



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

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΠΛΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ VCSEL ΜΕ
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασάτος Δημήτριος-Γεράσιμος

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΠΛΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ VCSEL ΜΕ
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασάτος Δημήτριος-Γεράσιμος

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΠΛΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ VCSEL ΜΕ
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασάτος Δημήτριος-Γεράσιμος

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

..... Αναστασάτος Δημήτριος-Γεράσιμος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αναστασάτος Δημήτριος-Γεράσιμος, 2015.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. 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 ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η αποδοτική και αξιόπιστη επικοινωνία απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες για γρήγορη μεταφορά δεδομένων από το ένα μέρος στο άλλο. Ενώ στο παρελθόν η φωτιά, ο καπνός, τα περιστέρια και τα άλογα χρησιμοποιούνταν για να στείλουμε ένα μήνυμα, σήμερα χρησιμοποιούνται σύγχρονες γραμμές μεταφοράς δεδομένων που βασίζονται σε χάλκινα καλώδια και οπτικές ίνες ή ακόμη και ασύρματη ανταλλαγή πληροφοριών μέσω ραδιοφώνου, τηλεόρασης και δορυφόρων, έτσι ώστε τα σήματα να μεταδίδονται με ηλεκτρónica και ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Ακολούθως, θα παρουσιαστεί μία επισκόπηση των σύγχρονων τεχνολογιών επικοινωνίας, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στον συνεχώς αυξανόμενο ρόλο των οπτικών γραμμών μεταφοράς δεδομένων και συγκεκριμένα στα lasers επιφανειακής εκπομπής κάθετης κοιλότητας (VCSELs), ως μία από τις πιο υποσχόμενες laser πηγές φωτός για τα μελλοντικά οπτικά συστήματα διασύνδεσης υπολογιστικών συστημάτων (optical interconnects).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός η μελέτη και κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του VCSEL, μέσα από τη διαδικασία μετρήσεων και εξαγωγής των χαρακτηριστικών καμπυλών της εν λόγω laser πηγής, και αφετέρου η προσπάθεια μοντελοποίησης, εξαγωγής παραμέτρων και τελικά επαλήθευσης ενός από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα συμπεριφοράς του VCSEL.

Λέξεις-Κλειδιά

Οπτικές Διασυνδέσεις, Κέντρα Πληροφορίας, Επικοινωνία Δεδομένων, Laser, Φωτοδίοδος, VCSEL, Μοντέλο Συμπεριφοράς, Θερμικό Μοντέλο, L-I-V Καμπύλες, Vector Network Analyzer, Probe Station, Συντελεστής Ανάκλασης, Συντελεστής Διάδοσης, Εξαγωγή Παραμέτρων, MS Excel, MatLab, Πολυωνυμική Προσαρμογή, Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων, Overfitting.

Abstract

Efficient and reliable communication requires advanced technologies for fast data transfer from one place to another. While in the past fire, smoke, doves and horses were used to send a message, today modern data transmission lines based on copper wires and optical fibers or even wireless information exchange over radio, television and satellites are utilized, so that signals are transmitted by electrons and electromagnetic waves.

In the following, an overview of modern communication technologies will be presented, special attention being paid to the ever increasing role of optical data transmission lines and particularly to vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs), as one of the most promising laser light sources for the future optical interconnects.

The aim of the present diploma thesis is on the one hand the study and comprehension of how VCSEL operates, through the process of measurements and extraction of the laser's characteristic functions, and on the other the effort of modeling, parameter extraction and finally verification of a widespread VCSEL behavior model.

Key-Words

Optical interconnects, Data Center, Datacom, Laser, Photodiode, VCSEL, Behavior Model, Thermal Model, L-I-V curves, Vector Network Analyzer, Probe Station, Reflection Coefficient, Transmission Coefficient, Parameter Extraction, MS Excel, MatLab, Least-Squares Polynomial Fitting, Overfitting.

Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθ. Παναγόπουλο Αθανάσιο ο οποίος με εμπιστεύτηκε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τη γενικότερη στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθ. Ηρακλή Αβραμόπουλο για την έμπνευση της παρούσας διπλωματικής και τη δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον, για εμένα προσωπικά, επιστημονικό αντικείμενο, όπως είναι αυτό της Φωτονικής Τεχνολογίας.

Σημαντική ήταν επίσης η βοήθεια του Συνεργάτη Ερευνητή ΕΜΠ Δρα. Παρασκευά Μπακόπουλου, τον οποίο και ευχαριστώ, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, με τις γνώσεις και την καθοδήγησή του. Επίσης, οφείλω ένα ευχαριστώ στους Υποψήφιους Διδάκτορες Ιωάννη Κανάκη και Νικόλαο Ηλιάδη οι οποίοι αφιέρωσαν χρόνο προκειμένου να πραγματοποιηθεί το πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Δεν θα μπορούσα, επίσης, να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αγάπη και στήριξή τους αυτά τα πέντε χρόνια φοίτησής μου στο ΕΜΠ.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον πατέρα μου, Ομότιμο Καθηγητή ΤΕΙ Πειραιά - Μαθηματικό Αναστασάτο Διονύσιο, ο οποίος αποτελεί από τα μαθητικά μου κιάλας χρόνια μέχρι και σήμερα τον άνθρωπο που συμβουλευόμαι και με καθοδηγεί σε κάθε μου βήμα και στον οποίο αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	14
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 – Εισαγωγή	19
1.2 – Η Οπτική στο Telecom και Datacom και ο Ρόλος των VCSELS	20
1.3 – Κέντρα Πληροφορίας – Data Centers.....	27
1.4 – Ο Νόμος του Moore στο Datacom	30
1.5 – Πρόσφατη Πρόοδος στα Υψηλής Ταχύτητας VCSELS.....	33
1.5.1 – Τελευταίας Τεχνολογίας VCSELS των 850 nm	34
1.5.2 – Τελευταίας Τεχνολογίας VCSELS των 980 nm	36
1.5.3 – Τελευταίας Τεχνολογίας VCSELS των 850 nm	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: VCSEL

2.1 – Εισαγωγή	39
2.1.1 – Οπτικές Διασυνδέσεις (Optical Interconnects).....	39

2.2 – VCSEL.....	42
2.2.1 – Δομή	42
2.2.2 – Γενικά Χαρακτηριστικά.....	43
2.2.3 – Τύποι VCSEL.....	45
2.2.4 – Εφαρμογές.....	49
2.2.5 – VCSEL 1550 nm.....	49
2.3 – Φωτοδίοδος	50
2.3.1 – Φωτοδίοδος P-N.....	50
2.3.2 – Φωτοδίοδος P-I-N.....	54
2.3.3 – Φωτοδίοδος Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode).....	55
2.3.4 – Φωτοδίοδος Schottky.....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 – Εισαγωγή	57
3.2 – 1 ^ο Στάδιο – Εξαγωγή L-I-V Καμπυλών.....	57
3.3 – 2 ^ο Στάδιο – Μέτρηση των S-Parameters.....	64
3.3.1 – Πειραματική Διάταξη Μέτρησης S-Παραμέτρων	65
3.3.2 – Προετοιμασία – Μετρήσεις	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.1 – Μοντελοποίηση VCSEL και Εξαγωγή Παραμέτρων	77
4.1.1 – Εξισώσεις Ρυθμού Βασισμένες στο Θερμικό Μοντέλο VCSEL	77
4.1.2 – Αλγόριθμοι Προσαρμογής Καμπύλης (Curve Fitting Algorithms).....	80

4.2 – Εξαγωγή των Παραμέτρων του VCSEL	82
4.2.1 – Συντελεστές στις LI Καμπύλες.....	82
4.2.2 – Συντελεστές στις καμπύλες VI.....	83
4.2.3 – Συντελεστές στις Εξισώσεις Ρυθμού.....	84
4.3 – Επαλήθευση του Μοντέλου VCSEL.....	86
4.3.1 – Προσομοίωση καμπύλης VI	86
4.3.2 – Προσομοίωση καμπύλης LI.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	
Παράρτημα Α – Laser: Χαρακτηριστικά & Αρχή Λειτουργίας.....	108
A.1 – Γενικά για τα laser	108
A.2 – Χαρακτηριστικά των Laser	110
A.3 – Η Φυσική των Lasers.....	111
A.3.1 – Ενεργό Μέσο	111
A.3.2 – Οπτική Κοιλότητα.....	112
A.4 – Λειτουργία των Lasers	113
A.5 – Τυπική Έξοδος Laser	120
A.6 – Είδη Laser πολλαπλών καναλιών	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Ανθρώπινη εξέλιξη: από την εξέλιξη του σώματος σε αυτήν του μυαλού	20
Σχήμα 1.2 Ιεραρχία των δικτύων για γραμμές μεταφοράς δεδομένων εκτός υπολογιστή με μια μικρή περιγραφή του ρόλου και της προσεγγιστικής ημερομηνίας έναρξης της χρήσης των αντίστοιχων οπτικών τεχνολογιών.....	21
Σχήμα 1.3 Τα διαφορετικά επίπεδα διασυνδέσεων στο εσωτερικό του υπολογιστή και η ημερομηνία της εισόδου της οπτικής στον αντίστοιχο τομέα αγοράς κατά προσέγγιση.	23
Σχήμα 1.4 Personal Area Network (PAN): Προσωπικός υπολογιστής με φορητές συσκευές όπως USB-sticks, κινητά τηλέφωνα, MP3 players κ.λπ. Με τυπικές αποστάσεις μετάδοσης της τάξης μερικών μέτρων	25
Σχήμα 1.5 Data Center	30
Σχήμα 1.6 Οι τάσεις της ITRS: (a) Οι τάσεις για το μέγεθος των cell και λογικής πύλης και (b) Οι τάσεις για τη τεχνολογία προϊόντος – συναρτήσεις ανά τσιπ.....	31
Σχήμα 1.7 Τάσεις για μετάδοση ψηφίων ηλεκτρικών δεδομένων: Μέγιστος εμπορικός ρυθμός δεδομένων για ένα κανάλι στο παρελθόν και προβλέψεις για το μέλλον μαζί με τα επερχόμενα σειριακά πρότυπα βασισμένα στο χαλκό για ρυθμούς bit πάνω από 10 Gbps. Για τη σκιασμένη περιοχή για ρυθμούς bit πάνω από 10 Gbps. και αποστάσεις μεγαλύτερες από 1m περίπου ή με υψηλή πυκνότητα διασυνδέσεων, καμία σειριακή λύση βασισμένη σε χαλκό δεν υπάρχει σήμερα.....	32
Σχήμα 2.1 Οπτική διασύνδεση ελευθέρου χώρου	39
Σχήμα 2.2 Υβριδικό PCB	40
Σχήμα 2.3 Πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις.....	41

Σχήμα 2.4 Τυπική δομή VCSEL.....	43
Σχήμα 2.5 Δομές για περιορισμό ρεύματος.....	46
Σχήμα 2.6 Δομές για περιορισμό φωτός	48
Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη P-N φωτοδιόδου	51
Σχήμα 2.8 Διάγραμμα απλουστευμένης ετεροδομικής φωτοδιόδου	54
Σχήμα 2.9 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας PIN φωτοδιόδου	55
Σχήμα 3.1 Το υπό μέτρηση VCSEL.....	57
Σχήμα 3.2 Πειραματική διάταξη για την εξαγωγή καμπυλών L-I-V. Στο πάνω μέρος της εικόνας διακρίνεται η κεφαλή του power meter μεγάλης επιφάνειας που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της οπτικής ισχύος.....	58
Σχήμα 3.3 Πειραματική Διάταξη για L-I-V Μετρήσεις	58
Σχήμα 3.4 Σταθμός οπτοηλεκτρονικών μετρήσεων (rf probe station) εργαστηρίου. Αριστερά φαίνεται ο Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (VNA).....	64
Σχήμα 3.5 Block διάγραμμα Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου.....	65
Σχήμα 3.6 Anritsu Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου.....	66
Σχήμα 3.7 Probe Station	69
Σχήμα 3.8 Lensed οπτική ίνα.....	69
Σχήμα 3.9 Ρύθμιση του holder της οπτικής ίνας	70
Σχήμα 3.10 Πειραματική Διάταξη Μέτρησης S-Παραμέτρων	71
Σχήμα 4.1 Διαδικασία Προσομοίωσης & Επαλήθευσης Μοντέλου VCSEL χρήσει εργαλείου σχεδίασης ηλεκτρονικών συστημάτων (EDA tool).....	86
Σχήμα 4.2 Παραδείγματα under-fitting και over-fitting.....	101
Σχήμα 5.1 Block Διάγραμμα Οπτικής Ζεύξης	103

Σχήμα 5.2 Προσομοίωση Οπτικής Ζεύξης	104
Σχήμα 5.3 Περιγραφή του Μοντέλου	106
Σχήμα A.1 Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε ποτέ βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο (ruby).....	109
Σχήμα A.2 Αρχή λειτουργίας του laser.....	111
Σχήμα A.3 Φάσμα αυθόρμητης εκπομπής και οι διαδιδόμενοι ρυθμοί της κοιλότητας ...	113
Σχήμα A.4 Αυθόρμητη εκπομπή	114
Σχήμα A.5 Απορρόφηση.....	115
Σχήμα A.6 Εξαναγκασμένη εκπομπή	116
Σχήμα A.7 Ενίσχυση - Απόσβεση.....	117
Σχήμα A.8 Διάγραμμα άντλησης (α)	118
Σχήμα A.9 Διάγραμμα άντλησης (β)	119
Σχήμα A.10 Παράδειγμα χρονικής συμπεριφοράς του τετραγώνου του πλάτους του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου $ A(t) ^2$, σε περίπτωση 51 ρυθμών ταλάντωσης, με το ίδιο πλάτος E_0 και τυχαίες φάσεις	120
Σχήμα A.11 Πρότυπο οπτικό πεδίο που κυκλοφορεί στο εσωτερικό κοιλότητας laser ...	120
Σχήμα A.12 Αναπαράσταση κοιλότητας laser DFB και DBR	122
Σχήμα A.13 Πολυσυχνотικό laser με WGR και το αντίστοιχο φάσμα.....	123

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.1 LI curve of 1550nm VCSEL at 20°C.....	59
Διάγραμμα 3.2 IV curve of 1550nm VCSEL at 20°C	59
Διάγραμμα 3.3 LI curve of 1550nm VCSEL at 30°C.....	60
Διάγραμμα 3.4 IV curve of 1550nm VCSEL at 30°C	60
Διάγραμμα 3.5 LI curve of 1550nm VCSEL at 40°C.....	61
Διάγραμμα 3.6 IV curve of 1550nm VCSEL at 40°C	61
Διάγραμμα 3.7 LI curve of 1550nm VCSEL at 50°C.....	62
Διάγραμμα 3.8 IV curve of 1550nm VCSEL at 50°C	62
Διάγραμμα 3.9 LI curves of 1550nm VCSEL	63
Διάγραμμα 3.10 IV curves of 1550nm VCSEL	63
Διάγραμμα 3.11 Reflection Coefficient (S_{11}) of 1550nm VCSEL @4mA	72
Διάγραμμα 3.12 Transmission Coefficient (S_{21}) of 1550nm VCSEL @4mA	72
Διάγραμμα 3.13 Reflection Coefficient (S_{11}) of 1550nm VCSEL @6.1mA.....	73
Διάγραμμα 3.14 Transmission Coefficient (S_{21}) of 1550nm VCSEL @6.1mA.....	73
Διάγραμμα 3.15 Reflection Coefficient (S_{11}) of 1550nm VCSEL @7.7mA.....	74
Διάγραμμα 3.16 Transmission Coefficient (S_{21}) of 1550nm VCSEL @7.7mA.....	74
Διάγραμμα 3.17 Reflection Coefficient (S_{11}) of 1550nm VCSEL @8.4mA.....	75
Διάγραμμα 3.18 Transmission Coefficient (S_{21}) of 1550nm VCSEL @8.4mA.....	75
Διάγραμμα 3.19 Reflection Coefficient (S_{11}) of 1550nm VCSEL @9mA	76
Διάγραμμα 3.20 Transmission Coefficient (S_{21}) of 1550nm VCSEL @9mA	76
Διάγραμμα 4.1 IV curve of 1550nm VCSEL at 20°C (measured/simulated).....	90

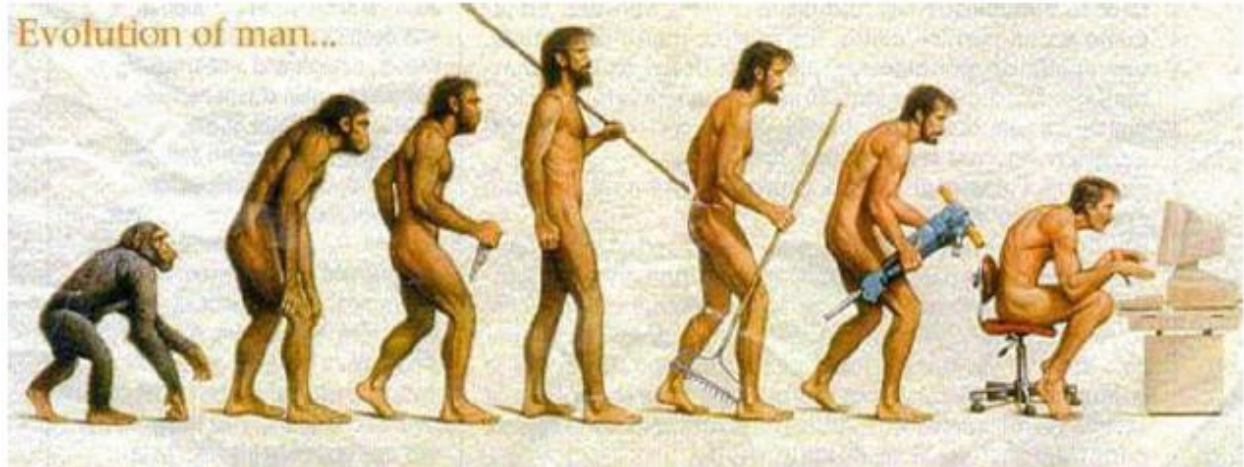
Διάγραμμα 4.2 IV curve of 1550nm VCSEL at 30°C (measured/simulated).....	90
Διάγραμμα 4.3 IV curve of 1550nm VCSEL at 40°C (measured/simulated).....	91
Διάγραμμα 4.4 IV curve of 1550nm VCSEL at 50°C (measured/simulated).....	91
Διάγραμμα 4.5 LI curve of 1550nm VCSEL at 20°C (measured/simulated)	96
Διάγραμμα 4.6 LI curve of 1550nm VCSEL at 30°C (measured/simulated)	97
Διάγραμμα 4.7 LI curve of 1550nm VCSEL at 40°C (measured/simulated)	98
Διάγραμμα 4.8 LI curve of 1550nm VCSEL at 50°C (measured/simulated)	99
Διάγραμμα 4.9 Διαδικασία εύρεσης τάξης βέλτιστου fitting.....	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της ανθρώπινης κοινωνίας συνεχίζεται σε έναν μόνιμα αυξανόμενο ρυθμό. Η επιτάχυνση τόσο της ατομικής όσο και την κοινωνικής ανθρώπινης ανάπτυξης δημιουργεί νέες προκλήσεις και απαιτεί ακόμα γρηγορότερες αντιδράσεις στις ραγδαία μεταβαλλόμενες συνθήκες. Ενώ στην αρχή της ανθρώπινης περιόδου, η πρόοδος προκλήθηκε κυρίως στις εξελικτικές αλλαγές του ανθρωπίνου σώματος, αργότερα η πρόοδος ξεκίνησε στην πνευματική σφαίρα, και είναι στις μέρες μας η κινητήριος δύναμη της ανάπτυξης της ανθρώπινης κοινωνίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα 1.1. Η επικοινωνία και η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα μέλη της κοινωνίας διαδραματίζουν εδώ αποφασιστικό ρόλο. Το να γνωρίζουν όχι μόνο πώς να κάνουν κάτι αλλά επίσης το πότε και πού έγινε μια απαραίτητη προϋπόθεση για μία επιτυχία ενός ατόμου, καθώς επίσης και μιας ολόκληρης κοινωνίας. Ξεκινώντας από απλή λεκτική ανταλλαγή πληροφοριών, η επικοινωνία αναπτύχθηκε μέσα από την εφεύρεση της γραφής, των βιβλίων, των έντυπων μέσων μαζικής ενημέρωσης, του ραδιοφώνου, της τηλεόρασης και πιο πρόσφατα των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του Internet σε μιας ζωτικής σημασίας βάση για την κοινωνία μας. Το σύνολο των βιομηχανικής, τεχνολογικής, επιστημονικής, πολιτιστικής και κοινωνικής προόδου θα ήταν αδύνατη χωρίς αποτελεσματική επικοινωνία.

Η αποτελεσματική επικοινωνία απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες για γρήγορη μεταφορά δεδομένων από το ένα μέρος στο άλλο. Ενώ στο παρελθόν η φωτιά, ο καπνός, τα περιστέρια και τα άλογα χρησιμοποιούνταν για να στείλουμε ένα μήνυμα, σήμερα σύγχρονες γραμμές μεταφοράς δεδομένων που βασίζονται σε χάλκινα καλώδια και οπτικές ίνες ή ακόμη και ασύρματη ανταλλαγή πληροφοριών μέσω ραδιοφώνου, τηλεόρασης και δορυφόρων χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε τα σήματα να μεταδίδονται με ηλεκτρόνια και ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ακολούθως, θα παρουσιαστεί μία επισκόπηση των σύγχρονων τεχνολογιών επικοινωνίας, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στον συνεχώς αυξανόμενο ρόλο των οπτικών γραμμών μεταφοράς δεδομένων και συγκεκριμένα στα lasers επιφανειακής εκπομπής κάθετης κοιλότητας (VCSELs), ως μία από τις πιο υποσχόμενες laser πηγές φωτός για τα μελλοντικά οπτικά συστήματα διασύνδεσης υπολογιστικών συστημάτων (optical interconnects) [1].



Σχήμα 1.1 Ανθρώπινη εξέλιξη: από την εξέλιξη του σώματος σε αυτήν του μυαλού [53]

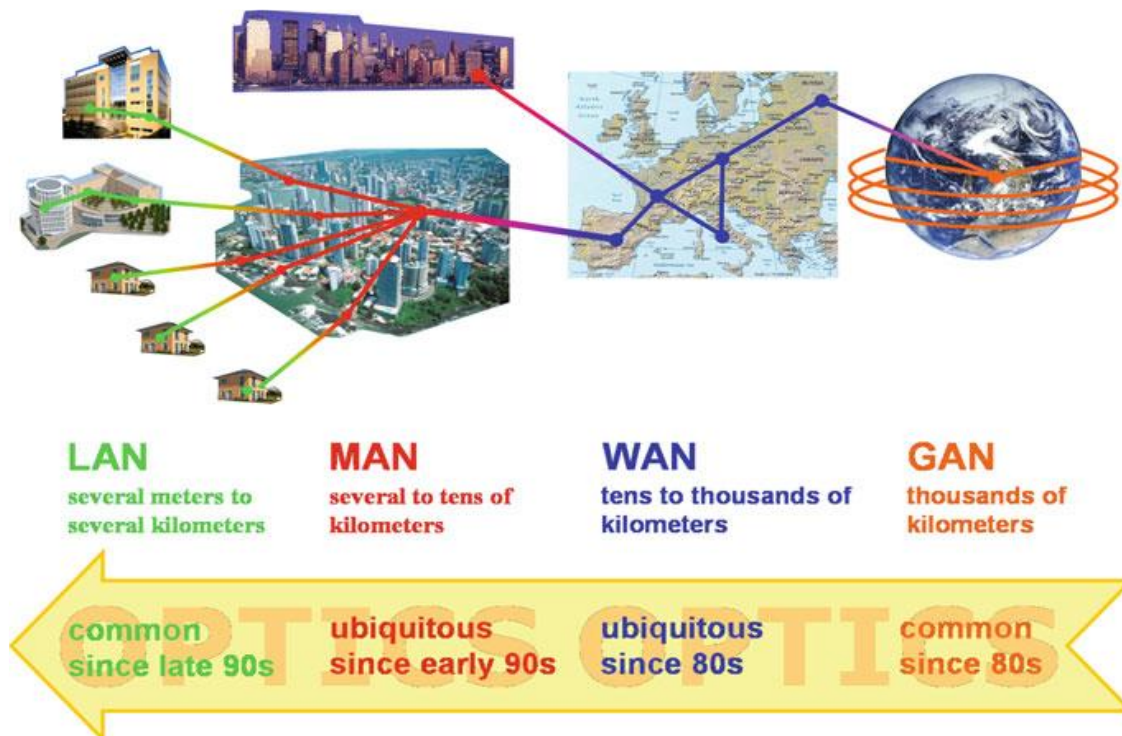
1.2 Η Οπτική στις Τηλεπικοινωνίες (Telecom) και την Επικοινωνία Δεδομένων (Datacom) και ο Ρόλος των VCSELs

Το μήκος μιας γραμμής μεταφοράς δεδομένων έχει ισχυρή επίδραση στην ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος και καθορίζει τις απόλυτες τιμές σημαντικών φυσικών ποσοτήτων, όπως για παράδειγμα την ηλεκτρική αντίσταση, την οπτική απορρόφηση και τις συνολικές απώλειες. Ως εκ τούτου, φαίνεται λογικό να ταξινομήσει κάποιος τις γραμμές μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με το μήκος τους. Οι μεγαλύτερες γραμμές επικοινωνίας εκτείνονται σε αποστάσεις πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων, για παράδειγμα οι διηπειρωτικές ζεύξεις με οπτικές ίνες μεταξύ Βορείου Αμερικής και Ευρώπης, Ασίας και Αυστραλίας, κ.λπ. Οι μικρότερες διασυνδέσεις θα μπορούσε να είναι μόνο μερικά μικρόμετρα ή ακόμη μικρότερες σε μήκος, για παράδειγμα εντός ενός μικροεπεξεργαστή chip σε έναν προσωπικό υπολογιστή.

Αφού οι υπολογιστές, τόσο οι προσωπικοί υπολογιστές όσο και οι υπολογιστές υψηλών επιδόσεων (High Performance Computers), αποτελούν σήμερα τα κύρια εργαλεία για την επεξεργασία πληροφοριών, καθιστά επίσης σκόπιμο να γίνει διάκριση μεταξύ των γραμμών μεταφοράς δεδομένων στο εξωτερικό του υπολογιστή και στο εσωτερικό. Στο Σχ. 1.2 παρουσιάζεται η ιεραρχία των συνδέσεων δεδομένων στο εξωτερικό του υπολογιστή. Στο κάτω βέλος εμφανίζονται ο σημερινός ρόλος των οπτικών τεχνολογιών στο αντίστοιχο ιεραρχικό επίπεδο μαζί με την προσεγγιστική ημερομηνία έναρξης της εφαρμογής τους κατά το παρελθόν.

Ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης μπορεί κανείς να κάνει διάκριση μεταξύ του παγκόσμιου δικτύου (Global Area Network-GAN), του δικτύου ευρείας περιοχής (Wide Area Network-WAN), του μητροπολιτικού δικτύου (Metropolitan Area Network-MAN) και του τοπικού δικτύου (Local Area Network-LAN). Ιστορικά, όταν κάποιος αναφέρεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, όπως στην περίπτωση των GAN, WAN και MAN δικτύων, χρησιμοποιείται ο όρος «Τηλεπικοινωνίες» (Telecom), ενώ για μικρότερες αποστάσεις, όπως σε ένα LAN ή μικρότερο δίκτυο, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται ο όρος «Επικοινωνία Δεδομένων» (Datacom). Οι αποστάσεις μετάδοσης μέσα από δίκτυο GAN μπορούν να φτάσουν πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα, για παράδειγμα σε διεπειρωτικές συνδέσεις, ενώ ένα δίκτυο WAN συνδέει συνήθως διαφορετικές πόλεις της ίδιας ή διαφόρων χωρών με τυπικές αποστάσεις αρκετών δεκάδων χιλιάδων χιλιομέτρων. Η περιοχή ενός MAN περιορίζεται συνήθως στην περιοχή μιας πόλης και ένα τοπικό LAN μεταφέρει συνήθως τα δεδομένα μεταξύ διάφορων υπολογιστών μέσα σε ένα κτήριο ή οικοδομικό συγκρότημα.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το Σχ. 1.2, οι οπτικές τεχνολογίες είναι πανταχού παρούσες σε όλους τους τύπους των δικτύων από το τέλος του περασμένου αιώνα. Ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιούνται κλασικά μονορυθμικά ημιαγωγίμα lasers (edge emitting) σε μήκη κύματος από 1550 περίπου έως 1310 nm, στα οποία εμφανίζονται η ελάχιστη



Σχήμα 1.2 Ιεραρχία των δικτύων για γραμμές μεταφοράς δεδομένων εκτός υπολογιστή με μια μικρή περιγραφή του ρόλου και της προσεγγιστικής ημερομηνίας έναρξης της χρήσης των αντίστοιχων οπτικών τεχνολογιών. [53]

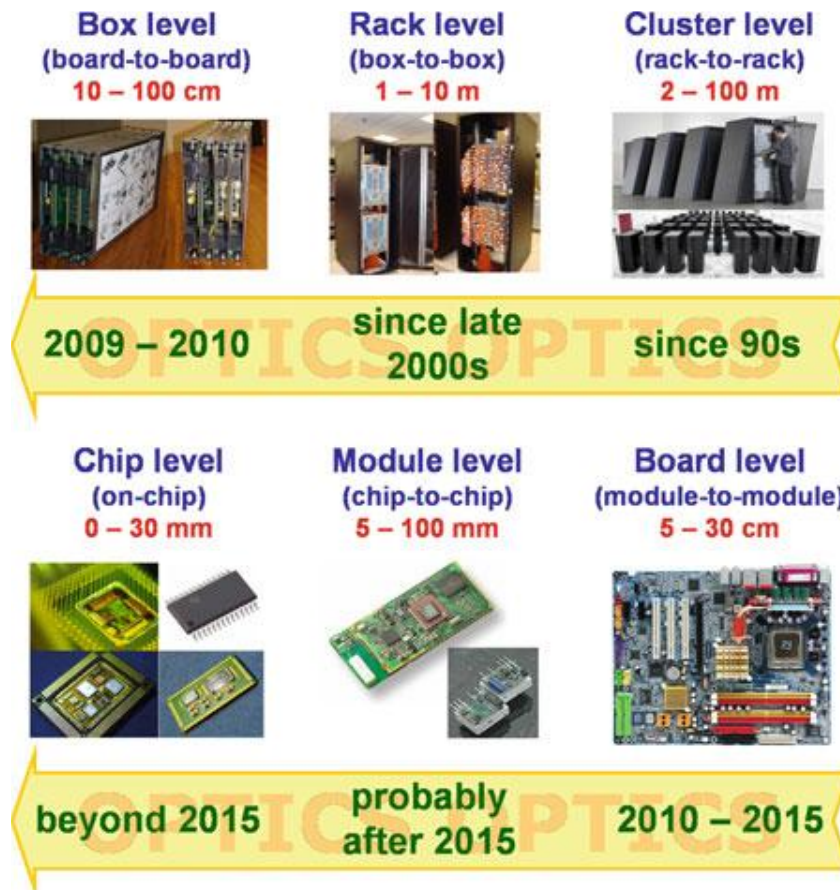
απορρόφηση και διασπορά αντίστοιχα στις οπτικές ίνες, για εφαρμογές τοπικού δικτύου LAN έχουν καθιερωθεί τα πολυρυθμικά oxide-confined VCSELs, που εκπέμπουν περίπου στα 850 nm, ως πολύ αξιόπιστες και οικονομικώς αποδοτικές lasers πηγές φωτός. [2] Η επιτυχία των VCSELs οφείλεται στις μοναδικές φυσικές τους ιδιότητες, οδηγώντας σε αποφασιστικά πλεονεκτήματα για κοντινή επικοινωνία δεδομένων σε σύγκριση με τα edge emitting lasers, τα οποία είναι μεταξύ άλλων:

- Η στενή κυκλική ακτίνα εξόδου με μικρή γωνία απόκλισης, που καθορίζεται από την κυκλική μορφή του mesa του VCSEL και επομένως η στενή κυκλική μορφή του ανοίγματος οξειδίου.
- Οι σταθεροί τρόποι διάδοσης και φάσμα εκπομπής, που καθορίζονται από τη σταθερότητα των φυσικών ιδιοτήτων της κοιλότητας του VCSEL.
- Το χαμηλό κατώφλι ρεύματος και η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, που καθορίζονται από το μικρό όγκο της ενεργού περιοχής.
- Η μεγάλη διαφορική αποδοτικότητα, που καθορίζεται από τις ελέγξιμες εσωτερικές απώλειες και απώλειες καθρεπτών.
- Η σταθερότητα της μέγιστης ισχύος εξόδου σε milliwatts υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, που καθορίζεται από τη μετατόπιση χαμηλότερης θερμοκρασίας του μήκους κύματος αντήχησης κοιλοτήτων σε σύγκριση με τη μεγαλύτερη μετατόπιση του μέγιστου κέρδους του μήκους κύματος, που προκαλείται από τη μεγαλύτερη μετατόπιση της ενέργειας του χάσματος ζωνών του ενεργού υλικού.
- Η επίπεδη επεξεργασία και ο χαρακτηρισμός επάνω στο wafer, που επιτρέπουν την ανέξοδη παραγωγή και δοκιμή των VCSELs και δισδιάστατων διατάξεων με VCSELs
- Η υψηλή αξιοπιστία και η εύκολη συσκευασία (packaging).

Τα oxide-confined VCSELs που εκπέμπουν περίπου 850 nm είναι διαθέσιμα στο εμπόριο εδώ και μία δεκαετία περίπου. Πολλά εκατομμύρια VCSELs κατασκευάζονται κάθε χρόνο με πολύ ώριμες, γερές, οικονομικώς αποδοτικές μεγάλης-κλίμακας διαδικασίες μαζικής παραγωγής από πολλές καθιερωμένες επιχειρήσεις. Σήμερα, τα oxide-confined VCSELs των 850 nm, που λειτουργούν σε ρυθμούς ψηφίου (bit rate) μέχρι και 10 Gbps, είναι εμπορικά διαθέσιμα στην αγορά.

Το να φθάσει το σήμα σε έναν υπολογιστή είναι μόνο ένα σημαντικό μέρος της διαδικασίας μεταφοράς πληροφοριών. Το δεύτερο, εξίσου σημαντικό μέρος είναι να

παρασχεθούν οι τεχνολογίες για την ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ των διαφορετικών συστατικών μέσα σε έναν υπολογιστή. Πάλι, για αυτόν τον στόχο, κάποιος μπορεί να κατηγοριοποιήσει τα διαφορετικά επίπεδα διασυνδέσεων στο εσωτερικό του υπολογιστή ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.3.



Σχήμα 1.3 Τα διαφορετικά επίπεδα διασυνδέσεων στο εσωτερικό του υπολογιστή και η ημερομηνία της εισόδου της οπτικής στον αντίστοιχο τομέα αγοράς κατά προσέγγιση. [53]

Μαζί με τα διαφορετικά επίπεδα διασυνδέσεων στο εσωτερικό του υπολογιστή, παρουσιάζονται επίσης η ημερομηνία, κατά προσέγγιση, του παρελθόντος ή η προβλεφθείσα μελλοντική ημερομηνία για την είσοδο της οπτικής στον αντίστοιχο τομέα της αγοράς [3]. Οι αποστάσεις των διασυνδέσεων στο εσωτερικό του υπολογιστή θα μπορούσαν να ποικίλουν από αρκετές χιλιάδες μέτρα για τις rack-to-rack συνδέσεις σε έναν υπερ-υπολογιστή μέχρι μόλις μερικά χιλιοστά ή ακόμη και μικρόμετρα για τις on-chip διασυνδέσεις. Σήμερα, η οπτική είναι συνήθης σε επίπεδο cluster για τις rack-to-rack διασυνδέσεις και σε επίπεδο rack για τις box-to-box διασυνδέσεις. Αυτήν την στιγμή οι οπτικές τεχνολογίες έρχονται σε επίπεδο box για τις board-to-board διασυνδέσεις με αποστάσεις μετάδοσης δεδομένων αρκετών δεκάδων εκατοστών. Για σκοπό αυτό, τα

ενεργά οπτικά καλώδια (Active Optical Cables-AOC) βασισμένα κυρίως σε VCSELs μικρού μήκους κύματος χρησιμοποιούνται ευρέως. Έχουν αποφασιστικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα χάλκινα καλώδια, καθώς μεταξύ άλλων είναι για μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης, έχουν λιγότερο βάρος, μικρότερο όγκο, μικρότερη ακτίνα κάμψης και χαμηλότερο ποσοστό λάθους ψηφίου (BER), ενώ ιδιαίτερα καθοριστικό είναι το πλεονέκτημά τους στο χαρακτηριστικό μέγεθος «*Εύρος Ζώνης · Απόσταση*». Δεδομένου ότι κανένα μήκος κύματος δεν τυποποιήθηκε για αυτό το είδος εφαρμογών μέχρι τώρα, οι διαφορετικές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν VCSELs που εκπέμπουν σε διαφορετικά μήκη κύματος, συνήθως γύρω στα 850, 980 ή 1100 nm. Η αγορά των ενεργών οπτικών καλωδίων αναπτύσσεται γρήγορα και προβλέπεται να υπερβεί τα 2.4 δις. δολάρια το έτος 2014 με περίπου 48 εκατομμύρια καλώδια εγκατεστημένα. Σε σύγκριση με τις προβλέψεις για το έτος 2010 αυτό θα ήταν μια αύξηση παραπάνω από μία τάξη μεγέθους, ανοίγοντας μοναδικές προοπτικές για τη σημαντική αύξηση της αγοράς των υψηλής ταχύτητας VCSELs με μικρό μήκος κύματος. Ένα αξιοπρόσεχτο μέρος της αύξησης της αγοράς ενεργών οπτικών καλωδίων και έτσι της αγοράς VCSEL θα προκαλούταν από την επέκταση σε εφαρμογές βασισμένες στο USB και τα πρότυπα διεπαφής πολυμέσων υψηλής ευκρίνειας (HDMI). Δεδομένου ότι μια φορητή συσκευή θα μπόρεσε να συνδεθεί απ' ευθείας με έναν υπολογιστή, τέτοιοι τύποι διασυνδέσεων ανήκουν όσον αφορά το μήκος τους κάπου μεταξύ διασυνδέσεων εκτός υπολογιστή και διασυνδέσεων στον εσωτερικό του υπολογιστή, και μπορούν να θεωρηθούν ως μέρος του προσωπικού δικτύου PAN (Personal Area Network). Ένα δίκτυο PAN συνδέει έναν υπολογιστή με φορητές συσκευές όπως USB-sticks, κινητά τηλέφωνα, κ.λπ., όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 1.4, και έχει τυπικές αποστάσεις μετάδοσης δεδομένων μέχρι 10μ. Επίσης, μελλοντικές οπτικές διασυνδέσεις για μεταφορά δεδομένων για αποστάσεις μέχρι μερικά μέτρα μεταξύ ενός υπολογιστή και φορητών συσκευών, όπως για παράδειγμα εκείνους που βασίζονται στην τεχνολογία Μέγιστου Φωτός (Light Peak technology) που ανακοινώθηκε πρόσφατα από την Intel [4], θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως μέρος ενός δικτύου PAN και θα οδηγήσουν σίγουρα στην αξιοσημείωτη αύξηση της αγοράς VCSEL.



Σχήμα 1.4 Personal Area Network (PAN): Προσωπικός υπολογιστής με φορητές συσκευές όπως USB-sticks, κινητά τηλέφωνα, MP3 players κ.λπ. Με τυπικές αποστάσεις μετάδοσης της τάξης μερικών μέτρων. [53]

Η διεύθυνση της οπτικής σε ακόμα μικρότερες σε μήκος διασυνδέσεις θα συνεχιστεί στο εγγύς μέλλον, όπως μπορεί να φανεί από το Σχ. 1.3. Μόλις στα επόμενα μερικά χρόνια αναμένεται ότι οι οπτικές διασυνδέσεις θα επεκταθεί στο επίπεδο board για την module-to-module μεταφορά δεδομένων. Μετά το 2015 περίπου, η οπτική θα έρθει επίσης σε επίπεδο module για την chip-to-chip μετάδοση δεδομένων και σε επίπεδο chip για την αντίστοιχη on-chip μετάδοση. Η ισχυρή μείωση (attenuation) και η παραμόρφωση (distortion) του σήματος υψηλής συχνότητας στις χάλκινες συνδέσεις σε αποστάσεις 1μ. και άνω, που είναι τυπικές για τη μετάδοση δεδομένων σε επίπεδο συστάδων (cluster), rack και box και επίσης για το τοπικό LAN και άλλους τύπους δικτύων, και σε συχνότητες άνω των 10 GHz οδηγούν στην αναπόφευκτη ανταλλαγή των χάλκινων διασυνδέσεων από την οπτική σε αυτούς τους τομείς εφαρμογής. Σε κοντινότερες αποστάσεις οι φυσικοί περιορισμοί του χαλκού που προκαλούνται από την υψηλή πυκνότητα διασυνδέσεων, μεταξύ άλλων της ηλεκτρομαγνητικής παρέμβασης (EMI), του crosstalk και της μεγάλης κατανάλωσης ισχύος, είναι οι κύριες κατευθυντήριες δυνάμεις για τη χρήση της οπτικής [5]. Εντούτοις υπάρχουν επίσης πρόσθετες απαιτήσεις για τα ηλεκτροοπτικά στοιχεία για τις εφαρμογές σε πιο κοντινές αποστάσεις μετάδοσης. Η κύρια απαιτούμενη ιδιότητα επιπρόσθετα στην υψηλή ταχύτητα είναι η υψηλής θερμοκρασίας σταθερότητα, ειδικά για τις lasers πηγές φωτός, δεδομένου ότι τα lasers θα μπορούσαν

να τοποθετηθούν απευθείας κοντά στην πηγή δεδομένων πάνω στο board, εντός του module ή και ακόμα απευθείας on-chip, όπου οι θερμοκρασίες θα μπορούσαν να επιτύχουν τιμές της τάξης των 85°C ή ακόμα και υψηλότερες.

