



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση των λείζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση
επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.**

Φοιτητής: Ντάνιελ Μπίτα

Αριθμός Μητρώου: 50346087

Επιβλέπων Καθηγητής

Ηρακλής Σίμος

Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

Diploma Thesis

Investigation of mode-locked lasers for processing short-pulse optical signals.

Student: Daniel Bitá

Registration Number: 50346087

Supervisor

Hercules Simos

Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2020

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή, Μήνας, Έτος

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία _____
(Ονοματεπώνυμο φοιτητή)

(Υπογραφή)

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία ερευνώνται οι δυνατότητες ενός laser εγκλείδωσης ρυθμών στην επεξεργασία οπτικών σημάτων μεγάλης ταχύτητας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιείται η λογική των νευρωνικών δικτύων τα οποία είναι σύγχρονα εργαλεία επεξεργασίας σημάτων. Αρχικά, όμως, μελετάται ο νευρώνας ως βιολογικό στοιχείο και αναλύονται η δομή, η συμπεριφορά του και οι λειτουργίες του. Ύστερα γίνεται προσομοίωση και περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων που διέπουν την συμπεριφορά τους. Έπειτα αναλύεται η δομή ενός laser εγκλείδωσης ρυθμών, ως βασική μονάδα ενός οπτικού νευρωνικού δικτύου, προσομοιώνεται και εξετάζεται η λειτουργία του μέσω του μοντέλου υστερημένης διαφορικής εξίσωσης. Οι βασικές λειτουργίες του νευρώνα προσομοιώνονται μέσω του laser αυτού και τέλος ένα παράδειγμα νευρωνικού δικτύου υλοποίησης της XOR πύλης μελετάται εξ' ολοκλήρου.

Λέξεις – κλειδιά

Νευρωνικό δίκτυο, φωτονικό νευρωνικό δίκτυο, laser εγκλείδωσης ρυθμών, MLL, νευρώνας, δυναμικό δράσης, παλμοί, XOR πύλη.

Abstract

The potential of mode locked lasers to be used as devices for ultra fast processing of signals is investigated. This is achieved by comparing the device with neurons and introducing the concept of neural network which is a modern and reliable way of processing. Firstly, the structure, the behavior and operation of a biological neuron are examined. The mathematical models that follow the behavior of neurons are presented and analyzed. Next, the structure and operation of mode locked lasers is examined theoretically and analytically using a delay differential equation model. The comparison between the model and the expected behavior is shown. The main dynamics of a neuron are introduced and emulated by a mode locked laser. Finally, an example of optical neural network implementing the XOR gate is built and studied from scratch.

Keywords

Neural network, photonic neural network, mode locked laser, MLL, neuron, action potential, pulse, XOR gate.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ I: Νευρώνας.....	3
1.1 Δομή ενός Νευρώνα.....	3
1.2 Δυναμικό Μembrάνης.....	5
1.2.1 Δυναμικό Ηρεμίας.....	5
1.2.2 Συναπτικό Δυναμικό.....	6
1.3 Δυναμικό Δράσης.....	7
1.4 Τύποι Νευρώνων.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: Μοντέλα Νευρώνων.....	17
2.1 Integrate and Fire Μοντέλα.....	17
2.1.1 Leaky Integrate and Fire.....	17
2.1.2 Μη γραμμικό Integrate and Fire.....	19
2.1.3 Εκθετικό Integrate and Fire.....	19
2.1.4 Τετραγωνικό Integrate and Fire.....	20
2.1.5 Προσαρμοζόμενο Εκθετικό Integrate and Fire.....	21
2.1.6 Integrate and Fire or Burst Model (IFB).....	22
2.1.7 Resonate and Fire Model.....	25
2.2 Άλλα Μοντέλα.....	25
2.2.1 Hodgkin-Huxley Model.....	25
2.2.2 FitzHugh-Nagumo Model.....	26
2.2.3 Morris-Lecar Model.....	28
2.2.4 Hindmarsh-Rose Model.....	31
2.2.5 Wilson Model.....	32
2.2.6 Izhikevich Model.....	35
Κεφάλαιο III: Laser Παθητικής Εγκλειδωσης Ρυθμών.....	37
3.1 Υλικά για S.A.....	41
3.2 Δυναμική του Passively Mode Locked Laser.....	41
3.3 Χαρακτηριστικά του Mode Locked Laser.....	42
3.3.1 Ρυθμός Επανάληψης (Repetition Rate).....	42
3.3.2 Εύρος & Μορφή Παλμού (Pulse Shape & Width).....	43
3.3.3 Μήκος Κύματος & Φάσμα Λειτουργίας.....	44

3.4 Μοντέλο Laser Εγκλειδωμένων Ρυθμών.....	45
3.5 Προσομοίωση του μοντέλου.....	48
3.6 Απόκριση του μοντέλου με αλλαγή του φίλτρου.....	50
3.7 Απόκριση του μοντέλου με αλλαγή στον χρόνο ανάκτησης φορέων του SA.....	52
3.8 Απόκριση του μοντέλου με αλλαγή του ρεύματος άντλησης.....	53
Κεφάλαιο IV: Προσομοίωση του νευρώνα με Mode Locked Laser.....	55
4.1 Περίοδος Αδράνειας (Refractory Period).....	56
4.2 Συνάρτηση Ενεργοποίησης (Activation Function).....	57
4.3 Ολοκλήρωση (Integration).....	58
4.6 Σάρωση στην Ισχύ.....	62
4.7 Σάρωση στην Συχνότητα.....	67
Κεφάλαιο V: Προσομοίωση Νευρωνικού Δίκτυο Με Lasers.....	69
5.1 Βάρη (Weights).....	70
5.2 Συνάψεις (Synapses).....	71
5.3 Εκμάθηση (Training).....	71
5.4 Φωτονικό Νευρωνικό Δίκτυο.....	72
6 Συμπεράσματα και Συζήτηση.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81
Κατάλογος Πινάκων	
Table 1.1: Κύριος Άξονας Καλαμαριού.....	4
Table 1.2: Νευρώνας Θηλαστικού.....	4
Table 2.1: Τιμές των παραμέτρων ανάλογα με την συμπεριφορά του νευρώνα.....	23
Table 2.2: Παράμετροι για το IFB μοντέλο.....	26
Table 2.3: Τιμές Νευρώνα του Wilson.....	34
Table 2.4: Τιμές IB νευρώνα.....	35
Table 3.1: Ρυθμός Επανάληψης συναρτήσεως του μήκους της κοιλότητας.....	46
Table 3.2: Τιμές της προσομοίωσης για Quantum Well Mode Locked Laser.....	52
Table 6.1: Τιμές της προσομοίωσης του CW DFB Laser.....	86

Κατάλογος Εικόνων

Figure 1.1: Η ανατομία ενός τυπικού πολυπολικού (multipolar) νευρώνα.....	3
Figure 1.2: Η δομή της μεμβράνης ενός κυττάρου.....	5
Figure 1.3: Το δυναμικό μεμβράνης ενός νευρώνα.....	8
Figure 1.4: Η διάδοση σε άξονα με στρώση μυελίνης.....	9
Figure 1.5: Διάδοση του δυναμικού δράσης κατά μήκος του άξονα.....	10
Figure 1.6: Διάφοροι τύποι νευρώνων ανάλογα με την δομή τους.....	11
Figure 1.7: Οι διαφορετικές συμπεριφορές νευρώνων σε διάφορες εισόδους.....	13
Figure 2.1: Το κυκλωματικό ανάλογο της μεμβράνης.....	18
Figure 2.2: Το κυκλωματικό ανάλογο με τη τιμή του δυναμικού ηρεμίας.....	19
Figure 2.3: Διαγράμματα του αριθμού των δυναμικών δράσης και της συχνότητας αυτών συναρτήσει του ρεύματος στον νευρώνα.....	21
Figure 2.4: Το δυναμικό της μεμβράνης παρουσίας σταθερού ρεύματος στο μοντέλο Exponential IF.	21
Figure 2.5: Το δυναμικό της μεμβράνης παρουσίας σταθερού ρεύματος στο μοντέλο Quadratic IF.	22
Figure 2.6: Δυναμικό δράσης στο IFB μοντέλο.....	25
Figure 2.7: Το κύκλωμα του μοντέλου Hodgkin-Huxley.....	28
Figure 2.8: Δυναμικό δράσης στο Hodgkin-Huxley μοντέλο.....	29
Figure 2.9: Το κυκλωματικό ανάλογο του μοντέλου FitzHugh-Nagumo.....	29
Figure 2.10: Γραφική απεικόνιση του μοντέλου FitzHugh-Nagumo.....	30
Figure 2.11: Το ανάλογο κύκλωμα του μοντέλου Morris-Lecar.....	32
Figure 2.12: Το δυναμικό της μεμβράνης με είσοδο σταθερού ρεύματος.....	32
Figure 2.13: Γραφική παράσταση του δυναμικού της μεμβράνης.....	33
Figure 2.14: Το κυκλωματικό ανάλογο του μοντέλου του Wilson.....	36
Figure 2.15: Η απόκριση του δυναμικού μεμβράνης στο μοντέλο Wilson με είσοδο ένα συνεχές ρεύμα.....	37
Figure 2.16: Τιμές των παραμέτρων ανάλογα με την συμπεριφορά του νευρώνα.....	38
Figure 2.17: Οι δυνατότητες του κάθε μοντέλου σε κάθε συμπεριφορά των νευρώνων.....	39
Figure 2.18: Το δυναμικό μεμβράνης για ένα RS νευρώνα.....	39
Figure 3.1: Απλοποιημένο διάγραμμα της δομής ενός Laser.....	40
Figure 3.2: Α Το φάσμα ενός ενεργού υλικού.....	41
Figure 3.3: Άθροισμα 5 κυμάτων με σταθερή διαφορά συχνότητας.....	42
Figure 3.4: Διάγραμμα ενός απλού passively MLL.....	43
Figure 3.5: Γραφική παράσταση της δημιουργίας ενός παλμού.....	45
Figure 3.6: Εύρος ενός παλμού.....	47
Figure 3.7: Διάγραμμα του μαθηματικού μοντέλου.....	49
Figure 3.8: Γραφική παράσταση της συμπεριφοράς του FWHM με την αύξηση του Bandwidth... ..	55
Figure 3.9: Η μορφή τριών παλμών ύστερα από τέτοιο χρόνο ώστε το laser να έχει σταθεροποιηθεί	55

Figure 3.10: Γραφική παράσταση της αλλαγής του FWHM με τον χρόνο ανάρρωσης του SA με BandWidth.....	56
Figure 4.1: Διάγραμμα λειτουργίας ενός απλού νευρώνα.....	58
Figure 4.2: Παλμοί από ένα Mode Locked Laser.	59
Figure 4.3: Δυναμικά δράσης από το μοντέλο Hudgkin & Huxley.....	60
Figure 4.4: Α Συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα. Β Συνάρτηση ενεργοποίησης του MLL. .	61
Figure 4.5: Διάγραμμα για την αναπαράσταση της δυνατότητας της άθροισης του νευρώνα.....	62
Figure 4.6: Διάγραμμα για την αναπαράσταση της δυνατότητας της άθροισης του MLL.....	63
Figure 4.7: Απλοποιημένο διάγραμμα της έγχυσης ενός CW laser σε ένα Mode locked laser.	65
Figure 4.8: Πειραματικό διάγραμμα για το κλείδωμα ενός slave laser στο master.....	65
Figure 4.9: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της ισχύος εισόδου του master στον κεντρικό τρόπο.....	66
Figure 4.10: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της ισχύος εισόδου του master στον 20ο τρόπο.....	68
Figure 4.11: Οπτικό φάσμα του MLL. Η κεντρική συχνότητα είναι κανονικοποιημένη στα 0 Hz..	69
Figure 4.12: Ισοδύναμο οπτικού φίλτρου.....	70
Figure 4.13: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της ισχύος εισόδου του master στον 20ο τρόπο μετά το φίλτρο.....	71
Figure 4.14: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της συχνότητας εισόδου του master στον 20ο τρόπο.....	72
Figure 5.1: Συνάρτηση ενεργοποίησης για οπτική είσοδο.....	73
Figure 5.2: Β Διάγραμμα της απόκρισης της φωτοδιάδου συναρτήσει της ισχύος πρόσπτωσης.....	74
Figure 5.3: Οπτική σύναψη.....	75
Figure 5.4: Διάγραμμα προσαρμογής τυχαίων πειραματικών δεδομένων μέσω νευρωνικού δικτύου	77
Figure 5.5: Διάγραμμα ενός οπτικού νευρωνικού δικτύου με MLLs.....	78
Figure 5.6: Οπτικό νευρωνικό δίκτυο για την προσομοίωση της XOR πύλης.....	78
Figure 5.7: Η σύναψη 11 η οποία συνδέει τον πρώτο νευρώνα εισόδου με τον πρώτο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.....	79
Figure 5.8: Η σύναψη 21 η οποία συνδέει τον δεύτερο νευρώνα εισόδου με τον πρώτο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.....	79
Figure 5.9: Η σύναψη 12 η οποία συνδέει τον πρώτο νευρώνα εισόδου με τον δεύτερο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.....	80
Figure 5.10: Η σύναψη 22 η οποία συνδέει τον δεύτερο νευρώνα εισόδου με τον δεύτερο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.....	80
Figure 5.11: Η σύναψη h1 η οποία συνδέει τον πρώτο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας με τον νευρώνα εξόδου.....	80
Figure 5.12: Η σύναψη h2 η οποία συνδέει τον δεύτερο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας με τον νευρώνα εξόδου.....	81
Figure 5.13: Ο νευρώνας εξόδου, έχοντας ως εισόδους τις δύο εξόδους από την κρυφή βαθμίδα....	82

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδώσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

Figure 5.14: Διάγραμμα των υπόλοιπων πιθανών εισόδων σε μία πύλη XOR.....	82
Figure A.1: Γραφική παράσταση της ισχύος εντός του Laser με το ρεύμα άντλησης.....	85
Figure A.2: Ηλεκτρικό φάσμα του Laser.....	85

Ακρωνύμια

MLL	Mode Locked Laser
CW	Continuous Wave
SA	Saturable Absorber
GS	Gain Section
ISO	Optical Isolator
PC	Polarization Controller
MZM	Mach-Zehnder Modulator

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την εφεύρεση του transistor το 1947 [1] και ειδικότερα του MOSFET το 1959 [2] έως σήμερα, τα ψηφιακά ηλεκτρονικά είναι πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του ανθρώπου. Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια η μείωση της τιμής και η αύξηση της ισχύος έχει εκτοξεύσει την χρήση ψηφιακών συστημάτων σε κάθε τομέα. Για δεκαετίες ο αριθμός των transistor σε κάθε υπολογιστική μονάδα σχεδόν διπλασιαζόταν κάθε δύο χρόνια όπως εξηγείται από τον νόμο του Moore [3]. Με παρόμοιο τρόπο, και ταχύτερα, αυξανόταν η ισχύς (Kooomey's Law) και μειωνόταν το μέγεθος των τρανζίστορ (Dennard Scaling) [4]. Μετά από ένα σημείο όμως λαμβάνουν χώρα φυσικά εμπόδια. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα φράγμα στην συχνότητα των επεξεργαστών περίπου στα 4 GHz ενώ πλέον η μείωση των διαστάσεων δεν επιφέρει μείωση της ισχύος κατανάλωσης. Επίσης, σταδιακά δυσκολεύει και η χρήση ταυτόχρονα, δηλαδή μέσω της ίδιας τροφοδοσίας και εξαγωγής θερμότητας, πολλών πυρήνων γεννώντας έτσι το φαινόμενο 'dark silicon' [5]. Τα προβλήματα αυτά πυροδότησαν την ανάπτυξη των ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων (PIC).

Από την άλλη τα νευρωνικά δίκτυα αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα στην βελτίωση της μηχανικής μάθησης η οποία βρίσκει εφαρμογή στην αναγνώριση φωνής, εικόνων, βίντεο κλπ [6]. Τα νευρωνικά δίκτυα μέχρι στιγμής υλοποιούνται από υπολογιστές και μάλιστα βασίζονται στην διασύνδεση point-to-point μεταξύ της μνήμης και του επεξεργαστή. Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι η ταχύτητα είναι αρκετά χαμηλή. Από την άλλη σε ένα φωτονικό ανάλογο η διαδικασία δεν είναι βηματικής φύσεως, δηλαδή δεν χρειάζεται να ολοκληρωθεί μια διαδικασία για να ξεκινήσει η επόμενη. Επιπλέον η φύση των φωτονικών συσκευών (πχ κυματοδηγών) επιτρέπουν στην χρήση πολύ μεγαλύτερου εύρους ζώνης το οποίο είναι χρήσιμο για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Στόχος είναι δηλαδή η δημιουργία μίας συσκευής η οποία θα είναι ικανή για μεταφορά (πλεονέκτημα των φωτονικών συσκευών) και επεξεργασία (πλεονέκτημα των υπολογιστών) της πληροφορίας [7][8].

Για τους λόγους αυτούς τον τελευταίο καιρό υπάρχει έξαψη στην μελέτη φωτονικών νευρωνικών κυκλωμάτων που θα μπορέσουν να υλοποιήσουν τα παραπάνω [9]-[22].

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εύρεση αντίστοιχων υλοποιήσεων, η πλήρης ανάλυση και κατανόηση τους, ώστε η προτεινόμενη υλοποίηση να διαφέρει από τις ήδη υπάρχουσες. Από εκεί και πέρα έγινε ανάλυση της θεωρίας και του σχεδιασμού του δικτύου. Μετά την αποσαφήνιση αυτών έγιναν προσομοιώσεις ώστε να αποδειχθεί η λειτουργία του.

Η διπλωματική αυτή είναι οργανωμένη σε 5 κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αναλύει το βασικό στοιχείο ενός νευρωνικού δικτύου (νευρώνα) από βιολογικής απόψεως. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά των υπαρχόντων μαθηματικών μοντέλων όπου χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση νευρωνικών δικτύων. Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει το βασικό στοιχείο του φωτονικού νευρωνικού δικτύου (laser εγκλειδωσης ρυθμών). Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνονται προσομοιώσεις σχετικά με την ομοιότητα του laser αυτού με έναν πραγματικό νευρώνα και τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

η ανάλυση και η προσομοίωση ενός φωτονικού νευρωνικού δικτύου με χρήση, ως παράδειγμα, την XOR πύλη.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ I: Νευρώνας

Ο νευρώνας ή νευρικό κύτταρο είναι το δομικό στοιχείο του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος. Πρόκειται για το κύτταρο το οποίο είτε λαμβάνει ερεθίσματα από το περιβάλλον, είτε αποστέλλει εντολές στους μύες, είτε χρησιμεύει ως μεταβατικό μέσο για την αποστολή πληροφορίας από νευρώνα σε νευρώνα σε εκτέλεση άλλης λειτουργίας [23].

1.1 Δομή ενός Νευρώνα

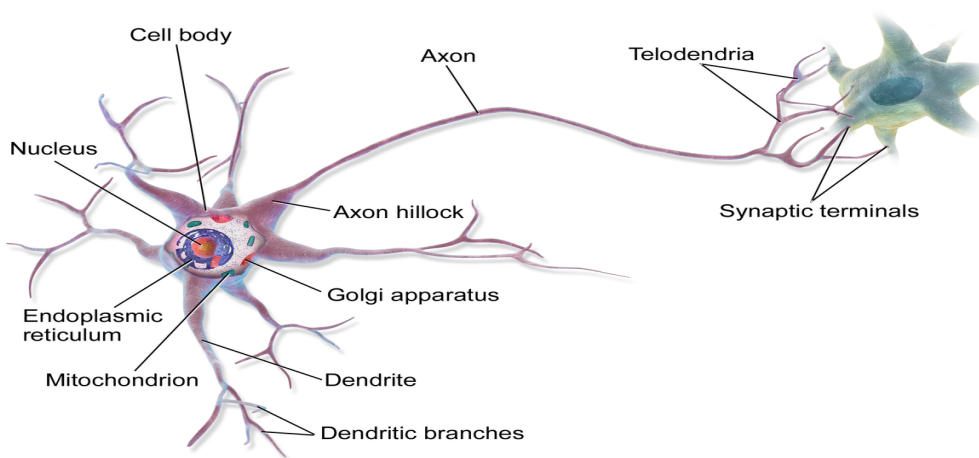


Figure 1.1: Η ανατομία ενός τυπικού πολυπολικού (multipolar) νευρώνα.

Η βασική δομή είναι [24][25]:

- **Σώμα:** Πρόκειται για το κεντρικό τμήμα ενός νευρώνα το οποίο περιέχει τα απαραίτητα σωματίδια για την επεξεργασία των σημάτων της εισόδου και της εξόδου, όπως τον πυρήνα, τα μιτοχόνδρια, τα λυσοσώματα, το σωματίδιο Golgi κλπ.

- **Δενδρίτες:** Είναι αποφυάδες οι οποίες συλλέγουν τα ερεθίσματα από άλλα νευρικά κύτταρα.
- **Κύριος Άξονας:** Πρόκειται για μία νηματοειδή προέκταση του κυρίου νευρικού κυττάρου. Για κάθε νευρώνα υπάρχει αποκλειστικά ένας και μόνο άξονας. Σε αυτόν οδεύει το δυναμικό δράσης έως τις απολήξεις. Οι απολήξεις είναι συνδεδεμένες με άλλους νευρώνες δημιουργώντας μία σύναψη. Ουσιαστικά πρόκειται για διακλαδισμό του άξονα με σκοπό την επικοινωνία με άλλα νευρικά κύτταρα. Η σύναψη από την άλλη είναι η περιοχή της σύνδεσης τους. Αποτελείται από την προσυναπτική μεμβράνη, το τέλος μίας απόληξης και την μετασυναπτική μεμβράνη, η οποία μπορεί να είναι, συνήθως, είτε σώμα είτε δενδρίτες ενός άλλου νευρώνα. Μεταξύ αυτών των μεμβρανών υπάρχει ένα χάσμα.

Όλο το κύτταρο αυτό καλύπτεται από κυτταρική μεμβράνη όπου ουσιαστικά πρόκειται για ένα διπλό στρώμα λιπιδίων, κυρίως φωσφολιπιδίων, στην οποία υπάρχουν τοποθετημένα διάφορα είδη πρωτεϊνών. Οι πρωτεΐνες αυτές είναι πολύ χρήσιμες καθώς λειτουργούν ως κανάλια (δίοδοι) για την επικοινωνία των νευρώνων.

Εσωτερικά και εξωτερικά του νευρώνα υπάρχουν ιόντα όπως Κάλιο (K^+), Νάτριο (Na^+), Χλώριο (Cl^-), Ασβέστιο (Ca^{2+}) κ.α. και διάφορα ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα) όπως πρωτεΐνες και αμινοξέα. Οι συγκεντρώσεις αυτές ποικίλουν ανά κύτταρο. Γενικά όμως ισχύουν τα εξής. Στο κυτταρόπλασμα, δηλαδή στο εσωτερικό της κυτταρικής μεμβράνης, υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων καλίου και ανιόντων. Αντιθέτως, στο εξωτερικό της μεμβράνης, υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων νατρίου, χλωρίου και ασβεστίου. Στους παρακάτω πίνακες δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές [26].

Table 1.1: Κύριος Άξονας Καλαμαριού

Ιόντα	Εσωτερική Συγκέντρωση (mol/L)	Εξωτερική Συγκέντρωση (mol/L)
Na^+	50	440
K^+	400	20
Cl^-	40	560
Ca^{2+}	0.4	10

Table 1.2: Νευρώνας Θηλαστικού

Ιόντα	Εσωτερική Συγκέντρωση (mol/L)	Εξωτερική Συγκέντρωση (mol/L)
Na ⁺	18	145
K ⁺	135	3
Cl ⁻	7	20
Ca ²⁺	0.0001	1.2

Η μεμβράνη αυτή είναι διαπερατή από αυτά τα ιόντα όμως με διαφορετική “αντίσταση” ως προς το καθένα. Για παράδειγμα, είναι πιο διαπερατή από ιόντα καλίου από ότι νατρίου. Εξαίρεση αυτού είναι τα ανιόντα (αποκαλώντας τα έτσι θα εννοούνται οι πρωτεΐνες και τα αμινοξέα), τα οποία δε μπορούν να μετακινηθούν προς το εξωτερικό ή το εσωτερικό της μεμβράνης.

Η κίνηση των ιόντων, λοιπόν, γίνεται μέσω των πρωτεϊνικών καναλιών. Τα κανάλια αυτά επιτρέπουν να περάσουν μόνο ιόντα με τα οποία σχετίζονται με αυτά, για παράδειγμα ένα κανάλι καλίου επιτρέπει την διέλευση μόνο ιόντων καλίου κλπ.

Τα κύρια είδη αυτών είναι, τα κανάλια διαρροής (leak), όπου είναι πάντοτε διαθέσιμα ώστε να διαπεραστούν από ιόντα, τα ηλεκτρικά ελεγχόμενα κανάλια (voltage-gated), όπου ενεργοποιούνται

όταν η διαφορά δυναμικού φτάσει σε μία συγκεκριμένη τιμή, τα χημικά ελεγχόμενα κανάλια (ligand-gated), όπου ανταποκρίνονται με την παρουσία συγκεκριμένης χημικής ουσίας, οι αντλίες (pumps), όπου “ανταλλάσσουν” ιόντα εσωτερικά και εξωτερικά της μεμβράνης και τα μηχανικά ελεγχόμενα (mechanically-gated), όπου ενεργοποιούνται με άσκηση δυνάμεων όπως τέντωμα, πίεση κλπ [27].

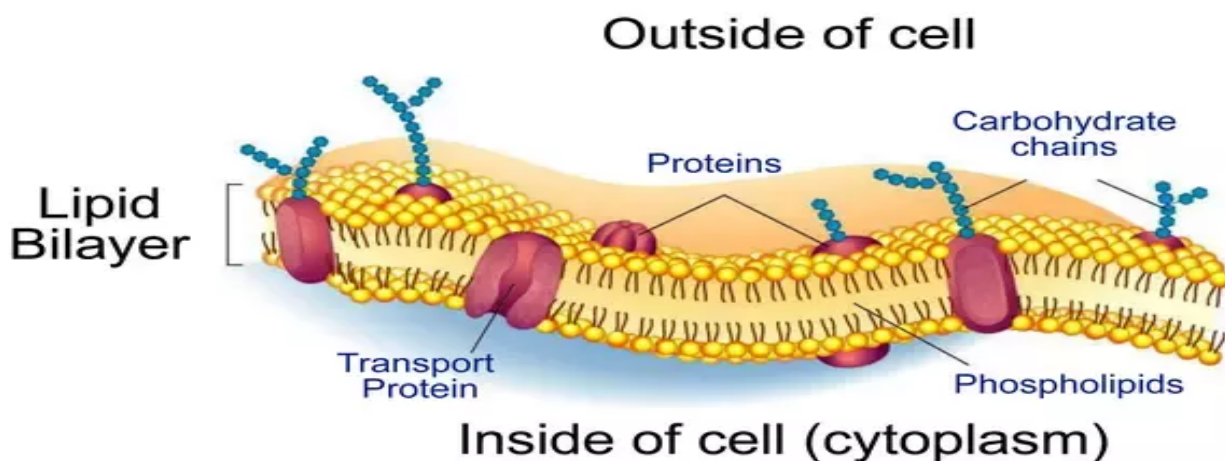


Figure 1.2: Η δομή της μεμβράνης ενός κυττάρου.

1.2 Δυναμικό Μεμβράνης

1.2.1 Δυναμικό Ηρεμίας

Όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, οι συγκεντρώσεις των ιόντων στις δύο περιοχές είναι διαφορετικές. Σε αυτή τη περίπτωση τα ιόντα έχουν την τάση να διαχέονται από την περιοχή με την μεγαλύτερη συγκέντρωση σε αυτή με την μικρότερη. Επιπλέον, ισχύει ότι ομώνυμα (είτε θετικά είτε αρνητικά φορτισμένα) άτομα απωθούνται μεταξύ τους ενώ έλκονται από ετερόνυμα. Όταν μεταξύ αυτών των δύο “δυνάμεων” επέλθει ισορροπία, δηλαδή αλληλεξουδετέρωση, τότε το δυναμικό της μεμβράνης ισούται με το δυναμικό ηρεμίας. Για να γίνει ευκολότερα κατανοητό παρατίθεται το εξής απλουστευμένο παράδειγμα. Έστω ότι σε ένα δοχείο υπάρχει ένα διάλυμα με θετικά ιόντα καλίου και αρνητικά ιόντα νατρίου, και αυτό χωρίζεται στη μέση από μία διαχωριστική μεμβράνη η οποία είναι διαπερατή μόνο από το κάλιο. Οι αρχικές συνθήκες έχουν ως εξής. Στην αριστερή πλευρά του δοχείου υπάρχουν ισοκαταμεμημένα τα δύο ιόντα σε μεγάλη ποσότητα ενώ στη δεξιά πλευρά ισοκαταμεμημένα σε χαμηλή ποσότητα με συνέπεια το ηλεκτρικό δυναμικό να είναι μηδέν. Λόγω της χημικής τάσης (chemical gradient) τα ιόντα προσπαθούν διαχυθούν προς την δεξιά πλευρά. Λόγω όμως της μεμβράνης μόνο τα ιόντα καλίου είναι δυνατόν να περάσουν.

Με αυτόν τον τρόπο τα ιόντα καλίου αρχίζουν και μειώνονται στο αριστερό τμήμα με αποτέλεσμα το άθροισμα των φορτίων να γίνεται αρνητικό ενώ στο δεξί τμήμα θετικό. Όμως λόγω του

αρνητικού φορτίου τα θετικά ιόντα καλίου που βρίσκονται δεξιά αρχίζουν και έλκονται προς τα αριστερά.

Το χρονικό σημείο κατά το οποίο δεν υπάρχει κίνηση ιόντων είναι και το χρονικό σημείο στο οποίο συμβαίνει το δυναμικό ηρεμίας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ηλεκτροχημική βαθμίδα (electrochemical gradient) [28].

Εάν γίνει μια επέκταση αυτού του παραδείγματος με πραγματικές συνθήκες, δηλαδή ότι η μεμβράνη είναι διαπερατή από τα περισσότερα ιόντα με διαφορετική αγωγιμότητα όμως, όπως και ότι οι συγκεντρώσεις είναι διαφορετικές τότε καταλήγει το δυναμικό ηρεμίας να είναι αρνητικό. Ένας χρήσιμος τύπος για τον υπολογισμό του δυναμικού ηρεμίας για καθένα από τα ιόντα στην κατάσταση ισορροπίας είναι το δυναμικό Nernst [29]

$$\Delta u = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{C_{out}}{C_{in}} \right), \quad (1.1)$$

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδώσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

όπου k η σταθερά του Boltzmann, T η θερμοκρασία σε Kelvin, q το φορτίου του ιόντος, C_{out} και C_{in} οι συγκεντρώσεις εκτός και εντός της μεμβράνης αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό του δυναμικού ηρεμίας της μεμβράνης χρησιμοποιείται, έχοντας και κάποιους περιορισμούς, ο τύπος των Goldman-Hodgkin-Katz [30]

$$E_m = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{P_K [K^+]_o + P_{Na} [Na^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i}{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o} \right) \quad (1.2)$$

όπου R η παγκόσμια σταθερά αερίων, T η θερμοκρασία σε Kelvin, F η σταθερά του Faraday, P η σχετική διαπερατότητα της μεμβράνης για τα διάφορα ιόντα και σε αγκύλες οι συγκεντρώσεις όπου με “ο” χαρακτηρίζονται αυτές που βρίσκονται εκτός του κυτταροπλάσματος και με “i” αυτές που βρίσκονται εντός.

Για έναν νευρώνα θηλαστικού σε θερμοκρασία $37^\circ C$ το δυναμικό ηρεμίας είναι $-63.6 mV$ όταν οι σχετικές διαπερατότητες έχουν λόγο $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 0.05 : 0.45$.

1.2.2 Συναπτικό Δυναμικό

Στις τερματικές αποφυάδες του κυρίως άξονα υπάρχουν κυστίδια τα οποία περιέχουν νευροδιαβιβαστές. Αυτοί είναι χημικές ουσίες οι οποίες λειτουργούν σαν κλειδιά για την ενεργοποίηση των πρωτεϊνικών καναλιών [31]. Όταν, λοιπόν, κατά μήκος του άξονα ταξιδέψει ένα

σήμα και φτάσει στα κυστίδια (vesicles) τότε αυτά θα απελευθερώσουν τους νευροδιαβιβαστές οι οποίοι θα φτάσουν στον επόμενο νευρώνα. Στον τελευταίο, υπάρχουν τα χημικά ελεγχόμενα

κανάλια τα οποία λαμβάνοντας έναν συγκεκριμένο νευροδιαβιβαστή ενεργοποιούνται επιτρέποντας την κυκλοφορία συγκεκριμένων ιόντων.

Ουσιαστικά αυτό που συμβαίνει είναι πως συγκεκριμένοι νευροδιαβιβαστές ενεργοποιούν τα κανάλια τα οποία επιτρέπουν την διέλευση θετικών ιόντων (όπως Νάτριο) προς το εσωτερικό της μεμβράνης με αποτέλεσμα την αύξησης του δυναμικού, ενώ άλλη ενεργοποιούν αυτά που επιτρέπουν την διέλευση αρνητικών ιόντων (όπως χλώριο) με αντίθετα αποτελέσματα [32]. Αν το δυναμικό της μεμβράνης σε αυτή τη περίπτωση αυξηθεί, δηλαδή γίνει θετικότερο, τότε ονομάζεται *διεγερτικό* μετασυναπτικό δυναμικό [33]. Αν αντιθέτως μειωθεί και άλλο ονομάζεται *κατασταλτικό* μετασυναπτικό δυναμικό. Παράδειγμα κατασταλτικού νευροδιαβιβαστή είναι το γ-αμινοβουτυρικό οξύ (GABA), ενώ ενός διεγερτικού το glutamate [34].

Εκ πρώτης όψεως φαίνεται πως το δυναμικό δεν είναι δυνατόν να φτάσει ξανά σε επίπεδα ηρεμίας. Όμως κατά μήκος της μεμβράνης υπάρχουν διάφορες αντλίες, όπως έχει αναφερθεί. Αυτές είναι υπεύθυνες για την εξισορρόπηση του δυναμικού. Η πιο σημαντική είναι η αντλία νατρίου-καλίου. Η αντλία αυτή, μεταφέρει τρία ιόντα νατρίου από το εσωτερικό προς το εξωτερικό της μεμβράνης για κάθε δύο ιόντα καλίου τα οποία τα μεταφέρει προς τα έσω. Η διαδικασία αυτή τροφοδοτείται μέσω της υδρόλυσης τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP) σε αδενοσινοδιφωσφορικό οξύ (ADP). Με αυτόν τον τρόπο οι συγκεντρώσεις αποκτούν τις αρχικές τιμές [35].

1.3 Δυναμικό Δράσης

Ένα μετασυναπτικό δυναμικό από μόνο του είναι συνήθως αρκετά αδύναμο ώστε να προκαλέσει δυναμικό δράσης. Το σώμα όμως, έχει την λειτουργία ενός αθροιστή ο οποίος αθροίζει τα μετασυναπτικά δυναμικά που συμβαίνουν κατά μήκος όλου του νευρώνα σε μία χρονική στιγμή. Αν το άθροισμα αυτό ξεπεράσει ένα κατώφλι (συνήθως -55 mV) τότε ενεργοποιούνται όλα τα ηλεκτρικά ελεγχόμενα κανάλια τα οποία επιτρέπουν στα ιόντα νατρίου να εισέλθουν στον νευρώνα. Με αυτό τον τρόπο το δυναμικό αυξάνεται, ξεπερνάει το μηδέν, έως ότου φτάσει την υψηλότερη τιμή (συνήθως 30 mV). Η φάση αυτή ονομάζεται αποπόλωση (depolarization). Σε αυτό το σημείο τα κανάλια νατρίου γίνονται αδρανή και τα κανάλια καλίου ενεργοποιούνται επιτρέποντας στα ιόντα να εξέλθουν μειώνοντας, έτσι, το δυναμικό δράσης. Η φάση αυτή ονομάζεται επαναπόλωση (repolarization) και όσο διαρκεί είναι αδύνατον να επαναληφθεί το δυναμικό δράσης (με ενδεχόμενο ισχυρό μετασυναπτικό δυναμικό), για αυτό και η περίοδος είναι απολύτως αδρανής (absolute refractory period). Όσο το δυναμικό μειώνεται, τα κανάλια νατρίου από αδρανή γίνονται κλειστά με ενδεχόμενο την δημιουργία επόμενου δυναμικού δράσης αν και το μετασυναπτικό δυναμικό θα πρέπει να είναι ισχυρότερο από προηγούμενως για να καταφέρει το ίδιο αποτέλεσμα.

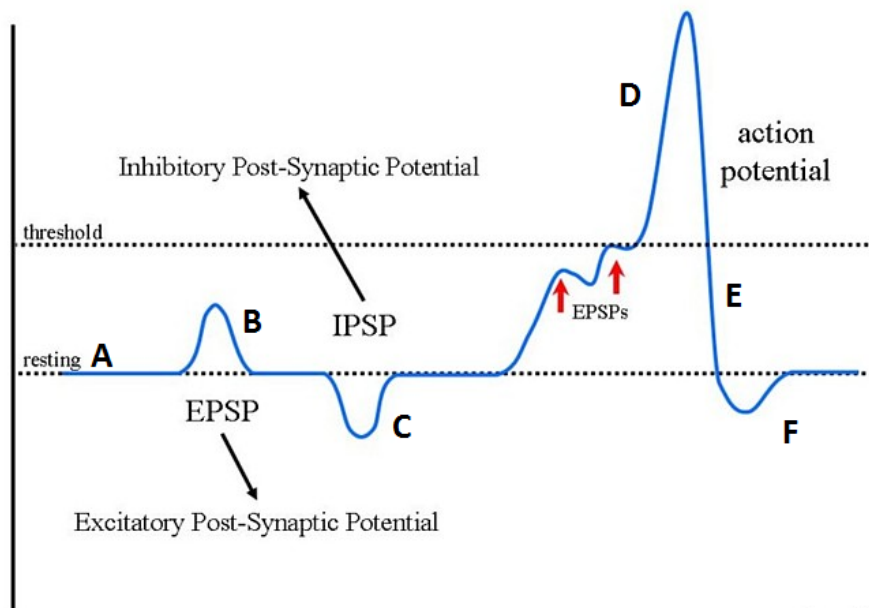


Figure 1.3: Το δυναμικό μεμβράνης ενός νευρώνα. A Δυναμικό ηρεμίας κατά την χρονική περίοδο που ο νευρώνας δεν δέχεται είσοδο. B Η είσοδος θετικών ιόντων δεν είναι δυνατό να προκαλέσει δυναμικό δράσης. C Το δυναμικό της μεμβράνης μειώνεται περαιτέρω με την έλευση αρνητικών ιόντων. D Έπειτα από πολλά διεγερτικά μετασυναπτικά δυναμικά το δυναμικό της μεμβράνης ξεπερνά το κατώφλι. Αυτή τη στιγμή προκαλείται η φάση της αποπόλωσης. E Όταν το δυναμικό φτάσει ένα ανώτατο σημείο τότε προκαλείται επαναπόλωση. F Το δυναμικό της μεμβράνης μειώνεται ακόμη περισσότερο και επαναφέρεται στην αρχική τιμή στην φάσης της υπερπόλωσης.

