

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ

ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ
ΛΑΣΚΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ.(Phd.) ΠΕΤΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αυτή η εργασία περιγράφει της αρχές λειτουργίας ηλεκτρομηχανικών διατάξεων που χρησιμοποιούν διάφορα χαρακτηριστικά του φωτός. Περιγράφεται η χρήση της μεταβολής του δείκτη διάθλασης του φωτός, η χρήση του πλέγματος διάθλασης και η χρήση της πόλωσης του φωτός. Είναι επομένως χρήσιμη η μελέτη των χαρακτηριστικών του φωτός, αναλύεται η χρήση της θερμικής απορρόφησης του φωτός, της φωτοαγωγιμότητας και της φωτοεκπομπής. Εξετάζονται τεχνολογίες απεικόνισης που βασίζονται στην σωλήνα κενού έως και συστοιχίες στερεάς κατάστασης. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συσκευών απεικόνισης, όπως και η αντίδραση του ανθρώπινου οφθαλμού στο φως. Στη συνέχεια περιγράφονται οι τεχνολογίες των συσκευών απεικόνισης, Τέλος παρουσιάζονται οι εξής εφαρμογές της οπτοηλεκτρονικής: το οπτοηλεκτρονικό φράγμα, ο αισθητήρας στάθμης υγρών οπτικής ίνας, ο αισθητήρας πίεσης οπτικής ίνας, το γυροσκόπιο οπτικής ίνας, ο αναγνώστης κωδικού ράβδου (barcode), η συσκευή αναπαραγωγής οπτικού δίσκου, ο εκτυπωτής laser, ο μαγνητο-οπτικός δίσκος και το σύστημα επικοινωνίας οπτικής ίνας. Γενικά ο κλάδος της οπτοηλεκτρονικής έχει προσφέρει πολλά στην ανάπτυξη της τεχνολογίας, και επιδέχεται μεγάλης προόδου.

Κεφάλαιο 6: Ειδικές Συσκευές

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε έναν αριθμό από εξειδικευμένες οπτικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για την απόκλιση δέσμης φωτός, την διαμόρφωση της έντασης της ή την περιστροφή της γωνίας πόλωσης της. Γενικά είναι αρκετά μεγάλες συσκευές και μπορεί να χρειάζονται ισχυρή παροχή ενέργειας. Στην αρχή αυτό δεν είχε σημασία, επειδή οι πηγές φωτός που χρησιμοποιούνταν στα πρώτα οπτοηλεκτρονικά συστήματα ήταν επίσης ογκώδεις και συχνά χρειαζόταν μια ισχυρή παροχή ενέργειας. Από τότε, ωστόσο, έχει καταβληθεί προσπάθεια να μειωθεί σημαντικά το μέγεθος ενός συστήματος, και επίσης να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας του. Αυτό οφείλεται σημαντικά στην ανακάλυψη των ημιαγωγικών πηγών φωτός που δεν ήταν μόνο συσκευές μικρές σε μέγεθος, με χαμηλή κατανάλωση αλλά και δεν χρειαζόταν εξωτερική διαμόρφωση της έντασης της ακτινοβολίας τους επειδή μπορούν να διαμορφωθούν απευθείας: μπορούμε να τις ανάβουμε και να τις σβήνουμε με ρυθμούς της τάξης των gigahertz. Ωστόσο η ανάγκη για εξωτερικούς διαμορφωτές και εκτροπείς παραμένει ακόμη, καθώς μόνο οι πηγές ημιαγωγών μπορούν να διαμορφωθούν απευθείας: άλλου τύπου πηγές πρέπει να διαμορφωθούν εξωτερικά. Για παράδειγμα, ο κύριος δίσκος για CD (οπτικός δίσκος) παραγωγή είναι γραμμένος με τη χρήση ενός laser ιόντων αργού υψηλής ισχύος. Ένα laser ιόντων αργού λειτουργεί σε μεγάλο ποσοστό βάση των αρχών λειτουργίας του laser HeNe και, όπως το laser HeNe, δεν μπορεί απλά να ανάβει και να σβήνει για να διαμορφώνει την ένταση εξόδου του έτσι χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός διαμορφωτής. Άλλος ένας λόγος για τη χρήση ενός εξωτερικού διαμορφωτή είναι ότι όταν ένα laser ημιαγωγού διαμορφωθεί απευθείας το μήκος κύματος της εξόδου του αλλάζει. Σε πολλές εφαρμογές αυτό δεν έχει σημασία, στην πραγματικότητα σε κάποιες, όπως στην τηλεμετρία laser, αυτό είναι ένα σημαντικό μέρος της τεχνικής. Ωστόσο, όπου απαιτείται σταθερό μήκος κύματος εξόδου τότε ένας εξωτερικός διαμορφωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και με μια πηγή ημιαγωγού.

Άλλος ένας λόγος για τον οποίο οι ογκώδεις εξωτερικές συσκευές πλέον προτιμώνται λιγότερο είναι ότι, συχνά, χρειάζονται προσεκτική ευθυγράμμιση μέσα στο οπτικό σύστημα διαφορετικά δεν θα λειτουργήσουν σωστά, αν όχι καθόλου. Αυτό τις κάνει μη οικονομικές για πρακτική εφαρμογή επειδή, για παράδειγμα, είναι μακράν δαπανηρότερη η επισκευή της συσκευής αναπαραγωγής CD από ένα πολύ

έμπειρο τεχνικό επειδή μόνο αυτός μπορεί να ευθυγραμμίσει σωστά όλα τα οπτικά όταν όλα τα μέρη του CD πρέπει να επανασυνδεθούν. Ο στόχος σήμερα είναι η κατασκευή οπτικών εξαρτημάτων που συνδέονται μεταξύ τους, όπως συνδέονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία, έτσι ώστε όταν συνδεθούν με την σωστή σειρά να είναι είμαστε βέβαιοι ότι θα λειτουργήσουν ορθά χωρίς την ανάγκη περαιτέρω μικρό – ρυθμίσεων. Η τάση αυτή της αγοράς έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη συσκευών που κάνουν σχεδόν την ίδια δουλειά με τις ογκώδεις συσκευές που θα εξετάσουμε, αλλά με ένα τρόπο που να μπορούν να ενσωματωθούν πολύ πιο εύκολα σε ένα μοντέρνο σύστημα. Οι σύγχρονες αυτές απαιτήσεις έχουν δώσει ώθηση σε ένα μοντέρνο κλάδο αυτό των ολοκληρωμένων οπτικών. Θα τα εξετάσουμε περιληπτικά αυτά στο τέλος του κεφαλαίου.

6.2 Ηλεκτρο-οπτικές συσκευές

Στο κεφάλαιο 3 ότι μιλήσαμε για μία ιδιότητα που χαρακτηρίζει κάποια υλικά, η οποία καλείται διπλοθλαστικότητα, στην οποία ο δείκτης διάθλασης του υλικού δεν είναι ίδιος σε όλες τις κατευθύνσεις. Το πιο απλό ηλεκτρο-οπτικό υλικό είναι αυτό που είναι συνήθως ιστροπικό, αλλά γίνεται διπλοθλαστικό όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο: Στο παράδειγμα που απεικονίζεται στο σχήμα 6.1 ο οπτικός άξονας του πλέον διπλοθλαστικού κρυστάλλου είναι παράλληλος στο εφαρμοσμένο πεδίο, και έχει δείκτη διάθλασης $n_{//}$. Όλες οι κατευθύνσεις κάθετα στον οπτικό άξονα του κρυστάλλου έχουν δείκτη διάθλασης n_{\perp} . Το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον John Kerr το 1875 και, πράγματι, ένας τύπος διαμορφωτή, το στοιχείο Kerr δανείστηκε το όνομά του από τον επιστήμονα αυτό.

Χωρίς Πεδίο (No field) Εφαρμογή Πεδίου (Applied Field)

Σχήμα 6.1 Διάγραμμα που απεικονίζει τα διαδοχικά στάδια της διπλοθλαστικότητας με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Ο άξονας Z δεν εμφανίζεται για διευκόλυνση αλλά για $n_z = n_y$.

6.2.1 Ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής

Η ερώτηση που γεννάται τώρα είναι: «Πώς αυτό βοηθάει στη διαμόρφωση της έντασης του φωτός;». Μπορούμε να κατανοήσουμε την απάντηση αν κοιτάξουμε το σύστημα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Στο Σχήμα 6.2 (α) πολωμένο φως

εισέρχεται σε έναν ηλεκτρο-οπτικό κρύσταλλο, με διεύθυνση πόλωσης στις 45° ως προς τον κάθετο άξονα. Όπως κάναμε και στο κεφάλαιο 3, μπορούμε να το αναλύσουμε την πόλωση σε δύο συνιστώσες, μία κάθετα πολωμένη συνιστώσα και μία οριζόντια πολωμένη συνιστώσα, με την βασική διεύθυνση να είναι η συνισταμένη αυτών των δύο. Στο Σχήμα 6.2 (α) ο κρύσταλλος είναι ισοτροπικός κι έτσι και η κάθετη και η οριζόντια συνιστώσα βλέπουν τον ίδιο δείκτη διάθλασης και διατρέχουν και οι δύο ένα οπτικό δρόμο μήκους nL . Αυτό σημαίνει ότι η διεύθυνση πόλωσης της συνισταμένης είναι ίδια στην έξοδο με την είσοδο, με άλλα λόγια πόλωση εξόδου = πόλωση εισόδου.

Στο Σχήμα 6.2 (β) ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται, και ο κρύσταλλος είναι τώρα διπλοθλαστικός. Η κάθετη συνιστώσα του πολωμένου φωτός τώρα βλέπει διαφορετικό δείκτη διάθλασης από την οριζόντια συνιστώσα. Η κάθετη συνιστώσα θα διανύσει μία οπτική απόσταση $n_{//}L$ ενώ η οριζόντια συνιστώσα θα διανύσει μία οπτική απόσταση $n_{\perp}L$. Αν το πεδίο που εφαρμόζεται στον κρύσταλλο επιλεγεί έτσι ώστε η κάθετη συνιστώσα να διανύσει οπτική απόσταση μεγαλύτερη από την οριζόντια συνιστώσα κατά ένα μισό του μήκους κύματος τότε οι δύο συνιστώσες θα αποκτήσουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180° στο τέλος του κρυστάλλου: η μία συνιστώσα θα έχει διανύσει μεγαλύτερη απόσταση κατά ένα μισό του μήκους κύματος από τον οπτικό δρόμο που διένυσε η άλλη και η πόλωση της δέσμης στην έξοδο του κρυστάλλου είναι κάθετη με την διεύθυνση πόλωσης που είχε στην είσοδο.

Κάθετη συνιστώσα (vertical component)

Είσοδος (Input) Έξοδος (Output) Χωρίς πεδίο

Οριζόντια συνιστώσα (Horizontal component)

Είσοδος (Input) Έξοδος (Output) Εφαρμοζόμενο πεδίο (Field Applied)

Σχήμα 6.2 Η συμπεριφορά ενός ηλεκτρο-οπτικού κρυστάλλου (α) χωρίς την εφαρμογή πεδίου και (β) με την εφαρμογή πεδίου έτσι ώστε οι δύο συνιστώσες να έχουν διαφορά φάσης 180° στην έξοδο του κρυστάλλου.

Οι κρύσταλλοι που βασικά χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές δεν είναι εκ φύσεως ισοτροπικά υλικά. Συνηθισμένα υλικά είναι ο δι-

υδρογονικός φώσφορος καλίου (KDP) ή ο δι-δευτέριος φώσφορος του καλίου (KD*P). Αυτά τα υλικά είναι εκ φύσεως ανισοτροπικά, και ο κρύσταλλος είναι στραμμένος έτσι ώστε, όταν δεν εφαρμόζεται τάση, ένας από τους κύριους άξονες, x , να είναι ευθυγραμμισμένος με την διεύθυνση πόλωσης εισόδου του φωτός έτσι ώστε και οι δύο συνιστώσες του φωτός εισόδου να βλέπουν τον ίδιο δείκτη διάθλασης, Σχήμα 6.3 (α). Όταν εφαρμοστεί μία τάση παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του φωτός οι x και y άξονες περιστρέφονται σε νέες θέσεις x' και y' , και, αν η γωνία περιστροφής είναι 45° τότε μία συνιστώσα του φωτός εισόδου συναντά το δείκτη διάθλασης x , και η άλλη συνιστώσα του προσπίπτοντος φωτός συναντά το δείκτη διάθλασης y Σχήμα 6.3 (β). Αν η γωνία περιστροφής δεν είναι 45° οι δύο συνιστώσες του φωτός εισόδου θα συναντήσουν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης που θα είναι κάπου ανάμεσα σε n_x και n_y .

Προσπίπτον φως (Incident light)	Κρύσταλλος (Crystal)	Χωρίς πεδίο
Προσπίπτον φως (Incident light)	Κρύσταλλος (Crystal)	Εφαρμογή πεδίου

Σχήμα 6.3 Η συμπεριφορά του KDP (α) χωρίς την εφαρμογή πεδίου και (β) με την εφαρμογή πεδίου.

Μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση που απαιτείται για την περιστροφή της πόλωσης του φωτός κατά 90° , που λέγεται η τάση μισού κύματος, V_π , από την εξίσωση

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n^3 r_{63}} \quad (6.1)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος στον κενό χώρο του προσπίπτοντος φωτός και r_{63} λέγεται ο ηλεκτρο-οπτικός συντελεστής.

Λυμένο Παράδειγμα 1

Ένας κρύσταλλος KDP χρησιμοποιείται για έναν ηλεκτροπτικό διαμορφωτή.

Αν $r_{63} = 10.6 \times 10^{-12} \text{mV}^{-1}$ και $n=1.51$ ποια είναι η τάση μισού κύματος για φως μήκους κύματος 514.5nm;

Λύση

Από την εξίσωση (6.1)

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n^3 r_{63}} = \frac{514.5 \times 10^{-9}}{2 \times (1.51)^3 \times 10.6 \times 10^{-12}} = 7.05 V \quad (6.2)$$

Το Σχήμα 6.4(α) απεικονίζει την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή. Αυτοί οι διαμορφωτές συχνά καλούνται συσκευές Pockels επειδή η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο φαινόμενο Pockels. Ο πολωτής στην έξοδο του διαμορφωτή τοποθετείται κάθετα σε σχέση με τον πολωτή εισόδου, κι έτσι η έξοδος της συσκευής ξεκινάει από ένα ελάχιστο χωρίς την εφαρμογή πεδίου, σε ένα μέγιστο στην τάση μισού κύματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4(β).

Πολωτής (Polarizer) Συσκευή Pockels Πολωτής

Έξοδος (% της εισόδου) Εφαρμοζόμενη τάση

Σχήμα 6.4 (α) Η δομή μιας συσκευής διαμόρφωσης Pockels, και (β) η διακύμανση της εξόδου ως προς εφαρμοζόμενη τάση.

Η διακύμανση της έντασης εξόδου ως προς την εφαρμοζόμενη τάση V , δίνεται από

$$I = I_o \sin^2 \left(\frac{\pi V}{2V_{\pi}} \right) \quad (6.3)$$

που είναι ξεκάθαρα μη γραμμική ως προς την εφαρμοζόμενη τάση, αν και για χαμηλές τιμές της τάσης η ένταση της εξόδου είναι ανάλογη με V^2 . Αυτή η μη γραμμικότητα μπορεί να καταστήσει την οδήγηση του διαμορφωτή σχετικά περίπλοκη. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί βάζοντας ένα πλακίδιο ενός τετάρτου μήκους κύματος ανάμεσα στον πρώτο πολωτή και την συσκευή Pockels. Ένα πλακίδιο ενός τετάρτου μήκους κύματος είναι κατασκευασμένο από διπλοθλαστικό υλικό και η χρήση του είναι ισοδύναμη με την εφαρμογή μίας τάσης $V_{\pi}/2$ στην συσκευή Pockels. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν δεν εφαρμόζεται τάση στην συσκευή Pockels, η ένταση του φωτός που εκπέμπεται από τον πολωτή εξόδου είναι η μισή της έντασης εισόδου στον πρώτο πολωτή. Αν, τώρα, εφαρμόσουμε μία θετική τάση, $+V$, στην συσκευή Pockels, η συνολική δυναμική τάση που εφαρμόζεται είναι $(V_{\pi}/2) + V$, κι έτσι η ένταση εξόδου αυξάνεται. Αν εφαρμόσουμε μία αρνητική τάση στην συσκευή Pockels, η συνολική δυναμική τάση που εφαρμόζεται είναι $(V_{\pi}/2) - V$ κι έτσι η ένταση εξόδου μειώνεται. Το νόημα αυτού είναι ότι στο κεντρικό τμήμα της

καμπύλης I συναρτήσει του V η εκπεμπόμενη ένταση είναι σχεδόν γραμμική με την εφαρμοσμένη τάση, Σχήμα 6.5, κι έτσι είναι ευκολότερο να ελεγχθεί η ένταση εξόδου του διαμορφωτή. Τυπικά, η ένταση εξόδου είναι γραμμική με την εφαρμοζόμενη τάση ανάμεσα στις τιμές $0.95V_{\pi}$ και $1.05 V_{\pi}$.

Έξοδος (% εισόδου) Γραμμικό μέρος της καμπύλης

Μεταβολή της έντασης εξόδου με τον χρόνο

Εφαρμοζόμενη τάση

Μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης με τον χρόνο

Σχήμα 6.5 Η χρήση πόλωσης για την απόκτηση μίας γραμμικής σχέσης ανάμεσα στην εφαρμοζόμενη τάση και την ένταση εξόδου.

ΕΡΩΤΗΣΗ1

Εξηγείστε, χωρίς να συμβουλευτείτε το βιβλίο, γιατί μία τάση πόλωσης N εφαρμόζεται σε μια συσκευή διαμορφωτή Pockels.

Ξεκάθαρα, το φως πρέπει να είναι σε θέση να εισέλθει στο διαμορφωτή, κι έτσι τα ηλεκτρόδια στις όψεις εισόδου και εξόδου του κρυστάλλου πρέπει να έχουν μικρές οπές στο κέντρο τους, ή πρέπει να είναι διάφανα. Αυτό δεν είναι απόλυτα ικανοποιητικό και το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση ηλεκτρο-οπτικών υλικών, όπου η τάση μπορεί να εφαρμόζεται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του φωτός. Αυτό απαιτεί τη χρήση διαφορετικών υλικών, όπως το γαλλιούχο αρσενίδιο (GaAs), κι έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα ότι όσο πιο μακρύς είναι ο κρύσταλλος τόσο μικρότερη είναι η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα. Το κύριο πρόβλημα με αυτά τα υλικά είναι ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ορατό φως, αφού είναι διάφανα μόνο στο υπέρυθρο.

Οι ηλεκτρο-οπτικοί διαμορφωτές μπορούν να διαμορφώσουν την ένταση εξόδου του φωτός πραγματικά πολύ γρήγορα, με τους κύριους περιορισμούς στην μέγιστη συχνότητα λειτουργίας να είναι η χωρητικότητα του διαμορφωτή και ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διανύσει τον κρύσταλλο. Τα προβλήματα της χωρητικότητας του διαμορφωτή μειώνονται συνδέοντας τον κρύσταλλο με ένα κύκλωμα συντονισμού LCR. Η μέγιστη συχνότητα διαμόρφωσης, f_m , υπολογίζεται από το γεγονός ότι το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στον κρύσταλλο δεν πρέπει

να αλλάζει σημαντικά ως προς τον χρόνο που χρειάζεται το φως για να διανύσει τον κρύσταλλο. Με άλλα λόγια

$$\frac{1}{f_m} \gg \frac{Ln}{c} \quad (6.4)$$

Αφού ο χρόνος διέλευσης του φωτός $= (Ln)/c$.

Λυμένο Παράδειγμα 2

Ένας διαμορφωτής είναι κατασκευασμένος από KDP μήκους 7 mm. Αν το KDP έχει δείκτη διάθλασης 1.5 υπολογίστε την μέγιστη δυνατή συχνότητα διαμόρφωσης αυτού του κρυστάλλου.

Λύση

Ανασυντάσσοντας την εξίσωση (6.4) και αντικαθιστώντας με τις δεδομένες τιμές έχουμε

$$f_m \ll \frac{c}{Ln} = \frac{3 \times 10^8}{7 \times 10^{-3} \times 1.5} = 2.86 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

6.2.2 Ο ηλεκτρο-οπτικός παρεκτροπέας

Ένας ηλεκτρο-οπτικός παρεκτροπέας λειτουργεί μεταβαλλόντας το δείκτη διάθλασης που «συναντά» μία δέσμη, καθώς διαδίδεται κατά μήκος μίας συσκευής. Στην πράξη, αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας δύο ορθογώνια πρίσματα ενός κρυστάλλου, όπως αυτά που είναι κατασκευασμένα από KDP, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.6. Οι κρύσταλλοι είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε, όταν εφαρμόζεται το πεδίο, τότε όταν η αρχή της δέσμης βλέπει μία αύξηση στο δείκτη διάθλασης κατά μία δεδομένη ποσότητα το τελικό άκρο της δέσμης συναντά μία μείωση του δείκτη διάθλασης κατά την ίδια ποσότητα. Η γωνία παρεκτροπής της δέσμης, θ , δίνεται από

$$\theta = \frac{Ln^3 r_{63} E_z}{D} \quad (6.5)$$

όπου D είναι το ύψος της δέσμης και E_z είναι το πεδίο που εφαρμόζεται στην διεύθυνση z . Παρατηρήστε ότι η γωνία θ υπολογίζεται σε ακτίνια. Η μετατροπή από ακτίνια σε μοίρες μπορεί να γίνει έχοντας υπ' όψιν ότι $180^\circ = \pi = 3.142$ ακτίνια.

Δέσμη εισόδου Δέσμη εξόδου

Σχήμα 6.6 Η λειτουργία ενός ηλεκτρο-οπτικού παρεκτροπέα. Η κατεύθυνση z προς τη σελίδα.

ΕΡΩΤΗΣΗ2

Ένας παρεκτροπέας μήκους 10 mm είναι κατασκευασμένος από δύο πρίσματα από KDP. Αν η διάμετρος της προσπίπτουσας δέσμης είναι 1.5 mm, τι πεδίο πρέπει να εφαρμοστεί για να παρεκτραπεί η δέσμη κατά 5° ; Αν το πεδίο εφαρμοστεί εγκάρσια του κρυστάλλου για μια απόσταση 5 mm, σε τι τάση ανταποκρίνεται αυτό;

($n=1.5$, and $r_{63}=10.6 \times 10^{-12} \text{mV}^{-1}$)

6.3 Ακουστικο-οπτικές συσκευές

Υπάρχουν δύο μεγάλα μειονεκτήματα με τους ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές

- απαιτούν μεγάλες τάσεις που, όταν αλλάζουν κατάσταση πολύ γρήγορα μπορούν να γίνουν ηλεκτρικά πολύ θορυβώδεις, και
- πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολωτές, συχνά υψηλής ποιότητας, αν απαιτείται καλό αποτέλεσμα.

Καθένα ή και τα δύο από τα παραπάνω αποτελούν πρόβλημα. Μια λύση είναι η χρήση ενός ακουστικο-οπτικού διαμορφωτή και, πράγματι, αν αποσυναρμολογήσετε ένα παλιό μηχάνημα φαξ, μπορεί να βρείτε μία τέτοια συσκευή.

Ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής χρησιμοποιεί ένα υλικό του οποίου οι ιδιότητες του δείκτη διάθλασης μεταβάλλονται όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοστεί, ενώ μία ακουστικο-οπτική συσκευή χρησιμοποιεί ένα υλικό του οποίου οι ιδιότητες του δείκτη διάθλασης αλλάζουν όταν εφαρμοστεί πίεση. Αυτό λέγεται φωτο-ελαστικό φαινόμενο και η πίεση συνήθως είναι της μορφής συμπίεσης ή διάτασης του υλικού. Στην ακουστικο-οπτική συσκευή, εφαρμόζεται πίεση στο υλικό της συσκευής με τη χρήση ενός πιεζο-ηλεκτρικού μετατροπέα. Τα πιεζο-ηλεκτρικά υλικά είναι μία πολύ ενδιαφέρουσα κατηγορία υλικών, επειδή παραμορφώνονται όταν εφαρμοστεί τάση σε αυτά. Αυτό σημαίνει ότι αν εφαρμόσετε μία a.c. τάση, δονούνται και αυτή η δόνηση μπορεί να συζευχθεί σε ένα άλλο υλικό, αν το πιεζο-ηλεκτρικό υλικό είναι κολλημένο

σε αυτό. Η αντιστροφή αυτής της συμπεριφοράς των πιεζο-ηλεκτρικών είναι ότι αν τα παραμορφώσετε παράγουν μία τάση, που σημαίνει ότι μπορούν να γίνουν καλοί αισθητήρες πίεσης, και άρα καλά μικρόφωνα.

Στις ακουστικο-οπτικές συσκευές οι πιεζο-ηλεκτρικοί μετατροπείς λειτουργούν σε υπερηχητικές (πολύ υψηλές) συχνότητες και έτσι συντίθενται ηχητικά κύματα στο υλικό της συσκευής. Τα ηχητικά κύματα είναι μηχανικά κύματα, που σημαίνει ότι ταξιδεύουν μέσα από υλικά προκαλώντας τα άτομα ή τα μόρια από τα οποία το υλικό συντίθεται να ταλαντώνονται μπρος – πίσω. Καθώς διαδίδεται το ηχητικό κύμα, δημιουργεί εναλλασσόμενες συμπίεσεις και αραιώσεις του υλικού, που σημαίνει ότι εναλλασσόμενα τμήματα του υλικού όπου η πυκνότητα των μορίων ή των ατόμων είναι είτε μεγαλύτερη από την αδιατάρακτη κατάσταση, ή μικρότερη από την αδιατάρακτη κατάσταση. Σε οπτικούς όρους, αυτές οι διακυμάνσεις πυκνότητας σημαίνουν διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης, και, στη μία δέσμη φωτός, περιοδικές διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης σε υπερηχητικά μήκη κύματος, που μοιάζουν με ένα πλέγμα περίθλασης. Η συμπεριφορά ενός συμβατικού πλέγματος διάθλασης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.7. Φως ενός μόνο μήκους κύματος προσπίπτει κανονικά στο πλέγμα, και διαθλάται από αυτό. Στην πλευρά εξόδου του πλέγματος προκύπτει ένας αριθμός από δέσμες, ή από διαθλώμενες τάξεις, με τη μηδενική τάξη ($m=0$) να περνάει από μέσα και τη δέσμη πρώτης τάξης ($m=1$) να διαθλάται με γωνία θ και ούτω καθ' εξής. Το περισσότερο από το φως βρίσκεται στη μηδενική τάξη και η ένταση μειώνεται όσο αυξάνεται το m . Η συμπεριφορά ενός πλέγματος διάθλασης συνοψίζεται από την εξίσωση

$$m\lambda = a\sin\theta_m \quad (6.6)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός και a είναι η περίοδος του πλέγματος.

Προσπίπτον φως Φράγμα περίθλασης Διαθλώμενο φως

Σχήμα 6.7 Η συμπεριφορά ενός πλέγματος διάθλασης.

Ωστόσο, στις περισσότερες ακουστικο-οπτικές συσκευές, εξαιτίας του πάχους του υλικού, δε έχουμε πάντα 'κανονική' διάθλαση αλλά διάθλαση τύπου Bragg. Στη διάθλαση τύπου Bragg το προσπίπτον φως επιλεκτικά αντανακλάται επιτυχώς, ένα

φαινόμενο που ήδη έχουμε συναντήσει όταν μιλήσαμε για τη χρήση της επιλεκτικής ανάκλασης του φωτός που επιλέγει ένα μήκος κύματος σε μία κοιλότητα laser. Σε αυτήν την περίπτωση δεν έχουμε στρώματα υλικού αλλά το μέγιστο και ελάχιστο του δείκτη διάθλασης, με τον διαχωρισμό ανάμεσα σε επιτυχές μέγιστο (ή ελάχιστο) να είναι ισοδύναμο με το ακουστικό μήκος κύματος στο υλικό, Σχήμα 6.8 (α). Η συνθήκη Bragg για ανάκλαση του προσπίπτοντος φωτός ικανοποιείται όταν

$$\sin\theta_i = \sin\theta_r = \frac{m\lambda}{2\Lambda} = \sin\theta_B \quad (6.7)$$

Όπου θ_i και θ_r είναι, αντίστοιχα, η προσπίπτουσα και ανακλώμενη γωνία, Λ είναι το ακουστικό μήκος κύματος, και θ_B είναι η γωνία Bragg. Θα παρατηρήσετε ότι αυτή η εξίσωση είναι ίδια με την εξίσωση (6.6), ισχύει μόνο στην ιδιαίτερη περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης του φωτός.

Δείκτης περίθλασης

Κατεύθυνση διάδοσης

Ακουστικό κύμα

Σήμα εισόδου

Μετατροπέας

Σχήμα 6.8 (α) Η δημιουργία ενός εσωτερικού πλέγματος διάθλασης σε ένα υλικό, και (β) η χρήση του πλέγματος για τη δημιουργία ενός διαμορφωτή.

6.3.1 Ο ακουστικο-οπτικός διαμορφωτής

Το Σχήμα 6.8 (β) είναι το διάγραμμα της δομής ενός ακουστικο-οπτικού διαμορφωτή. Παράγονται υπερηχητικά κύματα στο υλικό της συσκευής ενεργοποιώντας τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα. Αυτό παράγει ένα εσωτερικό πλέγμα διάθλασης περιόδου Λ . Αν προσπέσει φως στη συσκευή υπό γωνία Bragg διαθλάται και μπλοκάρεται από την πλάκα εξόδου της συσκευής. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος απενεργοποιηθεί, το φως δε διαθλάται πλέον και συνεχίζει να διαδίδεται μέσα στη συσκευή.

Αν παρατηρήσετε την εξίσωση (6.7) θα δείτε ότι για ένα δεδομένο μήκος κύματος του φωτός, η ακουστική συχνότητα και γωνία πρόσπτωσης της δέσμης φωτός πρέπει να προσαρμοστούν προσεκτικά για να εξασφαλίσουν ότι ικανοποιείται

η συνθήκη Bragg. Αυτό οδηγεί σε έναν από τους περιορισμούς της ακουστικο-οπτικής συσκευής που είναι ότι όλο το φως πρέπει να προσπέσει στη συσκευή με σχεδόν ακριβώς την ίδια γωνία, διαφορετικά αυτή δε λειτουργεί ορθά. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι μόνο παράλληλο, ή ευθυγραμμισμένο φως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτές τις συσκευές. Η μέγιστη ταχύτητα με την οποία ο ακουστικο-οπτικός διαμορφωτής μπορεί να αλλάξει τρόπο λειτουργίας εξαρτάται από τον χρόνο που χρειάζεται το ακουστικό κύμα να διασχίσει την φωτεινή δέσμη. Έτσι εξαρτάται από το πλάτος της δέσμης, w , και την ταχύτητα του ακουστικού κύματος. Ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης του διαμορφωτή, t_{min} , έτσι δίνεται από

$$t_{min} = \frac{w}{v_a} \quad (6.8)$$

Όπου v_a είναι η ταχύτητα του ακουστικού κύματος. Η μείωση της διαμέτρου της δέσμης εισόδου μπορεί να βελτιώσει το χρόνο απόκρισης.

Λυμένο Παράδειγμα 3

Ένας ακουστικο-οπτικός παρεκτροπέας χρησιμοποιείται για να παρεκτρέψει μια δέσμη laser διαμέτρου 1.5mm. Αν η v_a για TeO_2 είναι 620ms^{-1} υπολογίστε τον ελάχιστο χρόνο απόκρισης του διαμορφωτή.

Λύση

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.8) και αντικαθιστώντας τις δεδομένες τιμές έχουμε ότι

$$t_{min} = \frac{w}{v_a} = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{620} = 2.4 \mu\text{s}$$

Οι εμπορικοί διαμορφωτές έχουν εύρος ζώνης έως και 50 MHz και οπές μερικών χιλιοστών. Συνήθως κατασκευάζονται από διοξείδιο του τελλουρίου (TeO_2) ή μολυβδούχο μόλυβδο (PbMoO_4) με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς από νιοβιούχο λίθιο (LiNbO_3). Χρησιμοποιούνται σε παρόμοιες εφαρμογές με τους ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές, παρόλο που δεν είναι τόσο γρήγοροι. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα, ωστόσο, είναι ότι χρειάζονται μόνο πολύ χαμηλές τάσεις οδήγησης (έως και $\pm 15\text{V}$) και για τα δύο σήματα και παροχή ισχύος, έχουν τη γνωστή εμπέδηση

εισόδου 50Ω και χρειάζονται μόνο ισχύ οδήγησης 0.5 έως 4W. Η απόδοση ενός διαμορφωτή μπορεί να υπολογιστεί από την έκφραση

$$\text{Απόδοση } h = \frac{I_{\text{διάθλασης}}}{I_{\text{προσπίπτουσα}}} = \sin^2 \left(M I_{\text{ακουστικό}}^{1/2} \right) \quad (6.9)$$

Όπου $I_{\text{διάθλασης}}$ και $I_{\text{προσπίπτουσα}}$ είναι οι εντάσεις διάθλασης και πρόσπτωσης, $I_{\text{ακουστικό}}$ είναι η ένταση του ακουστικού κύματος, όλα σε Wm^{-2} , και M είναι η μορφή κέρδους του υλικού. Από την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να δούμε ότι η απόδοση της διάθλασης μπορεί να αλλάξει μεταβάλλοντας την ισχύ εξόδου από τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα.

6.3.2 Ο ακουστικο-οπτικός παρεκτροπέας

Η κατασκευή ενός ακουστικο-οπτικού παρεκτροπέα είναι όμοια με αυτή του διαμορφωτή, εκτός από το διάφραγμα μπλοκαρίσματος στην έξοδο. Η δέσμη σαρώνεται εναλλάσσοντας τη συχνότητα του ακουστικού κύματος. Μία αλλαγή Δf_a στη συχνότητα προκαλεί μία μεταβολή στη γωνία

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{nv_a} \Delta f_a \quad (6.10)$$

Δυστυχώς, επειδή τώρα δεν ικανοποιούμε τη συνθήκη Bragg, καθώς αυξάνεται η γωνία, η ποσότητα ενέργειας στη διαθλώμενη δέσμη μειώνεται. Επιπλέον, οι γωνίες διάθλασης είναι μικρές, συνήθως μερικές μοίρες. Ωστόσο, και πάλι, οι χαμηλές απαιτήσεις οδήγησης μπορούν να κάνουν τους ακουστικούς-οπτικούς παρεκτροπέες ελκυστικούς για ορισμένες εφαρμογές.

6.3.3 Ο αναλογικός ακουστικο-οπτικός διαμορφωτής

Ο ακουστικο-οπτικός διαμορφωτής που έχουμε παρουσιάσει μέχρι αυτό εδώ το σημείο παράγει μία ψηφιακή έξοδο, δηλαδή, είναι είτε ενεργή είτε ανενεργή. Οι ακουστικο-οπτικοί διαμορφωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναλογικές συσκευές, αλλά συνήθως με έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο. Σε έναν αναλογικό διαμορφωτή, το φως προσπίπτει κάθετα στον κρύσταλλο, Σχήμα 6.9, και το υλικό του διαμορφωτή είναι πολύ λεπτότερο, έτσι ώστε ο διαμορφωτής να συμπεριφέρεται σαν ένα συμβατικό πλέγμα διάθλασης μεταβλητής περιόδου. Σε αυτό το διαμορφωτή η

ποσότητα φωτός που διαθλάται σε τάξεις $m \geq 1$ εξαρτάται από το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης, έτσι αυξάνοντας απλά ή μειώνοντας την ισχύ που εφαρμόζεται στο μετατροπέα, το πλάτος του φωτός εξόδου (η $m = 0$ τάξη) μπορεί να μεταβάλλεται.

Είσοδος Διαμορφωτής Φακός Οπή Έξοδος
 Σχήμα 6.9 Ένας αναλογικός ακουστικο-οπτικός διαμορφωτής.

6.4 Μαγνητο-οπτικές συσκευές

Έως τώρα έχουμε εξετάσει πως η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου ή μίας πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει τις οπτικές ιδιότητες ενός υλικού. Σε αυτήν την τελική κατηγορία συσκευών θα κοιτάξουμε πώς ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο. Γενικά, επειδή τα ηλεκτρικά πεδία μπορούν να παραχθούν πιο εύκολα από τα μαγνητικά, οι ηλεκτρο-οπτικές συσκευές προτιμώνται στις εφαρμογές όταν υπάρχει επιλογή. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες εφαρμογές στις οποίες μόνο μία μαγνητο-οπτική συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτές θα μας απασχολήσουν σε αυτό το σημείο. Οι πιο χρήσιμες μαγνητο-οπτικές συσκευές βασίζονται στο φαινόμενο Faraday, συνεπώς αυτό θα εξετάσουμε.

6.4.1 Το φαινόμενο Faraday

Το φαινόμενο Faraday παρατηρήθηκε πρώτα από τον Faraday, το 1845. Αυτός παρατήρησε ότι όταν μία δέσμη γραμμικά πολωμένου φωτός ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό το οποίο βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο, το επίπεδο πόλωσης περιστρέφεται. Το ερώτημα είναι, γιατί συμβαίνει αυτό; Έχουμε ήδη αναφέρει ότι η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του δείκτη διάθλασης ενός υλικού. Ωστόσο, το φαινόμενο Faraday είναι λίγο πιο περίπλοκο, και για την κατανόησή του πρέπει να μελετήσουμε την συμπεριφορά ενός ηλεκτρονίου μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ηλεκτρόνιο που κινείται σε κενό διάστημα με ταχύτητα v . Αν τώρα εφαρμόσουμε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο B κάθετα στη διεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου, στο ηλεκτρόνιο θα ασκηθεί μία δύναμη, F , που δίνεται από

$$F = qvB \quad (6.11)$$

Η κατεύθυνση της δύναμης θα είναι κάθετη και στο v και στο B , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.10(α). Αντί να κινείται κατά μήκος μιας ευθείας τροχιάς, το ηλεκτρόνιο τώρα θα ακολουθήσει κυκλική πορεία, με ακτίνα, R , που δίνεται από

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (6.12)$$

Όπου m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου ($=9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$), και q είναι το ηλεκτρικό του φορτίο, Σχήμα 6.10 (β).

Χωρίς πεδίο B ($B = 0$)

Με το B να κατευθύνεται προς τα μέσα

Είσοδος ηλεκτρονίου

Έξοδος ηλεκτρονίου

Σχήμα 6.10 (α)

Η κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται από ένα ηλεκτρόνιο που κινείται κάθετα σε ένα εφαρμοζόμενο πεδίο, και (β) η τροχιά που ακολουθεί.

ΕΡΩΤΗΣΗ 3

Ένα ηλεκτρόνιο με ταχύτητα 10^6ms^{-1} εισέρχεται σε μαγνητικό πεδίο 0.5T κάθετα στο πεδίο. Ποια είναι η ακτίνα της κυκλικής διαδρομής που το ηλεκτρόνιο θα ακολουθήσει ενώ βρίσκεται στο πεδίο;

Φυσικά, δεν έχουμε ελεύθερα ηλεκτρόνια, αλλά ηλεκτρόνια που είναι δεσμευμένα στους πυρήνες των ατόμων ενός υλικού, παρόλα αυτά τα ηλεκτρόνια θα εκτελέσουν κυκλική κίνηση.

Πώς λοιπόν το χρησιμοποιούμε αυτό; Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί αναπαριστώντας το γραμμικά πολωμένο κύμα μας με έναν ελάχιστα διαφορετικό τρόπο από αυτόν που είδαμε έως τώρα. Αντί να το αναπαραστήσουμε ως το αποτέλεσμα των δύο κάθετων συνιστωσών, θα το αναπαραστήσουμε ως το αποτέλεσμα δύο κυκλικά πολωμένων συνιστωσών. Το Σχήμα 6.11 (α) αναπαριστά με ένα κυκλικά πολωμένο κύμα: Καθώς διαδίδεται στο κενό, το πλάτος του κύματος παραμένει σταθερό αλλά η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται. Τότε, γραμμικά πολωμένο φως αποτελείται από μία συνισταμένη που περιστρέφεται δεξιόστροφα (δεξιόστροφο κυκλικά πολωμένο φως), και από μια συνισταμένη που

περιστρέφεται αριστερόστροφα (αριστερόστροφο κυκλικά πολωμένο φως), Σχήμα 6.11 (β).

Σχήμα 6.11 (α) Η περιστροφή της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου με διάδοση για ένα δεξιόστροφο κυκλικά πολωμένο κύμα, και (β) η αναπαράσταση ενός γραμμικά πολωμένου φωτός με όρους κυκλικά πολωμένου φωτός.

Έτσι, τώρα έχουμε δύο πράγματα που περιστρέφονται στο χρόνο: Τα ηλεκτρόνια στο υλικό και την κατεύθυνση πόλωσης του φωτός. Τώρα, καθώς το φως εισέρχεται στο υλικό, η κυκλική συνιστώσα του φωτός που περιστρέφεται στην ίδια κατεύθυνση με τα ηλεκτρόνια θα αισθανθεί την περιστροφή τους, ενώ η άλλη συνιστώσα δεν θα αισθανθεί τίποτα. Και, αφού η κίνηση των ηλεκτρονίων τροποποιεί το δείκτη διάθλασης του υλικού, η συνιστώσα του φωτός που αισθάνεται την κίνηση των ηλεκτρονίων επίσης θα συναντήσει έναν διαφορετικό δείκτη διάθλασης από την άλλη συνιστώσα. Αυτό σημαίνει ότι καθώς οι δύο συνιστώσες διαδίδονται στο υλικό, ταξιδεύουν σε διαφορετικού μήκους οπτικές διαδρομές. Αυτό σημαίνει ότι η διεύθυνση πόλωσης της συνισταμένης στην έξοδο του υλικού έχει περιστραφεί υπό γωνία θ , που δίνεται από

$$\theta = VBL \quad (6.13)$$

Όπου V λέγεται η σταθερά Verdet. Το μέγεθος του V εξαρτάται από τη διαφορά των δεικτών διάθλασης που βλέπουν οι δύο κυκλικά πολωμένες συνιστώσες και είναι συνήθως αρκετά μικρό. Για παράδειγμα, το V για τον χαλαζία είναι μόνο 0.23 μοίρες ανά χιλιοστό ανά Tesla.

Λυμένο Παράδειγμα 4

Μία συσκευή Faraday πρόκειται να φτιαχτεί από πολύ πυκνό πυρολιθικό γυαλί, που έχει σταθερά Verdet $1.78^\circ \text{ mm}^{-1} \text{ T}^{-1}$. Το κομμάτι γυαλιού έχει μήκος 1.5cm και πρέπει να περιστρέφει το φως κατά 22.5° . Τι μαγνητικό πεδίο πρέπει να εφαρμοστεί για να επιτευχθεί αυτό;

Λύση

Αναδιατάσσοντας την εξίσωση (6.13) και βάζοντας τις δεδομένες τιμές έχουμε

$$B = \frac{\theta}{VL} = \frac{22.5}{1.78 \times 15} = 0.843T$$

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα του φαινομένου Faraday είναι ότι αν το φως εξόδου ανακλαστεί μέσα από το σύστημα η περιστροφή της διεύθυνσης πόλωσης του φωτός δεν αντιστρέφεται. Αυτό δεν ισχύει στο ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο όπου οποιαδήποτε περιστροφή της διεύθυνσης πόλωσης από τη συσκευή ακυρώνεται με την οπίσθια ανάκλαση προς το σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι, με την πρόσθεση πολωτών, μπορεί να κατασκευαστεί ένας οπτικός μονωτής, που εξασφαλίζει ότι οποιοδήποτε φως ανακλάται πίσω στο διαμορφωτή μπορεί να εμποδιστεί από το να διανύσει το σύστημα κατά την αντίστροφη φορά. Το Σχήμα 6.12 απεικονίζει την δομή και τη συμπεριφορά ενός τέτοιου μονωτή.

Πολωτής Φως εισόδου Περιστροφέας Faraday Πολωτής

Ανακλώμενο φως Ανακλώμενη επιφάνεια

Σχήμα 6.12 Η δομή και συμπεριφορά ενός περιστροφέα Faraday.

Όταν απαιτείται η σταθερή λειτουργία ενός συστήματος laser θα πρέπει να περιοριστεί η οπισθοανάκλαση προς αυτό. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση οπτικού μονωτή. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται κάπου μετά την έξοδο του laser για να το προστατέψει από τέτοιες ανακλάσεις.

6.5 Ολοκληρωμένα οπτικά

Τα ολοκληρωμένα οπτικά είναι ένα ευρύ πεδίο, και ολόκληρα βιβλία έχουν γραφτεί για αυτά. Έχει υπάρξει μεγάλη επιθυμία για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων οπτικών συστημάτων όπως οπτικά ανάλογα των ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ή ICs: Δεν χρειάζεται να κατασκευάσουμε έναν τελεστικό ενισχυτή από διαφορετικά τρανζίστορ, αντιστάσεις και πυκνωτές, απλώς τοποθετούμε ένα τσιπ. Με αυτόν τον τρόπο διαφάνηκε η ελπίδα ότι τα laser, οι φακοί, οι διαχωριστές δέσμης, οι διαμορφωτές, κ.ο.κ., μπορούν να παραχθούν μαζικά σε μικρά, ευκόλως συνδεδεμένα πακέτα, με κερασάκι στην τούρτα την παραγωγή τσιπ που συνδυάζουν αμφότερες οπτικές και ηλεκτρονικές λειτουργίες σε ένα μόνο υπόστρωμα. Δυστυχώς, παρόλο

που σημαντικές εξελίξεις έχουν πραγματοποιηθεί, είμαστε ακόμα μακριά από τα απόλυτα ολοκληρωμένα οπτικά. Ωστόσο, είναι ενδιαφέρον να κοιτάξουμε σε μερικές από τις επιτυχημένες συσκευές που έχουν κατασκευαστεί και θα κοιτάξουμε τη βάση της ολοκληρωμένης οπτικής συσκευής, που είναι ο επίπεδος κυματοδηγός.

Ο επίπεδος κυματοδηγός μοιάζει αρκετά με την οπτική ίνα, εκτός από το ότι, αντί για μία κυλινδρική ίνα με ένα υψηλού δείκτη διάθλασης πυρήνα που περιτυλίγεται από μία χαμηλότερου δείκτη διάθλασης επικάλυψη, έχουμε ένα υπόστρωμα χαμηλότερου δείκτη διάθλασης που περιέχει ένα κανάλι υψηλότερου δείκτη διάθλασης υλικού, Σχήμα 6.13. Όσον αφορά την ίνα, το φως κατευθύνεται κατά μήκος του καναλιού μέσω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης.

Κυματοδηγός Υπόστρωμά

Σχήμα 6.13 Η κατασκευή ενός πεπλατυσμένου κυματοδηγού.

Τα υποστρώματα είναι κατασκευασμένα από νιοβιούχο λίθιο, που έχει υψηλό ηλεκτρο-οπτικό συντελεστή, ή GaAlAs, που είναι ελκυστικό διότι είναι, φυσικά, ένα υπόστρωμα ημιαγωγού κι έτσι είναι ενδεχομένως πολύ κατάλληλο για απόλυτα ολοκληρωμένες συσκευές. Το κανάλι υψηλού δείκτη διάθλασης μπορεί να κατασκευαστεί με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, στα υποστρώματα του νιοβιούχου λιθίου, το κανάλι μπορεί να κατασκευαστεί με τη διάχυση τιτανίου στο μέταλλο και στα υποστρώματα GaAlAs το κανάλι υψηλού δείκτη διάθλασης μπορεί να σχηματισθεί μέσω του βομβαρδισμού του με πρωτόνια. Και στις δύο περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται μάσκες έτσι ώστε μόνο η επιθυμητές περιοχές να υποστούν επεξεργασία.

6.5.1 Ο διακόπτης On/Off

Το Σχήμα 6.14 απεικονίζει την δομή ενός ολοκληρωμένου οπτικού διακόπτη. Το φως διαδίδεται κατά μήκος του καναλιού έως ότου φτάσει το σημείο όπου το κανάλι χωρίζεται σε δύο μέρη. Η μισή φωτεινή ενέργεια διαδίδεται προς τον πάνω βραχίονα, και το άλλο μισό διαδίδεται προς τον χαμηλότερο βραχίονα. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοστεί στον άνω βραχίονα, το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο προκαλεί μία αύξηση στο δείκτη διάθλασης αυτού του μέρους της συσκευής, και, αν το πεδίο που εφαρμόζεται έχει το κατάλληλο μέτρο, το φως στον άνω βραχίονα διατρέχει έναν οπτικό δρόμο με μήκος μεγαλύτερο κατά ένα μήκος κύματος από αυτό του

χαμηλότερου βραχίονα. Αυτό σημαίνει ότι, όταν τα δύο μέρη του φωτεινού κύματος επανασυνδεθούν, αλληλεπιδρούν καταστρεπτικά και δεν διαφεύγει φως από το διακόπτη. Όταν δεν εφαρμόζεται τάση, τα μήκη των διαδρομών είναι πανομοιότυπα κι έτσι παρουσιάζεται εποικοδομητική συμβολή. Η τάση που απαιτείται για την αύξηση του μήκους της διαδρομής κατά μία απόσταση $\lambda/2$ δίνεται από

$$V = \frac{\lambda D}{r_{63} n^3 L} \quad (6.14)$$

Όπου D είναι η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, n είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού του οδηγού, r_{63} είναι ο ηλεκτρο-οπτικός συντελεστής και L είναι το μήκος του ηλεκτροδίου.

Ηλεκτρόδια

Σχήμα 6.14 Ένας ολοκληρωμένος οπτικός διακόπτης ON/OFF.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της συσκευής έναντι της συσκευής Rockels είναι ότι η μικρή απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια σημαίνει ότι D/L μπορεί να γίνει πολύ μικρό κάνοντας δυνατή την εναλλαγή λειτουργίας με την εφαρμογή μονάχα ενός Volt. Οι διακόπτες αυτού του τύπου μπορούν να εναλλάσσουν την λειτουργία τους με ρυθμούς της τάξης των GHz.

Λυμένο Παράδειγμα 5

Κατασκευάζεται ένας διακόπτης που βασίζεται σε ένα υπόστρωμα νιοβιούχου λιθίου που έχει ηλεκτρο-οπτικό συντελεστή ίσο με $30.8 \times 10^{-12} \text{mV}^{-1}$. Δεδομένου ότι ο δείκτης διάθλασης του LiNbO_3 είναι 2.29, ο διαχωρισμός των ηλεκτροδίων είναι $15 \mu\text{m}$ και το μήκος του ηλεκτροδίου είναι 2mm , υπολογίστε την τάση που απαιτείται για τη λειτουργία του διακόπτη.

Λύση

Έχουμε ότι

$$V = \frac{\lambda D}{r_{63} n^3 L} = \frac{1.33 \times 10^{-6} \times 15 \times 10^{-6}}{30.8 \times 10^{-12} \times 2.29^3 \times 2 \times 10^{-3}} = 27 \text{ volts}$$

6.5.2 Ο μονοπολικός διακόπτης

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ο μονοπολικός διακόπτης εναλλάσσει το σήμα από μία γραμμή σε μία άλλη. Αυτό μπορεί να γίνει οπτικά, ξανά με τη χρήση του ηλεκτροοπτικού φαινομένου. Η δομή ενός τέτοιου διακόπτη απεικονίζεται στο Σχήμα 6.15. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια, ο δείκτης διάθλασης στο ένα κανάλι αυξάνεται κατά μία ποσότητα Δn σε $n+\Delta n$, ενώ ο δείκτης διάθλασης στο άλλο κανάλι μειώνεται κατά μία ποσότητα Δn σε $n-\Delta n$. Τότε, η διαδικασία αλληλεπίδρασης μέσα στον οδηγό βοηθάει το φως να «ευθυγραμμιστεί» πριν την Υ επαφή και να ακολουθήσει το κατάλληλο κανάλι αν η πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης αντιστραφεί, τότε το φως θα ακολουθήσει το άλλο κανάλι.

Καθόλου φώς

Φώς

Σχήμα 6.15 Ο μονοπολικός ολοκληρωμένος οπτικός διακόπτης.

6.5.3 Ο μεταβατικός διακόπτης

Η λειτουργία αυτής της συσκευής βασίζεται σε μία εσφαλμένη υπόθεση που έχουμε κάνει ως τώρα: ότι όταν παρουσιάζεται ολική εσωτερική ανάκλαση δεν διαφεύγει φως από το υλικό του υψηλότερου δείκτη διάθλασης. Στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι αλήθεια, και ένα μικρό μέρος της οπτικής ενέργειας διαφεύγει στο υλικό επικάλυψης. Το έχουμε ήδη δει αυτό, όταν συζητήσαμε για τη διασπορά του κυματοδηγού στο κεφάλαιο 5. Αυτή η διαφυγή του φωτός καλείται μεταβατικό κύμα, και το πλάτος του μειώνεται ραγδαία με την απόσταση από την συνοριακή επιφάνεια των δυο υλικών. Κανονικά, τίποτα δε συμβαίνει στο μεταβατικό κύμα και η ενέργειά του παραμένει μέρος της ολικής ενέργειας του φωτός που διαδίδεται στον οδηγό. Ωστόσο, ο μεταβατικός διακόπτης χρησιμοποιεί το μεταβατικό κύμα βάζοντας δύο κυματοδηγούς τόσο κοντά μαζί έτσι ώστε η ενέργεια του μεταβατικού κύματος από τον ένα οδηγό να μπορεί να συζευχθεί στον άλλο οδηγό. Καθώς η ενέργεια του μεταβατικού κύματος είναι πάντα το ίδιο κλάσμα του ολικού, πέρα από μία χαρακτηριστική απόσταση, L_c , όλη η ενέργεια μπορεί να συζευχθεί από έναν οδηγό σε έναν άλλο, και πέρα από μία δεύτερη απόσταση L_c θα συζευχθεί ξανά στον άλλο κυματοδηγό. Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 6.16.

Σχήμα 6.16 Μεταβατική σύζευξη.

Ο διακόπτης είναι σχεδιασμένος με ένα μήκος αλληλεπίδρασης ίσο με L_c έτσι ώστε, χωρίς την εφαρμογή πεδίου, το φως εισέρχεται στο διακόπτη από το ένα κανάλι και φεύγει από το άλλο. Όταν εφαρμοστεί ένα πεδίο κατάλληλου μεγέθους, η αύξηση του δείκτη διάθλασης μέσα από το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο διπλασιάζει το μήκος της οπτικής διαδρομής και το φως εισέρχεται και φεύγει από το ίδιο κανάλι.