Η επίμονη πίεση στην αγορά μόλυβδου οδηγεί σε σημαντική επένδυση των πόρων στην έρευνα και την ανάπτυξη των οπτικών στοιχείων υψηλής ταχύτητας, ικανών να αντικαταστήσουν τις ζεύξεις που βασίζονται στο χαλκό στις μελλοντικές διασυνδέσεις. Τόσο οι βιομηχανικές επιχειρήσεις όσο και η ακαδημαϊκή κοινότητα εργάζονται αυτήν την περίοδο σε αυτά τα θέματα. Ενώ για τις οπτικές γραμμές μετάδοσης δεδομένων εκτός υπολογιστή (Σχ. 1.2), οι γενικές έννοιες είναι σχετικά καθιερωμένες και η κύρια προσπάθεια είναι να βελτιωθεί η υπάρχουσα απόδοση, από την άλλη για οπτικές διασυνδέσεις στο εσωτερικό του υπολογιστή (Σχ. 1.3), οι έννοιες οι ίδιες είναι επίσης υπό έρευνα στα διάφορα projects, όπως το Terabus από την IBM ή οι Multiwavelength Assemblies for Ubiquitous Interconnects (MAUI) από τη Intel. Ο τελευταίος στόχος για τις οπτικές διασυνδέσεις εκτός υπολογιστή είναι να φέρουν τα δεδομένα με πολύ υψηλή ταχύτητα χρησιμοποιώντας τις οπτικές τεχνολογίες άμεσα στο σπίτι, η αποκαλούμενη fiber-to-the-home (FTTH) έννοια. Ο τελευταίος στόχος για την οπτική στο εσωτερικό του υπολογιστή είναι να μεταφέρονται τα δεδομένα με φως σε όλα τα επίπεδα, ακόμη και στις πολύ κοντινές αποστάσεις on-chip. Όσο οι αποστάσεις γίνονται μικρότερες και η πυκνότητα των διασυνδέσεων και ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς αυξάνεται, οι δαπάνες για την κατασκευή ενός μόνο laser αρχίζουν να διαδραματίζουν έναν συνεχώς αυξανόμενο ρόλο στις συνολικές δαπάνες. Τα VCSELS, ως πολύ ανέξοδα χαμηλής ισχύος αξιόπιστα lasers, επωφελούνται από αυτήν την τάση αποφασιστικά. Σήμερα τα oxide-confined GaAs-based VCSELS κυριαρχούν στην αγορά Datacom.

Η φτηνότερη εναλλακτική λύση για τα GaAs-based VCSELS θα ήταν οι Si-based οπτικές διασυνδέσεις, οι οποίες θα επωφελούνταν έντονα από την καθιερωμένη ανέξοδη τεχνολογία επεξεργασίας πυριτίου. Εντούτοις το κύριο εμπόδιο της φωτονικής που βασίζεται στο πυρίτιο (silicon photonics) είναι η φύση του πυριτίου, το οποίο είναι ένας ημιαγωγός με ένα έμμεσο χάσμα ζωνών, κάτι το οποίο καθιστά το υλικό του πυριτίου πρακτικά αδύνατο. Διάφορες προσεγγίσεις έχουν προταθεί για να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα και μάλιστα σημαντικά αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί στον τομέα τη φωτονικής πυριτίου στο παρελθόν, μεταξύ άλλων και η επιτυχής επίδειξη του παροδικού laser πυριτίου κατανεμημένης ανατροφοδότησης (distributed feedback silicon evanescent laser-DFB-SEL) με την ενεργό περιοχή βασισμένη στα υλικά III-V [6], τα AlGaInAs-silicon evanescent racetrack lasers και οι φωτοανιχνευτές (photodetectors), τα mode-locked silicon evanescent lasers που λειτουργούν σε συχνότητες μέχρι 40 GHz, τα

AlGaInAs-silicon Fabry–Perot (FP) lasers, οι υβριδικοί AlGaInAs-silicon evanescent ενισχυτές, οι Ge-on-SOI φωτοανιχνευτές κυματοδηγού που λειτουργούν σε ρυθμούς ψηφίου μέχρι 40 Gbps και silicon-based διαμορφωτές που λειτουργούν σε ρυθμούς ψηφίου μέχρι 40 Gbps. Αυτές οι προσεγγίσεις εντούτοις χρησιμοποιούν καινοτόμες ιδέες, οι οποίες απαιτούν απόδειξη για να παρουσιάσουν την καταλληλότητά τους για την εμπορική μεγάλης-κλίμακας φτηνή μαζική παραγωγή και την αξιόπιστη λειτουργία στο πέρασμα των χρόνων. Τα oxide-confined GaAs-based VCSELS σε σχέση με αυτές τις νέες Si-based έννοιες έχουν το κύριο πλεονέκτημα της παρουσίας στην αγορά εδώ και μία δεκαετία περίπου και έχουν αποδειχθεί πολύ αξιόπιστες και ανέξοδες πηγές φωτός λέιζερ, καθώς έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά υψηλής ταχύτητας, όπως θα δούμε στα επόμενα τμήματα.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την επισκόπηση της οπτικής σε Telecom και Datacom εφαρμογές, οι οπτικές διασυνδέσεις είναι πανταχού παρούσες για τη μεταφορά δεδομένων εκτός υπολογιστή σε επίπεδο LAN, MAN, WAN και GAN δικτύου. Εισχωρούν ασταμάτητες σε όλο και μικρότερες αποστάσεις και θα φθάσουν σε πέντε έως δέκα έτη σε επίπεδο chip. Ο μείζων ρόλος, ως ανέξοδες, χαμηλής ισχύος και αξιόπιστες πηγές φωτός λέιζερ σε όλα τα επίπεδα οπτικών διασυνδέσεων αρχίζοντας από το τοπικό LAN μέχρι κάτω σε επίπεδα cluster, rack και box, ανήκει στα GaAs-based oxide-confined VCSEL's. Η μελλοντική ανάπτυξη και επέκταση των οπτικών διασυνδέσεων σε επίπεδο board, module και chip θα βασιστούν σίγουρα στα μικρού μήκους κύματος VCSELS, τουλάχιστον μέχρι πιθανές νέες επαναστατικές ιδέες ερευνηθούν και είναι έτοιμες να μπουν στην αγορά. Συνεπώς, η ζήτηση για υψηλής ταχύτητας VCSELS θα συνεχίσει να αυξάνεται, οδηγώντας την έρευνα και την ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα σε νέες εγγραφές και φέρνοντας νέα προϊόντα στην αγορά βασισμένα σε VCSEL.

1.3 Κέντρα Πληροφορίας – Data Centers

Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των υπολογιστικών απαιτήσεων των χρηστών για την μεταφορά, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων τους, λόγω και της ευρείας χρήσης του διαδικτύου, έχει καταστήσει άμεση την ανάγκη της δημιουργίας υπερ-υπολογιστών. Πρόκειται για υπολογιστές με τεράστιες δυνατότητες επεξεργασίας, που αφορούν στην ταχύτητά τους και στη δυνατότητα που παρέχουν για πολύπλοκους υπολογισμούς. Για την κάλυψη λοιπόν των υψηλών υπολογιστικών αναγκών δημιουργούνται συστοιχίες (ομάδες) από υπερ-υπολογιστές και κατανεμημένους servers

ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη, αξιόπιστη και παράλληλη επεξεργασία δεδομένων κρατώντας ταυτόχρονα χαμηλά τα επίπεδα κατανάλωσης ισχύος. Οι συστοιχίες αυτές των υπερ-υπολογιστών και των servers δημιουργούν συστήματα τα οποία συνολικά αναφέρονται ως Κέντρα Πληροφορίας (Data Centers).

Κύριος σκοπός των Data Centers είναι η αποθήκευση, η διαχείριση και η διάδοση των δεδομένων και των πληροφοριών που σχετίζονται και είναι απαραίτητα σε μία επιχείρηση (πχ εταιρίες επικοινωνιών, τράπεζες) ή κάποιον άλλον φορέα (πχ Πανεπιστήμια, Κρατικές Υπηρεσίες κτλ).

Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι ιδιόκτητα και να έχουν αναπτυχθεί από την ίδια την επιχείρηση ή να έχουν αγοραστεί από άλλες εταιρείες πώλησης λογισμικού. Το Εθνικό Κέντρο Κλιματικών Δεδομένων (National Climatic Data Center - NCDC), για παράδειγμα, είναι ένα δημόσιο data center, το οποίο διατηρεί το μεγαλύτερο αρχείο του κόσμου με πληροφορίες για τον καιρό. Ένα ιδιωτικό data center μπορεί να υπάρχει εντός των εγκαταστάσεων ενός οργανισμού ή μπορεί να διατηρείται ως εξειδικευμένη εγκατάσταση.

Ένα Data Center αποτελείται συνήθως από το χώρο υπολογιστών, τον χώρο UPS (εφεδρική τροφοδοσία) και λοιπούς υποστηρικτικούς χώρους [8]. Περιλαμβάνει:

- ❖ Κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης για την πλήρη κάλυψη της εγκατάστασης, που υποστηρίζει την καταγραφή, αναφορά και αυτόματη απεμπλοκή του συστήματος σε περίπτωση φωτιάς.
- ❖ Κλιματισμό σε όλους τους χώρους για τη διατήρηση ιδανικών συνθηκών θερμοκρασίας .
- ❖ Εξοπλισμό πυρανίχνευσης και πυρασφάλειας.
- ❖ Εξοπλισμό υγρανίχνευσης για τη διατήρηση ιδανικών συνθηκών υγρασίας.
- ❖ Σύστημα Διαχείρισης Εγκατάστασης για την επιτήρηση και την εύρυθμη λειτουργία του Κέντρου.
- ❖ Στοιχεία ασφάλειας δικτύου (firewalls, πύλες VPN, συστήματα ανίχνευσης εισβολών).

Πέρα από τις υπηρεσίες που προσφέρει, ένα Data Center έχει μεγάλες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Ιδιαίτερως αν λάβουμε υπόψη ότι στην ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία ενός Data Center σε διαρκή βάση συνυπολογίζονται οι παροχές ισχύος στον υπολογιστικό εξοπλισμό, οι ανάγκες ψύξης αυτού του εξοπλισμού, αλλά και άλλες

απώλειες, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το μέγεθος της ενέργειας που καταναλώνεται καθημερινά.

Πιο συγκεκριμένα, στις ΗΠΑ μέχρι πρόσφατα, το 1,5% του συνόλου της ηλεκτρικής κατανάλωσης (ή 61 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες) χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για την τροφοδοσία των servers και των Data Centers, κατανάλωση που ξεπερνάει το μισό της κατανάλωσης ενέργειας για τον φωτισμό όλων των νοικοκυριών των ΗΠΑ (101 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες) [7].

Εκτιμάται ότι κατά την τελευταία πενταετία το συνολικό ποσό ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα εγχώρια Data Centers των ΗΠΑ, έχει διπλασιαστεί και υπάρχουν ενδείξεις ότι αυτή η τάση θα συνεχιστεί και στο μέλλον [8].

Η αυξημένη ζήτηση ενέργειας θα απαιτούσε την προσθήκη νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας. Από περιβαλλοντική άποψη, αυτό αντιστοιχεί σε σημαντική αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και των ρυπογόνων εκπομπών, εάν το μεγαλύτερο μέρος της επιπλέον απαιτούμενης ενέργειας συνεχίσει να παράγεται στους παραδοσιακούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες, «πράσινων» Data Centers που σκοπό έχουν την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών.

Στις μέρες μας, οι περισσότερες πρωτοβουλίες που αφορούν τα «Πράσινα» Data Centers ασχολούνται με την μείωση της κατανάλωσης του ενεργού εξοπλισμού και την αύξηση της αποδοτικότητάς του. Κυρίως στοχεύουν στην μείωση του λειτουργικού κόστους με την εφαρμογή αξιόπιστων σύγχρονων τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, που θα έχουν σαν αποτέλεσμα την βελτίωση των δεικτών απόδοσης (PUE, CiUE, κλπ) και την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) [9].



Σχήμα 1.5 Data Center [52]

Στην Ελλάδα τα περισσότερα από τα Data Centers, σύμφωνα με στατιστικές, βρίσκονται στην Αθήνα (74%), μετά ακολουθεί η Θεσσαλονίκη (17%) και έπεται η επαρχία (9%). Τα στοιχεία αυτά δίνονται βέβαια με κάθε επιφύλαξη, καθώς κάποιες εταιρείες-οργανισμοί (μικρό ποσοστό) δεν δημοσιοποιούν στοιχεία για τη θέση των Data Centers τους, αναφέροντας απλά ότι βρίσκονται κάπου στην Ελλάδα [10].

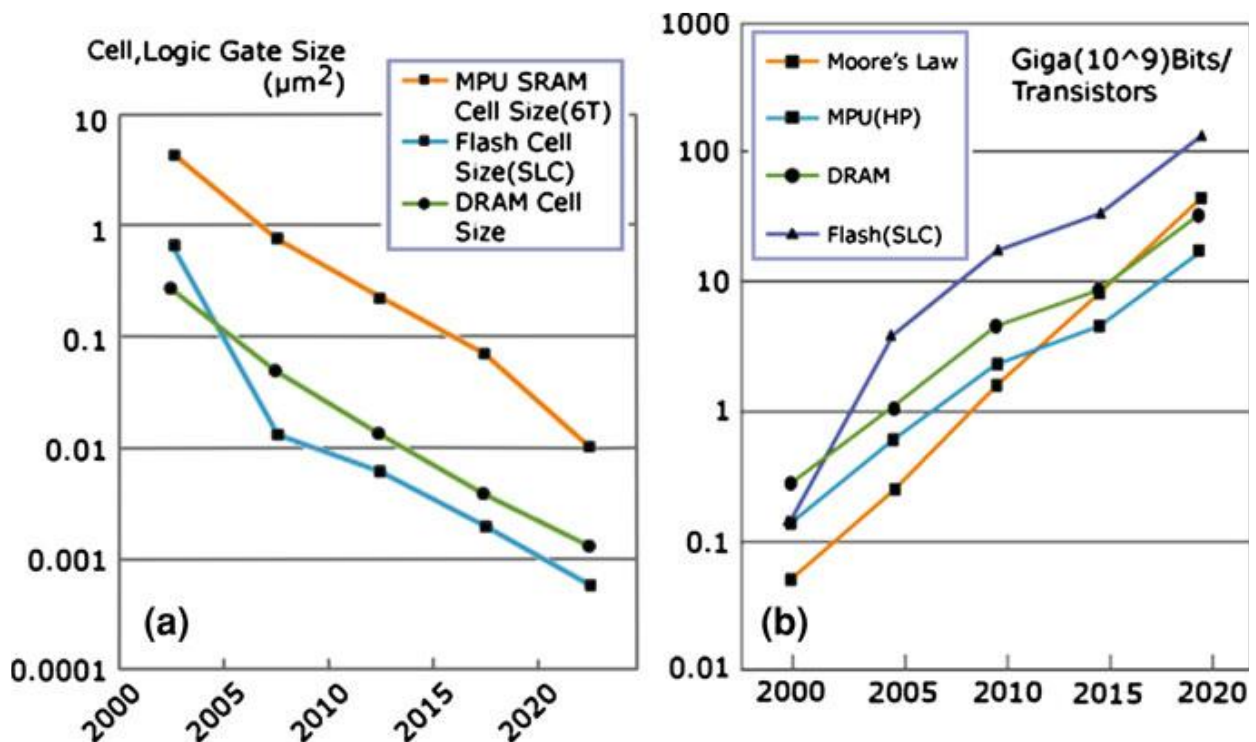
1.4 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ MOORE ΣΤΟ DATACOM

Εφόσον έχουμε ερευνήσει τον ρόλο των οπτικών διασυνδέσεων στη συνολική διαδικασία μετάδοσης δεδομένων και ειδικά τον ρόλο των VCSELs ως τις σημαντικότερες πηγές φωτός λέιζερ για εφαρμογές Datacom τόσο εντός όσο και εκτός υπολογιστή, σήμερα και στο μέλλον, η επόμενη ερώτηση είναι: ποιος είναι ο κύριος στόχος της έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των υψηλής ταχύτητας VCSELs για οπτικές διασυνδέσεις. Για να απαντηθεί αυτή η ερώτηση κάποιος μπορεί να αναλογιστεί τις κατευθυντήριες δυνάμεις της βελτίωσης της απόδοσης των διασυνδέσεων.

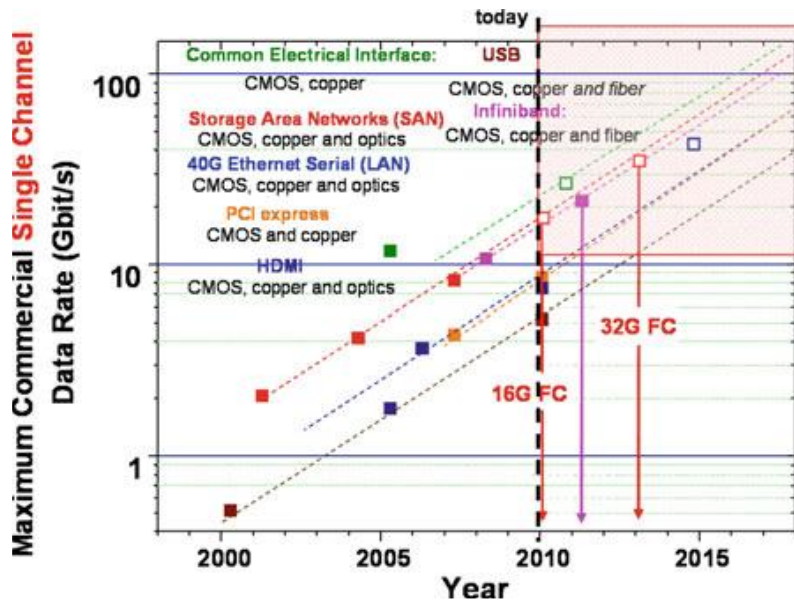
Πάνω από 40 χρόνια πριν, ο μεγάλος οραματιστής και συνιδρυτής της Intel Gordon Moore έχει εισάγει έναν εμπειρικό νόμο, ο οποίος προβλέπει ότι ο αριθμός των τρανζίστορ σε ένα τσιπ διπλασιάζεται περίπου κάθε δύο χρόνια. [11] Στις μέρες μας, αυτός ο νόμος είναι

γνωστός ως «ο Νόμος του Moore», από το όνομα του εφευρέτη του. Αυτή η τάση, που προβλέφθηκε το έτος 1965, κρατά δεκαετίες και αναμένεται να συνεχίσει και στο μέλλον. Η International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) προβλέπει στην έκδοση του 2007 ότι οι μελλοντικές τάσεις του μεγέθους του cell και της λογικής πύλης και του αριθμού των τρανζίστορ ανά τσιπ θα ακολουθήσουν τον Νόμο του Moore επίσης στην επόμενη δεκαετία [12], όπως φαίνεται από το Σχ. 1.6.

Το άμεσο συμπέρασμα του Νόμου του Moore είναι η μόνιμη αύξηση της υπολογιστικής δύναμης των υπολογιστών, βασισμένης σε τσιπ ικανά να χειριστούν όλο μεγαλύτερο και μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών με συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα. Άμεσα στη συγκατάθεση στη κλιμάκωση (scaling) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πυριτίου, η πρόβλεψη για τους τυποποιημένους ρυθμούς σειριακής μετάδοσης ψηφίων για διασυνδέσεις είναι μια συνεχής εκθετική αύξηση με το χρόνο, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.7, όπου παρουσιάζεται ο μέγιστος τυποποιημένος εμπορικός ρυθμός δεδομένων για ένα κανάλι στο παρελθόν καθώς επίσης και οι προβλέψεις για το μέλλον και για διαφορετικά πρότυπα, μεταξύ των οποίων και Common Electrical Interface (CEI), HDMI, USB, Ethernet, κ.λπ.



Σχήμα 1.6 Οι τάσεις της ITRS: (a) Οι τάσεις για το μέγεθος των cell και λογικής πύλης και (b) Οι τάσεις για τη τεχνολογία προϊόντος – συναρτήσεις ανά τσιπ [53]



Σχήμα 1.7 Τάσεις για μετάδοση ψηφίων ηλεκτρικών δεδομένων: Μέγιστος εμπορικός ρυθμός δεδομένων για ένα κανάλι στο παρελθόν και προβλέψεις για το μέλλον μαζί με τα επερχόμενα σειριακά πρότυπα βασισμένα στο χαλκό για ρυθμούς bit πάνω από 10 Gbps. Για τη σκιασμένη περιοχή για ρυθμούς bit πάνω από 10 Gbps. και αποστάσεις μεγαλύτερες από 1m περίπου ή με υψηλή πυκνότητα διασυνδέσεων, καμία σειριακή λύση βασισμένη σε χαλκό δεν

υπάρχει σήμερα. [53]

Όλα τα υπάρχοντα πρότυπα ακολουθούν την ίδια τάση: ο ρυθμός δεδομένων ενός διαύλου αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο επί έναν παράγοντα 4 σε βάθος περίπου πέντε ετών. Σήμερα οι ρυθμοί δεδομένων ενός διαύλου φθάνουν τα 10 Gbps. Ακολουθώντας αυτή τη τάση, οι ηλεκτρικές διεπαφές για σειριακή μετάδοση για ταχύτητες πέραν από τα 10 Gbps προτυποποιούνται για ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων για το παράδειγμα (με αναμενόμενο data rate): Fibre Channel FC32G (34 Gbps), Infiniband (50 Gbps), κοινή ηλεκτρική διεπαφή CEI (25-28 Gbps) και πρωτόκολλα USB 3.0 (αποδεκτά μέχρι 25 Gbps). Για τέτοιους υψηλούς ρυθμούς δυαδικών ψηφίων η μέγιστη ενσύρματη ζεύξη από χαλκό περιορίζεται σε αποστάσεις κάτω από 1m για τις υψηλότερες ταχύτητες, και έτσι δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή καμία μη-σειριακή λύση βασισμένη στο χαλκό για τη σκιασμένη περιοχή στο Σχ. 1.6 για ρυθμούς μετάδοσης δυαδικών ψηφίων μεγαλύτερους από 10 Gbps για τις περισσότερες εφαρμογές. Κατά συνέπεια η μόνη πιθανότητα να εκπληρωθούν τα πρότυπα και να επιτευχθούν οι ρυθμοί δεδομένων πάνω από 10 Gbps σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1m περίπου είναι η χρήση οπτικών διασυνδέσεων. Λόγω του μεγάλου αριθμού των απαραίτητων ζεύξεων, της πίεσης από την αγορά, επιτρέποντας μόνο ανέξοδες λύσεις, και της αναγκαίας χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, η οποία καθορίζεται από τη φύση των εφαρμογών, οι διασυνδέσεις που βασίζονται στο VCSEL είναι σήμερα η μόνη ρεαλιστική λύση.

Κατά συνέπεια, κάποιος μπορεί να συμπεράνει ότι η πρόοδος στα ολοκληρωμένα κυκλώματα πυριτίου, ακολουθώντας το Νόμο του Moore, οδηγεί αμέσως στην πρόοδο των γραμμών μεταφοράς δεδομένων, απαιτώντας όλο και υψηλότερους ρυθμούς δυαδικών ψηφίων, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο με χρήση οπτικών τεχνολογιών. Ο ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων των 10 Gbps για σειριακή μετάδοση είναι το όριο, πέραν του οποίου οι χάλκινες ζεύξεις «προσκρούουν» στους φυσικούς περιορισμούς τους. Μόλις στο άμεσο μέλλον, οι οπτικές διασυνδέσεις, που βασίζονται στο VCSEL και λειτουργούν σε ρυθμούς της τάξης των 20-30 Gbps και ακόμα υψηλότερους, θα έχουν μεγάλη ζήτηση στην αγορά. Εφόσον ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων των υπαρχόντων διαθέσιμων στο εμπόριο VCSELS είναι τα 10 Gbps, ο κύριος στόχος της έρευνας και της ανάπτυξης για το VCSEL είναι να ωθήσει το ρυθμό μετάδοσης σε υψηλότερες τιμές, καλύπτοντας ταυτόχρονα άλλες σημαντικές απαιτήσεις, μεταξύ άλλων και την υψηλής θερμοκρασίας σταθερότητα, τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος, την άριστη αξιοπιστία, κ.λπ., και διατηρώντας την καθιερωμένη, ώριμη, ανέξοδη και μεγάλης κλίμακας μαζική παραγωγή τεχνολογίας VCSEL, αποφεύγοντας την εισαγωγή νέων περίπλοκων βημάτων ανάπτυξης ή επεξεργασίας της συσκευής.

1.5 Πρόσφατη Πρόοδος στα Υψηλής Ταχύτητας VCSELS

Ακολουθώντας το κίνητρο που παρουσιάζεται στα προηγούμενα τμήματα, πολλές βιομηχανικές επιχειρήσεις, πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και ιδρύματα έχουν επικεντρώσει τη δραστηριότητά τους στην ανάπτυξη υψηλής ταχύτητας VCSELS βασισμένα σε GaAs εκπέμποντας σε μήκη κύματος γύρω στα 850, 980 και 1100 nm. Αυτό έχει οδηγήσει σε μια σημαντική πρόοδο στον τομέα των VCSELS με μικρό μήκος κύματος τα τελευταία χρόνια. Σε διαφορετικά μήκη κύματος έχουν μετρηθεί διαφορετικοί μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης δυαδικών ψηφίων, αλλά η γενική τάση είναι εμφανής: και στα τρία μήκη κύματος, οι ρυθμοί μετάδοσης πέρα από τα 30 Gbps έχουν επιτευχθεί μέσα τα τελευταία τρία χρόνια και οι προσδοκίες για νέα κατάρριψη παραμένουν πολύ υψηλές. Επίσης για μεγαλύτερα μήκη κύματος, παραδείγματος χάριν στα 1310 [13] και 1550 nm [14], η τάση πηγαίνει σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Η αξιοπρόσεκτη πρόοδος στον τομέα των υψηλής ταχύτητας VCSELS αντικατοπτρίζει την τεράστια προσπάθεια που έγινε από τους ερευνητές σε όλο τον κόσμο για να αυξηθεί το εύρος ζώνης των λείζερ. Πολλές νέες ιδέες, μεταξύ άλλων και τα φωτονικά κρυσταλλικά VCSELS (PhC-VCSELS), proton implanted holey VCSELS και VCSELS με νέες ενεργές περιοχές [15], έχουν εφαρμοστεί προκειμένου να αυξηθεί το εύρος ζώνης διαμόρφωσης. Ακολουθώντας

θα παρουσιαστεί μια επισκόπηση για τα αποτελέσματα όσον αφορά τα τελευταία τεχνολογία και υψηλής ταχύτητας VCSELS, κάνοντας διάκριση μεταξύ των διαφορετικών μηκών κύματος εκπομπής, καθώς σημαντικές φυσικές ιδιότητες, όπως η απορρόφηση ελεύθερων φορέων (free-carrier absorption), η μη ακτινοβολούμενη επανασύνδεση φορέων (nonradiative recombination), κ.λπ., και αντίστοιχες προκλήσεις είναι διαφορετικές ανάλογα με το μήκος κύματος λέιζερ. Με αυτόν τον τρόπο θα περιορίσουμε τη συζήτησή μας στα μικρότερα μήκη κύματος των 850, 980 και 1100 nm, δεδομένου ότι αυτά είναι τα σημαντικά μήκη κύματος των υψηλής ταχύτητας VCSELS βασισμένων σε GaAs για τις εφαρμογές Datacom.

➤ 1.5.1 Τελευταίας Τεχνολογίας VCSELS των 850 nm

Το πιο ενδιαφέρον μήκος κύματος από άποψη προτυποποίησης είναι το μήκος κύματος των 850 nm, δεδομένου ότι έχει προτυποποιηθεί ήδη για εφαρμογές τοπικού δικτύου LAN και δικτύου περιοχής αποθήκευσης (Storage Area Network-SAN) και σίγουρα θα διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο στα επερχόμενα μελλοντικά πρότυπα. Υπάρχει άριστη υποδομή για τις εφαρμογές που στοχεύουν σε 850 nm, συμπεριλαμβανομένων των βέλτιστων οπτικών ινών στα 850 nm και των σχετικά φθηνών φωτοανιχνευτών GaAs που λειτουργούν γύρω στα 850 nm. Το μήκος κύματος των 850 nm έχει επίσης διάφορα φυσικά πλεονεκτήματα σε σχέση με μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το σημαντικότερο φυσικό πλεονέκτημα είναι ο χαμηλότερος συντελεστής απορρόφησης ελευθέρων φορέων (free carrier absorption coefficient) του AlGaAs σε σύγκριση με μεγαλύτερα μήκη κύματος, δεδομένου ότι ο συντελεστής απορρόφησης αυξάνεται με το μήκος κύματος. Αυτό, σε συνδυασμό με λεπτότερα στρώματα, που προκαλούνται από μικρότερα μήκη κύματος σε σύγκριση με τα 980 ή 1100 nm, οδηγεί στη συνολική χαμηλότερη απορρόφηση, επιτρέποντας υψηλότερα επίπεδα doping και έτσι χαμηλότερες ηλεκτρικές αντιστάσεις και μειώνοντας τις πυκνότητες φορέων κατωφλίου, η οποία είναι αποφασιστική για υψηλής ταχύτητας λειτουργία.

Διάφορα υλικά για την ενεργό περιοχή που εκπέμπει περίπου στα 850 nm μπορούν να χρησιμοποιηθούν και έχουν αναφερθεί, ανάμεσα στα οποία το ίδιο το GaAs [16], το InGaAs, το InAlGaAs και το InGaAsP. Στα περισσότερα από τα διαθέσιμα στο εμπόριο VCSELS 850nm GaAs χρησιμοποιούνται πηγάδια δυναμικού (quantum wells-QWs), τα οποία έχουν επιβεβαιώσει την ωριμότητα και την αξιοπιστία τους την τελευταία δεκαετία. Με να προσθέσουμε ίνδιο (In) στα ενεργά στρώματα, μπορεί να εισαχθεί καταπόνηση (compressive strain), αυξάνοντας το διαφορικό κέρδος (differential gain) και

έτσι την ταχύτητα του λέιζερ. Αυτή η ιδέα χρησιμοποιείται στα υπάρχοντα υψηλής ταχύτητας και τελευταίας τεχνολογίας VCSELs των 850 nm, επιτρέποντας να επιτευχθεί λειτουργία χωρίς σφάλμα σε ρυθμούς μετάδοσης δυαδικών ψηφίων τόσο υψηλούς όσο τα 38 Gbps με πολύ καλές προοπτικές για να επιτευχθούν ρυθμοί των 40 Gbps και παραπάνω.

Ήδη το 2001, oxide-confined VCSELs τα οποία λειτουργούν στα 20 Gbps και εκπέμπουν περίπου στα 850 nm έχουν παρουσιαστεί από την IBM [17]. Διήρκησε σχεδόν επτά έτη για να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων των 850 nm VCSELs στα 30 Gbps. Τελικά το 2008 η ομάδα της Finisar παρουσίασε VCSELs των 850 nm με πηγάδια δυναμικού (QWs) GaAs ως ενεργό περιοχή οποία λειτουργούν στα 30 Gbps με μέγιστο εύρος ζώνης (bandwidth) 19 GHz. Ξεκινώντας από το 2008, έχει σημειωθεί ραγδαία ανάπτυξη των υψηλής ταχύτητας VCSELs των 850 nm. Μέσα σε μόλις δύο έτη ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων αυξήθηκε σε 38 Gbps.

Το πρώτο βήμα έγινε από την ερευνητική ομάδα του καθ. Dr. Larsson από το Chalmers University of Technology στη Σουηδία, ο οποίος εφάρμοσε καταπονημένα πηγάδια δυναμικού InGaAs (compressively strained InGaAs QWs) ως ενεργό μέσο και αύξησε διαδοχικά τον ρυθμό μετάδοσης δυαδικών ψηφίων από 25 Gbps σε 28 Gbps και περαιτέρω σε 64 Gbps [18]. Μια από τις σημαντικότερες βελτιώσεις πρόσθετα στα καταπονημένα πηγάδια δυναμικού InGaAs ήταν η εισαγωγή του διπλού ανοίγματος του οξειδίου, που μειώνει την παρασιτική χωρητικότητα και αυξάνει τα μέγιστα εύρη ζώνης διαμόρφωσης, τα οποία έφθασαν τα 20 GHz. Στην ανεβασμένη θερμοκρασία των 85°C αυτά τα VCSELs λειτούργησαν χωρίς σφάλμα σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 25 Gbps.

Παρ' όλο που ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των 32 Gbps έχει επιτευχθεί, ο τρόπος να επιτευχθούν τα 40 Gbps ακόμα φαινόταν να είναι μακρινός, έως ότου οι συγγραφείς να ωθήσουν τον μέγιστο πραγματοποιημένο ρυθμό μετάδοσης των 850 nm VCSELs σε 38 Gbps [19], φέρνοντας την επίτευξη του ρυθμού μετάδοσης των 40 Gbps πιο κοντά. Επιπλέον στα καταπονημένα (compressively strained) πηγάδια δυναμικού InGaAs στην ενεργό περιοχή και στο διπλό άνοιγμα οξειδίου, η βελτιστοποιημένη περιοχή κοιλότητας, μαζί με το προηγμένο σχέδιο συσκευών με δύο "mesas" και τα παχιά διηλεκτρικά στρώματα, εφαρμόστηκε για να αυξήσει τη συχνότητα αντήχησης χαλάρωσης (relaxation resonance frequency) και να μειώσει τα ηλεκτρικά parasitics, τα οποία και τα δύο αυξάνουν το εύρος ζώνης. Αυτά τα λέιζερ είναι αυτή τη στιγμή τα γρηγορότερα VCSELs

παγκοσμίως που λειτουργούν στα 850 nm και οι γρηγορότερες συσκευές από οποιοδήποτε άλλο oxide-confined VCSEL.

➤ 1.5.2 Τελευταίας Τεχνολογίας VCSELS των 980 nm

Το μήκος κύματος των 980 nm έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με των 850 nm, παρά το μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης ελευθέρων φορέων (free carrier absorption coefficient). Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι:

- Βαθύτερα εμπόδια (deeper barriers), που καταστέλλουν τη διαφυγή των φορέων μη-ισορροπίας (non-equilibrium carriers) και βελτιώνουν έτσι τη σταθερότητα θερμοκρασίας του κέρδους
- Η ευκολότερη δυνατότητα να εφαρμοστούν τα καταπονημένα υλικά για να βελτιώσουν το διαφορικό κέρδος
- Η διαφάνεια (transparency) του GaAs σε αυτό το μήκος κύματος, που επιτρέπει την ελαφριά εξαγωγή μέσω του κατώτατου καθρέφτη και του υποστρώματος
- Οι χαμηλότερες λειτουργούσες τάσεις, που προκαλούνται από τη χαμηλότερη ενέργεια φωτονίων, η οποία είναι πολύ σημαντική για τους οδηγούς συμπληρωματικού μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (CMOS drivers) χαμηλής τάσης. Το μήκος κύματος των 980 nm χρησιμοποιείται συνήθως σήμερα για την άντληση ενισχυτών ίνας ντοπαρισμένης με έρβιο (Erbium-doped Fiber Amplifiers-EDFA). Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα που περιγράφονται ανωτέρω, το μήκος κύματος των 980 nm γίνεται επίσης σημαντικό για τις Datacom εφαρμογές που βασίζονται στο VCSEL, που οδηγεί στην έρευνα και την ανάπτυξη υψηλής ταχύτητας και επίσης υψηλής σταθερής θερμοκρασίας VCSELS και διατάξεις VCSELS 980 nm.

Στα πλαίσια του προγράμματος Terabus, αναπτύχθηκαν ήδη από τα έτη 2005 και 2006 από την IBM VCSELS και διατάξεις VCSELS που λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 20 Gbps για μελλοντικές chip-to-chip οπτικές διασυνδέσεις. Ένα χρόνο αργότερα, το 2007, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για λειτουργία χωρίς σφάλματα των 980 nm VCSELS αυξήθηκε δραστικά από την ομάδα καθ. Dr. Coldren από το University of California στην Santa Barbara σε 35 Gbps [20]. Χρησιμοποίησαν άνοιγμα οξειδίου που στενεύει σταδιακά με βαθιά στρώματα οξείδωσης και βελτιστοποίησαν τα προφίλ ντοπαρίσματος (doping profiles), που οδηγούν σε πραγματοποιημένο μέγιστο εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 20 GHz. Αυτά είναι αυτήν την περίοδο τα γρηγορότερα 980 nm VCSELS παγκόσμια.

Παρ' όλο που έχει επιτευχθεί τέτοιος υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε θερμοκρασία δωματίου, σε ανεβασμένες θερμοκρασίες ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης περιορίστηκε αρχικά σε 20 Gbps στους 85°C, όπως αποδείχθηκε από την ομάδα του Technical University of Berlin το 2006 [21]. Τα VCSELs έχουν αξιοποιήσει ενεργά στρώματα που έχουν αναπτυχθεί σε καθεστώς «υπομονοστρωματικής» (submonolayer-SML) αύξησης. Από τις περαιτέρω βελτιώσεις της σχεδίασης συσκευών από την ομάδα του Technical University of Berlin η θερμοκρασία λειτουργίας θα μπορούσε να αυξηθεί στους 120°C για τη λειτουργία υψηλής ταχύτητας VCSEL σε ρυθμό μετάδοσης 20 Gbps [22], η οποία είναι προς το παρόν η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία σημειώθηκε λειτουργία «ανοικτού ματιού» (open eye operation) οποιουδήποτε VCSEL και σε οποιοδήποτε μήκος κύματος στα 20 Gbps. Αυτά ήταν, με βάση τις γνώσεις μας, τα παγκοσμίως πρώτα VCSELs που παρουσιάζουν open eye στα 20 Gbps σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Το έτος 2007 ερευνητές της Agilent Technologies παρουσίασαν VCSELs των 980 nm που λειτουργούν σε 25 Gbps στους 70°C.

➤ 1.5.3 Τελευταίας Τεχνολογίας VCSELs των 1100 nm

Το μήκος κύματος των 1100 nm παρέχει ακόμα περισσότερα πλεονεκτήματα από θερμικής άποψης λόγω των ακόμα μεγαλύτερων πιθανών ασυνεχειών του χάσματος ζωνών έναντι του μήκους κύματος 980 nm. Οι τάσεις λειτουργίας είναι χαμηλότερες επίσης. Εντούτοις, το αρνητικό trade-off είναι οι υψηλότερες απώλειες στα 1100 nm έναντι των μικρότερων μηκών κύματος. Παρ' όλα αυτά, τα 1100 nm είναι το μήκος κύματος στο οποίο έχουν παρουσιαστεί τα πρώτα VCSELs που λειτουργούσαν σε ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 40 Gbps [23]. Αυτά ήταν τα oxide-confined VCSELs των 1100 nm που βασίζονται στο InGaAs που αναπτύχθηκαν από ερευνητές της NEC.

Ήδη από το έτος 2006 αυτή η ομάδα είχε καταδείξει oxide-confined VCSELs που εκπέμπουν σε 1100 nm και λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι τα 25 Gbps. Αργότερα, παρουσιάστηκε επίσης από την ίδια ομάδα η λειτουργία στα 25 Gbps των 1100 nm VCSELs στην ανεβασμένη θερμοκρασία των 100°C. Το έτος 2007 η ομάδα της NEC παρουσίασε VCSELs των 1100 nm βασισμένα στην ιδέα της Θαμμένης Δίοδου Σήραγγας (Buried Tunnel Junction, BTJ), τα οποία λειτουργούσαν σε ρυθμό μετάδοσης των 30 Gbps [24]. Τελικά την ίδια χρονιά ο ρυθμός μετάδοσης των 40 Gbps που χρησιμοποιούσε VCSELs βασισμένα στην ιδέα της Θαμμένης Δίοδου Σήραγγας επιτεύχθηκε από την ομάδα της NEC. Αυτός ο τύπος είναι προς το παρόν τα γρηγορότερα VCSELs. Εντούτοις προκειμένου να δημιουργηθεί η Θαμμένη Δίοδος

Σήραγγας (BTJ) απαιτείται ένα πρόσθετο βήμα ανάπτυξης, καθιστώντας την κατασκευή τέτοιων συσκευών πιο περίπλοκη και ακριβή.

Τα VCSELS που βασίζονται στο InGaAs από την NEC έχουν να επιδείξουν άριστη αξιοπιστία, γεγονός που επιβεβαιώνει την ωριμότητα των πηγαδιών δυναμικού από InGaAs για τις εφαρμογές με VCSEL στον πραγματικό κόσμο. Αν και τα VCSELS που λειτουργούν στα 40 Gbps έχουν καταδειχθεί, αυτές ήταν συσκευές βασισμένες στη Δίοδο Σήραγγας χωρίς ανοίγματα οξειδίου. Το γρηγορότερο oxide-confined VCSEL, που είναι απλό στην επεξεργασία και έτσι φθινό στη μεγάλης κλίμακας κατασκευή, είναι αυτήν την περίοδο αυτό των 850 nm με πηγάδι δυναμικού που αναπτύχθηκε από την ομάδα του TU Berlin και λειτουργεί στα 38 Gbps.

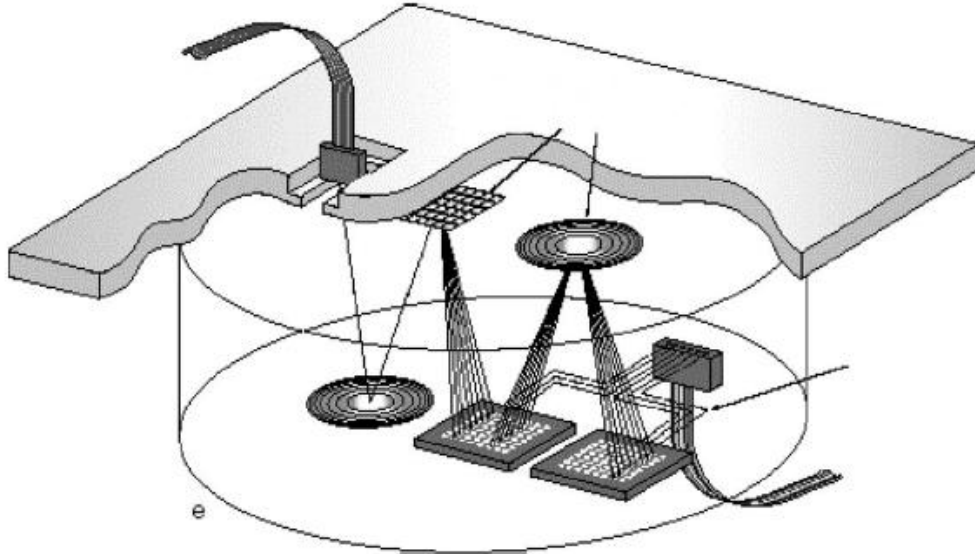
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : VCSEL

2.1 Εισαγωγή

➤ 2.1.1 Οπτικές Διασυνδέσεις (Optical Interconnects)

Τα τελευταία χρόνια οι οπτικές ίνες έχουν κυριαρχήσει στον τομέα της επικοινωνίας μακρινών αποστάσεων (long-haul communication). Έτσι, στην ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης αλλά και στην ανάγκη για χαμηλού κόστους επικοινωνία απαντούν οι πολλαπλές δυνατότητες που μας παρέχουν οι οπτικές διασυνδέσεις. Τα πλεονεκτήματά τους είναι πολλά και τα περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης σημαντικά.

