



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Μετρήσεις συμπεριφοράς και φωτεινής απόδοσης διόδου (LED) σε  
υπερ-υψηλά ρεύματα πολύ στενών παλμών (nanosec)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΛΓΑ Κ. ΓΕΙΤΟΝΑ

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Μετρήσεις συμπεριφοράς και φωτεινής απόδοσης διόδου (LED) σε  
υπερ-υψηλά ρεύματα πολύ στενών παλμών (nanosec)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΛΓΑ Κ. ΓΕΙΤΟΝΑ

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....  
Κ. Πολιτόπουλος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ι.Ξανθάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ε. Αλεξανδράτου  
Ε.Δ.Ι.Π. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016

.....  
Όλγα Κ. Γείτονα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Όλγα Κ. Γείτονα, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. 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 το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς και της φωτεινής απόδοσης μιας διόδου εκπομπής φωτός (LED) , υψηλής ισχύος , η οποία τροφοδοτείται από πολύ στενούς παλμούς - της τάξης των nanosecond - υπέρ-υψηλών τιμών ρεύματος . Η μελέτη αυτή έχει να κάνει με τη δυνατότητα αξιοποίησης των διόδων εκπομπής φωτός στην ανίχνευση και τη 3D απεικόνιση (έκταση, βάθος, σχήμα κτλ) βιολογικών ιστών , ή , και περιοχών ενδιαφέροντος, με έγχυση ιχνηθετών σε αυτούς και μέσω της μελέτης της χρονικής μεταβολής της απόκρισης της φθορίζουσας αυτής ουσίας μέσα στο σκεδάζον υλικό-ιστό. Η πιο συνηθισμένη παράμετρος που προσδιορίζεται είναι της έντασης του φθορισμού. Μέσω της έντασης μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση του ιχνηθέτη, άρα και του υλικού-ιστού που μελετάται. Η εξάρτηση, όμως, αυτή είναι μη γραμμική και η επίλυσή της πολύ σύνθετη. Έχουμε εξασθένηση της έντασης της ακτινοβολίας λόγω σκεδάσεων, αλλά και απορρόφηση του φθορισμού από τον ιστό και ιδιαίτερα για ιχνηθέτες που βρίσκονται βαθιά μέσα στον ιστό, όπου η σκέδαση και η απορρόφηση είναι πιο έντονες. Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος της προσπάθειας δημιουργίας ενός νέου συστήματος μελέτης της χρονικής μεταβολής του φαινομένου του φθορισμού.

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε ένα τέτοιου είδους φαινόμενο απαιτείται η χρήση μιας πηγής διέγερσης του ιχνηθέτη, κατάλληλου για κάθε διαφορετική περίπτωση. Η πηγή διέγερσης στη δική μας περίπτωση θεωρείται μια δίοδος εκπομπής φωτός (LED) ισχύος 1W η οποία δέχεται παλμική τροφοδότηση, οδηγούμενη από κύκλωμα. Προκειμένου να βγάλουμε συμπεράσματα για το αν η δίοδος μπορεί να εξυπηρετήσει μια τέτοια διαδικασία , είναι αναγκαίο να εξετάσουμε τα όρια αντοχής αυτής συναρτήσεως των παραμέτρων του κυκλώματος καθώς και των στοιχείων της διάταξης. Έτσι η φωτεινή δέσμη του LED διέρχεται από φράγμα περίθλασης και στη συνέχεια ένας φωτοπολλαπλασιαστής μας δίνει το σήμα εξόδου που μας ενδιαφέρει στον παλμογράφο. Τέλος , βγάζουμε συμπεράσματα όσον αφορά τη συμπεριφορά του LED όπως αυτή μεταφράζεται βάσει παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων για την παραπέρα αξιοποίηση του για το σκοπό που προηγουμένως αναφέρθηκε

**Λέξεις κλειδιά:** δίοδος εκπομπής φωτός, φθορισμός, ιχνηθέτης, κύκλωμα, τρανζίστορ ισχύος, φωτοπολλαπλασιαστής, φράγμα περίθλασης.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to investigate the behaviour and the luminous efficiency of high-power light-emitting diodes (LEDs) when injected with high power ultra-short pulse current. Pulses used in this study were ns-duration pulses.

This study is related with the possible use of light-emitting diodes in tracking and 3D visualisation of specific biological tissues. Tagging of biological tissues occurs when a fluorophore is applied on the tissue and the results are based on the tracking of the time-resolved fluorescence of the fluorophore within the sample. The most common parameter measured in these cases is the fluorescence intensity. Since the fluorescence intensity is quantitatively dependent on the absorbance of the fluorophore, its monitoring can be used to monitor the absorbed fluorophore concentration and through this the concentration of biological tissue. However, the nonlinearity of the dependence of the fluorescence intensity on fluorophore concentration is a significant obstacle in the use of the method. Fluorescence intensity attenuation can occur due to multiple scattering or fluorescent photon absorption within the tissue. These effects are enhanced in cases of fluorophore targeting deep tissue.

This study is a part of the development of a novel system of time-resolved fluorescence tracking. In order to achieve our aim, an appropriate excitation source for the fluorophore was needed. In our case, as an excitation source we used a power LED (1W) injected with a voltage pulse controlled by a circuit .

Before drawing conclusions about the efficiency of the choice of a LED as an excitation source, we will need to consider its limits as a function of the other elements of the circuit and the overall setup. Therefore, the emitted light from the LED is going through a diffraction grating followed by a photomultiplier. The output signal of the photomultiplier is then exported in an oscillograph. Finally based on the outcome of our experiments, we have enough evidence regarding the behaviour of the LED that can be used for further improvements on the basis described above.

**Key words:** light-emitting diodes, led, fluorescence, fluorophore, circuit, tracing, photomultiplier, diffraction grating.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέπων Επίκουρο Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Πολιτόπουλο για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια και διαδικασία εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, όπως επίσης και για το κλίμα μέσα στο οποίο δουλέψαμε. Επιπλέον , ευχαριστώ το φίλο και υποψήφιο διδάκτορα Τάσο Γεωργακόπουλο για την καθοριστική συμβολή του και την ανεκτίμητη βοήθειά του. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Στρατή Γεωργίου για τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους φίλους, τους νυν και τους μελλοντικούς συναδέλφους, που βοήθησαν με διαφορετικό τρόπο ο καθένας ώστε να καταφέρω να φτάσω εδώ.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου , Κώστα και Λαμπρινή, στον αδερφό μου , Βαγγέλη, και στο Δημήτρη για την υπομονή, την κατανόηση, τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια και πάνω από όλα για την αγάπη τους.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.Οπτικές ιδιότητες ιστού.....	12
Κεφάλαιο 2.Συστήματα και τεχνικές απεικόνισης.....	17
2.1 Άμεση Μοριακή Απεικόνιση Φθορισμού.....	17
2.2 Τεχνικές στο Πεδίο του Χρόνου.....	18
Κεφάλαιο 3.Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED).....	19
3.1Αρχές των LED.....	19
3.1.1 LED ετεροεπαφής υψηλής εντάσεως.....	23
Κεφάλαιο 4. Μονοχρωμάτορας.....	25
Κεφάλαιο 5.Ο φωτοπολλαπλασιαστής.....	27
5.1 Η φωτοκάθοδος.....	28
5.1.1 Η ενεργός επιφάνεια της φωτοκαθόδου.....	28
5.1.2. Το υλικό του παραθύρου.....	28
5.1.3 Είδη και φωτοευαισθησία φωτοκαθόδων.....	29
5.2.Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων.....	31
5.2.1 Ο διαιρέτης τάσης.....	31
5.2.2 Η περιοχή εισόδου του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων.....	33
5.2.3.Οι επιφάνειες των δυνόδων του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων.....	33
5.2.4.Ενίσχυση του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων.....	34
5.2.5. Το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοπολλαπλασιαστή.....	35
5.3 Παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή.....	37
5.3.1 Μέγιστη υψηλή τάση και ευαισθησία.....	37
5.3.2 Χρονική απόκριση.....	37
5.3.3 Γραμμικότητα και μέγιστο ρεύμα.....	39
5.4 Θόρυβος, Ρεύμα Σκότους και Παλμοί Σκότους.....	39
5.4.1 Θόρυβος.....	40
Κεφάλαιο 6. Πειραματική διαδικασία.....	43
Κεφάλαιο 7.Συμπεράσματα.....	63
Κεφάλαιο 8.Περαιτέρω μελέτη-έρευνα.....	63
Βιβλιογραφία.....	65







## Κεφάλαιο 1.Οπτικές ιδιότητες ιστού

Ο ιστός θεωρείται ως ένα τυχαίο, μη διαυγές μέσο, με διακυμάνσεις στις οπτικές του ιδιότητες αρκετά μικρές ούτως ώστε να παρεμποδιστεί η τοπική απορρόφηση. Με άλλα λόγια, ο ιστός θεωρείται ότι εμφανίζει ογκομετρικές ιδιότητες σκέδασης και απορρόφησης, παρά ότι αποτελείται από διακριτά κέντρα σκέδασης και απορρόφησης, κατανομημένα σε ένα μη σκεδαστικό και μη απορροφητικό μέσο. Παρόλο που τόσο η σκέδαση, όσο και η απορρόφηση, είναι εξαιρετικά σημαντικές παράμετροι για την περιγραφή των οπτικών ιδιοτήτων ενός ιστού, ως κυρίαρχος μηχανισμός λαμβάνεται η σκέδαση. Ακόμη και για λεπτά, με πάχος κάτω από ένα χιλιοστό, τμήματα ιστού, τα εγχυόμενα φωτόνια είναι πολύ πιθανό να υποστούν σκέδαση αρκετές φορές, μέχρι να φτάσουν στο σύνορο του ιστού.

Ως αποτέλεσμα, για παράδειγμα, μία συνεχόμενη σύμφωνη δέσμη laser εισόδου θα γίνει αποτελεσματικά μη συνεχόμενη και ισότροπη διανύοντας μερικά μόνο χιλιοστά, μέσα στον ιστό. Η επικράτηση της σκέδασης έναντι της απορρόφησης γίνεται ακόμη πιο ισχυρή στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που συνδέεται με την λειτουργικότητα των συστημάτων της **Μοριακής Απεικόνισης Φθορισμού (FMI)**. Ο λόγος είναι ότι σε αυτά τα μήκη κύματος ο συντελεστής σκέδασης λαμβάνει έως και 1000 φορές μεγαλύτερη τιμή από τον συντελεστή απορρόφησης.

Η απορρόφηση οφείλεται, κυρίως, στη μερική μετατροπή της ενέργειας του φωτός σε θερμική κίνηση ή σε συγκεκριμένες δονήσεις των μορίων του μέσου απορρόφησης κι εξαρτάται από την ηλεκτρονική σύσταση των ατόμων και των μορίων, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, το πάχος του επιπέδου απορρόφησης και από διάφορες εσωτερικές παραμέτρους (συγκέντρωση, θερμοκρασία). Στους βιολογικούς ιστούς, η απορρόφηση συμβαίνει κυρίως λόγω της παρουσίας των μορίων νερού ή διαφόρων μακρομορίων, όπως είναι οι πρωτεΐνες και το DNA.

Σε εφαρμογές βιοϊατρικής οπτικής, ο συντελεστής απορρόφησης των φωτονίων, αποτελεί σημαντική ιδιότητα των ιστών, για δύο κυρίως λόγους: Ο πρώτος εξ αυτών συνίσταται στο γεγονός ότι μέσω της απορρόφησης ένα laser, ή κάποια άλλη πηγή φωτός, για παράδειγμα μια δίοδος εκπομπής φωτός, δύναται να προκαλέσει μία δυναμική θεραπευτική (ή καταστροφική) επίδραση σε κάποιον ιστό. Χωρίς την απορρόφηση δεν υφίσταται μεταφορά ενέργειας στον ιστό κι έτσι μένει ανεπηρέαστος από το φως. Από την άλλη, η **απορρόφηση του φωτός** αξιοποιείται και διαγνωστικά, όπως για παράδειγμα στη **φασματοσκοπία των ιστών**. Επίσης, με την απορρόφηση παρέχεται πληροφορία για τη χημική σύσταση ενός ιστού και λειτουργεί ως μηχανισμός οπτικής αντίθεσης, κατά τη διαδικασία απεικονιστικών μεθόδων, όπως είναι η Οπτική Απεικόνιση Διάχυσης. Επιπλέον, στο φαινόμενο της απορρόφησης οφείλεται και η εκπομπή του φθορισμού που αποτελεί το μετρούμενο

μέγεθος κατά την FMI .

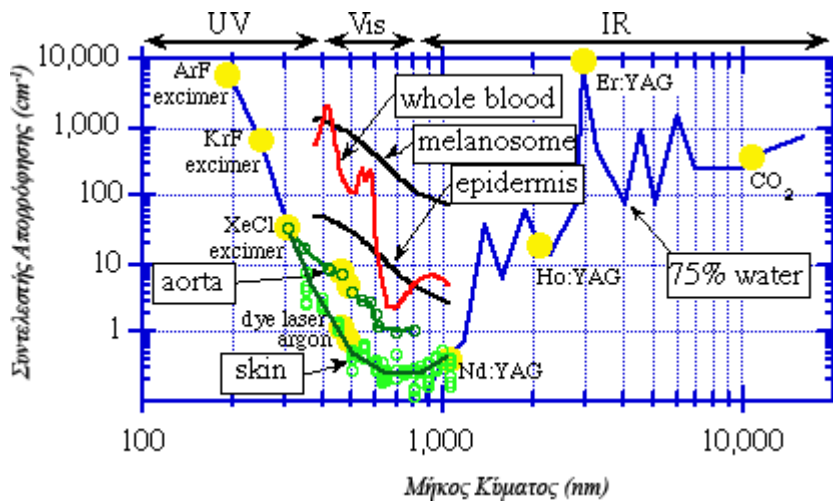
Για την επιλογή της περιοχής όπου η απορρόφηση υπερτερεί έναντι της σκέδασης εφαρμόζεται το κριτήριο  $\mu_a > 10 \cdot \mu_s \cdot (1-g)$ . Η συνθήκη αυτή ισχύει για μήκη κύματος  $\lambda < 250\text{nm}$  και  $\lambda > 2000\text{nm}$ , όπου το φαινόμενο της απορρόφησης κυριαρχεί.

Η απορρόφηση του φωτός στο υπεριώδες που οφείλεται στην παρουσία πρωτεϊνών και DNA , στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο καθορίζεται από τη συγκέντρωση χρωμοφόρων όπως η αιμοσφαιρίνη και η μελανίνη , ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος στο υπέρυθρο έντονη απορρόφηση παρουσιάζει το νερό.

Το μέγιστο απορρόφησης για τους αρωματικούς δακτυλίους των πρωτεϊνών εντοπίζεται στην περιοχή του υπεριώδους μεταξύ 260nm και 280nm. Η απορρόφηση της αιμοσφαιρίνης είναι ισχυρά εξαρτώμενη από το μήκος κύματος: αυξάνεται με έναν πολλαπλασιαστικό παράγοντα περίπου 5 από το ιώδες στο κίτρινο και ελαττώνεται κατά 10 και 100 φορές για μετάβαση από το κίτρινο στο κόκκινο ή στο εγγύς υπέρυθρο. Η απορρόφηση της μελανίνης παρουσιάζει μια συνεχή μείωση με το μήκος κύματος και ο συντελεστής ελαττώνεται περίπου κατά 5 φορές περίπου από το ιώδες προς το κοντινό υπέρυθρο. Στο νερό, η απορρόφηση αυξάνεται σημαντικά για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1.4μm.

Η σκέδαση κυριαρχεί της απορρόφησης στην περιοχή που δίνεται μέσω του κριτηρίου  $10 \cdot \mu_a < \mu_s \cdot (1-g)$  για μήκη κύματος στην περιοχή του ερυθρού και του κοντινού υπέρυθρου (600-1200nm). **Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται σαν οπτικό "παράθυρο", περιοχή εύκολης διέλευσης της οπτικής ακτινοβολίας.** Αυτό συμβαίνει γιατί στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει έντονη απορρόφηση από τα βιολογικά μόρια των ιστών. Η σκέδαση οφείλεται σε ασυνέχειες του δείκτη διάθλασης σε μικροσκοπικό επίπεδο, όπως η επιφάνεια των μεμβρανών των κυττάρων (λιπιδική ή υδρόφιλη) ή οι αλυσίδες του κολλαγόνου.

Για μήκη κύματος που δεν εμπίπτουν στις περιοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω τα φαινόμενα της απορρόφησης και της σκέδασης είναι συγκρίσιμα. Στο γράφημα της Εικ. 1.1 φαίνονται οι συντελεστές απορρόφησης του αίματος , του δέρματος, της επιδερμίδας, της μελανίνης και του νερού για διάφορα μήκη κύματος. Επίσης φαίνονται τα μήκη κύματος εκπομπής μερικών από τα πλέον χρησιμοποιούμενα laser.

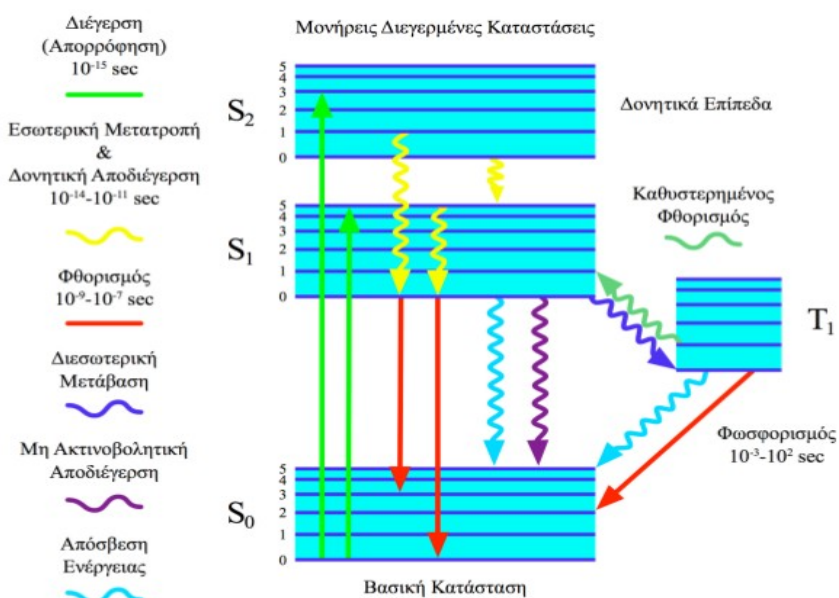


Εικ. 1.1 Ο συντελεστής απορρόφησης διαφόρων βιολογικών δειγμάτων συναρτήσει του μήκους κύματος και η εκπομπή μερικών από τα πλέον χρησιμοποιούμενα laser.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η σπουδαιότητα των οπτικών ιδιοτήτων των ιστών για την επιλογή των παραμέτρων της φωτεινής πηγής (LED, laser κτλ) που θα εξασφαλίσουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Για παράδειγμα αν για μια ιατρική πράξη χρειάζεται θέρμανση του ιστού πρέπει να γνωρίζουμε ποια μόρια του ιστού απορροφούν κυρίως και στη συνέχεια να επιλέξουμε το μήκος κύματος που απορροφάται καλύτερα από τα μόρια αυτά. Για την πειραματική μας διαδικασία επιλέξαμε το φράγμα περιθλασης να απορροφά και να αναλύει ακτινοβολία με μήκος κύματος 631nm (περιοχή ερυθρού).

Η εκπομπή φθορισμού αποτελεί άμεσο αποτέλεσμα της ιδιότητας της απορρόφησης ακτινοβολίας από ένα μέσο και συγκαταλέγεται στη γενικότερη κατηγορία της φωτοφωταύγειας. Γενικά, η εκπομπή φωτός από ένα σώμα, η οποία δεν οφείλεται στην υψηλή του θερμοκρασία, καλείται φωταύγεια. Καθώς κατά την εκπομπή της φωταύγειας χάνεται από το σύστημα ενέργεια, θα πρέπει να προηγηθεί της εκπομπής η απορρόφηση κάποιας μορφής ενέργειας. Το είδος της φωταύγειας καθορίζεται από την πηγή της ενέργειας που απορροφάται, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο την ηλεκτροφωταύγεια, την ραδιοφωταύγεια, την χημειοφωταύγεια και τη φωτοφωταύγεια. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα Jablonski (Εικ 1.2) την απορρόφηση ενός φωτονίου από κάποιο μόριο, ακολουθεί μετάβαση του μορίου στην πρώτη ή δεύτερη μονήρη διεγερμένη κατάσταση, ανάλογα με το αν το απορροφηθέν φωτόνιο ανήκε στην περιοχή της ορατής ή της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Η διαδικασία αυτή είναι πολύ εξειδικευμένη και ακτινοβολία συγκεκριμένης ενέργειας απορροφάται από συγκεκριμένες χημικές δομές. Κατά τη διάρκεια παραμονής του μορίου στη διεγερμένη κατάσταση, η πλεονάζουσα ενέργεια, σε σχέση με την ενέργεια του χαμηλότερου δονητικού επιπέδου της στάθμης, αποσβένεται μέσω δονήσεων. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή με την ονομασία εσωτερική μετατροπή ή δονητική αποδιέγερση και μέσω αυτής το μόριο επιστρέφει στο χαμηλότερο δονητικό ενεργειακό επίπεδο της πρώτης μονήρους διεγερμένης κατάστασης ( $S(1)=0$ ). Η ενέργεια που χάνεται μέσω της διαδικασίας αυτής μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία και απορροφάται από γειτονικά μη διεγερμένα μόρια. Από την κατάσταση αυτή, το μόριο μπορεί να επιστρέψει στην βασική του στάθμη, ή σε κάποιο δονητικό επίπεδο αυτής, ακολουθώντας διάφορους μηχανισμούς αποδιέγερσης.



Εικ. 1.2 Διάγραμμα Jablonski

Ένας τέτοιος μηχανισμός είναι και η εκπομπή φθορισμού. Το διεγερμένο μόριο που βρίσκεται στο χαμηλότερο δονητικό ενεργειακό επίπεδο της πρώτης μονήρους διεγερμένης κατάστασης μπορεί να μεταβεί σε ένα δονητικό επίπεδο της βασικής ( $S_1 \rightarrow S_0$ ), με εκπομπή ενός φωτονίου, ακτινοβολία η οποία ονομάζεται φθορισμός. Η ενέργεια του φωτονίου, και άρα το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, καθορίζεται από την ενεργειακή διαφορά μεταξύ της διεγερμένης και του δονητικού επιπέδου της βασικής ηλεκτρονιακής κατάστασης. Αυτός είναι και ο λόγος που ο εκπεμπόμενος φθορισμός δεν αποτελεί μονοχρωματική ακτινοβολία, αλλά εκτείνεται σε ένα εύρος μηκών κύματος. Επιπροσθέτως, λόγω της απώλειας ενέργειας που συμβαίνει κατά την εσωτερική μετατροπή, το μήκος κύματος είναι

μεγαλύτερο εκείνου της απορρόφησης, αφού και η ενέργειά του είναι μικρότερη. Η μετατόπιση αυτή του μήκους κύματος είναι γνωστή με την ονομασία μετατόπιση Stokes.

Τα περισσότερα χρωμοφόρα μπορούν να επαναλάβουν αυτόν τον κύκλο διέγερσης κι εκπομπής αρκετές εκατοντάδες, έως και χιλιάδες, φορές πριν να συμβεί το φαινόμενο της φωτοκαταστροφής. Στην περίπτωση των ιστών, η υπεριώδης ακτινοβολία επάγει φθορισμό σε μήκη κύματος που ανήκουν στην μπλε-πράσινη περιοχή του φάσματος. Αυτός ο φθορισμός γενικότερα καλείται αυτοφθορισμός και υπεύθυνα για την εκπομπή του είναι τα ενδογενή χρωμοφόρα των ιστών. Πολλά από αυτά τα χρωμοφόρα έχουν μελετηθεί εκτενώς, εφαρμόζοντας διάφορες φασματοσκοπικές τεχνικές, όπως επίσης και τεχνικές μικροσκοπίας φθορισμού.

Ωστόσο οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε διαλύματα που περιέχουν αρωματικά μόρια που αποτελούν ενδογενή χρωμοφόρα των ιστών. Η *in vivo* μελέτη τους παραμένει ακόμη και σήμερα εξαιρετικά απαιτητική για μία σειρά από αιτίες. Καταρχήν, η εκπομπή φθορισμού από αυτές τις δομές επηρεάζεται σημαντικά από το σύνθετο μικρο-περιβάλλον τους και γι' αυτό συνήθως καταγράφεται ως ένα μη δομημένο φάσμα. Επιπροσθέτως, το φάσμα αυτό επηρεάζεται άμεσα και από τις οπτικές ιδιότητες των βιοδομών που είτε εκπέμπουν τον φθορισμό αυτό είτε περιβάλλουν τα χρωμοφόρα που τον εκπέμπουν. Για παράδειγμα, η αιμοσφαιρίνη, εμφανίζοντας ισχυρή απορρόφηση στην περιοχή του υπεριώδους και του ορατού, απορροφά μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας διέγερσης προκαλώντας σημαντική μείωση του εκπεμπόμενου φθορισμού. Όμως, εκτός από την ακτινοβολία διέγερσης, η αιμοσφαιρίνη απορροφά και την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, προκαλώντας αλλοίωση το καταγραφόμενου σήματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ψευδή απεικόνιση της βιοδιασποράς των χρωμοφόρων του ιστού, αφού το φάσμα θα εμφανίζει κορυφές και κοιλάδες που δεν οφείλονται στον φθορισμό, αλλά στην ισχυρή απορρόφησή της. Για τους παραπάνω λόγους, η FMI έχει συνδεθεί με την επαγωγή φθορισμού σε εξωγενή χρωμοφόρα και όχι με σήματα αυτοφθορισμού και μάλιστα σε μήκη κύματος που ανήκουν στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου.

Το μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον που έχει κερδίσει τα τελευταία χρόνια η FMI οφείλεται έμμεσα στη συνδυασμένη ανάπτυξη της τεχνολογίας των **ιχνηθετών** και των συστημάτων απεικόνισης η οποία παρατηρείται έντονα τα τελευταία χρόνια. Οι ιχνηθέτες είναι ουσίες που έχουν την ιδιότητα να φθορίζουν, να δίνουν δηλαδή-μετά από την ακτινοβόληση τους μέσω μιας φωτεινής πηγής-μια ανιχνεύσιμη φωτεινή αντίθεση.