Επειδή τα κανάλια καλίου αργούν να απενεργοποιηθούν το δυναμικό μειώνεται περισσότερο από κάθε άλλη φορά. Η φάση αυτή ονομάζεται υπερπόλωση (hyperpolarization). Με αυτή την διαδικασία ιόντα νατρίου βρίσκονται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση εντός από ότι εκτός της μεμβράνης, όπως και η συγκέντρωση ιόντων καλίου είναι μεγαλύτερη εξωτερικά από ότι εσωτερικά. Για να επέλθει η τελική ισορροπία λειτουργούν “ακατάπαυστα” οι αντλίες νατρίου-καλίου και εν τέλη το δυναμικό φτάνει στο επίπεδο της ηρεμίας και τα κανάλια καλίου κλείνουν.

Πρέπει να τονιστεί ότι το φαινόμενο αυτό είναι “όλα ή τίποτα” (all or none), δηλαδή, αν δεν ξεπεραστεί το δυναμικό κατωφλίου τότε δε υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθεί δυναμικό δράσης. Επίσης η μορφή του δυναμικού δράσης και η τάση κορυφής του, δεν εξαρτώνται από το πόσο ισχυρή είναι η είσοδος. Αυτό που διαφέρει μόνο είναι η συχνότητα της εμφάνισής του. Για παράδειγμα αν ένα ρεύμα διέγερσης καταφέρει να προκαλέσει το δυναμικό δράσης τότε και πολλαπλάσια της έντασης αυτού θα επιφέρουν το ίδιο αποτέλεσμα στο ύψος του δυναμικού (30 με 40 mV) .

Κατά το δυναμικό δράσης η περιοχή εντός της μεμβράνης γίνεται θετικότερη από την εξωτερική. Αν περιοριστούμε σε μία συγκεκριμένη περίπτωση τότε μπορεί να ειπωθεί ότι συνέπεια αυτού είναι η είσοδος ιόντων νατρίου. Η είσοδος αυτών των ιόντων σε ένα τμήμα προκαλεί αποπόλωση της μεμβράνης και στο επόμενο καθώς αυτά διαχέονται. Έτσι το δυναμικό κινείται κατά μήκος του άξονα. Αυτό που εμποδίζει την διάδοση από την αντίθετη πλευρά είναι η περίοδος αδράνειας που ακολουθεί μετά την αποπόλωση [36]. Το δυναμικό δράσης προκαλείται στην περιοχή η οποία ονομάζεται εκφυτικός κώνος (axon hillock), η οποία βρίσκεται στην αρχή του άξονα [37].

Επειδή, όμως, οι αποστάσεις μπορεί να μην είναι μικρές και επειδή η προηγούμενη είναι σχετικά αργή διαδικασία, πολλών νευρώνων οι άξονες καλύπτονται από στρώμα μυελίνης. Το στρώμα αυτό είναι κατανεμημένο σε κομμάτια, δηλαδή δεν είναι συνεχές, αφήνοντας, έτσι, μικρές περιοχές στις οποίες μπορεί να δημιουργηθεί δυναμικό, αποκαλούμενες και ως κόμβοι του Ranvier. Το στρώμα λειτουργεί ως μονωτής, εμποδίζοντας έτσι την ροή του δυναμικού μέσα σε αυτό. Το δυναμικό ρέει επιφανειακά των στρωμάτων αυτών και ουσιαστικά διαδίδεται μέσω των κόμβων σε υψηλές ταχύτητες και με λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις (καθώς έχει μειωθεί η περιοχή διάδοσης) εξαιτίας της χαμηλής χωρητικότητας του στρώματος. Αυτού του είδους η διάδοση ονομάζεται αλματώδης αγωγή (saltatory conduction) [38].

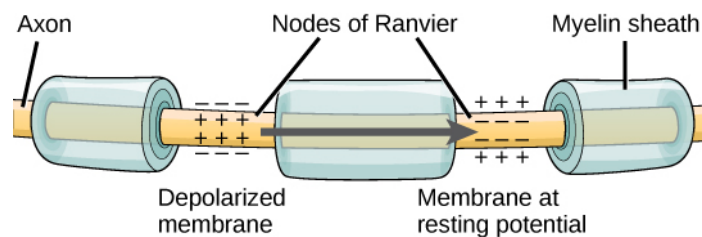


Figure 1.4: Η διάδοση σε άξονα με στρώση μυελίνης.

1.4 Τύποι Νευρώνων

Οι νευρώνες, συνήθως, διαχωρίζονται με βάση το σχήμα, την λειτουργία τους κλπ. Για παράδειγμα υπάρχουν νευρώνες οι οποίοι όταν δράσουν (δηλαδή παράξουν το δυναμικό δράσης) τότε στο τερματικό του κεντρικού άξονα θα παραχθούν κατασταλτικοί νευροδιαβιβαστές, για αυτό και ονομάζονται κατασταλτικοί νευρώνες (inhibitory neurons), ενώ στην αντίθετη περίπτωση διεγερτικοί (excitable neurons). Υπάρχει όμως και περίπτωση ενός νευρώνα μπορεί να απελευθερώσει και τους δύο τύπους νευροδιαβιβαστών [39]

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

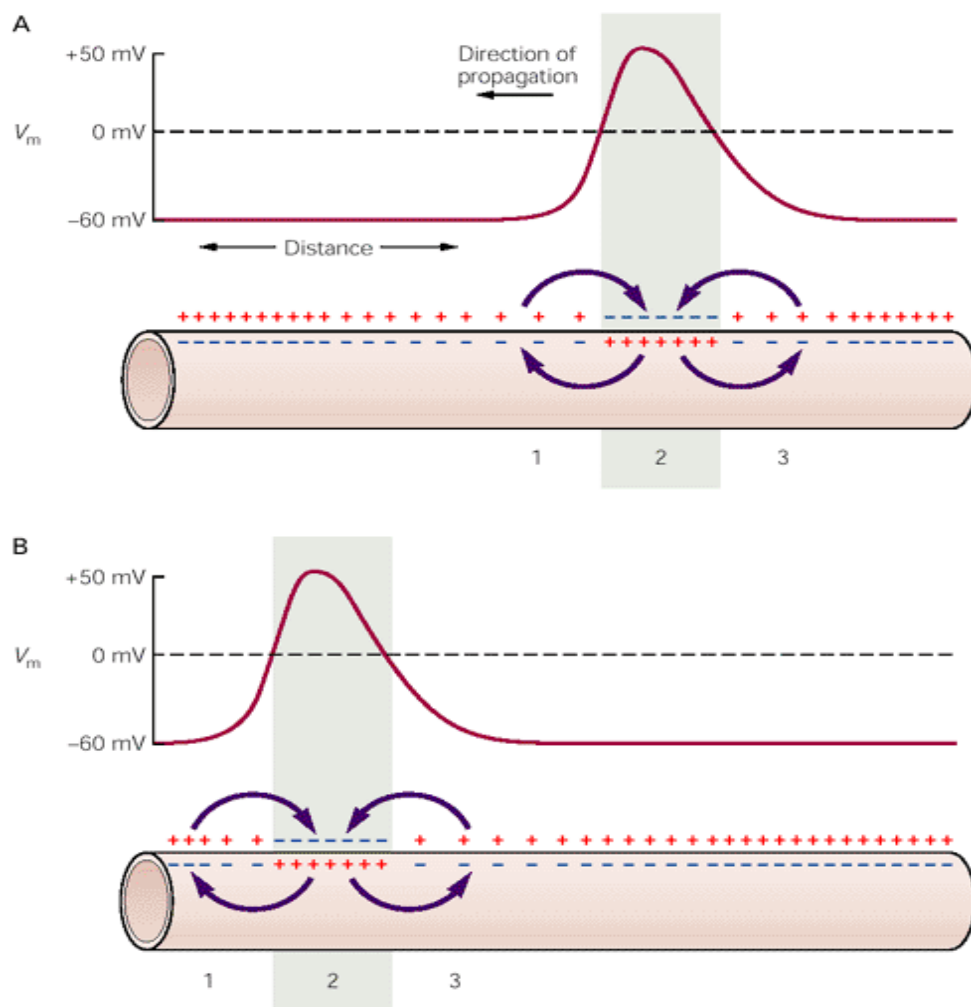


Figure 1.5: Διάδοση του δυναμικού δράσης κατά μήκος του άξονα (από δεξιά προς τα αριστερά).

Όσον αφορά την λειτουργία τους υπάρχουν πάρα πολλών ειδών νευρώνες. Αν περιοριστεί κανείς στην σπονδυλική στήλη τότε φαίνεται ότι τρεις κυριαρχούν. Οι αισθητήριοι (sensory) νευρώνες, οι κινητήριοι (motor) και οι διάμεσοι (inter-neurons). Οι αισθητήριοι νευρώνες ανταποκρίνονται από διεγέρσεις του περιβάλλοντος και γενικά από διεγέρσεις όπου μπορούν να εντοπιστούν από τις αισθήσεις του οργανισμού, όπως για παράδειγμα θερμοκρασία, αφή, ήχος κλπ. Οι κινητήριοι νευρώνες συνδέονται με διάφορα όργανα και μύες του σώματος. Έχουν έναν ενεργό ρόλο καθώς μεταδίδοντας ένα ηλεκτρικό σήμα ελέγχουν όλα τα παραπάνω. Οι διάμεσοι νευρώνες χρησιμεύουν ως μέσο μεταφοράς της πληροφορίας από ένα σημείο σε ένα άλλο αλλά και μεταξύ των άλλων τύπων νευρώνων [40].

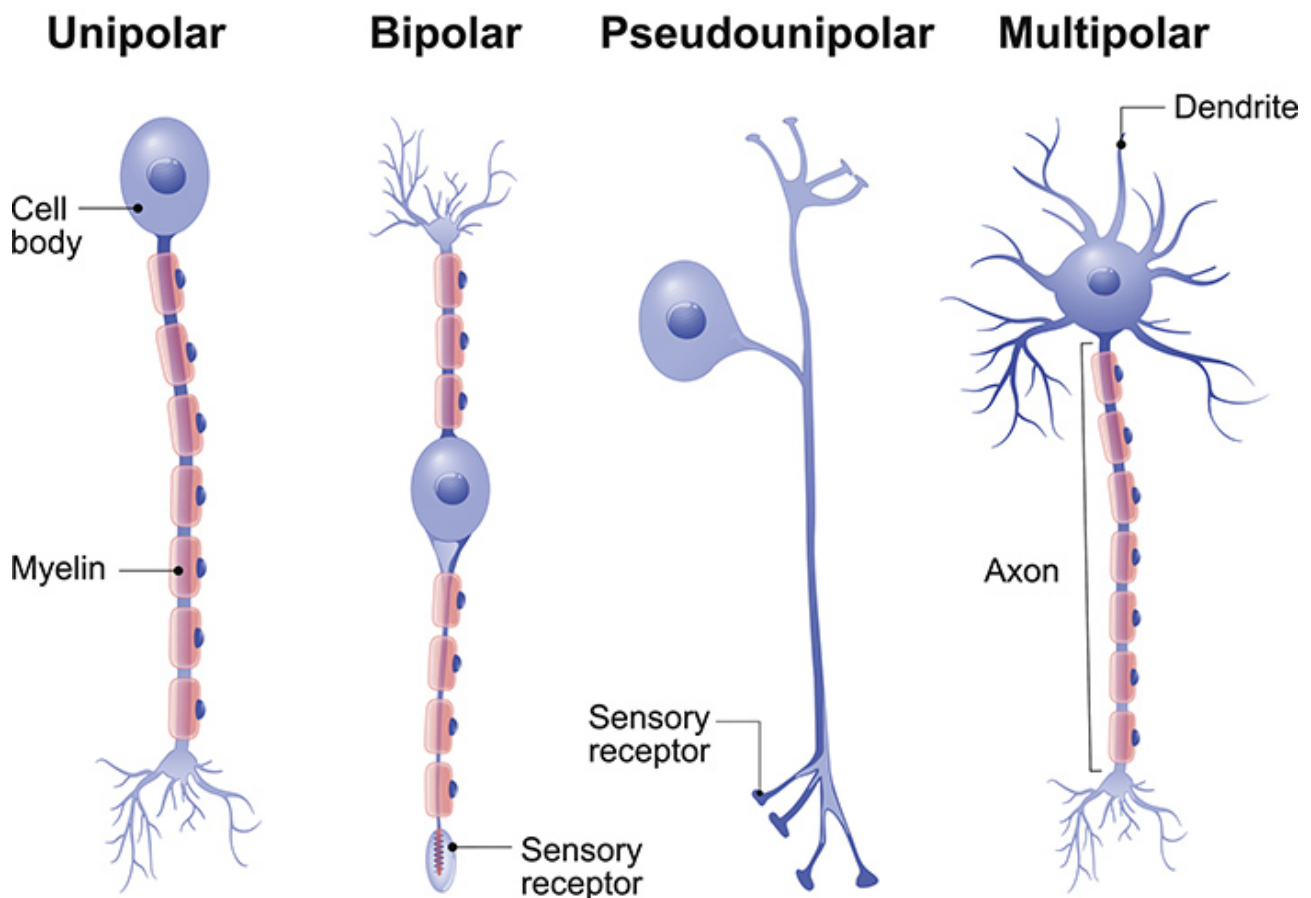


Figure 1.6: Διάφοροι τύποι νευρώνων ανάλογα με την δομή τους.

Άλλη μία διάκριση μεταξύ των νευρώνων μπορεί να καθοριστεί από την προσαρμογή (adaptation) όσον αφορά την διέγερση. Η προσαρμογή είναι η μείωση της ηλεκτρικής απόκρισης τους στον χρόνο ακόμη και αν ένα αρκετά ισχυρό ερέθισμα βρίσκεται στον νευρώνα. Η αλλαγή αυτή είναι προφανής στον ρυθμό με τον οποίο παράγουν δυναμικά δράσης, καθώς η συχνότητα αυτή μειώνεται. Υπάρχουν νευρώνες οι οποίοι προσαρμόζονται αρκετά γρήγορα που ονομάζονται φασικοί (phasic). Άλλοι προσαρμόζονται πιο αργά στον χρόνο και ονομάζονται τονικοί (tonic). Η ικανότητα αλλαγής, προσαρμογής και τροποποίησης των νευρώνων καθ' όλη την διάρκεια ζωής ονομάζεται νευροπλαστικότητα (neuroplasticity) [41]. Μία σύντομη και πρακτική ερμηνεία της νευροπλαστικότητας είναι η εξής: όταν ένα δυναμικό δράσης φτάσει σε έναν νευρώνα πριν αυτός παράξει δυναμικό δράσης τότε η σύναψη μεταξύ τους ενδυναμώνει. Αυτό συμβαίνει διότι ουσιαστικά το δυναμικό στην είσοδο του ενδεχομένως να υποβοήθησε τον νευρώνα να παράξει ένα δικό του δυναμικό δράσης. Αντιθέτως, εάν ένα δυναμικό δράσης φτάσει στην στιγμή του χρόνου ανάρρωσης τότε η σύναψη αποδυναμώνει διότι το δυναμικό αυτό ουσιαστικά 'χάθηκε' και δεν βοήθησε τον νευρώνα να προκαλέσει ένα άλλο δυναμικό.

Οι νευρώνες μπορούν, επίσης, να διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται σε ορισμένη διέγερση αναφερόμενο και ως spiking dynamics (δυναμικές των “καρφιών”). Η επόμενη εικόνα συνοψίζει τις δυναμικές αυτές, που πολλές από αυτές μπορεί να απαντώνται είτε στον ίδιο νευρώνα είτε σε διαφορετικούς [42].

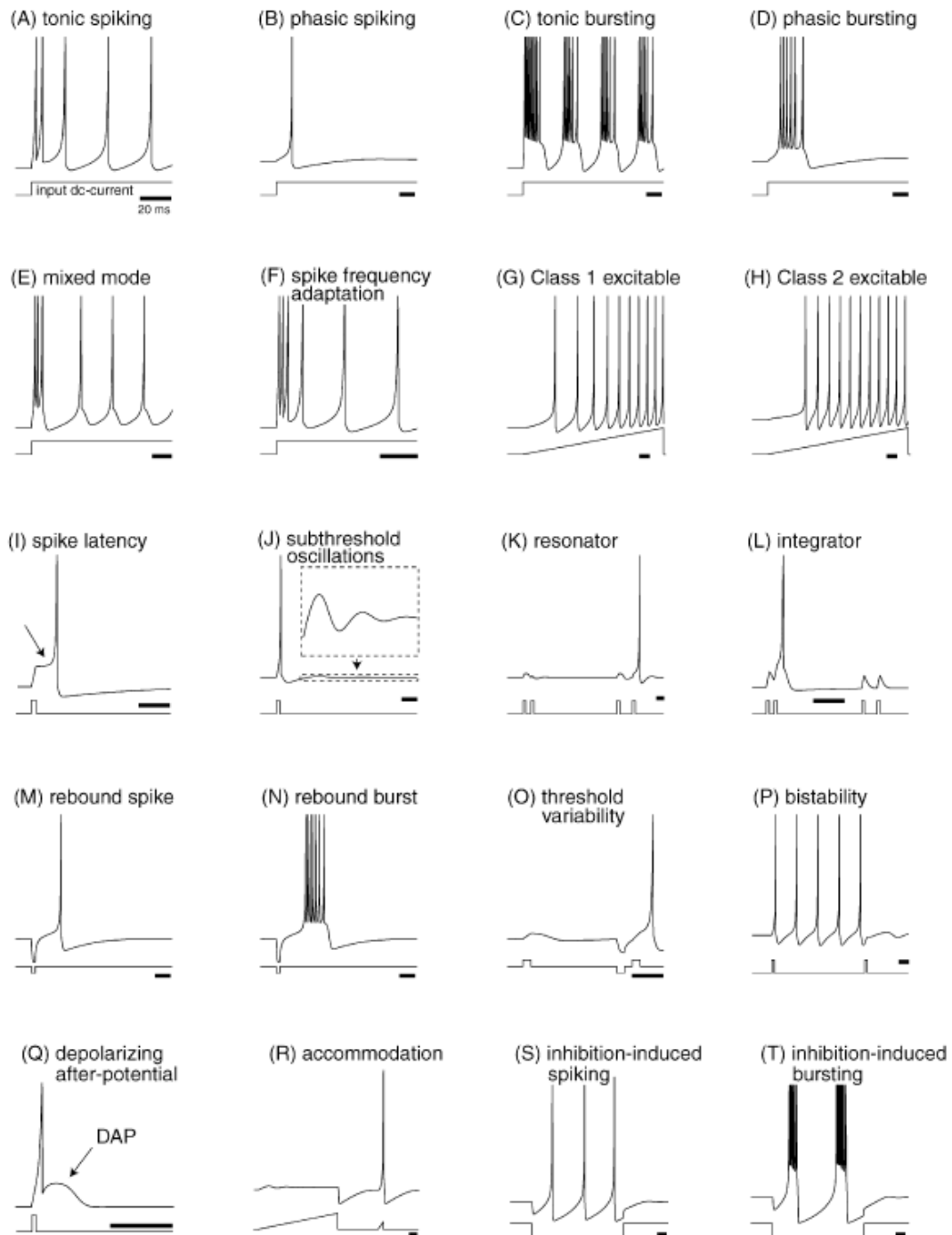


Figure 1.7: Οι διαφορετικές συμπεριφορές νευρώνων σε διάφορες εισόδους.

(A) Τονική Παλμοσειρά

Όταν ένας νευρώνας βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας δεν προκαλεί δυναμικό δράσης. Εάν διεγερθεί από μία είσοδο τότε θα προκληθούν δυναμικά δράσης με διάρκεια όση αυτή της διέγερσης. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται σε τρεις τύπους νευρώνων του φλοιού (του εγκεφάλου). Στους Regular Spiking (RS) excitable νευρώνες στους οποίους η συχνότητα εμφάνισης των δυναμικών δράσης μειώνεται στην διάρκεια του χρόνου (προσαρμογή), στους Low-Threshold Spiking (LTS) inhibitory νευρώνες οι οποίοι διεγείρονται από κατασταλτικούς νευροδιαβιβαστές (αρνητική είσοδο) και αποδίδουν υψηλής συχνότητας δυναμικά δράσης με εμφανή προσαρμογή στον χρόνο και τέλος τους Fast Spiking inhibitory νευρώνες οι οποίοι πυροδοτούν σε υψηλές συχνότητες χωρίς όμως να υπάρχει προσαρμογή. Οπότε συνεχής απόδοση δυναμικών πληροφορεί για παρουσία συνεχής διέγερσης στον νευρώνα.

(B) Φασική Παλμοσειρά

Υπάρχει περίπτωση ένας νευρώνας να προκαλέσει μόνο ένα δυναμικό δράσης παρά την συνεχή διέγερση την οποία υφίσταται. Αυτή η συμπεριφορά είναι χρήσιμη στην ένδειξη για την αρχή της διέγερσης.

(C) Τονική “Έκρηξη”

Κάποιοι νευρώνες, όπως για παράδειγμα οι chattering στον νεοφλοιό των γατιών, μπορούν να προκαλούν περιοδικά δυναμικά δράσης τα οποία έχουν εκρηκτική συμπεριφορά (bursting) σε πολύ υψηλές συχνότητες μεταξύ τους. Τέτοιοι νευρώνες πιστεύεται ότι συμβάλλουν στην παρουσία του γ ρυθμού στον εγκέφαλο (παρουσία του οποίου μπορεί να δείχνει την αυξημένη προσοχή του ατόμου και σε άλλες περιπτώσεις να είναι ένδειξη επιληψίας, σχιζοφρένειας κλπ).

(D) Φασική “Έκρηξη”

Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρείται phasic spiking συμπεριφορά με πρόκληση μιας αρχικής εκρηκτικής παλμοσειράς και μετέπειτα κατευνασμός της εξόδου. Υπάρχουν τρεις κύριοι λόγοι όπου μία τέτοιου είδους έκρηξη προκαλείται. Πρώτον, χρησιμεύουν στην μείωση του θορύβου του νευρώνα και την υπερίσχυση σφαλμάτων στην μετάδοση κατά μήκος του άξονα. Δεύτερον

(E) Μοντέλο Μίξης

Πρόκειται για έναν συνδυασμό του phasic bursting με του tonic spiking καθώς αρχικά ο νευρώνας προκαλεί μία έκρηξη παλμών ενώ ύστερα συνεχίζει να εκπυρσοκροτεί με συνεχή τρόπο.

(F) Προσαρμογή στην Συχνότητα της Παλμοσειράς

Σε αυτή τη περίπτωση νευρώνες, παρουσίας συνεχής διέγερσης, αποδίδουν συνεχώς δυναμικά δράσης η συχνότητα των οποίων είναι αυξημένη αρχικά και μειώνεται όσο προχωρά ο χρόνος. Τέτοια συμπεριφορά έχουν οι RS και οι LTS νευρώνες. Η αλλαγή της συχνότητας αυτής στον χρόνο μπορεί να πληροφορήσει για την χρονική διάρκεια της εισόδου.

(G) Διέγερση Κλάσης I

Η συχνότητα των δυναμικών δράσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και η “ισχύς” της διέγερσης και επιπλέον αυτού του είδους νευρώνες έχουν την ικανότητα να αποδίδουν δυναμικά ακόμη και με ασθενής είσοδο σε χαμηλές συχνότητες. Άρα παρατηρείται άμεση σχέση της ισχύς εισόδου με την συχνότητα της εξόδου.

(H) Διέγερση Κλάσης II

Αντιθέτως, νευρώνες σε αυτήν την κλάση δεν μπορούν να προκαλέσουν χαμηλών συχνοτήτων εξόδους. Είτε παραμένουν αδρανή σε τέτοια περίπτωση είτε προκαλούν δυναμικά υψηλών συχνοτήτων.

(I) Καθυστέρηση εκपुरσοκρότησης

Τα δυναμικά δράσης παράγονται με μία καθυστέρηση η οποία εξαρτάται από την ισχύ της εισόδου. Σε αρκετές περιπτώσεις ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Είναι ένα χαρακτηριστικό πολλών από τους φλοιώδεις νευρώνες.

(J) Ταλαντώσεις κάτω του Κατωφλίου

Πρόκειται για ταλαντώσεις στο δυναμικό της μεμβράνης είτε μετά από ένα δυναμικό δράσης είτε σε ένα μετασυναπτικό δυναμικό

(K) Συχνοτική προτίμηση & Συντονισμός

Οι νευρώνες στους οποίους συμβαίνουν οι ταλαντώσεις προκύπτει η “προτίμηση” στην πρόκληση δυναμικών δράσης με είσοδο ίσης συχνότητας με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης τους. Τέτοιοι νευρώνες ονομάζονται ταλαντωτές.

(L) Ανίχνευση σύμπτωσης & Ολοκλήρωση

Για να εκπυρσοκροτήσουν οι νευρώνες με την συγκεκριμένη ιδιότητα θα πρέπει παλμοί στην είσοδο να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά χρονικά μεταξύ τους έτσι ώστε να γίνει ένα άθροισμα στο μετασυναπτικό δυναμικό και εν τέλει να ξεπεραστεί το κατώφλι. Δείχνουν, λοιπόν, μία προτίμηση σε υψηλής συχνότητας εισόδους.

(M) Καρφί Αναπήδησης

Όταν υπάρξει κατασταλτική είσοδος τότε τη στιγμή εκείνη που αυτή πάψει να υφίσταται, δηλαδή σταματήσει, τότε υπάρχει περίπτωση να προκληθεί δυναμικό δράσης.

(N) Έκρηξη Αναπήδησης

Είναι παρόμοια με την προηγούμενη συμπεριφορά με την διαφορά ότι προκαλείται μία έκρηξη παλμών αντί για ένα μόνο δυναμικό δράσης.

(O) Μεταβλητότητα του Κατωφλίου

Οι νευρώνες οι οποίοι παράγουν spikes στην έξοδο δεν έχουν σταθερό κατώφλι, αντιθέτως το δυναμικό αυτό αλλάζει δυναμικά ανάλογα με την πρόσφατη δραστηριότητα του νευρώνα.

(P) Διστάθεια μεταξύ Ηρεμίας & εκπυρσοκροτησης

Μερικοί νευρώνες μπορούν να κατέχουν δύο ειδών σταθερές συμπεριφορές, ηρεμία και τονικοί ή και εκρηκτική. Ένας παλμός εισόδου μπορεί να καθορίσει ανάλογα την στιγμή την οποία εμφανίζεται ποια από τις δύο συμπεριφορές θα ακολουθεί.

(Q) Αποπόλωση μετά την Εκπυρσοκρότηση

Μετά από ένα δυναμικό δράσης υπάρχει πιθανότητα ο νευρώνας να παρουσιάσει μία αργή (σε σχέση με την συνηθισμένη) υπερπόλωση, σε άλλες περιπτώσεις ακόμη και αποπόλωση της μεμβράνης.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

(R) Προσαρμογή

Πιθανά, μία είσοδος αρκετά ισχυρή όμως αργά αυξανόμενη στον χρόνο (ράμπα) να μην μπορεί να προκαλέσει δυναμικό δράσης, ενώ αντιθέτως ένας ταχύς παλμός να το προκαλεί.

(S) Εκπυρσοκρότηση από Κατασταλτική είσοδο

Ένα χαρακτηριστικό σε πολλούς θαλαμοφλοιώδεις νευρώνες είναι η πρόκληση δυναμικών δράσεων με κατασταλτική είσοδο.

(T) “Εκρηξη” από Κατασταλτική είσοδο

Σε αυτή τη περίπτωση το δυναμικό δράσης προκαλείται από κατασταλτική είσοδο αλλά είναι τονικό με περιοδικές εκρήξεις. Πιστεύεται πως τέτοια συμπεριφορά έχει σημαντικό ρόλο στους ρυθμούς του ύπνου (χαμηλών συχνοτήτων).

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: Μοντέλα Νευρώνων

Η μελέτη των μαθηματικών μοντέλων είναι χρήσιμη στην κατανόηση της λειτουργίας των νευρώνων και την προσομοίωση τους από τον υπολογιστή.

2.1 Integrate and Fire Μοντέλα

Τα μοντέλα τα οποία περιγράφουν το δυναμικό δράσης ως ένα γεγονός (event) ονομάζονται “Integrate and Fire” (IF) [43]. Ουσιαστικά όταν το δυναμικό της μεμβράνης ξεπεράσει το κατώφλι τότε στην “έξοδο” προκύπτει ένας παλμός πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (spike). Για την απλότητα θεωρείται ότι αυτός ο παλμός είναι η συνάρτηση του Dirac $\delta(t-\tau_i)$, όπου τ_i η χρονική στιγμή ενεργοποίησης του δυναμικού δράσης.

2.1.1 Leaky Integrate and Fire

Η μετασυναπτική μεμβράνη αντικαθίσταται με ένα κύκλωμα $R_m C_m$, όπου R_m η αντίσταση της μεμβράνης και C_m η χωρητικότητα, το οποίο διαρρέεται από ένα προσυναπτικό ρεύμα I . Το ρεύμα αυτό εισέρχεται πρώτα από ένα βαθυπερατό φίλτρο το οποίο ουσιαστικά αποκόπτει τις απότομες μεταβολές προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο καλύτερα την ηλεκτροχημική διαδικασία.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

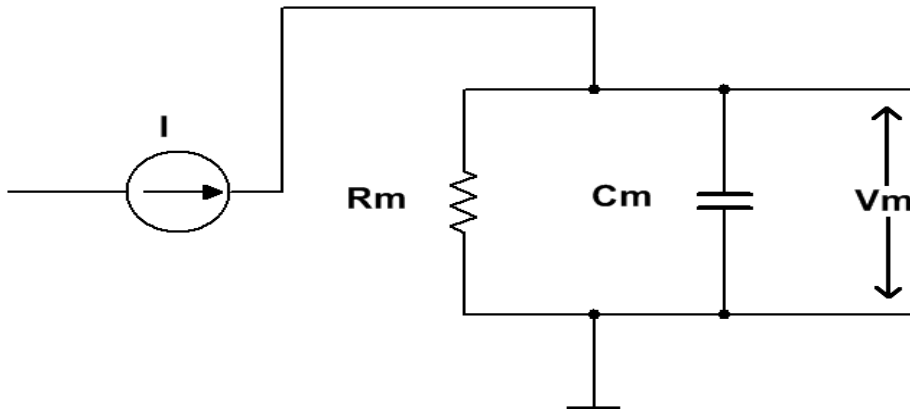


Figure 2.1: Το κυκλωματικό ανάλογο της μεμβράνης, όπου I το ρεύμα εισόδου, R_m , C_m τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης του νευρώνα και V_m η διαφορά δυναμικού.

Το ρεύμα, λοιπόν, χωρίζεται σε δύο κλάδους, αυτού της αντίστασης I_R και του πυκνωτή I_C . Οπότε και θα ισχύει ότι $I = I_R + I_C$. Μέσω του νόμου του Ohm $I_R = V_m R_m$, όπου V_m η διαφορά δυναμικού μεταξύ του εσωτερικού χώρου της μεμβράνης με του εξωτερικού.

Το ρεύμα στον πυκνωτή είναι $I_C = C_m \frac{dV_m}{dt}$. Αντικαθιστώντας, θα ισχύει

$I = V_m R_m + C \frac{dV_m}{dt}$. Λύνοντας ως προς το διαφορικό εισάγουμε την μορφή

$$\frac{dV_m(t)}{dt} = -\frac{V_m(t)}{\tau_m} + \frac{I(t)}{C_m} \quad (2.1)$$

Η διαφορά δυναμικού της μεμβράνης είναι κανονικοποιημένη ως προς τη τιμή 0 Volt. Όμως στη πραγματικότητα η τιμή του δυναμικού ηρεμίας όπως έχει εξηγηθεί προηγουμένως, είναι $V_{rest} < 0$. Τελικά η διαφορική εξίσωση παίρνει την μορφή

$$\frac{dV_m(t)}{dt} = -\frac{V_m(t)}{\tau_m} + \frac{V_{rest}}{\tau_m} + \frac{I(t)}{C_m} \quad (2.2)$$

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

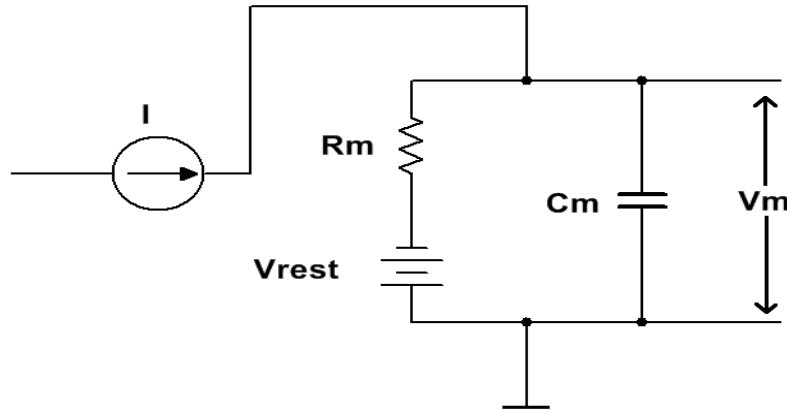


Figure 2.2: Το κυκλωματικό ανάλογο με τη τιμή του δυναμικού ηρεμίας να είναι διάφορο του μηδενός και μάλιστα αρνητική. Σε αυτή τη περίπτωση θα ισχύει ότι $I_R = (V_m - V_{rest}) R_m$.

Η τιμή τ_m είναι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος, ισούται με $\tau_m = R_m C_m$ και ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το “leaky” μέρος του μοντέλου.

Όταν ξεπεραστεί ένα δυναμικό κατωφλίου $V_{threshold}$ τότε προκαλείται ένα δυναμικό δράσης (spike) με τιμή V_{peak} και την αμέσως επόμενη στιγμή η τιμή του δυναμικού της μεμβράνης επαναφέρεται σε μία αρνητικότερη από την ηρεμία τιμή V_{reset} .

2.1.2 Μη γραμμικό Integrate and Fire

Στα μη γραμμικά μοντέλα η ανάκαμψη του δυναμικού της μεμβράνης από τη φάση της υπερπόλωσης περιγράφεται από εκθετικές συναρτήσεις [44]. Η γενική σχέση είναι η εξής.

$$\tau_m \frac{d}{dt} V_m = F(u) + G(u)I \quad (2.3)$$

Συγκρίνοντας την με την εξίσωση παρατηρείται ότι ο όρος $G(u)$ εκφράζει την μεταβολή της αντίστασης της μεμβράνης ανάλογα με το δυναμικό της. Από την άλλη ο όρος $F(u)$ αντιπροσωπεύει μία σταθερά η οποία φθίνει ανάλογα με το δυναμικό.

2.1.3 Εκθετικό Integrate and Fire

Το εκθετικό μοντέλο έχει την εξής μορφή:

$$\frac{d}{dt}V_m = -\frac{V_m}{\tau_m} + \frac{V_{rest}}{\tau_m} + \frac{\Delta T}{\tau_m} \exp\left(\frac{V_m - V_{rh}}{\Delta T}\right) + \frac{I}{C_m} \quad (2.4)$$

Το ΔT είναι ουσιαστικά η κλίση της καμπύλης και δηλώνει την οξύτητα της ή μη. Η V_{rh} ισούται με $I_c R_m$, όπου το I_c ονομάζεται ρεύμα ρεοβάσης (rheobase current) και εκφράζει την μικρότερη τιμή ρεύματος “εισόδου” συνεχούς χρόνου και μεγάλης διάρκειας το οποίο είναι ικανό να διεγείρει έναν νευρώνα αποδίδοντας ένα δυναμικό δράσης [45].