Μία χαρακτηριστική τεχνική οπτικής διασύνδεσης είναι η διασύνδεση ελευθέρου χώρου. Στις συνδέσεις αυτές υπάρχει ένας κενός χώρος μεταξύ δύο υποστρωμάτων (δύο ηλεκτρονικών πλακετών ή μιας ηλεκτρονικής και μιας οπτικής πλακέτας). Το οπτικό σήμα το οποίο εξέρχεται από την πηγή διαδίδεται σε μία καθορισμένη περιοχή στο άλλο υπόστρωμα, όπως δείχνει και το σχήμα:



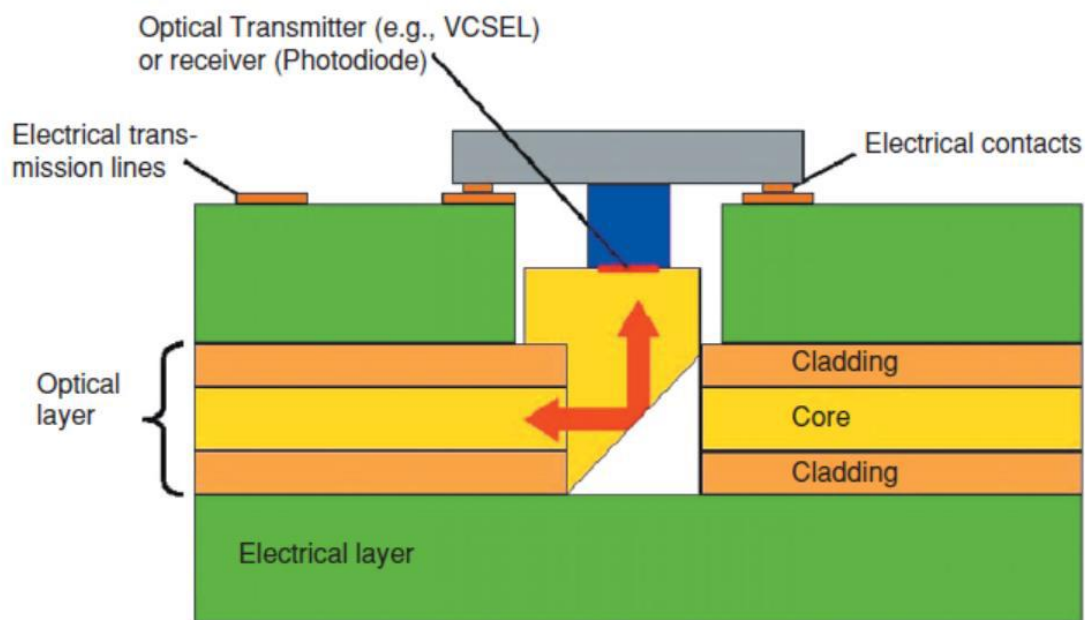
Σχήμα 2.1 Οπτική διασύνδεση ελευθέρου χώρου [25]

Η αρχιτεκτονική είναι απλή αλλά η πραγματοποίηση της αρκετά δύσκολη. Όλα τα οπτικά στοιχεία καθώς και τα δύο υποστρώματα πρέπει να είναι τοποθετημένα με μεγάλη

ακρίβεια στις καθορισμένες περιοχές, ενώ σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται ανακλαστικά οπτικά στοιχεία η ακρίβεια πρέπει να διπλασιαστεί. Άλλο ένα μειονέκτημα των διασυνδέσεων ελευθέρου χώρου είναι η δυσκολία στη συντήρηση του συστήματος, καθώς επίσης και ότι το σύστημα είναι ευάλωτο σε εξωτερικούς παράγοντες όπως σκόνη ή κραδασμοί.

Οι οπτικές διασυνδέσεις ελευθέρου χώρου είναι ακόμα σε αρκετά πρώιμο στάδιο, δεν έχουν αναπτύξει την απαραίτητη αξιοπιστία, ενώ παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες στην κατασκευή τους. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί πολλές λύσεις, οι περισσότερες εκ των οποίων επικεντρώνονται στην μείωση του όγκου και της ευπάθειας τους.

Προκειμένου να δοθεί λύση στα παραπάνω προβλήματα οι επιστήμονες κάνοντας χρήση της τεχνολογίας ημιαγωγικών υλικών επιχείρησαν να κατασκευάσουν οπτικά στοιχεία. Αρχικά, κατασκευάστηκαν επίπεδα οπτικά κυκλώματα (PLC- Planar Lightwave Circuit) σε σταθερό ή εύκαμπτο υπόστρωμα. Σε ένα δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκε η ολοκλήρωση των PLC με ηλεκτρικά κυκλώματα. Το οπτικό και το ηλεκτρικό κομμάτι των δομών αυτών αναπτύσσεται ξεχωριστά και μετά συνενώνονται δημιουργώντας την υβριδική οπτο-ηλεκτρονική πλατφόρμα. Ένα παράδειγμα υβριδικής τεχνολογίας φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα όπου ένα PLC έχει τοποθετηθεί πάνω σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB- Printed Circuit Board).



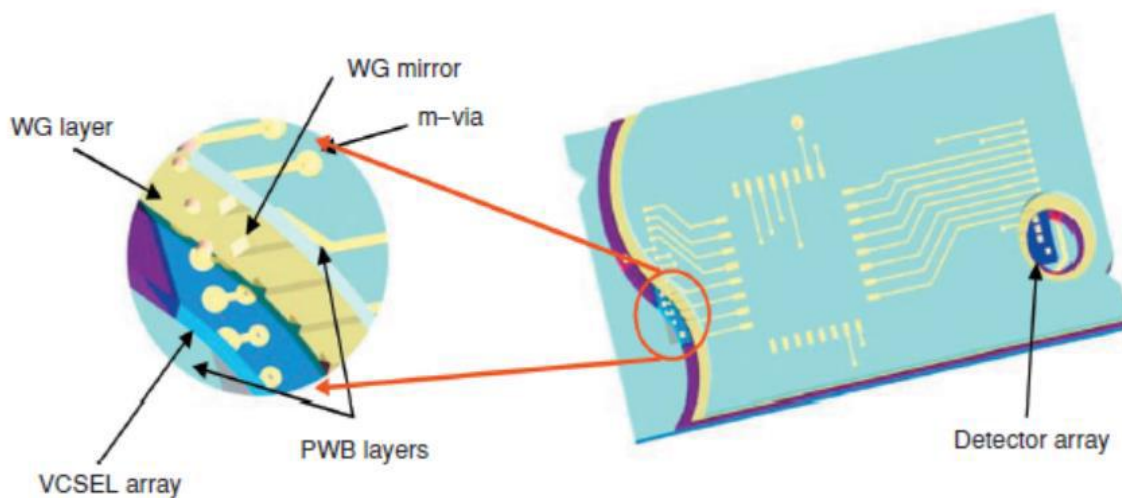
Σχήμα 2.2 Υβριδικό PCB [25]

Για να πραγματοποιηθεί η σύζευξη ηλεκτρονικού-οπτικού (transmitter) και οπτικού-ηλεκτρονικού (receiver) χρησιμοποιούνται δομές όπως το VCSEL και η φωτοδίοδος.

Πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις

Οι οπτικοί κυματοδηγοί πάνω ή μέσα σε PCB αποτελούν ένα πολύ ισχυρό σύστημα, αλλά καταλαμβάνουν αρκετό χώρο. Η σταθεροποίηση του PCB, η κατάλληλη συσκευασία των στοιχείων και οι δυσκολίες ευθυγράμμισης είναι μερικά ακόμη ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν.

Μία λύση αποτελούν οι πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις ένα παράδειγμα των οποίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3 Πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις [25]

Τα στοιχεία μίας τέτοιας διάταξης περιλαμβάνουν: ένα laser κάθετης κοιλότητας VCSEL, couplers κυματοδηγών και πολυμερικοί κυματοδηγοί που λειτουργούν ως φυσικό στρώμα στο οποίο πραγματοποιείται η οπτική διασύνδεση. Το οδηγούμενο ηλεκτρικό σήμα που διαμορφώνει το VCSEL και το αποδιαμορφωμένο σήμα που λαμβάνεται στον φωτοδέκτη διαδίδονται στο ηλεκτρικό μέσο που συνδέεται με την επιφάνεια του PCB. [25]

2.2 VCSEL

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία των οπτικών διασυνδέσεων, το VCSEL, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των λείζερ επιφανειακής εκπομπής φωτός (surface emitting), χάρη στα οποία είναι εφικτή η παράλληλη μετάδοση πληροφορίας σε υπολογιστικά συστήματα.

Ιστορική αναδρομή

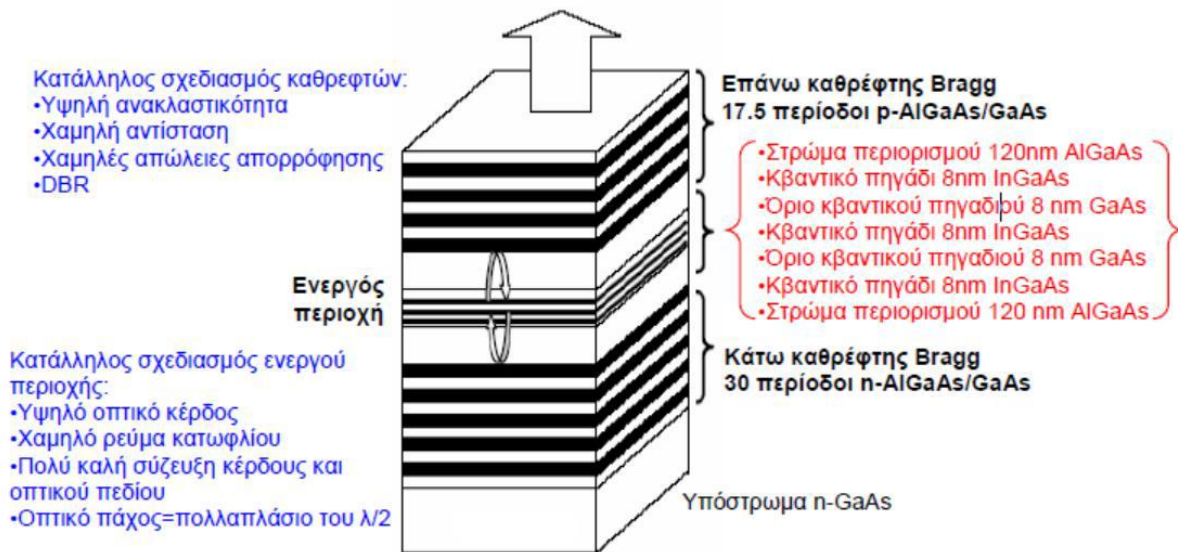
Το πρώτο VCSEL παρουσιάστηκε το 1979 από τους Soda, Iga, Kitahare και Yasuharu Suematsu, αλλά οι πρώτες διατάξεις για λειτουργία συνεχούς κύματος σε θερμοκρασία δωματίου αναφέρθηκαν μόλις το 1988. Το πρώτο ημιαγωγικό VCSEL εφευρέθηκε από τους Axel Scherer και Jack Jewell, δύο επιστήμονες της AT&T Bell Laboratories. Ο όρος VCSEL επινοήθηκε σε μία δημοσίευση της Optical Society of America το 1987. Σήμερα τα VCSELS έχουν αντικαταστήσει τα laser εκπομπής ακμής (edge-emitting laser) σε διάφορες εφαρμογές για επικοινωνία σε μικρή εμβέλεια όπως οι Gigabit Ethernet και Fibre Channel.

➤ 2.2.1 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 (σε συντονισμό σημαίνει ότι τα μέγιστα και τα ελάχιστα της δημιουργούμενης ακτινοβολίας, εμφανίζονται συγχρόνως). Τα φωτόνια επίσης δημιουργούνται σε ένα πολύ μικρότερο ενεργό όγκο από το κλασικό λείζερ 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. [25]

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 κατωφλίου, 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. [26]



Σχήμα 2.4 Τυπική δομή VCSEL [27]

Για μεγάλων αποστάσεων διασυνδέσεις είναι καταλληλότερα τα laser μεγάλου μήκους κύματος (1.3 μm – 1.5 μm) λόγω της χαμηλής απορρόφησης του γυαλιού της οπτικής ίνας. Η απορρόφηση του κυματοδηγού δεν είναι τόσο σημαντική σε μικρού μήκους διασυνδέσεις, γι' 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 μm , διότι η τεχνολογία κατασκευής του είναι αρκετά πιο ώριμη και οικονομική. [25]

➤ 2.2.2 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 ακμή 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 [31].

Η χρήση των DBRs μειώνει τον κίνδυνο της καταστροφικής οπτικής βλάβης (COD) στους καθρέφτες, η οποία μπορεί να συμβεί στα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ (η ενεργή περιοχή κοντά στα άκρα απορροφά φως λόγω της κένωσης από επιφανειακή επανασύνδεση). 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 [25], [26].

Επιπλέον επειδή τα VCSELS εκπέμπουν τη δέσμη κάθετα στην ενεργή περιοχή του laser, σε αντίθεση με την παράλληλη εκπομπή των laser εκπομπής ακμής, δεκάδες χιλιάδες VCSEL μπορούν να επεξεργασθούν συγχρόνως σε έναν 3 ιντσών wafer γαλλίου-αρσενίου ενώ παράλληλα η απόδοσή τους είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμη.

Τέλος, ενώ τα πρώτα VCSELS εξέπεμπαν σε πολλαπλούς διαμήκεις ή νηματοειδείς τρόπους, τα τελευταία χρόνια είναι πλέον συνήθη τα VCSEL ενός τρόπου (single mode) [25].

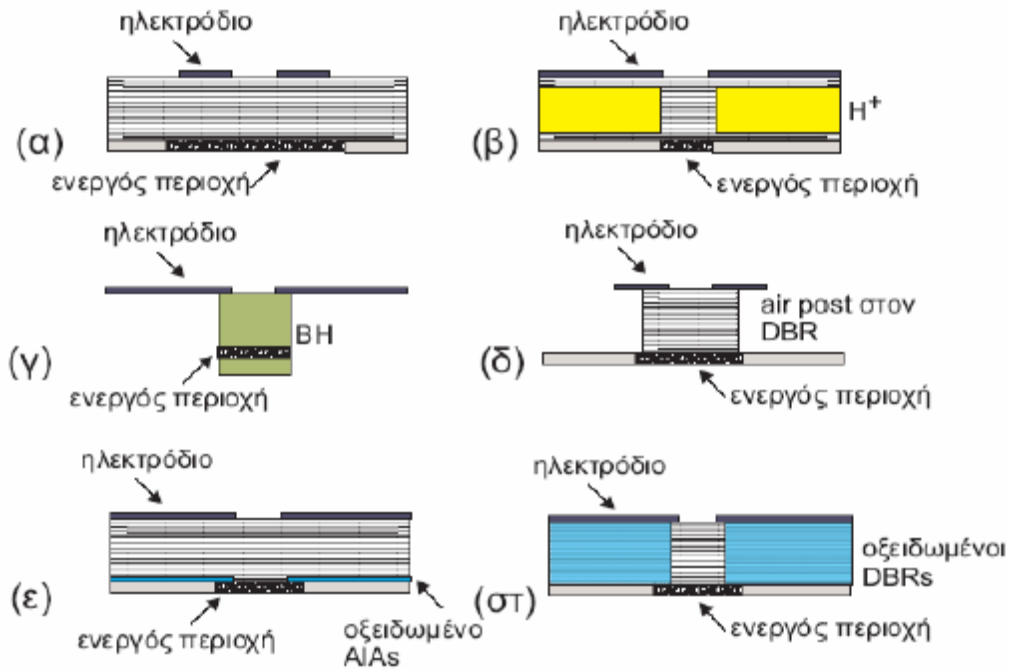
Παρ' όλα αυτά, τα VCSELS παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ. Οι κατασκευαστικές ανοχές στην ανάπτυξη των VCSELS είναι πολύ πιο αυστηρές σε σχέση με αυτές των laser εκπομπής ακμής, με περιορισμό για παράδειγμα στο πάχος να είναι της τάξης του 1%. Ίσως το μεγαλύτερο 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.

➤ 2.2.3 Τύποι VCSEL

Ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται για τον περιορισμό του ρεύματος μέσα στην ενεργό περιοχή και για τον περιορισμό του φωτός, τα VCSEL χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες.

Περιορισμός του ρεύματος

Οι κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του ρεύματος κατά την κατασκευή των VCSEL παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.5 Δομές για περιορισμό ρεύματος [27]

α) Με ηλεκτρόδιο τύπου δακτυλίου: Η δομή αυτή μπορεί να περιορίσει τη ροή ρεύματος σε γειτονικές περιοχές του δακτυλίου. Το φως που εκπέμπεται μπορεί να βγει έξω από το παράθυρο που βρίσκεται στο κέντρο του δακτυλίου. Κατασκευαστικά η δομή αυτή είναι αρκετά εύκολη, παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα της όχι απόλυτης παγίδευσης του ρεύματος σε μικρή περιοχή λόγω φαινομένων διάχυσης.

β) Με βομβαρδισμό πρωτονίων: δημιουργείται ένα μονωτικό στρώμα από πρωτόνια (H^+) το οποίο περιορίζει τη διάχυση του ρεύματος προς τις γύρω περιοχές.

γ) Τύπου καλυμμένης ετεροδομής (Buried Heterostructure, BH): Για να περιοριστεί το ρεύμα καλύπτεται η ενεργός περιοχή με έναν ημιαγωγό με μεγάλο ενεργειακό χάσμα. Ο δείκτης διάθλασης στην γύρω περιοχή μπορεί να πάρει πολύ μικρές τιμές με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας index-guiding δομής. Οι σχηματισμοί τύπου BH είναι ιδανικοί ως προς τον περιορισμό τόσο του ρεύματος όσο και του φωτός αλλά δυστυχώς η κατασκευή τους είναι αρκετά περίπλοκη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολύ μικρών 3-διάστατων στοιχείων.

δ) Τύπου air-post: Μέσω ενός κυκλικού ή ορθογώνιου διακένου (air-post) επιτυγχάνεται ο περιορισμός του ρεύματος. Αποτελεί την απλούστερη μέθοδο κατασκευής αλλά η

απόδοση των λέιζερ μπορεί να επηρεαστεί από την μη-ακτινοβολούσα επανασύνδεση στο εξωτερικό τοίχωμα.

ε) Επιλεκτική οξείδωση AIAs: Με οξείδωση ειδικού AIAs στρώματος περιορισμού που βρίσκεται στην ενεργό περιοχή δημιουργείται ένα μονωτικό στρώμα.

στ) Οξείδωση των DBR: Η ίδια μέθοδος με πριν εφαρμόζεται και για την οξείδωση των DBR. Με αυτή την τεχνική μπορεί επίσης να μειωθούν και τα φαινόμενα της μη-ακτινοβολούσας επανασύνδεσης [27].

Περιορισμός του φωτός

Οι κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του φωτός στα VCSEL παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-6. Η βασική ιδέα είναι να αυξηθεί η επικάλυψη του οπτικού πεδίου με την ενεργό περιοχή.

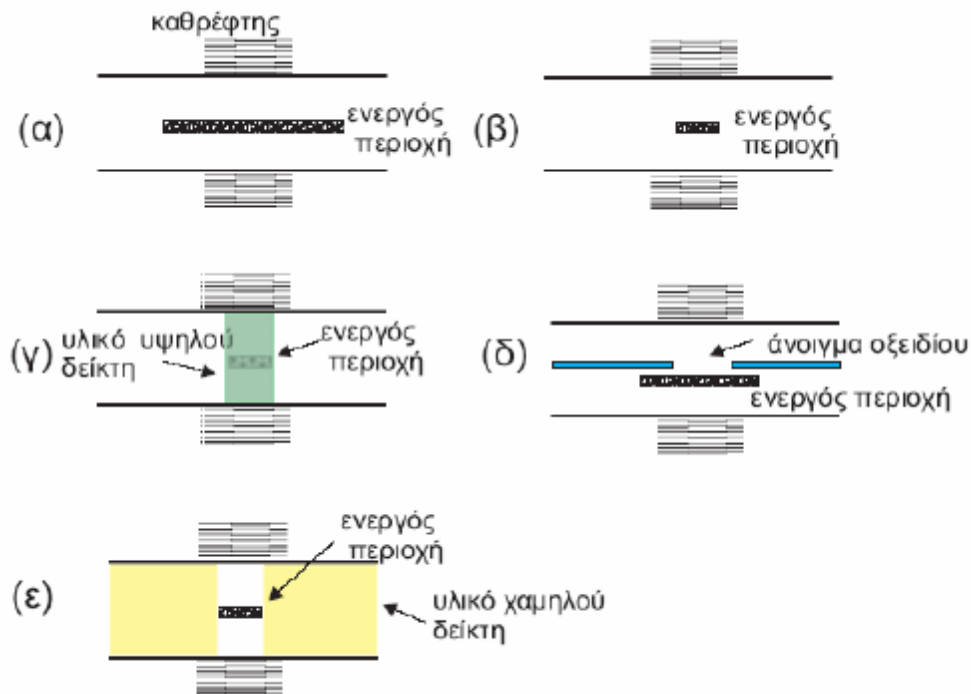
α) Τύπου Fabry-Perot: Το συντονισμένο οπτικό πεδίο περιορίζεται από τους δύο ανακλαστήρες που σχηματίζουν το Fabry-Perot συντονιστή. Αν η διάμετρος του καθρέφτη γίνει πολύ μικρή οι απώλειες διάθλασης αυξάνονται.

β) Τύπου gain-guide: περιορίζουμε το οπτικό πεδίο στην περιοχή όπου υπάρχει απολαβή. Σε υψηλότερα ρεύματα πόλωσης, εξαιτίας του φαινομένου της χωρικής εξαφάνισης οπών «spatial hole burning», μπορεί να μεταβληθεί ο τρόπος ταλάντωσης.

γ) Τύπου καλυμμένης ετεροδομής (Buried Heterostructure, BH) : όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με αυτή τη μέθοδο σχηματίζεται μία ιδανική index-guiding δομή.

δ) Επιλεκτική οξείδωση AIAs: Εξαιτίας της διαφοράς στους δείκτες διάθλασης που παρουσιάζουν το AIAs και τα οξειδωμένα στρώματα AIAs, μπορεί το οπτικό πεδίο να περιοριστεί.

ε) Τύπου anti-guiding: Η γειτονική περιοχή είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης. Αν και το ρεύμα κατωφλίου είναι αρκετά μεγάλο, αυτή η δομή είναι καλή για να παραμείνει ίδιος ο τρόπος ταλάντωσης ακόμα και σε μεγάλα ρεύματα οδήγησης.



Σχήμα 2.6 Δομές για περιορισμό φωτός [27]

Οι σημαντικότερες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή των λέιζερ επιφανειακής εκπομπής είναι:

- Ο σχεδιασμός της κοιλότητας συντονισμού
- Οι κατάλληλοι, πολλαπλών στρώσεων κατανεμημένοι καθρέφτες DBR για να εξασφαλιστεί μεγάλη ανακλαστικότητα
- Οι οπτικές απώλειες από φαινόμενα όπως επανασύνδεση Auger, απορρόφηση ενδιάμεσης ζώνης, απώλειες διάχυσης και διάθλασης
- Η νόθευση p-τύπου για τη μείωση της ειδικής αντίστασης σε p-τύπου υλικά κατά τη λειτουργία συνεχούς κύματος και για υψηλή απόδοση
- Η απαγωγή θερμότητας για λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία και μεγάλη ισχύ
- Τα επίπεδα Καταστροφικής Οπτικής Βλάβης (Catastrophic Optic Damage, COD), ειδικά σε περιπτώσεις λέιζερ μεγάλης ισχύος [27]

➤ 2.2.4 Εφαρμογές

- Ιατρική: διόρθωση μυωπίας, ανάλυση βιολογικού ιστού
- Στρατιωτική χρήση: υπέρυθρος φωτισμός
- 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
- Οπτοηλεκτρονικές δομές: εκτυπωτές, laser δείκτες, εξαρτήματα κινητών τηλεφώνων
- Επεξεργασία οπτικής πληροφορίας: οπτικοί επεξεργαστές, παράλληλοι επεξεργαστές
- Οπτικοί αισθητήρες: αισθητήρας οπτικών ινών, ανάγνωση barcode, κωδικοποιητές
- Οθόνες: φανοί πολλαπλής δέσμης, πηγές array light
- Φωτισμός: πηγές υψηλής απόδοσης, μικροδιατάξεις φωτισμού
- Μετάδοση αναλογικού ευρυζωνικού σήματος
- Απορρόφηση- φασματοσκοπία και άλλα. [27]

➤ 2.2.5 VCSEL 1550nm

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με μεγάλου μήκους κύματος VCSEL, συγκεκριμένα με VCSEL που λειτουργούν στα 1550nm.

Τα VCSEL που εκπέμπουν στα 1550nm είναι μία πολλά υποσχόμενη πηγή για οπτικές και τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις, εξαιτίας των τεχνολογικά ελκυστικών ιδιοτήτων τους. Το χαμηλό κόστος παραγωγής, το πολύ χαμηλό ρεύμα κατωφλίου, το στενό φασματικό εύρος γραμμής, η σχεδόν μονορρυθμική λειτουργία τους αλλά και οι μεγαλύτερες δυνατότητες ενίσχυσης του σήματος στο συγκεκριμένο μήκος κύματος, είναι μερικές από τις ιδιότητες που έκαναν τους ερευνητές να στραφούν στα VCSEL αυτά. [28], [29]

2.3 Φωτοδίοδος

Φωτοδίοδος είναι μία οπτική πηγή η οποία βασίζεται στη αυθόρμητη εκπομπή, σε αντίθεση με το laser που, όπως αναφέραμε προηγουμένως, βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή.

Η φωτοδίοδος μετατρέπει την οπτική ισχύ που προσπίπτει σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο ενισχύεται και επεξεργάζεται ώστε να ανακτηθεί η πληροφορία. Η φωτοδίοδος ανιχνεύει μόνο οπτική ισχύ σύμφωνα με τον τετραγωνικό νόμο και δεν μπορεί να ανακτήσει την πλήρη περιγραφή του οπτικού πεδίου.

$$I \propto P = |E \cdot \exp(-j \cdot (\omega \cdot t + \varphi))|^2$$

Η πληροφορία της φάσης χάνεται με δύο σημαντικές συνέπειες:

Τα σήματα που είναι διαμορφωμένα κατά φάση θα πρέπει πριν ανιχνευτούν να μετατραπούν σε σήματα διαμόρφωσης κατά πλάτος με αμιγώς οπτικό τρόπο (πχ συμβολόμετρο).

Και ο οπτικός θόρυβος (ο οποίος έχει τυχαία φάση) δεν μπορεί να αναγνωρισθεί και να διαχωρισθεί από το σήμα.

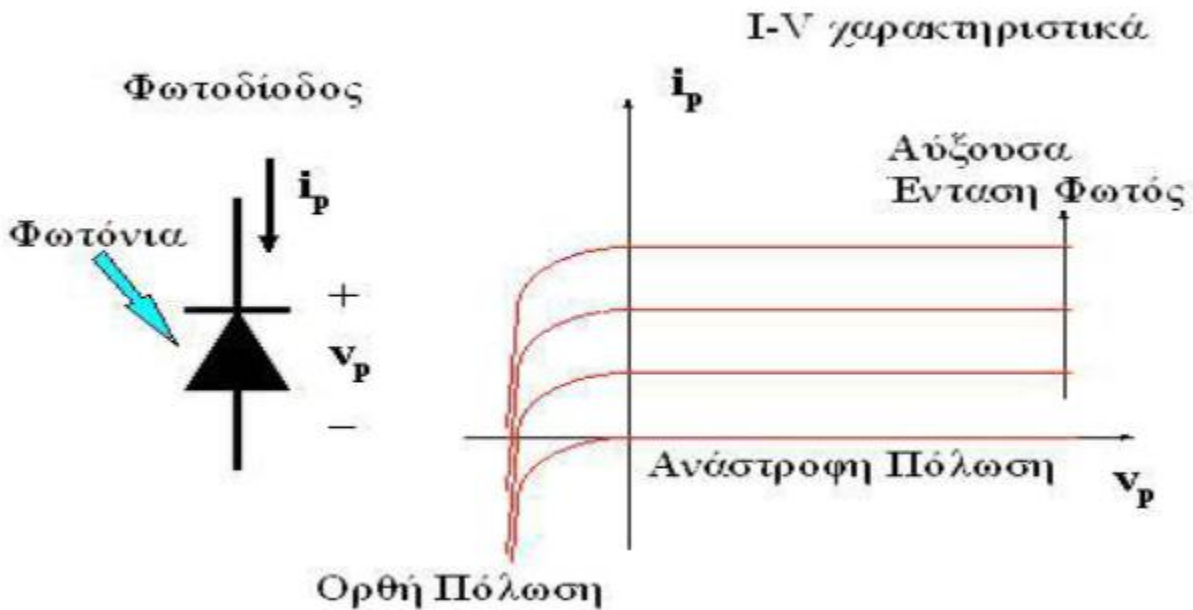
Στα σημερινά οπτικά δίκτυα, οι δύο πιο συνηθισμένοι οπτο-ηλεκτρονικοί δέκτες που χρησιμοποιούνται είναι η φωτοδίοδος τύπου P-N, φωτοδίοδος τύπου P-I-N και η φωτοδίοδος τύπου χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode ή APD). Η βασικότερη διαφορά μεταξύ τους είναι ότι η δεύτερη προσφέρει κέρδος στο σήμα, ενώ η πρώτη όχι.

➤ 2.3.1 Φωτοδίοδος P-N

Η πιο απλή μορφή φωτοδιόδου είναι μία επαφή P-N σε ανάστροφη πόλωση, την οποία έχουμε χρησιμοποιήσει και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Καθώς αυξάνει η εφαρμοζόμενη τάση, η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται και η διαφορά δυναμικού στην επαφή αυξάνεται. Τα προσπίπτοντα φωτόνια στην επαφή δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, τα οποία επιταχύνονται προς τις άκρες της επαφής και, εν κατακλείδει, συνεισφέρουν σε φωτονικό ρεύμα (photocurrent) στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη φωτοδιόδο.



Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη P-N φωτοδιόδου [30]

Τα βασικότερα γνωρίσματα μιας P-N φωτοδιόδου είναι η κβαντική απόδοση, ο χρόνος απόκρισης και η περιοχή μήκους κύματος λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα:

- Κβαντική απόδοση

Η κβαντική απόδοση της φωτοδιόδου εκφράζεται ως ο αριθμός των φωτονίων που δημιουργούνται για κάθε ζεύγος ηλεκτρονίων οπών:

$$n = \frac{I_p}{q} \cdot \left(\frac{P_{opt}}{h \cdot \nu} \right)^{-1}$$

όπου P_{opt} : η ισχύς του οπτικού σήματος που προσπίπτει στην φωτοδιόδο

I_p : το ρεύμα που δημιουργείται, με

$$I_p = \frac{P_{opt} \cdot e \cdot (1 - r)}{h \cdot \nu} \cdot (1 - e^{-ad})$$

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου

$h\nu$: η ενέργεια του φωτονίου.

Η κβαντική απόδοση εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης του υλικού και αυτός, με τη σειρά του, από το μήκος κύματος.

Κάθε είδος ημιαγωγού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, στις σημερινές οπτικές ζεύξεις, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι InGaAs και InGaAsP, όταν το μήκος κύματος λειτουργίας είναι στα 1.3μm και στα 1.55μm, ενώ Si για ζεύξεις στα 800nm.

Το φυσικό μέγεθος που συνήθως χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό φωτοдиодων είναι η αποκρισιμότητα (responsivity - \mathfrak{R}), το οποίο εκφράζεται ως το πηλίκο του φωτονικού ρεύματος προς την οπτική ισχύ που προσπίπτει στη φωτοδίοδο:

$$\mathfrak{R} = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{e \cdot n}{h \cdot \nu} = \frac{e \cdot n \cdot \lambda}{h \cdot c} A/W$$

- Χρόνος απόκρισης (Device Time Response)

Ο χρόνος απόκρισης της φωτοδίοδου περιορίζεται από τρεις παράγοντες:

(α) Ο χρόνος που χρειάζονται οι φορείς για να διασχίσουν (drift time) την περιοχή απογύμνωσης λόγω του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου (ανάστροφη πόλωση).

$$t_{drift} = \frac{w}{V_{drift}}$$

(β) Χρόνος διάχυσης (diffusion) φορέων έξω από την περιοχή απογύμνωσης

$$t_{drift} = \frac{d^2}{2D_c}$$

όπου D_c είναι σταθερά διάχυσης φορέων, η οποία φυσικά είναι διαφορετική για τα ηλεκτρόνια και τις οπές.

(γ) Χρονική σταθερά λόγω χωρητικότητας της επαφής (time constant due to junction capacitance)

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{w} \cdot A$$

όπου C_j : η χωρητικότητα της επαφής

ϵ_s : η ηλεκτρική επιδεκτικότητα (permittivity) του ημιαγωγικού υλικού

w : το μήκος της περιοχής απογύμνωσης

Ανάλυση θορύβου

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι όταν η οπτική ισχύς είναι μηδενική, το ρεύμα που δημιουργείται είναι και αυτό μηδενικό. Στην πραγματικότητα αυτό ισχύει κατά προσέγγιση, μιας και ένα πολύ μικρό ποσό ρεύματος διαχέεται από την επαφή. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα σκότους (dark current) και είναι της τάξης των nA.

Εκτός από το ρεύμα σκότους, υπάρχει ο θερμικός θόρυβος (Thermal Noise). Ο θερμικός θόρυβος πηγάζει από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων, η οποία είναι πάντα παρούσα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επιπλέον, υπάρχει ο θόρυβος βολής (Shot Noise) που προέρχεται από την τυχαία κατανομή των ηλεκτρονίων, ακόμα και αν η οπτική ισχύς είναι σταθερή. Οι τυπικές αποκλίσεις των θορύβων αυτών δίνονται παρακάτω:

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4k_B T}{R} \cdot B_e$$

$$\sigma_{thermal}^2 = 2 \cdot e \cdot I \cdot B_e$$

Τέλος, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε τυχόν θόρυβο από ηλεκτρικούς ενισχυτές σήματος. Αν για παράδειγμα μετά την φωτοδίοδο περιλαμβάνεται και ηλεκτρονικός ενισχυτής, όπως συμβαίνει συνήθως σε ένα οπτο-ηλεκτρικό δέκτη, τότε πρέπει να συμπεριληφθεί και η εικόνα θορύβου του ενισχυτή (noise figure), η οποία είναι ο λόγος του SNR στην είσοδο προς το SNR στην έξοδο του ενισχυτή (SNR-Signal-to-Noise-Ratio). Επομένως ο θερμικός θόρυβος του δείκτη γίνεται:

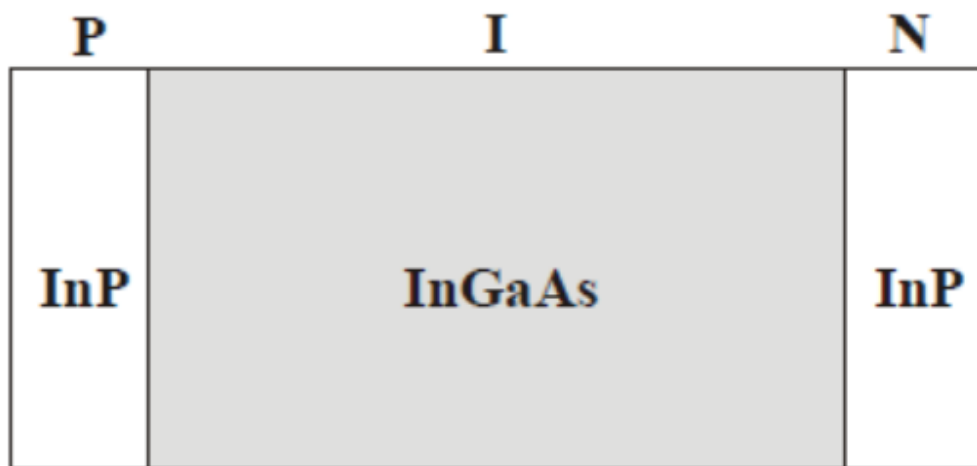
$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4k_{\beta}T}{R} \cdot F_n B_e$$

όπου F_n : η εικόνα θορύβου του ενισχυτή με τυπικές τιμές από 3dB έως 5dB

Πολύ χρήσιμο φυσικό μέγεθος είναι το Noise-Equivalent-Power (NEP). Το NEP εκφράζει την οπτική ισχύ ενός μήκους κύματος ή ενός συγκεκριμένου φασματικού εύρους που χρειάζεται μια φωτοδίοδος για να δημιουργήσει ρεύμα ίσο με το RMS ρεύμα θορύβου σε μοναδιαίο εύρος ζώνης. Οι μονάδες μέτρησης είναι pW/\sqrt{Hz} .

➤ 2.3.2 Φωτοδίοδος P-I-N

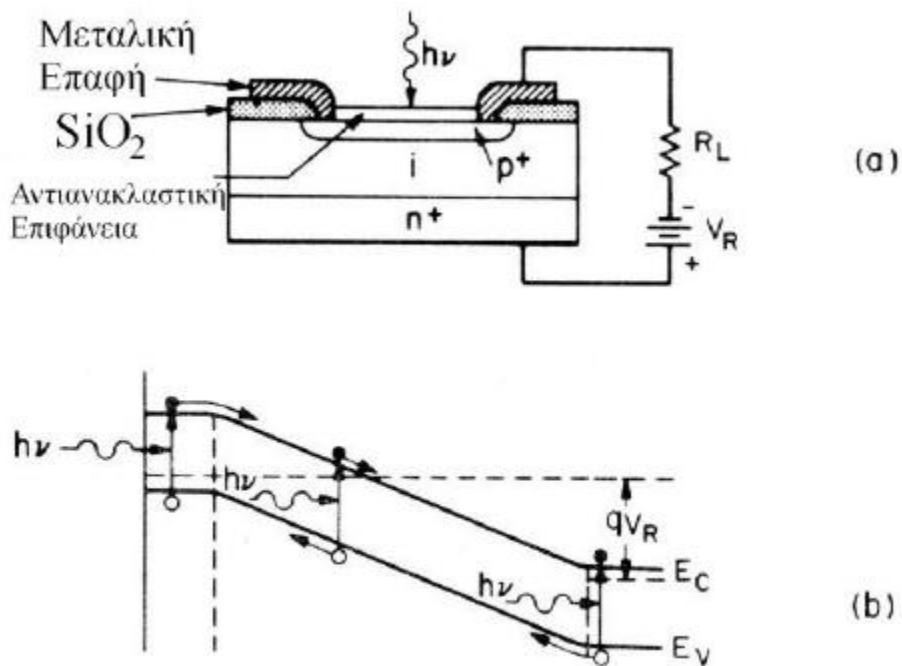
Η φωτοδίοδος PIN μοιάζει με την PN με τη διαφορά ότι ανάμεσα στην PN επαφή έχει εισαχθεί μία ενδογενής επίστρωση (intrinsic region). Σκοπός της εισαγωγής αυτής είναι να αυξηθεί η ενεργός περιοχή της συσκευής και να μεγιστοποιηθεί έτσι η απορρόφηση των προσπιπτόντων φωτονίων (αύξηση δηλαδή της αποδοτικότητας της συσκευής). Όσο αυξάνεται όμως αυτή η περιοχή, τόσο πιο πολύ χρόνο χρειάζονται τα ηλεκτρόνια και οι οπές να διαχυθούν στα ηλεκτρόδια. Επομένως, υπάρχει ένα ισοζύγιο μεταξύ απόδοσης και χρονικής απόκρισης της συσκευής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σε απλουστευμένη μορφή η δομή μιας PIN φωτοδίοδου:



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα απλουστευμένης ετεροδομικής φωτοδίοδου [30]

Στις φωτοδιόδους PIN, οι περιοχές P και N κατασκευάζονται πολύ λεπτές έτσι ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης να γίνεται στην ενδογενή περιοχή, μειώνοντας τους ανασυνδυασμούς στην επιφάνεια (surface recombination). Σήμερα, οι εμπορικά διαθέσιμες φωτοδιόδους, βασίζονται κατά κανόνα σε διπλή ετεροδομή, όπου οι περιοχές P και N είναι κατασκευασμένες από διαφορετικό υλικό, διάφανο στο μήκος κύματος λειτουργίας. Έτσι, όλη η απορρόφηση γίνεται στην ενδογενή περιοχή αυξάνοντας της απόδοση της συσκευής.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας μίας PIN φωτοδιόδου (α) σε διατομή απεικονίζοντας τις επιστρώσεις και (β) το ενεργειακό διάγραμμα.



Σχήμα 2.9 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας PIN φωτοδιόδου [30]

➤ 2.3.3 Φωτοδιόδος Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode)

Το βασικότερο γνώρισμα της φωτοδιόδου PIN είναι το γεγονός ότι για κάθε προσπίπτον φωτόνιο, μόνο ένα ηλεκτρόνιο δημιουργείται. Αντίθετα, οι φωτοδιόδους τύπου Avalanche παρουσιάζουν κέρδος το οποίο προέρχεται από το φαινόμενο χιονοστιβάδας της

επαφής pn. Όταν ένα φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, αυτό επιταχύνεται προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, όπως και στην περίπτωση της PIN φωτοδιόδου. Στην περίπτωση όμως που το ηλεκτρόνιο «δει» ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, μπορεί να αποκτήσει αρκετή ενέργεια ώστε να διεγείρει κι άλλα ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και αντίστοιχα η οπή, άλλες οπές από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους. Αυτά τα δευτερεύοντα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών μπορούν να διεγείρουν και άλλα ζεύγη, αν έχουν αρκετή ενέργεια. Το φαινόμενο ονομάζεται πολλαπλασιασμός χιονοστιβάδας (avalanche photodiode) και είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για τον οποίο παρουσιάζει κέρδος η συγκεκριμένη κατηγορία φωτοδίοδων.

Ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που θα δημιουργηθούν από ένα πρωταρχικό ηλεκτρόνιο είναι τυχαίος και η μέση τιμή αυτού του αριθμού ονομάζεται πολλαπλασιαστικό κέρδος (multiplicative gain) της φωτοδιόδου. Θεωρητικά, ο όρος αυτός μπορεί να αποκτήσει αρκετά μεγάλες τιμές. Στην περίπτωση αυτή όμως, η τυπική απόκλιση του ηλεκτρικού ρεύματος που δημιουργείται (photocurrent) αυξάνει με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει την επίδοση της συσκευής ως προς τον θόρυβο. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που δε χρησιμοποιούνται ευρέως στις οπτικές ζεύξεις. Αντίθετα το σήμα συνηθίζεται να ενισχύεται από ειδικούς ενισχυτές πολύ χαμηλού θορύβου (FET).

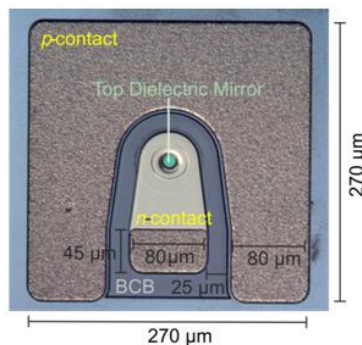
➤ 2.3.4 Φωτοδιόδοι Schottky

Στις φωτοδιόδους Schottky, στη θέση της P περιοχής τοποθετείται μία πολύ λεπτή μεταλλική επιφάνεια. Όπως και οι PIN φωτοδιόδοι, έτσι και οι Schottky χρησιμοποιούνται για υπέρ-υψηλές ταχύτητες διάδοσης δεδομένων, όπου υψηλό εύρος ζώνης είναι απαραίτητο. Ο χρόνος απόκρισης των φωτοδίοδων αυτού του τύπου είναι πολύ μικρός επειδή ο χρόνος διάχυσης των φορέων στο μέταλλο είναι επίσης μικρός. [30]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της μελέτης και καλύτερης κατανόησης των ιδιοτήτων και του τρόπου λειτουργίας ενός laser τύπου VCSEL, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών ενός VCSEL που λειτουργεί στα 1550 nm στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (Ε.Φ.Ε) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε δύο στάδια: Στο πρώτο μετρήθηκαν οι χαρακτηριστικές L-I-V σε διάφορες θερμοκρασίες και στο δεύτερο, μετρήθηκαν οι μικροκυματικοί συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL για τιμές ρεύματος τόσο στο roll-over όσο και σε μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες τιμές από αυτό.