## Κεφάλαιο 2.Συστήματα και τεχνικές απεικόνισης

### 2.1 Άμεση Μοριακή Απεικόνιση Φθορισμού

Όπως συμβαίνει και σε άλλα μοριακά απεικονιστικά συστήματα, η FMI προϋποθέτει την εφαρμογή τεχνολογιών σήμανσης, δηλαδή μεθόδων που προσδιορίζουν τις υπό μελέτη μοριακές λειτουργίες in vivo και ποσοτικοποιούν την παρουσία τους μέσω του φθορισμού. Οι δύο σημαντικότερες στρατηγικές στην ανάπτυξη και τη χρήση αυτών των ουσιών διακρίνονται στις **άμεσες** (οι οποίες συνδέονται με την παρούσα εργασία) και τις έμμεσες.

Η **άμεση FMI** σχετίζεται με την εφαρμογή μίας τεχνικά κατασκευασμένης φωτοευαίσθητης ουσίας, η οποία στοχοποιεί μία συγκεκριμένη κατευθυντήρια ομάδα όπως είναι για παράδειγμα ένας υποδοχέας ή κάποιο ένζυμο. Οι ιχνηθέτες φθορισμού για την άμεση απεικόνιση κατηγοριοποιούνται ως ενεργοί και ενεργοποιούμενοι.

Οι ενεργοί ιχνηθέτες είναι βασικά φθορίζουσες χρωστικές οι οποίες συνδέονται σε ένα βιοσυγγενή συνδέτη που παρουσιάζει επιλεκτικότητα προς κάποιο βιολογικό στόχο. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας ιχνηθετών είναι ότι επάγουν φθορισμό ακόμη και αν δεν έχουν επικολληθεί στο στόχο τους, γεγονός που οδηγεί στην ύπαρξη έντονου σήματος φθορισμού προερχόμενου από την περιοχή του υποβάθρου, κατά τη λήψη των εικόνων. Κάτι τέτοιο μπορεί να περιοριστεί με την πάροδο του χρόνου, αφού οι μη συνδεδεμένοι, με κάποιον στόχο, ιχνηθέτες αποβάλλονται από το κυκλοφορικό. Από την άλλη, οι ενεργοποιούμενοι ιχνηθέτες φθορισμού είναι μόρια τα οποία φέρουν χρωμοφόρα φθορισμού σε κατάσταση εκτόνωσης. Τα χρωμοφόρα αυτά συνήθως τοποθετούνται σε μικρές αποστάσεις το ένα από το άλλο ούτως ώστε να αυτο-αποσβένουν το φθορισμό, ή τοποθετούνται δίπλα σε κάποιο στοιχείο απόσβεσης χρησιμοποιώντας ειδικές ενζυμικές αλληλουχίες πεπτιδίων. Αυτές οι αλληλουχίες δύνανται να διασπαστούν υπό την παρουσία ενζύμων, απελευθερώνοντας τις χρωστικές. Οι χρωστικές μπορούν τότε να επάγουν φθορισμό με την προϋπόθεση κατάλληλης ακτινοβολίας διέγερσης.

Η πιο κοινή τακτική για την καταγραφή σημάτων φθορισμού, ο οποίος προέρχεται από περιοχές που βρίσκονται βαθύτερα από μερικές εκατοντάδες μικρά, από την επιφάνεια των ιστών σχετίζεται με την ακτινοβόληση του ιστού με κάποιο επίπεδο κύμα και την συλλογή των εκπεμπόμενων κυμάτων φθορισμού. Αυτή η μεθοδολογία είναι γενικά γνωστή ως επίπεδη απεικόνιση και μπορεί να εφαρμοστεί υπό τη μορφή απεικόνισης **επι-φωτισμού** ή απεικόνισης **δια-φωτισμού** .



Στη μη επεμβατική ανίχνευση σημάτων φθορισμού από την επιφάνεια (απεικόνιση επι-φωτισμού), αλλά και από εσωτερικές περιοχές των ιστών, η διεγείρουσα ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του ιστού και ο εκπεμπόμενος φθορισμός συλλέγεται από την ίδια πλευρά του ιστού.

Κατά την απεικόνιση δια-φωτισμού, η ακτινοβολία “διαπερνά” τον ιστό, δηλαδή η πηγή διέγερσης και ο ανιχνευτής τοποθετούνται σε αντιδιαμετρικές επιφάνειες του ιστού, και καταγράφονται η σχετική εξασθένηση της ακτινοβολίας ή ο εκπεμπόμενος φθορισμός.

## 2.2 Τεχνικές στο Πεδίο του Χρόνου

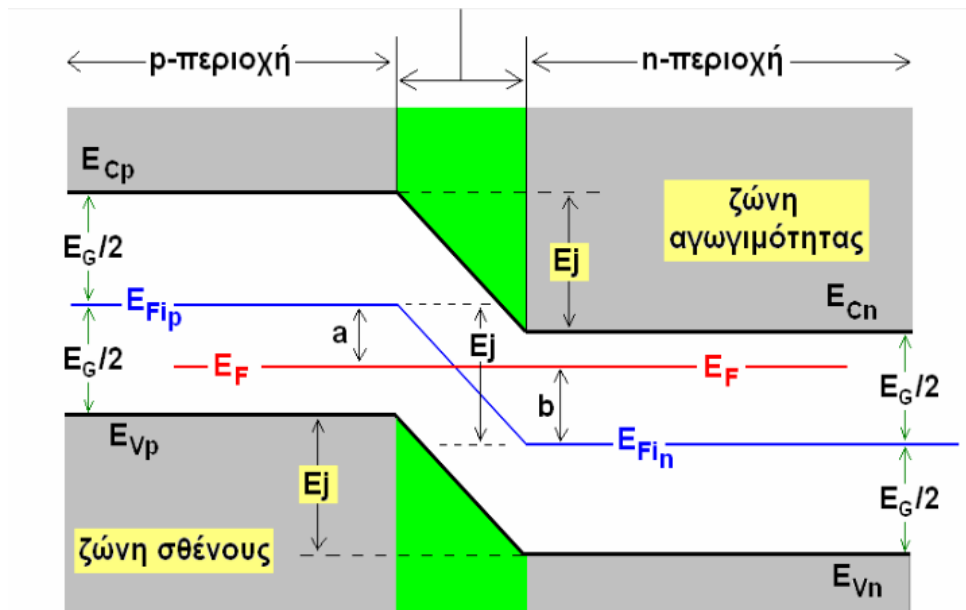
Οι τεχνικές ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται σήμερα στην FMI μπορούν να διακριθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες, στις τεχνικές συνεχούς κύματος, στις τεχνικές οι οποίες λειτουργούν στο πεδίο των συχνοτήτων και σε εκείνες που λειτουργούν στο **πεδίο του χρόνου** .

Κατά την εφαρμογή των τεχνικών που λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου, παλμική ακτινοβολία εξαιρετικά μικρής διάρκειας, προσπίπτει στον ιστό και η χρονική κατανομή των διερχόμενων φωτονίων καταγράφεται, με ανάλυση της τάξεως των nanosecond. Αυτή η χρονική κατανομή είναι γνωστή ως χρονική σημειακή συνάρτηση διασποράς (temporal point spread function, TPSF). Στη δική μας περίπτωση το πλάτος του παλμού κυμαίνεται από 50ns έως 250ns.

## Κεφάλαιο 3. Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED)

### 3.1 Αρχές των LED

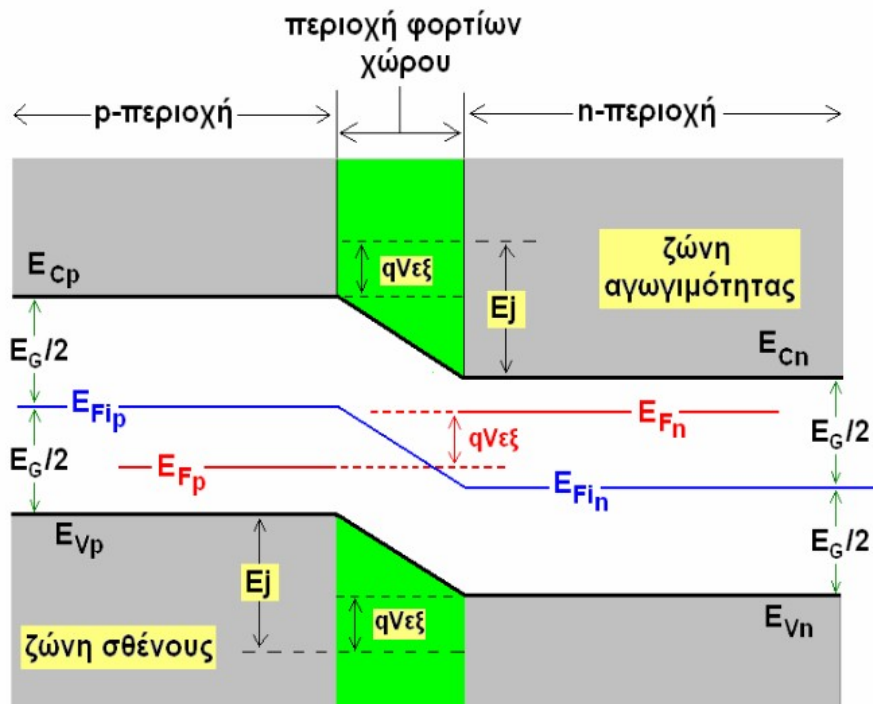
Μια δίοδος εκπομπής φωτός (light emitting diode, LED) είναι στην ουσία μια ένωση pn που έχει κατασκευαστεί από έναν ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού διακένου, όπως για παράδειγμα το GaAs, και στην οποία η επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών (ZHO) έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων. Η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων,  $h\nu$ , ισούται κατα προσέγγιση με το ενεργειακό διάκενο  $E_g$ . Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών μιας μη πολωμένης ένωσης pn+, στην οποία η n-περιοχή είναι πιο έντονα νοθευμένη από την p-περιοχή. Το επίπεδο Fermi,  $E_f$ , είναι ενιαίο σε ολόκληρη τη διάταξη. Το γεγονός αυτό είναι συνέπεια των συνθηκών ισορροπίας χωρίς εξωτερική πόλωση. Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κατά κύριο λόγο εντός της p-περιοχής. Για τη μετάβαση από την  $E_c$  της p-περιοχής στην  $E_c$  της n-περιοχής χρειάζεται να υπερπηδηθεί ένα φράγμα δυναμικής ενέργειας ίσο με  $E_j$  ( $=eV_0$ , όπου  $V_0$  το εσωτερικό δυναμικό). Το φράγμα δυναμικής ενέργειας  $E_j$  αποτρέπει τη διάχυση των ηλεκτρονίων από την n-περιοχή στην p-περιοχή.



Εικ.3.1 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών μη πολωμένης ένωσης pn.

Όταν εφαρμόσουμε μια ορθή πόλωση  $V_{εξ}$ , τότε το εσωτερικό δυναμικό  $V_0$ , μειώνεται και γίνεται  $V_0 - V_{εξ}$ , επιτρέποντας έτσι τη διάχυση των ηλεκτρονίων. Έτσι τα ηλεκτρόνια εγχέονται από τη n+-περιοχή στην p-περιοχή (Εικόνα 3.2). Ο συντελεστής που αντιστοιχεί στην έγχυση των οπών από την p-περιοχή στην n+-περιοχή είναι πολύ μικρότερος από το συντελεστή που αντιστοιχεί στην έγχυση των

ηλεκτρονίων από την n+-περιοχή στην p-περιοχή. Η επανασύνδεση των εγχεόμενων ηλεκτρονίων στην περιοχή απογύμνωσης και στο εσωτερικό του όγκου που εκτείνεται και στην p-περιοχή σε απόσταση ίση με το μήκος της διάχυσης  $L_e$ , οδηγεί στην εκπομπή φωτονίων. Το φαινόμενο της εκπομπής φωτός λόγω της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων-οπών, η οποία με τη σειρά της οφείλεται στην έγχυση φορέων μειονότητας ονομάζεται **ηλεκτροφωταύγεια έγχυσης**. Λόγω της στατιστικής φύσης της διαδικασίας της επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων με τις οπές, τα εκπεμπόμενα φωτόνια κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις. Το καθένα είναι το αποτέλεσμα μιας αυθόρμητης εκπομπής.



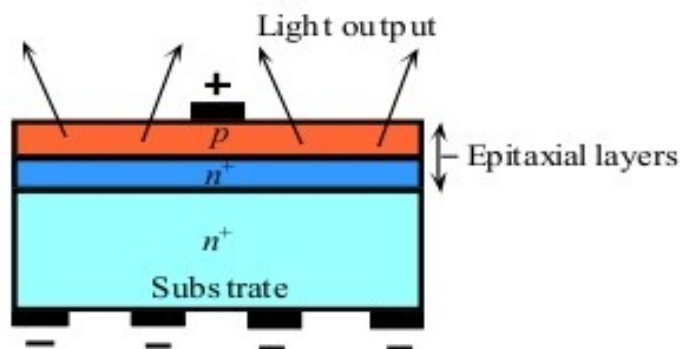
Εικ. 3.2 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ορθά πολωμένης ένωσης pn.

Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από τη διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγωγικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η p-περιοχή πρέπει να είναι επαρκώς ρηχή, ή διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διατάξεις ετεροδομών, σαν αυτές που θα αναφέρουμε στη συνέχεια.

Στην Εικόνα 3.3 απεικονίζεται μια πολύ απλή δομή ενός LED. Πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα (GaAs ή GaP) αναπτύσσεται ένα νοθευμένο ημιαγωγικό στρώμα. Η ανάπτυξη του στρώματος γίνεται επιταξιακά, δηλαδή κάθε νέο κρυσταλλικό επίπεδο αναπτύσσεται έτσι ώστε να ακολουθεί την κρυσταλλική δομή του κρυστάλλου του υποστρώματος. Το υπόστρωμα είναι απαραίτητα ένας αρκετά παχύς κρύσταλλος, ο οποίος λειτουργεί και ως μηχανικό υποστήριγμα της ένωσης

pn (δηλαδή των νοθευμένων στρωμάτων) , και μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου υλικό από το υλικό των στρωμάτων που προστίθενται στη συνέχεια.

Η ένωση pn+ δημιουργείται με την ανάπτυξη άλλου ενός επιταξιακού στρώματος, τύπου p αυτή τη φορά. Τα φωτόνια που εκπέμπονται προς τη n-περιοχή , είτε απορροφώνται, είτε ανακλώνται προς τη διεπιφάνεια του υποστρώματος, ανάλογα με το πάχος του υποστρώματος και την ακριβή δομή του LED. Αν το επιταξιακό στρώμα και ο κρύσταλλος του υποστρώματος έχουν διαφορετικές κρυσταλλικές πλεγματικές παραμέτρους, τότε ανάμεσα στις δύο κρυσταλλικές δομές θα υπάρχει μία πλεγματική ασυνέχεια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε παραμόρφωση του πλέγματος στο στρώμα του LED και επομένως δημιουργεί κρυσταλλικές ατέλειες. Η παρουσία κρυσταλλικών ατελειών ευνοεί την επανασύνδεση ZHO χωρίς την εκπομπή ακτινοβολίας. Με άλλα λόγια , οι ατέλειες λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης. Αυτές οι ατέλειες μειώνονται με το συνταίριασμα του επιταξιακού στρώματος του LED και του κρυστάλλου του υποστρώματος. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται το συνταίριασμα ανάμεσα στο επιταξιακό στρώμα και τον κρύσταλλο του υποστρώματος. Για παράδειγμα ένα από τα κράματα AlGaAs είναι ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, του οποίου το ενεργειακό διάκενο αντιστοιχεί σε εκπομπή στην ερυθρή περιοχή του φάσματος.



Εικ. 3.3 Δομή LED

Το υλικό αυτό μπορεί να αναπτυχθεί πάνω σε υποστρώματα GaAs επιτυγχάνοντας τέλειο συνταίριασμα των κρυσταλλικών τους δομών , δημιουργώντας έτσι διατάξεις LED υψηλών αποδόσεων.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά υλικά άμεσου ενεργειακού διακένου , τα οποία μπορούν εύκολα να νοθευτούν και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εμπορικών LED που εκπέμπουν ακτινοβολία στην ερυθρή και την υπέρυθη περιοχή μηκών κύματος του φάσματος. Μια σημαντική κατηγορία εμπορικών ημιαγωγίμων υλικών , που εκπέμπουν ακτινοβολία στην ορατή περιοχή , είναι τα

**τριαδικά κράματα III-V.** Τα υλικά αυτά προκύπτουν από την κραμάτωση του GaAs με το GaP , και συμβολίζονται με  $GaAs_{1-y}P_y$  . Στα μείγματα αυτά, τα άτομα του As και του P , που ανήκουν στην ομάδα V , κατανέμονται με τυχαίο τρόπο στις θέσεις που κανονικά , στο GaAs θα καταλαμβάνονταν από άτομα As . Όταν το  $y < 0.45$  , τότε το  $GaAs_{1-y}P_y$  είναι ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου και επομένως , η διαδικασία της επανασύνδεσης ZHO είναι άμεση. Ο ρυθμός της επανασύνδεσης είναι ευθέως ανάλογος του γινομένου των συγκεντρώσεων των ηλεκτρονίων και των οπών. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κυμαίνεται από 630 nm (κόκκινο) όταν  $y=0.45$  ( $GaAs_{0.55}P_{0.45}$ ) μέχρι 870 nm όταν  $y=0$  (GaAs).

Τα κράματα  $GaAs_{1-y}P_y$  ( στα οποία περιλαμβάνουμε και το GaP) με  $y > 0.45$  είναι ημιαγωγοί εμμέσου ενεργειακού διακένου. Η διαδικασία της επανασύνδεσης των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών λαμβάνει χώρα μέσω των κέντρων επανασύνδεσης και συνεπάγεται της δημιουργία πλεγματικών ταλαντώσεων μάλλον παρά την εκπομπή φωτονίων. Προσθέτοντας όμως **ισοηλεκτρονικές προσμίξεις** όπως άζωτο, στον ημιαγωγό κρύσταλλο, τότε ορισμένα από τα άτομα N παίρνουν τη θέση των ατόμων του P. Αφού το N και ο P έχουν το ίδιο σθένος , τα άτομα N που αντικαθιστούν τα άτομα P σχηματίζουν τον ίδιο αριθμό δεσμών και δε λειτουργούν ως δότες ή αποδέκτες. Οι ηλεκτρονικοί πυρήνες όμως του N και του P διαφέρουν. Ο θετικός πυρήνας του N είναι λιγότερο καλυμμένος από ηλεκτρόνια από ότι ο πυρήνας του P. Αυτό συνεπάγεται ότι ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας που βρίσκεται κοντά σε ένα άτομο N θα έλκεται και μπορεί να δεσμευτεί από αυτό.

Άρα, τα άτομα του N δημιουργούν κοντά στην άκρη της ζώνης αγωγιμότητας (ZA) εντοπισμένα ενεργειακά διάκενα που λειτουργούν ως παγίδες ηλεκτρονίων. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας δεσμεύεται στο ενεργειακό διάκενο , τότε μπορεί λόγω της δύναμης Coulomb , να έλξει στην περιοχή του μια οπή (της ζώνης σθένους). Είναι δυνατόν έτσι , να πραγματοποιηθεί άμεσα επανασύνδεση του ηλεκτρονίου με την οπή και να εκπεμφθεί ένα φωτόνιο. Η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου θα είναι λίγο μικρότερη από αυτή στην περίπτωση ημιαγωγού άμεσου ενεργειακού διακένου. Αφού η διαδικασία της επανασύνδεσης εξαρτάται από τη νόθευση N , δε θα είναι εξίσου αποτελεσματική με την άμεση επανασύνδεση. Επομένως η απόδοση των LED που έχουν κατασκευαστεί με ημιαγωγούς  $GaAs_{1-y}P_y$  εμμέσου ενεργειακού διακένου και οι οποίοι έχουν νοθευτεί με N , θα είναι μικρότερη από τα LED που έχουν κατασκευαστεί με ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου. Τα κράματα  $GaAs_{1-y}P_y$  με προσμίξεις αζώτου χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή οικονομικών πράσινων , κίτρινων και πορτοκαλί LED.

Η **εξωτερική απόδοση  $\eta_{\text{εξ}}$**  ενός LED είναι ένα μέτρο της απόδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε εξωτερικά φωτεινή ενέργεια. Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζεται η εσωτερική απόδοση της ακτινοβολούσας διαδικασίας επανασύνδεσης και η επακόλουθη απόδοση της εξόδου φωτονίων από τη διάταξη.

Η ηλεκτρική ενέργεια στην είσοδο ενός LED ισούται απλά με το γινόμενο του ρεύματος επί την τάση της διόδου ( $I \times V$ ). Αν η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από τη διάταξη είναι  $P_{out}$ , τότε

$$\eta_{εξ} = P_{εξ}(\text{οπτική}) / I \cdot V \quad (\times 100\%)$$

Στον Πίνακα 3 αναγράφονται ορισμένες ενδεικτικές τιμές για την εξωτερική απόδοση. Εν γένει, για τους ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού διακένου, η τιμή της απόδοσης είναι μικρότερη από 1%, ενώ για τους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου με την ορθή δομή διάταξης, η  $\eta_{εξ}$  μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.

Ημιαγωγός	Άμεσος ή έμμεσος	$\lambda$ (nm)	$\eta$ (εξωτερική) %	Σχόλια
GaAs	A	870-900	10	Υπέρυθρα LEDs
AlGaAs	A	640-870	5-20	Ερυθρά-Υπέρυθρα LEDs DH
InGaAsP	A	1000-1600	>10	LEDs στις επικοινωνίες
Κράματα InGaN	A	430-460	2	Μπλε LED
		500-530	3	Πράσινα LED
SiC	E	460-470	0.02	Μπλε LED(χαμηλή απόδοση)
InAlGaP	A	590-630	1-10	Κίτρινα, Πράσινα, Κόκκινα LEDs
GaAsP	A	630-870	<1	Ερυθρά-Υπέρυθρα LEDs
GaAsP	E	560-700	<1	Ερυθρά, Πορτοκαλί, Κίτρινα LEDs
GaP(Zn-O)	E	700	2-3	Ερυθρά LEDs
GaP(N)	E	565	<1	Πράσινα LEDs

Πίνακας 3

### 3.1.1 LED ετεροεπαφής υψηλής εντάσεως

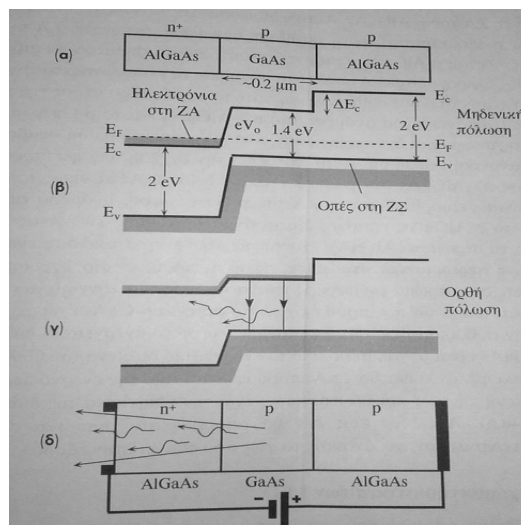
Μία ένωση pn ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με διαφορετική νόθευση, οι οποίοι όμως αποτελούνται από το ίδιο υλικό, έχουν δηλαδή το ίδιο ενεργειακό διάκενο  $E_g$ , ονομάζεται **ομοεπαφή**. Μια ένωση ανάμεσα σε δυο ημιαγωγούς με το ίδιο ενεργειακό διάκενο  $E_g$  ονομάζεται **ετεροεπαφή**. Μια ημιαγωγίμη μορφή διάταξης η οποία περιλαμβάνει ενώσεις ανάμεσα σε υλικά με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο ονομάζεται **διάταξη ετεροδομής**.

Οι διατάξεις LED που έχουν στόχο την αύξηση της έντασης του φωτός στην έξοδο κάνουν χρήση της **διπλής ετεροδομής**, η οποία αποτελείται από δύο ενώσεις ανάμεσα σε δύο διαφορετικά ημιαγωγίμα υλικά με διαφορετικά ενεργειακά διάκενα. Στην περίπτωση που φαίνεται στην Εικόνα 3.4, τα υλικά είναι το AlGaAs με  $E_g = 2 \text{ eV}$ , και το GaAs με  $E_g = 1.4 \text{ eV}$ . Η διπλή ετεροδομή της Εικόνας 3.4α περιλαμβάνει μια  $n^+p$  ετεροεπαφή ανάμεσα στο  $n^+$ -AlGaAs και το  $p$ -GaAs και μια ετεροεπαφή ανάμεσα στο  $p$ -GaAs και το  $p$ -AlGaAs. Συνήθως η περιοχή του  $p$ -

GaAs είναι ένα λεπτό στρώμα , κλάσμα του 1 μm και με ελαφρά νόθευση.

Στην εικόνα 3.4.β απεικονίζεται το απλουστευμένο διάγραμμα ενεργειακών ζωνών για ολόκληρη τη διάταξη απουσία εξωτερικής τάσης. Το επίπεδο Fermi ,  $E_f$  , είναι συνεχές σε ολόκληρη τη δομή. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας του  $n^+$ -AlGaAs συναντούν ένα φράγμα δυναμικής ενέργειας ,  $eV_0$  , και δε μπορούν να διαχυθούν προς το  $p$ -GaAs. Στην ένωση μεταξύ του  $p$ -GaAs και του  $p$ -AlGaAs πραγματοποιείται μια μεταβολή του ενεργειακού διακένου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη βηματική μεταβολή  $\Delta E_c$  , της  $E_c$  , ανάμεσα στις δύο ζώνες αγωγιμότητας . Αυτή η διαφορά λειτουργεί ως φράγμα δυναμικού η οποία αποτρέπει τη μετάβαση των ηλεκτρονίων απο τη μια ΖΑ στην άλλη.

