

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ LI-FI

ΣΟΥΛΤΑΝΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΛΕΣΣΑΣ ΦΩΤΙΟΣ, Επίκουρος καθηγητής

ΑΝΤΙΠΡΙΟ 2013

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αντίρριο .../...../2013

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Όνοματεπώνυμο, Υπογραφή

- 1.
- 2.
- 3.

Ευχαριστίες

Με την εργασία αυτή, ένας κύκλος φτάνει στο τέλος του. Η ακαδημαϊκή πορεία ολοκληρώνεται και ξεκινάει μια σελίδα, ένα νέο κεφάλαιο στην ζωή μου.

Έτσι, μέσα από αυτή την σελίδα θα ήθελα να ευχαριστήσω και να δείξω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέπων καθηγητή κ. Πλέσσα Φώτιο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, και τον καθηγητή Λούβρο Σπυρίδων για τις πληροφορίες και την καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον "χορηγό" μου, στην οικογένεια μου δηλαδή , για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τους καλούς μου φίλους και συναδέλφους Γκογκριτσιάνι Δαβιδ και Αλναι Γιονίντ για την πολύτιμη συνεργασία που είχαμε.

Την Τσοκανά Σοφία για την βοήθεια της στο θεωρητικό μέρος και την Λακουμέντα Παναγιώτα για την γενικότερη βοήθεια και υπομονή της.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω τη πτυχιακή εργασία στη μνήμη του πατέρα μου .

Abstract

In the following text, we will study wireless communication Li-Fi. The term Li-Fi (Light-Fidelity) was first introduced by Professor Harald Haas of the University of Edinburgh in a speech he made. Li-Fi although is a technology which is rapidly being evolving over the last two years, is still in a very early stage. The reason for that is that further improvement is needed to the design of electronic circuits. The innovation of this technology is that the data is not being transmitted with the use of radio waves, but with the use of visible light. The same light that created life and everything we see around us. Wouldn't it be a great idea to use this light for wireless communications? From one point of view is tested and therefore safe compared to the harmful effects of radio waves on the human body. Light is produced by LED lamps which are a cheaper and more cost efficient solution for wireless internet connection transmission comparing to Wi-Fi. LED lamps seems that will overtake the market the next decade which will be a create advantage to Li-Fi technology.

Key-words: Li-Fi, LED, Optical Wireless Communications (OWC).

Περίληψη

Στο κείμενο που ακολουθεί θα μελετήσουμε την ασύρματη επικοινωνία Li-Fi. . Τον όρο Li-Fi (Light-Fidelity) εισήγαγε ο καθηγητής Χάραλντ Χάας του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου σε μία ομιλία του. Είναι μια τεχνολογία που εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία 2 χρόνια. Βρίσκεται όμως ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο. Ο λόγος είναι ότι πρέπει να βελτιωθεί ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η καινοτομία της τεχνολογίας αυτής είναι ότι τα δεδομένα δεν είναι σε μορφή ραδιοκυμάτων αλλά σε μορφή ορατού φωτός. Είναι το φως που δημιούργησε τη ζωή, είναι το φως που δημιούργησε τα πάντα που βλέπουμε γύρο μας. Δεν θα ήταν σπουδαίο αυτό το φως να χρησιμοποιηθεί στις ασύρματες επικοινωνίες; Από μία άποψη είναι δοκιμασμένο, άρα και ασφαλές σε σχέση με την βλαβερή επίδραση των ραδιοκυμάτων στον ανθρώπινο οργανισμό. Για την εκπομπή του φωτός χρησιμοποιούνται λάμπες LED οι οποίες είναι μία φθηνότερη και αποδοτικότερη λύση ασύρματης σύνδεσης στο διαδίκτυο απ' το μέχρι πρότινος Wi-Fi. Οι λάμπες LED φαίνεται ότι θα εδραιωθούν την επόμενη δεκαετία, και τότε η τεχνολογία Li-Fi μπορεί να αποτελέσει το μέλλον, το οποίο είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

Λέξεις Κλειδιά: Li-Fi, LED, οπτικές ασύρματες επικοινωνίες(OWC).

Σύντομη περιγραφή διπλωματικής

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται η ασύρματη επικοινωνία Li-Fi. Όπως γνωρίζουμε στις ασύρματες επικοινωνίες αντιμετωπίζουμε πολλά προβλήματα όπως είναι η χωρητικότητα, η αποδοτικότητα, η ασφάλεια και η διαθεσιμότητα. Η έλευση του Li-Fi έδωσε λύση στα προβλήματα αυτά και η λύση δεν είναι άλλη από το φως.

Το πειραματικό μέρος της πτυχιακής έχει να κάνει με την προσομοίωση ενός σεναρίου στο λογισμικό Matlab. Η προσπάθεια θα επικεντρωθεί στην ανάλυση και εξήγηση των αποτελεσμάτων του κώδικα. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface – GUI).

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια. Έχει την εξής δομή: το Κεφάλαιο 1, όπου περιγράφει μια ιστορική αναδρομή πάνω στα ασύρματα δίκτυα. Το Κεφάλαιο 2 που εστιάζει σε στους οπτικούς πομπούς και για το πώς αυτοί λειτουργούν. Έπειτα το κεφάλαιο 3 περιγράφει τους οπτικούς ανιχνευτές καθώς και τις βασικές ιδιότητες των φωτοδίοδων. Στην συνέχεια ακολουθεί το κεφάλαιο 4 με περιεχόμενο σχετικό με την δομή των ασύρματων οπτικών καναλιών, ενώ το κεφάλαιο 5 δίνει μια λεπτομερή ανάλυση της τεχνολογίας που εξετάζουμε. Η εργασία κλείνει με το κεφάλαιο 6, με τον επίλογο και τα συμπεράσματα. Στο Παράρτημα περιλαμβάνεται ο κώδικας.

Περιεχόμενα

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή	ii
Λίστα Εικόνων	ix
1.1 Οπτικά Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών.....	2
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή	2
1.1.2 Οπτικά Συστήματα Ελεύθερου Χώρου	3
1.1.3 Ασύρματα Δίκτυα Ραδιοσυχνοτήτων.....	4
1.2. Οπτικά Ασύρματα Δίκτυα.....	4
1.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	4
1.2.2 Σύγκριση με RF Συστήματα.....	7
2.1 Δομή Συστημάτων Ασύρματης Οπτικής Ζεύξης.....	8
2.2 Εισαγωγικά Στοιχεία	9
2.2.1 Θεωρία της λειτουργίας τους	10
2.2.2 Συχνοτικές Ζώνες και Ασφάλεια	12
2.3. Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LEDs)	15
2.3.1 Εισαγωγή.....	15
2.3.2 Βασική Λειτουργία	17
2.3.3 Αποδοτικότητα των LEDs	18
2.3.4 Δομές LED.....	20
2.3.5 Εύρος Ζώνης Διαμόρφωσης.....	23
2.3.6 Οπτική Ισχύς.....	24
2.3.7 Οπτικό Φάσμα.....	25
2.4 Δίοδοι Laser (LDs).....	26
2.4.1 Εισαγωγή.....	26
2.4.2 Βασική Λειτουργία	27
2.4.3 Δομές LD.....	28
2.5 Σύγκριση LED και LD.....	30
3.1 Εισαγωγή.....	32
3.2 Βασικές Αρχές Οπτικής Ανίχνευσης	33
3.2.1 Αποκρισιμότητα	33
3.2.2 Συντελεστής Απορρόφησης	35
3.2.3 Εύρος Ζώνης και Χρόνος Ανόδου.....	36
3.3 Διαδεδομένες Φωτοдиодοι.....	37
3.3.1 Φωτοдиодοι P-N	37

3.3.2 Φωτοδίοδος PIN.....	39
3.3.2.1 Ανάστροφη Τάση.	42
3.3.3 Φωτοδίοδοι APD.....	43
4.1 Δομή Ασύρματων Οπτικών Καναλιών	47
4.2 Διαμόρφωση	48
4.3 Σχήματα Διαμόρφωσης.....	50
4.3.1 Διαμόρφωση Έντασης Παλμών (IM).....	50
4.3.2 Διαμόρφωση Παλμών κατά Θέση (PPM).....	51
4.4 Χωρική Διαμόρφωση (SM).....	53
5.1 Εισαγωγή.....	56
5.1.1 Ιστορικά Στοιχεία	56
5.1.2 Wi-Fi	57
5.2 Βασικές Αρχές	58
5.2.1 Λειτουργία.....	58
5.2.1.1 Χρήση LED	60
5.2.2 OFDM και MIMO.....	60
5.2.3 Επικοινωνία Ορατού Φωτός (VLC).....	61
5.3 Χαρακτηριστικά.....	62
5.3.1 Πλεονεκτήματα της Τεχνολογίας Li-Fi	62
5.3.2 Σύγκριση με Άλλες Τεχνολογίες	63
5.4 Εφαρμογές και Μελλοντικές Προκλήσεις.....	64
6.1 Τι είναι Matlab	66
6.1.2 Πως λειτουργεί.....	66
6.1.3 Graphical User Interface	66
6.1.4 Η μαθηματική βάση του Li-Fi/VLC	67
6.1.5 Υλοποίηση εφαρμογής Li-Fi/VLC.....	70
6.1.6 Λεπτομέρειες χρήσης.....	72
6.1.7 Αποτελέσματα-συμπεράσματα	75
Παράρτημα κώδικα	84
Αναφορές	92

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση RF και OWC συστημάτων.....	7
Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά συχνοτικών ζωνών οπτικών πηγών.	13
Πίνακας 3. Περίληψη τρεχόντων προτύπων ασφαλείας οπτικών πηγών.	14
Πίνακας 4. Τα σημαντικότερα οπτοηλεκτρονικά υλικά για κατασκευή LED.	17
Πίνακας 5. Υλικά υποστρωμάτων διόδων laser, φασματικό εύρος και εφαρμογές τους.	28
Πίνακας 6. Βασικές διαφορές οπτικών πηγών LEDs και LDs.	31
Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά συνηθισμένων p-i-n φωτοδίοδων.	42
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά συνηθισμένων APD φωτοδίοδων.	45
Πίνακας 9. Σύγκριση Li-Fi με Wi-Fi.	64
Πίνακας 10. Συγκριτικός πίνακας Li-Fi με άλλες τεχνολογίες.	64

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Σχηματικό διάγραμμα του φωτοφώνου των Alexander G. Bell και Charles S. Tainter.	3
Εικόνα 2. Διαγραμματική αναπαράσταση ενός τυπικού οπτικού ασύρματου συστήματος.	5
Εικόνα 3. Κατηγοριοποίηση οπτικών ασύρματων συνδέσεων.	6
Εικόνα 4. Γενικό διάγραμμα βαθμίδων τηλεπικοινωνιακού συστήματος.	8
Εικόνα 5. Γενικό διάγραμμα βαθμίδων ασύρματου οπτικού συστήματος.	9
Εικόνα 6. Διαφορετικές περιοχές μηκών κύματος οπτικών πηγών.	12
Εικόνα 7. (α') Παράλληλη εκπομπή φωτός προς τον ανθρώπινο οφθαλμό από σημειακή πηγή. Η εστίαση γίνεται σε μικρή περιοχή του αμφιβλιστροειδούς αδένα. (β') Η εστίαση στην περίπτωση εκτεταμένης πηγής γίνεται σε ευρεία περιοχή του αμφιβλιστροειδούς αδένα.	14
Εικόνα 8. Δομή LED επιφανειακής εκπομπής.	15
Εικόνα 9. Εκπομπός επιφάνειας (surface emitting) και εκπομπός κορυφής (edge emitting).	17
Εικόνα 10. Τυπική Lambertian κατανομή ισχύος για LED επιφάνειας.	19
Εικόνα 11. Δίοδος εκπομπής φωτός LED.	20
Εικόνα 12. Η δομή μίας LED επιπέδου, δείχνοντας την εκπομπή φωτός από όλες τις επιφάνειες.	21
Εικόνα 13. Η δομή μίας LED θόλου.	21
Εικόνα 14. Η δομή μίας AlGaAs DH LED εκπομπής επιφάνειας.	22
Εικόνα 15. Σχηματική αναπαράσταση της δομής μίας AlGaAs DH LED κορυφής με ραβδωτή γεωμετρία.	23
Εικόνα 16. Οπτική ισχύς συναρτήσεως του ρεύματος για (α') LED επιφάνειας και (β') LED κορυφής.	25
Εικόνα 17. Φάσμα εκπεμπόμενου φωτός μίας τυπικής 1.3μm LED. Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει το αναμενόμενο θεωρητικό αποτέλεσμα.	26
Εικόνα 18. Γενική δομή laser. Μία δίοδος laser μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια υπό μορφή φωτός.	27
Εικόνα 19. Αντηχείο Fabry-Perot.	29
Εικόνα 20. DFB laser.	30
Εικόνα 21. Μεταβολή της οπτικής ισχύος με το μήκος κύματος για λαμπτήρα πυρακτώσεων, LED και LD.	31
Εικόνα 22. Πλάκα ημιαγωγού που χρησιμοποιείται ως οπτικός ανιχνευτής.	34
Εικόνα 23. Αποκρισιμότητα ως προς το μήκος κύματος για ιδανική φωτοδίοδο πυριτίου. Επίσης, φαίνεται η αποκρισιμότητα μίας τυπικής συσκευής.	35

Εικόνα 24. Εξάρτηση συντελεστή απορρόφησης από το μήκος κύματος για διάφορα ημιαγώγιμα υλικά.....	36
Εικόνα 25. (α) Ανάστροφα πολωμένη p-n επαφή, (b) η οπτική ισχύς μίας p-n φωτοδιόδου, (c) διάγραμμα κίνησης των ηλεκτρικών φορέων.....	38
Εικόνα 26. (α) Όψη p-i-n φωτοδιόδου, (b) Τομή p-i-n φωτοδιόδου.....	40
Εικόνα 27. Δομή μίας InGaAs p-i-n φωτοδιόδου.....	42
Εικόνα 28. Συντελεστές ιονισμού για διάφορους ημιαγωγούς σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο.	44
Εικόνα 29. (α) Φωτοδιόδος APD με κατανομή ηλεκτρικού πεδίου, (b) σχεδιασμός φωτοδιόδου APD πυριτίου.....	45
Εικόνα 30. Διάγραμμα οπτικού καναλιού άμεσης ανίχνευσης.....	48
Εικόνα 31. Επικοινωνιακό μοντέλο του συστήματος οπτικής έντασης της Εικόνας 30.....	49
Εικόνα 32. Οπτικό σήμα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση OOK.....	50
Εικόνα 33. Οπτικό σήμα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση 4-PPM.....	52
Εικόνα 34. Απεικόνιση λειτουργίας SM που παρέχει απόδοση 4 bit/s/Hz.....	55
Εικόνα 35. Βασικά μέρη ενός συστήματος βασισμένο στο Li-Fi.....	59
Εικόνα 36. Μετάδοση Li-Fi.....	59
Εικόνα 37. Περιβάλλον Matlab.....	72
Εικόνα 38. Layout editor του Matlab.....	73
Εικόνα 39. Γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής.....	74
Εικόνα 40. Προσομοίωση ενός Li-Fi συστήματος επικοινωνίας.....	75
Εικόνα 41. Η κάτοψη της κάλυψης του LED με μικρή γωνία.....	76
Εικόνα 42. Η κάτοψη της κάλυψης του LED με μεγαλύτερη γωνία.....	77
Εικόνα 43. Συνολική λαμβανόμενη ισχύς με μικρή γωνία.....	78
Εικόνα 44. Συνολική λαμβανόμενη ισχύς με μικρή γωνία.....	79
Εικόνα 45. Καταμετρημένη ολική λαμβανόμενη ισχύς.....	80
Εικόνα 46. Η έξοδος του συστήματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας.....	81
Εικόνα 48. Καταγραφή του SNR.....	83

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος που σημειώνεται τις τελευταίες δεκαετίες, έχει σαν αποτέλεσμα τη σύγκλιση πολλών επιστημονικών κλάδων και κυρίως της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Το συνεχώς μεταβαλλόμενο κοινωνικό και οικονομικό περιβάλλον, έχει θέσει νέους στόχους για την εγκαθίδρυση νέων, βελτιωμένων συνθηκών για την συλλογή, επεξεργασία και διανομή της πληροφορίας.

Η επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων μονάδων, είναι κάτι που ο άνθρωπος επιδιώκει από πολύ παλιά. Ήδη από τον 11ο αι. π.Χ., συναντάμε τις φρυκτωρίες, που ήταν σύστημα συνεννόησης με χρήση πυρσών και θεωρείται ως το αρχαιότερο συγκροτημένο επικοινωνιακό σύστημα, ενδεχομένως σε όλο τον κόσμο. Από τότε, η απομακρυσμένη επικοινωνία έχει εξασφαλιστεί μέσω ραδιοφωνικών, τηλεοπτικών, τηλεφωνικών δικτύων. Ωστόσο, οι ανάγκες των σημερινών δεδομένων για συνεχή βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας, απαιτούν την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Υπό αυτά τα δεδομένα, αναπτύχθηκαν τα δίκτυα υπολογιστών. Το παλιό μοντέλο όπου ένας υπολογιστής εξυπηρετούσε όλες τις υπολογιστικές ανάγκες ενός οργανισμού, έχει πλέον αντικατασταθεί από το νέο μοντέλο όπου η εργασία πραγματοποιείται από ένα σύνολο αυτόνομων μεταξύ τους, αλλά διασυνδεδεμένων υπολογιστών. Οι χρήστες ενός δικτύου υπολογιστών, μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους, με ανταλλαγή μηνυμάτων, να μοιράζονται τους ίδιους πόρους, να χειρίζονται κοινές εφαρμογές κ.α.. Εκτός του ότι δημιουργείται ένα καλό υπολογιστικό μέσο, μερικά άλλα πλεονεκτήματα της διαδικτύωσης είναι η βελτιωμένη αξιοπιστία της υπηρεσίας, λόγω της παρουσίας πολλών υπολογιστικών μονάδων, ο διαμοιρασμός των πόρων ανεξάρτητα από τη φυσική τοποθεσία των υπολογιστών και των χρηστών, και η απόδοση.

Η σύνδεση των υπολογιστών μπορεί να επιτευχθεί είτε ενσύρματα, είτε ασύρματα. Ο πρώτος τρόπος είναι και ο πιο διαδεδομένος. Ωστόσο, το κόστος των καλωδίων και της συντήρησής τους μπορεί να είναι ασύμφορο και η εγκατάσταση ή/και επέκτασή τους μπορεί να προκαλέσει προβλήματα. Εκτός αυτού, η εκρηκτική ανάπτυξη του διαδικτύου γεννά την ανάγκη για κανάλια επικοινωνίας μεγάλου εύρους ζώνης, για μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων, με υψηλή ταχύτητα και ταυτόχρονα με μικρό κόστος. Τα ασύρματα συστήματα αποτελούν μία καλή απάντηση σε όλες αυτές τις απαιτήσεις και μπορούν να λειτουργούν είτε με ραδιοσυχνότητες είτε με οπτική ακτινοβολία.

1.1 Οπτικά Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών

Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα είναι μία τεχνολογία με πολλές εφαρμογές τόσο για κοντινές όσο και για μακρινές αποστάσεις. Οι μέχρι τώρα υπάρχουσες τεχνολογίες για μεταφορά δεδομένων κυρίως στο διαδίκτυο (DSL, καλωδιακό modem, κ.α.), έχουν εξυπηρετήσει πολλά σπίτια και πολλές εταιρείες να αποκτήσουν ευρεία πρόσβαση. Το εύρος ζώνης όμως στον τελικό χρήστη είναι περιορισμένο. Τα συστήματα αυτά, που χρησιμοποιούν συχνότητες μικρότερες από ένα μήκος κύματος χιλιοστού (millimeter wave), δε μπορούν να μεταδώσουν μεγάλους ρυθμούς πληροφορίας. Ρυθμοί δεδομένων μεγαλύτεροι από 1 Gbps μπορούν να μεταδοθούν μόνο με χρήση lasers ή millimeter waves. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν laser μέσω της ατμόσφαιρας για την παροχή υψηλών ρυθμών μετάδοσης πληροφορίας καλούνται πλήρως ευρυζωνικά *οπτικά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας* (OWC).

Με απλά λόγια, οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες είναι η μετάδοση της οπτικής πληροφορίας όχι μέσω οπτικής ίνας αλλά μέσω του *ελεύθερου χώρου* και παρέχουν μία εναλλακτική, ασύρματη τεχνολογία δικτύωσης.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ασύρματων οπτικών συστημάτων είναι τα εξής:

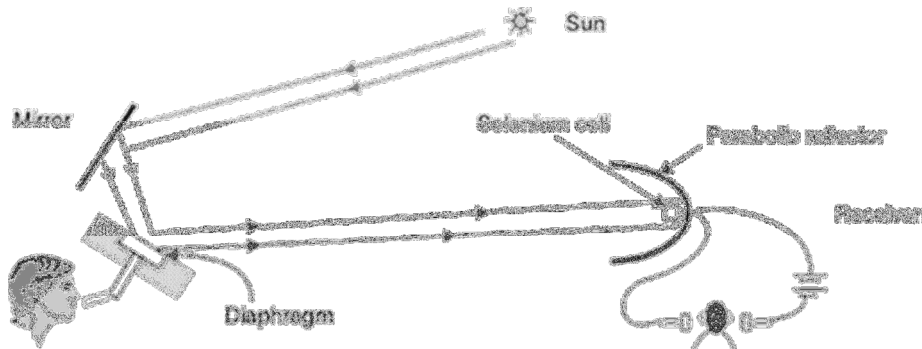
- απουσία καλωδίωσης, που προσφέρει γρήγορη και οικονομική εγκατάσταση, σε σχέση με τις τεχνολογίες που κάνουν χρήση ινών,
- εξάλειψη αλληλοπαρεμβολών ακόμα και όταν λειτουργούν στον ίδιο χώρο με εκπομπή ραδιοσυχνοτήτων
- ο εξοπλισμός τους μπορεί να αφαιρεθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί σε άλλο μέρος,
- χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλό εύρος ζώνης
- λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την εγκατάστασή τους, χωρίς τις χρονοβόρες διαδικασίες και τη γραφειοκρατία που ταλαιπωρεί άλλα αντίστοιχα συστήματα που χρειάζονται αδειοδότηση.

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Όπως είπαμε, η χρήση οπτικών μέσων για αποστολή πληροφορίας, υπάρχει ήδη από τα αρχαία χρόνια (φρυκτωρία), όπου κάθε φορά αποστέλλεται ένα bit πληροφορίας. Γύρω στο 1790 ο Claude Charpe εφηύρε τον οπτικό τηλέγραφο, ο οποίος έστελνε μηνύματα σε μεγάλες αποστάσεις, αλλάζοντας την κατεύθυνση των πομπών από έναν μεγάλο σταθμό.

Το επόμενο οπτικό σύστημα για ασύρματη επικοινωνία είναι το φωτόφωνο που κατασκευάστηκε το 1880 από τους Alexander G. Bell και Charles S. Tainter και χρησιμοποιούσε το φως του ήλιου για τη μετάδοση της φωνής (Σχήμα 1). Η περιορισμένη εμβέλεια, η ανάγκη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη καθώς και η απόσβεση του

φωτός κατά τη διάδοσή του στην ατμόσφαιρα λόγω των καιρικών φαινομένων (βροχή, ομίχλη, κτλ.) δεν ευνόησαν την περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος αυτού.



Εικόνα 1. Σχηματικό διάγραμμα του φωτοφώνου των Alexander G. Bell και Charles S. Tainter .

Το επόμενο βήμα στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες έγινε το 1979 από τους F. R. Gfeller και U. Barpst, οι οποίοι στα πλαίσια δικτύων εσωτερικού χώρου, πρότειναν την διάχυτη εκπομπή υπέρυθρων δεσμών. Από τότε, έχουν γίνει μεγάλες αλλαγές στον σχεδιασμό σταθμών οπτικής ασύρματης επικοινωνίας.

1.1.2 Οπτικά Συστήματα Ελεύθερου Χώρου

Τα οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου (FSO systems), αποτελούν μια άλλη ονομασία των οπτικών ασύρματων συστημάτων και είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί τη διασπορά του φωτός στον χώρο για τη μετάδοση δεδομένων, ήχου ή βίντεο στις τηλεπικοινωνίες. Η λειτουργία των συστημάτων FSO απαιτεί την οπτική επαφή (Line of Sight - LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη και εκπέμπει από 100μ. μέχρι μερικά χιλιόμετρα, με εύρος ζώνης ρυθμαπόδοσης μέχρι 1.25 Gbps σε συχνότητες πάνω από 300 GHz, σε μήκη κύματος, συνήθως από 785 έως 1550 nm. Λόγω της παραλληλισμένης και εξαπλωμένης δέσμης που χρησιμοποιούν τα συστήματα αυτά, απαιτείται η απόσταση οποιουδήποτε εμποδίου από το κέντρο της δέσμης να είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα της.

Η φύση των FSO συστημάτων (συστήματα που χρησιμοποιούν την ατμόσφαιρα για μετάδοση), τους προσδίδει μια επιρροπή σε οποιαδήποτε αλλαγή των ατμοσφαιρικών και καιρικών συνθηκών. Επίσης, η μικρή διάμετρος της δέσμης laser που χρησιμοποιείται, απαιτεί την απόλυτη ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτά είναι τα κυριότερα μειονεκτήματα τους και αποτελούν γνώμονα για την εγκατάσταση τέτοιων ζευξίων.

Επομένως, για την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων, λαμβάνουμε υπόψιν τους παρακάτω παράγοντες:

- **Καιρικές Συνθήκες.** Η επιλογή της τοποθεσίας είναι πολύ σημαντική για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος. Καιρικά φαινόμενα ομίχλης, χιονιού, βροχής ή αμμοθυελλών ενδέχεται να προκαλέσουν σκέδαση του μεταδιδόμενου σήματος.
- **Ατμοσφαιρικές Συνθήκες.** Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας μπορεί να προκαλέσουν συχνοεπιλεκτική απορρόφηση (σε συγκεκριμένα μήκη κύματος), σκέδαση (γωνιακή ανακατανομή) και ατμοσφαιρικούς σπινθηρισμούς (διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος).
- **Τοποθέτηση Πομπού.** Ακριβώς επειδή το φως δε μπορεί να περάσει μέσα από αδιαφανή μέσα, θα πρέπει ο πομπός να τοποθετηθεί σε μέρος με ελάχιστα τέτοια εμπόδια.

Πρακτικά, έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα FSO αποδίδουν καλύτερα σε περιβάλλοντα με συνθήκες καθαρού ουρανού, σε ευρυζωνικά δίκτυα και σε μητροπολιτικά δίκτυα (MAN).

1.1.3 Ασύρματα Δίκτυα Ραδιοσυχνότητων

Τα ασύρματα δίκτυα με ραδιοσυχνότητες (Radio Frequency-RF) αν και μπορούν να εξαλείψουν τα προβλήματα που δημιουργούν οι ενσύρματες επικοινωνίες, αποτελούν ακριβή λύση και έχουν χαμηλούς ή μέτριους ρυθμούς αποστολής δεδομένων. Τα πιο διαδεδομένα ασύρματα RF συστήματα σήμερα είναι συμβατά με το πρότυπο IEEE 802.11, ιδιαίτερα γνωστό ως Wi-Fi με ταχύτητα λειτουργίας 2Mbps (στα 2.4GHz) αρχικά, ενώ η νέα γενιά προτύπων της οικογένειας αυτής είναι το 802.11n που λειτουργεί στα 2.4GHz και στα 5.7GHz, με κανάλι εύρους ζώνης 40MHz και ταχύτητα λειτουργίας άνω των 100Mbps. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλη κατανάλωση ισχύος και υψηλό κόστος.

Τα RF συστήματα, έχουν δύο συχνοτικές περιοχές λειτουργίας. Οι συχνότητες 2.4-5GHz ονομάζονται συχνότητες ISM και είναι ελεύθερες με την έννοια ότι δεν απαιτείται ειδική άδεια για τη χρήση τους σε σχέση με τις υπόλοιπες. Τα συστήματα Wi-Fi λειτουργούν στις ISM συχνότητες, οι οποίες όμως μοιράζονται ένα πολύ μικρό εύρος ζώνης με άλλες συσκευές με αποτέλεσμα να δημιουργείται ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή υποβαθμίζοντας την ποιότητα της σύνδεσης.

Οι πολύ υψηλές απώλειες διάδοσης και το υψηλό κόστος των συσκευών που σχετίζονται με αυτά τα συστήματα, αποτελούν ισχυρό κίνητρο για την αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης.

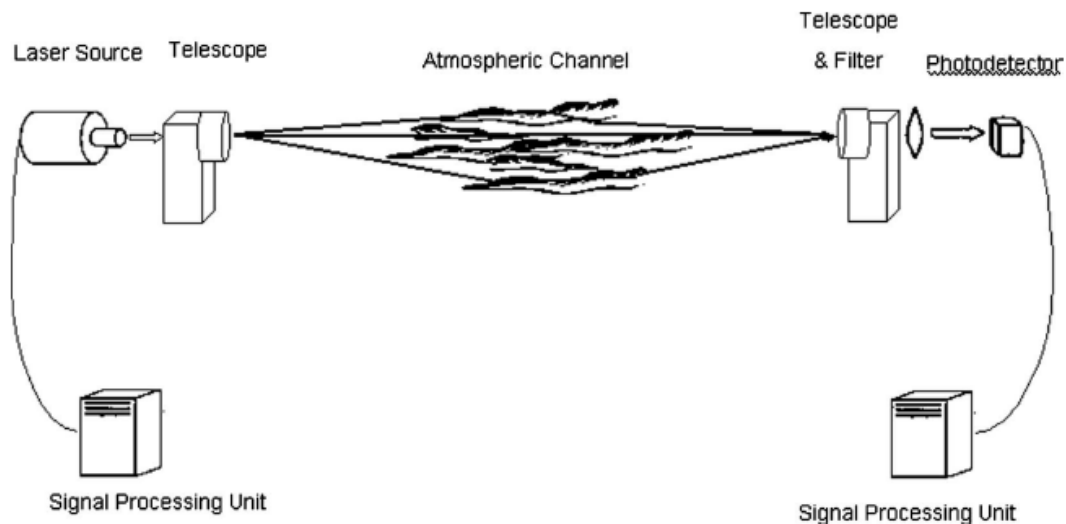
1.2. Οπτικά Ασύρματα Δίκτυα

1.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Τα ασύρματα οπτικά συστήματα, ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας της οπτικής πηγής που χρησιμοποιούν, διακρίνονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- Ορατού Φωτός (Visible Light Communication - VLC) και
- Υπέρυθρα (InfraRed - IR).

Ένα τυπικό οπτικό ασύρματο σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 2. Στο σύστημα, τουλάχιστον ένα μέρος του οπτικού καναλιού, περνάει από την ατμόσφαιρα της γης, που συνήθως περιλαμβάνει ομίχλη. Η ομίχλη προκαλεί τη διασπορά των μονοπατιών των φωτονίων ανάμεσα στον εκπομπό και τον δέκτη, με αποτέλεσμα να προκαλείται σημαντική εξασθένιση του σήματος.



Εικόνα 2. Διαγραμματική αναπαράσταση ενός τυπικού οπτικού ασύρματου συστήματος.

Στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν τα συστήματα FSO που περιγράψαμε νωρίτερα και αποτελούν συστήματα είτε εσωτερικού είτε εξωτερικού χώρου. Εδώ, χρησιμοποιείται η ορατή περιοχή συχνοτήτων. Η τεχνολογία VLC στηρίζεται στη χρήση λαμπτήρων για τη μετάδοση της πληροφορίας. Στην πλευρά του πομπού τοποθετούνται πηγές φωτός που αναβοσβήνουν με σκοπό την υψηλού ρυθμού μετάδοση. Σύνηθη εργαλεία είναι οι δίοδοι εκπομποί φωτός (LEDs - Light Emitting Diodes). Χώροι όπως πολυκαταστήματα, νοσοκομεία βιβλιοθήκες, που υπάρχει διαρκές φως, αποτελούν ιδανικά περιβάλλοντα για την υλοποίηση VLC συστημάτων για πολυμεσικές ή άλλες υπηρεσίες.

Οι αποστάσεις που καλύπτονται από υπέρυθρα οπτικά ασύρματα δίκτυα είναι μικρές. Για το λόγο αυτό η χρήση τους είναι διαδεδομένη σε εφαρμογές κλειστών χώρων. Γενικά, οι συνδέσεις με υπέρυθρη ακτινοβολία ταξινομούνται με βάση δύο κριτήρια:

- **Κατευθυντικότητα του πομπού και του δέκτη.**

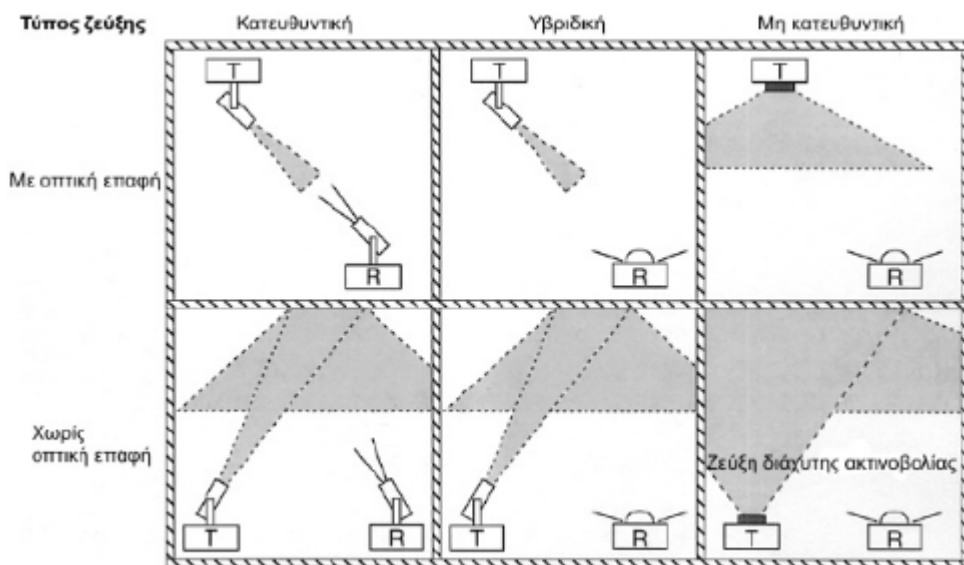
Στις κατευθυντικές συνδέσεις (directed links), οι κατευθυντικοί πομποί και δέκτες που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι πλήρως ευθυγραμμισμένοι και μεγιστοποιούν την απόδοση ισχύος. Αντίθετα στις μη-κατευθυντικές συνδέσεις (non-directed links) δεν υπάρχει αυτή η απαίτηση, και η χρήση τους είναι ευρεία σε κινητά τερματικά. Τέλος, μπορούν να συνδυαστούν

τερματικά με διαφορετικά χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας, σχηματίζοντας τις υβριδικές συνδέσεις (hybrid links).

- **Ύπαρξη Οπτικής Επαφής (LOS)**

Στις συνδέσεις οπτικής επαφής (LOS links) το σήμα πηγαίνει απευθείας από τον πομπό στον δέκτη και μεγιστοποιείται η απόδοση ισχύος. Σε περίπτωση που παρεμβάλλεται εμπόδιο, η σύνδεση δεν είναι εφικτή. Επιπλέον ενδεχόμενες παραμορφώσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών εξαλείφονται. Σύμφωνα με το εύρος της οπτικής δέσμης, τα LOS συστήματα διακρίνονται σε ευρείας (WLOS - Wide Line Of Sight) και στενής δέσμης (NLOS - Narrow Line Of Sight). Αντίθετα, στις συνδέσεις μη οπτικής επαφής (non-LOS links), δεν απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη και το σήμα ανακλάται από επιφάνειες στον δέκτη, δηλαδή υπάρχει η έννοια των πολλαπλών διαδρομών, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Η χρήση τους, ωστόσο, ενθαρρύνεται σε συστήματα που υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη. Και στην περίπτωση αυτή, οι διατάξεις διαφοροποιούνται ανάλογα με το εύρος της δέσμης και του οπτικού πεδίου (FOV - Field Of View). Μια τέτοια διάταξη είναι η διάταξη διάχυσης (diffuse) όπου ο πομπός εκπέμπει μία ευρεία οπτική δέσμη και ο δέκτης έχει ένα ευρύ FOV.

Τα χαρακτηριστικά αυτά φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3. Κατηγοριοποίηση οπτικών ασύρματων συνδέσεων.

1.2.2 Σύγκριση με RF Συστήματα

Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα δεν εμπίπτουν στους κανονισμούς για αδειοδότηση των συχνοτήτων που χρησιμοποιούν και δεν παρεμβάλλονται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Χαρακτηριστικά που τα κάνουν πιο ελκυστικά σε σχέση με τα RF συστήματα είναι η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, το χαμηλό κόστος υλοποίησης, και η ελεύθερη χρήση συχνοτήτων.

Από την άλλη, η διάδοση των οπτικών κυμάτων είναι αδύνατη μέσα από αδιαφανή εμπόδια, σε αντίθεση με τα RF συστήματα. Στην περίπτωση αυτή, η μετάδοση μπορεί να γίνει μόνο μέσω ανακλάσεων, όπως είπαμε νωρίτερα. Για το λόγο αυτό, η χρήση τους είναι πιο συνήθης σε κυψελωτά δίκτυα εσωτερικού χώρου. Αν θεωρήσουμε κάθε δωμάτιο σαν κυψέλη, είναι ασφαλές να πούμε ότι δεν παρουσιάζονται παρεμβολές σε όμοια συστήματα γειτονικών κυψελών. Αντίθετα, στα συστήματα Wi-Fi κάτι τέτοιο δεν ισχύει, αφού δεν είναι δυνατή η απομόνωση μεταξύ δωματίων.