6.5.4 Φίλτρο μήκους κύματος

Έχουμε ήδη δει ότι οι διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκαλέσουν επιλεκτική ανάκλαση του φωτός μέσα από το πλέγμα Bragg. Μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα μόνιμου δείκτη διάθλασης σε ολοκληρωμένα οπτικά εξαρτήματα χαράζοντας αυλακώσεις στην επιφάνεια σε ένα κυματοδηγό, Σχήμα 6.17. Αν οι αυλακώσεις έχουν μήκος κύματος D τότε επιλεκτική ανάκλαση του φωτός θα παρουσιαστεί για μήκη κύματος που δίνονται από

$$\lambda = \frac{2Dn}{m} \quad (6.15)$$

όπου m είναι ακέραιος και λ είναι το μήκος κύματος στο κενό. Φίλτρα τέτοιου είδους μπορούν να εγγραφούν σε οπτικές ίνες χρησιμοποιώντας UV laser που λέγονται excimer lasers. Αυτές οι ίνες μπορούν τότε να ενσωματωθούν σε «έξυπνες» κατασκευές, όπως ένα δίκτυο από οπτικές ίνες μέσα στο φτερό ενός αεροσκάφους. Όπως το φτερό του αεροσκάφους κάμπτεται κατά την πτήση, οι ίνες τεντώνονται ή συμπιέζονται και η τιμή D ενός συγκεκριμένου πλέγματος αλλάζει. Που σημαίνει ότι θα αντανακλά επιλεκτικά φως σε διαφορετικό μήκος κύματος. Αν αυτές οι αλλαγές παρακολουθούνται, το συγκεκριμένο κομμάτι του φτερού που κάμπτεται μπορεί να προσδιοριστεί, όπως και η κατεύθυνση της κάμψης.

Δείκτης Διάθλασης

Απόσταση κατά μήκος της οπτικής ίνας

Σχήμα 6.17 Η παρουσία ενός πλέγματος σε ένα κυματοδηγό.

Ερώτηση 4

Ένα πλέγμα με περίοδο 177nm είναι εγγραμμένο σε έναν πυρήνα ίνας με δείκτη διάθλασης 1.51. Τι μήκος κύματος θα έχει το φως που θα αντανακλά αυτό επιλεκτικά (υποθέστε ότι $m=1$);

6.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε ότι

- τα ηλεκτροπτικά υλικά είναι υλικά των οποίων ο δείκτης διάθλασης μπορεί να αλλάξει με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου
- ένα πλέγμα διάθλασης μπορεί να παραχθεί σε ακουστικο- οπτικά υλικά από την διάδοση ενός ηχητικού κύματος
- η εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητο-οπτικό υλικό θα αλλάξει τον δείκτη διάθλασης του ανάλογα με το κυκλικά πολωμένο φως
- όλα αυτά τα φαινόμενα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή διαμορφωτών φωτός και παρεκτροπών
- ο στόχος των ολοκληρωμένων οπτικών είναι η παραγωγή οπτικού ανάλογου του μικροεπεξεργαστή, με τελικό στόχο τα ολοκληρωμένα οπτικά και ηλεκτρονικά να περικλείονται σε ένα πακέτο ημιαγωγού
- υπάρχουν οπτικά ισοδύναμα ενός ηλεκτρονικού διακόπτη ON/OFF και ενός μονοπολικού διακόπτη
- μπορούν να σχεδιαστούν διακόπτες που χρησιμοποιούν το μεταβατικό κύμα για να συζεύξουν ενέργεια από ένα κανάλι σε ένα άλλο
- μπορούν να σχεδιαστούν πλέγματα διάθλασης σε κυματοδηγούς ή στον πυρήνα των οπτικών ινών. Μια χρήση αυτών είναι στις 'έξυπνες κατασκευές' όπου η αλλαγή στο μήκος κύματος του φωτός που επιλεκτικά αντανακλάται από το πλέγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξακρίβωση της τοποθεσίας πίεσης και καταπόνησης σε μια δομή όπου η ίνα είναι ενσωματωμένη.

6.7 Περαιτέρω ανάγνωση

Το φαινόμενο Pockels, το φαινόμενο Faraday και τα ακουστικο – οπτικά φαινόμενα αναφέρονται συχνά σε οπτικά κείμενα, επειδή είναι πολύ ενδιαφέροντα από την άποψη της φυσικής που περιλαμβάνουν, και, όπως σημειώθηκε στην αρχή του τμήματος 6.5, το τρομερό ενδιαφέρον στα ολοκληρωμένα οπτικά έχει παροτρύνει

την έκδοση κειμένων αποκλειστικά σε αυτό το θέμα. Τα κείμενα που αναγράφονται παρακάτω προτείνονται, ως συνήθως, για την ευκολία της ανάγνωσης τους.

'Optics, (2nd edition)', E Hecht, Addison Wesley, 1989

'Optoelectronics: an Introduction', JCA Chaimowicz, Butterworth-Heinemann Ltd, 1989

'Optoelectronic Devices', S Desmond Smith, Prentice Hall, 1995

'Engineering Optics, 2nd edition', K Iizuka, Springer-Verlag, 1987

6.8 Ερωτήσεις

- 6.1 Ένα ηλεκτρο – οπτικό υλικό έχει μια τάση μισού κύματος των 1.015 kV σε μήκος κύματος των 633 nm. Ποιος είναι ο ηλεκτρο- οπτικός συντελεστής του υλικού αν $n = 2.175$;
- 6.2 Μια συσκευή διαμορφωτή Pockels χρησιμοποιείται με ένα πλακίδιο ενός τετάρτου μήκος κύματος. Υπολογίστε τον λόγο της μέγιστης έντασης φωτός εξόδου προς την ελάχιστη ένταση φωτός εξόδου αν ο διαμορφωτής λειτουργεί έτσι ώστε η έξοδος να είναι γραμμική με την εφαρμογή τάσης.
- 6.3 Αναζητείται ένα ηλεκτρο- οπτικό υλικό που να παρεκτρέπει μια δέσμη διαμέτρου 2 mm έως και 10° σε μήκος 2 cm με εφαρμοσμένο πεδίο $1.6 \times 10^8 \text{ Vm}^{-1}$. Ποιο από τα παρακάτω υλικά μπορεί να το κάνει αυτό;

<i>Material</i>	<i>n</i>	r_{63} ($\times 10^{-12} \text{ Vm}^{-1}$) ¹⁾
GaAs	3.6	1.6
CdTe	2.6	6.8
KD*P	1.51	26.4

- 6.4 Φως μήκους κύματος 532nm προσπίπτει κάθετα σε ένα φράγμα περίθλασης. Υπολογίστε την περίοδο του φράγματος που απαιτείται για να παρεκτραπεί η πρώτη διάταξη φωτός κατά μια γωνία 10° .
- 6.5 Ένας ακουστικο – οπτικός διαμορφωτής είναι κατασκευασμένος από μολυβδόχο μόλυβδο. Υπολογίστε την γωνία Bragg και τον ελάχιστο χρόνο απόκρισης του διαμορφωτή για πρώτης τάξης ανάκλαση του προσπίπτοντος φωτός με μήκος κύματος 633nm και εύρος δέσμης 1mm, δεδομένου ότι το ακουστικό κύμα έχει ταχύτητα $3,500 \text{ ms}^{-1}$, και μήκος κύματος $4.3 \times 10^{-5} \text{ m}$. Έτσι εκτιμήστε την μέγιστη συχνότητα στην οποία η ένταση του φωτός μπορεί να διαμορφωθεί.
- 6.6 Μια ακουστικο – οπτική συσκευή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως ένας αναλογικός διαμορφωτής. Η ποσότητα του φωτός στην μη διαθλώμενη δέσμη πρόκειται να κυμανθεί ανάμεσα σε 10% και 90% του προσπίπτοντος φωτός. Ποια είναι η απαιτούμενη απόδοση του διαμορφωτή σε κάθε ένα από αυτά τα όρια; Κατόπιν υπολογίστε τις ποσότητες της απαιτούμενης ακουστικής ισχύος σε 10% και 90% της εκπομπής.
- 6.7 Ένα ηλεκτρόνιο που κινείται με ταχύτητα $2 \times 10^6 \text{ ms}^{-1}$ εισέρχεται σε ένα μαγνητικό πεδίο των 0.05 T. Υπολογίστε την ακτινοβολία της κυκλικής διαδρομής ενώ βρίσκεται μέσα στο πεδίο αν το ηλεκτρόνιο κινείται κάθετα στην κατεύθυνση του πεδίου.
- 6.8 Σε έναν μεταβατικό διακόπτη, το 10% της ενέργειας του φωτός συζεύγεται σε έναν οδηγό 2 από έναν οδηγό 1 σε απόσταση l . Ποιο, σε όρους του l , πρέπει να είναι το μήκος του διακόπτη για να συζεύξει 99% της ενέργειας από τον οδηγό 1 στον οδηγό 2;
- 6.9 Ένα πλέγμα σχεδιασμένο σε μια ίνα με $n_{core}=1.53$ πρόκειται να ανακλάσει φως μήκους κύματος 488nm. Ποια είναι η απαιτούμενη διαγράμμιση του πλέγματος; Δηλώστε οποιεσδήποτε υποθέσεις κάνετε.

Κεφάλαιο 7 : Ανιχνευτές Φωτός

7.1 Εισαγωγή

Ο ορισμός που χρησιμοποιείται στην οπτοηλεκτρονική για τον ανιχνευτή φωτός είναι ότι πρόκειται για μια συσκευή που μπορεί να παράγει ή να τροποποιεί ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογα με την ποσότητα του φωτός που προσπίπτει στην **ενεργό** περιοχή της. Όπως θα υπέθετε κάποιος, υπάρχουν πολλές συσκευές που επιτελούν αυτή τη διαδικασία αλλά ανήκουν σε ένα μικρό αριθμό βασικών κατηγοριών. Θα γίνει ξεκάθαρο ότι οι βασικές αρχές της φυσικής πίσω από τη λειτουργία της πλειοψηφίας των ανιχνευτών φωτός είναι παρόμοιες και αν κατανοηθεί η αρχή λειτουργίας τους, οι περισσότερες αλλαγές απλώς αντιστοιχούν σε τροποποίηση του σχεδιασμού της συσκευής. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχές πίσω από τις διάφορες μεθόδους της φωτοανίχνευσης, τις συσκευές φωτοανίχνευσης που είναι διαθέσιμες και τους σημαντικούς παράγοντες που εμπλέκονται με την φωτοανίχνευση **προκειμένου να κατανοήσουμε τους διαθέσιμους φωτοανιχνευτές και να μπορεί να γίνει κατάλληλη επιλογή σε μια δεδομένη εφαρμογή.**

7.2 Ανίχνευση Φωτονίων

Με εξαίρεση τις υψηλής ενέργειας ακτίνες x και ακτίνες γάμμα, οι οποίες συχνά ανιχνεύονται από τις δευτερεύουσες επιδράσεις τους, ή τα ραδιοκύματα, τα οποία ανιχνεύονται από την άμμεση επίδραση τους στα ηλεκτρόνια, υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί που σχετίζονται με την φωτοανίχνευση. Αυτοί είναι η φωτοεκπομπή, η φωτοαγωγιμότητα και η απορρόφηση θερμότητας. Όλοι αυτοί απαιτούν **η** ενέργεια του φωτονίου να απορροφηθεί από άτομα ή ηλεκτρόνια κατά κάποιον τρόπο. Ας αρχίσουμε από τις βασικές αρχές πίσω από αυτούς τους μηχανισμούς με τη σειρά.

7.2.1 Απορρόφηση Θερμότητας

Όταν φωτόνια με μήκη κύματος στο απώτερο υπεριώδες και πέρα απορροφηθούν από ύλη διεγείρουν **δονητικές** και περιστροφικές στάθμες στα μόρια ή **στο πλέγμα** του υλικού στο οποίο έχουν απορροφηθεί. Επειδή η ενέργεια πρέπει να διατηρείται η απορρόφηση αυτή του φωτονίου στην ύλη δημιουργεί αύξηση της

θερμοκρασίας, η οποία με τη σειρά της, μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες της ύλης. Ανίχνευση των αλλαγών αυτών μας επιτρέπει να υπολογίσουμε πόσο φως έχει προσπέσει στον ανιχνευτή.

7.2.2 Φωτοαγωγιμότητα

Η φωτοαγωγιμότητα είναι ένας μηχανισμός που σχετίζεται με ημιαγωγούς. Η κατανόηση της λειτουργίας της απαιτεί μια εξέταση της ενεργειακής δομής των υλικών.

Υπενθυμίζουμε από το κεφάλαιο 4, ότι όταν ένας σημαντικός αριθμός ατόμων ενός υλικού συμπυκνεί οι διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες στις οποίες ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί αλλάζουν από τις διακριτές ατομικές στάθμες σε μεγαλύτερες ζώνες. Η **χαμηλότερη** ενεργειακή ζώνη, η οποία είναι γεμάτη σε μια θερμοκρασία **ίση με μηδέν βαθμούς Kelvin**, **καλείται** ζώνη σθένους. **Πάνω από αυτή την ενεργειακή ζώνη** είναι η ζώνη αγωγιμότητας. Ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους βρίσκονται σε **δέσμια** κατάσταση από το άτομο κι έτσι δεν κινούνται μέσα στο υλικό. Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας βρίσκονται σε καταστάσεις που είναι κοινές **μέσα στο υλικό** κι έτσι είναι ελεύθερα να κινούνται μέσα **σε αυτό**. Ένα εφαρμοσμένο δυναμικό θα μετακινήσει τα ηλεκτρόνια μέσω του υλικού στη ζώνη αγωγιμότητας.

Στους ημιαγωγούς υπάρχει ένα ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας αλλά η ενεργειακή διαφορά είναι σημαντικά μικρή ώστε οπτικά φωτόνια με αρκετή ενέργεια μπορούν εύκολα να διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό προκαλεί την αγωγιμότητα του υλικού να αυξηθεί ανάλογα με τον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν στο υλικό. Αυτή είναι η ιδιότητα που επιτρέπει στους ημιαγωγούς να σχηματίσουν την βάση μιας ολόκληρης τάξης φωτοανιχνευτών.

7.2.3 Φωτοεκπομπή

Η φωτοεκπομπή **λαμβάνει μέρος** όταν ένα φωτόνιο δίνει σε ένα ηλεκτρόνιο ικανή ενέργεια όχι μόνο να μεταβεί το ενεργειακό **χάσμα** αλλά να αφήσει την ύλη αυτούσια και να περάσει **στο κενό χώρο**. Στα μέταλλα η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που εκβάλλεται στο κενό από ένα φωτόνιο δίνεται από

$$E = hf - f \quad (7.1)$$

Όπου το ϕ είναι γνωστό ως **έργο εξαγωγής** και είναι η ενεργειακή διαφορά ανάμεσα σε αυτό που **καλείται** επίπεδο Fermi στο μέταλλο και την ενέργεια στο κενό διάστημα. Το επίπεδο Fermi ορίζεται ως **η** υψηλότερη κατειλημμένη ενεργειακή στάθμη στο υλικό στο απόλυτο μηδέν (0 K). Σε αυτή την θερμοκρασία δεν υπάρχει θερμική διέγερση **κανενός ηλεκτρονίου** και άρα όλα καταλαμβάνουν την χαμηλότερη διαθέσιμη ενεργειακή στάθμη ενώ ταυτόχρονα υπακούν τους κανόνες κατάληψης για τις ηλεκτρονικές καταστάσεις. Ένα καλό παράδειγμα είναι μια ήρεμη λίμνη· χωρίς αέρα ή άλλους παράγοντες που παράγουν κύματα η λίμνη θα παραμείνει στο χαμηλότερο επίπεδο που ορίζεται από την ποσότητα του νερού **σε αυτή**. Οποιοσδήποτε παράγοντας διέγερσης που παράγει κύματα θα αυξήσει τη στάθμη του νερού σε τοπικές περιοχές, αυτό θα αναπαριστούσε θερμικά διεγερμένα ηλεκτρόνια ενώ η στάθμη της ήρεμης θα ήταν το επίπεδο Fermi. Η βασική διαδικασία φωτοεκπομπής **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.1

Αύξηση ενέργειας ηλεκτρονίων (Increasing electron energy)

Ζώνη σθένους (Valence band)

Ζώνη αγωγιμότητας (Conduction band)

Κενός χώρος (Free space)

Σχήμα 7.1 Ένα διάγραμμα ενεργειακής στάθμης που δείχνει φωτοεκπομπή από μέταλλο.

Ερώτηση 1

Ένα **φύλλο** καισίου εκπέμπει ηλεκτρόνια με ενέργεια της τάξης των $1.5 \times 10^{-19} \text{J}$ (0.934eV) όταν **ακτινοβολείται** με φως στα 450nm. **Ποιο είναι το έργο εξαγωγής** του καισίου;

Στους ημιαγωγούς η κατάσταση είναι πιο **περίπλοκη**. Στους ημιαγωγούς η στάθμη Fermi συνήθως **βρίσκεται μέσα στο ενεργειακό χάσμα**. **Αφού τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να βρίσκονται στο ενεργειακό χάσμα** και άρα δεν μπορούν να βρεθούν στο επίπεδο Fermi **το έργο εξαγωγής** δεν είναι πλέον μια χρήσιμη ποσότητα. Τα περισσότερα ηλεκτρόνια στους ημιαγωγούς πρέπει πρώτα να περάσουν το ενεργειακό χάσμα από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας και μετά να ξεφύγουν από **τον πυθμένα** της ζώνης αγωγιμότητας. Η ενέργεια που απαιτείται από το ηλεκτρόνιο για

να φύγει από την ύλη αφού **διασχίσει το ενεργειακό χάσμα** είναι γνωστή ως ηλεκτρονική συγγένεια και **συμβολίζεται με χ** . Αυτή η ποσότητα **εκφράζει την ενεργειακή διαφορά** ανάμεσα στα άκρα της ζώνης αγωγιμότητας. Έτσι για την πλειοψηφία των ηλεκτρονίων σε έναν ημιαγωγό η ενέργεια που απαιτείται για να εκπεμφθεί ένα ηλεκτρόνιο στο κενό διάστημα θα ήταν $E_g + \chi$ όπου E_g είναι η ενέργεια χάσματος.

Περισσότερες επιπλοκές **συναντώνται** στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού επειδή η κατανομή των ενεργειακών σταθμών μπορεί να αλλάξει καθώς τα άτομα δεν βρίσκονται πλέον **μέσα στο εσωτερικό του** υλικού. Αυτό οδηγεί σε ένα φαινόμενο γνωστό ως **‘λύγισμα ζώνης’**. Αυτό συμβαίνει διότι αναπτύσσονται ενεργειακές στάθμες σε μια ενέργεια που θα βρισκόταν στο ενεργειακό κενό **στο εσωτερικό του** υλικού. Αυτές γεμίζουν οπές δημιουργώντας μια περιοχή κένωσης. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί μια πτώση τάσης που οδηγεί στο **λύγισμα ζώνης** όπως **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.2.

Αυξανόμενη ενέργεια ηλεκτρονίων (Increasing electron energy) Κενός χώρος (Free space)

Ζώνη αγωγιμότητα (Conduction Band)

Ζώνη σθένους (Valence Band)

Εσωτερικό υλικού (Bulk material) Επιφάνεια υλικού (surface)

Σχήμα 7.2 Λύγισμα ζώνης λόγω επιφανειακών καταστάσεων σε ένα ημιαγωγό.

Τα ηλεκτρόνια **στο εσωτερικό** του υλικού βλέπουν ένα πολύ μειωμένο ενεργειακό **φράγμα** στην κατεύθυνση της επιφάνειας του ημιαγωγού εξ αιτίας της κλίσης της ζώνης και έτσι η ηλεκτρονική **συγγένεια** μειώνεται. Η ωφέλιμη ηλεκτρονική **συγγένεια** του υλικού τότε δίνεται από

$$\chi_{eff} = \chi - \frac{V_s}{q} \quad (7.2)$$

όπου V_s είναι η πτώση τάσης **κατά μήκος** της περιοχής **απογύμνωσης**. Σε ορισμένα υλικά ημιαγωγών το $(V_s/q) > \chi$ so χ_{eff} θα είναι αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο δεν θα **συναντήσει** φράγμα δυναμικού αφού θα έχει περάσει **το ενεργειακό χάσμα** και άρα θα **διαφύγει** στο κενό διάστημα.

7.3 Μέτρηση του φωτός

Μια υψηλά συγκεχυμένη περιοχή στην οπτοηλεκτρονική είναι οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του φωτός που ανιχνεύει ο φωτοανιχνευτής. Ενώ οι διάφοροι παράγοντες μετατροπής ανάμεσα σε πολλές από αυτές τις μονάδες **μπορούν απλά να αναζητηθούν**, υπάρχει ένας αριθμός από θεμελιώδεις διαφορές που πρέπει να κατανοηθούν. Πρώτη είναι η διαφορά ανάμεσα στις φωτομετρικές και τις ραδιομετρικές μονάδες.

Οι φωτομετρικές μονάδες έχουν σχεδιαστεί **βάση της ανθρώπινης αντίδρασης στο φως**. Η αντίδραση του ανθρώπινου οφθαλμού μεταβάλλεται αισθητά με το μήκος κύματος στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Επίσης ο οφθαλμός παρουσιάζει μηδενική αντίδραση για μήκη κύματος μικρότερα από τα 360 nm και μεγαλύτερα από 760 nm. Η χρησιμότητα των φωτομετρικών μονάδων, **έγκειται λοιπόν ότι δυο φωτεινές πηγές θα φαίνονται σε εμάς το ίδιο λαμπερές**. Αυτό θα ήταν σημαντικό π.χ. σε ένα αεροδρόμιο όπου διαφορετικού χρώματος φώτα προσγείωσης με την ίδια ισχύ θα είχαν διαφορετική φωτεινότητα από την οπτική γωνία του πιλότου. Έτσι τα φώτα προσγείωσης θα είχαν απαιτήσεις που θα εκφραζόταν με φωτομετρικές μονάδες.

Οι ραδιομετρικές μονάδες είναι απόλυτες τιμές της φωτεινότητας **και μας πληροφορούν σχετικά με την ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που προέρχεται από την πηγή ανεξαρτήτως του μήκος κύματος**. Αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούνται σε **όλες τις περιοχές** του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος κι έτσι χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την ηλεκτρική αντίδραση σε επίπεδα φωτός.

Υπάρχουν τέσσερις ακόμη θεμελιώδεις αρχές της μέτρησης του φωτός που πρέπει να αναλυθούν για να έχουμε μια ξεκάθαρη κατανόηση των ποσοτήτων της μέτρησης του φωτός. Αυτές οι τέσσερις αρχές περιγράφονται παρακάτω.

7.3.1 Ροή Φωτός

Αυτή η έννοια μπορεί απλά να δηλωθεί ως την ποσότητα φωτός που **διαπερνά** μια δεδομένη **επιφάνεια** σε δεδομένο χρόνο, παρόμοια με την ποσότητα νερού που ρέει από μια σωλήνα που μας δίνει ένα βαθμό ροής ή τον αριθμό των ηλεκτρονίων που ρέουν μέσα από ένα καλώδιο που μας δίνει το ρεύμα. Αφού το φως είναι μια καλώς ορισμένη πηγή ενέργειας αυτό μπορεί να αναλυθεί με όρους μιας ποσότητας ενέργειας, με τη μορφή φωτονίων, που ρέουν μέσα από μια δεδομένη περιοχή σε

δεδομένο χρόνο. Έτσι στις ραδιομετρικές μονάδες η ροή φωτός **μετριέται σε watts** (Joules ενέργειας που ρέουν ανά δευτερόλεπτο). Η φωτομετρική μονάδα της **φωτεινής** ροής **μετρείται σε Lumen**. Τα φωτομετρικά Lumen σχετίζονται με τα ραδιομετρικά Watt όπως **απεικονίζεται** στο σχήμα 7.3.

Παράγοντας μετατροπής φωτεινής ροής (Luminous conversion factor)

Μήκος κύματος (wavelength)

Σχήμα 7.3 Η σχέση ανάμεσα σε Lumens και Watts σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.

Αυτή η καμπύλη είναι μια διεθνώς αποδεκτή σχέση που βασίζεται στη μέση αντίδραση του ανθρώπινου ματιού και τελικά ορίζει τη σχέση ανάμεσα σε όλες τις φωτομετρικές και ραδιομετρικές μονάδες. Άρα στο μήκος κύματος των 550nm η φωτεινή ροή των 1W ισούται με 680 Lumen, αλλά στο μήκος κύματος των 600 nm η φωτεινή ροή των 1W ισούται με 430 Lumen.

7.3.2 Φωτεινότητα

Η φωτεινότητα είναι απλά η ποσότητα φωτός που **λαμβάνεται** από μια δεδομένη επιφάνεια. Δεν είναι η ποσότητα φωτός που ανακλάται από μια επιφάνεια, ούτε η ποσότητα φωτός που εκπέμπεται από μια επιφάνεια αλλά καθαρά η ποσότητα που προσπίπτει σε μια επιφάνεια. Υπάρχουν δυο όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την φωτεινότητα. Ο **φωτισμός** είναι ο φωτομετρικός όρος της φωτεινότητας και έχει ως μονάδα το lux, όπου $1\text{Lux} = 1\text{Lumen}/\text{m}^2$. Άρα εάν μια φωτεινή ροή 4 Lumens προσπέσει σε μια επιφάνεια 8m^2 τότε η φωτεινότητα θα είναι 0.5 lux. Η ακτινοβολία είναι ο ραδιομετρικός όρος της φωτεινότητας και έχει λογικά W/m^2 . Αν πάλι μια φωτεινή ροή των 4 W προσπέσει σε μια επιφάνεια 8m^2 τότε η ακτινοβολία θα είναι $0.5\text{W}/\text{m}^2$.

7.3.3 Ένταση

Όταν ασχολούμαστε με **σημειακές** φωτεινές πηγές τότε η φωτεινή ροή δεν είναι μια καλή μονάδα μέτρησης του φωτός για να χρησιμοποιήσουμε. Το φως που εκπέμπεται από **μια σημειακή** πηγή θα αποκλίνει όσο απομακρύνεται από την πηγή. Έτσι η ίδια ροή πάντα θα καλύπτει την ίδια γωνιακή διασπορά παρά μια δεδομένη περιοχή. Όσο

κάποιος απομακρύνεται από την πηγή η φωτεινή ροή που περνάει από μια δεδομένη επιφάνεια θα μειώνεται. Για ένα τρισδιάστατο σύμπαν πρέπει να ορίσουμε μια τρισδιάστατη γωνία. Αυτή είναι γνωστή ως η στερεά γωνία και μετριέται με μια μονάδα που **καλείται steradians**. Άρα μπορούμε να ορίσουμε την ένταση της φωτεινότητας ως την ροή που εκπέμπεται σε μια δεδομένη στερεά γωνία. Αυτή είναι μια πολύ πιο χρήσιμη ποσότητα αφού η ένταση θα είναι τώρα ίδια ανεξάρτητα από την απόσταση από την πηγή. Το **steradian** ορίζεται ως την στερεά γωνία όταν η εκτεταμένη περιοχή της επιφάνειας μιας σφαίρας ισούται με **την ακτίνα της σφαίρας υψωμένη** στο τετράγωνο. Στην πιο ακραία περίπτωση αυτό σημαίνει ότι μια ολόκληρη σφαίρα πρέπει να **βρίσκεται υπό** μια στερεά γωνία ίση με 4π στερακτίνια. Η φωτομετρική ένταση της φωτεινότητας μετριέται σε Lumens ανά στερακτίσιο που είναι γνωστό ως candela (μονάδα φωτεινής έντασης). Η ραδιομετρική ένταση της φωτεινότητας φυσικά μετριέται σε Watt ανά στερακτίσιο.

7.3.4 Φωτοβολία

Η φωτοβολία χρησιμοποιείται για να ορίσει την εκπομπή της ροής του φωτός από μια επιφάνεια με τον ίδιο τρόπο που η φωτεινότητα όρισε την ροή του φωτός που προσπίπτει σε μια επιφάνεια. Μια εκτεταμένη πηγή θα εκπέμπει φως σε μια στερεά γωνία όπως κάνει η **σημειακή** πηγή στον ορισμό της έντασης του φωτός παραπάνω. Ωστόσο πρέπει τώρα να λάβουμε υπ όψιν την ροή φωτός που εκπέμπεται από μια δεδομένη περιοχή της πηγής. Αν μια πηγή που παράγει μια δεδομένη ροή φωτός από μια δεδομένη περιοχή και εξέπεμπε την ίδια φωτεινή ροή από την διπλάσια περιοχή τότε η πηγή θα φαινόταν να φέγγει κατά το μισό π.χ. η φωτεινότητα της πηγής έχει υποδιπλασιαστεί. Άρα το κεφάλαιο μας για φωτεινότητα πρέπει να λάβει υπ όψιν την περιοχή από την οποία η φωτεινή ροή εκπέμπεται. **Η μονάδα μέτρησης της φωτεινότητας θα πρέπει να λάβει υπόψη της και την επιφάνεια της περιοχής που εκπέμπει την φωτεινή ροή.** Για φωτομετρική χρήση ο όρος φωτεινότητα χρησιμοποιείται και ως μονάδα **μέτρησης** χρησιμοποιείται το Candela/m^2 . Για ραδιομετρική χρήση η φωτεινότητα είναι γνωστή ως ακτινοβολήση και έχει για μονάδα $\text{W}/(\text{Sr m}^2)$, όπου Sr είναι η συντομογραφία για στερακτίνια.

7.4 Παράμετροι Φωτοανιχνευτών

Υπάρχει ένας αριθμός από σημαντικές παραμέτρους που σχετίζονται με **τους** φωτοανιχνευτές που χρειάζεται να αναλυθεί για να μπορούμε να επιλέξουμε την πιο

κατάλληλη συσκευή για μια δεδομένη εφαρμογή. Τα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών πρέπει πάντα να διαβάζονται προσεκτικά για να εξακριβωθούν οι ακριβείς συνθήκες κάτω από τις οποίες οι ακόλουθοι παράμετροι **λαμβάνουν τις τιμές που αναφέρονται** πριν **επιλέξουμε** μια συσκευή διότι οι συνθήκες δοκιμασιών ποικίλουν.

7.4.1 Κβαντική απόδοση

Η κβαντική απόδοση ενός φωτοανιχνευτή είναι μια μέτρηση για το πόσα ηλεκτρόνια παράγονται για κάθε πρόσπτωση φωτονίου στην φωτοευαίσθητη περιοχή του φωτοανιχνευτή. Αυτό συνήθως ορίζεται από την ποσότητα η όπου

$$\eta = \left(\frac{n_e}{n_p} \right) \times 100\% \quad (7.3)$$

όπου n_p είναι ο ρυθμός με τον οποίο τα φωτόνια φτάνουν και n_e είναι ο ρυθμός με τον οποίο τα ηλεκτρόνια παράγονται. Το αποτέλεσμα ποτέ δεν μπορεί να είναι **μεγαλύτερο από** 100% αφού δεν περιμένουμε να λάβουμε δυο ζευγάρια ηλεκτρονίου – οπής από ένα φωτόνιο. Η κβαντική **απόδοση** είναι μια ποσότητα που εξαρτάται πολύ από τη μήκος κύματος. Όσο η ενέργεια των φωτονίων με μακρύ μήκος κύματος προς το ερυθρό/ υπέρυθρο άκρο του φάσματος πλησιάζει το ενεργειακό κενό του υλικού του φωτοανιχνευτή η κβαντική απόδοση **μειώνεται**. Παρόμοια, μικρού μήκους κύματος φωτόνια προς το ιώδες/ υπεριώδες άκρο του φάσματος μπορούν να απορροφηθούν από την επιφάνεια του ανιχνευτή πριν φτάσουν την ενεργή περιοχή του ανιχνευτή **και** ξανά μειώνει την κβαντική **απόδοση**. Κάποιες συσκευές φωτοδιόδων μπορούν να έχουν κβαντική **απόδοση** που πλησιάζει το 100% σε κάποια μήκη κύματος. Ωστόσο **αποδόσεις** του 30% ή **μικρότερες** είναι πιο κοινές με κάποιους ανιχνευτές **να χαρακτηρίζονται από** κβαντικές αποδόσεις μικρότερες από 1%.

7.4.2 Ευαισθησία

Η ευαισθησία σχετίζεται άμεσα με την κβαντική **απόδοση** και αναφέρεται στην **απόκριση** ενός φωτοανιχνευτή σε μια δεδομένη ροή φωτονίων. Συνήθως δίνεται από

$$S = \frac{I}{\Phi} \quad (7.4)$$

όπου S είναι η ευαισθησία, I είναι το ρεύμα εξόδου του ανιχνευτή και Φ είναι η προσπίπτουσα ροή φωτονίων. Για μονοχρωματικό φως μήκους κύματος λ η προσπίπτουσα ροή φωτονίων δίνεται από

$$\Phi = n_p hf = \frac{n_p hc}{\lambda} \quad (7.5)$$

όπου n_p είναι ο ρυθμός άφιξης των προσπιπτόντων φωτονίων. **Ως ρεύμα είναι γνωστό ότι ορίζουμε την ποσότητα φορτίου που ρέει από ένα δεδομένο σημείο στη μονάδα του χρόνου άρα $I = n_e q$ όπου n_e είναι ο ρυθμός παραγωγής των φωτοηλεκτρονίων και q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου. Επίσης γνωρίζουμε ότι $\eta = n_e/n_p$, έτσι αντικαθιστώντας αυτές στην εξίσωση (7.5) και λύνοντας ως προς I έχουμε**

$$I = \frac{\eta \Phi \lambda q}{hc} \quad (7.6)$$

αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (7.5) και (7.6) στην εξίσωση (7.4) έχουμε

$$S = \frac{\eta \lambda q}{hc} \quad (7.7)$$

Γνωρίζοντας την κβαντική **απόδοση** σε δεδομένο μήκος κύματος μπορεί να υπολογιστεί η ευαισθησία του ανιχνευτή.

7.4.3 Φασματική Απόκριση

Όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως, όλοι οι φωτοανιχνευτές έχουν μια καμπύλη φασματικής απόκρισης, με την κβαντική απόδοση να μεταβάλλεται με το μήκος κύματος. Μια τυπική καμπύλη φασματικής απόκρισης απεικονίζεται για μια φωτοδίοδο πυριτίου στο Σχήμα 7.4.

Κβαντική απόδοση (Quantum efficiency)

Μήκος κύματος (Wavelength)

Σχήμα 7.4 Καμπύλη φασματικής αντίδρασης για μια τυπική φωτοδίοδο **πυριτίου**

Όπως απεικονίζεται, το μέγιστο σημείο της απόκρισης βρίσκεται στο κοντινό υπέρυθρο με μια απότομη πτώση προς το μακρινό υπέρυθρο αφού η ενέργεια των φωτονίων πλησιάζει την ενέργεια του ενεργειακού χάσματος. Για το πυρίτιο η κορυφή αυτή είναι στο 1.1 eV όπου αντιστοιχεί το μήκος κύματος των 1125 nm. Η μείωση στην απόκριση προς το άλλο άκρο του φάσματος είναι λιγότερο απότομη αλλά για μήκη κύματος μικρότερα από τα 400 nm μπορεί να εισέλθουν άλλοι παράγοντες απορρόφησης. Ιδανικά αν αυτό είναι δυνατόν οποιοσδήποτε ανιχνευτής μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε η κορυφή της καμπύλης απόκρισης του να βρίσκεται στο εύρος των μηκών κύματος που ανιχνεύονται.

Ερώτηση 2

Χρησιμοποιώντας την καμπύλη φασματικής απόκρισης για την φωτοδίοδο πυριτίου στο σχήμα 7.4 ορίστε την κβαντική απόδοση και κατόπιν την ευαισθησία της φωτοδίοδου στα 600 nm.

7.4.4 Δυναμικό Εύρος

Το δυναμικό εύρος ενός φωτοανιχνευτή είναι ένα μέτρο της δυνατότητας του να παράγει μια ακριβή έξοδο για διάφορα επίπεδα στην ροή φωτός. Εκφράζεται συνήθως ως ο λόγος της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ποσότητας φωτός προς την μέγιστη ποσότητα ανιχνεύσιμου φωτός και εκφράζεται συχνά σε decibels (dB). Το χαμηλότερο όριο ανιχνευσιμότητας συνήθως οριοθετείται από τον θόρυβο. Σε θερμοκρασία δωματίου η κυρίαρχη πηγή θορύβου προέρχεται από θερμικές διεγέρσεις εντός του ανιχνευτή η οποία θα προκαλέσει ένα σήμα εξόδου ακόμη και απουσία σήματος εισόδου. Εάν μια ροή φωτός παράγει ένα σήμα μικρότερο από αυτή την έξοδο θορύβου τότε το σήμα της 'χάνεται μέσα στον θόρυβο' και δεν είναι δυνατόν να καθορίσουμε την ροή του προσπίπτοντος φωτός στον φωτοανιχνευτή. Το ανώτερο όριο ανιχνευσιμότητας παρουσιάζεται όταν ο φωτοανιχνευτής βρίσκεται στον κόρο. Σε αυτό το σημείο λειτουργίας, ο φωτοανιχνευτής δεν μπορεί να παράγει άλλη αύξηση στο σήμα εξόδου σε μια αντίστοιχη αύξηση στη ροή φωτός έτσι ακόμη και αν παράγεται ένα μετρήσιμο σήμα εξόδου η μέτρηση είναι ανούσια.

Λυμένο Παράδειγμα 1

Αν ένας φωτοανιχνευτής μπορεί να ανιχνεύσει ελάχιστη ροή φωτός ίση με 2×10^8 φωτόνια/m² και μπορεί να ανιχνεύσει έως 5×10^{11} φωτόνια/m² πριν φτάσει στον κόρο, ορίστε το δυναμικό εύρος του φωτοανιχνευτή.

Λύση

Ο λόγος του μέγιστου ανιχνεύσιμου φωτός προς την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ροή φωτός δίνεται από

$$5 \times 10^{11} : 2 \times 10^8 = 2500 : 1$$

Επομένως η μέγιστη ανιχνεύσιμη ροή φωτός είναι 2500 φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ροή φωτός. Για να εκφράσουμε το δυναμικό εύρος σε decibels για αυτά τα δυο επίπεδα ισχύος:

$$\text{Δυναμικό Εύρος (dB)} = 10 \log_{10} (5 \times 10^{11} / 2 \times 10^8) = 33.98 \text{ dB}$$

7.4.5 Χρόνος Απόκρισης

Ο χρόνος απόκρισης εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται ο φωτοανιχνευτής για να ανταποκριθεί σε μια μεταβολή της προσπίπτουσας ροής φωτός. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται από την αντίδραση του φωτοανιχνευτή σε μια βηματική είσοδο στο επίπεδο ροής φωτός και ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να αποκριθεί από το 10 % της ολικής μεταβολής στο 90% της ολικής μεταβολής στην ροή των προσπιπτόντων φωτονίων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.5.

Μεταβολή στην οπτική ροή (Change in light flux)

Απόκριση φωτοανιχνευτή (Photodetector output response)

Σχήμα 7.5 Ο χρόνος απόκρισης μιας φωτοδιόδου σε μια στιγμιαία αλλαγή της ροής φωτός

Μια αύξηση στο επίπεδο της φωτεινής ροής μπορεί να προκαλέσει έναν αρκετά διαφορετικό χρόνο απόκρισης από αυτόν που θα προκαλέσει μια πτώση στο επίπεδο της ροής φωτός και έτσι συχνά αναφέρονται ως δυο διαφορετικές τιμές.

Ο χρόνος απόκρισης είναι σημαντικός για σήματα που αλλάζουν γρήγορα. Ένας παλμός φωτός πολύ μικρής χρονικής διάρκειας θα μπορούσε να περάσει χωρίς ο ανιχνευτής να προλάβει να ανταποκριθεί σε αυτό. Γενικά μια φωτοδιόδος θα πρέπει να επιλέγεται βάση του βραδύτερου χρόνου απόκρισης της που θα πρέπει να είναι

κατά ένα παράγοντα του 10 μικρότερος από το πλάτος του μικρότερου παλμού που επιθυμείτε να ανιχνευθεί.

7.4.6 Ισοδύναμη Ισχύς Θορύβου

Ο θόρυβος είναι το εμπόδιο **οποιοδήποτε** προσπαθεί να εντοπίσει χαμηλά επίπεδα **φωτός**. Όλοι οι ανιχνευτές θα παράγουν κάποιο σήμα εξόδου, ακόμη και στο απόλυτο σκοτάδι. Αυτό θα θέσει ένα κατώτερο όριο για τα ανιχνεύσιμα επίπεδα φωτός, όπως αναφέρεται παραπάνω, εφόσον κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο φωτός το σήμα θα χαθεί **μέσα** στο θόρυβο. Αυτό το μικρό λανθάνων ρεύμα συχνά αναφέρεται ως το σκοτεινό ρεύμα και παράγεται συνήθως από τα ηλεκτρόνια που θερμικά διεγείρονται εκτός του φωτοανιχνευτικού υλικού ή διεγείρονται στην ζώνη αγωγιμότητας του. Μια άμεση λύση για τη μείωση του σκοτεινού ρεύματος των φωτοανιχνευτών είναι η ψύξη του ανιχνευτή. Αυτό ακριβώς γίνεται με μερικούς από τους πιο ευαίσθητους ανιχνευτές στον κόσμο στους τομείς της αστρονομίας και της σωματιδιακής φυσικής. Συνήθως τα σκοτεινά ρεύματα είναι της τάξης των μερικών **pA (10^{-15} A)** έως μερικά nA (10^{-9} A).

Η Ισοδύναμη Ισχύς Θορύβου (**NEP**) είναι μια ποσότητα που χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ισχύς του φωτοανιχνευτή. Ορίζεται ως η **ισχύς**, σε watt, η οποία θα παρήγαγε ένα σήμα εξόδου από το ιδανικό (χωρίς θόρυβο) φωτοανιχνευτή του ίδιου μεγέθους με αυτή που παράγεται από το σήμα του θορύβου από τον πραγματικό φωτοανιχνευτή μας. Ως εκ τούτου η **NEP** είναι πιο χρήσιμη ποσότητα από το σκοτεινό ρεύμα, καθώς ορίζει την ελάχιστη ποσότητα φωτός που μπορεί να ανιχνευθεί και να διακριθεί από το θόρυβο στον φωτοανιχνευτή. **Η NEP του φωτοανιχνευτή ορίζεται βασικά ως η rms τιμή ημιτονοειδούς διαμορφωμένου σήματος φωτός που θα προκαλούσε την παραγωγή ηλεκτρικού σήματος με rms τιμή ίση με την rms τιμή του ρεύματος θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης από τον ανιχνευτή.** Ωστόσο, η πραγματική τιμή του **NEP ενός** φωτοανιχνευτή εξαρτάται από μια σειρά άλλων παραγόντων. Αυτοί είναι η θερμοκρασία του ανιχνευτή, η οποία θα αυξήσει την παραγωγή θορύβου, καθώς αυξάνει, η **επιφάνεια** του ανιχνευτή, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια από την οποία δημιουργείται θόρυβος, και η συχνότητα διαμόρφωσης κατά την οποία έγιναν οι μετρήσεις. Για να μειωθεί αυτό το δυσκίνητο σύνολο των συνθηκών, είναι χρήσιμο να αφαιρεθούν ορισμένες από αυτές για την ομαλοποίηση της **NEP**. Το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου του ανιχνευτή είναι λευκός θόρυβος, όπου η ισχύς του θορύβου είναι ευθέως ανάλογη

προς το εύρος ζώνης Δf . Επίσης, το ποσό της ενέργειας του θορύβου που παράγεται από ένα φωτοανιχνευτή **επιφάνειας** A είναι ευθέως ανάλογο με την **επιφάνεια αυτή**. Μπορούμε να ορίσουμε ως εκ τούτου την ποσότητα ΔfA που μπορεί να εφαρμοστεί με τη **NEP** ως συντελεστή προσαύξησης αν ξέρουμε το εύρος ζώνης και **την επιφάνεια** του υπό εξέταση φωτοανιχνευτή. Πριν το κάνουμε αυτό, ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η **NEP** είναι ένα μέτρο του ρεύματος εξόδου το οποίο είναι ανάλογο προς την τετραγωνική ρίζα της ισχύος, ώστε εξίσωση μας για την **κανονικοποιημένη NEP**, η οποία προσδιορίζεται ως **NEP***, γίνεται

$$NEP^* = \frac{NEP}{(\Delta fA)^{1/2}} \quad (7.8)$$

Πιο συχνά **μπορεί να συναντηθεί η** αντίστροφη ποσότητα **και η οποία** αναφέρεται στις προδιαγραφές του φωτοανιχνευτή. Αυτή είναι γνωστή ως ειδική ανιχνευσιμότητα (D^*), όπου

$$D^* = \frac{(\Delta fA)^{1/2}}{NEP} \quad (7.9)$$

Και οι δύο ποσότητες φυσικά εξαρτώνται από το μήκος κύματος, τη θερμοκρασία και τη συχνότητα της διαμόρφωσης της δοκιμαστικής πηγής φωτός ώστε οι τιμές που αναφέρονται συχνά ως $D^*(\lambda, f_m)$ ή $NEP^*(\lambda, f_m)$ σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία όπου λ είναι το μήκος κύματος και f_m είναι η συχνότητα της διαμόρφωσης του **δοκιμαστικού** σήματος. Σε γενικές γραμμές θα πρέπει να αναζητήσετε φωτοανιχνευτές με υψηλή D^* ή χαμηλό NEP^* που επίσης πληρούν όλα τα άλλα καθορισμένα κριτήρια σας.

7.5 Θερμικοί Ανιχνευτές

Μια συσκευή θεωρείται ότι είναι ένας θερμικός ανιχνευτής όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει τόσο μεγάλο μήκος κύματος που δεν διαθέτει επαρκή ενέργεια για την παραγωγή φωτοαγωγιμών ή φωτοεκπεμπόμενων ηλεκτρονίων. Ωστόσο, εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται η ενέργεια πρέπει να **μεταφέρεται** κάπου και το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Η ανίχνευση αυτής της **μεταβολής** της θερμοκρασίας είναι η βάση της λειτουργίας των θερμικών

ανιχνευτών. Αυτοί οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ των 10 μm και 0.1mm. Στα 10 μm και άνω, τα φωτόνια δεν έχουν πλέον αρκετή ενέργεια για να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας. Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 0.1 mm χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές τεχνικές ανίχνευσης μικροκυμάτων και ραδιοκυμάτων.

Ένας καλός θερμικός ανιχνευτής χρειάζεται να προκαλεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μεταβολή της θερμοκρασίας του υλικού του ανιχνευτή για ένα συγκεκριμένο ποσό της προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο του ανιχνευτή πρέπει να έχει υψηλό λόγο επιφάνειας σε σχέση με τον όγκο με μια φωτοαπορροφητική επιφάνεια και θα πρέπει επίσης να μονωθεί θερμικά από τα γύρω αντικείμενα. Αυτή είναι η προέλευση της μορφής λεπτού μαύρου φύλλου που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους ανιχνευτές σε αυτή την τάξη. Φυσικά το φύλλο αυτό δεν μπορεί να είναι πολύ λεπτό διότι η ακτινοβολία θα περνάει μέσα χωρίς να αλληλεπιδρά με αυτό. Ένα πάχος της τάξης των 50 nm ή περισσότερο θα εξασφαλίσει ότι το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται. Ο πιο ευαίσθητος ανιχνευτής θα είναι ένα τέτοιο φύλλο τοποθετημένο σε συνθήκες κενού, όπου η θερμότητα χάνεται από την ακτινοβολία μόνο. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα ένα στοιχείο ανιχνευτή επιφάνειας της τάξης των 1 mm^2 που θα μπορούσε να ανιχνεύσει επίπεδα ισχύος έως και 5×10^{-9} W σε θερμοκρασία δωματίου. Ένας μεγαλύτερος ανιχνευτής θα μπορούσε, φυσικά, να εντοπίσει πολύ χαμηλότερα επίπεδα ισχύος.

Ωστόσο, αν και καλά θερμικά μονωμένοι ανιχνευτές είναι πολύ ευαίσθητοι δεν ανταποκρίνονται καλά στις διακυμάνσεις των επιπέδων ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η ανίχνευση της μείωσης των επιπέδων ακτινοβολίας απαιτεί το στοιχείο του ανιχνευτή να χάσει θερμότητα η οποία, φυσικά, γίνεται πιο αποτελεσματικά μέσω αγωγιμότητας. Ως εκ τούτου υπάρχει εξισορρόπηση μεταξύ του χρόνου απόκρισης του ανιχνευτή και της ευαισθησίας του.

Ακολουθεί μια επιλογή από τα πιο κοινά 'ηλεκτρονικά' συστήματα θερμικής ανίχνευσης. Αυτό δεν αποτελεί ένα πλήρη κατάλογο των πολλαπλών μεθόδων ανίχνευσης των μεταβολών της θερμοκρασίας στα υλικά, αλλά αντιπροσωπεύει τις μεθόδους που συνήθως χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των μηχανικών και των επιστημόνων σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται τέτοιοι ανιχνευτές.

7.5.1 Το Θερμοστοιχείο

Το **θερμοστοιχείο** είναι ίσως η πιο συνηθισμένη συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας δεδομένου ότι είναι απλό, ανθεκτικό και εύκολο στη χρήση. Ένας αποτελεσματικός, αν και όχι ιδιαίτερα ευαίσθητος, ανιχνευτής θερμότητας μπορεί να δημιουργηθεί απλά επισυνάπτοντας μια από τις επαφές του θερμοζεύγους στο στοιχείο του ανιχνευτή όπως **απεικονίζεται** στο σχήμα 7.6.

Ακτινοβολία (Radiation)

Περιοχή ανίχνευσης (Detection Junction)

Στοιχείο ανιχνευτή (Detector element)

Περιοχή σταθερής θερμοκρασίας (Constant temperature junction)

Σχήμα 7.6 Ένας απλός ανιχνευτής θερμότητας χρησιμοποιώντας ένα θερμοζεύγος.

Η **αρχή λειτουργίας του θερμοστοιχείου** βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck (μερικές φορές καλείται ως θερμοηλεκτρικό φαινόμενο), όπου η θέρμανση **της επαφής** δύο ανόμοιων μετάλλων **συνδεδεμένης** σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί μια ροή ρεύματος στο κύκλωμα η οποία είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ **της** θερμαινόμενης και της μη **θερμαινόμενης επαφής**. Όταν το στοιχείο του ανιχνευτή **θερμανθεί** λόγω **της** προσπίπτουσας ακτινοβολίας **η συνημμένη επαφή** του **θερμοστοιχείου** επίσης θα θερμανθεί (μια καλή θερμική επαφή προτείνεται για ακριβή μέτρηση). Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ **της επαφής αυτής** και **της δεύτερης επαφής** θα δημιουργήσει ένα ρεύμα το οποίο μπορεί να μετρηθεί με ένα ευαίσθητο αμπερόμετρο ή παρόμοιο όργανο. Για τη μέτρηση της απόλυτης θερμοκρασίας **η δεύτερη επαφή, η οποία** ονομάζεται πιο σωστά **ως κρύα επαφή**, θα πρέπει να διατηρείται σε σταθερή γνωστή θερμοκρασία ή, εναλλακτικά, μία από τις σύγχρονες ηλεκτρονικές αναφορές μπορούν να το υποκαταστήσουν αυτό. Μια πιο ευαίσθητη συσκευή μπορεί να κατασκευαστεί από αρκετά διαδοχικά θερμοζεύγη για να ενισχυθεί το ρεύμα εξόδου.

7.5.2 Το Βολόμετρο

Το βολόμετρο βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων υλικών αλλάζει με την θερμοκρασία. Το μέγεθος αυτής της **μεταβολής** καθορίζεται από το μέγεθος του θερμοκρασιακού συντελεστή αντίστασης, α , του υλικού. Στα μέταλλα αυτή την ποσότητα έχει θετική τιμή, διότι η αντίσταση του μετάλλου

αυξάνει με τη θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πλάτους ταλάντωσης των ιόντων των μετάλλων στη δομή του υλικού που μειώνει το χρόνο μεταξύ των συγκρούσεων των ηλεκτρονίων που διέρχονται από το μέταλλο. Τα μέταλλα έχουν θερμοκρασιακούς συντελεστές αντιστάσεων με τιμές έως $5 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Η ειδική αντίσταση του μετάλλου, ρ , δίνεται επομένως από

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta) \quad (7.10)$$

όπου ρ_0 είναι η ειδική αντίσταση του μετάλλου στους 273K (0°C) και θ είναι η θερμοκρασία σε $^\circ\text{C}$. Η εξίσωση αυτή είναι μια προσέγγιση η οποία είναι βαθμονομημένη σε 0°C . Για ακριβή μέτρηση μια πλήρης καμπύλη της θερμοκρασίας σε σχέση με την αντίσταση του υλικού θα πρέπει να ληφθεί και να χρησιμοποιηθεί για να γίνουν διορθώσεις στα αποτελέσματα. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής α αντίστασης ορίζεται από:

$$\alpha = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT} \quad (7.11)$$

όπου και πάλι ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού και T είναι η θερμοκρασία. Πολύ **μεγαλύτερη** ευαισθησία μπορεί να αποκτηθεί με τη χρήση **thermistor** που βασίζονται σε ημιαγωγούς που αποτελούνται από οξείδια μεταβατικών μετάλλων, όπως κοβάλτιο, νικέλιο και μαγγάνιο. Αυτά έχουν αρνητικές τιμές για τον θερμοκρασιακό συντελεστή ειδικής αντίστασης που οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητας του μεταφερόμενου φορτίου με θερμοκρασία με τιμές έως και $-6 \times 10^{-2} \text{K}^{-1}$. Αυτό αποτελεί βελτίωση μιας τάξης μεγέθους για τα μέταλλα.

Ερώτηση 3

Υπολογίστε τη μεταβολή της αντίστασης ενός ελάσματος πλατίνας μήκους (l) 20mm και διατομής (A) $1 \times 10^{-8} \text{m}^2$ που αυξήθηκε από 300K σε 350K ; Η ειδική αντίσταση της Πλατίνας στους 273K (ρ_0) είναι $10.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ και ο θερμοκρασιακός συντελεστής είναι $\alpha 3.9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Υπενθύμιση η αντίσταση είναι $R = \rho l / A$.

Μία από τις πιο κοινές **διατάξεις οργάνου** κατηγορίας βολόμετρου είναι να χρησιμοποιήσετε το στοιχείο ανιχνευτή σε ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone όπως **απεικονίζεται** στο σχήμα 7.7.

Διαφορικός ενισχυτής (Differential Amplifier)

Ακτινοβολία (radiation)

Ανιχνευτής (Detecting Element)

Σχήμα 7.7 Βολόμετρο Γέφυρας Wheatstone

Η γέφυρα είναι σε ισορροπία όταν $R_1/R_2 = R_3/R_4$. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο εισόδους του ενισχυτή θα είναι μηδέν. Όταν η θερμική ακτινοβολία αλλάζει την αντίσταση του στοιχείου του ανιχνευτή (R_3) η ισορροπία θα διαταραχθεί και μια τάση θα δημιουργηθεί στις εισόδους ενισχυτή. Η τάση που παράγεται στην έξοδο του ενισχυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας που έχει πραγματοποιηθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ροή ρεύματος στο κύκλωμα πρέπει να είναι μικρή ώστε η επιρροή της θέρμανσης να αποφευχθεί στο στοιχείο του **ανιχνευτή**.

