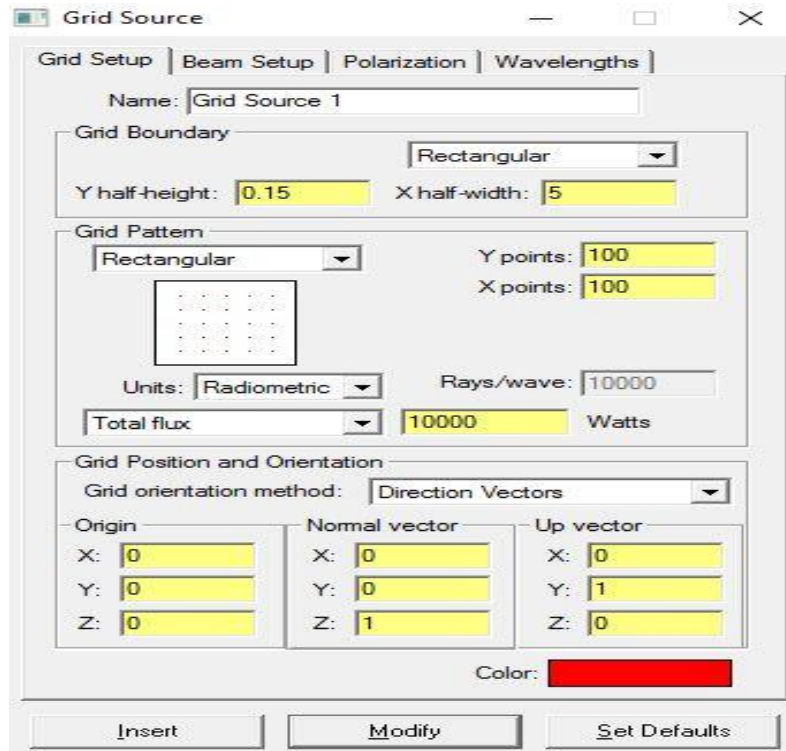
Βασικό αποτέλεσμα του προγράμματος που προκύπτει από την προσομοίωση είναι η διαδρομή των ακτίνων. Το πρόγραμμα παρέχει πολλά φίλτρα για την παρουσίαση της διαδρομής των ακτίνων καθώς μπορείς να επιλέξεις να εμφανίζονται ακτίνες συγκεκριμένου μήκους κύματος ή έντασης με διαφορετικά χρώματα. Αν ορισθεί μια επιφάνεια ως επιφάνεια εξόδου, σε αυτήν μπορεί να ευρεθεί η χωρική κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Irradiance Map), η γωνιακή κατανομή της δέσμης (Candela plot), η εικόνα που αποτυπώνεται στην επιφάνεια (Luminance plot) και η πόλωση της δέσμης (Polarization Map). Τέλος το πρόγραμμα μπορεί να μετρήσει το χρόνο που χρειάζεται η δέσμη για να φτάσει στην έξοδο από την είσοδο (time-of-flight) ή το μήκος του οπτικού δρόμου (optical path length, OPL), ενώ αποθηκεύει όλα τα συμβάντα που συμβαίνουν (ανακλάσεις σε επιφάνειες κλπ.) ανά μήκος κύματος καθώς επίσης και την ένταση κάθε δέσμης.

3.3 Σχεδίαση και αποτελέσματα προσομοίωσης

3.3.1 Σχεδίαση πηγής

Αρχικά κατασκευάζουμε μια τετραγωνική πηγή διαστάσεων 10x0.3 mm. Η ολική ροή ενέργειας είναι 10000 Watts με εύρος μήκους κύματος από 600 έως 800 nm με τον ανάλογο συντελεστή για κάθε μήκος που προκύπτει από την Εικ. 2.1. Η χωρική και η γωνιακή κατανομή της δέσμης είναι ομοιόμορφη με μηδενική γωνιακή

απόκλιση. Για την δημιουργία της πηγής επιλέγουμε από την γραμμή εντολών Define>Grid Source, επιλέγουμε τις επιθυμητές ιδιότητες (Εικ. 3.4), επιλέγουμε τα μήκη κύματος σύμφωνα με τον Πίν. 3.2 πηγαίνοντας στην καρτέλα Wavelengths και πατάμε Modify.



Εικόνα 3.4 Ιδιότητες της πηγής.

Πίνακας 3.2 Πίνακας συντελεστών βάρους και αντίστοιχης ροής ενέργειας ανά μήκος κύματος

Μήκος κύματος (nm)	Συντ. Βάρους	Ροή (Watt)
600	0,2	27,14
610	0,5	67,84
620	1,75	237,45
630	3	407,06

640	3,5	474,90
650	4	542,74
660	3,5	474,90
670	3	407,06
680	2,5	339,21
690	2,25	305,29
700	2	271,37
710	2,5	339,21
720	3	407,06
730	4	542,74
740	5	678,43
750	8	1085,48
760	10	1356,85
770	6	814,11
780	4	542,74
790	3	407,06
800	2	271,37

3.3.2 Σχεδίαση περιθλαστικής ανακλαστικής επιφάνειας

Για την σχεδίαση του περιθλαστικού ανακλαστήρα αρχικά πρέπει να ορίσουμε μια νέα επιφανειακή ιδιότητα (Surface property). Για το

λόγο αυτό επιλέγουμε Define>Edit Property Data>Surface Properties. Έπειτα, ορίζουμε το όνομα της ιδιότητας, τον τύπο της (grating) και την απόσταση μεταξύ των επιπέδων. Ορίζουμε $d=2$ μm . Μετά ορίζουμε την θερμοκρασία της επιφάνειας ($T = 300 \text{ K}$), τα μήκη κύματος που περιέχει η προσπίπτουσα δέσμη, τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης (έχουμε ορίσει $\alpha_i = 0, 20, 30$ και 45 μοίρες), τις τάξεις περίθλασης που εμφανίζονται ($m = 0, \pm 1, \pm 2$) και τους συντελεστές ανάκλασης (R), διάθλασης (T), απορρόφησης (a) και τους συντελεστές BRDF και BTDF (Bidirectional Reflectance\Transmittance Distribution Function). Θα εξετάσουμε την ιδανική περίπτωση όπου ο συντελεστής απορρόφησης $a = 0$.

