

Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Χανίων
Τμήμα Ηλεκτρονικής

Σύνδεσμος επικοινωνίας με Laser

Πτυχιακή εργασία των σπουδαστών :
Ζερβαλάκη Ιωάννη, Λουϊζίδη Νικόλαου

Εισηγητής : Ταταράκης Μιχαήλ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005

ABSTRACT

Many modern devices use lasers nowadays. We use laser for CD and DVD reproduction and for recreational, medical and military purposes too. Laser devices are very common in our life. Laser has been developed to replace, in many cases, the point-to-point connection without using cables as its characteristics allow the optical communication over the beam which can transfer signals and data wirelessly. The operation which we present is showing how we can achieve a simple and low cost communicative connection over a diode laser beam or a led so an audio signal can be transferred from a source - transmitter to a destination – receiver. For that purpose we implemented a system which is consisted of transmitter and receiver units which is able to give communication distance of several hundred meters, and with parabolic light reflector, up to several kilometers.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Ιστορική αναδρομή – το πρώτο Laser	5
1.2 Σκοπός της παρούσας εργασίας - εφαρμογής.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΖΩΝΩΝ.....	7
2.1 Ημιαγωγά υλικά.....	7
2.2 Φωτοφυσικές ιδιότητες των laser ημιαγωγών	9
2.3 Χαρακτηριστικά των laser ημιαγωγών	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ LASER.....	19
3.1 Οπτικές επικοινωνίες	19
3.2 Οπτικοί διαμορφωτές.....	20
3.2.1 Άμεση διαμόρφωση	21
3.2.2 Έμμεση εξωτερική διαμόρφωση.....	22
3.3 Μέθοδοι διαμόρφωσης	22
3.3.1 Αναλογική διαμόρφωση	23
3.4 Χαρακτηριστικά διαμόρφωσης.....	25
3.5 Χαρακτηριστικά συντονισμού.....	27
3.6 Κυκλώματα οδήγησης πηγών LED για αναλογική μετάδοση.....	28
3.7 Κυκλώματα οδήγησης laser.....	31
3.8 Διαμόρφωση έντασης	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΟΔΟΙ ΚΑΙ LASER.....	36
4.1 Εισαγωγή στη θεωρία των διόδων	36
4.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	42
4.3 Ανιχνευτές φωτός	43
4.3.1 Σημαντικές παράμετροι φωτοανιχνευτών.....	44
4.4 Φωτοдиодοι	46
4.4.1 Φωτοдиодοι p-n ως ανιχνευτής	46
4.4.2 Πως λειτουργεί μία φωτοдиодος	49
4.4.3 Φωτοдиодοι p-n	51
4.4.4 Χαρακτηριστικές λειτουργίας της φωτοдиодου	52
4.4.5 Μειονεκτήματα Φωτοдиодων p-n	55
4.5 Φωτοдиодοι pin	57
4.7 Led	59
4.8 Διοδικό laser	64
4.8.1 Χαρακτηριστικά επίδοσης διόδων laser.	66
4.8.2 Εφαρμογές των laser ημιαγωγών.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΤΗΜΑ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	70
5.1 Σύνδεσμος επικοινωνίας μέσω laser.....	70
5.1.1 Μονάδα πομπού.....	71
5.1.2 Μονάδα δέκτη.....	74
5.2 Λειτουργία πομπού	76
5.3 Λειτουργία δέκτη	78

5.4 Έλεγχος πριν τη λειτουργία της κατασκευής.....	79
5.5 Αναρτώντας το σύνδεσμο	80
5.6 Πειραματική διαδικασία του συστήματος	81
5.7 Ο οπτικός ενισχυτής LM358.....	82
5.7.1 Χαρακτηριστικά.....	83
5.7.2 Πλεονεκτήματα	83
5.7.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	83
5.8 Εφαρμογές	84
5.8.1 Laser βασισμένο σε ψηφιακή επικοινωνία δεδομένων.....	84
5.8.1.1 Χαρακτηριστικά:.....	85
5.8.2 Εφαρμογή του Laser στις Τηλεπικοινωνίες.....	85
5.8.3 Μια ιδεατή εικόνα του οπτικού επικοινωνιακού συστήματος.....	88
5.8.4 Πειραματική διάταξη συνδέσμου δεδομένων με χρήση laser	90
5.8.4.1 Περίληψη των χαρακτηριστικών του κυκλώματος.....	90
5.8.4.2 Περιγραφή του κυκλώματος.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ.....	93
6.1 Συμπεράσματα	93
6.2 Η οπτική ίνα σαν μέσο μετάδοσης.....	93
6.2.1 Κυματοδότηση σε οπτική ίνα	95
6.2.3 Χαρακτηριστικά των οπτικών ινών	98
6.2.4 Ψηφιακή μετάδοση μέσω laser	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή – το πρώτο Laser

Η λέξη LASER προέρχεται από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» που σημαίνουν Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας. Έτσι, στον όρο LASER αντανακλάται ο κρίσιμος ρόλος των διαδικασιών της εξαναγκασμένης εκπομπής για την παραγωγή και την ενίσχυση σύμφωνου φωτός. Για το λόγο αυτό μπορούμε να πούμε ότι η αρχή της ανάπτυξης των LASER έγινε το 1917 όταν ο Albert Einstein απέδειξε ότι πρέπει να υπάρχει η διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής.

Από τότε, οι εκτεταμένες θεωρητικές και πειραματικές μελέτες στις ΗΠΑ και την πρώην Σοβιετική Ένωση είχαν σαν αποτέλεσμα την κατασκευή του πρώτου LASER από τον Αμερικανό Φυσικό Theodore Maiman, το οποίο λειτούργησε στα μέσα του 1960. Το LASER αυτό αποτελείτο από μια μικρή ράβδο ρουβιδίου με μήκος 5 cm της οποίας τα πέρατα είχαν λειανθεί και επαργυρωθεί. Η ράβδος αυτή είχε τοποθετηθεί στον άξονα ενός ελικοειδούς σωλήνα ηλεκτρικής εκκένωσης ο οποίος μπορούσε να δώσει φωτεινή ακτινοβολία με μεγάλη ισχύ και με μήκος κύματος στην περιοχή του πράσινου. Όταν η ελικοειδής αυτή λάμπα φωτοβολούσε περιοδικά από το ένα άκρο της ράβδου ρουβιδίου, που έφερε μικρή οπή, γινόταν παλμική εκπομπή ακτινοβολίας LASER με μήκος κύματος στην περιοχή του κόκκινου.

Το επόμενο βήμα έγινε πάλι μέσα στο 1960 από τους Javan Bermett και Herriott με την επίδειξη του πρώτου LASER αερίου, (He-Ne LASER). Το 1961 πολλοί τύποι LASER, στερεών και αερίων, άρχισαν να μελετώνται και να κατασκευάζονται ενώ την ίδια εποχή έγινε και η επίδειξη του πρώτου LASER ημιαγωγών.

Η αλματώδης ανάπτυξη των LASER στο διάστημα που μεσολάβησε από το 1960 μέχρι και σήμερα είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών φαινομένων έτσι ώστε τα LASER σήμερα να αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της επιστήμης, της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. (Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και laser, 1999. Δρ. Σιδεράς Ευστάθιος, σελ. 61)

1.2 Σκοπός της παρούσας εργασίας - εφαρμογής

Πολλές είναι οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούν laser στην εποχή μας καθώς στην καθημερινή μας ζωή συναντάμε αρκετές εφαρμογές όπου η χρήση του είναι απαραίτητη. Από την πιο απλή εφαρμογή όπως είναι το laser pointer και την αναπαραγωγή δίσκων CD και DVD για ψυχαγωγικούς σκοπούς, μέχρι και τη χρήση του σε ιατρικούς και στρατιωτικούς σκοπούς συμπεραίνουμε ότι το laser είναι πλέον ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Το laser αναπτύχθηκε για να αντικαταστήσει σε πολλές περιπτώσεις τη διασύνδεση δύο σημείων με χρήση καλωδίων καθώς οι ιδιότητες του επιτρέπουν την οπτική επικοινωνία πλέον μέσω της ακτίνας του η οποία μπορεί να μεταφέρει σήματα και δεδομένα, ασύρματα. Η εφαρμογή την οποία θα παρουσιάσουμε έχει σκοπό να μας δείξει πως μπορούμε να επιτύχουμε επικοινωνιακή ζεύξη με απλό και ανέξοδο τρόπο μέσω της δέσμης ενός διοδικού laser ή ενός led ώστε να μεταφέρουμε ένα ακουστικό σήμα πληροφορίας από μία πηγή-πομπός, σε έναν προορισμό-δέκτης. Έτσι για το σκοπό αυτό υλοποιήσαμε ένα σύστημα που αποτελείται από τις μονάδες πομπού και δέκτη το οποίο θα μπορεί να έχει οπτική επαφή σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων και με διατάξεις παραβολικών κατόπτρων σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΖΩΝΩΝ

2.1 Ημιαγωγά υλικά

Τα ηλεκτρονικά υλικά μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες: τους μονωτές, τους αγωγούς, και τους ημιαγωγούς. Η κύρια παράμετρος που χρησιμοποιείται για να διακρίνουμε ανάμεσα στα υλικά αυτά είναι η ειδική αντίσταση ρ , με μονάδες $\Omega \cdot \text{cm}$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, οι μονωτές έχουν ειδικές αντιστάσεις μεγαλύτερες από $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, ενώ οι αγωγοί έχουν ειδικές αντιστάσεις μικρότερες από $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. Για παράδειγμα, το διαμάντι, ένας από τους πιο καλής ποιότητας μονωτές, έχει πολύ μεγάλη ειδική αντίσταση, $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$. Αντίθετα, ο καθαρός χαλκός, που είναι ένας καλός αγωγός, έχει μια ειδική αντίσταση μόνο $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. Οι ημιαγωγοί καταλαμβάνουν την πλήρη κλίμακα ειδικών αντιστάσεων μεταξύ των ορίων των μονωτών και των αγωγών. Επιπλέον, η ειδική αντίσταση τους μπορεί να ελεγχθεί με την προσθήκη διαφόρων ατόμων "προσμιξέων" στον κρύσταλλο του ημιαγωγού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1	
Ηλεκτρική Ταξινόμηση των Στερεών Υλικών	
Υλικά	Ειδική Αντίσταση ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Μονωτές	$10^5 < \rho$
Ημιαγωγοί	$10^{-3} < \rho < 10^5$
Αγωγοί	$\rho < 10^{-3}$

Οι στοιχειώδεις ημιαγωγοί σχηματίζονται από έναν απλό τύπο ατόμου (στήλη IV του περιοδικού πίνακα των στοιχείων, Πίνακα 2.2), ενώ οι σύνθετοι ημιαγωγοί μπορούν να σχηματιστούν από συνδυασμούς των στοιχείων από τις στήλες III και V ή από τις στήλες II και VI. Τα προαναφερόμενα υλικά αναφέρονται συχνά σαν σύνθετοι ημιαγωγοί III-V ή II-VI. Υπάρχουν επίσης τριαδικά υλικά, όπως το τελλουρίδιο του υδραργύρου-καδμίου, το αρσενίδιο του γαλλίου-αλουμινίου, το αρσενίδιο του γαλλίου-ινδίου, και το φωσφίδιο του γαλλίου-ινδίου.

Το γερμάνιο (Ge) ήταν ένας από τους πρώτους ημιαγωγούς που χρησιμοποιήθηκαν. Γρήγορα όμως αντικαταστάθηκε από το πυρίτιο (Si), που σήμερα είναι το πιο διαδεδομένο ημιαγωγό υλικό. Το πυρίτιο έχει μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα (E_g) μεταξύ των ζωνών, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μεγαλύτερης θερμοκρασίας από το γερμάνιο. Επίσης, η οξείδωση σχηματίζει ένα σταθερό μονωτικό οξείδιο πάνω στο πυρίτιο, δίνοντας του σημαντικά πλεονεκτήματα επεξεργασίας έναντι του γερμανίου στη διεργασία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Επιπλέον με το πυρίτιο, σήμερα συναντάμε συχνά και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και το φωσφίδιο του ινδίου (InP), παρόλο που και το γερμάνιο χρησιμοποιείται ακόμα σε μερικές περιορισμένες εφαρμογές. Τα σύνθετα ημιαγωγά υλικά αρσενικούχο γάλλιο και φωσφίδιο του ινδίου είναι τα πιο σημαντικά υλικά για εφαρμογές οπτοηλεκτρονικής, που περιλαμβάνουν τις διόδους εκπομπής φωτός (LED), τα laser, και τους ανιχνευτές φωτός.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2

Μέρος του Περιοδικού Πίνακα, που περιλαμβάνει τα πιο
Σημαντικά Ημιαγώγιμα Στοιχεία

IIIA		IVA		VA		VIA			
5	10.811	6	12.01115	7	14.0067	8	15.9994		
	B Boron		C Carbon		N Nitrogen		O Oxygen		
	13	14	28.086	15	30.9738	16	32.064		
	Al Aluminum		Si Silicon		P Phosphorus		S Sulfur		
30	65.37	31	69.72	32	72.59	33	74.922	34	78.96
	Zn Zinc		Ga Gallium		Ge Germanium		As Arsenic		Se Selenium
48	112.40	49	114.82	50	118.69	51	121.75	52	127.60
	Cd Cadmium		In Indium		Sn Tin		Sb Antimony		Te Tellurium
80	200.59	81	204.37	82	207.19	83	208.980	84	(210)
	Hg Mercury		Tl Thallium		Pb Lead		Bi Bismuth		Po Polonium

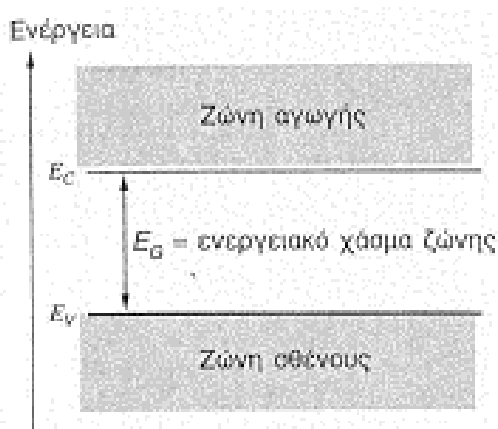
Ο πίνακας 2.3 που παρατίθεται παρακάτω μας δείχνει τη σύγκριση των ημιαγωγικών υλικών με κριτήριο σύγκρισης το ενεργειακό χάσμα. Από τον πίνακα φαίνεται ότι το πυρίτιο έχει το διπλάσιο σχεδόν ενεργειακό χάσμα από το γερμάνιο. Έτσι χρησιμοποιείται το πυρίτιο έναντι του γερμανίου αφού μπορεί να αντέξει σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3	
Ημιαγωγά Υλικά	
Ημιαγωγός	Ενεργειακό χάσμα EG (eV)
άνθρακας	5.47
πυρίτιο	1.12
γερμάνιο	0.66
κασσίτερος	0.082
αρσενικούχο γάλλιο	1.42
φωσφίδιο του ινδίου	1.35
αζωτούχο βόριο	7.50
καρβίδιο του πυριτίου	3.00
σεληγιούχο κάδμιο	1.70

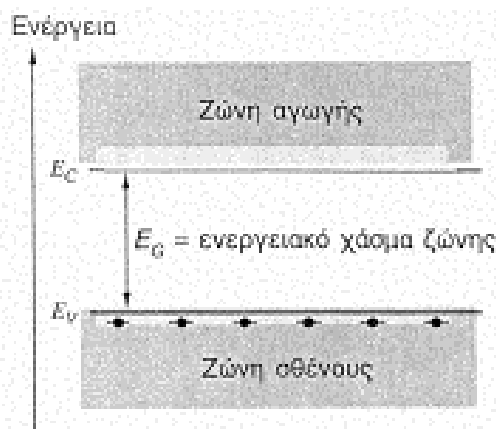
2.2 Φωτοφυσικές ιδιότητες των laser ημιαγωγών

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στη θεωρία του ενεργειακού χάσματος με την οποία λειτουργεί το laser ημιαγωγών. Θα αναφερθούμε στο μοντέλο της ενεργειακής ζώνης για έναν ημιαγωγό, που μας παρέχει μια χρήσιμη εναλλακτική άποψη της διαδικασίας δημιουργίας ηλεκτρονίου-οπής, και τον έλεγχο των συγκεντρώσεων φορέων μέσω προσμίξεων.

Η κβαντομηχανική προβλέπει ότι η πολύ τακτική κρυσταλλική δομή ενός ημιαγωγού παράγει περιοδικές κβαντισμένες κλίμακες επιτρεπόμενων και μη επιτρεπόμενων ενεργειακών καταστάσεων για τα ηλεκτρόνια που περιβάλλουν τα άτομα στον κρύσταλλο. Η Εικόνα 2.1 είναι μια εννοιολογική εικόνα αυτής της δομής ζωνών στον ημιαγωγό. Στην εικόνα, οι περιοχές που επιγράφονται ζώνη αγωγής και ζώνη σθένους αναπαριστούν επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις για τα ηλεκτρόνια. Η ενέργεια E_C αντιστοιχεί στην κορυφαία άκρη της ζώνης σθένους, και αναπαριστά τη μέγιστη επιτρεπόμενη ενέργεια για ένα άτομο σθένους. Η ενέργεια αντιστοιχεί στο κάτω μέρος της ζώνης αγωγιμότητας, και αναπαριστά το ελάχιστο διαθέσιμο ενεργειακό επίπεδο στη ζώνη αγωγής. Παρόλο που οι ζώνες αυτές φαίνονται σαν συνεχείς στην Εικόνα 2.1, στην πραγματικότητα αποτελούνται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό, διακριτών ενεργειακών επιπέδων. Τα ηλεκτρόνια δεν επιτρέπεται να λάβουν τιμές ενέργειας που βρίσκονται μεταξύ των E_C και E_V . Η διαφορά μεταξύ των E_C και E_V ονομάζεται ενέργεια χάσματος ζώνης, E_g .



Εικόνα 2.1: Μοντέλο ενεργειακών ζωνών για ένα ημιαγωγό με χάσμα ζώνης E_g .



Εικόνα 2.2: Ημιαγωγός στους 0°K , με πλήρη τη ζώνη σθένους και κενή τη ζώνη αγωγιμότητας.

Το φάσμα των ενεργειακών επιπέδων αποτελείται από πολύ ευρείες ζώνες. Αυτές είναι η ζώνη σθένους V και η ζώνη αγωγιμότητας C , διαχωρισμένες από μία περιοχή απαγορευμένων ενεργειών (ζώνη χάσματος E_g). Κάθε ζώνη αποτελείται πρακτικά από ένα μεγάλο αριθμό πολύ κοντά τοποθετημένων ενεργειακών καταστάσεων. Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, μπορεί να βρίσκονται μόνο δύο ηλεκτρόνια (με αντίθετο spin) σε κάθε ενεργειακή κατάσταση. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα κατάληψης $f(E)$ δεδομένης κατάστασης ενέργειας E δίνεται από τη στατιστική Fermi-Dirac παρά από τη στατιστική Maxwell-Boltzmann. Έτσι:

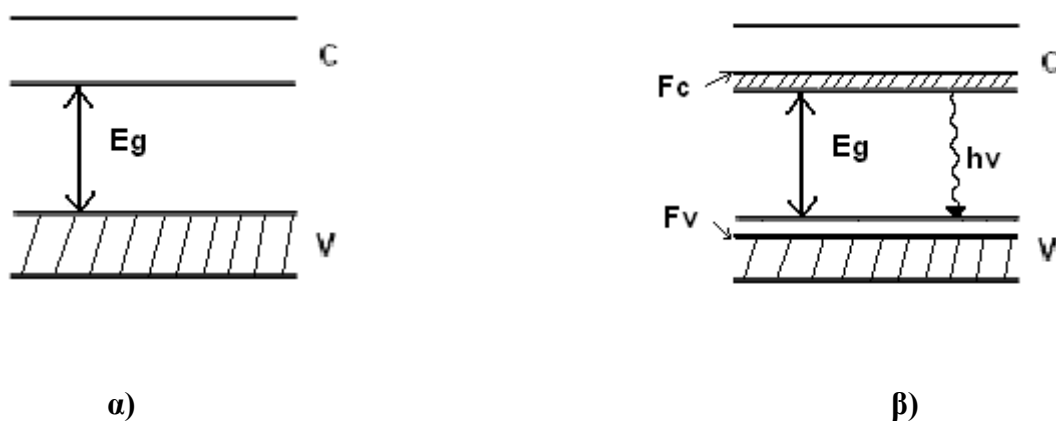
$$f(E) = \{1 + \exp[(E - F)/kT]\}^{-1} \quad \text{εξ.2.1}$$

όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin, F η ενέργεια του αποκαλούμενου επίπεδου Fermi και k η σταθερά Boltzmann. Αυτό το επίπεδο έχει την ακόλουθη φυσική σημασία: όταν $T \rightarrow 0$ έχουμε,

$$f=1 \text{ (για } E < F) \quad \text{εξ.2.2}$$

$$f=0 \text{ (για } E > F) \quad \text{εξ.2.3}$$

έτσι ώστε αυτό το επίπεδο παριστά το σύνορο μεταξύ των πλήρως κατειλημμένων και των τελείως κενών επιπέδων σε $T=0^\circ \text{ K}$. Για μη εκφυλισμένους ημιαγωγούς το επίπεδο Fermi βρίσκεται μέσα στη ζώνη χάσματος (Εικόνα 2.2). Έτσι λοιπόν, για $T=0^\circ \text{ K}$ η ζώνη σθένους θα είναι πλήρως κατειλημμένη και η ζώνη αγωγιμότητας τελείως κενή. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο ημιαγωγός δεν θα άγει, επομένως είναι μονωτής. Έχοντας κάνει όλες τις παραπάνω παρατηρήσεις, μπορούμε να αρχίσουμε την περιγραφή των αρχών λειτουργίας των laser ημιαγωγών. Υποθέτουμε αρχικά ότι ο ημιαγωγός βρίσκεται σε $T=0^\circ \text{ K}$. (Στην εικόνα 2.3α η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί σε εντελώς πλήρεις ενεργειακές καταστάσεις).



Εικόνα 2.3: Αρχή λειτουργίας ενός laser ημιαγωγού.

Υποθέτουμε τώρα ότι τα ηλεκτρόνια διεγείρονται κατά κάποιο τρόπο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Μετά από ένα πολύ βραχύ χρόνο (10^{-10} ms) τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας θα έχουν πέσει στα χαμηλότερα επίπεδα μέσα στη ζώνη και επίσης τα ηλεκτρόνια κοντά στην κορυφή της ζώνης σθένους, θα έχουν πέσει στα χαμηλότερα μη κατειλημμένα επίπεδα, αφήνοντας έτσι την κορυφή της ζώνης σθένους γεμάτη <<οπές>>. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει αντιστροφή πληθυσμών μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας (Εικόνα 2.3β). Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας πέφτουν πίσω στη ζώνη σθένους (επανασυνδέονται με τις οπές) εκπέμποντας στη διαδικασία ένα φωτόνιο (ακτινοβολία επανασύνδεσης). Δεδομένης μιας αντιστροφής πληθυσμών μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3β, η διεργασία της εξαναγκασμένης εκπομπής της ακτινοβολίας επανασύνδεσης θα παράγει ταλάντωση laser όταν ο ημιαγωγός τοποθετηθεί σ' ένα κατάλληλο αντηχείο. Από την εικόνα 2.3β φαίνεται ότι η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη.

$$E_g < h\nu < F_c - F_u \quad \text{εξ.2.4}$$

η οποία δημιουργεί το εύρος γραμμής απολαβής του ημιαγωγού. Αν τώρα $T > 0$ αναφερόμενοι και πάλι στην εικόνα 2.2β σημειώνουμε ότι, αν και ο ημιαγωγός στην ολότητά του δεν είναι σε θερμική ισορροπία, παρ' όλα αυτά ισορροπία θα επιτευχθεί

εντός μιας μόνης ζώνης σε πολύ βραχύ χρόνο. Μπορούμε λοιπόν να μιλάμε για πιθανότητες κατάληψης f_u και f_c για τις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας χωριστά, όπου f_u και f_c δίνονται από τις σχέσεις :

$$f_u = \{1 + \exp[(E - F_u) / kT]\}^{-1} \quad \text{εξ.2.5}$$

$$f_c = \{1 + \exp[(E - F_c) / kT]\}^{-1} \quad \text{εξ.2.6}$$

και οι οποίες είναι οι ενέργειες των αποκαλούμενων επιπέδων Fermi των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι οι τιμές f_u και f_c εξαρτώνται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας. Έχοντας εισάγει την έννοια των ψευδοεπιπέδων Fermi μπορούμε εύκολα να βρούμε την αναγκαία συνθήκη για δράση laser επιβάλλοντας την απαίτηση ο αριθμός των γεγονότων εξαναγκασμένης εκπομπής να γίνει μεγαλύτερος από τον αριθμό των γεγονότων απορρόφησης (η περίσσεια είναι αναγκαία για να ξεπεραστούν οι απώλειες της κοιλότητας). Και οι δύο αυτές διεργασίες, εξαναγκασμένη εκπομπή και απορρόφηση είναι ανάλογες προς το γινόμενο του αριθμού των φωτονίων που παρευρίσκονται στην κοιλότητα και του συντελεστή B για τη μετάπτωση. Από το άλλο μέρος, ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής θα είναι επίσης ανάλογος προς το γινόμενο της πιθανότητας κατάληψης του υψηλότερου επιπέδου με τη πιθανότητα μη κατάληψης του χαμηλότερου επιπέδου, ενώ ο ρυθμός απορρόφησης θα είναι ανάλογος προς το γινόμενο της πιθανότητας κατάληψης του χαμηλότερου επιπέδου με τη πιθανότητα μη κατάληψης του υψηλότερου επιπέδου. Ως εκ τούτου, για να έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή πρέπει να ισχύει:

$$Bq[f_c(1 - f_u) - f_u(1 - f_c)] > 0 \quad \text{εξ.2.7}$$

Αυτή η ανισότητα σημαίνει ότι $f_c > f_u$. Άρα έχω ότι:

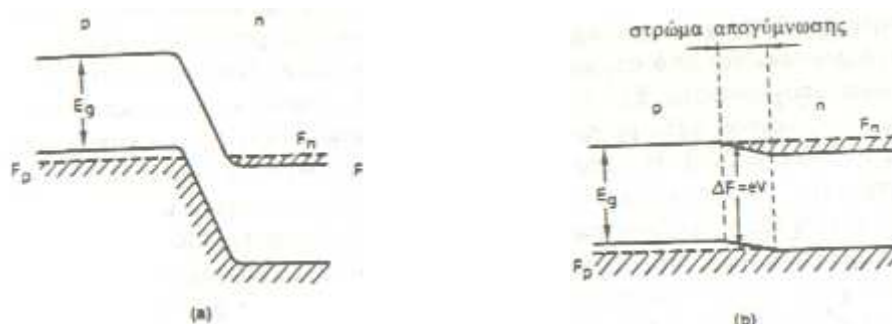
$$F_c - F_u > E_2 - E_1 = h\nu \quad \text{εξ.2.8}$$

όπου E_2 και E_1 είναι οι ενέργειες του υψηλότερου και του χαμηλότερου επιπέδου αντίστοιχα. Έχουμε λοιπόν έτσι παράγει ξανά μια από τις δύο σχέσεις οι οποίες προηγουμένως βρέθηκαν με μια ενορατική προσέγγιση για $T=0^{\circ}\text{K}$. Αυτή η απόδειξη όμως, δείχνει ότι η σχέση αυτή ισχύει για κάθε θερμοκρασία (εφόσον η έννοια των ψευδοεπιπέδων Fermi εξακολουθεί να ισχύει). Επιπλέον έχει δειχθεί ότι η παραπάνω εξίσωση $F_c - F_u > E_2 - E_1 = h\nu$, είναι μια συνέπεια της απαίτησης ότι οι διεργασίες εξαναγκασμένης εκπομπής πρέπει να ξεπερνούν τις διεργασίες εξαναγκασμένης απορρόφησης.

2.3 Χαρακτηριστικά των laser ημιαγωγών

Οι αντλητικές διεργασίες σ' ένα laser ημιαγωγού επιτυγχάνονται συνήθως προπαρασκευάζοντας τον ημιαγωγό υπό τη μορφή μιας διοδικής επαφής p-n με υψηλά εκφυλισμένες p-τύπου και n-τύπου περιοχές, δηλαδή πολύ εμπλουτισμένες συγκεντρώσεις δοτών ή αποδεκτών (μεγαλύτερες από 10^{18} άτομα / cm^3). Μπορεί να φανεί ότι με αυτό τον τρόπο η αντιστροφή παράγεται στην περιοχή της επαφής.

Σαν πρώτο παράδειγμα ενός laser επαφής θα θεωρήσουμε την περίπτωση όπου τα υλικά p-τύπου και n-τύπου είναι τα ίδια (π.χ. GaAs) και εφάπτονται άμεσα για να σχηματίσουν την επαφή, η οποία ως εκ τούτου θα ονομάζεται ομοεπαφή (homojunction). Οι αρχές λειτουργίας ενός laser που είναι κατασκευασμένο με αυτόν τον τρόπο φαίνονται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Αρχή λειτουργίας ενός laser ημιαγωγού επαφής p-n με

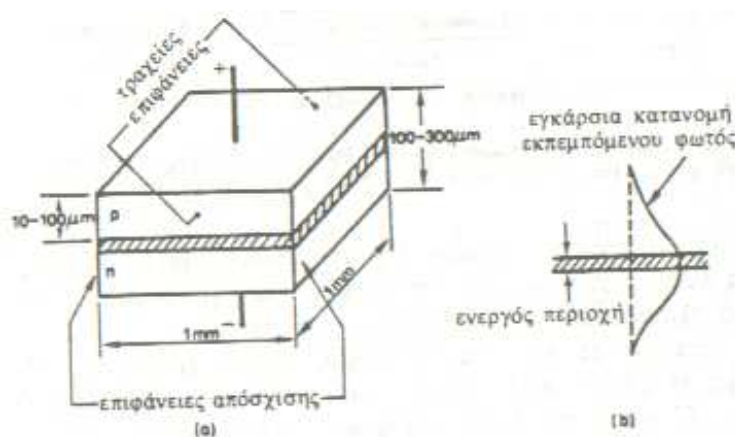
a) Μηδενική πόλωση

b) Ορθή πόλωση

Επειδή τα υλικά είναι εμπλουτισμένα, το επίπεδο Fermi F_p του ημιαγωγού p-τύπου πέφτει μέσα στη ζώνη σθένους και το επίπεδο Fermi F_n του ημιαγωγού n-τύπου πέφτει μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας. Μπορεί να δειχθεί ότι, χωρίς την εφαρμογή τάσης, τα δύο επίπεδα Fermi βρίσκονται στην ίδια οριζόντια γραμμή (Εικόνα 2.4α), δηλαδή έχουν την ίδια ενέργεια. Όταν εφαρμόζεται μια τάση V , τα δύο επίπεδα διαχωρίζονται κατά μια ποσότητα που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta F = eV \quad \text{εξ.2.9}$$

Έτσι, εάν το laser ημιαγωγού είναι ορθά πολωμένο, τα ενεργειακά επίπεδα θα είναι τότε όπως φαίνονται στην εικόνα 2.4b. Βλέπουμε από την εικόνα πως η αντιστροφή πληθυσμών έχει παραχθεί στο αποκαλούμενο <<στρώμα απογύμνωσης>> της επαφής p-n. Αυτό που πετυχαίνει η ορθή πόλωση είναι βασικά η έγχυση στο στρώμα απογύμνωσης ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας του n-τύπου υλικού και οπές από τη ζώνη σθένους του p-τύπου υλικού. Τελικά σημειώνουμε ότι αφού $\Delta F \approx E_g$, συνεπάγεται από την εξ.2.9 ότι $V \approx E_g/e$. Για το GaAs αυτό σημαίνει ότι $V \approx 1.5V$. Η εικόνα 2.5 δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα ενός laser επαφής p-n, όπου η γραμμοσκιασμένη περιοχή είναι το στρώμα απογύμνωσης.

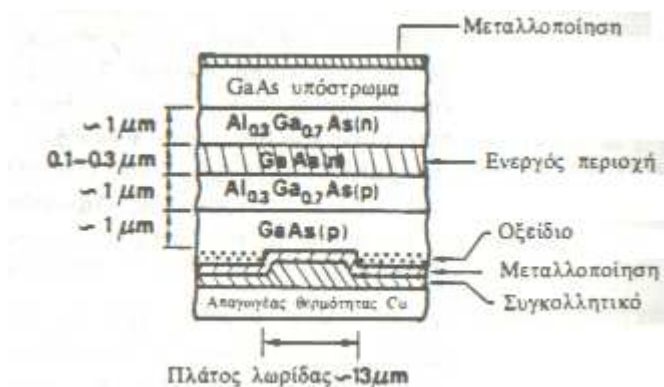


Εικόνα 2.5: α) Σχηματικό διάγραμμα ενός laser ημιαγωγού β) εγκάρσια κατανομή της έντασης φωτός.

Φαίνεται ότι η δίοδος έχει μικρές διαστάσεις. Το πάχος της περιοχής του στρώματος απογύμνωσης είναι συνήθως πολύ μικρό (0,1μm). Για να επιτύχουμε δράση laser, οι δύο τερματικές επιφάνειες κατασκευάζονται να είναι παράλληλες, συνήθως με κοπή κατά μήκος των κρυσταλλικών επιπέδων. Οι άλλες δύο αφήνονται επεξεργασμένες ανώμαλα για να εξουδετερωθεί η ταλάντωση σε ανεπιθύμητες διευθύνσεις. Συχνά οι δύο επιφάνειες δεν έχουν ανακλαστικές επιστρώσεις. Στην πράξη, επειδή ο δείκτης διάθλασης του ημιαγωγού είναι πολύ μεγάλος, υπάρχει ήδη πολύ μεγάλη ανακλαστικότητα (περίπου 35%) για τη διαχωριστική επιφάνεια ημιαγωγού-αέρα. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από στρώμα πάχους περίπου 1μm, δηλαδή κάπως πλατύτερο από το στρώμα απογύμνωσης. Εξ' αιτίας της περίθλασης, η εγκάρσια διάσταση της δέσμης είναι πολύ μεγαλύτερη (40μm) απ' ότι το πλάτος της ενεργούς περιοχής (Εικόνα 2.5β). Η δέσμη laser έτσι εκτείνεται κατά πολύ μέσα στις p και n περιοχές. Όμως, επειδή οι εγκάρσιες διαστάσεις της δέσμης είναι ακόμη πολύ μικρές, η δέσμη εξόδου παρουσιάζει τελικά κάπως μεγάλη απόκλιση (μερικές μοίρες). Τονίζουμε ότι σε θερμοκρασία δωματίου, η πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου για ένα laser ομοεπαφής είναι αρκετά υψηλή (περίπου 10^5 A/cm^2 για το GaAs). Αυτό οφείλεται στις υψηλές απώλειες του ρυθμού κοιλότητας επειδή εκτείνεται πολύ μέσα στις p και n περιοχές (όπου η απορρόφηση μάλλον παρά η ενίσχυση κυριαρχεί). Αυτή η πυκνότητα ρεύματος, όμως, ελαττώνεται γρήγορα με την ελάττωση της θερμοκρασίας λειτουργίας [περίπου $\exp(T/T_0)$, όπου η τιμή του T_0 και η περιοχή ισχύος της έκφρασης μεταβάλλεται από τον έναν ημιαγωγό στον άλλο]. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα του γεγονότος ότι, καθώς η θερμοκρασία ελαττώνεται, το $f_c(1-f_u)$ αυξάνει και το $f_u(1-f_c)$ ελαττώνεται. Έτσι η απολαβή [η οποία εξαρτάται από $f_c(1-f_u) - f_u(1-f_c)$] αυξάνει γρήγορα. Σαν επακόλουθο αυτού, τα laser ομοεπαφής μπορούν να λειτουργούν μόνο σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Αυτό αποτελεί ένα σοβαρό περιορισμό των laser αυτού του τύπου.

