



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των
laser τύπου VCSEL και η Ηλεκτρο-Οπτική Διαμόρφωσή τους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκόγκος Βασιλάκης

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των
laser τύπου VCSEL και η Ήλεκτρο-Οπτική Διαμόρφωσή τους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκόγκος Βασιλάκης

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Χ. Καμάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2015

.....
Γκόγκος Βασιλάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γκόγκος Βασιλάκης 2015. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης, και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στον πατέρα μου

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών και η εισαγωγή απαιτητικών, από πλευράς εύρους ζώνης, διαδικτυακών εφαρμογών όπως, High Definition (HD) video και 3DTV-on-demand, θέτει υπό αμφισβήτηση τα παραδοσιακά δίκτυα πρόσβασης που βασίζονται σε καθαρά ηλεκτρικές VDSL λύσεις, σχεδιασμένες για ταχύτητες δεδομένων μερικών δεκάδων Mb/s. Προχωρώντας προς την επόμενη γενιά ευζωνικών δικτύων, η λύση που είναι ικανή να ανταποκριθεί στις ραγδαίες απαιτήσεις των χρηστών είναι η χρήση οπτικών τεχνικών Fiber-to-the-Home (FTTH) που επιτρέπουν ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως 10 Gb/s (GPON) και πρόσφατα έως 40 Gb/s (TWDM PON) στον χρήστη, επιδόσεις που υπερτερούν κατά πολύ των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών δικτυακών υποδομών. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική μελέτη των πομποδεκτών χαμηλού κόστους, οι οποίοι προσδιορίζονται για τα μελλοντικά παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης δεύτερης γενιάς και μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς μετάδοσης πολύ μεγαλύτερους από αυτούς του TWDM PON.

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας αναφερόμαστε στην Ιστορική Αναδρομή των λέιζερ και ειδικότερα των λέιζερ τύπου VCSEL. Ακόμα, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή, τα γενικά χαρακτηριστικά και οι διάφορες κατηγορίες VCSEL. Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται συνοπτικά οι βασικές αρχές των λέιζερ και συγκεκριμένα των VCSEL. Στη συνέχεια μελετιούνται οι τεχνικές ανάπτυξης και κατασκευής των VCSELs (Κεφάλαιο 3). Πιο συγκεκριμένα, στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνικές ανάπτυξης των wafers (ημιαγωγικός δίσκος) και η διαδικασία κατασκευής της συνολικής συσκευής. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι αποδόσεις των διαφόρων τύπων VCSELs (ανάλογα με το μήκος κύματος τους). Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται ένας διαχωρισμός των εφαρμογών VCSEL τα οποία χρησιμοποιούνται στα πεδία Datacom και Telecom. Ακόμα παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές τα οποία χρησιμοποιούνται σε άλλα τεχνολογικά πεδία. Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση μερικών ερευνητικών πειραμάτων και αποτελεσμάτων αυτών με χρήση VCSEL.

Λέξεις κλειδιά

Λείζερ Κάθετης Κοιλότητας Επιφανειακής Εκπομπής (VCSEL), ημιαγωγό λείζερ, Datacom, Telecom, Οπτική Ίνα, πολύτροπη ίνα (MMF), QWs, DBR καθρέπτες, MOCVD, MBE, Συνεχώς κύμα (CW), Οπτική κοιλότητα, Εύρος Ζώνης, BER.

Abstract

The ever growing demand of bandwidth during the last decades and the import of demanding, in terms of bandwidth, online applications such as, High Definition (HD) videos and 3DTV-on-demand, causes controversy over the traditional access networks which are based on purely electrical VDSL solutions, designed for data transfer rates around several tens of MB/s. Moving towards the next generation of networks, the solution that is capable of meeting the rapid requirements of the users is the use of optical techniques Fiber-to-the-Home(FTTH) which allow data transfer rates up to 10Gb/s (GPON) and recently up to 40 Gb/s (TWDMPON) to the user, performance that outweigh by far the performance of traditional telecommunications network infrastructures. The object of this bachelor thesis is the bibliographic study of low cost transceivers, which are determined for the future second generation passive optical access networks and can achieve data transfer rates much bigger than those of TWDMPON.

At the first part of the bachelor thesis there is a reference to the Historical Recursion of laser and more specifically for VCSEL laser. Furthermore in this chapter we present the structure, the general characteristic and the different categories of VCSEL laser. In 2nd Chapter there is a short analysis of the basic operating principles of lasers and specifically of the VCSEL ones. Subsequently we investigate the development and construction techniques of VCSELs (Chapter 3). More specifically in the 3rd chapter are presented the growth and fabrication of wafers (semiconductor disk) and the manufacture process of total package. In Chapter 2 are presented the performances of different types of VCSELs (depending on their wavelength). In 5th Chapter there is a separation of the VCSEL applications which are used on the Datacom and Telecom field. Also some applications are presented that are used at other fields. At the end, in 6th Chapter there is a presentation of some experimental researches and the results of those using VCSEL.

Key Words

Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL), Semiconductor Laser, Datacom, Telecom, Optical Fiber, Multimode Fiber (MMF), Quantum wells (QWs), DBR mirrors, Metalorganic Chemical Vapour Deposition (MOCVD), Molecular Beam Epitaxy (MBE), Continuous Wave (CW), Optical Cavity, Bandwidth, Bit Error Rate (BER).

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στον τομέα των Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο για την ευκαιρία που μου προσέφερε, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα που αποτελεί εφόδιο για την πορεία μου από εδώ και στο εξής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφεραν για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Περίληψη</i>	7
<i>Abstract</i>	9
<i>Ευχαριστίες</i>	11
Κεφάλαιο 1: Laser	15
1.1 Γενικά για τα laser	15
1.2 Laser τύπου VCSEL	16
1.2.1 Δομή	17
1.2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά	18
1.3.Κατηγορίες VCSELS.....	19
Βιβλιογραφία κεφαλαίου	22
Κεφάλαιο 2: Βασικές αρχές λειτουργίας των VCSEL	23
2.1 Οπτικές διαδικασίες στα ημιαγωγικά λέιζερ	23
2.2 Εξισώσεις εκπομπής	25
2.3 Εξισώσεις ρυθμού	26
2.4 Κατάστατη σταθερής ηλεκτρικής πόλωσης.....	28
2.5 Ρεύμα κατωφλίου.....	29
2.6 Ισχύς εξόδου και συντελεστής απόδοσης	32
2.7 Διαμόρφωση	32
2.8 Συντονισμένος τρόπος ταλάντωσης.....	33
Βιβλιογραφία κεφαλαίου	35
Κεφάλαιο 3: Κατασκευή και ανάπτυξη των VCSELS	36
3.1. Εισαγωγή	36
3.2.Ανάπτυξη της επιταξίας δομής των VCSELS	36
3.3.Τεχνολογία κατασκευής VCSEL	39
Βιβλιογραφία κεφαλαίου	43
Κεφάλαιο 4: State-Of-The-Art στα VCSELS	44
4.1.Εισαγωγή	44
4.2. Μήκη κύματος για Datacom εφαρμογές.....	44
4.2.1.State-of-the-Art των 850 nm VCSELS	44
4.2.2.State-of-the-Art των 980 nm VCSELS	45
4.2.3.State-of-the-Art των 1100 nm VCSELS	47
4.3.Μεγάλα μήκη κύματος για Telecom εφαρμογές.....	47
4.3.1.State-of-the-art για τα 1.3 μm VCSELS	48
4.3.2.State-of-the-art για τα 1.55 μm VCSELS	48

Βιβλιογραφία κεφαλαίου	49
Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές VCSEL	52
5.1.Εισαγωγή	52
5.1.VCSEL σε Datacom.....	54
5.1.1.Οπτικές συνδέσεις βίντεο με χρήση VCSEL	54
5.1.2.Απαιτήσεις των VCSEL για τις μονάδες απεικόνισης.....	55
5.1.3.Εφαρμογές στις οπτικές συνδέσεις βίντεο με χρήση VCSEL.....	56
5.1.4.Σύστημα απεικόνισης Τρένων	56
5.1.5.Σύστημα ανύψωσης.....	57
5.1.6.Ιατρικές εφαρμογές	59
5.1.7. Οθόνες και ποντίκια υπολογιστών	60
5.1.8. Οπτική αισθητήρες VCSEL	61
5.2. VCSEL σε Telecom εφαρμογές.....	62
5.2.1. POF και FSO.....	63
5.3. VCSEL σε άλλα πεδία	65
5.3.1 Βιομηχανικές εφαρμογές.....	65
5.3.1 VCSEL σε εκτυπωτές	66
5.3.2. VCSEL σε Φωτοχημικές, Βιολογικές και Ιατρικές εφαρμογές	67
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	68
Κεφάλαιο 6: Παρουσίαση ερευνητικών πειραμάτων με VCSELs.....	69
6.1. NRZ διαμόρφωση για οπτικές συνδέσεις βασιζόμενες σε 850 nm VCSELs	69
6.1.1. Το Πείραμα	69
6.1.2. Αποτελέσματα.....	70
6.2. 4-PAM διαμόρφωση VCSEL για μετάδοση σε MMF	72
6.2.1. Το Πείραμα	72
6.2.1. Αποτελέσματα.....	73
6.3. Απευθείας διαμόρφωση ASK και QPSK στα OIL VCSEL.....	74
6.3.1. Το πείραμα	74
6.3.2. Διαμόρφωση ASK.....	75
6.3.3. Διαμόρφωση QPSK.....	76
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	78

Κεφάλαιο 1:Laser

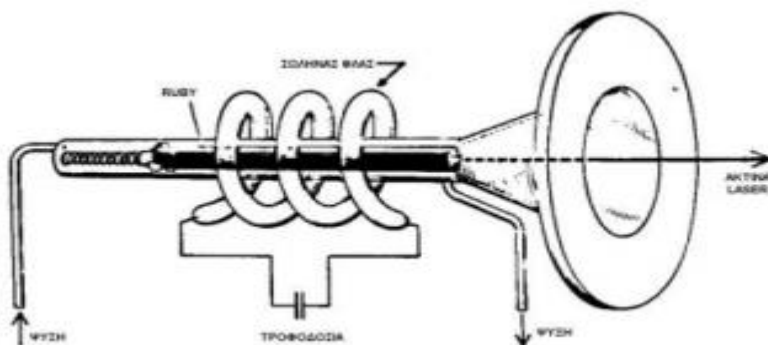
1.1 Γενικά για τα laser

Τα laser αποτελούν αναμφίβολα ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα του περασμένου αιώνα. Χάρη στις ιδιότητές τους έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών ενώ ταυτόχρονα αποτελούν έναν τομέα με τεράστιες δυνατότητες για έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη. Η λέξη Laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, δηλαδή ενίσχυση φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας είναι μία φυσική διαδικασία η οποία προσδιορίστηκε για πρώτη φορά από τον Einstein και λαμβάνει χώρα όταν μία φωτεινή δέσμη διέρχεται μέσα από ένα κατάλληλο μέσο, στο οποίο έχουν διεγερθεί με κατάλληλο τρόπο τα άτομα που υπάρχουν στο εσωτερικό του, προκειμένου το μέσο αυτό να εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη δέσμη έχει την ίδια κατεύθυνση και το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος με την προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη[1].

Ο Albert Einstein ήταν αυτός που εξήγησε πρώτος το 1917 τη θεωρία της εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία αποτέλεσε τη βάση για τη λειτουργία των laser. Η διατύπωση του Einstein βασίστηκε, όπως αναφέρεται και παραπάνω στην υπόθεση ότι όταν λαμβάνει χώρα αναστροφή πληθυσμών μεταξύ των ανώτερων και των κατώτερων επιπέδων ενός συστήματος ατόμων, είναι πιθανό να παρατηρηθεί ενισχυμένη εξαναγκασμένη εκπομπή. Η αναστροφή πληθυσμών πραγματοποιείται έπειτα από κατάλληλη διέγερση των ατόμων και μάλιστα η δέσμη που εκπέμπεται έχει συχνότητα και φάση η οποίες είναι ίδιες με τη συχνότητα και τη φάση του μέσου διέγερσης (συνήθως προσπίπτουσα ακτινοβολία) [2]. Από το 1920 μέχρι και το 1950 οι ερευνητές του επιστημονικού πεδίου αυτού είχαν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε άλλους τομείς της επιστήμης, με αποτέλεσμα να μείνει αρκετά πίσω η προσπάθεια για τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός laser, παρόλο που ήταν ήδη γνωστά τόσο η αρχή στην οποία βασιζόταν η λειτουργία, όσο και τα απλουστευμένα τεχνολογικά και κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά[3].

Στη δεκαετία του 1950 μια ομάδα από εξειδικευμένους επιστήμονες, με πρωτοπόρο τον Charles Hard Townes, έπειτα από πλήθος μελετών, οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μία πρακτικά υλοποιήσιμη συσκευή, η λειτουργία της οποίας βασίζεται στη θεωρία της εξαναγκασμένης εκπομπής. Η συσκευή αυτή ονομάστηκε Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), μία συσκευή πρόδρομο του laser, η οποία όμως αντί για

υπέρυθρη ή οπτική ακτινοβολία ενίσχυε μικροκύματα. Η ομάδα αυτή αποτελούνταν από τους : Charles Hard Townes, Joseph Weber, Alexander Prokhorov και Nikolai Basov. Το 1960 έλαβε χώρα στα εργαστήρια του Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια ένα πείραμα, το οποίο οδήγησε στην κατασκευή του πρώτου laser [2]. Το πείραμα αυτό υλοποιήθηκε από τον Theodore Maiman, ήταν σχετικά απλό και βασιζόταν στη ύπαρξη ενός κρύσταλλου από ρουβίνιο (ruby). Αυτό το laser φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.1 : Το πρώτο laser το οποίο υλοποιήθηκε βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο[15]

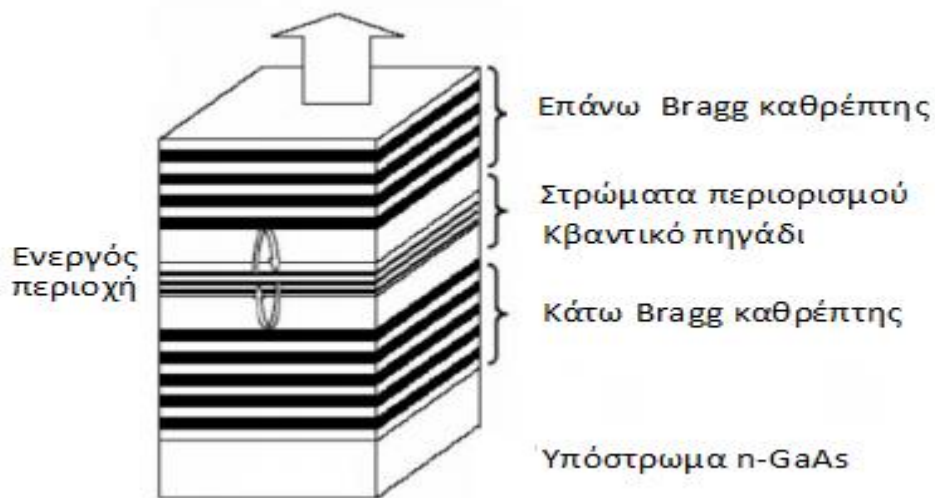
Το 1961 ιδρύθηκε η Trion Instruments η οποία ήταν η πρώτη εμπορική εταιρεία με laser. Την ίδια χρονιά ο Ali Javan ανακάλυψε το laser Ηλίου-Νέου (He-Ne) . Το 1962 ο Robert Hall και ο Nick Holonyak ανακάλυψαν το πρώτο ημιαγωγικό laser στα εργαστήρια της General Electric ενώ το 1964 ανακαλύφθηκε το laser διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τον Kumar Patel. Τη δεκαετία του 1970 κατασκευάστηκαν lasers που βασιζόνταν σε διάφορα πολυμερή υλικά. Τα lasers αυτά αξιοποιήθηκαν σε πολλαπλές ιατρικές εφαρμογές (πχ χειρουργικές επεμβάσεις στα μάτια). Τη 29 δεκαετία του 1980 σημειώθηκαν περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία των lasers με κυριότερη εξέλιξη τη δημιουργία laser ακτινών X. Κατά τις δεκαετίες που ακολούθησαν τα lasers παρουσίασαν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Τη δεκαετία του 1990 δημιουργήθηκαν τα πρώτα κβαντικά lasers και το 2006 το πρώτο laser πυριτίου από τον John Bowers [4].

1.2 Laser τύπου VCSEL

Ένας τύπος laser με τον οποίο θα ασχοληθούμε εκτενώς παρακάτω είναι το VCSEL (Vertical Cavity Surface – Emitting Laser)[6]. Το χαρακτηριστικό των lasers αυτών είναι ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται κάθετα στην ημιαγωγική περιοχή τους. Ένα τέτοιου τύπου laser αποτελείται από δύο καταναμημένες ανάδρασης κάτοπτρα Bragg τα οποία είναι αντίθετων προσμίξεων (n και p τύπου). Στο ενδιάμεσο αυτών βρίσκεται η περιοχή του κέρδους που στις περισσότερες περιπτώσεις τροφοδοτείται ηλεκτρικά. Παρακάτω θα μελετήσουμε ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία των οπτικών διασυνδέσεων, το VCSEL, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των λέιζερ επιφανειακής εκπομπής φωτός (surface emitting), χάρη στα οποία είναι εφικτή η παράλληλη μετάδοση πληροφορίας σε υπολογιστικά συστήματα.

1.2.1 Δομή

Στο VCSEL, ο ημιαγωγός σχηματίζεται με εναπόθεση εναλλασσόμενων στρωμάτων υψηλού και χαμηλού δείκτη ανακλαστικότητας, πάχους ίσο με το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Η κλασική δομή που έχουν τα περισσότερα VCSELS αποτελείται από δύο παράλληλους καθρέφτες ανάμεσα στους οποίους παρεμβάλλεται ένα λεπτό ενεργό στρώμα. Τα στρώματα διαμορφώνονται σε ακριβή απόσταση το ένα από το άλλο, αναγκάζοντας να αντανακλούν σε συντονισμό, την ακτινοβολία, έτσι ώστε η ισχύς της δέσμης να είναι πολύ υψηλή. Τα φωτόνια επίσης δημιουργούνται σε ένα πολύ μικρότερο ενεργό όγκο από το κλασικό λέιζερ ημιαγωγών, επηρεάζοντας την τιμή του ελάχιστου ρεύματος που χρειάζεται για να αρχίσει να εκπέμπει το VCSEL. Το πλήθος των στρωμάτων από τα οποία αποτελούνται οι καθρέφτες κυμαίνεται από 20 με 30, ενώ ο στόχος που τίθεται είναι η ανακλαστικότητα που θα έχουν οι καθρέφτες να είναι μεγαλύτερη από 99.9%, για να επιτευχθεί εκπομπή φωτός.[5] Φυσικά, εκτός από το σχηματισμό της οπτικής κοιλότητας, θα πρέπει στη δομή που θα αναπτυχθεί να υπάρχει η δυνατότητα επαρκούς έγχυσης ηλεκτρονίων και οπών μέσα στη μικρού όγκου ενεργό περιοχή. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των VCSELS, το ρεύμα κατοφλίου, εξαρτάται, τόσο από το αν ο όγκος της ενεργού περιοχής είναι μικρός, όσο και από το πόσο καλά μπορεί να οριστεί το οπτικό πεδίο και να υπάρχει μεγάλη αλληλοεπικάλυψη με την ενεργό περιοχή. [4]



Εικόνα 1.2 : Τυπική δομή VCSEL

Για μεγάλων αποστάσεων διασυνδέσεις είναι καταλληλότερα τα laser μεγάλου μήκους κύματος ($1.3\mu\text{m} - 1.5\mu\text{m}$) λόγω της χαμηλής απορρόφησης του γυαλιού της οπτικής ίνας. Η απορρόφηση του κυματοδηγού δεν είναι τόσο σημαντική σε μικρού μήκους διασυνδέσεις, για αυτό και δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση γυάλινων οπτικών ινών. Πιο σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος είναι η αποδοτικότητα μετατροπής του σήματος από ηλεκτρικό σε οπτικό και η αποδοτικότητα σύζευξης. Παρόλα αυτά πιο κατάλληλη πηγή από κάθε άλλο μήκος κύματος είναι στα $850\mu\text{m}$, διότι η τεχνολογία κατασκευής του είναι αρκετά πιο ώριμη και οικονομική. [5]

1.2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Τα ημιαγωγικά laser χρησιμοποιούνται ευρέως σε οπτικές επικοινωνίες και οπτικές συσκευές αποθήκευσης. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους με βάση τη δομή τους: ο ένας τύπος είναι το laser που εκπέμπει από την ακίδα και ο άλλος τύπος το laser που εκπέμπει από την επιφάνειά του. Το laser εκπομπής ακμής έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά, αλλά είναι σχεδόν αδύνατη η δημιουργία δισδιάστατου 2D σήματος. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην παραγωγή των VCSELs σε αντίθεση με τα laser εκπομπής ακμής. Τα laser εκπομπής ακμής δεν μπορούν να ελεγχθούν και να χαρακτηριστούν πριν το τέλος της διαδικασίας παραγωγής. Αν δεν λειτουργούν σωστά, είτε λόγω κακών επαφών είτε λόγω χαμηλής ποιότητας των υλικών, τότε όλος ο χρόνος και τα υλικά κατασκευής αχρηστεύονται. Τα VCSELs όμως μπορούν να αξιολογηθούν σε πολλά στάδια κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους και να ελεγχθούν τυχών αστοχίες στην ποιότητα των υλικών και γενικά πιθανά προβλήματα στη διαδικασία. Για παράδειγμα αν το μέσο δεν είναι απολύτως καθαρό από διηλεκτρικά υλικά, κατά τη διάρκεια της χάραξης με οξύ μία σύντομη εξέταση μπορεί να εντοπίσει ότι το ανώτερο μεταλλικό στρώμα δεν κάνει επαφή με το εσωτερικό στρώμα. [7].

Η χρήση των DBRs μειώνει τον κίνδυνο της καταστροφικής οπτικής βλάβης (COD) στους καθρέφτες, η οποία μπορεί να συμβεί στα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ. Επίσης μειώνεται ο κίνδυνος μηχανικής βλάβης των καθρεφτών. Ο μικρός όγκος της ενεργού περιοχής και η μεγάλη ανακλαστικότητα των καθρεφτών συνεισφέρουν στο πολύ χαμηλό ρεύμα κατωφλίου, της τάξης ακόμα και κάποιων μA , επιτυγχάνοντας έτσι μικρή κατανάλωση ισχύος και μειωμένη θέρμανση του λέιζερ. Αυτό το χαρακτηριστικό σε συνδυασμό με την απουσία του κινδύνου για COD, επεξηγεί την εξαιρετική αξιοπιστία των VCSELs και τους μεγάλους χρόνους ζωής που έχουν αναφερθεί σε πολλές περιπτώσεις.

Η επιφανειακή εκπομπή και το μικρό μέγεθος καθιστούν δυνατή την κατασκευή πολύ πυκνών 2-διάστατων συστοιχιών από VCSELs, κατάλληλες και για παράλληλη μετάδοση σε μονάδες πολλαπλών διαύλων. Τα VCSELs δεν χρειάζεται να διαχωριστούν μεταξύ τους επομένως είναι δυνατή η μονολιθική ολοκλήρωσή τους μαζί με άλλα οπτοηλεκτρονικά στοιχεία όπως φωτοανιχνευτές, διαμορφωτές ή ετερο-διπολικά τρανζίστορ (HBT).

Εξαιτίας της κυλινδρικής συμμετρίας που παρουσιάζουν τα VCSELs, το φως που εκπέμπεται έχει κυκλική δέσμη και μικρή απόκλιση. Η σύζευξη με τις οπτικές ίνες είναι ακόμα και μέχρι 90% και επιτρέπει μεγαλύτερες ανοχές στην ευθυγράμμιση, μειώνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης. Για λόγους σύγκρισης αναφέρουμε πως, το φως που εκπέμπεται από ένα κλασικό ημιαγωγικό laser εκπομπής ακμής έχει ελλειπτική δέσμη με κάθετη και διαμήκη απόκλιση περίπου 40° και 10° αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η σύζευξη του φωτός στην οπτική ίνα χωρίς να υπάρχουν απώλειες ή χωρίς την χρήση εξειδικευμένων οπτικών εξαρτημάτων. [5],[4]

Τέλος, ενώ τα πρώτα VCSELs εξέπεμπαν σε πολλαπλούς διαμήκεις ή νηματοειδείς τρόπους, τα τελευταία χρόνια είναι πλέον συνήθη τα VCSEL ενός τρόπου (single mode)[5]. Παρ' όλα αυτά, τα VCSELs παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ. Οι κατασκευαστικές ανοχές στην ανάπτυξη των VCSELs είναι πολύ πιο αυστηρές σε σχέση με αυτές των laser εκπομπής ακμής, με περιορισμό για παράδειγμα στο πάχος να είναι της τάξης του 1%. Ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα των VCSELs είναι η τάση που εμφανίζουν για λειτουργία σε πολλαπλούς τρόπους ταλάντωσης, εξαιτίας της μεγάλης

κατακόρυφης διάστασης της οπτικής κοιλότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φάσμα εκπομπής να έχει πολλά μήκη κύματος που περιορίζουν την μέγιστη απόσταση εξαιτίας φαινομένων χρωματικής διασποράς.