Συντελεστές BRDF και BTDF

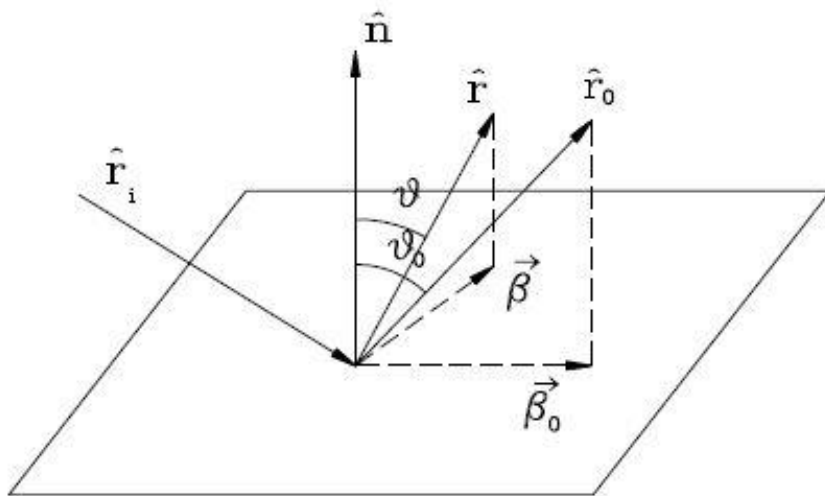
Οι συντελεστές BRDF και BTDF είναι ένα μέτρο του κατά πόσο προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται και διαθλάται από μία επιφάνεια σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Οι συντελεστές είναι συνάρτηση τόσο της κατεύθυνση πρόσπτωσης όσο και της κατεύθυνσης ανάκλασης ή διάθλασης. Από μαθηματική άποψη, η BRDF\BTDF ορίζεται ως η ανακλώμενη\διαθλώμενη ισχύς ακτινοβολίας ανά μονάδα ισχύος προσπίπτουσας ακτινοβολίας, δηλαδή

$$BRDF = \frac{P_{ref}/\Omega}{P_i \cdot \cos\theta_{ref}} \quad (3.3)$$

όπου P_{ref} είναι η ανακλώμενη ισχύς, P_i η ισχύς της προσπίπτουσας δέσμης, Ω η στερεά γωνία της ανακλώμενης δέσμης, και θ_{ref} είναι η γωνία ανάκλασης (αντίστοιχα για την BTDF). Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται ένας πιο απλός τύπος, ο

$$BRDF = \frac{A}{B + |\vec{\beta} + \vec{\beta}_0|^g} \quad (3.4)$$

Οι συντελεστές A, B και g εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες και δίνονται διαγραμματικά από τον κατασκευαστή του περιθλαστικού ανακλαστήρα. Τυπικές τιμές που χρησιμοποιούνται



Εικόνα 3.5 Γραφική αναπαράσταση των διανυσμάτων $\vec{\beta}$ και $\vec{\beta}_0$.

είναι $B = 0.001$ και $g = 2$. Το TracePro υπολογίζει μόνο του το A για δεδομένο συντελεστή BRDF. Στην περίπτωση μας έχουμε θεωρήσει $BTDF = 0$ και $BRDF = 0.3$. Καταλήγουμε έτσι ότι ο συντελεστής ανάκλασης είναι $R = 0.7$.

Κατανομή Ενέργειας (Απόδοση Διάθλασης)

Ο συντελεστής ανάκλασης δεν είναι ίδιος για όλες τις τάξεις περίθλασης. Η εύρεσή του για κάθε τάξη είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Γενικά, το πώς κατανέμεται η ενέργεια της προσπίπτουσας δέσμης, και άρα τι συντελεστή ανάκλασης έχει κάθε τάξη, εξαρτάται από πολλές παραμέτρους,

συμπεριλαμβανομένης της ισχύος και πόλωσης του προσπίπτοντος φωτός, οι γωνίες πρόσπτωσης και περίθλασης, το μιγαδικό δείκτη διάθλασης του υλικού στην επιφάνεια του φράγματος την απόσταση d και δίνονται στα χαρακτηριστικά του περιθλαστικού ανακλαστήρα από τον κατασκευαστή. Στην περίπτωση μας θεωρούμε ότι για $m = 0$ έχουμε $R = 0.4$, για $m = \pm 1$ έχουμε $R = 0.1$ και για $m = \pm 2$ είναι $R = 0.05$.

3.3.3 Γεωμετρική σχεδίαση φασματογράφου

Για το φασματογράφο, θα χρησιμοποιήσουμε τρία στερεά αντικείμενα, το πρώτο (Block 1) από τα οποία θα χρησιμοποιηθεί ως περιθλαστικός ανακλαστήρας, το δεύτερο (Block 2) ως πλήρως ανακλαστική επιφάνεια και το τρίτο (Block 3) ως επιφάνεια εξόδου όπου αντιστοιχεί σε κάποια ανιχνευτική διάταξη της επιλογής μας. Το κέντρο της πηγής, που έχει διαστάσεις όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω, τοποθετείται στην αρχή των αξόνων. Το Block 1 έχει διαστάσεις $20 \times 15 \times 1$ mm (διαστάσεις στον x, y και z αντίστοιχα) με κέντρο που τοποθετείται στο $A(0,0,100)$ (σε mm) και είναι στραμμένο γύρω από τον άξονα x κατά 45 μοίρες. Το Block 2 έχει διαστάσεις $50 \times 50 \times 1$ mm με κέντρο που τοποθετείται στο $A(0,100,100)$ και είναι στραμμένο γύρω από τον άξονα x κατά 45 μοίρες. Τέλος, το Block 3 έχει διαστάσεις $50 \times 50 \times 1$ mm με κέντρο που τοποθετείται στο $A(0,100,400)$.



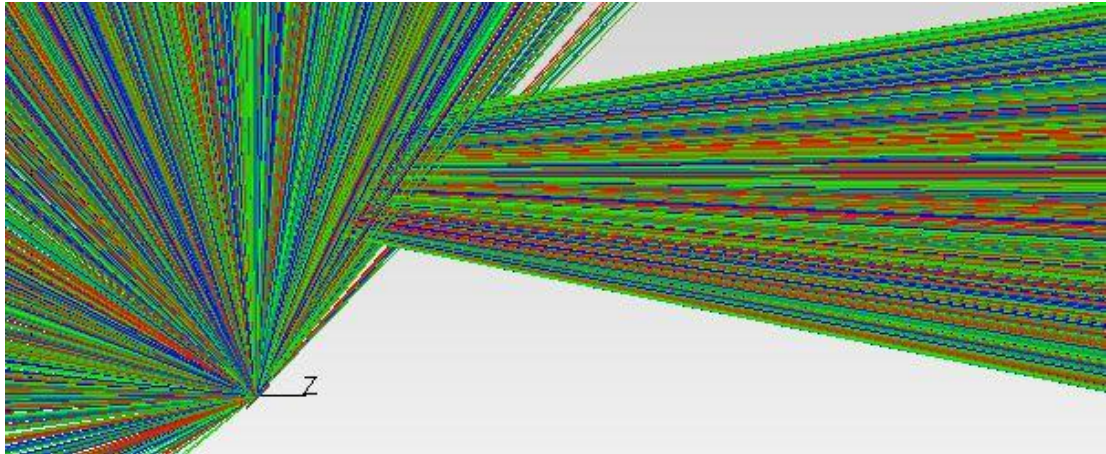
Εικόνα 3.6 Γεωμετρική αναπαράσταση της διάταξης

Τέλος, να σημειώσουμε ότι η γεωμετρία της διάταξης μπορεί να αλλάξει αναλόγως τις απαιτήσεις του πειράματος και τα χαρακτηριστικά του περιθλαστικού ανακλαστήρα (απόδοση διάθλασης κ.α.).

