



ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών

Δ.Π.Μ.Σ. Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις

Διπλωματική Εργασία

**Memristors με Δισδιάστατα Υλικά και Νευρομορ-
φικές Εφαρμογές**

Δημήτριος Σπιθούρης
ΑΜ 09920023

Επιβλέπων:
Δημήτριος Τσουκαλάς
Καθηγητής

Αθήνα 2022

Περίληψη

Η ταχύτατη ανάπτυξη της τεχνολογίας των πληροφοριών έχει δημιουργήσει ανάγκες και προβλήματα που οι συμβατικοί υπολογιστές δεν μπορούν να ξεπεράσουν. Τα memristors αποτελούν μια από τις καλύτερες εναλλακτικές για τη δημιουργία νευρομορφικών υπολογιστών που μπορούν να υποστηρίξουν Τεχνητή Νοημοσύνη (AI). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, που χωρίζεται σε δύο μέρη, εξετάστηκαν η προσθήκη του δισδιάστατου υλικού MoS_2 σε μία διάταξη memristor, δομής $Ag/SiO_2/TiN$, για να ενισχυθούν το φαινόμενο της κβαντικής αγωγιμότητας και τα χαρακτηριστικά της και διαφορετικές διατάξεις ενός τεχνητού νευρώνα Leaky Integrate and Fire (LIF) σε συνδυασμό με ένα κύκλωμα παραγωγής παλμοσειρών ερεθίσματος. Στο πρώτο μέρος, ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός της διάταξης με το MoS_2 επέδειξε πολλαπλές, σταθερές και επαναλήψιμες καταστάσεις κβαντικής αγωγιμότητας, μειωμένη μεταβλητότητα στη λειτουργία της, καλύτερα συναπτικά χαρακτηριστικά και αμετάβλητη απόδοση ως προς την αντοχή στην διατήρηση της πληροφορίας. Οι βελτιωμένες επιδόσεις της διάταξης οφείλονται στον περιορισμό στην ανάπτυξη του αγωγίμου σύρματος (CF), που εισάγει το δισδιάστατο υλικό, το οποίο λειτουργεί σαν σίτα κβαντικού περιορισμού του CF και ελέγχει τον σχηματισμό του, κάνοντας τα χαρακτηριστικά της διάταξης πιο ομοιόμορφα. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, όλες οι διατάξεις του τεχνητού νευρώνα που μελετήθηκαν, εμφάνισαν τα ζητούμενα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένας τεχνητός νευρώνας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά memristors, ένα με πτητικό και μη πτητικό τρόπο λειτουργίας και ένα καθαρά πτητικό, και παλμογεννήτρια ή ένα κύκλωμα παραγωγής παλμών, το οποίο, μέσω της ρύθμισης διαφορετικών στοιχείων του, μπορεί να μεταβάλλει τις παραμέτρους της παλμοσειράς. Πιο συμβατό αποδείχτηκε το καθαρά πτητικό memristor, λόγω της μεγαλύτερης σταθερότητάς του και του μεγαλύτερου παραθύρου μνήμης που έχει, ενώ η χρήση του κυκλώματος παραγωγής παλμών είναι επιτυχημένη και παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς, αντί για τα κυκλωματικά στοιχεία που μεταβάλλονται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες και να δημιουργηθεί μία ολοκληρωμένη συσκευή αίσθησης.

Abstract

The rapid growth of information technology has created needs and problems that the conventional computers cannot overcome. Memristors are one of the best alternatives for the realization of neuromorphic computing systems that can sustain artificial intelligence (AI). In this work, which is separated in two parts, the two dimensional material MoS_2 was incorporated in a memristor with structure $Ag/SiO_2/TiN$, in order to enhance its characteristics and the quantum conductance phenomenon. Also, different configurations of an artificial Leaky Integrate and Fire (LIF) neuron were examined, in combination with a pulse generator or a pulse generating circuit. In the first part, after the electrical characterization, the device with the embedded MoS_2 demonstrated multiple, stable and repeatable quantum conductance states, reduced variability and improved synaptic properties, while its endurance and retention performance were not affected by the incorporation of the MoS_2 . The enhanced performance of the device is attributed to the restriction to the growth of the conductive filament (CF), that the 2D material introduces. Thus, MoS_2 works as a sieve of quantum constriction to the CF and it controls its formation, making the characteristics of the device more uniform and stable. In the second part of this work, all the different configurations of the artificial neuron that were examined, displayed the required characteristics, that artificial neurons should possess. Two different memristors were used, one with coexisting volatile and non-volatile resistive switching and one clearly volatile. The pulse generating circuit can alter the parameters of the pulse train by changing the values of its components and it is confirmed that it can substitute the pulse generator. The clearly volatile memristor is found to be more compatible with the nature of the device, due to the better stability of its resistive threshold switching and the greater memory window that it exhibits. Finally, the use of the pulse generating circuit is shown to be successful, something interesting, as it gives the ability to replace components of the circuit with sensors and create a fully integrated sensing device.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Δημήτριο Τσουκαλά, καθηγητή ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου την ευκαιρία να δουλέψω στο εργαστήριο του για την υλοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας. Κυρίως όμως, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον του, για την πορεία της εργασίας, αλλά και για άλλα θέματα.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Παναγιώτη Μπούσουλα, υποψήφιο μεταδιδάκτορα του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, και τον Σταύρο Κίτσιο, υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, για την δυνατότητα που μου παρέιχαν να συμμετάσχω σε ερευνητική δουλειά και να πετύχω την πρώτη μου δημοσίευση. Η ερευνητική ενασχόληση με βοήθησε να μάθω πολλά περισσότερα και να γίνομαι καλύτερος, καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο εργαστήριο. Ακόμα, η συνεχή τους καθοδήγηση, η στήριξή τους και το φιλικό κλίμα, ήταν πολύ σημαντικά για την προσωπική μου πορεία και την υλοποίηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του γκρουπ του Δρ. Τσουκαλά για τη συνεργασία μας, για τη βοήθειά τους σε όποια απορία είχα και για το εύθυμο κλίμα που υπήρχε όλον αυτόν τον καιρό.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	3
2	Μελέτη και Χαρακτηρισμός Memristor	6
2.1	Μελέτη λειτουργίας ECM Memristors	6
2.1.1	Εισαγωγή	6
2.1.2	Μηχανισμοί και κινητική του CF	7
2.1.3	Μοντελοποίηση	8
2.2	Κατασκευή Memristor	10
2.3	DC μετρήσεις	11
2.4	Παλμικές μετρήσεις	16
2.5	Μελέτη Κβαντικής Αγωγιμότητας	20
2.5.1	Εισαγωγή	20
2.5.2	Θεωρία	21
2.5.3	Μετρήσεις	26
3	Τεχνητός Νευρώνας LIF	31
3.1	Εισαγωγή	31
3.2	Ανάλυση Λειτουργίας Τεχνητού Νευρώνα LIF	34
3.3	Νευρώνας με παλμογεννήτρια και $Ag/SiO_2/TiN$ memristor	40

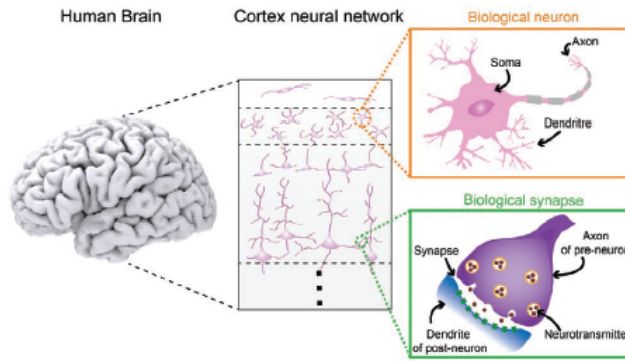
3.4	Νευρώνας με κύκλωμα παραγωγής παλμών και <i>Ag/SiO₂/TiN memristor</i> . . .	45
3.5	Νευρώνας με παλμογεννήτρια και <i>Ag/SiO₂/Pt NPs memristor</i>	52
3.6	Νευρώνας με κύκλωμα παραγωγής παλμών και <i>Ag/SiO₂/Pt NPs memristor</i>	55
3.7	Λειτουργία κυκλώματος παραγωγής παλμών με μεταβολή <i>duty cycle</i>	58
4	Συμπεράσματα	60
	Βιβλιογραφία	63
	Λίστα Ακρωνυμίων	71

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών βασίζεται στην ανάπτυξη των τεχνολογιών πυριτίου (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor- CMOS) τρανζίστορ επίδρασης πεδίου. Παρ' όλα αυτά, η περαιτέρω βελτίωση, μέσω της συνεχιζόμενης σμίκρυνσης των διαστάσεων των τρανζίστορ δεν φαίνεται να είναι δυνατή λόγω της ύπαρξης συγκεκριμένων προβλημάτων. Αυτά είναι η γένεση μεγάλων ρευμάτων διαρροής μέσω κβαντικού φαινομένου σήραγγος, η συσσώρευση θερμότητας λόγω αύξησης της ενεργειακής πυκνότητας που οδηγεί σε δυσλειτουργίες και το αυξανόμενο κόστος της βιομηχανίας ημιαγωγών. Όλα αυτά οδηγούν στο τέλος του Νόμου του Moore [1]. Ακόμα ένα πρόβλημα είναι ο περιορισμός στην υπολογιστική ταχύτητα που εισάγει η αρχιτεκτονική von Neumann, καθώς η συνεχής μεταφορά δεδομένων από τον επεξεργαστή στη μνήμη και αντίστροφα, προσθέτει καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας στους υπολογισμούς [1].

Λύση σε όλα τα παραπάνω φαίνεται να αποτελεί η μετάβαση σε μια αρχιτεκτονική νευρομορφικής επεξεργασίας που προσπαθεί να μιμηθεί τον τρόπο λειτουργίας του εγκεφάλου. Τα κύρια πλεονεκτήματα του εγκεφάλου είναι η ταχεία και ογκώδης επεξεργασία δεδομένων σε συνδυασμό με την πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [2, 3]. Πιο συγκεκριμένα, στον φλοιό του εγκεφάλου, που αποτελεί ένα νευρωνικό δίκτυο, βρίσκονται 10^{11} νευρώνες συνδεδεμένοι μέσω 10^{15} συνάψεων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1 οι βιολογικοί νευρώνες αποτελούνται από 3 μέρη: τον άξονα, το σώμα και τους δενδρίτες. Η πληροφορία διαβιβάζεται μέσω ηλεκτρικών παλμών που λαμβάνονται από τους δενδρίτες και οδηγούν σε νέους παλμούς, όταν συσσωρευτούν στο σώμα και ξεπεραστεί ένα κατώφλι. Τότε ο νέος παλμός περνάει μέσα από τον άξονα στον επόμενο δενδρίτη, αφού πρώτα μεταβληθεί σύμφωνα με την συναπτικό βάρος της ενδιάμεσης σύναψης [2]. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Network- ANN) προσπαθούν να την προσομοιάσουν, με σκοπό να εκμεταλλευτούν την αποδοτικότητα του εγκεφάλου, που είναι καλύτερη κατά 10^7 από οποιαδήποτε άλλη διάταξη έχει φτιαχτεί μέχρι σήμερα [3].

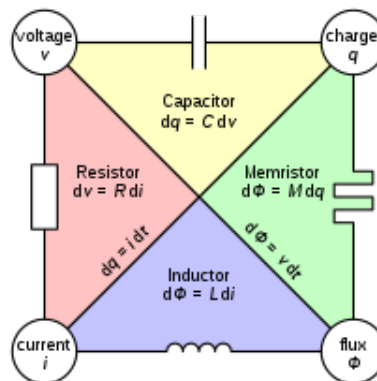


Εικόνα 1.1: Δομή φλοιού ανθρώπινου εγκεφάλου και βιολογικοί νευρώνες και συνάψεις [4].

Ο καλύτερος υποψήφιος για τη δημιουργία των στοιχείων των TNN φαίνεται πως είναι τα memristors. Τα memristors, μια αντίσταση με μνήμη, προτάθηκαν θεωρητικά από τον L. Chua το 1971 [5] και δημιουργήθηκαν πειραματικά πρώτη φορά το 2008 από τον Strukon, στα εργαστήρια της HP[6]. Το memristor είναι το τέταρτο θεμελιώδες κυκλωματικό στοιχείο, που συνδέει την ηλεκτρική ροή ϕ με το ηλεκτρικό φορτίο q μέσω της σχέσης:

$$d\phi = M(q)dq \quad (1.1)$$

όπου το $M(q)$ ονομάζεται Memristance και μπορεί να εξαρτάται από το φορτίο, κάνοντας το memristor μη γραμμικό στοιχείο [5, 6]. Ικανοποιείται λοιπόν η θεωρία που θέλει έξι διαφορετικές εξισώσεις να συνδέουν τα τέσσερα βασικά κυκλωματικά στοιχεία [5] και φαίνονται περιληπτικά στην Εικόνα 1.2. Αυτό που κάνει όμως ενδιαφέροντα τα memristors είναι τα χαρακτηριστικά τους όπως, οι μεγάλες ταχύτητες εναλλαγής (<1 ns)[7], οι μικρές ενέργειες εναλλαγής (<10 pJ) [8], οι χαμηλές διαστάσεις (<10 nm)[9], η αντοχή (>10¹⁰ κύκλοι)[10] και η μεγάλη διατήρηση της πληροφορίας (>10 χρόνια)[11].



Εικόνα 1.2: Τα 4 βασικά στοιχεία κυκλωμάτων και οι σχέσεις που τα συνδέουν.

Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών έχουν αναπτυχθεί και μελετηθεί πολλοί τύποι memristor, όπως τα electrochemical metallization (ECM)[12], τα valence change (VCM)

[11], τα phase change (PCM)[13], τα spintronics([14], τα σιδηροηλεκτρικά [15] και άλλα. Από αυτά, πολύ δημοφιλή είναι τα ECM, λόγω των σχετικά γνωστών μηχανισμών λειτουργίας τους, από άποψη φυσικής, και της κινητικής τους, της απλής δομής τους, αλλά και της δυνατότητας τους να εμφανίζουν κβαντική αγωγιμότητα ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου[16]. Τέτοιου είδους memristor θα μελετηθούν στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας, καθώς και η ικανότητά τους για εμφάνιση κβαντικής αγωγιμότητας.

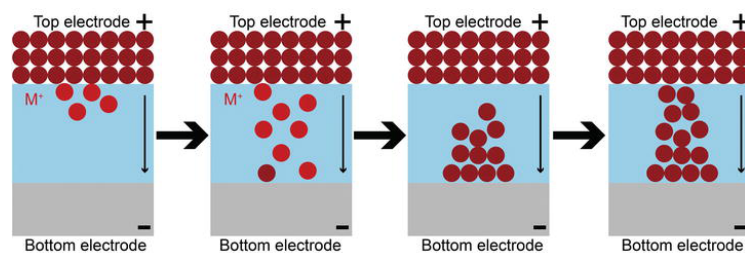
Κεφάλαιο 2

Μελέτη και Χαρακτηρισμός Memristor

2.1 Μελέτη λειτουργίας ECM Memristors

2.1.1 Εισαγωγή

Τα ECM Memristors, γνωστά και ως Μνήμες Τυχαίας Προσπέλασης Αγωγίμου Δρόμου (Conductive Bridge Random Access Memory- CBRAM), είναι διατάξεις με απλή δομή Μετάλλου-Μονωτή-Μετάλλου (Metal-Insulator-Metal- MIM) και με κύρια ιδιότητα την εναλλαγή καταστάσεων αντίστασης (Resistive Switching- RS), μεταξύ μιας κατάστασης υψηλής αντίστασης (High Resistance State- HRS) και μιας χαμηλής αντίστασης (Low Resistance State- LRS). Η λειτουργία τους στηρίζεται στην χημική αντίδραση της οξειδοαναγωγής [17] και φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Λειτουργία CBRAM

Το άνω ηλεκτρόδιο ονομάζεται ενεργό (Active Electrode- AE) και αποτελείται από υλικά όπως Ag ή Cu, ενώ το κάτω ηλεκτρόδιο είναι το αδρανές (Inert Electrode- IE) και συνίσταται από υλικά όπως Pt ή Au. Όταν εφαρμοστεί θετική τάση στο AE παρατηρείται η οξείδωσή του και η δημιουργία κατιόντων. Τα κατιόντα, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, θα μετακινηθούν μέσω του διηλεκτρικού προς το IE. Εκεί θα γίνει η αναγωγή, δηλαδή τα κατιόντα θα προσλάβουν πάλι ηλεκτρόνια, και θα γίνει η μετάλλωσή τους. Έτσι δη-

μιουργείται εντός του διηλεκτρικού ένα μεταλλικό αγώγιμο νήμα (Conductive Filament-CF) μέσω της συσσώρευσης των μεταλλικών ατόμων. Λόγω της δημιουργίας του CF, το memristor μεταβαίνει από την HRS στην LRS, αφού το ρεύμα μπορεί να περνάει πλέον από τον αγώγιμο δρόμο. Η μετάβαση αυτή ονομάζεται **SET** και η αντίστροφη **RESET**. Τέλος με την εφαρμογή αρνητικής τάσης στο ΑΕ το CF θα διαλυθεί στο λεπτότερο σημείο του, λόγω της θέρμανσης που εξηγείται με τον Νόμο του Joule (**θέρμανση Joule**)[18].

2.1.2 Μηχανισμοί και κινητική του CF

Αρχικά, με την εφαρμογή της τάσης, θα πρέπει να δημιουργηθούν τα κατιόντα του υλικού του ΑΕ. Ως κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου υλικού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ελεύθερη ενέργεια Gibbs για την δημιουργία των κατιόντων του. Αν η ενέργεια Gibbs είναι αρνητική, τότε το υλικό τείνει να οξειδωθεί εύκολα, αλλά δύσκολα μπορεί να υποστεί αναγωγή, ενώ αν είναι θετική τα άτομα δεν οξειδώνονται εύκολα [19]. Έτσι υλικά με ενέργεια Gibbs λίγο μεγαλύτερη του μηδενός είναι τα κατάλληλα για ΑΕ, ώστε η αντίδραση της οξειδοαναγωγής να συμβαίνει αβίαστα και προς τις δύο κατευθύνσεις ($\Delta_f G_{(Ag^+/Ag)} = 77 \text{ kJmol}^{-1}$ και $\Delta_f G_{(Cu^+/Cu)} = 50 \text{ kJmol}^{-1}$)[19]. Απόδειξη ότι τα κατιόντα θα σχηματίσουν εν τέλει ένα μεταλλικό CF είναι η εξάρτηση της αντίστασης της LRS από την θερμοκρασία και το ότι το CF είναι υπεύθυνο για το RS υποστηρίζεται από την μη εξάρτηση της LRS από την επιφάνεια της διάταξης[20].

Η ανάπτυξη των CF μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους και εξαρτάται από το συνδυασμό του ρυθμού της διάχυσης των κατιόντων και του ρυθμού της πυρήνωσης του CF[21]. Αν τον περιορισμό στον ρυθμό της ανάπτυξης τον θέτει η ταχύτητα διάχυσης των κατιόντων, τότε αυτά θα αναχθούν έχοντας διανύσει μια μικρή απόσταση, με αποτέλεσμα το CF να αρχίσει την ανάπτυξή του κοντά στο ΑΕ. Αντιθέτως, αν η πυρήνωση του νήματος είναι η πιο αργή διαδικασία, τότε τα κατιόντα θα μπορούν να φτάσουν μέχρι το ΙΕ πρώτου προσλάβουν ηλεκτρόνια και το CF θα αναπτυχθεί από το ΙΕ προς το ΑΕ. Υπάρχει και η ενδιάμεση περίπτωση, όπου και οι δύο διεργασίες έχουν παρόμοιο ρυθμό και έτσι τα κατιόντα ανάγονται έχοντας διαχυθεί σε μια μέση απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, δημιουργώντας περιοχές πυρήνωσης στο μέσο της διάταξης[21]. Ο τρόπος ανάπτυξης του CF επηρεάζεται από τα υλικά του ΑΕ και του μονωτή, κυρίως λόγω της ευκινησίας των κατιόντων στο διηλεκτρικό μέσο[22].

Η μορφολογία των CF είναι μια ακόμα παράμετρος που επηρεάζει τη σταθερότητα και τη μετέπειτα διάλυση τους. Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη μορφολογία των CF είναι ο ρυθμός της αντίδρασης της οξειδοαναγωγής[23]. Ακόμη και για ίδιους τρόπους ανάπτυξης, ένας αργός ρυθμός οξειδοαναγωγής θα οδηγήσει σε ένα δενδριτικό CF, ενώ αντιθέτως, γρήγορος ρυθμός οδηγεί σε συνεχές CF. Ο ρυθμός της οξειδοαναγωγής με τη σειρά του μπορεί να επηρεάζεται από το χρησιμοποιούμενο διηλεκτρικό, καθώς αυτό θέτει διαφορετικούς φραγμούς και ευκινησίες ιόντων, αλλά και από τη σύνθεση του ΑΕ, αφού μεγαλύτερο ποσό ενεργού υλικού και μεγαλύτερη διαχυσιμότητα, αυξάνουν την ταχύτητα της αντίδρασης[22, 23].

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των memristors είναι η δυνατότητα που

έχουν να παρουσιάζουν διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Οι τρόποι αυτοί μπορεί να είναι είτε πτητικοί, είτε μη πτητικοί. Στην περίπτωση του πτητικού τρόπου λειτουργίας, το CF διαλύεται αυθόρμητα όταν η τάση πέσει κάτω από ένα κατώφλι (Threshold Switching- TS), εντός μερικών ns[18]. Αντιθέτως, στο μη πτητικό τρόπο (Memory Switching- MS), τα CF που δημιουργούνται είναι ιδιαίτερα σταθερά και η διατήρησή τους μπορεί να διαρκέσει χρόνια [11]. Επίσης, είναι δυνατόν οι τρόποι λειτουργίας να συνυπάρχουν σε μια διάταξη[24, 25]. Ο Shukla [26] όρισε ένα μηχανισμό διάκρισης μεταξύ TS και MS, που στηρίζεται στην ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στο σχηματισμό συσσωματωμάτων και στο σχηματισμό νήματος. Όταν η ενεργειακή διαφορά είναι περίπου μηδέν, τότε ευνοείται ο μη πτητικός τρόπος λειτουργίας, ενώ αν η διαφορά είναι μεγάλη υπέρ των συσσωματωμάτων, τότε κυρίαρχος μηχανισμός είναι ο πτητικός.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να διαμορφωθεί ο τρόπος λειτουργίας των memristors. Αρχικά έχουν χρησιμοποιηθεί δισδιάστατα υλικά [27] και νανοσωματίδια/ νανοκρύσταλλοι μέσα στο διηλεκτρικό με σκοπό τον χωρικό περιορισμό του CF [28]. Έτσι κατά την ανάπτυξη του CF θα περιοριστεί η διάμετρός του με αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτότερου και πιο μυτερού νήματος. Ως αποτέλεσμα, το CF θα οδηγήσει σε ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου και σε ταχύτερη διάχυση των κατιόντων και άρα σε μεγαλύτερη κλίση στο SET. Επίσης βελτιώνεται η επαναληψιμότητα και η σταθερότητα του CF, και άρα η λειτουργία τείνει σε MS, αφού ελέγχεται η διάμετρος του, και είναι λεπτότερο αλλά και πιο πυκνό. Τα υλικά των ηλεκτροδίων μπορούν επίσης να επηρεάσουν το RS των διατάξεων. Για το ΑΕ αναφέρθηκε και πιο πάνω, πως η ευκινησία των κατιόντων του είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, με τα μικρότερα εξ αυτών να διαχέονται ταχύτερα και να δημιουργούν δυνατότερα CF με λιγότερη τάση[29]. Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος είναι η θερμική αγωγιμότητα των υλικών των ηλεκτροδίων. Για παράδειγμα, με την τοποθέτηση ενός υμενίου από νανοσωματίδια πλατίνας ως ΙΕ, το CF θα σπάσει εύκολα στο λεπτό σημείο ένωσης του με το ΙΕ, λόγω της κακής θερμικής αγωγιμότητας της πλατίνας. Η θερμότητα που δημιουργείται λόγω Joule heating και λόγω της υψηλής πυκνότητας ρευμάτων, δεν μπορεί να διοχετευτεί εύκολα και η βαθμίδα θερμοκρασίας που προκύπτει διαλύει το CF[30]. Τέλος το σημείο τήξης του CF, σε συνδυασμό με τη στερεά διαλυτότητα του υλικού του ΑΕ, μπορούν να μεταβάλουν τον τρόπο λειτουργίας. Η στερεά διαλυτότητα καθορίζει το πόσο υλικό πρέπει να διοχετευτεί στο διηλεκτρικό μέχρι τη δημιουργία νανοκρυστάλλων και άρα και το μέγεθος τους[31]. Το σημείο τήξης των νανοκρυστάλλων εξαρτάται από τη διάμετρό τους, με τα μικρότερα να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης[32]. Έτσι λοιπόν και CFs που απαρτίζονται από νανοκρυστάλλους με χαμηλό σημείο τήξης είναι πιο πιθανό να λειτουργούν με TS, ενώ για το αντίθετο θα λειτουργούν με MS[18, 29].

2.1.3 Μοντελοποίηση

Μέσα από όλους τους μηχανισμούς που δρουν στα CBRAM memristors πρέπει να βρεθούν οι κυρίαρχοι, με τους οποίους θα μπορέσει να γίνει και η μοντελοποίηση της λειτουργίας τους. Δεδομένου ότι η λειτουργία τους στηρίζεται στην κίνηση των κατιόντων του ΑΕ προς το ΙΕ, είναι αναμενόμενο το ότι η ολίσθηση των κατιόντων με εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο και η διάχυσή τους, που εξαρτάται από τη βαθμίδα συγκέντρω-

σης, θα είναι δύο από τους κύριους μηχανισμούς και πάνω σε αυτούς έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα[33, 34, 35]. Αν και τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη ακρίβεια, δεν μπορούν να προσομοιάσουν τους πολύ μικρούς χρόνους χαλάρωσης των CF που λειτουργούν με TS(της τάξης των μερικών ns)[36]. Ανάμεσα στις εξηγήσεις που έχουν προσπαθήσει να δοθούν είναι η ελαχιστοποίηση της διεπιφανειακής ενέργειας μέσω δημιουργίας συσσωματωμάτων[26] και η ελαχιστοποίηση της επιφάνειας του CF, μέσω επιφανειακής διάχυσης των μεταλλικών ιόντων[37], χωρίς επιτυχία.

Η εξήγηση του φαινομένου των πολύ χαμηλών χρόνων χαλάρωσης του CF φαίνεται να είναι η θερμοδιάχυση ή αλλιώς διάχυση Soret[38]. Παρόλο που τα ρεύματα στα memristors είναι αρκετά χαμηλά, οι πυκνότητες ρεύματος που αναπτύσσονται είναι εξαιρετικά μεγάλες, καθώς η διάσταση των CF είναι στη νανοκλίμακα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα η κατανομή θερμότητας να παρουσιάζει μεγάλες διαφορές τοπικά και τη δημιουργία βαθμίδας θερμοκρασίας, λόγω και της διαφορετικής διαμέτρου του CF κατά το μήκος του. Αυτή η βαθμίδα θερμοκρασίας προκαλεί και την διάχυση Soret, με τα θερμά σωματίδια του CF να κινούνται προς τα ψυχρότερα και να δημιουργούν μια ροή θερμότητας αλλά και σωματιδίων[39]. Οι κινήσεις λόγω θερμικής διάχυσης συμβαίνουν στην κλίμακα των ns και γι' αυτό μπορούν να εξηγήσουν το φαινόμενο.

Έτσι το μοντέλο που αναπτύχθηκε στηρίζεται στη συνεργιστική δράση των μηχανισμών της ολίσθησης των κατιόντων, της διάχυσής τους και της θερμικής διάχυσής τους [18]. Η λειτουργία του CF μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω της εξέλιξης της διαμέτρου του ϕ :

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= \left. \frac{d\phi}{dt} \right|_{drift} + \left. \frac{d\phi}{dt} \right|_{diffusion} + \left. \frac{d\phi}{dt} \right|_{thermo-diffusion} = \\ &= A e^{-\frac{E_{drift} - \alpha q \psi}{k_B T}} + B \phi^{-1} e^{\frac{E_{diff}}{k_B T}} - C \phi^{-1} S \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου A, B και C είναι παράμετροι, E_{drift} είναι ο ενεργειακός φραγμός για την ιοντική αναπήδηση, α είναι ο συντελεστής χαμηλώματος του φραγμού, ψ είναι το ηλεκτρικό δυναμικό, k_B είναι η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία, E_{diff} ο ενεργειακός φραγμός διάχυσης και S ο συντελεστής Soret, που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S = \frac{E_s}{k_B T^2} \quad (2.2)$$

όπου E_s είναι η ενέργεια ενεργοποίησης της θερμικής διάχυσης και το πρόσημο είναι θετικό γιατί συμβολίζει την κίνηση των κατιόντων προς τις πιο ψυχρές περιοχές[39].

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση πρέπει να λυθεί λαμβάνοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες και σε συνδυασμό και συμφωνία με τις εξισώσεις του Poisson, για να καθοριστεί η ηλεκτροστατική συνέχεια του CF, και του Fourier, για να λειφθεί υπόψιν και το Joule heating.

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \psi = 0 \quad (2.3)$$

$$\rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla k_{th} \cdot \nabla T + \sigma \nabla |\psi|^2 \quad (2.4)$$

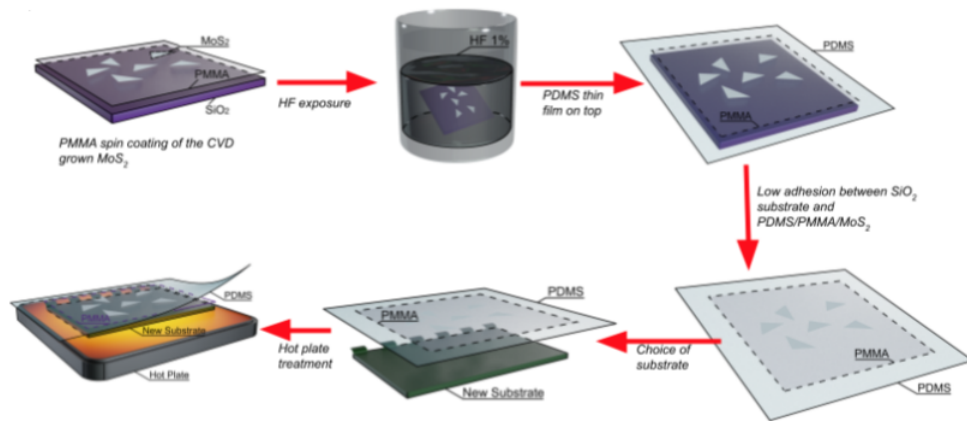
όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ρ_m είναι η πυκνότητα μάζας, C_p είναι η ειδική και k_{th} είναι η θερμική αγωγιμότητα. Το μοντέλο δείχνει και ικανότητα στην πρόβλεψη του τύπου RS μέσω της θερμικής αγωγιμότητας και του ρόλου της, που αναφέρθηκε και προηγουμένως[18].

Αυτό που συμβαίνει κατά την λειτουργία του memristor είναι πως στο SET τα κατιόντα ολισθαίνουν και διαχέονται από το ΑΕ προς στο ΙΕ, σχηματίζοντας νανοκρυστάλλους, ενώ η θερμική τους διάχυση έχει την αντίθετη κατεύθυνση, καθώς γίνεται μεγάλη πτώση δυναμικού, και άρα Joule heating, στο διηλεκτρικό. Όταν το CF σχηματιστεί και φτάσει στο ΙΕ, η ολίσθηση γίνεται ισχνή και το CF μεγαλώνει σε διάμετρο μέσω των διαχύσεων. Αν στο CF υπάρχουν λεπτές περιοχές που απαρτίζονται από ένα με δύο νανοκρυστάλλους, η κατανομή της θερμοκρασίας δεν είναι ομογενής και η θερμική διάχυση μπορεί να οδηγήσει στο σπάσιμο του CF, δίνοντας TS λειτουργία. Αντίθετα, αν το CF αποτελείται από πολλούς νανοκρυστάλλους, η θερμική διάχυση δεν μπορεί να το διασπάσει και η λειτουργία του είναι μη πτητική[18].

2.2 Κατασκευή Memristor

Για αυτό το μέρος της εργασίας συγκρίνονται δύο διαφορετικές δομές memristor. Η πρώτη δομή είναι $Ag/SiO_2/SiO_2/TiN$ και χρησιμοποιείται σαν δείγμα αναφοράς, ενώ η δεύτερη είναι $Ag/SiO_2/MoS_2/SiO_2/TiN$. Αρχικά αναπτύχθηκαν 300 nm SiO_2 με θερμική οξείδωση, πάνω σε p-Si υπόστρωμα. Για την εναπόθεση των υμενίων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της μαγνητικά υποβοηθούμενης ιοντοβολής ραδιοσυχνότητας (**RF magnetron sputtering**). Το SiO_2 δημιουργείται με αυτή την τεχνική, όμως σε πιο μεγάλες πιέσεις ώστε να αποκτήσει μια πιο πορώδη δομή, σημαντική για τη λειτουργία της διάταξης[40]. Επίσης με μεγαλύτερη παροχή οξυγόνου κατά την ανάπτυξη του SiO_2 , μειώνονται οι ατέλειές του [41]. Το ΑΕ αποτελείται από 50 nm Ag και το ΙΕ από 55 nm TiN . 16 nm SiO_2 εναποτέθηκαν σε δύο βήματα, από 8 nm κάθε φορά. Ανάμεσα στην πρώτη και τη δεύτερη εναπόθεση έγινε η μεταφορά του δισδιάστατου υλικού MoS_2 στο ένα δείγμα, ώστε να κλειστεί αυτό μέσα στο SiO_2 . Το MoS_2 αναπτύχθηκε με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (Chemical Vapor Deposition- CVD)[42] πάνω σε υπόστρωμα SiO_2 και από πάνω μπήκε ένα στρώμα PMMA. Στη συνέχεια το SiO_2 απομακρύνθηκε με την βύθισή του σε διάλυμα περιεκτικότητας 1% HF και για να γίνει η μεταφορά προστέθηκε ένα στρώμα PDMS, το οποίο κρατάει το PMMA αφήνοντας τελικά μόνο το MoS_2 πάνω στο δείγμα. Η διαδικασία της μεταφοράς φαίνεται και στην Εικόνα 2.2.