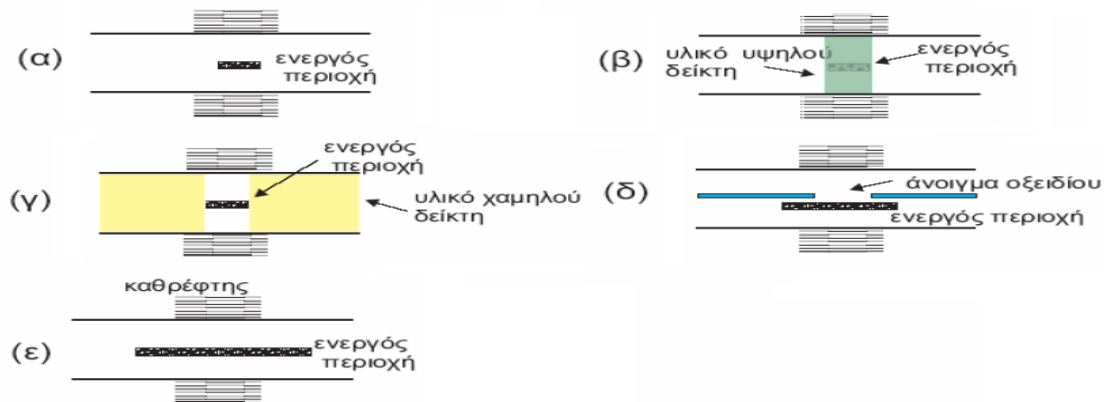
1.3.Κατηγορίες VCSELs

Σε αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε με τις διάφορες κατηγορίες VCSEL. Η πιο γνωστή κατηγοριοποίηση των VCSELs είναι αυτό το οποίο έχει να κάνει με το μήκος κύματος που εκπέμπουν. Τα VCSELs κατηγοριοποιούνται σε αυτά για Datacom εφαρμογές και σε αυτά για Telecom εφαρμογές. Στις Datacom εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως τα μήκη κύματος των 850,980 και 1100 nm και στις Telecom αυτά των 1300 και 1550 nm. Αυτά τα μήκη κύματος επιλέχθηκαν μετά από πολλά πειράματα και έρευνες οι οποίες οδήγησαν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη χρήση τους στις εκάστοτε εφαρμογές.

Εκτός από την παραπάνω κατηγορία, μία άλλη κατηγοριοποίηση είναι αυτή που έχει να κάνει με τον τρόπο εκπομπής φωτός. Οι δύο κατηγορίες σε αυτή τη περίπτωση είναι το Single-mode και Multi-mode VCSEL. Τα single-mode VCSELs είναι αυτά τα VCSELs τα οποία εκπέμπουν μόνο σε ένα μήκος κύματος ενώ τα multi-mode ή Tunable VCSELs είναι αυτά τα οποία διαθέτουν την δυνατότητα να εκπέμπουν σε πολλά μήκη κύματος ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία λειτουργούν. Και στις δύο περιπτώσεις έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί διάφορες οπτικές ίνες οι οποίες έχουν βελτιστοποιηθεί για αυτές τις συσκευές.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση είναι αυτή η οποία έχει να κάνει με την τεχνική που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του φωτός και βασίζεται στην αύξηση της επικάλυψης του οπτικού πεδίου με αυτής της ενεργής περιοχής. Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε τους παρακάτω τύπους [8]:

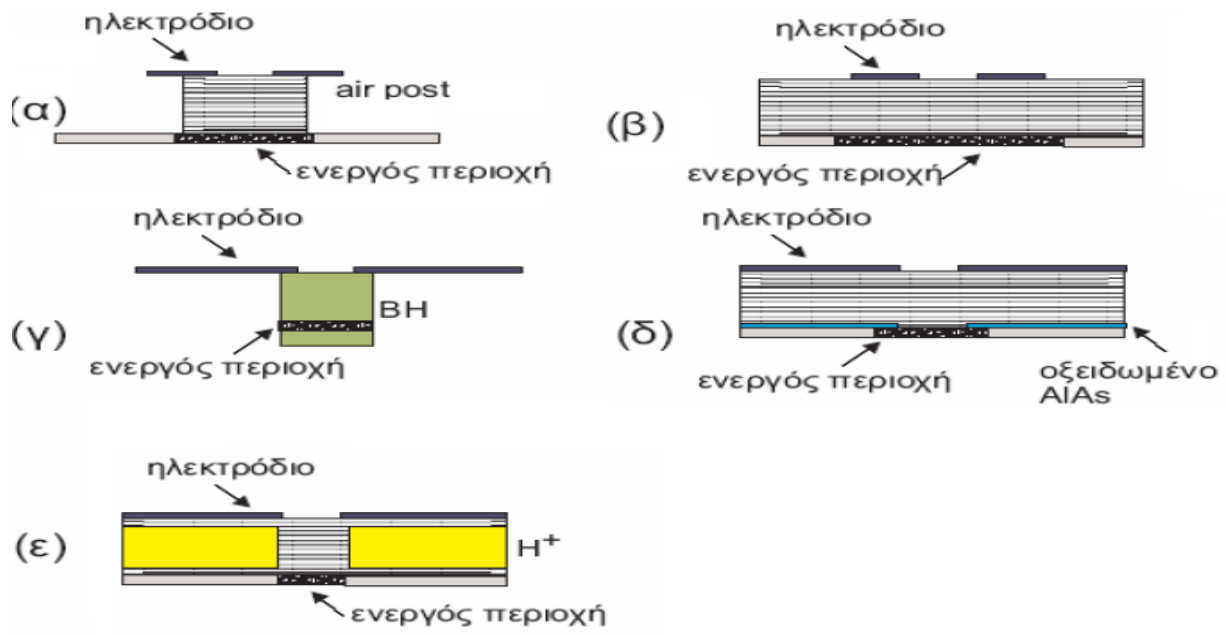
- Τύποι gain-guide (Εικόνα 2.1α). Περιορίζεται το οπτικό πεδίο στην περιοχή όπου υπάρχει απολαβή. Σε υψηλότερα ρεύματα πόλωσης μπορεί να μεταβληθεί ο τρόπος ταλάντωσης, εξαιτίας του φαινομένου της χωρικής εξαφάνισης οπών.
- Τύποι Buried Heterostructure, (BH) (Εικόνα 2.1β). Με αυτή τη μέθοδο σχηματίζεται μια ιδανική index-guiding δομή.
- Τύποι anti-guiding (Εικόνα 2.1γ). Η γειτονική περιοχή παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης. Αυτή η δομή είναι κατάλληλη για να παραμείνει ίδιος ο τρόπος ταλάντωσης ακόμα και σε μεγάλα ρεύματα οδήγησης.
- Επιλεκτική οξειδωση AIAs(Εικόνα 2.1δ). Το οπτικό πεδίο μπορεί να περιοριστεί εξαιτίας της διαφοράς στους δείκτες διάθλασης του AIAs και από τα οξειδωμένα στρωματά AIAs.
- Τύποι Fabry-Perot (Εικόνα 2.1ε). Το συντονισμένο πεδίο περιορίζεται από τους δυο ανακλαστήρες που σχηματίζουν το Fabry-Perot συντονιστή. Η απώλειες διάθλασης αυξάνονται με την μείωση του διαμέτρου του καθρέπτη.



Εικόνα 1.3: Δομές για περιορισμό φωτός

Τέλος ,εκτός από τεχνικές για τον περιορισμό του φωτός, υπάρχουν και τεχνικές για τον περιορισμό του ρεύματος. Άρα μια άλλη κατηγοριοποίηση των VCSELs είναι αυτή που έχει να κάνει με την τεχνική που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του ρεύματος. Αυτές οι τεχνικές παρουσιάζονται συνοπτικά και είναι οι παρακάτω [8]:

- Τύποι air-post(Εικόνα 2.2α). Ο περιορισμός του ρεύματος επιτυγχάνεται μέσω ενός ορθογωνίου ή κυκλικού διάκενου. Αποτελεί την απλούστερη μέθοδο κατασκευής. Η απόδοση των λέιζερ μπορεί να επηρεαστεί από την μη-ακτινοβολούσα επανασύνδεση στο εξωτερικό τοίχωμα.
- Με ηλεκτρόδια δακτυλίου (Εικόνα 2.2β). Η δομή αυτή περιορίζει την ροή ρεύματος σε γειτονικές περιοχές του δακτυλίου. Το φως που εκπέμπεται μπορεί να εξέρθει από το παράθυρο που βρίσκεται στο κέντρο του δακτυλίου. Αυτή η δομή παρουσιάζει το μειονέκτημα της όχι απολυτής παγίδευσης του ρεύματος σε μικρή περιοχή λόγω διάχυσης.
- Τύποι Buried Heterostructure (Εικόνα 2.2γ). Σε αυτή τη δομή καλύπτεται η ενεργός περιοχή με έναν ημιαγωγό με μεγάλο ενεργειακό χάσμα. Η γειτονικές δομές μπορούν να έχουν πολύ μικρό δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας index-guiding δομής. Ένα μειονέκτημα είναι αυτό της περίπλοκης κατασκευής ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μικρών τρισδιάστατων στοιχείων.
- Επιλεκτική οξείδωση AIAs (Εικόνα 2.2δ). Εδώ δημιουργείται ένα μονωτικό στρώμα με οξείδωση ειδικού AIAs στρώματος που βρίσκεται στην ενεργό περιοχή.
- Με βομβαρδισμό πρωτονίων (Εικόνα 2.2ε). Σε αυτή τη δομή περιορίζεται η διάχυση του ρεύματος προς τις γύρω περιοχές από ένα μονωτικό στρώμα από πρωτόνια



Εικόνα 1.4: Δομές για περιορισμό ρεύματος

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Silfvast W. T., Lasers. Fundamentals of Photonics (course 1 of 8). University of Central Florida. Orlando, Florida.
- [2] History of Lasers. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα με διεύθυνση: <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>
- [3] Στασινοπούλου Β., Ταμπαθάνη Ν., Χριστογιάννη Μ., Το Laser και οι Εφαρμογές του. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005
- [4] A Brief History of Lasers. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα: <http://www.kigre.com/files/historylasers.pdf>
- [5] Ray T. Chen, Chulchae Choi, Optical Interconnects, USA, 2007
- [6] K. Iga, Surface -Emitting Laser - Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics , Vol . 6, No. 6, pp. 1201-1215, Nov. /Dec. 2000
- [7] Joseph T. Verdeyen, Laser Electronics, Third Edition, USA, 1995
- [8] Μινόγλου Κυριακή, " Οπτικοηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης για υπέρυθμα φωτονικά μικροσυστήματα", Διδακτορική Διατριβή, ΕΚΠΑ, Αθήνα, Μάρτιος 2007

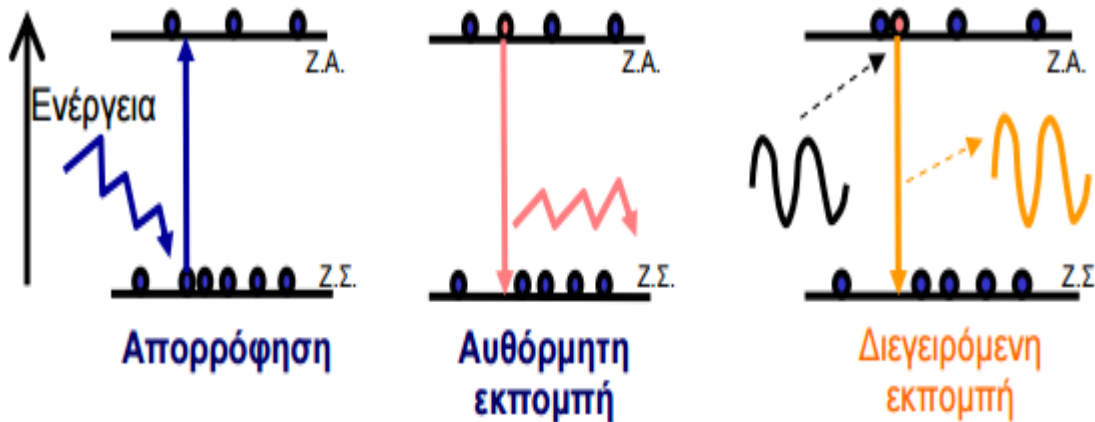
Κεφάλαιο 2: Βασικές αρχές λειτουργίας των VCSEL

2.1 Οπτικές διαδικασίες στα ημιαγωγικά λέιζερ

Η εκπομπή φωτονίων στα ημιαγωγικά λέιζερ οφείλεται στη επανασύνδεση ηλεκτρονίων- οπών μέσα στην ενεργό περιοχή. Ακτινοβολούσα επανασύνδεση συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας επανασυνδέεται με μία κενή θέση (οπή) της ζώνης σθένους και η ενέργεια εκπέμπεται με τη μορφή φωτονίου. Οι οπτικές διαδικασίες που σχετίζονται με την ακτινοβολούσα επανασύνδεση στους ημιαγωγούς είναι: (α)απορρόφηση, (β)αυθόρμητη εκπομπή και (γ)διεγυρόμενη εκπομπή (εικόνα 4.1). Κατά την απορρόφηση, ένα φωτόνιο προσπίπτει στο ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους και αν έχει την απαιτούμενη ενέργεια κάνει το ηλεκτρόνιο να μεταβεί στην ζώνη αγωγιμότητας, ενώ το ίδιο το φωτόνιο χάνεται. Οι αντίθετες μεταβάσεις, από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους, συνδέονται με την παραγωγή φωτονίου. Η αυθόρμητη εκπομπή δεν απαιτεί κάποια διέγερση για να συμβεί, αλλά το φως που προκύπτει είναι ασύμφωνο και δεν έχει συσχέτιση τόσο στην φάση όσο και στην πόλωση με την υπόλοιπη φωτεινή ακτινοβολία στην κοιλότητα. Αντίθετα, διεγυρόμενη εκπομπή συμβαίνει όταν ένα φωτόνιο που προέρχεται από τη διέγερση πέφτει σε ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας, το διεγείρει και αυτό μεταπίπτει στη ζώνη σθένους εκπέμποντας ένα νέο φωτόνιο που έχει την ίδια ενέργεια και ορμή με το προσπίπτον φωτόνιο. Αυτή η διαδικασία αποτελεί την αρχή της λειτουργίας των λέιζερ και περιεγράφηκε από τον Einstein [1] το 1917. Οι ηλεκτρονικές μεταβάσεις ανάμεσα στη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας στα ημιαγωγικά λέιζερ είναι όμοιες με τις ατομικές ή μοριακές μεταβάσεις που συμβαίνουν στα λέιζερ αερίου. Η μόνη διαφορά είναι πως στα ημιαγωγικά λέιζερ οι οπτικές μεταβάσεις γίνονται ανάμεσα σε συνεχείς ζώνες καταστάσεων. Η ακριβής περιγραφή της δομής των ενεργειακών ζωνών απαιτεί σύνθετες αριθμητικές μεθόδους. Η πιο συχνή προσέγγιση που χρησιμοποιείται στους ημιαγωγούς αμέσου χάσματος είναι το παραβολικό μοντέλο βάση του οποίου η ενέργεια με την κυματοσυνάρτηση σχετίζονται με την εξίσωση 4.1.

$$E_c = \frac{\hbar^2 \psi^2}{2m_c} \quad , \quad E_v = \frac{\hbar^2 \psi^2}{2m_v} \quad (2.1)$$

όπου m_e και m_v είναι οι ενεργές μάζες των ηλεκτρονίων και των οπών, \hbar είναι η σταθερά του Planck και ψ είναι το πλάτος της κυματοσυνάρτησης Ψ . Σε ένα ημιαγωγό αμέσου χάσματος το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας και το μέγιστο της ζώνης σθένους συμβαίνουν στο ίδιο Ψ . Αφού η ορμή του φωτονίου είναι πολύ μικρότερη από την ορμή των φορέων $\hbar \Psi$, ακτινοβολούσες μεταπτώσεις συμβαίνουν ανάμεσα σε ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές του ίδιου κυματοδιανύσματος.



Εικόνα 2.1: Οπτικές διαδικασίες

Η βασική δομή ενός κλασικού ημιαγωγικού λέιζερ διπλής ετεροδομής αποτελείται από ένα υλικό αμέσου χάσματος που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα των οποίων τα ενεργειακά χάσματα είναι μεγαλύτερα και οι δείκτες διάθλασης μικρότεροι. Η διαδικασία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων-οπών αποτελεί την οπτική απολαβή ενώ οι διαχωριστικές επιφάνειες την οπτική ανάδραση. Όταν το ρεύμα έγχυσης αυξάνεται όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια πηγαίνουν στην υψηλής ενέργειας ζώνη αγωγιμότητας, μέχρι που κάποια στιγμή οι πιθανότητες για απορρόφηση και διεγειρόμενη εκπομπή γίνονται ίσες. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως διαφάνεια (transparency). Αν το ρεύμα αυξηθεί ακόμα περισσότερο επιτυγχάνεται αναστροφή πληθυσμού (population inversion) και η δομή παρέχει οπτική απολαβή για μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο ενεργειακό χάσμα. Για κάποια τιμή του ρεύματος η απολαβή γίνεται αρκετά μεγάλη ώστε να αντισταθμίσει τις οπτικές απώλειες και η δομή λειτουργεί ως ένας οπτικός ταλαντωτής. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα κατωφλίου. Το λέιζερ, στην πιο απλή του δομή, αποτελείται από δύο καθρέφτες όπου ανάμεσα τους παρεμβάλλεται ένα μέσο ενίσχυσης του φωτός. Οι δύο καθρέφτες αντανακλούν μερικώς το φως (~99%) το οποίο ταλαντώνεται πολλές φορές μέσα στην περιοχή ενίσχυσης. Αν η απολαβή είναι αρκετή ώστε να αντισταθμίσει τις οπτικές απώλειες, τότε το λέιζερ θα εκπέμψει σύμφωνο φως δια μέσω των καθρεφτών. Αυτή η τιμή της απολαβής κατά την οποία αρχίζει η εκπομπή ονομάζεται κέρδος κατωφλίου.

2.2 Εξισώσεις εκπομπής

Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης φωτεινής ακτινοβολίας καθορίζεται από τη συνθήκη σχετικά με τη φάση, βάση της οποίας το οπτικό κύμα αφού περάσει από την κοιλότητα θα εκπεμφθεί συμφασικά. Οι συνθήκες για εκπομπή που αναφέρονται στο κέρδος και στην φάση είναι:

$$\sqrt{R_f R_r} e^{-2jkL + 2\frac{\Gamma_g - \alpha_i L}{2}} = 1 \quad (2.2)$$

και

$$2kL = m2\pi \quad (2.3)$$

όπου R_f και R_r είναι οι βαθμοί ανάκλασης των 2 καθρεφτών, L είναι το μήκος της κοιλότητας, Γ είναι ο συντελεστής οπτικού περιορισμού, g είναι η απολαβή στην κοιλότητα και α_i είναι οι εσωτερικές απώλειες. Το k είναι η σταθερά μετάδοσης του κύματος (με m : ακέραιο) και ισούται με

$$k = 2\pi n / \lambda_0 \quad (2.4)$$

όπου n ο ενεργός δείκτης διάθλασης στην κοιλότητα και λ_0 το μήκος κύματος της ταλάντωσης. Από τις (4.3) και (4.4) προκύπτει ότι

$$\lambda_0 = \frac{2nL}{m} \quad (2.5)$$

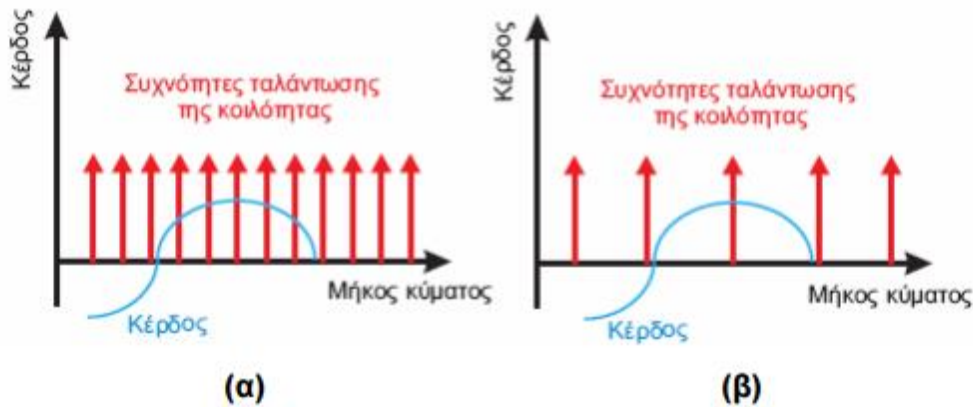
Τα διαφορετικά μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε διαφορετικές λύσεις της συνθήκης φάσης (4.3) αναφέρονται ως διαφορετικοί διαμήκης τρόποι (longitudinal modes). Το λέιζερ θα εκπέμπει τελικά μόνο σε ένα ή σε ορισμένα διακριτά μήκη κύματος, όπου η απολαβή παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της. Ένα λέιζερ το οποίο ταλαντώνεται σε ένα μόνο μήκος κύματος ονομάζεται μονότροπο (singlemode).

Αν επιλύσουμε την εξίσωση (4.2) ως προς τη απολαβή θα καταλήξουμε στη σχέση (4.6) για το κέρδος κατωφλίου, όπου γίνεται φανερός ο λόγος για τον οποίο τα μικρού μήκους

κοιλότητας VCSELs απαιτούν υψηλή ανακλαστικότητα των καθρεφτών αν θέλουμε χαμηλό κέρδος κατωφλίου.

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left[a_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_f R_r} \right) \right] \quad (2.6)$$

Στην εικόνα 4.2 που ακολουθεί φαίνεται πως γίνεται η επιλογή του τρόπου εκπομπής (lasing mode) σε ένα κλασικό ημιαγωγικό λέιζερ και σε ένα VCSEL. Η απόσταση ανάμεσα στα διαμήκη modes της κοιλότητας δίνεται από την σχέση $\Delta\nu=c/2L$, όπου L είναι το μήκος της κοιλότητας. Στα edge-emitting FB λέιζερ το μήκος κύματος εκπομπής ορίζεται ως το μήκος κύματος στο οποίο έχουμε τη μεγαλύτερη απολαβή, σε αντίθεση με τα VCSELs όπου καθορίζεται από το συντονισμό των DBR καθρεφτών. Αν και το εύρος σε μήκη κύματος είναι το ίδιο για τα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ και για τα VCSELs, επειδή στην περίπτωση των VCSELs το μήκος της κοιλότητας είναι πολύ μικρό, η απόσταση ανάμεσα στα modes είναι πολύ μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα να έχουμε μονότροπη (single-mode) λειτουργία. Υπάρχει βεβαίως περίπτωση να έχουμε και πολύτροπα VCSELs, αν περισσότερες από μία συχνότητες ταλάντωσης της κοιλότητας βρεθούν μέσα στην καμπύλη της απολαβής.



Εικόνα 2.2: Διαφορά στον τρόπο εκπομπής (α) των in-plane και (β) των VCSELs

2.3 Εξισώσεις ρυθμού

Η λειτουργία ενός μονότροπου λέιζερ μπορεί να περιγράψει από τη θεωρία των «δεξαμενών» (reservoir) για το πλήθος των ελεύθερων φορέων (ηλεκτρόνια στη ζώνη

αγωγιμότητας) και φωτονίων (οπτική ενέργεια στην κοιλότητα). Οι ρυθμοί με τους οποίους αλλάζουν οι πληθυσμοί δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{dN}{dt} = I_{in} - I_{sp} - R_{st}S \quad (2.7)$$

$$\frac{dS}{dt} = (R_{st} - \gamma_i - \gamma_m)S + R_{sp} \quad (2.8)$$

Η πρώτη εξίσωση δηλώνει πως η μεταβολή των φορέων στην κοιλότητα, N , ισούται με τον ρυθμό έγχυσης φορέων, I_{in} , μειωμένο κατά το ρυθμό με τον οποίο χάνονται φορείς λόγω αυθόρμητης επανασύνδεσης I_{sp} και διεγερόμενης εκπομπής, $R_{st}S$. Το ρεύμα αυθόρμητης επανασύνδεσης I_{sp} περιγράφει την επανασύνδεση των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας με οπές από την ζώνη σθένους. Αυτή η επανασύνδεση μπορεί να είναι ακτινοβολούσα (με την εκπομπή ενός φωτονίου), ή μη ακτινοβολούσα. Φορείς μπορεί να επανασυνδεθούν χωρίς την εκπομπή φωτός εξαιτίας ατελειών στον κρύσταλλο ή στην επιφάνεια του κρυστάλλου ή λόγω του φαινομένου Auger, κατά το οποίο ένας τρίτος φορέας απορροφά ως κινητική την ενέργεια που εκλύεται από την επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής. Η μη ακτινοβολούσα επανασύνδεση δημιουργεί θερμότητα και γι' αυτό το λόγο είναι μη επιθυμητή. Όλες οι διαδικασίες επανασύνδεσης αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των φορέων και συνήθως χρησιμοποιείται η προσέγγιση:

$$I_{sp} = \frac{N}{\tau_{sp}} \quad (2.9)$$

όπου τ_{sp} είναι ο χρόνος ζωής των φορέων.

Η δεύτερη εξίσωση [2] δηλώνει πως η καθαρή αύξηση του αριθμού των φωτονίων, S , ισούται με τον ρυθμό με τον οποίο τα φωτόνια δημιουργούνται λόγω αυθόρμητης εκπομπής, R_{sp} , και λόγω διεγερόμενης εκπομπής, $R_{st}S$, μείον τα φωτόνια που χάνονται λόγω εσωτερικών απωλειών, $\gamma_i S$, και απωλειών στους καθρέφτες, $\gamma_m S$. Οι απώλειες σύζευξης κατά την έξοδο του φωτός λαμβάνονται υπόψη με τον όρο $\gamma_m S$. Οι εσωτερικές απώλειες $\gamma_i S$ περιλαμβάνουν την απορρόφηση των φωτονίων από σκέδαση καθώς και την απορρόφηση των ελευθέρων φορέων. Ο όρος R_{sp} είναι το ποσό της αυθόρμητης εκπομπής που είναι σε ίδιο τρόπο ταλάντωσης με το σύμφωνο φως που εκπέμπεται.

