



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΗΠΕΙΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ
ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

**ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΕΚΤΗ
ΔΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ-ΔΙΔΑΣΚΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΛΑΜΠΡΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΚΟΡΜΑΝΙΩΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α.Μ. 3547**

ΑΡΤΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2006

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
2. Υλικά συστήματα φωρατών	5
2.1. Εφαρμογές επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων	5
2.2. Τοπικά δίκτυα	6
2.3. Φώραση μεγάλων μηκών κύματος	6
2.4. Φωρατές υψηλής ταχύτητας.....	6
3. Οπτικές διεργασίες σε ημιαγωγούς και ημιαγωγικές διατάξεις	8
3.1. Φωτοαγωγιμότητα	8
3.2. Φωτοαντιστάσεις	9
3.3. Φωταύγεια	9
3.4. Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	11
4. Εισαγωγή στους οπτικούς δέκτες	13
5. Σχεδίαση φωτοανιχνευτή	15
5.1. Εισαγωγή.....	15
5.2. Φωτοδίοδοι p-n	16
5.3. Φωτοδίοδοι p-i-n	18
5.3.1. Επιλογή υλικού και απόκριση συχνοτήτων ενός p-i-n φωρατή	23
5.4. Φωτοδίοδοι χιονοστοιβάδας (Avalanche photodetector) ...	24
5.4.1. Σχεδιαστικά θέματα APD.....	26
5.5. Φωρατές μετάλλου - ημιαγωγού	29
5.5. Φωρατές MSM.....	31
5.6.1. Φωρατές MSM σε συστήματα GaAs & InGaAs.....	32
6. Σχεδίαση του δέκτη	35
6.1. Εισαγωγή.....	35
6.2. Είσοδος του δέκτη ή κυκλώματα εισόδου	36
6.3. Γραμμικό κανάλι	36
6.4. Ανάκτηση δεδομένων	37
6.5. Ολοκληρωμένοι δέκτες	39
6.6. Θόρυβος δέκτη	43
6.6.1. Μηχανισμοί θορύβου	43
6.6.1.1. Θόρυβος βολής.....	43
6.6.1.2. Θερμικός θόρυβος.....	43
6.6.2. Δέκτες p-i-n	44
6.6.2.1. Όριο θερμικού θορύβου	44

6.6.2.2. Όριο θορύβου βολής	44
6.6.3. Δέκτες APD	45
6.6.3.1. Ενίσχυση θορύβου βολής	45
6.7. Ευαισθησία δέκτη	45
6.7.1. Ρυθμός εσφαλμένων bit	46
6.8. Υποβάθμιση της ευαισθησίας	47
6.9. Απόδοση δέκτη	48
<i>Παρατημα1. Εργαστηριακή εφαρμογή</i>	<i>53</i>
<i>Παρατημα2. Διεθνές σύστημα μονάδων</i>	<i>55</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>56</i>

Αντί προλόγου...

Η παρούσα εργασία με θέμα «Μελέτη και κατασκευή οπτικού δέκτη δια ανιχνευτή αντιστάσεως» αποτελεί την πτυχιακή μου εργασία για το Εργαστήριο των Οπτικών Επικοινωνιών του τμήματος Τηλεπληροφορικής και Διοίκησης της Άρτας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Ηπείρου. Πρόκειται για την μελέτη της μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρικό παλμό μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Κίνητρο για την επιλογή του θέματος αποτέλεσαν οι ραγδαίες εξελίξεις που εμφανίστηκαν στην τεχνολογία επικοινωνίας με την χρήση οπτικών ινών τα τελευταία χρόνια.

Σκοπός της προσπάθειάς μου ήταν τόσο η ικανοποίηση της δικής μου θέλησης για περαιτέρω ενασχόληση με το θέμα, όσο και η επιθυμία μου να μοιραστώ τη γνώση αυτή με ανθρώπους που αγαπάνε το αντικείμενο της επικοινωνίας οπτικών ινών και θέλουν να μάθουν περισσότερα γι' αυτό.

Η εργασία αυτή είναι το αποτέλεσμα βιβλιογραφικής μελέτης και πειραματικών ασκήσεων. Η έρευνά μου ξεκίνησε από την Κεντρική Βιβλιοθήκη των Τ.Ε.Ι. Άρτας, όπου συνέλεξα σημαντικά στοιχεία, τα οποία αποτέλεσαν και την βάση της εργασίας μου. Η μελέτη μου συνεχίστηκε στα εργαστήρια Οπτικών Επικοινωνιών και Ηλεκτρονικής του τμήματος Τηλεπληροφορικής και Διοίκησης Άρτας όπου υλοποιήθηκε το πειραματικό μέρος της εργασίας. Το βιβλιογραφικό κομμάτι συνεχίστηκε και τελείωσε σε βιβλιοθήκες της Θεσσαλονίκης, όπως στην Βιβλιοθήκη του τμήματος Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ. και στην Δημοτική Βιβλιοθήκη του δήμου Θεσσαλονίκης.

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της προσπάθειας, που ελπίζω να ικανοποιήσει τους αναγνώστες της, νιώθω την ανάγκη, αλλά και την υποχρέωση, να ευχαριστήσω τους ανθρώπους, των οποίων η βοήθειά υπήρξε καθοριστική για την εξέλιξη της εργασίας μου. Πρώτα από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον καθηγητή του τμήματος Τηλεπληροφορικής και Διοίκησης του Τ.Ε.Ι. Άρτας και επιβλέπων καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Λάμπρου Κωνσταντίνο για την καθοδήγησή του και τις πολύτιμες συμβουλές του καθώς και για το πραγματικό ενδιαφέρον που έδειξε κατά την διάρκεια της μελέτης μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω επίσης και στον καθηγητή του τμήματος Τηλεπληροφορικής και Διοίκησης κ. Δρούγα Βασίλειο ο οποίος μου πρόσφερε αφειδώς την βοήθειά του όποτε του το ζήτησα. Επιπρόσθετα, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, κ. Τουτουτζόγλου Χρυσόστομο, για τις πολύ χρήσιμες πληροφορίες και συμβουλές του σε θέματα ηλεκτρονικής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν στην προσπάθεια αυτή και ιδιαίτερα την οικογένειά μου που, όπως κάθε φορά, μοιράστηκε μαζί μου την κούραση και την αγωνία μου, αλλά και την συμφοιτήτρια και φίλη μου Αρζόγλου Ευθυμία-Σουλτάνα για την άμεση ανταπόκρισή της σχετικά με τα στοιχεία που της ζήτησα.

Κορμανιώτης Γεώργιος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των οπτικών ινών στην μετάδοση πληροφοριών διαδόθηκε σημαντικά κατά την δεκαετία του 1980, όπως αποδεικνύει η εγκατάσταση δικτύων επικοινωνίας οπτικών ινών σε ολόκληρο τον κόσμο. Επίσης, , απόδειξη αποτελεί και η ανάπτυξη υποθαλάσσιων καλωδίων που διασχίζουν τόσο τον Ατλαντικό όσο και τον Ειρηνικό Ωκεανό. Ο ρυθμός της τεχνολογικής ανάπτυξης στον σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας οπτικών ινών ήταν ραγδαίος κατά την δεκαετία του 1980. Η τάση αυτή συνεχίστηκε και κατά την δεκαετία του 1990, όπως φαίνεται από την βαρύτητα που δίνεται στις μέρες μας στην έρευνα και ανάπτυξη πολυκάναλων φωτεινών συστημάτων, ενισχυτών οπτικών ινών εμπλουτισμένους με έρβιο, και τα συστήματα επικοινωνίας σολιτονίων. Ένα παράδειγμα, του κατά πόσο η τεχνολογία φωτεινών συστημάτων επηρεάζει την σύγχρονη κοινωνία, αποτελεί η χρήση οπτικών ινών στην βιομηχανία της καλωδιακής τηλεόρασης, για διανομή της αναλογικής εικόνας video μέσω μιας τεχνικής γνωστής σαν *πολυπλεξία υπο-φέροντος*. Αυτή η αντικατάσταση των ομοαξονικών καλωδίων από τις οπτικές ίνες μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα της μετάδοσης κατά μία τάξη μεγέθους ή και περισσότερο, κάνοντας δυνατή την μετάδοση εκατοντάδων καναλιών εικόνας video σε κάθε συνδρομητή. Επίσης μας δίνει την δυνατότητα να μεταβούμε από την αναλογική στην ψηφιακή εικόνα video, και τελικά στην τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας. Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελούν τα ψηφιακά δίκτυα ολοκληρωμένων υπηρεσιών ευρείας ζώνης, τα οποία αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών. Πράγματι, τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών μπορούν να θεωρηθούν σαν αναπόσπαστο τμήμα της σύγχρονης εποχής πληροφοριών.

Ένα σύστημα επικοινωνίας μεταδίδει πληροφορίες από μια θέση σε μία άλλη, που απέχει απόσταση μερικών χιλιομέτρων ή χιλιάδων χιλιομέτρων.

Η πληροφορία συχνά μεταφέρεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό φέρον κύμα, του οποίου η συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται από μερικά MHz μέχρι αρκετές εκατοντάδες THz. Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες φέροντος (~100 THz) στην περιοχή του ορατού του εγγύς υπέρυθρου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτά μερικές φορές ονομάζονται και συστήματα οπτικών κυμάτων για να τα διακρίνουν από τα μικροκυματικά συστήματα, στα οποία η συχνότητα του φέροντος είναι τυπικά πέντε τάξεις μεγέθους μικρότερη (~1GHz).

Τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών είναι συστήματα οπτικών κυμάτων που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για μετάδοση της πληροφορίας. Τέτοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί ευρήτα από το 1980 όπως αναφέρθηκε παραπάνω και έχουν φέρει επανάσταση στην τεχνολογία των επικοινωνιών. Πράγματι, η τεχνολογία των οπτικών σημάτων, μαζί με την Μικροηλεκτρονική, πιστεύεται ότι είναι οι μεγαλύτεροι παράγοντες στην άφιξη της "εποχής της πληροφορίας".

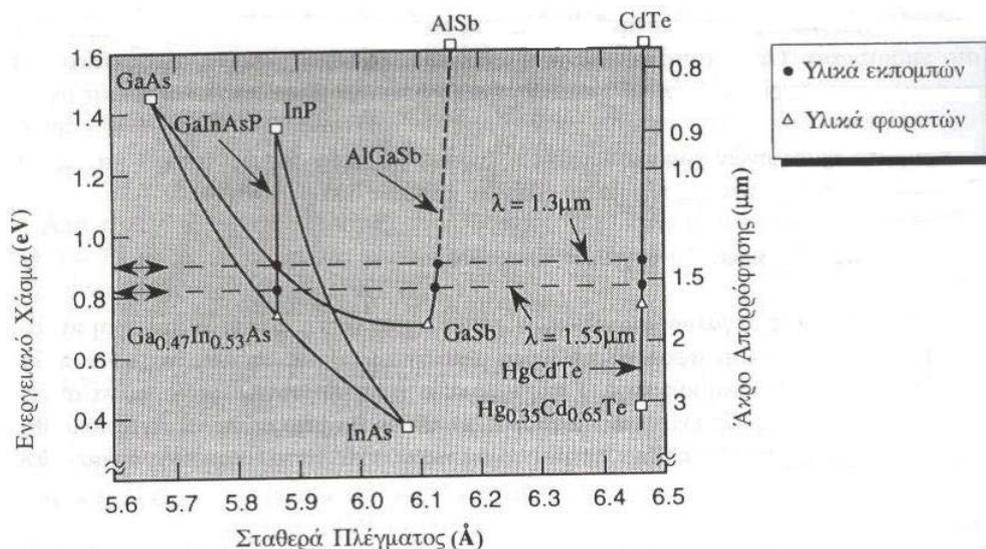
2. ΥΛΙΚΑ ΣΤΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΡΑΤΩΝ

2.1 Εφαρμογές Επικοινωνιών Μεγάλων Αποστάσεων

Για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, χρησιμοποιούνται φωτόνια με μήκη κύματος 1.55 μm ή 1.3 μm αφού οι απώλειες μετάδοσης σε μία οπτική ίνα είναι πολύ μικρές σε αυτά τα μήκη κύματος. Ένας φωρατής χρησιμοποιείται έτσι για να ανταποκρίνεται σε αυτές τις ενέργειες. Καθάρά το GaAs θα μπορούσε να ανταποκριθεί σε αυτές τις ενέργειες φωτονίων επειδή το μήκος κύματος του αποκοπής είναι $\sim 0.8\mu\text{m}$.

Ανάμεσα στους σύνθετους ημιαγωγούς, τα συστήματα κραμάτων InGaAs, InGaAsP, GaAlSb, HgCdTe, μπορούν όλα να προσαρμοστούν ώστε να ανταποκρίνονται σε αυτές τις ενέργειες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Τα υλικά με δυνατότητα για εκπομπή στα 1.55 μm και 1.3 μm (δηλ., το E_g αντιστοιχεί σε αυτά τα μήκη κύματος) φαίνονται στο σχήμα. Το ενεργειακό χάσμα του φωρατή θα πρέπει να είναι λίγο χαμηλότερο από την ενέργεια του φωτονίου έτσι ώστε ο συντελεστής απορρόφησης να είναι σημαντικός. Το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο υλικό είναι το $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ προσαρμοσμένο στο πλέγμα του InP για επικοινωνίες μεγάλης απόστασης. Αυτό το υλικό έχει ώριμη τεχνολογία, μερικώς επειδή χρησιμοποιείται επίσης για διαμόρφωση υψηλής συχνότητας εμπλουτισμένου τρανζίστορ φαινομένου πεδίου.

Επιπλέον των σύνθετων ημιαγωγών, το Ge χρησιμοποιείται επίσης για επικοινωνίες μεγάλης απόστασης. Αυτός ο φωρατής χρησιμοποιείται σαν φωρατής χιονοστοιβάδας για να βελτιώσει την απολαβή της συσκευής.



Σχήμα 2.1 Ενεργειακό χάσμα σε συνάρτηση με την σταθερά πλέγματος για μερικούς σημαντικούς σύνθετους ημιαγωγούς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. (Από *Semiconductors and Semimetals*, Vol.22, ed. W.T. Tsang, Academic Press, New York (1985).)

2.2 Τοπικά Δίκτυα

Στα τοπικά δίκτυα (LANs) όπου το οπτικό σήμα πρέπει να διαδοθεί περίπου ένα χιλιόμετρο, χρησιμοποιούνται πομποί βασισμένοι σε GaAs. Αυτές οι συσκευές εκπέμπουν σε $\sim 0.8\mu\text{m}$ και είναι πολύ φθηνότερες από τις συσκευές που εκπέμπουν στα $1.55\mu\text{m}$ και $1.3\mu\text{m}$.

Οι φωρατές σύνθετων ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για LAN, αλλά το Si σχηματίζει ένα καλό υλικό για φωρατή. Φωτοδίοδοι χιονοστοιβάδας από Si χρησιμοποιούνται ευρέως για εφαρμογές LAN.

2.3 Φώραση Μεγάλων Μηκών Κύματος

Μια σημαντική εφαρμογή φωρατών είναι στην περιοχή της θερμικής απεικόνισης για νυχτερινή όραση ή για διαγνωστική ιατρική. Η περιοχή ενδιαφέροντος ποικίλλει σε μήκη κύματος που φτάνουν μέχρι και τα $20\mu\text{m}$. Φωρατές για τέτοιες εφαρμογές πρέπει να είναι βασισμένοι σε υλικά πολύ στενού ενεργειακού χάσματος, σε εξωγενείς στάθμες ατελειών ή σε αρχές ετεροδομών. Ανάμεσα στα υλικά στενού ενεργειακού χάσματος σημαντικές επιλογές είναι κράματα από HgCdTe, PbTe, PbSe, InSb. Εξωγενείς φωρατές που βασίζονται στο Si και στο Ge εμπλουτισμένοι με προσμίξεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

Μια σημαντική περιοχή εφαρμογών των κβαντικών φρεάτων είναι στην περιοχή των φωρατών δια-υποζωνών. Η τεχνολογία GaAs/AlGaAs μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τέτοιους φωρατές.

2.4 Φωρατές Υψηλής Ταχύτητας

Μια σημαντική πρόοδος στην απόκριση φωρατή υψηλής ταχύτητας είναι η πρόσφατη ανακάλυψη "GaAs χαμηλής θερμοκρασίας". Αυτό το υλικό αναπτύσσεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες υποστρώματος όπου ένας μεγάλος αριθμός ατελειών ενσωματώνονται στο υλικό. Αυτές οι ατέλειες μειώνουν τον χρόνο επανασύνδεσης ηλεκτρονίων-οπών σε $\sim 1\text{ps}$ σε αντίθεση με το $\sim 1\text{ns}$ του υψηλής ποιότητας GaAs. Ο πολύ υψηλός χρόνος απόκρισης οδηγεί σε οπτικά συστήματα φώρασης υψηλής ταχύτητας.

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται μια σύντομη περίληψη των διαφορετικών υλικών συστημάτων και τις κύριες ιδιότητές τους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωρατές.

InGaAs (Ρυθμιζόμενο E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαιρετικό υλικό για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων (στα 1.55 μm) • Μπορεί να προσαρμοστεί πλεγματικά με το InP
AlGaSb (Ρυθμιζόμενο E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαιρετικές Οπτικές Ιδιότητες • Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων • Φτωχή διαθεσιμότητα υποστρώματος, αφού πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε GaSb, του οποίου η τεχνολογία δεν είναι ώριμη
InGaAsP (Ρυθμιζόμενο E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για εφαρμογές στα 1.55μm και στα 1.33μm για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων • Μπορεί να προσαρμοστεί πλεγματικά σε εφαρμογές InP
HgCdTe (Ρυθμιζόμενο E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαιρετικό υλικό για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων σε νυχτερινή όραση και θερμική απεικόνιση • Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα 1.55μm και στα 1.33μm αλλά η τεχνολογία δεν είναι τόσο εξελιγμένη όσο η τεχνολογία σε InP
Si ($E_g = 1.1 \text{ eV}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Έμμεσο υλικό με μικρό σ κοντά στο άκρο ζώνης • Έχει μεγάλο $\beta_{\text{imp}}/\sigma_{\text{imp}}$ λόγο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φωτοδιόδους χιονοστοιβάδας υψηλών επιδόσεων για εφαρμογές τοπικών (LAN) δικτύων • Δεν είναι κατάλληλο για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων σε $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ ή $1.33\mu\text{m}$
Ge ($E_g = 0.7 \text{ eV}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Έμμεσο υλικό με μικρό σ κοντά στο άκρο ζώνης • Έχει μεγάλο $\beta_{\text{imp}}/\sigma_{\text{imp}}$ λόγο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φωτοδιόδους χιονοστοιβάδας υψηλών επιδόσεων για εφαρμογές τοπικών (LAN) δικτύων και για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων
GaAs ($E_g = 1.43 \text{ eV}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό άμεσου χάσματος • Μη κατάλληλο για φωρατές χιονοστοιβάδας αφού $\beta_{\text{imp}} \approx \sigma_{\text{imp}}$

Πίνακας 2.1 Σημαντικά συστήματα αγωγών για φωρατές

3. Οπτικές διεργασίες σε ημιαγωγούς & ημιαγωγικές διατάξεις

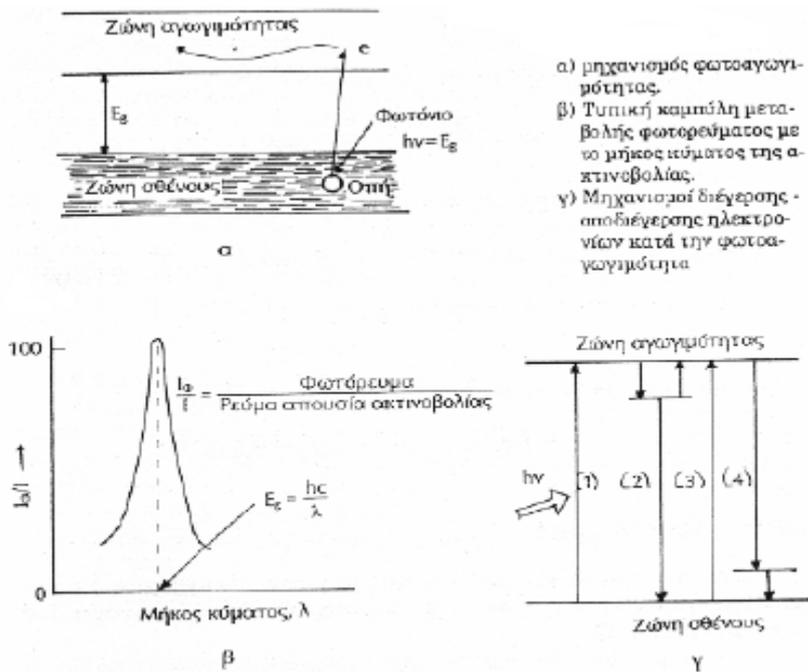
3.1 Φωτοαγωγιμότητα

Φωτοαγωγιμότητα είναι η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ημιαγωγού λόγω απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με ενέργεια $E=hf$ μεγαλύτερη είτε ίση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Η απορρόφηση ακτινοβολίας προκαλεί διέγερση ηλεκτρονίων από την ταινία σθένους στην ταινία αγωγιμότητας με αποτέλεσμα την δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων οπών. Η φωτοαγώγιμη συμπεριφορά των ημιαγωγών καθορίζεται από το ρυθμό με τον οποίο δημιουργούνται τα ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων - οπών και το χρόνο ζωής τους. Η δημιουργία ελεύθερων φορέων αγωγιμότητας εξαρτάται από το μήκος κύματος, και την ένταση της ακτινοβολίας. Ο χρόνος ζωής των ελεύθερων φορέων είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη δημιουργία ενός ζεύγους μέχρι την επανασύζευξη του. Οι πιθανοί μηχανισμοί επανασύζευξης των ελεύθερων φορέων δίνονται διαγραμματικά στο σχήμα 3.1

- ▶ (1) Μηχανισμός απ' ευθείας διέγερσης από τη ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας.
- ▶ (2) Η επανασύζευξη των ηλεκτρονίων - οπών γίνεται με απ'ευθείας αποδιέγερση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους οπότε ο χρόνος ζωής τους είναι μικρός.
- ▶ (3) & (4) Η αποδιέγερση των ηλεκτρονίων γίνεται δια μέσου ενεργειακών επιπέδων που εισάγονται από κατάλληλη πρόσμειξη. Με τους μηχανισμούς αυτούς η επανασύζευξη ηλεκτρονίων-οπών καθυστερεί με αποτέλεσμα ο χρόνος ζωής τους να είναι μεγαλύτερος.