Για να μελετηθεί περαιτέρω η δομή των διατάξεων, έγινε εξέταση με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διέλευσης (Transmission Electron Microscopy- TEM). Στην Εικόνα 2.3 φαίνονται τα αναλυτικά δομικά χαρακτηριστικά της διάταξης με το MoS_2 , μέσω των οποίων μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και για το δείγμα αναφοράς, αφού η ανάπτυξη τους έγινε παράλληλα. Επιπλέον, πολλαπλά στρώματα MoS_2 τοποθετήθηκαν στη διάταξη και η επιφανειακή κάλυψη του στρώματος MoS_2 δείχνει να είναι καλή. Όπως φαίνεται από τη διατομή του δείγματος, το MoS_2 ενσωματώθηκε επιτυχώς στο διηλεκτρικό. Η Εικόνα 2.3e δείχνει το ότι το στρώμα του MoS_2 τοποθετήθηκε κάθετα στην διέυθυνση [0001] και



Εικόνα 2.2: Μέθοδος μεταφοράς MoS_2 .

είναι 5-6 επίπεδα (0002) παχύ. Σημειώνεται ότι η τραχύτητα και η διαφορετική δομή του SiO_2 έχει επιφέρει στο MoS_2 κλίση και περιστροφές. Τέλος το ΑΕ ηλεκτρόδιο, δηλαδή ο Ag, έχει πολύ μεγάλη τραχύτητα.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα πάχη κάθε στρώματος των διατάξεων, όπως μετρήθηκαν από το TEM.

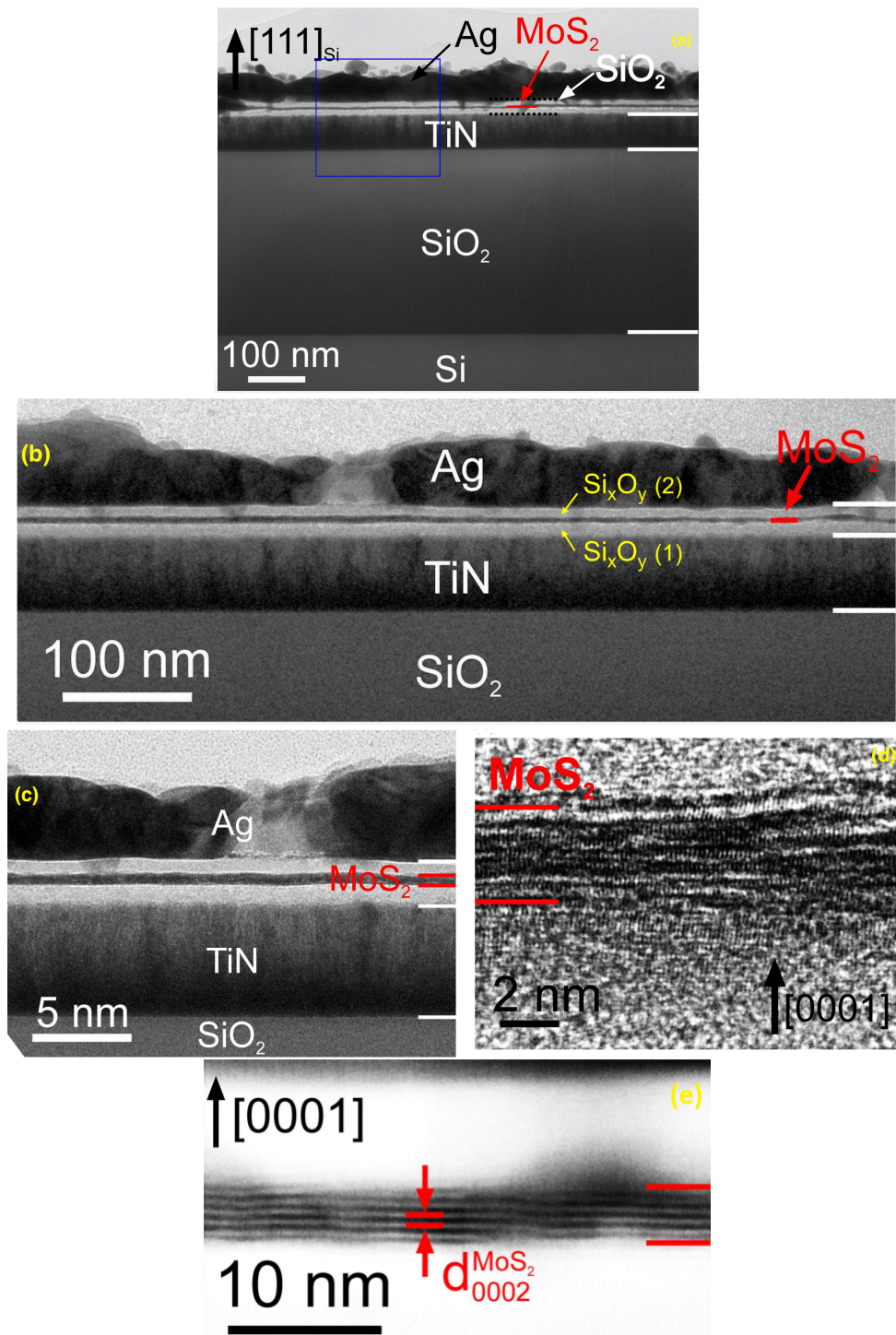
Στρώμα	Πάχος (nm)
TiN	55.4 ± 0.7
$SiO_2(1)$	8.7 ± 0.6
MoS_2	< 4
$SiO_2(2)$	6.6 ± 0.5
Ag	47 ± 9

Πίνακας 2.1: Πίνακας μετρούμενων παχών στρωμάτων διάταξης.

2.3 DC μετρήσεις

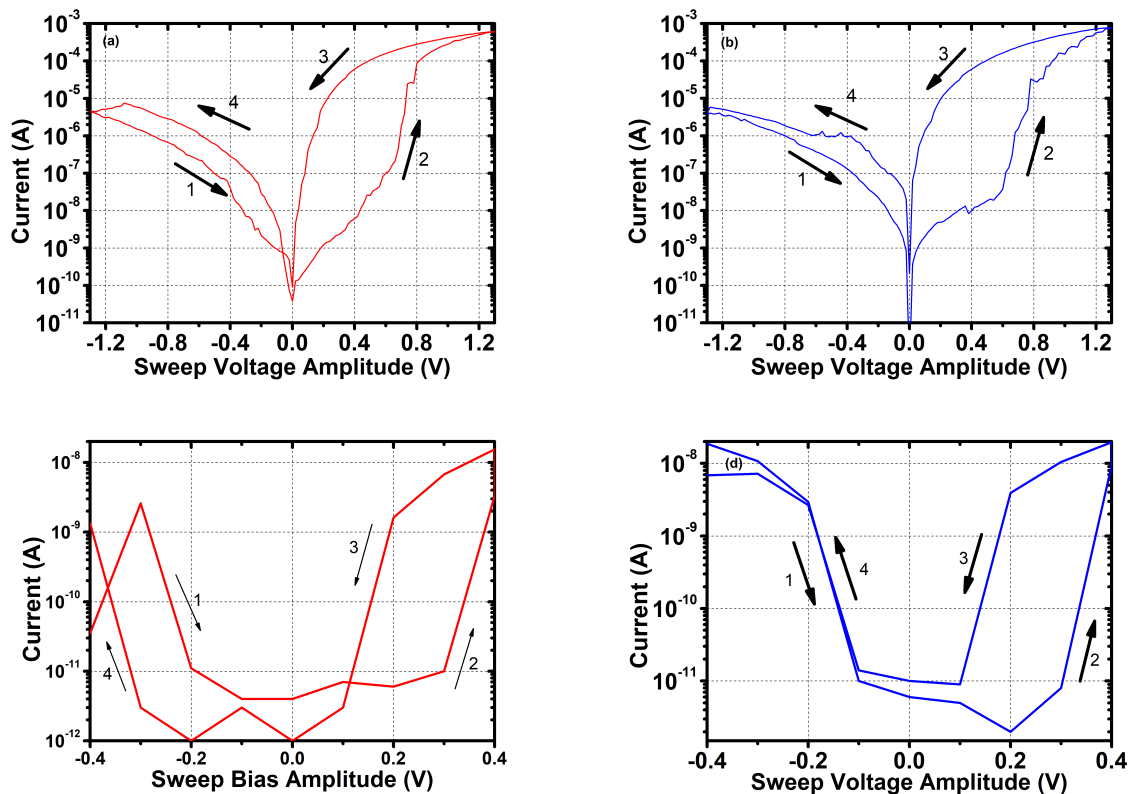
Οι μετρήσεις σταθερής τάσης είναι πολύ σημαντικές για να δώσουν μια εικόνα του τρόπου λειτουργίας και των χαρακτηριστικών του memristor. Για όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιείται το σύστημα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού ημιαγωγών Keithley 4200 Semiconductor Parameter Analyzer (4200-SCS). Αρχικά έγινε σάρωση τάσης στα δείγματα, ώστε να εξαχθούν οι χαρακτηριστικές τους καμπύλες ρεύματος- τάσης (**I-V**).

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V. Σε όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε περιορισμός στο ρεύμα $I_{cc} = 10^{-3} A$, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή της επαφής. Όμως τα δείγματα παρουσιάζουν την ιδιότητα αυτο-περιορισμού στο ρεύμα τους, κάτι που οφείλεται σε ισορροπία μεταξύ ολίσθησης και διάχυσης των κατιόντων Ag και έτσι στον έλεγχο του μεγέθους του CF[28]. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό



Εικόνα 2.3: α) Εικόνα TEM διατομής (XTEM) που δείχνει μια γενική οπτική της διάταξης κατά τον άξονα [1-10] του Si. β) Εικόνα XTEM που καταγράφηκε κατά τον άξονα [110] του Si. Το στρώμα MoS₂ αναπτύχθηκε επιτυχώς πάνω στο άμορφο SiO₂(1), εμφανίζοντας καλή επιφανειακή κάλυψη. γ) Εικόνα XTEM που καταγράφηκε κατά τον άξονα [110] του Si σε μεγαλύτερη μεγέθυνση δ) Εικόνα TEM υψηλής ανάλυσης (HRTEM) του στρώματος MoS₂. ε) Εικόνα υψηλής ανάλυσης High-angle Annular Dark-Field (HAADF) που απεικονίζει τα στρώματα του MoS₂ κάθετα στα πλεγματικά επίπεδα (0001).

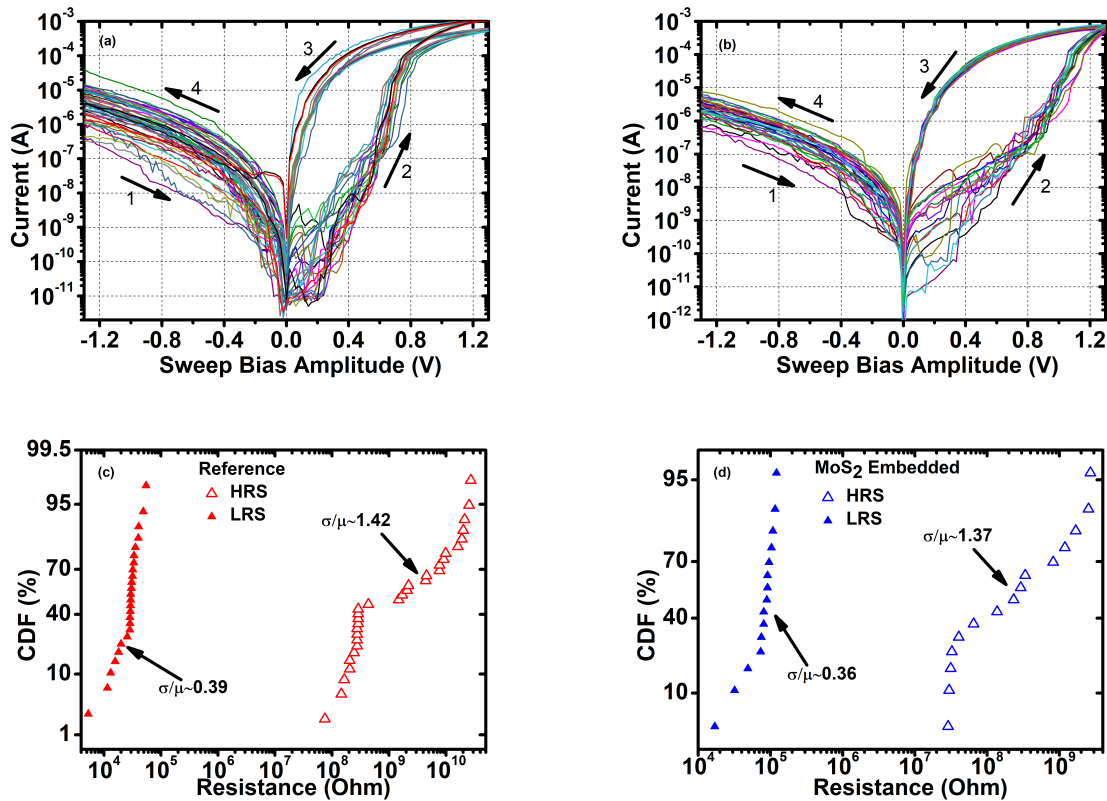
να σημειωθεί το ότι οι διατάξεις δεν χρειάζονται κάποια πρότερη ηλεκτρική διαμόρφωση ώστε να ενεργοποιηθεί η λειτουργία τους. Αρχικά στα σχήματα φαίνεται η υστερητική συμπεριφορά των memristors που είναι και ο λόγος που παρουσιάζουν ενδιαφέρον σαν διατάξεις. Τα δείγματα παρουσιάζουν την ιδιότητα να λειτουργούν και σε MS και σε TS, ανάλογα την εξωτερική εφαρμοζόμενη τάση. Για κύκλους τάσης από -0.4 V μέχρι 0.4 V ο τρόπος λειτουργίας τους είναι πτητικός (2.4c, 2.4d), με το RS να συμβαίνει για την ίδια πολικότητα τάσης, με το SET να γίνεται στα 0.3 V και το RESET στα 0.2 V και για τα δύο δείγματα. Στο TS το παράθυρο μνήμης είναι σε αποδεκτά επίπεδα, αλλά πολύ μικρότερο από ότι στο MS. Για κύκλους από 0.5 V και πάνω το RS γίνεται μη πτητικό και στις χαρακτηριστικές 2.4a, 2.4b παρουσιάζονται κύκλοι από -1.3 V έως 1.3 V . Το δείγμα αναφοράς και το δείγμα με το εγκλεισμένο MoS_2 κάνουν SET στα 0.5 V και στα 0.6 V αντίστοιχα, ενώ και τα δύο παρουσιάζουν RESET στα 0.15 V . Και για τα δύο η κλίση του RS είναι αρκετά ομαλές, περίπου στα 45 mV/dec(A) . Η κύρια διαφορά, αλλά και ο σκοπός αυτή της σύγκρισης, είναι η εμφάνιση των διακυμάνσεων βηματικής μορφής στο SET του δείγματος με το MoS_2 , μετά τα 0.75 V , και για αυτό το λόγο θα μελετηθεί περισσότερο ο μη πτητικός τρόπος λειτουργίας. Αυτά τα σκαλοπάτια στην αύξηση της αγωγιμότητας (G) οφείλονται στην κβάντισή της, που αναλύεται στο παρακάτω υποκεφάλαιο της Μελέτης Κβαντικής Αγωγιμότητας. Η επιλογή όσο το δυνατόν μεγαλύτερου κύκλου σάρωσης τάσης λειτουργίας



Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστικές I-V των memristors. a) Δείγμα αναφοράς σε MS. b) Δείγμα με MoS_2 σε MS. c) Δείγμα αναφοράς σε TS. d) Δείγμα με MoS_2 σε TS.

γίας, πρώτου φτάσει στο I_{cc} , έγινε με στόχο την ευκρινέστερη εμφάνιση του φαινομένου της κβαντικής αγωγιμότητας (Quantum Conductance- QC).

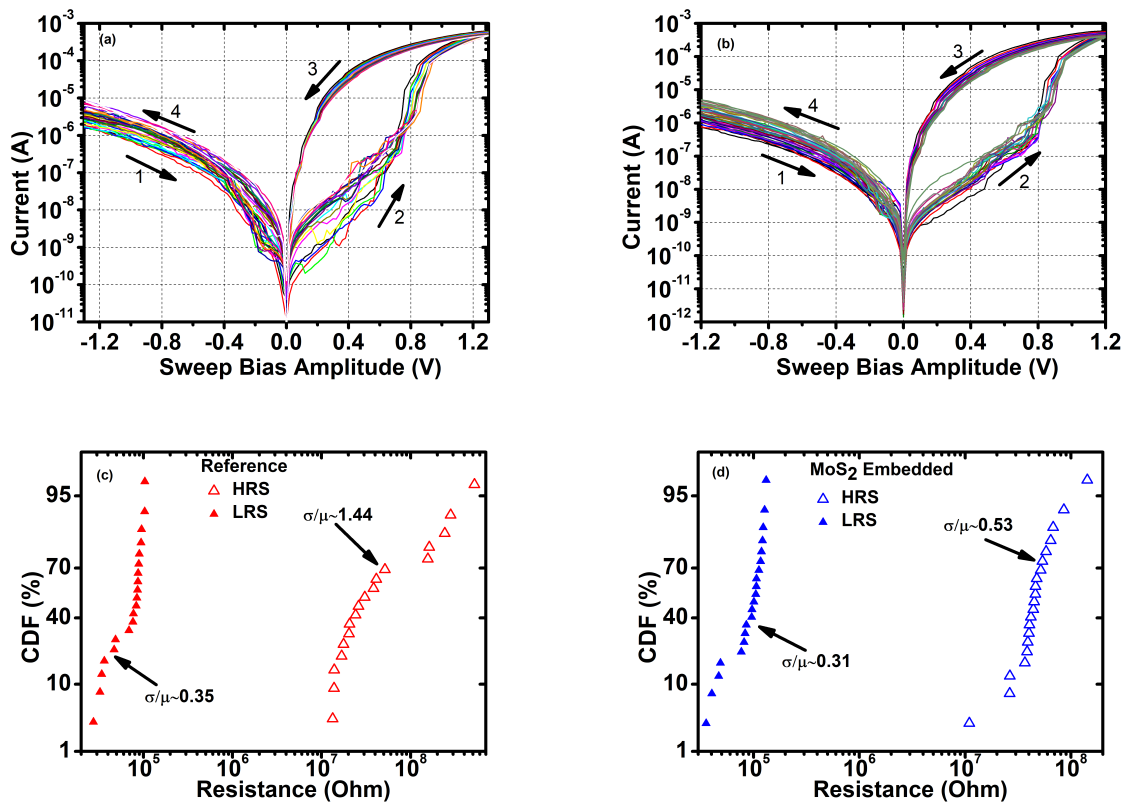
Στη συνέχεια μελετάται η αξιοπιστία και η σταθερότητα των διατάξεων. Αρχικά μετρήθηκαν 20 ξεχωριστές διατάξεις και σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές I-V τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5a για το δείγμα αναφοράς και στην Εικόνα 2.5b για το δείγμα με το MoS_2 . Ειδικά στην LRS, το δείγμα με το MoS_2 δείχνει να έχει λιγότερες μεταβολές στην λειτουργία του σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις Αθροιστικές Συναρτήσεις Κατανομής (Cumulative Distribution Function- CDF), που δείχνουν την σταθερότητα της τιμής μέτρησης για αυξανόμενη πιθανότητα. Χαμηλές σταθερές μεταβλητότητας (σ/μ) καταγράφονται και για τα δύο δείγματα, με τις τιμές της αντίστασης να υπολογίζονται στα 0.2 V των χαρακτηριστικών. Πιο αναλυτικά, για τις HRS, οι σταθερές είναι $(\sigma/\mu) = 1.42$ για το δείγμα αναφοράς και $(\sigma/\mu) = 1.37$ για το δείγμα με το MoS_2 , ενώ για τις LRS είναι $(\sigma/\mu) = 0.39$ και $(\sigma/\mu) = 0.36$ αντίστοιχα. Η βελτιωμένη εικόνα σταθερότητας του δείγματος με MoS_2 προτείνεται ότι συμβαίνει λόγω της λειτουργίας του διδιάστατου υλικού ως σίτα, που περιορίζει την διάμετρο των CF και δίνει καλύτερο



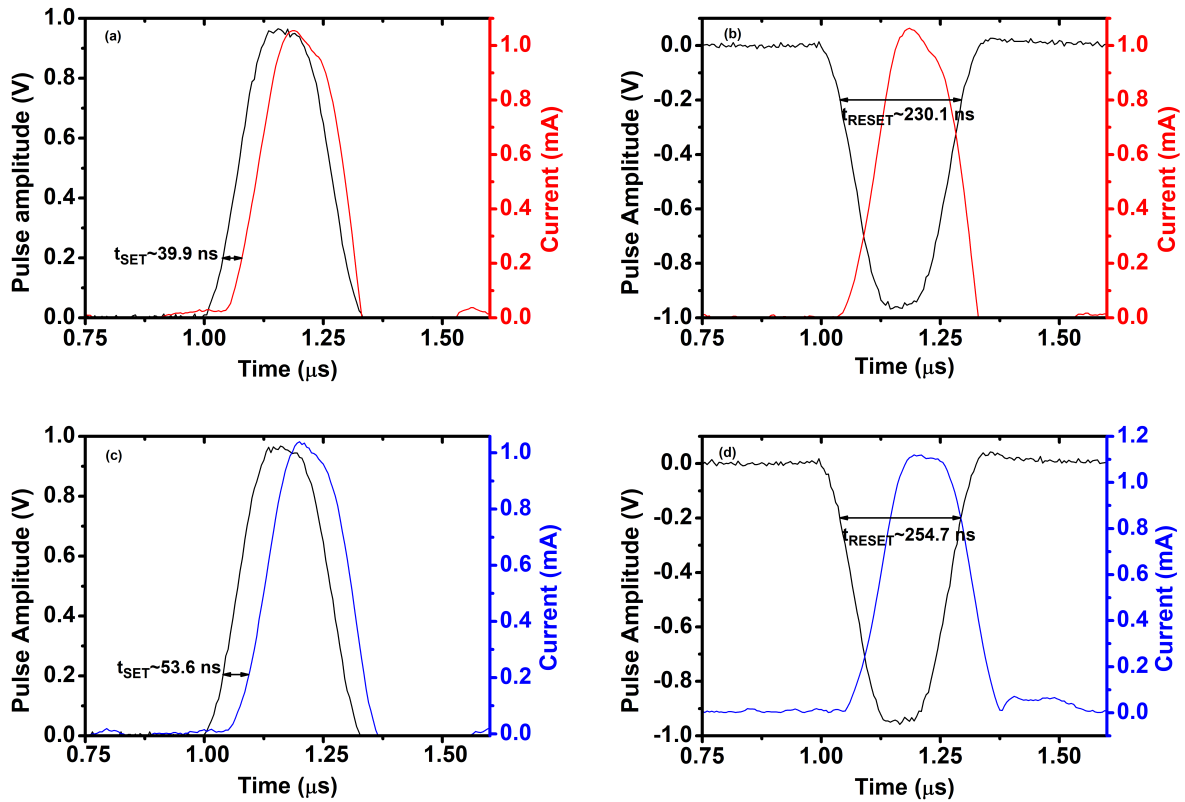
Εικόνα 2.5: Μελέτη αξιοπιστίας διαφορετικών διατάξεων α) Χαρακτηριστικές I-V 20 διαφορετικών διατάξεων στο δείγμα αναφοράς. β) Χαρακτηριστικές I-V 20 διαφορετικών διατάξεων στο δείγμα με το MoS_2 . γ) CDF διαφορετικών διατάξεων δείγματος αναφοράς. δ) CDF διαφορετικών διατάξεων δείγματος με το MoS_2 .

και πιο ομοιογενή έλεγχο κατά την δημιουργία του, οδηγώντας σε πιο καθορισμένα χαρακτηριστικά. Τέλος το παράθυρο μνήμης, κατά μέσο όρο, είναι σταθερό στα $10^4\Omega$, μια τιμή παραπάνω από αποδεκτή για memristors [17].

Εν συνεχεία, επαναλήφθηκε η παραπάνω διαδικασία αλλά, αντί για διαφορετικές διατάξεις, οι μετρήσεις έγιναν σε μια μόνο διάταξη για 20 κύκλους και για τα δύο δείγματα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 2.6. Όπως είναι αναμενόμενο οι σταθερές μεταβλητότητας για τους διαφορετικούς κύκλους είναι πιο μικρές από ότι αυτές για τις διαφορετικές διατάξεις, μιας και δεν υπάρχει ο παράγοντας των αλλαγών στη δομή της κάθε διάταξης. Αναλυτικά, για τις HRS, οι σταθερές είναι $(\sigma/\mu) = 1.44$ για το δείγμα αναφοράς και $(\sigma/\mu) = 0,53$ για το δείγμα με το MoS_2 , ενώ για τις LRS είναι $(\sigma/\mu) = 0.35$ και $(\sigma/\mu) = 0.31$ αντίστοιχα. Για την HRS του δείγματος αναφοράς παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην σ/μ , η οποία οφείλεται σε λίγες αρχικές τιμές μεγάλης αντίστασης. Αυτό είναι πολύ πιθανό να συμβαίνει λόγω του ότι, μετά τους αρχικούς κύκλους τάσης, το διηλεκτρικό δεν αδειάζει εντελώς από κατιόντα, με αποτέλεσμα η αντίσταση της HRS να μειώνεται. Και εδώ το παράθυρο μνήμης είναι κατά μέσο όρο $10^4\Omega$, ολοκληρώνοντας έτσι



Εικόνα 2.6: Μελέτη αξιοπιστίας ίδιων διατάξεων α) Χαρακτηριστικές I-V 20 διαφορετικών κύκλων στο δείγμα αναφοράς. β) Χαρακτηριστικές I-V 20 διαφορετικών κύκλων στο δείγμα με το MoS_2 . γ) CDF διαφορετικών κύκλων δείγματος αναφοράς. δ) CDF διαφορετικών κύκλων δείγματος με το MoS_2 .



Εικόνα 2.7: Μελέτη δυναμικής RS a) t_{SET} δείγματος αναφοράς. b) t_{RESET} δείγματος αναφοράς. c) t_{SET} δείγματος με MoS_2 . d) t_{RESET} δείγματος με MoS_2 .

την εικόνα της καλής λειτουργίας για τις διατάξεις.

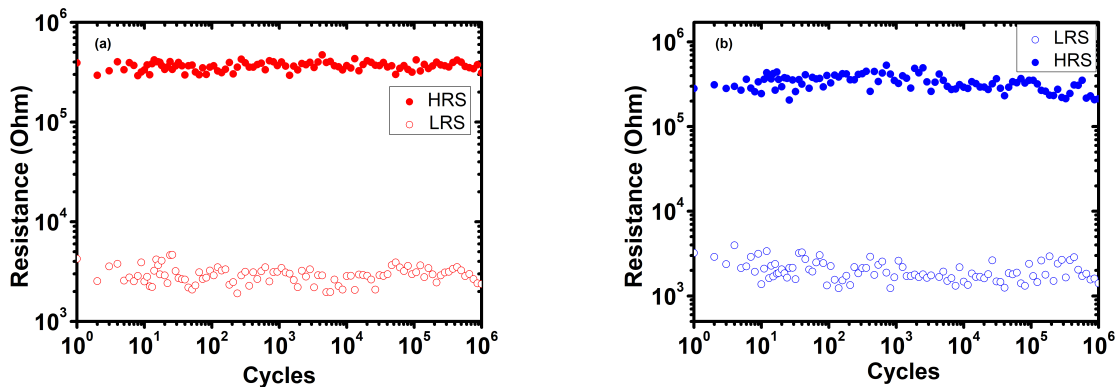
2.4 Παλμικές μετρήσεις

Με τις παλμικές μετρήσεις είναι δυνατόν να μελετηθούν διαφορετικές πτυχές των memristors, όπως η αντοχή τους, η ικανότητα διατήρησης της πληροφορίας, οι συναπτικές τους ιδιότητες και η δυναμική του RS.

Για την δυναμική της ανάπτυξης του CF, εξετάστηκε η ταχύτητα με την οποία συμβαίνουν τα SET και RESET των δύο δειγμάτων. Αυτό γίνεται μέσω της εξαγωγής των χρόνων καθυστέρησης t_{SET} και t_{RESET} , που ορίζονται ως τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ του αρχικού παλμικού ερεθίσματος και του SET και RESET αντίστοιχα [43]. Για αυτό το σκοπό στάλθηκαν στα δείγματα τετραγωνικοί παλμοί πλάτους $1\mu s$ και ύψους $\pm 0.9V$. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7, ο χρόνος καθυστέρησης που είναι απαραίτητος για να παρατηρηθεί μια ουσιαστική αύξηση στο ρεύμα για το δείγμα αναφοράς, είναι $t_{SET} = 39.9ns$ και μια καθυστέρηση $t_{RESET} = 230.1ns$ χρειάζεται για να μειωθεί η

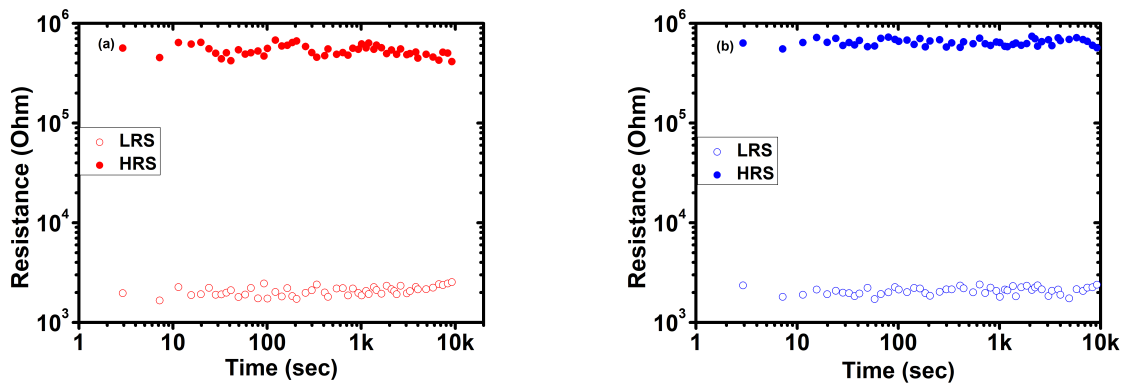
τιμή του ρεύματός του. Αντίστοιχα, για το δείγμα με το MoS_2 , οι χρόνοι καθυστέρησης είναι $t_{SET} = 53.6ns$ και $t_{RESET} = 254.7ns$. Παρατηρείται αύξηση των χρόνων απόκρισης στο δείγμα με το MoS_2 σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Αυτή η αύξηση συμβαίνει λόγω του ότι το MoS_2 αποτελεί έναν επιπλέον φραγμό και έτσι η ταχύτητα κίνησης των κατιόντων Αργύρου μειώνεται.

Η αντοχή των διατάξεων RS ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός κύκλων προγραμματισμού που αντέχει η διάταξη, πρώτου τα ηλεκτρικά της χαρακτηριστικά της αρχίζουν να αποκλίνουν από τις αποδεκτές τιμές[44]. Κατά τους διαδοχικούς κύκλους είναι αδύνατον να παραμείνουν εντελώς σταθερές οι τιμές της αντίστασης, καθώς αυτό θα σημαίνει ακριβή έλεγχο του αριθμού των ατόμων που κινούνται σε κάθε κύκλο[45]. Ο κυριότερος λόγος καταστροφής των memristors δομής Μετάλλου- Μονωτή- Μετάλλου είναι η φθορά στην μικροδομή τους, λόγω της δημιουργίας ατελειών στο διηλεκτρικό και της μη αναστρέψιμης εισχώρησης ατόμων από τα ηλεκτρόδια σε αυτό[46]. Επίσης, και θερμικά φαινόμενα, λόγω των υψηλών ρευμάτων, συντελούν στην καταστροφή του διηλεκτρικού μέσω ατομικής διάχυσης[47]. Γενικά η ταχύτητα καταστροφής έχει να κάνει με το πάχος και τα υλικά της διάταξης και μπορεί να είναι είτε απότομη είτε σταδιακή. Επιπλέον, πολλές φορές η αντίσταση μπορεί να κολλήσει σε συγκεκριμένες τιμές. Αν σε ένα κύκλο πολλά ιόντα του ΑΕ περάσουν στο διηλεκτρικό, μπορεί να χρειάζεται παραπάνω από έναν παλμό για να γίνει το RESET και έτσι η διάταξη να μείνει σε μια μόνιμη LRS και αντίστροφα.



Εικόνα 2.8: α) Γράφημα μελέτης αντοχής δείγματος αναφοράς. β)Γράφημα μελέτης αντοχής δείγματος με MoS_2 .