Μια σημαντική ανακάλυψη εμφανίστηκε το 1970, όταν πέτυχαν ταυτόχρονα ο Δρ Alferon στη Ρωσία (στο παρελθόν η Σοβιετική Ένωση), και οι Δρ Hayashi και Panish στις Ηνωμένες Πολιτείες, την επίτευξη συνεχούς λειτουργίας των Laser ημιαγωγών. Τα laser ημιαγωγών που αναπτύχθηκαν χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι μείωσαν ουσιαστικά την πυκνότητα ρεύματος κατώτατων ορίων μέσω της εφαρμογής μιας διπλής ετεροδομής (heterojunction) που αποτελείται από ένα GaAs

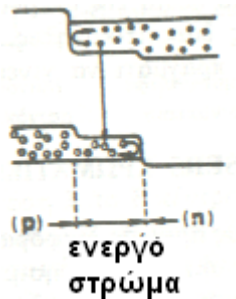
ενεργό στρώμα, μια λεπτή ταινία για την ακτινοβολία του φωτός, που στριμώχτηκε μεταξύ δύο στρωμάτων AlGaAs. Για να ξεπεραστεί η παραπάνω δυσκολία (λειτουργία laser μόνο σε κρυογενείς θερμοκρασίες), χρησιμοποιήθηκαν τα laser ετεροεπαφής. Το σχήμα 2.6 δείχνει ένα παράδειγμα laser GaAs διπλής ετεροεπαφής.



Εικόνα 2.6: Σχηματικό διάγραμμα ενός laser ημιαγωγού διπλής ετεροεπαφής. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από στρώμα GaAs(n), (γραμμοσκιασμένη περιοχή).

Σ' αυτήν τη δίοδο υπάρχουν δύο επαφές [Al_{0.3}Ga_{0.7}As(p) - GaAs και GaAs - Al_{0.3}Ga_{0.7}As(n)] μεταξύ διαφορετικών υλικών. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από λεπτό στρώμα GaAs (0,1-0,3μm). Με μια τέτοια δίοδο, η πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου, για λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου μπορεί να μειωθεί περίπου δυο τάξεις μεγέθους (δηλαδή σε 10^3 A/cm²) συγκριτικά με τη συσκευή ομοεπαφής. Έτσι η cw λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου γίνεται δυνατή. Η μείωση της πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου οφείλεται στο συνδυασμένο αποτέλεσμα τριών περιστάσεων: α) Ο δείκτης διάθλασης του GaAs (n=3.6) είναι σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνον του Al_{0.3}Ga_{0.7}As (n=3.4) παρέχοντας μια δομή οπτικού κυματοδηγού. Αυτό σημαίνει πως ο ρυθμός laser θα είναι τώρα εγκλωβισμένος στο στρώμα του GaAs, δηλαδή στην περιοχή ενίσχυσης και, αντίθετα προς την κατάσταση στη δίοδο ομοεπαφής, τα πτερύγια της κατανομής του πεδίου δεν εκτείνονται πλέον μέσα στις μη αντλούμενες (και ως εκ τούτου απορροφούσες) περιοχές β) Το χάσμα ζώνης του Al_{0.3}Ga_{0.7}As (περίπου 1,8eV), είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτού του GaAs (περίπου 1,5eV).

Συνεπώς σχηματίζονται ενεργειακοί φραγμοί στις δύο επαφές, οι οποίοι εγκλωβίζουν αποτελεσματικά τις εγχυμένες οπές και ηλεκτρόνια στο ενεργό στρώμα (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Ενεργειακό διάγραμμα ζωνών ενός laser ημιαγωγού διπλής ετεροδομής.

Για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος, η συγκέντρωση οπών και ηλεκτρονίων στο ενεργό στρώμα αυξάνεται. γ) Η ικανότητα κατανάλωσης θερμότητας της διόδου έχει αισθητά βελτιωθεί. Αυτό έχει επιτευχθεί συγκολλώντας στο GaAs(p) υπόστρωμα, ένα πλακίδιο χαλκού ή κασσιτέρου το οποίο, εξαιτίας της μάζας και της θερμικής του αγωγιμότητας, δρα σαν απαγωγέας θερμότητας. (Αρχές των Lasers-O.Svelto, 1986. σελ.228)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ LASER

3.1 Οπτικές επικοινωνίες

Από την πρώτη ημέρα της επιτυχημένης λειτουργίας του laser άρχισε και η προσπάθεια εφαρμογής του στις τηλεπικοινωνίες. Επικοινωνίες με laser είναι μια ενδιαφέρουσα περίπτωση για πολλούς λόγους. Πρώτα είναι η μεγάλη κατευθυντικότητα της δέσμης laser αν συγκριθεί π.χ. με την αντίστοιχη των δεσμών που παράγουν οι μικροκυματικές κεραιές. Η κατευθυντικότητα μίας δέσμης laser εκφράζεται από το άνοιγμα της Φ που δίνεται από την :

$$\Phi = 1.27 \lambda_L / D_L \quad (\text{εξ } 3.1)$$

όπου λ_L είναι το μήκος κύματος της δέσμης laser και D_L η διάμετρος της κατά την έξοδο της από το laser. Η έκφραση αυτή της Φ είναι περίπου σωστή και για μικροκυματικές κεραιές διαμέτρου D_M που εκπέμπουν ακτινοβολία μήκους κύματος λ_M . Για να έχει ο μικροκυματικός πομπός το ίδιο άνοιγμα δέσμης όπως ο πομπός laser πρέπει η διάμετρος της μικροκυματικής κεραιάς να είναι :

$$D_M = \frac{\lambda_M}{\lambda_L} D_L \approx 10^5 D_L \quad (\text{εξ.3.2})$$

Δηλαδή 100.000 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της δέσμης laser. Δηλαδή laser με δέσμη διαμέτρου 1mm, ισοδυναμεί με μικροκυματική κεραιά διαμέτρου 100m, ως προς την κατευθυντικότητα.

Ένας άλλος λόγος που κάνει την ιδέα της οπτικής επικοινωνίας ελκυστική είναι η μεγάλη δυνατότητα της σε μεταφερόμενη ποσότητα πληροφορίας. Το ποσό πληροφορίας που μπορεί να σταλεί με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ανάλογο του εύρους ζώνης του φέροντος κύματος. Έτσι πηγαίνοντας από την μικροκυματική περιοχή στην οπτική περιοχή, η συχνότητα του φέροντος αυξάνει κατά ένα παράγοντα 10^4 δημιουργώντας προϋποθέσεις πολύ μεγάλου εύρους ζώνης. Με ένα

τόσο μεγάλο εύρος ζώνης είναι θεωρητικά δυνατό να μεταφερθούν μερικά έγχρωμα κανάλια τηλεόρασης με μία δέσμη laser.

Αν και το μεγάλο εύρος ζώνης και η κατευθυντικότητα της δέσμης laser των συστημάτων επικοινωνίας με laser αποτελούν δυο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν δυστυχώς και μερικά μειονεκτήματα. Το μεγάλο εύρος ζώνης π.χ. της δέσμης laser πολύ δύσκολα μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης η χρησιμότητα επικοινωνιακών συστημάτων με laser περιορίζεται από άλλους παράγοντες όπως φωρατές και δυσκολίες τοποθέτησης της πληροφορίας πάνω σε δέσμες laser. Αν δε το επικοινωνιακό σύστημα με laser χρησιμοποιεί σαν μέσο διάδοσης την ατμόσφαιρα τότε η απόδοση του συστήματος προφανώς θα επηρεάζεται από ατμοσφαιρικές διαταραχές, βροχή, ομίχλη κ.τ.λ.

Οι δυσκολίες αυτές που προκύπτουν από την διάδοση των οπτικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα οδήγησε τους ερευνητές στην χρήση των οπτικών κυματαγωγών, που οδηγούν την δέσμη laser και επί πλέον είναι εύκολο και οικονομικά προσιτό να κατασκευασθούν σήμερα. Το είδος αυτό επικοινωνίας μονοπωλεί σήμερα το ενδιαφέρον των ερευνητών.

Η χρήση των laser στις επικοινωνίες, χωρίς μέσο διάδοσης την οπτική ίνα, περιορίστηκε αντίθετα σε δύο μόνο εφαρμογές, τις επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων ή δορυφόρου και σταθμού εδάφους, καθώς και σε επικοινωνίες μικρών αποστάσεων, μεταξύ σταθμών που έχουν μεταξύ τους οπτική επαφή. (Εισαγωγή στην οπτοηλεκτρονική, Α.Α Σεραφετινίδης, 1989.σελ.4.7)

3.2 Οπτικοί διαμορφωτές

Στο σημείο αυτό θα δούμε τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα σήμα οποιασδήποτε μορφής, π.χ. ομιλία, σήμα video κλπ, πάνω σε μία φωτεινή δέσμη led ή laser. Η τοποθέτηση αυτή του σήματος πάνω στην οπτική συχνότητα λέγεται διαμόρφωση οπτικών συχνοτήτων.

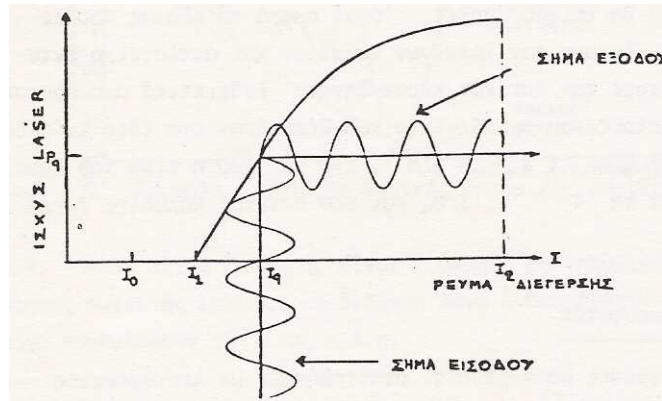
Η διάταξη που τοποθετεί το σήμα πάνω στην φωτεινή δέσμη ονομάζεται διαμορφωτής. Για να στείλουμε ένα σήμα με μία φωτεινή δέσμη πρέπει να διαμορφώσουμε ή να αλλάξουμε τα χαρακτηριστικά της δέσμης αυτής με κάποιο τρόπο. Υπάρχουν πέντε χαρακτηριστικά που μπορούν να μεταβληθούν. Είναι η ισχύς,

η συχνότητα, η φάση, η πόλωση και η κατεύθυνση της δέσμης. Από τα πέντε αυτά χαρακτηριστικά συνήθως μεταβάλλονται η ισχύς ή η συχνότητα, ενώ η πόλωση χρησιμοποιείται σαν ενδιάμεσο στάδιο κάποιου άλλου τύπου διαμόρφωσης. Αντίθετα η φάση ή η κατεύθυνση της δέσμης χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο.

Υπάρχουν τρεις τρόποι επέμβασης στα χαρακτηριστικά της φωτεινής δέσμης που προαναφέραμε. Η άμεση επέμβαση ή άμεση διαμόρφωση και η έμμεση εξωτερική και η έμμεση εσωτερική διαμόρφωση όπου οι λέξεις εξωτερική – εσωτερική αναφέρονται στο κατά πόσο οι διαμορφωτές βρίσκονται έξω ή μέσα στο οπτικό αντηχείο της διάταξης laser που παράγει την φωτεινή ακτινοβολία.

3.2.1 Άμεση διαμόρφωση

Στην περίπτωση της άμεσης διαμόρφωσης έχουμε ουσιαστικά επέμβαση στον ρυθμό άντλησης του laser όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1, όπου η ισχύς εξόδου του laser εμφανίζεται σαν συνάρτηση του ρεύματος που διαρρέει τον σωλήνα laser. Το I_0 είναι το ελάχιστο ρεύμα που απαιτείται για να υπάρξει ηλεκτρική εκκένωση, το I_1 είναι το ελάχιστο ρεύμα που απαιτείται για να υπάρξει έξοδος laser, και το I_2 είναι το ρεύμα κόρου. Θα μπορούσαμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε όλη την περιοχή $I_1 - I_2$ και να διαμορφώσουμε την έξοδο του laser μεταξύ των τιμών ελαχίστου και μεγίστου. Συνήθως όμως η διαμόρφωση περιορίζεται στην γραμμική περιοχή της καμπύλης, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι παραμορφώσεις και το dP/dI να είναι σταθερό. Αν τώρα το ρεύμα εισόδου μεταβάλλεται ημιτονοειδώς γύρω από μία τιμή I_q τότε και η ισχύς εξόδου του laser μεταβάλλεται ημιτονοειδώς γύρω από μία μέση τιμή P_q . Το σημείο (I_q, P_q) λέγεται στην περίπτωση αυτή, σημείο λειτουργίας του laser.



Εικόνα 3.1: Εφαρμογή της άμεσης διαμόρφωσης σε laser αερίου.

Η μέθοδος αυτή διαμόρφωσης αν και είναι πάρα πολύ απλή έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε άλλα laser πλην αυτών που διεγείρονται κατ' ευθείαν από ηλεκτρικές εκκενώσεις όπως τα laser αερίων ή τα laser ημιαγωγών. Είναι αδιανόητη η χρήση σε laser όπως τα οπτικής άντλησης ή τα χημικά.

3.2.2 Έμμεση εξωτερική διαμόρφωση

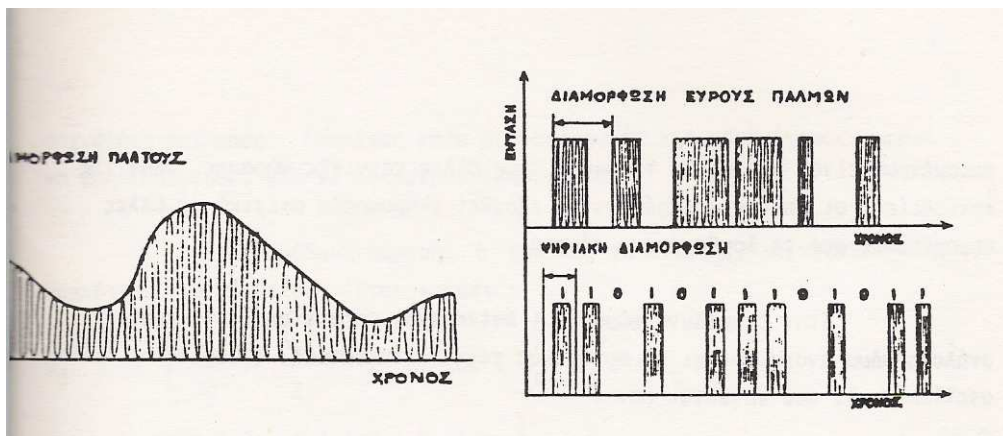
Οι τρόποι διαμόρφωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η εξωτερική ηλεκτροοπτική διαμόρφωση, η εξωτερική μαγνητοοπτική διαμόρφωση και η εξωτερική ακουστοοπτική διαμόρφωση. (Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική, Α.Α Σεραφετινίδης, 1989.σελ.4.15)

3.3 Μέθοδοι διαμόρφωσης

Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι, που μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς για να μετατρέψει κάποιο είδος πληροφορίας σε μεταβολή κάποιας παραμέτρου του φέροντος κύματος. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες : στις αναλογικές, ψηφιακές και κατά παλμούς.

Στην αναλογική διαμόρφωση η πληροφορία εμφανίζεται με την μορφή μίας χρονικά μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής τάσης που επηρεάζει κάποια παράμετρο του

φέροντος κύματος. Επομένως σε κάθε χρονική στιγμή υπάρχει αντιστοιχία του πλάτους του αρχικού σήματος και του μεγέθους της παραμέτρου του φέροντος. Στις άλλες δύο μεθόδους το πλάτος του σήματος εξετάζεται σε τακτά χρονικά διαστήματα και η πληροφορία εμφανίζεται με την μορφή παλμών. Στην περίπτωση αυτή το εύρος του παλμού μεταβάλλεται ανάλογα με το απαιτούμενο σήμα ή οι παλμοί συγκεκριμένου εύρους εμφανίζονται, μέσα σε κάποια χρονική περίοδο, ανάλογα πάλι με το απαιτούμενο σήμα. Οι τρεις αυτές περιπτώσεις εμφανίζονται στην εικόνα



Εικόνα 3.2: Τρεις διαφορετικές μέθοδοι διαμόρφωσης μίας φωτεινής δέσμης.

Από τις τρεις μεθόδους διαμόρφωσης που αναφέραμε προηγουμένως, οι δυο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι η αναλογική και η ψηφιακή.

3.3.1 Αναλογική διαμόρφωση

Παρά το ότι κατ' αρχήν πολλοί παράμετροι του φέροντος κύματος θα μπορούσαν να διαμορφωθούν στις οπτικές συχνότητες, υπάρχει το πρόβλημα ότι οι φωρατές ακτινοβολίας αποκρίνονται μόνο σε μεταβολές της έντασης της ακτινοβολίας που φθάνει σ' αυτούς. Το ηλεκτρικό πεδίο του φέροντος κύματος γράφεται σαν :

$$E_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \Phi_c) \quad (\text{εξ.3.3})$$

όπου τα A_c , ω_c , Φ_c , είναι το πλάτος, η γωνιακή συχνότητα και η φάση αντίστοιχα και προφανώς όλα μπορούν να διαμορφωθούν. Εάν το σήμα αυτό πέσει πάνω στον φωρατή ακτινοβολίας, τότε η έξοδος 0_d του φωρατή, (που αποκρίνεται μόνο σε μεταβολές της έντασης ακτινοβολίας), θα είναι :

$$0_d = R A_c^2 \langle \cos^2 (\omega_c t + \Phi_c) \rangle \quad (\text{εξ.3.4})$$

$$0_d = R A_c^2 / 2 \quad (\text{εξ.3.5})$$

όπου R είναι η ευαισθησία του φωρατή, (responsivity), και οι $\langle \rangle$ υποδηλώνουν τον μέσο όρο, της συνάρτησης μέσα σ' αυτές, για μία πλήρη περίοδο. Είναι προφανές λοιπόν ότι στην κατ' ευθείαν φώραση, (direct detection), μόνο η ένταση της ακτινοβολίας μπορεί να ανιχνευθεί, η οποία είναι ανάλογη του A_c^2 και επομένως διαμόρφωση των άλλων παραμέτρων είναι αδύνατη. Υπάρχουν όμως άλλες τεχνικές φώρασης, πλην της κατευθείαν, οι οποίες επιτρέπουν να εξαχθεί πληροφορία σχετικά με άλλες παραμέτρους από τα λαμβανόμενα σήματα.

Στην ετερόδυνη φώραση, (heterodyne detection), το προς ανάλυση σήμα ανακατεύεται μ' αυτό ενός τοπικού ταλαντωτή, (local oscillator), που γράφεται σαν :

$$E_o(t) = A_o \cos (\omega_o + \Phi_o) \quad (\text{εξ.3.6})$$

Όπου το ω_o βρίσκεται πολύ κοντά στην τιμή ω_c . Η έξοδος του φωρατή τώρα θα είναι :

$$0_d = R \langle [E_c(t) + E_o(t)]^2 \rangle = R \langle E_c^2(t) + E_o^2(t) + 2 E_c(t) E_o(t) \rangle$$

ή

$$0_d = R [A_c^2 / 2 + A_o^2 / 2 + 2 A_c A_o \langle \cos (\omega_c t + \Phi_c) \cos (\omega_o t + \Phi_o) \rangle]$$

Ισχύει όμως :

$$\langle \cos (\omega_c t + \Phi_c) \cos (\omega_o t + \Phi_o) \rangle = 1/2 \langle \cos [(\omega_c t + \omega_o) t + (\Phi_c + \Phi_o)] +$$

$$+ \cos [(\omega_c - \omega_o) t + (\Phi_c - \Phi_o)] >$$

Επειδή όμως τα ω_o και ω_c έχουν περίπου την ίδια τιμή ο όρος $\cos [(\omega_c - \omega_o) t + (\Phi_c - \Phi_o)]$ ταλαντούται πολύ πιο αργά παρά ο άλλος όρος και μπορεί να θεωρηθεί σαν μία σταθερά για την μικρή διάρκεια του χρόνου στον οποίο λαμβάνεται ο μέσος όρος. Η χρήση ενός ηλεκτρικού φίλτρου περατού στην ζώνη γύρω από το $(\omega_c - \omega_o)$ στην έξοδο του φωρατή θα περιορίσει την έξοδο του φωρατή στο :

$$O_d = R A_c A_o \cos [(\omega_c - \omega_o) t + (\Phi_c - \Phi_o)] \quad (\text{εξ.3.7})$$

όπου προφανώς το O_d εξαρτάται από το πλάτος του φέροντος, την γωνιακή συχνότητα και φάση. Επομένως κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταφέρει πληροφορία.

Στην ομόδυνη φώραση, ο τοπικός ταλαντωτής, λειτουργεί στην συχνότητα του φέροντος. Έτσι ισχύει :

$$O_d = R [A_c^2 / 2 + A_o^2 / 2 + A_c A_o \cos (\Phi_c - \Phi_o) + A_c A_o \cos (2\omega_c t + (\Phi_c + \Phi_o))] > \quad (\text{εξ.3.8})$$

η χρήση τώρα ενός ηλεκτρικού φίλτρου περατού στις χαμηλές συχνότητες δεν επιτρέπει την διέλευση στους δεύτερο και τελευταίο όρο του δεξιού μέρους της τελευταίας έκφρασης και αν επί πλέον $A_o \gg A_c$ τότε έχουμε :

$$O_d = R A_c A_o \cos (\Phi_c - \Phi_o) \quad (\text{εξ.3.9})$$

Επομένως στην ομόδυνη φώραση και η διαμόρφωση πλάτους και η διαμόρφωση κατά φάση είναι δυνατές. (Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική, Α.Α Σεραφεινίδης, 1989.σελ.4.28)

3.4 Χαρακτηριστικά διαμόρφωσης

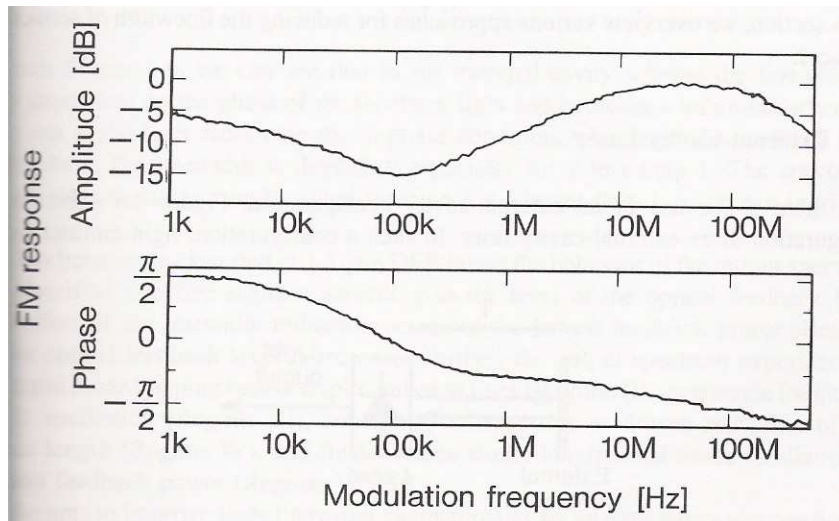
Στα λογικά συστήματα επικοινωνίας με φωτοκύματα χρησιμοποιούνται τρεις τύποι διαμόρφωσης : η ASK (Amplitude Shift – Keying) , η FSK (Frequency Shift –

Keying) και η PSK (Phase Shift – Keying). Συνήθως, οι διαμορφώσεις ASK και PSK τίθενται σε λειτουργία από εξωτερικούς διαμορφωτές που χρησιμοποιούν την ηλεκτροοπτική δράση. Από την άλλη μεριά, η FSK διαμόρφωση μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με μια ελαφρά διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης του laser. Για το λόγο αυτό, η χρήση της FSK διαμόρφωσης είναι περισσότερο διαδεδομένη. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, θα επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στα FM χαρακτηριστικά των ημιαγωγών lasers.

Σύμφωνα με θεωρητικές και πειραματικές έρευνες τα άμεσα FM χαρακτηριστικά των ημιαγωγών lasers κυριαρχούνται από δύο κύρια φαινόμενα. Το ένα είναι το φαινόμενο της φέρουσας πυκνότητας διαμόρφωσης. Σε αυτό το μηχανισμό η διαμόρφωση του παρεχομένου ρεύματος προκαλεί διαμόρφωση στη φέρουσα πυκνότητα του υλικού του laser και η τελευταία με τη σειρά της προκαλεί διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης του ενεργού στρώματος και αλλαγή της συχνότητας ταλάντωσης. Κατά το φαινόμενο της φέρουσας πυκνότητας διαμόρφωσης, το μήκος κύματος του laser αλλάζει σε μικρότερο μήκος κύμα αυξάνοντας το ρεύμα, το οποίο λέγεται *μπλε – μετατόπιση (blue – shift)*.

Το άλλο φαινόμενο είναι η αλλαγή της θερμοκρασίας. Αυτή προκαλείται εξαιτίας της θέρμανσης του ενεργού στρώματος από το παρεχόμενο ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό είναι κυρίαρχο στις περιοχές χαμηλής συχνότητας λόγω της σχετικά χαμηλής ταχύτητας αντίδρασης. Στην περίπτωση αυτή το μήκος κύματος του laser μεγαλώνει αυξάνοντας το ρεύμα και αυτό λέγεται *κόκκινη – μετατόπιση (red – shift)*.

Τα πραγματικά FM χαρακτηριστικά των ημιαγωγών lasers κυριαρχούνται βασικά από τα δύο φαινόμενα που περιγράψαμε παραπάνω. Τα FM χαρακτηριστικά στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων είναι το αποτέλεσμα του φαινομένου της αλλαγής θερμοκρασίας, ενώ αυτά στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων προκαλούνται από τη φέρουσα πυκνότητα διαμόρφωσης. Η εικόνα 3.3 δείχνει τις πραγματικές μετρήσεις των FM χαρακτηριστικών ενός DFB laser [1]. Στην εικόνα 3.3 παρατηρούμε μια περιοχή γύρω στα 100 kHz όπου η απόδοση των FM είναι σχετικά χαμηλή. Μια τέτοια περιοχή καλείται *κάμψη απόδοσης (efficiency dip)* του ημιαγωγού laser, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο όπου διασταυρώνονται τα φαινόμενα της αλλαγής θερμοκρασίας και της φέρουσας πυκνότητας διαμόρφωσης.



Εικόνα 3.3: FM χαρακτηριστικά ενός DFB laser.

Το όριο του εύρους ζώνης διαμόρφωσης ενός ημιαγωγού laser στην περιοχή υψηλής συχνότητας προέρχεται κυρίως από την *ταλάντωση ηρεμίας (relaxation oscillation)* ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του αριθμού των φωτονίων και ηλεκτρονίων του laser. Μετά από κάποιους υπολογισμούς, μπορεί να αποδειχθεί ότι η συχνότητα ταλάντωσης ηρεμίας είναι, κατά προσέγγιση, ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ισχύς εξόδου του laser και επίσης με την τετραγωνική ρίζα του αντίστροφου χρόνου ζωής των φωτονίων. Επομένως, για τη διαμόρφωση υψηλής συχνότητας, είναι προτιμότερο να οδηγήσουμε ένα laser με μεγάλη ισχύ εξόδου.

3.5 Χαρακτηριστικά συντονισμού

Η οπτική συχνότητα των ημιαγωγών lasers μπορεί να συντονιστεί αλλάζοντας το παρεχόμενο ρεύμα και την θερμοκρασία των lasers. Τυπικά, μια αλλαγή στην οπτική συχνότητα από, περίπου, 1 σε 3 GHz μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας το ρεύμα οδήγησης κατά 1 mA, και μια αλλαγή από περίπου 12 σε 13 GHz μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της θερμοκρασίας 1 °C στην περιοχή του μήκους κύματος 1.55 μm.

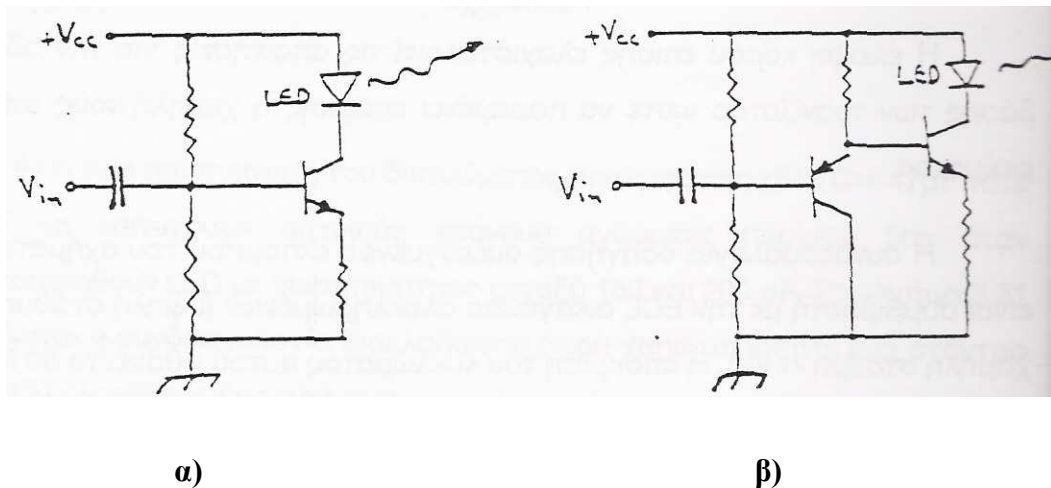
Στα λογικά συστήματα επικοινωνίας με φωτοκύματα τα χαρακτηριστικά συχνότητας συντονισμού των ημιαγωγών lasers έχουν εφαρμογή στο συντονισμό του σήματος του αναμεταδότη και στους τοπικούς ταλαντωτές. Ωστόσο, η δυνατότητα συντονισμού των συμβατικών laser ημιαγωγών δεν είναι απαραίτητα επαρκής για

ορισμένες εφαρμογές, όπως, για παράδειγμα, στα συστήματα FDM (Frequency - Division Multiplexing). (Coherent Lightwave Communication Systems, Shiro Ryu.1995, σελ.84)

3.6 Κυκλώματα οδήγησης πηγών LED για αναλογική μετάδοση

Στην αναλογική μετάδοση πρέπει να εξασφαλίζεται δια του κυκλώματος οδήγησης ότι η φωτεινή έξοδος θα παρακολουθεί με ακρίβεια την αναλογική τάση εισόδου ως προς το πλάτος και τη φάση. Έτσι η απόκριση του led, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, πρέπει να έχει γραμμική εξάρτηση από την τάση ή το ρεύμα εισόδου. Η απαίτηση αυτή πολλές φορές είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί στην πράξη γιατί οι πηγές led παρουσιάζουν από τη φύση τους μη γραμμικότητες. Το γεγονός αυτό τείνει να περιορίσει την απόδοση των αναλογικών συστημάτων εκτός και αν γίνει ιδιαίτερη πρόβλεψη για την χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων αντιστάθμισης. Σε πολλές τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις όπου ένα μόνο αναλογικό σήμα διαβιβάζεται είναι ανεκτά κάποια όρια παραμόρφωσης πλάτους και φάσης, πράγμα που δεν συμβαίνει στα συστήματα πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας στα οποία είναι αναγκαίος ένας υψηλός βαθμός γραμμικότητας ώστε να ξεπεραστεί η αλληλοπαρεμβολή μεταξύ γειτονικών καναλιών που οφείλεται σε νέες φασματικές συνιστώσες λόγω ενδοδιαμόρφωσης. Παρόμοια απαίτηση όσον αφορά τη γραμμικότητα ισχύει και στην περίπτωση μετάδοσης τηλεοπτικών σημάτων σε βασική ζώνη.

Θα παρουσιάσουμε παρακάτω μερικά απλά κυκλώματα οδήγησης διόδων led που χρησιμοποιούνται όταν η παραμόρφωση από τη μη γραμμικότητα δεν έχει σοβαρές επιπτώσεις στην λειτουργία του αναλογικού συστήματος επικοινωνίας, καθώς επίσης και τεχνικές αντιστάθμισης της μη γραμμικότητας του led και του κυκλώματος οδήγησης. Στην εικόνα 3.4 φαίνονται απλές αλλά υψηλής ταχύτητας διαμόρφωσης των led.



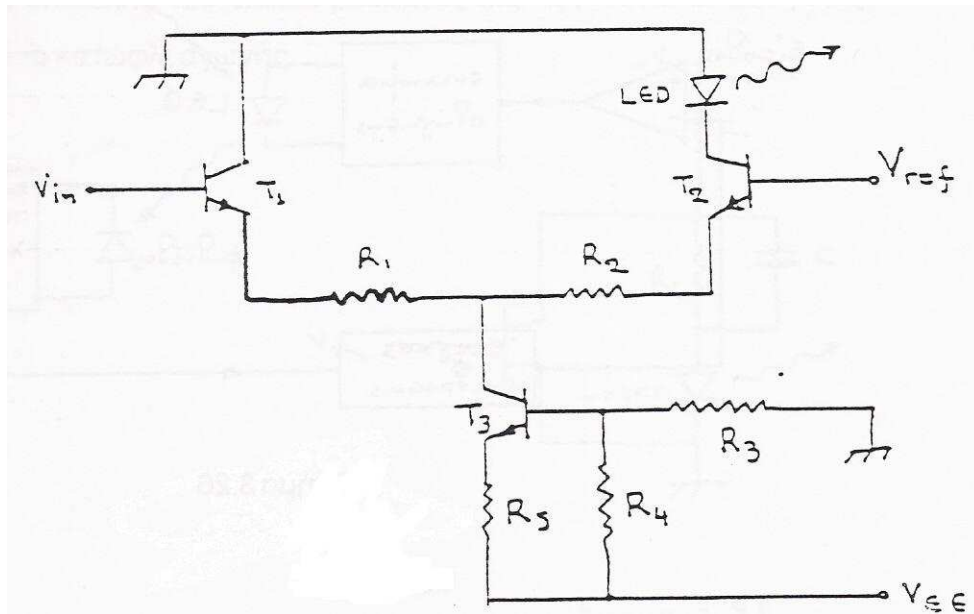
Εικόνα 3.4

Το κύκλωμα οδήγησης του σχήματος 3.4α) είναι ένας ενισχυτής διαγωγιμότητας συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού ο οποίος μετατρέπει την τάση στην βάση του τρανζίστορ σε ρεύμα συλλέκτη. Το τρανζίστορ πολώνεται ώστε να εργάζεται σε τάξη Α ενισχυτή με ρεύμα ηρεμίας συλλέκτη περίπου το μισό της τιμής κορυφής. Μια παρόμοια τεχνική οδήγησης που φαίνεται στην εικόνα 3.4β) χρησιμοποιεί αντί του απλού τρανζίστορ ένα ζεύγος Darlington για μεγαλύτερη ενίσχυση ρεύματος. Τα κυκλώματα αυτά επιτρέπουν τη διαμόρφωση σε αρκετά υψηλές συχνότητες (70 MHz).

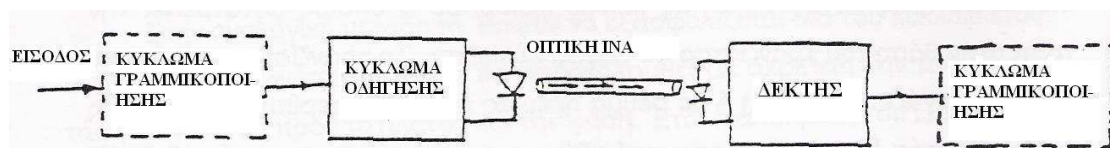
Μια άλλη απλή διάταξη διαμόρφωσης είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 3.5 στην οποία χρησιμοποιείται ένας διαφορικός ενισχυτής που εργάζεται στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του.