Τα κυριότερα φωτοαγώγιμα υλικά είναι:
Si, Ge, ZnS, CdS, PbS, PbSe, CdSe, Bi₂S₃, SiC

Οι βασικές εφαρμογές της φωτοαγωγιμότητας είναι:
φωτοαντιστάσεις, φωτοδιόδοι, φωτοτρανζίστορ, φωτο-στοιχεία (φωτοβολταϊκά στοιχεία)



Σχήμα 3.1 Μηχανισμοί επανασύζευξης των ελεύθερων φορέων

3.2 Φωτοαντιστάσεις

Οι φωτοαντιστάσεις (Light Dependent Resistors) παρουσιάζουν εξάρτηση της τιμής τους από την ένταση της ακτινοβολίας που πέφτει επάνω τους. Είναι φωτοαγωγά υλικά δηλαδή ημιαγωγοί οι οποίοι όταν η ενέργεια της ακτινοβολίας που προσπίπτει επάνω τους υπερβεί το ενεργειακό χάσμα τότε ηλεκτρόνια από την ταινία σθένους μεταπίπτουν στην ταινία αγωγιμότητας. Οι Φωτοαντιστάσεις κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά με μικρή συγκέντρωση προσμείξεων. Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στην οποία είναι ευαίσθητη μια φωτοαντίσταση εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα του υλικού και τη θέση του ενεργειακού επιπέδου που εισάγουν οι προσμείξεις.

Κατάλληλα ημιαγωγά υλικά είναι το CdS, PbS το CdSe και τα μείγματα τους. Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η αντίσταση στο σκοτάδι και η αντίσταση στο φως R_L . Οι τιμές αυτές μπορεί να διαφέρουν έως και 10^6 τάξεις μεγέθους. Το μειονέκτημα των φωτοαντιστάσεων είναι η χημική τους αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

3.3 Φωταύγεια

Είναι η εκπομπή ορατού φωτός από ένα υλικό λόγω επίδρασης ακτινοβολίας ηλεκτρικού πεδίου ή θερμότητας. Αν το μήκος κύματος των φωτονίων αυτών βρίσκεται στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το υλικό εκπέμπει ορατό φως. Στα μέταλλα η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας επικαλύπτονται με αποτέλεσμα τα φωτόνια που εκπέμπονται να έχουν πολύ μικρή ενέργεια και μήκος κύματος μεγαλύτερο από την ορατή περιοχή του φάσματος. Η φωταύγεια των υλικών

χαρακτηρίζεται ως *φθορισμός* ή *φωσφορισμός* ανάλογα με το χρόνο που παραμένει το ηλεκτρόνιο στη διηγευμένη κατάσταση πριν από την εκπομπή του φωτονίου.

Στο *φθορισμό* η εκπομπή φωτός λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με τη διέγερση των ηλεκτρονίων και διακόπτεται όταν διακοπεί η επίδραση της ακτινοβολίας στο υλικό. Όλα τα διηγευμένα ηλεκτρόνια μεταπίπτουν στη ζώνη σθένους και τα φωτόνια εκπέμπονται μέσα σε χρόνο της τάξης των 10^{-8} s.

Στο *Φωσφορισμό* η εκπομπή φωτός λαμβάνει χώρα μετά τη διέγερση των ηλεκτρονίων. Ο φωσφορισμός οφείλεται σε προσμείξεις που περιέχει το υλικό οι οποίες δημιουργούν επίπεδο δότη μέσα στο ενεργειακό χάσμα. Τα ηλεκτρόνια κατά την αποδιέγερση παγιδεύονται στο ενεργειακό αυτό επίπεδο. Όταν η πηγή ακτινοβολίας διακόπτεται τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια μεταπίπτουν βαθμιαία στη ζώνη σθένους εκπέμποντας φως για μια χρονική περίοδο. Τα φωσφορίζοντα υλικά είναι πολύ σημαντικά για τη λειτουργία της οθόνης των τηλεοράσεων. Ανάλογα με το είδος της διέγερσης διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους φωταύγειας.

Ηλεκτροφωταύγεια: Η διέγερση γίνεται με την διέλευση ρεύματος συνήθως σε μία επαφή p-n. Κατά τη σύζευξη ηλεκτρονίων οπών εκπέμπονται φωτόνια των οποίων το μήκος κύματος αντιστοιχεί στο ενεργειακό χάσμα του υλικού. Ορατό φως εκπέμπουν πολλοί ημιαγωγοί όπως GaAs, GaP, CdS, SiC. Η ηλεκτροφωταύγεια χρησιμοποιείται σε οθόνες τηλεοράσεων, φωτεινές ενδείξεις, σε χαμηλής ενέργειας πηγές ορατού φωτός κλπ.

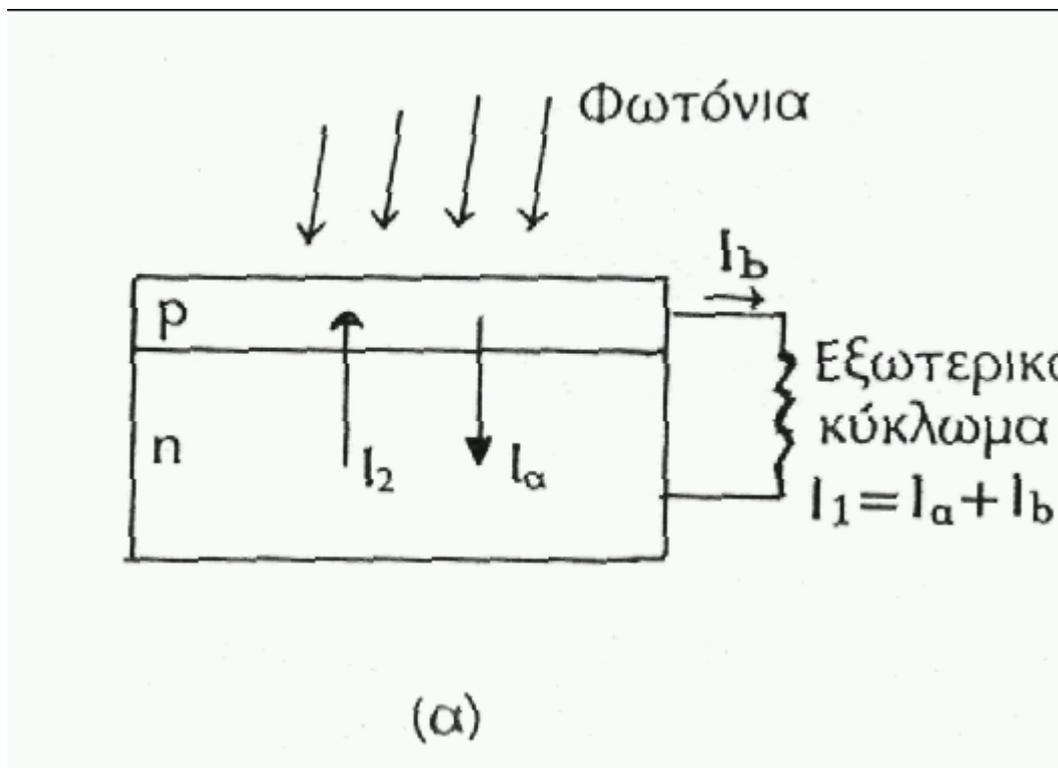
Φωτοφωταύγεια: Η διέγερση γίνεται με φως. Εφαρμογές έχουμε στα φθορίζοντα διαφράγματα για την ανίχνευση των ακτίνων-X και στους λαμπτήρες η λυχνίες φθορισμού. Στους λαμπτήρες φθορισμού ο υδράργυρος με πυράκτωση εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία ($\lambda=2537 \text{ \AA}$) η οποία μετατρέπεται σε ορατό φως. Για τη μετατροπή το εσωτερικό του λαμπτήρα καλύπτεται με κατάλληλο φθορίζον υλικό που είναι συνήθως σύμπλοκο άλας $\text{CaCl}_2 \cdot \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ με προσμείξεις Sb, Mn, Ta, Sb και Mn που εκπέμπουν μπλε και πορτοκαλί φως αντίστοιχα. Το υπόστρωμα εκπέμπει συνολικά λευκό φως.

Καθοδοφωταύγεια: Η διέγερση γίνεται μεν καθοδικές ακτίνες δηλαδή με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται στους καθοδικούς σωλήνες των τηλεοράσεων και άλλες ανάλογες εφαρμογές. Τυπικά υλικά είναι ZnS με Mn, ZnS με Cd.

Θερμοφωταύγεια: Η διέγερση γίνεται με θέρμανση του υλικού. Όταν ένα υλικό θερμαίνεται εκπέμπει ένα συνεχές φάσμα ακτινοβολίας. Η περιοχή συχνοτήτων που καλύπτει εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού. Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας είναι πολύ μεγάλα και δεν ανήκουν στην ορατή περιοχή. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει η ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια με μικρότερα μήκη κύματος. Σε υψηλές θερμοκρασίες όλα τα φωτόνια που εκπέμπονται έχουν μήκη κύματος στην περιοχή του ορατού φάσματος και η ακτινοβολία που εκπέμπεται έχει λευκό φως. Στη θερμική εκπομπή οφείλεται η μεταβολή του χρώματος των υλικών με τη θερμοκρασία.

3.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα Φωτοβολταϊκά ή ηλιακά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως. Ένα ηλιακό στοιχείο είναι βασικά μια επαφή $p-n$ που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Τα φωτόνια που απορροφούνται διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και δημιουργούν ελεύθερους φορείς (οπές και ηλεκτρόνια) στη περιοχή της επαφής. Η βασική διεργασία που λαμβάνει χώρα για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι ότι οι ελεύθεροι φορείς μετακινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στην περιοχή της επαφής. Τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την πλευρά n και οι οπές προς την πλευρά p (Σχήμα 3.2)



Σχήμα 3.2

Αν η επαφή δε συνδέεται με εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα το ρεύμα που παράγεται από τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών αναπτύσσει μια διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαφής η οποία προκαλεί τη δημιουργία αντίθετου ρεύματος I_2 ($I_1 = I_2$) με αποτέλεσμα η συνολική ροή ρεύματος να μηδενίζεται. Όταν η επαφή συνδέεται με εξωτερικό κύκλωμα μέρος του ρεύματος I_1 διαρρέει το κύκλωμα οπότε η επαφή $p-n$ λειτουργεί ως στοιχείο μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Το πάχος του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθορίζεται από τη δυνατότητα του να απορροφά τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζεται από δύο κρίσιμες παραμέτρους. Το ενεργειακό χάσμα και το συντελεστή απορρόφησης. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως το Si , GaAs επιλέγονται γιατί αρχίζουν να απορροφούν φως σε μεγάλα μήκη κύματος με αποτέλεσμα να απορροφούν μεγάλο κλάσμα της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης διαφορετικά ημιαγώγιμα υλικά παρουσιάζουν καλύτερη απορρόφηση του ηλιακού φωτός σε διάφορα πάχη τα οποία μπορεί να κυμαίνονται από 100μm μέχρι μικρότερα από 1μm Για παράδειγμα το κρυσταλλικό Si πάχους 50 μm παρουσιάζει την ίδια απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας με το άμορφο Si πάχους 1 μm και το $CuInSe_2$ πάχους 0.1 μm.

4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΟΠΤΙΚΟΥΣ ΔΕΚΤΕΣ

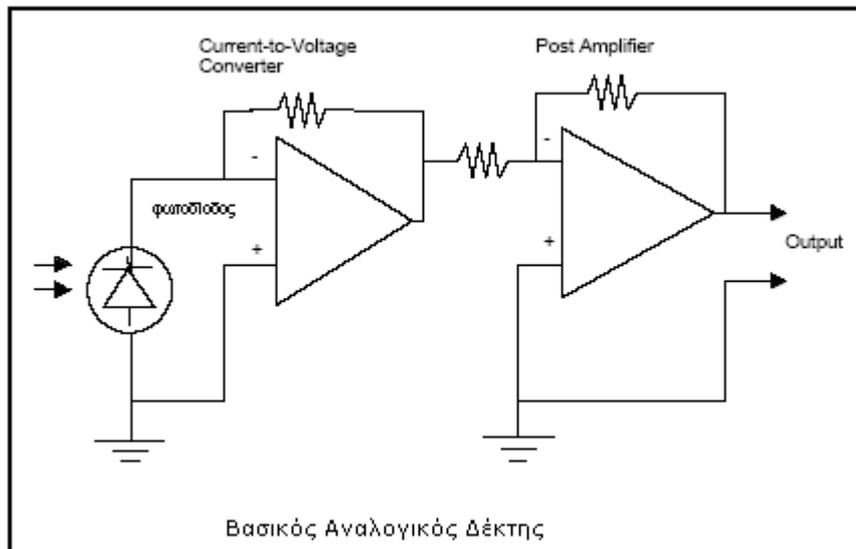
Ο ρόλος ενός οπτικού δέκτη είναι να μετατρέπει το οπτικό σήμα πάλι σε ηλεκτρικό και να ανακτά τις πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί μέσω ενός οπτικού συστήματος. Ουσιαστικά οι βασικοί οπτικοί δέκτες μετατρέπουν το διαμορφωμένο φως που προέρχεται από την οπτική ίνα πίσω σε ένα αντίγραφο του αρχικού σήματος το οποίο στον πομπό. Το βασικό του εξάρτημα είναι ένας φωτοανιχνευτής που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό παλμό μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Οι απαιτήσεις για έναν φωτοανιχνευτή είναι όμοιες με εκείνες μιας οπτικής πηγής. Θα πρέπει να έχει μεγάλη ευαισθησία, γρήγορη απόκριση, χαμηλό θόρυβο, χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία. Ο ανιχνευτής του διαμορφωμένου φωτός είναι συνήθως μια φωτοδίοδος είτε τύπου PIN, είτε τύπου Avalanche (χιονοστιβάδας). Ο φωτοανιχνευτής τοποθετείται σε έναν συνδετήρα παρόμοιο με αυτούς που χρησιμοποιούνται για τα LED. Οι φωτοδιόδοι έχουν μιας μεγάλης ευαισθησίας περιοχή ανίχνευσης η οποία μπορεί να έχει διάμετρο αρκετές εκατοντάδες μικρά. Αυτό το χαρακτηριστικό μειώνει την ανάγκη για ειδικές προφυλάξεις κατά την κεντροθέτηση της ίνας με τον συνδετήρα και κάνει την “ανησυχία για ευθυγράμμιση” λιγότερο κρίσιμη απ’ ότι στους οπτικούς πομπούς.

Από την στιγμή που η ποσότητα φωτός η οποία εξέρχεται από την οπτική ίνα είναι αρκετά μικρή οι οπτικοί δέκτες συνήθως χρησιμοποιούν υψηλής απολαβής εσωτερικούς ενισχυτές. Λόγω αυτού, για οποιοδήποτε σύστημα είναι σημαντικό να χρησιμοποιεί ίνα της οποίας το μέγεθος διευκρινίζεται ανάλογα με την περίπτωση. Διαφορετικά μπορεί υπάρξει μεγάλη πιθανότητα να εμφανιστεί υπερφότωση του οπτικού δέκτη. Για παράδειγμα εάν ένα ζευγάρι πομπού/δέκτη το οποίο έχει σχεδιαστεί για χρήση μονότροπης ίνας και χρησιμοποιηθεί πάνω σε πολύτροπες ίνες μια μεγάλη ποσότητα φωτός η οποία θα βρισκόταν στην έξοδο (.....) θα υπερφόρτωνε τον δέκτη και θα προκαλούσε διαστρέβλωση στο τελικό σήμα. Ομοίως εάν ένα ζευγάρι πομπού/δέκτη το οποίο έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται πάνω σε πολύτροπες ίνες και εφαρμοστεί πάνω σε μονότροπη ίνα ο δέκτης είναι πολύ πιθανό να λάβει πολύ μικρή ποσότητα φωτός, με συνέπεια ένα υπερβολικά θορυβώδες σήμα εξόδου ή κανένα σήμα καθόλου.

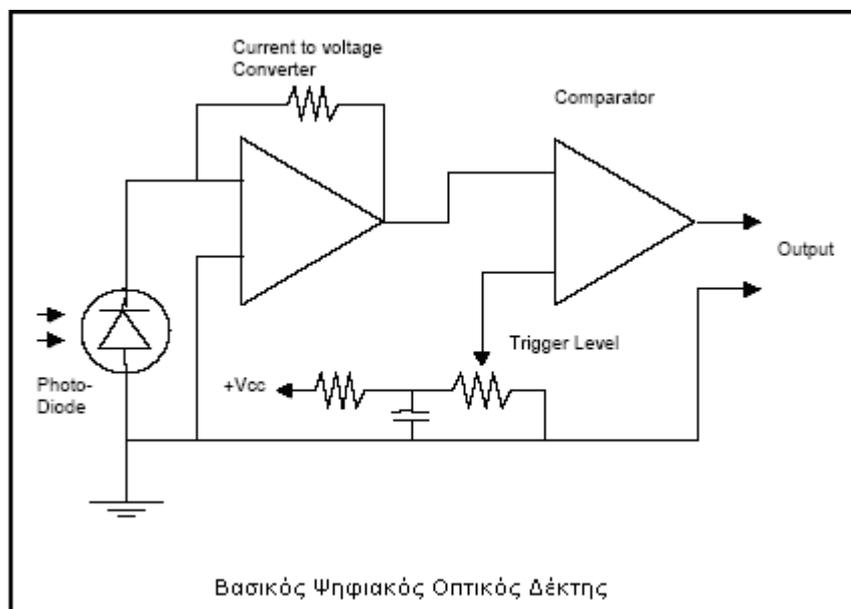
Όπως και στην περίπτωση των οπτικών πομπών έτσι και οι οπτικοί δέκτες είναι διαθέσιμοι και στις δύο εκδόσεις. Δηλαδή έχουμε αναλογικούς και ψηφιακούς οπτικούς δέκτες. Και στους δύο τύπους συνήθως διακρίνουμε δύο στάδια. Στο πρώτο χρησιμοποιείται ένας αναλογικός προενισχυτής και ακολουθεί το δεύτερο στάδιο στο οποίο επιτυγχάνεται είτε αναλογική είτε ψηφιακή παραγωγή (ανάλογα με τον τύπο του δέκτη που χρησιμοποιούμε).

Το σχήμα 4.1 στην επόμενη σελίδα είναι ένα λειτουργικό διάγραμμα ενός απλού αναλογικού οπτικού δέκτη. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από ένα λειτουργικό ενισχυτή που συνδέεται ως μετατροπέας της τάσης.

Σε αυτό το στάδιο διοχετεύεται μια πολύ μικρή ποσότητα ρεύματος από την φωτοδίοδο και το μετατρέπει σε μία τάση, συνήθως στην millivolt κλίμακα. Το επόμενο στάδιο είναι ένας απλός λειτουργικός ενισχυτής. Εδώ το σήμα αυξάνεται – ενισχύεται στο επιθυμητό επίπεδο παραγωγής.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Αναλογικού Δέκτη



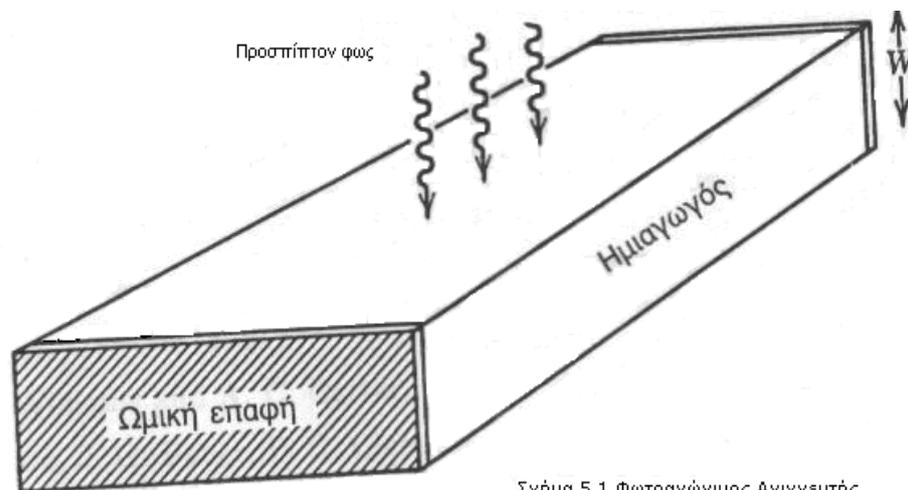
Σχήμα 4.2 Διάγραμμα Ψηφιακού Οπτικού Δέκτη

Το σχήμα 4.2 είναι ένα λειτουργικό διάγραμμα ενός απλού ψηφιακού οπτικού δέκτη. Όπως και στην περίπτωση του αναλογικού δέκτη στο πρώτο στάδιο έχουμε έναν μετετροπέα της τάσης. Η παραγωγή αυτού του σταδίου εντούτοις τροφοδοτεί έναν συγκρητή τάσης ο οποίος παράγει ένα καθαρό, γρήγορο rise-time ψηφιακό σήμα παραγωγής. Η ρύθμιση των επιπέδων ώθησης χρησιμοποιείται για να "αγγίξει" το σημείο του αναλογικού σήματος όπου ο συγκρητής μεταστρέφει. Αυτό επιτρέπει την συμμετρία του ανακτόμενου ψηφιακού σήματος για να το λαμβάνουμε στην έξοδο όπως ακριβώς επιδιώκουμε.

5. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την καρδιά των περισσότερων οπτοηλεκτρονικών συστημάτων αποτελούν οι φωτοανιχνευτές και οι οπτικοί δέκτες, οι οποίοι μετατρέπουν τα εισερχόμενα σήματα φωτός σε ηλεκτρικά σήματα για περαιτέρω επεξεργασία και ανασύνθεση. Οι φωτοανιχνευτές μπορούν χονδρικά να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες : στους φωτοαγωγιμους και τους φωτοβολταϊκούς. Ένα κομμάτι ομοιογενούς ημιαγωγού με ωμικές επαφές (βλέπε Σχήμα 5.1) λειτουργεί σαν απλό είδος φωτοαγωγιμου ανιχνευτή.