Έτσι, για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν παλμοί τάσης για το SET $4V$ και για το RESET $-4V$ με πλάτος $10^{-5}s$, χρόνο ανόδου $10^{-5}s$, χρόνο μεταξύ των παλμών $10^{-4}s$ και ενδιάμεσους παλμούς ανάγνωσης $0.1V$. Η παλμοσειρά περιέχει κύκλους που αποτελούνται πρώτα από τον SET παλμό, μετά από έναν παλμό ανάγνωσης, στη συνέχεια από τον παλμό RESET και τέλος από έναν ακόμα παλμό ανάγνωσης. Στην Εικόνα 2.8 φαίνονται τα γραφήματα που στον άξονα y έχουν την μετρούμενη αντίσταση και στον άξονα x έχουν τον αριθμό των κύκλων. Και οι δύο διατάξεις παρουσιάζουν συγκρινόμενες αντοχές, με περίπου 10^6 επιτυχημένους κύκλους, πρώτου αρχίσουν τις αποκλίσεις. Και στις δύο το παράθυρο μνήμης παραμένει περίπου στα $10^2\Omega$. Η απόδοση των δειγμάτων στην αντοχή είναι πολύ υψηλή



Εικόνα 2.9: α) Γράφημα διατήρησης πληροφορίας δείγματος αναφοράς. β) Γράφημα διατήρησης πληροφορίας δείγματος με MoS_2 .

και θετική για μελλοντικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια μελετάται η διατήρηση της πληροφορίας από τα δείγματα. Εδώ ελέγχεται για πόσο χρόνο μπορούν να παραμείνουν σταθερές οι διατάξεις όταν προγραμματιστούν, είτε στην LRS, είτε στην HRS. Χρησιμοποιείται αρχικά ένας παλμός προγραμματισμού που θέτει την διάταξη σε μια κατάσταση αντίστασης και στη συνέχεια στέλνονται διαδοχικοί παλμοί ανάγνωσης χαμηλής τάσης, ώστε να ελέγξουν την διατήρησή της, χωρίς όμως να την επηρεάσουν. Είναι λογικό πως η διατήρηση της HRS δεν θα είναι τόσο δύσκολη, καθώς είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι διατάξεις πρώτου προγραμματισμού και σε αυτή επιτρέφουν. Από την άλλη η διατήρηση της LRS είναι λιγότερο δεδομένη λόγω της σταδιακής διάλυσης του CF. Είναι πιθανό να εξαρτάται και από τον περιορισμό ρεύματος που έχει τεθεί κατά την μέτρηση, καθώς όσο μεγαλύτερο το όριο ρεύματος, τόσο δυνατότερο μπορεί να γίνει το CF και συνεπώς να διατηρηθεί περισσότερο η πληροφορία[25]. Φυσικά τα memristors που λειτουργούν με μη πτητικό τρόπο θα έχουν μεγαλύτερους χρόνους διατήρησης από αυτά που λειτουργούν με πτητικό τρόπο και η διαφορά έγκειται στα σταθερότερα CF.

Έτσι, χρησιμοποιήθηκε για το SET παλμός τάσης $4V$, πλάτους $10^{-5}s$ και χρόνου ανόδου $10^{-5}s$ και για το RESET παλμός τάσης $-0.5V$ και ίδιων χρονικών χαρακτηριστικών. Οι παλμοί ανάγνωσης είχαν τάση $0.1V$. Μόνο ο μη πτητικός τρόπος λειτουργίας εξετάζεται. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 2.9. Και για τις δύο διατάξεις, ένα παράθυρο μνήμης κοντά στα $10^3\Omega$ διατηρείται για 10^4s πρώτου το παράθυρο αρχίσει να συρρικνώνεται. Αυτό το χρονικό διάστημα είναι αποδεκτό αλλά δεν φτάνει τα $10years$ που απαιτούνται για μια ιδανική μη πτητική μνήμη[17].

Όπως αναφέρθηκε, η νευρομορφική αρχιτεκτονική προσπαθεί μέσω των τεχνητών νευρονικών δικτύων να μιμηθεί τον τρόπο λειτουργίας του εγκεφάλου. Τα στοιχεία αυτών των δικτύων είναι οι αντίστοιχες συνάψεις και νευρώνες που υπάρχουν στα βιολογικά TNN και τα memristors είναι οι υποψήφιοι να αποτελέσουν και τα δύο αυτά στοιχεία.

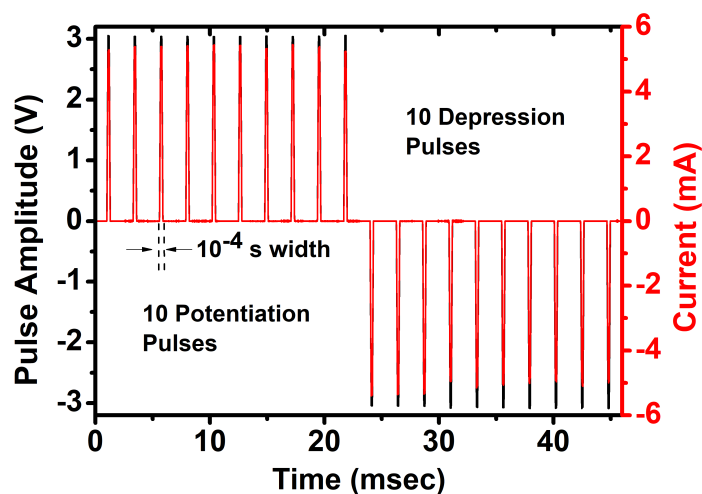
Οι συνάψεις είναι οι ενώσεις μεταξύ των αξόνων των νευρών που προηγούνται και

των δενδριτών των νεύρων που ακολουθούν σε μια σύνδεση. Ενώ οι νευρώνες είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία και την διάδοση σήματος, οι συνάψεις είναι υπεύθυνες για την αποθήκευση και την επεξεργασία της πληροφορίας. Ο ρόλος τους είναι να ρυθμίζουν το σήμα που μεταδίδεται, μέσω του προ-συναπτικού άξονα στον μετα-συναπτικό νευρώνα, σύμφωνα με το συναπτικό τους βάρος. Το συναπτικό βάρος αποτελεί μέτρο του πόσο δυνατή είναι η σύνδεση και άρα το πόσο επηρεάζει η πυροδότηση του νεύρου που προηγείται το νεύρο που ακολουθεί[48]. Ο κύριος υποψήφιος για να αποτελέσει τις συνάψεις στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, είναι τα memristors. Τα δύο ηλεκτρόδια τους μπορούν να θεωρηθούν ως ο άξονας και ο δενδρίτης και η αγωγιμότητα G του διηλεκτρικού, ως το συναπτικό βάρος[4].

Τα memristors θα πρέπει να μπορούν να προσομοιώνουν τις συναπτικές λειτουργίες και ιδιότητες. Η κυριότερη ιδιότητα των συνάψεων είναι ότι μπορούν να διαμορφώνουν το συναπτικό τους βάρος ανάλογα με την δραστηριότητά τους. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται συναπτική πλαστικότητα (Synaptic Plasticity) και μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον χρόνο που διατηρείται μια μεταβολή στο συναπτικό βάρος[48]. Οι κατηγορίες είναι η βραχεία συναπτική πλαστικότητα (Short Term Plasticity- STP), όπου η μεταβολή διαρκεί κάτω από ένα δευτερόλεπτο και έχει να κάνει με την εκπαίδευση της σύναψης, και η μακρά συναπτική πλαστικότητα (Long Term Plasticity- LTP), όπου η μεταβολή μπορεί να διαρκεί από ένα λεπτό μέχρι πολλά χρόνια και σχετίζεται με την μακροχρόνια μνήμη[48]. Στην STP ανήκουν και οι ιδιότητες της Συναπτικής Ενίσχυσης Ζευγαρωμένου Παλμού (Paired-Pulse Facilitation- PPF) και της Συναπτικής Αποδυνάμωσης Ζευγαρωμένου Παλμού (Paired-Pulse Depression- PPD), παρόλο που παρατηρούνται και παρόμοιες LTP ιδιότητες. Οι PPF και PPD είναι ιδιότητες με εξάρτηση από την δραστηριότητα, κατά τις οποίες εφαρμόζονται δύο πανομοιότυπα ερεθίσματα, με το μετα-συναπτικό σήμα να γίνεται μεγαλύτερο ή μικρότερο, αντίστοιχα. Έχει παρατηρηθεί ότι με μεγαλύτερη συχνότητα ερεθισμάτων το μετα-συναπτικό σήμα γίνεται μεγαλύτερο και αντίστροφα[49].

Για τα δύο δείγματα εξετάστηκε η δυνατότητά τους να παρουσιάσουν τις ιδιότητες PPF και PPD. Στάλθηκε μια παλμοσειρά 20 παλμών, με 10 από αυτούς να είναι με θετική τάση και οι υπόλοιποι 10 με αρνητική. Οι τάσεις των παλμών ήταν $\pm 3V$, τα πλάτη $10^{-4}s$, χρόνο ανόδου $10^{-4}s$, χρόνο μεταξύ των παλμών $10^{-3}s$ και ενδιάμεσους παλμούς ανάγνωσης $0.1V$. Η παλμοσειρά και μια αντιπροσωπευτική απόκριση ρεύματος φαίνονται στην Εικόνα 2.10.

Στην Εικόνα 2.11 φαίνονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της παλμοσειράς σε 20 διαφορετικές διατάξεις του δείγματος αναφοράς και του δείγματος με MoS_2 . Και στα δύο είναι εμφανής η ικανότητα για εμφάνιση των ιδιοτήτων PPF και PPD. Με την εφαρμογή των θετικών παλμών η αγωγιμότητα ανεβαίνει σταδιακά, ενώ, αντίθετα, μετά τους αρνητικούς η αγωγιμότητα πέφτει. Στα διαγράμματα η απόκριση εκφράζεται σε όρους κβαντικών σκαλοπατιών αγωγιμότητας. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο δειγμάτων είναι στον τρόπο μεταβολής της αγωγιμότητας με κάθε παλμό. Στο δείγμα αναφοράς, μετά από τους πρώτους 4 θετικούς παλμούς, η αγωγιμότητα φτάνει σε ένα πλατό και με την εφαρμογή των αρνητικών παλμών πέφτει με μια εκθετική μορφή. Αντιθέτως, για το δείγμα με MoS_2 , η άνοδος και η πτώση της αγωγιμότητας είναι πιο γραμμικές. Η γραμμικότητα και η συμμετρία στην μεταβολή της αγωγιμότητας, με την εφαρμογή παλμών προγραμματισμού,



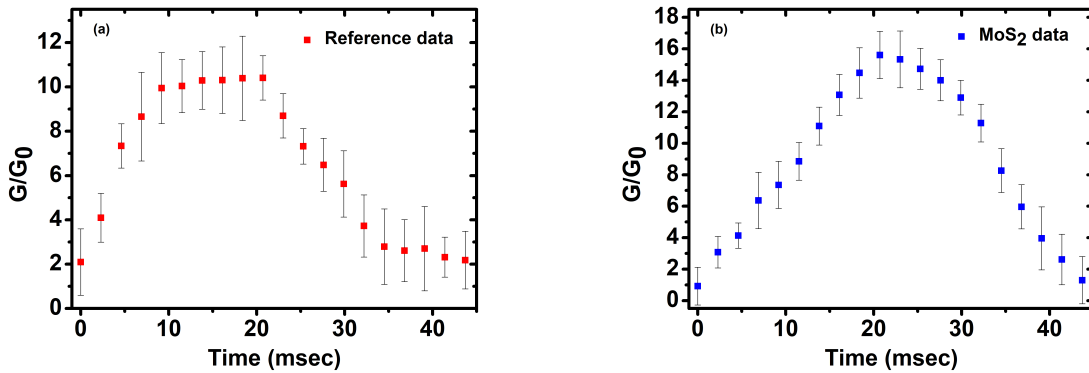
Εικόνα 2.10: Παλμοσειρά εξέτασης ιδιοτήτων PPF/PPD.

είναι χαρακτηριστικά πολύ επιθυμητά για τα memristors, καθώς χωρίς αυτά τα TNN αντιμετωπίζουν προβλήματα με την ακρίβεια μάθησης σε αναγνώριση μοτίβων[50, 51]. Εικάζεται ότι η ενισχυμένη γραμμικότητα που εμφανίζει το δείγμα με το MoS_2 , οφείλεται στα διακριτά σκαλοπάτια κβαντικής αγωγιμότητας που εμφανίζει η διάταξη. Έτσι η απόκριση της διάταξης έχει μια πιο σταδιακή μεταβολή και όχι απότομη, οδηγώντας σε ενισχυμένη γραμμικότητα στις ιδιότητες PPF και PPD.

2.5 Μελέτη Κβαντικής Αγωγιμότητας

2.5.1 Εισαγωγή

Οι βάσεις για την θεωρία της κβαντικής βαλλιστικής μεταφοράς και συνεπώς της κβαντικής αγωγιμότητας μπήκαν από τον Landauer το 1957[52]. Η κβαντική αγωγιμότητα παρατηρήθηκε πειραματικά πρώτη φορά το 1988 από τον van Wees, σε διδιάστατο αέριο ηλεκτρονίων ετεροεπαφής GaAs-AlGaAs στους 0.6 Kelvin[53] και μετέπειτα η ανακάλυψη των κβαντικών σημειακών επαφών (Quantum Point Contact- QPC) ήταν το σημείο καμπής για την καθιέρωση της θεωρίας. QPC είναι ένας πολύ στενός περιορισμός ανάμεσα σε δύο μακροσκοπικές πηγές φορέων, με άνοιγμα συγκρίσιμο σε διάσταση με το μήκος κύματος Fermi των ηλεκτρονίων και μικρότερο από το μήκος της μέσης ελεύθερης διαδρομής τους, ενώ στα άκρα της βρίσκονται δύο μακροσκοπικές πηγές φορέων και θεωρητικά άπειρα κανάλια[54]. Έκτοτε έχει παρατηρηθεί κβαντική αγωγιμότητα σε μεταλλικά νανοσύρματα[55], σε QPCs κατασκευασμένες σε μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας[56], σε μηχανικά και ηλεκτρικά ελεγχόμενες break junctions[57, 58], σε ηλεκτροχημική εναπόθεση[59] και άλλες διατάξεις. Στα memristors ήταν γνωστή αυτή η ιδιότητα από νωρίς[53], αλλά λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των μνημών φλας δεν δόθηκε προσοχή μέχρι τα μέσα



Εικόνα 2.11: a) PPF/PPD 20 διατάξεων δείγματος αναφοράς. b) PPF/PPD 20 διατάξεων δείγματος με MoS_2 .

της δεκαετίας του 2000, με αρχή μια δουλειά του Terabe το 2005[60]. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι η κβαντική αγωγιμότητα στα memristors παρατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά, μέχρι στιγμής, μόνο στα ECM[61] και VCM[62], λόγω της ικανότητάς τους να δημιουργούν CFs πολύ μικρής διάστασης. Οι εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν memristors με κβαντική αγωγιμότητα είναι πολλές, με κύριους τομείς τα λογικά κυκλώματα, τη νευρομορφική εξεργασία και συστήματα αλληλεπίδρασης οπτικών ερεθισμάτων με ηλεκτρονικές διατάξεις[16].

2.5.2 Θεωρία

Η κβαντική αγωγιμότητα στα memristors που λειτουργούν με το σχηματισμό CF, μπορεί να εξηγηθεί με βάση τη θεωρία του βαλλιστικού καναλιού[63], με το πάχος του CF να είναι το ανάλογο του ανοίγματος του καναλιού.

Τα ηλεκτρόνια, ταξιδεύοντας μέσα σε ένα κανάλι μπορούν να υποστούν κρούσεις και να αλλάξει η φάση τους και η ορμή τους. Σε αυτή την περίπτωση ο νόμος του Ohm ισχύει και το σύστημα μπορεί να περιγραφεί κλασικά, καθώς η εξίσωση του *Schrödinger* δεν μπορεί να λυθεί σε όλο το μήκος L του καναλιού. Όμως αν το μήκος του καναλιού είναι μικρότερο από το μήκος της μέσης ελεύθερης διαδρομής των ηλεκτρονίων, τότε η φάση και η ορμή τους δεν μεταβάλλεται και η μεταφορά θεωρείται βαλλιστική.

Στα memristors, τα δύο ηλεκτρόδια μπορούν να θεωρηθούν μακροσκοπικές μεταλλικές πηγές φορέων και το CF ως κανάλι με διαστάσεις διατομής συγκρίσιμες με το μήκος κύματος Fermi των ηλεκτρονίων και μήκος πολύ μικρότερο του μήκους ελεύθερης διαδρομής (γύρω στα δεκάδες nm), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Όσον αφορά τα ηλεκτρόδια, αν οι διαστάσεις τους είναι $D \times D \times D$, η ενέργεια των

ηλεκτρονίων τους θα δίνεται από την εξήσωση:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mD^2} n^2 \quad (2.5)$$

όπου m η μάζα των φορέων. Αν D μεγάλο, τότε οι ενεργειακές στάθμες απέχουν ελάχιστα και δημιουργούν ένα συνεχές φάσμα ενεργειών.

Έστω ότι το CF αναπτύσσεται κατά τον άξονα x . Τα ηλεκτρόνια τότε θα έχουν ενέργεια:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_{y,n_y}^2 + k_{z,n_z}^2) \\ &= E_{n_y, n_z} + \frac{\hbar^2}{2m_e^*} k_x^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

όπου m_e^* είναι η ανηγμένη μάζα των ηλεκτρονίων, k_x θα είναι συνεχής παράμετρος, αφού τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα να κινηθούν στον άξονα x και οι παράμετροι n_y και n_z ορίζουν τις υποκαταστάσεις ενέργειας που δίνονται από τη σχέση:

$$E_{n_y, n_z} = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_{z,n_z}^2 + k_{y,n_y}^2) \quad (2.7)$$

και σε περίπτωση που το περιοριστικό δυναμικό είναι άπειρο με διαστάσεις w_1, w_2 , η μορφή του θα είναι:

$$E_{n_y, n_z} = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} \left(\left(\frac{n_y \pi}{w_1} \right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{w_2} \right)^2 \right) \quad (2.8)$$

με $n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$

Υποθέτουμε ότι το CF έχει τετράγωνη διατομή με $w_1 = w_2 = w$, τότε οι ενέργειες των υποκαταστάσεων θα γίνουν:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e^* w^2} n^2 \quad (2.9)$$

έτσι που ο αριθμός των υποκαταστάσεων, ή αλλιώς ο αριθμός των καναλιών των ηλεκτρονίων, κάτω και ίσα από την στάθμη Fermi θα δίνεται από τη σχέση:

$$N = \sqrt{\frac{E_F 2m_e^* w^2}{\hbar^2 \pi^2}} = \frac{w}{\hbar \pi} \sqrt{E_F 2m_e^*} = \frac{w k_F}{\pi} = \frac{w}{\lambda_F / 2} \quad (2.10)$$

όπου θεωρήθηκε για την ενέργεια Fermi:

$$E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m_e^*} \quad (2.11)$$

Όπως φαίνεται, όσο το πλάτος του CF αυξάνεται, ο αριθμός των καναλιών αυξάνεται επίσης και πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά που το πλάτος αυξάνει κατά μισό μήκος κύματος Fermi, προσθέεται ένα κανάλι ακόμα.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης, και άρα της αγωγιμότητας του καναλιού, θεωρούμε ότι ένα δυναμικό V εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο για $x=0$, έτσι που σε αυτό η ενέργεια Fermi γίνεται $E_F - qV$ και στο άλλο ηλεκτρόδιο E_F . Τα ηλεκτρόνια στο νήμα θα έχουν κυματοσυναρτήσεις της μορφής:

$$\psi(x, y, z) = \psi_x(x)\psi_y(y)\psi_z(z) \quad (2.12)$$

και ένα αντίστοιχο ρεύμα πιθανότητας:

$$J(x, y, z) = \frac{\hbar}{m_e^*} \text{Im}(\psi^* \nabla \psi) \quad (2.13)$$

Το ρεύμα στο CF θα δίνεται από τον τύπο:

$$I = \int_S J \cdot \hat{n} dS \quad (2.14)$$

όπου S είναι η επιφάνεια της διατομής του νήματος και \hat{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S , ώστε το γινόμενο $J \cdot \hat{n}$ να δίνει τη συνιστώσα του ρεύματος που περνάει μέσα από την διατομή.

Έτσι, από τις εξισώσεις 2.12, 2.13, 2.14, θα γίνεται:

$$\begin{aligned} I_x &= \int_y \int_z (-e) J(x, y, z) \cdot \hat{x} dy dz \\ &= -\frac{e\hbar}{m_e^*} \int_y \int_z \text{Im} \left(\psi^* \frac{\partial}{\partial x} \right) \psi dy dz \\ &= -\frac{e\hbar}{m_e^*} \int_y \int_z |\psi_y(y)|^2 |\psi_z(z)|^2 \text{Im} \left(\psi_x^*(x) \frac{\partial \psi_x(x)}{\partial x} \right) dy dz \\ &= -\frac{e\hbar}{m_e^*} \text{Im} \left(\psi_x^*(x) \frac{\partial \psi_x(x)}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

όπου χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη κανονικοποίησης:

$$\int_y \int_z |\psi_y(y)|^2 |\psi_z(z)|^2 dy dz = 1 \quad (2.16)$$

Τα ηλεκτρόνια κατά τον άξονα x θα είναι ελεύθερα να κινηθούν και η κυματοσυνάρτησή τους θα είναι της μορφής:

$$\psi_x(x) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ikx} \quad (2.17)$$

με k θετικό ώστε να υποδηλώνει κίνηση των ηλεκτρονίων από τα αριστερά προς τα δεξιά. Χρησιμοποιώντας αυτήν την κυματοσυνάρτηση στην εξίσωση 2.15 γίνεται:

$$I_x = -\frac{e\hbar}{m_e^* L} \text{Im}(e^{-ikx} (ik) e^{ikx}) = -\frac{e\hbar k}{m_e^* L} \quad (2.18)$$

Αυτό θα είναι το ρεύμα για μία κατάσταση και λαμβάνοντας υπόψιν ότι δύο ηλεκτρόνια χρειάζονται για να γεμίσουν μια κατάσταση, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με 2 λόγω spin:

$$I_{x,k} = -\frac{2e\hbar k}{m_e^*L} \quad (2.19)$$

Έτσι, εξάγεται η εξίσωση 2.19 μια έκφραση για το ρεύμα στον άξονα x λόγω των ηλεκτρονίων στην κατάσταση k. Παρόλα αυτά, για το ολικό ρεύμα, θα πρέπει να συνυπολογιστούν η πιθανότητα κατάληψης της κάθε κατάστασης και η πιθανότητα το κάθε ηλεκτρόνιο να μπει στο κανάλι και να καταφέρει να το διαπεράσει. Για να βρεθεί η εξίσωση του ολικού ρεύματος κατά τον άξονα x, θα γίνει η πρόσθεση σε όλες τις πιθανές καταστάσεις k και σε όλα τα πιθανά κανάλια (N υποκαταστάσεις). Έτσι για κάθε κατάσταση πολλαπλασιάζουμε με την πιθανότητα κατάληψης Fermi-Dirac της κατάστασης k του αριστερού ηλεκτροδίου $f(E, E_F - eV, T)$, την πιθανότητα διέλευσης του καναλιού $T_n(E)$, που εξαρτάται από την ενέργεια, και το ρεύμα της κάθε κατάστασης $I_{x,k}$. Το ρεύμα λοιπόν που θα ρέει από τα αριστερά προς τα δεξιά θα είναι:

$$\begin{aligned} I_{L \rightarrow R} &= \sum_{n=1}^N \sum_k f(E, E_F - eV, T) T_n(E) \left(-\frac{2e\hbar k}{m_e^*L} \right) dk \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{L}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(E, E_F - eV, T) T_n(E) \left(-\frac{2e\hbar k}{m_e^*L} \right) dk \\ &= -\frac{2e}{h} \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} f(E, E_F - eV, T) T_n(E) dE \end{aligned} \quad (2.20)$$

όπου ο όρος $L/2\pi$ προήλθε από την μετατροπή του αθροίσματος ως προς k σε ολοκλήρωμα. Υποθέτοντας ότι οι δύο πηγές φορέων είναι πανομοιότυπες και ότι ο φραγμός δυναμικού είναι συμμετρικός, τότε η πιθανότητα διέλευσης από τα αριστερά στα δεξιά και αντίθετα θα είναι η ίδια. Άρα για το ρεύμα από τα δεξιά προς τα αριστερά θα έχουμε:

$$I_{R \rightarrow L} = -\frac{2e}{h} \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} f(E, E_F, T) T_n(E) dE \quad (2.21)$$

και το ολικό ρεύμα θα είναι:

$$\begin{aligned} I &= I_{L \rightarrow R} - I_{R \rightarrow L} \\ &= -\frac{2e}{h} \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} (f(E, E_F - eV, T) - f(E, E_F, T)) T_n(E) dE \end{aligned} \quad (2.22)$$

Αν το eV είναι σημαντικά μικρό:

$$\begin{aligned} f(E, E_F - eV, T) - f(E, E_F, T) &\approx \frac{\partial f(E, E_F, T)}{\partial E_F} (-eV) \\ &= -\frac{\partial f(E, E_F, T)}{\partial E_F} (-eV) \end{aligned} \quad (2.23)$$

και ως αποτέλεσμα:

$$I = \frac{2e^2}{h} V \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \left(- \frac{\partial f(E, E_F, T)}{\partial E_F} \right) T_n(E) dE \quad (2.24)$$

Η εξίσωση για το ρεύμα 2.24 οδηγεί στην σχέση για την εξαρτώμενη από την θερμοκρασία αγωγιμότητα $G(T)$:

$$G(T) = \frac{I}{V} = \frac{2e^2}{h} \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \left(- \frac{\partial f(E, E_F, T)}{\partial E_F} \right) T_n(E) dE \quad (2.25)$$

Για χαμηλές θερμοκρασίες η κατανομή Fermi-Dirac προσομοιάζει μια βηματική εξίσωση:

$$\left(- \frac{\partial f(E)}{\partial E} \right) = \delta(E_F - E) \quad (2.26)$$

έτσι ώστε:

$$G(T = 0) = \frac{2e^2}{h} \sum_{n=1}^N T_n(E_F) \quad (2.27)$$

Όπως φάνηκε και στην εξίσωση 2.10, ο αριθμός των καναλιών N θα αυξάνεται με την αύξηση του πλάτους του νήματος και σε περίπτωση που η πιθανότητα διέλευσης για κάθε κανάλι είναι 1, τότε θα γίνεται:

$$G = \frac{2e^2}{h} N \quad (2.28)$$

εξίσωση που είναι γνωστή ως τύπος του Landauer και συνδυάζοντας την με την εξίσωση 2.10 θα γίνει:

$$G = \frac{2e^2}{h} \frac{2w}{\lambda_F} \quad (2.29)$$

για CF διατομής w^2 . Η αγωγιμότητα κάθε καναλιού θα είναι:

$$G_0 = \frac{2e^2}{h} \approx 77.5 \mu S \quad (2.30)$$

που είναι το κβάντο αγωγιμότητας, με αντίστοιχο κβάντο αντίστασης:

$$R_0 = \frac{h}{2e^2} = 12.9 k\Omega \quad (2.31)$$

και ολική αντίσταση καναλιού:

$$R = \frac{h}{2e^2 N} = \frac{12.9}{N} k\Omega \quad (2.32)$$

Όσο ο αριθμός των καναλιών θα αυξάνει, η αγωγιμότητα του καναλιού θα μεγαλώνει και η αντίσταση του θα μικραίνει. Η κλασική θεωρία προβλέπει αυτή τη συμπεριφορά, όμως η κβαντική θεωρία δείχνει ότι οι μεταβολές συμβαίνουν σε διακριτά βήματα. Αν το N γίνει

πολύ μεγάλο, τα κανάλια ηλεκτρονίων δημιουργούν ένα συνεχές φάσμα και η κβαντική θεωρία τείνει προς την κλασική. Φυσικά για όλα αυτά, τα ηλεκτρόνια δεν πρέπει να βιώνουν φαινόμενα διασκορπισμού.

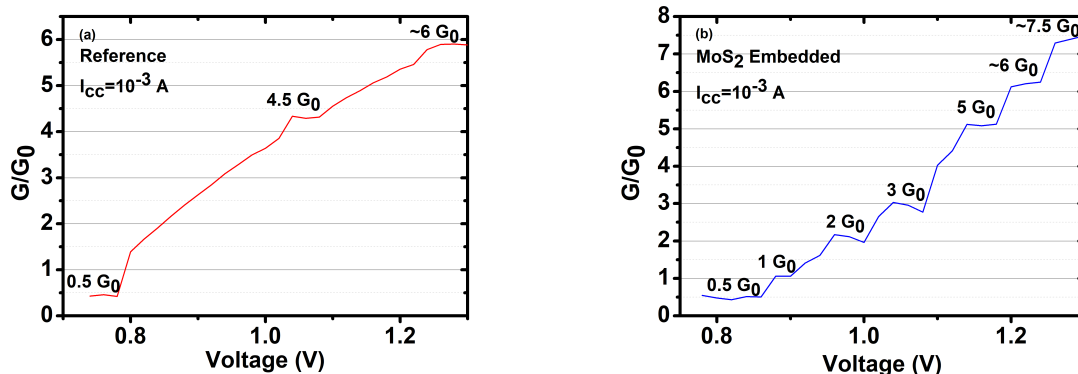
Με δεδομένο ότι το μήκος του CF είναι μικρότερο από το μήκος ελεύθερης διαδρομής και η μεταφορά είναι βαλλιστική, θα ήταν λογικό η αντίσταση του να είναι μηδενική και να μην παρατηρείται πτώση δυναμικού κατά μήκος του. Η αντίσταση που υπολογίστηκε παραπάνω είναι στην πραγματικότητα της διεπαφής των θεωρητικά άπειρων καναλιών των πηγών και του βαλλιστικού καναλιού και αυτή η διεπαφή είναι αναγκαία συνθήκη για την παρατήρηση της QC. Αν το ηλεκτρόδιο είναι πηγή ηλεκτρονίων με μακροσκοπικές διαστάσεις, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει πολλά κανάλια ηλεκτρονίων και στην επαφή με το CF της μικρής διατομής θα πρέπει να γίνει μια ανακατανομή του ρεύματος. Το κβάντο αντίστασης R_0 θα προκύπτει από την επαφή της μακροσκοπικής πηγής με ένα κανάλι ηλεκτρονίου. Πράγματι, όσο διατηρείται η συνθήκη βαλλιστικής μεταφοράς, η αντίσταση είναι ανεξάρτητη του μήκους του CF και οι βαλλιστικοί αγωγοί είναι ικανοί να μεταφέρουν μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος, αφού δεν θερμαίνονται ελλείψει φαινομένων διασκορπισμού των φορέων.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας η κβαντική αγωγιμότητα τείνει να μην παρατηρείται γιατί η θερμική ενέργεια $k_B T$ γίνεται συγκρίσιμη με την ενεργειακή διαφορά των υποκαταστάσεων ενέργειας που υπολογίζεται από την εξίσωση 2.8. Για τα memristors παρατηρείται κβαντική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου όπου η θερμική ενέργεια είναι $k_B T (T = 293K) \approx 0.025eV$. Αν το CF έχει διατομή μόλις λίγα νανόμετρα τότε η ενεργειακή διαφορά των υποκαταστάσεων ενέργειας είναι της τάξης του $1eV$ και η θερμική ενέργεια είναι πολύ μικρότερη. Αντιθέτως, γύρω στα $10nm$ διατομή η θερμική ενέργεια είναι συγκρίσιμη με την διαφορά μεταξύ των υποκαταστάσεων και η κβαντική αγωγιμότητα τείνει να εξαφανιστεί.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολλές φορές παρατηρούνται αγωγιμότητες που δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια του G_0 . Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η πιθανότητα διέλευσης κάθε καναλιού δεν είναι πάντα 1 και γιατί σε ένα CF με μόλις μερικά άτομα να αποτελούν την διάμετρό του, παίζει μεγάλο ρόλο και η ατομική του δομή.

2.5.3 Μετρήσεις

Ο σκοπός της προσθήκης του MoS_2 στην διάταξη ήταν να ενισχυθεί το φαινόμενο της κβαντικής αγωγιμότητας και να εμφανιστούν περισσότερα βήματα. Όπως φάνηκε από τις χαρακτηριστικές I-V 2.4 και φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 2.12, η κβαντική αγωγιμότητα είναι όντως εντονότερη στη διάταξη με το MoS_2 . Στις I-V παρατηρούνται κάποια βήματα και σε χαμηλά ρεύματα αλλά αυτά δεν αποτελούν κβαντική αγωγιμότητα γιατί οι τιμές της αγωγιμότητας εκεί είναι πολύ μικρότερες του G_0 . Έτσι, QC εμφανίζεται από τα 10^{-5} και πάνω και προς αυτή την κατεύθυνση επιλέχθηκε ρεύμα περιορισμού μεγάλο στα 10^{-3} . Και τα δύο δείγματα εμφανίζουν διακριτά βήματα αγωγιμότητας ακέραιων και ημισακέραιων τιμών G_0 , με το δείγμα αναφοράς να έχει 3 καταστάσεις QC και το δείγμα με το MoS_2 να έχει 7, με περίπου $20mV$ πλάτος. QC σε memristors με οξείδιο πυριτίου έχει πα-



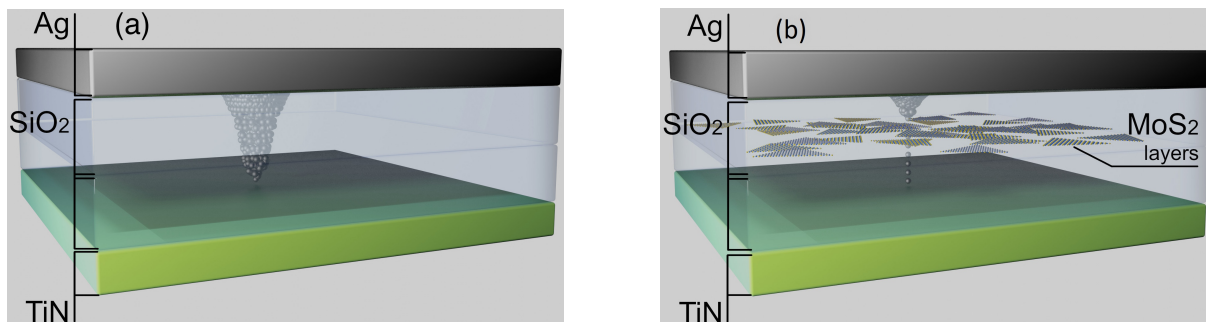
Εικόνα 2.12: α) Βήματα κβαντικής αγωγιμότητας στο δείγμα αναφοράς. β) Βήματα κβαντικής αγωγιμότητας στο δείγμα με MoS_2 .