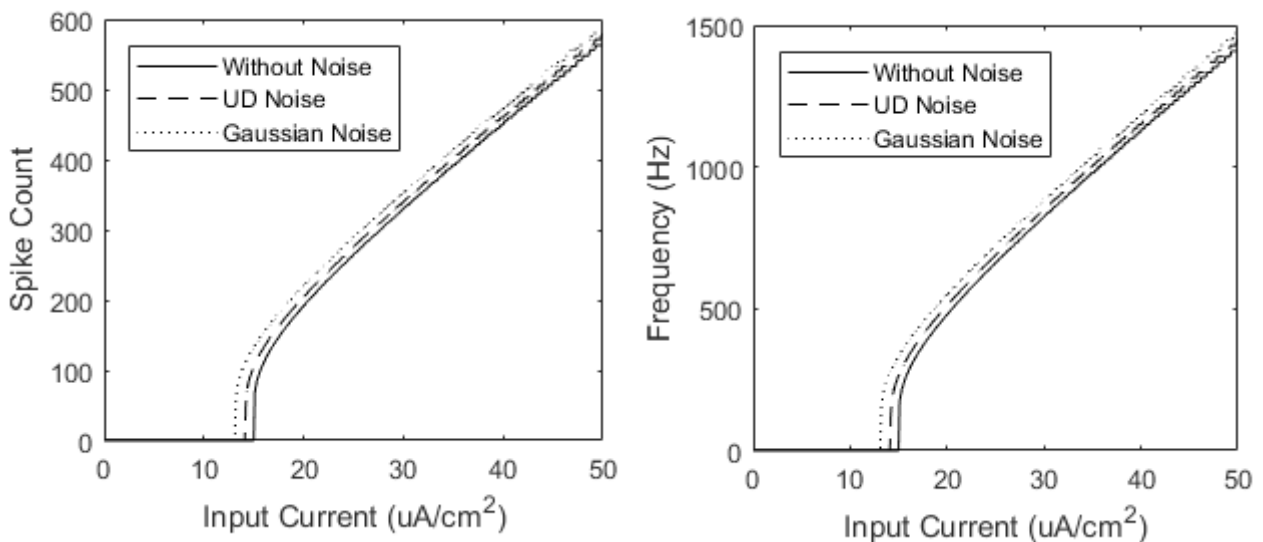


Figure 2.3: Διαγράμματα του αριθμού των δυναμικών δράσης και της συχνότητας αυτών συναρτήσει του ρεύματος στον νευρώνα. *LIF μοντέλο

Διερεύνηση των λείζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

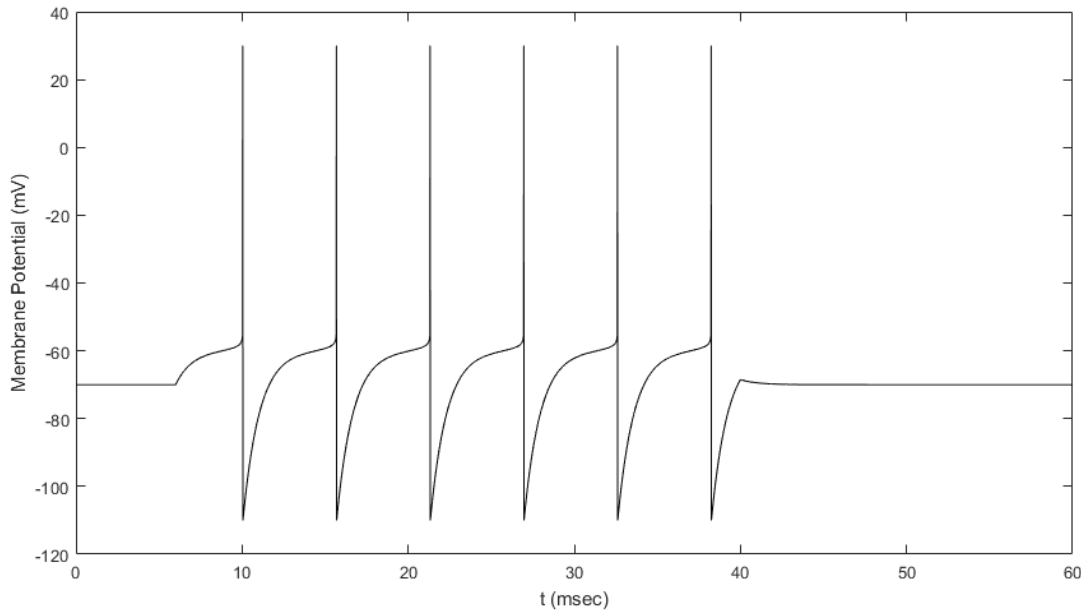


Figure 2.4: Το δυναμικό της μεμβράνης παρουσίας σταθερού ρεύματος $I=40 \text{ nA}$ στο μοντέλο Exponential IF. Παρατηρούμε πως αφού το δυναμικό ξεπεράσει το κατώφλι το εκθετικό μέρος της εξίσωσης κυριαρχεί δίνοντας το παραπάνω αποτέλεσμα. Οι τιμές είναι: $\Delta T = 0.001 \text{ V}$ και $V_{rh} = -60 \text{ mV}$. Οι υπόλοιπες δίνονται από τον πίνακα (2.1).

2.1.4 Τετραγωνικό Integrate and Fire

Είναι, όπως και το εκθετικό μοντέλο, μία ειδική περίπτωση των μη γραμμικών μοντέλων [46]. Έχει την μορφή:

$$\frac{d}{dt}V_m = \frac{\alpha_0}{\tau_m} (V_m - V_{rest}) (V_m - V_c) + \frac{I}{C_m} \quad (2.5)$$

με παραμέτρους $\alpha_0 < 0$ και $V_c < V_{rest}$.

Για μηδενική είσοδο παρατηρούνται τα εξής. Αν ισχύει ότι η αρχική συνθήκη είναι $V_m < V_c$ τότε το δυναμικό της μεμβράνης φτάνει στην τιμή ηρεμίας. Αν όμως ισχύει $V_m > V_c$ τότε το τάση αυξάνεται μέχρις ότου αποδοθεί ένα δυναμικό δράσης. Οπότε η V_c ορίζεται ως η κρίσιμη τιμή της τάσης στην οποία θα αποδοθεί ένα δυναμικό δράσης από έναν παλμό εισόδου πολύ μικρής διάρκειας.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

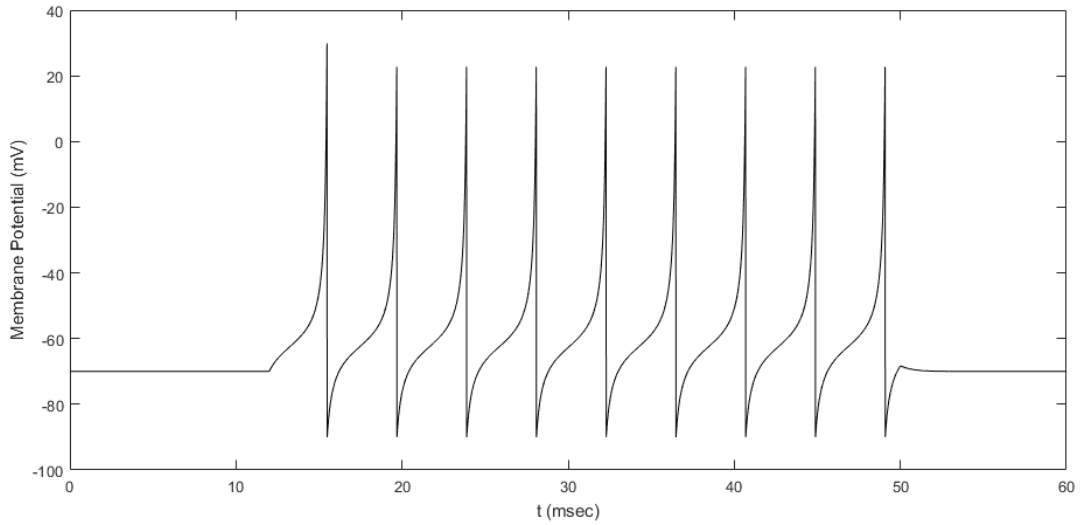


Figure 2.5: Το δυναμικό της μεμβράνης παρουσίας σταθερού ρεύματος $I=40 \text{ nA}$ στο μοντέλο Quadratic IF. Παρατηρείται ότι στο δυναμικό, πλέον, δίνεται ένα σχήμα έως ότου προσεγγίσει την μέγιστη τιμή. Η τιμή της παραμέτρου a_0 είναι 100. Οι υπόλοιπες τιμές δίνονται στον πίνακα (2.1).

2.1.5 Προσαρμοζόμενο Εκθετικό Integrate and Fire

Επειδή μόνο μία εξίσωση δεν είναι δυνατή για να περιγράψει τις περίπλοκες συμπεριφορές του νευρώνα, εισάγεται μία δεύτερη διαφορική εξίσωση η οποία έχει τον ρόλο του ρεύματος προσαρμογής [47].

$$\tau_m \frac{d}{dt} u = -(u - u_{rest}) + \Delta_T \exp\left(\frac{u - u_{rh}}{\Delta_T}\right) - R w + R I \quad (2.6)$$

$$\tau_w \frac{d}{dt} w = a(u - u_{rest}) - w + b \tau_w \sum_{t^{(f)}} \delta(t - t^{(f)}) \quad (2.7)$$

Η παράμετρος a έχει τον ρόλο του “συζεύκτη” μεταξύ του δυναμικού μεμβράνης και του ρεύματος αυτού και εξελίσσεται με σταθερά χρόνου τ_w . Αυτό τροφοδοτείται μέσω της αντίστασης στη τάση της μεμβράνης.

Όπως και σε προηγούμενα IF μοντέλα ένα δυναμικό δράσης προκαλείται όταν η τιμή της τάσης αυτής ξεπεράσει το κατώφλι. Η χρονική στιγμή αυτή είναι $t = t^{(f)}$. Σε αυτή τη χρονική στιγμή

το ρεύμα προσαρμογής αυξάνεται κατά b και το δυναμικό αυξάνεται στη μέγιστη τιμή u_{peak} και την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή μειώνεται στην τάση επαναφοράς u_{reset} .

Table 2.1: Τιμές των παραμέτρων ανάλογα με την συμπεριφορά του νευρώνα

Τύπος	τ_m (ms)	a (nS)	τ_w (ms)	b (pA)	u_{reset} (mV)
Tonic	20	0	30	60	-55
Adapting	20	0	100	5	-55
Initial Bursting	5	0.5	100	7	-51
Bursting	5	-0.5	100	7	-46
Irregular	0.01855	-0.5	100	7	-46
Transient	10	1	100	10	-60
Delay	5	-1	100	10	-60

2.1.6 Μοντέλο Integrate and Fire or Burst (IFB)

Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο προσπαθεί να προσομοιώσει την συμπεριφορά των αναμεταδοτών κυττάρων του θαλάμου του εγκεφάλου (thalamic relay cells), τα οποία μεταφέρουν πληροφορία στον φλοιό. Όταν, λοιπόν, σε αυτούς τους νευρώνες ενεργοποιείται η Ca^{++} αγωγιμότητα τότε ιόντα ασβεστίου εισέρχονται στην μεμβράνη, μέσω καναλιών ασβεστίου τύπου T (Transient) δημιουργώντας ένα διαμεμβρανικό ρεύμα I_T το οποίο οδηγεί σε αποπόλωση. Η κατάσταση αδράνειας του ρεύματος αυτού καθορίζει εάν η πληροφορία αναμεταδίδεται εκρηκτικά ή τονικά [48][49].

$$C \frac{d}{dt} V = I - I_L - I_T \quad , \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dt} h = \begin{cases} -\frac{h}{\tau_h^-} & (V > V_h) \\ \frac{1-h}{\tau_h^+} & (V < V_h) \end{cases} \quad . \quad (2.9)$$

Η μεταβλητή h περιγράφει την δυναμική του διαμεμβρανικού ρεύματος με σταθερές χρόνου τ_h^- η οποία θέτει την διάρκεια της “έκρηξης” (burst) και τ_h^+ η οποία ελέγχει τον ρυθμό αδρανοποίησης. Η τάση V_h είναι μία τάση κατωφλίου όπου υπό της ($V < V_h$) βρίσκεται η

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

περιοχή υπερπόλωσης όπου το ρεύμα αυτό είναι “απενεργοποιημένο” , ενώ στην αντίθετη περίπτωση ($V > V_h$) βρίσκεται σε περιοχή μη υπερπόλωσης όπου το ρεύμα είναι αδρανές.

Τα ρεύματα έχουν την εξής μορφή:

$$I_L = g_L(V - V_L) \quad (2.10)$$

$$I_T = g_T m_\infty h(V - V_T) \quad (2.11)$$

Το πρώτο είναι το ρεύμα διαρροής, όπως, συζητήθηκε στο Leaky IF. Στη δεύτερη περίπτωση το διαμεμβρανικό ρεύμα οδηγείται μέσω μίας αγωγιμότητας g_T . Η τάση V_T είναι το δυναμικό Nernst για τα ιόντα ασβεστίου. Η μεταβλητή m_∞ ελέγχει την χρονική στιγμή όπου ενεργοποιείται το κανάλι Ca^{++} και αναπαριστάται από την συνάρτηση Heaviside.

$$m_\infty(V) = H(V - V_h) = \begin{cases} 1 & (V > V_h) \\ 0 & (V < V_h) \end{cases} \quad (2.12)$$

Μόλις ξεπεραστεί το δυναμικό κατωφλίου V_θ τότε προκαλείται δυναμικό δράσης και το δυναμικό της μεμβράνης επαναφέρεται στην τιμή V_{reset}

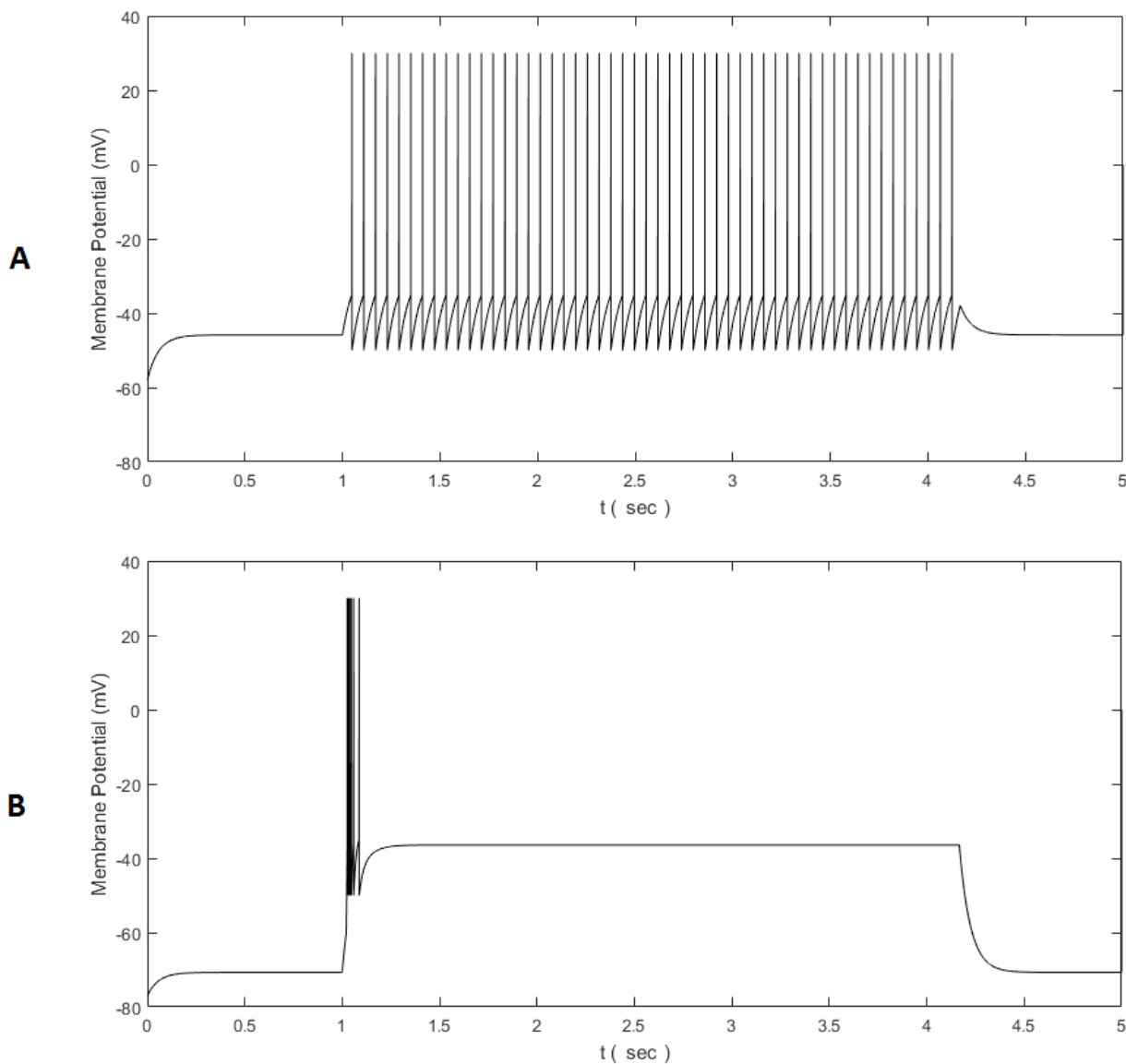


Figure 2.6: Δυναμικό δράσης στο IFB μοντέλο. A Τονική συμπεριφορά του νευρώνα. Προκαλείται όταν η αρχική κατάσταση του δυναμικού της μεμβράνης είναι -58 mV , με παρουσία σταθερού ρεύματος τιμής $I = 1.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ εντός του χρονικού παραθύρου $t_0 = 1 \text{ sec}$ έως $t_1 = 4.16 \text{ sec}$ και $I = 0.67 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ εκτός αυτού. B Εκρηκτική συμπεριφορά του νευρώνα η οποία προκαλείται όταν η αρχική κατάσταση του δυναμικού της μεμβράνης κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, πχ -77 mV . Ο χρόνος παρουσίας του ρεύματος εισόδου είναι ο ίδιος με την A περίπτωση όμως η τιμή πλέον είναι $I = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ και $I = 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ αντίστοιχα.

Table 2.2: Παράμετροι για το IFB μοντέλο

Παράμετροι	Τιμή
V_θ	-35 mV
V_L	-65 mV
C	$2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$
g_L	0.035 mS
V_{reset}	-50 mV
V_h	-60 mV
V_T	120 mV
τ_h^-	20 ms
τ_h^+	100 ms
g_T	0.07 mS

2.1.7 Μοντέλο Resonate and Fire

Σε πολλούς βιολογικούς νευρώνες παρατηρούνται ταλαντώσεις στο δυναμικό της μεμβράνης όταν βρίσκεται κάτω από την τιμή κατωφλίου [50]. Το μοντέλο αυτό περιγράφει το συγκεκριμένο φαινόμενο με τον πιο απλό τρόπο. Η βασική εξίσωση είναι η εξής:

$$\frac{d}{dt}z = (b + j\omega)z + I \quad (2.13)$$

Η μεταβλητή z είναι μιγαδική και περιγράφεται από ένα πραγματικό μέρος και ένα φανταστικό μέρος ώστε $z = x + jy$ με $x = \text{Real}(z)$ και $y = \text{Imaginary}(z)$. Η μεταβλητή αυτή την ταλαντευτική δραστηριότητα του νευρώνα. Η παράμετρος $b < 0$ είναι ο ρυθμός της έλξης προς την ηρεμία ενώ η παράμετρος ω η γωνιακή συχνότητα της ταλάντωσης.

Όταν το φανταστικό μέρος του z δηλαδή το y ξεπεράσει ένα όριο α_{thresh} τότε η μεταβλητή z λαμβάνει την τιμή $z_0 = -I/(b + j\omega)$.

2.2 Άλλα Μοντέλα

2.2.1 Μοντέλο Hodgkin-Huxley

Οι Hodgkin και Huxley το 1952 μετά από πειράματα στον γιγάντιο νευροάξονα των καλαμαριών κατέληξαν σε ένα μοντέλο το οποίο περιέχει τα κανάλια ιόντων νατρίου, καλίου και ένα κανάλι το οποίο αναφέρεται σε ρεύμα διαρροής που ουσιαστικά προσομοιώνει τα υπόλοιπα κανάλια [51][52]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κύκλωμα το οποίο αποτελείται από τρεις αγωγιμότητες οι οποίες αναπαριστούν τα κανάλια και έναν πυκνωτή. Οι αγωγιμότητες είναι g_{Na} για το κανάλι νατρίου g_K για το κανάλι καλίου και g_L για το κανάλι διαρροής, ενώ ο πυκνωτής C είναι η χωρητικότητα της μεμβράνης.

Όταν ένα ρεύμα εισέρχεται στον κοινό κόμβο, διαχωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Συνήθως τα ρεύματα στα κανάλια ομαδοποιούνται ως $\sum_k I_k(t)$. Οπότε το από νόμο ρευμάτων του Kirchhoff στον συγκεκριμένο κόμβο, θα ισχύει $I(t) = I_c(t) + \sum_k I_k(t)$.

Το ρεύμα στα κανάλια ισούται με

$$\sum_k I_k(t) = g_{Na} m^3 h (V - E_{Na}) + g_K n^4 (V - E_K) + g_L (V - E_L) \quad , \quad (2.14)$$

όπου E_{Na}, E_K, E_L οι διαφορές δυναμικού στις πύλες και m, n, h παράμετροι οι οποίες σχετίζονται με την πιθανότητα ένα κανάλι να είναι ανοιχτό όπου εκφράζονται από τις εξής διαφορικές εξισώσεις:

$$\frac{d}{dt} m = \alpha_m(V)(1-m) - \beta_m(V)m \quad (2.15)$$

$$\frac{d}{dt} n = \alpha_n(V)(1-n) - \beta_n(V)n \quad (2.16)$$

$$\frac{d}{dt} h = \alpha_h(V)(1-h) - \beta_h(V)h \quad (2.17)$$

Τα $\alpha_m, \alpha_n, \alpha_h$ ορίζονται ως

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

$$\alpha_n(V) = \frac{0.1 - 0.01V}{e^{(1-0.1V)} - 1}, \quad \beta_n(V) = 0.125e^{-V/80},$$

$$\alpha_m(V) = \frac{2.5 - 0.1V}{e^{(2.5-0.1V)} - 1}, \quad \beta_m(V) = 4e^{-V/18}, \quad (2.18)$$

$$a_h(V) = 0.07e^{-V/20}, \quad \beta_h = \frac{1}{e^{3-0.1V} + 1}.$$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι $E_{Na} = 115 \text{ mV}$, $E_K = -12 \text{ mV}$, $E_L = 10.6 \text{ mV}$
 $g_{Na} = 120 \frac{\text{mS}}{\text{cm}^2}$, $g_K = 36 \frac{\text{mS}}{\text{cm}^2}$, $g_L = 0.3 \frac{\text{mS}}{\text{cm}^2}$.

Το δυναμικό της μεμβράνης μέσω της ανάλυσης του κυκλώματος είναι

$$C \frac{d}{dt} V(t) = - \sum_k I_k(t) + I(t). \quad (2.19)$$

2.2.2 Μοντέλο FitzHugh-Nagumo

Ο FitzHugh το 1961 πρότεινε ένα μοντέλο το οποίο θα απομόνωνε τις μαθηματικές ιδιότητες της διέγερσης και της διάδοσης των ιόντων καλίου και νατρίου [53]. Ουσιαστικά πρόκειται για μία απλοποίηση του μοντέλου των Hodgkin-Huxley. Ο Nagumo το υλοποίησε αυτό σε κύκλωμα το 1962 [54]. Αποτελείται από μία μεταβλητή για το δυναμικό της μεμβράνης (v) και μία μεταβλητή αποκατάστασης (w). Αυτές στην γενική μορφή είναι οι εξής,

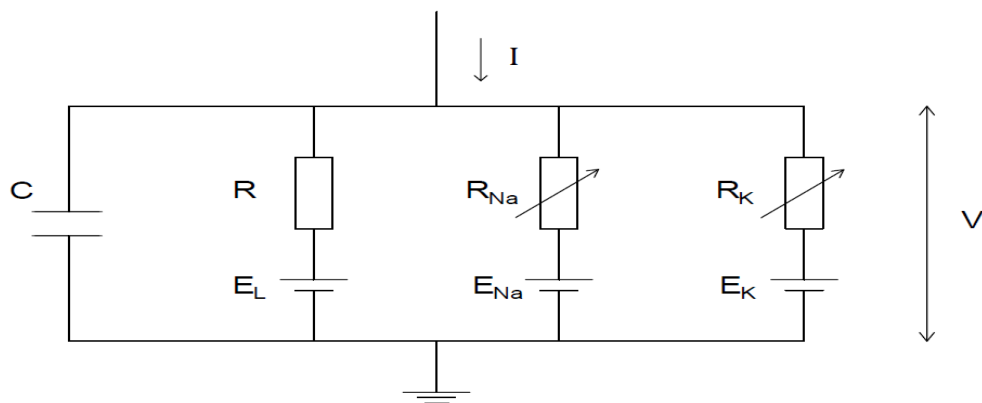


Figure 2.7: Το κύκλωμα του μοντέλου Hodgkin-Huxley το οποίο αποτελείται από τέσσερις κλάδους, ένας είναι η χωρητικότητα της μεμβράνης και αντιστοιχεί σε έναν πυκνωτή C . Οι άλλοι κλάδοι αντιστοιχούν στα κανάλια των ιόντων νατρίου και καλίου και στο στο κανάλι διαρροής με αντιστάσεις $R_{Na} = 1/g_{Na}$, $R_K = 1/g_K$, $R = 1/g_L$ και τα δυναμικά Nernst για την κάθε περίπτωση.

Διερεύνηση των λείζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

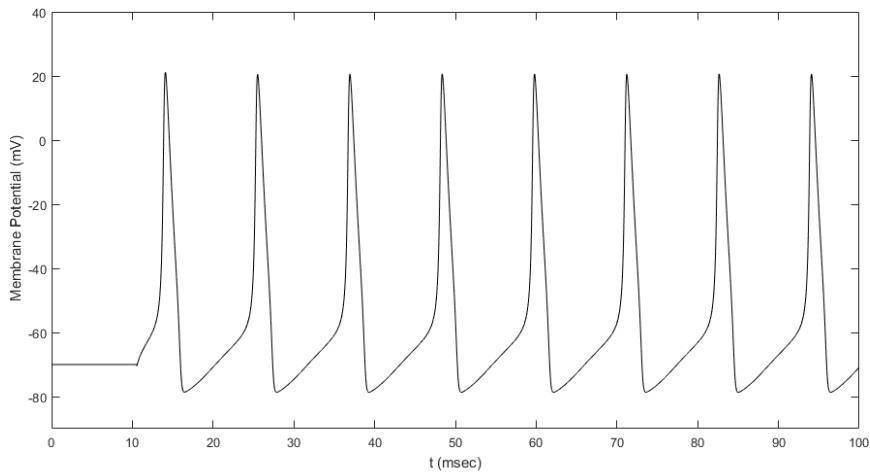


Figure 2.8: Δυναμικό δράσης στο Hodgkin-Huxley μοντέλο. Η τιμή της χωρητικότητας C είναι $0.9 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, ενώ του ρεύματος εισόδου $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

$$\frac{d}{dt}u = u - \frac{1}{3}u^3 - w + I \quad , \quad (2.20)$$

$$\frac{d}{dt}w = \varepsilon(b_0 + b_1u - w) \quad , \quad (2.21)$$

όπου $\varepsilon = \tau/\tau_w$, τ και τ_w οι σταθερές χρόνου για τις μεταβλητές αντίστοιχα, ενώ b_0, b_1 παράμετροι.

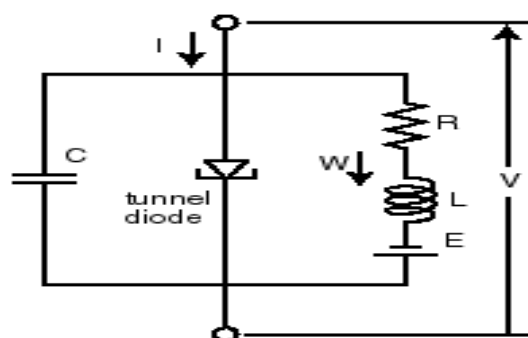


Figure 2.9: Το κυκλωματικό ανάλογο του μοντέλου FitzHugh-Nagumo.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

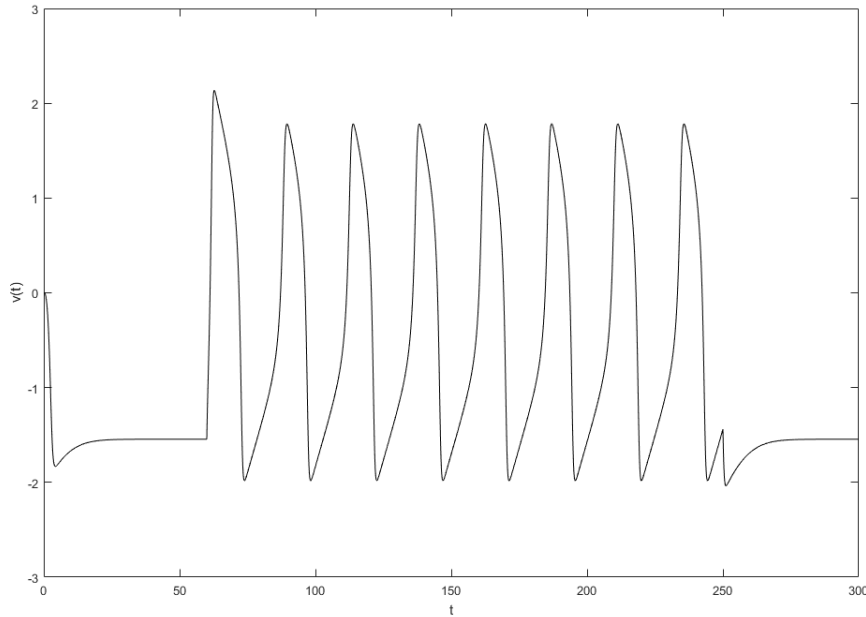


Figure 2.10: Γραφική απεικόνιση του μοντέλου FitzHugh-Nagumo με παραμέτρους $\epsilon=0.1$, $b_0=2$, $b_1=1.5$ και ρεύμα εισόδου $I=2$ [55] την χρονική στιγμή 60 έως 250. Οι τιμές στο μοντέλο είναι κανονικοποιημένες.

2.2.3 Μοντέλο Morris-Lecar

Οι Morris και Lecar το 1981 πραγματοποιώντας πειράματα στις μυικές ίνες θυσανόποδων (συγκεκριμένα στο *balanus nubilus*) προέβησαν σε ένα μοντέλο με δύο μεταξύ τους ανεξάρτητες αλλά εξαρτώμενες από το δυναμικό, αγωγιμότητες καλίου και ασβεστίου [56].

Το μοντέλο έχει ως εξής,

$$I = C \frac{d}{dt} V + g_L(V_L) + g_{Ca} M(V - V_{Ca}) + g_K N(V - V_K) \quad , \quad (2.22)$$

$$\frac{d}{dt} M = \lambda_M(V) [M_\infty(V) - M] \quad , \quad (2.23)$$

$$\frac{d}{dt} N = \lambda_N(V) [N_\infty(V) - N] \quad , \quad (2.24)$$

όπου C η χωρητικότητα της μεμβράνης σε $(\mu F/cm^2)$, g_L , g_{Ca} , g_K οι μέγιστες ή στιγμιαίες αγωγιμότητες για τα κανάλια διαρροής, ασβεστίου και καλίου αντίστοιχα σε (S/cm^2) ,

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

V_L, V_{Ca}, V_K τα δυναμικά ισορροπίας που αντιστοιχούν στις παραπάνω αγωγιμότητες, M, N το ποσοστό των Ca & K καναλιών την κάθε χρονική στιγμή στην οποία είναι ανοιγμένα, $M_\infty(V), N_\infty(V)$ το ποσοστό των Ca & K καναλιών στη μόνιμη κατάσταση και $\lambda_M(V), \lambda_N(V)$ οι σταθερές ρυθμού του ανοίγματος των καναλιών ασβεστίου και καλίου αντίστοιχα.

Οι σχέσεις αυτές είναι οι εξής.

$$\begin{aligned} M_\infty(V) &= 1/2 \left\{ 1 + \tanh \left[(V - V_1)/V_2 \right] \right\} , \\ \lambda_M(V) &= \bar{\lambda}_M \cosh \left([V - V_1]/2V_2 \right) , \\ N_\infty(V) &= 1/2 \left\{ 1 + \tanh \left[(V - V_3)/V_4 \right] \right\} , \\ \lambda_N(V) &= \bar{\lambda}_N \cosh \left([V - V_3]/2V_4 \right) . \end{aligned} \tag{2.25}$$

όπου $\bar{\lambda}_M, \bar{\lambda}_N$ οι μέγιστες σταθερές του ρυθμού ανοίγματος των δύο καναλιών, V_1 το δυναμικό στο οποίο ισχύει $M_\infty = 0.5$ (mV) , V_2 η αντίστροφος της κλίσης της M_∞ (mV) , V_3 το δυναμικό στο οποίο ισχύει $N_\infty = 0.5$ (mV) και V_4 η αντίστροφος της κλίσης της N_∞ (mV) .

Για την μελέτη της κατάστασης ταλάντωσης σε ένα γενικό βαθμό χρησιμοποιούνται οι εξής εξισώσεις, θεωρώντας ότι το σύστημα του Ca^{++} είναι τόσο γρήγορο από το σύστημα του καλίου K^+ ώστε η αγωγιμότητα του να είναι στην μόνιμη κατάσταση σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή $M = M_\infty(V)$.

Άρα:

$$I = C \frac{d}{dt} V + g_L(V - V_L) + g_{Ca} M_\infty(V) (V - V_{Ca}) + g_K N(V - V_K) , \tag{2.26}$$

$$\frac{d}{dt} N = \lambda_N(V) (N_\infty(V) - N) . \tag{2.27}$$

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

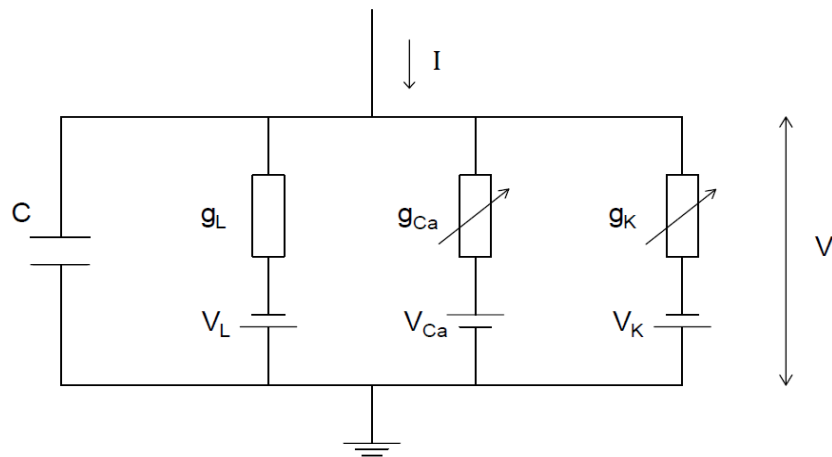


Figure 2.11: Το ανάλογο κύκλωμα του μοντέλου Morris-Lecar.

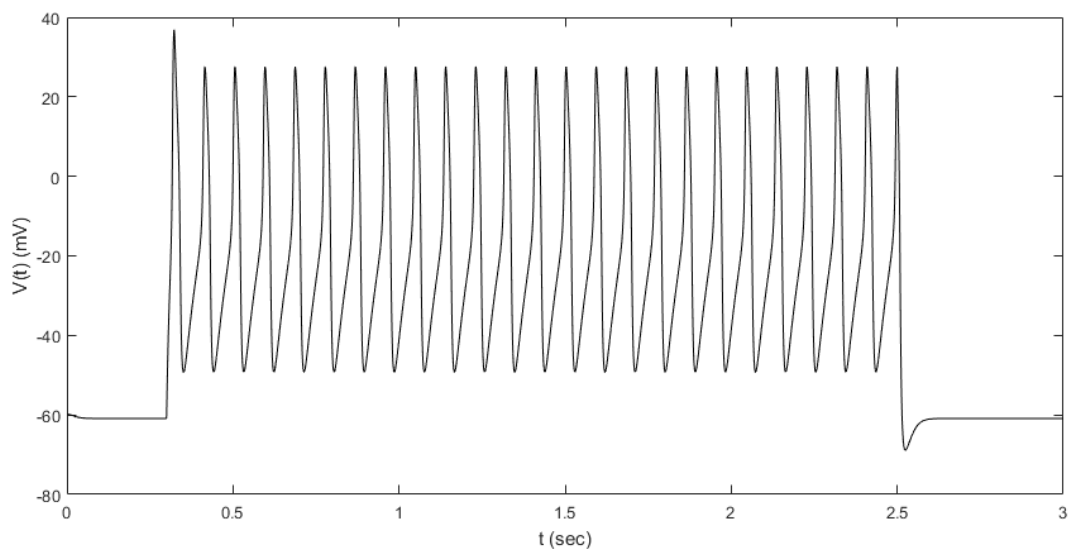


Figure 2.12: Το δυναμικό της μεμβράνης με είσοδο σταθερού ρεύματος $I=100$ (κλιμακωμένη τιμή) από την χρονική στιγμή $t_0=0.3$ sec έως $t_1=2.5$ sec και παραμέτρους $C=20$, $g_L=2$, $E_L=-60$, $g_{Ca}=4$, $E_{Ca}=120$, $g_K=8$, $E_K=-84$, $V_1=-1.2$, $V_2=18$, $V_3=2$, $V_4=30$ και $\lambda = 0.04$.

2.2.4 Μοντέλο Hindmarsh-Rose

Οι Hindmarsh και Rose πρότειναν το 1984 πρότειναν ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να αναλυθεί ως μία γενίκευση του μοντέλου των FitzHugh και Nagumo είτε ως και αυτό ως απλοποίηση του μοντέλου των Hodgkin και Huxley [57]. Έχει αποδειχθεί πως είναι υπολογιστικά απλό αλλά

Διερεύνηση των λείζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

παρέχει την δυνατότητα για την ανάλυση όλων, σχεδόν, των συμπεριφορών των νευρώνων. Αποτελείται από τρεις διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι οι εξής,

$$\frac{d}{dt}x = y - x^3 + bx^2 + I - z \quad , \quad (2.28)$$

$$\frac{d}{dt}y = 1 - 5x^2 - y \quad , \quad (2.29)$$

$$\frac{d}{dt}z = \mu[s(x - x_{rest}) - z] \quad . \quad (2.30)$$

Οι παράμετροι αυτού του συστήματος έχουν τον εξής ρόλο: το I εξομοιώνει το συναπτικό ρεύμα, δηλαδή, το ρεύμα εισόδου στην μεμβράνη των νευρώνων, το b επιτρέπει την αλλαγή στην συμπεριφορά του νευρώνα και τον έλεγχο της συχνότητας των παλμών εξόδου, το μ ελέγχει την ταχύτητα αλλαγής της μεταβλητής z , το s είναι παράμετρος για την προσαρμογή, ενώ το x_{rest} είναι το δυναμικό ηρεμίας. Η έξοδος, δηλαδή το δυναμικό της μεμβράνης, εκφράζεται από την μεταβλητή x .

