

ΤΕΙ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ, ΔΙΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2012**

Μαίρη Κωνσταντάκη

Πρόλογος

Ο σκοπός του εργαστηρίου **Οπτικών Ινών, Δικτύων Οπτικών Ινών** είναι να δώσει στους σπουδαστές πρακτική εμπειρία στο σχεδιασμό, στη χρήση και στην αξιολόγηση τυπικών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών.

Στα πλαίσια του εργαστηρίου η εξοικείωση με τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών γίνεται με δύο τρόπους. Αρχικά με πειράματα, στα οποία οι σπουδαστές θα έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν απλές οπτικές ζεύξεις και να μελετήσουν τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων. Η επιτυχή εκπόνηση των πειραμάτων απαιτεί σχετική εμπειρία στην λειτουργία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Στο δεύτερο μέρος του εργαστηρίου οι σπουδαστές θα χρησιμοποιήσουν ένα πρόγραμμα εξομίωσης στον υπολογιστή (LinkSIM) όπου θα έχουν τη δυνατότητα να σχεδιάσουν και να μελετήσουν πιο περίπλοκα συστήματα οπτικών επικοινωνιών.

Στην αρχή κάθε εργαστηριακής άσκησης δίδονται περιληπτικά τα κυριότερα θέματα για την επεξήγηση του πειράματος. Σε καμία περίπτωση η σύντομη αυτή θεωρία δεν μπορεί να θεωρηθεί αρκετή για την πλήρη κατανόηση του θέματος και οι σπουδαστές πρέπει να ανατρέχουν σε επιπλέον βιβλιογραφία.

Μετά την επιτυχή συμπλήρωση κάθε εργαστηριακής άσκησης οι σπουδαστές παραδίδουν εργασία με τα αποτελέσματα της άσκησης και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Μ. Κωνσταντάκη
Ηράκλειο, Σεπτέμβριος 2012

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περιεχόμενα	3
Άσκηση 1	4
Εξοικείωση με τα όργανα του εργαστηρίου	4
Άσκηση 2	11
Οπτικές πηγές LED και οπτικοί ανιχνευτές PIN	11
Άσκηση 3	17
Οπτική ίνα	17
Άσκηση 4	23
Αναλογική και ψηφιακή μετάδοση	23
Άσκηση 5	27
Διακλαδωτές -Συζευκτές (Couplers)	27
Άσκηση 6	30
Εξοικείωση με το πρόγραμμα προσομοίωσης LinkSIM	30
Άσκηση 7	38
Επίδραση των χαρακτηριστικών της ίνας στην απόδοση της ζεύξης	38
Άσκηση 8	45
Ρυθμός μετάδοσης σήματος ζεύξης	45
Άσκηση 9	50
Οπτικοί ενισχυτές	50
Άσκηση 10	53
Πολυπλεξία μήκους κύματος	53
Άσκηση 11	58
Εξωτερική διαμόρφωση οπτικής πηγής	58
Παράρτημα I	61
Ηλεκτρονικά κυκλώματα πομπού –δεκτή	61
Παράρτημα II	64
Οδηγίες για το περιεχόμενο των αναφορών	64
Παράρτημα III	66
Αντιστάσεις	66
Παράρτημα IV	68
Βιβλιογραφία	68

Άσκηση 1

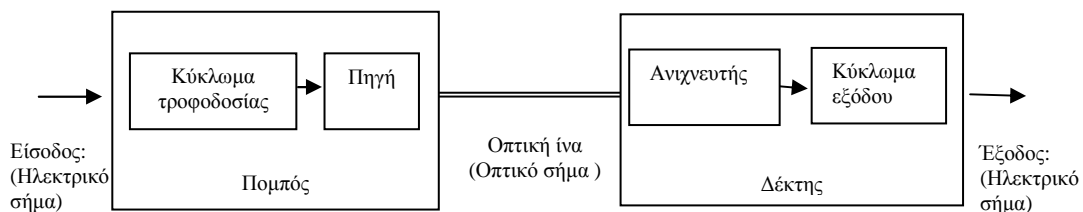
Εξοικείωση με τα όργανα του εργαστηρίου

Εισαγωγή

Ένα σύστημα επικοινωνιών μεταδίδει πληροφορία από ένα σημείο σε κάποιο άλλο. Το ζητούμενο είναι το σύστημα αυτό, να μπορεί να μεταφέρει με ακρίβεια μεγάλο πλήθος πληροφορίας σε μεγάλη απόσταση.

Η πληροφορία συχνά μεταφέρεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό φέρον κύμα του οποίου η συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται από μερικά MHz μέχρι αρκετές εκατοντάδες THz. Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες φέροντος (~ 100 THz) στην περιοχή του ορατού ή του κοντινού υπερύθρου. Επίσης, στις οπτικές επικοινωνίες το μέσο μετάδοσης της πληροφορίας είναι η οπτική ίνα, ένα ειδικά κατασκευασμένο καλώδιο από γυαλί ή πλαστικό μέσα στο οποίο μπορεί να μεταδίδεται το φως.

Ένα βασικό σύστημα επικοινωνιών όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 έχει τρία βασικά μέρη: τον πομπό, το δέκτη και το μέσο μετάδοσης: την οπτική ίνα.



Σχήμα 1.1 Βασικό σύστημα οπτικών επικοινωνιών

Πομπός

Ο πομπός μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα (την πληροφορία που θα μεταδοθεί) σε οπτικό σήμα. Αποτελείται από ένα κύκλωμα τροφοδοσίας και μία οπτική πηγή (συνήθως LED ή Laser). Συνήθως η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό γίνεται στην πηγή (απευθείας διαμόρφωση) ή με χρήση στοιχείου που μεταβάλλει την οπτική ισχύ που παρέχει μια οπτική πηγή συνεχούς λειτουργίας (εξωτερική διαμόρφωση). Για απευθείας διαμόρφωση, το κύκλωμα τροφοδοσίας μεταβάλλει το ρεύμα τροφοδοσίας της οπτικής πηγής συναρτήσει του σήματος προς μετάδοση.

Οπτική ίνα

Η οπτική ίνα μεταφέρει το κωδικοποιημένο με την πληροφορία οπτικό κύμα από τον πομπό στο δέκτη. Είναι δηλαδή το μέσο μετάδοσης της πληροφορίας. Υπάρχουν πολλά είδη καλωδίων οπτικών ινών που διαφέρουν ανάλογα με το χώρο στον οποίο γίνεται η μετάδοση καθώς και με το ρυθμό της πληροφορίας που

μεταδίδεται. Κυρίως αποτελούνται από μία ή περισσότερες οπτικές ίνες και προστατευτικά μέρη.

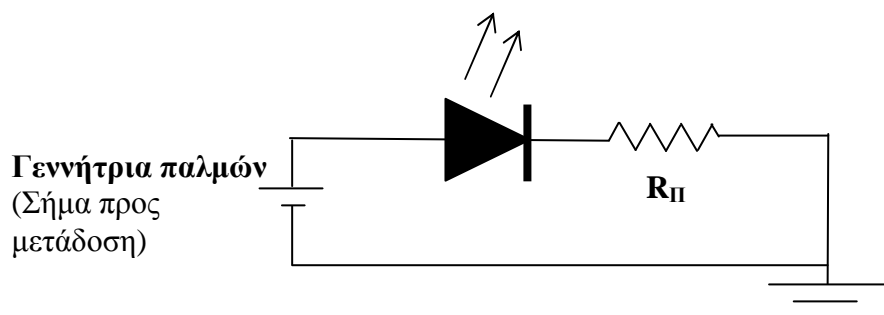
Δέκτης Ο δέκτης ανιχνεύει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό. Ιδανικά, το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο είναι ίδιο με αυτό στην είσοδο του πομπού. Τα δύο βασικά μέρη του δέκτη είναι ο ανιχνευτής που ανιχνεύει το φως και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα και το κύκλωμα εξόδου το οποίο ενισχύει και γενικά αναμορφώνει το σήμα.

Περιγραφή του εξοπλισμού και των οργάνων που χρησιμοποιούνται στα πειράματα

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφεί περιληπτικά ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα. Σε κάθε περίπτωση για πληρέστατη περιγραφή των χαρακτηριστικών του κάθε εξαρτήματος ο σπουδαστής πρέπει να ανατρέχει στα εγχειρίδια τεχνικών χαρακτηριστικών των οργάνων που δίδονται από τον κατασκευαστή και υπάρχουν στο χώρο του εργαστηρίου.

Ο πομπός

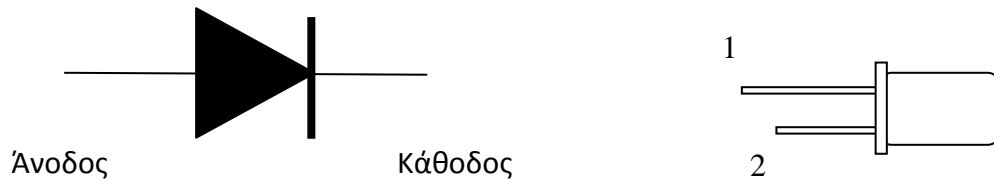
Ο πομπός που θα χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο περιλαμβάνει την οπτική πηγή και το κύκλωμα ορθής πόλωσης και τροφοδοσίας που φαίνεται στο σχήμα 1.2. **(Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του πομπού αναλύεται στο παράρτημα Ι)** Οι οπτικές πηγές που θα χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο είναι τύπου LED (Light –Emitting Diode, Δίοδος εκπομπής φωτός) ενώ το κύκλωμα τροφοδοσίας είναι το απλούστερο δυνατό: μια γεννήτρια παλμών που δίνει την απαιτούμενη τάση ορθής πόλωσης και μια αντίσταση R_{Π} συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο που καθορίζει το ρεύμα τροφοδοσίας της διόδου ώστε να εξασφαλισθεί η λειτουργία της διόδου στα επιτρεπτά όρια ρεύματος. Σε όλα τα πειράματα η έξοδος της γεννήτριας παλμών αντιπροσωπεύει το σήμα προς μετάδοση.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα του κυκλώματος του πομπού που χρησιμοποιείται στα πειράματα

Ως πηγές οπτικού φωτός θα χρησιμοποιηθούν δίοδοι LED λόγω του χαμηλού κόστους σε σύγκριση με τις πηγές LASER. Ηλεκτρικά, η LED έχει περίπου τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά μίας συνηθισμένης διόδου. Διαφέρει μόνο σχετικά με το

φως. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 ο συμβολισμός της LED είναι ίδιος με αυτός μιας συνηθισμένης διόδου. Στο ίδιο σχήμα επίσης μπορείτε να δείτε πως είναι οπτικά μία LED. Αποτελείται από το κύριο μέρος από το οποίο εκπέμπεται το φως και δύο ακροδέκτες 1, 2 διαφορετικού μήκους. Η αντιστοιχία ανόδου –καθόδου με τους ακροδέκτες 1,2 μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή.



Σχήμα 1.3. Συμβολισμός και εικόνα LED

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων θα σας δοθεί η δυνατότητα να χρησιμοποιήσετε διαφορετικές LED που διαφέρουν ως προς την φασματική περιοχή εκπομπής, το χρώμα δηλαδή του φωτός που εκπέμπουν. Στον πίνακα I δίδονται συνοπτικά μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πηγών LED που θα χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο (Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορείτε να συμβουλευτείτε τα εγχειρίδια τεχνικών χαρακτηριστικών που δίδονται από τον κατασκευαστή και υπάρχουν στο χώρο του εργαστηρίου).

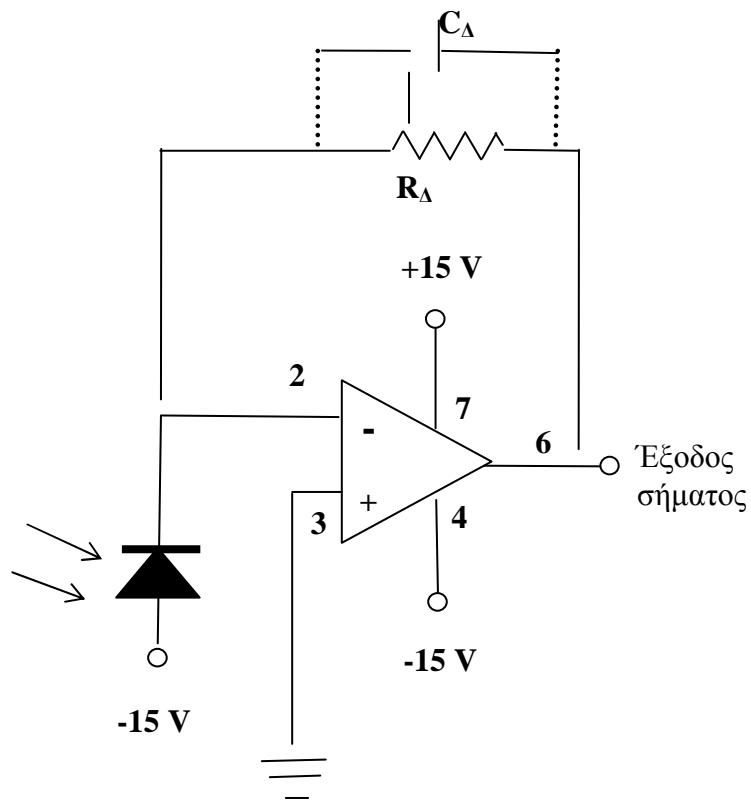
Χρώμα συσκευασίας	Κόκκινο	Πράσινο	Μωβ
Κωδικός	SFH 750	L02R4700H1	SFH 485 P
Χρώμα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας	Κόκκινο	Πράσινο	(Αόρατο στο μάτι)
Μέγιστο μήκος κύματος εκπομπής	660 nm	567 nm	880 nm
Φασματική περιοχή εκπομπής	590-750 nm		775- 950 nm
Τάση ορθής πόλωσης	1.6 V	2.1 V	1.5 V
Μέγιστο ρεύμα τροφοδοσίας	45 mA	25 Ma	100 mA
Σύνδεση με ίνα	Απευθείας	Απαιτείται επιπλέον στήριξη	Απαιτείται επιπλέον στήριξη

Πίνακας I. Τεχνικά χαρακτηριστικά των πηγών LED που θα χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο

Ο δέκτης

Ο δέκτης που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα περιλαμβάνει μια φωτοδίοδο pin (Positive-Intrinsic-Negative), το κύκλωμα ανάστροφης πόλωσης και ένα ενισχυτή

διαντίστασης όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. (Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του δέκτη αναλύεται στο παράρτημα Ι) Η φωτοδίοδος έχει το ίδιο συμβολισμό και όψη με τη LED (σχήμα 1.2)



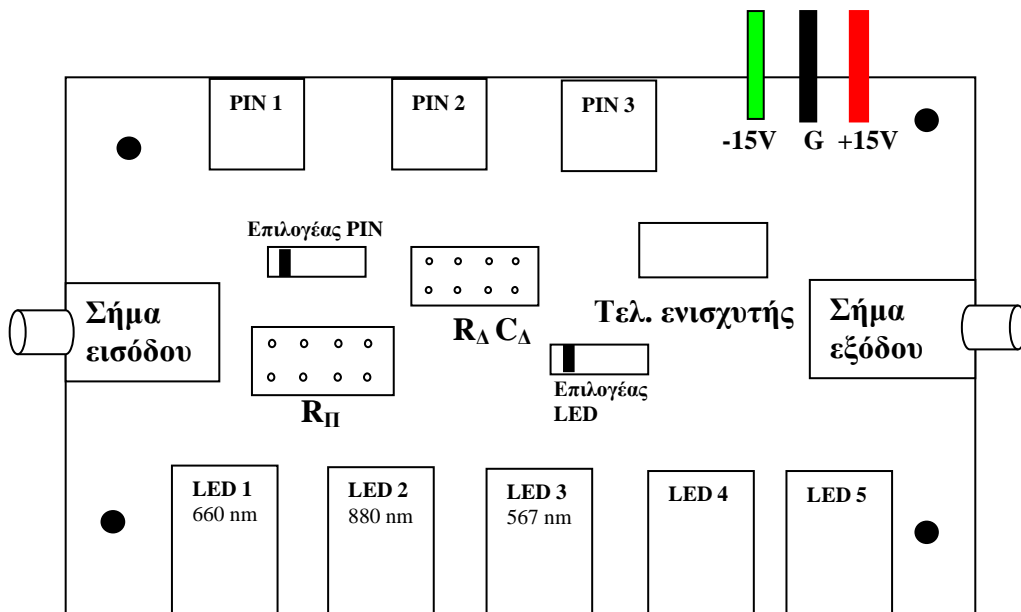
Σχήμα 1.4 Διάγραμμα του κυκλώματος του δέκτη που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα (Ο πυκνωτής θα συνδεθεί μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις)

Στην επιλογή ενός φωτοανιχνευτή σημαντικό ρόλο παίζει η συμβατότητα του μήκους κύματος ευαισθησίας του ανιχνευτή με αυτό που εκπέμπεται από τον πομπό. Συνήθως οι φωτοανιχνευτές συνοδεύονται από ένα διάγραμμα όπου φαίνεται η φασματική απόκριση της συσκευής, δηλαδή η περιοχή μηκών κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που μπορεί να ανιχνεύσει. Στα πλαίσια των πειραμάτων θα χρησιμοποιήσουμε ανιχνευτή (SFH 250) συμβατό και με τις τρεις πηγές LED που περιγράφονται στον πίνακα Ι.

Πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων πομπού –δέκτη.

Για την εκπόνηση των επόμενων εργαστηρίων θα χρησιμοποιηθεί μία πλακέτα με τυπωμένα τα κυκλώματα του πομπού και του δέκτη της οποίας η πάνω όψη δίδεται γραφικά στο σχήμα 1.5.

Οι σπουδαστές ακολουθώντας τις οδηγίες των εργαστηριακών ασκήσεων συνδέουν τα στοιχεία στο κύκλωμα του πομπού (R_{Π}) και του δέκτη (R_{Δ} , C_{Δ}) και επιλέγουν την κατάλληλη πηγή LED και ανιχνευτή PIN.



Σχήμα 1.5 Πάνω όψη τυπωμένης πλακέτας κυκλωμάτων πομπού και δέκτη.

Οπτική ίνα

Η οπτική ίνα μεταφέρει την οπτική ακτινοβολία από την πηγή στον ανιχνευτή. Στα πειράματα για την μετάδοση του οπτικού σήματος θα χρησιμοποιηθούν πλαστικές οπτικές ίνες. Οι πλαστικές οπτικές ίνες είναι πολύ πιο εύχρηστες από τις οπτικές ίνες γυαλιού και επιτρέπουν την κατασκευή ζεύξεων χαμηλού κόστους. Η σχετικά μεγάλη διάμετρος πυρήνα που παρουσιάζουν, διευκολύνει την ευθυγράμμιση της ίνας με την πηγή χωρίς την χρήση ακριβών οργάνων ευθυγράμμισης. Ένα αρνητικό χαρακτηριστικό των πλαστικών ινών σε σύγκριση με της γυάλινες είναι οι αυξημένες απώλειες για αυτό η χρήση τους περιορίζεται σε ζεύξεις μικρών αποστάσεων.

Μετρητικό οπτικής ισχύος

Τα ανιχνευτικά όργανα που θα χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο είναι ψηφιακό πολύμετρο, παλμογράφος και μετρητικό οπτικής ισχύος. Στα δύο πρώτα δεν θα αναφερθούμε μια και η ικανότητα χρήσης τους είναι προϋπόθεση αυτού του εργαστηρίου. Το μετρητικό οπτικής ισχύος είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για να μετράει απευθείας την ισχύ του φωτός. Όπως και ο φωτοανιχνευτής έτσι και το μετρητικό οπτικής ισχύος έχει μια περιοχή φασματικής απόκρισης συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιούμε το κατάλληλο ανάλογα με την περιοχή εκπομπής της πηγής.

Το μετρητικό οπτικής ισχύος που θα χρησιμοποιήσουμε στο εργαστήριο έχει ρυθμιστεί ώστε να μετράει σε συγκεκριμένα μήκη κύματος (πχ 820 nm, 850 nm, 1300 nm και 1500 nm κλπ). Το κατάλληλο μήκος κύματος επιλέγεται με τη χρήση ενός διακόπτη. Η ισχύς δίδεται σε dBm και η περιοχή ισχύος που μπορεί να μετρηθεί είναι -60 dBm έως +5 dBm.

Το dBm χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ισχύ σε μονάδα συμβατή με την ευρέως χρησιμοποιούμενη στις τηλεπικοινωνίες μονάδα decibel (dB). Το dB δεν είναι απόλυτη μονάδα αλλά αναφέρεται πάντα σ' ένα λόγο δύο ομοειδών ποσοτήτων. Το dB είναι η λογαριθμική έκφραση οποιουδήποτε λόγου Q και ορίζεται ως

$$Q(\text{σε dB}) = 10 \log_{10} Q$$

Το dBm προκύπτει όταν θεωρήσουμε ότι η σύγκριση γίνεται ως προς μια σταθερή τιμή ισχύος ίση με 1mW.

$$\text{Ισχύς (σε dBm)} = 10 \log_{10} \frac{\text{ισχύς}}{1\text{mW}}$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να μετατρέπουμε μεταξύ Watt και dBm. Για παράδειγμα, ισχύς 100 mW ισούται με 20dBm ενώ ισχύς μικρότερη από 1mW εκφράζεται ως αρνητικός αριθμός πχ 1μW αντιστοιχεί σε -30dBm.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Περιγράψτε τα χαρακτηριστικά και το πεδίο εφαρμογών των πλαστικών οπτικών ινών σε σχέση με τις γυάλινες οπτικές ίνες.
2. Σχετικά με τη μονάδα dBm απαντήστε στις παρακάτω ερωτήσεις
 - α) Τι μέγεθος εκφράζεται σε dBm;
 - β) Ποιος είναι ο ορισμός του dBm και ποια η σχέση του με το dB;
 - γ) Τι εκφράζει μια αρνητική ποσότητα dBm και τι μία θετική;
 - δ) Συμπληρώστε τις τιμές στον παρακάτω πίνακα στις μονάδες που υποδεικνύονται σε κάθε περίπτωση

Ισχύς (W)	200 mW	20 mW	? mW	? μW	2 μW	? μW
Τιμή σε dBm	?	?	0	-20	?	-50

3. Έστω ότι στο κύκλωμα του πομπού έχει συνδεθεί LED με τάση ορθής πόλωσης ίση με 2.1 V και αντίσταση $R_{\pi} = 330 \Omega$. Αν εφαρμοστεί συνεχής τάση 11 V να υπολογίσετε το ρεύμα τροφοδοσίας της πηγής (το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα).

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Ο σκοπός του σημερινού εργαστηρίου είναι η εξοικείωση με τα εξαρτήματα της οπτικής ζεύξης που θα χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο.

(Εισαγωγικά)

Λειτουργία παλμογεννήτριας και παλμογράφου

Αφού εξοικειωθείτε με τους επιλογείς ρυθμίσεων τις παλμογεννήτριας και του παλμογράφου, συνδέστε την έξοδο της παλμογεννήτριας απευθείας στον

παλμογράφο. Κάντε τις παρακάτω επιλογές και ελέγξτε την έξοδο στον παλμογράφο.

α) Συνεχής τάση (DC) 3V, 8V και 10V διαδοχικά,

β) Τετραγωνικό παλμό συχνότητας 300 Hz με V_{p-p} 5V και στη συνέχεια 20KHz με V_{p-p} 3V

γ) Ημιτονοειδή παλμό συχνότητας 80Hz με V_{p-p} 4V και στη συνέχεια 18KHz με V_{p-p} 5V

(Σε κάθε περίπτωση μετρείστε στην οθόνη του παλμογράφου την τιμή της τάσης V_{p-p} πρώτα “με το μάτι” και στη συνέχεια με την επιλογή “measure” του παλμογράφου και συγκρίνετε τα αποτελέσματα).