ρατηρηθεί λόγω ατελειών του άμορφου μέρους του διηλεκτρικού που οδηγούν σε CFs κενών οξυγόνου[64]. Στα δείγματα που αναλύονται σε αυτή την εργασία, η διάχυση των κατιόντων Ag είναι ο μηχανισμός πίσω από την λειτουργία και έτσι είναι δυνατή η παρατήρηση QC σε πολύ μικρότερες ενέργειες σε σχέση με memristors με CF βασισμένο σε κενά οξυγόνου[65].

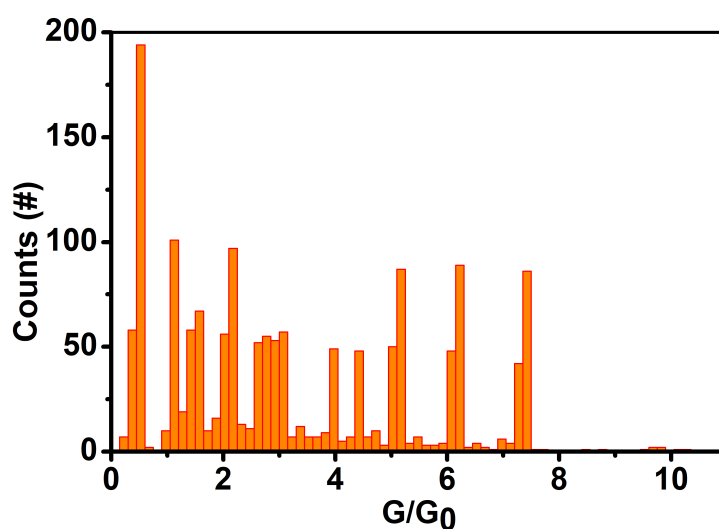
Στην Εικόνα 2.13 αναπαριστάται η διαφορά στην ανάπτυξη του CF ανάμεσα στα δύο δείγματα. Το MoS_2 λειτουργεί σαν σίτα που αναγκάζει το CF να αναπτυχθεί ενδιάμεσα στα πλεγματικά κενά του και έτσι του περιορίζει το πάχος. Η ανάπτυξη του CF μέσα από το MoS_2 είναι δενδριτική και κάθε διακλάωση μπορεί να έχει πάχος λίγα άτομα. Για κάθε κλάδο που καταφέρνει να φτάσει στο ΙΕ η αγωγιμότητα θα αυξάνεται κατά $1 - 2G_0$. Λόγω της λεπτονσης του CF, το φαινόμενο της QC γίνεται πιο έντονο καθώς μεγαλώνει η ενεργειακή διαφορά των υποκαταστάσεων ενέργειας. Ένα πρόβλημα με τα διδιάστατα υλικά είναι ότι κατά την ανάπτυξή τους και την μεταφορά τους, δημιουργούνται ρωγμές και όρια κόκκων. Αυτά αποτελούν ατέλειες που οδηγούν σε διαρροές ρεύματος και υποβαθμίζουν την λειτουργία των διατάξεων[66]. Επίσης, στην περίπτωση που ο τρόπος λειτουργίας μια διάταξης είναι πτητικός, είναι πολύ πιθανό με την χρήση των διδιάστατων υλικών να γίνει μη-πτητικός, λόγω της μεγαλύτερης σταθερότητας του CF όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο υποκεφάλαιο[67].

Για την μελέτη της επαναληψιμότητας των βημάτων QC, μετρήθηκαν 500 κύκλοι I-V σε διαφορετικές διατάξεις και σχεσιάστηκε το ιστόγραμμα της Εικόνας 2.14. Φαίνονται ξεκάθαρα διακριτές καταστάσεις αγωγιμότητας και πιο συγκεκριμένα 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 4.5, 5, 6, 7.5 και λιγότερο 10 G_0 . Η κβαντική αγωγιμότητα είναι έντονα παρατηρήσιμη και επαναλήψιμη, κάτι που αποδεικνύει ότι η προσθήκη του MoS_2 είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Περαιτέρω μελέτη της κβαντικής αγωγιμότητας έγινε με παλμούς, και λόγω του ότι οι διατάξεις και τα νευρωνικά δίκτυα που κατασκευάζονται λειτουργούν με παλμούς και όχι με συνεχές ρεύμα. Χρησιμοποιήθηκαν 20 παλμοί προγραμματισμού και ανάγνωσης με 10 μs πλάτος και χρόνο ανόδου και 100 μs διάστημα μεταξύ των παλμών. Μετά από



Εικόνα 2.13: α) Σχηματική αναπαράσταση CF στο δείγμα αναφοράς. β) Σχηματική αναπαράσταση CF στο δείγμα με MoS_2 .



Εικόνα 2.14: Ιστογράμμο κβαντικών καταστάσεων αγωγιμότητας 500 κύκλων.

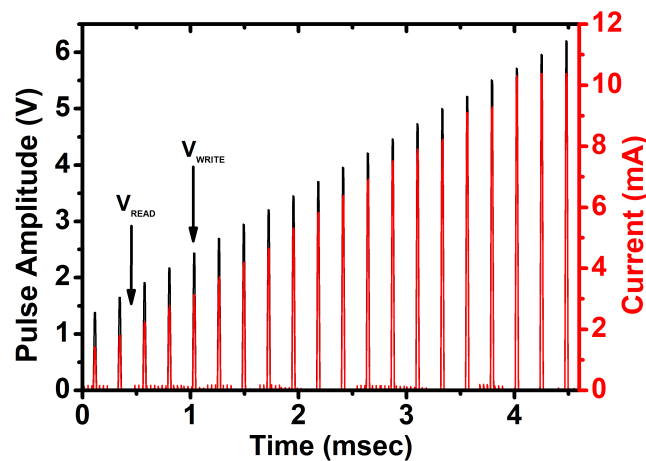
κάθε παλμό, η τάση αυξανόταν κατά 0.25 V και ενδιάμεσα οι παλμοί ανάγνωσης είχαν 0.1 V τάση. Οι παλμοί και μια αντιπροσωπευτική απόκριση ρεύματος φαίνονται στην Εικόνα 2.15. Όπως φαίνεται, η γραμμική αύξηση της τάσης των παλμών ακολουθείται από μια πιο απότομη γραμμική αύξηση του ρεύματος και άρα μείωση της αντίστασης.

Στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Και στα δύο δείγματα, με την παλμοσειρά αυξανόμενης τάσης, παρατηρούνται περισσότερες καταστάσεις κβαντικής αγωγιμότητας από ότι στις χαρακτηριστικές I-V. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, καθώς με τους παλμούς μπορεί να προγραμματιστεί μια πιο ελεγχόμενη και σταδιακή αύξηση της προσφερόμενης ενέργειας στην διάταξη και έτσι να εμφανιστούν περισσότερες καταστάσεις. Μπορεί οι τάσεις των παλμών, που φτάνουν ακόμα και τα 6 V, να φαίνονται αντικρούμενες με τον ισχυρισμό της ελεγχόμενης αύξησης της ενέργειας, όμως κατά τη διάρκεια μιας παλμοσειράς η προσφερόμενη ενέργεια είναι πολύ μικρότερη από ότι στο DC για τον ίδιο

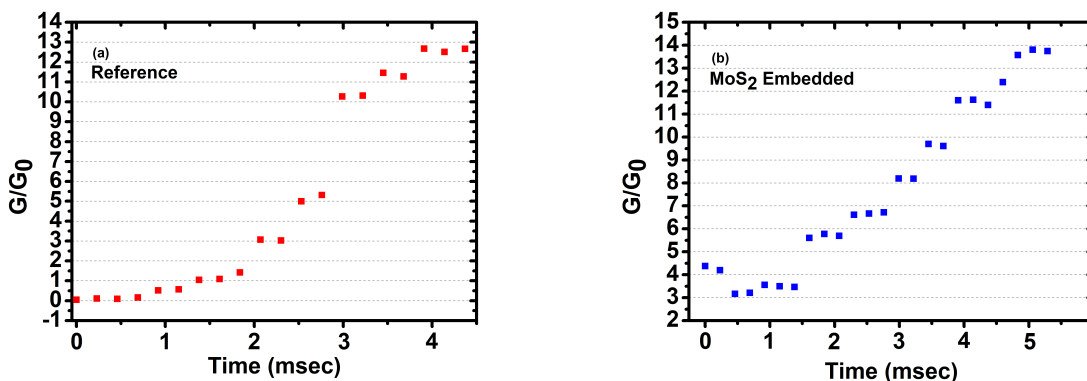
χρόνο. Αυτό φαίνεται και από τον τύπο της προσφερόμενης ενέργειας 2.33:

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (2.33)$$

όπου V η τάση του παλμού, I το ρεύμα στη διάταξη και t το πλάτος του παλμού, στην περίπτωση τετραγωνικών παλμών. Έτσι μπορούν να δικαιολογηθούν οι υψηλές τάσεις παλμών, ενώ στις DC μετρήσεις η τάση για την εμφάνιση των βημάτων είναι έως και έξι φορές μικρότερη. Ακόμα μια σημαντική παράμετρος για τον έλεγχο της QC με παλμούς είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ τους. Αν είναι πολύ μικρό τότε θα υπάρχουν διακυμάνσεις στην QC, λόγω του ότι, για ένα διάστημα μετά την απομάκρυνση της τάσης, το CF εμφανίζει δομικές και ηλεκτροχημικές αστάθειες[16]. Από την άλλη, αν το ενδιαμέσο χρονικό διάστημα γίνει αρκετά μεγάλο, τότε υπάρχει η περίπτωση το CF να αποσυντεθεί μερικώς πρώτου το χτυπήσει ο επόμενος παλμός και έτσι να είναι ανακριβής η μέτρηση[62].

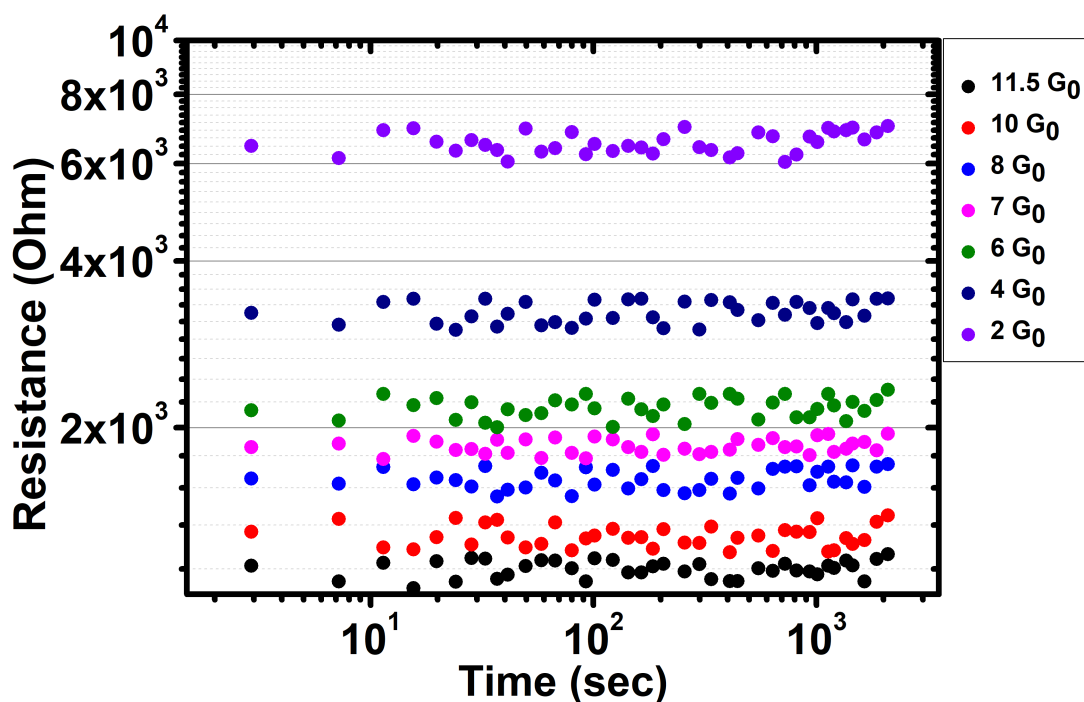


Εικόνα 2.15: Παλμοσειρά μελέτης κβαντικής αγωγιμότητας και απόκριση διάταξης.



Εικόνα 2.16: a) Καταστάσεις κβαντικής αγωγιμότητας μέσω παλμικών μετρήσεων στο δείγμα αναφοράς. b) Καταστάσεις κβαντικής αγωγιμότητας μέσω παλμικών μετρήσεων στο δείγμα με MoS_2 .

Τέλος ελέγχθηκε η δυνατότητα της διάταξης με το MoS_2 να διατηρεί την πληροφορία σε διαφορετικές καταστάσεις κβαντικής αγωγιμότητας. Στην Εικόνα 2.17 φαίνονται οι δυνατότητες διατήρησης της διάταξης. Οι αρχικοί παλμοί προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν είχαν 10 μs πλάτος και χρόνο ανόδου και 100 μs διάστημα μεταξύ των παλμών, με διάφορες τιμές τάσεων. Τα βήματα είναι λιγότερα από αυτά που είχαν εξασχθεί από την παλμική μελέτη, καθώς υπάρχουν θέματα αλληλοκάλυψης των τιμών αντίστασης. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι η διατήρηση των καταστάσεων φτάνει μέχρι λίγο πάνω από τα $2 \cdot 10^3 s$, μια τιμή ικανοποιητική για περαιτέρω εφαρμογές. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα οι καταστάσεις μεταβάλλονται και είτε καταλήγουν στην LRS, είτε παίρνουν τιμές που ανήκουν σε άλλες καταστάσεις. Έτσι η QC που παρουσιάζει η διάταξη είναι ελεγχόμενη, επαναλαμβανόμενη και σταθερή, με την προσθήκη του MoS_2 να βοηθάει στην ενίσχυση των χαρακτηριστικών της QC.



Εικόνα 2.17: Διατήρηση διαφορετικών καταστάσεων κβαντικής αγωγιμότητας.

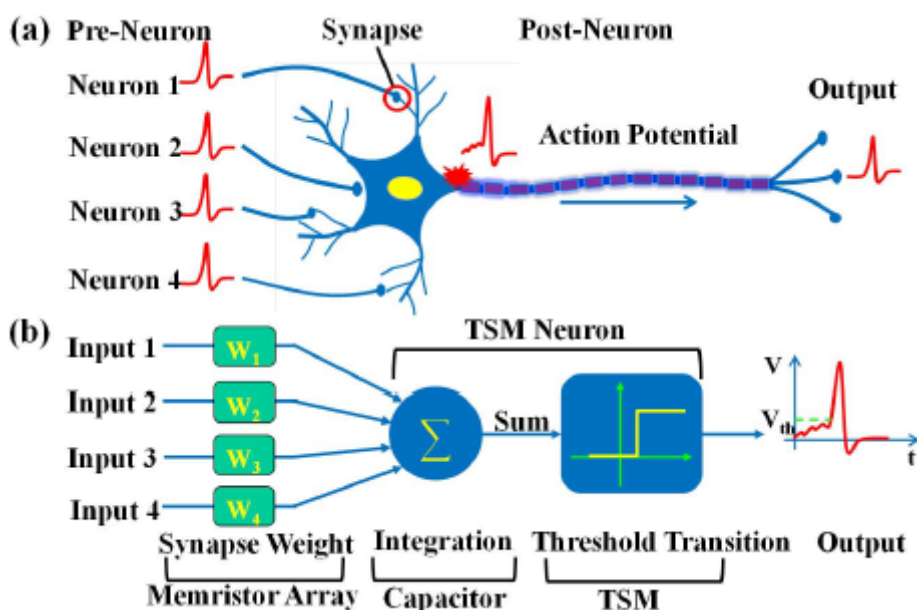
Κεφάλαιο 3

Τεχνητός Νευρώνας LIF

3.1 Εισαγωγή

Για την δημιουργία ολοκληρωμένων Τεχνητών Νευρωνικών δικτύων θα πρέπει τα memristors, πέρα από την μίμηση των συνάψεων και των ιδιοτήτων τους, να μιμούνται και την λειτουργία των νευρώνων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι νευρώνες είναι υπεύθυνοι για την επεξεργασία της πληροφορίας που λαμβάνουν μέσω των δενδριτών τους, της διαμόρφωσης της νευρωνικής μεμβράνης τους και εν τέλει την μετάδοση του σήματος με την εκπομπή ηλεκτρικών παλμών προς τον επόμενο νευρώνα. Ένα ακόμα στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι οι βιολογικοί νευρώνες δίνουν παλμούς κυρίως στοχαστικά και όχι ντετερμινιστικά, επιτρέποντας στον εγκέφαλο να κάνει πιθανολογικούς υπολογισμούς[68]. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται ένας βιολογικός νευρώνας και ένας αντίστοιχος τεχνητός με τη χρήση memristor με TS. Φυσικά έχουν γίνει προσπάθειες να δημιουργηθούν τεχνητοί νευρώνες με τεχνολογία CMOS όμως υπάρχουν μειονεκτήματα σε αυτά. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι χρειάζονται πολλά κυκλωματικά στοιχεία για να επιτευχθούν οι νευρωνικές λειτουργίες και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πέφτει η ενεργειακή τους απόδοση και η πυκνότητα ανάπτυξής τους σε τσιπ[69].

Υπάρχουν κάποια κύρια χαρακτηριστικά των νευρώνων που θα πρέπει να προσομοιώνουν και οι τεχνητοί νευρώνες. Αρχικά θα πρέπει να δίνουν ηλεκτρικούς παλμούς υπό τον κανόνα του όλα ή τίποτα, δηλαδή η έξοδος του νευρώνα να μπορεί να πάρει μόνο δύο τιμές, του μηδενός και της μέγιστης τιμής του ηλ. παλμού. Στη συνέχεια θα πρέπει η λειτουργία των νευρώνων και άρα η εξαγωγή παλμών, να συμβαίνει μόνο αν ξεπεραστεί ένα κατώφλι δυναμικού και ο νευρώνας να μην παράγει παλμούς όταν το εισαγόμενο σήμα είναι ανεπαρκές. Επίσης θα πρέπει να κατέχει αυτό που ονομάζεται περίοδος ανθεκτικότητας. Αυτή η περίοδος είναι το χρονικό διάστημα, μετά από την παραγωγή ενός παλμού, κατά το οποίο ο νευρώνας δεν μπορεί να ξαναδώσει παλμό. Τέλος η συχνότητα παραγωγής παλμών από τον νευρώνα θα πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του εισαγόμενου ερεθίσματος. Όσο ισχυρότερο είναι το ερέθισμα, τόσο μεγαλύτερη θα πρέπει να είναι η συχνότητα των εξαγόμενων παλμών, και αντίστροφα[70]. Στην περίπτωση των τε-

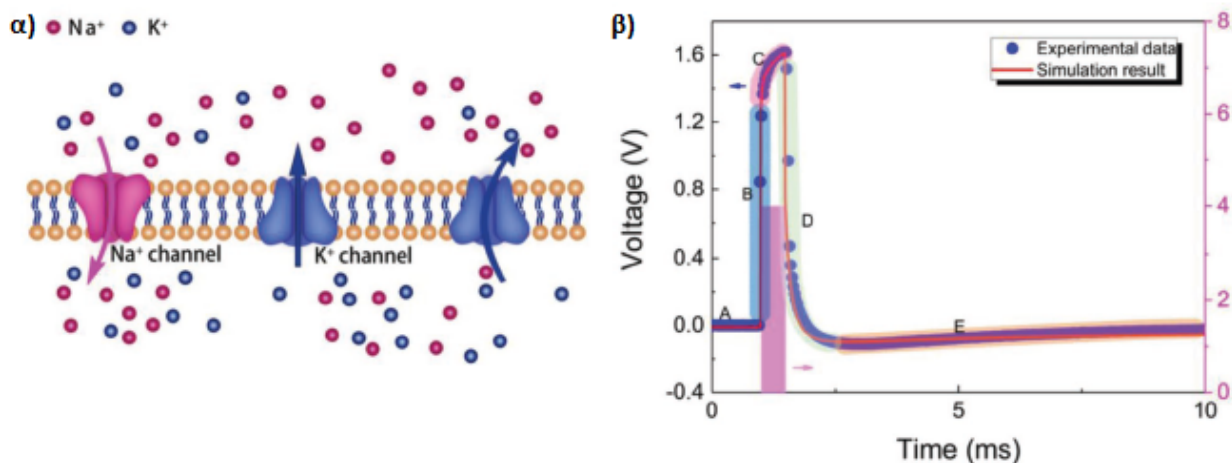


Εικόνα 3.1: α) Βιολογικός νευρώνας που λαμβάνει πληροφορία από άλλους νευρώνες συνδεδεμένους μέσω συνάψεων. β) Αντίστοιχος τεχνητός νευρώνας με TS memristor[70].

χνητών νευρώνων αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να ελεγχθεί μέσω διάφορων τρόπων όπως π.χ. με την αύξηση της συχνότητας του ερεθίσματος ή του πλάτους του παλμού ή με τη μείωση του ενδιάμεσου διαστήματος μεταξύ των παλμών, θα πρέπει να αυξάνει η παλμική συχνότητα, και αντίστροφα, και κάποιες τέτοιες περιπτώσεις θα παρουσιαστούν και στη συνέχεια.

Διάφορα μοντέλα για την λειτουργία των νευρώνων έχουν προταθεί και πάνω σε κάποια από αυτά προσπαθεί να πατήσει η ανάπτυξη των τεχνητών νευρώνων. Τα τρία κυριότερα είναι το Integrate-and-Fire (IF), το Leaky Integrate-and-Fire (LIF) και το μοντέλο των Hodgkin και Huxley (HH). Με τα μοντέλα IF και LIF ασχολήθηκε αρχικά ο Lapicque[71] και επικεντρώνονται κυρίως στην χτίση του εσωτερικού δυναμικού μέχρι να φτάσει αυτό στο κατάλληλο κατώφλι και να γίνει η πυροδότηση των παλμών. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι ότι το LIF προσθέτει και το χαρακτηριστικό της διαρροής. Ενώ στο IF το εσωτερικό δυναμικό στο νευρώνα διατηρείται μέχρι να φτάσει στο κατώφλι, στο LIF υπάρχει διαρροή δυναμικού ακόμα και αν δεν έχει ξεπεραστεί, κάτι που συμφωνεί με την ιδιότητα των νευρώνων να γυρνάνε αυτόματα στο δυναμικό χαλάρωσης. Το πιο ακριβές μοντέλο και η πιο σημαντική δουλειά, είναι αυτή των Hodgkin και Huxley, οι οποίοι με μια σειρά από άρθρα το 1952 εξήγησαν με τον καλύτερο και πιο αναλυτικό τρόπο την λειτουργία των νευρώνων[72, 73, 74, 75]. Για αυτή τους την δουλειά έλαβαν το βραβείο Nobel του 1963 της Φυσιολογίας και Ιατρικής και ακόμα και σήμερα είναι το βασικότερο μοντέλο για νευρώνες. Το HH μοντέλο λοιπόν, περιγράφει πως παράγονται οι παλμοί από τους νευρώνες μέσω της λειτουργίας των καναλιών διάφορων ιόντων, που έχει η κυτταρική μεμβράνη. Σε ένα απλοποιημένο HH μοντέλο μπορούν να ληφθούν υπόψιν μόνο τα κανάλια ιόντων Νατρίου Na^+ και Καλίου K^+ . Την αγωγιμότητα των καναλιών ελέγχει το δυναμικό της μεμβράνης που δημιουργείται λόγω διαφορετικών συγκεντρώσεων

ιόντων, εντός και εκτός μεμβράνης. Όταν το εσωτερικό δυναμικό φτάνει προς το δυναμικό κατωφλίου, τα κανάλια των ιόντων αρχίζουν να λειτουργούν διαδοχικά. Το άνοιγμα του καναλιού Na^+ έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή ιόντων Νατρίου και την αύξηση του δυναμικού της μεμβράνης. Στη συνέχεια, όταν το δυναμικό φτάσει στη μέγιστη τιμή, τα κανάλια Na^+ αρχίζουν να μειώνουν την αγωγιμότητά τους, ενώ τα κανάλια K^+ αυξάνουν την προς τα έξω αγωγιμότητά τους, επιτρέποντας στα ιόντα Καλίου να φύγουν και να μειωθεί το δυναμικό της μεμβράνης. Αυτή η εναλλάξ λειτουργία των καναλιών είναι ο μηχανισμός παραγωγής παλμών και μπορεί να φανεί και στην Εικόνα 3.2. Η κίνηση των K^+ είναι πιο αργή από αυτή των Na^+ και για αυτό το λόγο η μορφή η χαλάρωση των παλμών είναι πιο αργή.



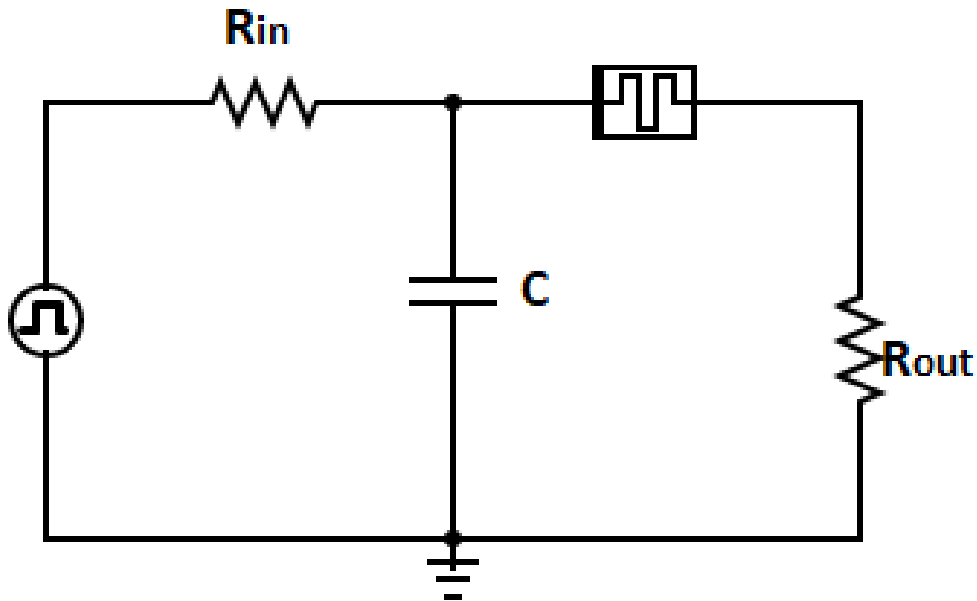
Εικόνα 3.2: α) Βιολογική νευρωνική μεμβράνη με κανάλια Na^+ και K^+ . β) Παραγωγή ηλεκτρικού παλμού από το νευρώνα.[76]

Τα χαρακτηριστικά των νευρώνων και τα επιμέρους μοντέλα φαίνεται ότι μπορούν να τα καλύψουν τα πτητικά memristors. Η ιδιότητά τους να επιστρέφουν στην HRS σε ελάχιστο χρόνο από τη μετάβασή τους στην LRS τα κάνει ιδανικά για να αποτελέσουν μέρη[70] ή και ολόκληρους νευρώνες[20] και παραδείγματα τεχνητών νευρώνων όλων των μοντέλων έχουν παρουσιαστεί. Ο M. Pickett et al. έφτιαξαν ένα νευρώνα βασισμένο στο μοντέλο HH, με δύο Mott memristors, δομής $Pt/Nb_2O_5/Pt$ να προσομοιώνουν τα κανάλια ιόντων[77]. Οι μονωτές Mott επιδεικνύουν αλλαγή φάσης, μέσω θέρμανσης Joule, από μονωτές σε αγωγούς και άρα διαφορετικές καταστάσεις αντίστασης, αποτελώντας ιδανικά υλικά για memristors. Σημειώνεται ότι δεν έχουν παρουσιαστεί εφαρμογές με HH νευρώνες ακόμα και κυρίως η έρευνα σε αυτούς επικεντρώνεται στην προσομοίωση των βιολογικών λειτουργιών, λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Ο X. Zhang et al. παρουσίασαν ένα νευρώνα IF με τη χρήση ενός TS ECM memristor δομής $Ag/SiO_2/Au$ σε ένα κύκλωμα με παράλληλο πυκνωτή[70]. Κατάφεραν να αποδείξουν ότι ο τεχνητός νευρώνας τους καλύπτει όλα τα χαρακτηριστικά των νευρώνων και να το χρησιμοποιήσουν επιτυχώς σε νευρωνικό δίκτυο για αναγνώριση αριθμητικών ψηφίων. Ακόμα, ο K. Wang et al. παρουσίασαν ένα LIF νευρώνα με δομή $Pt/CuS/GeSe/SiO_2/Pt$, ικανό για στοχαστική παραγωγή παλμών[78]. Η λειτουργία του memristor στηρίζεται στον τυχαίο σχηματισμό του CF και ο LIF νευρώνας χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός νευρωνικού δικτύου.

Επίσης έχουν γίνει βήματα προς τον συνδυασμό των υπάρχοντων τεχνητών νευρώνων με αισθητήρες για την δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων αίσθησης. Ο J. Zhu et al. κατασκεύασαν έναν τεχνητό υποδοχέα πόνου με τη χρήση ενός αισθητήρα πίεσης και ενός νερώνα με memristor δομής $Ti/Pt/NbO_x/Ti/Pt$ [79]. Ο αισθητήρας ρυθμίζει, μέσω της αλλαγής της αντίστασης του, το χρόνο φόρτισης $\tau = RC$ ενός πυκνωτή, που με τη σειρά του επηρεάζει την κατάσταση αντίστασης του memristor. Κατάφεραν η συσκευή τους να καλύψει τα κριτήρια για ένα υποδοχέα πόνου, όπως η ικανότητα να γίνεται πιο ευαίσθητος μετά από ένα τραυματικό ερέθισμα και να δίνει σήμα σε παλμούς. Ο T. Fu et al. εφηύραν έναν αισθητήρα υγρασίας για νευρομορφικές εφαρμογές με το συνδυασμό memristor με πρωτεϊνικά νανοσύρματα και αισθητήρα υγρασίας με πρωτεϊνικά νανοσύρματα[80]. Πέτυχαν να είναι η συσκευή τους αυτοσυντηρούμενη, καθώς παράγει ενέργεια από το περιβάλλον της, να είναι οικολογική, λόγω της χρήσης των πρωτεϊνικών νανοσυρμάτων και κυρίως να έχει συμφωνία ανάμεσα στις εντάσεις του περιβαλλοντικού ερεθίσματος και του σήματος που χρειάζεται για να λειτουργήσει το memristor. Ακόμα, ο Y. Pei et al. παρουσίασαν ένα απολύτως βασισμένο σε memristor τεχνητό σύστημα τεχνητής αντίληψης[81]. Ένα φωτοβολταϊκό memristors με νανοσωματίδια PbS δομής $TiN/PbS QDs/ITO$, έχει το ρόλο του αισθητήρα φωτός και της σύναψης και ένα TS memristor με δομή $Ag/MoS_2/Ag/MoO_x/Ag$ προσθέτεται ως το ενεργό στοιχείο σε ένα νευρώνα LIF. Τα δύο στοιχεία συνδέονται και αποτελούν ένα ολοκληρωμένο νευρομορφικό σύστημα όρασης, με πιθανή εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία και πιο ειδικά για την αυτόματη μείωση ταχύτητας, σε περίπτωση που τα φώτα αυτοκινήτου στο αντίθετο ρεύμα θαμπώσουν τον οδηγό, σε νυχτερινή οδήγηση.