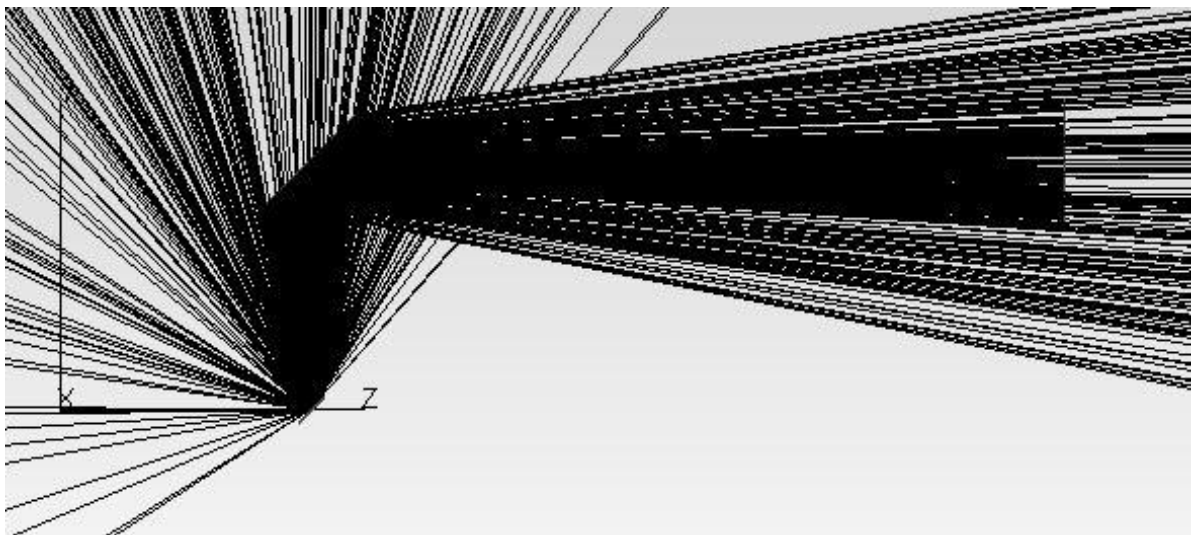
3.3.4 Προσομοίωση και ανάλυση αποτελεσμάτων

Τροχιές ακτίνων

Αρχικά, για την καταγραφή των διαδρομών των οπτικών ακτίνων με το TracePro επιλέγουμε από την γραμμή εντολών Raytrace> Trace Rays όπου εμφανίζονται οι τροχιές των ακτίνων που ανακλώνται από το κλιμακωτό φράγμα και την ανακλαστική επιφάνεια όλων των μηκών κύματος (Εικ. 3.7), όπου φαίνεται και η γωνιακή διασπορά των ακτίνων ανάλογα με το μήκος κύματος. Λόγω της πυκνότητας των ακτίνων φιλτράραμε το σύνολό τους ώστε να εμφανίζονται οι διαδρομές των ακτίνων μόνο για μήκη κύματος $\lambda = 800 \text{ nm}$, 700 nm και 600 nm (Εικ. 3.8-10).

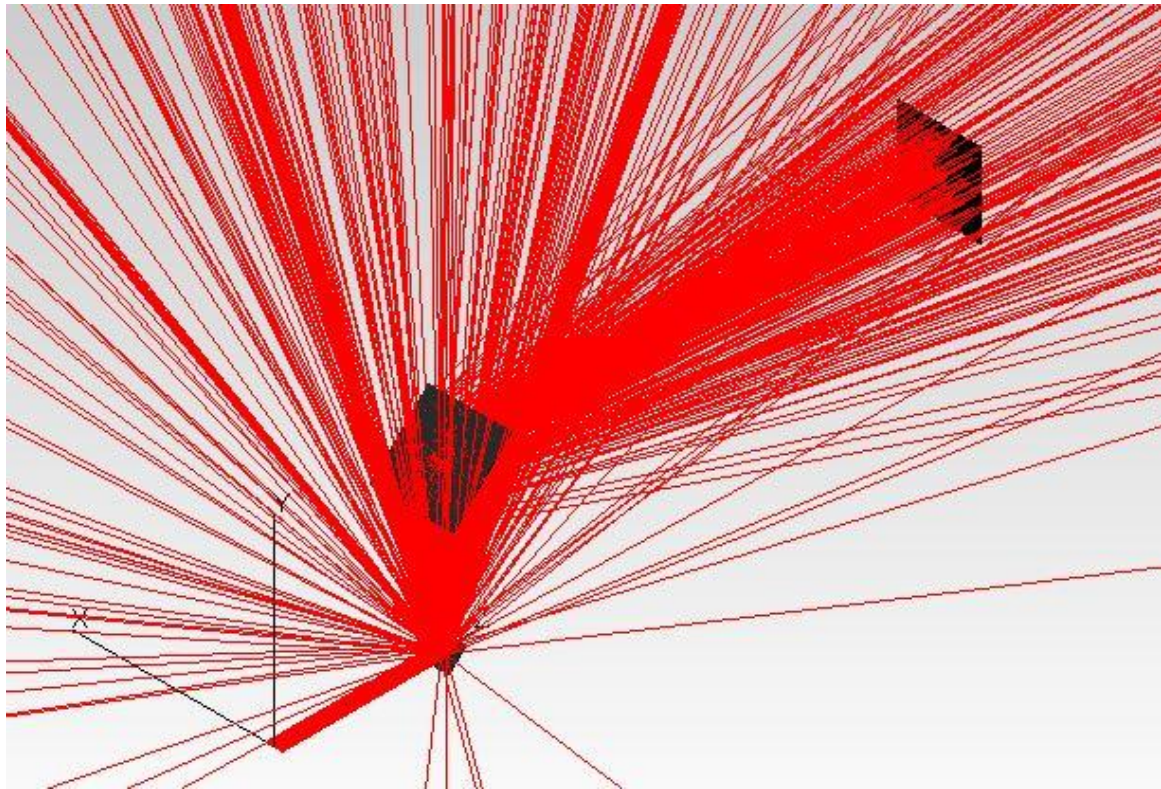


Εικόνα 3.7 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων. Το μπλε αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μήκος κύματος και το κόκκινο στο μικρότερο.