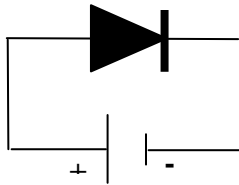
1. Αφού εξοικειωθείτε με τις συνδέσεις και τη λειτουργία της πλακέτας συνδέστε στον πομπό αντίσταση $R_{\Pi} = 330\Omega$.
2. Για σήμα ορίστε στην γεννήτρια παλμών τάση DC 0 V. Αυξήστε την τάση ως τα 9V και παρακολουθήστε πως μεταβάλλεται η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός. Καταγράψτε την τιμή της τάσης για την οποία αρχίζει η εκπομπή φωτός. Είναι αυτή η τιμή αναμενόμενη;
3. Συνδέστε στο κύκλωμα του δέκτη αντίσταση $R_{\Delta} = 1\text{ M}\Omega$ χωρίς πυκνωτή και συνδέστε την έξοδο του δέκτη στον παλμογράφο ή στο πολύμετρο.
4. Συνδέστε τον πομπό με τον δέκτη χρησιμοποιώντας πλαστική ίνα. Ελέγξτε τη λειτουργία της οπτικής ζεύξης συγκρίνοντας στην οθόνη του παλμογράφου το σήμα στην έξοδο της παλμογεννήτριας με αυτό στην έξοδο του ανιχνευτή. Μεταβάλετε τα χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος (τάση, συχνότητα, μορφή) και δείτε τη συμπεριφορά της ζεύξης στη μετάδοση διαφόρων σημάτων.
5. Για να ελέγξετε την επίδραση των δύο αντιστάσεων R_{Π} και R_{Δ} στην λειτουργία της ζεύξης αρχικά διατηρείστε την αντίσταση του πομπού $R_{\Pi}=330\Omega$ και μεταβάλετε την τιμή της αντίστασης του δέκτη R_{Δ} χρησιμοποιώντας αντιστάσεις 0 Ω (βραχυκύκλωση), 1 K Ω , 100 K Ω , 470 K Ω 1 M Ω , 2.2 M Ω . Σε κάθε περίπτωση εφαρμόστε σήμα DC 7 V στον πομπό και μετρείστε την τιμή της τάσης στην έξοδο. Καταγράψτε (σε μορφή πίνακα ή γραφικής παράστασης) και σχολιάστε /εξηγήστε τα αποτελέσματα.
6. Στη συνέχεια διατηρείστε σταθερή και ίση με 1 M Ω την αντίσταση του δέκτη R_{Δ} και μεταβάλετε την τιμή της αντίστασης του πομπού R_{Π} χρησιμοποιώντας αντιστάσεις 220 Ω , 330 Ω , 470 Ω και 680 Ω . Όπως και πριν σε κάθε περίπτωση εφαρμόστε σήμα DC 7 V στον πομπό και μετρείστε την τιμή της τάσης στην έξοδο. Καταγράψτε (σε μορφή πίνακα ή γραφικής παράστασης) και σχολιάστε /εξηγήστε τα αποτελέσματα.

Άσκηση 2

Οπτικές πηγές LED και οπτικοί ανιχνευτές PIN

Χαρακτηριστικά πηγών LED

Στην απλή της μορφή, μια πηγή LED είναι μια δίοδος ημιαγωγών pn (**positive – negative**) πολωμένη ορθά όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Η δίοδος pn σχηματίζεται όταν ένα ημιαγωγικό υλικό (p) με περίσσια θετικού φορτίου (οπές) έρθει σε επαφή με ένα άλλο ημιαγωγικό υλικό (n) με περίσσια αρνητικού φορτίου (ηλεκτρόνια). Υπό συνθήκες ορθής πόλωσης η επαφή pn εκπέμπει φως λόγω της επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων και των οπών.



Σχήμα 2.1 Ορθά πολωμένη LED

Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στην επαφή pn. Συγκεκριμένα, το μήκος κύματος λ εξαρτάται από την ενέργεια χάσματος E_g του ημιαγωγού σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck και c η ταχύτητα του φωτός. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σταθερές στον τύπο (2.1) προκύπτει:

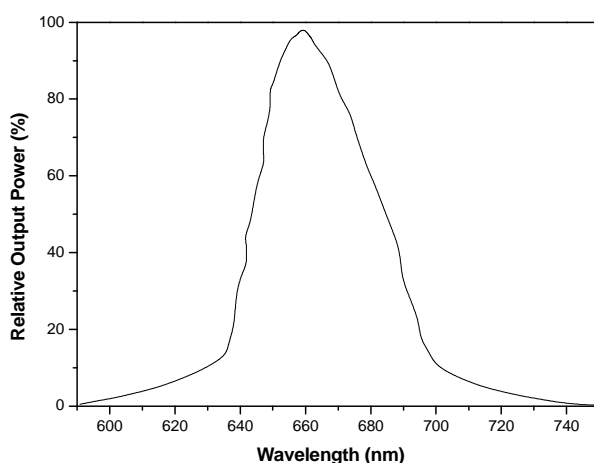
$$\lambda = \frac{1.24}{E_g} \quad (2.2)$$

όπου το λ δίδεται σε μm και το E_g σε eV. Για να προκύψει το επιθυμητό μήκος κύματος ακτινοβολίας υλικά κατασκευάζονται τεχνητά με το σχηματισμό τριαδικών και τετραδικών χημικών ενώσεων. Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις ενώσεις είναι τα στοιχεία Ίνδιο (In) Γάλλιο (Ga), Αρσενικό (As) και Φώσφορος (P). Για ένα ενεργό στρώμα φτιαγμένο από GaAs ($E_g = 1,424$ eV) από την σχέση 2.2 μπορούμε να υπολογίσουμε ότι το μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής είναι ίσο με $0.87 \mu\text{m}$. Για την περιοχή $1.0 - 1.65 \mu\text{m}$ που λειτουργούν τα περισσότερα συστήματα οπτικών επικοινωνιών σήμερα χρησιμοποιούνται πηγές InGaAsP.

Τα LED εκπέμπουν φως μέσω της διαδικασίας αυθόρμητης εκπομπής (σε αντίθεση με το LASER που οφείλετε σε διεγερμένη εκπομπή) με αποτέλεσμα το φασματικό τους εύρος (FWHM-Full Width at Half Maximum, εύρος στο μισό του μέγιστου) να

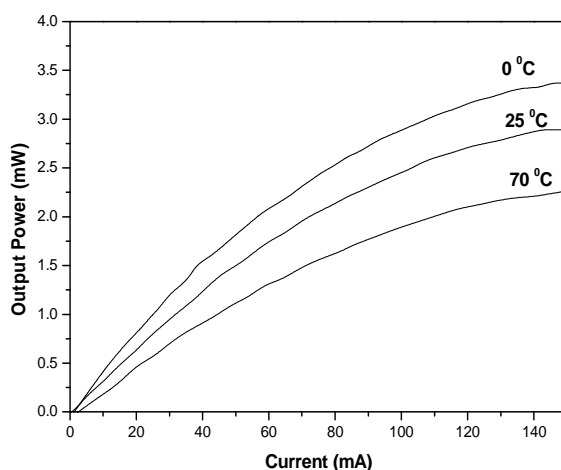
είναι της τάξης 30-60 nm. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που οι LED δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σε οπτικά συστήματα επικοινωνίας (εμφανίζουν έντονη διασπορά). Είναι κυρίως κατάλληλες για εφαρμογές σε τοπικά δίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης bit της τάξης 10 - 100 Mb/s και αποστάσεις μετάδοσης μερικών χιλιομέτρων.

Η κόκκινη LED (SFH 750) που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα έχει το φάσμα εκπομπής που φαίνεται στο σχήμα 2.2. Από το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι έχει φασματικό εύρος περίπου 35 nm και μέγιστο μήκος κύματος εκπομπής στα 660 nm. Είναι δηλαδή μία LED που εκπέμπει στην περιοχή του κόκκινου.



Σχήμα 2.2 Φάσμα εκπομπής της LED SFH 750

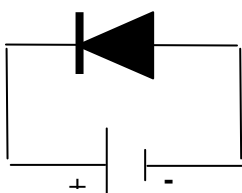
Ιδανικά η σχέση του ρεύματος τροφοδοσίας με την ισχύ εξόδου μίας LED είναι γραμμική. Στην πραγματικότητα είναι γραμμική μονάχα σε χαμηλά ρεύματα και θερμοκρασίες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3



Σχήμα 2.3 Τυπικές καμπύλες ισχύς εξόδου LED συναρτήσει ρεύματος τροφοδοσίας για διάφορες θερμοκρασίες

Χαρακτηριστικά φωτοανιχνευτών pin

Ο ρόλος του φωτοανιχνευτή είναι να μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Η φωτοανίχνευση επιτυγχάνεται με πολλούς τρόπους αλλά στην περίπτωση των οπτικών επικοινωνιών οι φωτοανιχνευτές ημιαγωγών καλύπτουν τις απαιτήσεις ευαισθησίας, γρήγορης απόκρισης, χαμηλού θορύβου και κόστους και έχουν μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό του πυρήνα της οπτικής ίνας. Οι φωτοανιχνευτές pin που είναι από τους πιο διαδεδομένους είναι μία ανάστροφα πολωμένη επαφή pn (σχήμα 2.4) με ένα επιπλέον στρώμα ανόθευτου (intrinsic) ημιαγωγού ανάμεσα στα τμήματα με την περίσσια θετικού (p) και αρνητικού φορτίου (n). Η προσθήκη του στρώματος i βελτιώνει την απόκριση του φωτοανιχνευτή.



Σχήμα 2.4 Ανάστροφα πολωμένος φωτοανιχνευτής PIN

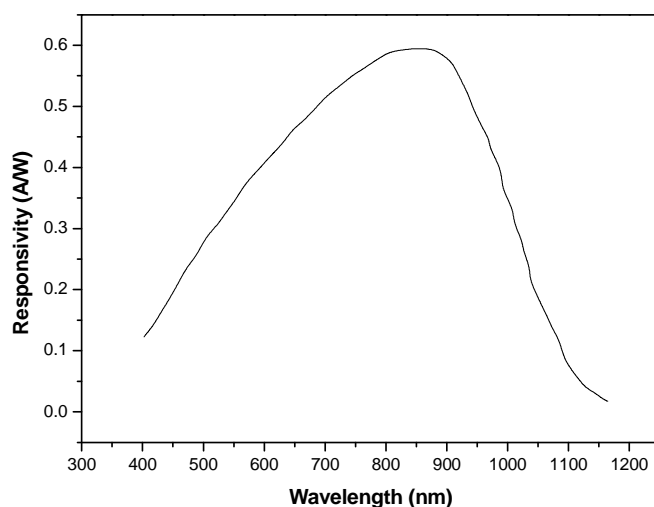
Η διαδικασία φωτοανίχνευσης είναι ακριβώς αντίστροφη της διαδικασίας παραγωγής φωτός στα LED που περιγράφηκε παραπάνω. Το φως που προσπίπτει στον ανιχνευτή απορροφάται με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Υπό την επήρεια της ανάστροφης πόλωσης τα δύο φορτία επιταχύνονται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Η ροή ρεύματος που προκύπτει είναι ανάλογη προς την προσπίπτουσα ισχύ.

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που σχετίζεται άμεσα με τη λειτουργία του φωτοανιχνευτή είναι η **αποκρισιμότητα ρ (Responsivity)** Αντιστοιχεί στον παράγοντα μετατροπής μεταξύ της προσπίπτουσας οπτικής ισχύς P_{in} και του επαγόμενου ρεύματος I_p βάση του τύπου

$$I_p = \rho P_{in} \quad (2.3)$$

δίδεται σε μονάδες Amber /Watt (A/W) και εξαρτάται από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η εξάρτηση της αποκρισιμότητας από το μήκος κύματος εκφράζει το γεγονός ότι οι φωτοανιχνευτές ανιχνεύουν φως σε μια συγκεκριμένη περιοχή του οπτικού φάσματος που εξαρτάται από το είδος του ημιαγωγού που έχουν κατασκευαστεί. Για ανίχνευση στην περιοχή 0.4-1.1 μm χρησιμοποιούνται ανιχνευτές με ενεργό υλικό Si ενώ στην περιοχή 1.0 – 1.7 μm λειτουργούν φωτοδιόδοι με ενεργό υλικό Ge ή InGaAs.

Το διάγραμμα της αποκρισιμότητας συναρτήσεως του μήκους κύματος για τον φωτοανιχνευτή (SFH 250) που θα χρησιμοποιήσουμε στο εργαστήριο φαίνεται στο σχήμα 2.5 Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής λειτουργεί στην περιοχή 400 – 1100 nm με μέγιστη απόκριση στα 850 nm.



Σχήμα 2.5 Φασματική απόκριση του φωτοανιχνευτή SFH 250.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Περιγράψτε την λειτουργία μιας LED (επαφή p-n σε κατάσταση ορθής πόλωσης)
2. Πώς ορίζεται και από τι εξαρτάται η αποκρισιμότητα ενός ανιχνευτή; Με τι κριτήριο θα επιλέγατε ανάμεσα σε ένα ανιχνευτή με ενεργό υλικό Ge (Γερμάνιο) ή Si (Πυρίτιο).
3. Έστω ο ανιχνευτής pin που χρησιμοποιείτε στο εργαστήριο και στην επιφάνεια του προσπίπτει διαδοχικά ακτινοβολία στην περιοχή των 600 nm και 800 nm αντίστοιχα. Αν και στις δύο περιπτώσεις η ένταση της ακτινοβολίας είναι ίδια τότε το σήμα στην έξοδο θα είναι ισχυρότερο και γιατί.
4. Έστω ότι στο κύκλωμα του δέκτη έχει συνδεθεί αντίσταση $2M\Omega$ αλλά όχι πυκνωτής. Αν η τάση που καταγράφεται στην έξοδο είναι 2V να υπολογίσετε το φωτόρρευμα (το ρεύμα που επάγεται στον ανιχνευτή pin λόγω του προσπίπτοντος φωτός).

Εργαστηριακή άσκηση

1. Αρχικά θα χρησιμοποιήσετε την κόκκινη LED και στο κύκλωμα του πομπού θα συνδέσετε αντίσταση $R_{\pi} = 330 \Omega$.
2. Για ασφαλή λειτουργία της LED το μέγιστο ρεύμα που θα τροφοδοτήσετε την πηγή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $2/3$ της μέγιστης επιτρεπτής τιμής που δίδεται στον πίνακα I. Υπολογίστε τη μέγιστη τάση που μπορείτε να τροφοδοτήσετε το κύκλωμα του πομπού ώστε να το ρεύμα που διαρρέει την

LED να μην υπερβεί αυτή την τιμή. (Υπόδειξη: Για να υπολογίσετε την τάση τροφοδοσίας πρέπει να λάβετε υπόψη την τιμή ορθής πτώσης τάσης της διόδου που δίδεται στον πίνακα I)

3. Συνδέστε τη LED με τον φωτοανιχνευτή χρησιμοποιώντας οπτική ίνα μήκους περίπου 1 μέτρου. Στο κύκλωμα του δέκτη συνδέστε αντίσταση $R_{\Delta}=1M\Omega$. Ορίστε στην γεννήτρια παλμών συνεχή τάση (DC). Ξεκινώντας με τη μέγιστη επιτρεπτή τάση που υπολογίσατε παραπάνω και μεταβάλλοντας την μέχρι το μηδέν με βήμα 1 Volt καταγράψτε την έξοδο χρησιμοποιώντας ένα παλμογράφο ή ένα ψηφιακό πολύμετρο.
4. Υπολογίστε την τιμή του ρεύματος (ρεύμα τροφοδοσίας) που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις τάσης τροφοδοσίας, συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα και δώστε γράφημα με την τάση στην έξοδο του δέκτη συναρτήσει του ρεύματος τροφοδοσίας

Τάση τροφοδοσίας (V)	Ρεύμα τροφοδοσίας (mA)	Τάση εξόδου (V)
·		
·		
·		

5. Είναι η σχέση ρεύματος τροφοδοσίας – τάσης εξόδου γραμμική; Μπορείτε να δώσετε μία προσεγγιστική τιμή της τάσης εξόδου αν η LED τροφοδοτηθεί με το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ;
6. Χρησιμοποιώντας την LED υπέρυθρης ακτινοβολίας και για τις ίδιες με πριν αντιστάσεις στα κυκλώματα πομπού και δέκτη και επαναλάβετε τη μέτρηση του βήματος 3. Αν για υψηλές τιμές της τάσης τροφοδοσίας παρουσιάζεται κορεσμός αυξήστε την τιμή της αντίστασης του πομπού (πχ 470Ω) ή μειώστε αυτή του δέκτη.
7. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα και παρουσιάστε τα αποτελέσματα σε μορφή γραφήματος όπως και πριν και σχολιάστε σχετικά με την γραμμικότητα της LED υπερύθρου.

Τάση τροφοδοσίας (V)	Ρεύμα τροφοδοσίας (mA)	Τάση εξόδου (V)	Ρεύμα εξόδου (μA) (βήμα 8)	Ισχύς εξόδου (μW) (βήμα 9)
·				
·				
·				

8. Για την LED υπερύθρου υπολογίστε το ρεύμα στην έξοδο του δέκτη για τις διάφορες τιμές τάσης εξόδου που μετρήσατε.
9. Χρησιμοποιώντας το μετρητικό οπτικής ισχύος επαναλάβετε την προηγούμενη μέτρηση καταγράφοντας την τιμή της οπτικής ισχύς στην έξοδο της ίνας.
10. Παρουσιάστε τα αποτελέσματα ως γράφημα της ισχύος εξόδου (σε μW) συναρτήσεως του ρεύματος τροφοδοσίας (mA).
11. Βασιζόμενοι στα παραπάνω αποτελέσματα υπολογίστε την αποκρισιμότητα της φωτοδιόδου στα μήκος κύματος εκπομπής της LED (880nm).
12. Συγκρίνετε τα πειραματικά σας αποτελέσματα με την τιμή της αποκρισιμότητας που δίδεται από τον κατασκευαστή (σχήμα 2.5).

Επεξήγηση

Στα πλαίσια του πειράματος πρέπει να καταγράψετε ή να υπολογίστε τις παρακάτω ποσότητες σύμφωνα με τις οδηγίες του φυλλαδίου.

Τάση τροφοδοσίας: Η τάση που εφαρμόζεται με την παλμογεννήτρια στο κύκλωμα του πομπού.

Ρεύμα τροφοδοσίας: Το ρεύμα του κυκλώματος του πομπού, υπολογίζεται από την τάση τροφοδοσίας λαμβάνοντας υπόψη την τιμή ορθής πτώσης τάσης της διόδου.

Τάση εξόδου: Η τάση που μετράται στην έξοδο του δέκτη.

Ρεύμα εξόδου: Το ρεύμα στην έξοδο του δέκτη, υπολογίζεται από την τάση εξόδου και είναι συνάρτηση της αντίστασης ανάδρασης στο κύκλωμα του δέκτη.

Ισχύ εξόδου σε dB: Μετράται στην έξοδο της οπτικής ίνας με τη χρήση του μετρητικού οπτικής ισχύος

Ισχύ εξόδου σε W: Υπολογίζεται από την ισχύ εξόδου σε dB με τη χρήση του κατάλληλου μαθηματικού τύπου.

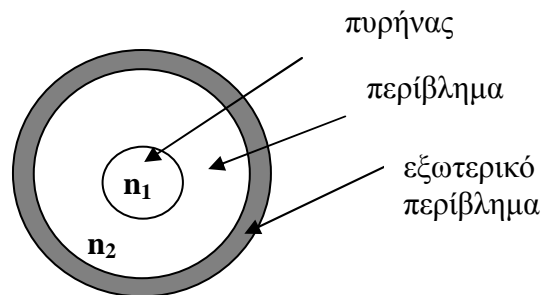
Αποκρισιμότητα(A/W): $\frac{\text{ρεύμα εξόδου}}{\text{ισχύ εξόδου}}$ για την ίδια τάση τροφοδοσίας.

Άσκηση 3

Οπτική ίνα

Εισαγωγή

Στην πιο απλή της μορφή η οπτική ίνα αποτελείται από τον πυρήνα, το περίβλημα και ένα εξωτερικό περίβλημα προστασίας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1 Τομή οπτικής ίνας

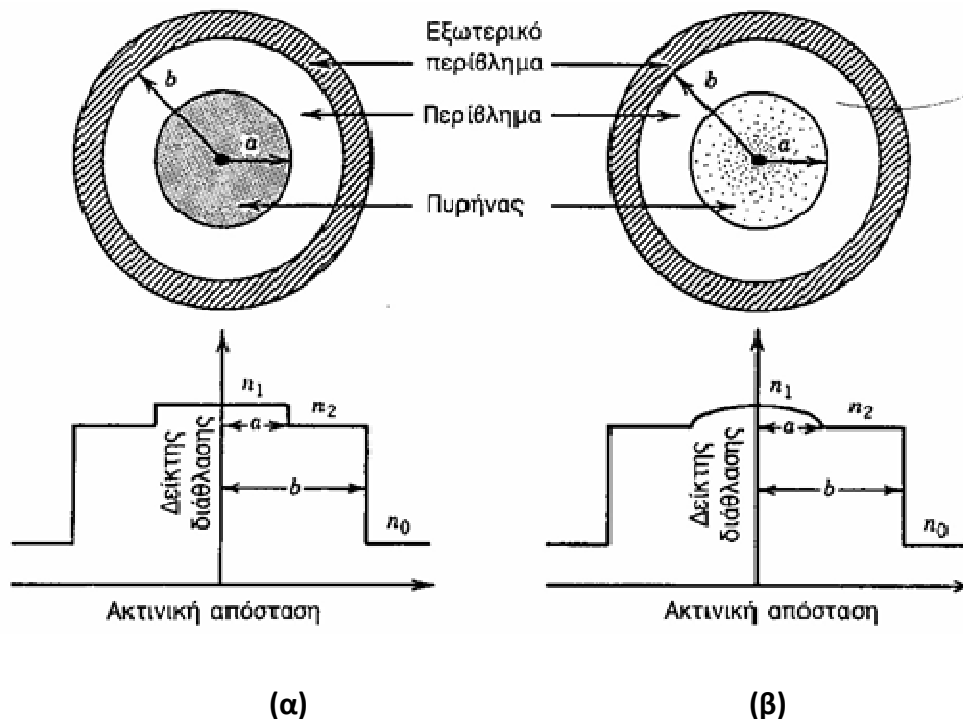
Το υλικό του πυρήνα έχει δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από εκείνο του περιβλήματος. Φως που προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος με γωνία μεγαλύτερη από μία κρίσιμη γωνία ϕ_c υπόκειται ολική ανάκλαση και διαδίδεται από την ίνα. Η κρίσιμη γωνία ϕ_c εξαρτάται από τα υλικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί η ίνα και συγκεκριμένα δίδεται από τον τύπο:

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1 \quad (3.1)$$

όπου n_1 και n_2 είναι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος αντίστοιχα.

Ο δείκτης διάθλασης στο εσωτερικό του πυρήνα μπορεί να έχει μία σταθερή τιμή ή να μεταβάλλεται. Αυτό περιγράφεται μέσω της λεγόμενης κατανομής (ή προφίλ) του δείκτη διάθλασης. Αυτό το χαρακτηριστικό της ίνας είναι πολύ κρίσιμο μια και καθορίζει την τιμή της διασποράς που εμφανίζει η οπτική ίνα.

Αν ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα έχει παντού την ίδια τιμή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 (α) τότε η ίνα λέγεται βηματικού δείκτη διάθλασης (step index). Αντίστοιχα στην ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης - graded index (σχήμα 3.2 (β)), ο δείκτης διάθλασης έχει μέγιστη τιμή στο κέντρο του πυρήνα και μειώνεται σταδιακά μέχρι την διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα περιβλήματος όπου έχει την ελάχιστη τιμή



Σχήμα 3.2 Βηματική (α) και διαβαθμισμένη (β) κατανομή του δείκτη διάθλασης

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των οπτικών ινών είναι οι απώλειες που παρουσιάζουν μια και καθορίζει την μέγιστη απόσταση διάδοσης του σήματος χωρίς παραμόρφωση (ή την απόσταση μεταξύ αναμεταδοτών). Η χρήση των οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες έγινε πρακτική όταν κατασκευάστηκαν ίνες με απώλειες λιγότερες από 5 dB/ km, χαμηλότερες δηλαδή από αυτές των συμβατικών καλωδίων. Η απώλειες ή αλλιώς η εξασθένηση του φωτός οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση / σκέδαση του φωτός από το υλικό της ίνας καθώς και στην παρουσία προσμίξεων και εξαρτάται από το μήκος κύματος του διαδιδόμενου φωτός.