3.2 Ανάλυση Λειτουργίας Τεχνητού Νευρώνα LIF

Ίσως η πιο διαδεδομένη μορφή τεχνητού νευρώνα μέχρι τώρα, είναι αυτή του μοντέλου LIF. Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται το κύκλωμα ενός τεχνητού νευρώνα LIF. Αποτελείται από μια γεννήτρια θετικών παλμών τάσης που τροφοδοτεί το κύκλωμα, από μια αντίσταση R_{out} και έναν πυκνωτή C που συνδέονται παράλληλα με το πτητικό memristor και μια αντίσταση R_{in} που έχει ρόλο παρόμοιο με μια σύναψη, αφού μπορεί να ρυθμίζει το ρεύμα που ρέει στο υπόλοιπο κύκλωμα. Αρχικά, καθώς λειτουργεί η πλαμογεννήτρια, φορτίζει σταδιακά τον πυκνωτή, ενώ παράλληλα δεν περνάει ρεύμα προς το memristor, λόγω της κατάστασης υψηλής αντίστασης στην οποία βρίσκεται. Όσο φορτίζει ο πυκνωτής, η τάση στα άκρα του αυξάνεται και συνεπώς αυξάνεται και η τάση στα άκρα του κλάδου με το memristor. Όταν η τάση φτάσει την τιμή της τάσης κατωφλίου του memristor, τότε αυτό μεταβαίνει στην LRS. Πλέον, με την χαμηλότερη αντίσταση του memristor, το ρεύμα μπορεί να περάσει και στο δεξιό βρόχο και ο πυκνωτής αποφορτίζεται. Σύντομα όμως η τάση του πυκνωτή θα πέσει κάτω από την τιμή κατωφλίου και η πτητική φύση του memristor θα το κάνει να επανέλθει πολύ σύντομα στην HRS, με αποτέλεσμα να σταματήσει γρήγορα και η ροή ρεύματος δεξιά. Έτσι παράγεται ένας παλμός τάσης από το memristor και στη συνέχεια ο νευρώνας ετοιμάζεται ξανά για την παραγωγή του επόμενου. Η τάση στα άκρα του πυκνωτή και η εμφάνιση των παλμών στα άκρα της R_{out} μπορούν να ελεγχθούν με την χρήση παλμογράφου.



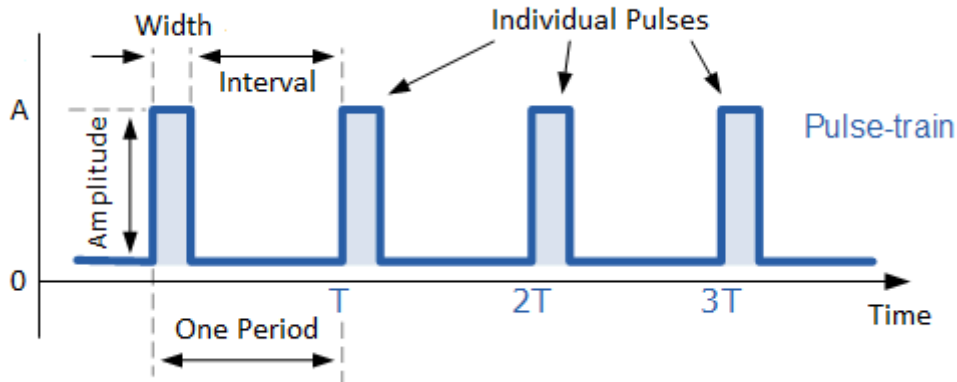
Εικόνα 3.3: Κύκλωμα τεχνητού νευρώνα Leaky Integrate-and-fire.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος και της μεθόδου επιλογής των κατάλληλων κυκλωματικών στοιχείων, είναι βοηθητικό να χωριστεί νοητά το κύκλωμα σε δύο επιμέρους RC κυκλώματα. Ο αριστερός βρόχος μπορεί να ονομασθεί βρόχος φόρτισης του πυκνωτή και ο δεξιός βρόχος εκφόρτισης. Όταν το memristor βρίσκεται στην HRS δεν θα περνάει ρεύμα στον δεξιό βρόχο και θα γίνεται φόρτιση του πυκνωτή. Η παλμογεννήτρια παρέχει στο κύκλωμα παλμοσειρές ορθογώνιων θετικών παλμών που χαρακτηρίζονται από την τάση τους, το πλάτος w και το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα των παλμών d . Η περίοδος της παλμοσειράς ισούται με το άθροισμα του πλάτους και του ενδιάμεσου διαστήματος $T = w + d$ και άρα η συχνότητα θα είναι $f = 1/(w + d)$. Η μορφή της παλμοσειράς φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Κατά τη διάρκεια του πλάτους του παλμού μπορεί να θεωρηθεί ότι το κύκλωμα έχει μια σταθερή πηγή τάσης που φορτίζει τον πυκνωτή, ενώ στο ενδιάμεσο διάστημα είναι ένα απλό κύκλωμα RC, κατά το οποίο ο πυκνωτής αποφορτίζεται μέσω της αντίστασης. Αντίστοιχα και ο δεξιός βρόχος θα είναι ένα απλό κύκλωμα RC.

Κατά τη διάρκεια του πλάτους του παλμού λοιπόν, και χρησιμοποιώντας το δεύτερο κανόνα του Kirchhoff, έχουμε:

$$A - I(t)R_{in} - V_c(t) = 0 \Rightarrow A - \frac{dQ(t)}{dt}R_{in} - \frac{Q(t)}{C} = 0 \quad (3.1)$$

όπου A το ύψος του παλμού και Q το φορτίο του πυκνωτή. Η εξίσωση αυτή είναι μια δια-



Εικόνα 3.4: Μια παλμοσειρά θετικών παλμών με εμφανή την περίοδο, το πλάτος και το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα των παλμών.

φορική εξίσωση 1ου βαθμού και μπορεί να λυθεί με διαχωρισμό μεταβλητών.

$$\begin{aligned}
 A - \frac{dQ(t)}{dt} R_{in} - \frac{Q(t)}{C} &= 0 \Rightarrow \frac{dQ(t)}{dt} R_{in} = A - \frac{Q(t)}{C} \Rightarrow \\
 \frac{dQ(t)}{(A - \frac{Q(t)}{C})} &= \frac{1}{R_{in}} dt \Rightarrow \frac{dQ(t)}{AC - Q(t)} = \frac{1}{R_{in}C} dt \Rightarrow \\
 \frac{dQ(t)}{Q(t) - AC} &= -\frac{1}{R_{in}C} dt \Rightarrow \int_0^Q \frac{dQ'(t)}{Q'(t) - AC} = \int_0^t -\frac{1}{R_{in}C} dt' \Rightarrow \\
 \ln\left(\frac{Q - AC}{AC}\right) &= -\frac{1}{R_{in}C} t \Rightarrow \frac{Q - AC}{AC} = e^{-t/R_{in}C} \Rightarrow Q(t) = AC(1 - e^{-t/R_{in}C}) \Rightarrow \\
 Q(t) &= Q_{max}(1 - e^{-t/\tau})
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Η έκφραση αυτή είναι η έκφραση για το φορτίο του πυκνωτή, ενώ η μεταβλητή τ είναι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος RC και ισούται με το χρόνο που χρειάζεται για να φορτιστεί ο πυκνωτής στο 62.3% της εφαρμοζόμενης τάσης. Είναι ένας τρόπος να φανεί εύκολα το πόσο γρήγορη απόκριση έχει ένα κύκλωμα. Το μέγιστο φορτίο του πυκνωτή θα είναι ίσο με το γινόμενο της τάσης και της χωρητικότητάς του.

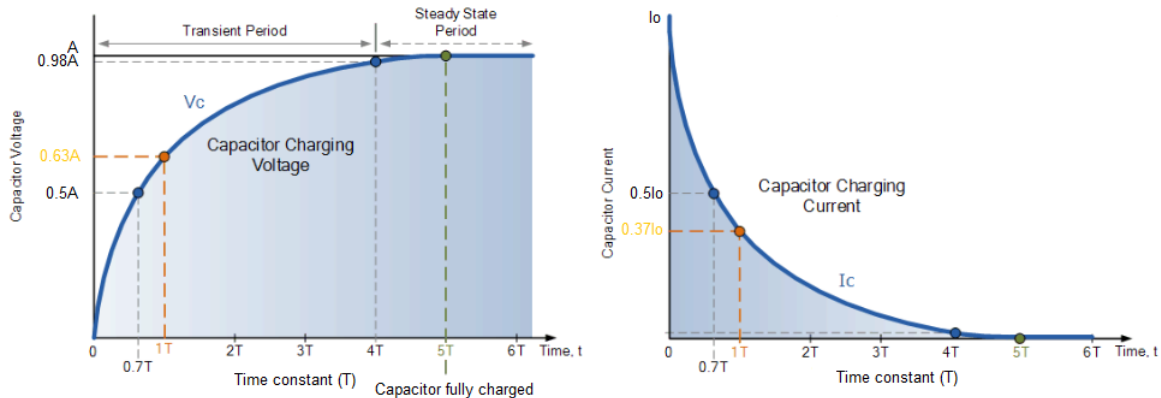
Μέσω της σχέσης για το φορτίο του πυκνωτή, μπορεί να βρεθεί και η τάση στα άκρα του:

$$\begin{aligned}
 V_c(t) &= \frac{Q(t)}{C} \Rightarrow \\
 V_c(t) &= A(1 - e^{-t/\tau})
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

αλλά και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα:

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{Q_{max}}{R_{in}C} e^{-t/\tau} \Rightarrow \\
 I(t) &= I_0 e^{-t/\tau}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Καθώς το φορτίο, και άρα η τάση στα άκρα του πυκνωτή, αυξάνεται, το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα μειώνεται. Στην Εικόνα 3.5 φαίνονται οι αποκρίσεις ρεύματος και τάσης του κυκλώματος. Περίπου μετά από χρονικό διάστημα 5τ ο πυκνωτής έχει φορτιστεί πλήρως και το ρεύμα στο κύκλωμα μηδενίζεται.



Εικόνα 3.5: Απόκριση τάσης και ρεύματος σε κύκλωμα RC φόρτισης πυκνωτή.

Κατά την διάρκεια του ενδιαμέσου διαστήματος μεταξύ των παλμών, αλλά και στην περίπτωση του δεξιού βρόχου, τα κυκλώματα θα είναι απλά κυκλώματα RC και ο πυκνωτής θα έχει εξ αρχής φορτίο Q . Από τον δεύτερο κανόνα του Kirchhoff θα είναι για τον αντιστερό βρόχο:

$$V_c(t) - I(t)R_{in} = 0 \Rightarrow \frac{Q(t)}{C} + \frac{dQ(t)}{dt}R_{in} = 0 \quad (3.5)$$

Η παραπάνω σχέση είναι μια διαφορική εξίσωση πρώτου βαθμού και λύνεται με διαχωρισμό μεταβλητών.

$$\begin{aligned} \frac{Q(t)}{C} &= -\frac{dQ(t)}{dt}R_{in} \Rightarrow \frac{dQ(t)}{Q(t)} = -\frac{dt}{R_{in}C} \Rightarrow \\ \int_{Q_{max}}^Q \frac{dQ'(t)}{Q'(t)} &= -\frac{1}{R_{in}C} \int_0^t dt \Rightarrow \ln\left(\frac{Q}{Q_{max}}\right) = -\frac{t}{R_{in}C} \Rightarrow \\ Q(t) &= Q_{max}e^{-t/\tau} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Άρα η τάση στα άκρα του πυκνωτή θα είναι:

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C} \Rightarrow V(t) = V_0e^{-t/\tau} \quad (3.7)$$

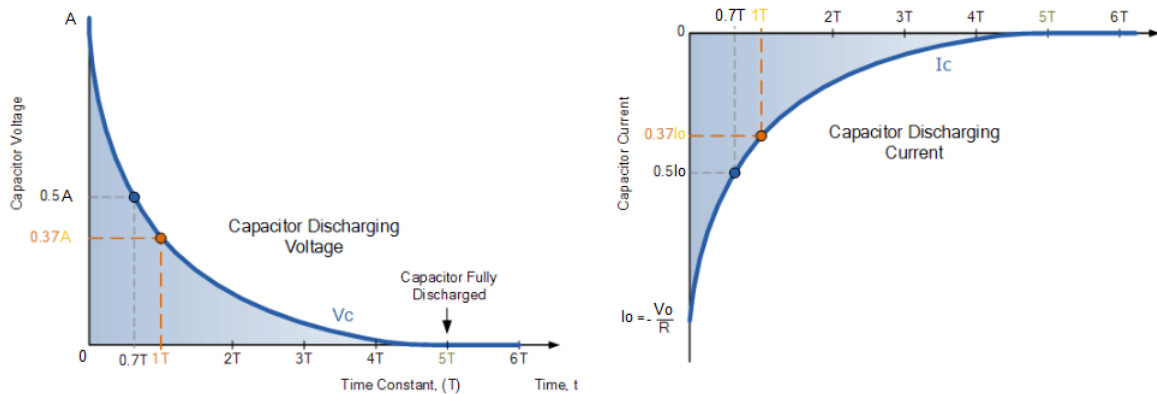
όπου V_0 η αρχική τάση στα άκρα του πυκνωτή. Το αντίστοιχο ρεύμα θα είναι:

$$I(t) = -\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{Q_{max}}{\tau}e^{-t/\tau} \Rightarrow I(t) = I_0e^{-t/\tau} \quad (3.8)$$

όπου I_0 το αρχικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα.

Στην Εικόνα 3.6 φαίνονται οι γραφικές της τάσης και του ρεύματος στον πυκνωτή. Ξεκινώντας από την αρχική τάση και φορτίο του πυκνωτή, στο κύκλωμα θα εμφανιστεί

ρεύμα που θα οδηγήσει στην σταδιακή αποφόρτιση του πυκνωτή μέσω της αντίστασης. Το ρεύμα εμφανίζεται αρνητικό γιατί θα έχει την αντίστροφη φορά από αυτή της φόρτισης. Όσο περνάει ο χρόνος, η τάση και το ρεύμα θα μειώνονται εκθετικά μέχρι μηδενισμό λόγω της πλήρους αποφόρτισης του πυκνωτή. Μετά από χρονικό διάστημα 5τ και πάλι, η αποφόρτιση του πυκνωτή θα είναι πλήρης. Για τον δεξιό βρόχο θα ισχύουν τα ίδια με τη διαφορά πως η σταθερά χρόνου του κυκλώματος RC θα είναι ίση με $\tau = (R_{out} + R_m)C$, όπου R_m η αντίσταση του memristor.

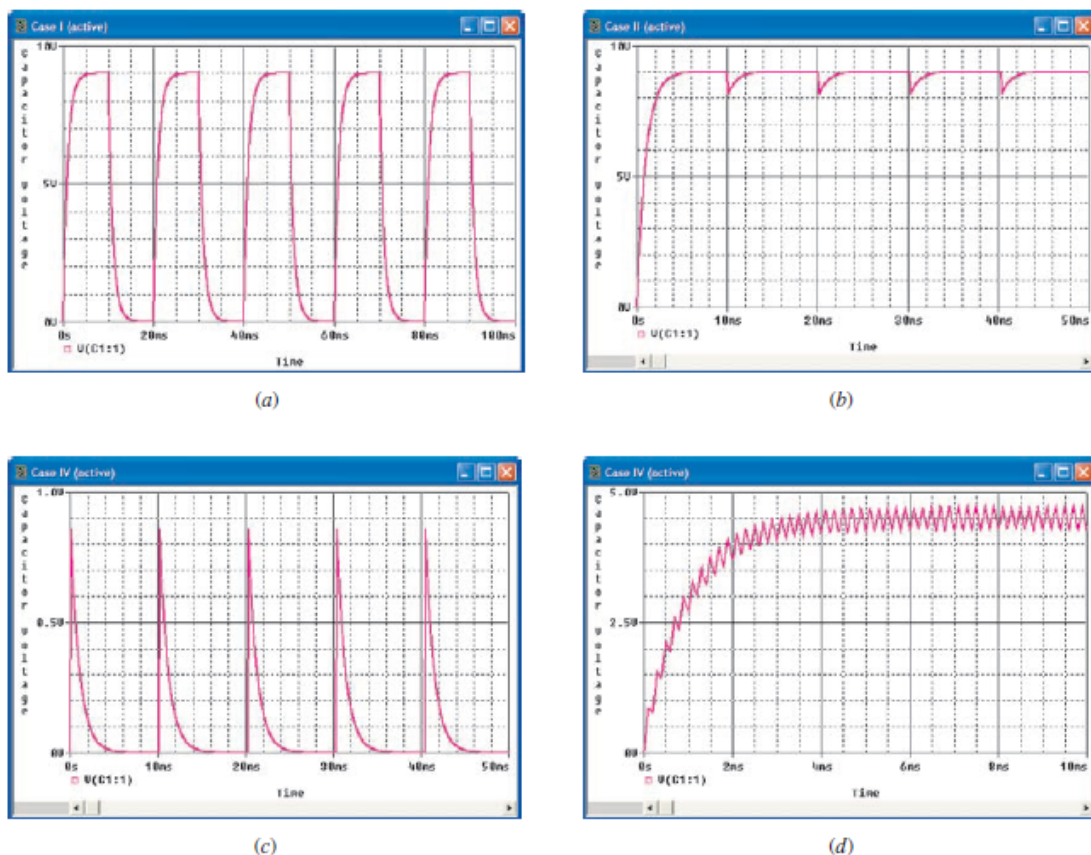


Εικόνα 3.6: Απόκριση τάσης και ρεύματος σε κύκλωμα RC εκφόρτισης πυκνωτή.

Η συνολική απόκριση του αριστερού βρόχου θα εξαρτάται από τις παραμέτρους της παλμοσειράς και την χρονική σταθερά τ . Πιο ειδικά, η φόρτιση του πυκνωτή θα εξαρτάται από τη σύγκριση μεταξύ πλάτος παλμού w και της σταθεράς τ και η εκφόρτισή του από τη σύγκριση μεταξύ του ενδιάμεσου διαστήματος d των παλμών και της σταθεράς τ . Υπάρχουν 4 πιθανές περιπτώσεις:

1. Υπάρχει αρκετός χρόνος για φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή.
($\tau \ll w$ & $\tau \ll d$)
2. Υπάρχει αρκετός χρόνος για φόρτιση, αλλά όχι για εκφόρτιση του πυκνωτή.
($\tau \ll w$ & $\tau \gg d$)
3. Δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για φόρτιση, αλλά υπάρχει για εκφόρτιση του πυκνωτή.
($\tau \gg w$ & $\tau \ll d$)
4. Δεν υπάρχει αρκετός χρόνος ούτε για φόρτιση, ούτε για εκφόρτιση του πυκνωτή.
($\tau \gg w$ & $\tau \gg d$)

Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της τάσης του πυκνωτή, για κάθε περίπτωση, φαίνονται στην Εικόνα 3.7. Είναι εμφανές πως όταν δεν υπάρχει αρκετός χρόνος, οι φορτίσεις και οι εκφορτίσεις είναι ατελείς και ειδικά στην τέταρτη περίπτωση η εναλλαγή φόρτισης εκφόρτισης καταλήγει σε ταλαντωτική συμπεριφορά γύρω από μια μέση τιμή τάσης, πολύ μικρότερης φυσικά της μέγιστης τιμής.



Εικόνα 3.7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με την εφαρμογή PSpice που αντιστοιχούν στην περίπτωση 1(a), 2(b), 3(c) και 4(d). [82]

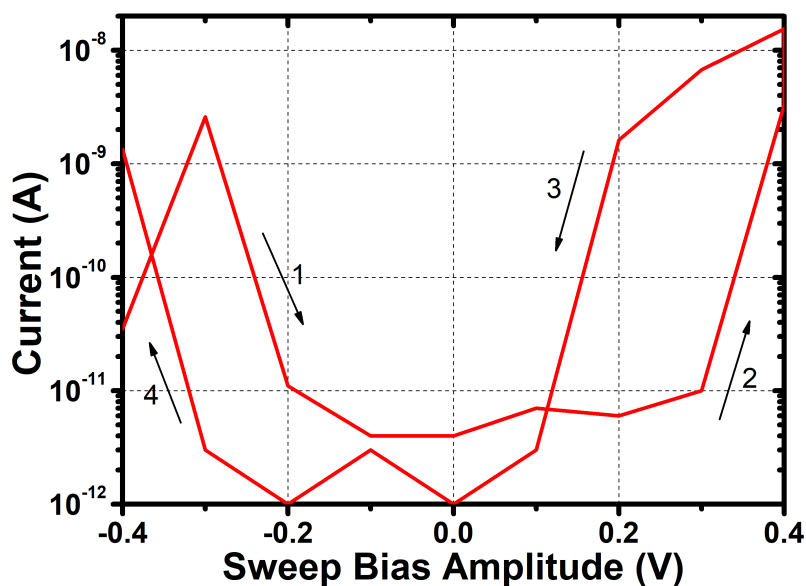
Η ομαλή λειτουργία του κυκλώματος βασίζεται στην σωστή επιλογή των κυκλωματικών στοιχείων. Θα πρέπει κατά την φόρτιση του πυκνωτή, η σταθερά χρόνου τ του βρόχου φόρτισης να είναι μικρότερη από αυτή του χρόνου αποφόρτισης και αντίστροφα, κατά την αποφόρτιση η τ του βρόχου αποφόρτισης μικρότερη από αυτή της φόρτισης [83]. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η σταθερά χρόνου του βρόχου φόρτισης είναι $\tau = R_{in}C$ και του βρόχου αποφόρτισης $\tau = (R_m + R_{out})C$. Για την R_{out} πρέπει να επιλεχτεί μια τιμή αντίστασης αρκετά μεγάλη ώστε να έχει μεγάλη πτώση στα άκρα της και να εμφανίζονται οι παλμοί και αρκετά μικρή ώστε να μην εμποδίζει τη διαρροή του memristor και την παραγωγή των παλμών [84]. Για την R_{in} , η επιλογή μιας μέσης τιμής στο εύρος του παραθύρου αντίστασης του memristor, είναι η ιδανική για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Τέλος για τον πυκνωτή, όσο μικρότερη είναι η τιμή της χωρητικότητας, τόσο πιο συχνή είναι η παραγωγή των παλμών. Άρα είναι σωστό να επιλεχθεί μια χωρητικότητα ούτε πολύ μικρή αλλά ούτε και μεγάλη, για να είναι διακριτές οι αλλαγές στην συχνότητα των παλμών όταν μεταβάλλεται το ερέθισμα.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, αυτό το κύκλωμα είναι καλύτερο από τα αντίστοιχα κυκλώματα που έχουν παρουσιαστεί και βασίζονται στην τεχνολογία CMOS, καθώς χρησιμοποιούν πολύ περισσότερα κυκλωματικά στοιχεία και έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση

ενέργειας[69]. Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντικό να αναφερθεί και η περίπτωση όπου ένα μόλις memristor μπορεί να προσομοιώσει όλη τη λειτουργία ενός LIF τεχνητού νευρώνα. Για παράδειγμα, ο Stoliar et al. έδειξαν πως ένα memristor Mott με $GaTa_4Se_8$ μπορεί να επιδείξει όλες τις ιδιότητες των LIF νευρώνων χωρίς τη χρήση εξωτερικού κυκλώματος[85]. Η συσκευή τους λειτουργεί με την συσσώρευση μεταλλικών επιπέδων στο υλικό Mott. Ακόμα ο Bousoulas et al. κατασκεύασαν ένα memristor με δομή $Ag/SiO_x/TiN$, με διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου, που λειτουργεί ως LIF νευρώνας από μόνο του[20]. Αυτό το TS memristor έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί CF τα οποία σπάνε μόνο κοντά στην διεπαφή με το ΙΕ. Έτσι το μεγαλύτερο μέρος του CF παραμένει άθικτο και λειτουργεί σαν ένας πυκνωτής με διαρροή.

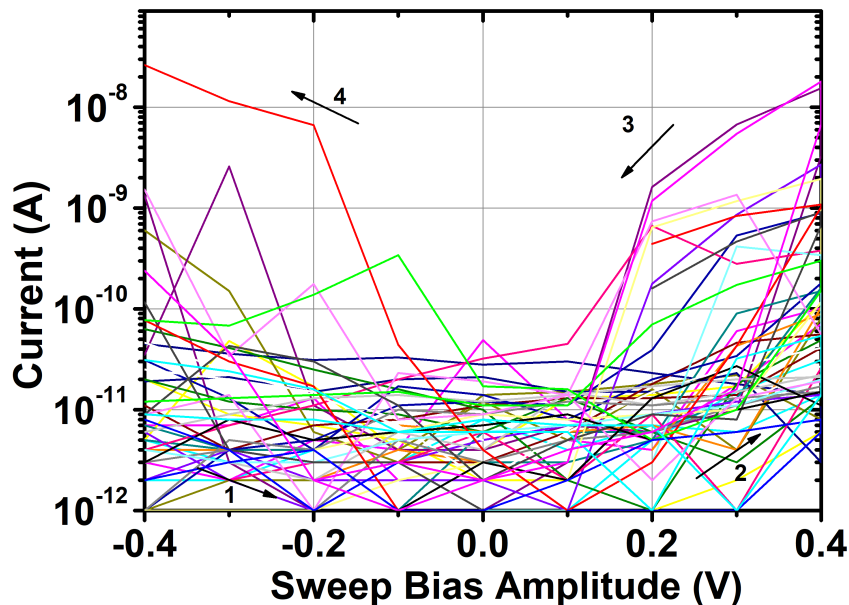
3.3 Νευρώνας με παλμογεννήτρια και $Ag/SiO_2/TiN$ memristor

Η πρώτη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του τεχνητού νευρώνα LIF είναι αυτή της Εικόνας 3.3, σε συνδυασμό με το δείγμα αναφοράς του προηγούμενου μέρους, δομής $Ag/SiO_2/TiN$. Το δείγμα, όπως αναφέρθηκε εκτενώς προηγουμένως, επιδεικνύει και MS και TS λειτουργία και στην Εικόνα 3.8 φαίνεται το TS της, που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του νευρώνα, ενώ η Εικόνα 3.9 δείχνει τις καμπύλες 20 διαφορετικών διατάξεων.



Εικόνα 3.8: Threshold καμπύλη I-V δείγματος $Ag/SiO_2/TiN$.

Η μετάβαση στην LRS γίνεται για 0.3 V και το παράθυρο μνήμης των διατάξεων είναι



Εικόνα 3.9: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V 20 διαφορετικών TS διατάξεων.

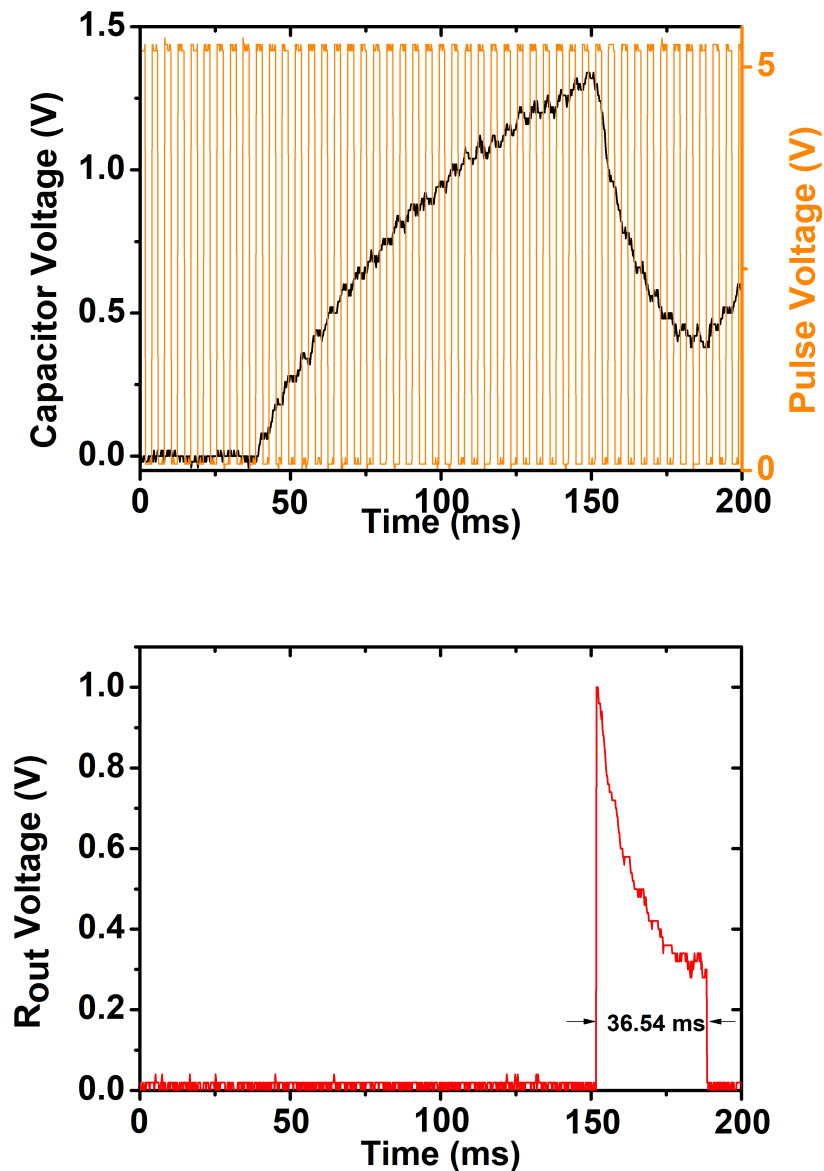
μεταξύ 2 και 3 τάξεων μεγέθους. Υπάρχουν σημαντικές μεταβολές από διάταξη σε διάταξη, δείχνοντας ότι το TS του δείγματος δεν είναι τόσο σταθερό όσο το MS του. Τέλος το RESET γίνεται για 0.2 V. Με βάση αυτές τις παραμέτρους η συσκευή προσομοίωσε νευρωνικές λειτουργίες.

Οι τιμές των κυκλωματικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Κυκλωματικά στοιχεία	
R_{in}	474.5k Ω
C	100nF
R_{out}	19.81k Ω

Πίνακας 3.1: Κυκλωματικά στοιχεία τεχνητού νευρώνα.

Στην Εικόνα 3.10 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενός παλμού τάσης από το κύκλωμα. Με την έναρξη της λειτουργίας της παλμογεννήτριας, ο πυκνωτής αρχίζει να φορτίζεται. Οι παράμετροι της εφαρμοζόμενης παλμοσειράς είναι συχνότητα 450 Hz, πλάτος 1 ms και τάση 5 V. Η φόρτιση του πυκνωτή έχει αυτή τη μορφή, λόγω του ότι δεν δίνεται αρκετός χρόνος ούτε για τη φόρτιση ούτε για την εκφόρτισή του και αυτή η περίπτωση είναι που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην βιβλιογραφία[70, 84, 83, 78, 86, 87]. Ειδικότερα, σε αυτό το κύκλωμα, η σταθερά χρόνου του αριστερού βρόχου υπολογίζεται στα

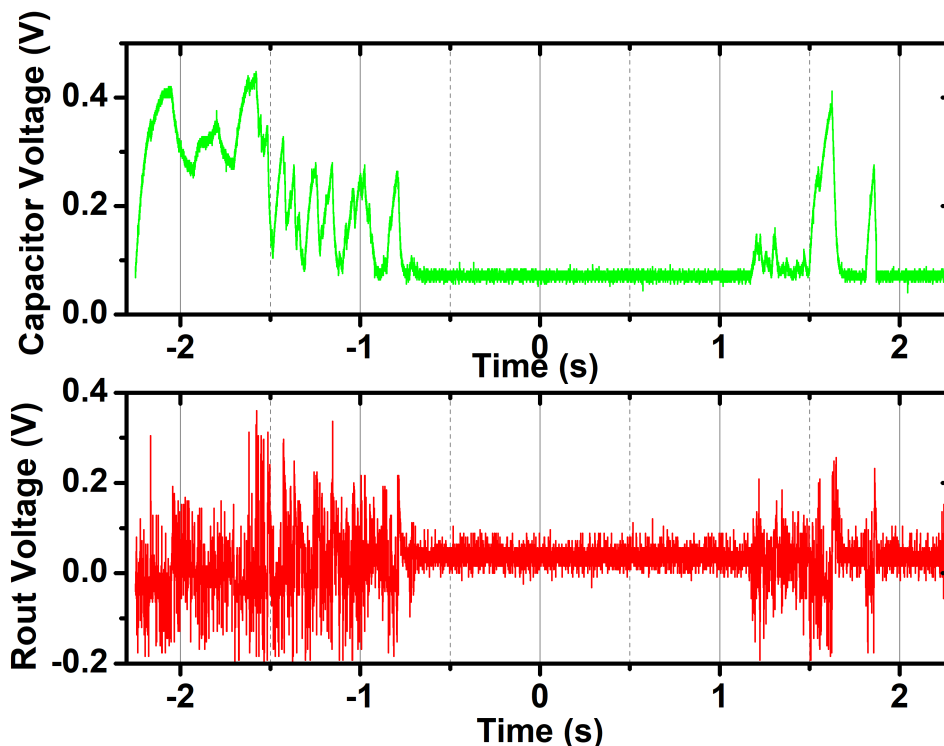


Εικόνα 3.10: Παλμοσειρά και φόρτιση του πυκνωτή (πάνω). Παραγωγή παλμού (κάτω).