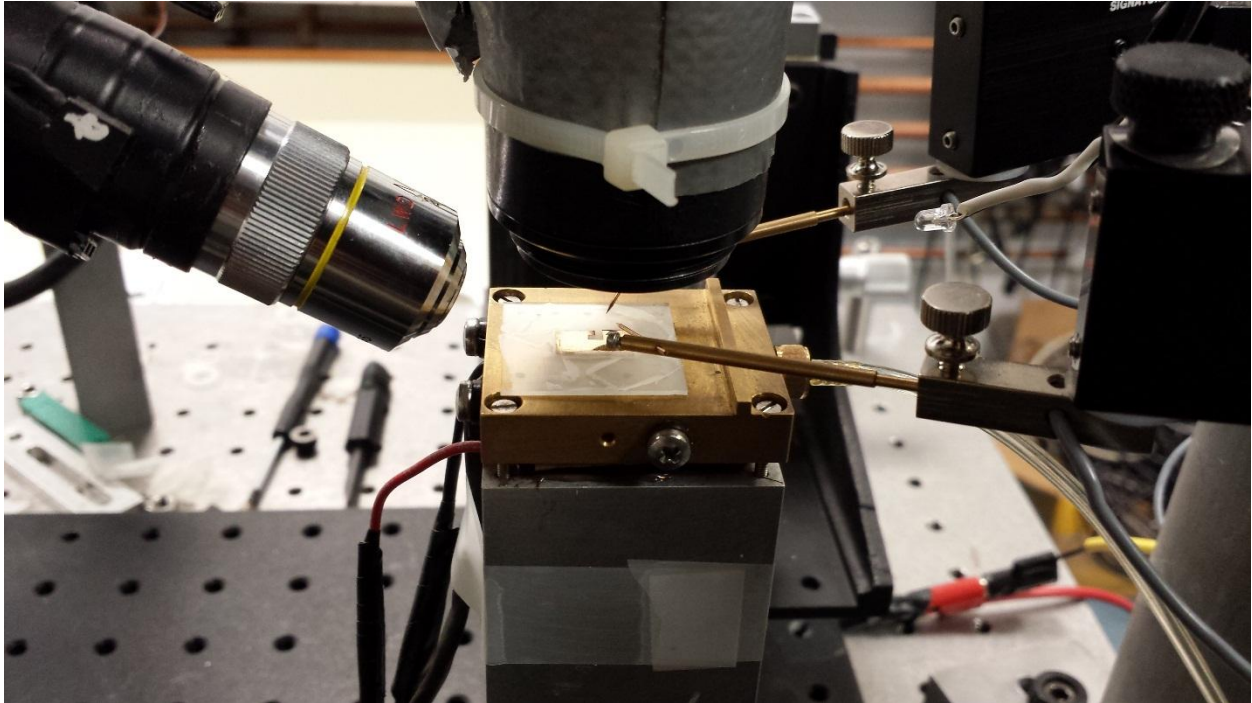


Σχήμα 3.1 Το υπό μέτρηση VCSEL

3.2 1^ο Στάδιο – Εξαγωγή L-I-V καμπυλών

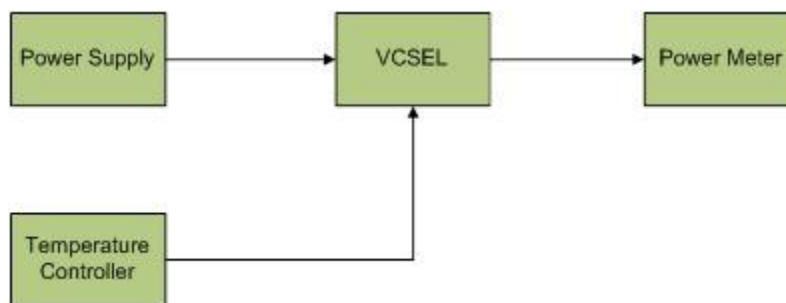
Για την εξαγωγή των L-I-V καμπυλών η πειραματική διάταξη είναι αρκετά απλή: Συνδέουμε το τροφοδοτικό μέσω των probe tips στα pads του VCSEL και με αυτόν τον τρόπο εγχέεται το απαραίτητο ρεύμα ώστε το VCSEL να εκπέμψει φως. Προκειμένου να συλλέξουμε και να μετρήσουμε την εκπεμπόμενη οπτική ισχύ, χρησιμοποιούμε ένα optical power meter, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.2, το οποίο θέτουμε πάνω από το VCSEL κάθετα και το πλησιάζουμε όσο πιο κοντά μπορούμε προκειμένου να μειώσουμε την οπτική

απώλεια ισχύος. Είναι προφανές ότι αφού το VCSEL λειτουργεί στα 1550 nm, δηλαδή βρίσκεται εκτός ορατού φάσματος (390-700 nm), το ανθρώπινο μάτι δεν αντιλαμβάνεται το εκπεμπόμενο φως, παρά μόνο την ένδειξη της μετρούμενης ισχύος στο power meter.



Σχήμα 3.2 Πειραματική διάταξη για την εξαγωγή καμπυλών L-I-V. Στο πάνω μέρος της εικόνας διακρίνεται η κεφαλή του power meter μεγάλης επιφάνειας που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της οπτικής ισχύος

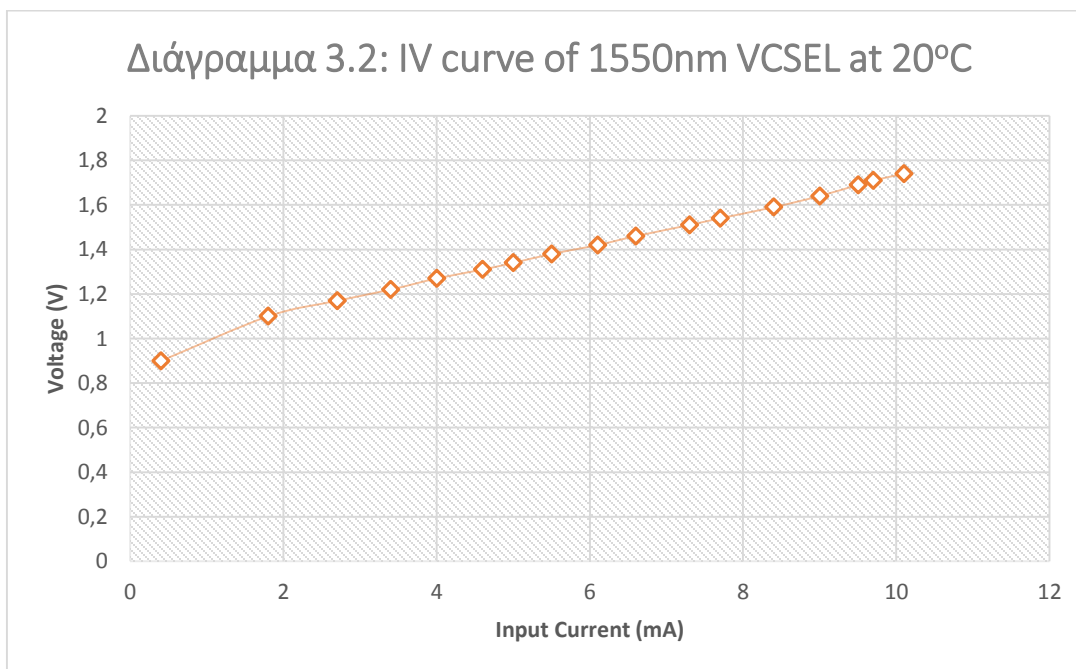
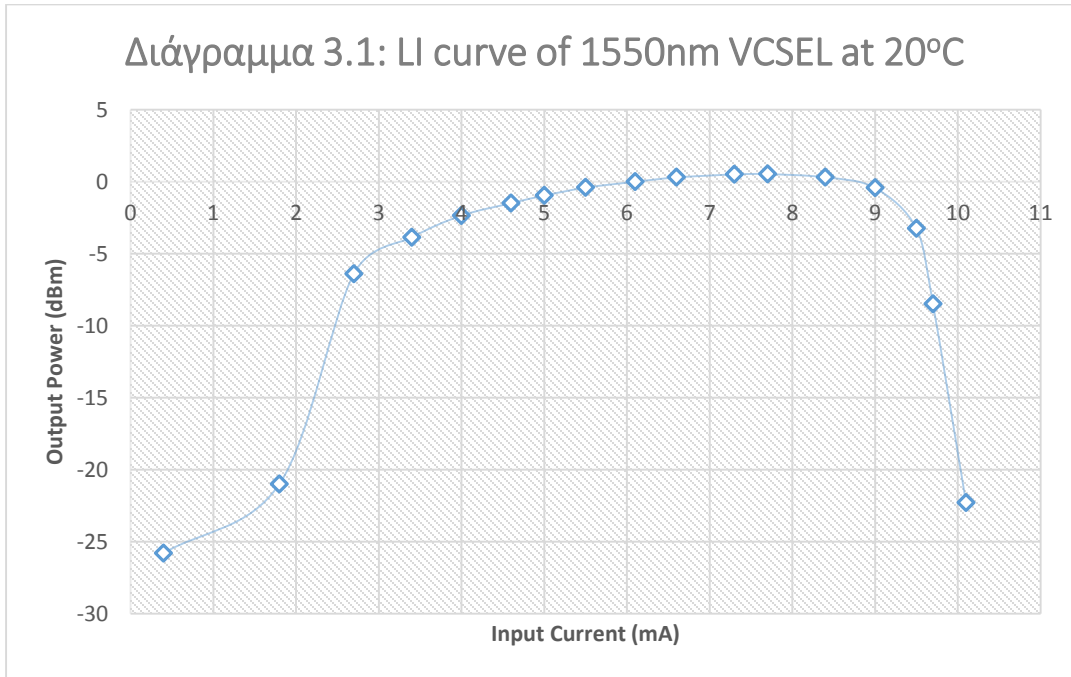
Ακολουθεί η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών L-I-V του VCSEL.



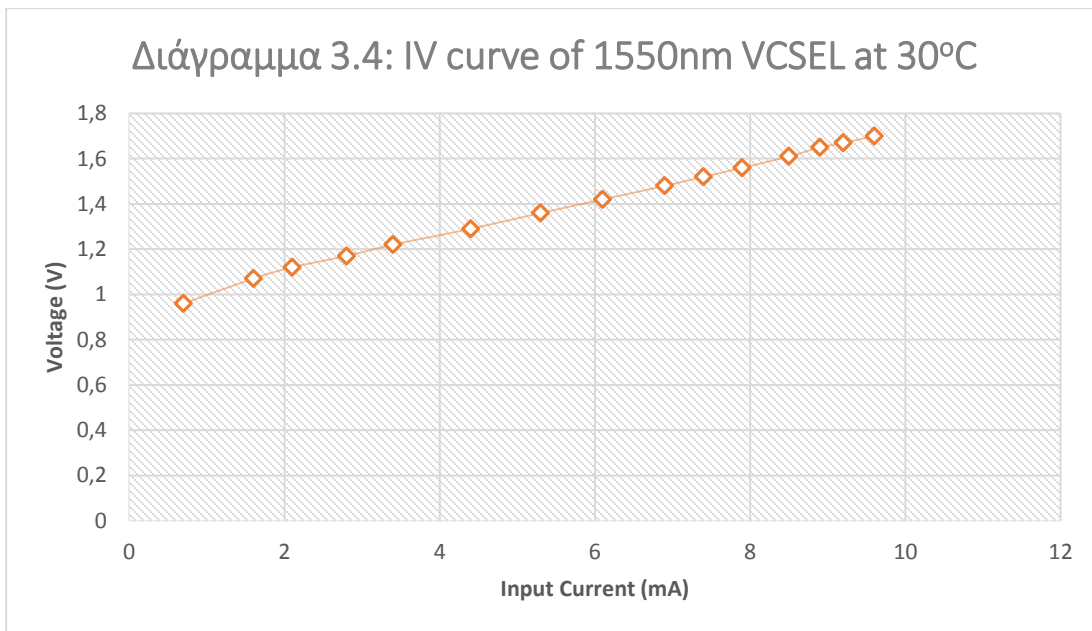
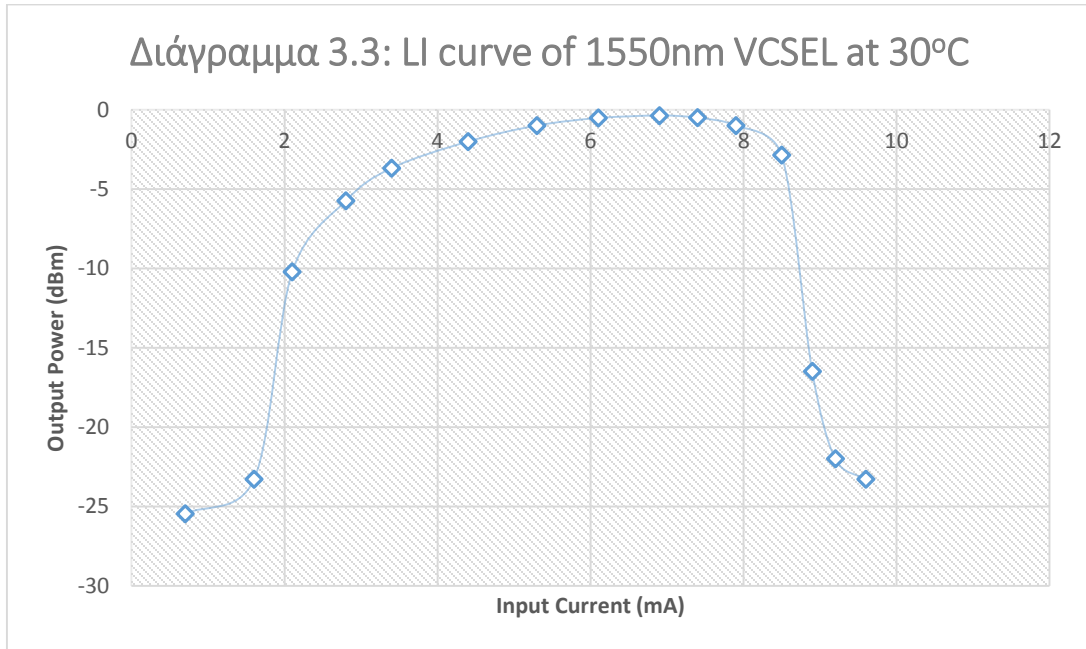
Σχήμα 3.3 Πειραματική Διάταξη για L-I-V Μετρήσεις

Μετρώντας, επομένως, την εκπεμπόμενη ισχύ του laser για τιμές θερμοκρασίας $T = 20, 30, 40, 50^{\circ}\text{C}$ και καταγράφοντας τις αντίστοιχες τιμές εγχεόμενου ρεύματος αλλά και τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του VCSEL, προκύπτουν αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές φωτός-ρεύματος (LI curves) και οι χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης (IV curves):

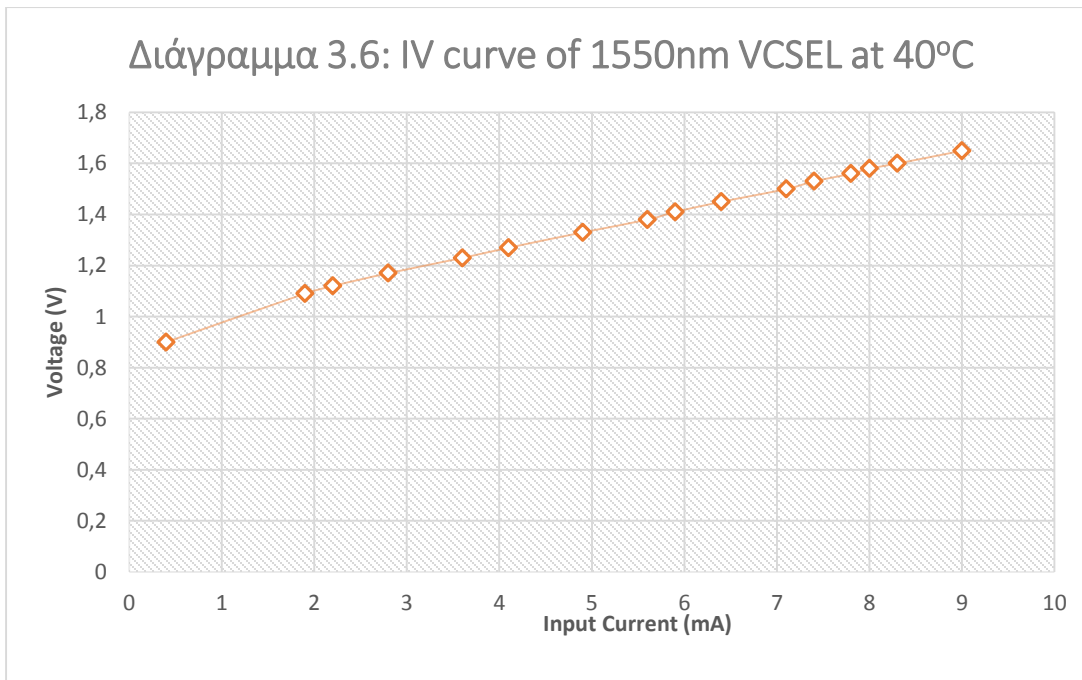
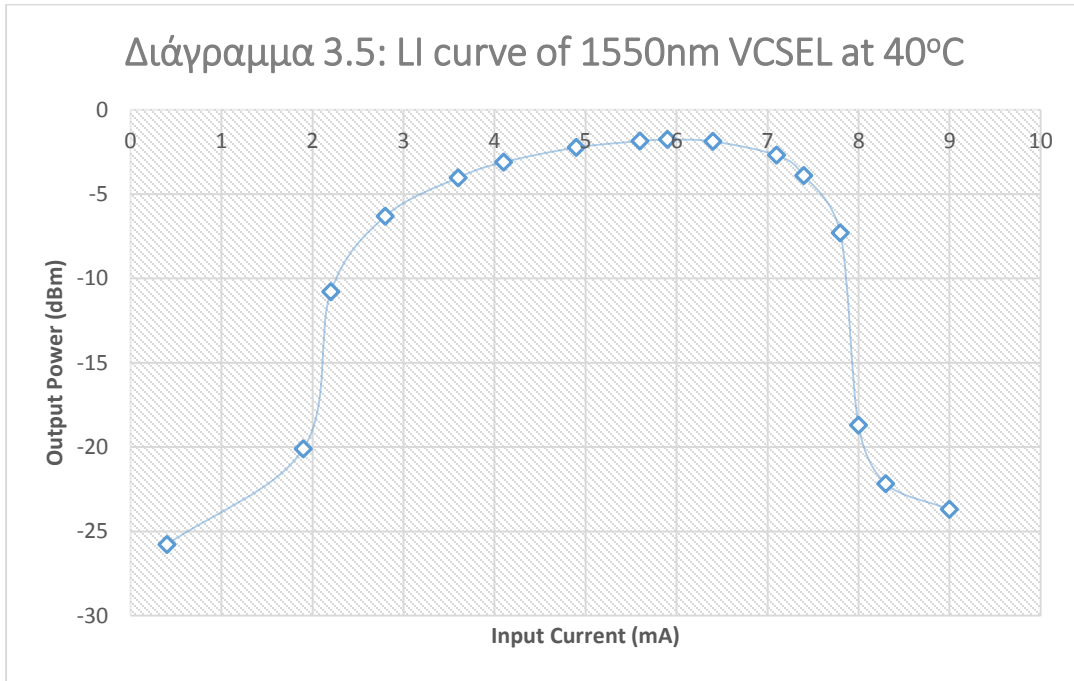
- Για $T=20^{\circ}\text{C}$:



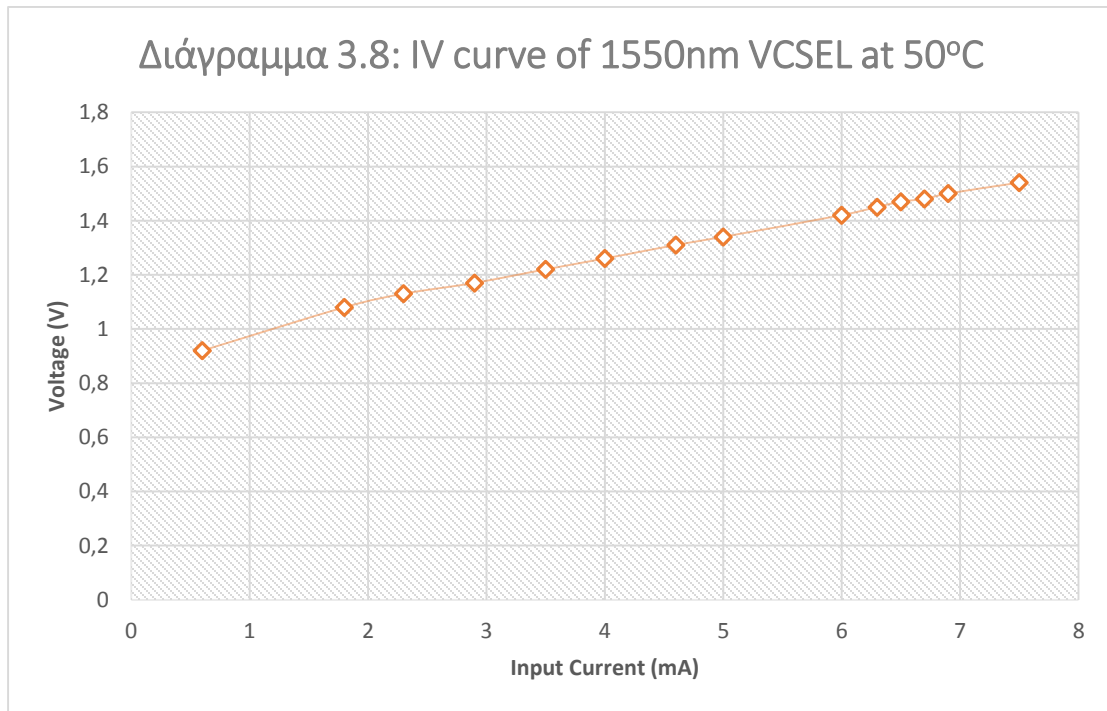
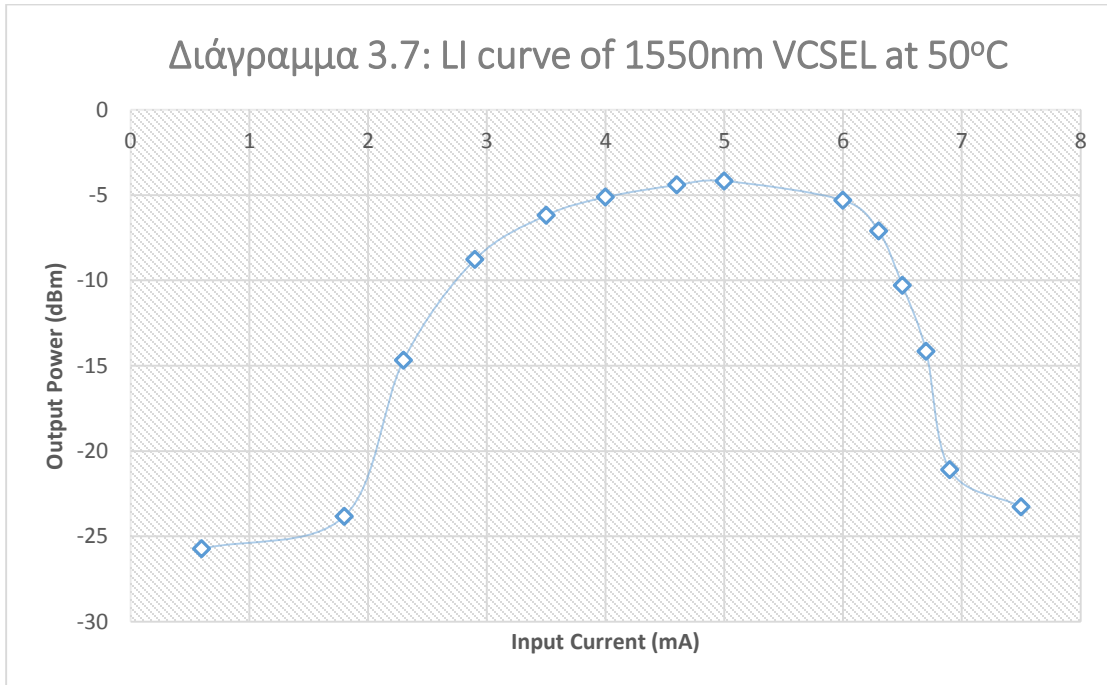
- Για $T=30^{\circ}\text{C}$:



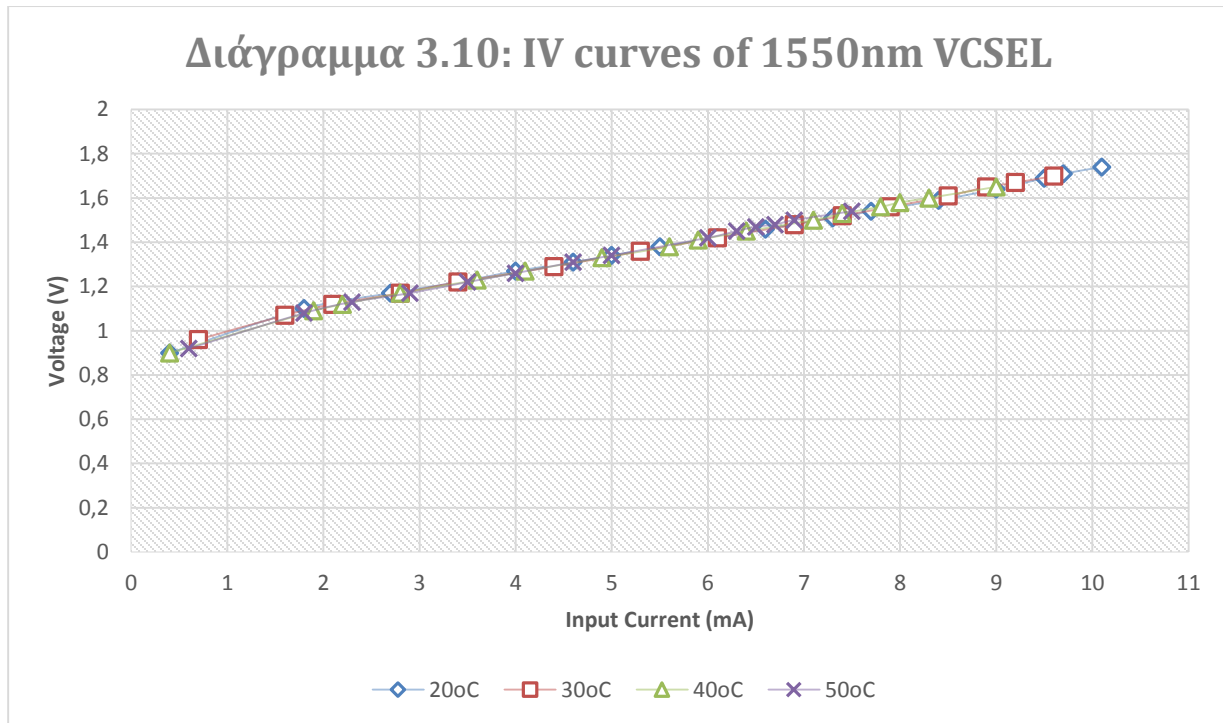
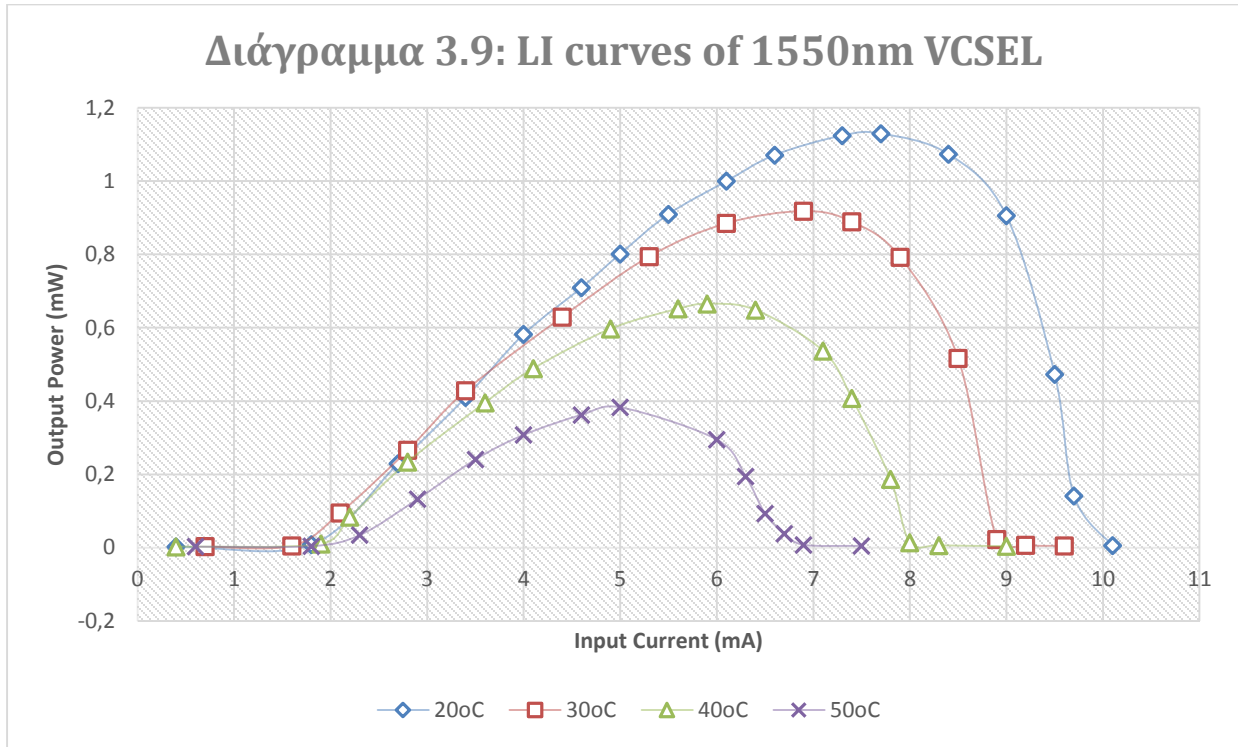
- Για $T=40^{\circ}\text{C}$:



- Για $T=50^{\circ}\text{C}$:



Και συγκεντρωτικά σε απόλυτες τιμές :



3.3 2^ο Στάδιο – Μέτρηση των S-Parameters

Στη συνέχεια προκειμένου να μετρήσουμε τον συντελεστή ανάκλασης (S_{11}) και τον συντελεστή μετάδοσης (S_{21}) του VCSEL, μεταβαίνουμε στον σταθμό οπτοηλεκτρονικών μετρήσεων (rf probe station) του εργαστηρίου, ο οποίος φαίνεται στο Σχ.3.4.



Σχήμα 3.4 Σταθμός οπτοηλεκτρονικών μετρήσεων (rf probe station) εργαστηρίου. Αριστερά φαίνεται ο Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (VNA).

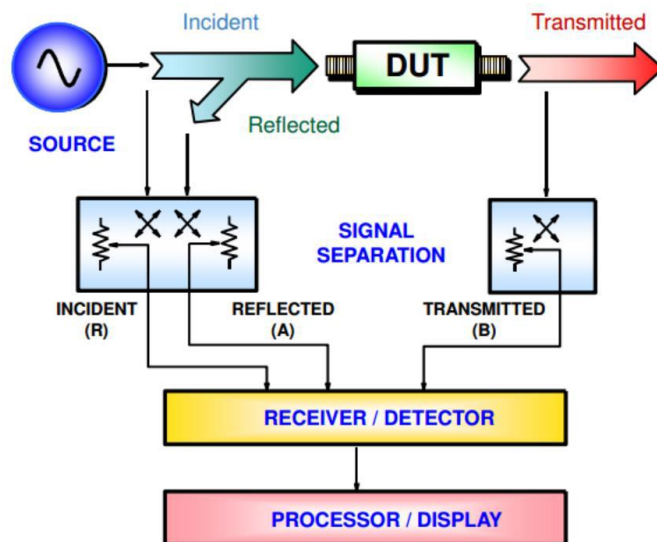
Σε αυτό το σημείο, κρίνεται αναγκαίο να γίνει η περιγραφή της πειραματικής διάταξης.

➤ 3.3.1 Πειραματική Διάταξη Μέτρησης S-Παραμέτρων

- **Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyzer - VNA)**

Ο διανυσματικός αναλυτής δικτύου (VNA) είναι ένα μετρητικό όργανο το οποίο ελέγχει την απόκριση RF εξαρτημάτων ή δικτύων σαν συνάρτηση της συχνότητας ενός συνεχούς εφαρμοζόμενου μη-διαμορφωμένου RF σήματος. Ο VNA μετράει την απόκριση του δικτύου ανά μία συχνότητα τη φορά, αλλά μεταβάλλει τη συχνότητα μέτρησης σε ένα εύρος συχνοτήτων πολύ γρήγορα, κάνοντας εκατοντάδες μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο. Ο όρος διανυσματικός αναφέρεται στο γεγονός ότι ο VNA εκτός από το πλάτος μετράει και τη φάση ενός RF σήματος. Συντίθεται από μία εσωτερική RF πηγή και πολλαπλούς δέκτες για τη μέτρηση των RF εξαρτημάτων. Η έξοδος στην οθόνη μπορεί να είναι είτε χαρακτηριστικές σε X-Y άξονες, είτε πολικές απεικονίσεις, είτε απεικονίσεις σε διάγραμμα Smith. Έχει σχεδιαστεί κυρίως για τη μέτρηση της ευθείας και ανάστροφης διάδοσης των σημάτων. Η κύρια λειτουργία του VNA είναι η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης ενός κυκλώματος σε μια δεδομένη συχνότητα μέσω της οποίας πραγματοποιείται ο καθορισμός των s-parameters ενός διθύρου, καθώς επίσης μετρήσεις προσαρμογής, μετρήσεις φάσης, μετρήσεις καθυστέρησης ομάδας (group delay), και μετρήσεις ισχύος (ισχύς εξόδου συναρτήσει ισχύος εισόδου, 1dB compression point). [32]

Στο σχήμα 3.5 φαίνεται το block διάγραμμα του VNA κ στο σχήμα 3.6 ο VNA που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο:



Σχήμα 3.5 Block διάγραμμα Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου [32]



Σχήμα 3.6 Anritsu Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου [32]

Για να μπορέσει να μετρηθεί το προσπίπτον, το ανακλώμενο και το διαδιδόμενο σήμα απαιτούνται τέσσερα τμήματα:

1. Πηγή για διέγερση.
2. Εξαρτήματα διαχωρισμού σήματος.
3. Δέκτες, οι οποίοι μετατρέπουν τις υψηλές συχνότητες σε χαμηλές και ανιχνεύουν τα σήματα.
4. Επεξεργαστή και οθόνη για υπολογισμό και προβολή των αποτελεσμάτων.

Πιο αναλυτικά:

Πηγή:

Η πηγή σημάτων παρέχει τη διέγερση για το αυτοδιεγειρόμενο σύστημα του VNA. Μπορεί γίνει είτε σάρωση της συχνότητας της πηγής, είτε σάρωση του επιπέδου ισχύος της.

Διαχωρισμός σήματος:

Το τμήμα διαχωρισμού σήματος επιτελεί τη σημαντικότερη λειτουργία. Το υλικό (hardware) του τμήματος αυτού είναι υπεύθυνο για δύο λειτουργίες. Η πρώτη αφορά τη μέτρηση του προσπίπτοντος σήματος που λειτουργεί ως σήμα αναφοράς. Αυτό μπορεί να γίνει με διαχωριστές (splitters) ή με κατευθυντικούς ζεύκτες (directional couplers). Η δεύτερη λειτουργία είναι ο διαχωρισμός των προσπιπτόντων και των ανακλώμενων διαδιδόμενων κυμάτων στην είσοδο της προς μέτρηση συσκευής (Device Under Test - DUT). Και σε αυτή την περίπτωση είναι ιδανική η χρησιμοποίηση ζευκτών με μεγάλη κατευθυντικότητα, χαμηλές απώλειες και υψηλή ανάστροφη απομόνωση.

Ανιχνευτές:

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για την ανίχνευση των σημάτων στους αναλυτές δικτύου. Ο πρώτος είναι η χρησιμοποίηση διόδων ανίχνευσης, οι οποίες μετατρέπουν το RF σήμα σε ένα αντίστοιχο DC επίπεδο και ονομάζεται AC ανίχνευση. Η ανίχνευση της διόδου είναι βαθμωτή καθώς οι πληροφορίες φάσης της RF συνιστώσας χάνονται. Ο δεύτερος τρόπος είναι η χρησιμοποίηση συντονισμένου δέκτη (tuned receiver), ο οποίος χρησιμοποιεί έναν τοπικό ταλαντωτή και έναν μείκτη για να μετατρέψει το RF σήμα σε χαμηλότερη (μεσαία) συχνότητα (IF). Ο τοπικός ταλαντωτής κλειδώνει είτε στο RF είτε στο IF σήμα, έτσι ώστε ο αναλυτής δικτύου να είναι συντονισμένος πάντα στην παρουσία του RF σήματος στην είσοδό του. Το IF σήμα φιλτράρεται από ζωνοπερατό φίλτρο, το οποίο στενεύει το εύρος του δέκτη και βελτιώνει το δυναμικό εύρος. Οι σύγχρονοι αναλυτές δικτύου χρησιμοποιούν A-D μετατροπέα και ψηφιακή επεξεργασία σήματος για να εξάγουν τις πληροφορίες πλάτους και φάσης από το IF σήμα.

Επεξεργαστής και οθόνη:

Το τελευταίο στάδιο είναι το τμήμα επεξεργασίας και απεικόνισης. Σε αυτό το στάδιο τα δεδομένα της ανάκλασης και της διάδοσης μετατρέπονται σε τέτοια μορφή ώστε να είναι εύκολο να μεταφραστούν σε κατανοητά αποτελέσματα μετρήσεων. Οι περισσότεροι αναλυτές δικτύου διαθέτουν παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως γραμμικές και λογαριθμικές σαρώσεις, γραμμικές και λογαριθμικές μορφές, πολικές απεικονίσεις, απεικονίσεις σε διάγραμμα Smith κτλ. [34]

- **Βαθμονόμηση του Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου (VNA Calibration)**

Σε κάθε εξοπλισμό υπάρχουν ατέλειες που οδηγούν σε λάθη. Τέτοιοι παράγοντες είναι συνήθως επαναλαμβανόμενοι και προβλέψιμοι σε σχέση με το χρόνο ή τη θερμοκρασία και μπορούν να απαλειφθούν σχετικά εύκολα από μελλοντικές μετρήσεις.

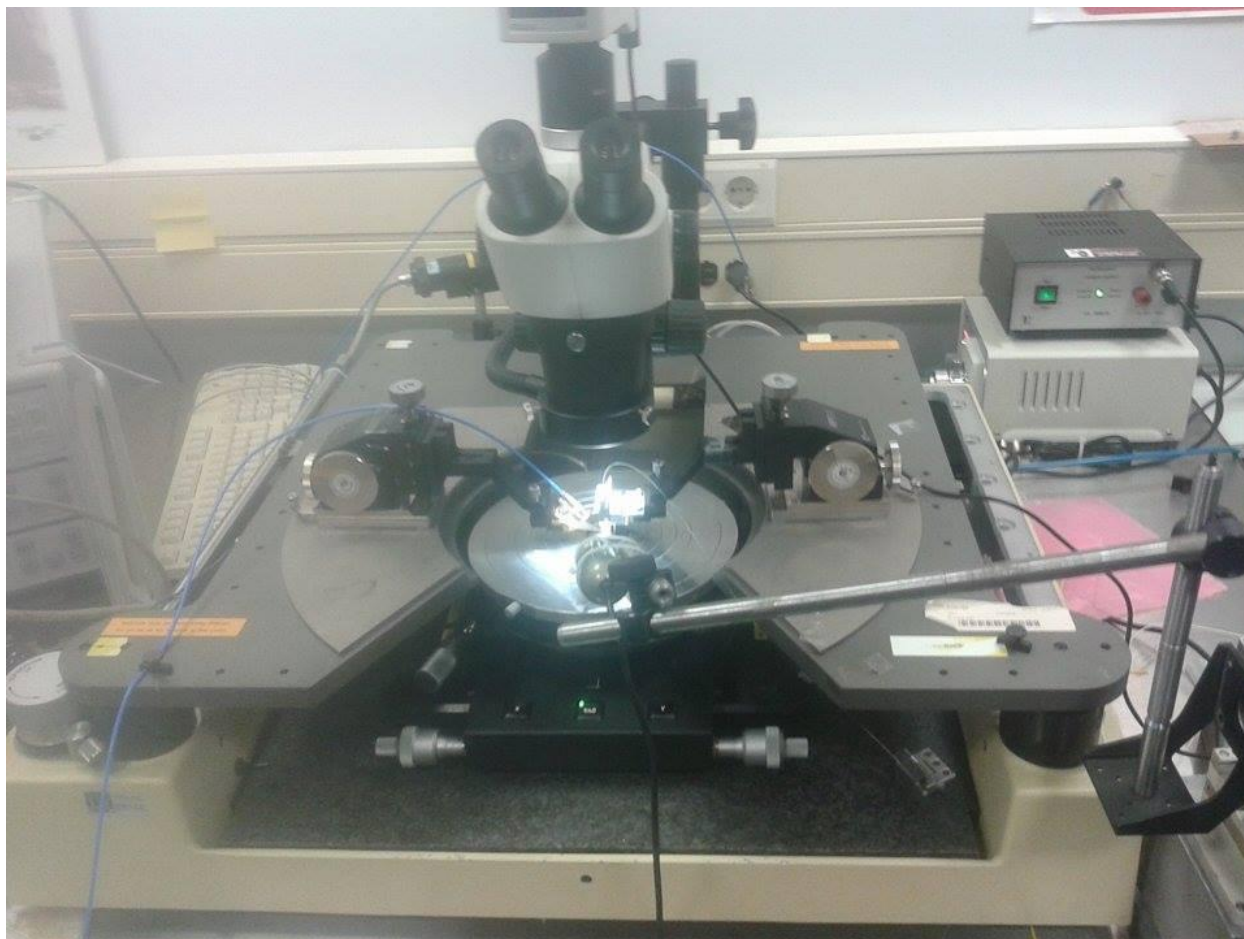
Αυτό ουσιαστικά που υλοποιείται είναι η μέτρηση του πλάτους και της απόκρισης φάσης διαφόρων συσκευών των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά, και η σύγκρισή τους με τις λαμβανόμενες μετρήσεις. Ρυθμίζεται - αντισταθμίζεται έτσι ο VNA ούτως ώστε οι λαμβανόμενες μετρήσεις όσο το δυνατόν να ταυτίζονται με τις δεδομένες, και έτσι ο VNA ώστε να «αντισταθμίζει» την μη ιδανική συμπεριφορά του (τόσο του ίδιου, όσο και των λοιπών εξαρτημάτων ή παραγόντων όπως για παράδειγμα: μη αμελητέο μήκος

μοαξονικών καλωδίων, μη καλή προσαρμογή των αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς κτλ).