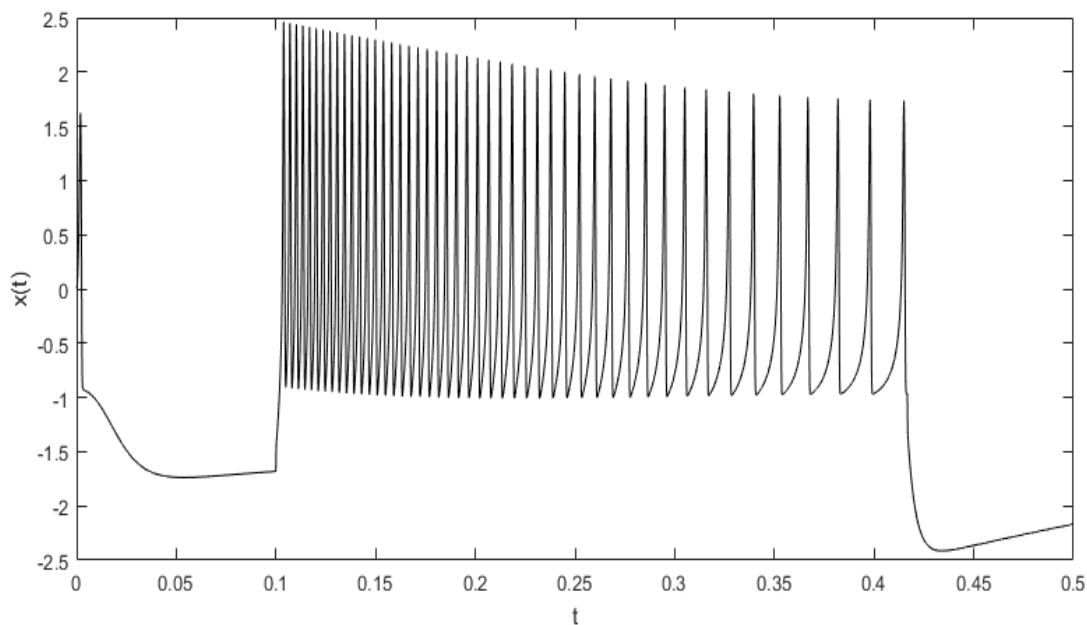


Figure 2.13: Γραφική παράσταση του δυναμικού της μεμβράνης με παραμέτρους $x_{rest}=-1.6$, $\mu=0.005$, $b=3$, $s=4$ [58] με σταθερό ρεύμα εισόδου $I=4$ την χρονική στιγμή $t_0=0.1$ έως $t_1=0.42$. Πρόκειται για έναν νευρώνα που προσαρμόζει το δυναμικό δράσης στον χρόνο. Οι τιμές των αξόνων είναι κλιμακωμένες ενώ παρατηρείται κατά τις πρώτες χρονικές στιγμές μεταβατικό φαινόμενο.

2.2.5 Wilson Model

Ο Wilson το 1999 πρότεινε ένα μοντέλο το οποίο είναι μία απλουστευμένη προσέγγιση της συμπεριφοράς των νευρώνων του νεοφλοιού των θηλαστικών και των ανθρώπων [59]. Το σύστημα των εξισώσεων είναι το εξής:

$$C \frac{d}{dt} V = -G_{Na}(V - E_{Na}) - G_K(V - E_K) - G_{Ca}(V - E_{Ca}) - G_H(V - E_H) + I \quad , \quad (2.31)$$

όπου

$$\begin{aligned} G_K &= g_K R \quad , \\ G_{Na} &= 17.8 + 47.6 V + 33.8 V^2 \quad , \\ G_{Ca} &= g_T T \quad , \\ G_H &= g_H H \quad , \end{aligned} \quad (2.32)$$

είναι οι αγωγιμότητες των καναλιών καλίου, νατρίου, ασβεστίου και την αγωγιμότητα ενός καναλιού καλίου το οποίο είναι εξαρτημένο από το ασβέστιο με g_K, g_T, g_H οι παράμετροι των αγωγιμοτήτων και R, T, H είναι οι μεταβλητές ενεργοποίησης του Wilson.

Οι μεταβλητές αυτές αναλύονται ως

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} R &= \frac{1}{\tau_R} (-R + R_\infty(V)) \quad , \\ \frac{d}{dt} T &= \frac{1}{\tau_T} (-T + T_\infty(V)) \quad , \\ \frac{d}{dt} H &= \frac{1}{\tau_H} (-H + -3T(V)) \quad , \end{aligned} \quad (2.32)$$

όπου τ_R, τ_T, τ_H οι σταθερές χρόνου και

$$\begin{aligned} R_\infty &= 1.24 + 3.7 V + 3.2 V^2 \quad , \\ T_\infty &= 4.205 + 11.6 V + 8 V^2 \quad . \end{aligned} \quad (2.33)$$

Οι εξισώσεις αυτές είναι κλιμακωμένες ως προς το 100, δηλαδή οι τάσεις διαιρούνται με το 100 ενώ η χωρητικότητα και οι αγωγιμότητες πολλαπλασιάζονται με αυτή τη τιμή. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τιμές για έναν τυπικό νευρώνα [60].

Table 2.3: Τιμές Νευρώνα του Wilson

	Πραγματικές Τιμές	Κλιμακωτές Τιμές
C	$1 \mu F / cm^2$	-
E_{Na}	$50 mV$	0.5
E_K	$-95 mV$	-0.95
E_{Ca}	$120 mV$	1.20
E_H	$-95 mV$	-0.95
g_K	$0.26 \mu S$	26
τ_T	$14 msec$	14
t_H	$45 msec$	45

Οι τιμές αυτές είναι κοινές σε κάθε είδος δυναμικής των νευρώνων.

Οι υπόλοιπες τιμές είναι οι εξής:

Για RS νευρώνα:

$$g_T = 10^{-4} \mu S \quad \text{ή} \quad g_T = 0.1 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή,}$$

$$g_H = 0.05 \mu S \quad \text{ή} \quad g_H = 5 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή,}$$

$$\tau_R = 4.2 msec \quad \text{ή} \quad \tau_R = 4.2 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή.}$$

Για FS νευρώνα:

$$g_T = 2.5 \cdot 10^{-3} \mu S \quad \text{ή} \quad g_T = 0.25 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή,}$$

$$g_H = 0 \mu S$$

$$\tau_R = 1.5 msec \quad \text{ή} \quad \tau_R = 1.5 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή.}$$

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

Για CB νευρώνα:

$$g_T = 0.0225 \mu S \quad \text{ή} \quad g_T = 2.25 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή,}$$

$$g_H = 0.095 \mu S \quad \text{ή} \quad g_H = 9.5 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή,}$$

$$\tau_R = 4.2 \text{ msec} \quad \text{ή} \quad \tau_R = 4.2 \quad \text{σε κλιμακωτή τιμή.}$$

Για IB νευρώνα καταγράφηκαν δύο υποκατηγορίες:

Table 2.4: Τιμές IB νευρώνα

	Πρώτη Υποκατηγορία		Δεύτερη Υποκατηγορία	
	Πραγματικές	Κλιμακωτές	Πραγματικές	Κλιμακωτές
g_T	0.008 μS	0.8	0.012 μS	1.2
g_H	0.04 μS	4.0	0.034 μS	3.4
τ_R	4.2 msec	4.2	4.2 msec	4.2

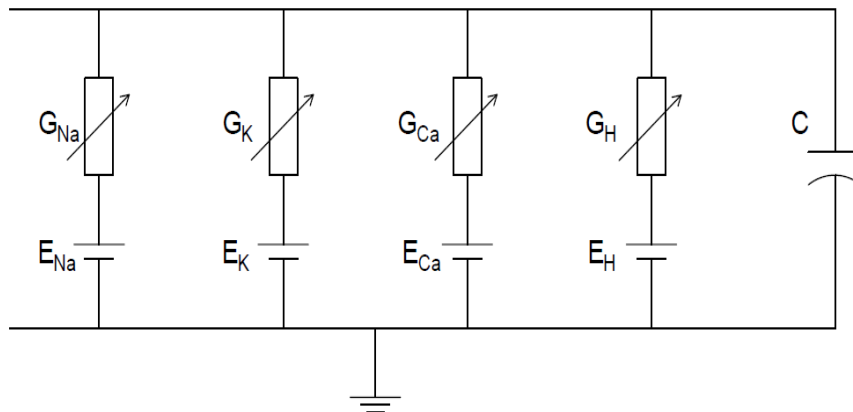


Figure 2.14: Το κυκλωματικό ανάλογο του μοντέλου του Wilson το οποίο αποτελείται από μία χωρητικότητα (πυκνωτής C), τέσσερις αγωγιμότητες και ισάριθμα δυναμικά Nernst για όλα τα κανάλια ιόντων.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

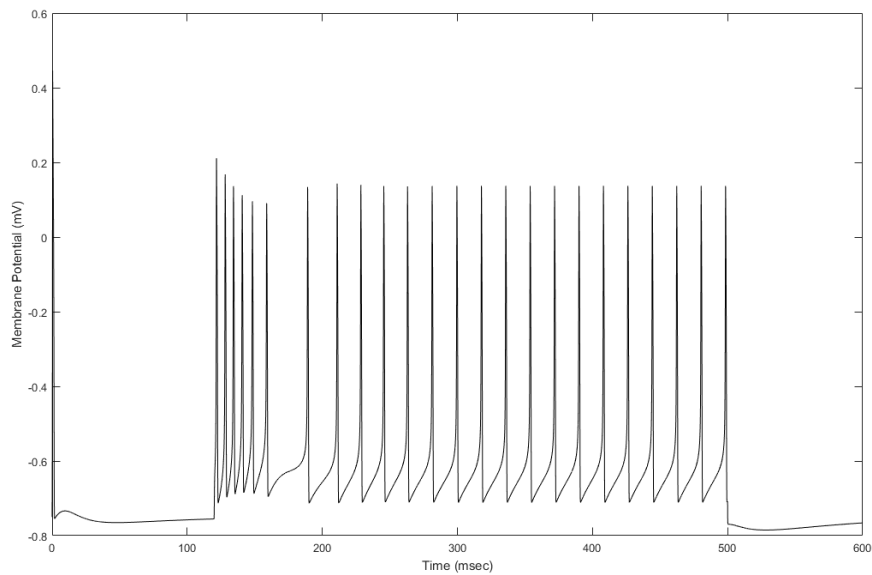


Figure 2.15: Η απόκριση του δυναμικού μεμβράνης στο μοντέλο Wilson με είσοδο ένα συνεχές ρεύμα $I=1$ (κλιμακωμένη τιμή) σε έναν IB νευρώνα της πρώτης υποκατηγορίας.

2.2.6 Το Μοντέλο του Izhikevich

Το 2003 ο Izhikevich προτείνει ένα δισδιάστατο μοντέλο το οποίο παρέχει την δυνατότητα ταχέων υπολογισμών και συνάμα βιολογικής ακρίβειας και περιπλοκότητας [61]. Το μοντέλο αυτό ουσιαστικά χρησιμοποιεί το δευτεροβάθμιο IF μοντέλο με χρήση της μεταβλητής ανάκτησης. Οι διαφορικές εξισώσεις είναι οι εξής.

$$\frac{d}{dt}u = 0.04u^2 + 5u + 140 - v + I \quad , \quad (2.34)$$

$$\frac{d}{dt}v = a(bu - v) \quad . \quad (2.35)$$

Με την εμφάνιση του παλμού (spike) γίνεται επαναφορά στο σύστημα δηλαδή:

$$\text{αν } u \geq 30 \text{ mV, τότε } \begin{cases} u \leftarrow c \\ v \leftarrow v + d \end{cases}$$

όπου a, b, c, d αδιάστατοι παράμετροι, u το δυναμικό της μεμβράνης και v η μεταβλητή ανάκτησης.

Η παράμετρος a περιγράφει την χρονική κλίμακα της μεταβλητής ανάκτησης. Η παράμετρος b περιγράφει την ευαισθησία της μεταβλητής αυτής στις διακυμάνσεις του δυναμικού u στα επίπεδα υπό του κατωφλίου. Η παράμετρος c ορίζει την τιμή της επαναφοράς του δυναμικού μετά τον παλμό που προκαλείται από τις άνω κατωφλίου ταχείες K^+ αγωγιμότητες και με d ορίζεται η παράμετρος της για την επαναφορά της μεταβλητής ανάκτησης μετά την πρόκληση παλμού, η οποία προκαλείται από άνω κατωφλίου αργές Na^+ και K^+ αγωγιμότητες.

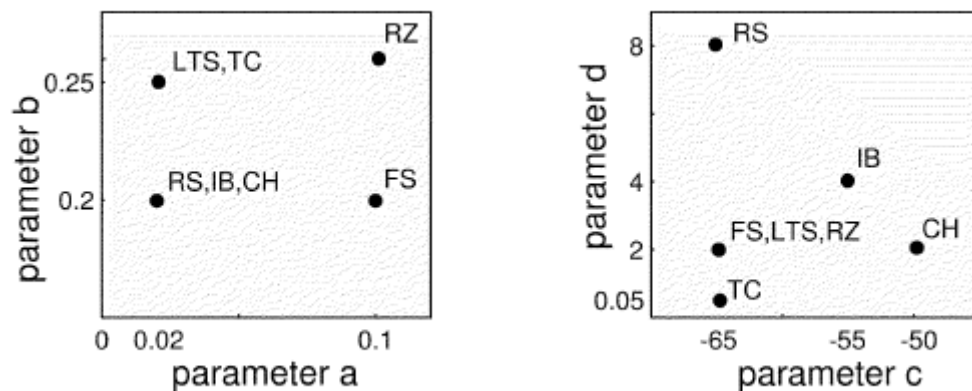


Figure 2.16: Τιμές των παραμέτρων ανάλογα με την συμπεριφορά του νευρώνα.

Διερεύνηση των λείζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

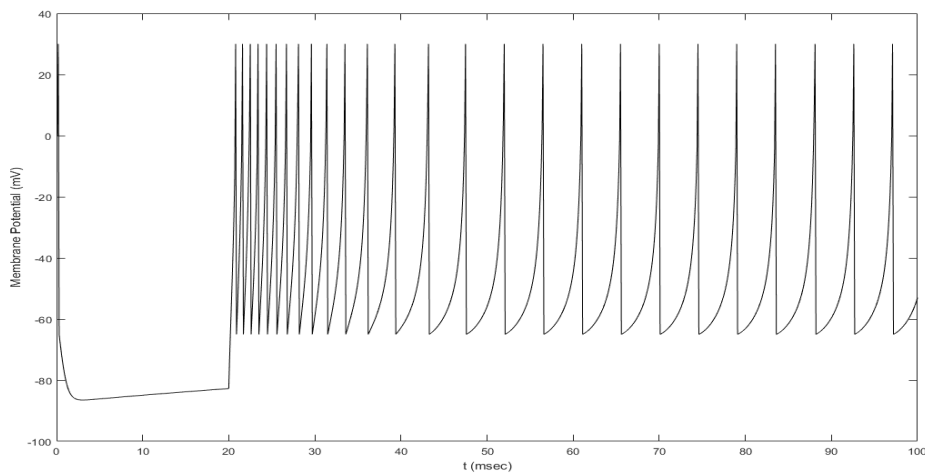


Figure 2.17: Το δυναμικό μεμβράνης για ένα RS νευρώνα με τιμές παραμέτρων $\alpha=0.02$, $b=0.2$, $c=-65$, $d=8$ με διέγερση συνεχούς ρεύματος $I=100$ (κλιμακωμένη τιμή) από την χρονική στιγμή $t_0=20$ msec έως $t_1=100$ msec. Στα πρώτα msec παρατηρείται το μεταβατικό φαινόμενο το οποίο προκύπτει εάν η μεταβλητή ανάκτησης και το δυναμικό μεμβράνης δεν βρίσκονται στις τιμές ηρεμίας.

Models	biophysically meaningful	tonic spiking	phasic spiking	tonic bursting	phasic bursting	mixed mode	spike 1 frequency adaptation	class 1 excitable	class 2 excitable	spike latency	subthreshold oscillations	resonator	integrator	rebound spike	rebound burst	threshold variability	biability	DAP	accommodation	inhibition-induced spiking	inhibition-induced bursting	chaos	# of FLOPS	
integrate-and-fire	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
integrate-and-fire with adapt.	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	10
integrate-and-fire-or-burst	-	+	+		+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	13	
resonate-and-fire	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	10	
quadratic integrate-and-fire	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	7	
Izhikevich (2003)	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	13	
FitzHugh-Nagumo	-	+	+	-		-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	72	
Hindmarsh-Rose	-	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	120	
Morris-Lecar	+	+	+	-		-	-	+	+	+	+	+	+	+		+	+	-	+	+	-	-	600	
Wilson	-	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						180	
Hodgkin-Huxley	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1200	

Figure 2.18: Οι δυνατότητες του κάθε μοντέλου σε κάθε συμπεριφορά των νευρώνων. Το # of FLOPS δηλώνει τον αριθμό των πράξεων (προσθέσεις, πολ/σμούς κλπ) που γίνονται σε διάρκεια 1 ms.

3 Κεφάλαιο III: Laser Παθητικής Εγκλειδωσης Ρυθμών

Αρχικά παρατηρούμε ένα απλό ημιαγωγικό laser [62]. Ένα τέτοιο laser αποτελείται από μία κοιλότητα, όπως πχ Fabry-Perot ή Ring. Για ευκολία στην εξήγησή της υποθέσουμε πως είναι Fabry-Perot το οποίο ουσιαστικά είναι δύο κάτοπτρα με ανακλαστικότητες R και R' όπου συνήθως $R' < R$ ώστε το πεδίο που δημιουργείται να μην εγκλωβίζεται εντός της κοιλότητας. Μέσα σε αυτήν υπάρχει το ενεργό υλικό (active medium ή αλλιώς gain section) το οποίο περιέχει τους φορείς και καθορίζει το φάσμα και την συχνότητα λειτουργίας, λειτουργεί δηλαδή και ως ένα είδος φίλτρου. Για να υπάρξει δράση laser απαιτείται ένας μηχανισμός διέγερσης των φορέων του ενεργού υλικού. Ο μηχανισμός αυτός γίνεται με μία εξωτερική πηγή (οπτική ή ηλεκτρική) γνωστή και ως άντληση.

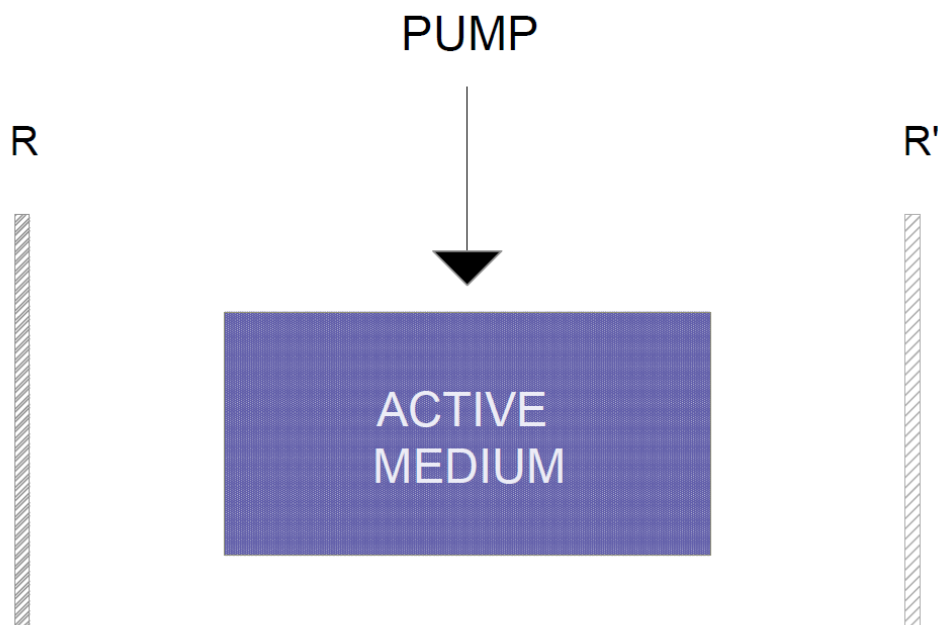


Figure 3.1: Απλοποιημένο διάγραμμα της δομής ενός Laser.

Εάν σε αυτό το σύστημα εισαχθεί η άντληση τότε οι φορείς διεγείρονται σε ανώτερες κβαντικές στάθμες. Μετά από μέσο χρόνο τ αυτοί αποδιεγείρονται εκπέμποντας, κατά πλειοψηφία, φωτόνια ενέργειας ίσης με την διαφορά ενεργειών των δύο σταθμών.

Στην πραγματικότητα οι φορείς αυτοί διεγείρονται αρχικά σε μία διαφορετική στάθμη στην οποία αποδιεγείρονται στην στάθμη ενδιαφέροντος (σε αυτήν δηλαδή που έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί) χωρίς εκπομπή φωτονίων. Τα φωτόνια αυτά, τυχαίας πόλωσης και φάσης, καθώς ταξιδεύουν στην κοιλότητα και ανακλώμενα από τα κάτοπτρα εν τέλει συμβάλλουν με αυτά που συνεχώς παράγονται με αποτέλεσμα την επιβίωση των φωτονίων (σκεπτόμενοι την κυματική φύση του φωτός) αυτών με συχνότητα (και φάση) ανάλογη της απόστασης των κατόπτρων L , διότι σε αυτές συμβάλλουν ενισχυτικά. Αυτό φασματικά παράγει τους λεγόμενους τρόπους. Το ενεργό υλικό

επιτρέπει μόνο ένα συγκεκριμένο φάσμα να δημιουργηθεί καθώς, χωρίς τον περιορισμό αυτόν οι τρόποι εκτείνονται από το μηδέν έως το άπειρο.

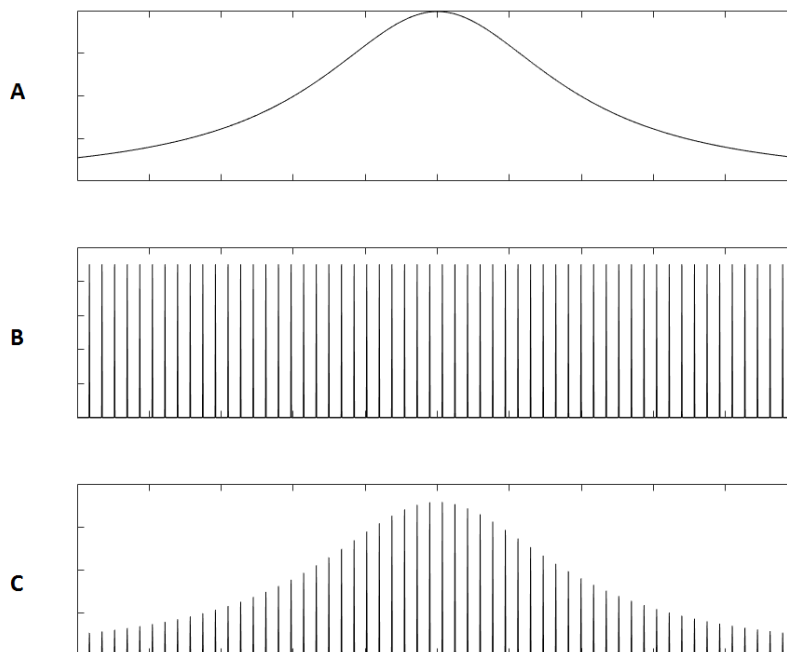


Figure 3.2: **A** Το φάσμα ενός ενεργού υλικού. **B** οι τρόποι που υποστηρίζονται από την κοιλότητα και **C** το πραγματικό φάσμα του Laser καθώς οι δύο παραπάνω αποκρίσεις πολλαπλασιάζονται στο πεδίο της συχνότητας.

Για την δημιουργία ενός Continuous Wave Laser είναι σαφές πως απαιτείται η ύπαρξη ενός μόνο τρόπου ο οποίος μάλιστα είναι επιθυμητός να είναι όσο το δυνατότερο οξύτερος, ιδανικά, μία μόλις συχνότητα. Η προσέγγιση αυτής της λειτουργίας υλοποιείται με μείωση της απόστασης των κατόπτρων και επιλογή ενεργού υλικού με στενό εύρος φασματικής απόκρισης.

Αν θέλαμε, όμως, να μελετήσουμε την περίπτωση ενός MLL θα έπρεπε, αρχικά, να χρησιμοποιήσουμε ένα πλήθος από συχνότητες, οπότε η παραπάνω τεχνική αμελείται [63]. Φασματικά, λοιπόν, θα υπάρχουν πολλές συχνότητες.

Οι συχνότητες αυτές (αν και έχουν ένα μικρό εύρος) στο πεδίο του χρόνου αντιστοιχούν σε ημιτονοειδή κύματα τα οποία μεταξύ τους έχουν διαφορά συχνότητας:

$$\Delta\nu = \frac{u_g}{2L} \quad , \quad (3.1)$$

όπου u_g η ομαδική ταχύτητα των κυμάτων εντός της κοιλότητας.

Η σχετική φάση αυτών των κυμάτων, δηλαδή η φάση μεταξύ τους, είναι τυχαία καθώς δεν τίθεται κάποιος περιορισμός από την κοιλότητα. Σε αυτήν την περίπτωση το πεδίο εσωτερικά θα είναι

$$E(t) = A \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(\omega_n t + \varphi_n)} \quad (3.2)$$

όπου A το πλάτος του κάθε κύματος, $\omega_n = \omega + n \cdot 2\pi\Delta\nu$ οι συχνότητες των κυμάτων, φ_n φάση και N το πλήθος των κυμάτων.

Παρατηρεί κανείς από την εξίσωση (3.2) πως εάν φάση είναι τυχαία τότε το πεδίο θα έχει μία τυχαία ένταση και μορφή. Η επιθυμία για δημιουργία παλμών οδηγεί στην σκέψη για σχετική φάση η οποία θα είναι ίδια για κάθε κύμα. Το άθροισμα, τότε, αυτών θα οδηγούσε σε ενισχυτική συμβολή σε συγκεκριμένα σημεία και καταστροφική στα υπόλοιπα

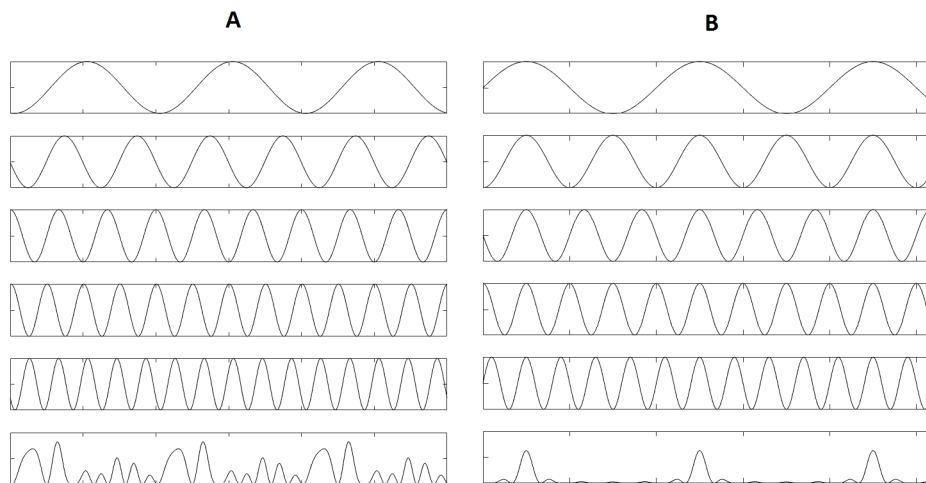


Figure 3.3: Άθροισμα 5 κυμάτων με σταθερή διαφορά συχνότητας και A τυχαία σχετική φάση και B σταθερή σχετική φάση.

Η κατάσταση αυτή μπορεί να προκληθεί με την εισαγωγή ενός Saturable Absorber (SA) εντός της κοιλότητας. Πρόκειται για ένα υλικό το οποίο απορροφά φωτόνια εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο απώλειες [64]. Η ικανότητα του, αυτή, εξαρτάται από την ένταση του προσπίπτοντος πεδίου. Όσο πιο ισχυρό είναι αυτό, τόσο μειώνεται η ικανότητα απορρόφησης.

Στην απλή εκδοχή, πρόκειται για απορρόφηση φωτονίων και διέγερση των φορέων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Εάν ο χρόνος ζωής αυτών σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες αυξηθεί τότε με την συνεχή παρουσία πεδίου, άρα και την συνεχή διέγερση φορέων, δεν θα υπάρχουν φορείς στην χαμηλότερη στάθμη για να συμμετέχουν στην διαδικασία απορρόφησης με αποτέλεσμα ο SA να κορεστεί και άρα όλο το πεδίο να καταφέρει να περάσει [65].

Η χρησιμότητα του SA σε ένα MLL είναι αρχικά η παροχή μηχανισμού παραγωγής παλμών. Δευτερευόντως και εφόσον έχει σταθεροποιηθεί η λειτουργία του, να παρέχει έναν επιπλέον μηχανισμό για την μείωση του εύρους των παλμών που παράγονται.

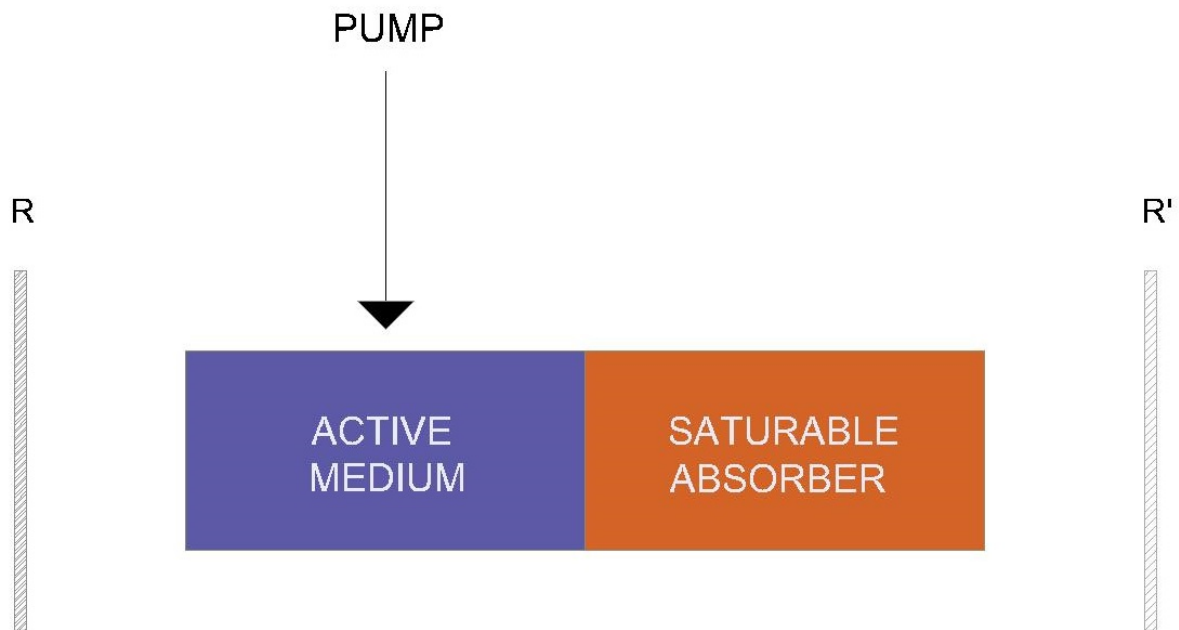


Figure 3.4: Διάγραμμα ενός απλού passively MLL.

Για να λειτουργήσει ικανοποιητικά θα πρέπει να πληρεί τα εξής χαρακτηριστικά [66]. Η ένταση κορεσμού του SA πρέπει να είναι υψηλότερη από την ένταση του πεδίου οδεύοντα κύματος εντός της κοιλότητας ώστε να μην κορεστεί εντελώς με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υποστηρίξει την δημιουργία παλμών. Ο χρόνος ανάκτησης των φορέων πρέπει να είναι μικρότερος από την περίοδο των παλμών που γεννιούνται καθώς σε επόμενο παλμό ο SA δε θα βρίσκεται στην κατάσταση ηρεμίας ώστε να υποδεχθεί τον επόμενο. Γενικά, αυξημένος χρόνος ανάκτησης φορέων οδηγεί σε μείωση του χρόνου ευσταθής λειτουργίας του MLL δηλαδή σε καλύτερο χρόνο εκκίνησης. Αντιθέτως, μειωμένος χρόνος οδηγεί σε μικρότερο εύρος παραχθέντων παλμών.

3.1 Υλικά για SA

Τα υλικά αυτά πρέπει να πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις. Κάποια δημοφιλή και ‘τελευταίας τεχνολογίας’ υλικά είναι το κβαντικό πηγάδι (quantum well), οι κβαντικές κηλίδες (quantum dots) και το γραφένιο (graphene).

Το κβαντικό πηγάδι είναι ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγικής δομής το οποίο περικλείεται από άλλες ημιαγωγικές δομές. Οι δύο αυτές δομές έχουν διαφορετικό ενεργειακό χάσμα και κατασκευάζονται

από διαφορετικά υλικά. Λόγω αυτής της ενεργειακής διαφοράς οι φορείς περιορίζονται μέσα σε αυτό το λεπτό στρώμα. Μάλιστα το τελευταίο είναι τόσο λεπτό ώστε να συγκρίνεται με το μήκος κύματος De Broglie. Σε μία τέτοια περίπτωση η ενέργεια κβαντίζεται και η πιθανότητα εύρεσης φορέων, σε μία ενεργειακή στάθμη, στον χώρο αντιστοιχεί σε διακριτά στάσιμα κύματα. Οι φορείς, λοιπόν, περιορίζονται και χωρικά σε ένα δισδιάστατο επίπεδο [67].

Οι κβαντικές κηλίδες είναι ημιαγωγοί κρύσταλλοι των οποίων το μέγεθος μπορεί να συγκριθεί με την ακτίνα Bohr. Λόγω αυτού οι δομές αυτές περιορίζονται σε όλες τις διαστάσεις του χώρου, δηλαδή πρόκειται για 0-D σύστημα, εμφανίζοντας έτσι διακριτά ενεργειακά επίπεδα [68]. Επιπλέον το ενεργειακό τους χάσμα μπορεί με ακρίβεια να διαμορφωθεί αλλάζοντας το μέγεθός τους [69]. Πλεονεκτήματα αυτών είναι η ευρεία απορρόφηση, οι στενές φασματικές γραμμές και η υψηλή σταθερότητα του φωτός [70].

Το γραφένιο είναι μία δισδιάστατη δομή αποτελούμενη από άτομα άνθρακα σε εξαγωνική κρυσταλλική δομή με sp^2 δεσμούς. Έχει υψηλή επιφανειακή έκταση, κινητικότητα ηλεκτρονίων, θερμική αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή [71]. Στα laser, λόγω του πολύ χαμηλού χρόνου ανάκτησης των φορέων καθώς και του ισχυρού κορεσμού του και της ευρείας φασματικής απόκρισης, έχει χρησιμοποιηθεί ως fast SA με παραγωγή παλμών έως και κάτω από τα 20 femtosecnds. [72]

Μεταξύ άλλων έχουν χρησιμοποιηθεί και υλικά όπως ημιαγωγοί SA καθρέπτες (SESAMs), κάτοπτρο Kerr, οπτική βαφή, νανοσωλήνες άνθρακα κλπ [73-76].

3.2 Δυναμική του Passively Mode Locked Laser

Συγκριτικά με το ενεργό υλικό ή αλλιώς gain section (GS), οι απώλειες του SA πρέπει να είναι μεγαλύτερες από το κέρδος σε κάθε γύρο ταξιδιού του παλμού. Έτσι το πεδίο φτάνοντας στον SA απορροφάται και οι φορείς που δημιουργούνται μειώνουν τις απώλειες έως ότου φτάσει σε κορεσμό. Όταν συμβεί το τελευταίο τότε το υλικό “αναρρώνει” έως ότου ανακτήσει την κατάσταση ηρεμίας του. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει και με το GS με την διαφορά ότι ο χρόνος “ανάρρωσης” (refractory period) και κορεσμού είναι πιο αργός. Στην φάση, λοιπόν, που γίνεται ο κορεσμός δημιουργείται ένα παράθυρο όπου η ενίσχυση (gain) είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες. Σε εκείνο το παράθυρο (net window) σχηματίζεται ο παλμός. Το εύρος αυτού καθορίζει και το εύρος του παλμού [77].

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

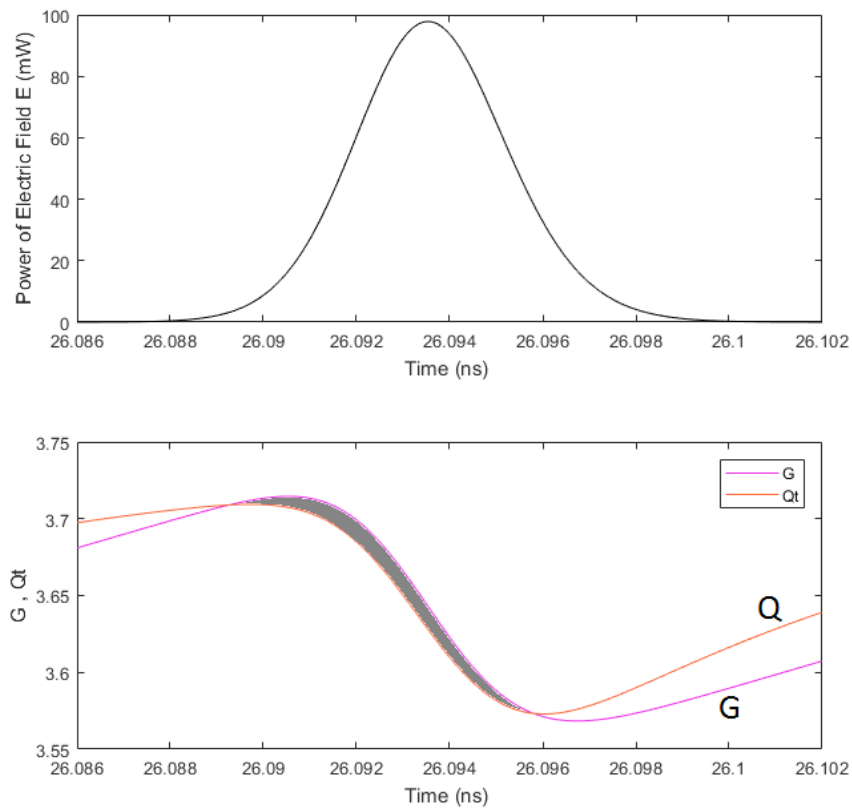


Figure 3.5: Γραφική παράσταση της δημιουργίας ενός παλμού. Τα G & Qt αντιστοιχούν στο κέρδος και τις απώλειες αντίστοιχα. Στο γκριζο τμήμα συμβαίνει το παράθυρο κέρδους, είναι δηλαδή η διάρκεια όπου $G > Qt$. Στο παράθυρο αυτό αναπτύσσεται ο παλμός.

3.3 Χαρακτηριστικά του Mode Locked Laser

3.3.1 Ρυθμός Επανάληψης (Repetition Rate)

Ο ρυθμός επανάληψης ουσιαστικά καθορίζεται από τον χρόνο που κάνει το πεδίο να ολοκληρώσει μία πλήρη διαδρομή εντός της κοιλότητας. Σε περίπτωση που αυτή πρόκειται για Fabry-Perot η διαδρομή έχει μήκος $2L$ ώστε να διαγραφεί ένας πλήρης κύκλος, ενώ σε έναν δακτύλιο (ring) έχει μήκος L ίση δηλαδή με την περιμέτρο του [78].