Το σημείο λειτουργίας του led ελέγχεται από την τάση αναφοράς V_{ref} , ενώ το άθροισμα των ρευμάτων των συλλεκτών της διαφορικής βαθμίδας καθορίζεται από το τρανζίστορ T3 που λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος. Οι αντιστάσεις R1 και R2 που συνήθως εκλέγονται ίσες, με την ανάδραση που παρέχουν αυξάνουν την αντίσταση εισόδου της βαθμίδας.

Σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η διατήρηση άκρως χαμηλών σταθμών παραμόρφωσης πλάτους και φάσης, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιούνται τεχνικές αντιστάθμισης της μη γραμμικότητας. Στο σχήμα 3.6 η αντιστάθμιση γίνεται με την παρεμβολή ενός μη γραμμικού κυκλώματος είτε μπροστά από το κύκλωμα οδήγησης του πομπού είτε μετά τον δέκτη.



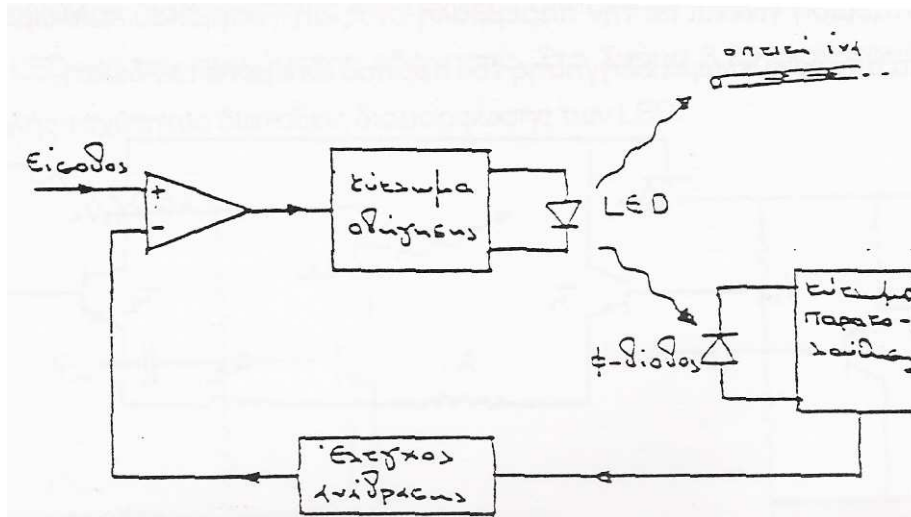
Εικόνα 3.5



Εικόνα 3.6

Αν η συνάρτηση μεταφοράς αυτού του κυκλώματος επιλεγεί κατάλληλα είναι δυνατόν να επιτύχουμε γραμμική έξοδο της οπτικής ισχύος από το led ή της τελικής εξόδου στο δέκτη ανάλογη κάθε φορά με την τάση εισόδου. Η τεχνική αυτή έχει αποδειχθεί ότι ελαττώνει την παραμόρφωση εξ' αιτίας των αρμονικών ενδοδιαμόρφωσης μέχρι 20dB για περιορισμένες τιμές πλατών διαμόρφωσης. Στην εικόνα 3.7 φαίνεται μια πιο αποτελεσματική τεχνική γραμμικοποίησης στην οποία χρησιμοποιείται ανάδραση του οπτικού σήματος. Το σήμα αυτό από το led οδηγείται στην οπτική ίνα για μεταβίβαση στο δέκτη ενώ παράλληλα ένα δείγμα του, διαβιβάζεται σε παρακαείμενη φωτοδίοδο και το σήμα που προκύπτει συγκρίνεται με το σήμα εισόδου. Η χρησιμοποίηση της ανάδρασης τείνει να απορρίψει τις μη

γραμμικότητες του κυκλώματος οδήγησης και του led και να εξασφαλίσει μια γραμμική σχέση μεταξύ τάσης εισόδου και οπτικής ισχύος εξόδου.



Εικόνα 3.7

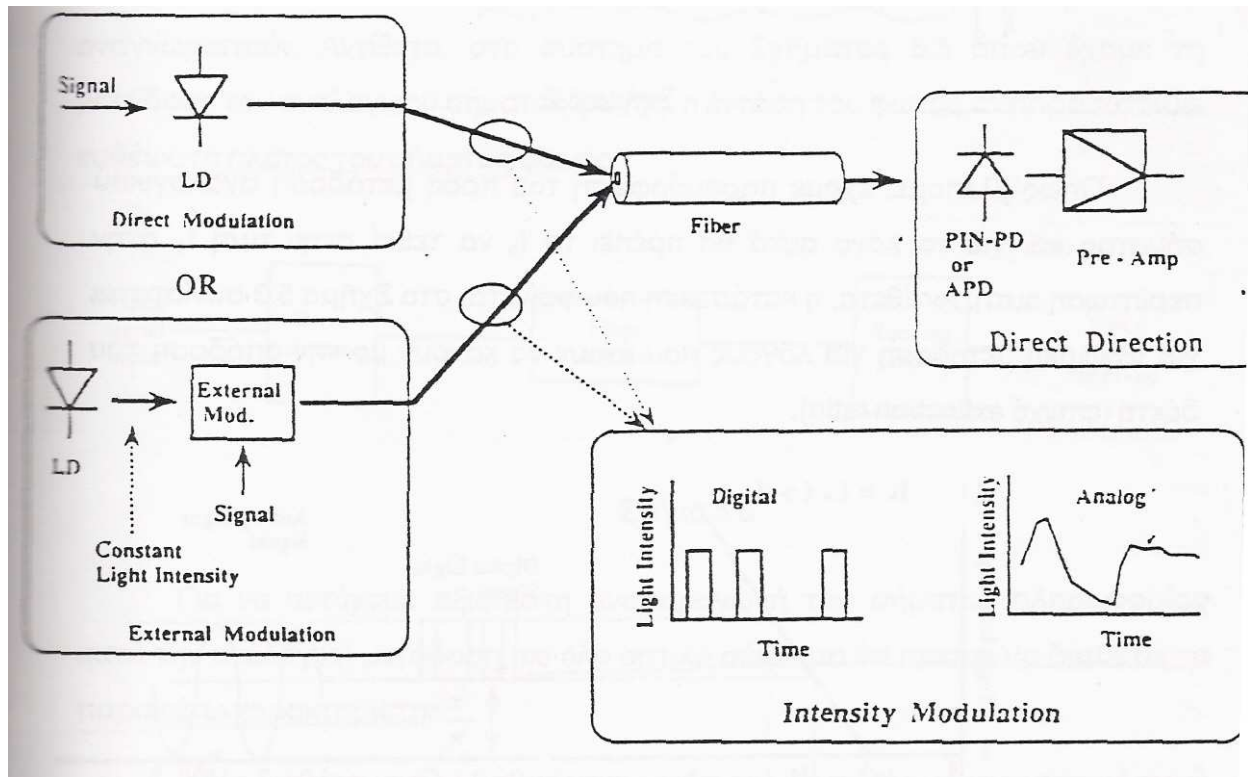
3.7 Κυκλώματα οδήγησης laser

Τα κυκλώματα οδήγησης των led που εξετάσαμε παραπάνω μπορεί με μικρές μόνο τροποποιήσεις να χρησιμοποιηθούν και για την οδήγηση των laser. Αυτό βέβαια γίνεται γιατί ως γνωστό οι δίοδοι laser παρουσιάζουν ένα κατώφλι εκπομπής πράγμα που δεν συμβαίνει στις διόδους led. Αυτή ακριβώς η διαφορά εκφράζεται σε μικρή απόκλιση των απαιτήσεων όσον αφορά το ρεύμα οδήγησης των δύο τύπων φωτοπηγών. (Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και Συστημάτων Οπτικών Επικοινωνιών, Λιοδάκης Γεώργιος σελ.40)

3.8 Διαμόρφωση έντασης

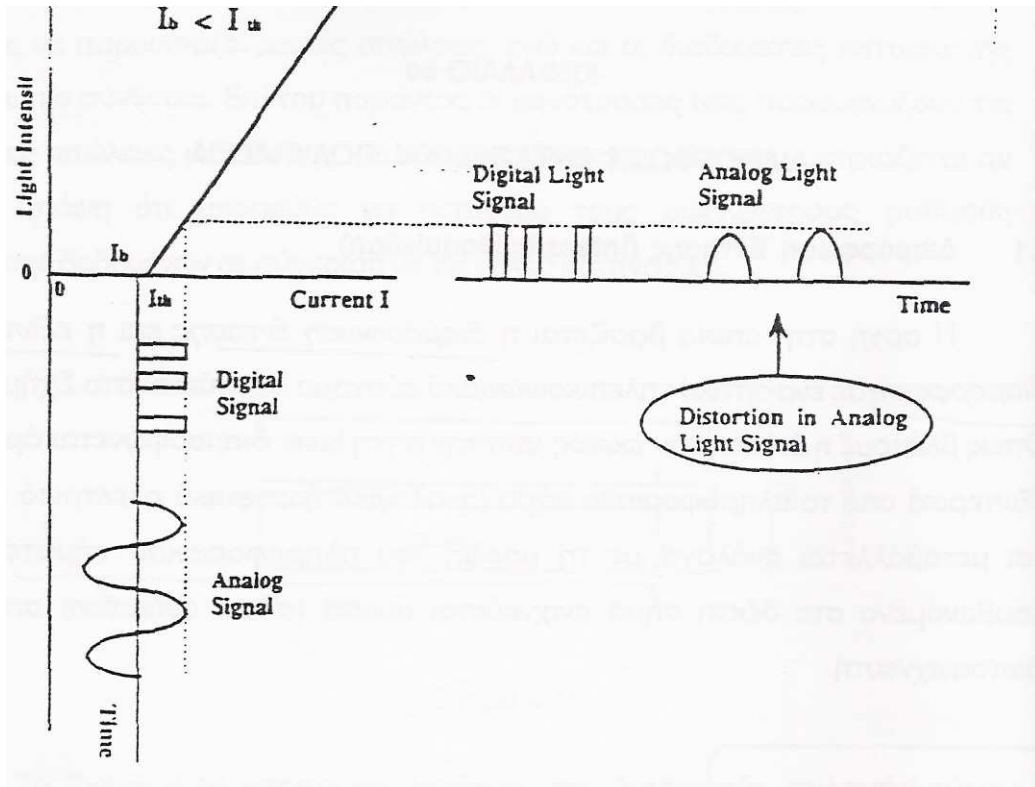
Η αρχή στην οποία βασίζεται η διαμόρφωση έντασης και η εξωτερική διαμόρφωση σε ένα οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα δεικνύεται στην εικόνα 3.8. Όπως βλέπουμε η ένταση του φωτός από την πηγή laser διαμορφώνεται άμεσα ή εξωτερικά από το πληροφοριακό σήμα (αναλογικό ή ψηφιακό ηλεκτρικό σήμα) και

μεταβάλλεται ανάλογα με τη μορφή του πληροφοριακού σήματος. Το λαμβανόμενο στο δέκτη σήμα ανιχνεύεται άμεσα (direct detection) από τον φωτοανιχνευτή.



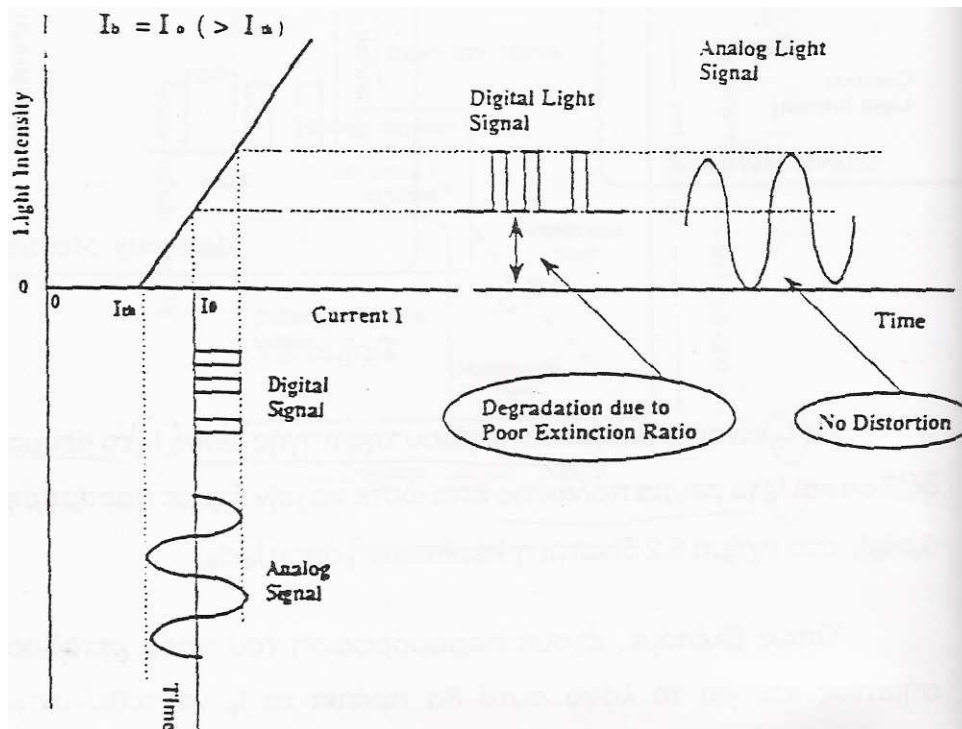
Εικόνα 3.8

Αν I_{th} είναι το ρεύμα κατωφλίου της πηγής laser, I_b το ρεύμα πόλωσης της διόδου και I_0 το ρεύμα πόλωσης έτσι ώστε να μην έχουμε παραμόρφωση σήματος ($I_0 > I_{th}$), στην εικόνα 3.9 δίνεται η περίπτωση όπου $I_b < I_{th}$.



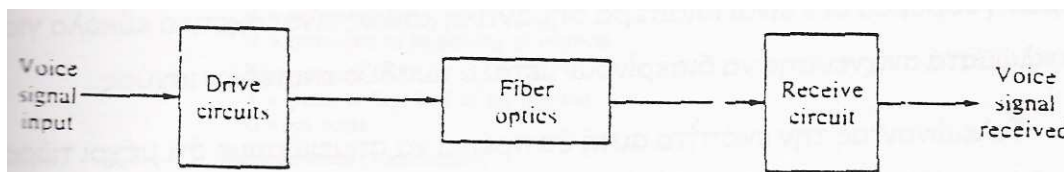
Εικόνα 3.9

Όπως βλέπουμε, έχουμε παραμόρφωση του προς μετάδοση αναλογικού σήματος και για το λόγο αυτό θα πρέπει το I_b να τεθεί στην τιμή I_0 στην περίπτωση αυτή. Αντίθετα, η κατάσταση που φαίνεται στην εικόνα 3.10 συνίσταται για ψηφιακή μετάδοση για λόγους που έχουν να κάνουν με την απόδοση του δέκτη (φτωχό extinction ratio).



Εικόνα 3.10

Στο σύστημα της εικόνας 3.11 έχουμε τη μετάδοση του αναλογικού σήματος φωνής, η ένταση του φωτός αντιπροσωπεύει ευθέως το πλάτος του σήματος φωνής.



Εικόνα 3.11

Για να πετύχουμε αξιόπιστη αναπαραγωγή του σήματος πληροφορίας κατά την αναλογική μετάδοση, το όλο οπτικό σύστημα θα πρέπει να διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

α) Να διαθέτει υψηλό βαθμό γραμμικότητας : Αυτό για μεν την οπτική πηγή σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ του οδηγούντος ρεύματος αυτής και της έντασης φωτός θα πρέπει να είναι γραμμική. Η προϋπόθεση αυτή ισχύει για την πηγή led καθώς διαθέτει μια σχεδόν γραμμική χαρακτηριστική που την καθιστά κατάλληλη για

αναλογική μετάδοση. Η ισχύς εκπομπής όμως της led είναι σχετικά μικρή (ακόμα μικρότερη είναι τελικά η οπτική ισχύς που συζευγνύεται στην οπτική ίνα) με αποτέλεσμα η όλη μετάδοση να επηρεάζεται αρκετά από τον θόρυβο. Αντίθετα, για μια πηγή laser, αν θέλουμε να λειτουργήσει στο γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής της και πάνω από το “γόνατο”, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ειδικά κυκλώματα σταθεροποίησης που περιορίζουν το εύρος χρήσης των laser κατά την αναλογική μετάδοση. Τώρα, όσον αφορά την οπτική ίνα, αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Τέλος, είναι εφικτή η ύπαρξη οπτικών ανιχνευτών με σχεδόν γραμμική συμπεριφορά όπου η προκαλούμενη παραμόρφωση είναι μικρότερη του 1%.

β) Η απόκριση του όλου συστήματος (είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο των συχνοτήτων εξεταζόμενη) θα πρέπει να μπορεί να είναι αντίστοιχα συμβατή με τα πληροφοριακά σήματα που πρόκειται να μεταδοθούν.

γ) Στο όλο σύστημα θα πρέπει να εμφανίζεται χαμηλό επίπεδο θορύβου για την επίτευξη υψηλών τιμών Signal-to-Noise (S/N). Η απαίτηση αυτή μας υποχρεώνει να χρησιμοποιήσουμε τις πηγές led μόνο για μετάδοση σε μικρές αποστάσεις. (Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και Συστημάτων Οπτικών Επικοινωνιών, Λιοδάκης Γεώργιος σελ.59)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΟΔΟΙ ΚΑΙ LASER

4.1 Εισαγωγή στη θεωρία των διόδων

Η δίοδος είναι ο απλούστερος τύπος συσκευής ημιαγωγού. Γενικά, είναι μια ηλεκτρονική συσκευή δύο ακροδεκτών τα οποία επιτρέπουν στο ρεύμα να ρέει επικρατέστερα σε μία κατεύθυνση. Το ρεύμα το οποίο περνάει εξαρτάται σύμφωνα με την τάση μεταξύ των ακροδεκτών. Οι δίοδοι δεν υπακούουν στο νόμο του Ωμ.

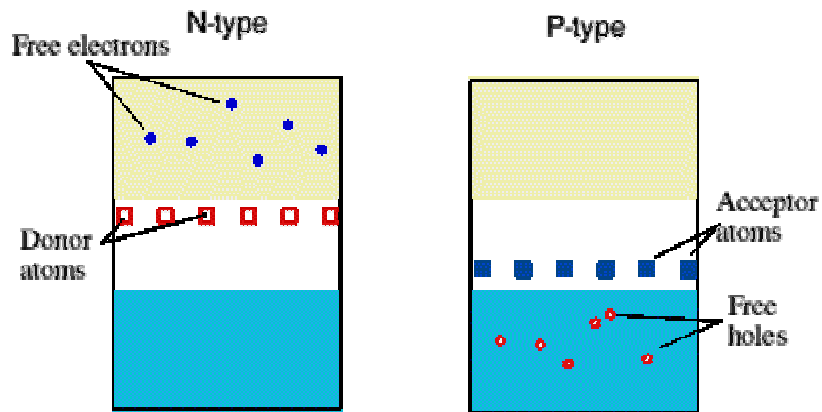
Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ημιαγωγών υλικών:

1. Εσωτερικοί – όπου οι ημιαγωγικές ιδιότητες του υλικού συμβαίνουν φυσικά, δηλαδή είναι έμφυτες στη φύση του υλικού
2. Εξωτερικοί – όπου οι ημιαγωγικές ιδιότητες του υλικού το οποίο κατασκευάζεται από εμάς ώστε το υλικό να συμπεριφέρεται με τον τρόπο με τον οποίο εμείς επιθυμούμε.

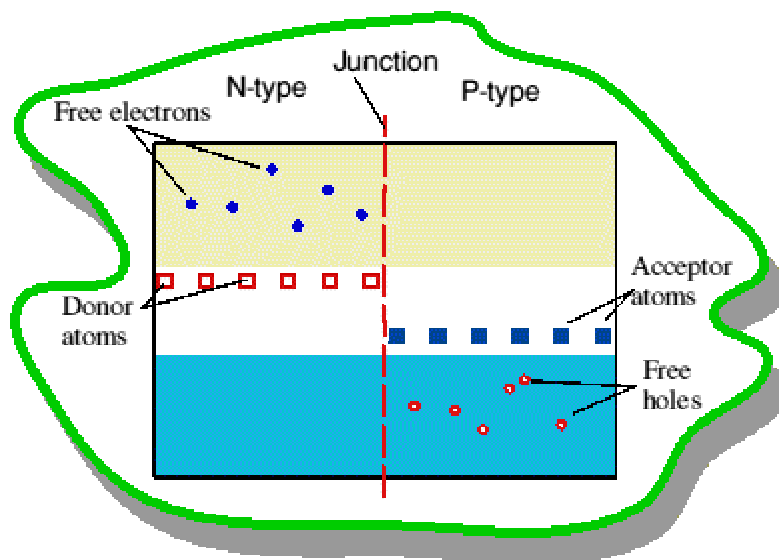
Σχεδόν όλοι οι ημιαγωγοί στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα είναι εξωτερικοί. Αυτό σημαίνει ότι έχουν δημιουργηθεί μεταβάλλοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού. Οι πιο κοινές μέθοδοι να τροποποιήσουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες είναι οι παρακάτω:

1. Προσθήκη προσμίξεων – δηλαδή η προσθήκη «ξένων» ατόμων στο υλικό.
2. Επιδράσεις επαφής – δηλαδή το γεγονός που συμβαίνει όταν ενώσουμε διαφορετικά υλικά μαζί.

Για να κατανοήσουμε πως λειτουργεί μία δίοδος επαφής $p - n$, ξεκινάμε υποθέτοντας δύο ξεχωριστά κομμάτια ενός ημιαγωγού, ένα κομμάτι p κι ένα κομμάτι n .



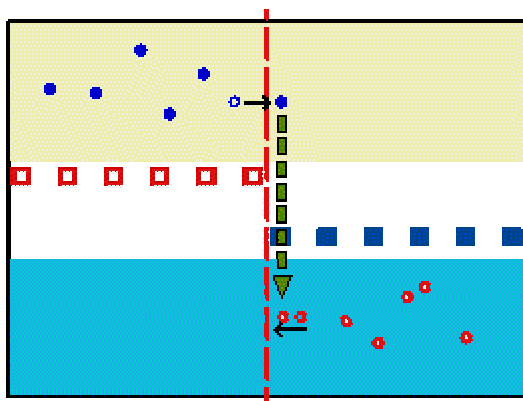
Εικόνα 4.1. Περιοχές p και n.



Εικόνα 4.2. Ενωμένες περιοχές p και n σε μία.

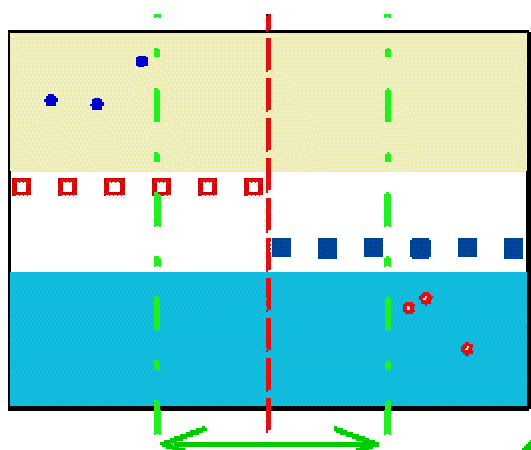
Με τις μπλε κουκκίδες συμβολίζουμε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, με τα μπλε τετράγωνα τα άτομα του αποδέκτη, με κόκκινα τετράγωνα τα άτομα του δότη και με κόκκινες κουκκίδες τις ελεύθερες οπές.

Φέρνουμε τις περιοχές και τις ενώνουμε για να φτιάξουμε ένα κομμάτι ημιαγωγού στο οποίο έχει γίνει διαφορετικά η προσθήκη προσμίξεων για κάθε πλευρά της επαφής.



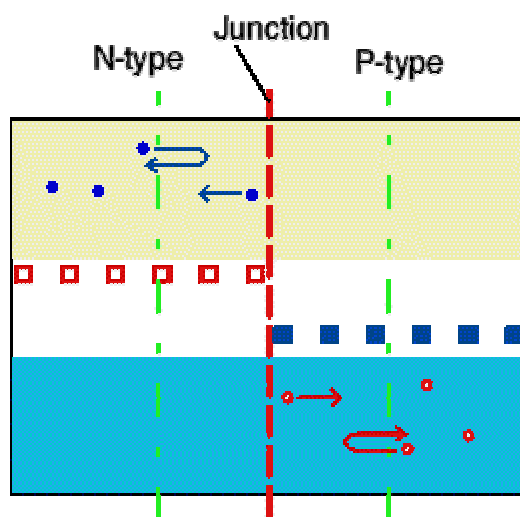
Εικόνα 4.3. Μεταπήδηση ελεύθερων ηλεκτρονίων από την περιοχή p στην περιοχή n.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή n και οι ελεύθερες οπές στην περιοχή p μπορούν αρχικά να περιφέρονται με τυχαία κίνηση μέσα στην επαφή. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο συναντήσει μία ελεύθερη οπή, τότε «πέφτει» μέσα σε αυτή. Όσον αφορά τις κινήσεις των φορτίων αυτό σημαίνει ότι η οπή και το ηλεκτρόνιο καταστρέφουν το ένα το άλλο και εξαφανίζονται.



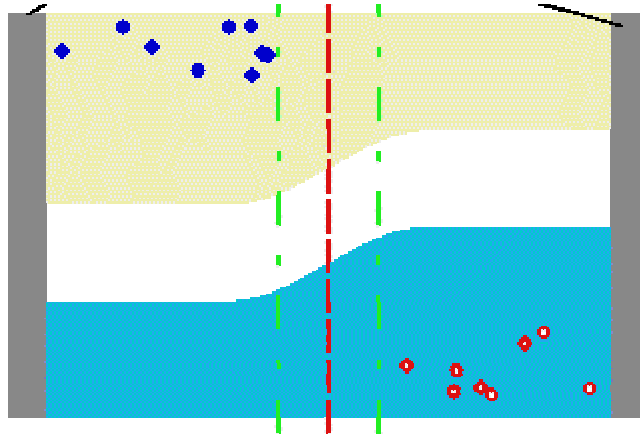
Εικόνα 4.4. Στιγμή «πτώσης» του ηλεκτρονίου μέσα σε μία οπή.

Το αποτέλεσμα είναι ότι ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία βρίσκονται κοντά στην επαφή, τείνουν να «φαγωθούν» μεταξύ τους, παράγοντας μία περιοχή μειωμένη από οποιοδήποτε κινούμενο φορτίο. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την επονομαζόμενη περιοχή απογύμνωσης.



Εικόνα 4.5. Πως δημιουργείται η περιοχή απογύμνωσης.

Τώρα κάθε ελεύθερο φορτίο το οποίο περιφέρεται μέσα στην περιοχή απογύμνωσης βρίσκει τον εαυτό του σε μία περιοχή χωρίς άλλα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τοπικά βλέπει πολλά θετικά φορτία (τα άτομα των δοτών) στην περιοχή n και πολλά αρνητικά φορτία (τα άτομα των αποδεκτών) στην περιοχή p. Αυτά καταβάλλουν δύναμη σε ένα ελεύθερο φορτίο οδηγώντας τα πίσω στην «δική» τους περιοχή της επαφής μακριά από την περιοχή απογύμνωσης. Τα άτομα των δοτών και των αποδεκτών εγκαθιδρύνονται στο στερεό σώμα και δεν μπορούν να μετακινηθούν. Ωστόσο, το αρνητικό φορτίο του ηλεκτρονίου του αποδέκτη και το θετικό φορτίο του πρωτονίου του δότη (εκτιθέμενο από το χαμένο ηλεκτρόνιο του) τείνει να διατηρήσει την περιοχή απογύμνωσης καθαρή από ελεύθερα ηλεκτρόνια καθώς σχηματίζεται η περιοχή. Ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο τώρα απαιτεί κάποια επιπλέον ενέργεια για να υπερνικήσει τις δυνάμεις από τα άτομα των δοτών και αποδεκτών ώστε να διασχίσει την περιοχή. Η επαφή επομένως δρα σαν ένα φράγμα, εμποδίζοντας οποιοδήποτε φορτίο να διαρρεύσει (ρεύμα) διαμέσου του φράγματος.

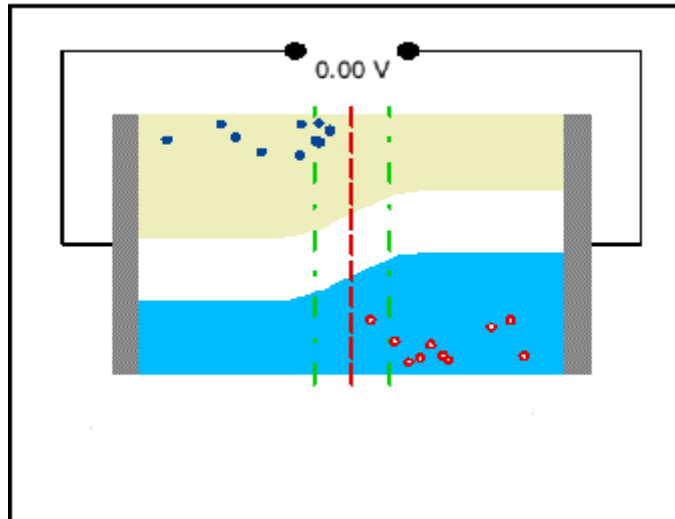


Εικόνα 4.6. Επαφή p και n και απεικόνιση του φράγματος.

Συνήθως αναπαριστούμε το φράγμα αυτό αποκλίνοντας την αγωγιμότητα και τις ζώνες σθένους καθώς αυτές διαπερνούν την περιοχή απογύμνωσης. Τώρα μπορούμε να φανταστούμε τα ηλεκτρόνια να οδηγούνται «ανοδικά» για να κινηθούν από την περιοχή n στην περιοχή p.

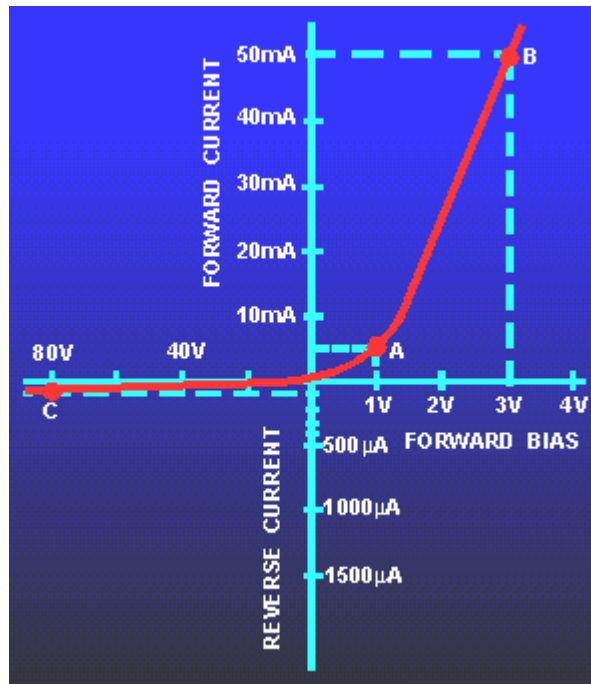
Οι οπές συμπεριφέρονται σαν να είναι μπαλόνια τα οποία εμφανίζονται ξαφνικά ενάντια σε μία οροφή. Σε αυτό το διάγραμμα θα χρειαστούμε ενέργεια για να τα τραβήξουμε προς τα κάτω πριν μπορέσουν και μετακινηθούν από την περιοχή τύπου p στην περιοχή τύπου n. Η ενέργεια η οποία απαιτείται από τις ελεύθερες οπές και τα ηλεκτρόνια μπορεί να προμηθευτεί από κατάλληλη τάση εφαρμοσμένη μεταξύ των δύο άκρων της διόδου p – n επαφής. Λαμβανομένου υπ’ όψιν ότι η τάση αυτή πρέπει να εφαρμοστεί με σωστό τρόπο, αυτό ωθεί τα φορτία πάνω από το φράγμα. Ωστόσο, εφαρμόζοντας την τάση με το λάθος τρόπο τα πράγματα γίνονται χειρότερα αποτραβώντας όποια ελεύθερα φορτία βρίσκονται μακριά από την επαφή. Γι’ αυτό οι διόδοι άγουν κατά μία μόνο κατεύθυνση.

Δημιουργούμε μία επαφή p – n ενώνοντας μαζί δύο κομμάτια ενός ημιαγωγού, ένα με προσμίξεις τύπου n και το άλλο με προσμίξεις τύπου p. Αυτό προκαλεί μία περιοχή απογύμνωσης που σχηματίζεται γύρω από την επαφή (την ένωση δηλαδή) μεταξύ των δύο υλικών. Η περιοχή αυτή ελέγχει τη συμπεριφορά της διόδου.



Εικόνα 4.7. Πώς λειτουργεί η διόδος.

Όταν φέρουμε μαζί τις δύο περιοχές δημιουργείται γύρω από αυτές μία περιοχή απογύμνωσης. Αυτό παράγει ένα φράγμα το οποίο εμποδίζει τα φορτία να ρεύσουν. Αρχικά η τάση μεταξύ των περιοχών p και n είναι μηδενική. Εφαρμόζουμε τάση κατά την ορθή φορά. Με μπλε χρώμα συμβολίζονται τα ηλεκτρόνια και το αρνητικό της συνεχούς τάσης (-) ενώ με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι οπές και το θετικό της συνεχούς τάσης (+). Τροφοδοτώντας με ορθή πόλωση την επαφή, δηλαδή το αρνητικό στην περιοχή n και το θετικό στην περιοχή p το φράγμα μειώνεται και αυτό επιτρέπει μερικά φορτία να διαπεράσουν την επαφή, δημιουργώντας ένα ρεύμα μέσω της διόδου. Με την αύξηση της τάσεως το φράγμα εξαφανίζεται το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τα φορτία να ρέουν μέσω της διόδου. Αυτό παράγει ένα μεγαλύτερο ρεύμα διόδου. Το γεγονός αυτό συμβαίνει μέχρι η τάση να φθάσει περίπου μέχρι τα 0,7 V. Τροφοδοτούμε τώρα κατά την ανάστροφη φορά, δηλαδή το θετικό στην περιοχή n και το αρνητικό στην περιοχή p. Η διαφορά αυτή δυναμικού που εφαρμόζεται αυξάνει απλά το εύρος της περιοχής και το ύψος του φράγματος. Συμπερασματικά λοιπόν όσο η επαφή τροφοδοτείται με ανάστροφη τάση η διόδος δεν άγει, ενώ όσο τροφοδοτείται με ορθή τάση η διόδος αρχίζει να άγει από την τάση τροφοδοσίας των 0,7 V περίπου και άνω. Θα πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει μία τιμή της τάσης στην οποία η διόδος είναι επικίνδυνο να καταστραφεί. Στην μεν ορθή πόλωση ονομάζεται μέγιστη τάση, στη δε ανάστροφη πόλωση ονομάζεται μέγιστη ανάστροφη τάση. Το παρακάτω σχήμα μας δείχνει τη χαρακτηριστική διόδου επαφής p – n.