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι βαθμονόμησης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από παράγοντες όπως τα μέσα και ο εξοπλισμός ο οποίος διατίθεται, η επιθυμητή ακρίβεια, ο χρόνος πραγματοποίησής της και η προσπάθεια που καταβάλλεται.

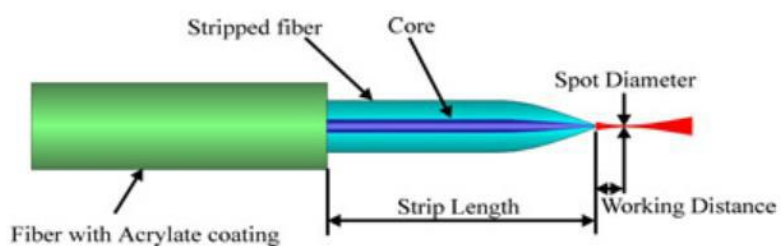
- **Probe Station**

Το probe station είναι μία εργαστηριακή διάταξη πάνω στην οποία τοποθετούνται τα ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα (chip) για την διεξαγωγή πειραμάτων. Περιλαμβάνει οπτικές ίνες εισόδου και εξόδου της οπτικής ισχύος, μικροκυματικούς ακροδέκτες (probe tips) για την ηλεκτρική οδήγηση του DUT, μία πλατφόρμα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς μελέτη ολοκληρωμένο οπτικό κύκλωμα και μία IR camera για να είναι δυνατή η επισκόπηση των δομών που περιλαμβάνει το chip. Επιπλέον, περιλαμβάνει έναν ελεγκτή θερμοκρασίας (Temperature controller- Peltier) για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της βάσης του chip. Η βάση του chip από πυρίτιο και λειτουργεί με βάση τις αρχές του θερμοηλεκτρικού φαινομένου και του φαινομένου Peltier για την απαγωγή της θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα ρυθμίζοντας κατάλληλα, με ηλεκτρονικό τρόπο τον ελεγκτή αυτόν, διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του υποστρώματος του chip παρά την μεταβαλλόμενη θερμοκρασία στα φύλλα χρυσού. Τέλος το probe station περιλαμβάνει μοχλούς για την κίνηση τόσο του chip όσο και των οπτικών ινών εισόδου και εξόδου κατά τους τρεις άξονες. Παρακάτω φαίνεται το probe station που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις:



Σχήμα 3.7 Probe Station

Στη διάταξη του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε lensed οπτική ίνα με διάμετρο ίχνους στα 6.5 μ m. Η lensed οπτική ίνα προσφέρει το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου εύρους (amplitude) με αποτέλεσμα να συλλέγει περισσότερο φως από το laser και να έχουμε λιγότερες απώλειες.



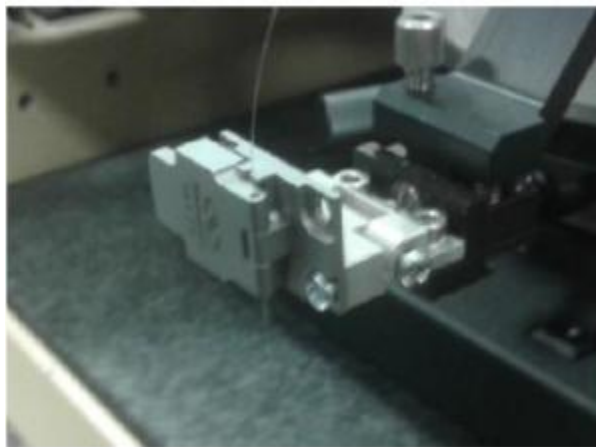
Σχήμα 3.8 Lensed οπτική ίνα [54]

➤ 3.3.2 Προετοιμασία – Μετρήσεις

Επειδή ο κύριος στόχος του probe station είναι η μέτρηση των S-παραμέτρων (συντελεστές S_{11} και S_{12}) του VCSEL, ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθούν μερικές τροποποιήσεις στο PM8 probe station, για να γίνει δυνατή η οπτοηλεκτρονική λειτουργία του. Οι τροποποιήσεις αυτές περιγράφονται παρακάτω.

Το δείγμα VCSEL τοποθετείται στην 8 ιντσών βάση του probe station και η πρόσβαση σε αυτά μπορεί να γίνει ηλεκτρικά μέσω μικροκυματικών ακροδεκτών (rf probe tips). Το rf probe tip συνδέεται στη θύρα 1 του 40GHz VNA μέσω ενός 40GHz ομοαξονικού καλωδίου. Επιπλέον το rf probe tip είναι μηχανικά προσδεμένο σε έναν χειροκίνητο μοχλό καθορισμού θέσης με υψηλή ακρίβεια (της τάξης των μm) μέσω του βραχίονα του probe station. Η ακριβής ευθυγράμμιση του probe tip με το δείγμα (VCSEL) διευκολύνεται με τη βοήθεια ενός οπτικού μικροσκοπίου.

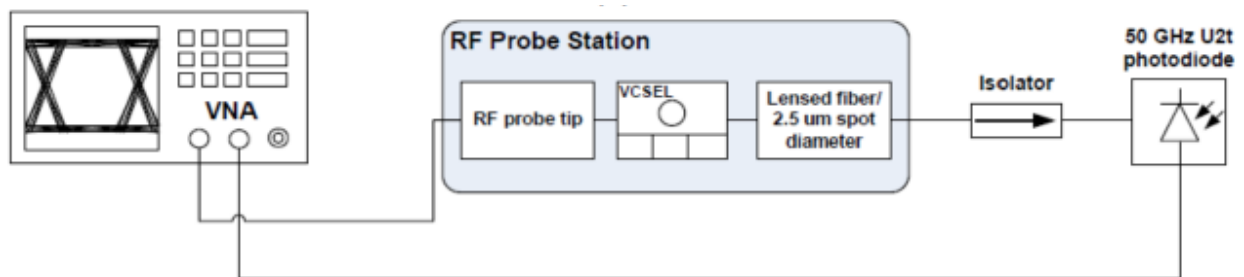
Το οπτικό σήμα συλλέγεται στην έξοδο του VCSEL μέσω μίας lensed οπτικής ίνας προσδεμένης σε έναν προσαρμοσμένο συγκρατητή (holder) (σχήμα 3.9). Ο holder της ίνας τοποθετείται σε έναν υψηλής ακρίβειας μοχλό καθορισμού θέσης με τη βοήθεια του βραχίονα του probe και μίας κατάλληλης μηχανικής διεπαφής. Αυτή η τοποθέτηση επιτρέπει την πλευρική και κάθετη ρύθμιση της ίνας πάνω από το VCSEL, όπως επίσης και τη ρύθμιση της γωνίας της ίνας από την κάθετη θέση, επιτρέποντας μετρήσεις και άλλων οπτικών δομών εκτός από VCSEL (πχ. grating couplers). Το σήμα που έχει συλληχθεί εισάγεται σε μία U2t φωτοδίοδο 50GHz, η οποία συνδέεται στην θύρα 2 του VNA έτσι ώστε να επιτρέπεται η μέτρηση της S_{21} παραμέτρου.



Σχήμα 3.9 Ρύθμιση του holder της οπτικής ίνας

Για να μπορέσουμε να λάβουμε αξιόπιστες μετρήσεις των S-παραμέτρων (συντελεστές S_{11} και S_{21}) είναι πολύ σημαντικό να διεξάγουμε με πολλή προσοχή τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούμε τα σφάλματα που εισάγονται από το σύστημα μέτρησης, και αποσυσχετίζουμε τα χαρακτηριστικά των στοιχείων της μετρητικής διάταξης από αυτά της προς μέτρηση συσκευής. Τα κυριότερα σφάλματα μέτρησης αποδίδονται συνήθως σε ατέλειες στην κατευθυντικότητα των couplers μέσα στον VNA και σε λάθη που προκαλούνται λόγω ανακλάσεων ανάμεσα στη θύρα εκείνη του VNA που στέλνει το rf σήμα και στο δείγμα (VCSEL). Επιπλέον τα rf καλώδια εισάγουν εξασθένηση, χρονική καθυστέρηση και μια αντίστοιχη μετατόπιση φάσης, επηρεάζοντας τις μετρήσεις του VNA. Η βαθμονόμηση του συστήματος βασίζεται σε μία τεχνική που ονομάζεται διανυσματική διόρθωση λαθών, κατά την οποία τα συστηματικά σφάλματα ελαχιστοποιούνται μέσα από τυποποιημένες διαδικασίες. Ο τύπος βαθμονόμησης που χρησιμοποιήσαμε στη διάταξη μας είναι η SOLT (Short-Open-Load-Through) βαθμονόμηση. Αυτή η μέθοδος είναι η απλούστερη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οπτοηλεκτρονικές μετρήσεις και απαιτεί ένα πλήθος δομών αναφοράς, όπως βραχυκύκλωμα, ανοικτοκύκλωμα, ένα φορτίο (συνήθως 50 Ohm) και μία γραμμή μεταφοράς. Μετά τη βαθμονόμηση το επίπεδο αναφοράς των μετρήσεων έρχεται στην είσοδο του προς εξέταση VCSEL και όλα τα συστηματικά σφάλματα ελαχιστοποιούνται.

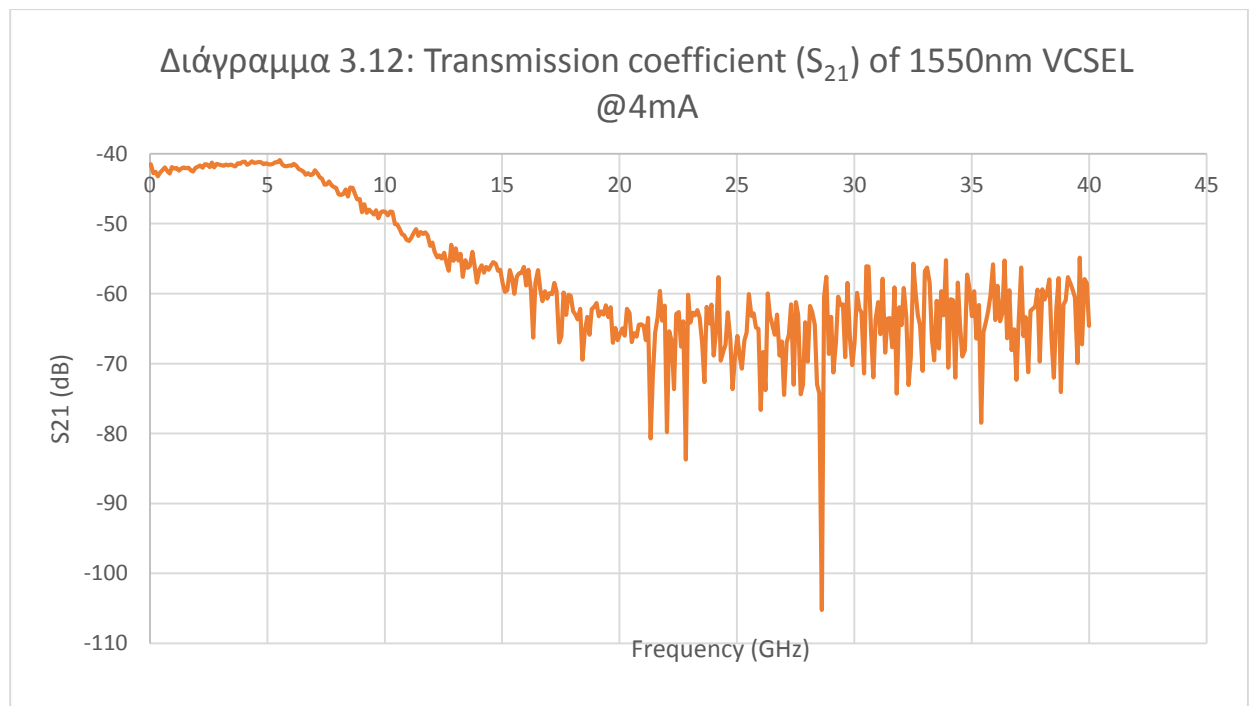
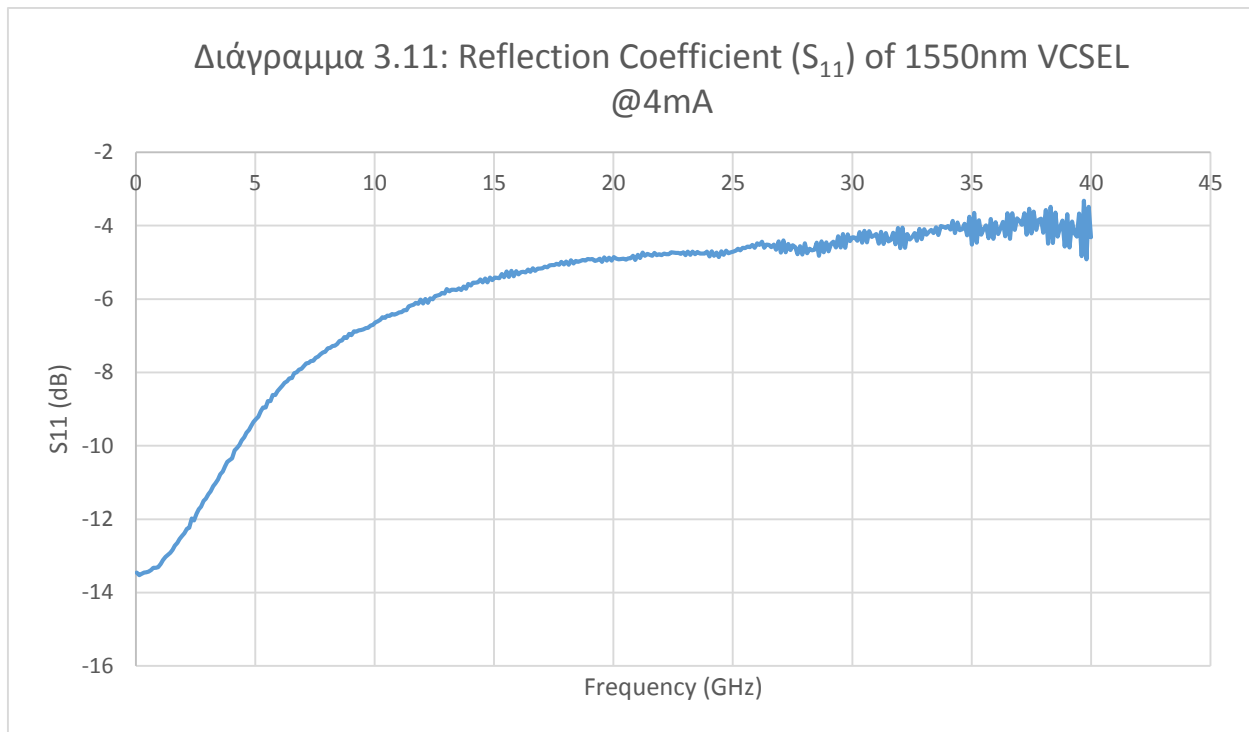
Σχηματικά, η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των S-παραμέτρων του VCSEL, φαίνεται στο Σχ. 3.10.



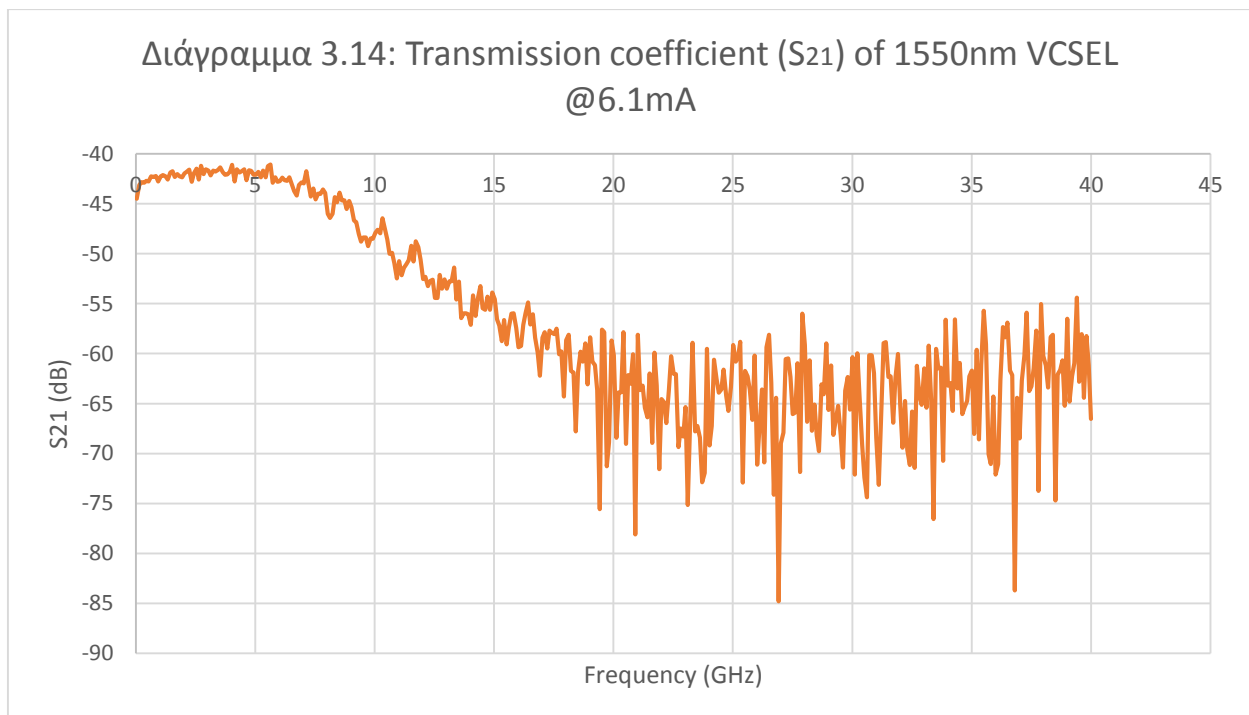
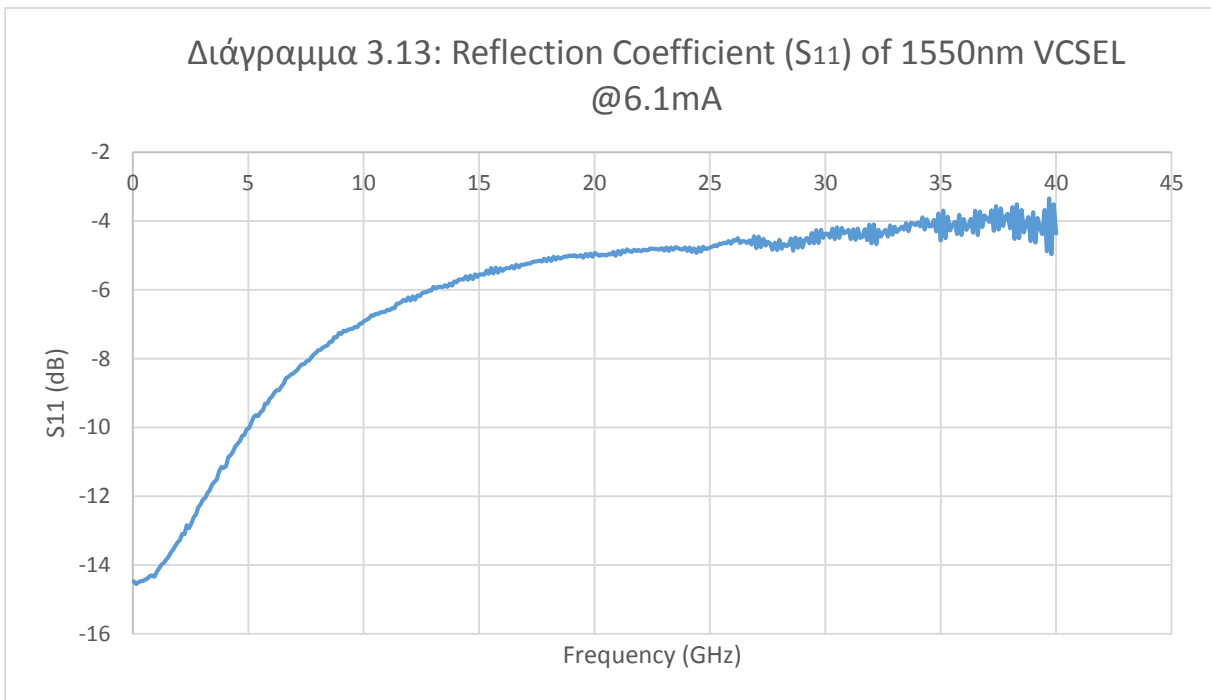
Σχήμα 3.10 Πειραματική Διάταξη Μέτρησης S-Παραμέτρων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι τα ακόλουθα:

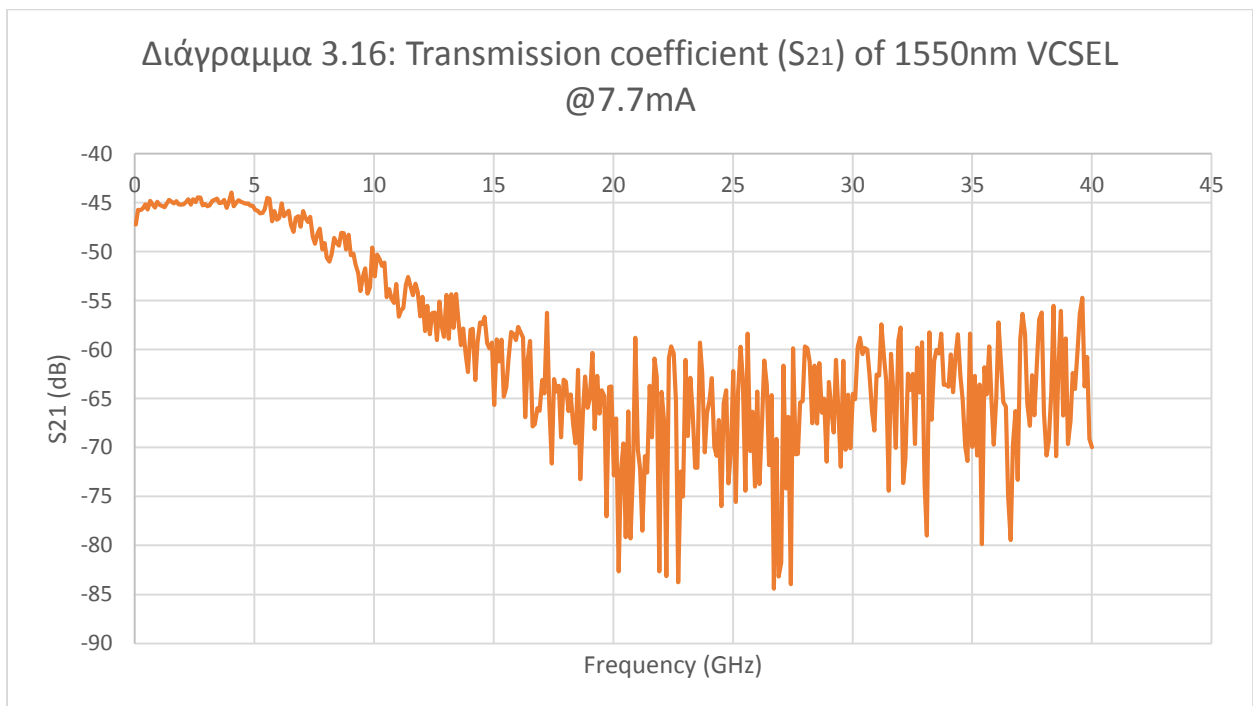
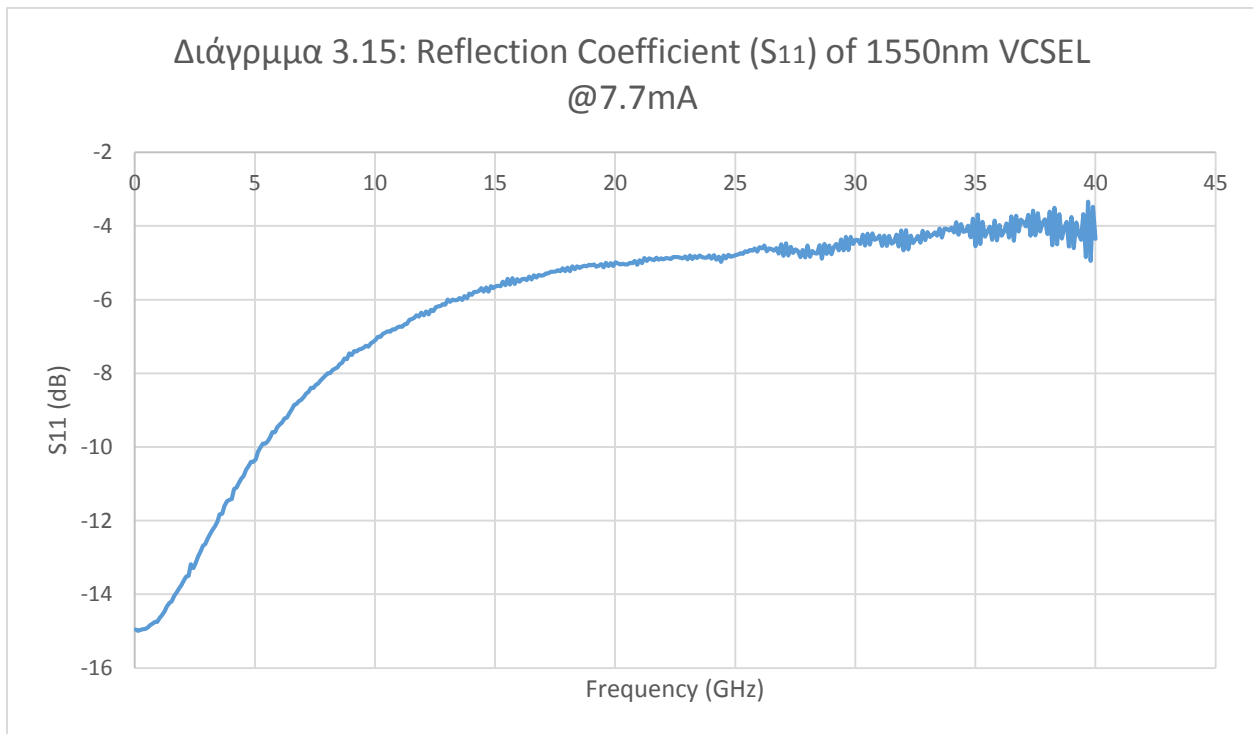
- Για $I=4\text{mA}$:



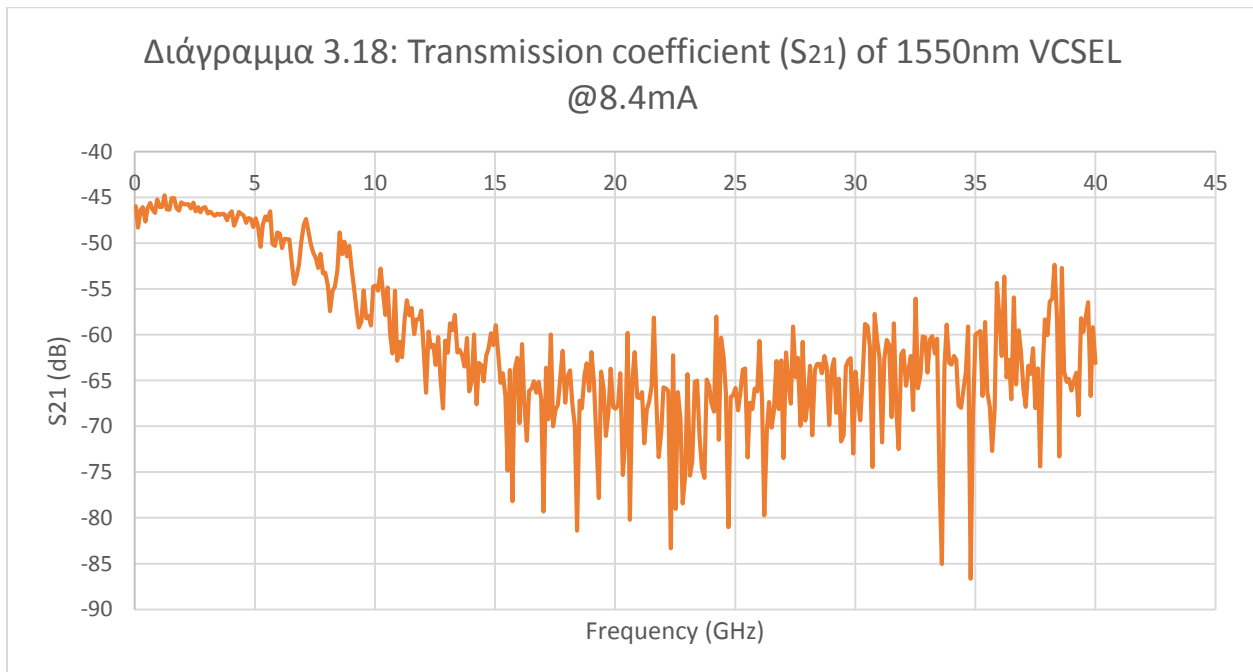
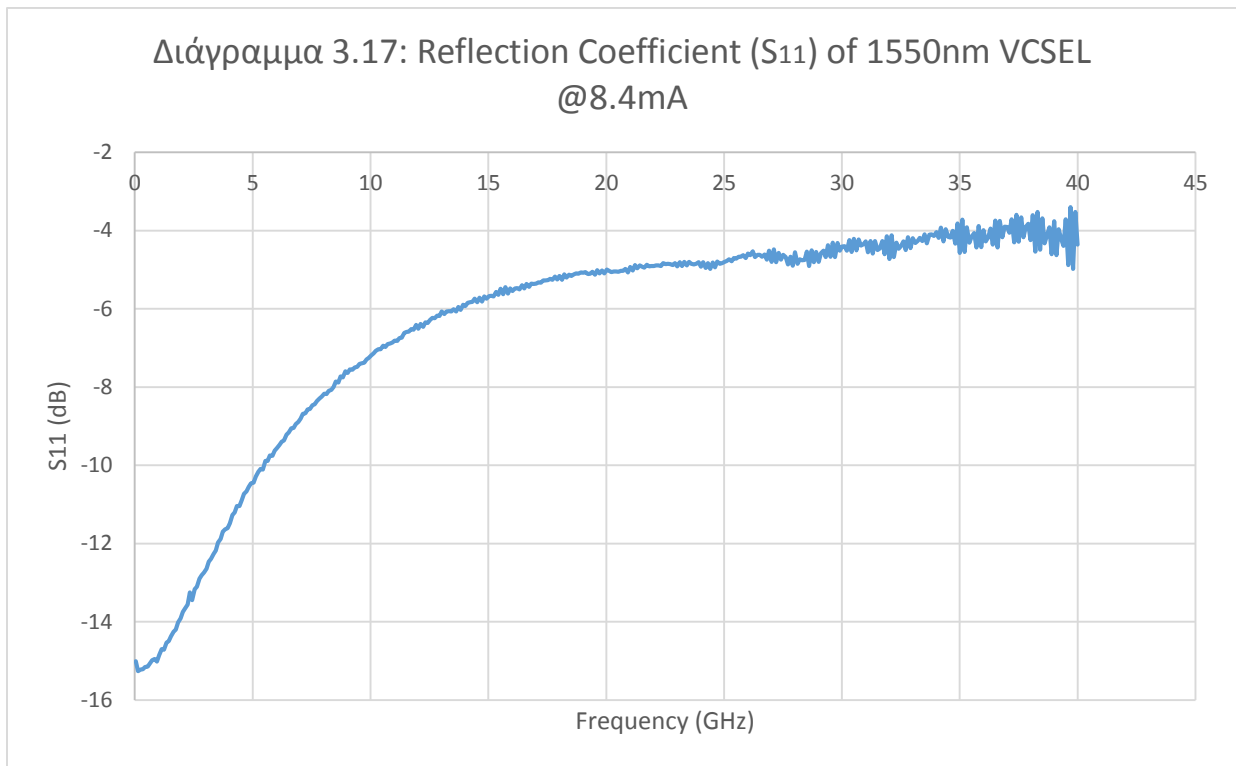
- Για $I=6.1$ mA:



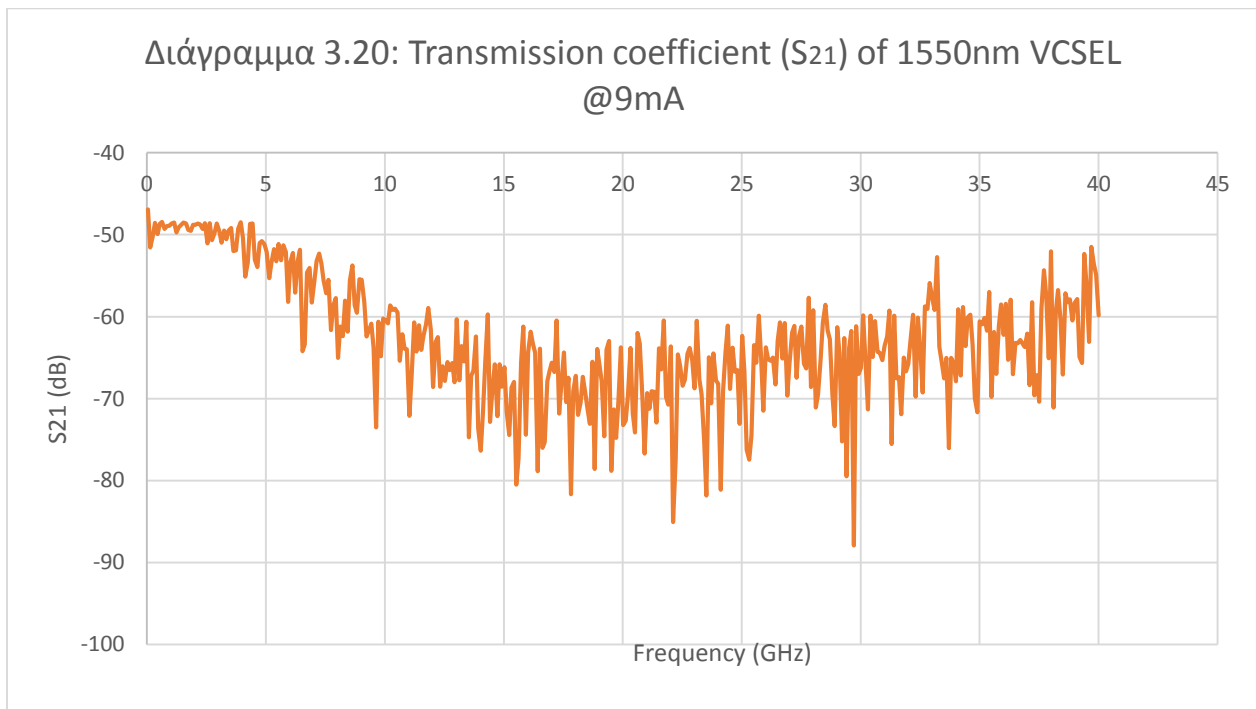
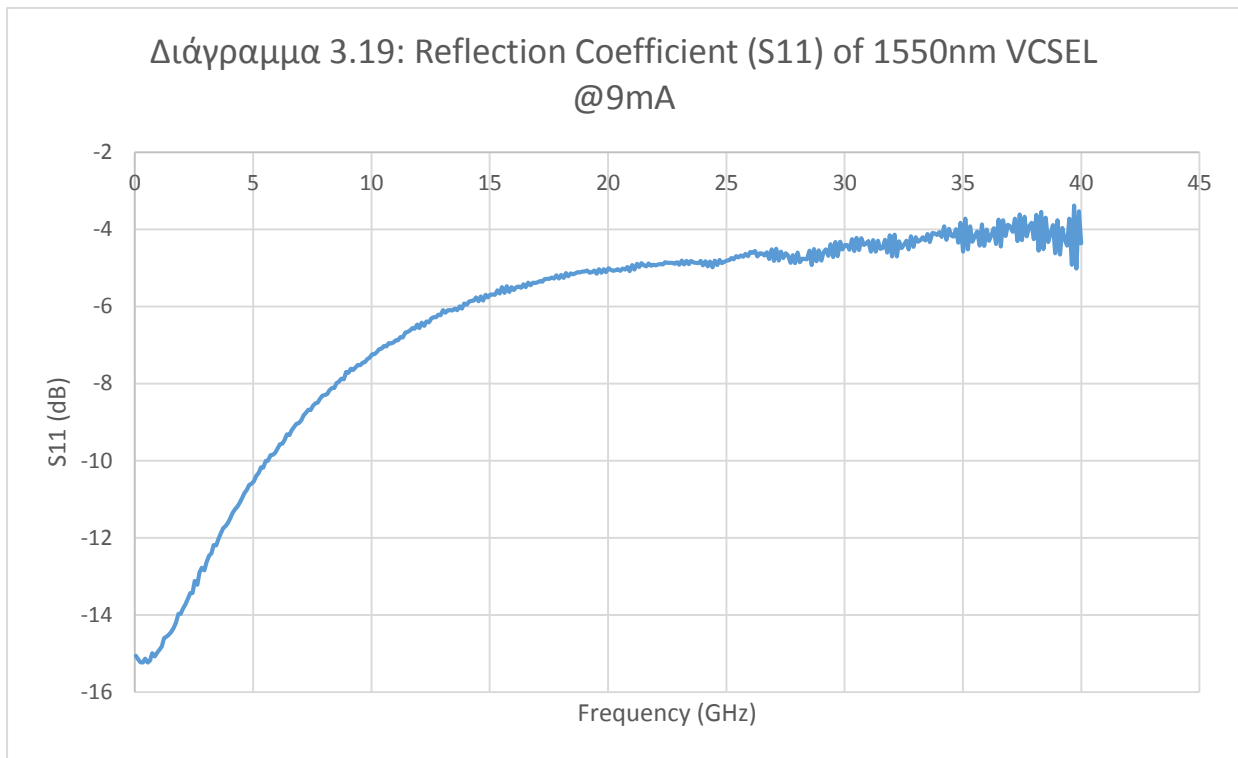
- Για $I=7.7$ mA :



- Για $I=8.4\text{ mA}$:



- Για $I=9\text{ mA}$:



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.1 Μοντελοποίηση VCSEL και Εξαγωγή Παραμέτρων

➤ 4.1.1 Εξισώσεις Ρυθμού Βασισμένες στο Θερμικό Μοντέλο VCSEL [35]

Τα χαρακτηριστικά της συσκευής VCSEL μπορούν να περιγράψουν από ένα σύστημα (2x2) πεπλεγμένων μη-γραμμικών εξισώσεων ρυθμού (non-linear rate equations). Καθώς οι εξισώσεις ρυθμού είναι παραδοσιακά εκφρασμένες σε όρους πυκνότητας φορέων και φωτονίων, χρησιμοποιούμε τους συμβολισμούς: τον αριθμό φορέων N και τον αριθμό φωτονίων S . Τα ηλεκτρόνια και οι οπές (που αντιπροσωπεύονται εδώ με N) εγχέονται στην ενεργό περιοχή του VCSEL από μια εφαρμοζόμενη τάση διαμέσου της ένωσης, και χάνονται μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής και άλλων (αυθόρμητη και μη ακτινοβολούσα εκπομπή) μονοπατιών. Οι διαδρομές μη ακτινοβολούσας και αυθόρμητης εκπομπής αποδίδονται μέσω της διάρκειας ζωής φορέων τ_n στην εξίσωση ρυθμού. Τα φωτόνια παράγονται από εξαναγκασμένη και αυθόρμητη εκπομπή, και χάνονται μέσω των μερικώς διαφανών καθρεφτών και άλλων (απορρόφηση-absorption, διασπορά-scattering) οπτικών απωλειών. Η συνολική οπτική απώλεια λαμβάνεται υπόψη μέσω της διάρκειας ζωής φωτονίων τ_p . Η εξαναγκασμένη εκπομπή εξαρτάται από το κέρδος στην ενεργό περιοχή και είναι συνάρτηση της πυκνότητας φορέων και (αδύνατη) συνάρτηση της πυκνότητας φωτονίων. Οι εξισώσεις ρυθμού μπορούν να περιγραφούν ως εξής[35]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{n_i \cdot (I - I_{\text{off}}(T))}{q} - \frac{N}{\tau_n} - \frac{G_o \cdot (N - N_o) \cdot S}{1 + \varepsilon S} \quad (4.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta N}{\tau_n} + \frac{G_o \cdot (N - N_o) \cdot S}{1 + \varepsilon S} \quad (4.2)$$

Όπου n_i είναι η αποδοτικότητα έγχυσης φορέων, G_o είναι ο συντελεστής κέρδους, N_o είναι ο αριθμός φορέων σε κατάσταση διαφάνειας (transparency), β είναι ο παράγοντας αυθόρμητης εκπομπής, ε είναι ο συντελεστής κορεσμού απολαβής, και το q είναι το

ηλεκτρικό φορτίο. Το ρεύμα οδήγησης είναι I και το $I_{\text{off}}(T)$ είναι ένα offset ρεύμα εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία, που περιγράφεται στη συνέχεια. Έχουν γίνει ορισμένες απλοποιήσεις στην περιγραφή του VCSEL και σημειώνονται κατάλληλα. Τα περισσότερα VCSELS που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι πολύτροπα (multi-mode) με σημαντικούς πληθυσμούς φωτονίων σε διάφορους εγκάρσιους ρυθμούς. Αντιπροσωπεύονται ακριβέστερα από μια εξίσωση ρυθμού για τον αριθμό φωτονίων S_1, S_2, \dots κ.λπ. σε κάθε εγκάρσιο τρόπο. Εδώ, χρησιμοποιείται ένας μοναδικός αριθμός φωτονίων $S = S_1 + S_2 + \dots$ για να περιγράψει τη συμπεριφορά της συσκευής. Το κέρδος της ενεργού περιοχής έχει προσεγγιστεί ως γραμμική συνάρτηση του N . Τέλος, οι επιπτώσεις της μεταφοράς φορέων έχουν αγνοηθεί, σύμφωνα και με το [36].

Η εκπεμπόμενη οπτική ισχύς P_o από το VCSEL είναι ανάλογη προς την πυκνότητα φωτονίων:

$$P_o = kS \quad (4.3)$$

Και μπορεί να εκφραστεί επίσης σε όρους ρεύματος οδήγησης:

$$P_o = \eta \cdot (I - I_{\text{tho}} - I_{\text{off}}(T)) \quad (4.4)$$

Εδώ το k είναι ένας παράγοντας κλίμακας που περιλαμβάνει την αποδοτικότητα σύζευξης εξόδου (output coupling efficiency) μέσω του διανεμημένου καθρέφτη Bragg στο VCSEL, της ενέργειας φωτονίων και της διάρκειας ζωής φωτονίων [36]. Η παράμετρος η αντιπροσωπεύει την αποδοτικότητα της κλίσης, και I_{tho} είναι το ρεύμα κατωφλίου σε μια θερμοκρασία αναφοράς. Το φως που εκπέμπεται από ένα VCSEL είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και αυτό ενσωματώνεται μέσω του όρου $I_{\text{off}}(T)$. Μια εμπειρική έκφραση χρησιμοποιείται για το ρεύμα offset:

$$I_{\text{off}} = \sum_{k=0}^M a_k T^k \quad (4.5)$$

Έχει βρεθεί ότι ένα πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού ($M=4$) παρέχει μια επαρκή περιγραφή. Σημειώνεται ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας στην αποδοτικότητα της κλίσης και στο ρεύμα κατωφλίου ενός VCSEL λαμβάνεται υπ' όψη με τον όρο $I_{\text{off}}(T)$.

