



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ**  
**ΣΠΟΥΔΩΝ «ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΛΟΥΚΑΣ**

**«ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ RTN ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ReRAM ΝΙΤΡΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )»**

Ερευνητικός Επιβλέπων: Δρ. Παναγιώτης Δημητράκης, Ερευνητής Β	Ακαδημαϊκός Επιβλέπων: Δρ. Δημήτριος Τσουκαλάς
Ίδρυμα: Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"	Ίδρυμα: Καθηγητής, Ε.Μ.Π. Τομέας Φυσικής

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Δημητράκης Παναγιώτης, Ερευνητής INN

Τσουκαλάς Δημήτρης, Καθ. Ε.Μ.Π.

Ράπτης Ιωάννης, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 03/2021



Παναγιώτης – Ιωάννης Ν. Λουκάς

© (2021) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή είναι μέρος του προγράμματος σπουδών του Δ.Π.Μ.Σ. Μικροσυστημάτων και Νανοδιατάξεων το οποίο οργανώνεται από την Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Τεχνολογίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ‘ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ’ το οποίο αποτελεί συνεργαζόμενο φορέα του Δ.Π.Μ.Σ.

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΛΟΥΚΑΣ

Μάρτιος 2021



## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου Δρ. Παναγιώτη Δημητράκη για την πολύτιμη βοήθεια και τις γνώσεις που μου παρείχε, καθώς και για την δημιουργία του κατάλληλου κλίματος, το οποίο βοήθησε τα μέγιστα στην ομαλή διαδικασία της εκπόνησης και εν τέλει διεκπεραίωσης της διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό φοιτητή κ. Νικόλαο Βασιλειάδη για την αμέριστη ,συνεχή, αλλά και καθοριστική, βοήθεια που μου πρόσφερε καθόλη την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να δώσω και στην οικογένειά μου, η οποία με την κατάλληλη στήριξη, αλλά και την υπομονή και ενθάρρυνση που μου έδειξε, μου στάθηκε και με βοήθησε στην ομαλή διεκπεραίωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου.



## Περίληψη

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται μία θεωρητική και πειραματική μελέτη του τρόπου λειτουργίας, και της δυναμικής, του μηχανισμού αγωγιμότητας σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης εναλλαγής αντίστασης (ReRAM), οι οποίες έχουν ως βάση το νιτρίδιο του πυριτίου, μέσω της ανάλυσης του σήματος RTN σε διάφορα επίπεδα αντιστάσεων. Οι ReRAM είναι διατάξεις που, στην πιο απλή τους μορφή, αποτελούνται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια εκατέρωθεν ενός διηλεκτρικού, διάταξη οποία επιτρέπει το φαινόμενο της εναλλαγής αντίστασης, μέσω του οποίου συντελείται η αποθήκευση πληροφορίας, δηλαδή η λειτουργία μνήμης. Αυτές οι διατάξεις μνήμης είναι πολλά υποσχόμενες για την αντικατάσταση τωρινών μη πτητικών μνημών, με την παραγωγή αποθηκευτικού μέσου εξολοκλήρου από ReRAM. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά διαφορετικά μεταλλικά οξείδια ως διηλεκτρικό για τις δομές αυτές, και η κατανόηση του μηχανισμού και της δυναμικής του μηχανισμού της εναλλαγής της αντίστασης είναι κρίσιμη για την μοντελοποίηση και τη χρήση των ReRAM σε διαφορετικές εφαρμογές. Ο τυχαίος τηλεγραφικός θόρυβος (Random Telegraph Noise - RTN) είναι μία ειδική περίπτωση θορύβου, και αποδίδεται στα συνεχόμενα συμβάντα παγίδευσης και, αντίστοιχα, τα συνεχόμενα συμβάντα έκλυσης μεμονωμένων ή πολλαπλών φορέων, οι οποίοι βρίσκονται σε κέντρα ατελειών στο εσωτερικό του διηλεκτρικού. Στην καταγραφή του σήματος του ρεύματος, το οποίο διαπερνάει την διάταξη, παρατηρούμε μεταβολές, ή τον λεγόμενο θόρυβο, οι οποίες τείνουν να είναι κυρίως RTN, αλλά και θόρυβος flicker. Μέσω διαφόρων συστημάτων καταγραφής του σήματος, και διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας του, καθίσταται δυνατή η μελέτη του συγκεκριμένου θορύβου.