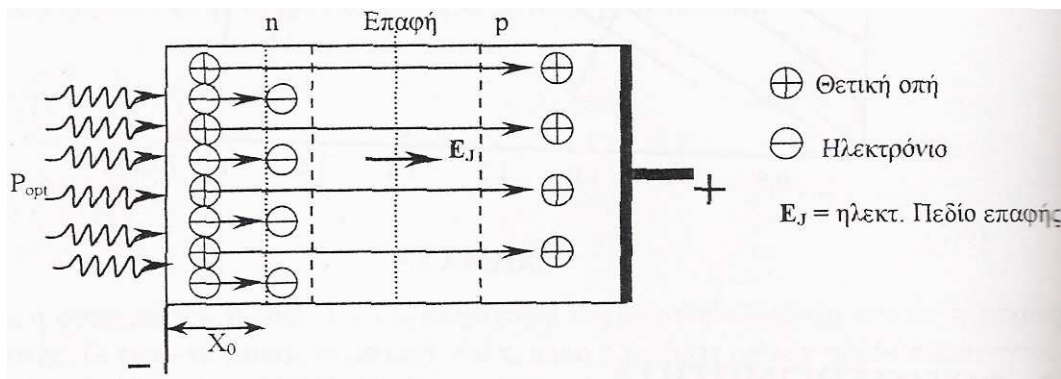


Εικόνα 4.8. Χαρακτηριστική της διόδου επαφής p – n.

Από την χαρακτηριστική της διόδου φαίνεται ότι η διάδος άγει στα 0,7 V όταν πολώνεται ορθά, ενώ όταν πολώνεται ανάστροφα το ρεύμα αγωγής είναι μηδενικό. (www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/index.html)

4.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Θεωρούμε μια δίοδο ημιαγωγών και μια οπτική ακτινοβολία η οποία έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της επαφής p-n και η οποία “φωτίζει” την περιοχή n της διόδου. Όταν το υλικό απορροφά τα φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη ή ίση από το εύρος E_g του ενεργειακού χάσματος, στη περιοχή n της διόδου εμφανίζονται ζεύγη ηλεκτρικών φορέων, (ηλεκτρόνια-θετικές οπές), μέχρι σε ένα βάθος X_0 από την επιφάνεια του ημιαγωγού (Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9

Οι φορείς αυτοί, που λέγονται και φωτοφορείς, διαχέονται μέσα στον ημιαγωγό μέχρι να φθάσουν στην επιφάνεια επαφής. Για να συμβεί αυτό πρέπει το πάχος του ημιαγωγού αυτού να είναι τέτοιο ώστε, ένα μεγάλο μέρος από τους φωτοφορείς να φθάνει στην επιφάνεια επαφής πριν επανασυνδεθούν. Εκεί επέρχεται ο διαχωρισμός των φωτοφορέων. Το ηλεκτρικό πεδίο E_J της επαφής, εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να διαχυθούν στον ημιαγωγό p. Αυτά συσσωρεύονται στη περιοχή του ημιαγωγού n που συνορεύει με την επαφή (Εικόνα 4.9). Αντίθετα, οι θετικές οπές επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο E_J , περνάνε την επαφή και διαχέονται μέσα στον ημιαγωγό p. Παρατηρούμε ότι, το ρεύμα των φωτοφορέων που διαρρέει την επαφή p-n είναι αποτέλεσμα των φορέων μειονότητας, που είναι οι θετικές οπές. Τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εμφάνιση ηλεκτρικής πόλωσης στα άκρα της φωτοδιόδου, όπου ο ημιαγωγός n φορτίζεται αρνητικά και ο ημιαγωγός p φορτίζεται θετικά. Η πόλωση αυτή ονομάζεται Φωτοβολταϊκή Τάση η δε πηγή που προκύπτει ονομάζεται Φωτοβολταϊκό Στοιχείο. (Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και Laser, Σιδεράς Ευστάθιος.1999, σελ.112)

4.3 Ανιχνευτές φωτός

Οι ανιχνευτές φωτός εκτελούν την ακριβώς αντίθετη λειτουργία από τους πομπούς φωτός. Οι πομποί όπως ήδη γνωρίζουμε είναι ηλεκτρο-οπτικά εξαρτήματα. Οι ανιχνευτές είναι οπτοηλεκτρικά εξαρτήματα. Μετατρέπουν τους ηλεκτρικούς παλμούς σε παλμούς φωτός. Επιτρέπουν στο οπτικό σήμα να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρικούς παλμούς που λαμβάνονται από τον ακροδέκτη των δεδομένων των

οπτικών ινών, οπτικών και ακουστικών συνδέσεων. Ο πιο συνηθισμένος ανιχνευτής είναι η φωτοδίοδος ημιαγωγού, που παράγει ρεύμα σαν απόκριση στο προσπίπτον φως. Σε μία δίοδο εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED), η ενέργεια που εκπέμπεται κατά την επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών είναι με τη μορφή φωτός. Σε μια φωτοδίοδο, συμβαίνει το αντίθετο φαινόμενο. Το φως που πέφτει στη φωτοδίοδο δημιουργεί ένα ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Απορροφημένα φωτόνια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Για κάθε ζεύγος που δημιουργείται, ένα ηλεκτρόνιο τίθεται σε κυκλοφορία σαν ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Όπως και στους πομπούς φωτός, η λειτουργία των ανιχνευτών βασίζεται στην αρχή της επαφής p-n. Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει στη δίοδο δίνει σε ένα ηλεκτρόνιο μέσα στη ζώνη σθένους αρκετή ενέργεια για να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας έτσι ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή. Αν η δημιουργία αυτών των φορέων συμβεί σε μια περιοχή αραίωσης, οι φορείς γρήγορα θα διασπαστούν και θα δημιουργήσουν ρεύμα καθώς φτάνουν στα άκρα της περιοχής αραίωσης, οι ηλεκτρονικές δυνάμεις ελαττώνονται και το ρεύμα παύει να υπάρχει. Ενώ οι δίοδοι p-n είναι ακατάλληλοι ανιχνευτές για συστήματα οπτικών ινών, οι φωτοδίοδοι PIN είναι και οι φωτοδίοδοι χιονοστιβάδας (APD's) είναι σχεδιασμένοι για να αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα των δίοδων p-n.

4.3.1 Σημαντικές παράμετροι φωτοανιχνευτών

Οι ανιχνευτές φωτός χαρακτηρίζονται από κάποιες παραμέτρους οι οποίες σημαντικότερες είναι οι παρακάτω:

Αποκρισιμότητα: Η αποκρισιμότητα ενός φωτοανιχνευτή είναι ο λόγος του ρεύματος εξόδου προς το φως εισόδου. Όσο μεγαλύτερη η αποκρισιμότητα του ανιχνευτή, τόσο καλύτερη η ευαισθησία του δέκτη. Αφού η αποκρισιμότητα ποικίλει σε σχέση με το μήκος κύματος, καθορίζεται είτε στο μήκος κύματος της μέγιστης αποκρισιμότητας είτε στο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει. Για τις περισσότερες εφαρμογές, η αποκρισιμότητα είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ανιχνευτή επειδή καθορίζει τη σχέση μεταξύ της οπτικής εισόδου και της ηλεκτρικής εξόδου. Η μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα είναι περίπου 1,05 A/W σε ένα μήκος κύματος των 1300 nm. Οι ανιχνευτές InGaAs του εμπορίου προσφέρουν τυπική

αποκρισιμότητα από 0,8 – 0,9 A/W σε ένα μήκος κύματος των 1300 nm. Η μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα ενός ανιχνευτή προκύπτει όταν η κβαντική απόδοση του ανιχνευτή είναι 100%. Αποκρισιμότητα και κβαντική απόδοση (η) συνδέονται με τη σχέση: $R = \eta \cdot \lambda / 1240$ όπου R =μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα σε A/W η = κβαντική απόδοση λ = μήκος κύματος σε nm. Συνεπώς ένας ανιχνευτής στα 1300 nm θα έχει μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα 1,05 A/W και ένας ανιχνευτής στα 850 nm θα έχει 0,68 A/W.

Κβαντική απόδοση: Η κβαντική απόδοση είναι ο λόγος των αρχικών ζευγών ηλεκτρονίων – οπών που δημιουργούνται όταν προσπίπτουν φωτόνια πάνω στο υλικό μιας διόδου. Μια 100 % κβαντική απόδοση σημαίνει ότι κάθε φωτόνιο που απορροφάται δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής. Η τυπική κβαντική απόδοση για έναν ανιχνευτή του εμπορίου είναι από 70% ως 90%. Αυτό το μέγεθος κβαντικής απόδοσης δείχνει ότι 7 ως 9 από τα 10 φωτόνια θα δημιουργήσουν φορείς. Παράγοντες που εμποδίζουν την κβαντική απόδοση από το να είναι 100% είναι οι απώλειες στη ζεύξη από την ίνα στον ανιχνευτή, η απορρόφηση φωτός στην p ή n περιοχή και οι διαρροές ρευμάτων στον ανιχνευτή.

Χωρητικότητα: Η χωρητικότητα ενός ανιχνευτή εξαρτάται από την ενεργό περιοχή του εξαρτήματος και την ανάστροφη τάση πάνω σ' αυτό. Μια μικρή ενεργός διάμετρος επιτρέπει μικρότερη χωρητικότητα. Όμως, καθώς η ενεργός διάμετρος μειώνεται, γίνεται δυσκολότερο να ευθυγραμμίσουμε την ίνα από τον ανιχνευτή. Αυτό περιπλέκεται από το γεγονός ότι η απόκριση της φωτοδιόδου είναι πιο αργή στα άκρα της ενεργού περιοχής. Αν τα άκρα φωτιστούν, μια αργή απόκριση θα εμφανιστεί, αυξάνοντας το «τρεμοπαίξιμο» των άκρων. Είναι σημαντικό να φωτίζεται μόνο το κεντρικό μέρος της ενεργού περιοχής για να ελαχιστοποιήσουμε αυτό το φαινόμενο. Η χωρητικότητα της φωτοδιόδου μειώνεται με την αύξηση της ανάστροφης τάσης. Η χαρακτηριστική δείχνει ότι καθώς η ανάστροφη τάση αυξάνει πάνω από 5 ή 6 Volt, η μείωση στη χωρητικότητα γίνεται ελάχιστη. Σε αυτό το σημείο λέμε ότι ο ανιχνευτής είναι πλήρως αραιωμένος. Υψηλότερες ανάστροφες τάσεις επίσης αυξάνουν την ταχύτητα του ανιχνευτή. Η υπερβολική ανάστροφη τάση μπορεί να αυξήσει το θόρυβο του ανιχνευτή σε ορισμένες περιπτώσεις.

4.4 Φωτοдиодοι

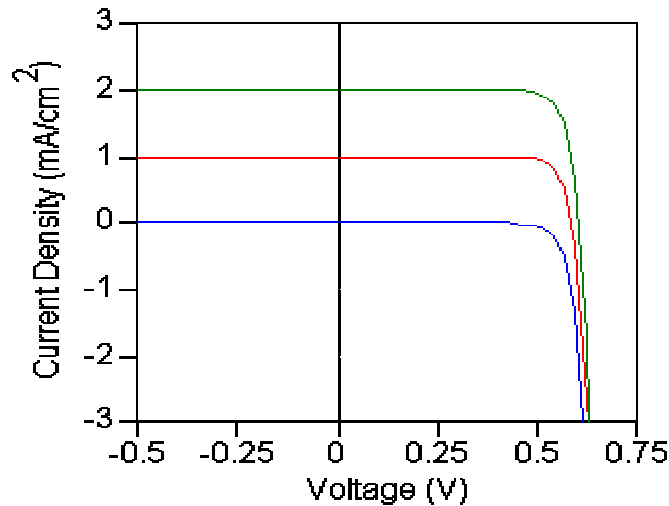
Οι φωτοдиодοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο να μετρήσουν φωτεινότητα. Η πτώση τάσεως που περνάει αυτές εξαρτάται από το ποσό του φωτός που πέφτει πάνω σε αυτές. Μια διόδος led παράγει φως όσο το ρεύμα περνάει από αυτή. Μερικά led μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή φωτός των laser. Συσκευές φωτονίου συμπαγής κατάστασης περιλαμβάνουν:

- α) Πηγές φωτός όπως led και laser ημιαγωγών.
- β) Συσκευές οι οποίες ανιχνεύουν οπτικά σήματα (φωτοανιχνευτές ή οπτικοί αισθητήρες ανίχνευσης)
- γ) Φωτοβολταϊκές συσκευές (ηλιακά κύτταρα)

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα $h\nu < E_g$ διαπερνάει έναν ημιαγωγό με σχετικά μικρή απορρόφηση. Η ακτινοβολία με συχνότητα $h\nu > E_g$ απορροφάται εντονότερα. Τέτοια ακτινοβολία μπορεί να δημιουργήσει ζεύγη οπών. Ένα ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο υπάρχει είναι μια διόδος επαφής p-n ή σε μια διόδο Schottky μπορεί να διαχωρίσει τα ηλεκτρόνια από τις οπές. Για το λόγο αυτό αυτές οι συσκευές είτε σαν ηλιακά κύτταρα παράγουν ηλεκτρισμό, είτε σαν φωτοανιχνευτές, οι οποίοι ανταποκρίνονται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα.

4.4.1 Φωτοдиодοι p-n ως ανιχνευτής

Οι p-n διόδους ανάστροφης πόλωσης είναι πιθανόν οι πιο διαδεδομένοι σε χρήση φωτοανιχνευτές. Για την κατανόηση της λειτουργίας αυτών των συσκευών παραθέτουμε την χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος της διόδου υπό φωτεινότητα (Εικόνα 4.10). Στην εικόνα αυτή η κατεύθυνση του ρεύματος σε κατάσταση σκότους επιλέγεται ως αρνητική, το οποίο είναι επίσης σύνηθες για ένα ηλιακό κύτταρο. Στο πρώτο τέταρτο ($V > 0, I > 0$), η διόδος λειτουργεί ως ηλιακό κύτταρο. Στο δεύτερο τέταρτο ($V < 0, I > 0$), η διόδος λειτουργεί ως φωτοανιχνευτής.



Εικόνα 4.10: Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος μιας p-n διόδου για ρεύματα παραγόμενα από φως, $I_L=0,1$ και 2 mA/cm^2 . Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι: ρεύμα κόρου σε κατάσταση σκότους 10^{-9} mA/cm^2 , ιδανικός παράγοντας 1.1, αντίσταση σε σειρά, $R_s=0$, παρασιτική αντίσταση εκτροπής ρεύματος, $R_{sh} \rightarrow \infty$, θερμοκρασία $T=300 \text{ }^\circ\text{K}$.

Ένα τυπικό σχέδιο μιας p - n φωτοδιόδου φαίνεται στην εικόνα 4.11α. Σε αυτή τη συσκευή τα ηλεκτρόνια και οι οπές παράγονται στην περιοχή χωρίς προσμίξεις και χωρίζονται από το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11β. (Αυτή είναι διαφορετική από ένα κρυσταλλικό ηλιακό κύτταρο όπου οι φορείς συλλέγονται από διάφορα μήκη διάχυσης στις ουδέτερες περιοχές μιας διόδου p-n.)

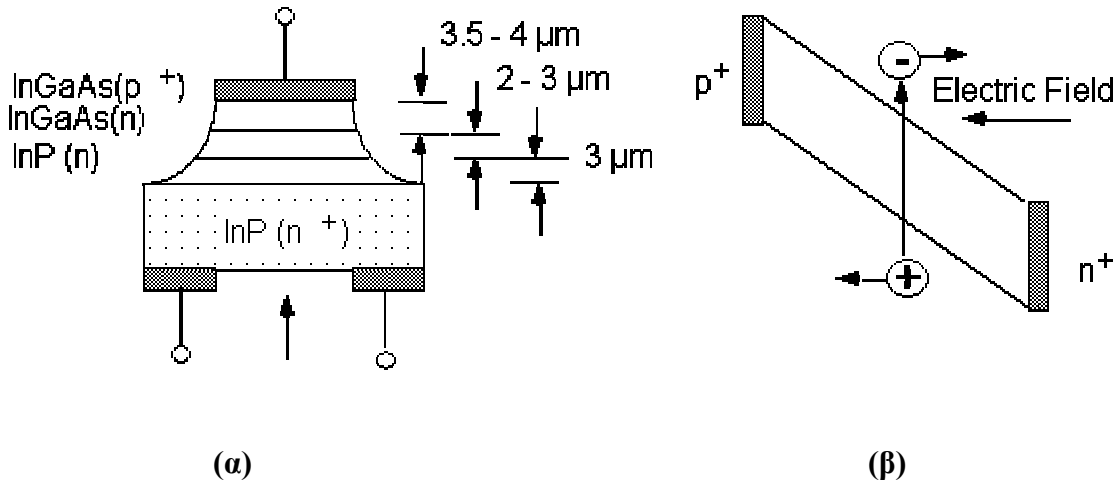
Το μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορεί να συλλεχθεί από μια δίοδο p-n δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = qS \int_0^L G_L(x) dx \quad (\text{εξ.4.1})$$

όπου S είναι το εμβαδόν της συσκευής, L είναι το μήκος της εσωτερικής περιοχής.

$$G_L = \frac{R}{\hbar\omega} \alpha \exp(-\alpha x) \quad (\text{εξ.4.2})$$

Η παραπάνω εξίσωση μας δείχνει το ρυθμό παραγωγής ζευγών ηλεκτρονίων και οπών (υποθέτοντας ότι κάθε φωτόνιο που απορροφάται παράγει ένα ζευγάρι ηλεκτρονίου – οπής, P_1 είναι η προσπίπτουσα ένταση ακτινοβολίας (σε μονάδες W/m^2) και $P_1/h\nu$ είναι η ροή φωτονίων (ανά μονάδα εμβαδού ανά δευτερόλεπτο).



Εικόνα 4.11: α) Φωτοδιόδος p-n φωτισμένη από το υπόστρωμα και β) διάγραμμα ζώνης μιας ανάστροφα πολωμένης διόδου p – n.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 4.2 στην εξίσωση 4.1 και ολοκληρώνοντας την εξίσωση βρίσκουμε ότι το ρεύμα είναι:

$$I_L = \frac{qSR_1[1 - \exp(-\alpha L)]}{h\nu} \quad (\text{εξ.4.3})$$

Επίσης λαμβάνουμε τον παρακάτω υπολογισμό για τη μέγιστη αποδοτικότητα συλλογής για μια δίοδο p – n:

$$Q_c = 1 - \exp(-\alpha L) \quad (\text{εξ.4.4})$$

Αν λάβουμε υπ' όψιν μας το γεγονός ότι μερικό ποσό του φωτός ανακλάται από την επιφάνεια του φωτοανιχνευτή, τότε η εξίσωση αυτή γίνεται ως εξής:

$$Q_c = (1 - R)[1 - \exp(-\alpha L)] \quad (\text{Εξ.4.5})$$

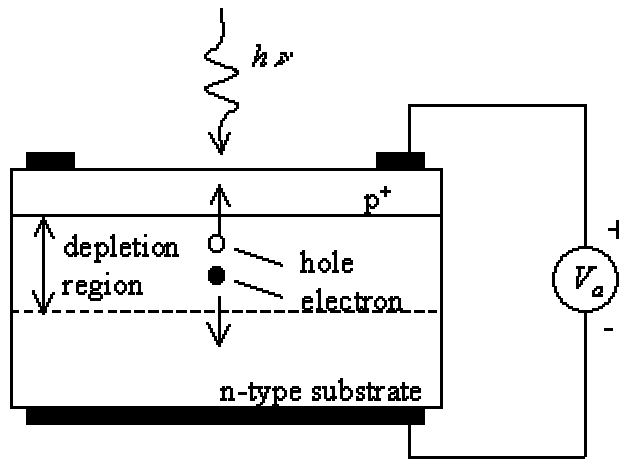
όπου R είναι ο συντελεστής ανάκλασης για φως πρόσπτωσης έτσι ώστε 1-R να είναι το κλάσμα των φωτονίων τα οποία εισχωρούν στον ημιαγωγό. Όπως φαίνεται από την εξίσωση 4.5 οι δίοδοι p – n με μεγαλύτερες εσωτερικές (Intrinsic) περιοχές έχουν μεγαλύτερη κβαντική αποδοτικότητα. Από την άλλη, ο χρόνος μεταφοράς του φέροντος (ο οποίος προσδιορίζει την απόκριση συχνότητας των διόδων p – n) αυξάνεται αναλογικά στο L. Αυτό καθορίζει μια καθαρή αλλαγή στον τρόπο σχεδιασμού των διόδων p – n. Η μέγιστη συχνότητα της λειτουργίας των p – n φωτοδίοδων InGaAs είναι της τάξεως των 10 GHz. Αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από τις τυπικές αποκρίσεις συχνότητας των φωτοαγωγών (photoconductor), οι οποίες είναι περί τα 100 MHz. Επίσης ο θόρυβος σε μια δίοδο p – n είναι συνήθως πολύ μικρότερος από ότι σε ένα φωτοαγωγό. Από την άλλη οι φωτοδίοδοι δεν παρουσιάζουν κέρδος ($A_{ph} = 1$), και η απόκριση της φωτοδίοδου, $R_{ph} \approx Q_c \lambda (\mu\text{m}) / 1.24$ είναι πολύ μικρότερη από ότι σε έναν φωτοαγωγό.

4.4.2 Πως λειτουργεί μία φωτοδίοδος

Οι φωτοδίοδοι και τα κρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα είναι βασικά πανομοιότυπα όπως οι δίοδοι p – n. Παρά ταύτα η δίοδος εκτίθεται στο φως, όπου αποδίδει ένα ρεύμα επιπρόσθετα με το ρεύμα της δίοδου ώστε το συνολικό ρεύμα να δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = I_s (e^{V_a / V_t} - 1) - I_{ph} \quad (\text{Εξ.4.6})$$

όπου το προστιθέμενο ρεύμα, I_{ph} , είναι όπως η παραγωγή των ηλεκτρονίων και των οπών φαίνεται στην εικόνα 4.12. Τα ηλεκτρόνια αυτά και οι οπές μαζεύονται στην περιοχή όπου υπάρχει πλειονότητα φορέων από το ηλεκτρικό πεδίο, στην περιοχή απογύμνωσης.



Εικόνα 4.12: Κίνηση των φωτοπαραγόμενων φερόντων σε μια φωτοδιόδο p-n.

Οι παραγόμενοι από φως φορείς προκαλούν ένα ρεύμα, το οποίο αντιτίθεται στο ρεύμα διόδου κατά την ανάστροφη πόλωση. Συνεπώς, η διόδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φωτοανιχνευτής, χρησιμοποιώντας ανάστροφη ή μηδενική τάση πόλωσης, καθώς το μετρούμενο ρεύμα λόγω φωτός είναι ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Η διόδος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ηλιακό κύτταρο, χρησιμοποιώντας ορθή πόλωση, για να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας φωτοδιόδου είναι η απόκριση, το ρεύμα σε κατάσταση σκότους και το εύρος ζώνης. Η απόκριση είναι το ρεύμα λόγω φωτός χωριζόμενο από την προσπίπτουσα οπτική ισχύ. Το μέγιστο αυτό ρεύμα για μια φωτοδιόδο ισούται με:

$$I_{ph,max} = \frac{q}{h\nu} P_{in} \quad (\text{εξ.4.7})$$

όπου P_{in} η προσπίπτουσα οπτική ισχύς. Το μέγιστο ρεύμα λαμβάνει χώρα όταν κάθε εισερχόμενο φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής το οποίο συμβάλλει στο ρεύμα λόγω φωτός. Το ρεύμα αυτό στην παρουσία μιας ανάκλασης R στην επιφάνεια της φωτοδιόδου και μιας απορρόφησης πυκνότητας d σε ένα υλικό με συντελεστή απορρόφησης α δίδεται από την παρακάτω σχέση:

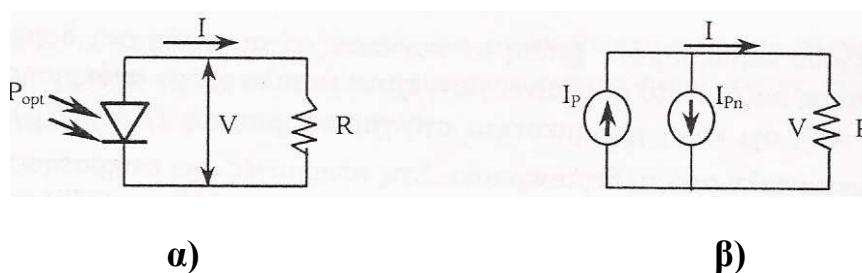
$$I_{ph} = (1 - R)(1 - e^{-\alpha d}) \frac{q P_{in}}{h\nu} \quad (\text{εξ.4.8})$$

Το ρεύμα αυτό που προκαλείται από το φως μειώνεται περισσότερο εάν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που παράγονται λόγω φωτός ανασυσταθούν μέσα στη φωτοδίοδο αντί να κινούνται άτακτα μέσα στις περιοχές όπου υπάρχουν πλειονότητα φορέων. Το ρεύμα σε κατάσταση σκότους είναι το ρεύμα που διαπερνάει τη δίοδο απουσία φωτός. Το ρεύμα αυτό υπάρχει λόγω του ιδανικού ρεύματος διόδου, δηλαδή της παραγωγής - ανασύστασης των φορέων στην περιοχή απογύμνωσης και κάθε επιφάνειας διαρροής, η οποία συμβαίνει στην δίοδο. Το ρεύμα σε κατάσταση σκότους είναι εμφανές πως περιορίζει την ελάχιστη ισχύ η οποία ανιχνεύεται από τη φωτοδίοδο, αφότου ρεύμα λόγω φωτός είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα σε κατάσταση σκότους το οποίο είναι δύσκολο να μετρηθεί.

(www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/photonic_detectors.htm#Photodiodes)

4.4.3 Φωτοдиодοι p-n

Οι φωτοдиодοι είναι φωτοευαίσθητοι διόδοι ημιαγωγών (επαφές p-n), των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο. Με άλλα λόγια, οι διόδοι αυτοί, όταν δεν φωτίζονται συμπεριφέρονται ως κανονικοί διόδοι, ενώ όταν φωτίζονται αλλάζουν την ηλεκτρική τους συμπεριφοράς εξαιτίας του Εσωτερικού Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου που αναπτύσσεται μέσα σε αυτές. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να εκδηλωθεί είτε ως φωτοβολταϊκό, όταν δεν υπάρχει εξωτερική ηλεκτρική πόλωση, ή σαν φωτοαγωγιμότητα, όταν υπάρχει πόλωση. Αυτό σημαίνει ότι οι φωτοдиодοι μπορούν να λειτουργήσουν σαν φωτοβολταϊκά στοιχεία, αλλά και σαν φωτοαγωγά υλικά. Στην πρώτη περίπτωση, η φωτοдиодος συμπεριφέρεται σαν μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος (φωτορεύμα) (Εικόνα 4.13α) του οποίου η ένταση μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.9 και το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 4.13β.



Εικόνα 4.13

$$I = \frac{V}{R} = I_p - I_{pn} \Rightarrow I = I_p(P_{opt}) - I_0 (e^{eV/KT} - 1) \quad (\text{εξ.4.9})$$

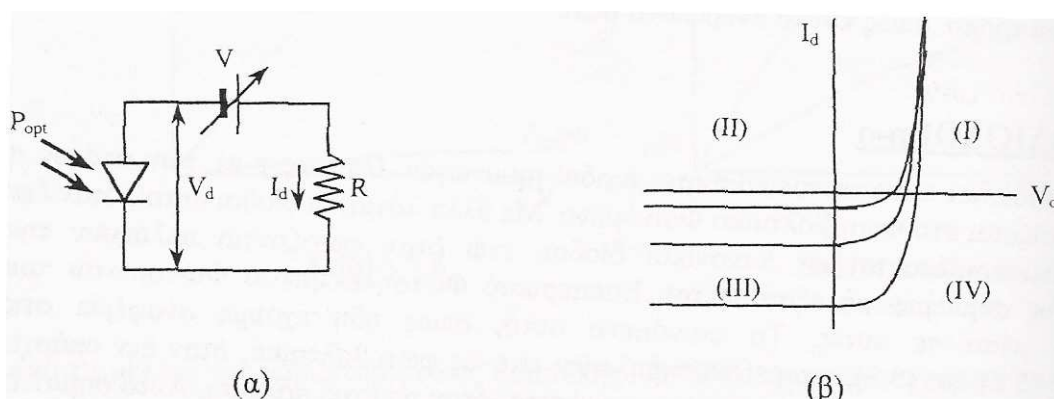
όπου, $I_p(P_{opt})$ είναι το φωτορεύμα που εξαρτάται από την οπτική ισχύ, R είναι η αντίσταση του κυκλώματος (αντίσταση φορτίου), I_{pn} είναι το ρεύμα που διαρρέει την επαφή, V είναι η τάση στα άκρα της αντίστασης R , και $I_0 (e^{eV/KT} - 1)$ προκύπτει από το γεγονός ότι, η κατανομή των φορτίων q μέσα στο δυναμικό V της επαφής ακολουθεί τη κατανομή Boltzmann,

$$q = q_0 e^{eV/KT} \quad (\text{εξ.4.10})$$

όπου T είναι η θερμοκρασία της διόδου, e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και $K=1.38 \times 10^{-23}$ joule/grad (σταθερά Boltzmann).

4.4.4 Χαρακτηριστικές λειτουργίας της φωτοδιόδου

Θεωρούμε το ηλεκτρικό κύκλωμα της εικόνας 4.14α για να εξετάσουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:



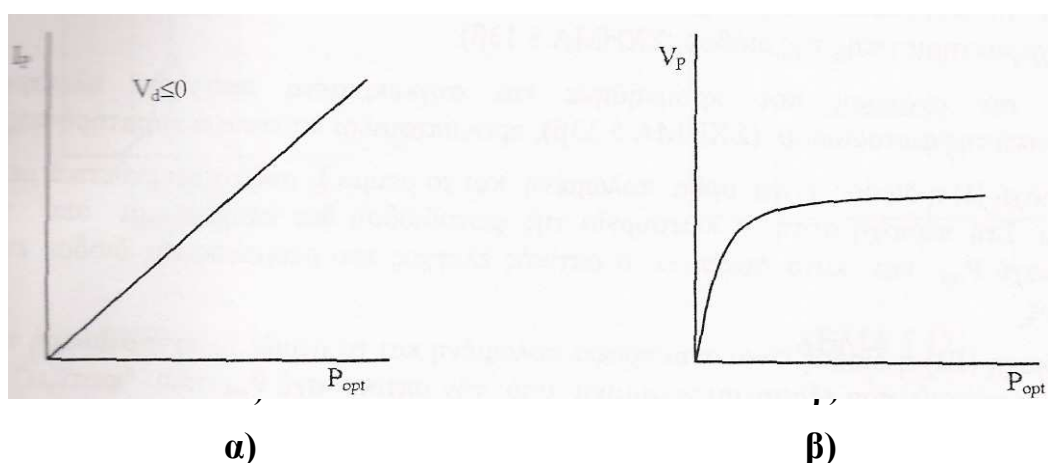
Εικόνα 4.14

Πρώτη Περίπτωση, $V_d \leq 0$.

Όταν $V_d=0$ ο εκθετικός όρος της εξίσωσης 4.9 είναι ίσος με τη μονάδα οπότε:

$$I_d = I_p (P_{opt}) \propto P_{opt} \quad V_d=0 \quad (\text{εξ.4.11})$$

Επίσης, όταν $V_d < 0$ τότε ο εκθετικός όρος $e^{eV_d/KT} \ll 1$ και $I_0 \ll I_p (P_{opt})$, οπότε η εξίσωση 4.9 δίνει και πάλι την εξίσωση 4.11. Στην περίπτωση λοιπόν που $V_d \leq 0$ το ρεύμα που θα διαρρέει το κύκλωμα της φωτοδιόδου θα είναι ανεξάρτητο της τάσης V_d και ανάλογο της οπτικής ισχύος P_{opt} . Η παρατήρηση αυτή αντικατοπτρίζεται στην περιοχή (III) της ηλεκτρικής χαρακτηριστικής $I_d=f(P_{opt})$ (Εικόνα 4.14β) και αποδίδεται γραφικά με την οπτική χαρακτηριστική $I_p=f(P_{opt})$ (Εικόνα 4.15α).



Εικόνα 4.15

Περίπτωση δεύτερη, $V_d > V_\gamma$.

Στην περίπτωση αυτή, όταν δηλαδή η τάση V_d της φωτοδιόδου είναι μεγαλύτερη από τη τάση αγωγής V_γ , τότε ο εκθετικός παράγοντας της εξίσωσης 4.9 θα είναι πολλές φορές μεγαλύτερος από τη μονάδα και επιπλέον το ρεύμα I_{pn} ορθής πόλωσης της διόδου θα είναι πολύ μεγαλύτερο από το φωτορεύμα $I_p(P_{opt})$. Οπότε:

$$I_d \approx I_0 e^{eV_d/KT} \quad (\text{εξ.4.12})$$

Η εξίσωση 4.12 αντιπροσωπεύει την περιοχή (I) της ηλεκτρικής χαρακτηριστικής $I_d=f(P_{opt})$ της φωτοδιόδου, (Εικόνα 4.14β).

Περίπτωση Τρίτη, $I_d=0$.

Στην περίπτωση αυτή το κύκλωμα της φωτοδιόδου είναι ανοιχτό και κατά συνέπεια δεν διαρρέεται με ρεύμα, ($I_d=0$). Σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε, οι φωτοφορείς (ηλεκτρόνια-θετικές σπές) που δημιουργούνται μέσα στη φωτοδίοδο τελικά διαχωρίζονται με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου της επαφής με αποτέλεσμα στα άκρα του στοιχείου αυτού να αναπτύσσεται ηλεκτρική τάση V_p η οποία ονομάζεται τάση ανοιχτού βρόχου της φωτοδιόδου ή φωτοβολταϊκή τάση. Η σχέση προσδιορισμού της φωτοβολταϊκής τάσης V_p προκύπτει από την εξίσωση 4.9 αν σε αυτή θέσουμε $I_d=0$ και $V_d=V_p$. Συγκεκριμένα:

$$0 = I_p (P_{opt}) - I_0 (e^{eV_p/KT} - 1) \Rightarrow e^{eV_p/KT} = 1 + I_p (P_{opt}) / I_0 \Rightarrow$$

$$e^{V_p/KT} = \ln (1 + I_p (P_{opt}) / I_0) \Rightarrow$$

$$V_p = KT/e \ln (1 + I_p (P_{opt}) / I_0) \quad I_d=0 \quad (\text{εξ.4.13})$$

Στην εικόνα 4.15β φαίνεται η εξάρτηση της φωτοβολταϊκής τάσης V_p της φωτοδιόδου από την οπτική ισχύ P_{opt} που προσπίπτει σε αυτή.

Περίπτωση τέταρτη, $0 < V_d \leq V_g$.

Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα ορθής πόλωσης και το φωτορεύμα της φωτοδιόδου είναι συγκρίσιμα και με δεδομένο ότι το φωτορεύμα I_p είναι σταθερό, (εξαρτάται μόνο από την οπτική ισχύ), ενώ το ρεύμα I_{pn} αυξάνεται με την αύξηση της τάσης V_d , το συνολικό ρεύμα I_d που διαρρέει τη φωτοδίοδο θα μεταβάλλεται από τη τιμή I_p στην τιμή 0, (περιοχή IV της ηλεκτρικής χαρακτηριστικής της διόδου (Εικόνα 4.14β)).

Από την ανάλυση που προηγήθηκε και συγκεκριμένα από την ηλεκτρική χαρακτηριστική της φωτοδιόδου (Εικόνα 4.14β) προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

1. Στην περιοχή (I) η διόδος είναι ορθά πολωμένη και το ρεύμα I_d αυξάνεται εκθετικά με την τάση V_d . Στην περιοχή αυτή, η λειτουργία της φωτοδιόδου δεν επηρεάζεται από την οπτική ισχύ P_{opt} και κατά συνέπεια, ο οπτικός έλεγχος του ρεύματος της διόδου είναι αδύνατος.
2. Στην περιοχή (III) η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και το ρεύμα I_d έχει σταθερή τιμή I_p (ρεύμα κόρου), που εξαρτάται γραμμικά από την οπτική ισχύ P_{opt} που “φωτίζει” τη φωτοδιόδο. Στην περιοχή αυτή, η φωτοδιόδος λειτουργεί ως φωτοαγωγίμο υλικό και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό της ισχύος της οπτικής ακτινοβολίας.
3. Στην περιοχή IV η διόδος είναι ορθά πολωμένη και λειτουργεί ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα σημεία τομής των καμπυλών $I_d=f(V_d)$ με τον άξονα V_d μας δίνουν τις τιμές V_p των φωτοηλεκτρεγερτικών δυνάμεων, ή φωτοβολταϊκών τάσεων. Επίσης, οι τομές των καμπυλών αυτών με τον άξονα I_d αντιστοιχούν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_s (=I_p)$ που προκύπτει όταν η τάση στα άκρα της φωτοδιόδου είναι μηδέν.

