

Συστήματα Μετάδοσης

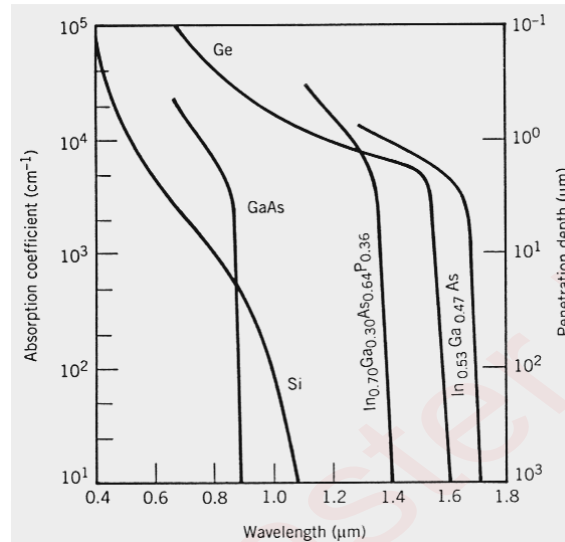
Οπτικοί Δέκτες



Βασικές Αρχές



Οπτική Απορρόφηση



- Ημιαγωγοί απορροφούν φωτόνια των οποίων η ενέργεια $h\nu$ υπερβαίνει το ενεργειακό διάκενο τους E_g .
- Η απορρόφηση φωτονίων παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών.
- ⇒ Το ποσοστό απορρόφησης (κβαντική απόδοση) εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης a και το πάχος W του ημιαγωγού

$$\eta = \frac{P_a}{P_{in}} = 1 - e^{-aW}$$

Γενικά Χαρακτηριστικά

⇒ Αποκρισιμότητα R (αριθμός φωτονίων που παράγουν ηλεκτρόνια)

$$I = RP_{in}$$

⇒ Κβαντική απόδοση (πηλίκο του ρυθμού παραγωγής ηλεκτρονίων προς το ρυθμό πρόσπτωσης φωτονίων)

$$\eta = \frac{I/q}{P_{in}/h\nu} = \frac{h\nu}{q} R$$

⇒ Εύρος ζώνης

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})}$$

τ_{tr} : χρόνος που κάνουν τα ηλεκτρόνια να διασχίσουν την περιοχή απορρόφησης

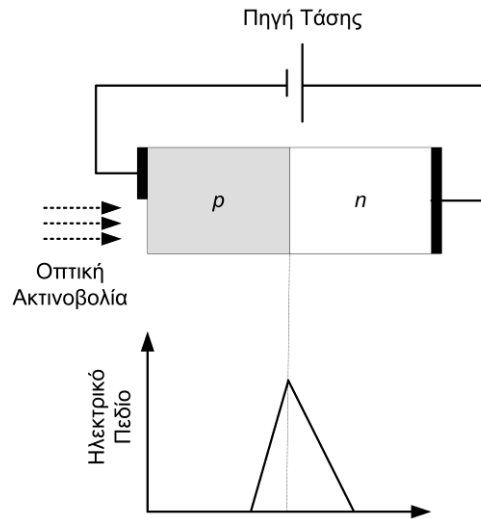
τ_{RC} : σταθερά χρόνου παρασιτικών φαινομένων

⇒ Ρεύμα σκότους (ρεύμα το οποίο παράγεται απουσία οπτικού σήματος)

Τύποι Φωτοδιόδων



Φωτοдиодοι p-n (I)



□ Ανάστροφα πολωμένη p-n επαφή

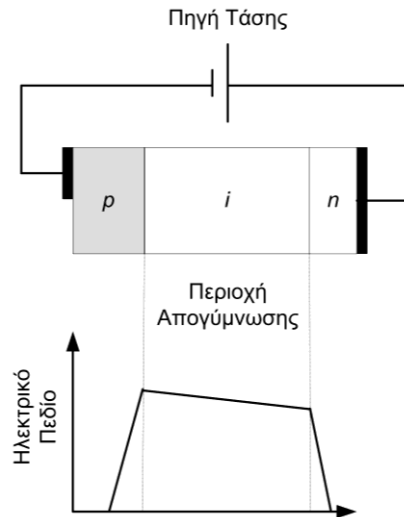
- ⇒ Λόγω της ανάστροφης πόλωσης δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή της επαφής η οποία καλείται περιοχή απογύμνωσης.
- ⇒ Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που υφίσταται στην περιοχή απογύμνωσης συγκεντρώνει τα ηλεκτρόνια και οι οπές που παράγονται από την προσπίπτουσα οπτική ακτινοβολία στην n- και p- περιοχή, αντίστοιχα.