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδώσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

Ως γνωστόν, η ταχύτητα ενός H/M πεδίου στο κενό είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό. Λόγω όμως των GS και SA των οποίων ο δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος από την μονάδα η ταχύτητα των κυμάτων που δημιουργούνται (group velocity) είναι

$$u_g = \frac{c}{n_g} , \quad (3.3)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n_g ο ομαδικός δείκτης διάθλασης (group index) της κοιλότητας. Θεωρούμε ότι ο n_g είναι σταθερός κατά μήκος της για μία δεδομένη συχνότητα.

Οπότε μία πλήρης επανάληψη (Round Trip Time ή RTT εν συντομία) διαρκεί

$$T_r = \frac{2L}{u_g} \quad \text{ή} \quad T_r = \frac{L}{u_g} , \quad (3.4)$$

για Fabry-Perot ή Ring κοιλότητα αντίστοιχα.

Τελικά ο ρυθμός επανάληψης είναι το αντίστροφο της περιόδου επανάληψης, δηλαδή

$$f_r = \frac{1}{T_r} . \quad (3.5)$$

Table 3.1: Ρυθμός Επανάληψης συναρτήσει του μήκους της κοιλότητας

Ρυθμός Επανάληψης	Μήκος Κοιλότητας για InGaAsP Quantum Well GS και AS ($n_g \simeq 3.6$)
1 GHz	83.27 mm
20 GHz	4.16 mm
40 GHz	2.08 mm
160 GHz	0.52 mm
1 THz	0.08 mm

3.3.2 Εύρος & Μορφή Παλμού (Pulse Shape & Width)

Οι απαιτήσεις για αυτά τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται αρκετά από την εκάστοτε εφαρμογή. Για παράδειγμα, σε διεργασίες όπως οπτικούς διακόπτες ή κοπή αντικειμένων (πχ μετάλλων) κλπ η μεγαλύτερη προσοχή δίνεται στην διάρκεια ενός παλμού, η οποία συνεπάγεται με το εύρος του, έτσι ώστε να μεταφέρεται η μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια μέσα σε έναν παλμό. Από την άλλη συστήματα τηλεπικοινωνιών απαιτούν υψηλή ποιότητα και στην μορφή λόγω φαινομένων όπως η διασπορά και η εξασθένιση. Σε ένα MLL αυτά τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται άμεσα από την συμπεριφορά των GS και SA όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως. Πολλές φορές βέβαια ο παλμός προσεγγίζεται από συναρτήσεις όπως η γκαουσιανή (Gaussian) ή η υπερβολική τέμνουσα (hyperbolic secant) στο τετράγωνο.

Κατά κανόνα το εύρος του παλμού μετράται ως εύρος ημίσειας ισχύος (FWHM), δηλαδή εκεί που η ισχύς γίνεται η μισή της μέγιστης ή μειώνεται κατά 3 dB.

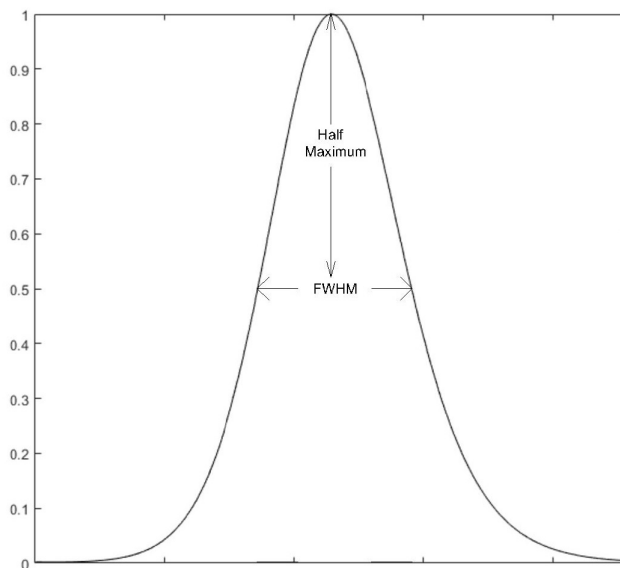


Figure 3.6: Εύρος ενός παλμού.

3.3.3 Μήκος Κύματος & Φάσμα Λειτουργίας

Το εύρος φάσματος λειτουργίας εξαρτάται από το πλήθος των τρόπων καθώς και τον ρυθμό επανάληψης. Το μήκος κύματος λειτουργίας συνήθως επιλέγεται στην τηλεπικοινωνιακή ζώνη, δηλαδή στα 1530-1565 nm καθώς η εξασθένιση των ινών που τροφοδοτούνται από τα αυτά τα laser είναι η ελάχιστη. Υπάρχει επίσης και η επιλογή γύρω από τα 1300 nm όπου η διασπορά είναι σχεδόν μηδενική αποφεύγοντας έτσι την χρήση ινών αντιστάθμισης [79].

Το φάσμα επίσης επηρεάζει το εύρος των παλμών καθώς περισσότεροι τρόποι αντιστοιχούν σε ευρύτερο φάσμα και άρα στενότερους παλμούς.

3.3.4 Ισχύς

Η ισχύς διακρίνεται στην ισχύ κορυφής και την μέση ισχύ. Η ισχύ κορυφής ορίζεται ως η ενέργεια του παλμού προς την χρονική του διάρκεια.

$$P_{peak} = \frac{E}{\Delta t} \quad (3.6)$$

όπου $E = \int_0^{\Delta t} E(\tau) d\tau$ και Δt η διάρκεια του παλμού.

Η μέση ισχύς ορίζεται ως η ενέργεια του πεδίου σε μία ολόκληρη περίοδο.

$$P_{av} = \frac{E}{T_r} \quad (3.7)$$

Κατά κύριο λόγο είναι ανάλογες της ισχύς άντλησης.

3.4 Μοντέλο Laser Εγκλειδωμένων Ρυθμών

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί είναι ανεπτυγμένο από τους Vladimirov και Turaev [80]. Χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης με καθυστέρηση (delay differential equations). Πολλές από τις μαθηματικές διαδικασίες θα παραληφθούν καθώς ο σκοπός της διπλωματικής αυτής δεν είναι η πλήρης μελέτη του αλλά η χρήση του για προσομοιώσεις.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

Αρχικά θεωρείται μία κοιλότητα δακτυλίου. Αυτή, ως γνωστόν, αποτελείται από έναν SA και ένα GS. Σε πραγματικά laser το μήκος του GS είναι αρκετά φορές μεγαλύτερο από αυτό του SA. Επειδή σε ένα τέτοιο σύστημα ο περιορισμός του φάσματος λόγω του ενεργού υλικού δεν φαίνεται άμεσα, εισάγεται σε αυτό ένα φίλτρο το οποίο ακολουθεί την Lorentzian κατανομή. Το μήκος όλης της κοιλότητας είναι ίσο με L .

Το πεδίο οδεύοντος κύματος το οποίο αναπτύσσεται μπορεί να μελετηθεί με τις παρακάτω εξισώσεις,

$$\frac{\partial}{\partial z} E(t, z) + \frac{1}{u} \frac{\partial}{\partial t} E(t, z) = \frac{g_r \Gamma_r}{2} (1 - ia_r) [N_r(t, z) - N_r^r] E(t, z) \quad , \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} N_r(t, z) = J_r - \gamma_r N_r(t, z) - u_g g_r \Gamma_r [N_r(t, z) - N_r^r] |E(t, z)|^2 \quad . \quad (3.9)$$

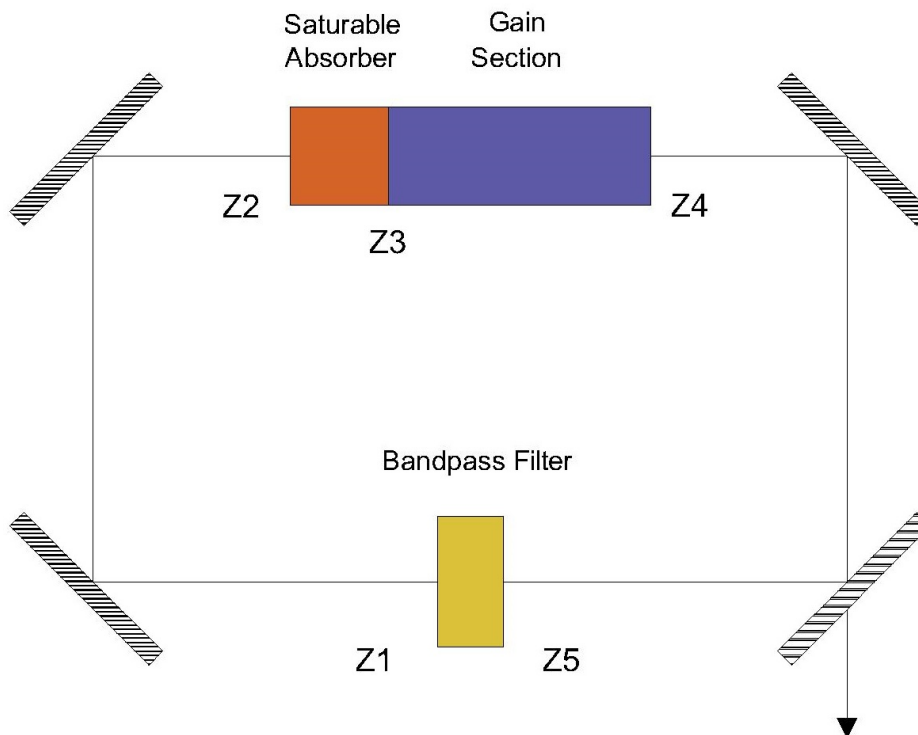


Figure 3.7: Διάγραμμα του μοντέλου. Το πεδίο ταξιδεύοντας δέχεται τις απώλειες από τον SA, την ενίσχυση από το GS και τον περιορισμό στο φάσμα από το φίλτρο. Θεωρείται ότι στα διαστήματα από Z1 έως Z2 και Z4 έως Z5 υπάρχει παθητικό υλικό (passive medium).

Ο δείκτης $r = g$ ή $r = q$ δηλώνει τον τομέα που βρίσκεται το πεδίο την κάθε δεδομένη στιγμή δηλαδή GS και SA αντίστοιχα. Οι μεταβλητές $N_r(t, z)$ είναι η πυκνότητα των φορέων για τους δύο τομείς (GS και SA). Οι παράμετροι N_r^{tr} είναι η πυκνότητα των φορέων υπολογισμένη στο κατώφλι διαφάνειας (στο κατώφλι που τα υλικά εντός της κοιλότητας δεν διασκορπίζουν το πεδίο). Οι παράμετροι α_r είναι παράγοντες βελτιστοποίησης του φάσματος, g_r οι διαφορικές ενισχύσεις, Γ_r οι παράγοντες περιορισμού (confinement factors) και γ_r οι ρυθμοί ανάκτησης των πυκνοτήτων των φορέων, ουσιαστικά το αντίστροφο των χρόνων ζωής τους. Η παράμετρος J_r είναι το ρεύμα άντλησης το οποίο για τον SA είναι μηδέν. Τέλος u είναι η ομαδική ταχύτητα.

Μετά από μετασχηματισμούς και αλλαγή των μεταβλητών του χώρου z και του χρόνου t ως $\zeta = \gamma_q z/u$ και $\tau = \gamma_q(t - z/u_g)$ αντίστοιχα οι παραπάνω εξισώσεις παίρνουν της εξής αδιάστατη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} A(\tau, \zeta) = \frac{1}{2}(1 - ia_r)n_r(\tau, \zeta)A(\tau, \zeta) \quad , \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} n_g = j_g - \Gamma n_g(\tau, \zeta) - n_g(t, \zeta)|A(\tau, \zeta)|^2 \quad , \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} n_q = -j_q - n_q(\tau, \zeta) - s n_q(t, \zeta)|A(\tau, \zeta)|^2 \quad . \quad (3.12)$$

Οι παράμετροι είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} A(\tau, \zeta) &= E(t, z)\sqrt{u g_g \Gamma_g / \gamma_q} \quad , \\ n_{g,q}(\tau, \zeta) &= u g_{g,q} \Gamma_{g,q} [N_{g,q}(t, z) - N_{g,q}^{tr}] / \gamma_q \quad , \\ j_g &= u g_g \Gamma_g (J_g - \gamma_g N_g^{tr}) / \gamma_q^2 \quad , \\ j_q &= u g_q \Gamma_q N_q^{tr} / \gamma_q \quad , \\ \Gamma &= \frac{\gamma_g}{\gamma_q} \quad . \end{aligned} \quad (3.13)$$

Η παράμετρος $s = \frac{g_q \Gamma_q}{g_g \Gamma_g}$ είναι ο λόγος των εντάσεων κορεσμού των SA και GS.

Όπως είναι εμφανές οι παράμετροι είναι κανονικοποιημένες ως προς τον ρυθμό χαλάρωσης της πυκνότητας των φορές του SA. Την τιμή της κανονικοποίησης του πεδίου την ονομάζουμε $IntensityFactor = \sqrt{u g_g \Gamma_g / \gamma_q}$.

Ύστερα από μαθηματικούς μετασχηματισμούς οι τελικές εξισώσεις για το πεδίο, το SA και το GS καταλήγουν σε μονοδιάστατη μορφή, απαλλαγμένες από την χωρική συνιστώσα. Αυτές είναι οι εξής:

$$\gamma^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} A(\tau) + A(\tau) = \sqrt{k} e^{(1-ia_g)G(\tau-T)/2 - (1-ia_q)Q(\tau-T)/2 - i\varphi} A(\tau-T) , \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} G(\tau) = g_0 - \Gamma G(\tau) - e^{-Q(\tau)} (e^{G(\tau)} - 1) |A(\tau)|^2 , \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} Q(\tau) = q_0 - Q(\tau) - s(1 - e^{-Q(\tau)}) |A(\tau)|^2 . \quad (3.16)$$

Οι νέες παράμετροι είναι υπολογισμένες ως εξής:

$$g_0 = \int_{\zeta_3}^{\zeta_4} j_g d\zeta , \quad (3.17)$$

$$q_0 = \int_{\zeta_2}^{\zeta_3} j_q d\zeta .$$

όπου ζ_3 έως ζ_4 το κανονικοποιημένο μήκος του GS L_{ng} και ζ_2 έως ζ_3 το κανονικοποιημένο μήκος του SA L_{nq} .

Επιπλέον $T = \gamma_q L/u$ είναι ο “cold-cavity” χρόνος πλήρους ταξιδιού (round trip time). Ο όρος “cold-cavity” αναφέρεται στην περίπτωση όπου κανένα φαινόμενο το οποίο θα επηρέαζε την ταχύτητα του πεδίου δεν έχει ληφθεί υπόψη κατά την διαδρομή του. Η παράμετρος $\gamma = Bandwidth/f_r$ καθορίζει τον περιορισμό στο φάσμα λόγω του ενεργού υλικού, είναι δηλαδή το φίλτρο. Η αλλαγή στην φάση καθορίζεται από το $\varphi = \Omega T$ όπου Ω ο αποσυντονισμός της κεντρικής συχνότητας του φίλτρου με έναν από τους τρόπους της κοιλότητας. Τέλος οι υπόλοιπες απώλειες, πχ λόγω του κυματοδηγού ή του συζεύκτη περιγράφονται από την παράμετρο k .

3.5 Προσομοίωση του μοντέλου

Για να σιγουρευτεί κανείς ότι ένα μοντέλο παράγει τα αναμενόμενα αποτελέσματα θα πρέπει να την αλλαγή κάποιων παραμέτρων να μεταβάλλονται και τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά. Καταρχάς, είναι εμφανές ότι όλες οι τιμές είναι κανονικοποιημένες. Ειδικότερα για να υπολογιστεί η ισχύς σε μονάδες Watt χρειάζεται ένας πολλαπλασιαστικός όρος. Συγκεκριμένα το πεδίο υπολογίζεται λύνοντας ως προς το $E(t, z)$ δηλαδή,

$$E(t, z) = \frac{A(\tau, \zeta)}{\text{IntensityFactor}} \quad (3.18)$$

Εν συνεχεία πολλαπλασιάζουμε το πεδίο με έναν όρο ο οποίος θα το μετασχηματίσει σε μονάδες (\sqrt{W}). Ο όρος αυτός είναι,

$$\text{PowerFactor} = \sqrt{h \cdot f \cdot w \cdot d \cdot u} \quad (3.19)$$

όπου h η σταθερά του Planck, f η συχνότητα λειτουργίας και w & d οι διαστάσεις του υλικού (σε περίπτωση 2-D).

Τελικά η ισχύς του πεδίου θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P(t, z) = \frac{\text{PowerFactor}^2}{\text{IntensityFactor}^2} |A(\tau, \zeta)|^2 \quad (3.20)$$

σε Watt.

Επιπλέον, το ρεύμα άντλησης του ενεργού υλικού εκφράζεται σε (Amperes). Στο μοντέλο η παράμετρος που αντιστοιχεί σε αυτό είναι η J_g . Η τιμή αυτή είναι ίση με :

$$J_g = \frac{I}{qV} \quad (3.31)$$

όπου I το ρεύμα άντλησης σε (A), ενώ q είναι το στοιχειώδες φορτίο και V ο όγκος του υλικού.

Table 3.2: Τιμές της προσομοίωσης για Quantum Well Mode Locked Laser

Περιγραφή Παραμέτρων	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Ταχύτητα του Φωτός στο κενό	c	$2.99792458 \cdot 10^8$	m/s
Δείκτης Διάθλασης	n	3.6	-
Μήκος Κοιλότητας	L	2	mm
Ύψος Κοιλότητας	d	200	nm
Πλάτος Κοιλότητας	w	2	μm
Μήκος του GS	L_g	1.9	mm
Μήκος του SA	L_q	0.1	mm
Διαφορική Ενίσχυση του GS	g_g	$3 \cdot 10^{-20}$	m^2
Διαφορική Ενίσχυση του SA	g_q	$40 \cdot 10^{-20}$	m^2
Χρόνος ανάκτησης φορέων του GS	$\tau_g = 1/\gamma_g$	5	$nsec$
Χρόνος ανάκτησης φορέων του SA	$\tau_q = 1/\gamma_q$	10	$psec$
Παράγοντες Βελτιστοποίησης Φάσματος.	$a_g = a_q$	0	-
Παράγοντες Περιορισμού	$\Gamma_g = \Gamma_q$	0.10	-
Πυκνότητα Φορέων Διαφάνειας του GS	N_g^{tr}	$1.1 \cdot 10^{24}$	m^{-3}
Πυκνότητα Φορέων Διαφάνειας του SA	N_q^{tr}	$4.8 \cdot 10^{24}$	m^{-3}
Μήκος Κύματος Λειτουργίας	λ	1450	nm
Εύρος Φάσματος	BW	10.5	nm
Λοιπές Απώλειες	k	0.1	-
Αποσυντονισμός της Κεντρικής Συχνότητας	Ω	0	Hz

Οποιαδήποτε αλλαγές γίνονται στα παραπάνω στοιχεία θα αναγράφονται κάθε φορά. Σε κάθε άλλη περίπτωση ισχύουν τα παραπάνω.

3.6 Απόκριση του μοντέλου με αλλαγή του φίλτρου

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η απόκριση του μοντέλου σχετικά με την παράμετρο γ η οποία αντιστοιχεί στο φίλτρο το οποίο περιορίζει το τελικό φάσμα (ενεργό υλικό). Αναμένεται αυξάνοντας αυτήν την παράμετρο οι παλμοί να γίνονται οξύτεροι και βραχύτεροι καθώς φασματικά αναμένεται να επιβιώνουν περισσότεροι τρόποι από μία χαμηλότερη τιμή.

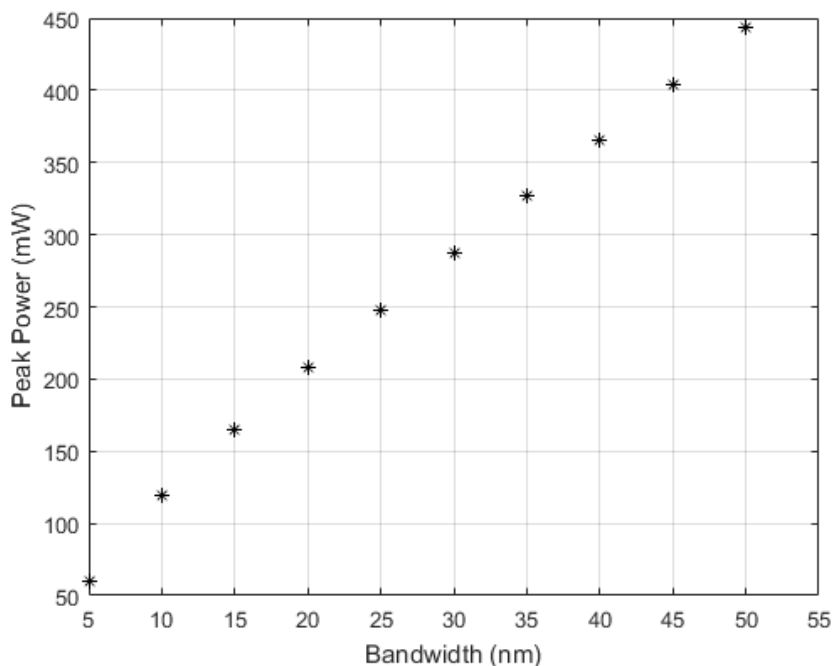


Figure 3.10: Γραφική παράσταση της αλλαγής της ισχύος κορυφής με το εύρος του ενεργού υλικού με $I=300 \text{ mA}$. Επιβεβαιώνουμε ότι αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται το εύρος.

Αναλύοντας τον μετασχηματισμό Fourier, παρατηρείται πως οι τρόποι αντιστοιχούν σε ημιτονικά κύματα με διαφορετικές συχνότητες, που βέβαια αυτές θα ισαπέχουν η μία από την άλλη καθώς το ίδιο συμβαίνει και με τους τρόπους. Άρα τα αθροιζόμενα ημίτονα θα παράξουν έναν παλμό (βλ. Εικόνα (3.3)). Όσο περισσότερα είναι αυτά είναι σαφές πως και ο παλμός θα έχει τα χαρακτηριστικά που εξηγήθηκαν προηγουμένως.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

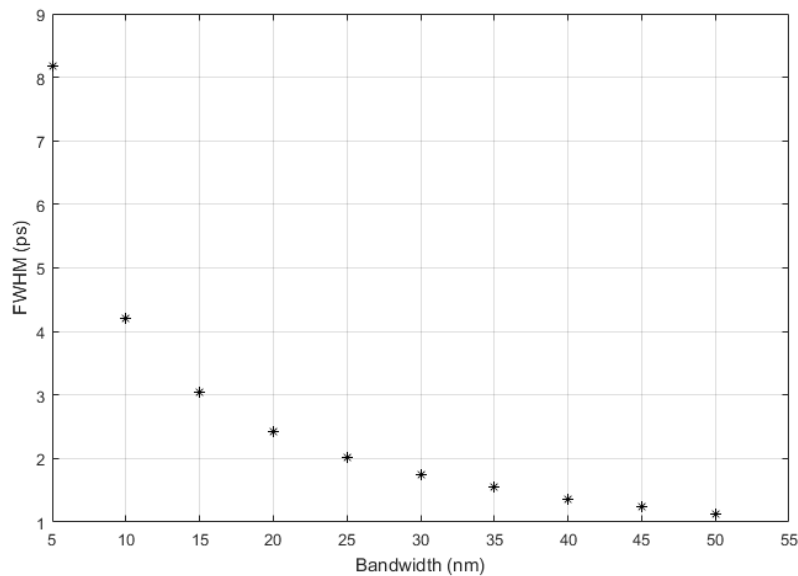


Figure 3.8: Γραφική παράσταση της συμπεριφοράς του FWHM με την αύξηση του Bandwidth με $I=300$ mA. Όσο αυτό αυξάνεται το εύρος του παλμού μειώνεται με εκθετικό ρυθμό.

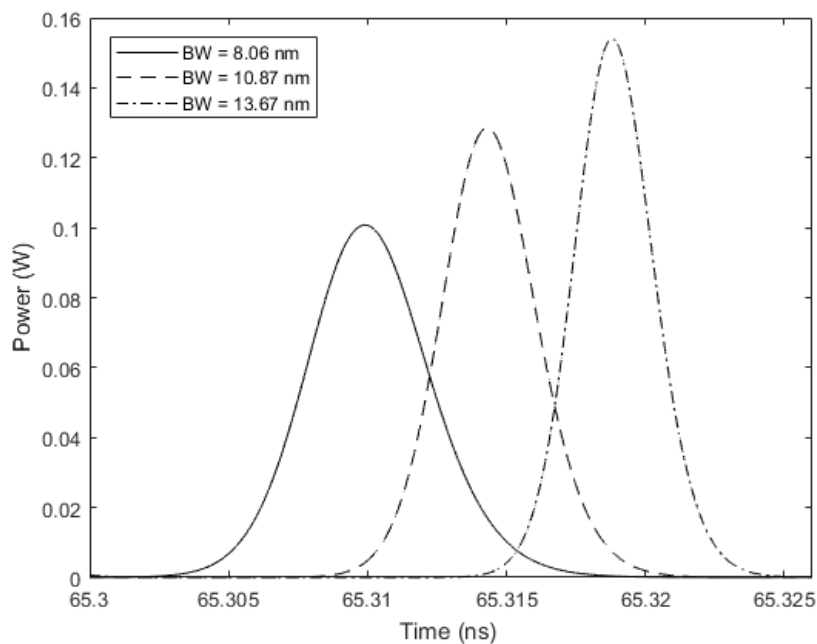


Figure 3.9: Η μορφή τριών παλμών ύστερα από τέτοιο χρόνο ώστε το laser να έχει σταθεροποιηθεί με $I_{\text{pump}} = 300$ mA. Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται το εύρος τόσο οι παλμοί οξύνονται και βραχύνονται ώστε η ενέργειά τους να παραμείνει σταθερή.

3.7 Απόκριση του μοντέλου με αλλαγή στον χρόνο ανάκτησης φορέων του SA

Όπως έχει εξηγηθεί και προηγουμένως, στην δυναμική του MLL, ο χρόνος 'ανάρρωσης' του SA, δηλαδή ο χρόνος ανάκτησης των φορέων, καθορίζει και την διάρκεια του παλμού. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται αυτή ακριβώς η δυναμική.

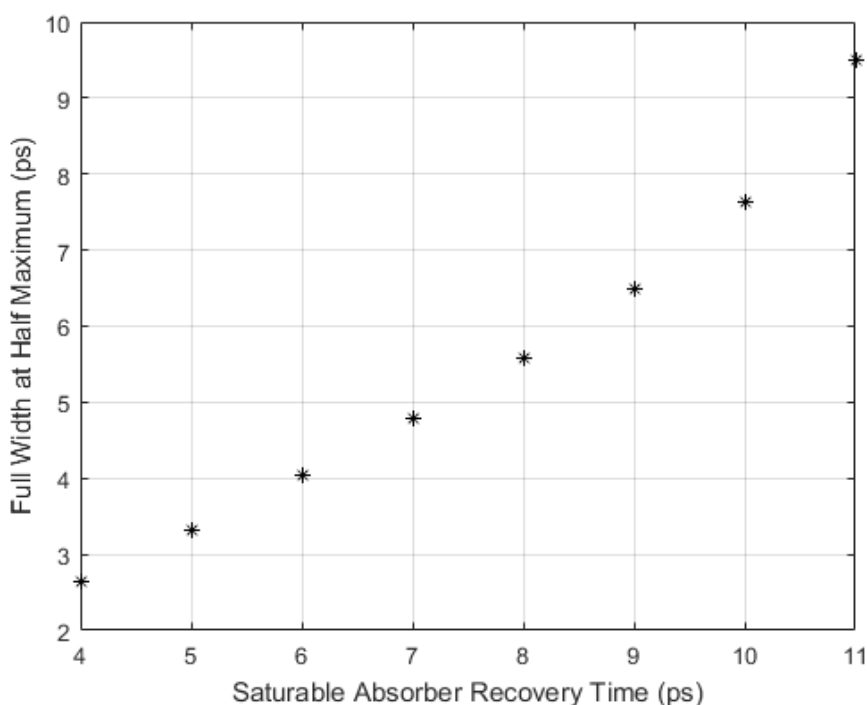


Figure 3.10: Γραφική παράσταση της αλλαγής του FWHM με τον χρόνο ανάρρωσης του SA με BandWidth = 5.25 nm και I=300 mA. Όσο αυξάνεται ο χρόνος αυτός τόσο αυξάνεται και το εύρος του παλμού.

Μία άλλη σημαντική συμπεριφορά που πρέπει να μελετηθεί είναι αυτή της έναυσης του MLL. Για να υπάρχει δράση Laser θα πρέπει τα ξεπεραστεί ένα κατώφλι. Το κατώφλι αυτό επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για την χαμηλότερη σπατάλη ενέργειας. Επομένως τα υλικά για SA και GS μελετώνται και ερευνώνται με γνώμονα και αυτή την απαίτηση. Πρέπει λοιπόν να παρατηρηθεί ότι η ισχύς του Laser αυξάνεται μετά από ένα σημείο, ενώ πριν από αυτό θεωρητικά θα υπάρχει μόνο θόρυβος.

3.8 Απόκριση του μοντέλου με αλλαγή του ρεύματος άντλησης

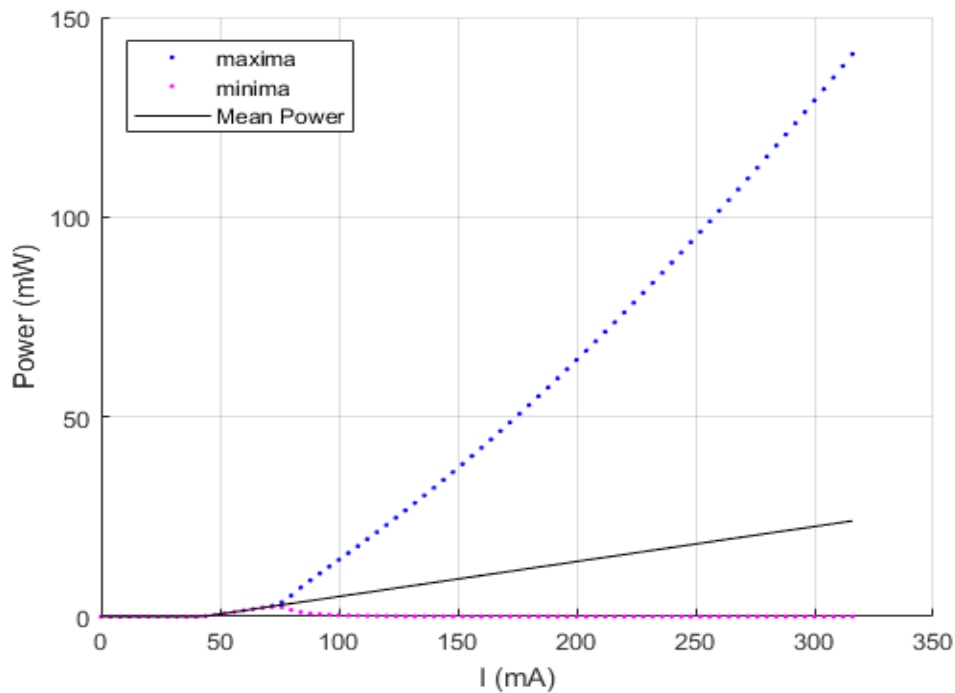


Figure 3.12: Γραφική παράσταση της μέσης ισχύος προς το ρεύμα άντλησης. Παρατηρούμε πως περίπου από τα 40 mA αρχίζει και υπάρχει δράση Laser και από περίπου 80 mA υπάρχει παραγωγή παλμών.

Βέβαια η μέση ισχύς από μόνη της δεν παρέχει την απαραίτητη πληροφορία για την λειτουργία του Laser. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχουν περιοχές (regimes) στις οποίες το MLL συμπεριφέρεται ως CW ή Q. Switching ή απλώς οι παλμοί οι οποίοι δημιουργεί δεν είναι καλής “ποιότητας” με την έννοια ότι δεν έχουν σχηματικά τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται. Είναι όμως μία καλή ένδειξη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως αυτή που θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4 Κεφάλαιο IV: Προσομοίωση του νευρώνα με Mode Locked Laser

Πριν την προσομοίωση αυτή πρέπει να κατανοηθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές ενός Mode Locked Laser και ενός νευρώνα. Αρχικά μελετώνται οι διαφορές. Η πιο προφανής από αυτές είναι στον χρόνο παραγωγής παλμών. Ένα τέτοιο laser έχει συχνότητα της τάξεως των δεκάδων GHz, ενώ ένας νευρώνας, τυπικά, στα δεκάδες με εκατοντάδες Hz [81]. Αυτή η διαφορά ενώ περιορίζει σημαντικά την ταύτιση των δύο αυτών οντοτήτων, δεν προκαλεί ιδιαίτερο πρόβλημα σε περίπτωση της μελέτης νευρωνικών δικτύων και μάλιστα η αυξημένη ταχύτητα των lasers μπορούν να βοηθήσουν στην γρηγορότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι η αδυναμία άμεσης προσέγγισης κατασταλτικής δραστηριότητας. Οπότε πιο περίπλοκες μεθόδους μελετώνται ιδίως στην περίπτωση δικτύων. Πέραν αυτών όμως τα δύο αυτά στοιχεία έχουν αρκετές ομοιότητες. Η μορφή των παλμών και η διαδικασία παραγωγής και μορφοποίησης τους καθώς και η διαδικασία της περιόδου αδράνειας είναι αρκετά παρόμοια.

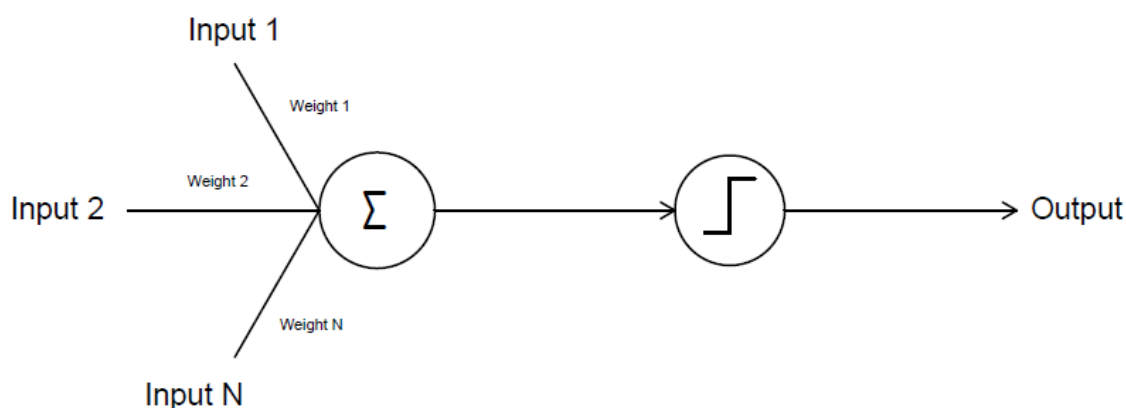


Figure 4.1: Διάγραμμα λειτουργίας ενός απλού νευρώνα.

Αρχικά παρατηρούμε την συμπεριφορά του νευρώνα στις διάφορες διεγέρσεις τις οποίες δέχεται. Αυτός λειτουργεί ως ένας αθροιστής/ολοκληρωτής, με κατώφλι, τυχαίων στο πλάτος (weights) και στο χρόνο παλμών. Ο νευρώνας αυτός δέχεται αυτές τις εισόδους τις αθροίζει και εάν ξεπεραστεί ένα κατώφλι τότε παράγει το δυναμικό δράσης. Η λειτουργία αυτή ομοιάζει αρκετά με το ρεύμα κατωφλίου σε ένα laser. Εάν και εφόσον ξεπεραστεί το κατώφλι αυτό τότε υπάρχει μαζική εκπομπή φωτονίων ιδίων χαρακτηριστικών. Βέβαια πολλοί άλλοι τρόποι υπάρχουν για την προσομοίωση και εξομοίωση της συμπεριφοράς αυτής.

4.1 Περίοδος Αδράνειας (Refractory Period)

Όπως έχει εξηγηθεί, μετά το δυναμικό δράσης επέρχεται μία κατάσταση αδράνειας όπου ο νευρώνας δεν μπορεί να διεγερθεί περαιτέρω ακόμη και με την εμφάνιση πολλών εισόδων. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στην περίπτωση του MLL. Όταν το gain του ενεργού υλικού ξεπεράσει τις απώλειες, τότε “χτίζεται” ένας παλμός καθ’ όλη την διάρκεια που συμβαίνει αυτό.

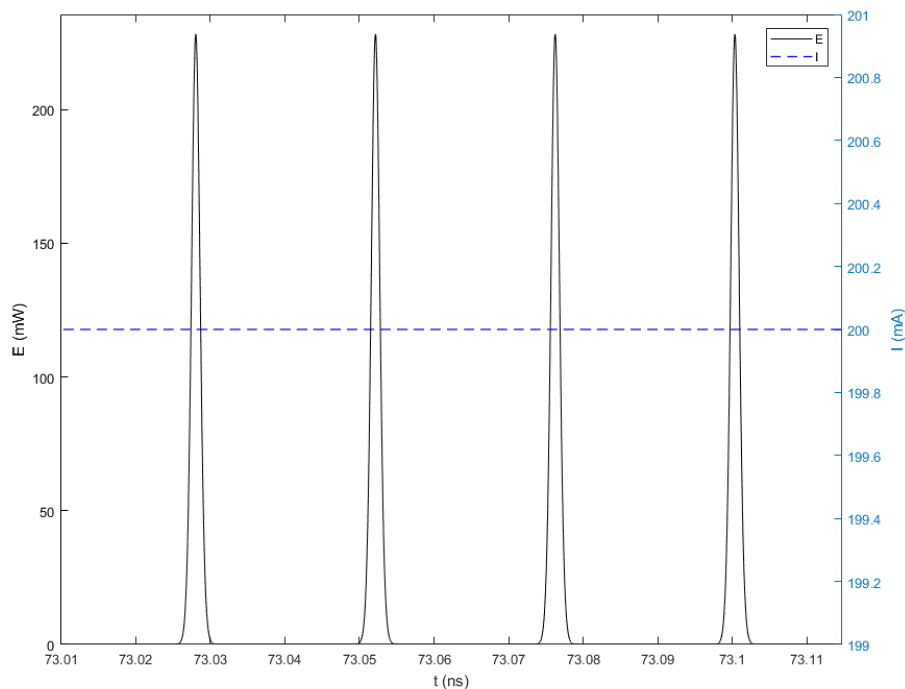


Figure 4.2: Παλμοί από ένα Mode Locked Laser. Παρατηρούμε πως ενώ υπάρχει συνεχής παρουσία ρεύματος άντλησης το laser αυτό δεν ακτινοβολεί, παρά μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Ουσιαστικά, τα GS & SA σε αυτή τη φάση κορένονται. Μετά τον κορεσμό επέρχεται η επαναφορά των φορέων των υλικών αυτών στην αρχική τους κατάσταση. Κατά την διάρκεια αυτή δεν μπορεί να ξαναδημιουργηθεί παλμός. Όσο πιο γρήγορη η επαναφορά τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός επανάληψης του laser αυτού. Η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως παρόμοια με αυτή του νευρώνα.