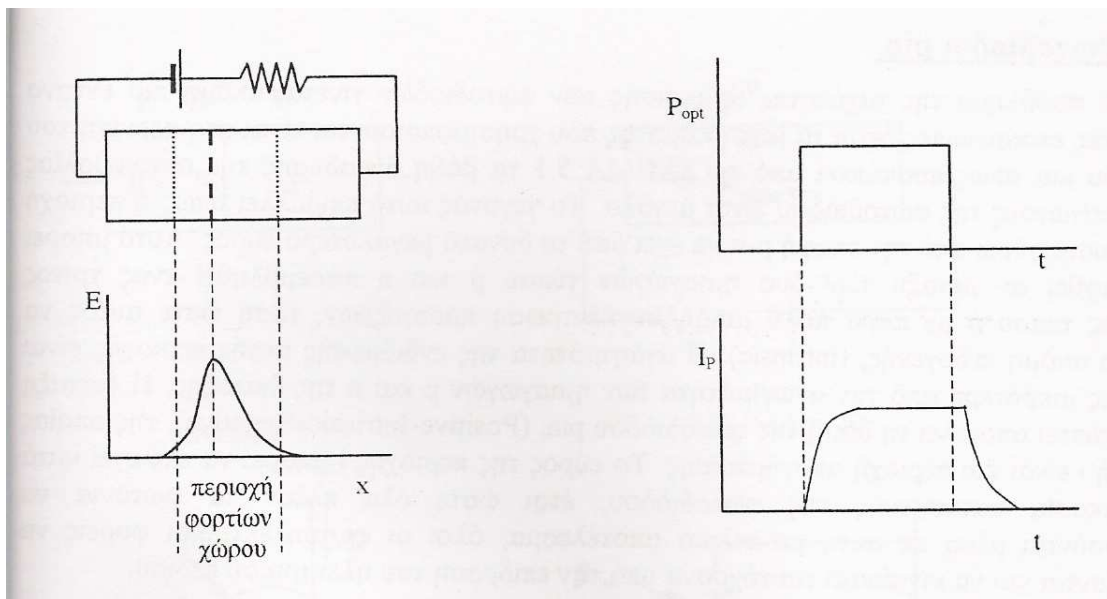
4.4.5 Μειονεκτήματα Φωτοδιόδων p-n

Αν και οι φωτοδιόδοι p-n μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν φωτοανιχνευτές στις οπτικές επικοινωνίες, αυτοί παρουσιάζουν τρεις ανεπιθύμητες ιδιότητες:

1. Δεν έχουν μεγάλη ευαισθησία.
2. Παρουσιάζουν θόρυβο.
3. Δεν αποκρίνονται, συνήθως, ικανοποιητικά στις γρήγορες μεταβολές της φωτεινής ροής και ως εκ τούτου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οπτικές επικοινωνίες για τη μεταφορά μεγάλης συχνότητας σημάτων.

Από τις ανεπιθύμητες αυτές ιδιότητες, η τρίτη είναι η πιο σημαντική και για το λόγο αυτό θα προσπαθήσουμε να τη διερευνήσουμε.

Η εικόνα 4.16 δείχνει μια ανάστροφα πολωμένη φωτοδίοδο p-n καθώς και την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στην περιοχή απογύμνωσης. Το εύρος της περιοχής αυτής, για δοσμένη ανάστροφη πόλωση, εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ατόμων πρόσμιξης στους ημιαγωγούς που βρίσκονται εκατέρωθεν της επαφής p-n.



Εικόνα 4.16

Εικόνα 4.17

Συγκεκριμένα, όσο πιο μικρή είναι η συγκέντρωση αυτή τόσο πιο μεγάλο είναι το εύρος της περιοχής απογύμνωσης. Έτσι, η φωτοδίοδος της εικόνας 4.16 αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p με μεγάλη συγκέντρωση θετικών οπών και από έναν ημιαγωγό τύπου n με πολύ μικρή συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων. Αν στη διάταξη αυτή πέσει οπτική ακτινοβολία, τα φωτόνια θα εισέλθουν στον ημιαγωγό τύπου p και κάποια από αυτά θα διεισδύσουν στην περιοχή απογύμνωσης όπου και θα δημιουργήσουν φωτοηλεκτρικούς φορείς, (ηλεκτρόνια και θετικές οπές). Στην περιοχή απογύμνωσης, τα ηλεκτρόνια και οι θετικές οπές θα διαχωριστούν αμέσως και θα κινηθούν αντίθετα εξαιτίας της ύπαρξης του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ οι φωτοφορείς που δημιουργούνται στην περιοχή p θα διαχυθούν προς την περιοχή απογύμνωσης όπου και θα συλλεχθούν. Η διαδικασία της διάχυσης είναι πολύ πιο

αργή σε σχέση με την κίνηση των ηλεκτρικών φορέων μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο και ως εκ τούτου θα υπάρχει καθυστέρηση για τον πλήρη διαχωρισμό των φωτοηλεκτρικών φορέων στη φωτοδίοδο. Αυτό σημαίνει ότι οι φωτοδιόδοι p-n παρουσιάζουν αδράνεια, δηλαδή έχουν μικρή ταχύτητα απόκρισης στις μεταβολές της οπτικής ισχύος. Το αποτέλεσμα της ανεπιθύμητης αυτής ιδιότητας φαίνεται στην εικόνα 4.17 όπου η απότομη μεταβολή του φωτορεύματος I_p διαρρέει τη φωτοδίοδο. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για την αύξηση της ταχύτητας απόκρισης της φωτοδίοδου, πρέπει η απορρόφηση των φωτονίων να γίνεται, κατά κύριο λόγο, μέσα στην περιοχή απογύμνωσης. Μια πρώτη βελτίωση της ιδιότητας αυτής επέρχεται ελαττώνοντας τη συγκέντρωση των ατόμων πρόσμιξης στον ημιαγωγό p.

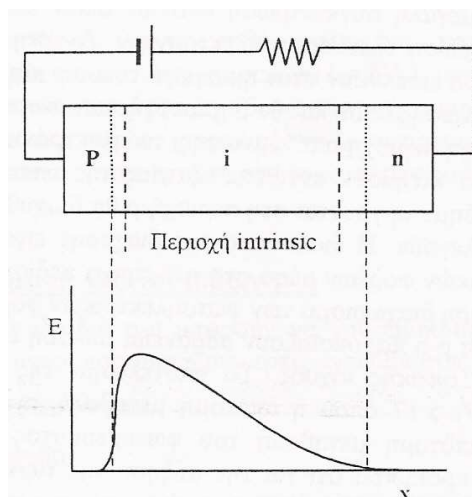
Έτσι, μια τυπική φωτοδίοδος p-n έχει εύρος περιοχής απογύμνωσης περίπου 1-3 μm . Η δε επίδοση της εξαρτάται τόσο από το μήκος κύματος της οπτικής ακτινοβολίας όσο και από το υλικό της διάταξης. Για παράδειγμα οι φωτοδιόδοι πυριτίου, (Si), έχουν μέγιστη επίδοση στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος, (0.4 – 0.7 μm) ενώ οι φωτοδιόδοι γερμανίου, (Ge), στη περιοχή πλησίον του υπέρυθρου, (0.7 – 0.9 μm). (Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και Laser, Σιδεράς Ευστάθιος, 1999, σελ.115)

4.5 Φωτοδιόδοι pin

Το πρόβλημα της ταχύτητας απόκρισης των φωτοδίοδων γίνεται ακόμα πιο έντονο στις οπτικές επικοινωνίες όπου τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται είναι στην περιοχή του υπέρυθρου και τα βάθη διείσδυσης της ακτινοβολίας στους ημιαγωγούς της φωτοδίοδου είναι μεγάλα. Το γεγονός αυτό επιβάλλει η περιοχή απογύμνωσης γύρω από την επαφή p-n να έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν μεταξύ των δύο ημιαγωγών τύπου p-n παρεμβληθεί ένας τρίτος ημιαγωγός τύπου n με πάρα πολύ μικρή συγκέντρωση προσμίξεων, τόση ώστε αυτός να θεωρείται ακόμη ενδογενής (intrinsic). Η αγωγιμότητα της ενδιάμεσης αυτής περιοχής είναι μικρότερη από την αγωγιμότητα των ημιαγωγών p και n της διάταξης. Η διάταξη που προκύπτει αποτελεί τη δομή της φωτοδίοδου pin, (Positive-Intrinsic-Negative), της οποίας η περιοχή i είναι και περιοχή απογύμνωσης. Το εύρος της περιοχής i μπορεί να επιλεγεί κατά τη διαδικασία κατασκευής της φωτοδίοδου, έτσι ώστε όλα πλέον τα φωτόνια να απορροφούνται μέσα σε αυτή με τελικό

αποτέλεσμα, όλοι οι φωτοηλεκτρικοί φορείς να διαχωρίζονται και να κινούνται ταυτόχρονα υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου.

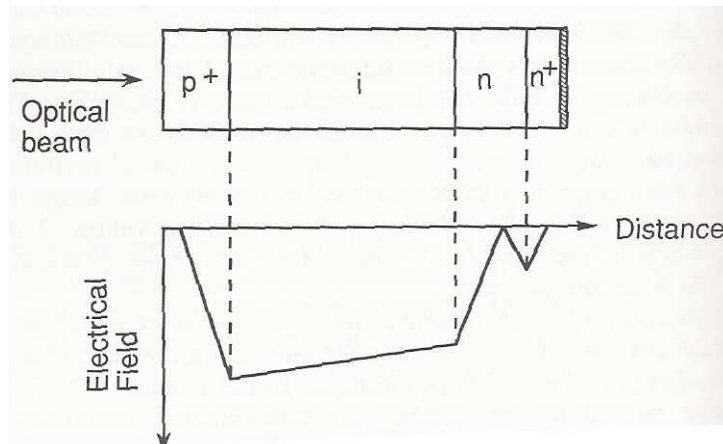
Η εικόνα 4.18 δείχνει μια ανάστροφα πολωμένη φωτοδίοδο pin καθώς και την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στην περιοχή i. Σε μια τυπική φωτοδίοδο pin το εύρος της περιοχής i είναι μεταξύ 20 και 50 μm , η κβαντική της απόδοση φθάνει το 85%, ο δε χρόνος απόκρισης στις μεταβολές των οπτικών σημάτων είναι μικρότερος του 1ns.



Εικόνα 4.18

(Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και Laser, Σιδεράς Ευστάθιος.1999, σελ.120)

Η δομή, η οποία οδηγεί σε μία καλή, μεγάλου μήκους κύματος, απόκριση με σχετικά μέτρια επίπεδα πόλωσης, είναι η λεγόμενη p-i-n δομή, που φαίνεται στην εικόνα 4.19.



Εικόνα 4.19: Σχηματική δομή μίας pin φωτοδιόδου. Αναφέρεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στη δομή pin

Οι φωτοδιόδοι pin έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Αυξάνεται ο διαθέσιμος όγκος για την “αιχμαλώτιση” φωτονίων, αυξάνοντας κατά συνέπεια το πλάτος του στρώματος εκκένωσης προκειμένου να πετύχουν μεγαλύτερη απόδοση.
- Ένα ευρύτερο στρώμα εκκένωσης μειώνει την χωρητικότητα επαφής ώστε να υπάρξει γρηγορότερη απόκριση. Ωστόσο, ταυτόχρονα αυξάνεται ο χρόνος μετάδοσης και έτσι είναι απαραίτητο να γίνει μια αντιστάθμιση.
- Η μείωση της αναλογίας ανάμεσα στον αριθμό των φορτίων που παράγονται στα γύρω από την περιοχή και στον αριθμό των φορτίων που παράγονται μέσα στη περιοχή εκκένωσης, αυξάνει την ταχύτητα της συσκευής. (Coherent Optical Communications Systems, Silvello Betti.1995, σελ.176)

4.7 Led

Η δίοδος εκπομπής φώτος (Light Emitting Diode - LED) είναι μια από τις απλούστερες οπτοηλεκτρονικές συσκευές η οποία έχει βρει σημαντικές εφαρμογές όπως γεννήτρια οπτικού σήματος για οπτικές επικοινωνίες. Επίσης χρησιμοποιούνται συχνά ως "πειραματικά" φώτα στις ηλεκτρονικές συσκευές για να δείξουν εάν το κύκλωμα είναι κλειστό ή όχι.

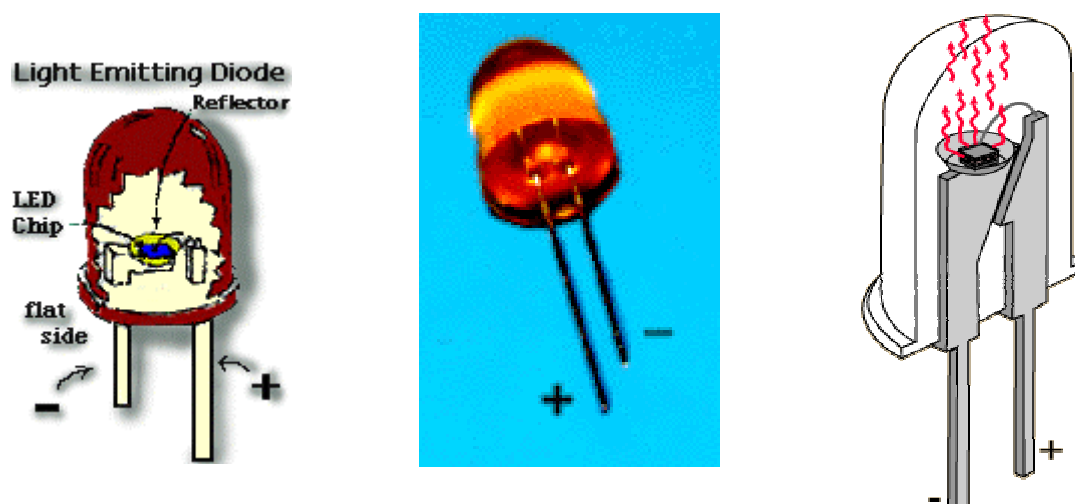


Εικόνα 4.20: Πραγματική απεικόνιση κοινού led και κυκλωματικό σύμβολο μιας διόδου εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED).

Τα δύο καλώδια που επεκτείνονται κάτω από το LED, δείχνουν πώς τα LED πρέπει να συνδεθούν με ένα κύκλωμα. Η αρνητική πλευρά των LED είναι υποδειγμένη με δύο τρόπους:

1. από την επίπεδη πλευρά του καλύμματος
2. από το μικρότερο καλώδιο που επεκτείνεται από το LED.

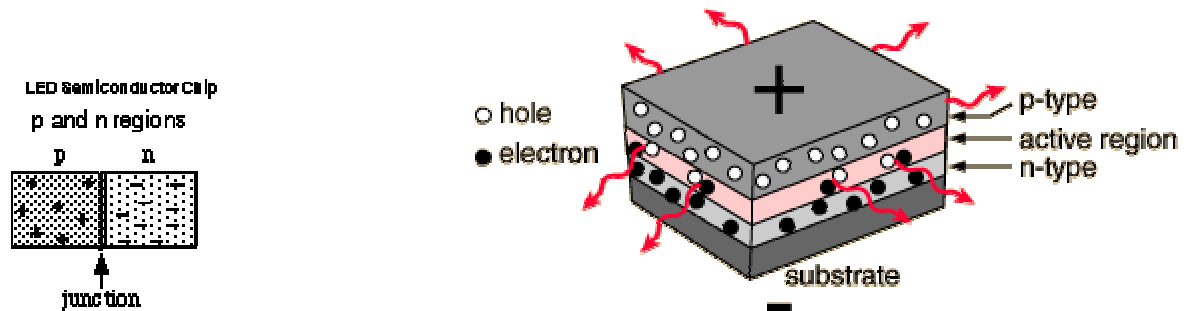
Το αρνητικό του LED πρέπει να συνδεθεί με το αρνητικό άκρο μιας μπαταρίας. Τα LED λειτουργούν σε σχετικές χαμηλές τάσεις μεταξύ περίπου 1 και 4 Volt, και σε ρεύματα μεταξύ περίπου 10 και 40 mA. Τάσεις και ρεύματα ουσιαστικά επάνω από αυτές τις τιμές μπορούν να καταστρέψουν ένα LED.



Εικόνα 4.21: Δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED).

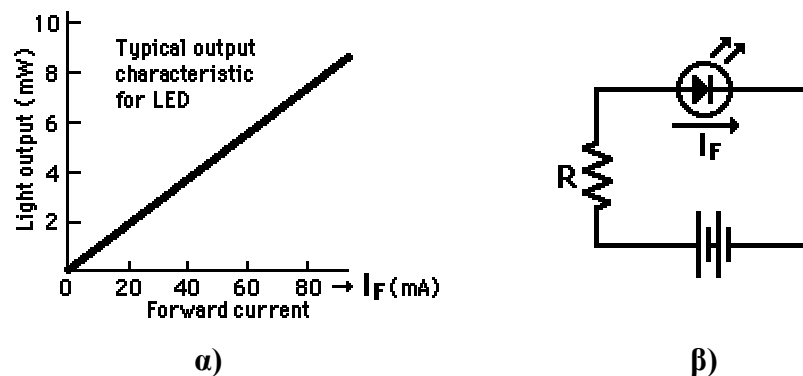
Το βασικό LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχείει ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις p και n πλευρές αντίστοιχα. Το εγχεόμενο φορτίο

μειονότητας επανασυνδέεται με το φορτίο πλειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης ή στην ουδέτερη περιοχή. Σε ημιαγωγούς άμεσης ζώνης η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός αφού η ακτινοβόλα επανασύνδεσης κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας. Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωχή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης είναι μη ακτινοβόλες με παραγωγή θερμότητας μάλλον παρά φωτός.



Εικόνα 4.22: Δομή ενός LED.

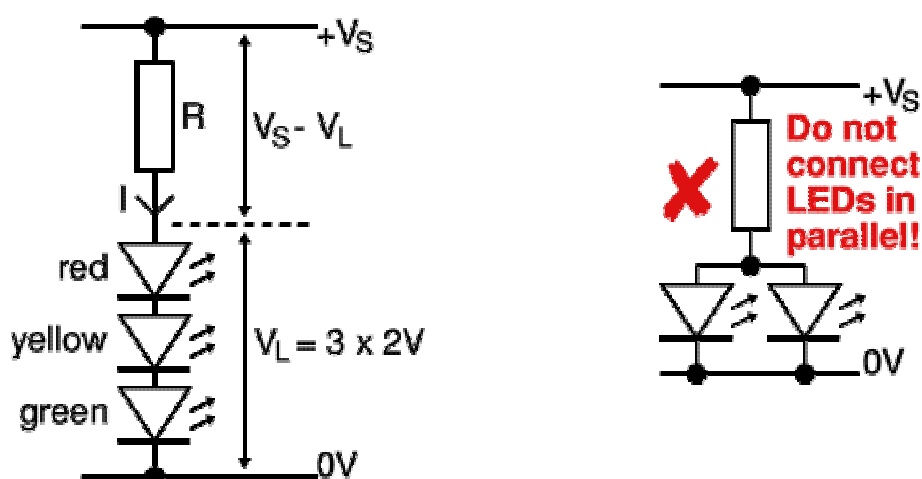
Όταν η δίοδος εκπομπής φωτός διαφέρει σε τιμή από το κατώφλι αγωγιμότητας, το ρεύμα αυξάνει γρήγορα και πρέπει να ελεγχθεί για να αποτρέψει την καταστροφή της συσκευής. Η έξοδος είναι αρκετά γραμμικά ανάλογη προς το ρεύμα μέσα στην ενεργό περιοχή της. Έτσι η έξοδος (του φωτός) μπορεί να διαμορφωθεί ακριβώς για να στείλει ένα μη διαστρεβλωμένο σήμα μέσω ενός οπτικού καλωδίου ινών.



Εικόνα 4.23: α) Χαρακτηριστική της εξόδου ενός LED συναρτήσει του ρεύματος β) Απλό κύκλωμα με δίοδο.

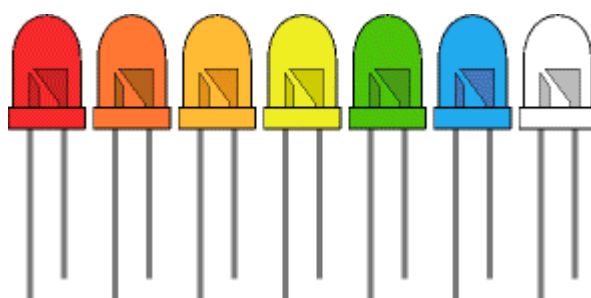
Δεν πρέπει να συνδέεται μια δίοδος LED απ' ευθείας με μια μπαταρία ή μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Θα καταστραφεί σχεδόν αμέσως επειδή πάρα πολύ ρεύμα θα περάσει μέσα απ' αυτήν. Τα LED πρέπει να έχουν μια αντίσταση σε σειρά για να περιορίσουν το ρεύμα σε μια ασφαλή τιμή (Εικόνα 4.23β). Για γρήγορες δοκιμαστικές εφαρμογές, μια αντίσταση 1kΩ είναι κατάλληλη για τα περισσότερα LED εάν η τάση τροφοδοσίας είναι 12V ή λιγότερο.

Επιπλέον, εάν χρειαζόμαστε πολλά LED ταυτόχρονα η σύνδεση την οποία θα πρέπει να επιλέξουμε είναι η σύνδεση σε σειρά όχι παράλληλα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 4.24: Ορθός τρόπος σύνδεσης ενός LED.

Όλα τα LED που συνδέονται σε σειρά διαρρέοντα από το ίδιο ρεύμα επομένως πρέπει να είναι και του ίδιου τύπου. Συνδέοντας τα LED παράλληλα με μία μόνο αντίσταση γενικά δεν ενδείκνυται. Αν τα LED απαιτούν διαφορετικές τάσεις, μόνο το LED που απαιτεί τη χαμηλότερη τάση θα ανάψει και μπορεί να καταστραφεί από το μεγαλύτερο ρεύμα που το ρέει. Τα LED είναι διαθέσιμα σε κόκκινα, πορτοκαλί, κίτρινα κεχριμπαριού, κίτρινα, πράσινα, μπλε και άσπρα. Τα μπλε και τα άσπρα LED είναι ακριβότερα από τα άλλα χρώματα. Το χρώμα των LED καθορίζεται από το υλικό των ημιαγωγών, όχι από το χρωματισμό της "συσκευασίας" (το πλαστικό σώμα). Υπάρχουν led όλων των χρωμάτων είναι διαθέσιμα σε μη χρωματισμένες συσκευασίες όπως επίσης και σε χρωματισμένες συσκευασίες.



Εικόνα 4.25: Χρώματα στα οποία τα LED είναι διαθέσιμα

Ο πίνακας 4.1 παρουσιάζει τα τυπικά τεχνικά στοιχεία για κυκλικά LED περίπου 5mm διαμέτρου. Οι τρεις στήλες που είναι πιο σημαντικές, παρουσιάζονται με πιο έντονους χαρακτήρες.

Τύπος	Χρώμα	I_F max.	V_F typ.	V_F max.	V_R max.	Ένταση φωτεινότητας	Γωνία παρατήρησης	Μήκος κύματος
Βασικό	Κόκκινο	30mA	1.7V	2.1V	5V	5mcd @ 10mA	60°	660nm
Βασικό	Φωτεινό Κόκκινο	30mA	2.0V	2.5V	5V	80mcd @ 10mA	60°	625nm
Βασικό	Κίτρινο	30mA	2.1V	2.5V	5V	32mcd @ 10mA	60°	590nm
Βασικό	Πράσινο	25mA	2.2V	2.5V	5V	32mcd @ 10mA	60°	565nm
Υψηλής έντασης	Μπλε	30mA	4.5V	5.5V	5V	60mcd @ 20mA	50°	430nm
Υψηλής φωτεινότητας	Κόκκινο	30mA	1.85V	2.5V	5V	500mcd @ 20mA	60°	660nm
Μικρού ρεύματος	Κόκκινο	30mA	1.7V	2.0V	5V	5mcd @ 2mA	60°	625nm

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων χρωμάτων led διαμέτρου 5mm.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ανάλογη προς την τάση που απαιτείται για να αναγκάσει τα ηλεκτρόνια να ρεύσουν δια μέσου της p-n επαφής. Η ενέργεια (E) του φωτός που εκπέμπεται από τα LED συσχετίζεται με το ηλεκτρικό φορτίο (q) ενός ηλεκτρονίου και την τάση (V) που απαιτούνται για να ανάψει το LED από την έκφραση: $E = qV$ Joule. Αυτή η έκφραση απλά λέει ότι η τάση είναι ανάλογη προς την ηλεκτρική ενέργεια, και είναι ένας γενικός ισχυρισμός που ισχύει για οποιοδήποτε κύκλωμα, καθώς επίσης και για τα LED. Η σταθερά q είναι το ηλεκτρικό φορτίο ενός ηλεκτρονίου, που είναι $-1,6 * 10^{-19}$ Coulomb.

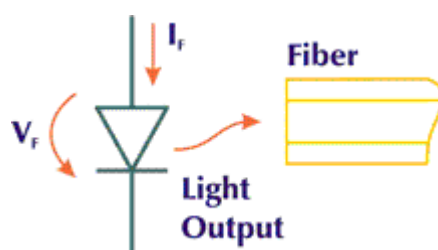
(<http://www.kpsec.freeuk.com/components/led.htm>

<http://accept.la.asu.edu/courses/phs110/expmts/exp13a.html>)

4.8 Διοδικό laser

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τη δίοδο laser και τα χαρακτηριστικά της.

Οι εκπομποί φωτός είναι το στοιχείο <<κλειδί>> σε ένα σύστημα οπτικής ίνας. Το εξάρτημα αυτό μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα αντίστοιχο φωτεινό σήμα το οποίο μπορεί να περάσει μέσα από μία ίνα. Ο εκπομπός φωτός είναι ένα σημαντικό στοιχείο διότι είναι συχνά το πιο δαπανηρό στοιχείο στο σύστημα και τα χαρακτηριστικά του συχνά επηρεάζουν τα τελικά όρια της επίδοσης ενός συνδέσμου.



Εικόνα 4.26: Οι δίοδοι laser μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα σε φως.

Τα διοδικά laser είναι πολύπλοκοι ημιαγωγοί οι οποίοι μετατρέπουν ηλεκτρικό ρεύμα σε φως. Η διαδικασία μετατροπής είναι αρκετά αποδοτική κατά το ότι παράγει μικρό ποσό θερμότητας συγκρινόμενο με το λαμπρό φως. Πέντε έμφυτες ιδιότητες κάνουν τα laser ελκυστικά για χρήση στην επιστήμη των οπτικών ινών.

1. Καταλαμβάνουν μικρό χώρο
2. Έχουν υψηλή ακτινοβολία (Εκπέμπουν πολύ φως σε μικρή περιοχή)
3. Η περιοχή εκπομπής τους είναι μικρή, συγκρινόμενη με τις διαστάσεις των οπτικών ινών
4. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία.
5. Μπορούν να διαμορφωθούν σε υψηλές ταχύτητες.

Ο παρακάτω πίνακας 4.2 προσφέρει μια γρήγορη σύγκριση μερικών από τα χαρακτηριστικά των laser και των led. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα αναλυθούν λεπτομερέστερα παρακάτω.

Χαρακτηριστικά	LEDs	Lasers
Ισχύς εξόδου	Γραμμικά ανάλογη προς το ρεύμα κατωφλίου	Ανάλογη του ρεύματος πάνω από το κατώφλι
Ρεύμα	Ρεύμα κατωφλίου: 50 - 100 mA	Ρεύμα κατωφλίου: 5 - 40 mA
Συζευγμένη ισχύς	Μέτρια	Υψηλή
Ταχύτητα	Αργότερη	Γρηγορότερη
Τύπος εξόδου	Υψηλότερη	Μικρότερη
Εύρος ζώνης	Μέτριο	Υψηλό
Διαθέσιμα μήκη κύματος	0.66 - 1.65 μm	0.78 - 1.65 μm
Φασματικό εύρος	Ευρύτερο (40-190 nm FWHM)	Στενότερο (0.00001 nm - 10 nm FWHM)
Fiber Type	Multimode Only	SM, MM
Ευκολία στη χρήση	Ευκολότερη	Δυσκολότερη
Διάρκεια ζωής	Μεγαλύτερη	Μεγάλη
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό

Πίνακας 4.2

Τα διοδικά laser συνήθως κατασκευάζονται από GaAlAs (Γάλλιο Αλουμίνιο Αρσενίδιο) για συσκευές μικρών μηκών κύματος. Συσκευές μεγάλων μηκών κύματος γενικά ενσωματώνονται InGaAsP (Ινδίο Γάλλιο Αρσενίδιο Φωσφίδιο).

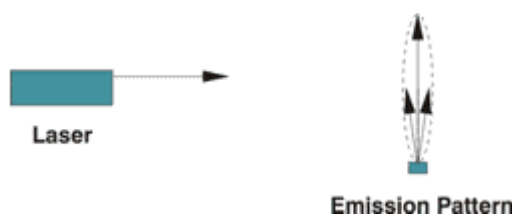
4.8.1 Χαρακτηριστικά επίδοσης διόδων laser.

Διαφορετικά θεμελιώδη χαρακτηριστικά καθορίζουν τη χρησιμότητα σε μια εφαρμογή. Αυτά είναι:

Μήκος κύματος κορυφής: Είναι το μήκος κύματος στο οποίο η πηγή εκπέμπει την μέγιστη ισχύ. Θα πρέπει να ταιριάζει στα μήκη κύματος τα οποία εκπέμπονται με την ελάχιστη εξασθένηση διαμέσου της οπτικής ίνας. Οι πιο κοινές κορυφές μηκών κύματος είναι στα 1310, 1550 και 1625 nm.

Φασματική περιοχή: Θεωρητικά, όλο το φως το οποίο εκπέμπεται από ένα laser θα ήθελε να είναι στην κορυφή του μήκους κύματος. Πρακτικά όμως το φως εκπέμπεται σε μία περιοχή από μήκη κύματος επικεντρωμένο στο κορυφαίο μήκος κύματος. Η περιοχή αυτή ονομάζεται φασματικό εύρος της πηγής.

Διάγραμμα εκπομπής: Το διάγραμμα του εκπεμπόμενου φωτός επηρεάζει την ποσότητα του φωτός το οποίο περνάει μέσα σε μία οπτική ίνα. Το μέγεθος της περιοχής εκπομπής θα πρέπει να είναι όμοιο με τη διάμετρο του πυρήνα της ίνας. Η εικόνα 4.27 δείχνει το σχέδιο εκπομπής ενός laser.



Εικόνα 4.27: Σχέδιο εκπομπής laser

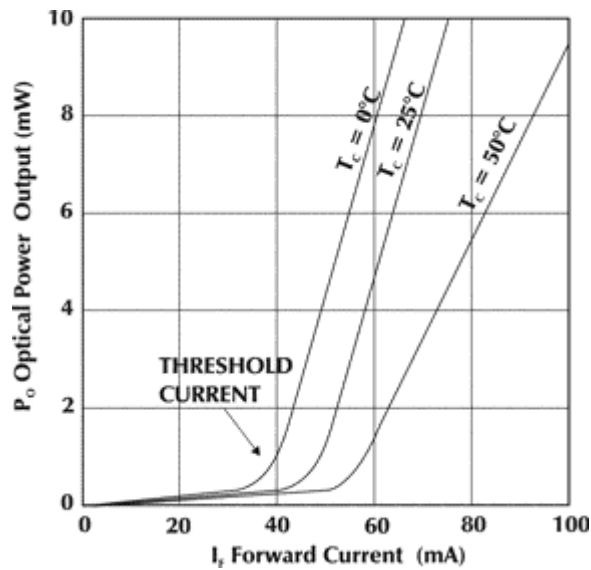
Ισχύς: Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται συνήθως κάνοντας ζεύξη όσο το δυνατόν περισσότερης ισχύος από την πηγή μέσα σε μια οπτική ίνα. Η βασική απαίτηση είναι ότι η ισχύς εξόδου της πηγής πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να

εξασφαλίζει επαρκή ισχύ στον ανιχνευτή λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξασθένιση της ίνας, την απώλεια της σύζευξης και άλλους περιορισμούς του συστήματος. Γενικά τα laser είναι ισχυρότερα από τα led.

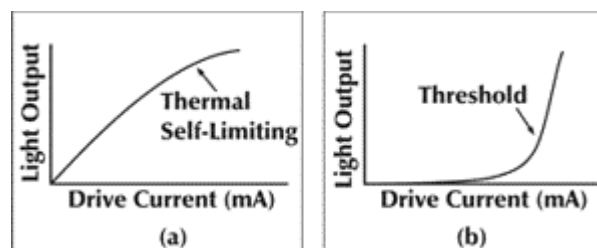
Ταχύτητα: Μία πηγή θα έπρεπε να ανοίγει και να κλείνει αρκετά γρήγορα ώστε να αντέξει τα όρια εύρους του συστήματος. Η ταχύτητα δίδεται σύμφωνα με το χρόνο ανόδου (rise time) ή το χρόνο καθόδου (fall time) της πηγής ο οποίος είναι ο χρόνος που απαιτείται στην ισχύ να ανέβει από το 10 % στο 90 %. Τα laser έχουν μεγαλύτερο χρόνους ανόδου και καθόδου από ότι το led.

Γραμμικότητα: Η γραμμικότητα είναι άλλο ένα χαρακτηριστικό των πηγών ενέργειας για μερικές εφαρμογές. Η γραμμικότητα αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο η οπτική έξοδος είναι άμεσα ανάλογη στην εισαγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι περισσότερες πηγές φωτός δίνουν μικρή έως καθόλου προσοχή στη γραμμικότητα, κάνοντας τις χρήσιμες μόνο για ψηφιακές εφαρμογές. Οι αναλογικές εφαρμογές απαιτούν στενή προσοχή στη γραμμικότητα. Η μη γραμμικότητα στα laser προκαλεί αρμονική παραμόρφωση σε ένα αναλογικό σήμα το οποίο εκπέμπεται επάνω σε ένα σύνδεσμο οπτικής ίνας.

Τα laser είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία. Το κατώφλι των laser αλλάζει με τη θερμοκρασία. Η εικόνα 4.28 δείχνει μια τυπική συμπεριφορά ενός διοδικού laser. Καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας αλλάζει, συμβαίνουν διάφορα αποτελέσματα. Αρχικά, το ρεύμα κατωφλίου αλλάζει. Το ρεύμα κατωφλίου είναι πάντα χαμηλότερο στις χαμηλότερες θερμοκρασίες και αντίστροφα. Η δεύτερη αλλαγή η οποία είναι σημαντική είναι η κλίση της αποδοτικότητας. Η κλίση της αποδοτικότητας είναι ο αριθμός των mW ή των μ W της εξόδου φωτός ανά mA του αυξανόμενου ρεύματος οδήγησης πάνω από το κατώφλι. Τα περισσότερα laser δείχνουν μία πτώση στην κλίση της αποδοτικότητας κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, τα laser απαιτούν μία μέθοδο σταθεροποίησης του κατωφλίου ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση. Συχνά μία φωτοδίοδος χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της εξόδου του φωτός στην πίσω όψη του laser. Το ρεύμα από μία φωτοδίοδο αλλάζει με αποκλίσεις στην έξοδο του φωτός και παρέχει ανάδραση ώστε να ρυθμίσει το ρεύμα οδήγησης του laser.