Όταν εφαρμοστεί μια ορθή πόλωση , τότε το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης τάσης λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο  $n^+$ -AlGaAs και το  $p$ -GaAs μειώνοντας έτσι το φράγμα δυναμικής ενέργειας  $E_{V_0}$  , όπως συμβαίνει και στην κανονική ένωση pn. Αυτό επιτρέπει την έγχυση των ηλεκτρονίων της ΖΑ του  $n^+$ -AlGaAs στο  $p$ -GaAs (Εικόνα 3.4.γ). Αυτά όμως τα ηλεκτρόνια είναι περιορισμένα στη ΖΑ του  $p$ -GaAs αφού, ανάμεσα στο  $p$ -GaAs και στο  $p$ -AlGaAs, υπάρχει ένα φράγμα δυναμικής ενέργειας  $\Delta E_c$ . Επομένως τα στρώματα AlGaAs, έχοντας μεγάλο ενεργειακό διάκενο λειτουργούν ως **περιοριστικά στρώματα** αφού περιορίζουν την έγχυση των ηλεκτρονίων στο στρώμα  $p$ -GaAs. Η επανασύνδεση των εγχεόμενων ηλεκτρονίων και των οπών που προϋπήρχαν στο στρώμα  $p$ -GaAs έχει ως αποτέλεσμα την αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων. Αφού το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του  $p$ -AlGaAs είναι μεγαλύτερο απο το ενεργειακό διάκενο του GaAs , τα εκπεμπόμενα φωτόνια δε θα επαναπορροφώνται απο την ενεργό περιοχή μετά την εκπομπή τους και θα φτάνουν μέχρι την επιφάνεια της διάταξης (3.4.δ). Αφού το φως δε θα απορροφάται ούτε και στο  $p$ -AlGaAs, θα ανακλάται , αυξάνοντας το φως που φτάνει στην έξοδο.



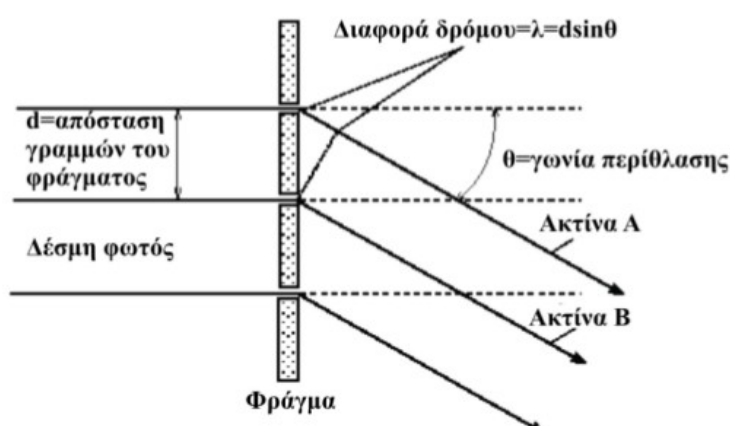
Εικ. 3.4

## Κεφάλαιο 4. Μονοχρωμάτορας

Ο μονοχρωμάτορας είναι μια συσκευή, που περιλαμβάνει ένα διαχωριστή μηκών κύματος σε αντίθεση με ένα φίλτρο, που αποκόπτει συγκεκριμένα μήκη. Στις πρώτες μέρες της φασματοσκοπίας ένα πρίσμα χρησιμοποιούνταν για να διαχωρίζει την ακτινοβολία. Σήμερα χρησιμοποιείται ένα φράγμα περίθλασης. Επιπλέον ένας μονοχρωμάτορας περιλαμβάνει σχισμές εισόδου και εξόδου και κατάλληλους καθρέπτες. Μία ποικιλία τύπων υπάρχουν συχνά για τους μονοχρωμάτορες σε μία διάταξη φθορισμού. Πρώτα θα αναφερθούμε όμως στο φράγμα περίθλασης.

Για την μελέτη των φασμάτων απορρόφησης και εκπομπής είναι απαραίτητη η ανάλυση τον φωτός σε μονοχρωματική ακτινοβολία. Αυτό επιτυγχάνεται στην περίπτωση μας μέσω ενός φράγματος περίθλασης. Το φράγμα περίθλασης είναι κομμάτι διαφανούς υλικού, το οποίο έχει χαραχθεί από έναν μεγάλο αριθμό ισοδιάστατων παράλληλων γραμμών. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών ονομάζεται σταθερά τον φράγματος,  $G$ .

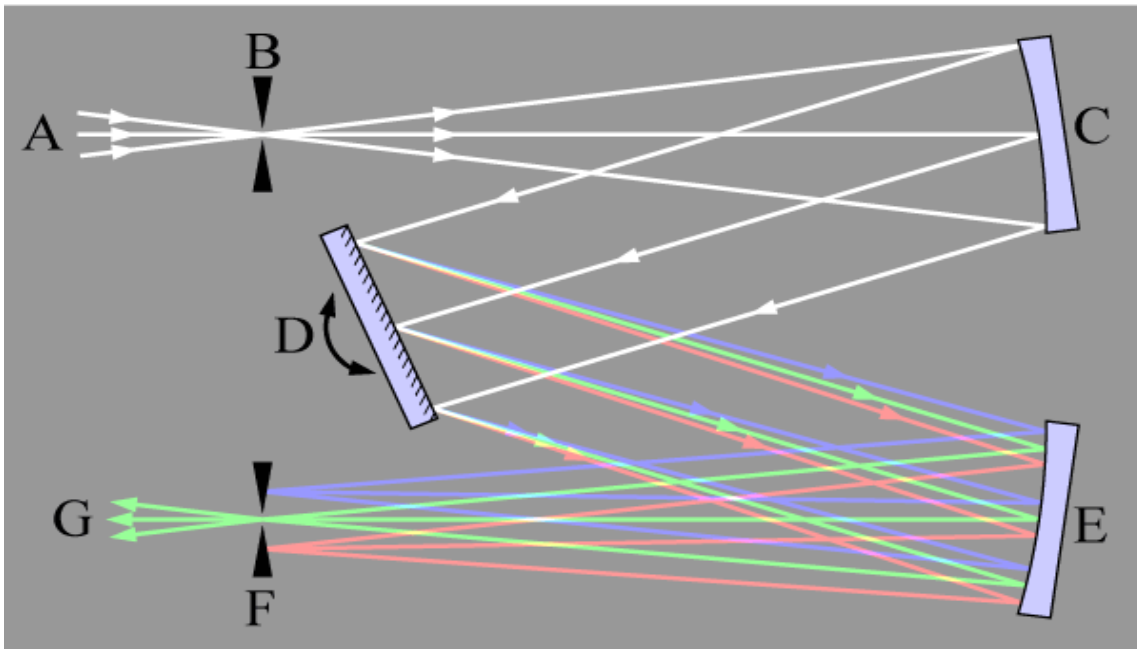
Το φως που χτυπά το φράγμα περιθλάται από τις παράλληλες γραμμές. Οι περιθλώμενες ακτίνες είναι σε φάση εάν οι ακτίνες έχουν διαφορά οπτικού δρόμου ( $G\sin\theta$  ή στο όπως συμβολίζεται στο Σχ.4.1,  $d\sin\theta$ ) ίσο με ακέραιο αριθμό μηκών κύματος τον φωτός.



Σχ.4.1 Πορεία ακτίνων σε περίθλαση πρώτης τάξης από φράγμα.



Η διάταξη του μονοχρωμάτορα φαίνεται στο Σχ. 4.2. Η δέσμη φωτός αφού εισέλθει στην σχισμή εισόδου (B) οδηγείται με κάτοπτρο (C) στο φράγμα περίθλασης (D). Εκεί με βάση τα παραπάνω ανάλογα με το μήκος κύματος, κάθε συνιστώσα του εισερχόμενου φωτός αποκτά διαφορετική καθυστέρηση. Έπειτα οι ακτίνες οδηγούνται με δεύτερο κάτοπτρο (E) στην σχισμή εξόδου (F). Λόγω της σχετικής καθυστέρησης των ακτίνων σε διαφορετικό σημείο θα συμβάλλουν τα διάφορα μήκη κύματος. Τελικά στην σχισμή εξόδου θα έχουμε μια μονοχρωματική ακτίνα. Περιστρέφοντας το φράγμα περίθλασης, τα σημεία όπου συμβάλλουν τα διάφορα μήκη κύματος μετατοπίζονται ανάλογα με την γωνία περιστροφής κι έτσι στην σχισμή εξόδου εξέρχεται ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος.



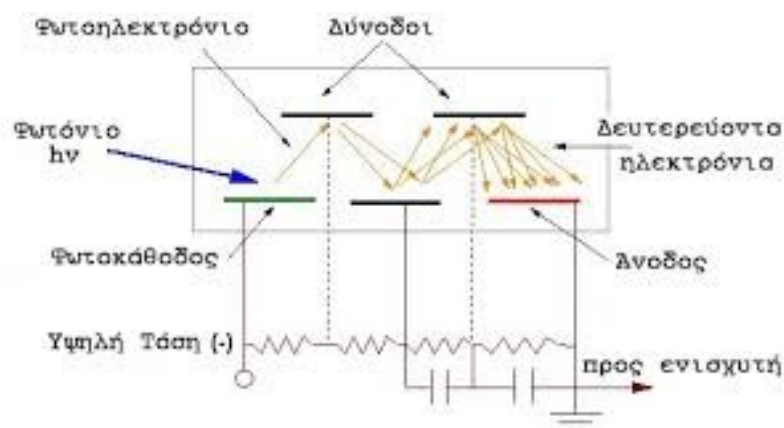
Σχ.4.2 Διάταξη μονοχρωμάτορα (D:φράγμα περίθλασης, C,E:καθρέφτες)

Ο κλάδος της φυσικής που μελετά τα φάσματα απορρόφησης/εκπομπής σωμάτων ονομάζεται οπτική φασματοσκοπία. Η οπτική φασματοσκοπία στηρίζεται στην χρήση οργάνων που ονομάζονται φασματοσκόπια, με τα οποία επιτυγχάνεται ο φασματικός διαχωρισμός και προσδιορισμός γραμμών (γραμμικό φάσμα) ή ταινιών (συνεχές φάσμα) απορρόφησης/εκπομπής σωμάτων. Η οπτική φασματοσκοπία επικεντρώνεται κυρίως στην απεικόνιση και ανάλυση φασμάτων στην ορατή περιοχή του φάσματος (από όπου προέρχεται και ο χαρακτηρισμός «οπτική») ωστόσο χρησιμοποιείται πολλές φορές και με ποιο ευρεία έννοια για να χαρακτηρίσει φασματοσκοπικές μετρήσεις στο υπεριώδες και το υπέρυθρο.

## Κεφάλαιο 5.Ο φωτοπολλαπλασιαστής

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένα όργανο με εξαιρετική ευαισθησία στην ανίχνευση και μέτρηση του φωτός. Ο φωτοπολλαπλασιαστής (για συντομία αναφέρεται και ως PM) παρέχει στην έξοδό του ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος σε αυτό φωτός. Τα κύρια πλεονεκτήματα του φωτοπολλαπλασιαστή ως προς τα άλλα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης φωτός είναι η ικανότητά του να ανιχνεύει, καλύπτοντας μεγάλες επιφάνειες, πολύ χαμηλές εντάσεις φωτός, που φθάνουν μέχρι και την ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων, και να ενισχύει σημαντικά το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει, με εξαιρετική ταχύτητα. Είναι επίσης σχετικά μικρός σε μέγεθος, αρκετά ανθεκτικός κάτω από αντίξοες συνθήκες λειτουργίας, και εύκολα ελεγχόμενος ως ηλεκτρονική διάταξη.

Για όλους αυτούς τους λόγους χρησιμοποιείται ευρύτατα στη σύγχρονη πειραματική Φυσική. είναι ένας γυάλινος σωλήνας, μέσα στον οποίο υπάρχει υψηλό κενό. Το φως προς μέτρηση προσπίπτει συνήθως στη μία από τις επίπεδες επιφάνειες του σωλήνα, και το ηλεκτρικό σήμα εξέρχεται μέσω ενός ηλεκτροδίου στο άλλο άκρο. Στο ίδιο αυτό άκρο υπάρχουν και τα ηλεκτρόδια τροφοδοσίας του οργάνου με τις απαιτούμενες για τη λειτουργία του ηλεκτρικές τάσεις. Το φως προσπίπτει πάνω σε ένα λεπτό υμένιο φωτοευαίσθητου υλικού, την φωτοκάθοδο, από την οποία, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, εκδιώκει ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά στη συνέχεια εστιάζονται και επιταχύνονται προς μια μεταλλική επιφάνεια η οποία βρίσκεται σε θετικό δυναμικό ως προς την φωτοκάθοδο. Η επιφάνεια αυτή, η πρώτη δύνοδος είναι επιστρωμένη με υλικό



5. Διάταξη φωτοπολλαπλασιαστή

χαμηλού έργου εξαγωγής, ώστε, για κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο, να αποβάλλονται από αυτήν περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια. Επιτυγχάνεται έτσι

ένας πολλαπλασιασμός του αριθμού των ηλεκτρονίων. Αυτά τα δευτερογενή ηλεκτρόνια επιταχύνονται και πάλι από ηλεκτρικό πεδίο προς τη δεύτερη δύνοδο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές (ο συνήθης αριθμός δυνόδων είναι 9 έως 13), ώστε ο τελικός αριθμός των ηλεκτρονίων που προκύπτουν να είναι μεγάλος και το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή εύκολα μετρήσιμο. Ο λόγος του αριθμού των δευτερογενών προς τον αριθμό των πρωτογενών ηλεκτρονίων σε κάθε δύνοδο εξαρτάται, εκτός από τις ιδιότητες της επιφάνειας, και από την ενέργεια των πρωτογενών ηλεκτρονίων, η οποία καθορίζεται από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο διαδοχικές δυνόδους. Με τη χρήση αρκετά υψηλής τάσης η οποία κατανέμεται μεταξύ των δυνόδων, επιτυγχάνεται ένα σημαντικό δυναμικό εύρος στην ενίσχυση του ηλεκτρικού σήματος από τον φωτο- πολλαπλασιαστή.

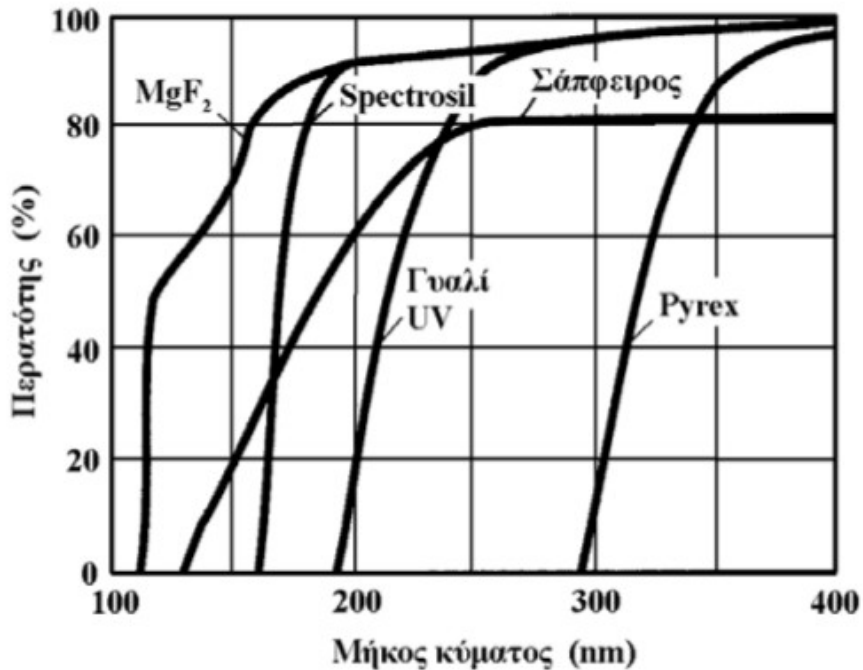
## 5.1 Η φωτοκάθοδος

### 5.1.1 Η ενεργός επιφάνεια της φωτοκαθόδου

Η φωτοκάθοδος εναποτίθεται ως λεπτό στρώμα φωτοευαίσθητου υλικού στο εσωτερικό της επιφάνειας του φωτοπολλαπλασιαστή (ΦΠ) που δρα ως παράθυρο. Το επιθυμητό εμβαδόν και σχήμα της φωτοευαίσθητης επιφάνειας της φωτοκαθόδου εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Υπάρχει διαθέσιμη μια ποικιλία μεγεθών και σχημάτων φωτοκαθόδων, και φωτοπολλαπλασιαστών γενικότερα.

### 5.1.2. Το υλικό του παραθύρου

Το υλικό του παραθύρου του φωτοπολλαπλασιαστή επηρεάζει καθοριστικά τη φωτοευαισθησία του. Η οπτική περατότητα διαφόρων υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως παράθυρα σε φωτοπολλαπλασιαστές φαίνεται στο Σχ.5.1



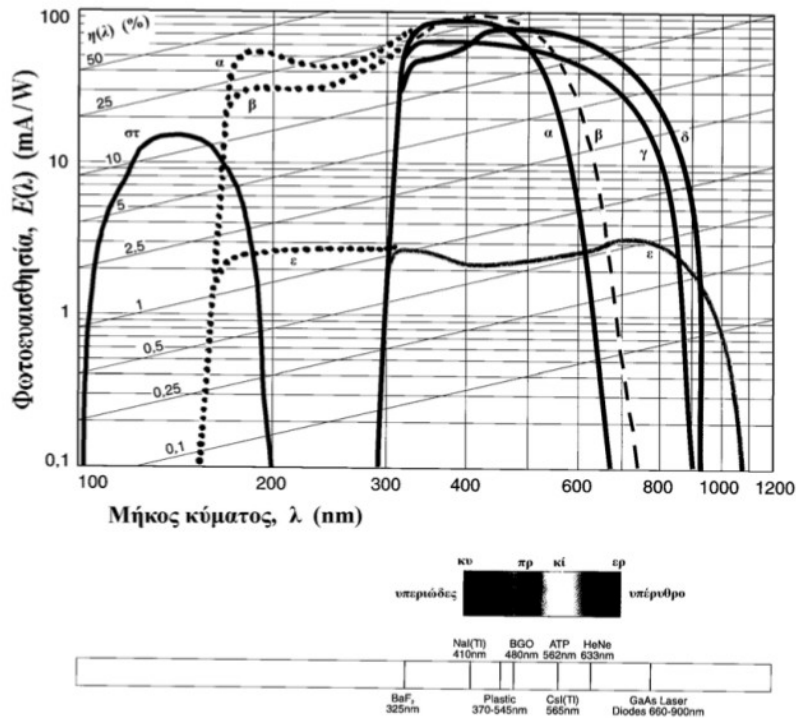
Σχ.5.1

### 5.1.3 Είδη και φωτοευαισθησία φωτοκαθόδων

Φωτοκάθοδοι από διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικές φασματικές ευαισθησίες. Στο Σχ. 5.2 φαίνονται οι φωτοευαισθησίες διαφόρων φωτοκαθόδων. Η φωτοευαισθησία  $E(\lambda)$  της φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή στο μήκος κύματος  $\lambda$  ορίζεται ως το ρεύμα που εκπέμπεται από την φωτοκάθοδο ανά μονάδα ενέργειας που προσπίπτει σε αυτήν ανά μονάδα χρόνου ως φως μήκους κύματος  $\lambda$ . Εκφράζεται σε μονάδες mA/W.

Ένα ισοδύναμο μέγεθος είναι η κβαντική απόδοση  $\eta(\lambda)$  της φωτοκάθοδο στο μήκος κύματος  $\lambda$ , που ορίζεται ως ο μέσος αριθμός φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται από τη φωτοκάθοδο ανά προσπίπτον φωτόνιο μήκους κύματος  $\lambda$ . Εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό. Για παράδειγμα, μια κβαντική απόδοση 10

% σημαίνει ότι μόνο το ένα στα 10 προσπίπτοντα φωτόνια θα προκαλέσει την εκπομπή ενός φωτοηλεκτρονίου.



Σχ.5.2 Η φωτοευαισθησία μερικών φωτοκαθόδων των φωτοπολλαπλασιαστών της εταιρείας THORN EMI . Με τα εμπορικά ονόματα της εταιρείας, (α) Bialkali (Sb-K-Cs, Sb-Rb-Cs), (β) S11 (SbCs) και RbCs, (γ) S20 Trialkali (Na-K-Sb-Cs), (δ) S20, (ε) S1 (Ag-O-Sc), (στ) CsI.

Η σχέση ανάμεσα στα δύο μεγέθη αποδεικνύεται εύκολα ότι είναι:

$$E(\lambda) = 0,81 \eta(\lambda) \lambda \text{ mA/W} .$$

Στο Σχ. 5.2 δίνονται, συναρτήσεως του μήκους κύματος του φωτός, τόσο η φωτοευαισθησία όσο και η κβαντική απόδοση, για διάφορους τύπους φωτοκαθόδων. Οι στικτές γραμμές δίνουν τις επεκτάσεις της φωτοευαισθησίας στην περιοχή του υπεριώδους για τις περιπτώσεις που το παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή είναι

από χαλαζία. Η καμπύλη (στ) δίνει τη φωτοευαισθησία της φωτοκαθόδου από CsI, η οποία εκτείνεται μόνο στην περιοχή του υπεριώδους. Κάτω από την κλίμακα του μήκους κύματος, σχεδιάστηκε το φάσμα του ορατού φωτός, με σημειωμένες τις προσεγγιστικές θέσεις του κυανού (κυ), του πράσινου (πρ), του κίτρινου (κί) και του ερυθρού (ερ). Οι περιοχές του υπεριώδους και του υπέρυθρου εκτείνονται, στο σχήμα, στα αριστερά και στα δεξιά του ορατού φάσματος αντίστοιχα. Στο κάτω μέρος του σχήματος δίνονται τα μήκη κύματος του φωτός από ορισμένες πηγές ενδιαφέροντος στη φυσική, όπως: οι σπινθηριστές NaI(Tl), CsI(Tl) και οι πλαστικοί σπινθηριστές, που χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία  $\gamma$ , καθώς και κάποιων λέιζερ, όπως οι GeAs και HeNe. Η επιλογή της κατάλληλης φωτοκαθόδου και παραθύρου του φωτοπολλαπλασιαστή καθορίζεται από τη χρήση για την οποία προορίζεται ο φωτοπολλαπλασιαστής. Οι κατασκευαστές παρέχουν πιστοποιητικά βαθμονόμησης της ευαισθησίας ενός συγκεκριμένου φωτοπολλαπλασιαστή, σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ή και περιοχές του φάσματος.

Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι η ευαισθησία της φωτοκαθόδου παρουσιάζει μια ανομοιογένεια από το ένα της σημείο στο άλλο, που μπορεί να φθάνει τα 10 % της μέσης της τιμής. Για τον λόγο αυτό, μερικές φορές είναι επιθυμητό να διαχέεται το προσπίπτον φως ώστε να χρησιμοποιείται ολόκληρη η φωτοκάθοδος, και όχι κάποια μικρή περιοχή η οποία μπορεί να διαφέρει από μέτρηση σε μέτρηση.

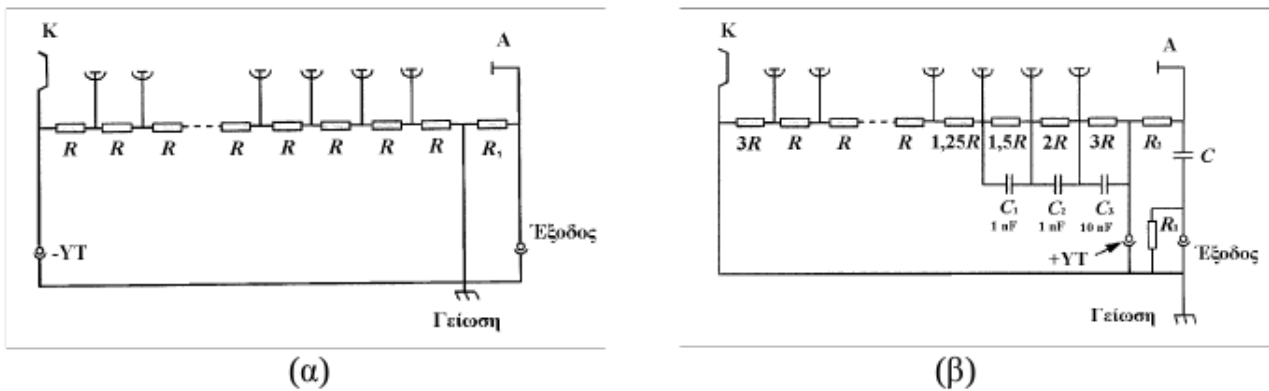
## 5.2.Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων

Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων είναι ουσιαστικά ένας ενισχυτής μεγάλου εύρους συχνοτήτων, με πολύ χαμηλό θόρυβο και μεγάλη ενίσχυση, που έχει τη δυνατότητα να παρέχει σήμα εξόδου συμβατό με την ευαισθησία των διαθέσιμων σύγχρονων μετρητικών οργάνων. Στον φωτοπολλαπλασιαστή, ο προορισμός του είναι να ενισχύσει κάθε αρχικό φωτοηλεκτρόνιο σε ένα μετρήσιμο παλμό φορτίου. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η διαδικασία αυτή είναι επιθυμητό να γίνεται με τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Σταθερή ενίσχυση για διαφορετικά φωτοηλεκτρόνια.
2. Ενίσχυση σταθερή στον χρόνο, για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
3. Σταθερό και επαναλήψιμο ύψος και διάρκεια του παλμού στην έξοδο.
4. Η διαδικασία ενίσχυσης πρέπει να διαρκεί για όσο το δυνατό μικρότερο χρονικό διάστημα, το οποίο να είναι επαναλήψιμο για διαφορετικούς παλμούς.

### 5.2.1 Ο διαιρέτης τάσης

Ανάμεσα στις γειτονικές δυνόδους πρέπει να διατηρείται σταθερή διαφορά δυναμικού, η οποία θα επιταχύνει τα δευτερογενή ηλεκτρόνια κάθε δυνόδου προς την αμέσως επόμενη δυνόδο, όπου και θα προκαλέσουν περαιτέρω πολλαπλασιασμό του αριθμού των. Η άνοδος πρέπει να βρίσκεται επομένως σε θετικότερο δυναμικό από αυτό της φωτοκαθόδου, συνολικά της τάξης των 1000 V. Τα δύο απλούστερα, και πιο διαδεδομένα κυκλώματα κατανομής αυτής της υψηλής τάσης, φαίνονται στο Σχ. 3.