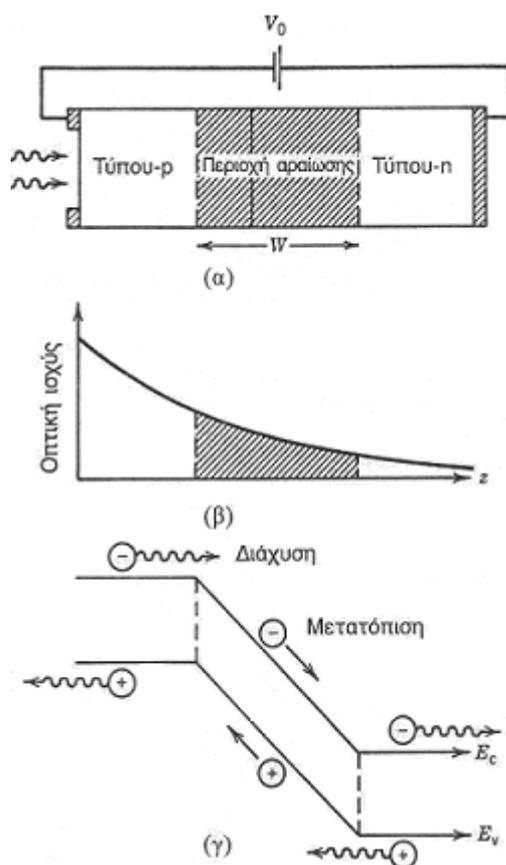
Σχήμα 5.1 Φωτοαγωγιμος Ανιχνευτής

Μικρή ποσότητα ρεύματος ρέει όταν δεν υπάρχει προσπίπτον φως, λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας των ημιαγωγών. Το προσπίπτον φως αυξάνει την αγωγιμότητα με την δημιουργία ζευγαριών ηλεκτρονίου-οπής κι επιτρέπει την ροή του ρεύματος ανάλογα με την οπτική ισχύ. Οι φωτοβολταϊκοί ανιχνευτές (π.χ ηλιακά στοιχεία) λειτουργούν δημιουργώντας τάση παρουσία φωτός.

Οι πλέον ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι φωτοανιχνευτές για την ορατή και κοντινή υπέρυθρη περιοχή του οπτικού φάσματος (400-1800nm) και ως εκ τούτου για τις τηλεπικοινωνίες είναι ουσιαστικά τροποποιήσεις της απλής σύνδεσης p-n.

5.2 ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΙ $p-n$

Μια ανάστροφα πολωμένη επαφή $p-n$ αποτελείται από μια περιοχή, γνωστή σαν περιοχή αραίωσης, που στην ουσία είναι κενή από ελεύθερους φορείς φορτίου και όπου ένα μεγάλο εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο αλλάζει την ροή των ηλεκτρονίων από την πλευρά n στην πλευρά p (και των οπών από την p στην n). Όταν μια τέτοια επαφή $p-n$ φωτίζεται με φως στην μία πλευρά, έστω στην πλευρά p (βλέπε σχήμα 5.2) δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής μέσω της απορρόφησης. Εξαιτίας του μεγάλου εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια και οι οπές, που δημιουργούνται στο εσωτερικό της περιοχής αραίωσης, επιταχύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις και μετατοπίζονται προς τις πλευρές n και p , αντίστοιχα. Η ροή ρεύματος που ακολουθεί είναι ανάλογη προς την προσπίπτουσα οπτική ισχύ. Επομένως μια ανάστροφα πολωμένη επαφή $p-n$ λειτουργεί σαν φωτοανιχνευτής και ονομάζεται *φωτοδίοδος $p-n$* .

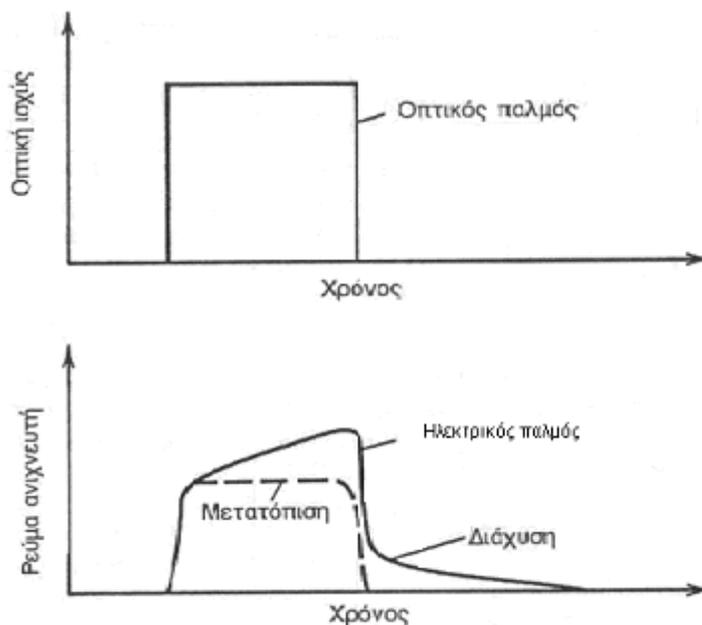


Σχήμα 5.2 (α) μια φωτοδίοδος $p-n$ ανάστροφα πολωμένη, (β) μεταβολή της οπτικής ισχύος στο εσωτερικό της φωτοδίοδου, (γ) ενεργειακό διάγραμμα ζώνης που παρουσιάζει την κίνηση των φορέων κατά την μετατόπιση και την διάχυση.

Το Σχήμα 5.2(α) παρουσιάζει την δομή μιας φωτοδιόδου $p-n$. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2(β), το προσπίπτον φως απορροφάται κυρίως στο εσωτερικό της περιοχής αραίωσης. Τα ζευγάρια ηλεκτρονίου-οπής που δημιουργούνται υφίστανται μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο και μετατοπίζονται γρήγορα προς την πλευρά p ή n , ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο [Σχήμα 5.2(γ)].

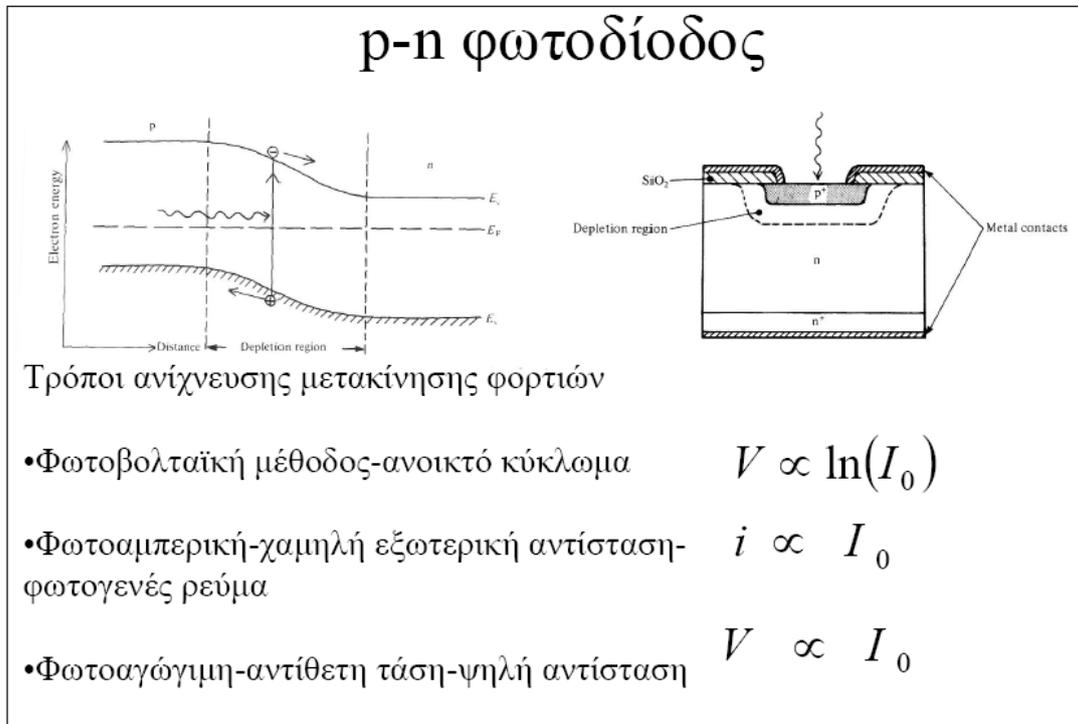
Ο περιοριστικός παράγοντας του εύρους ζώνης στις φωτοδιόδους $p-n$ είναι η παρουσία μιας συνιστώσας διάχυσης στο φωτόρρευμα. Η φυσική προέλευση αυτής της συνιστώσας διάχυσης σχετίζεται με την απορρόφηση του προσπίπτοντος φωτός έξω από την περιοχή αραίωσης. Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται στην περιοχή $-p$ πρέπει να διαχυθούν στα όρια της περιοχής αραίωσης πριν μετατοπιστούν στην πλευρά $-n$. Παρομοίως, οι οπές που δημιουργούνται στην περιοχή $-n$, πρέπει να διαχυθούν στα όρια της περιοχής αραίωσης.

Η διάχυση αποτελεί μια εσωτερικά αργή διαδικασία. Οι φορείς χρειάζονται ένα nanosecond ή και περισσότερο για να διαχυθούν σε απόσταση περίπου $1\mu\text{m}$. Το σχήμα 5.3 δείχνει πως η παρουσία της συνιστώσας διάχυσης μπορεί να παραμορφώσει την προσωρινή απόκριση μιας φωτοδιόδου. Στην πραγματικότητα, η συνεισφορά της διάχυσης εξαρτάται από τον βαθμό των bit και γίνεται αμελητέα αν ο οπτικός παλμός είναι κατά πολύ βραχύτερος από τον χρόνο διάχυσης. Επίσης, μπορεί να μειωθεί αν περιορίσουμε τα εύρη περιοχών $-p$ και $-n$ και αυξήσουμε το εύρος της περιοχής αραίωσης, ώστε το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος να απορροφάται στο εσωτερικό του. Αυτή είναι η προσέγγιση που υιοθετείται για τις φωτοδιόδους $p-i-n$ οι οποίες θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.



Σχήμα 3.3 Η απόκριση μιας φωτοδιόδου $p-n$ σε ένα ορθογώνιο οπτικό παλμό όταν και η μετατόπιση και η διάχυση συνεισφέρουν στο ρεύμα ανιχνευτή

Τέλος στο Σχήμα 5.4 βλέπουμε τους τρόπους ανίχνευσης μετακίνησης φορτίων μέσω μιας *p-n* φωτοδιόδου

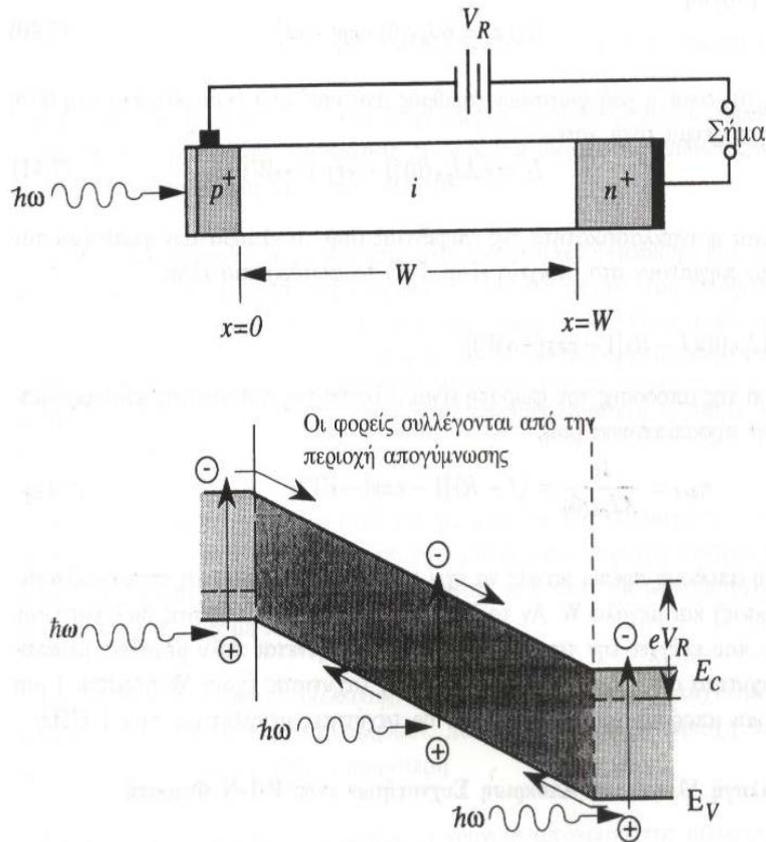


Σχήμα 5.4 Τρόποι ανίχνευσης μετακίνησης φορτίων με φωτοδιόδο *p-n*.

5.3 ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΙ p-i-n

Ένας σημαντικός τρόπος λειτουργίας της *p-n* διόδου που υπόκειται σε πρόσπτωση φωτός είναι όταν η διόδος πολώνεται ανάστροφα. Η ανάστροφη πόλωση όμως δεν είναι τόσο ισχυρή ώστε να υπάρχουν φαινόμενα διάσπασης πράγμα το οποίο συμβαίνει με τις διόδους χιονοστοιβάδας τις οποίες θα δούμε σε επόμενη ενότητα.

Μια σχηματική απεικόνιση προφίλ ζωνών δείχνεται στο σχήμα 5.5. Αφού η συσκευή είναι ανάστροφα πολωμένη, το ρεύμα σκότους διόδου είναι I_0 και είναι ανεξάρτητο της εφαρμοζόμενης πόλωσης. Το φωτόρευμα I_L οφείλεται ουσιαστικά στους φορείς που παράγονται στην περιοχή απογύμνωσης και συλλέγονται. Η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη έτσι ώστε ολόκληρη η *i*-περιοχή να είναι κενή από φορείς και να έχει ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο.

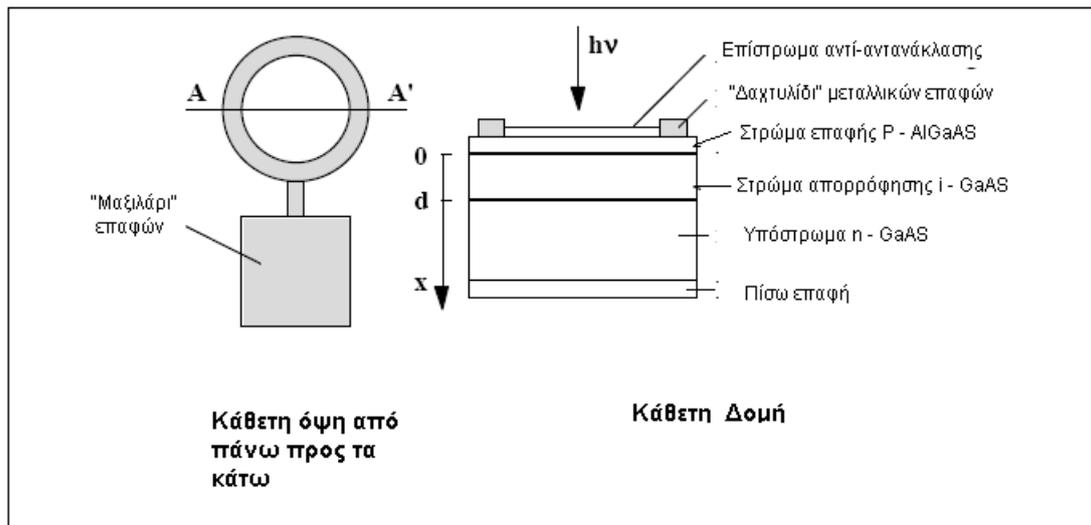


Σχήμα 5.5 Μια διατομή και προφίλ ενεργειακών ζωνών μιας δομής $p-i-n$ φωρατή. Φορείς που παράγονται στην ίδια περιοχή απογύμνωσης συλλέγονται και συνεισφέρουν στο ρεύμα. Αν η ενδογενής περιοχή είναι παχιά, το φωτόρρευμα κυριαρχείται από φορείς που συλλέγονται από την περιοχή απογύμνωσης αφού οι φορείς που γεννώνται στις ουδέτερες περιοχές συνεισφέρουν ένα μικρότερο ρεύμα στο φωτόρρευμα. Αφού το φωτόρρευμα κυριαρχείται από το άμεσο φωτόρρευμα, η απόκριση της συσκευής είναι γρήγορη.

Οι φωτοδιόδοι $p-i-n$ χρησιμοποιούνται συνήθως σε ποικίλες εφαρμογές. Στην εικόνα 5.6 βλέπουμε μια φωτογραφία τραβηγμένη από τα εργαστήρια και στην οποία απεικονίζεται μια φωτοδιόδος $p-i-n$, ενώ στην επόμενη εικόνα (5.7) έχουμε σχηματική απεικόνιση μιας φωτοδιόδου $p-i-n$.



Εικόνα 5.6 Φωτοδιόδος $p-i-n$



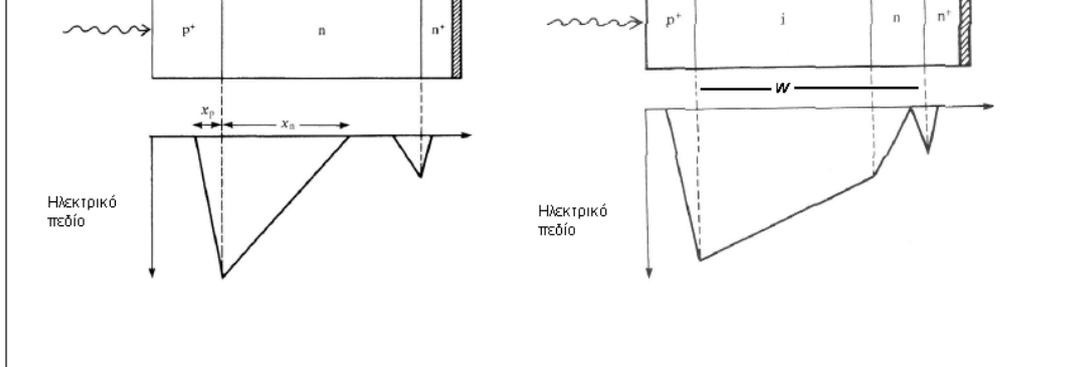
Σχήμα 5.7 Κάθετη άποψη και δομή μέσω του τμήματος AA' μιας φωτοδιόδου ετεροδομής *pin*

Η βαθμολόγηση της υλικής σύνθεσης μεταξύ του διαφανούς στρώματος επαφής και του στρώματος απορρόφησης χρησιμοποιείται συνήθως για να μειώσει το $n-n+$ ή $p-p+$ εμπόδιο που διαμορφώνεται στην διεπαφή. Η ανωτέρω δομή εξελίχθηκε κυρίως από μια βασική προϋπόθεση: το φως πρέπει να απορροφηθεί στην περιοχή μείωσης για να εξασφαλίσει ότι τα ηλεκτρόνια και οι τρύπες είναι χωρισμένα στο ηλεκτρικό πεδίο και να συμβάλει στην απορρόφηση, ενώ ο χρόνος διέλευσης πρέπει να είναι ελάχιστος. Αυτό υπονοεί ότι μια περιοχή μείωσης μεγαλύτερη από το μήκος απορρόφησης πρέπει να υπάρξει στον ανιχνευτή. Επίσης υπονοεί ότι το τελευταίο στρώμα επαφών πρέπει να είναι διαφανές στο εισερχόμενο φως. Στο πυρίτιο οι φωτοδιόδοι χρησιμοποιούν ένα λεπτό ιδιαίτερα στρώμα επαφών για να ελαχιστοποιήσουν την απορρόφηση.

Στην ουσία μια φωτοδιόδος $p-i-n$ δεν είναι παρά μια φωτοδιόδος $p-n$ στην οποία έχει εισαχθεί ένα στρώμα ανόθευτου (ή ελαφρά νοθευμένου) υλικού ημιαγωγού ανάμεσα στην επαφή $p-n$. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται το εύρος της περιοχής αραίωσης. Αυτό το μεσαίο στρώμα αποτελείται από εγγενές υλικό, και μια τέτοια δομή ονομάζεται φωτοδιόδος $p-i-n$ (positive-intrinsic-negative). Στο Σχήμα 5.8 παρατηρούμε αυτό που μόλις αναφέρθηκε, δηλαδή την βασική διαφορά των $p-n$ και $p-i-n$ φωτοδιόδων.

Εξαιτίας της εγγενούς του φύσης, το ενδιάμεσο στρώμα $-i$ παρέχει υψηλή αντίσταση και η μεγαλύτερη πτώση τάσης εμφανίζεται στα άκρα του. Σαν αποτέλεσμα υπάρχει ένα μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο στο στρώμα $-i$. Ουσιαστικά η περιοχή αραίωσης εκτείνεται σε ολόκληρη την περιοχή $-i$ και το εύρος του W μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το πάχος του μεσαίου στρώματος. Η βασική διαφορά από την φωτοδιόδο $p-n$ είναι ότι η συνιστώσα μετατόπισης του φωτορεύματος κυριαρχεί έναντι της συνιστώσας διάχυσης απλώς επειδή το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ισχύος απορροφάται στο εσωτερικό της περιοχής $-i$ μιας φωτοδιόδου $p-i-n$.

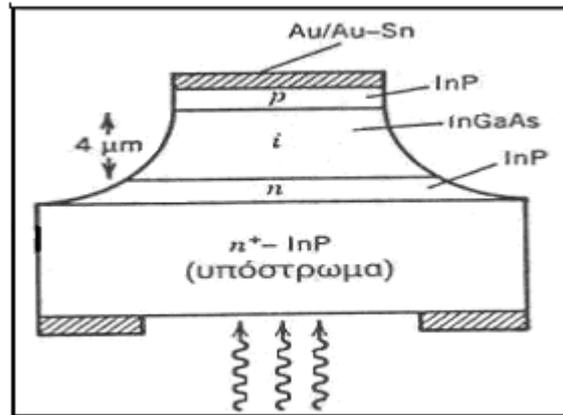
p-n & p-i-n φωτοδιόδοι



Σχήμα 5.8 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε φωτοδιόδο $p-n$ και $p-i-n$.

Αφού το εύρος αραίωσης W μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα στις φωτοδιόδους $p-i-n$, ένα φυσικό ερώτημα πρέπει να είναι πόσο μεγάλο πρέπει να είναι το W . Η βέλτιστη τιμή του W εξαρτάται από τον συμβιβασμό ταχύτητας κι ευαισθησίας. Η αποκρισιμότητα μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας το W , ώστε η κβαντική απόδοση η να φτάνει το 100%. Ωστόσο, αυξάνεται επίσης και ο χρόνος απόκρισης, αφού οι φορείς χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να μετατοπιστούν στην άλλη πλευρά της περιοχής αραίωσης.

Η απόδοση των φωτοδίοδων $p-i-n$ μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά αν χρησιμοποιήσουμε μια σχεδίαση διπλής ετεροδομής. Όπως και στην περίπτωση των laser ημιαγωγών το μεσαίο στρώμα τύπου $-i$ τοποθετείται μεταξύ των στρωμάτων τύπου $-p$ και τύπου $-n$ ενός διαφορετικού ημιαγωγού, του οποίου το ενεργειακό χάσμα επιλέγεται έτσι ώστε το φως να απορροφάται μόνο στο μεσαίο στρώμα $-i$. Μια φωτοδιόδος $p-i-n$ που συνήθως χρησιμοποιείται για οπτικές εφαρμογές, χρησιμοποιεί InGaAs για μεσαίο στρώμα και InP για τα διπλανά στρώματα τύπου $-p$ και τύπου $-n$. Στο σχήμα 5.9 βλέπουμε την σχεδίαση μιας φωτοδιόδου InGaAsP $p-i-n$.