Η εξασθένηση εκφράζεται με τη λογαριθμική μονάδα decibel (dB) ως ο λόγος δύο τιμών ισχύος: της οπτικής ισχύος στην είσοδο της ίνας P_{in} και της οπτικής ισχύος στην έξοδο P_{out} .

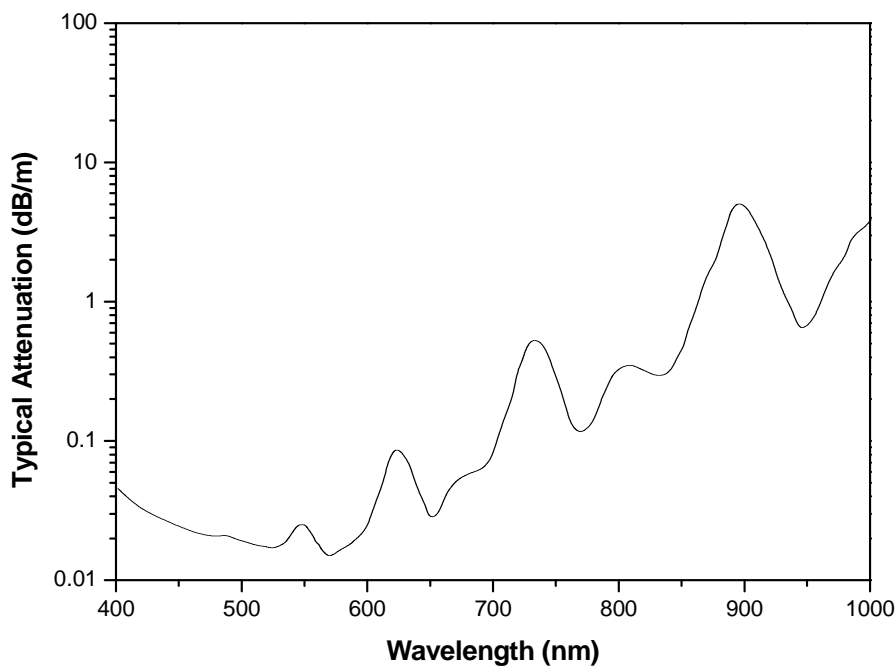
$$\text{Loss (dB)} = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (3.2)$$

Η ποσότητα που δίδεται συνήθως για να περιγράψει την εξασθένηση μίας ίνας είναι ο συντελεστής εξασθένησης α που εκφράζεται σε dB/ km και ουσιαστικά εκφράζει την εξασθένηση ανά μονάδα μήκους:

$$\alpha \text{ (dB/km)} = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (3.3)$$

όπου L είναι το μήκος της ίνας.

Ίνες κατασκευάζονται από γυαλί ή πλαστικό και σε διαφορετικές διαστάσεις ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιηθούν. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή, στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε πλαστικές ίνες. Ο πυρήνας είναι από PMMA βηματικού δείκτη διάθλασης, έχει διάμετρο 1 mm και περιβάλλεται από φθοριομένο πολυμερές μικρού πάχους (10 –20 μm). Το εξωτερικό περίβλημα (μαύρου χρώματος) προστίθεται για προστασία της ίνας και η τελική διάμετρος του καλωδίου είναι 2.2 mm. Συγκρινόμενες με τις ίνες από γυαλί, οι πλαστικές ίνες παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες. Στην περιοχή του ορατού η εξασθένιση είναι της τάξης των 200 dB / km ενώ γίνεται ακόμα ισχυρότερη στην περιοχή του υπεράυθρου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Τυπική εξασθένιση φωτός σε πλαστική ίνα συναρτήσει του μήκους κύματος

Πειραματικός υπολογισμός του συντελεστή εξασθένισης

Μία από τις μεθόδους μέτρησης του συντελεστή εξασθένισης στις ίνες είναι η τεχνική μείωσης μήκους (Cut Back). Σε αυτή την τεχνική, η ισχύς εξόδου μετρείται για ίνα μήκους 1 χιλιομέτρου και στη συνέχεια το μήκος της ίνας μειώνεται κόβοντας, από το άκρο του τέλους, ένα μέρος της ίνας και η ισχύς μετράται ξανά. Ο συντελεστής εξασθένισης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha(\text{dB/m}) = \frac{10}{L_1 - L_2} \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right), \quad (3.4)$$

όπου L_1 και P_1 είναι το μήκος και η οπτική ισχύς εξόδου, αντίστοιχα, της ίνας με το μεγαλύτερο μήκος.

Για την πρακτική μέτρηση στο εργαστήριο θα χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω αρχή αλλά με ίνες μικρότερου μεγέθους. Η ισχύς μπορεί να μετρηθεί απευθείας με ένα μετρητικό οπτικής ισχύς ή χρησιμοποιώντας τον δέκτη ως μετρητικό και μετρώντας την τάση εξόδου η οποία είναι ανάλογη της οπτικής ισχύος. Ιδανικά η ίδια ίνα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και για τις δύο μετρήσεις, πρώτα η ισχύς μετράτε για ίνα μεγάλου μήκους μετά ένα τμήμα από το τέλος της κόβεται, το άκρο γυαλίζεται και η ισχύς μετράται ξανά. Παρόλα αυτά, το πείραμα μπορεί να γίνει και με δύο διαφορετικά κομμάτια ίνας για εξοικονόμηση ινών και του χρόνου που απαιτείται για το γυάλισμα.

Απώλειες λόγω καμπυλότητας

Πέρα από τις εγγενής απώλειες των οπτικών ινών που περιγράφηκαν παραπάνω, επιπλέον απώλειες μπορεί να προκύψουν λόγω εξωτερικών παραγόντων όπως είναι η έντονη καμπυλότητα της ίνας. Κατά την τοποθέτηση ινών σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις είναι συνήθως αναγκαίο να καμπυλωθεί η ίνα σε κάποιο βαθμό. Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η διάδοση του φωτός εξαρτάται έντονα από τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος. Αν η ίνα καμπυλωθεί, η γωνία πρόσπτωσης αλλάζει και αν η τιμή της γίνει μικρότερη από αυτή της κρίσιμης γωνίας το φως δεν ανακλάται ολικά αλλά εισέρχεται στο περιβλήμα όπου δεν μπορεί να διαδοθεί και χάνεται.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Μία γυάλινη οπτική ίνα έχει δείκτη διάθλασης πυρήνα 1.5 και δείκτη διάθλασης περιβλήματος 1.47. Εξηγείστε την έννοια την ολικής ανάκλασης και υπολογίστε την κρίσιμη γωνία στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος.
2. Η οπτική ισχύ που εισέρχεται σε οπτική ίνα μήκους 8 km είναι 120 μW , ενώ στην έξοδο της μετράται ισχύ 3 μW . Να υπολογίσετε: α) Την συνολική εξασθένιση του σήματος σε dB. β) Τον συντελεστή εξασθένισης (την εξασθένιση του σήματος ανά χιλιόμετρο ίνας) γ) Την εξασθένιση του σήματος σε μια ζεύξη μήκους 10 Km που χρησιμοποιεί την ίδια ίνα. δ) Τον λόγο της ισχύς εισόδου προς την ισχύ εξόδου στην ζεύξη των 10 Km.
3. Χρησιμοποιώντας πλαστική ίνα επιθυμούμε να κατασκευάσουμε οπτική ζεύξη μήκους 100 μέτρων. Έχουμε στη διάθεση μας δύο οπτικές πηγές LED ίδιας ισχύος με μέγιστο μήκος κύματος εκπομπής στα 660 nm και 880 nm αντίστοιχα. Ποια πηγή είναι προτιμότερη ώστε να έχουμε στην έξοδο της ίνας τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Η απάντησή σας θα ήταν ίδια ή διαφορετική αν η ίνα ήταν γυάλινη; Δικαιολογήστε τις απαντήσεις σας.

Εργαστηριακή άσκηση

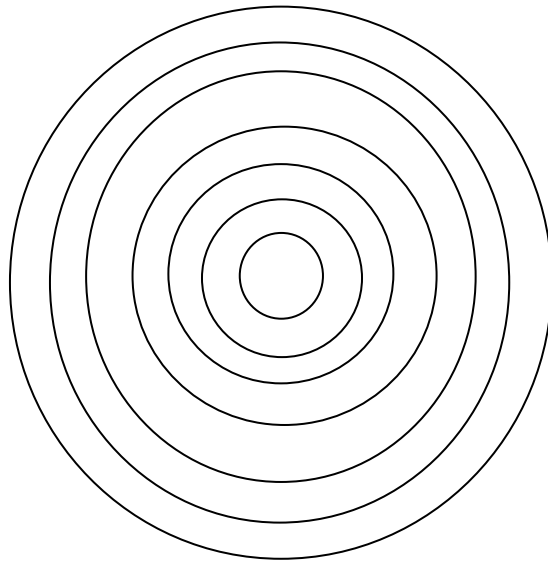
Στα πλαίσια της σημερινής άσκησης θα μετρηθεί πειραματικά ο συντελεστής εξασθένισης της πλαστικής ίνας σε τρία μήκη κύματος χρησιμοποιώντας LED με διαφορετική φασματική περιοχή εκπομπής.

1. Συνδέστε στα κυκλώματα πομπού και δέκτη αντιστάσεις $R_{\Pi} = 330 \Omega$ και $R_{\Delta} = 1 \text{ M}\Omega$ αντίστοιχα.
2. Αρχικά με την κόκκινη LED, ορίστε στην γεννήτρια παλμών σήμα DC 10V και συνδέστε το ένα άκρο ίνας, μήκους περίπου 1 μέτρου, στη LED και το άλλο στο φωτοανιχνευτή. Μετρείστε την τάση εξόδου με ένα ψηφιακό πολύμετρο ή τον παλμογράφο.
3. Αντικαταστήστε την ίνα μήκους 1 μέτρου με άλλες ίνες μεγαλύτερου μήκους (πχ 7, 10, 15 μέτρα ανάλογα με το τι μήκη υπάρχουν διαθέσιμα στο εργαστήριο) και μετρείστε την τάση εξόδου για κάθε μία από τις ίνες. (Σε κάποιες περιπτώσεις ίσως το μη κάθετο κόψιμο των ινών ή η ύπαρξη σκόνης στο άκρο της ίνας να αλλοιώνει τα αποτελέσματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα άκρα των ινών πρέπει να γυαλίζονται / κόβονται με τα ειδικά εργαλεία που υπάρχουν στο εργαστήριο.)
4. Χρησιμοποιώντας σε ζευγάρια κάθε φορά μία από τις ίνες μεγάλου μήκους και την ίνα 1 μέτρου υπολογίστε τον συντελεστή εξασθένισης της ίνας χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.4. Σχολιάστε τα αποτελέσματα.
5. Επαναλάβετε τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς χρησιμοποιώντας την πράσινη LED και την LED υπερύθρου. (Ίσως να χρειαστεί να αλλάξετε τις αντιστάσεις R_{Δ} ή / και R_{Π} στα κυκλώματα του δέκτη και πομπού αντίστοιχα ώστε να επιτύχετε τη βέλτιστη τιμή εξόδου. Φυσικά η σύγκριση διαφορετικών μηκών ίνας πρέπει να γίνεται για τα ίδια κυκλώματα ή να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορές στους υπολογισμούς.)
6. Αφού προσδιορίστε από τον πίνακα I της 1^{ης} άσκησης (σελίδα 6) τα μέγιστα μήκη κύματος εκπομπής των τριών LED, χρησιμοποιώντας την γραφική παράσταση που δίδεται στο σχήμα 3.2 βρείτε τις τιμές του συντελεστή εξασθένισης της ίνας στα μήκη κύματος των LED. Συγκρίνετε τις πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές και σχολιάστε τα αποτελέσματα.

Απώλειες λόγω καμπυλότητας

1. Συνδέστε την κόκκινη LED στο κύκλωμα του πομπού.
2. Για να μελετήσετε την επίδραση της καμπυλότητας της ίνας στην διάδοση του φωτός συνδέστε ίνα περίπου 1 μέτρου μεταξύ του πομπού και του δέκτη και μετρήστε την τάση εξόδου.

3. Στη συνέχεια σε ένα τμήμα της ίνας δημιουργείτε καμπυλότητες φθίνουσας διαμέτρου (πχ από 7 έως 1 cm όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4) μετρώντας την αντίστοιχη τάση εξόδου. Προσδιορίστε την καμπυλότητα για την οποία αρχίζουν οι απώλειες διάδοσης. ΠΡΟΣΟΧΗ Μην δημιουργείτε καμπυλότητες πολύ μικρής διαμέτρου γιατί η ίνα μπορεί να μην επανέρθει στο αρχικό της σχήμα.
4. Σχεδιάστε την τάση εξόδου συναρτήσει της ακτίνας καμπυλότητας και δώστε μία εκτίμηση για την καμπυλότητα για την οποία η ίνα παύει να διαδίδει το φως.



Σχήμα 3.4 Ομόκεντροι κύκλοι διαμέτρου 1, 2, 3, 4, 5, 6 και 7 cm

Άσκηση 4

Αναλογική και ψηφιακή μετάδοση

Εισαγωγή

Η πληροφορία που μεταφέρεται με ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι διαθέσιμη σαν ηλεκτρικό σήμα που μπορεί να πάρει αναλογική ή ψηφιακή μορφή. Το αναλογικό σήμα μεταβάλλεται με το χρόνο και οι τιμές του είναι συνεχής. Ένα παράδειγμα αναλογικού σήματος είναι η ανθρώπινη φωνή που παράγει ήχους σε όλη την περιοχή των φωνητικών συχνοτήτων. Αντίθετα, το ψηφιακό σήμα παίρνει μόνο μερικές διακριτές τιμές. Στην δυαδική αναπαράσταση ενός ψηφιακού σήματος είναι δυνατές μόνο δύο τιμές: μηδέν και ένα. Ένα αναλογικό σήμα μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή εφαρμόζοντας διάφορες μεθόδους δειγματοληψίας.

Σε αυτό το εργαστήριο, ένα ημιτονοειδές σήμα και ένας τετραγωνικός παλμός χρησιμοποιούνται ως προσομοίωση αναλογικού και ψηφιακού σήματος αντίστοιχα. Η LED διαμορφώνεται με αυτά τα σήματα για να εξεταστεί η επίδραση της αντίστασης και της χωρητικότητας του κυκλώματος του δέκτη στην λειτουργία της ζεύξης.

Εύρος ζώνης 3dB ανιχνευτή

Κατά την ανίχνευση οπτικού σήματος με συχνότητα διαμόρφωσης ίση με το εύρος ζώνης 3 dB του ανιχνευτή, η ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο του δέκτη $P(f_{3dB})$ θα είναι η μισή σε σύγκριση με την ηλεκτρική ισχύ που θα παραγόταν για οπτικό σήμα χωρίς διαμόρφωση ή με χαμηλή συχνότητα διαμόρφωσης $P_{X\Delta}$.

$$P(f_{3dB}) = \frac{1}{2} P_{X\Delta} \quad (4.1)$$

Ονομάζεται εύρος ζώνης 3dB γιατί αν μετατρέψουμε σε dB τον παραπάνω λόγο προκύπτει:

$$10 \log \frac{P_{X\Delta}}{P(f_{3dB})} = 10 \log 2 = 10 \cdot 0.3 = 3 \text{ dB} \quad (4.2)$$

Το εύρος ζώνης 3dB ενός φωτοανιχνευτή καθορίζεται από την ταχύτητα με την οποία αυτός αποκρίνεται στις μεταβολές της προσπίπτουσας οπτικής ισχύς. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μια δίοδος PIN είναι ένα φίλτρο συχνοτήτων που επιτρέπει τη διέλευση χαμηλών συχνοτήτων ενώ κόβει εντελώς ή σε κάποιο βαθμό τις υψηλές συχνότητες. Το εύρος ζώνης 3dB ουσιαστικά ορίζει την περιοχή συχνοτήτων την οποία μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια ο δέκτης.

Το εύρος ζώνης καθορίζεται είτε από το χρόνο ανόδου της δίοδου είτε από την σταθερά χρόνου RC του κυκλώματος ανάλογα με το ποια από τις δύο παραμέτρους

δίνει τη χαμηλότερη ταχύτητα απόκρισης και συνεπώς το μικρότερο εύρος ζώνης. Για τον δέκτη που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο καθοριστική παράμετρος είναι η σταθερά χρόνου RC του κυκλώματος και συνεπώς το εύρος ζώνης Δf_{3dB} δίδεται από τον τύπο:

$$\Delta f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_{\Delta} (C_{\Delta} + C_{PIN})} \quad (4.3)$$

όπου R_{Δ} και C_{Δ} είναι η αντίσταση και ο πυκνωτής αντίστοιχα του κυκλώματος του δέκτη και C_{PIN} είναι η χωρητικότητα του φωτοανιχνευτή PIN η οποία για τον φωτοανιχνευτή (SFH 250) που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο έχει τιμή 11 pF.

Για να μετρήσουμε πρακτικά το εύρος ζώνης ενός ανιχνευτή ακολουθούμε το παρακάτω σκεπτικό. Όταν η συχνότητα του σήματος είναι σχετικά χαμηλή ή στην ακραία περίπτωση μηδενική (συνεχές σήμα ή σήμα με Χαμηλή συχνότητα Διαμόρφωση- ΧΔ) τότε η ανίχνευση του σήματος γίνεται χωρίς απώλειες. Έστω λοιπόν ότι ένα σήμα με χαμηλή συχνότητα διαμόρφωσης δίνει στον ανιχνευτή μία ηλεκτρική τάση $P_{X\Delta}$. Αν στη συνέχεια η συχνότητα διαμόρφωσης του σήματος αυξηθεί η ηλεκτρική τάση στην έξοδο του ανιχνευτή θα μειώνεται σταδιακά και η τιμή της P_{Δ} θα εξαρτάται από τη συχνότητα διαμόρφωσης.

Βάση του ορισμού (4.1) για να προσδιορίσουμε την ηλεκτρική ισχύ για συχνότητα διαμόρφωσης **3dB** συγκρίνουμε την ηλεκτρική ισχύ P_{Δ} για τυχαία τιμή συχνότητας διαμόρφωσης με την ηλεκτρική ισχύ για χαμηλή συχνότητα διαμόρφωσης μέσω του παρακάτω τύπου:

$$J_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{X\Delta}}{P_{\Delta}} \quad (4.4)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $P = V^2/R$ προκύπτει ότι:

$$J_{dB} \propto 10 \log_{10} \left[\frac{V_{X\Delta}}{V_{\Delta}} \right]^2 \quad (4.5)$$

Όπως δείξαμε στην (4.2) για συχνότητα διαμόρφωσης ίση με το εύρος ζώνης 3dB η (4.5) ισούται με 3dB οπότε προκύπτει ότι

$$3 = 10 \log_{10} \left[\frac{V_{X\Delta}}{V_{\Delta}} \right]^2 \Rightarrow \left[\frac{V_{X\Delta}}{V_{\Delta}} \right]^2 = 10^{0.3} = 2 \Rightarrow V_{X\Delta}^2 = 2 V_{\Delta}^2 \quad (4.6)$$

Άρα προκύπτει ότι

$$V_{\Delta} = 0.707 V_{X\Delta} \quad (4.7)$$

Δηλαδή για σήμα με συχνότητα ίση με το εύρος ζώνης 3dB του ανιχνευτή η τάση στην έξοδο του ανιχνευτή είναι το 0.707 της τάσης που θα παίρναμε για σήμα χωρίς διαμόρφωση (ή με πολύ χαμηλή συχνότητα). **Πρακτικά λοιπόν** για να μετρήσουμε

το εύρος ζώνης 3dB αρχικά στέλνουμε σήμα χαμηλής συχνότητας (θεωρούμε ότι αυτό αντιστοιχεί σε σήμα χωρίς διαμόρφωση) και μετράμε την τιμή τάσης στην έξοδο του δέκτη, αυτή είναι η $V_{\chi\Delta}$. Εφαρμόζουμε τη σχέση (4.7) για να υπολογίσουμε την τάση V_{Δ} που θα παίρναμε στην έξοδο αν η συχνότητα διαμόρφωσης ήταν ίση με το εύρος ζώνης 3dB. Τέλος αυξάνουμε την συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος μέχρι η τιμή της τάσης εξόδου να γίνει ίση με την τάση V_{Δ} που υπολογίσαμε παραπάνω. Η συχνότητα για την οποία συμβαίνει αυτό είναι το εύρος ζώνης 3dB

Το εύρος ζώνης 3dB όπως έχει οριστεί εδώ αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό εύρος ζώνης. Ορίζεται επίσης το οπτικό εύρος ζώνης 3dB Δf_{3dB-OP} το οποίο δίδεται από το λόγο των αντίστοιχων οπτικών ισχύων στη σχέση (4.4).

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Από τι εξαρτάται γενικά το εύρος ζώνης ενός φωτοανιχνευτή pin;
2. Θεωρώντας ότι το εύρος ζώνης του ανιχνευτή που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο καθορίζεται από το ηλεκτρονικό του κύκλωμα, να υπολογίσετε την θεωρητική τιμή του εύρους ζώνης 3dB για τα δύο σετ αντίστασης- πυκνωτή που θα χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό μέρος.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Αναλογική ζεύξη

1. Συνδέστε στο κυκλώματα πομπού αντίσταση $R_{\pi} = 330\Omega$ και στο κύκλωμα του δέκτη αντίσταση $R_{\Delta} = 180\text{ K}\Omega$ και πυκνωτή $C_{\Delta} = 82\text{ pF}$. Ορίστε στην γεννήτρια παλμών ημιτονοειδή παλμό με συχνότητα 1KHz (χαμηλή συχνότητα διαμόρφωσης) και τάση $V_{p-p} 10\text{ V}$.
2. Συνδέστε την έξοδο του δέκτη στο κανάλι 1 του παλμογράφου. Μεταβάλετε το πλάτος του σήματος της γεννήτριας παλμών (AC και DC) έτσι ώστε να πάρετε ένα μη παραμορφωμένο σήμα. Ελέγξτε το σήμα εξόδου και σημειώστε την τιμή V_{p-p} του σήματος.
3. Για να βρείτε το εύρος ζώνης της παρούσας διάταξης υπολογίστε την τάση V_{p-p} του σήματος στο σημείο 3dB βάση της σχέσης (4.5). Αλλάξτε τη συχνότητα μέχρι το πλάτος να έχει αυτή την τιμή (σιγουρευτείτε ότι το σήμα δεν είναι παραμορφωμένο). Καταγράψτε την τιμή της συχνότητας
4. Υπολογίστε την θεωρητική τιμή του εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.1). Συγκρίνετε τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα.
5. Επαναλάβετε τη παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιώντας αντίσταση $R_{\Delta} = 47\text{ K}\Omega$ και πυκνωτή $C_{\Delta} = 181\text{ pF}$ στο κύκλωμα του δέκτη.

6. Συγκρίνετε τις τιμές του εύρους ζώνης για τα δύο σετ στοιχείων.