7.5.3 Πυροηλεκτρικοί Ανιχνευτές

Οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές χρησιμοποιούν ένα πολύ διαφορετικό φαινόμενο που εξαρτάται από τη θερμοκρασία **για να λειτουργήσουν** ως ανιχνευτές θερμότητας. Είναι κατασκευασμένοι από **σιδηροηλεκτρικό κρύσταλλο του οποίου τα μόρια παρουσιάζουν** μόνιμη ηλεκτρική διπολική ροπή. Σε χαμηλές θερμοκρασίες αυτά τα δίπολα ευθυγραμμίζονται **κατά μήκος ενός** κοινού άξονα στον κρύσταλλο προκαλώντας μια καθαρή διπολική ροπή σε όλο το κρύσταλλο. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται το **πλάτος** αυτής της διπολικής ροπής σταδιακά μειώνεται λόγω της ανατάραξης των μεμονωμένων μορίων. Τελικά, σε θερμοκρασία που είναι γνωστή ως η θερμοκρασία Curie, ο κρύσταλλος δεν παρουσιάζει διπολική ροπή. Σε οποιαδήποτε θερμοκρασία κάτω από την θερμοκρασία Curie **μεταβολές** στη θερμοκρασία του υλικού θα προκαλέσουν μεταβολή στην **ολική** διπολική ροπή και έτσι θα προκαλέσουν μεταβολή στα **επιφανειακά** φορτία του κρυστάλλου. Είναι δυνατόν να γίνει χρήση αυτής της ιδιότητας **με** τον τεμαχισμό πλακών του κρυστάλλου έτσι ώστε η κατεύθυνση της **ολικής** διπολικής ροπής να είναι **κάθετη**

στις μεγάλες πλευρές της πλάκας. Η αλλαγή της θερμοκρασίας θα προκαλέσει **την επαγωγή** φορτίων αντίθετης πολικότητας στις **απέναντι** μεγάλες επιφάνειες του κρυστάλλου. Ηλεκτρόδια μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτές τις επιφάνειες **τα οποία** θα συγκεντρώσουν τα φορτία που δημιουργούνται στην επιφάνεια. Ένα κύκλωμα που μπορεί στη συνέχεια να σχηματιστεί χρησιμοποιώντας μια απλή αντίσταση η οποία θα **κλείνει** το κύκλωμα ανάμεσα στις επιφάνειες του κρυστάλλου και θα επιτρέψει την ροή ρεύματος **απεικονίζεται** στο σχήμα 7.8 (α)

Σχήμα 7.8 Τυπικά κυκλώματα για τη χρήση ενός πυροηλεκτρικού ανιχνευτή.

Η τιμή της αντίστασης φορτίου R_L πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη (10^8 - $10^{11}\Omega$) για να προκληθεί αξιόλογο σήμα τάσης από το μικρό φορτίο που αναπτύχθηκε μεταξύ των δύο όψεων. Δυστυχώς, η υψηλή αντίσταση φορτίου οδηγεί επίσης σε πιο αργούς χρόνους απόκρισης και, όπως πάντα, **υπάρχει** μια εξισορρόπηση μεταξύ υψηλής ευαισθησίας χρησιμοποιώντας μια μεγάλη τιμή της R_L ή μικρότερους χρόνους απόκρισης με μια μικρότερη τιμή της R_L . Ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος για να μετρηθεί αυτή η τάση είναι να χρησιμοποιήσετε έναν ενισχυτή FET μεγάλης σύνθετης αντίστασης εισόδου όπως **απεικονίζεται** στο σχήμα 7.8 (β). Οι ιδιότητες **του κατ' ουσία βραχυκυκλώματος** του τελεστικού ενισχυτή παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση φορτίου της συσκευής ενώ **επιτρέπουν** την ενίσχυση του σήματος. Με έναν κατάλληλο ανιχνευτή και κύκλωμα με πυροηλεκτρικούς ανιχνευτές μπορούμε να έχουμε χρόνους απόκρισης έως και μερικά nanoseconds. Δυστυχώς, αυτοί οι ανιχνευτές είναι πολύ ευαίσθητοι στο πιεζοηλεκτρικό φορτίο που παράγεται από δόνηση, το οποίο αποτελεί σήμερα ένα σημαντικό πρόβλημα. Έχουν, πάντως, μια φασματική απόκριση που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της 'θερμότητας' του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από την κοντινή υπέρυθρη στο 1 μm **μέχρι τα μικροκύματα** στα 0.1mm. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα σήμα δημιουργείται μόνο με την αλλαγή της θερμοκρασίας και έτσι μόνο μια αλλαγή στην προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία θα δημιουργήσει κάποιο σήμα. Προς το παρόν τα πιο κοινά **σιδηροηλεκτρικά** υλικά που χρησιμοποιούνται είναι θειική τριγλυκερίνη, λιθικό άλας τανταλικού οξέος, το στροντικό νιοβικό βάριο και μολυβδούχο ζirkόνιο. Οι συσκευές αυτές είναι σήμερα δημοφιλής στους παθητικούς ανιχνευτές υπέρυθρης (PIR) που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα συστήματα εισβολής και ανίχνευσης πυρκαγιάς.

7.6 Φωτοαγώγιμες Συσκευές

Οι φωτοαγώγιμοι ανιχνευτές βασίζονται εξ ολοκλήρου σε υλικά ημιαγωγών. Όπως είδαμε στο τμήμα 7.2.2 το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας στους ημιαγωγούς είναι αρκετά μικρό ώστε ένα φωτόνιο μπορεί να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από την ζώνη σθένους επάνω στις ενεργειακές καταστάσεις της ζώνης αγωγιμότητας υπό την προϋπόθεση ότι

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (7.12)$$

όπου E_g είναι η ενέργεια της ζώνης του ενεργειακού κενού. Μόλις το ηλεκτρόνιο βρεθεί στην ζώνη αγωγιμότητας αυξάνει την αγωγιμότητα των ημιαγωγών και έτσι παρέχει μια μετρήσιμη ιδιότητα με την οποία καθορίζει το ποσό του φωτός που πέφτει πάνω στην επιφάνεια του ανιχνευτή.

7.6.1 Η φωτοαντίσταση (LDR)

Αυτή είναι η απλούστερη από τις φωτοαγώγιμες συσκευές δεδομένου ότι αποτελείται μόνο από ένα απλό στρώμα **ημιαγωγού**, όπως **είναι το** θειούχο κάδμιο (CdS) ή το σεληνιούχο κάδμιο (CdSe) με ηλεκτρική επαφή σε κάθε άκρο **του στρώματος**. Καθώς το φως **προσπίπτει** επάνω στον ημιαγωγό διεγείρονται ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας οπές στη ζώνη σθένους και έτσι δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών όπως **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.9.

Αυξανόμενη ενέργεια ηλεκτρονίων (Increased electron energy)

Ζώνη σθένους (Valence band)

Ζώνη αγωγιμότητας (Conduction Band)

Σχήμα 7.9 Διέγερση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας από φως με διάφορα μήκη κύματος.

Η αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση σε οπές στη ζώνη σθένους ώστε η αγωγιμότητα του υλικού αυξάνει. Εάν **μια διαφορά δυναμικού** εφαρμοστεί **στα άκρα του υλικού** τα

ηλεκτρόνια θα προσελκύονται προς το θετικό πόλο και οι οπές θα κινηθούν προς τον αρνητικό πόλο, προκαλώντας μια ροή ρεύματος. Η κίνηση αυτή των φορέων φορτίου μπορεί να προσδώσει στη συσκευή κάποια ενίσχυση γνωστή ως φωτοαγωγίμο κέρδος. Τα κινούμενα φωτοηλεκτρόνια παράγουν άλλα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών καθώς ταξιδεύουν στον ημιαγωγό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα διαδοχικό φαινόμενο όπου ένα φωτόνιο οδηγεί στη δημιουργία μεταξύ 10^3 και 10^5 ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Φυσικά, αν η ενέργεια του φωτονίου είναι χαμηλότερη από εκείνη του ενεργειακού χάσματος E_g τότε το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να διεγερθεί στη ζώνη αγωγιμότητας και έτσι δεν παράγονται φορείς φορτίων. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει ένα μήκος κύματος πέρα από το οποίο η φωτοαγωγιμότητα δεν μπορεί να συμβεί. Αυτό είναι γνωστό ως μήκος κύματος αποκοπής, λ_c , και εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού που έχει κατασκευαστεί η συσκευή. Το μήκος αποκοπής υπολογίζεται από την σχέση:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (7.13)$$

Τυπικές ενέργειες χάσματος κυμαίνονται από 2.5 eV μέχρι 0.4eV. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερη είναι η ενέργεια χάσματος τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που είναι σε θέση να ανταποκριθεί ο ανιχνευτής.

Ερώτηση 4

Προσδιορίστε το μήκος κύματος αποκοπής ενός ημιαγωγού με ενεργειακό χάσμα ίσο με 2.4eV.

Η χρήση μιας φωτο - αντίστασης είναι εξαιρετικά απλή. Το μόνο που απαιτείται είναι μια απλή αντίσταση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.10.

Κίνηση ηλεκτρονίων (electron drift)

Κίνηση οπών (hole drift)

Σχήμα 7.10 Τυπικό κύκλωμα για χρήση LDR δείχνοντας τη γραμμή μεταφοράς

Δεδομένου ότι η διακύμανση **μιας φώτο-αντίστασης** μπορεί να είναι **μεγαλύτερη** από 10 MΩ στο σκοτάδι και μόλις αρκετά Ωhm υπό ισχυρό φωτισμό, η αντίσταση πρέπει να επιλέγεται ώστε να μεγιστοποιεί τη μεταβολή της τάσης V_o με την ένταση του φωτός με την οποία σκοπεύετε να χρησιμοποιήσετε την συσκευή ενώ ταυτόχρονα να παρέχει μια μετρήσιμη τάση **υπό** ελάχιστο φωτισμό.

Λυμένο Παράδειγμα 2

Επιλέγοντας μια αντίσταση για ένα εύρος εντάσεων φωτός για ένα LDR.

Πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μια LDR για ένα εύρος εντάσεων φωτός από 1 έως 1000 lux. Υπολογίστε μια κατάλληλη αντίσταση φορτίου για χρήση με την LDR.

Λύση

Πρώτα χρησιμοποιήστε τα φύλλα δεδομένων για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων αντιστάσεων για κάθε ένταση.

Στο 1 lux R_{LDR} είναι 80KΩ

Στα 1000 lux R_{LDR} είναι 150Ω

Αν η ελάχιστη ανιχνεύσιμη αλλαγή τάσης σε ολόκληρη την αντίσταση φορτίου R_L είναι 50mV τότε για 10V παροχή η τάση της LDR σε 1 lux πρέπει να είναι :

$$10 - 0.05 = 9.95V$$

και το ρεύμα που διαρρέει την LDR θα είναι $.95/80 \times 10^3 = 0.124mA$

Άρα η απαιτούμενη τιμή αντίστασης R_L πρέπει να είναι $0.05/0.124 \times 10^{-3} = 403\Omega$

Η τάση στα άκρα της R_L θα είναι $403 \times 10 / 403 + 150 = 7.29V$

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα με LDR συσκευές είναι ο χρόνος απόκρισης τους. Ο χρόνος απόκρισης της LDR εξαρτάται από το πόσοι χρόνος απαιτείται για το φορτίο που μεταφέρει οπές ή ηλεκτρόνια να περάσει, υπό το προσελκόμενο δυναμικό, στο αντίστοιχο τέλος του υλικού του ημιαγωγού. Αυτό μπορεί να κυμαίνεται από 10s έως 100s των χιλιοστών του δευτερολέπτου, ανάλογα με το μέγεθος της συσκευής. Συσκευές με μεγαλύτερη περιοχή είναι ασφαλώς πιο ευαίσθητες, αλλά έχουν υπερβολικά μεγάλους χρόνους απόκρισης.

7.6.2 Η Φωτοδίοδος

Όλες οι επαφές διόδων pn είναι ευαίσθητες στο φως. Έτσι μια τυπική φωτοδίοδος δεν είναι μια ειδική συσκευή αλλά απλώς μια δίοδος που έχει **κατασκευαστεί** έτσι ώστε οι

επαφές pn να μπορούν να εκτεθούν στο φως. Η δομή μιας τυπικής επαφής διόδου pn **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.11.

Μπροστινή επαφή (Front contact)

Περιοχή διάχυσης p^+

Περιοχή απογύμνωσης (Depletion Region)

Πυρίτιο τύπου n (n – type silicon)

Περιοχή διάχυσης n^- (n^- diffusion)

Πίσω επαφή (back contact)

Σχήμα 7.11 Δομή μιας τυπικής φωτοδιόδου pn

Σε απομόνωση η επαφή pn είναι σε κατάσταση ισορροπίας. Η δημιουργία της περιοχής **απογύμνωσης κατά μήκος της** επαφής pn (βλ. Κεφάλαιο 4) με την ανταλλαγή των φορέων **πλειονότητας** κατά μήκος της επαφής **δημιουργεί** ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αποτελεί ένα φράγμα δυναμικού που η πλειοψηφία των υπόλοιπων φορέων φορτίου στην περιοχή p και n του υλικού δεν μπορούν να διασχίσουν. (Αυτό δεν είναι απολύτως αληθές, δεδομένου ότι μερικοί από τους φορείς φορτίων θα έχουν αρκετή ενέργεια για να περάσουν το χάσμα. Ωστόσο αυτό εξισορροπείται από τη μειοψηφία της ροής των θερμικά παραγόμενων φορέων **μειονότητας** προς την αντίθετη κατεύθυνση λόγω του ηλεκτρικού πεδίου.). Η έκθεση της επαφής pn στο φως δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων οπών που αμέσως χωρίζουν και **κινούνται προς τις** αντίστοιχες πλευρές της περιοχής **απογύμνωσης** λόγω αυτού του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.12.

Προσπίπτων φώς (Incident light)

Περιοχή ημιαγωγού τύπου p (p – type)

Περιοχή απογύμνωσης (Depletion region)

Περιοχή ημιαγωγού τύπου n (n – type)

Σχήμα 7.12 Κίνηση των ζευγών ηλεκτρονίων – οπών που δημιουργήθηκαν από το φως σε μια επαφή pn.

Πρέπει να ανιχνευτούν αυτά τα φορτία αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε την δίοδο pn ως φωτοανιχνευτή. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για να γίνει αυτό, γνωστές ως φωτοβολταϊκός και φωτοαγωγίμος τρόπος λειτουργίας.

7.6.2.1 Ο Φωτοβολταϊκός τρόπος λειτουργίας

Για να λειτουργήσει η φωτοδίοδος υπό τον φωτοβολταϊκό τρόπο η δίοδος είναι ουσιαστικά ανοικτό κύκλωμα και εμείς απλά μετράμε την τάση που δημιουργείται στα άκρα της. Ας εξετάσουμε αυτή την δημιουργία τάσης πιο προσεκτικά.

Όπως προαναφέρθηκε, όταν μια δίοδος εκτεθεί στο φως χωρίς να έχουν εφαρμοστεί εξωτερικά πεδία παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων οπών στην περιοχή απογύμνωσης της φωτοδίοδου τα οποία κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις της περιοχής απογύμνωσης λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ροή ρεύματος από την πλευρά τύπου n της φωτοδίοδου στην πλευρά τύπου p, γνωστό ως φωτορεύμα I_{ph} . Αυτή η ροή ρεύματος μειώνει την πραγματική τάση στην περιοχή απογύμνωσης και συνεπώς το μέγεθος της ενέργειας του φράγματος που δημιουργήθηκε από την πλειοψηφία φορέων στην περιοχή αυτή. Όπως προαναφέρθηκε, φορείς πλειονότητας υψηλής ενέργειας μπορούν πάντοτε να διασχίζουν την περιοχή απογύμνωσης αλλά εάν το φράγμα δυναμικού μειώνεται τότε περισσότεροι από τους φορείς πλειονότητας θα διασχίσουν τη περιοχή κένωσης δημιουργώντας ροή ρεύματος προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του φώτο - ρεύματος. Αυτό είναι γνωστό ως το ευθύ ρεύμα I_f . Η κατάσταση ροής ρεύματος απεικονίζεται στο Σχήμα 7.13.

Προσπίπτων φώς (Incident light)

Περιοχή ημιαγωγού τύπου p (p – type)

Περιοχή απογύμνωσης (Depletion region)

Περιοχή ημιαγωγού τύπου n (n – type)

Σχήμα 7.13 Κίνηση φορέων φορτίου σε μια επαφή δίοδου pn που βρίσκεται σε φωτοβολταϊκή λειτουργία.

Δεδομένου ότι η φωτοδίοδος είναι σε ανοικτό κύκλωμα δεν μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος και έτσι το ευθύ ρεύμα πρέπει να ισούται με το φωτορεύμα. Ωστόσο, έχουμε μείωση του δυναμικού της επαφής. Αυτό θεωρείται ως η ανάπτυξη ενός δυναμικού μεταξύ των άκρων της δίοδου. Αυτή η φωτοτάση μπορεί πλέον να μετρηθεί με εξωτερικά κυκλώματα.

Για να προσδιοριστεί το μέγεθος αυτής της τάσης πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση δίοδου, μια θεμελιώδη σχέση που ειπώθηκε στο

κεφάλαιο 4 η οποία εκφράζει το ευθύ ρεύμα σε μια pn επαφή με όρους μιας εφαρμοσμένης τάσης και είναι

$$I_f = I_0 \left(e^{\frac{qV_{ph}}{k_B T}} - 1 \right) \quad (7.14)$$

Όπου I_0 είναι το **αναστρέφω**ν ρεύμα της διόδου και T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin. Όπως έχουμε δηλώσει παραπάνω το ευθύ ρεύμα είναι ίσο με το φωτορεύμα σε ένα ανοικτό κύκλωμα. Σε πρακτικές θερμοκρασίες ο εκθετικός όρος στην εξίσωση (7.14) είναι πολύ μεγαλύτερος από την μονάδα και έτσι έχουμε ότι

$$I_{ph} = I_0 e^{\frac{qV_{ph}}{k_B T}} \quad (7.15)$$

Λύνοντας ως προς την φωτοτάση έχουμε

$$V_{ph} = \left(\frac{k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (7.16)$$

Προσέξτε την ομοιότητα της εξίσωσης (7.16) με αυτήν για το δυναμικό επαφής που δίνεται στο Κεφάλαιο 4. Αυτό είναι λογικό αν θυμηθούμε ότι το ρεύμα είναι ανάλογο προς την πυκνότητα των φορέων. Μπορούμε τώρα να αντικαταστήσουμε στην εξίσωση (7.6) το I_{ph} και να μας δώσει

$$V_{ph} = \left(\frac{k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{\eta \Phi \lambda q}{I_0 h c} \right) \quad (7.17)$$

Παρόλο που τώρα μπορεί να καθοριστεί η φωτοτάση εξόδου της φωτοδιόδου, η εξίσωση (7.17) τονίζει επίσης τη μη-γραμμική φύση της τάσης εξόδου **ως προς** τη ροή φωτονίων στη φωτοβολταϊκή λειτουργία. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της χρήσης φωτοδιόδου σε αυτήν την λειτουργία. Το άλλο είναι οι αργοί χρόνοι απόκρισης δεδομένου ότι, όπως και η LDR παραπάνω, βασιζόμαστε σε φορείς φορτίων που μετακινούνται προς τα άκρα της φωτοδιόδου για ανίχνευση και ως εκ τούτου, όσο παχύτερη είναι η φωτοδιόδος τόσο πιο αργή θα είναι η απόκριση.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της χρήσης της φωτοβολταϊκής λειτουργίας είναι η χαμηλή παραγωγή θορύβου, εφόσον δεν υπάρχει ρεύμα διαρροής στην φωτοδιόδο σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας.

Ερώτηση 5

Μια pn φωτοδιόδος παρουσιάζει ένα αναστρέφον ρεύμα ίσο με $100\mu\text{A}$ και κβαντική απόδοση ίση με 60% στα 600nm . Όταν ακτινοβολείται από μια οπτική ισχύ 0.5mW στα 600nm , να καθοριστεί η φωτοβολταϊκή τάση εξόδου της φωτοδιόδου σε θερμοκρασία 300K ;

Ο απλούστερος τρόπος για να χρησιμοποιηθεί μια φωτοδιόδος σε φωτοβολταϊκή λειτουργία είναι να συνδεθεί απλά σε μια υψηλής τιμής ωμική αντίσταση φορτίου R_L όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7.14 (α).

Σχήμα 7.14 Χρησιμοποιώντας μια φωτοδιόδο σε φωτοβολταϊκή λειτουργία.

Η τιμή αυτής της αντίστασης θα πρέπει να επιλέγεται ώστε να είναι μεγαλύτερη από την δυναμική αντίσταση της φωτοδιόδου. Φωτοδιόδοι μεγάλης επιφάνειας μπορούν να παρουσιάζουν δυναμικές αντιστάσεις έως και $500\text{k}\Omega$ αλλά η δυναμική αντίσταση των περισσότερων φωτοδιόδων τείνει σε τιμές έως και $100\text{M}\Omega$. Αυτό καθιστά πιθανό ότι απαιτείται μια αρκετά μεγάλη αντίσταση (μέχρι $10\text{G}\Omega$!). Ο σχεδιασμός γραμμών φορτίου στην καμπύλη ρεύματος – τάσης για μια φωτοδιόδο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7.15, δείχνει πώς η χρήση μιας χαμηλής αντίστασης φορτίου θα μπορούσε να μας επιτρέψει τη δυνατότητα να έχουμε μια γραμμική απόκριση σε φωτοβολταϊκή λειτουργία με το να λειτουργούμε μακριά από την λογαριθμική περιοχή απόκρισης μέσα στο φωτοβολταϊκό τεταρτημόριο του γραφήματος.

Αυξανόμενη ροή φωτονίων (Increased photon flux)

Υψηλής αντίστασης γραμμή φορτίου (High load resistance load line)

Τεταρτημόριο Φωτοβολταϊκής λειτουργίας (Photovoltaic quadrant)

Χαμηλής Αντίστασης γραμμή φορτίου (Low load resistance load line)

Σχήμα 7.15 Αντίσταση φορτίου σχηματισμένες γραμμές φορτίου στο φωτοβολταϊκό τεταρτημόριο των χαρακτηριστικών καμπυλών της φωτοδιόδου.

Ωστόσο η **συμβατική** χρήση μιας χαμηλής αντίστασης φορτίου δεν θα παράγει μετρήσιμο σήμα. Αυτό μπορεί να λυθεί με τη χρήση ενός απλού κυκλώματος τελεστικού ενισχυτή, όπως **απεικονίζεται** στο σχήμα 7.14(β). Η **κατ' ουσίαν** γη των ακροδεκτών εισόδου του τελεστικού ενισχυτή παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση φορτίου στην φωτοδίοδο παρέχοντας ταυτόχρονα ενίσχυση στο ελάχιστο φωτορεύμα. Η αντίσταση R_f είναι συνήθως της τάξης των 1-10MΩ και η τάση εξόδου είναι ανάλογη με το φωτορεύμα όπου $V_{ph} = I_{ph} R_f$. Το LT1055 είναι ένας ενισχυτής με FET με απόκριση συχνότητας που θα χειριστεί κάθε φωτοδίοδο που **βρίσκεται** σε φωτοβολταϊκή λειτουργία. Άλλοι ενισχυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν στη θέση του εάν χρειάζεται. Εάν χρησιμοποιείτε έναν διπολικό τελεστικό ενισχυτή σιγουρευτείτε ότι εισάγετε μια αντίσταση αποκατάστασης ίση με την τιμή της R_f μεταξύ του θετικού αναστρέφοντος πόλου και του εδάφους. Αυτό μειώνει τα σφάλματα που προκαλούνται από τα ρεύματα εισόδου που υπάρχουν σε αυτό το είδος των τελεστικών ενισχυτών.

7.6.2.2 Φωτοαγωγήμια Λειτουργία

Για να βρίσκεται μια φωτοδίοδος **υπό** φωτοαγωγήμια λειτουργία πρέπει να εφαρμοστεί **στα άκρα της** pn επαφής αναστροφή πόλωση δηλαδή, **η** πλευρά τύπου n **να βρίσκεται** σε υψηλότερο δυναμικό (θετικός πόλος) **από** την πλευρά τύπου p (αρνητικός πόλος). Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4 αυτό έχει ως αποτέλεσμα **περισσότεροι φορείς πλειονότητας να απομακρύνονται από την περιοχή απογύμνωσης** καθώς **έλκονται από το θετικό δυναμικό**. Έτσι, στην πλευρά τύπου n τα ηλεκτρόνια **τραβιούνται εκτός της περιοχής απογύμνωσης** καθώς **έλκονται από το θετικό δυναμικό**. Στην περιοχή τύπου p οι οπές **απομακρύνονται από την περιοχή απογύμνωσης** καθώς **έλκονται από το αρνητικό δυναμικό**. Αυτό έχει **επακόλουθο** να κάνει ευρύτερη την περιοχή **απογύμνωσης**, με συνέπεια την αύξηση του δυναμικού στην περιοχή **αυτή** και έτσι αυξάνεται το ενεργειακό **φράγμα**. Αυτή η αύξηση στην ενέργεια του φράγματος μειώνει τη ροή κάθε **φορέα πλειονότητας κατά μήκος του φράγματος** κοντά στη τιμή μηδέν. Το μόνο ρεύμα που ρέει τώρα στην επαφή προκαλείται από τους θερμικά παραγόμενους φορείς μειονότητας, I_{th} .

Όταν η φωτοδίοδος **ακτινοβολείται**, ζεύγη ηλεκτρονίων οπών που παράγονται από φως **απομακρύνονται μεταξύ τους** από το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή **απογύμνωσης**. Και πάλι αυτό δημιουργεί ένα ρεύμα που παράγεται από φως I_{ph} που

ρέει προς την ίδια κατεύθυνση με το ρεύμα από τους θερμικά παραγόμενους φορείς μειονότητας, όπως **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.16.

Προσπίπτον φως (Incident light)

Θερμικά παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών (Thermally generated pair)

Περιοχή τύπου p (p – type)

Περιοχή απογύμνωσης (Depletion region)

Περιοχή τύπου n (n- type)

Σχήμα 7.16 Κυκλοφορία φορέων φορτίου, σε μία pn επαφή διόδου σε φωτοαγώγιμη λειτουργία.

Στην φωτοαγώγιμη λειτουργία αυτό το φωτορεύμα ρέει στο κύκλωμα και είναι ένα άμεσα μετρήσιμο σήμα. Έτσι, το μέγεθος του σήματος εξόδου μας μπορεί να προέρχεται απευθείας από την εξίσωση (7.6) και δίνεται από

$$I_{ph} = \frac{\eta\Phi\lambda q}{hc} \quad (7.18)$$

Ερώτηση 6

Μια φωτοδίοδος pn έχει κβαντική απόδοση 60% στα 600nm. Όταν **ακτινοβολείται από** μια οπτική ισχύ ίση με 0.5 mW στα 600nm, να καθοριστεί το ρεύμα που παράγεται από φως στην έξοδο της φωτοδίοδου;

Το πλεονέκτημα της φωτοαγώγιμης λειτουργίας είναι ότι έχουμε ένα σήμα εξόδου που αυξάνεται γραμμικά με τη ροή των προσπίπτων φωτονίων. Η παρουσία **της ευρύτερης περιοχής απογύμνωσης** και ως εκ τούτου, μεγαλύτερου ηλεκτρικού πεδίου, επίσης μειώνει το χρόνο διέλευσης των φορέων φορτίου στα αντίστοιχα άκρα της διόδου με αποτέλεσμα οι χρόνοι απόκρισης να είναι πολύ **μικροί**. Το μόνο σημαντικό πρόβλημα με τον φωτοαγώγιμο τρόπο λειτουργίας είναι **το ρεύμα διαρροής** που οφείλεται στους θερμικά παραγόμενους φορείς φορτίου I_{th} . Αυτό θα εμφανίζεται ως θόρυβος στο σήμα μας αλλά σε κρίσιμες εφαρμογές μπορεί να μειωθεί με την ψύξη του φωτοανιχνευτή.

Σχήμα 7.17 Χρησιμοποιώντας μια φωτοδίοδο σε φωτοαγώγιμη λειτουργία.

Ένα απλό κύκλωμα για τη λειτουργία της φωτοδιόδου σε φωτοαγωγίμη λειτουργία απεικονίζεται στο Σχήμα 7.17(α). Αυτή είναι μια απλή αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με την επαφή pn και όπου θα αναπτυχθεί τάση όταν διαρρέεται από φωτορεύμα. Και πάλι η επιλογή αυτής της αντίστασης έχει τα υπέρ και τα κατά: μια χαμηλή αντίσταση, σε σύγκριση με την δυναμική αντίσταση της φωτοδιόδου, είναι επιθυμητή, για μια γραμμική απόκριση σε ένα ευρύ δυναμικό φάσμα ενώ μια υψηλότερη αντίσταση θα παρέχει μεγαλύτερα επίπεδα σήματος. Παρατηρώντας την γραμμή φορτίου στην τρέχουσα καμπύλη απόκρισης τάσης για την φωτοαγωγίμη λειτουργία στο Σχήμα 7.18 βλέπουμε γιατί, όταν λειτουργούν στο φωτοαγωγίμο τεταρτημόριο του γραφήματος μια χαμηλή αντίσταση φορτίου είναι επιθυμητή για γραμμική απόκριση.

Γραμμή φορτίου φωτοαγωγίμης λειτουργίας (Photoconductive operation load line)

Αυξανόμενη ροή φωτονίων (Increasing photon flux)

Τεταρτημόριο φωτοαγωγίμης λειτουργίας (Photoconductive quadrant)

Σχήμα 7.18 Απεικονίζονται η αντίσταση φορτίου η γραμμή φορτίου στο φωτοαγωγίμο τεταρτημόριο των χαρακτηριστικών καμπυλών της φωτοδιόδου.

Ένα κύκλωμα που βασίζεται σε ένα τελεστικό ενισχυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 7.16 (β). Αυτό θα παρέχει γραμμικότητα και καλά επίπεδα σήματος. Τυπικές τιμές για την αντίσταση ανάδρασης R_f είναι περίπου $1M\Omega$ ανάλογα με το επίπεδο σήματος που απαιτείται. Η AD380K είναι ένας ενισχυτής υψηλής απόδοσης ικανός να αποκριθεί σε συχνότητες έως και $300MHz$ και επίσης μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας με ομοαξονικά καλώδια 50Ω . Εάν η εφαρμογή σας δεν απαιτεί τέτοια απόδοση χρησιμοποιήστε μια συσκευή χαμηλότερων προδιαγραφών: το LT1055 που χρησιμοποιείται για φωτοβολταϊκά κυκλώματα θα αποδώσει το ίδιο μέχρι συχνότητες μερικών megahertz. Όπως και πριν, αν επιλέξετε μια διπολική συσκευή να συμπεριλάβετε μια αντίσταση ίση με την τιμή της R_f μεταξύ του μη αναστρέφον ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή και του εδάφους.

Το μεγάλο πρόβλημα με τη την φωτοδιόδο pn είναι ότι αν το φως δεν αλληλεπιδράσει με τον ημιαγωγό στην περιοχή απογύμνωσης δεν παράγει μετρήσιμο ρεύμα.

7.6.3 Η Φωτοδιόδος PIN

Η φωτοδιόδος PIN είναι μια **βελτιωμένη** επαφή pn που προέκυψε από την προσθήκη ενός επιπλέον εσωτερικού στρώματος ημιαγωγού μεταξύ των τύπου p και τύπου n στρωμάτων, όπως **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.19

Μπροστά επαφή (Front contact)

Περιοχή διάχυσης p^+ (p^+ diffusion)

Ενδογενές στρώμα (Intrinsic layer)

Περιοχή πυριτίου τύπου n (n-type silicon)

Περιοχή διάχυσης n^- (n^- diffusion)

Πίσω επαφή (back contact)

Σχήμα 7.19 Τυπική δομή μιας φωτοδιόδου pin.

Αυτό τεχνητά αυξάνει το μέγεθος της σημαντικής περιοχής **απογύμνωσης**, αυξάνοντας τις πιθανότητες σύλληψης ενός φωτονίου. Η εφαρμογή μιας μικρής αναστροφής τάσης πόλωσης μπορεί να επεκτείνει τώρα την περιοχή **απογύμνωσης** έως τα άκρα της συσκευής της διόδου. Αυτό έχει ορισμένες ευεργετικές συνέπειες. Στην κανονική **δομή** της φωτοδιόδου το φως εισέρχεται στην φωτοδιόδο μέσα από το στρώμα τύπου p. Αν αυτό είναι πλέον μέρος της περιοχής **απογύμνωσης** έχουμε βελτιώσει τις πιθανότητες για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου - οπής σε αυτήν την κρίσιμη περιοχή και έτσι **βελτιώνεται η απόδοση** της συσκευής. Επίσης, η δημιουργία μιας τόσο **ευρείας** περιοχής απογύμνωσης δίνει στη φωτοδιόδο έναν πολύ γρήγορο χρόνο απόκρισης, μερικές φωτοδιόδοι pin έχουν απόκριση **της τάξης** υπό-νανοδευτερόλεπτου. Τέλος, λειτουργώντας σε χαμηλότερο δυναμικό πόλωσης μειώνεται το ρεύμα διαρροής και η παραγωγή θορύβου. Η διόδος pin έχει γίνει το βασικό στοιχείο φωτοανίχνευσης.

7.6.4 Φωτοδιόδοι Schottky

Στην Schottky φωτοδιόδο το στρώμα τύπου p αντικαθίσταται στη δομή της διόδου από ένα πολύ λεπτό στρώμα χρυσού ($\approx 15\text{nm}$) όπως **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.20.

Μπροστά επαφή (Front contact)

Υμένιο χρυσού (Gold film)

Περιοχή απογύμνωσης (depletion region)

Περιοχή τύπου n από πυρίτιο (n – type silicon)

Περιοχή διάχυσης n^- (n^- διάχυση)

Πίσω επαφή (Back contact)

Σχήμα 7.20 Τυπική δομή μιας φωτοδιόδου Schottky.

Αυτό το στρώμα χρυσού είναι τόσο λεπτό που **το μεγαλύτερο μέρος** του προσπίπτοντος φωτός στην φωτοδίοδο περνά μέσα από αυτό. **Η περιοχή απογύμνωσης** σχηματίζεται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια χρυσού κατά την εφαρμογή του δυναμικού πόλωσης. Αυτό θέτει την περιοχή **απογύμνωσης** πολύ κοντά στο σημείο πρόσπτωσης της εισερχόμενης ακτινοβολίας και έτσι αποτελεί **προκύπτει** μια καλή απόκριση **στο μπλε** και την ιώδη περιοχή του φάσματος που συνήθως απορροφάται από **τα επιφανειακά στρώματα** του ημιαγωγού. Το στρώμα χρυσού αντανakλά ωστόσο φως προς το κόκκινο άκρο του φάσματος και έτσι η απόκριση της φωτοδιόδου Schottky μειώνεται σε αυτήν την περιοχή. Διαφορετικά ο χρόνος απόκρισης αυτής της διόδου είναι πολύ καλός, όμοιος με αυτόν της φωτοδιόδου PIN. Το μειονέκτημα είναι ότι η φωτοδίοδος Schottky δεν **συμπεριφέρεται τόσο καλά για** μεγάλες ροές φωτονίων και δεν **λειτουργεί** σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι συσκευές αυτές μπορούν να **κατασκευαστούν με ενεργές περιοχές μεγάλης επιφάνειας** και ως εκ τούτου **συναντώνται** σε εφαρμογές με μεγάλες περιοχές αντίχρευσσης.

7.6.5 Φωτοδιόδοι Χιονοστιβάδας

Η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας παράγει σημαντικά αυξημένο φωτορεύμα ενισχύοντας εσωτερικά τον αριθμό των φορέων φορτίου που παράγονται από **το προσπίπτον φως**.

Η εσωτερική δομή μιας φωτοδιόδου χιονοστιβάδας **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.21.

Μπροστινή επαφή (Front contact)

Περιοχή p^+ (p^+ region)

Περιοχή p (p region)

Περιοχή n^- (n^- περιοχή)

Πίσω επαφή (Back contact)

Σχήμα 7.21 Τυπική δομή μιας φωτοδιόδου χιονοστιβάδας που δείχνει την κατανομή ηλεκτρικού πεδίου.

Για να **επιτευχθεί αυτή η** εσωτερική ενίσχυση η δίοδος πρέπει να λειτουργεί **υπό ανάστροφη** πόλωση πολύ κοντά στην τάση διάσπασης της διόδου (συνήθως 300-500V). Το φως που διεισδύει στο p^+ στρώμα παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων οπών με τον συνήθη τρόπο **στην περιοχή απογύμνωσης**. Καθώς τα ηλεκτρόνια **κινούνται** προς το θετικό δυναμικό επιταχύνονται σε μια ζώνη υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται μεταξύ των p και n^+ στρωμάτων. Αυτό δίνει σε κάθε ηλεκτρόνιο αρκετή ενέργεια για να διεγείρει ένα άλλο ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτά τα ηλεκτρόνια διεγείρουν **με την σειρά τους** άλλα ηλεκτρόνια και έτσι δημιουργείται μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων. Κάθε ηλεκτρόνιο αφήνει μια αντίστοιχη οπή που κινείται προς προς το αρνητικό δυναμικό. Το αποτέλεσμα είναι ένας μεγάλος αριθμός φορέων φορτίου που παράγεται από μια μόνο αλληλεπίδραση φωτονίων. Το κέρδος φωτορεύματος από αυτές τις διόδους **είναι περίπου** 50 έως 300 φορές μεγαλύτερο από αυτό μιας τυπικής **διόδου** PIN. Το πιο σημαντικό, το κέρδος αυτό επιτυγχάνεται χωρίς την αντίστοιχη αύξηση του θορύβου, κάνοντας τις διόδους αυτές δημοφιλής σε εφαρμογές χαμηλού φωτισμού. Επίσης το υψηλό αυτό πεδίο δίνει στη δίοδο εξαιρετικά σύντομους χρόνους απόκρισης, έως και 50 ps σε ορισμένες συσκευές. Δυστυχώς, δεν είναι εύκολες **στο χειρισμό**. Η μεγάλη τάση πόλωσης πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια 0.1V για να λειτουργήσει η συσκευή σε μια περιοχή όπου το φαινόμενο χιονοστιβάδας θα συμβεί χωρίς να δημιουργηθεί μια διαφορετική χιονοστιβάδα από την είσοδο στην περιοχή διάσπασης της διόδου. Η συσκευή είναι επίσης ευαίσθητη στη θερμοκρασία, με τη θερμοκρασία να επηρεάζει το κέρδος και πάλι, ενδεχομένως προκαλώντας μια διαφορετική χιονοστιβάδα. Αυτό απαιτεί πολύπλοκα κυκλώματα σταθεροποίησης θερμοκρασίας για την αντιστάθμιση για τις αλλαγές στο κέρδος και να διατηρηθεί τη σταθερότητα της τάσης πόλωσης.

7.6.6 Φωτοτρανζίστορ

Μια άλλη συσκευή που παρέχει αυξημένο ρεύμα εξόδου για μια δεδομένη ροή φωτονίων είναι το φωτοτρανζίστορ. Η τυπική δομή ενός npn φωτοτρανζίστορ **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.22.

Μπροστινή επαφή (Front contact)

Περιοχή πυριτίου p τύπου (p-type silicon)

Περιοχή πυριτίου n – τύπου (n – type silicon)

Πίσω επαφή (Back contact)

Σχήμα 7.22 Τυπική δομή ενός ηρη φωτοτρανζίστορ.

Η επαφή βάσης – συλλέκτη ηρη είναι πολωμένη ανάστροφα και συμπεριφέρεται σαν μια κανονική φωτοδιόδο. Η επαφή βάσης εκπομπού είναι φυσικά ορθά πολωμένη και επιτρέπει έτσι το τρανζίστορ να άγει.

Σε ένα κανονικό τρανζίστορ η ποσότητα του ρεύματος που διαρρέει τις επαφές εκπομπού - συλλέκτη ελέγχεται από τη μείωση του φράγματος δυναμικού στην ανάστροφα πολωμένη επαφή βάση-συλλέκτη παρέχοντας ένα ασθενές ρεύμα προς τη βάση. Η βάση είναι συνήθως κατασκευασμένη από ένα λεπτό στρώμα υλικού και έτσι η απομάκρυνση του φράγματος δυναμικού από ένα μικρό ρεύμα βάσης μπορεί να επιτρέψει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα συλλέκτη-εκπομπού να ρέει διαμέσου της βάσεως. Αυτό οδηγεί σε αυτό που είναι γνωστό ως το κέρδος του τρανζίστορ, β , όπου μια μικρή αλλαγή στο ρεύμα βάσης μπορεί να προκαλέσει μια αρκετά μεγαλύτερη αλλαγή στο ρεύμα συλλέκτη-εκπομπού. Η αναλογική αύξηση είναι ίση με ένα παράγοντα της τάξης του β .

Στο φωτοτρανζίστορ το ρεύμα βάσης αντικαθίσταται από το φωτορεύμα που δημιουργείται όταν προσπίπτει φως στην επαφή ηρη βάση-συλλέκτη. Για το λόγο αυτό, τα φωτοτρανζίστορ είναι κανονικά συσκευές μόνο δύο ακροδεκτών αφού σύνδεση με τη βάση δεν απαιτείται (Περιστασιακά ένας τρίτος ακροδέκτης παρέχεται για εφαρμογές που απαιτούν κάποια πόλωση που θα εφαρμοστεί στη βάση). Εξ ου και η φωτεινή ροή ελέγχει τώρα το ρεύμα συλλέκτη-εκπομπού και έτσι το ρεύμα εξόδου θα είναι $I_p\beta$. Το κέρδος του τρανζίστορ, β , είναι συνήθως της τάξης των 50 έως 300. Παρόλο που τα φωτοτρανζίστορ παρέχουν μεγάλα ρεύματα εξόδου έχουν αργό χρόνο απόκρισης και έχουν κακή γραμμικότητα σε σύγκριση με τις φωτοδιόδους.

Τα φωτοτρανζίστορ που η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην επίδραση πεδίου και όχι την πρότυπη επαφή τρανζίστορ που αναφέρεται παραπάνω παρουσιάζουν μια πολύ καλύτερη απόδοση, αφού έχουν καλύτερη γραμμικότητα και χρόνους απόκρισης για τα ίδια κέρδη φωτορεύματος.

7.7 Φωτοεκπέμπουσες συσκευές

Φωτοεκπέμπουσες συσκευές βασίζονται στην απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από ένα υλικό με σκοπό τον εντοπισμό προσπίπτοντος φωτός. Για το λόγο αυτό, η πλειοψηφία των συσκευών αυτών απαιτούν σωλήνες κενού μέσα στους οποίους λειτουργούν. Αυτό επιτρέπει στο εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο να χειραγωγηθεί και

επιτρέπει ένα μετρήσιμο σήμα να εξαχθεί. Ωστόσο **σωλήνες** κενού είναι ογκώδεις και εύθραυστες δομές και έτσι όσο οι φωτοαγώγιμες συσκευές στερεάς κατάστασης γίνονται **πιο περίπλοκες** η χρήση των φωτοαγώγιμων συσκευών **μειώνεται σταθερά**. Οι μόνες δύο συσκευές ακόμη σε γενική χρήση είναι ο φωτοπολλαπλασιαστής, που περιγράφεται εδώ, και η σωλήνα ενίσχυσης της εικόνας, που περιγράφεται στο κεφάλαιο 8.

7.7.1 Ο φωτοπολλαπλασιαστής

Τα δύο κύρια στοιχεία του σωλήνα του φωτοπολλαπλασιαστή είναι η **φωτοκάθοδος** και η **σειρά των δυνόδων**. Αυτά σε **μια κοινή διάταξη** φωτοπολλαπλασιαστή **απεικονίζονται** στο Σχήμα 7.23.

Φωτοκάθοδος (Photocathode)

Σωλήνας κενού (Vacuum tube)

Σειρά από δυνόδων (Dynode chain)

Άνοδος (Anode)

Σχήμα 7.23 Σχηματικό διάγραμμα **μιας** γραμμικής αλυσίδας 10 δυνόδων σε ένα σωλήνα φωτοπολλαπλασιαστή.

Φωτόνια με αρκετά υψηλή ενέργεια θα απελευθερώσουν ένα φωτοηλεκτρόνιο από την επιφάνεια της φωτοκαθόδου μέσα από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η $1^{\text{η}}$ **δύνοδος** της αλυσίδας διατηρείται σε θετικό δυναμικό σε σχέση με τη φωτοκάθοδο, ώστε το ηλεκτρόνιο που απελευθερώνεται από τη φωτοκάθοδο να επιταχύνεται αμέσως προς **αυτήν**. Οι δύνοδοι είναι **επικαλυμμένες** με εξωτερικά κράματα για να προωθήσουν την εκπομπή δευτερευόντων ηλεκτρονίων, έτσι ώστε όταν φθάσει το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο **στην πρώτη δύνοδο** η ενέργεια που έχει αποκτήσει παράγει μια σειρά από δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Αυτά έλκονται από **δεύτερη δύνοδο της σειράς η οποία βρίσκεται** σε υψηλότερο θετικό δυναμικό από **την πρώτη** και έτσι τα δευτερογενή ηλεκτρόνια επίσης επιταχύνονται προς την κατεύθυνση αυτή. Κατά την άφιξή τους κάθε ηλεκτρόνιο θα παράγει παρόμοια μια παρτίδα δευτερογενών ηλεκτρονίων. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται κατά μήκος της αλυσίδας έως ότου φτάσει την άνοδο όπου ένας παλμός εκατομμυρίων ηλεκτρονίων μπορεί να φτάσει από το μοναδικό φωτοηλεκτρόνιο που εκπέμφθηκε στην φωτοκάθοδο.

Η φωτοκάθοδος είναι συνήθως ένας ημιαγωγός αφού τα μέταλλα τείνουν να έχουν πολύ χαμηλές κβαντικές αποδόσεις (περίπου 0,1%) και **υψηλά έργα εξαγωγής**. Όπως σημειώθηκε **στην ενότητα** Τμήμα 7.2.3 οι ημιαγωγοί προσφέρουν τη δυνατότητα αρνητικής ηλεκτροσυγγένειας, όπως προαναφέρθηκε, και έτσι η φωτοκάθοδος έχει **χαμηλότερο έργο εξαγωγής**, ϕ , και είναι σε θέση να λειτουργεί σε μεγάλα μήκη κύματος. Το **πάνω** μήκος κύματος αποκοπής δίνεται από

$$\lambda = \frac{hc}{\phi} \quad (7.19)$$

Ερώτηση 7

Ένας ημιαγωγός φωτοκαθόδου έχει **έργο εξαγωγής ίσο με** 1.5eV. Ποιο είναι το μεγαλύτερο μήκος κύματος φωτός που μπορεί να ανιχνευθεί **αυτή την φωτοκάθοδο**.

Το πάχος της φωτοκαθόδου είναι κρίσιμο. Εάν είναι πολύ παχύ τότε τα φωτόνια δεν θα διεισδύσουν στην μακριά πλευρά της φωτοκαθόδου και έτσι δεν θα εκπεμφθούν ηλεκτρόνια. Εάν είναι πολύ λεπτό τότε τα φωτόνια, δεν θα απορροφηθούν, το οποίο έχει επίσης ως αποτέλεσμα μειωμένη εκπομπή ηλεκτρονίων. Τα δυναμικά **στις δυνόδους** παράγονται συνήθως **με** τη χρήση μιας **σειράς αντιστάσεων** όπως **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.24.

Σχήμα 7.24 **Σειρά αντιστάσεων** που απαιτείται για τη λειτουργία σωλήνα φωτοπολλαπλασιαστή.

Η βέλτιστη απόδοση του δευτερεύοντος ηλεκτρονίου συνήθως συμβαίνει για δυναμικό δυνόδων ίσο με 200-300V. Γι αυτό και η φωτοκάθοδος μπορεί να πολωθεί σε δυναμικό-3000V περίπου για να διατηρηθούν τα δυναμικά αυτά στη διαδρομή της αλυσίδας **των δυνόδων**. Το κέρδος, G , του φωτοπολλαπλασιαστή μπορεί να υπολογιστεί από

$$G = \delta^N \quad (7.20)$$

όπου N είναι ο αριθμός των **δυνόδων** και δ είναι η μέση εκπομπή δευτερευόντων ηλεκτρονίων ανά σύγκρουση. Όπως μπορεί να φανεί με μια καλή εκπομπή **δευτερευόντων** ηλεκτρονίων και ένα μεγάλο αριθμό **δυνόδων** στην αλυσίδα μπορεί

να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση. Συνήθως το δ λαμβάνει τιμές μεταξύ 4 και 6, αν και συνηθίζονται 10 με 14 **δυνόδοι** σε μια αλυσίδα. Η αντίσταση φορτίου R_L χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μια τάση από τον παλμό ρεύματος που φθάνει στην άνοδο. Όπως και πριν υψηλές τιμές έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μετρήσιμες τάσεις αλλά αργούς χρόνους απόκρισης.

ΛΥΜΕΝΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

Ένας φωτοπολλαπλασιαστής με 12 δυναμό φωτίζεται από 1000 φωτόνια φωτός ανά δευτερόλεπτο στα 650nm. Εάν ο φωτοπολλαπλασιαστής έχει μια φωτοκάθοδο S20 (10% κβαντική αποδοτικότητα στα 650nm) και ένα κέρδος δυναμού 4.5, ποιο είναι το σήμα ρεύματος εξόδου από την σωλήνα;

Λύση

1000 φωτόνια σε 10% κβαντική αποδοτικότητα δίνει:

$1000 \times 0.1 = 100$ φωτοηλεκτρόνια παράγονται ανά δευτερόλεπτο.

Το συνολικό κέρδος της αλυσίδας δυναμού είναι $G = \delta^N = 4.5^{12} = 68.953 \times 10^6$

Άρα τα συνολικά ηλεκτρόνια ανά δευτερόλεπτο στην έξοδο της σωλήνας

$= 100 \times 68.935 \times 10^6 = 68.935 \times 10^8$ και το συνολικό ρεύμα εξόδου από την σωλήνα του φωτοπολλαπλασιαστή είναι $68.935 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-19} = 0.1 \text{ nA}$.

Ο χρόνος απόκρισης του φωτοπολλαπλασιαστή μπορεί να είναι αρκετά αργός, λόγω της εξάπλωσης των ταχυτήτων των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από τη φωτοκάθοδο και την εξάπλωση των χρόνων διέλευσης **μέσα** από το σωλήνα, αφού ορισμένα ηλεκτρόνια **ακολουθούν** μεγαλύτερες διαδρομές. Αυτό συνήθως έχει ως αποτέλεσμα την διεύρυνση του παλμού. Μειώνοντας τον χρόνο διέλευσης μέσα από το σωλήνα βοηθάμε στη μείωση της διεύρυνσης αυτής που γίνεται πιο εύκολα με τη χρήση λιγότερων **δυνόδων** με μεγαλύτερο συντελεστή εκπομπής **δευτερευόντων** ηλεκτρονίων. Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι τώρα διαθέσιμοι για τον χρόνο διέλευσης του σωλήνα να βρίσκεται χαμηλά έως και 25 ns με αποτέλεσμα αύξηση του χρόνου ανόδου του παλμού κάτω **από 2 ns**.

Όπως και άλλοι φωτοανιχνευτές οι φωτοπολλαπλασιαστές παράγουν επίσης ένα σκοτεινό ρεύμα όταν δεν φωτίζονται. Αυτό το σκοτεινό ρεύμα παράγεται από θερμικές εκπομπές των ηλεκτρονίων **στην φωτοκάθοδο**. Αυτό το σκοτεινό ρεύμα είναι ποσοτικοποιημένο από την εξίσωση Ρίτσαρντσον-Dushman

$$I_T = aAT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right) \quad (7.21)$$

όπου A είναι η περιοχή της φωτοκαθόδου, T είναι η θερμοκρασία και ϕ είναι το **έργο εξαγωγής** του υλικού φωτοκαθόδου. Η σταθερά, a , εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται στην φωτοκάθοδο. Όπως φαίνεται, το σκοτεινό ρεύμα μπορεί να μειωθεί με **ελάττωση** της θερμοκρασίας του σωλήνα του φωτοπολλαπλασιαστή. Αυτό ακριβώς γίνεται όταν ανιχνεύονται πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού ή όταν γίνονται ευαίσθητες μετρήσεις.

Οι φωτοπολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται όλο και λιγότερο αφού άλλες φωτοαγωγίμες συσκευές **τους έχουν αντικαταστήσει**. Οι σωλήνες του φωτοπολλαπλασιαστή είναι ακόμη πιο **ευαίσθητοι** για ορισμένες εφαρμογές και **υπό κατάλληλη διάταξη** είναι σε θέση να καταμετράνε μεμονωμένα φωτόνια. Το γεγονός ότι είναι ογκώδεις μονάδες που απαιτούν πολλά kilovolt για να λειτουργήσουν έχει ως αποτέλεσμα πτώση στην δημοτικότητάς τους.

7.8 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε ότι:

- Οι βασικοί φυσικοί μηχανισμοί που σχετίζονται με την πλειοψηφία των φωτοανιχνευτικών συσκευών είναι η θερμική απορρόφηση, η φωτοαγωγιμότητα, και η φωτοεκπομπή
- Οι σημαντικοί παράγοντες που σχετίζονται με την φωτοανίχνευση είναι η κβαντική **απόδοση**, η ευαισθησία, το δυναμικό εύρος, ο χρόνος απόκρισης και η ισοδύναμη ισχύς θορύβου
- Οι βασικές αρχές λειτουργίας των συσκευών φωτοανίχνευσης όπως το θερμοζεύγος, το βολόμετρο, **οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές βασίζονται** στην θερμική απορρόφηση,.
- Οι βασικές αρχές λειτουργίας των **ημιαγωγικών** συσκευών φωτοανίχνευσης όπως η φωτοαντίσταση, η φωτοδίοδος με όλες τις παραλλαγές της και το φωτοτρανζίστορ βασίζονται στην φωτοαγωγιμότητα.
- Η λειτουργία του λιγότερου σημαντικού ανιχνευτή που βασίζεται στην φωτοεκπομπή, βασίζεται στην διάταξη του φωτοπολλαπλασιαστή.

7.9 Περαιτέρω Ανάγνωση

Αν και το παραπάνω κεφάλαιο καλύπτει τις βασικές αρχές ανίχνευσης και τις συσκευές που απαιτούνται για φωτοανίχνευση υπάρχει ένα ευρύτερο φάσμα πιο εξειδικευμένων συσκευών και βαθύτερων αναλύσεων, όπως ο θόρυβος, που είναι πέρα από τους στόχους αυτού του βιβλίου. Για περισσότερες πληροφορίες προτείνονται τα ακόλουθα βιβλία:

'Observational Astrophysics' R C Smith, Cambridge University Press, 1995

'Optoelectronic Devices', S Desmond Smith, Prentice Hall, 1995

'Optoelectronics: An introduction', J C A Chaimowicz, Butterworth-Heinemann, 1989

Optoelectronics: An introduction (Second Edition)', J Wilson & J F B Hawkes, Prentice Hall, 1989.

