



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας

Ενότητα 2: Οπτικοί δέκτες

Βλάχος Κυριάκος

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

Σκοποί ενότητας

Οι σκοποί της ενότητας είναι:

- η εξοικείωση του σπουδαστή με τους οπτικούς δέκτες, καθώς και με τις βασικές αρχές που τους διέπουν.
- Η εξοικείωση του σπουδαστή με τη χρήση στοιχείων οπτικών δεκτών καθώς και με τη διαδικασία αποσφαλμάτωσης των σημάτων



Περιεχόμενα ενότητας

- Βασικές αρχές
- Τύποι φωτοδιόδων
- Θόρυβος
- Ευαισθησία δέκτη
- Demodulation
- Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων



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 (πηλίκιο του ρυθμού παραγωγής ηλεκτρονίων προς το ρυθμό πρόσπτωσης φωτονίων)

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

⇒ Εύρος ζώνης

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

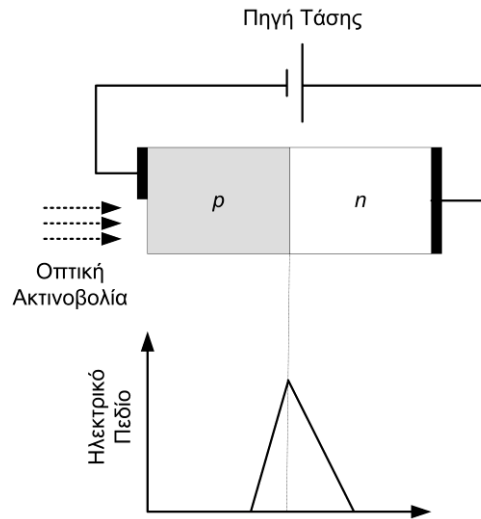
τ_{tr} : χρόνος που κάνουν τα ηλεκτρόνια να διασχίσουν την περιοχή απορρόφησης

τ_{RC} : σταθερά χρόνου παρασιτικών φαινομένων

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

Τύποι Φωτοδιόδων

Φωτοδιόδοι p-n (I)



□ Ανάστροφα πολωμένη p-n επαφή

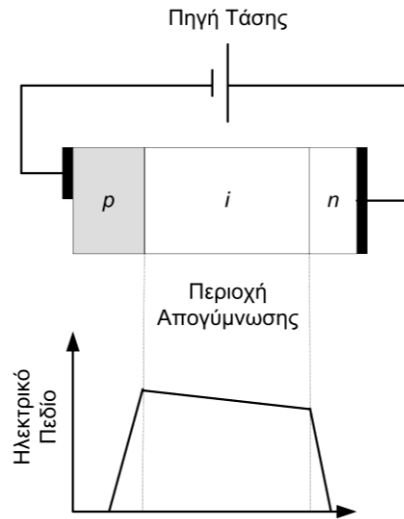
- ⇒ Λόγω της ανάστροφης πόλωσης δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή της επαφής η οποία καλείται περιοχή απογύμνωσης.
- ⇒ Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που υφίσταται στην περιοχή απογύμνωσης συγκεντρώνει τα ηλεκτρόνια και οι οπές που παράγονται από την προσπίπτουσα οπτική ακτινοβολία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

Φωτοδιόδοι 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.

Φωτοδιόδοι p-i-n (II)

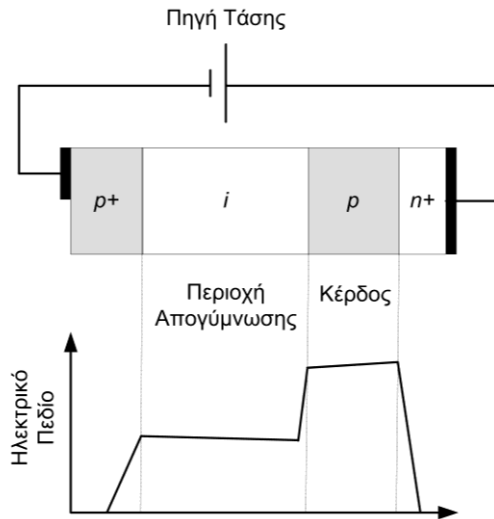
Διπλή ετεροεπαφή

- ⇒ 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 φωτοδιόδοι 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 Σκότους	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 φωτοδιόδων 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 ενισυτών 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.



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Βλάχος Κυριάκος, «Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας. Οπτικοί δέκτες». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Όλα τα σχήματα έχουν δημιουργηθεί από τον κ. Βλάχο Κυριάκο, εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/courses/CEID1108/index.php>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

