



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

**Πειραματικός Χαρακτηρισμός Dilute-Nitride Ημιαγωγίων  
Οπτικών Ενισχυτών (SOAs) και εφαρμογές σε Οπτικά  
Δίκτυα Πρόσβασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστόφορος Π. Σαραντόπουλος

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

---

Αθήνα, Αύγουστος 2014





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

## Πειραματικός Χαρακτηρισμός Dilute-Nitride Ημιαγωγίων Οπτικών Ενισχυτών (SOAs) και εφαρμογές σε Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστόφορος Π. Σαραντόπουλος

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την <sup>η</sup> Αυγούστου 2014.

.....  
Η. Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ν. Ουζούνογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χ. Καμάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

---

Αθήνα, Αύγουστος 2014

.....

Χριστόφορος Π. Σαραντόπουλος

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

Copyright © Χριστόφορος Π. Σαραντόπουλος 2014

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

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο πειραματικός χαρακτηρισμός των dilute-nitride SOAs τεχνολογίας GaInNAs(Sb)/GaAs και οι διερεύνηση της δυνατότητας τους να αποτελέσουν ενεργά στοιχεία σε ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα, μέσω της αξιολόγησης τους σε περιβάλλον πραγματικής μετάδοσης πληροφορίας.

Η εργασία περιέχει μία εκτενή περιγραφή των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στους ημιαγωγούς όταν αυτοί αλληλοεπιδρούν με το φως, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο η *εξαναγκασμένη εκπομπή* (Stimulated Emission) γίνεται το κυρίαρχο φαινόμενο στην ενεργό περιοχή νοθευμένων ημιαγωγών. Ακολουθεί εκτενείς παρουσίαση των ιδιοτήτων των SOAs ως στοιχεία ενίσχυσης, αλλά και ως μέρη ενός οπτικού κυκλώματος, με ιδιαίτερο βάρος στα χαρακτηριστικά εκείνα που τους καθιστούν ικανούς για περισσότερες λειτουργίες, όπως η *Ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης* (Cross-Gain Modulation-XGM, Cross-Phase Modulation-XPM).

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην φωτονική ολοκλήρωση με πλατφόρμες III-V ημιαγωγών, που μπορούν να αποτελέσουν την πλέον αξιόλογη λύση για την ολοκλήρωση ενεργών δομών σε *φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα* (Photonic Integrated Circuits-PICs). Ιδίως οι dilute-nitride ημιαγωγοί, λόγω της σχετικής ανεξαρτησίας των χαρακτηριστικών εκπομπής τους από τη θερμοκρασία, πράγμα που απαλλάσσει από την ανάγκη για ενεργοβόρους μηχανισμούς ψύξης, καθώς και του μικρού ανηγμένου κόστους ολοκλήρωσης για της πλατφόρμες GaAs-, αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο υλικό, πάνω στο οποίο επικεντρώνεται η εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού των dilute-nitride SOAs που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ). Αξιολογήθηκαν τα φάσματα αυθόρμητης εκπομπής, οι φασματικές ιδιότητες του κέρδους, η στατική και δυναμική του συμπεριφορά, καθώς και η δυνατότητα τους για τη διέγερση του φαινομένου τεσσάρων φωτονίων (Four-Wave Mixing-FWM). Συνολικά, τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ καλά χαρακτηριστικά και επιβεβαίωσαν την αναισθησία της λειτουργίας όσον αφορά τις εναλλαγές θερμοκρασίας.

Το επόμενο στάδιο ήταν η αξιολόγηση της λειτουργίας των SOAs σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας. Αξιολογήθηκε η δυνατότητα των SOAs να εκτελέσουν αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος, εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητα του Cross-Gain Modulation. Οι μετρήσεις έδειξαν λειτουργία χωρίς λάθη στα 5 Gb/s και 10 Gb/s, και ανέδειξαν τη δυνατότητα των dilute-nitride SOAs να λειτουργήσουν ακόμη και σε υπέρ-υψηλές ταχύτητες.

Τέλος, παρουσιάστηκαν προτάσεις για εφαρμογή σε τοπολογίες οπτικών δικτύων πρόσβασης. Τα *παθητικά οπτικά δίκτυα* (Passive Optical Networks-PONs) μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική λύση στην επικοινωνία, καθώς μπορούν να εξυπηρετήσουν με αξιοπιστία μεγάλο αριθμό χρηστών με πολύ μικρό κόστος εξοπλισμού. Οι προτεινόμενες εφαρμογές για τη χρήση ανακλαστικών SOAs (Reflective SOAs) για της λειτουργίες στο τερματικό ONU αποτελούν ενδιαφέρουσες λύσεις για απλή και φθηνή σχεδίαση του.

## Λέξεις Κλειδιά

Ημιαγώγιμοι Οπτικοί Ενισχυτές (SOAs), Φωτονική ολοκλήρωση, III-V ημιαγώγιμα υλικά Αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος, Αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος, Οπτικά δίκτυα πρόσβασης

## Abstract

The aim of this diploma thesis is the experimental characterization of the dilute-nitride GaInNAs(Sb)/GaAs SOAs and the investigation of their capability to be used as active elements in photonic circuits, through their evaluation in a datacom environment.

The diploma thesis contains a comprehensive description of the phenomena taking place in semiconductor materials when they interact with light, as well the way in which Stimulated emission becomes the dominant phenomenon at the active region of doped semiconductors. An extensive presentation follows including the key-characteristics of the SOAs as amplification units, as well as non-linear elements of an optical circuit, focusing on the characteristics making them capable of advanced functions, such as Cross-Gain Modulation (XGM) and Cross-Phase Modulation (XPM).

The third chapter discusses about the photonic integration of III-V semiconductor platforms, which can be considered as a robust solution for the integration of active structures in Photonic Integrated Circuits (PICs). In particular, the dilute-nitride semiconductors, due to their insensitivity to temperature changes releasing them from the need of energy-consuming cooling mechanism, as well as the low fabrication cost for GaAs- platforms, are making a promising material, on which this diploma thesis focuses.

The characterization results of dilute-nitride SOAs, that carried out at the Photonic Communications Research Laboratory (PCRL) premises, are reported in the forth chapter. The Amplified Spontaneous Emission (ASE) spectrum, the gain spectral properties, the static and dynamic gain characteristics and the capability of Four-wave mixing (FWM) were experimentally evaluated. As a result, the measurements of tested SOA-chips showed very good performance and experimentally validate the inherent temperature insensitive characteristics. .

The next stage was the evaluation of the operation of the SOAs in under true-data conditions. We evaluated the capability of the SOAs to perform all-optical wavelength conversion using the Cross-Gain Modulation mechanism. The measurements showed error-free operation at 5 Gb/s and 10 Gb/s confirming thereby the potentiality of dilute-nitride SOAs to penetrate into the high-speed signal processing environment.

At the end, various integration concepts for applications in the area of Access Optical Networks are proposed. Passive Optical Networks (PONs) can be considered as a considerable solution for the installed systems while they can reliably accommodate a vast amount of users with a relatively low infrastructure cost. The proposed applications for the adoption of Reflective SOAs (RSOAs) within the ONU schemes are remarkable solutions for its inexpensive and low-complexity.

## Key Words

Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs), Photonic Integration, III-V semiconductor materials, All-optical signal processing, All-optical wavelength conversion, Optical Access Networks

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον τομέα συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. Ηρακλή Αβραμόπουλο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές. Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Γιαννούλη που καθ' όλη τη διάρκεια αυτών των μηνών με βοήθησε ουσιαστικά τόσο με τις γνώσεις του και την καθοδήγησή του όσο και με την ηθική υποστήριξή του χωρίς την οποία η εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Παναγιώτη, την μητέρα μου Μαρία και τον αδερφό μου Γιάννη που πάντα βρίσκονται κοντά μου και με στηρίζουν και περίμεναν με υπομονή την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Ευχαριστώ επίσης τους φίλους με του οποίους μοιραστήκαμε τις στιγμές εκείνες που κάνουν τα φοιτητικά μου χρόνια το πιο ξεχωριστό κομμάτι της ζωής μου.

<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>11</b>
1.1 Φωτονική τεχνολογία	11
1.2 Τεχνολογικές εξελίξεις και ανάγκες	11
1.3 Η απάντηση των οπτικών στον παλιό κόσμο της ηλεκτρονικής	12
1.4 Πώς τα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα δίνουν τη λύση	15
<b>2. Αρχές λειτουργίας Ημιαγωγίων Οπτικών Ενισχυτών</b>	<b>20</b>
2.1 Ημιαγώγιμα Υλικά	20
2.1.1 Ιδιότητες	20
2.1.2 Ενεργειακές στάθμες και ηλεκτρική αγωγιμότητα	21
2.1.3 Φορείς φορτίου	21
2.1.4 Δημιουργία και επανασύνδεση φορέων	22
2.1.5 Νόθευση	22
2.1.6 Υλικά	23
2.2 Αλληλεπίδραση Ημιαγωγίων υλικών και φωτός	23
2.2.1 Εξαναγκασμένη εκπομπή	23
2.2.2 Ρυθμοί απορρόφησης και εκπομπής	25
2.2.3 Ενώσεις p-n	27
2.3 Οπτικοί ενισχυτές	30
2.3.1 Χαρακτηριστικά οπτικών ενισχυτών	30
2.3.2 Erbium-doped Fiber Amplifiers – EDFA	31
2.3.3 Ενισχυτής Raman	32
2.4 Ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές (Semiconductor Optical Amplifiers – SOAs)	33
2.4.1 Αρχή λειτουργίας	33
2.4.2 Ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή	34
2.4.3 Κέρδος ασθενούς σήματος	35
2.4.4 Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος	36
2.4.5 Κορεσμός του SOA από βραχύ οπτικό παλμό	36
2.4.6 Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων	37
2.4.7 Δείκτης διάθλασης του SOA	38
2.4.8 Διάδοση δύο οπτικών σημάτων σε SOA	40
2.5 SOAs και φωτονική	42
<b>3. III-V πλατφόρμες φωτονικής ολοκλήρωσης</b>	<b>44</b>
3.1 Φωτονική πλατφόρμα Si	46
3.2 Φωτονικές πλατφόρμες βασισμένες σε III-V υλικά	48
3.2.1 Ιστορική αναδρομή	48
3.2.2 Quantum well ενεργά στοιχεία	50
3.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των III-V υλικών στη φωτονική	52
3.3 Τεχνολογία GaInNAs(Sb)/GaAs	54



<b>4. Πειραματικός Χαρακτηρισμός SOAs</b>	<b>55</b>
4.1 Μετρήσεις στο probe station	55
4.2 Dilute Nitride SOAs στα 1.3 μm (GalNAs)	58
4.2.1 Σχεδιασμός και κατασκευή	58
4.2.2 Φάσμα ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission- ASE spectrum)	59
4.2.3 Στατικές μετρήσεις κέρδους	62
4.2.4 Δυναμική συμπεριφορά κέρδους	64
4.2.5 Διέγερση φαινόμενο μίξης τεσσάρων φωτονίων (Four-wave mixing – FWM) στον SOA	68
4.3 Dilute Nitride SOAs στα 1,55 μm (GalNAsSb)	71
4.3.1 Σχεδίαση και κατασκευή	71
4.3.2 Στατικές οπτικές και ηλεκτρικές μετρήσεις για τους DQW SOAs 1mm	72
4.3.3 Φασματικά χαρακτηριστικά κέρδους του DQW SOA	74
4.3.4 Στατικές μετρήσεις κέρδους στον DQW SOA	76
4.3.5 Δυναμικές μετρήσεις DQW SOA	78
4.3.6 Φασματικές μετρήσεις ASE για τους SQW SOAs 2mm	82
4.3.7 Καμπύλη κορεσμού κέρδους SQW SOA	82
4.3.8 Δυναμική συμπεριφορά του κέρδους στους SQW SOAs	83
4.3.9 Φαινόμενο Μίξης τεσσάρων φωτονίων (FWM) στον SQW SOA	84
4.4 Σύγκριση με τους InP SOAs	85
<b>5. Πειραματική Αξιολόγηση GalNAs(Sb) SOAs σε περιβάλλον πραγματικής κίνησης πληροφορίας</b>	<b>88</b>
5.1 Η τεχνική επιτάχυνσης της ταχύτητας ανάκαμψης κέρδους του SOA μέσω του chirp-filtering	89
5.2 Μετατροπή μήκους κύματος στους 1,3 μm GalNAs SOAs	90
5.3 Μετατροπή μήκους κύματος στους Single-QW 1,55 μm GalNAsSb SOAs	94
5.4 Μετατροπή μήκους κύματος στους 2-QW 1,55 μm GalNAsSb SOAs	97
<b>6. Προτεινόμενες Εφαρμογές Ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για τοπολογίες Access Δικτύων</b>	<b>102</b>
6.1 Παθητικά οπτικά δίκτυα	102
6.1.1 Αρχιτεκτονικές	103
6.1.2 Σχεδίαση και χαρακτηριστικά του ONU	105
6.2 Προτεινόμενες εφαρμογές	106
<b>7. Σύνοψη σημαντικών αποτελεσμάτων διπλωματικής εργασίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα</b>	<b>109</b>
7.1 Σύνοψη σημαντικών αποτελεσμάτων	109
7.1.1 Dilute Nitrides σε τεχνολογία GaAs: III-V τεχνολογίες στη φωτονική ολοκλήρωση	109
7.1.2 GalNAs(Sb)/GaAs: Επιτυχής κατασκευή και πειραματικός χαρακτηρισμός	110

7.1.3	Πιθανά σενάρια εφαρμογών dilute-nitride SOAs σε εφαρμογές οπτικών δικτύων πρόσβασης (Optical Access Networks)	111
<b>7.2</b>	<b>Προτάσεις για μελλοντική έρευνα</b>	<b>112</b>
<b>8.</b>	<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές</b>	<b>114</b>

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Φωτονική τεχνολογία

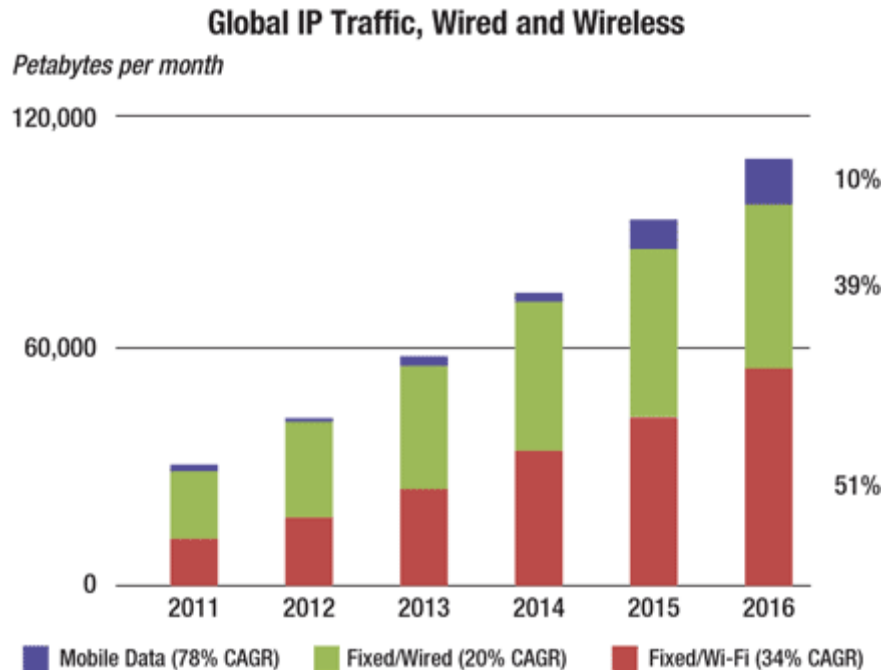
Φωτονική ονομάζεται ο κλάδος της επιστήμης και της τεχνολογίας που περιλαμβάνει τη μελέτη, τη δημιουργία, τον έλεγχο και την ανίχνευση φωτονίων. Ξεκίνησε ως σύνθεση από διαφορετικές προσεγγίσεις (οπτική, επιστήμη των υλικών, μηχανική, νανοτεχνολογία, φυσική και χημεία) με σκοπό την εκμετάλλευση του φωτός προς όφελος του ανθρώπου. Η εξέλιξη της αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα επιστημονικά επιτεύγματα του προηγούμενου αιώνα και τομή γι' αυτή αποτέλεσε ουσιαστικά η εφεύρεση του laser το 1960. Ακολούθησαν μια σειρά από σημαντικές εφευρέσεις όπως η ανάπτυξη των οπτικών ινών το 1970, καθώς και η κατασκευή του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου το 1987, οι οποίες οδήγησαν σε μια επί της ουσίας τηλεπικοινωνιακή επανάσταση και παρείχαν την απαραίτητη υποδομή για την ανάπτυξη του διαδικτύου.

Από τη δεκαετία του 1980 η φωτονική έγινε συνώνυμη με τη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικής ίνας. Αν και το πεδίο της φωτονικής περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, η μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στις τηλεπικοινωνίες έως και το 2001, όταν σημειώθηκε η κρίση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Από τότε και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, οι μη-τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές της φωτονικής εμφανίζουν μεγάλη άνθιση λόγω της ωριμότητας στον τομέα των φωτονικών υλών.

## 1.2 Τεχνολογικές εξελίξεις και ανάγκες

Η παραγωγή, διακίνηση και διάχυση της πληροφορίας αποτελούν θεμελιώδη χαρακτηριστικά της κοινωνίας μας και επιδρούν σε κοινωνικό, οικονομικό, πολιτικό και πολιτιστικό επίπεδο. Έτσι, η έρευνα στις μέρες μας έχει στρέψει σε πολύ μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον της τόσο στην ενσύρματη μετάδοση της πληροφορίας σε υψηλές ταχύτητες (telecom), όσο και στους τρόπους επεξεργασίας και δρομολόγησης της πληροφορίας αυτής σε κέντρα και μεταξύ κέντρων υπολογιστών (datacom).

Η ευρεία χρήση του διαδικτύου καθώς και η εξέλιξη της μορφής και των εφαρμογών του (από την απλή περιήγηση και την αποστολή μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, σε νέες ευρυζωνικές εφαρμογές όπως αποστολή video και υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης) αύξησε κατακόρυφα τον όγκο των δεδομένων που διακινούνται καθημερινά και κατά συνέπεια οδήγησε σε μία αλματώδη αύξηση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης. Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω γράφημα στο οποίο απεικονίζεται η αύξηση του όγκου των δεδομένων διαδικτύου (IP traffic) τα τελευταία χρόνια και γίνεται μια εκτίμηση μέχρι και το 2016. Παράλληλα, προσεγγίζει ποσοτικά και το είδος της σύνδεσης από την οποία διακινείται η πληροφορία αυτή.

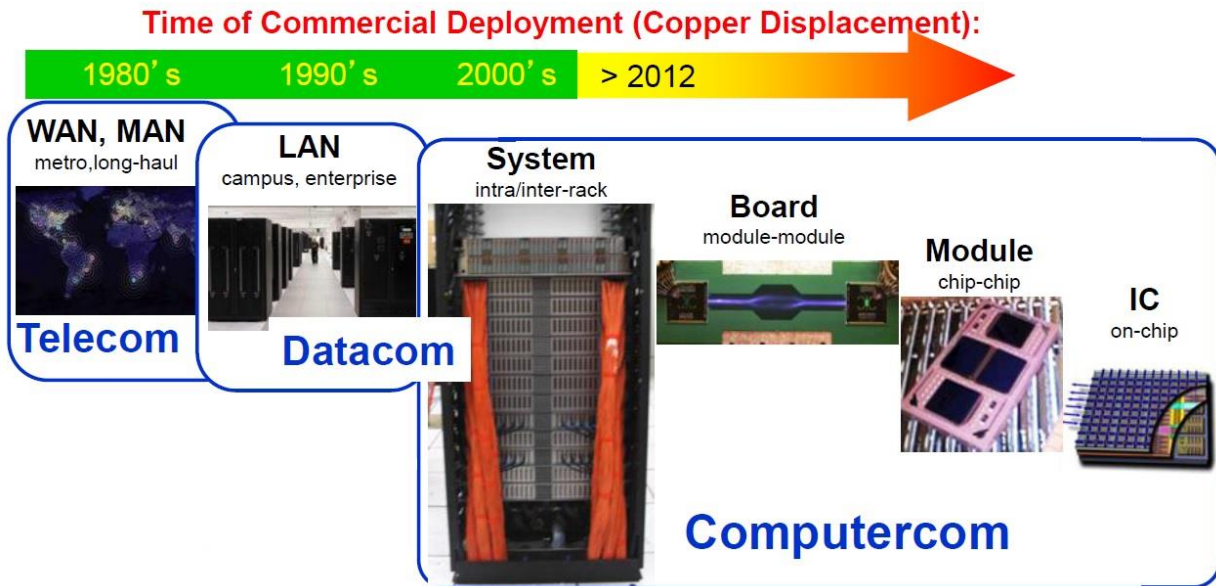


Εικόνα 1.1 Παγκόσμια κίνηση IP σε βάθος της πενταετίας που διανύουμε

Επιπλέον, η ανάγκη για άριστη επίδοση των servers του διαδικτύου τόσο ως προς τη γρήγορη επεξεργασία και αποστολή πληροφορίας όσο και ως προς την ανάγκη χαμηλής κατανάλωσης ισχύος είναι μη διαπραγματεύσιμη. Έτσι, η μεγάλη αυτή κινητικότητα έχει οδηγήσει στην εμφάνιση του Cloud Computing, δηλαδή στη χρησιμοποίηση πολλών και διαφορετικών servers που είναι ηλεκτρονικοί υπολογιστές ή ομάδες υπολογιστών που εξυπηρετούν τις ανάγκες των χρηστών των ιστοσελίδων, επεξεργάζονται και παρέχουν τις εφαρμογές του διαδικτύου. Σε ένα τέτοιο λοιπόν ολόενα και πιο απαιτητικό περιβάλλον όσον αφορά στη μετάδοση της πληροφορίας και στην επίλυση των ζητημάτων που ανακύπτουν γύρω από αυτή, έρχεται να δώσει λύση η φωτονική τεχνολογία.

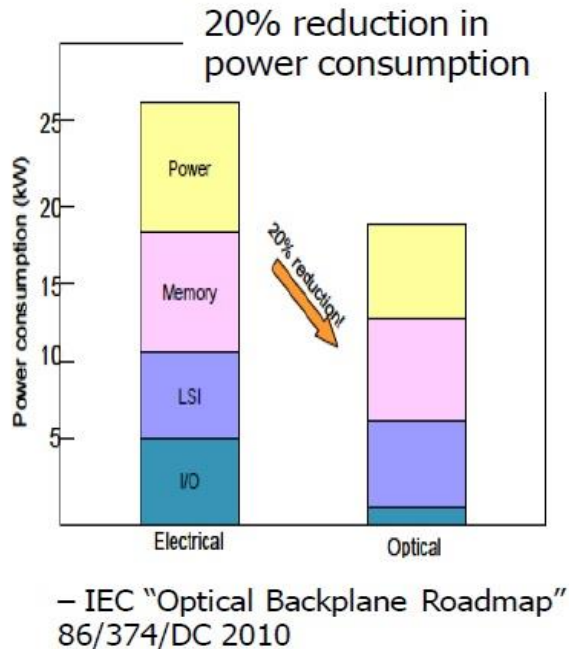
### 1.3 Η απάντηση των οπτικών στον παλιό κόσμο της ηλεκτρονικής

Στον τομέα της Φωτονικής η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάπτυξη του διαδικτύου, πέρα από την ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης, δημιούργησε περισσότερες απαιτήσεις για χωρητικότητα στις οπτικές ίνες. Η εξέλιξη των οπτικών διασυνδέσεων σε βάθος χρόνου μπορεί να φανεί στην εικόνα 1.2. Γίνεται εμφανές το πώς σε βάθος χρόνου έχουν αρχίσει να σχεδιάζονται οπτικές διασυνδέσεις ακόμη και μεταξύ των στοιχείων ενός και μόνο chip. Το πλεονέκτημα των οπτικών διασυνδέσεων στον παράγοντα bandwidth\*απόσταση οδηγεί στην εγκατάστασή τους για όλο και μικρότερες αποστάσεις.



Εικόνα 1.2 Εξέλιξη οπτικών διασυνδέσεων

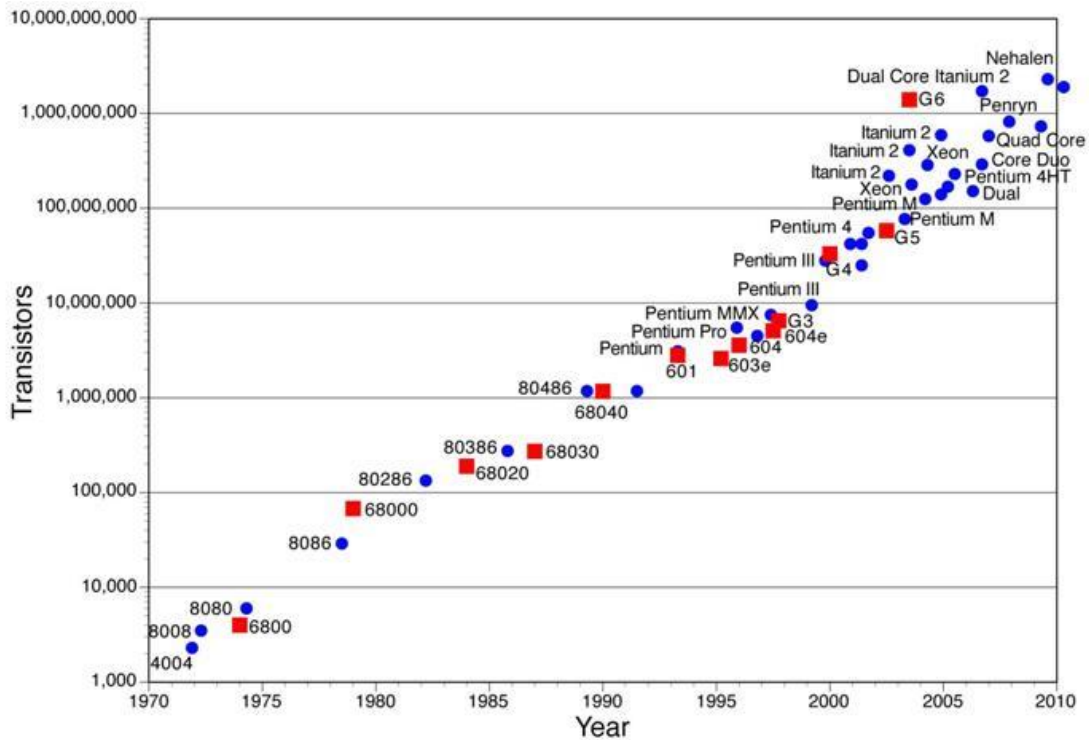
Για τις οπτικές διασυνδέσεις, η μέχρι τώρα διακριτοποιημένη (discretized) αρχιτεκτονική - δηλαδή η αρχιτεκτονική εκείνη κατά την οποία τα διάφορα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς ή αγωγίμες διασυνδέσεις πάνω στην πλακέτα - δεν μπορούσε να ανταπεξέλθει. Υψηλό κόστος, πολυπλοκότητα και ελλιπής αξιοπιστία είναι μερικά από τα μειονεκτήματα που συνδέονται με τα πολλαπλά και ανεξάρτητα στοιχεία και ενώσεις. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι το εύρος ζώνης αυξάνεται κατά 75% κάθε χρόνο (όπως συμβαίνει σε πολλά σύγχρονα δίκτυα σήμερα) για τα επόμενα 10 χρόνια. Χρησιμοποιώντας τα σημερινά διακριτοποιημένα συστήματα, το διαδίκτυο θα απαιτούσε εκατομμύρια περισσότερες κάρτες γραμμής, χιλιάδες περισσότερους μηχανικούς για να τις εγκαταστήσουν καθώς επίσης θα κατανάλωνε περισσότερα από 3 GW ηλεκτρικής ενέργειας – ισοδύναμη με 7 μεσαίου μεγέθους μονάδες παραγωγής ενέργειας. Με τους περιορισμούς του προϋπολογισμού στους οποίους υπόκεινται οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών, αυτό δεν θα ήταν εφικτό. Απάντηση δίνει η εισαγωγή μιας μεγάλης κλίμακας φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Photonic Integrated Circuits–PICs) σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, προσφέροντας μια εναλλακτική προσέγγιση στη δημιουργία ευέλικτων δικτύων. Κλασικό παράδειγμα στο πεδίο της μεταγωγής μπορεί να αποτελέσει η διαφορά στην κατανάλωση μεταξύ ενός οπτικού και ηλεκτρικού router, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε σε ένα ενδεικτικό παράδειγμα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων κάνοντας χρήση των οπτικών συστημάτων, ένας οπτικός router μπορεί να έχει 20% μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση μειώνοντας αισθητά την ενεργειακή κατανάλωση σε όλες τις βασικές λειτουργίες του μεταναστεύοντας στον κόσμο των οπτικών.



Εικόνα 1.3 Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης σε ηλεκτρικό και οπτικό router

Αντικείμενο της επιστημονικής έρευνας την τελευταία εικοσαετία αποτέλεσε η δυνατότητα ένταξης των οπτικών στοιχείων σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα οποία θα επέτρεπαν τη συνεχή αύξηση της πυκνότητάς τους, όπως ακριβώς τα ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Στον τομέα της ηλεκτρονικής είναι ευρέως διαδεδομένος ο *Νόμος του Moore*, κατά τον οποίο ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούν να τοποθετηθούν χωρίς υπερβολικό κόστος σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιάζεται ανά δύο έτη. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τον αριθμό των τρανζίστορ στα ολοκληρωμένα κυκλώματα από το 1971 ως το 2010 και αποτελεί επαλήθευση του Νόμου του Moore. [1]

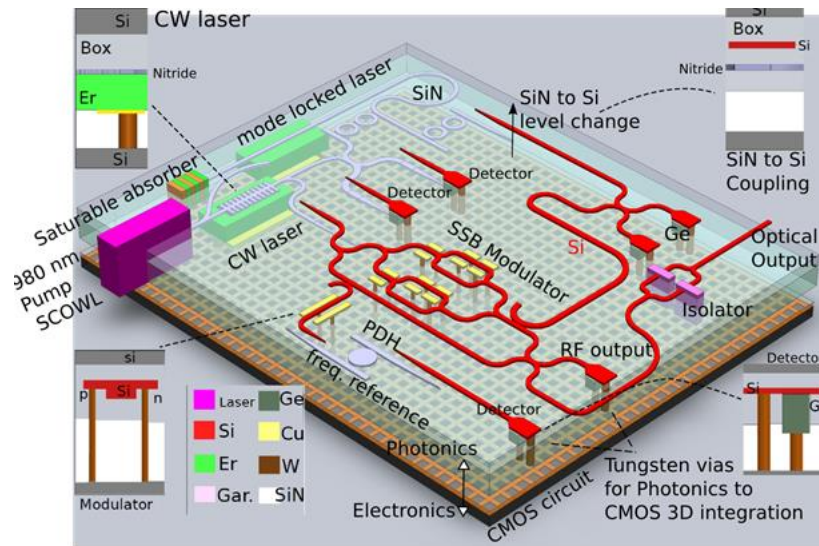


Εικόνα 1.4 Ιστορικά στοιχεία για τον αριθμό τρανζίστορ σε ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα στοιχεία επαληθεύουν το νόμο του Moore

Μία αντίστοιχη πρόβλεψη υπάρχει και στα οπτικά κυκλώματα, ο «Νόμος του Moore για τη Φωτονική». Παρόλα αυτά, η ενσωμάτωση οπτικών στοιχείων επικοινωνιών θέτει σημαντικές προκλήσεις, λόγω της ποικιλομορφίας των στοιχείων και των λειτουργιών που απαιτούνται για τη δημιουργία, τη διαμόρφωση, την ανίχνευση και τη δρομολόγηση του φωτός.

## 1.4 Πώς τα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα δίνουν τη λύση

Η χρήση του πυριτίου παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, σημαντικότερο από τα οποία είναι η τεχνογνωσία που έχει αποκτηθεί από την χρήση του στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η τεχνολογία CMOS η οποία υιοθετείται για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορεί να μεταπηδήσει εύκολα και στα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα Si. Επίσης, διαθέτει όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται έτσι ώστε να αποτελεί μια τρομερά αξιόπιστη λύση για οποιαδήποτε παθητική δομή.



Εικόνα 1.5 Παράδειγμα φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος που περιέχει μεγάλο αριθμό ενεργών και παθητικών στοιχείων

Παρόλα αυτά το πυρίτιο κρύβει και μία εγγενή αδυναμία. Το έμμεσο ενεργειακό του διάκενο καθιστά ανέφικτη τη χρήση του για την ολοκλήρωση ενεργών οπτικών στοιχείων. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η μετατόπιση του πεδίου της έρευνας σε άλλες ανταγωνιστικές λύσεις, ικανές να καλύψουν αυτό το κενό. Οι III-V ημιαγωγοί (δυαδικά παράγωγα των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα) αποτελούν την βασική κατεύθυνση για την ολοκλήρωση ενεργών οπτικών στοιχείων, είτε υβριδικά πάνω σε πλατφόρμες πυριτίου, είτε μονολιθικά, δηλαδή σε πλατφόρμες που αποτελούνται από ένα μοναχά υλικό.

Τα τελευταία χρόνια ειδικότερα, μεγάλο ενδιαφέρον έχει επιδειχθεί για μια ιδιαίτερη ομάδα των III-V ημιαγωγών, τους dilute nitride, αυτούς δηλαδή που περιέχουν προσμίξεις αζώτου (N). Η χρήση των υλικών αυτών έχει εδώ και πολλά χρόνια δοκιμαστεί σε φωτοβολταϊκές διατάξεις, προσφέροντας μεγάλη απόδοση για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών. Η πραγματική αξία αυτών των υλικών κρύβεται στην αναισθησία τους στις μεταβολές αυτές. Αναλυτικά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η αναισθησία αυτή είναι:

- Χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, μιας και απαλλάσσει από την ανάγκη για ενεργοβόρους μηχανισμούς ψύξης.
- Μεγάλη απλοποίηση στο packaging, αφού δεν υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν μηχανισμοί ψύξης
- Αναισθησία σε φαινόμενα θερμικού crosstalk με συνέπεια την αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης καθώς μπορούν να έρθουν κοντά οι ενεργές διατάξεις των κυκλωμάτων.

Ακόμη, λόγω της χρήσης πλατφόρμας ολοκλήρωσης GaAs- προσφέρουν πολύ μικρότερο ανηγμένο κόστος ολοκλήρωσης. Η χρήση τους σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα σε μεγάλο βαθμό θα μπορούσε να καλύψει την ανάγκη για αποδοτικό κόστος, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και υψηλές επιδόσεις.

Σημαντικό κεφάλαιο για την φωτονική ολοκλήρωση αποτελούν οι ημιαγωγιμοί οπτικοί ενισχυτές (SOAs). Ο βασικότερος λόγος είναι ότι τα μη-γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν

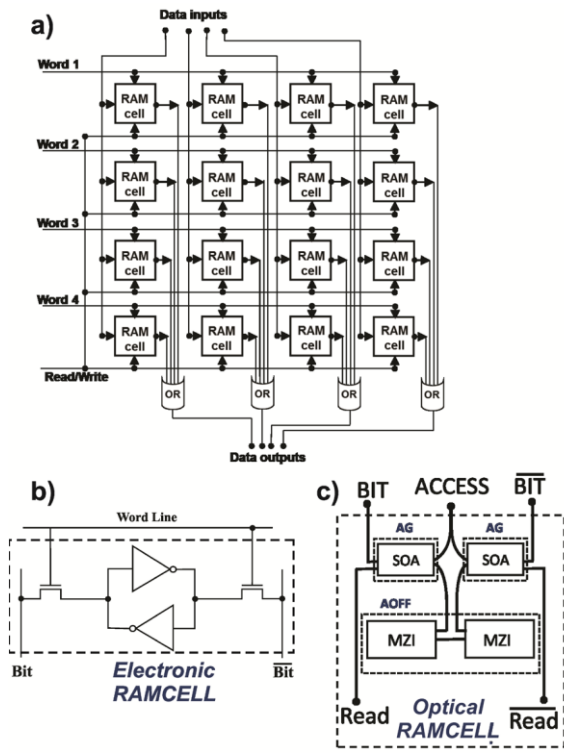


χώρα στο εσωτερικό του και η μεγάλη ταχύτητα των δυναμικών που αναπτύσσονται που δίνουν τη δυνατότητα για ενίσχυση και επεξεργασία σήματος σε πολύ υψηλά bitrates. Επιπρόσθετα, το μικρό τους μέγεθος τους δίνει τη δυνατότητα να ολοκληρωθούν σε PICs.

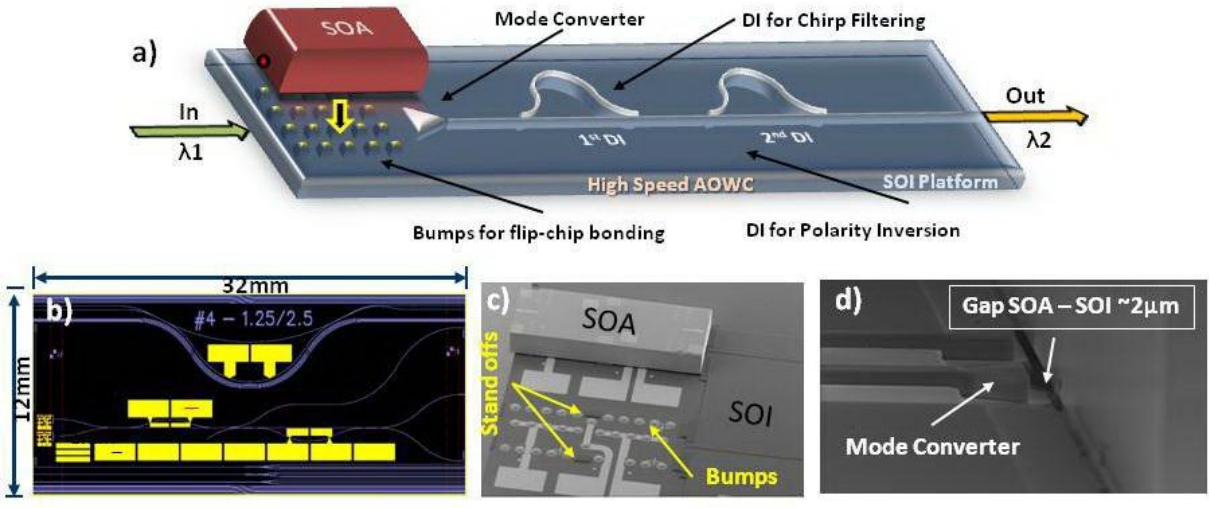
Εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες τους, οι SOAs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια σειρά από εφαρμογές που διευρύνονται από απλά στοιχεία κέρδους ως μη-γραμμικά στοιχεία συντελώντας σε λειτουργίες επεξεργασίας οπτικού σήματος και άλλες λειτουργίες οπτικών δικτύων. Μερικά ενδεικτικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω:

- Στοιχεία ενίσχυσης πάνω στο chip. Οι SOAs απαντάν στην ανάγκη για ενίσχυση πάνω στο chip που ανοίγει το δρόμο για την αύξηση των παθητικών λειτουργιών πάνω στο chip καθώς είναι εφικτό να υπάρχει αντιστάθμιση των απωλειών που προκαλείται από τις απώλειες διάδοσης (propagation losses) και τις απώλειες εισόδου (insertion losses) παθητικών διατάξεων.
- Η υλοποίηση αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος (Wavelength Converters) σε υπερύψηλές ταχύτητες με αξιοποίηση των μηχανισμών του Cross Gain Modulation και του Cross Phase Modulation (XPM)[38]. Αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές που εφαρμόζεται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών των οπτικών δικτύων (packet contention resolution, buffering schemes) αλλά και επεξεργασίας οπτικού σήματος σε datacom περιβάλλον. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων δομών που μπορεί να προσφέρουν τη συγκεκριμένη λειτουργία σε ταχύτητες  $> 100\text{Gb/s}$  καθιστά την υλοποίηση αυτή σαν μια ολοκληρωμένη λύση ικανή να συναντά τις σύγχρονες απαιτήσεις για υπερ-υψηλές ταχύτητες.
- Χρήση στην δημιουργία αμιγώς οπτικών αναγεννητών σήματος διαμορφωμένου κατά φάση[39]. Η οπτική αναγέννηση σημάτων αποτελεί μια ελκυστική προσέγγιση που αποσύρει την ανάγκη για οπτο/ηλεκτρονική/οπτική μετατροπή του σήματος. Οι ολοκληρωμένες αναγεννητικές διατάξεις που βασίζονται σε υψηλά μη-γραμμικούς SOAs αποτελούν μια αξιόπιστη επιλογή για σχήματα διαμόρφωσης στη φάση σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης [81].
- Εφαρμογές σε οπτικά δίκτυα πρόσβασης με χρήση Reflective SOAs (RSOAs) καθώς και με παράλληλη χρήση SOA και διαμορφωτή τύπου EAM [40]. Αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές ολοκληρωμένων δομών που βασίζονται σε SOAs έχοντας διεισδύσει στο πραγματικό κόσμο των οπτικών δικτύων πρόσβασης.
- Ανάπτυξη κυκλωμάτων flip-flops βασισμένα σε συζευγμένες δομές SOAs [41]. Η ανάπτυξη ενός αμιγώς οπτικού κυκλώματος ψαλιδιστή (All-Optical Flip-Flop) αποτέλεσε τομή την προηγούμενη δεκαετία και άνοιξε το δρόμο για τη διερεύνηση της απάντησης του κόσμου των οπτικών στο θεμελιώδες πρόβλημα της ανάπτυξης οπτικών στοιχείων μνήμης.
- Ανάπτυξη οπτικής μνήμης RAM που βασίζεται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα που χρησιμοποιούν τους SOAs για την υλοποίηση κυκλωμάτων μνήμης (shift registers) καθώς και ανάπτυξη περιφερειακών κυκλωμάτων ελέγχου της οργάνωσης της μνήμης (peripheral circuits) [82].

Στις εικόνες 1.6 και 1.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που βασίζονται στη χρήση SOAs και υποστηρίζουν τις πιο πάνω λειτουργίες.



Εικόνα 1.6 (α) 4x4 δομή κελιών RAM (β) κελί ηλεκτρονικής στατικής RAM (γ) κελί οπτικής RAM



Εικόνα 1.7 (α) Αμιγώς οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος (β) σχεδίαση μάσκας (γ),(δ) εικόνες από SEM του SOA πάνω στην πλατφόρμα SOI

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (Semiconductor Optical Amplifiers - SOAs) κατασκευασμένων από dilute nitride ημιαγωγούς να αποτελέσουν μια αξιόπιστη και ανταγωνιστική λύση ως ενεργά στοιχεία σε ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας.

## 2. Αρχές λειτουργίας Ημιαγώγιμων Οπτικών Ενισχυτών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι θεωρητικές αρχές που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μία ημιαγώγιμη συσκευή. Αρχικά γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην θεωρία των ημιαγωγών, η οποία ακολουθείται από την παρουσίαση των φαινομένων αλληλεπίδρασης τους με το φως. Τέλος, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των οπτικών ενισχυτών, καθώς και μία εκτενείς αναφορά στα χαρακτηριστικά των SOAs.

### 2.1 Ημιαγώγιμα Υλικά

Ημιαγωγός ονομάζεται ένα υλικό το οποίο έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ενδιάμεση αυτής ενός αγωγού και ενός μονωτή. Οι ημιαγωγοί αποτελούν τον στυλοβάτη των σύγχρονων ηλεκτρονικών και χρησιμοποιούνται σε τρανζίστορ, φωτοβολταϊκά, οπτικές συσκευές και σε όλα τα αναλογικά και ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η προσέγγιση των ιδιοτήτων των ημιαγωγών βασίζεται στη κβαντική φυσική, ώστε να εξηγηθεί η κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα πλέγμα κρυσταλλικών δομών. Η όλο και αυξανόμενη κατανόηση των ημιαγώγιμων υλικών και οι σύγχρονες τεχνικές κατασκευής έχουν οδηγήσει σε συνεχόμενη αύξηση της πολυπλοκότητας και ταχύτητας των ημιαγώγιμων συσκευών, σύμφωνα και με το προαναφερθέντα νόμο του Moore [1].

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός ημιαγώγιμου υλικού αυξάνεται με την θερμοκρασία, συμπεριφορά αντίθετη με αυτή των μετάλλων. Οι ημιαγωγοί μπορούν να παρουσιάσουν μια σειρά από ελκυστικές ιδιότητες, όπως η ροή ηλεκτρικού ρεύματος ευκολότερα προς τη μία κατεύθυνση από ότι σε άλλη, μεταβλητή αντίσταση και ευαισθησία στο φως ή τη ζέστη. Οι ιδιότητες των ημιαγωγών που σχετίζονται με την αγωγιμότητα μπορούν να μεταβάλλονται με την ελεγχόμενη προσθήκη νοθεύσεων ή από την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Για αυτόν ακριβώς το λόγο οι ημιαγωγοί είναι πολύ χρήσιμοι για την ενίσχυση σημάτων και στη μετατροπή ενέργειας[2].

#### 2.1.1 Ιδιότητες

Οι καθαροί ημιαγωγοί είναι κακοί αγωγοί του ρεύματος, καθώς όλα τους τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν επακριβώς τους δεσμούς σθένους. Μέσω διάφορων τεχνικών (π.χ. νόθευση) οι ημιαγωγοί μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να έχουν περίσσια ηλεκτρονίων (και έτσι να γίνουν ημιαγωγοί n-τύπου) είτε έλλειψη ηλεκτρονίων (και να γίνουν ημιαγωγοί p-τύπου). Σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις ο ημιαγωγός γίνεται πολύ πιο αγωγίμος (έως και ένα εκατομμύριο φορές πάνω!). Οι ημιαγώγιμες συσκευές εκμεταλλεύονται αυτό το φαινόμενο για το σχηματισμό ηλεκτρικού ρεύματος.

Όταν νοθευμένοι ημιαγωγοί ενώνονται με μέταλλα, άλλους ημιαγωγούς ή και τον ίδιο ημιαγωγό αλλά με διαφορετική νόθευση, η ένωση που δημιουργείται απογυμνώνει τον ημιαγωγό από την περίσσια ή έλλειψη ηλεκτρονίων κοντά στην ένωση. Η ενεργός περιοχή (Depletion region) ανορθώνεται (και το ρεύμα ρέει προς τη μία κατεύθυνση) και δημιουργεί περαιτέρω ρεύματα στην ημιαγώγιμη συσκευή.

## 2.1.2 Ενεργειακές στάθμες και ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ιδιαίτερη συμπεριφορά των ημιαγωγών σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να γίνει αντιληπτή αν λάβουμε υπόψη μας τις κβαντικές καταστάσεις των ηλεκτρονίων, όπου η καθεμία μπορεί να περιέχει ένα ή κανένα ηλεκτρόνιο, σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli. Αυτές οι καταστάσεις σχετίζονται με την ηλεκτρονιακή δομή σταθμών του υλικού. Για να μπορεί να συμμετέχει στη μεταφορά ηλεκτρονίων μία ενεργειακή στάθμη πρέπει να είναι



Εικόνα 2.1 Ηλεκτρονιακή δομή ζωνών σε ημιαγωγό

μερικώς κατειλημμένη δηλαδή να περιέχει ηλεκτρόνιο μόνο μέρος του συνολικού χρόνου.[3]

Αν η κατάσταση είναι κατειλημμένη από ηλεκτρόνιο στο σύνολο του χρόνου παραμένει αδρανής, και δεν επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρονίων δια μέσω αυτής της κατάστασης. Η ενέργεια αυτών των καταστάσεων έχει αποφασιστικό ρόλο, μίας και μία κατάσταση είναι μερικώς κατειλημμένη μόνο εάν η ενέργεια της είναι κοντά στη στάθμη Fermi.

Υψηλή αγωγιμότητα έχει ένα υλικό που έχει πολλές μερικώς κατειλημμένες καταστάσεις. Σε έναν ημιαγωγό, το ενεργειακό διάκενο είναι τόσο μικρό, που μπορούν ηλεκτρόνια να μεταπηδήσουν από την ζώνη σθένους (valence band) (περιοχή κάτω απ' το διάκενο) στη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) (περιοχή πάνω από το διάκενο), δημιουργώντας μερικώς κατειλημμένες καταστάσεις σε καθεμία από τις δύο ζώνες [4].

Ένας καθαρός ημιαγωγός δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, καθώς δεν είναι ιδιαίτερα καλός αγωγός ούτε μονωτής. Παρ' όλα αυτά μία σημαντική ιδιότητα των ημιαγωγών είναι ότι η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα μπορεί να αυξηθεί και να ελεγχθεί είτε μέσω της νόθευσης, είτε με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Αυτές οι διαδικασίες μετακινούν τη ζώνη σθένους ή αγωγιμότητας πολύ πιο κοντά στη στάθμη Fermi, και αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό το πλήθος των μερικώς κατειλημμένων καταστάσεων.

## 2.1.3 Φορείς φορτίου

Η μερική κατάληψη καταστάσεων στον πάτο της ζώνης σθένους μπορεί να γίνει αντιληπτή σαν προσθήκη ηλεκτρονίων σ' αυτή τη ζώνη. Τα ηλεκτρόνια δεν μένουν επ' αόριστον σε αυτή την κατάσταση. Η πραγματική συγκέντρωση ηλεκτρονίων είναι συνήθως πολύ μικρή, και

μπορούμε να φανταστούμε τα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού σαν σε ιδανικό αέριο, να περιφέρονται ελεύθερα.