'Optics, Optoelectronics & Photonics', A Billings, Prentice Hall, 1993

'Solid State Electronic Devices', B G Streetman, Prentice Hall, 1990

7.10 Ερωτήσεις

- 7.1 Το μεγαλύτερο μήκος κύματος φωτός που θα παράγει φωτοηλεκτρόνια από την επιφάνεια ενός δείγματος ποτάσσιου είναι 564nm. Να υπολογίσετε την συνάρτηση εργασίας για το ποτάσσιο σε Joules και σε eV.
- 7.2 Ένας φωτοανιχνευτής φωτίζεται από οπτική ισχύ ίση με 10 mW στα 550nm και παράγει ένα φωτορεύμα ίσο με 1.867 mA. Να υπολογίσετε την κβαντική απόδοση και ευαισθησία του φωτοανιχνευτή.
- 7.3 Μια θερμική λωρίδα πυριτίου ενός ανιχνευτή με 10 mm μήκος, 2 mm πλάτος και 1 mm πάχος υπόκειται μια μεταβολή στην αντίσταση κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα από 2.24 MΩ σε 1.28 MΩ με την αύξηση της θερμοκρασίας. Δεδομένου ότι η ειδική αντίσταση πυριτίου στους 239 K είναι 640 Ω m και ο θερμοκρασιακός συντελεστής του πυριτίου είναι -0.075 K^{-1} να υπολογίσετε την αρχική και την τελική θερμοκρασία της λωρίδας του ανιχνευτή και άρα την μεταβολή της θερμοκρασίας.
- 7.4 Μια φωτοαντίσταση έχει κατασκευαστεί από ημιαγωγό που έχει ενεργειακό χάσμα ίσο με 1.5 eV. Όταν φωτίζεται ικανοποιητικά από φως με μήκος κύματος 400nm, 700nm και 1100nm, ποιο παράγει μεταβολή στην αντίσταση;

- 7.5 Χρησιμοποιώντας την καμπύλη κβαντικής **απόδοσης** της φασματικής απόκρισης για μια φωτοδίοδο **πυριτίου** που **απεικονίζεται** στο Σχήμα 7.4 να δείξετε ένα γράφημα τάσης εξόδου σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για την φωτοδίοδο που να βρίσκεται σε φωτοβολταϊκή λειτουργία στους 293 K δεδομένου ότι το ρεύμα διαρροής της φωτοδίοδου είναι 100 nA και είναι υπό μια συνεχή ροή φωτός με φωτοβολία 10 mW.
- 7.6 Μια φωτοδίοδος παράγει φωτορεύμα 3.36 mA όταν φωτίζεται από ροή φωτός 10 mW στα 650nm όταν είναι στην φωτοαγώγιμη λειτουργία. Να ορίσετε την κβαντική αποδοτικότητα της φωτοδίοδου σε αυτό το μήκος κύματος.
- 7.7 Να ορίσετε τον ρυθμό της ενέργειας εξόδου που απαιτείται από ένα laser Αργού που εκπέμπει φως στα 488nm και ένα laser Ηλίου – Νέου που εκπέμπει φως στα 633nm εάν πρόκειται να παράγουν το ίδιο ρεύμα εξόδου από μια φωτοδίοδο που είναι σε λειτουργία φωτοαγωγιμότητας. Υποθέστε ότι η κβαντική **απόδοση** της δίοδου είναι ίση και στα δυο μήκη κύματος.
- 7.8 Ένας φωτοπολλαπλασιαστής με 14 δυναμό παράγει ρεύμα εξόδου 0.4μΑ όταν φωτίζεται από ροή φωτός 2500 φωτόνια/ δευτερόλεπτο. Υποθέτοντας ότι έχει κβαντική αποδοτικότητα 10% να ορίστε την μέση εκπομπή δευτερευόντων ηλεκτρονίων από τα δυναμό.

Κεφάλαιο 8: Συστήματα Απεικόνισης

8.1 Εισαγωγή

Η οπτική απεικόνιση είναι μια διαδικασία που η πλειοψηφία των ανθρώπων βιώνει από την στιγμή που ανοίξουν τα μάτια τους. Τα μάτια θεωρούνται το πιο σημαντικό αισθητήριο όργανο στο σώμα και ένα σημαντικό μέρος του εγκεφάλου μας είναι αφιερωμένο στην καταγραφή και επεξεργασία των εικόνων. Γι' αυτό δεν αποτελεί έκπληξη το ότι σημαντική προσπάθεια έχει καταβληθεί για την ανάπτυξη οπτο-ηλεκτρονικών συστημάτων που μπορούν να καταγράψουν, να αποθηκεύσουν, να επεξεργαστούν και να απεικονίσουν οπτικές εικόνες. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να επικεντρωθεί στις διάφορες διαθέσιμες συσκευές καταγραφής οπτικών εικόνων. Μια περιγραφή της χημικής φωτογραφικής διαδικασίας έχει συμπεριληφθεί, αν και μια τέτοια τεχνική δεν έχει θέση σε ένα βιβλίο οπτοηλεκτρονικής, γιατί ήταν η κύρια μέθοδος καταγραφής εικόνας για πάνω από έναν αιώνα και επίσης χρησιμεύει ως μέτρο σύγκρισης για να κριθεί η απόδοση του ηλεκτρονικού συστήματος απεικόνισης. Η λειτουργία των διαφόρων μορφών ηλεκτρονικής απεικόνισης περιγράφεται στη συνέχεια ξεκινώντας από την εποχή των σωλήνων απεικόνισης έως τις σύγχρονες συσκευές απεικόνισης στερεάς κατάστασης CCD.

8.2 Χωρική ανάλυση

Δυο σημαντικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τα συστήματα απεικόνισης είναι: το εύρος ζώνης και η χωρική ανάλυση. Το εύρος ζώνης είναι μια σημαντική παράμετρος για όλους τους οπτικούς ανιχνευτές και έχει μελετηθεί στο Κεφάλαιο 7. Η χωρική ανάλυση είναι ένα χαρακτηριστικό μοναδικό στα συστήματα απεικόνισης. Με απλά λόγια, είναι ένα μέτρο του βαθμού της λεπτομέρειας που το σύστημα απεικόνισης μπορεί να αποδώσει. Όλα τα συστήματα απεικόνισης αποτελούν κατά κάποιο τρόπο μια συλλογή μεμονωμένων στοιχείων τοποθετημένων σε μια συστοιχία που ανιχνεύουν φως. Το κάθε στοιχείο καταγράφει την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από ένα μικρό μέρος του αντικειμένου που παρατηρείται. Όσο περισσότερους μεμονωμένους ανιχνευτές έχετε να παρακολουθούν μια δεδομένη περιοχή τόσο μεγαλύτερη λεπτομέρεια θα παρατηρήσετε. Αυτό αποδεικνύεται εύκολα με ένα απλό τεστ με το ανθρώπινο μάτι: Εστιάστε σε μια λέξη στη μέση της

σελίδας και θα διαπιστώσετε ότι δεν μπορείτε να διακρίνετε καθαρά γράμματα περισσότερο από λίγα εκατοστά από κάθε πλευρά. Αυτό οφείλεται στο ότι υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση των επιμέρους στοιχείων του ανιχνευτή στο κέντρο της όρασης μας, μια περιοχή που ονομάζεται βοθρίο στον αμφιβληστροειδή. Πέρα από αυτή την περιοχή η συγκέντρωση των ανιχνευτών μειώνεται με μεγάλο ρυθμό. Γι αυτό και η χωρική ανάλυση του ματιού γίνεται πολύ ασθενέστερη όσον αφορά την περιφερειακή όραση.

Ας το ποσοτικοποιήσουμε αυτό. Η συνήθης μέθοδος καθορισμού της χωρικής ανάλυσης επιτυγχάνεται με την λήψη της εικόνας ενός συστήματος ίσα απεχουσών γραμμών. Αυτές οι γραμμές θα σχηματίζουν μια εικόνα στο σύστημα απεικόνισης του ανιχνευτή που αντιστοιχεί σε έναν αριθμό γραμμών ανά χιλιοστό στην επιφάνεια του. Όταν αυτές οι γραμμές έρθουν πιο κοντά από ένα σημείο οι επιμέρους γραμμές δεν μπορούν πλέον να διακριθούν και η χωρική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή έχει καθοριστεί. Το Σχήμα 8.1 απεικονίζει μια συστοιχία 10 στοιχείων ενός γραμμικού φωτοανιχνευτή που έχει 1 χιλιοστό μήκος. Μια εικόνα 5 γραμμών / mm αναλύεται αφού κάθε γραμμή καταλαμβάνει περισσότερα από ένα εικονοστοιχεία, ωστόσο μία εικόνα 20 γραμμών / mm δεν αναλύεται αφού δύο γραμμές καταλαμβάνουν ένα εικονοστοιχείο και συνεπώς δεν μπορεί να διακριθούν ξεχωριστά. Οι γραμμές μπορούν να αναλυθούν μόνο όταν μια γραμμή καταλαμβάνει το πλάτος του ενός εικονοστοιχείου. Ένα εύκολο παράδειγμα αυτού του γεγονότος μπορεί να βρεθεί σε μια δοκιμαστική κάρτα τηλεόρασης όπου ελέγχεται η χωρική διακριτική ικανότητα της κάμερας και του δέκτη τηλεόρασης. Ο μέγιστος αριθμός των γραμμών / mm, που ο ανιχνευτής μπορεί να παρατηρήσει ονομάζεται ισχύς ανάλυσης.

Συστοιχία Φώτο – ανιχνευτή (Photodetector array)

Εικόνα (5 γραμμές ανά mm) (Image 5 lines per mm)

Αποκτούμενη εικόνα (Resolved Image)

Σχήμα 8.1 Χρήση μιας εικόνας γραμμών για τον καθορισμό της χωρικής ανάλυσης μιας συστοιχίας φωτοανιχνευτή.

Ερώτηση 1

Μια συστοιχία φωτοδιόδου αποτελείται από εικονοστοιχεία πλάτους 100 μm . Ποια είναι η ισχύς ανάλυσης της συστοιχίας.

ΕΡΕΥΝΑ

Εάν έχετε την ευκαιρία να παρατηρήσετε μια κάρτα δοκιμής δείτε πόσο καλά το μάτι σας μπορεί να αναλύσει τις γραμμές σε σχέση με αυτό που βλέπετε στην τηλεόραση. Μπορεί να εκπλαγείτε με το πόσο κακή είναι η ανάλυση ενός συστήματος τηλεόρασης.

Για να καθοριστεί το ελάχιστο μέγεθος αντικειμένου που μπορεί να διακριθεί με ένα σύστημα απεικόνισης η ισχύς ανάλυσης μετατρέπεται συχνά σε μια γωνιακή ποσότητα που λαμβάνει υπ όψιν το οπτικό πεδίο του συστήματος του φακού. Εξετάστε την διάταξη στο σχήμα 8.2.

Συστοιχία φωτοανιχνευτή (Photodetector array)

Αντικείμενα που μπορούν να διακριθούν (Resolved objects)

Αντικείμενα που δεν μπορούν να διακριθούν (Unresolved objects)

Σχήμα 8.2 Γωνιακή ισχύς ανάλυσης μιας συστοιχίας ενός φωτοανιχνευτή.

Μια συστοιχία φωτοανιχνευτή μήκους 5 χιλιοστών έχει χωρική διακριτική ικανότητα 20 γραμμών / mm, ή 100 γραμμές για όλο τον ανιχνευτή. Μια εικόνα, που καταλαμβάνει όλη την συστοιχία, σχηματίζεται στους ανιχνευτές μέσω ενός φωτογραφικού φακού που έχει ένα οπτικό πεδίο της τάξης των 50° . Έτσι, κάθε στοιχείο της συστοιχίας του φωτοανιχνευτή καταγράφει το φως που αντιστοιχεί σε μια γωνία 0.5° του οπτικού πεδίου. Δεδομένου ότι το προσπίπτον φως σε ένα μόνο φωτοανιχνευτή είναι απλώς ένα μέτρο της συνολικής έντασης του χώρου παρατήρησης που αντιστοιχεί σε αυτήν την γωνία των 0.5° , οποιαδήποτε δύο αντικείμενα στην σκηνή που απέχουν γωνιακή απόσταση μικρότερη από 0.5° δεν θα αναλυθούν ως μεμονωμένα αντικείμενα. Ωστόσο, τα αντικείμενα στην σκηνή που απέχουν γωνιακή απόσταση μεγαλύτερη από 0.5° θα απεικονιστούν από διαφορετικά στοιχεία του φωτοανιχνευτή και έτσι θα αποδοθούν ως δύο διαφορετικά αντικείμενα. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 8.2 μη διακεκριμένα αντικείμενα σε απόσταση θα αναλυθούν εάν πλησιάσουν δεδομένου ότι ο κατάλληλος γωνιακός διαχωρισμός τους θα αυξηθεί. Έτσι, η γωνιακή ισχύς ανάλυσης του συνδυασμού της φωτοδιόδου /

φακών δίνεται από την γωνία που τέμνεται από το χώρο παρατήρησης που καταλαμβάνει ένα πλήρες στοιχείο της συστοιχίας.

Ερώτηση 2

Μια συστοιχία μήκους 10 mm από φωτοανιχνευτές που ο κάθε ένας έχει 50 μm πλάτος καταλαμβάνεται πλήρως από την εικόνα ενός τηλεφακού 18° . Ποια είναι η γωνιακή ισχύς ανάλυσης του συστήματος;

8.3 Φωτογραφία

Προς το παρόν το πιο γνωστό οπτικό σύστημα απεικόνισης είναι ίσως το φωτογραφικό γαλάκτωμα, αν και αυτό μπορεί σύντομα να αντικατασταθεί από κάμερες στερεάς κατάστασης με τον ίδιο τρόπο που οι βιντεοκάμερες αντικατέστησαν την κινηματογραφική κάμερα. Το φωτογραφικό γαλάκτωμα συνήθως αποτελείται από μικρού μεγέθους κόκκους κρυστάλλων αλογονιδίων αργύρου (συνήθως βρωμιούχου αργύρου) ομοιόμορφα κατανεμημένων σε ένα διαφανές μέσο όπως η ζελατίνη. Το γαλάκτωμα αυτό τοποθετείται συνήθως σε γυαλί, για να δημιουργηθεί μια φωτογραφική πλάκα ή σε πλαστικό για να δημιουργηθεί το φωτογραφικό φιλμ.

Ο σχηματισμός μιας φωτογραφικής εικόνας είναι μια περίπλοκη διαδικασία, οι λεπτομέρειες της οποίας δεν είναι πλήρως κατανοητές. Μια ευρεία επισκόπηση της διαδικασίας παρουσιάζεται εδώ.

Όταν ένα φωτόνιο προσπέσει στην επιφάνεια ενός κόκκου βρωμιούχου αργύρου η ενέργεια του απορροφάται από το κρυσταλλικό πλέγμα και ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να διεγερθεί στη ζώνη αγωγιμότητας του κρυστάλλου. Αυτό το ηλεκτρόνιο είναι τώρα ελεύθερο να κινηθεί μέσα στην δομή του κρυστάλλου. Ο κρύσταλλος θα περιλαμβάνει επίσης έναν αριθμό από θετικά ιόντα αργύρου που έχουν μετατοπιστεί στο πλέγμα λόγω θερμικής διέγερσης και τα οποία επίσης κινούνται μέσα σε αυτόν. Εάν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και ένα ιόν αργύρου συναντηθούν ένα άτομο αργύρου θα σχηματιστεί. Ωστόσο, το ιόν αργύρου και το ηλεκτρόνιο συνήθως διαχωρίζονται θερμικά και πάλι σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο. Εάν δύο ή περισσότερα άτομα αργύρου δημιουργηθούν από κοινού μπορούν να συμμετάσχουν στο σχηματισμό μιας ομάδος που δεν γίνεται να διαχωριστεί θερμικά. Αυτό θα έπρεπε κανονικά να είναι ένα απίθανο γεγονός. Ωστόσο, φαίνεται ότι οι ατέλειες στο κρυσταλλικό πλέγμα του κόκκου μπορούν στην

πραγματικότητα να λειτουργήσουν ως παγίδες για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιτρέποντας ομάδες ατόμων αργύρου να σχηματιστούν εκεί πολύ πιο εύκολα. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 8.3. Οι ομάδες των ατόμων αργύρου που έχουν σχηματιστεί στους κόκκους του κρυστάλλου αναφέρονται ως λανθάνουσα εικόνα.

Φωτόνια (Photons)

Κόκκοι (Grains)

Σταθερό σύμπλεγμα ατόμων αργύρου (Stable silver cluster)

Σχήμα 8.3 Σχηματισμός μιας ομάδας ατόμων αργύρου σε έναν κόκκο φωτογραφικού γαλακτώματος.

Για την μετατροπή της λανθάνουσας εικόνας σε μια ορατή απαιτείται το στάδιο επεξεργασίας της φωτογραφικής διαδικασίας. Ένας χημικός παράγοντας μείωσης προστίθεται στο γαλάκτωμα που ελαττώνει τον βρωμιούχο άργυρο σε άργυρο. Όλοι οι κόκκοι του κρυστάλλου σταδιακά μειώνονται σε άργυρο καθώς η διαδικασία προχωράει. Ωστόσο οι κόκκοι που περιέχουν μικρές ομάδες ατόμων αργύρου μειώνονται με ταχύτερο ρυθμό λόγω των ατόμων αργύρου που λειτουργεί ως καταλύτης. Προσεκτικός χρονοσμός της χημικής διαδικασίας μας επιτρέπει να πάρουμε το film όταν έχουν μειωθεί πλήρως οι κόκκοι που είναι εκτεθειμένοι αλλά οι κόκκοι που δεν είναι εκτεθειμένοι έχουν μόνο εν μέρει μειωθεί. Η διαδικασία της ανάπτυξης είναι στην πραγματικότητα ένας χημικός ενισχυτής που μπορεί να παράγει κόκκους περίπου 10^{10} ή περισσότερα άτομα αργύρου από μια ομάδα με μερικά μόνο άτομα. Η κατανομή και η πυκνότητα αυτών των αδιαφανών κόκκων αργύρου στο γαλάκτωμα σχηματίζει την αρνητική εικόνα που όλοι γνωρίζουμε.

Η εκπομπή από το επεξεργασμένο γαλάκτωμα σχετίζεται με την πυκνότητα, D , των κόκκων αργύρου βάση της:

$$D = -\log_{10} T_i \quad (8.1)$$

όπου $T_i = I_o/I_i$, είναι ο ρυθμός της έντασης που διαπερνά το film προς την προσπίπτουσα ένταση όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.4.

Γυάλινο πλακίδιο (Glass plate)

Προσπίπτουσα ένταση (incident intensity)

Γαλάκτωμα (Emulsion)

Μεταδιδόμενη ένταση (Transmitted Intensity)

Σχήμα 8.4 Έκπομπή φωτός μέσα από ένα επεξεργασμένο γαλάκτωμα.

Όταν ένα φιλμ εκτίθεται στο φως η έκθεση μιας δεδομένης περιοχής του γαλακτώματος, E , ισούται με το γινόμενο της έντασης του φωτός που προσπίπτει σε αυτήν την περιοχή επί το χρόνο έκθεσης, δηλαδή. $E = It$. Αυτή είναι η οπτική ενέργεια που προσπίπτει σε μια συγκεκριμένη περιοχή του φιλμ κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας της περιοχής και της έκθεσης, E , δίνεται από την καμπύλη Hurter-Driffield όπως απεικονίζεται στο σχήμα 8.5

Κάτω του αναμενόμενου έκθεσης (Underexposed)

Σωστό επίπεδο έκθεσης (Correct exposure)

Πάνω από το όριο επίπεδο έκθεσης (Overexposed)

Κλίση γραμμικής περιοχής (linear portion slope)

Φόντο (background fog)

Σχήμα 8.5 Η καμπύλη Hurter-Driffield για την φωτογραφική έκθεση.

Στην γραμμική περιοχή της καμπύλης η σχέση μεταξύ της πυκνότητας της περιοχής και της έκθεσης είναι:

$$D = s \log_{10} E - D_0 \quad (8.2)$$

όπου s είναι η κλίση της γραμμικής περιοχής της καμπύλης και D_0 είναι το σημείο τομής της γραμμικής περιοχής με τον άξονα D . Αφού $D = -\log_{10} T_i$ η ένταση εκπομπής σχετίζεται με την έκθεση με:

$$T_i = 10^{D_0} E^{-s} \quad (8.3)$$

Γι αυτό και η ένταση εκπομπής είναι μια μη γραμμική συνάρτηση της έκθεσης, η οποία για σκοπούς επιστημονικής μέτρησης αποτελεί ανεπιθύμητη σχέση.

Τα φωτογραφικά γαλακτώματα έχουν επίσης το πρόσθετο μειονέκτημα ότι έχουν πολύ χαμηλή απόδοση. Ένα τυπικό γαλακτώμα θα έχει απόδοση μετατροπής 0.1% (1000 φωτόνια που προσπίπτουν θα παράγουν έναν κόκκο αργύρου). Ακόμη και ακριβά υπερ-ευαίσθητα γαλακτώματα για αστρονομική χρήση μόνο έχουν αποδοτικότητα 4%.

Η χωρική ανάλυση του γαλακτώματος περιορίζεται από το μέγεθος και την απόσταση μεταξύ των κόκκων. Πιο ευαίσθητα γαλακτώματα στο φως (γρήγορο φιλμ) έχουν μεγαλύτερους κόκκους και άρα λιγότερα στοιχεία που ανιχνεύουν φως σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μειώνοντας την χωρική ανάλυση του φιλμ και δημιουργώντας την κοκκώδη εμφάνιση σε μερικές φωτογραφίες. Ένα γρήγορο φιλμ κακής ποιότητας μπορεί να έχει χωρική ανάλυση τόσο χαμηλά όσο 20 γραμμές /mm. Ένα φιλμ χαμηλότερης ταχύτητας καλής ποιότητας θα μπορούσε να έχει ανάλυση τόσο υψηλή όσο 2000 γραμμές /mm.

8.4 Σωλήνες Απεικόνισης

Οι σωλήνες απεικόνισης έχουν αντικατασταθεί σχεδόν εξ ολοκλήρου στα συστήματα απεικόνισης από συστοιχίες ανιχνευτών στερεάς κατάστασης CCD. Ωστόσο, οι σωλήνες ήταν οι μόνες ηλεκτρονικές συσκευές απεικόνισης διαθέσιμες για αρκετές δεκαετίες και εξακολουθούν να έχουν ορισμένες ειδικές χρήσεις.

Οι σωλήνες απεικόνισης είναι στην πραγματικότητα ανάλογες συσκευές με τον καθοδικό σωλήνα (CRT) με τον οποίο οι περισσότεροι άνθρωποι είναι εξοικειωμένοι. Μια εικόνα κατασκευάζεται σε ένα σωλήνα CRT σαρώνοντας μια δέσμη ηλεκτρονίων σε μια οθόνη φωσφόρου γραμμή ανά γραμμή με ένα τρόπο γνωστό ως σάρωση raster. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 8.6.

Κανόνι ηλεκτρονίων (Electron gun)

Πλακίδια εκτροπής (Deflector plates)

Οθόνη Φωσφόρου (Phosphor screen)

Γραμμή σάρωσης (Scan line)

Γρήγορος δρόμος επιστροφής (Fast flyback)

Σχήμα 8.6 Σάρωση raster για τη δημιουργία εικόνας σε μια CRT.

Η ένταση της δέσμης ηλεκτρονίων καθορίζει την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από το φώσφορο και έτσι η γραμμική χρονική ακολουθία των

ηλεκτρονικών σημάτων που καθορίζει την ένταση του πυροβόλου ηλεκτρονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει μια δισδιάστατη εικόνα με την προϋπόθεση η αρχή κάθε γραμμής να είναι συγχρονισμένη.

Στους σωλήνες απεικόνισης η διαδικασία αυτή είναι αντίστροφη. Μια δισδιάστατη εικόνα εστιάζεται σε ένα τετράγωνο του υλικού στόχου. Η ένταση της εικόνας σε κάθε σημείο του υλικού στόχου «διαβάζεται» σαρώνοντας μια δέσμη ηλεκτρονίων πάνω στο υλικό στόχο με σάρωση raster. Γι αυτό και στην περίπτωση αυτή η εικόνα μετατρέπεται σε μια γραμμική χρονική ακολουθία ηλεκτρονικών σημάτων που μπορεί να αποθηκευτούν ή να μεταδοθούν εύκολα από τα μέσα επικοινωνίας.

Το 1930 έγινε η παραγωγή της πρώτης ηλεκτρονικής συσκευής σωλήνα σάρωσης γνωστής ως εικονοσκόπιο. Αυτό χρησιμοποιούσε μια πλάκα ως εικόνα στόχο που αποτελείτο από μια σειρά μικρών εξογκωμάτων αργύρου επικαλυμμένων με καίσιο και οξείδιο του αργύρου. Όταν ένα εξόγκωμα εκτίθεται στο φως αποκτά ένα φορτίο ανάλογο με την ένταση του φωτός. Όταν η δέσμη ηλεκτρονίων περνάει πάνω από κάθε εξόγκωμα αποφορτίζεται. Αυτό το ρεύμα εκφόρτισης ανιχνεύεται και μεταδίδεται ως σήμα από το οποίο η οπτική εικόνα μπορεί να ανασυσταθεί.

Ένα μεταγενέστερο είδος σωλήνα, που είναι γνωστός ως σωλήνας Vidicon, χρησιμοποιεί ένα φωτοαγώγιμο υλικό στόχο για να μετατρέψει την οπτική εικόνα σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Αυτός ο σωλήνας ήταν πολύ πιο συμπαγής και είχε μεγαλύτερη ευαισθησία από ότι το εικονοσκόπιο. Ένας τυπικός σωλήνας vidicon απεικονίζεται στο σχήμα 8.7

Φως από στόχο (Light image)

Φώτο-αγώγιμο υλικό (photoconductive target)

Πλακίδια απόκλισης (Deflection coils and plates)

Σωλήνας κενού (vacuum tube)

Δέσμη ηλεκτρονίων σάρωσης (Scanning electron beam)

Κανόνι ηλεκτρονίων (Electron gun)

Έξοδος σήματος (Signal output)

Σχήμα 8.7 Ένας σωλήνας απεικόνισης vidicon.

Το υλικό στόχος είναι κατασκευασμένο από ένα λεπτό στρώμα ημιαγώγιμου υλικού (συνήθως τρισουλφίδιο αντιμονίου) το οποίο είναι επικαλυμμένο στη μία

πλευρά με ένα λεπτό διαφανές στρώμα αγωγίμου οξειδίου του κασσίτερου. Αυτή η πλευρά είναι τοποθετημένη στο σωλήνα για να λαμβάνει το φως από την εστιασμένη εικόνα. Στην πλευρά αυτή εφαρμόζεται επίσης ένα δυναμικό περίπου +50 V σε σχέση με το κανόνι ηλεκτρονίων του σωλήνα. Η άλλη πλευρά του υλικού του στόχου είναι στραμμένη προς το κανόνι ηλεκτρονίων και σαρώνεται από την δέσμη ηλεκτρονίων η οποία εκτρέπεται από μια σειρά από ηλεκτρικά πλακίδια και μαγνητικά πηνία. Το υλικό του ημιαγωγίμου στόχου λειτουργεί ως πυκνωτής και καθώς η δέσμη ηλεκτρονίων περνά πάνω από ένα τμήμα του στόχου αυτό φορτίζεται σε ένα δυναμικό 0V δημιουργώντας διαφορά δυναμικού περίπου 50V σε όλο το πάχος του στόχου σε εκείνο το σημείο. Αν αυτό το τμήμα του υλικού του στόχου ακτινοβοληθεί τότε είναι πιο αγωγίμο ανάλογα με την ένταση του φωτισμού. Αυτή η αύξηση της αγωγιμότητας θα προκαλέσει το φορτίο να ρέει σε όλο το υλικό προς τη μπροστινή θετική όψη. Κατά συνέπεια όταν η δέσμη ηλεκτρονίων περάσει πάνω από την περιοχή του υλικού του στόχου πάλι το ποσό του φορτίου που θα πρέπει να μεταδώσει στο τμήμα της πλάκας για να δημιουργήσει πάλι δυναμικό ίσο με 0V θα είναι ίσο με το φορτίο που χάθηκε λόγω αγωγιμότητας η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη με τον φωτισμό. Μετρώντας αυτή τη μεταφορά φορτίου με τη μορφή ρεύματος ως συνάρτηση του χρόνου επιτρέπει στην εικόνα να καταγραφεί ηλεκτρονικά. Ένα τυπικό σήμα εξόδου από έναν τέτοιο σωλήνα απεικόνισης απεικονίζεται στο Σχήμα 8.8.

Αυξανόμενη ένταση (increasing intensity) Απεικόνιση (Image scene)

Γραμμή ρεύματος σάρωσης (current scan line)

Αύξηση ρεύματος (increasing current)

Χρόνος (Time)

Σήμα εξόδου (output signal)

Σχήμα 8.8 Μια γραμμή σάρωσης εξόδου από μια λυχνία απεικόνισης.

Οι συνηθισμένοι σωλήνες vidicon συνήθως χαρακτηρίζονται από υψηλά σκοτεινά ρεύματα, λόγω της πεπερασμένης αγωγιμότητας της πλάκας του στόχου των ημιαγωγών ακόμη και όταν δεν υπάρχει φωτισμός, και έτσι είναι πολύ θορυβώδης σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Μια παραλλαγή του σωλήνα απεικόνισης vidicon η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερο ρεύμα σκότους είναι ο σωλήνας Plumbicon. Χρησιμοποιώντας ένα

στρώμα οξειδίου του μολύβδου σχηματίζεται μια δομή PIN (βλ. την PIN φωτοδίοδο στο κεφάλαιο 7) με την επίστρωση οξειδίου του κασσιτέρου. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.9 το οξείδιο του κασσιτέρου αποτελεί το στρώμα τύπου n ενώ το πλεόνασμα του οξυγόνου προς την αντίθετη όψη του οξειδίου του μολύβδου είναι το στρώμα τύπου p. Αυτό δημιουργεί μια εσωτερική περιοχή απογύμνωσης μεταξύ των δύο.

Φως από την εικόνα (Light from the image)

Διαφανές στρώμα οξειδίου του κασσιτέρου (n τύπου) – (Transparent tin oxide layer (n-type))

Στρώμα οξειδίου του μολύβδου (i – τύπου)

Υψηλής συγκέντρωσης σε οξυγόνο επιφάνεια οξειδίου του κασσιτέρου (p – τύπου) – Oxygen – rich lead oxide surface (p-type)

Σχήμα 8.9 Μολυβδούχα δομή πλάκας απεικόνισης.

Σε αυτή την περίπτωση όταν η πλάκα φορτίζεται από τη δέσμη ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε ανάστροφα πολωμένη δίοδο και το ρεύμα διαρροής σε όλη την πλάκα είναι ελάχιστο. Μόνο όταν φορείς φορτίου δημιουργούνται από την παρουσία κάποιας μορφής φωτισμού θα ρέει φορτίο σε όλη την πλάκα. Οι λειτουργίες φόρτισης και ανάγνωσης εκτελούνται κατά τον ίδιο τρόπο όπως το σωλήνα vidicon.

Μια περαιτέρω εξέλιξη του σωλήνα απεικόνισης ήταν η χρήση μιας πλάκας στόχου που αποτελούταν από μια διακριτή συστοιχία με δομή διόδων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.10.

Φως από την εικόνα (Light from image)

Στρώμα φορέων διάχυσης n^+ (Diffused n^+ layer)

Στρώμα n – τύπου (n – type substrate)

Περιοχές διάχυσης τύπου p^+ (Diffused p^+ regions)

Στρώμα οξειδίου του κασσιτέρου (Tin oxide layer)

Σχήμα 8.10 Διακριτή συστοιχία διόδων δομής πλάκας απεικόνισης.

Οι προηγούμενοι σωλήνες απεικόνισης ήταν επιρρεπείς σε ένα φαινόμενο γνωστό ως ‘ανθοφορία’ όταν εκτίθονταν σε υψηλά επίπεδα φωτισμού. Αυτό συνέβη όταν ένας πολύ έντονος φωτισμός σε ένα μέρος του πλακιδίου θα δημιουργούσε τόσους πολλούς φορείς φορτίου με την μορφή ζευγών ηλεκτρονίων- οπών ώστε ένα

μεγάλο μέρος του πλακιδίου να εκφορτιστεί. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή μιας μεγάλης άσπρης κηλίδας ή ‘άνθους’ στην εικόνα. Με την τοποθέτηση των δομών των διόδων ως μικρά μεμονωμένα στοιχεία και όχι μιας και μόνο μεγάλης δομής επιτεύχθηκε η μείωση του φαινομένου αυτού αφού φορείς φορτίων που δημιουργούνται από έντονο φωτισμό σε μια δίοδο δεν επηρεάζουν μια γειτονική δίοδο.

EPEYNA

Εάν έχετε την ευκαιρία παρακολουθήστε ένα πολύ παλιό τηλεοπτικό πρόγραμμα και προσέξτε την επίδραση που έχουν τα φωτεινά φώτα στην κάμερα ειδικά σε σκοτεινές σκηνές. Αυτό είναι το φαινόμενο του ‘ανθίσματος’ που συμβαίνει στις λυχνίες vidicon που χρησιμοποιούταν εκείνη την εποχή.

Για συνθήκες λειτουργίας χαμηλού φωτισμού (σε τομείς όπως η αστρονομία) χρησιμοποιούταν συχνότερα δευτερογενείς σωλήνες αγωγιμότητας ηλεκτρονίων. Μια τυπική διάταξη για αυτό το είδος σωλήνας απεικονίζεται στο Σχήμα 8.11.

Φωτεινή εικόνα (light image) Φωτοκάθοδος (Photocathode) KCI στόχος (KCI target)
Πηνία και πλακίδια απόκλισης (Deflection coils and plates) Σωλήνας κενού (Vacuum tube)
Δέσμη ηλεκτρονίων σάρωσης (Scanning electron beam) Κανόνι ηλεκτρονίων (electron gun)
Έξοδος ρεύματος (Current output)

Σχήμα 8.11 Ένας σωλήνας απεικόνισης δευτερευόντων ηλεκτρονίων.

Το φως εστιάζεται σε μια φωτοκάθοδο και όχι απευθείας πάνω στο πλακίδιο εικόνας. Ένα υψηλό δυναμικό μεταξύ της φωτοκαθόδου και του πλακιδίου εικόνας χρησιμοποιείται για την εστίαση και την επιτάχυνση των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται από την φωτοκάθοδο πάνω στο πλακίδιο εικόνας. Σε αυτή την διάταξη του σωλήνα το πλακίδιο εικόνας είναι κατασκευασμένο από φωτοαγώγιμο υλικό (συνήθως χλωριούχου καλίου, KCl). Τα υψηλής ενέργειας φωτοηλεκτρόνια που προσπίπτουν στο πλακίδιο θα δημιουργήσουν ένα μεγάλο αριθμό δευτερογενών ηλεκτρονίων που παράγουν τελικά ένα μεγάλο αριθμό ζευγών ηλεκτρονίων-οπών (τυπικά 200-500). Αυτό αυξάνει την αγωγιμότητα του υλικού του πλακιδίου της

εικόνας και αποφορτίζει το δυναμικό κατά μήκος του. Για άλλη μια φορά η εικόνα διαβάζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στους άλλους σωλήνες απεικόνισης. Το προφανές πλεονέκτημα αυτού του τύπου σωλήνα είναι η εσωτερική ενίσχυση της εικόνας. Ένα μόνο φωτόνιο προκαλεί την εκπομπή ενός φωτοηλεκτρονίου το οποίο μπορεί να παράγει αρκετές εκατοντάδες ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών στο πλακίδιο της εικόνας, ενισχύοντας επιτυχώς το σήμα φωτός.

Παρά το ότι πρόκειται για παλιά τεχνολογία οι σωλήνες απεικόνισης εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στην πυρηνική βιομηχανία δεδομένου ότι είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές σε ακτινοβολία και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε ένα αντιδραστήρα όπου μια σύγχρονη CCD κάμερα απλώς θα σταματούσε να λειτουργεί και σύντομα θα καταστρεφόταν.

8.5 Συστοιχίες CCD

Ο σωλήνας απεικόνισης έχει σχεδόν εξ ολοκλήρου αντικατασταθεί από την συστοιχία CCD ως την προτιμώτερη μέθοδο ηλεκτρονικής απεικόνισης. Οι τελευταίες τεχνολογίες συστοιχίες CCD είναι ανώτερες από τον σωλήνα απεικόνισης από κάθε άποψη.

Αυτές οι συσκευές στερεάς κατάστασης είναι απλώς ένας μεγάλος αριθμός από στοιχεία φωτοανιχνευτών τοποθετημένα σε μια συστοιχία που μπορεί να είναι γραμμική, τετραγωνική ή ακόμη και κυκλική. Τέτοιες συστοιχίες μπορούν να κατασκευαστούν με διακριτές συσκευές, αλλά οι εκατοντάδες συνδέσεις που απαιτούνται κάνουν μια τέτοια συστοιχία μη πρακτική. Ωστόσο τα πολλά στοιχεία σε μια συστοιχία στερεάς κατάστασης ενός φωτοανιχνευτή πρέπει να αλληλοσυνδεθούν με κάποιο τρόπο για να έχουμε ως έξοδο το φορτίο από κάθε στοιχείο του φωτοανιχνευτή σε μια μορφή που μπορεί να μετατραπεί σε εικόνα. Εδώ αξιοποιούνται οι συστοιχίες CCD. Η λέξη CCD αποτελεί ακρωνύμιο των λέξεων “Charge Coupled Devices” και είναι στην πραγματικότητα μια δομή πυριτίου που μπορεί να ενσωματωθεί στην συστοιχία και να μεταφέρει το φορτίο από τα στοιχεία φωτοανίχνευσης με παρόμοιο τρόπο όπως η ‘γέφυρα με κουβάδες’ που μεταφέρει νερό κατά μήκος μιας σειράς ανθρώπων. Μια προσεκτική κατανομή αυτών των δομών επιτρέπει στο φορτίο να περάσει από κάθε στοιχείο ανιχνευτή στην έξοδο της συστοιχίας με τη σειρά.

Ας κοιτάξουμε πιο προσεκτικά στα στοιχεία της συστοιχίας CCD. Το πρώτο στοιχείο είναι προφανώς οι φωτοανιχνευτές. Αυτοί μπορεί να είναι η γνωστή

φωτοδίοδος ή μια φωτο MOS (ημιαγωγός μετάλλου- οξειδίου) δομή χωρητικότητας. Και οι δυο αυτές διατάξεις απεικονίζονται στο Σχήμα 8.12 και μονολότι εκτελούν την ίδια λειτουργία, οι οπτικές και ηλεκτρικές τους αποδόσεις διαφέρουν.

Εμπρόσθια επαφή (Front Contact) Διαπερατή μεταλλική πύλη (Transparent metal gate)

Περιοχή διάχυσης p^+ (p^+ diffusion) Πυρίτιο p – τύπου

Ενδογενές στρώμα (Intrinsic layer) Πίσω επαφή (Back contact)

Πυρίτιο (n – τύπου)

Οπίσθια επαφή (Back contact)

Φωτοδίοδος PIN (PIN photodiode) Οπτικό MOS

Σχήμα 8.12 Δομές φωτοστοιχείων που χρησιμοποιούνται σε συστοιχίες απεικόνισης.

Η βασική λειτουργία της φωτοδίοδου έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 7 και δεν διαφέρει εδώ. Η χωρητικότητα MOS είναι μια απλή δομή που αποτελείται από ένα υπόστρωμα τύπου p πάνω στο οποίο επικάθεται ένα στρώμα οξειδίου (διοξείδιο πυρίτιου). Ένας λεπτός ημιαγωγός, με αυξημένες προσμίξεις ή ένα διάφανο ηλεκτρόδιο μετάλλου, γνωστό ως πύλη, τοποθετείται πάνω σε αυτό το στρώμα οξειδίου. Κατά τη λειτουργία στοιχείου φωτοανίχνευσης εφαρμόζεται στο υπόστρωμα τύπου p αρνητικό δυναμικό και στη μεταλλική πύλη εφαρμόζεται ένα θετικό δυναμικό. Το φως που διαπερνά το μεταλλικό ηλεκτρόδιο και το στρώμα του οξειδίου παράγει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής μέσα στο πυρίτιο τύπου p . Το δυναμικό κατά μήκος της δομής αμέσως διαχωρίζει αυτό το ζευγάρι με το ηλεκτρόνιο να κινείται προς την μεταλλική πύλη και την οπή προς το αρνητικό μέρος του υποστρώματος. Ωστόσο τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να περάσουν το μονωτικό στρώμα οξειδίου και έτσι περιφέρονται από κάτω ελκυόμενα από το θετικό δυναμικό παραμένοντας μακριά από την μεταλλική πύλη. Αυτό είναι ανάλογο με ένα πηγάδι δυναμικού που παγιδεύει τα ηλεκτρόνια στην περιοχή απογύμνωσης που σχηματίζεται κάτω από το στρώμα οξειδίου από το θετικό δυναμικό. Το φορτίο που υπάρχει σε αυτό το πηγάδι είναι ανάλογο με το προσπίπτων φως σε αυτό το φωτοστοιχείο.

Το φωτοστοιχείο MOS στις συστοιχίες CCD μπορεί να φωτιστεί με έναν από τους δυο τρόπους. Ο πρώτος, λέγεται φωτισμός εμπρόσθιας πλευράς και επιτρέπει το

φως να περνάει μέσα από το διάφανο ηλεκτρόδιο και το στρώμα οξειδίου για να παράγει ζεύγαρα ηλεκτρονίων - οπών. Αυτή η ρύθμιση μειώνει την ευαισθησία του φωτοανιχνευτή προς το ιώδες και υπερ-ιώδες άκρο του φάσματος εξ αιτίας της απορροφητικότητας σε αυτά τα μήκη κύματος στα στρώματα ηλεκτροδίου και οξειδίου. Η δεύτερη μέθοδος φωτισμού είναι γνωστή ως φωτισμός οπίσθιας πλευράς και το φως εισέρχεται μέσα από την πίσω πλευρά του υποστρώματος τύπου p. Αυτό μπορεί να προκαλέσει βελτιωμένη απόδοση στην υπερ-ιώδη περιοχή του φάσματος μειώνοντας το γεωμετρικό εύρος της χωρητικότητας εξασφαλίζοντας ότι τα φωτόνια υψηλής ενέργειας δεν απορροφώνται πριν φτάσουν την κρίσιμη περιοχή απογύμνωσης ζεύγους ηλεκτρονίου οπής. Ωστόσο με το να γίνει αυτή η ευαισθησία στο κόκκινο και στο υπέρυθρο θα μειωθεί. Και οι δυο αυτές μέθοδοι απεικονίζονται στο Σχήμα 8.13.

Διαπερατή επαφή (Transparent contact)	Διαπερατή μεταλλική επαφή πύλης
Πυρίτιο p- τύπου (p-type silicon)	Πυρίτιο p-τύπου
Επαφή πύλης (gate contact)	Πίσω επαφή
Φωτισμός πίσω πλευράς	Φωτισμός μπροστινής πλευράς

Σχήμα 8.13 Φωτισμός εμπρόσθιας και οπίσθιας πλευράς του MOS φωτοστοιχείου σε συστοιχίες CCD.

Αν και κανένας μεμονωμένος MOS φωτοανιχνευτής δεν μπορεί να καλύψει ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ένας συνδυασμός αυτών των μεθόδων επιτρέπει οποιαδήποτε συστοιχία να ρυθμιστεί ώστε να είναι ευαίσθητη σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από την περιοχή των ακτινών X έως περίπου το 1.1μm, που είναι το μακρινό μήκος κύματος αποκοπής λόγω του ενεργειακού χάσματος του πυριτίου.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του φορτίου σε μια έξοδο απαιτεί την κατανόηση της επέκτασης μιας απλής δομής MOS χρησιμοποιώντας πολλαπλές πύλες σε ένα μόνο υπόστρωμα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.14.

Φάση 1 Φάση 2 Φάση 3 Φάση 1 Φάση 2 Φάση 3

Πύλες (Gates) Στρώμα οξειδίου (Oxide layer) Στρώμα p – τύπου Παγιδευμένα ηλεκτρόνια

Σχήμα 8.14 Διάδοση πακέτου φορτίου κατά μήκος μιας συστοιχίας μεταφοράς CCD.

Ένα πολυφασικό ρολόι χρησιμοποιείται για να εφαρμοστούν μεταβαλλόμενα δυναμικά στις πύλες ανά τριάδες. Η λειτουργία έχει τρία στάδια που επαναλαμβάνονται συνεχώς για μια γραμμή οποιουδήποτε μήκους. Αρχικά μόνο μια πύλη σε μια ομάδα μιας τριάδας θα έχει θετικό δυναμικό. Οι άλλες δυο δεν θα παρουσιάζουν διαφορά δυναμικού με το υπόστρωμα κι έτσι τα ηλεκτρόνια θα παραμείνουν στο πηγάδι κάτω από την θετική πύλη. Αν μια από τις γειτονικές πύλες έχει τώρα θετικό δυναμικό τα ηλεκτρόνια θα διαχυθούν στο διευρυμένο πηγάδι κάτω από τα δυο ηλεκτρόδια. Αν το θετικό δυναμικό τώρα απομακρυνθεί από το αρχικό ηλεκτρόδιο, τα ηλεκτρόνια απωθούνται από αυτήν την αρνητική περιοχή και προσπαθούν και κινούνται προς την μοναδική θετική περιοχή που απέμεινε. Έτσι το πακέτο φορτίου των ηλεκτρονίων έχει μεταφερθεί κατά μία πύλη μακρύτερα στη γραμμή, ενώ παραμένει ανεξάρτητο από τυχόν άλλα πακέτα φορτίου, που επίσης κινούνται κατά μήκος της γραμμής, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.14. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας της CCD κάμερας.

Πώς εφαρμόζεται αυτό, λοιπόν, σε μία συστοιχία φωτοανίχνευσης; Για απλούστευση, ας θεωρήσουμε μία γραμμική συστοιχία. Αυτή η γραμμική δομή μεταφοράς CCD, βρίσκεται κατά μήκος των στοιχείων φωτοανίχνευσης, με ένα φωτοστοιχείο να είναι συζευγμένο μέσω του υποστρώματος σε κάθε ομάδα τριών στοιχείων στη δομή μεταφοράς, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.15.

Πύλη μεταφοράς (Transfer gate)

Φωτοστοιχείο (Photoelement)

Κανάλια παρεμπόδισης της διάχυσης

Θωρακισμένοι αναγνώστες

Σχήμα 8.15 Σχέδιο μίας γραμμικής συστοιχίας απεικόνισης CCD.

Ενώ δημιουργείται η εικόνα και τα τρία στοιχεία CCD της μεταφοράς είναι απομονωμένα από το στοιχείο του φωτοανιχνευτή, μέσω μίας επιπρόσθετης δομής MOS, γνωστής ως πύλη μετάδοσης. Το φωτοστοιχείο MOS θα έχει ένα θετικό δυναμικό και θα συλλέγει ένα φορτίο φωτοηλεκτρονίων. Αυτό είναι γνωστό ως περίοδος ολοκλήρωσης μίας συστοιχίας CCD. Για να μεταφερθεί το φορτίο από τα

φωτοστοιχεία σε ένα σημείο εξόδου, εφαρμόζεται ένα θετικό δυναμικό στην πύλη μετάδοσης και σε ένα από τα τρία στοιχεία μεταφοράς CCD, ενώ το δυναμικό στο φωτοστοιχείο απομακρύνεται. Αυτό αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινηθούν στην συστοιχία μεταφοράς CCD. Το θετικό δυναμικό στην πύλη μετάδοσης τότε αφαιρείται, επιτρέποντας στο φωτοστοιχείο να συσσωρεύσει φορτίο ξανά, ενώ η συστοιχία μεταφοράς μεταφέρει τις προηγούμενες ομάδες φορτίου. Η συστοιχία μεταφοράς είναι, φυσικά, αθέατη από το φως, ώστε να προληφθεί περαιτέρω συσσώρευση φωτοηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της μεταφοράς. Η διαδικασία μεταφοράς, όπως περιγράφεται παραπάνω, επαναλαμβάνεται και τα πακέτα φορτίου θα περάσουν στο τέλος της γραμμής μεταφοράς ένα τη φορά, όπου ένας κατάλληλος ενισχυτής φορτίου μπορεί να τα μετατρέψει σε μετρήσιμες τάσεις. Ως εκ τούτου, μία γραμμική εικόνα έχει μετατραπεί σε μία τάση εξόδου σε σχέση με το χρόνο, κατάλληλη για εγγραφή και μετάδοση.

Μονολότι αυτό το σύστημα μεταφοράς φορτίου είναι μία καλή λύση για τη χρήση μίας συστοιχίας φωτοστοιχείων, υπήρχαν δύο βασικά προβλήματα σε αυτό το σύστημα. Το ένα ήταν η διαρροή φορτίου ανάμεσα στα στοιχεία της συστοιχίας, το οποίο επιλύθηκε αρκετά γρήγορα, αφού οι CCD είχαν αναπτυχθεί σε σημείο που το φορτίο μπορούσε να διατηρηθεί για αρκετές ώρες, χωρίς σημαντική διαρροή στο γειτονικό στοιχείο. Το άλλο σημαντικό πρόβλημα ήταν η απόδοση μεταφοράς φορτίου από στοιχείο σε στοιχείο. Κάθε φορά που το πακέτο φορτίου κινούνταν κατά μήκος της συστοιχίας, μέρος του φορτίου θα έμενε πίσω κατά τη μεταφορά, ή θα χανόταν εξαιτίας απορρόφησης των φορέων φορτίου από τις ενεργειακές καταστάσεις επιφάνειας στο σύνορο του ημιαγωγού/οξειδίου. Αν η συστοιχία σας έχει μήκος μόνο μερικών στοιχείων, αυτό δεν θα αποτελέσει πρόβλημα, αλλά αν έχετε μία συστοιχία μήκους εκατοντάδων στοιχείων, τότε η απώλεια φορτίου μπορεί να είναι αρκετά σημαντική, μέχρι το πακέτο φορτίου να φτάσει το τέλος της συστοιχίας. Ευτυχώς, οι αποδόσεις μεταφοράς φορτίου στις σύγχρονες CCD είναι περίπου 99.999%, εξαιτίας της τεχνολογίας του θαμμένου καναλιού, το οποίο χρησιμοποιεί ένα στρώμα εμφυτευμένων ιόντων κάτω από το στρώμα οξειδίου ώστε η μεταφορά φορτίου να γίνεται βαθύτερα στο υπόστρωμα και μακριά από τις ενεργειακές καταστάσεις επιφάνειας. Ωστόσο, σε υψηλότερες συχνότητες, αυτός ο ρυθμός μεταφοράς αρχίζει να μειώνεται, καθώς το πλήρες φορτίο στα πακέτα δεν μπορεί να κινηθεί πλήρως από στοιχείο σε στοιχείο, πριν τα πηγάδια δυναμικού

καταρρεύσουν. Η μειωμένη απόδοση μεταφοράς φορτίου θα έχει ως αποτέλεσμα, φυσικά, ένα μειωμένο σήμα και άρα μειωμένη ευαισθησία.

Λυμένο Παράδειγμα 1

Τι ποσοστό του αρχικού φορτίου που συγκεντρώθηκε στο πιο απομακρυσμένο φωτοστοιχείο από το σημείο εξόδου προκύπτει αν η απόδοση μεταφοράς φορτίου μίας συστοιχίας CCD 100 φωτοστοιχείων είναι 99.999%;

Λύση

Πρώτα, θυμηθείτε ότι 3 στοιχεία μεταφοράς απαιτούνται για κάθε φωτοστοιχείο, για να μεταφερθεί το φορτίο, άρα 300 μεταφορές φορτίου πρόκειται να συμβούν.

Εάν κάθε μεταφορά φορτίου περιέχει 0.99999 του αρχικού φορτίου, τότε μετά από 300 μεταφορές θα υπάρχει $0.99999^{300}=0.997$ ή 99.7% του αρχικού φορτίου που παραμένει. Ένα αποδεκτό ποσοστό.

Ερώτηση 3

Επανέλαβε το παραπάνω παράδειγμα εργασίας χρησιμοποιώντας απόδοση μεταφοράς φορτίου 99.9%.

Για μία συστοιχία φωτοστοιχείων δύο διαστάσεων, χρησιμοποιείται μία λογική επέκταση της γραμμικής συστοιχίας, γνωστή ως **διάταξη** ενδογραμμικής μεταφοράς. Βασικά, ένας αριθμός από γραμμικές συστοιχίες, όπως περιγράφονται παραπάνω, μπορεί να συζευχθεί με μία επιπρόσθετη δομή μεταφοράς CCD, για να ληφθεί η έξοδος από κάθε γραμμική συστοιχία, όπως τελικά προκύπτει. Οι έξοδοι από όλες τις γραμμικές συστοιχίες, κατόπιν, οδηγούνται σε μία μόνο έξοδο. Αυτό το σύστημα απεικονίζεται στο Σχήμα 8.16.

Καταγραφείς οριζόντιας μεταφοράς (Horizontal transport register)

Φάση 1 (Phase 1) Φάση 2 (Phase 2) Φάση 3 (Phase 3)

Σημείο εξόδου (Output port)

Καταγραφείς κάθετης μεταφοράς (Vertical transport register)

Κανάλια ανάσχεσης διάχυσης (Channel stop diffusion) Πύλη μεταφοράς (gate transfer)

Φωτοστοιχείο (Photoelement)

Θωρακισμένοι καταγραφείς ανάγνωσης (Shielded readout registers)

Σχήμα 8.16 Μία δισδιάστατη CCD συστοιχία απεικόνισης που χρησιμοποιεί ενδογραμμική μεταφορά ένδειξης.

Μετά από την περίοδο ολοκλήρωσης, τα φορτία στα στοιχεία φωτοανίχνευσης μεταφέρονται στις κάθετες συστοιχίες μεταφοράς. Όλες οι κάθετες συστοιχίες μεταφοράς συγχρονίζονται, έτσι ώστε το φορτίο από μία γραμμή στοιχείων φωτοανίχνευσης να μεταφέρεται στην οριζόντια συστοιχία μεταφοράς. Ολόκληρη η οριζόντια συστοιχία μεταφοράς αποσυγχρονίζεται, παράγοντας το γραμμικό ηλεκτρονικό σήμα που περιέχει την πρώτη γραμμή της εικόνας. Αφού η οριζόντια συστοιχία μεταφοράς καθαρίσει, το φορτίο από την επόμενη σειρά φωτοανιχνευτών, που τώρα περιμένει στην κορυφή της κάθετης συστοιχίας μεταφοράς, μεταφέρεται στην οριζόντια συστοιχία μεταφοράς. Για άλλη μια φορά, αυτό απορυθμίζεται, παράγοντας τη δεύτερη γραμμή της εικόνας. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το φορτίο από όλους τους φωτοανιχνευτές να έχει παραχθεί στην έξοδο, από το μοναδικό σημείο εξόδου.

Μία άλλη, λιγότερο γνωστή, μέθοδος που παράγει στην έξοδο φορτίο από μία συστοιχία, είναι γνωστή ως μεταφορά πλαισίου. Στην περίπτωση αυτή, οι φωτοανιχνευτές και οι καταχωρητές μεταφοράς συνδυάζονται στην ίδια γραμμική δομή MOS με επιπρόσθετο έναν μόνο καταχωρητή, που λαμβάνει την έξοδο από κάθε γραμμική συστοιχία και την οδηγεί σε μία μοναδική έξοδο. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.17, κάθε μία από αυτές τις γραμμικές συστοιχίες χωρίζεται σε δύο τομείς.

Φάση 1 Φάση 2 Φάση 3

Καταγραφείας Ανάγνωσης

Σημείο εξόδου

Θωρακισμένη περιοχή αποθήκευσης

Πύλη απομόνωσης

Μη θωρακισμένη περιοχή απεικόνισης

Κανάλια μπλοκαρίσματος διάχυσης

Σχήμα 8.17 Δισδιάστατη συστοιχία απεικόνισης CCD που χρησιμοποιεί μεταφορά πλαισίου ως ένδειξη.