Εικόνα 4.28: Επιδράσεις της θερμοκρασίας στην ισχύ της εξόδου του οπτικού laser.



Εικόνα 4.29: Χαρακτηριστικές εκπομπών για a) Led b) Laser

Η εικόνα 4.29a δείχνει τη συμπεριφορά ενός led και η εικόνα 4b δείχνει τη συμπεριφορά ενός διοδικού laser. Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν το σχετικό ποσό της εξόδου του φωτός έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος οδήγησης. Οι έξοδοι φωτός του led είναι περίπου γραμμικές με το ρεύμα οδήγησης. Σχεδόν όλα τα led παρουσιάζουν μία κύρτωση στην καμπύλη όπως φαίνεται στην εικόνα 4.29b. Η μη γραμμικότητα του led περιορίζει τη χρησιμότητα του σε αναλογικές εφαρμογές. Η κύρτωση μπορεί να προκληθεί από έναν αριθμό παραγόντων στη φυσική των led ημιαγωγών αλλά συχνά, κατά ένα μεγάλο βαθμό οφείλεται στην αυτοθέρμανση του ολοκληρωμένου κυκλώματος του led. Η αποδοτικότητα όλων των led μειώνεται

καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία κατά τη λειτουργία τους. Έτσι, καθώς το led οδηγείται σε υψηλότερα ρεύματα το ολοκληρωμένο κύκλωμα του ζεσταίνεται προκαλώντας πτώση στην αποδοτικότητα του και τη φαινομενική κύρτωση της εικόνας 4.29a. Τα led τυπικά λειτουργούν σε ρεύματα με κορυφή περί τα 100mA. Μονάχα ειδικές συσκευές λειτουργούν σε υψηλότερα επίπεδα ρεύματος. (www.fiber-optics.info)

4.8.2 Εφαρμογές των laser ημιαγωγών

Η διαθεσιμότητα των laser ημιαγωγών μονού τρόπου λειτουργίας, υψηλής αποτελεσματικότητας και αξιοπιστίας, έχει βελτιώσει πολύ την διευρυμένη χρήση τους στις οπτικές επικοινωνίες τόσο στα λογικά συστήματα όσο και στα συστήματα διαμόρφωσης έντασης, υψηλού ρυθμού μετάδοσης bit – άμεσης ανίχνευσης (**Intensity Modulation – Direct Detection**).

Για εφαρμογή σε λογικά συστήματα απαιτείται μονός τρόπος λειτουργίας με περιορισμένο εύρος γραμμής φάσματος και υψηλής δυνατότητας συντονισμού διοδικά laser που παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και για χρήση στα πολυκαναλικά συστήματα, όπως στα συστήματα CATV, LAN και MAN.

Στα IM-DD συστήματα υψηλού ρυθμού μετάδοσης bit η σχέση ανάμεσα στα διοδικά laser άμεσης διαμόρφωσης και στη συχνότητα εκπομπής πρέπει να αντιμετωπιστεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η απόκλιση της συχνότητας που σχετίζεται με το ρεύμα διαμόρφωσης, παρουσιάζεται στα διοδικά laser μονής λειτουργίας ως ανεπιθύμητο τιτίβισμα (ή ως δυναμική διεύρυνση γραμμής), επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του συστήματος.

Ο σκοπός αυτού του τομέα είναι να παρέχει το θεμελιώδες υπόβαθρο στα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγών laser που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας. (*Coherent Optical Communications Systems, Silvello Betti.1995, σελ. 93*)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΤΗΜΑ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Σύνδεσμος επικοινωνίας μέσω laser

Υπάρχει κάτι μάλλον μελλοντικό μιλώντας για μια δέσμη laser, η οποία παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία. Δίνει επικοινωνία σε απόσταση μερικών μέτρων και με τη βοήθεια ενός παραβολικού ανακλαστή φωτός μέχρι και μερικά χιλιόμετρα μεταδίδοντας υψηλής ποιότητας ακουστικό σήμα.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται ως πομπός μια ορατή δίοδος laser ισχύος 5 mW και μήκους κύματος 650 nm. Αυτό κάνει την ευθυγράμμιση μεταξύ του πομπού και του δέκτη εύκολη, εφόσον τώρα η δέσμη είναι πια ορατή. Επιπλέον το laser έχει μεγάλη ισχύ εξόδου.

Υπάρχουν δύο τμήματα: ο πομπός και ο δέκτης, οι οποίοι τροφοδοτούνται από τάση 9 Volt. Το μέρος του πομπού διαθέτει ένα μικρόφωνο στο ένα του άκρο και τη δίοδο laser στο άλλο του άκρο. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα διαμορφώνουν την ένταση της δέσμης του laser σύμφωνα με την έξοδο του μικροφώνου. Η δίοδος laser διαθέτει ένα ενσωματωμένο ευθυγραμμισμένο φακό, και είναι απλά μια μονάδα η οποία ενώνεται στο τμήμα του πομπού.

Ο δέκτης χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο σαν στοιχείο υποδοχής και ο ενισχυτής που είναι στο κομμάτι αυτό ενισχύει ένα μικρό μεγάφωνο 4-36 Ωμ. Το κομμάτι αυτό είναι επομένως ένας ενισχυτής υψηλής απολαβής με μια βασική ακουστική βαθμίδα εξόδου.

Το κύκλωμα μας χρησιμοποιεί μια υψηλής ισχύος δέσμη laser εύκολη στην ευθυγράμμιση και καθόλου κρίσιμη ειδικά πάνω από μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η ποιότητα του ήχου που μεταδίδεται είναι σχεδόν τέλεια.

Ως παράδειγμα τοποθετούμε το πρωτότυπο με το μικρόφωνο-πομπό κοντά σε ένα ραδιόφωνο. Ο ήχος που λαμβάνεται είναι καθαρός και φαίνεται να καλύπτει όλο το εύρος των ακουστικών συχνοτήτων. Αν τροφοδοτήσουμε ένα ακουστικό σήμα απ'ευθείας στον πομπό τα αποτελέσματα είναι αναμφισβήτητα καλύτερα.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της μετάδοσης με δέσμη laser είναι η μυστικότητα. Επειδή η δέσμη laser είναι σκόπιμα στενή, είναι σχεδόν αδύνατο σε κάποιον να υποκλέψει τη σύνδεση χωρίς να το αντιληφθούμε. Εάν κάποιος εμποδίσει τη δέσμη, η σύνδεση διακόπτεται. Επίσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα

υπέρυθρο laser. Το laser αυτό παρέχει ακόμη μεγαλύτερη ασφάλεια καθώς η δέσμη laser δεν είναι ορατή χωρίς ειδικό εξοπλισμό όπως επίσης κάνει την ευθυγράμμιση δυσκολότερη.

5.1.1 Μονάδα πομπού

Το κύκλωμα για τον πομπό: Η έξοδος από το μικρόφωνο ενισχύεται από το ολοκληρωμένο IC2a το οποίο τροφοδοτεί το ρυθμιζόμενο τρανζίστορ Q1, το οποίο μεταβάλλει το ρεύμα του laser ανάλογα το σήμα. Το ρεύμα ηρεμίας της διόδου laser διαμορφώνεται από το ποτενσιόμετρο VR1. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πομπού είναι τα παρακάτω:

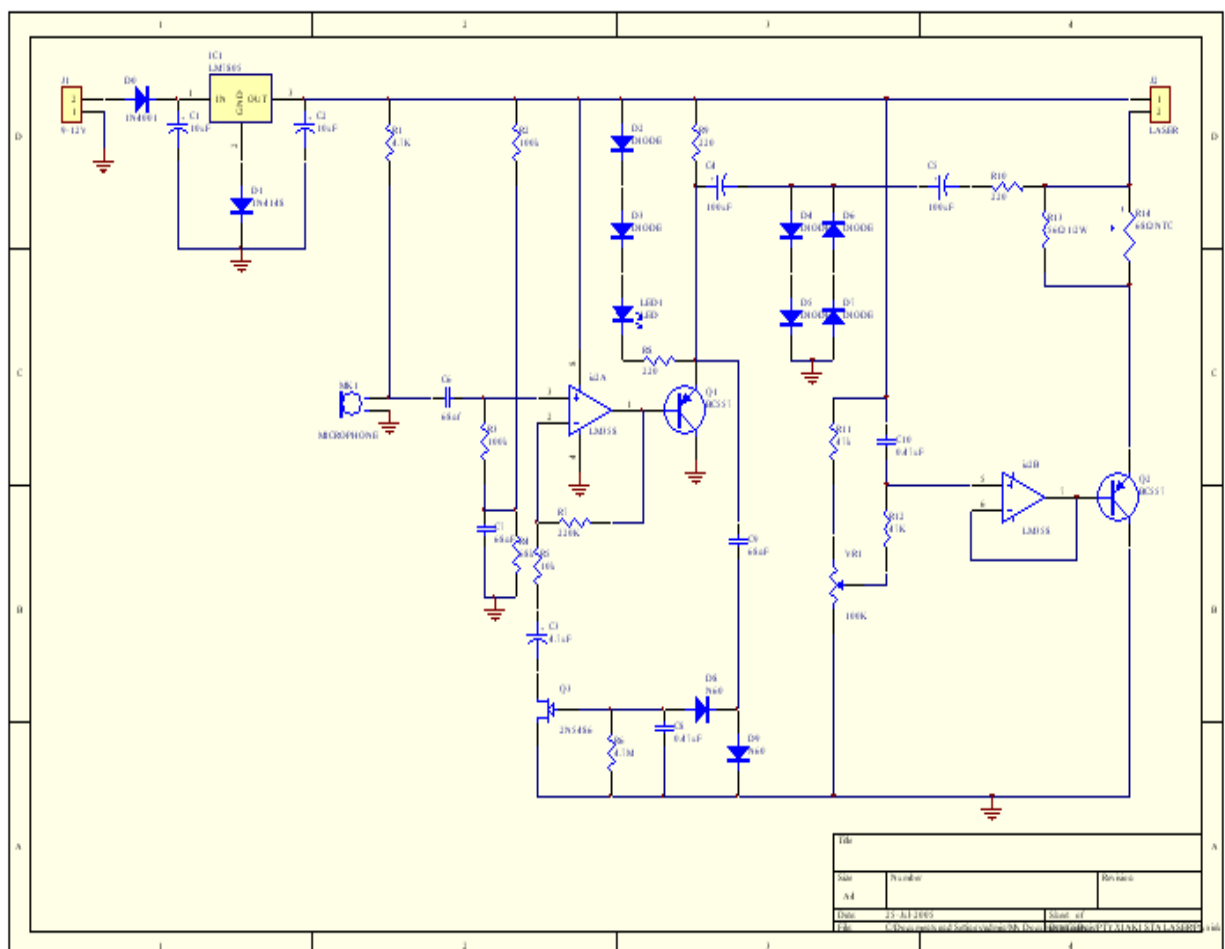
1. Αντίσταση R1 4.7k Ισχύος 1/4 Watt
2. Αντιστάσεις R2, R3 100k Ισχύος 1/4 Watt
3. Αντίσταση R4 68k Ισχύος 1/4 Watt
4. Αντίσταση R5 10k Ισχύος 1/4 Watt
5. Αντίσταση R6 4.7M Ισχύος 1/4 Watt
6. Αντίσταση R7 220k Ισχύος 1/4 Watt
7. Αντιστάσεις R8, R9, R10 220 Ohm Ισχύος 1/4 Watt
8. Αντιστάσεις R11, R12 47k Ισχύος 1/4 Watt
9. Αντίσταση R13 56Ohm Ισχύος 1/4 Watt
10. NTC Thermistor 68Ohm
11. Ποτενσιόμετρο VR1 100k
12. Πυκνωτής C1, C2 10μF 16V ηλεκτρολυτικοί
13. Πυκνωτής C3 4.7μF 16V ηλεκτρολυτικός
14. Πυκνωτές C4, C5 100μF 16V ηλεκτρολυτικός
15. Πυκνωτές C6, C7, C9 68nF κεραμικοί
16. Πυκνωτές C8, C10 470pF μονολιθικοί κεραμικοί
17. LED πράσινο 5mm
18. Διοδικό laser ισχύος 5mW 650 nm
19. Δίοδοι D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 1N4148
20. IC LM358 οπτικός ενισχυτής
21. Τρανζίστορ Q1, Q2 BC557 PNP

22. Τρανζίστορ Q3 JFET 2N5486

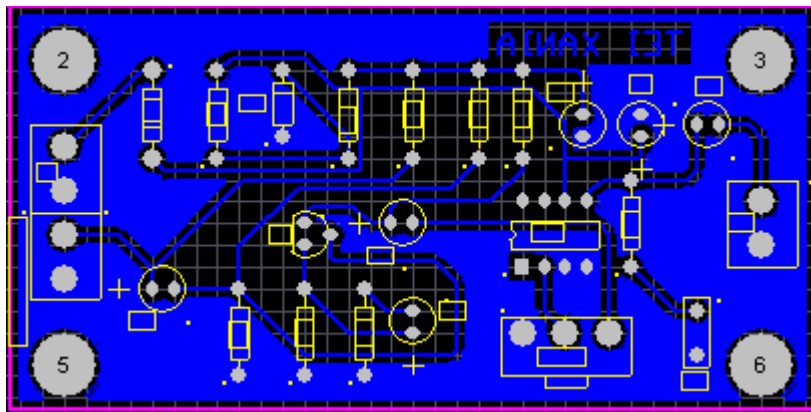
23. Μικρόφωνο MK1

24. Τροφοδοσία 9V

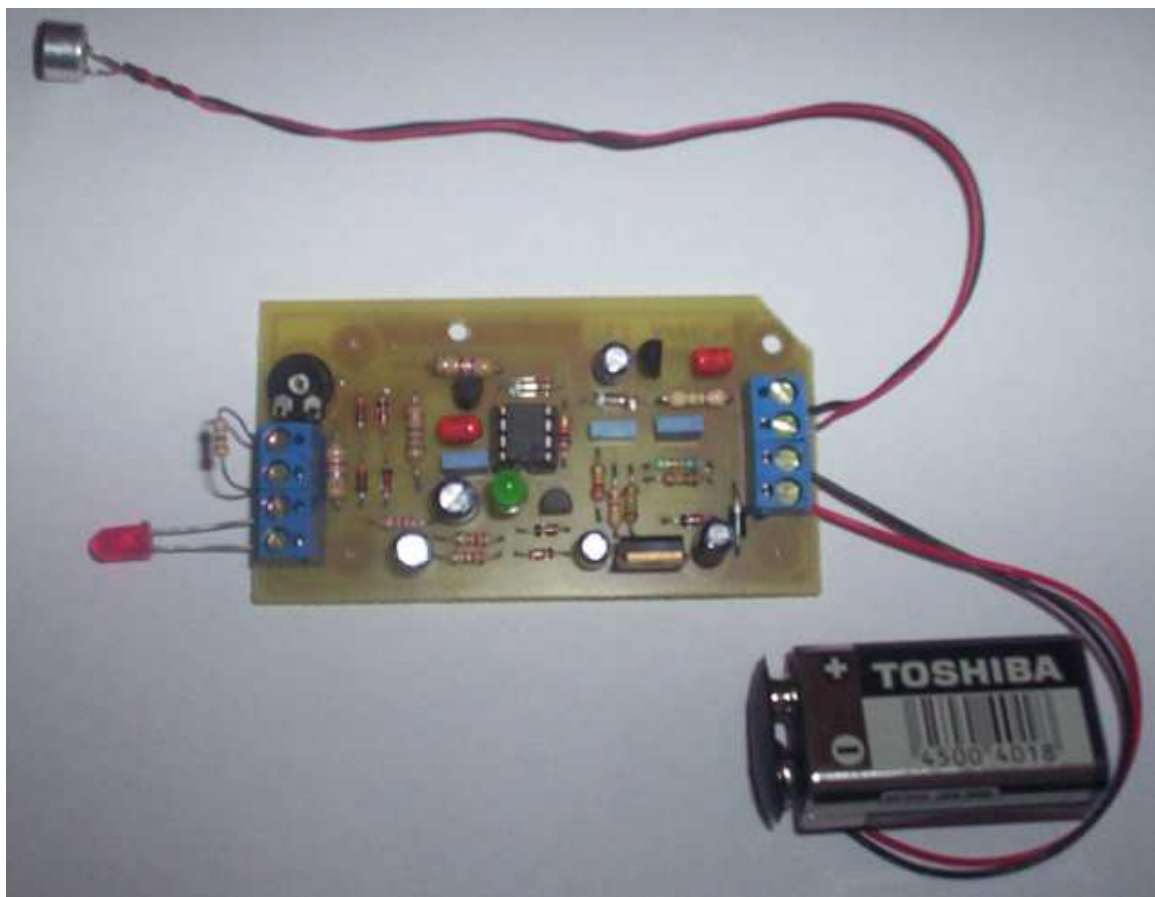
Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν τον πομπό σαν σχηματικό διάγραμμα, σαν PCB μέσω του προγράμματος σχεδίασης που χρησιμοποιήσαμε στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και στην πραγματική του μορφή.



Εικόνα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα του πομπό.



Εικόνα 5.2: PCB πομπού.



Εικόνα 5.3: Πομπός συνδέσμου επικοινωνίας με laser.

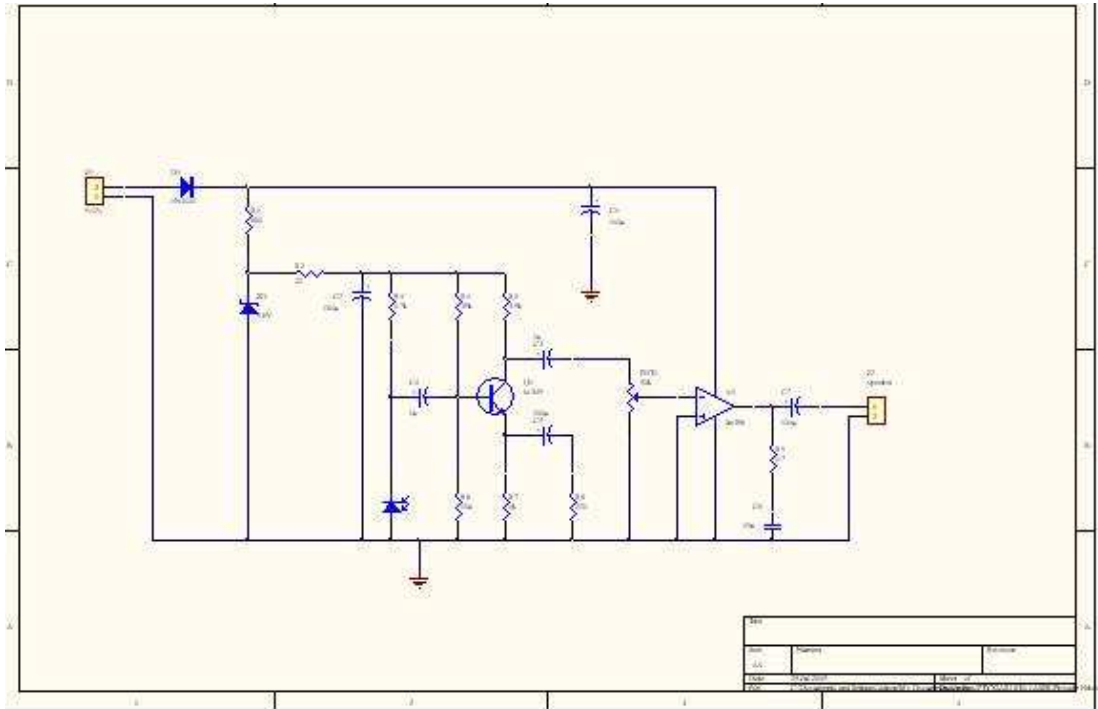
5.1.2 Μονάδα δέκτη

Το κύκλωμα για τον δέκτη, όπου το φως από τον πομπό εντοπίζεται και μετατρέπεται σε μια τάση από τη φωτοδίοδο. Το σήμα ενισχύεται από το τρανζίστορ Q1 και το ολοκληρωμένο IC1, τα οποία οδηγούν το μεγάφωνο.

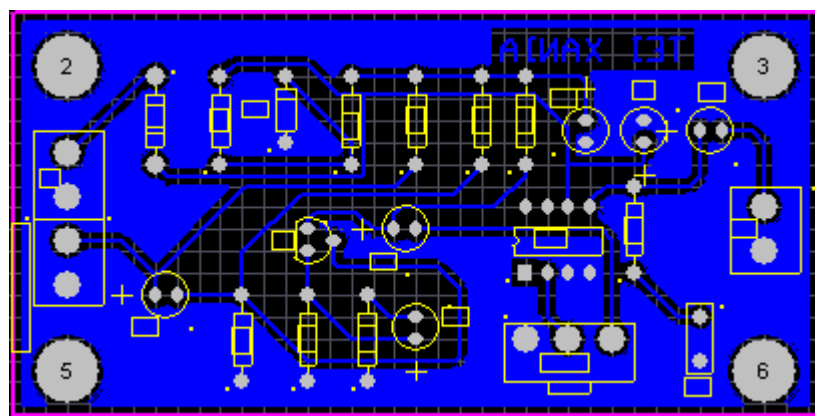
Όπου η απόσταση εκπομπής είναι μικρότερη από ένα μέτρο, η δίοδος laser μπορεί να αντικατασταθεί με ένα led. Προφανώς η ασφάλεια της μετάδοσης είναι αρκετά μικρότερη εφόσον το led διαδίδει το φως σε κάθε κατεύθυνση. Αυτή η σύνδεση laser μπορεί να προσαρμοστεί για χρήση όπως μια περιμετρική προστατευτική διάταξη. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πομπού είναι τα παρακάτω:

1. Αντίσταση R1 680Ohm
2. Αντίσταση R2 220Ohm
3. Αντίσταση R3 4.7k
4. Αντίσταση R4 39k
5. Αντίσταση R5 3.9k
6. Αντίσταση R6 10k
7. Αντίσταση R7 1k
8. Αντίσταση R8 220Ohm
9. Αντίσταση R9 4.7Ohm
10. Ποτενσιόμετρο VR1 50k
11. Πυκνωτές C1, C2, C5, C7, 100μF 16V ηλεκτρολυτικοί
12. Πυκνωτές C3, C4, 1μF 16V ηλεκτρολυτικοί
13. Πυκνωτής C6 1nF ηλεκτρολυτικός
14. Τρανζίστορ Q1 BC549 NPN
15. IC LM386 ενισχυτής
16. Δίοδος Zener ZD 5.6V ισχύος 400 mW
17. Φωτοδίοδος
18. Μεγάφωνο 4-16 Ohm
19. Τροφοδοσία 9V

Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν το δέκτη σαν σχηματικό διάγραμμα, σαν PCB μέσω του προγράμματος σχεδίασης που χρησιμοποιήσαμε στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και στην πραγματική του μορφή.



Εικόνα 5.4: Σχηματικό διάγραμμα του δέκτη.



Εικόνα 5.5: PCB δέκτη.



Εικόνα 5.6: Δέκτης συνδέσμου επικοινωνίας με laser.

5.2 Λειτουργία πομπού

Η δίοδος laser χρειάζεται μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος, το ονομαζόμενο ρεύμα κατώφλιου (threshold current), πριν να εκπέμψει φως. Περαιτέρω αύξηση σε αυτό το ρεύμα παράγει μεγαλύτερο φως εξόδου. Η σχέση μεταξύ ισχύος εξόδου και ρεύματος είναι γραμμική, μόλις το ρεύμα είναι πάνω από το κατώφλι, δίνοντας μια χαμηλή παραμόρφωση όταν η δέσμη είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος. Για παράδειγμα η δίοδος laser των 650 nm 5mW έχει ένα τυπικό ρεύμα κατώφλιου 30mA και παράγει την ολική της έξοδο όταν το ρεύμα αυξάνεται περίπου 10 mA πάνω από το κατώφλι στα 40 mA. Περαιτέρω αύξηση του ρεύματος θα μειώσει κατά πολύ τη ζωή της δίοδου laser, και υπερβαίνοντας τα 80 mA θα την καταστρέψει αμέσως. Οι δίοδοι laser είναι πολύ εύθραυστες και δεν αντέχουν σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και στιγμιαίες αυξομειώσεις.

Ωστόσο ο τυπικός χρόνος ζωής τέτοιων διόδων είναι γύρω στις 20.000 ώρες. Στο κύκλωμα του πομπού η δίοδος laser τροφοδοτείται μέσω μιας ρυθμιζόμενης πηγής σταθερού ρεύματος. Αφού το κατώφλι του laser ποικίλει με τη θερμοκρασία,

περιλαμβάνεται ένα NTC thermistor ώστε να αντισταθμίζονται οι αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ας σημειώσουμε επίσης ότι το μεταλλικό προστατευτικό κάλυμμα για τη δίοδο laser και το φακό λειτουργούν ως δεξαμενή θερμότητας. Η δίοδος laser δεν θα πρέπει να τροφοδοτείται χωρίς τοποθέτηση μεταλλικού καλύμματος. Το ρεύμα ηρεμίας της διόδου ελέγχεται από το τρανζίστορ Q2 το οποίο προέρχεται από το ολοκληρωμένο IC2b. Η συνεχής τάση όπως τίθεται από το ποτενσιόμετρο VR1 εμφανίζεται στη βάση του τρανζίστορ Q2, η οποία καθορίζει το ρεύμα μέσω του τρανζίστορ και επομένως τη δίοδο laser. Αυξάνοντας την τάση στο VR1 μειώνεται το ρεύμα του laser. Η ρύθμιση του VR1 καθορίζει τη λάμψη της δέσμης του laser και επομένως την ολική ευαισθησία του συστήματος. Η ρύθμιση της τάσης του ακουστικού σήματος εφαρμόζεται στην κάθοδο της διόδου laser, η οποία μεταβάλλει το ρεύμα laser γύρω από ένα σημείο $\pm 3\text{mA}$. Η ρύθμιση τάσης είναι από τον εκπομπό του Q1, ο οποίος είναι μια μονάδα ακόλουθου εκπομπού οδηγούμενου από μια μονάδα ενισχυτή ακουστικού σήματος του IC2a. Οι δίοδοι D4 ως D7 περιορίζουν την τάση διαμόρφωσης στα $\pm 2\text{V}$, ενόσω οι πυκνωτές C4 και C5 εμποδίζουν τις συνεχείς τάσεις στον εκπομπό του Q1 και στην κάθοδο της διόδου laser.

Το ακουστικό σήμα κάνει τη ζεύξη του στη δίοδο laser μέσω της αντίστασης R10, η οποία περιορίζει τη μέγιστη πιθανή απόκλιση στο ρεύμα της διόδου laser σε μερικά mA.

Το LED δίνει μια ένδειξη της διαμορφωμένης τάσης. Οι δίοδοι D2, D3 και η αντίσταση R8 περιορίζουν το ρεύμα διαμέσου του LED και αυξάνουν τις αλλαγές της λάμψης του laser ώστε η μετατροπή να είναι προφανής. Τα τρεμόπαιγμα του LED επιπλέον με τον ήχο ο οποίος λαμβάνεται από το μικρόφωνο, δίνουν μια ένδειξη ότι υπάρχει η μετατροπή τάσης.

Ο αναστρέφων ενισχυτής του ολοκληρωμένου IC2a περιλαμβάνει έναν τύπο συμπίεσης, της οποίας το επίπεδο εξόδου είναι σχετικά σταθερό και ανεξάρτητο από το πόσο σιγανό ή δυνατό είναι το ακουστικό επίπεδο στο μικρόφωνο. Αυτό επιτυγχάνεται από το FET Q3 και το κύκλωμα που συνδέεται σε αυτό.

Ο διαδοχικός διπλασιαστής τάσης των C9, D8 και C8 ανορθώνει το ακουστικό σήμα στον εκπομπό του Q1 και η τελική αρνητική συνεχής τάση τροφοδοτείται στην πύλη του Q3. Μία αύξηση στο ακουστικό σήμα θα αυξήσει την αρνητική τάση πόλωσης στο Q3, αυξάνοντας την αντίσταση πηγής-απαγωγού. Λόγω της απολαβής του IC2a που καθορίζεται από την αντίσταση R7 και της

συνδεσμολογίας σε σειρά των R5 και Q3 η οποία είναι $A=1+[R7/(R5+Rds)]$, όπου Rds είναι η αντίσταση που παρουσιάζει το FET Q3, αυξάνοντας την πραγματική αντίσταση του Q3, μειώνεται η απολαβή.

Το σήμα εξόδου του τελεστικού οδηγεί το Q1, όπου με την βοήθεια του C9 έχουμε ανάδραση προς το FET. Εάν η τάση εξόδου (ανάδρασης) είναι μεγάλη οδηγεί το FET περισσότερο στον κόρο, μεγαλώνοντας την αντίσταση Rds και κατά συνέπεια ρίχνοντας την απολαβή του ενισχυτή IC2a. Στην αντίθετη περίπτωση που η τάση εξόδου είναι μικρότερη οδηγεί το FET προς την αποκοπή, ελατώνοντας την αντίσταση Rds και αυξάνοντας την απολαβή του ενισχυτή. Με αυτό τον τρόπο κρατιέται σταθερή η τάση εξόδου, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της τάσης εισόδου.

Από τη στιγμή που το κύκλωμα χρειάζεται χρόνο για να ανταποκριθεί, το δικτύωμα των D4-D7 χρειάζεται για την προστασία ενάντια απότομων αυξήσεων τάσεων.

Το μικρόφωνο ενισχύεται μέσω της R1 και συνδέεται με την μη αναστρέφουσα είσοδο του IC2a μέσω του C6 ο οποίος κάνει σύζευξη του σήματος εισόδου με το κυρίως κύκλωμα. Η είσοδος αυτή «κρατιέται» σε σταθερή συνεχή τάση για να δώσει μια συνεχή έξοδο ώστε να πολώσει το Q1. Η τάση τροφοδοσίας στον πομπό κανονίζεται από το IC1, το οποίο ρυθμίζει στα 5 Volt με δυνατότητα τροφοδότησης μέχρι και 1A. Με την διόδο D1 αναγκάζουμε να αυξηθεί η τάση εξόδου κατά 0.6V παίρνοντας τα 5.6V τα οποία τροφοδοτούν το κύκλωμα μας.

5.3 Λειτουργία δέκτη

Το μεταδιδόμενο σήμα συλλέγεται από τη φωτοδίοδο στον πομπό. Η τάση εξόδου αυτής της διόδου ενισχύεται από τον ενισχυτή κοινού εκπομπού γύρω από το Q1. Ο ενισχυτής έχει μια απολαβή της τάξης 20 και συνδέει μέσω του VR1 στο IC1, έναν LM386 βασικό ενισχυτή με κέρδος ρυθμισμένο εσωτερικά στο 20.

Το ολοκληρωμένο αυτό μπορεί να οδηγήσει ένα ηχείο με αντίσταση τόσο χαμηλή όσο των 4 Ωμ και ισχύος 350mW όταν το κύκλωμα τροφοδοτείται από τάση 9 Volt. Αυξάνοντας την τροφοδοσία θα αυξηθεί οριακά η ισχύς εξόδου.

Η τάση στη βαθμίδα του ενισχυτή ρυθμίζεται από το ZD στα 5,6 Volt. και ξεχωρίζει από την κύρια τροφοδοσία από την αντίσταση R2 και τον πυκνωτή C2. Η αντίσταση R3 τροφοδοτεί ορθό ρεύμα για τη φωτοδίοδο.

5.4 Έλεγχος πριν τη λειτουργία της κατασκευής

Αρχικά, το σημαντικότερο είναι ότι θα πρέπει να αποφεύγουμε να κοιτάμε άμεσα τη δέσμη laser καθότι αυτό μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στα μάτια. Για το λόγο αυτό λαμβάνουμε και τα απαραίτητα μέτρα.

Ο πομπός όπως άλλωστε και ο δέκτης τροφοδοτούνται είτε από μπαταρία τάσης 9V, είτε από κατάλληλες τροφοδοσίες συνεχούς ρεύματος DC. Πριν εφαρμόσουμε τάση στον πομπό, ρυθμίζουμε το ποτενσιόμετρο VR1 σε ενδιάμεση θέση, ώστε να είμαστε σίγουροι ότι το ρεύμα του laser ότι δεν είναι υπερβολικά μεγάλο. Για να είμαστε απολύτως σίγουροι μπορούμε να ρυθμίσουμε το ποτενσιόμετρο πλήρως αριστερόστροφα, ώστε να μειωθεί το ρεύμα του laser μέχρι το μηδέν.

Έπειτα τροφοδοτούμε με τάση την κατασκευή. Εάν το laser δεν παράγει φως τότε ρυθμίζουμε αργά το ποτενσιόμετρο VR1 σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού, δηλαδή δεξιόστροφα. Η δίοδος laser θα πρέπει να εκπέμπει μία δέσμη με μία ένταση ρυθμιζόμενη από το ποτενσιόμετρο VR1. Σε αυτό το στάδιο, διατηρούμε την ένταση της δέσμης χαμηλή, αλλά αρκετή ώστε να φαίνεται καθαρά. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει έξοδος ελέγχουμε το κύκλωμα γύρω από το ολοκληρωμένο IC2b.

Το πράσινο LED θα πρέπει ακόμη να τρεμοπαίζει εάν περάσουμε το δάκτυλο μας πάνω από το μικρόφωνο. Εάν συμβαίνει κάτι τέτοιο, αυτό δείχνει ότι το τμήμα του ενισχυτή λειτουργεί και ότι υπάρχει μια τάση διαμόρφωσης στη δίοδο laser. Η αλλαγή έντασης της δέσμης laser με το διαμορφωμένο σήμα δεν είναι ορατή.

Για να ελέγξουμε ότι το σύστημα λειτουργεί, τοποθετούμε τις δύο πλακέτες, πομπό και δέκτη, σε έναν πάγκο σε απόσταση ενός μέτρου μεταξύ τους. Ίσως χρειαστεί να παρεμβάλλουμε ένα φύλλο χαρτί μπροστά από τη φωτοδίοδο ώστε να μειωθεί η ένταση του φωτός από τη δέσμη laser. Θέτουμε την ένταση του μεγαφώνου περίπου στο μέσο. Εάν η ένταση είναι ρυθμισμένη υψηλά θα έχουμε ακουστική ανάδραση.

Μετακινούμε τον πομπό με τη δίοδο laser ώστε η δέσμη να κατευθύνει στη φωτοδίοδο του πομπού. Είναι ωφέλιμο να ρυθμιστεί η δέσμη ώστε να είναι έξω από την εστίαση στη φωτοδίοδο για να γίνει η ευθυγράμμιση ευκολότερη. Θα πρέπει να ακούμε το μεγάφωνο να αναπαράγει κάθε ακουστικό σήμα που συλλαμβάνεται από το μικρόφωνο. Όταν ο πομπός και ο δέκτης είναι σε κοντινή εμβέλεια, η ισχύς της δέσμης μπορεί να προκαλέσει το δέκτη να ανταποκριθεί ακόμη κι αν η δέσμη laser δεν προσπίπτει επάνω στη φωτοδίοδο.

5.5 Αναρτώντας το σύνδεσμο

Παρακάτω θα περιγράψουμε το πώς θα αναρτήσουμε το σύνδεσμο επικοινωνίας laser.