Για τη μερική κατάληψη της κορυφής της ζώνης σθένους εισάγουμε την έννοια της ηλεκτρονιακής οπής. Παρόλο που τα ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους βρίσκονται διαρκώς σε κίνηση, όταν η ζώνη σθένους είναι πλήρως κατειλημμένη είναι αδρανής και δεν άγει καθόλου ρεύμα. Αν όμως αφαιρεθεί ένα ηλεκτρόνιο, τότε η τροχιά που αυτό θα καταλάμβανε κανονικά χάνει το φορτίο της. Για της ανάγκες της κατανόησης σε επίπεδο ηλεκτρικού ρεύματος, μπορούμε να αντιληφθούμε την πλήρως κατειλημμένη ζώνη σθένους μείον ένα ηλεκτρόνιο σαν μία εντελώς άδεια ζώνη που περιέχει ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο που κινείται σαν ηλεκτρόνιο. Αυτό το σωματίδιο ονομάζεται οπή.

#### 2.1.4 Δημιουργία και επανασύνδεση φορέων

Όταν ιονίζουσα ακτινοβολία προσπίπτει σε ημιαγωγό, μπορεί να οδηγήσει ένα ηλεκτρόνιο σε διέγερση από την ενεργειακή στάθμη του και συνεπώς να αφήσει μια οπή. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών δημιουργούνται διαρκώς λόγω θερμικής ενεργείας απουσία εξωτερικής πηγής ενέργειας.

Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τείνουν επίσης να επανασυνδέονται. Κατά την επανασύνδεση φορέων το ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο. Για τη διατήρηση της ενέργειας πρέπει αυτή η διαδικασία να συνοδεύεται από την εκπομπή ακτινοβολίας, σε μορφή φωτονίου, η θερμικής ενέργειας (μέσω φωνονίου)[5].

Η επανασύνδεση κατά την οποία εκπέμπεται ένα φωτόνιο του οποίου το μήκος κύματος ανταποκρίνεται στην ενεργειακή μετάβαση ονομάζεται *ακτινοβολούσα επανασύνδεση* (Radiative recombination). Η ακτινοβολούσα επανασύνδεση φορέων αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας των SOAs. Λόγω της μικρής ορμής που έχει το φωτόνιο, τέτοιου τύπου επανασύνδεση φορέων μπορεί να υπάρξει μοναχά σε ημιαγωγό υλικά με άμεσο ενεργειακό διάκενο (direct bandgap). Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο συνήθη ημιαγωγό υλικά, όπως το πυρίτιο (Si) δεν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή SOAs.

Ειδικά στην περίπτωση που φωτόνια προσπίπτουν στο υλικό, μπορούν είτε να απορροφηθούν, δημιουργώντας ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, είτε μπορεί να εξαναγκάσει ένα γεγονός επανασύνδεσης, οδηγώντας στην δημιουργία ενός φωτονίου με παρόμοιες ιδιότητες με αυτό που προκάλεσε το γεγονός. Η απορρόφηση είναι η ενεργώς διαδικασία στις φωτοδιόδων, φωτοβολταϊκών και διαφόρων ημιαγωγικών φωτοανιχνευτών, ενώ η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι η βάση της λειτουργίας των laser, των LED και βέβαια των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών[2].

#### 2.1.5 Νόθευση

Η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί με την εισαγωγή νοθεύσεων στην κρυσταλλική τους δομή. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *νόθευση* (Doping). Η ποσότητα των νοθεύσεων σε έναν καθαρό (ανόθευτο) ημιαγωγό μεταβάλλει την αγωγιμότητα του κατά εκατομμύρια.

Η επιλογή των υλικών κατάλληλων για νοθεύσεις εξαρτάται από τις ατομικές ιδιότητες και των δύο υλικών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται χωρίζονται κυρίως σε δέκτες και δότες ηλεκτρονίων. Οι ημιαγωγοί που νοθεύονται με δότες γίνονται n-τύπου και αυτοί που νοθεύονται με δέκτες γίνονται p-τύπου.

Κατά την παρασκευή, οι νοθεύσεις μπορούν να διαχυθούν στο κυρίως σώμα του ημιαγωγού μέσω επαφής με αέρια παράγωγα του επιθυμητού υλικού νόθευσης, είτε μέσω εμφύτευσης ιόντων με αποτέλεσμα την πιο ακριβή τοποθέτηση των νοθεύσεων στον ημιαγωγό. [6]

### 2.1.6 Υλικά

Ημιαγωγίμα υλικά είναι [7] :

α) Στοιχεία της XIV ομάδας του περιοδικού πίνακα. Πιο συνηθισμένα στη χρήση είναι το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge). Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά λόγω του ότι διαθέτουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική τους στιβάδα, πράγμα που τους επιτρέπει να δίνουν και να παίρνουν ηλεκτρόνια ταυτοχρόνως.

β) Δυαδικά παράγωγα κυρίως των ομάδων III-V, όπως το InP και το GaAs. Οι ημιαγωγοί τεχνολογίας III-V θα μας απασχολήσουν κυρίως στη συνέχεια της εργασίας, μιας και αποτελούν τη βάση των SOAs.

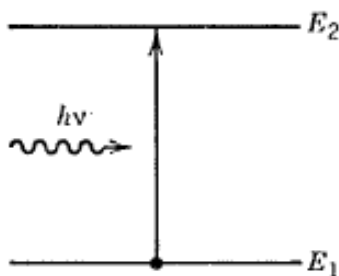
γ) Σε μικρότερο βαθμό τριαδικά και οργανικά παράγωγα

## 2.2 Αλληλεπίδραση Ημιαγωγίμων υλικών και φωτός

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τους βασικούς μηχανισμούς που διέπουν την αλληλεπίδραση ημιαγωγίμων υλικών και φωτός. Με βάση τις αρχές της Κβαντικής και Στατιστικής Φυσικής θα εισάγουμε τους βασικούς μηχανισμούς που ερμηνεύουν τη γέννηση, επεξεργασία και φώραση οπτικών σημάτων με χρήση ημιαγωγίμων οπτικών στοιχείων.

### 2.2.1 Εξαναγκασμένη εκπομπή

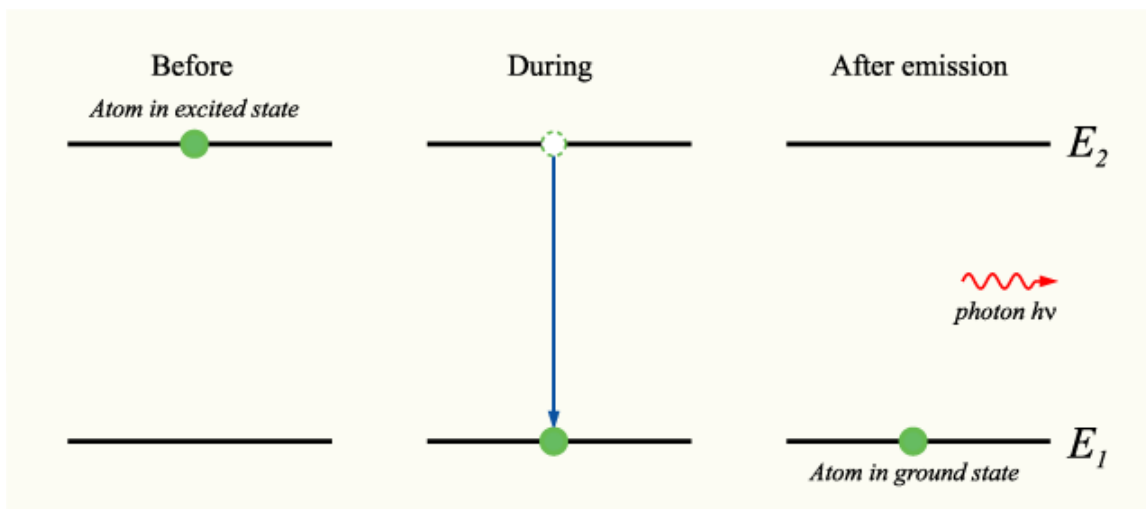
Σε κανονικές συνθήκες, τα σώματα απορροφούν και δεν εκπέμπουν φως. Κατά την απορρόφηση φωτός, για ένα υλικό όπου  $E_1$  είναι η θεμελιώδης ενεργειακή του κατάσταση και  $E_2$  μια διεγερμένη κατάσταση, αν για το προσπίπτον φωτόνιο, του οποίου η ενέργεια είναι  $h\nu$  (όπου  $h$  η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα του), ισχύει πως η διαφορά  $\Delta E = E_2 - E_1$  είναι περίπου ίση με την ενέργεια  $h\nu$ , τότε το φωτόνιο απορροφάται και το άτομο του υλικού μεταβαίνει στη διεγερμένη κατάσταση. Το προσπίπτον φως εξασθενεί σαν αποτέλεσμα πολλών τέτοιων απορροφήσεων εντός του μέσου. Τα διεγερμένα άτομα τελικά επιστρέφουν στη θεμελιώδη ενεργειακή τους κατάσταση εκπέμποντας φως.



Εικόνα 2.2 Απορρόφηση φωτονίου

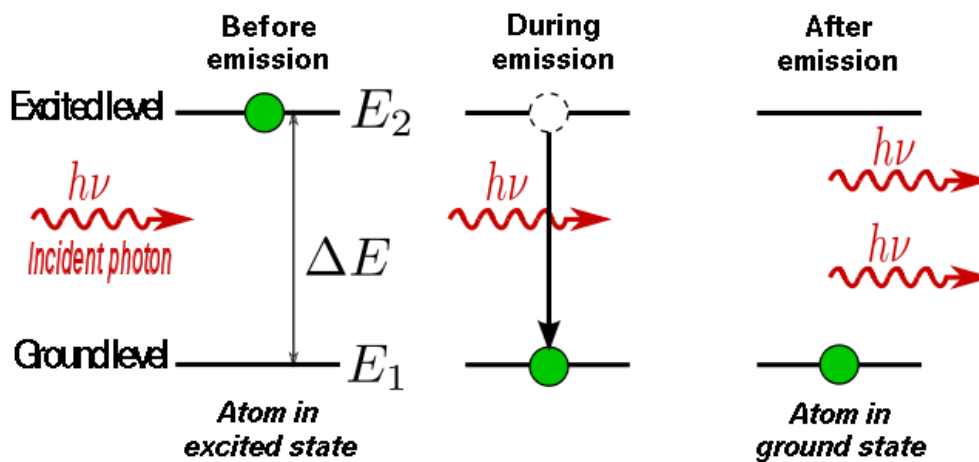
Η εκπομπή φωτός μπορεί να συμβεί μέσω δύο βασικών διεργασιών, της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης εκπομπής. Σε κάθε περίπτωση, κατά την αποδιέγερση ενός ατόμου σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, εκπέμπεται ενέργεια μέσω ενός φωτονίου ίση με τη διαφορά ενέργειας που καλύπτεται κατά τη μετάβαση.

Κατά την αυθόρμητη εκπομπή, λαμβάνουν χώρα όλες οι πιθανές ενεργειακές μεταβάσεις, με αποτέλεσμα η ενέργεια (και άρα η συχνότητα) του εκπεμπόμενου φωτονίου να υπάγονται σε στοχαστική διαδικασία, ενώ η κατεύθυνση και ταχύτητα του εκπεμπόμενου φωτονίου είναι τυχαίες και έτσι το εκπεμπόμενο φως να είναι αποπολωμένο .



Εικόνα 2.3 Αυθόρμητη εκπομπή

Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή, το διεγερμένο άτομο αντιδρώντας με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συγκεκριμένης συχνότητας μπορεί να αποδιεγερθεί προσφέροντας την ενέργεια που εκπέμπει στο πεδίο του κύματος. Έτσι για κάθε φωτόνιο που προσπίπτει δημιουργείται άλλο ένα με την ίδια συχνότητα, πόλωση κατεύθυνση και ταχύτητα. [8]



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Εικόνα 2.4 Εξαναγκασμένη εκπομπή



Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με την απορρόφηση φωτονίου από ένα άτομο, όπου το απορροφόμενο φωτόνιο προκαλεί την ακριβώς αντίθετη ενεργειακή μετάβαση: από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Σε συνήθη μέσα και σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας η απορρόφηση φωτονίων είναι μεγαλύτερη από την εξαναγκασμένη εκπομπή, καθώς τα περισσότερα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε χαμηλότερες ενεργειακά στάθμες. Παρ' όλα αυτά, όταν έχουν δημιουργηθεί συνθήκες αναστροφής πληθυσμών, ο ρυθμός της εξαναγκασμένης εκπομπής ξεπερνά αυτόν της απορρόφησης δημιουργώντας τις συνθήκες για οπτική ενίσχυση. Τέτοιου τύπου ενεργά υλικά, μαζί με την οπτική κοιλότητα, αποτελούν τον πυρήνα του Laser. Αφαιρώντας το μηχανισμό ανατροφοδότησης, οι περισσότεροι οπτικοί ενισχυτές χρησιμοποιούν σαν αρχή λειτουργίας την εξαναγκασμένη εκπομπή.

## 2.2.2 Ρυθμοί απορρόφησης και εκπομπής

Για να κατανοήσουμε τους ρυθμούς απορρόφησης και εκπομπής σε ένα ημιαγωγικό υλικό πρέπει πρώτα να φανταστούμε ένα σύστημα δύο ενεργειακών σταθμών, όπου  $N_1$  και  $N_2$  είναι οι πυκνότητες των ατόμων στην θεμελιώδη και στη διεγερμένη κατάσταση, και  $\rho_{em}$  η φασματική πυκνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Όπως είναι γνωστό σ αυτή την περίπτωση [9]

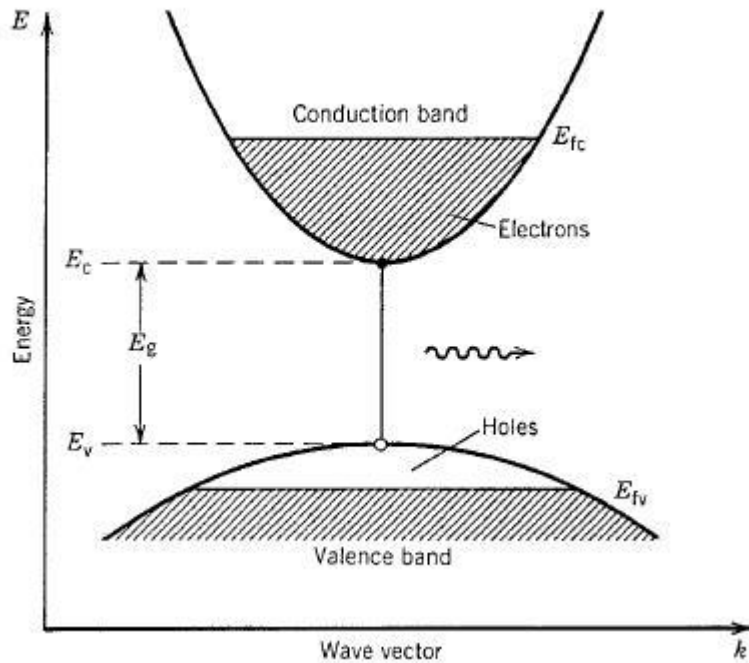
$$N_2/N_1 = \exp(-hv/k_B T)$$

όπου  $k_B$  είναι η σταθερά του Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία. Σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας μπορεί να υπολογιστεί για του ρυθμούς εξαναγκασμένης εκπομπής  $R_{stim}$ , αυθόρμητης εκπομπής  $R_{spon}$ , και απορρόφησης  $R_{abs}$  ότι

$$R_{stim}/R_{spon} = [\exp(hv/k_B T) - 1]^{-1}$$

Δύο σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν: Πρώτον ότι το  $R_{spon}$  μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τα  $R_{stim}$  και  $R_{abs}$  για συνθήκες όπου  $k_B T > hv$ . Δεύτερον, σε συνθήκες δωματίου ( $k_B T \approx 25$  meV), ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού ή ελαφρώς υπέρυθρη ( $hv \approx 1$  eV) η αυθόρμητη εκπομπή κυριαρχεί πάνω στην εξαναγκασμένη. Αυτό σημαίνει ότι οι ημιαγωγικές οπτικές συσκευές αδυνατούν να λειτουργήσουν σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας. Αυτό επιτυγχάνεται διεγείροντάς τες με μία εξωτερικής πηγή ενέργειας.

Οι ρυθμοί εκπομπής και απορρόφησης στους ημιαγωγούς λαμβάνουν υπόψη τις ενεργειακές στάθμες των ημιαγωγών [10]. Η εικόνα 2.5 απεικονίζει τη διαδικασία εκπομπής χρησιμοποιώντας την απλούστερη δομή ενεργειακών σταθμών σε ημιαγωγό, αποτελούμενο από παραβολικές ζώνες σθένους και αγωγιμότητας. Μόνο εάν η στάθμη  $E_2$  είναι κατειλημμένη από ηλεκτρόνιο και η ενεργειακή στάθμη  $E_1$  είναι κενή (κατειλημμένη από οπή) μπορεί να υπάρξει αυθόρμητη εκπομπή.



Εικόνα 2.5 Ζώνες σθένους και αγωγιμότητας σε ημιαγωγό. Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας μπορούν να επανασυνδεθούν με τις σπές στη ζώνη σθένους και να εκπέμψουν φωτόνια μέσω αυθόρμητης ή εξαναγκασμένης εκπομπής

Η πιθανότητα κατάληψης της ζώνης σθένους και αγωγιμότητας από ηλεκτρόνιο δίνεται από την κατανομή Fermi-Dirac [10]:

$$f_c(E_2) = \{1 + \exp[(E_2 - E_{f_c})/kBT]\}^{-1}$$

$$f_v(E_1) = \{1 + \exp[(E_1 - E_{f_v})/kBT]\}^{-1}$$

όπου  $E_{f_c}$  και  $E_{f_v}$  οι στάθμες Fermi. Για να έχουμε αναστροφή πληθυσμών, πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

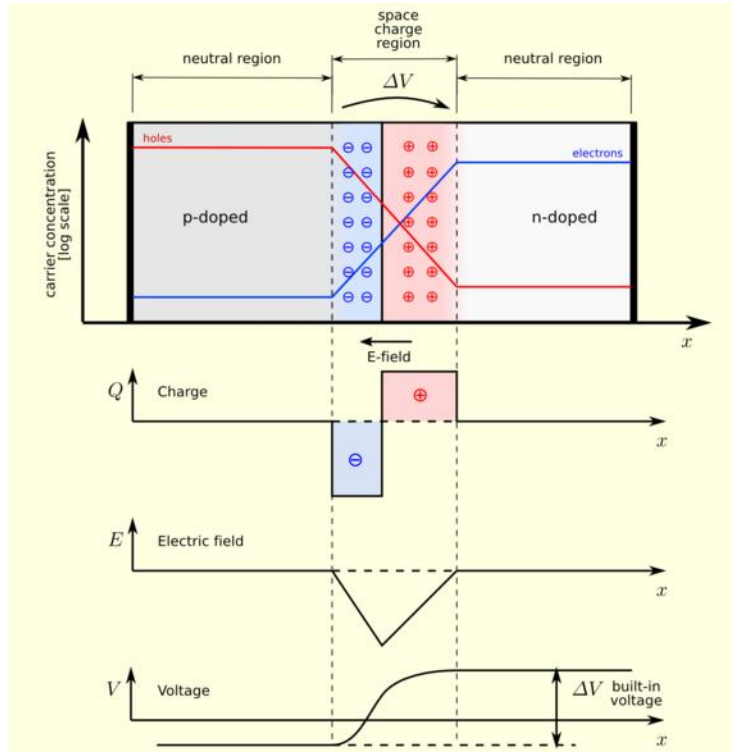
$$E_{f_c} - E_{f_v} > E_2 - E_1 > E_g$$

όπου  $E_g$  το ενεργειακό διάκενο μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας. Η χαμηλότερη τιμή που μπορεί να πάρει η διαφορά  $E_2 - E_1$  για μία μετάβαση είναι η το μέγεθος του διακένου  $E_g$ . Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά στις στάθμες Fermi πρέπει να ξεπερνά το διάκενο ώστε να έχουμε αναστροφή πληθυσμών, και άρα οι στάθμες Fermi  $E_{f_c}$  και  $E_{f_v}$  να βρίσκονται εντός της ζώνης αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα [11]. Σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας οι δύο στάθμες Fermi ταυτίζονται ( $E_{f_c} = E_{f_v}$ ). Μπορούν να διαχωριστούν μέσω διοχέτευσης ενέργειας στον ημιαγωγό από μια εξωτερική πηγή ενέργειας. Ο πιο συνηθής τρόπος για τη διέγερση ενός ημιαγωγού είναι μέσω μιας ένωσης p-n υπό ορθή τάση.

### 2.2.3 Ενώσεις p-n

Η “καρδιά” της ημιαγωγικής οπτικής πηγής είναι η ένωση p-n, που δημιουργώντας φέρνοντας έναν ημιαγωγό n-τύπου και έναν p-τύπου σε επαφή. Οι ημιαγωγοί δημιουργούνται n-τύπου και p-τύπου δημιουργούνται από τη νόθευση με προσμίξεις των οποίων τα άτομα έχουν ένα παραπάνω ή ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους απ’ ότι τα άτομα του ημιαγωγού. Στην περίπτωση του n-τύπου τα παραπάνω ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν τις καταστάσεις της ζώνης αγωγιμότητας, που είναι κενές σε ανόθευτους ημιαγωγούς. Η στάθμη Fermi που βρίσκεται καταμεσής του ενεργειακού διακένου στους ανόθευτους ημιαγωγούς μετατοπίζεται προς τη ζώνη αγωγιμότητας καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των προσμίξεων. Σε βαριά νοθευμένο n-τύπου ημιαγωγό, η στάθμη Fermi  $E_{fc}$  κείται εντός της ζώνης αγωγιμότητας. Τέτοιοι ημιαγωγοί περιγράφονται ως εκφυλισμένοι. Αντιστοίχως, η στάθμη Fermi  $E_{fv}$  μετατοπίζεται προς τη ζώνη σθένους για τους ημιαγωγούς p-τύπου και βρίσκεται εντός της για έντονες νοθεύσεις.

Για την ένωση p-n στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας, η στάθμη Fermi πρέπει να είναι συνεχής κατά μήκος της ένωσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διάχυσης ηλεκτρονίων και οπών κατά μήκος της ένωσης. Οι φορτισμένες νοθεύσεις δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο αρκετά ισχυρό ώστε να εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων και οπών υπό συνθήκες ισορροπίας. Το πεδίο αυτό αναφέρεται ως *built-in* ηλεκτρικό πεδίο. Η εικόνα 2.6 απεικονίζει μία ένωση p-n σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας (χωρίς εφαρμογή εξωτερικής τάσης) καθώς και γραφικές παραστάσεις για το φορτίο, το πεδίο και την τάση που δημιουργούνται.

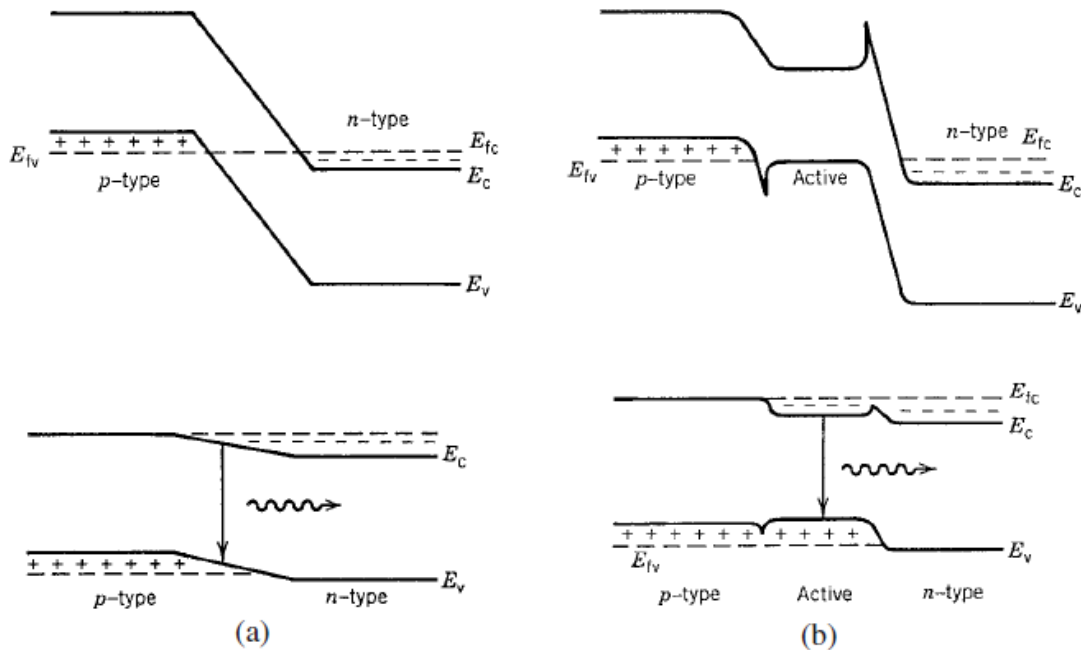


Εικόνα 2.6 Ένωση p-n σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας και γραφικές παραστάσεις φορτίου, έντασης πεδίου και τάσης

Η εικόνα 2.7(α) απεικονίζει το διάγραμμα ενεργειακών σταθμών μιας ένωσης p-n σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας καθώς και υπό ορθή τάση (το θετικό συνδεδεμένο στο p και το αρνητικό στο n). Όταν μια ένωση p-n βρίσκεται υπό ορθή τάση, το built-in ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται. Η μείωση αυτή οδηγεί σε διάχυση ηλεκτρονίων και οπών. Σαν αποτέλεσμα εμφανίζεται ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Το ρεύμα  $I$  αυξάνεται εκθετικά σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη τάση  $V$ . [5]

$$I = I_s[\exp(qV/kBT)-1]$$

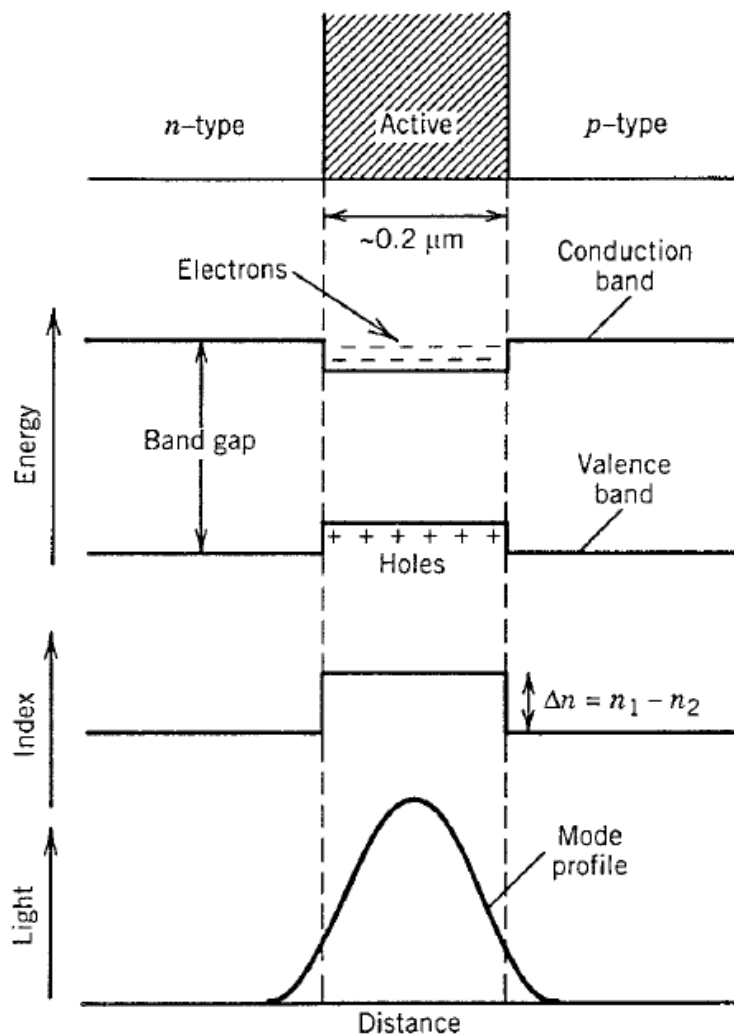
Το  $I_s$  είναι το ρεύμα κορεσμού που εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης που σχετίζεται με τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7(α) σε μια περιοχή περιβάλλουσα της ένωσης (γνωστή ως ενεργός περιοχή), τα ηλεκτρόνια και οι οπές παρευρίσκονται ταυτόχρονα όταν η ένωση βρίσκεται υπό ορθή τάση. Σε μία ημιαγωγική οπτική συσκευή τα ηλεκτρόνια και οι οπές μπορούν να επανασυνδεθούν μέσω αυθόρμητης η εξαναγκασμένης εκπομπής και να παράγουν φως.



Εικόνα 2.7 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών μιας (α) ομοιοδομής και (β) διπλής ετεροδομής ένωσης p-n σε θερμική ισορροπία (πάνω) και υπό ορθή τάση (κάτω)

Η επαφή που φαίνεται στην εικόνα 2.7(α) λέγεται ομοιοεπαφή (homojunction), μιας και το ίδιο ημιαγωγικό υλικό βρίσκεται εκατέρωθεν της επαφής. Το βασικό πρόβλημα των ομοιοεπαφών είναι πως η επανασύνδεση ηλεκτρονίων και οπών λαμβάνει χώρα σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή (~1-10  $\mu\text{m}$ ) καθοριζόμενη από το μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων και οπών. Καθώς οι φορείς δεν είναι περιορισμένοι στην άμεσα γειτονική στην επαφή περιοχή, είναι δύσκολο να έχουμε υψηλή συγκέντρωση φορέων. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί τοποθετώντας μια λεπτή στρώση μεταξύ των περιοχών p και n της οποίας το ενεργειακό διάκενο να είναι μικρότερο από των περιοχών αυτών. Αυτή η στρώση μπορεί να είναι είτε

νοθευμένη ή ανόθευτη, ανάλογα με το σχεδιασμό της συσκευής. Ο ρόλος που επιτελεί είναι να περιορίζει εντός της τους φορείς που έχουν εγχυθεί όταν βρισκόμαστε υπό ορθή τάση. [12] Ο περιορισμός των φορέων επέρχεται σαν αποτέλεσμα της ασυνέχειας του ενεργειακού διακένου στην ένωση μεταξύ δύο ημιαγωγών που έχουν την ίδια κρυσταλλική δομή αλλά διαφορετικά διάκενα. Τέτοιες επαφές λέγονται ετεροεπαφές (heterojunctions) και τέτοιου τύπου συσκευές διπλές ετεροδομές (double heterostructures). Εφόσον το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης μπορεί να ρυθμιστεί εξωτερικά (τυπικά γύρω στα  $0.1 \mu\text{m}$ ) υψηλές συγκεντρώσεις φορέων μπορούν να επιτευχθούν με δεδομένο εγχεόμενο ρεύμα. Η εικόνα 2.7(b) δείχνει το διάγραμμα ενεργειακών σταθμών μίας διπλής ετεροδομής υπό ορθή τάση.



Εικόνα 2.8 Ταυτόχρονη συγκέντρωση φορέων φορτίου και οπτικού πεδίου σε διπλή ετεροδομή. Η ενεργός στρώση έχει μικρότερο ενεργειακό διάκενο και μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης απ' ότι οι p και n περιοχές.

Η χρήση γεωμετριών ετεροδομών για ημιαγωγίμες οπτικές συσκευές είναι διπλά ευεργετική. Όπως προαναφέρθηκε, η διαφορά στο ενεργειακό διάκενο μεταξύ των δύο ημιαγωγών βοηθά στον περιορισμό των ηλεκτρονίων και των οπών στην ενδιάμεση στρώση, που λέγεται και ενεργός στρώση αφού το φως παράγεται κυρίως εντός της σαν αποτέλεσμα της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων – οπών. Ακόμη, η ενεργός στρώση έχει κατά τι μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από την επίστρωση n-τύπου και p-τύπου λόγω του μικρότερου ενεργειακού διακένου. Σαν αποτέλεσμα της διαφοράς στον δείκτη διάθλασης, η ενεργός στρώση λειτουργεί σαν διηλεκτρικός κυματοδηγός και μπορεί να υποστηρίξει οπτικούς ρυθμούς των οποίων ο αριθμός ελέγχεται από το πάχος της ενεργού στρώσης (παρόμοιους με τους ρυθμούς που υποστηρίζονται στον πυρήνα οπτικής ίνας). [8] Η εικόνα 2.8 απεικονίζει σχηματικά τον ταυτόχρονο περιορισμό των φορέων φορτίου και του οπτικού πεδίου στην ενεργό περιοχή μέσω ενός σχεδιασμού ετεροδομής. Αυτή η ιδιότητα είναι που κάνει τις ημιαγωγίμες οπτικές συσκευές ελκυστικές για μία ευρεία γκάμα εφαρμογών.

## 2.3 Οπτικοί ενισχυτές

Όπως είναι λογικό, για κάθε σύστημα οπτικών επικοινωνιών, η απόσταση μετάδοσης περιορίζεται κυρίως από τις απώλειες στο εσωτερικό της οπτικής ίνας. Τυπικά η εξασθένηση του σήματος στο εσωτερικό της ίνας γύρω στα 1.5 μm είναι περίπου 20 dB κάθε 100 km. Τέτοιου τύπου απώλειες θα οδηγούσαν σε ένα πολύ ασθενές σήμα στον δέκτη, και άρα ένα πολύ μικρό *σηματοθορυβικό λόγο* (signal-to-noise ratio – SNR). Σαν αποτέλεσμα θα υπήρχε μεγάλος αριθμός σφαλμάτων κατά τη λήψη και άρα πολύ μεγάλο *BER* (bit error ratio). Για συστήματα που εκτείνονταν σε μεγάλες αποστάσεις, οι περιορισμοί λόγω των απωλειών παραδοσιακά ξεπερνιόνταν με τη χρήση οπτικοηλεκτρονικών αναμεταδοτών, όπου το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα, και αναγεννιόταν στον εκπομπό. Τέτοιου τύπου αναγεννητές γίνονται πολύ ακριβοί και περίπλοκοι για πολυπλεξίες τύπου WDM. Η εναλλακτική προσέγγιση για τη διαχείριση των απωλειών είναι η χρήση οπτικών ενισχυτών, οι οποίοι δεν απαιτούν τη μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρικό. Διάφοροι τύποι οπτικών ενισχυτών αναπτύχθηκαν αρχικά κατά τη δεκαετία του 80 και έγιναν πολύ δημοφιλείς τη δεκαετία του 90. [8]

### 2.3.1 Χαρακτηριστικά οπτικών ενισχυτών

α) **Κέρδος:** Οι περισσότεροι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το προσπίπτον φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι το οπτικό κέρδος, δηλαδή ο λόγος της ισχύος του εξερχόμενου σήματος προς την ισχύ του εισερχόμενου, που παρατηρείτε όταν ο ενισχυτής διεγείρεται οπτικά ή ηλεκτρικά ώστε να έχει επιτευχθεί αναστροφή πληθυσμών. Το οπτικό κέρδος δεν εξαρτάται μοναχά από την συχνότητα (και άρα μήκος κύματος) του προσπίπτοντος σήματος, αλλά και από την ένταση της ακτίνας σε κάθε σημείο εντός του ενισχυτή.

β) **Αποδοτικότητα κέρδους (Gain efficiency):** Το κέρδος σαν συνάρτηση τις ισχύος εισόδου (μετρούμενο σε dB/mW). Τυπικά είναι το *κέρδος ασθενούς σήματος* (small-signal gain) προς την ισχύ που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτό το κέρδος.

γ) **Εύρος ζώνης κέρδους (Gain Bandwidth):** Το εύρος των μηκών κύματος στα οποία ο ενισχυτής παραμένει λειτουργικός. Ένα μικρό εύρος ζώνης κέρδους είναι προτιμότερο σε περιπτώσεις λειτουργίας σε μία συχνότητα.

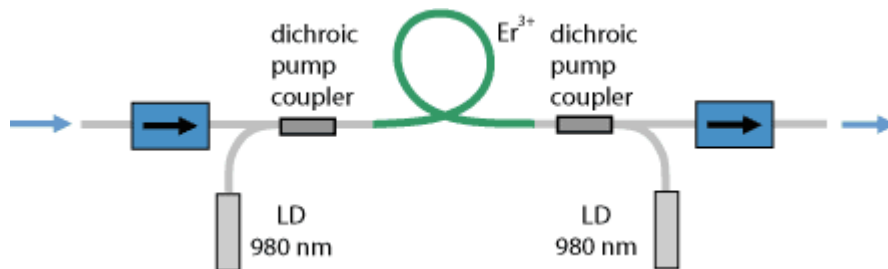
δ) **Κορεσμός κέρδους (Gain Saturation):** Είναι η μέγιστη εξερχόμενη ισχύς, πέρα απ' την οποία δεν μπορεί να υπάρξει ενίσχυση. Ένας οπτικός ενισχυτής δεν μπορεί να διατηρήσει σταθερό το κέρδος του για πολύ μεγάλη ισχύ εισόδου, καθώς αυτό θα απαιτούσε τεράστια ποσότητα ισχύος στο εξερχόμενο σήμα. Έτσι λοιπόν το κέρδος μειώνεται για μεγάλη αύξηση της ισχύος εισόδου.

ε) **Θόρυβος:** Κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης, πέρα από το ενισχυμένο σήμα προστίθεται και ο ανεπιθύμητος θόρυβος. Στους οπτικούς ενισχυτές οφείλεται κυρίως στην αυθόρμητη εκπομπή η οποία λαμβάνει χώρα παράλληλα με την εξαναγκασμένη εκπομπή και προσθέτει ανεπιθύμητο σήμα και στις υπόλοιπες συχνότητες, πέρα από αυτή του εισερχόμενου σήματος.

### 2.3.2 Erbium-doped Fiber Amplifiers – EDFA

Μία σημαντική κατηγορία οπτικών ενισχυτών είναι αυτοί που χρησιμοποιούν σπάνιες γαίες σαν μέσο ενίσχυσης. Τα υλικά αυτά προσμιγνύονται στον πυρήνα της ίνας κατά την παρασκευή της. Σημαντικότεροι από αυτούς είναι αυτοί που χρησιμοποιούν προσμίξεις ερβίου (Er), καθώς λειτουργούν σε μια περιοχή μήκους κύματος γύρω στα 1.55  $\mu\text{m}$ , όπου οι οπτικές ίνες έχουν τις ελάχιστες απώλειες. Η χρήση τους σε WDM συστήματα άλλαξε ριζικά το πεδίο των οπτικών επικοινωνιών, δίνοντας στα οπτικά συστήματα χωρητικότητες που ξεπερνούν το 1 Tbps.

Μια τυπική διάταξη ενός EDFA φαίνεται στην εικόνα 2.9. Ο πυρήνας του είναι η ίνα με τις προσμίξεις ερβίου, η οποία συνήθως υποστηρίζει έναν ρυθμό. Στην εικονιζόμενη περίπτωση η ενεργός ίνα διεγείρεται με φως από δύο διόδους laser. Το διεγείρον φως που συνήθως έχει συχνότητα γύρω στα 980 nm και μερικές φορές στα 1450 nm διεγείρει τα ιόντα ερβίου ( $\text{Er}^{3+}$ ) στην κατάσταση  $^4\text{I}_{13/2}$ , απ' όπου ενισχύει το φως στα 1.5  $\mu\text{m}$  μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής. [13]

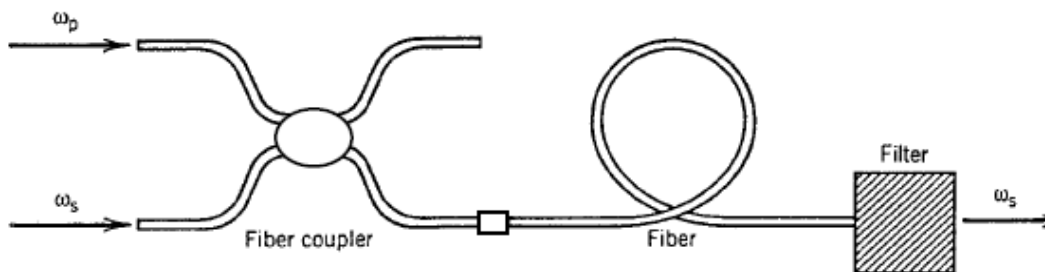


Εικόνα 2.9 Τυπική διάταξη EDFA

Οι EDFAs παρουσιάζουν παρά πολλά πλεονεκτήματα. Μπορούν να αποδώσουν κέρδος μέχρι και 50 dB, ενώ μπορούν να ενισχύσουν ταυτόχρονα διάφορα μήκη κύματος. Η ενίσχυση αυτή μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλή ισχύ εξόδου (10 – 20 dBm), ενώ η έχουμε και μεγάλη αποδοτικότητα κέρδους (40% - 80%). Εξίσου σημαντικό είναι ότι η ενίσχυση γίνεται ανεξάρτητα από την πόλωση του φωτός στο μέσο. Παρόλα αυτά οι EDFAs δεν μπορούν να αποτελέσουν κυρίαρχη επιλογή σε ολοκληρωμένα συστήματα, καθώς το πολύ μεγάλο μέγεθος τους δεν τους επιτρέπει να ολοκληρωθούν μαζί με άλλες ημιαγώγιμες συσκευές. [14]

### 2.3.3 Ενισχυτής Raman

Οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman βασίζονται στη λειτουργία τους στο φαινόμενο εξαναγκασμένης σκέδασης Raman (Stimulated Raman scattering – SRS) [15] που λαμβάνει χώρα στις οπτικές ίνες όταν μία ακτίνα διέγερσης διαδίδεται μέσω αυτών. Το φαινόμενο SRS διαφέρει από την εξαναγκασμένη εκπομπή σε ένα θεμελιώδες σημείο. Ενώ κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή το προσπίπτον φωτόνιο εξαναγκάζει την εκπομπή ενός πανομοιότυπου φωτονίου χωρίς να υπάρχει απώλεια ενέργειας, στην περίπτωση του SRS το προσπίπτον φωτόνιο διέγερσης τείνει να απωλέσει την ενέργεια του και παράγει ένα νέο φωτόνιο με μειωμένη ενέργεια σε χαμηλότερη συχνότητα (ανελαστική σκέδαση). Η υπόλοιπη ενέργεια απορροφάται από το μέσο με τη μορφή μοριακών δονήσεων (οπτικό φωνόνιο). Έτσι, οι ενισχυτές Raman πρέπει να διεγερθούν με φως ώστε να δώσουν κέρδος. Η εικόνα 2.10 δείχνει πώς μία οπτική ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενισχυτής Raman. Οι ακτίνες διέγερσης και σήματος στις συχνότητες  $\omega_p$  και  $\omega_s$  αντίστοιχα εισέρχονται στην ίνα μέσω του coupler. Η ενέργεια μεταφέρεται από την ακτίνα διέγερσης στην ακτίνα σήματος μέσω του SRS και οι δύο ακτίνες διαδίδονται ταυτόχρονα στην ίνα.



Εικόνα 2.10 Σχηματική απεικόνιση ενισχυτή Raman οπτικών ινών

Οι ενισχυτές Raman παρουσιάζουν μεγάλο κατώφλι ισχύος (1W) και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό θόρυβο. Η SRS είναι μια διεργασία με απολαβή ευρέος φάσματος ( $\Omega_R = \omega_p - \omega_s \sim 13\text{THz}$ ). Οι ενισχυτές Raman μπορούν να παρέχουν είτε εντοπισμένη είτε κατανομημένη ενίσχυση. Παρ' όλα αυτά εμφανίζουν μεγάλη ανομοιομορφία στην απολαβή και λόγω του μικρού χρόνου του φαινομένου SRS εμφανίζουν αισθητά φαινόμενα διαφωνίας. [16]



## 2.4 Ημιαγωγιμοί οπτικοί ενισχυτές (Semiconductor Optical Amplifiers – SOAs)

### 2.4.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας ενός SOA βασίζεται στη θεωρία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, θερμικές, ηλεκτρικές ή οπτικές διεγέρσεις των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας συντελούν στη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Η διαδικασία αυτή καλείται αναστροφή πληθυσμού. Το κάθε ζεύγος ηλεκτρονίου και οπής ονομάζεται φορέας. Η αντίστροφη διαδικασία της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών μπορεί να είναι μη ακτινοβολούσα (δημιουργία φωνονίου ή επανασύνδεση Auger) ή ακτινοβολούσα (δημιουργία φωτονίου). Η ακτινοβολούσα επανασύνδεση συνίσταται στην αυθόρμητη αποδιέγερση των ηλεκτρονίων ή στην εξαναγκασμένη αποδιέγερση των φορέων λόγω εισερχόμενου φωτονίου. Η πρώτη διαδικασία προκαλεί την αυθόρμητη εκπομπή φωτός, ενώ η δεύτερη προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός. Η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός παράγει φωτόνια, τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα εισερχόμενα φωτόνια, και είναι η διαδικασία, που αξιοποιείται για τη λειτουργία του SOA ως ενισχυτή.

Ενίσχυση του εισερχόμενου οπτικού σήματος μπορεί να επιτευχθεί αν ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής υπερτερεί του ρυθμού απορρόφησης. Συνήθης τρόπος για την απαιτούμενη αναστροφή πληθυσμού είναι η ηλεκτρική διέγερση, δηλαδή η έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος στην ενεργό περιοχή. Βέβαια, η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή δρουν αντίθετα με την έγχυση φορέων, αφού μειώνουν την συγκέντρωση των φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας (πυκνότητα φορέων  $N$ ). Η σύνδεση των πιο πάνω διαδικασιών περιγράφεται από τη γνωστή εξίσωση ροής, η οποία εκφράζει τη μεταβολή της πυκνότητας των φορέων στο χωρικό σημείο  $z$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα του ενισχυτή και κατά τη χρονική στιγμή  $t$ :

$$\frac{dN(z, t)}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z, t)}{\tau_c} - \frac{\Gamma \cdot g \cdot [N(z, t) - N_T] \cdot P(z, t)}{A\hbar\omega_0} \quad (1)$$

Στην προηγούμενη σχέση,  $I$  είναι το ρεύμα έγχυσης,  $e$  το φορτίο ηλεκτρονίου,  $V$  ο όγκος της ενεργού περιοχής,  $\tau_c$  ο χρόνος ζωής των φορέων,  $\Gamma$  ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης οπτικής ισχύος (optical confinement factor),  $g$  ο παράγοντας κέρδους,  $N_T$  η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή,  $A$  το εμβαδό διατομής της ενεργού περιοχής του ημιαγωγού,  $\hbar$  η σταθερά Planck,  $\omega_0$  η φέρουσα συχνότητα του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, και  $P(z, t)$  η ισχύς του εισερχόμενου οπτικού σήματος. Ο πρώτος όρος του δεξιού σκέλους της σχέσης,  $\frac{I}{eV}$ , αποδίδει τη διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος, ενώ ο δεύτερος και τρίτος όρος αποδίδουν την αποδιέγερση και, επομένως, τη μείωση των φορέων λόγω της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης επανασύνδεσης, αντίστοιχα.

## 2.4.2 Ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή

Η διάδοση ενός οπτικού σήματος κατά τη διεύθυνση του z-άξονα (διαμήκης άξονας) του ημιαγωγού περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{dP(z, t)}{dz} = [\Gamma \cdot g \cdot [N(z, t) - N_T] \cdot -a_s] \cdot P(z, t) \quad (2)$$

Η σταθερά  $a_s$  εκφράζει τις εσωτερικές απώλειες ισχύος του ενισχυτή λόγω σκέδασης του κυματοδηγούμενου πεδίου.

Οι εξισώσεις (1) και (2) αποτελούν τις δύο κλασσικές εξισώσεις ροής του ενισχυτή. Σε αυτό το σημείο χρήζουν επεξήγησης ορισμένα μεγέθη, που εμφανίζονται στις δύο σχέσεις, καθώς, επίσης, και ορισμένες παραδοχές, που έχουν γίνει για την εξαγωγή των δύο σχέσεων, και φαινόμενα, που έχουν αγνοηθεί.

Περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή καλείται η περιοχή εκείνη, όπου το κέρδος του ενισχυτή είναι ίσο με τη μονάδα. Ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης χαρακτηρίζει το λόγο του κέρδους του κυματοδηγού προς το κέρδος του υλικού, και στην ουσία εκφράζει το ποσοστό της οπτικής ισχύος, που δεν διαχέεται εκτός του κυματοδηγού [17]. Επίσης, ο παράγοντας κέρδους  $g$ , αλλά και η πυκνότητα φορέων στην περιοχή διαφάνειας, είναι γενικά συναρτήσεις του μήκους κύματος του σήματος [18], η εξάρτηση αυτή, όμως, δε φαίνεται στις δύο προηγούμενες σχέσεις, καθώς θεωρούμε ότι μόνο ένα οπτικό σήμα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος εισέρχεται στον ενισχυτή. Τέλος, στις δύο εξισώσεις ροής αγνοούνται τα ενδοζωνικά φαινόμενα (intraband effects) των φορέων, όπως δημιουργία φασματικής οπής (spectral hole burning), θέρμανση φορέων (carrier heating) και απορρόφηση ελεύθερων φορέων-απορρόφηση δύο φωτονίων (free carrier absorption – two photon absorption). Αυτά τα ενδοζωνικά φαινόμενα έχουν πολύ μικρούς χαρακτηριστικούς χρόνους απόκρισης, που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες fsec [19] – [21]. Αποτέλεσμα των μικρών χρονικών σταθερών απόκρισης αυτών των φαινομένων στην περίπτωση των οπτικών σημάτων διάρκειας μερικών psec, όπως είναι τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική αυτή, είναι τα ενδοζωνικά φαινόμενα να επέρχονται σε σταθερή κατάσταση και να μην επηρεάζουν την απόκριση του ενισχυτή 0.