Ο εκτεθειμένος τομέας συλλέγει την εικόνα, ενώ υπάρχει ένας καλυμμένος τομέας πανομοιότυπου μήκους που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της προηγούμενης εικόνας. Αφού, έχει συλλεχθεί μία εικόνα, μεταφέρεται στον καλυμμένο τομέα. Από εδώ, τα φορτία στο καλυμμένο τομέα μπορούν να αναγνωστούν με έναν πανομοιότυπο τρόπο με την μέθοδο της ενδογραμμικής μεταφοράς.

Η μέθοδος ενδογραμμικής μεταφοράς έχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας. Αφού όλα τα φωτοστοιχεία μεταφέρονται στους καταγραφείς μεταφοράς ταυτόχρονα, μία περίοδος ολοκλήρωσης μπορεί σχεδόν άμεσα να ακολουθήσει μία άλλη, με την προϋπόθεση ότι οι καταγραφείς μεταφοράς μπορούν να αποσυγχρονιστούν έγκαιρα. Ωστόσο, η παρουσία των καταγραφών μεταφοράς που παρεμβάλλεται από φωτοανιχνευτές μειώνει την ενεργή περιοχή από κάθε φωτοστοιχείο στην συστοιχία.

Στο σύστημα μεταφοράς πλαισίου, η ολοκλήρωση πρέπει να σταματάει ενώ τα φορτία αποσυγχρονίζονται στην γραμμή φωτοστοιχείων. Επίσης, αν δεν υπάρχει κανένα εξωτερικό σύστημα κάλυψης, είναι πιθανό τα φωτοστοιχεία να συνεχίσουν να συσσωρεύουν φορτίο κατά τη διαδικασία της μεταφοράς, προκαλώντας την κηλίδωση της εικόνας. Ωστόσο, αφού ολόκληρη η συστοιχία αποτελείται μόνο από φωτοστοιχεία, η ανάλυση είναι γενικά καλύτερη από την ισοδύναμη συστοιχία ενδογραμμικής μεταφοράς.

Η ταχύτητα συγχρονισμού της οριζόντιας συστοιχίας μεταφοράς περιορίζει τον ρυθμό πλαισίων των συστοιχιών απεικόνισης CCD. Οι κάθετες συστοιχίες μεταφοράς έχουν μόνο να συγχρονίσουν δεδομένα με έναν ρυθμό που δίνεται από: Ταχύτητα συγχρονισμού οριζόντιας συστοιχίας μεταφοράς / Αριθμός οριζόντιων εικονοστοιχείων. Συστοιχίες με ρυθμούς εξόδου δεδομένων 30 MHz είναι διαθέσιμες, όσο πιο μεγάλο το μήκος της συστοιχίας, τόσο αυξάνει το χρόνο που απαιτείται για την εξαγωγή κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας και, όπως έχουμε δει, η απόδοση μεταφοράς φορτίου μειώνεται, σε υψηλούς ρυθμούς συγχρονισμού. Μία τέτοια ταχύτητα είναι καλή για 500×592 ανάλυση εικονοστοιχείων μιας βιντεοκάμερας που καταγράφει 25 καρέ ανά δευτερόλεπτο, ενώ διατίθενται πλέον συστοιχίες με 4096×4096 εικονοστοιχεία, σε αρκετά υψηλές τιμές. Ακόμα κι αν αποσυγχρονίζουμε δεδομένα στα 30 MHz, αυτές οι συστοιχίες θα χρειαστούν 5.6 s για να εξάγουν ένα καρέ της εικόνας. Ενώ, προφανώς, δεν είναι κατάλληλες για βίντεο ή άλλες εφαρμογές πραγματικού χρόνου, τέτοιες μεγάλες συστοιχίες θα χρησιμοποιούνταν

στην αστρονομία ή σε στρατιωτικούς κατασκοπευτικούς δορυφόρους, όπου η χωρική ανάλυση είναι πιο σημαντική από τον ρυθμό πλαισίων.

Ερώτηση 4

Αν μία συστοιχία βιντεοκάμερας 500x592 στοιχείων απαιτείται για να δώσει ένα ρυθμό καρέ 25 καρέ/ δευτερόλεπτο, ποιος είναι ο απόλυτα μικρότερος ρυθμός συγχρονισμού που απαιτείται για την έξοδο των δεδομένων;

Κάποια από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των συστοιχιών CCD πρέπει να είναι η ευαισθησία και οι προδιαγραφές θορύβου αυτών των συσκευών. Οι φωτοδίοδοι MOS μπορούν να πλησιάσουν κβαντικές αποδόσεις έως και 100% σε μήκη κύματος κοντά στην μέγιστη ευαισθησία και ο μόνος θόρυβος που παράγεται είναι ο θερμικός που όμως μπορεί να μειωθεί σε τιμές έως και ένα ηλεκτρόνιο ανά εικονοστοιχείο ανά ώρα όταν η συστοιχία ψύχεται σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου (77K). Εξ ου και η δημοφιλής χρήση αυτών των συσκευών σε φωτοευαίσθητες περιοχές όπως η αστρονομία όπου οι χρόνοι ολοκλήρωσης μπορούν να είναι πολλές ώρες. Ωστόσο το δυναμικό εύρος των συστοιχιών CCD είναι συνήθως στην περιοχή 2000:1 και ενώ αυτό παράγει αποδεκτές εικόνες συγκρίσιμες με τις κανονικές φωτογραφικές μεθόδους δεν καλύπτει ολόκληρο το δυναμικό εύρος του τοπίου της εικόνας που μπορεί να είναι 100,000:1 ή μεγαλύτερο και είναι ευδιάκριτο από το ανθρώπινο μάτι. Βελτιωμένο δυναμικό εύρος μπορεί να αποκτηθεί με την ψύξη της CCD ή, αν αυτό δεν είναι δυνατόν, την στρώση ενός αριθμού από εικόνες του ίδιου τοπίου ηλεκτρονικά, αλλά αυτές δεν είναι ιδανικές λύσεις. Οι νέες τεχνολογίες που επιχειρούν να αντιγράψουν την ικανότητα αυτόματου συντονισμού του ανθρώπινου ματιού σε μια βάση ανά εικονοστοιχείο μπορεί να αποδειχτεί μια πολύ καλύτερη λύση.

8.6 Ενισχυτές Εικόνας

Υπάρχουν μερικές εφαρμογές όπου απαιτείται μια εικόνα από τοπία που ο φωτισμός είναι πολύ χαμηλός όπως στην αστρονομία ή στην νυχτερινή φωτογράφιση. Τέτοια απεικόνιση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πολύ μεγάλες περιόδους ολοκλήρωσης με μια συστοιχία CCD. Ωστόσο αυτό δεν προσφέρει στην απεικόνιση πραγματικού χρόνου και μπορεί να παράγει μια εικόνα με πολύ θόρυβο εξ αιτίας θερμικών σκοτεινών ρευμάτων που παράγονται στην συστοιχία CCD αν η συστοιχία

δεν ψύχεται. Μια λύση γι' αυτό είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν ενισχυτή εικόνας. Οι πρώτοι ενισχυτές εικόνας ήταν κάπως ογκώδεις σωλήνες εστίασης ηλεκτρονίων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.18.

Φωτοκάθοδος (Photocathode) Σωλήνας κενού (vacuum tube) Οθόνη φωσφόρου
Ηλεκτροστατικά στοιχεία φακών (Electrostatic lens element)
Σχήμα 8.18 Σωλήνας ενισχυτή εικόνας πρώτης γενιάς.

Αυτοί αναφέρονται συνήθως ως σωλήνες πρώτης γενιάς. Μια εικόνα που εστιάζεται στην φωτοκάθοδο θα εξέπεμπε φωτοηλεκτρόνια ανάλογα με την ένταση του φωτός σε αυτή την θέση της εικόνας. Αυτά τα ηλεκτρόνια εστιάζονται από μια σειρά από στοιχεία ηλεκτροστατικών φακών και μετά επιταχύνονται προς μια οθόνη φωσφόρου με τη χρήση ενός υψηλού δυναμικού. Κάθε ηλεκτρόνιο προκαλεί την εκπομπή φωτονίων από ένα σημείο στην οθόνη φωσφόρου ενώ διατηρεί την σωστή χωρική σχέση που απαιτείται για την αναπαραγωγή της αρχικής εικόνας. Για κάθε φωτόνιο που φτάνει στην φωτοκάθοδο θα μπορούσαν έως και 2000 φωτόνια να εκπεμφθούν από τον φώσφορο, παρέχοντας ένα σημαντικό κέρδος στην ένταση της εικόνας.

Οι σύγχρονες σωλήνες ενίσχυσης εικόνας δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν μια συσκευή γνωστή ως πλάκα μικρού καναλιού για να αυξήσουν την ενίσχυση. Οι πλάκες μικρού καναλιού είναι απλώς μια συστοιχία από μικροσκοπικούς γυάλινους σωλήνες με ένα ωμικό περιτύλιγμα περίπου 10-25 μm σε διάμετρο με κλίση σε σχέση με την πλάκα. Η ηλεκτρονική διαδικασία ενίσχυσης απεικονίζεται στο Σχήμα 8.19.

Δευτερογενή ηλεκτρόνια (secondary electrons) Παλμός ηλεκτρονίων $\sim 10^3$
ηλεκτρόνια

Σχήμα 8.19 Ηλεκτρονική ενίσχυση σε ένα κανάλι πλάκας μικρού καναλιού.

Ένα δυναμικό 1 KV με 1.5 KV εφαρμόζεται ανάμεσα στα άκρα της πλάκας. Ένα ηλεκτρόνιο που εισέρχεται στο σωλήνα υφίσταται το υψηλό δυναμικό και επιταχύνεται προς το τοίχωμα του σωλήνα. Αυτό προκαλεί την εκπομπή ενός αριθμού από δευτερεύοντα ηλεκτρόνια που επίσης επιταχύνονται προς το τοίχωμα του

σωλήνα. Κάθε ένα από αυτά τα ηλεκτρόνια προκαλεί την εκπομπή πολλαπλών ηλεκτρονίων και άρα η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ένας μεγάλος αριθμός από δευτερεύοντα ηλεκτρόνια να προκύψει από το τέλος του σωλήνα. Ένας σωλήνας δεύτερης γενιάς απεικονίζεται στο Σχήμα 8.20.

Φωτοκάθοδος (photocathode) Σωλήνας κενού (vacuum tube) Πλακίδια καναλιών (Microchannel plates) Φώσφορος (Phosphor)

Φωτοηλεκτρόνια (Photoelectron) Παλμός ηλεκτρονίων $\sim 10^6$ ηλεκτρόνια

Φωτεινός παλμός (Light pulse)

Σχήμα 8.20 Λυχνία ενίσχυσης εικόνας δεύτερης γενιάς.

Σε αυτή την περίπτωση τα φωτοηλεκτρόνια από την φωτοκάθοδο επιταχύνονται απευθείας στις πλάκες μικρού καναλιού. Δυο πλάκες μικρού καναλιού χρησιμοποιούνται μαζί με τους σωλήνες τοποθετημένους σε μια γωνία γαλονιού προκειμένου να ενισχύσουν το ηλεκτρικό σήμα. Τελικά τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τις πλάκες μικρού καναλιού επιταχύνονται στον φώσφορο, προκαλώντας την εκπομπή φωτονίων. Σε αυτό το σωλήνα διατηρείται η χωρική ενότητα της εικόνας ενισχύοντας μεμονωμένα στοιχεία της εικόνας σε διαφορετικά κανάλια της πλάκας μικρού καναλιού και χρησιμοποιώντας πεδία υψηλού δυναμικού για να επιβάλουν στα ηλεκτρόνια να κινούνται κατά μήκος του άξονα του σωλήνα χωρίς να διασκορπίζονται. Η ενίσχυση σε αυτούς τους σωλήνες μπορεί να είναι της τάξης 10^6 επιτρέποντας τους να παράγουν εικόνες σχεδόν στο εικονικό σκοτάδι.

Επίσης υπάρχουν και λυχνίες τρίτης γενιάς που χρησιμοποιούν τρεις πλάκες μικρού καναλιού παρέχοντας ενίσχυση 10^8 - 10^9 . Ωστόσο αυτές σπάνια χρησιμοποιούνται έξω από επιστημονικά εργαστήρια που εμπλέκονται με απεικόνιση χαμηλής έντασης φωτός ή μέτρηση φωτονίων.

8.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε ότι

- Υπάρχει η επιπρόσθετη παράμετρος της χωρικής ευκρίνειας που σχετίζεται με συσκευές απεικόνισης.
- Υπάρχει μια μακρά ιστορία της τεχνολογίας απεικόνισης που βασίζεται στην τεχνολογία σωλήνα κενού. Η λειτουργία της Vidicon, Plumbicon και του

Διακριτού σωλήνα συστοιχίας διόδων έχουν εξηγηθεί παρουσιάζοντας την βαθμιαία εξέλιξη στην τεχνολογία με την οποία είμαστε εξοικειωμένοι σήμερα.

- Η λειτουργία των παρόντων CCD και της φωτοδίοδου βασίζεται σε τεχνολογία απεικόνισης, πως αυτές οι συσκευές μπορούν να ρυθμιστούν για βέλτιστη απόδοση και τα παρόντα περιοριστικά προβλήματα της ταχύτητας συγχρονισμού και της αποδοτικότητας μεταφοράς φορτίου.

8.8 Περαιτέρω Μελέτη

Πιο λεπτομερείς πληροφορίες για τις συσκευές απεικόνισης και τεχνολογίες που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο μπορούν να βρεθούν στα παρακάτω κείμενα.

'Theory of the Photographic Process', C E K Mees, Macmillan, 1971

'Closed Circuit TV Cameras for Technicians' K J Bohlman, N Price, 1978

'Optoelectronic Devices', S Desmond Smith, Prentice Hall, 1995

'Solid State Electronic Devices', B G Streetman, Prentice Hall, 1990

Ερωτήσεις

- 8.1 Μια συστοιχία CCD περιέχει 100×100 φωτο στοιχεία σε ένα $10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ορθογώνιο. Υπολογίστε την ισχύ ανάλυσης της συστοιχίας κατά μήκος των δυο αξόνων του ορθογωνίου.
- 8.2 Μια κάμερα ασφαλείας εστιάζει σε ένα τοπίο σε ένα $8.5 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}$ CCD που περιέχει 500×592 εικονοστοιχεία χρησιμοποιώντας ένα φακό γωνίας 78° . Υποθέτοντας ότι ολόκληρο το οπτικό πεδίο εάν εστιάζοταν σε μια συστοιχία CCD υπολογίστε την γωνιακή ισχύ ανάλυσης της κάμερας στον οριζόντιο και κάθετο άξονα.
- 8.3 Ένας μετρητής δείκτη διάθλασης χρησιμοποιεί μια γραμμική συστοιχία μήκους 4096 φωτοστοιχείων για να συσσωρεύσει ένα φάσμα. Εάν το φορτίο σε κάθε φωτο - στοιχείο είναι μη συγχρονισμένο σε ρυθμό 100 KHz πόσος χρόνος θα χρειαστεί για αναγνωστεί ολόκληρη η συστοιχία;
- 8.4 Μια κάμερα υψηλής ταχύτητας χρειάζεται να πάρει 1000 καρέ ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας ένα 500×592 στοιχείο συστοιχίας CCD. Ποια θα είναι η μικρότερη ταχύτητα συγχρονισμού που απαιτείται;

- 8.5 Μια γραμμική συστοιχία 2048 φωτοστοιχείων εξάγει δεδομένα με ρυθμό 20 MHz με απόδοση μεταφοράς φορτίου κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς 99.99%. Ποιο ποσοστό του αρχικού πακέτου φορτίου προκύπτει στην έξοδο της συστοιχίας από το πιο μακρινό στοιχείο;
- 8.6 Η απόδοση μεταφοράς φορτίου μιας συγκεκριμένης συστοιχίας μεταφοράς CCD μπορεί να περιγραφεί από την συνάρτηση $[1 - (f \times 1 \times 10^{-10})] \times 100\%$ όπου f είναι η συχνότητα εξαγωγής δεδομένων της συστοιχίας μεταφοράς. Για μια συστοιχία CCD 250x250 φωτοστοιχείων που εξάγει δεδομένα με ρυθμό 10MHz, ποιο ποσοστό του αρχικού πακέτου φορτίου θα προκύψει από το πιο μακρινό φωτοστοιχείο από την έξοδο;
- 8.7 Σαν μέρος ενός πειράματος με laser διασποράς χαμηλού φωτισμού ένας ενισχυτής εικόνας είναι συνδεδεμένος με μια συστοιχία 100×100 CCD για να ανιχνεύσει την διασπορά φωτός από ένα laser Ηλίου-Νέου που λειτουργεί στα 633nm. Σε αυτό το μήκος κύματος η φωτοκάθοδος του ενισχυτή εικόνας έχει κβαντική αποδοτικότητα 15%. Ο ενισχυτής εικόνας έχει ρυθμιστεί για ένα ηλεκτρικό κέρδος 10^6 και έχει αποδοτικότητα μετατροπής φωσφόρου με ηλεκτρόνιο σε φωτόνιο 10%. Στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος του φωσφόρου η συστοιχία CCD έχει κβαντική αποδοτικότητα 90%. Το CCD έχει ένα ρυθμό πλαισίου 10 καρέ ανά δευτερόλεπτο και αποδοτικότητα μεταφοράς φορτίου που δίνεται από $[1 - (f \times 1 \times 10^{-9})] \times 100\%$. Αν υπάρχει μια ροή από 1000 φωτόνια ανά δευτερόλεπτο να προσπίπτουν στον ενισχυτή εικόνας στην περιοχή που καλύπτεται από ένα μόνο φωτοστοιχείο, ποιο είναι το φορτίο εξόδου από ένα φωτοστοιχείο στην μέση της συστοιχίας CCD;
- 8.8 Επαναλάβετε την ερώτηση 8.7 χρησιμοποιώντας ένα ρυθμό πλαισίου 1000 καρέ ανά δευτερόλεπτο για την συστοιχία CCD. Ο νέος υπολογισμός παρουσιάζει πιθανά προβλήματα;

Κεφάλαιο 9: Συσκευές Απεικόνισης

9.1 Εισαγωγή

Πολλές εφαρμογές στην οπτοηλεκτρονική απαιτούν την απεικόνιση πληροφοριών στον χρήστη, είτε ως ένδειξη ολοκλήρωσης της εφαρμογής είτε ως ένδειξη για την κατάσταση της προόδου της. Είναι λοιπόν σημαντική η μελέτη των διαθέσιμων τεχνολογιών απεικόνισης για τον σχεδιασμό ενός οπτοηλεκτρονικού συστήματος. Όταν αποφασίζουμε ποια τεχνολογία θα χρησιμοποιήσουμε υπάρχει ένας αριθμός από θεμελιώδεις αρχές που πρέπει να ληφθούν υπ όψιν για να εξασφαλίσουμε ότι ο τύπος της απεικόνισης που επιλέχθηκε είναι ο πιο κατάλληλος για την συγκεκριμένη εφαρμογή: Δεν υπάρχει όφελος να σχεδιασθεί μία φορητή συσκευή αναπαραγωγής CD που χρειάζεται μία οθόνη τηλεόρασης, για να σας πληροφορήσει ποιο τραγούδι αναπαράγεται, εκτός αν είστε προετοιμασμένοι να κουβαλάτε μία φορητή γεννήτρια μαζί σας! Θα ξεκινήσουμε αυτό το Κεφάλαιο, συνεπώς, εξετάζοντας κάποια στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, όταν αποφασίζουμε για μια συσκευή απεικόνισης και κατόπιν θα προχωρήσουμε σε μία ανάλυση των συσκευών αυτών.

9.2 Τι να σκεφτείτε όταν αποφασίζετε για μια συσκευή απεικόνισης.

9.2.1 Τάση λειτουργίας και κατανάλωση ενέργειας.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για κάθε συσκευή απεικόνισης είναι η ενέργεια που καταναλώνει, P , και η τάση, V , που χρειάζεται για να λειτουργήσει. Αυτά σχετίζονται, με την εξίσωση:

$$P = VI \quad (9.1)$$

όπου I είναι το ρεύμα που ρέει μέσα από τη συσκευή όταν λειτουργεί. Μία συσκευή που χρειάζεται υψηλή τάση αλλά μπορεί να λειτουργεί με πολύ μικρό ρεύμα μπορεί, να τροφοδοτηθεί από μία μπαταρία, αφού η κατανάλωση ενέργειάς της είναι χαμηλή. Μία συσκευή όμως που χρειάζεται υψηλή τάση και ρεύμα θα χρειαστεί μία αρκετά μεγαλύτερη πηγή ενέργειας, που μπορεί να σημαίνει σύνδεση με την πρίζα. Η τάση λειτουργίας που χρειάζεται μια συσκευή απεικόνισης επίσης επηρεάζει την συμβατότητά της με το κύκλωμα του οπτοηλεκτρονικού συστήματος: συσκευές απεικόνισης με τάσεις λειτουργίας μικρότερες από 40 V μπορούν να οδηγηθούν

απευθείας από κυκλώματα που χρησιμοποιούν συνηθισμένες διατάξεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Για τάσεις λειτουργίας άνω των 40V πρέπει να χρησιμοποιηθούν διασυνδεδεμένα ηλεκτρονικά, που σημαίνει περισσότερος χώρος και υψηλότερο κόστος. Συσκευές χαμηλής τάσης μπορούν να θεωρηθούν αυτές που λειτουργούν με τάση στην περιοχή 0.5-40 V. Συσκευές που λειτουργούν με μικρό ρεύμα έχουν μία ροή ρεύματος περίπου μAcm^{-3} , όπου ο όρος cm^{-3} αναφέρεται στην ενεργό περιοχή της συσκευής. Συσκευές υψηλού ρεύματος συνήθως καταναλώνουν mAcm^{-3} .

9.2.2 Αντίθεση και χρωματικός τόνος στην συσκευή απεικόνισης.

Η αντίθεση χρωμάτων μιας οθόνης μας πληροφορεί για την φωτεινότητα των ενεργών περιοχών της οθόνης σε σχέση με τις ανενεργές περιοχές, υπολογίζεται δε από τον λόγο των δυο φωτεινοτήτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση τόσο ευκολότερα διακρίνεται αυτό που απεικονίζεται. Μπορείτε αυτό να το παρατηρήσετε και μόνοι σας ρυθμίζοντας την αντίθεση σε μία οθόνη υπολογιστή ή οθόνη τηλεόρασης: σε χαμηλά επίπεδα αντίθεσης η εικόνα είναι δύσκολο να φανεί. Είναι πιθανό να βελτιωθεί η φαινομενική αντίθεση μιας οθόνης βάζοντας ένα φίλτρο πάνω της, ώστε το φως που εκπέμπεται από την οθόνη είναι σε ένα μήκος κύματος στο οποίο το μάτι είναι πολύ ευαίσθητο.

Ο χρωματικός τόνος αναφέρεται στην δυνατότητα μιας οθόνης να είναι κάτι περισσότερο από ενεργή ή ανενεργή και είναι βασική ρύθμιση για οθόνες που απεικονίζουν εικόνες. Το πόσοι διαφορετικοί χρωματικοί τόνοι μπορούν να επιτευχθούν ανάμεσα σε ενεργές και ανενεργές περιοχές αναφέρεται ως κλίμακα του γκρι (grayscale), και μπορεί να υπολογιστεί από τον αριθμό των $\sqrt{2}$ σκαλών της φωτεινότητας ανάμεσα σε ενεργή και ανενεργή λειτουργία.

Λυμένο Παράδειγμα 1

Μία οθόνη έχει ενεργή φωτεινότητα η οποία είναι 30 φορές μεγαλύτερη από την ανενεργή φωτεινότητα. Ποια είναι η κλίμακα του γκρι της οθόνης;

Λύση

Για να υπολογιστεί η κλίμακα του γκρι πρέπει να υπολογίσουμε πόσες φορές μπορούμε να αυξήσουμε την έξοδο με ένα παράγοντα $\sqrt{2}$ πριν φτάσουμε από το ελάχιστο στο μέγιστο της φωτεινότητας. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά ως

$$\begin{aligned} \log_{10}(\sqrt{2})^n &= \log_{10}(30) \\ n \log_{10}(\sqrt{2}) &= \log_{10}(30) \end{aligned}$$

όπου x είναι η ανενεργός φωτεινότητα και n είναι η κλίμακα του γκρι. Λογαριθμίζοντας και τις δύο πλευρές και λύνοντας ως προς n έχουμε:

$$\log_{10}(\sqrt{2})^n = n \log_{10}(\sqrt{2}) = \log_{10}(30) \quad \dotsc \quad n = \frac{\log_{10}(30)}{\log_{10}(\sqrt{2})} = 9.8$$

το n πρέπει να είναι ακέραιος, άρα αυτή η οθόνη έχει κλίμακα του γκρι ίση με 9.

9.2.3 Χρόνος απόκρισης

Ο χρόνος απόκρισης μιας οθόνης μας πληροφορεί πόσο γρήγορα μπορεί να μεταβεί από την ενεργή στην ανενεργή λειτουργία. Γενικά, αυτοί οι δύο αριθμοί δεν είναι ίδιοι, και είναι η βραδύτερη απόκριση που υποδεικνύει την τελική ταχύτητα της συσκευής και, άρα, τις δυνατές εφαρμογές της. Για παράδειγμα, οι εικόνες της τηλεόρασης πρέπει να ανανεώνονται τουλάχιστον με ρυθμό 25 φορές ανά δευτερόλεπτο προκειμένου να μην τρεμοπαίζουν. Αν μία οθόνη δεν μπορεί να αλλάξει αρκετά γρήγορα ώστε να ανταποκρίνεται σε αυτό το κριτήριο, τότε οποιαδήποτε κίνηση εμφανίζεται θολή επειδή ένα μέρος της οθόνης δεν έχει απενεργοποιηθεί προτού ενεργοποιηθεί το επόμενο. Πολλές άλλες εφαρμογές απεικόνισης δεν χρειάζεται να ανανεώνουν τις πληροφορίες στην οθόνη τόσο συχνά, επομένως πιο αργοί χρόνοι αλλαγής είναι αποδεκτοί. Αν μία οθόνη αλλάζει από ενεργή σε ανενεργή λειτουργία μέσα σε 50-100ms, οι περισσότεροι άνθρωποι αντιλαμβάνονται το γεγονός αυτό ως ακαριαίο.

9.2.4 Λαμπρότητα.

Το μέγεθος αυτό αναφέρεται στην φαινόμενη φωτεινότητα μίας οθόνης. Για οθόνες που παράγουν τον δικό τους φωτισμό, και καλούνται ενεργές οθόνες, αυτό αναφέρεται πιο σωστά ως φωτεινότητα της οθόνης, και είναι μέτρο της έντασης του εκπεμπόμενου φωτός, όπως γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Ο όρος λαμπρότητα χρησιμοποιείται σωστότερα σε οθόνες που λειτουργούν μέσω της διαμόρφωσης της έντασης του φωτός που προσπίπτει σε αυτές. Αυτές οι οθόνες ονομάζονται παθητικές οθόνες. Η φαινόμενη φωτεινότητα, ή λαμπρότητα, μιας οθόνης εξαρτάται πολύ από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η οθόνη

χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, μία οθόνη υπολογιστή θα έχει υψηλή φωτεινότητα όταν χρησιμοποιείται σε ένα σκοτεινό δωμάτιο. Όταν χρησιμοποιείται κοντά σε παράθυρο, μία ηλιόλουστη μέρα, με το ηλιακό φως να προσπίπτει στην οθόνη, είναι ουσιαστικά αδύνατο να διακριθεί οτιδήποτε, καθώς η φωτεινότητα της οθόνης δεν συγκρίνεται με αυτή του ήλιου. Αντιστρόφως, μία παθητική οθόνη δεν θα λειτουργεί σωστά στο σκοτάδι επειδή δεν υπάρχει καθόλου διαθέσιμο φως, αλλά υπό συνθήκες ηλιόλουστης μέρας φαίνεται πραγματικά πολύ λαμπρή.

9.2.5 Χρώμα και αποδοτικότητα

Το χρώμα μιας οθόνης ορίζεται από την αρχή λειτουργίας της οθόνης και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Οθόνες κατηγοριοποιούνται σε μαύρες και λευκές, μονοχρωματικές ή έγχρωμες. Μαύρες και λευκές οθόνες μπορούν να μετατραπούν σε έγχρωμες οθόνες με τη χρήση φίλτρων. Ένα παράδειγμα αυτού είναι η τηλεόραση έγχρωμων υγρών κρυστάλλων.

Η απόδοση της συσκευής εξαρτάται από την απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος σε οπτική και την ευαισθησία του ματιού στο φως που παράγεται: μια οθόνη μπορεί να μετατρέψει ηλεκτρική ισχύ σε οπτική ισχύ πολύ αποδοτικά, αλλά αν το φως εξόδου αντιστοιχεί σε περιοχή του ορατού φάσματος που το μάτι δεν είναι αρκετά ευαίσθητο τότε η συνολική απόδοση της συσκευής μπορεί να είναι χαμηλή.

9.2.6 Λειτουργία Μνήμης

Μια συσκευή απεικόνισης παρουσιάζει λειτουργία μνήμης αν η οθόνη παραμένει ενεργή ή ανενεργή μετά από την απομάκρυνση της τάσης λειτουργίας. Με μια πρώτη ματιά αυτό θα φαινόταν να μην είναι σωστό, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορους χρόνους αλλαγής, αλλά, δεδομένου ότι η συσκευή μπορεί ακόμη να ανάψει ή να σβήσει στην απαιτούμενη ταχύτητα, η μνήμη είναι ένα πλεονέκτημα αφού μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Πολλές συσκευές χρειάζονται συνεχή εφαρμογή της τάσης λειτουργίας για να παραμείνουν ενεργές ή ανενεργές, ενώ συσκευές με λειτουργία μνήμης χρειάζονται μόνο ένα γρήγορο παλμό τάσης για να αλλάξει η κατάσταση λειτουργίας, και μετά η τάση μπορεί να απομακρυνθεί.

9.2.7 Χρόνος ζωής λειτουργίας

Κανένας δεν πρόκειται να αγοράσει έναν υπολογιστή τσέπης του οποίου η οθόνη θα λειτουργήσει για 20 υπολογισμούς και μετά θα χαλάσει. Γενικά, αναμένουμε ο

χρόνος ζωής μιας οθόνης να υπολογίζεται, συνήθως σε χρόνια παρά μήνες. Ο χρόνος ζωής μιας οθόνης εξαρτάται πολύ από την αρχή λειτουργίας της οθόνης και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, και συμπεριλαμβάνει τέτοιους παράγοντες όπως η χημική σταθερότητα των υλικών, περιβαλλοντολογική αντοχή όπως αντίσταση στο φως και το νερό, και παράπλευρες αντιδράσεις και παραγωγή καταστρεπτικών ακαθαρσιών. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες εξαρτώνται καθαρά από την ηλικία της οθόνης και άλλοι εξαρτώνται από το πόσες φορές έχει ανοιγοκλείσει. Για παράδειγμα, η διαρροή αέρα στο γυάλινο περιτύλιγμα της λυχνίας της τηλεόρασης που βρίσκεται σε συνθήκες κενού παρουσιάζεται είτε η τηλεόραση είναι ενεργή είτε ανενεργή. Αντίστροφα, η παρουσία μιας ακαθαρσίας σε μια οθόνη υγρών κρυστάλλων μπορεί να είναι μόνο καταστρεπτική όταν η συσκευή ουσιαστικά αλλάζει κατάσταση, και άρα ο χρόνος ζωής μιας οθόνης εξαρτάται από το πόσο συχνά χρησιμοποιείται.

9.2.8 Άλλοι παράγοντες

Όταν επιλέγεται μια οθόνη άλλοι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος. Ο πίνακας πληροφοριών σε ένα σιδηροδρομικό σταθμό πρέπει να είναι ευανάγνωστος από πολλούς ανθρώπους ακόμα και από μεγάλη απόσταση, άρα δεν είναι ικανοποιητικός αν είναι ένα τετράγωνο πλευράς μόνο 5 cm. Μια άλλη σκέψη είναι η ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να απεικονιστεί στον ίδιο χρόνο. Οι περισσότερες οθόνες δεν λειτουργούν ως μεμονωμένα στοιχεία αλλά αποτελούνται από πολλά στοιχεία γνωστά ως τμήματα ή εικονοστοιχεία. Η πυκνότητα αυτών σε μια οθόνη υποδεικνύει την πυκνότητα της πληροφορίας που μπορεί να απεικονιστεί, και πόσο περίπλοκη μπορεί να είναι. Για παράδειγμα, αν το μόνο που θέλετε να κάνετε είναι να απεικονίσετε αριθμούς μπορείτε να χρησιμοποιήσετε μια οθόνη με σχετικά χαμηλή πυκνότητα από σχεδόν ορθογώνια στοιχεία που λέγονται τμήματα. Αν, ωστόσο, θέλετε να απεικονίστε γραφικά, κείμενο ή εικόνες τότε χρειάζεστε μια μεγαλύτερη πυκνότητα (αρκετά μεγαλύτερη) από τετράγωνα στοιχεία που ονομάζονται εικονοστοιχεία.

9.3 Η απόκριση του ματιού

Κάτι που είναι πολύ χρήσιμο να θυμόμαστε όταν σκεφτόμαστε για συσκευές απεικόνισης είναι ότι το μέσον σύνδεσης μεταξύ της οθόνης και του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι το ανθρώπινο μάτι. Πρέπει άρα να εξετάσουμε λεπτομερώς το πώς

το μάτι αποκρίνεται στο φως, θέμα που παρουσιάσαμε πολύ επιφανειακά στο Κεφάλαιο 7.

9.3.1 Το ανθρώπινο μάτι και το φως.

Το φωτοευαίσθητο μέρος του ματιού είναι ο αμφιβληστροειδής, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 9.1. Ο αμφιβληστροειδής περιέχει κύτταρα υποδοχείς του φωτός και καλούνται ράβδοι και κύτταρα που καλούνται κώνοι που απορροφούν το προσπίπτον φως. Οι κώνοι είναι ευαίσθητοι μόνο σε ένα στενό εύρος από προσπίπτοντα μήκη κύματος, και είναι τριών ειδών, ευαίσθητοι στο μπλε, ευαίσθητοι στο κόκκινο και ευαίσθητοι στο πράσινο φως. Οι κώνοι είναι η βάση της αντίληψής μας για το χρώμα και χρησιμοποιούνται για την ημερήσια όραση. Οι ράβδοι του αμφιβληστροειδούς απορροφούν ένα πολύ μεγαλύτερο φάσμα από μήκη κύματος και είναι πολύ πιο ευαίσθητοι από τους κώνους. Τους χρησιμοποιούμε, λοιπόν, για τη νυχτερινή μας όραση. Η περιοχή κοντά στο κέντρο του αμφιβληστροειδούς, το βοθρίο, είναι το μέρος όπου ο κερατοειδής χιτώνας και ο φακός εστιάζουν το φως το οποίο εισέρχεται από το μάτι κατά τον άξονά του. Το βοθρίο έχει διάμετρο περίπου 200 μm και περιέχει μόνο σφιχτά πακεταρισμένους κώνους. Έξω από το βοθρίο υπάρχουν μόνο κύτταρα ράβδοι. Γι' αυτό, σε χαμηλά επίπεδα φωτός, εάν κοιτάξετε απ' ευθείας σε κάτι μπορεί να φανεί ότι εξαφανίζεται, ωστόσο, εάν το κοιτάξετε πλαγίως, μπορείτε να το δείτε καθαρά: μετακινείτε το σημείο εστίασης από το βοθρίο, το οποίο περιέχει μόνο κύτταρα κώνων και είναι ουσιαστικά τυφλό στον χαμηλό φωτισμό, σε ένα άλλο μέρος του αμφιβληστροειδούς που περιέχει τους πολύ ευαίσθητους ράβδους του αμφιβληστροειδούς.

Οπτικό νεύρο (Optic nerve) Βοθρίο (Fovea) Αμφιβληστροειδής (Retina)

Φακός (Lens) Κόρη (Iris) Κερατοειδής χιτώνας (Cornea)

Σχήμα 9.1 Η δομή του ματιού.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της απόκρισης των κυττάρων ράβδων και των κώνων στο φως είναι ότι δεν είναι γραμμική. Δηλαδή, 1 mW κόκκινου φωτός δε θα φαινόταν τόσο φωτεινό όσο 1 mW πράσινου φωτός. Από το Κεφάλαιο 7 ανακαλούμε ότι, όταν ασχολούμαστε με την απόκριση του ματιού πρέπει να έχουμε κάτι διαφορετικό από το απόλυτο σύστημα μετρήσεως που χρησιμοποιούμε μέχρι τώρα: χρειαζόμαστε ένα σύστημα το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν την απόκριση του

ματιού όπως και την ουσιαστική ενέργεια που περιέχει το προσπίπτον φως. Πρέπει να χρησιμοποιήσουμε φωτομετρικές μονάδες.

9.3.2 Φωτομετρικές εναντίων ραδιομετρικών μονάδων

Μέχρι τώρα έχουμε χρησιμοποιήσει ένα σύστημα μέτρησης που βασίζεται στην ραδιομετρική ποσότητα της ισχύος, που είναι η ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που εκπέμπεται από μία πηγή. Το φωτομετρικό ισοδύναμο της ισχύος είναι η φωτεινότητα, ή η φωτεινή ροή. Η μονάδα της φωτεινής ροής είναι το lumen, που έχει το σύμβολο lm. Οι δύο ποσότητες σχετίζονται μέσα από την εξίσωση

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{760} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (9.2)$$

Όπου Φ_v είναι η συνολική φωτεινή ροή, Φ_e είναι η ροή ακτινοβολίας (ισχύς) με μήκος κύματος λ , $V(\lambda)$ είναι η απόκριση του ματιού σε μήκος κύματος λ και K_m είναι η μέγιστη φασματική απόδοση φωτεινότητας. Στο δυνατό φως, το K_m παρουσιάζεται στα 555 nm και έχει τιμή 680 lumens ανά Watt. Στο χαμηλό φως το K_m παρουσιάζεται στα 510 nm και αυξάνεται στα 1.746 lumens ανά Watt, που αντανακλά την μεγαλύτερη ευαισθησία των κυττάρων ράβδων του αμφιβληστροειδούς. Η εξίσωση (9.2) είναι αρκετά αποθαρρυντική, αλλά η χρήση της είναι αρκετά απλή. Για παράδειγμα, για να υπολογίσουμε την φωτεινή ροή από μία πηγή που εκπέμπει σε ένα μόνο μήκος κύματος, απλά πολλαπλασιάζουμε την ισχύ της πηγής (σε Watt) με την σχετική απόκριση του ματιού σε αυτό το μήκος κύματος, και τότε πολλαπλασιάζουμε το αποτέλεσμα με την κατάλληλη τιμή K_m .

Η μεταβολή του V με το μήκος κύματος για δυνατό φως απεικονίζεται στο Σχήμα 9.2. Σημειώστε ότι ο άξονας y είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Από αυτή την καμπύλη είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι το μάτι είναι τουλάχιστον χίλιες φορές λιγότερο ευαίσθητο στα άκρα του ορατού φάσματος από το κέντρο. Η καμπύλη απόκρισης των ματιών σας μπορεί να διαφέρει ελάχιστα από αυτήν που απεικονίζεται, αλλά η γενική της μορφή θα είναι ίδια.

Σχετική απόκριση (Relative response)

Μήκος κύματος (Wavelength)

Σχήμα 9.2 Η σχετική απόκριση του ματιού σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για δυνατό φως.

Η σημασία της χρήσης των φωτομετρικών ποσοτήτων είναι ότι δύο πηγές φωτός που έχουν την ίδια φωτεινή ροή θα φαίνονται ισοδύναμα φωτεινές στο μάτι, αν και η ισχύς (ροή ακτινοβολίας) από κάθε πηγή μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική.

Ερώτηση 1

Ο πίνακας ελέγχου από ένα κουτί ηλεκτρονικών χρησιμοποιεί κόκκινα και πράσινα LED για να υποδείξει την κατάσταση του μηχανήματος που ελέγχει. Είναι πολύ σημαντικό, για λόγους ασφαλείας, τα LED να εμφανίζονται ισοδύναμα φωτεινά στο μάτι. Αν ο σχεδιαστής του πίνακα χρησιμοποιεί ένα πράσινο LED, με μήκος κύματος 550 nm και ένα κόκκινο LED με μήκος κύματος 650 nm, πόσο πιο δυνατό πρέπει να είναι το κόκκινο LED από το πράσινο, έτσι ώστε να εμφανίζονται ισοδύναμα φωτεινά; (Σχετική απόκριση του ματιού στα 550 nm=0.995, σχετική απόκριση του ματιού στα 650 nm=0.107).

9.4 Οθόνες υγρών κρυστάλλων.

Από τις διαθέσιμες παθητικές τεχνολογίες απεικόνισης, των οποίων οι οθόνες διαμορφώνουν την ένταση του προσπίπτοντος περιβάλλοντος φωτός, μακράν οι πιο επιτυχημένες είναι οι οθόνες υγρών κρυστάλλων ή LCD. Τι είναι όμως ένας υγρός κρύσταλλος. Είμαστε συνηθισμένοι σε τρεις καταστάσεις ύλης: την στερεά, την υγρή και την αέρια. Η υγρή κρυσταλλική κατάσταση είναι μία επιπρόσθετη κατάσταση της ύλης που υπάρχει, όπως υποδεικνύει το όνομα, βρίσκεται κάπου ανάμεσα στην κρυσταλλική και την υγρή κατάσταση. Δεν έχουν όλα τα υλικά την δυνατότητα αυτής της ενδιάμεσης κατάστασης. Γενικά, πρέπει να είναι υλικά κατασκευασμένα από μόρια που είναι γεωμετρικά ανισοτροπικά. Δηλαδή, τα μόρια είναι πολύ μακρείς, λεπτοί ράβδοι, ή πλατείς επίπεδοι δίσκοι, ή μπορούν να οργανωθούν σε ομάδες με αυτά τα σχήματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9.3.

Σχήμα 9.3 Η γεωμετρία μορίων που σχηματίζουν υγρές κρυσταλλικές καταστάσεις (α) μορίων με σχήμα ράβδου και (β) μορίων με σχήμα δίσκου.

Η υγρή κρυσταλλική κατάσταση μπορεί να προέλθει, είτε με την θέρμανση ενός κατάλληλου υλικού από την στερεά του κατάσταση, ή ψύχοντάς το από την υγρή του κατάσταση, ή προσθέτοντας ή απομακρύνοντας ένα διαλύτη όπως το νερό. Τα υλικά που παίρνουν την μορφή υγρών κρυστάλλων, εξαιτίας αλλαγής στη θερμοκρασία λέγονται θερμοτροπικοί υγροί κρύσταλλοι. Αυτά που απαιτούν μία αλλαγή στη συγκέντρωση διάλυσης λέγονται λυοτροπικοί κρύσταλλοι. Για πρακτικούς λόγους, όλες οι συσκευές απεικόνισης χρησιμοποιούν θερμοτροπικούς υγρούς κρυστάλλους.

9.4.1 Διάταξη των υγρών κρυστάλλων

Σε ένα μοριακό κρύσταλλο επιδεικνύεται μια μεγάλης κλίμακας τάξη θέσης και προσανατολισμού των μορίων. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να προβλέψουμε τον προσανατολισμό και την θέση όλων των μορίων στην στερεά κατάσταση αν γνωρίζουμε την κατεύθυνση και θέση οποιουδήποτε από τα μόρια του (κάτι παρόμοιο με την κρυσταλλική του κατάσταση). Σε ένα υγρό, ωστόσο, δεν μπορούμε να κάνουμε μια τέτοια πρόβλεψη. Η γνώση του προσανατολισμού και της θέσης ενός μορίου δεν μας πληροφορεί για τον προσανατολισμό και την θέση των άλλων μορίων. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υγρά δεν παρουσιάζουν μεγάλης έκτασης τάξη στην τοποθέτησή τους. Τι συμβαίνει λοιπόν σε έναν υγρό κρύσταλλο;

Αυξανόμενη τάξη (Increasing order) Υγρό (Liquid) Αύξηση της θερμοκρασίας

Νηματικός κρύσταλλος (chiral nematic)

Μη περιστρεμμένος σμεκτικός κρύσταλλος με ευθυγραμμισμένα μόρια τα οποία είναι τοποθετημένα σε διακριτές περιοχές (chiral smectic)

Κρύσταλλος (Crystal)

Σχήμα 9.4 Η μετάβαση από την υγρή στην στερεά κατάσταση μέσω της υγρής κρυσταλλικής κατάστασης.

Οι θερμοτροπικοί υγροί κρύσταλλοι χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τους chiral κρυστάλλους και τους μη chiral κρυστάλλους. Ο καθένας από αυτούς τους τύπους έχει τα προσανατολισμένα μόρια του τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις (nematic – νηματική φάση) ή σε διακριτές περιοχές (smectic – σμεκτική φάση) όπως

1 Είναι οι κρύσταλλοι εκείνοι που δεν παρουσιάζουν κατοπτρική συμμετρία

απεικονίζεται στο Σχήμα 9.4. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 9.4, η νηματική φάση είναι πιο κοντά στην υγρή φάση. Σε ένα μη chiral νηματικό υγρό κρύσταλλο, τα μόρια παρουσιάζουν ισχυρό προσανατολισμό σε μεγάλη έκταση. Αυτό σημαίνει ότι όλα δείχνουν σχεδόν την ίδια κατεύθυνση, Σχήμα 9.5(a). Ωστόσο δεν παρουσιάζουν μεγάλη τάξη θέσης, οπότε δεν μπορούμε ακόμη να πούμε τίποτε για το πώς τοποθετείται το ένα ως προς το άλλο. Οι σμεκτικοί υγροί κρύσταλλοι, από την άλλη πλευρά, παρουσιάζουν τάξη στην θέση τους. Υπάρχουν ένδεκα είδη σμεκτικών υγρών κρυστάλλων, κάποια από τα οποία παρουσιάζουν παραπάνω από μια μορφή. Σε όλους τους σμεκτικούς κρυστάλλους τα μόρια είναι τοποθετημένα σε στρώματα, όπου όλα τα μόρια μέσα στο στρώμα βρίσκονται προσανατολισμένα σχεδόν προς την ίδια κατεύθυνση, Σχήμα 9.5(β). Η στρωματική τους δομή υποδεικνύει ότι ακόμη και ο πιο ανοργάνωτος σμεκτικός κρύσταλλος έχει διάταξη θέσης, και η κατηγοριοποίηση των σμεκτικών βασίζεται στην τάξη θέσης μέσα στα στρώματα.

Οι chiral υγρές κρυσταλλικές φάσεις παρουσιάζονται μόνο σε μόρια που έχουν μόνιμη εγκάρσια διπολική ροπή. Αυτό σημαίνει ότι το κέντρο του θετικού φορτίου του μορίου δεν είναι στο ίδιο μέρος με το κέντρο του αρνητικού φορτίου, και είναι ουσιαστικά εκτός του άξονα του μορίου. Οι chiral νηματικοί κρύσταλλοι είναι επίσης γνωστοί ως χοληστερικοί υγροί κρύσταλλοι επειδή οι πρώτοι chiral νηματικοί συνδυασμοί που ανακαλύφθηκαν ήταν εστέρες χοληστερόλης. Όπως οι non-chiral νηματικοί παρουσιάζουν μονάχα τάξη ως προς τον προσανατολισμό τους. Ωστόσο, όπως ανεβαίνουμε μέσα από τα επίπεδα του υλικού, ο προσανατολισμός των μορίων σε κάθε στρώμα περιστρέφεται, Σχήμα 9.5(c). Η ύπαρξη αυτών των στρωμάτων είναι η αιτία ενός από τα πιο γνωστά χαρακτηριστικά των χοληστερικών υγρών κρυστάλλων, που είναι η εξάρτηση του χρώματος τους από την θερμοκρασία. Το θερμόμετρο που βάζετε στο μέτωπο σας περιέχει χοληστερικούς υγρούς κρυστάλλους. Το χρώμα αυτό προκύπτει από την επιλεκτική ανάκλαση του φωτός, και εξαρτάται από την θερμοκρασία επειδή ο χωρισμός των στρωμάτων εξαρτάται από την θερμοκρασία.

Τέλος, έχουμε τους chiral σμεκτικούς υγρούς κρυστάλλους. Στους non-chiral, η επικλινή διεύθυνση των μορίων στα διαδοχικά επίπεδα είναι η ίδια. Στους chiral, σμεκτικούς κρυστάλλους η επικλινή διεύθυνση των μορίων των διαδοχικών στρωμάτων διαγράφουν έναν κώνο του οποίου η κορυφή είναι η βάση του μορίου, Σχήμα 9.5(d). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό κάποιων chiral κρυστάλλων, πιο αξιοπρόσεκτα οι σμεκτικοί C^* , είναι που κάθε στρώμα, έχει μια μόνιμη διπολική ροπή.

Δεν συμβαίνει αυτό με όλες τις πανομοιότυπα περιστρεμμένες υγρές κρυσταλλικές φάσεις επειδή, συνήθως, τα μόρια δημιουργούν ζευγάρια έτσι ώστε η διπολική ροπή να είναι μηδέν. Όπως θα δούμε αργότερα αυτό κάνει την σμετική C* φάση χρήσιμη όσον αφορά συσκευές απεικόνισης.

Σχήμα 9.5 Σχηματικά που δείχνουν τη δομή (α) ενός non-chiral νηματικού, (b) ενός non-chiral σμετικού, (c) ενός chiral νηματικού, (d) ενός chiral σμεκτικού (σμετικός C*)

9.4.2 Οθόνες νηματικού υγρού κρυστάλλου

Η πλειοψηφία των LCD σε χρήση σήμερα είναι συσκευές νηματικού υγρού κρυστάλλου, και από αυτές οι περισσότερες βασίζονται στη στρεφόμενη νηματική, ή TN δομή. Η βασική δομή μιας συσκευής υγρού κρυστάλλου, απεικονίζεται στο σχήμα 9.6.

Γυαλί (Glass)

Στρώματα ηλεκτροδίων (electrode layer)

Υγρός Κρύσταλλος (Liquid Crystal)

Στρώματα ευθυγράμμισης (alignment layer)

Διαχωριστής (Spacer)

Γυαλί (Glass)

Σχήμα 9.6 Η βασική δομή μιας συσκευής απεικόνισης υγρού κρυστάλλου.

Οι περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν γυαλί για την κατασκευή του υγρού κρυστάλλου, επειδή είναι, από την φύση του αρκετά γερό, και είναι επίσης πολύ επίπεδο, που σημαίνει ότι το κενό ανάμεσα σε δύο γυάλινες επιφάνειες παραμένει σταθερό. Αυτό είναι σημαντικό επειδή ο χρόνος απόκρισης, τ , μιας συσκευής νηματικού υγρού κρυστάλλου είναι ανάλογος με d^2 , όπου d είναι το πάχος του υγρού κρυστάλλου. Αν το πάχος του υγρού κρυστάλλου ποικίλλει στην περιοχή του, τότε, ο χρόνος αλλαγής θα μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης και η συσκευή δεν θα λειτουργεί σωστά. Θα παραπονιόμασταν, τότε, ότι είναι μία συσκευή χαμηλής ποιότητας.

Λυμένο Παράδειγμα 2

Μία οθόνη υγρού κρυστάλλου είναι φτιαγμένη από γυαλί που δεν είναι πολύ πλατύ. Ως αποτέλεσμα υπάρχει μία διακύμανση 10% στο υγρό κρυσταλλικό πάχος στην περιοχή της οθόνης. Υπολογίστε πόσο γρηγορότερα θα αλλάζουν οι λεπτότερες περιοχές όταν συγκρίνονται με τις παχύτερες.

Λύση

Έστω το ελάχιστο πάχος $=d$, οπότε το μεγαλύτερο πάχος $= 1.1d$. Έχουμε ότι τ είναι ανάλογο με d^2 , άρα

$$\frac{\tau_{thin}}{\tau_{thick}} = \left(\frac{d^2}{(1.1d)^2} \right) = 0.83$$

Οπότε η λεπτότερη περιοχή θα αλλάζει 17% γρηγορότερα από την παχύτερη περιοχή.

Οι εσωτερικές επιφάνειες του γυαλιού είναι επιστρωμένες με ένα πολύ λεπτό στρώμα από αγώγιμο υλικό. Συνήθως αυτό είναι οξειδίο του ινδίου, οξειδίο του κασσιτέρου ή ινδικό οξειδίο του κασσιτέρου (ITO). Η επίστρωση είναι τόσο λεπτή που είναι σχεδόν εντελώς διάφανη, η διαπερατότητα της οποίας συνήθως υπερβαίνει το 90%. Η επίστρωση αυτή είναι απαραίτητη επειδή οι πρακτικές συσκευές αλλάζουν κατάσταση με την εφαρμογή μίας τάσης στα άκρα του κρυστάλλου. Αυτή η αλλαγή ονομάζεται φαινόμενο Freedericksz, και παρατηρήθηκε πρώτη φορά από τον Freedericksz και τους συνεργάτες του το 1933. Το φαινόμενο Freedericksz βασίζεται στο γεγονός ότι είναι πολύ πιο εύκολο να μετακινηθούν ηλεκτρόνια προς μία κατεύθυνση στο μόριο του υγρού κρυστάλλου, παρά σε άλλες κατευθύνσεις. Για παράδειγμα, στο ραβδόμορφο μόριο που απεικονίζεται στο σχήμα 9.3 (α), τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν πολύ ευκολότερα κατά μήκος του άξονα του μορίου, παρά κάθετα σε αυτό. Αν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοστεί κάθετα στον άξονα του μορίου το μόριο γρήγορα θα αναδιαταχθεί από μόνο του, έτσι ώστε ο άξονας που επιτρέπει την εύκολη κίνηση ηλεκτρονίων να είναι παράλληλος στο ηλεκτρικό πεδίο.

Φυσικά, πρακτικά, δεν έχουμε ένα μεμονωμένο μόριο, αλλά πολλά μόρια, και σε μία συσκευή αυτά τα μόρια βρίσκονται ανάμεσα σε δυο γυάλινα στρώματα. Έτσι λοιπόν, η κίνηση ενός μεμονωμένου μορίου εξαρτάται όχι μόνο από το εφαρμοσμένο εξωτερικό πεδίο, αλλά επίσης από την επιρροή των γειτονικών μορίων και από άλλες

δυνάμεις, όπως εκείνες ανάμεσα στα μόρια και στις γυάλινες επιφάνειες του στοιχείου. Αυτό έχει τρεις μεγάλες επιπτώσεις:

- το εφαρμοζόμενο πεδίο πρέπει να υπερβαίνει μία ελάχιστη τιμή, ώστε να συμβεί αναδιάταξη. Κάτω από αυτήν την τιμή, η δύναμη επαναδιάταξης του εφαρμοζόμενου πεδίου είναι μικρότερη από τις δυνάμεις που συγκρατούν το μόριο στην αρχική του θέση. Αυτό το ελάχιστο πεδίο λέγεται κρίσιμο πεδίο, E_c , και δίνεται από

$$E_c = \frac{\pi}{d} \left(\frac{k}{\Delta \epsilon \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (9.3)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $E=V/d$, όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση,

$$V_c = \pi \left(\frac{k}{\Delta \epsilon \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (9.4)$$

όπου $\Delta \epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ και k είναι μια ελαστική σταθερά. Οι παράμετροι $\epsilon_{//}$ και ϵ_{\perp} αντανακλούν την ευκολία της κίνησης του ηλεκτρονίου παράλληλα και κάθετα στον άξονα του μορίου. ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού ($=8.85 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$). Για ένα δεδομένο υγρό κρύσταλλο σε μία δεδομένη θερμοκρασία, k και $\Delta \epsilon$ είναι σταθερές.