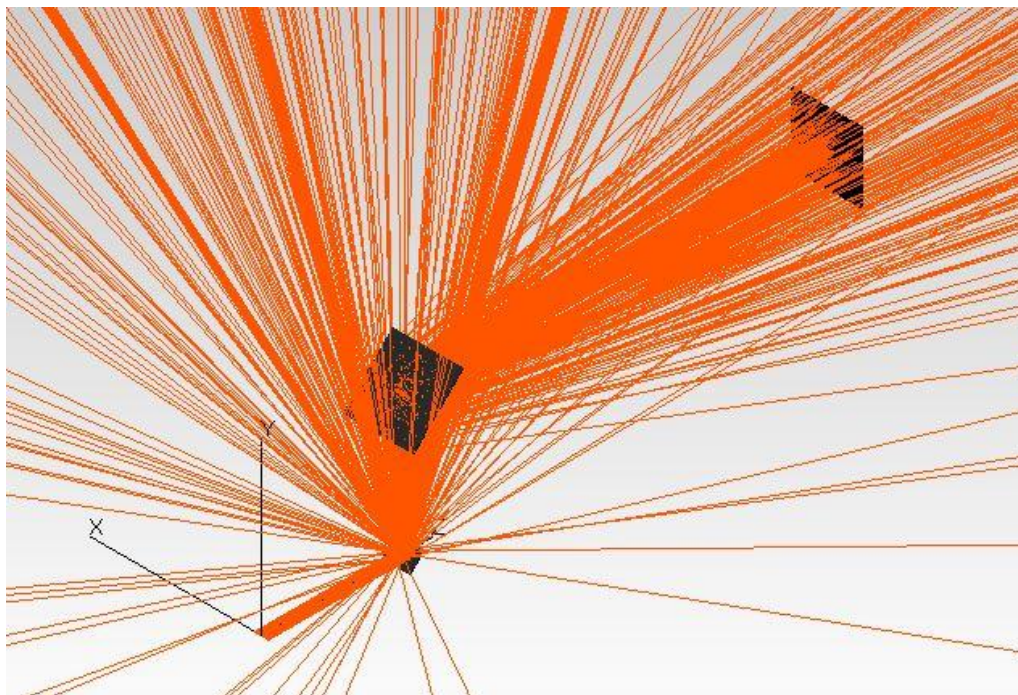


Εικόνα 3.8 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων μήκους κύματος 800 nm (IR).

Πιο συγκεκριμένα, για τις Εικ 3.9 και 3.10 φαίνονται οι ακτίνες που ξεκινούν από την πηγή (αρχή των αξόνων) έπειτα περιθλώνται στο κλιμακωτό ανακλαστικό φράγμα, όπου παρατηρούμε με μεγαλύτερη πυκνότητα τις διάφορες τάξεις περίθλασης. Έπειτα οι τάξεις περίθλασης $m = 0$ και $m = 1$ ανακλώνται από την ανακλαστική επιφάνεια που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κλιμακωτό φράγμα,



Εικόνα 3.9 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων μήκους κύματος 700 nm.

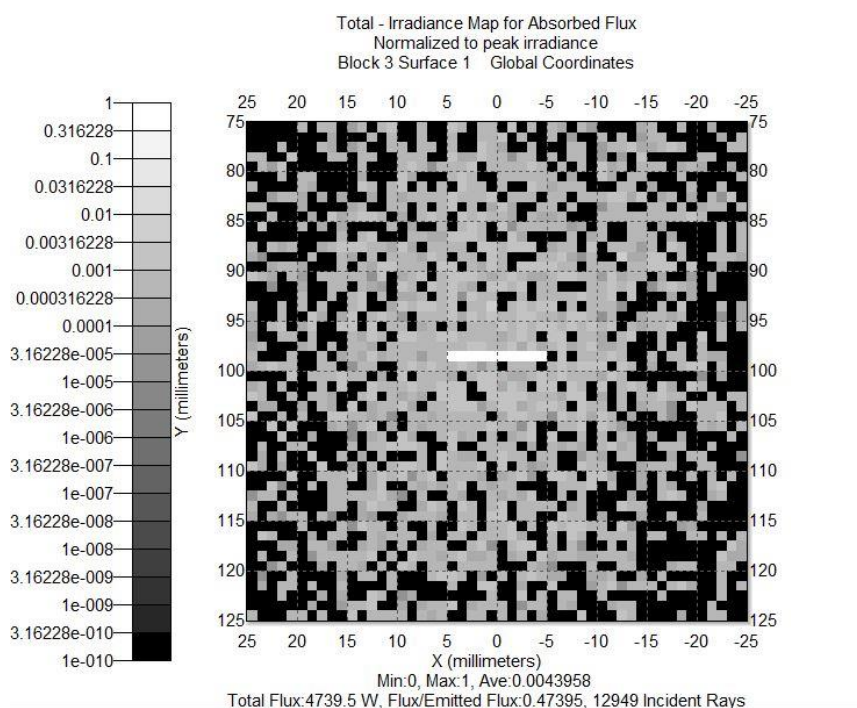


Εικόνα 3.10 Τροχιές των φωτεινών ακτίνων μήκους κύματος 600 nm.

ενώ οι υπόλοιπες διαφεύγουν στο άπειρο. Τέλος στην επιφάνεια εξόδου καταλήγουν οι ακτίνες τάξης περίθλασης $m = 0$, αλλά και κάποιες σκεδαζόμενες ακτίνες λόγω του μη μηδενικού συντελεστή BRDF. Για να έφταναν στην έξοδο και οι ακτίνες μεγαλύτερης τάξης περίθλασης θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερη επιφάνεια ανάκλασης ή μεγαλύτερη επιφάνεια στόχου ή περισσότερο αριθμό στόχων.

Απόδοση διάταξης και χωρική κατανομή της ενέργειας στην έξοδο

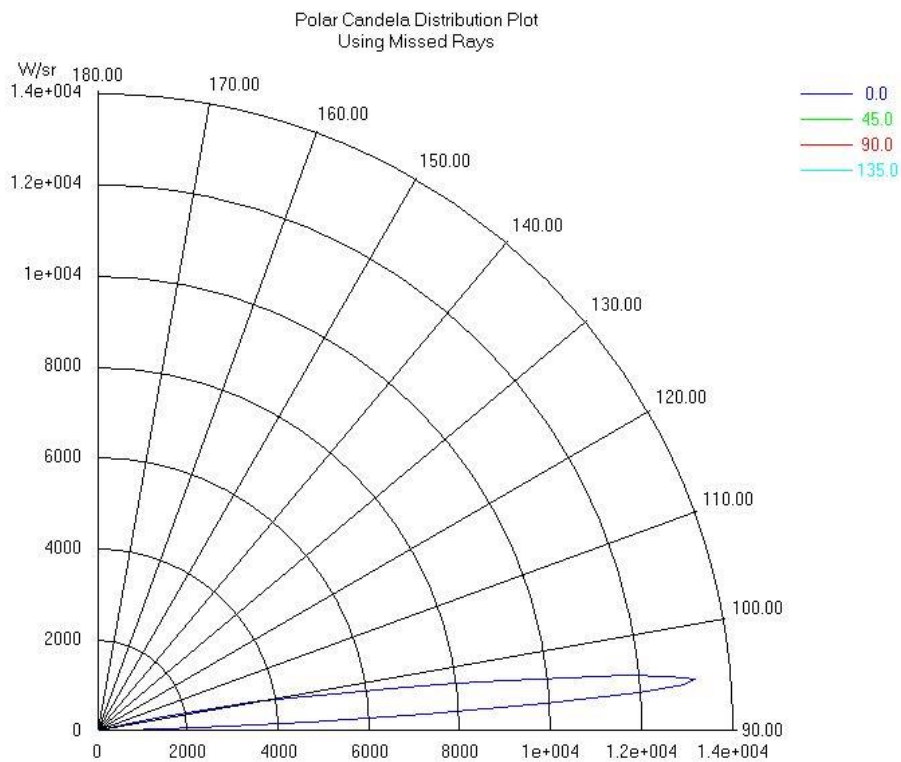
Με το TracePro μετρήσαμε την ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια εξόδου. Η Εικ. 3.11 περιέχει 50 pixels διάστασης 1x1 mm, όπου παρατηρούμαι ότι η ακτίνες της μηδενικής τάξης προσέγγισης είναι συγκεντρωμένες, ενώ γύρο της σκορπίζονται πολλές ακτίνες μικρότερης ισχύος. Ο συντελεστής απόδοσης της διάταξης είναι περίπου 47,4%.