Το κέρδος ενίσχυσης ενός SOA, θεωρώντας την περίπτωση ενίσχυσης οπτικού σήματος συνεχούς (CW) κύματος, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου από τον ενισχυτή προς την ισχύ εισόδου σε αυτόν. Αν θεωρήσουμε την ισχύ εισόδου ίση με  $P(0) = P_{in}$  και την ισχύ εξόδου ίση με  $P(L) = P_{out}$ , όπου  $L$  το μήκος του κυματοδηγού, το κέρδος περιγράφεται από την έκφραση

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P(L)}{P(0)} \quad (3)$$

Για τον αναλυτικό υπολογισμό του κέρδους του ημιαγωγού θα πρέπει να εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας του SOA. Έτσι αναφερόμαστε στην ακόρεστη (unsaturated) και στην κορεσμένη (saturated) περιοχή, όπου έχουμε αντίστοιχα το κέρδος ασθενούς σήματος (small signal gain) και το κορεσμένο κέρδος (saturated gain) του ενισχυτή.

### 2.4.3 Κέρδος ασθενούς σήματος

Το κέρδος ασθενούς σήματος του ενισχυτή είναι το κέρδος, που αποδίδει ο SOA, όταν το εισερχόμενο οπτικό σήμα έχει πολύ μικρή οπτική ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, η πυκνότητα φορέων  $N(z,t)$  καθίσταται ανεξάρτητη από τη χωρική μεταβλητή  $z$ , αφού η μικρή ισχύς του οπτικού σήματος εισόδου θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του ενισχυτή. Θέτοντας, επομένως, στη σχέση (1)  $P(z,t) \cong 0$ , και λύνοντας τη σχέση για τη μόνιμη κατάσταση  $\frac{dN}{dt} = 0$ , υπολογίζεται η πυκνότητα φορέων στη μόνιμη κατάσταση, η οποία βρίσκεται ότι είναι ίση με  $N_{ss} = \frac{I \cdot \tau_c}{eV}$  (3).

Από τη σχέση (2), λύνοντας ως προς την ισχύ, προκύπτει

$$P(z,t) = P(0,t) \cdot \exp \int_0^z [\Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] \cdot -a_s] \cdot dz \quad (4)$$

οπότε το **κέρδος ασθενούς σήματος**, με βάση τον ορισμό της (3) και την πυκνότητα  $N_{ss}$  των φορέων στη μόνιμη κατάσταση, είναι

$$G_0 = \frac{P(L,t)}{P(0,t)} = \exp[\Gamma \cdot g \cdot [N_{ss} - N_T] \cdot L - a_s \cdot L] \quad (5)$$

Για το υπόλοιπο της μαθηματικής ανάλυσης των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών αμελούμε τη διάσταση του μήκους του SOA και θεωρούμε τους ενισχυτές ως χωρικά συγκεντρωμένα στοιχεία. Για το σκοπό αυτό εισάγουμε την έννοια της συνολικής πυκνότητας φορέων  $N_{tot}(t)$

$$N_{tot}(t) = \int_{z=0}^{z=L} [N(z,t) - N_T] \cdot dz \quad (6)$$

Με τη θεώρηση αυτή, το κέρδος πλέον του ενισχυτή σε κάθε χρονική στιγμή μπορεί να γραφτεί ως

$$G(t) = \exp[\Gamma \cdot g \cdot N_{tot}(t) - a_s \cdot L] \quad (7)$$

#### 2.4.4 Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος

Αν ως είσοδος στον ενισχυτή θεωρηθεί οπτικό CW σήμα με σταθερή οπτική ισχύ  $P_{CW}$  στην είσοδο, τότε η πυκνότητα φορέων διαμορφώνεται πάλι σε μια μόνιμη σταθερή κατάσταση, διαφορετική όμως από αυτήν της περιοχής ασθενούς σήματος. Η τιμή  $N(z)$  της πυκνότητας φορέων σε αυτήν την κατάσταση σε κάθε  $z$  βρίσκεται από τη σχέση (1), μηδενίζοντας τη χρονική παράγωγο της πυκνότητας φορέων και αγνοώντας, πλέον, τη χρονική εξάρτηση των υπολοίπων μεγεθών, οπότε προκύπτει

$$N(z) - N_T = \frac{(N_{ss} - N_T)}{1 + \frac{P(z)}{P_{sat}}} \quad (8)$$

όπου  $P(z)$  η ισχύς του CW σήματος σε κάθε σημείο  $z$  του ημιαγωγού και  $P_{sat} = \frac{\hbar\omega_0 A}{\Gamma g \tau_c}$  η ισχύς κορεσμού του SOA, η οποία εκφράζει το ποσό της ισχύος του σήματος, που απαιτείται για να μειωθεί η συνολική πυκνότητα των φορέων στο μισό της αντίστοιχης τιμής της στην περιοχή ασθενούς σήματος.

Αγνοώντας τις εσωτερικές απώλειες  $a_s$  του ενισχυτή στη σχέση (7), καθώς αυτές θεωρούνται αμελητέες ως προς το κέρδος του ενισχυτή, και χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις των σχέσεων (5) και (8) στην (7), η (7) δίνει, τελικά, το **κέρδος  $G_{CW}$  στη μόνιμη κατάσταση**, το οποίο γράφεται ως [22]

$$G_{CW} = G_0 \cdot \exp[-(G_{CW} - 1)P_{CW}/P_{sat}] \quad (9)$$

Παρατηρούμε ότι το κέρδος εξαρτάται, πλέον, από την οπτική ισχύ του CW σήματος στην είσοδο του SOA και από τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή, τουτέστιν το κέρδος ασθενούς σήματος και την παράμετρο ισχύος κορεσμού του SOA.

#### 2.4.5 Κορεσμός του SOA από βραχύ οπτικό παλμό

Θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δέχεται ως είσοδο στενό οπτικό παλμό μη μηδενικής ισχύος, ενώ λειτουργεί στην περιοχή ασθενούς σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση το κυρίαρχο φαινόμενο για όση χρονική διάρκεια διαδίδεται ο παλμός μέσα από τον ενισχυτή είναι η αποδιέγερση των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής, δεδομένου ότι στο μικρό αυτό χρονικό διάστημα, που χρειάζεται για να διαδοθεί ο παλμός μέσα από το SOA, η διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος και η αυθόρμητη εκπομπή φορέων συμβάλλουν σε πολύ μικρό βαθμό στη μεταβολή της πυκνότητας φορέων. Κατά συνέπεια, αγνοούμε τους δύο πρώτους όρους του δεξιού

σκέλους της σχέσης (1), και λύνουμε την εξίσωση, που προκύπτει, με τη βοήθεια κατάλληλων μετασχηματισμών, οπότε το **κέρδος κορεσμού του SOA από βραχύ οπτικό παλμό** προκύπτει από την έκφραση [22], [23]:

$$G(t) = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{G_0} \right) \cdot \exp\left( -\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

Στην παραπάνω σχέση,  $U_{in}(t)$  είναι η ενέργεια του παλμού, που βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή τη χρονική στιγμή  $t$ . Αν θεωρήσουμε ως χρονική στιγμή 0 τη στιγμή που ο παλμός με κυματομορφή ισχύος  $P_{in}(t)$  αρχίζει να εισέρχεται στο SOA, τότε η  $U_{in}(t)$  εκφράζεται ως  $U_{in}(t) = \int_0^t P_{in}(t') dt'$ . Η παράμετρος  $U_{sat}$ , κατά αντιστοιχία με την  $P_{sat}$ , είναι η ενέργεια κορεσμού του SOA και σχετίζεται με την  $P_{sat}$  μέσω της σχέσης  $U_{sat} = P_{sat} \cdot \tau_c$  [22], [23].

Η σχέση (10) δείχνει ότι το κέρδος του ημιαγωγού μειώνεται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η διάδοση του στενού παλμού μέσα από τον ημιαγωγό. Επομένως, ο χρόνος κορεσμού του SOA μπορεί να είναι αρκετά μικρός και να μην υπερβαίνει τα μερικά psec.

#### 2.4.6 Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων

Αμέσως μετά την έξοδο του στενού οπτικού παλμού από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει λόγω της διέγερσης φορέων από την έγχυση ρεύματος προς την αρχική του τιμή, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος. Ως χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή ορίζεται το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για να ανακάμψει το κέρδος από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του  $G_0$ .

Κατά την χρονική περίοδο της ανάκαμψης του κέρδους δεν υπάρχει οπτικό σήμα μέσα στο SOA, οπότε στη σχέση (1) αγνοούμε τον τρίτο όρο του δεξιού σκέλους, ο οποίος είναι ο όρος εξαναγκασμένης εκπομπής [22], [23]. Αν η ελάχιστη τιμή του κέρδους, στην οποία έχει φτάσει το κέρδος του SOA αμέσως μετά τον κορεσμό του από τον οπτικό παλμό, είναι  $G(t_s)$ , όπου  $t_s$  η χρονική στιγμή που εξέρχεται πλήρως ο παλμός από τον ημιαγωγό, τότε από τη (1) με τη βοήθεια κατάλληλων μετασχηματισμών προκύπτει η έκφραση του κέρδους για τη χρονική διάρκεια της ανάκαμψης, η οποία δίνεται από τη σχέση [22], [23]

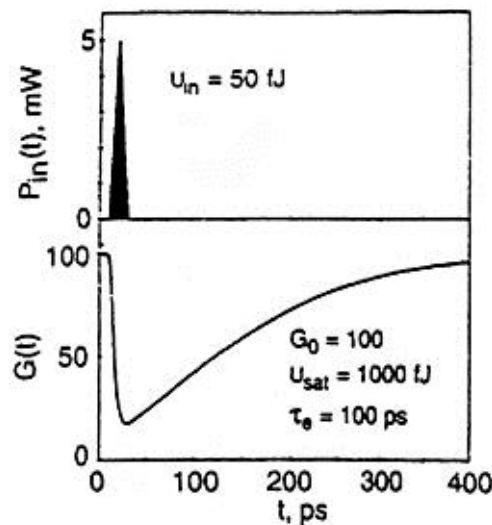
$$G(t) = G_0 \cdot \left[ \frac{G(t_s)}{G_0} \right]^{\exp[-(t-t_s)/\tau_c]} \quad , t \geq t_s \quad (11)$$

Με βάση αυτή την αναλυτική έκφραση ανάκαμψης του κέρδους, η χρονική σταθερά ανάκαμψης από το 10% στο 90% του  $G_0$ , προκύπτει ότι συνδέεται με το χρόνο ζωής των φορέων από τη σχέση  $\tau_r = \tau_c \cdot \ln\left(\frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}\right) \cong 3,13 \cdot \tau_c$ . Τυπικές τιμές χρονικών σταθερών

ανάκαμψης κέρδους για τους ημιαγωγούς είναι από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες psec [24], [25].

Η συμπεριφορά του κέρδους ενός ενισχυτή κατά τον κορεσμό του από στενό οπτικό παλμό και κατά την ανάκαμψή του μέχρι την αρχική του κατάσταση αποδίδεται γραφικά στην εικόνα 2.11.

Η χρονική σταθερά ανάκαμψης του SOA είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη χρήση του ενισχυτή σε οπτικές μεταγωγικές διατάξεις, καθώς αυτή καθορίζει τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του ενισχυτή. Για αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας είναι απαραίτητη η μείωση του χρόνου ανάκαμψης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές επιτάχυνσης της χρονικής απόκρισης, όπως είναι η εφαρμογή ισχυρού CW σήματος στον ενισχυτή με μήκος κύματος του σήματος στην περιοχή κέρδους [26], [27] ή στην περιοχή διαφάνειάς του ενισχυτή [28]-[30].



Εικόνα 2.11 Κορεσμός από στενό οπτικό παλμό και ανάκαμψη του κέρδους ενός SOA.

Στην πρώτη αυτών των μεθόδων, όπου το CW σήμα βρίσκεται στη φασματική περιοχή κέρδους του ενισχυτή, είδαμε στην παράγραφο 2.4.4 ότι το κέρδος του ενισχυτή μεταβάλλεται σε σχέση με το κέρδος ασθενούς σήματος. Αντίστοιχη μεταβολή υφίσταται και η χρονική σταθερά ανάκαμψης. Από την εξίσωση (1) και με διαδικασία ανάλογη αυτής της εύρεσης της χρονικής σταθεράς ανάκαμψης απουσία σήματος στο SOA, συμπεριλαμβάνοντας, επιπλέον, την επίδραση του CW σήματος κατά την ανάκαμψη στον τρίτο όρο του δεξιού σκέλους της εξίσωσης, η χρονική σταθερά ανάκαμψης προκύπτει ότι είναι ίση με  $\tau_e = \tau_c \tau_h / (\tau_c + \tau_h)$ , όπου  $\tau_h = U_{sat} / (P_{CW} / 2)$  [26], [27] και  $P_{CW}$  η ισχύς του CW σήματος στην είσοδο του ενισχυτή.

#### 2.4.7 Δείκτης διάθλασης του SOA

Οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού είναι μέσα, που παρουσιάζουν έντονη διασπορά, ακριβώς επειδή ο δείκτης διάθλασης της ενεργού περιοχής εξαρτάται από το μήκος κύματος του προς ενίσχυση οπτικού σήματος. Ο δείκτης διάθλασης  $n$  και το κέρδος του υλικού του ενισχυτή, το οποίο είναι  $g \cdot [N(z, t) - N_T]$ , είναι συζευγμένα μεγέθη μέσω της εξίσωσης Kramers-Kronig

[31], σύμφωνα με την οποία ο δείκτης διάθλασης μπορεί να υπολογιστεί, όταν είναι γνωστοί οι συντελεστές κερδών για κάθε μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, και ο δείκτης διάθλασης του ενισχυτή είναι συνάρτηση της πυκνότητας φορέων του N, αφού αντίστοιχη εξάρτηση εμφανίζει το κέρδος του υλικού από την πυκνότητα των φορέων.

Ο δείκτης διάθλασης των SOA είναι ένα μιγαδικό μέγεθος, του οποίου το πραγματικό μέρος περιγράφει την συμπεριφορά της φάσης του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, ενώ το φανταστικό του μέρος περιγράφει το κέρδος του υλικού:

$$\underline{n} = n' - jn'' \quad (12)$$

Έτσι, το πλάτος και η φάση ενός οπτικού πεδίου αφού διαδοθεί μέσα από τον ενισχυτή, περιγράφεται ως

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \exp\left(-j \frac{2\pi nL}{\lambda}\right) = \exp\left(-j \frac{2\pi n'L}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi n''L}{\lambda}\right) = e^{-j\Delta\varphi} \cdot \sqrt{G} \quad (13)$$

όπου  $\Delta\varphi$  η διαφορά φάσης,  $G$  το κέρδος ισχύος του υλικού,  $L$  το μήκος του μέσου και  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτός. Σε μία πρώτη προσέγγιση τόσο το μιγαδικό όσο και το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης εξαρτώνται γραμμικά από την πυκνότητα των φορέων για ημιαγωγούς όπως αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Η παράμετρος, που συσχετίζει τη μεταβολή στη φάση με το κέρδος του υλικού, είναι ο **παράγοντας επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής- $\alpha$**  (linewidth enhancement factor) [32], και ισχύει:

$$\frac{dn'}{dN} = \alpha \frac{dn''}{dN} \quad (14)$$

Τυπικές τιμές για το συντελεστή  $\alpha$  είναι από 3 ως 11 [33].

Με βάση τις σχέσεις (12) και (14), η διαφορά φάσης και ο λόγος των κερδών για δύο διαφορετικές καταστάσεις κέρδους του ενισχυτή συνδέονται με τη σχέση

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (15)$$

Αποτέλεσμα της εξάρτησης της φάσης του πεδίου από το κέρδος, όταν το πεδίο, που διαδίδεται, είναι ένας στενός οπτικός παλμός, είναι η εμφάνιση **ολίσθησης συχνότητας (chirp)** κατά μήκος του παλμού[22]. Αν είναι  $P(t)$  η κυματομορφή ισχύος του παλμού και  $G(t)$  η απόκριση του κέρδους του SOA στην είσοδο αυτού του παλμού, τότε η φάση του παλμού, καθώς αυτός διαδίδεται μέσα από τον ενισχυτή, είναι η χρονικά εξαρτώμενη συνάρτηση  $\Delta\varphi(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln G(t)$ . Η μη γραμμική απόκριση κέρδους του ενισχυτή κατά τον κορεσμό του,

όπως αποδίδεται από τη σχέση (10), έχει ως αποτέλεσμα το προπορευόμενο χρονικό τμήμα του παλμού να αντιλαμβάνεται μεγαλύτερο κέρδος από το πίσω τμήμα του παλμού. Κατά συνέπεια, κάθε χρονικό τμήμα του παλμού αποκτά διαφορετική φάση κατά τη διάδοσή του και αντιλαμβάνεται διαφορετική συχνότητα ως φέρουσα συχνότητα. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αλλοίωση του σχήματος του παλμού, όπως επίσης και η αλλοίωση του φασματικού του περιεχομένου, το οποίο, μάλιστα, διευρύνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυτοδιαμόρφωση φάσης (Self-Phase Modulation) [22]. Περισσότερο λεπτομερής περιγραφή της ολίσθησης συχνότητας του παλμού μέσα στο SOA μπορεί να βρεθεί στα, 0, [34].

#### 2.4.8 Διάδοση δύο οπτικών σημάτων σε SOA

Στην προηγούμενη ενότητα περιεγράφηκε με τη βοήθεια αναλυτικών σχέσεων η απόκριση του ενισχυτή σε είσοδο ένα μόνο οπτικό σήμα. Στην περίπτωση διάδοσης δύο οπτικών σημάτων μέσα από τον ενισχυτή οι εξισώσεις, που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ενισχυτή και την επίδρασή της στην οπτική ισχύ και τη φάση των δύο σημάτων, είναι [35]-[37]:

$$\frac{\partial P_c(z,t)}{\partial z} = \frac{g_c(z,t)}{1 + \varepsilon[P_c(z,t) + P_s(z,t)]} P_c(z,t) - a_{\text{int}} P_c(z,t) \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi_c(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha g_c(z,t) \quad (17)$$

$$\frac{\partial g_c(z,t)}{\partial z} = \frac{g_{sc} - g_c(z,t)}{\tau_c} - \frac{1}{U_{\text{sat}c}} \frac{g_c(z,t)[P_c(z,t) + P_s(z,t)]}{1 + \varepsilon[P_c(z,t) + P_s(z,t)]} \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_s(z,t)}{\partial z} = \frac{g_s(z,t)}{1 + \varepsilon[P_c(z,t) + P_s(z,t)]} P_s(z,t) - a_{\text{int}} P_s(z,t) \quad (19)$$

$$\frac{\partial \varphi_s(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha g_s(z,t) \quad (20)$$

$$\frac{\partial g_s(z,t)}{\partial z} = \frac{g_{ss} - g_s(z,t)}{\tau_c} - \frac{1}{U_{\text{sat}s}} \frac{g_s(z,t)[P_c(z,t) + P_s(z,t)]}{1 + \varepsilon[P_c(z,t) + P_s(z,t)]} \quad (21)$$

Στις παραπάνω σχέσεις ο δείκτης “c” και ο δείκτης “s” χρησιμοποιούνται για τη διαφοροποίηση των αντίστοιχων μεγεθών μεταξύ των δύο οπτικών σημάτων. Η χωρική μεταβλητή z μεταβάλλεται μέσα στο πεδίο [0,L], όπου L το μήκος του SOA. Οι υπόλοιπες μεταβλητές και παράμετροι, που εμφανίζονται στο παραπάνω σύστημα εξισώσεων, είναι:

- $P(z,t)$  η διαδιδόμενη οπτική ισχύς
- $\varphi(z,t)$  η φάση του διαδιδόμενου οπτικού πεδίου
- $g(z,t)$  ο συντελεστής κέρδους
- $\tau_c$  ο χρόνος ζωής των φορέων
- $a_{\text{int}}$  οι εσωτερικές γραμμικές απώλειες ισχύος του ενισχυτή



- $\alpha$  ο συντελεστής επαύξησης φασματικής γραμμής
- $\epsilon$  ο παράγοντας μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους. Για τον παράγοντα αυτό ισχύει  $\epsilon = \epsilon_{CH} + \epsilon_{SHB}$  [35]-[37], όπου  $\epsilon_{CH}$  ο παράγοντας μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους λόγω του μηχανισμού της θέρμανσης των φορέων (Carrier Heating) και  $\epsilon_{SHB}$  ο αντίστοιχος παράγοντας λόγω του μηχανισμού της δημιουργίας φασματικής οπής (Spectral Hole Burning)
- $U_{sat}$  η ενέργεια κορεσμού του SOA
- $g_{sc}$  και  $g_{ss}$  οι συντελεστές κέρδους ασθενούς σήματος για τα δύο οπτικά σήματα μέσα στον ενισχυτή. Οι συντελεστές αυτοί δίνονται από τις σχέσεις  $g_{ss} = \Gamma a_{Nc} N_0 \left( \frac{I\tau_c}{eVN_0} - 1 \right)$  και  $g_{sc} = \Gamma a_{Nc} N_0 \left( \frac{I\tau_c}{eVN_0} - 1 \right)$ , αντίστοιχα, όπου  $a_N$  είναι ο διαφορικός παράγοντας κέρδους για κάθε ένα από τα δύο σήματα,  $N_0$  η πυκνότητα φορέων στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή,  $\Gamma$  ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης οπτικής ισχύος,  $I$  το ρεύμα έγχυσης,  $e$  τα φορτίο του ηλεκτρονίου και  $V$  ο όγκος της ενεργού περιοχής.

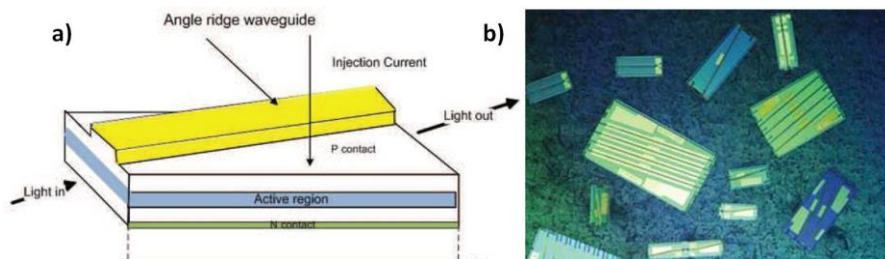
Η διαφοροποίηση των συμβολισμών ορισμένων μεγεθών συγκριτικά με τη θεωρητική ανάλυση της απόκρισης του ενισχυτή σε είσοδο ένα μόνο οπτικό σήμα γίνεται για διευκόλυνση της περιγραφής του παραπάνω συστήματος των έξι εξισώσεων. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις (18) και (21) αποτελούν απλή εξέλιξη των αντίστοιχων εξισώσεων της ροής πυκνότητας των φορέων, η οποία για κάθε ένα από τα δύο σήματα αποδίδεται με κατάλληλες μικρές τροποποιήσεις από τη σχέση (1). Τέλος, στο παραπάνω σύστημα εξισώσεων βλέπουμε ότι συμπεριλαμβάνεται η επίδραση των ενδοζωνικών φαινομένων θέρμανση φορέων (Carrier Heating) και δημιουργία φασματικής οπής (Spectral Hole Burning) μέσω της εισαγωγής των δύο παραγόντων μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους, η οποία είχε αμεληθεί στην ανάλυση της απόκρισης του ενισχυτή για είσοδο ένα οπτικό σήμα. Επομένως με αυτό το σύστημα εξισώσεων παρέχεται η δυνατότητα της μελέτης της απόκρισης του ενισχυτή ακόμα και όταν οι εισερχόμενοι οπτικοί παλμοί έχουν χρονικό εύρος της τάξεως μερικών εκατοντάδων fsec.

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων δε μπορεί να λυθεί αναλυτικά, αλλά απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων. Η αριθμητική επίλυση γίνεται χωρίζοντας το μήκος του ημιαγωγού σε πολλά μικρά τμήματα  $dz$  και θεωρώντας ως οριακές συνθήκες τις σχέσεις  $g_c(z,0) = g_{sc}$  και  $g_s(z,0) = g_{ss}$  σε κάθε σημείο  $z$  μεταξύ των τιμών του 0 και L. Αυτές οι οριακές συνθήκες εκφράζουν το γεγονός ότι, πριν εισέλθουν τα δύο σήματα στον ενισχυτή, ο παράγοντας κέρδους σε κάθε σημείο του ενισχυτή είναι ίσος με τον παράγοντα κέρδους ασθενούς σήματος.

## 2.5 SOAs και φωτονική

Η όλο και αυξανόμενη ροή πληροφορίας και τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών στην μετάδοση της πληροφορίας αυτής είναι οι βασικοί λόγοι που οδηγούν στο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη οπτικών συσκευών, και ιδίως αυτών που έχουν τη δυνατότητα να επεξεργαστούν σήματα στο οπτικό πεδίο, χωρίς την ανάγκη για την επίπονη μετατροπή οπτικού-ηλεκτρικού-οπτικού πεδίου. Τέτοιο ακριβώς στοιχείο είναι ο SOA. Ο βασικός λόγος πίσω από το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τους SOAs είναι η δυνατότητά τους να ενισχύουν και να επεξεργάζονται οπτικά σήματα σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών bit, απαιτώντας μέτρια ισχύ και όλα αυτά καταλαμβάνοντας μικρό μέγεθος.

Οι SOAs είναι ηλεκτρικά διεγερόμενοι και έχουν μεγάλο οπτικό εύρος ζώνης. Η τεχνολογία ημιαγωγών προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του μήκους κύματος στο οποίο μεγιστοποιείται το κέρδος, απλά επιλέγοντας την κατάλληλη σύσταση των υλικών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Το κυριότερο όμως πλεονέκτημά τους είναι ότι λόγω του μικρού μεγέθους τους (μήκος  $< 3\text{mm}$ , πλάτος κυματοδηγού  $\sim 2\mu\text{m}$ ) μπορούν να ολοκληρωθούν με άλλα ενεργά ή παθητικά οπτικά στοιχεία και να εκτελέσουν πιο περίπλοκες λειτουργίες όπως δικτυακές εφαρμογές και εφαρμογές επεξεργασίας σήματος. Τέλος, είναι εν δυνάμει σχετικά φθηνοί, μιας και η τεχνολογία των ημιαγωγών είναι αρκετά ώριμη.



Εικόνα 2.12 α) Σχηματική αναπαράσταση SOA β) Ολοκληρωμένα SOA-chips

Ο SOA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γραμμική και μη γραμμική λειτουργία. Στην δεύτερη περίπτωση μπορεί να εκτελέσει αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος λόγω της ισχυρής μη – γραμμικότητας και τη μεγάλη ταχύτητα με την οποία αναπτύσσονται οι δυναμικές σε αυτόν.

Οι ιδιότητες των SOAs τους επιτρέπουν να εκτελούν μια σειρά από λειτουργίες. Αυτό κάνει τους SOAs πολύ ευπροσάρμοστες συσκευές. Συνοπτικά οι φυσικοί μηχανισμοί πίσω από αυτές τις λειτουργίες, πέρα από το οπτικό κέρδος είναι[8]:

α) **Αυτοδιαμόρφωση φάσης** (Self-Phase Modulation – SPM): Είναι η διαμόρφωση της φάσης του εξερχόμενου σήματος που προκαλείται από τις διαφορές στο δείκτη διάθλασης λόγω των διακυμάνσεων στην ισχύ του σήματος.

β) **Αυτοδιαμόρφωση κέρδους** (Self-Gain Modulation – SGM): Είναι η διαμόρφωση του κέρδους λόγω των διακυμάνσεων στην ισχύ του σήματος.

γ) **Ετεροδιαμόρφωση φάσης** (Cross Phase Modulation – XPM): Η διαμόρφωση που προκαλούν οι αλλαγές στον δείκτη διάθλασης λόγω των διακυμάνσεων στην ισχύ μιας ακτίνας και επηρεάζει τη φάση όλων των άλλων σημάτων που διαδίδονται κατά μήκος του SOA.

δ) **Ετεροδιαμόρφωση κέρδους** (Cross Gain Modulation – XGM): Η διαμόρφωση κέρδους που προκαλεί ένα οπτικό σήμα και επηρεάζει το κέρδος σε όλα τα άλλα σήματα που διαδίδονται στον SOA.

ε) **Μίξη τεσσάρων φωτονίων** (Four-Wave Mixing – FWM): Η μίξη δύο ή και περισσότερων ακτινών που διαδίδονται σε έναν SOA δημιουργεί ακτίνες και σε άλλες συχνότητες.

### 3. III-V πλατφόρμες φωτονικής ολοκλήρωσης

Το τελευταίο διάστημα, στην εξέλιξη της φωτονικής τεχνολογίας αναδύεται έντονα η προσέγγιση της φωτονικής ολοκλήρωσης, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα να μεταφερθούν τα οπτικά κυκλώματα τα οποία υλοποιούνταν με χρήση οπτικών ινών στο πεδίο των οπτικών κυματοδηγών κλίμακας  $\mu\text{m}/\text{nm}$ . Ενώ η επιλογή της οπτικής ίνας έχει παγιωθεί σαν η αποτελεσματική λύση για τη μετάδοση της πληροφορίας σε μεγάλης κλίμακας (long-reach) ζεύξεις για telecom εφαρμογές (core, metropolitan δίκτυα), οι ηλεκτρονικές διασυνδέσεις παραμένουν η λύση για εφαρμογές μικρότερης κλίμακας (short-reach) (λειτουργίες σε data centers, διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων, on-chip συνδεσιμότητα), καθώς δίνουν τη δυνατότητα για ανάπτυξη αρκετά σύνθετων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που περιέχουν τεράστιο αριθμό τρανζίστορ [42]. Η πρόκληση για την εισαγωγή της ολοκληρωμένης φωτονικής σε datacom/computercom περιβάλλον οδηγείται από την ανάγκη για ύπαρξη διαύλων μετάδοσης πληροφορίας τεράστιου εύρους ζώνης (bandwidth) ικανών να διασυνδέσουν με χαμηλό κόστος και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση υπολογιστικά συστήματα (datacom) και σε δεύτερο επίπεδο αυξάνοντας την πυκνότητα ολοκλήρωσης (integration density) να προσεγγίσουν λύσεις για τη διασύνδεση chip-to-chip και on-chip διατάξεων (computercom) [43].

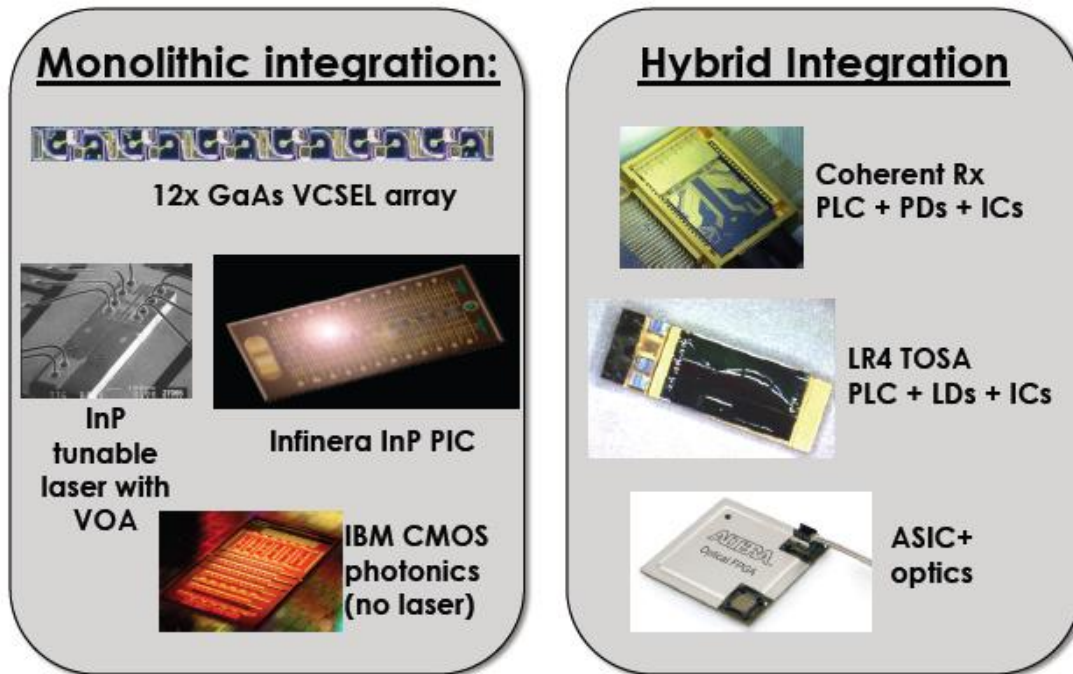
Φωτονική ολοκλήρωση αποκαλούμε τη διαδικασία τοποθέτησης σε κοινή “συσκευασία” πολλών φωτονικών στοιχείων (ενισχυτών, διαμορφωτών, μεταγωγών κλπ.). Έτσι ένα *φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα* (Photonic integrated circuit – PIC) είναι μία συσκευή που εκτελεί ταυτόχρονα πάνω από μία φωτονικές διεργασίες και αποτελεί το φωτονικό ανάλογο του συνηθισμένου ηλεκτρονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος, με τη διαφορά πως ένα PIC εκτελεί διεργασίες για οπτικά σήματα που βρίσκονται στο φάσμα του ορατού και εγγύς υπέρυθρου φωτός (τυπικά για μήκη κύματος μεταξύ 830nm και 1650 nm).[2]

Όπως και στα ηλεκτρονικά, έτσι και η φωτονική ολοκλήρωση περιλαμβάνει *υβριδική και μονολιθική ολοκλήρωση* (Hybrid integration, Monolithic integration). Στα υβριδικά PICs πολλές συσκευές μίας λειτουργίας συναθροίζονται στην ίδια συσκευασία, μερικές φορές μαζί με ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα, και διασυνδεδεμένες με οπτικές ή και ηλεκτρονικές ζεύξεις εντός της συσκευασίας. Χαρακτηριστικό της προσέγγισης ολοκλήρωσης αυτής είναι πως χρησιμοποιούμε διαφορετικές τεχνολογίες υλικών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των παθητικών και ενεργών στοιχείων. Πολλές ολοκληρωμένες φωτονικές συσκευές σήμερα αξιοποιούν την υβριδική ολοκλήρωση.

Παρόλα αυτά η συνάθροιση υβριδικών ολοκληρωμένων στοιχείων μπορεί να γίνει πολύ περίπλοκη, καθώς πολλές διακριτές συσκευές πρέπει να διασυνδεθούν εσωτερικά της συσκευασίας με ακρίβεια μικρότερη του  $\mu\text{m}$  στην ευθυγράμμιση οπτικών στοιχείων. Άλλη μία πρόκληση εκτός από το πρόβλημα του packaging είναι το γεγονός πως διαφορετικά υλικά απαιτούν διαφορετικό σχεδιασμό στο packaging λόγω των διαφορών στα οπτικά, μηχανικά και θερμικά τους χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα δύο υλικά με διαφορετικό συντελεστή διαστολής μπορούν να αποευθυγραμμιστούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας και

έτσι να απαιτούν διαφορετικούς θερμοηλεκτρικούς ψύκτες, πράγμα που κάνει το packaging σύνθετο και με μεγάλο κόστος. Στην πράξη αυτό περιορίζει τα υβριδικά PICs στο να ολοκληρώνουν το πολύ τρία με τέσσερα οπτικά στοιχεία σε μία κοινή συσκευασία.

Αντιθέτως, η μονολιθική ολοκλήρωση συνενώνει πολλές συσκευές ή και λειτουργίες σε μία φωτονική πλατφόρμα ολοκλήρωσης. Όπως και στα ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, η παρασκευή μονολιθικών PICs περιλαμβάνει την κατασκευή συσκευών σε κοινό υπόστρωμα έτσι ώστε όλες οι φωτονικές ζεύξεις να είναι πάνω στο υπόστρωμα και όλες οι λειτουργίες να συγχωνεύονται σε μία μοναδική συσκευή.[44]



Εικόνα 3.1 Παραδείγματα μονολιθικής και υβριδικής ολοκλήρωσης

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μονολιθικής ολοκλήρωσης αποτελεί η ανάπτυξη InP – based πλατφόρμας της Infinera, [44] όπου SOAs, lasers, passive κυματοδηγοί και οπτικά φίλτρα αναπτύσσονται στην ίδια πλατφόρμα. Υβριδική ολοκλήρωση θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη οπτικών στοιχείων μνήμης στο ερευνητικό πρόγραμμα ICT-RAMPLAS, όπου SOAs τεχνολογίας dilute-nitride θα ολοκληρωθούν με παθητικά στοιχεία (φίλτρα, couplers) τεχνολογίας thick – SOI.

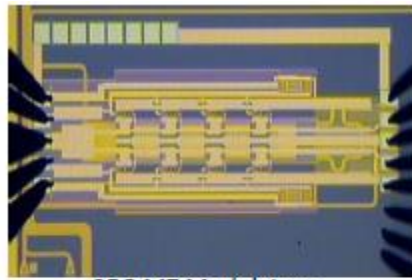
Η φωτονική ολοκλήρωση έχει πολλά πλεονεκτήματα. Μπορεί να μειώσει δραστικά το μέγεθος των οπτικών διατάξεων συγκριτικά με τις διατάξεις που υλοποιούνται με στοιχεία βασισμένα σε διατάξεις ίνας, προσφέρει υψηλής απόδοσης on-chip λειτουργίες, πολύ μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και τέλος επιτυγχάνει σαφώς μικρότερο κόστος εκμεταλλεζόμενη και το πλεονέκτημα που προσφέρει η οικονομία κλίμακας που υποστηρίζουν οι σύγχρονες τεχνικές ολοκλήρωσης. Επίσης, μια τάση που αναδύεται έντονα είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης ολοκλήρωσης με ηλεκτρονικά κυκλώματα για παροχή επαυξημένων

λειτουργιών, μια προσέγγιση που θα επαναστατικοποιήσει την ανάπτυξη σύνθετων φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων απλοποιώντας ουσιαστικά τα απαραίτητα βήματα κατασκευής και μειώνοντας το κόστος. [45]

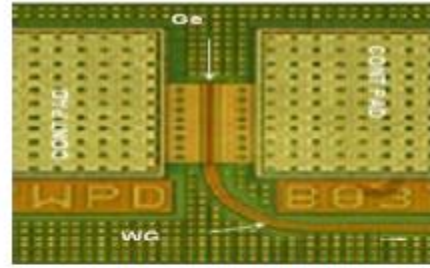
Για να επιτευχθεί αυτού του επιπέδου η ολοκλήρωση πρόκληση αποτελεί η αισθητή διαφορά στο μέγεθος μεταξύ των ηλεκτρονικών και οπτικών στοιχείων. [46]

### 3.1 Φωτονική πλατφόρμα Si

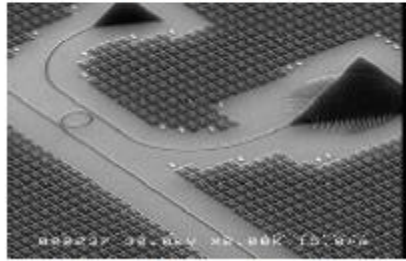
Η τεχνολογία πυριτίου (Si) αποτελεί την ηγεμονική τάση στο πεδίο ανάπτυξης αποτελεσματικών φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία ολοκλήρωσης είναι η τεχνολογία *πυριτίου σε μονωτή* (Silicon-on-insulator – SOI). Το wafer του SOI (που είναι διαθέσιμο στο εμπόριο μέχρι και σε διάμετρο 300mm) αποτελείται από μία στρώση πυριτίου πάνω σε μία στρώση SiO<sub>2</sub>, που έχει παρασκευαστεί πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου. Ενώ στα ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα η καλυμμένη στρώση SiO<sub>2</sub> βοηθά στη βελτίωση της απόδοσης των τρανζίστορ, στα φωτονικά κυκλώματα έχει μια εντελώς διαφορετική σημασία. Δημιουργεί μία μεγάλη αντίθεση στο δείκτη διάθλασης στο κάθετο επίπεδο μεταξύ της πάνω στρώσης του πυριτίου ( $n_{Si} = 3.45$ ) και του SiO<sub>2</sub> ( $n_{SiO_2} = 1.45$ ), έτσι ώστε να μπορεί να κυματοδηγεί το εγγύς υπέρυθρο φως ( $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$ ) στην άνω στρώση πυριτίου μέσω ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μια μεγάλη αντίθεση στο δείκτη διάθλασης σε κάθε κατεύθυνση επιτυγχάνεται μέσω πλευρικής χάραξης της πάνω στρώσης πυριτίου έτσι έστω να δημιουργηθεί ένα φωτονικό “καλώδιο” πυριτίου που περιτριγυρίζεται από περιοχές με χαμηλό δείκτη διάθλασης (αέρας και SiO<sub>2</sub>). Προκειμένου να εξασφαλιστεί η διάδοση του φωτός στον οπτικό κυματοδηγό σε έναν οπτικό ρυθμό στα μήκη κύματος 1.3  $\mu\text{m}$  και 1.55  $\mu\text{m}$ , τυπικά απαιτείται για τους κυματοδηγούς μία μέγιστη διατομή 0.1  $\mu\text{m}^2$ . Η μεγάλη διαφορά στον δείκτη διάθλασης κάνει δυνατή την ολοκλήρωση σε μεγάλη κλίμακα οπτικών λειτουργιών σε ένα SOI chip, καθώς το φως περιορίζεται στο “καλώδιο” πυριτίου. Αυτός ο περιορισμός του φωτός μειώνει εκπληκτικά τις απώλειες (2dB/cm για το τυπικό SOI, μέχρι και 0.01 dB/cm για την τεχνολογία thick SOI). Επιτρέπει επίσης την ολοκλήρωση resonators πολύ μικρού μεγέθους, bends και rings στον κυματοδηγό τάξης μεγέθους του μήκους κύματος με αμελητέο crosstalk. Όλα αυτά μας επιτρέπουν πολύ υψηλές πυκνότητες ολοκλήρωσης.[47]



25G MZ Modulators



25G Integrated Photodiodes



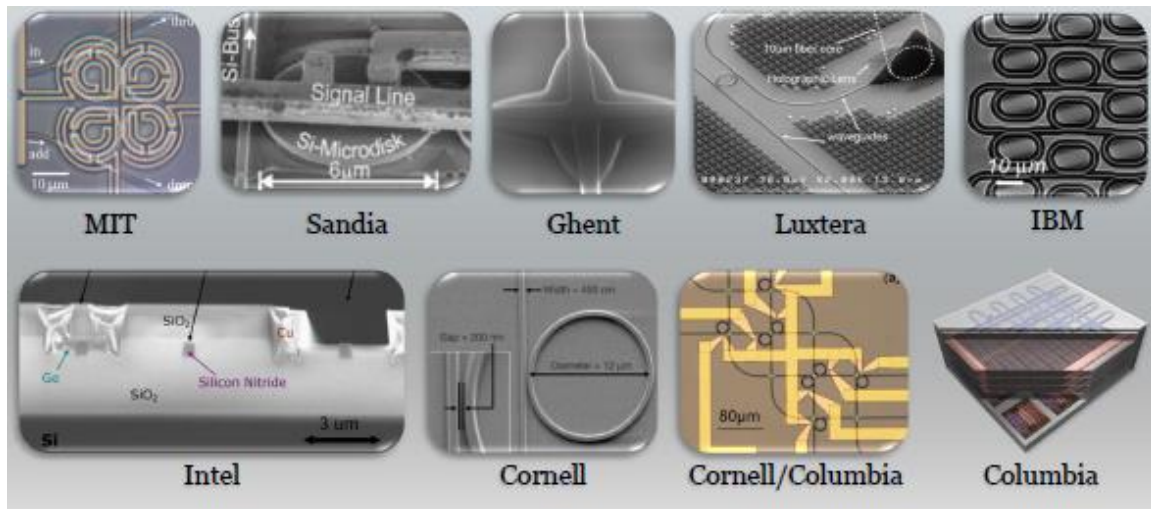
Vertical Optical Coupling



Wafer-Scale Testing

Εικόνα 3.2 Παραδείγματα SOI ολοκλήρωσης

Ένα ακόμη από τα βασικά πλεονεκτήματα του πυριτίου σαν υλικό ολοκλήρωσης είναι η συμβατότητα την τεχνολογία CMOS.[48] Αυτό επιτρέπει την παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα και την μείωση του κόστους παραγωγής δραματικά, ενώ αυξάνει τις δυνατότητες λόγω της ευρείας εφαρμογής της CMOS. Καθίσταται έτσι δυνατή ακόμη και η ταυτόχρονη ολοκλήρωση φωτονικών και ηλεκτρονικών εφαρμογών.



Εικόνα 3.3 Παραδείγματα SOI ολοκλήρωσης

Παρόλο που το πυρίτιο αποτελεί τη νούμερο ένα επιλογή στην ολοκλήρωση παθητικών δομών (π.χ. power splitters, διατάξεις σύζευξης φωτός από/προς το chip, οπτικά φίλτρα, κ.α.), δεν ενδείκνυται για active οπτικές λειτουργίες (π.χ. διαμορφωτές, αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος) για έναν απλούστατο λόγο. Τα φαινόμενα εξαναγκασμένης εκπομπής φωτός στο πυρίτιο παρεμποδίζονται από το έμμεσο ενεργειακό του διάκενο. Λόγω αυτό του έμμεσου διακένου, η πιθανότητα επανασύνδεσης για ένα διεγερμένο ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής και έτσι η εκπομπή φωτονίου είναι σημαντικά μειωμένη, λόγω του επικρατέστερου ρυθμού μη-ακτινοβολούσας επανασύνδεσης. Παρόλο που κάποια βήματα έχουν γίνει στην κατεύθυνση του να επιτευχθεί εκπομπή φωτός από το πυρίτιο, είτε διαμορφώνοντας την μικροδομή του υλικού[49], είτε εκμεταλλευόμενοι τις μη – γραμμικές ιδιότητές του[50], δεν ενδέχεται τέτοιες συσκευές να ξεπεράσουν σε επιδόσεις την εναλλακτική προσέγγιση που βασίζεται στην ανάπτυξη ενεργών οπτικών στοιχείων βασισμένα στην ολοκλήρωση III-V ημιαγωγίμων υλικών.

## 3.2 Φωτονικές πλατφόρμες βασισμένες σε III-V υλικά

### 3.2.1 Ιστορική αναδρομή

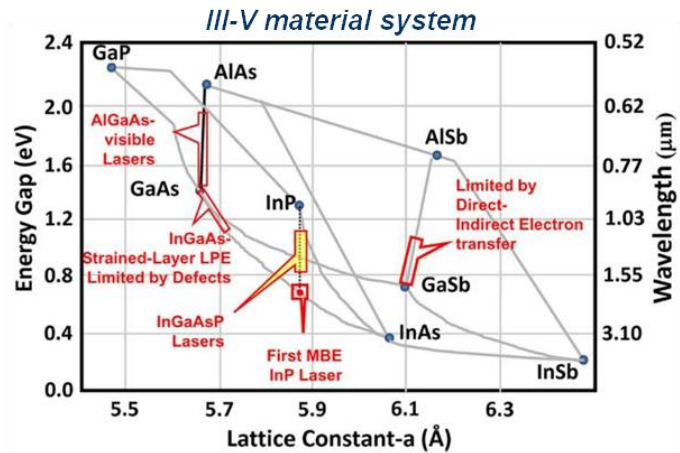
Το κενό αυτό για την ανάπτυξη ενεργών στοιχείων καλύπτεται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως από III-V πλατφόρμες (άμεσου ενεργειακού διακένου) που προσφέρουν υψηλής απόδοσης διατάξεις. Με τον όρο III-V εννοούμε τα δυαδικά παράγωγα των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα. Στον πίνακα 3.4(α) παρουσιάζεται ποια είναι αυτά.



'III-V' compounds (Binary)	5 B	13 Al	31 Ga	49 In	81 Tl
7 N	BN	AlN	GaN	InN	TlN
15 P	BP	AlP	GaP	InP	TlP
33 As	BAs	AlAs	GaAs	InAs	TlAs
51 Sb	BSb	AlSb	GaSb	InSb	TlSb
83 Bi	BBi	AlBi	GaBi	InBi	TlBi

Key for above table:	Nonmetals	Metalloids	Poor metals	atomic number in black above
----------------------	-----------	------------	-------------	------------------------------

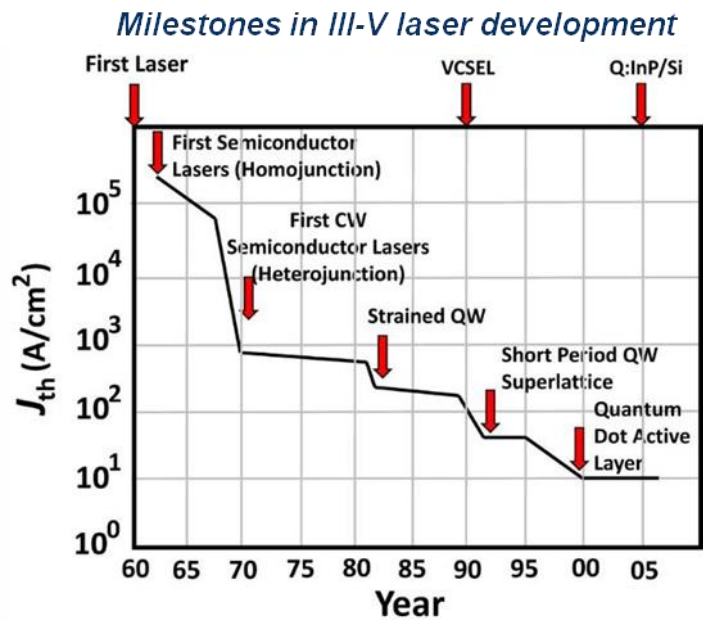


Εικόνα 3.4 α) Διαδικά παράγωγα των ομάδων III-V, β) Ενεργειακό διάκενο των III-V διαδικών παραγωγών

Στην εικόνα 3.4(β) παρουσιάζεται το μέγεθος του ενεργειακού διακένου για τα διάφορα III-V παράγωγα και άρα του μήκος κύματος στο οποίο αυτά εκπέμπουν. Βλέπουμε ότι στα 1.55  $\mu\text{m}$ , όπου συνήθως λειτουργούν τα οπτικά συστήματα (λόγω ελαχιστοποίησης των απωλειών στην ίνα) εκπέμπει και το Indium Phosphate (InP).