Φωτοдиодοι p-n (II)

Χαρακτηριστικά

- ✓ Η κβαντική απόδοση των φωτοδιόδων p-n είναι ιδιαίτερα μεγάλη και η αποκρισιμότητά τους R προσεγγίζει τη μονάδα.
- ⇒ Οι p-n φωτοдиодοι παρέχουν τη δυνατότητα φώρασης οπτικού σήματος σε ρυθμούς περίπου 10 Gbps, καθώς ο χρόνος που κάνουν τα ηλεκτρόνια να διανύσουν την περιοχή απογύμνωσης είναι της τάξης των 100 ps.
- ✗ Περιοριστικό παράγοντα του εύρους ζώνης των φωτοδιόδων p-n είναι το ρεύμα διάχυσης που προκαλείται λόγω της δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων οπών εκτός της περιοχής απογύμνωσης (χρόνος διάχυσης της τάξης του 1 ns).

Φωτοдиодοι p-i-n (I)



- Αύξηση του μήκους της περιοχής απογύμνωσης, ώστε να περιοριστεί το ρεύμα διάχυσης.
- Η αύξηση του μήκους της περιοχής απογύμνωσης επιτυγχάνεται εισάγοντας μεταξύ των περιοχών p- και n- ενδογενή (intrinsic) ημιαγωγό.

- ⇒ Η i- περιοχή αποτελεί την περιοχή απογύμνωσης, στην οποία παράγεται το σύνολο των φορέων .
- ⇒ Το μήκος της i- περιοχής καθορίζει την κβαντική απόδοση της φωτοδιόδου και το εύρος ζώνης αυτής.

Φωτοдиодοι p-i-n (II)

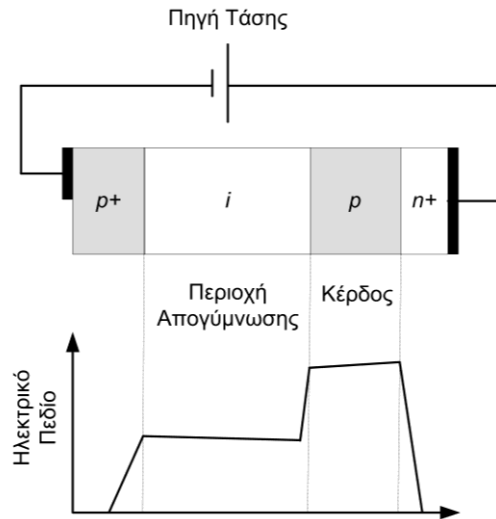
Διπλή ετεροεπαφή

- ⇒ Η απόδοση των p-i-n επαφών είναι δυνατόν να βελτιωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας διπλή ετεροεπαφή (η i-περιοχή κατασκευάζεται από υλικό διαφορετικό από αυτό των περιοχών p- και n-).
- ⇒ Υλικό για την i-περιοχή είναι το κράμα $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (ενεργειακό διάκενο 0.75 eV) που απορροφά οπτικά σήματα στην περιοχή των 1.3-1.6 μm .
- ⇒ Υλικό των περιοχών p- και n- είναι το InP (ενεργειακό διάκενο 1.35 eV και είναι) που είναι διαφανές για οπτικά σήματα με μήκος κύματος πάνω από 0.92 μm .

Χαρακτηριστικά

- ⇒ Η κβαντική απόδοση των ετεροεπαφών προσεγγίζει το 100% για μήκος περιοχής απογύμνωσης περί τα 4-5 μm .
- ⇒ Με διάφορες τεχνικές οι p-i-n φωτοдиодοι έχουν τη δυνατότητα μετατροπής οπτικού σήματος σε ρυθμούς που υπερβαίνουν τα 10 Gbps.

Φωτοδιόδοι χιονοστοιβάδας (I)



- Αύξηση της αποκρισιμότητας ώστε κάθε φωτόνιο να παράγει επιπλέον του ενός φορείς.
- Χρησιμοποιείται μία επιπλέον περιοχή (περιοχή κέρδους).