- Η μέγιστη γωνία αναδιάταξης, για εφαρμοσμένα πεδία, όπου $E > E_c$, εξαρτάται από την ισορροπία ανάμεσα στην δύναμη αναδιάταξης του εφαρμοσμένου πεδίου, και στην δύναμη αποκατάστασης των εσωτερικών πεδίων. Για μία χρήσιμη συσκευή αυτό σημαίνει ότι $E_{applied}$ πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο από το κρίσιμο πεδίο, E_c .
- Ένα μόριο δεν μπορεί να αναδιαταχθεί ακαριαία, επειδή η κίνησή του εμποδίζεται από γειτονικά μόρια. Με άλλα λόγια, ο χρόνος απόκρισης εξαρτάται από τις εσωτερικές τριβές του συστήματος και μπορεί να υπολογιστεί από

$$\tau_{rise} = \frac{\gamma d^2}{k\pi^2} \left[\left(\frac{V}{V_c} \right)^2 - 1 \right]^{-1}; \quad \tau_{fall} = \frac{\gamma d^2}{k\pi^2} \quad (9.5)$$

όπου γ είναι η εσωτερική τριβή του υγρού κρυστάλλου και τ_{rise} και τ_{fall} είναι, αντίστοιχα, οι χρόνοι απόκρισης σε εφαρμογή και απομάκρυνση του εφαρμοσμένου πεδίου. Για ένα δεδομένο υγρό κρύσταλλο και θερμοκρασία η παράμετρος γ , είναι σταθερή.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι συσκευές υγρών κρυστάλλων μπορούν να λειτουργήσουν με μία d.c. τάση. Ωστόσο, εάν υπάρχουν ιονισμένες ακαθαρσίες στη συσκευή, χρησιμοποιώντας μία d.c. τάση, θα καταστραφεί γρήγορα. Συνεπώς, νηματικά κύτταρα υγρών κρυστάλλων συνήθως οδηγούνται από μία μηδενική a.c. τάση πόλωσης, με συχνότητα κάπου ανάμεσα σε 1 και 20 kHz. Σε αυτήν την περίπτωση οι τάσεις που χρησιμοποιούνται σε όλους τους υπολογισμούς είναι rms (root mean square) τάσεις.

Ερώτηση 2

Μια συσκευή υγρού κρυστάλλου με πάχος 14 μm είναι κατασκευασμένη από νηματικό υγρό κρύσταλλο, ο οποίος έχει εσωτερική τριβή 0.053 Nsm^{-2} . Αν η σχετική ελαστική σταθερά είναι $4.1 \times 10^{-12} \text{ N}$, και $V_c = 0.6V_{\text{rms}}$, υπολογίστε τους χρόνους ανόδου και καθόδου του κυττάρου αν εφαρμόζεται μία τάση $2V_{\text{rms}}$.

Το τελευταίο στρώμα πριν τον υγρό κρύσταλλο, είναι το στρώμα ευθυγράμμισης. Αν δεν έχει γίνει καμία ικανοποιητική προσπάθεια για να ευθυγραμμιστούν τα μόρια στην συσκευή, τότε θα τείνουν να σχηματίσουν μία δομή χωρίων, όπου η τάξη προσανατολισμού επιτυγχάνεται τοπικά ανά περιοχές, αλλά δεν υπάρχει σχέση ανάμεσα στην μέση κατεύθυνση που δείχνουν τα μόρια σε γειτονικές περιοχές.

Όπως θα δούμε η λειτουργία της TN συσκευής εξαρτάται από όλα τα μόρια που δείχνουν στην ίδια κατεύθυνση, άρα πρέπει να κάνουμε κάτι για να εξασφαλίσουμε κοινό προσανατολισμό σε όλη την περιοχή της οθόνης. Η ευθυγράμμιση των μορίων μπορεί να επιτευχθεί απλά με την τριβή της εσωτερικής επιφάνειας του γυαλιού δημιουργώντας γρατσουνιές, Σχήμα 9.7. Τα μόρια τότε συγκεντρώνονται κατά μήκος των γρατσουνισμένων αυλακιών αντί εκτός αυτών, καθώς αυτό απαιτεί λιγότερη ενέργεια. Παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι ικανοποιητική για μικρής κλίμακας παραγωγή οθονών, είναι ακατάλληλη για

παραγωγή μεγάλης κλίμακας, επειδή είναι δύσκολο να εξασφαλίσουμε συνεπή ποιότητα παραγωγής κι επειδή είναι μία βρώμικη διαδικασία από μόνη της, που μπορεί να αφήσει σωματίδια σκόνης στο γυαλί, που αργότερα προκαλούν κακή ευθυγράμμιση των μορίων. Συνεπώς, στις οθόνες μαζικής παραγωγής συχνά χρησιμοποιούν και στρώματα ευθυγράμμισης, ενσωματώνοντας στην γυάλινη επιφάνεια. Σε αυτήν την περίπτωση, η δομή του υμενίου εκπληρώνει τον ρόλο των χαρακιών.

Προσανατολισμός υψηλής ενέργειας (High – energy orientation)

Προσανατολισμός χαμηλής ενέργειας (Low energy orientation)

Σχήμα 9.7 Η χρήση αυλακιών για την παραγωγή ομοιόμορφης ευθυγράμμισης στην περιοχή απεικόνισης.

Το τελικό μέρος της κατασκευής του στοιχείου είναι ο διαχωριστής. Αυτός καθορίζει το πάχος της δομής της συσκευής του υγρού κρυστάλλου και εξασφαλίζει ομοιόμορφου πάχους της περιοχής απεικόνισης. Οι διαχωριστές σχηματίζονται από υλικά όπως το γυαλί ή μικρά κομμάτια πλαστικού ή ίνα διασκορπισμένη σε στεγανοποιημένο μέσο, όπως η εποξική κόλλα, που κολλάει τα δύο κομμάτια γυαλιού μαζί και σφραγίζει την διάταξη.

9.4.3 Συσκευή στρεφόμενου νηματικού (TN) κρυστάλλου

Μια οθόνη υγρών κρυστάλλων λειτουργεί διαμορφώνοντας την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Η συσκευή απλής δομής που περιγράφεται παραπάνω δεν είναι κατάλληλη για οθόνη επειδή, για πρακτικούς σκοπούς, οι οπτικές της ιδιότητες όταν αλλάζει κατάσταση είναι ίδιες με αυτές όταν δεν αλλάζει. Η συσκευή TN υγρών κρυστάλλων είναι μια παραλλαγή της παραπάνω απλής διάταξης που έχει διαφορετικές οπτικές ιδιότητες στις ενεργές από αυτές που την χαρακτηρίζουν στις ανενεργές της καταστάσεις. Σε μια συσκευή TN υγρών κρυστάλλων τα γυάλινα υποστρώματα είναι προσανατολισμένα έτσι ώστε η κατεύθυνση των αυλακιών στην μια επιφάνεια να είναι κάθετα με την κατεύθυνση των αυλακιών της άλλης πλευράς. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9.8(a), όταν η διάταξη αυτή συμπληρωθεί από υγρό κρύσταλλο, τα μόρια δίπλα από το γυαλί θα ευθυγραμμιστούν με τα αυλάκια, και ανάμεσα στις δυο όψεις του γυαλιού η κατεύθυνση των μορίων περιστρέφεται αρμονικά και η μεταξύ τους γωνία είναι ίση με 90° . Αυτή η περιστροφή δίνει στην

συσκευή το όνομα της. Όταν τάση μεγαλύτερη από την κρίσιμη τάση εφαρμοστεί τα μόρια υγρού κρυστάλλου αυτά ευθυγραμμίζονται με την εφαρμοσμένη τάση, και η περιστροφή χάνεται όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9.8(b).

Σχήμα 9.8 Ο προσανατολισμός των μορίων σε μια συσκευή TN υγρού κρυστάλλου με (a) καμία τάση να εφαρμόζεται, και (b) $V > V_c$ να εφαρμόζεται.

Μπορούμε τώρα να δούμε πως μια τέτοια λειτουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια συσκευή. Μπορούμε να πολώσουμε το φως εισόδου της συσκευής, εξασφαλίζοντας ότι η διεύθυνση της ταλάντωσης του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλη στον άξονα των μορίων της επιφάνειας πρόσπτωσης του γυαλιού. Καθώς το φως κατευθύνεται μέσα στην διάταξη η διεύθυνση της πόλωσης του περιστρέφεται καθώς περιστρέφεται ο προσανατολισμός του μορίου, και η πόλωση του σχηματίζει γωνία ίση με 90° σε σύγκριση με την πόλωση του προσπίπτοντος φωτός. Μπορούμε τώρα να κάνουμε ένα από τα δυο πράγματα με έναν δεύτερο πολωτή στην έξοδο. Μπορούμε να τον προσανατολίσουμε έτσι ώστε η διεύθυνση πόλωσης να είναι παράλληλη με τον πρώτο πολωτή, όπου μπλοκάρεται το φως εξόδου από την συσκευή, ή μπορούμε να περιστρέψουμε τον αναλυτή έτσι ώστε η διεύθυνση πόλωσης να είναι 90° (τέμνεται) με τον πολωτή εισόδου, όπου εκπέμπεται το φως εξόδου από την συσκευή. Η δεύτερη περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 9.9(a).

Όταν η συσκευή αλλάζει κατάσταση, εφαρμόζοντας την τάση, η απώλεια της περιστροφής σημαίνει ότι δεν έχουμε οδηγήσει το φως και η διεύθυνση πόλωσης εξόδου του φωτός είναι ίδια με την διεύθυνση πόλωσης του σήματος εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να περάσει φως από τον αναλυτή αν ο πολωτής και ο αναλυτής τέμνονται κάθετα, Σχήμα 9.9(b). Όταν η τάση απομακρυνθεί τα μόρια επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση, μεταδίδεται φως, και η διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει εκ νέου. Η σημασία της καλής ευθυγράμμισης των μορίων τώρα είναι ξεκάθαρη. Η συσκευή λειτουργεί σωστά με προσεκτικά ευθυγραμμισμένους πολωτές για να λειτουργήσει σωστά, και θα ήταν αδύνατο να έχουμε πολωτές σωστά ευθυγραμμισμένους με τυχαία προσανατολισμένες περιοχές στην συσκευή.

Πρακτικά οι TN συσκευές δεν χρησιμοποιούν χωριστούς πολωτές και αναλυτές: αυτοί είναι μέρος της διάταξης της συσκευής και είναι προσκολλημένοι στις εξωτερικές επιφάνειες του γυαλιού. Επίσης, θα έχετε πλέον συνειδητοποιήσει ότι οι περισσότερες συσκευές δεν είναι συσκευές μετάδοσης: κοιτάζουμε το φως που ανακλάται από την οθόνη. Μια οθόνη μετάδοσης εύκολα μετατρέπεται σε οθόνη ανάκλασης προσθέτοντας μια επιφάνεια ανάκλασης πίσω από τον αναλυτή. Αν απαιτηθεί μια οθόνη χρώματος, προστίθενται φίλτρα χρώματος. Συνήθως, οι TN συσκευές αλλάζουν κατάσταση με τάσεις των 5V, και έχουν χρόνους απόκρισης περίπου 20 ms στους 20° C.

Σχήμα 9.9 Η χρήση μιας TN οθόνης με (a) καμία τάση να εφαρμόζεται, και (b) $V > V_c$ να εφαρμόζεται.

EPEYNA

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των οθονών TN είναι αυτό που λέγεται φαινόμενο αναπήδησης. Όταν η συσκευή αλλάζει κατάσταση, η ροή μέσα στο μόριο προκαλεί στα μόρια κοντά στο κέντρο να ξεπεραστούν (αν εφαρμόζεται τάση) ή να πηγαίνουν αντίστροφα στις αρχικές τους θέσεις (αν η τάση αφαιρείται). Μπορείτε να δείτε αυτό το φαινόμενο αν κοιτάξετε προσεκτικά σε μια οθόνη υγρού κρυστάλλου. Μην την κοιτάξετε απευθείας αλλά υπό μια οξεία γωνία, και επιλέξτε ένα μέρος της οθόνης που αναβοσβήνει συχνά. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήστε ένα LCD ρολόι και κοιτάξετε σε μια κουκίδα που δίνει τον παλμό κάθε δευτερολέπτου. Όπως αλλάζει κατάσταση η οθόνη η ένταση του φωτός εξόδου δεν αλλάζει καθαρά αλλά τρεμοσβήνει.

9.4.4 Πόλωση των συσκευών απεικόνισης TN

Επειδή απαιτούν χαμηλές τάσεις λειτουργίας και ρεύματα οι οθόνες υγρών κρυστάλλων οδηγούνται σχετικά εύκολα. Η πολυπλοκότητα του κυκλώματος οδήγησης εξαρτάται πολύ από τον τύπο της οθόνης.

9.4.4.1 Τμηματικές οθόνες

Ο πιο συνηθισμένος τύπος οθόνης είναι η τμηματική οθόνη. Σε αυτήν, επικαλύψεις των ηλεκτροδίων στις γυάλινες επιφάνειες έχουν χαραχθεί με συγκεκριμένο τρόπο. Συνήθως, μια επικάλυψη έχει τα τμηματικά σχέδια χαραγμένα σε αυτό, και η άλλη

έχει ένα πιο απλό σχέδιο που συμπεριφέρεται ως κοινό ψηφιακό ηλεκτρόδιο. Το Σχήμα 9.10(a) απεικονίζει τα χαραγμένα σχέδια για ένα ηλεκτρόδιο επτά τμημάτων. Μια τάση εφαρμόζεται στα κατάλληλα τμήματα για να ανάψει αυτά τα τμήματα της συσκευής και να απεικονίσει τους αριθμούς από 0 έως 9.

Σε οθόνες με μικρό αριθμό τμημάτων κάθε τμήμα οδηγείται χωριστά, και άρα έχει το δικό του κύκλωμα οδήγησης. Οι νηματικές συσκευές υγρών κρυστάλλων απαιτούν συνεχή εφαρμογή της τάσης αλλαγής για να βρίσκονται σε λειτουργία, και αυτή η τάση πρέπει να είναι μια a.c. κυματομορφή με μηδενική πόλωση για να αποφευχθεί η ζημιά της συσκευής. Το Σχήμα 9.10(b) απεικονίζει τις κυματομορφές μιας συνηθισμένης συσκευής. Συνήθως η συχνότητα οδήγησης είναι μεταξύ 1 και 20 kHz. Και το τμηματικό και το ψηφιακό ηλεκτρόδιο οδηγούνται από μια κυματομορφή με την ίδια πολικότητα. Όταν το τμηματικό ηλεκτρόδιο πρόκειται να ανάψει οι κυματομορφές μεταβάλλουν την φάση τους κατά 180° . Όταν το τμηματικό ηλεκτρόδιο πρόκειται να σβήσει οι κυματομορφές συμπίπτουν σε φάση. Παραδείγματα από συσκευές οδήγησης είναι οθόνες ρολογιών χειρός και τοίχου.

Ψηφιακό ηλεκτρόδιο (digit electrode)

Τμηματικό ηλεκτρόδιο (segment electrode)

Συνδέσεις (Connections)

Ψηφιακό ηλεκτρόδιο (digit electrode)

Τμηματικό ηλεκτρόδιο (segment electrode)

Τάση στα άκρα της συσκευής (Voltage across cell)

Σχήμα 9.10 (α) μορφή ηλεκτρόδιου για μια οθόνη επτά τμημάτων, και (β) κυματομορφές από άμεση οδήγηση μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων.

Σε οθόνες πολλαπλών τμημάτων, όπως αυτές των αριθμητικών υπολογιστών, ο αριθμός των συνδέσεων και τα στοιχεία του κυκλώματος οδήγησης που απαιτούνται αυξάνετε καθιστάμενος μη πρακτικός. Σε αυτή την περίπτωση τα τμήματα οδηγούνται χρησιμοποιώντας μια πολύπλοκη τεχνική οδήγησης. Σκεφτείτε, για παράδειγμα, μια συσκευή αριθμητικής απεικόνισης δώδεκα ψηφίων επτά τμημάτων, μέρος της οποίας απεικονίζεται στο Σχήμα 9.11(a). Αντί για ένα συγκεκριμένο τμήμα να είναι συνδεδεμένο στο δικό του κύκλωμα οδήγησης, είναι συνδεδεμένο σε ένα ηλεκτρόδιο που είναι κοινό με το ίδιο τμήμα καθενός από τα δώδεκα ψηφία. Αυτά τα ηλεκτρόδια ονομάζονται Y_1 - Y_7 στο Σχήμα 9.11(a). Κάθε ένα

από τα κοινά ηλεκτρόδια έχει την δική του σύνδεση, που ονομάζεται X_1 - X_{12} στο Σχήμα 9.11(b). Ο αριθμός των συνδέσεων στην οθόνη έχει άρα μειωθεί από 96(οχτώ ανά ψηφίο) σε 19. Ο αριθμός των κυκλωμάτων οδήγησης που απαιτούνται μπορεί να μειωθεί με την οδήγηση των ψηφιακών ηλεκτροδίων από μια πηγή. Αυτό λέγεται οδήγηση με υποδιαίρεση στον χρόνο και απεικονίζεται στο Σχήμα 9.11(b). Το θετικό μέρος της κυματομορφής οδήγησης εφαρμόζεται σε κάθε ψηφιακό ηλεκτρόδιο εναλλάξ, και τότε το αρνητικό μέρος εφαρμόζεται, κ.ο.κ. Ένα τμήμα αλλάζει κατάσταση όταν μια τάση ορθής πολικότητας εφαρμοστεί τον ίδιο χρόνο που εφαρμόζεται τάση από το ψηφιακό ηλεκτρόδιο.

Σχήμα 9.11 (a) συνδέσεις ηλεκτροδίου για μια πολύπλοκη οδήγηση μιας τμηματικής οθόνης, και (b) οδήγηση με υποδιαίρεση στο χρόνο της οθόνης.

Ένα πρόβλημα σ' αυτόν τον τύπο οθόνης είναι ότι εφαρμόζονται τάσεις σε τμήματα που δεν θα έπρεπε να αλλάζουν κατάσταση. Παρόλο που αυτές οι τάσεις δεν επαρκούν για πλήρη αλλαγή, μπορεί να εμφανιστεί μερική αλλαγή, μειώνοντας την αντίθεση της οθόνης. Αυτό λέγεται διασταύρωση ομιλίας. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν λεπτομερώς υπολογισμένες τάσεις για την μεγιστοποίηση της αντίθεσης της οθόνης, αλλά, όταν ο αριθμός των X και Y ηλεκτροδίων περάσει τα 200, η διασταύρωση ομιλίας δεν μπορεί να αποφευχθεί.

SAQ3

Εξηγήστε, χωρίς να συμβουλευτείτε το βιβλίο, γιατί χρησιμοποιούνται τεχνικές πολυπλεξίας και υποδιαίρεσης χρόνου για μεγαλύτερες οθόνες.

9.4.4.2 Οθόνες πινάκων

Το μεγαλύτερο πρόβλημα με τις τμηματικές οθόνες είναι ότι παρουσιάζουν πολύ μικρή ελαστικότητα: όταν η οθόνη σχεδιαστεί και χαραχθεί μπορεί πραγματικά να χρησιμοποιηθεί μόνο για ένα συγκεκριμένο σκοπό. Οι οθόνες πινάκων είναι πολύ πιο ελαστικές επειδή αποτελούνται από ένα πλέγμα από μικρά εικονοστοιχεία που μπορεί να αλλάξει κατάσταση για να σχηματισθούν χαρακτήρες και να απεικονίσουν γραφικά και εικόνες βίντεο. Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόδια έχουν την μορφή λωρίδων, με τις λωρίδες στο ένα γυάλινο κομμάτι να είναι κάθετες στις λωρίδες του

άλλου γυάλινου κομματιού. Η αλλαγή κατάστασης στα εικονοστοιχεία γίνεται όπου οι λωρίδες επικαλύπτονται, Σχήμα 9.12(α). Πρακτικά οι οθόνες πινάκων δεν μπορούν εύκολα να οδηγηθούν από πολύπλοκα κυκλώματα λόγω του αριθμού των στοιχείων που απαιτούνται για αποδεκτή ανάλυση. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με το χωρισμό της οθόνης σε δυο ή περισσότερα μέρη και την οδήγηση κάθε μέρους με πολύπλοκες τεχνικές. Ωστόσο, αυτό είναι σχετικά πολύπλοκο και ακόμη έχει το πρόβλημα της διασταύρωσης ομιλίας. Εξελίξεις στις τεχνολογίες ημιαγωγών έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη σύγχρονων οθονών γνωστών ως ενεργών οθονών πινάκων, που πραγματικά αντιμετωπίζουν τα προβλήματα αυτά. Στις ενεργές οθόνες πινάκων χρησιμοποιείται μια πηγή οδήγησης που αποτελείται από έναν πυκνωτή και ένα διακόπτη τρανζίστορ σε κάθε περιοχή εικονοστοιχείου, Σχήμα 9.12(β). Ο πυκνωτής αποθηκεύει το φορτίο του σήματος οδήγησης. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα δεν χρειάζεται να ανανεώνεται πολύ συχνά και είναι δυνατές πολύ μεγαλύτερες συστοιχίες. Επιπρόσθετα, το τρανζίστορ αποτρέπει την παραμόρφωση crosstalk με το να αλλάζει κατάσταση στην συσκευή όταν εφαρμόζεται η πλήρης τάση αλλαγής.

Σχήμα 9.12 (α) τα σχέδια του ηλεκτροδίου για μια οθόνη πινάκων, και (β) λεπτομέρεια των εξαρτημάτων αλλαγής σε κάθε περιοχή εικονοστοιχείου για μια οθόνη ενεργού πίνακα.

Σε έναν οδηγό ενεργού πίνακα ένα από τα κομμάτια του γυαλιού αντικαθίσταται από μονό κρυσταλλικό στρώμα πυριτίου, για τους οδηγούς μετάλλου οξειδίου ημιαγωγού (MOS) τρανζίστορ, είτε από μια γυάλινη επιφάνεια επιστρωμένη με ένα λεπτό στρώμα από πυρίτιο ή από σουλφίδιο καδμίου, για ένα λεπτού υμενίου οδηγό τρανζίστορ (TNT). Τα εξαρτήματα του κυκλώματος είναι κατασκευασμένα στο υπόστρωμα. Το πλεονέκτημα των οθονών TNT είναι ότι βασίζονται στο γυαλί έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει οθόνη μετάδοσης.

9.4.5 Φεροηλεκτρικές (FE) οθόνες

Οι νηματικές οθόνες υγρών κρυστάλλων έχουν δυο μεγάλα μειονεκτήματα:

1. Είναι, σχετικά, αργές συσκευές αφού έχουν χρόνους αλλαγής δεκάδων ms,
2. Δεν είναι διβάθμιοι. Δηλαδή χρειάζονται την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή τάσης για να παραμείνουν σε αλλαγή κατάστασης.

Και τα δυο αυτά προβλήματα μπορούν, ενδεχομένως, να λυθούν χρησιμοποιώντας την φεροηλεκτρική σμεκτική C* φάση σε μια συσκευή. Στις περισσότερες τωρινές FE οθόνες ο υγρός κρύσταλλος είναι στριμωγμένος ανάμεσα σε γυάλινες πλάκες που χωρίζονται από απόσταση ίση μονάχα 1-2 μm. Αυτό αποκλείει την εμφάνιση της κανονικής μετάπτωσης των κλίσεων στα στρώματα, και άρα όλα τα μόρια έχουν κλίση προς την ίδια κατεύθυνση, Σχήμα 9.13(α), και υπάρχει μια διπολική ροπή κάθετη προς την γυάλινη επιφάνεια. Όταν εφαρμοστεί μια τάση κατάλληλης πολικότητας, η αλληλεπίδραση του μόνιμου δίπολου και του εφαρμοσμένου πεδίου περιστρέφει τα μόρια κατά τον άξονα περιστροφής, Σχήμα 9.13(β) και τα μόρια δείχνουν προς την αντίθετη πλευρά. Αυτή η αλλαγή παρουσιάζεται σε μια κλίμακα χρόνου δεκάδων μικρο-seconds και είναι διβάθμια: τα μόρια παραμένουν στην νέα κατάσταση μέχρι να εφαρμοστεί μια τάση αντίθετης πολικότητας. Αυτό οδηγεί σε πιο φωτεινές οθόνες και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Το ηλεκτρικό πεδίο έχει φορά προς την σελίδα

Εγκάρσια διπολική ροπή προς την σελίδα

Το ηλεκτρικό πεδίο έχει φορά προς τα έξω

Εγκάρσια διπολική ροπή προς τα έξω

Σχήμα 9.13 Η αλλαγή ενός FE κυττάρου εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο.

Δυστυχώς, η χρήση των FE υγρών κρυστάλλων παρουσιάζει τις δυσκολίες της, των οποίων η πιο μεγάλη είναι ότι αυτές οι συσκευές πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή ή αλλιώς χάνουν την ευθυγράμμιση που είναι απαραίτητη για λειτουργία υψηλής επίδοσης. Παρόλα αυτά, ο γρήγορος χρόνος αλλαγής τους τις κάνει πολύ κατάλληλες για μεγάλης επιφάνειας, υψηλής πυκνότητας πληροφορίας οθόνες.

9.5 Οθόνες φωταύγειας

Η φωταύγεια είναι μια διαδικασία όπου παράγεται φως όταν εφαρμόζεται ενέργεια σε ένα υλικό. Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες φωταύγειας, που εξαρτώνται από τον τρόπο που παρέχεται η ενέργεια. Αυτές είναι

- Φωτοφωταύγεια , όπου η ενέργεια παρέχεται από το φως

- Καθοδοφωταύγεια, όπου η ενέργεια παρέχεται μέσω του βομβαρδισμού από μια δέσμη ηλεκτρονίων
- Ηλεκτοφωταύγεια όπου η ενέργεια παρέχεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Πιθανόν να είστε αρκετά εξοικειωμένοι με όλους αυτούς τους τρεις τύπους φωταύγειας. Όταν η τραπεζική επιταγή ελέγχεται μέσω φωτισμού με UV φως, φωτοφωταυγή χαρακτηριστικά ασφάλειας ακτινοβολούν και αποδεικνύουν ότι είναι έγκυρη. Κάθε φορά που ανάβετε την τηλεόραση σας η εικόνα στην οθόνη είναι παρούσα εξαιτίας της καθοδοφωταύγειας, και η ηλεκτροφωταύγεια εξασφαλίζει ότι η LED οθόνη σε ένα ρολόι είναι ορατή.

Από τα τρία είδη φωταύγειας, οι πιο επιτυχείς συσκευές απεικόνισης είναι αυτές που βασίζονται στην καθοδοφωταύγεια και την ηλεκτροφωταύγεια και άρα θα επικεντρωθούμε σε αυτές. Πρώτα, ωστόσο, θα μελετήσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια την φωταύγεια.

9.5.1 Φωταύγεια

Η φωταύγεια είναι μια διαδικασία κατά την οποία η ενέργεια απορροφάται από ένα υλικό, μετακινώντας τα ηλεκτρόνια της δομής του σε διεγερμένες καταστάσεις, και μετά μέρος της ενέργειας αυτής εκπέμπεται με τη μορφή φωτός. Στο κεφάλαιο 2 συζητήσαμε για όρο του χρόνου ζωής της διεγερμένης κατάστασης, και αν η φωταύγεια συνεχιστεί για χρόνο ίσο με αυτόν τον χρόνο, τότε την καλούμε φθορισμό. Αν, ωστόσο, η φωταύγεια συνεχιστεί για χρόνο πολύ περισσότερο από τον αναμενόμενο τότε την λέμε φωσφορισμό. Θα έχετε δει φωσφορισμό στην πράξη αν έχετε δει αντικείμενα ‘που λάμπουν στο σκοτάδι’: ο φώσφορος του αντικειμένου απορροφά ενέργεια από το γύρω φως, και εκπέμπει το δικό του. Συνήθως είναι πολύ αδύναμο και έτσι μπορείτε να το παρατηρήσετε μονάχα κάτω από συνθήκες αμυδρού φωτισμού και επειδή χαρακτηρίζεται από μεγάλο χρόνο ζωής η εκπομπή μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και αν το περιβάλλον φως απομακρυνθεί. Γενικά, οι οθόνες φωταύγειας βασίζονται σε φωσφορούχα υλικά αφού το φαινόμενο ‘μνήμης’ της διατήρησης του φωσφόρου επιτρέπει στην συσκευή να έχει εφαρμογές. Σε αυτό το κείμενο μπορούμε να δούμε ότι πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με την χρήση της λέξης ‘φώσφορος’. Εδώ, δεν αναφέρεται το στοιχείο φώσφορος, με χημικό σύμβολο P, αλλά σε ένα υλικό που φωσφορίζει.

EPEYNA

Βρείτε γιατί τα υλικά αυτά λέγονται φώσφοροι.

9.5.2 Οθόνες φωτοβολίας καθόδου-Η λυχνία καθοδικής ροής (CRT).

Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ανάλυση, υψηλή αντίθεση, καλό χρώμα, καλή φωτεινότητα και ευκολία στη χρήση, οι CRT είναι πολύ ανταγωνιστικές, και γι' αυτό το λόγο, είναι ακόμη συχνά, η πρώτη επιλογή σε εφαρμογές που δίνουν πολύ μεγάλη σημασία στα παραπάνω χαρακτηριστικά. Τα βασικά μέρη μίας CRT είναι το κανόνι ηλεκτρονίων, οι πλάκες απόκλισης και μία οθόνη φωσφόρου, όλα εσωτερικά κλεισμένα σε ένα σωλήνα κενού, Σχήμα 9.14.

Κανόνι ηλεκτρονίων (Electron gun)

Πλακίδια απόκλισης κατά τον άξονα x (Deflection plates)

Πλακίδια απόκλισης κατά τον άξονα y (y – deflection plates)

Δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam)

Οθόνη φωσφόρου (Phosphor screen)

Σχήμα 9.14 Ένα σχηματικό διάγραμμα της CRT.

Το πυροβόλο ηλεκτρονίων λειτουργεί παράγοντας ηλεκτρόνια από ένα ζεστό νήμα, που κατόπιν εστιάζονται και παίρνουν την μορφή δέσμης από έναν φακό ηλεκτρονίων και επιταχύνονται προς την οθόνη φωσφόρου. Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνεται εφαρμόζοντας κατάλληλα δυναμικά στις οριζόντιες και κάθετες πλάκες απόκλισης. Η ηλεκτροστατική απόκλιση ενός ηλεκτρονίου από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες απεικονίζεται στο σχήμα 9.15.

Σχήμα 9.15 Ηλεκτροστατική απόκλιση μιας δέσμης ηλεκτρονίων.

Μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος της απόκλισης χρησιμοποιώντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, που μας δίνει

$$F = ma = qE \quad (9.6)$$

όπου F είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα ηλεκτρόνιο, μάζας m και φορτίου q , από πεδίο έντασης E , και a είναι η επιτάχυνση του ηλεκτρονίου. Το ηλεκτρόνιο

εισέρχεται στις πλάκες διαδιδόμενο κατά την κατεύθυνση του άξονα x , με αρχική ταχύτητα v_o . Αφού η δύναμη απόκλισης βρίσκεται κατά μήκος του άξονα y , $a = a_y$. Η x συνιστώσα της ταχύτητάς του δεν αλλάζει, έτσι το ηλεκτρόνιο χρειάζεται χρόνο

$T=L/v_o$ για να ταξιδέψει ανάμεσα στις πλάκες. Η απόσταση κατά την οποία το ηλεκτρόνιο αποκλίνει στην κατεύθυνση y , y_1 , δίνεται από

$$Y_1 = \frac{1}{2}a_y t^2 = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} T^2 = \frac{1}{2} \frac{qEL^2}{m v_o^2} \quad (9.7)$$

Το ηλεκτρόνιο εξέρχεται από τις πλάκες και συνεχίζει σε ευθεία τροχιά που σχηματίζει γωνία θ με την αρχική διεύθυνση διάδοσης, όπου θ δίνεται από

$$\tan\theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{(qE/m)(L/v_o)}{v_o} = \frac{qEL}{mv_o^2} = y_2 \quad (9.8)$$

όπου v_x και v_y είναι οι συνιστώσες ταχύτητας στην x και y κατεύθυνση αντίστοιχα, και v_y είναι το ολοκλήρωμα του a_y σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Λυμένο Παράδειγμα 2

Ένα ζευγάρι από πλάκες απόκλισης μήκους 3cm και απόστασης 1cm χρησιμοποιούνται για να αποκλίνουν μία δέσμη ηλεκτρονίων. Ποιο είναι το μέγιστο δυνατό μέγεθος της οθόνης αν η οθόνη είναι 20cm από την έξοδο των πλακών;

Λύση

Το μέγιστο μέγεθος της οθόνης είναι διπλάσιο από τη μέγιστη απόκλιση. Η συνολική απόκλιση είναι y , όπου

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{1}{2} \frac{qEL^2}{m v_o^2} + \frac{qEL}{m v_o^2} = \frac{qEL}{m v_o^2} \left[\frac{L}{2} + D \right]$$

Έτσι το y_{max} αντιστοιχεί στην εφαρμογή του μέγιστου πεδίου, E_{max} . Δεν γνωρίζουμε το E_{max} αλλά μπορούμε να δούμε ότι η μέγιστη τιμή του y_1 είναι $d/2$. Αν αντικαταστήσουμε αυτό στην εξίσωση (9.7), και λύσουμε ως προς E έχουμε

$$E_{max} = \frac{dmv_o^2}{qL^2}$$

Το μέγιστο μέγεθος της οθόνης είναι ίσο με $2y_{max}$ που είναι

$$2y_{max} = \frac{2qL}{mv_o^2} \frac{dmv_o^2}{qL^2} \left[\frac{L}{2} + D \right] = \frac{2d}{L} \left[\frac{L}{2} + D \right] = \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} + 20 \right] = 14.3cm$$

Όπως βλέπουμε, πρακτικά σε μία CRT, οι παράλληλες πλάκες επιβάλλουν ένα μη αποδεκτό όριο στην μέγιστη γωνία απόκλισης και άρα, στην πράξη, οι πλάκες είναι λυγισμένες όπως απεικονίζεται στο σχήμα 9.14. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρομαγνήτες, για την απόκλιση της δέσμης. Αυτοί επιτρέπουν τη χρήση μεγαλύτερων δυναμικών επιτάχυνσης, που παράγουν ένα μικρότερο μέγεθος κουκίδας και άρα, μία πιο φωτεινή εικόνα στην οθόνη. Τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα απόκλισης, ωστόσο, σαρώνουν πιο αργά από τα ηλεκτροστατικά συστήματα.

Η οθόνη CRT αποτελείται από μικρά τεμάχια φωσφόρου, για παράδειγμα σουλφίδιο ψευδάργυρου, με διάμετρο περίπου 5μm σε ένα στρώμα αλουμινίου, με πάχος περίπου 0.1μm, που έχει εναποτεθεί στην πλευρά του κανονιού των ηλεκτρονίων, σχήμα 9.16. Το στρώμα αλουμινίου επιτελεί δυο πράγματα. Πρώτον, αποτρέπει δημιουργία φορτίου στα μικρά τεμάχια φωσφόρου, πράγμα που θα απωθούσε τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια και, δεύτερον, αντανακλά το εκπεμπόμενο φως που ταξιδεύει προς το κανόνι, πίσω προς την πλευρά εξόδου της οθόνης.

Δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam)	Οθόνη (screen)	Φως (Light)
Στρώμα αλουμινίου (Aluminium layer)	Σωματίδια φωσφόρου (Phosphor particles)	

Σχήμα 9.16 Η δομή της οθόνης φωσφόρου.

Οι συμβατικές CRT έχουν 625 γραμμές στην Ευρώπη και 525 γραμμές στην Αμερική, παρόλο που οι υψηλής ανάλυσης οθόνες έχουν 1125 γραμμές. Η εικόνα στην οθόνη πρέπει να ανανεώνεται τουλάχιστον 45 φορές ανά δευτερόλεπτο, για να μην τρεμοσβήνει. Η ανάγκη να ανανεωθεί ολόκληρη η οθόνη με αυτόν το ρυθμό, μπορεί να αποφευχθεί, ωστόσο, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα σάρωσης που χωρίζει την οθόνη σε δύο μισά πλέγματα. Στην πρώτη σάρωση οι γραμμές 1,3,5,...

ανανεώνονται και στην δεύτερη σάρωση, 2,4,6... ανανεώνονται. Αυτό υπερθέτει αποτελεσματικά τις εικόνες σε δύο διαδοχικές σαρώσεις, και ο εγκέφαλος προσλαμβάνει την εικόνα ανανεόμενη με διπλάσιο ρυθμό από αυτόν με τον οποίο έχει πραγματικά ανανεωθεί. Αυτό σημαίνει ότι ολόκληρη η εικόνα χρειάζεται να ανανεωθεί τουλάχιστον 22 ½ φορές το δευτερόλεπτο. Στην πράξη οι ρυθμοί είναι 25 φορές ανά δευτερόλεπτο στην Ευρώπη και 30 φορές ανά δευτερόλεπτο στην Αμερική. Η φωτεινότητα της οθόνης αλλάζει μεταβάλλοντας το ρεύμα της δέσμης, που με τη σειρά του προκαλεί παραγωγή περισσότερων ή λιγότερων ηλεκτρονίων από το θερμαινόμενο νήμα. Η μέγιστη φωτεινότητα περιορίζεται από το γεγονός ότι, με μεγάλα ρεύματα δέσμης, η οθόνη φωσφόρου αλλοιώνεται. Ο φώσφορος επίσης αλλοιώνεται, όταν η οθόνη ακτινοβολείται για πολύ καιρό. Το φαινόμενο αυτό μπορείτε να το παρατηρήσετε στις παλαιότερες, μονόχρωμες οθόνες, όπου το αρχικό κείμενο οθόνης φαίνεται μέχρι κάποιος να χρησιμοποιήσει τη μηχανή. Αν κοιτάξετε προσεκτικά, μπορείτε συχνά να δείτε την θαμπή σιλουέτα του κειμένου στην επιφάνεια της οθόνης ακόμη κι όταν δείχνει κάτι άλλο. Αυτή η ζημιά μπορεί να είναι παροδική ή μόνιμη. Η ζημιά στην οθόνη είναι επίσης ο λόγος που τα περισσότερα συστήματα υπολογιστών τώρα χρησιμοποιούν προστασία οθόνης, που παράγει μία εικόνα που κινείται διαρκώς, ή σβήνουν την οθόνη (που επίσης εξοικονομεί ενέργεια).

Το χρώμα στη CRT έχει επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό κανόνα για κάθε ένα από τα τρία χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε, Σχήμα 9.17. Στην θέση μιας απλής επικάλυψης από έναν φώσφορο, η οθόνη είναι τώρα καλυμμένη από κουκίδες τριών φωσφόρων, ένας που εκπέμπει μπλε φως ένας που εκπέμπει πράσινο φως και ένας που εκπέμπει κόκκινο φως. Προς την πλευρά του κανονίου των ηλεκτρονίων τοποθετείται μια μάσκα, που είναι μία μεταλλική οθόνη με τρύπες. Τα κανόνια ηλεκτρονίων έχουν μία ελαφρά κλίση το ένα με το άλλο, έτσι ώστε οι τρεις δέσμες να συμπίπτουν στην μάσκα. Έχοντας περάσει από μία από τις τρύπες της, οι δέσμες τότε χωρίζουν ξανά και φωτίζουν τον κατάλληλο φώσφορο. Το χρώμα της εικόνας αλλάζει μεταβάλλοντας τη σχετική φωτεινότητα των τριών χρωμάτων εξόδου.

Μάσκα με οπή (shadowmask with hole) Οθόνη φωσφόρου με στοίγματα

Σχήμα 9.17 Η επίτευξη χρωμάτων στη CRT.

Η καλή ποιότητα εικόνας απαιτεί προσεκτική ευθυγράμμιση της μάσκας, της οθόνης και των κανονιών, και την εξάλειψη παρεμβολών από μαγνητικά και

ηλεκτρικά πεδία. Υπάρχει επίσης κάποια απώλεια ανάλυσης σε σύγκριση με μία μονόχρωμη οθόνη με την ίδια πυκνότητα «κουκίδων». Αφού τώρα τρεις φυσικές κουκίδες αντιστοιχούν σε μία μονή «κουκίδα εικόνας». Συνηθισμένοι φώσφοροι είναι: σουλφίδιο του ψευδαργύρου αναμεμιγμένο με ασήμι (μπλε), καδμιούχο σουλφίδιο του ψευδαργύρου αναμεμιγμένο με χαλκό (πράσινο) και οξικό σουλφίδιο του υττερβίου αναμεμιγμένο με ευρώπιο και τέρβιο (κόκκινο).

EPEYNA

Χρησιμοποιήστε τη λειτουργία παύσης στο βίντεό σας για να παγώσετε μία εικόνα στην οθόνη (μπορείτε επίσης να το κάνετε αυτό με την παύση του παιχνιδιού ενός υπολογιστή) και κοιτάξτε προσεκτικά την οθόνη ικανοποιήστε την περιέργειά σας ότι το χρώμα, στην πραγματικότητα, είναι φτιαγμένο από μικρές κουκίδες από κόκκινους πράσινους και μπλε φωσφόρους.

9.5.3 Ηλεκτροφωταύγεια

Η CRT είναι μια πολλαπλών ρόλων συσκευή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπλοκες συσκευές απεικόνισης. Ωστόσο, υστερεί σε πολλές εφαρμογές, λόγω δυο σημαντικών μειονεκτημάτων: έχει σχετικά χαμηλό λόγο επιφάνεια οθόνης ως προς τον όγκο, και απαιτεί υψηλή παροχή τάσης. Έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια στην ανάπτυξη επίπεδων οθονών CRT, όπου το κανόνι ηλεκτρονίων είναι τοποθετημένο στην κατεύθυνση της οθόνης φωσφόρου αντί να είναι από πίσω της. Ωστόσο, αυτό χάνει την συμμετρία της αρχικής διάταξης και υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις αποστάσεις που πρέπει να καλύψουν τα ηλεκτρόνια, εξαρτώμενα από το πού θα πρέπει να βρίσκονται στην οθόνη. Επιπρόσθετα, η δέσμη πρέπει να στραφεί σχετικά σε μία οξεία γωνία, για να χτυπήσει την οθόνη. Τα προβλήματα αυτά σημαίνουν ότι, παρόλο που η πρώτη επίπεδη CRT έχει σχεδιαστεί από το 1956, υπάρχει μια στροφή προς άλλες τεχνολογίες, που είναι πιο ώριμες και ταιριάζουν πιο πολύ στη λειτουργία της επίπεδης οθόνης. Από αυτές, πιθανότατα η πιο επιτυχής είναι η LCD οθόνη, για την οποία έχουμε ήδη παρουσιαστεί. Άλλη μία επιτυχής τεχνολογία είναι η οθόνη ηλεκτροφωταύγειας.

Οι οθόνες ηλεκτροφωταύγειας (ELDs) είναι ενεργές οθόνες στις οποίες παράγεται φως, όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοστεί στο υλικό. Οι οθόνες αυτού του τύπου είναι στερεάς κατάστασης και άρα, είναι εύκολες στο χειρισμό. Η ηλεκτροφωταύγεια μπορεί να είναι δύο ειδών: 'πραγματική ηλεκτροφωταύγεια' ή

‘φωταύγεια έγχυσης φορτίου’. Στις πραγματικές οθόνες ηλεκτροφωταύγειας, το φως παράγεται μέσω της διέγερσης μέσω κρούσης ηλεκτρονίων μιας φωτοεκπέμπουσας ουσίας, τα ηλεκτρόνια διεγείρονται από μία τάση που εφαρμόζεται ανάμεσα σε ηλεκτρόδια, ανάμεσα στα οποία είναι τοποθετημένο το υλικό φωταύγειας. Αυτές οι οθόνες συνήθως αναφέρονται ως απλά οθόνες ηλεκτροφωταύγειας. Οι οθόνες φωταύγειας έγχυσης φορτίου παράγουν φως όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε μία ρη επαφή, με άλλα λόγια οθόνες LED. Θα αρχίσουμε την ανάλυση αυτή αρχικά παρουσιάζοντας τις οθόνες ηλεκτροφωταύγειας και μετά τις οθόνες LED, την αρχή λειτουργίας των οποίων ήδη έχουμε αναλύσει στο Κεφάλαιο 4.

9.5.4. Οθόνες ηλεκτροφωταύγειας

Η ηλεκτροφωταύγεια από τη σκόνη του σουλφιδίου του ψευδαργύρου ανακαλύφθηκε από τον G.Destriau στην Γαλλία το 1936. Το γεγονός αυτό το ακολούθησε η ανακάλυψη ενός διάφανου ηλεκτροδίου, γυαλιού τύπου nesa, το 1947, το οποίο προκάλεσε την εξέλιξη σε πλήρη κλίμακα των υλικών ηλεκτροφωταύγειας, για την κατασκευή μιας επίπεδης πηγής φωτός. Οι πρώτες ELD οθόνες καλούνται εναλλασσομένου ρεύματος -συσκευές διασποράς ηλεκτροφωταύγειας, εξαιτίας του γεγονότος ότι το υλικό φωτοβολίας είναι σε μορφή σκόνης και διασκορπίζεται σε ένα διάφανο, μονωτικό υλικό, σφηνωμένο ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, Σχήμα 9.18. Επειδή δεν υπάρχει διαδρομή αγωγιμότητας ανάμεσα στα ηλεκτρόδια αυτές οι συσκευές μπορούν να οδηγηθούν μόνο από εναλλασσόμενη τάση. Παρόλο που αναπτύχθηκαν συσκευές συνεχούς ρεύματος, η απογοήτευση όσον αφορά τον χρόνο ζωής των οθονών και η ανάγκη για υψηλές τάσεις λειτουργίας προκάλεσαν την διακοπή της κατασκευής τέτοιων οθονών στα τέλη του 1960. Το ενδιαφέρον για τις οθόνες αυτές αναθερμάνθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970, με τη ανάπτυξη οθονών ηλεκτροφωταύγειας λεπτών υμενίων (TFELDs) και μονοχρωματικές οθόνες TFEL βρίσκονται σε μαζική παραγωγή από τα μέσα του 1980. Οι μονάδες TFELD που είναι τώρα διαθέσιμες στην αγορά έχουν όλα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για να παράγουν υψηλής πληροφορίας περιεχόμενο σε επίπεδες οθόνες με την ποιότητα της εικόνας των CRT. Επιπρόσθετα, η στερεάς κατάστασης φύση αυτών των οθονών, προσφέρει ανθεκτικότητα, που είναι επιθυμητή σε φορητές εφαρμογές.

Κύκλωμα οδήγησης εναλλασσομένου ρεύματος (a.c. driver)

Σωματίδιο φωσφόρου (Phosphor particle)

Ηλεκτρόδιο ανάκλασης (Reflecting electrode)

Στρώμα εμπέδησης (Impedance layer)

Διηλεκτρικό (Dielectric)

Διαπερατό ηλεκτρόδιο (Transparent electrode substrate)

Σχήμα 9.18 Η δομή μίας οθόνης φωταύγειας διασποράς εναλλασσομένου ρεύματος φωτοβολίας.

Η δομή μίας TFEL απεικονίζεται στο Σχήμα 9.19(α). Το λεπτό στρώμα υμενίου από φώσφορο εκπέμπει φως όταν ένα αρκετά μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στα άκρα του. Συνήθως $E = 1.5 \text{ MV cm}^{-1}$. Εξαιτίας αυτού του υψηλού πεδίου, τυχόν ατέλειες στο υμένιο θα προκαλέσουν βραχυκύκλωμα που μπορεί να καταστρέψει τη συσκευή, και έτσι προστίθενται μονωτικά στρώματα και στις δύο πλευρές του στρώματος ηλεκτροφωταύγειας. Εκτός του περιορισμού του μέγιστου ρεύματος, αυτά τα στρώματα επίσης αποθηκεύουν φορτίο, το οποίο 'ενισχύει' το ηλεκτρικό πεδίο και αυξάνει σημαντικά την απόδοση της συσκευής. Το ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας τα ηλεκτρόδια, από τα οποία τουλάχιστον το ένα πρέπει να είναι διάφανο, για να επιτρέψει την διαφυγή του εκπεμπόμενου φωτός.

Το Σχήμα 9.19 (β) απεικονίζει την καμπύλη του φωτός εξόδου ως προς την μέγιστη τάση για μία TFELD. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της καμπύλης είναι ότι η ενεργοποίηση είναι πολύ απότομη. Αυτό ωφελεί τα απλά κυκλώματα οδήγησης, επειδή δεν επιτρέπει την εμφάνιση του φαινομένου της διασταύρωσης ομιλίας. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύπλοκα κυκλώματα οδήγησης ακόμα και για τους μεγαλύτερους, πιο περίπλοκους πίνακες. Το Σχήμα 9.19(γ) απεικονίζει τη μορφή της εξόδου από τη συσκευή ως συνάρτηση της εφαρμοσμένης τάσης.

Μονωτής (Insulator)

Φώσφορος (Phosphor)

Μονωτής (Insulator)

ITO

Γυαλί (glass)

Έξοδος (output) – Μέγιστη τάση (peak voltage)

Εφαρμοζόμενη τάση (Applied Voltage)

Φωτεινή έξοδος (Light output)

Σχήμα 9.19 (α) Η δομή μίας TFELD, (β) Η καμπύλη εξόδου κατά την τάση που εφαρμόζεται και (γ) Η μορφή της εξόδου.

Το μεγάλο μειονέκτημα των TFELD είναι η ανάγκη για υψηλές τάσεις λειτουργίας. Η οδήγηση πρέπει να γίνει από ολοκληρωμένα κυκλώματα, ικανά να μεταδώσουν παλμούς τάσης έως και 200V, ενώ ταυτόχρονα να παράσχουν χαμηλή λογική τάση στη συσκευή. Αυτό απαιτεί την εξέλιξη ειδικών μικροεπεξεργαστών που να έχουν εξίσου χαμηλή και υψηλή τάση, στο σχέδιο του κυκλώματος στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Μία από τις προκλήσεις στην εξέλιξη των TFELD είναι η παραγωγή χρώματος. Το χρώμα στις TFELD επιτυγχάνεται φιλτράροντας την έξοδο με ένα λευκό φώσφορο, ή χρησιμοποιώντας κόκκινους, πράσινους και μπλε φωσφόρους. Παρόλο που αποδοτικοί κόκκινοι και πράσινοι φώσφοροι ήταν διαθέσιμοι για αρκετό καιρό, μόνο πρόσφατα έχουν εργαστηριακά παρουσιασθεί μπλε και λευκοί φώσφοροι, ικανοποιητικής φωτεινότητας και χρόνου ζωής. Ωστόσο, εμπορικές, έγχρωμες TFELD έχουν μεγάλη πιθανότητα να εμφανιστούν στο κοντινό μέλλον.

Μία πολλά υποσχόμενη εφαρμογή των TFELD είναι οι μικρές, υψηλής ανάλυσης οθόνες που τοποθετούνται στο κεφάλι. Σε αυτές η οθόνη στηρίζεται στα γυαλιά που προβάλλουν την εικόνα σε μια οθόνη που το εύρος της μπορεί να είναι από αυτό μιας οθόνης υπολογιστή έως αυτής της εικόνας πλήρους βύθισης κατάλληλης για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μία ενεργή οθόνη πινάκων και οι συσκευές πρώτης γενιάς βασίζονται σε ένα μέγεθος εικονοστοιχείων 24 x 24 μm , που παρέχει μία ανάλυση ελαφρώς μεγαλύτερη από 40 γραμμές ανά χιλιοστό. Μία τυπική απόδοση χαρακτηριστικών για μία τέτοια οθόνη σε μορφή VGA (640 x 480) περιλαμβάνει μία φωτεινότητα διπλάσια από αυτήν μίας τηλεόρασης σπιτιού, με αντίθεση ίση με 100:1, με κατανάλωση ισχύος ίση με 200 mV, με πάχος 2mm και βάρος 4g. Πραγματικά αυτή είναι μία τεχνολογία που προκαλεί την υπεροχή της CRT!

9.5.5. Οθόνες LED

Η κατασκευή και η αρχές λειτουργίας των LED έχουν ήδη συζητηθεί στο Κεφάλαιο 4, και έτσι δε θα επαναλάβουμε αυτά που ήδη έχουν υπωθεί. Αρκεί να σημειωθεί ότι τα πλεονεκτήματα, χρήσης LED, πηγάζουν από το γεγονός ότι πρόκειται για πηγές φωτός υψηλής αξιοπιστίας, απαιτούν χαμηλή τάση οδήγησης και έτσι εύκολα

λειτουργούν με ολοκληρωμένα ημιαγωγικά κυκλώματα οδήγησης, και χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς διαμόρφωσης του σήματος τους. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι καταναλώνουν, σχετικά, αρκετή ενέργεια, που ανέρχεται από μερικά milliwatts σε αρκετές δεκάδες milli-watts και είναι ακριβά. Ωστόσο, η κατανάλωση ισχύος είναι σχετικά μικρότερη από την αντίστοιχη σε εξαρτήματα όπως η λυχνία ή ηλεκτρική λυχνία και, όταν αυτό συνδυαστεί με την αξιοπιστία τους, προκύπτει ότι τα LED μπορούν να καταλάβουν μία καλά εδραιωμένη θέση σε μία ευρεία ποικιλία οθονών.

Η απλούστερη εφαρμογή των LED είναι ως λάμπες ένδειξης. Ένα LED είναι αυτό που από τη φύση του καλείται εκπομπός Lambertian, που σημαίνει ότι έχει αριθμητικό άνοιγμα ίσο με 1, και σε μια γωνία 60° ως προς την κάθετο στην επιφάνεια του LED η ενέργειά του εξακολουθεί να είναι η μισή από αυτήν που εκπέμπει στην διεύθυνση της καθέτου στην επιφάνεια του LED, Σχήμα 9.20 (α). Αυτό μπορεί να κάνει το LED να φαίνεται αρκετά αμυδρό και η φωτεινότητα βελτιώνεται τοποθετώντας ανακλαστικές γύρω από τη συσκευή και κλείνοντάς τη με ένα πλαστικό περιτύλιγμα που έχει το σχήμα φακού. Αυτό προβάλλει περισσότερο φως απευθείας έξω από την επιφάνεια του LED, μειώνοντας τη γωνία μισής ισχύος, Σχήμα 9.20(β). Για μία λάμπα ένδειξης, μία καλή γωνία μισής ισχύος είναι 20° .

Ένταση (Intensity)

Σχήμα 9.20 Η ένταση σε συνάρτηση με τη γωνία εξάρτησης για (α) ένα LED χωρίς εξωτερική τροποποίηση, και (β) ένα τροποποιημένο LED.