Το InP καταλαμβάνει σημαντικό μερίδιο στην ανάπτυξη της III-V τεχνολογίας και έχει κατοχυρωθεί σαν πλατφόρμα που επιτρέπει τη μονολιθική ολοκλήρωση τόσο παθητικών όσο και ενεργών στοιχείων. Έχουν επιδειχθεί ολοκληρωμένα κυκλώματα σε πλατφόρμα InP τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό στοιχείων (>500) και συνθέτουν ολοκληρωμένους οπτικούς πομποδέκτες που λειτουργούν στα 500Gb/s [51]. Ανταγωνιστική πλατφόρμα στο InP, είναι το GaAs το οποίο είναι ήδη γνωστό και αυτό σαν πλατφόρμα ανάπτυξης ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών. Έχοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης αξιόπιστων παθητικών/ενεργών στοιχείων, πλεονεκτεί έναντι του InP στη χρήση μεγαλύτερων διαστάσεων wafers (μέχρι 150mm διάμετρο συγκριτικά με τα 50mm των InP wafers) οδηγώντας σε ουσιαστική μείωση του κόστους ολοκλήρωσης/κατασκευής [52].

Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της III-V lasers μέσω του ρεύματος κατωφλίου που απαιτείται για να υπάρξει διέγερση έτσι ώστε να υπερτερεί η εξαναγκασμένη εκπομπή έναντι της απορρόφησης. Διαρκές ερευνητικό κίνητρο στην ανάπτυξη αποδοτικών ενεργών στοιχείων αποτελεί η αισθητή μείωση των ρευμάτων κατωφλίου οι οποίες με τη σειρά τους θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη ενεργών στοιχείων που απαιτούν χαμηλά επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος οδήγησης. Γίνεται έτσι φανερό πως οι τομές που έγιναν επηρέασαν την ενεργειακή κατανάλωση και βοήθησαν στο να καθιερωθούν τα III-V παράγωγα ως η ηγεμονική τάση για την ολοκλήρωση ενεργών οπτικών συστημάτων.

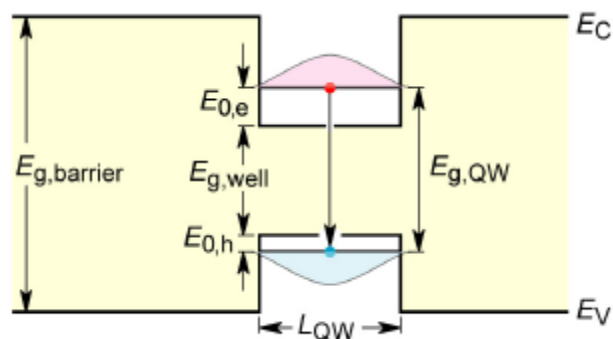


Εικόνα 3.5 Κομβικά σημεία της εξέλιξης των III-V laser

Είναι εμφανές πως διαδοχικές βελτιώσεις κάνουν αποδοτικότερα τα lasers III-V ημιαγωγών. Παρατηρούμε πως αρχικά η χρήση ετεροενώσεων μείωσε την ενεργειακή κατανάλωση, περιορίζοντας στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονίων και των οπών. Αργότερα, η χρήση κβαντικών πηγαδιών (Quantum Wells) στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού βοήθησε με τον εγκλωβισμό των φορέων στο εσωτερικό του πηγαδιού. Τελευταία καινοτομία είναι χρήση κβαντικών τελειών (Quantum Dots).

### 3.2.2 Quantum well ενεργά στοιχεία

Σε αυτό το σημείο έχει μια ιδιαίτερη αξία να αναφερθούμε στην χρήση κβαντικών πηγαδιών και πώς αυτή βελτιώνει την απόδοση της ημιαγωγικής συσκευής, καθώς αντικείμενο της μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ένα ενεργό στοιχείο (SOA) που υιοθετεί την τεχνολογία QW. Ένα κβαντικό πηγάδι συντίθεται από δύο διαφορετικών ημιαγωγών με ενεργειακά διάκενα  $E_{g,barrier}$  και  $E_{g,well}$ . Η δομή των ενεργειακών σταθμών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.6 Δομή ενεργειακών σταθμών κβαντικού πηγαδιού

Η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι :

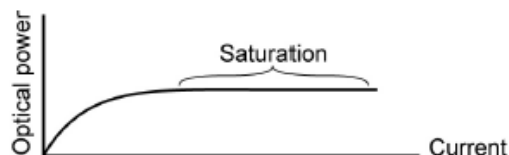
$$E_{g,QW} = E_{g,well} + E_{0,e} + E_{0,h} = h\nu$$

όπου  $E_{0,e}$  και  $E_{0,h}$  είναι η κβαντισμένη ενέργεια ηλεκτρονίου και οπής αντίστοιχα. Η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι διαφορετική από το διάκενο και των δύο υλικών. Είναι λοιπόν σαν να δημιουργείται ένα νέο συνθετικό υλικό το οποίο δεν σχετίζεται ιδιαίτερα με τα αρχικά υλικά που το αποτελούν. Έτσι λοιπόν τα κβαντικά πηγάδια παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα.

- Παρέχουν την ελευθερία σχεδιασμού ανάλογα με την επιθυμητή ενεργειακή μετάβαση.
- Παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση ακτινοβολίας. Έχουν πολύ μικρό όγκο και εγκλωβίζουν σε αυτόν τους ελεύθερους φορείς, δημιουργώντας μεγάλες συγκεντρώσεις και έτσι αυξάνουν το ρυθμό ακτινοβολούσας επανασύνδεσης.
- Χαμηλό lasing threshold. Λόγω του μικρού όγκου η πυκνότητα φορέων που απαιτείται έτσι ώστε να έχουμε αναστροφή πληθυσμών είναι μικρή.
- Η επιφανειακή επανασύνδεση δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι φορείς εγκλωβίζονται στο εσωτερικό του πηγαδιού.

Οι δομές με ένα κβαντικό πηγάδι παρουσιάζουν το πρόβλημα του κορεσμού της ισχύος ακτινοβολίας όταν το κβαντικό πηγάδι είναι γεμάτο με φορείς, για μεγάλες πυκνότητες ρεύματος. Γι' αυτό έχουν δημιουργηθεί δομές *πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών* (Multiple Quantum Wells – MQW). Οι MQW δομές περιέχουν πάνω από ένα κβαντικά πηγάδια και έτσι περισσότεροι φορείς μπορούν να εξυπηρετηθούν, επιλύοντας έτσι το ζήτημα του κορεσμού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Light output characteristic of SQW LED:



Solution: MQW structures:



Εικόνα 3.7 Οπτική ισχύς εξόδου δομών μοναδικού (α) και πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών (β)

Οι MQW δομές διατηρούν τα πλεονεκτήματα που έχει ένα κβαντικό πηγάδι, έχουν όμως μεγαλύτερο όγκο της ενεργού περιοχής και έτσι επιτρέπουν υψηλότερη οπτική ισχύ. Τα MQW lasers έχουν μεγαλύτερο κέρδος και υψηλότερο κατώφλι πυκνότητας ρεύματος.

### 3.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των III-V υλικών στη φωτονική

Συνολικά τα III-V υλικά ολοκλήρωσης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα τα οποία απαριθμούνται στον παρακάτω πίνακα, μαζί με τις αδυναμίες τους.

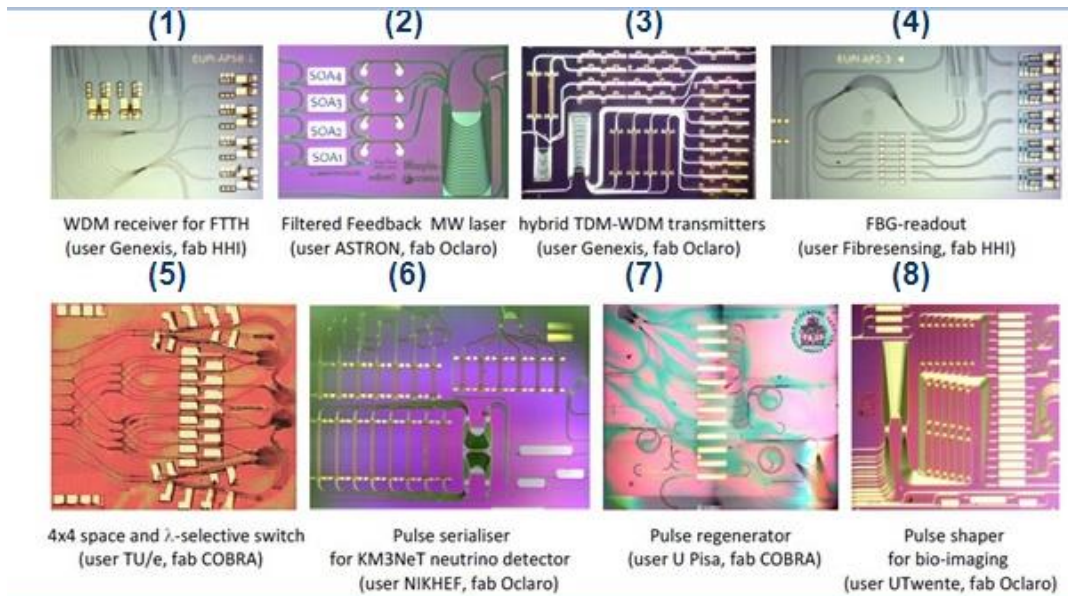
<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Διαθέσιμες λύσεις για laser, ενισχυτές, διαμορφωτές και ανιχνευτές	Μη συμβατότητα με CMOS
Μονολιθική ολοκλήρωση active/passive στοιχείων σε ένα chip	Αυξημένες απώλειες διάδοσης (> 0.5 dB/cm)
Πάρα πολύ γρήγορα οπτικοηλεκτρικά χαρακτηριστικά	Περιορισμοί στη μαζική παραγωγή λόγω των μικρών wafers για το InP
Υψηλή αξιοπιστία	Μικρή διαφορά στον δείκτη διάθλασης ( $\Delta n/n$ )

Πίνακας 3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα III-V τεχνολογίας ολοκλήρωσης

Όπως παρατηρούμε οι III-V ημιαγωγοί λόγω του άμεσου ενεργειακού διακένου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μονολιθική ολοκλήρωση ενεργών και παθητικών στοιχείων. Επίσης, λόγω των πολύ γρήγορων οπτικοηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαμορφωτές υψηλής ταχύτητας, ενώ παρουσιάζουν και μεγάλη αξιοπιστία. Από την άλλη, η μη συμβατότητα με CMOS αποτελεί ανάχωμα στην αυτοματοποίηση της παραγωγής τους, ενώ επίσης δεν μπορούν να αναπτυχθούν πολύ μεγάλα wafers. Λόγω της μικρής διαφοράς στο δείκτη διάθλασης έχουν αυξημένες απώλειες.

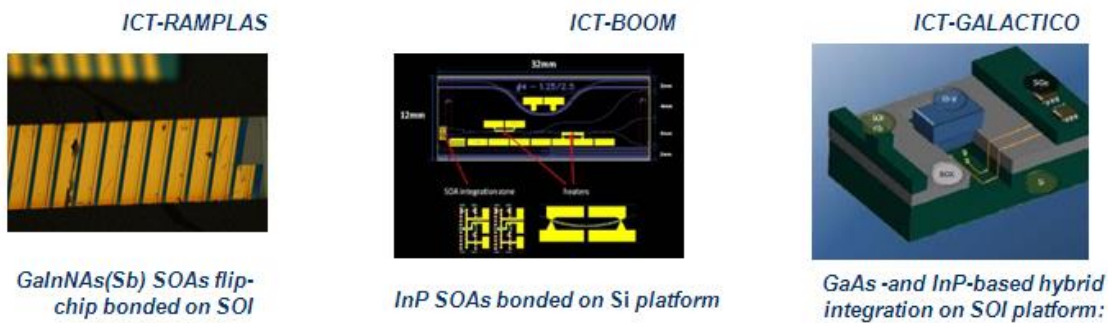
Τέλος, προκλήσεις για το επόμενο διάστημα αποτελούν η ταυτόχρονη μονολιθική ολοκλήρωση οπτικών και ηλεκτρονικών κομματιών, καθώς και η ανάπτυξη μίας προσέγγισης γραμμής παραγωγής η οποία να είναι ανταγωνιστική ως προς το κόστος.

Η εικόνα 3.8 επιδεικνύει μερικές από τις εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί μέσω III-V ολοκλήρωσης.



Εικόνα 3.8 Εφαρμογές III-V ολοκλήρωσης

Οι εικόνες 1-3 παρουσιάζουν telecom εφαρμογές, (έναν δέκτη WDM για fiber-to-the-home, ένα laser με φιλτραριζόμενη ανατροφοδότηση και υβριδικούς WDM-TDM πομπούς) οι 5,7 datacom εφαρμογές (ένα διακόπτη 4x4 και έναν αναγεννητή παλμών), οι 4,6 εφαρμογές αισθητήρων και η 8 βιοιατρική εφαρμογή. Όλες αυτές οι εφαρμογές έχουν υλοποιηθεί με III-V μονολιθική ολοκλήρωση.



Εικόνα 3.9 Εφαρμογές υβριδικής ολοκλήρωσης

Εκτός από τη μονολιθική προσέγγιση ολοκλήρωσης που αναπτύσσεται σε μια σειρά εφαρμογών, όπως έχει ήδη αναφερθεί αρκετά παραδείγματα υπάρχουν και στην υβριδική ολοκλήρωση III-V ενεργών στοιχείων σε παθητική πλατφόρμα Si. Στην εικόνα 3.9 μπορούμε να δούμε μερικά παραδείγματα υβριδικής ολοκλήρωσης III-V ημιαγωγών πάνω σε πλατφόρμα πυριτίου. Οι δομές αυτές αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκε η λειτουργία τους στα πλαίσια συνεργασίας του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών με ερευνητικά ινστιτούτα και πανεπιστήμια της Ευρώπης. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των dilute-nitrides (Εικόνα 3.9(a)) που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία, συστοιχίες από GaInNAsSb/GaAs SOAs θα χρησιμοποιηθούν σαν ενεργά στοιχεία σε σύνθετες δομές πάνω σε πλατφόρμα Si στοχεύοντας στην ανάπτυξη στοιχείων οπτικής μνήμης και βασικών τοπολογιών μνήμης RAM [74]. Στην

περίπτωση της εναπόθεσης InP SOAs σε πλατφόρμα Si (Εικόνα 3.9.β) αναπτύχθηκαν επιτυχώς ολοκληρωμένες δομές αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος (all-optical wavelength converters) οι οποίοι λειτουργούν σε υπερυψηλές ταχύτητες μέχρι τα 160Gb/s [75]. Τέλος, στην περίπτωση της υβριδικής ολοκλήρωσης InP- και GaAs- στοιχείων σε πλατφόρμα Si αναπτύχθηκαν ολοκληρωμένοι οπτικοί δέκτες για τεχνικές σύμφωνης λήψης οπτικών σημάτων (coherent detection) στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ICT-GALACTICO [76].

### 3.3 Τεχνολογία GaInNAs(Sb)/GaAs

Στην οικογένεια αυτή των GaAs- υποστρωμάτων ολοκλήρωσης, ανήκει και η τεχνολογία dilute-nitrides. Οι dilute-nitride ημιαγωγοί παρουσιάζουν τεράστιο ενδιαφέρον, τόσο για τις φυσικές τους ιδιότητες, όσο και για τις πιθανές εφαρμογές τους σε συσκευές. Τοποθετώντας προσμίξεις αζώτου στα συνήθη υλικά της V-στήλης σε συμβατικούς III-V ημιαγωγούς, όπως GaAs και GaP επηρεάζουμε σημαντικά την ηλεκτρονιακή τους δομή πράγμα που μας επιτρέπει να επέμβουμε στη δομή των ενεργειακών σταθμών των III-V ημιαγωγών, δίνονται προοπτικές για ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών και συσκευών. Ήδη υπάρχει μεγάλης κλίμακας εφαρμογή των υλικών αυτών σε ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία προσφέρουν μεγάλη απόδοση (conversion efficiency) αλλά και βελτιωμένη απόδοση σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών.[53] Σε εφαρμογές φωτονικής αναδύεται σαν υποσχόμενη τεχνολογία που θα απαντήσει στην ανάγκη για αποδοτικά ενεργά στοιχεία (lasers, ενισχυτές) χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, αποδοτικού κόστους, υψηλών επιδόσεων και ταχύτητας. Η ανάπτυξη οπτικοηλεκτρονικών κυκλωμάτων που μπορούν να συνδυάζουν σε ένα μόνο chip συνηθισμένα στοιχεία πυριτίου σαν παθητικές δομές με οπτικοηλεκτρονικά στοιχεία βασισμένα σε III-V ημιαγωγούς για τις ενεργές λειτουργίες αποτελούν ένα ρεαλιστικό οδικό χάρτη στον τομέα ανάπτυξης φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Το βασικό πλεονέκτημα τους βρίσκεται στην εξαιρετική συμπεριφορά τους σε σχέση με τη θερμοκρασία.[54] Η αναισθησία στη θερμοκρασία μπορεί να επιτρέψει στη λειτουργία τους χωρίς την απαίτηση υποστήριξης ενεργοβόρων μηχανισμών ψύξης (coolerless operation). Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη λειτουργία αυτή εντοπίζονται στη δραστική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, στην αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης καθώς θα μπορούμε να ολοκληρώσουμε με μεγάλη εγγύτητα ενεργές δομές που δεν επηρεάζονται από τις ροές θερμότητας γειτονικών στοιχείων (thermal crosstalk), καθώς και στην απλοποίηση των διαδικασιών για το packaging των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Σε επίπεδο φυσικών διεργασιών, η εξήγηση γι' αυτό βρίσκεται στην ατομική τους δομή. Η μεγάλη διαφορά στην ηλεκτραρνητικότητα καθώς και στο μέγεθος των συστατικών ατόμων των dilute nitrides (πχ GaInNAs) επιτρέπουν με πρόσμιξη μικρής ποσότητας αζώτου μια σημαντική μείωση στο ενεργειακό διάκενο μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας. Έτσι δημιουργούνται πολύ βαθιά «πηγάδια μεταξύ του III-N-V και του III-V, που εγκλωβίζουν τους φορείς σε ανεβασμένες θερμοκρασίες πολύ πιο αποτελεσματικά από το συνήθη III-V υλικά (όπως το InP), κάνοντας τη μη ευαίσθητη στην θερμοκρασία λειτουργία εφικτή.

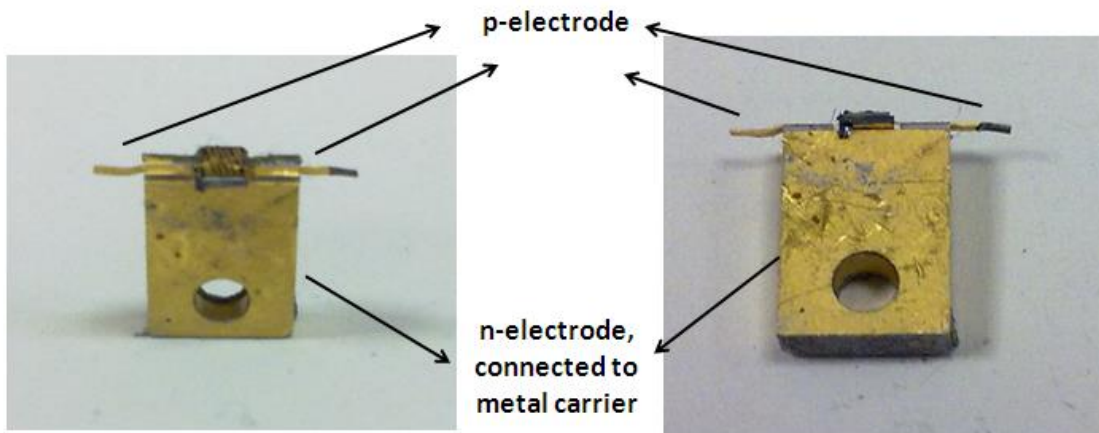
Παράλληλα, συγκριτικά με τις III-V δομές που βασίζονται στη χρήση του υλικού InP, τα dilute nitrides αποτελούν μια πιο φτηνή λύση καθώς εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα ανάπτυξης μεγαλύτερης κλίμακας wafers GaAs με αποτέλεσμα το αισθητά μικρότερο ανηγμένο κόστος ολοκλήρωσης (κόστος/mm<sup>2</sup>).

## 4. Πειραματικός Χαρακτηρισμός SOAs

Στο κεφάλαιο αυτό, που αποτελεί το κυρίως μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο probe station για τον χαρακτηρισμό των SOA-chips τεχνολογίας dilute nitrides (GaInNAs/GaAs στα 1.3  $\mu\text{m}$  και GaInNAsSb/GaAs στα 1.55  $\mu\text{m}$ ), καθώς και τον συμβατικών InP SOA-chips. Μέσα από την επεξεργασία και τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων θα προκύψουν και τα συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Το κεφάλαιο ξεκινάει με μία συνοπτική περιγραφή του probe station όπου έλαβαν χώρα οι μετρήσεις, ενώ ακολουθούν για κάθε κατηγορία SOA μετρήσεις που στοχεύουν στη συμπεριφορά του φάσματος ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission – ASE spectrum), στη στατική και δυναμική συμπεριφορά του κέρδους, καθώς και στο φαινόμενο μίξης τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing – FWM).

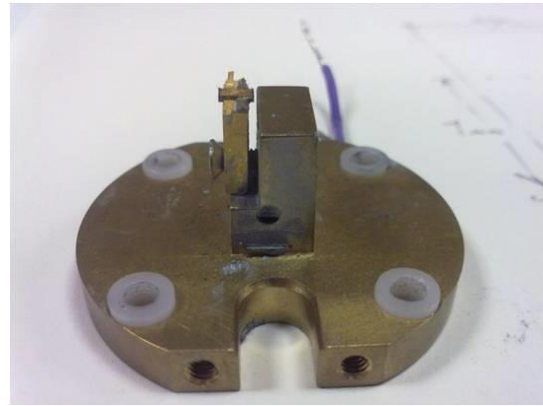
### 4.1 Μετρήσεις στο probe station

Για της μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε σταθμός εργασίας (probe station) ο οποίος φιλοξενεί τα SOA-chips. Είναι εφοδιασμένος με διατάξεις που διασφαλίζουν με ακρίβεια την ευθυγράμμιση οπτικών ινών και κυματοδηγών του SOA. Κατ' αρχάς για τη σύνδεση και διατήρηση της τοποθέτησης των SOAs χρησιμοποιείται ο μεταλλικός carrier που φαίνεται παρακάτω, πάνω στον οποίο προσδένεται ο SOA. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την ηλεκτρική απομόνωση των δύο περιοχών του ημιαγωγού ώστε να είναι εύκολη η εφαρμογή της απαιτούμενης τάσης πόλωσης.



Εικόνα 4.1 Ο carrier του SOA

Για την έκχυση ηλεκτρικού ρεύματος και τη διέγερση του SOA, χρησιμοποιούνται σαν θετικό ηλεκτρόδιο η μία επαφή του SOA συνδεδεμένη στις επαφές μέσω καλωδίου, ενώ για αρνητικό ηλεκτρόδιο η άλλη επαφή του SOA συνδέεται κατευθείαν στον μεταλλικό carrier ο οποίος λειτουργεί σαν n-τύπου επαφή.



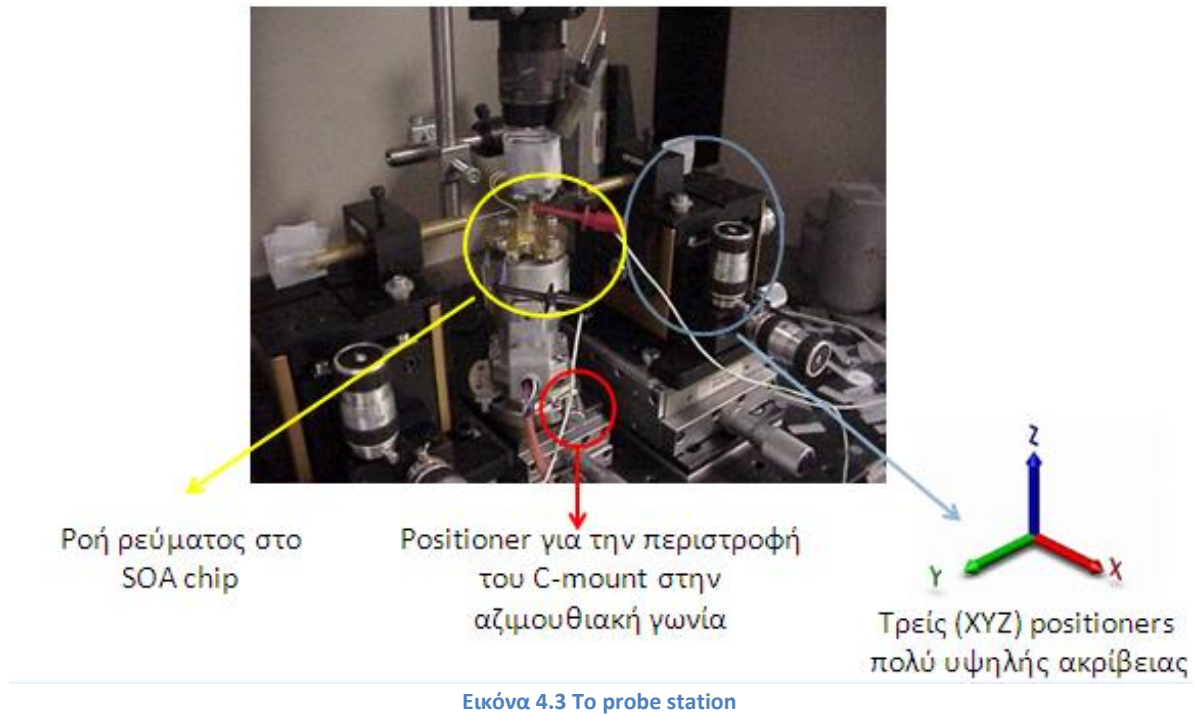
Εικόνα 4.2 Ο C-mount carrier (a) και η mounting base (b) που χρησιμοποιήθηκαν

Η mounting base, που απεικονίζεται στην 4.2(b) τοποθετείται πάνω σε μία θερμοηλεκτρική ψήκτρα – TEC, η οποία λειτουργεί μέσω ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου Peltier και εξασφαλίζει την ψύξη και άρα τη λειτουργία του SOA σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά το σχεδιασμό του μετρητικού σταθμού βάσης χρησιμοποιούνται υλικά με τις επιθυμητές ιδιότητες: υψηλή θερμική αγωγιμότητα για να διευκολυνθεί η ροή θερμότητας και υψηλή θερμοχωρητικότητα της δεξαμενής θερμότητας στη βάση του σταθμού εργασίας που δίνει τη δυνατότητα για επίτευξη μεγάλου εύρους θερμοκρασίας στις C-mounted δομές.

Όλο το παραπάνω σύστημα τοποθετείται πάνω σε έναν φ-positioner ο οποίος εξυπηρετεί στη βέλτιστη προσαρμογή της γωνίας εξόδου της δέσμης φωτός από τον SOA σύμφωνα με το νόμο του Snell.

Οι οπτικές ίνες τοποθετούνται με ακρίβεια 20nm μέσω positioners τριών καρτεσιανών αξόνων (x,y,z) και συνθέτουν μαζί με τον φ-axis positioner ένα σύστημα τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Το σύστημα αυτό φαίνεται στην εικόνα 4.3.





Αξίζει να σημειωθεί πως το σύστημα τοποθετείται πάνω σε μία βάση αλουμινίου η οποία εξασφαλίζει σταθερότητα για την τοποθέτηση και τη βέλτιστη ευθυγράμμιση.

Τέλος, για τη σύζευξη οπτικής ισχύος από και προς το chip χρησιμοποιήθηκαν ίνες εφοδιασμένες με δομή εστίασης (lensed fibers). Όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια η επιλογή των παραμέτρων των ινών καθορίστηκε με βάση τη γεωμετρία του κυματοδηγού του SOA. Στο Εργαστήριο υπάρχουν δύο τύποι ινών εστίασης με διάμετρο εστίασης (Spot Size Diameter) 2.5  $\mu\text{m}$  και 5  $\mu\text{m}$  οι οποίες αντιστοιχούν σε απόσταση λειτουργίας (working distance) 14  $\mu\text{m}$  και 28  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα.



Εικόνα 4.4 Lensed fiber

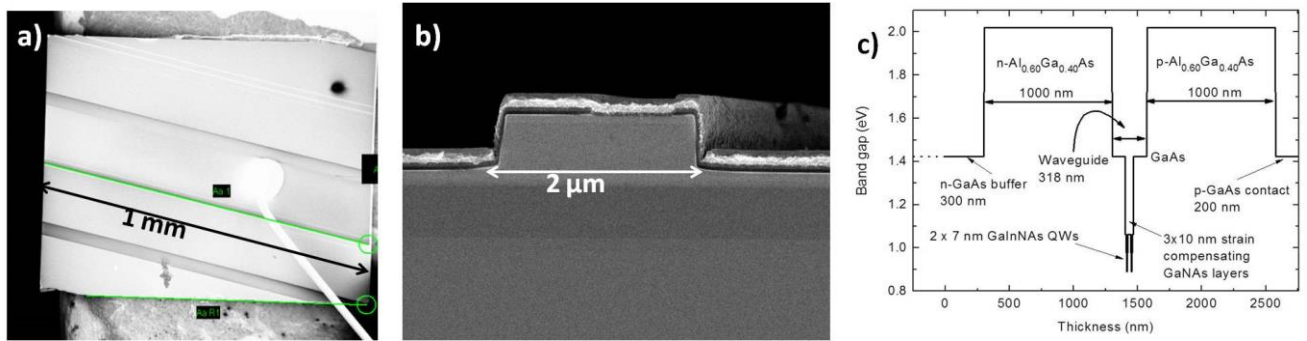
## 4.2 Dilute Nitride SOAs στα 1.3 μm (GaInNAs)

### 4.2.1 Σχεδιασμός και κατασκευή

Η επιλογή της τεχνολογίας GaInNAs για την κατασκευή αποτελεσματικών SOAs αναδύεται σαν μια πρωτοποριακή επιλογή που θα προσφέρει αξιόπιστες δομές SOA με βασικό χαρακτηριστικό τους: τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς την ανάγκη μηχανισμού ψύξης. Μελέτες από τις αρχές του '00 έχουν παρουσιάσει πως η λειτουργία των ενεργών στοιχείων GaInNAs(Sb) εμφανίζουν περιορισμένη ευαισθησία στη θερμοκρασία συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες III-V που βασίζονται στη χρήση του InP [55]. Η ερμηνεία της αναισθησίας της συμπεριφοράς των GaInNAs QWs σε θερμοκρασιακές μεταβολές εντοπίζεται στη μεγάλη διαφορά των ζωνών αγωγιμότητας που δημιουργούνται μεταξύ του GaInNAs QW και του GaAs φράγματος [56].

Οι GaInNAs/GaAs SOAs που περιλαμβάνονται στην εργασία αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα n-τύπου GaAs κρυσταλλικού προσανατολισμού (100) με χρήση της μεθόδου επιταξίας MBE (Molecular Beam Epitaxy). Πηγή πλάσματος σε RF συχνότητες χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του αζώτου (N) που απαιτείται για την εναπόθεση στον κυματοδηγό. Λεπτομέρειες σχετικά με τη μέθοδο κατασκευής του συγκεκριμένου chip ο αναγνώστης μπορεί να βρει στις [57],[58]. Επίσης, μια ενδιαφέρουσα μελέτη που διερευνά την επίδραση παραμέτρων της μεθόδου MBE για τη ανάπτυξη GaInNAs [77]. Στην εικόνα 4.5(b)-(c) παρουσιάζονται εικόνες μέσω μικροσκοπίου SEM (Scanning Electron Microscope) οι οποίες δίνουν τις βασικές πληροφορίες για τις σχεδιαστικές παραμέτρους των κυματοδηγών SOAs. Το μήκος των δομών επιλέχθηκε να είναι 1mm, ενώ για τη διαμόρφωση του ridge κυματοδηγού στην πλευρά του p-τύπου επιλέχθηκε πλάτος 2μm, και ύψος 1.7μm το οποίο εξασφαλίζει μεγαλύτερο παράγοντα περιορισμού (Γ) και συνεπώς μεγαλύτερο κέρδος στον SOA. Η αύξηση του παράγοντα περιορισμού που εξαρτάται από τις παραμέτρους σχεδιασμού του κυματοδηγού είναι πολύ σημαντική καθώς αυξάνει και τη συνολική απόδοση κέρδους του SOA. Αυτό συμβαίνει καθώς εκτός από το κέρδος του υλικού (material gain) που σχετίζεται με τις οπτικές ιδιότητες του ημιαγωγικού υλικού, ο υψηλός εγκλωβισμός (high confinement) του πεδίου στον κυματοδηγό διασφαλίζει τη μεγαλύτερη χωρική αλληλεπίδραση του εισερχόμενου πεδίου με το στοιχείο κέρδους και με αποτέλεσμα να αυξάνεται το συνολικό κέρδος. Ο κυματοδηγός τοποθετείται με γωνία  $7^\circ$  ως προς την επιφάνεια του chip που διαμορφώνεται (cleaved) ώστε να αποφευχθούν οι ανακλάσεις. Για την αποτελεσματική αντί-ανακλαστική συμπεριφορά χρησιμοποιείται επίστρωση με στρώμα  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  (AR coating) το οποίο μειώνει δραστικά το συντελεστή ανάκλασης ( $R < 0.1\%$ ). Τέλος, για να είναι εφικτή η οδήγηση του SOA με ηλεκτρικό ρεύμα αναπτύχθηκαν ωμικές μεταλλικές επιφάνειες επαφής Ni/Au/Ge/Au και τοποθετήθηκε σε δομή C-mount η οποία βοηθά το χαρακτηρισμό του.

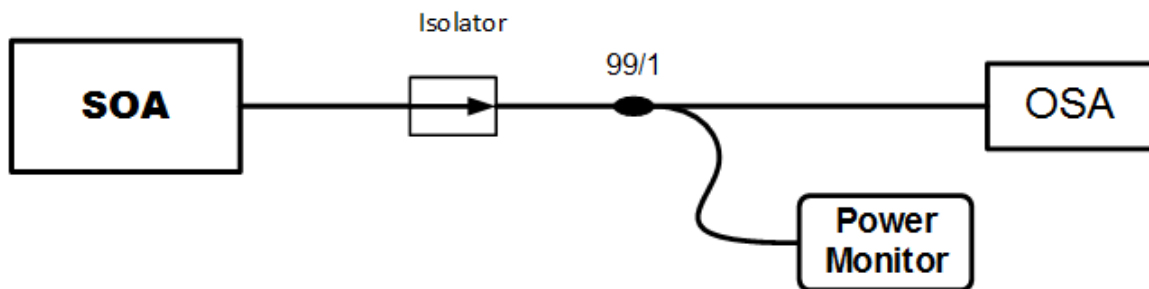
Στην εικόνα 4.5(a) αποτυπώνεται η κατανομή των υλικών στη δομή του κυματοδηγού και δίνεται μια πληροφορία για τις τιμές των ενεργειακών διακένων που χαρακτηρίζουν κάθε ημιαγωγικό στρώμα. Εδώ φαίνεται καθαρά η μεγάλη διαφορά των ζωνών αγωγιμότητας μεταξύ GaAs και GaInNAs που εξηγεί τα ανθεκτικά χαρακτηριστικά του ημιαγωγού στις μεταβολές της θερμοκρασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Παρατηρούμε επίσης τα δύο quantum-wells (2-QW) που χρησιμοποιήθηκαν για να αυξήσουν την ισχύ εξόδου όπως και τα στρώματα GaNAs που χρησιμοποιήθηκαν για να διαχωρίσουν τα δύο QWs.



Εικόνα 4.5 (a),(b) SEM εικόνες οι οποίες παρουσιάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κυματοδηγών των SOAs (c) Διάγραμμα ενεργειακών κενών στη δομή που αναπτύχθηκε.

#### 4.2.2 Φάσμα ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission- ASE spectrum)

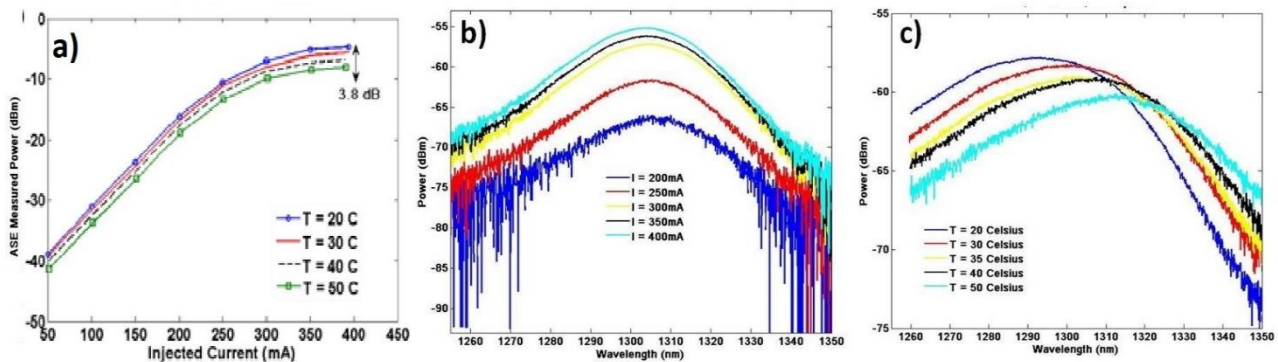
Ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (Amplified Spontaneous Emission-ASE) είναι η διαδικασία κατά την οποία ο SOA, βρισκόμενος σε κατάσταση αναστροφής πληθυσμών, εκπέμπει χωρίς κάποιο εισερχόμενο σήμα ένα σήμα ευρέος φάσματος που αντιστοιχεί σε όλες τις πιθανές ενεργειακές μεταβάσεις μεταξύ των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους. Το φάσμα θορύβου ASE αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του SOA καθώς μας παρέχει πληροφορίες για το φασματικό παράθυρο λειτουργίας της διάταξης. Η πειραματική διάταξη μέτρησης της ισχύος και αποτύπωσης του φάσματος της ASE φαίνεται στην εικόνα 4.6. Μετρήσεις για τα χαρακτηριστικά του ASE θορύβου μπορούν να παρθούν και από τις δύο πλευρές του SOA-chip καθώς εμφανίζεται συμμετρία στη συμπεριφορά του.



Εικόνα 4.6 Πειραματική διάταξη για φάσμα ASE

Όπως βλέπουμε ο SOA συνδέεται αρχικά με έναν οπτικό απομονωτή (optical isolator), ο οποίος χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την εισροή οπτικού feedback/ανάκλασης στον SOA. Σημεία ανακλαστικής συμπεριφοράς εντοπίζονται στα σημεία στα οποία το οδηγούμενο οπτικό πεδίο συναντά διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Στη συνέχεια η οπτική ισχύς μετράται στο Power meter και αποτύπωση του φάσματος εκπομπής γίνεται στον οπτικό αναλυτή φάσματος (Optical Spectrum Analyzer/OSA). Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος πηγαίνει στον OSA καθώς στον μετρητή οπτικής ισχύος εκμεταλλευόμαστε την χαμηλή ευαισθησία του οργάνου και συνεπώς τη δυνατότητα αναγωγής στην πραγματική τιμή μέτρησης ισχύος που καταγράφουμε.

Στην εικόνα 4.7(a) παρουσιάζεται η μέτρηση της ισχύος θορύβου αυθόρμητης εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission-ASE) για διαφορετικές τιμές ρεύματος. Σε έναν SOA η μέτρηση της ισχύος του ASE θορύβου είναι η ίδια και για τις δύο πλευρές, συνεπώς στο διάγραμμα αποτυπώνεται το μισό της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος ASE θορύβου. Παρατηρούμε πως για τιμές ρεύματος > 350mA επέρχεται κορεσμός της ισχύος του ASE στα -5dBm καθώς οδηγούμαστε σε συνθήκες πλήρους αντιστροφής πληθυσμών στο ενεργό υλικό. Μια πρώτη εικόνα για την αναισθητή συμπεριφορά του GaInNAs σε μεταβολές της θερμοκρασίας αποτυπώνεται στη μικρή μεταβολή της συνολικής ισχύος του ASE θορύβου (~2.15 dB) θερμαίνοντας τον SOA με τη χρήση ενός στοιχείου Peltier στο σταθμό εργασίας (probe station) από τους 20°C στους 50°C.



Εικόνα 4.7 (α) Ισχύς θορύβου αυθόρμητης εκπομπής (ASE) ως συνάρτηση του ρεύματος οδήγησης του SOA, (β) φασματικό προφίλ ASE θορύβου για διαφορετικές τιμές ρεύματος οδήγησης, (γ) φασματικό προφίλ ASE θορύβου για διαφορετικές θερμοκρασίες

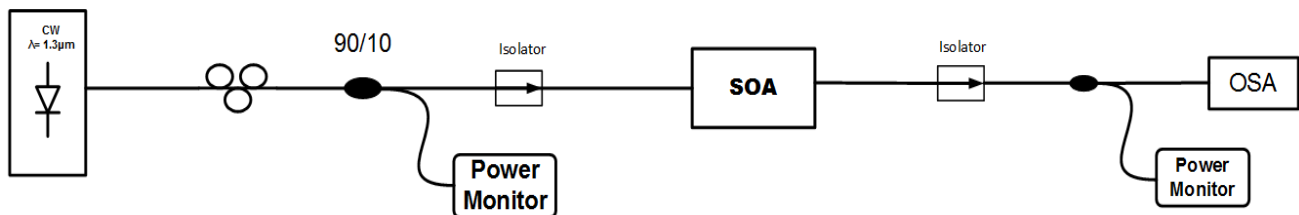
Στην εικόνα 4.7(b) παρουσιάζεται η φασματική κατανομή του προφίλ του ASE θορύβου για διαφορετικές επιλογές ρεύματος οδήγησης. Η μέτρηση αυτή είναι χρήσιμη καθώς μας δίνει την πληροφορία για το φασματικό παράθυρο ιδανικής λειτουργίας του SOA που προσφέρει τις μεγαλύτερες τιμές κέρδους σαν ενισχυτής (ASE peak). Παρατηρούμε πως αυξάνοντας την τιμή του ρεύματος το μήκος κύματος που εμφανίζει το μέγιστο της φασματικής πυκνότητας ισχύος του ASE θορύβου μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος (blue-shift). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ASE peak μετατοπίζεται από τα 1304nm στα 200mA στα 1301nm για 400mA. Ο φυσικός μηχανισμός που κρύβεται πίσω από το blue-shift είναι η μετάβαση ηλεκτρονίων σε στάθμες υψηλότερης ενέργειας στη ζώνη αγωγιμότητας και η αποδιέγερση στη συνέχεια με εκπομπή φωτονίων υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου και άρα μικρότερου μήκους κύματος ( $\Delta E = hc_0/\lambda$ ). Επιπλέον, από το φασματικό προφίλ του ASE θορύβου αξιολογούμε και τη συμπεριφορά του αντί-ανακλαστικού σχεδιασμού της δομής του SOA. Όπως παρατηρούμε

από το διάγραμμα, η απουσία οποιουδήποτε lasing ρυθμού που θα συντόνιζε σε μια κοιλότητα Fabry-Perot κατά μήκος του κυματοδηγού, αποδεικνύει την αποτελεσματική δράση του AR coating. Οι μετρήσεις του chip πραγματοποιήθηκαν κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία του chip στους 20°C.

Στην εικόνα 4.7(c) παρουσιάζεται το φασματικό προφίλ του ASE θορύβου για διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας του SOA για τιμή ρεύματος 350mA. Παρατηρούμε πως σε αντίθεση με το blue-shift για αυξανόμενες τιμές ρεύματος, με αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρούμε μετατόπιση του ASE peak προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (red-shift) και αύξηση του 3-dB εύρους ζώνης του κέρδους όπως αναμένεται [59]. Συγκεκριμένα, από τα 1302nm στους 20°C το ASE peak μετατοπίζεται στην περιοχή των 1320nm και αύξηση του 3-dB εύρους ζώνης κέρδους από τα 53nm στα 58nm θερμαίνοντας τον SOA. Η σημασία του 3-dB εύρους ζώνης του φασματικού προφίλ θορύβου είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς μεγάλες τιμές του επιτρέπουν τη λειτουργία ενίσχυσης σε συστήματα πολυπλεξίας μηκών κύματος (WDM) όσο και τη δυνατότητα για εφαρμογές των SOA σε ανάπτυξη πολυκυματικών πηγών με χρήση δομών λέιζερ δακτυλίου [60]. Ο φυσικός μηχανισμός που κρύβεται πίσω από τη συμπεριφορά αυτή είναι η στατιστική κατανομή Fermi-Dirac που συσχετίζει τις κατανομές πυκνότητας πιθανότητας των ενεργειακών ζωνών με τη θερμοκρασία. Η συγκεκριμένη μέτρηση είναι ενδεικτική για την ελκυστική συμπεριφορά του SOA τεχνολογίας GaInNAs σε περιβάλλον που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Επιλέγοντας ένα σημείο λειτουργίας κοντά στα 1320nm μπορεί να διασφαλιστεί η σχεδόν αναίσθητη λειτουργία του SOA σαν στοιχείο κέρδους για το θερμοκρασιακό εύρος 20°C – 50°C όπως φαίνεται και από τη μικρή μεταβολή του κέρδους στο συγκεκριμένο μήκος κύματος από την καμπύλη 4.7(c). Συγκριτικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί μεταξύ δομών SOAs InP και GaInNAs τεχνολογίας που φανερώνουν το χαρακτηριστικό αυτό των dilute-nitrides [61].

### 4.2.3 Στατικές μετρήσεις κέρδους

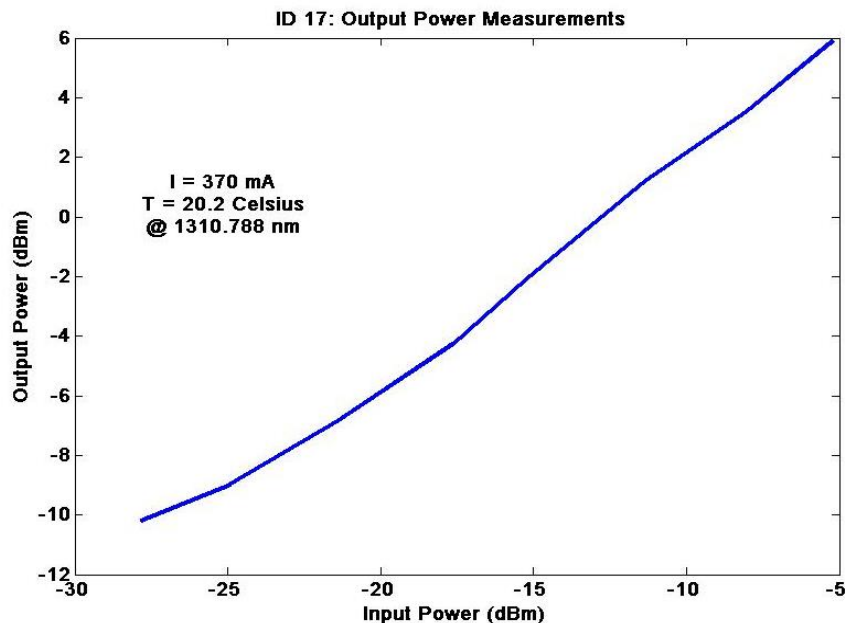
Για τον προσδιορισμό της καμπύλης κέρδους χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη (experimental setup) η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 4.8. Πηγής CW (Continuous Wave) λέιζερ στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο ASE peak χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσω την τιμή κέρδους στο φασματικό σημείο που εμφανίζει μέγιστο. Για τη σύζευξη της οπτικής ισχύος στο chip χρησιμοποιήθηκαν lensed-fibers με διάμετρο δέσμης  $2.5\mu\text{m}$  οι οποίες διασφαλίζουν τις λιγότερες δυνατές απώλειες σύζευξης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των διαστάσεων του SOA κυματοδηγού, οι απώλειες σύζευξης υπολογίζονται κοντά στα 5 dB ανά πλευρά. Ένας ελεγκτής πόλωσης (Polarization controller) χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της πόλωσης του εισερχόμενου φωτός για την απόδοση του μέγιστου κέρδους. Οπτικοί απομονωτές χρησιμοποιήθηκαν πριν και μετά τον SOA για να αποφευχθεί η είσοδος ανεπιθύμητων ανακλάσεων στο SOA-chip.