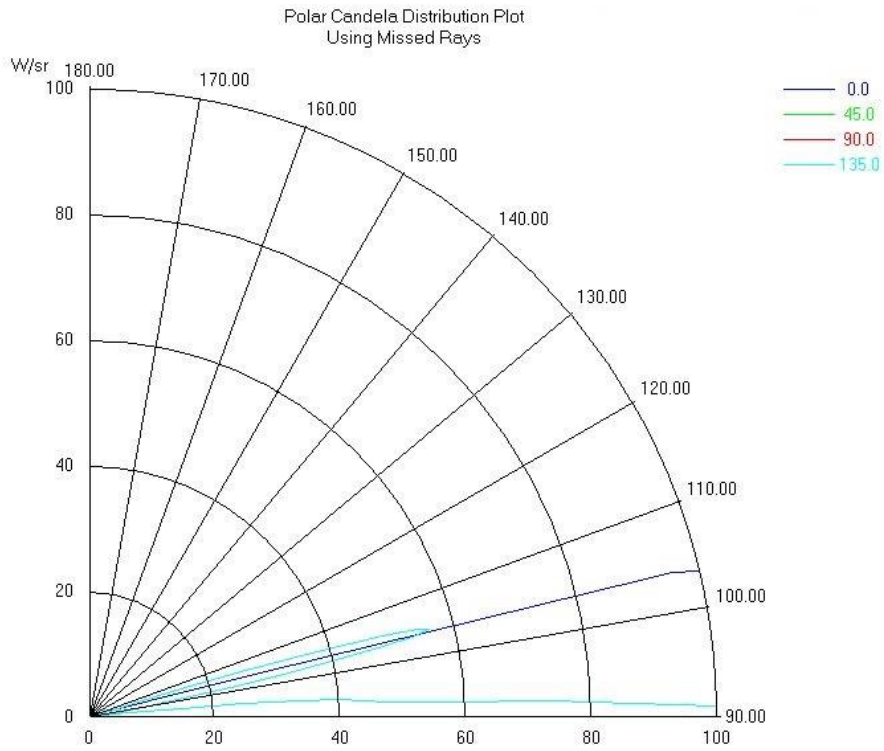
Εικόνα 3.11 Κανονικοποιημένη χωρική κατανομή της απορροφούμενης ισχύς στην επιφάνεια εξόδου.

Διαγράμματα Candela

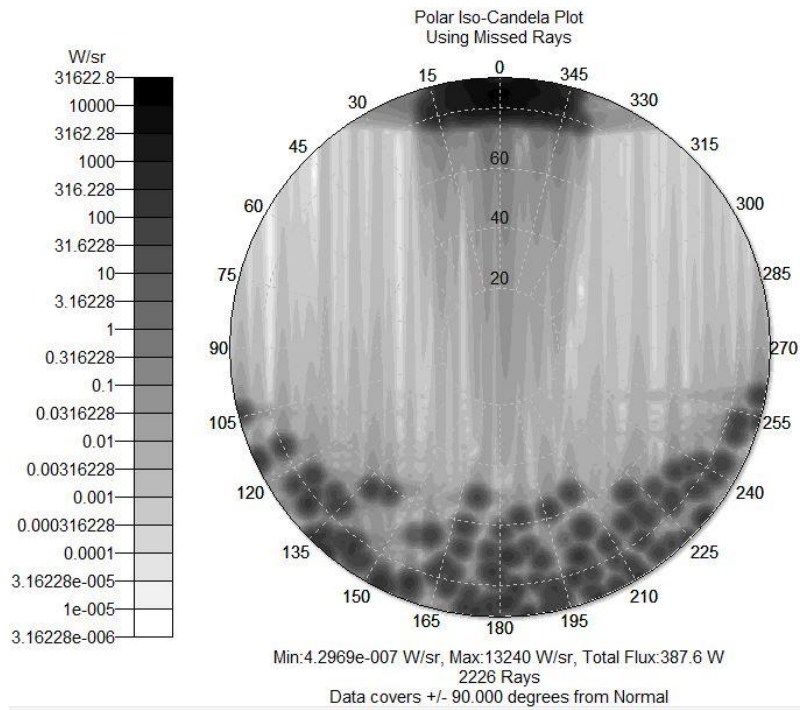
Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού των διαγραμμάτων Candela της προσπίπτουσας δέσμης μέσω των ακτίνων που διαφεύγουν στο άπειρο (missed rays). Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα Candela για διάφορες οριζόντιες γωνίες (0, 45, 90 και 135 μοιρών)