Ένα πολλά υποσχόμενο είδος διάταξης ReRAM για εφαρμογές μνήμης είναι η διάταξη που έχει ως διηλεκτρικό το νιτρίδιο του πυριτίου ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ), διάταξη η οποία στην παρούσα εργασία εξετάζεται σε δύο ειδών παραλλαγές. Η πρώτη έχει ως διηλεκτρικό το νιτρίδιο του πυριτίου  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , έχοντας επίσης πυρίτιο εμφυτευμένο με μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων ( $\text{n}^{++}\text{Si}$ ), και χαλκό (Cu) ως κάτω και άνω ηλεκτρόδια αντίστοιχα, ενώ η δεύτερη είναι η ίδια με την πρώτη με την διαφορά να έγκειται στην τοποθέτηση του υλικού του οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), ανάμεσα σε  $\text{Si}_3\text{N}_4$  και  $\text{n}^{++}\text{Si}$ . Αρχικά, με την ανάλυση των χαρακτηριστικών ρεύματος - τάσης των συγκεκριμένων διατάξεων, οι οποίες ήταν σε μέγεθος  $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$ , αποκαλύπτεται η δυνατότητα να επιτευχθεί αντίσταση πολλαπλών επιπέδων. Επιπλέον, με την βοήθεια ενός λογισμικού και της κατάλληλης πειραματικής διάταξης, εφαρμόζοντας κατάλληλες ακολουθίες παλμών SET / RESET, επετεύχθη ο συντονισμός σε διαφορετικά επίπεδα αντίστασης, αλλά και η μέτρηση του σήματος RTN σε αυτά. Με τα αποτελέσματα αυτά γίνεται δυνατή η μελέτη και η ανάλυση του μηχανισμού αγωγιμότητας των δύο διατάξεων.



## Abstract

In this thesis a theoretical and experimental study of the mode of operation, and the dynamics, of the conductivity mechanism in resistive random access memory (ReRAM) devices are studied, which are based on silicon nitride, through the analysis of the RTN signal at various levels of resistance. ReRAMs are devices that, in their simplest form, consist of two metal electrodes on either side of a dielectric, a device that allows the phenomenon of resistance exchange, through which information is stored, in other words the memory function. These memory devices are very promising for replacing current non-volatile memories, with the realization of storage class memories. Many different metal oxides have been used as dielectrics for these structures, and the understanding of the mechanism and dynamics of the resistance switching mechanism is critical to modeling and using ReRAM in different applications. The Random Telegraph Noise (RTN) is a special case of noise, which is attributed to the continuous trapping events and, respectively, the continuous release events of single or multiple carriers, that are located in the defect centers inside the dielectric. In the recording of the current signal, which passes through the device, we observe changes, or the so-called noise, which tend to be mainly RTN, but also flicker noise. Through various signal recording systems, and various processing techniques, it is possible to study this noise.

A promising type of ReRAM device for memory applications is the silicon nitride ( $\text{Si}_x\text{Ni}_y$ ) dielectric device, a device which in the present work is considered in two types of variants. The first has as dielectric the silicon nitride  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , also having a heavily doped Si ( $\text{n}^{++}\text{Si}$ ), and copper (Cu) as bottom and top-electrodes respectively, while the second is the same as the first with the difference, which lies in the placement of silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ ) material between  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{n}^{++}\text{Si}$ . The analysis of current-voltage characteristics, of those  $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$  devices, reveals that multi-level resistance operation can be achieved. In addition, with the help of the appropriate software and layout, applying appropriate SET / RESET pulse sequences, tuning was achieved at different resistance levels, random telegraph noise measurements performed at those different resistance levels. With these results it is possible to study and analyze the conductivity mechanism of these two devices.



## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Ευχαριστίες .....	6
Περίληψη .....	8
Abstract .....	9
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Μνήμες ReRAM.....	1
1.2 Σκοπός διατριβής.....	1
1.3 Δομή διατριβής.....	2
1.4 Αναφορές.....	3
2. Θεωρία θορύβου και ηλεκτρονικές διατάξεις .....	4
2.1 Τα είδη του θορύβου .....	4
2.1.1 Θερμικός θόρυβος .....	4
2.1.2 Θόρυβος βολής .....	4
2.1.3 Θόρυβος δημιουργίας - ανασυνδυασμού .....	4
2.1.4 Θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων .....	4
2.1.5 Τυχαίος τηλεγραφικός θόρυβος .....	4
2.2 Θόρυβος 1/f σε διατάξεις MOS.....	5
2.3 Θόρυβος δημιουργίας - ανασυνδυασμού .....	9
2.4 Θόρυβος RTN σε διατάξεις MOS .....	10
2.5 Διατάξεις μνήμης ReRAM .....	14
2.5.1 Εισαγωγή .....	14
2.5.2 Ιστορία.....	15
2.5.3 Η αρχή λειτουργίας (Το φαινόμενο εναλλαγής αντίστασης) .....	16
2.5.4 Κατηγοριοποίηση .....	18
2.5.5 Γιατί τις μελετάμε?.....	21
2.6 Αναφορές.....	23
3 Τεχνικές μέτρησης και ανάλυσης του θορύβου RTN.....	28
3.1 Τεχνικές μέτρησης του θορύβου RTN .....	28
3.1.1 Τεχνική μέτρησης τάσης με τροφοδοσία ρεύματος .....	28
3.1.2 Τεχνική μέτρησης ρεύματος με τροφοδοσία τάσης .....	29
3.2 Τεχνικές ανάλυσης του θορύβου RTN.....	29
3.2.1 Εισαγωγή .....	29