Εικόνα 4.8 Διάταξη στατικών μετρήσεων κέρδους

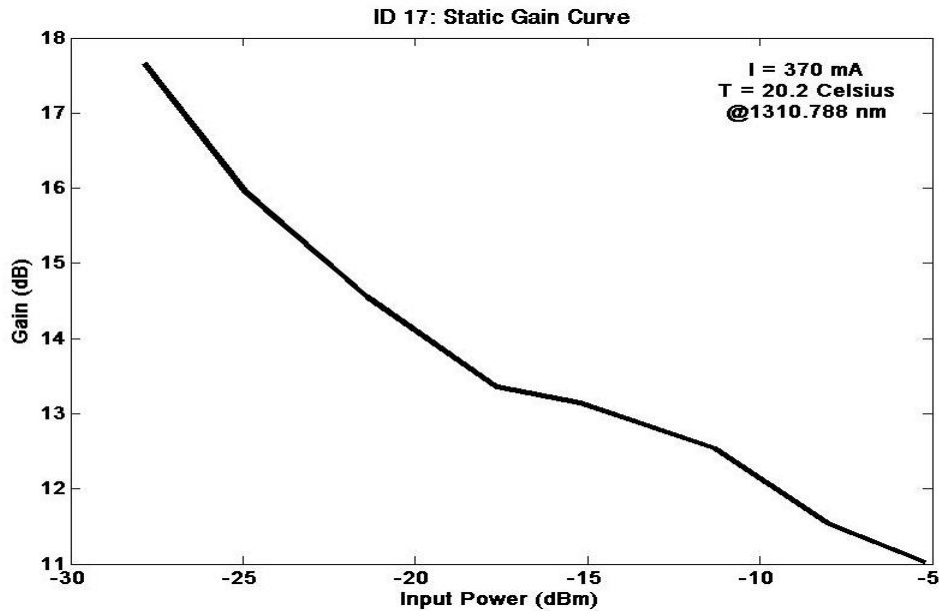
Η έννοια του καθαρού κέρδους (net gain) του chip περιγράφει τη μακροσκοπική συμπεριφορά του ενισχυτή σαν στοιχείο κέρδους σε μονοχρωματική συμπεριφορά – ενίσχυση ενός μήκους κύματος. Οι στατικές μετρήσεις κέρδους αναφέρονται στο μήκος κύματος που η καμπύλη του ASE εμφανίζει μέγιστο (ASE Peak) στα 370 mA ( $\lambda=1302\text{nm}$ ).

Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η καμπύλη κορεσμού της ισχύος εξόδου του SOA-chip σε συνάρτηση με την εισερχόμενη ισχύ του οπτικού σήματος για τιμή ρεύματος 370 mA σε θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$ .



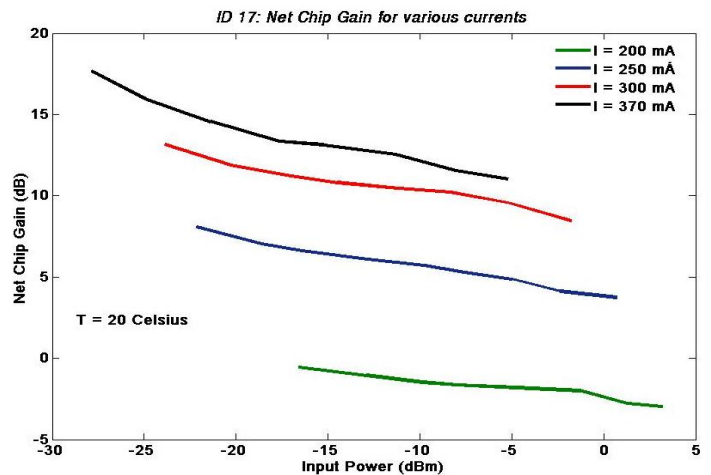
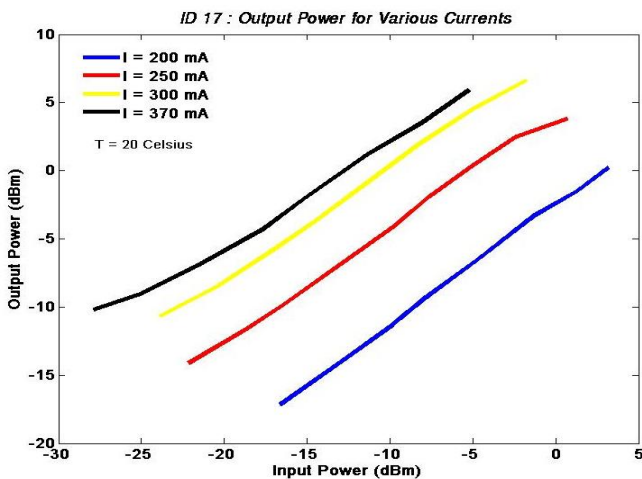
Εικόνα 4.9 Ισχύς εξόδου του SOA

Η κορεσμένη ισχύς εξόδου μετρήθηκε στα +6dBm, και λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τις απώλειες σύζευξης υπολογίζεται γύρω στα +11dBm. Η εικόνα 4.10 αποτυπώνει την καμπύλη κορεσμού κέρδους του SOA για λειτουργία στις ίδιες συνθήκες.



Εικόνα 4.10 Καμπύλη κορεσμού κέρδους SOA

Όπως φαίνεται το κέρδος ασθενούς σήματος (small signal gain) μετρήθηκε στα +18 dB, και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες και από τις δύο πλευρές υπολογίζουμε +28 dB. Η τιμή αυτή αποτελεί την υψηλότερη που έχει ποτέ αναφερθεί για dilute nitride SOAs.

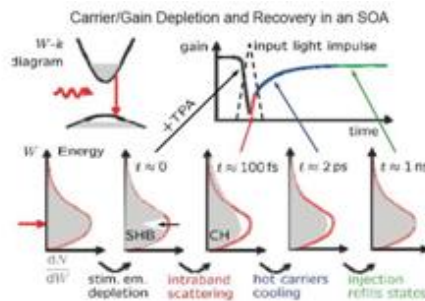


Εικόνα 4.11 Καμπύλες κορεσμού ισχύος και κέρδους για διάφορες τιμές ρεύματος

Για μικρότερες τιμές ρεύματος οδήγησης του SOA το κέρδος ασθενούς σήματος (small-signal gain) μετρήθηκε στα 24dB με 10 dB κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς με λιγότερο ρεύμα δεν οδηγήθηκε ο SOA σε συνθήκη πλήρους αντιστροφής πληθυσμών ώστε να εκμεταλλευτεί όλους τους διαθέσιμους φορείς. Με την αύξηση της εισερχόμενης ισχύος, το κέρδος του SOA μειώνεται λόγω κορεσμού και προσεγγίζει την περιοχή διαφάνειας του, στην οποία το κέρδος του ενεργού υλικού γίνεται ίδιο με τις απώλειες στον κυματοδηγό με αποτέλεσμα να λειτουργεί ο SOA σαν διαφανές στοιχείο ως προς την ισχύ. Η έννοια του κορεσμού του SOA αποτυπώνεται και στις εικόνες 4.10 και 4.11(b) καθώς φαίνεται πως η ισχύς εξόδου του SOA για τις διάφορες τιμές ρεύματος συγκλίνει σε μία τιμή κορεσμού ( $P_{sat}$ ). Επιλέγοντας τιμές εισερχόμενης ισχύος μεγαλύτερες από την  $P_{sat}$  ο SOA θα λειτουργήσει στη συνέχεια σαν στοιχείο απορρόφησης ( $G < 1$ ). Τέλος, κατά τη διάρκεια του στατικού χαρακτηρισμού, μελετήθηκε και η ευαισθησία του SOA στην πολωτική κατάσταση του εισερχόμενου σήματος και μετρήθηκε πως υπάρχει ένα εύρος 9-10 dB στην τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος (Polarization Dependence Gain –PDG) αλλάζοντας την πόλωση του σήματος εισόδου. Οι διαφορετικές απώλειες διάδοσης του κυματοδηγού στους πολωτικούς άξονες TE και TM (κάθετοι άξονες στο επίπεδο του κυματοδηγού) βρίσκονται πίσω από τη συμπεριφορά αυτή [62].

#### 4.2.4 Δυναμική συμπεριφορά κέρδους

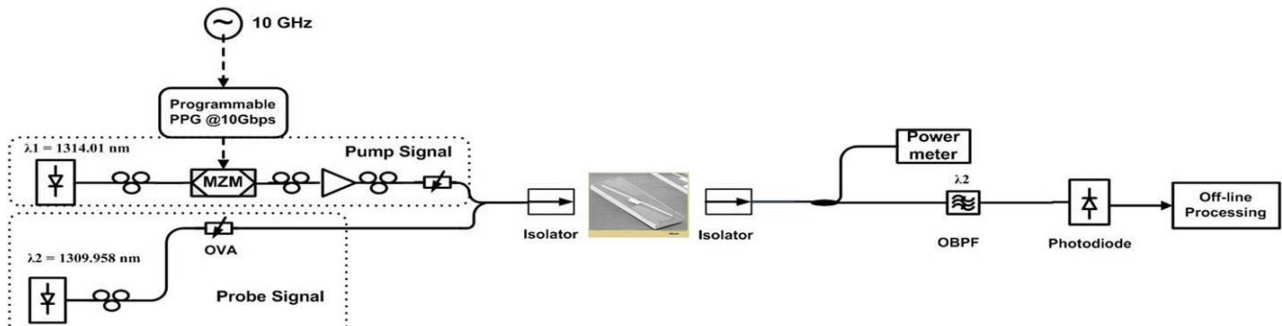
Στη συνέχεια περιγράφεται η μελέτη που έγινε για τον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του κέρδους του SOA. Η ταχύτητα που ανακάμπτουν οι φορείς/κέρδος ενός SOA έχει ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές που απαιτείται επεξεργασία σήματος σε υπερυψηλές ταχύτητες. Η ταχύτητα ανάκαμψης του κέρδους σχετίζεται με τη δυναμική των ελεύθερων φορέων της ζώνης αγωγιμότητας (conduction band). Το πρόβλημα της δυναμικής των συγκεντρώσεων φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας/σθένους σχετίζεται με τους μηχανισμούς μεταπτώσεων μεταξύ των δύο ενεργειακών ζωνών (conduction/valence bands) και εντός αυτών. Η εικόνα 4.12 βοηθάει στην παρουσίαση της χρονικής εξέλιξης της κατανομής φορέων της ζώνης αγωγιμότητας παρουσία ενός οπτικού παλμού η οποία τελικά μας δίνει και την εξέλιξη της απόκρισης του κέρδους του SOA. Φαινόμενα όπως το TPA (Two Photon Absorption), SHB (Spectral Hole Burning) επηρεάζουν την κατανομή Fermi που ακολουθούν οι φορείς. Καθώς η θεωρητική ανάλυση των φαινομένων αυτών βρίσκεται εκτός σκοπού αυτής της εργασίας, ο αναγνώστης μπορεί να βρει εκτενή στοιχεία στις αναφορές [63],[64].



Εικόνα 4.12 Σχηματική αναπαράσταση των φυσικών μηχανισμών που σχετίζονται με την ανάκαμψη του κέρδους στον SOA

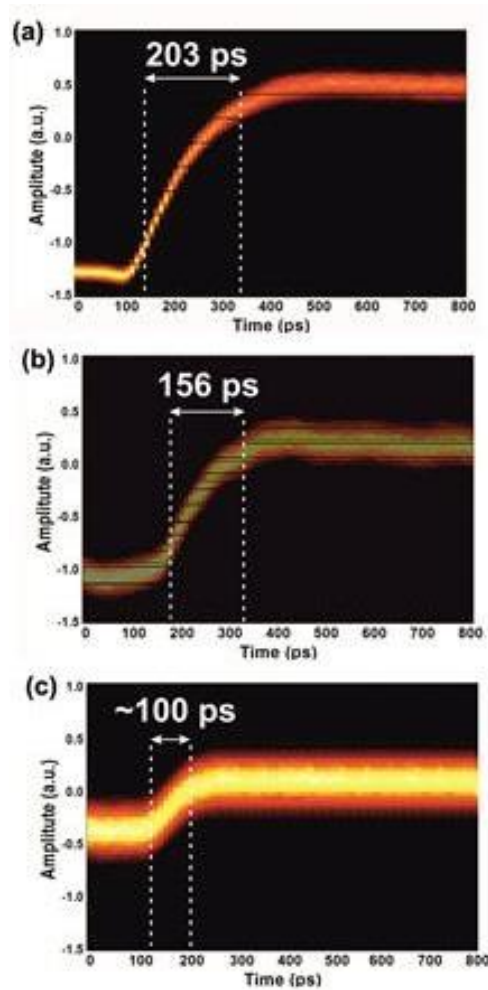


Στην εικόνα 4.13 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του χρόνου ανάκαμψης κέρδους του SOA υιοθετώντας τη μέθοδο άντλησης/καταγραφής (pump-probe). Το σήμα άντλησης (pump signal) θα χρησιμοποιηθεί για να μεταβάλλει το κέρδος του SOA στη διάρκεια του παλμού του, και η καταγραφή θα γίνει στο άλλο σήμα παρατηρώντας το χρόνο που απαιτείται για να επανέλθει το κέρδος που βλέπει το σήμα (probe signal) στην αρχική του τιμή. Για να πετύχουμε την παρουσία ενός συγκεκριμένου παλμού που θα οδηγήσει στην άντληση κέρδους του SOA, χρησιμοποιήσαμε μια ακολουθία από 21 '0' μεταξύ διαδοχικών '1'. Η παραγωγή του παλμού χρησιμοποιήθηκε μία προγραμματιζόμενη γεννήτρια PPG (Programmable Pulse Generator) και η διαμόρφωση του σήματος άντλησης μέσω ενός Mach – Zehnder Modulator (MZM). Ελεγκτές πόλωσης και στοιχεία που εισάγουν εξασθένιση στις στάθμες των δύο σημάτων χρησιμοποιήθηκαν για να μελετήσουμε την ταχύτητα ανάκαμψης κέρδους σε διαφορετικά σημεία της καμπύλης κορεσμού. Για τις μετρήσεις αυτές, στην έξοδο του SOA-chip, χρησιμοποιείται ένα φίλτρο το οποίο θα διαχωρίσει την παρουσία των δύο συνδιαδιδόμενων σημάτων πριν τον παλμογράφο. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα πειραματικής μελέτης για την επίδραση που έχουν το ρεύμα οδήγησης και η συμπίεση κέρδους στο χρόνο ανάκαμψης κέρδους.



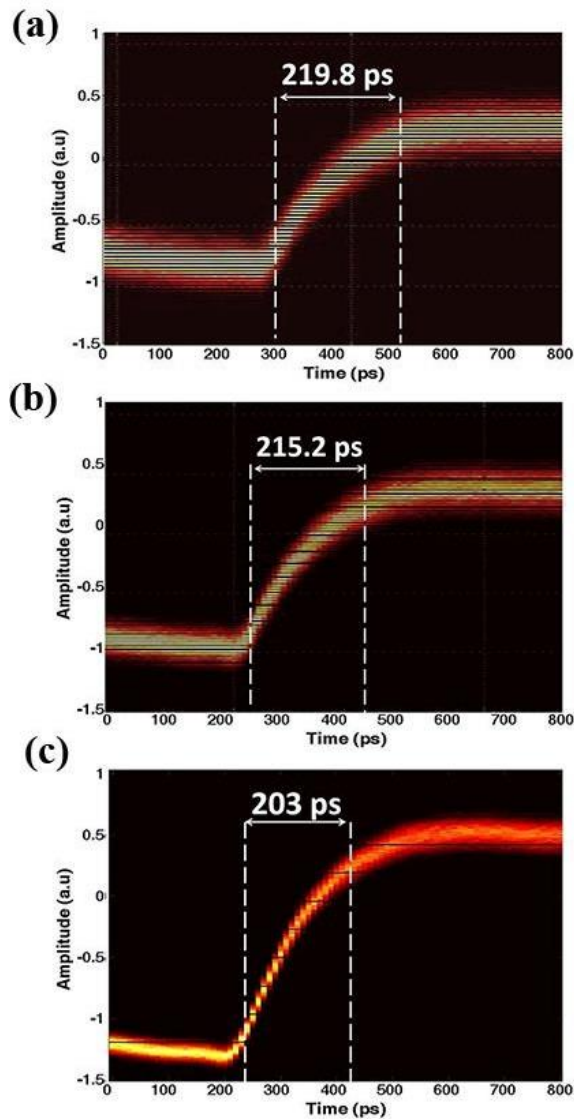
Εικόνα 4.13 Πειραματική διάταξη μεθόδου pump/probe

Στην εικόνα 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου άντλησης/καταγραφής για διαφορετικές τιμές συμπίεσης κέρδους (compression gain). Η παράμετρος της συμπίεσης κέρδους του SOA εξαρτάται από την ισχύ του σήματος άντλησης όσο επίσης και από το αρχικό κέρδος το οποίο προσδίδει στο σήμα καταγραφής ο SOA. Κατά την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, κρατώντας σταθερό το ρεύμα οδήγησης του SOA στα 390mA και το σημείο κορεσμού για το σήμα καταγραφής, μεταβάλλαμε την ισχύ του σήματος άντλησης ώστε να μειώσουμε τη συμπίεση κέρδους από τη μέγιστη τιμή της (4.14(a)) προς χαμηλότερες τιμές. Είναι φανερό πως μειώνοντας τη συμπίεση κέρδους του σήματος καταγραφής ο χρόνος ανάκαμψης του κέρδους (υπολογιζόμενο στην 10%-90% περιοχή της καμπύλης) μειώνεται από τα 203 ps στα 100ps περίπου, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο [65].



Εικόνα 4.14 Πειραματικές μετρήσεις προσδιορισμού του χρόνου ανάκαμψης του κέρδους καθώς μειώνεται η παράμετρος της συμπίεσης του κέρδους

Στη συνέχεια διερευνήσαμε την επίδραση που έχει το ρεύμα οδήγησης του SOA στη δυναμική της ανάκαμψης του κέρδους του. Για το λόγο αυτό κρατήσαμε σταθερά τα επίπεδα ισχύος των δύο σημάτων που χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλίσουμε το ίδιο αρχικό σημείο κορεσμού για το σήμα καταγραφής και το ίδιο βάθος συμπίεσης από το σήμα άντλησης. Η εικόνα 4.15 εμφανίζει τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής για τρεις διαφορετικές τιμές του ρεύματος (από 310mA, 345mA, 390mA). Καθώς αυξάνεται το ρεύμα στον SOA, το κέρδος του σήματος καταγραφής ανακάμπτει πιο γρήγορα, καθώς όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα φαίνεται να επιταχύνεται η ‘αργή’ συνιστώσα της ανάκαμψης. Παρατηρείται, αν και κρατήθηκαν σταθερές οι συνθήκες κορεσμού μέσω των ίδιων επιπέδων ισχύος των εισερχόμενων σημάτων, μια μικρή πτώση της συμπίεσης κέρδους για τις μικρότερες τιμές ρεύματος, που είναι λογικό καθώς όπως φάνηκε και από τις στατικές μετρήσεις μειώνεται το κέρδος του SOA.



Εικόνα 4.15 Πειραματικές μετρήσεις προσδιορισμού του χρόνου ανάκαμψης του κέρδους για διαφορετικές τιμές ρεύματος οδήγησης: (a) 310mA, (b) 345mA, (c) 390mA

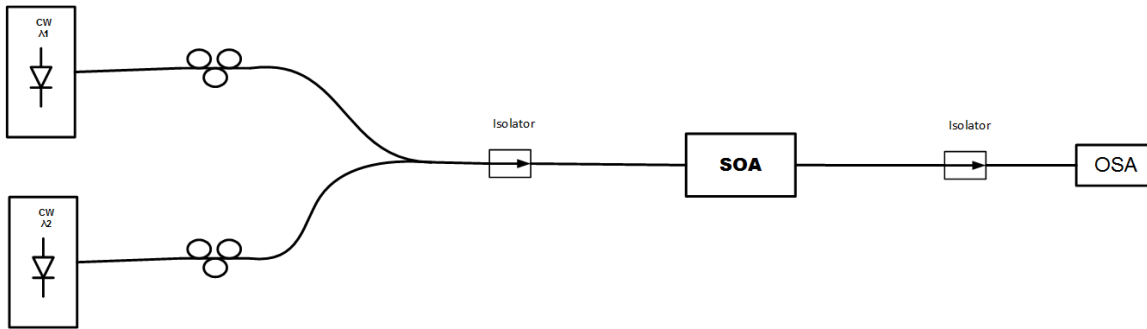
Ένα ενδιαφέρον στοιχείο είναι οι μεταβολές στην τυπική απόκλιση στις παραπάνω στατιστικές κατανομές. Για μεγαλύτερες τιμές βάθους διαμόρφωσης η τυπική απόκλιση είναι 25,8 ps, για τη μικρότερη τιμή 36,6 ps ενώ στην ελάχιστη διαπιστωμένη συμπίεσης κέρδους η τυπική απόκλιση είναι 33,3 ps. Η επίδραση του ρεύματος οδήγησης παρουσιάζει τυπικές αποκλίσεις 48,7 ps για το 310 mA, 39,2 ps για τα 345 mA και τέλος 25,8 ps για τα 390 mA. Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω της δυνατότητας σύζευξης μόνο της AC συνιστώσας στο δέκτη (AC-coupled receiver) δεν ήταν δυνατό να υπολογίσουμε ακριβείς τιμές του λόγου σβέσης (Extinction Ration-ER) για κάθε περίπτωση καθώς απουσίαζε η πληροφορία για τη DC συνιστώσα του σήματος

#### 4.2.5 Διέγερση φαινόμενο μίξης τεσσάρων φωτονίων (Four-wave mixing – FWM) στον SOA

Η μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing- FWM) αποτελεί ένα μη-γραμμικό φαινόμενο που πηγάζει από την 3<sup>ης</sup> τάξης μη-γραμμική συμπεριφορά της ηλεκτρικής πόλωσης και σχετίζεται με την επιδεκτικότητα 3<sup>ης</sup> τάξης του μέσου διάδοσης. Σε επίπεδο φυσικής ερμηνείας, πρόκειται για μια μη-γραμμική διαδικασία κατά την οποία, ενέργεια οπτικών πεδίων συζευγνύεται σε διαφορετικά μήκη κύματος που δημιουργούνται κατά τη διέγερση του φαινομένου. Η δημιουργία σύμφωνων (coherent) φωτονίων σε διαφορετική ενέργεια (μήκος κύματος) μπορεί να συμβεί σε ένα μέσο και για κυματοπακέτα (wavebands) πληροφορίας, και συνεπώς είναι εφικτή η μετατροπή μήκους κύματος για σήματα πληροφορίας τα οποία έχουν ένα ευρύ φασματικό περιεχόμενο. Ιδιαίτερα για οπτικά σήματα τα οποία περιέχουν πληροφορία στη φάση τους (phase modulated), ο μηχανισμός του FWM σε ένα μέσο επιτρέπει να λάβουμε την ίδια πληροφορία σε άλλο μήκος κύματος εκμεταλλευόμενοι τη συμφωνία φάσης που διέπει το φαινόμενο αυτό [66].

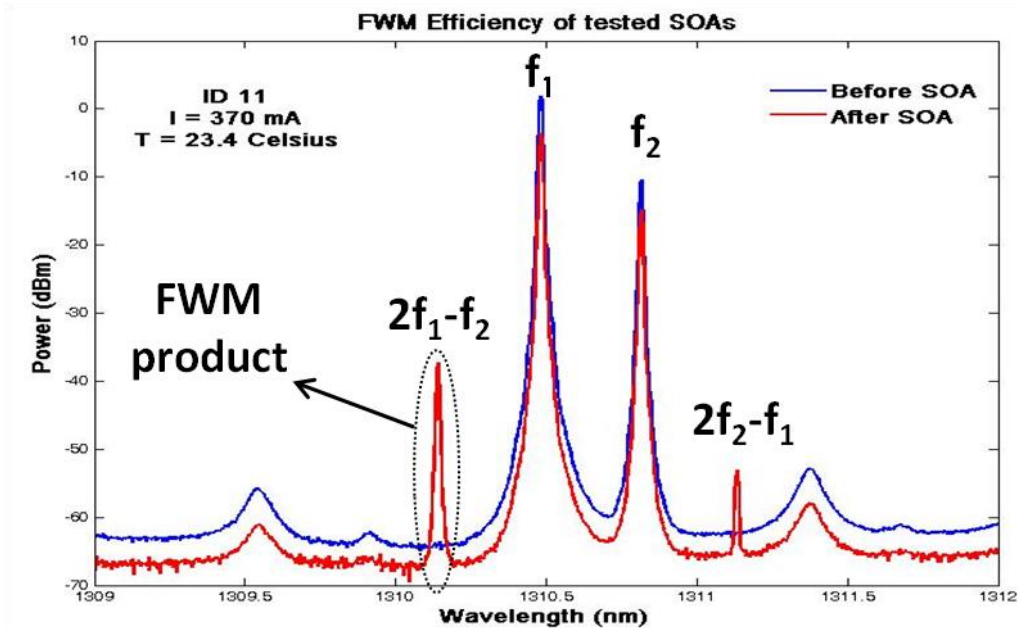
Στους SOAs, η ικανότητα διέγερσης του FWM έχει τραβήξει την προσοχή καθώς μπορεί σε πολύ μικρό μήκος να προσφέρει εφαρμογές που βασίζονται στο FWM χωρίς να απαιτούνται τα μεγάλα μήκη υψηλά μη-γραμμικών ινών (HNLF), μεγάλες τιμές ισχύος στα σήματα εισόδου ενώ παράλληλα λόγω του μεγάλου εύρους της λειτουργίας του μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές φασματικές περιοχές [67]. Σε επίπεδο φυσικών μηχανισμών, όταν δύο σήματα εισέρχονται σε έναν SOA, το διακρότημα τους (beat:  $f_1-f_2$ ) προκαλεί διαμόρφωση της πυκνότητας φορέων που ακολουθεί την περιβάλλουσα της οπτικής ισχύος. Καινούργιες φασματικές συνιστώσες γεννιούνται σε κάθε πλευρά των αρχικών σημάτων διαφέροντας κατά τη συχνότητα του beating ( $f_2-f_1$ ). Σε μικρές φασματικές αποστάσεις λοιπόν των εισερχόμενων σημάτων (λίγα GHz), η πυκνότητα φορέων είναι δυνατόν να ακολουθήσει τη συχνότητα του beating. Καθώς αυξάνεται η φασματική απόσταση ( $f_2-f_1$ ) πέραν του χρόνου ζωής των φορέων (carrier lifetime), η συγκέντρωση φορέων δεν ακολουθούν τη συχνότητα του beating. Στην περιοχή αυτή, κύριος μη-γραμμικός μηχανισμός είναι η αλλαγή στην ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων παρά η πυκνότητα τους. Είναι γεγονός πως η ικανότητα δημιουργίας FWM παραγώγων (FWM products) μειώνεται καθώς αυξάνεται η αρχική απόσταση των εισερχόμενων σημάτων [68]. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως η μη-γραμμική φύση του FWM οδηγεί σε μικρότερη ένταση μετατροπής προς μεγαλύτερο μήκος κύματος (wavelength upconversion) [69].

Στη συνέχεια αξιολογήσαμε την ικανότητα του συγκεκριμένου SOA στο να διεγείρει το FWM. Χρησιμοποιήσαμε δύο CW πηγές λέιζερ έχοντας τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε το μήκος κύματος και συνδιαδιδόμενες χρησιμοποιήθηκαν σαν σήμα εισόδου στον SOA. Σε έναν οπτικό φασματογράφο (Optical Spectrum Analyzer - OSA) αναλύσαμε το φάσμα στην έξοδο του SOA. Καθώς το FWM είναι ευαίσθητο στην πόλωση, χρησιμοποιήσαμε ελεγκτές πόλωσης για να διαπιστώσουμε τη μέγιστη ένταση των FWM παραγώγων. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 4.16.



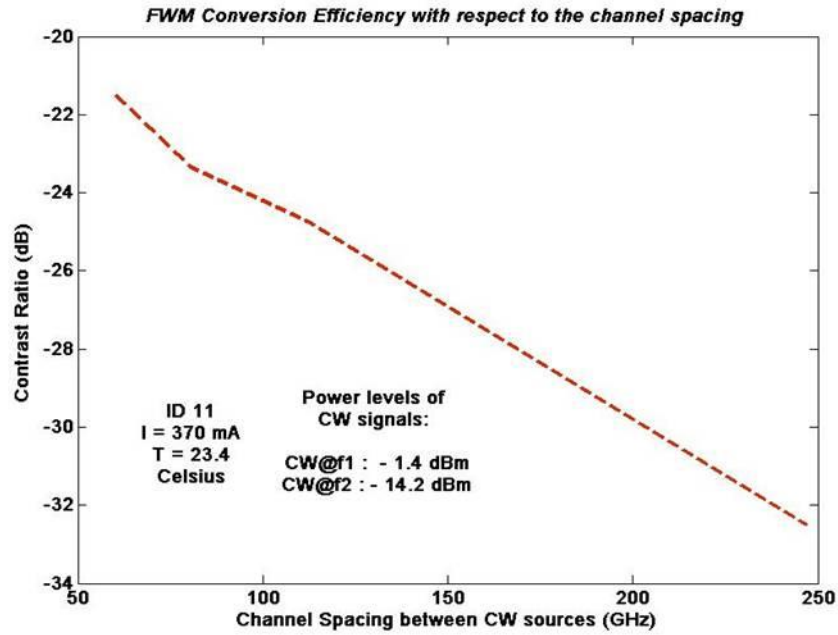
Εικόνα 4.16 Πειραματική διάταξη μέτρησης FWM

Από την εικόνα 4.17 παρατηρούμε και πειραματικά πλέον πως αυξάνοντας την απόσταση των εισερχόμενων σημάτων, η ένταση των FWM παραγώγων μειώνεται αισθητά ενώ παράλληλα, η ισχύς του παράγωγου που δημιουργείται στο μεγαλύτερο μήκος κύματος είναι αρκετά μικρότερη συγκριτικά με το συμμετρικό του blue-shifted παράγωγο.



Εικόνα 4.17 Μετρήσεις από τον οπτικό φασματογράφο που διαπιστώνουν τη διέγερση φαινομένου FWM μέσω της ύπαρξης FWM παραγώγων

Στην εικόνα 4.18 ποσοτικοποιείται η πτώση της έντασης διέγερσης του FWM για μεγάλες φασματικές αποστάσεις μεταξύ των εισερχομένων σημάτων καθώς μετρήθηκε η διαφορά των peaks μεταξύ του ισχυρότερου παραγώγου και του σήματος συχνότητας  $f_2$ . Παρουσιάζεται επίσης και η πληροφορία για τα επίπεδα ισχύος των δύο εισερχόμενων σημάτων CW.



Εικόνα 4.18 Ικανότητα διέγερσης FWM ως συνάρτηση της φασματικής απόστασης των εισερχόμενων σημάτων

### 4.3 Dilute Nitride SOAs στα 1,55 μm (GaInNAsSb)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός των GaInNAsSb SOAs στην περιοχή των 1.55 μm. Οι προσμίξεις αντιμονίου (Sb) χρησιμεύουν στη μείωση του ενεργειακού διακένου και άρα τη μεταφορά της λειτουργίας στα 1.55 μm. Χαρακτηρίστηκαν δύο διαφορετικά υλικά: Double quantum wells (2-QWs) SOAs μήκους 1mm και single quantum well(1-QW) SOAs μήκους 2 mm.

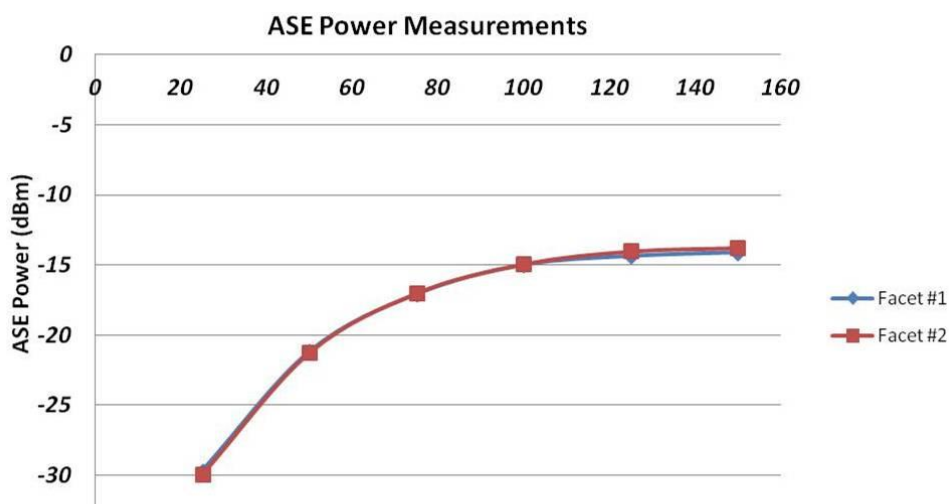
#### 4.3.1 Σχεδίαση και κατασκευή

Για την κατασκευή των GaInNAsSb/GaAs SOAs χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της plasma-assisted MBE. Πηγή πλάσματος σε RF συχνότητες χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του αζώτου (N) που απαιτείται για την ανάπτυξη της GaInNAsSb/GaAs ετεροδομής πάνω στο GaInNAs υπόστρωμα κρυσταλλικού προσανατολισμού (100). Η δομή αποτελείται από ένα ή δύο (αναλόγως με τον τύπο του SOA) κβαντικά πηγάδια, μήκους 7,5 nm. Η περιοχή των κβαντικών πηγαδιών είναι περιορισμένη στο εσωτερικό της περιοχής του κυματοδηγού, 120 nm GaAs σε κάθε πλευρά. Η περιοχή του κυματοδηγού βρίσκεται ανάμεσα σε στρώσεις 1800nm Al<sub>0.60</sub>GaAs, η οποία έχει n-νόθευση κάτω από το κβαντικό πηγάδι και p-νόθευση πάνω από αυτό. Για τη μείωση του ενεργειακού φράγματος μεταξύ του n-GaAs και του n-Al<sub>0.60</sub>GaAs, 50 nm Al<sub>0.60</sub>GaAs προστίθενται στο υπόστρωμα του n-περιβλήματος. Πάνω από το p-Al<sub>0.60</sub>GaAs 500 nm p-GaAs στρώσης επαφής ολοκληρώνουν τη δομή. Το προφίλ του ενεργειακού διακένου έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά που παρουσιάστηκαν στη δομή των 1.3μm SOAs..

Μετά την MBE, χαράσσεται στο υλικό ένας ridge κυματοδηγός με τη μέθοδο Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching (ICP-RIE). Το ύψος του ridge κυματοδηγού είναι 1,7 μm και σχεδιαστικέ ώστε να βελτιστοποιεί τον παράγοντα οπτικού περιορισμού της δομής της συσκευής και άρα το κέρδος του ενισχυτή.. Η εγχαραγμένη δομή του κυματοδηγού μονώθηκε από μία στρώση 150 nm SiN και ένα μονοπάτι έγχυσης ρεύματος ανοίχτηκε στην κορυφή του κυματοδηγού. Η συσκευή έπειτα κόπηκε για τη δημιουργία μιας κοιλότητας 2mm για τον SQW και 1mm για τον DQW SOA. Ο κυματοδηγός τοποθετείται με γωνία 7<sup>0</sup> ως προς την επιφάνεια του chip που διαμορφώνεται (cleaved) ώστε να αποφευχθούν οι ανακλάσεις. Για την αποτελεσματική αντί-ανακλαστική συμπεριφορά χρησιμοποιείται επίστρωση με στρώμα SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> (AR coating) το οποίο μειώνει δραστικά το συντελεστή ανάκλασης (R<0.1%). Τέλος, τοποθετήθηκε σε δομή C-mount η οποία βοηθά το χαρακτηρισμό του.

### 4.3.2 Στατικές οπτικές και ηλεκτρικές μετρήσεις για τους DQW SOAs 1mm

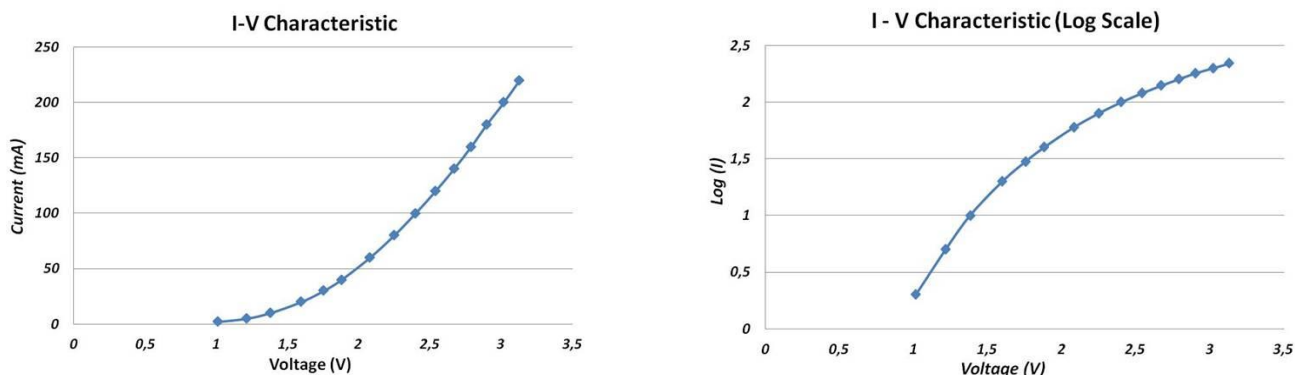
Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις για την εξερχόμενη ισχύ ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (ASE) σε συνάρτηση με το ρεύμα οδήγησης. Οι πειραματικές μετρήσεις πάρθηκαν χρησιμοποιώντας ίνες αντικειμενική εστίασης με διάμετρο 5 $\mu$ m. Οι μετρήσεις είναι και για τις δύο πλευρές του chip. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως απουσία εισερχόμενου οπτικού σήματος, η ισχύς του ASE θορύβου ισοκατανέμεται στις δύο πλευρές του chip όπως αναμενόταν.



Εικόνα 4.19 Ισχύς ASE θορύβου σε κάθε πλευρά του SOA chip σε συνάρτηση με το ρεύμα οδήγησης

Όπως βλέπουμε η μισή ASE ισχύς μετρήθηκε περίπου στα -13,5 dB. Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία 15°C. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η σύζευξη γίνεται με την ίδια αποτελεσματικότητα και στις δύο πλευρές ενώ η ισχύς φτάνει σε κορεσμό στα 140 με 150 mA. Είναι εμφανές ότι ο 1mm SOA απαιτεί μικρό ρεύμα οδήγησης.

Στην εικόνα 4.20 βλέπουμε τις μετρήσεις τάσης-ρεύματος σε φυσική και λογαριθμική κλίμακα για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος για τη λειτουργία του SOA.

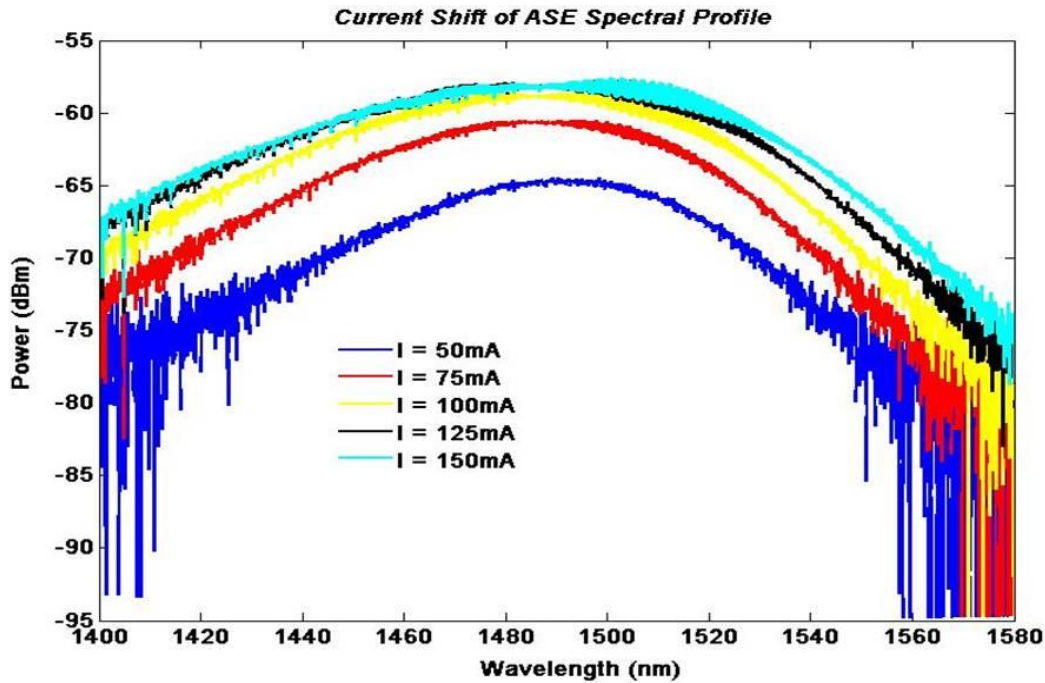


Εικόνα 4.20 Μετρήσεις τάσης - ρεύματος



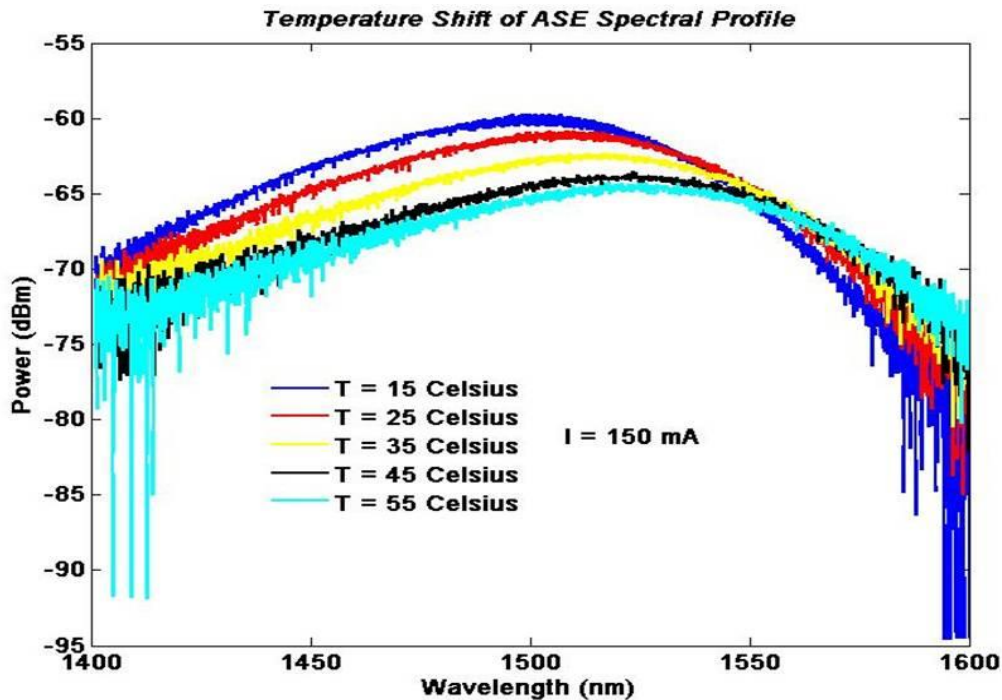
Η τάση επαφής (junction voltage) είναι μικρότερη από 950 mV, ενώ η απαιτούμενη τάση για να έχουμε φαινόμενα υψηλής έγχυσης είναι 2V. Μπορούμε έτσι να υπολογίσουμε ότι για να έχουμε ρεύμα οδήγησης 220 mA απαιτείται παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς 680 mW.

Το φάσμα ASE για τους DQW SOAs φαίνεται στην εικόνα 4.21.



Εικόνα 4.21 Φάσμα ASE σε συνάρτηση με το ρεύμα οδήγησης

Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία 15°C. Το μέγιστο της φασματικής κατανομής θορύβου (ASE peak) μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος για αυξημένες τιμές ρεύματος οδήγησης. Τη blue-shift συμπεριφορά του ASE φάσματος την έχουμε ήδη συμπεριλάβει στο σχολιασμό προηγούμενης ενότητας με αποτελέσματα των 1.3μm SOAs. Όπως μπορούμε να κρίνουμε από τα lasing modes λειτουργεί ικανοποιητικά το αντί-ανακλαστικό (AR) coating. Το κέρδος παρουσιάζει διακύμανση (gain ripple) μικρότερη από 1,5dB στα 1520 nm.



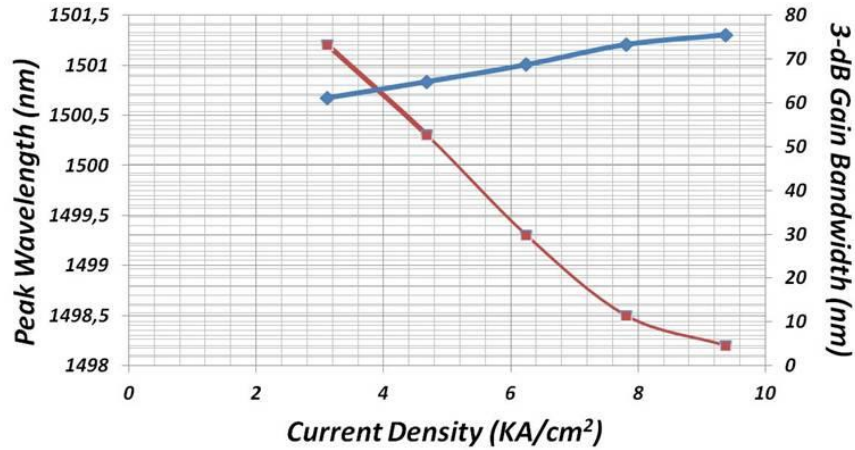
Εικόνα 4.22 Φάσμα ASE σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Στην εικόνα 4.22 βλέπουμε το φάσμα ASE σε διάφορες θερμοκρασίες, κρατώντας σταθερό το ρεύμα οδήγησης στα 150 mA. Παρατηρούμε ένα τυπικό red shift ενώ η ισχύς παραμένει σταθερή για ένα φασματικό παράθυρο κοντά στα 1550 nm. Η συνολική ισχύς παρουσιάζει μία πτώση της τάξης των 4.5 dB από του 15°C στους 55°C

### 4.3.3 Φασματικά χαρακτηριστικά κέρδους του DQW SOA

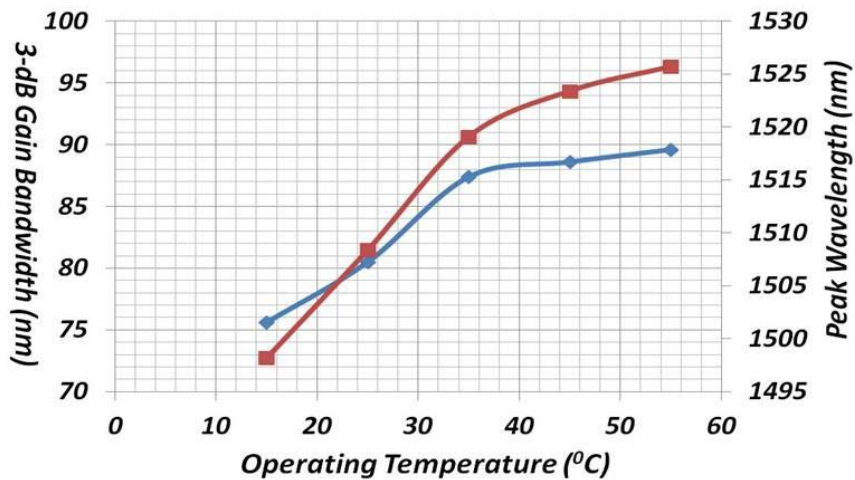
Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το ρεύμα και τη θερμοκρασία. Στην εικόνα 4.23 αναπαρίστανται ταυτόχρονα το μήκος κύματος όπου το κέρδος μεγιστοποιείται (ASE peak), καθώς και το εύρος ζώνης μισού κέρδους (3dB Gain bandwidth) σε συνάρτηση με τη χωρική πυκνότητα ρεύματος έγχυσης. Εδώ να σημειωθεί πως το συνολικό ρεύμα δίνεται από τον τύπο  $I = J(L \times W)$ , όπου  $L$  το μήκος και  $W$  το πλάτος του ridge SOA κυματοδηγού και  $J$  είναι η χωρική πυκνότητα ρεύματος οδήγησης του SOA.

Το κέρδος παρουσιάζει ευρυζωνικά χαρακτηριστικά, καθώς προσφέρει ένα σχετικά επίπεδο (flat) παράθυρο ενίσχυσης. Επίσης το εύρος ζώνης 3-dB αυξάνεται για μεγάλες πυκνότητες ρεύματος. Για πυκνότητα ρεύματος  $9,375 \text{ KA/cm}^2$  το εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος μετρήθηκε στα 75,6 nm. Αυτό το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγαλύτερο συγκριτικά με αυτό των GaInNAs SOAs στα 1,3μm.