- ⇒ Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια επιταγχύνονται στην περιοχή κέρδους και η σύγκρουσή τους με δέσμια ηλεκτρόνια προκαλεί την αποδέσμευση των τελευταίων (ιονισμός).
- ⇒ Μέσω του ιονισμού τα αρχικά ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζουν τον αριθμό τους, με αποτέλεσμα η αποκρισιμότητα της φωτοδιόδου χιονοστοιβάδας να αυξάνει

$$R_{APD} = MR$$

Φωτοδιόδοι χιονοστοιβάδας (II)

Περιγραφή Κέρδους M

- ⇒ Το κέρδος M εξαρτάται από το μήκος της περιοχής κέρδους d και από τις σταθερές ιονισμού ηλεκτρονίων a_e και οπών a_h .
- ⇒ Επιλέγεται να υπερισχύει ιονισμός ηλεκτρονίων ή οπών, οπότε το κέρδος είναι

$$M = e^{a_e d}$$

Χαρακτηριστικά

- ⇒ Το εύρος ζώνης σε φωτοδιόδους εξαρτάται από το κέρδος M , καθώς ο χρόνος διάχυσης τ_{tr} αυξάνει λόγω της διαδικασίας πολλαπλασιασμού

$$\Delta f = (2\pi\tau_e M_0)^{-1}$$

- ✘ Αντίστροφη εξάρτηση της αποκρισιμότητας και του εύρους ζώνης των φωτοδίοδων χιονοστοιβάδας.

Σύνοψη Χαρακτηριστικών

Παράμετρος	Σύμβολο και Μονάδα Μέτρησης	p-i-n		Χιονοστοιβάδας	
		Ge	InGaAS	Ge	InGaAS
Μήκος Κύματος	λ (μm)	0.8-1.8	1-1.7	0.8-1.8	1-1.7
Αποκρισιμότητα	R (A/W)	0.5-0.7	0.6-0.9	3-30	
Κβαντική Απόδοση	η	0.5-0.55	0.6-0.7	-	-
Κέρδος	M	-	-	50-200	10-40
Παράγοντας k	k_A	-	-	0.7-1	0.5-0.7
Ρεύμα Εκτόνου	I_d (A)	50-500	1-20	5-500	1-5
Εύρος Ζώνης	Δf (GHz)	0.5-3	1-5	0.4-0.7	1-3
Τάση Ανάστροφης Πόλωσης	V (Volt)	6-10	5-6	20-40	20-30

Θόρυβος



Θεωρητική Περιγραφή (I)

- Ο θόρυβος σε φωτοδιόδους έχει δύο συνιστώσες το θόρυβο βολής (shot noise) και το θερμικό θόρυβο (thermal noise).

Θόρυβος Βολής

- Οφείλεται στο γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα στις φωτοδιόδους αποτελείται από ηλεκτρόνια τα οποία παράγονται σε τυχαίες χρονικές στιγμές.
- ⇒ Αποτέλεσμα: το ρεύμα των φωτοδίων έχει μια σταθερή μέση τιμή στην οποία προστίθεται μια χρονικά μεταβαλλόμενη τυχαία μεταβλητή.

$$I(t) = I + i_s(t)$$

- ⇒ Φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου βολής: $S_s(f) = qI$

- ⇒ Ισχύς θορύβου βολής σε δέκτη με εύρος ζώνης Δf : $\sigma_s^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_s(f) df = 2qI\Delta f$

Θεωρητική Περιγραφή (II)

Θερμικός Θόρυβος

- Οφείλεται στην τυχαία θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων στην εσωτερική αντίσταση του δέκτη R_L .
- ⇒ Αποτέλεσμα: στο ρεύμα των φωτοδίοδων προστίθεται μια δεύτερη χρονικά μεταβαλλόμενη τυχαία μεταβλητή.

$$I(t) = I + i_s(t) + i_T(t)$$

- ⇒ Φασματική πυκνότητα ισχύος θερμικού θορύβου: $S_T(f) = \frac{2k_B T}{R_L}$

- ⇒ Ισχύς θερμικού θορύβου: $\sigma_T^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_T(f) df = \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}$

- ⇒ Αν υπάρχουν ενισχυτές με εικόνα θορύβου F_n : $\sigma_T^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_T(f) df = F_n \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}$