3.2.2 Σήμα RTN – PSD.....	30
3.2.3 Ιστογράμματα.....	32
3.2.4 Χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP).....	34
3.3 Αναφορές.....	39
4 Πειραματική διαδικασία, πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση .....	41
4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	41
4.1.1 Πειραματική διάταξη με την τεχνική μέτρησης τάσης .....	41
4.1.2 Πειραματική διάταξη με την τεχνική μέτρησης ρεύματος .....	42
4.2 Ανάπτυξη software .....	44
4.2.1 Software για την απόκτηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.....	44
4.2.2 Software για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων .....	45
4.3 Περιγραφή των δειγμάτων που μελετήθηκαν .....	48
4.3.1 Εισαγωγή.....	48
4.3.2 Διάταξη MIS.....	49
4.3.3 Διάταξη MIOS .....	49
4.4 Πειραματικά αποτελέσματα - συμπεράσματα.....	50
4.4.1 I – V μετρήσεις και ανάλυση .....	50
4.4.2 Πειραματική διαδικασία για ανάλυση και διερεύνηση του RTN .....	53
4.4.3 Αποτελέσματα – ανάλυση σημάτων.....	53
4.4.3 Ανάλυση των χαρακτηριστικών των παγίδων και της συσχέτισης των σημάτων RTN.....	58
4.4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	69
4.5 Συμπεράσματα.....	69
4.6 Αναφορές.....	71
5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα .....	72



## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Μνήμες ReRAM

Οι μνήμες τυχαίας προσπέλασης εναλλαγής αντίστασης (ReRAM), λόγω της εξαιρετικής τους δυνατότητας σμίκρυνσης σε όλο και πιο μικρή κλίμακα, αλλά και της απλής τους δομής, είναι ανάμεσα στους ισχυρότερους υποψήφιους μεταξύ των μελλοντικών μη πτητικών μνημών. Μία διάταξη ReRAM είναι ένα memristor, το οποίο σημαίνει ότι ανήκει στην κατηγορία του τέταρτου μη – γραμμικού, παθητικού ηλεκτρικού στοιχείου δύο ακροδεκτών (τα υπόλοιπα τρία είναι ο αντιστάτης, ο πυκνωτής, και το πηνίο), και στην γενική του μορφή αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, και ανάμεσά τους ένα υλικό – μονωτή. Είναι ιδανικές για διάφορες εφαρμογές, από την τρισδιάστατη αρχιτεκτονική με κυψέλες μνήμης μεγέθους  $4F^2/n$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των τρισδιάστατα στοιβαγμένων κυψελών μνήμης [1], στην χρησιμοποίησή τους για αποθήκευση qubit στους κβαντικούς υπολογιστές [2]. Από τεχνολογικής άποψης [3], τα πιο ελκυστικά υλικά είναι τα οξειδία μετάλλων (OxRAM), και τα υλικά αλλαγής φάσης (PCRAM). Είναι γνωστό ότι οι ιδιότητες του OxRAM επηρεάζονται σοβαρά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες [4] και τις ατέλειες [5]. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μονωτές με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου έχουν ιδιαίτερη σημασία λόγω της αντοχής τους έναντι της υγρασίας και των παρασιτικών επιδράσεων που σχετίζονται με το οξυγόνο [6] καθώς και έναντι της διάχυσης ιόντων μετάλλων [7]. Το νιτρίδιο του πυριτίου είναι ένα πολύ γνωστό υλικό στην τεχνολογία των μη πτητικών μνημών και διατίθενται διάφορες συσκευές μνήμης παγίδευσης φορτίου (π.χ. SONOS, BiCS). Ωστόσο πρόσφατα έγινε γνωστή η επιτυχής χρήση νιτριδίου του πυριτίου σε διατάξεις ReRAM [7]. Επομένως, η διερεύνηση της λειτουργίας της εναλλαγής μνήμης, ή του μηχανισμού αγωγιμότητας των συγκεκριμένων διατάξεων είναι πολύ σημαντική.

Το ρεύμα που διαπερνά αυτές τις διατάξεις παρουσιάζει μικρές μεταβολές γύρω από ένα σταθερό σημείο, τον λεγόμενο θόρυβο, ο οποίος γενικά μπορεί να έχει ένα συγκεκριμένο μοτίβο κίνησης, αλλά και να είναι εντελώς τυχαίος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θορύβου, όπως θα παρουσιάσουμε, και ο καθένας έχει τα χαρακτηριστικά του. Η εύρεση του τύπου του συγκεκριμένου θορύβου της διάταξης, και επακολούθως η μελέτη του με την χρήση ορισμένων εργαλείων, καθιστά δυνατή την εις βάθος διερεύνηση της λειτουργίας του μηχανισμού αγωγιμότητας της συγκεκριμένης διάταξης ReRAM, με αποτέλεσμα την καλύτερη αξιοποίησή της στις εκάστοτε εφαρμογές.