Εικόνα 4.23 Μήκος κύματος μεγιστοποίησης κέρδους και εύρος ζώνης ημισίου κέρδους σε συνάρτηση με την πυκνότητα ρεύματος

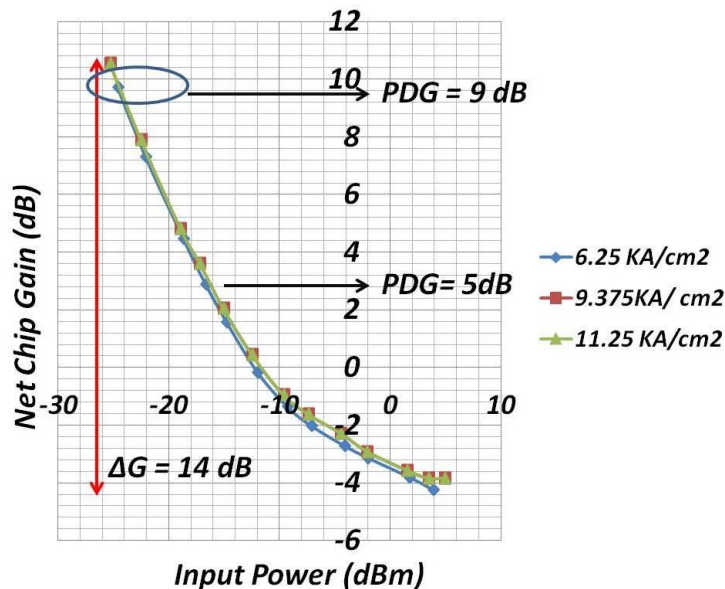
Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζονται τα ίδια χαρακτηριστικά σε σχέση με τη θερμοκρασία. Μπορούμε να δούμε ξανά το έντονο red shift (πάνω από 25 nm από τους 15°C στους 55°C). Επίσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες το προφίλ του ASE φάσματος γίνεται πιο επίπεδο, ενώ στους 55°C το 3dB εύρος ζώνης κέρδους μετρήθηκε κοντά στα 90 nm. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιβεβαιώνουν τη συμπεριφορά των φασματικών χαρακτηριστικών κέρδους του SOA όπως υπαγορεύεται από την κατανομή φορέων στις ζώνες σθένους/αγωγιμότητας του ημιαγωγού.



Εικόνα 4.24 Μήκος κύματος μεγιστοποίησης κέρδους και εύρος ζώνης ημισίου κέρδους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

#### 4.3.4 Στατικές μετρήσεις κέρδους στον DQW SOA

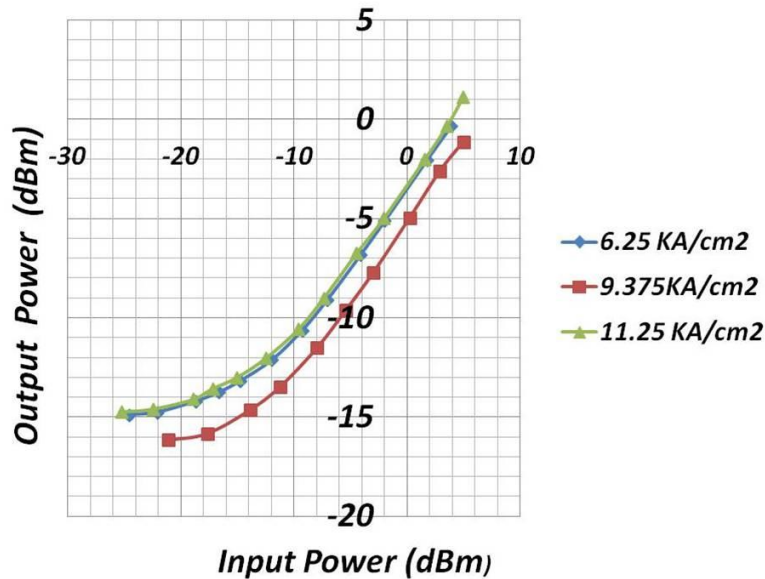
Οι στατικές μετρήσεις κέρδους έγιναν όπως ακριβώς και στους GaInNAs SOAs. Η καμπύλη κέρδους φαίνεται στην εικόνα 4.25.



Εικόνα 4.25 Καμπύλη κορεσμού κέρδους για διάφορες τιμές του ρεύματος οδήγησης

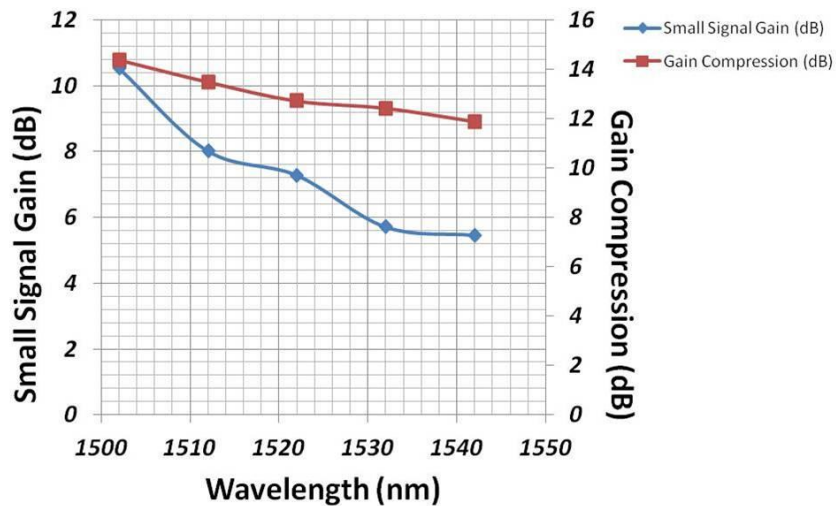
Το κέρδος ασθενούς σήματος είναι μεγαλύτερο από 10 dB για πυκνότητα ρεύματος 11,25 KA/cm<sup>2</sup> (180mA). Ο κορεσμός επέρχεται για ισχύ εισόδου μεταξύ 2-3 dBm. Η διαφορά μεταξύ κέρδους ασθενούς σήματος και κέρδους κορεσμού (Συμπίεση κέρδους - Gain compression) είναι 14 dB, επαρκής για Cross Gain Modulation (XGM). Το Polarization Dependence Gain (PDG) είναι 9 dB στην περιοχή ασθενούς σήματος και μειώνεται καθώς κινούμαστε στην περιοχή κορεσμού. Η οδήγηση του SOA με ρεύματα μεγαλύτερα των 100 mA οδηγεί σε ίδια στατική συμπεριφορά.

Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύος εισόδου – εξόδου. Σε όλες τις μετρήσεις δεν ελήφθησαν υπόψιν οι απώλειες σύζευξης. Όπως μπορούμε να δούμε η ισχύς κορεσμού εξόδου είναι +1,2 dBm στα 180 mA, ενώ για μικρότερες πυκνότητες ρεύματος κυμαίνεται γύρω στα 0 dBm. Η ισχύς κορεσμού εισόδου μετρήθηκε γύρω στα 3 με 4 dBm.



Εικόνα 4.26 Διάγραμμα ισχύος εισόδου-εξόδου για διάφορες πυκνότητες ρεύματος

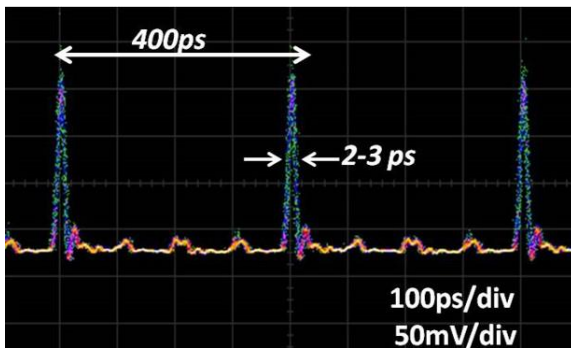
Τέλος μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά του κέρδους για λειτουργία σε διάφορα μήκη κύματος. Τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα φασματικά χαρακτηριστικά του κέρδους. Στην περιοχή μηκών κύματος κοντά στο ASE peak επιτυγχάνεται το μέγιστο κέρδος ασθενούς σήματος το οποίο μειώνεται με τη φασματική απομάκρυνση από το μήκος κύματος αυτό. Παρατηρείται επίσης σημαντική μείωση για την τιμή της συμπίεσης κέρδους, μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά τις δυναμικές καμπύλες όπως θα δούμε και σε επόμενη ενότητα.



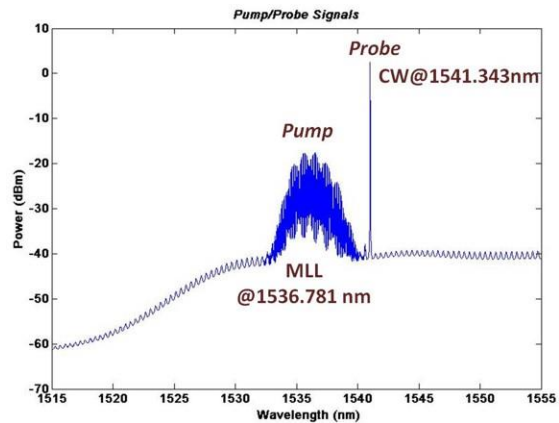
Εικόνα 4.27 Κέρδος ασθενούς σήματος και συμπίεση κέρδους σε διάφορα μήκη κύματος

### 4.3.5 Δυναμικές μετρήσεις DQW SOA

Η πειραματική διάταξη για το δυναμικό χαρακτηρισμό των GaInNAsSb SOAs περιοχής λειτουργίας στα 1,55  $\mu\text{m}$  διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με αυτή των GaInNAs SOAs στα 1,3  $\mu\text{m}$  σε δυο διαφορετικά σημεία. Το πρώτο είναι πως το σήμα άντλησης (Pump signal) δεν παράγεται από ένα διαμορφωμένο laser CW αλλά από ένα laser εγκλειδωσης ρυθμού (Mode-locked laser – MLL). Μία τέτοια πηγή laser παράγει πολύ στενούς παλμούς (2 με 3 ps) με περίοδο επαναληψιμότητας στα 100 ps. Για να μπορέσει ένα τέτοιο σήμα να χρησιμεύσει σαν σήμα άντλησης πρέπει να διαμορφωθεί έτσι ώστε να αφήνει αρκετό χρόνο για να παρατηρηθεί πλήρως η ανάκαμψη του κέρδους. Έτσι διαμορφώνεται μέσω του διαμορφωτή Mach – Zehnder μέσω επανάληψης της συμβολοσειράς ‘1000’ και έτσι αφήνει παράθυρο 400 ps για την πλήρη καταγραφή των περιοχών δυναμικής ανάκαμψης του κέρδους. Η παλμοσειρά στο πεδίο του χρόνου και το φάσμα που παράγεται από το MLL φαίνονται στις εικόνες 4.28 και 4.29. Το ευρύ φάσμα του MLL τοποθετείται γύρω από τα 1536.781 nm, ενώ το σήμα καταγραφής (Probe signal) έχει επιλεγεί στα 1541,343 nm.

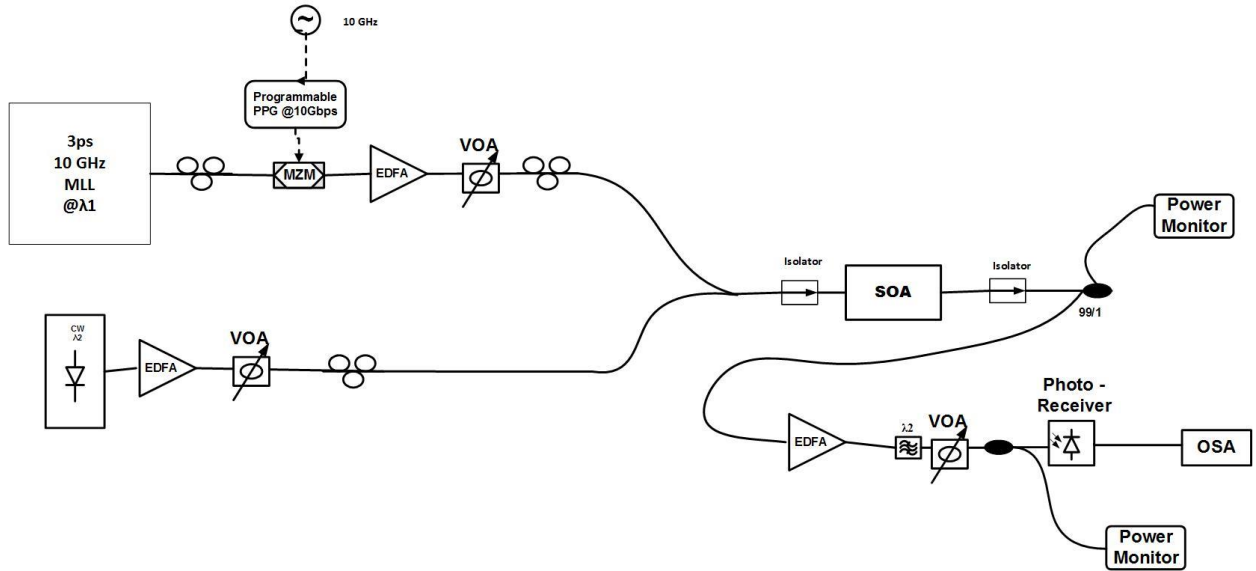


Εικόνα 4.28 Διαμορφωμένο σήμα MLL



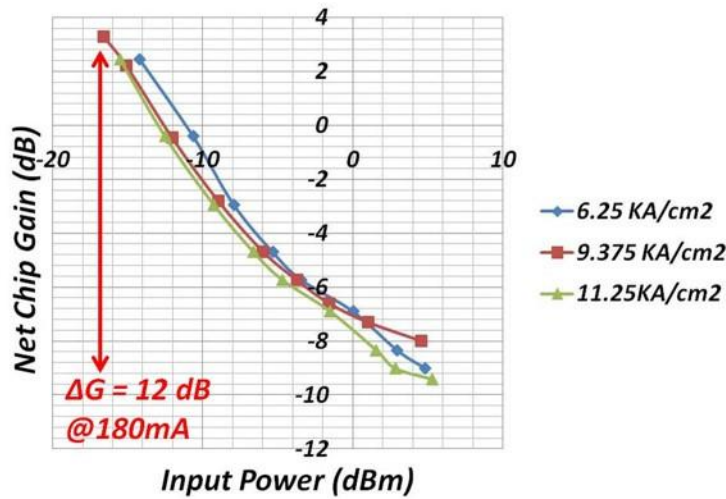
Εικόνα 4.29 Φάσμα σήματος MLL και CW

Η δεύτερη σημαντική διαφοροποίηση είναι πως η ανάκαμψη του κέρδους έχει επιταχυνθεί μέσω της τεχνικής chirp-filtering. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός φίλτρου OBPF, η φάση αργής ανάκαμψης του κέρδους επιταχύνεται, με αποτέλεσμα η καμπύλη ανάκαμψης να έχει διαφορετική μορφή. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 4.30.



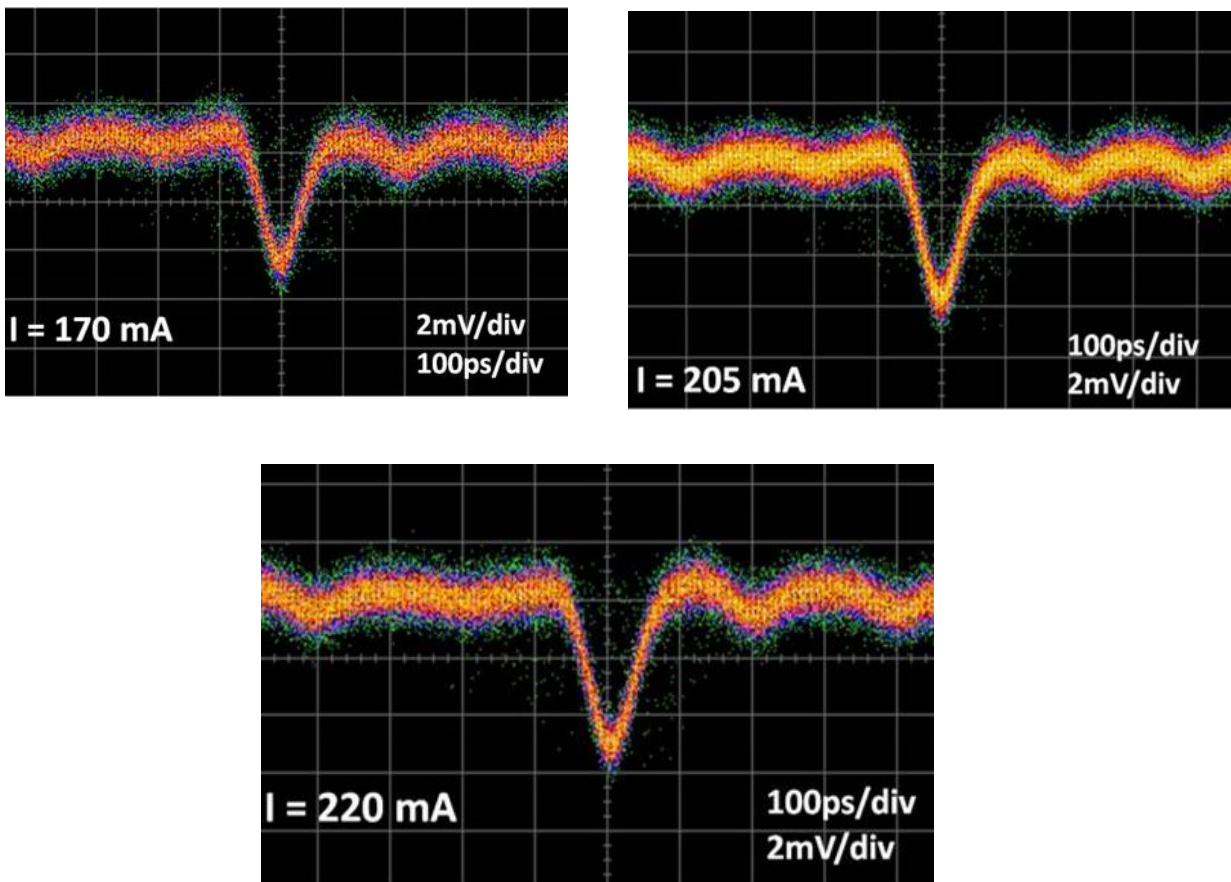
Εικόνα 4.30 Διάταξη δυναμικών μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των στατικών μετρήσεων έδειξαν συμπίεση κέρδους της τάξης των 12 dB. Αυτό επιτρέπει την πειραματική επίδειξη ενός βάθους διαμόρφωσης (Modulation Depth) μέχρι 9dB – 9,5 dB στο σήμα καταγραφής.



Εικόνα 4.31 Συμπίεση κέρδους για διάφορες πυκνότητες ρεύματος

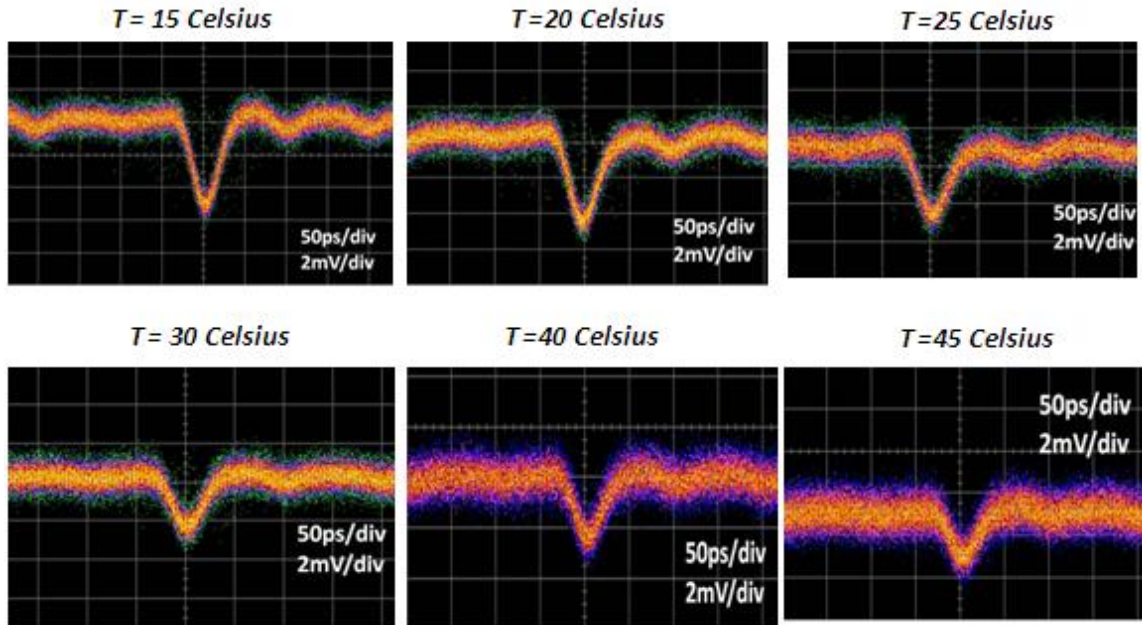
Στην εικόνα 4.32 φαίνονται σχηματικά τα αποτελέσματα των δυναμικών μετρήσεων για διάφορες τιμές του ρεύματος. Οι μετρήσεις αυτές έχουν καταγραφεί κάνοντας χρήση της τεχνικής του chirp-filtering. Υιοθετήσαμε την τεχνική αυτή καθώς επιχειρούμε να εστιάσουμε στη δυναμική συμπεριφορά του κέρδους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια.



Εικόνα 4.32 Ανάκαμψη κέρδους για διάφορες τιμές του ρεύματος



Όπως διαπιστώνεται από τις πειραματικές μετρήσεις, για μειωμένες τιμές της πυκνότητας ρεύματος ο χρόνος ανάκαμψης είναι ελαφρώς μεγαλύτερος. Σε κάθε περίπτωση, ο χρόνος ανάκαμψης από το 10% στο 90% του κέρδους είναι μικρότερος από 40 ps. Επιπλέον, όπως αναμένεται για υψηλότερες τιμές του ρεύματος μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερο βάθος διαμόρφωσης.



Εικόνα 4.33 Ανάκαμψη κέρδους σε διάφορες θερμοκρασίες

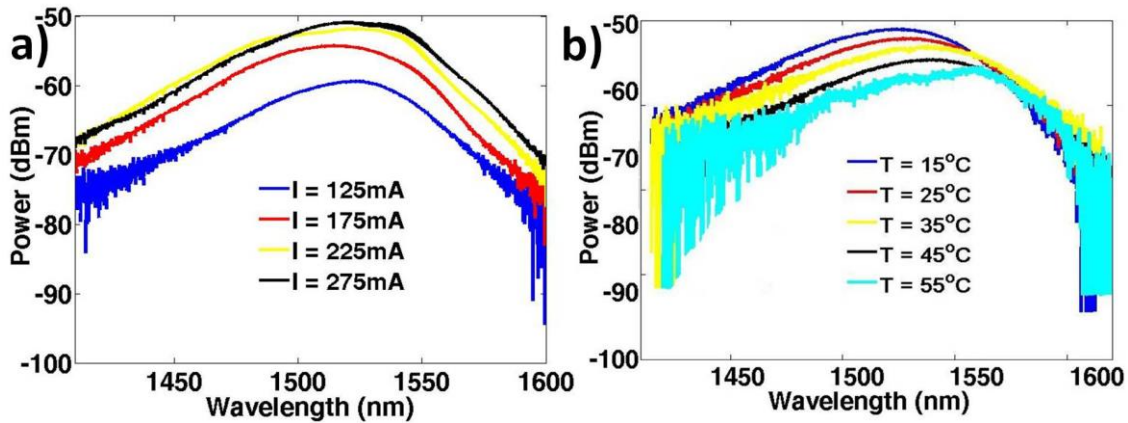
Στην εικόνα 4.33 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που στοχεύουν στη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του κέρδους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του SOA-chip. Συνολικά, παρατηρήσαμε ελαφρώς μεγαλύτερους χρόνους ανάκαμψης με τη θέρμανση του SOA στους 45°C. Η επιλεγμένη φασματική περιοχή (γύρω στα 1540 nm) για τα σήματα άντλησης και καταγραφής επιτρέπει τις δυναμικές μετρήσεις σε σχετικά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Η συμπίεση κέρδους μειώνεται στις μεγάλες θερμοκρασίες, οδηγώντας σε χαμηλότερο βάθος διαμόρφωσης. Τελικά, ο χρόνος ανάκαμψης κέρδους εμφανίζει μια σχετική αναισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ενθαρρυντικό καθώς επιτρέπει τη λειτουργία των GaInNAsSb SOAs σε περιβάλλον εφαρμογών επεξεργασίας σήματος (signal processing) σε ένα εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών χωρίς επιβάρυνση στην ταχύτητα που μπορεί να υποστηριχτεί.

Temperature (°C)	15	20	25	30	35	40	45
Modulation Depth (dB)	7.8	7.3	6.7	6.1	5.8	5.6	5.4
10% - 90% Gain Recovery (psec)	35	35-40	35-40	35-40	40	40-45	45

Εικόνα 4.34 Βάθος διαμόρφωσης και χρόνος 10%-90% ανάκαμψης σε διάφορες θερμοκρασίες

### 4.3.6 Φασματικές μετρήσεις ASE για τους SQW SOAs 2mm

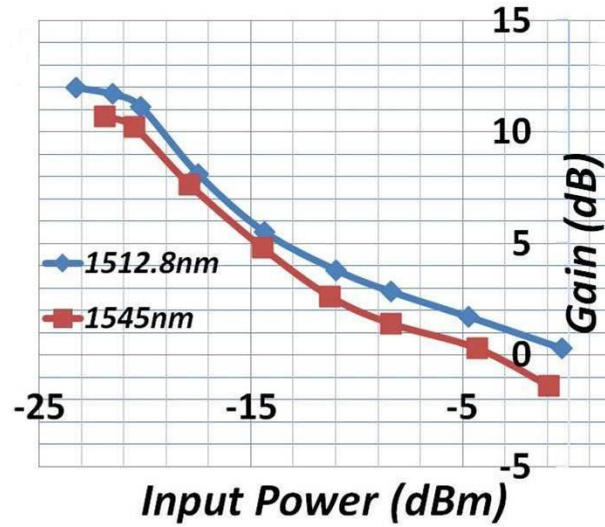
Στην εικόνα 4.35 παρουσιάζεται το ASE φάσμα σε διάφορες τιμές ρεύματος και θερμοκρασίας. Καθώς το ρεύμα αυξάνεται, το peak του κέρδους μετακινείται σε χαμηλότερα μήκη κύματος (blueshift). Η ASE ισχύς φτάνει σε κορεσμό στα 275 mA, με peak κέρδους στα 1512,8 nm. Το εύρος ζώνης κέρδους 3-dB μετρήθηκε στα 65 nm, αποκαλύπτοντας τα ευρυζωνικά φασματικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση SOA. Θερμαίνοντας τον SOA στους 55°C, με σταθερό ρεύμα οδήγησης 275 mA, το φασματικό μέγιστο της καμπύλης του ASE θορύβου μετακινείται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (redshift), ενώ η συνολική ισχύς ASE μειώνεται μόνο κατά 5 dB. Ακόμη, στα 1555 nm, το πλάτος του ASE παραμένει σταθερό σε όλες τις θερμοκρασίες, επιβεβαιώνοντας και σε αυτό το σχεδιασμό της δομής του 1-QW GaInNAsSb SOA την αναισθησία των dilute nitride SOAs στη θερμοκρασία.



Εικόνα 4.35 ASE φάσμα σε διαφορετικές τιμές a) ρεύματος οδήγησης και b) θερμοκρασίας

### 4.3.7 Καμπύλη κορεσμού κέρδους SQW SOA

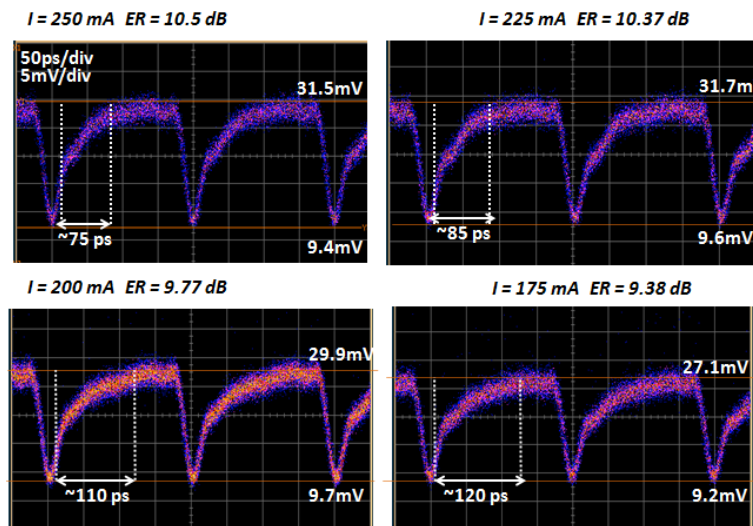
Η καμπύλη κορεσμού του κέρδους φαίνεται στην εικόνα 4.36. Ο SOA οδηγήθηκε στα 275 mA. Η πηγή CW laser ρυθμίστηκε αρχικά να εκπέμπει στα 1512,8 nm, που ήταν και το peak του ASE φάσματος, και στη συνέχεια στα 1545 nm. Το κέρδος ασθενούς σήματος μετρήθηκε 12 dB στην πρώτη περίπτωση και 10,8 dB στη δεύτερη. Η ευαισθησία του κέρδους στην πόλωση του εισερχόμενου σήματος μετρήθηκε μέσω του polarization-dependence gain (PDG) το οποίο υπολογίστηκε κοντά στα 8dB και για τα δύο μήκη κύματος και στις δύο περιπτώσεις. Οι απώλειες σύζευξης από/προς την ίνα και το SOA-chip δεν περιλαμβάνονται στην επεξεργασία των μετρήσεων .



Εικόνα 4.36 Καμπύλη κέρδους σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος

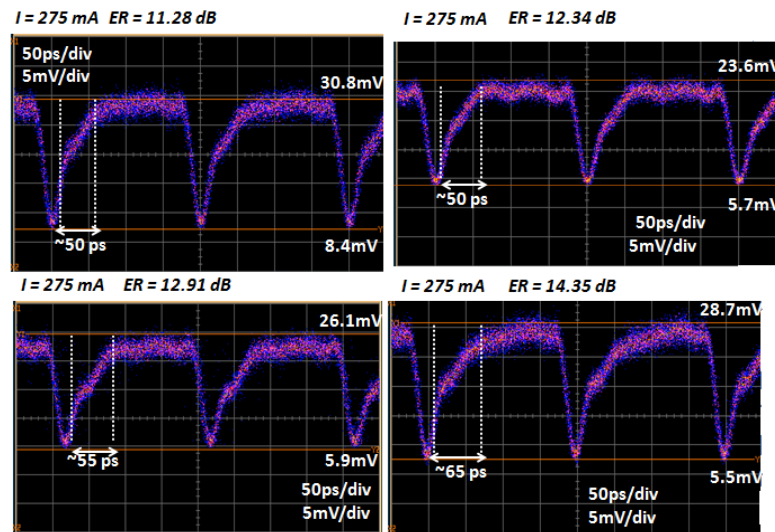
#### 4.3.8 Δυναμική συμπεριφορά του κέρδους στους SQW SOAs

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στις μέτρησις άντλησης-καταγραφής στους SOAs. Η πειραματική διάταξη και η μέθοδος των μετρήσεων είναι ίδια με αυτή που έγινε για τους DQW SOAs 1mm. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις που στοχεύουν στη μελέτη της επίδρασης του ρεύματος οδήγησης και της συμπίεσης κέρδους στην τιμή της ανάκαμψης κέρδους του SOA. Στην εικόνα 4.37 βλέπουμε την ανάκαμψη του κέρδους για διαφορετικές τιμές του ρεύματος οδήγησης.



Εικόνα 4.37 Ανάκαμψη κέρδους για διάφορες τιμές του ρεύματος με σημειωμένους τους αντίστοιχους χρόνους

Στην εικόνα 4.38 βλέπουμε την ανάκαμψη κέρδους για διαφορετικά βάθη διαμόρφωσης.

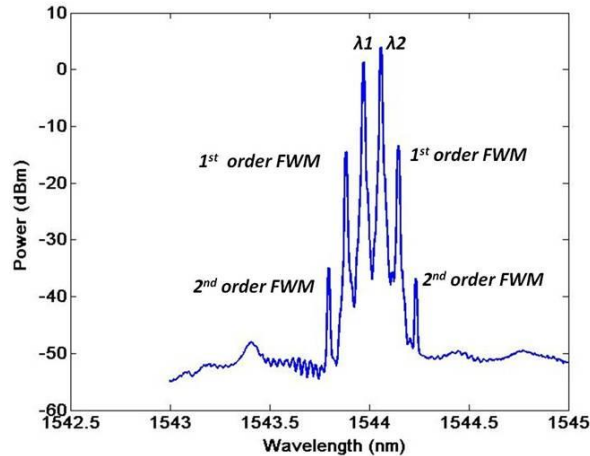


Εικόνα 4.38 Ανάκαμψη κέρδους για διαφορετικά βάθη διαμόρφωσης

Παρατηρούμε πως στα 175mA μετρήθηκε χρόνος ανάκαμψης 120ps. Αυξάνοντας το ρεύμα στα 275mA παρατηρείται δραστική επιτάχυνση της ανάκαμψης με χρόνο ανάκαμψης στα 65ps. Ακόμη, η αύξηση του βάθους διαμόρφωσης (Modulation depth) αυξάνει το χρόνο ανάκαμψης του κέρδους. Για βάθος διαμόρφωσης 11,28 dB ο χρόνος ανάκαμψης μετρήθηκε γύρω στα 50 ps, ενώ για βάθος διαμόρφωσης 14,35 dB ο χρόνος ανάκαμψης αυξήθηκε στα 65 ps.

#### 4.3.9 Φαινόμενο Μίξης τεσσάρων φωτονίων (FWM) στον SQW SOA

Σε αντίθεση με τους DQW SOAs μήκους 1mm, οι SQW SOAs 2mm παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα FWM. Το FWM είναι ένα φαινόμενο που εξαρτάται από τη μη-γραμμική συμπεριφορά του μέσου και το ενεργό μήκος αλληλεπίδρασης του οπτικού πεδίου με το μη γραμμικό μέσο. Συνεπώς αναμένουμε σε μεγαλύτερο μήκος κυματοδηγού να διαπιστώσουμε μεγαλύτερης έντασης διέγερση μη-γραμμικότητας. Έτσι, στο 1mm μήκους των DQW SOAs που μελετήσαμε σε προηγούμενες παραγράφους δε διαπιστώθηκε καταγραφή διέγερσης FWM παραγώγων υψηλής ισχύος. Αντιθέτως, στον SQW SOA 2 mm ισχυρότερη διέγερση ακόμη και από τους GaInNAs SOAs στα 1,3 μm. Στην εικόνα 4.39 φαίνονται τα παράγωγα FWM στο φάσμα εκπομπής του SOA. Όπως παρατηρούμε, εμφανίζεται διέγερση ακόμη και παραγώγων δεύτερης τάξης.

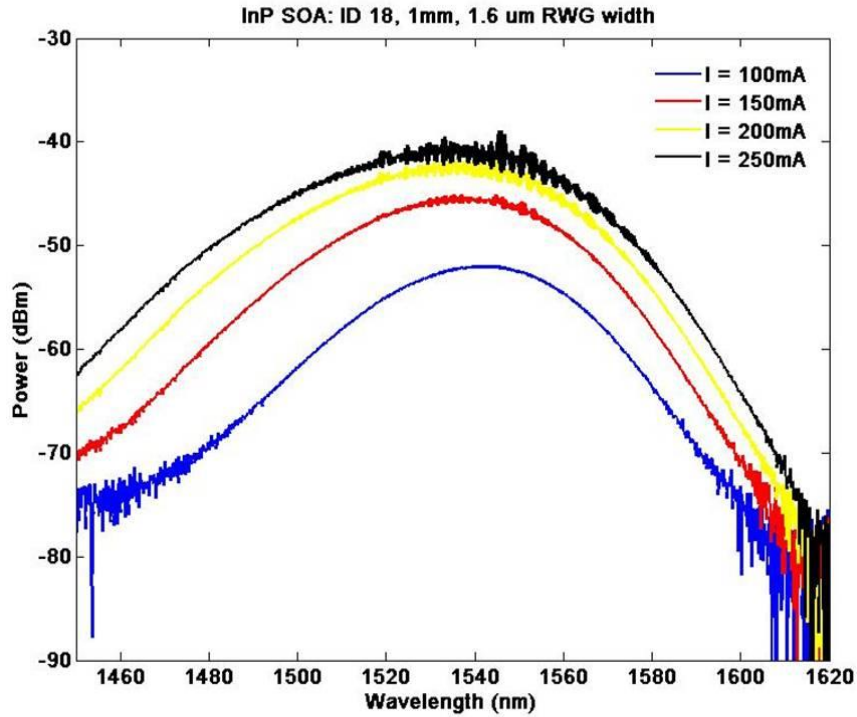


Εικόνα 4.39 Φαινόμενο FWM

#### 4.4 Σύγκριση με τους InP SOAs

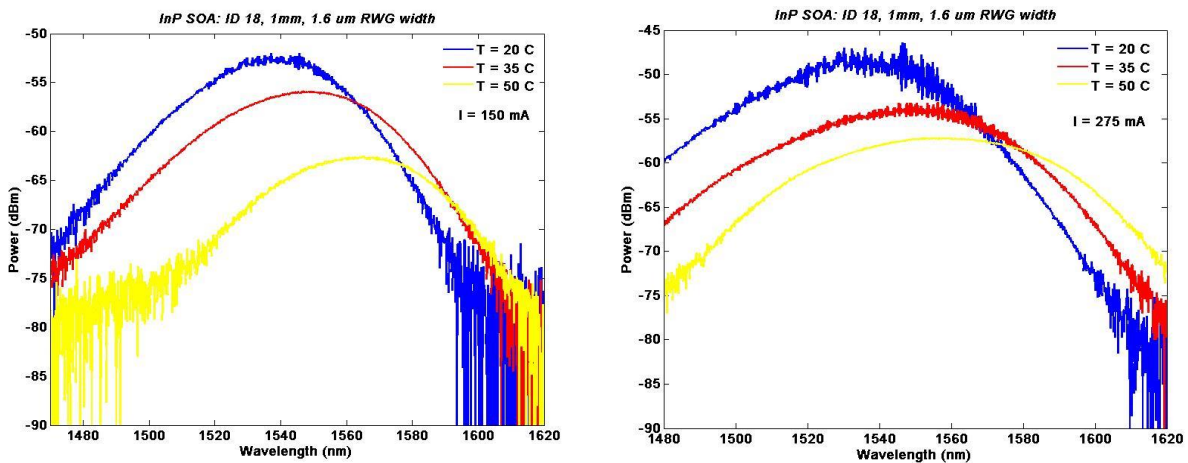
Η ουσιαστική συμβολή της παραγράφου αυτής εντοπίζεται στη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν για τους SOAs τεχνολογίας dilute nitrides με αντίστοιχα αποτελέσματα για InP SOAs μήκους 1mm MQW (Multiple Quantum Wells). Η συγκριτική αυτή μελέτη στοχεύει κυρίως στην ανάδειξη των βελτιωμένων χαρακτηριστικών των dilute nitrides που παρουσιάζουν ένα εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών. Συνεπώς, θα παρουσιαστούν πειραματικά αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά κέρδους των InP SOAs καθώς και η συγκριτική μελέτη της θερμοκρασιακής εξάρτησης της απόδοσης τους με αυτήν των GaInNAs SOAs.

Στην εικόνα 4.40 βλέπουμε το φάσμα εκπομπής του ASE θορύβου για διάφορες τιμές του ρεύματος. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, για τιμές του ρεύματος μεγαλύτερες των 150 mA εμφανίζονται ισχυρά lasing modes. Ακόμη, μπορούμε να παρατηρήσουμε την φασματική μετατόπιση για την αύξηση του ρεύματος οδήγησης (blueshift).



Εικόνα 4.40 ASE φάσμα του InP SOA για διάφορες τιμές ρεύματος οδήγησης

Περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα δεδομένα για την ευαισθησία που παρατηρείται σε σχέση με τη θερμοκρασία. Μπορούμε να δούμε το φασματικό redshift στην εικόνα 4.41. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες τα έντονα lasing modes καταστέλλονται σε μεγάλο βαθμό. Επίσης γίνεται εμφανές ότι για χαμηλότερο ρεύμα η διακύμανση του peak της ισχύος είναι ασθενέστερη.



Εικόνα 4.41 Φασματικό redshift για ρεύμα οδήγησης 150 mA και 275 mA

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αντίστοιχα των GaInNAs SOAs φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 4.1 ASE peak και 3-dB bandwidth για τους InP SOAs

	T=20°C		T=35°C		T=50°C	
	150 mA	275 mA	150 mA	275 mA	150 mA	275 mA
ASE peak (nm)	1537	1539,6	1547,85	1556,4	1569,3	1556,7
3-dB Bandwidth (nm)	38,7	36,75	49,7	48,9	49,35	64,95

Πίνακας 4.2 ASE peak και 3-dB bandwidth στους GaInNAs (ρεύμα οδήγησης 350 mA)

	T=20°C	T=35°C	T=50°C
ASE peak (nm)	1302	1308	1320
3-dB Bandwidth (nm)	53	56	58

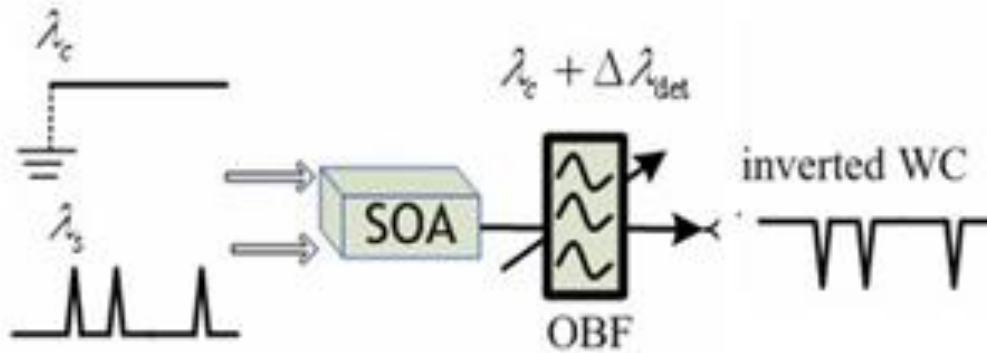
Πίνακας 4.3 Σύγκριση των μεταβολών που επιφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας για τους δύο τύπους

T=20°C – T=50°C	InP	GaInNAs
$\Delta P_{\text{peak}}$ (dB)	11	3
$\Delta \lambda_{\text{peak}}$ (nm)	17,1	18

Η πιο εμφανής διαφοροποίηση μεταξύ των InP και των dilute nitride SOAs είναι η μεγάλη διαφορά στην πτώση της εκπεμπόμενης ισχύος λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Ωστόσο, το μέτρο της φασματικής μετατόπισης προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (redshift) δε φαίνεται να διαφέρει ιδιαίτερα. Μεγάλη εντύπωση επίσης προκαλεί η ελάχιστη διαφοροποίηση που έχει το εύρος ζώνης 3-dB στους dilute nitride SOAs με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η τιμή του βρίσκεται σταθερά πάνω από 50 nm, επιβεβαιώνοντας πως πρόκειται για συσκευή με προδιαγραφές που καλύπτουν την ανάγκη για ευρυζωνικότητα. Γίνεται εμφανές λοιπόν ότι ο dilute nitride SOA μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα και με ελάχιστη πτώση της ισχύος ακόμη και σε συνθήκες θέρμανσης που οδηγούν στην αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας κατά 30° C.

## 5. Πειραματική Αξιολόγηση GaInNAs(Sb) SOAs σε περιβάλλον πραγματικής κίνησης πληροφορίας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η αξιολόγηση των dilute nitride SOAs σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες αλλά και θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο, οι SOAs χρησιμοποιούνται ευρέως σε μια σειρά εφαρμογών που σχετίζονται με την ενίσχυση σήματος, την επεξεργασία σήματος, την αναγέννηση οπτικών σημάτων, στη αμιγώς-οπτική μεταγωγή πληροφορίας. Για το λόγο αυτό στο κεφάλαιο αυτό θα διερευνήσουμε τη δυνατότητα λειτουργίας των υπό εξέταση dilute nitrides σε συνθήκες κίνησης/επεξεργασίας πραγματικής πληροφορίας. Η μελέτη αυτή που συνοδεύει την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των SOA-chips είναι απαραίτητη ώστε να διαπιστωθεί εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία των dilute nitrides μπορεί να υιοθετηθεί σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα που καλούνται να υποστηρίξουν συγκεκριμένες



Εικόνα 5.1 Μετατροπή μήκους κύματος με χρήση του φαινομένου διαμόρφωσης κέρδους του SOA

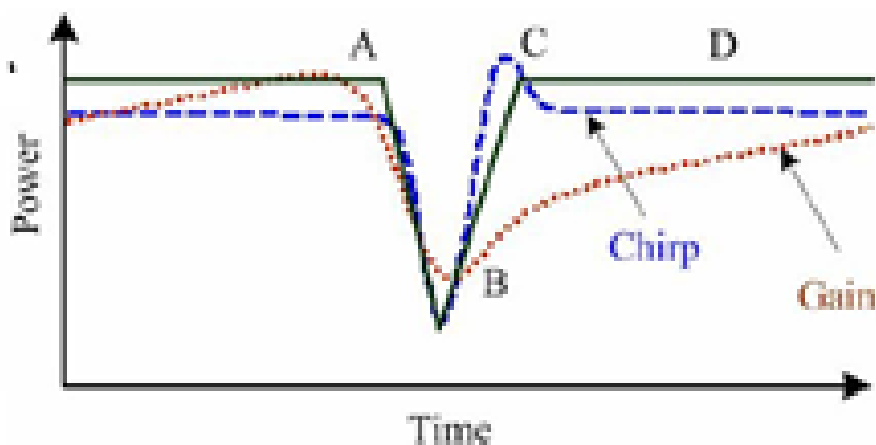
εφαρμογές είτε στο πλαίσιο των datacom/computercom εφαρμογών είτε σε εφαρμογές που σχετίζονται με αποδοτικές λειτουργίες οπτικών πεδίων πρόσβασης (optical access networking). Για την πειραματική επίδειξη της λειτουργίας των dilute nitride SOAs σε περιβάλλον πληροφορίας επιλέχτηκε η διερεύνηση της λειτουργίας της αμιγούς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των SOAs είναι η οπτική μετατροπή του μήκους κύματος με χρήση της διαμόρφωσης κέρδους (XGM – based wavelength conversion)[70]. Στην εικόνα 5.1 αναπαρίσταται η αρχή που διέπει το μηχανισμό της λειτουργίας αυτής. Χρησιμοποιώντας ένα διαμορφωμένο σήμα ( $\lambda_s$ ) το οποίο εισέρχεται σε ένα SOA μαζί με ένα CW σήμα ( $\lambda_c$ ), παρατηρούμε πως το κέρδος του σήματος που ‘βλέπει’ το  $\lambda_c$  μεταβάλλεται καθώς το σήμα πληροφορίας διαμορφώνει τους φορείς – και συνεπώς – το κέρδος του SOA. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ‘γράφεται’ η (συμπληρωματική ακολουθία) πληροφορία του σήματος  $\lambda_s$  στο σήμα  $\lambda_c$  μετά από το φασματικό διαχωρισμό τους με χρήση ενός ζωνοπερατού φίλτρου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα πειραματικής αξιολόγησης των GaInNAsSb/GaAs SOA-chips που υιοθετήθηκαν για την υλοποίηση ενός αμιγώς μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητες μέχρι τα 10Gb/s.



## 5.1 Η τεχνική επιτάχυνσης της ταχύτητας ανάκαμψης κέρδους του SOA μέσω του chirp-filtering

Κρίνεται σκόπιμο πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων να ενσωματωθεί η συνοπτική επισκόπηση της τεχνικής του chirp-filtering η οποία προσέφερε ουσιαστική βελτίωση στην αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας σήματος από τους SOAs. Όπως έχει ήδη σημειωθεί, βασικό χαρακτηριστικό των SOAs που τους καθιστά ικανούς να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλών ρυθμών μετάδοσης πληροφορίας είναι η χρονική συμπεριφορά της ανάκαμψης του κέρδους τους καθώς όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1 επηρεάζει την ποιότητα της κυματομορφής που αποτυπώνεται στο σήμα ( $\lambda_c$ ). Για να είναι συμβατή η λειτουργία των SOAs σε υπερυψηλές ταχύτητες απαιτείται η επιτάχυνση του χρόνου ανάκαμψης για να μην αλλοιώνεται η ακεραιότητα της ακολουθίας των bits πληροφορίας. Η τεχνική του φιλτραρίσματος του chirp του SOA είναι ενδεικτική και ευρέως χρησιμοποιούμενη [71]. Στο σχήμα 5.2 εξηγείται ο μηχανισμός που επιταχύνει την ανάκαμψη του κέρδους στην περίπτωση που το φίλτρο διαχωρισμού στην έξοδο του SOA είναι ελαφρώς μετατοπισμένο προς μικρότερα μήκη κύματος (blue-shifted) καθώς αναπαρίσταται η δυναμική απόκριση του κέρδους και του chirp. Όταν ο παλμός της πληροφορίας ( $\lambda_s$ ) φθάσει στον SOA (σημείο A) το κέρδος που 'βλέπει' το σήμα ( $\lambda_c$ ) μειώνεται ακαριαία λόγω απογύμνωσης φορέων φθάνοντας στο σημείο B. Κατά τη μετάβαση από το A στο B (διάρκειας  $\sim 2-3$  ps) το σήμα λαμβάνει red chirp και το μετατοπισμένο φίλτρο εξασθενεί την ισχύ του. Στη λήξη της παρουσίας του παλμού ( $\lambda_s$ ), το κέρδος αρχίζει να ανακάμπτει γρήγορα. Υποθέτοντας πως το μέγιστο chirp που εισάγει ο SOA είναι στο σημείο C, μετά το σημείο αυτό μειώνεται κινούμενο προς το μηδενισμό του, την ίδια στιγμή που το φίλτρο μειώνει τη διέλευση. Την ίδια στιγμή το κέρδος συνεχίζει να ανακάμπτει. Συνεπώς, η χρήση του blue-shifted οπτικού φίλτρου ισορροπεί την ισχύ της blue-chirped συνιστώσας και την ισχύ λόγω της ανάκαμψης κέρδους με αποτέλεσμα η συνολική καμπύλη στην έξοδο του φίλτρου να είναι (περίπου) σταθερή μετά το σημείο C (πράσινη καμπύλη από C προς D). Συνεπώς αντιμετωπίζοντας σαν ένα σύστημα τον SOA και το φίλτρο, επιτυγχάνουμε ένα wavelength converter πολύ πιο γρήγορο συγκριτικά με την απόκριση του SOA.