Σχήμα 5.9 Σχεδίαση μιας φωτοδιόδου InGaAsP *p-i-n*

Αφού το ενεργειακό χάσμα του InP είναι 1.35eV, ο InP είναι διαφανής για φως του οποίου το μήκος κύματος υπερβαίνει τα 0.92μm. Αντίθετα, το ενεργειακό χάσμα του υλικού με πλεγματικό συνδυασμό $In_{1-x}Ga_xAs$ με $x = 0.47$ είναι περίπου 0.75eV, τιμή που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος αποκοπής 1.65μm. Το μεσαίο στρώμα InGaAs έτσι απορροφά ισχυρά στην περιοχή μηκών κύματος 1.3-1.6μm. Η συνιστώσα διάχυσης του ρεύματος ανιχνευτή εξαλείφεται εντελώς σε τέτοιες φωτοδιόδους ετεροδομής, απλώς επειδή τα φωτόνια απορροφώνται μόνο στο εσωτερικό της περιοχής αραίωσης. Η μπροστινή πλευρά συχνά καλύπτεται με κατάλληλα διηλεκτρικά στρώματα για να περιορίσουμε τις ανακλάσεις. Η κβαντική απόδοση η μπορεί να φτάσει το 100% χρησιμοποιώντας ένα στρώμα InGaAs πάχους 4-5μm. Οι φωτοδιόδοι InGaAs είναι αρκετά χρήσιμες στα οπτικά συστήματα και συχνά χρησιμοποιούνται στην πράξη. Ο πίνακας 5.1 καταγράφει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των τριών συνηθισμένων φωτοδιόδων *p-i-n*.

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	Si	Ge	InGaAs
Μήκος Κύματος	λ	μm	0.4 – 1.1	0.8 – 1.8	1.0 -1.7
Αποκρισιμότητα	R	A/W	0.4 - 0.6	0.5 – 0.7	0.6 – 0.9
Κβαντική Απόδοση	η	%	75 - 90	50 - 55	60 - 70
Ρεύμα Κόστους	I_d	nA	1 -10	50 - 500	1 - 20
Χρόνος Ανόδου	τ_r	ns	0.5 - 1	0.1 – 0.5	0.005 – 0.5
Εύρος Ζώνης	Δf	GHz	0.3 – 0.6	0.5 - 3	1 -5
Τάση Πόλωσης	V_b	V	50 - 100	6 -10	5 - 6

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά των κοινών φωτοδιόδων *p-i-n*

Κατά την δεκαετία του 1990 καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια προς την κατεύθυνση της δημιουργίας φωτοδιόδων *p-i-n* υψηλής ταχύτητας, ικανών να λειτουργούν με ρυθμό μετάδοσης bit πάνω από 10Gb/s [1]. Μόλις το 1986 επιτεύχθηκε εύρος ζώνης μέχρι και 70 GHz,

χρησιμοποιώντας ένα λεπτό στρώμα απορρόφησης ($<1\mu\text{m}$) και μειώνοντας την παρασιτική χωρητικότητα C_p μικρού μεγέθους, αλλά μόνο εις βάρος μιας χαμηλότερης κβαντικής απόδοσης και αποκρισιμότητας [2]. Ως το 1995, οι φωτοδιόδοι $p-i-n$ παρουσίαζαν εύρος ζώνης 110GHz για εξαρτήματα που σχεδιάστηκαν να μειώσουν τον τ_{RC} σε $\sim 1\text{ps}$ [3].

5.3.1 Επιλογή Υλικού και Απόκριση Συχνοτήτων ενός $p-i-n$ Φωρατή

Το πιο σημαντικό θέμα στην σχεδίαση του φωρατή είναι να δουλέψει κανείς με υλικό που έχει καλό συντελεστή απορρόφησης για τις συχνότητες που πρέπει να ανιχνευτούν. Για εφαρμογές επικοινωνιών όπου χρησιμοποιούνται GaAs/AlGaAs ($h_\omega \sim 1.45 \text{ eV}$) (συνήθως για τοπικά δίκτυα). Οι φωρατές πυριτίου είναι ικανοποιητικοί εκτός αν απαιτούνται υψηλές ταχύτητες. Οι φωρατές πυριτίου πρέπει να έχουν μήκος απορρόφησης $>10\mu\text{m}$. Για εφαρμογές μεγαλύτερων μηκών κύματος χρησιμοποιούνται φωρατές από Ge. Ένα σημαντικό μήκος κύματος είναι τα $1.55\mu\text{m}$ που χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων αφού η απώλεια διάδοσης της ίνας είναι ελάχιστη. Για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων απαιτούνται φωρατές άμεσου χάσματος έτσι ώστε το ενεργό μήκος απορρόφησης να μπορεί να γίνει ένα μικρό ή μικρότερο. Έτσι φωρατές από InGaAs χρησιμοποιούνται τώρα ευρέως για εφαρμογές επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων.

Στην περίπτωση εφαρμογών νυχτερινής όρασης χρησιμοποιούνται υλικά όπως $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, InAs, και InSb που έχουν πολύ στενά ενεργειακά χάσματα. Ένα πρόβλημα με τα υλικά στενού χάσματος είναι το υψηλό ρεύμα σκότους (το I_o της διόδου). Για να μειωθεί το I_o οι συσκευές ψύχονται, συχνά σε θερμοκρασία υγρού He. Τα διάφορα διαθέσιμα υλικά και τα ενεργειακά χάσματά τους φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Αφού γίνει η επιλογή του υλικού, τα σημαντικά θέματα στην επιλογή του υλικού είναι:

- ▶ *Ελαχιστοποίηση της ανάκλασης στην επιφάνεια:* Αυτό γίνεται συνήθως εφαρμόζοντας αντι-ανακλαστικές επιστρώσεις οι οποίες μειώνουν τις απώλειες λόγω ανάκλασης από τόσο υψηλή τιμή όπως 40% σε 2-3%.
- ▶ *Μεγιστοποίηση της απορρόφησης στην περιοχή απογύμνωσης:* Για υψηλή απόδοση φωρατή πρέπει κανείς να έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη απορρόφηση στο εύρος απογύμνωσης. Όμως όσο αφορά την ταχύτητα δεν είναι πάντα καλή επιλογή να αυξάνεται το εύρος απογύμνωσης. Συχνά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά κάτοπτρα για να αυξήσουν το οπτικό μήκος αλληλεπίδρασης της συσκευής προκαλώντας την οπτική δέσμη να πάρει περισσότερες από μία διαδρομές στη συσκευή.
- ▶ *Ελαχιστοποίηση της επανασύνδεσης φορέων:* Για βελτιωμένη απόδοση θέλει κανείς όσο το δυνατό μικρότερη επανασύνδεση στην περιοχή απογύμνωσης. Αυτό απαιτεί την χρήση υλικού υψηλής καθαρότητας έτσι ώστε να μην υπάρχει επανασύνδεση

που σχετίζεται με παγίδα.

- ▶ *Μείωση του χρόνου διέλευσης:* Για να επιτευχθεί υψηλή ταχύτητα, οι χρόνοι μετάβασης πρέπει να ελαχιστοποιηθούν που σημαίνει ότι η περιοχή απογύμνωσης πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη.

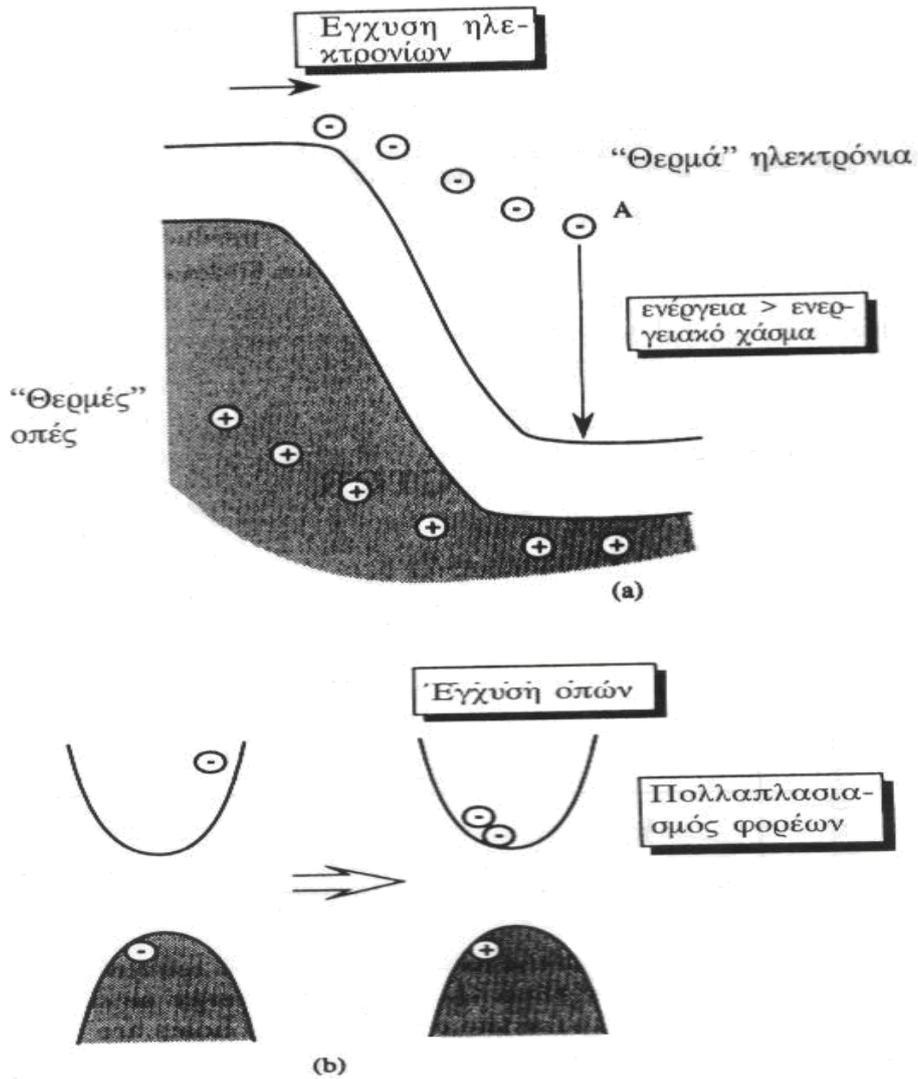
5.4 Φωτοδίοδοι Χιονοστοιβάδας (Avalanche Photodiode)

Επιπλέον του p-i-n φωρατή που συζητήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μια σημαντική τάξη φωρατών χρησιμοποιεί τον ιονισμό κρούσης ή διαδικασία χιονοστοιβάδας για να πάρει συσκευές πολύ υψηλής απολαβής. Ενώ στον p-i-n φωρατή, η απολαβή του φωρατή μπορεί, το μέγιστο, να είναι μονάδα στο φωτοφωρατή χιονοστοιβάδας (Avalanche Photodiode) (APD), μπορεί να επιτευχθούν πολύ υψηλές απολαβές.

Κατά την διαδικασία χιονοστοιβάδας ένα ηλεκτρόνιο (οπή) υψηλής ενέργειας δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Συνήθως η διαδικασία αυτή που συμβαίνει σε υψηλά ηλεκτρικά πεδία, περιορίζει την λειτουργία υψηλής ισχύος των ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά στις APDs χρησιμοποιείται ώστε να πολλαπλασιαστούν οι φορείς που δημιουργούνται από ένα φωτόνιο. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές που δημιουργούνται από την απορρόφηση φωτονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκαλέσουν χιονοστοιβάδα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10. Το σήμα εξόδου ενισχύεται κατ'αυτὸν τον τρόπο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία χιονοστοιβάδας απαιτεί το αρχικό ηλεκτρόνιο να έχει ενέργεια λίγο μεγαλύτερη από την ενέργεια του αρχικού ενεργειακού χάσματος. Οι συντελεστές ιονισμού κρούσης για τα ηλεκτρόνια και τις οπές δηλώνονται σαν α_{imp} και β_{imp} .

Εξαιτίας του πολλαπλασιασμού φορέων, ο APD έχει πολύ υψηλή απολαβή και έτσι χρησιμοποιείται ευρέως για συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Όμως αφού η διαδικασία πολλαπλασιασμού είναι τυχαία, η συσκευή έχει πολύ θόρυβο. Το επίπεδο θορύβου εξαρτάται από τον παράγοντα πολλαπλασιασμού φορέων και τον λόγο α_{imp}/β_{imp} . Ένας αριθμός συστημάτων υλικών που περιλαμβάνει Ge, Si και πολλές III-V ενώσεις ημιαγωγών έχουν χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό φωτοφωρατών.



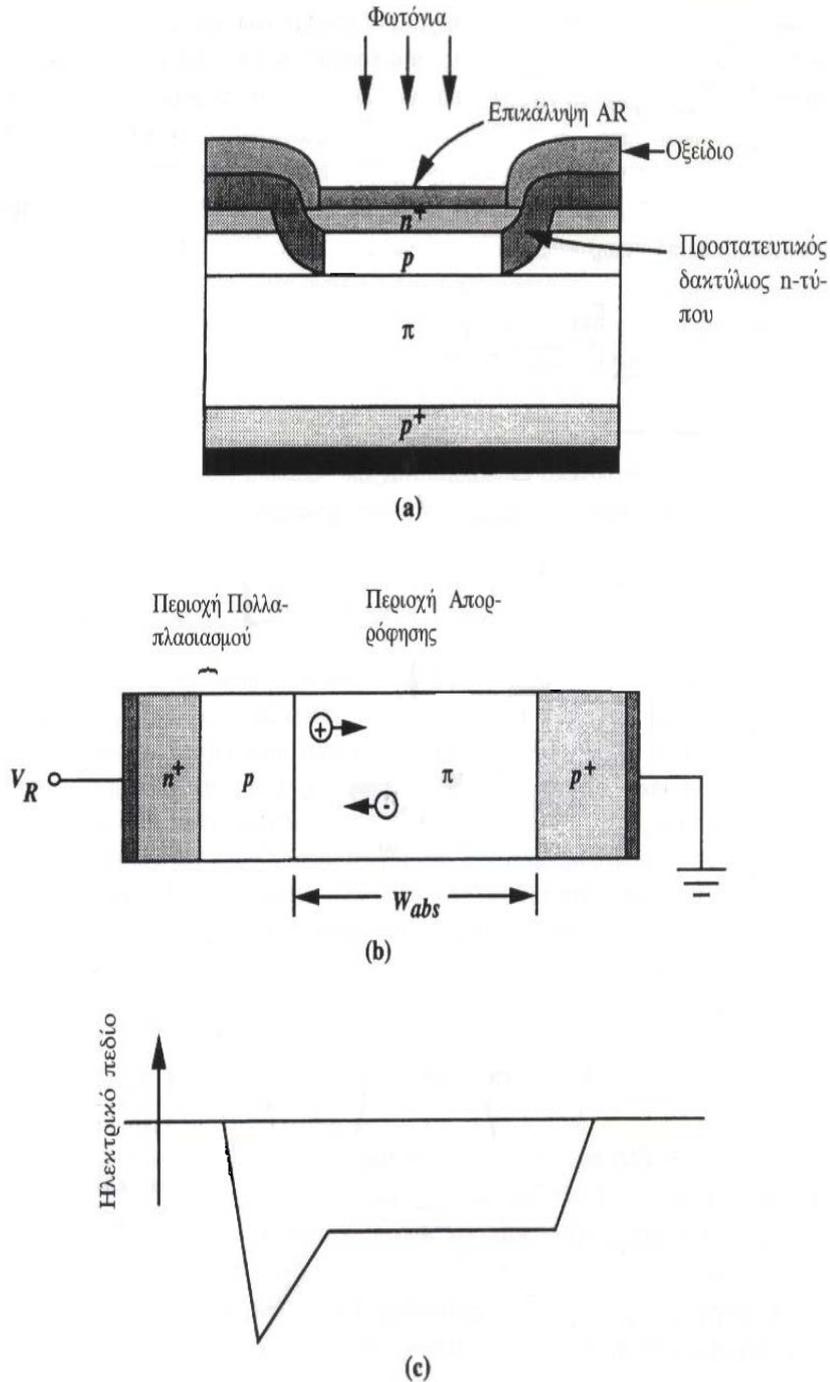
Σχήμα 5.10 Σχηματική αναπαράσταση ανάστροφα πολωμένης p-n διόδου. Το ηλεκτρόνιο Α έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού b). Ένα ηλεκτρόνιο στην ζώνη υψηλής αγωγιμότητας αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο στην ζώνη σθένους για να δημιουργήσει ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή, όπως δείχνεται.

5.4.1 Σχεδιαστικά θέματα του APD

Όπως στον φωρατή p-i-n το πρώτο θέμα σχεδιασμού για έναν APD είναι να έχουμε περιοχή απογύμνωσης που να είναι αρκετά παχιά ώστε να επιτρέπει απορρόφηση του οπτικού σήματος. Αυτή η περιοχή πρέπει να είναι $\sim 1/a_{imp}(h\nu)$ και μπορεί να έχει πάχος από ένα μικρό για τους ημιαγωγούς άμεσου χάσματος μέχρι αρκετές δεκάδες μικρών για τα υλικά έμμεσου χάσματος. Η περιοχή απορρόφησης και η περιοχή πολλαπλασιασμού είναι διακριτές γενικά (ειδικά αν η περιοχή απορρόφησης είναι μεγαλύτερη από ένα μικρό) εξαιτίας της δυσκολίας διατήρησης ενός υψηλού ηλεκτρικού πεδίου για μεγάλη περιοχή. Τυπικά ηλεκτρικά πεδία $\geq 10^5$ V/cm χρειάζονται για την διαδικασία χιονοστοιβάδας. Αν το πεδίο είναι μη ομογενές τοπικές ταλαντώσεις φορτίου μπορούν να εξελιχθούν και γίνεται δύσκολο να ελεγχθεί και να προβλεφθεί η έξοδος της συσκευής.

Μια σημαντική δομή για τις APDs είναι η δομή που φαίνεται στο σχήμα 5.11. Η δομή έχει μια διάταξη $n^+ - p - \pi - p^+$. Απορρόφηση φωτονίων συμβαίνει στην ενδογενή περιοχή πάχους W_{abs} , ενώ η περιοχή χιονοστοιβάδας είναι λεπτή στην $n^+ - p$ ένωση πάχους W_{aval} . Μπορεί κανείς να σχεδιάσει την δομή έτσι ώστε το πεδίο στην περιοχή απορρόφησης να είναι αρκετά υψηλό έτσι ώστε όλοι οι φορείς να κινούνται με ταχύτητα κόρου ($u_s(e)$ ή $u_s(h)$). Επίσης είτε ηλεκτρόνια είτε οπές μπορούν να επιλεγούν για να εγχυθούν στην περιοχή χιονοστοιβάδας. Η διαδικασία χιονοστοιβάδας θα έπρεπε να ξεκινήσει από τον φορέα με τον υψηλό συντελεστή ιονισμού (ηλεκτρόνια στην συγκεκριμένη περίπτωση) για να βελτιστοποιηθεί η απόκριση της συσκευής.

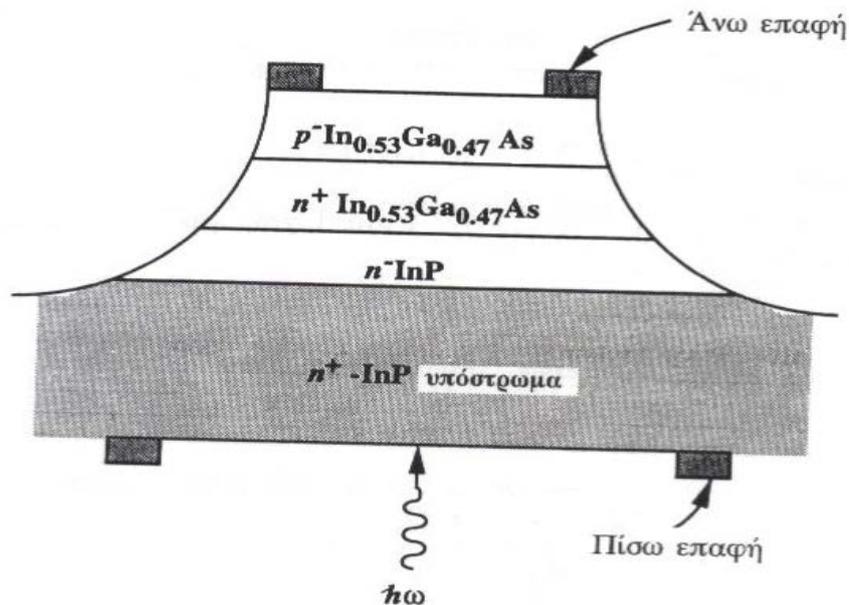
Στον APD η απολαβή ρεύματος εξαρτάται πάρα πολύ όχι μόνο από την πόλωση που εφαρμόζεται, αλλά και από τις θερμικές διακυμάνσεις. Έτσι οι δεξαμενές θερμότητας είναι σημαντικές σε τέτοιες συσκευές. Επίσης, προστατευτικοί δακτύλιοι εισάγονται για να ελαχιστοποιήσουν τα ηλεκτρικά πεδία γύρω από τα άκρα της επαφής p-n της συσκευής. Ο προστατευτικός δακτύλιος αφορά μια πρόσμιξη τύπου $n - p$ που εισάγει μια περιοχή π στο τμήμα p της συσκευής και έτσι υπάρχει ένα χαμηλότερο πεδίο στην $n^+ \pi$ περιοχή του προστατευτικού δακτυλίου και αποφεύγεται η διάσπαση στα άκρα.



Σχήμα 5.11: (a) Σχηματική απεικόνιση του $n^+rp\pi r^+$ APD. (b) Η διατομή του APD που δείχνει τις περιοχές για απορρόφηση και πολλαπλασιασμό. Στην δομή που δείχνεται, τα ηλεκτρόνια ευθύνονται για την έναυση της διαδικασίας πολλαπλασιασμού. (c) Το προφίλ ηλεκτρικού πεδίου στον APD. Το ισχυρότερο πεδίο στην επαφή n^+p προκαλεί την διαδικασία χιονοστοιβάδας.

APDs από γερμάνιο υποφέρουν από ένα πλήθος εσωτερικών προβλημάτων που περιορίζουν την χρήσιμη απολαβή της συσκευής σε ~10-20. Οι λόγοι για τα προβλήματα αυτά είναι υψηλά ρεύματα σκότους εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμικής γένεσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Είναι επίσης δύσκολο να αποκτηθούν υποστρώματα υψηλής ποιότητας για το Ge.

Η χρησιμοποίηση των ετεροπαφών σε APDs συνεχίζει να αυξάνεται, και σύνθετοι III-V ημιαγωγοί έχουν παράγει μερικές από τις συσκευές μέγιστης επίδοσης. Στην περίπτωση των ημιαγωγών άμεσου ενεργειακού χάσματος, δεν χρειάζεται κανείς την μακριά περιοχή απορρόφησης και μπορούν να δημιουργηθούν συσκευές με λεπτές περιοχές απορρόφησης και χιονοστοιβάδας (που βρίσκονται στην ίδια φυσική περιοχή). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 για τον APD $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$.