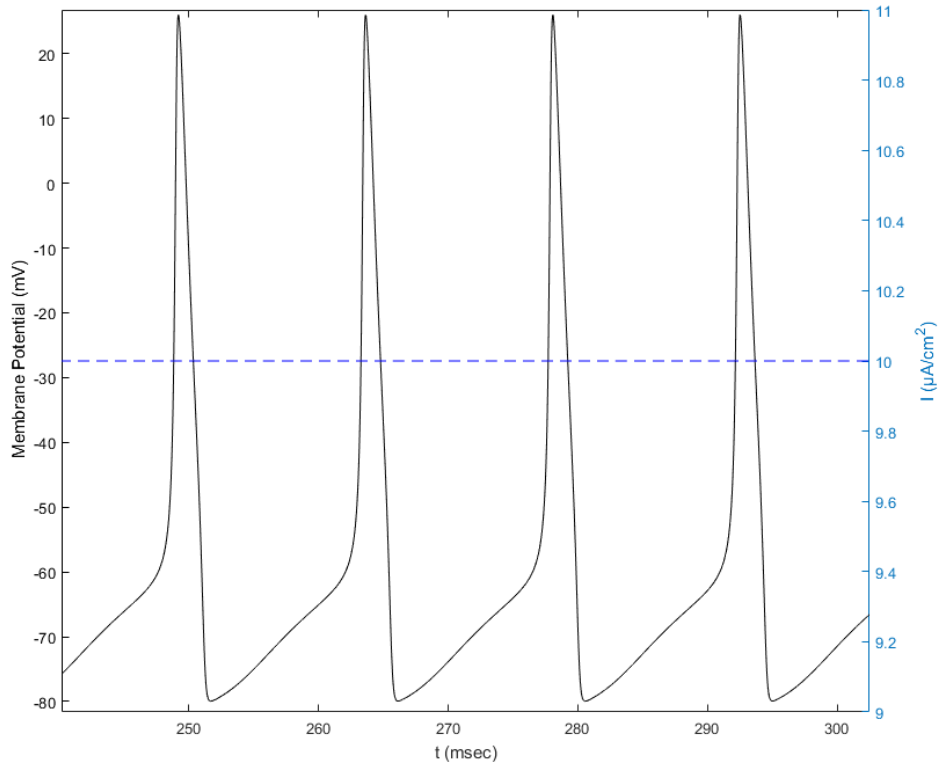
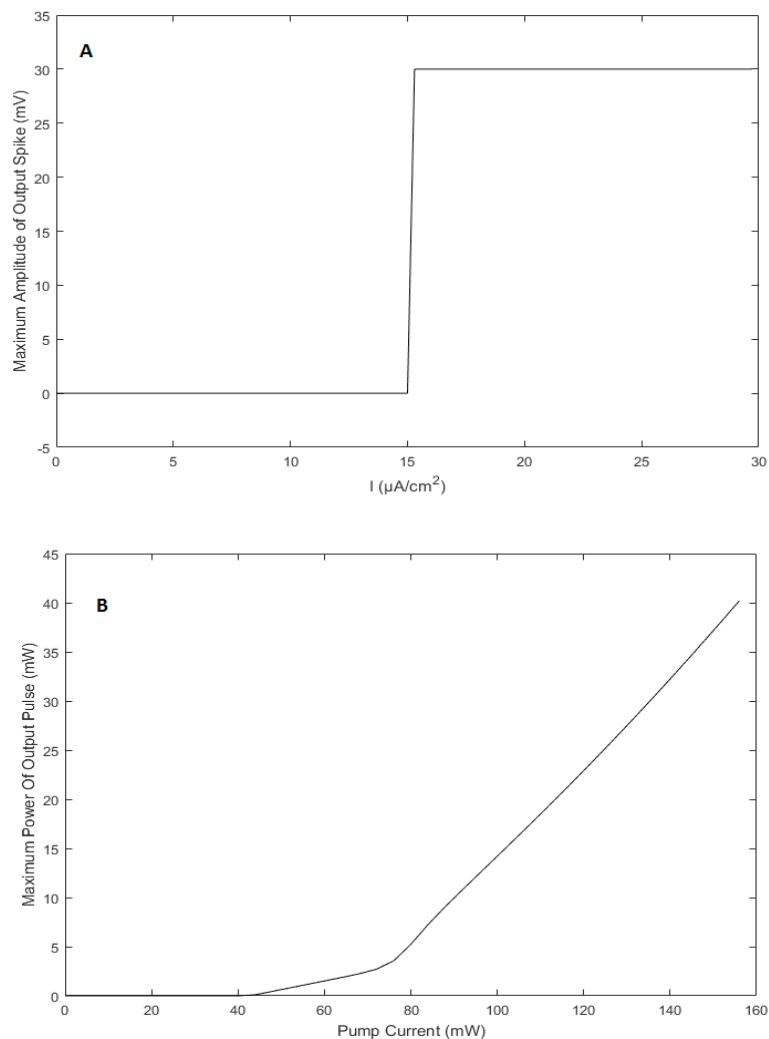


Figure 4.3: Δυναμικά δράσης από το μοντέλο *Hodgkin & Huxley*. Παρατηρούμε ακριβώς την ίδια λειτουργία με το *MLL*, ενώ υπάρχει συνεχής παρουσία ρεύματος στον νευρώνα, αυτός δεν παράγει συνεχώς "παλμούς".

4.2 Συνάρτηση Ενεργοποίησης (Activation Function)

Όπως έχουμε δει, σε έναν νευρώνα χρειάζεται να ξεπεραστεί ένα δυναμικό κατωφλίου για να εκτυρσοκροτήσει. Εάν δεν υπήρχε αυτό το δυναμικό, τότε θα δημιουργούνταν συνεχώς δυναμικά δράσης. Παρομοίως στο laser υπάρχει η έννοια της αναστροφής των πληθυσμών, η οποία

μεταφράζεται σε ένα κατώφλι στο ρεύμα άντλησης το οποίο πρέπει να ξεπεραστεί. Η απόκριση της της εξόδου με την είσοδο ονομάζεται *συνάρτηση ενεργοποίησης* [82]. Η συνάρτηση αυτή στην περίπτωση ενός νευρώνα είναι μία συνάρτηση Heaviside (step function), ενώ στο MLL υπάρχει γραμμική εξάρτηση. Αυτό σημαίνει πως ενώ ιδανικά περιμένει κανείς όσο και αν αυξηθεί η ένταση της εισόδου η έξοδος να παραμένει σταθερή (περίπτωση νευρώνα), στο laser, η ένταση της εξόδου αυξάνεται. Με μία πρώτη ματιά, φαίνεται πως αυτό εμποδίζει την αντιστοίχιση ενός νευρώνα με ένα MLL, όμως, το σημαντικό σε αυτή τη περίπτωση δεν είναι τόσο η απόκριση (καθώς αυτή μπορεί να ρυθμιστεί με ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου) αλλά το ότι υπάρχει κατώφλι. Το κατώφλι ουσιαστικά εμποδίζει το laser από το να ακτινοβολεί συνεχώς.



*Figure 4.4: A Συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα. B Συνάρτηση ενεργοποίησης του MLL. Παρατηρούμε πως μόνο εάν ξεπεραστεί μία συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος εισόδου έχουμε έξοδο. (*LIF μοντέλο)*

4.3 Ολοκλήρωση (Integration)

Ένα άλλο κρίσιμο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ένα σύστημα για να παρομοιαστεί με έναν νευρώνα είναι η *ολοκλήρωση* [83]. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στους νευρώνες να αθροίζουν τις εισόδους. Λόγω αυτού, με την παρουσία μικρών, αλλά πολλών, δυναμικών δράσεων στην μεμβράνη τους, το κατώφλι είναι δυνατόν να ξεπεραστεί και να υπάρξει καινούργιο δυναμικό δράσης.

Εάν δεν υπήρχε αυτή η λειτουργία τότε σχεδόν ποτέ δεν θα μπορούσαν οι νευρώνες να εκπυρσοκροτήσουν, καθώς ένα μόνο δυναμικό δράσης δεν είναι αρκετά ισχυρό για να τους διεγείρει. Εφόσον οι εισοδοί εκφράζονται ως ρεύμα (κινούμενα ιόντα), τότε η αναλογία είναι αρκετά άμεση με αυτήν του laser, όπου και εκεί έχουμε ρεύμα. Βέβαια ακόμη και οπτική να ήταν η άντληση, τα φωτόνια έχουν την δυνατότητα της άθροισης.

Το MLL χρειάζεται αρκετό χρόνο για να μπορέσει να δημιουργήσει παλμούς. Για αυτό και θα φανεί παρακάτω ότι δεν είναι και η καλύτερη επιλογή για το ανάλογο ενός νευρώνα. Αξίζει βέβαια και να μελετηθεί, διότι έχει άλλα χαρακτηριστικά τα οποία τα χειρίζεται πολύ πιο εύκολα από άλλα είδη laser.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδώσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

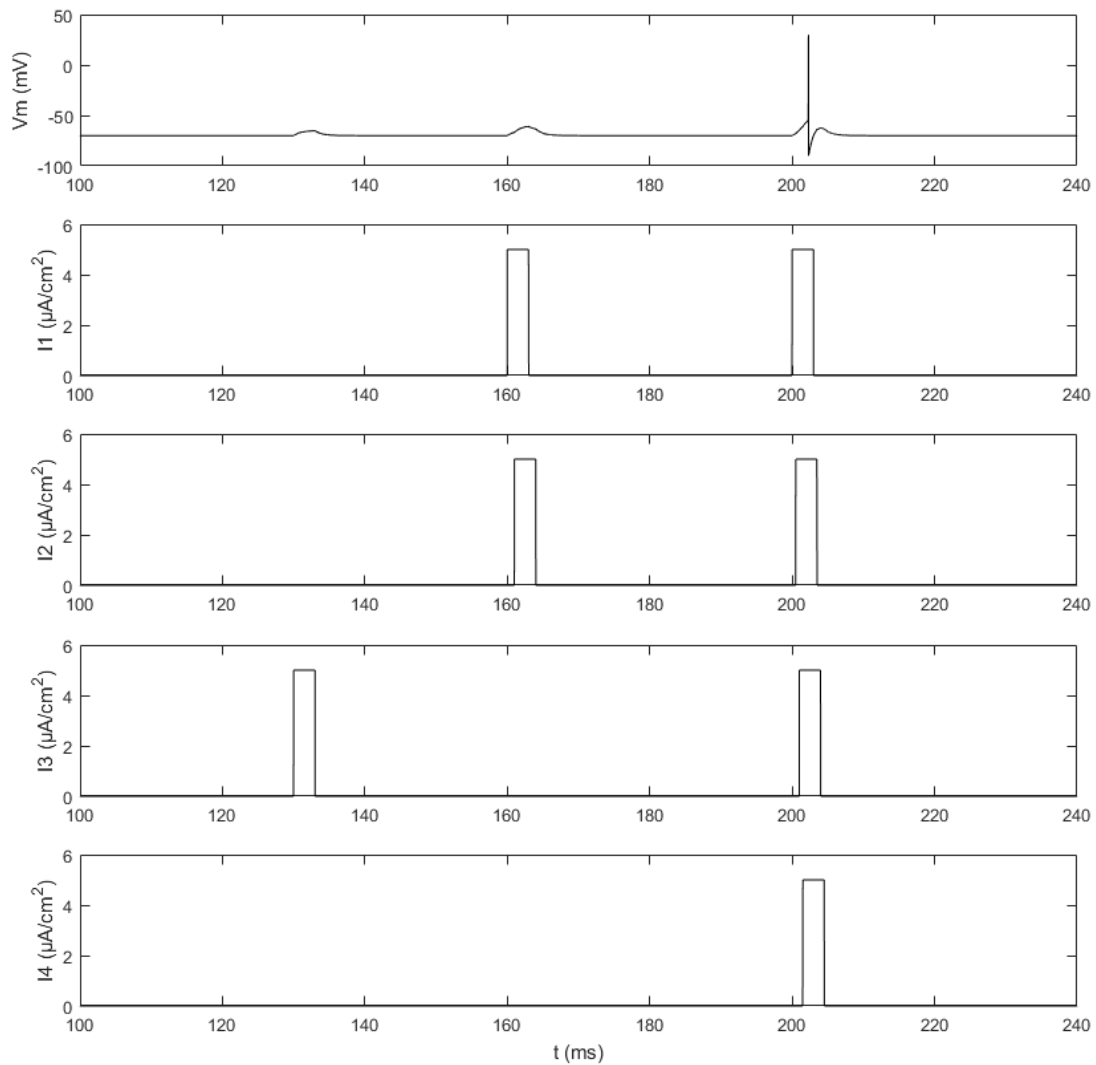


Figure 4.5: Διάγραμμα για την αναπαράσταση της δυνατότητας της άθροισης του νευρώνα. Όταν εισέλθει ένας παλμός το δυναμικό της μεμβράνης αυξάνεται αλλά δεν καταφέρνει να ξεπεράσει το κατώφλι. Στους δύο παλμούς αυξάνεται ακόμη περισσότερο. Τελικά με τέσσερις παλμούς διεγείρεται και παράγει δυναμικό δράσης. Στην πραγματικότητα οι παλμοί δεν είναι τετραγωνικοί, αλλά με ένα πολύ μικρό σφάλμα μπορεί να θεωρηθούν έτσι. (*LIF μοντέλο)

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

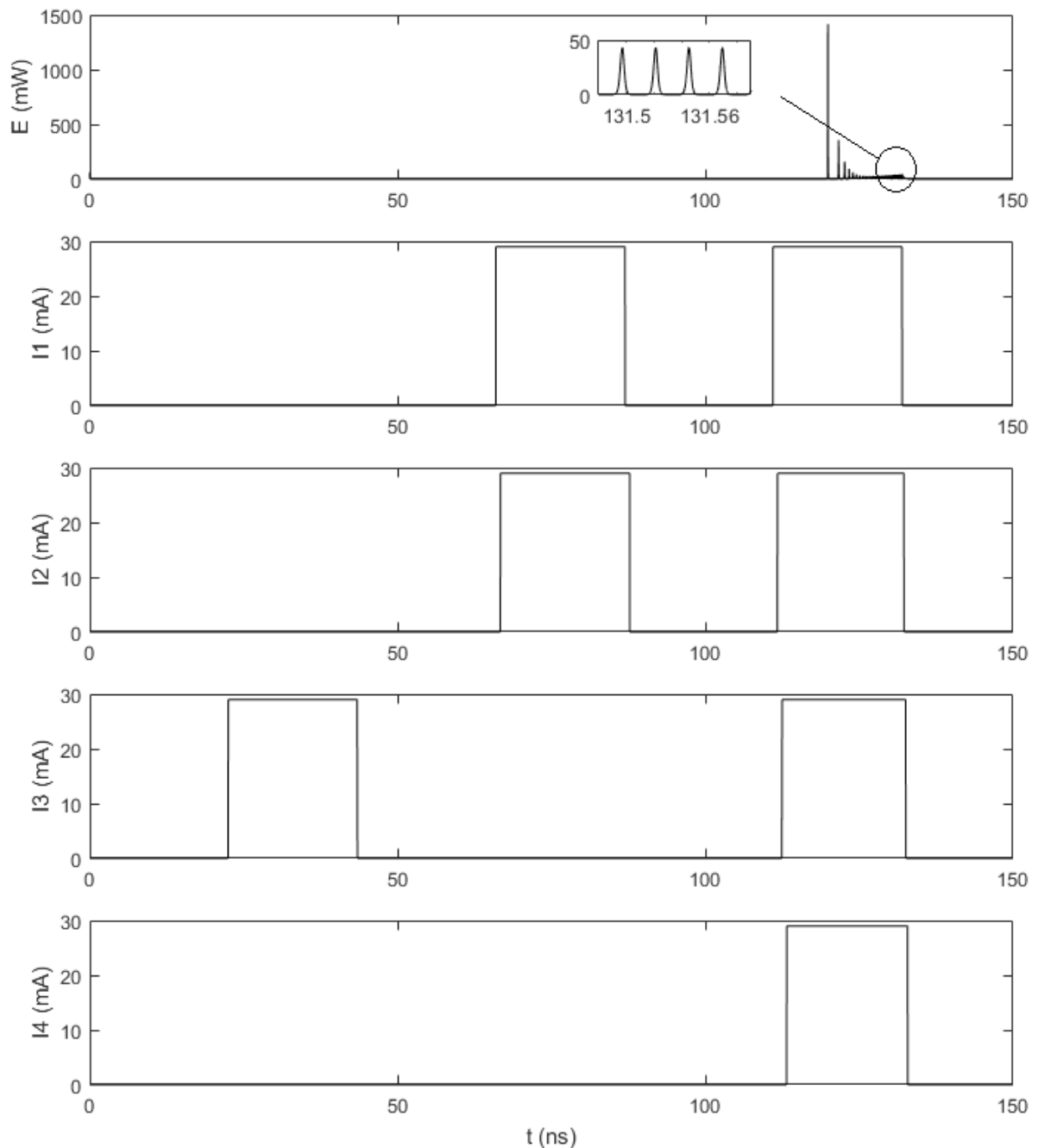


Figure 4.6: Διάγραμμα για την αναπαράσταση της δυνατότητας της άθροισης του MLL. Με έναν ή δύο παλμούς δεν είναι δυνατόν να αρχίσει η δράση laser. Με τέσσερις όμως παλμούς αυτό γίνεται εφικτό. Ας θυμηθούμε ότι για ~ 70 mA είσοδο δημιουργούνται παλμοί.

Παρακάτω μελετάται συστηματικά το πείραμα των Joshua et al [84] με την διαφορά ότι το MLL στην δική μας προσομοίωση είναι Quantum Well με ό, τι αυτό συνεπάγεται. Το πείραμα αυτό είχε ως στόχο την εξομοίωση κατασταλτικών και διεγερτικών συμπεριφορών. Η λογική είναι η εξής: Έστω ότι ένα MLL έχει αρχίσει την παραγωγή παλμών. Αυτή η κατάσταση θεωρείται ως διεγερμένος νευρώνας. Όταν ένα CW Laser (Master) εισέλθει ως είσοδος στο MLL (Slave) και έχει αρκετή ισχύ, τότε μπορεί να του προκαλέσει αστάθεια και τελικά να σταματήσει τη παραγωγή παλμών, να συντονιστεί στην συχνότητα του laser αυτού και να παράξει μονότροπο φως. Τότε το MLL έχει κλειδωθεί στο CW. Η συμπεριφορά αυτή είναι παρόμοια με την κατασταλτική ιδιότητα των νευρώνων καθώς το CW εμποδίζει το MLL να παράξει “δυναμικά δράσης” δηλαδή παλμούς. Αντιθέτως όταν η ισχύς του απλού laser μειώνεται δραστικά (“αρνητικός παλμός”) τότε το MLL επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση. Οι δύο κρίσιμοι παράγοντες για το injection-locking όπως ονομάζεται είναι η ισχύς του laser εισόδου και η συχνότητα του. Όσον αφορά την συχνότητα η επιλογή της είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς υπάρχουν ζώνες στις οποίες πρέπει να δοθεί πολύ περισσότερη ισχύς για να μπορέσει να κλειδωθεί στην είσοδο. Οι συχνότητες οι οποίες επιλέγονται είναι αυτές στις οποίες συμβαίνει συντονισμός, δηλαδή στους τρόπους.

Πριν γίνουν όμως οι προσομοιώσεις θα πρέπει να εισαχθεί ο όρος που αντιστοιχεί στο Master Laser. Η προσομοίωση αυτού παρατίθεται στο Παράρτημα I. Το μοντέλο, λοιπόν, τροποποιείται ως ακολούθως:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} A(\tau) = \gamma \{ \sqrt{k} e^{(1-i a_g)G(\tau-T)/2 - (1-i a_q)Q(\tau-T)/2 - i\phi} A(\tau-T) - A(\tau) + A_i(\tau-T_i) \}$$

όπου A_i το κανονικοποιημένο πεδίο του CW και T_i η χρονική στιγμή της εισόδου του η οποία επιλέγεται μετά από τέτοιο χρόνο ώστε η λειτουργία του MLL να έχει σταθεροποιηθεί.

Το πεδίο της έγχυσης E_i οδηγείται μέσω ενός coupler εντός της κοιλότητας του MLL. Ο coupler προκαλεί μία εξασθένιση α διαγώνια του και $1-\alpha$ στην ευθεία δηλαδή $S_{12} = S_{21} = \alpha$ & $S_{11} = S_{22} = 1-\alpha$. Επιπλέον ορίζεται και μία μεταβλητή ξ η οποία είναι το ποσοστό του ολικού πεδίου το οποίο μεταφέρεται εντός της κοιλότητας, συνήθως $\xi \leq 1$.

Θα ισχύει, λοιπόν, $E_i = \sqrt{(1-\alpha) \cdot \xi} E_{cw}$ προκειμένη περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί και η ισχύς έγχυσης ως $P_i = \eta E_i^2$, όπου η ο συντελεστής για την έκφραση της ισχύος σε W (βλ Παράρτημα).

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

Για να χρησιμοποιηθεί, όμως, αυτό το πεδίο στο μοντέλο χρειάζεται να κανονικοποιηθεί με τον ίδιο όρο με τον οποίο κανονικοποιήθηκε και το πεδίο του MLL ώστε να έχει τις ίδιες μονάδες με αυτό. Τότε,

$$A_i = \text{intensityfactor} \cdot E_i ,$$

σε αδιάστατες μονάδες.

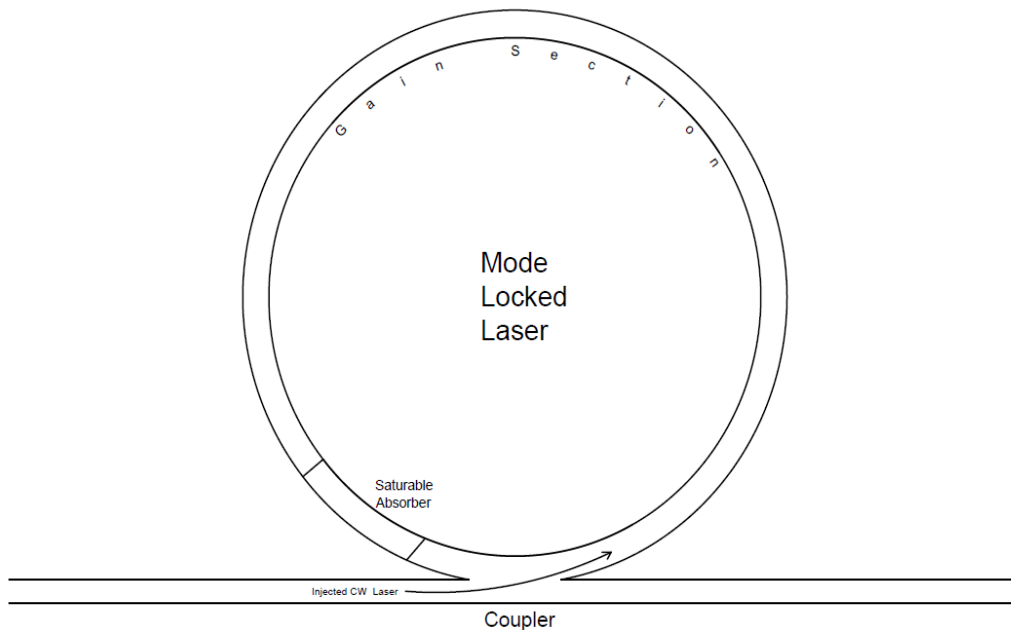


Figure 4.7: Απλοποιημένο διάγραμμα της έγχυσης ενός CW laser σε ένα Mode locked laser. Τα δύο αυτά laser συνδέονται μέσω ενός συζεύκτη.

4.4 Σάρωση στην Ισχύ

Μεταβάλλοντας την ισχύ εισόδου στο MLL είναι εφικτό να μεταβάλλουμε την ευστάθεια του ή και να το κλειδώσουμε στο master laser. Η μεταβολή αυτή πετυχαίνεται με έναν VOA (Variable Optical Attenuator). Επιπλέον, στην τοπολογία γίνεται χρήση ενός ISO (Optical Isolator) ώστε να μην υπάρχει τυχόν ακτινοβολία, πχ σε μορφή feedback, προς το master laser που θα μπορούσε να αλλοιώσει την λειτουργία του. Το PC (Polarization Controller) είναι μία συσκευή για την ρύθμιση της πόλωσης του φωτός, ενώ το MZM (Mach-Zehnder Modulator) χρησιμεύει στην έγχυση του φωτός σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

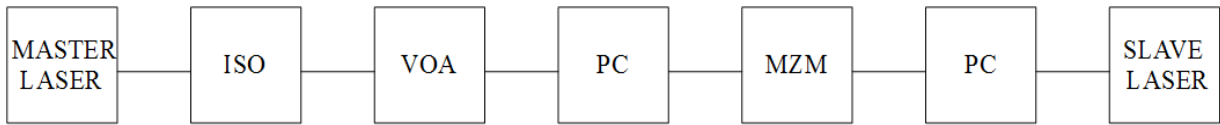


Figure 4.8: Πειραματικό διάγραμμα για το κλείδωμα ενός slave laser στο master.

Αρχικά, αποτρέπουμε κάθε είσοδο στο slave laser μέχρις ότου επέλθει στην κατάσταση ισορροπίας του, δηλαδή, μετά την μεταβατική κατάσταση. Ύστερα ρυθμίζοντας τον VOA εξασθενούμε την ισχύ του φωτός, αρχίζοντας από μεγάλες εξασθενίσεις και προβαίνοντας σε μικρότερες, όπου αντίστοιχα σημαίνει πως χρονικά αυξάνουμε την ισχύ εισόδου. Από την άλλη, όσον αφορά την συχνότητα, αρχικά στοχεύουμε το master στην κεντρική συχνότητα (τρόπο) του slave χωρίς να την μεταβάλλουμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το MLL λειτουργεί υπό 200 mA ρεύμα άντλησης όσο και το CW.

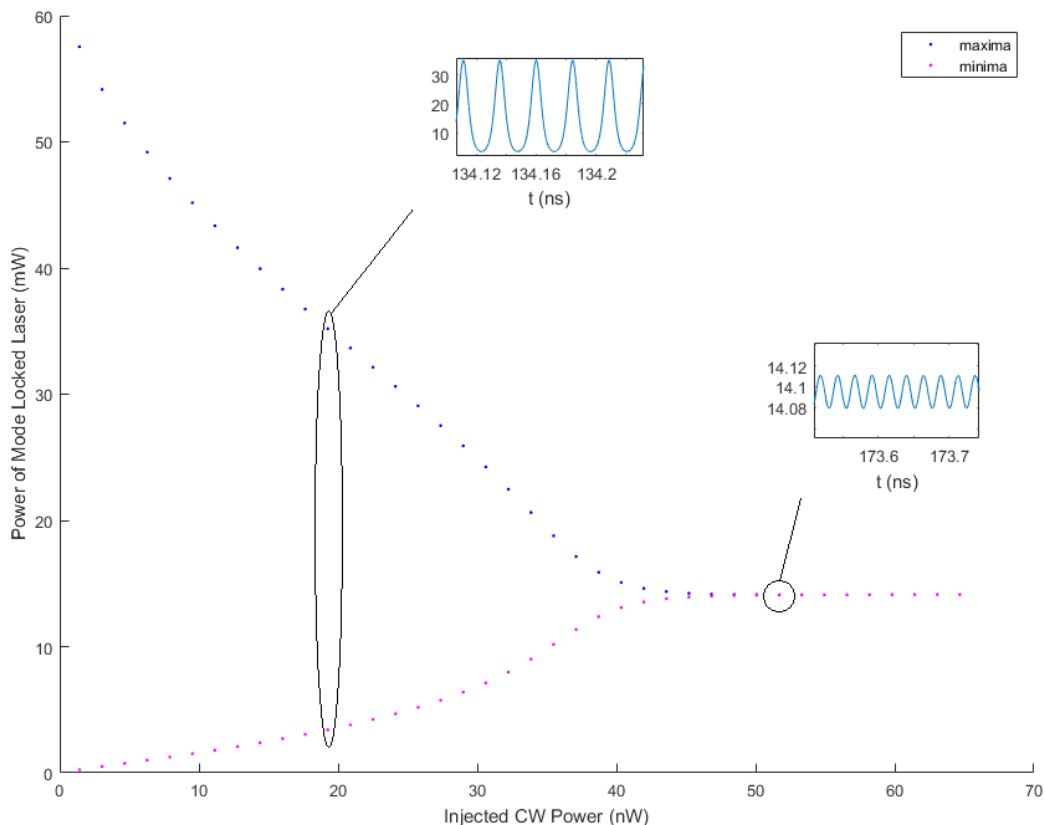


Figure 4.9: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της ισχύος εισόδου του master στον κεντρικό τρόπο με $I = 100\text{mA}$.

Παρατηρούμε πως αυξανόμενης της ισχύος του master το slave αλλοιώνεται έως ότου κλειδωθεί σε αυτό με περίπου, 50 nW ισχύ. Ο αριθμός αυτός δείχνει πολύ μικρός, καθώς η έγχυση γίνεται στην κεντρική συχνότητα στην οποία, λόγω και του ενεργού υλικού, συμβαίνει ο μέγιστος συντονισμός της κοιλότητας. Οπότε όποια οπτική είσοδος και αν επέλθει θα ενισχυθεί κατά το μέγιστο.

Κατά γενική ομολογία, για να υπάρξει απόλυτο κλείδωμα θα έπρεπε να έχουμε στην ισχύ μία γραφική παράσταση ευθείας γραμμής ή αλλιώς μία σταθερή μέση τιμή ισχύος και όχι ένας κυματισμός. Αυτό, και προφανώς, θα συνέβαινε για μεγαλύτερες τιμές ισχύος στην είσοδο, δηλαδή πέρα από τα 70 nW.

Όμως η περίπτωση έγχυσης του CW στην κεντρική συχνότητα δεν αποβαίνει χρήσιμη, καθώς, αργότερα θα γίνει χρήση ενός οπτικού φίλτρου στην συχνότητα αυτή (του CW δηλαδή). Ο σκοπός αυτού θα φανεί στη συνέχεια. Οπότε η εναλλακτική λύση είναι η μεταφορά της συχνότητας εκτός του φάσματος λειτουργίας του MLL, όπου εάν χρησιμοποιηθεί φίλτρο δεν θα αλλοιώσει την λειτουργία του.

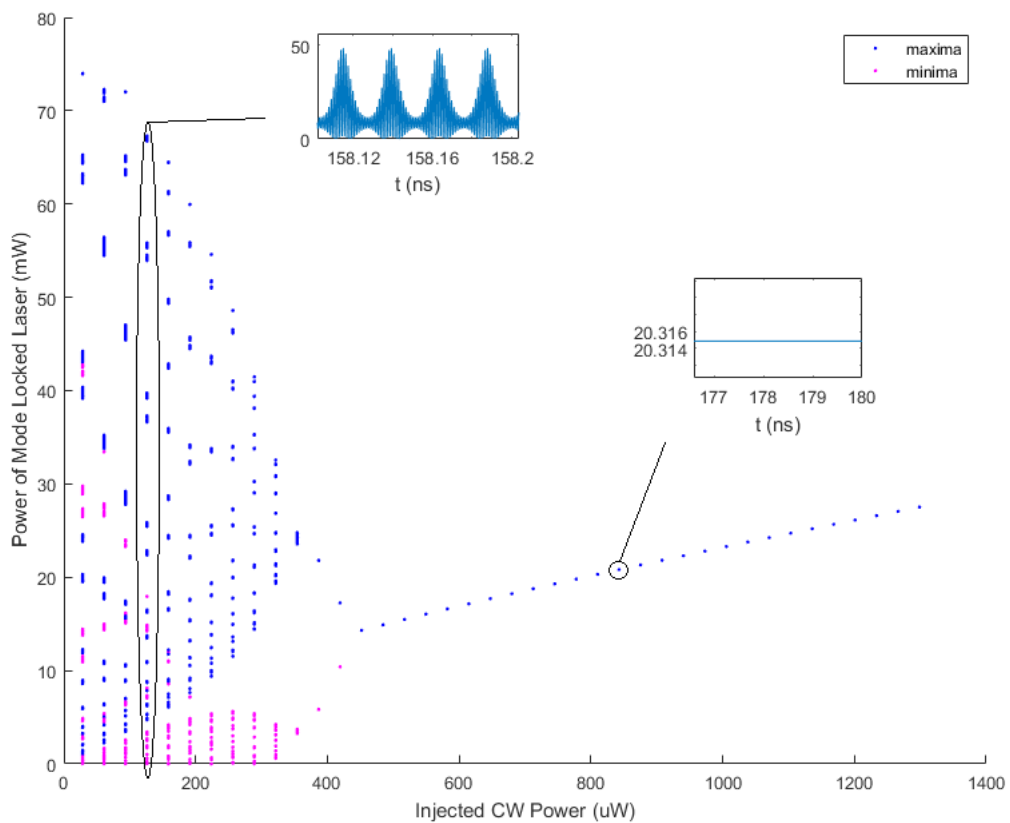


Figure 4.10: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της ισχύος εισόδου του master στον 2ο τρόπο με $I = 100mA$.

Πριν όμως προχωρήσουμε στην υλοποίηση του οπτικού φίλτρου πρέπει να κατανοηθεί πως ακριβώς είναι το φάσμα λειτουργίας του MLL με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αυτό εξυπηρετεί στην κατανόηση της σημασίας της επιλογής της συχνότητας του master laser. Στην πραγματικότητα ένα laser έχει μία συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή λειτουργίας και δεν είναι εύκολα ρυθμιζόμενη χωρίς ειδικά μη γραμμικά υλικά. Επειδή, όμως, πρόκειται για προσομοίωση υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής σε οποιαδήποτε συχνότητα.

Το φάσμα αυτού πρόκειται για μία ‘χτένα’ διότι οι συντονισμοί δεν συμβαίνουν σε όλο το διαθέσιμο φάσμα του υλικού αλλά σε συγκεκριμένες περιοχές στις οποίες συμβαίνει ενισχυτική συμβολή του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι, λοιπόν, λογικό ότι σε αυτές τις περιοχές, οποιοδήποτε

οπτικό σήμα και αν εισέλθει στην κοιλότητα να ενισχυθεί έντονα, ενώ σε άλλες περιοχές να διαταράξει απλώς την λειτουργία του. Για να μπορέσει λοιπόν το slave να κλειδωθεί στο master σε συχνότητες εκτός των τρόπων, θα πρέπει να δοθεί περισσότερη ισχύ ώστε κατά αντιστοιχία να είχαμε το ίδιο αποτέλεσμα αν βρισκόταν πάνω σε τρόπο.

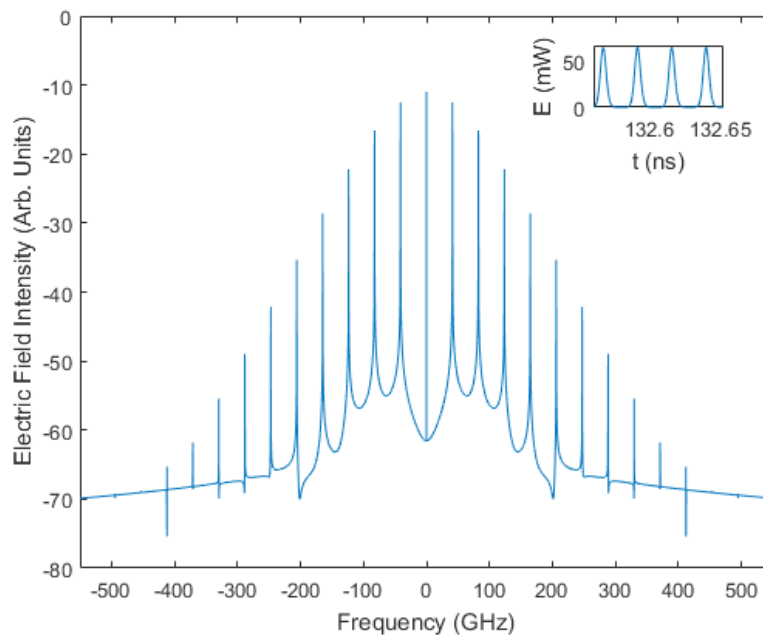


Figure 4.11: Οπτικό φάσμα του MLL. Η κεντρική συχνότητα είναι κανονικοποιημένη στα 0 Hz.

Με αυτόν τον γνώμονα επιλέγουμε το φίλτρο να μην λειτουργεί πάνω σε κάποιον τρόπο ή τουλάχιστον όχι πάνω σε τρόπο ο οποίος να προσφέρει πολύ στην δημιουργία των παλμών. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα φίλτρο σχισμής όπου θα αφαιρεί την συχνότητα του master.

Αυτό γίνεται διότι δεν επιθυμούμε στην έξοδο να υπάρχει ισχύς διότι θεωρητικά θέλουμε να το αποσβέσουμε. Εάν το φίλτρο απορροφήσει την δέσμη του slave τότε ουσιαστικά δεν θα παρατηρήσουμε ισχύ. Στην πραγματικότητα θα υπάρχει φως στην έξοδο, όμως θα είναι αρκετά εξασθενημένο.

Εξ' άλλου ο ίδιος ο νευρώνας, με την παρουσία, κατασταλτικής εισόδου, δεν μπορεί να παράξει ή τουλάχιστον είναι πιο δύσκολο να παράξει δυναμικό δράσης (αφού το δυναμικό στην μεμβράνη μειώνεται) οπότε και στην έξοδό του δεν παρατηρούμε τίποτα. Αυτή είναι και η αναλογία που προσπαθούμε να χτίσουμε.