Ψηφιακή ζεύξη

1. Για την ψηφιακή ζεύξη αφαιρέστε τον πυκνωτή από το κύκλωμα αλλά αφήστε την 47 KΩ αντίσταση συνδεδεμένη,
2. Ορίστε στην γεννήτρια παλμών τετραγωνικό παλμό με συχνότητα 40 KHz.
3. Στον ανιχνευόμενο παλμό θα παρατηρήσετε ένα σημαντικό ποσοστό κωδωνισμού που οφείλεται στην αστάθεια του βρόγχου ανάδρασης.
4. Για να μειώσετε τον κωδωνισμό πρέπει να προσθέσετε στο κύκλωμα ένα πυκνωτή ανάδρασης. Η τιμή του πυκνωτή καθορίζει την επαγόμενη αντιστάθμιση φάσης. Η χωρητικότητα του πυκνωτή πρέπει να είναι η μεγαλύτερη δυνατή σύμφωνα με την απαιτούμενη απόκριση συχνότητας. Δοκιμάστε τους πυκνωτές που δίνονται (πχ 4.7 pF, 22 pF, 47 pF, 82 pF, 101 pF, 181 pF) παρατηρείστε και καταγράψτε τις αντίστοιχα σήματα που προκύπτουν στην έξοδο του δέκτη. Για ποιον πυκνωτή επιτυγχάνεται η μικρότερη παραμόρφωση σήματος;

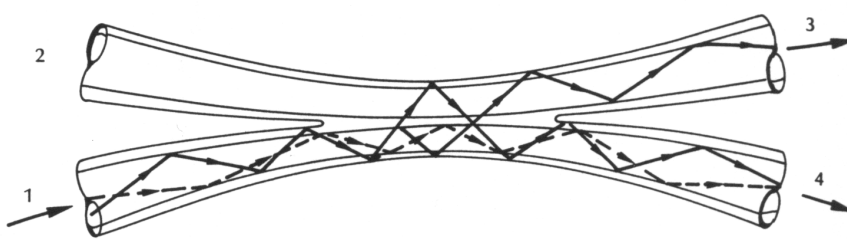
Άσκηση 5

Διακλαδωτές -Συζευκτές (Couplers)

Με τη χρήση συζευκτών μπορούμε να ενώσουμε το σήμα δύο ή παραπάνω οπτικών ινών σε μια, ενώ με διακλαδωτές να διαχωρίσουμε το οπτικό σήμα μίας οπτικής ίνας σε περισσότερες. Το ίδιο στοιχείο ανάλογα με τη χρήση του μπορεί να λειτουργήσει ως διακλαδωτής ή ως συζευκτής και ο αριθμός των εισόδων / εξόδων του ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή.

Στο σχήμα 5.1 εικονίζεται στοιχείο 2 x 2 δηλαδή με 2 εισόδους και 2 εξόδους και η χρήση του ως διακλαδωτής (διαχωριστής): το σήμα που εισέρχεται στην είσοδο 1 διαχωρίζεται στις εξόδους 3 και 4. Η κατανομή της ισχύος στις δυο εξόδους εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του στοιχείου.

Τα στοιχεία αυτά κατασκευάζονται με διάφορες μεθόδους αλλά η αρχή λειτουργία τους βασίζεται στη δυνατότητα αλληλεπίδρασης των πυρήνων των ινών που το αποτελούν. Κρίσιμα για τη λειτουργία τους είναι η απόσταση των πυρήνων και το μήκος της επιφάνειας αλληλεπίδρασης τους



Σχήμα 5.1: Στοιχείο 2 x 2 και η λειτουργία του ως διακλαδωτής

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Έστω ο 2 x 2 διακλαδωτής που εικονίζεται στο σχήμα 5.1 με το φως να εισέρχεται στην είσοδο 1. Η λειτουργία του περιγράφεται μέσω των παρακάτω χαρακτηριστικών μεγεθών:

- Διαχωρισμός ισχύος - Splitting ratio (%)
Καθορίζει το ποσοστό της ισχύος που μοιράζεται σε κάθε μια από τις εξόδους

$$S = \frac{P_3}{P_3 + P_4} \times 100 \quad (5.1)$$

- Πρόσθετες απώλειες - Excess Loss (dB)
Εκφράζει τις απώλειες που επιβάλλει το στοιχείο συγκρίνοντας το φως που εισέρχεται με αυτό που εξέρχεται (συνολικά).

$$L_E = 10 \log \frac{P_1}{P_3 + P_4} \quad (5.2)$$

Ιδανικά οι πρόσθετες απώλειες πρέπει να είναι μηδενικές ($L_E=0$) ώστε όλο το φως που εισέρχεται στο στοιχείο να φτάνει στις εξόδους. ($P_1=P_3+P_4$)

- Εισερχόμενη απώλεια - Insertion Loss (dB)
Ορίζεται για κάθε μια από τις εξόδους και συγκρίνει την ισχύ σε κάθε έξοδο με την ισχύ εισόδου.

$$\text{Για την έξοδο 3: } L_{I3} = 10 \log \frac{P_1}{P_3} \quad (5.3)$$

$$\text{Για την έξοδο 4: } L_{I4} = 10 \log \frac{P_1}{P_4}, \quad (5.4)$$

- Εμπλοκή - Cross talk (dB)

Απώλειες από πίσω-ανάκλαση ισχύος στην τέταρτη θύρα που δεν χρησιμοποιείται.

$$L_C = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (5.5)$$

Ιδανικά η ισχύς που ανιχνεύεται στην μη χρησιμοποιούμενη είσοδο θα πρέπει να είναι μηδενική ($P_2=0$)

Τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται με ανάλογο τρόπο αν χρησιμοποιηθεί η θύρα 2 ως είσοδος.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ένας διακλαδωτής έχει πρόσθετες απώλειες 1dB και διαχωρισμό ισχύος 1:1. Πόση από την εισερχόμενη ισχύ φτάνει στις δύο εξόδους;
2. Περιγράψτε μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διακλαδωτών / συζευκτών.
3. Στην θύρα 1 διακλαδωτή παρόμοιου με αυτόν που εικονίζεται στο σχήμα 5.1 διοχετεύεται ισχύς 60μW. Η ισχύς που μετράται στις θύρες 2,3 και 4 είναι 0.004, 26 και 27.5 μW αντίστοιχα. Να υπολογίσετε τις πρόσθετες απώλειες, την εισερχόμενη απώλεια, την εμπλοκή και το διαχωρισμό ισχύος.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

1. Συνδέστε στο κυκλώματα πομπού αντίσταση $R_{\Pi} = 330\Omega$ και στο κύκλωμα του δέκτη αντίσταση $R_{\Delta} = 1\text{ M}\Omega$. Ορίστε στην γεννήτρια παλμών σήμα DC 10V. Συνδέστε καλώδιο οπτικής ίνας μήκους 1 μέτρου και μετρήστε με τον παλμογράφο ή το πολυμετρο την ισχύ στην έξοδο της.
2. Αντικαταστήστε το καλώδιο οπτικής ίνας με διακλαδωτή 2 x 2 με διαχωρισμό ισχύος 50 / 50 και μετρήστε πειραματικά την παραπάνω τιμή του διαχωρισμού ισχύος διοχετεύοντας φως διαδοχικά και στις δύο εισόδους. Συγκρίνεται τα αποτελέσματα μεταξύ τους και με την τιμή του κατασκευαστή.
3. Για τον ίδιο διακλαδωτή μετρήστε πειραματικά τις πρόσθετες απώλειες, την εισερχόμενη απώλεια και την εμπλοκή διοχετεύοντας φως διαδοχικά και στις δύο εισόδους. Συγκρίνεται τα αποτελέσματα μεταξύ τους και με τις τιμές του κατασκευαστή.
4. Αντικαταστήστε το διακλαδωτή με διαχωρισμό ισχύος 50/50 με τον αντίστοιχο με διαχωρισμό ισχύος 90/10 και επαναλάβετε τις παραπάνω μετρήσεις

Άσκηση 6

Εξοικείωση με το πρόγραμμα προσομοίωσης LinkSIM

Εισαγωγή

Το LinkSIM είναι ένα προχωρημένο πακέτο προσομοίωσης οπτικών επικοινωνιακών συστημάτων. Χρησιμοποιώντας το LinkSIM μπορούμε να σχεδιάσουμε ζεύξεις οπτικών επικοινωνιών και να εξετάσουμε την λειτουργία και απόδοση τους συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων των στοιχείων που τις αποτελούν.

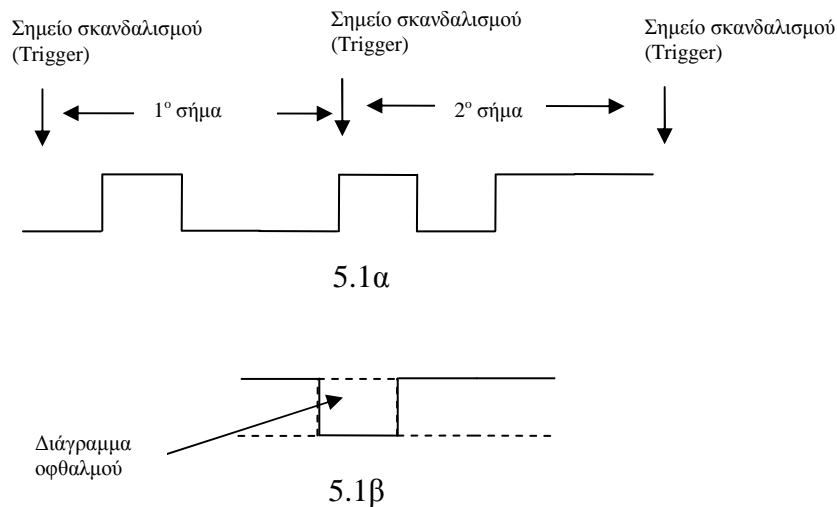
Στο LinkSIM μία ζεύξη οικοδομείται από ανεξάρτητα στοιχεία που συνδέονται και καθένα από αυτά αντιπροσωπεύει ένα τμήμα της ζεύξης. Όπως το πραγματικό σήμα μεταδίδεται μεταξύ των τμημάτων μίας ζεύξης, προσομοιωμένο σήμα μεταδίδεται στα μοντέλα των στοιχείων στην ζεύξη του LinkSIM. Κάθε στοιχείο προσομοιώνεται ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που δίδονται σε αυτό από το χρήστη και την πληροφορία σήματος που μεταδίδετε σε αυτό από άλλα στοιχεία. Τα στοιχεία παρουσιάζονται γραφικά σαν εικόνες ενώ εσωτερικά αποτελούνται από δεδομένα και περίπλοκους αριθμητικούς αλγορίθμους.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίδονται, μεταξύ άλλων, με την μορφή διαγραμμάτων οφθαλμού, διαγραμμάτων σήματος και γραφικές παραστάσεις του bit error rate (BER) συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων σε κατάλληλα σημεία της ζεύξης.

Διάγραμμα οφθαλμού (Eye Diagram)

Η επίδραση του θορύβου και του χρόνου ανόδου στην απόδοση ενός ψηφιακού συστήματος μπορεί να εξεταστεί οπτικά με τη χρήση του διαγράμματος οφθαλμού. Το διάγραμμα οφθαλμού προκύπτει αν απεικονίσουμε μια τυχαία αλληλουχία παλμών στον παλμογράφο χρησιμοποιώντας ένα σταθερό διάστημα σκανδαλισμού (trigger)

Ας πάρουμε ως παράδειγμα το ιδανικό σήμα που απεικονίζετε στο σχήμα 5.1α. Για να δημιουργήσουμε το διάγραμμα οφθαλμού αυτού του σήματος αρχικά επιλέγουμε το διάστημα του σκανδαλισμού, έστω ότι το σήμα σκανδαλίζεται κάθε 4 bit όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1α. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια αλληλουχία σημάτων. Αν αυτά παρουσιαστούν στο ίδιο χρονικό διάστημα η υπέρθεση τους δίδεται στο σχήμα 5.1β. Μια και το συγκεκριμένο σήμα ήταν ιδανικό με χρόνο ανόδου/ καθόδου μηδενικό και χωρίς θόρυβο το μάτι είναι τετράγωνο. Η περιοχή του τετραγώνου αντιπροσωπεύει την περιοχή όπου μπορεί να γίνει διαχωρισμός μεταξύ των bit 1 και 0. Για ένα πραγματικό σύστημα με θόρυβο και μη μηδενικό χρόνο ανόδου/ καθόδου το μάτι κλείνει δίνοντας μία ένδειξη της αποδοτικότητας του συστήματος.



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα οφθαλμού.


Ρυθμός εσφαλμένων bit (Bit error rate –BER)

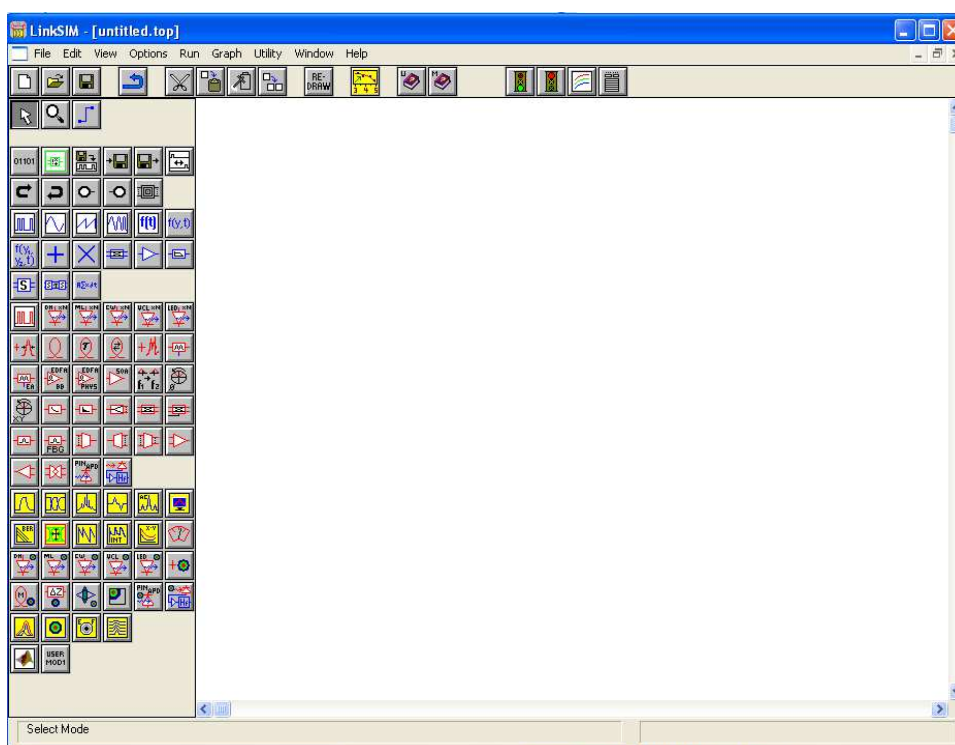
Ο ρυθμός εσφαλμένων bit (BER) δίνει μία μέτρηση της αποδοτικότητας ενός ψηφιακού συστήματος. Είναι ο λόγος του πλήθους των bit που ανιχνεύθηκαν εσφαλμένα προς το σύνολο των bit που ανιχνεύθηκαν. Ένα BER 10^{-9} σημαίνει ότι σε 1 δισεκατομμύριο bits (10^9 bit) που μεταδόθηκαν 1 bit ανιχνεύθηκε λάθος. Η απαιτούμενη τιμή BER εξαρτάται από την εφαρμογή. **Η μετάδοση ψηφιακά κωδικοποιημένης φωνής τηλεφωνικά απαιτεί BER (περίπου 10^{-6}) ενώ για τη μετάδοση δεδομένων υπολογιστή υπάρχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις απόδοσης (BER περίπου 10^{-9}).** Μερικά εσφαλμένα bit δεν θα προκαλέσουν σημαντική αλλαγή στη μετάδοση ομιλίας ενώ στην περίπτωση των δεδομένων υπολογιστή το πλήθος των εσφαλμένων bit είναι πολύ σημαντικό για την επιτυχή λειτουργία πχ ενός προγράμματος.

Χρήση του LinkSIM

Αφού ξεκινήσουμε το πρόγραμμα LinkSIM (σχήμα 5.2) παρατηρούμε στην μπάρα των μενού τις γνωστές λειτουργίες πχ File, Edit, View κλπ, και δύο μενού που σχετίζονται με την προσομοίωση. Το *Run* από όπου μπορούμε να ξεκινήσουμε (*Go*), να σταματήσουμε (*Stop Simulation*) μια προσομοίωση ή να προσομοιώσουμε τη λειτουργία μιας ζεύξης για περισσότερες από μια τιμές μιας παραμέτρου (*Scan Variable*). Από το *Utility* μενού και συγκεκριμένα από το *Open Simulation Log File* μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για την διαδικασία της τελευταίας προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε. Σε αυτό το αρχείο θα πρέπει να ανατρέχετε αν το πρόγραμμα εμφανίσει μηνύματα εσφαλμένων διαδικασιών (**warnings**) που καταστούν αδύνατη την προσομοίωση της ζεύξης.


Στην οριζόντια μπάρα εργαλείων υπάρχουν εικονίδια που επιτρέπουν γρήγορη πρόσβαση σε κάποιες διαδικασίες ενώ στην κάθετη και πιο σημαντική μπάρα εργαλείων υπάρχουν τα εικονίδια που αντιστοιχούν στα διάφορα στοιχεία μιας ζεύξης στα οποία θα αναφερθούμε με λεπτομέρεια στην συνέχεια.

Για να φτιάξουμε μία νέα ζεύξη αρχικά δημιουργούμε ένα καινούργιο χώρο εργασίας από το *File menu: New*. Δίπλα από την κάθετη μπάρα εργαλείων εμφανίζεται μία λευκή επιφάνεια όπου μπορούμε να δημιουργήσουμε τη ζεύξη. Για να τοποθετήσουμε ένα τμήμα της ζεύξης πρέπει να είμαστε σε *Select Mode* . Επιλέγουμε το εικονίδιο που μας ενδιαφέρει από την κάθετη μπάρα εργαλείων χρησιμοποιώντας το ποντίκι και στη συνέχεια το τοποθετούμε στην επιφάνεια εργασίας. Αν με το ποντίκι σε ένα εικονίδιο στην επιφάνεια εργασίας πατήσουμε δεξιά κλικ εμφανίζεται η λίστα με τις παραμέτρους του στοιχείου όπου μπορούμε να επιλέξουμε τα χαρακτηριστικά του, ανάλογα με τη ζεύξη που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε. Με τη λειτουργία *help* που διατίθεται σε όλα τα εικονίδια μπορούμε να πληροφορηθούμε λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά αυτού του στοιχείου καθώς και επεξηγήσεις για τις παραμέτρους που μπορούμε να μεταβάλλουμε.



Σχήμα 5.2 Το παράθυρο του προγράμματος LinkSIM

Αφού τοποθετήσουμε κάποια τμήματα της ζεύξης για να τα συνδέσουμε μεταξύ τους και να μεταφέρουμε την πληροφορία επιλέγουμε από την κάθετη μπάρα

εργαλείων το εικονίδιο *Connect Mode*.  Όπως θα παρατηρήσετε δεξιά ή / και αριστερά από κάθε εικονίδιο υπάρχει ένα μικρό χρωματιστό τετράγωνο από το οποίο το στοιχείο αυτό μπορεί να δώσει ή να λάβει σήμα. Κάποια στοιχεία μπορούν

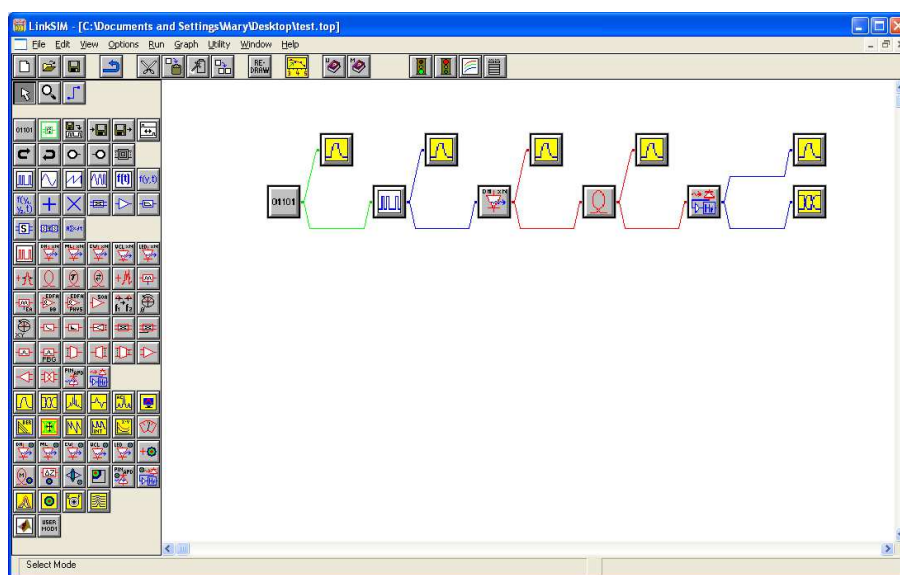
να δώσουν ή / και να λάβουν παραπάνω από ένα σήματα και αυτό υποδηλώνεται με την ύπαρξη περισσότερων τέτοιων σημείων σύνδεσης. Ενώ βρισκόμαστε σε *Connect mode* πατάμε το αριστερό κουμπί του ποντικιού πάνω σε ένα σημείο σύνδεσης ενός εικονιδίου κρατώντας πατημένο το κουμπί μετακινούμε το ποντίκι στο σημείο σύνδεσης του στοιχείου που θέλουμε να συνδέσουμε. Αντίστοιχα μία σύνδεση μπορεί να διαγραφεί αν επαναλάβουμε την παραπάνω διαδικασία αλλά κρατώντας πατημένο το δεξί κουμπί του ποντικιού. Το χρώμα της συνδετικής γραμμής που χαράζεται υποδηλώνει το είδος του σήματος που μεταφέρεται: κόκκινο για οπτικό σήμα, μπλε για ηλεκτρικό, και πράσινο για δυαδικό.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Περιγράψτε πως προκύπτει το διάγραμμα οφθαλμού μιας ζεύξης και πως χρησιμοποιείται στις οπτικές επικοινωνίες.
2. Εξηγείστε την έννοια του BER. Από τι εξαρτάται η μέγιστη επιτρεπτή τιμή BER μιας ζεύξης;
3. Καταγράψτε το όνομα που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα LinkSIM καθώς και τις μονάδες στις οποίες είναι εκφρασμένες οι παρακάτω παράμετροι μιας ζεύξης:
α) ρυθμός μετάδοσης σήματος β) Τιμή τάσης δυαδικού 0, γ) Μήκος κύματος και ρεύμα πόλωσης δ) μήκος και απώλεια οπτικής ίνας

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Στη συνέχεια για να εξοικειωθούμε με τη χρήση του προγράμματος θα δημιουργήσουμε μία απλή ζεύξη. Σε κάθε περίπτωση αν δε δίδονται διαφορετικές οδηγίες θα χρησιμοποιούμε τα χαρακτηριστικά των στοιχείων όπως ορίζονται από το πρόγραμμα χωρίς αλλαγές. Η ζεύξη αποτελείται από ένα σήμα προς μετάδοση, ένα laser άμεσης διαμόρφωσης, μία οπτική ίνα, και ένα δέκτη (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 Μια απλή ζεύξη

1. Για να παράγουμε το σήμα προς μετάδοση θα χρησιμοποιήσουμε τη γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) Generator* που μπορεί να δώσει διάφορες δυαδικές ακολουθίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που θα ορίσουμε. Από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης των bit (*bitRate*) είναι 10 Gbit/sec
2. Στη συνέχεια για να μετατρέψουμε τη δυαδική ακολουθία σε ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιούμε μία γεννήτρια σήματος (*Electrical Signal Generator*). Η οποία όπως μπορούμε να δούμε δίνει στην έξοδο της (*signaltype*) τάση (*Voltage*) 0 Volts (V_{min}) για δυαδικό σήμα 0 και 1 Volt (V_{max}) για δυαδικό σήμα 1 και χρησιμοποιεί διαμόρφωση (*modulationType*) NRZ-Non Return to Zero.
3. Για οπτική πηγή θα χρησιμοποιήσουμε ένα Laser άμεσης διαμόρφωσης (*Direct Modulated Laser*) το οποίο θα τροφοδοτείται από το σήμα που παράγει ο Signal Generator. Το laser εκπέμπει στα 1550 nm και είναι ορθά πολωμένο (*Bias value: I_0*) στα 30 mA.
4. Από τη λίστα των χαρακτηριστικών του laser επιλέγοντας την δυνατότητα *test – report* εμφανίζονται πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του laser (Ενδεικτικά στο σχήμα 5.4). Μπορούμε να δούμε ότι το ρεύμα κατωφλιού (*threshold current*) είναι περίπου 7.7 mA και το 3dB εύρος ζώνης διαμόρφωσης (*bandwidth*) εξαρτάται από το ρεύμα ορθής πόλωσης (*Bias current*) που εφαρμόζεται.