### 1.2 Σκοπός διατριβής

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια εύρεσης, ανάλυσης, και κατανόησης του φαινομένου του αγώγιμου μονοπατιού, ή διαφορετικά του μηχανισμού αγωγιμότητας διατάξεων ReRAM βασισμένων στο νιτρίδιο του πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, και software, για την λήψη του σήματος, και τα αντίστοιχα για την ανάλυση του σήματος RTN. Η ανάλυση και η κατανόηση του μηχανισμού επετεύχθη μέσω της λήψης, και της ανάλυσης του σήματος σε διαφορετικά επίπεδα αντίστασης.

Αυτά τα εργαλεία της παρούσας διατριβής, εκτός από την βοήθεια που παρέχουν για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της συγκεκριμένης ReRAM, είναι δυνατόν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για κατανόηση της λειτουργίας του μηχανισμού αγωγιμότητας και σε άλλες παρόμοιες διατάξεις.

### 1.3 Δομή διατριβής

Το κείμενο της διπλωματικής διατριβής ξεκινάει από το επόμενο κεφάλαιο, το οποίο είναι θεωρητικό, και με στοιχεία πάνω στην θεωρία του θορύβου και των ηλεκτρονικών διατάξεων. Ξεκινώντας, σε αυτό το κεφάλαιο, με μία σύντομη περιγραφή των διαφόρων ειδών του θορύβου, συνεχίζει σε μία πιο ενδελεχή παρουσίαση των ειδών flicker, δημιουργίας – ανασυνδυασμού, και RTN του θορύβου στις διατάξεις MOS, καταλήγοντας με μία παρουσίαση και ανάλυση των διατάξεων ReRAM από ιστορικής άποψης, αλλά κυρίως εστιάζοντας στο θέμα της αρχής λειτουργίας, στην κατηγοριοποίηση, αλλά και στην αξιοποίησή τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο, στο δεύτερο, παρουσιάζονται οι τεχνικές μέτρησης, αλλά και ανάλυσης του RTN θορύβου, ξεκινώντας με τις δύο τεχνικές μέτρησης του σήματος, με τάση και με ρεύμα, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθεμίας. Συνεχίζοντας με την παρουσίαση των διαφόρων τεχνικών ανάλυσης του σήματος, με τα αντίστοιχα διαγράμματα, οι οποίες συμβάλλουν στην απόκτηση σημαντικών πληροφοριών και, ταυτόχρονα, συμπερασμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, και προτελευταίο, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία, τα δείγματα προς μέτρηση, τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και η ανάλυσή τους. Αρχικά, παρουσιάζεται η αναζήτηση της πειραματικής διάταξης που θα φέρει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, η οποία και είναι η τεχνική μέτρησης με τάση, και μετά την επιλογή της ακολουθεί η περιγραφή της. Έπειτα, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του software, το οποίο βοηθάει στην λήψη του κατάλληλου σήματος του RTN στα διαφορετικά επίπεδα αντίστασης, και του αντίστοιχου που στόχο του έχει την εξαγωγή των κατάλληλων δεδομένων για την ανάλυσή του. Στην συνέχεια, γίνεται παρουσίαση των δύο δειγμάτων στα οποία θα γίνει η μελέτη με την λήψη των RTN σημάτων, τα οποία και είναι διατάξεις ReRAM με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου. Πριν την παρουσίαση των RTN σημάτων, δείχνονται οι I - V μετρήσεις τους με την κατάλληλη ανάλυσή τους, για την βοήθεια που παρέχουν στα αρχικά συμπεράσματα αλλά και στην μετέπειτα ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων. Στην συνέχεια, έπειτα από την παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας για την λήψη του σήματος, παρουσιάζονται τα ληφθέντα σήματα, τα κατάλληλα διαγράμματα από τις διάφορες τεχνικές ανάλυσης, η κατάλληλη περιγραφική ανάλυση, αλλά και η ανάλυση των χαρακτηριστικών των παγίδων και της συσχέτισης των σημάτων μέσω πινάκων με εξαχθέντα στοιχεία από τα διαγράμματα, αλλά και αποτελέσματα υπολογισμών. Τέλος, γίνεται η σύγκριση των δύο δειγμάτων.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων, και η παρουσίασή τους για την περαιτέρω αξιοποίησή τους, με μελλοντική έρευνα.