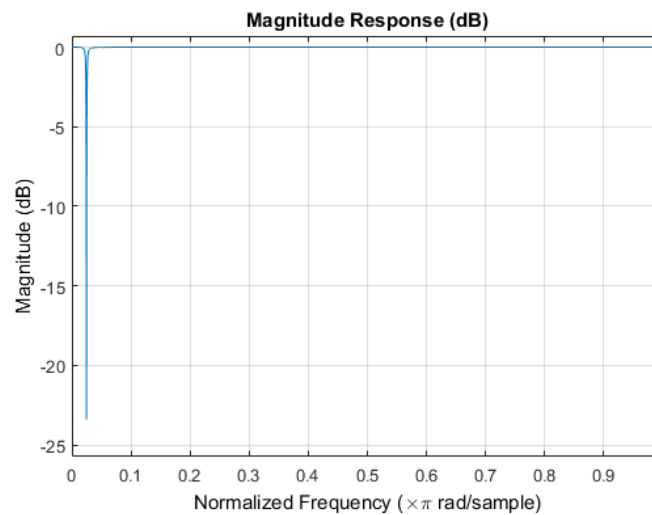


Figure 4.12: Ισοδύναμο οπτικού φίλτρου. Στην πραγματικότητα η εξασθένιση μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη έως και σχεδόν 100%. Η συχνότητα είναι κανονικοποιημένη ως προς την F_s η οποία είναι $6.66 \cdot 10^{13}$ Hz.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

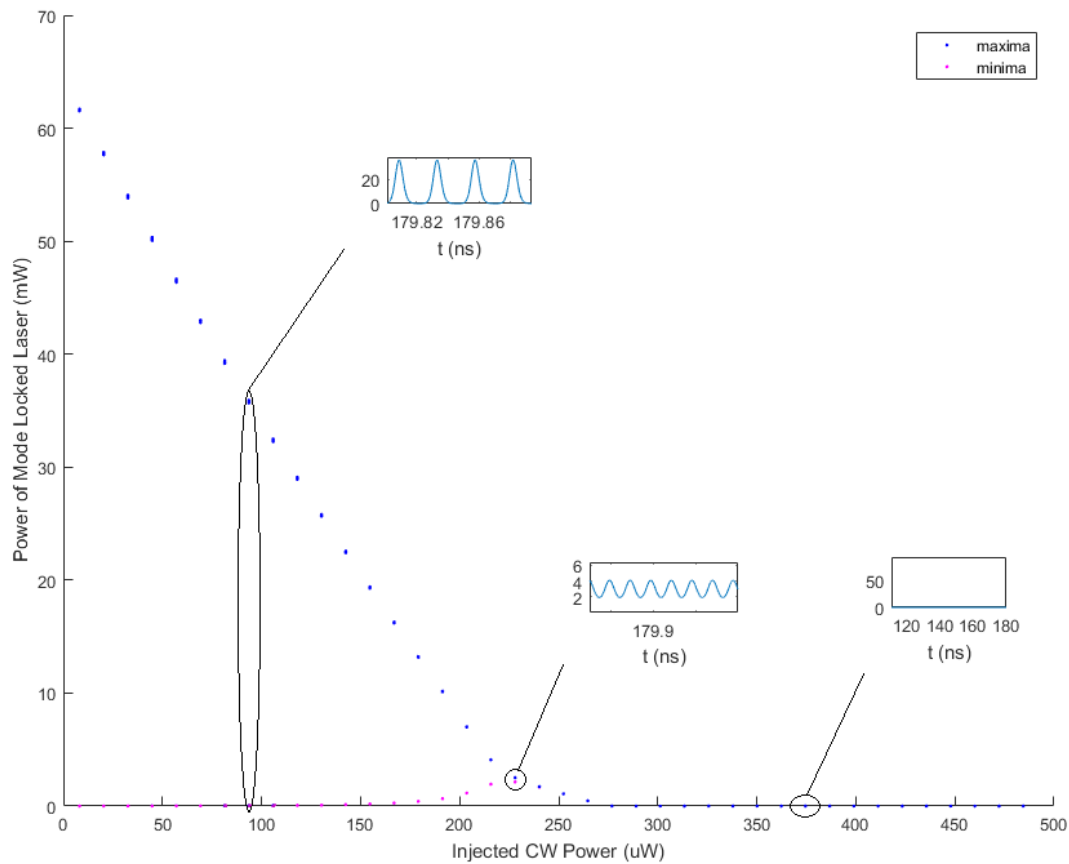


Figure 4.13: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της ισχύος εισόδου του master στον 2ο τρόπο μετά το φίλτρο.

Όντως, λοιπόν, το master laser μειώνει, την ισχύ της εξόδου μέχρις ότου την μηδενίσει. Άρα παρατηρούμε μία είδους ομοιότητα των δυναμικών του νευρώνα με το MLL. Η αλήθεια είναι πως δεν μπορεί να υπάρξει ένα προς ένα αναλογία, καθώς σε αυτή τη περίπτωση η καταστολή επιδρά στην έξοδο και όχι στο ίδιο το laser. Δηλαδή, στον νευρώνα, η καταστολή επιδρά στο δυναμικό της μεμβράνης το οποίο δεν είναι το ίδιο με την έξοδο του (άξονας). Στο laser το ανάλογο της μεμβράνης θα ήταν το GS. Όμως παρ' όλα αυτά καταφέρνουμε και εισάγουμε την έννοια αυτή.

4.5 Σάρωση στην Συχνότητα

Αντιστοίχως, για να πετύχει κανείς κλείδωμα, με μικρή ισχύ, θα πρέπει, όπως ειπώθηκε, η συχνότητα να συμπίπτει πάνω σε κάποιον τρόπο ή τουλάχιστον να βρίσκεται αρκετά κοντά σε αυτόν. Είναι λογικό, δε, να γνωρίζει κανείς, συγκεκριμένα, ποιο είναι το εύρος γύρω από τις συχνότητες συντονισμού.

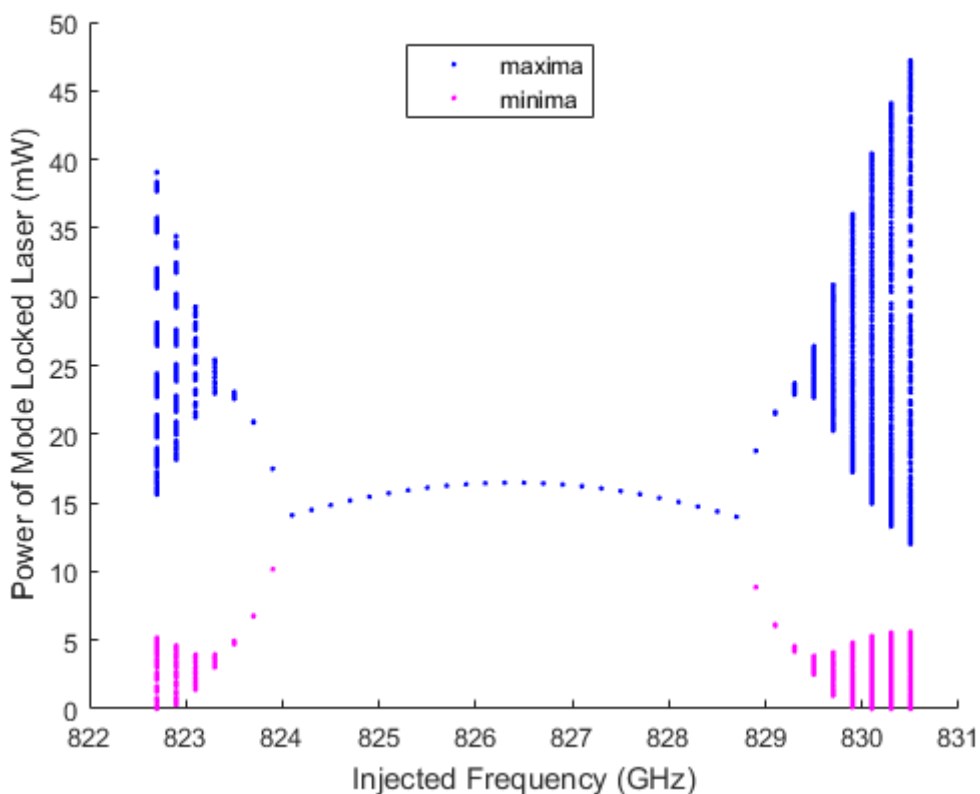


Figure 4.14: Γραφική παράσταση των μεγίστων-ελαχίστων των παλμών του slave συναρτήσει της συχνότητας εισόδου του master στον 20ο τρόπο με ισχύ εισόδου $407 \mu W$

Παρομοίως το παραπάνω διάγραμμα θα ισχύει και για τους υπόλοιπους τρόπους.

Ισχύει, επίσης, πως δεν έχει μεγάλη σημασία από ποια πλευρά του φάσματος εισέρχεται το laser καθώς αυτό είναι συμμετρικό στην ιδανική περίπτωση. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν συχνότητες οι οποίες μπορεί να ευνοούνται περαιτέρω καθαρά λόγω του ενεργού υλικού και τις ενεργειακές του ζώνες. Στην περίπτωση, όπου το master εισέλθει σε συχνότητα εκτός του φάσματος τότε θα προτιμούσε κανείς να επιλέξει την αριστερή πλευρά καθώς εκεί η συχνότητα

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

είναι μικρότερη και άρα η ισχύς που χρειάζεται μικρότερη. Η διαφορά, όμως, δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να είναι σημαντική.

5 Κεφάλαιο V: Προσομοίωση Νευρωνικού Δίκτυο Με Lasers

Τα πραγματικά νευρωνικά δίκτυα, πχ εγκέφαλος, είναι υλοποιημένα από εκατοντάδες δισεκατομμύρια νευρώνες [85] οι οποίοι είναι περίπλοκα συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Όσο περιπλοκότερες οι συνδέσεις τόσο δυσκολότερες οι διεργασίες που αναλαμβάνουν να εκτελέσουν. Για να μιμηθείς, λοιπόν, τέτοια συστήματα πρέπει να εισαχθεί η έννοια του *cascadability* δηλαδή της σύνδεσης πολλών μονάδων (νευρώνας, laser κλπ) για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί σε ένα νευρωνικό δίκτυο, για παράδειγμα την υλοποίηση αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης διάφορων εικόνων, ήχων κλπ. Υπάρχουν δύο, κυρίως, ειδών συνάψεις, οι διεγερτικές (excitable) και οι κατασταλτικές (inhibitory). Δείξαμε προηγουμένως ότι στα laser υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης και των δύο. Όμως, στην υλοποίηση ενός δικτύου τα πράγματα δεν είναι τόσο προφανή. Καταρχάς, θα πρέπει η έξοδος ενός laser να συνδέεται, μέσω μίας βαθμίδας η οποία θα έχει το ρόλο μίας σύναψης, με ένα άλλο laser. Ως βασική βαθμίδα ορίζεται το mode locked laser το οποίο έχει τον ρόλο του νευρώνα, οπότε και όλα τα παραπάνω πρέπει να προσαρμοστούν γύρω από αυτό. Αυτό σημαίνει πως η έξοδος από ένα MLL θα πρέπει να εισέρχεται σε ένα άλλο MLL κοκ έως και την τελευταία βαθμίδα.

Και τίθεται το ερώτημα, πως ακριβώς θα εισέλθει το ένα στο άλλο? Υπάρχουν δύο πιθανές απαντήσεις. Είτε οπτικά, είτε ηλεκτρικά. Οπτικά είναι αρκετά απλός τρόπος καθώς δεν χρειάζεται κανενός είδους μετατροπής. Από την άλλη για να εισαχθούν οι παλμοί ηλεκτρικά (μέσω της άντλησης) θα πρέπει να γίνει μετατροπή του ηλεκτρικού πεδίου σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω μιας φωτοδιόδου. Αρχικά είναι εμφανές ότι η επιλογή της οπτικής μεθόδου είναι και η καλύτερη. Όμως, σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει πρόβλημα με την συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία είναι γραμμική σε όλο το εύρος της ισχύος εισόδου. Δεν υπάρχει, δηλαδή, ένα κατώφλι που πρέπει να ξεπεραστεί για να υπάρχει έξοδος.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

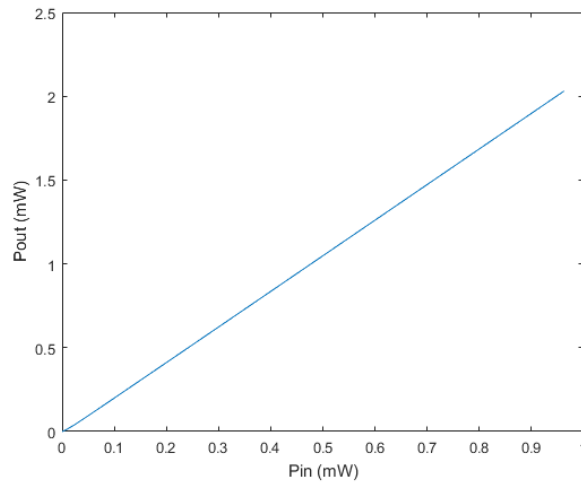


Figure 5.1: Συνάρτηση ενεργοποίησης για οπτική είσοδο. Δεν παρατηρούμε κανένα κατώφλι.

Τότε αναγκαστικά θα πρέπει να προβεί κανείς στην οπτικοηλεκτρική μετατροπή. Εδώ έχει σημασία η επιλογή της φωτοδιόδου, και συγκεκριμένα η απόκρισή της. Καταρχάς, είναι λογικό η συχνότητα λειτουργίας της να ταιριάζει με την κεντρική συχνότητα του MLL. Επιλέγουμε, επίσης, την

ταχύτητα απόκρισης να είναι σχετικά αργή καθώς επιθυμούμε να εισάγεται μία σταθερή τιμή ρεύματος στην άντληση του laser. Η φωτοδιόδος τότε δεν θα προλαβαίνει να ανταποκριθεί στους, υψηλού ρυθμού, παλμούς στην είσοδό της με αποτέλεσμα στην έξοδο να δίνει την μέση τιμή αυτών, η οποία είναι σταθερή. Σε αυτή τη περίπτωση αυτή ανταποκρίνεται ως ένα, πρώτης τάξης, βαθυπερατό φίλτρο [86] με συχνότητα αποκοπής $f_{3dB} \approx 0.35/t_r$, όπου t_r ο χρόνος ανόδου από το 10% στο 90% της εξόδου της φωτοδιόδου. Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως $\eta = S \cdot 1240/\lambda (nm)$, όπου S η απόκριση σε σχέση με την ισχύ εισόδου, δηλαδή $S = I_p/P$, σε συγκεκριμένη συχνότητα. Οι κατασκευαστές συνήθως παρέχουν ένα διάγραμμα του S συναρτήσει της συχνότητας, στο φάσμα λειτουργίας της φωτοδιόδου. Τελικά, αν θεωρήσουμε ότι η φωτοδιόδος δεν επηρεάζει το ρεύμα (παρασιτικά στοιχεία), θα ισχύει:

$$I = \eta P_{incident} \quad (5.1)$$

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδώσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

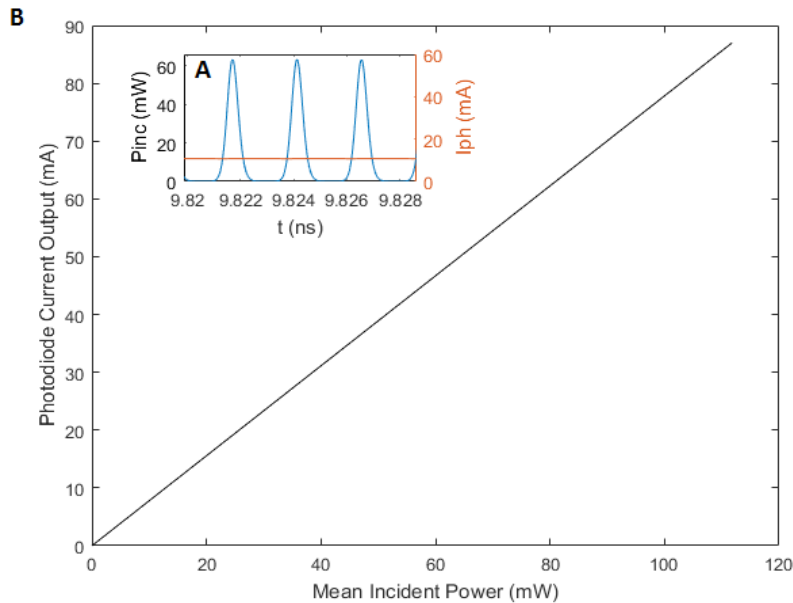


Figure 5.2: **B** Διάγραμμα της απόκρισης της φωτοδιόδου συναρτήσει της ισχύος πρόσπτωσης. **A** Χρονική σύγκριση της ισχύος πρόσπτωσης με το ρεύμα της φωτοδιόδου.

Θεωρούμε, πως σε όλη την έκταση του φάσματος του MLL η απόκριση είναι σταθερή και ίση με 91%. Η συχνότητα αποκοπής είναι 50 MHz. Τα χαρακτηριστικά αυτά ανήκουν στην LLAM-1550-R2AH. Θεωρούμε, επίσης, πως δεν υπάρχουν απώλειες λόγω αστοχίας στην σκόπευση του ηλεκτρικού πεδίου με το άνοιγμα της φωτοδιόδου.

5.1 Βάρη (Weights)

Τα βάρη δηλώνουν πόσο ισχυρές είναι οι συνάψεις μεταξύ των νευρώνων. Σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο συμβολίζονται με έναν αριθμό ο οποίος πολλαπλασιάζει την είσοδο [87]. Όσο μεγαλύτερος αυτός ο αριθμός τόσο ισχυρότερη η σύναψη. Οι αρνητικοί αριθμοί αντιστοιχούν στις κατασταλτικές συνάψεις. Στην περίπτωση μας, τα βάρη κυμαίνονται από 0 έως 1 καθώς χρησιμοποιείται ένας μεταβλητός οπτικός εξασθενητής. Λόγω αυτού, μετά την φωτοδίοδο,

χρησιμοποιείται ένας σταθερός ενισχυτής ρεύματος διότι τα επίπεδα είναι αρκετά χαμηλά ώστε να μπορέσουν να ‘ανάψουν’ ένα laser.

5.2 Συνάψεις (Synapses)

Η διεγερτική σύναψη αποτελείται ένα οπτικό φίλτρο στην συχνότητα της κατασταλτικής εκπομπής, έναν VOA όπου λειτουργεί ως το βάρος το οποίο θα μεταβάλλεται ανάλογα με το πρόβλημα προς επίλυση, από μία φωτοδίοδο, η οποία όπως είπαμε, θα μετατρέπει τα φωτόνια σε ηλεκτρικό ρεύμα, και έναν ενισχυτή ρεύματος για να μπορέσει το ρεύμα αυτό να διεγείρει το laser.

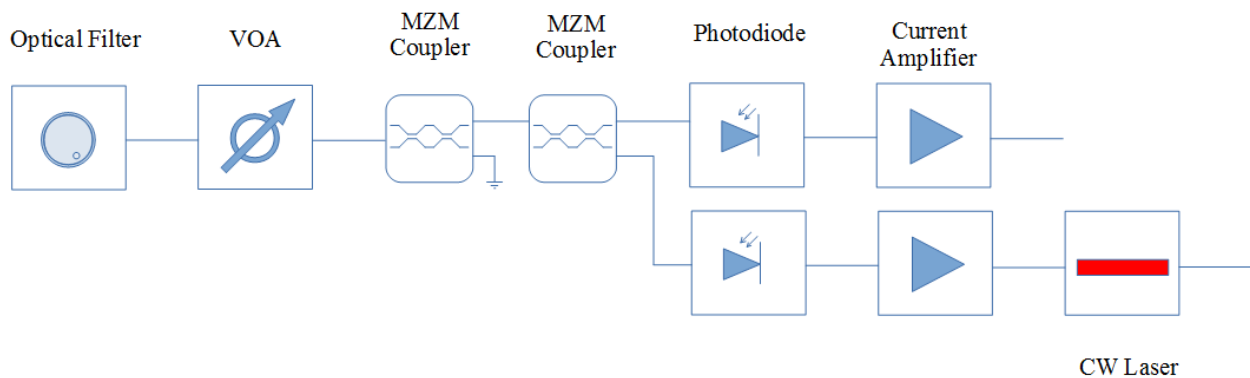


Figure 5.3: Οπτική σύναψη. Η άνω σύναψη είναι η διεγερτική ενώ η κάτω κατασταλτική.

Από την άλλη, η κατασταλτική σύναψη είναι λίγο πιο περίπλοκη. Αποτελείται και αυτή από ένα οπτικό φίλτρο, έναν VOA, μία φωτοδίοδο και έναν ενισχυτή ρεύματος αλλά χρησιμοποιείται, επιπλέον, το CW laser το οποίο ουσιαστικά είναι υπεύθυνο για την κατασταλτική λειτουργία. Η διαφορά, δηλαδή, είναι ότι στην κατασταλτική σύναψη το παραγόμενο ρεύμα δεν οδηγείται απευθείας στο gain του MLL αλλά οδηγείται αρχικά στο gain ενός CW και το φως που παράγεται από το τελευταίο οδηγείται οπτικά εντός της κοιλότητας του MLL.

5.3 Εκμάθηση (Training)

Τα βάρη αυτά, κατά την περίοδο εκμάθησης, μεταβάλλονται ώστε το νευρωνικό δίκτυο να λύσει το πρόβλημα που του έχει τεθεί. Συνήθως αρχικοποιούνται με τυχαίες τιμές και μεταβάλλονται βήμα βήμα με έναν αλγόριθμο. Ο πιο γνωστός από αυτούς είναι ο backpropagation [88]. Η μεταβολή μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική και είναι διαφορετική για το κάθε πρόβλημα. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει πιθανότητα ένα βάρος από θετικό να γίνει αρνητικό και αντίστροφα. Εδώ παρουσιάζεται ένα πρόβλημα. Στην περίπτωση της υλοποίησης του νευρωνικού δικτύου με υπολογιστή δεν υπάρχει δυσκολία στην αλλαγή αυτή.

Στην φωτονική υλοποίηση όμως οι διεγερτικές συνάψεις με τις κατασταλτικές είναι δύο διαφορετικοί δρόμοι οι οποίοι δεν μπορούν να συγχωνευτούν. Για αυτό το λόγο γίνεται χρήση ενός MZM Coupler ακριβώς μετά την έξοδο ενός

MLL. Όταν μετά τον υπολογισμό της μεταβολής αποφανθεί πως το βάρος γίνεται αρνητικό ή θετικό τότε δίνεται εντολή στο MZM να επιλέξει μία από τις δύο συνάψεις, την κατασταλτική ή την διεγερτική αντίστοιχα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν αναλύεται ο αλγόριθμος αλλά τα βάρη είναι επιλεγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετούν το αναμενόμενο αποτέλεσμα.

5.4 Φωτονικό Νευρωνικό Δίκτυο

Όπως ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, έτσι και το φωτονικό αποτελείται από πολλές βαθμίδες (layers). Η πρώτη βαθμίδα συνίσταται από τις εισόδους, πχ από αισθητήρες ή από ψηφιοποιημένη εικόνα ή ήχο, όπου αναπαρίστανται από το ρεύμα το οποίο εισέρχεται στον νευρώνα (MLL) μέσω μίας σύναψης. Στην περίπτωση ψηφιακής εισόδου το ρεύμα θα παίρνει κανονικοποιημένες τιμές από 0 ή 1, ενώ στην αναλογική 0 έως 1 με βήμα ανάλογα την εφαρμογή, πχ όσα τα $2^{-\text{bits}}$ ενός 8-bit ή 10-bit καταχωρητή κλπ. Οι επόμενες βαθμίδες αφορούν το λεγόμενο hidden layer το οποίο λειτουργεί ως μαύρο κουτί (black box), όπου ουσιαστικά κάθε τέτοια βαθμίδα αναλαμβάνει την αναγνώριση ενός συγκεκριμένου μοτίβου (pattern), πχ των ακμών μιας εικόνας κλπ. Όσο πιο περίπλοκη η διεργασία που πρέπει να εκτελεστεί τόσο πιο πολλές βαθμίδες θα υπάρχουν. Η επιλογή του αριθμού των βαθμίδων και των νευρώνων που περιέχουν είναι καθαρά πρόβλημα βελτιστοποίησης του δικτύου. Πρέπει να δοθεί αρκετή προσοχή καθώς σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν περισσότερες ή λιγότερες από ότι χρειάζεται μπορεί να οδηγήσουν σε 'λανθασμένα' αποτελέσματα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση προσαρμογής πειραματικών δεδομένων που ακολουθούν γραμμική συμπεριφορά, όταν επιλεγθεί περίπλοκο δίκτυο τότε η ευθεία προσαρμογής τείνει να ακολουθήσει την πορεία των σημείων και όχι να αναζητήσει την ευθεία εκείνη με το ελάχιστο σφάλμα. Τέλος, στην έξοδο, υπάρχει η βαθμίδα η οποία αποτελείται από τόσους νευρώνες όσοι και τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για παράδειγμα σε ένα απλό δίκτυο απόφασης τα ενδεχόμενα αποτελέσματα είναι δύο, ναι ή όχι, 0 ή 1, άρα δύο νευρώνες, ενώ ένα πιο σύνθετο δίκτυο θα μπορούσε να ελέγχει αναλογικά το γκάζι, το φρένο, το τιμόνι κλπ ενός αμαξιού. Επίσης, για την επεκτασιμότητα του δικτύου χρησιμοποιούνται MZM Couplers για την επιλογή κρυφών βαθμίδων ή νευρώνων απαιτεί η κάθε διεργασία. Βέβαια, είναι απαραίτητο να χτιστεί και ένας αλγόριθμος που θα προβλέπει και θα ελέγχει τον αριθμό αυτών.

5.5 Παράδειγμα της XOR πύλης

Μία από τις πιο χρήσιμες λογικές πύλες είναι η XOR, η οποία χρησιμοποιείται σε αθροιστές. Στην πραγματικότητα οι πύλες XOR υλοποιούνται από NANDs διότι οι τελευταίες μπορούν εύκολα να συνδεθούν μαζικά (cascadability). Όμως υπάρχει και κάτι άλλο που κάνει την συγκεκριμένη πύλη άξια προς μελέτη. Η πύλη αυτή οδήγησε στην μελέτη και κατασκευή του ίσως πιο διάσημου αλγόριθμου (backpropagation) [89]. Για να υλοποιηθεί με νευρωνικό δίκτυο χρειάζεται ένα hidden layer και τουλάχιστον μία κατασταλτική σύναψη. Μέσω αυτού μπορεί κανείς να εξετάσει την έννοια του cascadability και του inhibition. Παρακάτω δίνεται η πλήρης ανάλυση στην περίπτωση εισόδου 11. Αυτή είναι αρκετά καλή περίπτωση καθώς εξετάζεται η παρουσία ηλεκτρικών πεδίων και ρευμάτων σε όλους τους κλάδους του δικτύου.

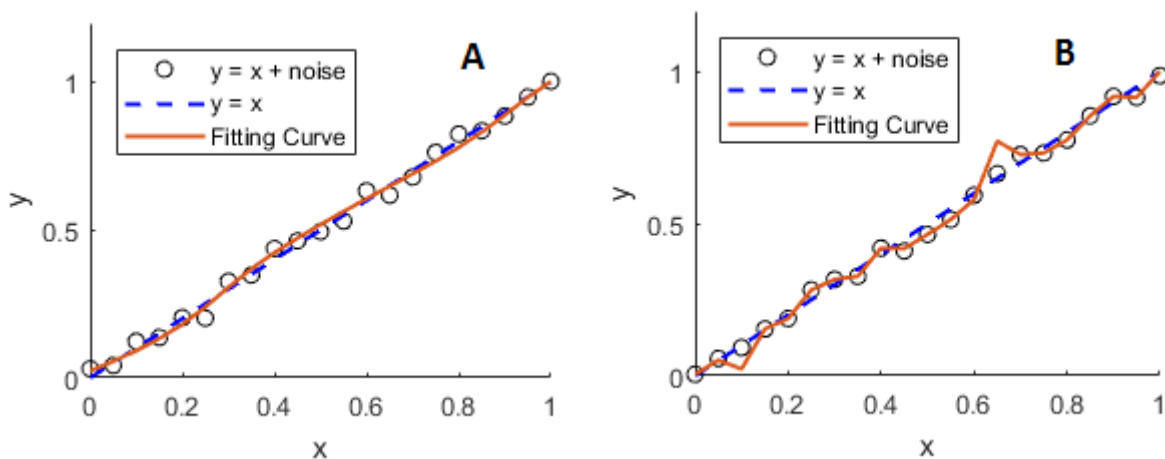


Figure 5.4: Διάγραμμα προσαρμογής τυχαίων πειραματικών δεδομένων μέσω νευρωνικού δικτύου από **A** 1 hidden layer με 3 νευρώνες και **B** 4 hidden layers από 20, 50, 40 και 30, αντίστοιχα, νευρώνες. Παρατηρούμε πως στην δεύτερη περίπτωση όπου στο δίκτυο υπάρχουν πιο περίπλοκες συνδέσεις η ευθεία τείνει να συνδέσει όλα τα σημεία μεταξύ τους και όχι να προσεγγίσει την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Ο θόρυβος είναι Gaussian.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

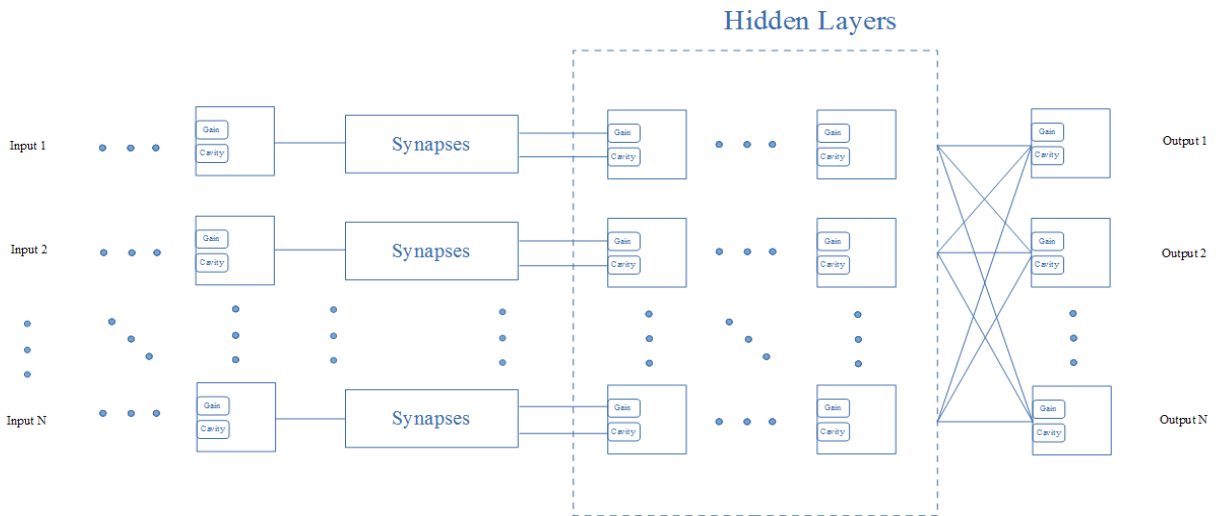


Figure 5.5: Διάγραμμα ενός οπτικού νευρωνικού δικτύου με MLLs. Οι περίπλοκες συνδέσεις της τελευταίας βαθμίδας ισχύουν για όλες τις βαθμίδες μεταξύ τους. Ως βασική μονάδα ορίζεται το Mode Locked Laser.

Όσον αφορά τα βάρη. Στις συνάψεις είδαμε πως έχουμε δύο τρόπους να τα ελέγξουμε, μέσω του VOA ή μέσω του ενισχυτή ρεύματος. Στην παρούσα περίπτωση, ο ενισχυτή ρεύματος ενισχύει το σήμα κατά 20 dB σταθερά. Οπότε η αλλαγή των βαρών γίνεται αποκλειστικά από τους VOA. Οπότε το 0.15 σημαίνει 85% μείωση του φωτός, $0.1 \rightarrow 90\%$ και $0.05 \rightarrow 95\%$.

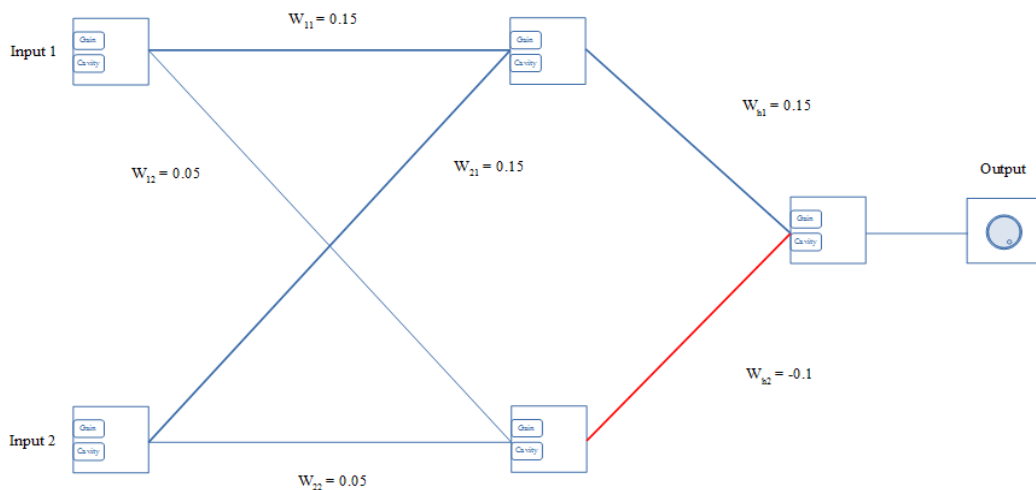


Figure 5.6: Οπτικό νευρωνικό δίκτυο για την προσομοίωση της XOR πύλης. Με κόκκινο συμβολίζεται η κατασταλτική σύνναψη ενώ με μπλε η διεγερτική. Επίσης οι πιο έντονες γραμμές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάρη.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

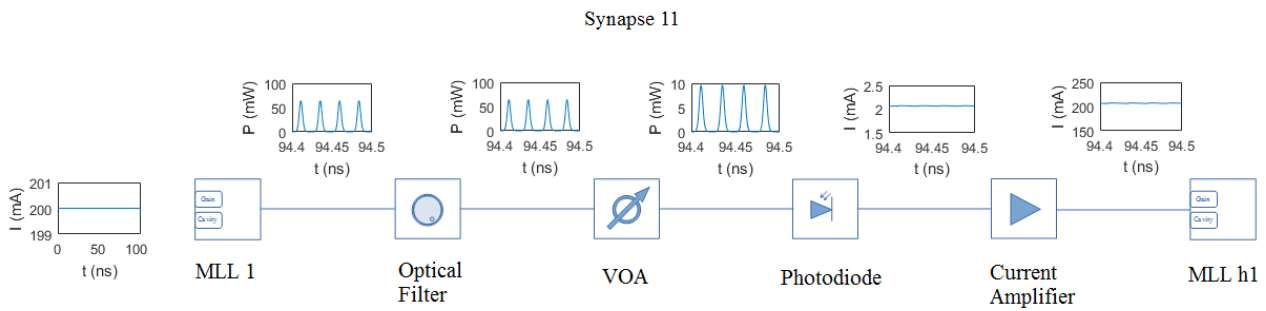


Figure 5.7: Η σύναψη 11 η οποία συνδέει τον πρώτο νευρώνα εισόδου με τον πρώτο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.

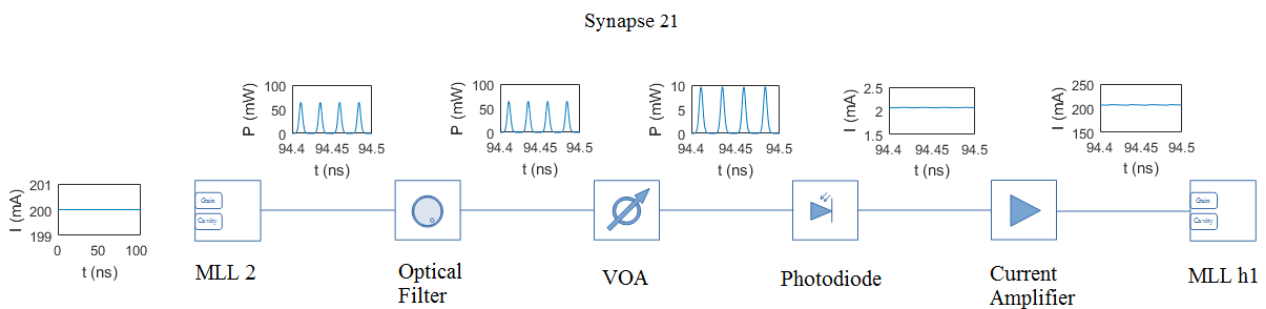


Figure 5.8: Η σύναψη 21 η οποία συνδέει τον δεύτερο νευρώνα εισόδου με τον πρώτο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.

Το bit 0 ή 1 δίνεται στο φωτονικό νευρωνικό δίκτυο ως μία στάθμη ρεύματος περιορισμένης χρονικής διάρκειας η οποία αντλεί τα MLL εισόδου. Για το 0 το επίπεδο της στάθμης είναι 0 ενώ για το 1 η στάθμη είναι 200 mA. Η χρονική διάρκεια θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε η λειτουργία του MLL να σταθεροποιηθεί. Στην περίπτωση του 1 το ρεύμα είναι ικανό να θέσει το MLL σε παλμική λειτουργία. Οι παλμοί αυτοί θα περάσουν μέσα από το φίλτρο. Εφόσον οι παλμοί δεν έχουν αναμιχθεί με φωτόνια συχνότητας όσο του CW, οι παλμοί απλώς θα περάσουν αναλλοίωτοι στην επόμενη διάταξη. Αυτή είναι ο VOA, ο οποίος θα απορροφήσει ποσοστό φωτονίων όσο και το ένα μείον το βάρος της συγκεκριμένης σύναψης (για παράδειγμα στη σύναψη 11 θα απορροφήσει το 85% των φωτονίων). Τα φωτόνια που απέμειναν θα περάσουν στην φωτοδίοδο όπου και θα γίνει η μετατροπή τους σε ρεύμα. Λόγω της αργής απόκρισής της, η έξοδος της φωτοδίοδου θα είναι η μέση τιμή των παλμών, οπότε και αναμένουμε ένα, σχεδόν, σταθερό ρεύμα. Αυτό, μετέπειτα, ενισχύεται κατά 100 φορές και οδηγείται στην άντληση του επόμενου MLL της κρυφής βαθμίδας. Αντίστοιχα η ίδια διαδικασία συμβαίνει, ταυτόχρονα, σε όλες τις συνάψεις. Αυτό που αλλάζει είναι η μείωση του πλάτους των παλμών λόγω του διαφορετικού βάρους. Λόγω της σύνδεσης all-to-all του δικτύου, οι εξοδοί των συνάψεων 11, 21 και 12, 22 θα προστεθούν αντίστοιχα προτού εισέλθουν στο επόμενο laser. Για παράδειγμα, η είσοδος στον πρώτο laser της κρυφής βαθμίδας h1

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

(εικόνα 5.11) θα είναι γύρω στα 420 mA το οποίο είναι το άθροισμα των εισόδων του 210 από την σύναψη 11 και 210 από τη σύναψη 21.