Σχήμα 5.12: Σχηματική απεικόνιση μιας φωτοδιόδου χιονοστοιβάδας από InGaAs/InP που φωτίζεται από την κάτω πλευρά. Εξαιτίας της μικρής περιοχής απορρόφησης, στους ημιαγωγούς άμεσου χάσματος, μπορεί κανείς να έχει την ίδια περιοχή για διαδικασίες απορρόφησης και πολλαπλασιασμού.

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	Si	Ge	InGaAs
Μήκος κύματος	λ	μm	0.4 – 1.1	0.8 – 1.8	1.0 – 1.7
Αποκρισιμότητα	R_{APD}	A/W	80 – 130	3 -30	5 – 20
Απολαβή APD	M	-	100 – 150	50 – 200	10 – 40
Παράγοντας-κ	K_A	-	0.02 – 0.05	0.7 – 1.0	0.5 – 0.7
Ρεύμα σκότους	I_d	nA	0.1 – 1	50 – 500	1 - 5
Χρόνος ανόδου	T_r	ns	0.1 – 2	0.5 – 0.8	0.1 – 0.5
Εύρος ζώνης	Δ_f	GHz	0.2 – 1.0	0.4 – 0.7	1 - 3
Τάση πόλωσης	V_b	V	200 - 250	20 - 40	20 - 30

5.5 Φωρατές Μετάλλου-Ημιαγωγού

Μια εξαιρετικά σημαντική τάξη φωτοφωρατών περιλαμβάνει τη χρήση ενός φράγματος Schottky το οποίο παράγεται μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού με χαμηλό ποσοστό προσμίξεων.

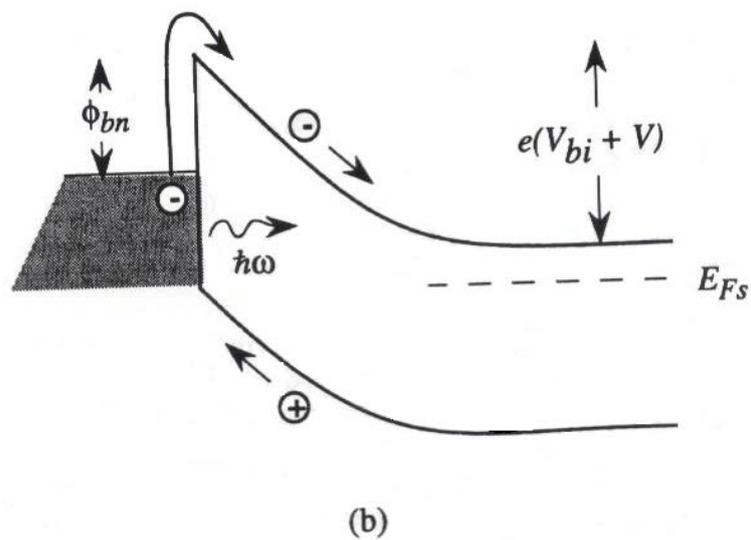
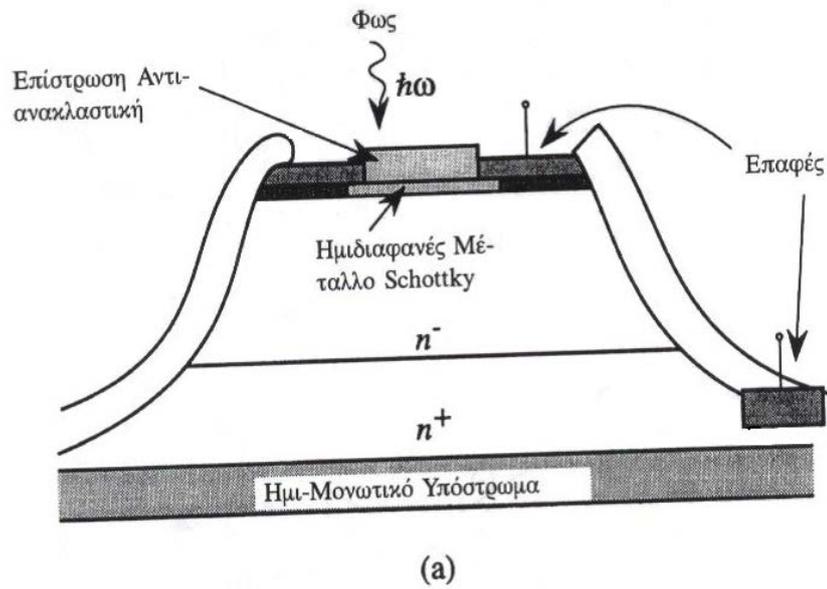
Συσκευές που βασίζονται σε φράγματα Schottky αφορούν δύο είδη σχηματισμών. Στο σχήμα 5.13. (a) δείχνεται μια συσκευή η οποία είναι μια απλή mesa δομή με ένα n^+ επίπεδο σε ένα ημιαγωγικό υπόστρωμα. Το ενεργό επίπεδο που απορροφά έχει χαμηλό ποσοστό προσμίξεων ($N_d \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) και ένα λεπτό ημιδιαφανές μεταλλικό επίπεδο επικάθεται σε αυτό. Το μεταλλικό υμένιο είναι αρκετά παχύ ώστε να επιτρέπει τον σχηματισμό φράγματος Schottky ($\sim 300 - 400 \text{ \AA}$) αλλά είναι αρκετά λεπτό ώστε να επιτρέπει την διέλευση φωτός. Για πολύ καλή λειτουργία το μεταλλικό υμένιο καλύπτεται με διηλεκτρικές αντί – ανακλαστικές επιστρώσεις και το εμβαδό της βάσης κρατείται τόσο μικρό όσο 10^{-5} cm^2 ($\sim 50 \mu\text{m}$ διάμετρος στις mesa διόδους).

Το προφίλ ζωνών της διόδου φράγματος Schottky φαίνεται στο σχήμα 5.13. (b) κατά μήκος του φράγματος. Όταν πέφτει φως πάνω στην διόδο, η διόδος μπορεί να αποκριθεί με δύο σημαντικούς τρόπους.

1. $h\omega > e\Phi_{bn}$: Στην περίπτωση αυτή, ηλεκτρόνια μπορούν να διεγερθούν στο φράγμα του μετάλλου και να υπερνικήσουν το ύψος του φράγματος Schottky. Σαν αποτέλεσμα φωτόρρευμα θα ρέει στην συσκευή. Το ρεύμα θα προστεθεί στο ρεύμα σκότους της ανάστροφα πολωμένης διόδου.
2. $h\omega > E_g$: Στην περίπτωση αυτή, ζεύγη ηλεκτρονίων–οπών θα δημιουργηθούν στον ημιαγωγό. Όπως στην περίπτωση της φωτοδιόδου, οι φορείς που δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης θα παρασυρθούν ώστε να παράγουν το φωτόρρευμα.

Σε συσκευές μεγάλης ταχύτητας η περιοχή απογύμνωσης είναι μικρότερη από ένα μικρό έτσι ώστε οι ταχύτητες της συσκευής να είναι

εξαιρετικά υψηλές. Με κατάλληλο σχεδιασμό οι δίοδοι φράγματος Schottky μπορούν να δουλεύουν μέχρι τα 150 GHz.

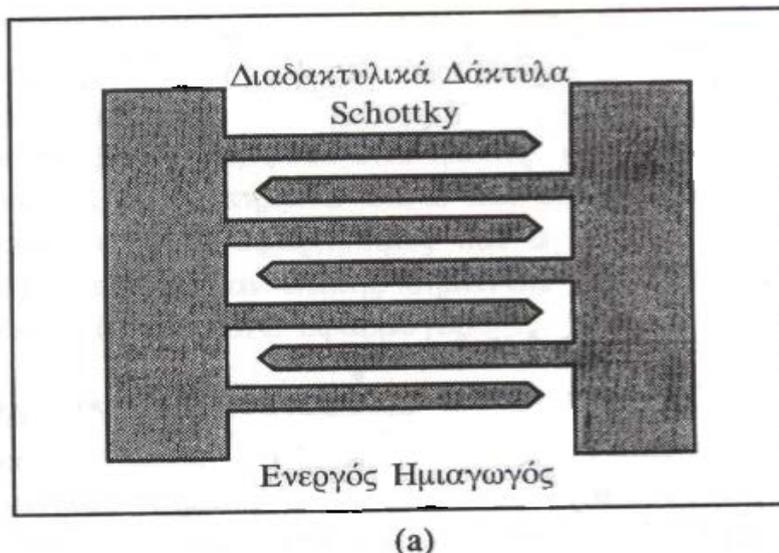


Σχήμα 5.13. (a) Σχηματική απεικόνιση του φράγματος Schottky. (b) Το προφίλ των ζωνών του φωρατή V_{bi} είναι η ενσωματωμένη τάση και V είναι η εφαρμοζόμενη πόλωση.

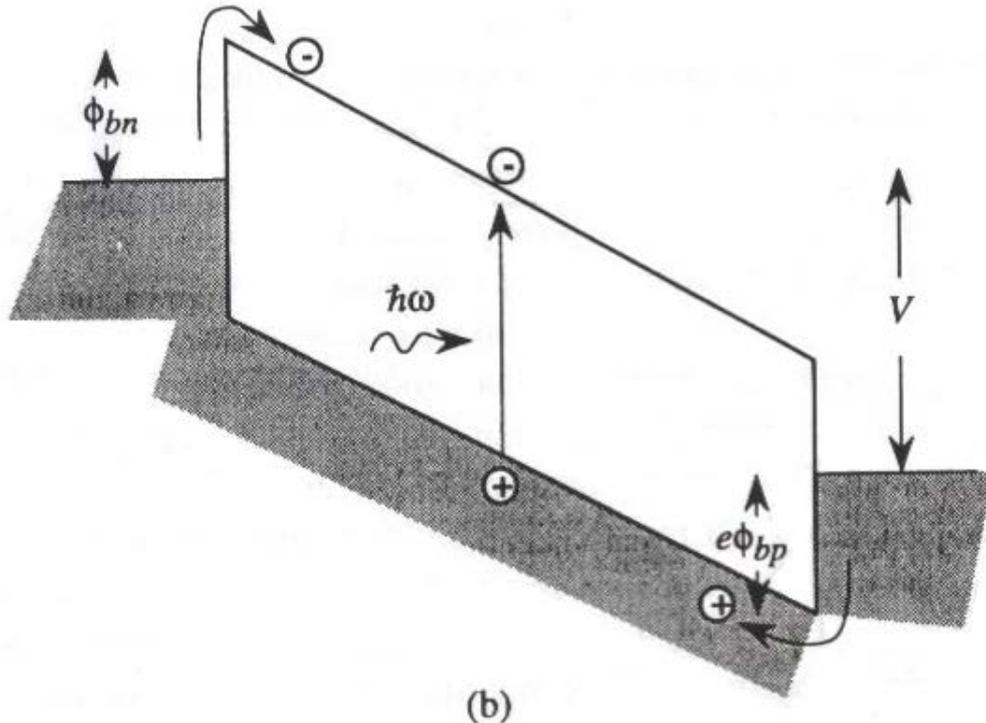
5.6 Φωτοανιχνευτές MSM

Μια δεύτερη τάξη φωρατών μετάλλου ημιαγωγού είναι ο φωρατής μετάλλου-ημιαγωγού-μέταλλο (MSM) στον οποίο δύο φράγματα Schottky τοποθετούνται σε επίπεδη γεωμετρία κοντά το ένα στο άλλο. Σε πραγματική σχεδίαση η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι ο διαδακτυλικός (interdigitated) σχηματισμός που φαίνεται στο Σχήμα 5.14.(a). Η απόσταση ανάμεσα στα δάκτυλα είναι $\sim 1\text{-}5\mu\text{m}$ έτσι ώστε όταν εφαρμόζεται μία πόλωση ανάμεσα στις επαφές, η περιοχή ανάμεσα στα δάκτυλα να μπορεί να αραιωθεί τελείως.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14.(b), όταν εφαρμόζεται μία πόλωση κατά μήκος των δακτύλων, μια επαφή γίνεται ανάστροφα πολωμένη, ενώ η άλλη γίνεται ορθά πολωμένη. Αφού όμως ο ημιαγωγός εκκενώνεται από φορείς, το ρεύμα στην ορθά πολωμένη επαφή δεν είναι το συνηθισμένο ρεύμα ηλεκτρονίων σε ορθή πόλωση. Αντ'αυτού, το ρεύμα σκότους στην ορθά πολωμένη επαφή οφείλεται στο ρεύμα οπών που εγχέεται από το μέταλλο πάνω στο φράγμα $e\Phi_{bp}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14.(b). Σαν αποτέλεσμα, σε μια ισχυρά, το ρεύμα σκότους της συσκευής ισούται με τα ανάστροφα ρεύματα κόρου των ηλεκτρονίων και των οπών.



Σχήμα 5.14.(a) Σχηματική απεικόνιση του MSM φωρατή χρησιμοποιώντας διαδακτυλικά δάκτυλα Schottky.



Σχήμα 5.14.(b) Προφίλ ζωνών της MSM φωτοδιόδου με εφαρμοζόμενη πόλωση

Οι φωρατές MSM έχουν εσωτερική απολαβή, συχνά ακόμα και σε μικρές εφαρμοζόμενες πολώσεις όταν δεν μπορεί να συμβεί ιονισμός κρούσης. Αυτό δίνει την πιθανότητα ώστε η φωτοαγωγική απολαβή έχει ενισχυθεί από παγίδες που μπορεί να αρπάξουν και να ξαναεκπέμψουν είτε ηλεκτρόνια είτε οπές. Οι διόδου MSM έχουν κατασκευαστεί και σε συστήματα GaAs καθώς και σε συστήματα InGaAs όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα. Έτσι αυτές οι συσκευές μπορεί να είναι εφαρμόσιμες και σε τοπικά δίκτυα και σε επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι οι φωρατές MSM είναι πολύ ελκτικοί για ΟΕΙC εφαρμογές.

5.6.1 Φωτοδιόδοι MSM σε συστήματα GaAs & InGaAs

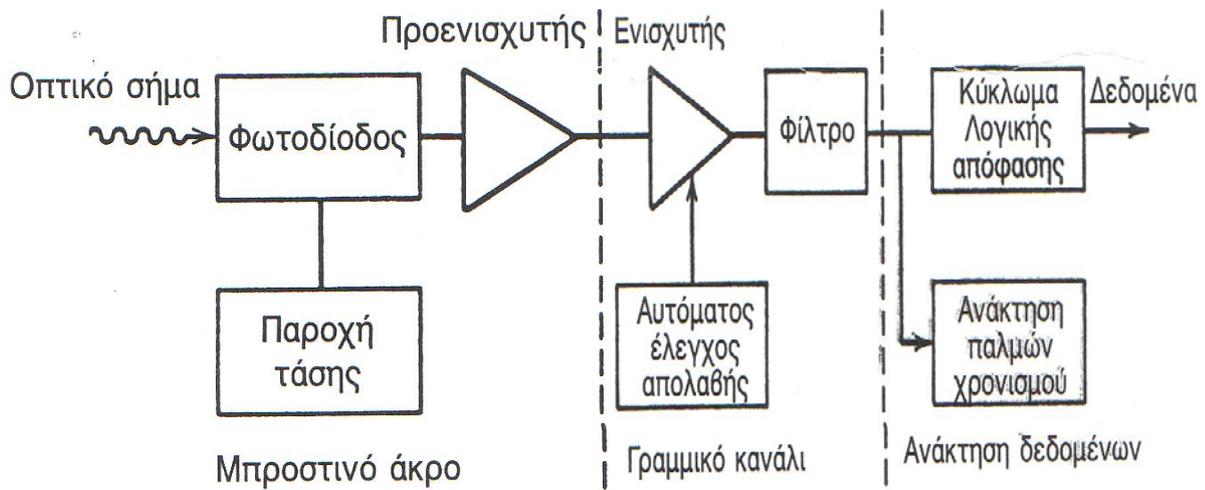
Όπως αναφέρθηκε στους φωτοανιχνευτές MSM, ένα στρώμα απορρόφησης ημιαγωγού τοποθετείται μεταξύ δύο μετάλλων, σχηματίζοντας ένα φράγμα δυναμικού Schottky σε κάθε επαφή μετάλλου-ημιαγωγού, το οποίο εμποδίζει τη ροή των ηλεκτρονίων από το μέταλλο στον ημιαγωγό. Όπως και στη φωτοδιόδο ρ - i - η , δημιουργούνται ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπής μέσω της ροής φωτοαπορρόφησης προς τις επαφές του μετάλλου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φωτορρέυματος, που αποτελεί μέτρο της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος. Για πρακτικούς λόγους, οι δύο

μεταλλικές επαφές κατασκευάζονται στην ίδια (επάνω) πλευρά του επιταξιακά αυξανόμενου στρώματος απορρόφησης, χρησιμοποιώντας ένα *μεσοδακτύλιο* ηλεκτρόδιο με απόσταση δακτύλων περίπου $1\mu\text{m}$ [4]. Αυτή η τεχνική καταλήγει σε μία επίπεδη δομή με εσωτερικά χαμηλή παρασιτική χωρητικότητα, που επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλή ταχύτητα (μέχρι και 300GHz) των φωτοανιχνευτών MSM. Αν το φως προσπίπτει από την πλευρά του ηλεκτροδίου, η αποκρισσιμότητα του φωτοανιχνευτή MSM μειώνεται λόγω της παρεμπόδισης του από τα αδιαφανή ηλεκτρόδια. Το πρόβλημα αυτό λύνεται μέσω του επιστρεφόμενου φωτισμού, αν το υπόστρωμα είναι διαφανές ως προς το προσπίπτον φως.

Οι φωτοανιχνευτές MSM που βασίζονται σε GaAs αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1980 και παρουσιάζουν καταπληκτικά λειτουργικά χαρακτηριστικά [4]. Η ανάπτυξη των φωτοανιχνευτών MSM που βασίζονται σε InGaAs, που είναι κατάλληλοι για οπτικά συστήματα που λειτουργούν μεταξύ $1.3 - 1.6\mu\text{m}$, άρχισε στα τέλη της δεκαετίας τον 1980, με τη μεγαλύτερη πρόοδο να σημειώνεται κατά τη δεκαετία τον 1990 [5]. Το σημαντικότερο πρόβλημα με Το InGaAs είναι ότι έχει σχετικά χαμηλό *ύψος φράγματος δυναμικού-Schottky* (περίπου 0.2eV). Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με την εισαγωγή ενός λεπτού στρώματος InP ή InAlAs ανάμεσα στο στρώμα InGaAs και την μεταλλική επαφή. Ένα τέτοιο στρώμα, που ονομάζεται *στρώμα ενισχυτής φράγματος δυναμικού*, βελτιώνει δραστικά την απόδοση των φωτοανιχνευτών MSM InGaAs.

Η χρήση ενός στρώματος ενίσχυσης-φράγματος δυναμικού InGaAs πάχους 20nm είχε σαν αποτέλεσμα το 1992 ένας φωτοανιχνευτής MSM στα $1.3\mu\text{m}$ να παρουσιάζει 92% κβαντική απόδοση (μέσω του επιστρεφόμενου φωτισμού), με χαμηλό ρεύμα σκότους. Ένα συσκευασμένο εξάρτημα είχε εύρος ζώνης 4GHz παρά τη μεγάλη του διάμετρο, $150\mu\text{m}$. Αν επιθυμούμε μέγιστο φωτισμό για λόγους επεξεργασίας ή συσκευασίας, η αποκρισσιμότητα μπορεί να ενισχυθεί αν χρησιμοποιήσουμε ημιδιαφανείς μεταλλικές επαφές. Σ' ένα από τα πειράματα, η αποκρισσιμότητα Ma $1.55\mu\text{m}$ αυξήθηκε από 0.4A/W στα 0.7A/W , όταν το πάχος της επαφής χρυσού μειώθηκε από 100nm στα 10nm . Σε μία άλλη προσέγγιση, η δομή διαχωρίζεται από το κανονικό υπόστρωμα και συνδέεται σ' ένα υπόστρωμα πυριτίου με μία μεσοδακτύλια επαφή στο κάτω άκρο. Ένας τέτοιος "ανάστροφος" φωτοανιχνευτής MSM, τότε παρουσιάζει υψηλή αποκρισσιμότητα, όταν φωτίζεται από την επάνω πλευρά .

Η προσωρινή απόκριση των φωτοανιχνευτών MSM γενικά είναι διαφορετική όταν φωτίζεται ανάστροφα ή από την επάνω πλευρά [5]. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος ζώνης Δf είναι μεγαλύτερο κατά περίπου 2GHz για τον φωτισμό από την επάνω πλευρά, παρόλο που η αποκρισσιμότητα μειώνεται εξαιτίας της σκίασης τον μετάλλου. Μετρήθηκε εύρος ζώνης μέχρι και 20GHz κάτω από συνθήκες φωτισμού από την επάνω πλευρά. Η απόδοση ενός φωτοανιχνευτή MSM μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο αν χρησιμοποιήσουμε μία διαβαθμισμένη κρυσταλλική δομή. Τα εξαρτήματα αυτά παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα ρεύματος σκότους της τάξης των $0.75\text{pA}/\mu\text{m}^2$, αποκρισσιμότητα περίπου 0.6A/W στα $1.3\mu\text{m}$ και χρόνο ανόδου περίπου 16ps [6]. Η επίπεδη δομή των φωτοανιχνευτών MSM είναι κατάλληλη για μονολιθική ολοκλήρωση θέμα που καλύπτεται σε παραπέρα ενότητα.



Σχήμα 5.15

6. Σχεδίαση του δέκτη

6.1 Εισαγωγή

Η σχεδίαση ενός οπτικού δέκτη εξαρτάται κατά πολύ από το είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται από τον πομπό. Πιο συγκεκριμένα, εξαρτάται από το αν το μεταδιδόμενο σήμα είναι αναλογικής ή ψηφιακής μορφής. Αφού τα περισσότερα οπτικά συστήματα χρησιμοποιούν ψηφιακή διαμόρφωση, στο κεφάλαιο αυτό θα επικεντρωθούμε στους ψηφιακούς οπτικούς δέκτες. Το Σχήμα 6.1 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου δέκτη. Τα εξαρτήματα του μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: την είσοδο, το γραμμικό κανάλι και το τμήμα ανάκτησης δεδομένων. Στην ενότητα αυτή θα σχολιάσουμε κάθε ομάδα χωριστά.

Σχήμα 6.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα για (α) είσοδο υψηλής σύνθετης αντίστασης και (β) είσοδος διαντίστασης στους οπτικούς δέκτες. Και στις δύο περιπτώσεις η φωτοδίοδος μοντελοποιείται σαν μία πηγή ρεύματος.