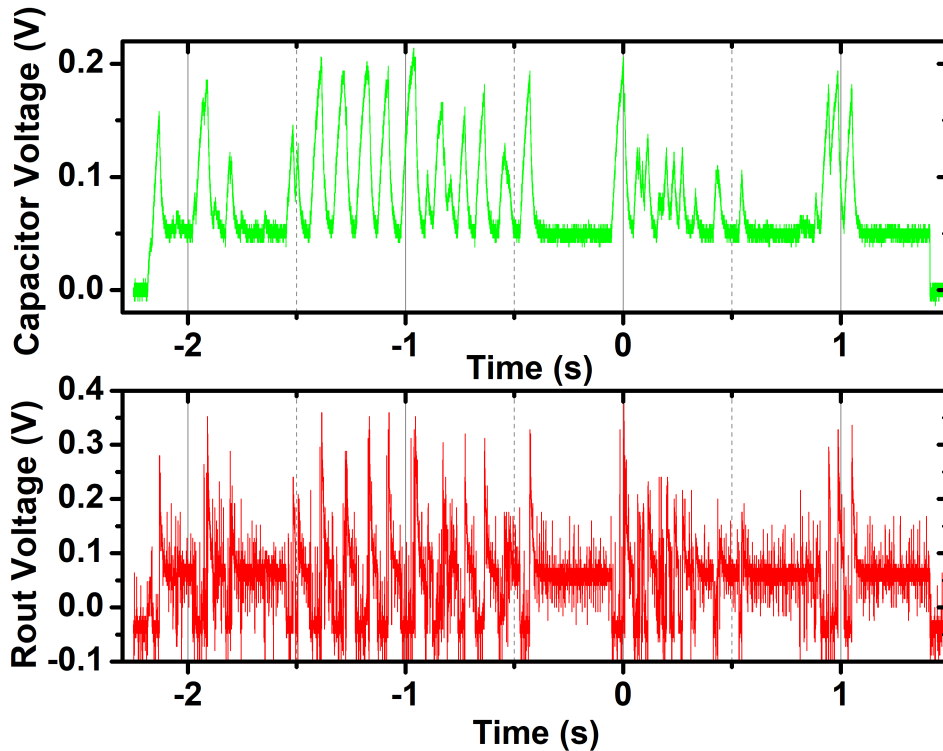
$\tau = R_{in}C = 47ms$, που είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος και το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα της παλμοσειράς που είναι γύρω 1 ms. Στην προκειμένη περίπτωση, για την ενεργοποίηση του memristor, χρειάστηκε η τάση του πυκνωτή να φτάσει περίπου στα 1.3 V και, αν και θεωρητικά η τιμή αυτή φαίνεται μεγαλύτερη της τάσης κατωφλίου για την μετάβαση στην LRS, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η πτώση τάσης στα άκρα του memristor θα είναι μικρότερη από την τάση στα άκρα του πυκνωτή και ότι η μεταβολή των παραμέτρων του TS είναι μεγάλη από διάταξη σε διάταξη, τότε αυτή η απόκλιση μπορεί να δικαιολογηθεί. Επιπλέον, το ύψος του παλμού είναι ίσο με αυτό της πτώσης τάσης στα άκρα του πυκνωτή

και αν και δεν υπάρχει πλήρης αποφόρτιση, η διατήρηση ενέργειας επιβεβαιώνεται. Κατά την χρονική διάρκεια του παλμού δεν υπάρχει περαιτέρω φόρτιση του πυκνωτή, λόγω του ότι οι παλμοί καταλλήγουν στον δεξιό βρόχο και αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να σχετιστεί με την περίοδο ανθεκτικότητας των βιολογικών νευρώνων[70]. Εδώ η περίοδος ανθεκτικότητας μετριέται στα 36.54 ms. Όταν το TS memristor επανέλθει στην HRS τότε ο πυκνωτής μπορεί να αρχίσει πάλι να φορτίζεται. Τέλος, η ουρά που παρατηρείται στους παλμούς είναι λόγω των παραπάνω σε συνδυασμό με τον χρόνο χαλάρωσης του CF του TS memristor[83].

Στη συνέχεια εξετάστηκε η ικανότητα του τεχνητού νευρώνα να παρουσιάζει ρυθμιζόμενη συχνότητα παραγωγής παλμών ανάλογα με την ένταση του ερεθίσματος. Στις Εικόνες 3.11 και 3.12 φαίνονται δύο περιπτώσεις με διαφορετικές παραμέτρους εφαρμοζόμενης παλμοσειράς, μιας ασθενέστερης και μιας εντονότερης. Στην Εικόνα 3.11 η παλμοσειρά ορθογώνιων παλμών έχει ύψος 1 V, συχνότητα 7 kHz και πλάτος 50 μ s, ενώ στην Εικόνα 3.12 έχει πλάτος 1 V, συχνότητα 1 kHz και πλάτος 500 μ s. Η δεύτερη περίπτωση, αν και έχει μικρότερη συχνότητα, αποδίδεται στο εντονότερο ερέθισμα, λόγω μεγαλύτερου κύκλου λειτουργίας (Duty Cycle). Ο κύκλος λειτουργίας είναι το κλάσμα μιας περιόδου όπου μια συσκευή ή ένα σήμα είναι ενεργά και λόγω του ίδιου ύψους των παλμών μπορεί να μας δώσει συμπέρασμα για το ποια παλμοσειρά είναι πιο έντονη. Εδώ, ο κύκλος λειτουργίας της πρώτης παλμοσειράς υπολογίζεται στο 35% και της δεύτερης στο 50%.



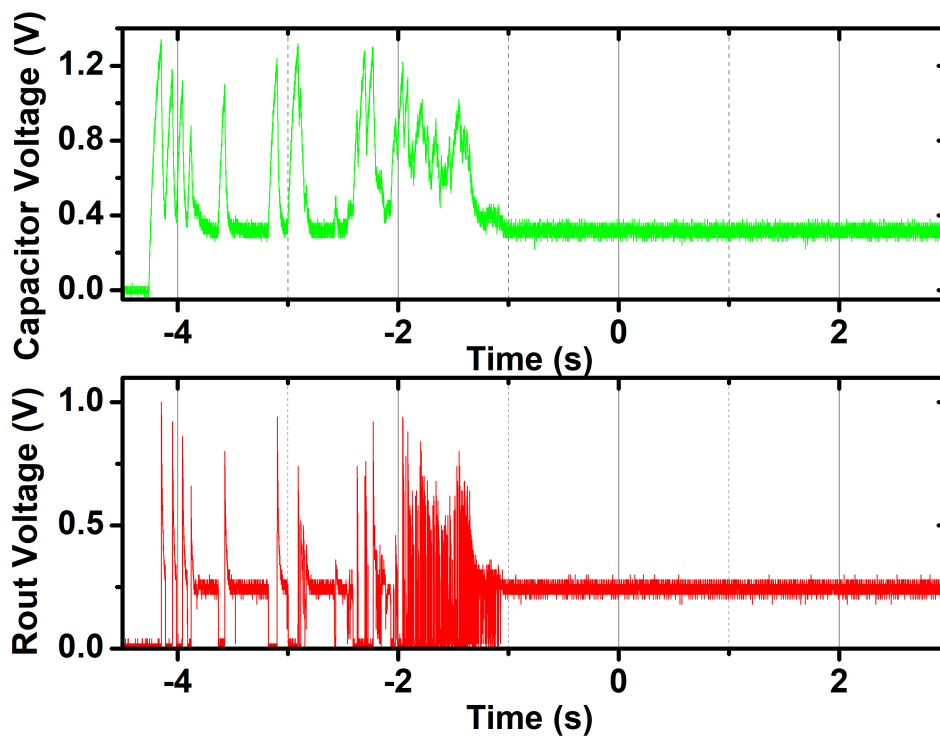
Εικόνα 3.11: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 1 V, 7 kHz, 50 μ s.



Εικόνα 3.12: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 1 V, 1 kHz, 500 μ s.

Είναι εμφανές ότι ο αριθμός των παλμών με το εντονότερο ερέθισμα, είναι αισθητά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο με το ασθενέστερο. Πιο συγκεκριμένα, από τα περίπου 5 Hz συχνότητα παραγωγής παλμών στην πρώτη περίπτωση, καταλήγει στα περίπου 7 Hz συχνότητα παλμών στην δεύτερη. Στα γραφήματα και ιδιαίτερα στην τάση της R_{out} , υπάρχει θόρυβος που αποδίδεται στην καλωδίωση και αντιμετωπίστηκε με την κατασκευή καλύτερων καλωδίων. Στον θόρυβο οφείλεται και το γεγονός πως στο δεύτερο γράφημα φαίνεται να ξεπερνάνε σε τάση οι παλμοί, την τάση του πυκνωτή, κάτι που θα ήταν αδύνατο και θα ερχόταν σε αντίθεση με τα προαιρετικά χαρακτηριστικά για να θεωρηθεί ένας τεχνητός νευρώνας σωστός. Αντίθετα στο πρώτο γράφημα, που ο θόρυβος δεν είναι τόσο έντονος, τα ύψη των παλμών συμφωνούν με την τάση του πυκνωτή. Επίσης να σημειωθεί ότι εδώ η τάση του πυκνωτή φτάνει μέχρι τα 0.4 V που είναι και πιο κοντά στο κατώφλι δυναμικού της μετάβασης στην LRS. Τέλος, επιβεβαιώνεται και η "leaky" λειτουργία του νευρώνα, καθώς, με μεγαλύτερο ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ των παλμών (μικρότερο duty cycle), παράγονται λιγότεροι παλμοί, επειδή χρειάζονται περισσότεροι παλμοί για να φορτιστεί ο πυκνωτής[87].

Στην Εικόνα 3.13 φαίνεται μια ακόμα περίπτωση παραγωγής παλμών από το κύκλωμα. Εδώ όμως, μετά την αρχική παλμική δραστηριότητα, ο νευρώνας σταματάει να παράγει περαιτέρω παλμούς και η τάση στην R_{out} κολλάει σε μια ενδιάμεση τιμή, συγκρίσιμη με αυτή της τάσης του πυκνωτή. Αυτό συμβαίνει γιατί το memristor από TS μεταβαίνει σε MS τρόπο λειτουργίας. Λόγω της διπλής φύσης του μηχανισμού εναλλαγής καταστάσεων του



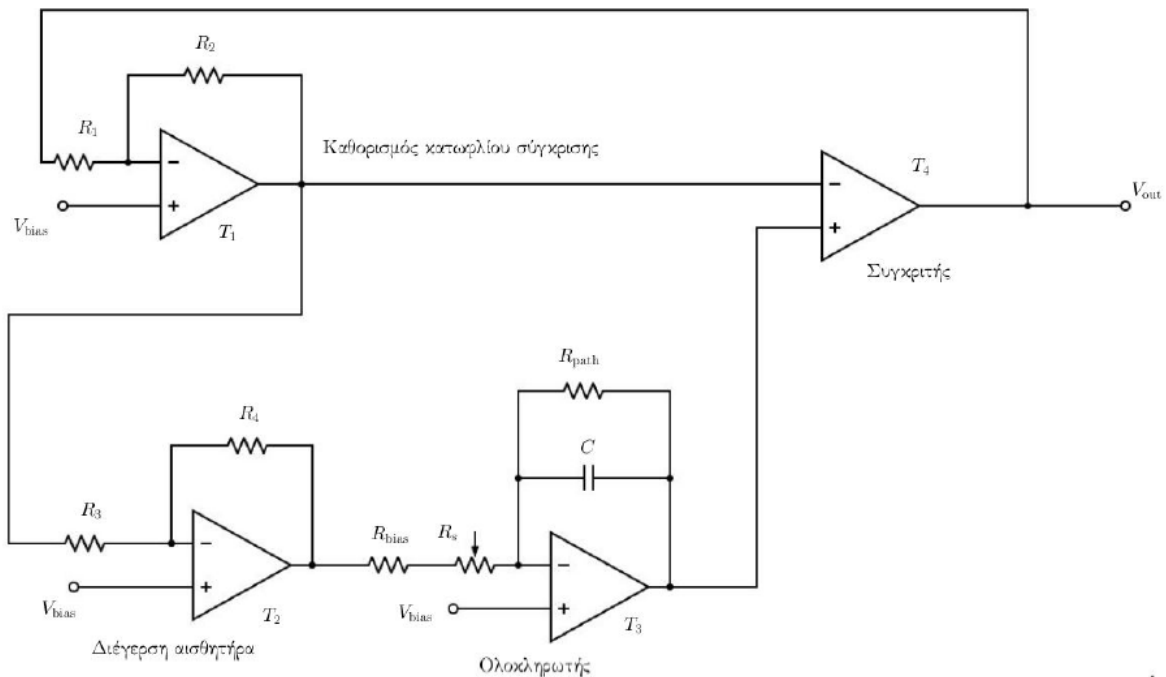
Εικόνα 3.13: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 5 V, 450 Hz, 1 ms.

memristor και λόγω του δυνατού ερεθίσματος που εφαρμόζεται (ύψος 5 V, συχνότητα 450 Hz και πλάτος 1 ms), το CF που δημιουργείται γίνεται όλο και πιο δυνατό με αποτέλεσμα να γίνει μη πτητικό. Έτσι είναι σημαντικό να βρίσκονται οι κατάλληλες παράμετροι των παλμοσειρών ώστε το memristor να λειτουργεί ομαλά μόνο σε TS και να μην μεταβαίνει σε MS, κάτι το οποίο είναι δύσκολο αν αναλογιστεί κανείς την έλλειψη σταθερότητας χαρακτηριστικών από memristor σε memristor. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παραγωγή των παλμών είναι στοχαστική και όχι ντετερμινιστική, καθώς, όπως φαίνεται στα γραφήματα δεν υπάρχει κάποιο μοτίβο εξαγωγής παλμών από το κύκλωμα ως προς τον χρόνο ή την τάση.

3.4 Νευρώνας με κύκλωμα παραγωγής παλμών και $Ag/SiO_2/TiN$ memristor

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα κύκλωμα που μετατρέπει την DC τροφοδοσία σε παλμοσειρά θετικών ορθογώνιων παλμών ώστε να αντικαταστήσει την παλμογεννήτρια, να κάνει πιο ολοκληρωμένο το κύκλωμα και να δώσει προοπτικές περαιτέρω επεξεργασίας του τεχνητού νευρώνα και προσθήκη αισθητήρων στην διάταξη.

Στην Εικόνα 3.14 φαίνεται το διάγραμμα του κυκλώματος παραγωγής παλμών. Απο-



Εικόνα 3.14: Διάγραμμα κυκλώματος παραγωγής ορθογώνιων παλμών.

τελείται από 4 τελεστικούς ενισχυτές και τα κατάλληλα παθητικά στοιχεία. Ο T_1 καθορίζει το κατώφλι σύγκρισης με βάση το οποίο θα προκύψει η έξοδος του συγκριτή T_4 . Ο T_2 διαμορφώνει κατάλληλα το πλάτος της τετραγωνικής παλμοσειράς που τροφοδοτεί την αντίσταση R_s . Τέλος, ο T_3 παράγει ένα τριγωνικό παλμό που συγκρίνεται με την τάση κατωφλίου, ώστε να δημιουργηθεί η παλμοσειρά εξόδου, και καθορίζει, ανάλογα με την επιλογή των παθητικών στοιχείων του, την περίοδο της παλμοσειράς εξόδου.

Οι τελεστικοί ενισχυτές T_1 , T_2 , T_3 λειτουργούν στην γραμμική περιοχή με αρνητική ανάδραση και δημιουργούν συμμετρικές κυματομορφές ως προς την τάση αναφοράς στο θετικό άκρο εισόδου τους. Χρησιμοποιείται μονή τροφοδοσία και ως τάση αναφοράς επιλέγεται το μισό της τάσης τροφοδοσίας, δηλαδή $V_{bias} = V_{DD}/2 = 2.5V$. Συνεπώς, όλες οι παλμοσειρές που παράγονται από τους τελεστικούς κατά την transient λειτουργία του κυκλώματος, θα προστεθούν στην τάση αναφοράς. Το πλεονέκτημα του κυκλώματος είναι ότι η περίοδος της παλμοσειράς ορθογώνιων παλμών είναι ανάλογη της τιμής της αντίστασης R_s . Στο διάγραμμα δεν φαίνεται το κύκλωμα της τάσης αναφοράς, που είναι ένας διαιρέτης τάσης.

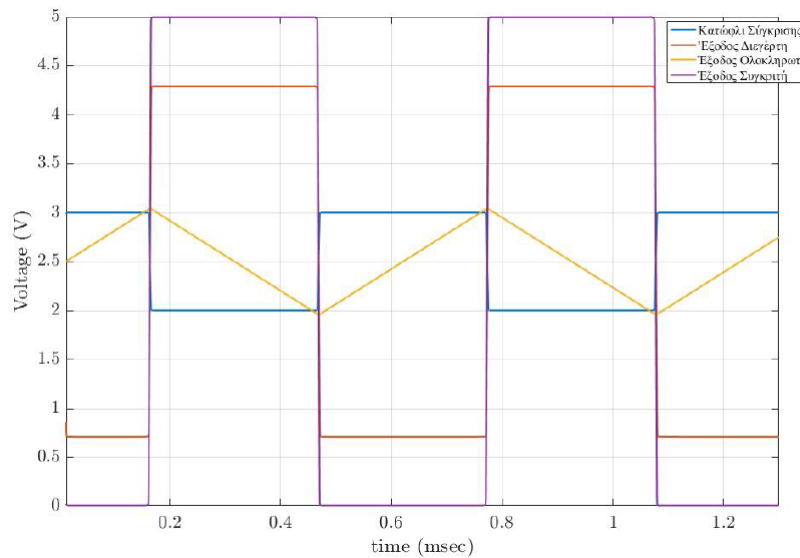
Μέσω της ανάλυσης του κυκλώματος γίνεται η εύρεση της σχέσης της περιόδου των παραγόμενων παλμοσειρών. Αρχικά, η έξοδος ενός τελεστικού ενισχυτή, που λειτουργεί στη γραμμική περιοχή με αρνητική ανάδραση, με αντίσταση ανάδρασης R_f , αντίσταση εισόδου R και τάση αναφοράς V_{bias} είναι:

$$u_{out} = \left(\frac{R_f}{R} + 1\right)V_{bias} - \frac{R_f}{R}u_{in} \quad (3.9)$$

ενώ η έξοδος του συγκριτή δίνεται από τη σχέση:

$$u_{out} = \begin{cases} V_{DD}, & \text{if } u_{T_{4+}} > u_{T_{4-}} \\ 0, & \text{if } u_{T_{4+}} < u_{T_{4-}} \end{cases} \quad (3.10)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την εξίσωση 3.10 μπορεί να προβλεφθεί η μορφή της εξόδου σε κάθε στάδιο του κυκλώματος. Από τη στιγμή, δηλαδή, που είναι γνωστό πως η έξοδος του T_4 είναι μια τετραγωνική παλμοσειρά, τετραγωνική παλμοσειρά θα είναι και η έξοδος των T_1, T_2 , ενώ η έξοδος του ολοκληρωτή T_3 θα είναι τριγωνική παλμοσειρά. Στην Εικόνα 3.15 απεικονίζεται η έξοδος των τελεστικών ενισχυτών ξεχωριστά, ώστε να δοθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή της λειτουργίας του κυκλώματος.



Εικόνα 3.15: Ενδεικτικό στιγμιότυπο λειτουργίας του κυκλώματος. Οι κυματομορφές είναι αποτέλεσμα προσομοίωσης στο λογισμικό LtSpice.[88]

Το κύκλωμα αποτελεί έναν ταλαντωτή και σε χρόνο της τάξης των μs από την έναρξη της τροφοδοσίας, η έξοδος του συγκριτή T_4 θα μεταβεί τυχαία σε μια από τις δύο δυνατές καταστάσεις και το κύκλωμα θα αρχίσει την ομαλή λειτουργία του. Μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν ως $t=0$ τη χρονική στιγμή που η έξοδος του T_4 αλλάζει και αποκτά μια σταθερή τιμή. Αρχικά το κατώφλι σύγκρισης, δηλαδή η έξοδος του T_1 θα δίνεται από την σχέση:

$$u_{T_{1,0}} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)V_{bias} - \frac{R_2}{R_1}u_{out} \quad (3.11)$$

που βγαίνει από απευθείας εφαρμογή της εξίσωσης 3.9. Η έξοδος του T_1 είναι με τη σειρά της η είσοδος του T_2 , που είναι και αυτός αναστρέφων ενισχυτής. Άρα για την έξοδο του T_2 θα είναι:

$$u_{T_{2,0}} = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1\right)V_{bias} - \frac{R_4}{R_3}u_{T_{1,0}} \quad (3.12)$$

και αντικαθιστώντας με την εξίσωση 3.11:

$$u_{T_2,0} = \left(1 - \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}\right) V_{bias} + \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} u_{out} \quad (3.13)$$

Όσον αφορά τον ολοκληρωτή T_3 , θεωρώντας ότι τη χρονική στιγμή $t=0$ η αρχική τιμή του θα είναι $u_{T_3,0}(0)$, η έξοδος του θα δίνεται από τη σχέση:

$$u_{T_3,0}(t) = u_{T_3,0}(0) + \frac{1}{(R_s + R_{bias})C} \int_0^t \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} (V_{bias} - u_{out}) dt \quad (3.14)$$

Οι τιμές τάσης των T_1 και T_2 παραμένουν σταθερές μέχρι να αλλάξει η έξοδος του T_4 , δηλαδή του κυκλώματος. Άρα όσο η έξοδος του κυκλώματος είναι σταθερή, η τάση εξόδου του ολοκληρωτή μπορεί να υπολογιστεί, ολοκληρώνοντας από 0 έως $t < t_{high}$ ή $t < t_{low}$, ανάλογα αν υπολογίζουμε για το διάστημα που η έξοδος είναι ψηλά ή χαμηλά. Έτσι θα είναι σε κάθε περίπτωση:

$$u_{T_3,0}(t) = u_{T_3,0}(0) + \frac{1}{(R_s + R_{bias})C} \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} (V_{bias} - u_{out}) t \quad (3.15)$$

Αλλαγή στην τάση εξόδου του συγκριτή παρατηρείται όταν οι τάσεις στον θετικό και τον αρνητικό ακροδέκτη γίνουν ίσες, δηλαδή:

$$u_{T_4,+} = u_{T_4,-} \quad (3.16)$$

Όμως, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του κυκλώματος, $u_{T_4,+} = u_{T_3,0}$ και $u_{T_4,-} = u_{T_1,0}$ και έτσι η εξίσωση 3.16, μέσω των εξισώσεων 3.15 και 3.11, θα γίνει:

$$V_{bias} + \frac{R_2}{R_1} (V_{bias} - u_{out}) = u_{T_3,0}(0) + \frac{1}{(R_s + R_{bias})C} \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} (V_{bias} - u_{out}) t \quad (3.17)$$

Ο συντελεστής της μεταβλητής του χρόνου t αντιστοιχεί στην κλίση της τριγωνικής κυματομορφής που παράγει ο ολοκληρωτής και άρα και η περίοδος της τελικής παλμοσειράς θα εξαρτάται από αυτόν.

Για τον υπολογισμό της περιόδου θεωρείται αρχικά το χρονικό διάστημα t_1 , από τη χρονική στιγμή $t=0$ έως τη χρονική στιγμή που ικανοποιείται η συνθήκη 3.16 και μεταβάλλεται η τάση εξόδου του T_4 . Θα δίνεται από τη σχέση 3.17 και με λίγη άλγεβρα θα γίνεται:

$$t_1 = \frac{(R_s + R_{bias})R_1 R_3 C}{R_2 R_4 (V_{bias} - u_{out})} \left(V_{bias} + \frac{R_2}{R_1} ((V_{bias} - u_{out}) - u_{T_3,0}(0)) \right) \quad (3.18)$$

Στη συνέχεια θεωρείται ότι η περίπτωση όπου η έξοδος του κυκλώματος είναι $u_{out} = V_{DD}$, δηλαδή για $t_1 = t_{high}$. Λύνοντας την εξίσωση 3.17 ως προς $u_{T_3,0}$ για $t=0$ και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 3.18, προκύπτει:

$$t_{high} = \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{bias}} \frac{(R_s + R_{bias})C}{|G_{T_2}|} \quad (3.19)$$

όπου $G_{T_2} = -\frac{R_4}{R_3}$ το κέρδος του διεγέρτη T_2 . Αντίστοιχα μπορεί να βρεθεί και το χρονικό διάστημα t_{low} , κατά το οποίο η έξοδος του κυκλώματος είναι $u_{out} = 0$, δηλαδή για $t_1 = t_{low}$. Με την ίδια διαδικασία βρίσκεται:

$$t_{low} = \frac{V_{DD} (R_s + R_{bias})C}{V_{bias} |G_{T_2}|} \quad (3.20)$$

Το χρονικό διάστημα t_{high} θα είναι το πλάτος της παλμοσειράς, ενώ το χρονικό διάστημα t_{low} θα αποτελεί το ενδιάμεσο διάστημα των παλμών. Η περίοδος δηλαδή της παλμοσειράς θα είναι το άθροισμα των t_{low} και t_{high} και άρα:

$$T = \frac{V_{DD}^2 (R_s + R_{bias})C}{V_{bias}(V_{DD} - V_{bias}) |G_{T_2}|} \quad (3.21)$$

Για $V_{bias} = V_{DD}/2$, η περίοδος της παραγώμενης παλμοσειράς εξόδου θα γίνει:

$$T = \frac{4(R_s + R_{bias})C}{|G_{T_2}|} \quad (3.22)$$

Θα ισχύει, λοιπόν, ότι $t_{low} = t_{high}$, οι παλμοσειρές θα έχουν duty cycle 50% και η τριγωνική κυματομορφή εισόδου θα έχει ίδιες κλίσεις ανόδου και καθόδου.

Αν επιλεχθεί V_{bias} διάφορη από το μισό της τάσης τροφοδοσίας, οι κλίσεις ανόδου και καθόδου της τριγωνικής κυματομορφής θα διαφέρουν και συνεπώς, θα δημιουργηθούν παλμοσειρές με duty cycle $\neq 50\%$.

Το κύκλωμα μέσω της αντίστασης R_s , που μπορεί να είναι είτε ένα ποτενσιόμετρο, είτε κάποιος αισθητήρας, μπορεί να μεταβάλει την περίοδο, και άρα την συχνότητα, της παλμοσειράς, μέσα σε ένα εύρος τιμών που καθορίζεται από το κέρδος του διεγέρτη, τον πυκνωτή του ολοκληρωτή και τις τάσεις τροφοδοσίας και αναφοράς. Οι τιμές των κυκλωματικών στοιχείων που επιλέχτηκαν για το κύκλωμα αναγράφονται στον Πίνακα 3.2.

Στοιχεία	Τιμή
R_1	9.84 kΩ
R_2	1.99 kΩ
R_3	9.72 kΩ
R_4	34.63 kΩ
R_{bias}	98.1 kΩ
C	10 nF
$R_{div,1}$	98.3 kΩ
$R_{div,2}$	99.1 kΩ

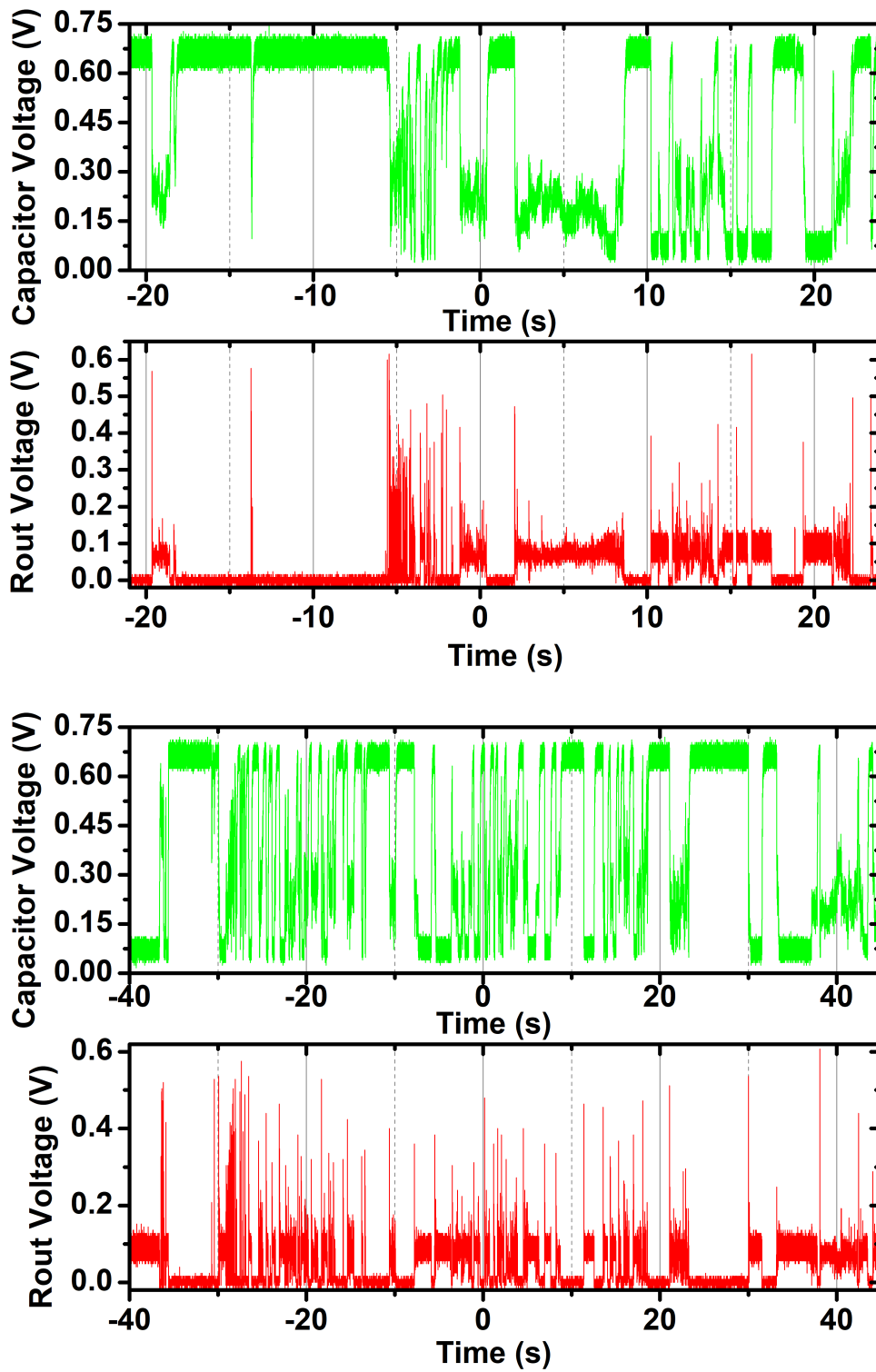
Πίνακας 3.2: Κυκλωματικά στοιχεία κυκλώματος παραγωγής παλμοσειράς.

Το κύκλωμα, με αυτά τα στοιχεία και ένα ποτενσιόμετρο R_s με τιμές από 10-500 kΩ, μπορεί να δίνει συχνότητες παλμοσειράς από περίπου 280 Hz έως περίπου 1725 Hz. Όπως ανεφέρθηκε και πιο πάνω, η λειτουργία των τεχνητών νευρώνων αυτής της δομής, γίνεται με παλμοσειρές υψηλής συχνότητας, που δεν αφήνουν χρόνο στον πυκνωτή να

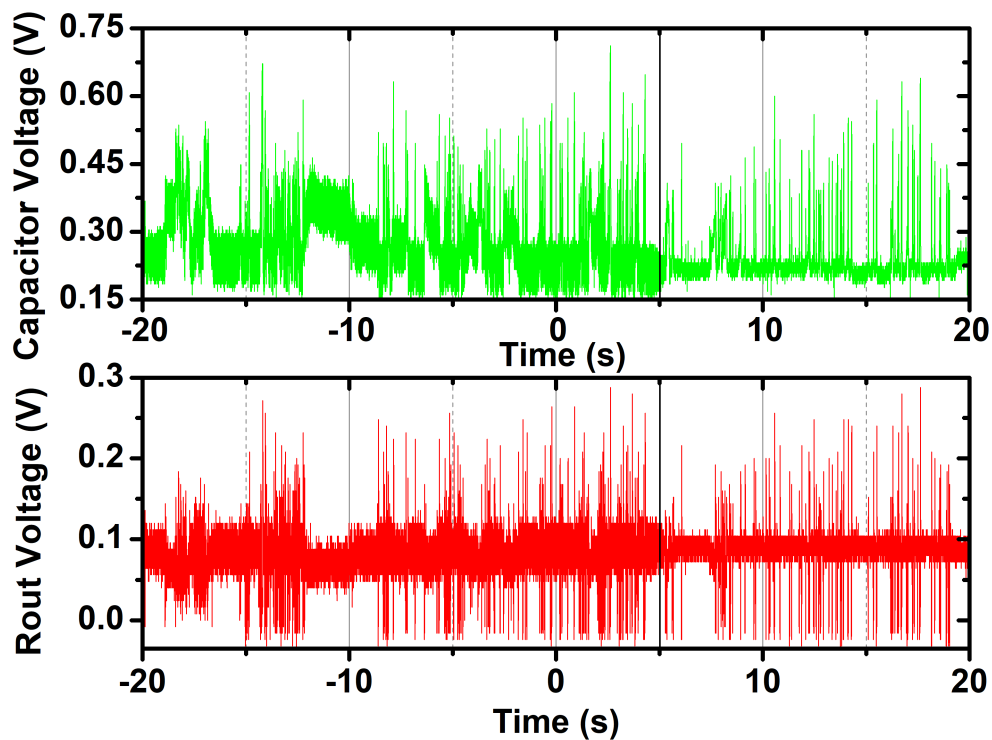
φορτιστεί και να αποφορτιστεί πλήρως. Ως εκ τούτου, η επιλογή των συχνοτήτων έγινε έτσι ώστε η ελάχιστη τιμή της συχνότητας του κυκλώματος να προσεγγίζει το κάτω όριο της παραπάνω συνθήκης. Η ελάχιστη συχνότητα, λοιπόν, είναι μόλις περίπου 13 φορές μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική συχνότητα του αριστερού κυκλωματικού βρόχου $f_{RC} = 21.3\text{Hz}$, με αποτέλεσμα να επιτρέπει μεγαλύτερη φόρτιση και αποφόρτιση του πυκνωτή και να είναι αισθητή η διαφορά σε σχέση με την μέγιστη συχνότητα. Σε όσο μεγαλύτερες τιμές βρίσκεται το εύρος συχνοτήτων, τόσο μικρότερη διαφορά υπάρχει μεταξύ της εφαρμογής της μέγιστης και ελάχιστης συχνότητας. Αυτή η επιλογή είναι σημαντική επειδή όλες οι παλμοσειρές έχουν duty cycle 50%, δηλαδή όλες θα είναι ίδιας έντασης ερεθίσματα, και η διαφοροποίηση που θα γίνεται θα είναι μόνο στο πόσο αφήνουν να φορτιστεί και να εκφορτιστεί ο πυκνωτής. Με μεγαλύτερες διακυμάνσεις, το memristor δεν προλαβαίνει να χτίσει τόσο γρήγορα το CF, λόγω και του leaky χαρακτήρα του και ο νευρώνας οδηγείται σε ασθενέστερη παραγωγή παλμών.