Εικόνα 3.12 Γράφημα Candela



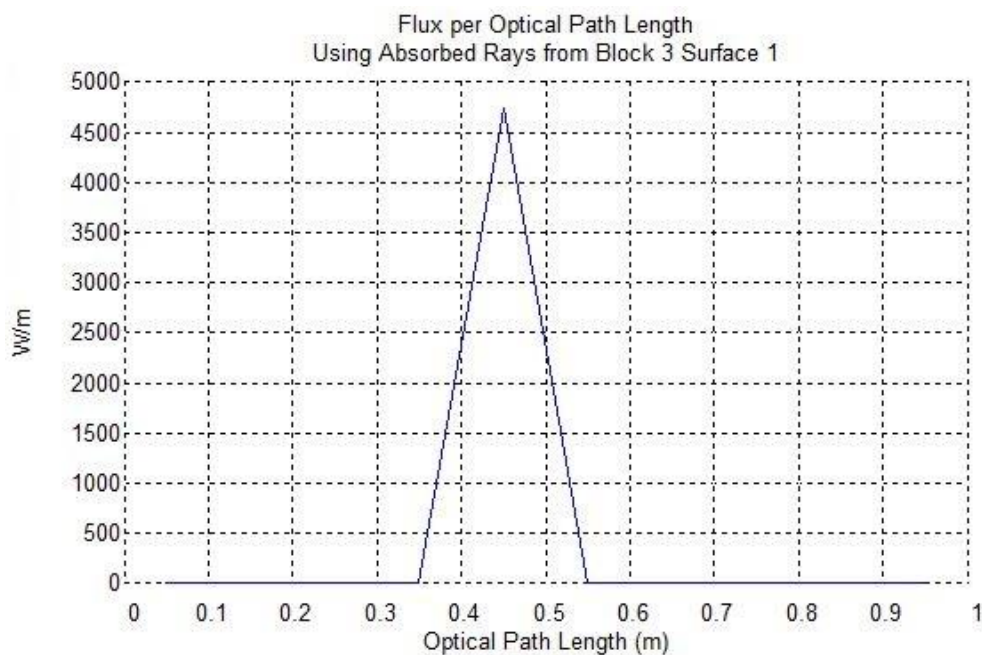
Εικόνα 3.13 Γράφημα Candela



Εικόνα 3.14 Γράφημα Candela

Μέτρηση οπτικού δρόμου

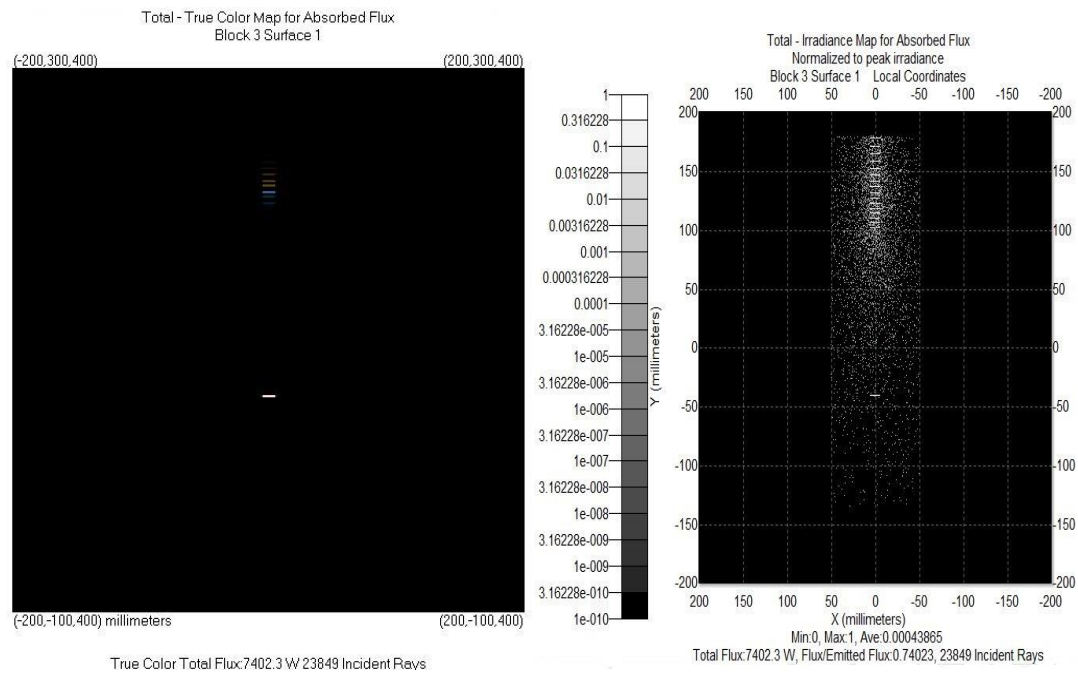
Τέλος μετρήθηκε το μήκος οπτικού δρόμου για τις ακτίνες που φτάνουν στον στόχο και έχουν διαφορετική ισχύ.



Εικόνα 3.15 Μήκος οπτικού δρόμου ακτίνων με αντίστοιχη ισχύ.

3.3.5 Αλλαγή παραμέτρων και επαναπροσδιορισμός της ισχύος

I. Αλλαγή στον αριθμό και στην ένταση των τάξεων περίθλασης
Αρχικά, τροποποιήθηκαν οι τάξεις περίθλασης που εκπέμπονται κατά την περίθλαση. Πιο συγκεκριμένα, οι τάξεις περίθλασης από $m = 0, \pm 1, \pm 2$ έγιναν $m = 0, 1, 2$ με την ένταση της δέσμης να κατανέμεται κυρίως στην πρώτη τάξη ($R_0 = 0.3, R_1 = 0.5, R_2 = 0.1$). Από την προσομοίωση έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



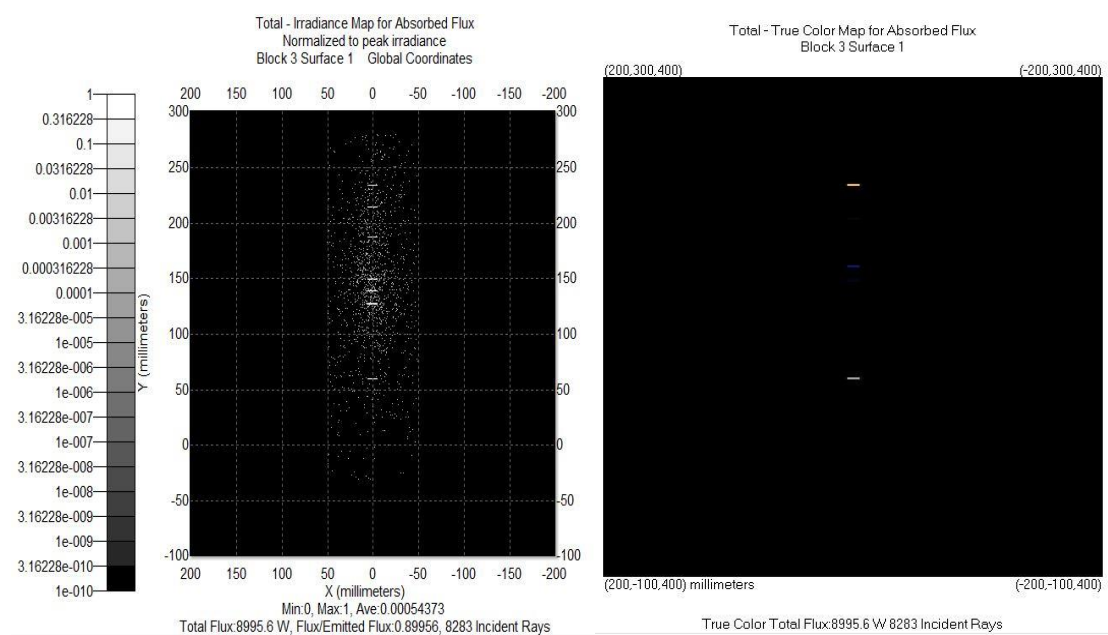
Εικόνα 3.16 Χρωματική αναπαράσταση της ανάλυσης της δέσμης (αριστερά) και χωρική κατανομή της έντασης (δεξιά).