Θόρυβος σε Φωτοδιόδους p-i-n

□ Σηματοθορυβικός λόγος $SNR_{pin} = \frac{I^2}{\sigma_N^2} = \frac{R^2 P_{in}^2}{2q(I + I_d)\Delta f + F_n \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}}$

⇒ Για μικρές οπτικές ισχύεις υπερισχύει ο θερμικός θόρυβος

$$SNR_{pin} = \frac{R_L R^2 P_{in}^2}{4k_B T F_n \Delta f}$$

⇒ Για μεγάλες ισχύεις υπερισχύει ο θόρυβος βολής

$$SNR_{pin} = \frac{I^2}{\sigma_N^2} = \frac{R P_{in}}{2q\Delta f} = \frac{\eta P_{in}}{2h\nu\Delta f}$$

Θόρυβος σε Φωτοδιόδους Χιονοστοιβάδας

- Ο θόρυβος βολής αυξάνει σε διόδους χιονοστοιβάδας καθώς τα ηλεκτρόνια και οι οπές που παράγονται λόγω ιονισμού δημιουργούνται σε τυχαίες χρονικές στιγμές

$$\sigma_s^2 = 2qM^2 F_A (M) (RP_{in} + I_d) \Delta f$$

- ⇒ Ο παράγοντας F_A καλείται επιπρόσθετος θόρυβος της διόδου χιονοστοιβάδας

- Σηματοθορυβικός λόγος $SNR_{APD} = \frac{M^2 R^2 P_{in}^2}{2qM^2 F_A (M) (I + I_d) \Delta f + F_n \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}}$

- ⇒ Για μικρές οπτικές ισχύεις υπερισχύει ο θερμικός θόρυβος

$$SNR_{APD} = \frac{R_L M^2 R^2 P_{in}^2}{4k_B T F_n \Delta f}$$

- ⇒ Για μεγάλες ισχύεις υπερισχύει ο θόρυβος βολής

$$SNR_{APD} = \frac{\eta P_{in}}{2h\nu F_A (M) \Delta f}$$

Ευαισθησία Δέκτη



Ευαισθησία Δέκτη (I)

- Η ευαισθησία του οπτικού δέκτη P_{rec} είναι η οπτική ισχύς που πρέπει να τον οδηγεί ώστε ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων να υπολείπεται του 10^{-9} .

Ρυθμός Εμφάνισης Σφαλμάτων

- Ιδανικά οι τιμές που μπορεί να λάβει το ηλεκτρικό ρεύμα είναι I_0 και I_1 , λόγω όμως του θορύβου οι στιγμιαίες τιμές ρεύματος που λαμβάνονται κατά τη δειγματοληψία κυμαίνονται σε περιοχές τιμών γύρω από τις ιδανικές τιμές.
- Η απόφαση αν η λαμβανόμενη τιμή αντιστοιχεί σε '0' ή '1' γίνεται μέσω της σύγκρισης του ρεύματος δειγματοληψίας I με ένα κατώφλι I_D .
- Ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων ισούται με την πιθανότητα να ανιχνευθεί '0' από το δέκτη δεδομένου ότι στάλθηκε '1' στον πομπό συν την πιθανότητα να ανιχνευθεί '1' δεδομένου ότι στάλθηκε '0'

$$BER = 0.5(P(1|0) + P(0|1))$$

Ευαισθησία Δέκτη (II)

Ρυθμός Εμφάνισης Σφαλμάτων

⇒ Θεωρώντας ότι ο θόρυβος βολής και ο θερμικός θόρυβος είναι ανεξάρτητες Gaussian μεταβλητές, οι πιθανότητες σφάλματος υπολογίζονται ως

$$P(1|0) = P(i_N + I_0 > I_D) = P(i_N > I_D - I_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \int_{I_D - I_0}^{\infty} e^{-e^{-\frac{i_N^2}{2\sigma_0^2}}} di_N = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right)$$

$$P(0|1) = P(i_N + I_1 < I_D) = P(i_N < I_D - I_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \int_{I_1 - I_D}^{\infty} e^{-e^{-\frac{i_N^2}{2\sigma_0^2}}} di_N = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right).$$

⇒ Αν το αποσταλλόμενο bit είναι '0' τότε δεν υπάρχει θόρυβος βολής στο δέκτη, οπότε η ισχύς θορύβου είναι διαφορετικές για αποσταλλόμενο '0' και '1'

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_T^2}, \quad \sigma_0 = \sigma_T.$$

Ευαισθησία Δέκτη (III)

Βέλτιστο Κατώφλι

⇒ Το βέλτιστο κατώφλι απόφασης I_D υπολογίζεται $I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

⇒ Για βέλτιστο κατώφλι προκύπτει $BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{e^{-Q^2/2}}{Q\sqrt{2\pi}}$

⇒ και ο παράγοντας Q είναι $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

⇒ Τυπικές τιμές του Q είναι $Q=6$ για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων ίσο με 10^{-9} και $Q=7$ για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων ίσο με 10^{-12} .

