



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**« ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ »**

**Προσομοίωση και Μοντελοποίηση Τεχνολογιών Μνήμης  
Μεταβλητής Αντίστασης για Νευρομορφικές Εφαρμογές**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΤΣΙΟΥΣΤΑΣ**

**Επιβλέπων :** Δημήτριος Τσουκαλάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021





## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ »

### **Προσομοίωση και Μοντελοποίηση Τεχνολογιών Μνήμης Μεταβλητής Αντίστασης για Νευρομορφικές Εφαρμογές**

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΤΣΙΟΥΣΤΑΣ**

**Επιβλέπων :** Δημήτριος Τσουκαλάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Σεπτέμβριο του 2021

..... Καθ. Δημήτριος Τσουκαλάς Καθ. Ανδρέας-Γεώργιος Σταφυλοπάτης .....  
..... Δημήτριος Σούντρης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

.....  
ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΤΣΙΟΥΣΤΑΣ

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

Copyright © Χαράλαμπος Τσιούστας, 2021. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, η αποθήκευση και διανομή για κάποιο σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας πληροφοριών σε συνδυασμό με την επανάσταση του κλάδου της τεχνητής νοημοσύνης κατέστησε αναγκαία την σχεδίαση αξιόπιστων διατάξεων που ταυτόχρονα να επιδεικνύουν ικανότητες υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης. Οι διατάξεις μνήμης μεταβλητής αντίστασης αποκτούν αυξανόμενο ενδιαφέρον καθώς αποτελούν τους βασικούς υποψήφιους για την αντικατάσταση των κλασσικών μνημών, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν απλή και ελκυστική δομή, υψηλές ταχύτητες επεξεργασίας, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και είναι ανθεκτικές στο χρόνο. Ταυτόχρονα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση λογικών εκφράσεων αλλά και για την κατασκευή τεχνητών νευρωνικών δικτύων με απώτερο στόχο την χρήση τους για νευρομορφικούς υπολογισμούς υψηλού βαθμού ακρίβειας.

Στη παρούσα εργασία αρχικά πραγματοποιείται μία απόπειρα σχεδίασης και κατασκευής ενός γενικού μοντέλου προσομοίωσης του memristor στο λογισμικό της Matlab, το οποίο να είναι ικανό να περιλαμβάνει όλους τους φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν την λειτουργία του και να περιγράφει τόσο την Bipolar όσο και την Threshold συμπεριφορά. Στην συνέχεια κατασκευάζεται μία αρχιτεκτονική αλληλοδιασταυρώμενων δομών (Cross – Bar structure) και εξετάζεται η απόκριση της κατά την εγγραφή και την ανάγνωση των στοιχείων της. Έπειτα αξιοποιώντας τις παραπάνω τεχνολογίες πραγματοποιείται ανάλυση και προσομοίωση της λογικής πύλης NAND. Τέλος εξετάζουμε τις νευρομορφικές εφαρμογές και πιο συγκεκριμένα την περίπτωση αναγνώρισης εικόνων με την μέθοδο Στοχαστικής Καθοδικής Κλίσης (Stochastic Gradient Descent).

**Λέξεις Κλειδιά:** CBRAM, μνήμη μεταβλητής αντίστασης, Αγώγιμο Νήμα, Threshold mode, Bipolar mode, Ενίσχυση LTP, Αποδυνάμωση LTD, Cross – Bar Memory Array, κατάσταση χαμηλής-υψηλής αντίστασης, SET-RESET, Ρεύματα Διαρροής, Read Margin, Write Margin, Τεχνικές Ανάγνωσης, Κατανάλωση Ισχύος, Λογική πύλη NAND, Αναγνώριση Εικόνων



# ABSTRACT

The rapid development of information technology in combination with the revolution of the artificial intelligence industry made it necessary to design reliable devices that at the same time demonstrate high-density storage capabilities. CBRAM devices are gaining more and more interest as they are the main candidates for the replacement of classic memories, while at the same time they have a simple and attractive structure, high processing speeds, low power consumption and are durable over time. At the same time, they can be used for the implementation of logical expressions but also for the construction of artificial neural networks with the ultimate goal of using them for neuromorphic calculations with high accuracy.

In the present work, an attempt is initially made to design and construct a general simulation model of the memristor in Matlab software, which is capable of including all the physical mechanisms governing its operation and describing both Bipolar and Threshold mode. Then a Cross – Bar architecture is constructed and its response is examined under writing and reading operations. Then, utilizing the above technologies, the NAND logic gate is analysed and simulated. Finally, we examine the neuromorphic applications and more specifically the case of image recognition with Stochastic Gradient Descent.

**Keywords:** CBRAM, memristor, Threshold mode, Conductive Filament, Bipolar mode, Potentiation LTP, Depression LTD, Cross – Bar Memory Array, LRS-HRS, SET-RESET, Sneak Path Currents, Read Margin, Write Margin, Read Schemes, Power Consumption, Logic Gate NAND, Image Recognition





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημήτριο Τσουκαλά για την ευκαιρία εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής και για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον μεταδιδακτορικό ερευνητή Δρ. Παναγιώτη Μπούσουλα για τις κρίσιμες συμβουλές του, την διορατικότητα του και την άνευ ωραρίου διαθεσιμότητα του, προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Οφείλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Προηγμένων Υλικών και Μικρο – Νανοδιατάξεων και ιδίως τον υποψήφιο διδάκτορα Σταύρο Κίτσιο, τον συμφοιτητή μου Σταύρο Λυμπερόπουλο και κυρίως τον φίλο μου Τζακ Χάντφιλντ.

Επίσης χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Γκέλυ, που ποτέ δεν έπαψε να πιστεύει σε μένα και να με παροτρύνει να δώσω όλο μου το είναι.

Τέλος ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τους γονείς μου και τις γιαγιάδες μου, για την αδιάκοπη και ανιδιοτελή στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	7
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	12
<b>1. ΤΟ MEMRISTOR</b> .....	16
1.1 Τα τέσσερα θεμελιώδη ηλεκτρονικά στοιχεία .....	17
1.2 Η διαδικασία κατασκευής μνημών CBRAM .....	18
1.3 Η αρχή λειτουργίας της μνήμης μεταβλητής αντίστασης CBRAM.....	19
1.4 Η χαρακτηριστική I-V του Memristor.....	20
1.5 Η καμπύλη υστέρησης.....	22
1.6 Οι υπεύθυνοι φυσικοί μηχανισμοί του CF .....	23
<b>2. Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b> .....	25
2.1 Η προσέγγιση του Shimeng Yu.....	26
2.2 Το διάγραμμα ροής του Bipolar μοντέλου.....	28
2.3 Το καθολικό μοντέλο του memristor .....	31
2.3.1 Οι γενικές σχέσεις που περιγράφουν το memristor .....	32
2.3.2 Οι παράμετροι του μοντέλου.....	33
2.4 DC SWEEP .....	36
2.4.1 Ο DC χαρακτηρισμός μίας Bipolar διάταξης.....	36
2.4.2 Ο DC χαρακτηρισμός μίας Threshold διάταξης.....	44
2.5 Η AC ανάλυση του μοντέλου.....	47
2.6 Η μετάβαση από Threshold σε Bipolar συμπεριφορά.....	50
<b>3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CROSS – BAR ARRAY</b> .....	51
3.1 Η αρχιτεκτονική μιας n x m Cross – Bar μνήμης.....	51
3.2 Τα Sneak Path Currents .....	53
3.3 Οι παρασιτικές αντιστάσεις.....	55
3.4 Οι τεχνικές ανάγνωσης.....	57
3.5 Write Margin .....	59
3.6 Read Margin .....	61

3.7	Power Consumption .....	68
<b>4.</b>	<b>ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝ ΚΑΙ ΕΚΦΡΑΣΕΩΝ .....</b>	<b>70</b>
4.1	Προσομοίωση της λογικής πύλης NAND .....	72
<b>5.</b>	<b>ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ.....</b>	<b>76</b>
5.1	Αναγνώριση εικόνων με SGD.....	78
5.2	Το διάγραμμα ροής του in situ training αλγορίθμου.....	79
5.3	Τα αποτελέσματα του Image Recognition .....	81
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>84</b>
6.1	Μελλοντική έρευνα .....	85
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>86</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ο νόμος του Moore και το εκτιμώμενο μήκος πύλης με την πάροδο του χρόνου..	16
Εικόνα 2: Τα τέσσερα θεμελιώδη ηλεκτρονικά στοιχεία.....	17
Εικόνα 3: Διατομή της διάταξης CBRAM. Η ανάπτυξη και η καταστροφή του CF. ....	19
Εικόνα 4: Οι χαρακτηριστικές I-V για πέντε διαφορετικές τάσεις σάρωσης 0.2V έως 0.6 Volt για μια διάταξη μνήμης μεταβλητής αντίστασης (a) $Ag/SiO_2/TiN$ και μία (b) $Cu/SiO_2/TiN$ . .....	21
Εικόνα 5: Η καμπύλη υστέρησης ενός Bipolar memristor.....	22
Εικόνα 6: Οι υπεύθυνοι φυσικοί μηχανισμοί για την δημιουργία και καταστροφή του CF. ..	23
Εικόνα 7: Το κυκλωματικό σχηματικό για το μοντέλο του memristor στο λογισμικό LTspice. .....	25
Εικόνα 8: Το συνολικό κύκλωμα μελέτης της συμπεριφοράς του memristor στο λογισμικό LTspice.....	26
Εικόνα 9: (a) Η κατακόρυφη ανάπτυξη του CF ενός CBRAM cell πριν επιτευχθεί το SET και (b) η οριζόντια διάλυση του πριν πραγματοποιηθεί το RESET. ....	27
Εικόνα 10: Το compact model του Bipolar memristor.....	29
Εικόνα 11: : Η χαρακτηριστική I-V του Bipolar memristor με βάση το μοντέλο του Shimeng Yu και Wong. ....	30
Εικόνα 12: Η υλοποίηση μη συμμετρικής χαρακτηριστικής I-V του memristor. ....	31
Εικόνα 13: Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους για τον υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων του μοντέλου. ....	35
Εικόνα 14: Η εφαρμοζόμενη τάση $V(t)$ και οι μεταβλητές κατάστασης κατακόρυφης $h(t)$ και οριζόντιας μεταβολής $r(t)$ μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	36
Εικόνα 15: Τα μεγέθη $V(t)$ , $h(t)$ και $r(t)$ μιας Bipolar διάταξης σε κοινό διάγραμμα χρόνου, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	37
Εικόνα 16: Η μεταβολή της θερμοκρασία $T$ , του ηλεκτρικού πεδίο $E$ και των αντιστάσεων $R_{on}$ και $R_{off}$ μιας Bipolar διάταξης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	37
Εικόνα 17: Η καμπύλη υστέρησης και το διάγραμμα της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος στο χρόνο μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	38
Εικόνα 18: Η κυματομορφή του ρεύματος της πειραματικής διάταξης σε κοινό διάγραμμα με το ρεύμα της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	39

Εικόνα 19: Οι χαρακτηριστικές I-V της πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	39
Εικόνα 20: Η εφαρμοζόμενη τάση V(t) και οι μεταβλητές κατάστασης κατακόρυφης h(t) και οριζόντιας μεταβολής r(t) μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς. ....	40
Εικόνα 21: Τα μεγέθη V(t), h(t) και r(t) μιας Bipolar διάταξης σε κοινό διάγραμμα χρόνου, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς. ....	41
Εικόνα 22: Η μεταβολή της θερμοκρασία T, του ηλεκτρικό πεδίο E και των αντιστάσεων <i>R<sub>on</sub></i> και <i>R<sub>off</sub></i> μιας Bipolar διάταξης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς. ....	41
Εικόνα 23: Η καμπύλη υστέρησης και το διάγραμμα της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος στο χρόνο μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς. ....	42
Εικόνα 24: Η κυματομορφή του ρεύματος της πειραματικής διάταξης σε κοινό διάγραμμα με το ρεύμα της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς. ....	42
Εικόνα 25: Οι χαρακτηριστικές I-V της πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς. ....	43
Εικόνα 26: Τα μεγέθη V(t), h(t) και r(t) σε κοινό διάγραμμα χρόνου μιας Threshold διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ....	44
Εικόνα 27: Οι χαρακτηριστικές I-V της Threshold πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό. ..	45
Εικόνα 28: Τα μεγέθη V(t), h(t) και r(t) σε κοινό διάγραμμα χρόνου μιας Threshold διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει όλους τους φυσικούς μηχανισμούς. ....	46
Εικόνα 29: Οι χαρακτηριστικές I-V της Threshold πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει όλους τους φυσικούς μηχανισμούς. ....	46
Εικόνα 30: Προσομοίωση του Potentiation και Depression μίας Bipolar διάταξης. ....	48
Εικόνα 31: Potentiation και Depression μίας Bipolar πραγματικής διάταξης. ....	48
Εικόνα 32: Προσομοίωση του Potentiation και Depression μίας Threshold διάταξης. ....	49
Εικόνα 33: Η μετάβαση από την Threshold στην Bipolar συμπεριφορά. ....	50
Εικόνα 34: 3D Cross - Bar μνήμη. ....	51
Εικόνα 35: Η αρχιτεκτονική μίας n x m Cross - Bar μνήμης. ....	52
Εικόνα 36: Το misreading του Selected Cell εξαιτίας των Sneak Path Currents. ....	53
Εικόνα 37: Οι διαδρομές των <i>I<sub>read</sub></i> και <i>I<sub>sneak</sub></i> κατά την ανάγνωση του στοιχείου (1,4) σε μία 2 x 2 μνήμη Cross – Bar. ....	54

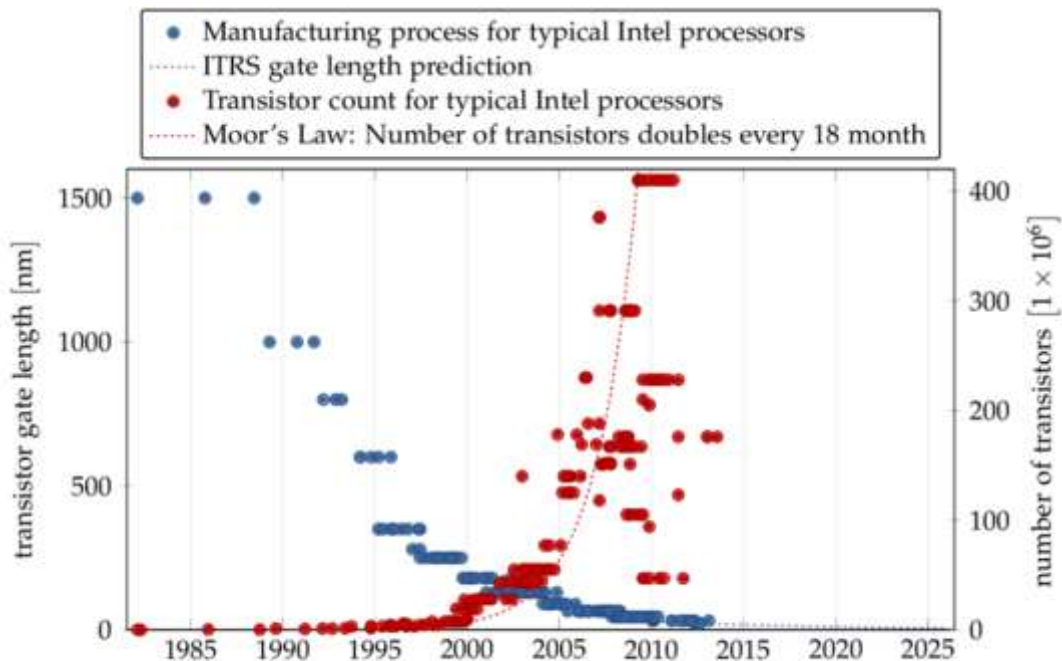
Εικόνα 38: Οι πιθανές διαδρομές των Sneak Path Currents κατά την ανάγνωση του στοιχείου (1,64) σε μία 32 x 32 μνήμη Cross – Bar. ....	55
Εικόνα 39: Το κύκλωμα για την εκτίμηση της πτώσης τάσης στα memristor λόγω των παρασιτικών αντιστάσεων. ....	56
Εικόνα 40: Οι τεχνικές ανάγνωσης των στοιχείων σε μία μνήμη Cross - Bar. ....	58
Εικόνα 41: Write Margin(Rwire) για τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης και $n=16$ . ....	60
Εικόνα 42: Write Margin(n) για τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης και $R_{wire}=50\Omega$ . ....	60
Εικόνα 43: Το ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό του Read Margin. ....	62
Εικόνα 44: Μία πρώτη προσομοίωση του θεωρητικού Read Margin. ....	63
Εικόνα 45: Οι $V_{write}$ και οι $V_{read}$ παλμοί σε μία μνήμη 3x3, με το Selected Cell στην LRS για την τεχνική VR2. ....	64
Εικόνα 46: Οι $V_{write}$ και οι $V_{read}$ παλμοί σε μία μνήμη 3x3, με το Selected Cell στην HRS για την τεχνική VR2. ....	64
Εικόνα 47: Τα ρεύματα που αναπτύσσονται εξαιτίας των $V_{write}$ και $V_{read}$ παλμών σε μία μνήμη 3x3, με το Selected Cell στην LRS. ....	65
Εικόνα 48: Τα ρεύματα που αναπτύσσονται εξαιτίας των $V_{write}$ και $V_{read}$ παλμών σε μία μνήμη 3x3, με το Selected Cell στην HRS. ....	65
Εικόνα 49: Read Margin(n) για τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης και $R_{wire}=50\Omega$ . ....	66
Εικόνα 50: Read Margin(n) για τρία διαφορετικά παράθυρα μνήμης. ....	67
Εικόνα 51: Η μήτρα αγωγιμοτήτων των unselected cells κατά την διαδικασία ανάγνωσης σε μία τετραγωνική μνήμη Cross - Bar με $n=32$ . ....	67
Εικόνα 52: Power Consumption(n) για τις τρεις τεχνικές διαβάσματος. ....	68
Εικόνα 53: Κύκλωμα υλοποίησης της λογικής πύλης NAND. ....	70
Εικόνα 54: Οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός $V_{DD}$ και το δυναμικό στο Word Line, για την περίπτωση που οι εισοδοί είναι σε κατάσταση LRS. ....	72
Εικόνα 55: Τα ρεύματα των Εισόδων A και B και της εξόδου Y, για την περίπτωση που οι εισοδοί είναι σε κατάσταση LRS. ....	72
Εικόνα 56: Οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός $V_{DD}$ και το δυναμικό στο Word Line, για την περίπτωση που ακριβώς μίας είσοδος είναι σε κατάσταση HRS. ....	73
Εικόνα 57: Τα ρεύματα των Εισόδων A και B και της εξόδου Y, για την περίπτωση που ακριβώς μία είσοδος είναι σε κατάσταση LRS. ....	73
Εικόνα 58: Οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός $V_{DD}$ και το δυναμικό στο Word Line, για την περίπτωση που οι εισοδοί είναι σε κατάσταση HRS. ....	74
Εικόνα 59: Τα ρεύματα των Εισόδων A και B και της εξόδου Y, για την περίπτωση που οι εισοδοί είναι σε κατάσταση HRS. ....	74

Εικόνα 60: Κύκλωμα υλοποίησης της λογικής πύλης AND. ....	75
Εικόνα 61: Η ιδανική συμπεριφορά της αγωγιμότητας των memristor, Linearity, της διάταξης CBRAM για εκατό θετικούς παλμούς (potentiation) και εκατό αρνητικούς παλμούς (depression). ....	76
Εικόνα 62: Linearity του μοντέλου προσομοίωσης. ....	77
Εικόνα 63: Η αρχιτεκτονική του συνολικού DNN.....	78
Εικόνα 64: Το διάγραμμα ροής του in situ training αλγορίθμου. ....	79
Εικόνα 65: Υπολογισμός των ρευμάτων στα Bit Lines των Cross – Bar.....	80
Εικόνα 66: Το heatmap των αγωγιμοτήτων ενός τυχαίου νευρώνα που αναγνωρίζει το ψηφίο 0.....	81
Εικόνα 67: Το heatmap των αγωγιμοτήτων ενός τυχαίου νευρώνα που αναγνωρίζει το ψηφίο 1.....	82
Εικόνα 68: Training Accuracy για την περίπτωση αναγνώρισης των ψηφίων 0 και 1. ....	82
Εικόνα 69: Training Accuracy για την περίπτωση αναγνώρισης των ψηφίων 0 έως 9.....	83

# 1. TO MEMRISTOR

Η εφεύρεση του transistor το 1947 αποτέλεσε επανάσταση για τον κλάδο των αναλογικών κυκλωμάτων, ενώ ταυτόχρονα συνέβαλε στην κατάργηση των λυχνιών κενού που χρησιμοποιούνταν για την υλοποίηση λογικών πυλών και κυκλωμάτων [1]. Το transistor θεωρείται από τις πιο σημαντικές εφευρέσεις του εικοστού αιώνα και είναι πολύ λογικό αν αναλογιστεί κανείς το εύρος των εφαρμογών και χρήσης του, από απλά αναλογικά κυκλώματα μέχρι τα ολοκληρωμένα που απαρτίζουν τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα.

Ύστερα από εκατό χρόνια από την σύλληψη της ιδέας του transistor ο κλάδος της ηλεκτρονικής έφτασε σε ένα τέλμα. Η υψηλή κατανάλωση ισχύος, το αυξανόμενο κόστος, οι ανάγκες για μεγαλύτερη ταχύτητα και απόδοση σε συνδυασμό με τον κορεσμό του νόμου Moore και τις προσπάθειες μείωσης των διαστάσεων του transistor μετέφερε το ενδιαφέρον σε νέα υλικά και νέες διατάξεις. Παράλληλα ο τομέας της



Εικόνα 1: Ο νόμος του Moore και το εκτιμώμενο μήκος πύλης με την πάροδο του χρόνου.

πληροφορικής και των τεχνολογιών αναζητούσε τρόπους για την αποθήκευση και επεξεργασία ενός τεράστιου όγκου δεδομένων και την επίλυση προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο ενισχύοντας το εγχείρημα για νέες δομές και διατάξεις. Ο καθημερινός όγκος δεδομένων που συλλέγεται και επεξεργάζεται δεν μπορεί πλέον να

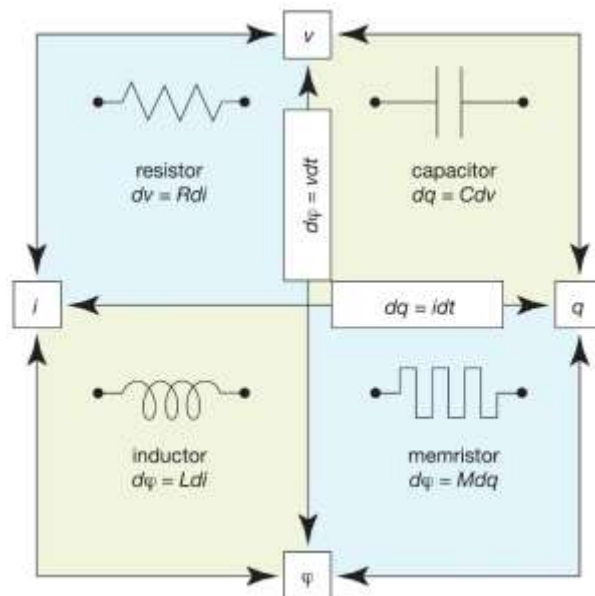


διαχειριστεί από την κλασική αρχιτεκτονική von Neumann που απαιτεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας, CPU, και την μνήμη να βρίσκονται σε ξεχωριστές θέσεις.

Οι παραπάνω ανάγκες άνοιξαν το δρόμο για την μελέτη ενός καινούριου υποψήφιου που θα ήταν ικανός να συμβάλει στην συνύπαρξη μνήμης και μονάδων επεξεργασίας, την υλοποίηση νευρομορφικών εφαρμογών χωρίς πολυάριθμα transistor να απαρτίζουν το ολοκληρωμένο κύκλωμα, μειώνοντας έτσι τις διαστάσεις και προσδίδοντας ικανοποιητικές ταχύτητες για τα σύγχρονα προβλήματα της Τεχνητής Νοημοσύνης [2].

### 1.1 Τα τέσσερα θεμελιώδη ηλεκτρονικά στοιχεία

Το memristor ή μνήμη μεταβλητής αντίστασης είναι ένα μη γραμμικό ηλεκτρονικό στοιχείο δύο ακροδεκτών και συσχετίζει το ηλεκτρικό φορτίο με την μαγνητική ροή. Ανακαλύφθηκε το 1971 από τον Leon Chua [3] και όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 αποτελεί το τέταρτο θεμελιώδες ηλεκτρονικό στοιχείο, μαζί με την αντίσταση, τον πυκνωτή και το πηνίο.



Εικόνα 2: Τα τέσσερα θεμελιώδη ηλεκτρονικά στοιχεία.

Σε αντιδιαστολή με την γραμμική αντίσταση το memristor παρουσιάζει μια δυναμική εξάρτηση μεταξύ ρεύματος και τάσης καθώς και την ικανότητα να «θυμάται» (μη πτητική μνήμη) προηγούμενες καταστάσεις. Η σχέση που διέπει το memristor είναι ότι η μνημαντίσταση  $M(q)$  είναι η παράγωγος της μαγνητικής ροής ως προς το ηλεκτρικό

φορτίο. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι σχέσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά αυτών των στοιχείων:

ΔΙΑΤΑΞΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ
Αντίσταση (R)	V/A ή Ω	$R = \frac{dV}{dI}$
Ποκνωτής (C)	C/V ή F	$C = \frac{dq}{dV}$
Πηνίο (L)	Wb/A ή H	$L = \frac{dI}{d\Phi_m}$
Μνημαντίσταση (M)	Wb/C ή Ω	$M = \frac{d\Phi_m}{dq}$

Πίνακας 1: Οι σχέσεις που περιγράφουν τα τέσσερα θεμελιώδη ηλεκτρονικά στοιχεία.

Παρατηρούμε ότι η μνημαντίσταση μπορεί να μετρηθεί και σε Ω. Αυτό μπορεί να αποδειχτεί αν απλώς αναπτύξουμε την σχέση:

$$M(q(t)) = \frac{d\Phi_m(t)}{dq(t)} = \frac{\frac{d\Phi_m(t)}{dt}}{\frac{dq(t)}{dt}} \Rightarrow M(q(t)) = V(t)/I(t) \quad (1)$$

Από την σχέση (1) αντιλαμβανόμαστε ότι η μνημαντίσταση είναι μια αντίσταση η οποία εξαρτάται από το φορτίο. Αν η μνημαντίσταση είναι σταθερή τότε λαμβάνουμε τον νόμο του Ohm. Βέβαια αυτά τα δύο μεγέθη δεν ταυτίζονται αφού το φορτίο εξαρτάται από την μεταβολή του χρόνου.

## 1.2 Η διαδικασία κατασκευής μνημών CBRAM

Προτού προχωρήσουμε στην αρχή λειτουργίας και στους εσωτερικούς μηχανισμούς μιας μνήμης μεταβλητής αντίστασης κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί η γενική διαδικασία που ακολουθείται για να κατασκευαστεί ένα memristor αγωγίμης γέφυρας. Στην παρούσα εργασία θα αναλύσουμε και θα μελετήσουμε μόνο την περίπτωση των memristor αγωγίμης γέφυρας, καθώς αποτέλεσαν το βασικό αντικείμενο μελέτης.

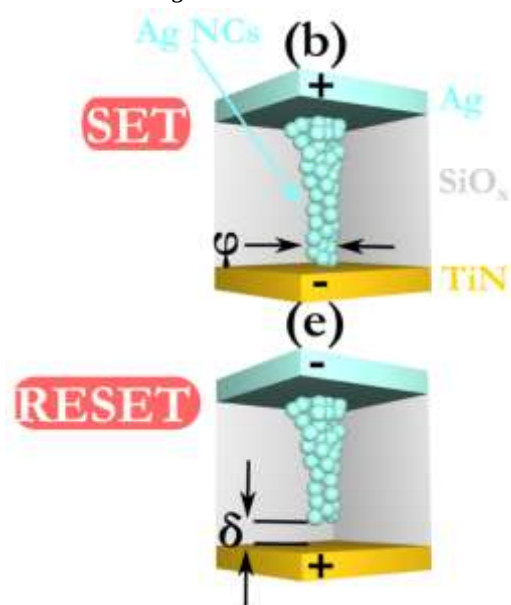
Για να λάβουμε τις επιθυμητές συναπτικές ιδιότητες από τις διατάξεις μας πρέπει να κατασκευαστούν δομές από  $A_g/SiO_2/TiN$ . Όλες οι επιστρώσεις λεπτών υμενίων πραγματοποιούνται πάνω σε υποστρώματα από οξειδίο του πυριτίου με την διαδικασία του RF magnetron sputtering. Οι εναποθέσεις γίνονται στο εσωτερικό ενός θαλάμου

υψηλού κενού με τυπική πίεση  $10^{-6}$  mbar σε θερμοκρασία δωματίου. Ένας κεραμικός στόχος υψηλής ποιότητας χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ενός λεπτού φιλμ 20 nm  $SiO_2$ . Κατά την εναπόθεση, η ροή του αδρανούς αερίου  $A_r$  διατηρείται σταθερή στα 20 sccm εντός του θαλάμου, ενώ για την ροή  $O_2$  μειώνεται στο 1 sccm. Το κάτω ηλεκτρόδιο (Bottom Electrode) από  $TiN$  και το άνω ηλεκτρόδιο (Top Electrode) από  $Ag$  εναποτέθηκαν με την χρήση αντίστοιχων στόχων με συνολικό πάχος 15 και 40 nm αντίστοιχα [4]. Οι τελικές διατάξεις είναι τυπικές διατάξεις Μετάλλου-Μονωτή-Μετάλλου (MIM) με τετραγωνικά ηλεκτρόδια διαστάσεων 100  $\mu m$  και ανήκουν στην οικογένεια των Conductive Bridging Random Memories – CBRAM [5].

### 1.3 Η αρχή λειτουργίας της μνήμης μεταβλητής αντίστασης CBRAM

Η λειτουργία των μνημών μεταβλητής αντίστασης στηρίζεται σε δύο διακριτές καταστάσεις αντίστασης, την κατάσταση υψηλής αντίστασης HRS (High Resistance State) και την κατάσταση χαμηλής αντίστασης LRS (Low Resistance State). Η μετάβαση από μία κατάσταση υψηλής αντίστασης σε μία χαμηλής αντίστασης ονομάζεται SET, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται RESET.

Αναλυτικότερα τα memristor που ανήκουν στην οικογένεια CBRAM απαιτούν την ύπαρξη ενός χημικά ενεργού ηλεκτροδίου, είτε από  $Ag$ , όπως αναλύθηκε στην παραπάνω διαδικασία κατασκευής, είτε από  $Cu$  [6]. Η διαδικασία μεταβολής της αντίστασης εκκινεί με την μετανάστευση των κατιόντων από το ηλεκτροχημικό ενεργό ηλεκτρόδιο (Top Electrode) με την υποβολή θετικής πόλωσης διαμέσου του ηλεκτρολύτη προς το χημικά ανενεργό ηλεκτρόδιο (Bottom Electrode). Μόλις φτάσουν στη κάθοδο λαμβάνουν ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε άτομα, που αποτελούν το κυρίως σώμα του αγωγίμου νήματος CF (Conductive Filament) και έχουμε την μετάβαση SET. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά πειραματικά στοιχεία που υποδεικνύουν ότι σχηματισμένο CF



Εικόνα 3: Διατομή της διάταξης CBRAM. Η ανάπτυξη και η καταστροφή του CF.