Επιπλέον, το ευρύ φάσμα των RF καναλιών, επιτρέπει μεν την κινητή συνδεσιμότητα, αλλά παρουσιάζει προβλήματα αλληλοπαρεμβολής με άλλες συσκευές που βρίσκονται σε εγγύς σημείο. Είναι δύσκολο να συμπεριληφθεί ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στις RF συχνότητες. Αν, ωστόσο, το καταφέρουμε, με μεγάλη πιθανότητα θα υποβαθμίσει την απόδοση του συστήματος.

Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα, λειτουργούν σε συνθήκες υψηλού θορύβου κυρίως φωτός (ήλιος, λαμπτήρες πυρακτώσεως, κ.τ.λ.). Είναι, λοιπόν, προφανές, ότι η ταχύτητα διάδοσης αλλά και η εμβέλεια των συστημάτων αυτών θα περιορίζεται.

Στον Πίνακα 1 φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων. Κανένα από τα δύο αυτά συστήματα δε μπορούμε να αποκλείσουμε ως χειρότερο, γιατί κάθε ένα βρίσκει εφαρμογές σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Τα συστήματα RF βρίσκουν εφαρμογές σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις μέσω εμποδίων. Αντίθετα, τα οπτικά ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής εμβέλειας, όπου απαιτείται υψηλός ρυθμός μετάδοσης.

Χαρακτηριστικά	IR/VLC	RF (802.11n)
Κόστος	Μεσαίο	Υψηλό
Κατανάλωση Ισχύος	Χαμηλή	Υψηλή
Εύρος Ζώνης	~700THz	70 ή 700 MHz
Ρυθμός Μετάδοσης	1Gbps/500Mbps	<600Mbps
Ασφάλεια από Υποκλοπές	Υψηλή	Χαμηλή
RF Παρεμβολές	Όχι	Ναι
Εμβέλεια	~3m	~70m

Πίνακας 1. Σύγκριση RF και OWC συστημάτων.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε πιο αναλυτικά τα ασύρματα οπτικά δίκτυα και όλες τις συνιστώσες τους.

2. ΟΠΤΙΚΟΙ ΠΟΜΠΟΙ

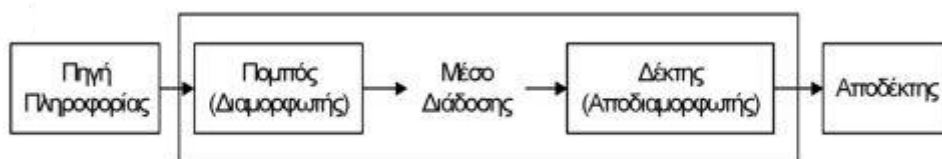
2.1 Δομή Συστημάτων Ασύρματης Οπτικής Ζεύξης

Πριν μελετήσουμε την αρχιτεκτονική των ασύρματων οπτικών επικοινωνιακών συστημάτων, θα δείξουμε περιληπτικά ένα γενικό σύστημα τηλεπικοινωνιών. Στο Σχήμα 4 φαίνεται το γενικό διάγραμμα βαθμίδων σε ένα σύστημα επικοινωνίας. Η πληροφορία που μεταδίδεται από την πηγή μπορεί να έχει μορφή ήχου, εικόνας κ.τ.λ. Τα κύρια μέρη του συστήματος είναι ο πομπός, το κανάλι και ο δέκτης.

Ο πομπός μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση μέσα από το κανάλι. Αυτό επιτυγχάνεται με μια διαδικασία που λέγεται διαμόρφωση (modulation). Η διαμόρφωση μεταβάλλει, συνήθως, το πλάτος (AM-amplitude modulation), τη συχνότητα (FM-frequency modulation) ή τη φάση (PM-phase modulation) του σήματος πληροφορίας.

Το κανάλι είναι το φυσικό μέσο που χρησιμεύει για να στέλνεται το σήμα από τον πομπό στον δέκτη. Για την ασύρματη μετάδοση, το κανάλι είναι συνήθως η ατμόσφαιρα (ελεύθερος χώρος). Στις ενσύρματες επικοινωνίες, το φυσικό μέσο μπορεί να είναι είτε ομοαξονικό καλώδιο, είτε καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους, είτε οπτική ίνα. Οποιοδήποτε και αν είναι το φυσικό μέσο, το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι το σήμα κατά την έξοδο του από το κανάλι, υπόκειται μια παραμόρφωση. Αυτή οφείλεται, συνήθως, σε έναν προσθετικό θόρυβο (θερμικός θόρυβος) που προκαλεί την ενίσχυση του σήματος. Στις ασύρματες μεταδόσεις, υπάρχουν επιπλέον θόρυβοι που προέρχονται από διαταραχές, όπως ο θόρυβος “ανθρώπινων δραστηριοτήτων” και ατμοσφαιρικοί θόρυβοι από την κεραία λήψης.

Τέλος, ο δέκτης ανακτά το σήμα και το αποδιαμορφώνει, προκειμένου να εξάγει το μήνυμα από το ημιτονοειδές φέρον. Η πιστότητα του λαμβανόμενου σήματος, έχει σχέση με την ένταση του θορύβου, τον τύπο διαμόρφωσης, καθώς και με οποιαδήποτε άλλη ενδεχόμενη προσθετική παραμόρφωση.



Εικόνα 4. Γενικό διάγραμμα βαθμίδων τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Τα δεδομένα είναι ελαφρώς διαφορετικά για τα ασύρματα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Η πηγή πληροφορίας παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο και παρέχει στον πομπό. Αυτό το σήμα, οδηγεί την οπτική πηγή μέσω ενός ηλεκτρικού πομπού και στην έξοδο του πομπού εμφανίζεται διαμορφωμένο το οπτικό φέρον. Η ηλεκτρική πηγή είναι είτε κάποια δίοδος Laser, είτε LED. Το οπτικό κανάλι είναι ο αέρας και εισάγει στο σήμα παραμόρφωση (θόρυβο). Ο οπτικός ανιχνευτής δέχεται το σήμα και πραγματοποιείται οπτο-ηλεκτρική μετατροπή. Στη συνέχεια περνάει στην ηλεκτρική βαθμίδα όπου αποδιαμορφώνεται και λαμβάνεται το αρχικό σήμα.



Εικόνα 5. Γενικό διάγραμμα βαθμίδων ασύρματου οπτικού συστήματος.

Στις προσεχείς υποενότητες θα εξετάσουμε λεπτομερώς τα κύρια μέρη ενός οπτικού καναλιού.

2.2 Εισαγωγικά Στοιχεία

Η βαθμίδα οπτικής πηγής, ουσιαστικά, δέχεται ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο πρέπει να μετατρέψει σε οπτικό σήμα. Ανάλογα με το φασματικό εύρος της ακτινοβολίας που εκπέμπουν, μπορούμε να χωρίσουμε τις οπτικές πηγές σε τρεις κατηγορίες:

- Μεγάλου εύρους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι λαμπτήρες πυρακτώσεως.
- Στενού φασματικού εύρους ασύμφωνες πηγές. Στην περίπτωση αυτή ανήκουν τα LEDs.
- Μηδενικού φασματικού εύρους σύμφωνες πηγές. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα Lasers και τα LDs. Είναι γνωστές ως μονοχρωματικές πηγές.

Οι πιο συνηθισμένες πηγές που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα οπτικά δίκτυα είναι οι πηγές LED και οι LD.

Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των οπτικών πηγών γίνεται με πυκνή ανάλυση των πιο πάνω κατηγοριών. Έτσι, έχουμε επίσης τις σημειακές πηγές, όπου εκπέμπουν μία πολύ

στενή δέσμη φωτός και τις εκτεταμένες πηγές που ακτινοβολούν είτε προς όλες τις κατευθύνσεις, είτε εντός μίας ευρείας δέσμης.

2.2.1 Θεωρία της λειτουργίας τους

Εκμεταλλευόμενοι τις φυσικές ιδιότητες ορισμένων ημιαγωγών μπορούμε να κατασκευάσουμε διατάξεις και κυκλώματα τα οποία υλοποιούν τις σχέσεις εισόδου-εξόδου σήματος:

- Είσοδος φωτεινού σήματος - Έξοδος ηλεκτρικού σήματος.
- Είσοδος ηλεκτρικού σήματος - Έξοδος φωτεινού σήματος.

Δηλαδή, υπάρχουν διατάξεις τέτοιες που επιτρέπουν την μετατροπή ενός ηλεκτρικού ή οπτικού σήματος σε οπτικό ή ηλεκτρικό σήμα, αντίστοιχα. Τέτοιες διατάξεις ονομάζονται *οπτοηλεκτρικές διατάξεις* και μπορούμε να τις χωρίσουμε σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

- Διατάξεις φωτοηλεκτρικής εκπομπής,
- Φωτοαγώγιμα στοιχεία,
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η λυχνία φωτοπολλαπλασιαστής, η φωτοηλεκτρική δίοδος κενού κ.α. Η λειτουργία αυτών των στοιχείων βασίζεται στην εκπομπή ηλεκτρονίων από μεταλλικές επιφάνειες όταν σε αυτές επιδρά φως. Η δεύτερη κατηγορία φωτοαγώγιμων υλικών περιλαμβάνει πολλούς ημιαγωγούς των οποίων η αγωγιμότητα μεταβάλλεται με το φως. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι το πυρίτιο, το γερμάνιο, το σελήνιο κ.α. Η τρίτη κατηγορία φωτοβολταϊκών κυττάρων (γνωστά και σαν φωτοκύτταρα) εκμεταλλεύονται την ηλεκτρεργετική δύναμη που παράγεται στα υλικά ημιαγωγών όταν σε αυτά επιδράσει το φως. Το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι το πυρίτιο.

Οι πομποί φωτός, γενικά, μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε ένα αντίστοιχο σήμα φωτός, με τους πιο σημαντικούς να είναι οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LEDs) και οι δίοδοι laser (LDs), όπως είπαμε και πιο πάνω. Όλοι οι εκπομποί φωτός είναι σύνθετοι ημιαγωγοί που πραγματοποιούν την μετατροπή. Η θερμότητα που εκλύεται από τη διαδικασία μετατροπής είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη παραγωγή θερμότητας από λαμπτήρες πυρακτώσεως, γεγονός που χαρακτηρίζει αυτούς τους οπτικούς πομπούς αποτελεσματικούς.

Οι LEDs και οι δίοδοι laser έχουν πέντε βασικά χαρακτηριστικά:

- μικρό μέγεθος
- υψηλή ακτινοβολία (π.χ. εκπέμπουν πολύ φως σε μια μικρή περιοχή)
- μικρή περιοχή εκπομπής

- μεγάλη διάρκεια ζωής
- μπορούν να διαμορφωθούν σε υψηλές ταχύτητες

Εκτός των άλλων, είναι πολύ εύκολη η χρήση τους καθώς υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία σε ηλεκτρονικά προϊόντα κατανάλωσης. Συνήθως, οι LEDs χρησιμοποιούνται σαν ορατοί ενδείκτες σε πολλά ηλεκτρονικά είδη, ενώ οι δίοδοι laser χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στους οπτικούς δίσκους (CDs).

Οι φώτοανιχνευτές (photo detector), τους οποίους θα εξετάσουμε λεπτομερώς πιο κάτω, εκτελούν ακριβώς την αντίθετη λειτουργία από τους πομπούς φωτός. Πρόκειται για οπτοηλεκτρικά εξαρτήματα, τα οποία επιτρέπουν στο οπτικό σήμα να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρικούς παλμούς που λαμβάνονται από τον ακροδέκτη οπτικών και ακουστικών συνδέσεων. Ο πιο συνηθισμένος ανιχνευτής είναι η φωτοδίοδος ημιαγωγού, που παράγει ρεύμα σαν απόκριση στο προσπίπτον φως.

Οι οπτικές πηγές λειτουργούν όλες πάνω στην ίδια βασική αρχή. Χρησιμοποιούν την αρχή ημιαγωγών επαφών p-n που τις βρίσκουμε σε τρανζίστορ και διόδους. Τοποθετώντας ένα δυναμικό κατά μήκος της επαφής p-n αντιδρά το εσωτερικό δυναμικό αρκετά ώστε να επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος. Στους άμεσους ημιαγωγούς (ημιαγωγοί σχεδιασμένοι για οπτικά) τα ηλεκτρόνια χάνουν ένα ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί σε μια ιδιότητα του ημιαγωγού. Η απώλεια αυτή ονομάζεται *ενεργειακό χάσμα*. Η συγκεκριμένη ενέργεια ελευθερώνεται σαν φως (φωτόνια) που έχει μήκος κύματος σχετιζόμενο με το ενεργειακό χάσμα σύμφωνα με τον τύπο:

$$E_g = hc/\lambda = 1240eV - nm/\lambda$$

όπου h : σταθερά *Planck* $4.13 \times 10^{-15} eV \cdot s$,

c : ταχύτητα του φωτός $2.998 \times 10^8 m/s$,

λ : μήκος κύματος φωτονίου(nm).

Η ευρεία χρήση των οπτικών πηγών έχει εδραιωθεί βάσει κάποιων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που εμφανίζουν σε δεδομένες εφαρμογές. Τα πιο σημαντικά από αυτά παρουσιάζονται πιο κάτω:

Μήκος κύματος κορυφής: Είναι το μήκος κύματος στο οποίο η πηγή εκπέμπει την περισσότερη ισχύ. Τα πιο συνηθισμένα μήκη κύματος κορυφής είναι 780, 850, 1300 και 1550 nm.

Εύρος φάσματος: Θεωρητικά, όλο το φως που εκπέμπεται από μία οπτική πηγή βρίσκεται στο μήκος κύματος κορυφής. Πρακτικά, όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς το φως εκπέμπεται σε μια σειρά από μήκη κύματος, τα οποία έχουν κέντρο το μήκος κύματος κορυφής. Η κλίμακα αυτή λέγεται εύρος φάσματος της πηγής.

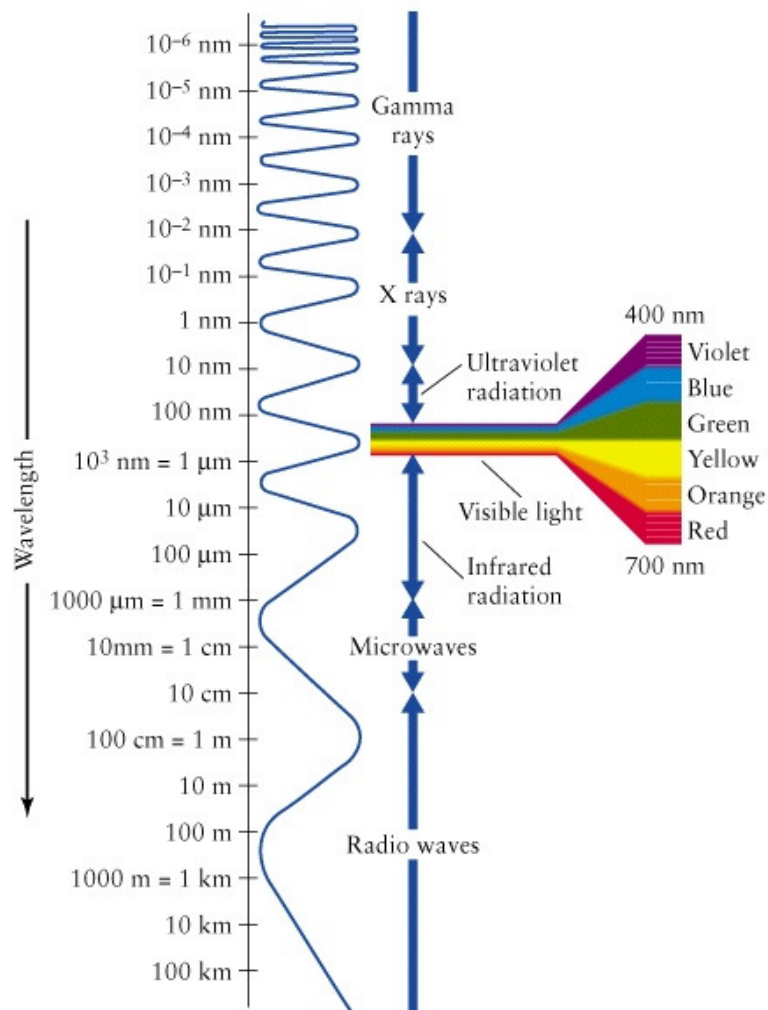
Ισχύς: Βασική απαίτηση είναι η ισχύς εξόδου της πηγής να είναι αρκετή ώστε να παρέχει επαρκή ισχύ στον τελικό ανιχνευτή στο άκρο του δέκτη. Φυσικά, θα πρέπει να ληφθούν

υπόψιν κατασταλτικοί παράγοντες της ισχύος, όπως η εξασθένιση, η απώλεια ζεύξης από εμπόδια κ.α.

Ταχύτητα: Μια πηγή πρέπει να ανοίγει και να κλείνει αρκετά γρήγορα, ώστε να συναντά τα όρια του εύρους ζώνης του συστήματος. Η ταχύτητα δίνεται σύμφωνα με τον χρόνο ανόδου ή καθόδου της πηγής. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζεται σε σχέση με το πόσο γρήγορα μπορεί να πάει από το 10% της κορυφής ισχύος στο 90%.

2.2.2 Συχνοτικές Ζώνες και Ασφάλεια

Η επιλογή του μήκους κύματος εκπομπής φωτός αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην μετάδοση της πληροφορίας και γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν πληθώρα περιβαλλοντικών και αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ο περιβαλλοντικός θόρυβος, το κανάλι διάδοσης, το κόστος κατασκευής κ.α.. Οι διάφορες οπτικές πηγές μπορούν να εκπέμπουν ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, από την υπεριώδη (UV - Ultraviolet) μέχρι την υπέρυθρη (IR - Infrared). Στο Σχήμα 6 φαίνονται όλες οι περιοχές των μηκών κύματος.



Εικόνα 6. Διαφορετικές περιοχές μηκών κύματος οπτικών πηγών.

Οι πιο συνήθεις περιοχές που χρησιμοποιούνται είναι η ορατή (Visible light) και η υπέρυθρη, είναι σε μήκη κύματος από 400nm έως 2000nm. Εκπομπές σε μήκη κύματος μικρότερα από του ορατού φωτός, προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον, ενώ σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι αρκετά ακριβό ώστε να αποφεύγεται.

Τα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν μήκη κύματος ορατού φωτός (400nm-700nm) ονομάζονται συστήματα επικοινωνιών με ορατό φως (VLC - Visible Light Communications). Στην περίπτωση αυτή, οι οπτικές πηγές που χρησιμοποιούνται διαμορφώνονται με τέτοιες συχνότητες, ώστε το εκπεμπόμενο φως να μην είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι.

Τα συστήματα στην υπέρυθρη περιοχή ακτινοβολίας λειτουργούν σε τρεις ζώνες μηκών κύματος: 850nm, 1300nm και 1550nm. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οπτικές πηγές και ανιχνευτές (photo detectors) που θα αναλύσουμε πιο κάτω.

Στον Πίνακα 2 φαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ζωνών συχνοτήτων που αναφέραμε.

Χαρακτηριστικά	VLC (550nm)	IR (850nm)	IR (1300nm)	IR (1550nm)
Κόστος	Μέτριο	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλό
Ασφάλεια	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Ισχύς Εκπομπής	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή
Ρυθμός Μετάδοσης	Μέτριος	Χαμηλός	Υψηλός	Υψηλός

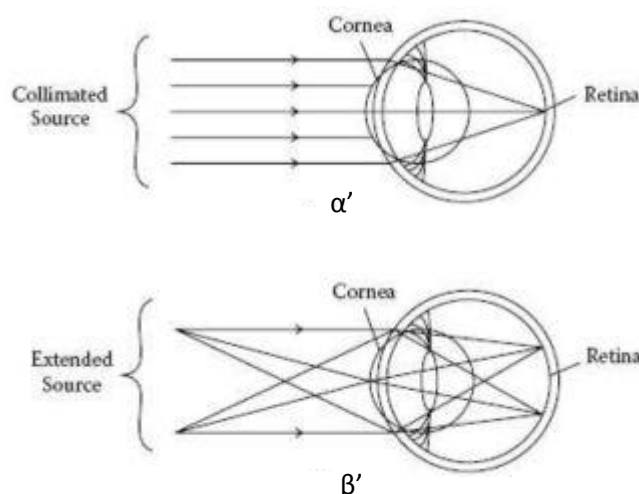
Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά συχνοτικών ζωνών οπτικών πηγών.

Όπως φαίνεται και από τον πιο πάνω πίνακα, ένα βασικό χαρακτηριστικό που μελετάται έντονα στα ασύρματα οπτικά δίκτυα είναι η ασφάλεια. Το ανθρώπινο μάτι αποτελεί ένα ευαίσθητο οπτικό ανιχνευτή που έχει απόκριση στο φως στο οπτικό εύρος 400-700 nm. Όπως και κάθε άλλος ζωντανός ιστός, οι ιστοί του οφθαλμού είναι επιρρεπείς σε βλάβες, υπό ακραίες συνθήκες. Επειδή διαφορετικοί ιστοί απορροφούν διαφορετικά μήκη κύματος, διαφορετικά μέρη του ματιού είναι ασταθώς επιρρεπή σε βλάβες σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Ο κερατοειδής (cornea), ο κρυσταλλοειδής (lens) και ο αμφιβληστροειδής (retina) χιτώνας του ματιού (Εικόνα 7) βρίσκονται και τα τρία στο μονοπάτι του φωτός που εισέρχεται στο μάτι, κι έτσι μπορεί να υποστούν τραυματισμούς.

Τέτοιοι τραυματισμοί μπορεί να προκύψουν από πολλαπλούς μηχανισμούς, όπως φωτοχημικούς, θερμικούς και θερμοακουστικούς. Οι *φωτοχημικές* αλληλεπιδράσεις προκύπτουν όταν ένα μόριο απορροφάει ένα φωτόνιο, με αποτέλεσμα να γίνεται χημική αντίδραση. Οι *θερμικές* αλληλεπιδράσεις αναφέρονται στην αλλαγή της θερμότητας σε κάποια (τοπική) περιοχή, ενώ οι *θερμοακουστικές* αλληλεπιδράσεις αφορούν σε ραγδαία αλλαγή της θερμότητας ενός χώρου με αποτέλεσμα ένα καταστροφικό κύμα (shock-wave). Μια θερμική αλληλεπίδραση, όσον αφορά στο ανθρώπινο μάτι, μπορεί να προκαλέσει ένα αργό έγκαυμα στο πεδίο ακτινοβόλησης, ενώ ένα θερμοακουστικό φαινόμενο μπορεί να

προκαλέσει περαιτέρω τραυματισμό στο έγκαυμα, όπως αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς.

Το μάτι είναι τελείως διαφανές στη UV και IR ακτινοβολίες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7 η ακτινοβολία εκπέμπεται με τη μορφή παράλληλων γραμμών. Ακτινοβολίες συχνότητας IR 850nm, εστιάζουν σε μία πολύ μικρή περιοχή του αμφιβληστροειδούς χιτώνα (Σχήμα 7α), με συνέπεια την άνοδο της θερμοκρασίας. Αντίθετα η ακτινοβολία από εκτεταμένη πηγή δεν εστιάζει σε ένα μόνο σημείο, και άρα δεν περιέχει αυτούς τους κινδύνους (Σχήμα 7β).



Εικόνα 7. (α') Παράλληλη εκπομπή φωτός προς τον ανθρώπινο οφθαλμό από σημειακή πηγή. Η εστίαση γίνεται σε μικρή περιοχή του αμφιβληστροειδούς αδένου. (β') Η εστίαση στην περίπτωση εκτεταμένης πηγής γίνεται σε ευρεία περιοχή του αμφιβληστροειδούς αδένου.

Θα πρέπει λοιπόν να υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής, στον χρόνο εκπομπής, στο μήκος κύματος και στην απόσταση από την πηγή. Υπάρχουν πολλοί ρυθμιστικοί, κυβερνητικοί και εκπαιδευτικοί οργανισμοί που έχουν αναπτύξει και δημοσιεύσει κάποια κριτήρια ασφαλείας. Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι τρεις κυριότεροι οργανισμοί που υπάρχουν αυτή τη στιγμή.

Πρότυπο	Τύπος	Στόχος
ANSI Z136.1	χρήση	χρήστες οπτικών πηγών και επαγγελματίες ασφαλείας
IEΣ 60825-1	τεχνικός	κατασκευαστές με παγκόσμια εμβέλεια
ΣFR Ch1 Part 1040	ρυθμιστικός	κατασκευαστές στις Η.Π.Α

Πίνακας 3. Περίληψη τρεχόντων προτύπων ασφαλείας οπτικών πηγών.

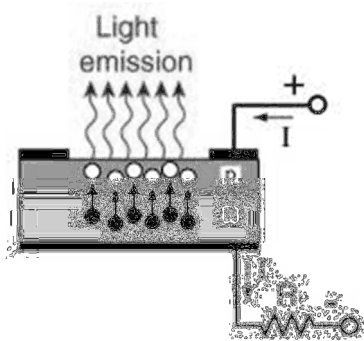
2.3. Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LEDs)

2.3.1 Εισαγωγή

Οι δίοδοι εκπομπής φωτός εκπέμπουν φωτεινή ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Η ακτινοβολία εκπέμπεται όταν, υπό συνθήκες ορθής πόλωσης της διόδου, ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή επανασυνδέονται, οπότε μεταπίπτουν προς χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες, αποδίδοντας ενέργεια με τη μορφή φωτονίων. Εφαρμόζοντας τάση στα άκρα της επαφής p-n κατά την ορθή φορά, ηλεκτρική τάση διαρρέει τη διάταξη με αποτέλεσμα να θέτει σε κίνηση τα ηλεκτρόνια της περιοχής n.

Η πρώτη, πρακτικά, LED ορατού φάσματος (κόκκινο) δημιουργήθηκε το 1962 από τον Nisik Hologyak Jr. Μέχρι το 1968 τα LED ορατού και υπεριώδους φάσματος ήταν υπερβολικά δαπανηρά, της τάξης των \$200 το τεμάχιο, έχοντας έτσι μικρή εφαρμογή. Ο οργανισμός Monsanto Corporation ήταν ο πρώτος που παρήγαγε μαζικά LED ορατού φάσματος χρησιμοποιώντας φωσφορούχο αρσενικούχο γάλλιο το 1968, για να παράγει κόκκινα LED κατάλληλα για φωτεινές ενδείξεις. Η Packard (HP) εισήγαγε τις διόδους εκπομπής φωτός το 1968 χρησιμοποιώντας αρχικά GaAsP υλικό παρεχόμενο από τη Monsanto. Η τεχνολογία αυτή αποδείχθηκε να έχει σημαντικές εφαρμογές σε αλφαριθμητικές οθόνες και εντάχθηκε η εφαρμογή της στα πρώιμα φορητά κομπιουτεράκια.

Η Εικόνα 8 απεικονίζει σχηματικά μία τέτοια δίοδο. Εφαρμόζοντας τάση στην επαφή p-n κατά την ορθή φορά, η διάταξη διαρρέεται από ρεύμα με αποτέλεσμα να τίθενται σε κίνηση τα ηλεκτρόνια της περιοχής n. Η τάση που εφαρμόζεται αυξάνεται σταδιακά μέχρι να ξεπεραστεί η τιμή κατωφλίου, οπότε και αρχίζει να εκπέμπεται φως. Η τιμή τάσης κατωφλίου είναι χαρακτηριστική για κάθε LED.



Εικόνα 8. Δομή LED επιφανειακής εκπομπής.

Η ευρεία χρήση τους στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες στηρίζεται στην πληθώρα των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν:

- Απλή κατασκευή. Δεν υπάρχουν καθρέπτες όπως θα δούμε παρακάτω για τις δίοδους laser. Σε κάποιες δομές δεν υπάρχει αυστηρή γεωμετρική κατασκευή.

- Χαμηλό κόστος. Η απλή κατασκευαστική πορεία τους οδηγεί, προφανώς, σε πολύ μειωμένο κόστος κατασκευής.
- Αξιοπιστία. Οι LEDs παρουσιάζουν ανοσία σε διακυμάνσεις από εξωτερικούς παράγοντες και προβλήματα θορύβου.
- Μειωμένη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Οι LEDs δεν είναι συσκευές κατωφλίου και επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας δεν αυξάνει το ρεύμα κατωφλίου πάνω από το σημείο λειτουργίας και επομένως δεν σταματάει η λειτουργία της διόδου.
- Απλό κύκλωμα οδήγησης. Αυτό προκύπτει από τα χαμηλά ρεύματα οδήγησης και τη χαμηλή εξάρτηση από τη θερμοκρασία, που έχει ως αποτέλεσμα να μην απαιτούμε την ύπαρξη επιπλέον κυκλωμάτων ρύθμισής της.
- Γραμμικότητα. Η γραμμικότητα είναι σημαντική σε περιπτώσεις αναλογικής διαμόρφωσης.

Το φως που εκπέμπεται από μια δίοδο εκπομπής φωτός είναι ασύμφωνο και εκπέμπεται προς κάθε κατεύθυνση. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια πέφτουν τυχαία και συνεχώς, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κυμάτων φωτονίων τα οποία έχουν τιμές φάσης μεταξύ 0 και 360 μοιρών. Η ισχύς, εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από το ρεύμα πόλωσης της διόδου, όμως μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της επαφής p-n. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τα υλικά προσμίξεων της διόδου. Τα συνήθη υλικά πυρίτιο (Si) και γερμάνιο (Ge), προκαλούν έκκληση θερμότητας και όχι φωτονίων, επομένως δεν είναι κατάλληλοι για χρήση στις οπτικές επικοινωνίες. Οι καταλληλότεροι ημιαγωγοί είναι οι σύνθετοι ημιαγωγοί που προέρχονται από κράματα των στοιχείων αλουμίνιο (Al), γάλλιο (Ga), ή ίνδιο (In), με τα στοιχεία φώσφορο (P), αρσενικό (As), άζωτο (N), ή αντιμόνιο (Sb). Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται, άρα και το χρώμα του φωτός εκπομπής της LED, εξαρτάται από την ακριβή σύνθεση του ημιαγωγού. Πιο συγκεκριμένα, τα κράματα GaAsP χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κόκκινων, πορτοκαλί και κίτρινων LEDs, τα AlGaAs για IR και πράσινες LEDs και τα InGaN για μπλε και βιολετί LEDs. Το χρώμα του φωτός καθορίζεται επίσης και από το ποσό ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της επανασύνδεσης.

Επανασύνδεση έχουμε όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται για να συμπληρώσουν τις οπές στα άτομα. Η ενέργεια που εκλύεται εξαρτάται από τον τύπο του ημιαγωγικού υλικού και από το ποσό των προσμίξεων που έχουν εγχυθεί μέσα στον ημιαγωγό. Η επανασύνδεση έχει σαν συνέπεια την απόδοση θερμότητας και ακτινοβολίας. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα πιο συνηθισμένα υλικά προσμίξεων διόδων εκπομπής φωτός με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους.

Υλικό	Χημικός Τύπος	Ενεργειακό Χάσμα	Μήκος Κύματος
Φωσφορούχο Γάλλιο	GaP	2.24eV	550nm
Αρσενικό Αλουμίνιο	AlAs	2.09eV	590nm
Αρσενικούχο Γάλλιο	GaAs	1.42eV	870nm
Φωσφορούχο Ίνδιο	InP	1.33eV	930nm
AlGaAs	AlGaAs	1.42-1.61eV	770-870nm
InGaAsP	InGaAsP	0.74-1.13eV	1100-1670nm

Πίνακας 4. Τα σημαντικότερα οπτοηλεκτρονικά υλικά για κατασκευή LED.

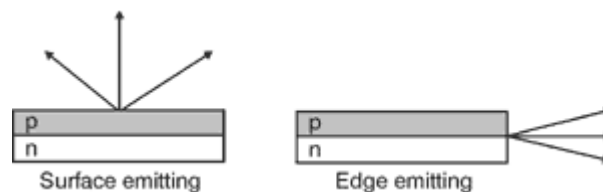
2.3.2 Βασική Λειτουργία

Το φως που εκπέμπουν οι δίοδοι όταν πολωθούν ορθά μπορεί να είναι είτε ορατό, είτε υπέρυθρο. Οι LEDs κατασκευάζονται, όπως είπαμε, από χωριστά στρώματα ημιαγωγών τύπου p και τύπου n. Μια επαφή p-n δημιουργεί τα φωτόνια και διάφορες επαφές p-p και n-n κατευθύνουν τα φωτόνια να δημιουργήσουν μια εστιασμένη εκπομπή φωτός. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται παρέχοντας φραγμούς ενέργειας και αλλαγές στον δείκτη διάθλασης.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι LEDs που χρησιμοποιούνται, οι πομποί επιφάνειας (ή επιφανειακής εκπομπής) και οι πομποί κορυφής.

Οι *εκπομποί επιφάνειας* (Σχήμα 9) κατασκευάζονται από στρώματα ημιαγωγικών υλικών (λεπτά υμένια) που εκπέμπουν φως σε τόξο 180°. Οι εκπομποί επιφάνειας είναι πιο οικονομικοί και από τους δύο τύπους LED, αλλά είναι γενικά αργές συσκευές.

Οι *πομποί κορυφής* (Σχήμα 9) έχουν σχεδιαστεί για να περιορίζουν το φως μέσα σε ένα στενό αυλάκι κατευθυνόμενο από την έξω πλευρά του πομπού. Αυτή η εστίαση του φωτός σημαίνει ότι εκπέμπεται περισσότερη ισχύς. Οι πομποί κορυφής εξασφαλίζουν υψηλές στάθμες οπτικής ισχύος και είναι γενικά γρήγορες συσκευές.



Εικόνα 9. Εκπομπός επιφάνειας (surface emitting) και εκπομπός κορυφής (edge emitting).

Οι LEDs αντέχουν και λειτουργούν σε ακραίες περιοχές θερμοκρασίας αν και η οπτική ισχύς εξόδου τους μπορεί να μεταβάλλεται αξιοσημείωτα καθώς η θερμοκρασία αλλάζει. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος μίας LED, τόσο πιο επιρρεπής είναι στη θερμοκρασία. Επίσης, οι LEDs εκπομπής επιφάνειας είναι σχεδόν πάντα περισσότερο σταθερές στη θερμοκρασία από ότι του τύπου εκπομπής κορυφής. Αναφορικά, μία LED 850nm μπορεί να μεταβληθεί $-0.03db/^\circ C$, ενώ μία δίοδος 1300nm μπορεί να μεταβληθεί τρεις με πέντε φορές περισσότερο.

Η θερμοκρασία επηρεάζει την οπτική ισχύ των LEDs, η οποία πέφτει όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Οπτική ισχύς είναι η οπτική δύναμη που εκπέμπεται υπό σταθερή γωνία και μετριέται σε μονάδες Watt ανά στερεακτίνιο. Επιπλέον, η θερμοκρασία επηρεάζει το μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής. Οι περισσότερες LEDs παρουσιάζουν μια μεταβολή $0.3 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ έως $0.6 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ στο μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής καθώς η θερμοκρασία αλλάζει. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό σε συστήματα πολλαπλών κυμάτων όπου υπάρχει η πιθανότητα διαφωνίας μεταξύ των καναλιών αν μεταβάλλεται το μήκος κύματος. Η οπτική ισχύς, εκτός των άλλων, μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με το συνεχές ρεύμα οδήγησης της LED και εξαρτάται από το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Ένα κοινό γνώρισμα όλων των τύπων LED είναι ότι ανάβουν πιο γρήγορα από ότι κλείνουν. Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο χρόνο σύνδεσης των φορέων επανασύνδεσης στις LEDs. Συχνά, αυτός ο φορέας επανασύνδεσης είναι της τάξης των nanoseconds. Τα περισσότερα κυκλώματα οδήγησης των LED, εφαρμόζουν ειδικά τεχνάσματα για να αποφύγουν αυτό το ελάττωμα. Αυτά αφορούν στην εφαρμογή μίας γρήγορης ανάστροφης πόλωσης στη δίοδο κατά τη διάρκεια του σβησίματος σε περισσότερο γρήγορη σάρρωση των φορέων της ενεργού περιοχής.

Η τάση λειτουργίας των διόδων εκπομπής φωτός είναι στην περιοχή $1.7 - 3.3\text{V}$ με τυπική κατανάλωση ισχύος μεταξύ 10 και 150mW και χρόνο ζωής μεγαλύτερο από 100.000 ώρες.

2.3.3 Αποδοτικότητα των LEDs

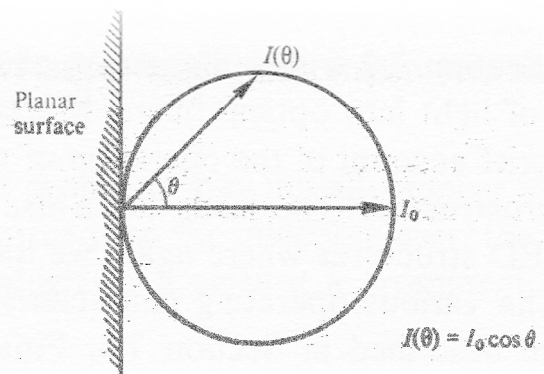
Η απουσία οπτικής ενίσχυσης μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής στις LEDs (κάτι που δε συμβαίνει στις διόδους laser) τείνει να περιορίσει την εσωτερική κβαντική αποδοτικότητα (αριθμός των φωτονίων που δημιουργούνται στα εγχεόμενα ηλεκτρόνια). Για απλές ομοειδείς συσκευές (όσον αφορά στις ενώσεις p-n), οι LEDs δίνουν εσωτερική κβαντική αποδοτικότητα το πολύ 50%. Παρολαυτά, υπάρχουν και πιο σύνθετες συσκευές, οι οποίες δίνουν αποδοτικότητα 60-80%.