Σχ.5.3 Δύο κοινά κυκλώματα διαιρέτη της υψηλής τάσης στις δυνόδους ενός φωτοπολλαπλασιαστή. (K = κάθοδος, A = άνοδος, YT = υψηλή τάση).

(α) Διαιρέτης τάσης για χρήση σε λειτουργία συνεχούς μεταβολής (ή dc).  $R=10\text{k}\Omega$  έως  $10\text{M}\Omega$ ,  $R_1=10\text{M}\Omega$ .

(β) Διαιρέτης τάσης για χρήση σε λειτουργία καταγραφής παλμών.  $R=10\text{k}\Omega$  έως  $10\text{M}\Omega$ ,  $R_1=10\text{M}\Omega$ ,  $R_2=10\text{k}\Omega$  έως  $10\text{M}\Omega$ .

Για την τροφοδοσία υψηλής τάσης χρησιμοποιείται μία πηγή τάσης, με μεγάλη ευστάθεια για καλύτερη λειτουργία του PM. Μια αλυσίδα αντιστάσεων χρησιμοποιείται για την κατανομή της τάσης στις δυνόδους.

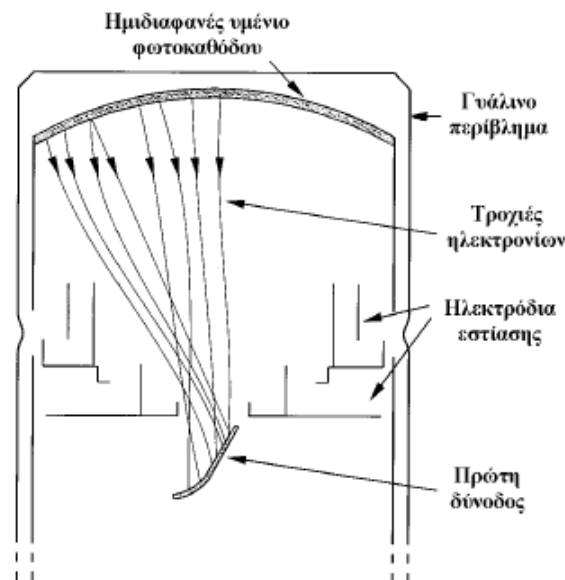
Για την καταγραφή συνεχούς ρεύματος (Σχ. 5.3α), μια αρνητική τάση εφαρμόζεται στην κάθοδο, αφήνοντας την άνοδο σε μηδενικό δυναμικό, για ευκολότερη σύνδεση με τον ενισχυτή που συνήθως ακολουθεί. Η επιλογή της τιμής της R (μεταξύ  $10\text{k}\Omega$  και  $10\text{M}\Omega$ ) καθορίζεται από το μέγιστο ρεύμα που αναμένεται να μετρά ο PM. Μια αντίσταση ασφαλείας  $R_1=10\text{M}\Omega$  συνδέεται μεταξύ γης και ανόδου, για να αποτρέψει την εμφάνιση τάσης ίσης με αυτήν της τελευταίας δυνόδου στην έξοδο όταν αφαιρείται το φορτίο από την έξοδο .

Για την καταγραφή παλμών (Σχ. 5.3β), μια θετική τάση εφαρμόζεται στην

τελευταία δύνοδο. Οι αντιστάσεις έχουν τιμή  $R = 10 \text{ k}\Omega$  έως  $10 \text{ M}\Omega$ . Η αντίσταση φορτίου είναι  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  έως  $10 \text{ M}\Omega$ , ενώ ως αντίσταση ασφαλείας χρησιμοποιείται μια τιμή  $R = 10 \text{ M}\Omega$ . Η χωρητικότητα σύζευξης,  $C$ , απομονώνει τη συνεχή τάση της ανόδου από την έξοδο, επιτρέποντας μόνο τους παλμούς ρεύματος να φθάνουν στην έξοδο. Πιο σύνθετοι διαιρέτες τάσης χρησιμοποιούνται για καλύτερη λειτουργία του PM, και για ειδικές χρήσεις.

### 5.2.2 Η περιοχή εισόδου του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων

Στο Σχ.5.4 φαίνεται η περιοχή εισόδου ενός πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων. Κάθε φωτοηλεκτρόνιο πρέπει να επιταχυνθεί και να εστιασθεί στην ευαίσθητη περιοχή της πρώτης δυνόδου. Η είσοδος στον πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων σχεδιάζεται έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η περισυλλογή των φωτοηλεκτρονίων από τη φωτοκάθοδο. Τα ηλεκτρόδια εστίασης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποκοπή του παλμού με εξωτερικό σήμα, αν αυτό είναι επιθυμητό.



Σχ.5.4 Η είσοδος στον πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων. Φαίνονται κάποιες τροχιές φωτοηλεκτρονίων από τη φωτοκάθοδο προς στην πρώτη δύνοδο



### 5.2.3.Οι επιφάνειες των δυνόδων του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων

Τα συνήθη υλικά επίστρωσης των επιφανειών των δυνόδων είναι τα BeCu και SbCs. Η χρήση για την οποία προορίζεται ο φωτοπολλαπλασιαστής καθορίζει και την επιλογή της κατάλληλης επιφάνειας, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της καθεμιάς, τα οποία είναι: BeCu: ευστάθεια στην ενίσχυση και μεγάλη τιμή ενίσχυσης ανά volt επιτάχυνσης των δευτερογενών ηλεκτρονίων, μικρή ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας, περιορισμένα φαινόμενα υστέρησης. SbCs: καλύτερη γραμμικότητα στην ενίσχυση, λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.

### 5.2.4.Ενίσχυση του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων

Κάθε μια από τις δυνόδους του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων πολλαπλασιάζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν σε αυτήν, και η ολική ενίσχυση είναι ίση με το γινόμενο των συνεισφορών όλων των δυνόδων. Αν με  $\delta_i$  συμβολίσουμε την ενίσχυση της  $i$ -στής δυνόδου (συντελεστής δευτερογενούς εκπομπής), και υπάρχουν συνολικά  $n$  δύνοδοι, το ρεύμα στην άνοδο θα είναι ίσο με

$$I_a = \delta_1 \delta_2 \dots \delta_{n-1} \delta_n I_k$$

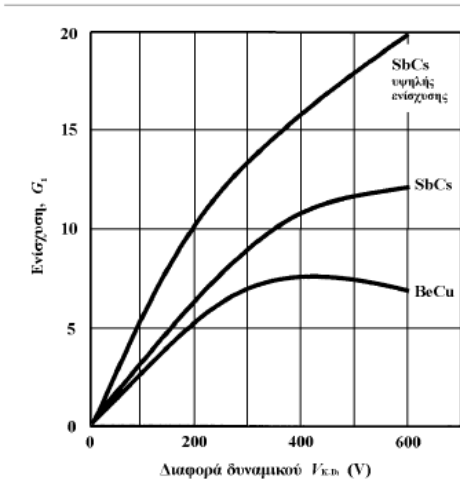
ή

$$I_a = G I_k$$

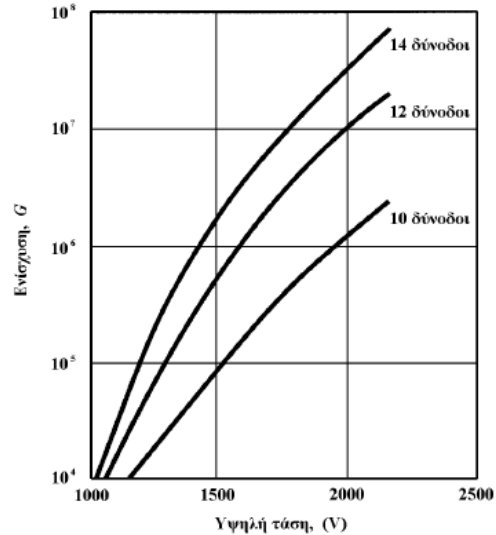
όπου  $I_k$  και  $I_a$  είναι τα ρεύματα καθόδου και ανόδου, αντίστοιχα, και  $G$  είναι η ενίσχυση του φωτοπολλαπλασιαστή. Η ενίσχυση μιας δυνόδου εξαρτάται από το υλικό της επιφάνειας της δυνόδου. Εξαρτάται επίσης από την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, και κατ' επέκταση, από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε διαδοχικές δυνόδους. Στο Σχ.5.5 φαίνεται η μεταβολή της ενίσχυσης  $\delta_1$  της πρώτης δυνόδου, συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού μεταξύ αυτής και της φωτοκαθόδου, για διάφορα υλικά της επιφάνειας της δυνόδου. Ανάλογες καμπύλες περιγράφουν την ενίσχυση και των άλλων δυνόδων.

Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων αποτελείται από μια αλυσίδα πολλών δυνόδων (π.χ. 9 έως και 14), και ένας διαιρέτης τάσης, αποτελούμενος από αντιστάσεις, κατανέμει σε αυτές την ολική υψηλή τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα. Έτσι επιτυγχάνεται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε οποιεσδήποτε δύο γειτονικές δυνόδους. Στο Σχ.5.6 φαίνεται η μεταβολή της ολικής ενίσχυσης  $G$  του φωτοπολλαπλασιαστή, συναρτήσει της ολικής υψηλής τάσης που εφαρμόζεται

στα άκρα της αλυσίδας των δυνόδων, για τρεις περιπτώσεις συνολικού αριθμού δυνόδων ίσου με 10, 12 και 14.



Σχ.5.5

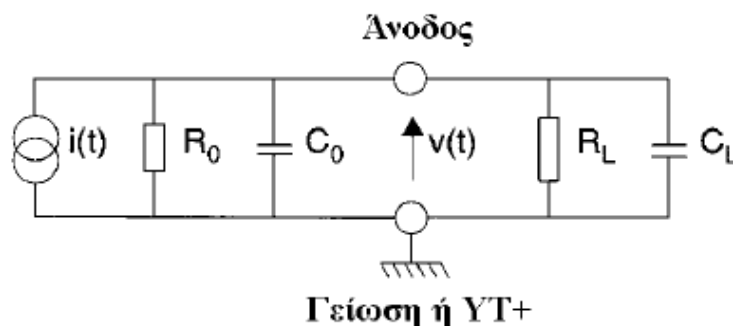


Σχ.5.6

### 5.2.5. Το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοπολλαπλασιαστή

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοπολλαπλασιαστή αποτελείται από μια ιδανική γεννήτρια ρεύματος, συνδεδεμένη παράλληλα με μια αντίσταση εξόδου  $R_0$  ( $> 10$   $12 \Omega$ ) και ένα πυκνωτή χωρητικότητας  $C_0$  ( $< 10$   $\mu F$ ). Το σήμα στην έξοδο εξαρτάται από τον παράλληλο συνδυασμό αυτών με την αντίσταση  $R_L$  και χωρητικότητα  $C_L$  του φορτίου (Σχ. 5.7).

Το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται τόσο σε περιπτώσεις μέτρησης συνεχούς σήματος όσο και σε περιπτώσεις στις οποίες το μετρούμενο φωτεινό σήμα έχει τη μορφή παλμών.



Σχ.5.7

Στην περίπτωση μέτρησης παλμών φωτός, το σχήμα του παλμού στην έξοδο εξαρτάται από το σχήμα του παλμού φωτός. Σε πολλές εφαρμογές, το φωτεινό σήμα που μετράται φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, με μια σταθερά χρόνου  $\tau$  s . Τότε, το ρεύμα  $i(t)$  μεταβάλλεται με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$$i(t) = Ne G e^{-t/\tau_s} \quad (1)$$

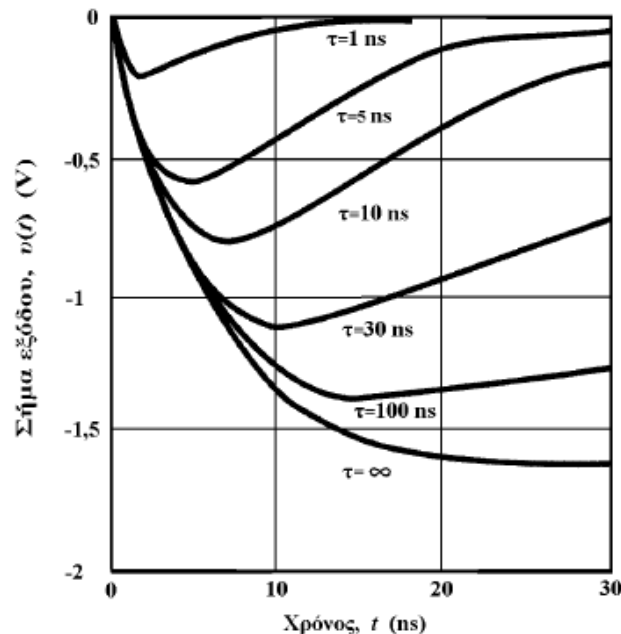
όπου  $N$  είναι ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται από τον φωτεινό παλμό,  $e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $G$  η ενίσχυση του φωτοπολλαπλασιαστή. Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι

$$\tau = RC, \text{ όπου } R = R_o R_L / (R_o + R_L) \text{ και } C = C_o + C_L. \quad (2)$$

Το σήμα στην έξοδο θα είναι τότε

$$u(t) = [(NeGR / (\tau - \tau_s)) * (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau})] \quad (3)$$

Τα σχήματα διαφόρων παλμών φαίνονται στο Σχ. 5.8.



Σχ.5.8 Η τάση εξόδου  $u(t)$  για φωτεινά σήματα με διάφορες σταθερές χρόνου  $\tau$ . Για τον φωτοπολλαπλασιαστή έχουν υποτεθεί οι τιμές  $N = 100$ ,  $G = 10^6$ ,  $C = 10$

pF και  $\tau = 5 \text{ ns}$  .

Για  $\tau \ll \tau_s$  , η Εξ.3 δείχνει ότι η τάση εξόδου καταγράφει πιστά τη μορφή του φωτεινού σήματος. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται τρόπος λειτουργίας ρεύματος. Σε αντίθεση, ο τρόπος λειτουργίας τάσης ισχύει όταν είναι  $\tau \gg \tau_s$  . Τότε, το ύψος του παλμού τάσης στην έξοδο είναι ανάλογος του ολικού φορτίου στην είσοδο. Για μεγάλο ή μεταβλητό ρυθμό παλμών, χρησιμοποιείται μια σταθερά χρόνου τέτοια ώστε το  $1 / \tau$  να είναι μικρότερο από το  $1/5$  περίπου του μέσου ρυθμού των παλμών, για να αποφευχθεί η αλληλεπικάλυψη των παλμών. Στις περιπτώσεις στις οποίες είναι γνωστή η σταθερά χρόνου του σήματος, αυτή λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του  $\tau$  . Για τη φασματοσκοπία  $\gamma$  με χρήση σπινθηριστή Na(Tl), για παράδειγμα, για τον οποίο είναι  $\tau_s = 230 \text{ ns}$  , μια τιμή  $\tau \approx 1 \mu\text{s}$  εξασφαλίζει καλή ολοκλήρωση του σήματος και επιτρέπει την καταμέτρηση παλμών με ρυθμούς μέχρι και 50000 c.p.s. (παλμοί το δευτερόλεπτο).

### 5.3 Παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένας οπτικός αισθητήρας με μεγάλη ενίσχυση, απόκριση σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ως τέτοιος έχει περιορισμούς στην απόδοση, που σχετίζονται με:

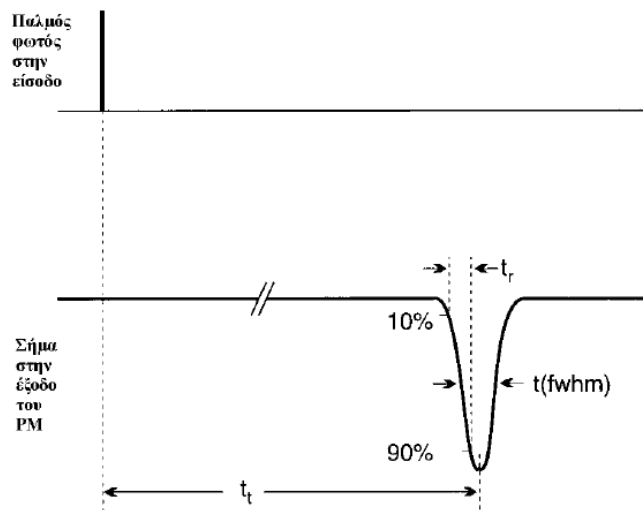
*Μέγιστη ενίσχυση  
Χρονική απόκριση  
Γραμμικότητα της απόκρισης  
Ρεύμα σκότους  
Λόγος θόρυβος/σήμα  
Ευστάθεια και υστέρηση*

#### 5.3.1 Μέγιστη υψηλή τάση και ευαισθησία

Η μέγιστη επιτρεπτή ενίσχυση εξαρτάται από τη δομή του φωτοπολλαπλασιαστή. Η μέγιστη επιτρεπτή διαφορά δυναμικού μεταξύ γειτονικών δυνόδων εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ τους και τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 100 και 150 V. Ο φωτοπολλαπλασιαστής δεν πρέπει να λειτουργεί με υψηλή τάση πέραν κάποιου ασφαλούς ορίου (για 10 δυνόδους, μεταξύ 1000 και 1500 V). Σε μεγάλες τάσεις, παρατηρούνται ασταθής συμπεριφορά και υψηλό ρεύμα σκότους, ή ακόμα και ηλεκτρική εκκένωση σε ακραίες περιπτώσεις.

### 5.3.2 Χρονική απόκριση

Η απόκριση του φωτοπολλαπλασιαστή σε έναν παλμό φωτός σχεδόν μηδενικής διάρκειας εξαρτάται από τις τροχιές των ηλεκτρονίων μέσα στον σωλήνα. Τα φωτοηλεκτρόνια που δημιουργούνται από τον παλμό φωτός εκπέμπονται από διαφορετικά σημεία της φωτοκαθόδου, με διαφορετικές κινητικές ενέργειες, και ακολουθούν διαφορετικές τροχιές προς την πρώτη δύνοδο. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρούνται ανάμεσα και στις υπόλοιπες δυνόδους. Παρατηρείται λοιπόν μια διασπορά στους χρόνους άφιξης των διαφόρων ηλεκτρονίων, η οποία είναι μεγαλύτερη στην άνοδο. Το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη (Σχ.5.9)



Σχ.5.9 Η χρονική απόκριση του φωτοπολλαπλασιαστή (PM).

- Χρόνος ανόδου,  $t_r$ . Τυπικές τιμές: 1,5 –15 ns.
- Πλήρες εύρος στο ήμισυ του μεγίστου,  $t(fwhm)$ . Τυπικές τιμές: 2 –20 ns.
- Χρόνος διέλευσης,  $t_t$ . Τυπικές τιμές: 20 –100 ns.

Η ζώνη συχνοτήτων της απόκρισης του φωτοπολλαπλασιαστή εκτείνεται από 0 (dc) μέχρι τη συχνότητα

$$f(3\text{ dB}) = 1/3 t_t, \text{ (σε Hz όταν ο } t_t \text{ είναι σε s.)}$$

Η μεταβολή του χρόνου διέλευσης  $t_t$  από έναν παλμό φωτός σε έναν άλλο, είναι σημαντική όταν ο PM χρησιμοποιείται για την καταγραφή των χρόνων κατά τους οποίους κάποια γεγονότα συμβαίνουν. Η τυπική απόκλιση σ πολλών μετρήσεων

του χρόνου διέλευσης  $t_t$  δίνεται ως μέτρο της διασποράς του  $t_t$  (transit time jitter) . Τυπικές τιμές του  $\sigma$  είναι 0,5 –5 ns. Οι φωτοπολλαπλασιαστές με επιπεδόκοιλα παράθυρα ή/και με εστίαση, έχουν την καλύτερη χρονική απόκριση. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη χρονική απόκριση ενός PM είναι:

- Ο αριθμός των δυνόδων. Λιγότερες δύνοδοι δίνουν καλύτερη χρονική συμπεριφορά του PM.
- Η ολική υψηλή τάση. Μεγαλύτερη υψηλή τάση βελτιώνει τη χρονική συμπεριφορά του PM.
- Η διάμετρος της φωτοκαθόδου. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν φωτίζεται μόνον η κεντρική περιοχή της φωτοκαθόδου.

### 5.3.3 Γραμμικότητα και μέγιστο ρεύμα

- Όρια για λειτουργία με συνεχές ρεύμα

Μεγάλες τιμές του μέσου ρεύματος της ανόδου μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα κόπωσης και να μειώσει τη διάρκεια ζωής ενός PM. Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ανόδου είναι 100  $\mu\text{A}$ , με τα καλύτερα αποτελέσματα ευστάθειας του PM να επιτυγχάνονται για ρεύματα ανόδου μικρότερα από 10  $\mu\text{A}$ . Με σωστό σχεδιασμό, όλα τα μέρη του PM λειτουργούν γραμμικά μέσα σε όρια  $\pm 1\%$ , για ρεύματα ανόδου μέχρι και 100  $\mu\text{A}$ . Υπάρχουν επίσης και όρια στο μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα από τη φωτοκάθοδο, λόγω περιορισμών που θέτει η ηλεκτρική αγωγιμότητα του στρώματος του φωτοευαίσθητου υλικού. Στους 20 ° C , τυπικές μέγιστες τιμές του ρεύματος της φωτοκαθόδου για καλή (γραμμική) απόκριση είναι 2 , 5 –250 nA/cm<sup>2</sup> , αναλόγως του υλικού της φωτοκαθόδου.

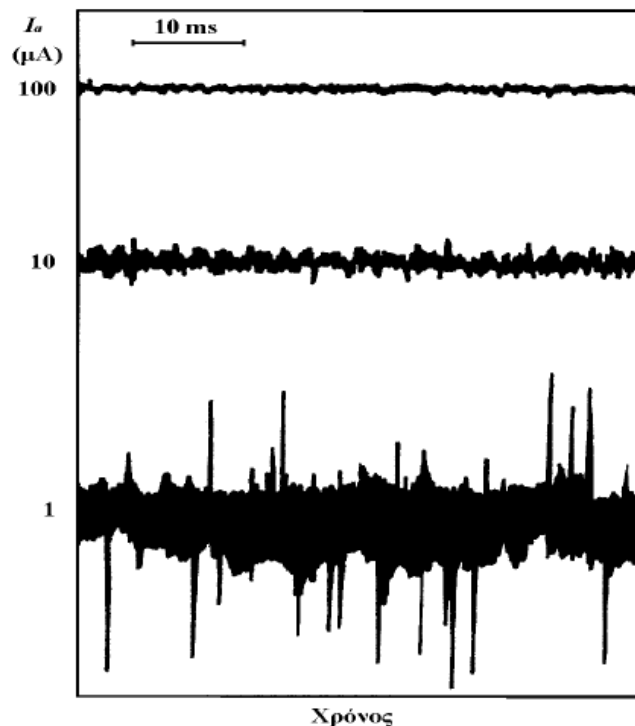
- Όρια για λειτουργία με ρεύμα σε μορφή παλμών

Ρεύματα σε μορφή παλμών μεγαλύτερα από 100  $\mu\text{A}$  μπορούν να αντληθούν, με την προϋπόθεση ότι το μέσο ρεύμα ανόδου σε διάστημα ενός δευτερολέπτου είναι μικρότερο των 100  $\mu\text{A}$ .

### 5.4 Θόρυβος, Ρεύμα Σκότους και Παλμοί Σκότους

Οι κύριοι τρόποι λειτουργίας ενός φωτοπολλαπλασιαστή είναι δύο: (α) Συνεχούς μεταβολής (ή dc), και (β) Καταγραφής παλμών. Παράδειγμα του τρόπου (α) είναι η σάρωση ενός φιλμ, κατά την οποία η ένταση του φωτός είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη σε μεγάλη εύρος τιμών, με απότομες αλλαγές στην τιμή της έντασης. Για τους σκοπούς αυτούς, απαιτείται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα για την επεξεργασία του σήματος να έχουν απόκριση σε μια ζώνη συχνοτήτων εύρους της τάξης των 3 MHz, για να είναι δυνατή η πιστή παρακολούθηση των μεταβολών στην

ένταση του φωτός. Παράδειγμα του τρόπου (β) είναι η καταγραφή των σημάτων από ένα σπινθηριστή Na(Tl), οι οποίοι έχουν χρόνο μείωσης  $\tau=230$  ns , ενώ μεταξύ των παλμών το σήμα μηδενίζεται. Θα εξετάσουμε πώς οι στατιστικές διακυμάνσεις των μετρούμενων μεγεθών και το ρεύμα σκότους του φωτοπολλαπλασιαστή επηρεάζουν τη λειτουργία του στους δύο τρόπους που αναφέρθηκαν. Αν καταγράψουμε το σήμα στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή όταν η ένταση του φωτός παραμένει σταθερή, θα παρατηρήσουμε μια διακύμανση να επιπροστίθεται σε ένα σταθερό σήμα, όπως φαίνεται στο Σχ.5.10.



Σχ.5.10 Το σήμα στην έξοδο ενός φωτοπολλαπλασιαστή με ενίσχυση ίση με  $G = 10^6$  , για τρεις σταθερές εντάσεις φωτός. Ο θόρυβος στο σήμα είναι ορατός. Να σημειωθεί ότι η κλίμακα του ρεύματος είναι λογαριθμική.

Οι πηγές των διακυμάνσεων στο σήμα εξόδου του PM είναι δύο:

- (α) Η συνεισφορά του ρεύματος σκότους, και
- (β) Τα φαινόμενα στατιστικού θορύβου στο σήμα.

Όπως το όνομα υποδηλώνει, το ρεύμα σκότους είναι ένα ρεύμα που είναι παρόν ακόμη και όταν δεν υπάρχει προσπίπτον φως στην είσοδο του φωτοπολλαπλασιαστή.

### 5.4.1 Θόρυβος

Όπως σε όλα τα μετρητικά συστήματα, έτσι και στον φωτοπολλαπλασιαστή το σήμα στην έξοδο συνοδεύεται από θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός προέρχεται :

A. Από τη στατιστική διακύμανση στον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται στη φωτοκάθοδο (θόρυβος φωτοκαθόδου), και

B. Από τη στατιστική διακύμανση στον αριθμό των δευτερογενών ηλεκτρονίων που παράγονται στις δυνόδους ανά προσπίπτον ηλεκτρόνιο (θόρυβος πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων).