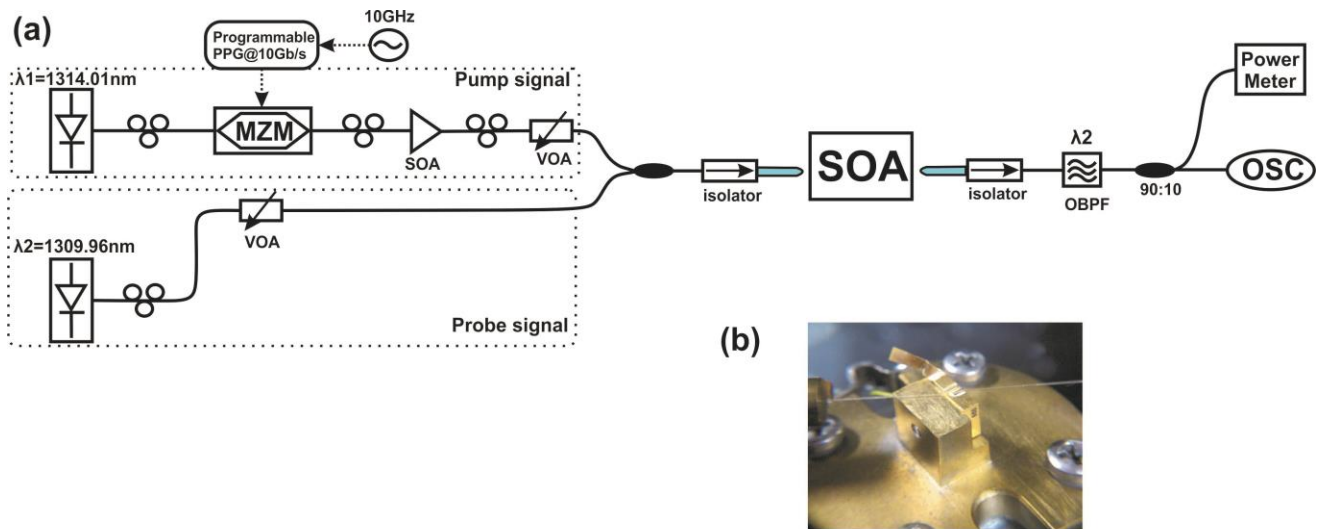


Εικόνα 5.2 Χρονική απόκριση κέρδους, chirp του SOA για την επιτάχυνση της συνολικής συμπεριφοράς με την τεχνική του chirp-filtering

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της απόδοσης του SOA σαν μετατροπέα μήκους κύματος σημάτων για διάφορες περιπτώσεις.

## 5.2 Μετατροπή μήκους κύματος στους 1,3 $\mu\text{m}$ GaInNAs SOAs

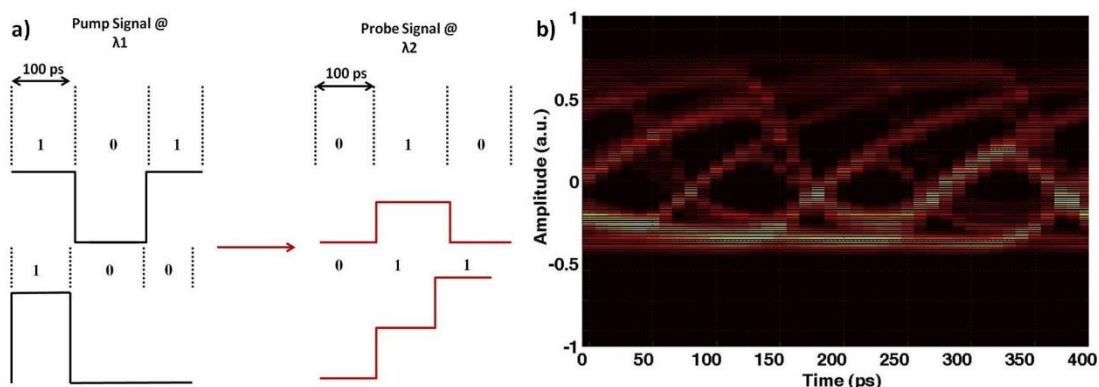
Οι μετρήσεις και στο πείραμα αυτό έγιναν στο probe station με χρήση lensed fibers διαμέτρου 2,5  $\mu\text{m}$  για να εξασφαλιστεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών σύζευξης. Η ελάχιστη απώλεια σύζευξης που επιτυγχάνεται με τον τύπο αυτό των ινών υπολογίζεται στα 5 dB για κάθε πλευρά (facet). Η πειραματική διάταξη που εγκαταστάθηκε για το πείραμα αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.3. Η μετατροπή μήκους κύματος βασίζεται στο μηχανισμό της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους του SOA (XGM). Η πληροφορία που μεταφέρει ένα σήμα άντλησης 'γράφεται' μέσω του μηχανισμού XGM στο σήμα καταγραφής. Το σήμα άντλησης (pump signal) δημιουργείται από ένα CW laser σε μήκος κύματος  $\lambda_1=1314,01$  nm και εισέρχεται σε ένα διαμορφωτή MZM οδηγούμενο από μια προγραμματιζόμενη γεννήτρια παλμών (PPG) για τη δημιουργία μιας  $2^7-1$  ψεύδο-τυχαίας αλληλουχίας bit (Pseudo Random Bit Sequence – PRBS) από NRZ παλμούς δεδομένων στα 5Gb/s και στα 10 Gb/s. Το σήμα καταγραφής (probe signal) δημιουργήθηκε και αυτό από CW laser σε μήκος κύματος  $\lambda_2=1309.95$  nm. Και τα δύο σήματα εισήχθησαν στον SOA περνώντας από έναν οπτικό εξασθενητή ισχύος (Variable Optical Attenuator/VOA) για τον έλεγχο της ισχύος των εισερχόμενων σημάτων στο SOA-chip. Ελεγκτές πόλωσης (PC) χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορα στάδια για να επιτευχθεί η επιθυμητή πόλωση του σήματος. Οπτικοί απομονωτές χρησιμοποιήθηκαν πριν και μετά το chip του SOA για να εμποδίσουν ανακλάσεις του φωτός προς τα πίσω στις συζεύξεις ίνας/αέρα και κυματοδηγού/αέρα. Για την καταγραφή μοναχά του σήματος στο  $\lambda_2$  χρησιμοποιήθηκε ζωνο-περατό φίλτρο 4-nm. Το σήμα, στο  $\lambda_2$  πλέον, λαμβάνεται μέσω μιας φωτοδιόδου και επεξεργάζεται σε έναν παλμογράφο επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time oscilloscope). Η εξάρτηση της απόδοσης του SOA από τη θερμοκρασία αξιολογήθηκε μέσω αλλαγών στη θερμοκρασία του chip από ένα στοιχείο Peltier.



Εικόνα 5.3 α) Πειραματική διάταξη για wavelength conversion β) το chip του SOA ευθυγραμμισμένο με τις οπτικές ίνες στο probe station

Όσον αφορά την επεξεργασία οπτικών σημάτων στα 10 Gb/s, και με βάση αυτήν την ταχύτητα ρυθμοδότησης είναι λογικό να απαιτείται ένας SOA ο οποίος έχει (τουλάχιστον) χρόνο ανάκαμψης κέρδους  $< 100$  ps ώστε να μην εισάγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλουχία των bits της πληροφορίας. Στην περίπτωση μας - όπως έχει ήδη αναφερθεί - ο GaInNAs SOA έχει χρόνο ανάκαμψης από 100ps (για μικρή τιμή συμπίεσης κέρδους) έως 200 ps στη μέγιστη δυνατή τιμή βάθους διαμόρφωσης. Στην εικόνα 5.4 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα της επίδρασης που μπορεί να έχει η ‘αργή’ ανάκαμψη του κέρδους του SOA στη δημιουργία φαινομένων υποβάθμισης της ακολουθίας πληροφορίας (pattern effects). Τα φαινόμενο αυτό οδηγεί σε διαφορετική απόκριση της εξόδου ανάλογα με την εισερχόμενη ακολουθία των bits. Συγκεκριμένα στην περίπτωση μας, οδηγώντας τον SOA με 400mA σε περιοχή μέγιστης συμπίεσης κέρδους αξιολογούμε την έξοδο του σήματος καταγραφής (probe) στο οποίο έχει μεταφερθεί η πληροφορία μέσω του XGM μηχανισμού του SOA. Στην περίπτωση αυτή, το κέρδους του SOA ανακάμπτει πλήρως στα  $\sim 200$ ps και η ταχύτητα των δεδομένων είναι 10Gb/s. Αυτό οδηγεί όπως βλέπουμε στο διάγραμμα οφθαλμού (eye diagrams) της εικόνας 5.4(a) σε φαινόμενα υποβάθμισης ακολουθίας καθώς έχει γεννηθεί μια ‘ψευδοστάθμη’ πληροφορίας λόγω της ημιτελούς ανάκαμψης του κέρδους του SOA. Στην εικόνα 5.4(b) δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού που ερμηνεύει στη συγκεκριμένη περίπτωση την αλλοίωση της ακολουθίας με βάση τα δεδομένα του πειράματος μας. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αλληλουχίας bits ‘101’ στο σήμα πληροφορίας, στο σήμα καταγραφής λόγω XGM γράφεται η συμπληρωματική ακολουθία ‘010’. Ωστόσο, η στάθμη του ‘1’ είναι χαμηλή καθώς το κέρδους του SOA δεν έχει προλάβει να ανακάμψει πλήρως. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση εισερχόμενης ακολουθίας στο σήμα πληροφορίας ‘100’ με συμπληρωματική ακολουθία ‘001’ που θα δημιουργηθεί στο σήμα πληροφορίας. Στην περίπτωση αυτή, το κέρδος στον δεύτερο ‘1’ θα ανακάμψει πλήρως

οδηγώντας σε μεγαλύτερη στάθμη ισχύος συγκριτικά με τον ‘ψευδο-1’ της προηγούμενης περίπτωσης.



Εικόνα 5.4 (α) Ερμηνεία δημιουργίας ανεπιθύμητων φαινομένων ακολουθίας (pattern effects) λόγω αργής ανάκαμψης κέρδους, (β) Διάγραμμα οφθαλμού σήματος 10Gb/s στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος που αποτυπώνονται τα pattern effects

Για να υπερνικήσουμε την εμφάνιση των φαινομένων ακολουθίας (pattern effects) λόγω αργής ανάκαμψης κέρδους, λειτουργήσαμε τον SOA αρχικά σε μικρότερο ρυθμό δεδομένων, στα 5Gb/s, ώστε να είναι περίπου συμβατοί οι χρόνοι ανάκαμψης του κέρδους με το παράθυρο του bit πληροφορίας (200ps). Στην εικόνα 5.5(a) παρουσιάζεται το διάγραμμα οφθαλμού του διαμορφωμένου σήματος καταγραφής για την ταχύτητα των 5Gb/s. Η ποιότητα του σήματος πληροφορίας είναι ικανοποιητική όπως φαίνεται και από το καθαρό άνοιγμα του ‘ματιού’.

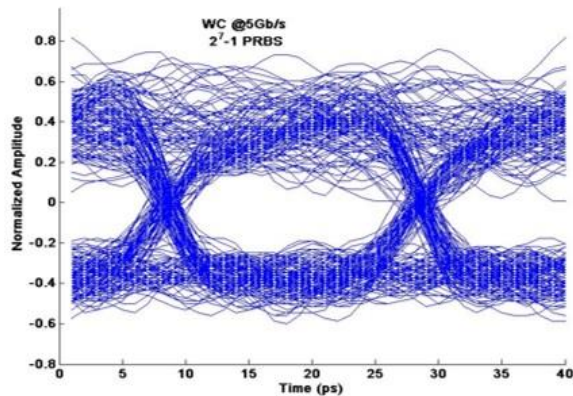
Σε αυτό το σημείο χρήσιμο είναι να εισαχθεί η έννοια του παράγοντα ποιότητας που αποτελεί ένα μετρητικό δείκτη της ποιότητας ενός σήματος πληροφορίας. Σε ένα eye diagram, το οποίο αναπαριστά όλες τις πιθανές μεταβάσεις, ο παράγοντας ποιότητας (Q-factor) ορίζεται ως:

$$Q=20\log (\mu_1-\mu_0/\sigma_1+\sigma_0)$$

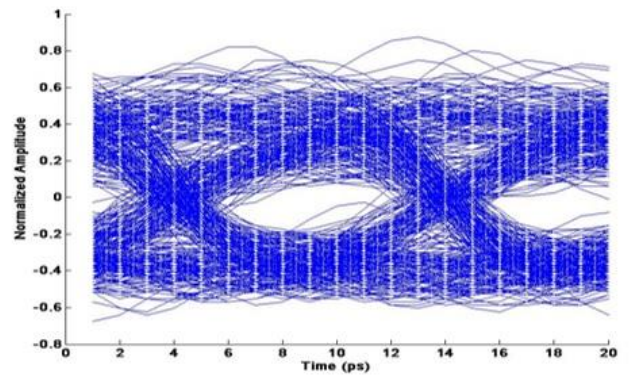
όπου  $\mu_1$  και  $\mu_0$  η μέση τιμή για τις καταστάσεις “1” και “0” αντίστοιχα, ενώ  $\sigma_1$  και  $\sigma_0$  οι τυπικές αποκλίσεις για αυτές τις δύο καταστάσεις. Είναι εμφανές πως μεγάλος Q-factor υποδηλώνει υψηλή ποιότητα σήματος.

Για την περίπτωση των NRZ-OOK δεδομένων στα 5 Gb/s ο παράγοντας ποιότητας (Q-Factor) υπολογίστηκε στα 11.73 dB. Για να επιτύχουμε λειτουργία του SOA στα 10Gb/s οδηγηθήκαμε σε τροποποίηση της περιοχής λειτουργίας του SOA καθώς δεν ήταν διαθέσιμη χρήση του κατάλληλου ζωνοπερατού φίλτρου που επέτρεπε επιτάχυνση της ταχύτητας της μετατροπής μήκους κύματος μέσω chirp-filtering. Λειτουργώντας τον SOA στην περιοχή βαθέως κορεσμού που εμφανίζει πιο γρήγορη ανάκαμψη (~ 100ps) αλλά με ταυτόχρονο κόστος που έρχεται με το μικρό βάθος διαμόρφωσης, αξιολογήσαμε τη λειτουργία του και στα 10Gb/s. Στην εικόνα 5.5(b) παρουσιάζεται το διάγραμμα οφθαλμού του διαμορφωμένου σήματος καταγραφής στο οποίο φαίνεται πως ο χρόνος ανάκαμψης πλέον είναι ικανός να ακολουθήσει τη μετάβαση των bits πληροφορίας. Το διάγραμμα ματιού στην περίπτωση αυτή φαίνεται πιο ‘κλειστό’ ενώ ταυτόχρονα ο θόρυβος έχει μεγαλύτερο μερίδιο στη στάθμη του ‘1’. Υπολογίστηκε ο παράγοντας ποιότητας στα 9.93 dB (ενδεικτικά, η τυπική απόκλιση  $\sigma_1$  είχε

τιμή 0,118 για λειτουργία στα 5 GHz και 0,168 στα 10 GHz). Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία του συγκεκριμένου μετρητικού σαν δείκτης ποιότητας πληροφορίας [72], είναι εμφανές πως ο μετατροπέας μήκους κύματος είναι πιο αποδοτικός στα 5Gb/s συγκριτικά με τα 10Gb/s. Τέλος, ο ρυθμός λανθασμένου bit (Bit-error rate–BER) μετρήθηκε και στις δύο περιπτώσεις καλύτερος από  $10^{-12}$ , επιβεβαιώνοντας τα διαπιστευτήρια της συσκευής σαν αξιόπιστη λύση για μια σειρά αμιγώς οπτικών λειτουργιών επεξεργασίας σήματος.



**Wavelength Converted @ 5 Gbps**

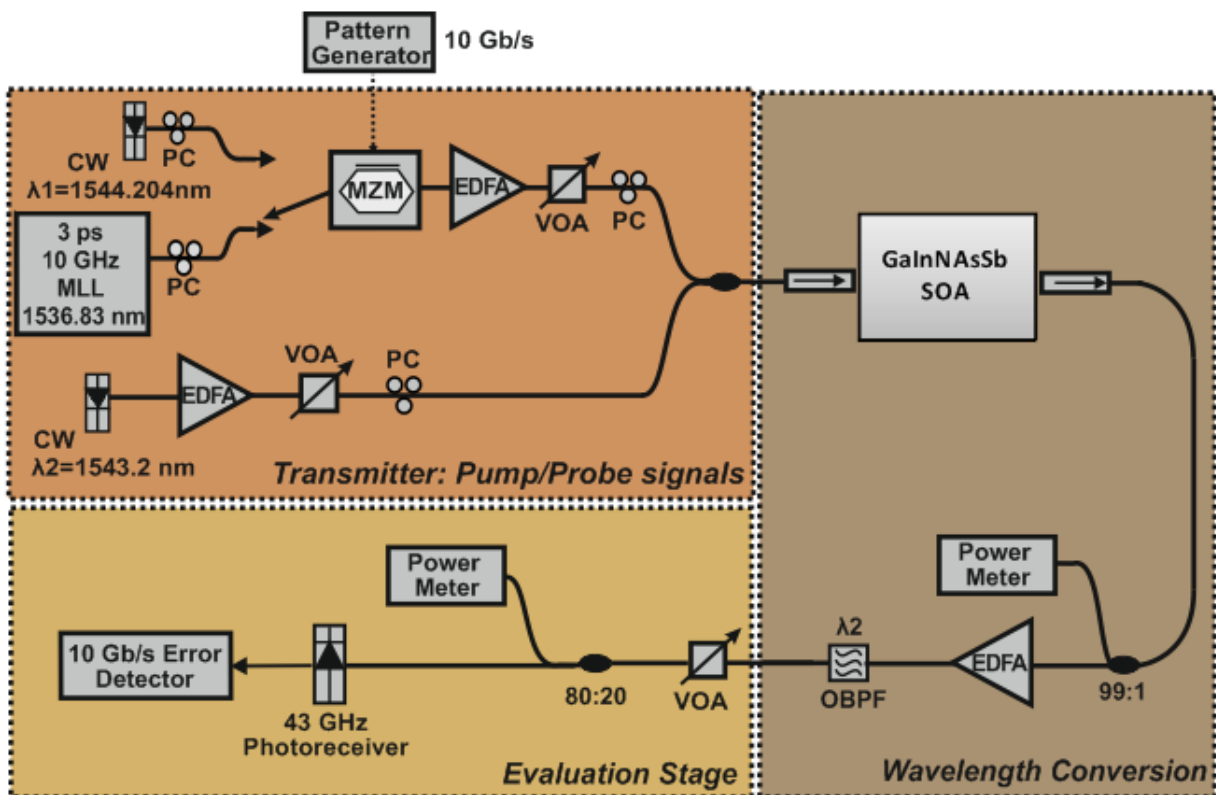


**Wavelength Converted @ 10 Gbps**

Εικόνα 5.5 Διαγράμματα οφθαλμού NRZ-OOK σημάτων στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητα 5Gb/s (a) και 10Gb/s (b)

### 5.3 Μετατροπή μήκους κύματος στους Single-QW 1,55 $\mu\text{m}$ GaInNAsSb SOAs

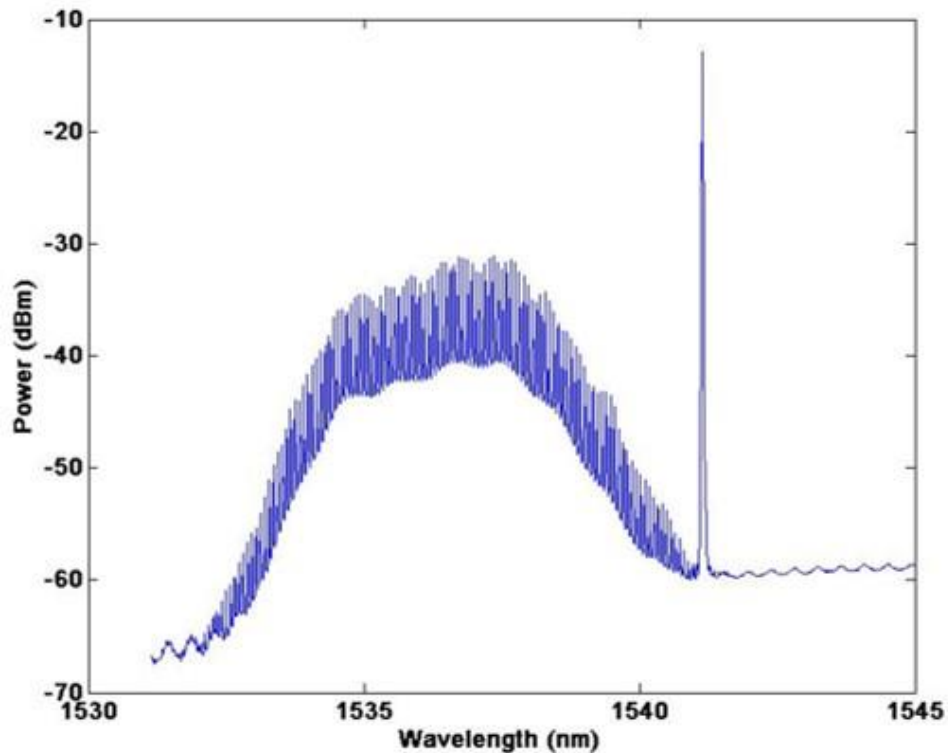
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η αξιολόγηση των GaInNAsSb SOAs σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας, για RZ σήμα. Όπως είχαμε καταγράψει νωρίτερα, ο χρόνος 10%-90% ανάκαμψης κέρδους για αυτή την κατηγορία των SOAs ενιαία 65 ps. Η παραγωγή του σήματος έγινε μέσω ενός MLL που παρήγαγε πολύ στενούς παλμούς εύρους 2-3 ps με κύκλο επαναληψιμότητας (repetition rate) στα 10 GHz. Η παλμοσειρά κωδικοποιήθηκε σε σήμα OOK μέσω ενός διαμορφωτή MZM. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6 Πειραματική διάταξη για 10 Gb/s wavelength conversion με GaInNAsSb SOA

Η διάταξη είναι χωρισμένη σε τρία τμήματα: τον πομπό στα 10 Gb/s, τη μονάδα μετατροπής μήκους κύματος και το στάδιο του δέκτη, όπου γίνεται και η αξιολόγηση των σημάτων με χρήση των διαγνωστικών οργάνων. Ένα Mode-locked laser (MLL) που εκπέμπει στα  $\lambda_1=1536,83$  nm παράγει οπτικούς παλμούς διάρκειας 3 ps και κύκλου επαναληψιμότητας στα 10 GHz. Η παλμοσειρά αυτή εισέρχεται σε έναν Ti:LiNbO<sub>3</sub> διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM). Ο MZM οδηγείται από μία γεννήτρια παλμών PRBS, δημιουργώντας τελικά στην

έξοδο του ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή ένα σήμα RZ-OOK στα 10 Gbps. Η ακολουθία δεδομένων συνδυάζεται με ένα σήμα καταγραφής προερχόμενο από CW πηγή στα  $\lambda_2=1543,24$  nm πριν εισέλθει στον SOA, ο οποίος οδηγείται με ρεύμα 275 mA. Και τα δύο σήματα εισήχθησαν στον SOA περνώντας από έναν οπτικό εξασθενητή ισχύος (VOA) για τον έλεγχο της ισχύος του εισερχόμενου σήματος. Ελεγκτές πόλωσης (PC) χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορα στάδια για να επιτευχθεί η επιθυμητή πόλωση των εισερχόμενων σημάτων στο SOA-chip. Οπτικοί απομονωτές χρησιμοποιήθηκαν πριν και μετά το chip του SOA για να εμποδίσουν ανακλάσεις του φωτός προς τα πίσω στις διεπαφές ίνας/αέρα καθώς και κυματοδηγού/αέρα όπου εμφανίζεται ασυνέχεια στις ενεργές τιμές του δείκτη διάθλασης (effective refractive index) που βλέπει το οπτικό πεδίο. Το φάσμα των δύο εισερχόμενων σημάτων φαίνεται στην εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7 Φάσμα σημάτων εισόδου στον SOA

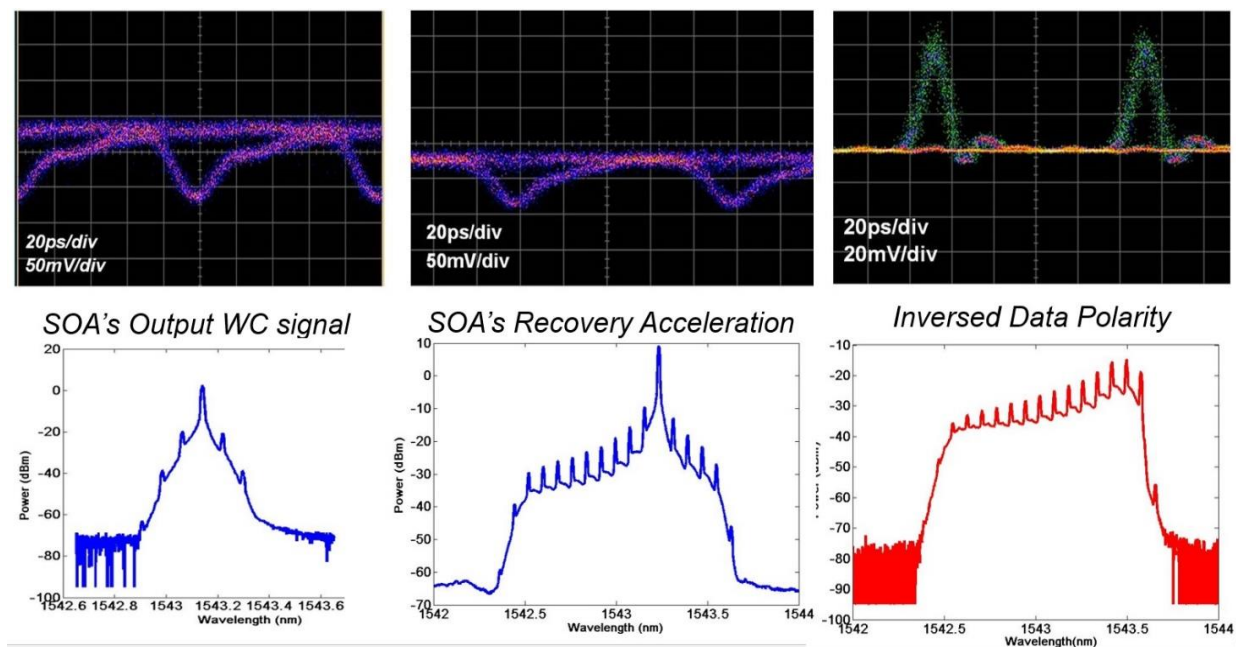
Εκμεταλλευόμενο τον μηχανισμό διαμόρφωσης φάσης του SOA (XPM) το σήμα εισόδου αντιγράφηκε στο μήκος κύματος του σήματος καταγραφής και έφυγε από τον SOA ανεστραμμένο, και με chirp με redshift στις άκρες που προηγούνται και blueshift σε αυτές που ακολουθούν.

Ένα οπτικό ζωνο-περατό φίλτρο (Optical Bandpass Filter/OBPF) εύρους ζώνης 0,9 nm με κέντρο στα 1542,88nm χρησιμοποιήθηκε στην έξοδο του SOA για να επιταχύνει την ανάκαμψη

του κέρδους και να αναστρέψει την πολικότητα του σήματος. Τα επίπεδα ισχύος που εισήχθησαν στον SOA ήταν +6,2 dBm για το σήμα δεδομένων και +4,8dBm για το CW σήμα.

Για την πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της λειτουργίας, χρησιμοποιήσαμε διαμόρφωση PRBS ανώτερης τάξης από  $7^{th}$  που είχαμε χρησιμοποιήσει αρχικά. (PRBS  $2^7-1$ , PRBS  $2^{15}-1$  και PRBS  $2^{31}-1$ ). Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε για να διερευνήσουμε εάν ο υπό εξέταση SOA είναι ευαίσθητος σε διαφορετικές ακολουθίες δεδομένων οι οποίες στα πραγματικά συστήματα ενυπάρχουν λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της κίνησης της πληροφορίας.

Στην εικόνα 5.8 αποδίδονται σχηματικά τα διαγράμματα οφθαλμού (eye diagrams) και το φάσμα του σήματος καταρχάς στη φάση εξόδου του από τον SOA, στη φάση επιτάχυνσης του χρόνου ανάκαμψης κέρδους και μετά την αναστροφή της πολικότητας των δεδομένων μέσω chirp filtering και καταπίεσης του μήκους κύματος του φέροντος. Αξίζει να σημειωθεί πως η αντιστροφή της πολικότητας επιτυγχάνεται φιλτράροντας τον carrier του διαμορφωμένου σήματος ο οποίος όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8(c) έχει καταπιεστεί πλήρως.



Εικόνα 5.8 Eye diagrams για και αντίστοιχα φάσματα για διάφορες φάσεις της επεξεργασίας του wavelength converted σήματος

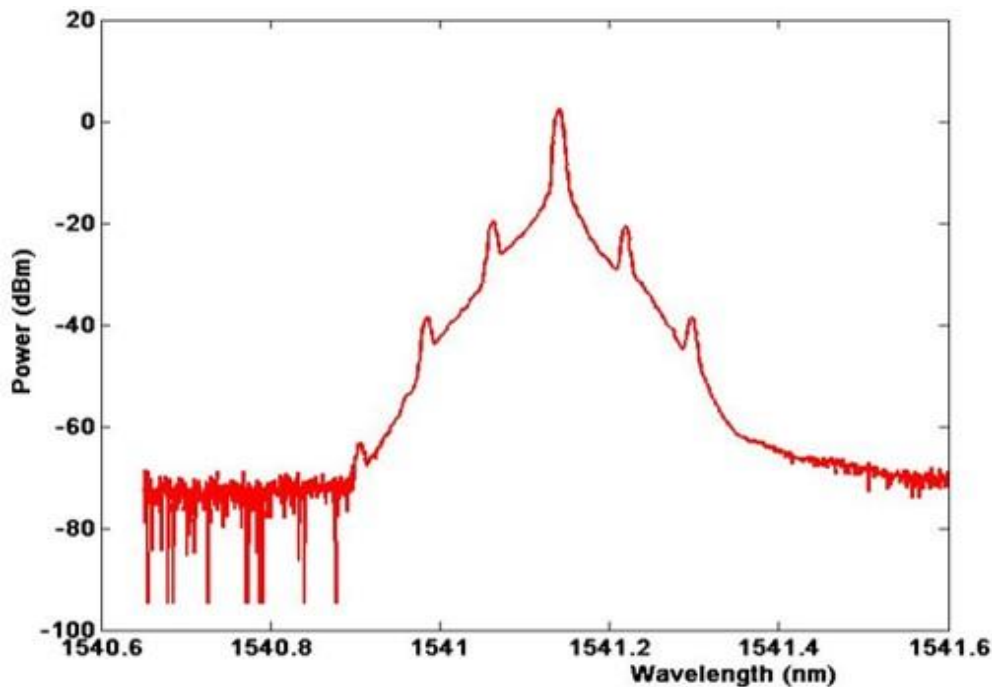
Όπως γίνεται εμφανές, καθαρά eye diagrams και λειτουργία χωρίς λάθη παρατηρήθηκαν για όλες τις τάξεις PRBS στα 10 Gbps.



## 5.4 Μετατροπή μήκους κύματος στους 2-QW 1,55 $\mu\text{m}$ GaInNAsSb SOAs

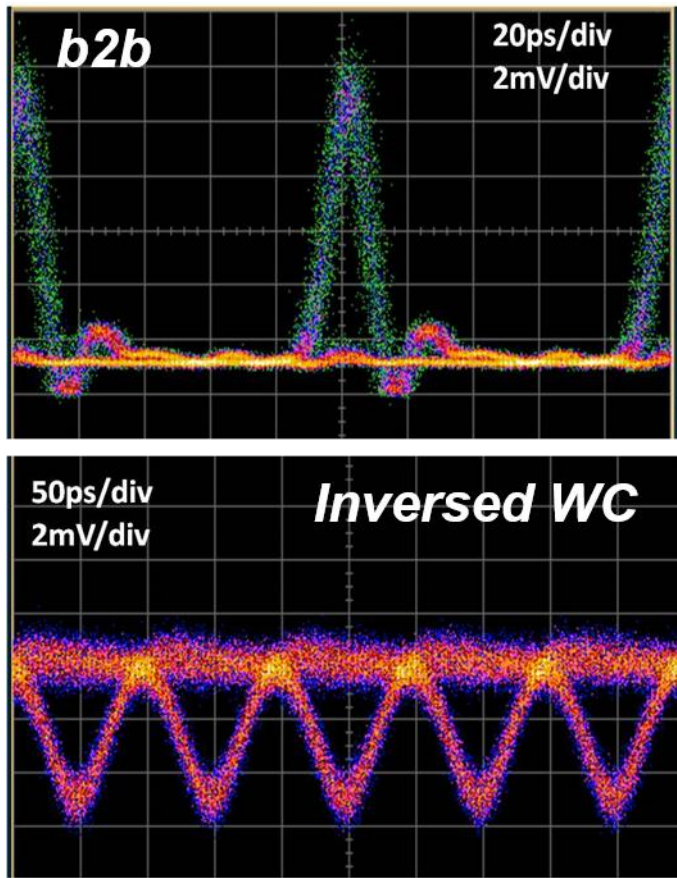
Η πειραματική διάταξη για τους DQW SOAs είναι ακριβώς αυτή της εικόνας 5.6, με το σήμα άντλησης να παράγεται από το Mode-locked laser στα  $\lambda_1=1536,83$  nm. Και πάλι οι μετρήσεις έγιναν για PRBS τριών τάξεων (PRBS  $2^7-1$ , PRBS  $2^{15}-1$  και PRBS  $2^{31}-1$ ). Αυτή τη φορά η αξιολόγηση του συστήματος έγινε και σχέση με την ευαισθησία του στις εναλλαγές θερμοκρασίας.

Το φάσμα του διαμορφωμένου σήματος άντλησης από το MLL και του σήματος καταγραφής φαίνονται στην εικόνα 5.7. Το φάσμα του ανεστραμμένου σήματος όπως αυτό εξέρχεται από τον SOA φαίνεται στην εικόνα 5.9.

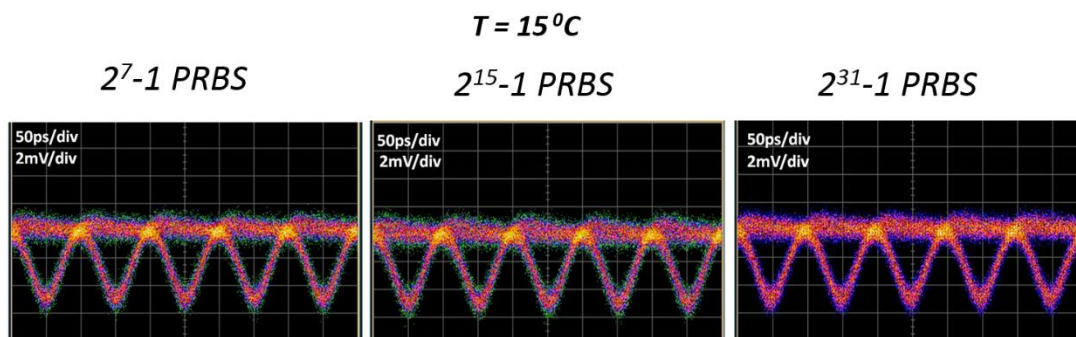


Εικόνα 5.9 Φάσμα ανεστραμμένου σήματος στο  $\lambda_2$

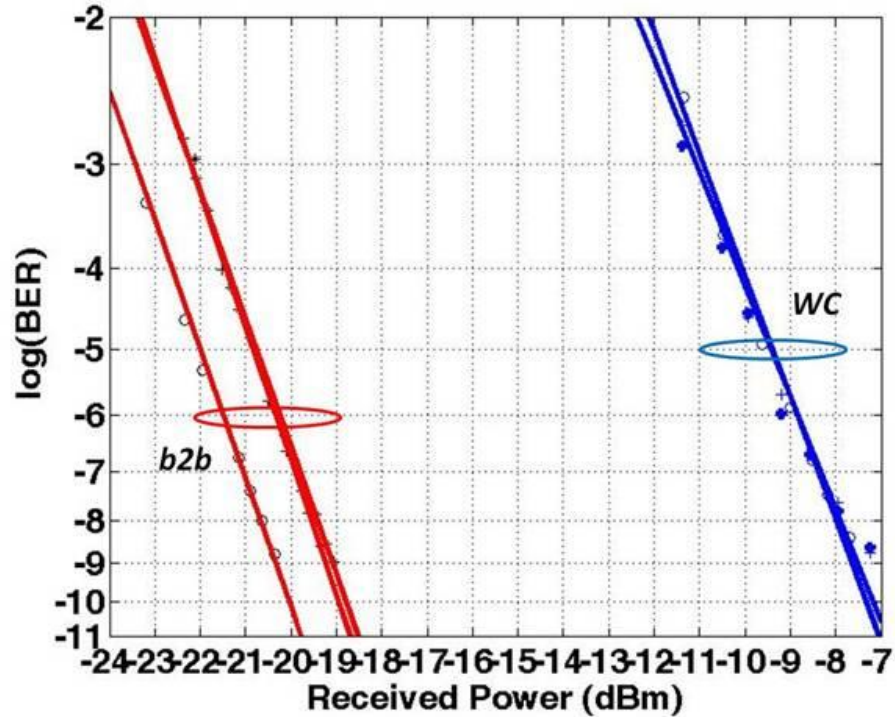
Τα eye diagrams για το b2b και το wc σήμα φαίνονται στην εικόνα 5.10. Και πάλι για την πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της λειτουργίας, χρησιμοποιήσαμε διαμόρφωση PRBS ανώτερης τάξης από  $7^{th}$  που είχαμε χρησιμοποιήσει αρχικά. (PRBS  $2^7-1$ , PRBS  $2^{15}-1$  και PRBS  $2^{31}-1$ ). Τα eye diagrams για λειτουργία σε κάθε μία από αυτές φαίνεται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.10 Eye diagrams για το b2b και το ανεστραμμένο (inverted) wc σήμα



Εικόνα 5.11 Eye diagrams για PRBS διαφόρων τάξεων



Εικόνα 5.12 Καμπύλες BER για b2b και wc σήμα στον DQW SOA

Όπως μπορούμε να δούμε από τα πολύ καθαρά eye diagrams έχουμε λειτουργία χωρίς λάθη για όλες τις παραπάνω τάξεις PRBS.

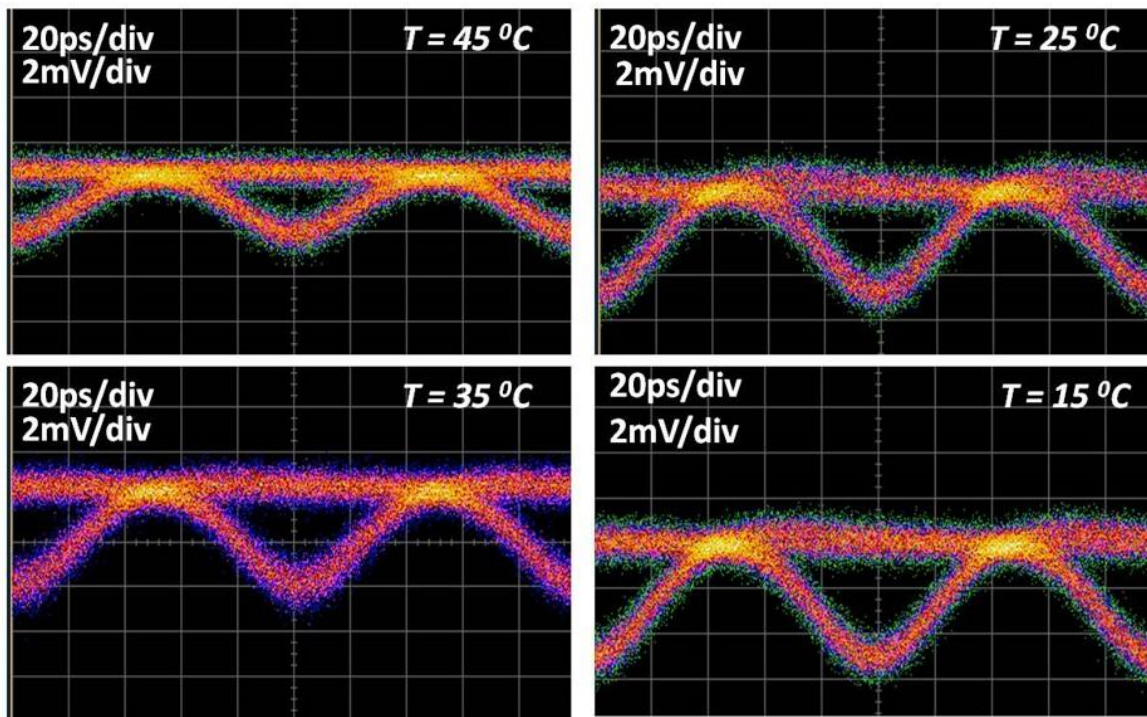
Για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων. Στο σημείο αυτό παρέχουμε στον αναγνώστη κάποιες βασικές πληροφορίες σχετικά με τη μεθοδολογία και τη σημασία των μετρήσεων ρυθμού σφαλμάτων ψηφίων (Bit Error Ratio – BER). Με τον όρο back-to-back (b2b) σήμα εννοούμε το εκπεμπόμενο σήμα όπως μετρήθηκε στον δέκτη, χωρίς να έχει δηλαδή υποστεί επεξεργασία (στη συγκεκριμένη περίπτωση το wavelength conversion). Βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση του συστήματος είναι η δυνατότητα του να μεταφέρει την επεξεργασμένη πληροφορία χωρίς λάθη και χωρίς μεγάλες απαιτήσεις ισχύος στο δέκτη. Οι καμπύλες BER που παρουσιάζονται στην εργασία αναπαριστούν τον ρυθμό λανθασμένου bit σε συνάρτηση με την ισχύ του σήματος που φέρει την πληροφορία. Τοποθετώντας στο ίδιο διάγραμμα την καμπύλη BER για το b2b σήμα και για το wc σήμα, προκύπτει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο αξιολόγησης, το power penalty (ποινή ισχύος).

Το power penalty είναι η μετατόπιση στον άξονα της ισχύος της καμπύλης του wc σήματος σε σχέση με αυτή του b2b σήματος, στο ύψος του επιθυμητού ορίου για το ρυθμό των λάθους bit. Επί της ουσίας, το power penalty είναι η παραπάνω ισχύς που απαιτείται να έχει το σήμα ώστε να μπορεί να μεταδοθεί χωρίς λάθη μετά την επεξεργασία που έχει υποστεί, σε σχέση με την αντίστοιχη ισχύ στην περίπτωση που μεταδιδόταν χωρίς την επεξεργασία αυτή. Η καμπύλες BER που λήφθηκαν για το b2b και για το wavelength converted σήμα φαίνονται στην εικόνα 5.12. Οι καμπύλες αναπαριστούν τις τρεις διαφορετικές τάξεις PRBS που χρησιμοποιήθηκαν. Το power penalty για διαφορετικές τάξεις PRBS στον πομπό παρουσιάζουν

ποινή ισχύος (power penalty) μικρότερο του 1dB, καταδεικνύοντας πως μπορεί να αναπτυχθεί πηγή με αξιόπιστο τρόπο που να λειτουργεί για όλες τις τάξεις των PRBS.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στις παραπάνω μετρήσεις, εμφανίζεται ένα συγκριτικά πολύ μεγάλο power penalty, περίπου 12dB μεταξύ του b2b και του wc σήματος. Δεν θα έπρεπε παρ' όλα αυτά να οδηγηθούμε σε λάθος συμπεράσματα, μιας και αυτή η τιμή σε καμία περίπτωση δε σηματοδοτεί χαμηλή ποιότητα σήματος. Η εξήγηση σε μεγάλο βαθμό κρύβεται στην ίδια την έννοια του ανεστραμμένου σήματος που έχουμε μετά το wavelength conversion. Κοιτώντας καλύτερα τον κάθε παλμό που έχουμε, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τα '0', ενώ στο b2b σήμα δεν υπάρχει απολαβή ισχύος στο inversed wc σήμα η ισχύς βρίσκεται συνεχώς στο peak. Αντιστοίχως, για τα '1', ενώ στο b2b σήμα έχουμε ισχύ στο peak για 2-3 ps που διαρκεί ο στενός παλμός (σε ένα bit window των 100 ps), στο inversed wc σήμα έχουμε ισχύ στο peak για ένα μέρος του bit window (περίπου 30%) και στο υπόλοιπο τη φάση της πτώσης και της ανάκαμψης που παρέχει κάποια απολαβή ισχύος. Τα παραπάνω θα προϋπέθεταν μια τεράστια διαφορά μεταξύ των  $P_{peak}$  για το b2b και το wc σήμα έτσι ώστε να μην υπάρχει κάποιο offset στο power penalty, μια διαφορά που δεν είναι δυνατόν να υπάρξει. Το πιθανότερο είναι το πραγματικό power penalty να είναι κοντά σε αυτό που παρουσίασε και ο SQW SOA στις μετρήσεις προηγούμενης παραγράφου.

Το πιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα είναι η μελέτη που έγινε στον συγκεκριμένο SOA σε σχέση με το πώς οι μεταβολές τις θερμοκρασίας επηρεάζουν την αξιοπιστία της λειτουργίας τους σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας. Τα eye diagrams που αποτυπώθηκαν φαίνονται στην εικόνα 5.13.



Εικόνα 5.13 Eye diagrams για λειτουργία σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες

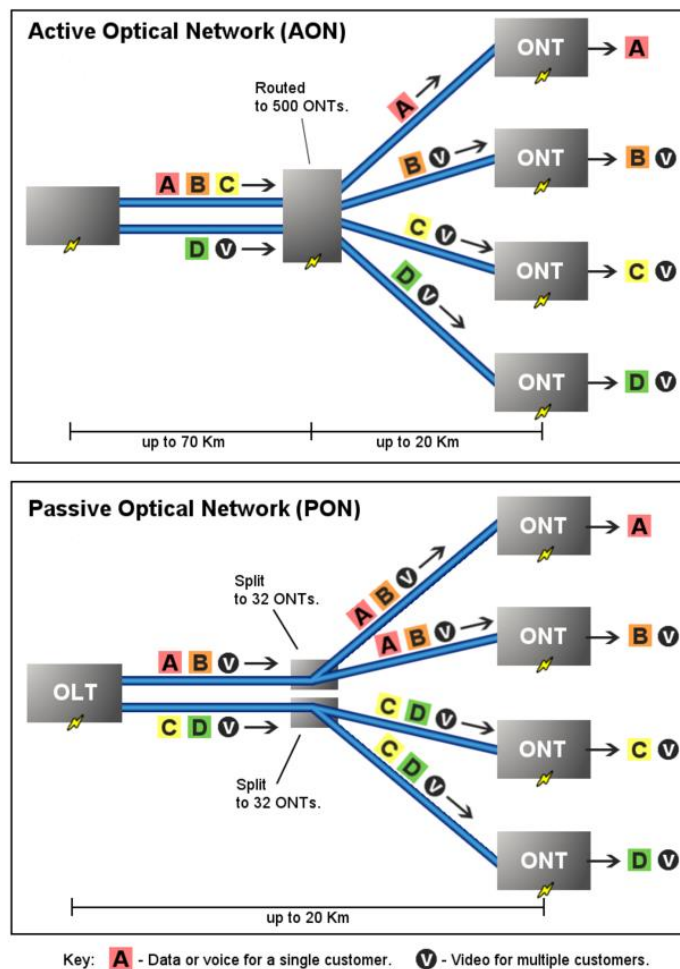
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τους 15° C, 25° C και 35° C τα eye diagrams είναι πολύ καθαρά, με ικανοποιητικά μεγάλο άνοιγμα “οφθαλμού”. Αντιθέτως, στους 45° C το άνοιγμα του “οφθαλμού” έχει γίνει αισθητά μικρότερο, ενώ η διασπορά των δειγμάτων μας δείχνει ότι τα λάθη πρέπει να έχουν αυξηθεί σημαντικά.