Στα οπτικά ασύρματα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται LEDs υπέρυθρου φωτός με μήκη κύματος στο εύρος 800-900nm. Το οπτικό μοντέλο μίας ιδανικής LED ακολουθεί πλήρη Lambertian κατανομή. Δηλαδή, η ακτινοβολία επιφάνειας (η δύναμη που ακτινοβολείται από μία μονάδα επιφάνειας σε μία μονάδα σταθερής γωνίας) είναι σταθερή σε όλες τις κατευθύνσεις. Η ένταση της Lambertian κατανομής απεικονίζεται στο Σχήμα 10, όπου η μέγιστη ένταση I_0 είναι κάθετη στο επίπεδο της επιφάνειας, αλλά μειώνεται στα πλαϊνά ανάλογα με το συνημίτονο της γωνίας θ .

Αυτό σημαίνει ότι η έντασή του είναι ανάλογη με το συνημίτονο της γωνίας του φωτός. Πιο συγκεκριμένα,

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta), \quad (1)$$

όπου I_0 είναι η ένταση του άξονα της LED, θ είναι η γωνία θέασης και $I(\theta)$ είναι η ένταση στη γωνία θέασης.



Εικόνα 10. Τυπική Lambertian κατανομή ισχύος για LED επιφάνειας.

Η οπτική δύναμη P_e που εκπέμπεται σε ένα μέσο με χαμηλό δείκτη διάθλασης n από την όψη του επιπέδου LED επιφανείας κατασκευασμένου από υλικό με δείκτη διάθλασης n_x δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$P_e = \frac{P_{int} F n^2}{4n_x^2}, \quad (2)$$

όπου P_{int} είναι η δύναμη που παράγεται εσωτερικά και F είναι ο παράγοντας μεταφοράς του ημιαγωγικού υλικού. Επομένως, μπορούμε να εκτιμήσουμε το ποσοστό της οπτικής δύναμης που εκπέμπεται από τον τύπο:

$$\eta_e \approx \frac{P_e}{P} \times 100\%. \quad (3)$$

Η φωτεινότητα του μοντέλου περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

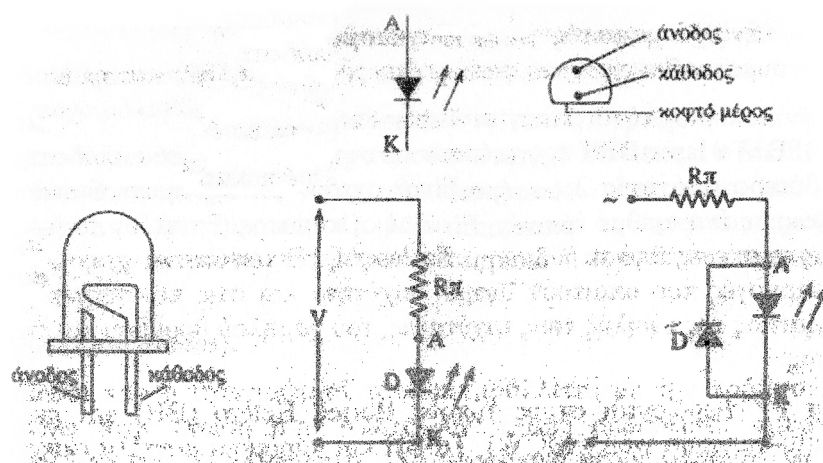
$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos^m(\theta),$$

όπου m είναι η τάξη της Lambertian κατανομής και σχετίζεται με τη γωνία ημίσειας ισχύος $\theta_{1/2}$, σύμφωνα με τον τύπο

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\theta_{1/2})}.$$

Η τάξη m εξαρτάται από τη σχετική θέση της περιοχής εκπομπής φωτός της LED από το καμπυλωτό κέντρο της σφαιρικής επιφάνειας. $E(r, \theta)$ είναι η φωτεινή ροή του επιπέδου στο οποίο στοχεύουμε ανά μονάδα επιφάνειας, και $E_0(r)$ είναι η φωτεινή ροή σε απόσταση r από τη LED.

Στις συνδεσμολογίες με LEDs μπορούμε να βάλουμε πριν την άνοδο της LED την κάθοδο μίας διόδου για προφύλαξη από ανάστροφη τάση πόλωσης και μια αντίσταση στην κάθοδο της LED για περιορισμό ρεύματος και χαμηλές τιμές εφαρμοζόμενης τάσης (Σχήμα 11). Η διόδος εκπομπής φωτός δεν εκπέμπει φως κατά την ανάστροφη πόλωση και πρακτικά έχει σχετικά χαμηλή ανάστροφη τάση διάσπασης. Για την αποφυγή μόνιμης βλάβης θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η ανάστροφη τάση που εμφανίζεται στη LED δεν υπερβαίνει την καθορισμένη ανάστροφη τάση διάσπασης.



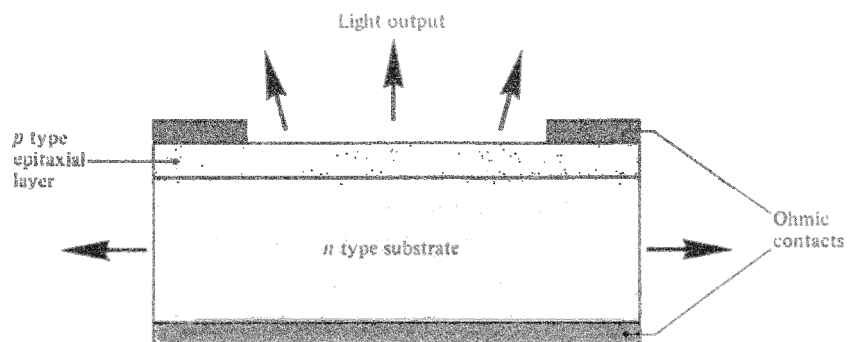
Εικόνα 11. Δίοδος εκπομπής φωτός LED.

2.3.4 Δομές LED

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι διόδων εκπομπής φωτός, αν και μόνο δύο βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες. Οι δύο τελευταίοι είναι ο εκπομπός επιφανείας ή Burrgus (από τον δημιουργό του) και ο πομπός κορυφής, που φαίνονται και στην Εικόνα 9. Οι άλλοι δύο τύποι, οι LEDs επιπέδου (planar) και θόλου (dome), βρίσκουν περισσότερες εφαρμογές σαν μικρές, πλαστικές, εντός κάψουλας συσκευές σε ηλεκτρονικές συσκευές. Ωστόσο, υπέρυθρες εκδοχές αυτών των συσκευών έχουν χρησιμοποιηθεί στις οπτικές επικοινωνίες, κυρίως με δέσμες οπτικών ινών και για το λόγο αυτό είναι χρήσιμο να τις εξετάσουμε περιληπτικά πριν προχωρήσουμε στις LEDs υψηλής ακτινοβολίας.

- **LED επιπέδου**

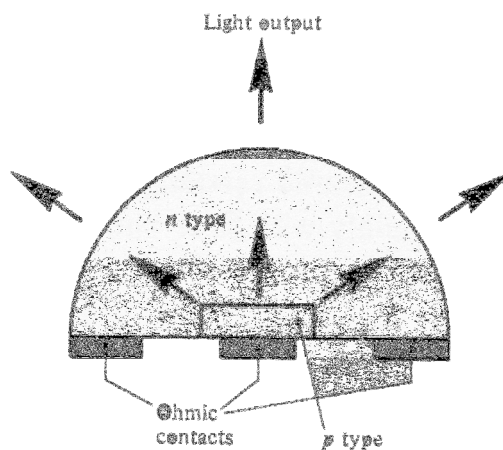
Η LED επιπέδου είναι η απλούστερη δομή που είναι διαθέσιμη και κατασκευάζεται είτε από υγρή, είτε αέρια διεργασία πάνω σε όλη την επιφάνεια του υποστρώματος GaAs. Περιλαμβάνει διάχυση τύπου p- στο υπόστρωμα τύπου n- προκειμένου να δημιουργηθεί η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 12. Η ροή ρεύματος πάνω στην ένωση των υλικών δίνει αυθόρμητη Lambertian εκπομπή και η συσκευή εκπέμπει φως προς όλες τις κατευθύνσεις. Ωστόσο, μόνο μια μικρή ποσότητα φωτός εκπέμπεται προς τα έξω, κάτι που οφείλεται στη συνολική εσωτερική ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να είναι χαμηλή.



Εικόνα 12. Η δομή μίας LED επιπέδου, δείχνοντας την εκπομπή φωτός από όλες τις επιφάνειες.

- **LED θόλου**

Η δομή μίας τυπικής LED θόλου φαίνεται στην Εικόνα 13. Σχηματίζεται ένα ημισφαίριο τύπου n- υποστρώματος GaAs, γύρω από μία περιοχή τύπου p-. Η διάμετρος του θόλου επιλέγεται έτσι ώστε να μεγιστοποιεί την ποσότητα της εσωτερικής εκπομπής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια μέσω της κρίσιμης γωνίας της επιφάνειας GaAs. Επομένως, γενικά αυτή η συσκευή έχει υψηλότερη αποδοτικότητα εξωτερικής ισχύος από την LED επιπέδου. Ωστόσο, η γεωμετρία της δομής είναι τέτοια ώστε ο θόλος να πρέπει να είναι μεγαλύτερος από την περιοχή επανασύνδεσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια εκπομπής και να μειώνεται η ακτινοβολία.



Εικόνα 13. Η δομή μίας LED θόλου.

- **LED επιφάνειας (τύπος Burrus)**

Μία μέθοδος για να αυξήσουμε την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, είναι να περιορίσουμε την εκπομπή σε μια μικρή ενεργό περιοχή μέσα στη συσκευή. Η τεχνική που καινοτόμησαν οι Burrus και Dawson, περιλάμβανε τη χρήση ενός

“πηγαδιού” στο υπόστρωμα GaAs, προκειμένου να αποτρέψει την υψηλή απορρόφηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Αυτές οι συσκευές έχουν μικρή αντίσταση στη θερμοκρασία στην ενεργό περιοχή, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν τις υψηλές πυκνότητες ρεύματος και να δίνουν υψηλή εκπομπή ακτινοβολίας. Αν μάλιστα, χρησιμοποιήσουμε διόδους με διπλές ετεροσυνδέσεις (double heterojunction - DH, δηλαδή, συνδέσεις που σχηματίζονται μεταξύ δύο διαφορετικών ημιαγωγών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 14), μπορούμε να αυξήσουμε την αποδοτικότητα και να μειώσουμε την απορρόφηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

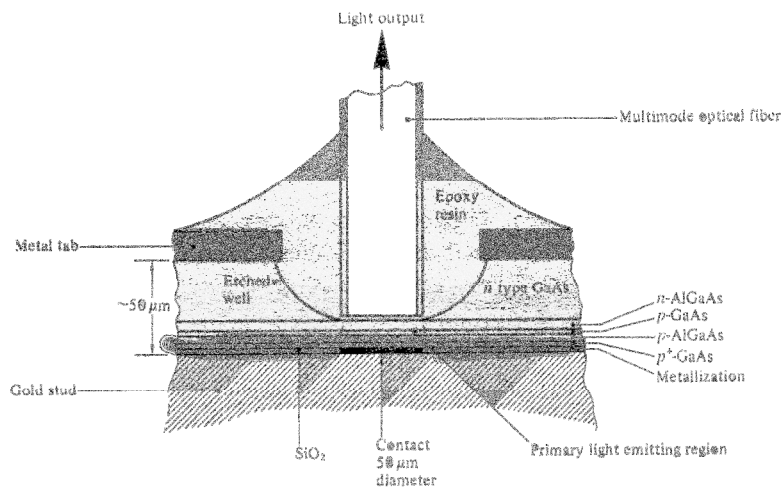
Παρατηρώντας την Εικόνα 14, βλέπουμε ότι η εσωτερική απορρόφηση σε αυτή τη συσκευή είναι πολύ μικρή, λόγω του μεγαλύτερου διάκενου χωρισμού των στρωμάτων. Επίσης, η εκπομπή από το ενεργό επίπεδο είναι ιστροπική, παρόλο που θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την εξωτερική εκπομπή Lambertian κατανομή, λόγω της διάθλασης από υψηλό σε χαμηλό δείκτη διάθλασης στο GaAs υλικό.

Υπολογίζουμε την ισχύ P_c από τον τύπο:

$$P_c = \pi(1 - r)AR_D(NA)^2, \quad (4)$$

όπου r είναι ο συντελεστής διάθλασης Fresnel, A είναι η ελάχιστη διάμετρος της περιοχής εκπομπής και R_D είναι ακτινοβολία της πηγής.

Φυσικά, η ακτινοβολία που τελικά εκπέμπεται προς τα έξω εξαρτάται επίσης και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η απόσταση και η ευθυγράμμιση της περιοχής εκπομπής και του δέκτη, τα εμπόδια ανάμεσα σε πομπό και δέκτη κ.α.



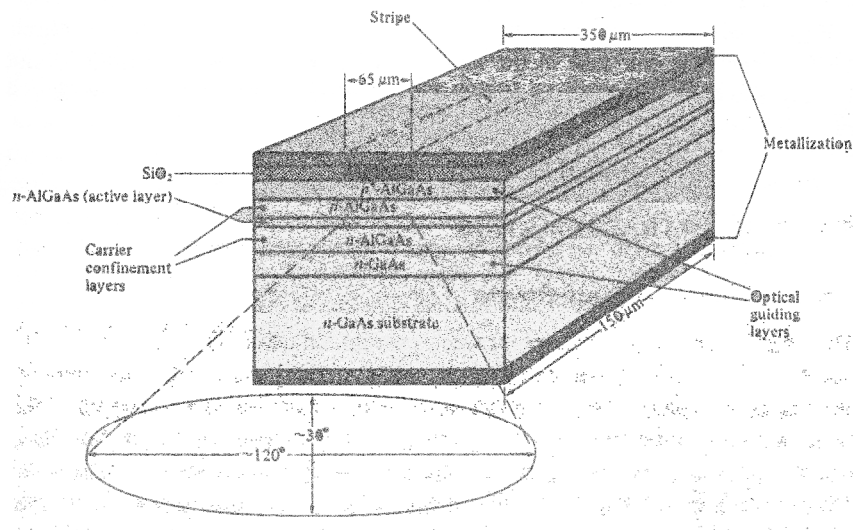
Εικόνα 14. Η δομή μίας AlGaAs DH LED εκπομπής επιφάνειας.

- **LED κορυφής**

Η DH LED εκπομπής κορυφής με ραβδωτή γεωμετρία είναι η δεύτερη δίοδος εκπομπής φωτός υψηλής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αλληλεπίδραση των διάφανων επιπέδων με ένα πολύ στενό ενεργό επίπεδο (50-100 μm), η οποία παράγει φως στο ενεργό επίπεδο και το διαχέει σε όλα τα υπόλοιπα διαφανή επίπεδα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απορρόφηση στο ενεργό. Η *κυματοδήγηση* που προκύπτει ελαχιστοποιεί την απόκλιση των εκπεμπόμενων οπτικών δεσμών σε μια κάθετη επιφάνεια στο επίπεδο της διόδου και με εύρος 30°. Η έξοδος όμως στις LEDs επιφάνειας, θα ακολουθεί Lambertian κατανομή επειδή στο επίπεδο της επαφής p-n δεν γίνεται κυματοδήγηση και η απόκλιση δέσμης θα είναι στις 120° (Εικόνα 15).

Το περισσότερο από το διαδοθέν φως εκπέμπεται προς τη μία μεριά από ένα κάτοπτρο στο αντίθετο σημείο και ένα επίστρωμα αντανάκλασης.

Το εύρος διαμόρφωσης των LED κορυφής είναι γενικά μεγαλύτερο (~ 200MHz) από αυτό των LED επιφάνειας, εξαιτίας της μειωμένης διάρκειας ζωής φορέα στο ίδιο εφαρμοζόμενο ρεύμα. Η επιλογή ανάμεσα από τους δύο τύπους διόδων εξαρτάται από την εφαρμογή και συνήθως έχει να κάνει με το κόστος και την απόδοση.



Εικόνα 15. Σχηματική αναπαράσταση της δομής μίας AlGaAs DH LED κορυφής με ραβδωτή γεωμετρία.

2.3.5 Εύρος Ζώνης Διαμόρφωσης

Το εύρος ζώνης της διαμόρφωσης στις οπτικές επικοινωνίες μπορεί να καθοριστεί είτε με ηλεκτρικούς, είτε με οπτικούς όρους. Όμως, είναι συχνό πιο χρήσιμο να χρησιμοποιούμε ηλεκτρικούς όρους αφού έχουμε ένα ηλεκτρικό σύστημα σε εφαρμογή οπτικής επικοινωνίας. Η ισχύς του ηλεκτρικού σήματος πέφτει στο μισό της αρχικής της τιμής εξαιτίας του διαμορφωμένου οπτικού σήματος. Αυτό αντιστοιχεί σε συχνότητα στην οποία η ισχύς του ηλεκτρικού σήματος μειώνεται κατά 3 dB σε σχέση με την αρχική ισχύ της εισόδου.

Το εύρος ζώνης διαμόρφωσης μίας LED γενικά, καθορίζεται από τρεις μηχανισμούς:

- το επίπεδο ηλεκτρικής φόρτωσης (doping level) στην ενεργό περιοχή,
- τη μείωση της διάρκειας ζωής της ακτινοβολίας λόγω των ηλεκτρικών μεταφορέων και
- την παρασιτική χωρητικότητα της συσκευής.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε αμελητέα παρασιτική χωρητικότητα, η ταχύτητα με την οποία μία LED μπορεί να διαμορφωθεί άμεσα με ρεύμα, περιορίζεται από τη διάρκεια ζωής των φορέων. Η οπτική ισχύς $P_e(\omega)$ που εκπέμπεται από τη συσκευή με γωνιακή συχνότητα διαμόρφωσης ω , δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{P_e(\omega)}{P_{DC}} = \frac{1}{[1 + (\omega\tau_i)^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

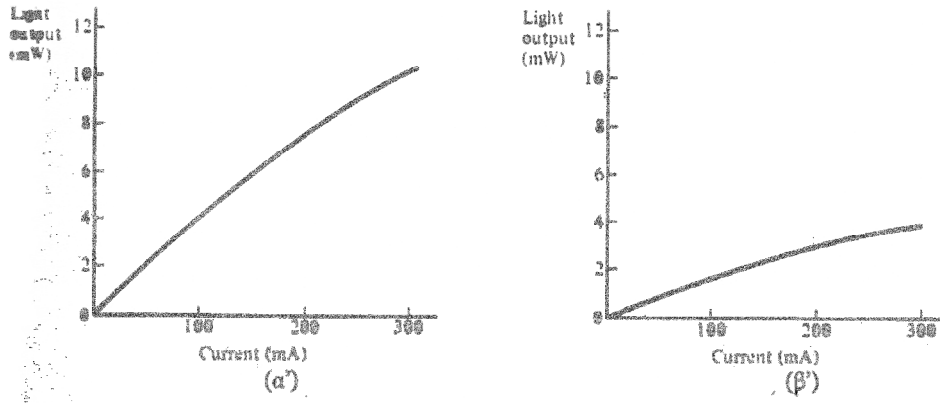
όπου τ_i είναι ο ελάχιστος χρόνος ζωής των φορέων στην περιοχή επανασύνδεσης και P_{DC} είναι η $D. C.$ οπτική ισχύς.

Ο χρόνος ζωής των φορέων εξαρτάται από τη συγκέντρωση ηλεκτρικής φόρτωσης, τον αριθμό των εισαγόμενων φορέων στην ενεργό περιοχή, την ταχύτητα επανασύνδεσης και το πάχος του ενεργού επιπέδου. Αυτές οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να ρυθμιστούν σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής.

2.3.6 Οπτική Ισχύς

Συγκριτικά με πολλές άλλες συσκευές εκπομπής φωτός, όπως οι δίοδοι laser που θα εξετάσουμε στη συνέχεια, οι LEDs παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά και χαρακτηρίζονται πιο κατάλληλες για αναλογική μετάδοση. Πρακτικά, τα σημεία στα οποία οι LEDs εμφανίζουν μη γραμμικότητα αφορούν σε λεπτομέρειες της σύνθεσης των σχετικών διατάξεων. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι επιθυμητό να συμβαίνει και για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται τεχνικές γραμμικής μορφοποίησης.

Στις εικόνες 16(α') και (β') φαίνεται η οπτική ισχύς συναρτήσει του εγχεόμενου ρεύματος για LED επιφάνειας και κορυφής αντίστοιχα.



Εικόνα 16. Οπτική ισχύς συναρτήσει του ρεύματος για (α') LED επιφάνειας και (β') LED κορυφής.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο εκπομπός επιφάνειας ακτινοβολεί σημαντικά περισσότερη οπτική ισχύ στον αέρα από τον εκπομπό κορυφής. Επίσης, και οι δύο συσκευές παρουσιάζουν σχετικά γραμμική συμπεριφορά σε μέτρια ρεύματα κίνησης.

2.3.7 Οπτικό Φάσμα

Η φασματική ακτίνα μίας LED που λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου στα 0.8-0.9 μm είναι συνήθως μεταξύ 25 και 40 nm στα σημεία έντασης (πλήρες πλάτος σε μισή ισχύ - full width at half power (FWHP)). Μπορεί, φυσικά, να αυξηθεί περίπου στα 50-100 nm, σε υλικά με ενέργειες σε μικρότερο εύρος.

Το φάσμα μίας LED σχετίζεται με το φάσμα αυθόρμητης εκπομπής, $R_{spont}(\omega)$, το οποίο εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Αυθόρμητη εκπομπή έχουμε μόνο όταν μεταβαίνουμε από μία άδεια κατάσταση ενέργειας E_1 , σε μία κατάσταση E_2 που καταλαμβάνεται από ένα ηλεκτρόνιο. Μπορούμε να υπολογίσουμε την αυθόρμητη εκπομπή από τον τύπο:

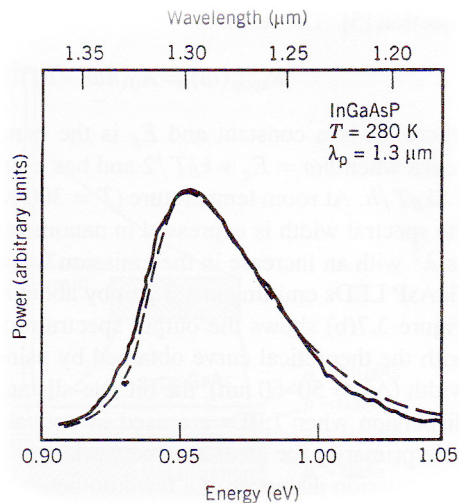
$$R_{spont}(\omega) = A_0(\hbar\omega - E_g)^{1/2} \exp [-(\hbar\omega - E_g)/k_B T], \quad (6)$$

όπου A_0 είναι μία σταθερά, $E_g = E_2 - E_1$ το ενεργειακό χάσμα, k_B η σταθερά του Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και $\hbar\omega$ η ενέργεια φωτονίου.

Πρακτικά, το φασματικό πλάτος εκφράζεται σε nm και το υπολογίζουμε από τη σχέση

$$\Delta\nu = (c/\lambda^2)\Delta\lambda \quad (7)$$

και αυξάνεται με την αύξηση του μήκους κύματος εκπομπής. Η εικόνα 17 δείχνει το φάσμα εξόδου μίας τυπικής LED στα 1.3 μm και συγκρίνεται με το θεωρητικό αποτέλεσμα που περιμένουμε από τη σχέση 6.



Εικόνα 17. Φάσμα εκπεμπόμενου φωτός μίας τυπικής 1.3μm LED. Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει το αναμενόμενο θεωρητικό αποτέλεσμα.

Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί διεύρυνση του φάσματος, κυρίως λόγω μεγαλύτερης κατανομής ενέργειας στους φορείς.

2.4 Δίοδοι Laser (LDs)

Περληπτικά αναφέρουμε και κάποια χαρακτηριστικά και στοιχεία των διόδων laser καθώς η χρήση τους στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες όλο και αυξάνεται.

2.4.1 Εισαγωγή

Μία δίοδος laser όπως και οι LEDs χρησιμοποιεί την αρχή ημιαγωγών επαφών p-n για τη λειτουργία της. Η διαφορά, ωστόσο, έγκειται στο εκπεμπόμενο φως. Μία LD δημιουργεί σύμφωνο φως (coherent light). Η βασική ιδέα μίας διόδου laser είναι η χρήση ενός θαλάμου συντονισμού με κάτοπτρα που ενισχύει την εκπομπή κυμάτων φωτός σε μία μόνο συχνότητα της ίδιας φάσης. Λόγω του συντονισμού, μια δίοδος laser δημιουργεί μια στενή δέσμη φωτός, έντονη, συγκεντρωμένη και αμιγή. Οι δίοδοι laser δημιουργούν φως τόσο στην ορατή περιοχή του φάσματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε), όσο και στην υπέρυθη.

Η πρώτη δίοδος laser κατασκευάστηκε το 1962 από δύο αμερικανικές ομάδες στο ερευνητικό κέντρο General Electric και στο Watson Research Center της IBM. Την ίδια χρονιά ο Nick Holonyak, Jr. κατασκευάζει την πρώτη LD με μήκη κύματος ορατού φωτός. Από εκεί και ύστερα οι δίοδοι laser εξελίσσονται με γοργούς ρυθμούς, οπότε και φτάνουν σε επίπεδο κατάλληλο για χρήση το 1970.

Η λέξη laser δημιουργήθηκε από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων που περιγράφουν το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της συσκευής. Δηλαδή, "Light Amplification by

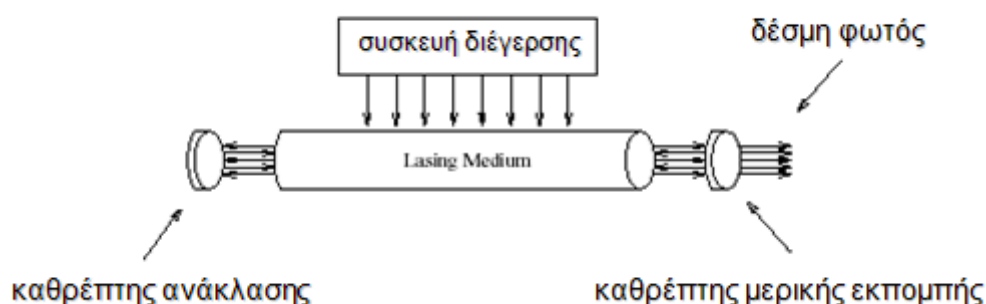
Stimulated Emission of Radiation”, που θα μπορούσε να αποδοθεί στα ελληνικά σαν “Ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας”. Επομένως, πρόκειται για έναν ενισχυτή φωτός.

Όπως και οι διόδους εκπομπής φωτός, έτσι και οι διόδους laser, χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ακτινοβολία λόγω της πολλαπλασιαστικής επίδρασης της εξαναγκασμένης εκπομπής.
- Στενό πλάτος εκπομπής της τάξεως του 1nm (10Å) ή λιγότερο, το οποίο βοηθάει στην ελαχιστοποίηση φαινομένων διασποράς υλικού.
- Μεγάλο εύρος ζώνης διαμόρφωσης της τάξεως των GHz.
- Χρονική συνοχή που είναι μεγάλης σημασίας για ετερόδυνες ανιχνεύσεις σε συστήματα υψηλής χωρητικότητας.
- Χωρική συνοχή που επιτρέπει η έξοδος να εστιάζει σε ένα σημείο, με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλότερη ένταση από εξόδους με διαχεόμενη εκπομπή ακτινοβολίας.
-

2.4.2 Βασική Λειτουργία

Η επαφή p-n στις διόδους laser ενσωματώνεται σε μία κοιλότητα συντονισμού που σχηματίζεται συνήθως από δύο κάτοπτρα. Η εξαναγκασμένη επανασύνδεση πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής η οποία προσφέρει ενίσχυση των ηλεκτρονίων στην περιοχή p. Η επανασύνδεση οπών-ηλεκτρονίων έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων. Η πιο απλή δομή μίας διόδου laser φαίνεται στο Σχήμα 18. Αυτή περιλαμβάνει δύο κάτοπτρα στα άκρα και εκπέμπει πολλά μήκη κύματος σε μια στενή περιοχή του φάσματος.



Εικόνα 18. Γενική δομή laser. Μία δίοδος laser μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια υπό μορφή φωτός.

Σε αναλογία με τα LEDs, τα ημιαγωγικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της επαφής p-n είναι αρσενικούχο γάλλιο, φωσφορούχο ίνδιο, νιτρικό γάλλιο και αντιμονιούχο γάλλιο. Ο Πίνακας 5 δείχνει τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των ενώσεων όσον αφορά στη χρήση τους σε διόδους laser. Όλες οι διόδους laser συγχωνεύουν μια φωτοδίοδο πίσω όψης για να παρέχουν πραγματικού χρόνου παρακολούθηση της εξόδου του laser. Αυτό είναι απαραίτητο, γιατί το ρεύμα κατωφλίου του laser μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας.

Η δίοδος laser εκπέμπει φως σε δύο κατευθύνσεις. Το φως από τη μια άκρη του laser εστιάζεται πάνω στην ίνα και παρέχει την χρήσιμη έξοδο. Το φως από την άλλη άκρη πέφτει πάνω σε μια μεγάλη περιοχή της φωτοδίοδου. Συνήθως, η φωτοδίοδος τοποθετείται σε μια απόσταση από το laser και κάνει γωνία για μείωση των αντανακλάσεων μέσα στην κοιλότητα του laser.

Οι φωτοδιόδους είναι διόδους που η αγωγιμότητά τους μεταβάλλεται με την πρόσπτωση φωτεινής ενέργειας πάνω στην ένωση p-n. Αποτελούνται από ραβδοειδείς κρυστάλλους που περιβάλλονται από ένα μικρό σωλήνα. Στο μπροστινό τους μέρος, υπάρχει ένας φακός που αποσκοπεί στην εστίαση του φωτός που πέφτει πάνω.

Υλικό/Χημικός Τύπος	Μήκος Κύματος	Εφαρμογές
GaN/InGaN	350-500nm	Δίσκοι Blue-Ray, Βιο-ιατρική
GaAlAs/GaAs	530-980nm	DVD, CD, Βιο-αναλύσεις
InP/InGaAsP	900-1650nm	Οπτικές επικοινωνίες, Τηλεπικοινωνίες

Πίνακας 5. Υλικά υποστρωμάτων διόδων laser, φασματικό εύρος και εφαρμογές τους.

2.4.3 Δομές LD

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι laser:

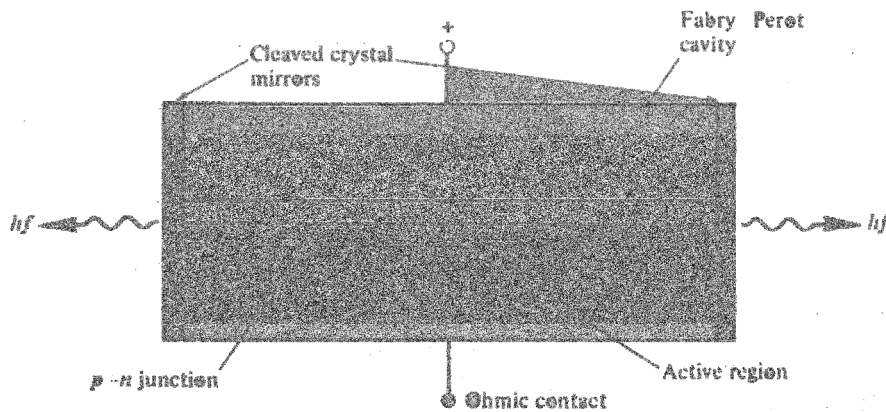
- Fabry-Perot (FP) και
- Δίοδοι κατανεμημένης ανάδρασης (DFB).

Η κοιλότητα Fabry-Perot είναι η απλούστερη μέθοδος οπτικής ανάδρασης (Σχήμα 19). Η κοιλότητα είναι κολλητή στο μέσο παραγωγής laser, για να φιλτράρει τα ανεπιθύμητα μήκη κύματος. Η ρύθμιση γίνεται με τη φυσική προσαρμογή της απόστασης μεταξύ δύο καθρεφτών σε κάθε άκρο της κοιλότητας με τέτοιο τρόπο, ώστε μόνο το επιθυμητό μήκος κύματος να παρεμβάλλεται κατασκευαστικά με τις πολλαπλές του ανακλάσεις στην κοιλότητα. Για το λόγο αυτό ονομάζεται Fabry-Perot αντηχείο. Με συνεχείς αντανακλάσεις τα κύματα φιλτράρουν συγκεκριμένα μήκη κύματος. Οι φάσεις που ακολουθούνται προκειμένου να παραχθεί οπτική ενέργεια είναι η εξής:

1. Εισάγεται φώς στον σωλήνα και διεγείρει πολλά άτομα.
2. Κάποια από τα διεγερμένα άτομα εκπέμπουν φωτόνια.

3. Μερικά φωτόνια ταξιδεύουν παράλληλα κατά μήκος του σωλήνα και ανακλώνται στους καθρέπτες.
4. Καθώς κινούνται διεγείρουν άλλα άτομα και εκπέμπουν νέα φωτόνια που προστίθενται στην ροή.
5. Μέρος των φωτονίων εξέρχεται από τον λιγότερο ανακλαστικό καθρέπτη.

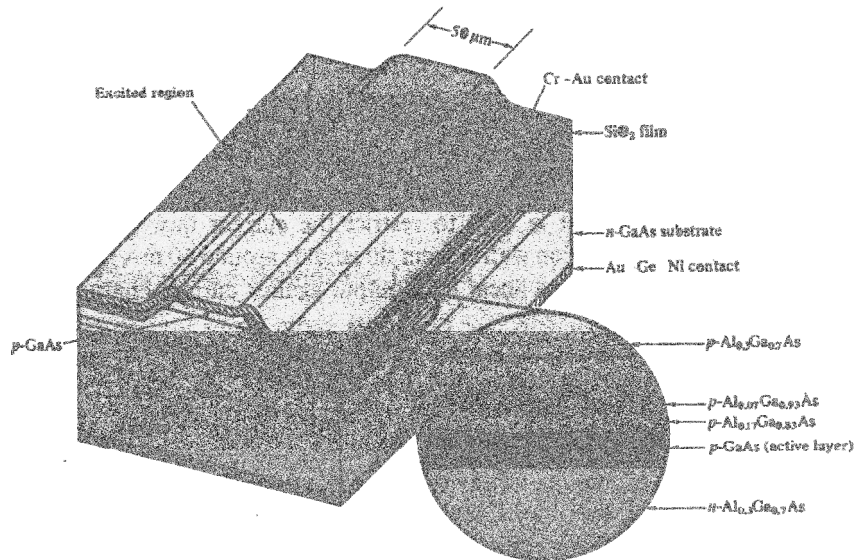
Τα laser FP χωρίζονται στους τύπους Buried Hetero (BH) και πολυκβαντικών φρεάτων (multi-quantum well - MQW). Τα τελευταία χρησιμοποιούνται ευρέως καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους laser. Παρουσιάζουν χαμηλότερο ρεύμα κατωφλίου, υψηλότερη αποδοτικότητα, χαμηλότερο θόρυβο, καλύτερη γραμμικότητα και πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα στη θερμοκρασία.



Εικόνα 19. Αντηχείο Fabry-Perot.

Στα laser DFB οι ανακλάσεις δεν επηρεάζονται από τα επίπεδα κάτοπτρα του κρυστάλλου, αλλά από μία αυλάκωση του ημιαγωγικού υποστρώματος. Είναι σχεδόν μονοχρωματικά, ενώ τα laser FP εκπέμπουν φως σε έναν αριθμό από διακριτά μήκη κύματος. Από πλευράς θορύβου, τα laser DFB υπερτερούν καθώς έχουν υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Για να υπάρξει δράση lasing στις διόδους θα πρέπει το ενεργό υλικό να τοποθετηθεί μεταξύ δύο κατόπτρων, έτσι ώστε η οπτική δέσμη να κάνει πολλαπλές διαδρομές μέσα από το ενεργό υλικό. Στην περίπτωση των DFB lasers τα κάτοπτρα υλοποιούνται με τη βοήθεια φραγμάτων περίθλασης (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. DFB laser.

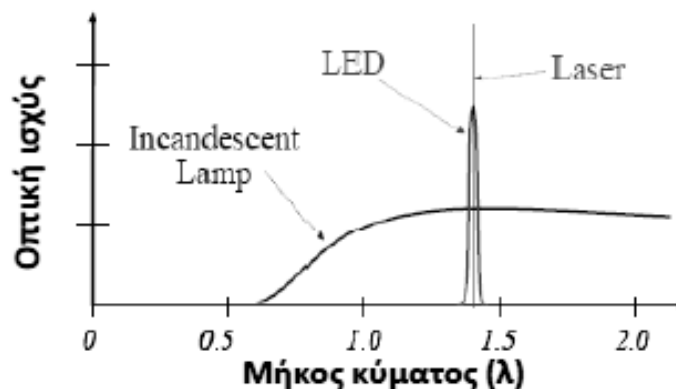
2.5 Σύγκριση LED και LD

Ως οπτική πηγή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε μία δίοδο εκπομπής φωτός, είτε μία δίοδο laser. Στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά laser ημιαγωγού λόγω των πλεονεκτημάτων τους:

- Στενό φασματικό εύρος, πολύ καλή συμφωνία,
- Ευκολία σύζευξης του παραγόμενου φωτός σε οπτικές ίνες,
- Μικρό μέγεθος, αξιοπιστία και καλή απόδοση,
- Πολύ υψηλές ταχύτητες.

Η γραμμικότητα, επίσης, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό και για τους δύο τύπους πηγής φωτός σε πολλές εφαρμογές. Η γραμμικότητα αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο η οπτική έξοδος είναι ευθέως ανάλογη με το ηλεκτρικό ρεύμα εισόδου.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γραφική παράσταση οπτικής ισχύος εκπομπής συναρτήσει του μήκους κύματος, για τις περιπτώσεις οπτικών πηγών λαμπτήρας πυρακτώσεως, LED και LD. Παρατηρούμε ότι η LED ακολουθεί μία σχεδόν γραμμική συμπεριφορά, γεγονός που διευκολύνει την αναλογική διαμόρφωση της. Για τις LDs παρατηρούμε υψηλή οπτική αποδοτικότητα (απότομη κλίση στο διάγραμμα) σε μήκη κύματος που προφανώς έχουμε περάσει την τιμή κατωφλίου του ρεύματος, οπότε και γίνεται εξαναγκασμένη εκπομπή.