Ο όρος R_{st} είναι ο ρυθμός διεγερόμενης εκπομπής ανά φωτόνιο και παίρνει θετική τιμή όταν οι φορείς είναι αρκετοί ώστε να έχουμε αναστροφή πληθυσμού (population inversion), δηλαδή όταν ο αριθμός των φορέων είναι μεγαλύτερος από την συγκεκριμένη τιμή N_0 , γνωστή ως συγκέντρωση φορέων στην κατάσταση διαφάνειας.

$$R_{st} = \frac{\Gamma v_g}{V} g(N) \quad (2.10)$$

όπου Γ είναι ο συντελεστής οπτικού περιορισμού, V είναι ο όγκος, v_g είναι η ταχύτητα ομάδας και $g(N)$ η απολαβή του υλικού. Για τα περισσότερα υλικά το $g(N)$ αυξάνει σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των φορέων και προσεγγίζεται με τη σχέση:

$$g = a(N - N_0) \quad (2.11)$$

όπου το a είναι η διαφορική απολαβή $\partial g / \partial N$. Για λέιζερ κβαντικού πηγαδιού (QW) και όταν η απολαβή είναι θετική το g προσεγγίζεται καλύτερα ως ανάλογο της ποσότητας $\ln(N/N_0)$. Σε υψηλή πυκνότητα φωτονίων μπορεί να παρατηρηθεί κορεσμός της απολαβής λόγω φαινομένων όπως είναι η χωρική εξαφάνιση οπών (spatial hole burning) [3] και η θέρμανση των φορέων (carrier heating) [4]. Για να συμπεριληφθούν και αυτά τα φαινόμενα στην έκφραση της απολαβής χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$g(N, S) = \frac{a}{1 + \frac{\Gamma \epsilon}{V} S} (N - N_0) \quad (2.12)$$

όπου ϵ είναι ο συντελεστής συμπίεσης απολαβής (gain compression factor). Η μη γραμμική απολαβή δεν έχει σημαντική επίδραση στις στατικές χαρακτηριστικές του λέιζερ, περιορίζει όμως την απόδοση κατά τη δυναμική λειτουργία καθώς μειώνει τη διαφορική απολαβή και αυξάνει την απόσβεση της συχνότητας συντονισμού.

2.4 Κατάστατη σταθερής ηλεκτρικής πόλωσης

Όταν το λέιζερ λειτουργεί με πόλωση σταθερού ρεύματος το αριστερό μέλος των εξισώσεων 4.7 και 4.8 ισούται με το μηδέν. Αν το λέιζερ λειτουργεί πάνω από το κατώφλι, ο όρος της αυθόρμητης εκπομπής R_{sp} μπορεί να μη ληφθεί υπόψη συγκρινόμενος με την εκπομπή από

διέγερση. Η ισχύς στην έξοδο, η οποία σχετίζεται άμεσα με το πλήθος των φωτονίων, δίνεται από την σχέση:

$$P = \gamma_m S = \frac{\gamma_m}{\gamma_i + \gamma_m} (I_{in} - I_{sp}) \quad (2.13)$$

Επίσης αν θεωρήσουμε γραμμική εξάρτηση της απολαβής προκύπτει η παρακάτω σχέση για τον αριθμό των φορέων:

$$N = \frac{\gamma_i + \gamma_m}{a} + N_0 \quad (2.14)$$

Για λειτουργία επομένως πάνω από το κατώφλι ο αριθμός των φορέων θα είναι ανεξάρτητος από το ρεύμα πόλωσης αν οι παράμετροι γ_i , γ_m και N_0 είναι επίσης ανεξάρτητες από τις ποσότητες που επηρεάζονται από το ρεύμα, όπως η θερμοκρασία και η πυκνότητα φωτονίων. Αυτό βέβαια δεν είναι απολύτως αληθές, αλλά σαν μια πρώτη προσέγγιση για την κατανόηση της λειτουργίας των λέιζερ, μπορεί να θεωρηθεί πως ο αριθμός των φορέων πάνω από το κατώφλι παραμένει σταθερός και ίσος με N_{th} . Αν δεχτούμε πως αυτό ισχύει, τότε και το ρεύμα αυθόρμητης επανασύνδεσης $I_{sp} = I_{th} = N_{th} / \tau_p$ θα είναι επίσης σταθερό. Η διαφορά $I - I_{th}$ θα δίνει την παραγωγή φωτονίων από διεγερόμενη εκπομπή. Το I_{th} ονομάζεται ρεύμα κατωφλίου. Από την κλίση της χαρακτηριστικής ισχύος-ρεύματος εξάγεται η παράμετρος που ονομάζεται κβαντική απόδοση (quantum efficiency).

Στην πραγματικότητα τα θερμικά φαινόμενα, η χωρική απώλεια οπών, η μη γραμμική απολαβή και το ρεύμα διαρροής (leakage current) διαφοροποιούν κατά πολύ αυτή την απλή προσέγγιση και θα επηρεάσουν για παράδειγμα τόσο τη γραμμική σχέση ισχύος- ρεύματος όσο και την παραδοχή της σταθερότητας του αριθμού των φορέων πάνω από το κατώφλι. Στα επόμενα κεφάλαια, όπου γίνεται εκτενής αναφορά στις εξισώσεις των VCSELs, θα γίνει φανερό πως κάθε άλλο παρά γραμμικές είναι οι σχέσεις και πως επιδράσεις παραγόντων όπως η θερμοκρασία αποδεικνύονται κρίσιμης σημασίας.

2.5 Ρεύμα κατωφλίου

Οι βασικές φυσικές διαφορές ανάμεσα στα VCSELs και τα κλασικού τύπου λέιζερ συνοψίζονται στον πίνακα 4.1. Το βασικό σημείο είναι ότι το μήκος της κοιλότητας στα VCSELs είναι της τάξης του μήκους κύματος, επομένως αρκετά μικρότερο από αυτό των κλασικών λέιζερ με 300μm μήκος.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση τιμών χαρακτηριστικών παραμέτρων των κλασικών ημιαγωγικών λέιζερ και των επιφανειακής εκπομπής

Παράμετρος	Σύμβολο	Κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ	Λέιζερ επιφανειακής εκπομπής
Πάχος ενεργού στρώματος	d	100Å-0.1 μm	80 Å-0.5μm
Εμβαδό ενεργού στρώματος	S	3x300 μm ²	5x5 μm ²
Ενεργός όγκος	V	9-90 μm ³	0.2-15.5 μm ³
Μήκος κοιλότητας	L	300 μm	≈1 μm
Ανακλαστικότητα	R _m	0.3	0.99-0.999
Οπτική παγίδευση	ξ	≈3%	≈4%
Εγκάρσια παγίδευση	ξ _t	3-5%	50-80%
Διαμήκης παγίδευση	ξ _l	50%	2x1% x3(3QWs)
Χρόνος ζωής φωτονίου	τ _p	≈1 ps	≈1 ps
Συχνότητα χαλάρωσης	f _r	<5GHz	>10GHz

Το ρεύμα κατωφλίου I_{th} των VCSELs μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου J_{th} με την παρακάτω σχέση:

$$I_{th} = \pi(D/2)^2 J_{th} = \frac{eV N_{th}}{n_i \tau_s} \cong \frac{eV B_{eff}}{n_i n_{spont}}, \quad (2.15)$$

και η πυκνότητα φορέων κατωφλίου δίνεται από τη σχέση:

$$N_{th} = N_t + \frac{a_a + a_d + a_m}{A_0 \xi}, \quad (2.16)$$

όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, V είναι ο όγκος της ενεργού περιοχής ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$V = \pi(D/2)^2 d \quad (2.17)$$

οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις είναι οι εξής:

- α_a : Συντελεστής απωλειών απορρόφησης κανονικοποιημένος στο μήκος
- α_d : Συντελεστής απωλειών περίθλασης κανονικοποιημένος στο μήκος
- α_m : Συντελεστής απωλειών καθρέφτη
- A_0 : Συντελεστής απολαβής που εκφράζει τη διαφορική απολαβή $\partial g / \partial N$

(όπου g είναι η οπτική απολαβή ανά cm)

B_{eff}	: Συντελεστής ενεργού επανασύνδεσης
D	: Διάμετρος ενεργού περιοχής
L	: Ενεργό μήκος κοιλότητας μαζί με τα στρώματα διαχωρισμού και τα στρώματα των Bragg καθρεφτών
N_t	: Πυκνότητα φορέων στην κατάσταση διαφάνειας
τ_s	: Χρόνος ζωής επανασύνδεσης
η_i	: Συντελεστής απόδοσης έγχυσης
η_{spon}	: Συντελεστής απόδοσης αυθόρμητης εκπομπής

Όπως φαίνεται από τη σχέση (4.15), αν θέλουμε να μειωθεί η τιμή του ρεύματος κατωφλίου θα πρέπει να ελαττωθεί ο όγκος της ενεργού περιοχής. Θεωρώντας πως η πυκνότητα των φορέων κατωφλίου δεν αλλάζει σημαντικά, αν μειώσουμε τον ενεργό όγκο μειώνουμε και το κατώφλι αφού τελικά καταφέρνουμε να ελαττώσουμε την ενεργό περιοχή. Συγκρίνοντας τις διαστάσεις των επιφανειακής εκπομπής και των κλασικών λέιζερ από τον πίνακα 4.1 είναι φανερό πως ο όγκος στα VCSELs μπορεί να είναι 3 τάξεις μεγέθους μικρότερος. Αυτό ερμηνεύει άμεσα το γεγονός πως στα κλασικά λέιζερ το ρεύμα κατωφλίου είναι της τάξης των δεκάδων mA, ενώ στα VCSELs μπορεί να γίνει μικρότερο του 1mA. Με πιο εξειδικευμένες τεχνικές οπτικού περιορισμού των φορέων, ξεπερνώντας τα τεχνολογικά προβλήματα όπως την κατασκευή δομών πολύ μικρών διαστάσεων, την ωδική αντίσταση των ηλεκτροδίων και βελτιώνοντας την απαγωγή θερμότητας αναμένονται VCSELs που θα έχουν ρεύμα κατωφλίου μικρότερο ακόμα και από 1μΑ.

Μια πρώτη εκτίμηση του κατωφλίου δείχνει πως το ρεύμα είναι ανάλογο του τετραγώνου της διαμέτρου της ενεργού περιοχής. Βέβαια, υπάρχει ένα ελάχιστο όριο που προκύπτει από την ελάττωση του συντελεστή οπτικού περιορισμού, δηλαδή από το πόσο αλληλοκαλύπτονται το οπτικό πεδίο και η περιοχή απολαβής όταν η διάμετρος μειωθεί σημαντικά. Επίσης, η ελάττωση του όγκου, ειδικά όσον αφορά τη διαμήκη κατεύθυνση, περιορίζεται καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη φαινόμενα απώλειας φορέων από την οπτική διασπορά, την περίθλαση των φωτεινών κυμάτων, τη μη ακτινοβολούσα επανασύνδεση φορέων και άλλες ατέλειες των λέιζερ.

2.6 Ισχύς εξόδου και συντελεστής απόδοσης

Αν στη θέση του εμπρόσθιου ανακλαστήρα χρησιμοποιηθεί ένας μη απορροφητικός καθρέφτης, ο διαφορικός συντελεστής απόδοσης n_d μπορεί να εκφραστεί ως:

$$n_d = \frac{a_m}{a_a + a_d + a_m} = n_i \frac{(1/L) \ln(1/R_f)}{a + (1/L) \ln(1/\sqrt{R_f R_r})} \quad (2.18)$$

όπου a είναι οι συνολικές εσωτερικές απώλειες απορρόφησης και περίθλασης: $a_a + a_d$, ενώ R_f και R_r είναι οι ανακλαστικότητες του εμπρός και του πίσω καθρέφτη αντιστοίχως.

Η οπτική ισχύς που εκπέμπεται δίνεται από τη σχέση:

$$P_o = \begin{cases} n_d n_{spont} C E_g I & (I \leq I_{th}) \\ n_d E_g (I - I_{th}) + n_d n_{spont} C E_g I_{th} & (I \geq I_{th}) \end{cases} \quad (2.19)$$

όπου E_g είναι το ενεργειακό χάσμα, C είναι ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής και I είναι το ρεύμα οδήγησης. Επομένως, η σχέση που εκφράζει το συντελεστή απόδοσης μετατροπής ενέργειας n_p , (wall-plug efficiency) για ρεύματα οδήγησης πολύ μεγαλύτερα από το ρεύμα κατωφλίου είναι:

$$n_p = \frac{P_o}{V_b I} = n_d \frac{E_g}{V_b} \left(1 - \frac{I_{th}}{I}\right) \quad (2.20)$$

με V_b την τάση πόλωσης και αγνοώντας τον παράγοντα της αυθόρμητης εκπομπής της εξίσωσης (4.19). Στην περίπτωση των VCSELs, όπου το ρεύμα κατωφλίου I_{th} μπορεί να πάρει πολύ μικρές τιμές, ο συντελεστής απόδοσης μπορεί να είναι σχετικά μεγάλος. Επίσης, με την εξέλιξη των τεχνολογιών σχετικά με τις ηλεκτρικές επαφές, τα επίπεδα των τάσεων οδήγησης μειώθηκαν. Έχουν αναφερθεί περιπτώσεις όπου ο συντελεστής απόδοσης της μετατροπής ισχύος είναι μεγαλύτερος ακόμα και από 57%.

2.7 Διαμόρφωση

Το εύρος ζώνης διαμόρφωσης εκφράζεται ως συνάρτηση της συχνότητας χαλάρωσης f_r μέσω της σχέσης

$$F_{3dB} = 1.55 f_r \quad (2.21)$$

όπου

$$f_r = \frac{1}{2\pi\tau_s} \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_p} \left(\frac{I}{I_{th}} - 1 \right)} \quad (2.22)$$

και ο χρόνος ζωής του φωτονίου είναι

$$\tau_p = \frac{n_{eff}/c}{a + a_m} \quad (2.23)$$

Ο χρόνος τ_p είναι τάξης μεγέθους του 1ps. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το ρεύμα κατωφλίου μπορεί να πάρει μικρές τιμές, οδηγεί στο συμπέρασμα παρατηρώντας την εξίσωση (4.22) πως η συχνότητα χαλάρωσης των VCSELS είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα κλασικά λέιζερ, ακόμα και σε χαμηλά ρεύματα οδήγησης. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.16), (4.22) και (4.23) μπορούμε να εκφράσουμε την πυκνότητα φορέων κατωφλίου ως συνάρτηση του χρόνου ζωής του φωτονίου (4.24). Παρατηρούμε πως αυξάνοντας την τιμή της διαφορικής απολαβής $\partial g / \partial N$, της οπτικής παγίδευσης ξ και του χρόνου ζωής του φωτονίου τ_p , παίρνουμε μικρές τιμές για την πυκνότητα φορέων κατωφλίου.

$$N_{th} = N_t + \frac{a_a + a_d + a_m}{A_0 \xi} \quad (2.24)$$

$$\Leftrightarrow N_{th} = N_t + \frac{1}{c/n_{eff}} \cdot \frac{1}{\partial g / \partial N} \cdot \frac{1}{\xi} \cdot \frac{1}{\tau_p}$$

2.8 Συντονισμένος τρόπος ταλάντωσης

Η λειτουργία με συντονισμένο τρόπο ταλάντωσης στα λέιζερ επιφανειακής εκπομπής μπορεί να εκφραστεί από τη Fabry-Perot λειτουργία εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού κύματος (TEM). Τα διαγράμματα κοντινού πεδίου (NFP) του θεμελιώδη τρόπου δίνονται από την Gaussian συνάρτηση:

$$E = E_0 \exp \left[-\frac{1}{2} (r/s)^2 \right] \quad (2.25)$$

όπου E είναι το οπτικό πεδίο, r η απόσταση και s το μέγεθος του φωτεινού στίγματος (spot). Το μέγεθος του στίγματος στα τυπικά λέιζερ επιφανειακής εκπομπής είναι της τάξης αρκετών μm , μεγαλύτερο από αυτό των κλασικών ημιαγωγικών λέιζερ (2-3 μm). Στην περίπτωση πολύτροπης λειτουργίας η συμπεριφορά προκύπτει ως ο συνδυασμός πολλαπλών TEM. Το αντίστοιχο φάσμα εμφανίζεται να είναι πιο πλατύ εξαιτίας των διαφορετικών μηκών κύματος.

Το διάγραμμα μακρινού πεδίου FFP που σχετίζεται με την Gaussian κοντινού πεδίου μπορεί να εκφραστεί και αυτό με την Gaussian συνάρτηση και με τη γωνία απόκλισης της δέσμης $\Delta\theta$ η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$2\Delta\theta = 0.64(\lambda/2s) \quad (2.26)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για $s=5\mu\text{m}$ και $\lambda=1\mu\text{m}$ προκύπτει $\Delta\theta=0,03(\text{rad})\approx 1,7^\circ$. Η γωνία αυτή είναι πιο μικρή απ' ό τι στα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] R. Szweda, “Optoelectronics A strategic study on the Worldwide Semiconductor Optoelectronic Components Industry to 2008”,
<http://www.rer.co.uk/publications/active/optoelectronics.shtml>, Reed Electronics Research
- [2] Einstein, Phys. Z., Vol. 18, pp.121, 1917
- [3] H. Marcuse, “Classical derivation of the laser rate equation”, IEEE J. Quantum Electron., Vol. 19, No. 8, pp. 1228-1231, Aug. 1983
- [4] D.A. Tauber, R. Spickermann, R. Nagarajan, T. Reynolds, A.L. Holmes and J.E. Bowers, “Inherent bandwidth limits in semiconductor lasers due to distributed microwave effects”, Appl. Phys. Lett., Vol. 64, pp. 1-3, 1994

Κεφάλαιο 3: Κατασκευή και ανάπτυξη των VCSELs

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξουμε τις μεθόδους κατασκευής των VCSELs. Η διαδικασία κατασκευής για τα VCSELs υψηλών ταχυτήτων αποτελείται από τρία βασικά βήματα. Αυτά είναι η σχεδίαση, η ανάπτυξη των wafers και η κατασκευή της τελικής συσκευής. Όλα τα παραπάνω στάδια αλληλοσυνδέονται μεταξύ τους. Η ακρίβεια, η ανοχές και η πολυπλοκότητα του κάθε βήματος επιλέγονται στη φάση του σχεδιασμού. Διάφορα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν, ειδικά στο στάδιο της ανάπτυξης, μπορούν να παρακαμφθούν εφαρμόζοντας παραπάνω βήματα στο συγκεκριμένο στάδιο.

3.2. Ανάπτυξη της επιταξίας δομής των VCSELs

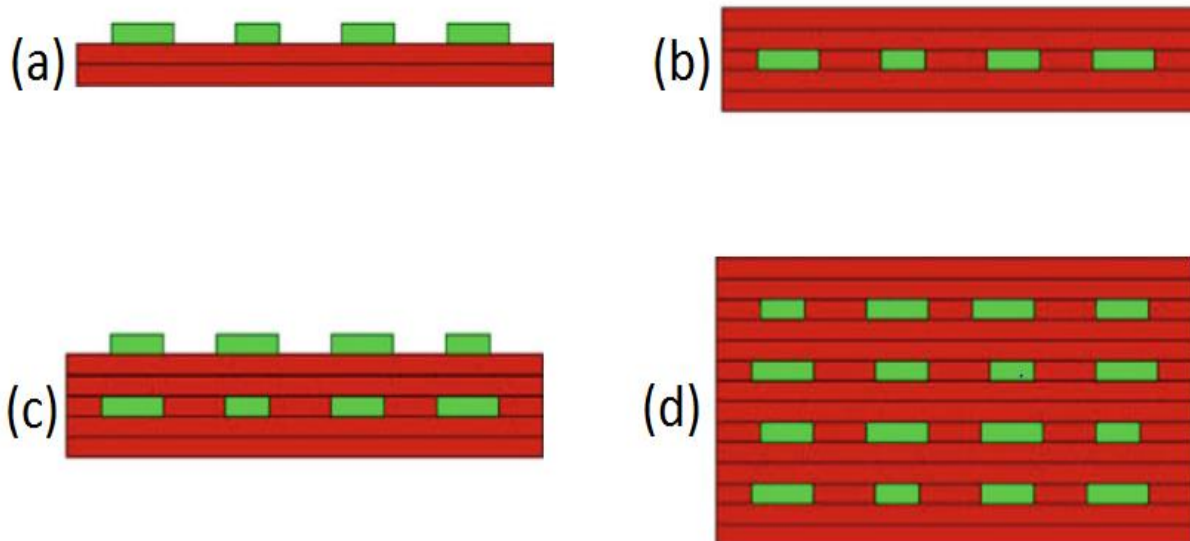
Η επιταξία ανάπτυξη των VCSELs είναι μια πολύ κρίσιμη και περίπλοκη διαδικασία η οποία σχετίζεται με την δημιουργία των ημιαγωγικών δισκών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή κατασκευή των λέιζερ είναι η δημιουργία ημιαγωγών υλικών υψηλής ποιότητας. Δύο από τις μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη των wafers είναι η MOCVD, μερικές φορές την αποκαλούν και MOVPE (metal-organic vapor phase epitaxy) και η MBE. Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των μεθόδων.

Ο αντιδραστήρας ανάπτυξης υλικών MBE περιλαμβάνει ξεχωριστά τα κύτταρα διάχυσης, σε στοιχειώδη μορφή, και με τη βοήθεια επιβολής υψηλού κενού εξατμίζονται δημιουργώντας επιταξιακά υλικά με σκοπό την δημιουργία υποστρωμάτων. Η ροή αυτών των κυττάρων ελέγχεται από την αλλαγή της θερμοκρασίας τους. Από την άλλη, η διαδικασία ανάπτυξης σε ένα αντιδραστήρα MOCVD επιτυγχάνεται από την χημική αντίδραση μεταξύ των διαφόρων υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτή την τεχνική. Οι κύριοι παράμετροι της διαδικασίας ανάπτυξης

σε αυτή την τεχνική είναι οι ροές αερίων, η θερμοκρασία των υποστρωμάτων, η πίεση του αντιδραστήρα και ο χρόνος ανάπτυξης.

Το κυριότερο πλεονέκτημα στην MBE μέθοδο είναι ο λεπτομερής έλεγχος του πάχους των στρωμάτων, ειδικότερα για πολύ λεπτά στρώματα [8]. Λόγω του ποσοτικού περιορισμού των εξατμισμένων κυττάρων σε ένα MBE αντιδραστήρα, είναι δυνατή η δημιουργία ενός σχετικά μικρού ποσοστού συνθέσεων. Από την άλλη, μία από τα κυριότερα πλεονεκτήματα στη MOCVD μέθοδο είναι ο υψηλός ρυθμός ανάπτυξης το οποίο καθιστά αυτή την τεχνολογία κατάλληλη για μαζικής παραγωγής VCSELs. Επειδή οι ροές αερίων διαφοροποιούνται συνεχώς, μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα κλιμακωτές συνθέσεις υλικών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η ανάπτυξη των wafers για τα VCSELs και με τους δύο τρόπους. Η τεχνολογία MBE εφαρμόζεται κυρίως για την ανάπτυξη των 980 nm SML-VCSELs (submonolayer) [9] λόγω του καλύτερου ελέγχου του πάχους. Η ανάπτυξη της SML InGaAs ενεργής περιοχής φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, όπου τα μικρά ορθογώνια παρουσιάζουν τα πλούσια σε In υλικά.

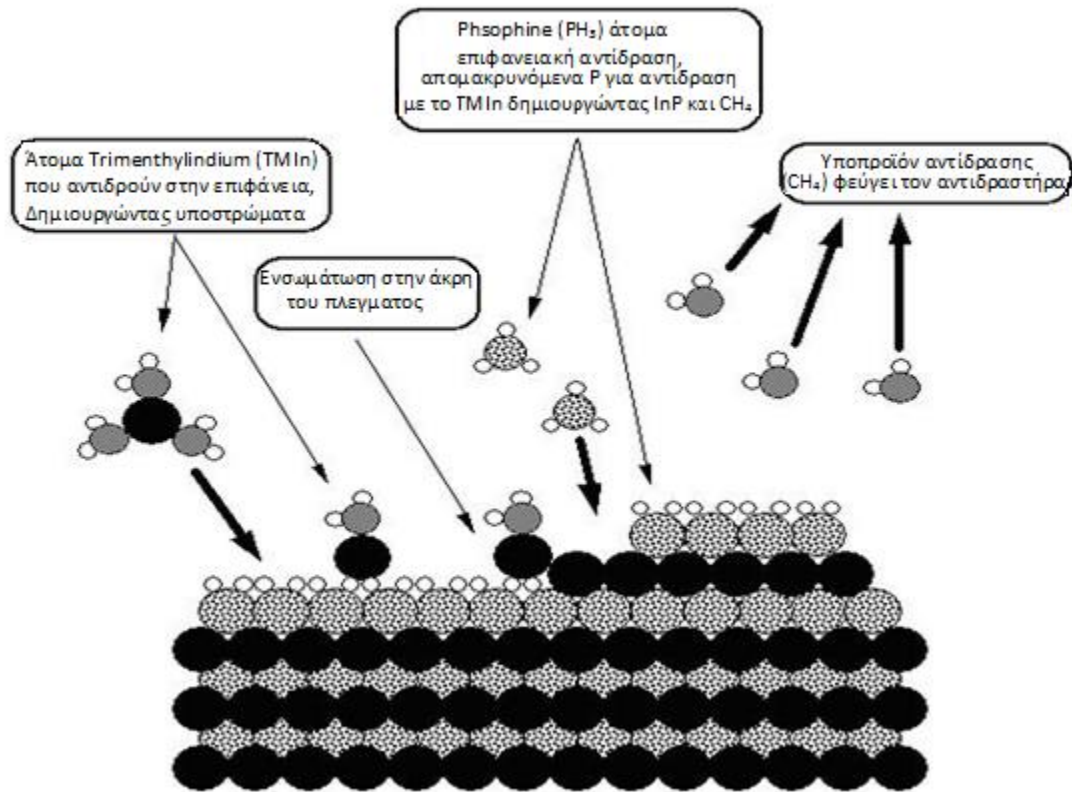


Εικόνα 3.1 : Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης της SML InGaAs ενεργής περιοχής.

Αρχικά, στη μήτρα GaAs (κόκκινο χρώμα) προστίθεται λιγότερο από ένα στρώμα InAs (πράσινο χρώμα). Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται στιβάδες νησιών πλούσια σε In υλικό πάνω από την επιφάνεια, εικόνα 3.1a. Οι στιβάδες στην επόμενη φάση υπερκαλύπτονται από μερικά στρώματα GaAs, εικόνα 3.1 b, δημιουργώντας μία επίπεδη επιφάνεια. Μετά από αυτή τη φάση τοποθετούνται τα δεύτερα InAs νησιά. Η τοποθέτηση των νησιών στην τρίτη φάση, Εικόνα 3.1c,

οδηγεί σε ένα κάθετο συσχετισμό μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων πλούσιο σε In υλικό. Όλη αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μερικές φορές οδηγώντας στη δημιουργία μιας InGaAs ενεργής περιοχής υψηλής ποιότητας, εικόνα 3.1d.