A. Θόρυβος φωτοκαθόδου.

Έστω ότι σταθερή ροή φωτός παράγει στη φωτοκάθοδο  $M$  φωτοηλεκτρόνια ανά μονάδα χρόνου. Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται στη φωτοκάθοδο, λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, παρουσιάζει διακυμάνσεις οι οποίες περιγράφονται από την κατανομή Poisson. Έτσι, αν το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή μετρηθεί για χρονικό διάστημα  $T$ , θα μετρηθούν συνολικά, κατά μέσον όρο,

$$MT \pm \sqrt{MT}$$

φωτοηλεκτρόνια, όπου  $\sqrt{MT}$  είναι η τυπική απόκλιση στον αριθμό  $MT$ , σύμφωνα με την κατανομή Poisson. Ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο θα είναι επομένως ίσος με

$$S / N = MT / \sqrt{MT} = \sqrt{MT} \quad (4)$$

Στην καλύτερη περίπτωση, αν δηλαδή δεν υπήρχε άλλη πηγή θορύβου στον φωτοπολλαπλασιαστή, αυτός θα ήταν ο λόγος  $S / N$  στην έξοδο. Για τους παλμούς του Σχ.11, στον καθένα από τους οποίους έχουμε συνολικά 100 φωτοηλεκτρόνια, η τυπική απόκλιση στο συνολικό φορτίο του κάθε παλμού θα είναι ανάλογη του  $\sqrt{100} = 10$ , και ο λόγος  $S / N$  θα είναι 0,10.

Για λειτουργία συνεχούς μεταβολής, το φαινόμενο πρέπει να εξετασθεί πιο γενικά, λαμβάνοντας υπόψη το εύρος της ζώνης συχνοτήτων απόκρισης του ηλεκτρονικού μετρητικού συστήματος, στον υπολογισμό του σχετικού χρόνου  $T$ . Η θεωρία του στοχαστικού ηλεκτρικού θορύβου, προβλέπει τον θόρυβο (rms),  $i_{rms}$ , στο ρεύμα  $I_k$  της φωτοκαθόδου ως



$$i_{rms} = \sqrt{2 e I_{\kappa} \Delta f} ,$$

όπου  $e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $\Delta f$  είναι το εύρος της ζώνης συχνοτήτων του μετρητικού συστήματος. Και πάλι, στην καλύτερη περίπτωση που δεν υπάρχει άλλη πηγή θορύβου στον φωτοπολλαπλασιαστή, ο λόγος  $S / N$  στην έξοδο θα ήταν

$$S / N = I_{\kappa} / i_{rms} = I_{\kappa} / \sqrt{2 e I_{\kappa} \Delta f} = \sqrt{I_{\kappa} / 2 e \Delta f} \quad (5)$$

Για φορτίο αποτελούμενο από παράλληλο συνδυασμό μιας αντίστασης  $R$  και ενός πυκνωτή χωρητικότητας  $C$ , είναι  $\Delta f = 1 / 4 RC$ . Προφανώς, όσο μικρότερο είναι το  $\Delta f$ , ή, ισοδύναμα, όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά χρόνου του μετρητικού συστήματος, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο,  $S / N$ . Βεβαίως αυτό επιτυγχάνεται εις βάρος της ταχύτητας με την οποία θα είναι ικανό το σύστημα να ανταποκριθεί σε μεταβολές στο σήμα (θεώρημα εύρους ζώνης!). Για παράδειγμα, στη σάρωση φωτογραφικού φιλμ, αν είναι επιθυμητή μια τιμή  $S / N \geq 100$  και το εύρος της ζώνης συχνοτήτων του μετρητικού συστήματος είναι  $\Delta f = 3 \text{ MHz}$ , τότε θα πρέπει να είναι  $I_{\kappa} \geq 10^{-8} \text{ A}$ .

## B. Θόρυβος πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων.

Ο πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων δεν γίνεται με ιδανικό τρόπο. Ο συντελεστής δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων,  $\delta$ , από μια δύνοδο δεν είναι απολύτως σταθερός αριθμός, αλλά κυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή  $\bar{\delta}$ . Ο πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων στην πρώτη δύνοδο παίζει το σημαντικότερο ρόλο στη διακύμανση του ολικού παράγοντα πολλαπλασιασμού των ηλεκτρονίων, γιατί ο αριθμός των ηλεκτρονίων,  $N$ , εκεί είναι ο μικρότερος, και η διακύμανσή του,  $N$ , είναι αναλογικά μεγαλύτερη από ότι στα κατοπινότερα στάδια πολλαπλασιασμού. Συγκεκριμένα, η ποσοστιαία διακύμανση είναι της τάξης του  $\sqrt{N} / N = 1 / \sqrt{N}$ . Στις τελευταίες δυνόδους, λόγω του μεγάλου αριθμού των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας δεν αποκλίνει πολύ από τη μέση του τιμή. Για πληρότητα, οι σχέσεις των Εξ. 4 και 5 πρέπει να διαιρεθούν με ένα παράγοντα

$$a = \sqrt{\frac{\bar{\delta}}{\bar{\delta} - 1}} , \quad (6)$$

για πολλαπλασιαστική διαδικασία που διέπεται από τη στατιστική Poisson. Έτσι γίνονται αντίστοιχα:

$$S/N = \sqrt{MT} \frac{1}{a} \quad (7)$$

και

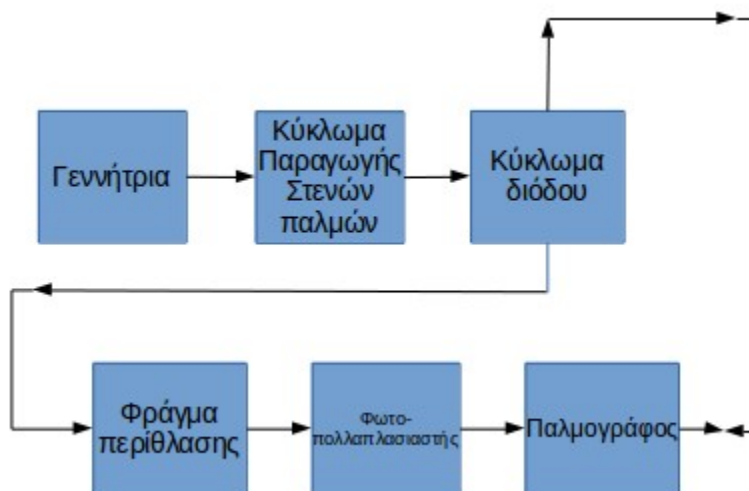
$$S/N = \sqrt{\frac{I_{\kappa}}{2e\Delta f}} \frac{1}{a} \quad (8)$$

Στην πραγματικότητα το φαινόμενο είναι πιο πολύπλοκο και δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από τη στατιστική Poisson. Η κατάσταση είναι χειρότερη από αυτήν που περιγράφουν οι Εξ. 7 και 8. Έτσι, ενώ οι παράγοντες  $\alpha$  που υπολογίζονται από την Εξ.6 κυμαίνονται μεταξύ 1,03 και 1,05 για διάφορους φωτοπολλαπλασιαστές, στην πράξη βρίσκονται τιμές μεταξύ 1,13 και 1,26 αντίστοιχα.

## Κεφάλαιο 6. Πειραματική διαδικασία

Η ανάλυση που προηγήθηκε αφορούσε τα βασικά στοιχεία της πειραματικής μας διάταξης έτσι ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή η λειτουργία αυτής, να μπορέσουμε να κάνουμε εύστοχες παρατηρήσεις όπως επίσης και να βγάλουμε πολύτιμα συμπεράσματα.

Παρακάτω φαίνεται η προσομοίωση του κυκλώματος που παράγει και οδηγεί τον παλμό ρεύματος έτσι ώστε να θέσει σε λειτουργία τη δίοδο εκπομπής φωτός που έχουμε χρησιμοποιήσει, μέσω του προγράμματος Pspice. Στη συνέχεια παραθέσαμε και μια σειρά χαρακτηριστικές της λειτουργίας της δίοδου όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή. Επιπλέον ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση του συνόλου της διάταξης (Εικ.6.1).



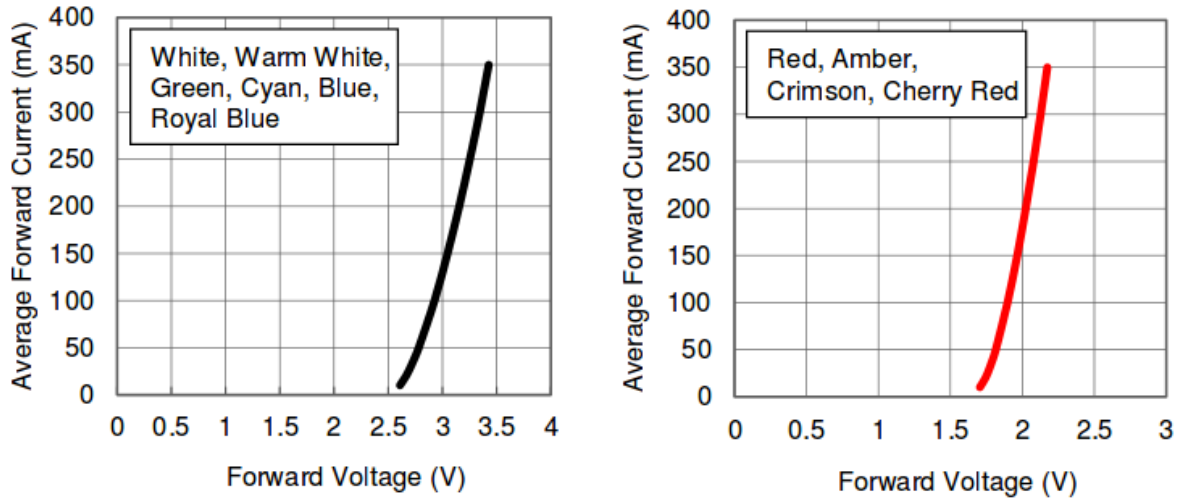
Εικ. 6.1 Σχηματική αναπαράσταση διάταξης

Στον παλμογράφο επιλέγουμε να εμφανίζεται το ρεύμα που διέρχεται της δίοδου (τάση πάνω σε ωμική αντίσταση  $0.3 \Omega$ ) και η απόκριση του φωτεινού σήματος μέσω της τάσης εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή.

Παρακάτω φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά της LED (Εικ 6.2 , 6.3 , 6.4 , 6.5).

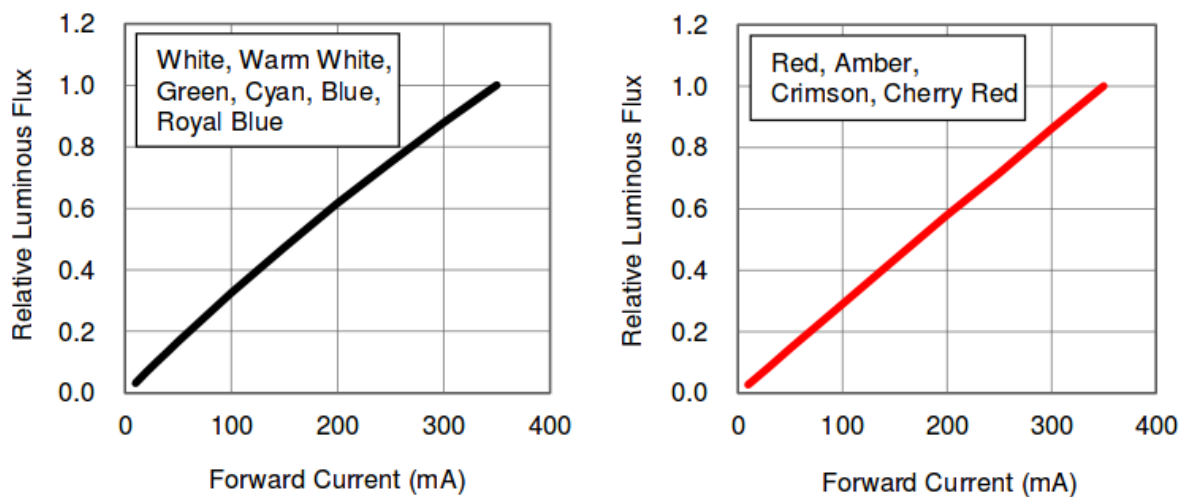
## Forward Current Characteristics, $T_J = 25^\circ\text{C}$

### 1. Forward Voltage vs. Forward Current



Εικ. 6.2 Χαρακτηριστικές I-V

### 2. Forward Current vs. Normalized Relative Luminous Flux



Εικ. 6.3 Χαρακτηριστικές Luminous Flux (Φωτεινής ροής)-I

## Forward Voltage Bin Structure

Color	Bin Code	Minimum Voltage (V)	Maximum Voltage (V)
White	A	2.85	3.10
	B	3.10	3.35
	D	3.35	3.60
	E	3.60	3.85
Warm White	A	2.85	3.10
	B	3.10	3.35
	D	3.35	3.60
	E	3.60	3.85
Red	A	1.75	2.00
	B	2.00	2.25
	D	2.25	2.50
	E	2.50	2.75
	F	2.75	3.00

Εικ6.4 Ελάχιστες και μέγιστες τιμές V σε DC λειτουργία

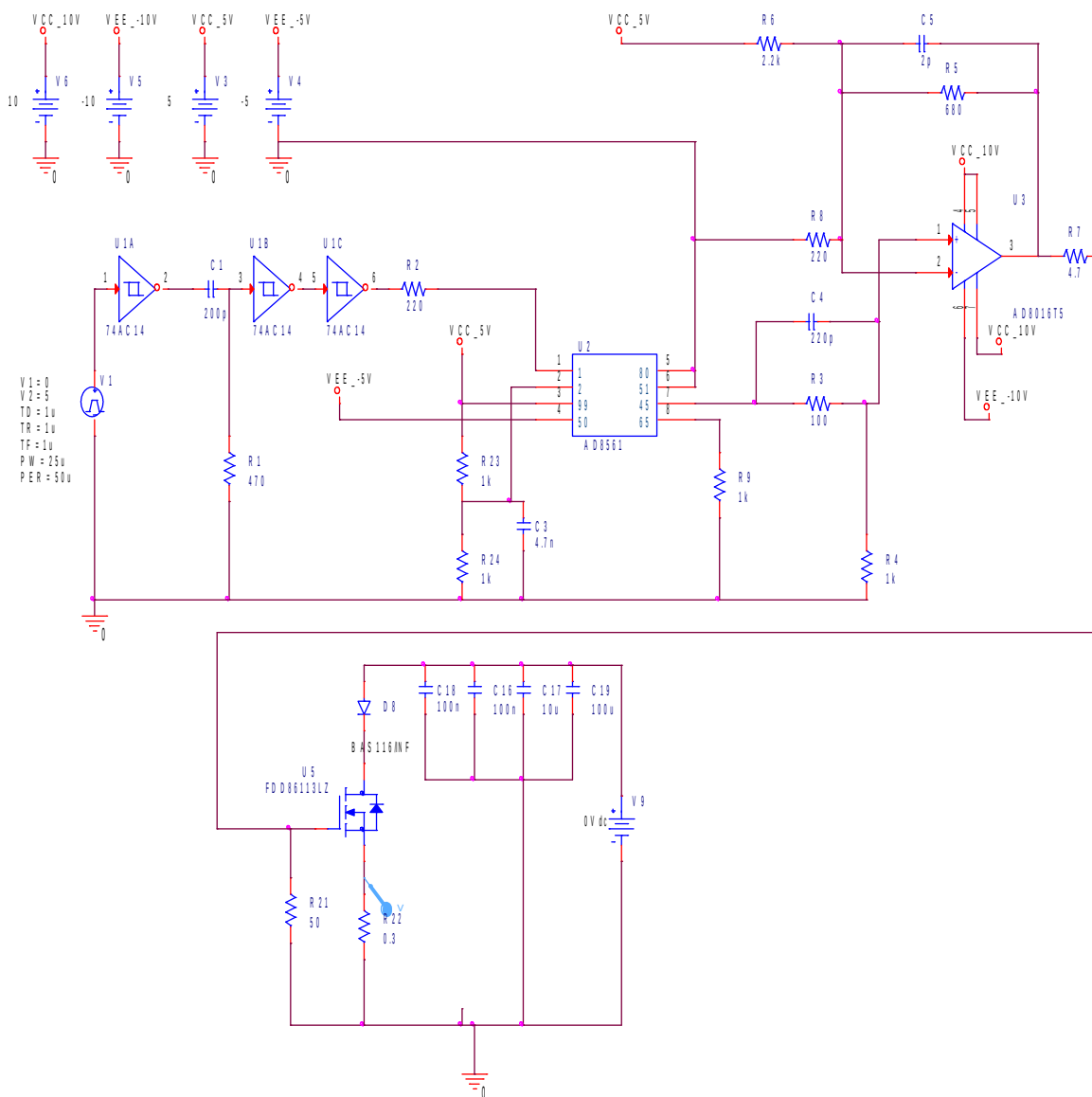
## Absolute Maximum Ratings

Parameter	White/Warm White/Red/Amber/Green/ Cyan/Blue/Royal Blue/Crimson/Cherry Red
DC Forward Current (mA)	350
Peak Pulsed Forward Current (mA)	500 (less than 1/10 duty cycle@1KHz)
Average Forward Current (mA)	350
ESD Sensitivity (HBM per MIL-STD-883E Method 3015.7)	±4000V (Class III)
LED Junction Temperature	120°C
Operating Board Temperature at Maximum DC Forward Current	-40°C - 105°C
Storage Temperature	-40°C - 120°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3
Reverse Voltage	Not designed to be driven in reverse bias

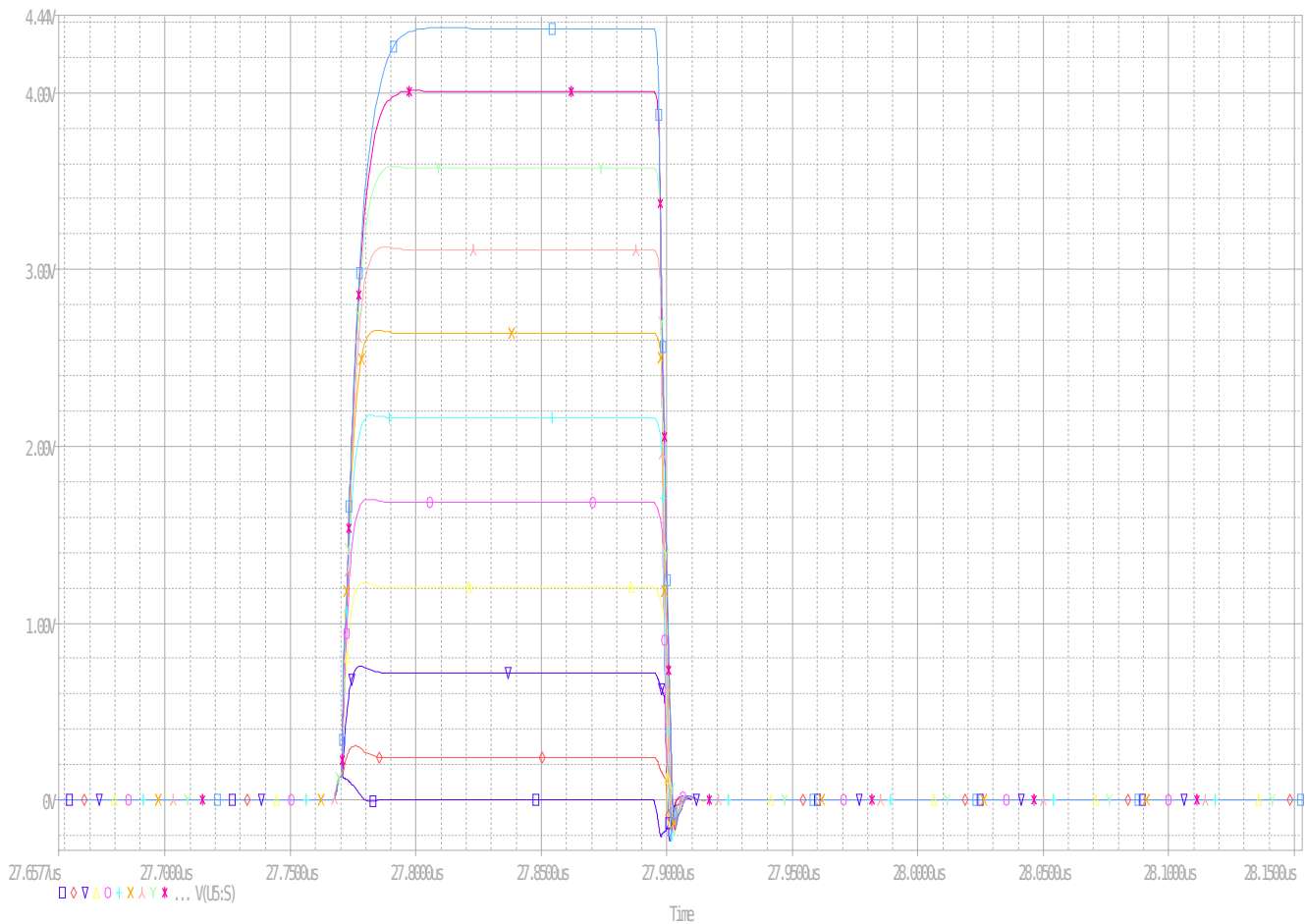
Εικ. 6.5 Μέγιστες τιμές DC λειτουργίας LED.

Εδώ θα πρέπει να κρατήσουμε πως από τον κατασκευαστή δίνεται ως **μέγιστη τιμή συνεχούς ρεύματος λειτουργίας τα 350mA**. Το όριο αυτό το ξεπεράσαμε, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, τροφοδοτώντας το κύκλωμα με παλμικό ρεύμα διάρκειας μερικών δεκάδων ns.

Στη συνέχεια παρατίθεται η προσομοίωση του κυκλώματος που οδηγεί τον παλμό της διόδου καθώς και κάποιες χαρακτηριστικές του παλμού αυτού.



Εικ. 6.6 Προσομοίωση του κυκλώματος-οδηγού του παλμού με τη βοήθεια του PSpice

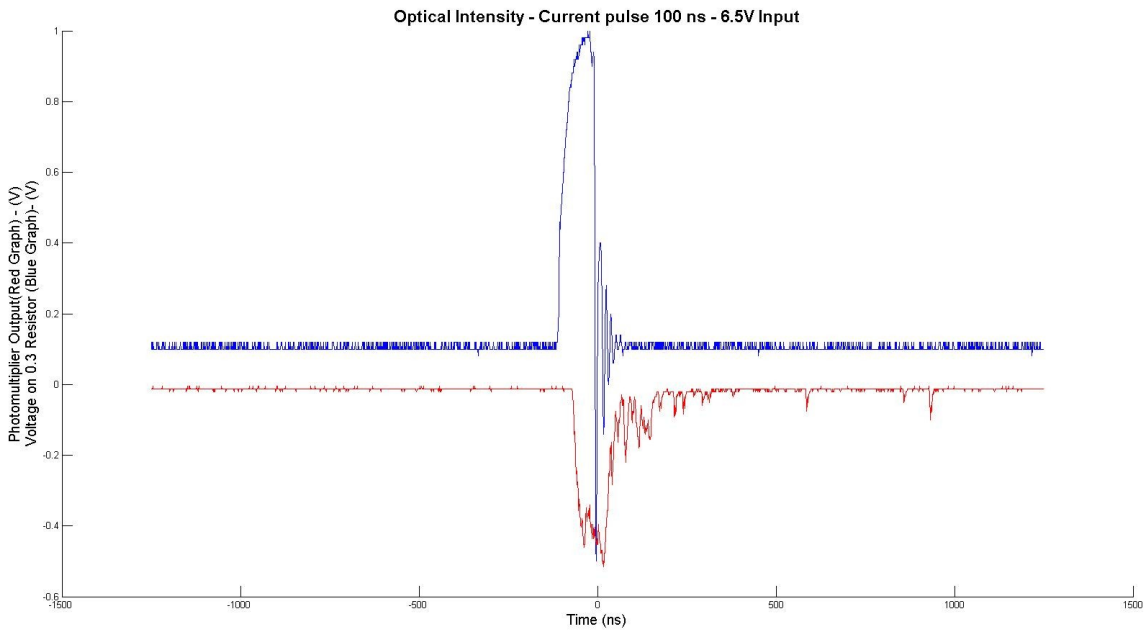


Εικ. 6.7 Παραγωγή του παλμού, με το Pspice , με βήμα μεταβολής της τάσης V9 τα 2V

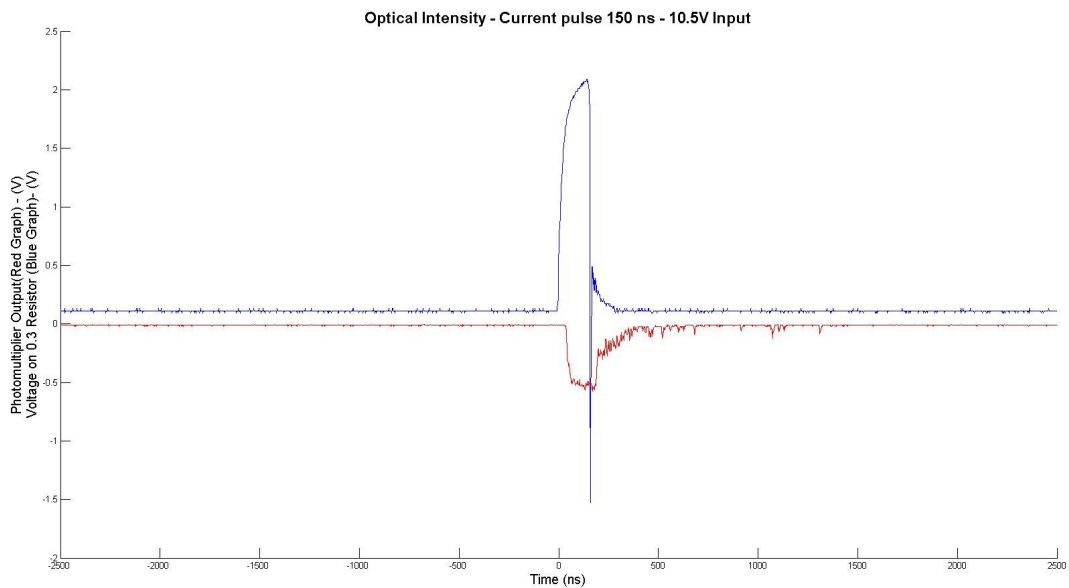
Οι μετρήσεις μας ,κατά την πειραματική διαδικασία, είχαν ως μεταβλητή -απο τη μία- μέσω του τροφοδοτικού που χρησιμοποιήθηκε, την τάση εισόδου και συνεπώς το ρεύμα της διόδου και- από την άλλη- το πλάτος του παλμού ρεύματος . Το βήμα της μεταβολής της τάσης ήταν τα 2V με πρώτη μέτρηση τα 2.5V (όπου και μπορούσαμε να έχουμε ευκρινή παλμό εξόδου στον παλμογράφο) και μέγιστη τιμή τάσης τα 18.5V (μέγιστη τιμή που μπορούσε να μας δώσει το τροφοδοτικό). Όλες οι μετρήσεις που αφορούσαν την τάση-ρεύμα διόδου και τη φωτεινή απόδοση της γίνανε για πλάτος παλμού 50ns, 100ns, 150ns, 200ns, 250ns. Παρακάτω παρατίθενται , επιλεκτικά, κάποιες από τις κυματομορφές όπως προκύψανε στο πρόγραμμα Matlab οι οποίες δίνουν τη φωτεινή απόδοση της διόδου σε σχέση με την τάση-ρεύμα σε αυτή (η τάση μετράται πάνω σε ωμική αντίσταση 0.3Ω). Το φράγμα περίθλασης έχει ρυθμιστεί στα 631nm (μέγιστη τιμή για το μήκος κύματος της μέγιστης φωτεινότητας της LED με την οποία δουλεύουμε) ενώ έχει γίνει εξομάλυνση των κυματομορφών (100 τιμές ανα χρονική στιγμή και εξαγωγή απλού μέσου όρου στον παλμογράφο).