αποτελείται από μία αλυσίδα μεταλλικών ατόμων. Με την υποβολή αρνητικής τάσης έχουμε την αντίστροφη διαδικασία και την ρήξη του CF, που είναι η μετάβαση RESET. Ταυτόχρονα έχει αναφερθεί ότι το CF μπορεί να έχει διάφορους χρόνους ζωής από μερικά nsec μέχρι και αρκετά έτη.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι ανάλογα την διαδικασία και τα υλικά κατασκευής των CBRAM μπορούμε να διακρίνουμε:

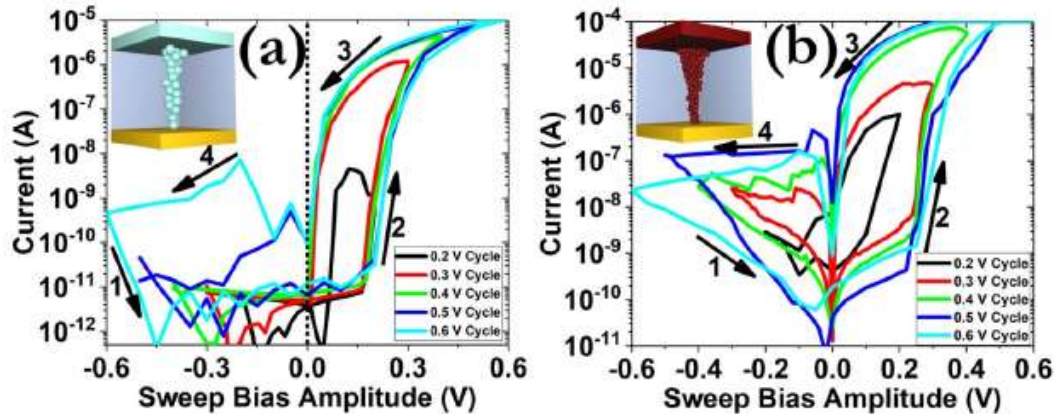
- Τις Unipolar διατάξεις, όπου δεν χρειάζεται να αντιστρέψουμε την πολικότητα στην εφαρμοζόμενη τάση για να πραγματοποιήσουμε τις μεταβάσεις SET και RESET. Στην περίπτωση αυτή οι μεταβάσεις πραγματοποιούνται βάση του μεγέθους της εφαρμοζόμενης τάσης και η χαρακτηριστική I-V είναι συμμετρική.
- Τις Bipolar διατάξεις, όπως αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω, με την πολικότητα της τάσης να ορίζει τις μεταβάσεις. Εφαρμόζοντας μια θετική τάση έχουμε την μετάβαση SET και αντίστοιχα αν εφαρμόσουμε μια αρνητική τάση έχουμε την RESET μετάβαση.
- Τις Theshold διατάξεις, όπου η μετάβαση SET πραγματοποιείται όταν η θετική εφαρμοζόμενη τάση ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή  $V_{threshold}$ , ενώ χωρίς να εφαρμοστεί μια αρνητική τάση έχουμε την κατάρρευση του CF και μηδενικό ρεύμα σε μία τάση  $V_{hold}$ . Η διάταξη αυτή είναι ισοδύναμη με την Bipolar διάταξη σε σειρά με μια δίοδο.

Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι υπάρχουν Threshold διατάξεις που μπορούν να αποκτήσουν Bipolar συμπεριφορές όταν η εφαρμοζόμενη τάση πάρει πολύ υψηλές τιμές [6,7].

#### 1.4 Η χαρακτηριστική I-V του Memristor

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές γραφικές ρεύματος – τάσης για δύο διαφορετικές διατάξεις, για ένα Bipolar memristor και ένα Threshold, όταν υποβάλλονται σε DC SWEEP. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζουμε μια αρνητική διαφορά δυναμικού στα άκρα της κάθε συσκευής  $-|V_{max}|$  με σκοπό την επαναφορά της σε κατάσταση υψηλής αντίστασης και στην συνέχεια την αυξάνουμε μέχρι να φτάσει την αντίστοιχη θετική τιμή που ξεκίνησε  $|V_{max}|$  και έπειτα την μειώνουμε μέχρι να

επιστρέφει στην αρχική τιμή της. Ο κύκλος αυτός έχει επαναληφθεί για πέντε διαφορετικές τάσεις σάρωσης [6].



Εικόνα 4: Οι χαρακτηριστικές I-V για πέντε διαφορετικές τάσεις σάρωσης 0.2V έως 0.6 Volt για μια διάταξη μνήμης μεταβλητής αντίστασης (a)  $Ag/SiO_2/TiN$  και μία (b)  $Cu/SiO_2/TiN$ .

Παρατηρούμε ότι οι γραφικές (a) και (b) διαφέρουν ως προς την συμπεριφορά των δύο memristor. Στην πρώτη I-V έχουμε την γενική συμπεριφορά ενός Threshold memristor μέχρι ένα εύρος τάσεων πόλωσης (έως 0.4 V), ενώ στην δεύτερη ενός Bipolar. Να σημειωθεί ότι ο κατακόρυφος άξονας του ρεύματος είναι λογαριθμικός. Μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερα στάδια για κάθε κύκλο σάρωσης:

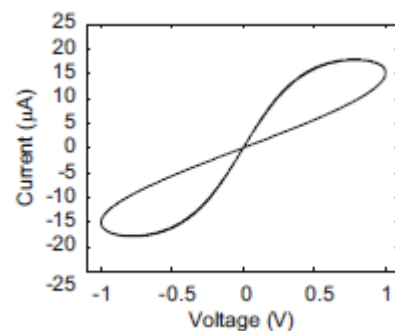
- i. Το πρώτο στάδιο μεταβολής της τάσης από  $-|V_{max}|$  έως τα 0 Volt είναι κοινό και για τα δύο memristor. Οι δύο διατάξεις μεταβαίνουν στην κατάσταση υψηλής αντίστασης HRS, καθώς είναι αδιευκρίνιστη η τιμή της αντίστασης που είχαν αρχικά.
- ii. Το δεύτερο στάδιο αποτελεί την μεταβολή της τάσης από 0 Volt στην μέγιστη τιμή σάρωσης  $|V_{max}|$ . Το Threshold memristor παραμένει στην HRS μέχρι την στιγμή που η εφαρμοζόμενη τάση ξεπεράσει μία τάση κατωφλίου  $V_{threshold}$ , όπου και θα μεταβεί ακαριαία στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης LRS. Το Bipolar memristor θα επιχειρήσει να μεταβεί από την HRS στην LRS από την πρώτη στιγμή που η εφαρμοζόμενη τάση γίνει θετική αλλά αυτό θα γίνει με έναν πολύ αργό ρυθμό. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση ξεπεράσει αντίστοιχα μια κρίσιμη τιμή  $V_{SET}$  θα επιταχυνθεί αυτή η μετάβαση.
- iii. Κατά το τρίτο στάδιο μεταβολής της τάσης από  $|V_{max}|$  σε 0 Volt έχουμε το RESET του Threshold memristor και την επιστροφή του στην HRS, ενώ το Bipolar θα παραμείνει στην LRS.

- iv. Κατά το τελευταίο στάδιο μεταβολής της τάσης από τα 0 Volt έως  $-|V_{max}|$  έχουμε το RESET του Bipolar memristor. Το Threshold θα παραμείνει στην HRS.

Παρόμοια καμπύλες μπορούν να ληφθούν και για τάσεις που ξεκινούν από 0 Volt και μεταβάλλονται μέχρι  $|V_{max}|$  και στην συνέχεια μειώνονται μέχρι  $-|V_{max}|$  και τέλος αυξάνονται πάλι μέχρι τα 0 Volt για να κλείσει ο κύκλος. Συνήθως είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται μια αρνητική τάση σάρωσης και στην συνέχεια να αυξάνεται, όπως πραγματοποιήθηκε στις παραπάνω γραφικές, διότι υπάρχει περίπτωση το memristor να βρισκόταν σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης. Το τελευταίο αποτελεί ένα πολύ πιθανό ενδεχόμενο. Εφαρμόζοντας μία κατάλληλη τάση στα ηλεκτρόδια του memristor, αυτό μπορεί να μεταβεί σε μια κατάσταση LRS και να παραμείνει εκεί για ένα αδιευκρίνιστο χρονικό διάστημα. Για αυτό το λόγο εφαρμόζουμε αρχικά μια αρνητική τάση για να το επαναφέρουμε σε κατάσταση HRS, διαφορετικά θα παρέμεινε στην LRS.

### 1.5 Η καμπύλη υστέρησης

Μια ακόμα γραφική που μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορία για την συμπεριφορά ενός memristor είναι η καμπύλη υστέρησης I-V. Σε αυτή την περίπτωση ο άξονας του ρεύματος δεν είναι λογαριθμικός και το ρεύμα δεν παρατίθεται σε απόλυτη τιμή, αλλά λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Μία από τις ιδιότητες που προκύπτουν από τα memristor είναι η ύπαρξη ενός φαινομένου υστέρησης [8]. Η κλίση της καμπύλης αποτελεί την ηλεκτρική αντίσταση, η οποία δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται. Αυτό μεταφράζεται ως μια μεταβολή μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων αντίστασης και αποτελεί κεντρικό φαινόμενο στις μνήμες μεταβλητής αντίστασης. Στην περίπτωση που έχουμε μια εφαρμοζόμενη παλμοσειρά υψηλής συχνότητας θα είχαμε τον εκφυλισμό της καμπύλης υστέρησης σε μια γραμμική αντίσταση, δηλαδή μετά τον πρώτο παλμό το memristor θα εισερχόταν



Εικόνα 5: Η καμπύλη υστέρησης ενός Bipolar memristor.

σε μια κατάσταση LRS και δεν θα προλάβαινε να επιστρέψει στην HRS (το relaxation time είναι μεγαλύτερο από την περίοδο της παλμοσειράς) με αποτέλεσμα οι επόμενοι παλμοί να το μετακινήσουν σε χαμηλότερες καταστάσεις. Η απόκριση αυτή λόγω των

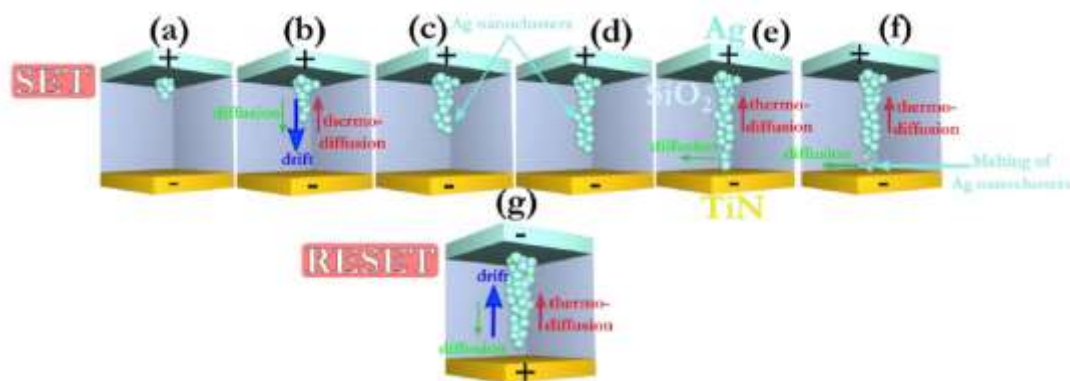
AC εφαρμοζόμενων παλμών ονομάζεται Potentiation του CF. Αν στην συνέχεια εφαρμόσουμε μια αντίστοιχη αρνητική παλμοσειρά θα λάβουμε την επιστροφή του memristor στην HRS και θα έχουμε το Depression του CF.

## 1.6 Οι υπεύθυνοι φυσικοί μηχανισμοί του CF

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε τους φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν την λειτουργία ενός memristor και αυτοί μπορούν να διακριθούν:

- Στο φαινόμενο της ολίσθησης (Drift), το οποίο οφείλεται στην επιβολή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα της μετακίνηση των ιόντων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο.
- Στο φαινόμενο της διάχυσης (Diffusion), το οποίο οφείλεται στην τάση των μορίων να διασπείρονται από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή χαμηλής μέχρις ότου να επέλθει ισορροπία στο σύστημα.
- Στο φαινόμενο της θερμοδιάχυσης (Thermophoresis), το οποίο οφείλεται στη βαθμίδα θερμοκρασίας και έχει την τάση να αντιτίθεται στην αιτία που δημιούργησε την μεταβολή της θερμοκρασίας.

Στην Εικόνα 6 φαίνονται οι παραπάνω μηχανισμοί κατά το SET και το RESET ενός memristor. Αρχικά με την εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού στα ηλεκτρόδια της διάταξης, έχουμε την δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου και κατά προέκταση την δημιουργία των ροών drift και diffusion με την ίδια κατεύθυνση προς το αρνητικό δυναμικό, ενώ το φαινόμενο της thermophoresis λειτουργεί ενάντια στους δύο μηχανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την μεταβολή της θερμοκρασίας [7].



Εικόνα 6: Οι υπεύθυνοι φυσικοί μηχανισμοί για την δημιουργία και καταστροφή του CF.

Αυτοί οι μηχανισμοί θα συνδράμουν στην δημιουργία ενός αγώγιμου δρόμου μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Όταν το CF ακουμπήσει στο κάτω ηλεκτρόδιο τότε θα συνεχίσει να αναπτύσσεται πλευρικά και το διάνυσμα της ροής της διάχυσης θα λάβει οριζόντια διεύθυνση. Τέλος όταν η τάση αντιστραφεί η ροή της ολίσθησης θα αλλάξει φορά και θα επιφέρει την ρήξη του CF. Οι ροές των diffusion και thermophoresis θα παραμείνουν αμετάβλητες με την πρώτη να ξαναποκτά κατακόρυφη διεύθυνση όταν το CF χάσει την πλευρική του υπόσταση.



## 2. Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

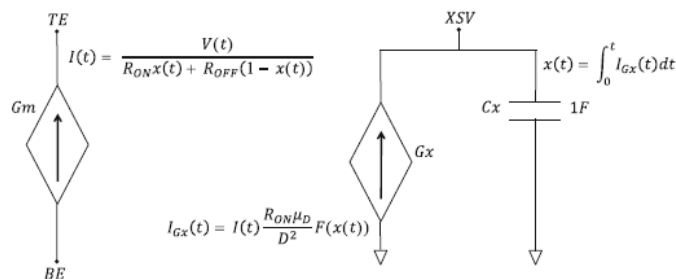
Το στάδιο της μοντελοποίησης των μνημών μεταβλητής αντίστασης είναι κρίσιμο για την σχεδίαση και την προσομοίωση της ορθής συμπεριφοράς των Crossbar Arrays και των νευρομορφικών συστημάτων [9]. Οι περισσότερες προσεγγίσεις κατασκευής ενός καθολικού μοντέλου του memristor και κατά προέκταση της προσομοίωσης των CBRAM βασίζονται στις διαφορικές εξισώσεις (2) και (3):

$$I(t) = G(x, V, t) * V(t) \quad (2)$$

$$\dot{x} = F(x, V, t) \quad (3)$$

Η  $V(t)$  είναι η χρονοεξαρτώμενη τάση στα άκρα του memristor και  $I(t)$  είναι το χρονοεξαρτώμενο ρεύμα που το διαρρέει, ενώ το  $x$  αποτελεί μια μεταβλητή κατάστασης που περιγράφει την μνήμη μεταβλητής αντίστασης. Η σχέση (2) περιγράφει την σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης, αποτελεί δηλαδή την καμπύλη υστέρησης που περιγράψαμε παραπάνω και έχει διαστάσεις αγωγιμότητας, ενώ η σχέση (3) περιέχει την δυναμική ανάπτυξης και καταστροφής του CF.

Το μοντέλο του memristor που βασίζεται στις παραπάνω εξισώσεις έχει αναπτυχθεί στο λογισμικό LTspice και το κυκλωματικό layout φαίνεται στην Εικόνα 7:

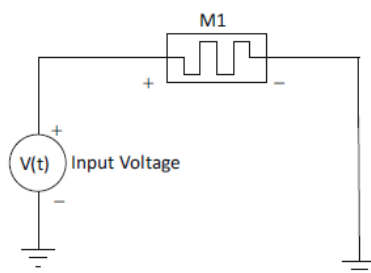


Εικόνα 7: Το κυκλωματικό σχηματικό για το μοντέλο του memristor στο λογισμικό LTspice.

Οι ακροδέκτες της εξαρτημένης πηγής ρεύματος αποτελούν τα Top και Bottom Electrodes του memristor [10]. Η εξαρτημένη πηγή ρεύματος περιγράφει την σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης όπως αυτή ορίζεται από την σχέση (2), ενώ η μεταβλητή

κατάστασης ορίζεται με βάση την πηγή ρεύματος και τον πυκνωτή (ολοκληρωτική μορφή της σχέσης (3) ). Ο ακροδέκτης XSV ορίζεται για την παρακολούθηση της μεταβλητής κατάστασης καθώς και για την διευκόλυνση ενός πιθανού debugging.

Στην Εικόνα 8 φαίνεται το συνολικό κύκλωμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για την μελέτη της συμπεριφοράς του memristor, όπου το  $M_1$  είναι το κυκλωματικό block της Εικόνας 7.



Εικόνα 8: Το συνολικό κύκλωμα μελέτης της συμπεριφοράς του memristor στο λογισμικό LTspice.

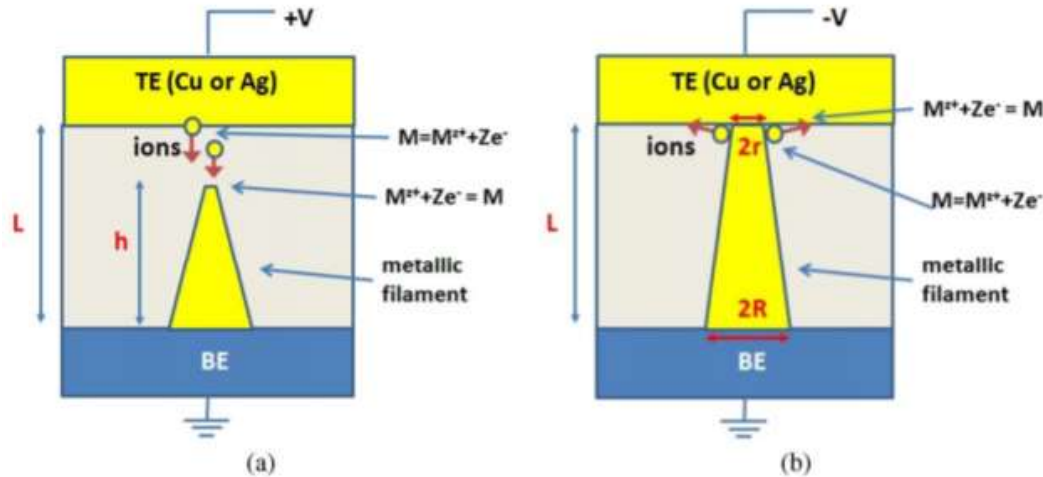
Ακολουθώντας την ίδια λογική έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αξιόλογες προσπάθειες, έτσι ώστε η συμπεριφορά του memristor να προσεγγιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα, εισάγοντας πολύπλοκες συναρτήσεις. Παρόλα αυτά τα παραπάνω μοντέλα δεν εισάγουν τα φυσικοχημικά φαινόμενα που είναι υπεύθυνα για την ανάπτυξη και την καταστροφή του CF, αλλά στηρίζονται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του μέσω κυκλωματικών στοιχείων και αποφεύγοντας την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Επομένως καθίσταται αναγκαίο το εγχείρημα της σχεδίασης και της κατασκευής ενός καθολικού μοντέλου, το οποίο θα ενσωματώνει τους μηχανισμούς της ολίσθησης, της διάχυσης και της θερμοδιάχυσης. Το μοντέλο αυτό οφείλει να μας παρέχει πληροφορία για την δυναμική του CF και θα πρέπει να επιλύει τις χρονοεξαρτώμενες διαφορικές εξισώσεις χωρίς να βασίζεται σε κυκλωματικά στοιχεία, όπως πυκνωτές και πηνία, για την ολοκλήρωση και την διαφορίση. Τέλος θα πρέπει να ενσωματώνει τόσο την Threshold, όσο και την Bipolar συμπεριφορά, αλλά και να μπορεί να πραγματοποιεί την μετάβαση από την πρώτη στην δεύτερη.

## 2.1 Η προσέγγιση του Shimeng Yu

Οι Shimeng Yu και Wong επιχείρησαν να ερμηνεύσουν την ανάπτυξη του CF με μια γεωμετρική ματιά [11]. Κατά την προσέγγιση τους θεώρησαν ότι ο αγωγίμος δρόμος αναπτύσσεται αρχικά κατακόρυφα (Vertical Evolution) από το ένα ηλεκτρόδιο στο

άλλο και στην συνέχεια μόλις το CF ακουμπήσει το άνω ηλεκτρόδιο εκκινεί η οριζόντια ανάπτυξη (Lateral Evolution). Η προσέγγιση αυτή είναι σε συμφωνία με τα παραπάνω και φαίνεται στην Εικόνα 9.

Εφαρμόζοντας μια θετική τάση στο άνω ηλεκτρόδιο έχουμε την κατακόρυφη ανάπτυξη



Εικόνα 9: (a) Η κατακόρυφη ανάπτυξη του CF ενός CBRAM cell πριν επιτευχθεί το SET και (b) η οριζόντια διάλυση του πριν πραγματοποιηθεί το RESET.

του Conductive Filament το οποίο αποτελείται από μεταλλικά μόρια που προέρχονται από το άνω ηλεκτρόδιο. Οι φυσικοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη ενός αγωγικού δρόμου κωνικού σχήματος με ύψος  $h < L$ , με  $L$  να είναι η απόσταση του Top από το Bottom Electrode. Όταν το CF ακουμπήσει το πάνω ηλεκτρόδιο  $h=L$  πραγματοποιείται η μετάβαση SET και η CBRAM μεταβαίνει σε μια κατάσταση χαμηλής αντίστασης. Ταυτόχρονα το CF αρχίζει να αναπτύσσεται στην οριζόντια διεύθυνση του Top Electrode λόγω των μεταλλικών ιόντων που μεταναστεύουν. Έχουμε δηλαδή την μετατροπή του CF από κώνο σε κύλινδρο. Αντιστρέφοντας την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης έχουμε την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή έχουμε την οριζόντια διάλυση του CF. Μόλις η άνω διάμετρος του CF μηδενιστεί έχουμε την μετάβαση RESET και εκκινεί η κατακόρυφη καταστροφή του.

Αυτή η προσέγγιση ανάπτυξης και καταστροφής του CF ή ισοδύναμα οι μεταβάσεις SET και RESET μιας διάταξης CBRAM μπορεί να αποδοθεί από τις σχέσεις (4) και (5) που περιγράφουν την κατακόρυφη και οριζόντια μεταβολή αντίστοιχα.

$$\frac{dh}{dt} = v_h \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \sinh\left(a \frac{ZqE}{2kT}\right) \quad (4)$$

$$\frac{dr}{dt} = v_r \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \sinh\left(b \frac{qV}{kT}\right) \quad (5)$$

Οι μεταβλητές  $h$  και  $r$  περιγράφουν την κατακόρυφη και την οριζόντια μεταβολή του CF και έχουν διαστάσεις μήκους. Στις εξισώσεις (4) και (5) εισέρχονται το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο  $q$ , η σταθερά του Planck  $k$  και ο αριθμός των φορτισμένων ιόντων  $Z$  (θεωρούμε ότι  $Z=1$ ). Οι παράμετροι  $v_h$  και  $v_r$  αποτελούν τις ταχύτητες κατακόρυφης και οριζόντιας μεταβολής του CF, η  $E_a$  είναι η ενέργεια ενεργοποίησης και οι  $a$  και  $b$  είναι οι αντίστοιχες fitting παράμετροι του Drift Hopping Distance.

Η θερμοκρασία της διάταξης  $T$  δεν διατηρείται σταθερή αλλά μεταβάλλεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$T = T_0 + \frac{V^2 R_{th}}{R_{on}} \quad (6)$$

όπου  $T_0$  είναι η θερμοκρασία δωματίου και η  $R_{th} = 10^5 K/W$ , ενώ οι αντιστάσεις  $on$  και  $off$  state δίνονται από τις σχέσεις:

$$R_{on} = \frac{\rho_{on} L}{\pi r R} \quad (7)$$

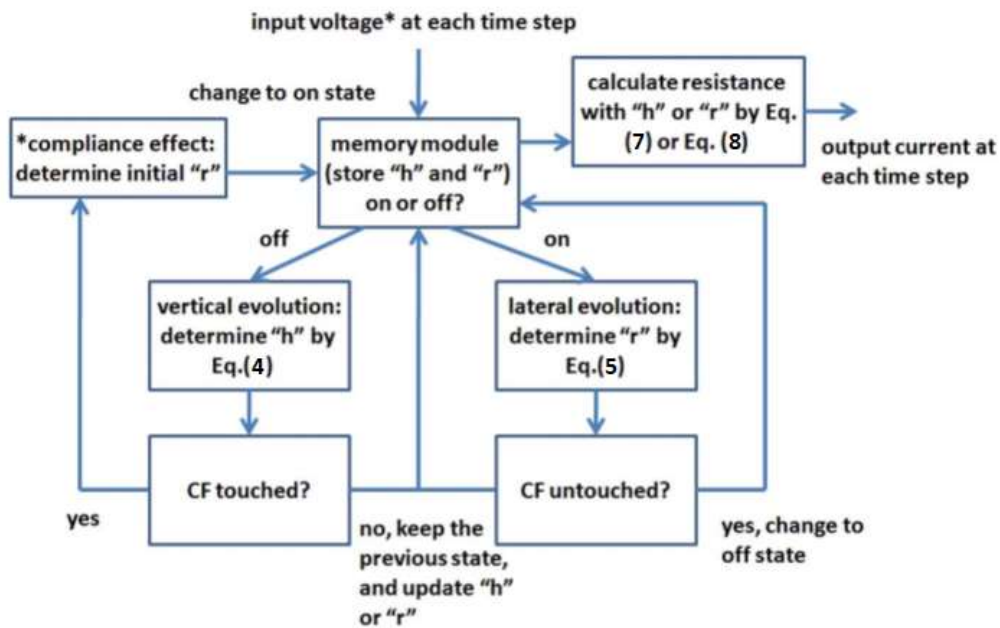
$$R_{off} = \frac{\rho_{on} h + \rho_{off} (L-h)}{A} \quad (8)$$

όπου  $R$  είναι η διάμετρος του CF στο Bottom Electrode και οι ειδικές αντιστάσεις είναι  $\rho_{on}=4 \Omega\text{cm}$  και  $\rho_{off}=1.33 * 10^4 \Omega\text{cm}$ .

## 2.2 Το διάγραμμα ροής του Bipolar μοντέλου

Γνωρίζοντας την εφαρμοζόμενη τάση στα ηλεκτρόδια του memristor και κατά προέκταση το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται μπορούμε να υπολογίσουμε τις χρονικές παραγώγους  $\frac{dh}{dt}$  και  $\frac{dr}{dt}$  αντίστοιχα. Στην συνέχεια μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια τραπεζοειδή ολοκλήρωση μέσω του λογισμικού της Matlab και να βρούμε την κατακόρυφη μεταβολή  $h(t)$  καθώς και την οριζόντια μεταβολή  $r(t)$ . Το διάγραμμα ροής που περιγράφει το compact model ενός memristor παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. Αρχικά το memristor βρίσκεται σε κατάσταση HRS (θεωρούμε ότι αν βρισκόταν σε κατάσταση LRS έχουμε επέμβει με έναν αρνητικό παλμό και το έχουμε επαναφέρει σε μια κατάσταση HRS) και πραγματοποιούμε ένα DC Sweep με την τάση να παίρνει τιμές από 0 Volt έως  $|V_{max}|$  αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μεταβλητή κατάστασης  $h$  να μεταβληθεί αντίστοιχα από 0 nm μέχρι την τιμή  $L=20$  nm (η απόσταση του Top από το Bottom Electrode), ενώ η μεταβλητή  $r$  θα έχει μηδενική τιμή.

Καθώς η τάση αυξάνεται μέχρι την τιμή  $|V_{max}|$  θα μεταβεί σε κάποια τιμή  $V_{set}$  κατά την οποία το CF θα έχει αναπτυχθεί πλήρως στην κατακόρυφη διεύθυνση και θα έχουμε την ικανοποίηση της συνθήκης  $h=L$  με την ταυτόχρονη μετάβαση SET. Το memristor θα μεταβεί σε μια κατάσταση LRS και η μεταβλητή  $h$  θα παραμείνει σταθερή ( $\frac{dh}{dt} = 0$  και  $h=L$ ) και θα αρχίσει να αυξάνεται η μεταβλητή κατάστασης  $r$ . Όταν η τάση αρχίζει να μειώνεται από  $|V_{max}|$  σε 0 Volt η μεταβλητή  $h$  θα παραμείνει μηδενική και θα εξακολουθεί να ισχύει ότι  $r>0$ . Αυτό σημαίνει πως το memristor θα παραμείνει στην LRS. Αντιστρέφοντας την πολικότητα της τάσης το CF θα αρχίσει να καταστρέφεται και κατά προέκταση η μεταβλητή  $r$  θα μειωθεί  $\frac{dr}{dt} < 0$ . Όταν μηδενιστεί θα έχουμε την μετάβαση RESET, το memristor θα καταλάβει μια θέση HRS και θα έχουμε την αντίστοιχη μείωση της μεταβλητής  $h$  από  $L$  σε 0 nm.



Εικόνα 10: Το compact model του Bipolar memristor.

Σημείωση: Στο σημείο πρέπει να αποσαφηνιστεί η έννοια του χρόνου στο παραπάνω μοντέλο. Η μεταβλητή του χρόνου είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό των μεταβλητών κατάστασης  $h$  και  $r$  με βάση τις εξισώσεις (4) και (5). Στην πραγματικότητα η μεταβλητή του χρόνου αποτελεί μια ακόμα παράμετρο του μοντέλου. Μεταβάλλοντας γραμμικά την τάση στο πεδίο του χρόνου, για να επιτύχουμε ένα DC Sweep, με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων που συμμετέχουν στις εξισώσεις, υπολογίζουμε και την περίοδο του τριγωνικού παλμού τάσης που εφαρμόζεται. Η χρονική περίοδος που υπολογίστηκε κατά την DC ανάλυση

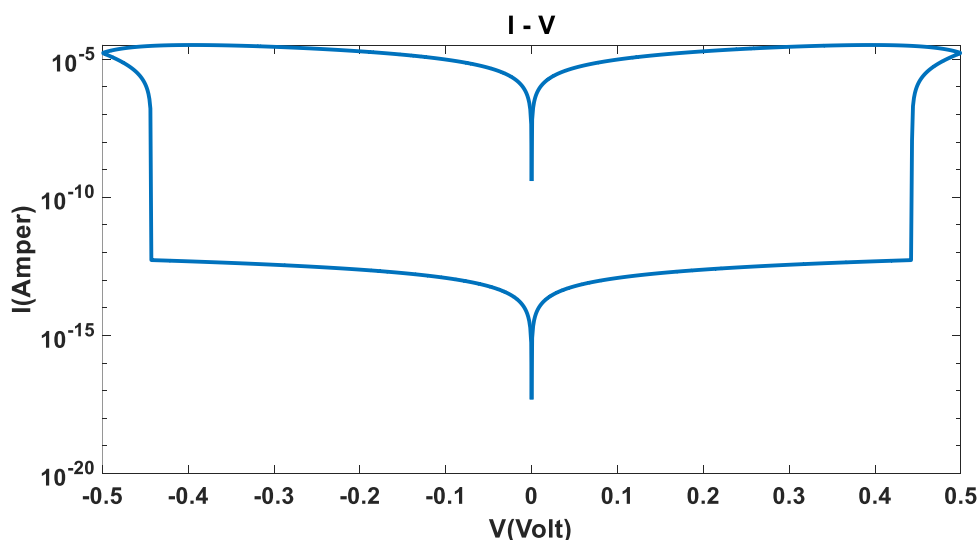
είναι καίριας σημασίας για το μοντέλο, καθώς θα μας βοηθήσει να ολοκληρώσουμε τις σχέσεις, να υπολογίσουμε τις μεταβλητές κατάστασης και να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους ώστε να λειτουργεί ορθά το μοντέλο, ενώ στην πραγματικότητα είναι άνευ σημασίας, αφού θα εφαρμόζαμε μια συνεχή τάση για ένα απροσδιόριστο χρονικό διάστημα. Ο ορθός υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων μας επιτρέπει την μεταγενέστερη AC προσομοίωση, δηλαδή μπορούμε να παρακολουθήσουμε την συμπεριφορά του memristor υπό την εφαρμογή διαφόρων AC παλμών τάσης. Κατά την AC ανάλυση μπορούμε να ρυθμίσουμε την περίοδο και το duty cycle των παλμών κατά προτίμηση και να παρακολουθήσουμε το memristor, χωρίς να αλλοιώνεται η συμπεριφορά του επειδή αλλάξαμε την παράμετρο του χρόνου.

Ακολουθώντας την λογική του παραπάνω διαγράμματος ροής και υπολογίζοντας την αντίσταση  $R_{on}$  μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του ρεύματος του memristor και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$I = \frac{V}{R_{on}} \quad (9)$$

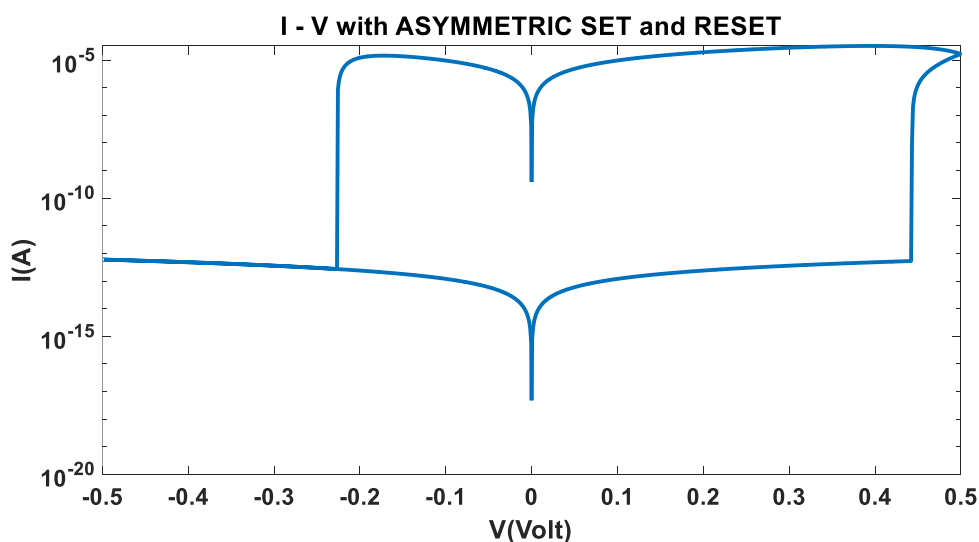
Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τον χαρακτηρισμό των διατάξεων CBRAM τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται ένα άνω κατώφλι ρεύματος με σκοπό την προστασία τους από υψηλά ρεύματα που είναι πιθανό να αναπτυχθούν αλλά και από τις επικίνδυνες ανόδους θερμοκρασίας. Αυτό το άνω κατώφλι ονομάζεται Compliance Current και μπορεί να εισαχθεί με εύκολο τρόπο στο παραπάνω μοντέλο.