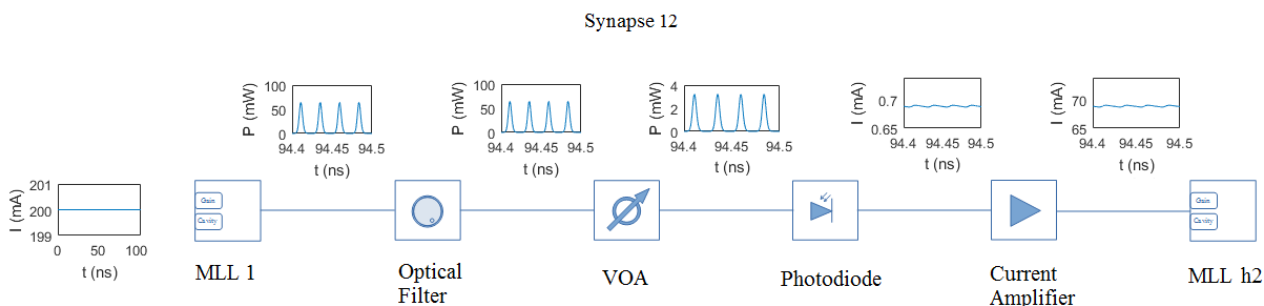


Figure 5.9: Η σύναψη 12 η οποία συνδέει τον πρώτο νευρώνα εισόδου με τον δεύτερο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.

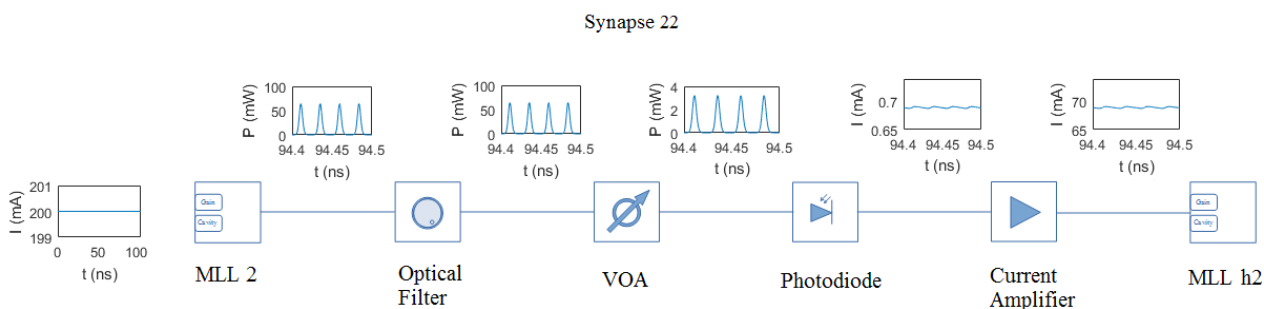


Figure 5.10: Η σύναψη 22 η οποία συνδέει τον δεύτερο νευρώνα εισόδου με τον δεύτερο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας.

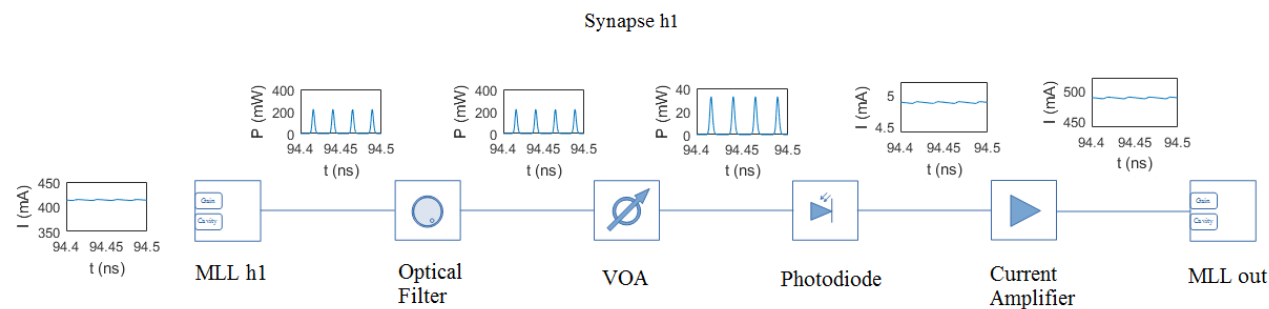


Figure 5.11: Η σύναψη h1 η οποία συνδέει τον πρώτο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας με τον νευρώνα εξόδου.

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

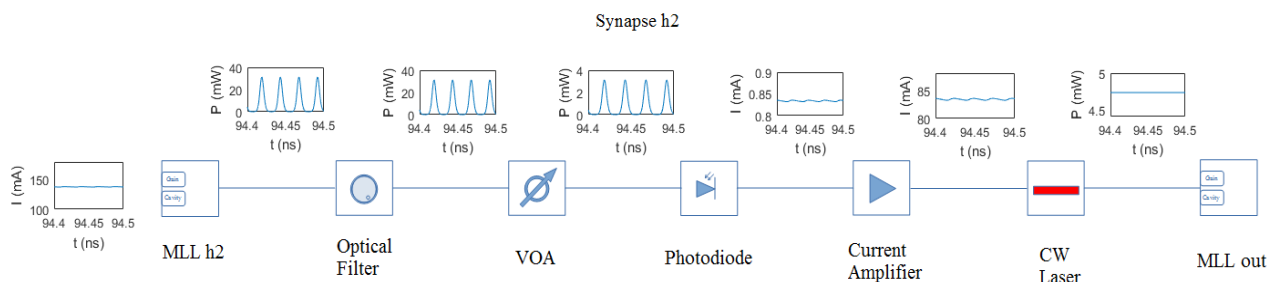


Figure 5.12: Η σύναψη h2 η οποία συνδέει τον δεύτερο νευρώνα της κρυφής βαθμίδας με τον νευρώνα εξόδου.

Παρομοίως το ίδιο συμβαίνει και τις συνάψεις μεταξύ της κρυφής βαθμίδας και της εξόδου. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στην σύναψη h2. Επειδή η συγκεκριμένη σύναψη είναι κατασταλτική, το ρεύμα δεν οδηγείται αμέσως στο τελικό laser αλλά πρώτα οδηγείται στο CW laser. Αφού, λοιπόν, αντληθεί το CW laser, αυτό θα παράξει μία σταθερή έξοδο στη συχνότητα όπου έχει ρυθμιστεί, όπως έχουμε αναφέρει αυτή η συχνότητα θα είναι εκτός του φάσματος του MLL. Τα φωτόνια του CW θα οδηγηθούν οπτικά εντός της κοιλότητας του laser εξόδου. Στην είσοδο του τελευταίου θα έχουμε μία ηλεκτρική άντληση και ταυτόχρονα μία οπτική. Από τη μία η ηλεκτρική άντληση προσπαθεί να οδηγήσει το laser σε παλμική λειτουργία και από την άλλη η οπτική άντληση του καταστρέφει αυτή τη δυνατότητα. Επειδή η οπτική άντληση είναι αρκετά ισχυρή το laser θα κλειδώσει στον ρυθμό του CW, δηλαδή στην έξοδο θα υπάρξει σταθερό πεδίο. Περνώντας το από ένα φίλτρο η συχνότητα του CW απορροφάτε. Τελικά απομένει κάτι το οποίο μοιάζει με θόρυβο. Αυτό ουσιαστικά οφείλεται στο ότι η φωτοδίοδος δεν βγάζει απόλυτα σταθερό ρεύμα αλλά έχει έναν μικρό κυματισμό ο οποίος αλυσωτά οδηγείται μέχρι την έξοδο. Βέβαια η ισχύς αυτή είναι της τάξεων των nW το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μηδενική ισχύς σε σχέση με τη συνήθης ισχύ των mW. Άρα παρατηρούμε ότι για είσοδο 11 η έξοδος είναι 0. Η λειτουργία της διατάξεως αυτή οφείλεται στην σύναψη της καταστολής και τα χαμηλά βάρη συνδέουν το laser h2. Για παράδειγμα στη περίπτωση της εισόδου 01, επειδή το 0 σημαίνει απουσία εισόδου στο πρώτο laser, δεν θα υπάρξει άθροισμα των στην είσοδο του νευρώνα h2. Το τελικό λοιπόν ρεύμα των ~70 mA δεν είναι ικανό να ανάψει το laser οπότε και δεν θα υπάρχει ρεύμα να αντλήσει το CW ώστε αυτό να καταστείλει τον τελικό νευρώνα. Για είσοδο 11 το ρεύμα αυτό ήταν $70+70 = 140$ mA το οποίο είναι ικανό για να ανάψει το laser (βλ εικόνα 3.12).

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

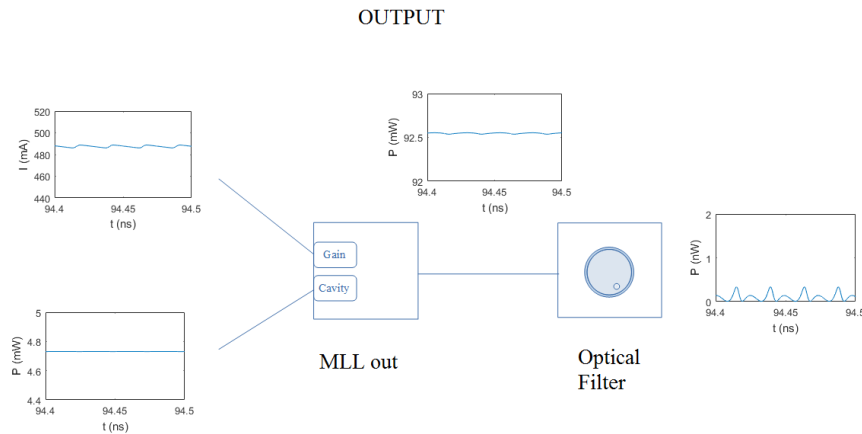


Figure 5.13: Ο νευρώνας εξόδου, έχοντας ως εισόδους τις δύο εξόδους από την κρυφή βαθμίδα

Παρακάτω, δίνονται και οι υπόλοιπες περιπτώσεις, οι οποίες αναλύονται επιφανειακά (το φωτονικό νευρωνικό δίκτυο αντιμετωπίζεται ως black box) διότι η διαδικασία της ανάλυσης είναι απολύτως παρόμοια.

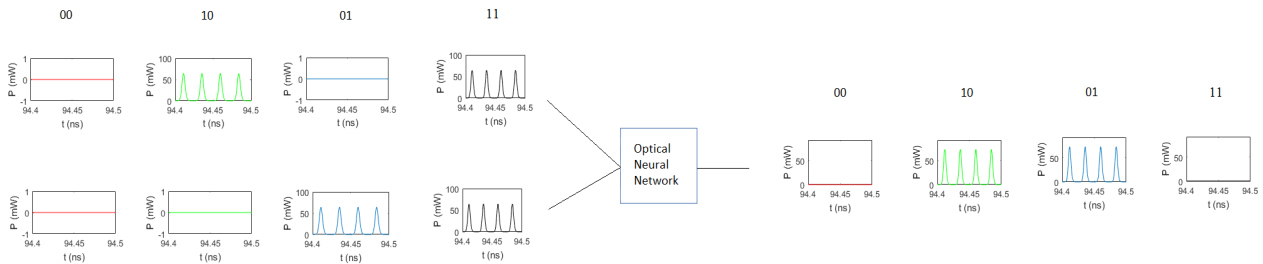


Figure 5.14: Διάγραμμα των υπόλοιπων πιθανών εισόδων σε μία πύλη XOR.

Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι το οπτικό νευρωνικό δίκτυο ανταποκρίνεται στα αναμενόμενα αποτελέσματα.

6 Συμπεράσματα και Συζήτηση

Στην πτυχιακή αυτή καταφέραμε να δημιουργήσουμε ένα φωτονικό νευρωνικό δίκτυο βασισμένο σε τεχνητά υπολογιστικά νευρωνικά δίκτυα τα οποία είναι εμπνευσμένα από τα πραγματικά. Το δίκτυο αυτό ήταν ικανό να εξομοιώσει την συμπεριφορά μίας XOR πύλης η οποία έχει το πλεονέκτημα της ανάδειξης των εννοιών της καταστολής και των μαζικών συνδέσεων. Υπάρχει όμως, αρκετή δουλειά να γίνει. Αρχικά, για να φανεί η επεκτασιμότητα και η ελαστικότητα του δικτύου πρέπει να εισαχθεί ένας αλγόριθμος ο οποίος να μεταβάλλει τα βάρη ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Επίσης πρέπει να μελετηθεί η δυνατότητα ολοκλήρωσης του δικτύου σε στρώματα χημικών ουσιών, όπως για παράδειγμα πυρίτιο. Τέλος, υπάρχει αρκετός χώρος για βελτίωση σε θέματα επιλογής των στοιχείων όπως για παράδειγμα στους ενισχυτές και τους couplers.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Το μοντέλο για το CW DFB Laser συντίθεται από τις παρακάτω εξισώσεις [90-92]:

$$\frac{d}{dt}N(t) = \frac{J(t)}{q} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g \frac{N(t) - N_0}{1 + \varepsilon S(t)} S(t) \quad , \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{d}{dt}S(t) = \Gamma g \frac{N(t) - N_0}{1 + \varepsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \Gamma \frac{\beta N(t)}{\tau_n} \quad , \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{d}{dt}\theta(t) = \Gamma \frac{\alpha}{2} g (N(t) - \bar{N}) \quad , \quad (\text{A.3})$$

όπου N η πυκνότητα φορέων, S η πυκνότητα φωτονίων και θ η φάση του πεδίου. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι οι εξής, q το στοιχειώδες φορτίο, τ_n ο χρόνος ζωής των φορέων, τ_p ο χρόνος ζωής των φωτονίων, N_0 ο όγκος των φορέων διαφάνειας, β το ποσοστό της αυθόρμητης εκπομπής, α παράγοντας βελτιστοποίησης του φάσματος, g το κέρδος (ενεργό υλικό), ε η μη γραμμική συμπίεση του κέρδους, \bar{N} η πυκνότητα των φορέων στο κατώφλι, J η πυκνότητα ρεύματος άντλησης και Γ ο παράγοντας περιορισμού.

Πρόκειται για laser στο οποίο, σε όλο το μήκος της κοιλότητας, έχει εισαχθεί ένα πλέγμα Bragg, το οποίο ουσιαστικά είναι μία περιοδική αλλαγή του δείκτη διάθλασης [93]. Η αλλαγή αυτή επιφέρει μία ανάκλαση στην συχνότητα αυτή η οποία ισούται με το αντίστροφο της περιοδικότητας του Bragg. Η ανάδραση η οποία προκαλείται ευνοεί την συχνότητα αυτή με αποτέλεσμα η τελική εκπομπή να είναι σχεδόν μονοχρωματική. Επίσης, λόγω αυτού, η συχνότητα εκπομπής επηρεάζεται ελάχιστα από την θερμοκρασία ή τα επίπεδα άντλησης [94].

Όπως και στο MLL, έτσι και στο CW η δράση ξεκινάει μόνο εάν το ρεύμα άντλησης ξεπεράσει ένα κατώφλι. Το κατώφλι αυτό είναι,

$$I_{th} = V \frac{q}{\tau_n} \left[N_0 + \frac{1}{\Gamma g \tau_p} \right] \quad , \quad (\text{A.4})$$

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλειδώσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

όπου V ο όγκος του ενεργού υλικού.

Η οπτική ισχύς εξόδου περιγράφεται από την σχέση $P(t) = \eta \cdot S(t)$, όπου $\eta = V \frac{\Gamma n_d h f}{2\tau_p}$ με n_d την κβαντική απόδοση του Laser, h την σταθερά του Planck και f την συχνότητα λειτουργίας.

Table 6.1: Τιμές της προσομοίωσης του CW DFB Laser

Παράμετροι	Τιμές	Μονάδες
V	$2 \cdot 10^{-11}$	cm^3
τ_n	0.33	ns
τ_p	7,15	ps
N_0	$4.1 \cdot 10^{17}$	cm^{-3}
β	$3.54 \cdot 10^{-5}$	-
α	1.55	-
g	$2.26 \cdot 10^{-7}$	cm^3/s
ε	$4.58 \cdot 10^{-8}$	cm^3
\bar{N}	$1.025 \cdot 10^{17}$	cm^{-3}
f	200	THz
n_d	0.21	-
Γ	0.2	-

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

Για την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση του μοντέλου αυτού και την ενσωμάτωσή του εντός άλλων μοντέλων χρησιμοποιείται η έκφραση του πεδίου σε μιγαδική μορφή:

$$E_{cw} = \sqrt{S(t)} e^{j(\omega t + \theta(t))} , \quad (A.5)$$

όπου ω η κυκλική συχνότητα του πεδίου.

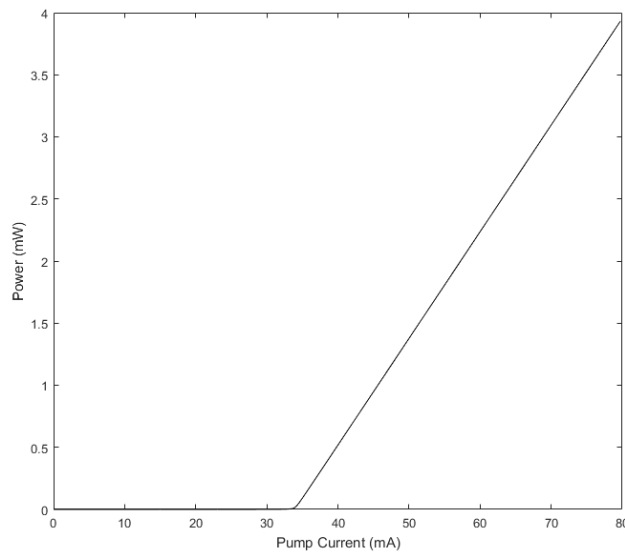


Figure A.1: Γραφική παράσταση της ισχύος εντός του Laser με το ρεύμα άντλησης. Από την σχέση (A.4) ισχύει ότι . Επειδή στο μοντέλο χρησιμοποιείται η πυκνότητα ρεύματος θα ισχύει ότι .

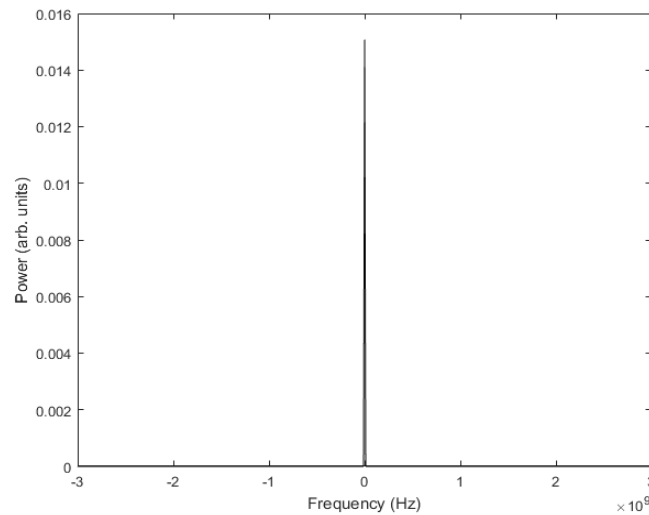


Figure A.2: Ηλεκτρικό φάσμα του Laser. Η ‘κεντρική’ συχνότητα είναι κανονικοποιημένη στα 0 Hz.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κείμενο

- [1] W. F. Brinkman, D. E. Haggan and W. W. Troutman, "A history of the invention of the transistor and where it will lead us," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 12, pp. 1858-1865, Dec. 1997
- [2] Sah Chih-Tang, "Evolution of the MOS transistor-from conception to VLSI," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 10, pp. 1280-1326, Oct. 1988.
- [3] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.," in *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 11, no. 3, pp. 33-35, Sept. 2006.
- [4] R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H. Yu, V. L. Rideout, E. Bassous and A. R. LeBlanc, "Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 9, no. 5, pp. 256-268, Oct. 1974.
- [5] Esmaeilzadeh H, Blem E, St. Amant R, Sankaralingam K, Burger D. Dark silicon and the end of multicore scaling. *IEEE Micro* 2012;32:122–34.
- [6] Stanford, 'Applications of neural networks', Retrieved from <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/neural-networks/Applications/index.html>
- [7] Ferreira de Lima, Thomas & Shastri, Bhavin & Tait, A.N. & Nahmias, Mitchell & Prucnal, Paul. (2017). Progress in neuromorphic photonics. *Nanophotonics*.
- [8] Paul R. Prucnal, Bhavin J. Shastri, Thomas Ferreira de Lima, Mitchell A. Nahmias, and Alexander N. Tait, "Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing," *Adv. Opt. Photon.* 8, 228-299 (2016)
- [9] B. Romeira, R. Av'ó, J. M. L. Figueiredo, S. Barland, and J. Javaloyes, in *Scientific reports*, 2016.
- [10] F. Selmi, R. Braive, G. Beaudoin, I. Sagnes, R. Kuszelewicz, and S. Barbay, *Physical Review Letters*, vol. 112, no. 18, p. 183902, 2014.

- [11] B. J. Shastri, M. A. Nahmias, A. N. Tait, A. W. Rodriguez, B. Wu, and P. R. Prucnal, *Scientific Reports*, vol. 6, 2016.
- [12] B. Benjamin, P. Gao, E. McQuinn, S. Choudhary, A. Chandrasekaran, J.-M. Bussat, R. Alvarez-Icaza, J. Arthur, P. Merolla, and K. Boahen, “Neurogrid: A mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 5, pp. 699–716, May 2014.
- [13] F. Akopyan, J. Sawada, A. Cassidy, R. Alvarez-Icaza, J. Arthur, P. Merolla, N. Imam, Y. Nakamura, P. Datta, G.-J. Nam, B. Taba, M. Beakes, B. Brezzo, J. Kuang, R. Manohar, W. Risk, B. Jackson, and D. Modha, “Truenorth: Design and tool flow of a 65 mw 1 million neuron programmable neurosynaptic chip,” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 34, no. 10, pp. 1537–1557, Oct 2015.
- [14] M. Davies, N. Srinivasa, T.-H. Lin, G. N. Chinya, Y. Cao, S. H. Choday, G. D. Dimou, P. Joshi, N. Imam, S. Jain, Y. Liao, C.-K. Lin, A. Lines, R. Liu, D. Mathaikutty, S. McCoy, A. Paul, J. Tse, G. Venkataramanan, Y.-H. Weng, A. Wild, Y. Yang, and H. Wang, “Loihi: A neuromorphic manycore processor with on-chip learning,” *IEEE Micro*, vol. 38, pp. 82–99, 2018.
- [15] S. Furber, F. Galluppi, S. Temple, and L. Plana, “The spinnaker project,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 5, pp. 652–665, May 2014.
- [16] H. J. Wünsche, O. Brox, M. Radziunas, and F. Henneberger, “Excitability of a semiconductor laser by a two-mode homoclinic bifurcation,” *Physical Review Letters*, vol. 88, p. 023901, Dec 2001.
- [17] B. Romeira, J. Javaloyes, C. N. Ironside, J. M. L. Figueiredo, S. Balle, and O. Piro, “Excitability and optical pulse generation in semiconductor lasers driven by resonant tunneling diode photo-detectors,” *Optics Express*, vol. 21, no. 18, pp. 20 931–20 940, Sep 2013.
- [18] L. Gelens, L. Mashal, S. Beri, W. Coomans, G. Van der Sande, J. Danckaert, and G. Verschaffelt, “Excitability in semiconductor microring lasers: Experimental and theoretical pulse characterization,” *Physical Review A*, vol. 82, p. 063841, Dec 2010.
- [19] M. P. Fok, Y. Tian, D. Rosenbluth, and P. R. Prucnal, “Asynchronous spiking photonic neuron for lightwave neuromorphic signal processing,” *Optics Letters*, vol. 37, no. 16, pp. 3309–3311, Aug. 2012.
- [20] A. Hurtado and J. Javaloyes, “Controllable spiking patterns in longwavelength vertical cavity surface emitting lasers for neuromorphic photonics systems,” *Applied Physics Letters*, vol. 107, no. 24, 2015.
- [21] M. A. Nahmias, B. J. Shastri, A. N. Tait and P. R. Prucnal, "A Leaky Integrate-and-Fire Laser Neuron for Ultrafast Cognitive Computing," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1-12, Sept.-Oct. 2013

[22] H. Peng *et al.*, "Temporal Information Processing With an Integrated Laser Neuron," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 1-9, Jan.-Feb. 2020

[23] 'Brain Basics: The Life and Death of a Neuron', (2019), Available from <https://www.ninds.nih.gov/disorders/patient-caregiver-education/life-and-death-neuron>

[24] Lodish H, Berk A, Zipursky SL, et al. *Molecular Cell Biology*. 4th edition. New York: W. H. Freeman; 2000. Section 21.1, Overview of Neuron Structure and Function. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK21535/>

[25] Raine CS. Characteristics of the Neuron. In: Siegel GJ, Agranoff BW, Albers RW, et al., editors. *Basic Neurochemistry: Molecular, Cellular and Medical Aspects*. 6th edition. Philadelphia: Lippincott-Raven; 1999. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK28209/>

[26] Wen-Jun Gao, 'Electrical Properties of Neurons', Drexel University College of Medicine, pp. 1-8.

[27] Podlaski, W. F., Seeholzer, A., Groschner, L. N., Miesenböck, G., Ranjan, R., & Vogels, T. P. (2017). Mapping the function of neuronal ion channels in model and experiment. *elife*, 6, e22152.

[28] Chrysafides SM, Sharma S. Physiology, Resting Potential. [Updated 2019 Feb 12]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2020 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538338/>

[29] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski, (2014), Equilibrium Potential, In: *Neuronal Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, Available from: <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch2.S1.html>

[30] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001. Electrochemical Equilibrium in an Environment with More Than One Permeant Ion. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11111/>

[31] 'What are neurotransmitters?', Available from: <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-physiology/what-are-neurotransmitters>

[32] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001. Molecular Mechanisms of Transmitter Secretion. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10843/>

[33] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001. Excitatory and Inhibitory Postsynaptic Potentials. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11117/>

[34] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001. Two Major Categories of Neurotransmitters. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10960/>

- [35] Beáta Sperlágh, Sylvester E. Vizi, Neuronal synthesis, storage and release of ATP, *Seminars in Neuroscience*, Volume 8, Issue 4, 1996, pp. 175-186.
- [36] Bean, B. The action potential in mammalian central neurons. *Nat Rev Neurosci* **8**, 451–465 (2007).
- [37] The Axon Initial Segment: An Updated Viewpoint Christophe Leterrier *Journal of Neuroscience* 28 February 2018, 38 (9) 2135-2145
- [38] Morell P, Quarles RH. The Myelin Sheath. In: Siegel GJ, Agranoff BW, Albers RW, et al., editors. *Basic Neurochemistry: Molecular, Cellular and Medical Aspects*. 6th edition. Philadelphia: Lippincott-Raven; 1999. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK27954/>
- [39] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001. Neurons Often Release More Than One Transmitter. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10818/>
- [40] ‘Types of Neurons’, Queensland Brain Institute, Available from: <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/types-neurons>
- [41] Feldman D. E. (2012). The spike-timing dependence of plasticity. *Neuron*, 75(4), 556–571.
- [42] E. M. Izhikevich, "Which model to use for cortical spiking neurons?," in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 5, pp. 1063-1070, Sept. 2004.
- [43] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski, (2014), Integrate-And-Fire Models, In: *Neuronal Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, Available from: <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch1.S3.html>
- [44] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski, (2014), Nonlinear Integrate-And-Fire Models, In: *Neuronal Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, Available from: <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch5.html>
- [45] Ashley, et al. "Determination of the Chronaxie and Rheobase of Denervated Limb Muscles in Conscious Rabbits". *Artificial Organs*, Volume 29 Issue 3 Page 212 - March 2005
- [46] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski, (2014), Quadratic Integrate-And-Fire, In: *Neuronal Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, Available from: <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch5.S3.html>
- [47] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski, (2014), Adaptive Exponential Integrate-And-Fire, In: *Neuronal Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, Available from: <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch6.S1.html>

- [48] Smith, Gregory & Cox, Charles & Sherman, Murray & Rinzel, John. (2000). Fourier Analysis of Sinusoidally Driven Thalamocortical Relay Neurons and a Minimal Integrate-and-Fire-or-Burst Model. *Journal of neurophysiology*.
- [49] Casti, Alexander & Omurtag, Ahmet & Sornborger, Andrew & Kaplan, Ehud & Knight, B & Victor, Jonathan & Sirovich, Lawrence. (2002). A Population Study of Integrate-and-Fire-or-Burst Neurons. *Neural computation*.
- [50] Eugene M. Izhikevich, Resonate-and-fire neurons, *Neural Networks*, Volume 14, Issues 6–7, 2001, pp. 883-894.
- [51] HODGKIN, A. L., & HUXLEY, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of physiology*, 117(4), 500–544.
- [52] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski, (2014), Hodgkin-Huxley Model, In: *Neuronal Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, Available from: <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch2.S2.html>
- [53] FitzHugh R. (1961) Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical J.* 1:445-466
- [54] J. Nagumo, S. Arimoto and S. Yoshizawa, "An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon," in *Proceedings of the IRE*, vol. 50, no. 10, pp. 2061-2070, Oct. 1962.
- [55] Che, Yanqiu & Geng, Li-Hui & Han, Chunxiao & Cui, Shigang & Wang, Jiang. (2012). Parameter estimation of the FitzHugh-Nagumo model using noisy measurements for membrane potential. *Chaos* (Woodbury, N.Y.).
- [56] Morris, C., & Lecar, H. (1981). Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber. *Biophysical journal*, 35(1), 193–213.
- [57] Hindmarsh J. L., Rose R. M. and Huxley Andrew Fielding A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations **221** *Proc. R. Soc. Lond. B*.
- [58] Steur, E. (2006). Parameter estimation in Hindmarsh-Rose neurons. (DCT rapporten; Vol. 2006.073). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
- [59] HUGH R. WILSON, Simplified Dynamics of Human and Mammalian Neocortical Neurons, *Journal of Theoretical Biology*, Volume 200, Issue 4, 1999, Pages 375-388.
- [60] Richard B. Wells, The Wilson Model of Cortical Neurons
- [61] E. M. Izhikevich, "Simple model of spiking neurons", in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, no. 6, pp. 1569-1572, Nov. 2003.

- [62] Farhan Rana, 'Basics of Semiconductor Lasers', Cornell University, Chapter 11.
- [63] M. Young, Mode Locking, In: 'Optics and Lasers, Including Fibers and Integrated Optics', Chapter 8, 5th completely rev. and enlarged ed. 2000, XIX.
- [64] F. X. Kurtner, J. A. der Au and U. Keller, "Mode-locking with slow and fast saturable absorbers-what's the difference?," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 4, no. 2, pp. 159-168, March-April 1998.
- [65] Shaimaa I. Azzam and Alexander V. Kildishev, "Time-domain dynamics of saturation of absorption using multilevel atomic systems," *Opt. Mater. Express* 8, 3829-3834 (2018).
- [66] Igor P. Bilinsky, (1999) 'Novel Saturable Absorber Materials and Devices for Laser Modelocking', P.h. D., Massachusetts Institute of Technology.
- [67] David A. B. Miller, Optical Physics of Quantum Wells, Rm. 4B-401, AT&T Bell Laboratories, Holmdel, NJ07733-3030, USA
- [68] Smith, A. M., & Nie, S. (2010). Semiconductor nanocrystals: structure, properties, and band gap engineering. *Accounts of chemical research*, 43(2), 190–200.
- [69] A.P. Alivisatos, 'Semiconductor Clusters, Nanocrystals, and Quantum Dots', *Science* 16 Feb 1996, Vol. 271, Issue 5251, pp. 933-937.
- [70] Valizadeh A, Mikaeili H, Samiei M, et al. Quantum dots: synthesis, bioapplications, and toxicity. *Nanoscale Res Lett.* 2012;7(1):480. Published 2012 Aug 28.
- [71] Velram Balaji Mohan, Kin-tak Lau, David Hui, Debes Bhattacharyya, Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations, *Composites Part B: Engineering*, Volume 142, 2018, Pages 200-220.
- [72] Ferda Canbaz, Nurbek Kakenov, Coskun Kocabas, Umit Demırbas, and Alphan Sennaroglu, "Generation of sub-20-fs pulses from a graphene mode-locked laser," *Opt. Express* 25, 2834-2839 (2017).
- [73] Keller, Ursula & Weingarten, Kurt & Kärtner, Franz & Kopf, Daniel & Braun, Bernd & Jung, I.D. & Fluck, Regula & Hönninger, Clemens & Matuschek, Nicolai & Aus-der-Au, Juerg. (1996). Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of.* 2. 435 - 453. 10.1109/2944.571743.
- [74] Joachim Herrmann, "Theory of Kerr-lens mode locking: role of self-focusing and radially varying gain," *J. Opt. Soc. Am.* B11, 498-512 (1994)
- [75] Shank C.V., Ippen E.P. (1973) Mode-Locking of Dye Lasers. In: Schäfer F.P. (eds) *Dye Lasers. Topics in Applied Physics*, vol 1. Springer, Berlin, Heidelberg

- [76] Sze Y. Set, Hiroshi Yaguchi, Yuichi Tanaka, and Mark Jablonski, "Laser Mode Locking Using a Saturable Absorber Incorporating Carbon Nanotubes," *J. Lightwave Technol.* 22, 51- (2004)
- [77] Kresten Yvind, (2003), 'Semiconductor Mode-Locked Lasers for Optical Communication Systems', Ph.D., Technical University of Denmark.
- [78] William T. Silfvast, (2004), Laser Cavity Modes, In: 'Laser Fundamentals', Cambridge University Press, Second Edition, Chapter 11.
- [79] Paul E. Green, 'Fiber Optic Networks', Prentice Hall 1992, First Edition.
- [80] Vladimirov, A. & Turaev, Dmitry. (2005). Model for passive mode locking in semiconductor lasers. *Phys. Rev. A.* 72. 10.1103/PhysRevA.72.033808.
- [81] Wang Bo, Ke Wei, Guang Jing, et al, 'Firing Frequency Maxima of Fast-Spiking Neurons in Human, Monkey, and Mouse Neocortex', *Frontiers in Cellular Neuroscience*, Vol. 10, 2016, pp. 239.
- [82] Ra'ul Rojas, One and Two Layered Networks, In: 'Neural Networks A Systematic Introduction', Springer-Verlag, Berlin 1996, pp. 125.
- [83] Ra'ul Rojas, Threshold Logic, In: 'Neural Networks A Systematic Introduction', Springer-Verlag, Berlin 1996, pp. 31.
- [84] Robertson, Joshua & Ackemann, Thorsten & Lester, Luke & Hurtado, Antonio. (2018). Externally-Triggered Activation and Inhibition of Optical Pulsating Regimes in Quantum-Dot Mode-locked Lasers. *Scientific Reports*.
- [85] Herculano-Houzel S. (2009). The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in human neuroscience*, 3, 31.
- [86] 'Si Photodiodes', Hamamatsu, Chapter 02
- [87] Ra'ul Rojas, Artificial Neural Networks, In: 'Neural Networks A Systematic Introduction', Springer-Verlag, Berlin 1996, pp. 23-24.
- [88] Yoshio Hirose, Koichi Yamashita, Shimpei Hijiya, Back-propagation algorithm which varies the number of hidden units, *Neural Networks*, Volume 4, Issue 1, 1991, Pages 61-66.

[89] Ra'ul Rojas, The XOR Problem, In: 'Neural Networks A Systematic Introduction', Springer-Verlag, Berlin 1996, pp. 62-63.

[90] L. Bjerkan, A. Royset, L. Hafskjaer and D. Myhre, "Measurement of laser parameters for simulation of high-speed fiberoptic systems," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 839-850, May 1996.

[91] J. C. Cartledge and R. C. Srinivasan, "Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes," *Conference Proceedings LEOS'96 9th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, Boston, MA, USA, 1996, pp. 248-249 vol.2.

[92] I. Fatadin, D. Ives and M. Wicks, "Numerical simulation of intensity and phase noise from extracted parameters for CW DFB lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 42, no. 9, pp. 934-941, Sept. 2006.

[93] I. Fatadin, D. Ives and M. Wicks, "Numerical simulation of intensity and phase noise from extracted parameters for CW DFB lasers," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 42, no. 9, pp. 934-941, Sept. 2006.

[94] Djie, Hery & Sookdhis, Chrisada & Dowd, Philip. (2001). Analysis and structure design of Distributed Feedback Laser (DFB) and Distributed Bragg Reflector (DBR) laser using Regrowth-free surface grating technology. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.

Εικόνες

[1.1] Wikipedia contributors. Neuron. Wikipedia, The Free Encyclopedia. January 20, 2020. Available at:

https://en.wikipedia.org/wiki/Neuron#/media/File:Blausen_0657_MultipolarNeuron.png .

[1.2] Arwen Cross, Maria Hrmova, ACPFG Blog, '[Making membrane proteins: curdlan synthase](#)', December 8, 2012.

[1.3] NeuroLove, Retrieved from <https://neurolove.tumblr.com/page/2>

[1.4] Figure 10.4, 'Neuron as a structural and functional unit of Neural system'. Retrieved from https://www.brainkart.com/article/Neuron-as-a-structural-and-functional-unit-of-Neural-system_33262/

Διερεύνηση των λέιζερ εγκλείδωσης τρόπων ως μέσα για την υλοποίηση επεξεργασίας οπτικών σημάτων βραχέων παλμών.

[1.5] Thompson, Alex. (2014). Investigation of Infrared Neural Stimulation in the Cochlea. Figure 1.3

[1.6] Queensland Brain Institute, 'Types of neurons', Retrieved from <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/types-neurons>

[1.7] E. M. Izhikevich, "Which model to use for cortical spiking neurons?.", Figure 1

[2.9] Eugene M. Izhikevich and Richard FitzHugh (2006) FitzHugh-Nagumo model. Scholarpedia, 1(9):1349, Figure 1.

[2.17] E. M. Izhikevich, "Simple model of spiking neurons", Figure 2

[2.18] E. M. Izhikevich, "Which model to use for cortical spiking neurons?", Figure 2