Επιπλέον, σύμφωνα και με το δείγμα του σήματος εξόδου του

φωτοπολλαπλασιαστή που δίνεται στην Εικ. 5.10 , δίνονται παρακάτω κάποιες κυματομορφές του σήματος εξόδου που προέκυψε απο τη δική μας διάταξη σε συνδυασμό πάντα με το ρεύμα της διόδου (τάση σε  $0.3\Omega$  αντίσταση), σε διαφορετικό πλάτος παλμού και διαφορετικές τάσεις εισόδου.

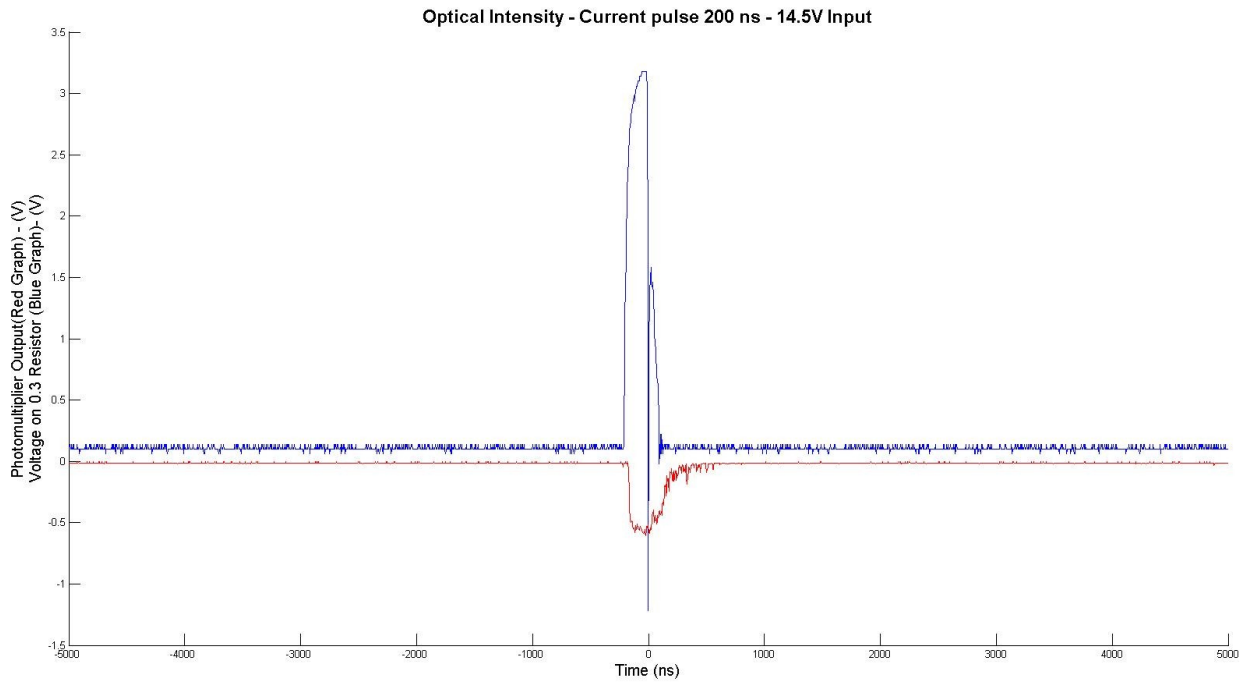


Εικ. 6.8 Παλμός πλάτους 100ns, τάση εισόδου 6.5V (χωρίς εξομάλυνση)

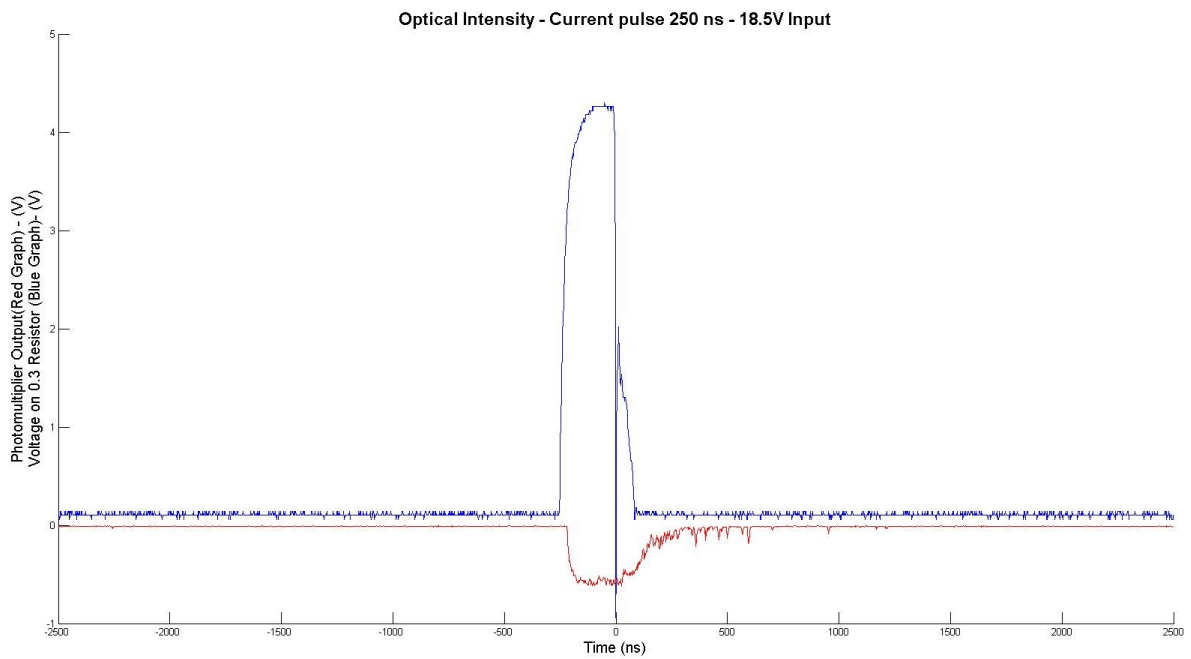


Εικ.6.9 Παλμός πλάτους 150ns, τάση εισόδου 10.5V (χωρίς εξομάλυνση)





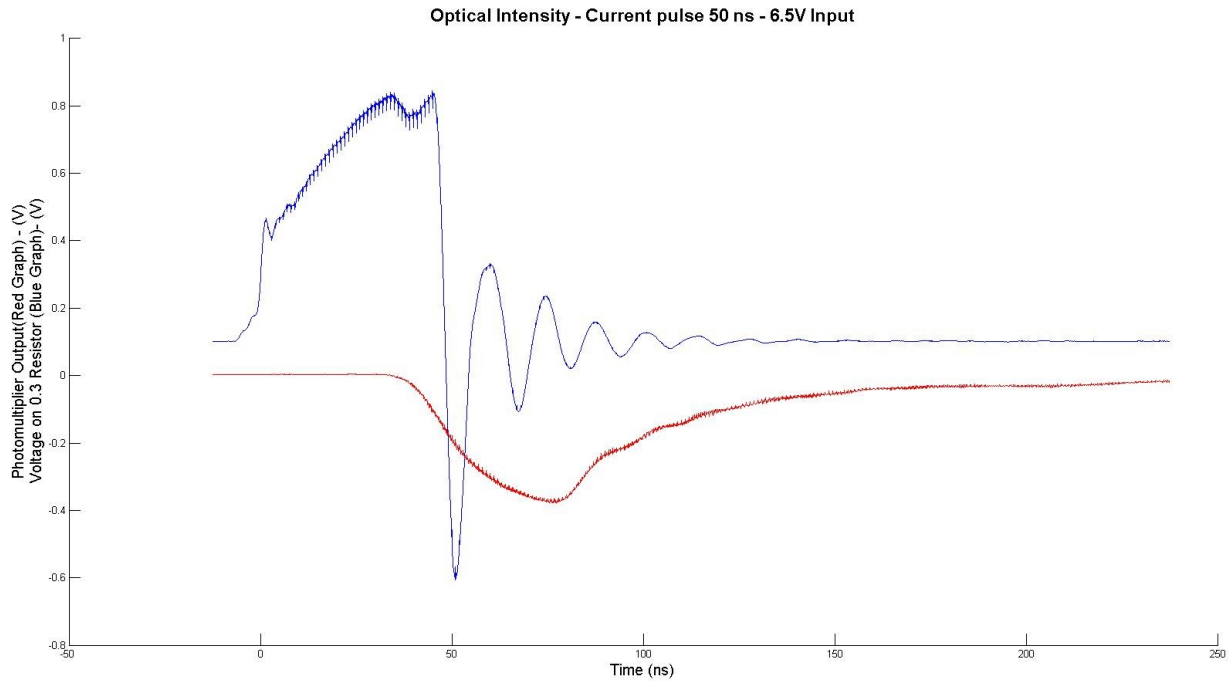
Εικ. 6.10 Παλμός πλάτους 200ns, τάση εισόδου 14.5V (χωρίς εξομάλυνση)



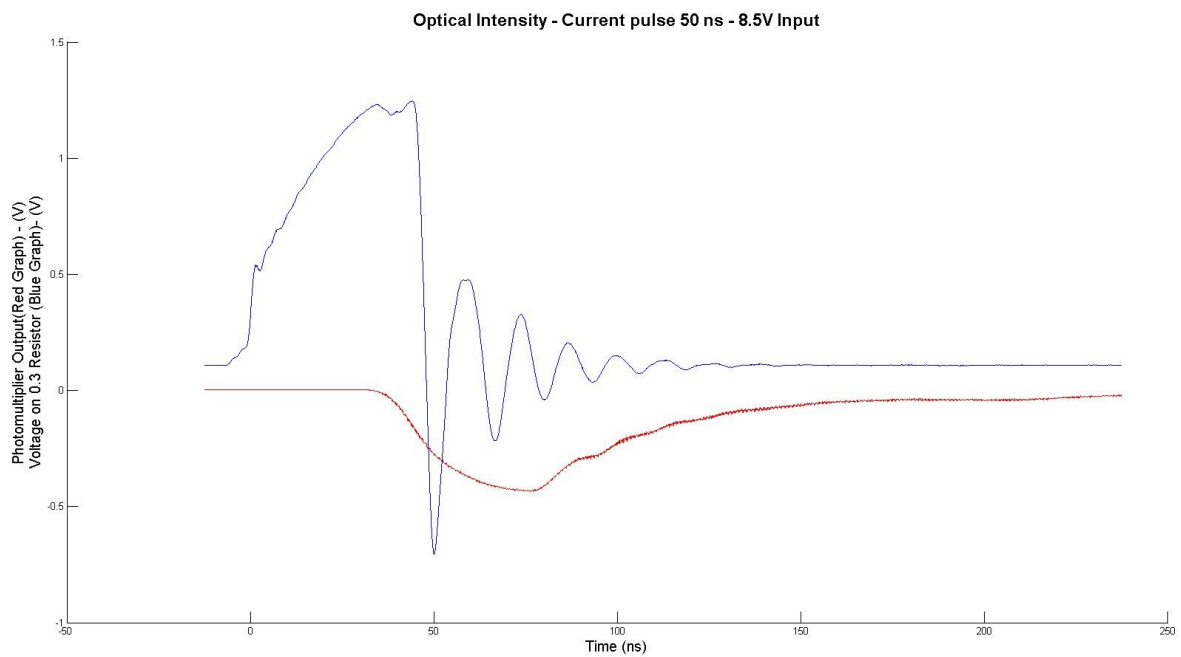
Εικ. 6.11 Πλάτος παλμού 250ns, τάση εισόδου 18.5V (χωρίς εξομάλυνση)

Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυματομορφές με την εξομάλυνση στο σήμα εξόδου όσο και στο σήμα εισόδου.

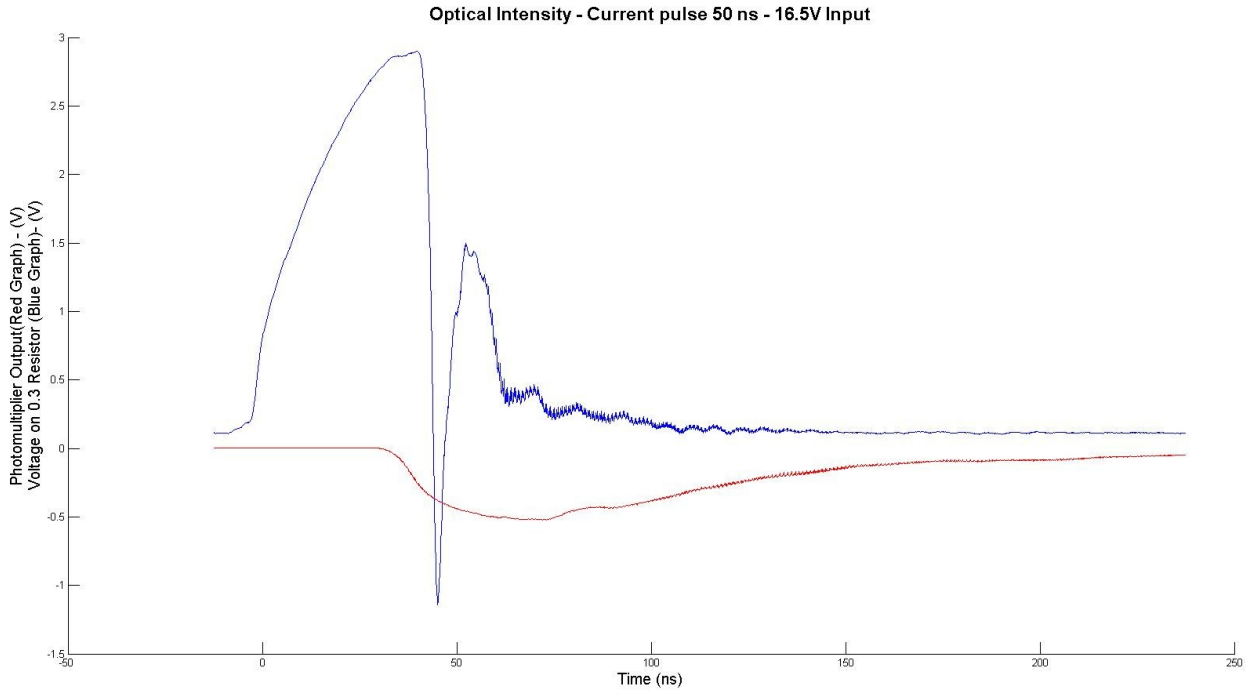
- Πλάτος παλμού: 50ns  
Τάση εισόδου: 6.5V



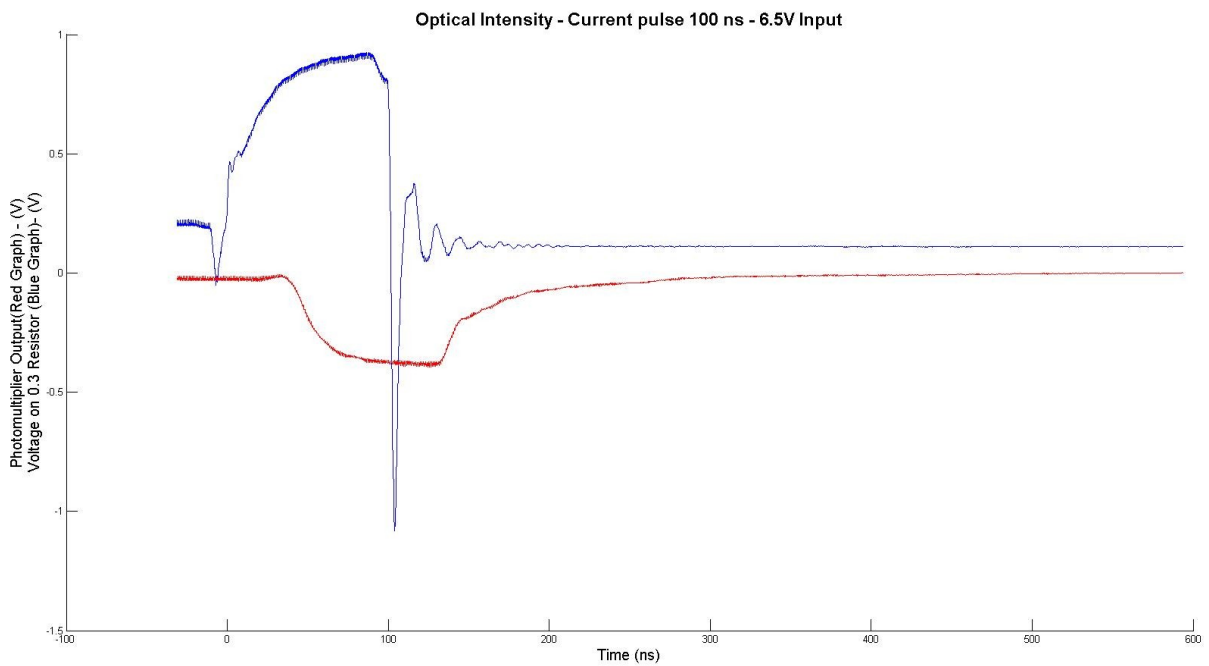
- Πλάτος παλμού: 50ns  
Τάση εισόδου: 8.5V



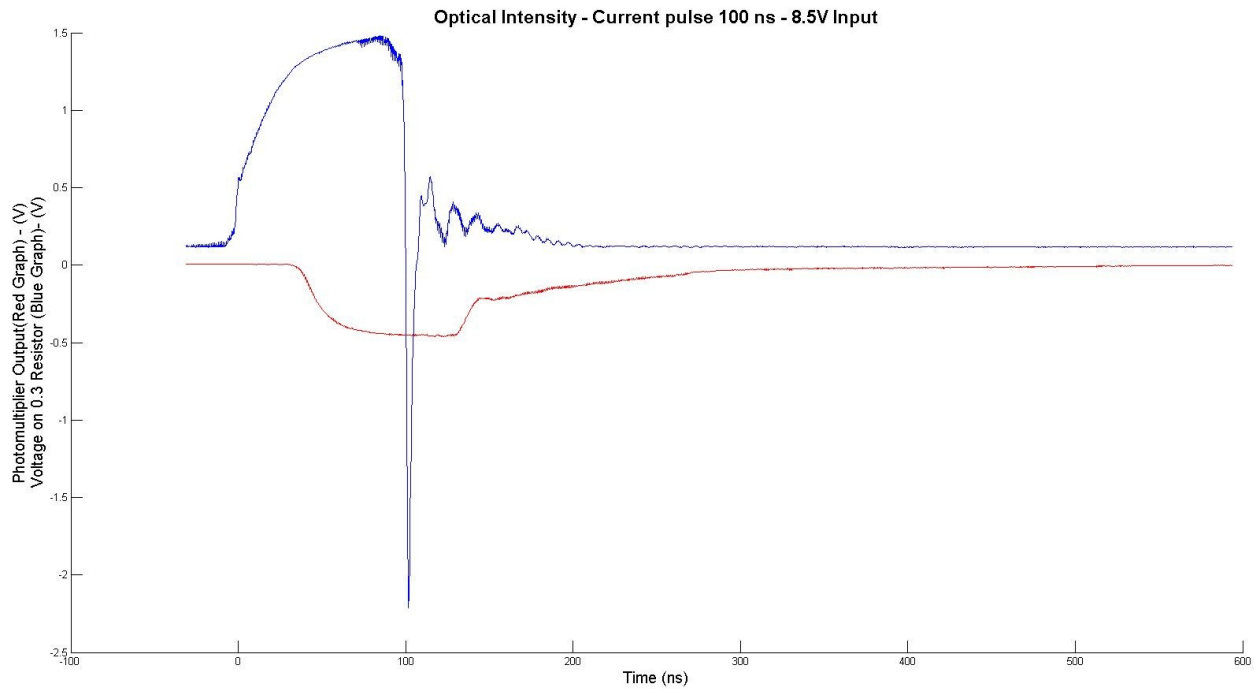
- Πλάτος παλμού: 50ns  
Τάση εισόδου: 16.5V



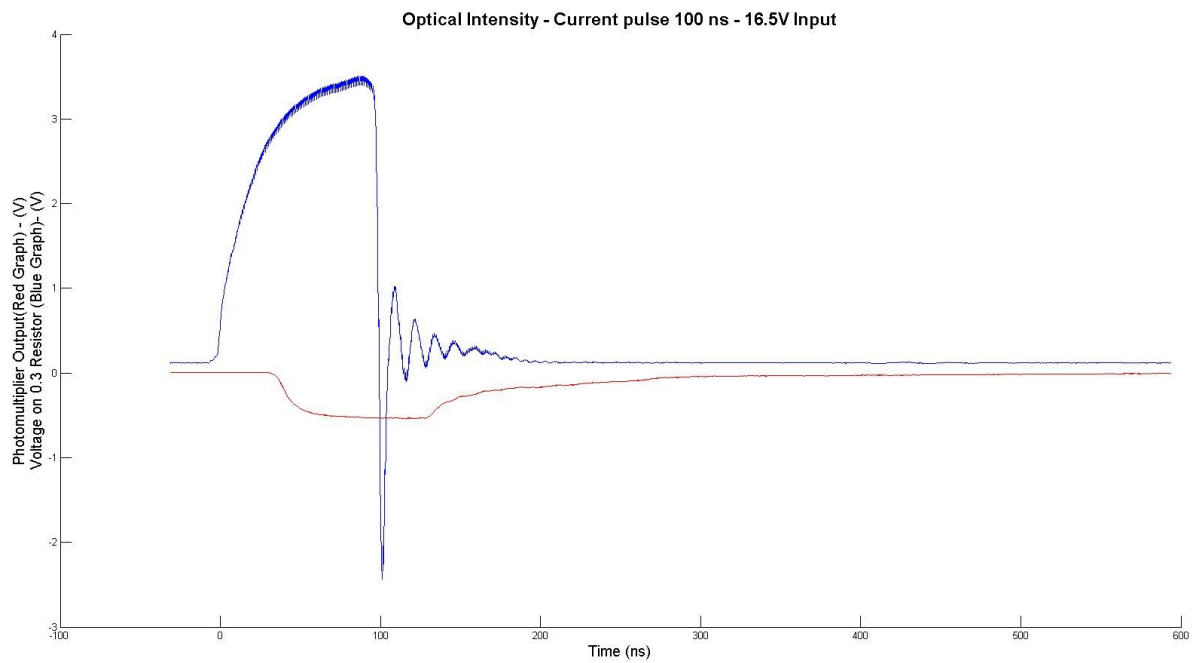
- Πλάτος παλμού: 100ns  
Τάση εισόδου: 6.5V



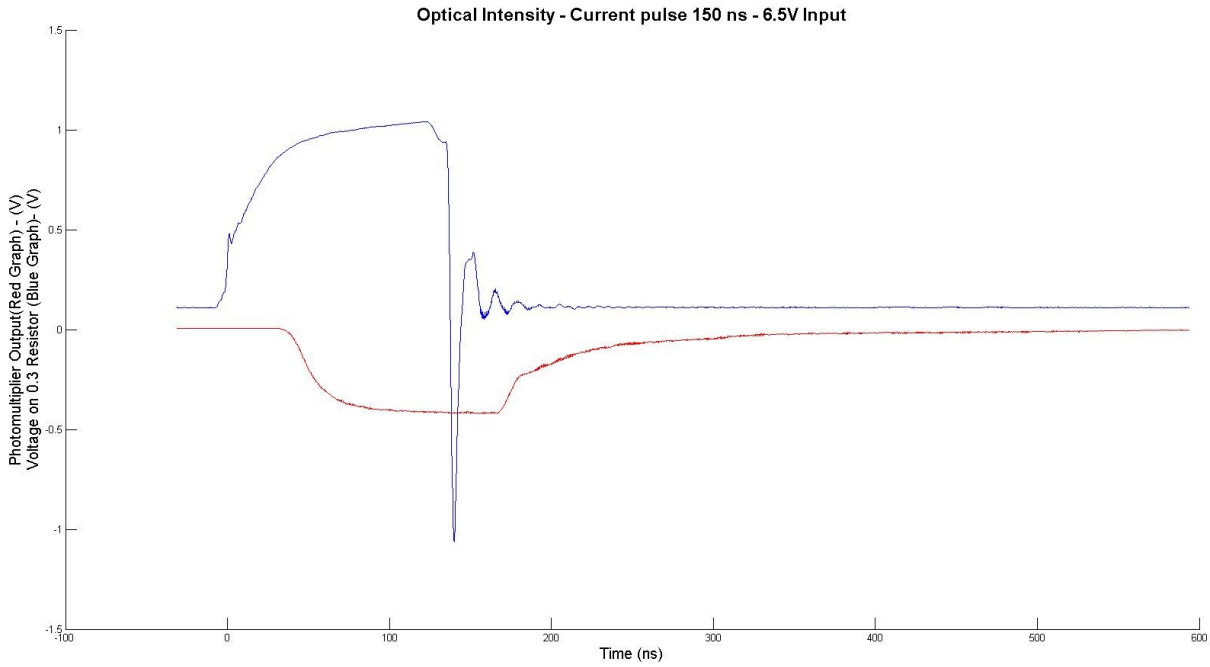
- Πλάτος παλμού: 100ns  
Τάση εισόδου: 8.5V