Στην συνέχεια προχωράμε στην υλοποίηση του παραπάνω μοντέλου στο λογισμικό της Matlab. Στην Εικόνα 11 παρατίθεται η χαρακτηριστική I-V του memristor:



Εικόνα 11: : Η χαρακτηριστική I-V του Bipolar memristor με βάση το μοντέλο του Shimeng Yu και Wong.

Παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική I-V προσομοιάζει ορθά την ιδανική συμπεριφορά του memristor. Ωστόσο για να πετύχουμε την μη συμμετρικότητα που παρουσιάζουν οι πραγματικές διατάξεις CBRAM πρέπει να εισάγουμε ακόμα τέσσερις παραμέτρους. Πιο αναλυτικά όταν εφαρμόζεται θετική τάση έχουμε τις παραμέτρους  $v_h^+$ ,  $v_r^+$ ,  $a^+$  και  $b^+$ , ενώ για αρνητική τάση έχουμε αντίστοιχα τις παραμέτρους  $v_h^-$ ,  $v_r^-$ ,  $a^-$  και  $b^-$ . Με αυτό το τρόπο πετυχαίνουμε την παρακάτω μη-συμμετρικότητα:



Εικόνα 12: Η υλοποίηση μη συμμετρικής χαρακτηριστικής I-V του memristor.

### 2.3 Το καθολικό μοντέλο του memristor

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα σε συνδυασμό με την εισαγωγή του compliance current και των παραμέτρων μη συμμετρικότητας αποτελούν μια πολύ καλή προσέγγιση της συμπεριφοράς του memristor. Παρόλα αυτά οι σχέσεις (4) και (5) εμπεριέχουν μόνο το φαινόμενο drift. Η απουσία των φαινομένων diffusion και thermophoresis είναι ο λόγος που το παραπάνω μοντέλο αποτυγχάνει να ενσωματώσει και την threshold συμπεριφορά του memristor. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο τα φαινόμενα αυτά δρουν άλλοτε συνεργατικά και άλλοτε ανταγωνιστικά. Για την πραγματοποίηση της SET μετάβασης τα φαινόμενα drift και diffusion δρουν προς την ίδια κατεύθυνση σε αντίθεση με το φαινόμενο thermophoresis. Το τελευταίο είναι υπεύθυνο για την ενσωμάτωση της threshold συμπεριφοράς. Όταν ο όρος του thermophoresis γίνει σημαντικότερος από τους άλλους όρους υπό θετική τάση τροφοδοσίας τότε έχουμε την επαναφορά του memristor στην

κατάσταση HRS. Αλλάζοντας την πολικότητα της τάσης θα έχουμε  $r=0$  και έχουμε τα φαινόμενα του drift και του thermophoresis να δρουν συνεργατικά σε αντίθεση με τον όρο του diffusion που δρα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αν ο όρος του diffusion είναι ασήμαντος σε σχέση με τους άλλους όρους, που συνήθως είναι, τότε το memristor θα παραμείνει στην HRS και επομένως θα έχουμε επιτύχει την threshold συμπεριφορά.

### 2.3.1 Οι γενικές σχέσεις που περιγράφουν το memristor

Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να αναπροσαρμόσουμε τις σχέσεις (4) και (5) που περιγράφουν την συμπεριφορά του memristor και να ενσωματώσουμε τους φυσικούς μηχανισμούς της διάχυσης και της θερμοδιάχυσης. Επομένως έχουμε τις γενικές εκφράσεις:

$$\frac{dh}{dt} = Drift_{vertical} + Diffusion_{vertical} - Thermophoresis_{vertical} \quad (10)$$

$$\frac{dr}{dt} = Drift_{lateral} + Diffusion_{lateral} - Thermophoresis_{lateral} \quad (11)$$

όπου οι όροι  $Drift_{vertical}$  και  $Drift_{lateral}$  αποτελούν τις σχέσεις (4) και (5) και επαναδιατυπώνονται για λόγους πληρότητας:

$$Drift_{vertical} = v_h \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \sinh\left(a \frac{ZqE}{2kT}\right) \quad (12)$$

$$Drift_{lateral} = v_r \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \sinh\left(b \frac{qV}{kT}\right) \quad (13)$$

ενώ οι όροι των Diffusion και Thermophoresis που περιγράφουν την κατακόρυφη και την οριζόντια μεταβολή δίνονται από τις σχέσεις (14), (15), (16) και (17):

$$Diffusion_{vertical} = d_h \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) \quad (14)$$

$$Diffusion_{lateral} = d_r \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) \quad (15)$$

$$Thermophoresis_{vertical} = t_h S \left| \frac{\partial T}{\partial h} \right| \quad (16)$$



$$Thermophoresis_{lateral} = t_r S \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right| \quad (17)$$

όπου οι παράμετροι  $d_h$ ,  $d_r$  και  $t_h$ ,  $t_r$  είναι οι αντίστοιχες fitting παράμετροι των φαινομένων diffusion και thermophoresis κατακόρυφης και οριζόντιας μεταβολής του CF. Η μεταβλητή  $S$  δίνεται από την σχέση:

$$S = E_S / kT^2 \quad (18)$$

και οι ενέργειες  $E_b$  και  $E_S$  είναι οι ενέργειες ενεργοποίησης των φαινομένων diffusion και thermophoresis αντίστοιχα.

Με τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να δημιουργήσουμε δύο μοντέλα ένα «θετικό» και ένα «αρνητικό». Αν ισχύει ότι  $r > 0$  την χρονική στιγμή πριν αλλάξουμε την πολικότητα στην εφαρμοζόμενη τάση αυτό συνεπάγεται ότι η διάταξη μας λειτουργεί σαν Bipolar memristor και άρα συνεχίζουμε να αξιοποιούμε το «θετικό» μοντέλο. Διαφορετικά θα είχαμε μια διάταξη threshold και θα έπρεπε να μεταβούμε από το «θετικό» στο «αρνητικό μοντέλο». Με αυτό το τρόπο μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα καθολικό μοντέλο που να είναι ικανό να ενσωματώνει και τις δύο διατάξεις και ταυτόχρονα να εμπεριέχει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

### 2.3.2 Οι παράμετροι του μοντέλου

Η εισαγωγή των φυσικών μηχανισμών και η τροποποίηση του διαγράμματος ροής ώστε να εμπεριέχει τόσο την Bipolar όσο και την Threshold συμπεριφορά συνέβαλε στην ανάπτυξη ενός γενικού μοντέλου περιγραφής των διατάξεων CBRAM. Με τον κατάλληλο προσδιορισμό των παραμέτρων μπορούμε να επιτύχουμε την ορθή προσομοίωση της συμπεριφοράς οποιασδήποτε διάταξης. Παρόλα αυτά, η αναζήτηση των βέλτιστων παραμέτρων δεν είναι αποτελεί ένα απλό εγχείρημα και ιδιαίτερα όταν θέλουμε να πετύχουμε την προσομοίωση πραγματικών διατάξεων που έχουν χαρακτηριστεί σε εργαστηριακό περιβάλλον. Για να γίνει πιο αντιληπτό αρκεί να αναλογιστούμε τον αριθμό των παραμέτρων που συμμετέχουν στις παραπάνω εξισώσεις.

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι παράμετροι που εισέρχονται στο μοντέλο:

A/A	Model Parameters	Περιγραφή	
1	$v_h^+$	Ταχύτητα κατακόρυφης μεταβολής για $V>0$	DRIFT PARAMETERS
2	$v_h^-$	Ταχύτητα κατακόρυφης μεταβολής για $V<0$	
3	$v_r^+$	Ταχύτητα οριζόντιας μεταβολής για $V>0$	
4	$v_r^-$	Ταχύτητα οριζόντιας μεταβολής για $V<0$	
5	$E_a$	Ενέργεια ενεργοποίησης Drift μηχανισμού	
6	$a^+$	Fitting παράμετρος Drift μηχανισμού κατακόρυφης μεταβολής για $V>0$	
7	$a^-$	Fitting παράμετρος Drift μηχανισμού κατακόρυφης μεταβολής για $V<0$	
8	$b^+$	Fitting παράμετρος Drift μηχανισμού οριζόντιας μεταβολής για $V>0$	
9	$b^-$	Fitting παράμετρος Drift μηχανισμού οριζόντιας μεταβολής για $V<0$	
10	L	Απόσταση του Top από το Bottom Electrode	
11	$I_{zero}$	Ρεύμα για $V=0$	
12	Period	Περίοδος του DC Sweep	
13	$R_{on}^{max}$	Μέγιστη αντίσταση όταν το μοντέλο είναι στην HRS	
14	$E_b$	Ενέργεια ενεργοποίησης Diffusion μηχανισμού	DIFFUSION
15	$d_h^+$	Fitting παράμετρος Diffusion μηχανισμού κατακόρυφης μεταβολής για $V>0$	
16	$d_h^-$	Fitting παράμετρος Diffusion μηχανισμού κατακόρυφης μεταβολής για $V<0$	
17	$d_r^+$	Fitting παράμετρος Diffusion μηχανισμού οριζόντιας μεταβολής για $V>0$	
18	$d_r^-$	Fitting παράμετρος Diffusion μηχανισμού οριζόντιας μεταβολής για $V<0$	
19	$E_s$	Ενέργεια ενεργοποίησης Thermophoresis μηχανισμού	THERMO-PHORESIS
20	$t_h$	Fitting παράμετρος Thermophoresis μηχανισμού κατακόρυφης μεταβολής	
21	$t_r$	Fitting παράμετρος Thermophoresis μηχανισμού οριζόντιας μεταβολής	

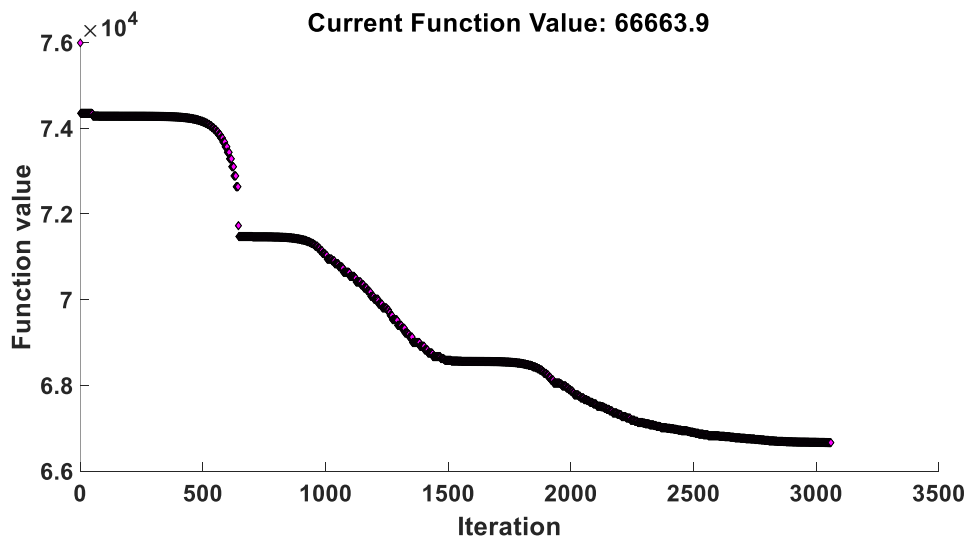
Πίνακας 2: Οι παράμετροι που συμμετέχουν στο καθολικό μοντέλο.

Παρατηρούμε ότι το γενικό μοντέλο περιέχει είκοσι μία παραμέτρους, οι οποίες συμμετέχουν στους φυσικούς μηχανισμούς αλλά και στην περιγραφή της διάταξης.

Είναι προφανές ότι η διαδικασία curve to curve fitting, δηλαδή η προσομοίωση μιας πραγματικής διάταξης έτσι ώστε το μοντέλο να την προσομοιάζει αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία στην περίπτωση που ο προσδιορισμός των παραμέτρων επιχειρηθεί να γίνει χειροκίνητα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την εφαρμογή βελτιστοποίησης παραμέτρων του λογισμικού Matlab. Αρχικά λαμβάνουμε τα πειραματικά δεδομένα μια πραγματικής διάταξης, χαρακτηριστική  $I_{data} - V_{data}$ , και εκτελούμε μια προσομοίωση του μοντέλου που αναπτύξαμε έτσι ώστε να λάβουμε την αντίστοιχη χαρακτηριστική  $I_{simulation} - V_{simulation}$ . Στην συνέχεια ορίζουμε μια συνάρτηση κόστους που φαίνεται παρακάτω και εκκινούμε την εφαρμογή με αρχικό σημείο το  $\vec{p}_0$ , που είναι το διάνυσμα των παραμέτρων που εκτελέσαμε αρχικά την προσομοίωση.

$$Cost\ Function = \sum_t |\log(I_{data}(t)) - \log(I_{simulation}(t))|^2 \quad (19)$$

Το διάνυσμα αυτό δεν είναι τυχαίο, αλλά έχει προκύψει ύστερα από έναν αριθμό δοκιμών έτσι ώστε να συγκλίνει σε γενικές γραμμές με την πραγματική διάταξη. Η εφαρμογή θα συνεχίσει να εκτελείται μέχρι η συνάρτηση κόστους να εισέλθει σε σημείο τοπικού ελαχίστου. Το σημείο αυτό θα αποτελεί το διάνυσμα των παραμέτρων που πετυχαίνουν να προσομοιάσουν καλύτερα την πειραματική διάταξη. Στην Εικόνα 13 φαίνεται η συνάρτηση κόστους κατά την αναζήτηση των βέλτιστων παραμέτρων προσομοίωσης μιας πειραματικής διάταξης.



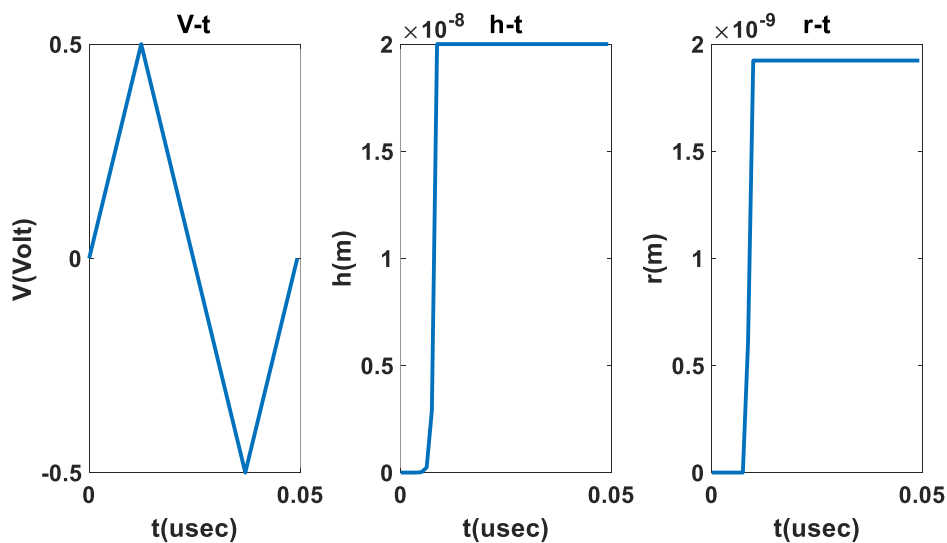
Εικόνα 13: Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους για τον υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων του μοντέλου.

## 2.4 DC SWEEP

Σε αυτή την ενότητα προχωράμε στον DC χαρακτηρισμό μιας Bipolar και μιας Threshold διάταξης. Έχοντας λάβει τα αντίστοιχα δεδομένα από πραγματικές διατάξεις επιχειρούμε την βέλτιστη προσομοίωση τους με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε. Για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων να πραγματοποιηθεί σε δύο μέρη. Αρχικά εκτελούμε μια προσομοίωση μόνο με τον drift όρο και στην συνέχεια εισάγουμε τους φυσικούς μηχανισμούς του diffusion και του thermophoresis. Με αυτό τον τρόπο θα αναδειχθεί η κρισιμότητα των φυσικών μηχανισμών που εισήχθησαν αλλά και η ανωτερότητα του μοντέλου.

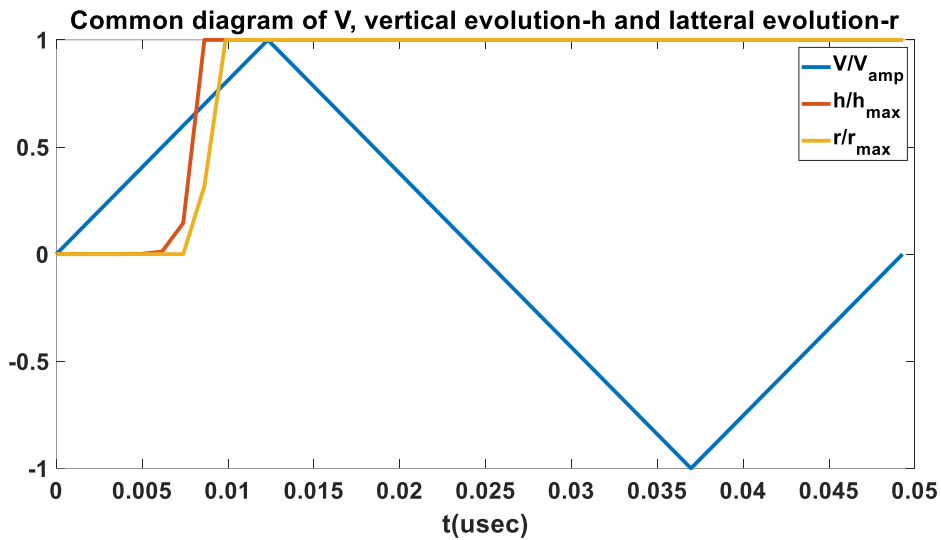
### 2.4.1 Ο DC χαρακτηρισμός μίας Bipolar διάταξης

Προτού προχωρήσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων πρέπει να αναφερθεί ότι αρχικά έχει πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση παραμέτρων και έχει επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους και για τις δύο περιπτώσεις που μελετάμε, οδηγώντας σε ένα διάλυμα βέλτιστων παραμέτρων. Για την πρώτη περίπτωση που έχουμε την ενσωμάτωση μόνο του drift όρου μηδενίζουμε όλες τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στους φυσικούς μηχανισμούς που δεν περιέχονται. Στην Εικόνα 14 φαίνεται η εφαρμοζόμενη τάση καθώς και οι μεταβλητές κατάστασης κατακόρυφης και οριζόντιας μεταβολής.



Εικόνα 14: Η εφαρμοζόμενη τάση  $V(t)$  και οι μεταβλητές κατάστασης κατακόρυφης  $h(t)$  και οριζόντιας μεταβολής  $r(t)$  μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

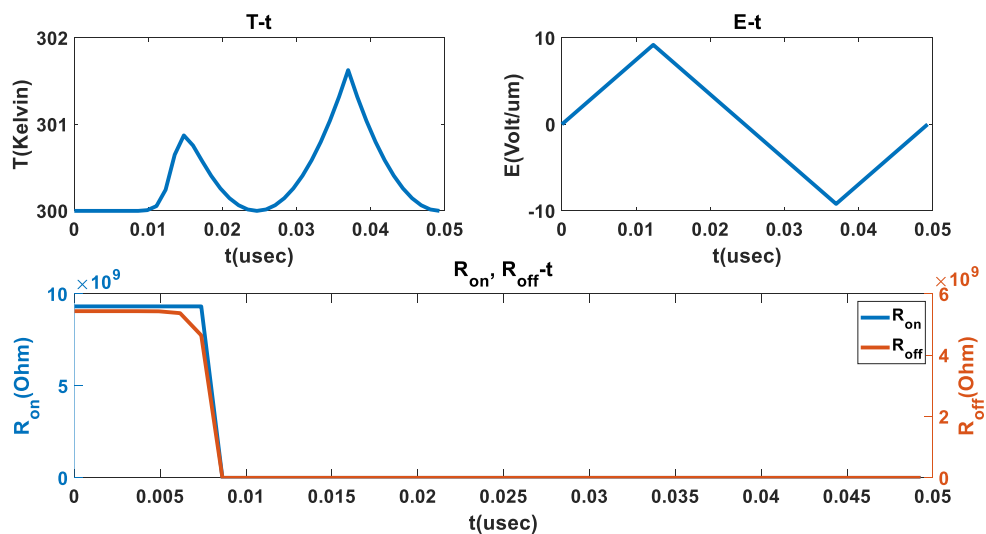
Τα τρία αυτά μεγέθη φαίνονται και στο παρακάτω κοινό διάγραμμα καθώς μεταβάλλονται στο χρόνο:



Εικόνα 15: Τα μεγέθη  $V(t)$ ,  $h(t)$  και  $r(t)$  μιας Bipolar διάταξης σε κοινό διάγραμμα χρόνου, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η τάση έχουμε αρχικά την κατακόρυφη ανάπτυξη του CF. Όταν η μεταβλητή κατάστασης  $h(t)=L=20$  nm έχουμε την εκκίνηση της οριζόντιας ανάπτυξης  $r(t)>0$ . Όταν η πολικότητα της τάσης αντιστραφεί η μεταβλητή  $r(t)$  δεν μειώνεται και αυτό γιατί δεν υπάρχει κάποιος ισχυρός ανταγωνιστικός μηχανισμός. Το memristor έχει εισέλθει σε μία βαθιά κατάσταση LRS και για να επιστρέψει στην HRS απαιτείται ένας ισχυρός αρνητικός παλμός.

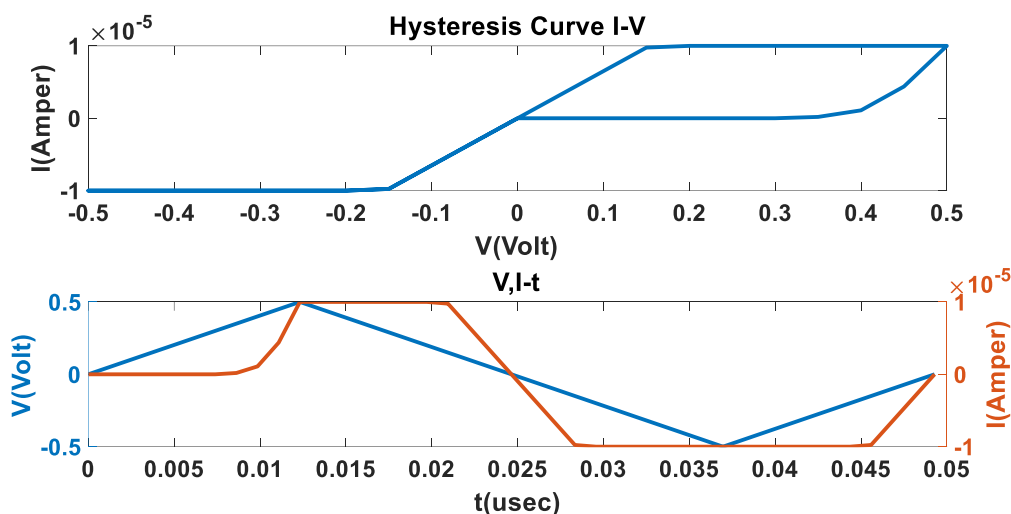
Στην Εικόνα 16 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας, του ηλεκτρικού πεδίου και των αντιστάσεων  $R_{on}$  και  $R_{off}$  σε συνάρτηση με τον χρόνο:



Εικόνα 16: Η μεταβολή της θερμοκρασία  $T$ , του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  και των αντιστάσεων  $R_{on}$  και  $R_{off}$  μιας Bipolar διάταξης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

Αρχικά παρατηρούμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο  $E(t)$  ακολουθεί όπως είναι αναμενόμενο την καμπύλη της εφαρμοζόμενης τάσης. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην διάταξη δεν παραμένει σταθερή, αντιθέτως μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση. Η αντίσταση  $R_{on}$  μεταβαίνει από την HRS στην LRS πραγματοποιώντας μια SET μετάβαση και παραμένει σε αυτήν ανεξαρτήτως της αρνητικής τάσης που εφαρμόζεται.

Στην Εικόνα 17 φαίνεται η καμπύλη υστέρησης καθώς και η εφαρμοζόμενη τάση μαζί με το ρεύμα που διαρρέει την διάταξη σε κοινό διάγραμμα χρόνου.

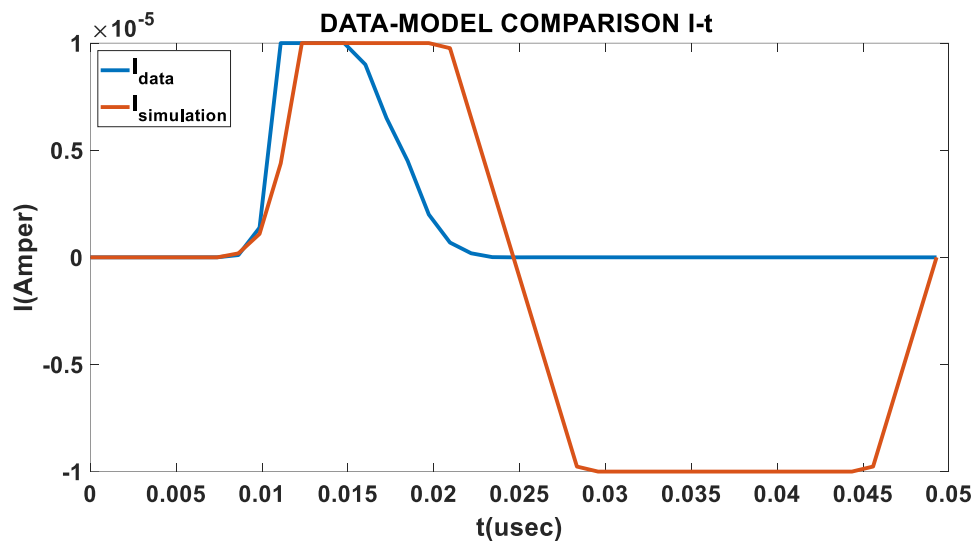


Εικόνα 17: Η καμπύλη υστέρησης και το διάγραμμα της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος στο χρόνο μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

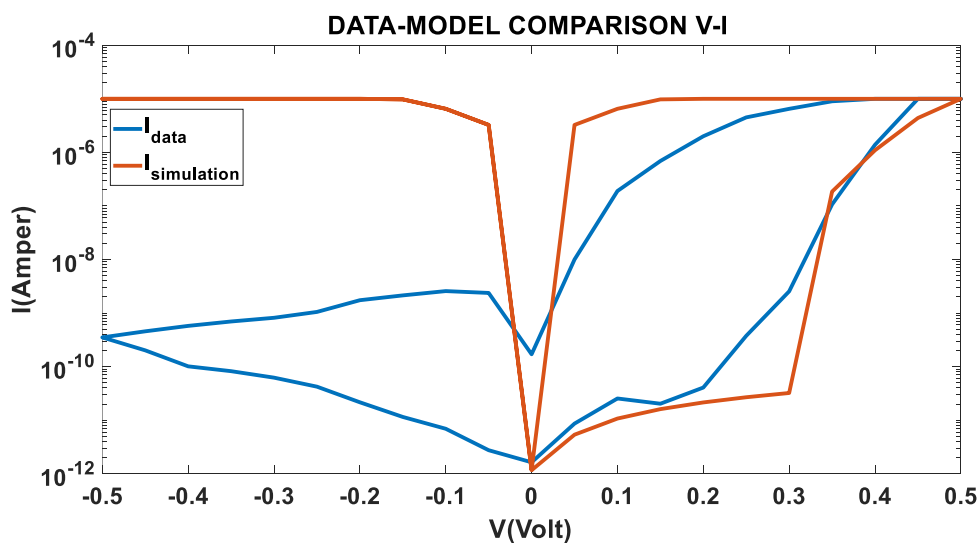
Η καμπύλη υστέρησης δεν είναι συμμετρική. Η μετάβαση SET πραγματοποιείται ομαλά, ενώ το RESET δεν συμβαίνει ποτέ. Στο κάτω διάγραμμα φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση. Είναι ορατό ότι το ρεύμα καθυστερεί να αναπτυχθεί, να ακολουθήσει την εφαρμοζόμενη τάση και τελικά να λάβει την μέγιστη τιμή του, όπως ορίζεται από το CC, που στην προκειμένη περίπτωση είναι  $I_{CC} = 10\mu A$ .

Στην Εικόνα 18 φαίνεται το ρεύμα της πειραματικής διάταξης  $I_{data}(t)$  σε κοινό διάγραμμα με το ρεύμα της προσομοίωσης  $I_{simulation}(t)$  και στην Εικόνα 19

παρατίθεται η χαρακτηριστική I-V της πειραματικής διάταξης μαζί με την αντίστοιχη γραφική της προσομοίωσης. Ο άξονας του ρεύματος είναι λογαριθμικός.



Εικόνα 18: Η κυματομορφή του ρεύματος της πειραματικής διάταξης σε κοινό διάγραμμα με το ρεύμα της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.



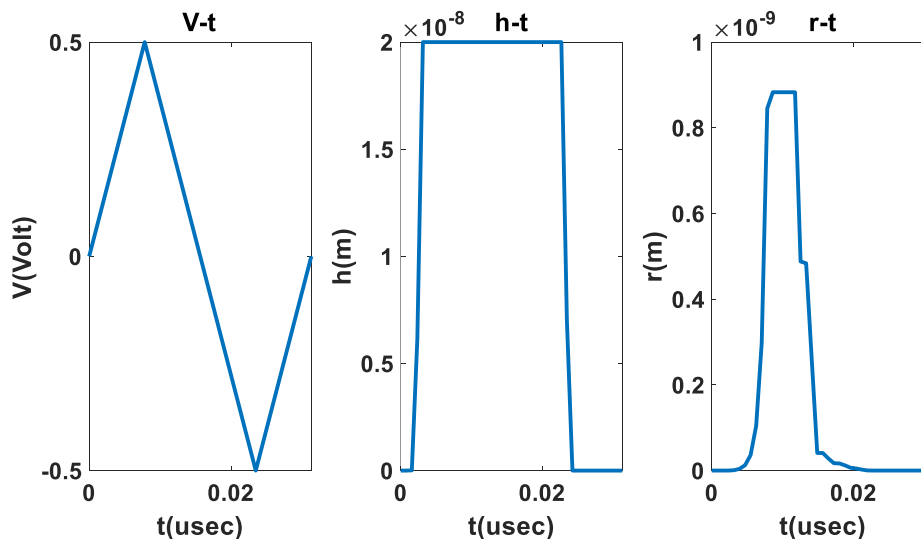
Εικόνα 19: Οι χαρακτηριστικές I-V της πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

Παρατηρούμε ότι οι χαρακτηριστικές I-V της προσομοίωσης και της πειραματικής διάταξης διαφέρουν αισθητά. Κατά την μετάβαση SET παρατηρούμε ότι το μοντέλο προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την αντίστοιχη μετάβαση της πειραματικής διάταξης. Παρόλα αυτά όταν η πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης αντιστραφεί το

μοντέλο αποτυγχάνει να ακολουθήσει την πορεία της διάταξης, με αποτέλεσμα να μεταβαίνει σε χαμηλότερη βαθμίδα από την πραγματική. Πιο συγκεκριμένα ενώ το ρεύμα μειώνεται στην διάταξη, παραμένοντας σε μία ενδιάμεση κατάσταση LRS που διαφέρει από αυτήν που ήταν αρχικά, το μοντέλο συνεχίζει να καταλαμβάνει την κατάσταση που βρισκόταν με ρεύμα  $I_{simulation} = -I_{CC}$  και παραμένει στην βαθμίδα αυτή ανεξαρτήτως της μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης.

Συμπεραίνουμε ότι ο drift φυσικός μηχανισμός από μόνος του δεν είναι ικανός για να προσομοιάσει την συμπεριφορά μιας πραγματικής διάταξης. Το παραπάνω μοντέλο και για τις συγκεκριμένα πειραματικά αποτελέσματα αποτυγχάνει να ενσωματώσει την RESET μετάβαση (υπό άλλα πειραματικά δεδομένα είναι πιθανό να πραγματοποιείται η μετάβαση RESET χωρίς όμως να προσεγγίζει ικανοποιητικά την μεταβολή του ρεύματος). Τα παραπάνω αποτελέσματα αποτελούν μια απόδειξη της αναγκαιότητας να εισαχθούν οι φυσικοί μηχανισμοί diffusion και thermophoresis.