#### 1.4 Αναφορές

- [1] I. G. Baek, D. C. Kim, M. J. Lee, H.-J. Kim, E. K. Yim, M. S. Lee, J. E. Lee, S. E. Ahn, S. Seo, J. H. Lee, J. C. Park, Y. K. Cha, S. O. Park, H. S. Kim, I. K. Yoo, U.-In. Chung, J. T. Moon, and B. I. Ryu. Multi-layer cross-point binary oxide resistive memory (OxRRAM) for post-NAND storage application. Tech. Dig. IEEE Int. Electron Devices Meeting, pp. 750–753, 2005.
- [2] I.G. Karafyllidis, G.C. Sirakoulis, P. Dimitrakis. Memristive Quantum Computing Simulator. *IEEE Trans. Nanotechnology*, 18, pp. 1015-1022, 2019.
- [3] L. Zhu, J. Zhou, Z. Guo, Z. Sun. An overview of materials issues in resistive random-access memory. *J. Materiomics*, vol. 1, pp.285-295, 2015.
- [4] M Lübben, S Wiefels, R Waser, I Valov. Processes and effects of oxygen and moisture in resistively switching TaOx and HfOx. *Advanced Electronic Materials*, 4 (1), 1700458, 2018.
- [5] M. Lübben, F. Cüppers, J. Mohr, M. von Witzleben, U. Breuer, R. Waser, C. Neumann, I. Valov. Design of defect-chemical properties and device performance in memristive systems. *Science Advances*, 6 (19), eaaz9079, 2020.
- [6] F.H.P.M. Habraken and A.E.T. Kuiper. Silicon nitride and oxynitride films. *Materials Science and Engineering*, R12, 123-175, 1994.
- [7] Vladimir Zubkov, Joseph Han, Grace Sun, Charles Musgrave, and Sheldon Aronowitz. Modelling Copper Diffusion in Silicon Oxide, Nitride, and Carbide”, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 716, B8.4.1- 6, 2002.



## 2. Θεωρία θορύβου και ηλεκτρονικές διατάξεις

### 2.1 Τα είδη του θορύβου

Τα βασικά είδη θορύβου που υπάρχουν σε διατάξεις MOS (Metal – Oxide - Semiconductor), και οι οποίες θα αναλυθούν περιληπτικώς, είναι τα εξής: ο θερμικός θόρυβος, ο θόρυβος βολής, ο θόρυβος δημιουργίας- ανασυνδυασμού, ο θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων, και ο λεγόμενος τυχαίος θόρυβος τηλεγραφου.

#### 2.1.1 Θερμικός θόρυβος

Τον θερμικό θόρυβο (Thermal noise) τον μέτρησε πρώτος ο John B. Johnson στα εργαστήρια Bell το 1926, και αναλύθηκε, έπειτα, από τον Harry Nyquist [1,2]. Από αυτά τα ιστορικά γεγονότα, ο θερμικός, ή “λευκός” θόρυβος, ονομάστηκε και “Johnson-Nyquist” θόρυβος, και μπορεί να θεωρηθεί ως ο θόρυβος υποβάθρου μίας διάταξης MOS. Η τυχαία κίνηση των φορέων του αγώγιμου υλικού, παράγει μεταβολές στην διαφορά του δυναμικού, ή αλλιώς τον θερμικό θόρυβο, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα το φάσμα ισχύος να είναι ανεξάρτητο της συχνότητας. Με αυτά τα δεδομένα, κάθε αντιστάτης παράγει θερμικό θόρυβο, και επίσης έχει δειχθεί ότι και κάθε ημιαγωγός θα παράξει θερμικό θόρυβο, ο οποίος θα είναι ανάλογος της δυναμικής του αντίστασης [3].

#### 2.1.2 Θόρυβος βολής

Ο λεγόμενος θόρυβος βολής (Shot noise), ή θόρυβος Poisson, οφείλεται στις τυχαίες μεταβολές που συμβαίνουν στην διάχυση των φορτίων - φορέων, ή αλλιώς στα συμβάντα προσπέρασης ενός φράγματος δυναμικού, αλλά και στην τυχαία δημιουργία και επανασύνδεση των ζευγών οπών και ηλεκτρονίων. Ο θόρυβος βολής παρουσιάστηκε, πρώτα, το 1918 από τον Walter Shottky, ο οποίος έκανε τις μελέτες του πάνω στις μεταβολές του ρεύματος σε σωλήνες κενού [4].

#### 2.1.3 Θόρυβος δημιουργίας - ανασυνδυασμού

Ο θόρυβος δημιουργίας - ανασυνδυασμού (Generation-Recombination, G-R Noise) είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας και του ανασυνδυασμού των φορέων μέσα στον ημιαγωγικό υλικό, που όμως γίνονται τυχαία, με αποτέλεσμα τις τυχαίες μεταβολές στον αριθμό των φορέων που είναι διαθέσιμοι για το ρεύμα μεταφοράς, και αντίστοιχα στην αντίσταση του υλικού. Συγκεκριμένα, αυτού του είδους ο θόρυβος προκαλείται με συμβάντα όπως ο ανασυνδυασμός ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου με μία ελεύθερη οπή, η δημιουργία ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου ή μίας ελεύθερης οπής, η παγίδευση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου σε μία ‘ελεύθερη’ παγίδα, καθώς και η παγίδευση μίας ελεύθερης οπής σε μία ‘κατειλημμένη’ παγίδα [5].

#### 2.1.4 Θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων

Ο θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων (Flicker noise), ή “ $1/f$ ” θόρυβος, είναι το κοινό όνομα για τις μεταβολές, οι οποίες έχουν πυκνότητα του φάσματος ισχύος ανάλογη με  $1/f^\gamma$ , όπου  $\gamma$  είναι κοντά στο 1, και συνήθως είναι σε εύρος 0.7-1.3. Αυτός ο θόρυβος τοποθετείται κυρίως στις διατάξεις MOSFET [5].