Στις εικόνες εμφανίζονται οι μηδενικής και πρώτης τάξης περίθλασης ακτίνες για μήκη κύματος από 600-800 nm. Η μηδενικής τάξης εμφανίζεται με λευκό χρώμα ενώ για τα υπόλοιπα μήκη κύματος εμφανίζονται ξεχωριστές γραμμές για το καθένα, ενώ οι υπέρυθρες δεν φαίνονται, αφού δεν γίνονται αντιληπτές από το μάτι. Οι εικόνες έχουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Επίσης, η ισχύς που προσπίπτει –και άρα ανιχνεύεται- από τον ανιχνευτή είναι μεγαλύτερη διότι πέφτουν και οι ακτίνες της πρώτης τάξης περίθλασης. Ο συντελεστής σε αυτήν την περίπτωση είναι 0.74.

II. Αλλαγή στα μήκη κύματος της δέσμης

Η επόμενη αλλαγή που έγινε ήταν στα μήκη κύματος και τις σχετικές εντάσεις τους. Χρησιμοποιήθηκαν τα μήκη 337, 385, 391.6, 427, 557 και 630 nm, με τις τάξεις περίθλασης που εμφανίζονται να είναι ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση, όπως και οι συντελεστές

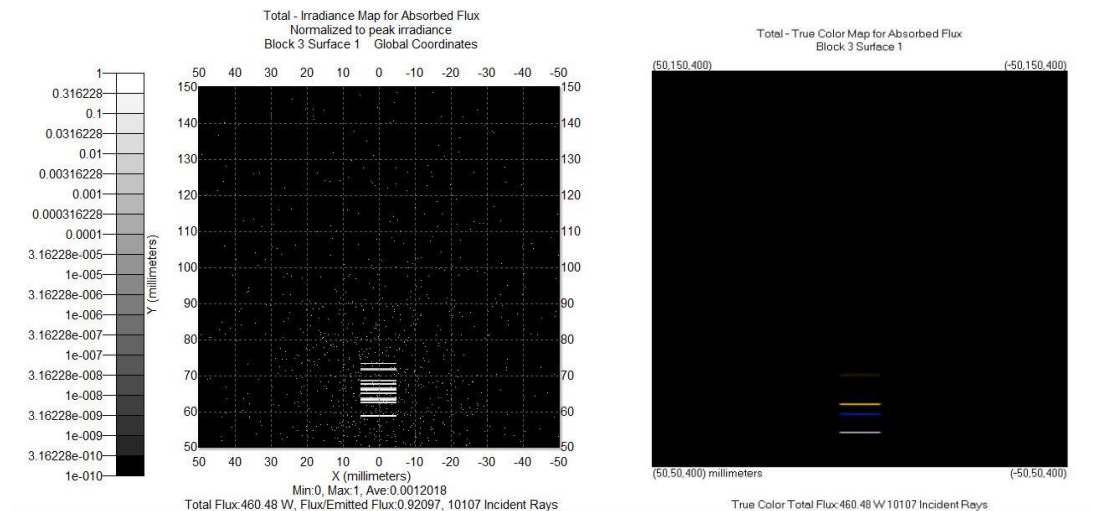
ανάκλασης κάθε τάξης. Στις εικόνες παρακάτω εμφανίζονται οι μηδενικής και πρώτης τάξης περίθλασης ακτίνες για τα προαναφερθέντα μήκη κύματος. Η μηδενικής τάξης εμφανίζεται με λευκό χρώμα ενώ για τα υπόλοιπα μήκη κύματος εμφανίζονται ξεχωριστές γραμμές για το καθένα. Στην χρωματική αναπαράσταση εμφανίζεται η μηδενικής τάξης και η πρώτης για τα μήκη 427 (μπλε) και 630 (κίτρινη), ενώ τα υπόλοιπα δεν εμφανίζονται είτε διότι είναι στο υπεριώδες, είτε γιατί έχουν μικρότερη ισχύ οπότε δεν γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι. Η μετρήσιμη ισχύς από τον ανιχνευτή είναι και αυτή τη φορά μεγαλύτερη με το συντελεστή να είναι περίπου 0.9.



Εικόνα 3.17 Χρωματική αναπαράσταση της ανάλυσης της δέσμης (δεξιά) και χωρική κατανομή της έντασης (αριστερά).

III. Αλλαγή στον αριθμό χαραγών και στην ένταση της δέσμης

Η τελική αλλαγή που έγινε είναι στην απόσταση μεταξύ των χαραγών (από 2 μm που ήταν αρχικά σε 31.6 μm) και στην ένταση της δέσμης (από $W=10 \text{ kW}$ σε $W=500 \text{ W}$)



Εικόνα 3.18 Χωρική κατανομή της έντασης (αριστερά) και χρωματική αναπαράσταση της ανάλυσης της δέσμης (δεξιά).

Από τις εικόνες φαίνεται ότι οι γραμμές πύκνωσαν, κάτι που αναμενόταν αφού αυξήθηκε η απόσταση μεταξύ των χαραγών. Επίσης σε αυτήν την προσομοίωση αποτυπώνονται στον ανιχνευτή και η δεύτερη τάξη περίθλασης, ενώ ο συντελεστής ισχύος είναι 0.92.

IV. Συμπεράσματα επί των αλλαγών

Παρατηρούμε ότι με τις αλλαγές που κάναμε αυξήσαμε την απόδοση της διάταξής μας. Φυσικά για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να αλλάξουμε και το μέγεθος και θέση του ανακλαστικού στοιχείου. Σε σχέση με άλλες έρευνες που έχουν γίνει [16] βλέπουμε ότι η διάταξη μας δεν είναι κατασκευασμένη για μελέτη μεγάλων τάξεων περίθλασης κάτι το οποίο συνηθίζεται στην αστρονομία.

Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα για τη διάταξη και προτάσεις για βελτίωση και πιθανές εφαρμογές

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη που έχει ως σκοπό την ανάλυση φάσματος TLEs με σκοπό τόσο την εύρεση ενεργειακών μεγεθών αλλά και των τροχιών που ακολουθούν ακτίνες διαφορετικών μηκών κύματος. Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος TracePro. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα να σχεδιάσεις και να μελετήσεις χαρακτηριστικά ρεαλιστικών διατάξεων. Επίσης σου δίνει τη δυνατότητα να προσδώσεις στα μέρη της διάταξης τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Το πρόγραμμα προσομοίωσης TracePro μας έδωσε τη δυνατότητα σχεδιασμού φασματογράφου με επίπεδο κλιμακωτό φράγμα και μελετήθηκε η απόδοσή του σε συγκεκριμένες φασματικές γραμμές εκπομπής του αζώτου αλλά και ενός sprite. Στην εργασία μελετήθηκε η προέλευση των TLEs, ο μηχανισμός εκπομπής τους καθώς και τα κύρια φασματικά χαρακτηριστικά τους. Η προσομοίωση του φασματογράφου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον κατάλληλο σχεδιασμό σε πειραματικές μελέτες των TLEs την καταγραφή και ανάλυση των φασμάτων και υπολογισμό της ενέργειας τους. Όσον αφορά τη διάταξη, έχει αρκετά καλή απόδοση που μπορεί να βελτιωθεί με μερικές γεωμετρικές αλλαγές των στοιχείων της ή και διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά της (διαφορετικούς συντελεστές ABg, μήκη κύματος