Στις Εικόνες 20 και 21 φαίνονται οι μεταβλητές κατάστασης και η εφαρμοζόμενη τάση έχοντας εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την λειτουργία του memristor.

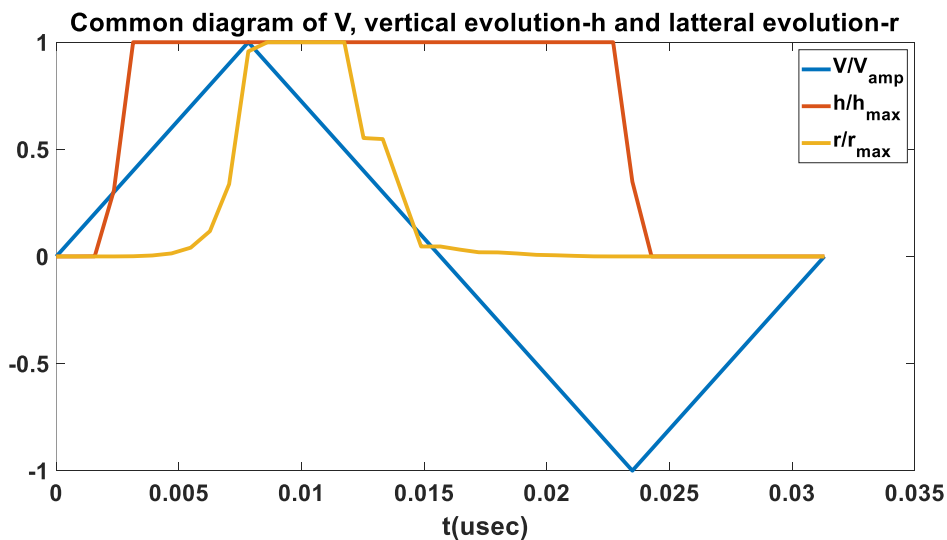


Εικόνα 20: Η εφαρμοζόμενη τάση  $V(t)$  και οι μεταβλητές κατάστασης κατακόρυφης  $h(t)$  και οριζόντιας μεταβολής  $r(t)$  μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

Με την εισαγωγή των φυσικών μηχανισμών της διάχυσης και της θερμοδιάχυσης το SET δεν μεταβλήθηκε αισθητά. Αντιθέτως παρατηρούμε ότι με την αλλαγή της

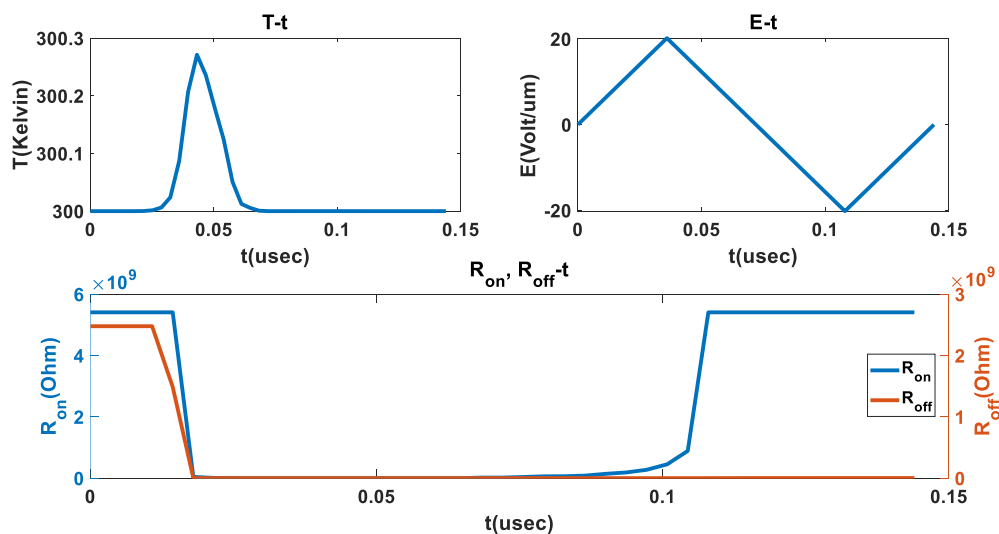


πολικότητας της τάσης τροφοδοσίας η μεταβλητή κατάσταση οριζόντια μεταβολής μειώνεται σημαντικά και στην συνέχεια με έναν αργό ρυθμό μέχρι να μηδενιστεί τελείως, που ακολουθείται με μια απότομη μείωση της μεταβλητής κατάστασης  $h(t)$ . Ο ανταγωνιστικός μηχανισμός της θερμοδιάχυσης είναι αρκετά σημαντικός σε σύγκριση με τους συνεργατικούς μηχανισμούς της ολίσθησης και της διάχυσης, κατά τον θετικό κύκλο της εφαρμοζόμενης τάσης αποτρέποντας την βαθιά πόλωση του memristor σε μία κατάσταση LRS.



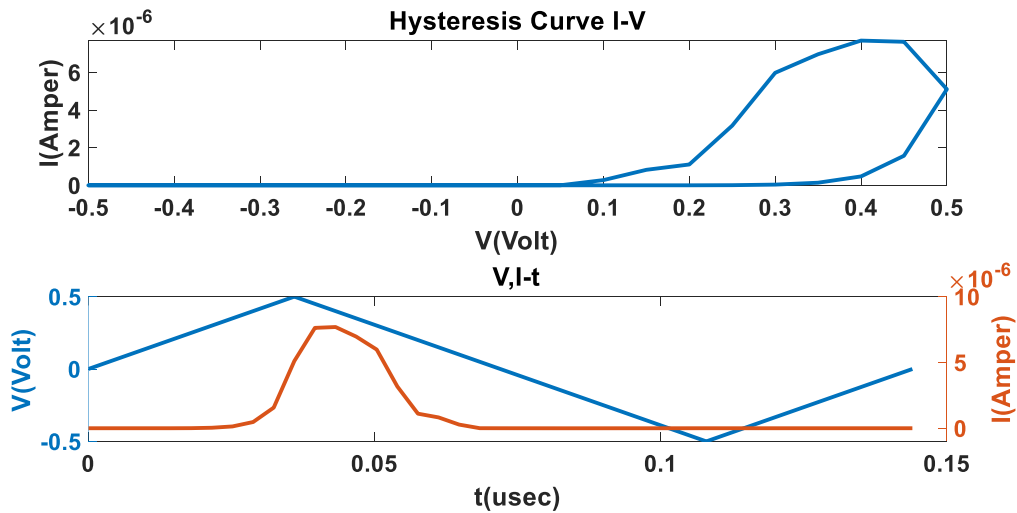
Εικόνα 21: Τα μεγέθη  $V(t)$ ,  $h(t)$  και  $r(t)$  μιας Bipolar διάταξης σε κοινό διάγραμμα χρόνου, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

Στην Εικόνα 22 φαίνονται αντίστοιχα η θερμοκρασία, το ηλεκτρικό πεδίο και οι αντιστάσεις  $R_{on}$  και  $R_{off}$ :



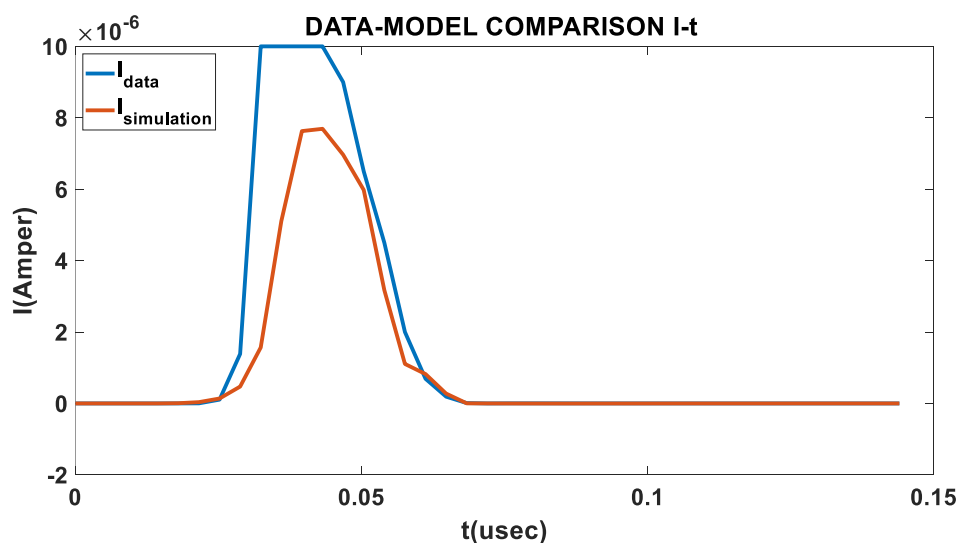
Εικόνα 22: Η μεταβολή της θερμοκρασία  $T$ , του ηλεκτρικό πεδίο  $E$  και των αντιστάσεων  $R_{on}$  και  $R_{off}$  μιας Bipolar διάταξης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας έχει μειωθεί αισθητά και αυτό οφείλεται στην εισαγωγή του όρου της θερμοδιάχυσης που προσπαθεί να λειτουργήσει ενάντια στο αίτιο που προκάλεσε την μεταβολή. Μελετώντας την αντίσταση  $R_{on}$  παρατηρούμε ότι το RESET πραγματοποιείται όταν η τάση λάβει την ελάχιστη τιμή της.



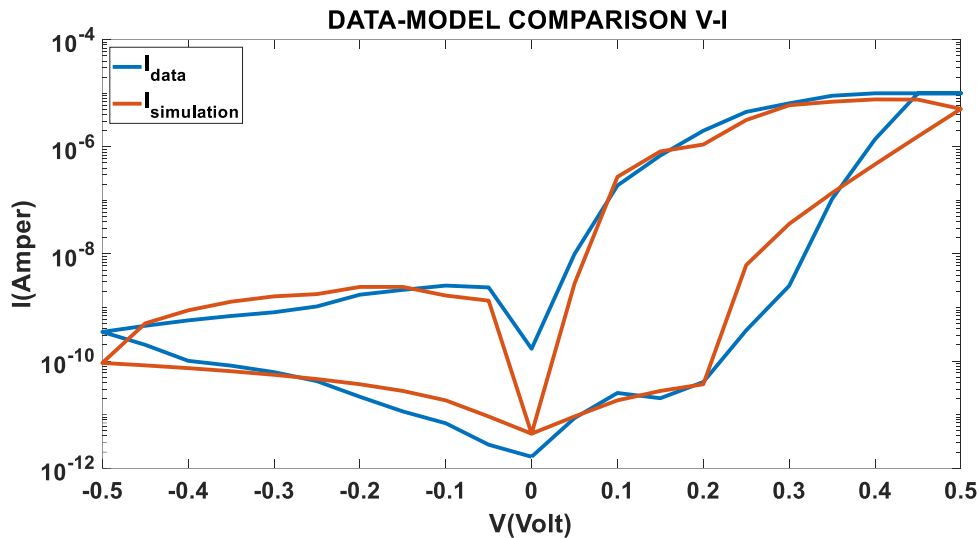
Εικόνα 23: Η καμπύλη υστέρησης και το διάγραμμα της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος στο χρόνο μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

Η καμπύλη υστέρησης και το κοινό διάγραμμα τάσης και ρεύματος αναδεικνύει τους παραπάνω ισχυρισμούς για ένα ομαλό SET και RESET μετά την αλλαγή της πολικότητας.



Εικόνα 24: Η καταμορφή του ρεύματος της πειραματικής διάταξης σε κοινό διάγραμμα με το ρεύμα της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

Στην Εικόνα 24 παρατηρούμε ότι η κυματομορφή του ρεύματος της πειραματικής διάταξης μεταβαίνει στην LRS πιο γρήγορα από το μοντέλο και μεταβαίνει αντίστοιχα στην HRS λίγο πριν από την κυματομορφή της προσομοίωσης. Η καθυστέρηση της κυματομορφής της προσομοίωσης κατά το SET είναι 3 nsec.



Εικόνα 25: Οι χαρακτηριστικές I-V της πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης μιας Bipolar διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς.

Τέλος παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική I-V της προσομοίωσης ακολουθεί πιστά την αντίστοιχη χαρακτηριστική της πειραματικής διάταξης. Η μετάβαση SET δεν έχει μεταβληθεί αισθητά, όμως η οριζόντια ανάπτυξη του CF έχει μειωθεί αισθητά λόγω του όρου της thermophoresis. Με την εισαγωγή του μηχανισμού αυτού, το CF είναι ασθενές και το μοντέλο είναι ικανό να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό την μετάβαση RESET αλλά και την βαθμίδα LRS που μεταβαίνει η πραγματική διάταξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη προσομοίωσης δεν τερματίζει στην μέγιστη τιμή λόγω του Compliance Current αλλά από μόνη της. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για τις περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζεται κάποιο άνω κατώφλι ρεύματος καθώς υποδεικνύει την ενδογενή ικανότητα προσομοίωσης τους. Η διαφορά των ρευμάτων στην περίπτωση που  $V=|V_{max}|$  είναι 2  $\mu A$ .

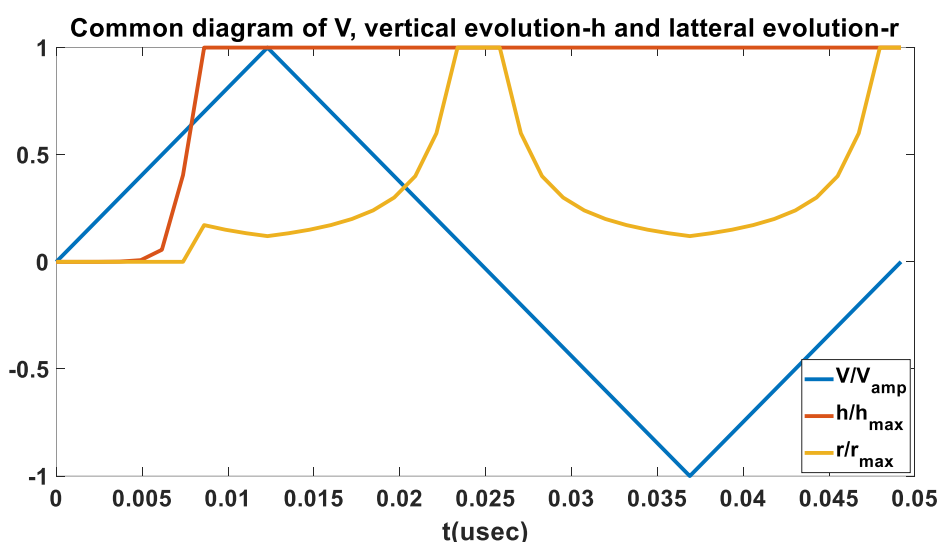
Εντάσσοντας και τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς στο μοντέλο είχε ως τελικό αποτέλεσμα μια αξιόπιστη προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός Bipolar memristor.

Τυχόν αποκλίσεις οφείλονται στον μικρό χρόνο καθυστέρησης και τυχόν σφάλματα κατά την βελτιστοποίηση παραμέτρων.

#### 2.4.2 Ο DC χαρακτηρισμός μίας Threshold διάταξης

Η εισαγωγή των φυσικών μηχανισμών στην περίπτωση της Bipolar διάταξης ήταν σημαντική για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσομοίωση. Προχωρώντας στην περίπτωση της Threshold διάταξης η εισαγωγή των όρων διάχυσης και θερμοδιάχυσης είναι απαραίτητη για να μπορέσει το μοντέλο να εισέλθει σε off state πριν την αλλαγή της πολικότητας. Για αυτό το λόγο ακολουθούμε παρόμοια λογική και παρουσιάζουμε αρχικά τα αποτελέσματα έχοντας εισάγει μόνο τον όρο της ολίσθησης.

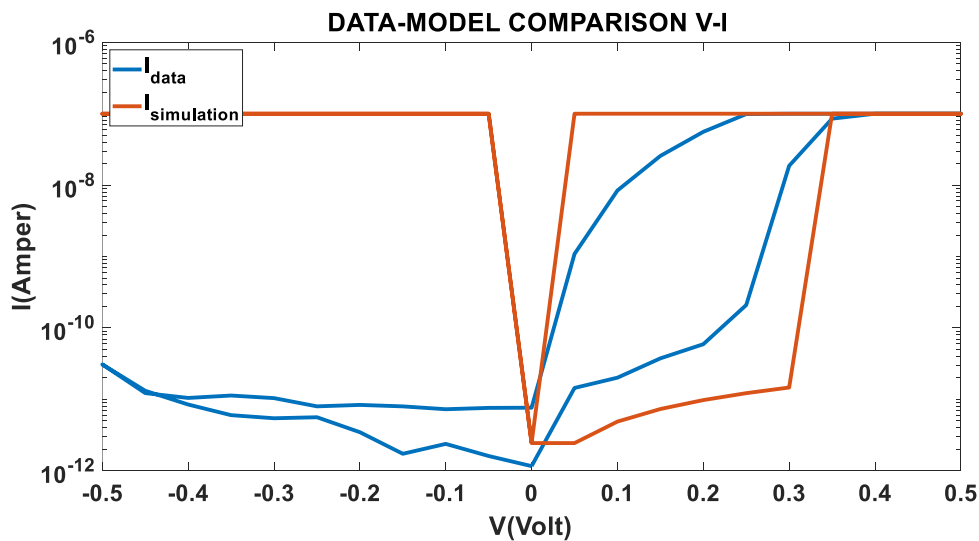
Στην Εικόνα 26 φαίνεται η εφαρμοζόμενη τάση και οι μεταβλητές κατάστασης σε κοινό διάγραμμα:



Εικόνα 26: Τα μεγέθη  $V(t)$ ,  $h(t)$  και  $r(t)$  σε κοινό διάγραμμα χρόνου μιας Threshold διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

Παρατηρούμε ότι ο Drift φυσικός μηχανισμός από μόνος τους δεν είναι ικανός να μηδενίσει το ρεύμα πριν την αλλαγή της πολικότητας της εφαρμοζόμενης τάσης. Πιο συγκεκριμένα η μεταβλητή οριζόντιας μεταβολής του CF αργεί πολύ να αναπτυχθεί με αποτέλεσμα να φτάνει στη μέγιστη τιμή της λίγο πριν αλλάξει πολικότητα. Στην συνέχεια η μεταβλητή κατάστασης  $r$  μειώνεται αλλά δεν καταφέρνει να ικανοποιηθεί

η συνθήκη  $r=0$  και κατά προέκταση να μην έχουμε την επιστροφή του memristor σε μία κατάσταση HRS.

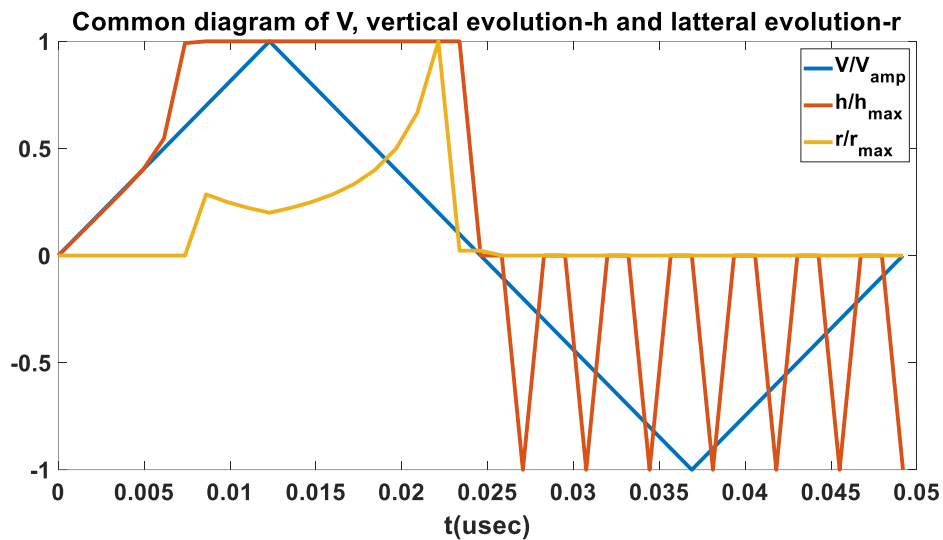


Εικόνα 27: Οι χαρακτηριστικές I-V της Threshold πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει μόνο τον Drift φυσικό μηχανισμό.

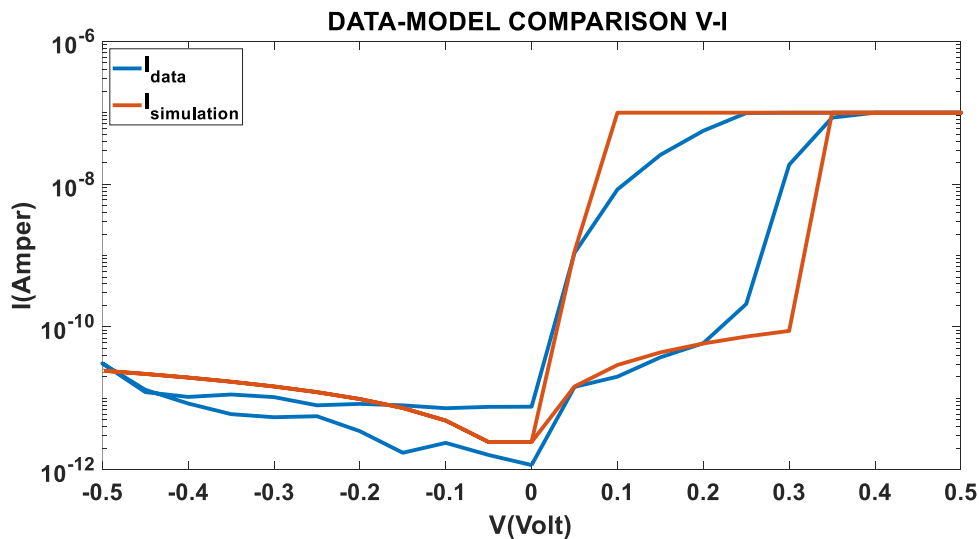
Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η χαρακτηριστική η προσομοίωση να αποτυγχάνει να ακολουθήσει κατά τον αρνητικό κύκλο το off state της πραγματικής διάταξης. Αυτό οφείλεται στην απουσία του ανταγωνιστικού μηχανισμού της thermophoresis. Το μοντέλο όχι μόνο δεν ακολουθεί την συμπεριφορά της διάταξης αλλά συμπεριφέρεται σαν Bipolar διάταξη η οποία έχει πολωθεί σε μια κατάσταση LRS και δεν μπορεί να επιστρέψει μέσω της μετάβασης RESET στην αρχική HRS. Όσον αφορά την μετάβαση SET παρατηρούμε ότι το  $V_{threshold}$  της προσομοίωσης πραγματοποιείται 0.1 Volt πιο μετά. Το  $I_{CC}$  έχει ρυθμιστεί στο 100 nA για να ταιριάζει με το Compliance Current της πειραματικής διάταξης.

Σημείωση: Όπως και στην περίπτωση της Bipolar διάταξης έχει πραγματοποιηθεί πρώτα μια βελτιστοποίηση παραμέτρων και έχει υπολογιστεί ένα διάνυσμα παραμέτρων που προσομοιάζει βέλτιστα την συμπεριφορά της Threshold διάταξης. Οι παραπάνω γραφικές είναι προϊόν αυτού του διανύσματος, έχοντας μηδενίσει τις παραμέτρους που συμμετέχουν στους φυσικούς μηχανισμούς της διάχυσης και της θερμοδιάχυσης.

Στις Εικόνα 28 και 29 φαίνονται η συμπεριφορά των μεταβλητών κατάστασης και η αντίστοιχη χαρακτηριστική I-V της προσομοίωσης, έχοντας προσθέσει όλους τους φυσικούς μηχανισμούς:



Εικόνα 28: Τα μεγέθη  $V(t)$ ,  $h(t)$  και  $r(t)$  σε κοινό διάγραμμα χρόνου μιας Threshold διάταξης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει όλους τους φυσικούς μηχανισμούς.



Εικόνα 29: Οι χαρακτηριστικές I-V της Threshold πειραματικής διάταξης και της προσομοίωσης, για την περίπτωση που έχουμε εισάγει όλους τους φυσικούς μηχανισμούς.

Αρχικά μπορούμε να διακρίνουμε ότι με την εισαγωγή όλων των φυσικών μηχανισμών η μεταβλητή κατάστασης οριζόντιας μεταβολής μηδενίζεται πριν η εφαρμοζόμενη τάση αλλάξει πρόσημο. Αυτό μεταφράζεται σε μια ορθή μετάβαση RESET μιας διάταξης Threshold. Το γεγονός ότι μετά από την μετάβαση αυτή η μεταβλητή

κατάστασης κατακόρυφης μεταβολής γίνεται αρνητική δεν πρέπει να μας ανησυχεί, καθώς αποτελεί μια σύμβαση κατά την σχεδίαση του μοντέλου ώστε να σηματοδοτεί ότι το μοντέλο μας συμπεριφέρεται σαν Threshold memristor. Στην πραγματικότητα η ανάπτυξη του CF θα συνεχιζόταν προς την ίδια κατεύθυνση. Μετά τον μηδενισμό της μεταβλητής  $r(t)$  παρατηρούμε ότι η  $h(t)$  αδυνατεί να διατητήσει την συνθήκη  $h=-L$  (στην πραγματικότητα  $h=L$ ) και έτσι δεν έχουμε μετάβαση SET κατά τον αρνητικό κύκλο. Στην Εικόνα 29 έχουμε την χαρακτηριστική της προσομοίωσης σε κοινό διάγραμμα με την χαρακτηριστική της πειραματικής Threshold διάταξης. Παρατηρούμε ότι η μετάβαση SET της προσομοίωσης είναι βελτιωμένη από την προηγούμενη περίπτωση και προσπαθεί να ακολουθήσει την καμπύλη της πραγματικής διάταξης. Η μετάβαση RESET της προσομοίωσης, αν και καθυστερεί κατά ένα αντίστοιχο ποσό με την SET μετάβαση, καταφέρνει και υιοθετεί την κλίση της καμπύλης της πραγματικής διάταξης κατά το κλείσιμο και την επαναφορά στην HRS. Στον αρνητικό κύκλο οι δύο καμπύλες παραμένουν σε μία κατάσταση υψηλής αντίστασης.

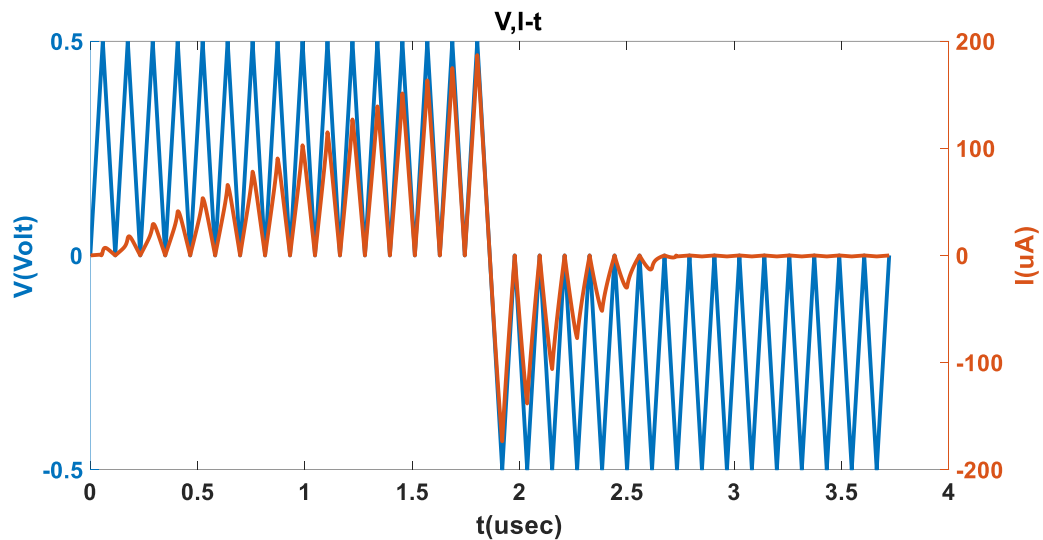
Επομένως η εισαγωγή των φυσικών μηχανισμών diffusion και thermophoresis είναι καταλυτικοί για να πετύχουμε μια ικανοποιητική συμπεριφορά της Threshold πειραματικής διάταξης. Η συνεισφορά τους είναι αναγκαία για να επιτύχει το μοντέλο την μετάβαση RESET πριν αλλάξει η πολικότητα της τάσης, καθώς ο Drift όρος δεν είναι ικανός να εμποδίσει την εξέλιξη του CF.

## 2.5 Η AC ανάλυση του μοντέλου

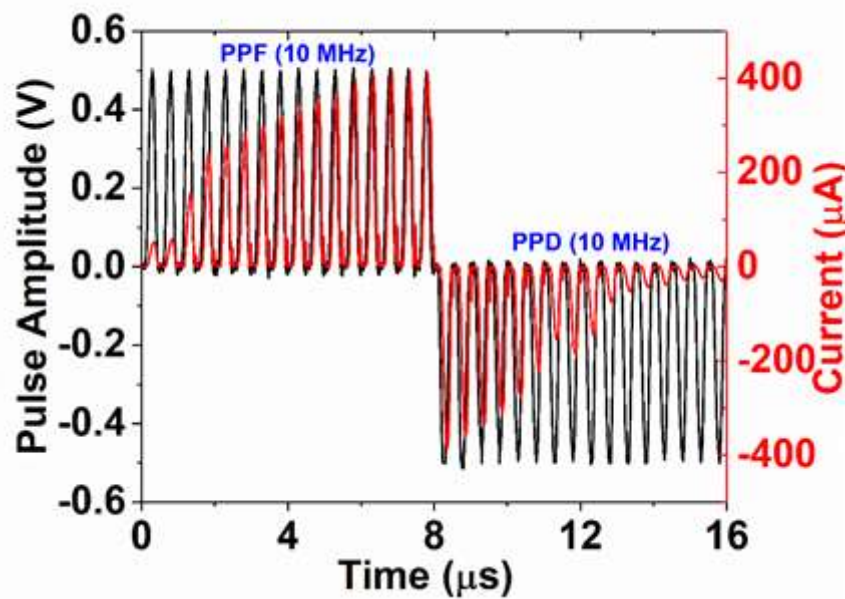
Τα memristor παρουσιάζουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των βιολογικών συστημάτων [12]. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να μιμηθούν τους βιολογικούς νευρώνες και υπό την εφαρμογή μιας κατάλληλης παλμοσειράς να πραγματοποιήσουν μια μετάβαση από STP (Short Term Plasticity) σε LTP ή LTD (Long Term Potentiation – Depression), παρουσιάζουν δηλαδή την ιδιότητα μνήμης των νευρώνων και μπορούν να ενισχύονται ή/και να συνθλιβονται συνεχώς. Πιο αναλυτικά με την εφαρμογή ενός θετικού παλμού τάσης στους ακροδέκτες του memristor το CF αναπτύσσεται και αν σταλθεί ένα δεύτερος θετικός παλμός, πριν επέλθει το relaxation time και η διάταξη επιστρέψει στην αρχική HRS, το CF θα ενισχυθεί και το memristor θα μεταβεί σε μια

κατάσταση χαμηλότερης αντίστασης. Στην πραγματικότητα το LTP μεταφράζεται στην ικανότητα της διάταξης να θυμάται την συμπεριφορά της και να προσπαθεί να την μιμηθεί.

Στην Εικόνα 30 φαίνεται η ικανότητα του Bipolar μοντέλου να πετύχει το Potentiation και Depression και στην Εικόνα 31 φαίνεται η απόκριση μίας πειραματικής διάταξης υπό την ίδια εφαρμοζόμενη παλμοσειρά τάσης:



Εικόνα 30: Προσομοίωση του Potentiation και Depression μίας Bipolar διάταξης.

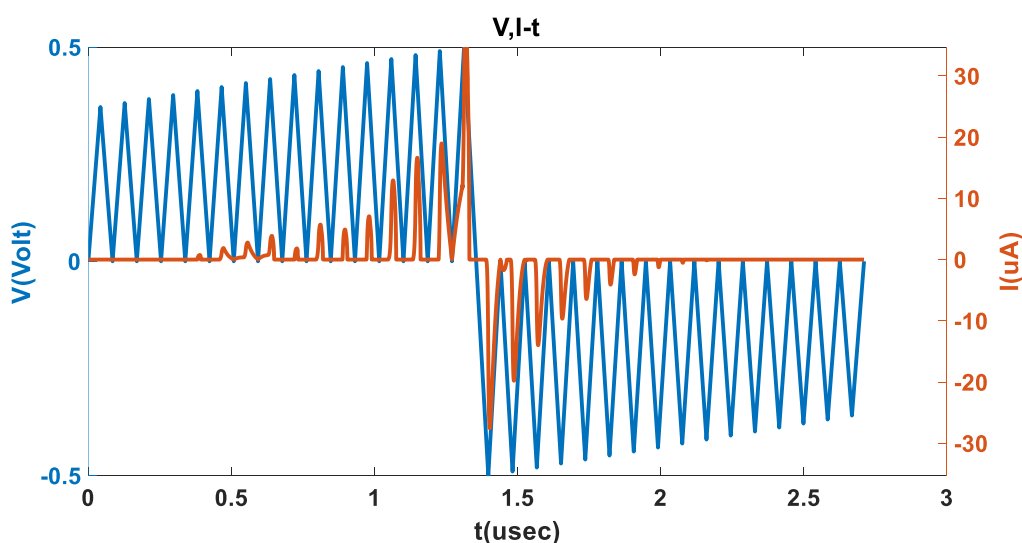


Εικόνα 31: Potentiation και Depression μίας Bipolar πραγματικής διάταξης.