Εικόνα 21. Μεταβολή της οπτικής ισχύος με το μήκος κύματος για λαμπτήρα πυρακτώσεων, LED και LD.

Επίσης, και οι δύο τύποι οπτικών πηγών (κυρίως οι δίοδοι laser) είναι ευαίσθητοι στη θερμοκρασία, γεγονός που επηρεάζει τον χρόνο ζωής τους. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν LDs, λόγω της συμφωνίας και της υψηλής έντασης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται, θα πρέπει εκπεμπόμενο φως να διαχέεται με κάποιον τρόπο. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση φίλτρων, τα οποία, όμως, μειώνουν την αποδοτικότητα της συσκευής και αυξάνουν το συνολικό κόστος. Αυτό δε συμβαίνει στις LEDs, οι οποίες δεν είναι σημειακές πηγές και εκπέμπουν σε αρκετά μεγάλη επιφάνεια.

Το πιο βασικό πλεονέκτημα των LDs σε σχέση με τις LEDs είναι η μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας τους, της τάξης των Gbps σε αντίθεση με τους ρυθμούς τάξεως κάποια Mbps των δίοδων εκπομπής φωτός.

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις κυριότερες διαφορές των δύο οπτικών πηγών που μελετήσαμε:

Χαρακτηριστικά	LED	LD
Οπτικό φασματικό εύρος	25-100nm	0.1-5nm
Εύρος ζώνης διαμόρφωσης	KHz-MHz	KHz-GHz
Απαιτήση επιπλέον κυκλωμάτων	Όχι	Κύκλωμα ρύθμισης θερμοκρασίας κατωφλίου
Ασφάλεια οφθαλμού	Ασφαλής	Πρέπει να καταστεί ασφαλής
Αξιοπιστία	Υψηλή	Μέτρια
Κόστος	Χαμηλό	Μέτριο έως Υψηλό
Κάλυψη	Μεγάλη	Σημειακή

Πίνακας 6. Βασικές διαφορές οπτικών πηγών LEDs και LDs.

3 ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Η βασική λειτουργία ενός οπτικού ανιχνευτή είναι η μετατροπή του λαμβανόμενου σήματος σε ηλεκτρικό, ώστε να υποστεί στη συνέχεια κατάλληλη επεξεργασία για την ανάκτηση του απεσταλμένου οπτικού σήματος.

Συγκεκριμένα, οι οπτικοί ανιχνευτές (φωτοδίοδοι) επιτελούν αντίστροφη λειτουργία από εκείνη των LEDs και των LDs. Ο οπτικός ανιχνευτής μετατρέπει την οπτική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το ηλεκτρικό σήμα στη συνέχεια μπορεί να ενισχυθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ανιχνευτές που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα οπτικά συστήματα. Ο οπτικός ανιχνευτής αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες κατά τη σχεδίαση ενός ασύρματου οπτικού δικτύου επικοινωνιών, καθώς η θέση του ως μέρος του δέκτη επηρεάζει την απόδοση τέτοιων συστημάτων. Για το λόγο αυτό, απαιτείται λεπτομερής μελέτη κατά τη σχεδίαση ενός φωτοανιχνευτή και μάλιστα οι σχεδιαστές εστιάζουν στα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Υψηλή απόδοση μετατροπής οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό,
- Μικρό μέγεθος και χαμηλό κόστος,
- Ευαισθησία στο μήκος κύματος που εκπέμπει η οπτική πηγή του συστήματος,
- Χαμηλή εισαγωγή θορύβου (dark current ή leak current),
- Υψηλή αξιοπιστία για συνεχή λειτουργία,
- Υψηλή ακρίβεια/πιστότητα,
- Σταθερότητα στα χαρακτηριστικά της απόδοσης,
- Γρήγορη απόκριση για συστήματα υψηλών ρυθμών μετάδοσης και
- Ανεξαρτησία από περιβαλλοντικές αλλαγές.

Προκειμένου να ανιχνευτεί η οπτική ακτινοβολία (φωτόνια) στην υπέρυθρη ζώνη του φάσματος, θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν και την εσωτερική και την εξωτερική φωτο-εκπομπή των ηλεκτρονίων. Ωστόσο, οι συσκευές για εξωτερική εκπομπή απαιτούν

για τη λειτουργία τους υψηλές τάσεις. Για το λόγο αυτό, η προσοχή μας εστιάζεται σε συσκευές για εσωτερική φωτο-εκπομπή.

Ο τύπος ανιχνευτή που χρησιμοποιείται κυρίως στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες είναι η φωτοδίοδος, που ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των φωτοβολταϊκών ανιχνευτών. Οι φωτοδιόδοι είναι δίοδοι που η αγωγιμότητά τους μεταβάλλεται με την πρόσπτωση φωτεινής ενέργειας πάνω στην ένωση p-n. Αποτελούνται από ραβδοειδείς κρυστάλλους που περιβάλλονται από έναν μικρό σωλήνα. Στο μπροστινό μέρος υπάρχει ένας φακός που αποσκοπεί στην εστίαση του φωτός που πέφτει πάνω.

Οι φωτοδιόδοι κατασκευάζονται από ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο (Si) ή το γερμάνιο (Ge), καθώς και από κράματα στοιχείων των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα. Τελευταία χρησιμοποιούνται και νέα στοιχεία, όπως πυρίτιο για μήκη κύματος 850nm.

Το φως που πέφτει στη φωτοδίοδο δημιουργεί ένα ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Απορροφημένα φωτόνια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Για κάθε τέτοιο ζεύγος που δημιουργείται, ένα ηλεκτρόνιο τίθεται σε κυκλοφορία σαν ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Οι φωτοδιόδοι λειτουργούν με ανάστροφη πόλωση. Το ρεύμα διαρροής μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του φωτός. Στο απόλυτο σκοτάδι έχουν ρεύμα διαρροής μερικά nA ή λίγων μ A και αυτό ονομάζεται *ρεύμα σκότους*. Μόλις εκτεθούν στο φως, παράγονται περισσότερα ζεύγη ηλεκτρονίων οπών και οι φορείς των φορτίων μειονότητας αυξάνονται αρκετά και σχηματίζουν το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης. Όταν η ένταση του φωτός αυξάνει, το ανάστροφο ρεύμα αυξάνεται και φθάνει τις μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες μ A.

Οι τρεις τύποι φωτοδίοδων που παρουσιάζονται είναι οι εξής :

- Φωτοδιόδοι P-N
- Φωτοδιόδοι PIN και
- Φωτοδιόδοι APD.

3.2 Βασικές Αρχές Οπτικής Ανίχνευσης

3.2.1 Αποκρισιμότητα

Το κύριο ενδιαφέρον για έναν ανιχνευτή, είναι να γνωρίζουμε την τιμή του σήματος που μας δίνει, σε σχέση με την ποσότητα της ισχύος (ακτινοβόλου ροής) την οποία απορροφά. Ο λόγος αυτός R ονομάζεται *αποκρισιμότητα* (responsivity) ή ευαισθησία (sensitivity).

Έστω ο ημιαγωγός του Σχήματος 21. κάθε φορά που ένα φωτόνιο απορροφάται από τον ημιαγωγό, δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Αυτό συμβαίνει, αν η ενέργεια $h\nu$ των φωτονίων ξεπερνάει την ενέργεια του χάσματος E_g . Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την τάση που εφαρμόζεται από τα ηλεκτρόνια και τις οπές που κινούνται στον ημιαγωγό, έχουν σαν αποτέλεσμα τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Το ρεύμα των φωτονίων (φωτορεύμα) I_p είναι ανάλογο με την οπτική ισχύ, σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_p = RP_{in}, \quad (8)$$

όπου R είναι η αποκρισιμότητα του οπτικού ανιχνευτή (σε A/W).

Ορίζουμε ως κβαντική απόδοση την ποσότητα η , όπου:

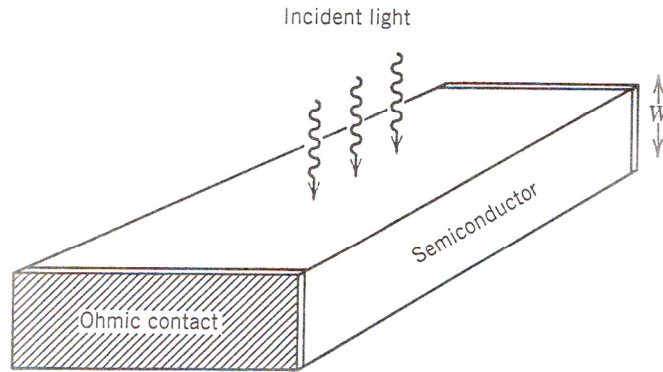
$$\eta = \frac{\text{ρυθμόLGRc παραγωγήLGRc ηλεκτρονίων}}{\text{ρυθμόLGRc επίπτωσηLGRsvηLGRc φωτονίων}} = \frac{I_p/e}{P_{in}/\hbar\omega} = \frac{\hbar\omega}{q} R, \quad (9)$$

e το φορτίο των ηλεκτρονίων.

Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την αποκρισιμότητα ως εξής:

$$R = \frac{\eta e}{\hbar\omega} \approx \frac{\eta\lambda}{1.24}, \quad (10)$$

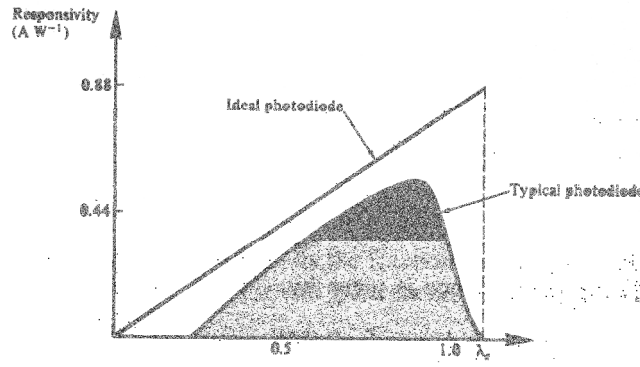
όπου το $\lambda \equiv c/\omega$ εκφράζεται σε μμ.



Εικόνα 22. Πλάκα ημιαγωγού που χρησιμοποιείται ως οπτικός ανιχνευτής.

Η αποκρισιμότητα ενός ανιχνευτή αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος λ , καθώς υπάρχουν περισσότερα φωτόνια για την ίδια οπτική δύναμη. Αυτή η γραμμική εξάρτηση από το μήκος κύματος δεν διαρκεί επ' άπειρον, αφού τελικά η ενέργεια των φωτονίων θα μειώνεται με αποτέλεσμα να μη μπορούν να παράγουν ηλεκτρόνια. Στους ημιαγωγούς αυτό συμβαίνει για $\hbar\omega < E_g$ και τότε η κβαντική απόδοση πέφτει στο μηδέν.

Η ιδανική αποκρισιμότητα σε σχέση με το μήκος κύματος μίας φωτοδίοδου πυριτίου, με μοναδιαία κβαντική απόδοση, φαίνεται στο Σχήμα 23.



Εικόνα 23. Αποκρισιμότητα ως προς το μήκος κύματος για ιδανική φωτοδίοδο πυριτίου. Επίσης, φαίνεται η αποκρισιμότητα μίας τυπικής συσκευής.

3.2.2 Συντελεστής Απορρόφησης

Η παραγωγή ρεύματος σε μια φωτοδίοδο, σχετίζεται με την απορρόφηση των φωτονίων και εξαρτάται από τον συντελεστή απορρόφησης α του φωτός στον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται. Θεωρώντας συγκεκριμένο μήκος κύματος το φωτο-ρεύμα I_p που παράγεται από φως οπτικής ισχύος P_{in} δίνεται από τον τύπο:

$$I_p = \frac{P_{in} e (1 - r)}{h \omega} [1 - \exp(-\alpha W)], \quad (11)$$

όπου r είναι ο συντελεστής ανάκλασης Fresnel και W η διατομή του ημιαγωγού (Σχήμα 22).

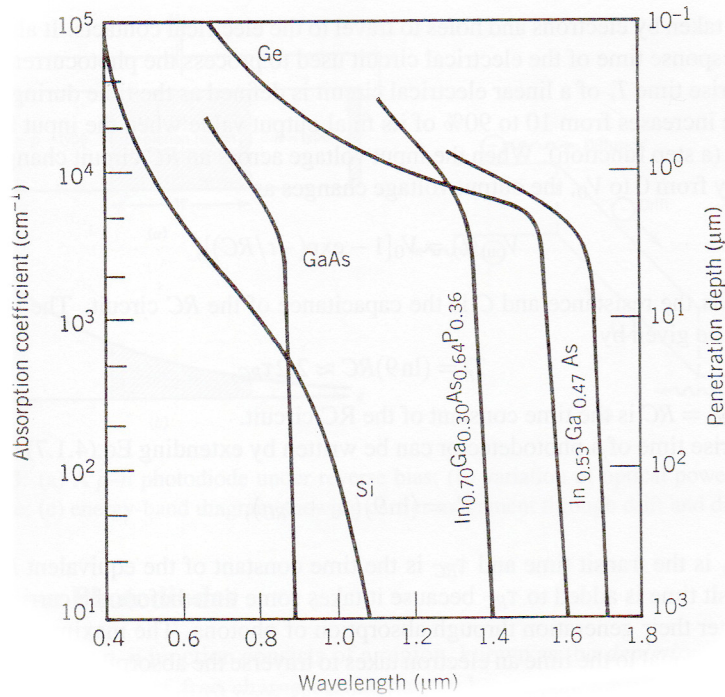
Η ισχύς που μεταδίδεται μέσω της πλάκας ημιαγωγού είναι $P_{tr} = \exp(-\alpha W) P_{in}$. Επομένως, η ισχύς που απορροφάται προς παραγωγή ρεύματος είναι:

$$P_{abs} = P_{in} - P_{tr} = [1 - \exp(-\alpha W)] P_{in}. \quad (12)$$

Για την κβαντική απόδοση ισχύει:

$$\eta = P_{abs} / P_{in} = 1 - \exp(-\alpha W). \quad (13)$$

Η Εικόνα 24 δείχνει την εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης α με διάφορα ημιαγωγικά υλικά που χρησιμοποιούνται συχνά για την ανάπτυξη συσκευών οπτικής ανίχνευσης. Η διαφορά στις καμπύλες εντοπίζεται τόσο στα διαφορετικά χάσματα ενεργειών στα διάφορα υλικά, όσο και στη θερμοκρασία. Το μήκος κύματος λ_c για το οποίο ο συντελεστής α γίνεται μηδέν, ονομάζεται μήκος κύματος αποκοπής. Κάθε υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φωτοδίοδος μόνο για $\lambda < \lambda_c$.



Εικόνα 24. Εξάρτηση συντελεστή απορρόφησης από το μήκος κύματος για διάφορα ημιαγώγιμα υλικά.

3.2.3 Εύρος Ζώνης και Χρόνος Ανόδου

Το εύρος ζώνης ενός οπτικού ανιχνευτή καθορίζεται από την ταχύτητα με την οποία αποκρίνεται σε παραλλαγές της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος. Ο χρόνος ανόδου T_r ορίζεται ως το χρονικό διάστημα στο οποίο το ρεύμα συσσωρεύεται από το 10 στο 90% της τελικής του τιμής, ενώ η οπτική ισχύς μεταβάλλεται απότομα. Προφανώς, ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον χρόνο που κάνουν τα ηλεκτρόνια και οι οπές να φτάσουν στις ηλεκτρικές επαφές καθώς και από τον χρόνο απόκρισης του ηλεκτρικού κυκλώματος για την παραγωγή φωτορεύματος.

Ο χρόνος ανόδου μίας φωτοδιόδου δίνεται από τη σχέση:

$$T_r = (\ln 9)RC \approx 2.2\tau_{RC}, \quad (14)$$

όπου R είναι η αντίσταση, C η χωρητικότητα και $\tau_{RC} = RC$ η χρονική σταθερά του RC κυκλώματος. Μπορούμε να γράψουμε τη σχέση 3.7 ως:

$$T_r = (\ln 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC}), \quad (15)$$

όπου τ_{tr} είναι ο χρόνος μετάβασης και προστίθεται στο τ_{RC} γιατί παίρνει κάποιο χρόνο να μαζευτούν όλοι οι φορείς αφού έχουν δημιουργηθεί μέσω της απορρόφησης φωτονίων. Είναι προφανές, ότι μπορούμε να μειώσουμε τον χρόνο τ_{tr} αυξάνοντας τη διατομή W του ημιαγωγού. Στην περίπτωση αυτή όμως, η κβαντική απόδοση αρχίζει και μειώνεται

σημαντικά για $\alpha W < 3$, όπως φαίνεται από τη σχέση 13. Επομένως, υπάρχει ένα trade-off μεταξύ του εύρους ζώνης και της αποκρισιμότητας των οπτικών ανιχνευτών.

Το εύρος ζώνης των οπτικών ανιχνευτών περιγράφεται με ανάλογο τρόπο, ως εξής:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}. \quad (16)$$

Για παράδειγμα, αν $\tau_{tr} = \tau_{RC} = 100ps$ το εύρος ζώνης του ανιχνευτή είναι κάτω από $1GHz$. Επομένως, για να έχουμε ρυθμούς πάνω από $10Gbps$ θα πρέπει να ρίξουμε αυτούς τους χρόνους κάτω από $10ps$.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στους οπτικούς δέκτες είναι το σκοτεινό ρεύμα (dark current) I_d , το οποίο παράγεται όταν δεν υπάρχει κανένα οπτικό σήμα στον ανιχνευτή και δημιουργείται είτε από παρασιτικό φως, είτε από την θερμική αλληλεπίδραση των ζευγών οπών-ηλεκτρονίων.

3.3 Διαδεδομένες Φωτοдиодοι

3.3.1 Φωτοдиодοι P-N

Είναι η πιο απλή φωτοдиодος και αποτελείται από μια επαφή p-n (Σχήμα 25α). Χρησιμοποιείται σπάνια στις οπτικές επικοινωνίες, αλλά θεωρείται θεμελιώδης γνώση για την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των φωτοдиодων.

Όταν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n τότε αναπτύσσονται δύο ρεύματα με αντίθετες φορές:

- ένα ρεύμα διάχυσης από την περιοχή p στην περιοχή n εξαιτίας της κίνησης των οπών από το p στο n και των ηλεκτρονίων από το n στο p.
- ένα ρεύμα ολίσθησης που οφείλεται στην δημιουργία, λόγω θερμικής διέγερσης, κυρίως στο στρώμα απογύμνωσης (depletion area), ηλεκτρονίων και οπών που κινούνται, οι μεν οπές από τον ημιαγωγό n στον p, τα δε ηλεκτρόνια από τον p στον n.

Στην ισορροπία τα δύο αυτά ρεύματα έχουν αντίθετες φορές οπότε το συνολικό ρεύμα είναι μηδέν.

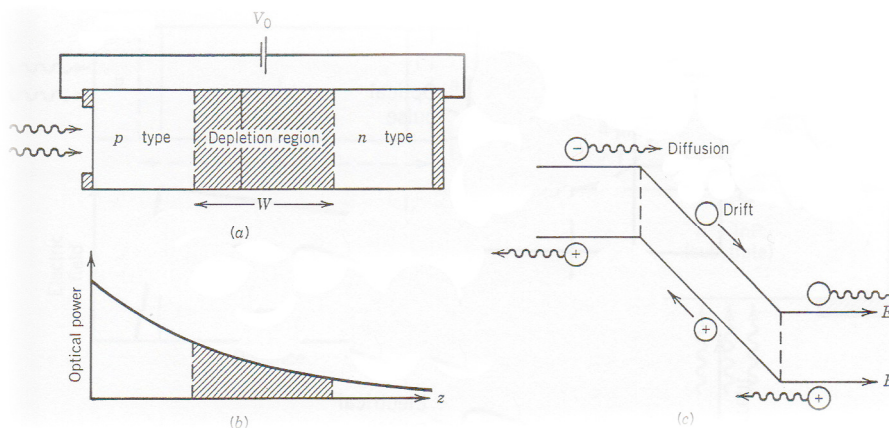
Παρατηρούμε ότι η διοδος αποτελείται από ένα p και ένα n στρώμα. Αν εφαρμοστεί αρνητική τάση στη διοδο (αρνητικός πόλος στο p-στρώμα), το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια περιοχή αραίωσης μεταξύ των δύο στρωμάτων. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές θα αρχίσουν να απομακρύνονται από την περιοχή επαφής και η ίδια περιοχή θα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση.

Όταν πολώσουμε την διοδο ορθά, τότε η ένταση του εξωτερικού πεδίου που εφαρμόζουμε αναγκάζει τις οπές να υπερνικήσουν το αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει στο στρώμα απογύμνωσης και να κινηθούν από την περιοχή p στην περιοχή n (για τα ηλεκτρόνια ισχύει το αντίθετο). Έτσι αυξάνεται το ρεύμα διάχυσης, καθώς αυξάνεται και η εξωτερική τάση, ενώ το ρεύμα ολίσθησης παραμένει ανεπηρέαστο γιατί οφείλεται σε

Θερμική διέγερση ηλεκτρονίων και οπών, εξαρτάται, δηλαδή, αποκλειστικά από την θερμοκρασία (όσο πιο πολύ αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο πιο εύκολα τα ηλεκτρόνια των δεσμών φεύγουν από αυτούς δημιουργώντας έτσι ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών).

Όταν πολώσουμε την δίοδο *ανάστροφα*, δηλαδή συνδέσουμε την περιοχή p με τον αρνητικό πόλο της πηγής και την περιοχή n με τον θετικό, τότε το εξωτερικό πεδίο έχει φορά από το n στο p στρώμα και αντιτίθεται στο ρεύμα διάχυσης, ενώ αφήνει ανεπηρέαστο το ρεύμα ολίσθησης, το οποίο εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία (που επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο δημιουργούνται οπές και ηλεκτρόνια). Έτσι, αν αυξήσουμε σημαντικά την ανάστροφη τάση που εφαρμόζουμε, μηδενίζεται το ρεύμα διάχυσης, οπότε το μόνο ρεύμα που θα υπάρχει θα είναι το ρεύμα ολίσθησης. Αυτό το ρεύμα εξαρτάται μόνο από τον ρυθμό με τον οποίο δημιουργούνται οπές και ηλεκτρόνια. Αν αυξήσουμε τον ρυθμό δημιουργίας ηλεκτρονίων –οπών με οπτικό τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε το ρεύμα στην φωτοδίοδο ελέγχοντας την φωτεινή ροή πάνω σε αυτήν. Μπορούμε, δηλαδή να μετατρέψουμε ένα φωτεινό σήμα σε ηλεκτρικό σήμα.

Όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί με φως κατάλληλης συχνότητας, δηλαδή τα φωτόνια να έχουν τέτοια ενέργεια ώστε να δημιουργήσουν οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια, τότε προκαλείται αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού καθώς αυξάνονται οι φορείς του ρεύματος (οπές και ηλεκτρόνια).



Εικόνα 25. (α) Ανάστροφα πολωμένη p-n επαφή, (β) η οπτική ισχύς μίας p-n φωτοδίοδου, (γ) διάγραμμα κίνησης των ηλεκτρικών φορέων.

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 τις οπές που παράγονται από την προσπίπτουσα οπτική ακτινοβολία στην n- και p- περιοχή, αντίστοιχα.

Όταν η φωτοδίοδος πολωθεί ανάστροφα τότε το ρεύμα που την διαρρέει είναι ανεξάρτητο από την εφαρμοζόμενη τάση και εξαρτάται αποκλειστικά από τον φωτισμό της φωτοδίοδου.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25b η οπτική ισχύς μειώνεται εκθετικά καθώς το φως απορροφάται στην περιοχή απογύμνωσης. Τα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων που υπάρχουν στην περιοχή απογύμνωσης υπόκεινται σε ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, με αποτέλεσμα να ολισθαίνουν στις περιοχές p- ή n-, ανάλογα με το φορτίο (Εικόνα 25c).

Η αποκρισσιμότητα μίας φωτοδιόδου είναι αρκετά υψηλή ($R \sim 1A/W$), λόγω υψηλής κβαντικής απόδοσης.

Το εύρος ζώνης μίας p-n φωτοδιόδου, συχνά περιορίζεται από τον χρόνο τ_{tr} (Σχέση 16). Αν W το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης και v_d η ταχύτητα ολίσθησης, τότε

$$\tau_{tr} = W/v_d. \quad (17)$$

Τυπικά, είναι $W \sim 10\mu m$, $v_d \sim 10^5 m/s$, $\tau_{tr} \sim 100ps$. Το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των θετικών και αρνητικών φορτίων. Η ταχύτητα v_d εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται και φτάνει στη μέγιστη τιμή της (ταχύτητα κορεσμού $\sim 10^5 m/s$) με ρυθμό που εξαρτάται από το υλικό της φωτοδιόδου.

3.3.2 Φωτοδίοδος PIN

Οι ελλείψεις μίας διόδου p-n σχετίζονται με το γεγονός ότι η περιοχή απογύμνωσης είναι μικρή. Πολλά ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών επανασυνδέονται πριν προλάβουν να δημιουργήσουν ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Στη φωτοδίοδο p-i-n, η περιοχή απογύμνωσης γίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Ένα ελαφρά εμπλουτισμένο εσωτερικό στρώμα χωρίζει τις περιοχές τύπου p και τύπου n, με υψηλό ποσοστό προσμίξεων. Το όνομα της διόδου προκύπτει από τη δομή αυτών των υλικών (Positive-Intrinsic-Negative).

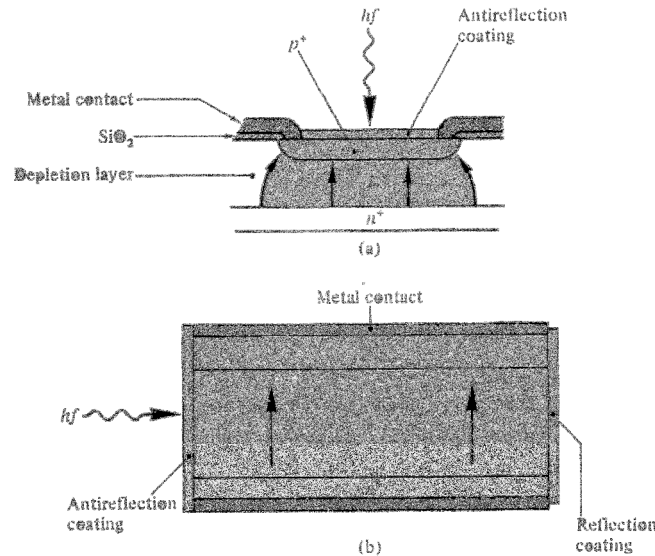
Επομένως, η φωτοδίοδος p-i-n αποτελείται από τρία στρώματα. Ένα τύπου p, ένα τύπου n και μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα φωτοευαίσθητο στρώμα χαμηλής νόθευσης (intrinsic). Σε αυτό το στρώμα πραγματοποιείται η μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η φωτοδίοδος πολώνεται ανάστροφα (δηλαδή ο θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας συνδέεται στην περιοχή τύπου n και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου p) με τυπική τιμή τάσης 5V. Όταν πέσει φως πάνω στη φωτοδίοδο, τότε κάθε φωτόνιο απορροφάται και δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Κάτω από την επίδραση της ανάστροφης πόλωσης, τα αντίθετα ηλεκτρικά φορτία ηλεκτρονίου και οπής κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα

Κατά την απουσία φωτός, οι φωτοδιόδοι p-i-n συμπεριφέρονται ηλεκτρικά όπως κάθε κοινή δίοδος ανορθωτή. Αν πολωθούν ορθά άγουν μεγάλες ποσότητες ρεύματος. Η ορθή τάση πόλωσης σχετίζεται με το ενεργειακό χάσμα του ανιχνευτή. Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου είναι γύρω στα 1.1eV, του γερμανίου 0.65eV και για την InGaAs ένωση 0.77eV.

Στην Εικόνα 26 φαίνεται η δομή μίας τέτοιας φωτοδιόδου σε μήκη κύματος μικρότερα από 1.09 μm . Η φωτοδίοδος του Σχήματος 26a, όταν λειτουργεί στο εύρος 0.8 – 0.9 μm ,

προκειμένου να πετύχει υψηλή κβαντική απόδοση (τυπικά 85%) και χαμηλό θόρυβο σκότους (ή ρεύμα σκότους dark current), απαιτεί η περιοχή απογύμνωσης να έχει πλάτος στο εύρος 20 – 50 μm .

Ο θόρυβος σκότους οφείλεται σε θερμική γένεση ζεύγους φορέων στην περιοχή απογύμνωσης, απουσία φωτός. Στην Εικόνα 26b φαίνεται η τομή της διόδου, όπου το φως εισέρχεται στη δίοδο παράλληλα στο επίπεδο, έχει υψηλό πλάτος απορρόφησης ($\sim 500\mu\text{m}$), και είναι ιδιαίτερα επιρρεπής σε μήκη κύματος όπου ο συντελεστής απορρόφησης είναι σχετικά μικρός.



Εικόνα 26. (a) Όψη p-i-n φωτοδιόδου, (b) Τομή p-i-n φωτοδιόδου.

Οι ανιχνευτές p-i-n μπορούν να λειτουργήσουν με δύο τρόπους: φωτοβολταϊκά και φωτοαγωγή. Με την φωτοβολταϊκή μέθοδο, δεν εφαρμόζεται καμία πόλωση στον ανιχνευτή. Σε αυτήν την περίπτωση ο ανιχνευτής θα είναι πολύ αργός και η έξοδος του θα είναι μία τάση σχεδόν λογαριθμική προς την στάθμη του φωτός της εισόδου. Οι δέκτες οπτικής ίνας που χρησιμοποιούνται ευρέως δεν χρησιμοποιούν ποτέ τη φωτοβολταϊκή μέθοδο. Στη φωτοαγωγή μέθοδο, ο ανιχνευτής είναι πολωμένος ανάστροφα. Σε αυτή τη περίπτωση η έξοδος είναι ένα ρεύμα πολύ γραμμικό με την ισχύ του φωτός εισόδου.

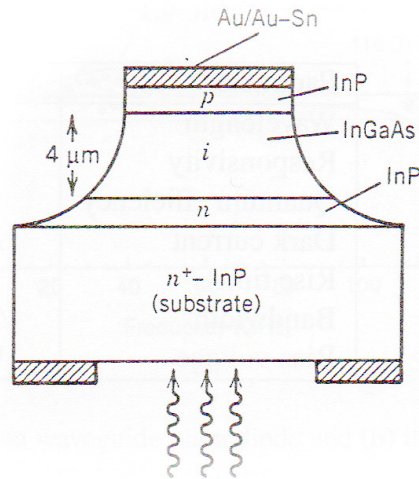
Η μέγιστη συχνότητα απόκρισης φθάνει μερικές δεκάδες GHz γεγονός που καθιστά τη φωτοδίοδο p-i-n ιδανικό φωτοφωρατή στις οπτικές επικοινωνίες. Από το 1990 έχουν αναπτυχθεί φωτοδιόδοι p-i-n, που λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης πάνω από 10 Gbps. Εύρη ζώνης της τάξεως των 70 GHz έχουν επιτευχθεί από το 1986, με χρήση ενός λεπτού στρώματος απορρόφησης ($< 1\mu\text{m}$) και μειώνοντας την παρασιτική χωρητικότητα C_p , σε βάρος, όμως, της κβαντικής απόδοσης και της αποκρισιμότητας. Μέχρι το 1995, οι φωτοδιόδοι p-i-n είναι σε θέση να λειτουργούν σε εύρος ζώνης των 110 GHz, και μειώνουν το χρόνο τ_{RC} κοντά στο 1ps.

Έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση τέτοιων φωτοδιόδων υψηλών ταχυτήτων. Σε μία από αυτές τις τεχνικές, δημιουργούμε μία κοιλότητα Fabry-Perot (FP) γύρω από τη από τη δομή p-i-n, με σκοπό την ενίσχυση της κβαντικής απόδοσης. Το αποτέλεσμα είναι μία δομή τύπου laser. Η κοιλότητα FP έχει μια σειρά από διαμήκεις καταστάσεις στις οποίες το εσωτερικό οπτικό πεδίο, ενισχύεται μέσω των παρεμβολών. Όταν το μήκος κύματος λειτουργίας είναι κοντά στις καταστάσεις αυτές, τότε η φωτοδίοδος έχει υψηλή ευαισθησία. Κάτι τέτοιο είναι χρήσιμο ακόμα και σε εφαρμογές πολυπλεξίας μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM). Σε πείραμα που χρησιμοποιείται κοιλότητα FP όπου το ένα κάτοπτρο δημιουργήθηκε με χρήση αντανakλαστικότητας Bragg, έχει επιτευχθεί κβαντική απόδοση σχεδόν 100%.

Σε μία διαφορετική προσέγγιση, γίνεται χρήση ενός οπτικού κυματοδηγού, στον οποίο το οπτικό σήμα είναι συζευγμένο. Ο κυματοδηγός είναι τόσο πλατύς ώστε να μπορεί να υποστηρίξει πολλές εγκάρσιες καταστάσεις, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση ζεύξης. Από τη στιγμή που πραγματοποιείται το φαινόμενο της απορρόφησης κατά μήκος του οπτικού κυματοδηγού ($\sim 10\mu m$), η κβαντική απόδοση μπορεί να φτάσει στο 100%, ακόμα και για πολύ λεπτό επίπεδο απορρόφησης. Το εύρος ζώνης τέτοιων φωτοδιόδων κυματοδηγών, περιορίζεται από τον παράγοντα τ_{RC} (Σχέση 16).

Επίσης η χρήση ειδικών μιγμάτων ημιαγωγών καθορίζουν την άριστη απόκριση της φωτοδίοδου σε μήκη κύματος όπου αριστοποιείται και η συμπεριφορά των οπτικών ινών.

Μία p-i-n φωτοδίοδος που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές οπτικής επικοινωνίας, χρησιμοποιεί συνήθως τη χημική ένωση InGaAs για το μεσαίο επίπεδο (επίπεδο i) και τη χημική ένωση InP για τις περιβάλλουσες στρώσεις (επίπεδα p και n). Στο Σχήμα 27 φαίνεται μία τέτοια φωτοδίοδος. Το χάσμα ενέργειας για την InP είναι $1.35eV$ και για το λόγο αυτό η ένωση αυτή είναι διαφανής σε φως με μήκη κύματος που ξεπερνούν τα $0.92\mu m$. Αντίθετα το χάσμα του πλέγματος ενώσεων $In_{1-x}Ga_xAs$, με $x = 0.47$ είναι περίπου $0.75eV$,, τιμή που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος αποκοπής $1.65\mu m$. Επομένως, το μεσαίο επίπεδο InGaAs απορροφά πολύ δυνατά σε μήκη κύματος στο εύρος $1.3 - 1.6\mu m$. Η κβαντική απόδοση η μπορεί να φτάσει στο 100%, αν το επίπεδο InGaAs έχει πλάτος $4 - 5\mu m$.



Εικόνα 27. Δομή μίας InGaAs p-i-n φωτοδιόδου.

Στον Πίνακα 7 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά τριών συνηθισμένων p-i-n φωτοδιόδων.

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδες	Si	Ge	InGaAs
Μήκος Κύματος	λ	μm	0.4-1.1	0.8-1.8	1.0-1.7
Αποκρισιμότητα	R	A/W	0.4-0.6	0.5-0.7	0.6-0.9
Κβαντική Απόδοση	η	%	75-90	50-55	60-70
Ρεύμα Σκότους	I_d	nA	1-10	50-500	1-20
Εύρος Ζώνης	Δf	GHz	0.3-0.6	0.5-3	1-10

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά συνηθισμένων p-i-n φωτοδιόδων.

3.3.2.1 Ανάστροφη Τάση.

Επειδή οι φωτοδιόδοι παράγουν ισχύ λόγω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την ανάγκη μίας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Εντούτοις, η απόκριση συχνότητας και η γραμμικότητα μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση μίας εξωτερικής ανάστροφης τάσης. (Η ροή του ρεύματος σε ένα κύκλωμα φωτοδιόδων καθορίζεται από τον αριθμό των ζευγαριών ηλεκτρονίων-οπών που έχουν δημιουργηθεί λόγω του φωτοβολταϊκού φαινομένου και η εφαρμογή μίας ανάστροφης τάσης δεν επηρεάζει το σήμα του ρεύματος ούτε εξασθενίζει τη γραμμικότητα της φωτοηλεκτρικής μετατροπής). Ενώ η εφαρμογή μίας ανάστροφης τάσης σε μια φωτοδίοδο είναι πολύ χρήσιμη στη βελτίωση της απόκρισης και της γραμμικότητας της συχνότητας, έχει το συνοδευτικό μειονέκτημα της αύξησης των επιπέδων του ρεύματος σκότους και του θορύβου, καθώς επίσης εμπεριέχει και τον κίνδυνο της καταστροφής της συσκευής από την υπερβολική εφαρμογή της ανάστροφης τάσης. Κατά συνέπεια, απαιτείται προσοχή έτσι ώστε να διατηρηθεί η ανάστροφη τάση, μέσα στα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια και για να εξασφαλιστεί ότι η κάθοδος διατηρείται σε δυναμικό θετικότερο σε σχέση με την άνοδο.