#### 2.1.5 Τυχαίος τηλεγραφικός θόρυβος

Ο τυχαίος τηλεγραφικός θόρυβος (Random Telegraph Noise - RTN), ή τυχαίο τηλεγραφικό σήμα (RTS), ή “porcorn” θόρυβος, είναι μία ειδική περίπτωση του G-R θορύβου, και αποδίδεται σε

μεμονωμένους φορείς οι οποίοι παγιδεύονται και ελευθερώνονται σε μερικές παγίδες στην διεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και οξειδίου [6]. Αυτού του είδους ο θόρυβος, παρατηρείται σε διατάξεις μικρού μεγέθους (επιφάνεια  $< 1\mu\text{m}^2$ ) [7]. Επίσης, οι μετρήσεις αυτές του RTS παρουσιάζονται ως χρονοεξαρτούμενα σήματα [5].

## 2.2 Θόρυβος $1/f$ σε διατάξεις MOS

Ο θόρυβος  $1/f$ , ή αλλιώς flicker θόρυβος, είναι ο πιο τυπικός θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων σε συσκευές ημιαγωγού και διακρίνεται με βάση την φύση του φάσματος ισχύος θορύβου, το οποίο, γενικά, έχει κλίση ίση περίπου με το αντίστροφο της συχνότητας. Για την εξήγηση των μηχανισμών και της προέλευσης αυτού του είδους του θορύβου στις διατάξεις MOS, έχουν προταθεί διάφορα φυσικά μοντέλα.

Ένα από αυτά τα μοντέλα, είναι το μοντέλο ενιαίου αριθμού – μεταβολών κινητικότητας (Unified Number – Mobility fluctuations (UNMF) model). Είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα και αποδεκτά μοντέλα, το οποίο παρέχει μια ικανοποιητική εικόνα για τον flicker θόρυβο σε διατάξεις MOS μεγάλης περιοχής [8]. Αυτό το μοντέλο, σε γενικές γραμμές, υποστηρίζει ότι σε μία διάταξη MOS, ο flicker θόρυβος παρατηρείται λόγω της αλληλεπίδρασης των φορέων του καναλιού, και των αρκετών παγίδων που βρίσκονται στην διεπιφάνεια ανάμεσα στο Si και στο SiO<sub>2</sub>. Στις μεγάλες συσκευές MOS, όταν αρκετοί φορείς του καναλιού παγιδευτούν από τις προαναφερόμενες παγίδες σε ένα ευρύ φάσμα χρόνων του φαινομένου σήραγγος, τότε η τοπική αγωγιμότητα του καναλιού αλλάζει τυχαία από την απώλεια των φορέων του. Επίσης, οι παγίδες που έχουν παγιδεύσει τους φορείς, γίνονται ηλεκτρικώς φορτισμένα ενεργά κέντρα, τα οποία έχουν την ικανότητα να συμβάλλουν στην ρύθμιση της κινητικότητας των φορέων του καναλιού [8]. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα τυχαία και αυθόρμητα μεταξύ των φορέων του καναλιού και των παγίδων.

Εστιάζοντας στην ιστορία και στις προσεγγίσεις, για τα φυσικά μοντέλα που έχουν ειπωθεί για τον θόρυβο  $1/f$ , είναι δυνατόν να ειπωθούν σύμφωνα με τα [9,10], αυτά τα φυσικά μοντέλα τα οποία είναι βασισμένα σε 2 προσεγγίσεις:

- Μεταβολές κινητικότητας: Σε αυτό το μοντέλο, θεωρείται ότι ο παρατηρούμενος θόρυβος  $1/f$  στην αγωγιμότητα, προκαλείται από τις μεταβολές στην κινητικότητα στους ελεύθερους φορείς, οι οποίοι βρίσκονται στο αγωγίμο κανάλι της διάταξης MOS. Αυτό το μοντέλο, προτάθηκε πρώτα από τον F. N. Hooge [11].
- Μεταβολές στον αριθμό των φορέων: Σε αυτό το μοντέλο, θεωρείται ως αποδεκτό ότι ο  $1/f$  θόρυβος οφείλεται στον θόρυβο δημιουργίας ανασυνδυασμού (G-R noise) στις μετακινήσεις των ηλεκτρονίων, μεταξύ της αγωγίμης περιοχής του υλικού του καναλιού και των παγίδων, οι οποίες βρίσκονται στο στρώμα του οξειδίου στην MOS διάταξη. Αυτό είναι γνωστό ως μοντέλο McWhorter [12].

Το επόμενο μοντέλο είναι μία σύντομη ανασκόπηση ενός αναθεωρημένου μοντέλου για τον  $1/f$  θόρυβο που προέρχεται από παγίδευση – έκλυση φορέων, το οποίο γενικεύει το μοντέλο McWhorter και, επίσης, παρουσιάζει τα συνδυασμένα αποτελέσματα των μεταβολών του αριθμού και της κινητικότητας των φορέων μαζί [13].