Η τεχνική MOCVD εφαρμόζεται σε συσκευές οι οποίες έχουν QWs ενεργές περιοχές, οδηγώντας στην εμπορευματοποίηση των VCSELs. Με αυτή την τεχνική κατασκευάζονται τα 850 nm και 980 nm QWs VCSELs και συνήθως χρησιμοποιούνται υλικά των 20 nm πάχους. Η ποιότητα της ανάπτυξης και το μήκος κύματος εκπομπής της ενεργής περιοχής ελέγχονται από την μέτρηση από τις δομές βαθμονόμησης με τη βοήθεια της μέτρησης της φωταύγειας (PL-photo luminescence). Η συνολική ποιότητα της ανάπτυξης ελέγχεται για τυχόν ατέλειες και ελέγχεται αυστηρά η πυκνότητα και το μήκος κύματος της ενεργής κοιλότητας. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται σχηματικά αυτή η διαδικασία.



Εικόνα 3.2: MOCVD τεχνική

3.3.Τεχνολογία κατασκευής VCSEL

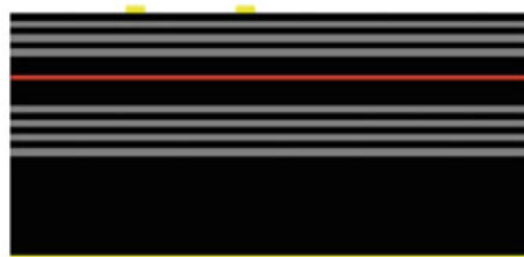
Η τελευταία φάση είναι η διαδικασία δημιουργίας της συσκευής. Αυτή η φάση αρχίζει από το wafer τα οποίο είναι έτοιμα από την επιταξία διαδικασία. Ο αριθμός των βημάτων εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της κατασκευής και μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι 15-20 στάδια. Στα VCSELS τα οποία προορίζονται για μαζική παραγωγή είναι σημαντικό ο αριθμός και η πολυπλοκότητα των βημάτων κατασκευής να είναι περιορισμένος. Η συνολική κατασκευαστική διαδικασία πρέπει να βελτιστοποιηθεί έτσι ώστε να επιτευχθεί παραγωγή υψηλής αξιοπιστίας λέιζερ με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Ωστόσο, οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός λέιζερ πολλές φορές αλληλοαναιρούν ο ένας τον άλλο και ως εκ τούτου πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διαδικασία κατασκευής. Αυτοί είναι οι θερμικοί, οι ηλεκτρικοί και οι εσωτερικοί παράγοντες. Μεγάλα επίπεδα πρόσμιξης στους καθρέπτες και στις ενεργές κοιλότητες μειώνουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις, αλλά αυξάνουν τις απώλειες λόγω απορρόφησης. Μικροί διάμετροι διαφραγμάτων βοηθούν στην μείωση του ρεύματος καταωφλίου, το οποίο μειώνει την πυκνότητα ρεύματος αλλά μειώνει και την ισχύ εξόδου. Κατά συνέπεια το τελικό κατασκευαστικό σχέδιο πρέπει να περιέχει ένα συμβιβασμό μεταξύ αυτών των παραγόντων για να επιτευχθεί υψηλή ταχύτητα μετάδοσης , υψηλή θερμική αγωγιμότητα και μεγάλη ισχύ εξόδου με μικρή πυκνότητα ρεύματος.

Το βελτιωμένο σχέδιο δημιουργίας των VCSELS ,το οποίο παρουσιάζεται σε αυτό το κομμάτι, αποτελείται από οκτώ βήματα τα οποία απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες [10].



(a) Το ανεπτυγμένο wafer



(b) Τοποθέτηση των πάνω και των πίσω μεταλλικών επαφών



(c) Πρώτη χάραξη



(d) Δεύτερη χάραξη



(e) Τοποθέτηση των κάτω μεταλλικών επαφών



(f) Οξείδωση και ανόπτιση



(g) BCB επιπέδωση



(h) Τοποθέτηση μετάλλου για ευθυγράμμιση



(i) Τοποθέτηση των GSG επαφών

Εικόνα 3.3 : Βήματα κατασκευής VCSEL. Η ενεργές περιοχές απεικονίζονται με το κόκκινο χρώμα, οι μεταλλικές επαφές με κίτρινο χρώμα, τα οξειδωμένα μέρη με μπλε και τα BCB με πράσινο. Το AlGaAs υλικό απεικονίζεται με μαύρο και γκρι.

Η διαδικασία αρχίζει με το ημιαγωγικό δίσκο μετά από μερικά βήματα καθαρισμού του, εικόνα 3.3a. Μετά από τον καθαρισμό τοποθετούνται στο πάνω και στο πίσω μέρος του wafer μεταλλικές επαφές χρησιμοποιώντας σύστημα εξάτμισης δεσμών ηλεκτρονίων, εικόνα 3.3b. Οι πάνω επαφές συνήθως χρησιμοποιούν μία πρόσμιξη των Ti/Pt/Au και οι επαφές της πίσω πλευράς μια πρόσμιξη των Ni/AuGe/Au. Αυτές οι δύο επιφάνειες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της δομής στη μέση της διαδικασίας κατασκευής[10].

Έπειτα από την παραπάνω διαδικασία, πραγματοποιείται το πρώτο χάραγμα του wafer με τη βοήθεια του ICP-RIE (inductive coupled plasma reactive ion etching) μηχανήματος, εικόνα 3.3c. Το βάθος της πρώτης χάραξης ελέγχεται από το σύστημα μέτρησης ανακλαστικότητας. Η χάραξη σταματάει μετά την έκθεση της κοιλότητας και μερικών κατώτατων καθρεπτών.

Η δεύτερη χάραξη εκτελείται στο τρίτο βήμα της διαδικασίας, Εικόνα 3.3d. Η παρουσία της δεύτερης χάραξης στοχεύει στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των VCSELs. Η διάμετρος της δεύτερης χάραξης είναι συνήθως 40 μm μεγαλύτερη από την πρώτη, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την ροή θερμότητας από την ενεργή περιοχή στα υποστρώματα. Αυτό το βήμα σταματάει με την εμφάνιση των κάτω στρωμάτων n-τύπου.

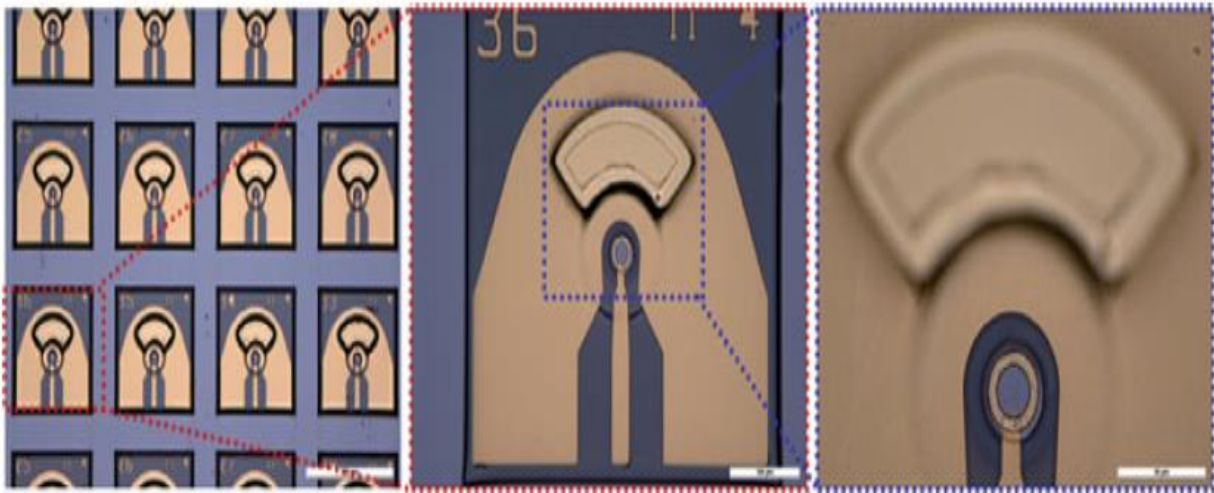
Το επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση των n-τύπου επαφών, Εικόνα 3.3e. Οι δύο τύποι στρωμάτων, p και n τύπου, μπορούν να έρθουν σε επαφή στην επιφάνεια του wafer επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τον έλεγχο του σχεδίου κατασκευής. Ο έλεγχος του σχεδίου κατασκευής γίνεται με την βοήθεια μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιούνται με σκοπό τον χαρακτηρισμό των υψηλών ταχυτήτων ημιαγωγών δικών.

Μετά την τοποθέτηση όλων των επαφών, η διαδικασία συνεχίζεται με τη δημιουργία του ανοίγματος οξειδίου με βοήθεια της επιλεκτικής οξείδωσης, Εικόνα 3.3f. Η επιλεκτική οξείδωση γίνεται με υλικά τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα αλουμινίου (Al). Η οξείδωση εκτελείται στους 400 μέχρι 420 $^{\circ}\text{C}$ και σύγχρονος οι επαφές αποσκληραίνονται λόγω της πυράκτωσης. Επειδή ο ρυθμός οξείδωσης είναι πολύ ευαίσθητος στις αλλαγές της θερμοκρασίας και στις διάφορες χημικές συνθέσεις, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το βήμα. Συνήθως η διαφοροποίηση στο ποσοστό οξείδωσης οδηγεί σε διαφοροποίηση του διαμέτρου του ανοίγματος, επιτρέποντας την επιλογή του κατάλληλου ανοίγματος .

Το έκτο βήμα κατασκευής είναι η διαδικασία της οπτικής λιθογραφίας (optical lithography process). Σε αυτήν την φάση χρησιμοποιείτε το παχύ στρώμα BCB (bisbenzocyclobutene) με σκοπό την μείωση των παρασιτικών επαφών, Εικόνα 3.3g. Με τον όρο των παρασιτικών επαφών εννοούμε όλα τα μέρη του wafer τα οποία αν μείνουν εκτεθειμένα μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία της συσκευής. Αυτό το βήμα είναι πολύ σημαντικό για την υπερπήδηση των περιορισμών που συνδέονται με τις ηλεκτρικές δραστηριότητες. Το πάχος του BCB δεν εξαρτάται μόνο από τους παραμέτρους κατασκευής αλλά και από τη γεωμετρία του VCSEL και την γεωμετρία των γύρω δομών.

Στη συνέχεια τοποθετούνται μεταλλικά τμημάτα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3 h, για την ευθυγράμμιση των διαφορετικών υψών που υπάρχουν μεταξύ των πάνω p-τύπου και των κάτω n-τύπου επαφών. Τέλος πραγματοποιείται η τοποθέτηση των GSG Cr/Au GSG (ground-signal-ground) επαφών υψηλών συχνοτήτων και με την βοήθεια της επιβολής υψηλού κενού εξατμίζεται τυχόν υγρασία που μπορεί να υπάρχει στην συσκευή, Εικόνα 3.3i. Μετά από αυτό το βήμα το VCSEL είναι έτοιμο για δοκιμή σε υψηλές συχνότητες και σε CW λειτουργία.

Εικόνες από κατασκευασμένα VCSELs παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα[10]. Μεμονωμένα wafers μπορούν να κοπούν από το σύνολο για να τοποθετηθούν σε διαφορετικές κατασκευές.



Εικόνα 3.4: Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο για τα κατασκευασμένα VCSEL.

Συνοπτικά, παρουσιάσαμε μία απλή μέθοδο κατασκευής VCSEL υψηλής απόδοσης με καλή ομοιογένεια στοιχείων. Στόχος αυτής της διαδικασίας μεταξύ άλλων είναι η καλή θερμική αγωγιμότητα των συσκευών, οι μικρές ηλεκτρικές αντιστάσεις και οι υψηλές ταχύτητες λειτουργίας των wafers. Ο αριθμός και η πολυπλοκότητα των κατασκευαστικών βημάτων πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας με στόχο την μαζική παραγωγή και την μείωση του κόστους κατασκευής.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Ray T. Chen, Chulchae Choi, Optical Interconnects, USA, 2007
- [2] P. L. Gourley and T. J. Drummond, “Single crystal, epitaxial multilayers of AlAs, GaAs, and Al_xGa_{1-x}As for use as optical interferometric elements,” Appl. Phys. Lett. 49.
- [3] J. L. Jewell, Y. H. Lee, S. L. McCall, J. P. Harbison, and L. T. Florez, “Highfinesse (Al, Ga)As interference filters grown by molecular beam epitaxy,” Appl.Phys. Lett. 53
- [4] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, “GaInAsP/InP surface emitting injection lasers,” Jpn. J. Appl. Phys. 18
- [5] D. Botez, L. M. Zitewicz, T. J. Roth, L. J. Mawst, and G. Peterson, “Low threshold current density vertical cavity surface emitting AlGaAs/GaAs diode lasers,” IEEE Photon. Tech. Lett. 1
- [6] C. Lei, T. J. Rogers, D. G. Deppe, and B. G. Streetman, “InGaAs-GaAs quantum well vertical-cavity surface-emitting laser using molecular beam epitaxial regrowth,” Applied Physics Letters 58
- [7] S. W. Corzin, R. S. Greels, J. W. Scott, R.H. Yan, and L. A. Coldren, “Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure,” IEEE J. Quantum Electron. 25
- [8] Sale TE (1995) Vertical cavity surface emitting lasers. Research Studies Press Ltd., Taunton.
- [9] Krestnikov I, Ledentsov NN, Hoffmann A, Bimberg D (2001) Arrays of two-dimensional islands formed by submonolayer insertions: growth, properties, devices (review). Phys Stat Sol A 183.
- [10] Alex Mutig Ph.D. Research “ High Speed VCSELs for Optical Interconnects”. 2011.

Κεφάλαιο 4: State-Of-The-Art στα VCSELS

4.1.Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις αποδόσεις των διαφόρων τύπων VCSEL και τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Η κατηγοριοποίηση η οποία έχει γίνει παρακάτω σχετίζεται με τα μήκη κύματος τα οποία χρησιμοποιούν κατά κόρων στις Datacom και Telecom εφαρμογές.

4.2. Μήκη κύματος για Datacom εφαρμογές

Όπως προαναφερθήκαμε, στις παρακάτω ενότητες θα αναφέρουμε τις σημαντικότερες αποδόσεις οι οποίες έχουν καταγραφεί στις εφαρμογές Datacom. Οι σημαντικότερες επιδόσεις σχετίζονται με τις ταχύτητες, αποστάσεις και θερμοκρασίες λειτουργίας των VCSEL στα μήκη των 850,980 και 1100 nm.

4.2.1.State-of-the-Art των 850 nm VCSELS

Από τα παραπάνω μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές Datacom αυτό που έχει πιο πολύ ενδιαφέρον είναι τα 850 nm. Ο λόγος είναι επειδή το συγκεκριμένο μήκος κύματος έχει τυποποιηθεί για εφαρμογές LAN (Local Area Networks) και SAN (Storage Area Networks) και στο μέλλον θα έχει σημαντικό ρόλο για άλλες τυποποιήσεις. Φυσικά η κυριαρχία αυτού του μήκους κύματος στηρίχτηκε στις ήδη υπάρχουσες υποδομές, όπως οι οπτικές συνδέσεις βελτιστοποιημένες στα 850 nm και στα λέιζερ όπως τα GaAs VCSELS. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του μήκους κύματος είναι το χαμηλό ποσοστό απορρόφησης του κύματος στα προϊόντα του AlGaAs.

Το πλεονέκτημα του χαμηλού συντελεστή απορρόφησης, σε συνδυασμό με λεπτά στρώματα υλικού επιτρέπει μεγαλύτερα επίπεδα προσμίξεων υλικών, για την ενεργή περιοχή στα λέιζερ, και ως αποτέλεσμα έχει την λειτουργία των λέιζερ σε μεγάλες ταχύτητες. Η επίτευξη των

μεγάλων ταχυτήτων λόγω πρόσμιξης οφείλεται στις μικρότερες ηλεκτρικές αντιστάσεις, στην αύξηση του διαφορικού κέρδους και στη μείωση της πυκνότητας του ρεύματος κατωφλίου. Μερικά από τα υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για τις ενεργές περιοχές των λέιζερ που εκπέμπουν στα 850 nm, μεταξύ άλλων είναι το GaAs [4], InGaAs [5,6], InAlGaAs [7] και InGaAsP [8]. Στα εμπορικά VCSELs που εκπέμπουν στα 850 nm χρησιμοποιείται σαν υλικό ενεργής περιοχής κυρίως το GaAs QWs (quantum wells).

Χρησιμοποιώντας το In (Ινδίο) σαν υλικό πρόσμιξης έχουν καταγραφεί ταχύτητες για μετάδοση χωρίς λάθη στα 38 Gb/s. Το 2001 παρουσιάστηκε από την IBM ένα oxide-confined 850 nm VCSEL που λειτουργούσε με ταχύτητα 20 Gb/s [9] και χρειάστηκαν ακόμα 7 χρόνια για να αυξηθεί αυτή η ταχύτητα στα 30 Gb/s. Το 2008 από την Finisar παρουσιάστηκε ένα GaAs QWs 850 nm VCSEL που λειτουργούσε στα 30 Gb/s με μέγιστο bandwidth στα 19 GHz [4]. Μετά το 2008 οι ταχύτητες των 850 nm VCSELs συνέχισαν να αυξάνονται. Το πρώτο βήμα έγινε από το Prof.Dr. Larsson ο οποίος εφάρμοσε InGaAs στην ενεργή περιοχή του VCSEL αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα των 25 Gb/s [10] στα 28 Gb/s [11] και αργότερα στα 32 Gb/s [5,6].

Εκτός από τα υλικά της ενεργής περιοχή σημαντικό ρόλο στην αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης στα 850 nm VCSELs έχουν οι οπτικές ίνες και οι διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται. Το 2011 παρουσιάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Σουηδίας ένα 850 nm VCSEL το οποίο χρησιμοποιούσε 4-PAM διαμόρφωση [12]. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκε MMF (multimode fiber) οπτική ίνα και είχε ως αποτέλεσμα τη μετάδοση χωρίς λάθη με ταχύτητα 30 Gb/s σε απόσταση 200 m. Το 2012 η FINISAR παρουσίασε ένα 850 nm VCSEL χρησιμοποιώντας απευθείας διαμόρφωση NRZ (no return to zero) το οποίο λειτουργούσε στα 56.1 Gb/s [13]. Το 2014 παρουσιάστηκε ένα 850 nm VCSEL το οποίο μετέδιδε δεδομένα σε ένα MMF οπτική ίνα χρησιμοποιώντας απευθείας διαμόρφωση NRZ [14]. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν η μετάδοση χωρίς λάθη, με BER μικρότερο από 10^{-12} , στα 64 Gb/s και μετάδοση στα 60 Gb/s για απόσταση μετάδοσης χωρίς λάθη των 107 m. Φυσικά όλα τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εργαστηριακά και θα χρειαστούν πολλά πειράματα ακόμα για να γίνουν εμπορικά διαθέσιμα.

4.2.2.State-of-the-Art των 980 nm VCSELs

Το μήκος των 980 nm έχει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτό των 850 nm, παρά του μεγαλύτερου συντελεστή απορρόφησης. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του 980 nm μήκους κύματος είναι η καταστολή των μη ισορροπημένων μεταφερόμενων σημάτων και κατά συνέπεια βοηθά στην βελτίωση της θερμοκρασιακής σταθερότητας, στη βελτίωση του κέρδους και στην μείωση της τάσης λειτουργίας που χρειάζονται τα λέιζερ σε αυτό το μήκος. Το συγκεκριμένο μήκος κύματος χρησιμοποιείται κατά κόρον στα EDFA (Eridium-doped fiber amplifiers).

Για τα 980 nm VCSEL έχουν πραγματοποιηθεί επίσης πολλά πειράματα. Σε αυτά τα πειράματα εκτός από την αξιολόγηση μίας μόνο συσκευής VCSEL αξιολογήθηκαν και τα VCSEL arrays. Ένα από τα πιο ενδεικτικά πειράματα με VCSEL array πραγματοποιήθηκε από την OCLARO, σε διάφορες χρονικές περιόδους, και παρουσιάστηκε το 2010 [15]. Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1. Αποτελέσματα ερευνών για τα 980 nm VCSELs array

Έτος	1997	1999	2002	2007
Οπτικά κανάλια	256(16x16)	256(16x16)	1024(32x32)	1096(64x64)
Μέγεθος του chip(mm ²)	2.5x2.5	2.5x2.5	3.2x3.2	4.0x4.0
Διάμετρος του VCSEL(μm)	15	10	4	2
Bit rate ανά κανάλι(Gb/s)	0.6	1.2	4	8
Μέσο bit rate (Gb/s)	10	80	1000	33000
Τάση λειτουργίας (V)	2.5	2.5	2.0	1.8
Ρεύμα κατωφλίου (mA)	3	1	0.5	0.1
Ρεύμα λειτουργίας (mA)	6	6	1.5	0.5
Οπτική ισχύς εξόδου(mW)	1	2	0.5	0.3

Αυτά τα πειράματα έδειξαν μέγιστη ταχύτητα 33 Tbps και το πεδίο ενδιαφέρον τους είναι οι εφαρμογές για διασυνδέσεις και ενδοσυνδέσεις των chip. Ακόμα, παρατηρούμε ότι η τάση λειτουργίας, το ρεύμα λειτουργίας, το ρεύμα κατωφλίου και η διάμετρος των VCSELs μειώθηκαν σταδιακά.

Πριν την παρουσίαση των παραπάνω αποτελεσμάτων είχαν διεξαχθεί πολλά άλλα πειράματα. Το 2005 και 2006 η IBM στα πλαίσια του προγράμματος TERABUS χρησιμοποιώντας 980 nm VCSEL κατάγραψε ταχύτητες πάνω από 20 Gb/s [16,17,18]. Ένα χρόνο αργότερα, το 2007, η μεγαλύτερη ταχύτητα για μεταφορά δεδομένων χωρίς λάθη με 980 nm VCSEL αυξήθηκε δραστικά στα 35 Gb/s [19,20]. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός του κωνικού διαφράγματος οξειδίου και πρόσμιξης διαφόρων υλικών και ως αποτέλεσμα είχε την αύξηση του bandwidth πάνω από τα 20 GHz.

Ωστόσο τα παραπάνω αποτελέσματα επιτεύχθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Για αυξημένες θερμοκρασίες, όπως παρουσιάστηκε από το Technical University of Berlin το 2006 [21,22], η μέγιστη ταχύτητα περιορίστηκε στα 20 Gb/s ,για θερμοκρασία 85°C . Αυτή η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί στα 120°C και η ταχύτητα να διατηρείται στα 20 Gb/s. Το 2007 ο Aglient παρουσίασε ένα 980 nm VCSEL που λειτουργούσε στα 25 Gb/s σε θερμοκρασία 70 °C και 85 °C [23]. Το 2014 από την IEEE παρουσίασε ένα πείραμα με oxide-confined 980 nm VCSEL [24] το οποίο λειτουργούσε με ταχύτητα 35 Gb/s σε θερμοκρασία 85 °C. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι διάμετροι ενεργής περιοχής του VCSEL της τάξης των 3,3.5 και 4 μm. Ωστόσο η μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης χωρίς λάθη που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής στα 980 nm VCSELs είναι 49 Gb/s [25].

4.2.3.State-of-the-Art των 1100 nm VCSELs

Το μήκος κύματος των 1100 nm παρέχει ακόμα περισσότερα πλεονεκτήματα στο τομέα της θερμικής λειτουργίας και της τάση λειτουργίας σε σχέση με τα παραπάνω μήκη. Σε αυτό το μήκος κύματος η τάση λειτουργίας του λέιζερ είναι μικρότερη από τα προηγούμενα μήκη ωστόσο το αρνητικό trade-off είναι οι μεγάλες απώλειες ισχύος του κύματος στην μεταφορά του μέσα στο λέιζερ. Με αυτό το μήκος κύματος πραγματοποιήθηκε το πρώτο πείραμα με oxide-confined VCSEL που λειτουργούσε στα 40 Gb/s από την NEC [26,27]. Πριν από την επίτευξη της παραπάνω ταχύτητας, το 2006 μία ομάδα από την ίδια εταιρία είχε παρουσιάσει ένα 1100 nm VCSEL που λειτουργούσε στα 25 Gb/s [28]. Αργότερα η ίδια ομάδα παρουσίασε ένα 1100 nm VCSEL στα 25 Gb/s άλλα σε θερμοκρασία 100°C [29]. Το 2007 η ταχύτητα αυτών των λέιζερ έφτασε τα 30 Gb/s.

Το InGaAs VCSEL από την NEC είχε επιδείξει μεγάλη αξιοπιστία [27,29], επιβεβαιώνοντας την ωριμότητα του InGaAs QWs για εφαρμογές πραγματικού χρόνου που χρησιμοποιούν VCSELs. Στα 1100 nm η μεγαλύτερη ταχύτητα που έχει επιτευχθεί είναι στα 40 Gb/s χρησιμοποιώντας δομή InGaAs για την ενεργή περιοχή [30]. Ωστόσο τα γρηγορότερα από τα oxide-confined VCSEL ,τα οποία χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές Datacom, είναι αυτά τα οποία εκπέμπουν φως γύρο από τα 850 nm. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται VCSELs που εκπέμπουν σε μεγάλα μήκη κύματος και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές Telecom.