Ευαισθησία Δέκτη (IV)

Υπολογισμός Ευαισθησίας

⇒ Μέση οπτική ισχύς στο δέκτη (ισοπίθανα '0' και '1') $P_{rec} = \frac{P_1 + P_0}{2}$

⇒ Λοιπές παράμετροι $I_0 = 0,$

$$I_1 = MRP_1 = 2MRP_{rec},$$

$$\sigma_0 = \sigma_T = \sqrt{F_n \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}},$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} = \sqrt{4qM^2 F_A(M) R P_{rec} \Delta f + F_n \frac{4k_B T \Delta f}{R_L}}$$

⇒ Παράγοντας Q $Q = \frac{I_1}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{2MRP_{rec}}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} + \sigma_T}$

⇒ Η ευαισθησία του δέκτη προσεγγίζεται ως $P_{rec} = \frac{Q}{R} \left(qF_A(M) Q \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right)$

Ευαισθησία Δέκτη (V)

Ευαισθησία p-i-n φωτοδιόδων

- ⇒ Στις p-i-n φωτοδιόδους υπερτερεί ο θερμικός θόρυβος $P_{rec}^{pin} = \frac{Q\sigma_T}{R}$
- ⇒ Η ευαισθησία του δέκτη μειώνεται με την αντίσταση του δέκτη R_L και την αυξάνει με την εικόνα θορύβου των ενισχυτών F_n .
- ⇒ Η ευαισθησία των δεκτών με p-i-n φωτοδιόδους αυξάνει με το ρυθμό μετάδοσης.

Ευαισθησία φωτοδιόδων χιονοστοιβάδας

- ⇒ Όταν υπερτερεί ο θερμικός θόρυβος η ευαισθησία του δέκτη μειώνεται με το κέρδος της χιονοστοιβάδας M .
- ⇒ Η ευαισθησία σε φωτοδιόδους χιονοστοιβάδας αυξάνει με το ρυθμό μετάδοσης.
- ⇒ Η ευαισθησία σε φωτοδιόδους χιονοστοιβάδας είναι μειωμένη σε σχέση με τις p-i-n περί τα 6-8 dB.

Ανίχνευση και Διόρθωση Σφαλμάτων



Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων (I)

- Η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων γίνεται μέσω κατάλληλης κωδικοποίησης των αποστέλλομενων δεδομένων.
- Τα δεδομένα (m διαδοχικά bit) πλαισιώνονται στον πομπό από r bit ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον δέκτη για την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων και την διόρθωση τους

Απόσταση Hamming

- Ο αριθμός bit στα οποία διαφέρουν οι κωδικές λέξεις καλείται απόσταση Hamming d .
- ⇒ Η ανίχνευση d λαθών είναι δυνατή όταν η απόσταση Hamming είναι $d+1$ (π.χ. ένα parity bit δίνει απόσταση Hamming $d=2$ και ανιχνεύει ένα σφάλμα).
- ⇒ Η διόρθωση d λαθών είναι δυνατή όταν η απόσταση Hamming είναι $2d+1$, καθώς ακόμα και με d λάθη η αλλοιωμένη κωδική λέξη προσομοιάζει την αρχική λέξη περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη.

Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων (II)

Κώδικες Reed-Solomon

- ⇒ Ο κώδικας RS(255,239) χρησιμοποιεί 16 byte ελέγχου για κάθε 239 byte δεδομένων και έχει τη δυνατότητα διόρθωσης μέχρι 8 byte στο σύνολο των 255.
- ✘ Η επιβάρυνση (overhead) εύρους ζώνης του κώδικα λόγω της μετάδοσης των byte ελέγχου είναι 6.7%.
- ✘ Η χρήση του κώδικα δίνει τη δυνατότητα μείωσης της ευαισθησίας του δέκτη κατά περίπου 6 dB με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση του ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων στο οπτικό σύστημα.