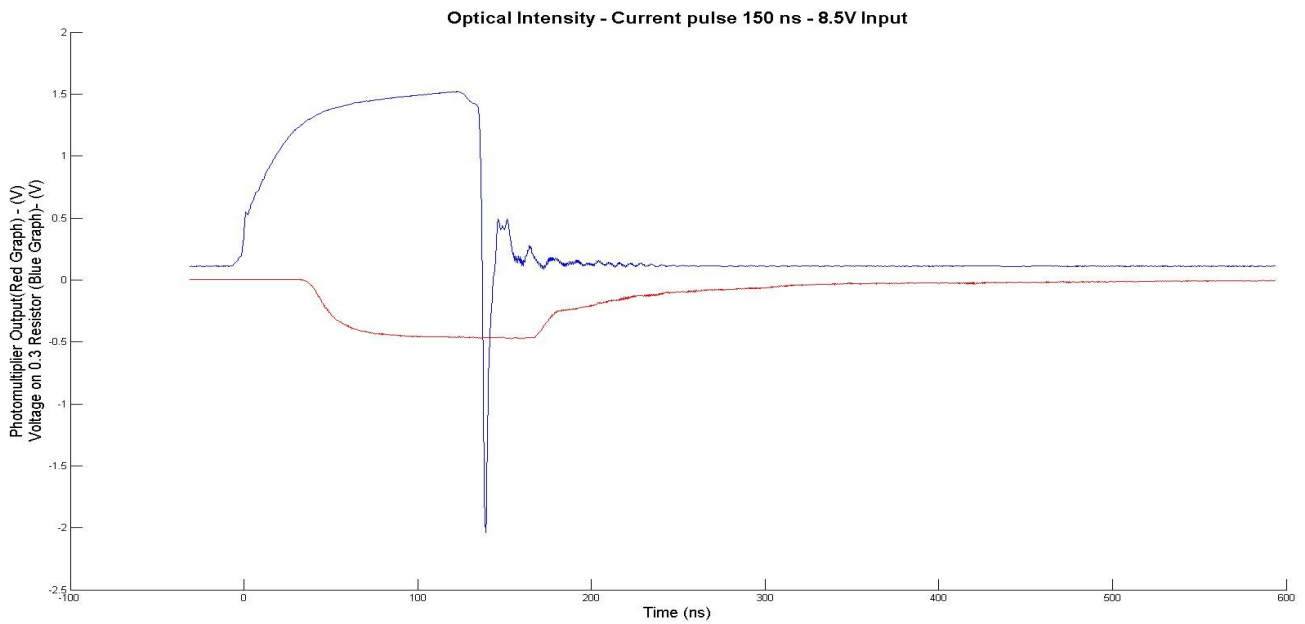
- Πλάτος παλμού: 100ns  
Τάση εισόδου: 16.5V



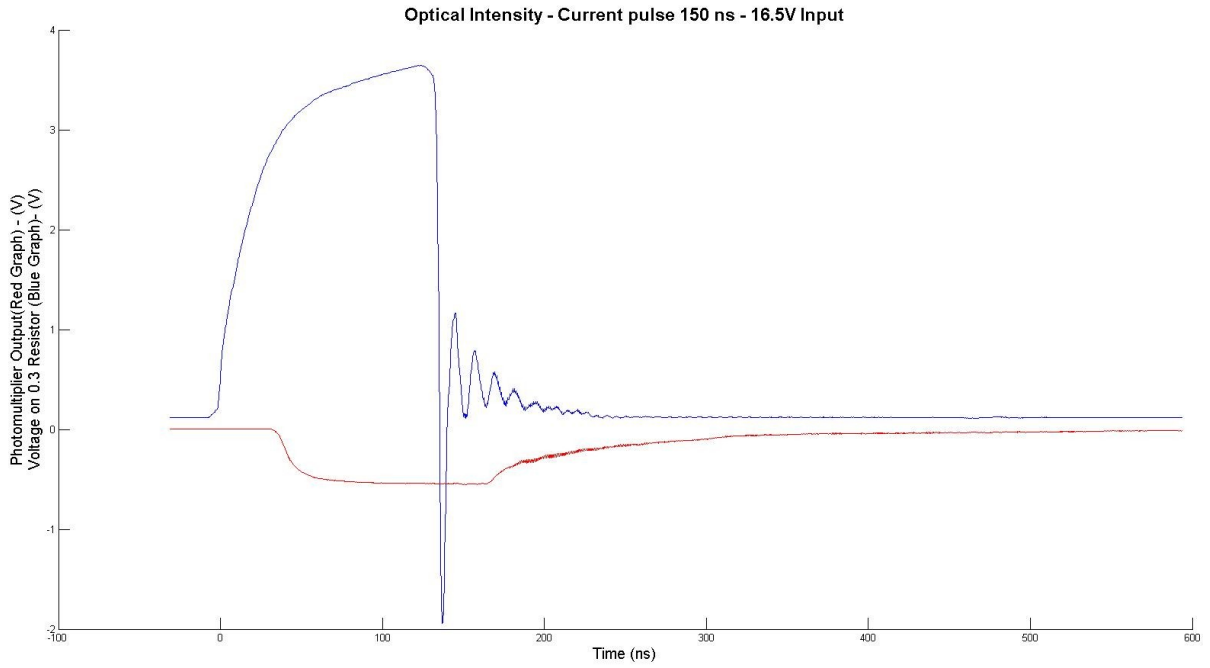
- Πλάτος παλμού:150ns  
Τάση εισόδου: 6.5V



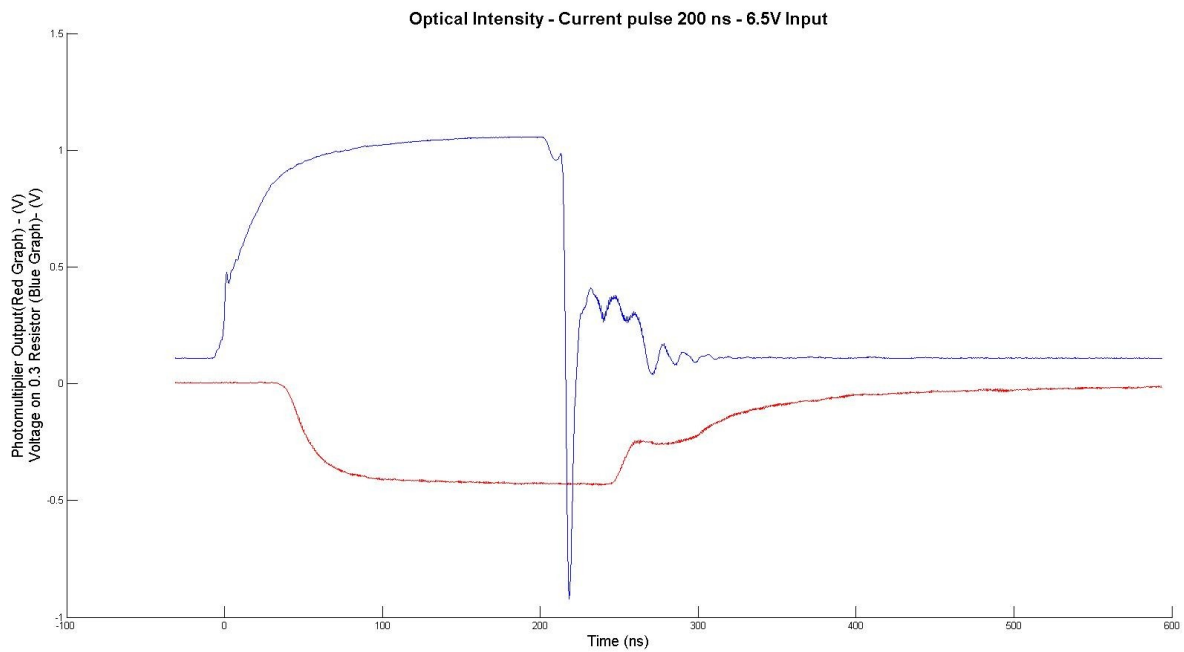
- Πλάτος παλμού:150ns  
Τάση εισόδου:8.5V



- Πλάτος παλμού: 150ns  
Τάση εισόδου: 16.5V

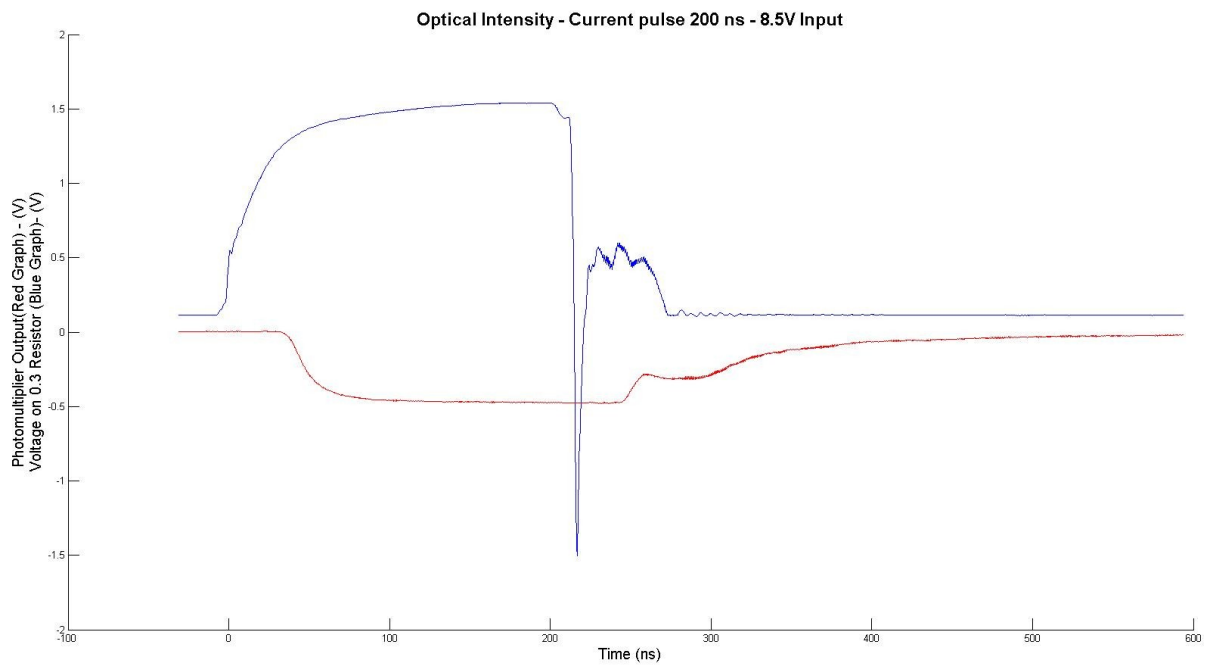


- Πλάτος παλμού: 200ns  
Τάση εισόδου: 6.5V



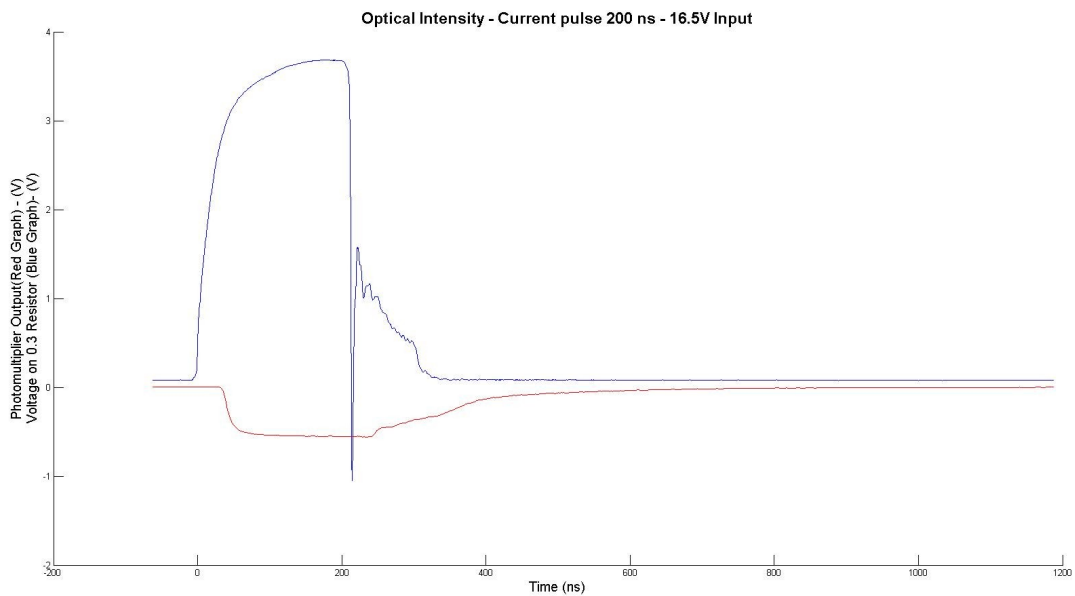
- Πλάτος παλμού: 200ns

Τάση εισόδου: 8.5V

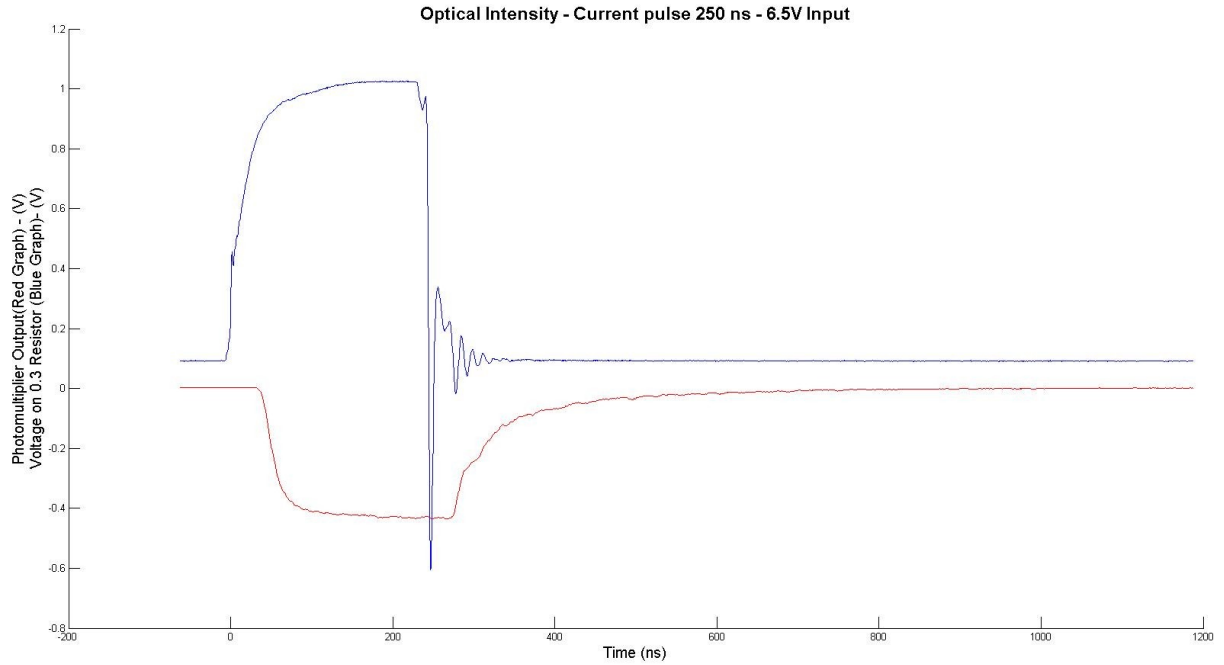


- Πλάτος παλμού: 200ns

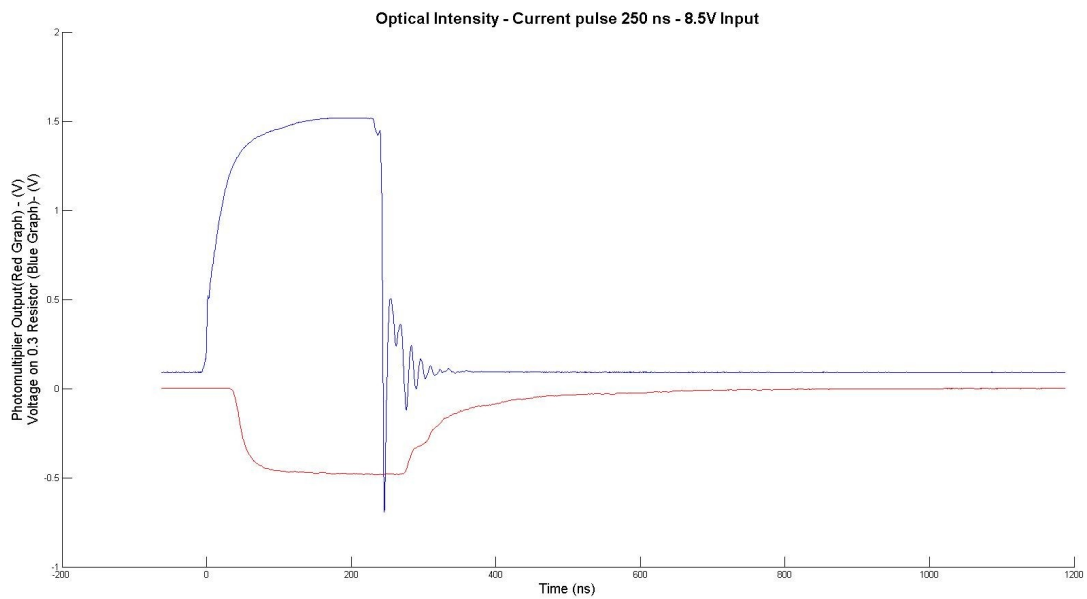
Τάση εισόδου: 16.5V



- Πλάτος παλμού: 250ns  
Τάση εισόδου: 6.5V

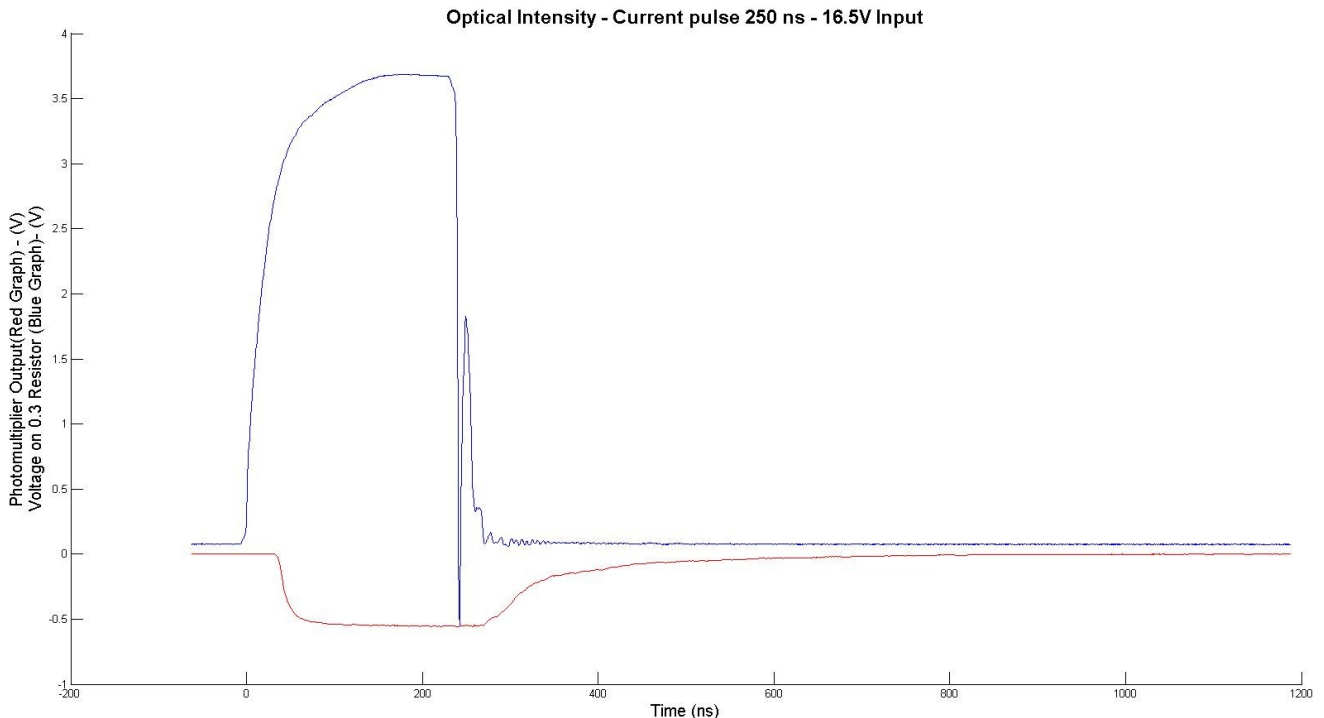


- Πλάτος παλμού: 250ns  
Τάση εισόδου 8.5V





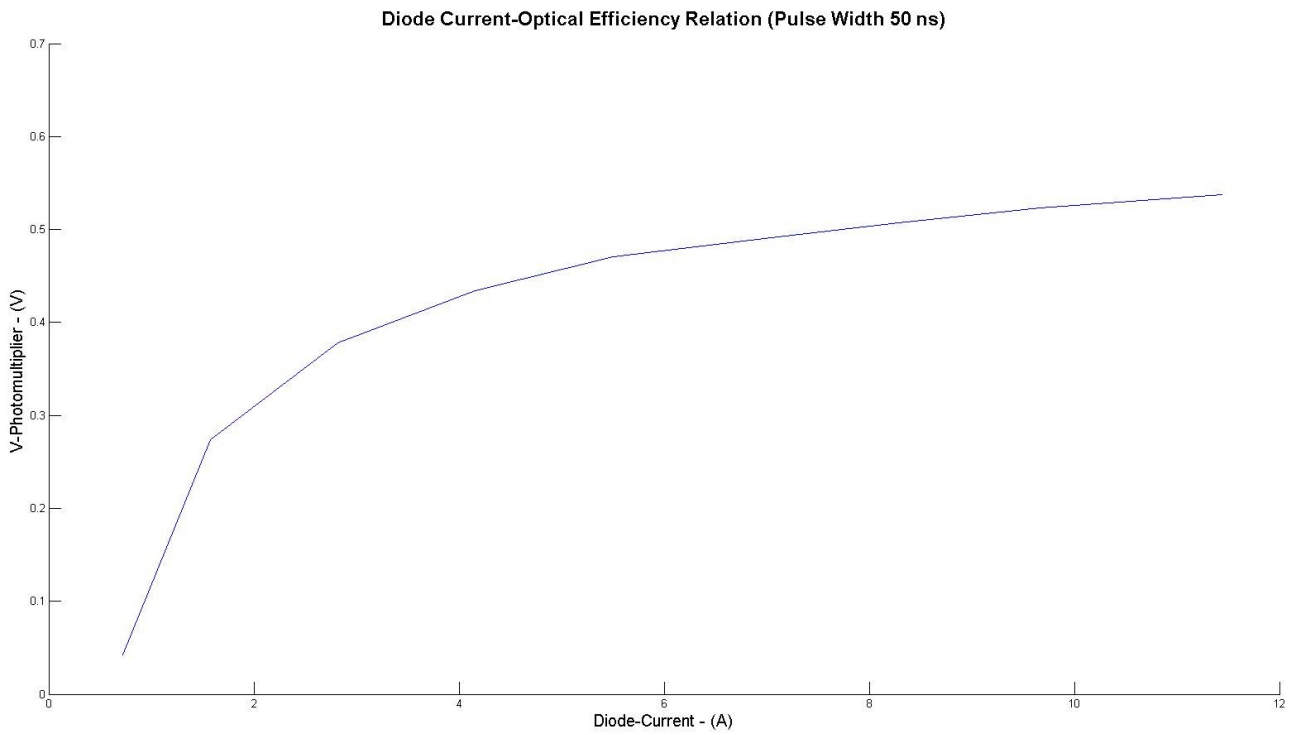
- Πλάτος παλμού: 250ns  
Τάση εισόδου: 16.5V



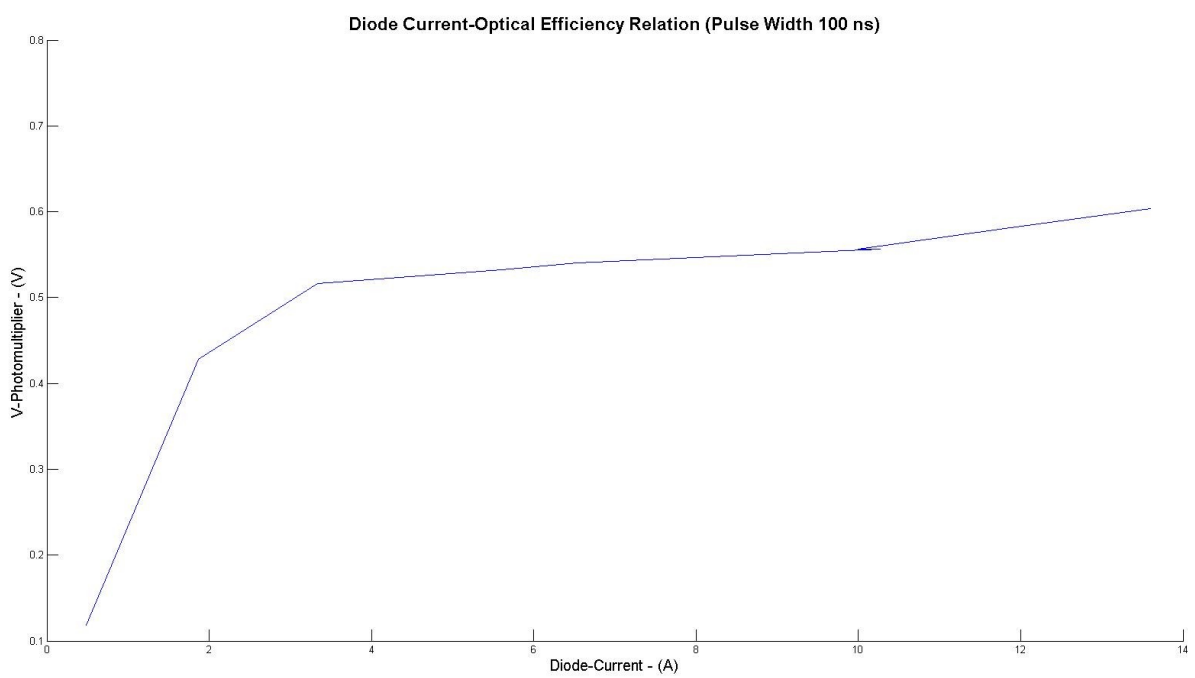
Παρατηρώντας τις κυματομορφές αυτές θα δούμε ότι υπάρχει μια περιοχή μέχρι τα 8V (τάση που ρυθμίζουμε στο τροφοδοτικό) κατά την οποία η φωτεινή απόκριση της διόδου είναι αυξανόμενη (ανεξάρτητα από το πλάτος του παλμού εισόδου) ενώ στη συνέχεια η απόκριση αυτή παραμένει αμετάβλητη όσο και να αυξήσουμε την τάση εισόδου (και συνεπώς το ρεύμα που διαρρέει τη διόδο). Έχουμε δηλαδή αύξηση του ρεύματος διόδου χωρίς ταυτόχρονη αύξηση της φωτεινότητας, κάτι που **θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε ως φωτεινό κορεσμό**. Επιπλέον παρατηρούμε πως έχουμε μια αρκετά σημαντική ταλάντωση μετά τον κύριο παλμό κάτι που θα μπορούσαμε να αποφύγουμε (με μια πιο προσεκτική τοποθέτηση των στοιχείων στο κύκλωμα της διόδου) αλλά δεν προκαλεί κάποια σημαντική αλλαγή στην απόκρισή μας.