Για τη χρήση σε εφαρμογές όπως οι οπτικές επικοινωνίες και ο τηλεχειρισμός που απαιτούν υψηλή ταχύτητα απόκρισης, η φωτοδίοδος p-i-n παρέχει όχι μόνο καλή ταχύτητα

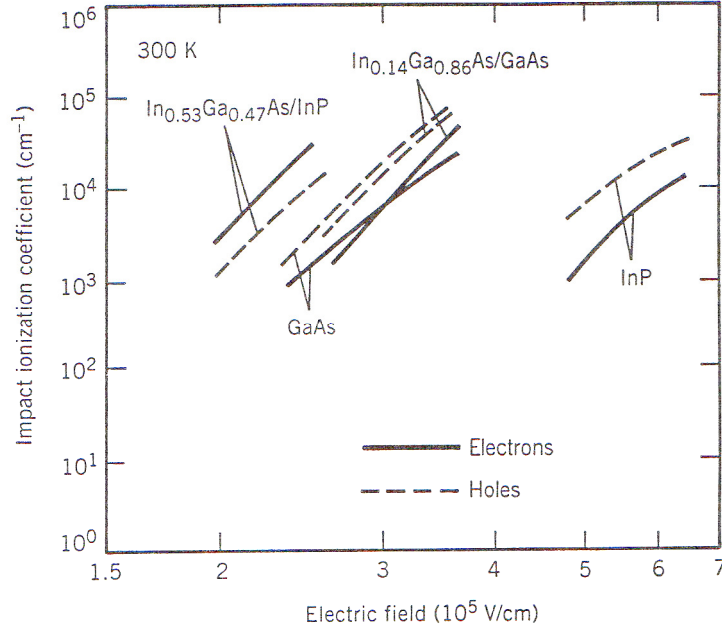
απόκρισης αλλά και άριστα χαρακτηριστικά σε ό,τι αφορά το ρεύμα σκότους και την αντίσταση τάσης, όταν εφαρμόζεται στο κύκλωμα ανάστροφη τάση.

3.3.3 Φωτοдиодοι APD

Η φωτοδιοδος APD ή φωτοδιοδος χιονοστιβάδα (Avalanche photodiode) είναι ο τελευταίος τύπος οπτικού ανιχνευτή που θα μελετήσουμε. Η δομή της είναι πιο εξελιγμένη από αυτή της φωτοδιόδου p-i-n, έτσι ώστε να δημιουργείται εξαιρετικά μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο στη δίοδο. Για τις διόδους p-i-n, κάθε απορροφημένο φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής και θέτει ένα ηλεκτρόνιο σε ροή στο εξωτερικό κύκλωμα. Σε αυτή την ένα προς ένα σχέση, οι φωτοдиодοι p-i-n μοιάζουν με τις LEDs. Οι διόδοι laser, από την άλλη, προσφέρουν μία υψηλότερη από ένα προς ένα αναλογία φωτονίων, φορέων, καθώς και υψηλότερο ρεύμα: ένας πρωτεύων φορέας μπορεί να οδηγηθεί στην εκπομπή αρκετών φωτονίων. Με αυτή τη σύγκριση, οι φωτοдиодοι APD είναι σαν τις διόδους laser.

Οι πρωτεύοντες φορείς, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι φορείς που δημιουργήθηκαν από τα απορροφημένα φωτόνια, επιταχύνουν κερδίζοντας έτσι αρκετά eV κινητικής ενέργειας. Μία σύγκρουση αυτών των επιταχυμένων φορέων με ουδέτερα άτομα, αναγκάζει τους φορείς να χρησιμοποιήσουν λίγη από τη δική τους ενέργεια για να κινήσουν το δέσμιο ηλεκτρόνιο έξω από τη ζώνη σθένους. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση ελεύθερων ζευγών ηλεκτρονίων, που είναι γνωστά σαν δευτερεύοντες φορείς. Η διαδικασία δημιουργίας αυτών των δευτερεύοντων φορέων ονομάζεται *σύγκρουση ιονισμού*. Ενώ οι πρωτεύοντες φορείς δημιουργούν δευτερεύοντες, αυτοί επιταχύνουν και δημιουργούν νέους φορείς. Συνολικά, αυτή η διαδικασία ονομάζεται *φωτοπολλαπλασιασμός*. Τυπικές τιμές πολλαπλασιασμού είναι της τάξης των δεκάδων εκατοντάδων.

Ο ρυθμός παραγωγής των δευτερεύοντων φορέων ρυθμίζεται από δύο παραμέτρους, a_e και a_h , που είναι οι συντελεστές ιονισμού των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα. Οι τιμές τους εξαρτώνται από το υλικό του ημιαγωγού και από το ηλεκτρικό πεδίο που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Στην Εικόνα 28 φαίνονται οι τιμές των συντελεστών αυτών για διάφορους ημιαγωγούς. Τιμές $\sim 1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ έχουμε για ηλεκτρικό πεδίο στο εύρος $2 - 4 \times 10^5 \text{ V/cm}$. Τέτοιες μεγάλες τιμές ηλεκτρικού πεδίου παίρνουμε αν ασκήσουμε υψηλό δυναμικό ($\sim 100\text{V}$) στη φωτοδιοδο APD.



Εικόνα 28. Συντελεστές ιονισμού για διάφορους ημιαγωγούς σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο.

Οι φωτοδιόδοι APD διαφέρουν στο σχεδιασμό τους από τις φωτοδιόδους p-i-n, κυρίως σε μία συνιστώσα: εισάγεται ένα επιπλέον επίπεδο, στο οποίο τα δευτερεύοντα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται μέσω ιονισμού. Στην Εικόνα 29 φαίνεται η δομή μίας APD φωτοδιόδου με προστατευτικό δακτύλιο, που εξαλείφει τις διαρροές στις άκρες των ενώσεων.

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

$$R_{APD} = MR, \quad (18)$$

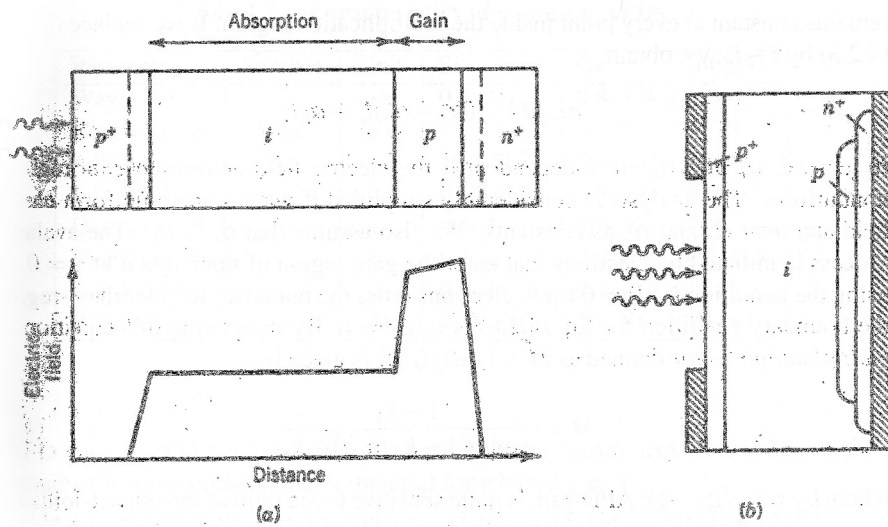
όπου M είναι το κέρδος και εξαρτάται από το μήκος της περιοχής κέρδους d και από τις σταθερές ιονισμού ηλεκτρονίων a_e και a_h . Συνήθως, επιλέγεται να υπερισχύει ιονισμός ηλεκτρονίων ή οπών, οπότε το κέρδος είναι:

$$M = e^{a_e d}, \quad (19)$$

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

$$\Delta f = (2\pi\tau_e M_0)^{-1}, \quad (20)$$

όπου $M_0 = M(0)$ είναι το κέρδος χαμηλής συχνότητας και τ_e είναι ο χρόνος διέλευσης που εξαρτάται από τον λόγο των συντελεστών ιονισμού $k_A = a_h/a_e$.



Εικόνα 29. (α) Φωτοδίοδος APD με κατανομή ηλεκτρικού πεδίου, (β) σχεδιασμός φωτοδίοδου APD πυριτίου.

Η λειτουργία αυτών των συσκευών γίνεται σε υψηλή ταχύτητα και απαιτεί πλήρη κένωση στην περιοχή απορρόφησης. Όταν δημιουργούνται οι φορείς σε ένα μη-αραιωμένο υλικό, συγκεντρώνονται αργά με τη διαδικασία της διάχυσης. Αυτό, όμως προκαλεί μία “ουρά-διάχυσης” κατά τη διάρκεια ενός μικρού οπτικού παλμού. Όταν η φωτοδίοδος APD έχει κενωθεί πλήρως (από το ηλεκτρικό πεδίο), οι φορείς έχουν μία τάση κορεσμού. Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος απόκρισης της συσκευής, περιορίζεται από τρεις παράγοντες:

- τον χρόνο διέλευσης των φορέων στην περιοχή απογύμνωσης,
- τον χρόνο που καταναλώνουν οι φορείς για τη διαδικασία φωτοπολλαπλασιασμού και
- τη χρονική σταθερά RC , που προκύπτει από την παρασιτική χωρητικότητα της διόδου και το φορτίο της.

Ο Πίνακας 8 συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά των φωτοδίοδων αυτών για διαφορετικά υλικά.

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδες	Si	Ge	InGaAs
Μήκος Κύματος	λ	μm	0.4-1.1	0.8-1.8	1.0-1.7
Αποκρισιμότητα	R_{APD}	A/W	80-130	3-30	5-20
Κέρδος APD	M	—	100-500	50-200	10-40
Ρεύμα Σκότους	I_d	nA	0.1-1	50-500	1-5
Εύρος Ζώνης	Δf	GHz	0.2-1	0.4-0.7	1-10

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά συνηθισμένων APD φωτοδίοδων.

Το εσωτερικό κέρδος που προσφέρουν, κάνουν τις φωτοδιόδους APD πολύ χρήσιμες. Επειδή περιλαμβάνουν κέρδος, η αλυσίδα ηλεκτρονίων του ενισχυτή μπορεί να απλοποιηθεί. Ωστόσο, όπως και στις περισσότερες μηχανολογικές εμπορικές συναλλαγές, υπάρχει κάποιο κόστος. Για τις φωτοδιόδους APD, το κόστος είναι μεγάλο. Απαιτούν υψηλή τάση τροφοδοσίας για τη λειτουργία τους. Η τάση μπορεί να ποικίλει από 20-30 *Volts* για τις InGaAs APD και πάνω από 300 για τις APD πυριτίου.

Επίσης, οι φωτοδιόδοι αυτοί είναι ευαίσθητοι στη θερμοκρασία, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω την πολυπλοκότητα του κυκλώματος. Γενικά, οι APD είναι χρήσιμοι μόνο για ψηφιακά συστήματα επειδή έχουν πολύ χαμηλή γραμμικότητα.

Λόγω της επιπρόσθετης πολυπλοκότητας του κυκλώματος και των υψηλών τάσεων στις οποίες υπόκεινται τα εξαρτήματα, είναι σχεδόν πάντα λιγότερο αξιόπιστες από τους ανιχνευτές τύπου p-i-n. Τέλος, λόγω του ότι οι δέκτες που είναι βασισμένοι σε ανιχνευτές p-i-n μπορούν σχεδόν να φτάσουν την απόδοση ενός APD, οι φωτοδιόδοι p-i-n, θεωρούνται η πρώτη επιλογή για τα περισσότερα αναπτυξιακά συστήματα.

4 ΚΑΝΑΛΙ

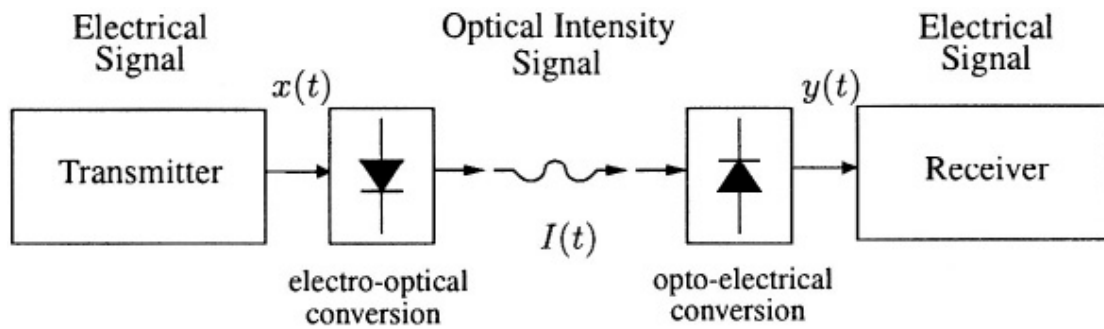
Πολλές φορές ένα σήμα που θέλουμε να μεταδοθεί από έναν πομπό σε έναν δέκτη εξασθενεί από ντετερμινιστικές ή τυχαίες διαδικασίες του περιβάλλοντος. Αυτά τα “εμπόδια” που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες αναφέρονται ως η απάντηση ενός επικοινωνιακού καναλιού μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Προκειμένου να σχεδιάσουμε ένα τέτοιο κανάλι, ώστε να συμβαδίζει με τα πραγματικά δεδομένα, θα πρέπει να το μοντελοποιήσουμε με μαθηματικό τρόπο και με στόχο να αναπτύξουμε σημαντικές τεχνικές που θα είναι ικανές να μεταδώσουν τα δεδομένα μας αξιόπιστα και με υψηλό ρυθμό.

Ακριβώς, όμως, επειδή στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες χρησιμοποιείται ασύμφωνη ακτινοβολία, η λήψη οπτικής ισχύος σε έναν καθορισμένο δέκτη είναι αρκετά δύσκολη. Για τον ίδιο λόγο είναι δύσκολη και η κατασκευή ομόδυνων ή ετερόδυνων δεκτών μεταλλαγής AM, FM, PM, ή ακόμα και φωρατών AM ή PM. Για τις υπέρυθρες ζεύξεις των οπτικών ασύρματων δικτύων η πιο εφαρμόσιμη μορφή διαμόρφωσης είναι η διαμόρφωση έντασης (intensity modulation - IM), όπου η πληροφορία μετατρέπεται σε στιγμιαία οπτική ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Η πιο πρακτική τεχνική για τη λήψη οπτικών σημάτων είναι η άμεση φώραση (direct detection - DD), όπου ένας ανιχνευτής παράγει ρεύμα με ένταση ανάλογη της στιγμιαίας εκπεμπόμενης ισχύος, ή με άλλα λόγια ανάλογη του τετραγώνου του λαμβανόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Τέτοια συστήματα ονομάζονται συστήματα διαμόρφωσης έντασης με άμεση φώραση (IM/DD systems).

4.1 Δομή Ασύρματων Οπτικών Καναλιών

Τα ασύρματα οπτικά κανάλια διαφέρουν από τα αντίστοιχα των συμβατικών επικοινωνιών σε αρκετά βασικά σημεία. Τα περισσότερα οπτικά κανάλια, σήμερα, ονομάζονται διαμορφωμένης έντασης ή κανάλια άμεσης ανίχνευσης. Η Εικόνα 30 παρουσιάζει τη βασική δομή ενός οπτικού καναλιού ελεύθερου χώρου.



Εικόνα 30. Διάγραμμα οπτικού καναλιού άμεσης ανίχνευσης.

Οι οπτικές ασύρματες ζεύξεις μεταδίδουν την πληροφορία από ένα ηλεκτρικό σήμα εισόδου $x(t)$, μέσω της οπτικής έντασης $I(t)$. Η πληροφορία όλη, επομένως, δεν περιέχεται ούτε στο πλάτος, ούτε στη συχνότητα, ούτε και στη φάση, αλλά στην ένταση του εκπεμπόμενου σήματος. Η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό αποτελεί τη διαμόρφωση έντασης (IM) και επιτυγχάνεται είτε με LEDs, είτε με LDs.

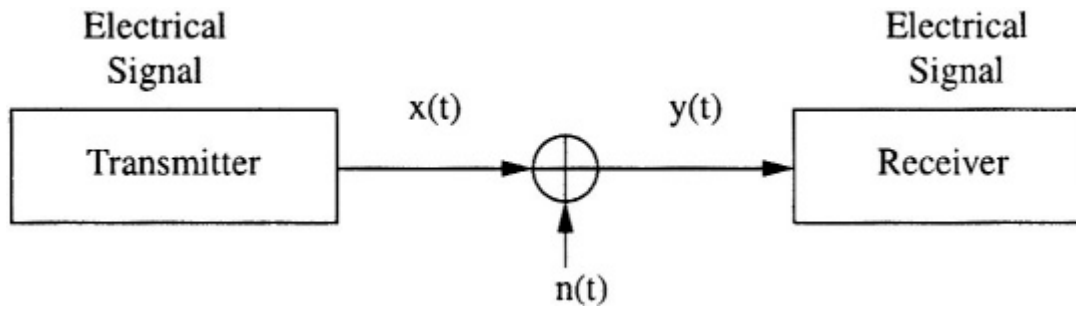
Η δομή του καναλιού, η οποία επιτρέπει τη διαμόρφωση και ανίχνευση του οπτικού σήματος, θέτει περιορισμούς μόνο στην κλάση των σημάτων που επιτρέπεται να μεταδοθούν. Το φέρον σήμα πληροφορίας, θα πρέπει να παραμένει μη αρνητικό, δεδομένου ότι η εκπεμπόμενη ισχύς δεν μπορεί ποτέ φυσικά να είναι αρνητική, δηλαδή:

$$\forall t \in R, I(t) \geq 0. \quad (21)$$

4.2 Διαμόρφωση

Για την οδήγηση των διατάξεων εκπομπής οπτικής ακτινοβολίας, απαιτείται το ηλεκτρικό σήμα να μην έχει αρνητικές τιμές. Έτσι, τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα στα οπτικά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας περιλαμβάνουν φωτεινούς παλμούς, και η προς μετάδοση πληροφορία περιέχεται είτε στο πλάτος, είτε στη θέση των παλμών. Το πλεονέκτημα αυτών των απλών τεχνικών διαμόρφωσης είναι η εύκολη και φθηνή υλοποίησή τους.

Η πλειονότητα των ασύρματων οπτικών συστημάτων χρησιμοποιεί διαμόρφωση έντασης με άμεση ανίχνευση (Intensity Modulation/Direct Detection-IM/DD). Η ένταση μίας οπτικής πηγής (intensity) ορίζεται ως η οπτική ισχύς που εκπέμπεται ανά μονάδα στερεής γωνίας [$Watt/steradian$]. Σε ένα σύστημα IM/DD η ένταση της πηγής διαμορφώνεται μεταβάλλοντας το ρεύμα που τη διαρρέει γύρω από κάποια πηγή πόλωσης. Έτσι, το σήμα μεταδίδεται απευθείας στη βασική ζώνη (baseband).



Εικόνα 31. Επικοινωνιακό μοντέλο του συστήματος οπτικής έντασης της Εικόνας 30.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του καναλιού οπτικής έντασης επιβάλλουν τον περιορισμό της σχέσης (4.1), και προφανώς αντικατοπτρίζεται και στο σήμα $x(t)$. Το μεταδιδόμενο σήμα $x(t)$ εκφράζει την ισχύ της φωτεινής πηγής και η μέση τιμή του P_t πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέση επιτρεπόμενη ισχύ P που εκπέμπει η πηγή. Οι περιορισμοί αυτοί συνοψίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$x(t) \geq 0, \quad (22)$$

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \leq P. \quad (23)$$

Κατά την άμεση ανίχνευση DD, το οπτικό σήμα που προσπίπτει στο δέκτη μετατρέπεται σε φωτόρευμα, το οποίο είναι ανάλογο της ισχύος ακτινοβολίας (irradiance) του οπτικού σήματος. Επομένως, η έξοδος του καναλιού $y(t)$ θα είναι:

$$y(t) = rx(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (24)$$

όπου το σύμβολο \otimes παριστάνει τη συνέλιξη, r είναι ο συντελεστής απόκρισης του φωτοδέκτη, $x(t)$ το μεταδιδόμενο σήμα, $h(t)$ η κρουστική απόκριση και $n(t)$ ο λευκός προσθετικός Gaussian θόρυβος. Ο θόρυβος $n(t)$ υπολογίζεται ως το άθροισμα του θορύβου φωτεινού υποβάθρου, του θερμικού θορύβου που εισάγει το κύκλωμα του δέκτη και του θορύβου βολής που προκύπτει κατά τη μετατροπή φωτονίων σε ηλεκτρόνια.

Η μεγάλη επιφάνεια του φωτοδέκτη σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας οπτικής ακτινοβολίας, έχει ως αποτέλεσμα να ολοκληρώνεται πάνω στο δέκτη η ισχύς των προσπιπτόντων οπτικών κυμάτων, αντί για το ηλεκτρικό τους πεδίο, όπως συμβαίνει με τα RF συστήματα. Έτσι, τα συστήματα IM/DD δεν επηρεάζονται από φαινόμενα διαλείψεων. Ωστόσο, η μεγάλη επιφάνεια του φωτοδέκτη, έχει σαν αποτέλεσμα τη λήψη, εκτός από το απεσταλμένο σήμα και ισχυρής ακτινοβολίας από εξωτερικές πηγές φωτός, η οποία αποτελεί θόρυβο (θόρυβος φωτεινού υποβάθρου). Για το λόγο αυτό, η ευαισθησία του δέκτη μειώνεται.

Μία άλλη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για IM/DD είναι η σύμφωνη ανίχνευση (Coherent Detection-CD). Τα συστήματα CD χρησιμοποιούν σύμφωνες πηγές φωτός, όπως οι LDs και η πληροφορία που μεταδίδεται μπορεί να περιέχεται είτε στη φάση, είτε στη συχνότητα, είτε στο πλάτος του οπτικού σήματος.

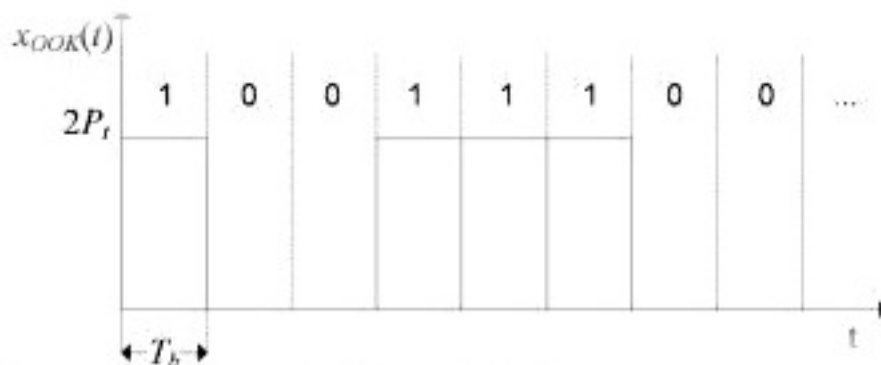
4.3 Σχήματα Διαμόρφωσης

Τα πιο διαδεδομένα σχήματα διαμόρφωσης στα IM/DD οπτικά ασύρματα συστήματα είναι η διαμόρφωση πλάτους (On Off Keying-OOK και Pulse Amplitude Modulation-PAM), η διαμόρφωση παλμού κατά θέση (Pulse Position Modulation-PPM) και η διακριτή πολυτονική διαμόρφωση (Discrete Multi Tone-DMT) την οποία δε θα εξετάσουμε. Το είδος της διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά, καθορίζεται από την τοπολογία του καναλιού, τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης, την περιοχή κάλυψης, τους περιορισμούς στην ισχύ της εκπομπής, κ.α.

4.3.1 Διαμόρφωση Έντασης Παλμών (IM)

Σε αυτόν τον τύπο διαμόρφωσης η πληροφορία βρίσκεται στο πλάτος των μεταδιδόμενων παλμών. Χρησιμοποιούνται τόσο δυαδικές, όσο και πολυεπίπεδες τεχνικές. Η απλούστερη διαμόρφωση αυτού του τύπου, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα σε οπτικά ασύρματα συστήματα, είναι η διαμόρφωση on-off keying-OOK.

Η διαμόρφωση πλάτους OOK αποτελεί ειδική περίπτωση της M-αδικής διαμόρφωσης πλάτους M-PAM. Τα OOK συστήματα χρησιμοποιούν δυαδική σηματοδότηση, δηλαδή κάθε φορά μεταδίδουν ένα μόνο bit (0 ή 1). Η μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας πραγματοποιείται οδηγώντας την οπτική είτε σε κατάσταση "On", είτε σε κατάσταση "Off". Στην πραγματικότητα αναβοσβήνει με ρυθμό ίσο με το ρυθμό μετάδοσης. Για κάθε bit πληροφορίας με τιμή 1 μεταδίδεται ένας οπτικός παλμός διάρκειας T_b και ισχύος $2P_t$, ενώ δεν μεταδίδεται τίποτα για bit πληροφορίας ίσο με 0. Παράδειγμα κυματομορφής παλμών σε σύστημα διαμόρφωσης OOK, φαίνεται στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32. Οπτικό σήμα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση OOK.

Μία κυματομορφή ΟΟΚ περιγράφεται από τη σχέση:

$$x(t) = \sum_k 2P\sqrt{T}A[k]\phi_{\text{OOK}}(t - kT_b), \quad (25)$$

όπου $A[k] \in \{0, 1\}$ και επιλέγεται ομοιόμορφα και $\phi_{\text{OOK}}(t)$ τετραγωνικός παλμός διάρκειας T_b και πλάτους 1. Η διάρκεια T_b του κάθε bit καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας R_b , του συστήματος, σύμφωνα με τη σχέση $R_b = 1/T_b$.

Η συνάρτηση βάσης $\phi_{\text{OOK}}(t)$ που καθορίζει τον παλμό ορίζεται ως:

$$\phi_{\text{OOK}}(t) = \frac{1}{\sqrt{T_b}} \text{rect}\left(\frac{t}{T_b}\right), \quad (26)$$

όπου

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & : 0 \leq t < T_b \\ 0 & : \text{αλλιώς} \end{cases}. \quad (27)$$

Οι παλμοί της συνάρτησης $\text{rect}(t)$ ονομάζονται παλμοί Non Return to Zero (NRZ).

Στις μη κατευθυντικές ζεύξεις η χρονική διασπορά προκαλεί διαπλάτυνση των παλμών και εμφανίζεται ISI, περιορίζοντας τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Το πρόβλημα αυτό, μπορεί να αντιμετωπιστεί με παλμούς Return to Zero (RZ), ο οποίοι περιγράφονται με την παρακάτω σχέση:

$$\text{rect}^{\blacksquare}(t) = \begin{cases} 1 & : 0 \leq t \leq \frac{T_b}{d} \\ 0 & : \frac{T_b}{d} \leq t \leq T_b \end{cases}. \quad (28)$$

όπου d είναι ο λόγος της χρονικής διάρκειας ενός παλμού προς τη χρονική διάρκεια ενός bit, που καλείται κύκλος εργασίας (duty cycle) και παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1.

Η ανίχνευση των σημάτων ΟΟΚ που χρησιμοποιούν RZ παλμούς είναι πιο εύκολη από την ανίχνευση σε NRZ παλμούς, λόγω της απλούστερης διαδικασίας συγχρονισμού που απαιτείται στα RZ συστήματα. Ωστόσο, η μη αποδοτική διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, δεν επιτρέπει τη χρήση τους σε συστήματα που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

4.3.2 Διαμόρφωση Παλμών κατά Θέση (PPM)

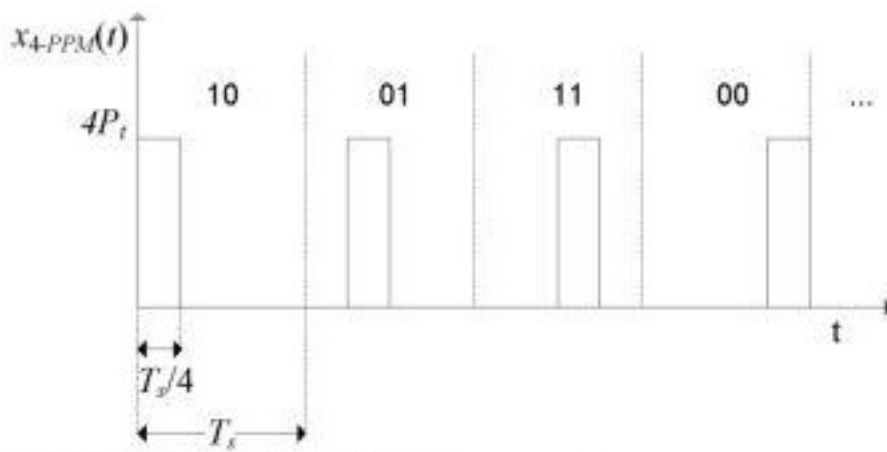
Η Μ-αδική διαμόρφωση παλμών κατά θέση, όπως και η διαμόρφωση ΟΟΚ, έχει δύο στάθμες για το πλάτος των εκπεμπόμενων παλμών, 0 και MP_t . Η μεταδιδόμενη

πληροφορία (σύμβολο) προκύπτει από το συνδυασμό $\log_2 M$ bits και έχει διάρκεια T_s , η οποία σχετίζεται με το ρυθμό μετάδοσης σύμφωνα με τη σχέση $T_s = \frac{\log_2 M}{R_b}$.

Η διάρκεια T_s του κάθε συμβόλου διαιρείται σε M διακριτά μη επικαλυπτόμενα χρονικά διαστήματα (chips). Η μετάδοση των συμβόλων πληροφορίας πραγματοποιείται οδηγώντας την πηγή στην κατάσταση "On" κατά τη διάρκεια ενός Chip και σε κατάσταση "Off" σε όλα τα υπόλοιπα Chips. Στην κατάσταση "On", αποστέλλεται ένας τετραγωνικός παλμός διάρκειας T_s/M στην οπτική πηγή και ισχύος MP_t , ώστε η μέση ισχύς του συστήματος να διατηρείται σταθερή και ίση με P_t .

Το κάθε σύμβολο της διαμόρφωσης PPM αναπαριστάται εκπέμποντας έναν παλμό σε κάθε ένα από τα M διαφορετικά Chips. Με άλλα λόγια, η πληροφορία αναπαριστάται στη θέση του παλμού στη διάρκεια T_s .

Μία ανάλογη της Εικόνας 32 αποστολή μηνύματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα που αφορά σε διαμόρφωση 4-PPM.



Εικόνα 33. Οπτικό σήμα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση 4-PPM.

Μία κυματομορφή M-PPM περιγράφεται από τη σχέση:

$$x(t) = \sum_k MP_t \sqrt{\frac{T_s}{M}} \phi_{A[k]}(t - kT_s), \quad (29)$$

όπου η $A[k]$ επιλέγει τα σύμβολα ισοπίθανα στο M , ενώ η συνάρτηση βάσης $\phi(t)$ μπορεί να έχει πολλές μορφές, μία πιθανή για $m \in M$ είναι η

$$\phi_m(t) = \sqrt{\frac{M}{T_s}} \text{rect} \left(\frac{t - \left(\frac{T_s}{M}\right)(m-1)}{T_s/M} \right). \quad (30)$$

Συγκρίνοντας τις Εικόνες 32 και 33 μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η διαμόρφωση PPM επιτρέπει υψηλότερες τιμές της μέγιστης ισχύος εκπομπής, σε σύγκριση με τη διαμόρφωση ΟΟΚ. Από την άλλη, παρατηρούμε ότι δε χρησιμοποιεί αποδοτικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης, αφού μόνο για $T_s/4$ μεταδίδεται πληροφορία, ενώ το υπόλοιπο διάστημα παραμένει ανεκμετάλλευτο. Επιπλέον, τα συστήματα που χρησιμοποιούν διαμόρφωση PPM απαιτούν κυκλώματα συγχρονισμού τόσο για την ανίχνευση των συμβόλων, όσο και για το διαχωρισμό των chips. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η υλοποίησή τους να είναι πολυπλοκότερη από αυτή του συστήματος ΟΟΚ.

4.4 Χωρική Διαμόρφωση (SM)

Μία νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνική διαμόρφωσης, που ήδη χρησιμοποιείται στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες και μάλιστα στο Li-Fi, αποτελεί η χωρική διαμόρφωση (Spatial Modulation-SM). Σε αντίθεση με τις κοινές τεχνικές διαμόρφωσης, όπου οι πληροφορίες μεταφέρονται με διαμόρφωση του σήματος, η SM μεταφέρει επιπρόσθετα bits δεδομένων στο πεδίο του χώρου. Για να επιτευχθεί αυτό, θεωρεί τη διάταξη μετάδοσης ως πρόσθετο (χωρικό) διάγραμμα αστερισμού. Επιπλέον, λειτουργεί με την αρχή ότι μόνο ένας πομπός είναι ενεργός ανά χρονική στιγμή. Εκτός από τη διαμόρφωση του σήματος (διαμόρφωση στο πλάτος του σήματος), τα δεδομένα κωδικοποιούνται και από τον πίνακα του εκπομπού που μεταδίδει το σήμα. Επομένως, μπορεί να επιτύχει μεγάλη απόδοση ισχύος που καθορίζεται τόσο από τη φύση του σήματος, όσο και από τον αριθμό των εκπομπών.

Στην πραγματικότητα, η χωρική διαφοροποίηση είναι μια τεχνική διαμόρφωσης στην οποία η χωρική θέση του πομπού χρησιμοποιείται για να μεταφέρει και αυτή πληροφορίες.

Όταν ο ενεργός πομπός στέλνει μόνο μια σταθερή ισχύ χωρίς πρόσθετη αλληλουχία παλμών ή αστερισμό σήματος στην κορυφή, τότε έχουμε διαμόρφωση μετατοπίσεως χώρου (Space Shift Keying-SSK). Στις οπτικές επικοινωνίες μεγάλο μέρος των εργασιών έχει γίνει στο οπτικό SSK, το οποίο είναι μια ειδική περίπτωση της SM. Η SM με πολλαπλούς οπτικούς πομπούς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μια μορφή χαμηλής πολυπλοκότητας MIMO, όταν συνδυάζεται με πολλαπλούς φωτοανιχνευτές.

Θεωρούμε ένα σύστημα MIMO με κατανομή πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh, και έχει n_T πομπούς και n_R δέκτες. Ο συντελεστής εξασθένησης καναλιού μεταξύ του t -οστού εκπομπού και του r -οστού δέκτη, που συμβολίζεται με $a_{t,r}$, ανήκει στην κατανομή complex normal, $\mathcal{CN}(0, 1)$. Το χωρικά διαμορφωμένο σύμβολο ορίζεται ως $x(i, s)$ όπου το s μεταδίδεται στην i -οστή κεραία. Το λαμβανόμενο σήμα στον r -δέκτη ($r = 1, \dots, n_R$) δίνεται από τον τύπο:

$$y_r = a_{i,r}s + w_r, \quad (31)$$

όπου w_r είναι ο λευκός προσθετικός Gaussian θόρυβος με κατανομή $\mathcal{CN}(0, N_0)$.

Η ανίχνευση στο δέκτη βασίζεται στην αρχή της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood-ML). Ο ανιχνευτής ML αποφασίζει για το διάνυσμα σήματος \hat{x} που ελαχιστοποιεί την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του πραγματικού λαμβανόμενου σήματος y και όλα τα πιθανά λαμβανόμενα σήματα:

$$\hat{x} = \arg \max_x p_y(y|x, H) = \arg \min_x \|y - Hx\|_F^2, \quad (32)$$

όπου p_y είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και H είναι το $n_T \times n_R$ μητρώο.

Οι εντάσεις I_m^{PAM} που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση σήματος εφαρμόζοντας M-PAM, είναι:

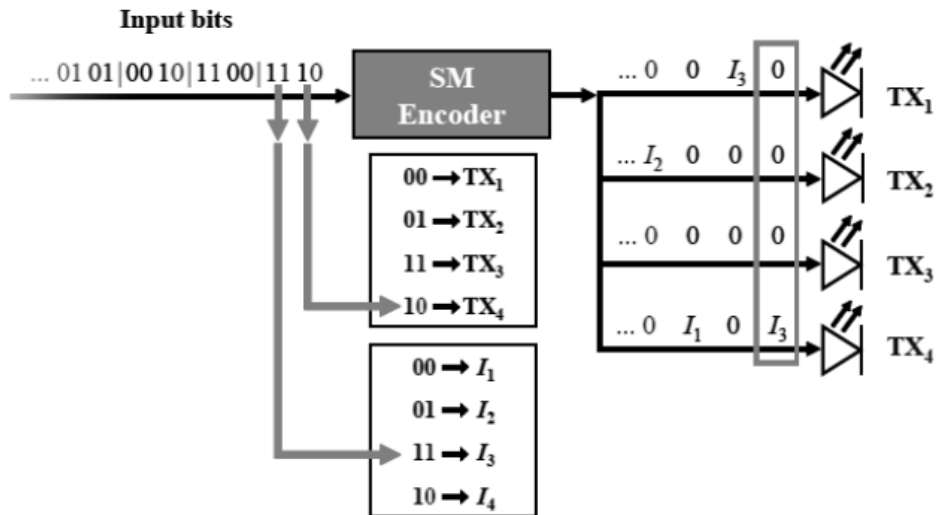
$$I_m^{PAM} = \frac{2I}{M-1}m, \text{ για } m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (33)$$

όπου I είναι η μέση οπτική ισχύς που εκπέμπεται. Επομένως, το M-PAM παρέχει φασματική απόδοση $\log_2 \frac{(M)bit}{s} / Hz$.

Με τη διαμόρφωση SM, η αλληλουχία bit που πρόκειται να μεταδοθεί διέρχεται στον κωδικοποιητή SM. Ο κωδικοποιητής χαρτογραφεί τα bits στο διάνυσμα σήματος x , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 34. Σε κάθε στιγμιότυπο, μόνο ένας εκπομπός ακτινοβολεί οπτική ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι, μόνο ένα στοιχείο του x είναι μη μηδενικό. Αυτό το στοιχείο, αντιστοιχεί στον εκπομπό που είναι ενεργοποιημένος. Με τον τρόπο αυτό, ένα μέρος των δεδομένων διαβιβάζεται. Το άλλο μέρος των δεδομένων μεταφέρεται με συμβατικό τρόπο μέσω του PAM.

Ωστόσο, το κλασικό PAM πρέπει να τροποποιηθεί, καθώς ένα σήμα με $I_m = 0$ δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μεταβίβαση πληροφορίας, αφού σε αυτή την περίπτωση όλα τα στοιχεία του διανύσματος x θα είναι μηδενικά και οι χωρικές πληροφορίες θα χαθούν. Για το λόγο αυτό, οι εντάσεις I_m^{SM} που χρησιμοποιούνται στη χωρική διαμόρφωση, είναι της μορφής:

$$I_m^{SM} = \frac{2I}{M+1}m, \text{ για } m = 1, 2, \dots, M. \quad (34)$$



Εικόνα 34. Απεικόνιση λειτουργίας SM που παρέχει απόδοση 4 bit/s/Hz.