Για ένα μικρό σύνδεσμο επικοινωνίας των εκατό μέτρων, αυτό που χρειαζόμαστε είναι να τοποθετήσουμε το δέκτη σε θέση ώστε η δέσμη laser να προσπίπτει πάνω στη φωτοδίοδο. Μόλις εγκαταστήσουμε το σύνδεσμο, όσο ρυθμίζουμε το ποτενσιόμετρο VR1 υψηλότερα του ρεύματος laser τόσο μικρότερο χρόνο ζωής θα έχει. Επίσης εστιάζουμε το laser ώστε όλη η δέσμη να κτυπάει πάνω στη φωτοδίοδο. Σε μικρή εμβέλεια πιθανόν να μην χρειάζεται εστίαση της δέσμης. Στην πραγματικότητα, λόγω της υψηλής ισχύος εξόδου, η οποία είναι 5mW, του διοδικού laser, μπορούμε να επιτύχουμε έξοχα αποτελέσματα σε σχετικά μικρές αποστάσεις, όπως είναι τα 20 μέτρα για παράδειγμα, με πρόχειρης εστίασης και ρεύματος ηρεμίας ρυθμίσεις. Για παράδειγμα, για αποστάσεις πάνω από είκοσι μέτρα, θα πρέπει ίσως να τοποθετήσουμε ένα σωληνάκι στο εμπρός μέρος της φωτοδίοδου ώστε να περιορίσει το περιβάλλοντα φως να προσπίπτει πάνω σε αυτήν. Η δίοδος αυτή είναι ευαίσθητη στο ορατό φως και έτσι ένα μεγάλο περιβάλλον φως μπορεί να προκαλέσει τον κορεσμό. Για πολύ μεγάλες αποστάσεις, όπως μερικά χιλιόμετρα, πιθανόν να χρειαστεί ένας παραβολικός ανακλαστήρας για τη δέσμη laser για να εστιαστεί ακριβώς επάνω στη φωτοδίοδο.

Για μικρότερες αποστάσεις, όπως μέτρο, ή για εκπαιδευτικούς ή δοκιμαστικούς σκοπούς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα τυπικό κόκκινο LED. Ρυθμίζουμε το ρεύμα ηρεμίας με το ποτενσιόμετρο VR1. Το φως εξόδου ενός LED

δεν εστιάζεται και απλά απλώνεται παντού, οπότε ένας ανακλαστήρας μπορεί να βοηθήσει στην ευαισθησία. (<http://captain.haddock.8m.com/laser/laser1.html>)

5.6 Πειραματική διαδικασία του συστήματος

Στην παρακάτω παράγραφο περιγράφουμε τα βήματα της πειραματικής διαδικασίας ώστε να μετρήσουμε την περιοχή συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί το σύστημα μας.

F(Hz)	Vout/Vin
100	35
200	60
300	80
400	100
500	80
600	82,5
700	85
800	90
900	90
1000	92,5
2000	92,5
3000	95
4000	92,5
5000	90
6000	87,5
7000	85
8000	82,5
9000	80
10000	80
11000	75
12000	75
13000	70
14000	65
15000	62,5
16000	60
17000	60
18000	55
19000	52,5
20000	50
21000	50
22000	45
23000	42,5
24000	42,5
25000	40
26000	40
27000	37,5
28000	35
29000	35
30000	32,5



Εικόνα 5.7: Χαρακτηριστική απόκρισης συχνότητας

Σαν είσοδο χρησιμοποιήσαμε ένα ημιτονικό σήμα από μία γεννήτρια συχνοτήτων, αντί για μικρόφωνο. Μεταβάλλαμε τη συχνότητα από τη γεννήτρια, από τα 100 Hz μέχρι τα 30 KHz. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διατηρούσαμε σταθερό το πλάτος της εισόδου στα 20 mV. Για κάθε τιμή της συχνότητας, λαμβάναμε την αντίστοιχη τιμή της τάσης εξόδου πάνω στο μεγάφωνο του δέκτη. Έπειτα υπολογίσαμε την απολαβή η οποία είναι ο λόγος της τάσης εξόδου ως προς την τάση εισόδου V_{out}/V_{in} .

Στην εικόνα 5.7 παρατίθεται η απόκριση συχνότητας του συστήματος. Από την χαρακτηριστική αυτή μπορούμε να διακρίνουμε την περιοχή συχνοτήτων κανονικής λειτουργίας του συνδέσμου η οποία είναι από 200 Hz έως 13 KHz βάσει της μέσης τιμής της απολαβής.

Ακόμη μία παράμετρος την οποία υπολογίσαμε είναι η απώλεια ενέργειας που έχει το laser όταν δεν υπάρχει σήμα εισόδου. Συνδέσαμε το laser με ένα μετρητή οπτικής ισχύος και αφού ρυθμίσαμε την ένταση του laser λίγο παραπάνω από το ρεύμα κατωφλίου, ώστε να μην έχουμε παραμόρφωση του σήματος, βρήκαμε ότι η απώλεια ενέργειας είναι 2,35 μJoule .

5.7 Ο οπτικός ενισχυτής LM358

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούμε για τον ενισχυτή LM358 και τα χαρακτηριστικά του.

Ο οπτικός ενισχυτής LM358 αποτελείται από δύο ανεξάρτητα, υψηλής απολαβής, εσωτερικά αντισταθμισμένους σε συχνότητα ενισχυτές οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι ειδικά να λειτουργούν από μία απλή τροφοδοσία μέχρι ένα μεγάλο εύρος τάσεων. Τα πεδία των εφαρμογών περιλαμβάνουν ενισχυτές διάταξης μετατροπής, μέρη απολαβής και όλα τα συνηθισμένα κυκλώματα οπτικής ενίσχυσης τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν σε συστήματα ισχύος.

5.7.1 Χαρακτηριστικά

Ο ενισχυτής αυτός έχει μοναδικά χαρακτηριστικά όπως:

- Σε γραμμική κατάσταση η τάση εισόδου κοινού σημείου περιλαμβάνει γείωση και η τάση εξόδου μπορεί επίσης να στραφεί σε γείωση, ακόμη κι αν λειτουργεί από μία απλή τροφοδοσία
- Η μονάδα ενίσχυσης συχνότητας είναι θερμοκρασιακά εξισορροπημένη.
- Η πόλωση εισόδου επίσης είναι θερμοκρασιακά εξισορροπημένη.

5.7.2 Πλεονεκτήματα

- Σε μία συσκευασία υπάρχουν δύο ενισχυτές.
- Για διπλές τροφοδοσίες είναι αναγκαία η εξάλειψη (eliminates)
- Επιτρέπει άμεση ευαισθησία κοντά στη γείωση και η τάση εξόδου οδηγείται επίσης στη γείωση.
- Συμβατό με κάθε μορφή λογικής.
- Διοχέτευση ισχύος κατάλληλη για λειτουργία με μπαταρία.

5.7.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Εσωτερική αντισταθμισμένη συχνότητα
- Υψηλή απολαβή σε συνεχή τάση της τάξης των 100 dB
- Μεγάλο εύρος, κέρδος μονάδας, της τάξης του 1 MHz
- Μεγάλο εύρος τροφοδοσίας: Απλή τροφοδοσία 3-32 V, για διπλές τροφοδοσίες 1,5-16 V
- Χαμηλό ρεύμα τροφοδοσίας 500 μ A
- Χαμηλό αντιστάθμισμα τάσης εισόδου
- Η τάση εισόδου κοινού σημείου περιλαμβάνει και τη γείωση.
- Διαφορικό εύρος τάσης εισόδου ίσο με την ισχύς της τροφοδοσίας.
- Μεγάλη ταλάντωση τάσης εξόδου 0V με V^+ - 1,5 V

5.8 Εφαρμογές

Ο μικρός όγκος της κατασκευής αυτής καθώς και η μεγάλη εμβέλεια που εκπέμπει το laser, είναι οι λόγοι για τους οποίους το σύστημα μας βρίσκει εφαρμογή όπως το στήσιμο καναλιού ομιλίας μεταξύ δύο περιοχών, όπως γειτονικά σπίτια, ή γραφεία τα οποία βρίσκονται εκατέρωθεν μιας οδού. Για αμφίδρομη επικοινωνία (duplex) προφανώς χρειαζόμαστε δύο κανάλια laser. Μερικές ακόμα εφαρμογές παρουσιάζονται στις παρακάτω παραγράφους.

5.8.1 Laser βασισμένο σε ψηφιακή επικοινωνία δεδομένων

Η ψηφιακή επικοινωνία με ημιαγωγό laser προσφέρει χαμηλό κόστος, στενό εύρος και ασφαλής υπέρυθη επικοινωνία δεδομένων για μετάδοση δεδομένων υπολογιστή και τηλεμετρίας. Η συσκευή αυτή μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε παρεχόμενο πομπό βραχέως πληροφορίας και ο δέκτης μπορεί να ανιληφθεί οποιονδήποτε. Το σύστημα αποτελείται από δύο σετ μονάδων δέκτη, τα οποία μπορούν να εκπέμψουν 10 kbps (kilobytes per second) ψηφιακής πληροφορίας σε εύρος 1.5 χιλιομέτρου.



Εικόνα 5.8

Κάθε πομπός εκπέμπει υπέρυθρους παλμούς διάρκειας 200 nsec με ισχύ κορυφής 4 W. Στο άκρο του δέκτη, οι παλμοί φωτός συγκεντρώνονται στη φωτοδίοδο με τη βοήθεια κατάλληλων οπτικών μέσων τα οποία τους μετατρέπουν σε ηλεκτρικούς παλμούς. Οι παλμοί αυτοί επεξεργάζονται επιπλέον για διασύνδεση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα δεδομένα ανταλλάσσονται στα δύο άκρα χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιο καλώδιο. Λόγω της μοναδικής ιδιότητας της πολύ μικρής απόκλισης της δέσμης laser, το σύστημα προσφέρει ασφαλή επικοινωνία δεδομένων συγκρινόμενη με τη ραδιοεπικοινωνία.

5.8.1.1 Χαρακτηριστικά:

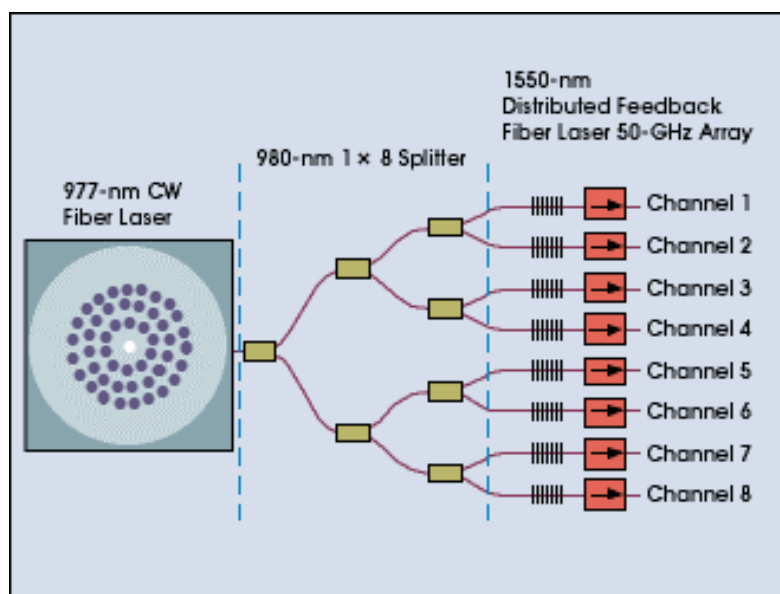
1. Υψηλή ασφάλεια και μυστικότητα της επικοινωνίας
2. Ταχεία και εύκολη εγκατάσταση
3. Χαμηλή κατανάλωση ισχύος
4. Επικοινωνία σημείου προς σημείο
5. Σύνδεσμος εκπομπής – λήψης
6. Μέγιστο εύρος σε αέθριο καιρό περί τα 1.5 χιλιόμετρα
7. Ελεύθερο από EM/RF παρεμβολές
8. Δεν χρειάζεται άδεια χρήσης
9. Ευθυγράμμιση των μονάδων με τηλεσκόπιο

Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για ασφαλή επικοινωνία δεδομένων σε αμυντικές και ευαίσθητες περιοχές, στα αεροδρόμια για επικοινωνία μεταξύ των απέναντι διαδρόμων προσγείωσης των αεροσκαφών, για την τηλεμετρία δεδομένων και για τηλεχειρισμό. (www.barc.ernet.in/webpages/technologies/laser_digi.html)

5.8.2 Εφαρμογή του Laser στις Τηλεπικοινωνίες

Η συνεργασία Βρετανών και Ρώσων μηχανικών στις τηλεπικοινωνίες, ανέπτυξε ένα σύστημα laser με οπτική ίνα το οποίο προωθεί την επίδοση και αποκόβει το κόστος όταν αντικαθίσταται από παραδοσιακούς εκπομπούς laser σε

δίκτυα πολυπλεξίας διαίρεσης κυματομορφής (Wavelength Division Multiplexing - WDM). Η ομάδα η οποία ανέπτυξε την εφαρμογή αυτή, πιστεύει ότι αυτό είναι το πρώτο laser <<άντλησης>> ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας οπτικής ίνας το οποίο αναπτύχθηκε ως τηλεπικοινωνιακός πομπός.



Εικόνα 5.9: Η έξοδος του laser Yb (Στοιχείο Υττέρβιο) των 977 nm διανέμεται σε οκτώ ξεχωριστά καταναμημένα laser ανάδρασης με οπτική ίνα, τα οποία παράγουν έναν κόμβο των 50 Hz από συχνότητες WDM.

Ο πομπός σε ένα σύστημα WDM είναι ένα από τα περισσότερο κρίσιμα εξαρτήματα, όσον αφορά την επίδοση αλλά και το κόστος του συστήματος. Τα laser ημιαγωγών τα οποία λειτουργούν σε καταναμημένη ανάδραση, συνήθως καλύπτουν τον ρόλο αυτό, αλλά τα καταναμημένης ανάδρασης laser οπτικής ίνας είναι δυνατοί ανταγωνιστές για την εργασία αυτή. Αυτά τα τελευταία είναι συσκευές υψηλής ισχύος με χαμηλή απώλεια παρεμβολής, ικανή να παράγει μοναδική συχνότητα πολωμένης εξόδου με υψηλούς λόγους σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR). Ωστόσο μειονέκτημα των πομπών laser οπτικής ίνας ήταν ότι απαιτούν ένα ακριβό δικτυωτά σταθεροποιημένο laser ημιαγωγού για άντληση αυτών. Τώρα όμως ο συνδυασμός παρουσιάζει την άντληση των πομπών laser οπτικής ίνας με ένα φθηνό

laser οπτικής ίνας. Στη διαμόρφωση του καινούριου συστήματος, η έξοδος των 977 nm από ένα laser οπτικής ίνας υττερβίου (Yb) διακλαδώνεται σε οκτώ πομπούς laser οπτικής ίνας WDM όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5.9). Κάθε κατανεμημένος πομπός ανάδρασης laser οπτικής ίνας χωρίζεται από το γειτονικό του με συχνότητα 50 GHz, ώστε το σύστημα να παράγει έναν τυπικό κόμβο WDM των 50 GHz. Το laser άντλησης των 977 nm αυτό καθεαυτό επικαλύπτεται με μία φθηνή, ευρέως φάσματος δίοδο laser, σε μήκος κύματος 915 nm. Περίπου 1 Watt της ακτινοβολίας των 977 nm προκύπτει από το laser, αλλά οι απώλειες των ζευκτών και οπτικών ινών των 3dB της διακλάδωσης μειώνουν την ισχύ παραδίδοντας σε κάθε διανεμημένο laser ανάδρασης οπτικής ίνας ισχύ 90 mW. Υπό αυτές τις συνθήκες κάθε ένα από τα οκτώ laser παράγει περίπου 21 mW ισχύ.

Έπειτα από σειρά δοκιμασιών, οι μηχανικοί σύγκριναν την επίδοση του κατανεμημένου laser ανάδρασης οπτικής ίνας, με διοδικό laser άντλησης ακτινοβολίας. Βρέθηκε ότι η κλίση των αποδοτικότητων (slope efficiencies) του κατανεμημένου laser ανάδρασης ήταν οι ίδιες αν η πηγή άντλησης ήταν το laser οπτικής ίνας ή το διοδικό laser και ότι η σχετική ένταση θορύβου ήταν ανεξάρτητη από την πηγή άντλησης.

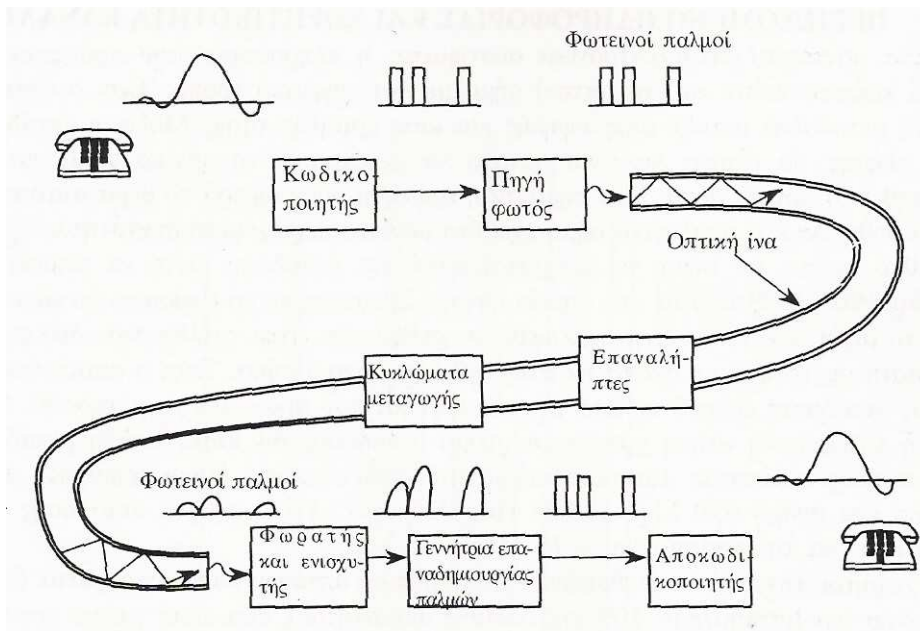
Τα φασματικά εύρη των οκτώ κατανεμημένων laser ανάδρασης ήταν αξιοσημείωτα μεγαλύτερα όταν αντλούνταν από ένα laser οπτικής ίνας. Η αύξηση του εύρους, πιστεύουν οι μηχανικοί, έχουν ως αποτέλεσμα την ποικιλία της ισχύος του laser άντλησης με οπτική ίνα, αλλά πιστεύουν ότι δεν είναι επιβλαβές στην επίδοση του συστήματος από ότι σε έναν πομπό WDM.

Χρησιμοποιώντας μόνο ένα φθηνό laser οπτικής ίνας αντί οκτώ ακριβά διοδικά laser για να αντλήσουν οκτώ κατανεμημένα laser ανάδρασης με οπτική ίνα, οι πομποί μπορούν να μειώσουν το συνολικό κόστος του πακέτου του πομπού. Η ανάπτυξη αυτή κάνει τα κατανεμημένα laser οπτικής ίνας περισσότερο ανταγωνιστικά με τα παραδοσιακά laser ημιαγωγών για χρήση ως πομποί WDM. (www.photonics.com/spectra/tech/XQ/ASP/techid.1570/QX/read.htm)

5.8.3 Μια ιδεατή εικόνα του οπτικού επικοινωνιακού συστήματος

Η οπτική επικοινωνία είναι ένα από τα ταχύτατα αναπτυσσόμενα τμήματα της οπτοηλεκτρονικής. Αυτό γίνεται παρά το γεγονός ότι οι ιδανικές οπτοηλεκτρονικές συσκευές, που μπορούν να εκμεταλλευτούν το πλήρες δυναμικό της σύμφωνης επικοινωνίας, ακόμη δεν υπάρχουν. Για παράδειγμα το δυναμικό της σύμφωνης επικοινωνίας δε χρησιμοποιείται ακόμη επειδή οι οπτοηλεκτρονικές συσκευές δεν είναι τόσο ανεπτυγμένες όσο οι ηλεκτρονικές συσκευές. Άρα, σήμερα χρησιμοποιείται μία πολύ μικρή χωρητικότητα του οπτικού συστήματος. Αυτό, φυσικά, προτείνει ότι το μέλλον της οπτικής επικοινωνίας θα είναι ακόμη λαμπρότερο.

Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος οπτικής επικοινωνίας προέρχεται από τις ιδιότητες της οπτικής ίνας η οποία είναι το μέσο που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει πληροφορίες. Στην εικόνα 5.10 δείχνουμε μία τυπική διάταξη οπτοηλεκτρονικού επικοινωνιακού συστήματος. Η πληροφορία που πρόκειται να μεταδοθεί (δεδομένα, φωνή κ.α) κωδικοποιείται πρώτα σε ένα οπτικό σήμα. Αυτό απαιτεί τον κατάλληλο οδηγό ή διαμορφωτή και μία οπτική πηγή. Το σήμα μετά συζευγνύεται σε μία οπτική ίνα, η οποία είναι ένα βασικό στοιχείο που έχει κάνει δυνατή την οπτική επικοινωνία. Καθώς το σήμα περνάει κατά μήκος της ίνας, σε μερικά σημεία μπορεί να απαιτείται να μεταβεί σε άλλα κανάλια. Αυτό απαιτεί κατάλληλα στοιχεία μεταγωγής. Μόλις τα δεδομένα φθάσουν το επιθυμητό σημείο, ανιχνεύονται από ένα οπτικό φωρατή. Το δημιουργούμενο σήμα ενισχύεται και λαμβάνεται.



Εικόνα 5.10. Συστατικά μέρη ενός οπτοηλεκτρονικού επικοινωνιακού συστήματος

Στα πραγματικά συστήματα, το οπτικό σήμα εξασθενεί όπως διαδίδεται. Αυτό απαιτεί την τοποθέτηση «επαναληπτών» για να επαναδημιουργήσουν το οπτικό σήμα ή ενισχυτών που ενισχύουν το σήμα. Επιπλέον, τα οπτικά δεδομένα μπορεί να χρειαστεί να μεταβούν από ένα κανάλι σε άλλο. Το κύκλωμα μεταγωγής μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκο και να απαιτεί lasers και φωρατές όπως επίσης και κυκλώματα λήψης αποφάσεων βασισμένα σε πυρίτιο κ.α.

Το οπτικό επικοινωνιακό σύστημα είναι αρκετά όμοιο σαν ιδέα με το ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο βασίζεται στα μικροκύματα. Οι βασικές διαφορές βρίσκονται στο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται και στη χρήση μίας οπτικής ίνας αντί μεταλλικού καλωδίου. Η χρήση ινών παρέχει τέσσερις βασικές περιοχές πλεονεκτημάτων για το οπτικό σύστημα ως προς το σύστημα το οποίο είναι βασισμένο σε μικροκύματα:

α) είναι δυνατές πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ επαναληπτών αφού η εξασθένιση του οπτικού σήματος σε μία ίνα είναι πολύ μικρότερη από αυτή ενός μικροκυματικού σήματος σε ένα καλώδιο

β) μία πολύ υψηλή χωρητικότητα πληροφοριών είναι διαθέσιμη εξαιτίας της χρήσης των οπτικών συχνοτήτων

γ) το σύστημα έχει χαμηλό κόστος και χαμηλό βάρος

δ) οι επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής συμβολής είναι ελάχιστες.

Όμως, προς το παρόν, εξαιτίας περιορισμών δυνατότητας της συσκευής, το τεράστιο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας δε χρησιμοποιείται πλήρως. Η οπτική ίνα έχει ένα τεράστιο δυναμικό. Όμως για να φτάσει αυτό το δυναμικό είναι ουσιαστικό να γίνουν διαθέσιμα σύμφωνα συστήματα φώρασης. (Οπτοηλεκτρονική Jasjit Singh.1998. σελ.709)

5.8.4 Πειραματική διάταξη συνδέσμου δεδομένων με χρήση laser

5.8.4.1 Περίληψη των χαρακτηριστικών του κυκλώματος

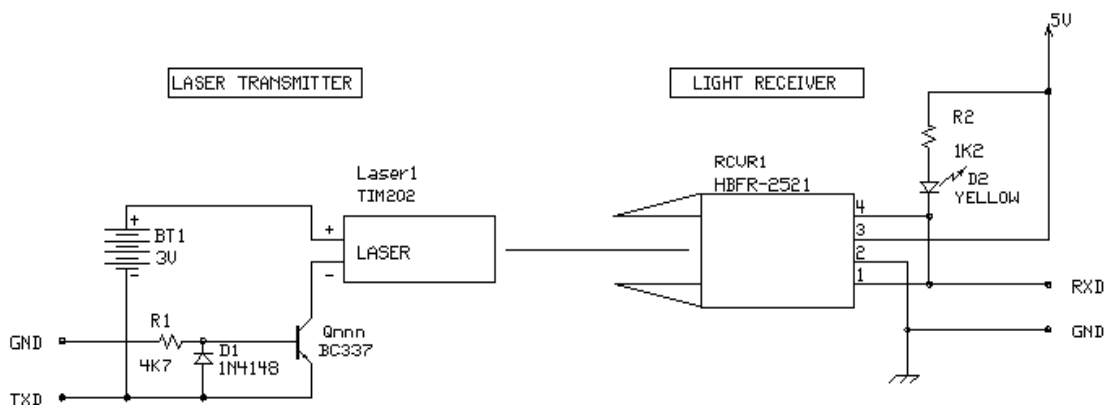
- Σύντομη περιγραφή της εφαρμογής: Ασύρματος σύνδεσμος laser για θύρα υπολογιστή RS-232
- Προστασία κυκλώματος: Δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερα κυκλώματα προστασίας
- Πολυπλοκότητα κυκλώματος: Αρκετά απλά κυκλώματα
- Εκτέλεση κυκλώματος: Λειτουργεί μέχρι ταχύτητες των 9600 bps σε απόσταση μερικών μέτρων.
- Διαθεσιμότητα εξαρτημάτων: Οι μονάδες laser είναι στις μέρες μας ευρέως διαθέσιμες, αλλά η καταλληλότητα άλλων μονάδων γι' αυτήν την εφαρμογή δεν είναι γνωστές.
- Δοκιμή σχεδίασης: Απλή πειραματική για αποστάσεις πάνω από μερικά μέτρα. Αξιοπιστία μακράς διαρκείας για αυτό το κύκλωμα δεν έχει δοκιμαστεί.
- Εφαρμογές: Πειραματική ασύρματη διάταξη επικοινωνίας με χρήση laser, συνδέεται στην σειριακή πόρτα του υπολογιστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σχεδόν κάθε πρόγραμμα επικοινωνίας το οποίο

χρησιμοποιεί ταχύτητα RS-232 δηλαδή 9600 bps μέγιστη και δεν χρειάζεται γραμμές ανταλλαγής σημάτων επικοινωνίας.

- Τροφοδοσία: Η τροφοδοσία αποτελείται από δύο μπαταρίες των 1.5 V ρεύματος 70 mA, εξωτερική πηγή +5V ρεύματος 20 mA.
- Μέτρα ασφάλειας: το κύκλωμα χρησιμοποιεί ακτινοβολία η οποία μπορεί να βλάψει τα μάτια εάν κοιτάζουν απ'ευθείας στη δέσμη του laser.

5.8.4.2 Περιγραφή του κυκλώματος

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε την πειραματική διάταξη με ημιαγωγικό laser. Χρειαζόμαστε ένα laser ημιαγωγού για όλα τα είδη των πειραμάτων όπως αυτό το οποίο χρησιμοποιούμε στα δεικτικά laser (laser pointers). Το laser αυτό τροφοδοτείται με τάση 3 V ρεύμα 45 mA και δίνει έξοδο 3-5 mW μήκους κύματος 670 nm. Η μονάδα laser μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα ανοιγοκλείνοντας την χρησιμοποιώντας ένα τρανζίστορ. Έπειτα χρησιμοποιούμε μία οπτική ίνα 1mm και μήκους κύματος 665nm το οποίο μπορεί να λειτουργεί μέχρι τα 5 mbps. Έπειτα κάνουμε δοκιμή της κατασκευής. Συνδέουμε το κύκλωμα στη σειριακή θύρα τον δέκτη και τον πομπό μερικά μέτρα μακριά. Μέσω προγράμματος υπολογιστή δοκιμάζουμε το κύκλωμα με διαφορετικές ταχύτητες επικοινωνίας.



Εικόνα 5.11: Πειραματική διάταξη επικοινωνίας ηλεκτρονικού υπολογιστή με χρήση laser.

Η δοκιμή έδωσε καλά αποτελέσματα. Αρχικά στην ταχύτητα των 115200 bps, η οποία είναι η καθιερωμένη ταχύτητα της σειριακής πόρτας του υπολογιστή, μερικοί χαρακτήρες δεν ήταν δυνατόν να περάσουν διαμέσου του συνδέσμου. Σε χαμηλότερες ταχύτητες πάλι υπήρξαν προβλήματα. Επίσης για ταχύτητες άνω των 9600 bps ήταν αναξιόπιστο το σύστημα. Έτσι η μοναδική ταχύτητα η οποία λειτουργεί σωστά είναι τα 9600 bps.

Τα υλικά για την πειραματική αυτή διάταξη είναι τα παρακάτω:

1. Αντίσταση R1 4,7 kΩ
2. Δίοδος D1 1N4148
3. Τρανζίστορ Q BC337
4. Αντίσταση R2 1,2 kΩ
5. Led κίτρινο D2

(www.tkk.fi/Misc/Electronics/circuits/laserlink.html)

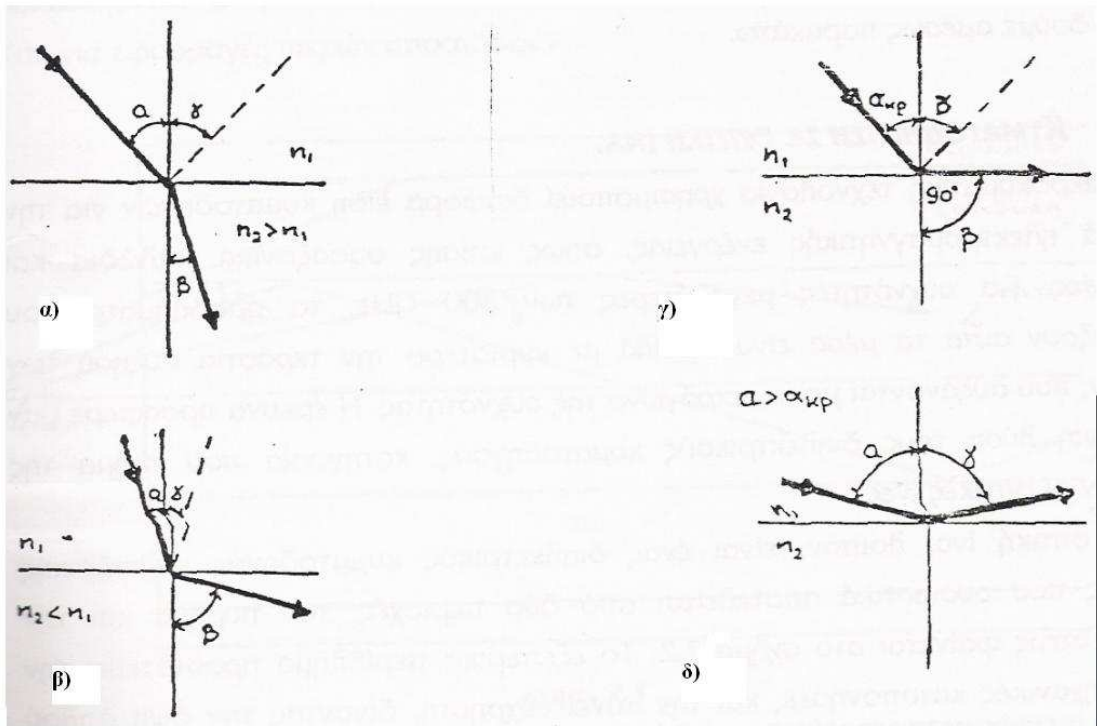
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

6.1 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα τα οποία πήραμε έπειτα απο την εκτέλεση του πειράματος, είναι αρκετά ικανοποιητικά όσον αφορά την ποιότητα του ήχου που μεταφέρθηκε μέσω της ακτίνας του laser. Η δοκιμή έγινε σε κλειστό χώρο χαμηλής φωτεινότητας ώστε να μην έχουμε την επίδραση του θορύβου λόγω της ακτινοβολίας του φωτός η οποία επηρεάζει τη φωτοδίοδο. Παρόλα αυτά το σύστημα μπορεί να δεχτεί βελτιώσεις αν η μετάδοση γίνει μέσω οπτικής ίνας. Οι οπτικές ίνες παρέχουν μεγάλη ασφάλεια, διότι είναι δύσκολο να γίνει ζεύξη μέσα στο καλώδιο αν κοπεί η σύνδεση.

6.2 Η οπτική ίνα σαν μέσο μετάδοσης

Το φως είναι μία μορφή ενέργειας την οποία μπορούμε να μελετάμε σαν μετάδοση κύματος. Η διεύθυνση μετάδοσης της ενέργειας του φωτός, με άλλα λόγια των φωτονίων, είναι πάντα ευθύγραμμη, εφόσον δεν παρεμβάλλονται εμπόδια και αποτελεί μία ακτίνα φωτός. Πολλές ακτίνες συγκροτούν μία δέσμη φωτός. Για τα κύματα του φωτός παρατηρούνται τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης, όταν αυτά προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Η εικόνα 6.1α δείχνει τις τρεις ακτίνες φωτός (προσπίπτουσα, ανακλώμενη και διαθλώμενη). Οι τρεις αυτές ακτίνες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και ισχύουν τα εξής:



Εικόνα 6.1

α) Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίδια με τη γωνία ανάκλασης: $\alpha = \beta$

β) Ο λόγος των συνημίτονων $\sin\alpha$, $\sin\beta$ των γωνιών α ως προς β ισούται με το λόγο των δεικτών διάθλασης των δύο φωτοδιαπερατών μέσων 1 και 2 n_2 προς n_1 . Δηλαδή

$$\sin\alpha/\sin\beta = n_2/n_1 \quad (\text{εξ. 6.1})$$

γ) Ο λόγος των δεικτών διάθλασης των δύο φωτοδιαπερατών μέσων 1 και 2 n_2 προς n_1 ισούται με το λόγο των ταχυτήτων του φωτός στο μέσο 1 και στο μέσο 2 c_1 και c_2 αντίστοιχα. Δηλαδή

$$n_2/n_1 = c_1/c_2. \quad (\text{εξ. 6.2})$$

Συνήθως έχουμε και τα δύο φαινόμενα μαζί. Η προσπίπτουσα δέσμη φωτός, δηλαδή, μερικά διαθλάται και μερικά ανακλάται. Από το νόμο του Snell που

εκφράζεται από την εξίσωση 6.1, μπορούμε να δούμε ότι $n_1 > n_2 \Rightarrow \beta > \alpha$. Αυξάνοντας κατάλληλα την γωνία πρόσπτωσης (α), μπορούμε να πετύχουμε ώστε $\beta = 90^\circ$ το οποίο σημαίνει ότι το διαθλώμενο τμήμα της δέσμης πρέπει να είναι παράλληλο με την διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από την προηγούμενη έχουμε το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης, δηλαδή η φωτεινή δέσμη ανακλάται εξ' ολοκλήρου και δεν υπάρχει διαθλώμενη ακτίνα. Τα παραπάνω φαίνονται στις εικόνες 6.1β, 6.1γ και 6.1δ. Η κρίσιμη γωνία $\alpha_{\text{κρ}}$ η οποία σημειώνεται στην εικόνα 6.1γ βρίσκεται από το νόμο του Snell ότι είναι:

$$\alpha_{\text{κρ}} = \arcsin(n_2/n_1) \quad (\text{εξ.6.3})$$

Η ολική ανάκλαση είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή και αποτελεί τη βασική αρχή πάνω στην οποία η κυματοδότηση ακτινών διαμέσου των οπτικών ινών.