Threshold current = 7.694598 mA	
Power efficiency = 0.318417 mW/mA	
Bias current = 30.000000 mA	
3dB Bandwidths (GHz) versus Bias Current (mA)	

Current	Intrinsic 3dB Bandwidth

8.464057	1.660660
11.541897	3.636756
15.389195	4.998553
23.083793	6.663605
30.000000	7.596786

Σχήμα 5.4 Πληροφορίες (ενδεικτικά) σχετικά με τα χαρακτηριστικά του laser που δίδονται μέσω της επιλογής *test* που προσφέρει το πρόγραμμα LinkSIM

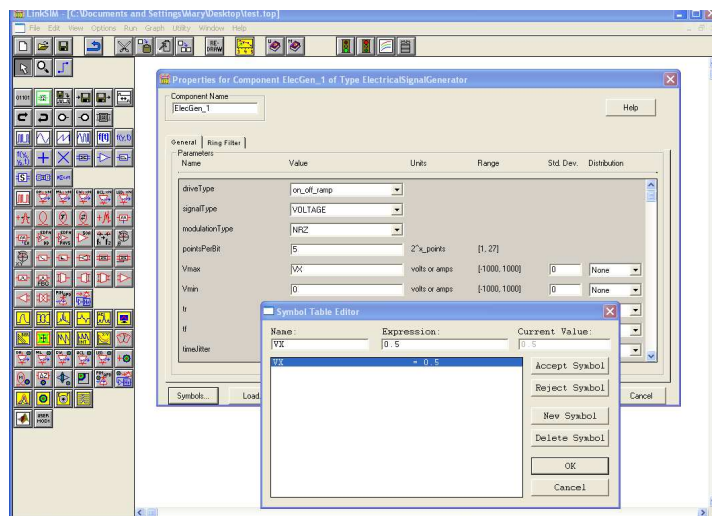
5. Στη συνέχεια το σήμα θα μεταδοθεί μέσω μιας μονότροπης οπτικής ίνας (*Nonlinear Fibre*) που έχει μήκος (*length*) 1 km, διάμετρο (*diameter*) 8.2 μm και συντελεστή απωλειών (*loss*) 0.25 dB/Km.
6. Τέλος, το σήμα στο άκρο της ίνας θα ανιχνευθεί από ένα δέκτη (*Receiver*)

7. Αφού συνδέσουμε τα παραπάνω στοιχεία της ζεύξης (παρατηρείστε το χρώμα των συνδετικών γραμμών που υποδηλώνει το είδος του σήματος που μεταδίδεται) τοποθετούμε μετά από κάθε στοιχείο ένα διάγραμμα σήματος *Plot Signal* για να παρακολουθήσουμε το σήμα σε κάθε τμήμα της ζεύξης. Επίσης στην έξοδο του δέκτη τοποθετούμε ένα διάγραμμα οφθαλμού *Eye Diagram analyzer* για να έχουμε μία εκτίμηση της αποδοτικότητας της ζεύξης.
8. Όταν η σχεδίαση της ζεύξης έχει ολοκληρωθεί εκτελούμε την προσομοίωση μέσω της επιλογής *Go* από το μενού *Run*.
9. Μελετείστε τα διαγράμματα σήματος μετά από κάθε τμήμα της ζεύξης καθώς και το διάγραμμα οφθαλμού στην έξοδο. Η απόδοση της ζεύξης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων. Όπως βλέπετε για την απλή ζεύξη με τα εξ ορισμού χαρακτηριστικά των στοιχείων το μάτι στο διάγραμμα οφθαλμού είναι αρκετά ανοικτό μια ένδειξη ότι η μεταφορά των σήματος θα είναι επιτυχής.

Προσομοίωση σε περισσότερες από μία μεταβλητές

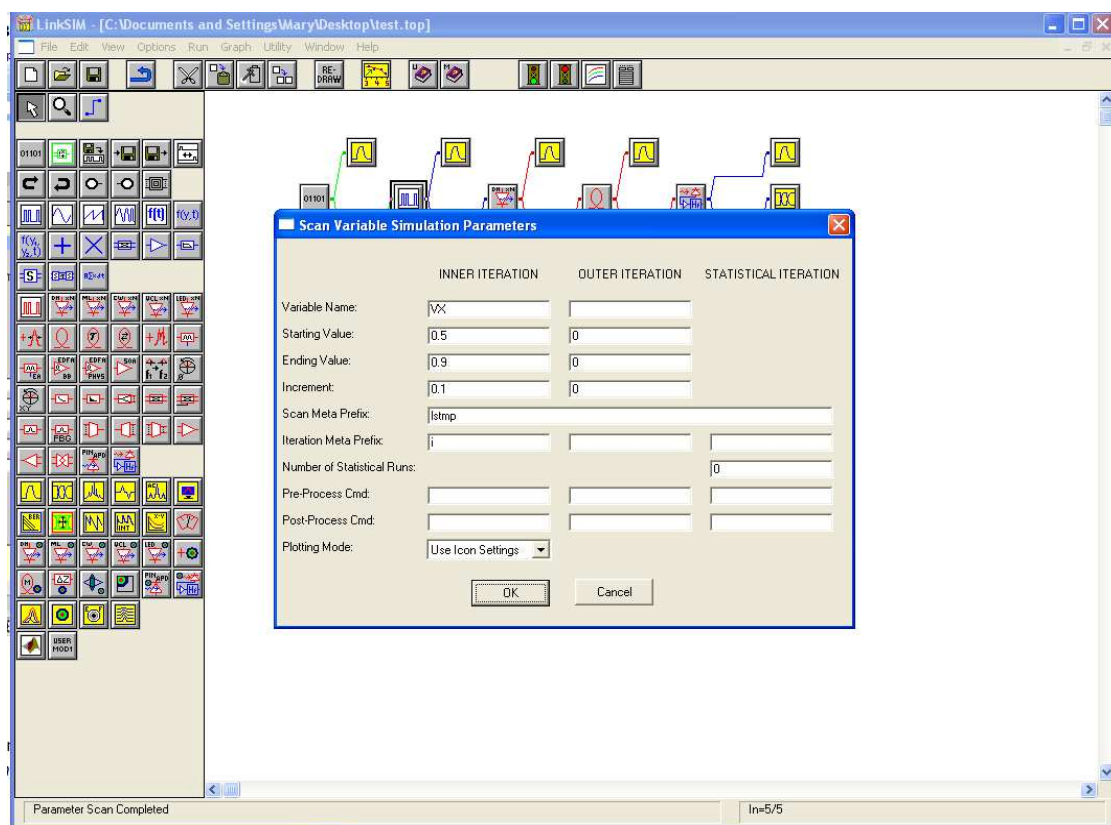
Στη συνέχεια θα δούμε πως μπορούμε χρησιμοποιώντας την επιλογή *Scan variable* να εκτελέσουμε προσομοιώσεις σε παραπάνω από μία μεταβλητές για να μελετήσουμε την επίδραση τους στην απόδοση της ζεύξης. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το BER ως ένδειξη της λειτουργίας του συστήματος.

1. Στην ζεύξη που έχουμε ήδη σχεδιάσει προσθέτουμε ένα *BER Tester* στην έξοδο του δέκτη. Ο *BER Tester* θα συνδεθεί και με την γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS* για να γίνει η σύγκριση μεταξύ του αρχικού και τελικού σήματος.
2. Στη συνέχεια ορίζουμε το μήκος της ίνας ίσο με 100 km.



Σχήμα 5.5 Ορισμός παραμέτρου

3. Ορίζουμε την τάση (V_{max}) που η γεννήτρια σήματος αντιστοιχείται στο δυαδικό 1 ως μεταβλητή με τυχαίο όνομα έστω VX. Αρχικά πρέπει να οριστεί στον πίνακα συμβόλων *Symbols* όπου επιλέγουμε *New Symbol* ορίζουμε τη μεταβλητή και μια ενδεικτική τιμή έστω 0.5 V και στη συνέχεια επιλέγουμε *Accept symbol* (σχήμα 5.5). Στον ορισμό των ενδεικτικών τιμών αλλά και των αρχικών, τελικών τιμών θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι μονάδες των μεταβλητών όπως ορίζονται από το πρόγραμμα
4. Για να δούμε τις επιπτώσεις τιμών του V_{max} στην απόδοση του συστήματος επιλέγουμε *scan variable* από το *Run* μενού και ορίζουμε την παράμετρο που θα μεταβληθεί (VX), την αρχική 0.5 V, τελική τιμή 0.9 V και το βήμα 0.1 V όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Αν στην επιλογή *Iteration Meta Prefix* γράψουμε *i* τότε το πρόγραμμα θα εκτελέσει και θα σώσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (διάγραμμα σήματος, διάγραμμα οφθαλμού) για καθεμία από τις τιμές της μεταβλητής όπως ορίζονται από το βήμα που έχουμε επιλέξει. Αν η επιλογή αυτή αφεθεί κενή το πρόγραμμα δίνει ως αποτέλεσμα μόνο το BER.



Σχήμα 5.6 Σάρωση παραμέτρου

5. Αν εκτελέσουμε την προσομοίωση και στη συνέχεια προσπαθήσουμε να δούμε τα αποτελέσματα στο BER έχουμε δύο επιλογές (*PLOT Selection*):

- αρχεία BER με κατάληξη **BER.plc* δίνουν τα αποτελέσματα του BER σε μορφή γραφικής παράστασης ενώ
- αρχεία BER με κατάληξη **table.txt* δίνουν τα αποτελέσματα του BER σε μορφή πίνακα (ενδεικτικά σχήμα 5.7)

VX	RUN#	BER
5.0000e-001	1	8.3689e-004
6.0000e-001	1	8.8798e-005
7.0000e-001	1	4.3607e-006
8.0000e-001	1	7.2993e-008
9.0000e-001	1	3.2925e-010

Σχήμα 5.7 Τιμές BER συναρτήσεως μεταβλητής VX σε μορφή πίνακα.

Επεξήγηση: Τιμή BER πχ 8.3689 e-004 μεταφράζεται σε $\sim 8.37 \times 10^{-4}$ ή $\frac{8.37}{10^4}$ δηλαδή περίπου 8 εσφαλμένα bit σε σύνολο 10000 bits

6. Εκτελέστε τη σάρωση και δείτε τις τιμές του BER που προκύπτουν για κάθε τιμή της μεταβλητής σε μορφή πίνακα και διαγράμματος. Επίσης παρατηρείστε το διάγραμμα οφθαλμού που προκύπτει για κάθε τιμή του V_{\max} συναρτήσεως της μεταβλητής.

Υπάρχει η δυνατότητα να εκτελέσουμε σάρωση σε δύο παραμέτρους συγχρόνως χρησιμοποιώντας και το *Outer Iteration* (σχήμα 5.6). Με το ίδιο τρόπο όπως πριν μπορούμε να επιλέξουμε και μια δεύτερη μεταβλητή και να εκτελέσουμε διπλή σάρωση.

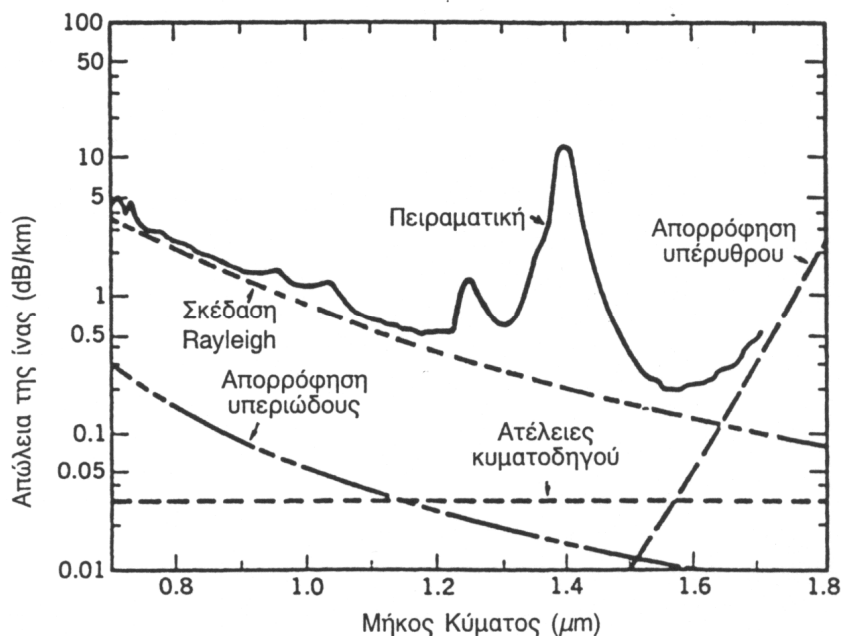
Άσκηση 7

Επίδραση των χαρακτηριστικών της ίνας στην απόδοση της ζεύξης

Απώλειες οπτικών ινών

Την δεκαετία του 1970, η κατασκευή οπτικών ινών με χαμηλές απώλειες στην περιοχή του 1 μm , (μαζί με την επίδειξη laser ημιαγωγών που λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου) έκαναν πρακτικά δυνατές τις οπτικές επικοινωνίες. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη άσκηση οι απώλειες που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας μια και καθορίζει την μέγιστη απόσταση διάδοσης του σήματος χωρίς παραμόρφωση (ή την απόσταση μεταξύ αναμεταδοτών). Συγκριτικά με τις πλαστικές οι γυάλινες οπτικές ίνες παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερες απώλειες.

Οι απώλειες συναρτήσει του μήκους κύματος για τις γυάλινες οπτικές ίνες φαίνονται στο σχήμα 7.1. Στο ίδιο σχήμα δίδεται και συμβολή των διαφόρων παραγόντων που προκαλούν τις απώλειες:



Σχήμα 7.1. Τυπική εξασθένιση φωτός σε γυάλινη ίνα συναρτήσει του μήκους κύματος

Επιγραμματικά οι παράγοντες που συμβάλουν στις απώλειες στις γυάλινες ίνες είναι:

- Απορρόφηση υλικού
Όλα τα υλικά παρουσιάζουν απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Στην γυάλινη οπτική ίνα που κατασκευάζεται από πυρίτιο

εμφανίζεται η φυσική απορρόφηση του πυριτίου (στην υπεριώδη περιοχή και στην υπέρυθρη) και η απορρόφηση λόγω προσμίξεων πχ Fe, Cu αλλά κυρίως λόγω της παρουσίας υδρατμών που προκαλούν τις κορυφές απορρόφησης OH σε μήκη κύματος 1.39 μm, 1.24μm και 0.95 μm

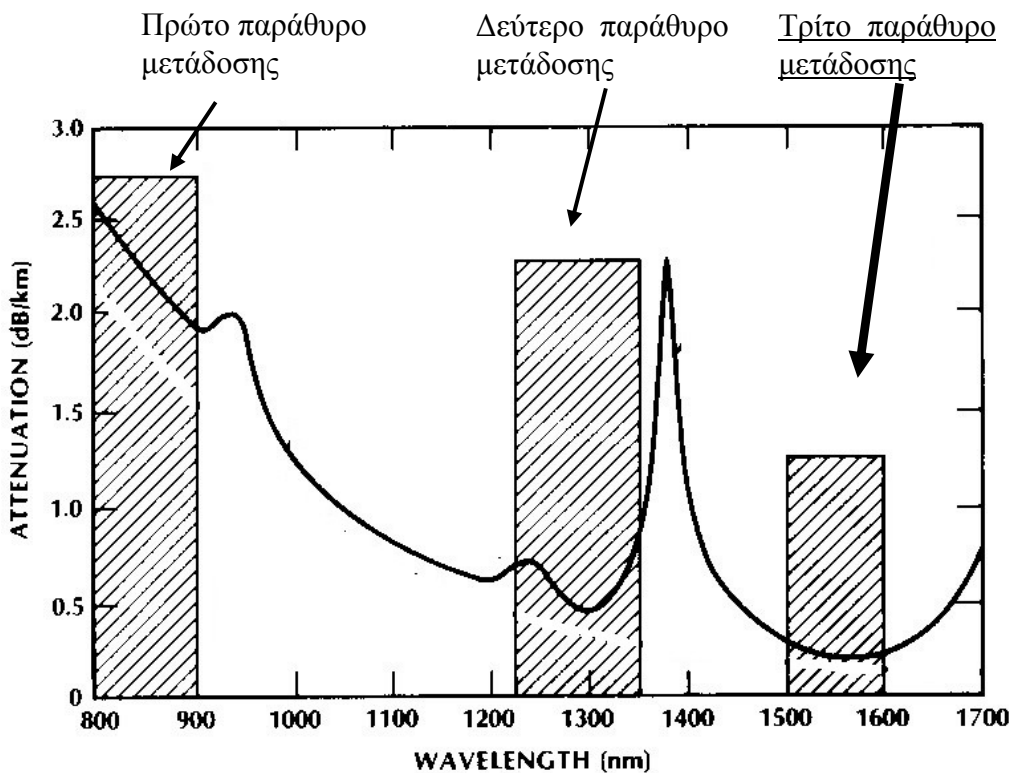
- Σκέδαση Rayleigh

Προκαλείται από τις κατά τόπους μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας του υλικού που οδηγούν σε διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης που δρουν ως εστίες σκέδασης στο “ομογενές” υλικό της οπτικής ίνας. Η σκέδαση Rayleigh της ακτινοβολίας εξαρτάται έντονα από το μήκος κύματος της και συγκεκριμένα είναι ανάλογη του $1/\lambda^4$

- Ατέλειες κυματοδηγού

Απώλειες προκαλούν οι ατέλειες στην περιοχή ένωσης του πυρήνα με το περίβλημα καθώς και τα λυγίσματα της οπτικής ίνας: μικροκάμψεις (παραμορφώσεις μικρής ακτίνας κατά την κατασκευή της ίνας) και μακροκάμψεις (καμπυλότητα της ίνας κατά τη χρήση της)

Οι απώλειες των γυάλινων οπτικών ινών (σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες όπως διαθέσιμες οπτικές πηγές) υπαγορεύουν τα μήκη κύματος λειτουργίας των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών που αποκαλούνται και παράθυρα μετάδοσης (σχήμα 7.2).

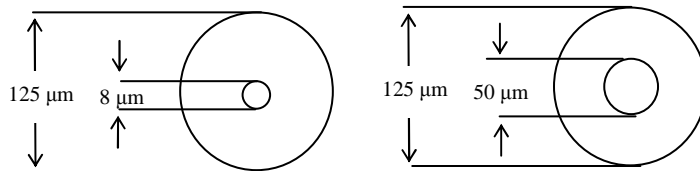


Σχήμα 7.2 “Παράθυρα” μετάδοσης οπτικών ινών

Οπτικοί τρόποι μετάδοσης (modes). Μονότροπες –Πολύτροπες ίνες

Οι οπτικοί τρόποι μετάδοσης είναι μαθηματικές και φυσικές έννοιες που περιγράφουν την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φως) από την οπτική ίνα ή κάποιο κυματοδηγό γενικότερα. Κάθε οπτικός τρόπος μετάδοσης αντιπροσωπεύει μία λύση της κυματικής εξίσωσης που προκύπτει από τις εξισώσεις Maxwell. Πιο απλά κάθε οπτικός τρόπος μετάδοσης είναι μια διαδρομή την οποία ακολουθεί το φως καθώς διαδίδεται από την ίνα. Μία ίνα μπορεί να υποστηρίξει από 1 έως περισσότερους από 100000 οπτικούς τρόπους μετάδοσης ανάλογα με το μέγεθος της και τα χαρακτηριστικά της.

Οπτικές ίνες που υποστηρίζουν μονάχα ένα οπτικό τρόπο μετάδοσης λέγονται μονότροπες (single mode) και οι τυπικές διαστάσεις του πυρήνα τους (διάμετρος) είναι 8-10 μm . Αντίστοιχα οπτικές ίνες με περισσότερους από ένα οπτικούς τρόπους μετάδοσης λέγονται πολύτροπες (multi mode) και έχουν τυπικές διαστάσεις πυρήνα (διάμετρος) από 50 μm μέχρι και mm (σχήμα 7.3). Ο αριθμός των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζει μία ίνα καθορίζει, ως ένα βαθμό, την δυνατότητα της να μεταφέρει πληροφορία λόγω του φαινομένου της διασποράς.

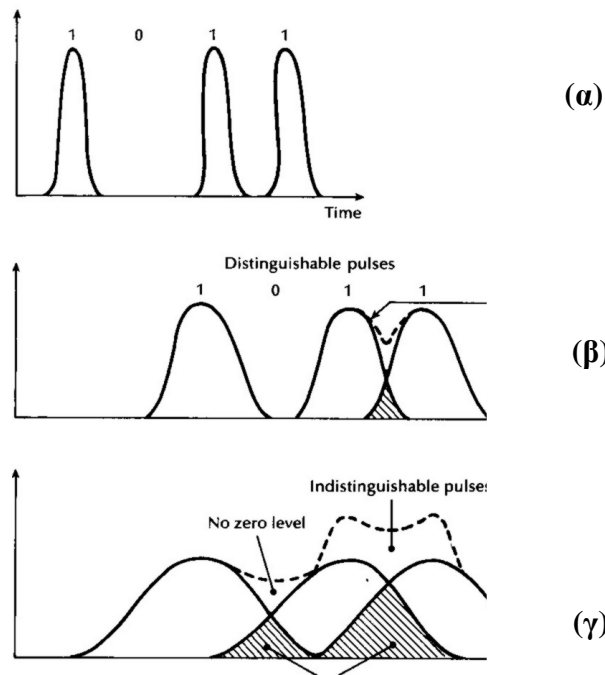


Σχήμα 7.3 Τυπικές διαστάσεις μονότροπων και πολύτροπων οπτικών ινών

Διασπορά οπτικών ινών

Η διασπορά (Dispersion), που μετράται σε μονάδες $\text{ps}/(\text{km nm})$ (ή σε μονάδες s/m^2 στο σύστημα SI που χρησιμοποιείται στο LinkSIM), είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί τη χρονική διαπλάτυνση των παλμών κατά τη μετάδοση. Έστω η αλληλουχία σήματος που εισέρχεται σε οπτική ίνα δίδεται στο σχήμα 7.4.(α). Λόγω της διασποράς μετά από κάποιο χρόνο οδήγησης του από την ίνα θα έχει διαπλατυνθεί και θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 7.4.(β). Όπως βλέπουμε οι παλμοί αν και διαπλατυσμένοι εξακολουθούν να είναι διακριτοί. Αν όμως το μήκος της ίνας ή η διασπορά είναι ακόμα μεγαλύτερη τότε οι διαπλάτυνση μπορεί να είναι τέτοια ώστε οι παλμοί στην έξοδο να μην μπορούν να διαχωριστούν (σχήμα 7.4.(γ)).

Σε μία πρακτική οπτική ζεύξη ο ρυθμός μετάδοσης των bit πρέπει να είναι τόσο χαμηλός ώστε οι παλμοί στο τέλος της ίνας να μην επικαλύπτονται άρα η διασπορά περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας που μπορεί να υποστηρίξει η ίνα επιτυχώς.