6.2 Είσοδος του δέκτη ή κυκλώματα εισόδου

Το μπροστινό μέρος ενός δέκτη αποτελείται από μία φωτοδίοδο που συνοδεύεται από έναν προενισχυτή. Το οπτικό σήμα υφίσταται ζεύξη στη φωτοδίοδο χρησιμοποιώντας μία τεχνική ζεύξης όμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στους οπτικούς πομπούς. Στην πράξη χρησιμοποιείται συχνά απευθείας ζεύξη. Η φωτοδίοδος μετατρέπει το οπτικό ρεύμα bit σε ηλεκτρικό σήμα που μεταβάλλεται ανάλογα με τον χρόνο. Ο ρόλος του προενισχυτή είναι να ενισχύει το ηλεκτρικό σήμα για περαιτέρω επεξεργασία.

Η σχεδίαση του μπροστινού άκρου απαιτεί εναλλαγή μεταξύ ταχύτητας κι ευαισθησίας. Αφού η τάση εξόδου τον προενισχυτή μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας μία μεγάλη αντίσταση φορτίου R_L , συχνά χρησιμοποιούμε *είσοδο υψηλής σύνθετης αντίστασης* [βλέπε Σχήμα 6.1(α)]. Επιπλέον, μία μεγάλη αντίσταση R_L μειώνει τον θερμικό θόρυβο και βελτιώνει την ευαισθησία τον δέκτη. Το βασικό μειονέκτημα της εισόδου υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι το μικρό εύρος ζώνης του. Το εύρος ζώνης του δέκτη περιορίζεται από τη χαμηλότερη συνιστώσα του. Μια είσοδος υψηλής σύνθετης αντίστασης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν η Δf είναι αρκετά μικρότερη από τον ρυθμό bit. Μερικές φορές χρησιμοποιούμε έναν εξισωτή για να αυξήσουμε το εύρος ζώνης. Αυτός λειτουργεί σαν φίλτρο που εξασθενίζει τις συνιστώσες χαμηλής συχνότητας του σήματος περισσότερο από τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας κι έτσι αυξάνει κατά πολύ το εύρος ζώνης της εισόδου. Αν δεν μας ενδιαφέρει η ευαισθησία του δέκτη, μπορούμε απλώς να μειώσουμε την R_L για να αυξήσουμε το εύρος ζώνης. Αυτές οι εισοδοί ονομάζονται *είσοδοι μικρής σύνθετης αντίστασης*.

Η είσοδος διαντίστασης παρέχει μία διάταξη με υψηλή ευαισθησία και μεγάλο εύρος ζώνης. Επίσης, έχει βελτιωθεί και η δυναμική του εμβέλεια σε σχέση με την είσοδο της υψηλής σύνθετης αντίστασης. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6.1(β), η αντίσταση φορτίου συνδέεται σαν αντίσταση ανάδρασης σ' έναν αναστρέφοντα ενισχυτή. Παρόλο που η R_L είναι μεγάλη, η *αρνητική ανάδραση* μειώνει την ενεργό σύνθετη αντίσταση εισόδου κατά G , όπου G είναι η απολαβή του ενισχυτή. Επομένως, το εύρος ζώνης ενισχύεται κατά G σε σχέση με Το μπροστινό άκρο σύνθετης αντίστασης. Το μπροστινό άκρο της διαντίστασης συχνά χρησιμοποιείται στον; οπτικούς δέκτες λόγω των βελτιωμένων χαρακτηριστικών του. Ένα πολύ σημαντικό θέμα σχεδιασμού έχει να κάνει με τη σταθερότητα τον βρόχου ανάδρασης.

6.3 Γραμμικό κανάλι

Το γραμμικό κανάλι στους οπτικούς δέκτες αποτελείται από έναν ενισχυτή υψηλής απολαβής (ο κύριος ενισχυτής) κι ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Μερικές φορές συμπεριλαμβάνεται κι ένας εξισωτής ακριβώς πριν τον ενισχυτή για να διορθώνει το περιορισμένο εύρος ζώνης του μπροστινού άκρου. Η απολαβή τον ενισχυτή ελέγχεται αυτόματα, ώστε

η μέση τάση εξόδου να περιορίζεται σ' ένα σταθερό επίπεδο, ανεξάρτητα από τη μέση προσπίπτουσα οπτική ισχύ στον δέκτη. Το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων μορφοποιεί τον παλμό τάσης. Σκοπός του είναι να μειώσει τον θόρυβο χωρίς να υπάρξει έντονη ενδοσυμβολική παρεμβολή (ISI: Intersymbol Interference). Ο θόρυβος του δέκτη είναι ανάλογος με το εύρος ζώνης του και μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, του οποίου το εύρος ζώνης Δf είναι μικρότερο από τον ρυθμό μετάδοσης bit. Αφού τα άλλα εξαρτήματα του δέκτη έχουν σχεδιαστεί με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από εκείνο του φίλτρου, το εύρος ζώνης του δέκτη καθορίζεται από το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στο γραμμικό κανάλι. Για $\Delta f < B$, ο ηλεκτρικός παλμός απλώνεται πέρα από την διάρκεια της περιόδου του bit. Ένα τέτοιο "άπλωμα" μπορεί να δημιουργήσει παρεμβολές στην ανίχνευση των γειτονικών bit, φαινόμενο που ονομάζεται *ISI*.

6.4 Ανάκτηση δεδομένων

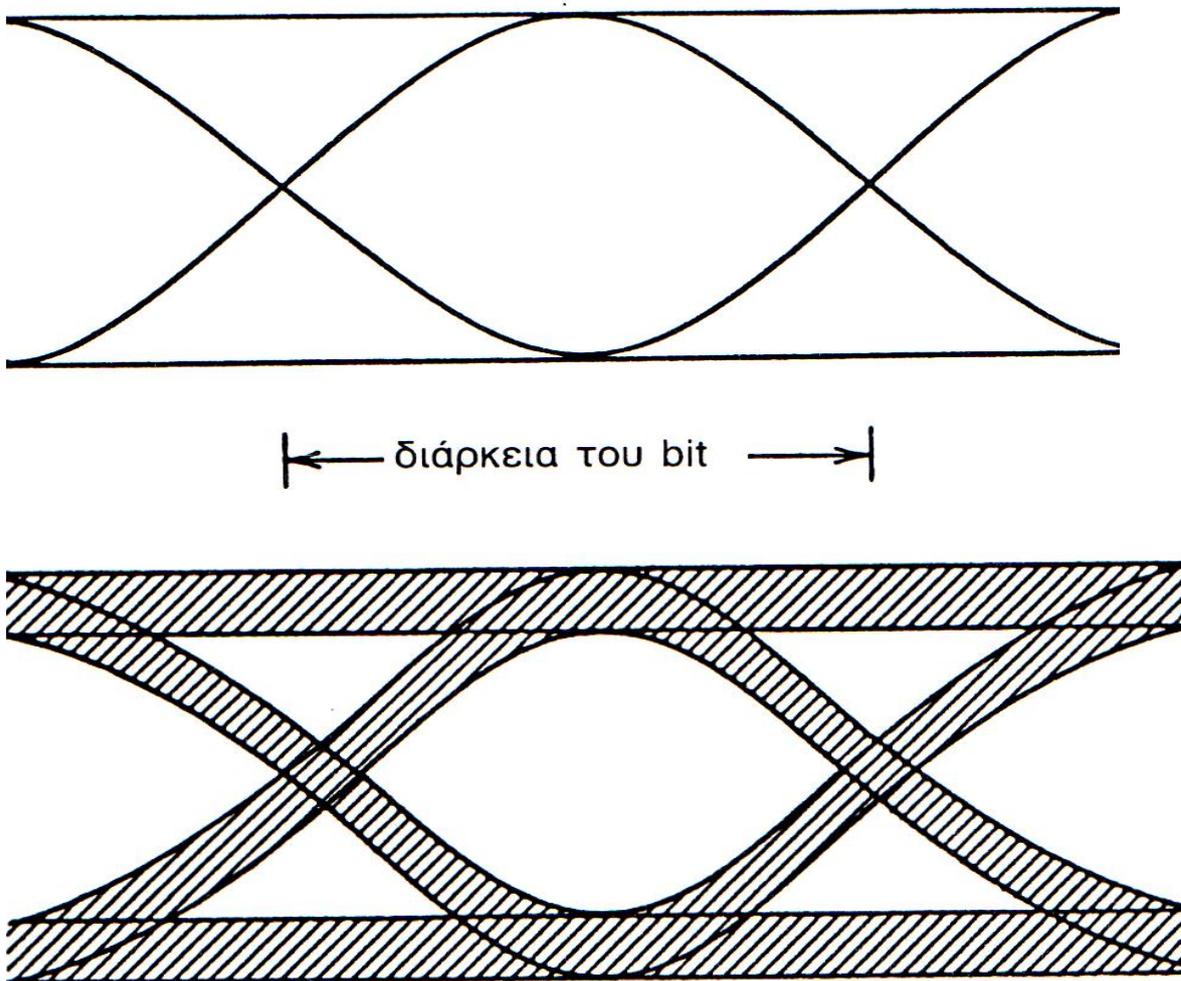
Το τμήμα ανάκτησης των δεδομένων ενός οπτικού δέκτη αποτελείται από ένα κύκλωμα λογικής απόφασης καθώς κι ένα κύκλωμα ανάκτησης παλμών χρονισμού. Ο σκοπός του τελευταίου (κύκλωμα ανάκτησης) είναι να απομονώσει μία φασματική συνιστώσα $f=B$ από το λαμβανόμενο σήμα. Η συνιστώσα αυτή παρέχει πληροφορίες για την περίοδο του bit ($T_B=1/B$) στο κύκλωμα απόφασης και βοηθά στον συγχρονισμό της διαδικασίας απόφασης. Στην περίπτωση διαμόρφωσης RZ (επιστροφή στο μηδέν), υπάρχει μία φασματική συνιστώσα $f=B$ στο λαμβανόμενο σήμα. Ένα φίλτρο διέλευσης στενής ζώνης συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα ένα φίλτρο επιφανειακού ακουστικού- κύματος, μπορεί εύκολα να απομονώσει τη συνιστώσα αυτή. Η ανάκτηση των παλμών χρονισμού είναι πολύ δυσκολότερη στην περίπτωση διαμόρφωσης NRZ, λόγω του ότι η λήψη του σήματος δεν διαθέτει τη φασματική συνιστώσα $f=B$. Μία συνηθισμένη τεχνική δημιουργεί μία τέτοια συνιστώσα τετραγωνίζοντας κι ανορθώνοντας την φασματική συνιστώσα σε $f=B/2$, ώστε να μπορεί να αποκτηθεί αν περάσουμε το λαμβανόμενο σήμα μέσα από ένα φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων.

Το κύκλωμα απόφασης συγκρίνει την έξοδο του γραμμικού καναλιού με ένα επίπεδο κατωφλίου, σε δειγματοληπτικούς χρόνους που καθορίζονται από ένα κύκλωμα ανάκτησης των παλμών χρονισμού, και αποφασίζει αν το σήμα αντιστοιχεί σε bit 1 ή 0. Ο καλύτερος δειγματοληπτικός χρόνος αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου η διαφορά επιπέδου σήματος μεταξύ bit 1 και 0 είναι μέγιστη. Αυτός καθορίζεται από το *οφθαλμικό διάγραμμα* που σχηματίζεται αν εναποθέσουμε ηλεκτρικές ακολουθίες μήκους 2-3 bit στο ρεύμα bit τη μία πάνω από την άλλη. Ο σχηματισμός που προκύπτει ονομάζεται *οφθαλμικό διάγραμμα* λόγω της μορφής του. Το Σχήμα 6.2 παρουσιάζει ένα ιδανικό οφθαλμικό διάγραμμα, καθώς κι ένα υποβαθμισμένο, στο οποίο ο θόρυβος και το χρονικό τρέμουλο οδηγούν

σε μερικό κλείσιμο του "ματιού". Ο καλύτερος δειγματοληπτικός χρόνος αντιστοιχεί στο μέγιστο άνοιγμα του "ματιού".

Εξαιτίας τον θορύβου, που βρίσκεται στο εσωτερικό κάθε δέκτη, υπάρχει πάντα η πιθανότητα ένα bit να αναγνωριστεί λανθασμένα από το κύκλωμα απόφασης. Οι ψηφιακοί δέκτες έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν έτσι ώστε η πιθανότητα λάθους να είναι πολύ μικρή (τυπικά $<10^{-9}$).

Στις επόμενες ενότητες, σχολιάζονται θέματα που αφορούν τον θόρυβο του δέκτη και τα σφάλματα απόφασης. Το οφθαλμικό διάγραμμα παρέχει έναν οπτικό τρόπο ελέγχου της απόδοσης του δέκτη: Το κλείσιμο του ματιού αποτελεί ένδειξη ότι ο δέκτης δεν λειτουργεί κανονικά.



Σχήμα 6.2 Το ιδανικό και το υποβαθμισμένο διάγραμμα "οφθαλμού" για ροή bit σε διαμόρφωση NRZ.

6.5 Ολοκληρωμένοι Δέκτες

Όλα τα εξαρτήματα του δέκτη που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3, με εξαίρεση τη φωτοδίοδο, είναι συνηθισμένα ηλεκτρικά εξαρτήματα και μπορούν εύκολα να ολοκληρωθούν πάνω στο ίδιο chip χρησιμοποιώντας την τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC), η οποία αναπτύχθηκε για τα μικροηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η ολοκλήρωση είναι ιδιαίτερα απαραίτητη για τους δέκτες που λειτουργούν σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit. Ως το 1988, και η τεχνολογία ολοκληρωμένων Si και η τεχνολογία ολοκληρωμένων GaAs χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουμε ολοκληρωμένους δέκτες με εύρος ζώνης μέχρι και πάνω από 2GHz [7]. Από τότε, το εύρος ζώνης έχει επεκταθεί στα 10GHz.

Σχήμα 6.3 Ένα chip ημιαγωγού με ακροδέκτες μόνο στη μία επιφάνεια τεχνολογίας OEIC (flip-chip) για τους ολοκληρωμένους δέκτες. Η φωτοδίοδος InGaAs κατασκευάζεται πάνω σε ένα υπόστρωμα InP και κατόπιν συνδέεται με το chip GaAs μέσω κοινών ηλεκτρικών επαφών.

Σημαντικές προσπάθειες έχουν κατευθυνθεί στην ανάπτυξη μονολιθικών οπτικών δεκτών που ολοκληρώνουν όλα τα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένης και της φωτοδίοδου, στο ίδιο chip χρησιμοποιώντας τεχνολογία *οπτοηλεκτρονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος* (OEIC). Μία τέτοια πλήρης ολοκλήρωση είναι σχετικά εύκολη για δέκτες GaAs και η τεχνολογία πίσω από τα OEIC βασισμένη σε GaAs είναι αρκετά προηγμένη. Η χρήση φωτοδίοδων MSM αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς έχουν παρόμοιες δομές με την αρκετά προηγμένη τεχνολογία των *τρανζίστορ επίδρασης πεδίου* (FET). Αυτή χρησιμοποιήθηκε το 1986 για να παρουσιάσει ένα chip τετρακάναλου δέκτη OEIC.

Για τα οπτικά συστήματα που λειτουργούν σε μήκος κύματος 1.3-1.6μm, χρειαζόμαστε δέκτες OEIC βασισμένους σε InP. Από τη στιγμή που η τεχνολογία IC για το GaAs είναι πολύ πιο ώριμη απ' ό τι για το InP, μερικές

φορές χρησιμοποιείται μία υβριδική προσέγγιση για τους δέκτες InGaAs. Στην προσέγγιση αυτή, που ονομάζεται *τεχνολογία OEIC flip-chip* [8], τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα ολοκληρώνονται πάνω σε ένα chip GaAs, ενώ η φωτοδίοδος κατασκευάζεται πάνω σε ένα chip InP. Τα δύο chip τότε συνδέονται με τοποθέτηση του chip InP, πάνω στο chip GaAs, όπως δείχνει το Σχήμα 6.3. Το πλεονέκτημα της τεχνολογίας του chip αυτού είναι ότι η φωτοδίοδος και τα ηλεκτρικά εξαρτήματα τον δέκτη μπορούν να βελτιωθούν μεμονωμένα ενώ διατηρούν τα παράσιτα (π.χ. ενεργός χωρητικότητα εισόδου) σε ελάχιστο επίπεδο.

Η τεχνολογία IC που βασίζεται στο InP έχει εξελιχθεί σημαντικά κατά τη δεκαετία του 1990, κάνοντας δυνατή τη δημιουργία δεκτών OEIC InGaAs. Για τον σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα είδη τρανζίστορ. Σε μία προσέγγιση, μία φωτοδίοδος *p-i-n* ολοκληρώνεται με ένα FET ή ένα τρανζίστορ υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων (HEMT) πλευρά με πλευρά σ' ένα υπόστρωμα InP. Ως το 1993, οι δέκτες βασισμένοι σε HEMT λειτουργούσαν στα 10Gb/s με υψηλή ευαισθησία. Το εύρος ζώνης ενός τέτοιου δέκτη έχει αυξηθεί στα 22GHz, κι έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ρυθμούς μετάδοσης bit πάνω από 20Gb/s. Μία δίοδος *p-i-n* κυματοδηγός επίσης ολοκληρώθηκε με ένα HEMT για τη δημιουργία μίας διάταξης δικάναλου δέκτη OEIC.

Σε μία άλλη προσέγγιση, χρησιμοποιείται η τεχνολογία του διπολικού τρανζίστορ ετερογενούς επαφής (HBT) για την κατασκευή φωτοδίοδου *p-i-n* δομής HBT με διάταξη κοινού συλλέκτη. Τα τρανζίστορ αυτά συχνά ονομάζονται *φωτοτρανζίστορ ετεροεπαφής*. Αυτοί οι δέκτες OEIC που λειτουργούν στα 5Gb/s (εύρος ζώνης $\Delta f = 3\text{GHz}$) παρουσιάστηκαν το 1993. Το εύρος ζώνης μπορεί να αυξηθεί στα 7.1 GHz χρησιμοποιώντας είσοδο διαντίστασης με ανάδραση για τον δέκτη OEIC. Ως το 1995, οι δέκτες OEIC χρησιμοποιούσαν τεχνολογία HBT και παρουσίαζαν εύρος ζώνης μέχρι και 16GHz, μαζί με υψηλή απολαβή, με την κατάλληλη βελτίωση του σχεδιασμού τους. Οι δέκτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ρυθμούς μετάδοσης bit πάνω από 20Gb/s. Πράγματι, ένα πρότυπο δέκτη OEIC υψηλής ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε με ρυθμό bit 20Gb/s σ' ένα οπτικό σύστημα 1.55 μm . Ακόμη κι ένα κύκλωμα απόφασης μπορεί να ολοκληρωθεί σ' έναν δέκτη OEIC χρησιμοποιώντας τεχνολογία HBT, κι έχει επιδειχθεί η λειτουργία τους στα 13Gb/s [9].

Μία τρίτη προσέγγιση των δεκτών OEIC βασισμένοι σε InP ολοκληρώνει έναν φωτοανιχνευτή MSM με ένα HEMT ή με ένα εμπλουτισμένο FET διαμόρφωσης. Ως το 1995, επιτεύχθηκε εύρος ζώνης 15GHz για ένα τέτοιο OEIC χρησιμοποιώντας εμπλουτισμένα FET διαμόρφωσης. Αργότερα αυξήθηκε στα 18.5GHz χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα ενισχυτή διαντίστασης με ενεργό ανάδραση συντονισμού. Το Σχήμα 6.4 παρουσιάζει το διάγραμμα κυκλώματος καθώς και τη δομή επιταξιακού στρώματος ενός τέτοιου δέκτη OEIC. Ο φωτοανιχνευτής MSM αναπτύχθηκε πάνω στο εμπλουτισμένο FET διαμόρφωσης κι ένα οριακό στρώμα InP εμπλουτισμένο με Fe διαχωρίζει αυτά τα δύο. Η ενεργός περιοχή του φωτοανιχνευτή MSM ήταν 25x25 μm^2 . Η αποκρισιμότητα στα 1.55 μm ήταν 0.26A/W, με ρεύμα σκότους 70-nA σε τάση λειτουργίας 8V Η τάση κατωφλίου του FET ήταν μόλις -0.7V Το εύρος ζώνης ενός τέτοιου δέκτη OEIC μετρήθηκε ότι είναι 18.5GHz σε μία διαντίσταση 80 Ω .

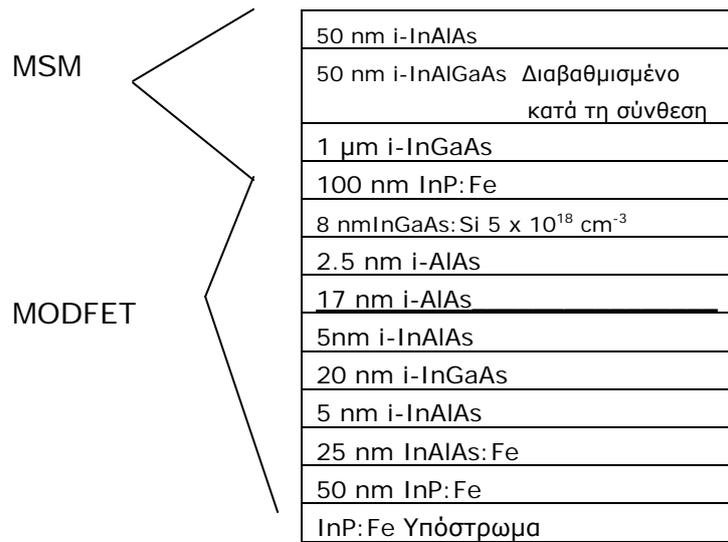
Αφού η τεχνολογία οπτικών συστημάτων προσανατολίζεται προς τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit μέσω της πολυπλεξίας διαίρεσης- μήκους

κύματος, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για τη δημιουργία εξαρτημάτων που μπορούν να ανιχνεύσουν διάφορα κανάλια χρησιμοποιώντας μια απλή διάταξη δέκτη ΟΕΙC.