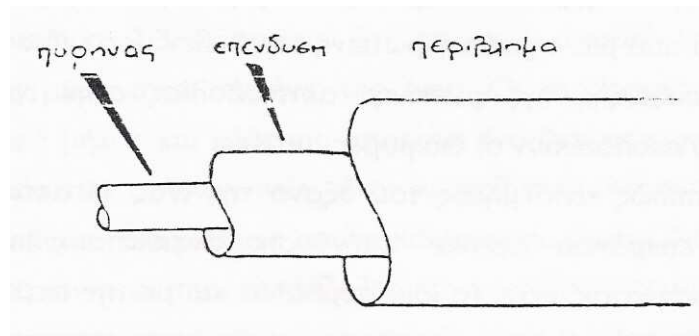
6.2.1 Κυματοδότηση σε οπτική ίνα

Η μικροκυματική τεχνολογία χρησιμοποιεί διάφορα είδη κυματοδηγών για τη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, όπως επίσης ομοαξονικά καλώδια και μικροταινίες. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 300 GHz, τα προβλήματα τα οποία παρουσιάζουν αυτά τα μέσα είναι πολλά με κυριότερο την τεράστια αύξηση των απωλειών, που αυξάνονται με το τετράγωνο της συχνότητας. Η έρευνα πρόσφερε σαν εναλλακτική λύση τους διηλεκτρικούς κυματοδηγούς, κατηγορία που τμήμα της αποτελούν οι οπτικές ίνες.

Μία οπτική ίνα, λοιπόν, είναι ένας διηλεκτρικός κυματοδηγός κυλινδρικής συμμετρίας που ουσιαστικά αποτελείται από δύο περιοχές, τον πυρήνα και την επένδυση, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2. Το εξωτερικό περίβλημα προστατεύει την ίνα από μηχανικές καταπονήσεις και την κάνει εύχρηστη, δίνοντας την όψη απλού καλωδίου.

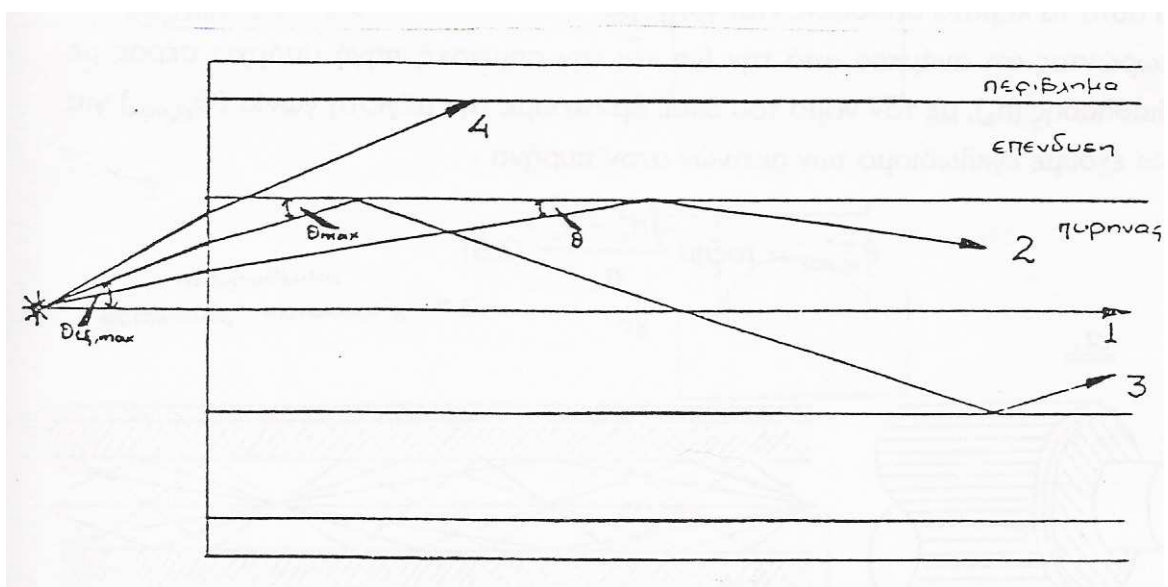
Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα υλικά για την κατασκευή του πυρήνα και της επένδυσης, καθώς και διάφορες τεχνικές. Συνήθως ο πυρήνας της ίνας κατασκευάζεται από πυριτικό γυαλί και επικαλύπτεται από καθαρό πυρίτιο. Τα νέα υλικά τα οποία μελετούνται σήμερα για πυρήνες βασίζονται σε οξειδία του πυριτίου, τα οποία μπορούν να είναι από δύο έως χίλιες φορές πιο φωτοδιαπερατά από το

πυρίτιο. Επίσης διαχέουν το φως λιγότερο, πράγμα το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερη χωρητικότητα.



Εικόνα 6.2: Τα μέρη που απαρτίζουν μία οπτική ίνα.

Για την κατασκευή των οπτικών ινών, παλιότερα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του διπλού χυτηρίου, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται η μέθοδος CVD (Chemical Vapor Deposition), για τις ίνες χαμηλής απόσβεσης. Στην ουσία, η κατασκευή των οπτικών ινών είναι θέμα χημείας. Στις μέρες μας είναι δυνατόν να κατασκευαστούν ίνες με απόσβεση 0.2 dB/Km, από την άλλη μεριά όμως κατασκευάζονται φθηνές ίνες από πολυμερές perspex, με απόσβεση 500-1000 dB/Km, για εφαρμογές μικρών αποστάσεων.



Εικόνα 6.3: Η κυματοδότηση σε μία πολυρυθμική ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης περιγράφεται εύκολα με γεωμετρική οπτική.

Τα υλικά του πυρήνα και της επένδυσης χαρακτηρίζονται από δύο δείκτες διάθλασης n_π και n_ϵ αντίστοιχα. Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ακτινική απόσταση από τον άξονα της ίνας μπορεί να χαρακτηρίσει τη συγκεκριμένη οπτική ίνα. Οι ίνες με απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης χαρακτηρίζονται σαν βηματικού δείκτη διάθλασης, ενώ υπάρχουν και ίνες με βαθμιαία κατανομή του δείκτη διάθλασης, συνήθως παραβολική. Η εικόνα 6.3 δείχνει μία τομή ίνας κατά μήκος του άξονα της. Η ίνα τροφοδοτείται από μία σημειακή φωτεινή πηγή. Δεν μας ενδιαφέρει προς το παρόν, ο τρόπος σύζευξης της φωτεινής ακτινοβολίας στην ίνα. Ας παρατηρήσουμε το δρόμο τον οποίο ακολουθούν οι διάφορες ακτίνες.

Η ακτίνα (1) διαδίδεται απλώς κατά μήκος του άξονα της ίνας. Η ακτίνα (2) προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – επένδυσης, ανακλάται ολικά και εγκλωβίζεται έτσι μέσα στον πυρήνα της ίνας. Το ίδιο συμβαίνει και με την ακτίνα (3). Η γωνία θ για την ακτίνα (2) πρέπει να είναι μικρότερη από την θ_{\max} της ακτίνας (3) η οποία από το νόμο του Snell αποδεικνύεται εύκολα ότι είναι

$$\theta_{\max} = \arcsin(n_\epsilon/n_\pi) \quad (\text{εξ. 6.4})$$

Για την ακτίνα (4) έχουμε $\theta > \theta_{\max}$, οπότε η ακτίνα αυτή εισέρχεται στην περιοχή της επένδυσης. Πρέπει εδώ να επισημανθεί, ότι μπορεί μία τέτοια ακτίνα να διαδοθεί με αλληπάλληλες ανακλάσεις στην περιοχή της επένδυσης (ρυθμοί επένδυσης). Επειδή, όμως, τα υλικά της επένδυσης είναι τέτοια ώστε να έχουν μεγαλύτερη απόσβεση από εκείνα του πυρήνα και επειδή το περίβλημα απορροφά επίσης οπτική ενέργεια αυτά τα κύματα αποσβένονται γρήγορα.

Θεωρώντας ότι ανάμεσα από την ίνα και τη σημειακή πηγή υπάρχει αέρας με δείκτη διάθλασης (n_a), με το νόμο του Snell βρίσκουμε τη μέγιστη γωνία ($\theta_{\text{εξ,max}}$) για την οποία έχουμε εγκλωβισμό των ακτινών στον πυρήνα:

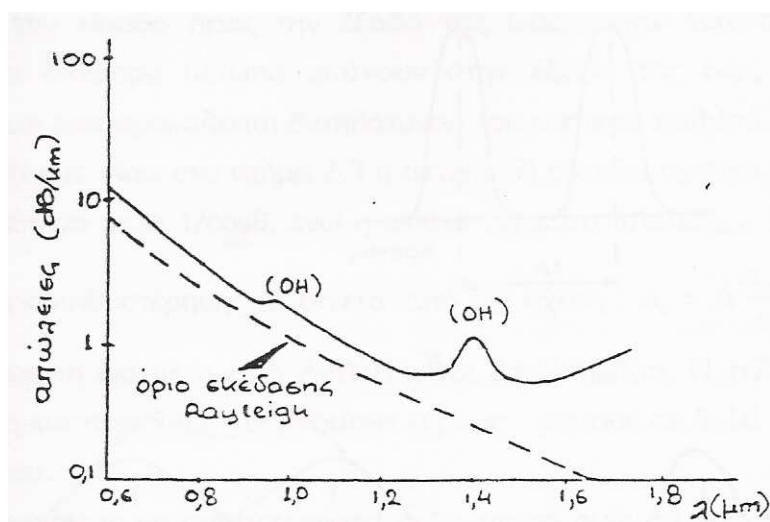
$$\theta_{\max} = \arcsin(\sqrt{n_\pi^2 - n_\epsilon^2})/n_a \quad (\text{Εξ. 6.5})$$

6.2.3 Χαρακτηριστικά των οπτικών ινών

Ας δούμε τώρα μερικά από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες σαν μέσο μετάδοσης πληροφορίας, με φορέα τη φωτεινή ενέργεια. Η αναφορά στα χαρακτηριστικά αυτά γίνεται λιγότερο ή περισσότερο λεπτομερώς, ανάλογα με το πόσο σημαντικό είναι το καθένα.

α) Εξασθένιση

Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις απώλειες τις οποίες εισάγει μία οπτική ίνα, αφού μόνο έτσι μπορούμε να καθορίσουμε τη μέγιστη απόσταση μίας ζεύξης χωρίς χρήση επαναλήπτη. Η εξασθένιση οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση της φωτεινής ενέργειας λόγω μετατροπής της σε θερμότητα λόγω σκέδασης. Έχουν κατασκευαστεί ίνες των οποίων η εξασθένιση που παρουσιάζουν πλησιάζει το όριο σκέδασης Rayleigh., που οφείλεται στις μοριακές ανομοιογένειες του γυαλιού. Στην εικόνα 6.4 φαίνεται η απόσβεση που παρουσιάζει μία οπτική ίνα σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Στο μήκος κύματος περίπου $0.85\mu\text{m}$, όπου και εκπέμπουν φωτοδιόδοι AlGaAs, το όριο Rayleigh είναι περίπου 2dB/Km . Αυτό μειώνεται για μήκος κύματος $1.55\mu\text{m}$ στα 0.15 dB/km .



Εικόνα 6.4: Καμπύλη απόσβεσης τυπικής εμπορικής ίνας

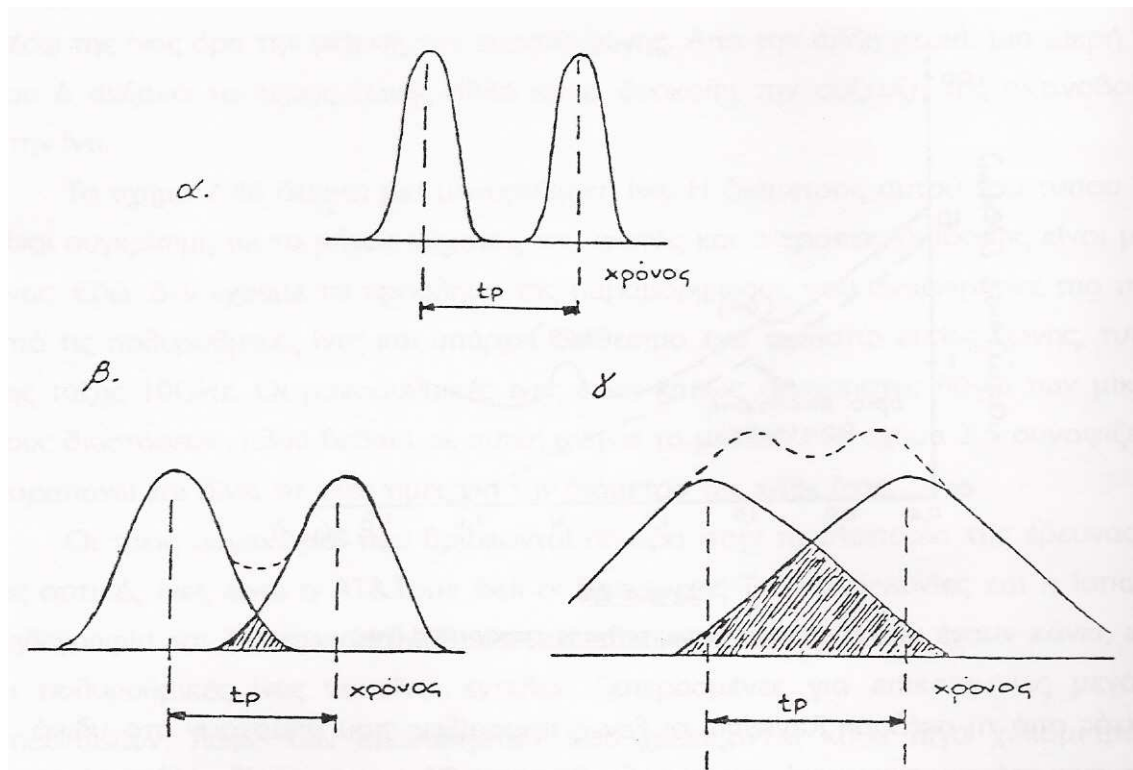
Εκτός από τη σκέδαση Rayleigh, οι ξένες προσμίξεις που υπάρχουν στο υλικό της ίνας, συμμετέχουν στο φαινόμενο της εξασθένησης. Τέτοιες προσμίξεις είναι ιόντα Cr_3^+ , Cu_2^+ , Fe_2^+ και κυρίως OH^- . Το υδροξύλιο, OH^- , δημιουργεί έντονες ζώνες απορρόφησης στα 0.95 και 1.4 μm και για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί προχωρημένες μέθοδοι και τεχνικές ξήρανσης.

Ακόμη ένας παράγοντας υπεύθυνος για την εξασθένηση του οπτικού σήματος είναι οι αναπόφευκτες κάμψεις του οπτικού καλωδίου που εμφανίζονται σε μία πρακτική ζεύξη. Το φαινόμενο γίνεται ιδιαίτερα αισθητό όταν η ακτίνα κάμψης είναι μικρότερη από 3 εκατοστά. Είναι δε σημαντικότερο στα μεγάλα μήκη κύματος.

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε μερικές τυπικές τιμές απόσβεσης των ανταγωνιστών της οπτικής ίνας. Έτσι, ένα ζευγάρι στριμμένων συρμάτων 0.65mm παρουσιάζει απόσβεση 15 – 20 dB/Km σε συχνότητα 1 MHz, το ομοαξονικό καλώδιο 0.7/2.9 mm 28dB/Km στα 10MHz, ο ορθογωνικός μεταλλικός κυματοδηγός 180dB/Km στα 9 GHz. Βέβαια δεν αναφέραμε το διατιθέμενο εύρος ζώνης στο οποίο και πάλι οι οπτικές ίνες υπερτερούν. Ας δούμε αναλυτικά.

β) Εύρος ζώνης και διασπορά

Το πληροφοριακό εύρος ζώνης είναι το μέγεθος που ανέκαθεν μας ενδιαφέρει όταν μελετάμε ένα συγκεκριμένο τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Τα υπάρχοντα συστήματα, γενικά υστερούν σε τούτο το σημείο, προσφέροντας μάλλον ένα μικρό εύρος ζώνης. Το γεγονός αυτό έχει συμβάλλει στην καθιέρωση ενός τρόπου σκέψης στον τηλεπικοινωνιακό μηχανικό. Οι τεχνικές της πολύπλεξης και της κωδικοποίησης είναι προσπάθειες για να αξιοποιηθεί στο έπακρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι οπτικές ίνες προσφέρουν ένα τεράστιο εύρος της τάξης των 10GHz, τουλάχιστον εκατό φορές μεγαλύτερο από εκείνο των ομοαξονικών καλωδίων και μεταλλικών κυματοδηγών.



Εικόνα 6.5: Διαπλάτωση παλμών λόγω περιορισμένου εύρους ζώνης

Η εικόνα 6.5 μας βοηθάει στην κατανόηση του εύρους ζώνης. Αν στην είσοδο της οπτικής ίνας εισέρχονται δύο παλμοί με χρονική απόσταση μεταξύ τους t_p , το ιδανικό θα ήταν, βέβαια, στην έξοδο να τους λάβουμε έτσι χωρίς καμία διαπλάτωση. Αυτό θα απαιτούσε ένα άπειρο εύρος ζώνης. Εξ' αιτίας όμως, του πεπερασμένου εύρους ζώνης της ίνας και γενικά των γνωστών συστημάτων, οι παλμοί διαπλάτνονται και στην έξοδο έχουμε ένα περισσότερο ή λιγότερο παραμορφωμένο σήμα.

Η εικόνα 6.5β μας δείχνει τη χειρότερη περίπτωση που είναι ανεκτό να έχουμε στην έξοδο. Οι παλμοί έχουν αρχίσει να επικαλύπτονται, αλλά μπορούμε ακόμα να τους ξεχωρίσουμε. Αν η επικάλυψη γίνει όπως η εικόνα 6.5γ το λαμβανόμενο σήμα είναι άχρηστο. Είναι προφανές ότι δεν μπορούμε να παραλείψουμε και το μήκος της οπτικής ίνας. Γενικά ένα χρησιμοποιούμενο μέγεθος είναι το γινόμενο εύρος – μήκος εκφραζόμενο σε MHz/Km ή GHz/Km.

Για τη συνέχεια χρησιμοποιούμε σαν σημείο αναφοράς την πολυρυθμική ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης, για λόγους που θα αναφέρουμε παρακάτω. Σε μία

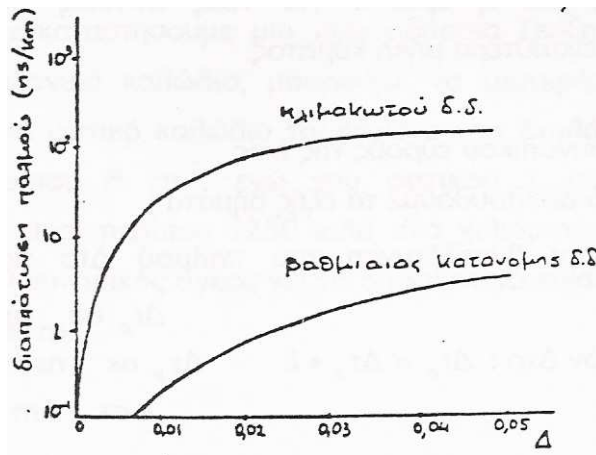
τέτοια ίνα το διατιθέμενο εύρος ζώνης καθορίζεται από δύο παράγοντες – μηχανισμούς, τη διασπορά ρυθμών και τη διασπορά υλικού. Ο πρώτος από αυτούς που αναφέρεται στις διαφορετικές διαδρομές των φωτεινών ακτινών από την είσοδο στην έξοδο της ίνας. Λόγω των πολλών δυνατών διαδρομών, τα διάφορα μέτωπα φτάνουν στην έξοδο της ίνας με διαφορετική καθυστέρηση και έτσι προκαλείται διαπλάτυνση του οπτικού παλμού.

Στην εικόνα 6.3 η ακτίνα (2) διανύει σχετικά με την ακτίνα (1) δρόμο μεγαλύτερο κατά $1/\cos\theta$, ενώ η ακτίνα (3) κατά $1/\cos\theta_{\max}$. Προσεγγιστικά, η μέγιστη διαφορά καθυστέρησης $\Delta\tau$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau = \Delta(n_{\pi}/c) \quad (\text{Εξ. 6.6})$$

Για μία τυπική ίνα με $n_{\pi}=1.5$ $\Delta=0.01$ είναι $\Delta\tau=50\text{nsec/Km}$. Η τελευταία τιμή είναι σχετικά μεγάλη και περιορίζει το γινόμενο εύρους – μήκους σε 5 – 10MHz/Km για ίνες αυτού του τύπου.

Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστεί η διασπορά ρυθμού, αναπτύχθηκαν ίνες με βαθμιαία κατανομή του δείκτη διάθλασης με την ακτινική απόσταση. Η κατανομή αυτή είναι συνήθως παραβολική. Μία ακτίνα που διαδίδεται από δρόμο τέτοιο ώστε να διανύει μεγαλύτερη απόσταση (ρυθμός υψηλής τάξης), επιτυγχάνουμε έτσι ώστε να βρίσκεται σε περιοχή που ο δείκτης διάθλασης είναι μικρότερος, άρα η ταχύτητα διάδοσης μεγαλύτερη. Σαν αποτέλεσμα, η διαφορά της καθυστέρησης είναι σημαντικά μικρότερη από πριν και μπορούμε να έχουμε βελτίωση κατά δύο ή και τρεις τάξεις μεγέθους, φτάνοντας σε ένα γινόμενο εύρους μήκους 1 – 5 GHz/Km. Στην εικόνα 6.6 φαίνεται καλύτερα η διαπλάτυνση των παλμών η οποία δίνεται σε συνάρτηση με το Δ .



Σχήμα 6.6

Η διασπορά ρυθμών μπορεί να μειωθεί αν μικραίνοντας τη διάμετρο της ίνας περιορίσουμε τον αριθμό των ρυθμών διάδοσης. Μία ίνα διαμέτρου 50μm μπορεί να μεταδώσει χιλιάδες ρυθμούς. Στενεύοντας τον πυρήνα μπορούμε να πάρουμε ένα πραγματικό μονορυθμικό κυματοδηγό με διάμετρο πυρήνα 5 –10 μm. Σε μία πραγματική μονορυθμική ίνα δεν υπάρχει διασπορά ρυθμών.

γ) Μηχανική αντοχή, κόστος, όγκος και βάρος.

Οι διεθνείς προδιαγραφές απαιτούν, σήμερα, διάρκεια ζωής 20 – 30 χρόνια χωρίς ανάγκη αντικατάστασης και χωρίς επιπτώσεις στις οπτικές ιδιότητες της ίνας. Επίσης απαιτούν ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας 4mm, ελάχιστο μέτρο ελαστικότητας 8.108 Nt/m² και εφαρμογές τάσης προστασίας 3-4 φορές μεγαλύτερης από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας κατά τη διάρκεια του τραβήγματος της.

Το κόστος των οπτικών ινών είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο των ομοαξονικών καλωδίων. Η μείωση στην τιμή τους προβλέπεται να μειώνεται με το πέρασμα των χρόνων καθώς θα είναι όλο και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες. Όσον αφορά την ευκολία χρήσης των οπτικών καλωδίων πράγμα το οποίο είναι άμεσα συνυφασμένο με τον όγκο και το βάρος τους, συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι υπερτερούν κατά πολύ σε σχέση με τα ομοαξονικά καλώδια και γενικά τα χάλκινα καλώδια. Οι οπτικές ίνες είναι σαφώς μικρότερου πάχους και βάρους, πράγμα που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για μερικές ειδικές εφαρμογές όπως για παράδειγμα στην

εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων. Με το παρακάτω παράδειγμα αυτό θα φανεί καλύτερα. Έστω ότι θέλουμε να εγκαταστήσουμε μία υποθαλάσσια ζεύξη μήκους 1000 Km. Χρησιμοποιώντας ομοαξονικό καλώδιο, μπορούμε να μεταφέρουμε 300 κανάλια επικοινωνίας, ενώ με ένα οπτικό καλώδιο θα χρειαζόνταν τουλάχιστο τα διπλάσια. Η διατομή του ομοαξονικού καλωδίου είναι περίπου 8cm^2 ενώ του οπτικού 2cm^2 . Το βάρος του ομοαξονικού καλωδίου είναι περίπου 1250 Kg ανά χιλιόμετρο ενώ του οπτικού λιγότερο από το μισό. Ο συνολικός όγκος για το ομοαξονικό είναι 800m^3 ενώ για το οπτικό καλώδιο είναι 200m^3

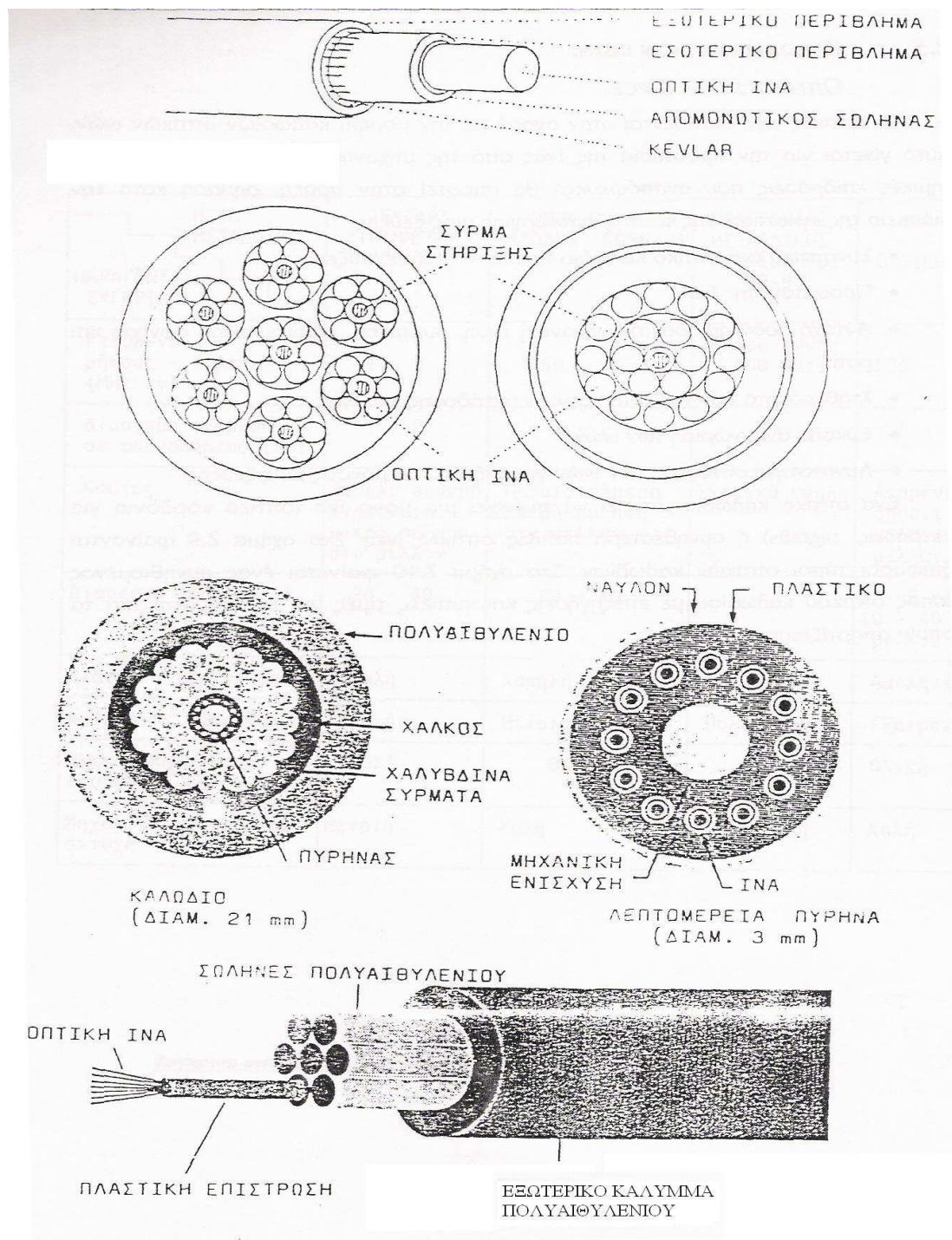
δ) Ισχύς

Τα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα γενικά λειτουργούν με χαμηλές ισχύεις επειδή και οι συνηθισμένες οπτικές πηγές είναι χαμηλής ισχύος, αλλά κυρίως γιατί είναι δύσκολο να συζευχθεί και να κυματοδηγηθεί στην ίνα οπτική ισχύς μεγαλύτερη από 1mW. Αυτό δεν αποτελεί κατ' ανάγκη μεγάλο μειονέκτημα, λαμβανομένης της μικρής απόσβεσης την οποία παρουσιάζουν τα οπτικά καλώδια. Πάντως οι επιτρεπόμενες απώλειες ισχύος ανάμεσα σε πομπό και δέκτη – επαναλήπτη είναι της τάξης των 40 dB για αποδεκτές τιμές πιθανότητας λάθους ψηφίου ή λόγου σήματος προς θορύβου (SNR).

ε) Άλλα χαρακτηριστικά

Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν και κάποια άλλα χαρακτηριστικά τα οποία τις κάνουν ιδανικές για μερικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα:

- Είναι τελείως αναισθητες στον ηλεκτρικό θόρυβο του περιβάλλοντος.
- Δεν παράγουν εσωτερικό θόρυβο.
- Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Δεν παρουσιάζουν κίνδυνο βραχυκυκλώματος και σπινθηρισμών άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χώρους όπου υπάρχουν τέτοιοι κίνδυνοι.
- Αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και γενικά σε αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος.
- Παρουσιάζουν ολική ηλεκτρική μόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου.
- Δεν μπορούν να υποκλαπούν τα μηνύματα.

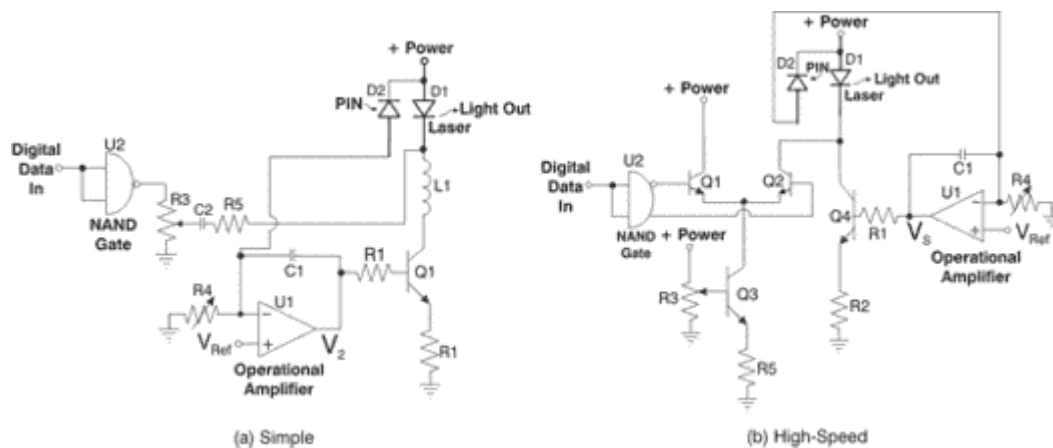


Σχήμα 6.7: Καλώδια οπτικών ινών

(Σημειώσεις εργαστηρίου Συστημάτων Οπτικών Επικοινωνιών. Λιοδάκης Γεώργιος. 2002. σελ.19)

6.2.4 Ψηφιακή μετάδοση μέσω laser

Η οδήγηση laser για ψηφιακή μετάδοση δεδομένων είναι μία ακόμη βελτίωση. Τα παρακάτω δύο κυκλώματα οδηγούν laser για ψηφιακές εφαρμογές. Ωστόσο, υπάρχει μία ευρεία ποικιλία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων λόγω των υψηλών απαιτήσεων για ψηφιακούς οδηγούς laser. Οι διακριτές διαμορφώσεις του κυκλώματος δείχνουν τις περισσότερο κοινώς χρησιμοποιούμενες αρχές σε εμπορικά ολοκληρωμένα κυκλώματα οδηγών laser.



Εικόνα 6.8. Ψηφιακά κυκλώματα οδήγησης laser

Το σχήμα 6.8a δείχνει ένα απλό κύκλωμα το οποίο αξιοποιείται σε συχνότητες μερικών εκατοντάδων MHz. Το «Digital data in», δηλαδή η ψηφιακή είσοδος δεδομένων ακολουθεί ένα σχετικά απλό δρόμο. Ο πυκνωτής C2, το πηνίο L1 και ο πυκνωτής C1 λειτουργούν για να ορίσουν τη χαμηλή συχνότητα, και συνεπώς να περιορίσουν τις λειτουργίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Κανονικά ένα κύκλωμα οδήγησης laser θα πρέπει να χειρίζεται συχνότητες τόσο χαμηλές όσο το ένα εκατοστό του ρυθμού δεδομένων της διάταξης. Το ρεύμα το οποίο ρέει από το τρανζίστορ Q3 καθορίζει το ποσό του ρεύματος διαμόρφωσης το οποίο αλλάζει θέση

στο laser σε αντίδραση με τα ψηφία '1' και '0'. Το ρεύμα διαμόρφωσης από το συλλέκτη του τρανζίστορ Q3 ταλαντεύεται μεταξύ του + της γραμμής του δικτύου (από το τρανζίστορ Q1) και το laser D1 (από το τρανζίστορ Q2) όσο οι έξοδοι του ενισχυτή U2 αλλάζουν μπροστά και πίσω. Για να αποφύγουμε να έχει το κύκλωμα αργή απόκριση, το κύκλωμα που χρησιμοποιεί το ψηφιακό laser πρέπει να αποφύγει να έρθει στον κόρο. Για το λόγο αυτό ένας οδηγός laser σχεδιασμένος να χειρίζεται έναν ρυθμό δεδομένων των 622Mb/s θα πρέπει επίσης να χειρίζεται συχνότητες τόσο χαμηλές όσο τα 6.22MHz. Το περισσότερο πολύπλοκο κύκλωμα είναι αυτό του σχήματος 6.8b, το οποίο επιτρέπει ταχύτητες της τάξης των Gb (10^9 Byte). (www.fiberoptics.info).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΎΕΝΤΥΠΗ:

Α.Α. Σεραφετινίδης.(1989). Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική, Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα.

Λιοδάκης Γεώργιος.(2003).Οπτοηλεκτρονική & Συστήματα Οπτικών Επικοινωνιών. Σημειώσεις Εργαστηρίου Επικοινωνιακών Δικτύων και Εφαρμογών, Χανιά.

Λιοδάκης Γεώργιος.(2002).Οπτικές Επικοινωνίες, Σημειώσεις Εργαστηρίου. Χανιά

Λιοδάκης Γεώργιος.(2002).Συστήματα Οπτικών Επικοινωνιών. Σημειώσεις Θεωρίας. Χανιά

Σιδεράς Ευστάθιος.(1999). Σημειώσεις Οπτοηλεκτρονικής και Laser.ΤΕΙ Ηρακλείου, Παράρτημα Χανίων, Χανιά.

Jaspit Singh.(1995). Οπτοηλεκτρονική, Εκδόσεις Α. Τζίολα Ε, Θεσσαλονίκη.

Ο.Svelto.(1986). Αρχές των Lasers, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Shiro Ryu.(1995). Coherent Lightwave Communication Systems, Artech House, Boston, London.

Silvello Betti.(1995), Coherent Optical Communication Systems. Wiley Series In Microwave And Optical Engineering. Kai Chang, Series Editor.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ:

<http://accept.la.asu.edu/courses/phs110/expmts/exp13a.html>

www.barc.ernet.in/webpages/technologies/laser_digi.html

www.fiber-optics.info

www.kpsec.freeuk.com/components/led.htm

www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/index.html)

www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/photonic_detectors.htm#Photodiodes

www.photonics.com/spectra/tech/XQ/ASP/techid.1570/QX/read.htm

www.tkk.fi/Misc/Electronics/circuits/laserlink.html