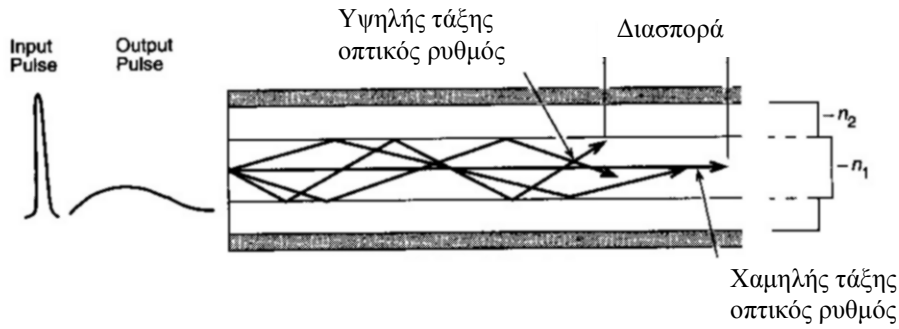
Σχήμα 7.4 Η επίδραση της διασποράς στο εύρος των οπτικών παλμών

Η διασπορά που εμφανίζονται στις οπτικές ίνες είναι γενικά δύο ειδών η

- **Διατροπική διασπορά** (Intermodal or mode dispersion) η οποία εμφανίζεται λόγω της διαφορετικής ταχύτητας με την οποία μεταδίδονται (γενικά) οι διαφορετικοί οπτικοί τρόποι μετάδοσης που υποστηρίζει η οπτική ίνα.
- **Ενδοτροπική διασπορα** (Intramodal dispersion) η οποία εμφανίζεται σε κάθε οπτικό τρόπο μετάδοσης και οφείλεται στη διασπορά υλικού (η ταχύτητα της ακτινοβολίας μέσα σε ένα υλικό εξαρτάται από το μήκος κύματος της άρα διαφορετικές φασματικές συνιστώσες ενός παλμού μεταδίδονται με διαφορετική ταχύτητα) και τη διασπορά κυματοδηγού (η ταχύτητα της ακτινοβολίας είναι διαφορετική στον πυρήνα και στο περίβλημα)

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η διασπορά που εμφανίζει μία οπτική ίνα εξαρτάται από το είδος της καθώς και από τις διαφορές στην ταχύτητα των οπτικών τρόπων μετάδοσης (αν αυτοί υπάρχουν). Εν γένει σε μια οπτική ίνα με περισσότερους από ένα οπτικούς τρόπους μετάδοσης (πολύτροπη) ένας παλμός διεγείρει περισσότερους από ένα, ίσως και όλους, τους οπτικούς τρόπους μετάδοσης που υποστηρίζονται από την ίνα.

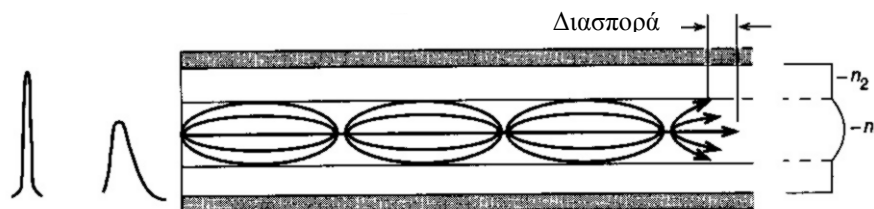
Σε μια πολύτροπη ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης όλοι οι οπτικοί τρόποι μετάδοσης έχουν την ίδια ταχύτητα $v = c / n_1$ άρα οι τρόποι μετάδοσης υψηλής τάξης (που διανύουν μεγαλύτερη απόσταση κατά τη μετάδοση) θα φτάσουν στην έξοδο καθυστερημένοι ως προς τους ρυθμούς χαμηλής τάξης (Σχήμα 7.5). Αυτή η χρονική διαφορά προκαλεί την διαπλάτυνση του αρχικού παλμού.



Σχήμα 7.5 Εμφάνιση διατροπικής διασποράς σε πολύτροπη ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

Το φαινόμενο της διατροπικής διασποράς είναι πολύ έντονο στις πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα η δυνατότητα μεταφοράς πληροφορίας από ίνες τέτοιου τύπου να είναι περιορισμένη. Τυπικές τιμές του γινομένου εύρου ζώνης 3dB επί μήκος μετάδοσης ($f_{3dB-OP} \times L$) για μια τέτοια ίνα να είναι 20 MHz km

Αντίθετα στις πολύτροπες ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης οι υψηλής τάξης ρυθμοί διανύουν μεγαλύτερη απόσταση αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα ενώ οι ρυθμοί χαμηλής τάξης έχουν μικρότερη ταχύτητα (ο δείκτης διάθλασης είναι μέγιστος στο κέντρο) αλλά διανύουν μικρότερες αποστάσεις (σχήμα 7.6). Συνεπώς οι διαφορετικοί οπτικοί τρόποι μετάδοσης φτάνουν στην έξοδο με μικρή χρονική διαφορά. Αυτό οδηγεί στη μείωση χρονικής διαπλάτυνσης παλμού άρα το φαινόμενο της διατροπικής διασποράς περιορίζεται στις πολύτροπες ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης και αυξάνει την τυπική τιμή του γινομένου εύρου ζώνης 3dB επί μήκος μετάδοσης ($f_{3dB-OP} \times L$) για μια τέτοια ίνα στο 1 GHz km



Σχήμα 7.6 Περιορισμός διατροπικής διασποράς σε πολύτροπη ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης

Αντίστοιχα στις μονότροπες ίνες μια και υποστηρίζεται μονάχα ένας τρόπος μετάδοσης η διατροπική διασπορά εξαλείφεται με αποτέλεσμα οι μονότροπες οπτικές ίνες να εμφανίζουν μόνο ενδοτροπική διασπορά και να επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφορίας με τυπικές τιμές $f_{3dB-OP} \times L$ της τάξης των 100 GHz km

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Δίδονται τρεις ίνες: πολύτροπη βηματικού δείκτη διάθλασης, μονότροπη και πολύτροπη διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης. Να τις αξιολογήσετε σε σειρά προτίμησης ως μέσο μετάδοσης στις οπτικές επικοινωνίες βάση της

δυνατότητας μετάδοσης μεγάλου όγκου πληροφορίας (Δικαιολογήστε την απάντησή σας).

2. Τι είναι τα λεγόμενα “παράθυρα” μετάδοσης οπτικών επικοινωνιών;
3. Εξηγήστε την μείωση της διατροπικής διασποράς στις ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης σε σύγκριση με τις ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Στη σημερινή άσκηση θα εξετάσουμε την επίδραση των χαρακτηριστικών της ίνας στην απόδοση της ζεύξης. Συγκεκριμένα να μελετήσουμε την απόδοση μιας ζεύξης συναρτήσει του μήκους, των απωλειών, της διαμέτρου και τέλος της διασποράς της οπτικής ίνας

1. Κατασκευάστε ζεύξη που αποτελείτε από γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS*, γεννήτρια σήματος *Signal Generator*, Laser άμεσης διαμόρφωσης *Direct Modulated Laser*, μονότροπη γυάλινη οπτικής ίνα *Nonlinear Fibre* και δέκτη *Receiver*. Σε κάθε περίπτωση, αν δε δίδονται διαφορετικές οδηγίες θα χρησιμοποιείτε, τα χαρακτηριστικά των στοιχείων όπως ορίζονται από το πρόγραμμα χωρίς αλλαγές.
2. Στην έξοδο του δέκτη τοποθετείτε διάγραμμα οφθαλμού *Plot Eye Diagram* και *BER tester*. Εκτελέστε προσομοίωση χωρίς αλλαγή στα χαρακτηριστικά των στοιχείων της ζεύξης και ελέγξτε την αποδοτικότητα της μέσω του διαγράμματος οφθαλμού και του BER. Τι παρατηρείτε;
3. Στη συνέχεια ορίστε την τιμή της τάσης (V_{max}) που αντιστοιχεί η γεννήτρια σήματος στο δυαδικό 1 ίση με 0.1V. Επαναλάβετε την προσομοίωση και σχολιάστε το αποτέλεσμα σε σύγκριση με το προηγούμενο.
4. Τοποθετείτε διαγράμματα σήματος (*Plot Signal*) μετά από κάθε στοιχείο της ζεύξης και περιγράψτε τι απεικονίζουν (άξονες x και y). Όπου υπάρχει έννοια αλλάξτε της μονάδες ισχύος στα διαγράμματα από Watt σε dBm και παρατηρείστε τις αλλαγές.
5. Ορίστε στη γεννήτρια σήματος την τιμή του V_{max} ίση με 0.5V. Για να εξετάσετε την επίδραση του μήκους της ίνας στην απόδοση της ζεύξης ορίστε το μήκος της ίνας (*length*) ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή έστω 1000 m, και στη συνέχεια εκτελέστε σάρωση με αρχική τιμή 70000 m, τελική 100000 m και βήμα 10000 m. Καταγράψτε την μεταβολή της τιμής του BER σε διάγραμμα και σχολιάστε το αποτέλεσμα.
6. Ορίστε το μήκος της ίνας σταθερό και ίσο με 10 km. Για να εξετάσετε την επίδραση των απωλειών της ίνας στην απόδοση της ζεύξης ορίστε τις απώλειες (*loss*) ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή έστω 0.5 dB/km και στη συνέχεια εκτελέστε σάρωση με αρχική τιμή 0.5 dB/km, τελική 2.5 dB/km και βήμα 0.5

dB/km. Ορίστε metaprefix ώστε το πρόγραμμα να παράγει τα διαγράμματα οφθαλμού για κάθε μία από τις τιμές απωλειών στις οποίες εκτελεί προσομοίωση. Παρατηρείστε και συγκρίνετε τα διαγράμματα οφθαλμού που προκύπτουν. Καταγράψτε την μεταβολή της τιμής του BER και σχολιάστε το αποτέλεσμα.

7. Ορίστε την απώλεια της ίνας σταθερή και ίση με 0.25 dB/km. Για να μελετήσετε την επίδραση της διασποράς στη λειτουργία της ζεύξης ορίστε τη διασπορά της οπτικής ίνας ως μεταβλητή (για ευκολία μέσω της παραμέτρου *dispersionOffset*) με ενδεικτική τιμή 0, αρχική τιμή $3.9 \times 10^{-4} \text{ s/m}^2$, τελική τιμή $4.0 \times 10^{-4} \text{ s/m}^2$ και βήμα $0.01 \times 10^{-4} \text{ s/m}^2$. Καταγράψτε την μεταβολή της τιμής του BER και σχολιάστε το αποτέλεσμα.

Άσκηση 8

Ρυθμός μετάδοσης σήματος ζεύξης

Εισαγωγή

Πέρα από το τοπικό δίκτυο που μεταφέρει σήματα τηλεφώνων στα σπίτια, η οπτική ίνα κυριαρχεί. Οι περισσότερες ζεύξεις μεταξύ τηλεφωνικών κέντρων γίνονται με οπτικές ζεύξεις. Παρόλο που μερικά συμβατικά καλώδια χαλκού υπάρχουν ακόμα η οπτική ίνα είναι το προτιμητέο μέσο μετάδοσης από τη δεκαετία του 1980 εξαιτίας των χαμηλών απωλειών και την ικανότητα μετάδοσης μεγάλου πλήθους πληροφοριών.

Μια μονότροπη ίνα έχει ικανότητα μετάδοσης πολλών Gbits ανά δευτερόλεπτο (Giga bits per sec: Gbps) σε δεκάδες χιλιόμετρα. Για να έχετε μια εκτίμηση της χωρητικότητας μίας τέτοιας ζεύξης, με ένα σήμα 10 Gbps μπορούν να μεταδοθούν ανά ένα δευτερόλεπτο καθένα από τα παρακάτω: περίπου 1000 βιβλία ή 130000 κανάλια φωνής ή 16 κανάλια τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας.

SONET

Η αυξημένη χρήση οπτικών συστημάτων επικοινωνιών τη δεκαετία του 1980 στην Αμερική και η ανάγκη συμβατότητας μεταξύ των διαφόρων εταιριών παροχής τηλεφωνικών υπηρεσιών οδήγησε στην καθιέρωση ενός προτύπου ρυθμών μετάδοσης στους οποίους λειτουργούν οι ζεύξεις. Το πρότυπο αυτό ονομάζεται Synchronous Optical Network (σύγχρονο οπτικό δίκτυο) πιο γνωστό ως SONET. Το βασικό δομικό μπλοκ του SONET με την ονομασία OC-1 (από τα αρχικά των λέξεων Optical Carrier- οπτικό φέρον) έχει ρυθμό μετάδοσης 51.84 Mbps και τα μεγαλύτερα επίπεδα έχουν ρυθμούς πολλαπλάσιους του βασικού.

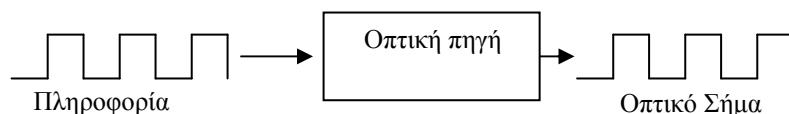
Μέσω μετάδοσης	Επίπεδο		Ρυθμός μετάδοσης	Αριθμός καναλιών φωνής	Απόσταση μεταξύ αναμεταδοτών
Καλώδιο χαλκού	DS-0		64 Kbps	1	1-2 km
	DS-1		1.544 Mbps	24	
	DS-1C		3.152 Mbps	48	
	DS-2		6.312 Mbps	96	
	DS-3		44.736 Mbps	672	
Οπτική ίνα	SONET	SDH			40 km
	OC-1		51.84 Mbps	672	
	OC-3	STM-1	155.52 Mbps	2016	
	OC-12	STM-4	622.08 Mbps	8064	
	OC-48	STM-16	2.48 Gbps	32,256	
	OC-96	STM-32	4.97 Gbps	64.512	
	OC-192	STM-64	9.95 Gbps	129,024	

Πίνακας II: Πρότυπα SONET/ SDH

Το αντίστοιχο διεθνές πρότυπο είναι το Synchronous Digital Hierarchy (σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία) ή SDH. Το βασικό δομικό μπλοκ του SDH έχει ρυθμό μετάδοσης 155.52 Mbps και αναφέρεται ως STM-1 (Synchronous Transport Module – μονάδα σύγχρονης μετάδοσης). Τα υψηλότερα επίπεδα έχουν ρυθμούς μετάδοσης πολλαπλάσιους αυτού του βασικού ρυθμού. Ο πίνακας II δίνει την αντιστοιχία μεταξύ SONET και SDH και τους ρυθμούς μετάδοσης bit για αρκετά επίπεδα. Για μία εκτίμηση της χωρητικότητας τέτοιων ζεύξεων δίδεται και ο αριθμός των βασικών 64 kbits ψηφιακών καναλιών φωνής που μπορούν να μεταδοθούν σε κάθε επίπεδο. Επίσης για σύγκριση δίδεται και οι ρυθμοί μετάδοσης για συστήματα που χρησιμοποιούν καλώδια χαλκού.

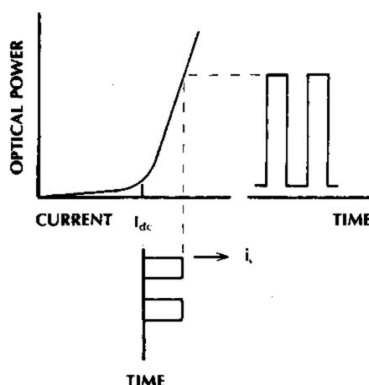
Άμεση διαμόρφωση οπτικής πηγής

Για την μετάδοση της επιθυμητής πληροφορίας από μια οπτική ζεύξη είναι απαραίτητη η διαμόρφωση του οπτικού σήματος που εισάγεται στην οπτική ίνα. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Στην άμεση διαμόρφωση (σχήμα 8) το ρεύμα τροφοδοσίας της οπτικής πηγής μεταβάλλεται συναρτησί της πληροφορίας συνεπώς στην οπτική ισχύ που εκπέμπει η πηγή έχει κωδικοποιηθεί η πληροφορία. Στην εξωτερική διαμόρφωση (που θα μελετηθεί στην άσκηση 11) χρησιμοποιούνται διακόπτες, ανεξάρτητοι από τις οπτικές πηγές (διαμορφωτές) που μεταβάλουν ελεγχόμενα την έξοδο μιας πηγής με σταθερή ισχύ λειτουργίας.



Σχήμα 8.1: Άμεση διαμόρφωση οπτικής πηγής

Υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις και συνεπώς διαφορετικά κυκλώματα τροφοδοσίας – διαμόρφωσης ανάλογα με το είδος της πηγής (LED ή LASER) και το είδος του σήματος (αναλογικό ή ψηφιακό). Στην περίπτωση μετάδοσης ψηφιακού σήματος με τη χρήση πηγής laser, που θα εξετάσουμε σήμερα η διαμόρφωση του laser φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2 Ψηφιακή διαμόρφωση laser

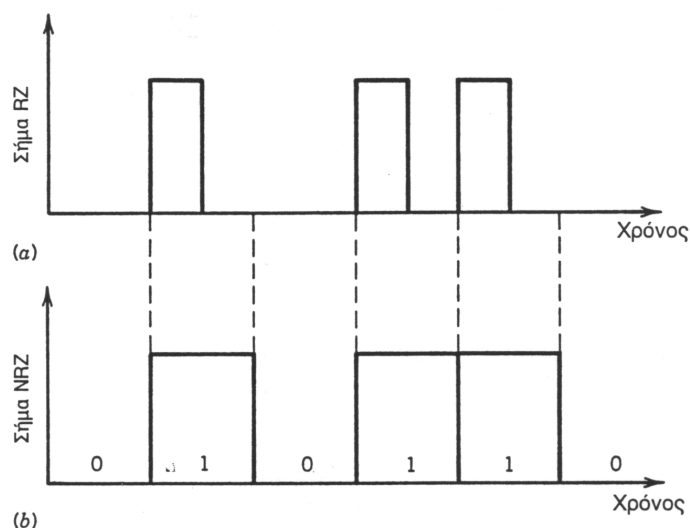
Απουσία σήματος το ρεύμα τροφοδοσίας του laser έχει μία μη μηδενική τιμή που ονομάζεται ρεύμα πόλωσης (bias current). Συνήθως η τιμή αυτή είναι κοντά στην τιμή του ρεύματος κατωφλιού του laser ώστε να μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται για την εκπομπή ισχύος (ο χρόνος που απαιτείται για να εκπέμψει φως ένα laser είναι μεγαλύτερος αν ξεκινά από μηδενικό ρεύμα τροφοδοσίας).

Κωδικοί διαμόρφωσης (Modulation Codes)

Υπάρχουν διάφορες αντιστοιχίες μεταξύ των μεταδιδόμενων bit και της εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος. Η επιλογή της κατάλληλης για κάποια ζεύξη γίνεται βάση της πολυπλοκότητας που εισάγεται στο σύστημα για την παραγωγή της.

Από τις πιο διαδεδομένες είναι :

- Διαμόρφωση με επιστροφή στο μηδέν (Return to Zero-RZ) Σχήμα 8.3α
Κάθε οπτικός παλμός που αναπαριστά το bit 1 είναι βραχύτερος από την περίοδο του bit και το πλάτος του επιστρέφει στο μηδέν (μηδενίζεται) πριν τελειώσει η διάρκεια του bit.
- Διαμόρφωση χωρίς επιστροφή στο μηδέν (Non Return to Zero-NRZ) Σχήμα 8.3 β
Ο οπτικός παλμός παραμένει σταθερός σε όλη τη διάρκεια της περιόδου του bit και το πλάτος του δεν πέφτει στο μηδέν μεταξύ δύο ή περισσότερων bit "1".



Σχήμα 8.3. Διαμόρφωση (α) με και (β) χωρίς επιστροφή στο μηδέν

Η διαμόρφωση NRZ χρησιμοποιείται συχνά στην πράξη επειδή απαιτεί μικρότερο εύρος ζώνης σήματος (οι μεταβάσεις ON-OFF γίνονται λιγότερες φορές). Συγκεκριμένα με τη χρήση της διαμόρφωσης NRZ ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης σήματος μπορεί να είναι (κατά προσέγγιση και όσον αφορά τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη διαμόρφωση της οπτικής πηγής της ζεύξης) **διπλάσιος** από το εύρος ζώνης 3dB (f_{3dB}) του laser ενώ στη διαμόρφωση RZ δεν μπορεί να υπερβαίνει το f_{3dB} . Συγχρόνως όμως η διαμόρφωση NRZ απαιτεί πιο αυστηρό έλεγχο του εύρους του παλμού και μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα που εξαρτώνται από τη μορφή των bit αν οι οπτικοί παλμοί “απλώνουν” κατά τη διάρκεια της μετάδοσης.

Στο σημερινό εργαστήριο θα σχεδιάσουμε μία ζεύξη οπτικών επικοινωνιών με ικανότητα μετάδοσης με ρυθμό 10 Gbps. Θα εξετάσουμε την λειτουργία της ζεύξης συναρτήσει των χαρακτηριστικών του laser, το είδος διαμόρφωσης που εφαρμόζεται και του ρυθμού μετάδοσης του σήματος. Τέλος θα δούμε πως η απόδοση του συστήματος υποβιβάζεται καθώς αυξάνεται ο όγκος της μεταδιδόμενη πληροφορία πάνω από την χωρητικότητα του συστήματος.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Τι είναι το ρεύμα πόλωσης του laser;
2. Περιγράψτε τις τεχνικές διαμόρφωσης με και χωρίς επιστροφή στο μηδέν (RZ και NRZ). Επίσης δώστε τα χαρακτηριστικά μιας ακόμα τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στις οπτικές επικοινωνίες.
3. Έστω οπτική πηγή laser με εύρος ζώνης 3dB (f_{3dB}) ίσο με 3GHz. Ποιος είναι ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός μετάδοσης που επιβάλλει το laser στην περίπτωση διαμόρφωσης (α) με επιστροφή στο μηδέν -RZ και (β) χωρίς επιστροφή στο μηδέν -NRZ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Η ζεύξη που θα σχεδιάσουμε είναι αποτελείται από ένα σήμα προς μετάδοση, ένα laser άμεσης διαμόρφωσης, μία οπτική ίνα, και ένα δέκτη. Σε κάθε περίπτωση, αν δε δίδονται διαφορετικές οδηγίες θα χρησιμοποιείτε, τα χαρακτηριστικά των στοιχείων όπως ορίζονται από το πρόγραμμα χωρίς αλλαγές.

1. Για να παράγουμε το σήμα προς μετάδοση θα χρησιμοποιήσουμε τη γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) Generator*.
2. Στη συνέχεια για να μετατρέψουμε τη δυαδική ακολουθία σε ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιούμε μία γεννήτρια σήματος (*Signal Generator*). Ορίζουμε την τάση εξόδου για το δυαδικό σήμα 1 (V_{max}) ίση με 0.5 Volts.