Η εσωτερική θερμοκρασία T μπορεί να συσχετιστεί με την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 και την ηλεκτρική ισχύ εισόδου ως εξής:

$$T = T_0 + (I \cdot V - P_o) \cdot R_{th} - \tau_{th} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.6)$$

όπου V είναι η τάση που εφαρμόζεται και R_{th} είναι η θερμική αντίσταση της συσκευής. Ο τελευταίος όρος με τη σταθερά χρόνου τ_{th} αντιπροσωπεύει ένα άεργο φορτίο, ο οποίος εξαφανίζεται κάτω από συνθήκες dc. Επίσης, η εσωτερική θερμοκρασία δεν αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια υψηλού ρυθμού δεδομένων διαμόρφωσης (> 1 Gbps). Με αυξανόμενο ρεύμα οδήγησης, η θερμοκρασία T αυξάνεται προκαλώντας αύξηση στον όρο $I_{off}(T)$. Τελικά, σε ένα ορισμένο ρεύμα οδήγησης $\Delta I = \Delta I_{off}(T)$, το φως που εκπέμπεται δεν αυξάνεται περαιτέρω. Αυτό είναι το ρεύμα rollover και μια περαιτέρω αύξηση στο ρεύμα οδήγησης προκαλεί μείωση του P_o .

Ο υπολογισμός της εσωτερικής θερμοκρασίας απαιτεί τη γνώση της εφαρμοζόμενης τάσης και αυτό επιτυγχάνεται με τη μοντελοποίηση της χαρακτηριστικής IV του VCSEL. Τρεις διαφορετικές συναρτήσεις τάσης-ρεύματος προτείνουν οι *Mena et al.* [35], οι οποίες είναι:

$$V = c_0 R_s + c_1 \cdot \ln \left(1 + \frac{I}{c_2} \right) \quad (4.7)$$

$$V = \sum_{p=0}^P b_p I^p \cdot \sum_{q=0}^Q c_q T^q \quad (4.8)$$

$$V = \sum_{p=0}^P b_p I^p \quad (4.9)$$

Η εξίσωση (4.7) περιγράφει μία αντίσταση εν σειρά με μία δίοδο. Η εξίσωση (4.8) χειρίζεται την τάση ως πολυωνυμική συνάρτηση του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Η εξίσωση (4.9) είναι μία μειωμένη εκδοχή της (4.8) όπου η επίδραση της θερμοκρασίας έχει αγνοηθεί.

Το VCSEL μπορεί να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί με τη χρήση των εξισώσεων που έχουν περιγράψει ανωτέρω. Η μη-γραμμική φύση των εξισώσεων απαιτεί την

ανάπτυξη αλγορίθμου προσαρμογής καμπύλης (curve fitting algorithm) για εξαγωγή των παραμέτρων.

➤ 4.1.2 Αλγόριθμοι Προσαρμογής Καμπύλης (Curve Fitting Algorithms)

Δύο αλγόριθμους προσαρμογής καμπύλης θα χρησιμοποιήσουμε προκειμένου να προσαρμόσουμε τα πειραματικά δεδομένα χαρακτηριστικά της συσκευής. Ο πρώτος είναι η γραμμική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (linear least squares method) και ο δεύτερος είναι η μη-γραμμική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (non-linear least squares method) για τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα γινόμενα των ποσοτήτων.

Προσαρμογή Καμπύλης με τη Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (Linear Least Squares Curve Fitting)

Ο αλγόριθμος Προσαρμογής Καμπύλης με τη Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων χρησιμοποιείται για να εξαχθούν οι συντελεστές σε πολυωνυμικές εξισώσεις όπως η σχέση μεταξύ του offset ρεύματος και της θερμοκρασίας, και μεταξύ της τάσης του λείζερ και του ρεύματος. Έστω μια πολυωνυμική συνάρτηση f που περιγράφει γενικά τη σχέση μεταξύ ενός μεγέθους x και ενός μεγέθους y :

$$y = f(x) = \sum_{k=0}^L a_k x^k \quad (4.10)$$

Ο στόχος είναι να εξαχθούν οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών a_k από ένα σύνολο δεδομένων $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. Οι βέλτιστες τιμές λαμβάνονται με την ελαχιστοποίηση της διαφοράς των τετραγώνων:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (4.11)$$

Το αποτέλεσμα είναι ένα σύστημα L γραμμικών εξισώσεων με k άγνωστους συντελεστές $\{a_k\}$ ($L > k$) που μπορεί να λυθεί ως προς τους συντελεστές από τυποποιημένη γραμμική τεχνική της άλγεβρας, π.χ. την LU αποσύνθεση της μήτρας των συντελεστών. Μια άλλη προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί μια ορθοκανονική βάση αντί της αρχικής βάσης. Η ορθοκανονική βάση μπορεί να ανακτηθεί με τη διαδικασία ορθοκανονικοποίησης

Schmidt (Schmidt orthogonalization process), όπου χρησιμοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία εφαρμόζεται ευκολότερα στον υπολογιστή.

$$\begin{aligned}
 P_0(x) &= 1 \\
 P_1(x) &= (x - a_1)P_0(x) \\
 P_{k+1}(x) &= (x - a_{k+1})P_0(x) - \beta_k P_{k-1}(x) \\
 (k &= 0, 1, \dots, n - 1)
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Όπου το $P_k(x)$ είναι ένα πολυώνυμο τάξης k και

$$\alpha_{k+1} = \frac{\sum_{i=0}^m x_i P_k^2(x_i)}{\sum_{i=0}^m P_k^2(x_i)} = \frac{(xP_k, P_k)}{(P_k, P_k)}, \beta_k = \frac{\sum_{i=0}^m P_k^2(x_i)}{\sum_{i=0}^m P_{k-1}^2(x_i)} = \frac{(P_k, P_k)}{(P_{k-1}, P_{k-1})}$$

Προσαρμογή Καμπύλης με τη Μη-Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (Non-Linear Least Squares Curve Fitting)

Ο αλγόριθμος Προσαρμογής Καμπύλης με τη Μη-Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων από τις πιο σύνθετες εξισώσεις, όπως είναι οι εξισώσεις ρυθμού και οι στατικές ΛΙ εξισώσεις του μοντέλου. Και τα δύο είδη εξισώσεων δεν μπορούν να λυθούν άμεσα και περιέχουν πολλαπλές παραμέτρους. Έτσι, λαμβάνεται μια εντελώς διαφορετική σκέψη σε σχέση με τον αλγόριθμο Προσαρμογής Καμπύλης με τη Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων. Η τελική λύση επιτυγχάνεται με πολλαπλές προσπάθειες. Ένα ή περισσότερα δεδομένα που μετρήθηκαν χρησιμοποιούνται ως στοιχείο-στόχος. Για κάθε βρόχο, ένα πιθανό σύνολο τιμών παραμέτρων προετοιμάζεται και έπειτα το στοιχείο-στόχος υπολογίζεται με τις εξισώσεις. Οι διαφορές συγκεντρώνονται μαζί και πολλαπλασιάζονται με το αντίστοιχο βάρος χωριστά. Και αυτό είναι το λάθος του τρέχοντος συνόλου των τιμών των παραμέτρων. Κατά τη διάρκεια της πολλαπλής προσπάθειας, το ελάχιστο λάθος μπορεί να ανακτηθεί και το αντίστοιχο σύνολο τιμών των παραμέτρων λαμβάνεται ως τελική λύση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, η επιλογή των πιθανών τιμών είναι πολύ σημαντική. Ένα λογικό εύρος της τρέχουσας εξαγόμενης μεταβλητής πρέπει να αποτελεί προϋπόθεση. Εντός του εύρους, λαμβάνεται μια μέθοδος παραγωγής τυχαίων τιμών και

έτσι εξάγεται το συγκεκριμένο σύνολο τιμών. Έτσι υπάρχει το ζήτημα με αυτήν τη μέθοδο για το πόσες τιμές επιλέγονται. Εάν ο αριθμός είναι πάρα πολύ μικρός, η βέλτιστη τιμή δεν μπορεί να επιλεγεί σωστά. Και εάν θεωρήσουμε περισσότερες λεπτομέρειες, ο υπολογισμός θα κοστίζει πάρα πολύ σε χρόνο. Για να επιλυθεί αυτό το ζήτημα, παράγεται μια επαναληπτική διαδικασία. Το εύρος μειώνεται βαθμιαία μαζί με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων.

4.2 Εξαγωγή των Παραμέτρων του VCSEL

Η διαδικασία εξαγωγής των διαφόρων συντελεστών από τις μετρηθείσες χαρακτηριστικές του VCSEL περιγράφεται σε αυτήν την υποενότητα. Συνήθως οι μετρούμενες χαρακτηριστικές ενός VCSEL περιλαμβάνουν τις LI, VI και την απόκριση διαμόρφωσης μικρού σήματος S_{21} . Η μέτρηση σε πολλαπλές θερμοκρασίες παρέχει ένα πληρέστερο σύνολο στοιχείων για την παραγωγή του μοντέλου του VCSEL.

➤ 4.2.1 Συντελεστές στις LI Καμπύλες

Μια τυπική καμπύλη LI παρουσιάζει ένα ρεύμα κατωφλίου, μια γραμμική αύξηση στη ισχύ εξόδου P_o για μικρά ρεύματα πάνω από το ρεύμα κατωφλίου, και ένα σημείο «ανατροπής» (rollover point) πέρα από το οποίο το P_o μειώνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα. Οι εξισώσεις (4.4), (4.5), (4.6) περιγράφουν την καμπύλη LI και παρουσιάζονται συγκεντρωμένες ακολούθως ως αναφορά.

$$\begin{cases} P_o = \eta \cdot (I - I_{tho} - I_{off}(T)) \\ T = T_0 + (I \cdot V - P_o) \cdot R_{th} \\ I_{off} = \sum_{k=0}^M a_k T^k \end{cases}$$

Δεδομένου ότι η καμπύλη LI συλλέγεται υπό συνθήκες dc, ο όρος dT/dt στην εξίσωση (4.6) εξαλείφεται. Η θερμική σταθερά χρόνου τ_{th} για ένα VCSEL είναι της τάξης του 1 μsec . Κατά συνέπεια ο όρος dT/dt μπορεί να αγνοηθεί και υπό συνθήκες dc και υπό τη διαμόρφωση πολλών Gbps (multi-Gbps modulation). Η ένωση έχει επαρκή χρόνο να προσαρμοστεί στο ρεύμα οδήγησης υπό συνθήκες dc ενώ κάτω από διαμόρφωση

πολλών Gbps, η εσωτερική θερμοκρασία δεν έχει το χρόνο να προσαρμοστεί στο μεταβαλλόμενο ρεύμα οδήγησης. Η μη γραμμική προσαρμογή καμπύλης με ελάχιστα τετράγωνα χρησιμοποιείται προκειμένου να εξαχθούν οι συντελεστές η , I_{th0} , R_{th} , και $\{a_k\}$ με $M = 4$.

➤ 4.2.2 Συντελεστές στις καμπύλες VI

Τρία αναλυτικά πρότυπα προτάθηκαν στην εξίσωση (4.7), την εξίσωση (4.8) και την εξίσωση (4.9) για να μοντελοποιηθεί η καμπύλη VI. Η εξίσωση (4.7) προσεγγίζεται περαιτέρω από την:

$$V = c_0 + c_1 \cdot I + c_2 \cdot \log(I) \quad (4.13)$$

για να διευκολύνει την Προσαρμογή Καμπύλης με τη Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων. Οι συντελεστές $\{c_i\}$ εξάγονται τότε από τη μετρηθείσα VI καμπύλη. Ομοίως, οι συντελεστές στην εξίσωση (4.9) μπορούν να ληφθούν από μία γραμμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων. Η επίδραση της θερμοκρασίας αγνοείται τόσο στην εξίσωση (4.9) όσο και στην εξίσωση (4.13).

Η εξίσωση (4.8) λαμβάνει τη θερμοκρασία υπ' όψη με τη χρήση μιας πολυωνυμικής ανάπτυξης τόσο ως προς το ρεύμα όσο και ως προς τη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία υπολογίζεται από την εξίσωση (4.6) σε κάθε ρεύμα χρησιμοποιώντας τη θερμική αντίσταση R_{th} που λαμβάνεται με την προσαρμογή της καμπύλης LI. Η εξίσωση (4.8) μπορεί να αναπτυχθεί ως εξής:

$$V = p_0 + p_{11}IT + p_{12}IT^2 + p_{21}I^2T + \dots + p_{ij}I^i T^j + \dots + p_{PQ}I^P T^Q$$

Και οι συντελεστές μπορούν να βρεθούν από τη γραμμική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ο συνολικός αριθμός συντελεστών είναι $PQ-1$.

➤ 4.2.3 Συντελεστές στις Εξισώσεις Ρυθμού

Οι εξισώσεις ρυθμού εκφράζονται σε όρους αριθμού φορέων και φωτονίων, τα οποία δεν μπορούν να μετρηθούν πειραματικά. Σε μόνιμη κατάσταση, ο ρυθμός αλλαγής του αριθμού των φορέων και των φωτονίων είναι μηδενικός με συνέπεια:

$$\frac{n_i \cdot (I - I_{\text{off}}(T))}{q} - \frac{N}{\tau_n} - \frac{G_0 \cdot (N - N_0) \cdot S}{1 + \varepsilon S} = 0 \quad (4.15)$$

$$-\frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta N}{\tau_n} + \frac{G_0 \cdot (N - N_0) \cdot S}{1 + \varepsilon S} = 0 \quad (4.16)$$

Αντικαθιστώντας το S με P_0 και k στην εξίσωση (4.3), συνδυάζοντας την εξίσωση (4.4) όπου το $I_{\text{off}}(T)$ μπορεί να αντικατασταθεί και ενώνοντας τις ανωτέρω δύο εξισώσεις μαζί, παράγεται μία μόνο εξίσωση που συσχετίζει τα μετρηθέντα δεδομένα (P_0 , I , και V) και τις παραμέτρους (η_i , β , τ_n , τ_p , G_0 , N_0 , ε).

$$I_{\text{cur}} = \frac{q \cdot (G_0 \beta P_0^2 / k^2 + (1 + G_0 N_0 \tau_p (1 - \beta) P_0) / k)}{\eta_i \tau_p (\beta + G_0 \tau_n P_0 / k)} + I_{\text{th0}} + I_{\text{off}} \quad (4.17)$$

$$N_s = P_0 / (k \tau_p) + \frac{G_0 N_0 P_0 / (k + \varepsilon P_0)}{\beta / \tau_n + G_0 P_0 / (k + \varepsilon P_0)}$$

$$S_s = \frac{\eta_i (I - I_{\text{off}}) / q - N_s / \tau_n}{G_0 (N_s - N_0)} \quad (4.18)$$

$$P_{od} = k S_s$$

Εάν η καμπύλη απόκρισης συχνότητας για το μικρό διαμορφωμένο σήμα μπορεί να παρασχεθεί, η εξαγωγή μπορεί να υιοθετήσει αυτό το δυναμικό χαρακτηριστικό. Μια μέθοδος εξαγωγής των παραμέτρων βασίζεται σε τροποποίηση των εξισώσεων ρυθμού [37],[38], και τότε η απόκριση συχνότητας για τις τρέχουσες εξισώσεις ρυθμού μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (4.19).

$$H(f) = \frac{Z}{(j2\pi f)^2 + j2\pi fY + Z} \quad (4.19)$$

$$\text{Όπου } Y = \frac{G_0 P_0}{k + \varepsilon P_0} + \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_n} - \frac{G_0(N_s - N_0)}{(1 + \varepsilon P_0/k)^2} \text{ και}$$

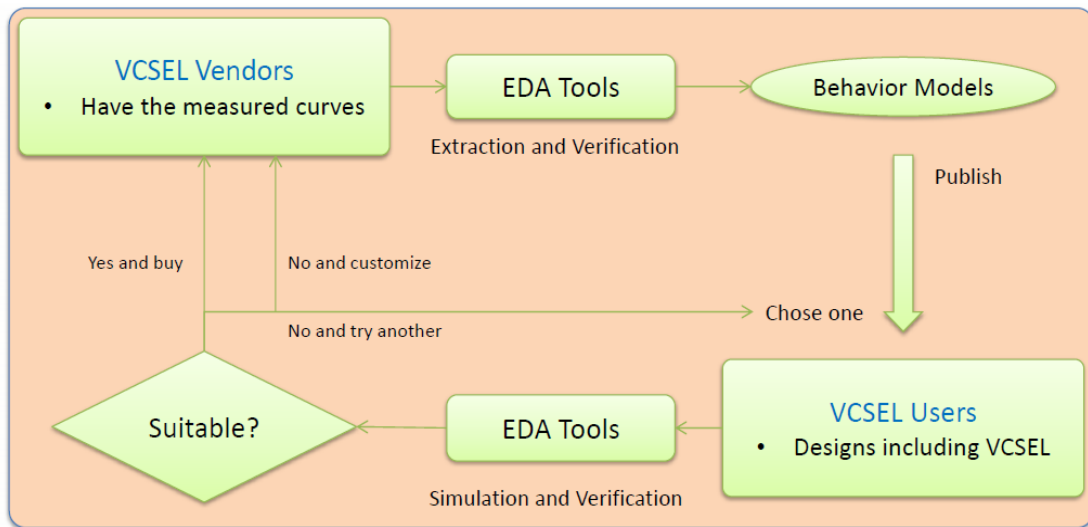
$$Z = \frac{G_0 P_0}{(k + \varepsilon P_0)\tau_p} + \frac{(\beta - 1)G_0(N_s - N_0)}{(1 + \varepsilon P_0/k)^2\tau_n} + \frac{1}{\tau_n\tau_p}.$$

Σε αυτό το βήμα, εφαρμόζεται ο μη-γραμμικός αλγόριθμος προσαρμογής καμπύλης. Το τελικό λάθος αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος προέρχεται από τη στατική σχέση που περιγράφει πόσο τρέχον ρεύμα απαιτείται για να μετατραπεί σε οπτική ισχύ. Το I_{cur} είναι το επιδρόν ρεύμα για την οπτική μετατροπή. Η εξίσωση (4.17) χρησιμοποιεί αυτό το ρεύμα ως στόχο. Το σφάλμα μέτρησης λαμβάνεται από τη σύγκριση μεταξύ του μετρούμενου και του υπολογισμένου. Το δεύτερο μέρος προέρχεται από το δυναμικό υπολογισμό της οπτικής ισχύος. Σε αυτόν τον υπολογισμό, η οπτική ισχύς αποκτάται από τον πολλαπλασιασμό του παράγοντα κλίμακας και του αριθμού των φωτονίων. Στην εξίσωση (4.18), το N_s είναι ο αριθμός των φορέων για την παρούσα στατική περίπτωση, οποίος και υπολογίζεται πρώτος. Με την εισαγωγή του N_s στη δεύτερη εξίσωση, μπορεί να βρεθεί ο αριθμός των φωτονίων S_s . Κατόπιν, το P_{od} μπορεί εύκολα να βρεθεί. Το υπολογισμένο P_{od} και το μετρηθέν P_{od} συμβάλλουν στο δεύτερο μέρος του τελικού λάθους. Το τελευταίο μέρος προέρχεται από το αποτέλεσμα της προσαρμογής της καμπύλης απόκρισης συχνότητας. Η εξίσωση (4.19) χρησιμοποιείται για να λάβουμε την υπολογισμένη απόκριση συχνότητας. Σε σύγκριση με μετρούμενα, λαμβάνεται το τελευταίο μέρος του σφάλματος. Τα τρία μέρη των σφαλμάτων διατίθενται με ένα προκαθορισμένο βάρος. Οι βέλτιστες τιμές παραμέτρων αποκτώνται όταν επιτυγχάνεται το ελάχιστο σφάλμα.

Μέχρι τώρα, παρουσιάστηκε η διαδικασία υπολογισμού των τιμών των παραμέτρων. Αυτό είναι το σύνολο που μπορεί να αντιπροσωπεύσει το τρέχον VCSEL. Η ολοκλήρωση των τιμών των παραμέτρων και των εξισώσεων ρυθμού αποτελεί το μοντέλο συμπεριφοράς. Η προσομοίωση του VCSEL είναι επίσης βασισμένη στις εξισώσεις ρυθμού. Με την εξαγωγή, το VCSEL έχει οριστεί επιτυχώς σε ένα μοντέλο συμπεριφοράς. Με την αντικατάσταση της παραμέτρου με μια συγκεκριμένη τιμή και τον υπολογισμό των εξισώσεων ρυθμού βήμα-βήμα στο πεδίο του χρόνου εγκαίρως, προσομοιάζεται η συμπεριφορά του VCSEL.

4.3 Επαλήθευση του Μοντέλου VCSEL

Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα αλλά και όπως γίνεται κατανοητό από την προηγούμενη ανάλυση, η εξαγωγή των παραμέτρων πραγματοποιείται στην πράξη με τη χρήση κάποιου εργαλείου σχεδίασης ηλεκτρονικών συστημάτων, ειδικά όσον αφορά την εφαρμογή του μη-γραμμικού αλγορίθμου προσαρμογής καμπύλης καθώς δεν επιδέχεται αναλυτικής λύσης.



Σχήμα 4.1 Διαδικασία Προσομοίωσης & Επαλήθευσης Μοντέλου VCSEL χρήσει εργαλείου σχεδίασης ηλεκτρονικών συστημάτων (EDA tool) [50]

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, λοιπόν, γίνεται η προσπάθεια εξαγωγής παραμέτρων και επαλήθευσης του μοντέλου μέσα από αναλυτικές λύσεις.

➤ 4.3.1 Προσομοίωση καμπύλης VI

Για τις παραμέτρους της καμπύλης VI επιλέγουμε τη σχέση τάσης-ρεύματος που δίδεται από την εξίσωση (4.13)

$$V = c_0 + c_1 \cdot I + c_2 \cdot \log(I)$$

Για τον προσδιορισμό των $\{c_i\}$ εφαρμόζουμε τη Προσαρμογή Καμπύλης με τη Μη-Γραμμική Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων, κάνοντας χρήση του MS Excel και συγκεκριμένα του Add-on Solver. Αρχικά, σε δύο στήλες τις οποίες ονομάζουμε "x" και "y"

καταγράφουμε τις μετρήσεις ρεύματος και τάσης αντίστοιχα που πήραμε για την 1^η τιμή θερμοκρασίας (T=20°C). Στην επόμενη στήλη, έστω "y_{hat}", θα υπολογιστούν οι τιμές της τάσης που θα προκύψουν έπειτα από την προσομοίωση. Τα στοιχεία y_{hat,i} προκύπτουν εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.13), δηλαδή με όρους Excel:

$$y_{hat,i} = Const_a + Const_b * xValues + Const_c * LOG10(xValues)$$

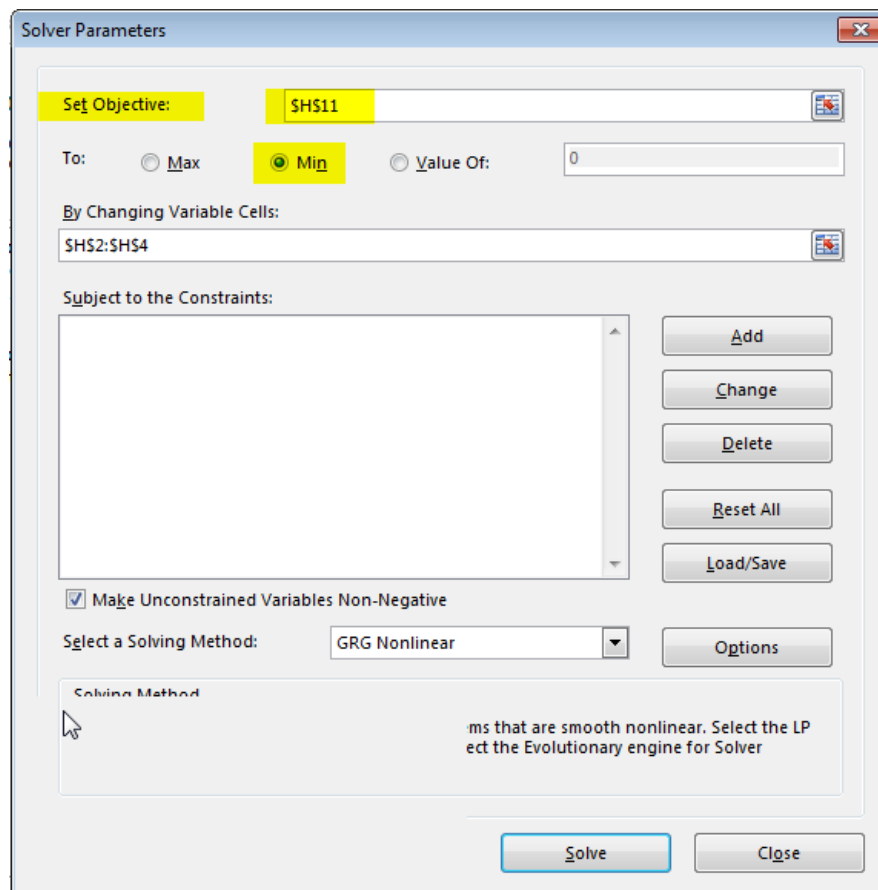
Για i=1...k, k ο αριθμός των μετρήσεων και όπου xValues η στήλη των μετρήσεων του εγχεόμενου ρεύματος και Const_a, Const_b, Const_c οι προσδιοριστέες παράμετροι.

Στην επόμενη στήλη υπολογίζουμε το τετράγωνο των διαφορών $y_i - y_{hat,i}$. Η εικόνα μέχρι στιγμής είναι η ακόλουθη:

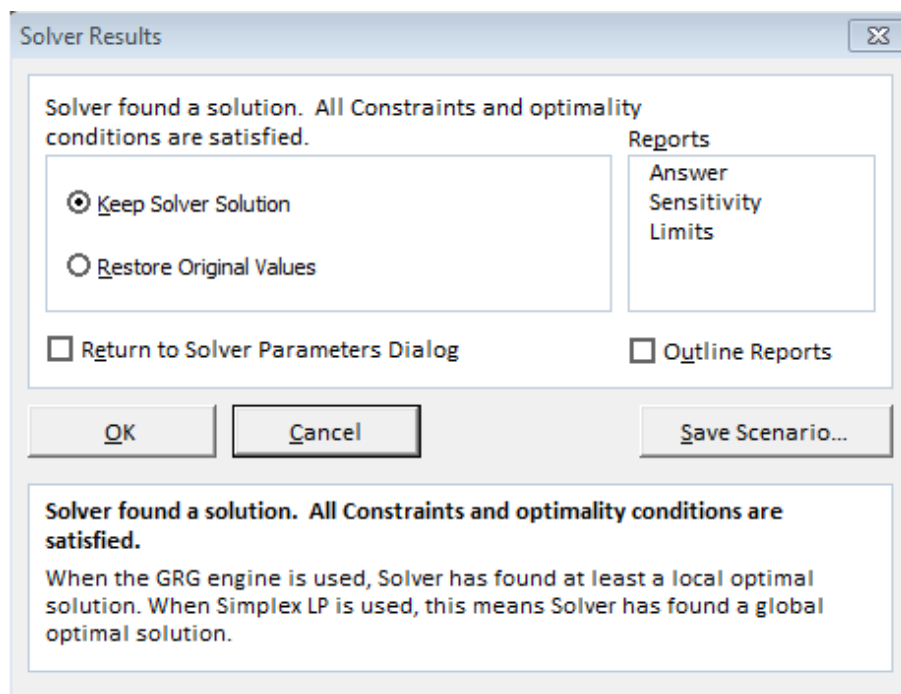
	x	y	yhat	(y - yhat) ²
1	0,6	0,92	0,924946	2,44595E-05
2	1,8	1,08	1,070454	9,11297E-05
3	2,3	1,13	1,118645	0,000128933
4	2,9	1,17	1,172828	7,99803E-06
5	3,5	1,22	1,224452	1,9821E-05
6	4	1,26	1,266116	3,74096E-05
7	4,6	1,31	1,314916	2,41651E-05
8	5	1,34	1,346876	4,7279E-05
9	6	1,42	1,425248	2,75403E-05
10	6,3	1,45	1,448414	2,5154E-06
11	6,5	1,47	1,463784	3,86443E-05
12	6,7	1,48	1,479098	8,14177E-07
13	6,9	1,5	1,49436	3,18132E-05
14	7,5	1,54	1,539861	1,92089E-08

Έπειτα, σε ένα νέο κελί υπολογίζουμε το άθροισμα των τετραγώνων αυτών, το οποίο τίθεται και ως στόχος ("Set Objective") ελαχιστοποίησης του Solver, όπως φαίνεται παρακάτω:

	F	G	H
			Initial guesses, final solver
1		Const_a	results
2		Const_a	0,9142
3		Const_b	0,067708
4		Const_c	0,13468
5		Const_d	
6		Const_e	
7		Const_f	
8		Const_g	
9		Const_h	
10			
11		SS	0,000483



Στη συνέχεια, στο πεδίο "By Changing Variable Cells" επιλέγουμε τα κελιά όπου θα υπολογιστούν οι παράμετροι, στα οποία έχουμε δώσει αντίστοιχα τις ονομασίες "Const_a", "Const_b" και "Const_c". Τέλος, δίνουμε αρχικές τιμές στις παραμέτρους, επιλέγουμε στο Solver μη-γραμμική μέθοδο επίλυσης και πατάμε Solve.

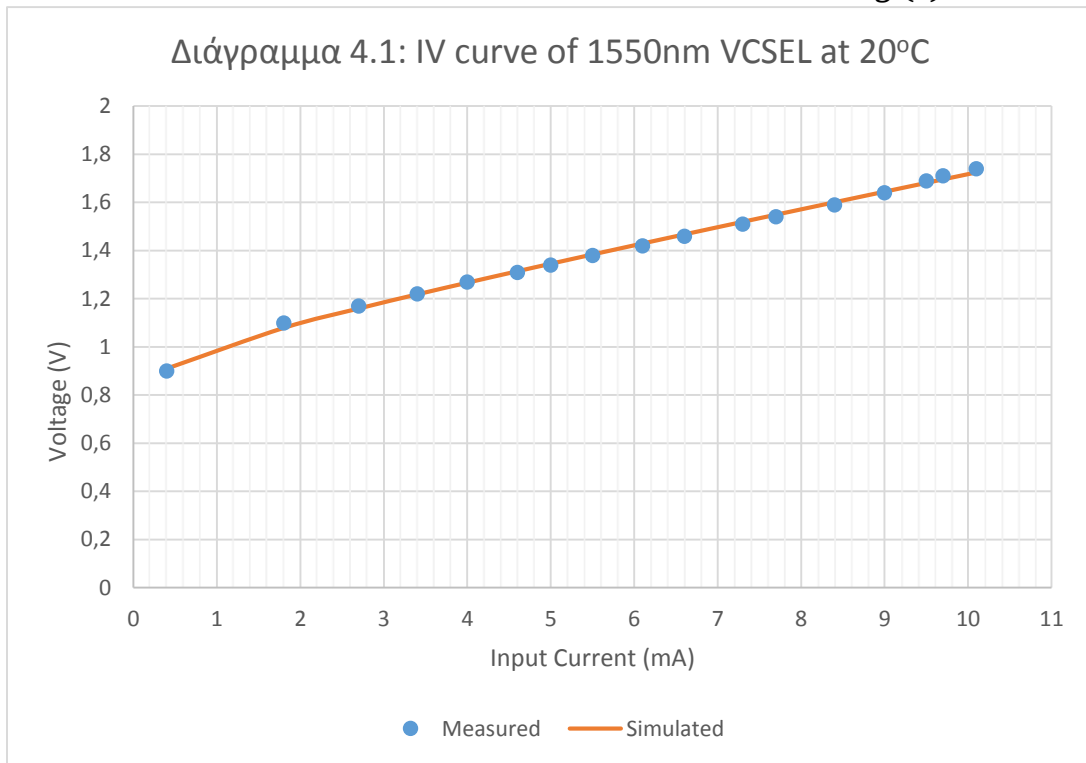


Παρατηρούμε ότι το πρόβλημα έχει λύση οπότε και ανανεώνεται η στήλη με τις παραμέτρους, καθώς υπολογίζονται και οι νέες τιμές της τάσης με βάση την εξίσωση που προέκυψε. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες τιμές θερμοκρασίας.

Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

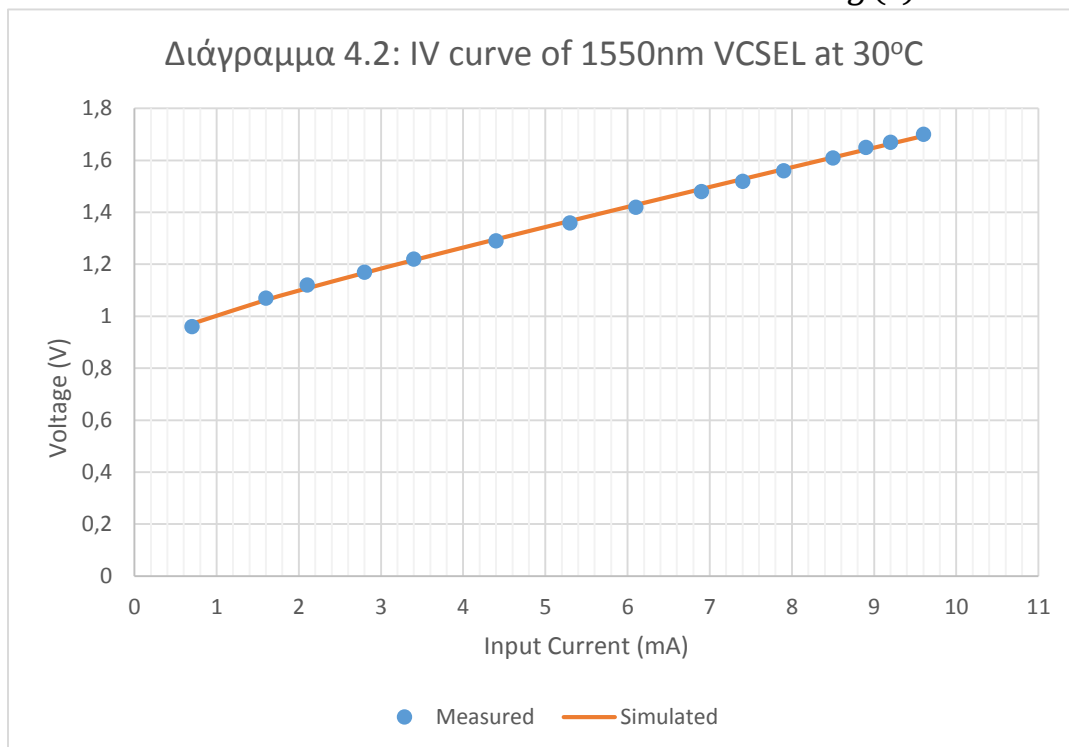
- Για $T=20^{\circ}\text{C}$:

$$V = 0.927839 + 0.067662 \cdot I + 0.113307 \cdot \log(I)$$



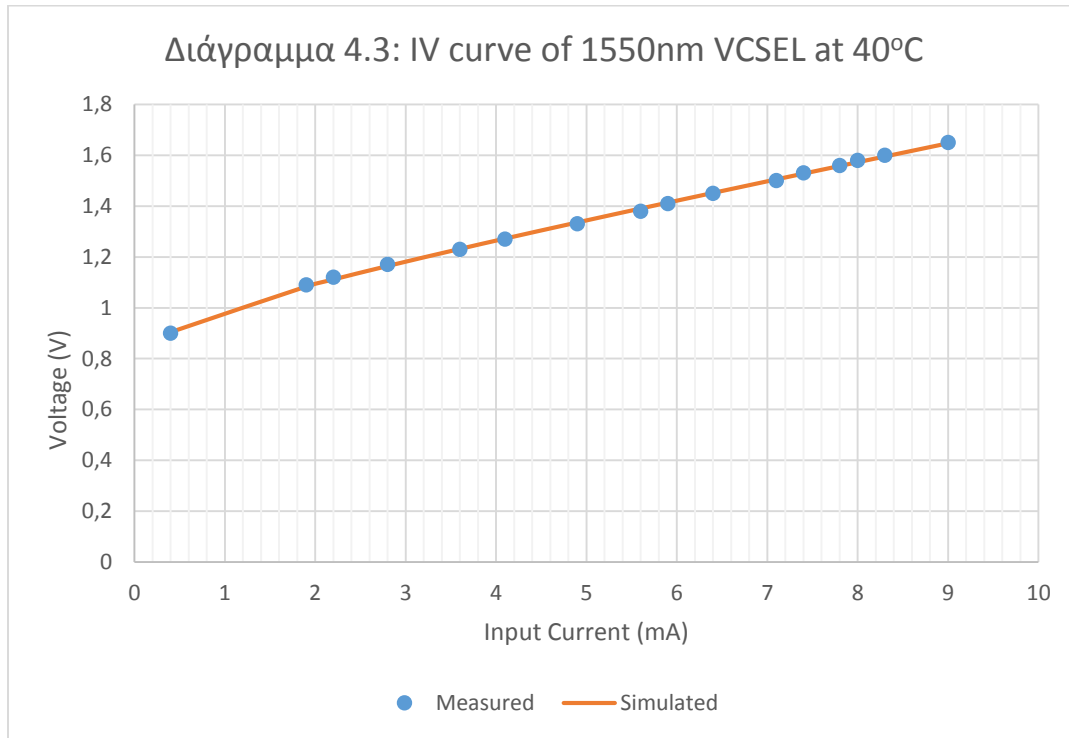
- Για $T=30^{\circ}\text{C}$:

$$V = 0.93205 + 0.07152 \cdot I + 0.075934 \cdot \log(I)$$



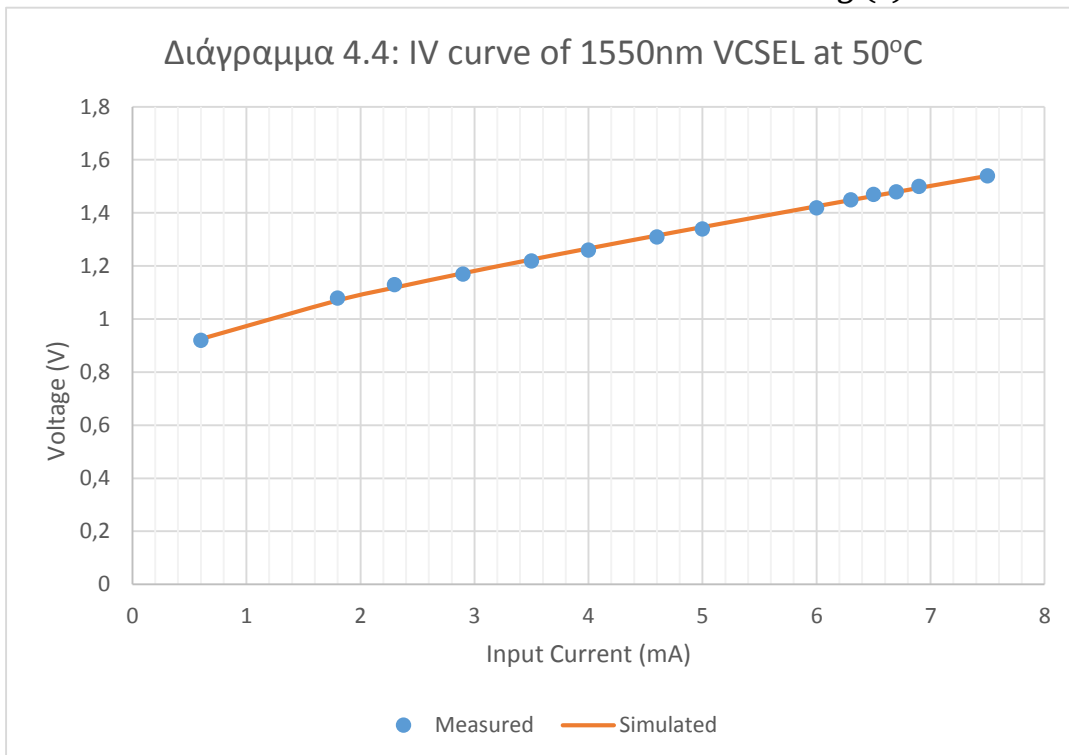
- Για $T=40^{\circ}\text{C}$:

$$V = 0.921794 + 0.068659 \cdot I + 0.113024 \cdot \log(I)$$



- Για $T=50^{\circ}\text{C}$:

$$V = 0.9142 + 0.067708 \cdot I + 0.13468 \cdot \log(I)$$



ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αρχικά, παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις που πάρθηκαν ταυτίζονται σχεδόν με τη καμπύλη που προκύπτει έπειτα από την προσομοίωση. Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση (4.13) είναι ένα πολύ καλό μοντέλο που περιγράφει τη σχέση του εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL με την αντίστοιχη τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του.

Επιπλέον, παρατηρώντας τις αντίστοιχες τιμές $\{c_i\}$ των παραμέτρων διατρέχοντας τη θερμοκρασία, επιβεβαιώνεται η ορθότητα αλλά και η απλότητα του συγκεκριμένου μοντέλου, καθώς έχει προκύψει κατ' ουσία η ίδια εξίσωση με παραπλήσιες τιμές παραμέτρων, ανεξάρτητα σε ποια θερμοκρασία βρισκόμαστε. Πράγματι:

$$V \cong 0.9 + 0.067 \cdot I + 0.1 \cdot \log(I), \forall T \quad (4.20)$$

➤ 4.3.2 Προσομοίωση καμπύλης LI

Όσον αφορά την εξαγωγή παραμέτρων για τη καμπύλη LI απαιτείται, όπως προαναφέρθηκε, μη-γραμμικός αλγόριθμος προσαρμογής καμπύλης ο οποίος δεν επιδέχεται αναλυτικής λύσης. Αντ' αυτού, λοιπόν, εφαρμόζουμε Πολυωνυμική Προσαρμογή Ελαχίστων Τετραγώνων (Least-Squares Polynomial Fitting) [39]

➤ Πολυωνυμική Προσαρμογή Ελαχίστων Τετραγώνων (Least-Squares Polynomial Fitting)

Έστω πολυώνυμο k -βαθμού, το οποίο θέλουμε να προσαρμόσουμε

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k$$

Ο συντελεστής «προσδιορισμού» (coefficient of determination) δίδεται από τη σχέση:

$$R^2 = \sum_{i=0}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)]^2$$

Υπολογίζουμε τις μερικές παραγώγους:

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] = 0$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] x = 0$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_k} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1 x + \dots + a_k x^k)] x^k = 0.$$

Αυτές οδηγούν στις εξισώσεις:

$$a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{2k} = \sum_{i=1}^n x_i^k y_i$$

Ή ισοδύναμα σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix}$$

Αυτός είναι ένας Vandermonde πίνακας. Μπορούμε επίσης να ανακτήσουμε τον πίνακα για την Προσαρμογή Ελαχίστων Τετραγώνων, γράφοντας:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

Πολλαπλασιάζοντας από τα αριστερά με τον ανάστροφο του 1^{ou} πίνακα, έχουμε:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^k & x_2^k & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^k & x_2^k & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

Έτσι,

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix}$$

Όπως και προηγουμένως, δοθέντων n -σημείων (x_i, y_i) και προσαρμόζοντας με πολυωνμικούς συντελεστές a_0, \dots, a_k παίρνουμε:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}$$

Σε μορφή πίνακα, η εξίσωση για την πολυωνυμική προσαρμογή δίδεται από

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \mathbf{a}$$

Η οποία μπορεί να λυθεί πολλαπλασιάζοντας από τα αριστερά με τον ανάστροφο πίνακα \mathbf{X}^T :

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$$

Πρακτικά, η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται εύκολα στο MatLab, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση **polyfit**. Η σύνταξη της συνάρτησης είναι η ακόλουθη:

$$p = \text{polyfit}(x,y,n)$$

Η **polyfit** επιστρέφει του συντελεστές για ένα πολυώνυμο $p(x)$ βαθμού n που προσαρμόζεται βέλτιστα (με τη λογική των Ελαχίστων Τετραγώνων) στα δεδομένα y . Οι συντελεστές στο p εμφανίζονται κατά φθίνουσα σειρά και το μήκος του p είναι $n+1$.