Όπως και στην περίπτωση των οπτικών πομπών η συσκευασία του οπτικού δέκτη επίσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα. Το θέμα της ζεύξης οπτικής ίνας-ανιχνευτή είναι ακόμη πιο κρίσιμο στην περίπτωση του δέκτη, απ' ό,τι το θέμα ζεύξης οπτικής ίνας-πηγής στην περίπτωση του πομπού, αφού μόνο μια μικρή ποσότητα οπτικής ισχύος τυπικά διατίθεται στον φωτοανιχνευτή. Το θέμα της οπτικής ανάδρασης είναι εξίσου σημαντικό, αφού αστάθμητες ανακλάσεις που στέλνονται πίσω στην οπτική ίνα μετάδοσης μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος και γι' αυτό θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

Στην πράξη, το άκρο της οπτικής ίνας κόβεται υπό γωνία για να μειώσει την οπτική ανάδραση. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για την παραγωγή συσκευασμένων οπτικών δεκτών ικανών να λειτουργούν με ρυθμό bit μέχρι και 10Gb/s. Σε μία προσέγγιση, μία InGaAs APD συνδέθηκε OF ένα IC βασισμένο σε Si με την τεχνική flip-chip. Χρησιμοποιώντας μία οπτική *ίνα λοξού άκρου* και ένα μικροφακό μονολιθικά κατασκευασμένο πάνω στη φωτοδίοδο επιτεύχθηκε ικανοποιητική ζεύξη οπτικής ίνας-APD. Η προέκταση της οπτικής ίνας συγκολλήθηκε κατευθείαν με laser στα τοιχώματα της συσκευασίας με διπλό δακτύλιο για μηχανική σταθερότητα. Το πρότυπο του δέκτη που προέκυψε άντεξε τους ελέγχους δονήσεων και είχε ένα εύρος ζώνης 10GHz.

Μια άλλη υβριδική προσέγγιση χρησιμοποιεί μια επιφάνεια *επιπέδου οπτικού κυκλώματος*, που εμπεριέχει κυματοδηγούς πυριτίου πάνω σ' ένα υπόστρωμα πυριτίου. Σ' ένα πείραμα [10], ένας δικάναλος δέκτης ΟΕΙC με βάση το InP συνδέθηκε μέσω flip-chip στο επίπεδο αυτό. Η μονάδα που προέκυψε μπορούσε να ανιχνεύσει δύο κανάλια των 10Gb/s με αμελητέα αλληλεπίδραση μεταξύ των καναλιών αυτών (διαφωνία). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν IC GaAs για την κατασκευή ενός συμπαγούς πρότυπου δέκτη ικανού να λειτουργεί με ρυθμό bit 10Gb/s. Για εφαρμογές τοπικού βρόχου και δικτύου, χρειάζεται συσκευασία χαμηλού κόστους κι ο δέκτης θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε μία μεγάλη εμβέλεια θερμοκρασίας (-4085°C). Πρόσφατα, αναπτύχθηκε ένας δέκτης με συνδέσεις πλαστικού, ικανός να λειτουργεί στα 155Mb/s με μόλις 300nW οπτικής ισχύος, για τις εφαρμογές αυτές.



(α)

(β)

Σχήμα 6.4 (α) Η δομή επιταξιακού στρώματος και (β) το κυκλωματικό διάγραμμα ενός δέκτη OEIC, όπου ένας φωτοανιχνευτής MSM (MSM-PD) δημιουργείται πάνω στο ντοπαρισμένο FET διαμόρφωσης (MODFET).

6.6 Θόρυβος του Δέκτη

Οι οπτικοί δέκτες μετατρέπουν την προσπίπτουσα οπτική ισχύ P_{in} , σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω μιας φωτοδιόδου. Η σχέση $I_p = RP_{in}$ υποθέτει πως μία τέτοια μετατροπή δεν παρουσιάζει θόρυβο. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει ούτε καν σ' έναν τέλειο δέκτη. Δύο βασικοί μηχανισμοί θορύβου, ο *θόρυβος βολής* και ο *θερμικός θόρυβος*, οδηγούν σε διακυμάνσεις του ρεύματος, ακόμη κι όταν το προσπίπτον οπτικό σήμα έχει σταθερή ισχύ. Η σχέση $I_p = RP_{in}$ ισχύει ακόμη αν λάβουμε το I_p σαν το μέσο ρεύμα. Ωστόσο, ο ηλεκτρικός θόρυβος, που επάγεται από τις διακυμάνσεις του ρεύματος, επηρεάζει την απόδοση του δέκτη. Ο αντικειμενικός σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιάσει τους μηχανισμούς θορύβου και να σχολιάσει τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) στους οπτικούς δέκτες. Οι δέκτες $p-i-n$ και APD εξετάζονται σε διαφορετικές υποενότητες, αφού ο SNR επηρεάζεται και από τον μηχανισμό απολαβής χιονοστιβάδας των APD.

6.6.1 Μηχανισμοί Θορύβου

Όπως προαναφέραμε, ο θόρυβος βολής και ο θερμικός θόρυβος είναι οι δύο βασικοί μηχανισμοί θορύβου, οι οποίοι ευθύνονται για τις διακυμάνσεις του ρεύματος σε όλους τους οπτικούς δέκτες, ακόμη κι όταν η προσπίπτουσα οπτική ισχύς P_{in} είναι σταθερή. Φυσικά, δημιουργείται επιπλέον θόρυβος αν και η ίδια η P_{in} παρουσιάζει διακυμάνσεις, επειδή ο θόρυβος έντασης σχετίζεται με τον πομπό.

6.6.1.1 Θόρυβος Βολής

Ο θόρυβος βολής αποδεικνύει πως το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελείται από μία ροή ηλεκτρονίων, τα οποία δημιουργούνται σε τυχαίους χρόνους. Αρχικά μελετήθηκε από τον Schottky [11] Το 1918 κι από τότε έχει μελετηθεί εκτεταμένα.

6.6.1.2 Θερμικός Θόρυβος

Σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, τα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαία σε οποιονδήποτε αγωγό. Η τυχαία θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων σε μία αντίσταση παρουσιάζεται με τη μορφή διακυμάνσεων ρεύματος, ακόμη κι όταν δεν εφαρμόζουμε τάση. Η αντίσταση φορτίου στο μπροστινό άκρο ενός οπτικού δέκτη (βλέπε Σχήμα 6.1) προσθέτει τέτοιου είδους διακυμάνσεις στο ρεύμα που δημιουργείται από μία φωτοδίοδο. Αυτός ο επιπλέον θόρυβος ονομάζεται *θερμικός θόρυβος*. Επίσης, ονομάζεται

θόρυβος *Johnson* ή θόρυβος *Nyquist* από τα ονόματα των δύο επιστημόνων που πρώτοι τον μελέτησαν τόσο πειραματικά, όσο και θεωρητικά.

6.6.2 Δέκτες p-i-n

Η απόδοση ενός οπτικού δέκτη εξαρτάται από τον SNR. Ο SNR ενός δέκτη με φωτοδίοδο p-i-n θα εξετασθεί στην ενότητα αυτή. Οι δέκτες APD σχολιάζονται στην επόμενη υποενότητα. Ο SNR οποιουδήποτε ηλεκτρικού σήματος ορίζεται ως εξής

$$SNR = \text{μέση ισχύς του σήματος/ισχύς θορύβου}$$

όπου χρησιμοποιούμε το γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς μεταβάλλεται με το τετράγωνο του ρεύματος.

6.6.2.1 Όριο θερμικού θορύβου

Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, ο θερμικός θόρυβος χαρακτηρίζει κυρίως την απόδοση του δέκτη. Αν αγνοήσουμε τον όρο του θορύβου βολής θα δούμε ότι ο SNR μεταβάλλεται κατά P_{in}^2 στο όριο του θερμικού θορύβου. Επίσης μπορεί να βελτιωθεί αν αυξήσουμε την αντίσταση του φορτίου. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος που οι περισσότεροι δέκτες χρησιμοποιούν κυκλώματα εισόδου υψηλής σύνθετης αντίστασης ή διαντίστασης με ανάδραση. Η επίδραση του θερμικού θορύβου συχνά υπολογίζεται με μια ποσότητα που ονομάζεται *ισοδύναμη ισχύς θορύβου* (NEP). Η NEP ορίζεται σαν η ελάχιστη οπτική ισχύς που απαιτείται ανά μονάδα εύρους ζώνης για να παράγει λόγο SNR=1.

Επίσης χρησιμοποιούμε και ένα άλλο ποσό για τον σκοπό αυτό, το οποίο ονομάζεται *ανιχνευσιμότητα* και ορίζεται σαν $(NEP)^{-1}$. Το πλεονέκτημα του προσδιορισμού του NEP ή της ανιχνευσιμότητας για έναν δέκτη p-i-n είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσουμε την οπτική ισχύ που χρειάζεται ώστε να παράγουμε μια συγκεκριμένη τιμή του SNR, αν γνωρίζουμε το εύρος ζώνης Δf . Τυπικές τιμές του NEP κυμαίνονται μεταξύ $1-10 \text{ pW/Hz}^{1/2}$.

6.6.2.2 Όριο θορύβου βολής

Αν πάρουμε το αντίθετο όριο, όπου η απόδοση του δέκτη χαρακτηρίζεται κυρίως από τον θόρυβο βολής, βλέπουμε ότι ο θόρυβος βολής αυξάνεται γραμμικά με την P_{in} καθώς και επιτυγχάνεται αν αυξήσουμε την προσπίπτουσα ισχύ. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αν αγνοήσουμε το ρεύμα σκότους I_d θα δούμε ότι ο SNR αυξάνεται γραμμικά με την P_{in} στο όριο του θορύβου βολής κι εξαρτάται μόνο από την κβαντική απόδοση η το εύρος ζώνης Δf και την ενέργεια φωτονίου $h\nu$. Μπορεί να γραφεί όσον αφορά στον αριθμό των φωτονίων N_p που εμπεριέχονται στο bit "1". Στο

όριο του θορύβου βολής, μπορούμε να πάρουμε SNR 20dB αν $N_p=100$. Αντίθετα, απαιτούνται αρκετές χιλιάδες φωτόνια για να πάρουμε SNR 20dB, όταν στον δέκτη κυριαρχεί θερμικός θόρυβος. Πληροφοριακά, για έναν δέκτη 1.55μm που λειτουργεί στα 10Gb/s $N_p = 100$ όταν $P_{in} = 130nW$.

6.6.3 Δέκτες APD

Οι οπτικοί δέκτες που χρησιμοποιούν μία APD γενικά παρέχουν μεγαλύτερο SNR για την ίδια ποσότητα προσπίπτουσας οπτικής ισχύος. Η βελτίωση οφείλεται στην εσωτερική απολαβή, η οποία αυξάνει το φωτόρρευμα κατά έναν παράγοντα πολλαπλασιασμού M , έτσι ώστε

$$I_p = MRP_{in} = R_{APD}P_{in} \quad (\text{Σχέση 1})$$

όπου R_{APD} είναι η αποκρισιμότητα της APD, ενισχυμένη κατά M σε σύγκριση με την φωτοδίοδο $p-i-n$ ($R_{APD}=MR$). Ο SNR θα βελτιωνόταν κατά M^2 αν ο θόρυβος του δέκτη παρέμενε ανεπηρέαστος από τον μηχανισμό της εσωτερικής απολαβής της APD. Δυστυχώς, ενισχύεται επίσης και ο θόρυβος ενός δέκτη APD κι έτσι η βελτίωση τον SNR μειώνεται αρκετά.

6.6.3.1 Ενίσχυση θορύβου βολής

Ο θερμικός θόρυβος παραμένει ο ίδιος στους δέκτες APD, αφού δημιουργείται στα ηλεκτρικά εξαρτήματα που δεν αποτελούν μέρος της APD. Αυτό δεν συμβαίνει και με τον θόρυβο βολής. Η απολαβή APD προέρχεται από την δημιουργία δευτερογενών ζευγών ηλεκτρονίου-οπής με τη διαδικασία ιονισμού με κρούση. Αφού τα ζευγάρια αυτά δημιουργούνται σε τυχαίους χρόνους, προστίθεται μία επιπλέον συνεισφορά στον θόρυβο βολής, που σχετίζεται με τη δημιουργία των πρωτευόντων ζευγαριών ηλεκτρονίου-οπής. Σαν συνέπεια, ο ίδιος ο παράγοντας πολλαπλασιασμού αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή, και ο M που εμφανίζεται στην Σχέση 1 αναπαριστά τη μέση απολαβή APD.

6.7 Ευαισθησία του Δέκτη

Μεταξύ μερικών οπτικών δεκτών, λέμε ότι κάποιος είναι πιο ευαίσθητος αν καταφέρνει να έχει την ίδια απόδοση με μικρότερη προσπίπτουσα οπτική ισχύ. Το κριτήριο της απόδοσης για τους ψηφιακούς δέκτες διέπεται από τον *ρυθμό εσφαλμένων bit* (BER), που ορίζεται σαν η πιθανότητα εσφαλμένης αναγνώρισης ενός bit από το κύκλωμα απόφασης τον δέκτη. Έτσι, ένας BER της τάξης του 2×10^{-6} αντιστοιχεί σε μέσο όρο 2

σφαλμάτων ανά ένα εκατομμύριο bit. Ένα συνηθισμένο κριτήριο για τους ψηφιακούς οπτικούς δέκτες απαιτεί $BER < 1 \times 10^{-9}$. Τότε, η ευαισθησία του δέκτη ορίζεται σαν η ελάχιστη μέση λαμβανόμενη ισχύς P_{rec} που απαιτείται από τον δέκτη για να λειτουργήσει σε $BER 10^{-9}$. Αφού η P_{rec} εξαρτάται από τον BER ως αρχίσουμε με τον υπολογισμό αυτού.

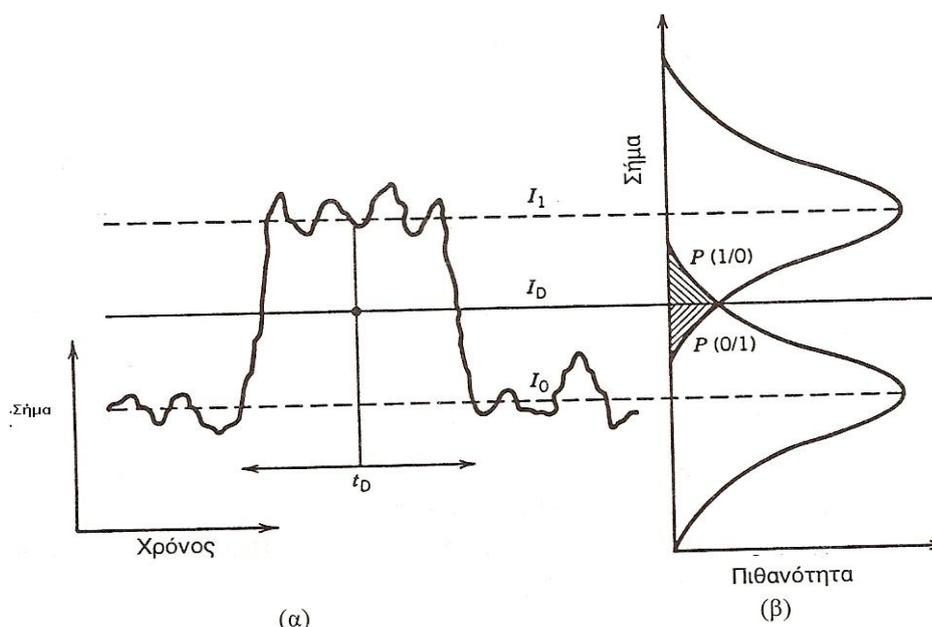
6.7.1 Ρυθμός Εμφάνισης Εσφαλμένων-bit

Το Σχήμα 6.5(α) παρουσιάζει σχηματικά τις διακυμάνσεις του σήματος, που λαμβάνονται από το κύκλωμα απόφασης, το οποίο υφίστανται δειγματοληψία στον χρόνο απόφασης t_D , που καθορίζεται μέσω της ανάκτησης των παλμών χρονισμού. Η δειγματοληπτική τιμή I μεταβάλλεται από bit σε bit με μέση τιμή I_1 ή I_0 , ανάλογα με το αν το bit αντιστοιχεί στο 1 ή στο 0 της αλληλουχίας των bit. Το κύκλωμα απόφασης συγκρίνει τις τιμές αυτές με μία τιμή κατωφλιού I_D και το ονομάζει "bit 1" αν $I > I_D$ ή "bit 0" αν $I < I_D$. Σφάλμα εμφανίζεται αν $I < I_D$ για "bit 1" λόγω του θορύβου του δέκτη. Επίσης, σφάλμα εμφανίζεται και αν $I > I_D$ για "bit 0". Μπορούμε να συμπεριλάβουμε και τις δύο πηγές σφαλμάτων ορίζοντας την *πιθανότητα σφάλματος* ως εξής :

$$BER = \rho(1)P(0/1) + \rho(0)P(1/0) ,$$

όπου $\rho(1)$ και $\rho(0)$ είναι η πιθανότητα λήψης 1 και 0 αντίστοιχα, $P(0/1)$ είναι η πιθανότητα απόφασης 0 όταν λαμβάνεται 1 και $P(1/0)$ είναι η πιθανότητα απόφασης 1 όταν λαμβάνεται 0. Αφού τα bit 1 και 0 έχουν τις ίδιες πιθανότητες εμφάνισης , $\rho(1)=\rho(0)=1/2$ και ο BER γίνεται :

$$BER = \frac{1}{2}[P(0/1)+P(1/0)] .$$



Σχήμα 6.5 (α) Η διακύμανση του σήματος που δημιουργείται στον δέκτη. (β) Οι πυκνότητες Γκαουσιανής πιθανότητας των bit 0 και 1. Η σκιασμένη

6.8 Υποβάθμιση της Ευαισθησίας

Η περιγραφή της ευαισθησίας που έγινε στην προηγούμενη ενότητα βασίζεται στον υπολογισμό του θορύβου του δέκτη μόνο. Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση δέχεται ότι το προσπίπτον οπτικό σήμα στον δέκτη αποτελείται από ένα ιδανικό ρεύμα bit, ώστε τα bit "1" να αποτελούνται από έναν οπτικό παλμό σταθερής ενέργειας, ενώ τα bit "0" δεν περιέχουν καθόλου ενέργεια. Στην πραγματικότητα, το οπτικό σήμα που εκπέμπεται από έναν πομπό παρεκκλίνει από την ιδανική κατάσταση. Επιπλέον, μπορεί να υποβαθμιστεί κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του μέσω της οπτικής ίνας. Η ελάχιστη μέση οπτική ισχύς που απαιτείται αυξάνεται λόγω αυτών των μη-ιδανικών συνθηκών, σε σύγκριση με την τιμή της P_{rec} που προκύπτει στην προηγούμενη ενότητα, αν θεωρήσουμε μόνο τον θόρυβο του δέκτη. Η αύξηση αυτή της μέσης λαμβανόμενης ισχύος ονομάζεται *καταστολή ισχύος*. Πολλοί είναι οι παράγοντες που συνεισφέρουν στην καταστολή ισχύος. Μερικοί από αυτούς εμφανίζονται μόνο όταν το σήμα μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας, ενώ άλλοι εμφανίζονται ακόμη κι όταν δεν υπάρχει οπτική ίνα. Στην ενότητα αυτή θα σχολιάσουμε τις πηγές καταστολής ισχύος, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην υποβάθμιση της ευαισθησίας, ακόμη και χωρίς μετάδοση σήματος μέσω μιας οπτικής ίνας. Οι μηχανισμοί καταστολής ισχύος που σχετίζονται με την παρουσία οπτικής ίνας σχολιάζονται παρακάτω. Μια εκτεταμένη και ακριβής ανάλυση των μηχανισμών καταστολής θα ήταν περίπλοκη, αφού έχει να κάνει με τον υπολογισμό των στατιστικών φωτορρεύματος.

- ▶ **Λόγος Διαγραφής:** Μια απλή πηγή καταστολής ισχύος σχετίζεται με την ενέργεια που μεταφέρεται από τα bit "0". Κάποια ποσότητα ισχύος εκπέμπεται από τους περισσότερους πομπούς ακόμη και σε κατάσταση off. Στην περίπτωση των laser ημιαγωγών, η ισχύς κατάστασης off P_0 εξαρτάται από το ρεύμα πόλωσης I_b και το ρεύμα κατωφλίου I_{th} . Αν $I_b < I_{th}$, η ισχύς που εκπέμπεται από τα bit "0" οφείλεται σε αυθόρμητη εκπομπή και γενικά, $P_0 \ll P_1$, όπου P_1 είναι η ισχύς κατάστασης (λειτουργίας). Αντίθετα η P_0 μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κλάσμα της P_1 , αν το laser είναι πολωμένο κοντά αλλά πάνω από το επίπεδο κατωφλίου. Ο λόγος διαγραφής ορίζεται ως:

$$r_{ex} = P_0 / P_1$$

- ▶ **Θόρυβος Έντασης:** Η ανάλυση του θορύβου στην ενότητα 6.6 βασίζεται στην προϋπόθεση ότι η οπτική ισχύς που προσπίπτει στον δέκτη δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις. Στην πραγματικότητα το φως που εκπέμπεται από οποιονδήποτε πομπό παρουσιάζει διακυμάνσεις της ισχύος του. Οι διακυμάνσεις αυτές ονομάζονται *θόρυβος έντασης*. Ο οπτικός δέκτης μετατρέπει τις διακυμάνσεις της ισχύος σε διακυμάνσεις

ρεύματος, που προστίθενται σ' εκείνες που προέρχονται από τον θόρυβο βολής και τον θερμικό θόρυβο. Σαν αποτέλεσμα ο SNR του δέκτη υποβαθμίζεται.

- ▶ **Τρέμουλο Χρονισμού:** Ο υπολογισμός της ευαισθησίας του δέκτη στην ενότητα 6.7 βασίζεται στην υπόθεση ότι το σήμα υφίσταται δειγματοληψία στην κορυφή του παλμού τάσης. Στην πράξη, ο στιγμιαίος χρόνος απόφασης καθορίζεται από το κύκλωμα ανάκτησης παλμών χρονισμού (βλέπε Σχήμα 5.15). Εξαιτίας του ότι το κύκλωμα ανάκτησης παλμών χρονισμού είναι από την φύση του θορυβώδες, ο χρόνος δειγματοληψίας παρουσιάζει διακυμάνσεις από bit σε bit. Οι διακυμάνσεις αυτές ονομάζονται *τρέμουλο χρονισμού* [12]. Ο SNR υποβαθμίζεται λόγω του ότι οι διακυμάνσεις του χρόνου δειγματοληψίας οδηγούν σε επιπλέον διακυμάνσεις του σήματος. Αυτό γίνεται κατανοητό αν σημειώσουμε ότι αν δεν κάνουμε τη δειγματοληψία του bit στο κέντρο του, η τιμή της θα μειωθεί κατά ένα ποσό, το οποίο εξαρτάται από το τρέμουλο χρονισμού Δt . Αφού το Δt αποτελεί τυχαία μεταβλητή, η μείωση της τιμής δειγματοληψίας είναι επίσης τυχαία. Ο SNR μειώνεται σαν αποτέλεσμα των επιπλέον αυτών διακυμάνσεων και η απόδοση του δέκτη υποβαθμίζεται σε σχέση με εκείνη που περιμένουμε όταν δεν υπάρχει τρέμουλο χρονισμού. Ο SNR μπορεί να διατηρηθεί αν αυξήσουμε την λαμβανόμενη οπτική ισχύ. Η αύξηση αυτή είναι η καταστολή ισχύος που επάγεται με το τρέμουλο χρονισμού.