Στη συνέχεια παρατίθενται μια σειρά από κυματομορφές στις οποίες προσπαθήσαμε να κάνουμε πιο σαφή και διακριτή αυτή την παρατήρηση μέσω των καμπυλών  $V_{out}$  (απόκριση) –  $I_{\text{διόδου}}$  σε κάθε ένα από τα πλάτη των παλμών καθώς και σε όλες τις τιμές τάσεων εισόδου που προαναφέρθηκαν.

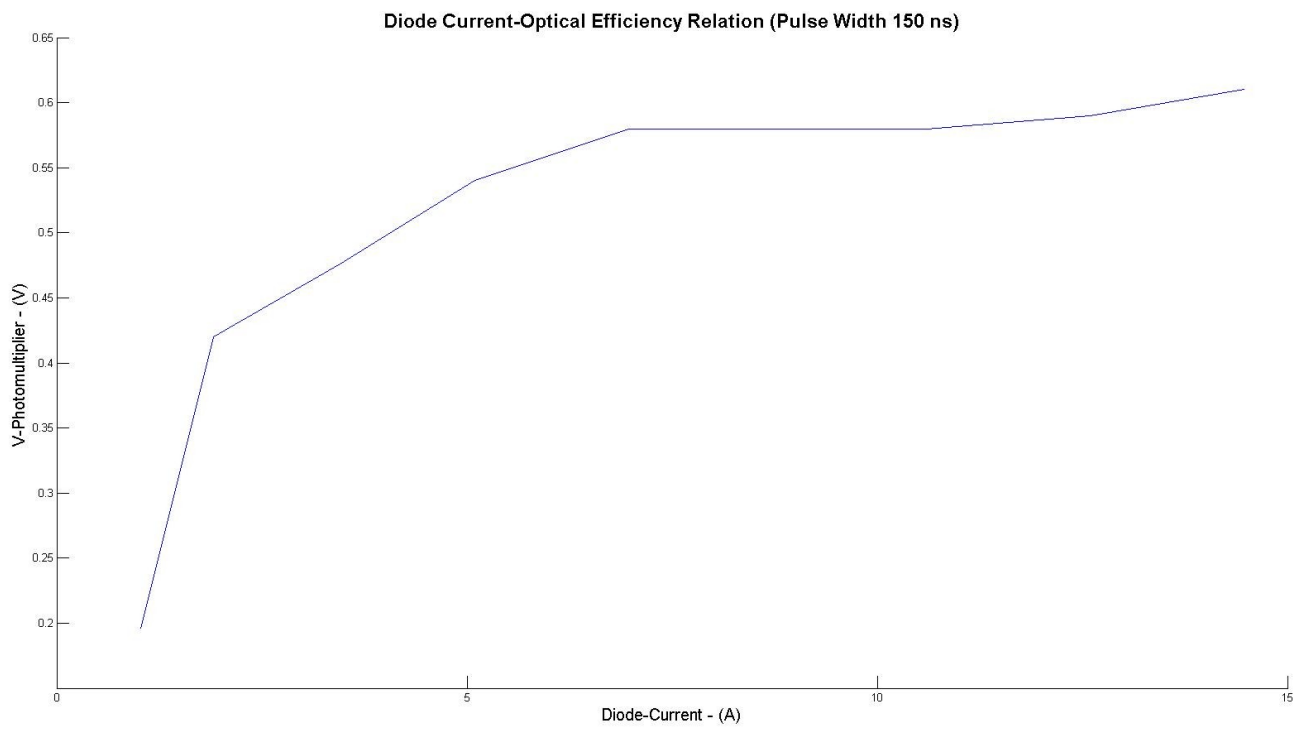
- Πλάτος παλμού:50ns



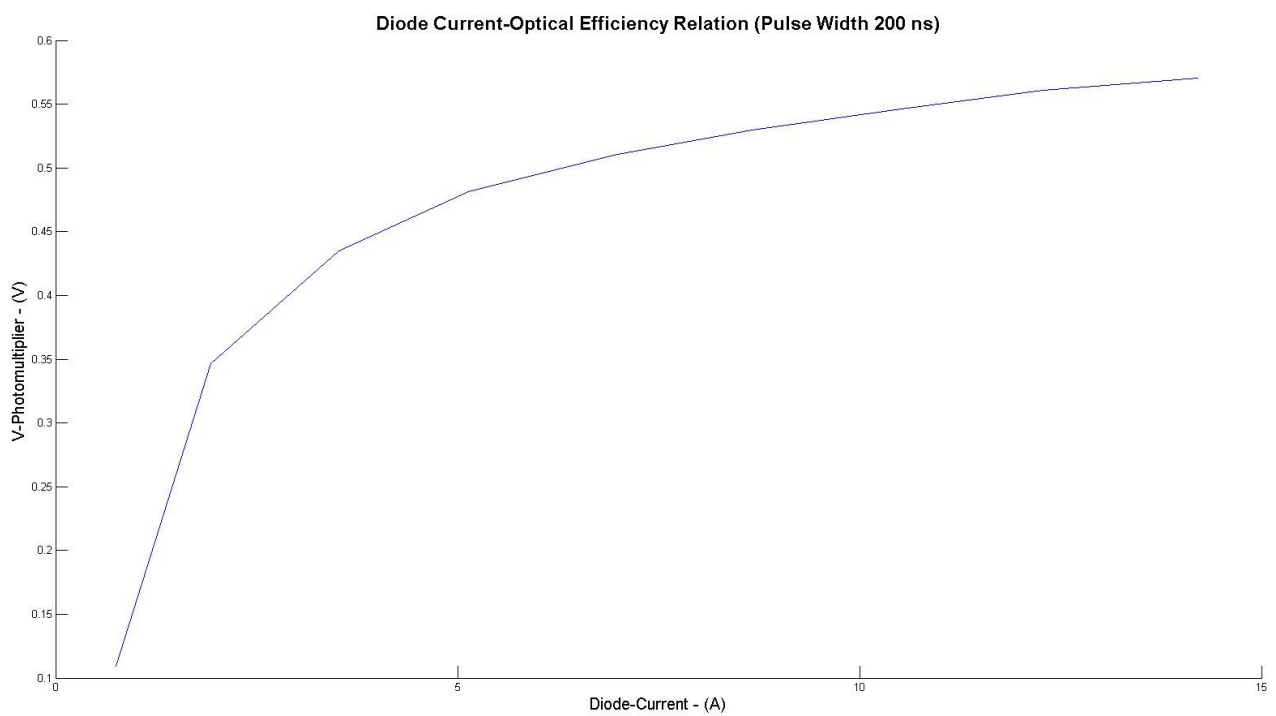
- Πλάτος παλμού:100ns



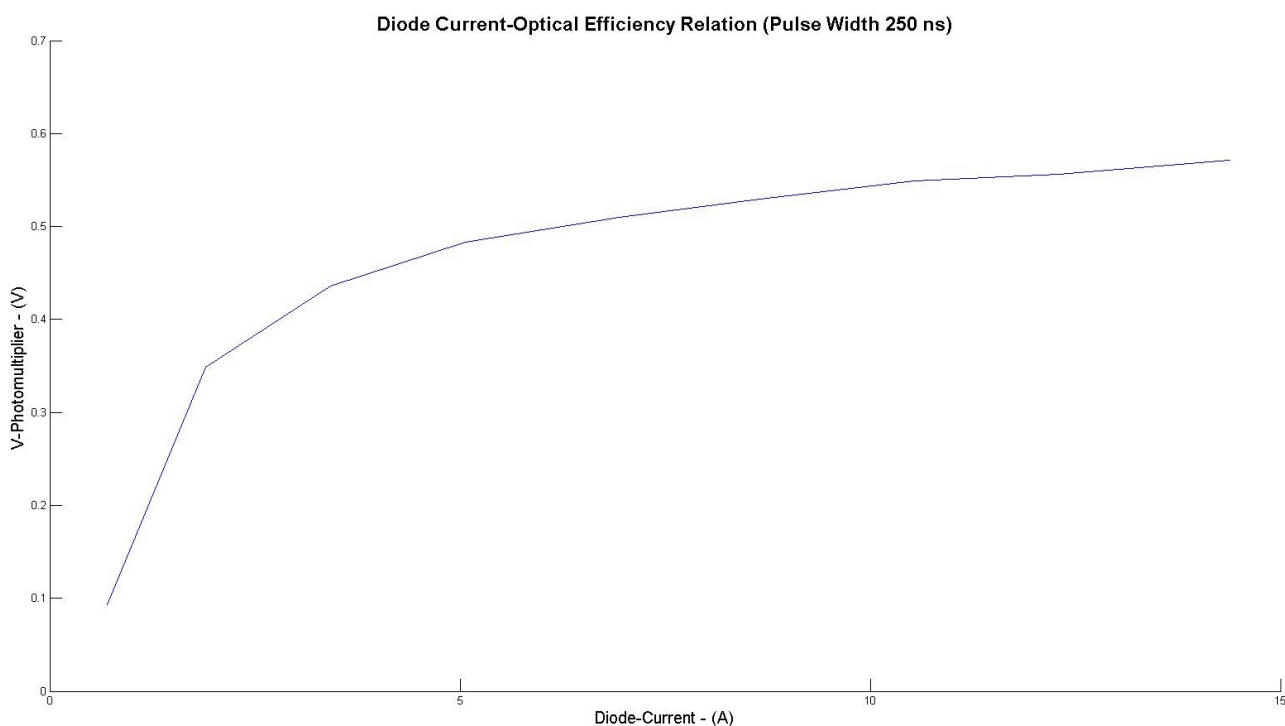
- Πλάτος παλμού:150ns



- Πλάτος παλμού:200ns



- Πλάτος παλμού:250ns



Συνεπώς, εδώ, το φαινόμενο αυτό του φωτεινού κορεσμού μπορούμε να το διακρίνουμε πιο εύκολα. Επιπλέον κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και ενώ παρατηρήσαμε τη συμπεριφορά αυτή, χρησιμοποιήσαμε φίλτρο που μειώνει την ένταση της ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει στο φράγμα περίθλασης έτσι ώστε να εξετάσουμε αν ο κορεσμός οφειλόταν στο φωτοπολλαπλασιαστή. Και εδώ είχαμε όμοια αποτελέσματα ενώ η μόνη διαφοροποίηση αφορούσε στην απόκριση λόγω της μειωμένης έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι δεν ήταν ο φωτοπολλαπλασιαστής που έφτασε σε κορεσμό.

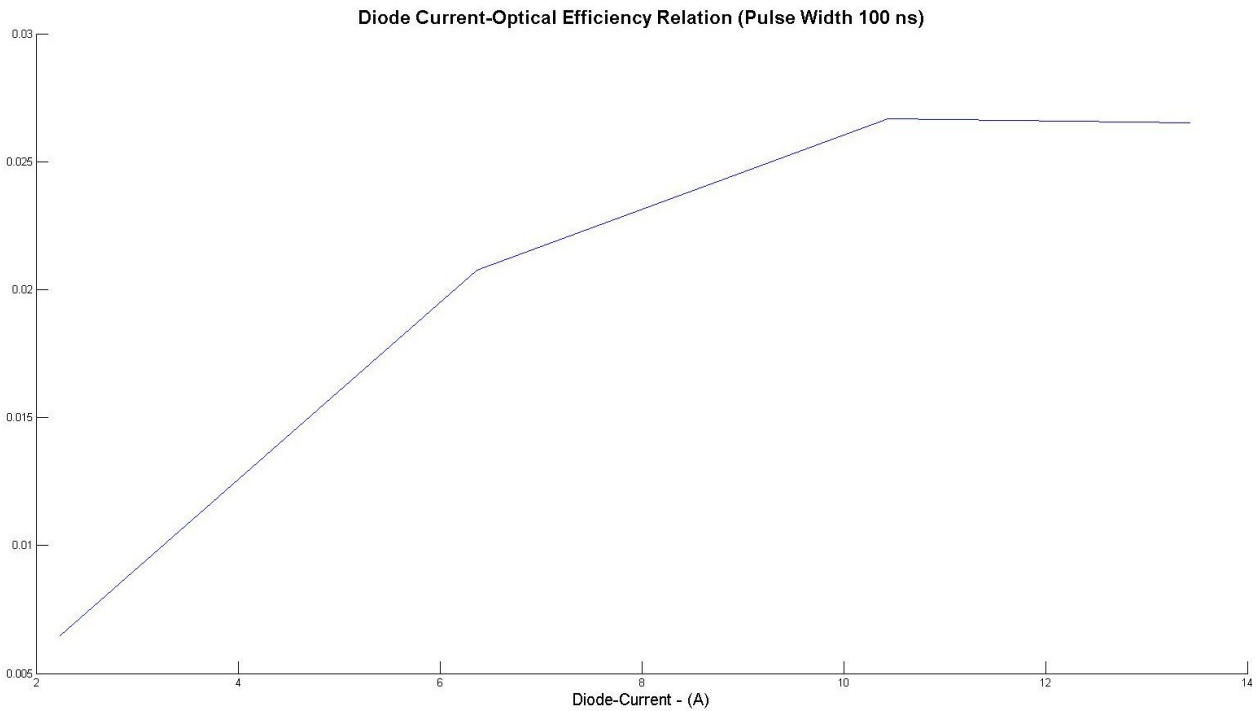
Με βάση την ανάλυση που έγινε νωρίτερα και για το φωτοπολλαπλασιαστή αλλά και για τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης, μπορούμε να πούμε ότι ο κορεσμός αυτός έχει να κάνει με την ίδια τη δίοδο, την ίδια τη φυσική του υλικού και της συμπεριφοράς του υπο τέτοιες συνθήκες, ενώ δεν μπορούμε να δώσουμε μια σαφή εξήγηση για την εμφάνισή του. Είναι ένα θέμα το οποίο χρειάζεται περαιτέρω μελέτη. Θεωρητικά υπάρχουν φαινόμενα τα οποία θα μπορούσαν έως ένα σημείο να εξηγήσουν μια μη γραμμική μεταβολή της φωτεινής απόκρισης σε σχέση με το ρεύμα της δίοδου όπως είναι για παράδειγμα η δημιουργία φωνονίου ή

επανασύνδεση Auger. Όμως στη δική μας περίπτωση , τα συγκεκριμένα φαινόμενα δε μπορούν να μας δώσουν σαφή εξήγηση.

Μετρήσεις γίνανε και με τη βοήθεια φωτοδιόδου (Εικ. 6.5), την απόκριση της οποίας παρατηρήσαμε στον παλμογράφο ενώ τα αποτελέσματα φαίνονται στη συνέχεια (καμπύλη  $V_{\text{φωτοδιόδου}} - I_{\text{LED}}$ , Εικ. 6.6). Η φωτοδίοδος τοποθετήθηκε σε πολύ μικρή απόσταση απο τη δίοδο (<1cm) όμως λόγω του οτι η ευαισθησία της φωτοδιόδου είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με αυτή του φωτοπολλαπλασιαστή, το σήμα στην έξοδο είχε σημαντικές αποκλίσεις όσον αφορά τις τιμές του σε σχέση με αυτές που είχαμε μέσω της κύριας διάταξης. Παρατηρήσαμε όμως και σε αυτή την περίπτωση φωτεινό κορεσμό κάτι που επιβεβαιώνει τη συμπεριφορά της διόδου.



Εικ. 6.5



Εικ. 6.6 Χαρακτηριστική φωτεινής απόκρισης φωτοδιόδου-ρεύματος διόδου

Μία πολύ βασική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε, είναι πως μέσω τροφοδότησης της διόδου εκπομπής φωτός με παλμούς της τάξης των nanosecond, και συγκεκριμένα απο 50ns-250ns, κατορθώσαμε τη λειτουργία αυτής σε υπερ-υψηλές τιμές ρεύματος, **μεγαλύτερες των 14 A** κάτι που φαίνεται καθαρά και απο τις παραπάνω κυματομορφές, την ίδια στιγμή που η κατασκευάστρια εταιρία δίνει το **όριο αντοχής της διόδου στα 350mA**. Μπορούμε να πούμε πως τα όρια αυτά έχουν να κάνουν με τη θερμική καταπόνηση (και εν συνεχεία την καταστροφή) της διόδου σε συνεχές ρεύμα της συγκεκριμένης τάξης μεγέθους κάτι που εμείς αποφύγαμε μέσω του συγκεκριμένου κυκλώματος δημιουργίας των πολύ στενών παλμών

## **Κεφάλαιο 7.Συμπεράσματα**

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια να μελετηθεί η συμπεριφορά μιας διόδου εκπομπής φωτός ισχύος 1W (power LED) σε συνθήκες παλμικής τροφοδότησης (της τάξης των nanosecond) υπερυψηλών τιμών ρεύματος (εως και τιμές >14A) καθώς και η φωτεινή απόκριση αυτής, σε μια προσπάθεια να αξιοποιηθεί η συγκεκριμένη τεχνολογία στο κομμάτι της 3D απεικόνισης βιολογικών ιστών μέσω του φαινομένου του φθορισμού και της ανάλυσης αυτού μέσω των διαφόρων συστημάτων απεικόνισης που έχουν αναπτυχθεί ή και νέων που πιθανόν να αναπτυχθούν. Προέκυψαν τα εξής:

- Η δίοδος αποδείχθηκε ανθεκτική σε υπερ-υψηλές τιμές ρεύματος ενώ κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μόλις μια power LED. Οι τιμές ρεύματος (παλμών) ξεπέρασε σε πολλές περιπτώσεις τα 14 A με βάση και τα ονομαστικά μεγέθη του τροφοδοτικού που χρησιμοποιήσαμε, με μέγιστη τιμή τάσης εισόδου τα 18.5 V.
- Παρουσιάζεται φωτεινός κορεσμός όταν η τάση εισόδου φτάσει περίπου στα 8,5-9V. Δηλαδή, όσο και να αυξήσουμε παραπάνω το ρεύμα που διαπερνά τη δίοδο η φωτεινή απόκρισή της παραμένει στα ίδια επίπεδα.

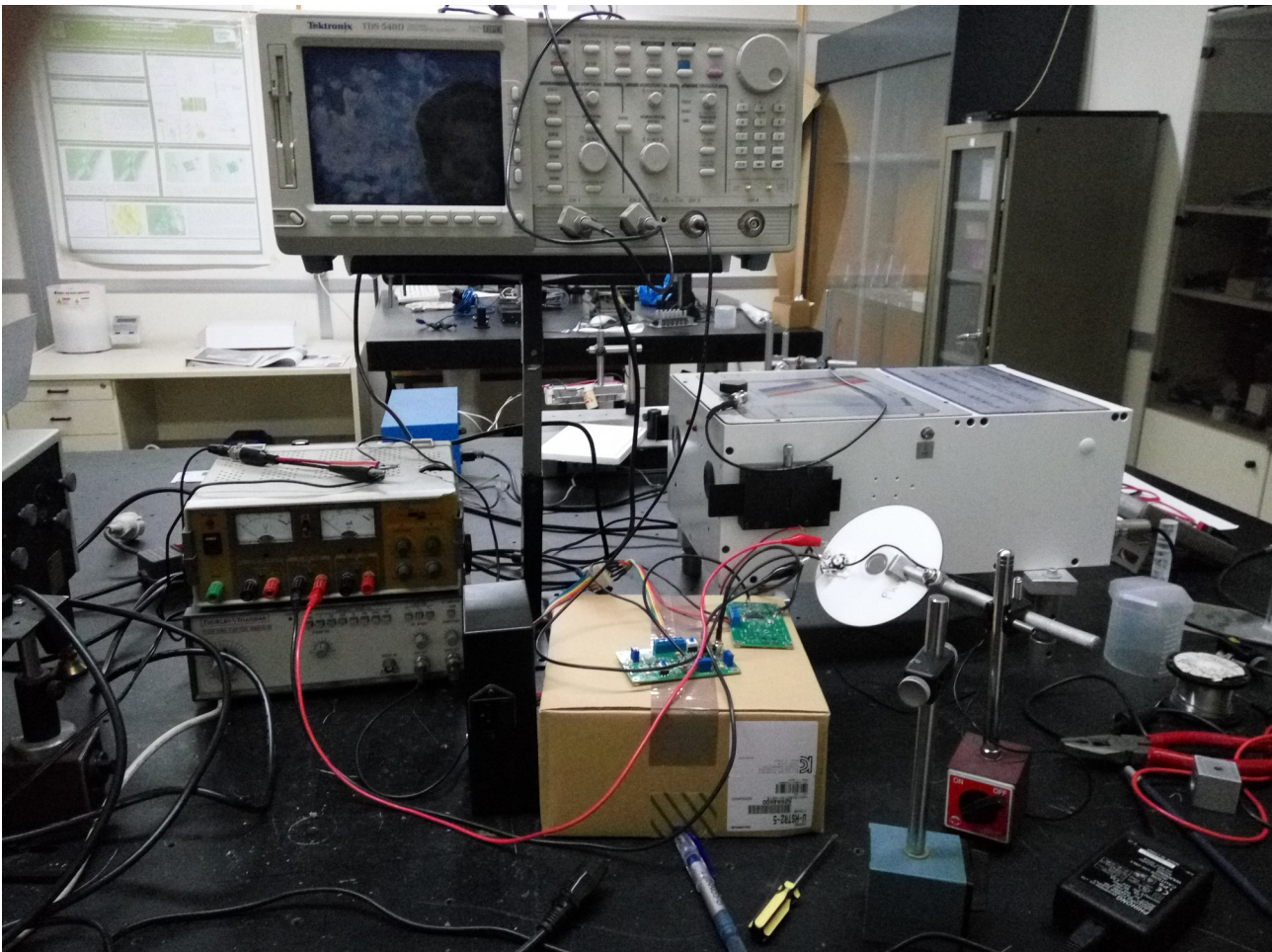
## **Κεφάλαιο 8.Περαιτέρω μελέτη-έρευνα**

Η δίοδος εκπομπής φωτός αποδείχθηκε, όπως είπαμε και προηγουμένως, ανθεκτική, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, και ταυτόχρονα ένα οικονομικό πειραματικό ή και αξιοποιήσιμο μέσο. Παρόλα αυτά θα πρέπει να υπάρξει παραπέρα μελέτη του φωτεινού κορεσμού που παρατηρήθηκε και αν το φαινόμενο αυτό εξελίσσεται με συγκεκριμένο τρόπο σε όλα τα μήκη κύματος ή αν παρουσιάζεται επιλεκτικά, και όχι μόνο σε αυτό που επιλέξαμε εμείς με δεδομένο ότι το πείραμα βασίστηκε στο “φιλτράρισμα” της ακτινοβολίας από το φράγμα περίθλασης μιας και η ακτινοβολία της διόδου δεν είναι μονοχρωματική (το μήκος κύματος στη συγκεκριμένη μπορεί να πάρει τιμές από 613-631 nm). Με δεδομένο ότι το laser βασίζεται στην ίδια τεχνολογία όμως πλεονεκτεί σε σχέση με τη δίοδο διότι παράγει μονοχρωματική ακτινοβολία, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια πειραματική διαδικασία προς μελέτη του φαινομένου του κορεσμού.

Δοκιμές επίσης θα μπορούσαν να γίνουν με τη βοήθεια κυκλώματος για να εξετάσουμε σε ποια επίπεδα τιμών παλμού ρεύματος  $>14A$  καταστρέφεται η LED ισχύος.

Επιπλέον θα πρέπει να μελετηθεί και η συμπεριφορά όπως και τα επίπεδα αντοχής της απλής διόδου εκπομπής φωτός, έτσι ώστε να παρατηρήσουμε τι συμβαίνει στην περίπτωση που υψηλές τιμές ρεύματος αρχίσουν να διαρρέουν μια LED που δεν είναι ισχύος όπως η συγκεκριμένη αλλά και την απόκριση της.

Τέλος, παρακάτω φαίνεται η διάταξή μας.





## **Βιβλιογραφία**

1) “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων”, S.O.Kasap.

2)<http://www.physics.ntua.gr/~cchrist/SIMEIOSEIS/>

3) “Συνδυαστική Τρισδιάστατη Υπολογιστική Όραση και Απεικόνιση Φθορισμού για την Αξιολόγηση Καρκινικών Όγκων”, Δημητρίου Σ. Γκόρπα.

4) “Σχεδιασμός και κατασκευή κυκλώματος παλμών υψηλής ισχύος για τροφοδοσία laser”, Αναστάσιος Π. Γεωργακόπουλος.

5)[www.ucy.ac.cy/phy/documents/physics/](http://www.ucy.ac.cy/phy/documents/physics/)