Σκοπός εδώ είναι να αποδειχθεί ότι τα αποτελέσματα της προηγούμενης διάταξης με την παλμογεννήτρια, μπορούν να αναπαραχθούν και με το κύκλωμα παραγωγής παλμών. Αρχικά στην Εικόνα 3.16 παρουσιάζονται δύο μετρήσεις με την ελάχιστη και την μέγιστη συχνότητα του κυκλώματος αντίστοιχα, ενώ η τάση είναι στα 3 V και φυσικά με duty cycle 50%. Η συχνότητα των παραγόμενων παλμών είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μεγαλύτερης συχνότητας ερεθίσματος. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της τάσης της εισαγόμενης παλμοσειράς, η συχνότητα παλμών αυξάνεται από τα 3 Hz στα περίπου 6 Hz. Επίσης, η εξαγωγή παλμών συνεχίζει να είναι στοχαστική.

Στην Εικόνα 3.17 φαίνεται και σε μια μέτρηση, η αύξηση της συχνότητας παραγωγής παλμών από τον νευρώνα, μέσω της μετάβασης από την ελάχιστη στην μέγιστη συχνότητα της εισαγόμενης παλμοσειράς. Το ύψος των παλμών είναι 3 V, ενώ και πάλι το duty cycle είναι 50%. Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις, έτσι κι εδώ, η διαφορά της εφαρμογής των παλμοσειρών υψηλής και χαμηλής συχνότητας εμφανίζεται στο πλάτος των καμπυλών τάσης-χρόνου. Όταν η συχνότητα είναι χαμηλότερη, οι καμπύλες είναι πιο πλατιές, και αυτό συμβαίνει επειδή ο πυκνωτής έχει χρόνο να φορτιστεί και να εκφορτιστεί περισσότερο σε σχέση με την περίπτωση μεγαλύτερης συχνότητας. Έτσι, ενώ αρχικά η συχνότητα παραγωγής παλμών είναι περίπου 5.3 Hz, με την αύξηση της συχνότητας ανεβαίνει στα 6.7 Hz. Το γεγονός ότι σε αυτή τη μέτρηση, οι συχνότητες παραγωγής παλμών είναι υψηλότερες από πριν, οφείλεται στο μεγαλύτερο ύψος παλμών που έχει δοθεί. Ακόμα εδώ, οι παλμοί που δημιουργούνται, δείχνουν να έχουν διαφορετική μορφή σε σχέση με πριν. Ο πυκνωτής δεν φορτίζεται και το memristor δεν αποφορτίζεται αρκετά, με τα δύο να ηρεμούν σε μια ενδιάμεση κατάσταση στο διάστημα μεταξύ των παλμών. Το γεγονός ότι το ερέθισμα είναι ισχυρότερο από πριν ή και το ότι η επαφή είναι καταπονημένη και έχει δημιουργήσει πιο δυνατό CF, οδηγεί το memristor στο να μην επιδεικνύει ολικό reset και ρεύμα να περνάει και από τον δεξιό βρόχο. Έτσι, για την εμφάνιση των παλμών, όταν το memristor εμφανίζει reset μετά από ένα διάστημα, τότε φορτίζεται ο πυκνωτής και οδηγεί ταχύτατα το memristor σε νέο set και εν τέλει στη δημιουργία του παλμού. Άρα και εδώ, η καλύτερη επιλογή ερεθίσματος δίνει καλύτερες μετρήσεις και τα χαρακτηριστικά του τεχνητού νευρώνα με την παλμογεννήτρια αναπαράγονται και από τον τεχνητό νευρώνα με το κύκλωμα παραγωγής παλμών.



Εικόνα 3.16: α) Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 2 V, 285 Hz, 50 % duty cycle.
 β) Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 2 V, 1725 Hz, 50 % duty cycle.

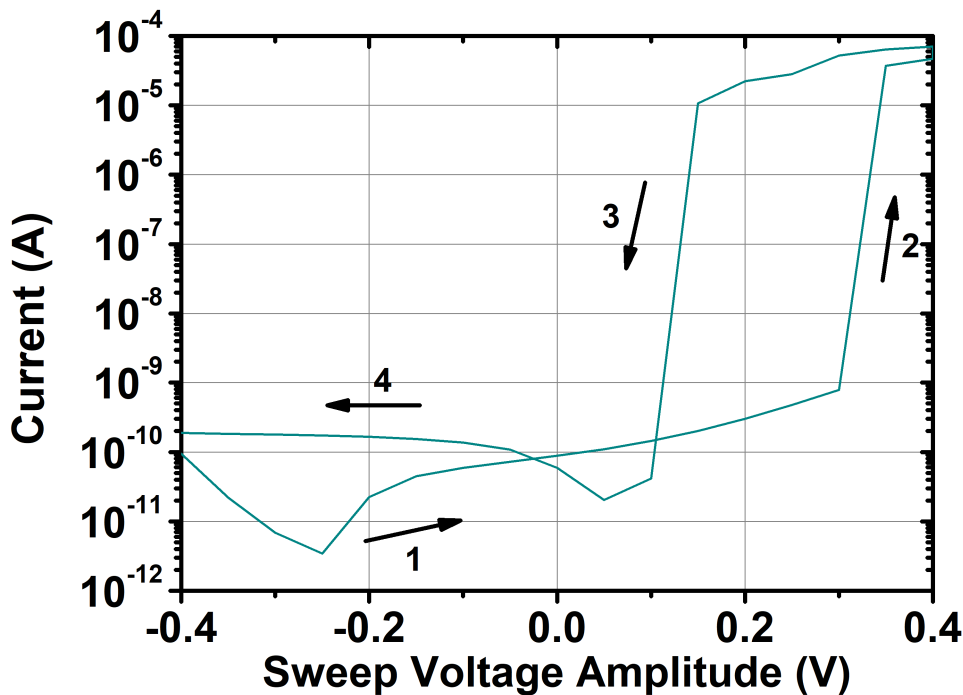


Εικόνα 3.17: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 3 V, 280 Hz, 50 % duty cycle αρχικά και 3 V, 280 Hz, 50 % duty cycle στη συνέχεια.

3.5 Νευρώνας με παλμογεννήτρια και $Ag/SiO_2/Pt$ NPs memristor

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν, αντί για τα memristor με τους δύο τρόπους λειτουργίας, ένας τύπος memristor με καθαρά πτητική λειτουργία. Τα memristors αυτά έχουν παρουσιαστεί από τον Bousoula et al.[89] και έχουν δομή $Ag/SiO_2/Pt$ NPs, με 40 nm Ag, 20 nm SiO_2 και 5 nm νανοσωματίδια πλατίνας. Ο λόγος της πτητικής λειτουργίας τους βρίσκεται στο γεγονός, πως η τραχειά επιφάνεια των νανοσωματιδίων πλατίνας ενισχύει το ηλεκτρικό πεδίο στην διάταξη και σε συνδυασμό με την χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα της πλατίνας, το CF αργύρου που δημιουργείται, καταστρέφεται λόγω θέρμανσης Joule. Μια χαρακτηριστική I-V του δείγματος φαίνεται στην Εικόνα 3.18. Η τάση που γίνεται το set είναι στα 0.3 V, το reset γίνεται στα 0.15 V, ενώ οι κλίσεις set/reset είναι περίπου 10 mV/dec(A). Το παράθυρο μνήμης είναι περίπου $10^5 \Omega$, μια πολύ καλή τιμή, καθώς εύκολα μπορούν να επιλεχθούν οι κατάλληλες αντιστάσεις του κυκλώματος.

Με τη χρήση του TS memristor αναμένεται η απόδοση του τεχνητού νευρώνα να είναι καλύτερη σε σχέση με τη χρήση του προηγούμενου δείγματος, λόγω της έμφυτης και πιο σταθερής πτητικής λειτουργίας του, που είναι και η πιο συναφής σε σχέση με τη λειτουργία των βιολογικών νευρώνων. Αρχικά πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι ο νευρώνας με αυτή τη διάταξη λειτουργεί ομαλά. Τα κυκλωματικά στοιχεία που επιλέχθηκαν φαίνονται



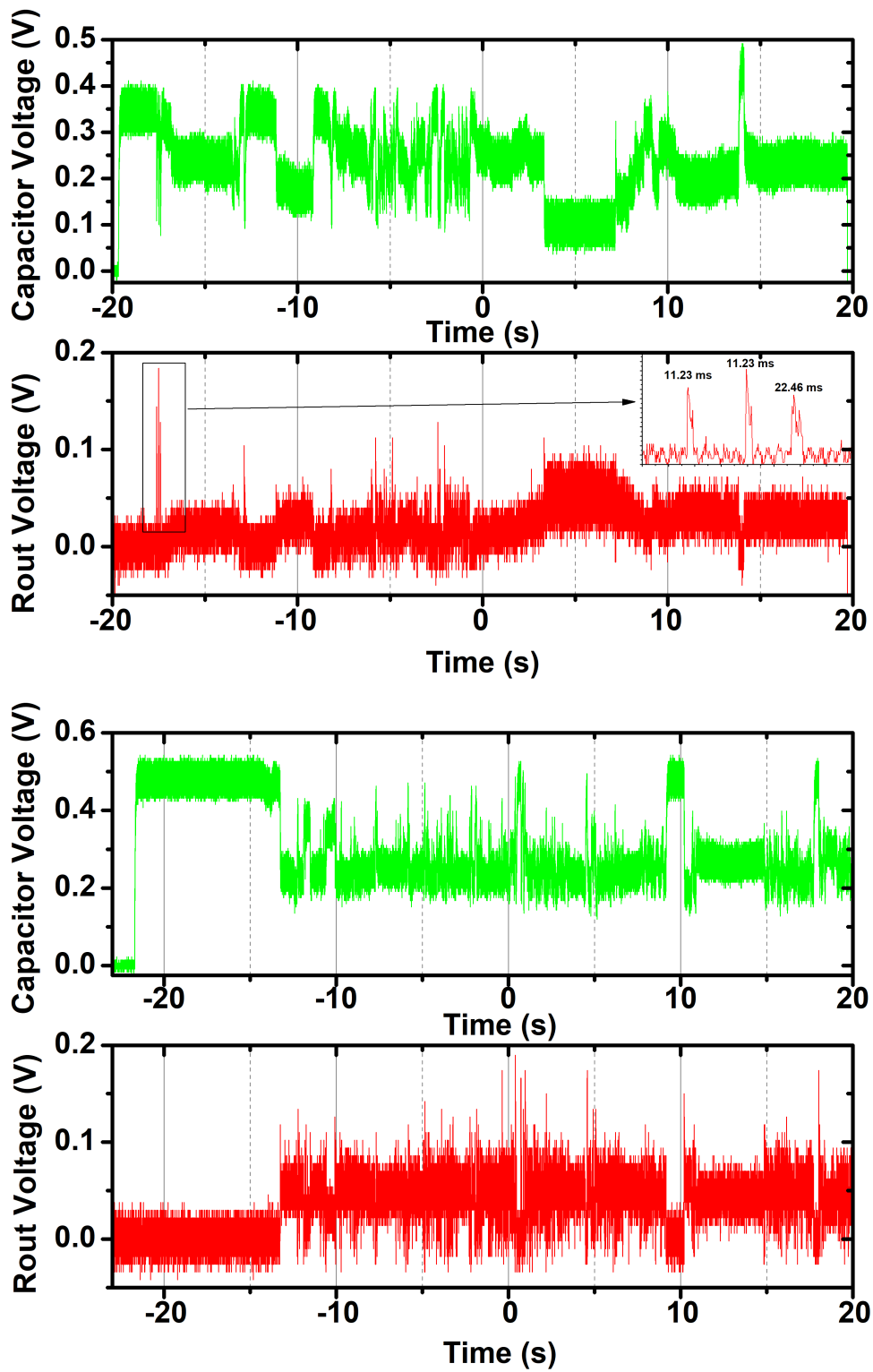
Εικόνα 3.18: Χαρακτηριστική I-V δείγματος $Ag/SiO_2/Pt$ NPs.

στον Πίνακα 3.3. Η τιμή της αντίστασης R_{out} έπρεπε να αυξηθεί, επειδή δεν ήταν αρκετή η πτώση τάσης στα άκρα της, ώστε να παρατηρηθούν οι παραγόμενοι παλμοί. Πιθανόν η χαμηλότερη αντίσταση της LRS του νέου δείγματος, σε σχέση με το προηγούμενο, να ευθύνεται για αυτό.

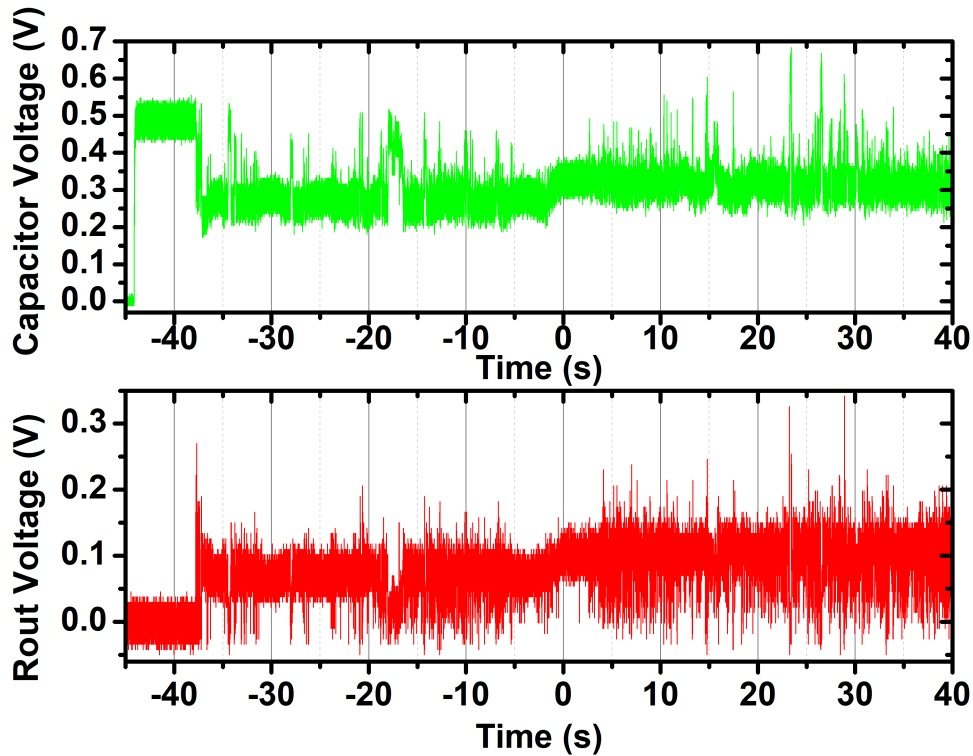
Στοιχεία	Τιμή
R_{in}	474.5 k Ω
C	100 nF
R_{out}	117.9 k Ω

Πίνακας 3.3: Κυκλωματικά στοιχεία κυκλώματος τεχνητού νευρώνα.

Αρχικά έγινε έλεγχος της λειτουργίας του νευρώνα με την χρήση παλμογεννήτριας. Στην Εικόνα 3.19 παρουσιάζονται δύο μετρήσεις με μια μικρή και μια μεγαλύτερη συχνότητα παλμών, ενώ η τάση είναι στα 4 V και το πλάτος των παλμών 0.5 ms σταθερά. Η συχνότητα των παραγόμενων παλμών είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μεγαλύτερης συχνότητας ερεθίσματος. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της τάσης της εισαγόμενης παλμοσειράς, η συχνότητα παλμών αυξάνεται από τα 0.65 Hz στα περίπου 2 Hz. Αυτές οι τιμές των συχνοτήτων παραγωγής παλμών είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις προηγούμενες παραγράφους, λόγω του ότι και το ερέθισμα είναι πιο ασθενές. Μάλιστα, οι συχνότητες των 100 και 150 Hz είναι πολύ κοντά στην χαρακτηριστική f_{RC} του αριστερού βρόχου RC, με αποτέλεσμα οι γραφικές V-t να είναι πολύ πλατιές. Στο ένθετο γράφημα



Εικόνα 3.19: α) Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 4 V, 100 Hz, 0.5 ms πλάτος. β) Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 4 V, 150 Hz, 0.5 ms πλάτος.

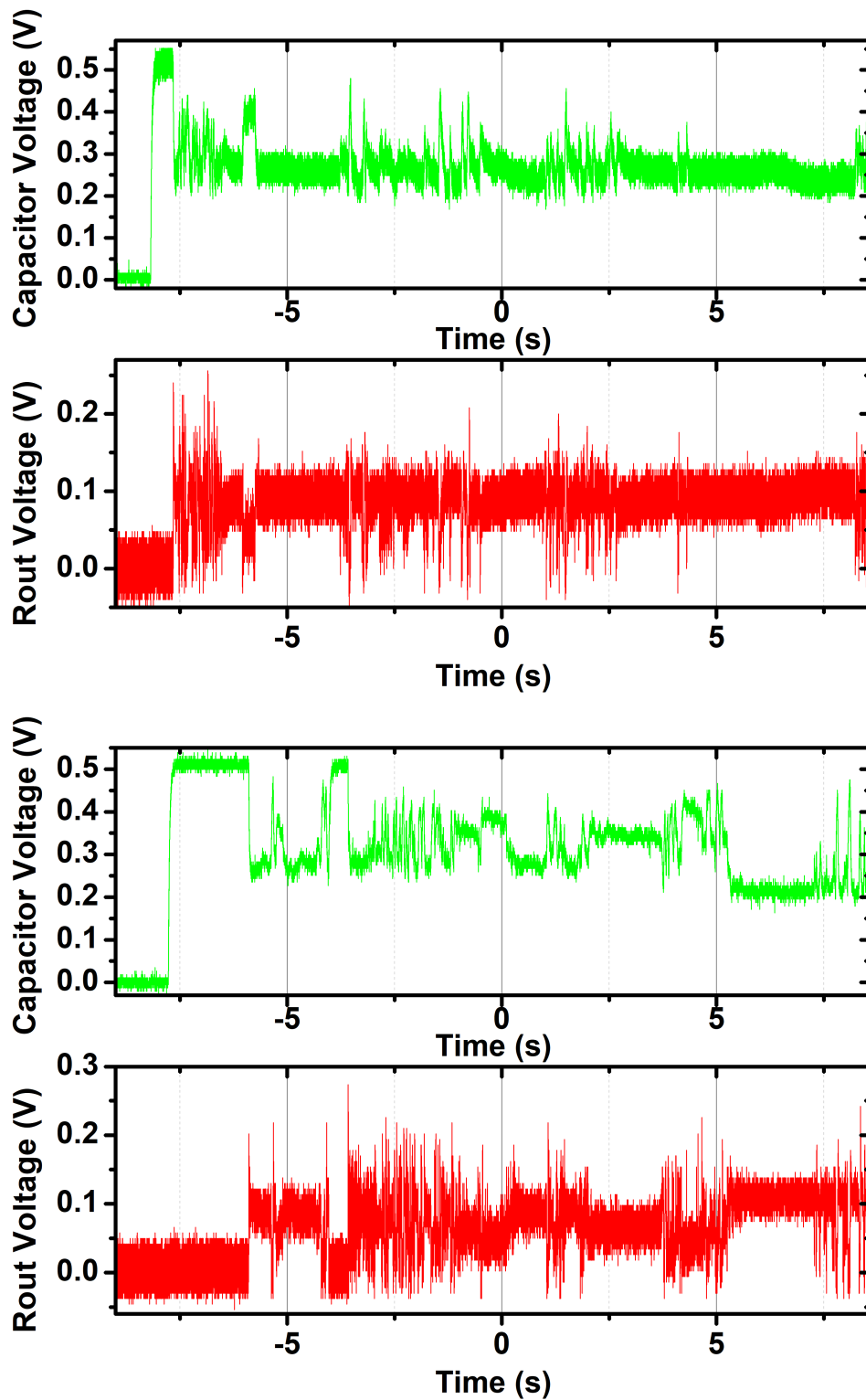


Εικόνα 3.20: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 4 V, 150 Hz, 0.5 ms πλάτος αρχικά και 4 V, 200 Hz, 0.5 ms πλάτος στη συνέχεια.

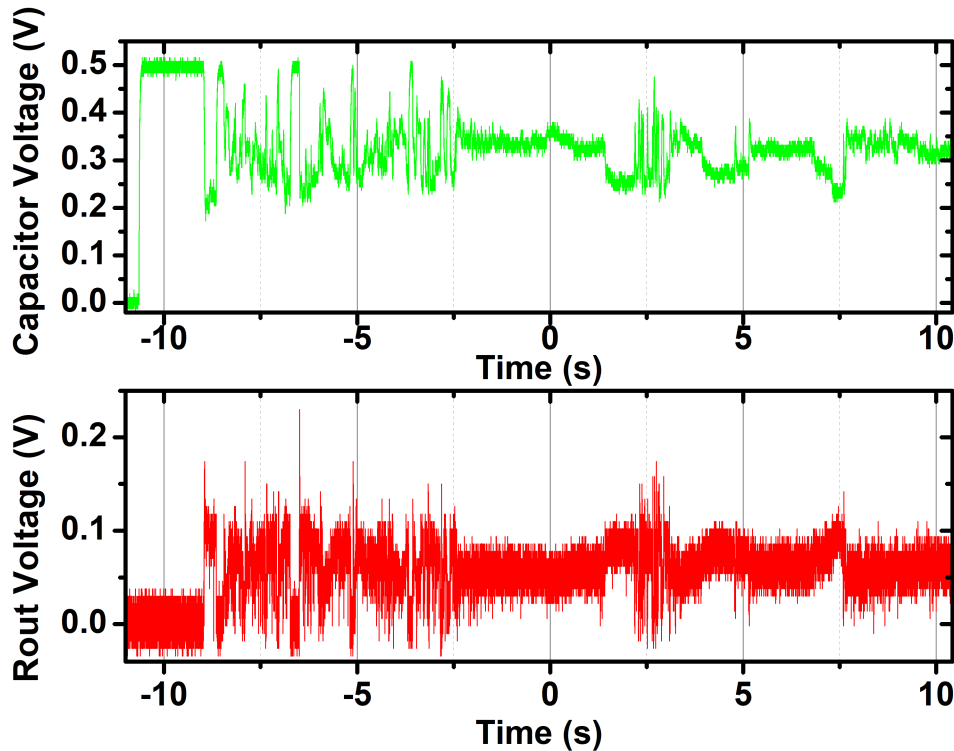
της πρώτης γραφικής, για μια σειρά παλμών, η περίοδος ανθεκτικότητας μετρήθηκε σταθερά στα 11.23 ms. Μάλιστα, στον τελευταίο παλμό η περίοδος βρέθηκε στα 22.46 ms και όπως φάνηκε, πρόκειται για δύο παλμούς συνενωμένους σε έναν, με 11.23 ms περίοδο έκαστος. Η τιμή αυτή επιβεβαιώθηκε και από μετρήσεις σε άλλους παλμούς και είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του προηγούμενου δείγματος, λόγω του ταχύτερου set/reset του TS memristor, που επιβεβαιώνετε από τις πιο απότομες κλίσεις τους. Επίσης, η εξαγωγή των παλμών είναι και σε αυτό το δείγμα στοχαστική. Τέλος, στην Εικόνα 3.20 φαίνεται και σε μια μέτρηση, η αύξηση της συχνότητας παραγωγής παλμών, μέσω της αύξησης της συχνότητας της εισαγόμενης παλμοσειράς από 150 Hz στα 200 Hz. Το ύψος των παλμών είναι 4 V και το πλάτος 0.5 ms. Η συχνότητα παραγωγής παλμών αυξάνεται από το 1 Hz στα 2 Hz μετά την ενδυνάμωση του ερεθίσματος. Έτσι, και αυτή η διάταξη τεχνητού νευρώνα αναπαρήγαγε όλα τα χαρακτηριστικά του LIF μοντέλου με επιτυχία.

3.6 Νευρώνας με κύκλωμα παραγωγής παλμών και $Ag/SiO_2/Pt$ NPs memristor

Εδώ εξετάζεται αν το κύκλωμα παραγωγής παλμών μπορεί να δώσει πάλι τα ίδια απο-



Εικόνα 3.21: α) Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 1.5 V, 280 Hz, 50% duty cycle.
 β) Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 1.5 V, 1725 Hz, 50% duty cycle.



Εικόνα 3.22: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 1.5 V, 2702 Hz, 50% duty cycle αρχικά και 1.5 V, 455 Hz, 50% duty cycle στη συνέχεια.

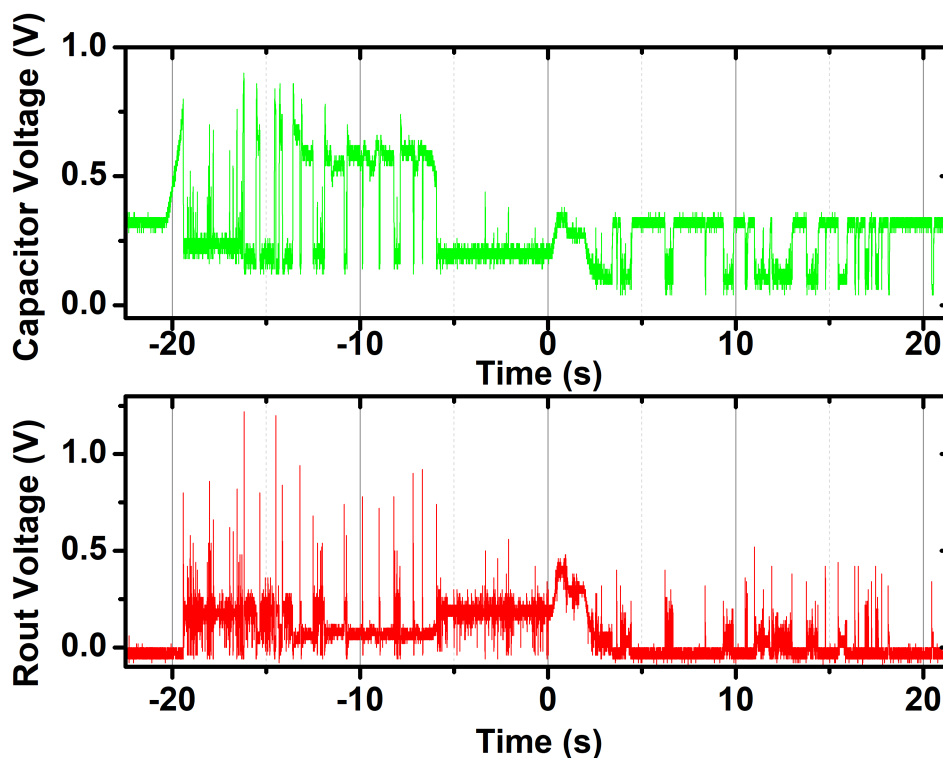
τελέσματα με την παλμογεννήτρια. Τα παράλληλα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα είναι τα ίδια με προηγουμένως και αναγράφονται στον Πίνακα 3.2. Έτσι, το εύρος των συχνοτήτων θα είναι και πάλι μεταξύ 280 και 1725 Hz. Στην Εικόνα 3.21 παρουσιάζονται δύο μετρήσεις με την ελάχιστη και τη μέγιστη συχνότητα παλμών εισόδου, ενώ η τάση είναι στα 1.5 V και το duty cycle στο 50% σταθερά. Η συχνότητα των παραγόμενων παλμών είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μεγαλύτερης συχνότητας ερεθίσματος. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της τάσης της παλμοσειράς ερεθίσματος, η συχνότητα παλμών αυξάνεται από τα 2 Hz στα περίπου 3.5 Hz. Στην Εικόνα 3.22 φαίνεται σε μια μέτρηση, η μείωση της συχνότητας παραγωγής παλμών, μέσω της μείωσης της συχνότητας της εισαγόμενης παλμοσειράς. Εδώ έγινε αλλαγή της τιμής χωρητικότητας του κυκλώματος παραγωγής παλμών από 10000 pF στα 4000 pF, ώστε να αυξηθεί η συχνότητα των παλμών και να γίνει πιο ευκρινής η μέτρηση, λόγω και της ύπαρξης θορύβου στην τάση της R_{out} . Το εύρος των συχνοτήτων γίνεται έτσι 455-2702 Hz, το ύψος των παλμών είναι 1.5 V και το duty cycle 50%. Η συχνότητα παραγωγής παλμών στη μέτρηση, μειώνεται από τα 6.5 Hz στα 2.5 Hz μετά την εξασθένιση του ερεθίσματος. Οι μετρήσεις είναι επαναλήψιμες με συνέπεια και ο τεχνητός νευρώνας λειτουργεί και με την διάταξη του πηκτικού memristor και του κυκλώματος παραγωγής παλμών.

3.7 Λειτουργία κυκλώματος παραγωγής παλμών με μεταβολή duty cycle

Μία ακόμα δυνατότητα που παρουσιάζει το κύκλωμα παραγωγής παλμών, είναι αυτή της μεταβολής του duty cycle. Όπως φάνηκε από τις εξισώσεις 3.19 και 3.20, για το t_{high} και t_{low} , που αποτελούν το πλάτος και το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα των παλμών των παραγόμενων παλμοσειρών αντίστοιχα, υπάρχει εξάρτηση αυτών από την τάση αναφοράς. Όμως, η τάση αναφοράς ρυθμίζεται από έναν διαιρέτη τάσης και αν σε αυτόν αντικατασταθεί η μία σταθερή αντίσταση από ένα ποτενσιόμετρο, τότε μπορεί να αλλάξει. Με δεδομένο ότι η μεταβολή των t_{high} και t_{low} είναι αντίστροφες, καθώς μεταβάλεται η τάση αναφοράς, το duty cycle της παλμοσειράς μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα. Όσο μεγαλώνει η V_{bias} τόσο θα μεγαλώνει και το duty cycle. Η έξοδος ενός διαιρέτη τάσης δίνεται από την σχέση:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (3.23)$$

και με δεδομένο ότι η V_{in} είναι η τάση τροφοδοσίας, επιλέχθηκε τιμή σταθερής αντίστασης $R_2 = 247.8k\Omega$ και ένα ποτενσιόμετρο με εύρος από 10-500 kΩ για R_1 , για να μπορεί να ρυθμιστεί το duty cycle πάνω και κάτω από το 50%.



Εικόνα 3.23: Γράφημα παραγωγής παλμών με παλμοσειρά 4 V, 1725 Hz, 50% duty cycle αρχικά και 4 V, 960 Hz, 20% duty cycle στη συνέχεια.