6.9 Απόδοση Δέκτη

Η απόδοση του δέκτη χαρακτηρίζεται από τη μέτρηση του BER σαν συνάρτηση της μέσης λαμβανόμενης οπτικής ισχύος. Η μέση οπτική ισχύς που αντιστοιχεί σε BER 10^{-9} αποτελεί μέτρο της ευαισθησίας του δέκτη. Το Σχήμα 6.6 παρουσιάζει την ευαισθησία του δέκτη μετρημένη σε διάφορα πειράματα μετάδοσης [13] στέλνοντας μία μεγάλη σειρά ψευδο-τυχαίων bit (τυπικό μήκος ακολουθίας $2^{15}-1$), σε ολόκληρο το μήκος μίας μονότροπης οπτικής ίνας και κατόπιν ανιχνεύοντας την μέσω ενός δέκτη *p-i-n* ή APD. Τα πειράματα έγιναν σε μήκος κύματος 1.3 ή 1.55 μm και ο ρυθμός μετάδοσης bit μεταβαλλόταν μεταξύ 100MHz μέχρι 10GHz. Το θεωρητικό κβαντικό όριο σ' αυτά τα δύο μήκη κύματος επίσης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6. Μία άμεση σύγκριση θα δείξει πως οι μετρημένες ευαισθησίες του δέκτη είναι χειρότερες από 20 dB ή περισσότερο, σε σύγκριση με το κβαντικό όριο. Το μεγαλύτερο μέρος της υποβάθμισης οφείλεται στον θερμικό θόρυβο, που είναι αναπόφευκτος σε θερμοκρασία δωματίου και γενικά υπερβασίζεται του θορύβου βολής. Κάποιο μέρος της υποβάθμισης οφείλεται στη διασπορά των ιών, που οδηγεί σε καταστολή ισχύος. Η υποβάθμιση της ευαισθησίας λόγω της διασποράς εξαρτάται και από τον ρυθμό bit B και από το μήκος της οπτικής ίνας L και αυξάνεται με το BL . Αυτός είναι ο λόγος που η υποβάθμιση της ευαισθησίας

από το κβαντικό όριο είναι μεγαλύτερη (25-30 dB) για συστήματα που λειτουργούν σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit. Η ευαισθησία του δέκτη στα 10Gb/s είναι τυπικά χειρότερη από -20dBm.

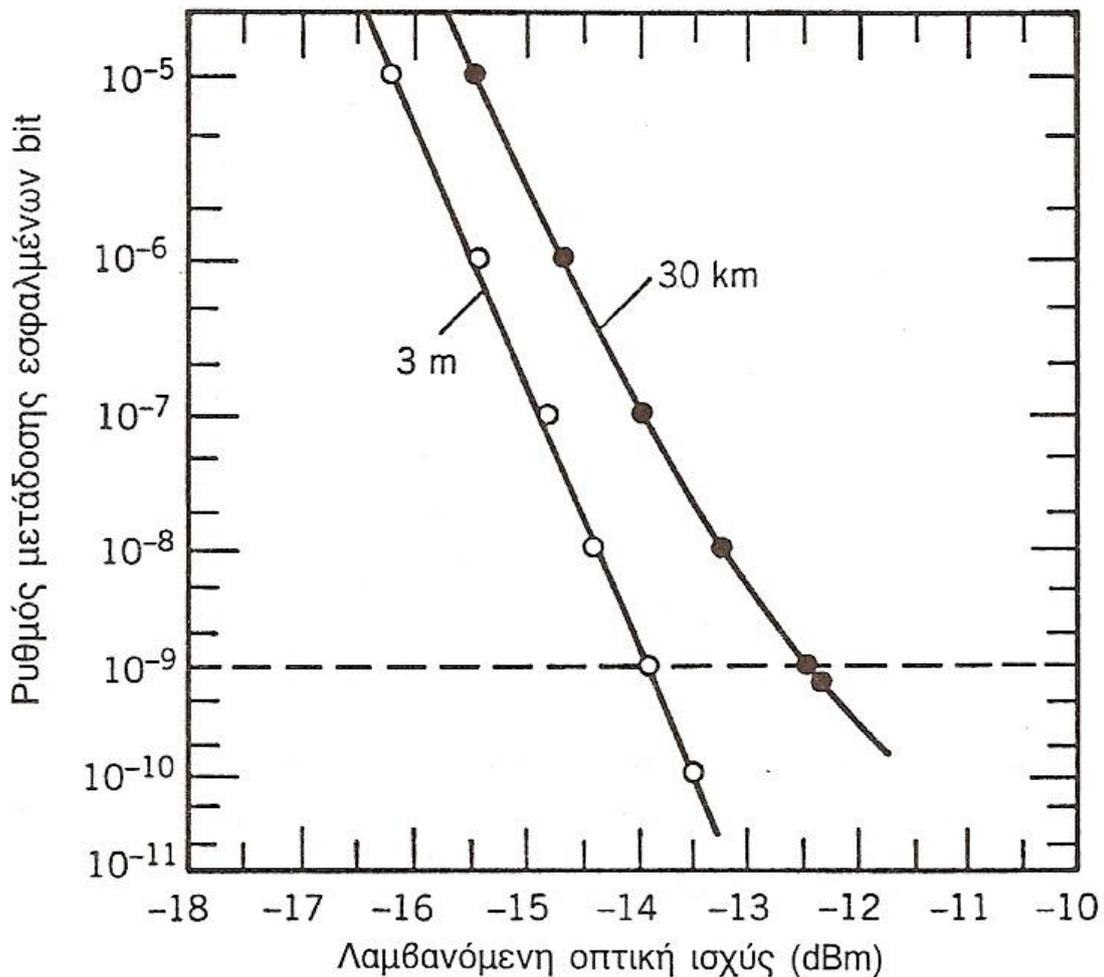
ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ BIT (Gb/s)

Σχήμα 6.6 Οι μετρημένες ευαισθησίες δέκτη συναρτήσει του ρυθμού bit για δέκτες p-i-n (κύκλοι) και APD (τρίγωνα) κατά την διάρκεια πειραμάτων μετάδοσης σε μήκη κύματος 1.3 και 1.55μm. Επίσης παρουσιάζεται και το κβαντικό όριο της ευαισθησίας του δέκτη, για την διεξαγωγή συγκρίσεων (συνεχείς γραμμές).

Μπορούμε να απομονώσουμε την έκταση της υποβάθμισης της ευαισθησίας, που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα της διάδοσης του σήματος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας. Η συνηθισμένη διαδικασία είναι να διεξάγουμε μία επιπλέον ξεχωριστή μέτρηση της ευαισθησίας του δέκτη συνδέοντας τον πομπό κατευθείαν με τον δέκτη, χωρίς ενδιάμεση οπτική ίνα.

Το σχήμα 6.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών των μετρήσεων για ένα πειραματικό σύστημα 1.31μm, στο οποίο το μεταδιδόμενο σήμα διαμορφωνόταν στα 8Gb/s, διαδιδόμενο σε οπτική ίνα μήκους 30km. Η ανίχνευση έγινε με δέκτη APD InGaAs. Όταν το μήκος της οπτικής ίνας μειώθηκε στα 3m (το μήκος των εύκαμπτων αγωγών που σχετίζονται με τον πομπό και τον δέκτη), η ευαισθησία του δέκτη βελτιώνεται κατά 1.50, αφού περιορίζεται η υποβάθμιση λόγω της διασποράς στις ίνες. Αν μία τέτοια ρύθμιση γίνει στις πληροφορίες του Σχήματος 6.6 βλέπουμε ότι οι δέκτες p-i-n τυπικά λειτουργούν στα 25dB πέρα από το κβαντικό όριο. Η ευαισθησία του δέκτη μπορεί να βελτιωθεί κατά περίπου 5-6dB χρησιμοποιώντας δέκτες APD, που τυπικά λειτουργούν στα 20dB πέρα από το κβαντικό όριο. Όσον αφορά τον μέσο αριθμό φωτονίων προς bit, οι δέκτες APD απαιτούν σχεδόν 1000 φωτόνια/bit σε σύγκριση με το κβαντικό όριο των 10 φωτονίων/bit. Η απόδοση του δέκτη γενικά είναι καλύτερη για τα μικρά μήκη κύματος στην περιοχή των 0.8-0.9μm, όπου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε APD πυριτίου. Λειτουργούν ικανοποιητικά με περίπου 400 φωτόνια/bit. Ένα πείραμα το 1976, πέτυχε ευαισθησία μόλις 187 φωτονίων/bit. Μπορούμε να βελτιώσουμε την ευαισθησία τον δέκτη χρησιμοποιώντας την τεχνική της κωδικοποίησης. Σ'

ένα πειραματικό σύστημα 1.55 μm . παρουσιάστηκε ευαισθησία 180 φωτονίων/bit, μετά από 305km εκπομπής στα 140Mb/s.

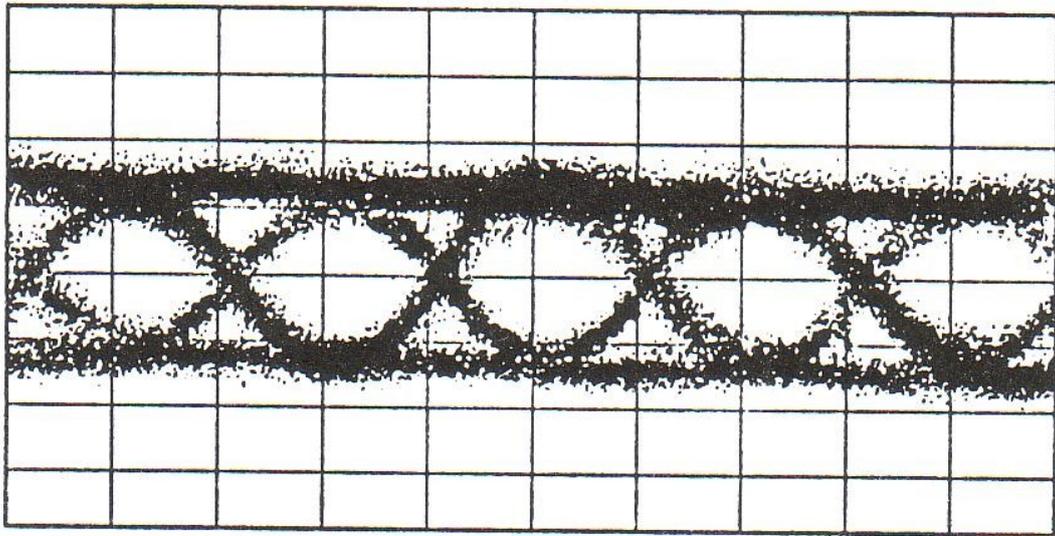


Σχήμα 6.7 Οι καμπύλες BER για πείραμα μετάδοσης 1.3 μm στα 8Gb/s. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε BER 10^{-9} . Η τομή της με τις καμπύλες BER καθορίζει την ευαισθησία του δέκτη.

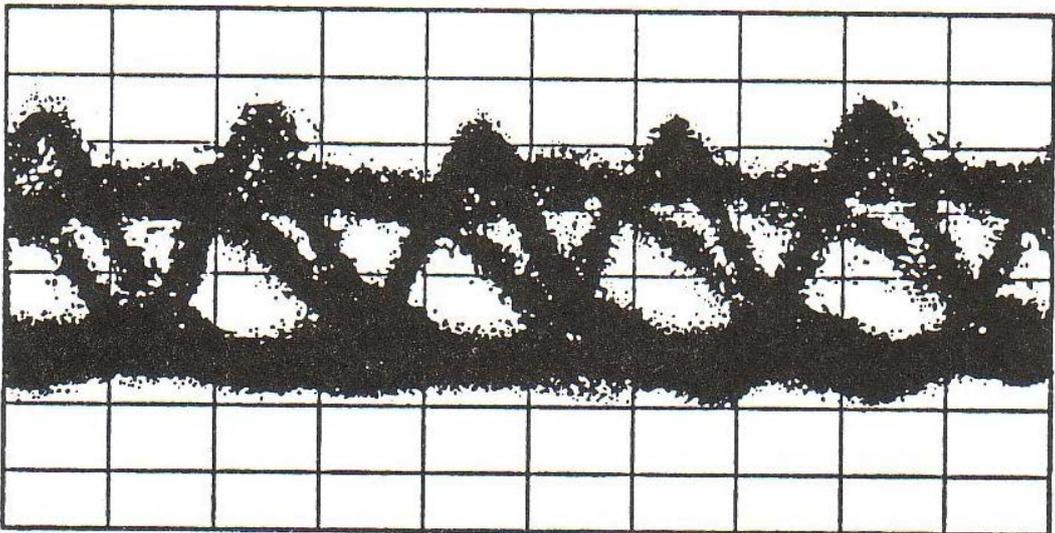
Η απόδοση τον οπτικού δέκτη σε πραγματικά οπτικά συστήματα μπορεί να μεταβάλλεται με τον χρόνο. Αφού δεν μπορούμε να μετρήσουμε άμεσα τον BER, σ' ένα σύστημα που βρίσκεται σε λειτουργία, χρειαζόμαστε μία εναλλακτική λύση για να ελέγχουμε την απόδοση τον συστήματος.

Όπως σχολιάστηκε στην Ενότητα 6.4, το διάγραμμα ματιού είναι το πιο κατάλληλο για τον συγκεκριμένο σκοπό. Το κλείσιμο τον ματιού αποτελεί μέτρο υποβάθμισης της απόδοσης τον δέκτη και σχετίζεται με την αντίστοιχη αύξηση του BER. Το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει τα διαγράμματα ματιού που καταγράφηκαν σ' ένα εργαστηριακό πείραμα, στο οποίο η έξοδος ενός οπτικού πομπού 1.55 μm διαμορφώθηκε άμεσα στα 2.5Gb/s κι ανιχνεύθηκε χρησιμοποιώντας έναν δέκτη APD. Το μάτι είναι ορθάνοιχτο όταν δεν υπάρχουν καθόλου οπτικές ίνες (επάνω διάγραμμα), αλλά είναι εν μέρει κλειστό όταν το σήμα μεταδίδεται μέσω μίας οπτικής

ίνας μήκους 120km (κάτω διάγραμμα). Το κλείσιμο τον "ματιού" οφείλεται στη διασπορά της οπτικής ίνας, που οδηγεί σε σημαντική παραμόρφωση των οπτικών παλμών, καθώς αυτοί διαδίδονται μέσω της οπτικής ίνας. Το διάγραμμα του "ματιού", που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8, δείχνει ότι η απόδοση τον δέκτη επηρεάζεται από τη διασπορά της οπτικής ίνας, παρόλο που δεν καταστέλλεται εντελώς από αυτόν, αφού το μάτι δεν είναι εντελώς κλειστό. Η συνεχής παρατήρηση των διαγράμματος τον ματιού είναι στα πραγματικά συστήματα μία μέτρηση της απόδοσης τον δέκτη.



(a)



(b)

Σχήμα 6.8 Τα διαγράμματα ματιού στα 0km και στα 120km (κάτω ίχνος) που παρατηρήθηκαν σε πειράματα μετάδοσης στα 2.5Gb/s. (Σύμφωνα με την Παρ. [115]. © 1990 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδειας.)

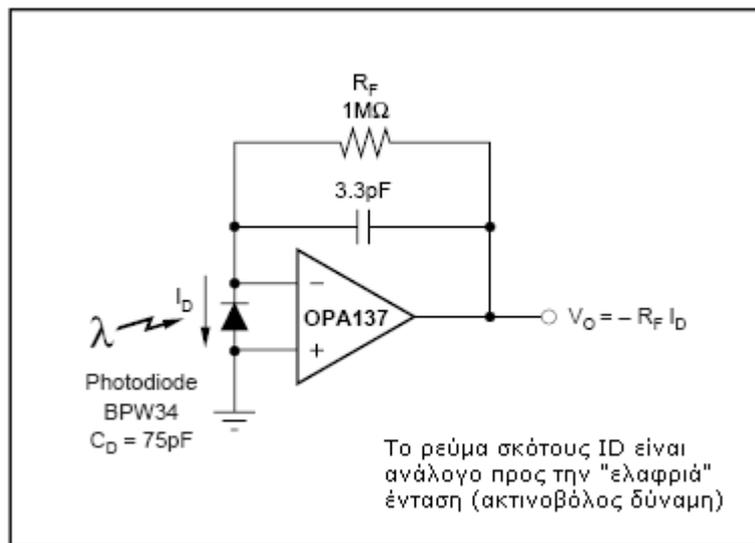
Η απόδοση των οπτικών δεκτών που λειτουργούν σε μήκος κύματος 1.3-1.6 μm περιορίζεται σημαντικά από τον θερμικό θόρυβο, όπως φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 6.6. Η χρήση ενός δέκτη APD βελτιώνει την κατάσταση, αλλά μόνο σε περιορισμένη έκταση, λόγω του παράγοντα πλεονάζοντος θορύβου, που σχετίζεται με την APD InGaAs. Οι περισσότεροι δέκτες λειτουργούν πολύ μακριά από το κβαντικό όριο κατά 20dB ή περισσότερο. Η επίδραση τον θερμικού θορύβου μπορεί να μειωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας τεχνικές σύμφωνης-ανίχνευσης, στην οποία το λαμβανόμενο σήμα αναμειγνύεται σύμφωνα με την έξοδο ενός laser στενού εύρους-γραμμής.

Η απόδοση τον δέκτη μπορεί επίσης να βελτιωθεί αν ενισχύσουμε το οπτικό σήμα πριν αυτό προσπέσει στην φωτοδίοδο. Η τεχνική αυτή έχει πρακτική χρήση μετά το επίτευγμα των ενισχυτών οπτικών ινών αλλά δεν αφορά την παρούσα μελέτη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

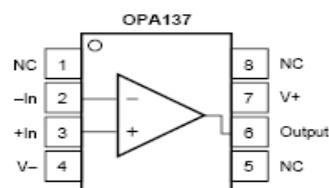
Ο στόχος της εργαστηριακής άσκησης η οποία πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια ηλεκτρονικής του Τμήματος Τηλεπληροφορικής και Διοίκησης είναι να μελετηθούν και να γίνουν κατανοητά διάφορα χαρακτηριστικά καθώς και περιορισμοί τα οποία παρουσιάζουν οι οπτικοί δέκτες. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το κύκλωμα το οποίο εκτελέστηκε κατά την διάρκεια της άσκησης.



Ο ενισχυτής ο οποίος χρησιμοποιήθηκε (OPA 137) έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και την ακόλουθη μορφή

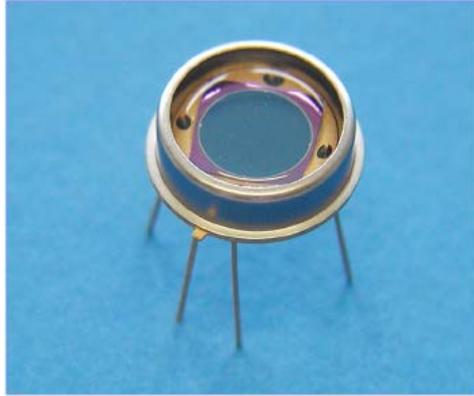
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

- ▶ FET INPUT: $I_B = 5\text{pA}$
- ▶ LOW OFFSET VOLTAGE: 1.5mV
- ▶ WIDE SUPPLY RANGE: $\pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$
- ▶ LOW QUIESCENT CURRENT: 220mA/channel
- ▶ EXCELLENT SPEED/POWER 1MHz
- ▶ INPUT TO POSITIVE SUPPLY
- ▶ MicroSIZE PACKAGES: SOT-23-5, MSOP-8
- ▶ SINGLE, DUAL, AND QUAD



Επίσης χρησιμοποιήθηκε μία αντίσταση $1\text{M}\Omega$ καθώς και ένας πυκνωτής $3.3\ \mu\text{F}$.

Τέλος για την ανίχνευση του φωτός χρησιμοποιήθηκε φωτοδίοδος PIN παρόμοια με την φωτοδίοδο σιλικόνης την οποία βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.

ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΑΔΩΝ

Το διεθνές σύστημα μονάδων (γνωστό ως SI, συντομογραφία του *Systeme International*) χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει τα κύρια φυσικά μεγέθη μαζί με τις μονάδες μέτρησης, τα σύμβολα και τις διαστάσεις τους.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΜΟΝΑΔΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ
Μήκος	meter	m	-
Μάζα	kilogram	kg	-
Χρόνος	second	s	-
Ρεύμα	ampere	A	-
Θερμοκρασία	kelvin	K	-
Συχνότητα	hertz	Hz	s ⁻¹
Δύναμη	newton	N	(kg·m)/s ²
Ενέργεια	joule	J	N·m
Ισχύς	watt	W	J/s
Πίεση	pascal	Pa	N·m ⁻²
Ηλεκτρικό φορτίο	coulomb	C	A·s
Δυναμικό	volt	V	J/C
Αγωγιμότητα	siemens	S	A/V
Αντίσταση	ohm	Ω	V/A
Χωρητικότητα	farad	F	C/V
Μαγνητική ροή	weber	Wb	V·s
Μαγνητική επαγωγή	tesla	T	Wb/m ²
Επαγωγή	henry	H	Wb/A

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. R.K. Dodd, J.C. Eilbeck, J.D. Gibbon, and H.C. Morris, *Solitons and Nonlinear Wave Equations*, Academic Press, San Diego, CA, 1984.
- [2]. G.P. Agrawal, in *Contemporary Nonlinear Optics*, G.P. Agrawal and R.W. Boyd, Eds., Academic Press, San Diego, CA, 1992, Chap.2.
- [3]. V.E. Zakharov and A.B. Shabat, *Sov. Phys.* **55**, 284 (1974).
- [4]. K. Wakita and I. Kotaka, *Microwave Opt. Tech. Lett.* **7**, 120 (1995).
- [5]. E.A. Swanson and S.R. Chinn, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7**, 114 (1995).
- [6]. A. Hasegawa and Y. Kodama, *Proc. IEEE* **69**, 1145 (1981).
- [7]. K.J. Blow and N.J. Doran, *Opt. Commun.* **52**,367 (1985).
- [8]. L.F. Mollenauer, R.H. Stolen, and M.N. Islam, *Opt. Lett.* **10**, 229 (1985).
- [9]. T. Georges and F. Fabre, *Opt. Lett.* **16**, 1656 (1991).
- [10]. L.F. Molleanauer, J.P. Gordon, and S.G. Evangelides, *Opt. Lett* **17**, 1575 (1992).
- [11]. G. Aubin, T. Montalant, J. Moulu, B. Nortier, F. Pirio, and J.-B. Thomine, *Electron. Lett.* **31**, 52 (1995).
- [12]. M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubota, E. Yamada, and Y. Kimura, *Electron. Lett.* **30**, 1331 (1994).
- [13]. Govind P. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*, John Wiley & Sons.Inc. , 1997.