4.3.Μεγάλα μήκη κύματος για Telecom εφαρμογές

Παρά την εντυπωσιακή απόδοση που προσφέρουν τα VCSELs μικρού μήκους κύματος, μειονεκτούν στη προσαρμογή με τα υπάρχουσα δίκτυα μακρινών αποστάσεων και άρα δεν μπορούν να συγκριθούν με τα EEL (edge emitting lasers) λέιζερ υψηλών ταχυτήτων τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτό το πεδίο. Στις μέρες μας, το ενδιαφέρον στα VCSELs μετακινείται στο πεδίο των Telecom εφαρμογών και ειδικότερα στην ανάπτυξη των VCSELs που εκπέμπουν σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν στα όρια εξασθένησης των οπτικών ινών. Ενώ τα VCSELs που λειτουργούν στις Datacom εφαρμογές έχουν δείξει πολύ καλή αξιοπιστία, τα λειτουργικά χαρακτηρίστηκα αυτόν των λέιζερ σε μεγάλα μήκη κύματος είναι αναξιόπιστα.

Χρησιμοποιώντας τα ίδια υλικά που χρησιμοποιούνται στα EEL, για την ενεργή περιοχή, έδειξε ότι δεν προσφέρουν μεγάλους δείκτες διάθλασης στα VCSELs αντιστοιχων καυμάτων για την επίτευξη μεγάλων κερδών εξόδου. Για την επίτευξη των παραπάνω χρειάζονται πολλά αρνητικά trade-off. Διάφορες προσεγγίσεις, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω, έχουν προταθεί για την ανάπτυξη των 1,3 και 1,5 μm VCSEL τα οποία προσπερνούν τα προβλήματα κατασκευής και αξιοπιστίας .

4.3.1.State-of-the-art για τα 1.3 μm VCSELS

Επωφελούμενα από το γνωστό GaAs υλικό για την κατασκευή των Bragg καθρεπτών, πολλά από τα πειράματα στο πεδίο των 1.3 μm VCSELS επικεντρώθηκαν στη ανάπτυξη των InGaAsN ενεργών περιοχών. Το 2001 μία ομάδα ερευνητών πειραματίστηκε πάνω στα 1.3 μm VCSEL [31,32]. Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών ήταν η ισχύ λειτουργίας μεγαλύτερη του 0.7 mW , θερμοκρασία λειτουργίας στα 85°C και διαμόρφωση στα 10 GHz, τα οποία ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις των OC-48 SONET και 10 Gb/s Ethernet εφαρμογών. Ωστόσο οι εφαρμογές που στοχεύουν τα 1.3 μm VCSEL είναι τα μητροπολιτικά δίκτυα αποστάσεων μέχρι 80 km. Πριν το 2001, το 1998, για τα παραπάνω δίκτυα είχαν παρουσιαστεί 1.3 μm VCSEL με ισχύ εξόδου 1.3 mW, ρεύμα κατωφλίου 5 mA και θερμοκρασία λειτουργίας στα 85°C [33].

Λόγω της ανάπτυξης της QD (quantum dot) ενεργής περιοχής υψηλής αποδοτικότητας για τα EEL [34,35], έχει δημιουργηθεί μία τάση στην ανάπτυξη και αξιοποίηση των QD VCSELS. Σε αυτά τα λέιζερ έχουν προσαρμόσει InGaAs QDs ενεργές περιοχές τα οποία λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την αξιοποίηση αυτού του συγκεκριμένου μήκους κύματος για τις Telecom εφαρμογές.

4.3.2.State-of-the-art για τα 1.55 μm VCSELS

Και στα VCSELS που εκπέμπουν γύρω από τα 1500 nm έχουν πραγματοποιηθεί μερικά πειράματα για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων τους για τις Telecom εφαρμογές. Στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στη Σάντα Μπάρμπαρα το 1996 και 1998 ,από μία ομάδα ερευνητών, παρουσιάστηκε ένα 1.55 μm VCSELS με θερμοκρασία λειτουργίας στα 75°C για συνεχή κύμα λειτουργίας [36,37]. Το αποτέλεσμα αυτών των ερευνών ήταν η επίτευξη ρεύματος κατωφλίου της τάξης των 0.8 mA και πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου 18 kA/cm² η οποία είναι πολύ μεγάλη για αξιόπιστη λειτουργία αυτού του λέιζερ. Το 1990 από την IEEE Photon Technol. παρουσιάστηκε ένα 1.55 μm VCSEL με συνεχή κύμα λειτουργίας σε θερμοκρασία 47°C και μέγιστη ισχύ εξόδου 1mW [38]. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν μετάδοση χωρίς λάθη στα 2.5 Gb/s σε απόσταση 90 km. Το 2000 παρουσιάστηκε ένα 1.5 μm VCSEL για μετάδοση χωρίς λάθη στα 10 Gb/s σε απόσταση 50 km [39]. Το 2001 από μία άλλη ομάδα ερευνητών παρουσιάστηκε ένα 1.55 μm VCSEL τα οποίο λειτουργούσε με συνεχή κύμα σε θερμοκρασία 88°C και ισχύ εξόδου 1mW [40]. Πρόσφατα, από μία ομάδα ερευνητών παρουσιάστηκε ένα 1.55 μm VCSEL το οποίο μετάδιδε δεδομένα χωρίς λάθη στα 35 Gb/s [41], το οποίο είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα που έχει καταγραφεί στα VCSELS που εκπέμπου σε αυτό το μήκος κύματος.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Leisher PO, Chen C, Sulkin JD, Alias MSB, Sharif KAM, Choquette KD (2007) High modulation bandwidth implant-confined photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photonics Technol Lett* 19
- [2] Danner AJ, Raftery JJ Jr, Leisher PO, Choquette KD (2006) Single mode photonic crystal vertical cavity lasers. *Appl Phys Lett* 88:091114
- [3] Leisher PO, Danner AJ, Raftery JJ Jr, Siriani D, Choquette KD (2006) Loss and index guiding in single-mode proton-implanted holey vertical-cavity surface emitting lasers. *IEEE J Quant Electron* 42
- [4] Johnson RH, Kuchta DM (2008) 30 Gb/s directly modulated 850 nm Datacom VCSELs. In: Conference on lasers and electro-optics (CLEO), CLEO Postdeadline Session II (CPDB), San Jose, CA, 4 May 2008
- [5] Westbergh P, Gustavsson JS, Haglund A, Sköld M, Joel A, Larsson A (2009) High-speed, low-current-density 850 nm VCSELs. *IEEE J Sel Top Quant Electron* 15
- [6] Westbergh P, Gustavsson JS, Haglund A, Larsson A, Hopfer F, Fiol G, Bimberg D, Joel A (2009) 32 Gbit/s multimode fiber transmission using high-speed, low current density 850 nm VCSEL. *IEEE Electron Lett* 45
- [7] Ko J, Hegblom ER, Akulova Y, Thibeault BJ, Coldren LA (1997) Low-threshold 840-nm laterally oxidized vertical-cavity lasers using AlInGaAs–AlGaAs strained active layers. *IEEE Photon Technol Lett* 9
- [8] Kuo HC, Chang YS, Lai FY, Hsueh TH, Lai LH, Wang SC(2003) High-speed modulation of 850 nm InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs. *Electron Lett* 39
- [9] Kuchta DM, Pepeljugoski P, Kwark Y (2001) VCSEL modulation at 20 Gb/s over 200 m of multimode fiber using a 3.3 V SiGe laser driver IC. Technical digest LEOS summer topical meeting, paper no. WA1.2,
- [10] Westbergh P, Gustavsson J, Haglund A, Sunnerud H, Larsson A (2008) Large aperture 850 nm VCSELs operating at bit rates up to 25 Gbit/s. *Electron Lett* 44
- [11] Westbergh P, Gustavsson JS, Haglund A, Larsson A (2008) Large aperture 850 nm VCSEL operating at 28 Gbit/s. In: The 21st IEEE international semiconductor laser conference 2008, MB1, Sorrento, Italy, September 2008
- [12] Krzysztof Szczerba, Petter Westbergh, Johnny Karout, Johan Gustavsson, Asa Haglund, Magnus Karlsson, Peter Andrekson, Erik Agrell and Anders Larsson “30 Gb/s 4-PAM transmission over 200 m of MMF using an 850 nm VCSEL”
- [13] C. Kocot, L. Graham, R. Johnson, G. Landry, E. Shaw, A. MacInnes, and J. Tatum .Finisar, 600 Millennium Drive, Allen TX 75013, 2012.
- [14] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, A. Larsson , Dept. of Microtechnology and Nanoscience, Photonics Laboratory, Chalmers University of Technology, Göteborg, SE-412 96, Sweden “ 64Gb/s Transmission over 57m MMF using an NRZ Modulated 850nm VCSEL”
- [15] OCLARO: VCSELs “ Key components for optical interconnects”, October 2010.
- [16] Schares L, Kash J, Doany F, Schow CL, Schuster C, Kuchta DM, Pepeljugoski PK, Trehwella JM, Baks CW, John RA, Shan L, Kwark YH, Budd RA, Chiniwalla P, Libsch FR, Rosner J, Tsang CK, Patel CS, Schaub JD, Dangel R, Horst F, Offrein BJ, Kucharski D, Guckenberger D, Hedge S, Nyikal H, Lin C-K, Tandon A, Trott GR, Nystrom M, Bour DP, Tan RTM, Dolfi DW (2006) Terabus: terabit/second-class card-level optical interconnects technologies. *IEEE J Sel Top Quant Electron* 12.

- [17] Doany F, Kuchta D, Pepeljugoski P, Schares L, Schaub J, Schow C, Trehwella J, Baks C, Kwark Y, Schuster C, Shan L, Tsang C, Rosner J, Libsch F, Budd R, Chiniwalla P, Guckenberger D, Kucharski D, Dangel R, Offrein B, Tan M, Troff G, Lin D, Tandon A, Nystrom M (2005) Terabus: a chip-to-chip parallel optical interconnects. In: LEOS 2005, the 18th annual meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Hilton Sydney, Sydney, Australia, TuW3, 23–27 October 2005,
- [18] Kash JA, Doany FE, Schares L, Schow CL, Schuster C, Kuchta DM, Pepeljugoski PK, Trehwella JM, Baks CW, John RA, Shan L, Kwark YH, Budd RA, Chiniwalla P, Libsch FR, Rosner J, Tsang CK, Patel CS, Schaub JD, Kucharski D, Guckenberger D, Hegde S, Nyikal H, Dangel R, Horst F (2006) Chip-to-chip optical interconnects. In: Optical fiber communication conference and exposition and the national fiber optic engineers conference (OFC), optical interconnect technology (OFA), paper OFA3, Anaheim, CA, 5 March 2006
- [19] Chang YC, Wang CS, Coldren LA (2007) High-efficiency high-speed VCSELs with 35 Gbit/s error-free operation. *IEEE Electron Lett* 43
- [20] Chang Y-C (2008) Engineering vertical-cavity surface-emitting lasers for high-speed operation. Thesis, University of California Santa Barbara, December
- [21] Hopfer F, Mutig A, Fiol G, Kuntz M, Shchukin V, Ledentsov NN, Bimberg D, Mikhurin SS, Krestnikov IL, Livshits DA, Kovsh AR, Bornholdt C (2006) 20 Gb/s 85°C error free operation of VCSEL based on submonolayer deposition of quantum dots. In: IEEE-LEOS 20th international semiconductor laser conference (ISLC), Kohala Coast, HI, USA, 17–21 September 2006.
- [22] Hopfer F, Mutig A, Fiol G, Kuntz M, Shchukin VA, Haisler VA, Warming T, Stock E, Mikhurin SS, Krestnikov IL, Livshits DA, Kovsh AR, Bornholdt C, Lenz A, Eisele H, Dähne M, Ledentsov NN, Bimberg D (2007) 20 Gb/s 85°C error-free operation of VCSELs based on submonolayer deposition of quantum dots. *IEEE J Sel Top Quant Electron* 13.
- [23] Lin C-K, Tandon A, Djordjev K, Corzine SW, Tan MRT (2007) High-speed 985 nm bottom-emitting VCSEL arrays for chip-to-chip parallel optical interconnects. *IEEE J Sel Top Quant Electron* 13.
- [24] *Photonics Technology Letters*, IEEE Volume: 26 Issue: 23, 05 September 2014
- [25] Wolf, P.; Moser, P.; Larisch, G.; Kroh, M.; Mutig, A.; Unrau, W.; Hofmann, W.; Bimberg, D., “High-performance 980 nm VCSELs for 12.5 Gbit/s data transmission at 155 degrees C and 49 Gbit/s at 14 degrees C”, *ELECTRONICS LETTERS* Volume: 48 Issue: 7.
- [26] Anan T, Suzuki N, Yashiki K, Fukatsu K, Hatakeyama H, Akagawa T, Tokutome K, Tsuji M (2007) High-speed InGaAs VCSELs for optical interconnections. In: International symposium on VCSELs and integrated photonics, Tokyo, Japan, 17–18 December 2007.
- [27] Suzuki N, Anan T, Hatakeyama H, Fukatsu K, Tokutome K, Akagawa T, Tsuji M (2009) High speed 1.1- μ m-range InGaAs-based VCSELs. *IEICE Trans Electron* E92-C(7).
- [28] Suzuki N, Hatakeyama H, Fukatsu K, Anan T, Yashiki K, Tsuji M (2006) 25-Gb/s operation of 1.1- μ m-range InGaAs VCSELs for high-speed optical interconnections. In: Proceedings of the optical fiber communication conference 2006 (OFC), paper no. OFA4.
- [29] Hatakeyama H, Akagawa T, Fukatsu K, Suzuki N, Yashiki K, Tokutome K, Anan T, Tsuji M (2008) 25 Gbit/s-100°C operation and high reliability of 1.1- μ m-range VCSELs with InGaAs/GaAsP strain-compensated MQWs. In: Conference on lasers and electro-optics (CLEO), VCSEL I (CMW), San Jose, CA, 4 May 2008

- [30] N. Suzuki; H. Hatakeyama; K. Yashiki; K. Fukatsu; K. Tokutome; T. Akagawa; T. Anan; M. Tsuji; , "High-speed InGaAs VCSELs," Lasers and Electro-Optics Society, 2006. (LEOS). 19th Annual Meeting of the IEEE.
- [31] G.Steinle, F. Mederr, M. Kicherer, R.Michalzik, G. Kristen, A. Y. Egorov, H. Riechert, H. D. Wolf, K. J. Ebeling, "Data transmission up to 10 Gbit/s with 1.3 μm wavelength InGaAsN VCSELs", *Electron. Lett.*, Vol. 37, Issue 10, May 2001.
- [32] A. W. Jackson, R.L. Naone, M.J. Dalberth, J.M. Smith, K.J. Malone, D.W. Kisker, J.F. Klem, K.D. Choquette, D.K. Serkland and K.M. Geib, "OC-48 capable InGaAsN VCSEL", *Electron. Lett.*, Vol. 37, Issue 6, March 2001.
- [33] V. Jayaraman, J.C. Geske, M.H. Mac Dougal, F.H. Peter, T.D. Lowers and T.T. Char, "Uniform threshold current, CW, single mode 1300 nm VCSEL from 0 to 70 $^{\circ}\text{C}$ ", *Electron. Lett.*, Vol. 34, 1998.
- [34] D.L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O.B. Shchekin and D.G. Deppe, "1.3 μm room-temperature GaAs-based quantum dot laser", *Appl. Phys.*, Vol.73, 1998.
- [35] Y.M. Shernyakov, D.A. Bedarev, E.Y. Kondrateva, P.S. Kopev, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledestov and D. Bimberg, "1.3 μm GaAs-based laser using quantum dots obtained by activated spinodal decomposition, *Electron. Lett.*, Vol. 35, 1999.
- [36] N.M. Margalit, D.I. Babic, K. Streubel, R.P. Mirin, R.L. Naone, J.E. Bowers and E.L. Hu, "Submilliamp long-wavelength VCSELs", *Electron. Lett.*, Vol. 32, 1996.
- [37] K.A. Black, P.Abraham, N.M. Margalit, E.R. Hegblom, Y-J. Chiu, J. Piprek, J.E. Bowers and E.L. Hu, "Dubled-fused 1.5 μm VCSELs with record high T_0 of 132K at room temperature", *Electron. Lett.*, Vol. 34, 1998.
- [38] J.Boucart, C. Starck, F. Gaborit, A. Plais, N. Bouche, E.Derouin, L. Goldstein, C. Fortin, D. Carpentier, P. Salet, F. Brillouet and J. Jacquet, "1mW CW RT monolithic VCSEL at 1.55 μm ", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, n^o6, 1999
- [39] R.J. Stone, R.F. Nabiev, J.Boucart, W. Yuen, P. Kner, G.S. Li, R. Carico, L.Scheffel, M. Jansen, D.P. Worland and C.J. Chang-Hasnain, "50 km error-free 10 Gbit/s WDM transmission using directly modulated long-wavelength VCSELs", *Electron. Lett.*, Vol. 36, Issue 21, Oct.2000.
- [40] S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, D.A. Buell, H. Kroemer and L.A. Coldren, "88 $^{\circ}\text{C}$ continuous-wave operation of aperture, intracavity contacted, 1.55 μm VCSELs", *Applied Physics Lett.*, Vol. 78, No. 10,2001.
- [41] Hofmann, W.; Müller, M.; Wolf, P.; Mutig, A.; Gründl, T.; Böhm, G.; Bimberg, D.; Amann, M.-C.; , "40 Gbit/s modulation of 1550 nm VCSEL," *Electronics Letters* , Vol.47, no.4, February 17 2011.

Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές VCSEL

5.1.Εισαγωγή

Από την εμφάνιση τους ως εμπορικά προϊόντα, τα VCSELs έδειξαν πως μπορούν να αποτελέσουν κύριο τεχνολογικό εξάρτημα, κυρίως σε δικτυακές εφαρμογές όπως είναι το “Gigabit Ethernet” και το “Fibre Channel”, παίρνοντας τη θέση των παραδοσιακών edge emitting δομών. Αν και κάποτε αποτελούσαν το πιο δημοφιλές προϊόν για πολλές υψηλού κύρους εταιρείες, εξαιτίας των τεχνολογικών προβλημάτων στην κατασκευή τους αλλά και της περιόδου ύφεσης στην αγορά των τηλεπικοινωνιών, ο αριθμός των εταιρειών παραγωγής VCSELs έχει μειωθεί. Βέβαια, τέτοιου είδους διακυμάνσεις στη βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας είναι αναμενόμενες και σίγουρα δεν αποτελούν τον επίλογο των VCSELs. Η επόμενη πρόκληση που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι κατασκευαστές VCSEL είναι να επεκτείνουν την τεχνογνωσία τους, από τα καλής απόδοσης και χαμηλού κόστους λέιζερ με μήκη κύματος τα 850nm σε αντίστοιχα με μεγαλύτερο μήκος κύματος

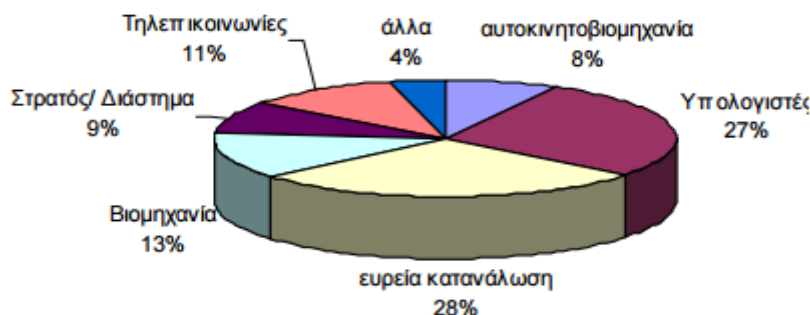
Αν και η Honeywell, πρωτοπόρος στα εμπορικά VCSELs, απομακρύνθηκε από τον τομέα αυτόν, αρκετές άλλες εταιρείες, ήδη υπάρχουσες ή πρωτοεμφανιζόμενες στην αγορά, δείχνουν μεγάλο ενδιαφέρον στο μέλλον των VCSELs. Η Ελβετική LITRAX GmbH, εισήγαγε ένα μονότροπο (single mode, SM) implant VCSEL, το οποίο αν και λειτουργεί στα 850nm, αποτελεί μία νέα γενιά VCSEL χάρη στις καλύτερες επιδόσεις και τη μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με τα oxide VCSELs. Επίσης, η Alight Technologies A/S, η οποία το Σεπτέμβριο του 2005 αγόρασε τα δικαιώματα των 1300nm GaInNAs από την Infineon Technologies, στοχεύει σε αγορές τηλεπικοινωνιακών συστημάτων υψηλών ταχυτήτων. Αλλά και η Panasonic, με το VCSEL που παρουσίασε το 2006 στα 850nm και ταχύτητα 12,5Gb/s με ρεύμα λειτουργίας τα 8mA, δείχνει το ενδιαφέρον της στις χαμηλού κόστους τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές πλαστικής ίνας (plastic optical fibre, POF).

Στον πίνακα 5.1 αναφέρονται τα κυριότερα τεχνολογικά πεδία όπου τα VCSELs έχουν ήδη σημειώσει μεγάλη εφαρμογή ενώ στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται δεδομένα και προβλέψεις της παγκόσμιας αγοράς [1].

Πίνακας 5.1: Εφαρμογές VCSELs

Τεχνολογικά πεδία	Συστήματα
Οπτικές επικοινωνίες	LANs, Οπτικές διασυνδέσεις, Κινητές διασυνδέσεις κ.α
Computer Optic	Συνδέσεις υπολογιστών, οπτικές διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας/ παράλληλη μεταφορά δεδομένων
Οπτικές μνήμες	CD, DVD, near field, multi-beam, initializer
Οπτοηλεκτρονικές δομές	Εκτυπωτές, λέιζερ δέκτες, εξαρτήματα κινητών τηλεφώνων, οικιακές εφαρμογές
Επεξεργασία οπτικής πληροφορίας	Οπτική επεξεργαστές, παράλληλη επεξεργαστές κ.α
Οπτική αισθητήρες	Αισθητήρες οπτικών ινών, αναγνώριση bar code, κωδικοποιητές κ.α
Οθόνες	Φανοί πολλαπλής δέσμης, πηγές array light
Φωτισμός	Πηγές υψηλής απόδοσης, μικροδιατάξεις φωτισμού, ρυθμιζόμενη φωτισμοί κ.α

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Αυτοκινητοβιομηχανία	18	23	27	30	33	38
Υπολογιστές	65	79	94	105	114	133
Ευρεία κατανάλωση	63	77	93	103	112	131
Βιομηχανία	30	37	44	49	53	62
Στρατός / Διάστημα	20	24	29	32	35	41
Τηλεπικοινωνίες	25	31	37	41	45	52
Άλλα	9	11	13	15	16	19
Σύνολο	230	282	337	375	408	476



Εικόνα 5.1: Η παγκόσμια αγορά των VCSELs από το 2003 έως την πρόβλεψη για το 2008, και σχηματικό διάγραμμα της αγοράς για το έτος 2005[1]

5.1.VCSEL σε Datacom

Μερικές από τις εφαρμογές στο πεδίο των Datacom στις οποίες σαν πομποδέκτες χρησιμοποιούνται τα VCSEL είναι οι παρακάτω [2]:

- Ιατρική: διόρθωση μυωπίας, ανάλυση βιολογικού ιστού
- Οπτικές επικοινωνίες: μετάδοση δεδομένων με οπτικές ίνες, LANs, οπτικές διασυνδέσεις, κινητές διασυνδέσεις
- Computer Optics: συνδέσεις υπολογιστών, υψηλής ταχύτητας/παράλληλη μεταφορά δεδομένων
- Οπτικές μνήμες: CD, DVD, initializer
- Επεξεργασία οπτικής πληροφορίας: οπτικοί επεξεργαστές, παράλληλοι επεξεργαστές

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζουμε τις απαιτήσεις και τις εφαρμογές των VCSEL στις οπτικές συνδέσεις βίντεο.

5.1.1.Οπτικές συνδέσεις βίντεο με χρήση VCSEL

Λόγου ψηφιοποιήσεις του σήματος στα τέλη του 90 το DVI (Digital Visual Interface) αναδείχτηκε γρήγορα ως ένα πρότυπο ψηφιακής μετάδοσης στην βιομηχανία των PC [3]. Με την εξάπλωση του DVI, η ζήτηση για οπτικές συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων αυξήθηκε. Μέσο της χρησιμοποίησης των λέιζερ ή των LED εξασφαλιστική η μετάδοση σε αυτές τις αποστάσεις, όταν το παραδοσιακό σήμα ,το οποίο μεταδιδόταν σε αναλογική μορφή, δεν μπορούσε να ανταγωνιστή το ψηφιακό για μετάδοση μέσα στην οπτική ίνα. Αντιθέτως με τις αναλογικές διεπαφές ,των οποίων το εύρος ζώνης ήταν μόνο 100-200 MHz για κάθε χρώμα, στις ψηφιακές διεπαφές το εύρος ζώνης περνούσε εύκολα τα Gb/s ανά χρώμα, και λόγω αυτού άρχισαν να παρουσιάζονται οι πρώτες οπτικές συνδέσεις οι οποίες χρησιμοποιούσαν σαν πομποδέκτη ημιαγωγό λέιζερ. Όταν το HDMI (High Definition Multimedia Interface) άρχισε να εφαρμόζεται στις οικιακές τηλεοράσεις οι ζήτηση για οπτικές συνδέσεις αυξήθηκε περεταίρω [4].

Τα DVI στάνταρτ παρουσιάστηκαν αμέσως μετά από την χρησιμοποίηση των 850 nm VCSEL πομποδεκτών στα Gigabit Ethernet. Το 2000 αναγγέλθηκε η πρώτη οπτική σύνδεση βίντεο η οποία υποστήριζε πλήρως τα στάνταρτ του DVI [5]. Μετά από αυτό, διάφορες οπτικές συνδέσεις αναπτύχθηκαν από πολλές επιχειρήσεις και τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούσαν 850 nm VCSEL ως πομποδέκτες.

Τα DVI και HDMI είναι πολυκαναλικές διεπαφές, και λόγω των πλεονεκτημάτων των VCSELs, το πολυκαναλικό στοιχείο μπόρεσε να εφαρμοστεί εύκολα, μειώθηκε το κόστος και το μέγεθος των συνδέσεων και διατηρήθηκε η ποιότητα του σήματος ανεξαρτήτως τη θέση της συσκευής απεικόνισης. Με αυτό τον τρόπο τα VCSELs εδραίωσαν την θέση τους στις εφαρμογές οπτικών συνδέσεων. Μερικές από τις εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούν ως πομποδέκτες τα VCSELs παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες.