Σε αντίθεση με τις LCD και ELD συσκευές, δεν συνηθίζεται να κατασκευάζονται μεγάλης περιοχής τμηματικές οθόνες LED: Το μέγεθος μίας τέτοιας οθόνης περιορίζεται από την ανάγκη στρώματος ενός κρυστάλλου και τα LED είναι συνήθως φτιαγμένα από τετραγωνικούς κρυστάλλους πλευράς ίσης με 0.3 mm, παρόλο που οθόνες μεγαλύτερες από αυτές καλούνται μονολιθικές οθόνες, μπορούν να κατασκευαστούν. Ένα παράδειγμα από μία μονολιθική οθόνη επτά στοιχείων απεικονίζεται στο Σχήμα 9.21. Ένα πλεονέκτημα της μονολιθικής οθόνης είναι ότι ένα ακριβές σχέδιο εκπομπής φωτός μπορεί να παραχθεί, αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν φωτογραφικές τεχνικές για να ορίσουν τα μέρη που εκπέμπουν φως.

Κάτοψη της οθόνης LED (Plan view of LED display)

Εγκάρσια τομή (cross-section through AB)

Σχήμα 9.21 Μία μονολιθική οθόνη επτά στοιχείων.

Οι περισσότερες οθόνες LED είναι υβριδικού τύπου, όπου τετράγωνα LED πλευράς 0.3mm είναι τοποθετημένα σε ένα μωσαϊκό από LED σε διάφορα σχέδια όπου χρησιμοποιούνται πλάκες παρεκτροπής και διάχυσης, Σχήμα 9.22. Μπορούν εύκολα να παραχθούν αλφαριθμητικά στοιχεία απεικόνισης ή στοιχεία κουκίδας πινάκων, οποιουδήποτε μεγέθους, έγχρωμες συσκευές, απλά προσθέτοντας πολλά LED. Τα LED σε μία οθόνη τέτοιου τύπου είτε οδηγούνται απευθείας, είτε από έναν πολύπλοκο οδηγό, που μπορεί να είναι κάπως απλούστερος από τον πολύπλοκο οδηγό των LCD, αφού απαιτείται σήμα μόνο μίας πολικότητας. Αυτού του τύπου οι οθόνες δεν είναι κατάλληλες για οδηγούς ενεργού πίνακα.

Κάτοψη οθόνης LED (Plan view of LED display)

Ενεργός διατομή πλευράς AB – Πλακίδιο διάχυσης – Ανακλαστήρες

Σχήμα 9.22 Μία υβριδικού τύπου οθόνη LED 7 στοιχείων.

Προς το παρόν, ο μεγαλύτερος περιορισμός της χρήσης των LED σε εφαρμογές τύπου βίντεο, είναι η ανάγκη για υψηλής απόδοσης μπλε LED. Τα μπλε LED βασίζονται στους ημιαγωγούς II-VI, και τα υψηλά επίπεδα πρόσμιξης που απαιτούνται για έντονο φως εξόδου παράγουν ατέλειες που μειώνουν την αποδοτικότητα της συσκευής. Όσον αφορά τους μπλε φώσφορους για τις TFELD, έχουν επιδειχθεί εργαστηριακά υψηλής απόδοσης μπλε LED, που επιτρέπουν στις απεικονίσεις βίντεο LED να γίνουν πραγματικότητα στο όχι τόσο απόμακρο μέλλον.

Ερώτηση 4

Χωρίς να συμβουλευέστε το βιβλίο, αναφέρετε περιληπτικά τη διαφορά ανάμεσα στη φωτοβολία έγχυσης φορτίου και στην ‘πραγματική’ ηλεκτροφωταύγεια. Πώς λειτουργεί κάθε συσκευή;

9.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε ότι

- υπάρχει ένας αριθμός από παράγοντες που πρέπει να σκεφτούμε όταν επιλέγουμε μια οθόνη

- αφού η οθόνες είναι το μέσον διασύνδεσης ανάμεσα στον άνθρωπο και την μηχανή, η απόκριση του ματιού σε μήκη κύματος του φωτός που χρησιμοποιούνται από την οθόνη πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν όταν εξετάζεται η αποδοτικότητα της
- η πιο επιτυχής παθητική τεχνολογία απεικόνισης είναι η LCD, της οποίας η πιο συνηθισμένη είναι το στρεφόμενο νηματικό στοιχείο (TN)
- δείγματα οθονών μπορούν να οδηγηθούν χρησιμοποιώντας απευθείας τεχνολογίες οδήγησης. Πιο περίπλοκες οθόνες οδηγούνται χρησιμοποιώντας περίπλοκους ή ενεργούς πίνακες οδήγησης
- οθόνες φωτοβολίας είναι οι CRT, η οθόνη ηλεκτροφωταύγειας ή τα LED. Από αυτές, οι CRT αυτή τη στιγμή προσφέρει την υψηλότερη απόδοση από πλευράς φωτεινότητας, ανάλυσης, χρώματος και αντίθεσης. Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες στις οθόνες ηλεκτροφωταύγειας θα προκαλέσουν την υπεροχή της CRT προσφέροντας ενίσχυση, πρακτικά επίπεδο πίνακα λειτουργίας και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το βασικό προτέρημα των LED είναι η απλότητα τους και η αξιοπιστία τους.

9.7 Περαιτέρω ανάγνωση

Οι συσκευές απεικόνισης αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο εύρος τεχνολογίας, και άρα όλα τα διαφορετικά είδη δεν μπορεί να αναλύονται εύκολα σε ένα μόνο κείμενο. Ωστόσο, η παρακάτω επιλογή καλύπτει όλες τις συσκευές που αναλύονται εδώ.

'Optoelectronic Devices', S Desmond Smith, Prentice Hall, 1995

'Liquid Crystals (2nd edition)', S Chandrasekhar, Cambridge University Press, 1992

'Electroluminescent Displays', C N King, Journal of Vacuum Science and Technology A, volume 14, number 3, pages 1729-1735, 1996.

'Physics and technology of thin film electroluminescent displays', R Mach and G O Mueller, Semiconductor Science and Technology, volume 6, pages 305-323, 1991

9.8 Ερωτήσεις

- 9.1 Μια οθόνη υγρών κρυστάλλων παρουσιάζει συνολική αντίσταση 2.6 MΩ. Να υπολογίσετε την ισχύ που καταναλώνει αυτή η οθόνη όταν εφαρμοστεί μια τάση 5V_{rms}.

- 9.2 Ένας ερευνητής μετράει την ισχύ εξόδου δυο πηγών ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Τα αποτελέσματα του απεικονίζονται παρακάτω. Από αυτά υπολογίστε την συνολική ισχύ εξόδου (ροή ακτινοβολίας) από κάθε πηγή, υποθέτοντας ότι είναι φωτεινές πηγές. Να υπολογίστε επίσης την συνολική φωτεινή ροή από κάθε πηγή. Ποια θα είναι φωτεινότερη;

Πηγή 1			Πηγή 2		
λ (nm)	Ισχύς (mW)	Σχετική απόκριση του ματιού	λ (nm)	Ισχύς (mW)	Σχετική απόκριση του ματιού
490	5	0.208	600	5	0.631
500	10	0.323	610	10	0.503
510	20	0.503	620	20	0.381
520	13	0.710	630	13	0.265
530	3	0.869	640	3	0.175

- 9.3 Ένα στοιχείο υγρού κρυστάλλου τυχαίνει να έχει κρίσιμη τάση ίση με 0.85V. Να υπολογίστε την ελαστική σταθερά αυτού του υγρού κρυστάλλου αν $\Delta\epsilon=13.5$. Ποια είναι η E_c αν το στοιχείο έχει 7 μm πάχος;
- 9.4 Αν το πάχος ενός στοιχείου υγρού κρυστάλλου διπλασιαστεί πως επηρεάζονται τα (a) E_c , (b) V_c , and (c) τ_{rise} ;
- 9.5 Μια τάση 0.7 V εφαρμόζεται σε ένα ζευγάρι ηλεκτροστατικών πλακών παρεκτροπής σε μια CRT που έχουν μήκος 4cm και χωρίζονται από 1cm. Ποια είναι η παρεκτροπή που υφίσταται σε μια δέσμη ηλεκτρονίων που εισέρχεται στις πλάκες με ταχύτητα $1.6 \times 10^6 \text{ms}^{-1}$;
- 9.6 Μια οθόνη TFEL έχει λόγο αντίθεσης 100:1. Ποια είναι η κλίμακα greyscale της συσκευής;
- 9.7 Μια οθόνη αποτελείται από εικονοστοιχεία 24 μm x 24 μm σε μέγεθος. Να εκτιμήσετε πόσα εικονοστοιχεία μπορούν να προσαρμοστούν σε κάθε φακό

από ένα ζευγάρι γυαλιών εικονικής πραγματικότητας, δηλώνοντας τις υποθέσεις σας.

- 9.8 Μια απλή αλφαριθμητική οθόνη αποτελείται από 20 δεκατεσσάρων-στοιχείων ηλεκτρόδια. Υπολογίστε τον αριθμό μεμονωμένων συνδέσμων της οθόνης που θα απαιτούνταν αν επρόκειτο να οδηγηθεί απευθείας. Πόσοι πολύπλοκοι σύνδεσμοι απαιτούνται;
- 9.9 Μια οθόνη τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας ανανεώνεται 30 φορές το δευτερόλεπτο. Υπολογίστε τον επιτρεπόμενο χρόνο κάθε αλλαγής της δέσμης ηλεκτρονίων στην οθόνη, και κατόπιν εκτιμήστε την ταχύτητα της, δηλώνοντας τις υποθέσεις σας.

Κεφάλαιο 10: Εφαρμογές της Οπτοηλεκτρονικής

10.1 Εισαγωγή

Καθημερινά, χρησιμοποιούμε συστήματα οπτοηλεκτρονικής που ποικίλλουν σε πολυπλοκότητα, από απλά οπτικά φράγματα μέχρι περίπλοκα τηλεπικοινωνιακά συστήματα οπτικών ινών. Δεν είναι δυνατόν να παρουσιάσουμε όλες αυτές τις εφαρμογές στο Κεφάλαιο αυτό, χωρίς να επεκταθούμε σε μία υπερβολικά μεγάλη ανάλυση. Έτσι θα παρουσιάσουμε κάποιες εφαρμογές, ώστε να αποκτήσετε μια αίσθηση του αριθμού των διαφορετικών περιοχών στις οποίες η οπτοηλεκτρονική εμφανίζεται στη ζωή μας.

10.2 Το οπτοηλεκτρονικό φράγμα

Το οπτοηλεκτρονικό φράγμα είναι μια διάταξη που συναντούμε καθημερινά. Για παράδειγμα, πιθανώς να το χρησιμοποιείτε κάθε φορά που ένας ανελκυστήρας σταματάει να κλείνει τις πόρτες του έτσι ώστε να μην εγκλωβιστείτε ανάμεσα τους. Τα φράγματα τέτοιου τύπου είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές ασφάλειας αφού δεν παραβιάζονται, μάλιστα αν χρησιμοποιηθεί υπέρυθρο φως, το φράγμα δεν είναι ορατό από τον παραβάτη. Τα οπτοηλεκτρονικά φράγματα είναι πολύ απλές διατάξεις καθώς βασίζονται στην ανίχνευση του φωτός που εκπέμπεται ανάμεσα σε πομπό και δέκτη. Αν ο ανιχνευτής δεν λαμβάνει καθόλου φως τότε το φράγμα συλλαμβάνει ένα 'εισβολέα' και ενεργοποιείται, για παράδειγμα να ξανά ανοίξει τις πόρτες ή να σημάνει συναγερμό. Τα φράγματα μπορούν να λειτουργήσουν είτε με την αρχή διάδοσης είτε με την αρχή ανάκλασης, Σχήμα 10.1(α) και (β), και συνήθως λειτουργούν μέσα σε ένα σύστημα όπου η απώλεια φωτός για οποιονδήποτε λόγο προκαλεί την ενεργοποίηση των ηλεκτρονικών στοιχείων του συστήματος για την αποφυγή της λανθασμένης λειτουργίας του.

Εκπομπός (Trasnmitter) Δέκτης (Receiver)

Ανακλαστήρας (Retroreflector)

Σχήμα 10.1 Οπτοηλεκτρονικά φράγματα που λειτουργούν σύμφωνα με τις αρχές της (α) μετάδοσης, και (β) της ανάκλασης.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 10(β), τα φράγματα ανάκλασης χρησιμοποιούν ανακλαστήρες. Σε ένα συμβατικό επίπεδο κάτοπτρο, αν προσπέσει φως υπό γωνία α θα ανακλαστεί υπό γωνία α και άρα η ολική γωνία παρεκτροπής της δέσμης είναι 2α . Αυτό σημαίνει ότι αν η δέσμη δεν προσπέσει κάθετα στην επιφάνεια του κατόπτρου δεν θα επιστρέψει στον ανιχνευτή. Ο νόμος της ανάκλασης δεν μπορεί να αποφευχθεί, οπότε οι ανακλαστήρες χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό από κάτοπτρα για να στείλουν το φως πίσω από όπου προήλθε, άσχετα με την γωνία πρόσπτωσης. Η λειτουργία μιας συσκευής αντανάκλασης απεικονίζεται στο Σχήμα 10.1(γ) και μπορεί εύκολα να φανεί ότι $\beta = 90^\circ - \alpha$. Ένας πρακτικός ανακλαστήρας είναι τριών διαστάσεων, και ονομάζεται και 'κυβογωνία' από το γεγονός ότι μπορεί να κατασκευαστεί από τρία κάτοπτρα όλα σε ορθές γωνίες μεταξύ τους σχηματίζοντας την γωνία ενός κύβου. Σε πρακτική χρήση υπάρχει ένας αριθμός από περιορισμούς στην μέγιστη γωνία πρόσπτωσης για την οποία η συσκευή αντανάκλασης μπορεί να στείλει πίσω φως. Αυτοί είναι:

- Καθώς οι γωνίες πρόσπτωσης γίνονται οξύτερες, το φυσικό μέγεθος του ανακλαστήρα έχει ως συνέπεια το φως που ανακλάται από την πρώτη επιφάνεια δεν προσπίπτει στην δεύτερη επιφάνεια
- Οι κυβογωνίες πρακτικά κατασκευάζονται συχνά από γυαλί και άρα ανάκλαση συμβαίνει μόνο για γωνίες που ικανοποιούν τα κριτήρια ολικής εσωτερικής ανάκλασης, αν και αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί επαργυρώνοντας τις επιφάνειες ανάκλασης

Σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη περιοχή κάλυψης, η χρήση των κατάλληλων κυβογωνιών είναι πολύ δαπανηρή. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με την χρήση στόχων αντανάκλασης που περιέχουν μεγάλους αριθμούς από σχετικά ακατέργαστες κοιλότητες αντανάκλασης που είναι επίπεδα γεμάτα με πλαστικό. Αυτού του τύπου οι συσκευές αντανάκλασης θα λειτουργήσουν για γωνίες πρόσπτωσης, α , έως και $\pm 20^\circ$.

Ερώτηση 1

Αποδείξτε, με τη χρήση απλής γεωμετρίας, ότι $\beta = 90^\circ - \alpha$.

EPEYNA

Μελετήστε τους εμπρόσθιους και οπίσθιους ανακλαστές ποδηλάτου. Αυτοί είναι ένα καλό παράδειγμα από χαμηλού κόστους ανακλαστές, που λέγονται καταδιόπτρες. Την επόμενη φορά που θα χρησιμοποιείτε ανελκυστήρα, δείτε αν χρησιμοποιεί ένα σύστημα ανάκλασης εμποδίου – μπορείτε να το εντοπίστε βρίσκοντας την συσκευή αντανάκλασης.

10.3 Αισθητήρες οπτικής ίνας

Μεγάλη προσπάθεια έχει καταβληθεί στην ανάπτυξη αισθητήρων οπτικών ινών, κυρίως για τους ίδιους λόγους που οι οπτικές επικοινωνίες είναι ελκυστικές: το φως δεν προσβάλλεται από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και οι ίνες δεν μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό κάνει τους αισθητήρες οπτικής ίνας ιδανικούς για χρήση σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπου υπάρχουν μεγάλα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, για παράδειγμα, κοντά σε βαρύ εξοπλισμό εναλλαγής λειτουργίας, και όπου υπάρχει ο κίνδυνος να δημιουργηθεί έκρηξη από αέρια, για παράδειγμα σε θαλάσσιες πλατφόρμες πετρελαίου και αερίου, όπως και σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου η συμπαγής φύση, η αντοχή και η συνδεσιμότητα ενός αισθητήρα οπτικής ίνας με τον λοιπό εξοπλισμό επεξεργασίας δεδομένων, οπότε καθιστούνται μία δημοφιλής επιλογή. Το εύρος των παραμέτρων που παρακολουθούνται από τις ίνες είναι μεγάλο και περιλαμβάνει την θερμοκρασία, την πίεση, την ειδική παραμόρφωση, την στάθμη υγρών, την επιτάχυνση, την περιστροφή, το ρεύμα, την τάση και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Δεν μπορούμε να καλύψουμε ολόκληρο το εύρος των αισθητήρων εδώ, αλλά θα κοιτάξουμε δύο σχετικά απλούς αισθητήρες και έναν πιο περίπλοκο.

10.3.1 Ο αισθητήρας στάθμης υγρών οπτικής ίνας

Αυτός είναι ένας πολύ απλός αισθητήρας, και ένα διάγραμμα του απεικονίζεται στο Σχήμα 10.2. Το φως που εκπέμπεται από το λέιζερ παρεκτρέπεται από τον διαχωριστή δέσμης στην οπτική ίνα. Ένας διαχωριστής δέσμης είναι, στην απλούστερη του μορφή, ένα κάτοπτρο επιστρωμένο από ένα λεπτότερο από το σύνηθες στρώμα αργύρου, έτσι ώστε να μην αντανακλά όλο το φως που προσπίπτει σε αυτό και να μεταδίδεται ένα μέρος του. Αυτός ο συγκεκριμένος τύπος διαχωριστή δέσμης λέγεται ημιεπαγυρωμένο κάτοπτρο. Μπορείτε να συναντήσετε τέτοια

κάτοπτρα να χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, σε παράθυρα γραφείων ασφαλείας στα σούπερ μάρκετ. Τα φώτα των σούπερ μάρκετ είναι έντονα και έτσι αρκετό φως περνάει ώστε το προσωπικό ασφαλείας να μπορεί να δει τι συμβαίνει, αλλά αρκετό αντανακλάται ώστε εσείς να νομίζετε ότι πρόκειται για ένα συνηθισμένο κάτοπτρο. Μετά το διαχωριστή δέσμης, το φως περνάει στην οπτική ίνα και, όταν το άκρο της βρίσκεται στον αέρα, όλο το φως ανακλάται εσωτερικά στην κορυφή και διαδίδεται μέσω της ίνας πίσω στον ανιχνευτή, Σχήμα 10.2 (α), όπου προκαλεί την παραγωγή μεγάλου σήματος. Όταν η άκρη της ίνας βυθιστεί στο υγρό, η κρίσιμη γωνία για ολική εσωτερική ανάκλαση αλλάζει, και άρα το φως δεν υφίσταται ολική εσωτερική ανάκλαση: το μόνο φως που διαδίδεται πίσω στην ίνα είναι αυτό που ανακλάται κάθετα στο σύνορο ανάμεσα στα δύο μέσα με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, Σχήμα 10.2 (β). Σε αυτήν την περίπτωση ο ανιχνευτής παράγει ένα αδύναμο σήμα στην έξοδο. Η διακύμανση στην έξοδο του ανιχνευτή ως προς την θέση της άκρης της ίνας απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 10.2(γ).

Ανιχνευτής (Detector)

Διαχωριστής (Beam Splitter) Laser

Όλο το φως ανακλάται στην κορυφή της ίνας (All light reflected at fiber tip)

Το φως διαφεύγει προς τα έξω (Light leaking out)

Έξοδος ανιχνευτή (Detector output)

Άκρη της ίνας που είναι βυθισμένη στο υγρό (Fiber tip dipped in liquid)

Χρόνος (Time)

Σχήμα 10.2 Ένας ανιχνευτής στάθμης υγρών οπτικής ίνας (α) στον αέρα, (β) σε υγρό και (γ) η αλλαγή στην έξοδο όταν η άκρη βυθιστεί σε υγρό.

Λυμένο Παράδειγμα 1

Για να ανακλαστεί αποτελεσματικά πίσω στην ίνα το φως, η εσωτερική γωνία της άκρης της ίνας σε έναν ανιχνευτή στάθμης υγρών πρέπει να είναι 90° . Αν ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού είναι 1.5, υπολογίστε τον ελάχιστο δείκτη διάθλασης που μπορεί να έχει το υγρό πριν ο αισθητήρας σταματήσει να λειτουργεί.

Λύση

Ο αισθητήρας λειτουργεί βάσει της ολικής εσωτερικής ανάκλασης του φωτός. Η κρίσιμη γωνία για την ολική εσωτερική ανάκλαση δίνεται από

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_{liq}}{n_{fibre}}\right)$$

Αν η εσωτερική γωνία της άκρης είναι 90° , το φως θα προσπέσει στην επιφάνεια του αισθητήρα, υπό γωνία 45° . Λύνοντας ως προς n_{liquid} , η παραπάνω εξίσωση μας επιτρέπει τον υπολογισμό των τιμών του n_{liquid} , αυτό αντιστοιχεί σε

$$n_{liq} = n_{fibre} \sin\theta_c = 1.5 \times \sin(45) = 1.06$$

Άρα ο ελάχιστος δείκτης διάθλασης όπου θα λειτουργεί αυτός ο αισθητήρας είναι 1.06, που είναι αρκετά χαμηλότερος από τον δείκτη διάθλασης των υγρών.

10.3.2 Ο αισθητήρας πίεσης οπτικής ίνας

Υπάρχει ένας αριθμός από παραλλαγές των αισθητήρων πίεσης οπτικής ίνας. Μπορούν να είναι είτε εσωτερικοί, όπου η ίνα καθαυτή είναι ο αισθητήρας είτε εξωτερικοί, όπου η ίνα απλά μεταφέρει το φως στο αισθητήριο στοιχείο. Οι εσωτερικοί αισθητήρες πίεσης βασίζονται στον σχηματισμό κάμψεων, ή την μεταβολή των ακτινών των κάμψεων αυτών, λυγίζοντας την οπτική ίνα. Στα Σχήματα 10.3(α) και (β) απεικονίζονται παραδείγματα αυτού του είδους αισθητήρα πίεσης. Οι κάμψεις εισάγουν απώλειες στο σύστημα οπτικής ίνας επειδή, απλά, αλλάζουν την γωνία πρόσπτωσης του φωτός στο σύνορο πυρήνα / περιβλήματος της οπτικής ίνας και το φως που αρχικά ικανοποιούσε το κριτήριο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης τώρα δεν το ικανοποιεί και διαθλάται έξω από την ίνα. Όσο περισσότερο κάμπτεται, τόσο περισσότερο φως χάνεται. Ο αισθητήρας που απεικονίζεται στο Σχήμα 10.3(γ) είναι ένας εξωτερικός αισθητήρας, και στην πραγματικότητα μετράει την πίεση υπολογίζοντας την απόσταση της πλάκας ανάκλασης από την άκρη της ίνας. Όταν η πλάκα ανεβοκατεβαίνει, το φως που εισέρχεται στην ίνα μεταβάλλεται. Όταν χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας τέτοιου τύπου, κάποιος πρέπει με προσοχή να επιλέξει το σημείο 'μηδέν' αφού το σύστημα δεν μπορεί να ξεχωρίσει την οπίσθια κίνηση της πλάκας από την εμπρόσθια κίνηση.

Πίεση (pressure)

Πηνίο οπτικής ίνας (coil of optical fiber)

Πλακίδιο ανάκλασης (Reflecting plate) Πίεση (pressure) Ευλύγιστο
διάφραγμα

Σχήμα 10.3 Αισθητήρες πίεσης οπτικής ίνας (α) αισθητήρας μικρής γωνίας, (β) αισθητήρας γωνίας, και (γ) αισθητήρας πίεσης που εξαρτάται από την αντανακλαστικότητα.

Παράδειγμα εργασίας 2

Ένας αισθητήρας πίεσης οπτικής ίνας λειτουργεί χρησιμοποιώντας φως μήκους κύματος 633 nm και πολύτροπη, βηματικού τύπου δείκτη διάθλασης με διάμετρο πυρήνα 25 μm και $n_{core} = 1.5$, $n_{clad} = 1.48$ οπτική ίνα. Υποθέτοντας ότι κάθε ρυθμός διάδοσης στην ίνα μεταφέρει την ίδια ποσότητα φωτεινής ενέργειας, εκτιμήστε την γωνία κατά την οποία η ίνα πρέπει να λυγίσει έτσι ώστε μόλις πάνω από το μισό φως να διαφύγει εκτός ίνας.

Λύση

Η εξίσωση (5.8) μας δίνει

$$m_{\max} = \frac{2n_{core}d\cos\theta_c}{\lambda} = \frac{2d(n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{1/2}}{\lambda}$$

Αντικαθιστώντας τις δεδομένες τιμές μας δίνει

$$m_{\max} = \frac{2 \times 25 \times 10^{-6} \times ((1.51)^2 - (1.48)^2)}{633 \times 10^{-9}} = 23.66$$

Αφού το m πρέπει να είναι ακέραιος, η ίνα θα μεταφέρει 23 ρυθμούς. Αυτό σημαίνει ότι μόλις πάνω από το μισό φως θα διαφύγει εκτός όταν ο ρυθμός $m = 13$ δεν ικανοποιεί πλέον τα κριτήρια ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μπορούμε να ορίσουμε την γωνία πρόσπτωσης για τον ρυθμό $m = 13$ αναδιατάσσοντας την εξίσωση (5.8), και αντικαθιστώντας τις δεδομένες τιμές:

$$\theta_{12} = \cos^{-1}\left(\frac{m\lambda}{2n_{core}d}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{13 \times 633 \times 10^{-9}}{2 \times 1.51 \times 25 \times 10^{-6}}\right) = 83.7^\circ$$

Η κρίσιμη γωνία δίνεται από $\theta_c = \sin^{-1}(n_{clad}/n_{core}) = 78.6^\circ$, άρα η ίνα πρέπει να λυγίσει κατά γωνία 5.1° .

10.3.3 Το γυροσκόπιο οπτικής ίνας

Το γυροσκόπιο οπτικής ίνας βασίζεται στο φαινόμενο Sagnac. Στο φαινόμενο Sagnac, μια δέσμη φωτός χωρίζεται σε δυο ίσα μέρη και αυτά στέλνονται να διαδοθούν γύρω από ένα δακτύλιο ίνας όπου ο δακτύλιος περιστρέφεται. Το φαινόμενο Sagnac είναι βασικά ένα σχετικιστικό φαινόμενο και μπορούμε να το καταλάβουμε καλύτερα αν παρατηρήσουμε το Σχήμα 10.4. Το φως χωρίζεται την χρονική στιγμή $t = 0$ και οι δυο δέσμες αρχίζουν να περιστρέφονται στο δακτύλιο. Αν ο δακτύλιος δεν περιστρέφεται τότε οι δυο δέσμες θα διανύσουν μια απόσταση $2\pi R$ πριν επιστρέψουν στο αρχικό τους σημείο, όπου R είναι η ακτίνα του δακτυλίου. Αν, ωστόσο, ο δακτύλιος περιστρέφεται δεξιόστροφα, όπως απεικονίζεται, τότε καθώς η αριστερόστροφη δέσμη περιστρέφεται το αρχικό της σημείο κινείται για να τη συναντήσει και άρα πρέπει να διανύσει μικρότερη απόσταση πριν η δέσμη φτάσει το αρχικό της σημείο. Αντίθετα, καθώς η δεξιόστροφη δέσμη περιστρέφεται το αρχικό της σημείο απομακρύνεται και πρέπει να διανύσει μια μεγαλύτερη απόσταση πριν φτάσει το αρχικό της σημείο. Αυτό σημαίνει ότι, ως προς την θέση του αρχικού σημείου, τώρα υπάρχει μια διαφορά διαδρομής ανάμεσα στις δυο αντίθετα διαδομένες δέσμες και θα υπάρξει συμβολή ανάμεσα τους. Αν η διαφορά διαδρομής είναι ακριβώς το μισό του μήκους κύματος τότε οι δέσμες θα συμβάλουν καταστρεπτικά. Η διαφορά διαδρομής ανάμεσα στις δυο δέσμες, Δd , δίνεται από

$$\Delta d = \frac{8\pi\Omega A}{c} \quad (10.1)$$

όπου Ω είναι η συχνότητα περιστροφής του δακτυλίου, σε περιστροφές ανά δευτερόλεπτο, και A είναι το εμβαδόν του δακτυλίου, που ισούται με πR^2 .

Δεξιόστροφα διαδιδόμενο φως (Clockwise – propagating light)

Σημείο εκκίνησης $t = t + \Delta t$ (Starting point at $t = t + \Delta t$)

Σημείο εκκίνησης $t = 0$

Αριστερόστροφα διαδιδόμενο φως (Anti- clockwise propagating light)

Σχήμα 10.4 Διάδοση δεξιόστροφου και αριστερόστροφου φωτός σε ένα περιστρεφόμενο δακτύλιο.

Ερώτηση 2

Ένα συμβολόμετρο Sagnac περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ίση με 0.1 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο. Αν το συμβολόμετρο χρησιμοποιεί φως στα 860 nm, ποια πρέπει να είναι η ακτίνα του δακτυλίου για να συμβεί καταστρεπτική συμβολή ανάμεσα στις δυο δέσμες με αυτόν τον ρυθμό περιστροφής;

Η βασική δομή του συμβολόμετρου Sagnac απεικονίζεται στο Σχήμα 10.5(α). Το φως στην εισόδου του χωρίζεται σε δυο ίσα μέρη με τη χρήση ενός 50/50 διαχωριστή δέσμης. Η δέσμη διαδίδεται στο δακτύλιο, εξέρχεται, και στην συνέχεια αποστέλλεται στον ανιχνευτή. Η ένταση του προσπίπτοντος φωτός στον ανιχνευτή δίνεται από

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi\Delta d}{\lambda}\right) \quad (10.2)$$

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10.5(β), για μικρές διαφορές στην διαδρομή η διαφορά ανάμεσα σε I και I_0 είναι πολύ μικρή, και άρα το συμβολόμετρο δεν είναι πολύ ευαίσθητο σε χαμηλούς ρυθμούς περιστροφής. Αυτό μπορεί να βελτιωθεί εξασφαλίζοντας μια διαφορά διαδρομής $\lambda/4$ ανάμεσα σε δεξιόστροφα και αριστερόστροφα εξαρτήματα όταν $\Omega = 0$. Αυτό μεταφέρει το σημείο ‘μηδέν’ του συμβολόμετρου στη μισή απόσταση ανάμεσα στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του I και αυξάνει ραγδαία την ευαισθησία. Αυτή η επιπλέον διαφορά διαδρομής συνήθως προστίθεται τυλίγοντας ένα μέρος της ίνας γύρω από τον κύλινδρο ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού, που διαστέλλεται και συστέλλεται όταν μια εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται στα άκρα του. Αυτό τεντώνει την ίνα, εισάγοντας το απαιτούμενο επιπλέον μήκος οπτικής διαδρομής.

Πηγή (Source) Διαχωριστής δέσμης (Beam splitter) Ανιχνευτής (Detector)

Ένταση (Intensity) Σημείο τετραγωνισμού (quadrature point)

Σχήμα 10.5 (α) ένα συμβολόμετρο Sagnac, και (β) I ως συνάρτηση της διαφοράς διαδρομής.

Φυσικά, σε οποιοδήποτε πρακτικό σύστημα, υπάρχει ένα κατώτερο όριο στις μεταβολές της έντασης που μπορεί να μετρηθούν αξιόπιστα, εξαιτίας του θορύβου στην πηγή, τον ανιχνευτή και τυχόν ενισχυτή. Ένας εύκολος τρόπος για την αύξηση της ευαισθησίας του συστήματος, προκειμένου να επιτραπεί η μέτρηση πολύ χαμηλών ρυθμών περιστροφής, είναι η αύξηση της Δd για μια δεδομένη Ω . Από την εξίσωση (10.1) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μπορούμε να το κάνουμε αυτό αυξάνοντας το A , αλλά αυτό αποτελεί μη πρακτική λύση. Μια πολύ καλύτερη ιδέα είναι η αύξηση της ενεργής περιοχής με τη χρήση περισσότερων από έναν βρόγχο ίνας στο δακτύλιο. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά διαδρομής δίνεται τώρα από

$$\Delta d = \frac{8N\pi\Omega A}{c} \quad (10.3)$$

όπου N είναι ο αριθμός των βρόγχων ίνας στο δακτύλιο.

Τα γυροσκόπια οπτικής ίνας είναι ικανά για την μέτρηση ρυθμών περιστροφής έως και 0.0001 μοίρες ανά ώρα. Ωστόσο, αυτά τα γυροσκόπια πρέπει να κατασκευαστούν πολύ προσεκτικά, διότι είναι πολύ σημαντικό η κάθε δέσμη να ακολουθήσει ακριβώς την ίδια διαδρομή εκτός από τις διαφορές που εισάγει η περιστροφή. Για παράδειγμα, ακόμη και οι διαφορές που εισάγονται από το γεγονός ότι η μια δέσμη ανακλάται δυο φορές από τον διαχωριστή δέσμης ενώ η άλλη εκπέμπεται δύο φορές από αυτόν είναι σημαντικές. Ομοίως, συνήθως χρησιμοποιούνται LED ως πηγές για γυροσκόπια επειδή η έξοδος τους είναι λιγότερο επιρρεπής στα φαινόμενα διασποράς στην ίνα εξ αιτίας των σχετικά χαμηλών μηκών συμφωνίας τους. Με σύμφωνες δέσμες το σκεδαζόμενο φως όπως και η κύρια δέσμη μπορεί να συμβάλλουν στον ανιχνευτή δίνοντας ψευδή ή όχι ξεκάθαρα αποτελέσματα.

10.4 Ο αναγνώστης κωδικού ράβδου (barcode)

Ο κωδικός ράβδου (barcode) είναι - μια σειρά από ανόμοιου πάχους λευκές και μαύρες μπάρες . Αποτελεί σήμερα ένα πρακτικό χαρακτηριστικό κάθε αντικείμενου που πωλείται ή δανείζετε. Η αυτοματοποιημένη ανάγνωση που είναι δυνατή με την χρήση των κωδικών ράβδου επιταχύνει σημαντικά τις πωλήσεις στην ουρά ενός ταμείου, επιτρέπει την αυτόματη καταγραφή κάθε αντικείμενου που πωλείται, και

αφαιρεί την ανάγκη για τα αντικείμενα να τιμολογούνται μεμονωμένα. Υπάρχουν δυο θεμελιώδη στοιχεία σε ένα σύστημα κωδικού ράβδου: ο κωδικός ράβδου και η διάταξη ανάγνωσης του. Πρώτα θα εξετάσουμε το barcode.

10.4.1 Κωδικός ράβδου

Ο κωδικός ράβδου είναι μια σειρά από μαύρες και λευκές γραμμές που αναπαριστούν μια ακολουθία αριθμών. Αρκετοί κωδικοί είναι σε χρήση, ένας που συναντάται συχνά είναι ο Κωδικός Αμερικάνικου Παγκόσμιου Προϊόντος, ή UPC. Το UPC έχει σχεδιαστεί να αναπαριστά 12 ψηφία, 11 από αυτά τυπώνονται. Ένας τυπικός κωδικός μπάρας UPC απεικονίζεται στο Σχήμα 10.6. Βλέπουμε ότι ο κωδικός ράβδου είναι χωρισμένος από τρία ζευγάρια ελαφρώς μακρύτερων μπαρών προφύλαξης σε δυο τμήματα, το κάθε ένα αναπαριστά έως έξι ψηφία,. Τα ψηφία κάθε τμήματος αναπαριστώνται από μια ομάδα από κωδικούς των επτά bit, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 10.6(β). Βλέπουμε στο Σχήμα 10.6(β) ότι οι αναπαραστάσεις των ψηφίων δεξιά από το κέντρο των μπάρων προφύλαξης είναι συμπληρώματα των αναπαραστάσεων αριστερά από τις μπάρες προφύλαξης. Αυτό σημαίνει ότι ο επεξεργαστής που μετατρέπει τις μπάρες σε αριθμούς μπορεί να διαπιστώσει από ποια πλευρά διαβάστηκε η ράβδος.

Είδος προϊόντος (Product type) Αριθμός κατασκευαστή (Manufacturer number)

Αριθμός προϊόντος (Item reference)

Αριστερά (Left) Δεξιά (Right)

Σχήμα 10.6 (α) ένας κωδικός ράβδου ΚΚΠ, και (β) το σχηματικό κωδικοποίησης.

Ο κωδικός που χρησιμοποιείται για τα προϊόντα του Ηνωμένου Βασιλείου, τους αριθμούς στοιχείων του Ηνωμένου Βασιλείου, αποτελείται από δεκατρία ψηφία. Δώδεκα από αυτά τα δεκατρία μπορούν ακόμη να απεικονιστούν απευθείας στον κωδικό ράβδου χρησιμοποιώντας επίσης το πρώτο ψηφίο μετά την πρώτη εξωτερική μπάρα προφύλαξης και το τελευταίο ψηφίο πριν την δεύτερη εξωτερική μπάρα προφύλαξης που είναι παρόντα στους κωδικούς UPC αλλά δεν χρησιμοποιούνται. Πληροφορία για το 13^ο ψηφίο απεικονίζεται με τη χρήση μιας τρίτης αναπαράστασης των ψηφίων. Σε αυτή την αναπαράσταση, τα ψηφία δεξιά από την κεντρική μπάρα προφύλαξης αναπαριστώνται με την *αντιστροφή* της διάταξης των ράβδων στους δεξιόπλευρους κωδικούς. Τα ψηφία αριστερά από την κεντρική μπάρα προφύλαξης

τώρα αναπαριστώνται από μια μίξη από δεξιούς και αριστερούς κωδικούς, και τα ψηφία δεξιά από το κέντρο αναπαριστώνται από αυτόν τον νέο, αντεστραμμένο, κωδικό. Ο τρόπος με τον οποίο οι αριστεροί και δεξιοί κωδικοί είναι αναμειγμένοι προσδίδει την αξία του επιπλέον ψηφίου.

10.4.2 Η συσκευή ανάγνωσης των κωδικών ράβδου

Στην απλούστερη της μορφή η συσκευή ανάγνωσης κωδικού ράβδου είναι μια 'ράβδος' που σαρώνει τον κωδικό ράβδου. Η ράβδος έχει ενσωματωμένα μια οπτική πηγή και οπτικά εστίασης, και έναν ανιχνευτή, επίσης με δικά του οπτικά εστίασης. Το διάγραμμα μιας ράβδου ανάγνωσης, της Hewlett Packard HEDS 1000 απεικονίζεται στο Σχήμα 10.7. Αυτό αποτελείται από ένα LED που εκπέμπει στο κόκκινο, μια φωτοδίοδο και ένα τρανζίστορ που βρίσκονται στο ίδιο υπόστρωμα. Το σημείο εκπομπής του LED και το οπτικό πεδίο της φωτοδίοδου συνδυάζονται με τη χρήση μιας μικρογραφίας διδύμων φακών. Μια πιο εξελιγμένη έκδοση, η ράβδος HEDS 3000, περιέχει επιπλέον κύκλωμα για να δίνει έξοδο συμβατή με TTL ή CMOS. Καθώς η ράβδος περνάει πάνω από τον κωδικό, η εναλλαγή της αντανακλαστικότητας ανάμεσα σε σκοτεινές και φωτεινές ράβδους μεταφράζεται σε μια εναλλαγή του σήματος εξόδου του ανιχνευτή. Ένας επεξεργαστής τότε μπορεί να αναλύσει το σήμα και να αναγνώσει τα παρόντα ψηφία. Αφού η ράβδος δεν σαρώνει πάντα κάθετα πάνω από τις μπάρες, οι μπάρες προστασίας εκτελούν μια σημαντική λειτουργία – παρέχουν μια βάση από την οποία το πλάτος μιας μεμονωμένης μπάρας μπορεί να υπολογιστεί. Συγκρίνοντας αυτό το πλάτος με το πλάτος των υψηλότερων και των χαμηλότερων τιμών στην έξοδο του ανιχνευτή ο επεξεργαστής μπορεί να παράγει μια ψηφιακή έξοδο που κατόπιν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί.

Σημείο εστίασης (Focused spot)

Δίδυμοι Φακοί (Twin lens)

Ανιχνευτής (Detector)

Πηγή (Source)

Σχήμα 10.7 Η ράβδος ανάγνωσης Hewlett Packard HEDS 1000.

Πολλές διατάξεις ανάγνωσης κωδικού μπάρας δεν χρησιμοποιούν πλέον ράβδο, ειδικά όπου υπάρχει υψηλή διεκπεραιευτικότητα, για παράδειγμα σε ένα ταμείο ενός καταστήματος. Σε αυτή την περίπτωση μια καλά εστιασμένη δέσμη laser

σαρώνει τον κωδικό ράβδου με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου πολυγωνικού κατόπτρου. Για την εξασφάλιση της ακριβούς ανάγνωσης κάθε φορά είναι απαραίτητες αρκετές σαρώσεις, και έτσι η δέσμη laser κατασκευάζεται για να διαβάσει ένα περίπλοκο συμβολισμό στο αντικείμενο που σαρώνεται με τη χρήση ενός ζεύγους κατόπτρων. Το ένα κάτοπτρο σαρώνει με την δέσμη οριζόντια και το άλλο σαρώνει κάθετα. Ένα διάγραμμα μιας συσκευής ανάγνωσης κωδικού ράβδου απεικονίζεται στο Σχήμα 10.8. Πιο εξελιγμένες φορητές συσκευές ανάγνωσης barcode χρησιμοποιούν μια γραμμική συστοιχία CCD με έναν κυλινδρικό φακό αντί για τον συμβατικό συνδυασμό φωτοδιόδου/ φακού. Αυτές οι συσκευές ανάγνωσης είναι ικανές να διαβάσουν ολόκληρο τον κωδικό ράβδου με τη μια επειδή ο κυλινδρικός φακός εστιάζει το φως σε μια γραμμή αντί σε ένα σημείο, και οι πολλαπλοί ανιχνευτές στην συστοιχία CCD μπορούν να διακρίνουν τα μεμονωμένα στοιχεία του κωδικού. Αυτή η συσκευή ανάγνωσης ξεπερνά τα προβλήματα που σχετίζονται με διαφορές στον ρυθμό με τον οποίο μια ράβδος ανάγνωσης σαρώνει τον κωδικό.

Τελικά, πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι δεν είναι κάτι τετριμένο η αξιόπιστη ανάγνωση ενός κωδικού ράβδου. Ο κωδικός μπορεί να είναι τυπωμένος πάνω σε γυαλιστερές ή σκούρες συσκευασίες, μπορεί να μην είναι τελείως μαύρες ή λευκές, το μέγεθος του κωδικού μπορεί να διαφέρει, ο κωδικός μπορεί να μην είναι επίπεδος, και μπορεί να μην έχει τυπωθεί σωστά. Συνοπτικά, η διαδεδομένη χρήση της συσκευής ανάγνωσης κωδικού ράβδου μαρτυρά την ικανότητα των σχεδιαστών και τις δυνατότητες των σύγχρονων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Ανιχνευτής (Detector)

Διαχωριστής Δέσμης (Beam splitter)

Πηγή (Source)

Κάτοπτρο στρέψης (torsional mirror)

Barcode

Σχήμα 10.8 Μια συσκευή ανάγνωσης κωδικού μπάρας.

10.5 Η συσκευή αναπαραγωγής οπτικού δίσκου

Από όλα τα σύγχρονα οπτοηλεκτρονικά συστήματα, αυτό που είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιείτε είναι η συσκευή αναπαραγωγής οπτικού δίσκου (CD). Τα συστήματα CD γνωρίζουν μεγάλη επιτυχία, τόσο που οι δίσκοι βινυλίου να μην κατασκευάζονται

πλέον καθόλου. Πριν κοιτάξουμε τις δυσκολίες ενός συστήματος CD πρέπει πρώτα να εξετάσουμε τον τρόπο κωδικοποίησης της πληροφορίας στο ίδιο το CD, αφού αυτός ο τρόπος αποτελεί μια μεγάλη αλλαγή στις μεθόδους εγγραφής και ανάκτησης.

10.5.1 Ψηφιοποίηση

Αν παρατηρήσετε προσεκτικά έναν δίσκο βινυλίου (αν έχετε!) θα δείτε ότι αποτελείται από ένα λεπτό, σπειροειδές, ασταθές αυλάκι, με την αστάθεια να αποτελεί μια απευθείας απεικόνιση της μεταβολής της έντασης του ακουστικού σήματος ως προς τον χρόνο. Το δισκόφωνο περιλαμβάνει μια βελόνα της οποίας το λεπτό άκρο είναι συνήθως κατασκευασμένο από διαμάντι. Καθώς η βελόνα κινείται γύρω στα αυλάκια, η δόνηση που προκαλείται από την αστάθεια μεταφέρεται στην γραφίδα όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από μια πιεζοηλεκτρική διάταξη μετατροπής ή από ένα σύστημα μαγνητικού πηνίου. Το μεγάλο πρόβλημα με αυτό το σύστημα είναι ότι η βελόνα ερχόταν σε επαφή με τον δίσκο. Αυτό σήμαινε ότι, με τον χρόνο, η βελόνα έφθειρε τον δίσκο (και αντίστροφα) και η παρουσία σκόνης ή γρατσουνιών στον δίσκο προκαλούσαν παραμόρφωση του μεταδιδόμενου σήματος. Στο σύστημα CD, αυτά τα προβλήματα αποφεύγονται (α) με τη χρήση μιας μεθόδου που δεν απαιτείται επαφή, φως, για την ανάγνωση της πληροφορίας από τον δίσκο, και (β) με τη χρήση μιας ψηφιακής μεθόδου για την αποθήκευση του σήματος στον δίσκο. Θα ασχοληθούμε με το θέμα (α) όταν εξετάσουμε την κατασκευή μιας συσκευής αναπαραγωγής CD με περισσότερη λεπτομέρεια, έτσι πρώτα θα εξετάσουμε το θέμα (β).

Η μετατροπή σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό, ή ADC, είναι μια τεχνική κατά την οποία ένα αναλογικό σήμα, που το πλάτος του σήματος αλλάζει συνεχώς μετατρέπεται σε ένα ψηφιακό σήμα που το πλάτος του σήματος είναι είτε πολύ χαμηλό ή μια καθορισμένη τιμή, που αναφέρονται ως '0' ή '1' αντίστοιχα. Ένας κοινός τρόπος κωδικοποίησης καλείται παλμική κωδικοποίηση διαμόρφωσης του σήματος, και η διαδικασία απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 10.9. Η διαδικασία περιλαμβάνει την δειγματοληψία της αναλογικής τάσης ανά τακτά διαστήματα και κατόπιν την μετατροπή σε δυαδικό αριθμό. Για να αντιληφτείτε καλύτερα το σχήμα, το σήμα που απεικονίζεται μετατρέπεται σε έναν δυαδικό αριθμό 3-bit, που λέγεται κβαντοποίηση 3-bit, που σημαίνει ότι το σήμα χωρίζεται σε $2^3 = 8$ επίπεδα. Ακόμη και από αυτό το σχήμα, μπορείτε να δείτε ότι το ψηφιακό σήμα δεν είναι μια πολύ καλή αναπαράσταση του αρχικού αναλογικού σήματος και, πράγματι, ακριβή συστήματα

χρησιμοποιούν κβαντοποίηση 8-bit, που σημαίνει ότι το ακουστικό σήμα είναι λεπτομερώς χωρισμένο σε 256 επίπεδα.

Λυμένο Παράδειγμα 3

Ποιο είναι το δυναμικό εύρος ενός συστήματος δειγματοληψίας 8-bit;

Λύση

Η δειγματοληψία 8-bit έχει $2^8 = 256$ επίπεδα, με το υψηλότερο επίπεδο να είναι 256 φορές μεγαλύτερο από το χαμηλότερο επίπεδο. Από το λυμένο παράδειγμα 1 στο Κεφάλαιο 7, και αντικαθιστώντας τις τιμές έχουμε ότι

$$\text{Dynamik\acute{h} Perioc\acute{h}} = 20 \log_{10} \frac{\zeta \text{ m\acute{e}gισt\acute{h} tim\acute{h}}}{\theta \text{ el \acute{a}cισt\acute{h} tim\acute{h}}} = 20 \log_{10}(256) = 48.2 \text{ dB}$$

Δεν μπορούμε ωστόσο να βάλουμε αυτά τα μη επεξεργασμένα κωδικοποιημένα δεδομένα στον δίσκο, επειδή υπάρχει μια πιθανότητα να λάβουμε μεγάλες ακολουθίες από μηδενικά και άσσους που κάνουν τον έλεγχο σφάλματος δύσκολο. Ο 8-bit κωδικός τότε αλλάζει σε μια 14-bit λέξη χρησιμοποιώντας έναν πίνακα ανίχνευσης που επιτρέπει μόνο δείγματα από τρία έως και 11 συνεχόμενα μηδενικά. Επιπλέον bit προστίθενται για συγχρονισμό και σκοπούς ανίχνευσης σφαλμάτων.

Πλάτος Τάσης (Voltage level)	Αναλογική Τάση (Analog voltage)
Ψηφιακή απεικόνιση (Digital representation)	Δυαδική τιμή του πλάτους της τάσης
Χρόνος (Time)	
Ψηφιακή τιμή τάσης (Digitized voltage)	
Ψηφιακή τάση ως λογικό σήμα (Digitized voltage as a logic signal)	

Σχήμα 10.9 Παλμική διαμόρφωση κωδικοποίησης για ένα αναλογικό σήμα, και το αποτέλεσμα ροής bit.

Από το Σχήμα 10.9 μπορείτε επίσης να παρατηρήσετε ότι, αν δεν δειγματοληπτούμε αρκετά συχνά, το ψηφιακό μας σήμα αναπαριστά ανεπαρκώς το αναλογικό. Μπορούμε να αποφασίσουμε πόσο συχνά να δειγματοληπτίσουμε

χρησιμοποιώντας ένα θεώρημα που λέγεται θεώρημα Nyquist, που θέτει ότι η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας είναι διπλάσια από την μέγιστη συχνότητα του σήματος προς δειγματοληψία. Το ακουστικό φάσμα φτάνει περίπου τα 18 kHz, και άρα πρέπει να παίρνουμε δείγματα με ρυθμό τουλάχιστον 36 kHz, ή, με άλλα λόγια, 36.000 φορές ανά δευτερόλεπτο. Στην πράξη, η δειγματοληψία γίνεται με ρυθμό 44.1 kHz, που επιτρέπει τα χαρακτηριστικά κύλισης (roll-off) που είναι παρόντα σε ενισχυτές να χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του ήχου. Για την στέρεο φωνό - εγγραφή αυτό πρέπει να γίνει για δυο στέρεο κανάλια, έτσι ώστε ο ρυθμός δειγματοληψίας να είναι 88.2 kHz (2 x 44.1kHz). Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε τον ρυθμό με τον οποίο η πληροφορία πρέπει να εγγραφεί, και να διαβαστεί, από το CD μας. Έχουμε ότι, 88.200 φορές ανά δευτερόλεπτο, πρέπει να στείλουμε ή να λάβουμε $16(2 \times 8)$ bits πληροφορίας. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός πληροφορίας είναι $88.2 \times 10^3 \times 16 = 1.41$ Mbits ανά δευτερόλεπτο. Φυσικά, αυτό είναι αρκετά χαμηλό αν συγκριθεί με ρυθμούς δεδομένων σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, αλλά είναι εντυπωσιακός παρόλα αυτά.

10.5.2 Ο οπτικός δίσκος CD

Το Σχήμα 10.10 απεικονίζει την κατασκευαστική δομή ενός οπτικού δίσκου (CD). Το ανακλαστικό μέρος του δίσκου, συνήθως από αλουμίνιο, έχει συμπιεστεί ανάμεσα σε προστατευτικά στρώματα από πλαστικό. Ο δίσκος προέρχεται από έναν κύριο δίσκο, κατασκευασμένο από γυαλί επιστρωμένο με υλικό που παρουσιάζει φώτο-αντίσταση. Ένα υπεριώδες laser χρησιμοποιείται για να ακτινοβολήσει το υλικό φώτο-αντίστασης έτσι ώστε οι άσσοι και τα μηδενικά στο ψηφιακό σήμα να μετατραπούν σε λάκκους και πεδιάδες, που είναι τα κενά ανάμεσα στους λάκκους, στον κύριο δίσκο. Ένα CD προς πώληση παράγεται τότε συμπιέζοντας μια πλαστική φόρμα με τον κύριο δίσκο και κατόπιν επιστρώνοντας την χαραγμένη επιφάνεια με ένα λεπτό στρώμα αλουμινίου. Στη συνέχεια ένα δεύτερο στρώμα από πλαστικό ή βερνίκι εφαρμόζεται στην άλλη πλευρά του δίσκου. Η ετικέτα τοποθετείται στην αντίθετη πλευρά που είναι τα υψώματα του δίσκου. Η πληροφορία στα σπειρώματα του δίσκου μακριά από το κέντρο, περιέχεται ανάμεσα σε μια εσωτερική ακτίνα 25 mm και μια εξωτερική ακτίνα 58 mm, σε γραμμές που έχουν πλάτος 1.6 μm. Αυτό δίνει ένα ολικό μήκος γραμμής περίπου 5.38 km. Τυπικά, ο δίσκος περιστρέφεται με περίπου 275 περιστροφές ανά λεπτό.

Επιφάνεια δίσκου (Disc surface)

Πλαστικό (Plastic)

Μουσικό κομμάτι (Music track)

Εξώφυλλο (Label)

Σχήμα 10.10 Η δομή ενός CD.

Ερώτηση 3

Υποθέτοντας μια μέση ακτίνα δίσκου 42 mm, εκτιμήστε τον χρόνο αναπαραγωγής ενός CD.

10.5.3 Τα οπτικά στοιχεία ενός συστήματος CD

Το Σχήμα 10.11(α) απεικονίζει ένα διάγραμμα με τα τυπικά οπτικά στοιχεία σε ένα σύστημα CD. Η διάταξη ανάγνωσης μη επαφής είναι, φυσικά, ένα laser. Οι συσκευές αναπαραγωγής CD λειτουργούν εξαιτίας της συμβολής του φωτός, γι' αυτό και είναι απαραίτητη μία σύμφωνη πηγή φωτός. Οι πρώτες συσκευές χρησιμοποιούσαν laser HeNe, αλλά με την ανάπτυξη των laser ημιαγωγών, το ογκώδες, υψηλής ισχύος HeNe έχει αντικατασταθεί από ένα μικρό και αποτελεσματικό laser διόδου. Πρόσφατες εξελίξεις σε laser διόδων που εκπέμπουν στο μπλε συμβάλουν σημαντικά στα συστήματα CD, εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας δεδομένων που μπορεί να αποθηκεύσει ο δίσκος, εφόσον πρόκειται να αναγνωστεί από φως μικρότερου μήκους κύματος. Τυπικά, οι σύγχρονες συσκευές CD περιέχουν laser GaAlAs με μήκος κύματος 780nm.