Στο παράδειγμα της Εικόνας 34, τα bits δεδομένων είναι διατεταγμένα σε ομάδες των 4 bits και μεταδίδονται με απόδοση 4 bit/s/Hz. Τα δύο τελευταία bits καθορίζουν το index του εκπομπού και τα δύο πρώτα την ισχύ του σήματος, υποθέτοντας $M = 4$. Η ακολουθία "1011" αντιστοιχεί στη LED 4 που εκπέμπει οπτικό παλμό με ένταση I_3 . Στην πλευρά του δέκτη, ο ανιχνευτής πρέπει να εκτελέσει δύο εργασίες ανίχνευσης: Πρώτον, πρέπει να εκτιμήσει το δείκτη της αντίστοιχης LED που είναι ενεργή και δεύτερον έχει να αποκωδικοποιήσει τις πληροφορίες που έχουν κωδικοποιηθεί στο σήμα από το λαμβανόμενο επίπεδο έντασης.

Μόνον εάν τόσο το index του σήματος και το σημείο αστερισμού του σήματος ανιχνεύονται σωστά, η ακολουθία των bit μπορεί να αποκωδικοποιηθεί χωρίς λάθη. Εφόσον, όμως χρησιμοποιούμε το κριτήριο ML, και οι δύο εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με εφαρμογή της σχέσης 4.12.

5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Li-Fi

5.1 Εισαγωγή

Η έλευση του Wi-Fi έφερε επανάσταση στον κόσμο του Διαδικτύου, καθώς η ασύρματη επικοινωνία άνοιξε έναν τεράστιο ορίζοντα προοπτικών, ειδικά για τις φορητές συσκευές. Ωστόσο, η μετεξέλιξή του ενδέχεται να φέρει ακόμα μεγαλύτερη επανάσταση, καθώς θα ξεφεύγει από τη σφαίρα της «τηλεπικοινωνίας» και θα ενοποιείται με πολύ πιο θεμελιώδεις λειτουργίες της καθημερινής ζωής, όπως αυτή του ηλεκτρικού φωτισμού. Αντί να χρησιμοποιήσουμε ραδιοσυχνότητες για μεταφορά δεδομένων (όπως το Wi-Fi), μία καινοτόμα ιδέα που έχει υλοποιηθεί αλλά βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, είναι η τεχνολογία Li-Fi. Το Li-Fi χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες και έχει σαν φορέα το ορατό φως (VLC). Γλωσσολογικά το Li-Fi προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων “Light Fidelity” που σημαίνουν “Ακρίβεια Φωτός”.

Γενικά ένα φως που τρεμοπαίζει μπορεί να είναι ενοχλητικό, αλλά μπορεί να έχει και ένα πλεονέκτημα. Το ορατό φως επικοινωνίας χρησιμοποιεί γρήγορους παλμούς φωτός για τη μετάδοση πληροφοριών ασύρματα. Επομένως, τώρα μπορεί να ανταγωνιστεί με τα συμβατικά Wi-Fi.

5.1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Το 2011 έγινε η πρώτη παρουσίαση της τεχνολογίας Li-Fi από τον καθηγητή Harald Haas του πανεπιστημίου του Εδιμβούργου. Ο καθηγητής Haas και η ομάδα του, αναπτύσσουν μία τεχνολογία η οποία θα καθιστά εφικτή την παροχή υπηρεσιών ασύρματου Internet μέσω συστημάτων ηλεκτρικού φωτισμού (κοινώς λαμπτήρες). Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα σύστημα ασύρματης δικτύωσης το οποίο μπορεί να αγγίξει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων μέχρι και 130 Mbps, καθώς χρησιμοποιεί φως αντί για ραδιοκύματα, το οποίο εκπέμπεται από LEDs και λαμβάνεται από φωτοευαίσθητους αισθητήρες. Τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω «κωδικοποίησης» της έντασης του φωτός, οι μεταβολές της οποίας είναι τόσο γρήγορες που δεν γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο μάτι.

Επίδειξη της τεχνολογίας έγινε στο πρόσφατο Consumer Electronics Show στο Λας Βέγκας, όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο smartphones τα οποία αντάλασσαν δεδομένα μέσω του φωτός των οθονών τους, σε απόσταση μέχρι δέκα μέτρων. Ο όρος Li-Fi είχε χρησιμοποιηθεί για πρώτη φορά από τον ίδιο τον καθηγητή σε ομιλία του στο TEDGlobal στο Εδιμβούργο το 2011, όπου και έγινε παρουσίαση της τεχνολογίας για πρώτη φορά. Τον Οκτώβριο του ίδιου έτους ιδρύθηκε το Li-Fi consortium, με σκοπό την προώθηση της

συγκεκριμένης τεχνολογίας. Σύμφωνα με κάποιες αισιόδοξες προβλέψεις, οι ταχύτητες μπορούν να φτάσουν ή και να ξεπεράσουν τα 10 Gbps.

Η εφεύρεση του Haas βασίζεται σε ένα υποσύνολο οπτικών τεχνολογιών που θα δούμε και παρακάτω εκτενέστερα, το VLC, δηλαδή επικοινωνία ορατού φωτός. Στην πραγματικότητα αυτό που αξιοποιεί το VLC είναι η αδυναμία του ανθρώπινου οφθαλμού να παρατηρήσει την ασυνέχεια στην εκπομπή φωτός από μία LED. Έτσι η LED αναβοσβήνει μεν, αλλά στον άνθρωπο η πηγή φωτός φαίνεται συνεχής.

5.1.2 Wi-Fi

Ο όρος Wi-Fi (Wireless Fidelity) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στην προδιαγραφή της IEEE. Ωστόσο το Wi-Fi (“ασύρματη πιστότητα”) έχει επικρατήσει και ως όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Η πρώτη έκδοση του Wi-Fi εισήχθη το 1997 και στο φυσικό επίπεδο περιλάμβανε δύο μεθόδους διασποράς φάσματος για τη μετάδοση στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz, η εκπομπή στην οποία δεν απαιτεί άδεια. Η πρώτη μέθοδος λειτουργούσε με διασπορά φάσματος αναπήδησης συχνότητας (Frequency Hopping-FHSS) και υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps, ενώ η δεύτερη λειτουργούσε με διασπορά φάσματος ¹ απευθείας ακολουθίας (Direct Sequence-DSSS) και υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1-2 Mbps.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μετάδοσης πολυπλεξίας με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM), δύο πρότυπα υψηλής ταχύτητας ακολούθησαν το 802.11b τα οποία παρέχουν μέχρι 54 Mbps: το 802.11a εκπέμπει στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz αλλά δεν είναι συμβατό με τις ασύρματες κάρτες δικτύου οι οποίες υποστηρίζουν 802.11b, ενώ το 802.11g εκπέμπει στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz και είναι συμβατό με το 802.11b.

Με τη διάδοση του Wi-Fi κατά τις αρχές της δεκαετίας του 2000 εμφανίστηκε μία νέα μέθοδος πρόσβασης στο Internet: μία ψηφιακή συσκευή με κάρτα ασύρματης δικτύωσης Wi-Fi, μπορεί να συνδεθεί στο Διαδίκτυο όταν βρίσκεται σε ακτίνα κάλυψης ασύρματου δικτύου ήδη συνδεδεμένου στο Internet, το οποίο ονομάζεται *σημείο πρόσβασης* (Access Point).

Για την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω συσκευών που χρησιμοποιούν WiFi χρησιμοποιούνται κεραιές που τα τελευταία χρόνια είναι κατευθυντικές, δηλαδή εκπέμπουν την περισσότερη ισχύ προς μία κατεύθυνση.

Στο Wi-Fi η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ραδιοκυμάτων (RF – Radio Frequency). Η συνήθης αρχιτεκτονική των ασύρματων τοπικών δικτύων περιλαμβάνει

¹Οι μέθοδοι διασποράς φάσματος (Spread Spectrum) αποτελούν τρόπους με τους οποίους η ενέργεια ενός σήματος που καταλαμβάνει κάποιο σχετικά περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων, κατανέμεται εσκεμμένα σε πολύ μεγαλύτερο φασματικό εύρος με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας των τηλεπικοινωνιών, την αποφυγή υποκλοπών και τη μεγαλύτερη αντοχή στα παράσιτα και τις παρεμβολές.

ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης, τα οποία λειτουργούν σε παρόμοια λογική με αυτή των σταθμών βάσης της κινητής τηλεφωνίας. Ένα σημείο πρόσβασης παρέχει την ασύρματη σύνδεση σε όσους κόμβους βρίσκονται εντός μία συγκεκριμένης απόστασης (εμβέλεια) από αυτό. Κόμβος μπορεί να είναι οποιαδήποτε συσκευή διαθέτει κάρτα δικτύου για ασύρματη επικοινωνία, όπως πχ ένας φορητός υπολογιστής ή ακόμα και ένα κινητό τηλέφωνο. Η εμβέλεια που μπορεί να καλύψει ένα σημείο πρόσβασης αλλά και η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ του σημείου πρόσβασης και του κόμβου εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται όσο και από τη μορφολογία της συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής.

5.2 Βασικές Αρχές

5.2.1 Λειτουργία

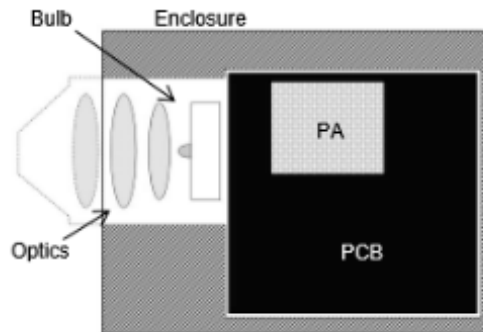
Η τεχνολογία Li-Fi δεν απαιτεί καν τη δημιουργία νέων access points και υποδομών: απλά τη ύπαρξη μίας πηγής φωτός συνδεδεμένης με τα υπάρχοντα δίκτυα παροχής ενέργειας, έτσι ώστε να στηθούν ολόκληρα νέα δίκτυα, χωρίς τον «πονοκέφαλο» των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο Li-Fi, καθορίζονται από το διεθνές πρότυπο IEEE 802.15, που εγκαταστάθηκε το 2011 από την ίδια επιτροπή που εγκατέστησε και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα Ethernet 802.3 και Wi-Fi 802.11.

Σύμφωνα με τον εφευρέτη του, τον Harald Haas, το Li-Fi προσφέρει μια δέσμη εξειδικευμένων εφαρμογών που τα τυπικά Wi-Fi, απλούστατα, δεν μπορούν να προσφέρουν. Η βασική αρχή του Li-Fi είναι η εξής: το ορατό φως έχει 10.000 φορές μεγαλύτερη ευρύτητα φάσματος, από την αντίστοιχη των ραδιοσυχνοτήτων που το Wi-Fi χρησιμοποιεί, επιτρέποντας όμως πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης, όταν αξιοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με το τρεμπάιγμα των λαμπτήρων LED για να δημιουργήσει δυαδικό κωδικό (on = 1 / off = 0), και γίνεται σε υψηλότερες τιμές από ό, τι το ανθρώπινο μάτι μπορεί να ανιχνεύσει. Επομένως, όσο πιο πολλές LED έχει ο λαμπτήρας, τόσο περισσότερα δεδομένα μπορεί να επεξεργαστεί.

Το Li-Fi προσφέρει μια ολοκληρωμένη πηγή φωτός που είναι εύκολο να ενταχθεί σε κάποιον προβολέα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 35, ένα σύστημα βασισμένο σε αυτήν την τεχνολογία αποτελείται από πέντε βασικά μέρη:

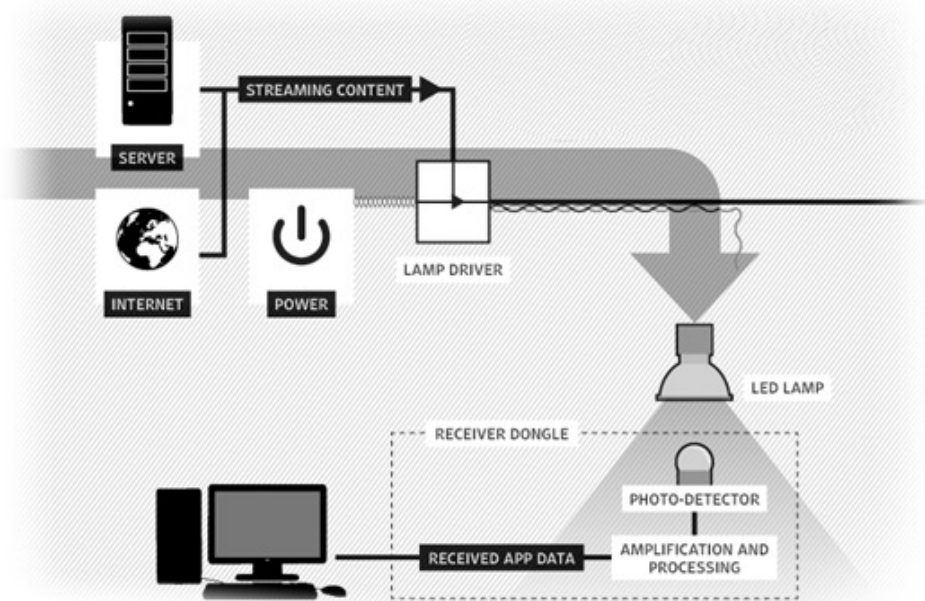
- πλακέτα κυκλώματος (Printed Circuit Board-PCB),
- ενισχυτής ισχύος RF (Power Amplifier-PA),
- ηλεκτρική λυχνία,
- οπτικά στοιχεία και
- περίβλημα (enclosure).



Εικόνα 35. Βασικά μέρη ενός συστήματος βασισμένο στο Li-Fi.

Το κύκλωμα (PCB) ελέγχει την ηλεκτρική είσοδο και έξοδο του λαμπτήρα, και έχει ενσωματωμένο έναν μικροεπεξεργαστή που διαχειρίζεται τις διαφορετικές λειτουργίες του λαμπτήρα. Από τον σταθερής κατάστασης ενισχυτή (PA) παράγεται ένα σήμα ραδιοσυχνότητας (RF) και οδηγείται στο ηλεκτρικό πεδίο της λυχνίας. Η υψηλή συγκέντρωση ενέργειας στο ηλεκτρικό πεδίο της λυχνίας, προκαλεί “εξάτμιση” των στοιχείων της λυχνίας το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την έντονη παραγωγή φωτός. Όλα αυτά τα επιμέρους στοιχεία, περιλαμβάνονται σε ένα περίβλημα αλουμινίου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τέτοιο υλοποιημένο σύστημα.



Εικόνα 36. Μετάδοση Li-Fi.

Ένας εναέριος λαμπτήρας LED, με τεχνολογία επεξεργασίας σημάτων, στέλνει πολύ υψηλές ταχύτητες ενσωματωμένα δεδομένα εντός της εμβέλειάς του, με, που φτάνουν σε έναν φωτοανιχνευτή. Στη συνέχεια ο δέκτης (receiver dongle) μετατρέπει το σήμα που λαμβάνει (μελέτη του πλάτους) σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε δεδομένα προς μετάδοση σε ένα υπολογιστικό σύστημα ή ασύρματη συσκευή.

Όπως καταλαβαίνουμε, είναι απαραίτητο να υπάρχει οπτική επαφή (LOS) για να μπορούν να περνούν τα κύματα φωτός (το οποίο δεν είναι απαραίτητα μειονέκτημα, καθώς δεν υπάρχει η πιθανότητα “υποκλοπής” του ασυρμάτου σήματος από κάποιον “πειρατή”). Επίσης, εν αντιθέσει με τα σημερινά συστήματα, δεν υπάρχει περίπτωση παρεμβολής σε/από άλλα δίκτυα, καθώς δεν τίθεται θέμα ραδιοκυμάτων τα οποία “μπλέκονται” μεταξύ τους.

5.2.1.1 Χρήση LED

Η χρήση των LEDs ως το βασικό στοιχείο αυτής της τεχνολογίας στηρίζεται στην αυξημένη απόδοση ισχύος που εμφανίζουν. Πιο συγκεκριμένα, οι συμβατικοί λαμπτήρες έχουν απόδοση μόλις 2%. Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι μόνο το 2% της ενέργειας που εισέρχεται σε αυτές μετατρέπεται σε ορατό φως, ενώ το υπόλοιπο χάνεται.

Αντίθετα, οι LEDs έχουν αποδόσεις γύρω στο 15% ή παραπάνω. Μάλιστα, το US Department of Energy έχει υπολογίσει ότι αν όλος ο κόσμος πάνω στη γη χρησιμοποιούσε LEDs, ο πλανήτης θα απαιτούσε τουλάχιστον 100 λιγότερους πυρηνικούς σταθμούς.

Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο στις διόδους εκπομπής φωτός όπως αναφέρουμε και πιο πάνω, είναι ότι όντας ηλεκτρονικές συσκευές που στηρίζονται στο πυρίτιο, μπορούν να ανοιγοκλείσουν με μεγάλες ταχύτητες, αντίθετα από τις απλές λυχνίες. Ένας λαμπτήρας φωτοβολεί αυξάνοντας τη θερμοκρασία σε κάποιο καλώδιο. Αυτό, ωστόσο παίρνει πολύ χρόνο ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση δεδομένων σε γρήγορο ρυθμό.

5.2.2 OFDM και MIMO

Από την αρχή της έρευνάς του ο Haas ενθουσιάστηκε με τις ιδιότητες δύο συστημάτων ασύρματης τεχνολογίας: την τεχνολογία MIMO (multiple input-multiple output), η οποία απασχολεί κεραιές στα σημεία πομπού και δέκτη προκειμένου για την βελτίωση του σήματος και την πολυπλεξία ορθογώνιας συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM).

Η τεχνολογία MIMO, είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και το δέκτη για τη βελτίωση των επιδόσεων. Είναι μία από τις πολλές μορφές της τεχνολογίας των έξυπνων κεραιών. Η MIMO τεχνολογία έχει προσελκύσει την προσοχή στις ασύρματες επικοινωνίες, δεδομένου ότι προσφέρει σημαντικές αυξήσεις στα δεδομένα απόδοσης χωρίς να απαιτείται πρόσθετο εύρος ζώνης ή μεταδιδόμενη ισχύ. Το επιτυγχάνει αυτό λόγω της υψηλότερης φασματικής απόδοσης (περισσότερα bits ανά δευτερόλεπτο ανά Hertz) και παράλληλα μειώνει και τις διαλείψεις που δημιουργούνται κατά τη μετάδοση. Για αυτό η τεχνολογία MIMO αποτελεί κύριο θέμα συζήτησης στις ασύρματες επικοινωνίες.

Η διαμόρφωση OFDM είναι μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά το φαινόμενο της πολυδιάθρυσης ειδικότερα στις συχνότητες πάνω των 2GHz. Συγκεκριμένα, αυτή η διαμόρφωση έχει πλεονεκτήματα στη ρυθμοαπόδοση, στη λανθάνουσα κατάσταση, τη φασματική αποδοτικότητα και την προηγμένη υποστήριξη κεραιών κάνοντάς το ικανό να παρέχει την υψηλότερη απόδοση από τις σημερινές ευρείες ασύρματες τεχνολογίες περιοχής. Το OFDM χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην πράξη στο DVB-T και σήμερα χρησιμοποιείται σε όλα τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα (π.χ. WiFi, WiMAX, κινητά 4ης γενιάς, κλπ) αλλά και ενσύρματα συστήματα (π.χ. στο DSL).

Μια αδυναμία του OFDM είναι ο λόγος ισχύος αιχμής προς μέση τιμή, ο οποίος παράγει μεγάλες διακυμάνσεις στο σήμα. Παρόλα αυτά ο Haas κατόρθωσε να μετατρέψει αυτή την αδυναμία σε πλεονέκτημα για τις οπτικές επικοινωνίες, επιτυγχάνοντας την ενδυνάμωση της έντασης ισχύος, ακριβώς μέσα από αυτές τις διακυμάνσεις. Αυτό σήμαινε, ότι μπορούσε να μεταδώσει δεδομένα παράλληλα και μάλιστα με ρυθμούς που περιορίζονταν μόνο από τον αριθμό των LEDs. Αυτή η τεχνική μετάδοσης ονομάζεται OFDM διαμόρφωση χώρου ή SIM-OFDM. Στην πραγματικότητα, γίνεται ανάλυση σε τρεις διαστάσεις, χρόνο, συχνότητα και χώρο, κάτι που δεν έχει κάνει ποτέ κανένας.

Επί της ουσίας, αυτό που κάνει το OFDM είναι ότι μας δίνει τη δυνατότητα να αλλάξουμε την ένταση των εξόδων των LED και στη συνέχεια αυτά τα σήματα να οδηγούνται σε απλούς αποδέκτες.

Τα βασικά σημεία σε αυτό το σύστημα είναι τα εξής δύο:

- Είναι πολύ γρήγορο. Μπορούμε να επιτύχουμε ρυθμούς δεδομένων 100 Mbps. Αντίθετα, ένα ασύρματο LAN (Local Area Network) έχει ρυθμούς μέχρι 50 Mbps.
- Ο ρυθμός μετάδοσης είναι τόσο γρήγορος που το ανθρώπινο μάτι δε μπορεί να το διακρίνει. Οι LEDs αλλάζουν τόσο γρήγορα που δε μπορεί κανείς να δει ότι στην πραγματικότητα αναβοσβήνει.

5.2.3 Επικοινωνία Ορατού Φωτός (VLC)

Με την εμπορική εκμετάλλευση του Li-Fi ασχολείται η PureVLC, μία εταιρεία η οποία στήθηκε μέσα στο 2012 ειδικά για αυτό τον σκοπό. Αυτή τη στιγμή, η εταιρεία αναπτύσσει ένα κιτ “έξυπνου φωτισμού”, το οποίο θα καθιστά δυνατή τη μετάδοση και λήψη δεδομένων από πηγές φωτισμού, φτάνοντας ταχύτητες 15 - 50Mbps.

Η τεχνολογία ορατού φωτός (Visible Light Communication-VLC) χρησιμοποιεί LEDs για τον διπλό ρόλο της εκπομπής φωτός και της μεταφοράς δεδομένων. Χρησιμοποιεί το φάσμα ορατού φωτός, το οποίο είναι δωρεάν και με λιγότερο συνωστισμό σε σχέση με άλλες συχνότητες.

Πειράματα έχουν δείξει ότι η πυκνότητα δεδομένων που επιτυγχάνεται με μία υλοποίηση VLC είναι $0.41 \text{ bits/s/Hz/m}^2$, ενώ σε ασύρματα ραδιοσυστήματα ο

αντίστοιχος ρυθμός είναι $4 \times 10^{-4} \text{ bits/s/Hz/m}^2$. Επομένως, η τεχνολογία VLC είναι τρεις φορές καλύτερη όσον αφορά σε πυκνότητα δεδομένων, σε σχέση με τα RF συστήματα.

5.3 Χαρακτηριστικά

5.3.1 Πλεονεκτήματα της Τεχνολογίας Li-Fi

Κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι οι πολύ υψηλές ταχύτητες εκπομπής που επιτυγχάνονται (πρόκειται για ταχύτητες φωτός). Επιπλέον, βασικό χαρακτηριστικό είναι η ασφάλειά του ακόμα και σε “ευαίσθητους” σε ραδιοκύματα χώρους, όπως για παράδειγμα το εσωτερικό αεροσκαφών, καθώς δεν προκαλεί παρεμβολές.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα, η ιατρική τεχνολογία έχει μείνει πίσω από τον υπόλοιπο ασύρματο κόσμο. Στα χειρουργεία δεν επιτρέπονται τα Wi-Fi λόγω ανησυχιών ως προς την επίπτωση της ακτινοβολίας. Ενώ Wi-Fi είναι εγκατεστημένο σε πολλά νοσοκομεία, παρεμβολές από κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές μπορούν να μπλοκάρουν τα σήματα από τον εξοπλισμό παρακολούθησης (των μηχανημάτων παρακολούθησης των ασθενών). Το Li-Fi λύνει και τα δύο προβλήματα: τα φώτα όχι μόνον επιτρέπονται στα χειρουργεία, αλλά τείνουν να είναι και τα πιο κραυγαλέα φωτιστικά σε ένα δωμάτιο. Και, όπως αναφέρει ο καθηγητής Haas, το Li-Fi έχει 10.000 φορές μεγαλύτερο φάσμα από το φάσμα ενός Wi-Fi², οπότε ίσως μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε, προκειμένου να δοθεί προτεραιότητα στα ιατρικά δεδομένα.

Εκτός των άλλων, είναι μία τεχνολογία που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υποβρυχίως, χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, αφού το αλάτι της θάλασσας άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για την χρήση του σε αεροσκάφη, καθώς και πάλι δεν προκαλούνται παρεμβολές στους ραδιοεπικοινωνίες.

Η μετάδοση μέσω της τεχνολογίας Li-Fi, ακριβώς επειδή επιβάλλει την οπτική επαφή (LOS), παρεμποδίζεται από εμπόδια ή τοίχους. Αυτό την καθιστά άκρως ασφαλής για τη μετάδοση της πληροφορίας και αποτρέπει τη διαρροή δεδομένων.

Η χρήση του μπορεί να έχει άπειρες εφαρμογές, σε νοσοκομεία, μουσεία, ακόμα και σε φανάρια για έλεγχο της κυκλοφορίας, ακόμα και σε βιτρίνες καταστημάτων, αεροπλάνα και σε οποιοδήποτε άλλο χώρο. Στην πραγματικότητα μιλάμε για την κατασκευή/ύπαρξη ενός ασύρματου δικτύου από τους λαμπτήρες μίας πόλης.

Επιπλέον, η μόνη υποδομή που απαιτείται, είναι ο εξοπλισμός μίας λυχνίας. Ο πάροχος του διαδικτύου δεν χρειάζεται να εγκαταστήσει κάποιο modem, αλλά στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας τοποθετείται σήμα ρελέ και μπορεί να επιτευχθεί σύνδεση.

²Το ορατό φως έχει εύρος φάσματος 10.000 φορές μεγαλύτερο του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιεί το Wi-Fi. Εκτός των άλλων, οι ζώνες αυτές δεν απαιτούν αδειοδότηση και επομένως είναι πολύ φθηνότερο από το Wi-Fi.

Παρακάτω φαίνονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Li-Fi που την ξεχωρίζουν από τις προηγούμενες:

- ευκολία χρήσης
- υψηλή ασφάλεια
- μετάδοση δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες
- αξιοπιστία
- μηδενικός κίνδυνος
- χαμηλό κόστος.

Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας είναι τα εξής:

- χρησιμοποιεί τα φωτόνια ως μέσο για τη μετάδοση των σημάτων
- προτιμώμενες πηγές φωτός είναι οι λαμπτήρες φθορισμού και οι LEDs
- οι φωτοδιόδοι χρησιμοποιούνται σαν αποδέκτες και μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα
- κάθε πηγή φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέσο μετάδοσης στο VLC

5.3.2 Σύγκριση με Άλλες Τεχνολογίες

Οι δίοδοι εκπομπής φωτός διαφέρουν από τις άλλες κατηγορίες πηγών φωτός καθώς είναι ημιαγωγοί. Αυτό το χαρακτηριστικό τους δίνει, όπως είπαμε, τη δυνατότητα να αναβοσβήνουν μέσα σε nanoseconds ή δισεκατομμυριοστά του λεπτού. Σε μορφή ρυθμού δεδομένων αυτό αντιστοιχεί σε 1 Gbps. Αντίθετα, το Wi-Fi στην καλύτερη περίπτωση να φτάσει στα 100 Mbps.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ του Li-Fi και άλλων τεχνολογιών μετάδοσης.

	Wi-Fi	VLC
Ταχύτητα	***	***
Εύρος	**	*
Διαθέσιμη Ισχύς	*	***
Ασφάλεια	**	***
Πυκνότητα Δεδομένων	*	***
Λειτουργία NLOS	**	*
T_x/R_x Ισχύς	**	***
Κόστος	***	**

Πίνακας 9. Σύγκριση Li-Fi με Wi-Fi.

Τεχνολογία	Ταχύτητα	Πυκνότητα Δεδομένων
Ενσύρματες		
FIRE WIRE	800 <i>Mbps</i>	*****
USB3.0	5 <i>Gbps</i>	*****
THUNDERBOLT	2 × 10 <i>Gbps</i>	*****
Ασύρματες (τώρα)		
WIFI IEEE 802.11N	150 <i>Mbps</i>	*
BLUETOOTH	3 <i>Mbps</i>	*
IrDA	4 <i>Mbps</i>	***
Ασύρματες (μέλλον)		
Wi-Gig	2 <i>Gbps</i>	**
Giga-IR	1 <i>Gbps</i>	***
Li-Fi	> 10 <i>Gbps</i>	*****

Πίνακας 10. Συγκριτικός πίνακας Li-Fi με άλλες τεχνολογίες.

Το Li-Fi ομολογουμένως μοιάζει ικανό να αλλάξει δραματικά τα δεδομένα στο χώρο των τηλεπικοινωνιών σχεδόν σε κάθε τομέα- άλλωστε, η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων μέσω του φωτός υπάρχει εδώ και δεκαετίες (η εμπορική της εκμετάλλευση ήταν μάλλον θέμα εξέλιξης της σχετικής τεχνολογίας και εύρεσης του κατάλληλου επιχειρηματικού μοντέλου). Ακόμα και αν το θέμα της ανάγκης οπτικής επαφής ενδεχομένως να δημιουργεί προβληματισμούς, οι εν δυνάμει εφαρμογές φαντάζουν άπειρες, καθώς αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων και σταθμών εδάφους, υποβρυχίων και γενικότερα υποκαθιστώντας τα ραδιοκύματα σε «δύσκολα» περιβάλλοντα.

5.4 Εφαρμογές και Μελλοντικές Προκλήσεις

Παρόλο που η τεχνολογία Li-Fi είναι ακόμα σε πολύ αρχικά στάδια, ήδη βρίσκει εφαρμογές σε πολλά πεδία και μάλιστα προβλέπεται ακόμα μεγαλύτερη χρήση για κάλυψη των αναγκών της σύγχρονης καθημερινότητας.

Μία καινοτόμα εφαρμογή που μελετάται είναι η “Ενημέρωση κυκλοφορίας”. Φανταστείτε ένα αυτοκίνητο με ενσωματωμένο σύστημα περιήγησης (GPS), το οποίο να λαμβάνει δεδομένα από τα φωτεινούς σηματοδότες των οδών, έτσι ώστε είτε να ενημερώνει για τυχόντα ατυχήματα, είτε ενδεχόμενες καθυστερήσεις στη ροή της κυκλοφορίας.

Μία άλλη ιδέα, επίσης, είναι η τοποθέτηση αισθητήρων σε μία τηλεόραση με σκοπό την αποδοχή πληροφοριών από κονσόλες βιντεοπαιχνιδιών. Ένα τέτοιο σύστημα, επιτρέπει την τοποθέτηση της μονάδας οπουδήποτε μέσα στο χώρο των αισθητήρων (εντός LOS) και

προφανώς προσφέρει μεγάλη εξυπηρέτηση καθώς το σύστημα είναι ασύρματο (εκτός από την τροφοδοσία της μονάδας).

Η αλληλεπίδραση του χρήστη με την τηλεόραση είναι ακόμα μία προσοδοφόρα μελλοντική εφαρμογή. Έχοντας ανοιχτή την τηλεόραση, με το σύστημα Li-Fi μπορεί από το εκπεμπόμενο φως να επικοινωνήσει με ένα κινητό τηλέφωνο και αμέσως να βρει οποιαδήποτε πληροφορία μας ενδιαφέρει για το πρόγραμμα που παρακολουθούμε.

Ένας σημαντικός λόγος υπέρ της νέας αυτής τεχνολογίας είναι το κόστος. Αντί να χρησιμοποιήσουμε καλώδια, μπορούμε να εδραιώσουμε μία σύνδεση απλά με μία LED. Χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα σημείο-προς-σημείο, ακόμα και δύο συσκευές σε διαφορετικά κτίρια μπορούν να επικοινωνήσουν χωρίς καλωδίωση. Προφανώς, θα πρέπει να μην υπάρχουν εμπόδια μεταξύ των κτιρίων, όπως στέρεα αντικείμενα, ή κακές καιρικές συνθήκες (ομίχλη, χιόνι).

6. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ MATLAB

6.1 Τι είναι Matlab

Το MATLAB είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστών για ανθρώπους που χρησιμοποιούν αριθμητικούς υπολογισμούς, ειδικά στη γραμμική άλγεβρα (πίνακες). Ξεκίνησε ως ένα πρόγραμμα "Εργαστηρίου Πινάκων" ("MATrixLABoratory") που είχε σκοπό να παρέχει αλληλεπιδρώσα προσπέλαση στις βιβλιοθήκες Linpack και Eispack. Από τότε έχει αναπτυχθεί αρκετά, για να γίνει ένα ισχυρότατο εργαλείο στην οπτικοποίηση, στον προγραμματισμό, στην έρευνα, στην επιστήμη των μηχανικών, και στις επικοινωνίες. Συμπεριλαμβάνονται μοντέρνοι αλγόριθμοι, με δυνατότητες χειρισμού τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, και ισχυρά προγραμματιστικά εργαλεία. Το Matlab δεν είναι σχεδιασμένο για συμβολικούς υπολογισμούς, αλλά αντισταθμίζει αυτή την αδυναμία του επιτρέποντας στο χρήστη να συνδέεται άμεσα με το Maple. Η επιφάνεια αλληλεπίδρασης βασίζεται κυρίως σε κείμενο, γεγονός που μπορεί να συγχύσει μερικούς χρήστες. Το Matlab έρχεται ως πακέτο του βασικού προγράμματος, με πολλές "εργαλειοθήκες", που πωλούνται ξεχωριστά.. Η τρέχουσα έκδοση (Released 5 Sep 2013) είναι το R2013b (Version 8.2)

6.1.2 Πως λειτουργεί

Το Matlab δουλεύει εκτελώντας τις μαθηματικές εντολές που εισάγουμε στο παράθυρο εντολών. Η προκαθορισμένη επιλογή είναι, κάθε έξοδος να τυπώνεται απευθείας στο παράθυρο. Ακόμα, μας επιτρέπεται να εκχωρούμε ένα όνομα σε μία έκφραση για δική μας ευκολία. Ξέρουμε ότι το όνομα που εκχωρούμε είναι μόνο ένα όνομα, και δεν αναπαριστά καμία μαθηματική μεταβλητή (όπως θα έκανε στο Maple, για παράδειγμα). Κάθε όνομα πρέπει να έχει μία τιμή κάθε στιγμή. Αν προσπαθήσουμε να διαβάσουμε την τιμή ενός μη προσδιορισμένου ονόματος, θα πάρουμε μήνυμα λάθους. Σχεδόν τα πάντα στο Matlab είναι πίνακες, είτε μοιάζουν με τέτοιους είτε όχι. Αυτό μπορεί να μας πάρει λίγο μέχρι να το συνηθίσουμε.

6.1.3 Graphical User Interface

Θα περιγράψουμε συνοπτικά την δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος(Graphical User Interface-GUI).

Το GUI αποτελείται συνήθως από διάφορα παράθυρα τα οποία περιέχουν διάφορα στοιχεία ελέγχου όπως μενού, πεδία κειμένου, γραμμές κύλισης, κουμπιά, πλαίσια, κ.α. Τα παράθυρα αυτά είναι δυνατόν να καλούν το ένα το άλλο, να δέχονται δεδομένα από τον χρήστη, να μεταβιβάζουν τα δεδομένα από το ένα παράθυρο στο άλλο και γενικά να εκτελούν διάφορες λειτουργίες. Το Guide για να το πετύχει αυτό δημιουργεί για κάθε παράθυρο δύο αρχεία. Τα αρχεία αυτά είναι το FIG – αρχείο και το m – αρχείο.

1. Το FIG – αρχείο, ουσιαστικά είναι το παράθυρο (figure), όπου το Matlab αποθηκεύει τα στοιχεία ελέγχου και την ακριβή τους θέση. Εδώ ο προγραμματιστής σχεδιάζει την εμφάνιση του παραθύρου.

2. Το m – αρχείο, όπου ο προγραμματιστής πρέπει να γράψει τον κώδικα που θα ενσωματωθεί στα στοιχεία ελέγχου (π.χ. κουμπιά ή φόρμες εισαγωγής δεδομένων), ώστε αυτά να εκτελέσουν τις επιθυμητές λειτουργίες.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι κάθε αρχείο *.fig πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο αρχείο *.m , (με το ίδιο όνομα). Αν χαθεί ή καταστραφεί το *.m αρχείο, τότε το παράθυρο *.fig δεν θα είναι λειτουργικό. Κάθε φορά που κάποιος χρήστης δημιουργεί ένα νέο παράθυρο (figure), το Guide δημιουργεί αυτομάτως και τους δύο προαναφερθέντες τύπους αρχείων. Η εκκίνηση του Guide γίνεται εύκολα με δύο τρόπους.

- Πρώτον, με την κλήση της ομώνυμης συνάρτησης από τη γραμμή εντολών του Matlab. > guide
- Δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή File->New->GUI.

6.1.4 Η μαθηματική βάση του Li-Fi/VLC

Σε αυτή την εργασία, περιγράφεται ένα ασύρματο οπτικό σύστημα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί LED λευκού φωτός. Στη προσομοίωση του συστήματος φαίνεται ένα πολύ αξιόπιστο κανάλι επικοινωνίας.

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους φωτισμού, οι LED λευκού φωτός έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- χαμηλότερη κατανάλωσης ενέργειας και
- μεγάλη διάρκεια ζωής.