5.1.2. Απαιτήσεις των VCSEL για τις μονάδες απεικόνισης

Όπως προαναφέρθηκε, στις οπτικές συνδέσεις βίντεο χρησιμοποιούνται κατά κόρον τα 850 nm VCSELs σαν τις καταλληλότερες πηγές φωτός λόγω του ότι η απόσταση μετάδοσης ήταν λιγότερη από το 1 km στα περισσότερα συστήματα απεικόνισης. Αν και στα VCSEL που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις συνδέσεις ζητήθηκαν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτών των πομποδεκτών VCSEL, υπήρχαν μερικές διαφορές.

Μια από τις μεγαλύτερες διαφορές είναι το μέγεθος της συσκευής. Το μέγεθος αυτών των συνδέσεων καθορίζεται από το μέγεθος των χάλκινων καλωδίων. Για να εφαρμοστούν τέσσερα η επτά κανάλια μετάδοσης σε ένα συνδετήρα DVI δύσκολα θα χρησιμοποιηθούν συσκευές TO και ακόμα πιο δύσκολα στα HDMI. Σε αυτή την περίπτωση υπήρχε ανάγκη για δομή πακέτων τα οποία μπορούν να ρυθμίσουν την αποδοτικότητα σύζευξης διατηρώντας την απόσταση μεταξύ VCSEL και της οπτικής ίνας στα 200 μm ή λιγότερη. Όσον αφορά τα VCSELs, αυτά πρέπει να έχουν μικρή γωνιακή απόκλιση και υψηλή αποδοτικότητα σύζευξης, η οποία είναι απαραίτητη για την ικανοποιητική ποιότητα μετάδοσης. Μικρή γωνιακή απόκλιση προέρχεται από μικρά ρεύματα λειτουργίας, άρα χρειάζεται μια μείωση του ρεύματος οδήγησης.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα, στην περίπτωση μίας απευθείας σύνδεσης μεταξύ του VCSEL και της οπτικής ίνας, είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του μεταδιδόμενου σήματος στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας [6]. Χωρίς φακό, η απόδοση σύζευξης μπορεί να είναι διαφορετική ανάλογα με τους εγκάρσιους τρόπους μετάδοσης. Οι υψηλότερη εγκάρσιοι τρόποι μετάδοσης έχουν συνήθως την μικρότερη αποδοτικότητα σύζευξης έναντι των χαμηλότερων. Οι διαφορές στην αποδοτικότητα σύζευξης μεταξύ διαφόρων εγκάρσιων τρόπων μπορεί να αυξήσει την υπερπήδηση και να αυξομειώσουν το χρόνο ανύψωσης προκαλώντας την υποβάθμιση της ποιότητας των μεταδόσεων σημάτων σε υψηλές ταχύτητες.

Αν και τα 850 nm VCSELs χρησιμοποιούνται στις περισσότερες οπτικές συνδέσεις βίντεο, μερικές εφαρμογές χρειάζονται μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης. Τα 1.3 μm VCSELs μπορεί να θεωρηθούν στο μέλλον ως μία ακόμη αξιόπιστη πηγή φωτός για αυτές τις διασυνδέσεις χρησιμοποιώντας τις μονότροπες ίνες [7]. Επιπλέον, δεδομένο ότι οι περισσότερες εγκατεστημένες οπτικές ίνες έχουν μονότροπη λειτουργία, τα παραπάνω VCSELs μπορούν να γίνουν ελκυστικές σε αυτά τα συστήματα. Με την χρήση των πολύτροπων ινών η απόσταση μετάδοσης ελαχιστοποιείται αρκετά. Για αυτό το σκοπό ένας συνδυασμός των μεγάλων μηκών VCSELs και των μονότροπων ινών προτιμάται από τον αντίστοιχο συνδυασμό με αυτών των μικρών μηκών κύματος VCSEL.

5.1.3.Εφαρμογές στις οπτικές συνδέσεις βίντεο με χρήση VCSEL

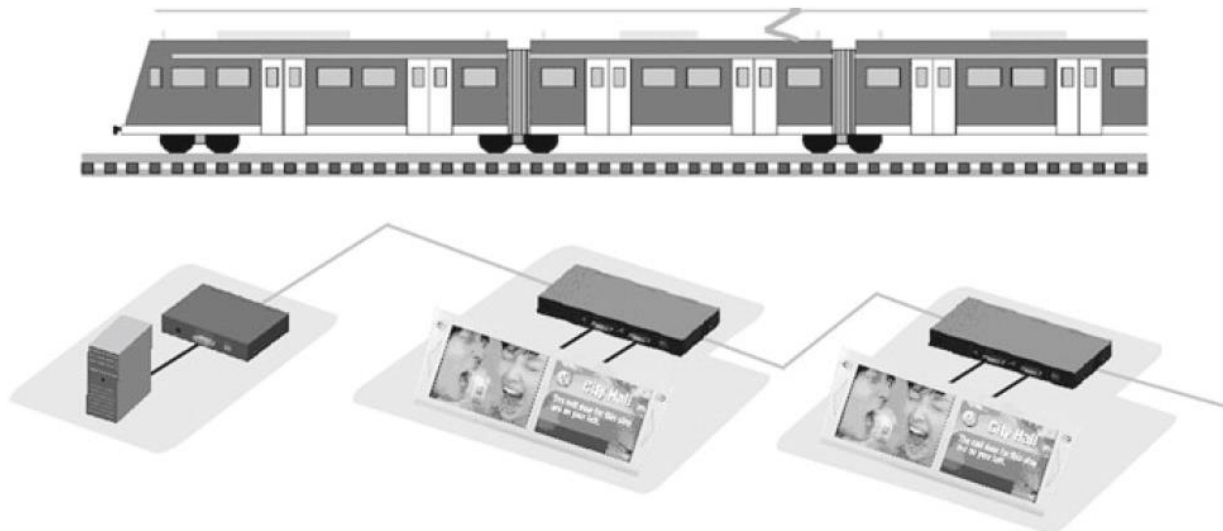
Τα τελευταία χρόνια το πλήθος των μεγάλων συστημάτων απεικόνισης αυξήθηκε ραγδαία. Καθώς οι τιμές των LCD/PDP πανελιών μειώνονται, η τιμή των εξαρτημάτων απεικόνισης επίπεδης οθόνης μειώνονται αντιστοίχως . Ωστόσο ένα από τα προβλήματα με τα μεγάλα συστήματα απεικόνισης είναι το πρόβλημα σύνδεσης και χειρισμού των επί μέρους εξαρτημάτων του συνολικού συστήματος. Σε αυτό το πρόβλημα δίνει λύση η φθηνή οπτική διασύνδεση βίντεο βασιζόμενο στα VCSELS. Σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιάσουμε μερικές ενδιαφέρουσες εφαρμογές αυτών των συνδέσεων[6].

5.1.4.Σύστημα απεικόνισης Τρένων

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα σύστημα απεικόνισης σε ένα τρένο του μετρό. Η σύνδεση αυτού του συστήματος απεικονίζεται στην εικόνα 5.3. Αυτά τα συστήματα εκτός από το μετρό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλοία και σε αεροπλάνα.



Εικόνα 5.2: Σύστημα απεικόνισης σε ένα τρένο μετρό



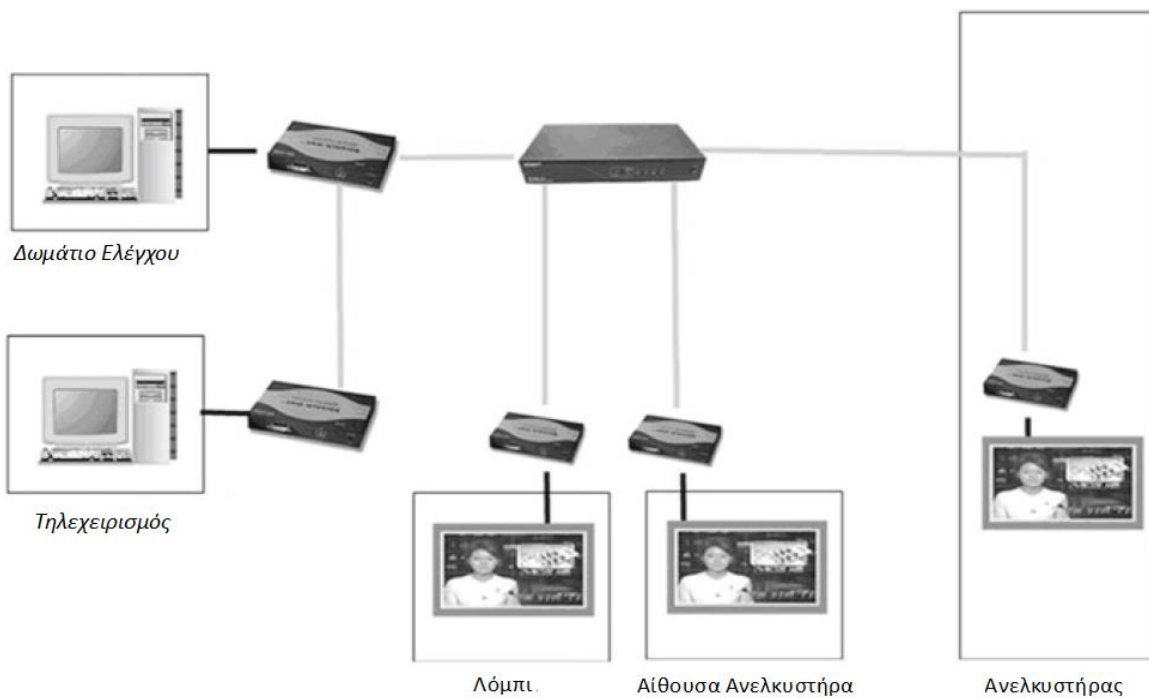
Εικόνα 5.3: Σύνδεση συστήματος απεικόνισης στα τρένα

Τα γραφικά σήματα αποθηκεύονται σε ένα server ,το οποίο βρίσκεται σε ένα δωμάτιο, και στην συνέχεια μεταδίδονται στις απεικονιστικές μονάδες στα βαγόνια επιβατών. Σε ένα τυπικό τρένο μετρό, η απόσταση μεταξύ δυο συνεχόμενων βαγονιών είναι 30-50 m και οι τηλεοράσεις είναι εγκατεστημένες σε δυο σημεία για κάθε βαγόνι. Ως εκ τούτου, η τυπική απόσταση της οπτικής σύνδεσης είναι περίπου 30 m. Λόγου του μεγάλου πλήθους χάλκινων καλωδίων για τροφοδότηση, για έλεγχο σημάτων και για αισθητήρες ,σε αυτά τα τρένα προτιμάται η χρήση μικρού πλήθους οπτικών ινών. Στο σύστημα της εικόνας 5.2 χρησιμοποιείται ο ηλεκτρικός παραλληλισμός για την μείωση του αριθμού των οπτικών ινών. Ακόμα, επειδή η ευκρίνεια της τηλεόρασης δεν είναι υψηλή, ο ρυθμός μετάδοσης είναι περίπου 2 Gb/s ανά κανάλι.

Ένα άλλο ζήτημα σε αυτά τα συστήματα είναι η θερμοκρασία λειτουργίας. Η θερμοκρασία μέσα στο τρένο μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 50°C , το οποίο είναι η μέγιστη λειτουργική θερμοκρασία των περισσότερων προϊόντων οπτικής σύνδεσης βίντεο. Σε μερικές περιπτώσεις η θερμοκρασία μέσα στην οπτική ενότητα μπορεί να είναι ακόμα και 10 με 15°C υψηλότερη από αυτό του βαγονιού. Άρα είναι επιθυμητή η χρήση VCSEL με πολύ σταθερές θερμοκρασιακές χαρακτηριστικές.

5.1.5.Σύστημα ανύψωσης

Αυτό το είδος συστημάτων προσφέρει πληροφορίες πολυμέσων, συμπεριλαμβμένου του καιρού και των διαφημίσεων, σε ένα κτήριο από τις συσκευές απεικόνισης τα οποία είναι εγκατεστημένα σε ένα λόμπι και στον ανελκυστήρα. Η εικόνα 5.4 παρουσιάζει την απλοϊκή έννοια του συστήματος και η εικόνα 5.5 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της απεικόνισης σε ένα ανελκυστήρα το οποίο είναι συνδεδεμένο με οπτική σύνδεση βίντεο.



Εικόνα 5.4: Απλοϊκό σύστημα ανεγκυστήρα το οποίο χρησιμοποιεί οπτική σύνδεση βίντεο



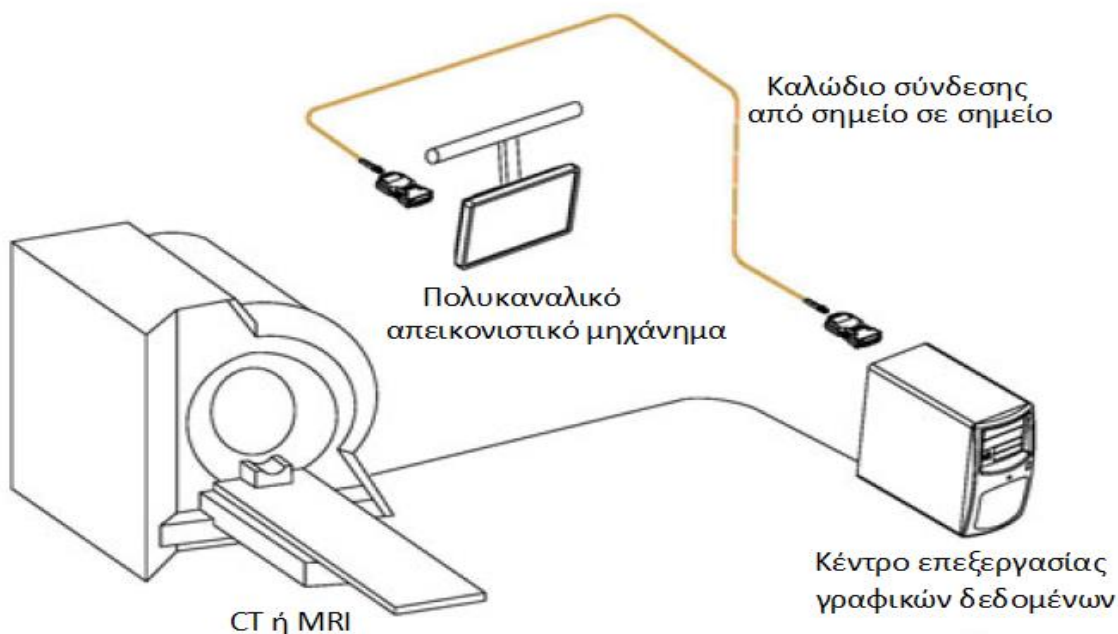
Εικόνα 5.5: Σύστημα απεικόνισης σε ένα ανεγκυστήρα

Στα συστήματα απεικόνισης των ανελκυστήρων, προτιμάται η χρήση των προ-εγκατεστημένων οπτικών ινών, τα οποία είναι συνήθως μονότροπες ίνες. Επιπλέον, ο αριθμός των διαθέσιμων οπτικών ινών είναι περιορισμένος. Η οπτική σύνδεση βίντεο σε αυτό το σύστημα θα πρέπει να χρησιμοποιεί μόνο μία μονότροπη ίνα στις περισσότερες περιπτώσεις.

Επειδή το απεικονιστική μονάδα σε ένα ανελκυστήρα είναι μικρό η ευκρίνεια αυτής είναι χαμηλή. Ακόμα, ο ρυθμός ανανέωσης μπορεί να είναι και αυτό χαμηλό, για παράδειγμα 30 Hz αντί για το συνήθη 60 Hz. Αυτό σημαίνει ότι το εύρος ζώνης μπορεί να είναι το μέγιστο 2 Gb/s.

5.1.6. Ιατρικές εφαρμογές

Έχουν δημιουργηθεί πολλά είδη ιατρικών μηχανημάτων τα οποία χρειάζονται υψηλής ευκρίνειας απεικονιστικές συσκευές. Για εξετάσεις υπάρχουν τα συστήματα CT, MRI, PET και το σύστημα ψηφιακών ακτίνων-X. Για επεμβάσεις υπάρχει το υψηλής ευκρίνειας ενδοσκόπιο. Αυτά τα συστήματα υιοθετούν υψηλής ευκρίνειας απεικονιστικές μονάδες. Η εικόνα 5.6 παρουσιάζει την εφαρμογή της οπτικής σύνδεσης βίντεο σε ένα CT ή MRI. Η επιλογή των VCSEL σε αυτά τα συστήματα έγινε με κριτήριο την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε σχέση με τα άλλα λέιζερ.

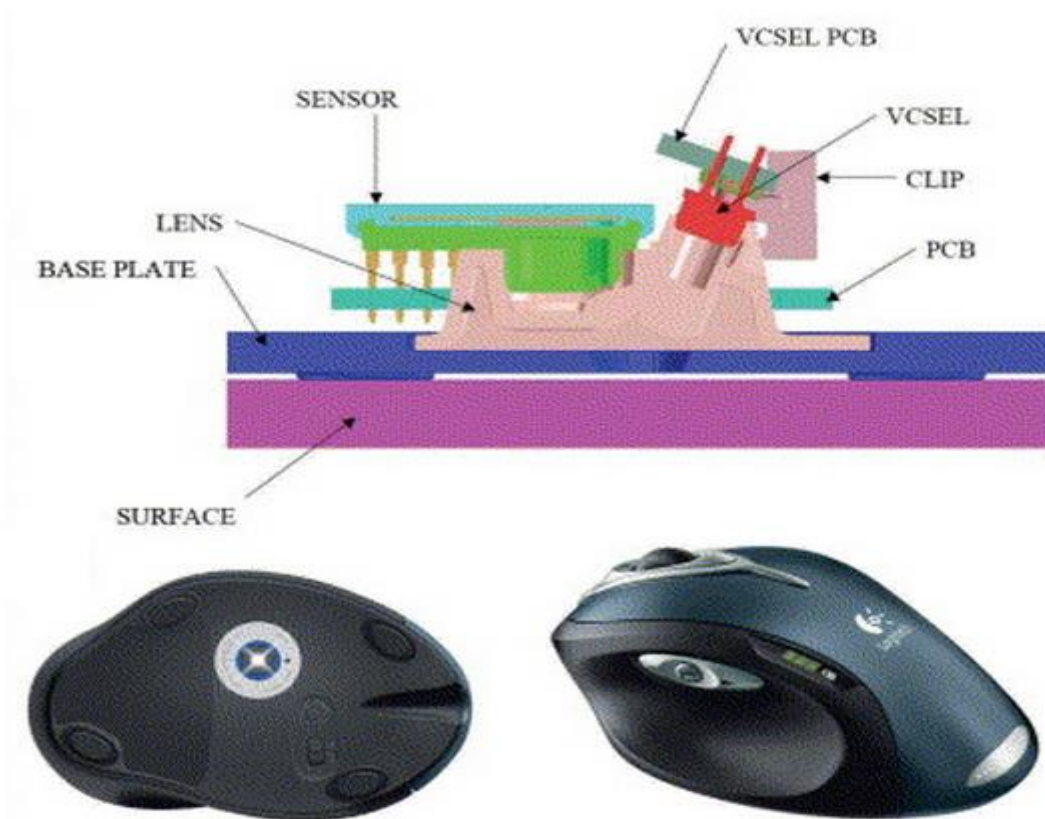


Εικόνα 5.6: Ιατρικό σύστημα απεικόνισης το οποίο χρησιμοποιεί οπτική σύνδεση

Επειδή ο θόρυβος το οποίο προέρχεται από το EMI μπορεί να προκαλέσει μοιραίες συνέπειες, τα υβριδικά χάλκινα καλώδια δεν επιτρέπονται για χρήση στις περισσότερες περιπτώσεις. Για αυτό το λόγο, σε αυτά τα συστήματα απαιτούνται VCSEL υψηλής αξιοπιστίας οι οποίες διαθέτουν πολύ καλές EMI χαρακτηριστικές.

5.1.7. Οθόνες και ποντίκια υπολογιστών

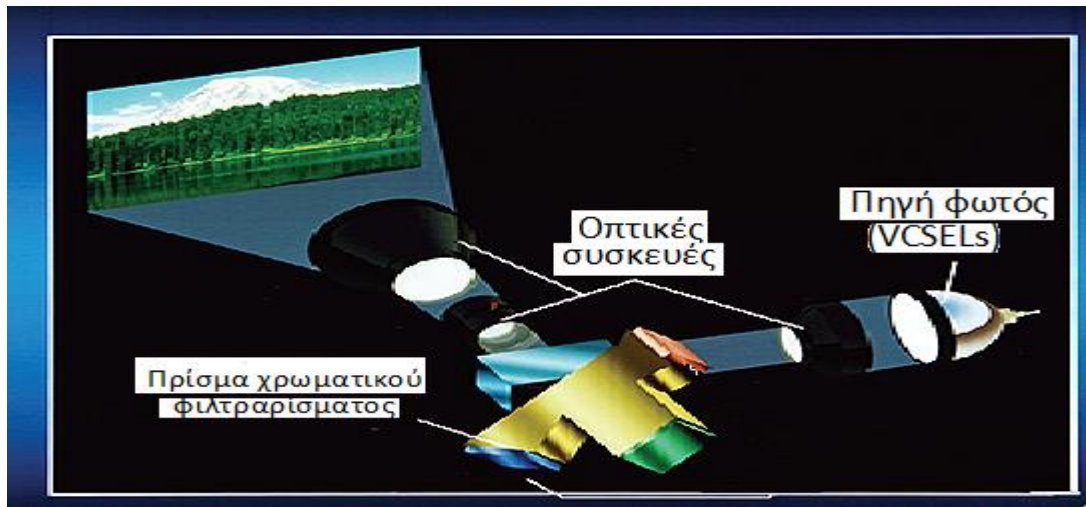
Μία θεαματική επιτυχία για τα VCSELs είναι η εφαρμογή τους στα ποντίκια των υπολογιστών [8]. Μια πολύ εργονομική λύση σε αυτό το πεδίο δίνουν τα ποντίκια τα οποία περιέχουν λέιζερ τύπου VCSEL της Logitech. Η επιλογή των VCSELs σε αυτά τα ποντίκια έγινε χάρη στο μικρό μέγεθος τους και ως συνέπεια και τις μικρής ισχύς κατανάλωσης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τη δομή των ποντικιών και την θέση του VCSEL μέσα σε αυτό.



Εικόνα 5.7: Η δομή ενός ποντικιού Logitech και η θέση το VCSEL μέσα σε αυτό

Ακόμα, άλλη μία μεγάλη αγορά για τα VCSELs είναι η χρήση τους ως πηγή φωτός στο πίσω μέρος σε ένα RPTV (Rear-Projection Television). Η Principia Lightworks ανέπτυξε ένα σύστημα VCSEL, το οποίο ονομαστικέ e-VCSEL, και είναι ένα χαμηλού κόστους λέιζερ το οποίο

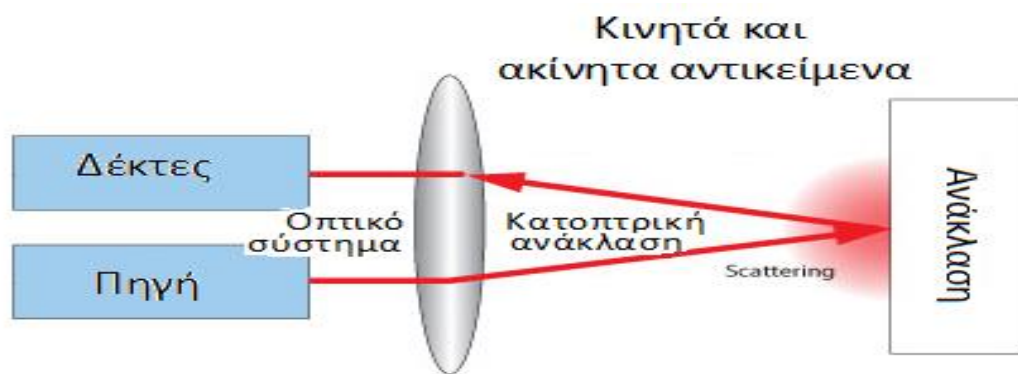
προορίζεται για χρήση στα RPTV. Τα e-VCSELS δεν απαιτούν οπτική διαφάνεια και η ψύξη τους επιτυγχάνεται μέσω εξαναγκασμένης κυκλοφορίας του αέρα, και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους. Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας των RPTV.



Εικόνα 5.8: Αρχή λειτουργίας των RPTV

5.1.8. Οπτική αισθητήρες VCSEL

Τα VCSELS μπορούν να παρέχουν υψηλή απόδοση, αξιοπιστία και ακρίβεια σε οπτικούς αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται στην ανάκλαση, στη μετάδοση, στην απορρόφηση, στην διασπορά και σε άλλες τεχνικές [9]. Για παράδειγμα, τα VCSEL είναι παντού παρόν στις εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες ανάκλασης για τον εντοπισμό των ακίνητων ή κινητών αντικειμένων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των παραπάνω αισθητήρων.



Εικόνα 5.9: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα ανάκλασης

Η επιτυχία των VCSEL σε αυτό το τομέα επιτεύχθηκε λόγω της εύκολης τοποθέτησης αυτών επιφανειακά και με αυτό τον τρόπο επιτρέπει την άμεση αντικατάσταση τους σε σύγκριση με τα LED. Με την βοήθεια της εστίασης τους και του συνεκτικού φως το οποίο εκπέμπουν, τα VCSELS είναι δέκα φορές πιο αποτελεσματικά από τις λυχνίες LED. Επίσης τα VCSELS παρέχουν αυξημένη διακριτική ικανότητα στο παρασκήνιο και βελτιωμένη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του αντικειμένου.