Για να διαβάσει τα δεδομένα, το laser εστιάζει το φως του στο ανακλαστικό μέρος του CD, που είναι περίπου 1.2 mm κάτω από την επιφάνεια του δίσκου. Αυτό έχει ένα πλεονέκτημα στο ότι η δέσμη παραμένει ευρεία, όπως περνάει μέσα από την επιφάνεια, κάνοντας το σύστημα πολύ ανεκτικό από επιφανειακές ατέλειες: μία γρατσουνιά ή ένα σωματίδιο σκόνης δεν μπλοκάρει εντελώς όλο το φως. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται, εξαρτάται από την θέση του σημείου πρόσπτωσης στην επιφάνεια του δίσκου. Αν όλο πέσει σε πεδιάδα, τότε όλο το φως ταξιδεύει σχεδόν την ίδια απόσταση πριν να ανακλαστεί και έτσι παρουσιάζεται μόνο εποικοδομητική αλληλεπίδραση. Αν, ωστόσο, το σημείο είναι σε λάκκο, τότε παρουσιάζεται καταστρεπτική αλληλεπίδραση. Οι λάκκοι έχουν τυπικό εύρος ίσο με 0.5 μm , και το σημείο εστίασης του laser έχει εύρος περίπου 1.2 μm . Αυτό σημαίνει ότι 50% περίπου του φωτός προσπίπτει σε πεδιάδα, σε οποιαδήποτε πλευρά του λάκκου, και

Αυτή η γωνία είναι επίσης ίση με το μισό της εσωτερικής γωνίας του κώνου του φωτός ανάμεσα στην επιφάνεια και το αντανακλαστικό στρώμα, και $\tan\theta_r = (\text{διάμετρος κουκκίδας στην επιφάνεια}/2)/(\text{πλάτος πλαστικού})$. Έτσι

διάμετρος κουκκίδας στην επιφάνεια = $2 \times \tan(17) \times 1.22 = 0.746 \text{mm}$.

Είναι σημαντικό το φως να παραμένει εστιασμένο σωστά στο δίσκο, αφού διακυμάνσεις στο μέγεθος της κυλίδας εστίασης επηρεάζουν την ποσότητα του φωτός που αντανακλάται πίσω, και, σε ακραίες περιπτώσεις, μια κακά εστιασμένη κηλίδα μπορεί να καλύψει περισσότερες από μία γραμμές. Τυπικά, η απόσταση ανάμεσα στον φακό και στην επιφάνεια του δίσκου περιορίζεται στα 2 μm .

Το σήμα που λαμβάνεται από ένα CD πρέπει να επιτελεί περισσότερες λειτουργίες από το να μεταφέρει μονάχα την ακουστική πληροφορία. Πρέπει, επίσης, να δίνει πληροφορίες σχετικά με την παρακολούθηση και εστίαση της δέσμης του laser. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την μεταβίβαση αυτής της πληροφορίας, που διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Στο σύστημα που απεικονίζεται, το φράγμα περίθλασης που χρησιμοποιείται προκαλεί την εκπομπή μηδενικής και πρώτης τάξης διαθλαστικών δεσμών με τις οποίες ακτινοβολείται το CD. Η μηδενικής τάξης περιθλώμενη δέσμη περιέχει την ακουστική πληροφορία και η πρώτη τάξης περιθλώμενη δέσμη χρησιμοποιείται για την εστίαση και την παρακολούθηση. Το φως πολώνεται, χρησιμοποιώντας ένα πρίσμα πολωτή, και κατόπιν ευθυγραμμίζεται πριν διαπεράσει μέσα από ένα πλακίδιο ενός τετάρτου μήκους κύματος. Το τελευταίο μετατρέπει το γραμμικά πολωμένο φως σε κυκλικά αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα πολωμένο. Η ανάκλαση από την μεταλλική επιφάνεια του CD αντιστρέφει την φορά περιστροφής του κυκλικά πολωμένου φωτός, έτσι αφού ξαναπεράσει από το πλακίδιο ενός τετάρτου μήκους κύματος, μετατρέπεται ξανά σε γραμμικά πολωμένο φως, αλλά με μία διαφορά 90° ως προς την αρχική διεύθυνση πόλωσης. Όταν αυτό προσπέσει στο πρίσμα πόλωσης, ανακλάται πια αποτελεσματικά προς τον ανιχνευτή. Χωρίς αυτή τη διάταξη, υπάρχει ο κίνδυνος το φως να εκπεμφθεί ξανά πίσω στο laser, αποσταθεροποιώντας το.

10.5.4 Ηλεκτρονικά Συστήματα CD

Σε αυτό το σύστημα η φωτεινή διαθλώμενη δέσμη μηδενικής τάξης προσπίπτει σε μία τετραγωνισμένη φωτοδίοδο. Μία τετραγωνισμένη φωτοδίοδος είναι βασικά μία

κυκλική φωτοδίοδος που έχει χωριστεί σε τέσσερα τέταρτα όπου κάθε τέταρτο είναι ένας ξεχωριστός ανιχνευτής. Οι τετραγωνισμένοι φωτοδίοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουν τη θέση μίας προσπίπτουσας δέσμης συγκρίνοντας τα σήματα από κάθε ένα από τα τέσσερα μέρη της: αν η δέσμη εντοπίζεται στην κεντρική περιοχή της φωτοδίοδου τότε κάθε τέταρτο θα δώσει το ίδιο σήμα. Εδώ, η δίοδος χρησιμοποιείται για να ελέγξει την εστίαση του σημείου στο CD και η φωτοδίοδος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έναν κυλινδρικό φακό. Αν η απόσταση ανάμεσα στο δίσκο και στο φακό αλλάξει, εξαιτίας παραμόρφωσης του δίσκου ή μηχανικών προβλημάτων, τότε το σημείο που προσπίπτει στη φωτοδίοδο δεν θα είναι πλέον κυκλικό αλλά ελλειπτικό, Σχήμα 10.12 (α). Επιπλέον, αν ο δίσκος είναι πολύ κοντά στο φακό ο μεγάλος άξονας της έλλειψης θα είναι κατακόρυφος, και αν ο δίσκος έχει απομακρυνθεί από το φακό ο μεγάλος άξονας της έλλειψης θα είναι οριζόντιος. Και στις δύο περιπτώσεις, το σήμα από ένα ζεύγος διαγώνιων φωτοδίοδων θα είναι πιο δυνατό από το άλλο ζεύγος και η διαφορά σήματος μπορεί να αποσταλεί σε έναν σέρβομηχανισμό για να μεταβάλει την απόσταση δίσκου-φακού.

Οι 1^η τάξης διαθλώμενες δέσμες εστιάζονται σε δύο διαφορετικές φωτοδίοδους, και στις δυο πλευρές της τετραγωνισμένης φωτοδίοδου. Αυτές χρησιμοποιούνται για να κρατήσουν τη δέσμη στην σωστή πορεία. Αν η μηδενικής τάξης διαθλώμενη δέσμη, η ακουστική δέσμη, διαδίδεται κατά μήκος της σωστής πορείας, τότε οι 1^{ης} τάξης διαθλώμενες δέσμες μοιράζονται γύρω από αυτήν και, παρόλο που υφίστανται διαμόρφωση, είναι μικρότερη από αυτή που υπόκεινται η ακουστική δέσμη, Σχήμα 10.12 (β). Αν η ακουστική δέσμη αρχίσει να κινείται εκτός της σωστής πορείας, τότε μία εκ των 1^{ης} τάξης περιθλώμενες δέσμες θα υποστεί μεγαλύτερη διαμόρφωση, αφού το περισσότερο από το φως της προσπίπτει σε λάκκο, και η άλλη δέσμη θα υποστεί μικρότερη διαμόρφωση, αφού λιγότερο από το φως της προσπίπτει σε λάκκο της τροχιάς. Όπως πριν, ένα σήμα διαφοράς από αυτές τις δύο φωτοδίοδους μεταφέρεται σε έναν σέρβο μηχανισμό για να μεταφέρει το σύστημα εστίασης. Το Σχήμα 10.12 (γ) δείχνει πώς τα σήματα και από τις έξι φωτοδίοδους συνδυάζονται για ακουστική, εστίαση και παρακολούθηση εξόδων.

Σωστή απόσταση (correcting spacing)

Μεγάλη απόσταση Πολύ κοντά

Ακουστικό σήμα (Audio signal)

Σήμα εστίασης (Focus signal)

Σήμα παρακολούθησης (Tracking signal)

Σχήμα 10.12 Η χρήση των φωτοдиодων για (α) εστίαση, και (β) σκοπούς παρακολούθησης. (γ) απεικονίζουν τις ηλεκτρικές συνδέσεις των φωτοδιόδων.

Τέλος, όπως οποιοδήποτε άλλο ακουστικό σύστημα, τα ανακτημένα δεδομένα πρέπει να μετατραπούν σε μία κατάλληλη μορφή για να οδηγήσουν ένα σύστημα μεγαφώνων ή ακουστικών. Το Σχήμα 10.13 απεικονίζει ένα απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα μιας συσκευής CD. Αφού το σήμα έχει ανακτηθεί από το δίσκο, ενισχύεται και ελέγχεται για σφάλματα ευθυγράμμισης και εστίασης. Το σήμα τότε αποδιαμορφώνεται, που σημαίνει ότι η επιπλέον πληροφορία που προστίθεται για συγχρονισμό και σκοπούς ελέγχου σφάλματος αφαιρείται, και η 14 bit λέξη για κάθε κανάλι αποκωδικοποιείται πίσω στην αρχική 8 bit μορφή της. Το ψηφιακό φίλτρο αφαιρεί οποιαδήποτε ψευδή σήματα που παρουσιάζονται στην αποκωδικοποίηση του σήματος, και στη συνέχεια περνάει από έναν 16 bit ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα, που παράγει την αρχική αναλογική έξοδο σε δύο διαφορετικά κανάλια. Αυτές οι έξοδοι στη συνέχεια ενισχύονται και περνάνε στα ηχεία.

Το CD αποτελεί μία μεγάλη επιτυχία, και, εκτός αν έχετε ένα πολύ ακριβό ηχοσύστημα, η απώλεια από τις υψηλές συχνότητες με τη διαδικασία της ψηφιοποίησης αναπληρώνεται με το παραπάνω με την απουσία σφυρίγματος ή τριξίματος, που συνηθίζονται σε εγγραφές ταινίας και βινυλίου. Επιπρόσθετα σε αυτό, φυσικά, είναι η δυνατότητα μίας φορητής συσκευής CD που δεν υπήρχε με τους δίσκους! Τέλος, ένα από τα δυνατά σημεία του CD είναι η χωρητικότητα δεδομένων και αυτή πρόκειται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την κατασκευή των laser που εκπέμπουν στο μπλε. Τα laser αυτά έχουν ένα μήκος κύματος περίπου μισό από αυτό που έχουν τα laser που χρησιμοποιούνται σήμερα και άρα το σημείο εστίασής τους έχει μόνο τη μισή διάμετρο. Αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητα των δεδομένων στο δίσκο μπορεί να αυξηθεί κατά έναν παράγοντα του τέσσερα αν χρησιμοποιηθεί laser που εκπέμπει στο μπλε, που σημαίνει ότι μπορείτε να έχετε ένα τετραπλάσιο άλμπουμ σε ένα μόνο CD!

Δίσκος (Disc)

Laser Οδηγός εστίασης (focus drive)

Οδηγός δίσκου

Φωτοδιόδος (Photodiode)

Επεξεργαστής σήματος φωτοδιόδου (Photodiode signal processor)

Αποκωδικοποιητής Ψηφιακό φίλτρο Μετατροπέας A/D Έξοδος

Επεξεργαστής σφάλματος

Οδηγός διαδρομής (Track drive)

Σχήμα 10.13 Ένα σχηματικό των εξαρτημάτων μίας συσκευής CD.

Ερώτηση 4

Σε μία συσκευή CD απαιτείται ένα σημείο εστίασης μεγέθους 1.2 μm . Αν χρησιμοποιηθεί φως μήκους κύματος 780nm, ποια είναι η εστιακή απόσταση του φακού που απαιτείται για διάμετρο 1cm;

10.6 Ο εκτυπωτής laser

Οι εκτυπωτές laser είναι πολύ διαδεδομένοι στα γραφεία εξ αιτίας των υψηλών ταχυτήτων και της ικανότητας τους να εκτυπώνουν με υψηλή ποιότητα. Στους πρώτους εκτυπωτές, οι πηγές φωτός που χρησιμοποιούταν ήταν laser HeNe ή laser αερίων Ηλίου Καδμίου, των οποίων η ένταση διαμορφωνόταν με τη χρήση ακουστικο – οπτικών διαμορφωτών. Σήμερα, αυτά τα laser έχουν αντικατασταθεί από laser ημιαγωγών για τους συνήθεις λόγους του μεγέθους, της κατανάλωσης ενέργειας, και επειδή το laser ημιαγωγού μπορεί να διαμορφωθεί απευθείας. Οι εκτυπωτές laser ανήκουν αυστηρά σε μια ομάδα εκτυπωτών που λέγονται ηλεκτροφωτογραφικοί εκτυπωτές, και η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την συσκευή φωτοτυπιών. Το Σχήμα 10.14 είναι ένα σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει την λειτουργία του εκτυπωτή laser. Το βασικότερο μέρος του εκτυπωτή είναι ένα φωτοευαίσθητο τύμπανο, που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, και η πληροφορία προς εκτύπωση καταγράφεται σαν μια χαρακτηριστική εικόνα στο τύμπανο. Η διαδικασία λειτουργεί ως εξής. Πρώτα, ένα ομοιόμορφο φορτίο τοποθετείται στην επιφάνεια του τύμπανου από τα ηλεκτρόδια φόρτισης. Η δέσμη laser σαρώνει μια γραμμή κατά μήκος του τύμπανου, διαμορφώνοντας την ένταση της έτσι ώστε επιτυχείς σαρώσεις δημιουργούν την εικόνα προς σάρωση: το laser ενεργοποιείται όταν υπάρχει κάτι προς εκτύπωση και απενεργοποιείται όταν δεν υπάρχει κάτι. Όταν το τύμπανο εκτίθεται στο φως η αντίσταση της φωτοευαίσθητης επιστρώσης μειώνεται και το ηλεκτρικό φορτίο που εφαρμόζεται με τα ηλεκτρόδια φόρτισης εκφορτίζεται, δημιουργώντας μια ηλεκτροστατική χαρακτηριστική εικόνα στο τύμπανο. Καθώς διέρχονται μπροστά από τον γραφίτη (toner) αυτές οι αποφορτισμένες περιοχές λαμβάνουν φορτία από

τον γραφίτη, παράγοντας μια εικόνα της πληροφορίας προς εκτύπωση. Το τύμπανο τότε περνάει πάνω από το ηλεκτρόδιο μεταφοράς, και σφηνωμένο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο μεταφοράς και το τύμπανο είναι το χαρτί. Το πεδίο από το ηλεκτρόδιο μεταφοράς 'έλκει' το φορτίο του γραφίτη από το τύμπανο και το χαρτί. Η εικόνα τότε σχηματίζεται στο χαρτί με τη χρήση της θερμότητας και της πίεσης.

Laser Περιστρεφόμενος πολυγωνικός καθρέπτης Κυλινδρικοί φακοί
 εμφανιστής (Developer) Φωτοευαίσθητο τύμπανο Ηλεκτρόδιο
φόρτισης Ηλεκτρόδιο μεταφοράς (Transfer electrode) Χαρτί Στερεωτής
(Fixer)

Σχήμα 10.14 Σχηματικό διάγραμμα του εκτυπωτή laser.

Η φωτοευαίσθητη επίστρωση στο τύμπανο μπορεί να είναι ένας οργανικός φωτοαγωγός, όπως το σελήνιο, ή το άμορφο πυρίτιο. Αφού η ευαισθησία αυτών των υλικών μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος, χρησιμοποιούνται τα laser με τα μικρότερα δυνατά μήκη κύματος. Τυπικά, τα laser έχουν μήκη κύματος ανάμεσα σε 750nm και 810nm, με εξόδους ανάμεσα σε 5 και 50 mW.

10.7 Ο μαγνητο-οπτικός δίσκος

Τα μαγνητο-οπτικά μέσα είναι ελκυστικά για χρήση σε συστήματα οπτικών εγγραφών επειδή μπορούν να διαγραφούν και να επανεγγραφούν πάνω από ένα εκατομμύριο φορές. Οι μαγνητο-οπτικοί δίσκοι χρησιμοποιούν το φαινόμενο Faraday ή την περιστροφή Kerr. Αν και η περιστροφή Faraday της διεύθυνσης πόλωσης του φωτός παρουσιάζεται όταν το φως ταξιδεύει μέσα από το μαγνητο-οπτικό υλικό, η περιστροφή Kerr παρουσιάζεται για φως που ανακλάται από την επιφάνεια του μαγνητο-οπτικού υλικού. Τα αποτελέσματα είναι ωστόσο παρόμοια. Οι μαγνητο-οπτικοί δίσκοι βασίζονται σε ένα γυάλινο ή πλαστικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο τοποθετείται το μαγνητο-οπτικό στρώμα, που μπορεί να είναι ένα απλό στρώμα, ή, πιο συνηθισμένα σήμερα πολλές στρώσεις από, για παράδειγμα, κοβάλτιο του τερβίου ή του σιδήρου. Πάνω από αυτό τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα από αλουμίνιο, που δρα ως ανακλαστικό στρώμα. Το στρώμα αλουμινίου τότε είτε προστατεύεται από ένα άλλο πλαστικό στρώμα ή δυο δίσκοι τοποθετούνται σε επαφή των οπίσθιων πλευρών για να σχηματίσουν ένα απλό δίσκο, δυο όψεων. Αρχικά, οι μαγνητικές ροπές στο μαγνητικό στρώμα ευθυγραμμίζονται κάθετα στην επιφάνεια

του δίσκου, και δείχνοντας προς την ίδια κατεύθυνση, Σχήμα 10.15(α). Ο δίσκος εγγράφεται με την εστίαση της δέσμης laser στο μαγνητο- οπτικό στρώμα που τοπικά αυξάνει την θερμοκρασία του. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί πάνω από το σημείο Curie τότε αυτό το μέρος του δίσκου μπορεί να επαναμαγνητιστεί στην αντίθετη κατεύθυνση με τον υπόλοιπο δίσκο με την εφαρμογή του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου, Σχήμα 10.15(β). Όταν η δέσμη laser απενεργοποιηθεί, η θερμοκρασία πέφτει κάτω από το σημείο Curie και η νέα κατεύθυνση της μαγνήτισης έχει 'παγώσει' στον δίσκο. Με την αλλαγή κατάστασης της δέσμης laser από ενεργή σε ανενεργή σύμφωνα με το ψηφιακό σήμα προς εγγραφή, το σήμα καταγράφεται με τη μορφή των μαγνητικών διπολικών ροπών των στοιχείων στον δίσκο. Επειδή το laser μπορεί να εστιάσει σε ένα σημείο με διάμετρο περίπου ίση με 1 μm , υψηλής πυκνότητας εγγραφή είναι δυνατή, και ένας δίσκος 130 mm έχει χωρητικότητα 500 Mbytes, ή 347 δισκέτες.

Τα δεδομένα διαβάζονται μέσω αναγνώρισης της περιστροφής της πόλωσης του προσπίπτοντος φωτός: μαγνητικές διπολικές ροπές ευθυγραμμισμένες σε μια κατεύθυνση θα περιστρέψουν την πόλωση της δέσμης προς μια κατεύθυνση, και μαγνητικές διπολικές ροπές ευθυγραμμισμένες προς την αντίθετη κατεύθυνση θα περιστρέψουν την πόλωση προς την άλλη πλευρά. Το Σχήμα 10.15(γ) απεικονίζει το σχηματικό ενός συστήματος μαγνητο- οπτικής ανάγνωσης, με το ζεύγος φωτοδίοδων μετά από τον διαχωριστή πολωμένης δέσμης να χρησιμοποιείται για να ορίσει προς ποια κατεύθυνση έχει περιστραφεί η πόλωση.

Στρώμα μαγνητικών διπολικών ροπών (Magnetic layer) Εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

Δέσμη laser

Μαγνήτης (Magnet) Δίσκος (Disc)

Laser

Διαχωριστής δέσμης (Beam splitter) Φωτοδίοδοι

Τετραγωνισμένη φωτοδίοδος

Σχήμα 10.15 Ο προσανατολισμός των χώρων στο μαγνητικό στρώμα(α) πριν την εγγραφή, και (β) κατά την εγγραφή. (γ) ένα σχηματικό ενός συστήματος μαγνητο-οπτικής διάταξης ανάγνωσης.

10.8 Το σύστημα επικοινωνίας οπτικής ίνας

Από όλες τις οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές που είναι σε χρήση σήμερα, οι επικοινωνίες με οπτική ίνα είναι φανερά η πιο επιτυχημένη. Οι οπτικές επικοινωνίες κατά κάποιον τρόπο είναι σε χρήση από τους αρχαίους χρόνους. Για παράδειγμα, οι Έλληνες χρησιμοποιούσαν μια διάταξη από γραμμές και στήλες σε σήματα φωτιάς για να επιτύχουν την μετάδοση σύντομων μηνυμάτων. Πρόωρα οπτικά συστήματα επικοινωνίας χαρακτηρίζονταν από χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και συστήματα που λειτουργούν στο κενό χώρο. Οι δυο μεγάλες δυσκολίες με την επικοινωνία αυτού του τύπου είναι προφανείς: η πληροφορία μπορεί να αποσταλεί πολύ αργά και, αν η ορατότητα είναι πολύ χαμηλή, τότε ίσως να μην μπορεί να αποσταλεί καθόλου. Το πρόβλημα του ρυθμού δεδομένων οφείλεται κατά κάποιον τρόπο στον Alexander Graham Bell, ο οποίος εφηύρε το φωτόφωνο το 1880. Σε αυτό, ένα οπτικό σήμα διαμορφωνόταν από μια ανακλαστική μεμβράνη η οποία δονούταν σύμφωνα με ηχητικά κύματα στον αέρα. Ωστόσο, αυτό ήταν ένα σύστημα κενού χώρου και έτσι οι εφαρμογές του ήταν περιορισμένες. Οι οπτικές επικοινωνίες δεν γνώρισαν μεγάλη πρόοδο μέχρι την ανάπτυξη πρακτικών συστημάτων κατευθυνόμενων κυμάτων και, παρόλο που η AT&T κάτεχε μια πατέντα για τις κατευθυνόμενες οπτικές επικοινωνίες μέσω του γυαλιού το 1934, δεν ήταν μέχρι την δεκαετία του 1970 που ένα σύστημα κατευθυνόμενου κύματος μπορούσε να υλοποιηθεί και να αξιοποιηθεί. Αυτό ήταν το αποτέλεσμα της επαρκούς εξέλιξης πλήθους τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένης της αξιόπιστης κατασκευής ινών χαμηλής απώλειας και της εξέλιξης των διοδικών laser το 1962. Τα πλεονεκτήματα των επικοινωνιών οπτικών ινών έναντι των συμβατικών επιχάλκωμένων τεχνολογιών καλωδίου είναι αναρίθμητα, τα μεγαλύτερα από τα οποία είναι η χαμηλή εξασθένηση και το μεγάλο εύρος ζώνης, που σημαίνει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των επαναληπτών και την μεταφορά μεγαλύτερου αριθμού καναλιών, ή γρηγορότερων ρυθμών δεδομένων: 1μm μήκους κύματος φως έχει συχνότητα 3×10^6 GHz. Αν μόνο 1% από αυτή την συχνότητα χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, το αντίστοιχο εύρος ζώνης επικοινωνιών είναι 3×10^6 MHz, που είναι αρκετά ευρύ για να υποστηρίξει εκατομμύρια τηλεφωνικών κλήσεων ή εκατοντάδες τηλεοπτικά κανάλια σε μια μόνο ίνα. Επιπρόσθετα, επειδή η μετάδοση του φωτός δεν δημιουργεί εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία δεν υπάρχει διασταύρωση ομιλίας ανάμεσα σε γειτονικές ίνες και, επιπλέον, είναι ασφαλείς επειδή είναι δύσκολο να παραβιαστούν. Οι ίνες είναι επίσης πιο ελαφρές από τα επιχάλκωμένα καλώδια, με ένα σύστημα ίνας να

ζυγίζει έως και 30 φορές λιγότερο από το ισοδύναμο σύστημα επιχαλκωμένου καλωδίου. Το μικρό μέγεθος των ινών είναι επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα στα πλαίσια της αστικής και οικοδομικής εγκατάστασης όπου ο χώρος είναι περιορισμένος, και ένα 7.5 cm διαμέτρου επιχαλκωμένο καλώδιο μπορεί να αντικατασταθεί από ένα μόνο ζεύγος από οπτικές ίνες με αυξημένη απόδοση. Το μεγάλο μειονέκτημα των επικοινωνιών οπτικών ινών είναι το κόστος. Οπτικά συστήματα υψηλού ρυθμού δεδομένων χρησιμοποιούν μονορυθμικές οπτικές ίνες, που σημαίνει ακριβούς συνδέσμους και πηγές laser. Για μεγάλου όγκου πληροφορίες και/ή μεγάλες αποστάσεις οι ίνες ακόμη αναπαριστούν ένα πλεονέκτημα καθαρού κόστους. Σε μικρότερα συστήματα και/ή μεταφορές δεδομένων σε χαμηλούς ρυθμούς, τα οφέλη είναι λιγότερο ξεκάθαρα, και ένα ζεύγος επιχαλκωμένων καλωδίων μπορεί να αποτελεί μια φθηνότερη εναλλακτική. Λόγω οικονομικού κόστους μεγάλο ενδιαφέρον επιδεικνύεται στην χρήση των laser CD όπως και των πηγών επικοινωνίας, αφού ο πολύ μεγάλος όγκος παραγωγής σημαίνει ότι αυτά τα laser είναι πολύ φθηνά.

Το διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος επικοινωνίας οπτικών ινών απεικονίζεται στο Σχήμα 10.16. Το αναλογικό σήμα προς μετάδοση, που είναι εδώ μια τηλεφωνική συζήτηση, πρώτα ψηφιοποιείται, και μετά κωδικοποιείται. Όπως ένα σύστημα CD η κωδικοποίηση βοηθά στην ανίχνευση σφαλμάτων και εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχουν μεγάλες ακολουθίες από μηδενικά ή άσσους που να κάνουν την αξιόπιστη αποκωδικοποίηση στο άλλο άκρο δύσκολη. Το ψηφιοποιημένο πλέον σήμα τότε χρησιμοποιείται για να αλλάξει την κατάσταση μιας πηγής φωτός, που μπορεί να είναι μια δίοδος laser ή ένα LED ανάλογα με το σύστημα. Στα συστήματα μεγάλων αποστάσεων, παρουσιάζεται εμφανής μείωση της έντασης του μεταδιδόμενου φωτός και αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί αν πρέπει να φτάσει ένα χρήσιμο-μετρήσιμο σήμα στο άλλο άκρο. Ένας επαναλήπτης παρεμβαίνει στο εξασθενημένο σήμα και ενισχύει και συγχρονίζει το σήμα, για να ανακτήσει την ακολουθία των bit σε αυτήν που αρχικά απεστάλη. Αν χρειάζεται, κυκλώματα εναλλαγής μεταφέρουν το σήμα σε διαφορετικά κανάλια. Όταν το σήμα φτάσει στο άλλο άκρο της σύνδεσης, ανιχνεύεται και ενισχύεται πριν περάσει σε κυκλώματα ανασύστασης, που το συγχρονίζουν, και τελικά σε έναν αποκωδικοποιητή για να εξαχθεί το αρχικό αναλογικό σήμα. Τέλος, αυτό το σήμα αποστέλλεται στην συσκευή του δέκτη. Για να κατανοήσουμε τους περιορισμούς στην σχεδίαση των συστημάτων οπτικών ινών, θα εξετάσουμε κάθε εξάρτημα με τη σειρά.

Εκπομπός

Κωδικοποιητής Φωτεινή πηγή

Κυκλώματα εναλλαγής Επαναληπτές

Ανιχνευτής και Ενισχυτής Επαναγεννητής Αποκωδικοποιητής

Δέκτης

Σχήμα 10.16 Διάγραμμα μιας σύνδεσης οπτικής ίνας.

ΕΡΕΥΝΑ

Οι τηλεφωνικοί ψηφιακοί κωδικοποιητές συχνά χρησιμοποιούν μη γραμμική κβαντοποίηση, όπου τα ψηφιακά επίπεδα δεν είναι ομοιόμορφα χωρισμένα. Βρείτε γιατί συμβαίνει αυτό.

10.8.1 Ο πομπός

Οι πομποί μετατρέπουν ηλεκτρικές εισόδους σε μια μορφή σήματος κατάλληλου προς εκπομπή στην σύνδεση. Οι πομποί οπτικής ίνας μετατρέπουν το σήμα εισόδου σε ένα σήμα οδήγησης για το LED ή τις διόδους laser, που στην συνέχεια το μετατρέπουν σε οπτικό σήμα. Οι πομποί είναι γενικά ακόμη υβριδικές μονάδες, που περιέχουν διακριτά εξαρτήματα, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και LED, και ολοκληρωμένα κυκλώματα σε ένα μόνο πακέτο, παρόλο που η αυξημένη ολοκλήρωση είναι ο στόχος, με πηγές και σχετιζόμενα ηλεκτρονικά σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Για να αποφευχθεί η χρήση μιας ίνας για να αποσταλεί κάθε ένα σήμα, τα συστήματα οπτικής ίνας χρησιμοποιούν την πολυπλεξία για να ενώσουν την αποστολή δυο ή περισσότερων σημάτων στην ίδια σύνδεση. Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους μπορεί να πολυπλεχθούν τα σήματα.

Στην πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου ένα μέρος του πρώτου σήματος λαμβάνεται, και σε αυτό προστίθεται ένα μέρος του δεύτερου σήματος, και μετά ένα μέρος του τρίτου σήματος, και ούτω καθ' εξής μέχρι να προστεθεί ένα μέρος όλων των σημάτων, και μετά επιστρέφουμε στο πρώτο σήμα και παίρνουμε το επόμενο μέρος, και προσθέτουμε το επόμενο μέρος του δεύτερου σήματος και ούτω καθ' εξής. Κατόπιν αυτό εκπέμπεται σαν ένα σήμα, που πρέπει να χωριστεί σε μικρά κομμάτια που είναι συνδεδεμένα μαζί για να σχηματίσουν τα αρχικά σήματα στο άλλο άκρο. Η πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου είναι πρακτικά κατάλληλη για ψηφιακά σήματα, και οι ψηφιακοί πολυπλέκτες συνήθως συνδέουν έως και 16 γραμμές εισόδου σε μία

γραμμή εξόδου. Περισσότερες εισοδοί συνδέονται με την σύνδεση των πολυπλεκτών. Η έλξη προς την πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρονικά τους είναι φθηνά.

Η πολυπλεξία στο πεδίο της συχνότητας μετατρέπει διακυμάνσεις πλάτους σε διακυμάνσεις συχνότητας γύρω από μια κεντρική φέρουσα συχνότητα, με κάθε σήμα να έχει μια διαφορετική κεντρική συχνότητα. Από πλευράς κόστους, η πολυπλεξία στο πεδίο της συχνότητας εφαρμόζεται πιο επιτυχώς στα αναλογικά σήματα επειδή δεν μπορεί να γίνει με καθορισμένη ψηφιακή λογική, πράγμα που την μετατρέπει σε δαπανηρή τεχνική για ψηφιακά συστήματα.

Η πολυπλεξία στο πεδίο του μήκους κύματος (WDM) είναι μια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε οπτικά συστήματα. Σε αυτή, κάθε σήμα χαρακτηρίζεται από το δικό του μήκος κύματος, και παράγεται από ξεχωριστή πηγή. Είναι δυνατόν να λειτουργήσει ένα σύστημα WDM έως και 5 nm διαφορά ανάμεσα στα μήκη κύματος των πηγών, παρόλο που οι πρώτες συνδέσεις χρησιμοποιούσαν πολύ διαφορετικά μήκη κύματος. Η μεγαλύτερη δυσκολία σε αυτήν την προσέγγιση είναι ο διαχωρισμός των σημάτων στο άκρο του λήπτη. Αυτό μπορεί να γίνει με την χρήση, για παράδειγμα, ενός φράγματος περίθλασης, ενός μικρού πρίσματος ή πολυστρωματικών φίλτρων συμβολής.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των συνδέσεων οπτικών ινών είναι ότι, επειδή δεν υπάρχει διασταύρωση ομιλίας (crosstalk) ανάμεσα στα σήματα βασικά στον σύνδεσμο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τρόποι διαμόρφωσης για να αποσταλούν διαφορετικά σήματα από την ίδια ίνα.

Η επιλογή LED ή δίοδου laser εξαρτάται πάρα πολύ από την απόδοση που απαιτείται από την σύνδεση, και την απόδοση των άλλων εξαρτημάτων. Για αναλογικές εφαρμογές, τα LED είναι η προτιμώμενη πηγή εξαιτίας της γραμμικής εξόδου τους. Για τα ψηφιακά συστήματα, ο χρόνος απόκρισης τους μπορεί να αυξηθεί οδηγώντας τα με ένα D.C. ρεύμα πόλωσης, και προσθέτοντας έναν μικρό χρόνο μεγάλης έντασης παλμό ρεύματος στα άκρα ανόδου και καθόδου. Για υψηλής ταχύτητας ψηφιακές συνδέσεις, μια δίοδος laser είναι η προτιμώμενη επιλογή, αφού οι δίοδοι laser έχουν μεγαλύτερο εύρος διαμόρφωσης από τα LED. Άρα αν η ταχύτητα της πηγής είναι ο περιοριστικός παράγοντας στην ροή δεδομένων τα ημιαγωγικά laser είναι μια καλή επιλογή. Επιπλέον, αφού η διασπορά των οπτικών συστημάτων μονότροπων ινών εξαρτάται από το εύρος γραμμής της πηγής, αν η

διασπορά είναι ένας παράγοντας περιορισμού, πρέπει επίσης να χρησιμοποιηθεί μια δίοδος laser.

10.8.3 Η ίνα

Η απόδοση της ίνας σε μια σύνδεση εξαρτάται από τον τρόπο μεταβολής του δείκτη διάθλασης της, την διάμετρο της και το αριθμητικό της άνοιγμα. Επίσης εξαρτάται από το μήκος κύματος και το φασματικό εύρος γραμμής της πηγής. Το υψηλότερης απόδοσης δίκτυο οπτικής ίνας υιοθετεί μια μονορυθμική μετατοπισμένης διασποράς οπτική ίνα που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μια πηγή laser στα 1.55 μm . Σε αυτό το μήκος κύματος η εξασθένηση είναι η ελάχιστη, το γεγονός ότι η ίνα είναι μονότροπη σημαίνει ότι δεν υπάρχει διασπορά ρυθμού, και το χαρακτηριστικό της μετατοπισμένης διασποράς σημαίνει ότι η μηδενική διασπορά του υλικού, που συνήθως παρουσιάζεται στα 1.3 μm στον χαλαζία, έχει μεταφερθεί στα 1.55 μm , εξασφαλίζοντας έτσι την ελάχιστη διασπορά υλικού. Η σύνδεση ελάχιστης απόδοσης υιοθετεί μια οπτική ίνα που είναι πολύτροπη, βηματικού δείκτη διάθλασης που λειτουργεί σε συνδυασμό με μια πηγή LED στα 820nm. Η σύνδεση αυτή παρουσιάζει σχετικά μεγάλη εξασθένηση, και το εύρος ζώνης της ίνας περιορίζεται από την διασπορά ρυθμού. Ενδεχομένως, υψηλές αποδόσεις μπορούν επίσης να επιτευχθούν από ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης, και αυτές είναι ιδιαίτερα ελκυστικές επειδή είναι εύκολο να εισαχθεί το φως στους μεγάλους διαμέτρους πυρήνες τους. Ωστόσο, η υπερβολική ευαισθησία της διασποράς σε μεταβολές στο μήκος κύματος λειτουργίας μειώνει κάπως την απόδοση αυτών των ινών. Μια ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης που λειτουργεί με ένα LED στα 1300 nm προσδίδει απόδοση κάπου ανάμεσα σε αυτή των προηγούμενων δυο παραδειγμάτων.

Για τα WDM συστήματα, χρησιμοποιείται η ίνα επίπεδης διασποράς, που έχει χαμηλή διασπορά για ένα εύρος μηκών κύματος. Σε αυτή την ίνα, ο απλός βηματικός δείκτης διάθλασης αντικαθίσταται από ένα μάλλον τετραγωνισμένο W, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10.17.

Δείκτης διάθλασης

Ακτίνα

Σχήμα 10.17 Ο δείκτης διάθλασης μιας ίνας επίπεδης διασποράς.

Ερώτηση 5

Τι θα συνέβαινε αν δεν χρησιμοποιούνταν οι ίνες επίπεδης διασποράς στα συστήματα WDM;

Πρακτικά οι ίνες πρέπει να ενδυναμωθούν μηχανικά για να μπορούν να αντεπεξέλθουν στις δυσκολίες της εγκατάστασης. Αυτό αποτελεί ένα πραγματικό γεγονός για τα υποθαλάσσια καλώδια όπου το βάρος του ελκυόμενου καλωδίου καθαυτό είναι σημαντικά μεγάλο. Η μηχανική ενίσχυση μπορεί να επιτευχθεί περιτυλίγοντας τις ίνες γύρω από έναν ατσάλινο πυρήνα, και μετά περιτυλίγοντας το σύνολο με μια εξωτερική θήκη κατασκευασμένη από πολυμερές υλικό, Σχήμα 10.18(α), ή παρέχοντας μια μηχανικά ενισχυμένη δομή καλωδίου όπου η ίνα να κείται χαλαρά σε μια κοιλότητα μέσα στο καλώδιο, Σχήμα 10.18(β). Πάνω απ' όλα, είναι σημαντικό να μην παρουσιάζονται κάμψεις ή πιέσεις στην ίνα, είτε σε καλωδιακή κατασκευή ή στην εγκατάσταση.

Στρώση προστασίας από πολυμερές

Ατσάλινος πυρήνας

Οπτική ίνα

Αντικραδασμικές στρώσεις

Ατσάλινος πυρήνας Στρώμα προστασίας από πολυμερές υλικό

Οπτική ίνα

Σχήμα 10.18 Μηχανική ενδυνάμωση μιας ίνας (α) τυλίγοντας την γύρω από έναν ατσάλινο πυρήνα, και (β) τοποθετώντας την σε κοιλότητες μέσα σε καλώδιο.

10.8.3 Ο επαναλήπτης

Ο επαναλήπτης αποκρίνεται στην εξασθένηση που υφίσταται το φως καθώς διαδίδεται μέσα στην ίνα. Προς το παρόν, οι περισσότεροι επαναλήπτες είναι ηλεκτρονικές συσκευές, που ανιχνεύουν το φως, το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα και μετά εκτελούν λειτουργίες επαναλήπτη όπως ενίσχυση, συγχρονισμός και ανασχηματισμός των παλμών πριν το μετατρέψουν πάλι σε οπτικό σήμα και το στείλουν να συνεχίσει την διαδρομή του. Οι ηλεκτρονικοί επαναλήπτες έχουν δυο μεγάλα μειονεκτήματα: χρειάζονται μια παροχή ενέργειας για να οδηγηθούν τα

ηλεκτρονικά εξαρτήματα, και δεν είναι διάφανοι, δηλαδή αν ο ρυθμός δεδομένων εκπομπής αυξηθεί πέρα από ένα συγκεκριμένο σημείο τα ηλεκτρονικά δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν, και πρέπει να αναβαθμιστούν. Αυτό είναι δαπανηρό αν το καλώδιο είναι στην μέση του Ατλαντικού! Πρόσφατα, οι εταιρίες τηλεπικοινωνιακών έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν ίνες μείγματος ερβίου ως επαναλήπτες. Σε αυτές, ένα μικρό μέρος από κανονική ίνα αντικαθίσταται με ίνες που ο πυρήνας γυαλιού χαλαζία έχει αναμειχθεί με έρβιο, Σχήμα 10.19. Το αναμειγμένο μέρος με έρβιο της ίνας αντλείται από ένα διοδικό laser, για να δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμού. Όταν φως περάσει από την περιοχή μείγματος, τότε λαμβάνει μέρος εξαναγκασμένη εκπομπή στο μήκος κύματος της σύνδεσης, και το φως της σύνδεσης ενισχύεται. Αφού αυτό είναι ένα ολικό οπτικό σύστημα, οι επαναλήπτες κατασκευασμένοι από ενισχυτές ίνας μείγματος ερβίου (EDFAs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλους τους ρυθμούς δεδομένων, και οι σύνδεσμοι έχει αποδειχθεί ότι μεταφέρουν 10 Gbits^{-1} σήματα με EDFA επαναλήπτες σε αποστάσεις 50 km. Οι EDFA μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν οπτικά σήματα πριν την μετάδοση, επιτρέποντας να διανυθούν μεγαλύτερες αποστάσεις, έως και 200 km, πριν χρειαστεί επαναλήπτης.

Είσοδος Οπτικός απομονωτής Εμπλουτισμένη με έρβιο οπτική ίνα
Οπτικός απομονωτής Έξοδος

Laser άντλησης

Σχήμα 10.19 Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός ενισχυτή ίνας εμπλουτισμένης με έρβιο.

10.8.4 Ο δέκτης

Οι δέκτες μετατρέπουν οπτικά σήματα εισόδου σε ηλεκτρικά σήματα εξόδου. Όπως με τους πομπούς, οι δέκτες είναι συνήθως υβρίδια από διακριτά εξαρτήματα και ολοκληρωμένα κυκλώματα και συνήθως κατασκευάζονται για την χρήση ενός συγκεκριμένου πομπού, αφού ακόμη και αν οι ηλεκτρικές προδιαγραφές διασύνδεσης είναι πανομοιότυπες ένας μη συμβατός πομπός και δέκτης μπορούν να έχουν διαφορετικά σχήματα κωδικοποίησης.

Ένας δέκτης αποτελείται από μια φωτοδίοδο, μια αντίσταση πόλωσης και, επειδή το ληφθέν οπτικό σήμα και τα συνεπαγόμενα ηλεκτρικά ρεύματα έχουν μικρά πλάτη, έναν προενισχυτή χαμηλού θρύβου. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνει επιπρόσθετη ενίσχυση και ισοσταθμιστές. Οι ισοσταθμιστές βελτιώνουν την ποιότητα

του σήματος αντισταθμίζοντας τις μη – γραμμικότητες του συστήματος που προκαλούν, εκτός των άλλων, εκπομπή σημάτων που αρχικά εκπέμποταν σε μια συχνότητα, να εκπέμπονται σε συχνότητες πολλαπλάσιες αυτής της συχνότητας. Οι ισοσταθμιστές επίσης απομακρύνουν τον θόρυβο των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα δέκτη μπορεί επίσης να περιέχει λειτουργίες όπως η αποκατάσταση ρολογιού, που εξάγει ένα σήμα χρονισμού από την ροή των bit έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να ανακτηθούν ορθά: στις επικοινωνίες οπτικής ίνας. Ένα ρολόι δεν εκπέμπεται χωριστά από τα δεδομένα και έτσι αυτή είναι μια πολύ σημαντική λειτουργία αν πρόκειται το ανακτημένο σήμα να μην περιέχει πολλά σφάλματα. Ο δέκτης μπορεί επίσης να περιέχει ένα κύκλωμα αποκωδικοποίησης, κυκλώματα ανίχνευσης σφαλμάτων και αποκατάστασης σφαλμάτων και μονάδες που να ανιχνεύουν την ανεπάρκεια των συνδέσμων. Ο δέκτης πρέπει να έχει υψηλή ευαισθησία, μεγάλο εύρος ζώνης και χαμηλό σήμα θορύβου. Ο φωτοανιχνευτής πρέπει να έχει μικρό μέγεθος και να είναι συμβατός με το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στην εκπομπή του σήματος. Ο δέκτης πρέπει επίσης να παρέχει μεγάλο κέρδος και μεγάλο σήμα εξόδου με χαμηλή πολυπλοκότητα πόλωσης, μεγάλη αξιοπιστία και μικρό κόστος.

Το σημαντικότερο εξάρτημα του δέκτη είναι η φωτοδίοδος, που μπορεί να είναι μια απλή δομή PIN ή μια φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD). Οι φωτοδιόδοι PIN είναι πολύ αξιόπιστες και μπορούν να λειτουργήσουν με μια συνηθισμένη παροχή ισχύος πλακέτας. Ωστόσο, σε ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 1 Gbits^{-1} , για παράδειγμα, μια APD είναι περίπου 160 φορές πιο ευαίσθητη από μια PIN. Για πηγές με μήκη κύματος έως και $1.1 \mu\text{m}$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν φωτοδιόδοι πυριτίου. Για μεγαλύτερα μήκη κύματος χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί όπως GaAs.

10.8.5 Η εξέλιξη των συνδέσμων οπτικών ινών

Ένα παράδειγμα του τρόπου που εξελίχθηκαν οι επικοινωνίες οπτικής ίνας, είναι η πρώτη υπερατλαντική σύνδεση οπτικής ίνας, TAT8, και ο πιο πρόσφατος σύνδεσμος TAT12/13. Ο TAT8 ανοίχθηκε για επισκευή ανάμεσα στην Ευρώπη και την Βόρεια Αμερική στις 14 Δεκεμβρίου 1988, από την AT&T, την Βρετανική Telecom και την Γαλλική Telecom. Ήταν ένας μονότροπος σύνδεσμος που λειτουργούσε στα $1.3 \mu\text{m}$, και ικανός να μεταφέρει 40.000 ταυτόχρονους τηλεφωνικούς διάλογους με ρυθμό δεδομένων 140 Mbits ανά δευτερόλεπτο. Διπλασίασε αποτελεσματικά την χωρητικότητα στον βόρειο Ατλαντικό. Τον Οκτώβριο το 1995, το TAT12/13

ξεκίνησε να μεταφέρει δεδομένα από την Αμερική στην Αγγλία, και κάποια στιγμή θα συνδέσει την Αμερική την Αγγλία και την Γαλλία. Είναι δακτυλιοειδούς σχήματος με συνολικό μήκος περίπου 14.000 χιλιόμετρα, και έχει ενισχυτές οπτικής ίνας κατά μήκος του σε απόσταση 45 km. Ο σύνδεσμος αποτελείται από δυο ζεύγη από μονότροπες ίνες μετατοπισμένης διασποράς που λειτουργούν κοντά στα 1.55 μm, και μπορεί να μεταφέρει 300.000 ταυτόχρονους τηλεφωνικούς διάλογους με ρυθμό δεδομένων 5 Gbit ανά δευτερόλεπτο. Ο δακτύλιος 'αυτό-θεραπεύεται' δηλαδή αν ανιχνευθεί μια βλάβη σε οποιοδήποτε τμήμα του δικτύου η ροή των δεδομένων μπορεί να περάσει από την αντίθετη κατεύθυνση χωρίς να διακοπεί η υπηρεσία. Με συστήματα όπως αυτό το ενδεχόμενο μιας τηλεφωνικής κλήσης ανάμεσα στο Λονδίνο και την Νέα Υόρκη δεν κοστίζει περισσότερο από μια ανάμεσα στο Λονδίνο και το Birmingham, και η ευκολία της κλήσης, δεν αποτελεί πλέον όνειρο.

10.9 Συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο είδαμε ότι

- Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος από εφαρμογές της οπτοηλεκτρονικής, από έναν απλό οπτικό φράγμα έως ένα πολύπλοκο τηλεπικοινωνιακό σύστημα
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες οπτικής ίνας για την μέτρηση μεγάλου εύρους παραμέτρων, είτε από φαινόμενα που αλλάζουν την μετάδοση της ίνας καθαυτής, ή με την σύζευξη του φωτός μέσα και έξω από τον αισθητήρα χρησιμοποιώντας μια ίνα. Παραδείγματα είναι ανιχνευτές στάθμης υγρών, αισθητήρες πίεσης και το γυροσκόπιο οπτικής ίνας.
- Η συσκευή ανάγνωσης κωδικού ράβδου βασίζεται στην ακριβή μετάδοση της ανάκλασης του φωτός από μια σειρά από φωτεινές και σκοτεινές μπάρες, που αναπαριστούν έναν αριθμό που υποδεικνύει ένα και μοναδικό κείμενο
- Η συσκευή CD διαβάζει πληροφορία από έναν οπτικό δίσκο με laser, χρησιμοποιώντας εποικοδομητικές και καταστρεπτικές εσωτερικές διαδικασίες για να παράγει '0' και '1'. Η φύση της μη – επαφής της συσκευής, και το γεγονός ότι τα δεδομένα αποθηκεύονται ψηφιακά μειώνει την φθορά του δίσκου, και την παραμόρφωση του σήματος από ατέλειες στην επιφάνεια του δίσκου
- Μπορεί να διαβαστεί πληροφορία αποθηκευμένη σε μαγνητικά μέσα

χρησιμοποιώντας μαγνητο- οπτικά φαινόμενα όπως τα φαινόμενα Kerr και Faraday

- Ο εκτυπωτής laser χρησιμοποιεί ένα φωτοευαίσθητο τύμπανο που 'είναι γραμμμένο' χρησιμοποιώντας φως για να δημιουργήσει φορτισμένες περιοχές που συλλέγουν χρώμα στο σχήμα της εικόνας που πρόκειται να παραχθεί
- Η ενδεχόμενη χωρητικότητα των συνδέσεων οπτικών ινών είναι τεράστια. Λόγω των βελτιώσεων στους τομείς των απωλειών και την διασπορά των ινών, η χρήση, για παράδειγμα, των ενισχυτών οπτικών ινών και η δημιουργία συνδέσεων σε ένα δίκτυο, ανάμεσα στο πρώτο και την πιο πρόσφατη υπερωκεάνια σύνδεση έχει γίνει μια επταπλάσια αύξηση σε χωρητικότητα συνδέσεων πάνω στον ίδιο τύπο ίνας.

10.10 Περαιτέρω ανάγνωση

Όσον αφορά τα οπτοηλεκτρονικά γενικά, το ενδιαφέρον στο αντικείμενο έχει δημιουργήσει αρκετά άρθρα και βιβλία στο θέμα των οπτοηλεκτρονικών εφαρμογών. Τα βιβλία και άρθρα που επιλέχθηκαν παρακάτω προτείνονται σαν ένα καλό σημείο αρχής αν θέλετε να μάθετε περισσότερα πάνω στο θέμα.

'Optoelectronics: an Introduction', JCA Chaimowicz, Butterworth Heinemann Ltd, 1989

'Optoelectronics, An Introduction (2nd edition)' J Wilson and JFB Hawkes, Prentice Hall International (UK) Limited, 1989.

'The Physics of the Compact Disc', J A Cope, Physics Education, volume 28, 1993

'Optical Networks to Span the Globe', N Doran and I Bennion, Physics World, November, 1996.

10.11 Ερωτήσεις

10.1 Μια συσκευή οπισθοσκέδασης δυο διαστάσεων είναι κατασκευασμένη από δυο κάτοπτρα μήκους 10 cm. Αν η δέσμη που πρόκειται να ανακλαστεί πέσει στο κέντρο του πρώτου κατόπτρου, υπολογίστε την μέγιστη γωνία πρόσπτωσης πέρα από την οποία η ανάκλαση δεν προσπίπτει στο δεύτερο κάτοπτρο.

10.2 Ένα συμβολόμετρο Sagnac διαθέτει ένα πηνίο με 100 σπειρώματα από οπτική ίνα ακτίνας 20 cm. Αν χρησιμοποιηθεί για φως με μήκος κύματος 1.3 μm, με

τι ρυθμό περιστροφής θα διαδοθούν οι δυο δέσμες σε διαδρομές που διαφέρουν σε μήκος κατά $\lambda/2$;

- 10.3 Ένα περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο έχει 6 επιφάνειες. Πόσο χρόνο θα χρειαστεί να σαρώσει μια δέσμη laser έναν κωδικό ράβδου αν το κάτοπτρο περιστρέφεται με 6.000 περιστροφές ανά λεπτό;
- 10.4 Η επιφάνεια ανάκλασης ενός CD είναι επιστρωμένη με πολυανθρακικό πλαστικό που έχει δείκτη διάθλασης 1.55. Αν ένα laser με μήκος κύματος στο κενό 780 nm χρησιμοποιηθεί για την ανάγνωση της πληροφορίας του δίσκου, πόσο βαθιές πρέπει να είναι οι χαρακιές στην επιφάνεια ανάκλασης; (θυμηθείτε, ότι πρέπει να χρησιμοποιήσετε το μήκος κύματος για το εσωτερικό του πλαστικού για τους υπολογισμούς σας).
- 10.5 Το πλακίδιο ενός τετάρτου μήκους κύματος σε ένα σύστημα CD είναι κατασκευασμένο από μίκα, που είναι ένα διπλοθλαστικό με $n_{//}=1.599$ και $n_{\perp}=1.594$. Γραμμικά πολωμένο φως προσπίπτει στο πλακίδιο έτσι ώστε μια συνιστώσα του φωτός να βλέπει $n_{//}$ και η άλλη να βλέπει n_{\perp} . Για να λειτουργήσει σωστά το πλακίδιο, η διαφορά διαδρομών ανάμεσα σε αυτές τις συνιστώσες πρέπει να είναι $\lambda/4$ όταν εξέλθουν. Πόσο πάχος πρέπει να έχει το πλακίδιο για να το επιτύχει αυτό αν στο κενό το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται είναι 780 nm;
- 10.6 Ένα πλέγμα περίθλασης χρησιμοποιείται για να χωρίσει τα μεμονωμένα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται σε έναν απλό WDM σύνδεσμο που μεταφέρει δυο μήκη κύματος στα 654 nm και στα 565 nm. Ποια είναι η μικρότερη απόσταση των γραμμών στο πλέγμα περίθλασης που εξασφαλίζει ότι το πρώτο μέρος διαθλώμενων κουκκίδων από αυτά τα μήκη κύματος είναι χωρισμένο από μια απόσταση 10 mm σε μια οθόνη τοποθετημένη 10 cm από την πλευρά εξόδου του πλέγματος;
- 10.7 Μια σύνδεση οπτικής ίνας χρησιμοποιεί μια οπτική ισχύ ίση με 1 mW. Υπολογίστε την μέγιστη απόσταση που μπορεί να επιτραπεί ανάμεσα σε επαναλήπτες αν ο ανιχνευτής πρέπει να δέχεται μια ελάχιστη είσοδο 1 nW, και η ίνα παρουσιάζει εξασθένηση ίση με 1.2 dBkm^{-1} . (Στοιχείο: μετατρέψτε τον ρυθμό ισχύος εισόδου στην απαιτούμενη ισχύ εξόδου σε decibel και κατόπιν χρησιμοποιείστε αυτό για να υπολογίστε το μέγιστο μήκος του συνδέσμου.)

- 10.8 Ένας ψηφιακός τηλεφωνικός διάλογος πρέπει να αποστέλλεται με ρυθμό δεδομένων 64 kbit^{-1} . Αν μια σύνδεση μπορεί να αποστέλλει δεδομένα με ρυθμό 10 Gbit^{-1} , πόσους ταυτόχρονους τηλεφωνικούς διαλόγους μπορεί να αποστέλλει;
- 10.9 Τα τηλεοπτικά σήματα συνήθως δειγματοληπτούνται χρησιμοποιώντας 12-bit κβαντοποίηση. Πόσα επίπεδα αναπαριστά αυτό;
- 10.10 Η μέγιστη συχνότητα ενός τηλεοπτικού σήματος είναι 10 MHz . Χρησιμοποιώντας το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist υπολογίστε τον ελάχιστο ρυθμό με τον οποίο το σήμα πρέπει να δειγματοληπτιθεί για μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό. Υπολογίστε τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων για εκπομπή του σήματος αν χρησιμοποιηθεί 12-bit δειγματοληψία. Πόσα τηλεοπτικά σήματα μπορούν να χωρέσουν σε έναν σύνδεσμο 10 Gbit^{-1} ;