Τα συστήματα εσωτερικού φωτισμού με αυτές τις LED, προβλέπεται να γίνουν η κυρίαρχη μέθοδος για το φωτισμό εσωτερικών χώρων μέσα στην επόμενη δεκαετία. Όπως γνωρίζουμε, οι LEDs δεν χρησιμοποιούνται μόνο για φωτισμό, αλλά και για μετάδοση δεδομένων.

1. Εκπομπός

Θεωρούμε ότι η LED έχει ακτινοβολία με ένταση στη Lambertian κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι εκπέμπει το φως προς όλες τις κατευθύνσεις. Κατά συνέπεια πολύ λίγο από το συνολικό φως πηγαίνει προς την απαιτούμενη κατεύθυνση για να μεταδοθεί.

$$R_o(\varphi) = [(m + 1)/2\pi]\cos^m(\varphi) \quad (1)$$

όπου m είναι η τάξη της Lambertian εκπομπής, και σχετίζεται με $\phi_1 / 2$, και η ημι-γωνία του πομπού(μισή ισχύ) ως $m = -\ln 2 / \ln (\cos \phi_1 / 2)$. Η ισχύς που εκπέμπεται από τη LED είναι PLED, και φ και ψ είναι η ακτινοβολία και οι γωνίες πρόσπτωσης. Η εκπεμπόμενη ισχύς είναι $P_{tx} = P_{LED} * R_o(\varphi)$.

2. Κανάλι

Η διάδοση της φωτεινής ακτινοβολίας από τη LED στο δέκτη γίνεται μέσω δύο κύριων μονοπατιών-καναλιών:

- οπτική επαφή (LOS)
- και τα διάχυτα(diffused) κανάλια.

Στην ενότητα αυτή θα συζητηθούν, και οι δύο παραπάνω τύποι καναλιού.

1) Ενόσ LOS καναλιού: Η απολαβή DC μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη μόνο την απευθείας διαδρομή LOS.

Η παρακάτω συνάρτηση δείχνει το κανάλι μεταφοράς:

$$H(0)_{LOS} = \begin{cases} \frac{A_{rx}}{d^2} R_o(\varphi)\cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

Όπου A_{rx} είναι η περιοχή ανίχνευσης, d είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, $R_o(\varphi)$ είναι η ένταση ακτινοβολίας του πομπού και δίνεται από σχέση 1, ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης, ψ_c είναι το FOV της φωτοδιόδου. Η συνολική ισχύς της LED στην απευθείας διαδρομή (Σχήμα ??) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{rx, LOS} = \sum_{i=1}^{L_{LEDs}} P_{tx} H^2_{LOS}(0) \quad (3)$$

2)Κανάλι μετάδοσης: Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται ένα ολοκληρωμένο σφαιρικό μοντέλο για το οπτικό ασύρματο σήμα μετάδοσης το οποίο είχε παρουσιασθεί στο [7]:

Η σκέδαση ή διάχυση (diffuse scattering) συμβαίνει όταν ένα σήμα προσκρούει είτε σε μια μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του μήκους κύματος ή μικρότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις.

Σε ένα δωμάτιο η πρώτη μεταδιδόμενη ανάκλαση, σε όλη την επιφάνεια του δωματίου Aroom, γίνεται μέσω ενός πομπού που εκπέμπει με ένταση I1 η ποία υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{1=\rho_1 \frac{P_{TotalLED}}{A_{room}}} \quad (4)$$

όπου ρ_1 είναι η ανακλασιμότητα της επιφάνειας και PtotalLed η συνολική ενέργεια όλων των LED.

Η μέση ανακλασιμότητα $\langle \rho \rangle$ ορίζεται ως:

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{A_{room}} \sum_i A_i \rho_i \quad (5)$$

όπου οι επιμέρους ανακλασιμότητες $\langle \rho \rangle$ των τοίχων, των παραθύρων και άλλων αντικειμένων που βρίσκονται στο δωμάτιο εξαρτώνται από τις επιμέρους επιφάνειες A_i .

Για το λόγο αυτό, η συνολική ένταση δίνεται από την πρόσθεση γεωμετρικών σειρών:

$$I = I_1 \sum_{j=1}^{\infty} \langle \rho \rangle^{j-1} = \frac{I_1}{1-\langle \rho \rangle} \quad (6)$$

όπου j είναι ο αριθμός των ανακλάσεων.

Θεωρούμε ότι ο δέκτης είναι ένα μικρό τμήμα της επιφάνειας του δωματίου. Έτσι η λαμβανόμενη ενέργεια P_{diff} από τη μετάδοση στο σημείο υποδοχής A_{rx} είναι

$$P_{diff} = A_{rx} I \quad (7)$$

Ως εκ τούτου η απώλεια του καναλιού ισούται με:

$$\eta_{diff} = \frac{P_{diff}}{P_{totalLED}} = \frac{A_{rx}}{A_{room}} \frac{\rho_1}{1-\langle \rho \rangle} \quad (8)$$

3. Προϋπολογισμός λαμβανόμενης ενέργειας

Στο δέκτη, το φως περνά μέσα από το οπτικό φίλτρο και το συγκεντρωτή, έτσι ώστε η λαμβανόμενη ενέργεια είναι

$$P_{rx} = (P_{LOS} + P_{diff}) * T_f(\psi) * g(\psi) \quad (9)$$

όπου $T_f(\psi)$ είναι ο συντελεστής μετάδοσης του οπτικού φίλτρου και $g(\psi)$ είναι η απολαβή (gain) του συγκεντρωτή.

Η φωτοδίοδος μετατρέπει τη λαμβανόμενη οπτική ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα, και το ρεύμα εξόδου είναι:

$$i = P_{rx} * R \quad (10)$$

όπου R είναι η απόκριση της φωτοδίοδου (A/W).

Το SNR δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$SNR = \frac{(R P_{rx})^2}{\sigma_{total}^2} \quad (11)$$

Όπου σ_{total}^2 είναι η συνολική διακύμανση θορύβου η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2 \quad (12)$$

όπου η στιγμιαία (shot) διακύμανση θορύβου υπολογίζεται από:

$$\sigma_{shot}^2 = 2qR(P_{rx} + P_n)B_n \quad (13)$$

Όπου B_n είναι ο θόρυβος του εύρους ζώνης και P_n είναι η ισχύς θορύβου από το φως του περιβάλλοντος. $B_n = I_2 R_b$, όπου R_b είναι ο ρυθμός δεδομένων και το I_2 είναι ο παράγοντας θορύβου-εύρους ζώνης [6].

Η διακύμανση του θορύβου ενισχυτή δίνεται από:

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (14)$$

όπου B_a είναι το εύρος ζώνης του ενισχυτή. Ο συνολικός θόρυβος επομένως είναι:

$$\sigma_{total}^2 = 2qR(P_r + P_n)I_2R_b + i_{amplifier}^2 B_a \quad (15)$$

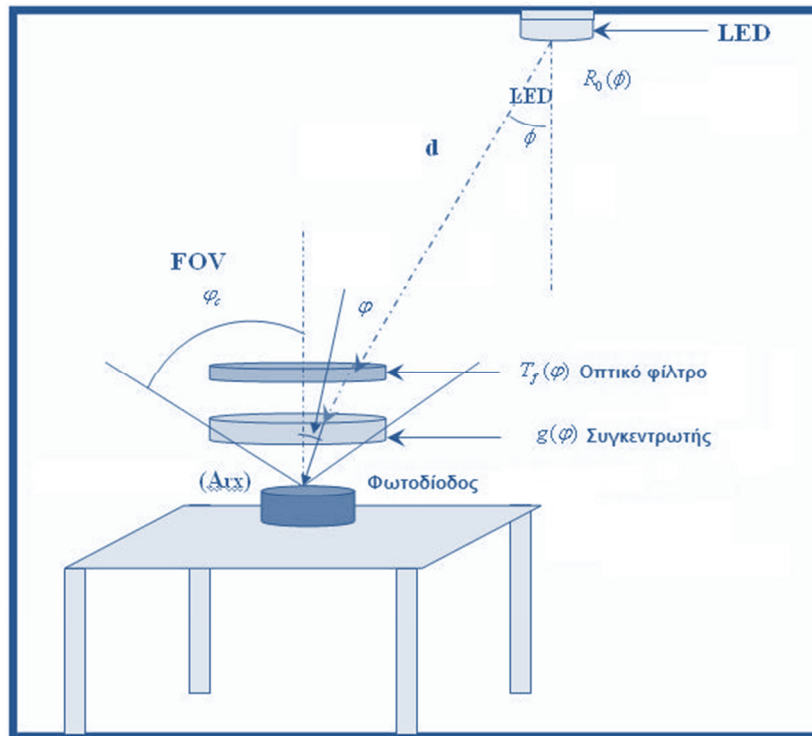
Το BER υπολογίζεται ως:

$$BER = Q(\sqrt{SNR}) \quad (16)$$

όπου το $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy$

6.1.5 Υλοποίηση εφαρμογής Li-Fi/VLC

Η προσομοίωση του συστήματος VLC/Li-Fi, αφορά μια υλοποίηση με τη χρήση του λογισμικού πακέτου MATLAB. Εξετάζεται η περίπτωση ενός πομπού τύπου LED και ενός αντιστοίχου δεκτή και η απόκριση του συστήματος στον δεκτή.



Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου που προσομοιώθηκε

Η βασική ιδέα στηρίζεται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών στοιχείων της φωτοδιόδου λήψης ανάλογα με την διαφορά στην γωνία που σχηματίζουν η θέση του πομπού και του δεκτή.

Για τον σκοπό αυτό δημιουργείται μια κυλιόμενη ράβδος (slider) που αναπαριστά τις διαφορές γωνίες ήμισεις ισχύος προσπίπτουσας και λαμβανομένης φωτεινής ακτινοβολίας και τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε κάθε γωνία. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος είναι :

Μέγεθος δωματίου	5m*5m*3m
LED που χρησιμοποιούνται	1 τεμάχιο
Ανακλαστικότητα πατώματος	0,15
Ανακλαστικότητα οροφής	0,8
Ανακλαστικότητα τοιχού	0,7
Απόσταση πομπού-δεκτή	1.5 m
Ρυθμός μετάδοσης	115,2Kbps
Παράγοντας θορύβου του B.W.(I ₂)	0.562

- Με αυτές τις εισόδους καλείται η συνάρτηση **strength_of_light.m** με την οποία υπολογίζουμε την ισχύ στη φωτοδίοδο του δεκτή σε σχέση με το μήκος και το πλάτος της ενεργούς του επιφάνειας. Ο υπολογισμός της ισχύος και του σηματοθορυβικού λόγου υλοποιείται σε λογαριθμική κλίμακα . Είναι αυτονόητο ότι υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων των χαρακτηριστικών του προσομοιωτή από τον χρήστη, προσαρμόζοντας τις στις ανάγκες του, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις.
- Η επομένη συνάρτηση **design_circle.m** χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό του διαγράμματος της φωτεινής κάλυψης του συστήματος σε σχέση με το μήκος και το πλάτος της ενεργούς επιφάνειας του LED. Δέχεται σαν ορίσματα ένα σημείο για το κέντρο του κύκλου , την ακτίνα καθώς και το σύμβολο σχεδιασμού που επιθυμεί ο χρήστης.
- Το κυρίως πρόγραμμα που καλεί τις συναρτήσεις είναι το **lifi_vlc.m** . Το αρχείο αυτή περιέχει και ένα πλήθος τοπικών συναρτήσεων για τον χειρισμό του GUI καθώς και τα χαρακτηριστικά της επεξεργασίας των οπτικών σημάτων από την σκοπιά του ανάλυσης του σήματος.

Συγκεκριμένα , ορίζεται ο χρόνος της προσομοίωσης (t = 0:0.01:4;) και η μορφή του σήματος εισόδου

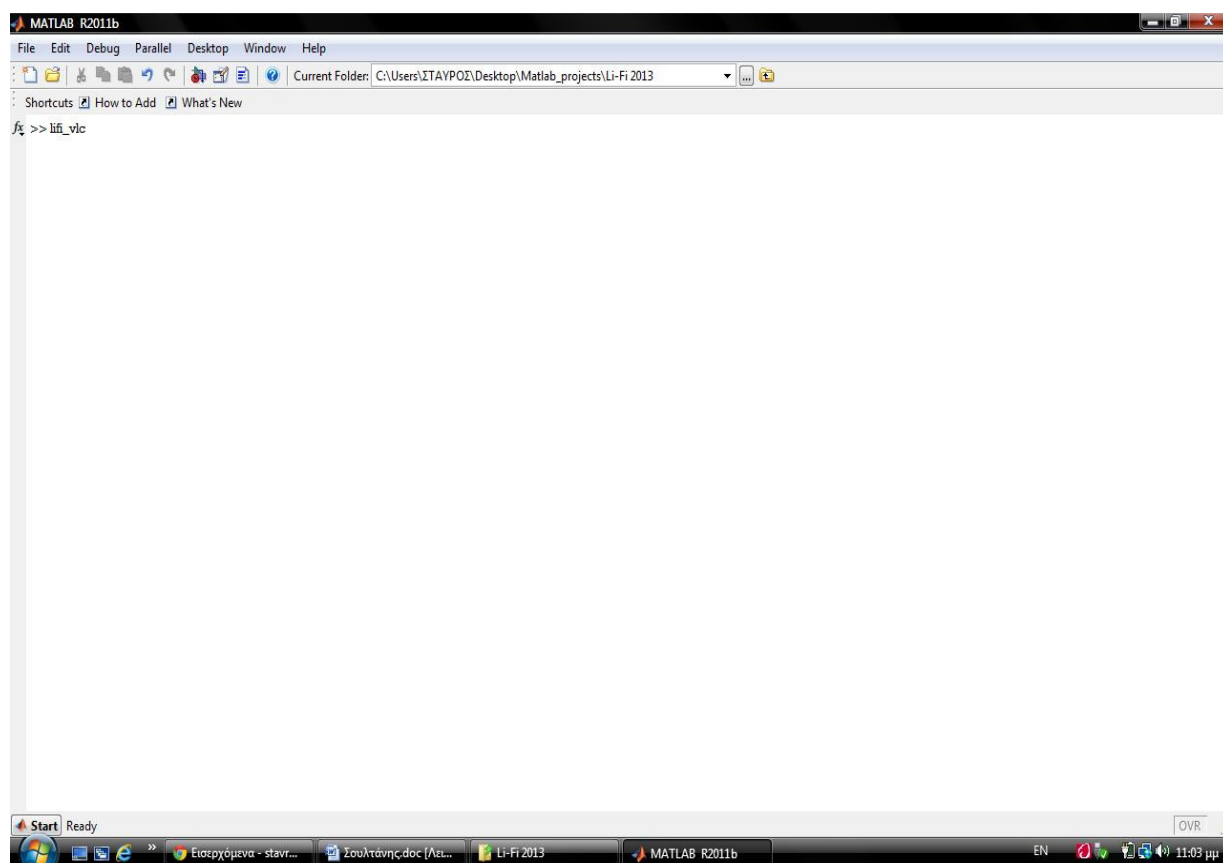
$$x(t) = [-3/3*0.2 -2/3*0.2 -1/3*0.2 -0.2*0.2 \ 0 \ 0.2*0.2 \ 0.2*1/3 \ 0.2*2/3 \ 0.2*3/3];$$

Γίνετε ο υπολογισμός της εξόδου $y(t)$ στο πεδίο του χρόνου και $Y(w)$ στο πεδίο της συχνότητας, με σκοπό να παραχθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Μαζί με το αρχείο που περιέχει τον κώδικα δημιουργείται και ένα ομώνυμο αρχείο **lifi_vlc.fig** (μορφής figure) για την δημιουργία ενός γραφικού περιβάλλοντος.

Το σύνολο των συναρτήσεων και του κώδικα υλοποίησης παρατίθεται στο παράρτημα

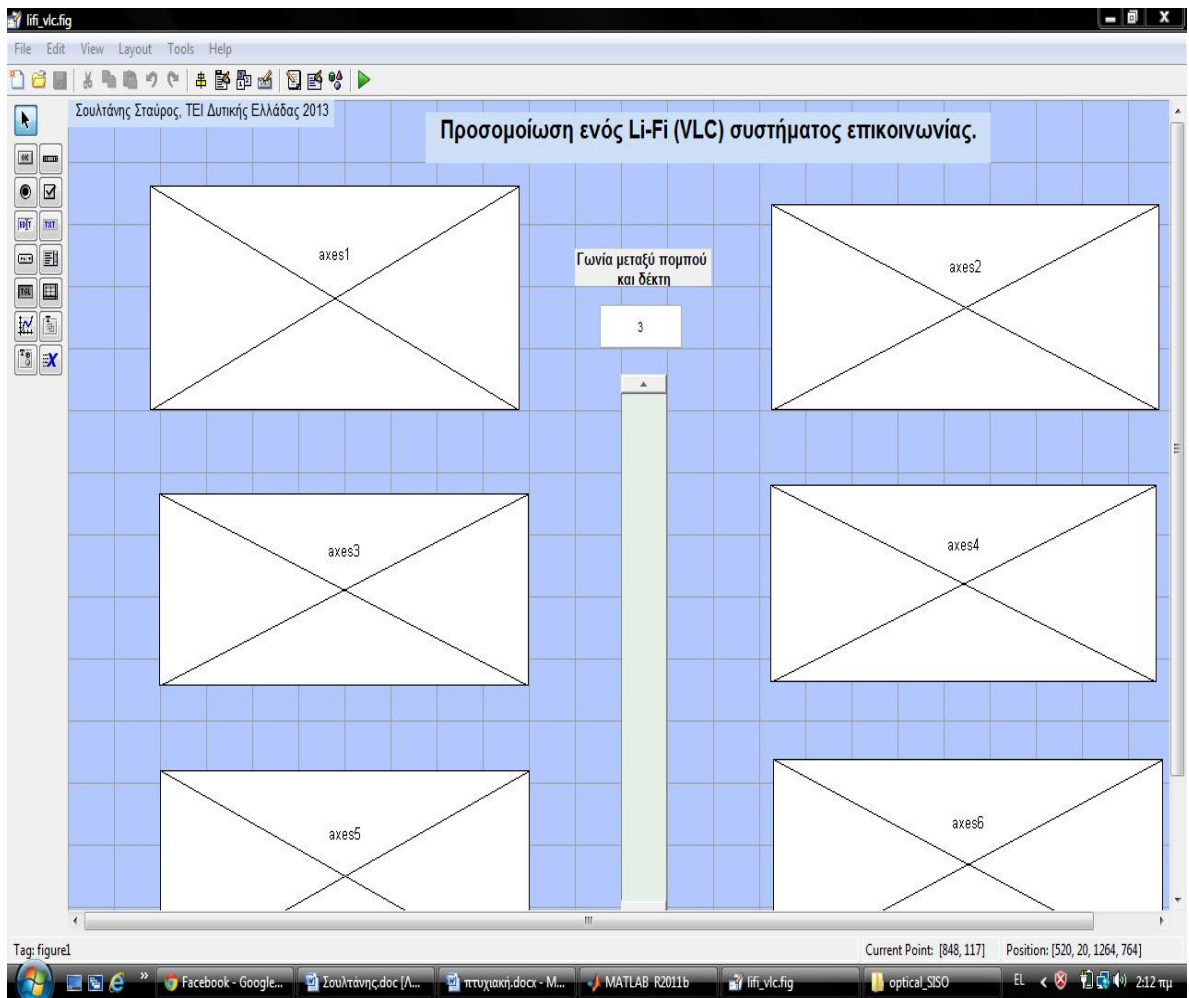
6.1.6 Λεπτομέρειες χρήσης

Για να μπορέσουμε να κάνουμε χρήση του προσομοιωτή είναι απαραίτητο να έχουμε κάνει εγκατάσταση του προγράμματος Matlab στον υπολογιστή μας. Στη συνέχεια τοποθετούμε τα m file σε έναν φάκελο της επιλογής μας C:\Users\...\...\Li-Fi 2013. Αφού ανοίξουμε το περιβάλλον του MATLAB στη γραμμή εντολών, δίνουμε την εντολή **lifi_vlc** (Εικόνα 37). Έτσι ενεργοποιείται η προσομοίωση και εμφανίζονται σε αναδυόμενο αρχείο τα διαγράμματα αποτελεσμάτων του προσομοιωτή καθώς και η κυλιόμενη ράβδος τοποθετημένα αρχικά σε μηδενική κατάσταση. (Εικόνα 39)



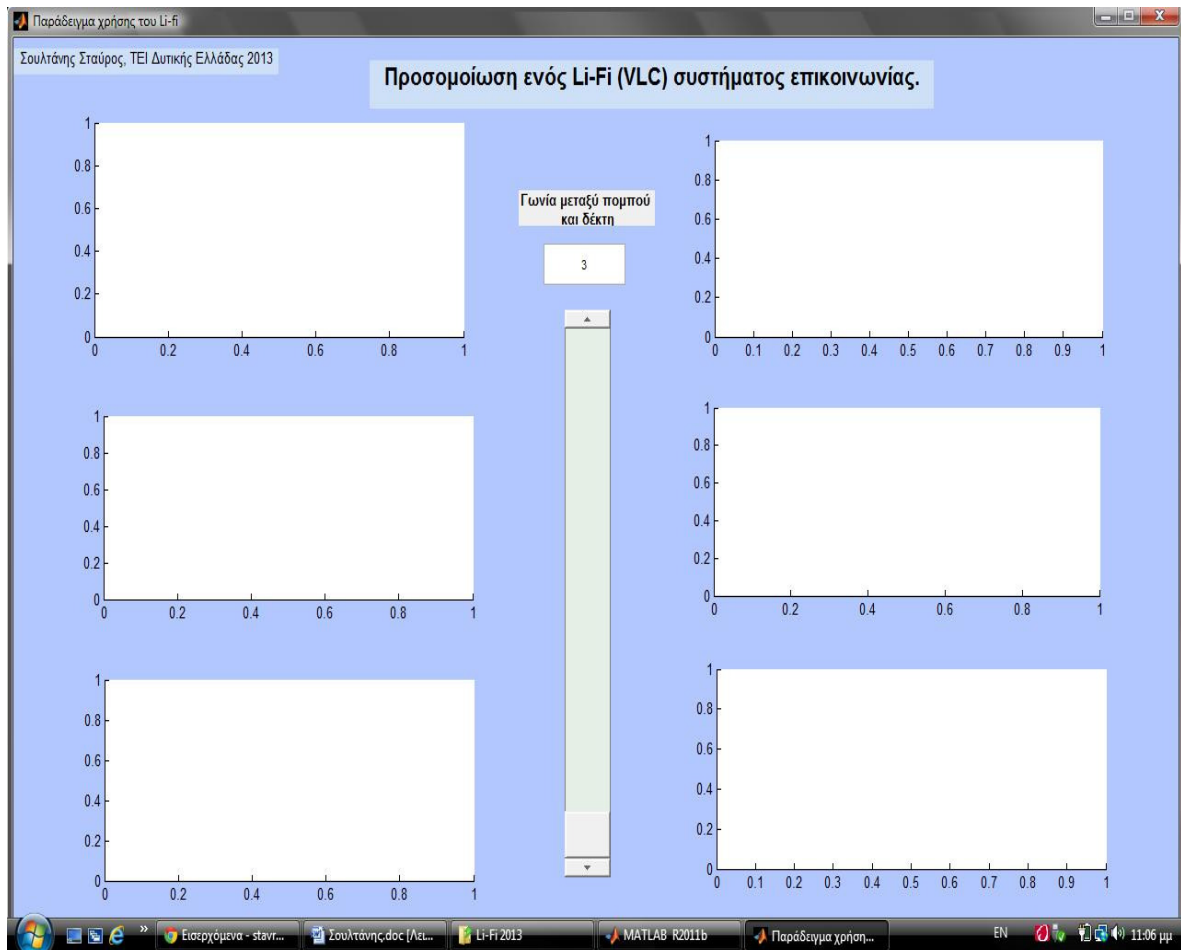
Εικόνα 37. Περιβάλλον Matlab

Το γραφικό περιβάλλον – Graphical User Interface (GUI) δημιουργήθηκε μέσα από τον οδηγό GUIDE που παρέχει το MATLAB για το σκοπό αυτό. Στην περίπτωση μας η εντολή για να δούμε και να επεξεργαστούμε το GUI είναι η εντολή: **guide lifi_vlc.fig**. Για τη δημιουργία του έπρεπε πρώτα να καθορίσουμε τις απαιτήσεις που θα ικανοποιούσε τον τελικό μας χρήστη.



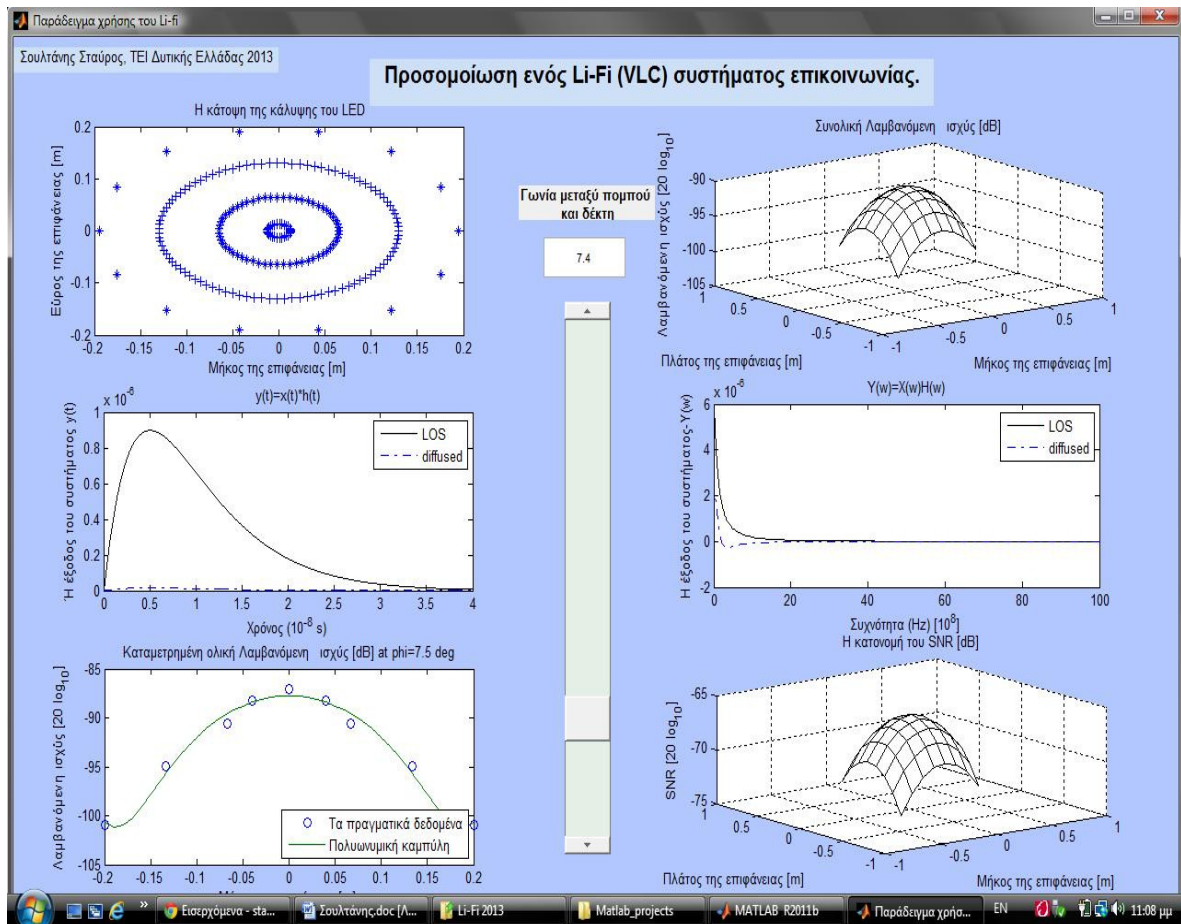
Εικόνα 38. Layout editor του Matlab

Ακριβώς παρακάτω παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής.



Εικόνα 39. Γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής

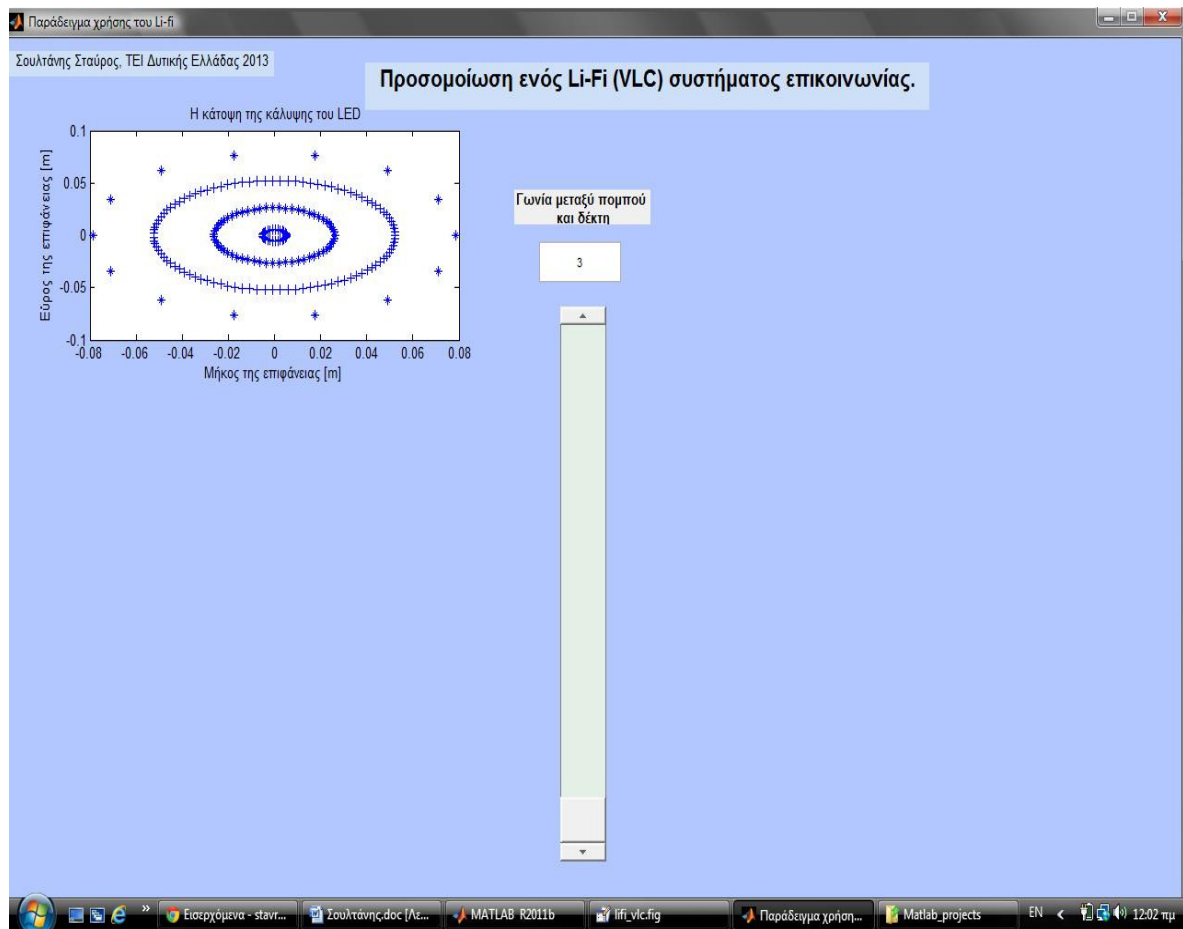
Μετακινώντας ο χρήστης την κυλιόμενη ράβδο και αυξάνοντας έτσι την γωνία μεταξύ πομπού και δέκτη, υπολογίζονται και εμφανίζονται τα ζητούμενα αποτελέσματα. (Σχήμα 3)



Εικόνα 40. Προσομοίωση ενός Li-Fi συστήματος επικοινωνίας

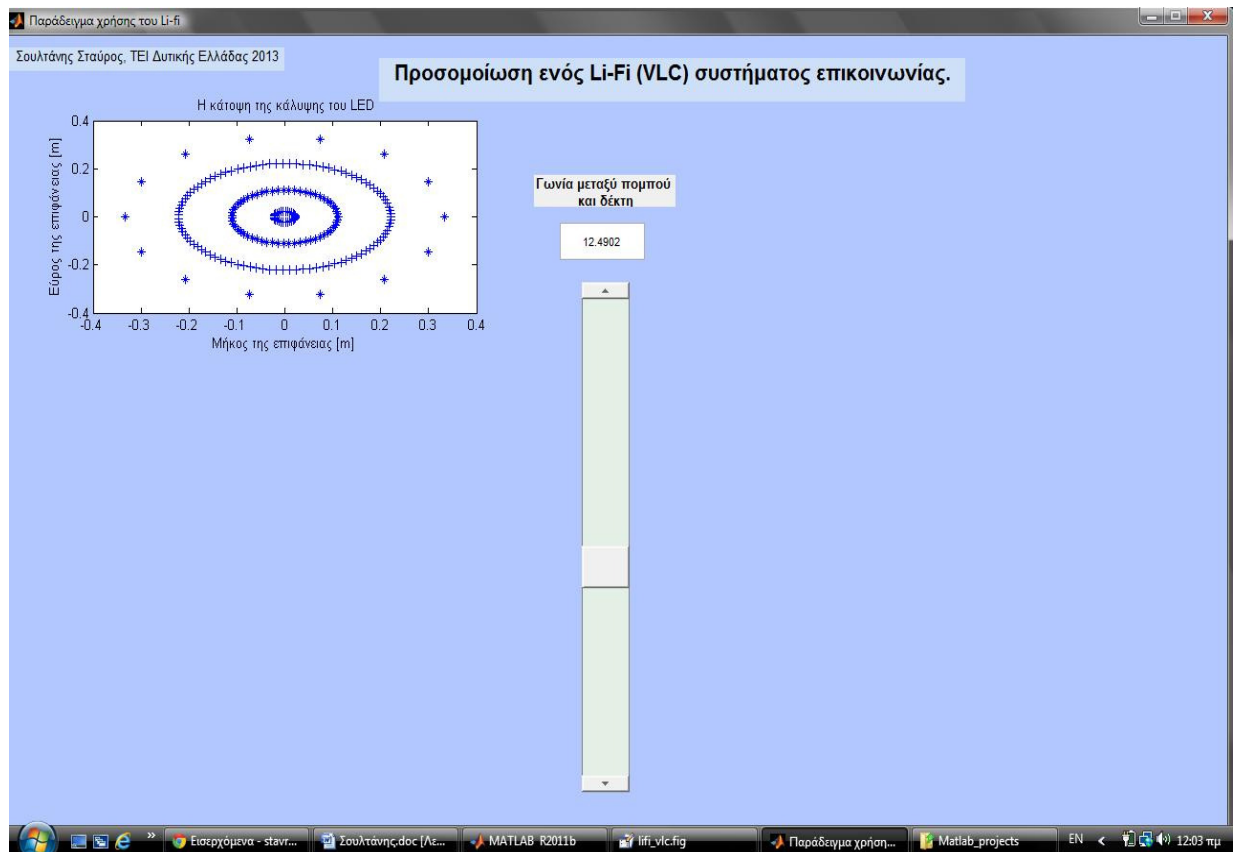
6.1.7 Αποτελέσματα-συμπεράσματα

Ο προσομοιωτής του VLC/Li-Fi καναλιού που δημιουργήσαμε παράγει μια ποικιλία διαδραστικών διαγραμμάτων με την έννοια ότι δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να παρακολουθεί τις μεταβολές των μεγεθών σε σχέση με τη γωνία εκπομπού και δέκτη και να συγκρίνει τις τιμές. Το πρώτο διάγραμμα που παρουσιάζεται αφορά την πανοραμική όψη της φωτεινής κάλυψης του LED σε συνάρτηση με τις διαστάσεις του (μήκος και πλάτος). (Σχήμα 1)



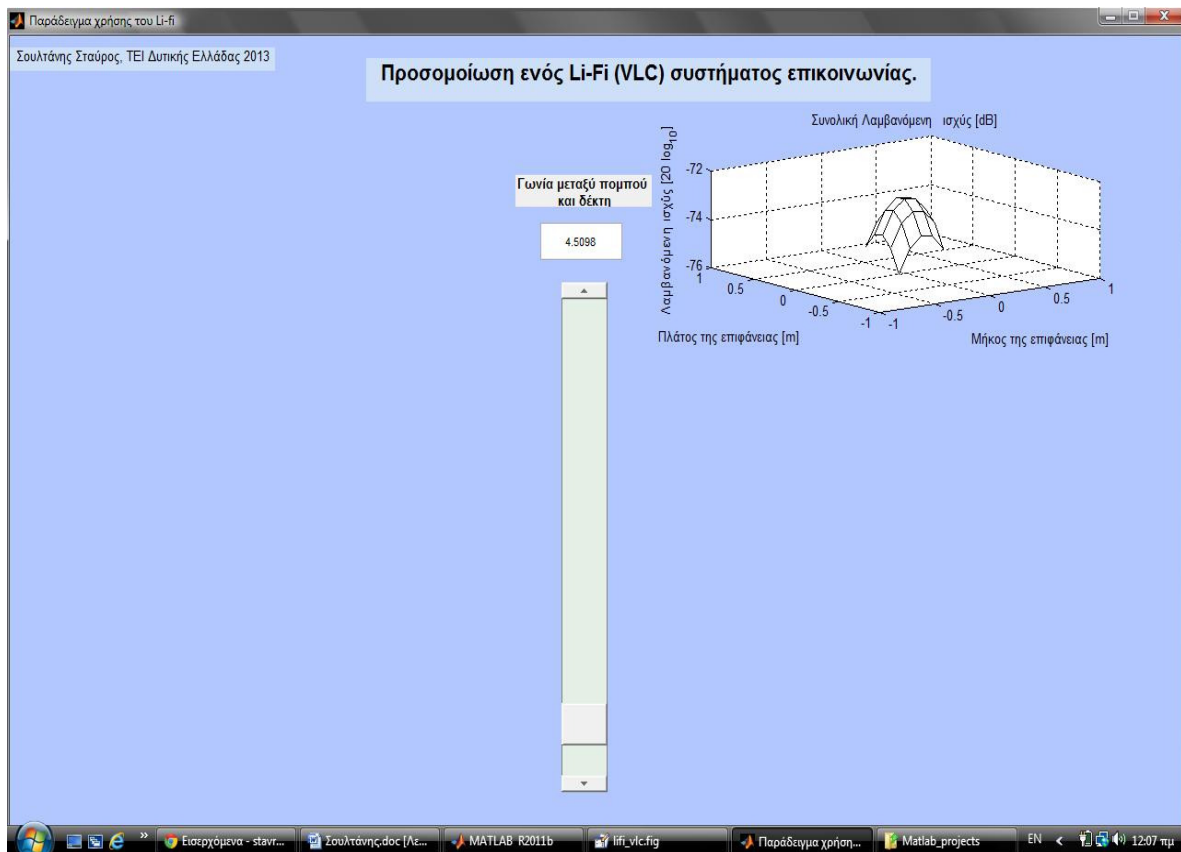
Εικόνα 41. Η κάτοψη της κάλυψης του LED με μικρή γωνία

Με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης στον δεκτή παρατηρούμε ότι η επιφάνεια κάλυψης αυξάνεται έως την μεγίστη τιμή της στις 25 μοίρες. (Σχήμα 4).