κλπ.), αναλόγως βέβαια το πείραμα στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Η απόδοση κυμαίνεται από 47% έως 92%, ενώ το κόστος των βασικών οπτικών εξαρτημάτων της διάταξης εκτιμάται στα επίπεδα των 500 €, αλλά για μια πληρέστερη διάταξη με ανιχνευτή, μηχανική στήριξη και φωτοστεγανότητα θα πρέπει να γίνει επανεκτίμηση. Η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πειράματα TLEs για ανάλυση δεσμών και εύρεση του φάσματος καθώς επίσης και σε πειράματα για την μέτρηση της ενέργειας που εκπέμπεται από τα TLEs. Επίσης, λόγω του μικρού της μεγέθους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διάταξη οπτικού φασματομέτρου. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα πειράματα οπτικής φασματοσκοπίας που δεν σχετίζονται με τα TLEs.

Βιβλιογραφία

- [1] V.P. Pasko, Y. Yair, C. L. Kuo, “Lightning Related Transient Luminous Events at High Altitude in the Earth’s Atmosphere: Phenomenology, Mechanism and Effects”, *Space Sci. Rev.*, Vol. 168, pp. 475-516, 2012
- [2] www.atmo.arizona.edu
- [3] E. Blanc, “Space observations of Transient Luminous Events and associated emissions in the upper atmosphere above thunderstorm areas”, *C. R. Geoscience*, Vol. 342, pp. 312-322, 2010
- [4] B. A. Khrenov et al., “Transient Flashes of Electromagnetic Radiation in the Upper Atmosphere”, *Cosmic Research*, Vol. 46 (1), pp. 25-34, 2008
- [5] G. K. Garipov et al., “Time and Energy Characteristics of UV Flashes in the Atmosphere: Data of the Universitetsky-Tatiana satellite”, *Cosmic Research*, Vol. 49 (5), pp. 391-398, 2011
- [6] G. K. Garipov et al., “Global Transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of the Universitetsky-Tatiana- 2 satellite”
- [7] G. K. Garipov et al., “Transient events in the upper atmosphere”
- [8] G. M. Millikh, M. N. Shneider, “Model of UV flashes due to gigantic blue jets”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 41, 2008
- [9] M. Füllekfrug, E. A. Mareev, M. J. Rycroft, “Spites, Elves and Intense Lightning Discharges”, *NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. 225*
- [10] F.C. Parra-Rojas et al., “Spectroscopic diagnosis of laboratory air plasmas as a benchmark for spectral rotational (gas) temperature determination in TLEs”, 31st ICPIG, Spain, Granada, 14-19 July 2013
- [11] D. Siingh et al., “Thunderstorms, lightning, spikes and magnetospheric whistler-mode radio waves”

- [12] M. Füllekrug, M. J. Rycroft, “The contribution of sprites to the global atmospheric electric circuit”, *Earth Planets Space*, Vol. 58, pp. 1193-1196, 2006
- [13] F. J. Gordillo-Vásquez, A. Luque, M. Simek, “Near infrared and ultraviolet spectra of TLEs”, 1st TEA – IS Summer School, Spain, Málaga, 17-22th June 2012
- [14] “Diffraction Grating Handbook”, C. Palmer, E. Loewen, 6th Ed., 2005
- [15] S. Maltezos et al., “High Accuracy Determination of Fabry-Perot Effective Mirror Spacing Used for the Receivers of Atmospheric Monitoring in VHE Gamma Ray Astronomy”
- [16] N. Σπυρόπουλος, «Πειραματική μελέτη του φάσματος του νυχτερινού ουρανού για χρήση σε ανιχνευτές κοσμικών ακτίνων υπερύψηλων ενεργειών», Μεταπτυχιακή εργασία, 2008
- [17] “Photomultiplier Tubes: Basics and Applications”, 3rd Ed., Hamamatsu
- [18] “TracePro: User’s Manual”, Lambda Research Corp.
- [19] J. E. Harvey, “Light-Scattering Characteristics of Optical Surfaces”, University of Arizona, 1976
- [20] F.C. Parra-Rojas, “Electrical discharges in planetary upper atmospheres: thermal and chemical effects”, University of Granada, 2015
- [21] N. Maragos et al., “Design Aspects and Characterization Tests of a Multi-Wavelength Beam HSRL for Atmospheric Monitoring in Ultra High Energy Observatories”, Proceedings of the 32nd ICRC, Beijing, 2011
- [22] M. A. Bailey, “Investigating Characteristics of Lightning-Induced Transient Luminous Events Over South America”, Utah State University, 2010
- [23] E. M. Wescott, D. D. Sentman, M. J. Heavner, D. L. Hampton, and O. H. Vaughan Jr., “Blue jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 60, 713-724, 1998

- [24] S. Maltezos et al., "Design and Data Analysis Method of HSRL Receivers for Atmospheric Monitoring in Ultra High Energy Cosmic Ray Experiments", *Nuclear Physics B*, 190, 261-265, 2009
- [25] P. A. Klimov et al., "The atmosphere UV background phenomena measured by detector on-board "Tatiana" satellite", 30th International Cosmic Ray Conference
- [26] J. B. Bjarno, "Transient Luminous Event & Radio Emission Correlator"
- [27] V. Yukhimuk, R. Roussel-Dupre, E. Symbalysty, and Y. Taranenko, "Optical characteristics of Red Sprites produced by runaway air breakdown", *J. Geophys. Res.*, Vol. 103(D10), pp. 11473-11482, 1998
- [28] Bering, E. A., III, J. R. Benbrook, J. A. Garrett, A. M. Paredes, E. M. Wescott, D. R. Moudry, D. D. Sentman, H. C. Stenbaek-Nielsen, and W. A. Lyons, "The electrodynamics of sprites", *Geophys. Res. Lett.*, Vol .29 (5), pp. 1064, 2002
- [29] Bering E. A. III, J. R. Benbrook, L. Bhusal, J. A. Garrett, A. M. Paredes, E. M. Wescott, D. R. Moudry, D. D. Sentman, H. C. Stenbaek-Nielsen, and W. A. Lyons, "Observations of transient luminous events (TLEs) associated with negative cloud to ground (-CG) lightning strokes", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, 2004
- [30] Armstrong, R. A., J. A. Shorter, M. J. Taylor, D. M. Suszcynsky, W. A. Lyons, and L. S. Jeong, "Photometric measurements in the SPRITES '95 & '96 campaigns of nitrogen second positive (399.8 nm) and first negative (47.8 nm) emission", *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, Vol. 60, pp. 787-799, 1998
- [31] Treumann R. A., Klos Z., Parrot M., "Physics of Electric Discharges in Atmospheric Gases: An Informal Introduction", *Space Sci. Rev.* 2008