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1}$$

Επιπλέον, προκειμένου να ολοκληρωθεί η προσομοίωση, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση **polyval** η οποία επιστρέφει την τιμή ενός πολυωνύμου βαθμού n για το οποίο γίνεται εκτίμηση ως προς x . Το argument που τίθεται ως είσοδος στο p είναι ένα διάνυσμα μήκους $n+1$, του οποίου τα στοιχεία είναι οι συντελεστές, κατά φθίνουσα σειρά, του πολυωνύμου που είναι προς εκτίμηση. Η σύνταξη της εντολής είναι η ακόλουθη:

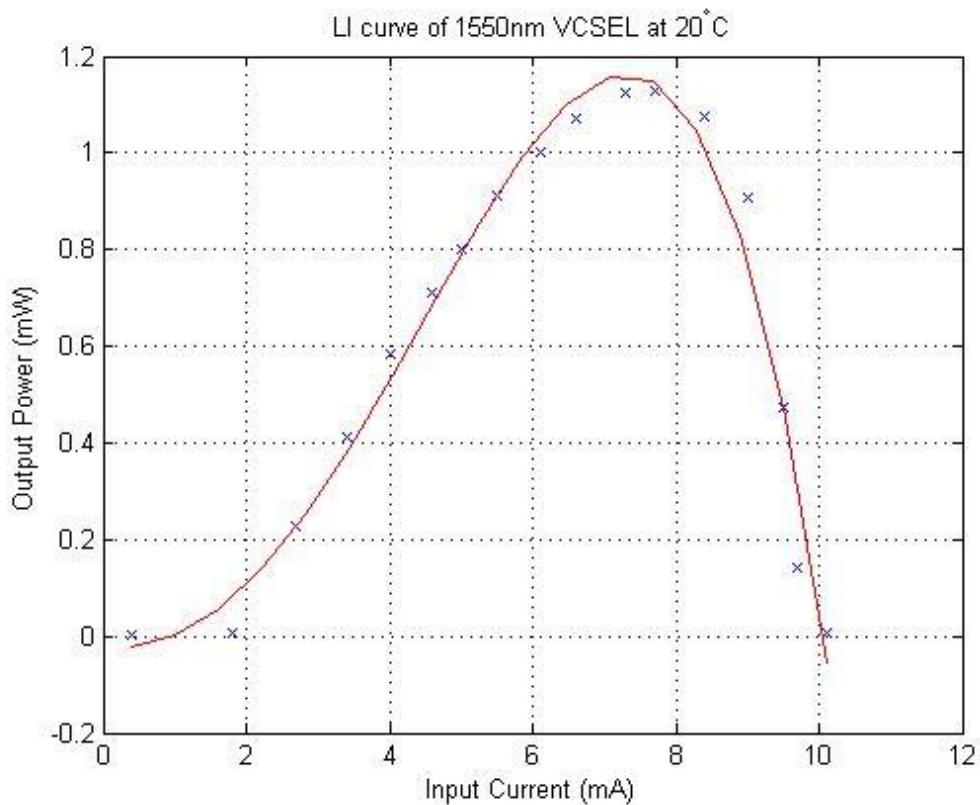
$$y = \text{polyval}(p,x)$$

Με βάση τις παραπάνω εντολές γράφουμε ένα script στο MatLab και υλοποιούμε την προσομοίωση. Ακολουθούν ο σχετικός κώδικας καθώς και τα αποτελέσματα:

- Για $T=20^{\circ}\text{C}$:

```
x = [0.4 1.8 2.7 3.4 4 4.6 5 5.5 6.1 6.6 7.3 7.7 8.4 9 9.5 9.7 10.1];
y = [0.002630268 0.007943282 0.229086765 0.410204103 0.582103218
0.709577768 0.801678063 0.909913273 1 1.071519305 1.124604974
1.129795915 1.073989412 0.905732601 0.473151259 0.141253754
0.005888437];
p = polyfit(x,y,4);
x2 = linspace(0.4,10.1,length(x));
y2 = polyval(p,x2);
plot(x,y,'x',x2,y2,'r')
title('LI curve of 1550nm VCSEL at 20^{\circ}C')
xlabel('Input Current (mA)')
ylabel('Output Power (mW)')
grid on
```

$$P_0 = -0.0007 \cdot I^4 + 0.0033 \cdot I^3 + 0.0352 \cdot I^2 - 0.0142 \cdot I - 0.0207$$

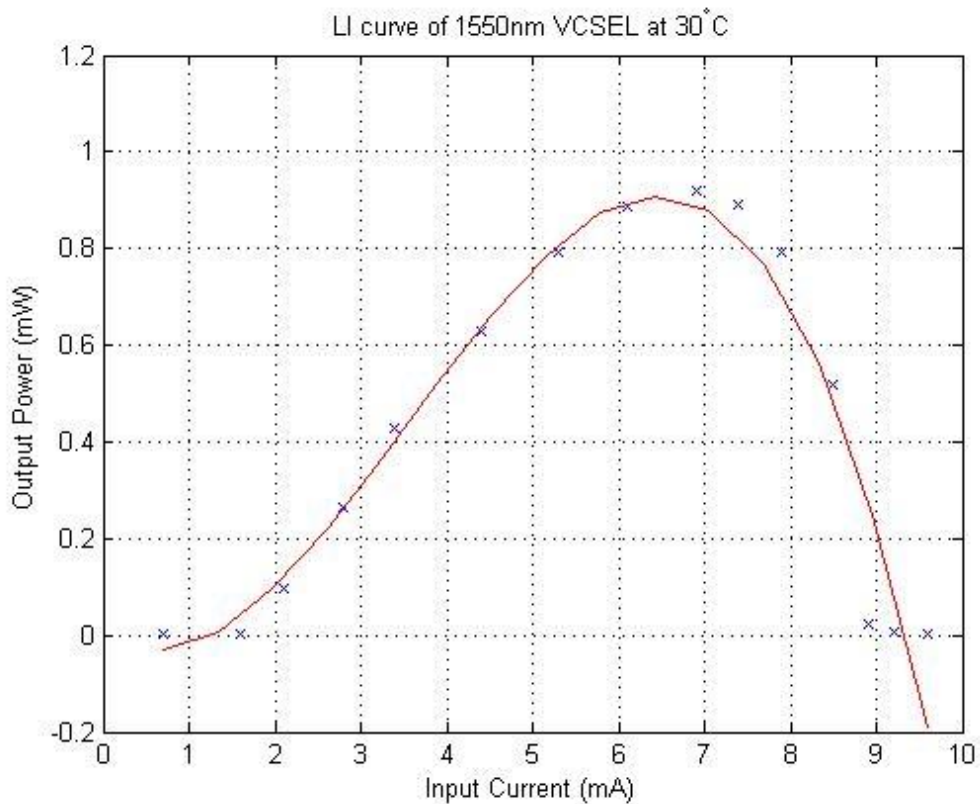


Διάγραμμα 4.5 LI curve of 1550nm VCSEL at 20°C (measured/simulated)

- Για $T=30^{\circ}\text{C}$:

```
x = [0.7 1.6 2.1 2.8 3.4 4.4 5.3 6.1 6.9 7.4 7.9 8.5 8.9 9.2 9.6];
y = [0.002837919 0.004677351 0.094841846 0.266072506 0.42854852
0.629506183 0.794328235 0.88511561 0.918332596 0.889201118 0.79250133
0.516416369 0.022387211 0.006309573 0.004677351];
p = polyfit(x,y,3);
x2 = linspace(0.4,10.1,length(x));
y2 = polyval(p,x2);
plot(x,y,'x',x2,y2,'r')
title('LI curve of 1550nm VCSEL at 30^{\circ}C')
xlabel('Input Current (mA)')
ylabel('Output Power (mW)')
grid on
```

$$P_0 = -0.0094 \cdot I^3 + 0.1005 \cdot I^2 - 0.1162 \cdot I + 0.0067$$

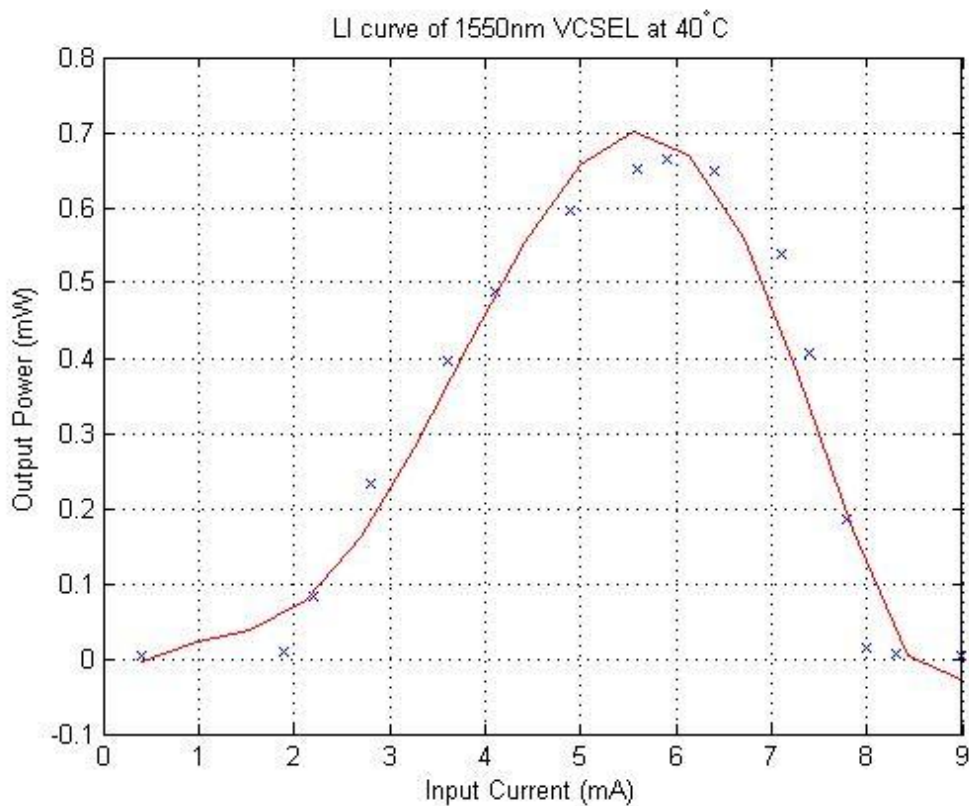


Διάγραμμα 4.6 LI curve of 1550nm VCSEL at 30°C (measured/simulated)

- Για $T=40^{\circ}\text{C}$:

```
x = [0.4 1.9 2.2 2.8 3.6 4.1 4.9 5.6 5.9 6.4 7.1 7.4 7.8 8 8.3 9];
y = [0.002636331 0.009772372 0.083176377 0.233883724 0.39536662
0.488652359 0.597035287 0.651628394 0.665273156 0.648634434
0.537031796 0.407380278 0.186208714 0.013489629 0.006067363
0.004265795];
p = polyfit(x,y,5);
x2 = linspace(0.4,9,length(x));
y2 = polyval(p,x2);
plot(x,y,'x',x2,y2,'r')
title('LI curve of 1550nm VCSEL at 40^{\circ}C')
xlabel('Input Current (mA)')
ylabel('Output Power (mW)')
grid on
```

$$P_0 = 0.0007 \cdot I^5 - 0.0147 \cdot I^4 + 0.0966 \cdot I^3 - 0.2208 \cdot I^2 + 0.2283 \cdot I - 0.0668$$

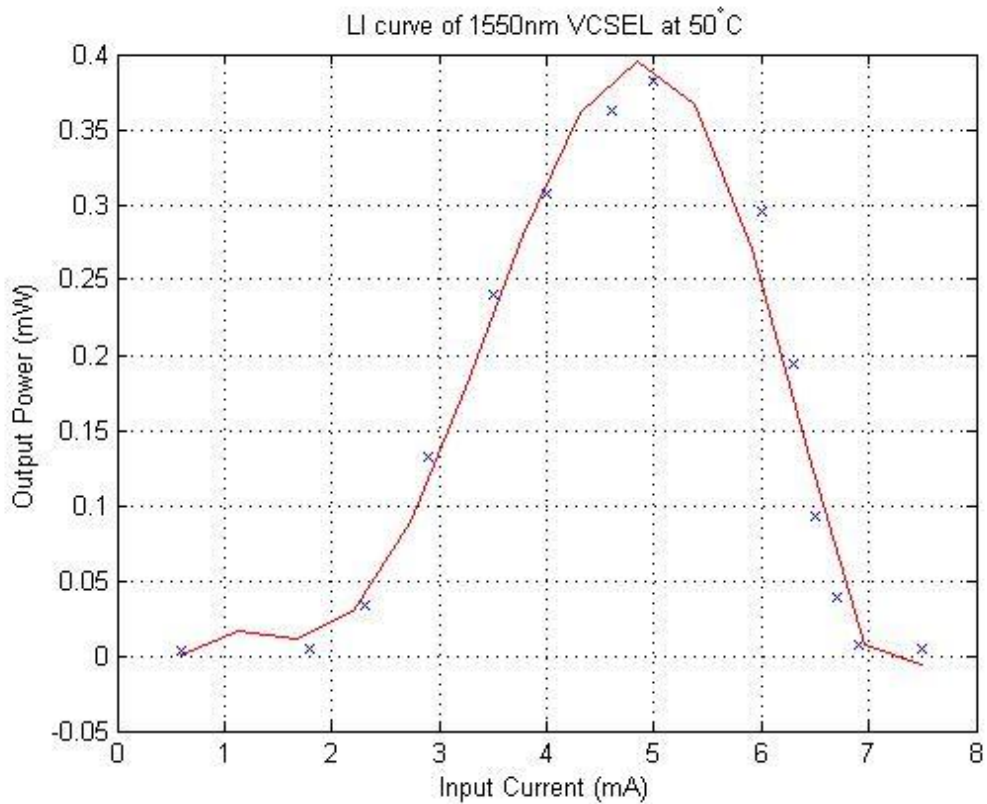


Διάγραμμα 4.7 LI curve of 1550nm VCSEL at 40°C (measured/simulated)

- Για $T=50^{\circ}\text{C}$:

```
x = [0.6 1.8 2.3 2.9 3.5 4 4.6 5 6 6.3 6.5 6.7 6.9 7.5];
y = [0.002673006 0.004139997 0.034119291 0.132434154 0.24043628
0.307609681 0.362242998 0.382824743 0.295120923 0.194536008 0.09332543
0.038370725 0.007762471 0.004709773];
p = polyfit(x,y,5);
x2 = linspace(0.6,7.5,length(x));
y2 = polyval(p,x2);
plot(x,y,'x',x2,y2,'r')
title('LI curve of 1550nm VCSEL at 50^{\circ}C')
xlabel('Input Current (mA)')
ylabel('Output Power (mW)')
grid on
```

$$P_0 = 0.0016 \cdot I^5 - 0.0290 \cdot I^4 + 0.1811 \cdot I^3 - 0.4463 \cdot I^2 + 0.4595 \cdot I - 0.1496$$



Διάγραμμα 4.8 LI curve of 1550nm VCSEL at 50°C (measured/simulated)

Επομένως, οι προσδιοριστέοι συντελεστές της συνάρτησης $P_o = P_o(I)$ για τις διάφορες θερμοκρασίες είναι :

$T (^{\circ}C)$	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
20	-	-0,0007	0,0033	0,0352	-0,0142	-0,0207
30	-	-	-0,0094	0,1005	-0,1162	0,0067
40	0,0007	-0,0147	0,0966	-0,2208	0,2283	-0,0668
50	0,0016	-0,029	0,1811	-0,4463	0,4595	-0,1496

Όπου a_5, a_4, \dots, a_1 οι συντελεστές 5^{ου}, 4^{ου}, ..., 1^{ου} βαθμού αντίστοιχα και a_0 ο σταθερός όρος.

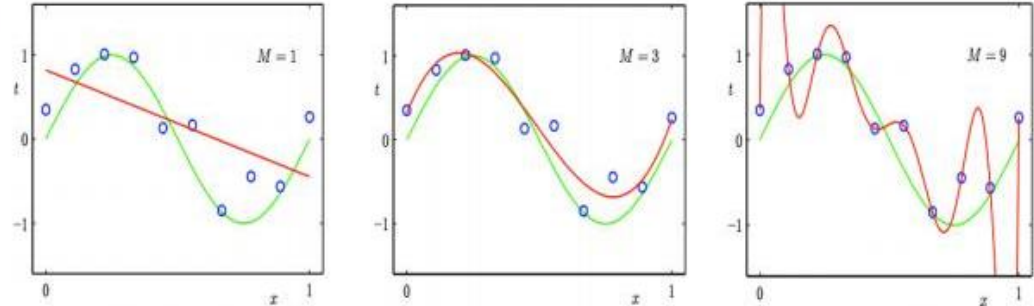
ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η πολυωνμική προσαρμογή για κάθε τιμή θερμοκρασίας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα καθώς μικρές αποκλίσεις εμφανίζονται μεταξύ μετρούμενων δεδομένων και τιμών που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Ο λόγος είναι ότι η επιλογή του βαθμού του πολυωνύμου κατά την προσαρμογή δεν ήταν τυχαία, αλλά προέκυψε έπειτα από αρκετές δοκιμές. Ως γνωστόν, όσο μεγαλύτερου βαθμού είναι το πολυώνυμο, τόσο καλύτερη είναι και η προσέγγιση. Από την άλλη μεριά, αν αυξηθεί αρκετά ο βαθμός του πολυωνύμου, ελλοχεύει ο κίνδυνος του overfitting. Με άλλα λόγια, αν υπερβούμε ένα συγκεκριμένο βαθμό τότε η προσαρμογή θα προσπαθήσει να ακολουθήσει ακριβώς τα μετρούμενα σημεία, ακόμα και τυχόν λανθασμένες μετρήσεις, και εν τέλει θα χαθεί ο γενικός κανόνας των δεδομένων. Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί και η αυξημένη πολυπλοκότητα των υπολογισμών για την προσαρμογή.

Under- and Over-fitting examples

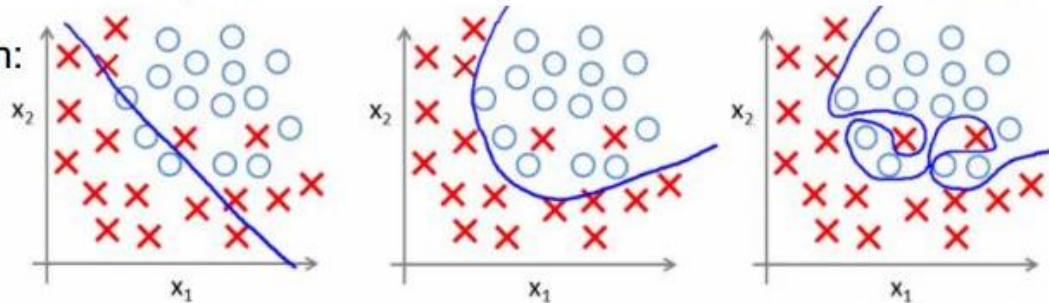
Regression:



**predictor too inflexible:
cannot capture pattern**

**predictor too flexible:
fits noise in the data**

Classification:



Σχήμα 4.2 Παραδείγματα under-fitting και over-fitting [51]

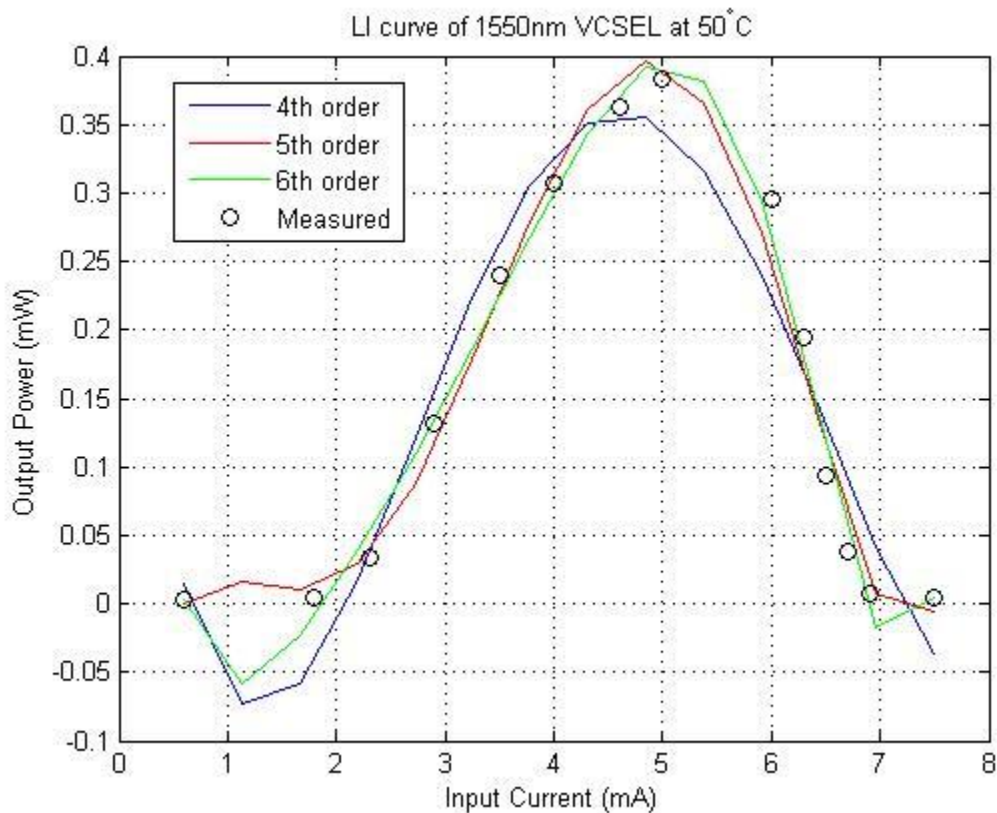
Επομένως, κάνοντας δοκιμές σε κάθε περίπτωση χωριστά, ελαττώνοντας και αυξάνοντας τον βαθμό του πολυωνύμου, καταλήγουμε στη βέλτιστη προσαρμογή.

Με τη βοήθεια του ακόλουθου script στο MatLab, γίνεται σαφής η παραπάνω διαδικασία, όπου φαίνεται ενδεικτικά το βέλτιστο fitting για την περίπτωση των 50°C:

```

x = [0.6 1.8 2.3 2.9 3.5 4 4.6 5 6 6.3 6.5 6.7 6.9 7.5];
y = [0.002673006 0.004139997 0.034119291 0.132434154 0.24043628 0.307609681
0.362242998 0.382824743 0.295120923 0.194536008 0.09332543 0.038370725
0.007762471 0.004709773];
a = [4 5 6]
colorstring = 'brg';
for i = 1:3
p = polyfit(x,y,a(i));
x2 = linspace(0.6,7.5,length(x));
y2 = polyval(p,x2);
plot(x2,y2,'Color',colorstring(i));
hold on;
title('LI curve of 1550nm VCSEL at 50^{\circ}C')
xlabel('Input Current (mA)')
ylabel('Output Power (mW)')
grid on
end
plot(x,y,'ko')
legend('4th order','5th order','6th order','Measured')

```

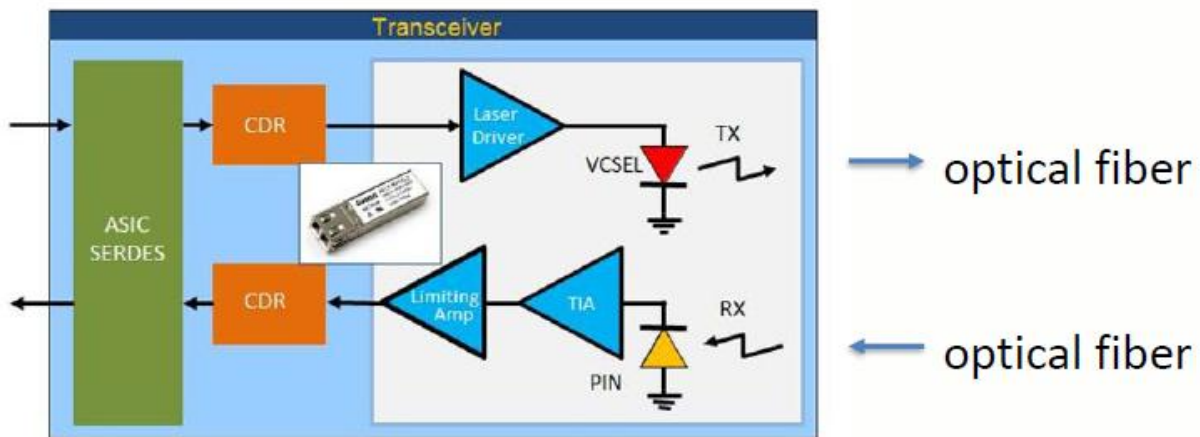


Διάγραμμα 4.9 Διαδικασία εύρεσης τάξης βέλτιστου fitting

Πράγματι, το βέλτιστο fitting για τους 50°C επιτυγχάνεται για πολυώνυμο 5^{ης} τάξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η αγορά πομποδεκτών έχει αναπτυχθεί γρήγορα τα τελευταία χρόνια χάρη στην αυξανόμενη ζήτηση των μεγάλης κλίμακας επικοινωνίας δεδομένων (large-scale data communications). Μια οπτική ζεύξη είναι μια αποτελεσματική λύση λόγω του υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής κατανάλωσης ισχύος.



Σχήμα 5.1 Block Διάγραμμα Οπτικής Ζεύξης [50]

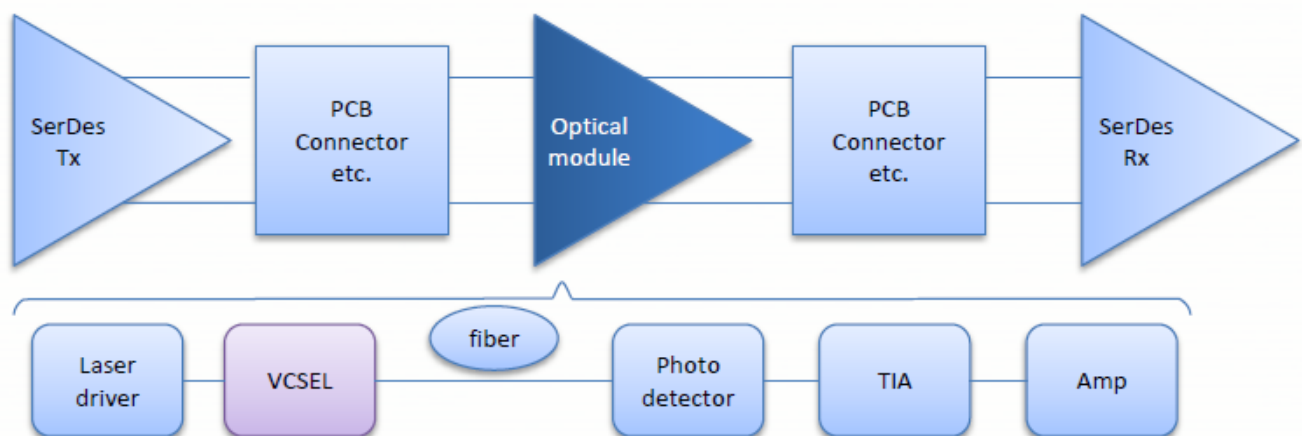
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1, μία οπτική ζεύξη αποτελείται από τον οδηγό λέιζερ (Laser Driver), το λέιζερ κάθετης κοιλότητας επιφανειακής εκπομπής (VCSEL), τον φωτοανιχνευτή (Photo-detector), τον ενισχυτή TIA (Trans-impedance Amplifier), τον περιοριστικό ενισχυτή (Limiting Amplifier), την οπτική ίνα και το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και αποκατάστασης δεδομένων (CDR). Το ηλεκτρικό σήμα λαμβάνεται από το board του host μέσω διασυνδεδεμένου ή ενσωματωμένου οπτικού module. Το λαμβανόμενο σήμα επεξεργάζεται κατάλληλα προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητά του από άποψη πλάτους και συγχρονισμού προτού μετατραπεί σε οπτικό σήμα. Ο ηλεκτρικός δέκτης στον οπτικό πομπό μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορα σχήματα εξισορρόπησης (equalization schemes), όπως τον Συνεχούς Χρόνου Εξισωτή ή την Από-έμφαση προτού βελτιωθεί η απόδοση jitter του σήματος χρησιμοποιώντας το κύκλωμα CDR. Ο οδηγός λέιζερ που ακολουθεί, λαμβάνει το σήμα από την έξοδο του CDR και το μετατρέπει σε κυματομορφή ρεύματος που οδηγεί τη δίοδο VCSEL. Για την περιορισμένου φάσματος επικοινωνία, το VCSEL παρέχει πολλά πλεονεκτήματα όπως οι

χαμηλής ισχύος απαιτήσεις και το χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλους τύπους οπτο-ηλεκτρικών συσκευών, όπως τα DFBs. Το σήμα εξόδου από το VCSEL συνδέεται με μια πολύτροπη οπτική ίνα η οποία ευθυγραμμίζεται με οπτικές τεχνικές ακρίβειας. Στο τέλος του δέκτη, το οπτικό σήμα υψηλής ταχύτητας λαμβάνεται από τον P-I-N φωτο-ανιχνευτή που μετατρέπει το εισερχόμενο φως σε κυματομορφή ρεύματος. Ο ενισχυτής ΤΙΑ που έπεται της P-I-N διόδου, μετασχηματίζει την κυματομορφή του ρεύματος σε κυματομορφή τάσης στην έξοδό του. Το σήμα περνά μέσω του Limiting Amplifier προτού η πληροφορία αναγνωστεί στο δέκτη.

Σε αυτή τη ζεύξη δεδομένων, λοιπόν, το VCSEL αποτελεί τη συσκευή-κλειδί χάρη στα μοναδικά οπτο-ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του και είναι σημαντικό να γίνει μοντελοποίηση του VCSEL προκειμένου να προσομοιωθεί η απόδοση ενός ολοκληρωμένου συστήματος επικοινωνίας δεδομένων.

Επομένως, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση της ανωτέρω ιδέας, καθώς έγινε η προσπάθεια προσομοίωσης και επαλήθευσης ενός από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα συμπεριφοράς για το VCSEL, του Θερμικού Μοντέλου [35], με αναλυτική μέθοδο. Ως επέκταση αυτής της εργασίας αλλά και ως μελλοντική εργασία προτείνεται η κατεύθυνση της έρευνας σε δύο άξονες: Ο πρώτος είναι η προσέγγιση του VCSEL με αριθμητική, πλέον, μέθοδο και ο δεύτερος η προσομοίωση ενός ολοκληρωμένου Datacom system με ενταγμένο και το VCSEL, με σκοπό τη μελέτη της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος της έρευνας, ακολουθεί σχηματική απεικόνιση μετάδοσης ενός οπτικού σήματος:



Σχήμα 5.2 Προσομοίωση Οπτικής Ζεύξης [50]

Για τη μοντελοποίηση αποκλειστικά του VCSEL μία πολύ χρήσιμη προσέγγιση είναι η εύρεση του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος του λέιζερ για δύο λόγους:

1. Η πλήρης διαδικασία μιας οπτικής ζεύξης ακολουθεί την εναλλαγή: Ηλεκτρικό Σήμα→Οπτικό Σήμα→Ηλεκτρικό Σήμα, όπου το οπτικό σήμα αντιστοιχεί στο VCSEL
2. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα σχεδίασης ηλεκτρικών κυκλωμάτων (πχ. PSpice) «υστερούν» στην αναπαράσταση οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων, οπότε είναι αναγκαία η εισαγωγή ενός αντίστοιχου ηλεκτρικού μοντέλου.

Η ισχυρή θερμική εξάρτηση του VCSEL μπορεί να αποδοθεί σε μια σειρά από μηχανισμούς. Καθώς το φαινόμενο της επανασύνδεσης φορέων (Auger recombination) και οι οπτικές απώλειες, όπως η απορρόφηση στη ζώνη σθένους (intervalence band absorption), μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στη θερμική συμπεριφορά, η πλειοψηφία των επιδράσεων κατά τη διάρκεια στατικής ή cw λειτουργίας, οφείλεται στο εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία κέρδος του laser και τη διαρροή φορέα έξω από την ενεργό περιοχή.

Πρώτον, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το φάσμα του κέρδους ενός VCSEL διευρύνεται και η κορυφή (peak) μετατοπίζεται σε υψηλότερα μήκη κύματος. Το μήκος κύματος εκπομπής της συσκευής αυξάνεται και αυτό επίσης με τη θερμοκρασία, εν τούτοις λιγότερο από το peak του κέρδους. Συνεπώς, ανάλογα με το αρχικό σημείο μεγίστου του κέρδους – ανάλογο του μήκους κύματος, το κέρδος του laser είτε θα μειωθεί είτε θα αυξηθεί με τη θερμοκρασία καθώς το peak του κέρδους και το μήκος κύματος ταιριάζουν λιγότερο ή περισσότερο. Πράγματι, μία βέλτιστη τιμή θερμοκρασίας θα έπρεπε να υπάρχει όπου το μη-ταιρίασμα να ελαχιστοποιείται προκειμένου να επιτυγχάνεται ένα ελάχιστο κέρδος κατωφλίου σαν και αυτό που παρατηρήθηκε πειραματικά.

Δεύτερον, η θερμική απώλεια φορέων εκτός ενεργού περιοχής μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αποτελεσματικότητας της διάχυσης (injection efficiency) το οποίο συμβάλλει στο θερμικό roll-over του VCSEL. Καθώς η θερμοκρασία της συσκευής αυξάνεται, η θέση της ενεργού στάθμης Fermi αυξάνεται ανάλογα με το ενεργειακό διάκενο (bandgap). Συνεπώς, η ενεργός στάθμη γίνεται σταδιακά ανίκανη να «φυλακίσει» φορείς. Η εν λόγω διαρροή δύναται να μοντελοποιηθεί ως μία συνάρτηση πυκνότητας φορέων και θερμοκρασίας. Λόγω της εξάρτησης από τη πυκνότητα φορέων, η «χωρική εξαφάνιση οπών» μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του injection efficiency. Όλοι αυτοί οι παραπάνω μηχανισμοί επηρεάζουν τις στατικές LI χαρακτηριστικές, ουσιαστικά

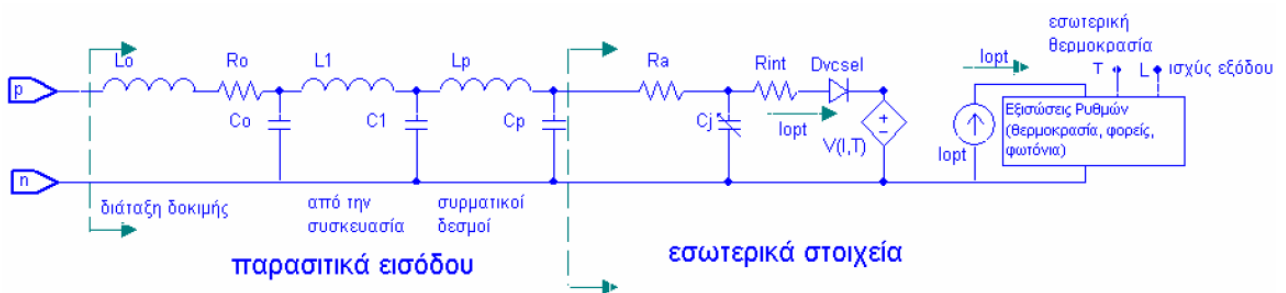
κάνοντας την απόδοση ενός VCSEL διαφορική και το ρεύμα κατωφλίου συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ρεύματος.

Συνοψίζοντας, προτείνεται η χρήση ενός μη γραμμικού κυκλωματικού μοντέλου για το VCSEL το οποίο θα ξεπεράσει τους περιορισμούς που θέτουν οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις:

1. Το μοντέλο να περιλαμβάνει μια εξίσωση για να περιγράψει με ακρίβεια την εκθετική μορφή και την θερμοκρασιακή εξάρτηση της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης (I-V) του VCSEL.
2. Επίσης, να λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση της εσωτερικής χωρητικότητας του στοιχείου από την εξωτερική τάση πόλωσης.
3. Τέλος, να χρησιμοποιηθεί ένα κατανεμημένο RLC δικτύωμα εισόδου που προσομοιώνει με μεγάλη ακρίβεια τα παρασιτικά στοιχεία της συσκευασίας στην είσοδο.

ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:

Η προσέγγιση που προτείνεται *δεν απαιτεί* την μέτρηση της οπτικής S_{21} για να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος εισόδου. Ο προσδιορισμός των τιμών όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με το μοντέλο απαιτεί την μέτρηση των dc χαρακτηριστικών ρεύματος-φωτός-τάσης (I-L-V) καθώς και των ac S_{11} και S_{21} παραμέτρων και γίνεται με τη χρήση μιας μεθοδολογίας τριών σταδίων.



Σχήμα 5.3 Περιγραφή του Μοντέλου [27]

Επειδή αυτό που καθορίζει τη συμπεριφορά του VCSEL είναι το I_{opt} που διαρρέει την πηγή $V(I, T)$, το οποίο καθορίζεται από το κύκλωμα εισόδου και το εσωτερικό του VCSEL, είναι δυνατόν να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του μοντέλου σε δύο στάδια:

1. Αρχικά, αναλύεται το μοντέλο με βάση την έξοδο που παίρνουμε στο I_{opt} και αναπτύσσεται μεθοδολογία εξαγωγής των σχετικών παραμέτρων (Η ανάλυση αυτή αφορά το παρασιτικό κύκλωμα εισόδου και το εσωτερικό VCSEL).
2. Στη συνέχεια, υλοποιούνται και οι διαφορικές εξισώσεις ρυθμού φωτονίων και φορέων και μελετάται η συμπεριφορά του μοντέλου ως προς την οπτική ισχύ που λαμβάνεται στην έξοδο (διαφορικές εξισώσεις παραγωγής φωτός).

Με αυτό τον τρόπο, καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός του πλήθους των παραμέτρων σε ομάδες και η εξαγωγή των αντίστοιχων τιμών με μεθοδικότητα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: LASER – Χαρακτηριστικά & Αρχή Λειτουργίας

A.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.

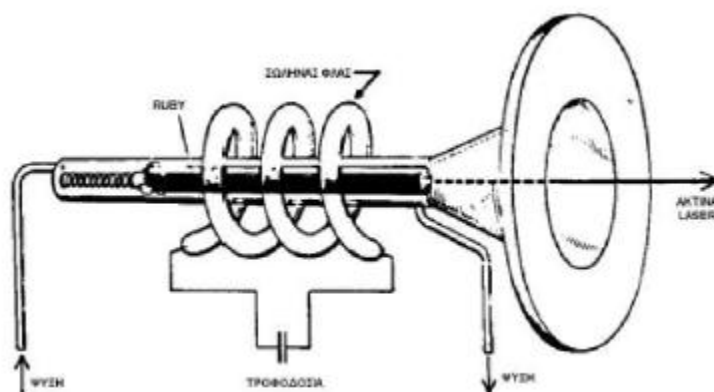
Η λέξη Laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, δηλαδή ενίσχυση φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας είναι μία φυσική διαδικασία η οποία προσδιορίστηκε για πρώτη φορά από τον Einstein και λαμβάνει 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 εκπέμψει φωτεινή ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη δέσμη έχει την ίδια κατεύθυνση και το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος με την προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη. [40]

Ιστορική αναδρομή

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). [41]

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. [42]

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. [14] Το 1960 έλαβε χώρα στα εργαστήρια του Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια ένα πείραμα, το οποίο οδήγησε στην κατασκευή του πρώτου laser. Το πείραμα αυτό υλοποιήθηκε από τον Theodore Maiman, ήταν σχετικά απλό και βασιζόταν στη ύπαρξη ενός κρύσταλλου από ρουβίνιο (ruby).



Σχήμα A.1 Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε ποτέ βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο (ruby). [42]

Ο κρύσταλλος είχε μήκος 2cm και διάμετρο 9mm. Οι δύο έδρες του ruby κρυστάλλου ήταν γυαλισμένες και είχαν πάνω τους μία λεπτή επίστρωση από άργυρο. Ο κρύσταλλος τοποθετήθηκε στο εσωτερικό ενός ελικοειδούς σωλήνα. Στο εσωτερικό του σωλήνα αυτού υπήρχε κατάλληλο φλας. Μόλις ενεργοποιούταν η λειτουργία του φλας, ο κρύσταλλος δεχόταν πολυχρωματικό φως και εξέπεμπε από το ένα του άκρο μία ιδιαίτερα λεπτή κόκκινη μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα. Αυτή ακριβώς η διαδικασία εκπομπής αποτέλεσε την πρώτη λειτουργία μίας συσκευής laser. [42]

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 βασίζονταν σε διάφορα πολυμερή υλικά. Τα lasers αυτά αξιοποιήθηκαν σε πολλαπλές ιατρικές εφαρμογές (πχ χειρουργικές επεμβάσεις στα μάτια). Την δεκαετία του 1980 σημειώθηκαν περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία των lasers με κυριότερη εξέλιξη τη δημιουργία laser ακτινών Χ. 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. [43]

A.2 Χαρακτηριστικά των Laser

Η ακτινοβολία των laser έχει ορισμένα μοναδικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν χρήσιμη σε πολλούς τομείς της επιστημονικής έρευνας. Κάποια από αυτά είναι [44]:

- ❖ Η μονοχρωματικότητά τους. Αν και καμία πηγή φωτός δεν μπορεί να δώσει απόλυτα μονοχρωματικό φως, η προσέγγιση σε αυτό είναι πολύ ικανοποιητική. Οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν μπορεί να ενισχυθεί, και στο ότι η ταλάντωση μπορεί να συμβεί μόνο στη συχνότητα συντονισμού της οπτικής κοιλότητας που σχηματίζεται μεταξύ των δύο κατόπτρων.
- ❖ Η κατευθυντικότητα της δέσμης τους. Κριτήριο της δέσμης είναι το λεγόμενο άνοιγμά της, δηλαδή το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική ακτίνα. Η δέσμη ενός laser είναι πολύ λεπτή και το άνοιγμά της πολύ μικρό.
- ❖ Η λαμπρότητα της δέσμης και η μεγάλη ένταση της ακτινοβολίας τους.
- ❖ Ο μεγάλος βαθμός συμφωνίας της ακτινοβολίας τους. Αν μια πηγή φωτός είναι τελείως σύμφωνη και στο χώρο και στο χρόνο, υπάρχει απόλυτη και σταθερή συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου της φωτεινής ακτινοβολίας σε ένα σημείο του χώρου με αυτές σε κάθε άλλο σημείο του. Αν η μεταβολή αυτή του ηλεκτρικού πεδίου μετρηθεί και στα δύο σημεία αυτά, μπορεί να πει κανείς με μεγάλη βεβαιότητα σε κάθε επόμενη χρονική στιγμή τι κάνει το ηλεκτρικό πεδίο σε δεύτερο σημείο, απλώς και μόνο μετρώντας το πεδίο στο πρώτο σημείο.
- ❖ Η πόλωση της δέσμης. Πολλά laser παράγουν πολωμένο φως, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στην οπτική κοιλότητα.