Για να επιτευχθεί το Potentiation και το αντίστοιχο Depression σε μία Bipolar διάταξη αρκεί να εφαρμόσουμε μία παλμοσειρά σταθερού πλάτους και ίδιας συχνότητας, έχοντας αφαιρέσει πρώτα το Compliance Current. Ο πρώτος θετικός παλμός τάσης είναι υπεύθυνος για την πόλωση του memristor σε μία ενδεχομένως κατάσταση LRS. Οι επόμενοι παλμοί τάσης θα πολώσουν το memristor σε πιο χαμηλές καταστάσεις LRS και έτσι συμπεραίνουμε ότι η διάταξη μας έχει την τάση να μιμείται την συμπεριφορά που παρουσίασε όταν λαμβάνει το ίδιο ερέθισμα. Η αντίστροφη διαδικασία του Depression του memristor επιτυγχάνεται με την αντιστροφή της πολικότητας των παλμών, μεταβαίνοντας τελικά στην αρχική HRS. Το μοντέλο πετυχαίνει σε απόλυτο βαθμό να προσομοιάσει την αντίστοιχη συμπεριφορά μίας πραγματικής Bipolar διάταξης.

Στην Εικόνα 32 φαίνεται η παρόμοια ικανότητα του Threshold μοντέλου να πετύχει το Potentiation και Depression:



Εικόνα 32: Προσομοίωση του Potentiation και Depression μίας Threshold διάταξης.

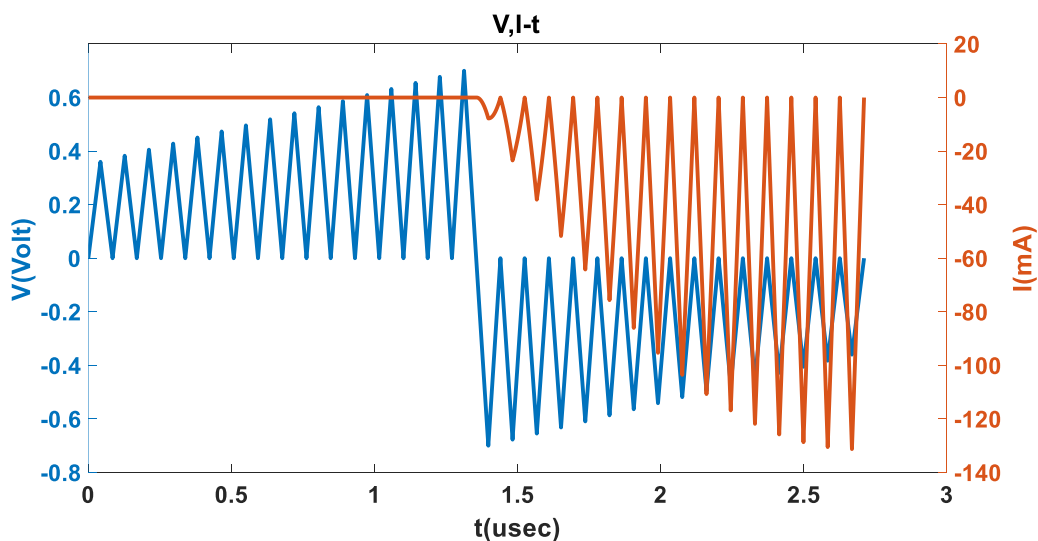
Η διαδικασία LTP για την Threshold διάταξη διαφέρει από την παραπάνω ως προς την εφαρμοζόμενη παλμοσειρά. Επειδή το Threshold memristor επιστρέφει στην HRS πριν το πέρας του θετικού παλμού, η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι οι παλμοί να είναι μεταβαλλόμενου πλάτους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32, ή μεταβαλλόμενης συχνότητας.

## 2.6 Η μετάβαση από Threshold σε Bipolar συμπεριφορά

Η τελευταία ιδιότητα του μοντέλου που μελετάμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι η μετάβαση από μία Threshold συμπεριφορά σε μια Bipolar. Αυτή η εγγενής ιδιότητα της διάταξης προκύπτει όταν ο φυσικός μηχανισμός της θερμοδιάχυσης δεν είναι ικανός να επαναφέρει το memristor σε μία κατάσταση υψηλής αντίστασης.

Στην προηγούμενη ενότητα εφαρμόστηκε μια παλμοσειρά αυξανόμενου πλάτους από 0.36 Volt (πρώτος παλμός) σε 0.5 Volt (τελευταίος παλμός) με σκοπό την διέγερση του CF και την επίτευξη του Potentiation. Παρόλα αυτά το memristor μετά το πέρας του κάθε θετικού παλμού επέστρεφε στην HRS. Στην περίπτωση που μελετάμε το memristor μετά από ένα θετικό παλμό τάσης δεν θα επιστρέψει στην HRS. Αντιθέτως θα παραμείνει στην LRS και θα «χάσει» την Threshold συμπεριφορά του πραγματοποιώντας μια μετάβαση σε μία Bipolar λειτουργία.

Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 33, όπου έχουμε εφαρμόσει μια παλμοσειρά τάσης αυξανόμενου πλάτους από 0.36 Volt (πρώτος παλμός) σε 0.7 Volt (τελευταίος παλμός) και έχουμε αφαιρέσει το Compliance Current, αφήνοντας το ρεύμα να αναπτυχθεί ελεύθερα. Για  $V > 0$  το ρεύμα δεν είναι μηδενικό αλλά πολύ μικρό κατά μέτρο σε σχέση με το ρεύμα που αντιστοιχεί στην αρνητική παλμοσειρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι κατά την εφαρμογή της αρνητικής τάσης, ο ανταγωνιστικός μηχανισμός της διάχυσης δεν είναι αρκετός για να μειώσει το ρεύμα που συνεχίζει να αναπτύσσεται ανεξέλεγκτα.



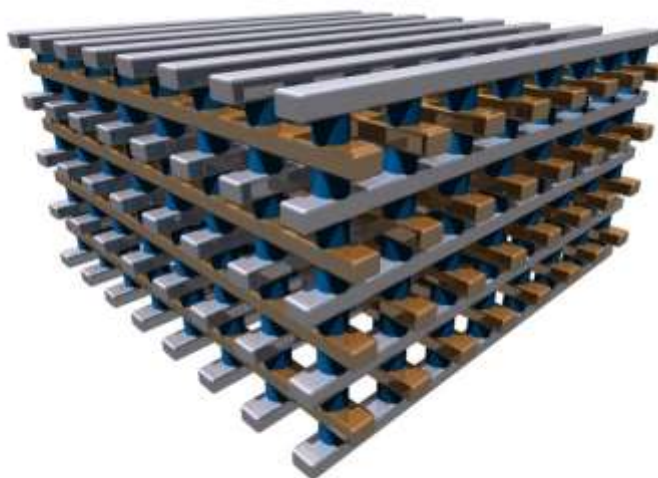
Εικόνα 33: Η μετάβαση από την Threshold στην Bipolar συμπεριφορά.

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CROSS – BAR ARRAY

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η διαδικασία κατασκευής ενός γενικού μοντέλου προσομοίωσης memristor, το οποίο είναι ικανό να υιοθετεί αξιόπιστα τόσο την Bipolar όσο και την Threshold συμπεριφορά. Έχοντας στην διάθεσή μας ένα τέτοιο εργαλείο μπορούμε να προχωρήσουμε στην μελέτη, την περιγραφή και την υλοποίηση ενός αντίστοιχου μοντέλου προσομοίωσης μιας μνήμης Cross – Bar.

Οι Cross – Bar μνήμες αποτελούνται από selector διατάξεις, όπως είναι τα threshold memristor, με σκοπό την αποκοπή των sneak path currents που διαρρέουν ανεξέλεγκτα την συνολική διάταξη και διαταράσσουν την διαδικασία εγγραφής και αποθήκευσης στη μνήμη [13]. Οι selectors οφείλουν να δρουν σαν ανορθωτές εμποδίζοντας τα ρεύματα να ρέουν όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι χαμηλή και να επιτρέπουν την διέλευση για υψηλές τιμές τάσης. Αυτές οι μνήμες είναι συμβατές με τις κλασικές τεχνολογίες CMOS και μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη τεχνολογίας και κόστους για πολλές εφαρμογές, που κυμαίνονται από λογικές πύλες και εκφράσεις, νευρομορφικές εφαρμογές αυτόνομης λειτουργίας έως και ενσωματωμένες μνήμες.

Στην Εικόνα 34 φαίνεται μια 3D Cross – Bar μνήμη, παρόλα αυτά σε αυτή την εργασία θα εστιάσουμε στην προσομοίωση 2D δομών.



Εικόνα 34: 3D Cross - Bar μνήμη.

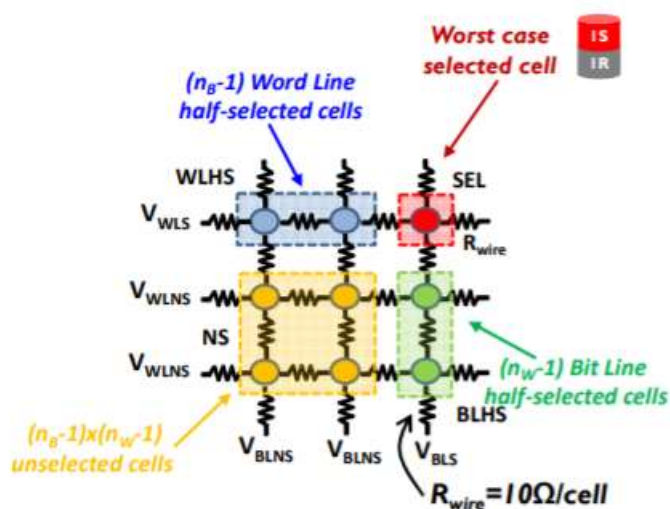
### 3.1 Η αρχιτεκτονική μιας $n \times m$ Cross – Bar μνήμης

Προτού προχωρήσουμε στην μελέτη και την προσομοίωση των βασικών χαρακτηριστικών μίας  $n \times m$  Cross – Bar μνήμης, πρέπει να περιγράψουμε την αρχιτεκτονική που διέπει μια τέτοια μνήμη. Στην Εικόνα 35 μπορούμε να διακρίνουμε:

- Το Selected Cell, που είναι το επιθυμητό στοιχείο που θέλουμε να διαβάσουμε και να αναγνωρίσουμε την κατάσταση του.
- Τα Word Lines, που είναι τα οριζόντια ηλεκτρόδια της μνήμης. Τα Word Lines είναι στην ουσία τα Top Electrodes των memristor.
- Τα Bit Lines, που είναι τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια της μνήμης. Τα Bit Lines είναι τα αντίστοιχα Bottom Electrodes των memristor.
- Το Selected Word Line και το αντίστοιχο Selected Word Line, με το σημείο τομής τους να αποτελεί το Selected Cell που επιθυμούμε να μελετήσουμε.
- Τις παρασιτικές αντιστάσεις  $R_{wire}$ , που αποτελούν τις αντιστάσεις των Word και Bit Lines.

Έτσι έχουμε την σύνθεση τριών περιοχών περιμετρικά του επιθυμητού στοιχείου, Selected Cell:

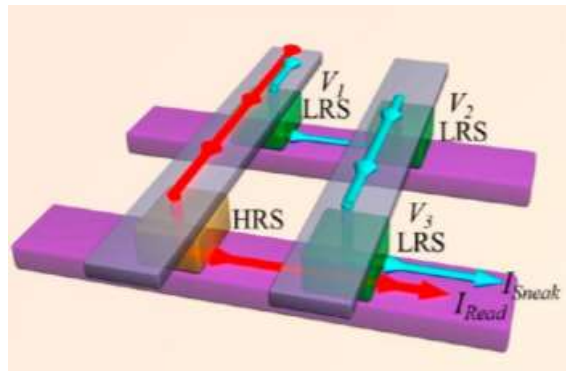
- Τα half selected cells του Selected Word Line.
- Τα half selected cells του Selected Bit Line.
- Τα  $(n-1) \times (m-1)$  unselected cells.



Εικόνα 35: Η αρχιτεκτονική μίας  $n \times m$  Cross - Bar μνήμης.

### 3.2 Τα Sneak Path Currents

Το μείζον πρόβλημα που προκύπτει από την παραπάνω αρχιτεκτονική μίας Cross – Bar μνήμης είναι τα ρεύματα διαρροής, Sneak Path Currents, που αναπτύσσονται εσωτερικά και διαρρέουν όλη την διάταξη. Τα Sneak Path Currents είναι ικανά να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα κατά την διαδικασία ανάγνωσης του Selected Cell [14]. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36, κατά την διαδικασία ανάγνωσης ενός επιθυμητού στοιχείου, αν το Selected Cell βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής αντίστασης HRS, είναι πιθανό αν τα half selected cells των Selected Word και Bit Line καθώς και ορισμένα unselected cells βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης LRS, να έχουμε μία ανεπιθύμητη λάθος ανάγνωση του στοιχείου (misreading σε LRS κατάσταση).



Εικόνα 36: Το misreading του Selected Cell εξαιτίας των Sneak Path Currents.

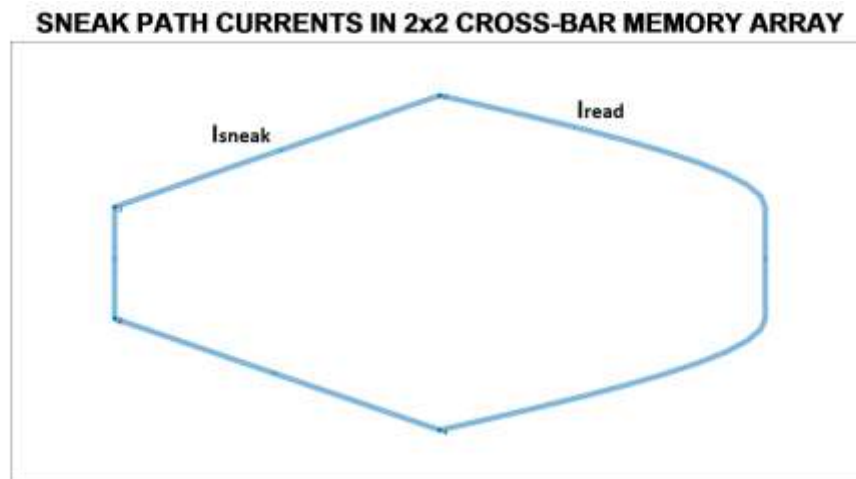
Παρατηρούμε ότι καθώς εφαρμόζουμε τον παλμό ανάγνωσης στην έξοδο λαμβάνουμε το άθροισμα δύο ρευμάτων, το  $I_{read}$  και το  $I_{sneak}$ . Το πρώτο προκύπτει από την ανάγνωση της κατάστασης του memristor και περιέχει την ορθή πληροφορία της κατάστασης, ενώ το δεύτερο προκύπτει από τα στοιχεία που είναι στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης και συμπεριφέρονται σαν βραχυκυκλώματα, επιτρέποντας την ροή ρεύματος προς την έξοδο. Είναι ευδιάκριτο ότι η ροή των Sneak Path Currents ακολουθεί την έμμεση διαδρομή από το Selected Word Line στα Unselected cells και από εκεί στο Selected Bit Line, θεωρώντας ότι οι διαφορές τάσεις στα Unselected cells είναι τέτοιες που επιτρέπουν την ροή ρεύματος από το Bit στο Word Line.

Επειδή οι Cross – Bar μνήμες μοιάζουν πολύ με μήτρες αγωγιμοτήτων, η σύμβαση που υιοθετήθηκε σε αυτή την εργασία για τον προσδιορισμό των στοιχείων φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3, όπου θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύει μία Cross – Bar μνήμη.

	<b>n+1</b>	<b>n+2</b>	<b>...</b>	<b>n+m-1</b>	<b>n+m</b>
<b>1</b>	$R_{1,n+1}$	$R_{1,n+2}$	...	$R_{1,n+m-1}$	$R_{1,n+m}$
<b>2</b>	$R_{2,n+1}$	$R_{2,n+2}$	...	$R_{2,n+m-1}$	$R_{2,n+m}$
<b>.</b>	.	.	.	.	.
<b>.</b>	.	.	.	.	.
<b>.</b>	.	.	.	.	.
<b>n-1</b>	$R_{n-1,n+1}$	$R_{n-1,n+2}$	...	$R_{n-1,n+m-1}$	$R_{n-1,n+m}$
<b>n</b>	$R_{n,n+1}$	$R_{n,n+2}$	...	$R_{n,n+m-1}$	$R_{n,n+m}$

Πίνακας 3: Σύμβαση ονομασίας των στοιχείων μίας Cross - Bar μνήμης.

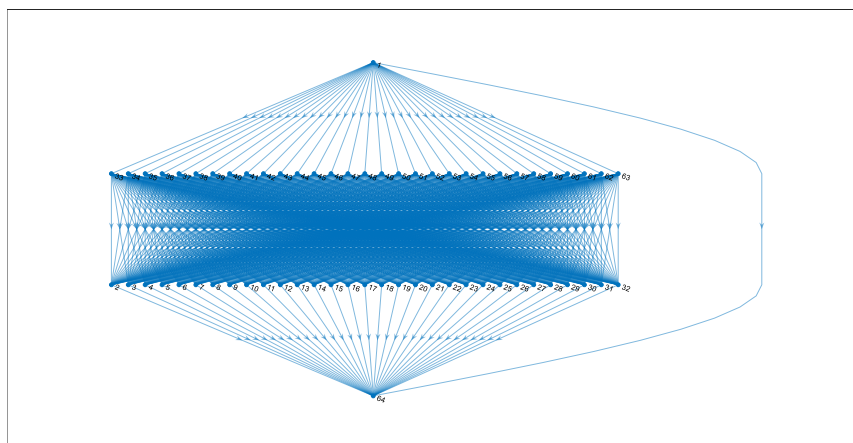
Επομένως το στοιχείο  $R_{i,j}$  μίας μήτρας αγωγιμοτήτων αντιστοιχεί στην θέση (i,n+j) στην παραπάνω Cross – Bar μνήμη. Θεωρώντας μία 2 x 2 μνήμη Cross – Bar που επιθυμούμε να διαβάσουμε το στοιχείο (1,4), βάση της παραπάνω σύμβασης, τότε το ρεύμα ανάγνωσης θα ακολουθήσει την διαδρομή 1 → 4, ενώ τα Sneak Path Currents θα ακολουθήσουν την διαδρομή 1 → 3 → 2 → 4, όπως φαίνεται στην Εικόνα 37.



Εικόνα 37: Οι διαδρομές των  $I_{read}$  και  $I_{sneak}$  κατά την ανάγνωση του στοιχείου (1,4) σε μία 2 x 2 μνήμη Cross – Bar.

Για την παραπάνω οπτικοποίηση του προβλήματος, κατασκευάστηκε ένας κατευθυνόμενος γράφος στο λογισμικό της Matlab. Η λογική που ακολουθήσαμε ήταν αρχικά η πόλωση όλων των memristor στην LRS χρησιμοποιώντας το γενικό μοντέλο, εκτός από το Selected Cell που ρυθμίζεται στην HRS και στην συνέχεια η υλοποίηση ενός γράφου που να δημιουργεί όλες τις επιτρεπτές διαδρομές, βάση των τάσεων των ηλεκτροδίων. Για να γίνει πιο κατανοητό το πρόβλημα το ρευμάτων διαρροής ο παρακάτω κατευθυνόμενος γράφος εμφανίζει όλες τις διαδρομές των Sneak Path Currents κατά την ανάγνωση του επιθυμητού στοιχείου (1,64) σε μία μνήμη 32 x 32.

#### SNEAK PATH CURRENTS IN 32x32 CROSS-BAR MEMORY ARRAY



Εικόνα 38: Οι πιθανές διαδρομές των Sneak Path Currents κατά την ανάγνωση του στοιχείου (1,64) σε μία 32 x 32 μνήμη Cross – Bar.

### 3.3 Οι παρασιτικές αντιστάσεις

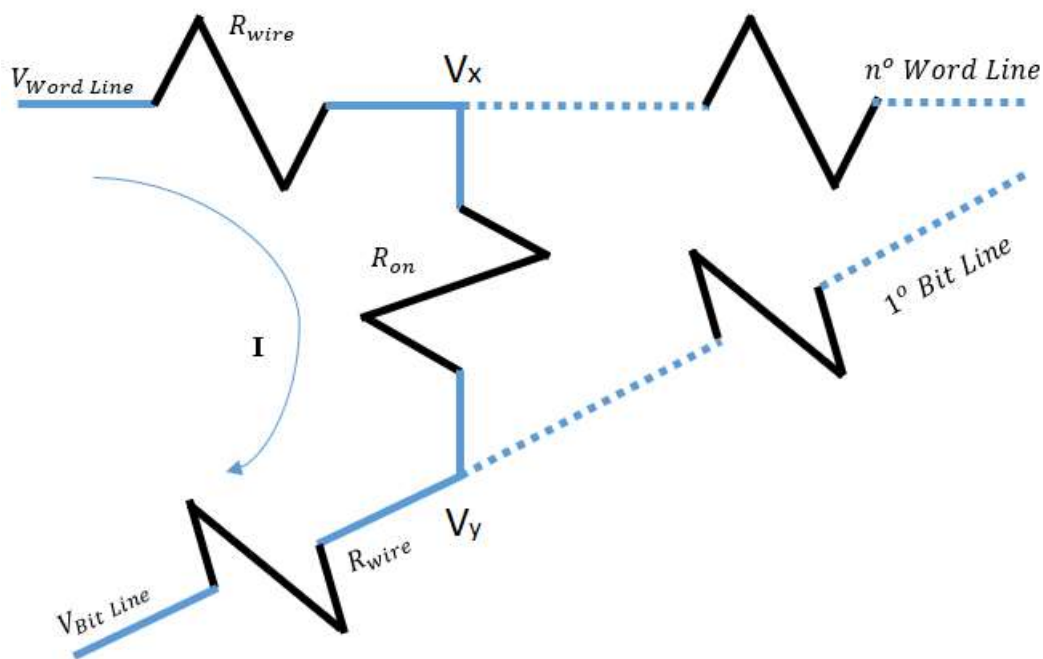
Ένα δεύτερο πρόβλημα που εισέρχεται λόγω της αρχιτεκτονικής της Cross – Bar μνήμης είναι η πτώση τάσης πάνω στα  $n \times m$  στοιχεία. Η πτώση τάσης οφείλεται στις παρασιτικές αντιστάσεις των ηλεκτροδίων, που είναι υπεύθυνες για την αλλοίωση της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για την προσομοίωση των παρασιτικών αντιστάσεων και την τελική εκτίμηση των Write Margin και Read Margin, που θα μελετήσουμε στην συνέχεια, υιοθετούμε την λογική του Worst Case Scenario. Αναλυτικότερα, θεωρώντας ότι το Selected Cell βρίσκεται στην θέση (1,m) του πίνακα μνήμης, δηλαδή στο 1<sup>ο</sup> Word Line και στο m<sup>ο</sup> Bit Line, θα είναι το στοιχείο που θα υποστεί την πιο σημαντική πτώση τάσης. Θεωρούμε δηλαδή ότι η τάση στα Word Lines εφαρμόζεται από τα αριστερά προς τα

δεξιά, ενώ για τα Bit Lines εφαρμόζεται από κάτω και έτσι η πτώση τάσης γίνεται εντονότερη καθώς μετακινούμαστε προς τα πάνω.

Για την προσομοίωση των παρασιτικών αντιστάσεων ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- i. Δημιουργούμε αρχικά την επιθυμητή  $n \times m$  μνήμη.
- ii. Εφαρμόζουμε την επιθυμητή τάση στα Word και Bit Lines.
- iii. Χρησιμοποιούμε το μοντέλο του memristor, που αναπτύξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να λάβουμε ένα 3D πίνακα αγωγιμοτήτων  $R_{i,j,t}$ . Αυτός ο πίνακας περιέχει την πληροφορία όλων των  $n \times m$  αγωγιμοτήτων στον χρόνο.
- iv. Στην συνέχεια προχωράμε σε μία εκτίμηση της πτώσης τάσης για το  $n \times 1$  στοιχείο του πίνακα μνήμης, δηλαδή για το στοιχείο που βρίσκεται στο  $n^{\circ}$  Word Line και στο  $1^{\circ}$  Bit Line και είναι αυτό που υπέστη την μικρότερη πτώση τάσης.



Εικόνα 39: Το κύκλωμα για την εκτίμηση της πτώσης τάσης στα memristor λόγω των παρασιτικών αντιστάσεων.

Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα μπορούμε να καταλήξουμε σε μία εκτίμηση των τάσεων  $V_x$  και  $V_y$ , θεωρώντας ότι τα ρεύματα που ρέουν στο Word και Bit Line είναι αμελητέα σε σχέση με το  $I$ .



$$V_{Word\ Line} - V_{Bit\ Line} = (2R_{wire} + R_{on})I \Rightarrow$$

$$\Delta V_{Word-Bit\ Line} = (2R_{wire} + R_{on}) \frac{V_x - V_y}{R_{on}} \Rightarrow$$

$$V_x - V_y = \frac{R_{on}}{2R_{wire} + R_{on}} \Delta V_{Word-Bit\ Line} \Rightarrow$$

Καταλήγοντας έτσι στις σχέσεις (20) και (21):

$$V_x = V_{Word\ Line} - \frac{R_{wire}}{2R_{wire} + R_{on}} \Delta V_{Word-Bit\ Line} \quad (20)$$

$$V_y = V_{Bit\ Line} + \frac{R_{on}}{2R_{wire} + R_{on}} \Delta V_{Word-Bit\ Line} \quad (21)$$

Με παρόμοια διαδικασία προχωράμε στην εκτίμηση ολόκληρου του  $n^{ou}$  Word Line, καθώς μετακινούμαστε από το  $1^o$  στο  $m^o$  Bit Line. Αντίστοιχα προχωράμε από το  $n^o$  στο  $1^o$  Word Line, φτάνοντας τελικά στο Selected Cell.

- v. Επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση των στοιχείων για τις διορθωμένες τάσεις που υπολογίσαμε.

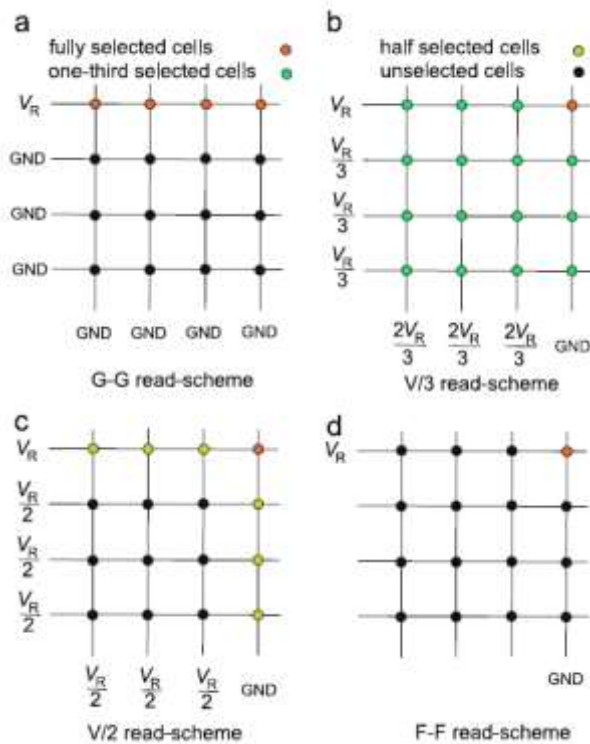
### 3.4 Οι τεχνικές ανάγνωσης

Οι παρασιτικές αντιστάσεις και τα Sneak Path Currents, επηρεάζουν την εγγραφή και την ανάγνωση των στοιχείων της μνήμης. Πριν προχωρήσουμε όμως στην μελέτη επίπτωσης, πρέπει πρώτα να περιγράψουμε τις τεχνικές ανάγνωσης που εφαρμόζονται σε μια Cross – Bar μνήμη. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται είναι οι  $\frac{V_R}{2}$ ,  $\frac{V_R}{3}$ , Floating - Floating και Ground – Ground ή  $V_R$  και φαίνονται στην Εικόνα 40 [15]. Η τάση  $V$  αποτελεί την rail to rail εφαρμοζόμενη τάση με σκοπό την ανάγνωση του στοιχείου που βρίσκεται στην θέση (1,n+m), δηλαδή του στοιχείου του Worst Case Scenario, όπως αυτό αναλύθηκε παραπάνω.

- a) Κατά την τεχνική ανάγνωσης  $V_R$  ή G-G, εφαρμόζεται μία τάση στο Selected Word Line, ενώ όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια συνδέονται στην γείωση, με αποτέλεσμα τα στοιχεία στο Selected Word Line να είναι fully selected και τα Sneak Path Currents να δημιουργούνται εξαιτίας αυτών των στοιχείων.
- b) Κατά την τεχνική ανάγνωσης  $\frac{V_R}{3}$  εφαρμόζεται μία τάση  $V_R$  στο Selected Word Line, ενώ στα υπόλοιπα Word Lines εφαρμόζεται μία τάση  $\frac{V_R}{3}$ . Αντίστοιχα το

Selected Bit Line γειώνεται και όλα τα υπόλοιπα Bit Lines δέχονται μία τάση  $\frac{2V_R}{3}$ . Όλα τα στοιχεία εκτός του επιθυμητού ονομάζονται one-third selected cells και είναι υπεύθυνα για τα Sneak Path Currents. Θεωρώντας ότι τα στοιχεία αυτά συμπεριφέρονται σαν Threshold memristor με  $V_{threshold} < \frac{V_R}{3}$ , τότε είναι δυνατό να περιορίσουμε τα ρεύματα διαρροής.

- c) Με παρόμοια λογική ορίζεται η τεχνική  $\frac{V_R}{2}$ , όπου στα Word Lines και στα Bit Lines των unselected cells εφαρμόζεται τάση  $\frac{V_R}{2}$  με αποτέλεσμα τα στοιχεία των Selected Word και Bit Line να είναι half selected.
- d) Τέλος, το τελευταίο σενάριο F-F έχει σαν αποτέλεσμα τα unselected cells να είναι υπεύθυνα για την ανεξέλεγκτη διέλευση των Sneak Path Currents και κατά προέκταση να έχει την μικρότερη κατανάλωση ισχύος και ταυτόχρονα το χειρότερο μέτρο ανάγνωσης στοιχείων, Read Margin.



Εικόνα 40: Οι τεχνικές ανάγνωσης των στοιχείων σε μία μνήμη Cross - Bar.

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει μία αντιστάθμιση μεταξύ Read Margin και κατανάλωσης ισχύος.

Σημείωση: Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι η τεχνική ανάγνωσης F-F δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας καθώς έχει το χειρότερο Read Margin.

### 3.5 Write Margin

Ο ρόλος των παρασιτικών αντιστάσεων κατά την διαδικασία εγγραφής είναι κρίσιμος. Η επιθυμία μας να εγγράψουμε τα στοιχεία σε μία συγκεκριμένη κατάσταση υπό κάποια τάση, που εφαρμόζουμε στα αντίστοιχα Word Lines και Bit Lines περιορίζεται από την πτώση τάσης που εισέρχεται από τις παρασιτικές αντιστάσεις.