5.2. VCSEL σε Telecom εφαρμογές

Η ταχύτητες μετάδοσης στις τηλεπικοινωνίες και το ζητούμενο εύρος ζώνης αυξάνονται συνεχώς. Ειδικότερα στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, πρέπει να χρησιμοποιηθούν νέες μπάντες σε μεγαλύτερες συχνότητες όπως αυτών του εύρους THz προκειμένου να υπάρχει συμβιβασμός με την όλο και αυξανόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση [9]. Ένας σημαντικός περιορισμός στις τηλεπικοινωνιακές συσκευές είναι το περιορισμένο εύρος συντονισμού των φθηνών DFB λέιζερ, τα οποία είναι οι πιο χρησιμοποιημένες πηγές φωτός σε αυτό το τομέα. Αντιθέτως τα VCSELS προσφέρουν ένα πολύ μεγάλο φασματικό εύρος και επιτρέπει την ενιαία λειτουργία εκπομπής.

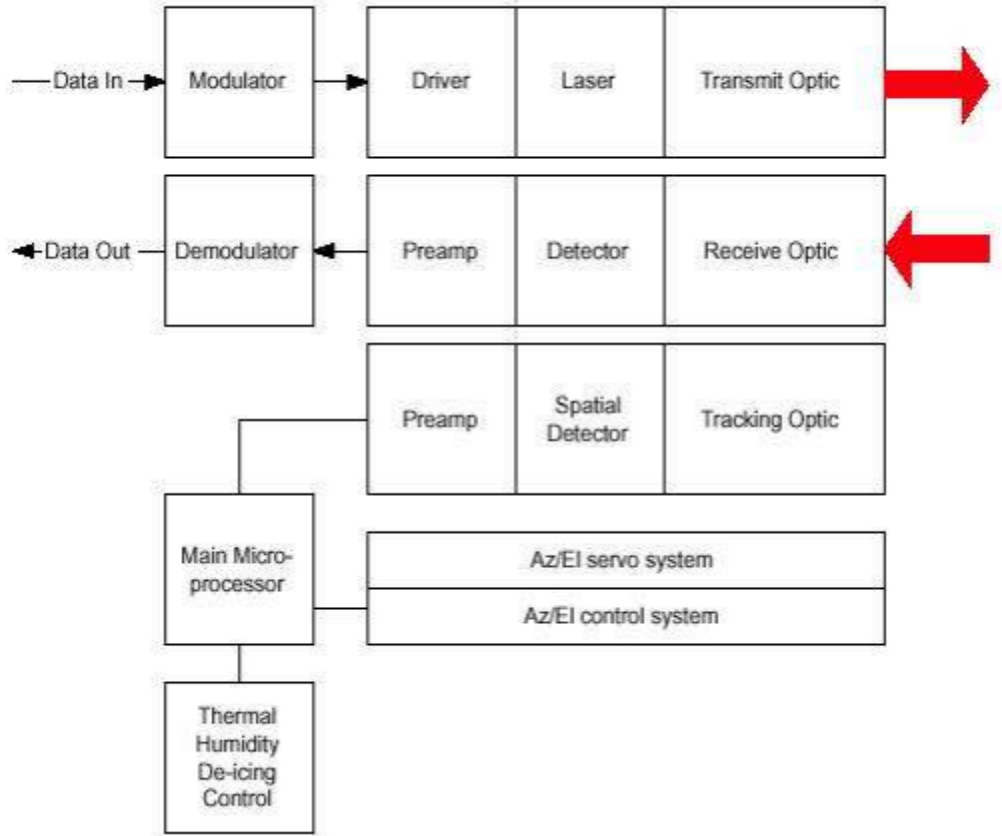
Στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, η Picolight Inc ήταν η πρώτη που έβαλε πομποδέκτη (transceiver) με VCSEL των 1310nm σε μία “Small Form-Factor Pluggable”(SFP) διάταξη 4Gb/s τριπλής ταχύτητας (1, 2 και 4Gb/s). Η BeamExpress έδειξε ενδιαφέρον προς την αγορά των transceivers με VCSELS των 1550nm αλλά αναγκάστηκε τελικά να στραφεί προς τους LX4 transceivers (διαχωρίζει το Ethernet των 10Gb/s σε τρία κανάλια των 3,125Gb/s). Μια άλλη εταιρεία που κατόρθωσε να συνδυάσει τις επιδόσεις των λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης (distributed feedback, DFB) με τα πλεονεκτήματα των VCSELS είναι η Photodigm Inc, με το επιφανειακής εκπομπής (grating-outcoupled surface-emitting, GSE) λέιζερ στα 1310nm. Η Avalon Photonics στρέφει το ενδιαφέρον της από τις τηλεπικοινωνίες σε εφαρμογές που έχουν σχέση με αισθητήρες ενώ η ιρλανδική Firecomms αναπτύσσει transceivers με VCSELS των 650-680nm για διάδοση ορατού φωτός μέσα από POF σε ταχύτητες μέχρι και 3,2Gb/s. Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών που βασίζονται στα οπτικά ελευθέρου χώρου (free-space optics, FSO) ασχολούνται εταιρείες όπως οι Lightpointe, MRV και Terabeam που χρησιμοποιούν VCSELS ισχύος 12-60mW (π.χ. της ULM Photonics).

Παρακάτω παρουσιάζουμε μερικές εφαρμογές των VCSEL, στο τομέα των τηλεπικοινωνιών, με χρήση των POF και FSO τεχνολογίας.

5.2.1. POF και FSO

Μία σημαντική εφαρμογή για τα VCSELs στα δίκτυα επικοινωνιών περιλαμβάνει τη Πλαστική Οπτική Ύψα (POF-plastic optical fiber) και το FSO (free space optic) και ως εκ τούτου διάφορες επιχειρήσεις στρέφουν την τεχνολογίας τους σε αυτό το τομέα [11]. Το πλεονέκτημα αυτού του τομέα είναι η ευκολία εγκατάστασης σε σύγκριση με τα χάλκινα καλώδια για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης .

Η μέθοδος της μετάδοσης της πληροφορίας διαμέσου της ατμόσφαιρας με τη βοήθεια μιας διαμορφωμένης ακτίνας φωτός είναι αρκετά παλιά. Παρά τις σημαντικές προόδους που έχουν γίνει στον τομέα αυτό κυρίως την περασμένη δεκαετία, η κεντρική ιδέα αυτής της μεθόδου επικοινωνίας παραμένει σχετικά απλή: μια παραλληλισμένη δέσμη φωτός εκπέμπεται από τον σταθμό του πομπού, διαδίδεται στον αέρα και τελικώς λαμβάνεται από τον σταθμό του δέκτη. Η θεωρία της FSO τεχνολογίας είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτή των ενσύρματων οπτικών επικοινωνιών. Η διαφορά είναι ότι στην FSO τεχνολογία η μεταδιδόμενη δέση φωτός δε χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για την μετάδοση της, αλλά μεταδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας. Η μεταδιδόμενη ακτίνα, η οποία παράγεται από τα λέιζερ, αφού παραλληλιστεί στέλνεται από την πηγή στο δέκτη, όπου με τη χρήση φακού συλλέγεται και οδηγείται στο φωτοανιχνευτή για να ανιχνευτεί. Στη συνέχεια γίνεται η αποδιαμόρφωση του οπτικού σήματος, η ενίσχυσή του και η περαιτέρω επεξεργασία της πληροφορίας που αυτό μεταφέρει. Σε αντίθεση με τις ζεύξεις οπτικών ινών, για να καταστεί εφικτή η εκπομπή, η μετάδοση αλλά και η λήψη του σήματος σε μια ζεύξη ελεύθερου χώρου είναι απαραίτητη η διασφάλιση της οπτικής επαφής (Line-of-sight) πομπού και δέκτη. Στην εικόνα 5.10 φαίνονται τα υποσυστήματα που συνθέτουν ένα σύστημα ασύρματης οπτικής επικοινωνίας [12]. Τα περισσότερα συστήματα ασύρματων οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν δύο καταστάσεις λειτουργίας (ON-OFF) ως τύπο διαμόρφωσης, την ίδια δηλαδή συνήθη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στα ψηφιακά συστήματα οπτικών ινών, όπου τα δεδομένα μεταδίδονται με ψηφιακό τρόπο, με την κατάσταση ON να αντιστοιχεί στη μετάδοση του δυαδικού '1' και την κατάσταση OFF να αντιστοιχεί στη μετάδοση του δυαδικού '0'. Αυτός ο απλός τρόπος διαμόρφωσης επιτρέπει στα συστήματα ασυρμάτων οπτικών επικοινωνιών να σχεδιάζονται ως συνδέσεις φυσικού επιπέδου.



Εικόνα 5.10: Τα υποσυστήματα που συνθέτουν ένα σύστημα ασύρματης οπτικής επικοινωνίας

Η τεχνολογία των οπτικών ζεύξεων ελευθέρου χώρου βρίσκει πολλές εφαρμογές στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση της και την κάνει πολύ ελκυστική σε σχέση με άλλες παρόμοιες τεχνολογίες επικοινωνιών (π.χ. οπτικές ίνες, RF επικοινωνίες). Οι οπτικές ζεύξεις ελευθέρου χώρου χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων [12]:

- Σε στρατιωτικές εφαρμογές, για την επικοινωνία των οπλικών συστημάτων. Η FSO τεχνολογία εξασφαλίζει τη γρήγορη και ασφαλή επικοινωνία των οπλικών συστημάτων, τα οποία κινούνται σε περιοχές δύσβατες, όπου η εγκατάσταση οπτικών ινών κρίνεται εξαιρετικά δύσκολη έως και απαγορευτική.
- Σε διαστημικές και δορυφορικές εφαρμογές, όπου απαιτείται η γρήγορη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, τόσο μεταξύ δύο δορυφόρων όσο και μεταξύ του δορυφόρου και του σταθμού βάσης. Η μεγαλύτερη χρησιμότητα των ασυρμάτων οπτικών επικοινωνιών αφορά την επικοινωνία από το δορυφόρο προς το σταθμό βάσης (downlink), λόγω του μεγαλύτερου όγκου δεδομένων μετάδοσης, και δίνει τη δυνατότητα επίτευξης μεγάλου ρυθμού μετάδοσης, της τάξης των Mb/s. Αυτό που κάνει πλέον κατάλληλη τη χρήση της τεχνολογίας αυτής σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η μεγαλύτερη κατευθυντικότητα της δέσμης που προσφέρουν τα μικρότερα μήκη κύματος σε σχέση με αυτή που προσφέρουν τα αντίστοιχα της RF επικοινωνίας.

- Σε ευρυζωνικές εφαρμογές, όπως η μετάδοση φωνής, ήχου και εικόνας.
- Για σύνδεση τοπικών δικτύων (Local Area Networks - LANs) μεταξύ τους σε μια Πανεπιστημιούπολη με ταχύτητες Fast ή Gigabit Ethernet.
- Για σύνδεση τοπικών δικτύων μεταξύ τους σε κάποιο αστικό κέντρο, για τη δημιουργία μητροπολιτικού δικτύου (Metropolitan Area Network-MAN).
- Για προσωρινή εγκατάσταση ενός δικτύου για την υποστήριξη κάποιου γεγονότος ή για κάποιο άλλο σκοπό.
- Για την άμεση ανάκτηση κάποιας σύνδεσης υψηλής ταχύτητας μετά από κάποια φυσική καταστροφή.

Για την POF τεχνολογία μια σημαντική εφαρμογή είναι το OTS (Optical Telephony Systems) [13]. Η οικογένεια OTS των οπτικών συστημάτων μετάδοσης φωνής χρησιμοποιεί προηγμένες ψηφιακές τεχνικές επικοινωνίας για μετάδοση φωνής μέσω μίας ενιαίας ίνας. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να διαμορφωθεί για την λειτουργία σε μονότροπές ή πολύτροπες ίνες με τη βοήθεια των 1.5μm, 1.3μm και 850 nm VCSELs. Ο συνδυασμός των τυποποιημένων μονότροπων ινών και της λειτουργίας στα 1.5μm έχουν ως αποτέλεσμα μετάδοση δεδομένων σε απόσταση 200 km. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την ιδιωτική τηλεφωνία, τα κανάλια υπηρεσιών και την επικοινωνία ανάμεσα σε τεχνικούς πεδίου κατά τη διάρκεια της συντήρησης των δικτύων τηλεπικοινωνιών.

5.3. VCSEL σε άλλα πεδία

Τα VCSEL, εκτός από την εφαρμογή τους στα πεδία των Datacom και Telecom, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλα τεχνολογικά πεδία. Μερικά από αυτά τα πεδία παρουσιάζονται παρακάτω.

5.3.1 Βιομηχανικές εφαρμογές

Στη βιομηχανική παραγωγή μεγάλης κλίμακας τα λέιζερ δίνουν γρήγορα και οικονομικά αποτελέσματα, με πολύ καλύτερο έλεγχο στην επεξεργασία των προϊόντων. Ειδικότερα, τα λέιζερ μικρού μήκους κύματος εκπομπής μεταδίδουν θερμότητα σε μέταλλα ή διηλεκτρικά καλύτερα από τα λέιζερ μεγάλου μήκους κύματος εκπομπής. Επίσης, αυτά τα λέιζερ υπερτερούν διότι μπορούν να κάνουν πιο λεπτές εργασίες επειδή έχουν πιο μικρή διάμετρο εστιασμένης δέσμης, ίση περίπου με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του. Δυστυχώς όμως αυτά τα λέιζερ έχουν μικρότερη ηλεκτρική απόδοση.

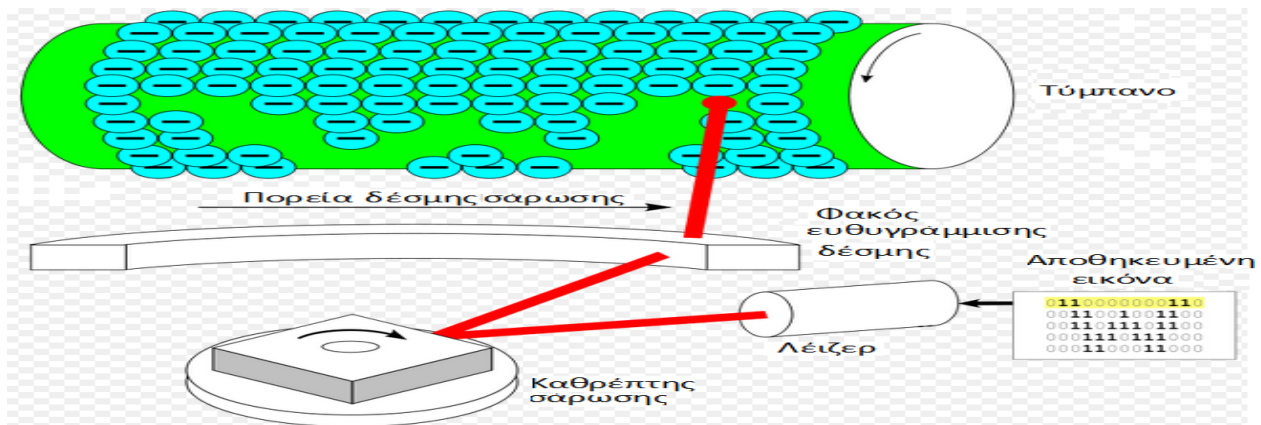
5.3.1 VCSEL σε εκτυπωτές

Ο εκτυπωτής λέιζερ χρησιμοποιεί την ηλεκτροστατική ψηφιακή διαδικασία εκτύπωσης. Αυτές οι συσκευές παράγουν υψηλής ποιότητας κείμενα και γραφικές παραστάσεις περνώντας επανειλημμένα μία ακτίνα λέιζερ μπρος-πίσω σε ένα αρνητικό φορτισμένο τύμπανο κυλίνδρου για να ορίσει μια φορτισμένη εικόνα [14]. Έπειτα, το τύμπανο συλλέγει την ηλεκτρική φορτισμένη σκόνη μελανιού και τη μεταφέρει στο χαρτί, το οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται για να παραμείνει μόνιμα το κείμενο ή η εικόνα στο χαρτί. Όπως και με τις ψηφιακές συσκευές φωτοαντιγραφής και τους συμβατικούς εκτυπωτές μελανιού, οι εκτυπωτές λέιζερ χρησιμοποιούν την ξηρογραφική διαδικασία εκτύπωσης. Παρακάτω παρουσιάζεται μια δομή αυτών των εκτυπωτών και η θέση του λέιζερ σε αυτά.



Εικόνα 5.11: Δομή λέιζερ μέσα σε ένα εκτυπωτή

Το λέιζερ στοχεύει σε ένα περιστρεφόμενο πολυγωνικό καθρέπτη το οποίο κατευθύνει την δέσμη μέσω ενός συστήματος φακών και κατόπτρων στο φωτοδέκτη. Ο κύλινδρος συνεχίζει να περιστρέφεται κατά τη διάρκεια της σάρωσης, και η γωνία της σάρωσης αντισταθμίζει αυτή την κίνηση. Το ροή των δεδομένων τα οποία αποθηκεύτηκαν στη μνήμη αναβοσβήνουν το λέιζερ για να σχηματίσουν κουκίδες πάνω στον κύλινδρο. Η επιλογή των VCSEL σε αυτά τα συστήματα γίνεται επειδή παράγουν στενή δέσμη εξόδου σε μεγάλη απόσταση. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.12: Αρχή λειτουργίας των εκτυπωτών λέιζερ

5.3.2. VCSEL σε Φωτοχημικές, Βιολογικές και Ιατρικές εφαρμογές

Τα ημιαγωγικά λέιζερ παίζουν σπουδαίο ρόλο στη χημεία και ιδιαίτερα στις φωτοχημικές αντιδράσεις. Αποτελούν τα πιο κατάλληλα εργαλεία για την μέτρηση της δομής των μορίων και για την μελέτη χημικών αντιδράσεων [15]. Επίσης, μπορούν να είναι η καταλύτες σε συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις μέσα σε ένα μείγμα στο οποίο είναι δυνατές πολλές διαφορετικές αντιδράσεις. Στις μέρες μας, αυτά τα λέιζερ χρησιμοποιούνται στη μελέτη φασμάτων αδρανών αερίων, των φασμάτων σπάνιων γαιών καθώς και του σθένους χημικών δεσμών. Ακόμα η ικανότητα των λέιζερ να συγκεντρώνουν μεγάλη ενέργεια σε μικρή επιφάνεια τα κάνει πολύ χρήσιμα σε καυστήρες και στην καταστροφή καρκινογόνων ιστών. Ο συνδυασμός των λέιζερ με τις οπτικές ίνες επιτρέπει την μεταφορά της ακτινοβολίας τους, για διάγνωση ή θεραπεία, ακόμα και σε δυσπρόσιτα σημεία του ανθρώπινου σώματος.

Η πιο γνωστή εφαρμογή των ημιαγωγικών λέιζερ στην ιατρική είναι η χρήση τους στην οφθαλμολογική χειρουργική και ειδικότερα στην περίπτωση της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς από τον χοριοειδή χιτώνα [15]. Η θεραπεία στην περίπτωση αυτή συνιστάται στην σύντηξη των δυο χιτώνων που έχουν αποκολληθεί με μια σειρά από μικρές τοπικές συγκολλήσεις. Λείζερ με παλμική διαμόρφωση με γρήγορη επαναληπτικότητα χρησιμοποιούνται από τους οδοντιάτρους σαν οδοντιατρικά τρυπάνια. Τέλος, μία ακόμα εφαρμογή αυτών είναι στην δερματολογία, είτε για καυτηριάσεις στην επιφάνεια του δέρματος είτε για να φθάσουμε ένα ιστό που βρίσκεται σε κάποιο βάθος αποφεύγοντας κάποιον άλλο που βρίσκεται στην επιφάνεια.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] H. Martinsson, J.A. Vukusic, M. Grabherr, R. Michalzik, R. Jäger, K.J. Ebeling and A. Larsson, “Transverse mode selection in large-area averse-confined vertical cavity surface-emitting lasers using a shallow surface relief”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, No. 12, pp. 1536-1538, Dec. 1999.
- [2] Μινόγλου Κυριακή, Οπτικοηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης για υψίρρυθμα φωτονικά μικροσυστήματα, Διδακτορική Διατριβή, ΕΚΠΑ, Αθήνα, Μάρτιος 2007
- [3] Digital Visual Interface, Rev 1.0, <http://www.ddwg.org/downloads.asp>
- [4] <http://www.hdmi.org/manufacturer/specification.aspx>
- [5] H.K. Shin, Optical interfaces using VCSEL array, in *Proceedings of International Symposium on Ultra-parallel Optoelectronics*, Kawasaki, Japan, pp. 68–71, Feb. 2000
- [6] Rainer Michalzik *Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*’.
- [7] J. Jewell, L. Graham, M. Crom, K. Maranowski, J. Smith, T. Fanning, 1310nm VCSELs in 1–10 Gb/s commercial applications, in *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers X*, ed. By C. Lei, K.D. Choquette. *Proceedings of SPIE*, vol. 6132 (2006), pp. 613204-1–613204-9
- [8] Roy Szweda VCSEL applications diversify as technology matures, Volume 19, Issue 1, February 2006, (34-38)
- [9] <http://www.myvcSEL.com/sensors/>
- [10] S. Koenig et al. “Wireless sub-THz communication system with high data rate,” *Nature Phot.*, 7, 977-981, (2013).
- [11] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961129006714776>
- [12] Πλακιά Χρήστου και Τασίκα Αναστασίου διπλωματική εργασία “ΟΠΤΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ” , 2007.
- [13] <http://www.fiberwork.net/products/fwl.html>
- [14] <http://www.merriam-webster.com/dictionary/laser%20printer>
- [15] ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΥ ΒΕΝΕΤΙΑ “ ΤΟ ΛΑΣΕΡ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ”, Αθήνα 2005

Κεφάλαιο 6: Παρουσίαση ερευνητικών πειραμάτων με VCSELs

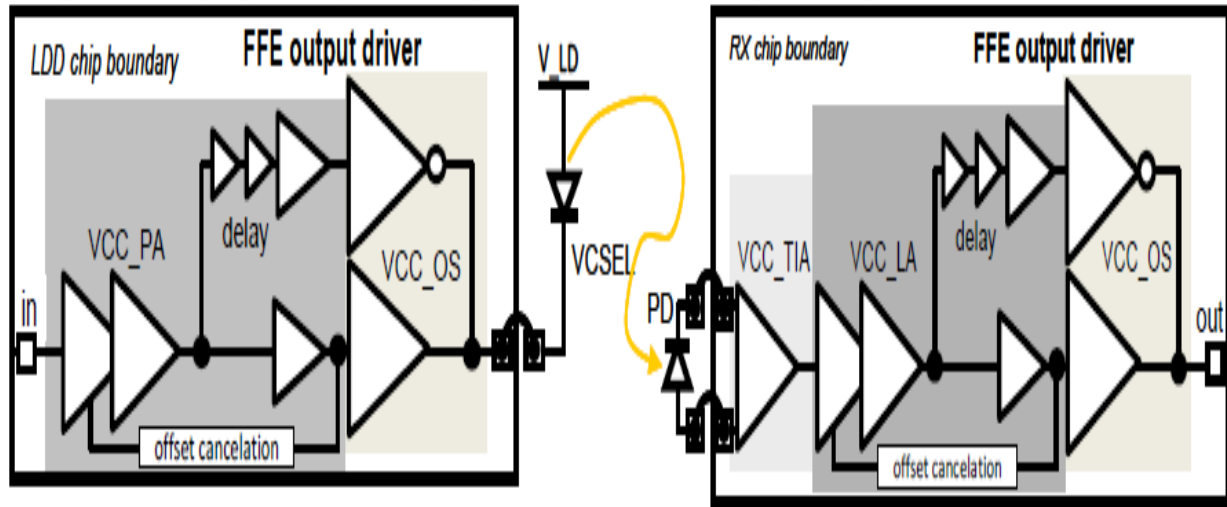
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε συνοπτικά μερικά πειραματικά αποτελέσματα συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούν VCSEL για τα πεδία Datacom και Telecom. Η επιλογή αυτών των πειραμάτων έγινε με κριτήριο το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας, την απόσταση μετάδοσης και τις διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη αυτών των ταχυτήτων. Συγκεκριμένα οι δύο πρώτες ενότητες ασχολούνται με απευθείας διαμορφωμένα VCSEL τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές Datacom και στην τελευταία ενότητα παρουσιάζεται ένα σύστημα με VCSEL το οποίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Telecom για ασύρματη σύνδεση.

6.1. NRZ διαμόρφωση για οπτικές συνδέσεις βασιζόμενες σε 850 nm VCSELs

Τα Datacenters και το διαδίκτυο τα τελευταία χρόνια οδήγησαν στην αύξηση της ζήτησης για υψηλό εύρος διασύνδεσης. Ήδη, ως μία λύση, έχουν τυποποιηθεί απευθείας διαμορφωμένα VCSELs με σειριακά δεδομένα ρυθμού των 25.78 και 28.05 Gb/s. Αναμένεται ,στις επόμενες γενιές προτύπων, να υπάρχουν σειριακούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων πάνω από 50 Gb/s. Συγκεκριμένα, η 64G Οπτική Ίνα είναι ικανή να μεταδώσει ταχύτητες των 56.1 Gb/s. Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζουμε προηγμένα VCSEL σε συνδυασμό με γρήγορα κυκλώματα και αντισταθμιστές, τα οποία λειτουργούν σε ταχύτητες πάνω από τα 50 Gb/s.

6.1.1. Το Πείραμα

Η πλήρης σύνδεση αποτελείται από ένα chip οδηγό το οποίο αποτελείται από FFE (Feed Forward Equalization) το οποίο συνδέεται σε ένα 850 nm VCSEL και σε ένα GaAs PIN φωτοδίοδο, τα οποία με την σειρά τους συνδέονται σε ένα δέκτη IC. Η εικόνα 6.1 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος[1].