Εικόνα 42. Η κάτοψη της κάλυψης του LED με μεγαλύτερη γωνία

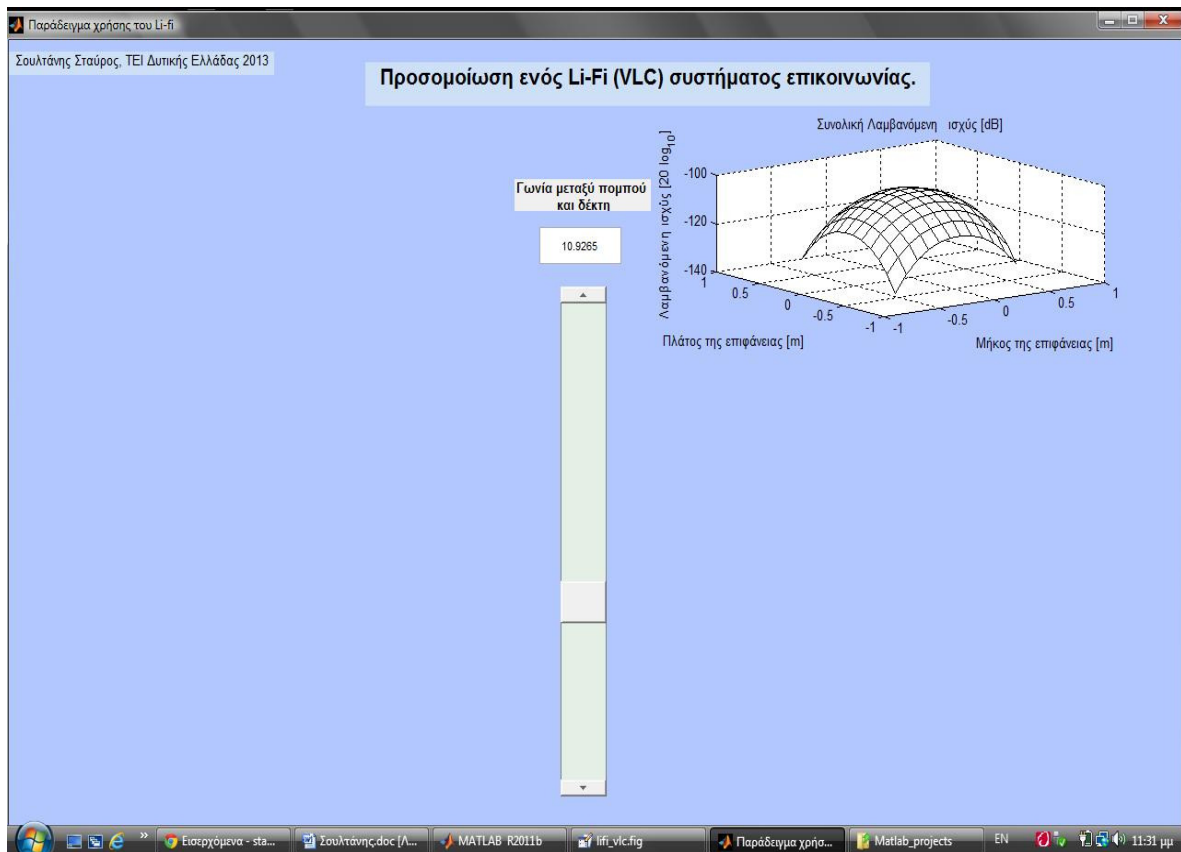
Το επόμενο διάγραμμα που παράγει ο κώδικας μας είναι αυτό της συνολικής λαμβανόμενης ισχύος σε db και πάλι σε σχέση με τις διαστάσεις του δεκτή.



Εικόνα 43. Συνολική λαμβανόμενη ισχύς με μικρή γωνία

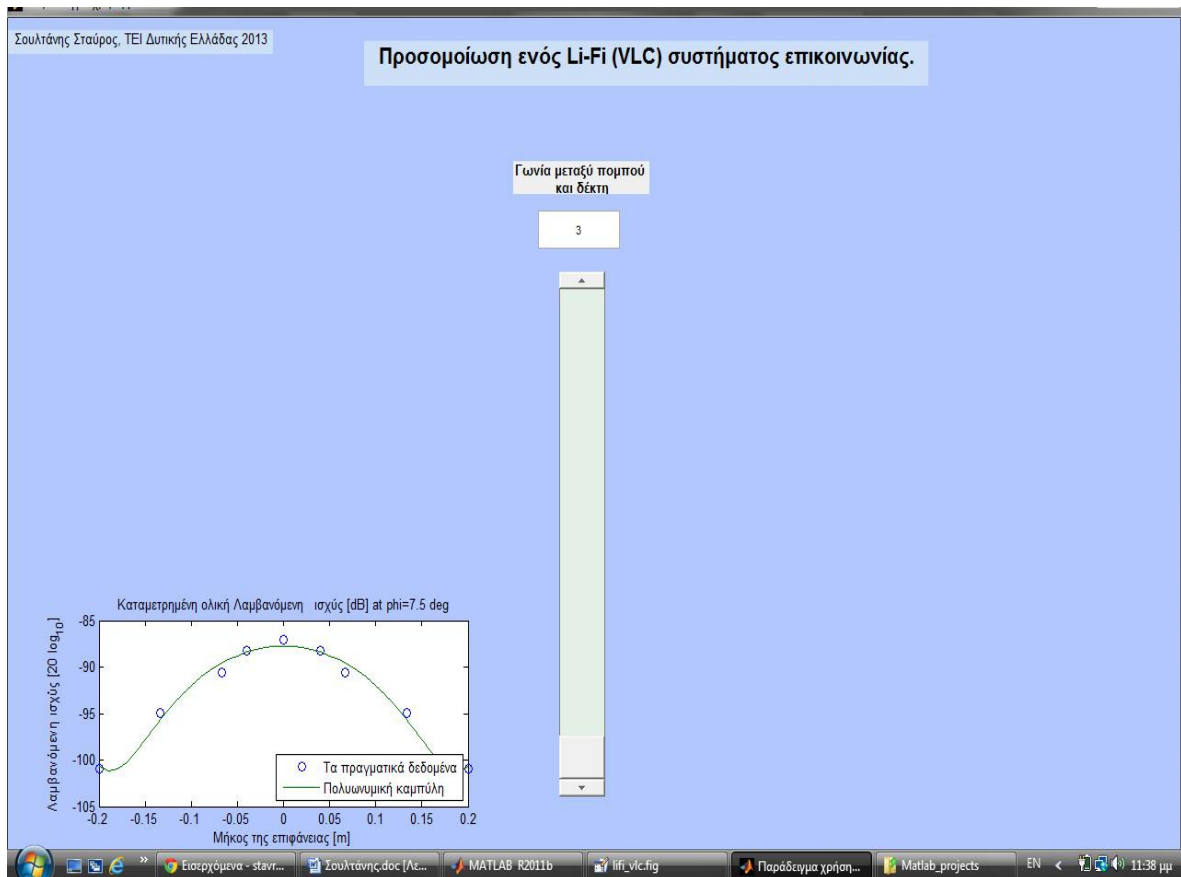
Με την αύξηση της γωνίας παρατηρούμε μείωση της ολικής ισχύος που λαμβάνεται στον δεκτή όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα .Η μείωση αυτή είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι ο υπολογισμός της ισχύος λήψης γίνεται στην συνάρτηση `strength_of_light.m` Εφόσον η συνιστώσα $\tan(R)/R$ είναι φθίνουσα συνάρτηση της γωνίας έπεται και το παρατηρούμενο γεγονός της μείωσης της ισχύος.

Σημειώνουμε ότι τα διαγράμματα είναι σε τρισδιάστατη μορφή και ο χρήστης έχει την δυνατότητα με το mouse να τα «περιστρέψει» με όποιον τρόπο επιθυμεί.



Εικόνα 44. Συνολική λαμβανόμενη ισχύς με μεγάλη γωνία

Μια εκτίμηση της συνολικής μετρούμενης ισχύος λήψης με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (LMS) δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 45)



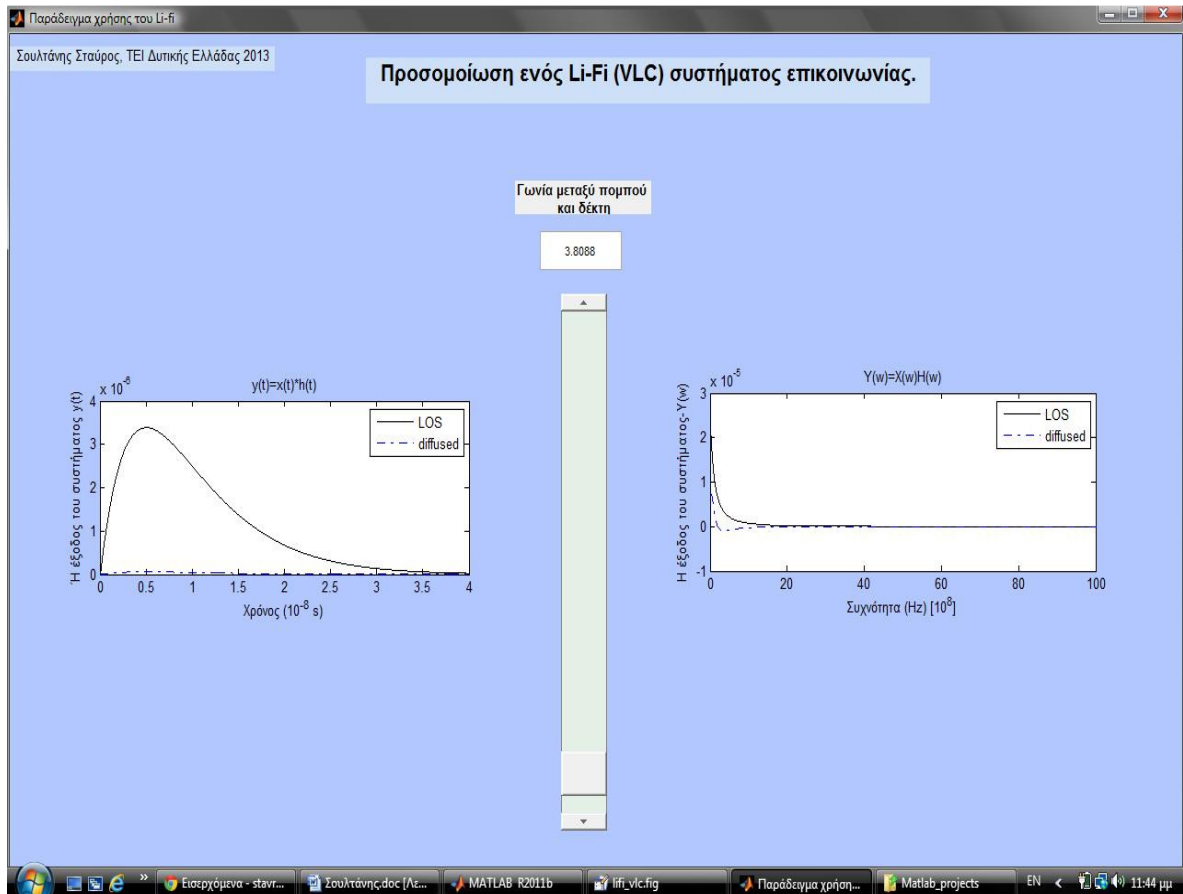
Εικόνα 45. Καταμετρημένη ολική λαμβανόμενη ισχύς

Η εκτίμηση της ισχύος λήψης είναι αρκετά καλή στο σύστημα μας όπως παρατηρούμε , δεδομένου ότι τα πραγματικά δεδομένα (μπλε κύκλοι στο σχήμα) συμφωνούν σε καλό βαθμό με τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα (πράσινη συνεχής καμπύλη). Ο υπολογισμός στον κώδικα έγινε με τις έτοιμες συναρτήσεις του Matlab, `prolific` και `polygal`. Στη προσομοίωση μας το διάνυσμα :

$\mathbf{x} = [-3/3*0.2 \ -2/3*0.2 \ -1/3*0.2 \ -0.2*0.2 \ 0 \ 0.2*0.2 \ 0.2*1/3 \ 0.2*2/3 \ 0.2*3/3]$ παριστάνει το σήμα εισόδου και το διάνυσμα : $\mathbf{y} = [4.96 \ 9.9 \ 16.3 \ 21.3 \ 24.4 \ 21.3 \ 16.3 \ 9.9 \ 4.96]$ το σήμα εξόδου. Η εντολή $\mathbf{y2} = \text{polyval}(\mathbf{p}, \mathbf{x2})$ επιστρέφει την τιμή ενός πολυωνύμου βαθμού n υπολογιζόμενες στο \mathbf{x} . Το όρισμα \mathbf{p} της εισόδου είναι ένα διάνυσμα μήκους $n+1$ τα στοιχεία της οποίας είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου κατά φθίνουσα βαρύτητα.

Τα επόμενα δυο διαγράμματα αφορούν την συμπεριφορά του συστήματος από πλευράς ανάλυσης σημάτων. Στον δεκτή η λαμβανομένη φωτεινή ακτινοβολία που αποτελείται από την «απευθείας» ακτινοβολία της οπτικής επαφής (LOS) καθώς και από την ακτινοβολία διάχυσης (diffused power) . Το σήμα στον δεκτή επεξεργάζεται από ένα οπτικό φίλτρο και προκύπτει το σήμα εξόδου $\gamma(t)$. Η έκφραση του σήματος εξόδου τόσο στο πεδίο του χρόνου

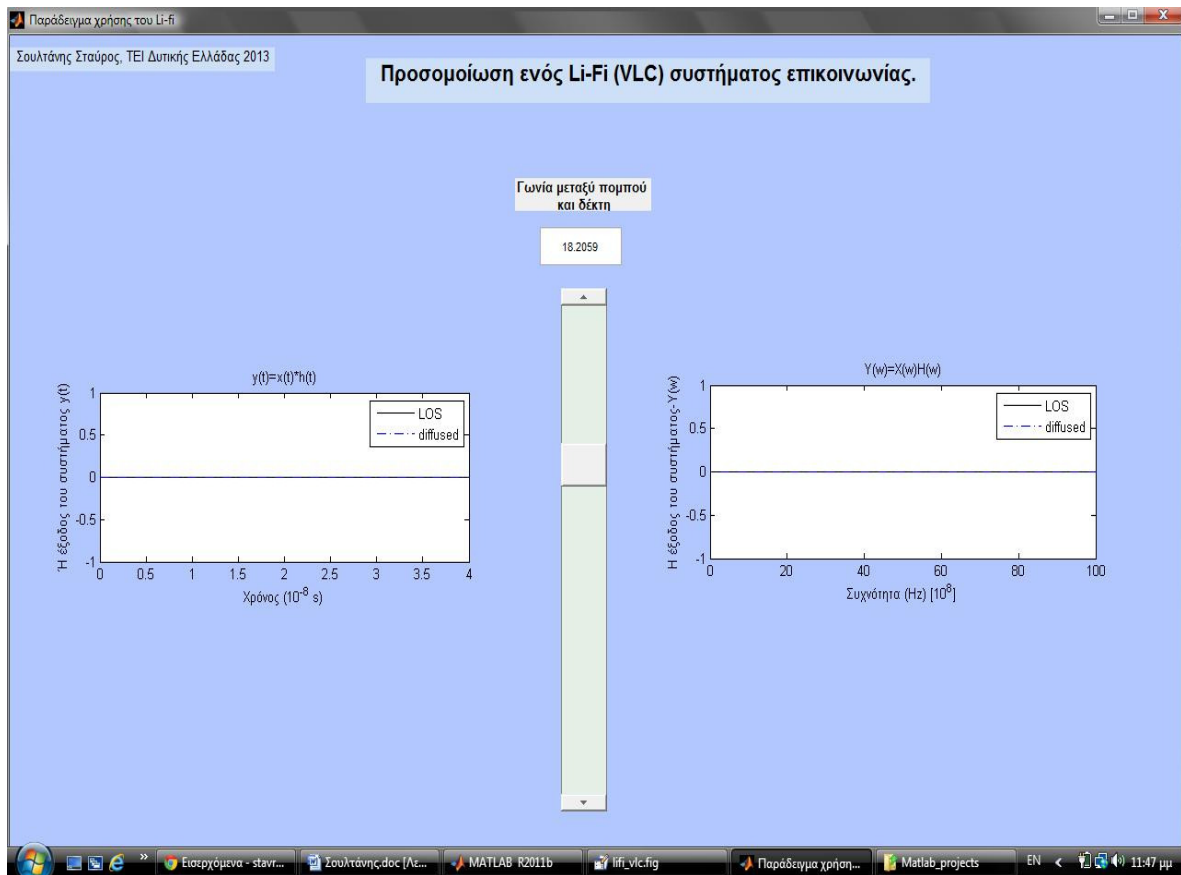
$y(t)=x(t)h(t)$, όσο και στο πεδίο της συχνότητας $Y(w)=X(w)H(w)$ παρουσιάζονται στην εικόνα 46 (με συνεχόμενη μαύρη γραμμή) , ενώ ταυτόχρονος παρουσιάζεται και η απόκριση του φίλτρου στην είσοδο λόγω διάχυσης (με την διακεκομμένη μπλε γραμμή). Παρατηρούμε μείωση του πλάτους του σήματος στην έξοδο σε συνάρτηση με την αύξηση της γωνίας καθώς και την μικρή επιρροή του σήματος λόγω διάχυσης.



Εικόνα 46. Η έξοδος του συστήματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας

Η προσομοίωση έγινε σε ένα δείγμα χρόνου $t = 0:0.01:4$. Αυξάνοντας την γωνιά πάνω από 15 μοίρες την οποία έχουμε ορίσει ως γωνιά οπτικής επαφής του LED

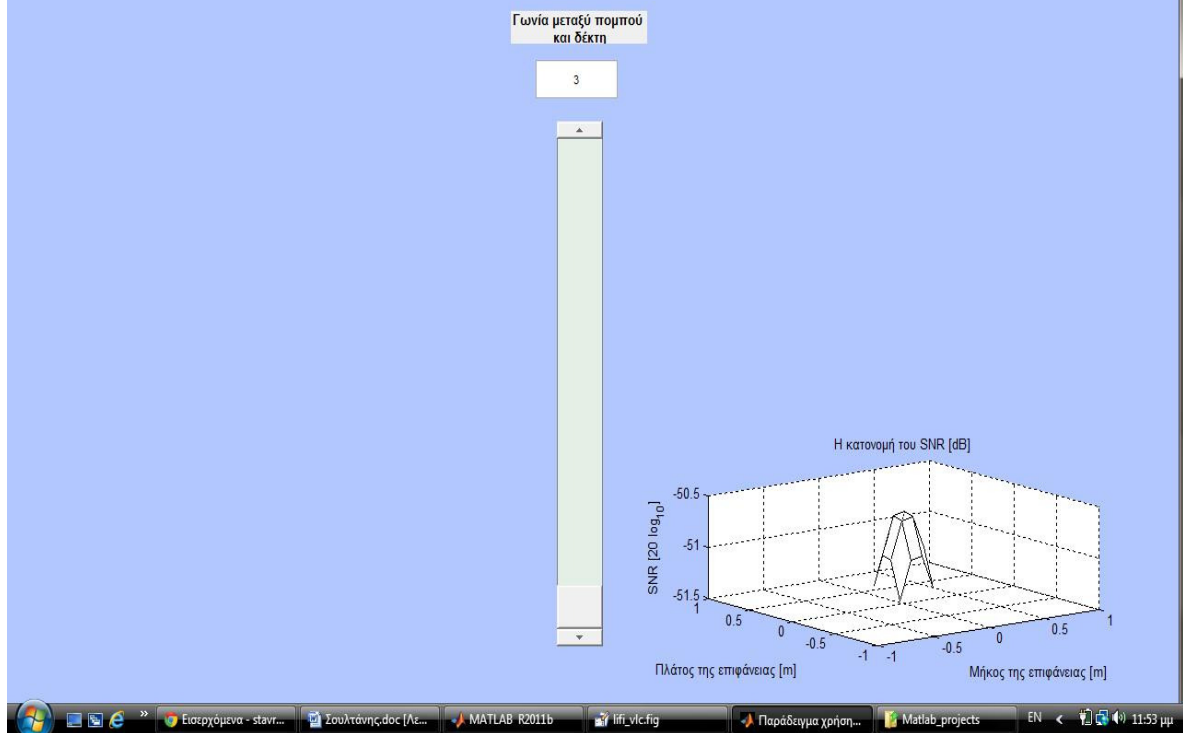
(**GWNIA_TheasisLED = 15**) , η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου μηδενίζεται **kanali_diadosis_LOS= 0** με αποτέλεσμα να μηδενίζεται και το σήμα εξόδου $y(t)$ (Εικόνα 47).



Εικόνα 47. Η έξοδος του συστήματος στα πεδία του χρόνου-συχνότητας

Η αύξηση της γωνίας πέραν του ορίου οπτικής επαφής προκαλεί και τον μηδενισμό του σηματοθρομβικού λόγου SNR που παρουσιάζεται στο τελευταίο διάγραμμα της οθόνης αποτελεσμάτων . (Εικόνα 48)

Προσομοίωση ενός Li-Fi (VLC) συστήματος επικοινωνίας.



Εικόνα 47. Καταγραφή του SNR

Η αύξηση της γωνίας μεταξύ πομπού και δεκτή προκαλεί την μείωση του λογού σήματος προς θόρυβο όπως προβλέπεται και θεωρητικά λόγω της μείωσης της προσπίπτουσας ισχύος στο LED λήψης. Φυσικά με τον μηδενισμό του σήματος ,πέραν της μεγίστης γωνίας οπτικής επαφής δεν υφίσταται και σηματοθορυβικός λόγος(SNR).

Παράρτημα κώδικα

- **Lifi_vlc.m**

```
function varargout = lifi_vlc(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
    'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @lifi_vlc_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @lifi_vlc_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [], ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function lifi_vlc_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = lifi_vlc_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)

sliderValue = get(handles.slider1,'Value');
%puts the slider value into the edit text component
set(handles.edit1,'String', num2str(sliderValue));
```

```

%CIRCLE
kentro_kuklou = [0,0]; %(centre the circle 0,0)
γpsos=1.5;
AKTINA = tand(sliderValue)*γpsos;
%%%%%%kataskeuh kuklou%%%%%%%%
[X1,Y1]=design_circle(kentro_kuklou,AKTINA,15);
plot(handles.axes1,X1,Y1,'*')
axes(handles.axes1)
xlabel(handles.axes1,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
ylabel(handles.axes1,'Εύρος της επιφάνειας [m]')
title(' Η κάτοψη της κάλυψης του LED' )
hold on

[X1,Y1]=design_circle(kentro_kuklou,(2/3)*AKTINA,100);
plot(handles.axes1,X1,Y1,'+')
axes(handles.axes1)
xlabel(handles.axes1,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
ylabel(handles.axes1,'Εύρος της επιφάνειας [m]')
title(' Η κάτοψη της κάλυψης του LED' )
hold on

[X1,Y1]=design_circle(kentro_kuklou,(1/3)*AKTINA,60);
plot(handles.axes1,X1,Y1,'*')
axes(handles.axes1)
xlabel(handles.axes1,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
ylabel(handles.axes1,'Εύρος της επιφάνειας [m]')
title(' Η κάτοψη της κάλυψης του LED' )
hold on

[X1,Y1]=design_circle(kentro_kuklou,(0.2/3)*AKTINA,30);
plot(handles.axes1,X1,Y1,'+')
axes(handles.axes1)
xlabel(handles.axes1,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
ylabel(handles.axes1,'Εύρος της επιφάνειας [m]')
title(' Η κάτοψη της κάλυψης του LED' )

```

```
hold off
```

```
t = 0:0.01:4; %time
```

```
aktinovia = sliderValue;
```

```
epiptwsi = sliderValue;
```

```
Gwnia_TheasisLED = 15;
```

```
OptikoPedio_PIN = 20;
```

```
[zp,Xalpha,Yalpha,Zalpha,kroustikiApokrisi_s,kroustikiApokrisi_f,kroustikiApokrisi_d,  
diaskorpismenessuxn] = strength_of_light(aktinovia,epiptwsi,Gwnia_TheasisLED,  
OptikoPedio_PIN,t);
```

```
mesh(handles.axes2,Xalpha,Yalpha,Zalpha,'EdgeColor','black')
```

```
axes(handles.axes2)
```

```
xlabel(handles.axes2,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
```

```
ylabel(handles.axes2,'Πλάτος της επιφάνειας [m]')
```

```
zlabel(handles.axes2,txlabel('Λαμβανόμενη ισχύς [20*log10]{10}'))
```

```
title('Συνολική Λαμβανόμενη ισχύς [dB]')
```

```
xlim([-1 1])
```

```
ylim([-1 1])
```

```
rotate3d on
```

```
[xpwq,Xalpha,Yalpha,Zalpha,kroustikiApokrisi_s,kroustikiApokrisi_f,impuld,diaskorpismeness  
uxn] = strength_of_light(aktinovia,epiptwsi,Gwnia_TheasisLED,OptikoPedio_PIN,t);
```

```
mesh(handles.axes6,Xalpha,Yalpha,xpwq,'EdgeColor','black')
```

```
axes(handles.axes6)
```

```
xlabel(handles.axes6,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
```

```
ylabel(handles.axes6,'Πλάτος της επιφάνειας [m]')
```

```
zlabel(handles.axes6,txlabel('SNR [20*log10]{10}'))
```

```
title('Η κατανομή του SNR [dB]')
```

```
xlim([-1 1])
```

```
ylim([-1 1])
```

```
rotate3d on
```

```
plot(handles.axes3,t,kroustikiApokrisi_s,'black')
```

```
axes(handles.axes3)
```



```

xlabel(handles.axes3,'Χρόνος (ns)')
ylabel(handles.axes3,'Η έξοδος του συστήματος γ(t)')
title('γ(t)=x(t)*h(t)')
hold on
plot(handles.axes3,t,kroustikiApokrisi_d,'-b')
axes(handles.axes3)
h = legend('LOS','diffused',1);
set(h,'Interpreter','none')
xlabel(handles.axes3,texlabel('Χρόνος (10^{-8} s)'))
ylabel(handles.axes3,'Η έξοδος του συστήματος γ(t)')
title('γ(t)=x(t)*h(t)')
hold off

```

```

plot(handles.axes4,1./t,kroustikiApokrisi_f,'black')
axes(handles.axes4)
xlabel(handles.axes4,texlabel('Συχνότητα (Hz) [10^8]'))
ylabel(handles.axes4,'Η έξοδος του συστήματος-Υ(w)')
title('Υ(w)=X(w)H(w)')
hold on
plot(handles.axes4,1./t,real(diaskorpismenessuxn),'-b')
axes(handles.axes4)
h = legend('LOS','diffused',1);
set(h,'Interpreter','none')
xlabel(handles.axes4,texlabel('Συχνότητα (Hz) [10^8]'))
ylabel(handles.axes4,'Η έξοδος του συστήματος-Υ(w)')
title('Υ(w)=X(w)H(w)')
hold off

```

```

x = [-3/3*0.2 -2/3*0.2 -1/3*0.2 -0.2*0.2 0 0.2*0.2 0.2*1/3 0.2*2/3 0.2*3/3];
y = [4.96 9.9 16.3 21.3 24.4 21.3 16.3 9.9 4.96];
γ = (y/0.55)*(10^-6);
kentro_kuklou= polyfit(x,y,4);

```

```

x2 = -.2:.01:.2;
y2 = polyval(kentro_kuklou,x2);

```

```

plot(handles.axes5,x,20*log10(y),'o',x2,20*log10(y2))
axes(handles.axes5)
ylabel(handles.axes5,txlabel('Λαμβανόμενη ισχύς [20*log_{10}]'))
xlabel(handles.axes5,'Μήκος της επιφάνειας [m]')
title('Καταμετρημένη ολική Λαμβανόμενη ισχύς [dB] at phi=7.5 deg')
h = legend('Τα πραγματικά δεδομένα','Πολυωνυμική καμπύλη',4);
set(h,'Interpreter','none')
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject,'value',3);
set(hObject,'max',25);
set(hObject,'min',3);

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

sliderValue = get(handles.edit1,'String');

%convert from string to number if possible, otherwise returns empty
sliderValue = str2double(sliderValue);

if (isempty(sliderValue) || sliderValue < 0 || sliderValue > 100)
    set(handles.slider1,'Value','3');
    set(handles.edit1,'String','3');
else
    set(handles.slider1,'Value',sliderValue);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
set(hObject,'string',3);

```

- **strength_of_light.m**

```

function [Xpwq,Xaa,Yaa,Zaa,KroustikiApokrisi_T,KroustikiApokrisi_F, KroustikiApokrisi_Diex,
KroustikiApokrisi_D] = strength_of_light(aktinovolia, epiptwsi,Gwnia_TheasisLED,
OptikoPedio_PIN,t)

paragontas_fwteinotitas=4;

q = 1.60E-19;

gwnia_prospiptousas_aktinas = (aktinovolia*pi)/180;%radians = degress x PI / 180 (deg to
rad conversion)

gwnia_prospwsi = (epiptwsi*pi)/180;%radians = degress x PI / 180 (deg to rad conversion)

ekpempomeni_isxus = 30E-3*paragontas_fwteinotitas;

energosi_perioxi_dekti = .78E-4;

optiko_pedio_anixneuti = (OptikoPedio_PIN*pi)/180;

apostasi_tx_rx = 1.5;

Ypsosi_dwmatioy = 3.0;

diataksi_Lampertianis_katanomis = real(-log(2)/log(cos(gwnia_prospiptousas_aktinas)));

Ro =
real(((diataksi_Lampertianis_katanomis+1)/(2*pi))*cos(gwnia_prospiptousas_aktinas)^diata
ksi_Lampertianis_katanomis);

if (gwnia_prospwsi>=0) && (gwnia_prospwsi<=optiko_pedio_anixneuti) &&
(aktinovolia<=Gwnia_TheasisLED)

    kanali_diadosis_LOS =
(energosi_perioxi_dekti/apostasi_tx_rx^2)*Ro*cos(gwnia_prospwsi);
elseif (gwnia_prospwsi>optiko_pedio_anixneuti)

    kanali_diadosis_LOS = 0.0;
elseif (aktinovolia>Gwnia_TheasisLED)

    kanali_diadosis_LOS = 0.0;

```

```

elseif (epiptwsi>OptikoPedio_PIN) || (aktinovolia>OptikoPedio_PIN)
    kanali_diadosis_LOS = 0.0;
end;
sunoliki_isxus_monopatiou_LED = ekpempomeni_isxus*kanali_diadosis_LOS;
apokrisimotita_fwtodiodou = 0.55;
thorivos_perivallontos = 0.07E-6/apokrisimotita_fwtodiodou;
rithmos_metadosis = 115200;
suntelestis_thorivou_BW = rithmos_metadosis*0.562;
BW_enisxiti = 4.5E6;
thorivos_enisxiti = 5E-12*BW_enisxiti;
epifaneia_dwmatiou = 2*(5*5 + 5*Ypsos_dwmatioy + 5*Ypsos_dwmatioy);
Sxedio_dwmatiou = 5*5;
ektasi_1toixou = 5*Ypsos_dwmatioy*2;
ektasi_2toixou = 5*Ypsos_dwmatioy*2;
ektasi_orofis = 5*5;

mesi_anaklastikotita = (1/epifaneia_dwmatiou)*(Sxedio_dwmatiou*0.15 + ...
    ektasi_1toixou* 0.7 + ektasi_2toixou*0.7 + ektasi_orofis*0.8);

I = mesi_anaklastikotita*sunoliki_isxus_monopatiou_LED/epifaneia_dwmatiou;
%suntelestis metadosis optikou filtrou
smof = 1.0;

if (gwnia_prospwsi>=0) && (gwnia_prospwsi<=optiko_pedio_anixneuti)
    %Aluminum      1.44
    s = (1.44^2)/(sin(optiko_pedio_anixneuti)^2);
elseif (gwnia_prospwsi>optiko_pedio_anixneuti)
    s = 0.0;
end;

lamvanomeni_isxus = (sunoliki_isxus_monopatiou_LED+ (energoss_perioxi_dekti*(
I/(1-mesi_anaklastikotita))))*smof*s;
sunartisi_xronou = t.*exp(-2.*t);

```

```

diff_sunartisi_xronou = t.*exp(-2.*(t+2));
sunartisi_suxnotitas = 1./(2 + (1./t)).^2;
sunartisi_diff_suxnotitwn = 1./(exp(4).*(2 + (1./t)*1i).^2);

KroustikiApokrisi_T = conv(lamvanomeni_isxus,sunartisi_xronou)*0.01;
KroustikiApokrisi_Diex =
conv((lamvanomeni_isxus-sunoliki_isxus_monopatiou_LED),diff_sunartisi_xronou)*0.01;
KroustikiApokrisi_F = sunoliki_isxus_monopatiou_LED.*sunartisi_suxnotitas;
KroustikiApokrisi_D =
(lamvanomeni_isxus-sunoliki_isxus_monopatiou_LED).*sunartisi_diff_suxnotitwn;

omegasunoliko = (2*q*apokrisimotita_fwtodiodou*(lamvanomeni_isxus+
thorivos_perivallontos)*suntelestis_thorivou_BW)+(thorivos_enisxiti^2*BW_enisxiti);
SNR = (apokrisimotita_fwtodiodou*lamvanomeni_isxus).^2./(omegasunoliko);
aktina = Ypsos_dwmatioy/tan(pi-pi/2-gwnia_prospiptousas_aktinas);
[Xaa,Yaa] = meshgrid(-aktina:.1:aktina);
R = sqrt(Xaa.^2 + Yaa.^2)./sin(pi-pi/2-gwnia_prospiptousas_aktinas);
Zaa = (20*log10(SNR)).*tan(R)./R;
Xpwpq = ( 20*log10(lamvanomeni_isxus)).*tan(R)./R;

```

- **design_circle.m**

```

function [X,Y]=design_circle(kentro,aktina,arithmos_sumvolwn)

THETA=linspace(0,2*pi,arithmos_sumvolwn);
RHO=ones(1,arithmos_sumvolwn)*aktina;
[X,Y] = pol2cart(THETA,RHO);
X=X+kentro(1);
Y=Y+kentro(2);

```

Αναφορές

- [1] M. Aharonovich, S. Arnon. Performance improvement of optical wireless communication through fog with a decision feedback equalizer. *Journal Optical Society of America A Vol 22*, 8, pp. 1646,1654, August 2005.
- [2] H. Manor, S. Arnon. Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength. *Electrical and Electronics Engineers in Israel, 2002. The 22nd Convention of*, pp.287,289, 2002.
- [3] T. Fath, H. Haas, M. Di Renzo, R. Mesleh. Spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor LOS environments. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE, pp.1,5, 5-9, 2011.
- [4] S. Hranilovic. Wireless Optical Communication Systems. *IEEE conference*, vol. 20, 2013.
- [5] H. Henniger, O. Wilfert. An introduction to free-space optical communications. In *SPIE Proceedings Vol. 7141, 16th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, 2010.
- [6] K. Mynbaev, L. Scheiner. Fiber-Optic Communications Technology, *PrenticeHall*, 2001.
- [7] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan. Optical networks: A practical perspective, *San Mateo, CA: Morgan Kaufmann*, 1998.
- [8] J. Rani, P. Chauhan, R. Tripathi. Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology in wireless communication. *International Journal of Applied Engineering Research*, vol.7 no.11, 2012.
- [9] A. Tanenbaum. Δίκτυα Υπολογιστών. *Αθήνα, Ελλάδα, Παπασωτηρίου*, 2000.
- [10] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, *SPIE/Baltzer Optical Networks Magazine (ONM)*, vol. 1, no. 1, Jan. 2000.
- [11] J. M. Senior, M. Y. Jamro. Optical Fiber Communications - Principles and Practice, 2009
- [12] G. I. Papadimitriou, P. A. Tsimoulas, M. S. Obaidat, A. S. Pomportsis. Οπτικά δίκτυα τεχνολογίας WDM, *Αθήνα, Ελλάδα*, 2005.
- [13] Zixiong Wang, Wen-De Zhong, Changyuan Yu, Jian Chen, Chin Po Shin, Francois, Wei Chen. Performance of dimming control scheme in visible light communication system, 2012
- [14]. LiFi Consortium - <http://www.lificonsortium.org/>
- [15]. Li-Fi - <http://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>
- [16]. Li-Fi Overview - <http://www.oledcomm.com/LiFi.html>
- [17]. Li-Fi Presentations - <http://www.slideshare.net>

[18]<http://www.teiser.gr/icd/staff/simeonid/psee/Digital%20Image%20Processing%20Matlab%20Jan%202008.pdf>

[19]<http://www.stumbleupon.com/su/2dyz8v/www.good.is/posts/forget-wifi-it-s-li-fi-internet-through-lightbulbs/>

[20]http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36046-lambertian-emission-of-1-led/content/Lambertian_1LED.m