Για να μπορέσουμε να αποφανθούμε για την επιρροή των παρασιτικών αντιστάσεων στο στάδιο της εγγραφής των στοιχείων της μνήμης, θα χρειαστούμε ένα μέτρο που να μας παρέχει την πληροφορία αυτή. Αυτό το μέτρο ονομάζεται Write Margin [16] και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

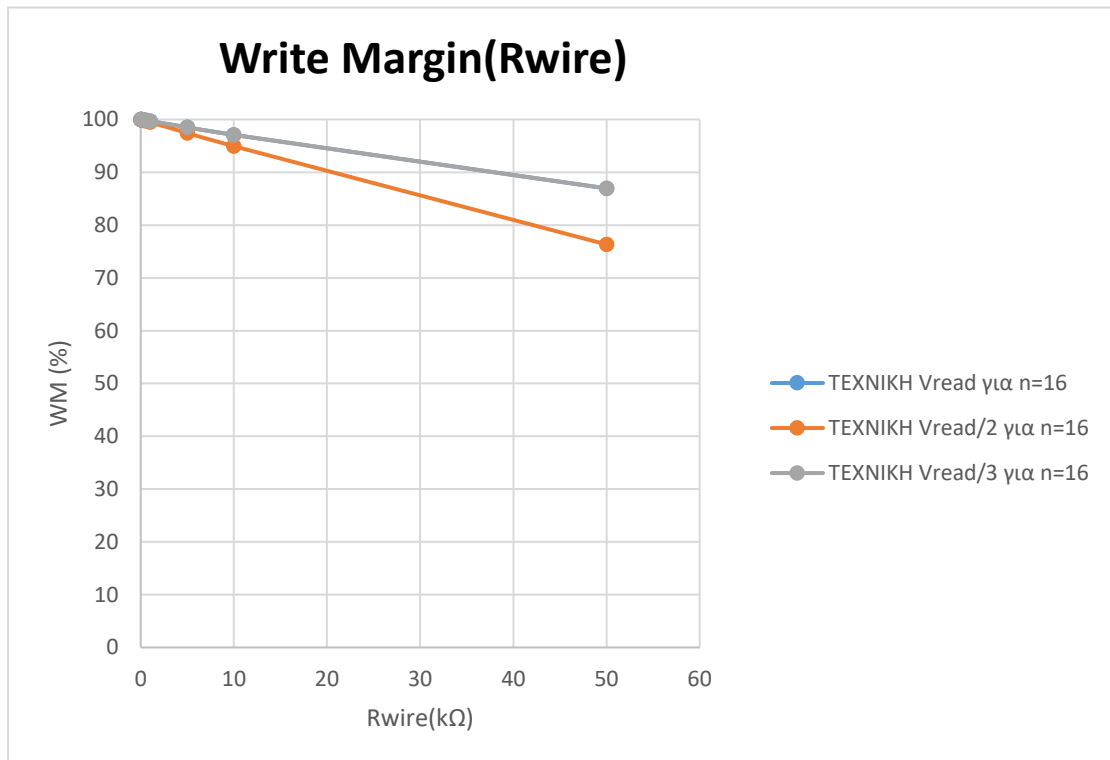
$$WM = \frac{V_{selective\ cell}}{V_{applied}} 100\% = \frac{V_{selective\ cell}}{V_{write}} 100\% \quad (22)$$

Είναι προφανές ότι το Write Margin θα επηρεάζεται από δύο παράγοντες, την παρασιτική αντίσταση  $R_{wire}$  και το μέγεθος της μνήμης Cross – Bar,  $n$ , εφόσον αναφερόμαστε για τετραγωνικούς πίνακες  $n \times n$ .

Προτού προχωρήσουμε στην παράθεση των αποτελεσμάτων πρέπει να κάνουμε κάποιες παραδοχές:

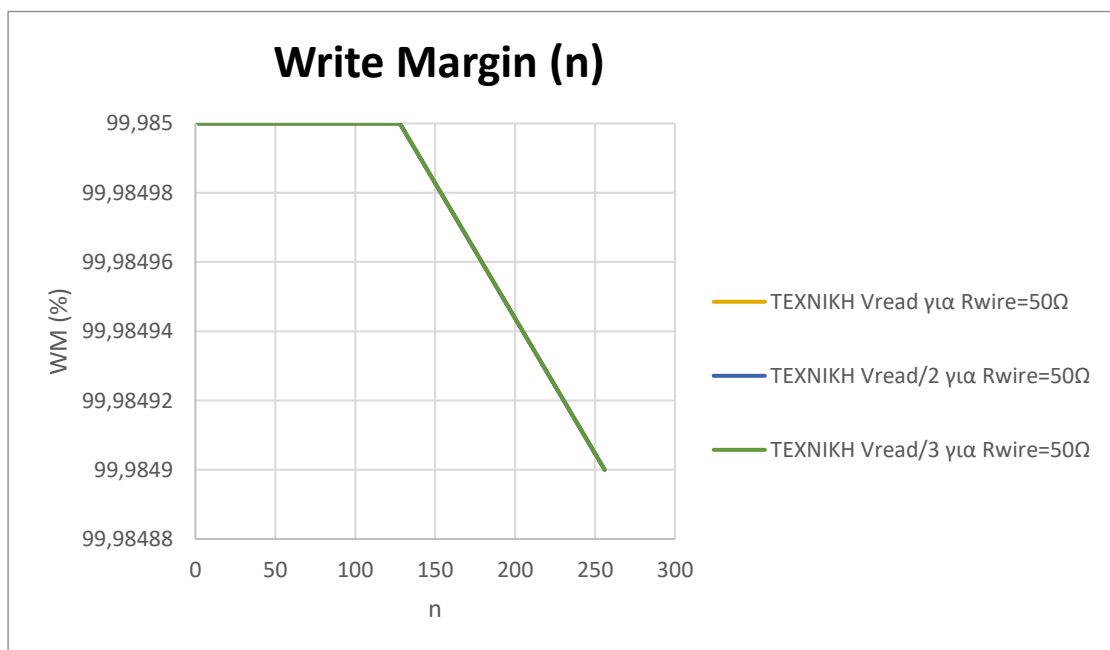
- i. Θα υπολογίσουμε το WM για το στάδιο που εφαρμόζουμε τον  $V_{read}$  παλμό, δηλαδή κατά την ανάγνωση και όχι κατά την εγγραφή. Παρόλο που αναφερόμαστε σε Write Margin, η εγγραφή μπορεί να έχει προηγηθεί χρονικά ή να λάβαμε την μνήμη εγγεγραμμένη και να κληθήκαμε να την αναγνωρίσουμε.
- ii. Το WM μας δίνει πληροφορία στο χρόνο του παλμού. Ωστόσο θα μετρήσουμε στο pick του παλμού ή στο  $T/2$ , για να λάβουμε την συνολική εικόνα, αφού πρόκειται για θετικούς παλμούς (δεν έχουμε παλμός εναλλασσόμενης πολικότητας).
- iii. Θα μελετήσουμε και τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης G-G,  $\frac{V_R}{2}$  και  $\frac{V_R}{3}$ .
- iv. Το Selected cell βρίσκεται στην LRS.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στις Εικόνες 41 και 42:



Εικόνα 41: Write Margin(R<sub>wire</sub>) για τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης και n=16.

Παρατηρούμε ότι οι τεχνικές  $V_R$  και  $\frac{V_R}{3}$  διαφέρουν ελάχιστα πετυχαίνοντας καλύτερο Read Margin.



Εικόνα 42: Write Margin(n) για τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης και R<sub>wire</sub>=50Ω.

Στη περίπτωση που αυξάνεται η διάσταση της μνήμης και διατηρώντας την  $R_{wire}$  στα 50 Ω, οι τεχνικές ταυτίζονται και το Write Margin μειώνεται ελάχιστα. Επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι παρασιτικές αντιστάσεις επηρεάζουν την εφαρμοζόμενη τάση και είναι υπεύθυνες για την πτώση τάσης που εμφανίζεται, με τις τεχνικές  $V_R$  και  $\frac{V_R}{3}$  να αποτελούν τις βέλτιστες τεχνικές. Στην συνέχεια προχωράμε θεωρώντας ότι οι  $R_{wire}$  είναι της τάξης των 50Ω (ρεαλιστική τιμή σε ένα δικτύωμα Cross – Bar) και πως δεν αποτελούν ιδιαίτερο πρόβλημα στην αρχιτεκτονική και την λειτουργία της μνήμης, καθώς δεν υπάρχει ιδιαίτερη μεταβολή του WM καθώς αυξάνεται η διάσταση n.

### 3.6 Read Margin

Όπως αναφέρθηκε τα Sneak Path Currents είναι υπεύθυνα για την λανθασμένη ανάγνωση της κατάστασης ενός στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα, το παραπάνω σενάριο λαμβάνει χώρα όταν το στοιχείο είναι στην HRS και τα πιθανά υψηλά ρεύματα στο Selected Bit Line είναι ικανά να μας οδηγήσουν στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι βρίσκεται στην LRS.

Τα παραπάνω οδηγούν στην ανάγκη ορισμού του Read Margin, που είναι το αντίστοιχο μέτρο κατά την ανάγνωση μίας μνήμης, ως το χειρότερο σενάριο που μπορεί να λάβει χώρα σε μια Cross – Bar μνήμη, δηλαδή ότι όλα τα στοιχεία βρίσκονται στην LRS και το στοιχείο που θέλουμε να διαβάσουμε είναι αυτό που υπέστη την μεγαλύτερη πτώση τάσης από τις παρασιτικές αντιστάσεις. Θεωρώντας πως για να μετρήσουμε το επιθυμητό στοιχείο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έναν ενισχυτή ανίχνευσης, Sense Amplifier, οδηγούμαστε αυτομάτως σε μια συνδεσμολογία One Bit Line pull-up με αντίσταση  $R_{pull-up}$  (επικρατέστερη συνδεσμολογία αν και υπάρχουν και άλλες συνδεσμολογίες όπως η All Bit Line pull-up, που μπορεί να αυξήσει και ένα ποσοστό το Read Margin) [17,18].

Για τον υπολογισμό του Read Margin υπάρχουν τρεις ισοδύναμες σχέσεις και φαίνονται παρακάτω [13,19,20,21]:

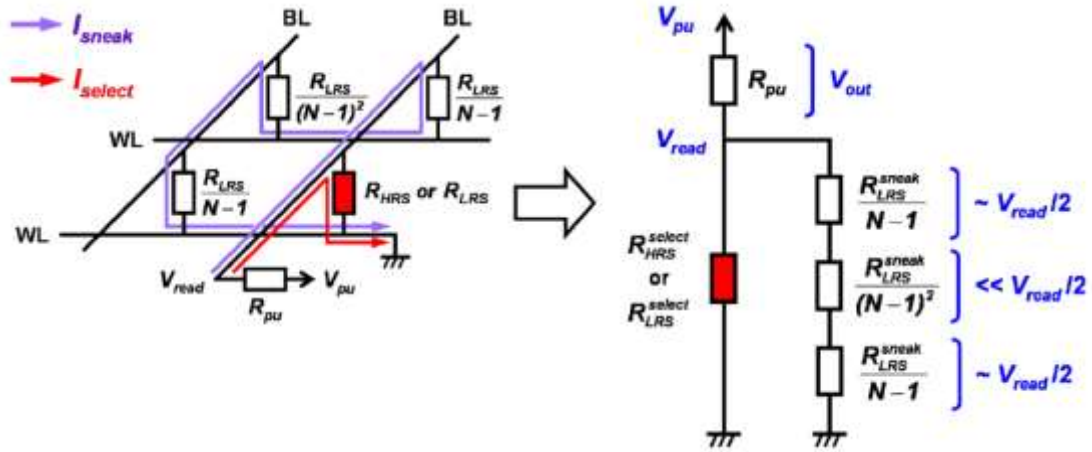
$$RM = \frac{V_{out}^{LRS} - V_{out}^{HRS}}{V_{pull-up}} 100\% \quad (23)$$

$$RM = \frac{I_{Selected\ Bit\ Line}^{LRS} - I_{Selected\ Bit\ Line}^{HRS}}{I_{ref}} \Rightarrow$$

$$RM = \left( 1 - \frac{\max\{I_{Selected\ Bit\ Line}^{Sel.\ Cell = HRS}\}}{\min\{I_{Selected\ Bit\ Line}^{Sel.\ Cell = HRS}\}} \right) 100\% \quad (24)$$

$$RM = \frac{R_{pull-up}}{R_{LRS}^{Sel\ Cell} \parallel \left( \frac{2R_{LRS}^{sneak}}{n-1} + \frac{R_{LRS}^{sneak}}{(n-1)^2} \right) + R_{pull-up}} - \frac{R_{pull-up}}{R_{HRS}^{Sel\ Cell} \parallel \left( \frac{2R_{LRS}^{sneak}}{n-1} + \frac{R_{LRS}^{sneak}}{(n-1)^2} \right) + R_{pull-up}} 100\% \quad (25)$$

Η σχέση (25) είναι η ιδανικότερη για την προσομοίωση των Cross – Bar μνημών, ενώ ταυτόχρονα είναι η πιο εύκολη στην κατανόηση του Read Margin, αν αναλογιστούμε την μνήμη σαν μία μήτρα αγωγιμότητας. Η σχέση (25) πηγάζει από το κύκλωμα της Εικόνας 43, θεωρώντας ότι εφαρμόζουμε την τεχνική ανάγνωση  $\frac{V_R}{2}$ .



Εικόνα 43: Το ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό του Read Margin.

Θεωρώντας ότι όλα τα στοιχεία είναι στην LRS και ότι λαμβάνουν την ίδια τιμή  $R_{on}$ , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική αντίσταση όλων των στοιχείων της μνήμης, εκτός του Selected Cell:

$$R_{sneak} = \frac{2R_{on}}{n-1} + \frac{R_{on}}{(n-1)^2} = R_{on} \frac{2n-1}{(n-1)^2} \quad (26)$$

$$R_{LRS} = R_{sneak} \parallel R_{on} = \frac{R_{on}^2 \frac{2n-1}{(n-1)^2}}{R_{on} \frac{2n-1}{(n-1)^2} + R_{on}} = \frac{R_{on} \frac{2n-1}{(n-1)^2}}{\frac{2n-1}{(n-1)^2} + 1} = R_{on} \frac{2n-1}{n^2} \quad (27)$$

$$R_{HRS} = R_{sneak} \parallel R_{off} = \frac{R_{on} R_{off} \frac{2n-1}{(n-1)^2}}{R_{on} \frac{2n-1}{(n-1)^2} + R_{off}} = \frac{R_{on} \frac{2n-1}{(n-1)^2}}{\frac{R_{on}}{R_{off}} \frac{2n-1}{(n-1)^2} + 1}$$

Η  $R_{LRS}$  αντιστοιχεί στην συνολική αντίσταση της μνήμης όταν όλα τα στοιχεία βρίσκονται στην LRS και το Selected Cell στην LRS. Αντίθετα η  $R_{HRS}$  είναι η συνολική αντίσταση της μνήμης όταν όλα τα στοιχεία βρίσκονται στην LRS και το Selected Cell στην HRS.

Θεωρώντας ότι το παράθυρο μνήμης, memory window, είναι ο λόγος  $\frac{R_{off}}{R_{on}} = k > 0$ , δηλαδή η απόσταση της κατάστασης υψηλής αντίστασης HRS από την κατάσταση χαμηλής αντίστασης LRS τότε:

$$R_{HRS} = \frac{R_{on} \frac{2n-1}{(n-1)^2}}{\frac{2n-1}{k(n-1)^2} + 1} = R_{on} \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{(n-1)^2}{2n-1}} = R_{on} \frac{2kn-k}{kn^2+2(1-k)n+(k-1)} \quad (28)$$

και άρα μπορούμε να υπολογίσουμε τον λόγο:

$$\frac{R_{HRS}}{R_{LRS}} = \frac{R_{on} \frac{2kn-k}{kn^2+2(1-k)n+(k-1)}}{R_{on} \frac{2n-1}{n^2}} = \frac{kn^2}{kn^2+2(1-k)n+(k-1)} = r \quad (29)$$

Επιστρέφοντας στην σχέση (25) του Read Margin έχουμε:

$$RM = \frac{R_{pull-up}}{R_{pull-up}+R_{LRS}} - \frac{R_{pull-up}}{R_{pull-up}+R_{HRS}} 100\%$$

όπου  $R_{pull-up} = \sqrt{R_{LRS}R_{HRS}}$  και είναι η αντίσταση του ενισχυτή ανίχνευσης.

$$RM = \frac{\sqrt{R_{LRS}R_{HRS}}}{\sqrt{R_{LRS}R_{HRS}}+R_{LRS}} - \frac{\sqrt{R_{LRS}R_{HRS}}}{\sqrt{R_{LRS}R_{HRS}}+R_{HRS}} 100\% = \frac{\frac{R_{HRS}-1}{R_{LRS}}}{\frac{R_{HRS}}{R_{LRS}}+2\sqrt{\frac{R_{HRS}}{R_{LRS}}+1}} 100\% \Rightarrow$$

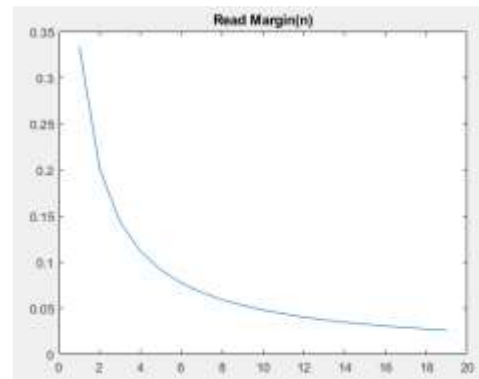
$$RM = \frac{r-1}{(\sqrt{r}+1)^2} 100\% \quad (30)$$

όπου το  $r$  υπολογίζεται από την σχέση (29), γνωρίζοντας το memory window.

Μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε σε μία σύντομη προσομοίωση του αναμενόμενου Read Margin με τη βοήθεια του λογισμικού της Matlab για ένα τετραγωνικό  $n \times n$  Cross – Bar, θεωρώντας ότι το παράθυρο μνήμης  $k = 10^5$ .

Παρατηρούμε ότι το μέγιστο Cross – Bar που μπορούμε να κατασκευάσουμε, έτσι ώστε να ικανοποιούμε την συνθήκη  $RM > 10\%$  είναι  $n=4$ .

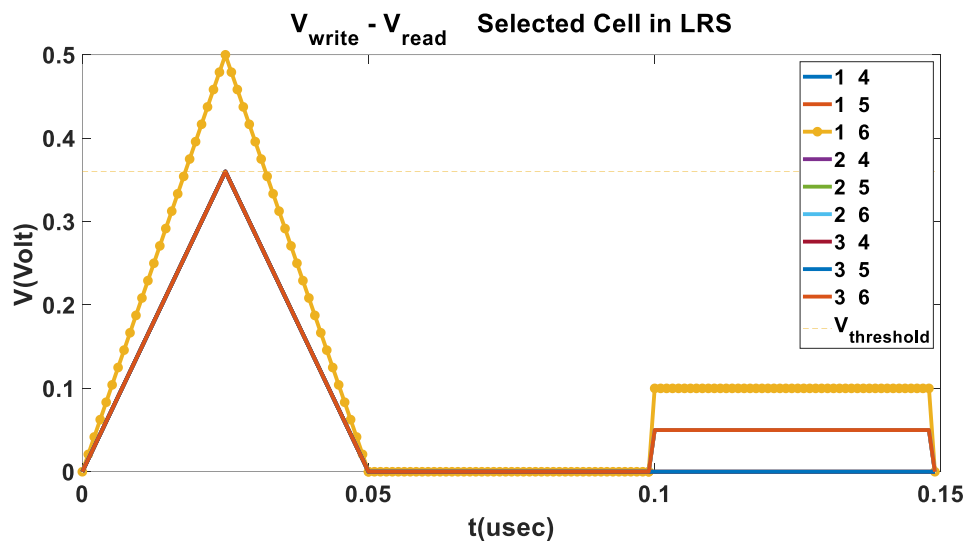
Τα αποτελέσματα είναι σε πλήρη αντιστοιχία με το άρθρο των Kavehei et. All [22].



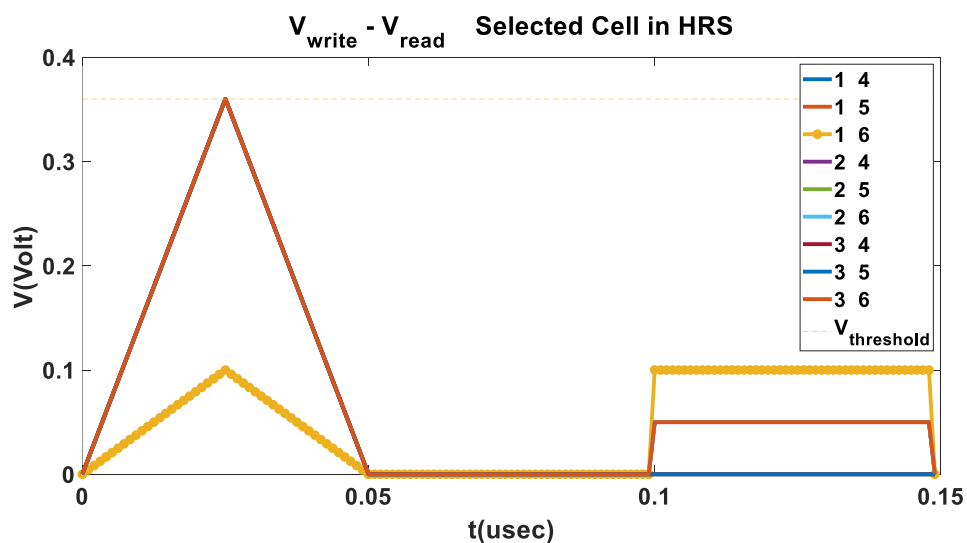
Εικόνα 44: Μία πρώτη προσομοίωση του θεωρητικού Read Margin.

Αυτά τα θεωρητικά αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα δραματικά σε σχέση με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών και ο ρόλος του Read Margin πρέπει να επαναπροσδιοριστεί, καθώς σχετικές έρευνες αναφέρουν πως είναι ικανές να επιτύχουν  $RM > 50\%$  για  $n > 1000$ . Με την σκοπιά του relaxation time, μπορούμε να επαναπροσδιορίσουμε το Read Margin.

- i. Αρχικά εγγράφουμε όλα τα στοιχεία στην LRS σε Threshold mode και το Selected Cell σε Bipolar mode και σε κατάσταση HRS.
- ii. Τα στοιχεία θα παραμείνουν στην LRS για ένα χρονικό διάστημα και στην συνέχεια θα αρχίσουν να επιστρέφουν στην HRS.
- iii. Τέλος εφαρμόζουμε έναν παλμό ανάγνωσης με πλάτος  $0.1 \text{ Volt} < V_{threshold}$ .



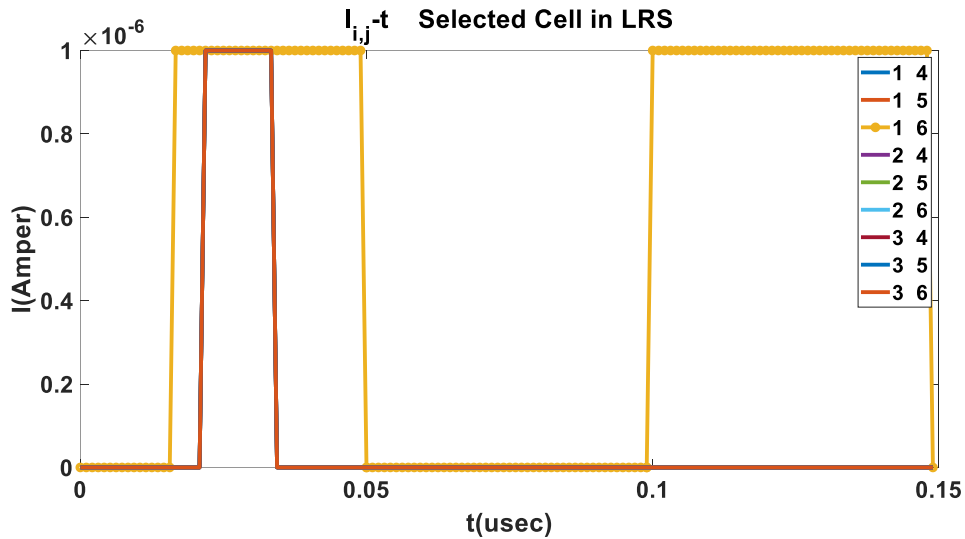
Εικόνα 45: Οι  $V_{write}$  και οι  $V_{read}$  παλμοί σε μία μνήμη  $3 \times 3$ , με το Selected Cell στην LRS για την τεχνική  $\frac{V_R}{2}$ .



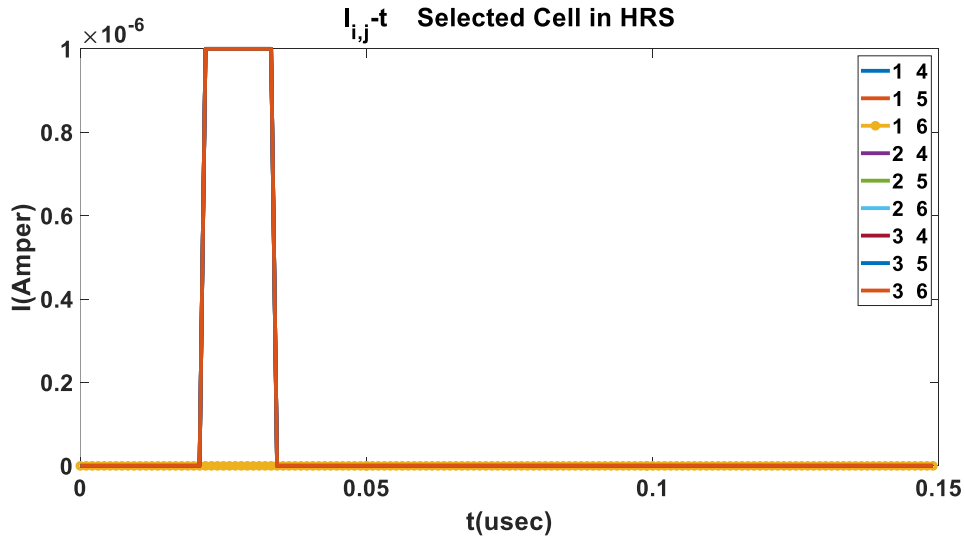
Εικόνα 46: Οι  $V_{write}$  και οι  $V_{read}$  παλμοί σε μία μνήμη  $3 \times 3$ , με το Selected Cell στην HRS για την τεχνική  $\frac{V_R}{2}$ .



Στις Εικόνες 45 και 46 φαίνονται οι εφαρμοζόμενοι παλμοί εγγραφής  $V_{write}$  και ανάγνωσης  $V_{read}$  σε μία μνήμη Cross – Bar 3 x 3, με το Selected Cell να βρίσκεται στην LRS και στην HRS αντίστοιχα. Οι Εικόνες 47 και 48 παρουσιάζουν τα ρεύματα που αναπτύσσονται εξαιτίας των παραπάνω παλμών με το Selected Cell να καταλαμβάνει την LRS και την HRS αντίστοιχα.



Εικόνα 47: Τα ρεύματα που αναπτύσσονται εξαιτίας των  $V_{write}$  και  $V_{read}$  παλμών σε μία μνήμη 3x3, με το Selected Cell στην LRS.

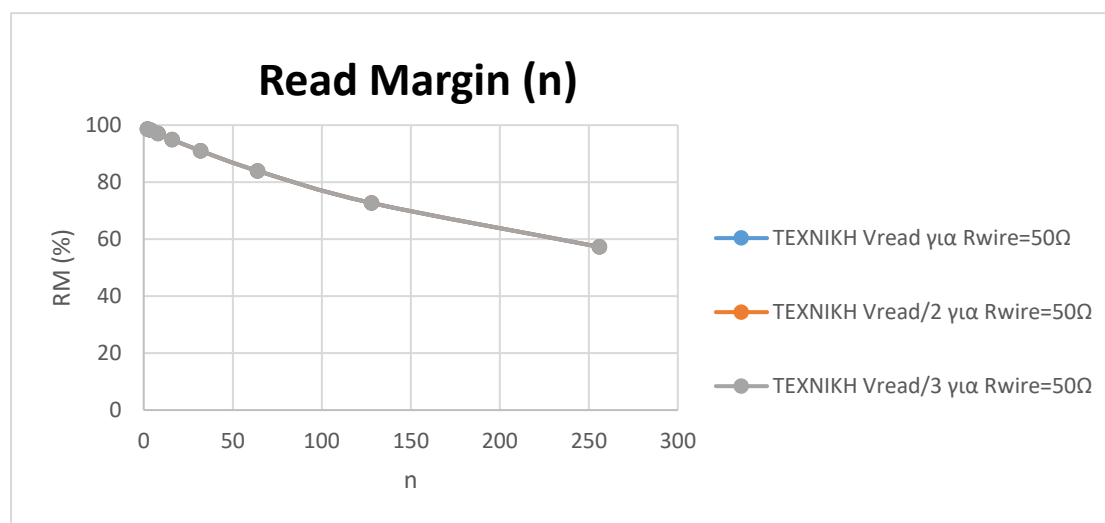


Εικόνα 48: Τα ρεύματα που αναπτύσσονται εξαιτίας των  $V_{write}$  και  $V_{read}$  παλμών σε μία μνήμη 3x3, με το Selected Cell στην HRS.

Παρατηρούμε ότι κατά την εφαρμογή του παλμού εγγραφής αναπτύσσονται πολύ υψηλά ρεύματα, τα οποία στην συνέχεια γίνονται ασθενή λόγω της Threshold συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα στοιχεία. Στην περίπτωση που το Selected Cell, το οποίο όπως αναφέραμε λειτουργεί σε Bipolar mode, εγγράφεται στην LRS θα διατηρήσει την κατάσταση χαμηλής αντίστασης ακόμα και μετά την επιβολή του

παλμού ανάγνωσης. Η τεχνική ανάγνωσης που εφαρμόστηκε στην παρούσα προσομοίωση είναι η  $\frac{V_R}{2}$ .

Στην συνέχεια παραθέτουμε τα αποτελέσματα μεταβολής του Read Margin σε συνάρτηση με το μέγεθος της μνήμης n, θεωρώντας ένα τετραγωνικό Cross – Bar, για τις διάφορες τεχνικές ανάγνωσης.



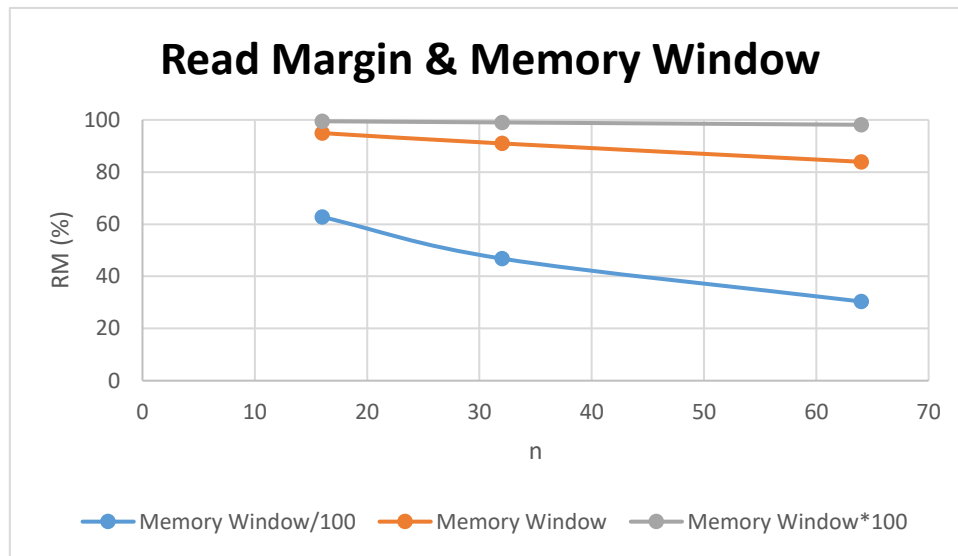
Εικόνα 49: Read Margin(n) για τις τρεις τεχνικές ανάγνωσης και Rwire=50Ω.

Παρατηρούμε ότι οι τρεις τεχνικές ανάγνωσης διαφέρουν ελάχιστα και είναι δύσκολο να αποφανθούμε ποια τεχνική υπερτερεί. Με τον παραπάνω επαναπροσδιορισμό μπορούμε πλέον να κατασκευάσουμε βιώσιμες μνήμες Cross – Bar, δηλαδή έχουμε την ικανοποίηση της συνθήκης  $RM > 10\%$ , πετυχαίνοντας  $n > 256$ .

Παρατήρηση: Οι προσομοιώσεις για  $n > 2^8$  έχουν μεγάλες απαιτήσεις μνήμης και έχουν υψηλό κόστος χρόνου προσομοίωσης.

Ένα μέτρο που επηρεάζει το Read Margin, όπως έγινε κατανοητό από τις παραπάνω σχέσεις, είναι το παράθυρο μνήμης, που για τις παραπάνω προσομοιώσεις έλαβε την τιμή  $k = 10^5$ . Η τιμή αυτή προέκυψε από την βελτιστοποίηση της δέκατης τρίτης παραμέτρου  $R_{on}^{max} \approx 10^{10} \Omega$  και την απαίτηση της ελάχιστης αντίστασης του memristor να είναι της τάξεως 100 kΩ. Παρακάτω προχωράμε σε μία σύντομη προσομοίωση της μεταβολής του memory window, όταν αυτό είναι μικρότερο και

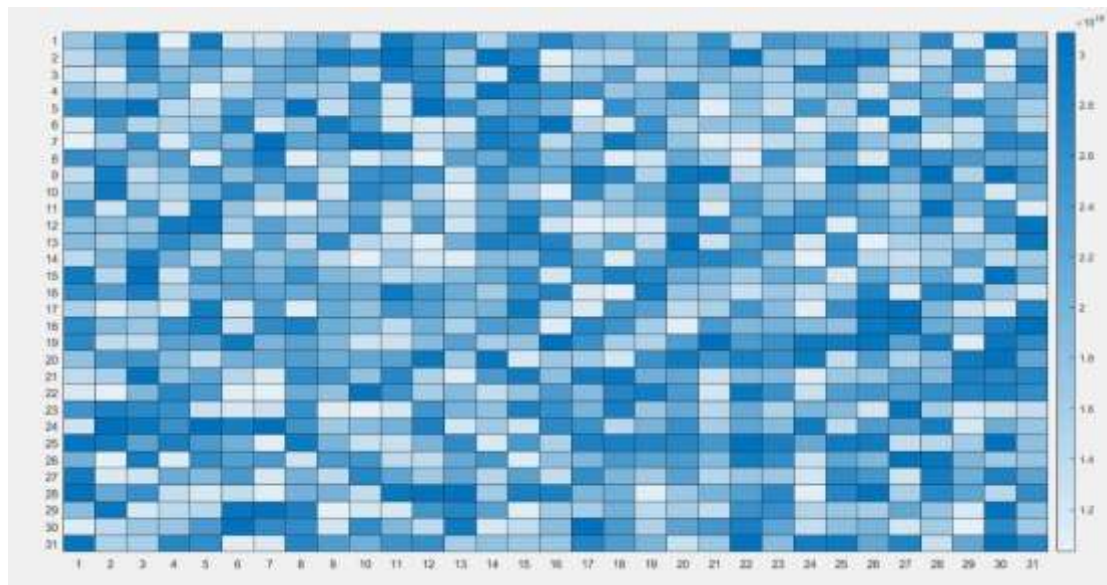
μεγαλύτερο, από αυτό που θεωρήσαμε αρχικά, κατά δύο τάξεις μεγέθους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 50.