Συνολικά πάντως οι GaInNAsSb DQW SOAs παρουσίασαν μεγάλη αναισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές, πράγμα που τους κάνει ιδιαιτέρως ελκυστικούς για χρήση σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας.

## 6. Προτεινόμενες Εφαρμογές Ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για τοπολογίες Access Δικτύων

### 6.1 Παθητικά οπτικά δίκτυα

Η όλο και αυξανόμενη ζήτηση των οικιακών χρηστών σε bandwidth (φωνή, βίντεο, internet) απαιτεί για την εξυπηρέτηση της αξιόπιστες και αποδοτικού κόστους λύσεις. Μια πιθανή λύση είναι τα Passive Optical Networks (PONs). Τα PONs είναι τοπολογίες δικτύων που χρησιμοποιούν οπτική για συνδέσεις point-to-multipoint (σημείο με πολλά σημεία). Μέσω splitters που δεν καταναλώνουν ισχύ εξυπηρετεί με μία μοναχά ίνα πολλούς χρήστες. Ένα PON ξεκινά από ένα Optical Line Terminal (OLT) στην πλευρά του παρόχου και καταλήγει σε πολλά Optical Network Units (ONUs) στην πλευρά των χρηστών. Το ONU αποτελεί τη βασική μονάδα οπτοηλεκτρικής μετατροπής των ρευμάτων πληροφορίας (upstream/downstream). Μια σχηματική αναπαράσταση ενός PON και η σύγκριση του με ένα Active Optical Network (AON) φαίνεται στην εικόνα 6.1.

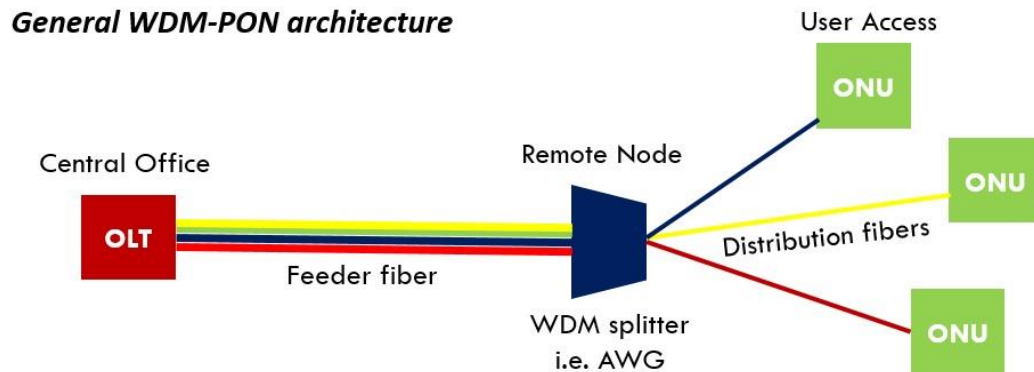


Εικόνα 6.1 Σύγκριση PON και AON

Όπως γίνεται εμφανές, ένα PON μπορεί να μειώσει σημαντικά τον εξοπλισμό που απαιτείται σε σχέση με τις point-to-point αρχιτεκτονικές. Προσφέρεται για την άφιξη της οπτικής πληροφορία μέχρι το σπίτι (Fiber-to-the-Home), και αποτελεί μια χαμηλού κόστους λύση για τις ευρυζωνικές διασυνδέσεις. Η χρήση παθητικών οπτικών στοιχείων απελευθερώνει από την ανάγκη για πηγές ενέργειας, καθώς και την ανάγκη για εξοπλισμό ελέγχου. Ταυτόχρονα, μπορεί να εξυπηρετήσει την ανάγκη των χρηστών για ευρυζωνικότητα, καθώς πλέον ένας οικιακός χρήστης απαιτεί μία σειρά από υπηρεσίες (βίντεο, VoIP, μουσική, δουλειά από το σπίτι, gaming).

### 6.1.1 Αρχιτεκτονικές

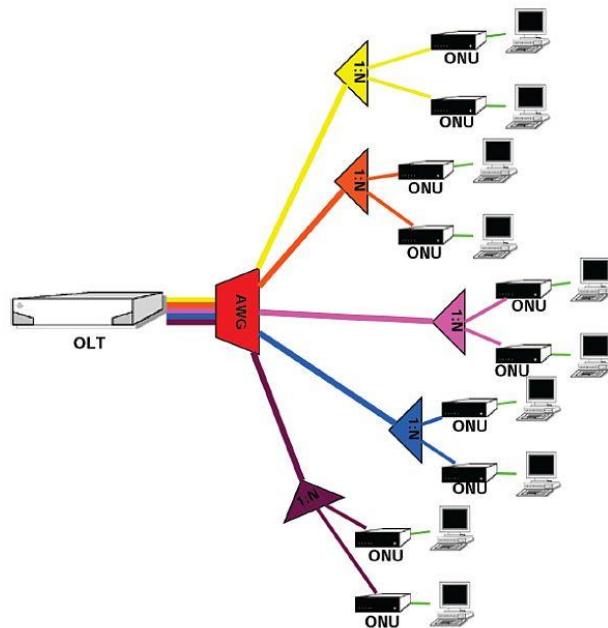
Μια πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική είναι η WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing). Βασίζεται στις αρχές της πολυπλεξίας μήκους κύματος στην οποία χρησιμοποιούνται πολλαπλά μήκη κύματος ως φορείς πληροφορίας (carriers) αξιοποιώντας με αυτόν τον τρόπο βέλτιστα το διαθέσιμο εύρος ζώνης των οπτικών μέσων μετάδοσης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2, η πολυπλεξία του σήματος γίνεται στο OLT, ενώ η από-πολυπλεξία του στον χρήστη, όπου το κάθε ONU “τραβάει” την πληροφορία από το μήκος κύματος που προορίζεται για αυτό. Δεν είναι αναγκαίο το κάθε ONU να έχει ένα συγκεκριμένο δικό του μήκος κύματος (dedicated), καθώς με στατιστική πολυπλεξία μπορεί να βελτιστοποιηθεί η χρήση των διαθέσιμων μηκών κύματος από όλα τα ONUs.



Εικόνα 6.2 Τυπική αρχιτεκτονική WDM-PON

Η αρχιτεκτονική WDM-PON παρουσιάζει πολλά και κομβικά πλεονεκτήματα. Μπορεί να δημιουργήσει εικονικές peer-to-peer οπτικές διασυνδέσεις, με συγκεκριμένη χωρητικότητα χρηστών ανά μήκος κύματος. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε μία ευρεία γκάμα χωρητικότητας διαύλου (μέχρι και τα 40 Gbps). Παρουσιάζει συμμετρική κίνηση στο upstream και το downstream, ενώ μπορεί να υποστηρίζεται από παθητικά και ενεργά στοιχεία που επιτρέπουν τη διάφανη λειτουργία σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος (colorless operation). Είναι τεχνολογία χαμηλού κόστους, συμβατή με τις WDM υποδομές που έχουν ήδη αναπτυχθεί και για άλλα στρώματα του δικτύου (core- και metro-) ενώ τέλος προσφέρει ικανοποιητικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.

Έχουν επίσης δημιουργηθεί τα περιθώρια για υλοποίηση υβριδικών αρχιτεκτονικών όπως η Hybrid WDM-TDM αξιοποιώντας τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές πολυπλεξίας στο χρόνο (Optical Time Division Multiplexing – OTDM). Μια υβριδική WDM-TDM αρχιτεκτονική παρουσιάζεται εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.3 Τυπική Hybrid WDM-TDM αρχιτεκτονική

Όπως βλέπουμε, πολυπλεξία WDM χρησιμοποιείται στην πρώτη βαθμίδα, ενώ μια συνηθισμένη TDM στη δεύτερη. Ως συγκριτικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής αυτής, παρουσιάζεται η δυνατότητα για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πάρα πολλών χρηστών.



## 6.1.2 Σχεδίαση και χαρακτηριστικά του ONU

Η σχεδίαση ενός ONU έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές. Η χρήση μίας μοναδικής ίνας που συντελεί στο μειωμένο μέγεθος του δικτύου αποτελεί βασική απαίτηση. Επίσης η λειτουργία του πρέπει να προσφέρει δυνατότητα υποστήριξης σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος, ώστε για παράδειγμα να το καθιστά ικανό για χρήση πολυπλεξίας WDM.

Τις παραπάνω προδιαγραφές πληρούν σε πολύ μεγάλο βαθμό οι SOAs, πράγμα που τους καθιστά μία αξιόπιστη επιλογή για την κατασκευή των ONUs. Είναι άμφι-κατευθυντικοί, με μία μοναχά ίνα. Εξασφαλίζουν τον βέλτιστο σχεδιασμό, καθώς μπορούν να αποτελούν τη μοναδική πηγή φωτός στο OLT και παρέχουν ανεξαρτησία από το μήκος κύματος στο ONU λόγω των χαρακτηριστικά μεγάλων ευρών ζώνης τους (>60-70nm). Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που επιτρέπουν τη μείωση του κόστους κατασκευής, την περαιτέρω μείωση των ρευμάτων οδήγησης και άρα της ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και μικρές διαστάσεις. Επίσης η ολοκλήρωση τους σε φωτονικές πλατφόρμες αποτελεί πλέον μια αξιόπιστη διαδικασία. Το ευρύ φάσμα κέρδους τους κάνει τη λειτουργία τους σχετικά ανεξάρτητη από το μήκος κύματος. Η πολύ γρήγορη δυναμική συμπεριφορά των φορέων προσφέρουν δυνατότητα λειτουργίας και επεξεργασίας σήματος σε υπερυψηλές ταχύτητες (> 100Gb/s). Τέλος, οι απώλειες εισόδου στη σύζευξη με την ίνα είναι σχετικά χαμηλές..

Ειδικότερα οι GaInNAsSb/GaAs SOAs, όπως έχουμε δει, μπορούν λόγω της αναισθησίας τους στις θερμοκρασιακές μεταβολές και την πολύ γρήγορη ανάκαμψη κέρδους που έχει επιδειχθεί μπορούν να αποτελέσουν μία πρώτης τάξεως λύση για την υλοποίηση ONUs με χαμηλό κόστος και λειτουργία σε πολλά μήκη κύματος.

Οι SOAs μπορούν να επιτελέσουν στο ONU τις λειτουργίες της ενίσχυσης, της ανίχνευσης και της διαμόρφωσης του σήματος. Χρησιμοποιούν σε εφαρμογές μετατροπής μήκους κύματος, αναγέννησης σήματος και επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος, με τη χρήση Reflective SOAs (RSOAs).

Ο ανακλαστικός SOA (Reflective SOA-RSOA) φαίνεται στην εικόνα 6.4. Όπως είναι εμφανές, η μοναδική διαφορά με έναν συνηθισμένο SOA έγκειται στο ότι η μία όψη είναι πλήρως ανακλαστική. Έτσι, το εισερχόμενο σήμα εξέρχεται από την ίδια πλευρά που εισέρχεται ενισχυμένο.



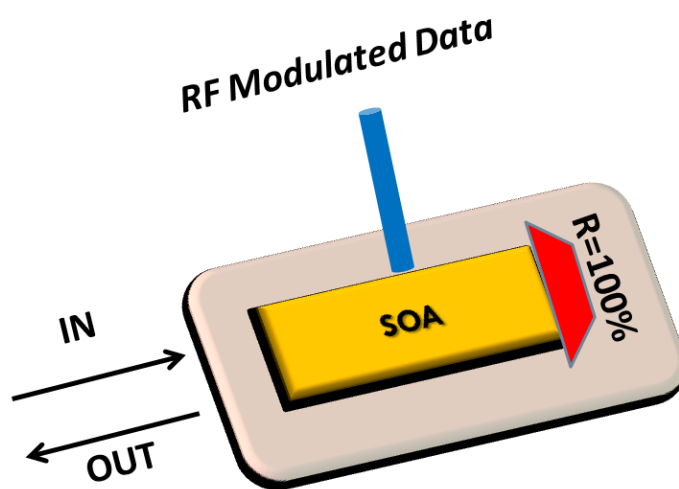
Εικόνα 6.4 Αρχή λειτουργίας SOA και RSOA

Τα ανακλαστικά ONUs το οποία πρωτουλοποιήθηκαν από τα μέσα της δεκαετίας του 90 μπορούν να παρέχουν μία σειρά από εφαρμογές, κάποιες από τις οποίες παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

## 6.2 Προτεινόμενες εφαρμογές

### α) RSOA σαν διαμορφωτής στην πλευρά του ONU

Η απλούστερη εφαρμογή είναι η χρήση ενός RSOA σαν οπτικό modem με μονολιθική III-V ολοκλήρωση. Όπως βλέπουμε ένα σήμα εισέρχεται στον RSOA και επαναδιαμορφώνεται μέσω του RF σήματος το οποίο αποτελεί και την πληροφορία που θέλει να στείλει ο χρήστης στο Central Office (CO). Η συγκεκριμένη υλοποίηση απαιτεί τη χρήση ενός αδιαμόρφωτου μήκους κύματος το οποίο φτάνει στο χρήστη. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το downstream που φτάνει στο ONU με χαμηλό πλάτος διαμόρφωσης. Το σήμα επαναδιαμορφώνεται για το upstream με μεγαλύτερο βάθος διαμόρφωσης (ώστε η νέα

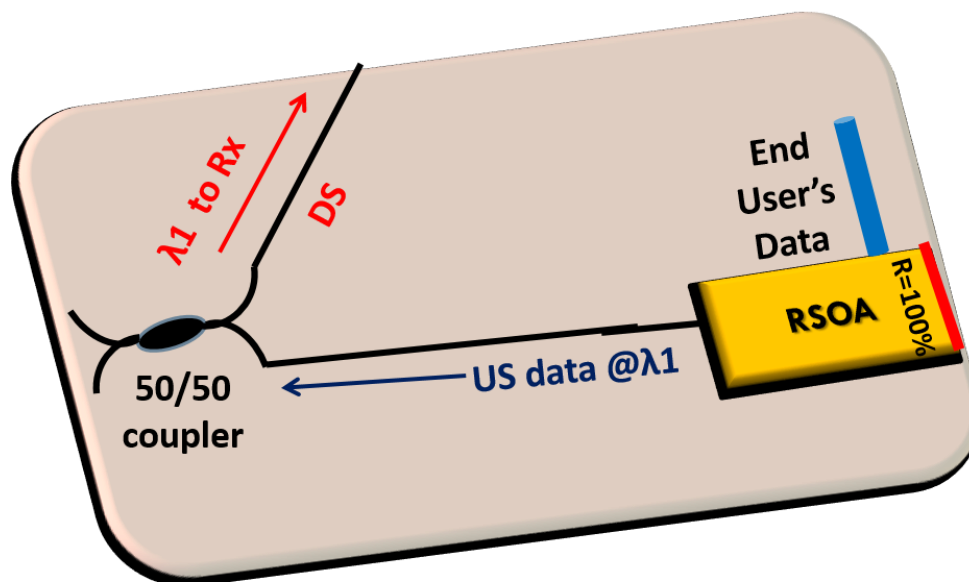


Εικόνα 6.5 Οπτικό modem με χρήση RSOA

διαμόρφωση να υπερισχύει) μέσω της παροχής η όχι ρεύματος οδήγησης. Σχηματικά η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 6.5.

## β) Επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος και λειτουργία modem

Μια πιο σύνθετη εφαρμογή θα μπορούσε να είναι η δημιουργία ενός ONU επαναχρησιμοποίησης του μήκους κύματος του downstream και για το upstream. Η ολοκλήρωση είναι υβριδική, καθώς όλα τα παθητικά στοιχεία εκτός του RSOA μπορούν να υλοποιηθούν σε μια πλατφόρμα Si που προσφέρει αξιόπιστα παθητικά στοιχεία. Το ενεργό στοιχείο της διάταξης που είναι ο RSOA βασισμένο σε τεχνολογία dilute nitrides μπορεί ολοκληρωθεί και να ενταχθεί στην πλατφόρμα Si με αρκετά διαδεδομένες τεχνικές έτερο-ολοκλήρωσης (flip-chip bonding [73]).



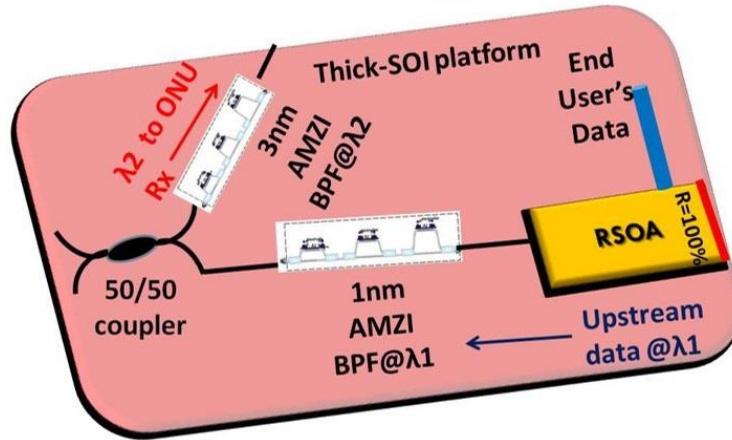
Εικόνα 6.6 Επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος σε ONU

Όπως μπορούμε να δούμε η downstream πληροφορία διαχωρίζεται μέσω ενός 50/50 coupler. Το ένα μέρος της πηγαίνει στο δέκτη του ONU. Το άλλο μπαίνει στον RSOA για επαναδιαμόρφωση, όπως επιδείχτηκε στο προηγούμενο παράδειγμα. Λόγω της χαμηλής ισχύος του εισερχόμενου σήματος, το φέρων κύμα απογυμνώνεται από την προηγούμενη διαμόρφωση του μέσα στον RSOA. Έτσι έχουμε επαναδιαμόρφωση πληροφορίας στο ίδιο μήκος κύματος για τα δύο διαφορετικά ρεύματα επικοινωνίας του χρήστη (Downstream και Upstream).

## γ) Σχεδίαση ONU με χρήση δύο AMZI φίλτρων ( $\lambda_1$ και $\lambda_2$ ) για το downstream και το upstream

Μια άλλη πιθανή υλοποίηση θα μπορούσε να είναι η χρήση δύο διαφορετικών μηκών κύματος,  $\lambda_1$  για το upstream και  $\lambda_2$  για το downstream. Ο 50/50 coupler στέλνει τα εισερχόμενα  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  στον δέκτη του ONU και στον RSOA. Αυτή τη φορά σε κάθε κλάδο το επιθυμητό μήκος κύματος απομονώνεται με χρήση του κατάλληλου φίλτρου. Η διαμόρφωση του upstream γίνεται όπως έχουμε περιγράψει στον RSOA. Τα φίλτρα επίσης επιτελούν τη λειτουργία της

απόρριψης του ASE θορύβου που παράγει ο RSOA βελτιώνοντας την ποιότητα του επανεκπεμπόμενου σήματος από το χρήστη.



Εικόνα 6.7 Σχεδίαση ONU με χρήση δύο φίλτρων

## 7. Σύνοψη σημαντικών αποτελεσμάτων διπλωματικής εργασίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 7.1 Σύνοψη σημαντικών αποτελεσμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε εκτενώς η υιοθέτηση της τεχνολογίας dilute nitrides στην ανάπτυξη αποτελεσματικών Ημιαγωγικών Οπτικών Ενισχυτών (SOAs) οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργά στοιχεία στην ανάπτυξη φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (PICs). Η παρουσίαση της συγκεκριμένης τεχνολογίας εστίασε στο βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου ημιαγωγικού υλικού που έγκειται στην αισθητά μειωμένη εξάρτηση των χαρακτηριστικών εκπομπής τους από τη θερμοκρασία. Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πειραματικών μετρήσεων χαρακτηρισμού και τη διεξαγωγή πειραμάτων αξιολόγησης σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας (Αμιγώς Οπτική Μετατροπή Μήκους Κύματος) των GaInNAs(Sb)/GaAs SOA-chips. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν σε σταθμό εργασίας (probe station) στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα/αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με βάση την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας:

#### 7.1.1 Dilute Nitrides σε τεχνολογία GaAs: III-V τεχνολογίες στη φωτονική ολοκλήρωση

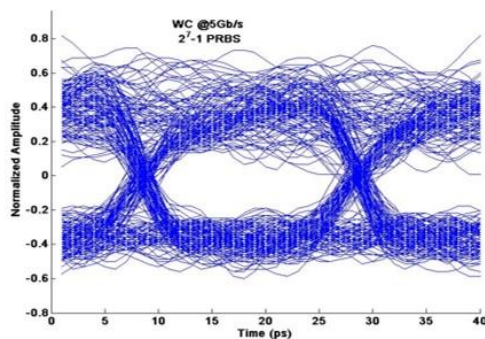
Ενώ το InP (Indium Phosphate) παραμένει η κυρίαρχη προσέγγιση στις III-V πλατφόρμες φωτονικής ολοκλήρωσης, στην οικογένεια των III-V ημιαγωγών αναζητούνται τεχνολογίες υλικών ικανές να προσφέρουν χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, μείωση του κόστους, υψηλής απόδοσης PICs. Στις παραπάνω απαιτήσεις προσπαθεί να απαντήσει η τεχνολογία των dilute nitrides που βασίζεται στην χαμηλού ανηγμένου κόστους ολοκλήρωσης ( $\text{cost}/\text{mm}^2$ ) πλατφόρμα του GaAs. Η υπόσχεση για αναισθησία της λειτουργίας ενεργών οπτικών στοιχείων σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών προσφέρει δραστική περικοπή της ενεργειακής κατανάλωσης λόγω της παρουσίας ενεργοβόρων μηχανισμών ψύξης προσφέροντας ενεργειακή αναβάθμιση ακόμα και μεγαλύτερη του 50% σε ενεργές διατάξεις [78]. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται εκτενώς η εξέλιξη της συγκεκριμένης III-V τεχνολογίας καθώς και τις προκλήσεις που συναντά στην ανάδυση της σαν μια αξιόπιστη επιλογή στην κατηγορία των III-V υλικών που προορίζονται για εφαρμογές φωτονικής ολοκλήρωσης.

### 7.1.2 GaInNAs(Sb)/GaAs: Επιτυχής κατασκευή και πειραματικός χαρακτηρισμός

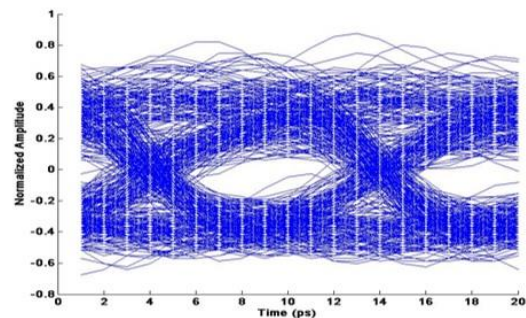
Στη συγκεκριμένη εργασία διερευνήθηκε και αξιολογήθηκε η ανάπτυξη SOAs τεχνολογίας των dilute nitrides που λειτουργούν στα 1300nm (GaInNAs/GaAs) και στα 1550nm (GaInNAsSb/GaAs). Παραθέτοντας τη θεωρία και τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τη λειτουργία των SOAs (φασματικά χαρακτηριστικά κέρδους, στατική/δυναμική συμπεριφορά κέρδους) περιγράφονται στην εργασία πειραματικές τεχνικές αξιολόγησης/χαρακτηρισμού. Τα κυριότερα πειραματικά αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω:

#### α) 1.3μm GaInNAs/GaAs SOA-chips

- +28 dB κέρδος ασθενούς σήματος
- Εύρος ζώνης κέρδους 3-dB πάνω από 50 nm
- Χρόνος ανάκαμψης κέρδους: 203 ps για μέγιστο βάθος διαμόρφωσης, έως και 100 ps για μικρή συμπίεση κέρδους
- Επιτυχημένη μετατροπή μήκους κύματος στα 5 Gb/s και 10 Gb/s



Wavelength Converted @ 5 Gbps

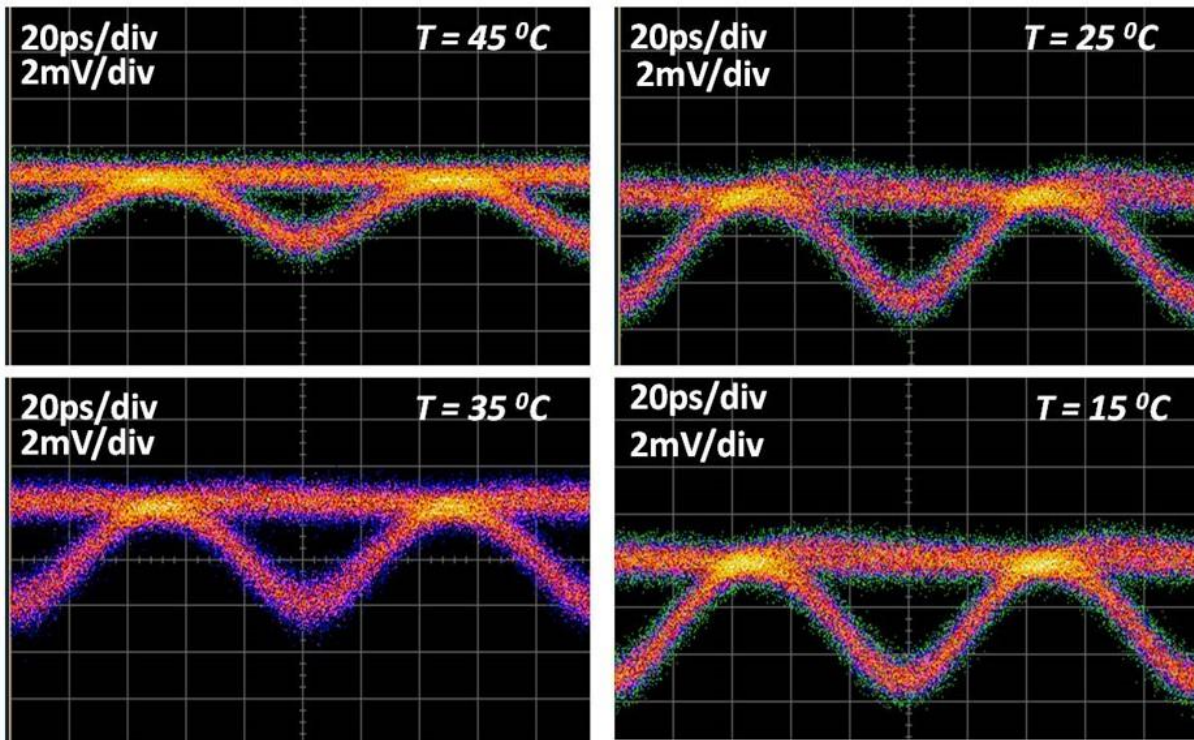


Wavelength Converted @ 10 Gbps

Εικόνα 7.1 Διαγράμματα οφθαλμού NRZ-OOK σημάτων στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητα 5Gb/s (a) και 10Gb/s (b)

#### β) 1.55 μm GaInNAsSb/GaAs SOA-chips

- +12 dB κέρδος ασθενούς σήματος
- Εύρος ζώνης κέρδους 3-dB μέχρι και 76 nm
- Χρόνος ανάκαμψης κέρδους μικρότερος από 50 ps
- Επιτυχής μετατροπή μήκους κύματος στα 10 Gb/s, ακόμα και για υψηλές θερμοκρασίες

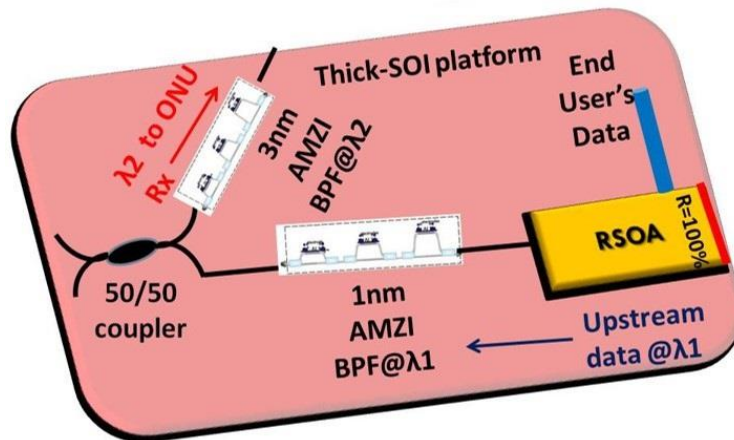


Εικόνα 7.2 Διαγράμματα οφθαλμού RZ-OOK σημάτων στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητα 10Gb/s σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας

Για να διερευνηθεί πειραματικά η συμπεριφορά των συγκεκριμένων SOA-chips ως προς τη θερμοκρασία διεξήχθησαν συγκριτικές μετρήσεις με SOA-chips βασισμένα σε τεχνολογία InP. Τα αποτελέσματα προερχόμενα από τις στατικές καμπύλες θορύβου ASE έδειξαν πως το συγκεκριμένο υλικό υπερτερεί αισθητά έναντι του InP στη δυνατότητα του να λειτουργεί σε θερμοκρασιακό εύρος διατηρώντας τα χαρακτηριστικά κέρδους του.

### 7.1.3 Πιθανά σενάρια εφαρμογών dilute-nitride SOAs σε εφαρμογές οπτικών δικτύων πρόσβασης (Optical Access Networks)

Με βάση τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία των dilute nitrides στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε να παρουσιαστεί η υλοποίηση φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εφοδιασμένων με GaInNAsSb SOAs ικανά να προσφέρουν υψηλής απόδοσης λειτουργίες για εφαρμογές οπτικών δικτύων πρόσβασης, ένα πεδίο στο οποίο η παράμετρος του κόστους και της ενεργειακής κατανάλωσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμες.



Εικόνα 7.3 Χρήση ανακλαστικού SOA σε ONU σε παθητικό οπτικό δίκτυο

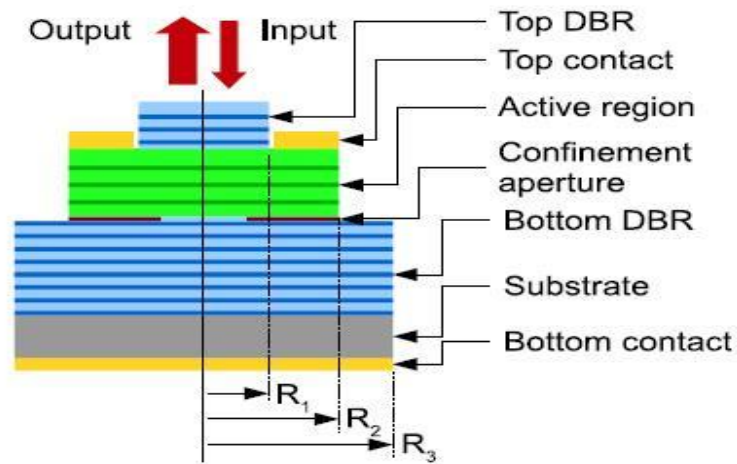
## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής αναδείχθηκε η οικογένεια των dilute nitrides σαν μια δυνητική πλατφόρμα ολοκλήρωσης ενεργών οπτικών στοιχείων για να εφοδιάσουν ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα. Ωστόσο, στη μελλοντική ερευνητική γραμμή αξίζει να προταθεί η υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας για την υλοποίηση ολοκληρωμένων δομών με βάση τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από αυτήν. Ενδεικτικά αναφέρουμε δύο πεδία εφαρμογής που αξίζει να αναδειχθούν:

### α) Vertical Cavity SOAs (VCISOAs)

Οι VCISOAs μπορεί να θεωρηθούν και ως η φυσική εξέλιξη των SOAs προσφέροντας γρήγορη απόκριση, μειωμένο κόστος και κυρίως χαμηλά ρεύματα κατωφλίου μειώνοντας με τον τρόπο αυτό δραματικά την απαραίτητη ισχύ οδήγησης της συσκευής. Ήδη έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία αρκετές εφαρμογές επεξεργασίας σήματος, οπτικής μεταγωγής κ.α. που βασίζονται στη χρήση VCISOAs [79]. Το ερευνητικό group του Πολυτεχνείου του Tampere δημοσίευσε πρόσφατα έναν υψηλής απόδοσης dilute nitride VCISOA στα  $1.3\mu\text{m}$  [80]. Η δομή που κατασκευάστηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 7.1.





Εικόνα 7.4 Δομή GaInNAs VCSCOA που δημοσιεύτηκε πρόσφατα από το group του TUT [79]

### β) GaInNAs(Sb)/GaAs laser χαμηλού θορύβου φάσης (low-linewidth) για εφαρμογές σε σύμφωνα σχήματα μετάδοσης (coherent schemes)

Η ανάγκη για χαμηλού linewidth laser έχει αναδειχθεί σαν κρίσιμος παράγοντας στην υλοποίηση οπτικών σύμφωνων συστημάτων. Η ανάπτυξη χαμηλού κόστους πηγών με χαμηλό θόρυβο φάσης οι οποίες θα εφοδιάσουν τα σύμφωνα συστήματα αποτελεί προτεραιότητα για την ερευνητική κοινότητα. Σε αυτή τη γραμμή, αξίζει να μελετηθεί η επίδοση της τεχνολογίας dilute-nitrides για την ανάπτυξη πηγών που θα χρησιμοποιηθούν σαν τοπικοί ταλαντωτές (Local Oscillators-LO) σε σχήματα σύμφωνης λήψης προηγμένων σχημάτων διαμόρφωσης.

## 8. Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] C.A. Mack, "Fifty Years of Moore's Law", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.24, No.2, pp.202-207, May 2011.
- [2] Wikipedia, en.wikipedia.org
- [3] Cutler, M. , Mott, N, "Observation of Anderson Localization in an Electron Gas". Physical Review 181 (3): 1336 , 1969
- [4] Charles Kittel, "Introduction to Solid State Physics", 7th ed. Wiley, 1995
- [5] N.W. Ashcroft and N.D. Mermin, Solid State Physics, Brooks Cole, 1976
- [6] Koenraad, Paul M.; Flatté, Michael E. (2011). "Single dopants in semiconductors". Nature Materials 10(2): 91–100, 2011
- [7] B.G. Yacobi, "Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles", Springer 2003 ISBN 0306473615, pp. 1–3
- [8] Agrawal, G.P, "Fiber-Optic Communications Systems", 3 ed. Wiley, 2002
- [9] B. Saleh and M. Teich, "Fundamental of Photonics", Wiley, New York, 1991, Chaps. 15 and 16
- [10] S. L. Chuang, "Physics of Optoelectronic Devices", Wiley, New York, 1995
- [11] M. G. A. Bernard and G. Duraffourg, "Phys. Status Solidi 1", 699 (1961)
- [12] Shockley, William (1949). "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors". Bell System Technical Journal 28 (3): 435–489
- [13] A. A. M. Saleh et al., "Modelling of gain in erbium-doped fiber amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett. 2 (10), 714 (1990)
- [14] R. I. Laming et al., "Efficient pump wavelengths of erbium-doped optical fiber amplifier", Electron. Lett. 25, 12 (1989)
- [15] V. V. Raman and K. S. Krishnan, "A new type of secondary radiation", Nature 121, 501 (1928)
- [16] A. J. Stentz, "Applications of Raman lasers and amplifiers in fiber communication systems", Proc. SPIE 3263, 91 (1998)
- [17] G. P. Agrawal, "Population pulsations and nondegenerate four wave mixing in semiconductor lasers and amplifiers," J. Opt. Society Amer. B, vol. 5, No. 1, pp. 147-159, 1988.
- [18] S. Diez, "All-optical signal processing by gain-transparent semiconductor switches", PhD Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000
- [19] M. J. Adams et al., "Nonlinearities in semiconductor laser amplifiers", Opt. Quantum Electron., vol. 27, No. 1, pp. 1-13, 1995.
- [20] J. L. Oudar et al., "Subpicosecond spectral hole burning due to non-thermalized photoexcited carriers in GaAs", Phys. Rev. Lett., vol. 55, No. 19, pp. 2074-2077, 1985.

- [21] K. L. Hall et al., “Sub-picosecond gain and index nonlinearities in InGaAsP diode lasers”, *Opt. Commun.*, vol. 111, No. 5-6, pp. 589-612, 1994.
- [22] G. P. Agrawal et al., “Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, No. 11, pp. 2297-2306, 1989.
- [23] M. Eiselt et al., “SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, pp. 2099-2112, Oct. 1995.
- [24] G. Eisenstein et al., “Gain recovery time of traveling-wave semiconductor optical amplifiers”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, No. 5, pp. 454-456, 1989.
- [25] F. Girardin et al., “Gain recovery of bulk semiconductor optical amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, No. 6, pp. 784-786, 1998.
- [26] R. J. Manning et al., “Three-Wavelength device for all-optical signal-processing”, *Opt. Lett.*, vol. 19, No. 12, pp. 889-891, 1994.
- [27] R. J. Manning et al., “Enhanced recovery rates in semiconductor-laser amplifiers using optical-pumping”, *Electron. Lett.*, vol. 30, No. 10, pp. 787-788, 1994.
- [28] M. Usami et al., “Mechanism for reducing recovery time of optical nonlinearity in semiconductor laser amplifier”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, No. 21, pp. 2657-2659, 1998.
- [29] J. L. Pleumeekers et al., “Acceleration of gain recovery in semiconductor optical amplifiers by optical injection near transparency wavelength”, *IEEE Photon. Technol.*, vol. 14, pp. 12–14, Jan. 2002
- [30] R. Inohara et al., “Experimental analysis of cross-phase modulation and cross-gain modulation in SOA-injecting CW assist light”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp. 1192-1194, Sept. 2003
- [31] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, “*Electrodynamics of continuous media*”, Pergamon Press, 1960
- [32] C. H. Henry, “Theory of the linewidth of semiconductor lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, No. 2, pp. 259-264, 1982.
- [33] K. Petermann, “*Laser diode modulation and noise*”, Kluwer Academic Publishers, KTK Scientific Publishers/Tokyo, 1991
- [34] X. E. Μπίντζας, “Αμιγώς οπτική μεταγωγή και δρομολόγηση δεδομένων σε ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα”, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003
- [35] J. M. Tang et al., “Analysis of the characteristics of TOAD’s subject to frequency-detuned control and signal picosecond pulses”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, No. 11, pp. 1704-1712, 1999.
- [36] M. Y. Hong et al., “Femtosecond self-and cross-phase modulation in semiconductor laser amplifiers”, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 2, No. 3, pp. 523-539, 1996.
- [37] R. Gutierrez-Castrejon et al., “Modeling and Measurement of Longitudinal Gain Dynamics in Saturated Semiconductor Optical Amplifiers of Different Length”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, No. 12, pp. 1476-1484, 2000.
- [38] C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, D. Kalavrouziotis, I. Lazarou, K. Vyrsokinos, L. Zimmermann, K. Voigt, G. B. Preve, L. Moerl, J. Kreissl, and H. Avramopoulos, “Fabrication and experimental

demonstration of the first 160Gb/s hybrid silicon-on-insulator integrated all-optical wavelength converter”, Optics Express, Vol.20, Issue 4, pp. 3825-3831, 01 February 2012.

[39] M. Spyropoulou, M. Bougioukos, G. Giannoulis, Christos Kouloumentas, D. Kalavrouziotis, Alexandros Maziotis, P. Bakopoulos, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A. Poustie, G. Maxwell, and Hercules Avramopoulos, “Large-Scale Photonic Integrated Circuit for Multi-Format Regeneration and Wavelength Conversion”, in Proc. of OFC’2011 Conference, OThY2 paper, March 6-10, Los Angeles, CA, USA.

[40] Hyun-Soo Kim et al, “Improvement of modulation bandwidth in multisection RSOA for colorless WDM-PON”, Optics Express, Vol. 17, Issue 19, pp. 16372-16378 (2009).

[41] Housseem Brahmi, Giannis Giannoulis, Mourad Menif, Vasilis Katopodis, Dimitrios Kalavrouziotis, Christos Kouloumentas, Panos Gkroumas, Giannis Kanakis, Christos Stamatiadis, Hercules Avramopoulos, Didier Erasme, “On the fly all-optical packet switching based on hybrid WDM/OCDMA labeling scheme”, Elsevier Optics Communications, Vol.312, pp.175-184, 01 February 2014.

[42] Marika Immonen, “Development of Optical Interconnect PCBs for High-Speed Electronic Systems – Fabrication’s view”, in Proc. of Workshop on Technologies for Short Reach Optical Interconnects, WS4, ECOC 2013, 22 September 2013, London, UK.

[43] Bert Jan Offrein, “Trends in Optical Interconnects for Computing Applications”, in Proc. of Workshop on Technologies for Short Reach Optical Interconnects, WS4, ECOC 2013, 22 September 2013, London, UK.

[44] Infinera, “Photonic Integrated Circuit : A technology and applications premier”

[45] "Silicon Photonics" Intel Technology Journal, Volume 08, Issue 02. 10 May 2004.

[46] Zia, Rashid; Schuller, Jon A.; Chandran, Anu; Brongersma, Mark L. (2006). "Plasmonics: The next chip-scale technology". *Materials Today* 9 (7–8): 20.

[47] G. Roelkens, J. Brouckaert, J. Van Campenhout, D. Van Thourhout, R. Baets “Heterogeneous III-V/Silicon Photonics: Bonding Technology and Integrated Devices”

[48] Bogaerts, W., et al., Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology. *Journal of Lightwave Technology*, 2005. 23(1): p. 401-412.

[49] Pavesi, L., Will silicon be the photonic material of the third millenium? *Journal of Physics-Condensed Matter*, 2003. 15(26): p. R1169-R1196.

[50] Rong, H.S., et al., Monolithic integrated Raman silicon laser. *Optics Express*, 2006. 14(15): p. 6705-6712.

[51] Infinera, “The Dawn of the Terabit Age, Developments in Photonic Integration and Scaling of the Digital Optical Network”

[52] P.C. Schindler et al, “Monolithic GaAs Electro-Optic IQ Modulator Demonstrated at 150 Gb/s with 64-QAM”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 32, No.4, pp. 760-765, February 15, 2014.

[53] R.R. King et al, “High-Voltage, Low-Current GaInP/GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge Solar Cells”, presented at the 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 20-24, New Orleans, Louisiana, USA.

- [54] Alexander Gubanov et al, "Dynamics of time-resolved photoluminescence in GaInNAs and GaNAsSb solar cells", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 9, No.80, 17 February 2014.
- [55] Chang Kyu Kim and Yong Hee Lee, "Thermal characteristics of optical gain for GaInNAs Quantum Wells at 1.3 $\mu$ m", *AIP Applied Physics Letters*, Vol.79, No.19, pp.3038-3040, 05 November, 2001
- [56] M. Dumitrescu, M. Wolf, K. Schulz, Y.Q. Wei, G. Adolfsson, J. Gustavsson, J. Bengtsson, M. Sadeghi, S. Wang, A. Larsson, J. Lim, E. Larkins, P. Melanen, P. Uusima and M. Pessa, "10 Gb/s Uncooled Dilute-Nitride Optical Transmitters Operating at 1.3  $\mu$ m", in *Proc. of Optical Fiber Communication (OFC) 2009, OWJ7 (2009)*.
- [57] D. Fitsios, G. Giannoulis, N. Iliadis, V.-M. Korpijärvi, J. Viheriälä, A. Laakso, S. Dris, M. Spyropoulou, H. Avramopoulos, G.T. Kanellos, N. Pleros and M. Guina, "High Gain 1.3- $\mu$ m GaInNAs SOA with Fast Gain Dynamics and Enhanced Temperature Stability", in *Proc. of SPIE Photonics West 2014, SPIE 8982, Optical Components and Materials XI, 898208, March 07 2014, San Francisco, CA, USA*.
- [58] V.M. Korpijärvi, D. Fitsios, G. Giannoulis, J. Viheriälä, J. Mäkelä, A. Laakso, N. Iliadis, M. Spyropoulou, G.T. Kanellos, N. Pleros, M. Guina, "GaInNAsSb/GaAs semiconductor optical amplifiers and laser diodes", in *Proc. of COST MP0805, Novel Gain Materials and Devices Based on III-V-N/Bi Compounds, P18, 24-26 September 2013, Istanbul, Turkey*.
- [59] A.Borghesani, I.F. Lealman, A.Poustie, D.W. Smith and R.Wyatt, "High Temperature, Colourless Operation of a Reflective Semiconductor Optical Amplifier for 2.5Gb/s upstream transmission in a WDM-PON", in *Proc. of ECOC'07 Conference, 16-20 September 2007, Berlin, Germany*.
- [60] N.Pleros, C. Bintjas, M. Kalyvas, G. Theofilopoulos, K. Yiannopoulos, S. Sygletos and H. Avramopoulos, "Multiwavelength and Power Equalized SOA Laser Sources", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.14, No.5, pp.693-695, May 2002.
- [61] J. Hashimoto, K. Koyama, T. Katsuyama, Y.Iguchi, T. Yamada, S. Takagishi, M. Ito, and A. Ishida, "1.3 $\mu$ m travelling-wave GaInNAs semiconductor optical amplifier," in *Proc. of Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) 2003, WB3 (2003)*.
- [62] I. Armstrong, I. Andonovic, A. Kelly, "Semiconductor Optical Amplifiers: performance and applications in optical packet switching", *OSA Journal of Optical Networking*, Vol.3, Issue 12, pp.882-897, Dec.3 2004.
- [63] Lorenzo Occhi, "Semiconductor Optical Amplifiers made of Ridge Waveguide Bulk InGaAsP/InP: Experimental Characterization and Numerical Modelling of Gain, Phase and Noise", *Dissertation Thesis submitted to ETH-Zurich, Diss. ETH No.14788, Zurich, 2002*.
- [64] Freude et al, "All-Optical Processing of Novel Modulation Formats Using Semiconductor Optical Amplifiers", in *Proc. of Frontiers in Optics Conference, FTuV1, October 10, 2006, New York, NY, USA*.
- [65] Occhi L. et al, "Intraband gain dynamics in bulk semiconductor optical amplifiers: measurements and simulations", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.38, Issue 1, pp.54-60, January 2002.
- [66] Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto and Tetsuya Kawanishi, "Wavelength Conversion of optical 64QAM through FWM in HNLF and its performance optimization by constellation monitoring", *OSA Optics Express*, Vol. 22, Issue 1, pp. 15-22, 13 January 2014.

- [67] Benoit Filion et al, "Wideband Wavelength Conversion of 16Gbaud 16-QAM Signals in a Semiconductor Optical Amplifier", in Proc. of Optical Fiber Communication (OFC)'13 Conference, paper OTh1C, March 17-21 2013, Anaheim, CA, USA.
- [68] J.M.H. Elmirighani and H.T. Mouftah, "All-Optical Wavelength Conversion: Technologies and Applications in DWDM Networks", IEEE Communications Magazine, Vol.38, Issue 3, pp.86-92, March 2000.
- [69] D. Nasset, T. Kelly and D. Marcenac, "All-Optical Wavelength Conversion using SOA Nonlinearities", IEEE Communications Magazine, Vol.14, No.6, pp. 942-954, December 1998.
- [70] Xinliang Zhang, Xi Huang, Jianji Dong, Yu Yu, Jing Xu and Dexiu Huang, "All-Optical Signal Processing with Semiconductor Optical Amplifiers and Tunable Filters", chapter 16 of Open Access Book: 'Advances in Lasers and Electro Optics', ISBN 978-953-307-088-9, April 1, 2010.
- [71] Y.Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, S. Zhang, H. de Waardt, G.D. Khoe and H.J.S. Dorren, "Error-free all-optical wavelength conversion at 160Gb/s using a semiconductor optical amplifier and an optical bandpass", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.24, No.1, pp. 230-236, March 2006.
- [72] Rene Schmogrow et al, "Error Vector Magnitude as a Performance Measure for Advanced Modulation Formats", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.24, No.1, pp.61-63, January 1, 2012.
- [73] Martin J.R. Heck et al, "Hybrid Silicon Photonics for Optical Interconnects", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.17, Issue 2, pp. 333-346, 05 August 2010.
- [74] <http://www.ict-ramplas.eu/>
- [75] <http://www.ict-boom.eu/>
- [76] <http://www.ict-galactico.eu/>
- [77] V.M. Korpijärvi, A. Aho, P.Laukkanen, A.Tukiainen, A.Laakso, M.Tuominen and M.Guina, "Study of nitrogen incorporation into GaInNAs: The role of growth temperature in molecular beam epitaxy", AIP Journal of Applied Physics, Vol.112, No.023504, 18 July 2012.
- [78] S. Tanaka et al, "Compact, Very-Low Electric Power Consumption (0.84W) 1.3 $\mu$ m Optical Amplifier Module Using AlGaInAs MQW-SOA", presented at ECOC'10, 19-23 September, 2010, Torino, Italy
- [79] A.M. Kaplan, G.P. Agrawal and D.N. Maywar, "All-Optical flip-flop operation of VCSEA", IET Electronic Letters, Vol.45, No.2, 15 January 2009
- [80] S.B. Lisesivdin et al, "Optical gain in 1.3 $\mu$ m electrically driven dilute nitride VCSEAs", Springer Nanoscale Research Letters, 2014, 9:22
- [81] Christos Stamatiadis, Konstantinos Vyrsoinos, Leontios Stampoulidis, Ioannis Lazarou, Bernhard Schrenk, Arne Leinse, Rene Heideman, Christiaan Bruinink, Edwin Jan Klein, and Hercules Avramopoulos, "Fabrication and experimental demonstration of the first 160 Gb/s hybrid silicon-on-insulator integrated all-optical wavelength converter", Journal of Lightwave Technology, Vol. 29, Issue 12, pp. 1886-1891 (2011)

[82] George T. Kanellos, Dimitrios Fitsios, Theonitsa Alexoudi, Christos Vagionas, Amalia Miliou, and Nikos Pleros, "Bringing WDM into optical static RAM architectures", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, Issue 6, pp. 988-995 (2013)