A.3 Η Φυσική των Lasers

Είναι απαραίτητη μία πιο ενδοσκοπική ματιά στα laser για να κατανοήσουμε πλήρως τη δομή και τη λειτουργία τους. Θα λέγαμε ότι υπάρχουν δύο βασικά τμήματα στο εσωτερικό ενός laser, το ενεργό υλικό και η οπτική κοιλότητα στα οποία λαμβάνουν χώρα οι φυσικές διεργασίες που θα περιγράψουμε παρακάτω, με αποτέλεσμα να έχουμε ενίσχυση του φωτός στην έξοδο της συσκευής laser. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας του laser.



Σχήμα A.2 Αρχή λειτουργίας του laser [45]

➤ A.3.1 Ενεργό Μέσο

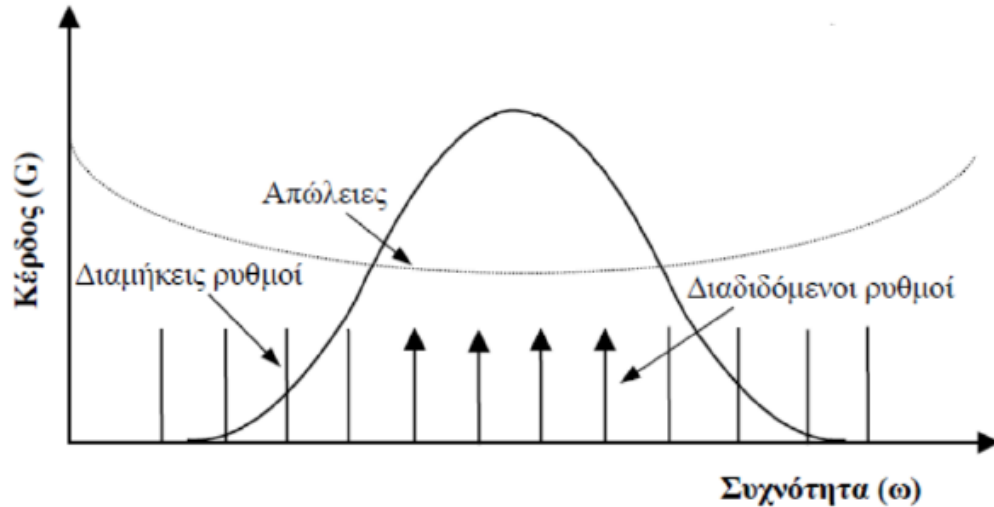
Είναι ένα υλικό το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε μορφή (στερεή, υγρή, αέρια, πλάσμα) και έχει συγκεκριμένο μέγεθος, σχήμα, σύσταση και καθαρότητα. Το μέσο αυτό μπορεί να ενισχύσει το φως παράγοντας μια φωτεινή ακτίνα μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, μία διαδικασία που θα περιγράψουμε ενδελεχώς παρακάτω. Ουσιαστικά είναι απαραίτητο για να αντισταθμίσει της απώλειες του αντηχείου. Όσο το ενεργό μέσο προσθέτει ενέργεια στο ενισχυόμενο φως, πρέπει και το ίδιο να λαμβάνει ενέργεια μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται άντληση. Η άντληση μπορεί να γίνεται είτε από μία ηλεκτρική πηγή με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρική άντληση), είτε μέσω μίας οπτικής πηγής (οπτική άντληση), σε ένα μήκος κύματος που δεν πρέπει να

ξεπερνάει το μήκος κύματος του σήματος. Κάποια υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργό μέσο σε ένα laser είναι τα ακόλουθα:

- ❖ Ορισμένοι κρύσταλλοι εμπλουτισμένοι με ιόντα σπάνιων γαιών (πχ Νεοδύμιο (Nd), Υττέρβιο (Yb), Έρβιο (Er)) ή με ιόντα μετάλλων μετάπτωσης (πχ. Τιτάνιο (Ti) και Χρώμιο (Cr))
- ❖ Υαλοί
- ❖ Αέρια όπως μίγματα Ηλίου και Νέου (HeNe), Αζώτου, μονοξειδίου και διοξειδίου του Ανθρακα.
- ❖ Ημιαγωγοί (πχ. αρσενιούχου γαλλίου (GaAs), αζωτούχου γαλλίου (GaN))
- ❖ Υγρά χρωστικά [45]

➤ A.3.2 Οπτική κοιλότητα

Η οπτική κοιλότητα από την άλλη είναι ουσιαστικά ένας οπτικός ταλαντωτής στάσιμων κυμάτων φωτός. Η οπτική κοιλότητα διαθέτει δύο ανακλαστικές επιφάνειες. Η μία ανακλά 100% τις ακτίνες φωτός, ενώ η άλλη τις ανακλά σε πολύ μεγάλο ποσοστό, της τάξης του 95-98% αφήνοντας μία δέσμη φωτός να περάσει στην οπή εξόδου. Οι επιφάνειες αυτές αναγκάζουν τα φωτόνια να περνούν αρκετές φορές από το ενεργό υλικό (τουλάχιστον δύο) προτού αποδεσμευτούν ή χαθούν λόγω απορρόφησης ή περίθλασης. Έτσι παράγονται στάσιμα κύματα σε συγκεκριμένες συχνότητες ταλάντωσης ή αλλιώς ρυθμούς ταλάντωσης, είτε διαμήκεις είτε εγκάρσιους, ανάλογα με τη γεωμετρία της οπτικής κοιλότητας (απόσταση ανακλαστικών επιφανειών, είδος κατόπτρων). Εάν το κέρδος της ενίσχυσης λόγω διέλευσης του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε παρουσιάζεται εκθετική ενίσχυση του φωτός μέσα στην κοιλότητα. [46]



Σχήμα Α.3 Φάσμα αυθόρμητης εκπομπής και οι διαδιδόμενοι ρυθμοί της κοιλότητας [45]

A.4 Λειτουργία των Lasers

Η θεμελιώδης φυσική διεργασία πάνω στην οποία στηρίζεται το laser είναι η Εξαναγκασμένη Εκπομπή. Η κβαντική θεωρία υποδεικνύει πως τα άτομα υπάρχουν μόνο σε διακριτές ενεργειακές στάθμες, και σε συνηθισμένη θερμοκρασία βρίσκονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση, δηλαδή τα ηλεκτρόνιά τους βρίσκονται στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή στάθμη. Οποιαδήποτε μετακίνησή τους σε υψηλότερη ή χαμηλότερη στάθμη είναι αποτέλεσμα απορρόφησης ή εκπομπής ακτινοβολίας. Η ενέργεια E της ακτινοβολίας που παράγεται ή απορροφάται δίνεται από τη σχέση:

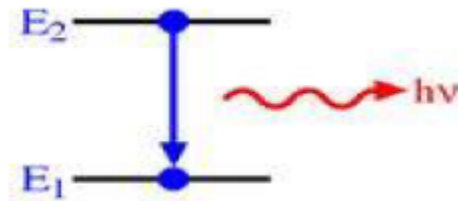
$$E = E_1 - E_2 = h \cdot f$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck και έχει τιμή $h = 6.67 \cdot 10^{-34} J \cdot s = 4.11 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$.

Κάθε μόριο κατέχει μια σειρά ενεργειακών σταθμών και μπορεί να μεταβεί από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερη στάθμη με απορρόφηση ενός φωτονίου ενέργειας ίσης με την διαφορά των δύο ενεργειακών επιπέδων. Έτσι η συχνότητα του φωτονίου αυτού θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

Ας θεωρήσουμε αρχικά δύο ενεργειακές στάθμες 1 και 2, ενός υλικού με ενέργειες E_1 και E_2 αντίστοιχα, με $E_1 < E_2$. Αν επιπλέον θεωρήσουμε ότι η στάθμη 1 αποτελεί την βασική στάθμη και το άτομο βρίσκεται στη στάθμη 2, τότε το άτομο τείνει να εκπέσει στην κατάσταση 1 που είναι ενεργειακά χαμηλότερη (ζώνη ενεργειακής ισορροπίας). Κατά τη μετάβαση αυτή ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η διαδικασία αυτή λέγεται Αυθόρμητη Εκπομπή και η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος δίνεται από τον τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα A.4 Αυθόρμητη εκπομπή [45]

Το γεγονός ότι το άτομο μπορεί να αποδιεγερθεί από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 1 προσδίδει στην διεγερμένη κατάσταση έναν πεπερασμένο χρόνο ζωής τ . Κατά συνέπεια, σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg ισχύει:

$$\Delta E \cong \frac{h}{\Delta t}$$

Υπάρχει δηλαδή αβεβαιότητα στην ενέργεια της διεγερμένης κατάστασης και συνεπώς προκύπτει μια Lorentzian κατανομή έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με μέγιστο στην συχνότητα συντονισμού που είναι η ν_{12} που αναφέραμε πιο πάνω. Το μισό του FWHM (Full Width at Half Maximum) της κατανομής αυτής, που το συμβολίζουμε με Γ , είναι το φυσικό πλάτος της ατομικής μετάπτωσης και είναι αντιστρόφως ανάλογο του χρόνου ζωής τ . Δηλαδή:

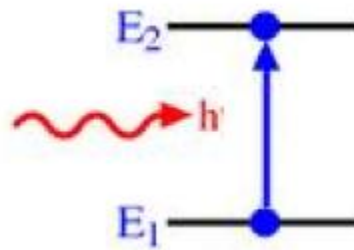
$$\Gamma = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Αν υποτεθεί ότι τη χρονική στιγμή t υπάρχουν N_2 άτομα ανά μονάδα όγκου στη στάθμη 2, ο ρυθμός αποδιέγερσης αυτών των ατόμων είναι ανάλογος με το N_2 και είναι:

$$\frac{dN_2}{dt} = -2\pi\Gamma N_2$$

Αν τώρα στην παραπάνω λογική των δύο σταθμών θεωρήσουμε ότι το άτομο βρίσκεται αρχικά στη βασική στάθμη, τότε αυτό, χωρίς την επίδραση εξωγενούς διέγερσης, θα παραμείνει σε αυτή την κατάσταση. Με την πρόσπτωση όμως μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συχνότητας 12 λαμβάνεται ακριβώς το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την μετάπτωση από την 1 στην 2 και το άτομο διεγείρεται στην ενεργειακή κατάσταση 2. Η διαδικασία αυτή λέγεται όπως είπαμε απορρόφηση, και ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνει χώρα είναι αντίστοιχος με αυτόν της αυθόρμητης αποδιέγερσης και είναι:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12} \cdot N_1$$



Σχήμα A.5 Απορρόφηση [45]

Με $W_{12} = \sigma_{12} \cdot F$, όπου F η ροή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προκαλεί την απορρόφηση και σ_{12} η ενεργός διατομή απορρόφησης της συγκεκριμένης μετάπτωσης. Η ενεργός διατομή, ουσιαστικά εκφράζει μια επιφάνεια γύρω από το άτομο μέσα στην οποία αν βρεθεί φωτόνιο θα γίνει εξαναγκασμένη απορρόφηση και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{12} = \frac{\lambda^2}{2\pi}$$

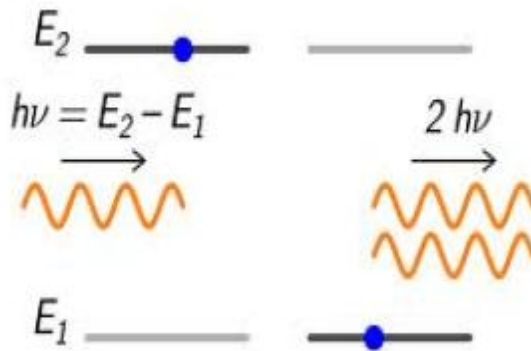
όπου λ το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού ν_{12} , αφού

$$\nu = c/\lambda$$

Ας θεωρήσουμε τώρα την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ότι το άτομο βρίσκεται στη στάθμη 2 και επιπλέον ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει με συχνότητα ίση με αυτή

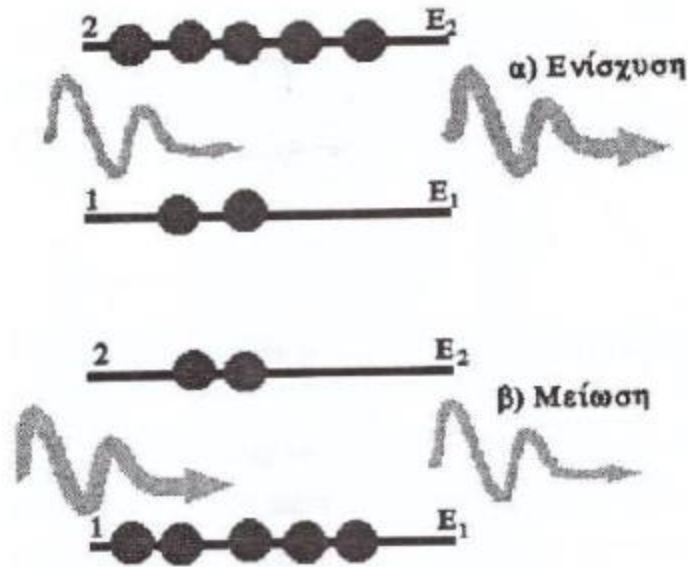
της αυθόρμητης αποδιέγερσης, δηλαδή ν_{12} . Σε αυτή την περίπτωση, επειδή η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την ίδια συχνότητα με την ατομική, υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα, η ακτινοβολία αυτή να ωθήσει το άτομο να υποστεί την μετάπτωση από την στάθμη 2 στην 1. Η επιπλέον ενέργεια $E_1 - E_2$ εκλύεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ενισχύει το προσπίπτον. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται Εξαναγκασμένη Εκπομπή. Και εδώ ισχύει:

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_{12} \cdot N_2 \text{ όπου } W_{21} = \sigma_{21} \cdot F$$



Σχήμα A.6 Εξαναγκασμένη εκπομπή [45]

Υπάρχει μια βασική διαφορά μεταξύ της αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής. Στην πρώτη περίπτωση η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, κατά την αποδιέγερση του ατόμου, δεν έχει καθορισμένη φάση και η κατεύθυνση εκπομπής είναι τυχαία. Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει την ίδια φάση και την ίδια διεύθυνση με τη προσπίπτουσα ακτινοβολία, είναι δηλαδή σύμφωνες. Όταν μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περνάει μέσα από μια συλλογή ατόμων η πιο ακριβής περιγραφή είναι ότι εξαναγκάζει τα ηλεκτρικά φορτία εντός των ατόμων να ταλαντώνονται σε σύμφωνη σχέση με αυτή. Τα άτομα δηλαδή αντιδρούν σαν μικροσκοπικές κεραίες, και έτσι η επανεκπεμπόμενη ακτινοβολία από το κάθε άτομο προκαλεί απορρόφηση ή ενίσχυση του σήματος.



Σχήμα A.7 Ενίσχυση – Απόσβεση [45]

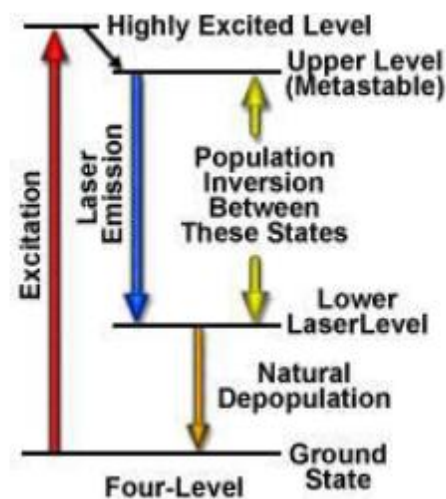
Η διεργασία της ατομικής απορρόφησης μπορεί χονδρικά να θεωρηθεί ως ανάστροφη της εξαναγκασμένης εκπομπής. Στη μια, άτομα που αρχικά βρίσκονται στη βασική κατάσταση μεταπίπτουν στην υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, ενώ στην άλλη περίπτωση άτομα που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση μεταπίπτουν στη βασική στάθμη λόγω της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αναλυτικότερα τα άτομα αντιδρούν σαν μικρά ηλεκτρικά δίπολα. Αυτά που βρίσκονται στη βασική κατάσταση αντιδρούν απλώς σε αντίθετη φάση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία μειώνοντας την, ενώ αυτά που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση αντιδρούν εν φάση ενισχυτικά. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης στις δύο διεργασίες είναι η ίδια, αφού $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ και άρα $W_{12} = W_{21}$. Επομένως, το ποια από τις δύο διεργασίες θα υπερισχύσει εξαρτάται από τον πληθυσμό της κάθε στάθμης σε άτομα. Αν η βασική στάθμη έχει περισσότερα άτομα τότε συνολικά υπερισχύει η ατομική απορρόφηση, ενώ αν η διεγερμένη στάθμη είναι περισσότερο κατειλημμένη υπερισχύει η εξαναγκασμένη εκπομπή και έχουμε ενίσχυση του σήματος. Είναι προφανές ότι αν $N_2 > N_1$ τότε το υλικό είναι ενισχυτής σήματος ενώ αν $N_2 < N_1$ το υλικό απορροφά ενέργεια και μειώνει το σήμα.

Εδώ ακριβώς υπεισέρχεται η ιδέα του laser. Αν με κάποιον τρόπο αναστραφούν οι αναλογίες ατομικών πληθυσμών, ώστε $N_2 > N_1$, κάτι που ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών, τότε το κυρίαρχο φαινόμενο θα είναι αυτό της εξαναγκασμένης εκπομπής και θα έχουμε ενίσχυση σήματος από το μέσο. Από την πρώτη ματιά φαίνεται ότι είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα σύστημα laser με τη χρήση ενός μέσου μετάπτωσης από την 1 στην 2 αρχικά χρησιμοποιώντας την διαδικασία της απορρόφησης και έπειτα,

αφού θα έχει γίνει η αναστροφή πληθυσμών, να ακολουθήσει το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να συμβεί γιατί, όταν μετά την απορρόφηση εξισωθούν ο ατομικός πληθυσμός της αρχικής και διεγερμένης κατάστασης τότε θα εξισωθεί και η πιθανότητα να συμβεί είτε απορρόφηση είτε εξαναγκασμένη εκπομπή. Έτσι ο ρυθμός των ατομικών απορροφήσεων θα εξισωθεί με τον αριθμό των εξαναγκασμένων αποδιεγέρσεων και οι δυο διαδικασίες θα αλληλοεξουδετερωθούν. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα ακολουθείται η τεχνική, της μεθόδου άντλησης. [44], [47]

Διάγραμμα Άντλησης

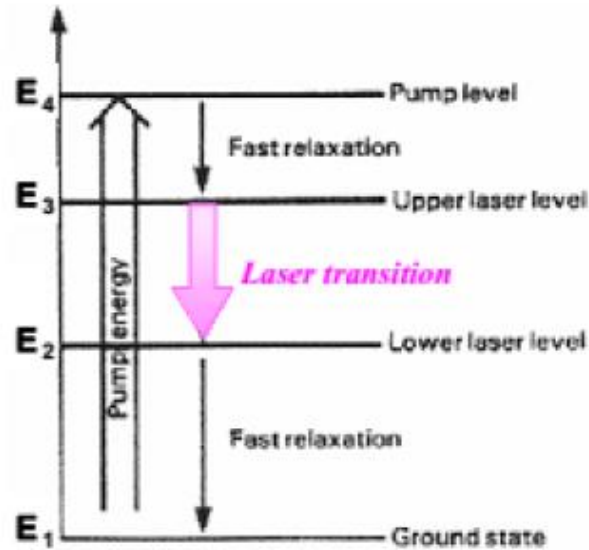
Με τον όρο άντληση εννοούμε την μεταφορά πληθυσμού από τη βασική σε μια ανώτερη διεγερμένη στάθμη, ώστε να πετύχουμε την αναστροφή πληθυσμού. Στη παρούσα φάση θα γίνει αναφορά στο σύστημα άντλησης τεσσάρων σταθμών, που είναι και το πιο συνηθισμένο σύστημα laser. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα άντλησης τεσσάρων σταθμών.



Σχήμα A.8 Διάγραμμα άντλησης (α)

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, αρχικά τα ηλεκτρόνια από την βασική στάθμη διεγείρονται στην στάθμη E_4 από εισερχόμενα φωτόνια, που έχουν ενέργεια ίση με $E_4 - E_1 = h \cdot \nu_{14}$. Στην συνέχεια τα ηλεκτρόνια από την E_4 , μεταβαίνουν απότομα στην στάθμη E_3 η οποία λέγεται και μετασταθής. Τα ηλεκτρόνια από την στάθμη E_4 στην E_3

μπορεί να μεταβούν είτε μέσω θερμικής αποδιέγερσης που είναι και το σύνηθες, είτε μέσω εκπομπής φωτονίων ενέργειας $E_4 - E_3 = h \cdot \nu_{43}$. Λέγεται μετασταθής στάθμη, επειδή ο χρόνος ζωής της είναι μεγαλύτερος από αυτόν της E_2 και έτσι δημιουργείται αναστροφή πληθυσμών μεταξύ των σταθμών E_3 και E_2 .

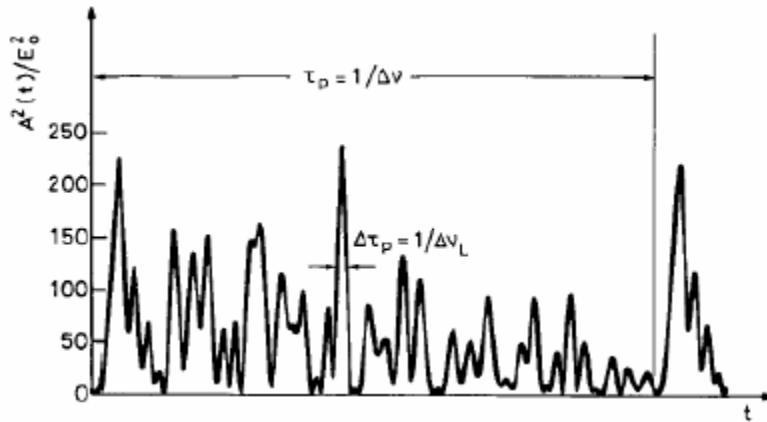


Σχήμα A.9 Διάγραμμα άντλησης (β)

Με ένα φωτόνιο ενέργειας $E_3 - E_2 = h \cdot \nu_{32}$, μπορεί να ξεκινήσει η εξαναγκασμένη εκπομπή. Τα φωτόνια τα οποία προκύπτουν, ενισχύουν το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής, έτσι ώστε τελικά να έχουμε μια πληθώρα φωτονίων ίδιας συχνότητας και συμφασικά. Έτσι παράγεται τελικά ένα συντονισμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μια ακτινοβολία laser.

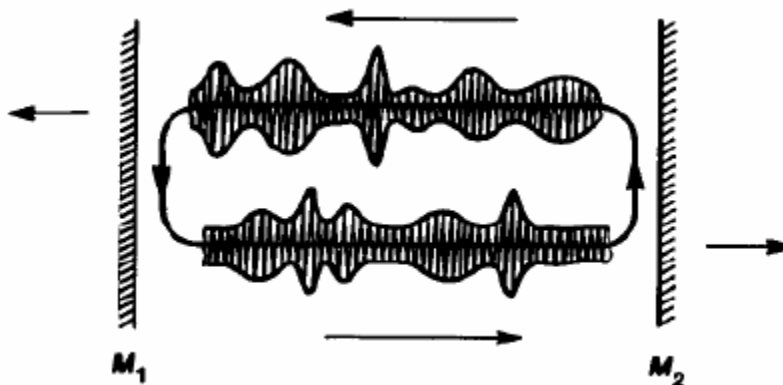
A.5 Τυπική Έξοδος Laser

Η τυπική έξοδος ενός laser με πολλαπλούς διαμήκεις ρυθμούς είναι η ακόλουθη



Σχήμα A.10 Παράδειγμα χρονικής συμπεριφοράς του τετραγώνου του πλάτους του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου $|A(t)|^2$, σε περίπτωση 51 ρυθμών ταλάντωσης, με το ίδιο πλάτος E_0 και τυχαίες φάσεις [45]

Παρά το γεγονός ότι η έξοδος μοιάζει εντελώς τυχαία, επαναλαμβάνεται σε χρονικά διαστήματα ίσα με $c/(2L_e)$. Παρόλα αυτά οι συγγενείς φάσεις των ρυθμών είναι τυχαίες. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το εσωτερικό μιας κοιλότητας laser και πώς ένα οπτικό σήμα κυκλοφορεί εντός αυτής.



Σχήμα A.11 Πρότυπο οπτικό πεδίο που κυκλοφορεί στο εσωτερικό κοιλότητας laser [45]

Το σήμα στο εσωτερικό της κοιλότητας αναπαράγεται μετά από ένα roundtrip μέσα στο οποίο και ενισχύεται. Το πλάτος αλλάζει γραμμικά λόγω της ενίσχυσης και της σύζευξης εξόδου (outcoupling) ενώ δεν υπάρχουν μη γραμμικότητες μιας και το σχήμα του σήματος παραμένει ίδιο.

$$\omega_{ax} = \omega_{q+1} - \omega_q = \frac{2\pi c}{p} = \frac{2\pi}{T}$$

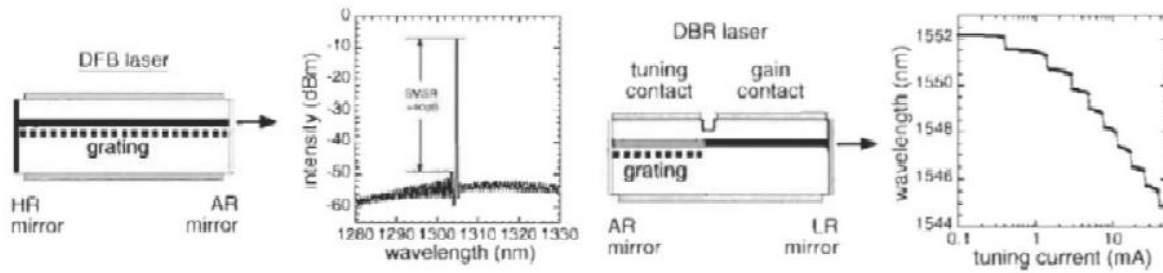
Οι βραχύτερες αιχμές στην έξοδο έχουν διάρκεια $\Delta T_p \sim 1/\Delta \nu_L$, ενώ οι αλλαγές σε αυτήν αλλάζουν αργά με το χρόνο καθώς οι συγγενείς φάσεις ολισθαίνουν. Μία αργή φωτοδίοδος «βλέπει» μόνο τη μέση ισχύ εξόδου από την κοιλότητα του laser.

$$P_{out}^{ave} \propto \sum_i^n (E_{0,i})^2$$

A.6 Είδη Laser πολλαπλών καναλιών

Laser τύπου DFB/DBR

Τα lasers Κατανεμημένης Ανάδρασης (DFB) μπορούν να οριστούν σαν τύπος ημιαγωγικών laser των οποίων η κοιλότητα αποτελείται από μια περιοδική δομή η οποία περιέχει στο μέσον της ένα μετατοπιστή φάσης (phase shifter) και λειτουργεί σαν ένας κατανεμημένος ανακλαστήρας στο εύρος ζώνης της επιθυμητής εκπομπής συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον και ένα στοιχείο κέρδους. Τα laser αυτά μπορούν να συντονιστούν σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων που είναι της τάξης των αρκετών νανομέτρων. Τα lasers Κατανεμημένου Ανακλαστήρα Bragg (DBR) κατασκευάζονται με τουλάχιστον ένα κατανεμημένο ανακλαστήρα Bragg εξωτερικά από το στοιχείο κέρδους. Η διαφορά τους με τα DFB είναι ότι στα DFB lasers το στοιχείο που προκαλεί την ανάδραση είναι ενιαίο και κατανεμημένο σε όλο το μήκος της κοιλότητας μαζί με το στοιχείο κέρδους.



Σχήμα A.12 Αναπαράσταση κοιλότητας laser DFB και DBR [49]

Στα DFB lasers η δομή περιλαμβάνει ένα κατανομημένο φράγμα περίθλασης Bragg έτσι ώστε η μεταβολή μέσα σε αυτό να είναι περιοδική. Με αυτόν τον τρόπο η ανάδραση της ενέργειας είναι περιοδική με βήμα Λ .

Αν η περίοδος κυμάτωσης Λ είναι ίση με:

$$\Lambda = \frac{l \cdot \lambda_B}{2n_e}$$

όπου l ακέραιος που εκφράζει την τάξη του φράγματος μεταγωγής, λ_B το μήκος κύματος Bragg και n_e ο δείκτης διάθλασης του μέσου τότε μόνο ο κοντινότερος ρυθμός στο λ_B ταλαντώνεται στην κοιλότητα και όλοι οι άλλοι αποσβένονται. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαφορά αυτού του τύπου των lasers με τα υπόλοιπα είναι ότι η σύζευξη της ενεργού περιοχής με μια συντονιζόμενη δομή γίνεται στο εσωτερικό της κοιλότητας και όχι εξωτερικά. Παρόμοια λειτουργούν και τα DBR με τη διαφορά ότι το φράγμα μεταγωγής δεν καλύπτει την ενεργό περιοχή αλλά η απολαβή είναι έξω από το φράγμα περίθλασης όπως στο σχήμα. Η συνάρτηση μεταφοράς αυτού του τύπου των laser βρίσκεται μετασχηματίζοντας κατά Fourier την κρουστική απόκριση του laser και δίνει:

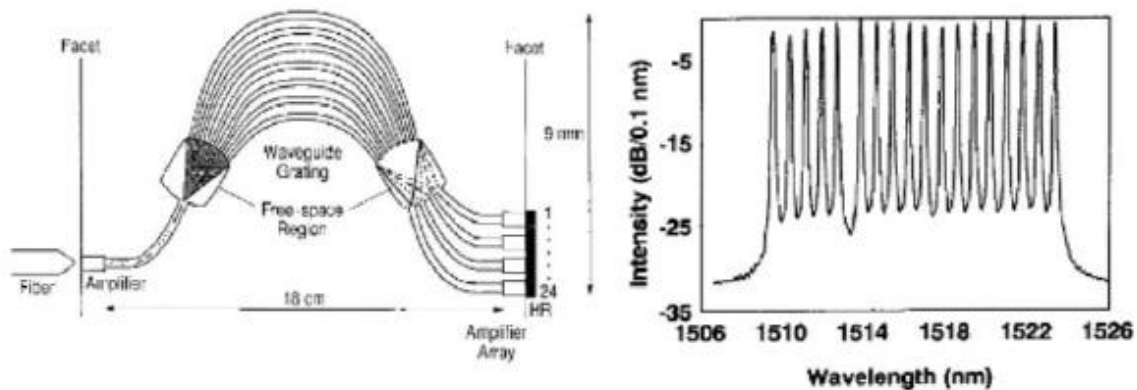
$$T(f) = \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$$

όπου τ ο χρόνος για μια πλήρη ταλάντωση στην κοιλότητα (roundtrip time).

Πολυσυχνοτικά Laser

Εκτός από την παραπάνω κατηγορία των lasers μια άλλη τεχνική που έχει υιοθετηθεί για αυτού του τύπου τις διατάξεις βασίζεται στην τοποθέτηση ενός AWG (Arrayed Waveguide Grating) μέσα στην κοιλότητα του laser. Τα lasers αυτά ονομάζονται Πολυσυχνοτικά

Lasers (Multifrequency Lasers) και η βασική τους διαφορά από τα υπόλοιπα πολυκαναλικά laser είναι ότι όλα τα κανάλια παράγονται στην ίδια κοιλότητα Fabry – Perot. [49]



Σχήμα A.13 Πολυσυχνотικό laser με WGR και το αντίστοιχο φάσμα [49]

Σε αυτή την υλοποίηση η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 103 GHz (~0.8 nm) που καθένα από αυτά δίνει κατά μέσο όρο ισχύ εξόδου της τάξης των -14.6 dBm. Κατά τη εκτέλεση πειράματος μετάδοσης κάθε κανάλι διαμορφώθηκε στα 1.24 Gbps δίνοντας συνολικό ρυθμό μετάδοσης πάνω από 20 Gbps.

Συντονιζόμενα Laser

Με βάση τους παραπάνω τύπους laser έχουν κατασκευαστεί διατάξεις laser οι οποίες έχουν την ικανότητα συντονισμού σε ένα μόνο κανάλι το οποίο μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ο συντονισμός σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα γίνεται είτε με τον μηχανικό έλεγχο του μήκους της κοιλότητας, είτε με τον έλεγχο της θερμοκρασίας αυτής. Τα πολυκαναλικά laser είναι οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται περισσότερο από όλες στα υπάρχοντα συστήματα WDM ως τώρα. Ωστόσο στο μέλλον αναμένεται η αντικατάστασή τους με πολυκυματικές πηγές. Οι λόγοι που υπαγορεύουν μια τέτοια αλλαγή βασίζονται σε διάφορους παράγοντες. Πρώτα από όλα, τα πολυκαναλικά laser απαιτούν ξεχωριστές τροφοδοσίες για κάθε πηγή κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Επιπλέον, η κατασκευή τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική αυξάνοντας κατά πολύ το κόστος ανά μεταδιδόμενο κανάλι. Επιπρόσθετα, με την υιοθέτηση της τεχνολογίας DWDM προκύπτει η απαίτηση για περισσότερα

κανάλια σε ένα συγκεκριμένο φασματικό εύρος που θα πρέπει να έχουν απόσταση μεταξύ τους 100 ή ακόμη και 50 GHz. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι απαιτήσεις για περισσότερα κανάλια, που ο αριθμός τους πλέον δεν είναι συγκρίσιμος με αυτόν των πολυκαναλικών laser, είναι αυξημένες. Έτσι οι πολυκυματικές πηγές προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα αυτό αφού με ένα laser ως είσοδο μπορούν να παράγουν πολλές συχνότητες στην έξοδο τους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πηγών αυτών είναι η δραματική μείωση του κόστους ανά κανάλι που παρέχουν σε συνδυασμό με τη συνοχή (coherence) μεταξύ των καναλιών. Μέχρι σήμερα κατά τη μετάδοση από τη μεριά του πομπού γινόταν διαμόρφωση της έντασης και από τη μεριά του δέκτη είχαμε άμεση αποδιαμόρφωση (μέθοδος IM/DD). Η παραγωγή πηγών με συνοχή επιτρέπουν τη χρήση τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που είναι ήδη γνωστές από άλλου τύπου τηλεπικοινωνιακά συστήματα, αυξάνοντας έτσι τη φασματική απόδοση. Σε αντίθεση με τα παραπάνω οι πολυκυματικές πηγές δημιουργούν πρόσθετες απαιτήσεις για σταθερότητα των καναλιών, ενώ ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων αφού τα μη-γραμμικά φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Laser τύπου VCSEL

Ένας άλλος τύπος laser με τον οποίο ασχοληθήκαμε εκτενώς στην παρούσα εργασία και που αποτελεί σημαντική τεχνολογία για πολυσυχνотικές συστοιχίες laser είναι το VCSEL (Vertical Cavity Surface – Emitting Laser). Το χαρακτηριστικό των lasers αυτών είναι ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται κάθετα στην ημιαγωγίμη περιοχή τους. Ένα τέτοιου τύπου laser αποτελείται από δύο καταναμημένης 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.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahadian J, Kusumoto K. Analog modulation characteristics of multimode fiber links based on commercial VCSELs. Executive summary, Ultra Communications, Inc. <http://ultracomminc.com/Documentation/RF-Photonics-Summary.pdf>. Accessed 11 August 2009
2. Huffaker DL, Deppe DG, Kumar K, Rogers TJ (1994) Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers. Appl Phys Lett 65:97–99
3. Benner A (2009) Cost-effective optics: enabling the exascale roadmaps. In: 17th annual IEEE symposium on high-performance interconnects, New York. [http://www.hoti.org/hoti17/program/slides/SpecialSession/Benner Optics Enabling Exascale Roadmaps.Hoti.090827.pdf](http://www.hoti.org/hoti17/program/slides/SpecialSession/Benner%20Optics%20Enabling%20Exascale%20Roadmaps.Hoti.090827.pdf). Accessed 27 August 2009
4. Light Peak, Intel. <http://www.intel.com/go/lightpeak>
5. Kern AM (2007) CMOS circuits for VCSEL-based optical IO. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, June
6. Fang AW (2008) Silicon evanescent lasers. Dissertation, University of California, Santa Barbara, CA, USA, March
7. <http://www.tcodevelopment.com/>
8. S Gupta, Computing with Green Responsibility, in International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2010) – TCET, Mumbai, India
9. [http://www.epset.gr/el/Nisrt/GreenIT#Πρασινη Πληροφορική και ΕΠΣΕΤ](http://www.epset.gr/el/Nisrt/GreenIT#Πρασινη%20Πληροφορική%20και%20ΕΠΣΕΤ)
10. <http://www.netweek.gr/default.asp?pid=9&la=1&arId=25639&pg=1&ss=>
11. Moore’s Law. <http://www.intel.com/technology/mooreslaw>
12. International technology roadmap for semiconductors, 2007 edn (ITRS 2007). Executive Summary <http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/ExecSum2007.pdf>
13. Jewell J, Graham L, Crom M, Maranowski K, Smith J, Fanning T (2006) 1310 nm VCSELs in 1–10 Gb/s commercial application. In: Proceedings of the SPIE, vol 6132, p 613204
14. Hofmann W, Müller M, Nadtochiy AM, Meltzer C, Mutig A, Böhm G, Roskopf J, Bimberg D, Amann MC, Chang-Hasnain C (2009) 22 Gb/s long wavelength VCSELs. Optics Express 17(20):17547–17554
15. Lott JA, Shchukin VA, Ledentsov NN, Stintz A, Hopfer F, Mutig A, Fiol G, Bimberg D, Blokhin SA, Karachinsky LY, Novikov II, Maximov MV, Zakharov ND, Werner P (2009) 20 Gbit/s error free

transmission with *850 nm GaAs-based vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) containing InAs–GaAs submonolayer quantum dot insertions. In: Proceedings of the SPIE 7211, paper 7211-40, Photonics West 2009, San Jose, CA, 29 January 2009

16. 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
17. 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, pp 49–50
18. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/197712/local_197712.pdf
19. Blokhin SA, Lott JA, Mutig A, Fiol G, Ledentsov NN, Maximov MV, Nadtochiy AM, Shchukin VA, Bimberg D (2009) Oxide-confined 850 nm VCSELs operating at bit rates up to 40 Gbit/s. *Electron Lett* 45(10)
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, Mikhrin 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. Mutig A, Fiol G, Moser P, Arsenijevic D, Shchukin VA, Ledentsov NN, Mikhrin SS, Krestnikov IL, Livshits DA, Kovsh AR, Hopfer F, Bimberg D (2008) 120_C 20 Gbit/s operation of 980 nm VCSEL. *Electron Lett* 44(22)
23. 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, pp 76–78
24. Fukatsu K, Shiba K, Suzuki Y, Suzuki N, Hatakeyama H, Anan T, Yashiki K, Tsuji M (2007) 30-Gbps transmission over 100 m-MMFs (GI32) using 1.1 μ m-range VCSELs and receivers. In: IEEE 19th international conference on indium phosphide & related materials, IPRM '07, Matsue, Japan, 14–18 May 2007
25. Ray T. Chen, Chulchae Choi, *Optical Interconnects*, USA, 2007
26. 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

27. Μινόγλου Κυριακή, Οπτικοηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης για υπέρυθρα φωτονικά μικροσυστήματα, Διδακτορική Διατριβή, ΕΚΠΑ, Αθήνα, Μάρτιος 2007
28. Christopher Chase, Yi Rao, Werner Hofmann, and Connie J. Chang-Hasnain, 1550nm high contrast grating VCSEL, University of California, Berkeley, USA, July 2010
29. Asier VillafrancaF, Javier Lasobras and Ignacio Garcés, Characterization of 1.55 μm VCSELs using high-resolution and highdynamic range measurements of the CW optical spectrum, University of Zaragoza, Spain, 2005
30. Ευστράτιος Κεχαγιάς, Εργαστηριακές Σημειώσεις για την λειτουργία των Φωτοδίοδων, Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών, ΕΜΠ, Αθήνα
31. Joseph T. Verdeyen, Laser Electronics, Third Edition, USA, 1995
32. Agilent Technologies, Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers, 2006
33. Agilent Technologies, Network Analysis Back to Basics
34. Αμανατιάδης Βασίλειος, Μετρήσεις σε πολύ υψηλές Συχνότητες, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2012
35. P. V. Mena, J. J. Morikuni, S. M. Kang, A. V. Harton and K. W. Wyatt, "A Simple Rate-Equation-Based Thermal VCSEL Model," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 17, no. 5, pp. 865-872, May 1999.
36. Goldren, L. A. and Corzine, S. W., Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, Chapter 5, New York: Wiley, 1995.
37. Matt Bruensteiner and George C. Papen, "Extraction of VCSEL Rate-Equation Parameters for Low-Bias System Simulation," IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, vol. 5, no. 3, pp. 487-494, 199.
38. John C. Cartledge and R. C. Srinivasan, "Extraction of DFB Laser Rate Equation Parameters for System Simulation Purposes," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 15, no. 5, pp. 852-860, 1997.
39. <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFittingPolynomial.html>
40. Silfvast W. T., Lasers. Fundamentals of Photonics (course 1 of 8). University of Central Florida. Orlando, Florida.

41. <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>
42. Στασινοπούλου Β., Ταμπαθάνη Ν., Χριστογιάννη Μ., Το Laser και οι Εφαρμογές του. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005
43. <http://www.kigre.com/files/historylasers.pdf>
44. Orazio Svelto, David Hanna, Principles of Lasers, Springer
45. Ηρακλής Αβραμόπουλος, Φωτονική Τεχνολογία για τηλεπικοινωνίες, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
46. Walter Koechner, Michael Bass, Solid state Lasers: a graduate text, Springer
47. William T. Silfvast, Laser Fundamentals, Cambridge
48. E. Siegman, Lasers, University Science Book, 1st Edition, California, 1996
49. M. Zirngibl et al ., An 18 Channel Multifrequency Laser, IEEE Photonics Technology Letters , Vol . 8, No. 7, pp.870-872 , July 1996
50. http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/3_TH2Combined_ModelingExtractionAndVerificationOfVCSELModelForOpticalIBISAMI_v2.pdf?&cc=GR&lc=eng
51. https://www.researchgate.net/post/How_to_Avoid_Overfitting/1
52. http://advancedsolutionsonline.net/?page_id=13
53. Alex Mutig, High Speed VCSELs for Optical Interconnects, Springer, Springer Theses, 2011
54. <http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/prashant.patil/index.html>