Στην Εικόνα 3.23 φαίνεται μία μέτρηση με μεταβαλλόμενο duty cycle. Για αυτή τη μέτρηση έχει χρησιμοποιηθεί το δείγμα $Ag/SiO_2/TiN$. Αρχικά, το duty cycle είναι 50% με 1725 Hz συχνότητα και μετά τη μέση γίνεται 20% με 960 Hz συχνότητα, ενώ το ύψος των παλμών είναι 4 V σταθερά. Να σημειωθεί ότι με την αλλαγή της τάσης αναφοράς αλλάζει και η περίοδος της παλμοσειράς, σύμφωνα με τη σχέση 3.21, κάνοντας τις μεταβολές στην ένταση του ερεθίσματος αρκετά απότομες. Αυτό ίσως αποτελεί και ένα μειονέκτημα σε αυτήν τη ρύθμιση του ερεθίσματος. Η συχνότητα, λοιπόν, της παραγωγής παλμών πέφτει από τα 2.5 Hz στο 1.5 Hz, με την εξασθένηση της παλμοσειράς ερεθίσματος. Έτσι, ο τεχνητός νευρώνας με το κύκλωμα παραγωγής παλμών δείχνει πως μπορεί να λειτουργεί με τη ρύθμιση διαφορετικών τιμών των στοιχείων του, δίνοντας τη δυνατότητα να εξεταστούν διαφορετικές εφαρμογές με αισθητήρες.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος της εργασίας έγινε ο χαρακτηρισμός των διατάξεων αναφοράς memristor $Ag/SiO_2/TiN$ και της $Ag/SiO_2/MoS_2/SiO_2/TiN$. Ο σκοπός της προσθήκης του διαστάτου MoS_2 ήταν η βελτίωση των χαρακτηριστικών της διάταξης και κυρίως, η ισχυροποίηση του φαινομένου της κβαντικής αγωγιμότητας. Μέσω TEM φάνηκε η δομή της διάταξης και η επιτυχημένη μεταφορά του MoS_2 . Οι μετρήσεις σταθερής τάσης ανέδειξαν την ύπαρξη περισσότερων καταστάσεων κβαντικής αγωγιμότητας και την καλύτερη απόδοση, όσον αφορά, την μεταβλητότητα των μετρήσεων. Ο περιορισμός στην ανάπτυξη του CF, που εισάγει MoS_2 , είναι και ο λόγος των πιο σταθερών και επαναλήψιμων μετρήσεων, αλλά και της πολύ περισσότερο παρατηρήσιμης QC. Για την περαιτέρω μελέτη και ανάλυση των διατάξεων, έγινε και ηλεκτρικός χαρακτηρισμός με παλμικές μετρήσεις. Ως προς την αντοχή και την διατήρηση της πληροφορίας των δύο διατάξεων, οι μετρήσεις έδειξαν ότι έχουν την ίδια απόδοση, αποδεικνύοντας ότι η προσθήκη του MoS_2 δεν επηρεάζει αρνητικά την αξιοπιστία των memristors. Επίσης, στην σύγκριση των συναπτικών ιδιοτήτων PPF/PPD των δύο δειγμάτων, παρουσιάστηκε αυξημένη γραμμικότητα στη διάταξη με το MoS_2 , που οφείλεται στην ενισχυμένη QC, λόγω της πιο σταδιακής απόδοσης της απόκρισης του ρεύματος. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό για την εκπαίδευση των TNN. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι υπάρχει η δυνατότητα να ελέγχεται η κατάσταση QC μέσω παλμικών ερεθισμάτων, επιτυγχάνοντας πολύ περισσότερες καταστάσεις για την δεύτερη διάταξη. Τέλος, επιβεβαιώθηκε η επαναληψιμότητα των καταστάσεων QC και η ικανότητα να διατηρείται η πληροφορία σε αυτές για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα. Σχετικά με τη μελλοντική ανάπτυξη της εν λόγω διάταξης, η κατασκευή της με τη χρήση της τεχνικής λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης (e-beam), θα έδινε τη δυνατότητα να φτιαχτεί ένα memristor πάνω σε ένα τρίγωνο του MoS_2 , ξεπερνώντας το θέμα που υπάρχει με την αδυναμία εναπόθεσης συνεχούς υμενίου MoS_2 , χωρίς κενά και ρωγμές. Η δυνατότητα που προσφέρει αυτή η τεχνική λιθογραφίας για χαμηλότερες διαστάσεις κατασκευής, μπορεί να λύσει το πρόβλημα που δημιουργείται από την μη ύπαρξη συνεχούς υμενίου MoS_2 και να αυξήσει σημαντικά την επαναληψιμότητα των χαρακτηριστικών των memristors. Ακόμα, η προσθήκη του MoS_2 κάτω από το άνω ηλεκτρόδιο, θα οδηγούσε σε καλύτερη συμφωνία με τα κριτήρια της QC και έτσι στην περαιτέρω ενίσχυση του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα, θα υπήρχε απευθείας επαφή του βαλλιστικού

μέρους του CF των λίγων καναλιών, με την μακροσκοπική πηγή των θεωρητικά άπειρων καναλιών, που, όπως σημειώθηκε, είναι αναγκαία συνθήκη για την παρατήρηση της QC. Τα memristors που παρουσιάζουν κβαντική αγωγιμότητα μπορούν να δώσουν λύση στα προβλήματα των CBRAMs, όσον αφορά τη γραμμικότητα στη μεταβολή της αγωγιμότητας τους υπό την εφαρμογή παλμοσειρών ενίσχυσης και αποδυνάμωσης και την σταθερότητα των χαρακτηριστικών τους. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν multi-bit μνήμες, λόγω των καταστάσεων QC που παρουσιάζουν. Τέλος, άλλες εφαρμογές που έχουν παρουσιαστεί για αυτόν τον τύπο των memristors, είναι στους τομείς των λογικών κυκλωμάτων, της νευρομορφικής επεξεργασίας και των συστημάτων αλληλεπίδρασης οπτικών ερεθισμάτων με ηλεκτρονικές διατάξεις.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάστηκε ένας τεχνητός νευρώνας LIF με διαφορετικές διατάξεις. Απώτερος σκοπός του πειράματος είναι να εξεταστεί η δυνατότητα του συνδυασμού του νευρώνα με έναν αισθητήρα, ώστε να δημιουργηθεί μία ολοκληρωμένη συσκευή αίσθησης. Μελετήθηκαν διατάξεις με παλμογεννήτρια και με κύκλωμα παραγωγής παλμών και με δύο διαφορετικά memristor. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το memristor $Ag/SiO_2/TiN$ με τον TS τρόπο λειτουργίας και την παλμογεννήτρια. Ο νευρώνας έδωσε παλμούς και παρατηρήθηκε αύξηση αυτών με ισχυρότερο ερέθισμα, όμως και δυσκολία επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Αυτό συμβαίνει, λόγω του ότι το TS αυτών των memristor είναι αρκετά ασταθές και, ενώ αρχικά ο νευρώνας λειτουργεί ομαλά, σύντομα το CF που δημιουργείται δυναμώνει και το memristor περνάει σε MS, παύοντας την παραγωγή παλμών. Ένας ακόμα λόγος μη ομαλής λειτουργίας είναι ότι το παράθυρο μνήμης του TS βρίσκεται σε πολύ υψηλές τιμές αντίστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να βρεθούν οι κατάλληλοι αντιστάτες ώστε να διατηρείται η συνθήκη ομαλής φόρτισης και αποφόρτισης των βρόχων του κυκλώματος, που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα ίδια αποτελέσματα και οι ίδιες δυσκολίες επαναληψιμότητας εμφανίστηκαν και στην περίπτωση χρήσης του κυκλώματος παραγωγής παλμών. Μέσω της μεταβολής μιας τιμής αντίστασης με τη χρήση ενός ποτενσιόμετρου, μπορεί να μεταβάλλεται η συχνότητα της παλμοσειράς ερεθίσματος που παράγει το κύκλωμα. Με την κατάλληλη επιλογή του εύρους συχνοτήτων, όπως σημειώθηκε πιο πάνω, έγινε η αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων της διάταξης με την παλμογεννήτρια και φυσικά η εντονότερη παραγωγή παλμών με την εφαρμογή ισχυρότερου ερεθίσματος. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το memristor $Ag/SiO_2/Pt\ NPs$ για να ξεπεραστούν τα προβλήματα επαναληψιμότητας του τεχνητού νευρώνα. Η καθαρά πτητική φύση του είναι η πιο συναφής στην λειτουργία των βιολογικών νευρώνων και η σταθερότητα του TS οδηγεί σε πιο συνεπή παραγωγή παλμών. Και για τις δύο περιπτώσεις χρήσης παλμογεννήτριας και κυκλώματος παραγωγής παλμών, η συχνότητα παραγωγής παλμών από τον νευρώνα μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του ερεθίσματος, επιτυγχάνοντας το κύριο χαρακτηριστικό των νευρώνων. Θεωρητικά, η διάταξη του τεχνητού νευρώνα με το κύκλωμα παραγωγής παλμών και το πτητικό memristor, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνδυασμό με αισθητήρα. Αντικαθιστώντας το ποτενσιόμετρο με οποιονδήποτε αισθητήρα, που μεταβάλλει την τιμή αντίστασης του, θα μπορούσαν να αναπαραχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα. Όμως, οι παραγόμενες παλμοσειρές με 50% duty cycle δεν αποτελούν ιδανικά ερεθίσματα αυξανόμενης έντασης. Επιπλέον, για να επιτευχθούν τα ζητούμενα χαρακτηριστικά, θα πρέπει να βρεθούν τα κατάλληλα κυκλωματικά στοιχεία και ο κατάλληλος αισθητήρας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του memristor, κάτι που αποτελεί δύσκολη συνθήκη για να επιτευχθεί.

Παρόλα αυτά, το κύκλωμα παραγωγής παλμών δίνει και άλλες δυνατότητες για ένταξη αισθητήρων σε αυτό, με καλύτερη επιλογή την εισαγωγή σε ένα διαιρέτη για τη μεταβολή της τάσης αναφοράς, καθώς έτσι ξεπερνιέται το εμπόδιο του σταθερού duty cycle. Μόνο μειονέκτημα σε αυτό, αποτελεί η πολύ απότομη αλλαγή στην ένταση του ερεθίσματος, αφού μία μικρή αλλαγή της τάσης αναφοράς μπορεί να μικρύνει το ενδιαμέσο διάστημα των παλμών και να μεγαλώσει το πλάτος πολύ έντονα. Με περαιτέρω διαμόρφωση των κυκλωμάτων παραγωγής παλμών και του νευρώνα, η ένταξη αισθητήρα στη διάταξη μπορεί να γίνει δυνατή και μια εξέλιξη θα μπορούσε να είναι ο συνδυασμός με συστοιχίες αισθητήρων και συνάψεων, μέσω των οποίων θα τροφοδοτείται ο νευρώνας και θα ελέγχεται η παραγωγή παλμών με βάση τις τιμές των αισθητήρων και τα συναπτικά βάρη.

Βιβλιογραφία

- [1] Thomas N. Theis and H.-S. Philip Wong. The end of moore's law: A new beginning for information technology. *Computing in Science and Engineering*, 19:41–50, 3 2017.
- [2] Guilherme Neves, Sam F. Cooke, and Tim V. P. Bliss. Synaptic plasticity, memory and the hippocampus: a neural network approach to causality. *Nature Reviews Neuroscience*, 9:65–75, 1 2008.
- [3] C. Mead. Neuromorphic electronic systems. *Proceedings of the IEEE*, 78:1629–1636, 1990.
- [4] Sanghyeon Choi, Jehyeon Yang, and Gunuk Wang. Emerging memristive artificial synapses and neurons for energy efficient neuromorphic computing. *Advanced Materials*, 32:2004659, 12 2020.
- [5] L. Chua. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18:507–519, 1971.
- [6] Dmitri B. Strukov, Gregory S. Snider, Duncan R. Stewart, and R. Stanley Williams. The missing memristor found. *Nature*, 453:80–83, 5 2008.
- [7] Antonio C Torrezan, John Paul Strachan, Gilberto Medeiros-Ribeiro, and R Stanley Williams. Sub-nanosecond switching of a tantalum oxide memristor. *Nanotechnology*, 22:485203, 12 2011.
- [8] B. Govoreanu, G.S. Kar, Y-Y. Chen, V. Paraschiv, S. Kubicek, A. Fantini, I.P. Radu, L. Goux, S. Clima, R. Degraeve, N. Jossart, O. Richard, T. Vandeweyer, K. Seo, P. Hendrickx, G. Pourtois, H. Bender, L. Altimime, D.J. Wouters, J.A. Kittl, and M. Jurczak. $10 \times 10 \text{ nm}^2$ Hf/HfO_x crossbar resistive ram with excellent performance, reliability and low-energy operation. pages 31.6.1–31.6.4. *IEEE*, 12 2011.
- [9] Hao Jiang, Lili Han, Peng Lin, Zhongrui Wang, Moon Hyung Jang, Qing Wu, Mark Barnell, J. Joshua Yang, Huolin L. Xin, and Qiangfei Xia. Sub-10 nm Ta channel responsible for superior performance of a HfO₂ memristor. *Scientific Reports*, 6:28525, 6 2016.
- [10] Myoung-Jae Lee, Chang Bum Lee, Dongsoo Lee, Seung Ryul Lee, Man Chang, Ji Hyun Hur, Young-Bae Kim, Chang-Jung Kim, David H. Seo, Sunae Seo, U-In Chung, In-Kyeong Yoo, and Kinam Kim. A fast, high-endurance and scalable non-volatile

- memory device made from asymmetric Ta_2O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structures. *Nature Materials*, 10:625–630, 8 2011.
- [11] Z. Wei, Y. Kanzawa, K. Arita, Y. Katoh, K. Kawai, S. Muraoka, S. Mitani, S. Fujii, K. Katayama, M. Iijima, T. Mikawa, T. Ninomiya, R. Miyanaga, Y. Kawashima, K. Tsuji, A. Himeno, T. Okada, R. Azuma, K. Shimakawa, H. Sugaya, T. Takagi, R. Yasuhara, K. Horiba, H. Kumigashira, and M. Oshima. Highly reliable TaOx ReRAM and direct evidence of redox reaction mechanism. pages 1–4. *IEEE*, 12 2008.
- [12] M.N. Kozicki, M. Park, and M. Mitkova. Nanoscale memory elements based on solid-state electrolytes. *IEEE Transactions On Nanotechnology*, 4:331–338, 5 2005.
- [13] M. Cassinero, N. Ciocchini, and D. Ielmini. Logic computation in phase change materials by threshold and memory switching. *Advanced Materials*, 25:5975–5980, 11 2013.
- [14] Robert Buhrman. Spin torque MRAM- challenges and prospects. pages 33–33. *IEEE*, 6 2009.
- [15] Evgeny Y. Tsymbal and Hermann Kohlstedt. Tunneling across a ferroelectric. *Science*, 313:181–183, 7 2006.
- [16] Wuhong Xue, Shuang Gao, Jie Shang, Xiaohui Yi, Gang Liu, and Run Wei Li. Recent advances of quantum conductance in memristors. *Advanced Electronic Materials*, 5:1800854, 9 2019.
- [17] Rainer Waser, Regina Dittmann, Georgi Staikov, and Kristof Szot. Redox-based resistive switching memories - nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. *Advanced Materials*, 21:2632–2663, 7 2009.
- [18] Panagiotis Bousoulas, Dionisis Sakellaropoulos, Charalampos Papakonstantinou, Stavros Kitsios, Chris Arvanitis, Emmanouil Bagakis, and Dimitris Tsoukalas. Investigating the origins of ultra-short relaxation times of silver filaments in forming-free SiO_2 -based conductive bridge memristors. *Nanotechnology*, 31:454002, 11 2020.
- [19] Michael Lübben and Ilia Valov. Active electrode redox reactions and device behavior in ECM type resistive switching memories. *Advanced Electronic Materials*, 5:1800933, 9 2019.
- [20] Panagiotis Bousoulas, Marianthi Panagopoulou, Nikos Boukos, and Dimitris Tsoukalas. Emulating artificial neuron and synaptic properties with SiO_2 -based memristive devices by tuning threshold and bipolar switching effects. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54:225303, 6 2021.
- [21] F. Pan, S. Gao, C. Chen, C. Song, and F. Zeng. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 83:1–59, 9 2014.

- [22] Yuchao Yang, Peng Gao, Siddharth Gaba, Ting Chang, Xiaoqing Pan, and Wei Lu. Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories. *Nature Communications*, 3:732, 1 2012.
- [23] Yuchao Yang, Peng Gao, Linze Li, Xiaoqing Pan, Stefan Tappertzhofen, ShinHyun Choi, Rainer Waser, Ilia Valov, and Wei D. Lu. Electrochemical dynamics of nanoscale metallic inclusions in dielectrics. *Nature Communications*, 5:4232, 9 2014.
- [24] Irimi Michelakaki, Panagiotis Bousoulas, Spyros Stathopoulos, Nikos Boukos, and Dimitris Tsoukalas. Coexistence of bipolar and threshold resistive switching in TiO_2 based structure with embedded hafnium nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50:045103, 2 2017.
- [25] Y. Shi, C. Pan, V. Chen, N. Raghavan, K. L. Pey, F. M. Puglisi, E. Pop, H.-S. P. Wong, and M. Lanza. Coexistence of volatile and non-volatile resistive switching in 2D h-BN based electronic synapses. pages 5.4.1–5.4.4. *IEEE*, 12 2017.
- [26] Nikhil Shukla, Ram Krishna Ghosh, Benjamin Grisafe, and Suman Datta. Fundamental mechanism behind volatile and non-volatile switching in metallic conducting bridge RAM. pages 4.3.1–4.3.4. *IEEE*, 12 2017.
- [27] Revannath Dnyandeo Nikam, Krishn Gopal Rajput, and Hyunsang Hwang. Single atom quantum point contact switch using atomically thin Hexagonal Boron Nitride. *Small*, 17:2006760, 2 2021.
- [28] Dionisis Sakellaropoulos, Panagiotis Bousoulas, Charalampos Papakonstantinou, Stavros Kitsios, and Dimitris Tsoukalas. Spatial confinement effects of embedded nanocrystals on multibit and synaptic properties of forming free SiO_2 -based conductive bridge random access memory. *IEEE Electron Device Letters*, 41:1013–1016, 7 2020.
- [29] Dionisis Sakellaropoulos, Panagiotis Bousoulas, Charalampos Papakonstantinou, Stavros Kitsios, and Dimitris Tsoukalas. Impact of active electrode on the synaptic properties of SiO_2 -based forming-free conductive bridge memory. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68:1598–1603, 4 2021.
- [30] Panagiotis Bousoulas, Charalampos Papakonstantinou, Stavros Kitsios, Konstantinos Moustakas, Georgios Ch. Sirakoulis, and Dimitris Tsoukalas. Emulating artificial synaptic plasticity characteristics from SiO_2 -based conductive bridge memories with Pt nanoparticles. *Micromachines*, 12:306, 3 2021.
- [31] J. D. McBrayer, R. M. Swanson, T. W. Sigmon, and J. Bravman. Observation of rapid field aided diffusion of silver in metal oxide semiconductor structures. *Applied Physics Letters*, 43:653–654, 10 1983.
- [32] Oleg A. Yeshchenko, Igor M. Dmitruk, Alexandr A. Alexeenko, and Andriy M. Dmytruk. Size-dependent melting of spherical copper nanoparticles embedded in a silica matrix. *Physical Review B*, 75:085434, 2 2007.

- [33] Daniele Ielmini. Modeling the universal set/reset characteristics of bipolar RRAM by field- and temperature-driven filament growth. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58:4309–4317, 12 2011.
- [34] Ying Zhao, Cong Fang, Xumeng Zhang, Xiaoxin Xu, Tiancheng Gong, Qing Luo, Chengying Chen, Qi Liu, Hangbing Lv, Qiang Li, Feng Zhang, Ling Li, and Ming Liu. A compact model for drift and diffusion memristor applied in neuron circuits design. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65:4290–4296, 10 2018.
- [35] Wei Wang, Mario Laudato, Elia Ambrosi, Alessandro Bricalli, Erika Covi, Yu-Hsuan Lin, and Daniele Ielmini. Volatile resistive switching memory based on Ag ion drift/diffusion part i: Numerical modeling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66:3795–3801, 9 2019.
- [36] P. Bousoulas, P. Asenov, I. Karageorgiou, D. Sakellaropoulos, S. Stathopoulos, and D. Tsoukalas. Engineering amorphous-crystalline interfaces in $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-y}$ -based bilayer structures for enhanced resistive switching and synaptic properties. *Journal of Applied Physics*, 120:154501, 10 2016.
- [37] Wei Wang, Ming Wang, Elia Ambrosi, Alessandro Bricalli, Mario Laudato, Zhong Sun, Xiaodong Chen, and Daniele Ielmini. Surface diffusion-limited lifetime of silver and copper nanofilaments in resistive switching devices. *Nature Communications*, 10:81, 12 2019.
- [38] Jonathan M. Goodwill, Georg Ramer, Dasheng Li, Brian D. Hoskins, Georges Pavlidis, Jabez J. McClelland, Andrea Centrone, James A. Bain, and Marek Skowronski. Spontaneous current constriction in threshold switching devices. *Nature Communications*, 10:1628, 12 2019.
- [39] Dmitri B. Strukov, Fabien Alibart, and R. Stanley Williams. Thermophoresis/diffusion as a plausible mechanism for unipolar resistive switching in metal–oxide–metal memristors. *Applied Physics A*, 107:509–518, 6 2012.
- [40] Kyeonghun Kim, Sungmin Kim, Sehoon An, Geun-Hyuk Lee, Donghwan Kim, and Seunghee Han. Anti-reflection porous SiO_2 thin film deposited using reactive high-power impulse magnetron sputtering at high working pressure for use in a-Si:H solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130:582–586, 11 2014.
- [41] W. M. Arnoldbik, P. A. Zeijlmans van Emmichoven, and F. H. P. M. Habraken. Electronic sputtering of silicon suboxide films by swift heavy ions. *Physical Review Letters*, 94:245504, 6 2005.
- [42] Menelaos Tsigkourakos, Maria Kainourgiaki, Evangelos Skotadis, Konstantinos P. Giannakopoulos, Dimitris Tsoukalas, and Yannis S. Raptis. Capping technique for chemical vapor deposition of large and uniform MoS_2 flakes. *Thin Solid Films*, 733:138808, 9 2021.
- [43] Wei Wang, Erika Covi, Yu-Hsuan Lin, Elia Ambrosi, Alessandro Milozzi, Caterina Sbandati, Matteo Farronato, and Daniele Ielmini. Switching dynamics of ag-based

filamentary volatile resistive switching devices—part ii: Mechanism and modeling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68:4342–4349, 9 2021.

- [44] Mario Lanza, Rainer Waser, Daniele Ielmini, J. Joshua Yang, Ludovic Goux, Jordi Suñe, Anthony Joseph Kenyon, Adnan Mehonic, Sabina Spiga, Vikas Rana, Stefan Wiefels, Stephan Menzel, Ilia Valov, Marco A. Villena, Enrique Miranda, Xu Jing, Francesca Campabadal, Mireia B. Gonzalez, Fernando Aguirre, Felix Palumbo, Kaichen Zhu, Juan Bautista Roldan, Francesco Maria Puglisi, Luca Larcher, Tuo-Hung Hou, Themis Prodromakis, Yuchao Yang, Peng Huang, Tianqing Wan, Yang Chai, Kin Leong Pey, Nagarajan Raghavan, Salvador Dueñas, Tao Wang, Qiangfei Xia, and Sebastian Pazos. Standards for the characterization of endurance in resistive switching devices. *ACS Nano*, 15:17214–17231, 11 2021.
- [45] Daniele Ielmini and H.-S. Philip Wong. In-memory computing with resistive switching devices. *Nature Electronics*, 1:333–343, 6 2018.
- [46] Felix Palumbo, Chao Wen, Salvatore Lombardo, Sebastian Pazos, Fernando Aguirre, Moshe Eizenberg, Fei Hui, and Mario Lanza. A review on dielectric breakdown in thin dielectrics: Silicon dioxide, high k , and layered dielectrics. *Advanced Functional Materials*, 30:1900657, 5 2020.
- [47] Juan B. Roldán, Gerardo González-Cordero, Rodrigo Picos, Enrique Miranda, Félix Palumbo, Francisco Jiménez-Molinos, Enrique Moreno, David Maldonado, Santiago B. Baldomá, Mohamad Moner Al Chawa, Carol de Benito, Stavros G. Stavrinos, Jordi Suñe, and Leon O. Chua. On the thermal models for resistive random access memory circuit simulation. *Nanomaterials*, 11:1261, 5 2021.
- [48] Ami Citri and Robert C Malenka. Synaptic plasticity: Multiple forms, functions, and mechanisms. *Neuropsychopharmacology*, 33:18–41, 1 2008.
- [49] Zhongrui Wang, Saumil Joshi, Sergey E. Savel'ev, Hao Jiang, Rivu Midya, Peng Lin, Miao Hu, Ning Ge, John Paul Strachan, Zhiyong Li, Qing Wu, Mark Barnell, Geng-Lin Li, Huolin L. Xin, R. Stanley Williams, Qiangfei Xia, and J. Joshua Yang. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing. *Nature Materials*, 16:101–108, 1 2017.
- [50] Shimeng Yu, Pai-Yu Chen, Yu Cao, Lixue Xia, Yu Wang, and Huaqiang Wu. Scaling-up resistive synaptic arrays for neuro-inspired architecture: Challenges and prospect. pages 17.3.1–17.3.4. *IEEE*, 12 2015.
- [51] G.W. Burr, R.M. Shelby, C. di Nolfo, J.W. Jang, R.S. Shenoy, P. Narayanan, K. Virwani, E.U. Giacometti, B. Kurdi, and H. Hwang. Experimental demonstration and tolerancing of a large-scale neural network (165,000 synapses), using phase-change memory as the synaptic weight element. pages 29.5.1–29.5.4. *IEEE*, 12 2014.
- [52] R. Landauer. Spatial variation of currents and fields due to localized scatterers in metallic conduction. *IBM Journal of Research and Development*, 1:223–231, 7 1957.

- [53] B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel, and C. T. Foxon. Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas. *Physical Review Letters*, 60:848–850, 2 1988.
- [54] Henk van Houten and Carlo Beenakker. Quantum point contacts. *Physics Today*, 49:22–27, 7 1996.
- [55] C. Z. Li and N. J. Tao. Quantum transport in metallic nanowires fabricated by electrochemical deposition/dissolution. *Applied Physics Letters*, 72:894–896, 2 1998.
- [56] Kazuya Terabe, Tsuyoshi Hasegawa, Changhao Liang, and Masakazu Aono. Control of local ion transport to create unique functional nanodevices based on ionic conductors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8:536–542, 1 2007.
- [57] Ryan Requist, Pier Paolo Baruselli, Alexander Smogunov, Michele Fabrizio, Silvio Modesti, and Erio Tosatti. Metallic, magnetic and molecular nanocontacts. *Nature Nanotechnology*, 11:499–508, 6 2016.
- [58] Writam Banerjee and Hyunsang Hwang. Quantized conduction device with 6 bit storage based on electrically controllable break junctions. *Advanced Electronic Materials*, 5:1900744, 12 2019.
- [59] F.-Q. Xie, R. Maul, A. Augenstein, Ch. Obermair, E. B. Starikov, G. Schön, Th. Schimmel, and W. Wenzel. Independently switchable atomic quantum transistors by reversible contact reconstruction. *Nano Letters*, 8:4493–4497, 12 2008.
- [60] K. Terabe, T. Hasegawa, T. Nakayama, and M. Aono. Quantized conductance atomic switch. *Nature*, 433:47–50, 1 2005.
- [61] A. Mehonic, A. Vrajitoarea, S. Cuff, S. Hudziak, H. Howe, C. Labbé, R. Rizk, M. Pepper, and A. J. Kenyon. Quantum conductance in silicon oxide resistive memory devices. *Scientific Reports*, 3:2708, 12 2013.
- [62] Chandreswar Mahata, Muhammad Ismail, and Sungjun Kim. Conductance quantization control and neuromorphic properties in Pt-nanoparticle incorporated HfAlO_x alloy memristor. *Applied Physics Letters*, 119:221601, 11 2021.
- [63] George W. Hanson. *Fundamentals of Nanoelectronics*. Pearson/Prentice Hall, 2008.
- [64] Jun Yao, Lin Zhong, Douglas Natelson, and James M. Tour. In situ imaging of the conducting filament in a silicon oxide resistive switch. *Scientific Reports*, 2:242, 12 2012.
- [65] S. R. Nandakumar, Marie Minvielle, Saurabh Nagar, Catherine Dubourdieu, and Bipin Rajendran. A 250 mV Cu/SiO₂/W memristor with half-integer quantum conductance states. *Nano Letters*, 16:1602–1608, 3 2016.
- [66] Deji Akinwande, Cedric Huyghebaert, Ching-Hua Wang, Martha I. Serna, Stijn Goossens, Lain-Jong Li, H.-S. Philip Wong, and Frank H. L. Koppens. Graphene and two-dimensional materials for silicon technology. *Nature*, 573:507–518, 9 2019.

- [67] Zuheng Wu, Xiaolong Zhao, Yang Yang, Wei Wang, Xumeng Zhang, Rui Wang, Rongrong Cao, Qi Liu, and Writam Banerjee. Transformation of threshold volatile switching to quantum point contact originated nonvolatile switching in graphene interface controlled memory devices. *Nanoscale Advances*, 1:3753–3760, 2019.
- [68] Qishao Lu, Huaguang Gu, Zhuoqin Yang, Xia Shi, Lixia Duan, and Yanhong Zheng. Dynamics of firing patterns, synchronization and resonances in neuronal electrical activities: experiments and analysis. *Acta Mechanica Sinica*, 24:593–628, 12 2008.
- [69] Giacomo Indiveri, Bernabé Linares-Barranco, Tara Julia Hamilton, André van Schaik, Ralph Etienne-Cummings, Tobi Delbruck, Shih-Chii Liu, Piotr Dudek, Philipp Häfliger, Sylvie Renaud, Johannes Schemmel, Gert Cauwenberghs, John Arthur, Kai Hynna, Fopefolu Folowosele, Sylvain Saighi, Teresa Serrano-Gotarredona, Jayawan Wijekoon, Yingxue Wang, and Kwabena Boahen. Neuromorphic silicon neuron circuits. *Frontiers in Neuroscience*, 5, 2011.
- [70] Xumeng Zhang, Wei Wang, Qi Liu, Xiaolong Zhao, Jinsong Wei, Rongrong Cao, Zhihong Yao, Xiaoli Zhu, Feng Zhang, Hangbing Lv, Shibing Long, and Ming Liu. An artificial neuron based on a threshold switching memristor. *IEEE Electron Device Letters*, 39:308–311, 2 2018.
- [71] L.F. Abbott. Lapicque’s introduction of the integrate-and-fire model neuron (1907). *Brain Research Bulletin*, 50:303–304, 11 1999.
- [72] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley. The components of membrane conductance in the giant axon of loligo. *The Journal of Physiology*, 116:473–496, 4 1952.
- [73] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley. Currents carried by sodium and potassium ions through the membrane of the giant axon of loligo. *The Journal of Physiology*, 116:449–472, 4 1952.
- [74] A. L. Hodgkin, A. F. Huxley, and B. Katz. Measurement of current voltage relations in the membrane of the giant axon of loligo. *The Journal of Physiology*, 116:424–448, 4 1952.
- [75] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117:500–544, 8 1952.
- [76] He Ming Huang, Rui Yang, Zheng Hua Tan, Hui Kai He, Wen Zhou, Jue Xiong, and Xin Guo. Quasi Hodgkin–Huxley neurons with leaky integrate and fire functions physically realized with memristive devices. *Advanced Materials*, 31:1803849, 1 2019.
- [77] Matthew D. Pickett, Gilberto Medeiros-Ribeiro, and R. Stanley Williams. A scalable neuristor built with Mott memristors. *Nature Materials*, 12:114–117, 2 2013.
- [78] Kuan Wang, Qing Hu, Bin Gao, Qi Lin, Fu-Wei Zhuge, Da-You Zhang, Lun Wang, Yu-Hui He, Ralph H. Scheicher, Hao Tong, and Xiang-Shui Miao. Threshold switching memristor-based stochastic neurons for probabilistic computing. *Materials Horizons*, 8:619–629, 2021.

- [79] Jiaxue Zhu, Xumeng Zhang, Ming Wang, Rui Wang, Pei Chen, Lingli Cheng, and Qi Liu. An artificial spiking nociceptor integrating pressure sensors and memristors. *IEEE Electron Device Letters*, 43:962–965, 6 2022.
- [80] Tianda Fu, Xiaomeng Liu, Shuai Fu, Trevor Woodard, Hongyan Gao, Derek R. Lovley, and Jun Yao. Self-sustained green neuromorphic interfaces. *Nature Communications*, 12:3351, 12 2021.
- [81] Yifei Pei, Lei Yan, Zuheng Wu, Jikai Lu, Jianhui Zhao, Jingsheng Chen, Qi Liu, and Xiaobing Yan. Artificial visual perception nervous system based on low-dimensional material photoelectric memristors. *ACS Nano*, 15:17319–17326, 11 2021.
- [82] William Hayt, Jack Kemmerly, and Steven Durbin. *Engineering circuit analysis*. McGraw-Hill Education, 8th edition, 8 2011.
- [83] Taehyun Kim, Seung Hwan Kim, Jae Hyeun Park, June Park, Euyjin Park, Seung Geun Kim, and Hyun Yong Yu. An artificial neuron using a bipolar electrochemical metallization switch and its enhanced spiking properties through filament confinement. *Advanced Electronic Materials*, 7:2000410, 1 2021.
- [84] P. Bousoulas, C. Tsiouostas, J. Hadfield, V. Aslanidis, S. Limberopoulos, and D. Tsoukalas. Low power stochastic neurons from SiO_2 -based bilayer conductive bridge memristors for probabilistic spiking neural network applications—part i: Experimental characterization. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 69:2360–2367, 5 2022.
- [85] Pablo Stoliar, Julien Tranchant, Benoit Corraze, Etienne Janod, Marie-Paule Besland, Federico Tesler, Marcelo Rozenberg, and Laurent Cario. A leaky-integrate-and-fire neuron analog realized with a Mott insulator. *Advanced Functional Materials*, 27:1604740, 3 2017.
- [86] Durjoy Dev, Adithi Krishnaprasad, Mashiyat S. Shawkat, Zhezhi He, Sonali Das, Deliang Fan, Hee-Suk Chung, Yeonwoong Jung, and Tania Roy. 2D MoS_2 -based threshold switching memristor for artificial neuron. *IEEE Electron Device Letters*, 41:936–939, 6 2020.
- [87] Yi-Fan Lu, Yi Li, Haoyang Li, Tian-Qing Wan, Xiaodi Huang, Yu-Hui He, and Xiangshui Miao. Low-power artificial neurons based on Ag/TiN/HfAlO_x/Pt threshold switching memristor for neuromorphic computing. *IEEE Electron Device Letters*, 41:1245–1248, 8 2020.
- [88] Φωτεινή Βασιλοπούλου, Θανάσης Μάρκου, Χρήστος Μυστιλίδης, and Άγγελος Φερίκογλου. Σχεδιασμός Συστήματος Μέτρησης Μήτρας Αισθητήρων Πίεσης, 2019.
- [89] P. Bousoulas, D. Sakellaropoulos, and D. Tsoukalas. Tuning the analog synaptic properties of forming free SiO_2 memristors by material engineering. *Applied Physics Letters*, 118:143502, 4 2021.

Ακρωνύμια

AE Active Electrode.

ANN Artificial Neural Network.

CBRAM Conductive Bridge Random Access Memory.

CDF Cumulative Distribution Function.

CF Conductive Filament.

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor.

CVD Chemical Vapor Deposition.

ECM Electrochemical Metallization.

HH Hodgkin Huxley.

HRS High Resistance State.

IE Inert Electrode.

IF Integrate and Fire.

LIF Leaky Integrate and Fire.

LRS Low Resistance State.

LTP Long Term Plasticity.

MIM Metal Insulator Metal.

MS Memory Switching.

PCM Phase Change Memory.

PPD Pair-Pulsed Depression.

PPF Pair-Pulsed Facilitation.

QC Quantum Conductance.

QPC Quantum Point Contact.

RS Resistive Switching.

STP Short Term Plasticity.

TEM Transmission Electron Microscope.

TS Threshold Switching.

VCM Valence Change Mechanism.