Εικόνα 50: Read Margin(n) για τρία διαφορετικά παράθυρα μνήμης.

Παρατηρούμε ότι καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνουμε για την περίπτωση που το παράθυρο μνήμης αυξήθηκε κατά δύο τάξεις μεγέθους. Αυτό είναι λογικό καθώς το Read Margin είναι μία αύξουσα συνάρτηση του k.

Στην Εικόνα 51 φαίνεται η μήτρα αγωγιμοτήτων των unselected cells κατά την διαδικασία ανάγνωσης και θεωρώντας μία τετραγωνική μνήμη Cross – Bar με n=32.



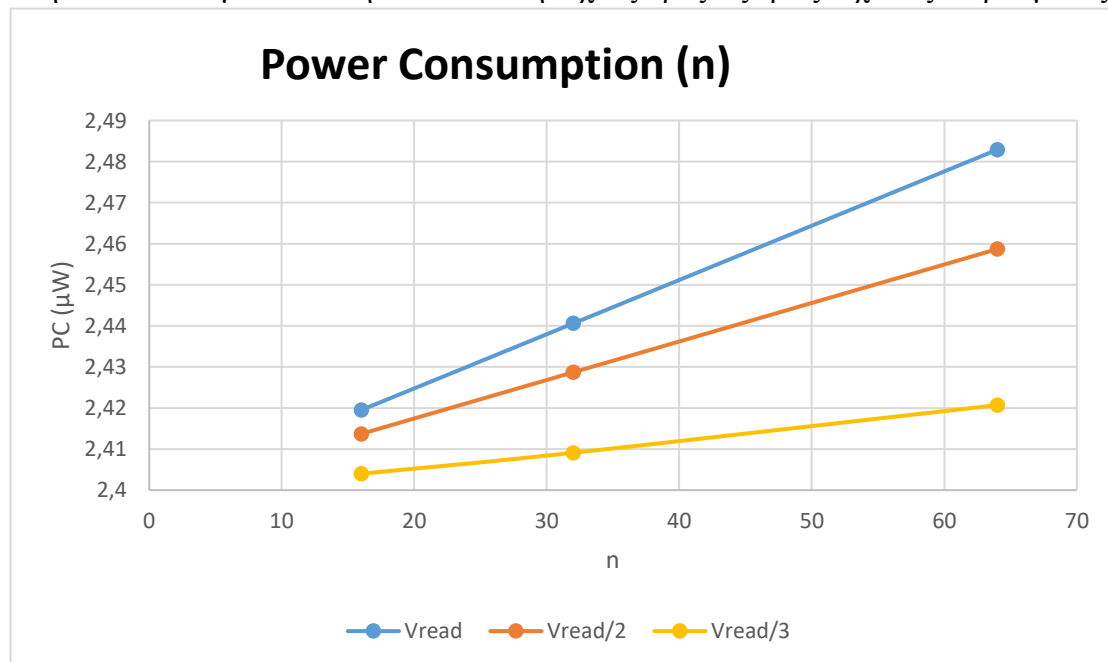
Εικόνα 51: Η μήτρα αγωγιμοτήτων των unselected cells κατά την διαδικασία ανάγνωσης σε μία τετραγωνική μνήμη Cross - Bar με n=32.

Τέλος να αναφέρουμε ότι πολλές φορές κατά την ανάγνωση μιας μνήμης Cross – Bar, με σκοπό την αναγνώριση των state των διάφορων στοιχείων, είναι πιθανό ορισμένα memristor να είναι βραχυκυκλωμένα μεταξύ τους. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται σε αστοχίες και ατέλειες που μπορεί να προέκυψαν κατά το στάδιο κατασκευής της μνήμης. Προχωρώντας σε μία προσομοίωση επίδρασης των βραχυκυκλωμένων cells στο τελικό Read Margin, μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις, για μία μνήμη με  $n=100$ :

- Αν όλα τα unselected cells είναι βραχυκυκλωμένα, το Read Margin δεν επηρεάζεται,  $RM = 96.4\%$ .
- Αν ένα Word Line ή ένα Bit Line είναι βραχυκυκλωμένο, τότε το Read Margin πάλι δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα,  $RM = 94.035\%$ .
- Αν ένα Selected Word Line ή ένα Selected Bit Line είναι βραχυκυκλωμένο, τότε το Read Margin μειώνεται σημαντικά,  $RM = 0.75\% < 10\%$ . Το Cross – Bar καταστρέφεται και αυτό γιατί έχει δημιουργηθεί ένα μονοπάτι για τα Sneak Path Currents, που τους επιτρέπει να μεταφέρονται από το Selected Word Line απευθείας στο Selected Bit Line.

### 3.7 Power Consumption

Στην Εικόνα 52 μελετάται η κατανάλωση ισχύος προς τις τρεις τεχνικές διαβάσματος.



Εικόνα 52: Power Consumption(n) για τις τρεις τεχνικές διαβάσματος.

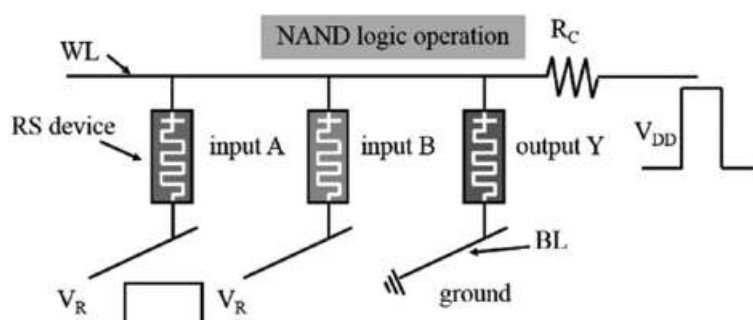
Παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ισχύος ελαχιστοποιείται όταν εφαρμόζουμε την τεχνική ανάγνωσης  $\frac{V_R}{3}$ , ενώ η τεχνική με την μεγαλύτερη κατανάλωση είναι η  $V_R$ . Η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ σημαντική στις μνήμες Cross – Bar που μελετάμε, καθώς επιθυμούμε να είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλή, ώστε να αναδεικνύεται η ανωτερότητα των CBRAM διατάξεων.

Μπορούμε πλέον να αποφανθούμε πως η βέλτιστη τεχνική ανάγνωσης είναι η  $\frac{V_R}{3}$ , όσον αφορά το Read Margin και την κατανάλωση ισχύος.

## 4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝ ΚΑΙ ΕΚΦΡΑΣΕΩΝ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ανάγκη να μεταβούμε στις τεχνολογίες CBRAM εξαιτίας του κορεσμού του νόμου του Moore. Αυτές οι διατάξεις, όπως αναφέρθηκε, παρουσιάζουν απλή και ελκυστική δομή, υψηλές ταχύτητες επεξεργασίας, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και είναι ανθεκτικές στον χρόνο. Αφού λοιπόν μελετήσαμε τις παραπάνω διατάξεις για την αντικατάσταση των κλασικών μνημών, οφείλουμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά τους για την υλοποίηση λογικών κυκλωμάτων. Τα λογικά κυκλώματα που βασίζονται στην συμβατική CMOS τεχνολογία αποτελούν τα δομικά στοιχεία των καθημερινών ηλεκτρονικών υπολογιστών [23], παρόλα αυτά τα σύγχρονα CBRAM λογικά κυκλώματα, που πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί, απαιτούν λιγότερο χώρο ολοκλήρωσης και ταυτόχρονα παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις.

Η βασικότερη και ευκολότερη εφαρμογή των CBRAM τεχνολογιών στον τομέα των λογικών κυκλωμάτων είναι η κατασκευή λογικών πυλών. Για αυτό το λόγο σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιήσουμε μία σύντομη ανάλυση της λογικής πύλης NAND, η οποία αποτελεί το βασικότερο στοιχείο των λογικών κυκλωμάτων. Οποιαδήποτε λογική έκφραση μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση ενός περιορισμένου αριθμού NAND πυλών [24]. Στην Εικόνα 53 φαίνεται το κύκλωμα για την υλοποίηση μίας λογικής πύλης NAND.



Εικόνα 53: Κύκλωμα υλοποίησης της λογικής πύλης NAND.

Παρατηρούμε ότι για την υλοποίηση της πύλης απαιτούνται τρία στοιχεία μεταβλητής αντίστασης. Τα πρώτα δύο αποτελούν τις εισόδους της πύλης A και B, ενώ το τρίτο memristor είναι η έξοδος  $Y=A(\text{NAND})B$  ή  $Y=\text{NOT}(A \cdot B)$ . Τα Top Electrodes των τριών memristor συνδέονται σε ένα κοινό Word Line και το Bottom Electrode του

στοιχείου εξόδου συνδέεται στην γείωση. Στα αντίστοιχα Bottom Electrodes των input εφαρμόζεται ένας θετικός τετραγωνικός παλμός με πλάτος  $V_R$  με σκοπό την μετάθεση τους σε LRS και HRS. Επίσης στο Word Line εφαρμόζεται ένας αντίστοιχος θετικός τετραγωνικός παλμός με πλάτος  $V_{DD} > V_R$  μέσω μίας σταθερής αντίστασης  $R_C$  για την ενεργοποίηση της λογικής έκφρασης.

Σαν σύμβαση θα θεωρήσουμε ότι η κατάσταση υψηλής αντίστασης HRS αντιστοιχεί στην λογική τιμή 1 και αντίθετα η κατάσταση χαμηλής αντίστασης LRS αντιστοιχεί στην λογική τιμή 0. Επομένως ο πίνακας αληθείας φαίνεται παρακάτω:

A		B		Y=A(NAND)B	
LRS	0	LRS	0	HRS	1
LRS	0	HRS	1	HRS	1
HRS	1	LRS	0	HRS	1
HRS	1	HRS	1	LRS	0

Πίνακας 4: Ο πίνακας αληθείας της λογικής πύλης NAND.

Αρχικά τα τρία στοιχεία θεωρούμε ότι βρίσκονται σε κατάσταση HRS πριν εφαρμόσουμε τους τετραγωνικούς παλμούς. Όταν τα input A και B βρίσκονται σε κατάσταση υψηλής αντίστασης δεν έχουμε την ροή ρεύματος διαμέσου των διατάξεων εισόδου και έτσι το Word Line έχει ένα δυναμικό ίσο με την τάση  $V_{DD}$ , με αποτέλεσμα την μετάβαση της εξόδου σε μία κατάσταση χαμηλής αντίστασης. Αντίθετα αν το πολύ μία από τις εισόδους βρίσκεται στην LRS το δυναμικό του Word Line είναι περίπου  $V_R$  και έτσι η έξοδος θα παραμείνει στην HRS.

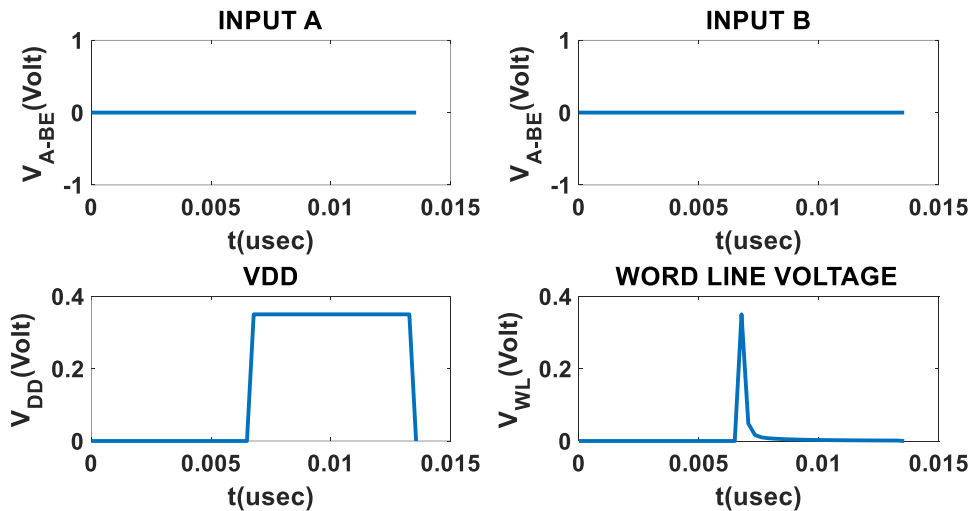
Προκειμένου να πετύχουμε μία ορθή συμπεριφορά της παραπάνω λογικής πύλης, οφείλουμε να προβούμε στις παρακάτω παραδοχές:

- Το πλάτος του παλμού στο Word Line πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του παλμού που εφαρμόζεται στο Bit Line του κάθε στοιχείο εισόδου. Πιο συγκεκριμένα για να έχουμε μία επιτυχή μετάβαση SET θεωρούμε πως  $V_R = \frac{V_{DD}}{2}$ , με το πλάτος  $V_{DD}$  να ρυθμίζεται στα 0.35 Volt.
- Πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:  $R_{LRS} \ll R_C \ll R_{HRS}$ .

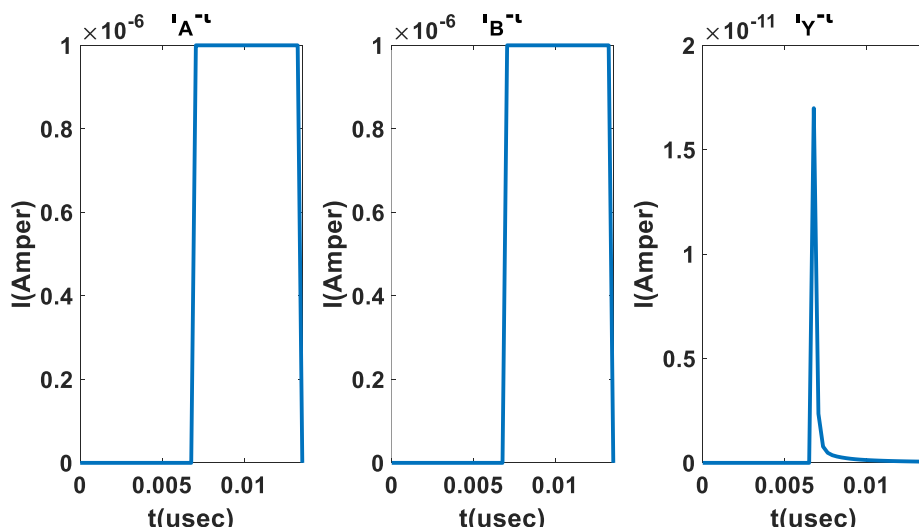
- Ο παλμός που εφαρμόζεται στο Word Line υστερεί χρονικά από τους αντίστοιχους παλμούς που εφαρμόζονται στα Bit Line των εισόδων.

#### 4.1 Προσομοίωση της λογικής πύλης NAND

Στην ενότητα αυτή προχωράμε στην προσομοίωση της λογικής πύλης NAND και διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη αποτελεί την περίπτωση που οι δύο εισοδοι βρίσκονται στην LRS, η δεύτερη που ακριβώς μία είσοδος είναι στην LRS και τέλος έχουμε την περίπτωση που και οι δύο παραμένουν στην HRS. Στις Εικόνες 54 και 55 φαίνονται οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός  $V_{DD}$ , το δυναμικό στο Word Line και τα ρεύματα των memristor.



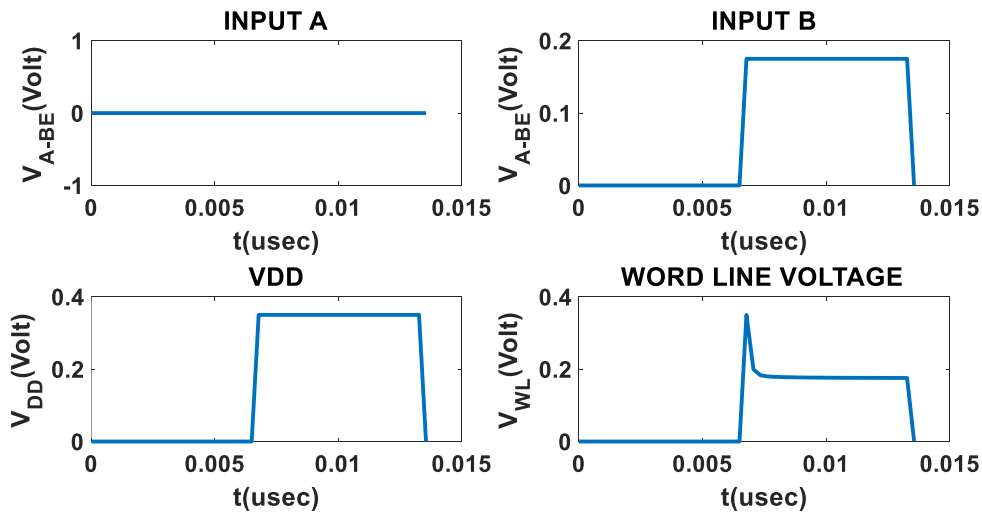
Εικόνα 54: Οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός  $V_{DD}$  και το δυναμικό στο Word Line, για την περίπτωση που οι εισοδοι είναι σε κατάσταση LRS.



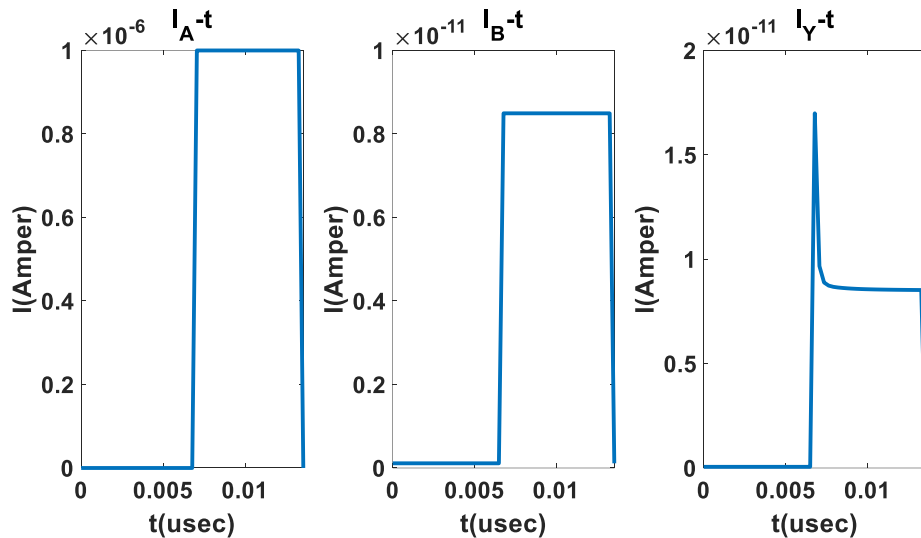
Εικόνα 55: Τα ρεύματα των Εισόδων A και B και της εξόδου Y, για την περίπτωση που οι εισοδοι είναι σε κατάσταση LRS.



Είναι ορατό πως αν δεν εφαρμόζουμε θετικούς παλμούς στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, τότε αυτά θα μεταβούν στην LRS και η τάση που αναπτύσσεται στο Word Line δεν είναι ικανή να πολώσει το memristor εξόδου και να μεταβεί στην LRS.



Εικόνα 56: Οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός  $V_{DD}$  και το δυναμικό στο Word Line, για την περίπτωση που ακριβώς μίας εισόδος είναι σε κατάσταση HRS.



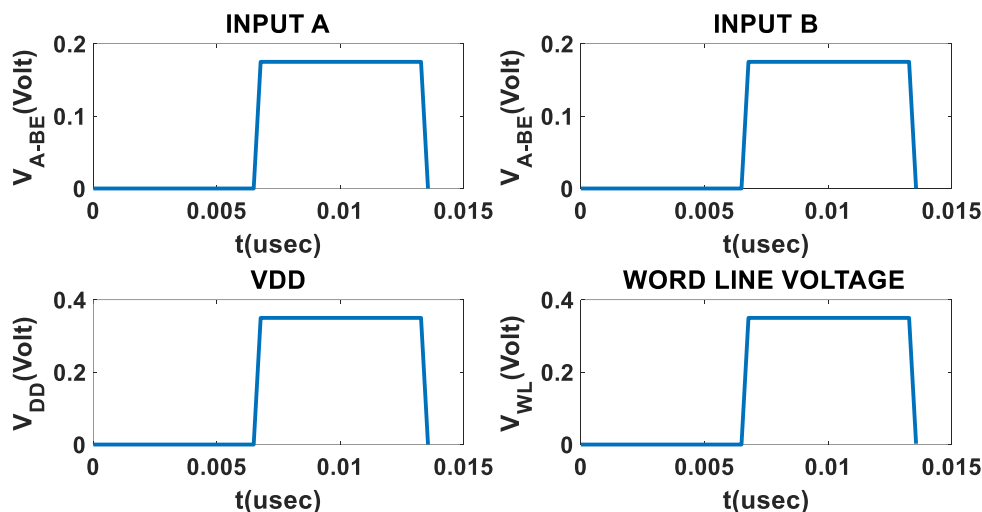
Εικόνα 57: Τα ρεύματα των Εισόδων A και B και της εξόδου Y, για την περίπτωση που ακριβώς μία είσοδος είναι σε κατάσταση LRS.

Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόζουμε έναν θετικό παλμό για διατηρήσουμε την διάταξη σε κατάσταση HRS. Το δυναμικό που αναπτύσσεται στο Word Line είναι περίπου όσο το πλάτος του παλμού  $V_R$ . Προφανώς η διαφορά τάσης πάνω στο input B, που είναι περίπου  $V_R$ , και κατά προέκταση και για την έξοδο Y δεν είναι ικανή για να αναπτυχθεί ένα στοιχειώδη CF και να έχουμε την μετάβαση SET.

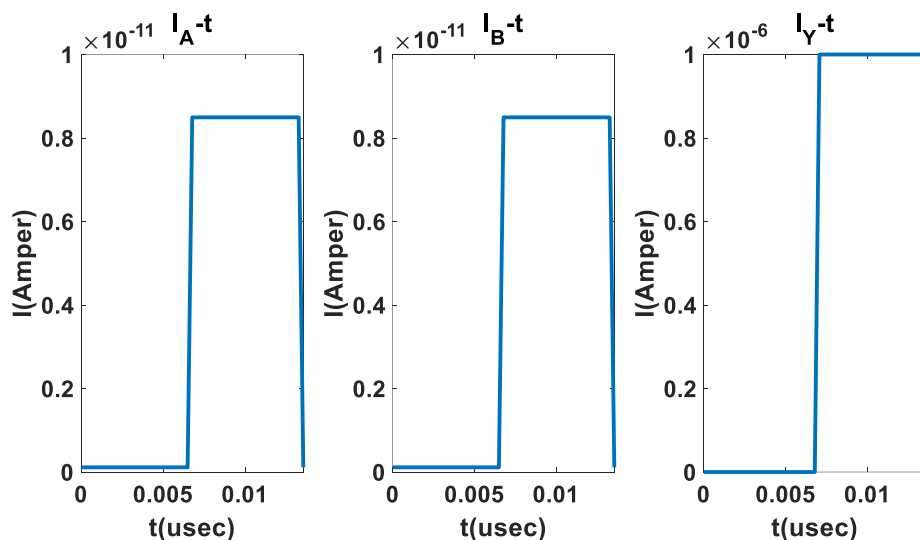
Σημείωση: Τα μοντέλα των memristor που χρησιμοποιήθηκαν είναι threshold mode. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε γιατί θέλουμε το  $V_R < V_{threshold}$  και γιατί δεν

επιθυμούμε το memristor να παρουσιάζει μνήμη και άρα διατήρηση της κατάστασης LRS, εφόσον αυτή επιτευχθεί.

Τέλος στις Εικόνες 58 και 59 παρατίθενται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που τα inputs παραμένουν στην HRS και το output μεταβαίνει στην LRS.



Εικόνα 58: Οι τάσεις στα κάτω ηλεκτρόδια των εισόδων, ο θετικός παλμός  $V_{DD}$  και το δυναμικό στο Word Line, για την περίπτωση που οι εισόδοι είναι σε κατάσταση HRS.

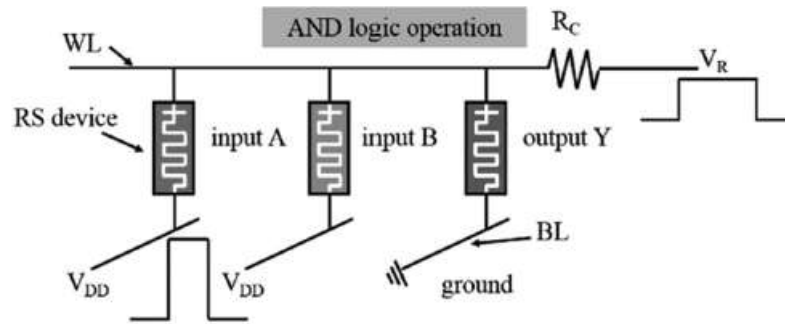


Εικόνα 59: Τα ρεύματα των Εισόδων A και B και της εξόδου Y, για την περίπτωση που οι εισόδοι είναι σε κατάσταση HRS.

Με την εφαρμογή τετραγωνικών παλμών στα Bottom Electrodes των inputs, αυτά θα παραμείνουν στην HRS και η τάση που θα αναπτυχθεί στο Word Line, η οποία είναι περίπου ίση με  $V_{DD}$ , θα είναι ικανή για να μεταβεί το output στην LRS.

Οι παραπάνω γραφικές πιστοποιούν την ορθότητα της προσομοίωσης της λογικής πύλης NAND. Με την υλοποίηση αυτή ολοκληρώνουμε το κεφάλαιο των λογικών

πυλών και εκφράσεων με διατάξεις CBRAM. Να προσθέσουμε ότι το κύκλωμα για την υλοποίηση της πύλης AND είναι παρόμοιας λογικής με το παραπάνω και φαίνεται στην Εικόνα 60. Με αυτές τις πύλες και αντίστοιχο σκεπτικό μπορούν να κατασκευαστούν οι βασικές πύλες NOT, OR, NOR και XOR και μπορεί να επιτευχθεί η υλοποίηση πολύπλοκων κυκλωμάτων όπως αθροιστών κ.ο.κ.

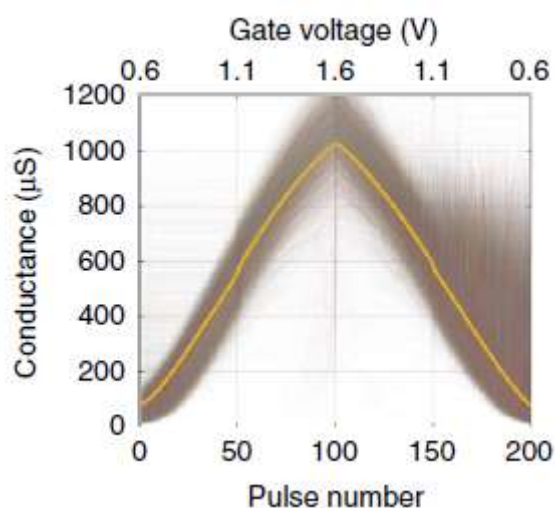


Εικόνα 60: Κύκλωμα υλοποίησης της λογικής πύλης AND.

## 5. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκαν οι διατάξεις CBRAM για την χρήση τους ως μνήμες καθώς και για την υλοποίηση λογικών πυλών και εκφράσεων. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η χρήση τους στον τομέα των νευρομορφικών εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα αξιοποιώντας αυτές τις διατάξεις θα πραγματοποιηθεί μία αναγνώριση εικόνων χρησιμοποιώντας ένα DNN (Deep Neural Network) με ένα κρυφό επίπεδο (hidden layer).

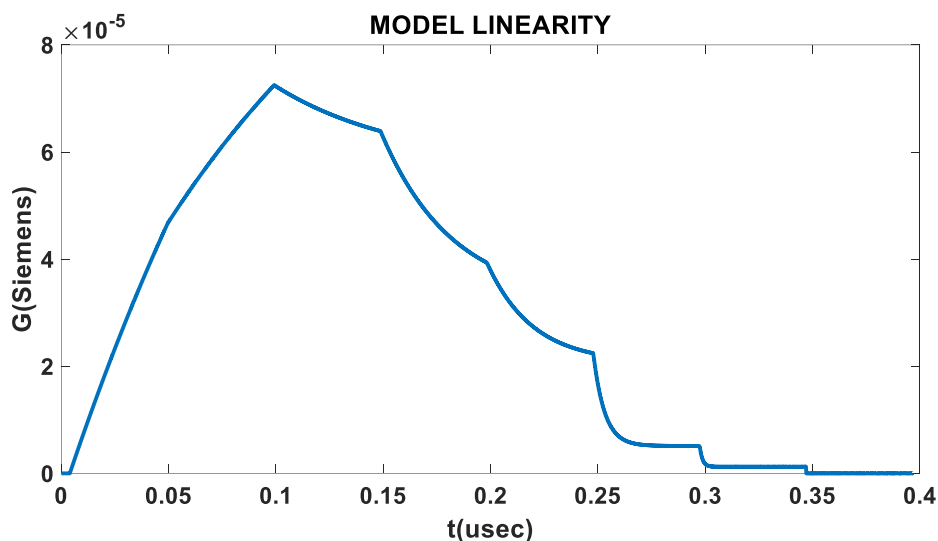
Τα memristor που απαρτίζουν σε αυτή την εφαρμογή το Cross – Bar είναι τύπου Bipolar και αυτό γιατί είναι απαραίτητο τα memristor να διατηρούν το state τους καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Τα βάρη του DNN αντιστοιχούν στις αντιστάσεις των cells της Cross – Bar διάταξης. Η μεταβολή των βαρών και κατά προέκταση η μεταβολή των αντιστάσεων πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής μία κατάλληλης παλμοσειράς στα memristors ώστε να επιτευχθεί το αντίστοιχο potentiation και depression. Στην Εικόνα 61 φαίνεται η ιδανική συμπεριφορά της αγωγιμότητας των memristor (Linearity) της διάταξης για εκατό θετικούς παλμούς (potentiation) και εκατό αρνητικούς παλμούς (depression) [25].



Εικόνα 61: Η ιδανική συμπεριφορά της αγωγιμότητας των memristor, Linearity, της διάταξης CBRAM για εκατό θετικούς παλμούς (potentiation) και εκατό αρνητικούς παλμούς (depression).

Παρατηρούμε ότι η μεταβολή της αγωγιμότητας είναι γραμμική, επιτρέποντας την αντιστοίχιση του αριθμού των παλμών με την επιθυμητή ποσοστιαία μεταβολή της αγωγιμότητας.

Στην Εικόνα 63 φαίνεται το Linearity που παρουσιάζει το μοντέλο του memristor που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση:



Εικόνα 62: Linearity του μοντέλου προσομοίωσης.