Σύμφωνα με το μοντέλο του McWhorter, η παγίδευση και η έκλυση των ηλεκτρονίων πραγματώνονται μέσω του φαινομένου της σήραγγος μεταξύ των αγωγίμων καταστάσεων των ηλεκτρονίων του καναλιού, και των παγίδων στο στρώμα του οξειδίου. Το φάσμα θορύβου, το οποίο ακολουθεί το μοντέλο McWhorter, υπακούει στον νόμο του  $1/f$ , εάν γίνουν διάφορες προσεγγίσεις απλούστευσης:

- οι διαδικασίες παγίδευσης και έκλυσης σε διαφορετικές παγίδες, είναι στατιστικά ανεξάρτητες,
- τα ποσοστά εμφάνισης του φαινομένου σήραγγος, για την παγίδευση και την έκλυση των ηλεκτρονίων από μία παγίδα, είναι ανάλογα με  $\exp[-x/l]$ , όπου  $x$  είναι η απόσταση, ή αλλιώς το βάθος, από την επιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και οξειδίου, και  $l$  η απόσταση στο φαινόμενο σήραγγος μέσα στο οξείδιο, η οποία είναι της τάξεως των 0.1nm,
- η χωρική κατανομή των παγίδων στο οξείδιο είναι ομοιόμορφη,
- για τις ενέργειες ενεργοποίησης,  $E_b$ , υπάρχει μία ομοιόμορφη κατανομή (Αυτή είναι μία προσέγγιση η οποία είναι κατά κάποιον τρόπο σιωπηρή, στο αυθεντικό μοντέλο McWhorter, η οποία προσέγγιση και είναι απαραίτητη για την λήψη ενός φάσματος θορύβου  $1/f$ , όπως υπογραμμίζεται μετέπειτα.).

Τώρα από την άλλη πλευρά, στην άλλη προσέγγιση των μεταβολών της κινητικότητας του Hooge, αυτό το μοντέλο προτείνει ότι οι μεταβολές του ρεύματος που ρέει μεταξύ απαγωγού και πηγής οφείλονται κυρίως στις μεταβολές στην κινητικότητα των φορέων στο αγωγίμο κανάλι [8,11]. Επίσης, με το μοντέλο του Hooge εισάγεται μία παράμετρο  $\alpha_H$ , που σχετίζεται με την ενεργή κινητικότητα ( $\mu_{eff}$ ) η οποία και είναι αποτέλεσμα δύο μηχανισμών: των κινητικοτήτων λόγω της σκέδασης στο πλέγμα ( $\mu_{lat}$ ) και στις ατέλειες του υλικού ( $\mu_{imp}$ ) [11]. Σε αυτό το μοντέλο, δεν λήφθηκαν υπόψιν οι άλλοι μηχανισμοί που μπορούν να επηρεάζουν τις μεταβολές της κινητικότητας των φορέων στο κανάλι, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, ή η σκέδαση Coulomb λόγω των ενεργών παγίδων στο οξείδιο της πύλης. Επίσης, υποτέθηκε ότι ο μηχανισμός της διασποράς πλέγματος συμβάλλει πολύ περισσότερο στον  $1/f$  θόρυβο, από ότι ο αντίστοιχος της διασποράς των ατελειών, ο οποίος συμβάλλει ελάχιστα [11]. Οι επιμέρους κινητικότητες,  $\mu_{lat}$  και  $\mu_{imp}$ , ενεργούν ανεξάρτητα και έχουν την ίδια ενεργειακή εξάρτηση η κάθε μία. Ως αποτέλεσμα αυτών των δεδομένων, η ενεργή κινητικότητα των φορέων του καναλιού υπολογίζεται με τον κανόνα του Matthiessen [11]:

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{1}{\mu_{lat}} + \frac{1}{\mu_{imp}} .$$

*Εξίσωση 2-1[11]*

Τότε, η παράμετρος του Hooge υπολογίζεται ως εξής [11]:

$$\alpha_H = \left( \frac{\mu_{eff}}{\mu_{lat}} \right) \alpha_{lat} ,$$

*Εξίσωση 2-2[11]*

όπου  $\alpha_{lat}$  είναι ο συντελεστής σκέδασης λόγω του μηχανισμού σκέδασης πλέγματος.