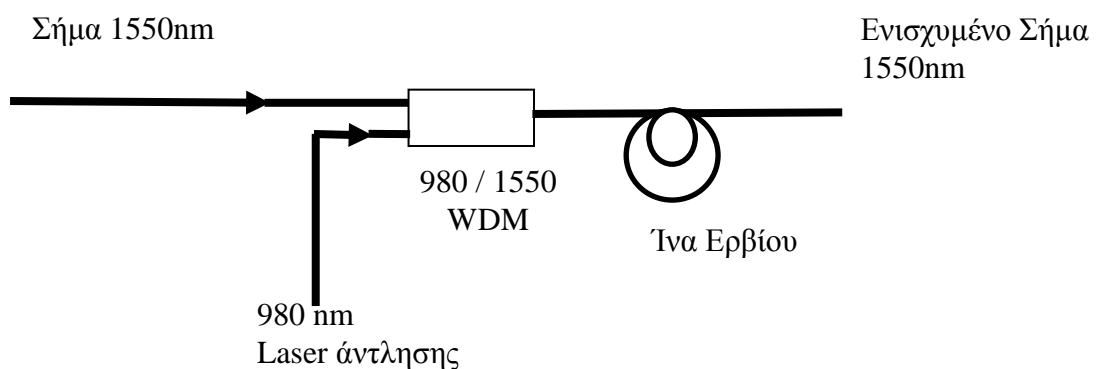
3. Για οπτική πηγή θα χρησιμοποιήσουμε ένα Laser άμεσης διαμόρφωσης (*Direct Modulated Laser*) το οποίο θα τροφοδοτείται από το σήμα που παράγει ο Signal Generator. Το laser εκπέμπει στα 1550 nm και είναι ορθά πολωμένο (*Bias value: I_0*) στα 30 mA.
4. Στη συνέχεια το σήμα θα μεταδοθεί μέσω μιας μονότροπης οπτικής ίνας (*Nonlinear Fibre*) για την οποία ορίζουμε μήκος (*length*) 10 km, και συντελεστή απωλειών (*loss*) 2 dB/Km.
5. Τέλος, το σήμα στο άκρο της ίνας θα ανιχνευθεί από ένα δέκτη *Receiver*
6. Αφού συνδέσουμε τα παραπάνω στοιχεία της ζεύξης στην έξοδο του δέκτη τοποθετούμε ένα διάγραμμα οφθαλμού *Plot Eye Diagram* για να έχουμε μία εκτίμηση της αποδοτικότητας της ζεύξης και ένα *BER Tester* τον οποίο συνδέουμε και με την γεννήτρια του δυαδικού σήματος.
7. Καταγράψτε (μέσω της επιλογής *test-report* του laser) και παρουσιάστε σε μορφή διαγράμματος την επίδραση του ρεύματος πόλωσης του laser στο εύρος ζώνης 3dB του laser. Πόσο είναι το εύρος ζώνης 3dB του laser στις συνθήκες λειτουργίας της παρούσας ζεύξης;
8. Για να επιβεβαιώσετε την επίδραση του ρεύματος πόλωσης του laser στη λειτουργία της ζεύξης ορίστε το ρεύμα πόλωσης (I_0) ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή 30 mA και στη συνέχεια εκτελέστε σάρωση με αρχική τιμή 10 mA, τελική 30 mA και βήμα 5 mA. Καταγράψτε την μεταβολή της τιμής του BER σε διάγραμμα και σχολιάστε το αποτέλεσμα.
9. Για ρεύμα πόλωσης του laser ίσο με 30mA ορίστε το ρυθμό μετάδοσης των bit (*bitRate*) ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή έστω 1 Gbit/sec Εκτελέστε σάρωση με αρχική τιμή 1Gbps, τελική τιμή 20 Gbps και βήμα 1Gbps. Καταγράψτε το διάγραμμα του BER συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης. Τι παρατηρείτε; Μέχρι ποια τιμή του ρυθμού μετάδοσης η απόδοση της ζεύξης παραμένει σχεδόν σταθερή; Είναι αυτή η τιμή αναμενόμενη;
10. Επαναλάβεται την προσομοίωση αλλάζοντας το είδος της διαμόρφωσης σήματος -*modulationtype* στη γεννήτρια σήματος από Non- Return to Zero - NRZ που ήταν μέχρι τώρα σε Return to Zero – RZ. Καταγράψτε το διάγραμμα του BER συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης και συγκρίνεται τα αποτελέσματα με αυτά της προηγούμενης προσομοίωσης.
11. Ορίστε ξανά το είδος της διαμόρφωσης σε Non- Return to Zero -NRZ και Ορίστε διαδοχικά εκτελέστε διαδοχικά απλές προσομοιώσεις σταθερή τιμή ρυθμού μετάδοσης στη γεννήτρια δυαδικών ακολουθιών ίση με 1 Gbps, 10 Gbps, και 50 Gbps αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση καταγράψτε και μελετήστε το διάγραμμα οφθαλμού στην έξοδο. Τι παρατηρείτε; Τι συμβαίνει και γιατί στην τελευταία περίπτωση των 50 Gbps;

Άσκηση 9 Οπτικοί ενισχυτές

Στην προηγούμενη άσκηση μας απασχόλησε η δυνατότητα μιας ζεύξης να μεταδώσει μεγάλο όγκο πληροφορίας, εξετάσαμε δηλαδή το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης μίας ζεύξης συναρτήσει των επιμέρους χαρακτηριστικών της. Στην περιγραφή των πρότυπων ρυθμών μετάδοσης στους οποίους λειτουργούν οι ζεύξεις όπως παρουσιάζεται στον πίνακα II της προηγούμενης άσκησης (σελίδα 44) βλέπουμε ότι στην τελευταία στήλη του δίδεται επίσης η μέγιστη απόσταση στην οποία μπορεί να μεταδοθεί ένα σήμα πριν εξασθενήσει τόσο ώστε να μην είναι ανιχνεύσιμο με ακρίβεια.

Αν και οι μειωμένες απώλειες των οπτικών ινών έχουν αυξήσει κατά πολύ αυτή την απόσταση το σήμα και στην περίπτωση των οπτικών ζεύξεων πρέπει να ενισχυθεί μετά από μετάδοση περίπου 40 km. Η παραδοσιακή μέθοδος απαιτεί την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό την ενίσχυση του και την επαναμετατροπή του σε οπτικό. Αυτή η διαδικασία αυξάνει το κόστος της ζεύξης λόγω της χρήσης επιπλέον ακριβών ηλεκτρικών στοιχείων και μειώνει την απόδοση της λόγω απωλειών κατά τη μετατροπή. Οι οπτικοί ενισχυτές αντίθετα μπορούν να ενισχύσουν ένα οπτικό σήμα απευθείας χωρίς μετατροπή. Ο πιο διαδεδομένος οπτικός ενισχυτής είναι ο ενισχυτής ίνας με προσμίξεις Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier- EDFA)

Ο EDFA χρησιμοποιεί ίνα εμπλουτισμένη κατά τη διαδικασία κατασκευής με το στοιχείο Έρβιο. Ενισχυτές μπορούν να κατασκευαστούν και από ίνες εμπλουτισμένες με άλλα στοιχεία από την κατηγορία των σπανίων γαιών αλλά το Έρβιο έχει επικρατήσει επειδή λειτουργεί στην περιοχή του 1550 nm στο παράθυρο χαμηλών απωλειών των ινών. Ο τρόπος λειτουργίας ενός EDFA εικονίζεται στο σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1 Λειτουργία οπτικού ενισχυτή ίνας εμπλουτισμένης με Έρβιο (EDFA)

Έστω μία ζεύξη που λειτουργεί σε μήκος κύματος 1550 nm με ένα μικρό τμήμα ίνας εμπλουτισμένης με Έρβιο συνδεδεμένο σε επιθυμητό σημείο. Χρησιμοποιείται επίσης πολυπλέκτης μήκους κύματος ο οποίος μπορεί να περιπλέκει τα μήκη κύματος 980 nm και 1550 nm. Στη μια είσοδο του εισέρχεται το σήμα που θα ενισχυθεί (1550 nm) ενώ στην άλλη είσοδο έχει συνδεθεί ένα laser που εκπέμπει στα 980 nm. Η ακτινοβολία στα 980 nm που εισέρχεται στην ίνα Ερβίου μέσω μίας διαδικασίας “αντλεί” το Έρβιο (το διεγείρει σε κάποια ανώτερη ενεργειακή στάθμη). Όταν το ενεργοποιημένο Έρβιο αποβάλλει αυτή την επιπλέον ενέργεια αυτή μεταφέρεται στο σήμα των 1550 nm και το ενισχύει μέχρι και 30 dB.

Στη σημερινή εργαστηριακή άσκηση θα μελετήσουμε την επίδραση ενός οπτικού ενισχυτή EDFA σε μία ζεύξη. Συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε πως η χρήση ενός EDFA βελτιώνει την απόδοση μίας ζεύξης όταν αυτή υποβαθμίζεται λόγω της αύξησης του μήκους μετάδοσης του σήματος.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Εξηγήστε περιληπτικά τη λειτουργία των οπτικών ενισχυτών ινών εμπλουτισμένων με Έρβιο.
2. Αναφέρεται δύο άλλα είδη οπτικών ενισχυτών (εκτός τους EDFA) και εξηγήστε περιληπτικά τη λειτουργία τους

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

1. Τοποθετείστε γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS* με ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps.
2. Μετατρέψτε το δυαδικό σήμα σε ηλεκτρικό χρησιμοποιώντας γεννήτρες σήματος με $V_{max} = 0.5$ V και διαμορφώστε με αυτό laser άμεσης διαμόρφωσης στα 1550 nm
3. Συνδέστε οπτική ίνα μήκους 11 km και συντελεστή απωλειών 2dB/km. Στη συνέχεια συνδέστε οπτικό ενισχυτή (*Black box EDFA*) με ενίσχυση (gain 30 dB).
4. Τέλος συνδέστε δέκτη για την ανίχνευση του σήματος.
5. Στην έξοδο του δέκτη τοποθετείστε διάγραμμα οφθαλμού *Plot Eye Diagram* για έλεγχο της αποδοτικότητας της ζεύξης και *BER Tester*.
6. Στην έξοδο της οπτικής ίνας και του οπτικού ενισχυτή τοποθετείστε διαγράμματα σήματος σε μονάδες dB (*Plot Signal*). Κάντε απλή προσομοίωση και καταγράψτε το σήμα πριν και μετά τον ενισχυτή. Πόση ενίσχυση επιφέρει

(σε dB) ο οπτικός ενισχυτής. Είναι αυτή η ενίσχυση αναμενόμενη βάση των χαρακτηριστικών του;

7. Καταγράψτε την απόδοση του συστήματος από το διάγραμμα οφθαλμού και το BER. Στη συνέχεια μηδενίστε την ενίσχυση, επαναλάβετε την προσομοίωση και συγκρίνετε το αποτέλεσμα με το προηγούμενο.
8. Ορίστε το κέρδος (*gain*) του ενισχυτή ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή 6 dB και εκτελέστε προσομοίωση με αρχική τιμή 0 dB, τελική τιμή 6 dB και βήμα 1 dB. Καταγράψτε το διάγραμμα του BER συναρτήσει της ενίσχυσης.
9. Στη συνέχεια, ορίστε ως δεύτερη μεταβλητή το μήκος της ίνας με ενδεικτική τιμή 11km και εκτελέστε διπλή σάρωση στις μεταβλητές μήκος ίνας (*inner iteration*) και το κέρδος του ενισχυτή (*outer iteration*). Ορίστε για το μήκος της ίνας αρχική τιμή 11000 m, τελική τιμή 12500 m και βήμα 500 m. Αντίστοιχα για το κέρδος του ενισχυτή ορίστε αρχική τιμή 0 dB, τελική τιμή 6 dB και βήμα 2 dB.
10. Καταγράψτε το διάγραμμα του BER που προκύπτει για τις δύο μεταβλητές και σχολιάστε τις επιπτώσεις της ενίσχυσης και του μήκους της ίνας στην απόδοση της ζεύξης. Αν αρχικά η ζεύξη έχει μήκος 11 km και επιθυμούμε να την επεκτείνουμε στα 12.5 km υπολογίστε, κατά προσέγγιση, πόσο πρέπει να αυξηθεί η ενίσχυση ώστε η απόδοση της ζεύξης (το BER) να διατηρηθεί στο ίδιο επίπεδο.

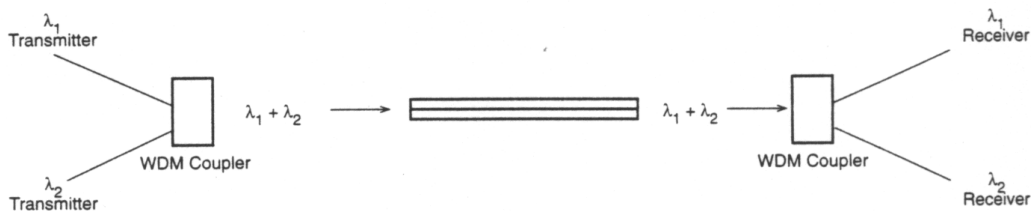
Άσκηση 10

Πολυπλεξία μήκους κύματος

Εισαγωγή

Η χωρητικότητα ενός οπτικού συστήματος επικοινωνιών θεωρητικά είναι στην περιοχή των 100 Tbps λόγω της μεγάλης συχνότητας του οπτικού φέροντος. Ωστόσο στην πράξη ο ρυθμός μετάδοσης των bit συνήθως περιορίζεται πολύ χαμηλότερα λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από την διασπορά των οπτικών ινών και την ταχύτητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων της ζεύξης.

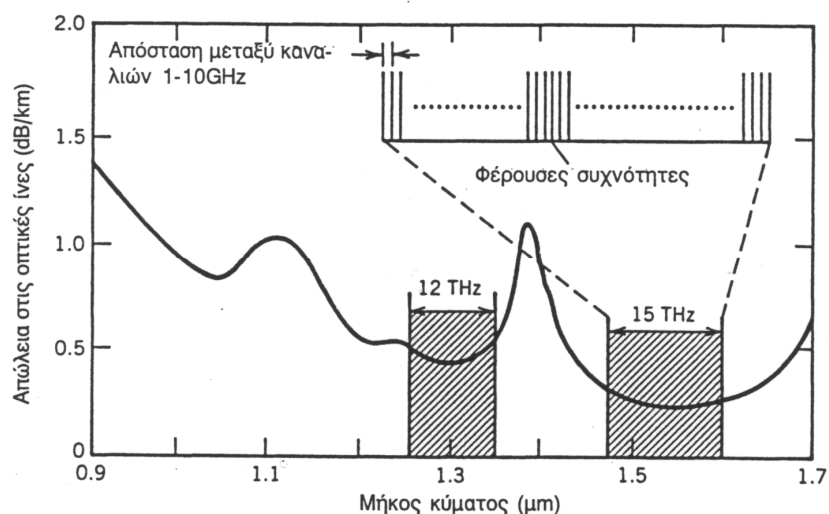
Η πολυπλεξία είναι η τεχνική με την οποία διαφορετικά σήματα μπορούν να μεταδοθούν από μια ζεύξη συγχρόνως, αξιοποιώντας έτσι περισσότερο από το διαθέσιμο εύρος ζώνης των οπτικών ινών. Η πολυπλεξία μπορεί να είναι στο πεδίο του χρόνου (Time Division Multiplexing-TDM), της συχνότητας (Frequency Division Multiplexing-FDM) ή του μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM). Στην πολυπλεξία χρόνου τα σήματα από τα διάφορα κανάλια πλέκονται με την εισαγωγή μίας χρονικής καθυστέρησης στις ροές των bit των διαδοχικών καναλιών. Στην περίπτωση της FDM τα κανάλια απέχουν μεταξύ τους στο πεδίο των συχνοτήτων και κάθε κανάλι μεταφέρεται από το δικό του φέρον κύμα. Συστήματα πολυπλεξίας TDM και FDM μπορούν να υλοποιηθούν και για ηλεκτρικά και για οπτικά δίκτυα. Η πολυπλεξία μήκους κύματος (σχήμα 10.1) χρησιμοποιείται αποκλειστικά στις οπτικές επικοινωνίες μια και πλέκει σήματα που μεταφέρονται από οπτικά φέροντα με διαφορετικά μήκη κύματος.



Σχήμα 10.1 Πολυπλεξία μήκους κύματος

Στην πιο απλή της μορφή η WDM χρησιμοποιείται για την πολυπλεξία δύο καναλιών σε διαφορετικά “παράθυρα” μετάδοσης της οπτικής ίνας. Για παράδειγμα η χωρητικότητα ενός οπτικού συστήματος που λειτουργεί στα 1300 nm μπορεί να αναβαθμιστεί αν το πλέξουμε με ένα κανάλι στα 1550 nm με αποτέλεσμα ένα σύστημα WDM όπου τα κανάλια που υποστηρίζονται απέχουν απόσταση 250 nm (σχήμα 10.2).

Μία πιο σύγχρονη μορφή της πολυπλεξίας μήκους κύματος είναι η πυκνή πολυπλεξία μήκους κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing –DWDM) όπου η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι πολύ μικρή της τάξης των 0.8 -1.6 nm. Η πολυπλεξία εφαρμόζεται πλέον σε ένα παράθυρο μετάδοσης της οπτικής ίνας κυρίως στην περιοχή των 1550 nm (σχήμα 10.2).



Σχήμα 10.2 Πολυπλεξία και πυκνή πολυπλεξία μήκους κύματος

Όταν N κανάλια με ρυθμούς μετάδοσης B_1, B_2, B_3, \dots και B_N μεταδίδονται ταυτόχρονα σε οπτική ίνα μήκους L το ολικό γινόμενο ρυθμού μετάδοσης bit επί απόσταση BL γίνεται:

$$BL = (B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_N) L$$

Η τελική χωρητικότητα ενός συστήματος WDM εξαρτάται από το πόσο κοντά μπορούν να είναι τα μήκη κύματος των διαδοχικών καναλιών. Η ελάχιστη απόσταση περιορίζεται από τις μεταξύ τους παρεμβολές. Τυπικά η απόσταση μεταξύ των καναλιών πρέπει να υπερβαίνει το τετραπλάσιο του ρυθμού μετάδοσης bit. Η περιοχή χαμηλής απώλειας (παράθυρο) των εξελιγμένων οπτικών ινών στην περιοχή των 1550 nm είναι 120 nm. Για κανάλια με ρυθμό μετάδοσης 20 Gbps η ελάχιστη απόσταση πρέπει να είναι 4×20 ίση με $\Delta\nu = 80$ GHz ή $\Delta\lambda = 0,6$ nm (βάση της σχέσης $\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$). Με αυτή την απόσταση στην περιοχή των 120 nm μπορούμε να πολυπλέξουμε 200 κανάλια οπότε ο συνολικός ενεργός ρυθμός των bit θα είναι 200×20 Gbps ίσος με 4 Tbps με τεράστια βελτίωση στην απόδοση του συστήματος. Στην πράξη πολλοί παράγοντες περιορίζουν την εκμεταλλεύσιμη περιοχή του οπτικού παραθύρου κάτω από τα 120 nm και μια πιο ρεαλιστική τιμή είναι τα 30-35 nm.

Για την πολυπλεξία και τον διαχωρισμό των διαφορετικών καναλιών χρησιμοποιούνται συσκευές που αποκαλούνται αντίστοιχα πολυπλέκτες (multiplexer) και αποπολυπλέκτες (demultiplexers). Τα χαρακτηριστικά του στοιχείου που χρησιμοποιείται εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από την απόσταση μεταξύ των καναλιών που υποστηρίζει το σύστημα. Στην περίπτωση πολυπλεξίας μηκών κύματος με μεγάλη απόσταση μεταξύ των καναλιών (WDM) υπάρχουν σε σχετικά χαμηλή τιμή πολυπλέκτες που λειτουργούν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα WDM δύο μηκών κύματος είναι: 850/ 1300 nm, 1300/1550 nm, 1480/ 1550 nm, 980/ 1550.

Στα συστήματα DWDM οι απαιτήσεις είναι περισσότερες μια και η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι πολύ μικρές. Οι πολυπλέκτες (και αντίστοιχα οι αποπολυπλέκτες) χρησιμοποιούν κάποια μορφή φίλτρου για να πολυπλέξουν ή να αποπολυπλέξουν τα σήματα. Ένα φίλτρο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μπορεί να επιτρέψει τη διέλευση ενός μήκους κύματος και να ανακλάσει όλα τα υπόλοιπα ή να ανακλάσει ένα μήκος κύματος και να επιτρέψει τη διέλευση όλων των άλλων. Είναι προφανές ότι το φίλτρο πρέπει να έχει μεγάλη ακρίβεια και να επιτρέψει τη διέλευση μόνο των επιλεγμένων μηκών κύματος και όχι άλλων. Η διέλευση ενός ανεπιθύμητου μήκους κύματος λόγω κακής λειτουργίας του φίλτρου εισάγει παρεμβολές και μειώνει την απόδοση του συστήματος. Επίσης οι απώλειες που εισάγουν τα φίλτρα πρέπει να είναι μηδαμινές ώστε να μην μειώνουν την ισχύ του σήματος στο σύστημα.

Στη σημερινή εργαστηριακή άσκηση θα εξετάσουμε τη λειτουργία ενός συστήματος WDM δύο μηκών κύματος (1300nm και 1550nm). Για την πολυπλεξία των σημάτων θα χρησιμοποιήσουμε ένα πολυπλέκτη ενώ για την αποπολυπλεξία δύο φίλτρα.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Περιγράψτε τους τρόπους πολυπλεξίας σήματος που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες. Ποιος είναι ο πιο διαδεδομένος και γιατί;
2. Εξηγείστε τις έννοιες της πολυπλεξίας (Wavelength Division Multiplexing-WDM) και της πυκνής πολυπλεξίας (Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM) μήκους κύματος. Περιγράψτε την βελτίωση που επιφέρει η εφαρμογή τους στις οπτικές επικοινωνίες.
3. Έστω οπτική ζεύξη στην περιοχή του 1550 nm που χρησιμοποιεί την τεχνική της πυκνής πολυπλεξίας μήκους κύματος για κανάλια με ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps αν η εκμεταλλεύσιμη περιοχή του οπτικού παραθύρου στην περιοχή του 1550 nm είναι περίπου 30 nm να υπολογιστεί ο μέγιστος αριθμός καναλιών που μπορούν να πολυπλεκτούν και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης της ζεύξης.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Θα κατασκευάσουμε δύο σήματα με γεννήτριες δυαδικής σειράς τα οποία θα διαμορφώσουν δύο lasers που εκπέμπουν σε διαφορετικά μήκη κύματος (1300 και 1550 nm). Τα σήματα θα οδηγηθούν σε ένα οπτικό πολυπλέκτη ώστε να έχουμε μετάδοση και των δύο σημάτων από την ίδια οπτική ίνα. Για το διαχωρισμό των δύο σημάτων στο τέλος της ίνας θα χρησιμοποιήσουμε δύο οπτικά φίλτρα που επιτρέπουν τη διέλευση δέσμης συγκεκριμένου μήκους κύματος. Τέλος, τα δύο ανεξάρτητα σήματα που προκύπτουν θα ακολουθήσουν πορεία ανίχνευσης παρόμοια με αυτή που εξετάσαμε στα προηγούμενα εργαστήρια. Σε κάθε

περίπτωση, αν δε δίδονται διαφορετικές οδηγίες θα χρησιμοποιείτε τα χαρακτηριστικά των στοιχείων όπως ορίζονται από το πρόγραμμα χωρίς αλλαγές.

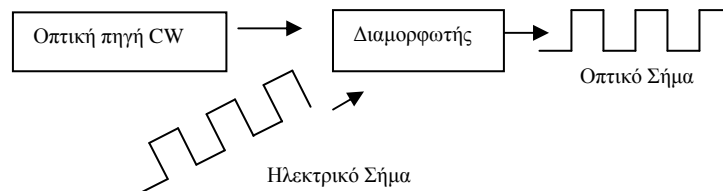
1. Για να παράγουμε τα δύο σήματα θα χρησιμοποιήσουμε δύο γεννήτριες τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) Generator*. Τα δύο σήματα πρέπει να έχουν κάποια διαφορά φάσης (*offset*) ώστε να μην μεταδίδεται το ίδιο bit και στα δύο κανάλια. Ορίστε στη δεύτερη γεννήτρια καθυστέρηση 64 bits
2. Στη συνέχεια καθένα από τα δυαδικά σήματα θα μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιώντας γεννήτριες σήματος *Signal Generator*. Ορίζουμε την τάση εξόδου για το δυαδικό σήμα 1 (V_{max}) ίση με 0.5 Volts και στις δύο γεννήτριες.
3. Για οπτική πηγή θα χρησιμοποιήσουμε δύο Laser άμεσης διαμόρφωσης *Direct Modulated Laser* τα οποία θα τροφοδοτηθούν από τα σήματα που παράγουν οι γεννήτριες σήματος. Το πρώτο laser εκπέμπει στα 1300 nm (*wavelength*) ενώ το δεύτερο στα 1550 nm. Κάντε μια απλή προσομοίωση και καταγράψτε το φάσμα (σε μήκη κύματος) στην έξοδο κάθε laser χρησιμοποιώντας *Spectrum analyser* με μονάδες ισχύος Watt. Εκτελέστε την εντολή test σε καθένα από τα laser και καταγράψτε τα χαρακτηριστικά τους σχολιάζοντας τυχόν διαφορές. Ελέγξτε το σήμα στην έξοδο κάθε laser. Εκπέμπουν και τα δύο φως με την ίδια ένταση;
4. Τροφοδοτείστε τα δύο σήματα στις εισόδους ενός πολυπλέκτη (*Optical Add Multiplexer*). Καταγράψτε το φάσμα (στο μήκος κύματος) στην έξοδο του πολυπλέκτη με μονάδες ισχύος Watt. Ελέγξτε το σήμα (με *Plot Signal*) στην έξοδο των laser και την έξοδο του πολυπλέκτη.
5. Στη συνέχεια το σήμα θα μεταδοθεί μέσω μιας μονότροπης οπτικής ίνας (*Nonlinear Fibre*) για την οποία ορίζουμε μήκος (*length*) 60 km.
6. Για το διαχωρισμό των δύο καναλιών μετά την οπτική ίνα θα χρησιμοποιήσουμε δύο οπτικά φίλτρα (*Optical Filter*), τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση δέσμης συγκεκριμένου μήκους κύματος. Ορίστε το μήκος κύματος διέλευσης του πρώτου φίλτρου ώστε να επιτρέπει τη διέλευση σήματος στα 1300 nm και του δεύτερου 1550 nm αντίστοιχα. Καταγράψτε το σήμα στην έξοδο της ίνας και μετά από κάθε φίλτρου φασματικά (*Spectrum analyser*) και σε ένταση (*Plot Signal*).
7. Συγκρίνεται τα σήματα στην έξοδο των δύο laser, του πολυπλέκτη, της οπτικής ίνας και των φίλτρων. Σχολιάστε τυχόν ομοιότητες / διαφορές.
8. Τέλος, για την μετατροπή των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά στην έξοδο κάθε φίλτρου τοποθετούμε από ένα δέκτη *Receiver* Στην έξοδο κάθε δέκτη τοποθετούμε από ένα διάγραμμα οφθαλμού *Plot Eye Diagram* για να έχουμε μία εκτίμηση της αποδοτικότητας της ζεύξης και ένα *BER Tester* τον οποίο συνδέουμε και με την αντίστοιχη γεννήτρια δυαδικού σήματος.