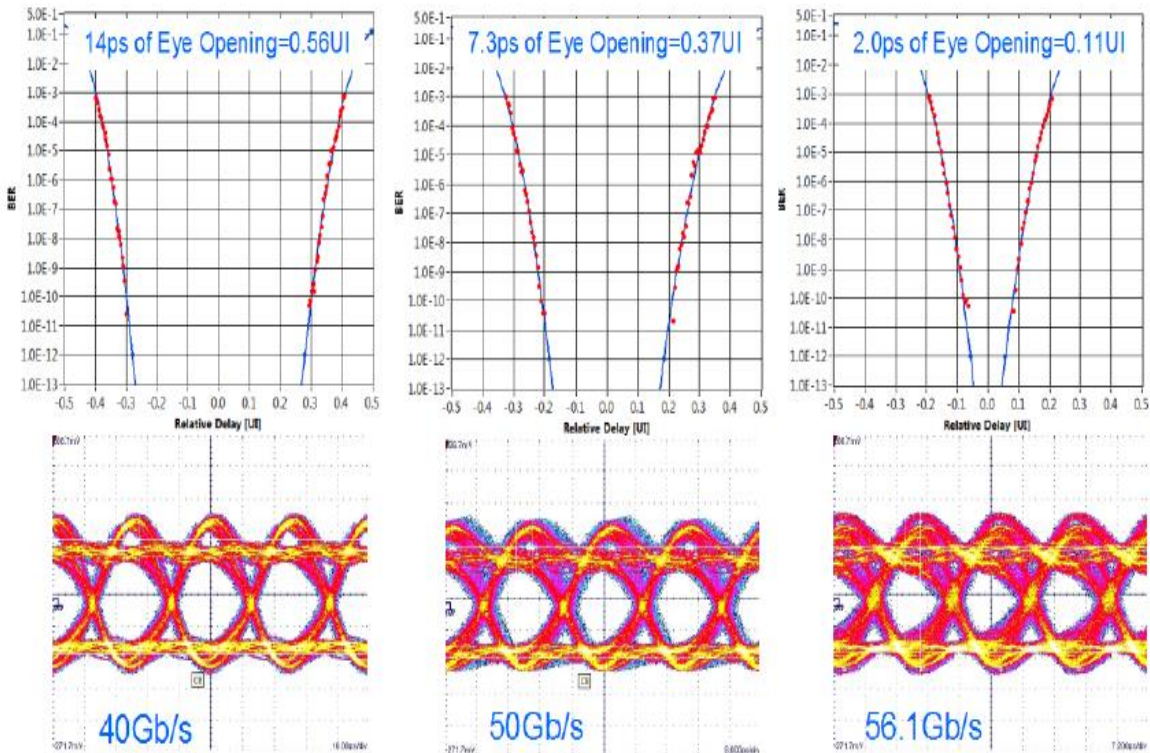
Εικόνα 6.1: Μπλοκ διάγραμμα της πλήρης οπτικής σύνδεσης μαζί με τα ολοκληρωμένα κυκλώματα του οδηγητή και του δέκτη ICs[1].

Οι διαφορετικοί έξοδοι του chip συνδέονται σε διαφορετικά VCSELs. Η οπτική έξοδος ενός VCSEL χρησιμοποιείται για μελέτη αποτελεσμάτων ενώ οι άλλοι έξοδοι χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση του φορτίου στην έξοδο του chip.

Το VCSEL το οποίο χρησιμοποιείται σε αυτό το πείραμα αναπτύχθηκε σε ένα n-τύπου υπόστρωμα με τη βοήθεια της MOCVD τεχνικής, και αποτελείται από n-τύπου κάτω DBR καθρέπτη, ενεργή περιοχή ενός τετάρτου QW και p-τύπου πάνω DBR καθρέπτη. Το VCSEL έχει 600 μA ρεύμα κατωφλίου, σειριακή αντίσταση των 100 Ω και αποτελεσματικότητα κλίσης (slope efficiency) 0.3 W/A. Το 3 dB οπτικό εύρος ζώνης ήταν 24 GHz.

6.1.2. Αποτελέσματα

Η πλήρη οπτική σύνδεση χαρακτηρίζεται από 40 έως 56.1 Gb/s ταχύτητες χρησιμοποιώντας PRBS7. Η λειτουργία χωρίς λάθη επιτεύχθηκε για ταχύτητες μέχρι 56.1 Gb/s. Στα 56.1 Gb/s το BER ήταν αρκετά χαμηλό ώστε να επιτρέψει πολλά Tbits να μεταδοθούν κατευθείαν χωρίς λάθη. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα eye diagrams και οι καμπύλες bathtub για ρυθμούς των 40,50 και 56.1 Gb/s χρησιμοποιώντας την ίδια σύνδεση[1].



Εικόνα 6.2: Eye diagrams της σύνδεσης και οι καμπύλες bathtub για τρεις ρυθμούς μετάδοσης των 40,50 και 56.1 Gb/s[1].

Στα 40 Gb/s το άνοιγμα ματιού ήταν 0.56 UI ή 14 ps. Στα 56.1 Gb/s ήταν 2.0 ps ή 0.11 UI για BER= 10^{-12} . Η συνολική απώλεια ενέργειας της συνολική σύνδεσης ήταν $1.33 \text{ W} = 682 \text{ mW} \cdot T_x + 648 \text{ mW} \cdot R_x$, το οποίο αντιστοιχεί στην κατανάλωση ισχύος της τάξης των 23.7 pJ/bit από το σύστημα στα 56.1 Gb/s, με το VCSEL να συνεισφέρει 245 fJ/bit.

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζει μία πλήρη σύνδεση ταχύτητας 56.1 Gb/s, το οποίο είναι ο μεγαλύτερος σειριακός ρυθμός bit για NRZ απευθείας διαμόρφωση VCSEL. Με τη βοήθεια ταχύτερων εξοπλισμών μέτρησης και με ακόμα πιο αναβαθμισμένα κυκλώματα και οπτικές συσκευές μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες μετάδοσης χωρίς λάθη της τάξης των 60 Gb/s και υψηλότερες [1].

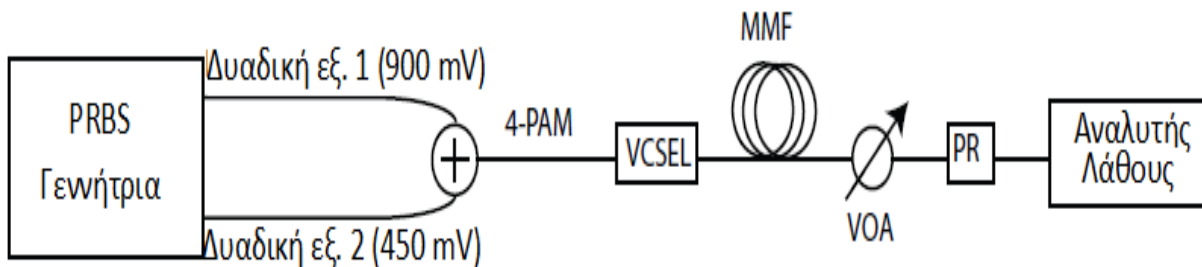
6.2. 4-PAM διαμόρφωση VCSEL για μετάδοση σε MMF

Η αυξανόμενη ζήτηση για χωρητικότητα στις μικρού μήκους οπτικές συνδέσεις παρακινεί την ανάπτυξη των γρήγορων και χαμηλού κόστους λύσεων χρησιμοποιώντας τα VCSELs και τις MMF. Χρησιμοποιώντας πολυεπίπεδες διαμορφώσεις με υψηλή φασματική απόδοση είναι ένας τρόπος επέκτασης των μεγάλων ρυθμών μετάδοσης σε πολύτροπες ίνες. Λόγου του περιορισμού κόστους, σε αυτά τα συστήματα εφαρμόζονται οι διαμορφώσεις έντασης και άμεσης ανίχνευσης (IM/DD). Για επίτευξη καλής φασματικής απόδοσης, στα IM/DD, υπάρχουν δύο πιθανές λύσεις διαμορφώσεων τα οποία είναι το PAM και το SCM (subcarrier modulation). Το 4-PAM έχει ερευνηθεί θεωρητικά για ρυθμούς 20 Gb/s και πειραματικά στα 10 Gb/s για χρήση με DFB λέιζερ.

Η πολυπλοκότητα είναι κρίσιμη για τις Datacom συνδέσεις και το PAM προσφέρει την χαμηλότερη εκτελεστική πολυπλοκότητα με φασματική απόδοση των 2 bits/sec/Hz. Σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των πραγματικού χρόνου μετάδοσης στα 25 και 30 Gb/s χρησιμοποιώντας 4-PAM διαμόρφωση VCSEL πάνω από 300 και 200 m MMF. Το 4-PAM σήμα δημιουργείται σε πραγματικό χρόνο.

6.2.1. Το Πείραμα

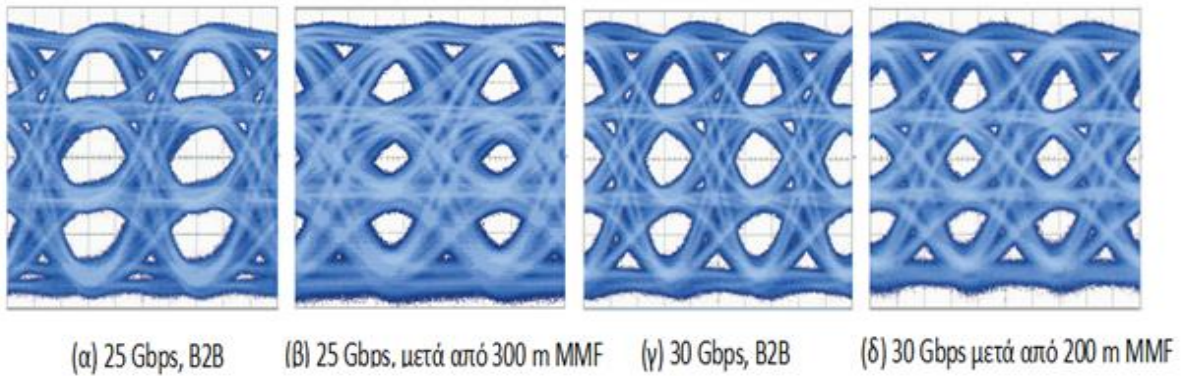
Το 4-PAM σήμα δημιουργείται από δύο διάδικους PRBS μήκους 2^7-1 , στα 12.5 Gb/s και 15 Gb/s για τα 25 και 30 Gb/s 4-PAM σήματα αντίστοιχα [2]. Τα μικρά PRBS σήματα επιλέχθηκαν για να διαμορφώσουν τους μικρούς μήκους κωδικών που χρησιμοποιούνται στις συνδέσεις δεδομένων Datacom. Τα πλάτη των διάδικων σημάτων ήταν 900 mV και 450 mV. Το 4-PAM σήμα διαχέεται σε ένα VCSEL μέσω ενός bias-T. Το VCSEL έχει 20 GHz εύρος διαμόρφωσης και ρεύμα 7 mA. Το χαμηλό ρεύμα μεταφράζεται σε χαμηλή πυκνότητα ρεύματος, το οποίο βελτιώνει την αξιοπιστία του λέιζερ [3]. Μεταξύ του VCSEL και του φωτοδέκτη χρησιμοποιείται μια MMF ίνα. Η μέτρηση του BER πραγματοποιείται μετρώντας την πιθανότητα λάθους σε κάθε ένα από τα τρία επίπεδα κατωφλίου που εμφανίζονται στην 4-PAM. Το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.3: Η πειραματική διάταξη[4].

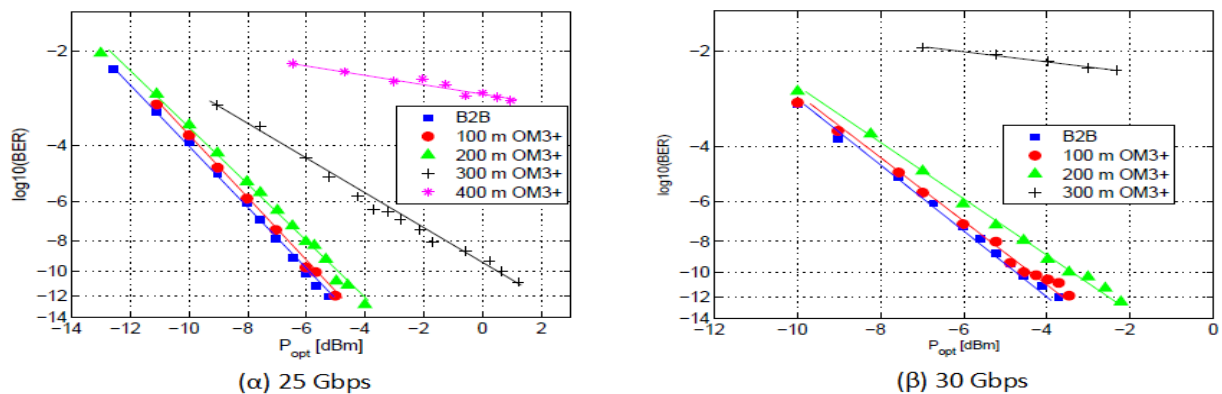
6.2.1. Αποτελέσματα

Στην εικόνα 6.4α παρουσιάζεται η ποιότητα του 25 Gb/s 4-PAM σήματος στη B2B (back-to-back) περίπτωση. Το διάγραμμα ματιού του σήματος μετά τη διάδοση του πάνω από 300 m MMF παρουσιάζεται στην εικόνα 6.4β. Στην εικόνα 6.4γ παρουσιάζεται το διάγραμμα ματιού του 30 Gb/s 4-PAM σήματος για την περίπτωση B2B και στην εικόνα 6.4δ το ίδιο διάγραμμα μετά από μετάδοση 200 m πάνω από MMF[4].



Εικόνα 6.4: Ανακτημένα διαγράμματα ματιού στα 25 και 30 Gb/s[4].

Η καμπύλη BER για την μετάδοση στα 25 Gb/s παρουσιάζεται στην εικόνα 6.5α. Η μέγιστη πρακτική απόσταση με χρήση του OM3+ MMF στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μετάδοση χωρίς λάθη είναι τα 300 m. Για την απόσταση των 400 m υπάρχει ένα επίπεδο λάθους λόγω της τροπικής διασποράς. Η καμπύλη BER για μετάδοση στα 30 Gb/s παρουσιάζεται στην εικόνα 6.5β. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη απόσταση είναι 200 m για την ίδια MMF, και υπάρχει ένα επίπεδο λάθους για 300 m του MMF. Λόγου του χαμηλού ρυθμού συμβόλων και άρα του χαμηλού εύρους ζώνης του σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλότερης ταχύτητας ενισχυτές στο φωτοδέκτη.



Εικόνα 6.5: BER καμπύλες για μετάδοση με 25 και 30 Gb/s[4].

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάσαμε μετάδοση χωρίς λάθη στα 25 και 30 Gb/s για απευθείας διαμόρφωση 4-PAM σε ένα 850 nm VCSEL πάνω από 300 και 200 m πολύτροπης ίνας αντίστοιχα. Το BER μετρήθηκε σε πραγματικό χρόνο και ήταν 10^{-12} και υπήρχε ένα μεγάλο περιθώριο ισχύς για λειτουργία χωρίς λάθη. Λόγω της καλύτερης φασματικής απόδοσης των σχημάτων PAM, η απόσταση μετάδοσης στην MMF είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την OOK διαμόρφωση. Ο ρυθμός bit του 4-PAM μπορεί να αυξηθεί εάν γίνουν διαθέσιμοι φωτοδέκτες με μεγαλύτερες ταχύτητες επεξεργασίας.

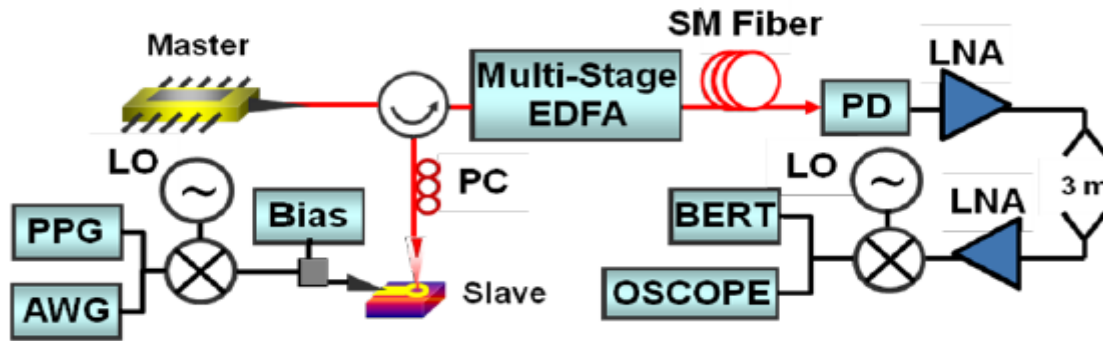
6.3. Απευθείας διαμόρφωση ASK και QPSK στα OIL VCSEL

Δεδομένη ότι η ζήτηση για υψηλούς ρυθμούς στις ασύρματες εφαρμογές αυξάνεται, το εύρος ζώνης των δικτύων διανομής πρέπει να συμβιβαστούν με αυτή την εκρηκτική ανάπτυξη. Για να λύσουν αυτό το πρόβλημα έχουν προταθεί οι ασύρματες επικοινωνίες, με μήκος κύματος της τάξης των mm, λόγω του ανεκμετάλλετου φάσματος μεταξύ 57-64 GHz η οποία όμως περιλαμβάνει υψηλές ατμοσφαιρικές απώλειες. Για να επεκταθεί η πρόσβαση σε αυτές τις συχνότητες έχει προταθεί η RoF (Radio over Fiber) λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης και των χαμηλών απωλειών της οπτικής ίνας.

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζουμε την αποδοτικότητα των απευθείας διαμορφωμένων OIL (Optically Injection Locked) VCSELS σαν 60 GHz πομπούς για μετάδοση σε RoF [5]. Παρακάτω παρουσιάζουμε μετάδοση των 3 Gb/s για διαμόρφωση ASK και 2 GHz για διαμόρφωση QPSK.

6.3.1. Το πείραμα

Η εικόνα 6.6 παρουσιάζει τη δομή του συστήματος πομποδέκτη. Ένας ταλαντωτής 60.5 Hz πολυπλέκεται με ένα σήμα βασικής ζώνης ASK ή QPSK και με την βοήθεια ενός bias-T διαμορφώνουν το VCSEL. Ένα CW υψηλής ισχύος ανατροφοδοτεί το κύριο λέιζερ κατόπιν μεταβιβάζεται στο 1540 nm VCSEL μέσω ενός κυκλοφορητή.

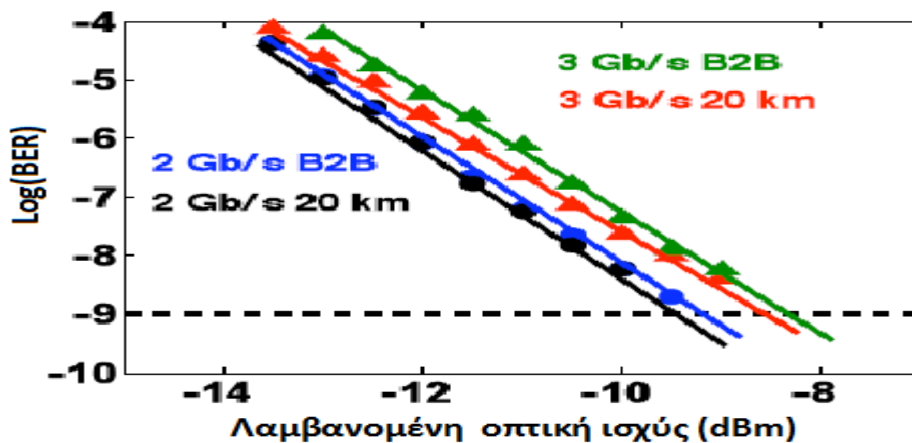


Εικόνα 6.6: Δομή συστήματος του OIL VCSEL RoF μεταδότη[5]

Ένας ελεγκτής πόλωσης χρησιμοποιείται για να ταιριάζει τη πολυπλοκότητα του κύριου λέιζερ με αυτού του VCSEL για να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα του ρυθμού έγχυσης. Μετά το κυκλοφορητή, το οπτικό σήμα και το σήμα 60.5 Hz πλευρική ζώνης εξισώνονται με την χρησιμοποίηση ενός EDFA για να μεταδοθούν σε διαφορετικά μήκη μέσα σε ένα SSMF (Standard Single Mode Fiber). Μία φωτοδίοδος 70 GHz χρησιμοποιείται για ανίχνευση σήματος. Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται με LNA (Low Noise Amplifier) το οποίο στη συνέχεια τροφοδοτεί μία κεραία. Η παραπάνω κεραία μεταδίδει σε μία άλλη κεραία σε απόσταση 3 m η οποία είναι συνδεδεμένη με ένα LNA. Τέλος το σήμα υπό-μετατρέπεται για να κατεβεί στη βασική ζώνη για να αναλυθεί.

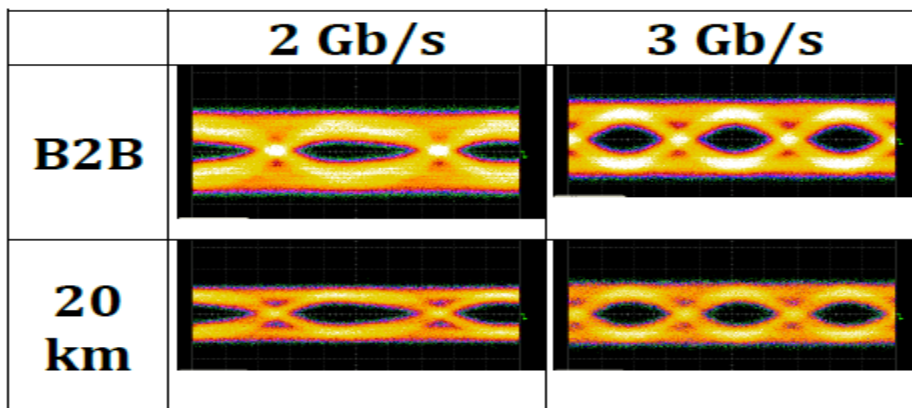
6.3.2. Διαμόρφωση ASK

Η εικόνα 6.7 παρουσιάζει τις καμπύλες BER για τους ρυθμούς 2 και 3 Gb/s με μήκος ψευδοκώδικα $2^{31}-1$, για τις περιπτώσεις μετάδοσης 20 km και B2B σε οπτική ίνα ακολουθούμενη με 3 m ασύρματης μετάδοσης [5].



Εικόνα 6.7: Καμπύλες BER για 2 και 3 Gb/s βασικής ζώνης ASK[5].

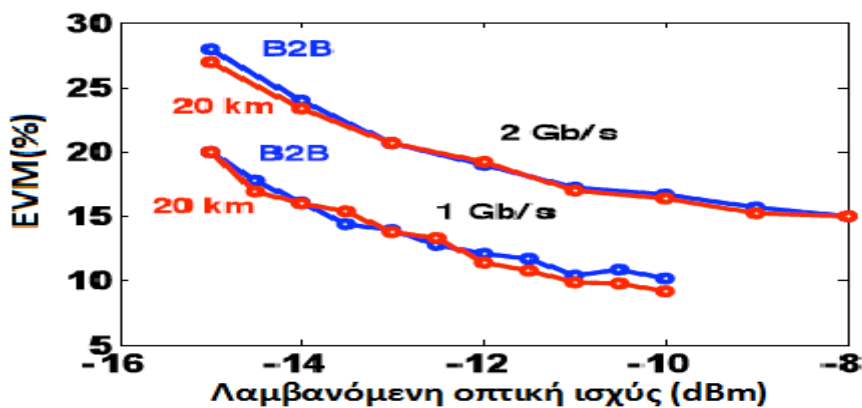
Συγκρίνοντας την B2B μετάδοση και την μετάδοση για 20 km, η B2B έχει μια μικρή βελτίωση ευαισθησίας στο δέκτη. Στην εικόνα 6.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ματιού για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις .



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα ματιού για το λαμβανόμενο ASK σήμα[5].

6.3.3. Διαμόρφωση QPSK

Εκτός από την διαμόρφωση βασικής ζώνης ASK, μετρήθηκε και η μετάδοση στη περίπτωση B2B και της περίπτωσης 20 km για διαμόρφωση QPSK ρυθμού 1 και 2 GHz με μήκους ψευδοκώδικα 2^9-1 . Η εικόνα 6.9 παρουσιάζει το λάθος διανυσματικού μεγέθους EVM (Error Vector Magnitude) συναρτήσει της οπτικής ισχύος για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις μετάδοσης . Σε αυτή τη μέτρηση δεν φαίνεται κάποιο penalty στην B2B και 20 km μετάδοση.



Εικόνα 6.9: Καμπύλες EVM συναρτήσει την λαμβανομένης οπτικής ισχύος για δύο περιπτώσεις μετάδοσης με QPSK διαμόρφωση OIL VCSEL[5].

Παραπάνω παρουσιάσαμε τη βιωσιμότητα της χρησιμοποίησης των απευθείας διαμορφωμένων OIL VCSEL για μετάδοση των ευρυζωνικών σημάτων στη 60 GHz μπάντα για τις μελλοντικές προσβάσεις σε ασύρματα δίκτυα. Με τη χρήση της ASK και της QPSK διαμόρφωσης επιτεύχθηκαν ταχύτητες μέχρι 3 Gb/s. Η μετάδοση της πληροφορίας έγινε χωρίς να υπάρχουν λάθη.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] D. M. Kuchta, C. L. Schow, A. V. Rylyakov, J. E. Proesel, F. E. Doany, C. Baks, B. H. Hamel-Bissell “ A 56.1Gb/s NRZ Modulated 850nm VCSEL-Based Optical Link” 2012 IEEE
- [2] J. D. Ingham et al., “32 Gb/s Multilevel Modulation of an 850 nm VCSEL for Next Generation Datacommunication Standards,” accepted to Conference on Lasers and Electro-Optics (2011).
- [3] P. Westbergh, et al. “32 Gbit/s multimode fiber transmission using high-speed, low current density 850 nm VCSEL,” Electron. Lett., 45, 366-368, (2009).
- [4] Krzysztof Szczerba, Petter Westbergh, Johan Gustavsson, Asa Haglund, Johnny Karout, Magnus Karlsson, Peter Andrekson, Erik Agrell and Anders Larsson “30 Gbps 4-PAM transmission over 200m of MMF using an 850 nm VCSEL”, 2010, Sec. 8.1.9
- [5] Devang Parekh, Weijian Yang, Anthony Ng’Oma, Davide Fortusini, and Connie J. Chang-Hasnain “Directly Modulated Optically Injection Locked VCSEL as a Multi-Gbps 60 GHz Radio over Fiber transmitter”.