Είναι προφανές ότι το Linearity του Bipolar μοντέλου προσομοίωσης που χρησιμοποιούμε απέχει πολύ από την ιδανική περίπτωση, παρόλα αυτά μπορεί να μας οδηγήσει στα επιθυμητά αποτελέσματα. Στο σημείο αυτό πρέπει να προβούμε σε ορισμένες παραδοχές:

- Το παραπάνω Linearity είναι ικανοποιητικό για να μας εξασφαλίσει τα επιθυμητά αποτελέσματα με αντίτιμο το υπολογιστικό κόστος και τους πολυάριθμους παλμούς που διαμεσολαβούν για την μεταβολή της αγωγιμότητας. Το υπολογιστικό κόστος είναι αρκετά υψηλό αν αναλογιστούμε ότι χρησιμοποιούμε δύο Cross – Bar (στην πραγματικότητα τα δύο Cross – Bar εντάσσονται σε ένα συνολικό) με μεγέθη  $968 \times 502$  και  $1004 \times 10$  cells.
- Για να αποφύγουμε το αναφερόμενο υπολογιστικό κόστος προχωράμε απευθείας στην προσομοίωση, αποφεύγοντας την ενσωμάτωση του μοντέλου. Με αυτό τον τρόπο θα αποφανθούμε για την επιτυχή ή μη αναγνώριση εικόνων και θα υπολογίσουμε το αντίστοιχο classification accuracy, θεωρώντας ότι οι επιθυμητές μεταβολές της αγωγιμότητας για το κάθε memristor πραγματοποιούνται παράλληλα.
- Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η εισαγωγή της μεταβολής της αγωγιμότητας στην προσομοίωση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μία χαρτογράφηση της παραπάνω γραφικής  $G - t$  και η αντιστοίχιση της με την

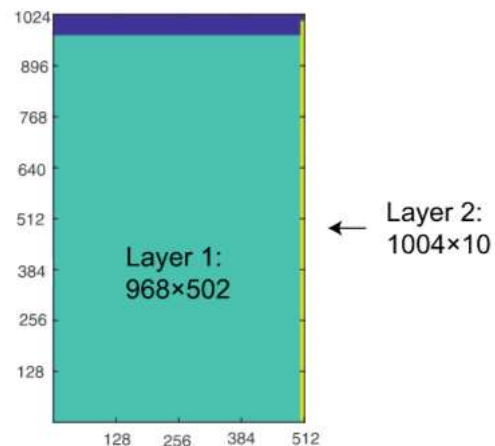
εφαρμοζόμενη παλμοσειρά  $V - t$ . Να σημειωθεί ότι για λόγους πληρότητας πραγματοποιήθηκε έλεγχος για την ορθότητα της μετάβασης από μία αρχική τιμή  $R_{ref}$  σε δύο επιθυμητές τιμές  $R_{target 1} = R_{ref} + R_{ref} * 10\%$  και  $R_{target 2} = R_{target 1} - R_{target 1} * 25\%$ .

## 5.1 Αναγνώριση εικόνων με SGD

Η εφαρμογή που θα επιχειρήσουμε να υλοποιήσουμε είναι η αναγνώριση εικόνων με χειρόγραφους αριθμούς. Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούμε την βάση δεδομένων του MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology) με το training set να αποτελείται από 50.000 φωτογραφίες και το αντίστοιχο test set να είναι 10.000. Οι φωτογραφίες αποτελούνται από 28 x 28 pixel και αφαιρούμε το εξωτερικό περίγραμμα καταλήγοντας σε ένα καρέ 22 x 22 pixel. Αυτά τα pixels θα αποτελέσουν τα input features του νευρωνικού δικτύου, αφού πρώτα κωδικοποιήσουμε την grayscale ένταση του κάθε pixel καταλήγοντας σε ένα διάνυσμα τάσεων για τα Top Electrodes του Cross – Bar διαστάσεων 1 x 484. Επίσης προχωράμε στην κανονικοποίηση του διανύσματος τάσης.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου SGD (Stochastic Gradient Descent) για το παραπάνω classification πρόβλημα κάθε συναπτικό βάρος κωδικοποιήθηκε ως η διαφορά αγωγιμότητας δύο memristors.

Επιλέγοντας 502 hidden neurons έχουμε την διαμόρφωση του πρώτου layer, το οποίο αποτελείται από 484 x 502 cells στα οποία εφαρμόζεται το θετικό διάνυσμα τάσης και από 484 x 502 cells στα οποία εφαρμόζεται το αρνητικό διάνυσμα τάσης, για να λάβουμε τα αρνητικά βάρη, καταλήγοντας στο συνολικό 968 x 502. Το δεύτερο layer αποτελείται από  $(2 * \text{hidden neurons}) \times C$



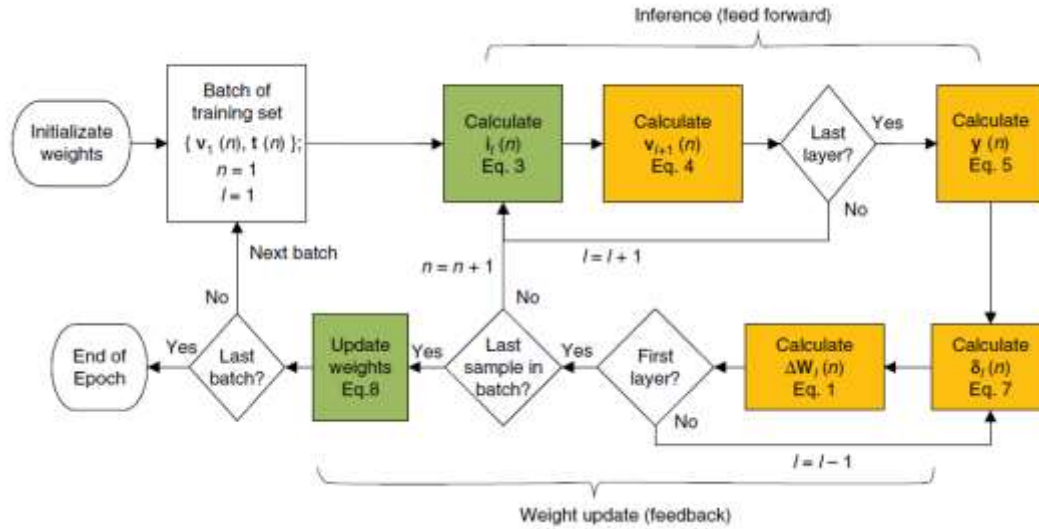
Εικόνα 63: Η αρχιτεκτονική του συνολικού DNN.

cells, όπου C ο αριθμός των κλάσεων (1004 x 10), όπου το 2 προκύπτει πάλι από την εισαγωγή των αρνητικών βαρών. Χρησιμοποιώντας ένα Cross – Bar διαστάσεων 1024 x 512 μπορούμε να ενσωματώσουμε τα δύο layers, όπως φαίνεται στην Εικόνα 63. Τα

cells που είναι χρωματισμένα με μπλε χρώμα δεν χρησιμοποιούνται στην αναγνώριση εικόνων.

## 5.2 Το διάγραμμα ροής του in situ training αλγορίθμου

Το διάγραμμα ροής του in situ training αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω:



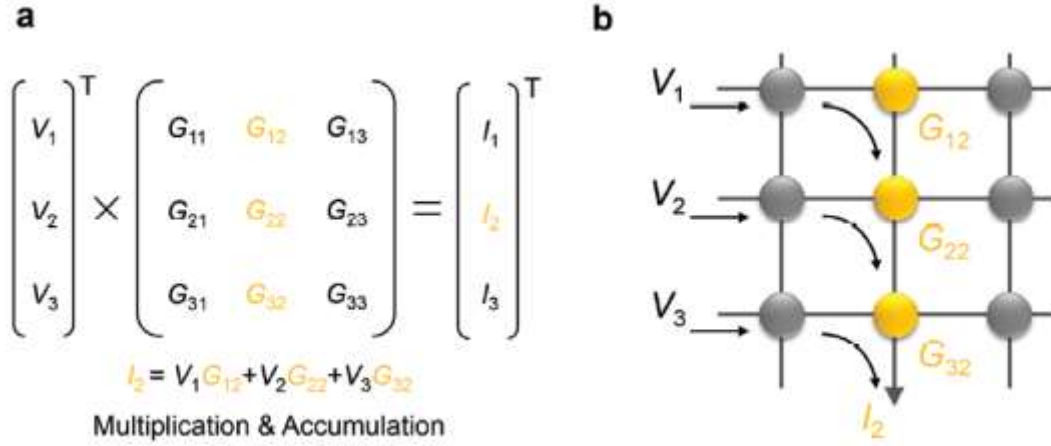
Εικόνα 64: Το διάγραμμα ροής του in situ training αλγορίθμου.

Παρατηρούμε ότι πρωταρχικό βήμα αποτελεί η αρχικοποίηση των βαρών, δηλαδή των αντιστάσεων των memristor. Οι τιμές αυτές των αντιστάσεων αποτελούν τις τιμές μέγιστες αντίστασης  $R_{on}^{max}$  των memristor οι οποίες ρυθμίζονται σε τυχαίες τιμές σε ένα εύρος μισής τάξης μεγέθους από την βέλτιστη τιμή της παραμέτρου. Στην συνέχεια προχωράμε στον υπολογισμό των ρευμάτων μέσω του νόμου του Ohm. Για να ρυθμίσουμε τις τάσεις στα άνω ηλεκτρόδια του δεύτερου layer κατασκευάζουμε μία συνάρτηση relu και φαίνεται στην σχέση (31).

$$V_i^{l+1} = \sigma(I_i^l) = \begin{cases} \sigma(I_i^l), & I_i^l > 0 \\ 0, & I_i^l < 0 \end{cases} \quad (31)$$

Όπου τα  $I_i^l$  αποτελούν το άθροισμα των ρευμάτων στο  $i^o$  bit line και για το layer l, που στην περίπτωση αυτή είναι το πρώτο Cross – Bar και  $\sigma$  είναι μία παράμετρος με διαστάσεις αντίστασης V/A. Ο τρόπος υπολογισμού αυτών των ρευμάτων φαίνεται στην Εικόνα 65 για την απλή περίπτωση που το διάνυσμα τάσης είναι 1x3, θεωρούμε

ότι τα Bit Lines είναι γειωμένα και θέλουμε να υπολογίσουμε το ρεύμα που διατρέχει το δεύτερο Bit Line [26].



Εικόνα 65: Υπολογισμός των ρευμάτων στα Bit Lines των Cross – Bar.

Υπολογίζοντας τα ρεύματα στα Bit Lines του τελευταίου layer υπολογίζουμε τις πιθανότητες  $y_c(n)$  να ανήκει η εικόνα  $n$  στην κλάση  $c$ , με  $c=0,1,2,\dots$

$$y_c(n) = \frac{e^{kI_c(n)}}{\sum_{m=1}^C e^{kI_m(n)}} \quad (32)$$

όπου  $k$  παράμετρος με διαστάσεις αντίστροφου ρεύματος.

Οι επιθυμητές ανανεώσεις βαρών για το κάθε layer υπολογίζονται μέσω του τύπου (33):

$$\Delta W_l = \eta \sum_{n=1}^B \delta_l(n) v_l(n)^T \quad (33)$$

όπου  $\eta$  είναι το learning rate,  $B$  το μέγεθος του Batch,  $n$  η sample εικόνα και το διάνυσμα σφάλματος  $\delta_l$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta_j^l = \begin{cases} y_j - t_j, & l = L \\ \sum_i w_{ij}^l \delta_i^{l+1}, & l < L \text{ και } I_j > 0 \\ 0, & I_j \leq 0 \end{cases} \quad (34)$$

Με  $L$  να είναι ο αριθμός των layers και

$$t_j = \begin{cases} 0, & \text{αν η εικόνα δεν } \in \text{ στην κλάση } j \\ 1, & \text{αν η εικόνα } \in \text{ στην κλάση } j \end{cases} \quad (35)$$

Τα βάρη ανανεώνονται όπως αναφέρθηκε μέσω της διαφοράς των αγωγιμοτήτων των αντίστοιχων memristor που ανήκουν στο θετικό και αρνητικό μέρος του layer, δηλαδή:

$$G_{ij}^l = G_{ij}^l - [\Delta W_i; \Delta W_l] \quad (36)$$

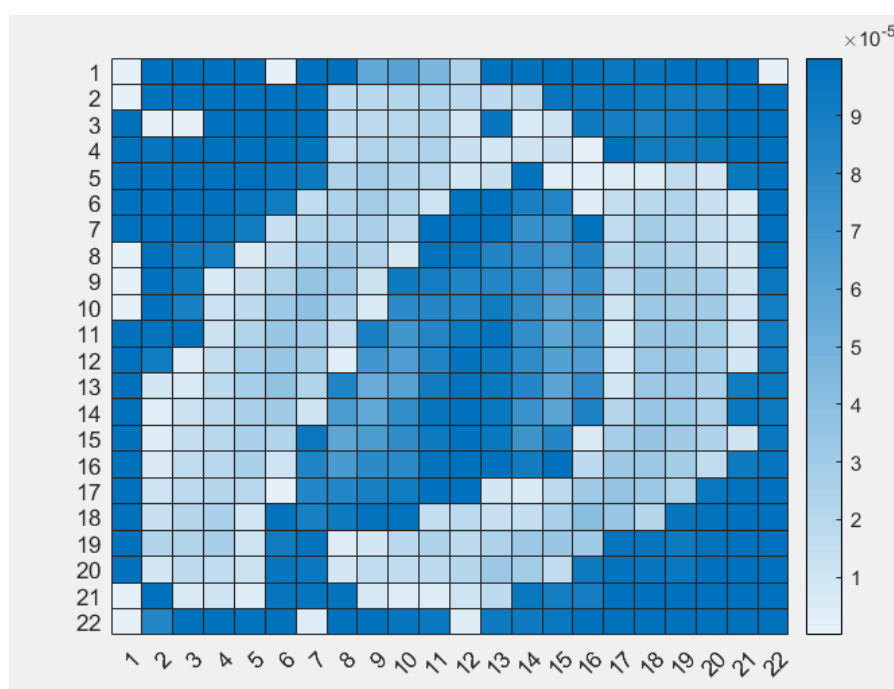


Παρατήρηση: Αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε αρχικοποίηση Xavier επειδή οι τιμές των αγωγιμοτήτων είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα η διακύμανση του σήματος εισόδου να μειώνεται καθώς περνά στα επόμενα layer του δικτύου. Το input σήμα καταλήγει να μειώνεται σε μεγάλο βαθμό και να χάνει τελικά την πληροφορία του [27].

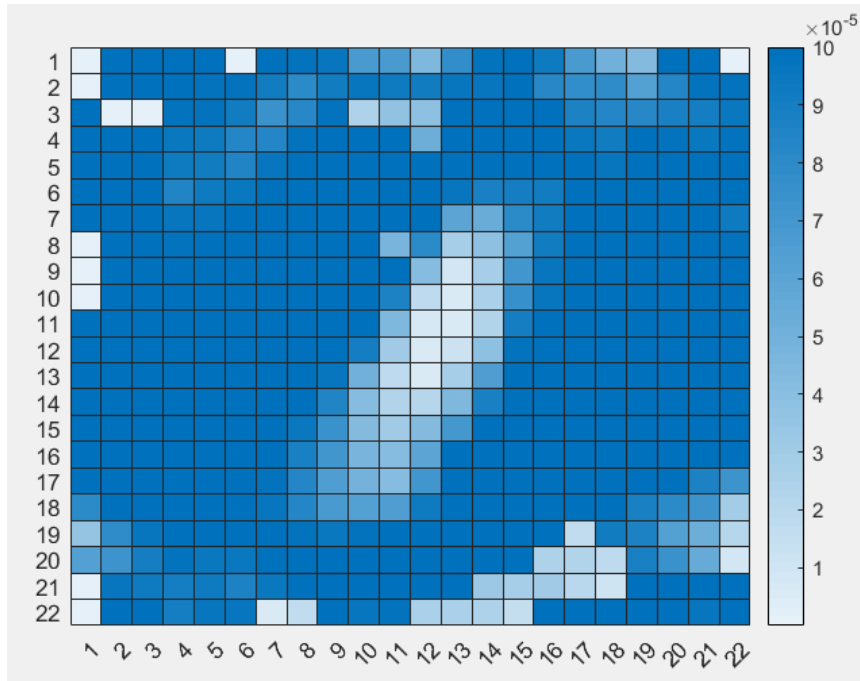
### 5.3 Τα αποτελέσματα του Image Recognition

Τέλος προχωράμε στην υλοποίηση του παραπάνω αλγορίθμου και στην μελέτη της συμπεριφοράς του για δύο περιπτώσεις. Η πρώτη αποτελεί την απλή περίπτωση που έχουμε να αναγνωρίσουμε εικόνες με τα ψηφία 0 και 1 και η δεύτερη είναι η σύνθετη περίπτωση που επιθυμούμε να αναγνωρίσουμε όλα τα ψηφία 0 έως 9.

Μετά το πέρας της διαδικασίας της εκμάθησης, για την πρώτη περίπτωση προσομοίωσης, μελετάμε το περιεχόμενο της μήτρας αγωγιμοτήτων του πρώτου layer (Cross – Bar) και πιο συγκεκριμένα τις θετικές αγωγιμότητες αυτού, δηλαδή την μήτρα 484 x 502. Όπως αναφέραμε αυτή η μήτρα περιέχει 502 νευρώνες και στο καθένα αντιστοιχεί ένα διάνυσμα αγωγιμοτήτων 1 x 484. Μετατρέποντας το τελευταίο διάνυσμα σε έναν πίνακα 22 x 22 και λαμβάνοντας το heatmap σε τυχαίους νευρώνες λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στις Εικόνες 66 και 67:



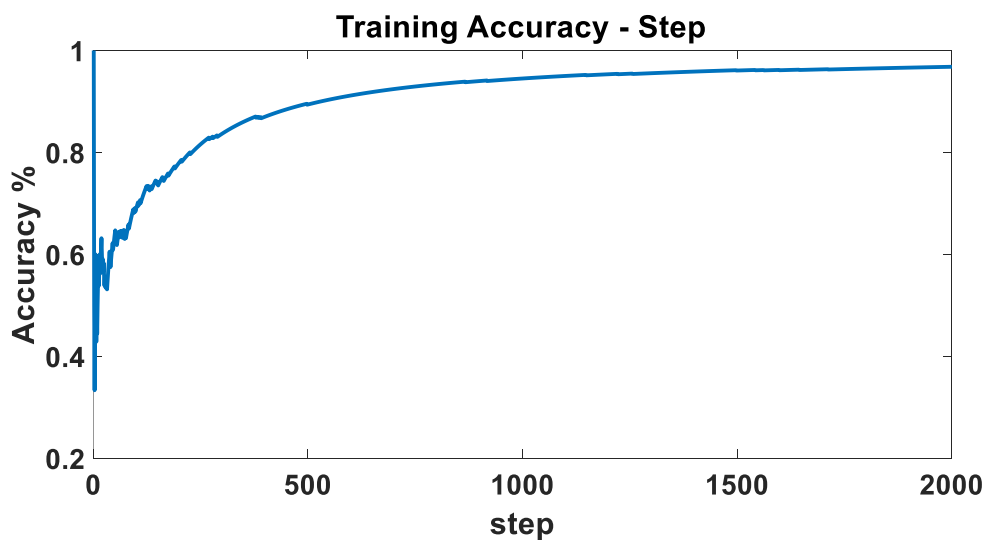
Εικόνα 66: Το heatmap των αγωγιμοτήτων ενός τυχαίου νευρώνα που αναγνωρίζει το ψηφίο 0.



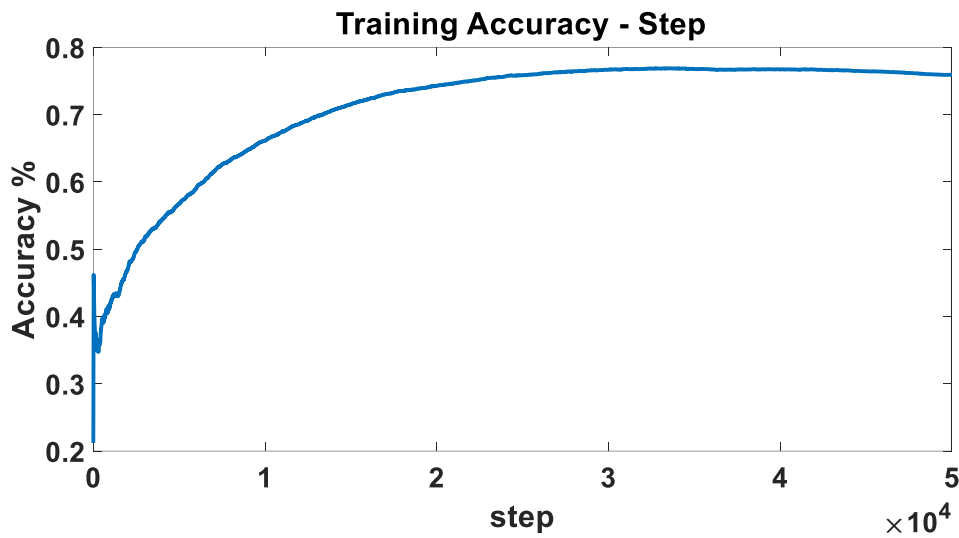
Εικόνα 67: Το heatmap των αγωγιμοτήτων ενός τυχαίου νευρώνα που αναγνωρίζει το ψηφίο 1.

Παρατηρούμε ότι πολλοί νευρώνες μετά την εκμάθηση έχουν αντιστοιχηθεί σε μία μήτρα αγωγιμοτήτων που αναγνωρίζει τα επιθυμητά ψηφία με το heatmap να έχει πάρει την μορφή αυτών των ψηφίων. Βέβαια πολλοί νευρώνες περιέχουν έναν γραμμικό συνδυασμό αγωγιμοτήτων των δύο ψηφίων.

Τα ποσοστά επιτυχίας κατά την διαδικασία της εκμάθησης για τις δύο περιπτώσεις που μελετάμε φαίνονται στις Εικόνες 68 και 69:



Εικόνα 68: Training Accuracy για την περίπτωση αναγνώρισης των ψηφίων 0 και 1.



Εικόνα 69: Training Accuracy για την περίπτωση αναγνώρισης των ψηφίων 0 έως 9.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι ικανοποιητικά, ιδίως για την απλή περίπτωση που κληθήκαμε να αναγνωρίσουμε τα ψηφία 0 και 1. Αυτή η πρώτη περίπτωση είχε εξαιρετικό ποσοστό επιτυχίας **99.49%** κατά την εξέταση του test set. Αντίστοιχα στην περίπτωση αναγνώρισης εικόνων όλων των ψηφίων 0-9 πετύχαμε test accuracy score **76.89%**. Το ποσοστό αυτό απέχει 14% από το εξαιρετικό ποσοστό της ερευνητικής ομάδας των Li C. et al. [25]. Το ποσοστό της δεύτερης περίπτωσης είναι ικανό για να αναδείξει τις διατάξεις CBRAM για νευρομορφικές εφαρμογές.

Καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με κατάλληλο parameter tuning και υπό διαφορετικό dataset.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στη παρούσα εργασία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα γενικό μοντέλο προσομοίωσης του memristor, το οποίο ενσωματώνει τους τρεις φυσικούς μηχανισμούς της ολίσθησης, της διάχυσης και της θερμοδιάχυσης, που είναι υπεύθυνοι για την λειτουργία του. Το μοντέλο αυτό είναι ικανό να προσομοιώσει σε εξαιρετικό βαθμό και τις δύο συμπεριφορές Threshold και Bipolar και να πετύχει την μετάβαση από την πρώτη στην δεύτερη. Ταυτόχρονα το μοντέλο παρουσιάζει συναπτικές ιδιότητες και μπορεί να περιγράψει το Potentiation και το Depression του Conductive Filament υπό κατάλληλη εφαρμοζόμενη τάση.

Στην συνέχεια έχοντας στην διάθεση μας το παραπάνω μοντέλο υλοποιήσαμε μία Cross – Bar μνήμη  $n \times m$  και μελετήσαμε την επιρροή των Sneak Path Currents κατά την ανάγνωση μέσω του κριτηρίου Read Margin για τις τρεις τεχνικές διαβάσματος. Αντίστοιχα εξετάστηκε το πρόβλημα των παρασιτικών αντιστάσεων και πως μεταβάλλεται το αντίστοιχο Write Margin. Η θεωρητική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας οδήγησαν στον επαναπροσδιορισμό του κριτηρίου ανάγνωσης και την καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος. Τα τελικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που είναι σε πλήρη συμφωνία με παρόμοιες έρευνες, ανέδειξαν την τεχνική ανάγνωσης  $\frac{V_R}{3}$  ως βέλτιστη.

Έπειτα μελετήθηκαν οι CBRAM τεχνολογίες στην ικανότητα υλοποίησης λογικών πυλών και εκφράσεων και πραγματοποιήθηκε μία επιτυχής προσομοίωση της λογικής πύλης NAND. Συνδέοντας τρία memristor σε ένα κοινό Word Line, με τα δύο να χρησιμοποιούνται σαν εισόδους και το άλλο σαν έξοδο και εφαρμόζοντας κατάλληλους παλμούς λάβαμε την λογική έκφραση  $\text{NOT}(A \cdot B)$ . Με παρόμοια λογική είναι δυνατή η κατασκευή των λογικών πυλών AND, OR, NOT και XOR.

Τέλος ερευνήθηκε η χρήση των Cross – Bar memory Arrays για την υλοποίηση νευρομορφικών εφαρμογών και πραγματοποιήθηκε Αναγνώριση Εικόνων με χειρόγραφα ψηφία. Στην απλή πρώτη περίπτωση καταφέραμε να αναγνωρίσουμε επιτυχώς 99.49% των εικόνων που περιείχαν τα ψηφία 0 και 1, ενώ στην περίπτωση που επιχειρήσαμε να αναγνωρίσουμε όλα τα ψηφία το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο

76.89%. Αυτά τα αποτελέσματα είναι αρκετά για να μας πιστοποιήσουν την ανωτερότητα των CBRAM τεχνολογιών.

## 6.1 Μελλοντική έρευνα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι ικανά για να μας αναδείξουν τις ικανότητες των CBRAM διατάξεων. Ωστόσο αποτελεί επιτακτική ανάγκη η εις βάθος μελέτη ορισμένων ζητημάτων:

- Αρχικά είναι σημαντική η υλοποίηση ενός γενικού μοντέλου προσομοίωσης σε ένα περιβάλλον ηλεκτρονικού σχεδιασμού, όπως LTspice. Η ορθή περιγραφή των φυσικών μηχανισμών και η ταυτόχρονη συνύπαρξη της Threshold και της Bipolar συμπεριφοράς, όπως πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία στο λογισμικό της Matlab, θα διευκολύνει τον έλεγχο και τον χαρακτηρισμό πραγματικών διατάξεων εργαστηρίου.
- Επίσης είναι μείζονος σημασίας η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του Read Margin και του Write Margin σε επίπεδο Hardware. Η υλοποίηση διατάξεων Cross – Bar και η μελέτη της βέλτιστης τεχνικής ανάγνωσης θα επιφέρει επιπλέον διορατικότητα ως προς την αντιμετώπιση των Sneak Path Currents.
- Επιπρόσθετα είναι απαραίτητη κατασκευή λογικών πυλών και εκφράσεων CBRAM σε εργαστηριακό περιβάλλον και η σύγκριση τους με τις αντίστοιχες τεχνολογίες CMOS.
- Ακόμα πρέπει να εξεταστούν οι CBRAM διατάξεις σε πιο περίπλοκες νευρομορφικές εφαρμογές, όπως αναγνώριση φωνής και προσώπου.
- Επίσης για την κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων αισθητήρων (artificial sensory systems) τα οποία θα έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν και να αναλύουν διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα χωρίς να τα στέλνουν σε κάποια υπολογιστικό νέφος (cloud computing).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Riordan, M., L. Hodderson, and C. Herring. 1999. "The Invention of the Transistor." *Reviews of Modern Physics* 71 (2): 336–345.
2. WILLIAMS, R. S. "How we found the missing memristor." *IEEE Spectrum*, 12/01/2008, p. 1-11, [www.spectrum.ieee.org/print/7024](http://www.spectrum.ieee.org/print/7024).
3. L. Chua, "Memristor-The missing circuit element," in *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 507-519, September 1971, doi: 10.1109/TCT.1971.1083337.
4. Bousoulas P., Papakonstantinou C., Kitsios S., Moustakas K., Sirakoulis G.C., Tsoukalas D., "Emulating Artificial Synaptic Plasticity Characteristics from SiO<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge Memories with Pt Nanoparticles", *Micromachines*, 2021, 12(3):306. <https://doi.org/10.3390/mi12030306>
5. Y. Chen, "ReRAM: History, Status, and Future," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 4, pp. 1420-1433, April 2020, doi: 10.1109/TED.2019.2961505.
6. P. Bousoulas et al., "Investigating the origins of ultra-short relaxation times of silver filaments in forming-free SiO<sub>2</sub>-based conductive bridge memristors", *Nanotechnology*, vol. 31, no. 45, Nov. 2020, Art. no. 454002, doi: 10.1088/1361-6528/aba3a1.
7. Michelakaki I, Bousoulas P, Stathopoulos S, Boukos N and Tsoukalas D 2017 "Coexistence of bipolar and threshold resistive switching in TiO<sub>2</sub> based structure with embedded hafnium nanoparticles", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 045103.
8. Pershin Y V and Di Ventra M 2011 "Memory effects in complex materials and nanoscale systems", *Adv. Phys.* 60 145–227.
9. Λυμπερόπουλος Σ. (2021), «Προσομοίωση Νευρομορφικού Δικτύου με τη Χρήση Δικτύωματος από Μνήμες Μεταβλητής Αντίστασης», Αθήνα.
10. Yakopcic, C., T. Taha, G. Subramanyam and R. Pino. "Chapter 12 Memristor SPICE Modeling." (2012).
11. Yu, S & Wong, HSP 2011, "Compact modeling of conducting-bridge random-access memory (CBRAM)", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 58, no. 5, 5740326, pp. 1352-1360. <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2116120>.
12. Kim, H. J., Kim, J., Park, T. G., Yoon, J. H., Hwang, C. S., "Multi-Level Control of Conductive Filament Evolution and Enhanced Resistance Controllability of the Cu-Cone Structure Embedded Conductive Bridge Random Access Memory.", *Adv. Electron. Mater.* 2021, 2100209. <https://doi.org/10.1002/aelm.202100209>.
13. B. Govoreanu, L. Zhang and M. Jurczak, "Selectors for high density crosspoint memory arrays: Design considerations, device implementations and some challenges ahead," 2015

- International Conference on IC Design & Technology (ICICDT), 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICICDT.2015.7165872.
14. Sun, B.; Guo, T.; Zhou, G.; Wu, J.; Chen, Y.; Zhou, Y. N.; Wu, Y. A., “A Battery-Like Self-Selecting Biomemristor from Earth-Abundant Natural Biomaterials”, *ACS Appl. Bio Mater.* 2021, 4,1976–1985.
  15. Y. Gao, O. Kavehei, S. F. Al-Sarawi, D. C. Ranasinghe, and D. Abbott, “Read operation performance of large selectorless cross-point array with self-rectifying memristive device,” *Integr., VLSI J.*, 2016
  16. Y. Li, B. Gao, H. Wu, W. Zhang and H. Qian, “The Impact of Interconnect Resistance on One-Selector One-Resistor (1S1R) Crossbar Array Performance,” 2019 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSTIC.2019.8755613.
  17. C. J. Amsinck, N. H. Spigna, D. P. Nackashi and P. D. Franzon, “Scaling constraints in nanoelectronic random-access memories”, *Nanotechnology*, vol. 16, pp. 2251-2260, August 2005.
  18. C. Lo, T. Hou, M. Chen and J. Huang, “Dependence of Read Margin on Pull-Up Schemes in High-Density One Selector–One Resistor Crossbar Array”, in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 1, pp. 420-426, Jan. 2013, doi: 10.1109/TED.2012.2225147.
  19. YC Chen, CC Lin and YF. Chang, “Post-moore memory technology: Sneak path current (spc) phenomena on rram crossbar array and solutions”, *Micromachines*, vol. 12, no. 1, 2021.
  20. Z.-J. Liu, J.-Y. Gan and T.-R. Yew, “ZnO-based one diode-one resistor device structure for crossbar memory applications”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 15, pp. 153503-1-153503-4, 2012.
  21. Donghyun Kim, Ju Hyun Park, Dong Su Jeon, Tukaram D. Dongale, Tae Geun Kim, “Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-y-based ReRAM device with annealing-free Ag: ZrN<sub>x</sub>-based bilayer selector device”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 854, 2021.
  22. O. Kavehei, S. Al-Sarawi, K. Cho, K. Eshraghian and D. Abbott, “An Analytical Approach for Memristive Nanoarchitectures,” in *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 11, no. 2, pp. 374-385, March 2012, doi: 10.1109/TNANO.2011.2174802.
  23. Gao, S., Zeng, F., Wang, M. et al., “Implementation of Complete Boolean Logic Functions in Single Complementary Resistive Switch”, *Sci Rep* 5, 15467 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15467>
  24. Huang, P., Kang, J., Zhao, Y., Chen, S., Han, R., Zhou, Z., Chen, Z., Ma, W., Li, M., Liu, L., & Liu, X. (2016), “Reconfigurable Nonvolatile Logic Operations in Resistance Switching Crossbar Array for Large-Scale Circuits”, *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 28(44), 9758–9764. <https://doi.org/10.1002/adma.201602418>

25. Li, C., Belkin, D., Li, Y. et al., “*Efficient and self-adaptive in-situ learning in multilayer memristor neural networks*”, Nat Commun 9, 2385 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04484-2>
26. Li S., Pam M.-E., Li Y., Chen L., Chien Y.-C., Fong X., Chi D., Ang K.-W., “*Wafer-Scale 2D Hafnium Diselenide Based Memristor Crossbar Array for Energy-Efficient Neural Network Hardware*”, Adv. Mater. 2021, 2103376, <https://doi.org/10.1002/adma.202103376>
27. <https://prateekvjoshi.com/2016/03/29/understanding-xavier-initialization-in-deep-neural-networks/>