9. Εκτελεστέ την προσομοίωση, καταγράψτε και μελετήστε το σήμα μετά από κάθε στοιχείο της ζεύξης Καταγράψτε τα διαγράμματα οφθαλμού για τα δύο σήματα και τις τιμές BER που προκύπτουν. Τι παρατηρείται;
10. Ορίστε το μήκος κύματος του δεύτερου φίλτρου ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή 1550 nm και στη συνέχεια εκτελέστε σάρωση με αρχική τιμή 1400nm, τελική 1650 nm και βήμα 50 nm. Καταγράψτε το διάγραμμα οφθαλμού για κάθε τιμή της μεταβλητής και ακόμα την μεταβολή της τιμής του BER από τον πίνακα. Σχολιάστε το αποτέλεσμα, επηρεάζεται η λειτουργία όλης της ζεύξης;

Άσκηση 11

Εξωτερική διαμόρφωση οπτικής πηγής

Στην άσκηση 8 είχαμε εξετάσει την άμεση διαμόρφωση οπτικής πηγής laser. Είχε επίσης αναφερθεί και ένας δεύτερος τρόπος διαμόρφωσης, η εξωτερική διαμόρφωση η οποία εικονίζεται γραφικά στο σχήμα 11.1



Σχήμα 11.1 Εξωτερική διαμόρφωση

Στην εξωτερική διαμόρφωση χρησιμοποιούνται οπτικές πηγές συνεχούς λειτουργίας (CW) και διακόπτες (διαμορφωτές), ανεξάρτητοι από τις οπτικές πηγές, που “ανοιγοκλείνουν” οδηγούμενοι από το σήμα προς μετάδοση. Το συνεχές σήμα της οπτικής πηγής τροφοδοτείται στην είσοδο του διαμορφωτή και στην έξοδο του προκύπτει το οπτικό σήμα της πηγής κωδικοποιημένο με την πληροφορία που επιθυμούμε να μεταδώσουμε. Οι διαμορφωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συχνότητες διαμόρφωσης μεγαλύτερες από αυτές που είναι επιτρεπτές με απευθείας διαμόρφωση. Η απευθείας διαμόρφωση των οπτικών πηγών (laser) σε υψηλές συχνότητες μπορεί να αλλάξει τα χαρακτηριστικά της πηγής (φασματικό εύρος, μήκος κύματος) αλλαγές ανεπιθύμητες σε πολλές εφαρμογές.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

1. Για να παράγεται το σήμα προς μετάδοση θα χρησιμοποιήσετε τη γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ακολουθιών *PRBS*
2. Στη συνέχεια για τη μετατροπή τη δυαδικής ακολουθίας σε ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιείτε μία γεννήτρια σήματος. Ορίστε την τάση εξόδου για το δυαδικό σήμα 1 (V_{max}) ίση με 0.5 Volts.
3. Για οπτική πηγή συνδέστε Laser συνεχούς λειτουργίας (Multiline CW Laser) που εκπέμπει στα 1550 nm με μέγιστη οπτική ισχύ (*peakpower*) ίση με 1mW. Στην έξοδο του laser τοποθετείστε διάγραμμα σήματος.
4. Το σήμα του ηλεκτρικής γεννήτριας θα τροφοδοτηθεί σε ένα διαμορφωτή (external modulator) που θα διαμορφώσει εξωτερικά το σήμα του συνεχούς laser συναρτήσει του δυαδικού σήματος. Στην έξοδο του διαμορφωτή τοποθετείστε διάγραμμα σήματος.

5. Στη συνέχεια το σήμα θα μεταδοθεί μέσω μιας μονότροπης οπτικής ίνας μήκους 50 km. Τέλος, το σήμα στο άκρο της ίνας θα ανιχνευθεί από ένα δέκτη *Receiver*
6. Αφού συνδέσετε τα παραπάνω στοιχεία της ζεύξης στην έξοδο του δέκτη τοποθετείστε ένα διάγραμμα οφθαλμού *Plot Eye Diagram* για έλεγχο της αποδοτικότητας της ζεύξης και ένα *BER Tester*.
7. Εκτελέστε προσομοίωση και συγκρίνεται το σήμα στην έξοδο του laser και στην έξοδο του διαμορφωτή. Σε τι τιμές ισχύος αντιστοιχεί το δυαδικό 1 και από τι εξαρτάται.
8. Ορίστε την οπτική ισχύ του laser (*peakpower*) ως μεταβλητή με ενδεικτική τιμή έστω 0.2 mW. Εκτελέστε σάρωση με αρχική τιμή 0.2 mW, τελική τιμή 1.2 mW και βήμα 0.2 mW. Καταγράψτε το διάγραμμα του BER συναρτήσει της ισχύος του laser. Σχολιάστε το αποτέλεσμα.
9. Για την ίδια ζεύξη αντικαταστήστε το CW laser και τον διαμορφωτή από laser απευθείας διαμόρφωσης. Χρησιμοποιώντας την επιλογή test του laser προσδιορίστε την τιμή του ρεύματος πόλωσης I_0 ώστε το δυαδικό σήμα 1 να αντιστοιχεί στην ίδια, κατά προσέγγιση, τιμή ισχύος όπως στην προηγούμενη ζεύξη με τον εξωτερικό διαμορφωτή. (Για τον υπολογισμό πρέπει να λάβετε υπόψη το ρεύμα κατωφλιού του laser και την απόδοση ισχύος (*power efficiency*))
10. Ορίστε την τιμή του ρεύματος πόλωσης βάση των παραπάνω υπολογισμών και εκτελέστε προσομοίωση. Τι παρατηρείται; Υποδείξετε τα τμήματα της ζεύξης που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της ζεύξης και προτείνεται τι μπορεί να γίνει για τη βελτίωση τους

Παράρτημα I

Ηλεκτρονικά κυκλώματα πομπού –δεκτή

Dr. ΗΛΙΑΣ ΑΠΕΡΑΘΙΤΗΣ

Στις οπτικές επικοινωνίες έχουμε μετάδοση σήματος/πληροφορίας με οπτικό τρόπο, δηλ., με φωτόνια (φως – ακτινοβολία) και όχι με ηλεκτρικό τρόπο, δηλ., με φορείς ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόνια) μέσω ηλεκτρικών αγωγών.

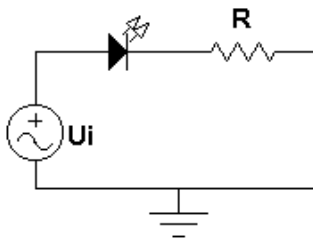
Το οπτικό σήμα για περαιτέρω επεξεργασία χρειάζεται μετατροπή σε ηλεκτρικό σήμα (αναλογικό ή ψηφιακό).

Η προς μετάδοση πληροφορία μετατρέπεται σε οπτικό σήμα με LEDs ή lasers, μεταδίδεται μέσω οπτικών ινών, και για τη μετατροπή του σε ηλεκτρικό σήμα χρειάζεται διάταξη μετατροπής του οπτικού σήματος μέσω ενός φωτοανιχνευτή (φωτοδίοδος), σε τάση ή ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια ενισχύεται για περαιτέρω επεξεργασία.

ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΚΠΟΜΠΟΥ ΜΕ LED

LED = κατάλληλες δίοδοι πολωμένες ορθά (με συγκεκριμένες τιμές ρεύματος και τάσης για εκπομπή φωτός). Το κύκλωμα του εκπομπού περιλαμβάνει και μία αντίσταση, R, σε σειρά με τη δίοδο LED για προστασία της LED από μεγάλα ρεύματα.

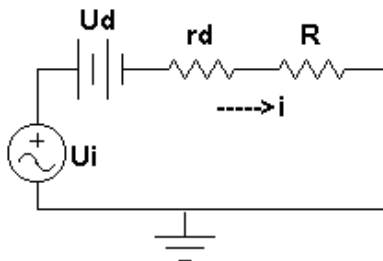
(α)



Από ανάλυση του κυκλώματος στο Σχ.1(α) προκύπτει:

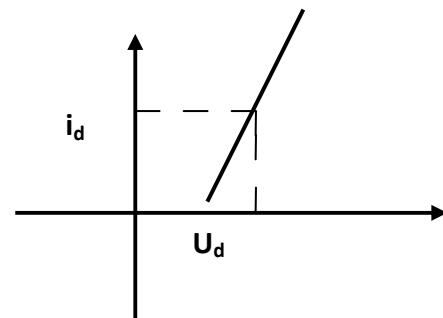
$$U_i - U_d - r_d i - Ri = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow i = \frac{U_i - U_d}{r_d + R}$$

(γ)



Με U_d, i_d δεδομένα, καθορίζουμε είτε U_i είτε R έτσι ώστε από τη LED να περνάει το απαιτούμενο ρεύμα.

(β)



ΣΧΗΜΑ 1. (α) Κύκλωμα εκπομπού με LED, (β) χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης διόδου και (γ) το ισοδύναμο κύκλωμα του (α) όπου το LED έχει αντικατασταθεί με το κυκλωματικό μοντέλο.

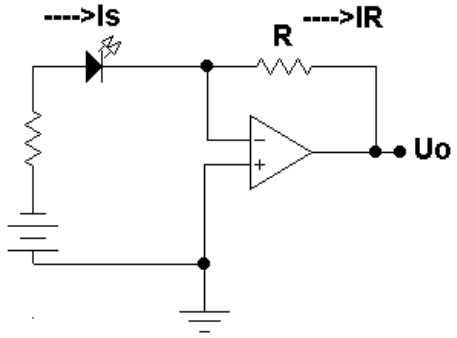
ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΕΚΤΗ ΜΕ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Η μετατροπή φωτός (οπτικού σήματος) σε ρεύμα ή τάση (ηλεκτρικό σήμα) και η ενίσχυση του γίνεται με κριτήρια:

- Τη γραμμικότητα,
- Το θόρυβο και
- Το εύρος ζώνης λειτουργίας

Η ενίσχυση γίνεται με τελεστικούς ενισχυτές που χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντίσταση εισόδου (μηδενικό ρεύμα εισόδου), μικρό θόρυβο και μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας.

Ο πιο συνήθης τρόπος μετατροπής του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό σήμα είναι η μετατροπή του φωτός σε φωτόρρευμα μέσω μιας φωτοδιόδου. Το σήμα αυτό στη συνέχεια ενισχύεται από ένα τελεστικό ενισχυτή, του οποίου η τάση εξόδου είναι ανάλογη του ρεύματος στην είσοδο του. Επειδή η τάση στα άκρα της φωτοδιόδου είναι σταθερή, υπάρχει γραμμικότητα μεταξύ ενέργειας φωτός και σήματος εξόδου.

 <p>ΣΧΗΜΑ 2. Κύκλωμα ενίσχυσης ρεύματος φωτοδιόδου, με τελεστικό ενισχυτή, σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία, και με κύκλωμα ανάδρασης που έχει αντίσταση R.</p>	<p>Το κύκλωμα για την ενίσχυση του ρεύματος της φωτοδιόδου φαίνεται στο Σχ.2. Το κύκλωμα δεν κάνει τίποτα άλλο από το να μετατρέπει μία πηγή ρεύματος με μεγάλη εσωτερική αντίσταση σε μία πηγή τάσης με μικρή εσωτερική αντίσταση.</p> <p>Η τάση εξόδου είναι:</p> $U_o = -I_R R = -I_S R$
---	---

Για μεγάλη ενίσχυση, η αντίσταση ανάδρασης R πρέπει να είναι μεγάλη, αλλά μεγάλη R δίνει DC μετατοπίσεις τάσης λόγω θερμότητας Joule.

Υπάρχουν παρασιτικές χωρητικότητες (λόγω διόδου) που αυξάνουν το θόρυβο, και οι οποίοι μειώνονται με μεγάλη αναστροφή τάση στη δίοδο.

Η αντίσταση ανάδρασης R καθορίζει:

- Το θόρυβο (ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ανάλογη του $R^{1/2}$ ($S/N \propto R^{1/2}$). Με μικρές R, ο θόρυβος είναι μικρός. Για $10k\Omega < R < 1M\Omega$, ο θόρυβος αρχίζει να γίνεται εμφανής.
- Το εύρος ζώνης και

- Την ενίσχυση.

Με πυκνωτή παράλληλα στην αντίσταση ανάδρασης, $C//R$, μειώνονται η αστάθεια του τελεστικού ενισχυτή (αλλαγή φάσης εξόδου) αλλά και οι παρασιτικές χωρητικότητες λόγω ενός επιπλέον πόλου ανάδρασης.

Στη περίπτωση αυτή, και χωρίς να λάβουμε υπόψη τις χωρητικές αντιστάσεις της φωτοδιόδου, εάν

$Z_c=1/j\omega C$ είναι η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή που μπαίνει παράλληλα με

$$\begin{aligned} \frac{U_o}{I_s} &= -Z_c // R = -\frac{Z_c R}{Z_c + R} = -\frac{R}{1 + \frac{R}{Z_c}} = \\ &= -\frac{R}{1 + j\omega RC} = -\frac{R}{1 + \frac{j\omega}{\omega_o}} \end{aligned}$$

την αντίσταση ανάδρασης, τότε:

όπου $\omega_o=1/RC$ είναι η συχνότητα 3dB ή συχνότητα γονάτου.

Δηλαδή η απόκριση συχνότητας του βαθυπερατού αυτού κυκλώματος (το εύρος ζώνης λειτουργίας του ενισχυτή) εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου $\tau_o=RC$, δηλαδή από τις τιμές των R και C .

Παράρτημα II

Οδηγίες για το περιεχόμενο των αναφορών

Ο πρωταρχικός σκοπός μιας αναφοράς εργαστηρίου αλλά και οποιασδήποτε άλλης αναφοράς είναι να δώσει την δυνατότητα σε κάποιον που τη διαβάζει να καταλάβει γρήγορα και εύκολα τρία πράγματα :

- Ποιος ήταν ο σκοπός του εργασίας,
- Ποια μέθοδος ακολουθήθηκε και
- Τι αποτελέσματα προέκυψαν

Η αναφορά πρέπει να χωρίζεται σε 4 μέρη:

1) Πρώτη σελίδα

Αυτή είναι μια χωριστή σελίδα που περιλαμβάνει: το **ονοματεπώνυμο** και το **εξάμηνο** σας, την **ομάδα** του εργαστηρίου που ανήκετε, την **ώρα και μέρα** που γίνεται το εργαστήριο, τον **τίτλο της άσκησης** που πραγματοποιήσατε.

2) Περίληψη

Σύντομη (όχι περισσότερες από 5 γραμμές) περιγραφή του σκοπού της εργαστηριακής άσκησης

3) Θεωρητικό μέρος

Σε αυτό το μέρος πρέπει να δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της εργασίας. Για τη διευκόλυνση σας, στο φυλλάδιο του εργαστηρίου αναγράφονται θεωρητικές ερωτήσεις. Οι απαντήσεις πρέπει να είναι σύντομες αλλά περιεκτικές. Μια απάντηση που αποτελείτε μονάχα από ένα νούμερο ακόμα και αν είναι το σωστό θα θεωρείται λάθος αν δεν συνοδεύετε από περιγραφή του τρόπου με τον οποίο προέκυψε, τους μαθηματικούς τύπους που χρησιμοποιήθηκαν, τα δεδομένα που βρήκατε από την βιβλιογραφία (σε περίπτωση που δεν δίνονται από την εκφώνηση).

3) Πειραματικό μέρος

Σε αυτό το μέρος πρέπει να δίνεται μια σύντομη περιγραφή της εργαστηριακής άσκησης έτσι ώστε κάποιος που θα την διαβάσει να μπορεί να επαναλάβει το εργαστήριο χωρίς να χρειαστεί να ανατρέξει στο φυλλάδιο. Για τον σκοπό αυτό, εδώ πρέπει να δίνεται μια περιγραφή του κυκλώματος που κατασκευάσατε (και με σχήμα όπου είναι δυνατό) και την μέθοδο που ακολουθήσατε για να πάρετε τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα πρέπει να δίνονται με σαφήνεια σε μορφή πίνακα ή σχεδιαγράμματος όπου είναι δυνατό. Επίσης πρέπει να αναγράφονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις με αιτιολόγηση.

4) Συμπεράσματα

Στο τελευταίο μέρος της αναφοράς θα δίνονται επιγραμματικά τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξατε μετά την πραγματοποίηση του πειράματος. Εδώ θα αναφέρεται κατά πόσο τα πειραματικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αναμενόμενα βάση της θεωρίας και θα εξηγείτε την πηγή πιθανών διαφοροποιήσεων. Ακόμα μπορείτε να περιγράφεται τυχόν δυσκολίες που αντιμετωπίσατε κατά τη διάρκεια του πειράματος καθώς και κάποιο άλλο τρόπο με

τον οποίο θα μπορούσε να γίνει η ίδια άσκηση. Τα σχόλια και οι προτάσεις σας είναι ευπρόσδεκτα και θα ληφθούν υπόψη στο μέλλον για την βελτίωση του εργαστηρίου.

Παράρτημα III

Αντιστάσεις

Οι χρωματικοί κώδικες χρησιμοποιούνται στην επιστήμη της Ηλεκτρονικής ως ένδειξη για τα χαρακτηριστικά κάποιου ηλεκτρονικού εξαρτήματος. Εμφανίζονται με την μορφή χρωματικών λωρίδων, οι οποίες τυπώνονται πάνω στο εξάρτημα και υποδηλώνουν την τιμή του εξαρτήματος αυτού, την ανοχή και τον θερμικό συντελεστή.

Η πιο συνηθισμένη μορφή χρωματικού κώδικα είναι των τεσσάρων λωρίδων, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Παρόλα αυτά υπάρχουν χρωματικοί κώδικες με πέντε λωρίδες (3 ψηφία, πολλαπλασιαστής, θερμικός συντελεστής) και έξι λωρίδες (3 ψηφία, πολλαπλασιαστής, ανοχή, θερμικός συντελεστής). Σε αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία (πχ. στρατιωτικές εφαρμογές) υπάρχει μία λωρίδα που υποδηλώνει την αξιοπιστία του εξαρτήματος.



A: Πρώτο Ψηφίο
B: Δεύτερο Ψηφίο
Γ: Πολλαπλασιαστής
Δ: Ανοχή

Χρωματικός Κώδικας 4 λωρίδων σε ηλεκτρική αντίσταση

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε χρώμα σύμφωνα με το πρότυπο EIA-RS-279 του Συνδέσμου Ηλεκτρονικών Βιομηχανιών (EIA - Electronic Industries Alliance):

Χρώμα	1 ^η λωρίδα	2 ^η λωρίδα	3 ^η λωρίδα (πολλαπλασιαστής)	4 ^η λωρίδα (ανοχή)
Μαύρο	0	0	$\times 10^0$	
καφέ	1	1	$\times 10^1$	$\pm 1\%$ (F)
Κόκκινο	2	2	$\times 10^2$	$\pm 2\%$ (G)
Πορτοκαλί	3	3	$\times 10^3$	
Κίτρινο	4	4	$\times 10^4$	
Πράσινο	5	5	$\times 10^5$	$\pm 0.5\%$ (D)
Μπλε	6	6	$\times 10^6$	$\pm 0.25\%$ (C)
Μοβ	7	7	$\times 10^7$	$\pm 0.1\%$ (B)
Γκρι	8	8	$\times 10^8$	$\pm 0.05\%$ (A)
Λευκό	9	9	$\times 10^9$	
Χρυσάφι			$\times 0.1$	$\pm 5\%$ (J)

Ασημί			×0.01	±10% (K)
Κανένα				±20% (M)

Παραδείγματα



Ηλεκτρική αντίσταση άνθρακα, 10KΩ, 0.5 Watt.

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε μία ηλεκτρική αντίσταση άνθρακα 0.5 Watt, πάνω στην οποία βρίσκονται 4 λωρίδες χρωμάτων. Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη ειπωθεί, οι πρώτες δύο λωρίδες συμβολίζουν ψηφία, η τρίτη λωρίδα καθορίζει τον πολλαπλασιαστή και η τέταρτη την ανοχή της αντίστασης. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα του Χρωματικού Κώδικα μπορούμε να εξάγουμε την τιμή της αντίστασης ως εξής: Το καφέ χρώμα συμβολίζει την μονάδα, το μαύρο χρώμα συμβολίζει το μηδέν, το πορτοκαλί χρώμα συμβολίζει το 1000 και το χρυσαφί καθορίζει πως η ανοχή είναι ±5%. Άρα η τιμή της αντίστασης θα είναι: $10 * 1000 = 10K\Omega$ με ανοχή ±5%.



Ηλεκτρική αντίσταση άνθρακα, ονομαστικής τιμής 1,5 kΩ, 0.5 Watt.

Ως δεύτερο παράδειγμα θα θεωρήσουμε την αντίσταση άνθρακα που φαίνεται παραπάνω και θα προσπαθήσουμε να διαβάσουμε την τιμή της. Ακολουθώντας παρόμοιο συλλογισμό όπως και προηγουμένως και χρησιμοποιώντας τον πίνακα του Χρωματικού Κώδικα έχουμε: Το καφέ συμβολίζει το 1, το πράσινο συμβολίζει το 5 το κόκκινο συμβολίζει το 100 και το χρυσαφί καθορίζει την ανοχή ίση με ±5%. Άρα η τελική τιμή της αντίστασης προκύπτει: $15 * 100 = 1500\Omega = 1.5K\Omega$ με ανοχή ±5%. Η ανοχή ουσιαστικά καθορίζει το εύρος τιμών που μπορεί να πάρει η ηλεκτρική αντίσταση. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η αντίσταση θα πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές $1500 - 0.05 * 1500 = 1425\Omega$ και $1500 + 0.05 * 1500 = 1575\Omega$.

Από: <http://el.wikipedia.org>

Παράρτημα IV

Βιβλιογραφία

Τα κυριότερα βιβλία σε θέματα οπτικών επικοινωνιών που είναι διαθέσιμα στη βιβλιοθήκη του Ιδρύματος:

1. “Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες”, G. Agrawal, 2^η έκδοση, Τζιόλας 2001
2. “Δίκτυα οπτικών επικοινωνιών”, P.E. Green, (Κ. Καρούμπαλος) Παπασωτηρίου, 1994
3. “Optical fiber communications”, J.M Senior, 2nd edition, Prentice Hall, 1992
4. “Optical communications systems” J. Gowar 2nd edition, Prentice Hall, 1993