Έπειτα από αυτά τα δύο μοντέλα, ο Hung το 1990 [8] πρότεινε μία θεωρία, η οποία και αναλύθηκε συνοπτικώς στην αρχή της παραγράφου. Είναι ουσιαστικά οι δύο προηγούμενες θεωρίες ενοποιημένες, και είναι το μοντέλο ενιαίου αριθμού – μεταβολών κινητικότητας (Unified Number –Mobility (UNMF) fluctuations model), το οποίο βασίζεται πάνω στις μεταβολές της συγκέντρωσης των φορέων ανά μονάδα περιοχής, και στις αντίστοιχες της κινητικότητας των φορέων επιφάνειας. Στο μοντέλο UNMF θεωρείται ότι το συνολικό φορτίο στην αναστροφή, μαζί με το πλάτος του καναλιού, είναι σταθερά. Αντιθέτως, αυτό το φορτίο μαζί με το πλάτος του καναλιού, μεταβάλλονται γενικά λόγω της παγίδευσης και της έκκλησης φορέων, ή αλλιώς του κινούμενου φορτίου, από τις παγίδες στο οξειδίο. Το ρεύμα μεταξύ απαγωγού και πηγής, στην γραμμική περιοχή, σε μία διάταξη MOS η οποία έχει συνδεθεί με μία μικρή τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I_{DS} = qW \bar{\mu}_l N_{inv} E_y .$$

*Εξίσωση 2-3[8]*

Σε αυτόν τον τύπο,  $\bar{\mu}_l$  είναι η μέση κινητικότητα των φορέων του καναλιού στην γραμμική περιοχή,  $N_{inv}$  η συγκέντρωση των φορέων του καναλιού στην αναστροφή ανά μονάδα περιοχής,  $E_y$  το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του καναλιού,  $q$  το ηλεκτρικό φορτίο, και  $W$  το πλάτος του καναλιού. Εάν υπάρχει μία ενεργή παγίδα, ικανή να παγιδεύσει έναν φορέα στο κανάλι, τότε παρατηρείται μία κλασματική αλλαγή στο τοπικό ρεύμα [8]. Μία άλλη θεώρηση του μοντέλου είναι ότι η μέση κινητικότητα των φορέων του καναλιού διέπεται από δύο μηχανισμούς. Η ενεργή κινητικότητα επιφάνειας κυριαρχείται από την διασπορά Coulomb από το παγιδευμένο φορτίο στο οξειδίο, φαινόμενο το οποίο προβάλλεται από τους φορείς του καναλιού. Με αυτά τα δεδομένα, όπως και στο μοντέλο του Hooge, χρησιμοποιείται ο κανόνας του Matthiessen για την κατασκευή της τιμής της μέσης κινητικότητας των φορέων του καναλιού, ως εξής:

$$\frac{1}{\bar{\mu}_c} = \frac{1}{\mu_{oth}} + \frac{1}{\mu_{ox}} \rightarrow \frac{1}{\mu_{oth}} + \alpha N_t .$$

*Εξίσωση 2-4[8]*

Σε αυτήν την έκφραση, το  $\mu_{ox}$  είναι η κινητικότητα που περιορίζεται από την σκέδαση του φορτίου του οξειδίου πύλης, και το  $\mu_{oth}$  η κινητικότητα η οποία περιορίζεται από διάφορους μηχανισμούς όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η σκέδαση των ατελειών, η σκέδαση του

πλέγματος, και άλλους [14], α ο εκθέτης  $\alpha_H$  του Hooge του συνεχούς ρεύματος, και  $N$  ο αριθμός των κατελιγμένων παγίδων ανά μονάδα επιφάνειας. Σε αυτό το μοντέλο γίνονται οι εξής προσεγγίσεις:

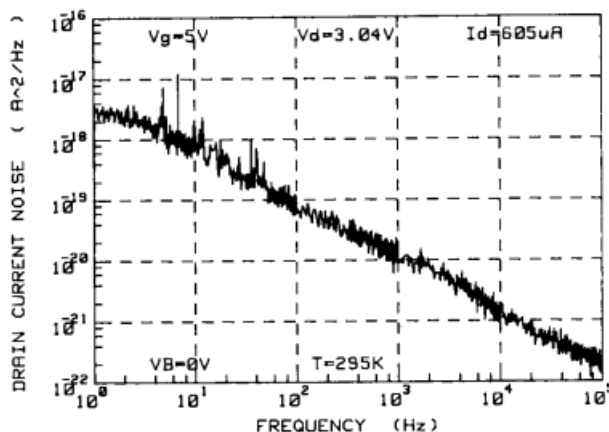
- η συγκέντρωση των παγίδων, κοντά στην επιφάνεια μεταξύ Si και οξειδίου, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη και διαφέρει μόνο κατά την ενέργεια,
- η πιθανότητα το σύνολο των φορέων να μπορέσει να διεισδύσει στο οξείδιο, μειώνεται εκθετικά.

Η πυκνότητα του φάσματος ισχύος του flicker θορύβου είναι ανάλογη του  $1/f^\gamma$ , όπου το  $\gamma$  κυμαίνεται από 0.7 έως και 1.3. Επίσης, η πυκνότητα φάσματος του ρεύματος μπορεί να εκφραστεί από τον συνοπτικό τύπο του Hooge, το μοντέλο του McWhorter, το μοντέλο ενιαίου αριθμού – μεταβολών κινητικότητας, και από άλλα. Στην σύντομη ανάλυση του συνοπτικού τύπου του Hooge, ο τύπος του θορύβου του ρεύματος του απαγωγού, παράγεται από τις μεταβολές της κινητικότητας των φορέων του καναλιού, και εκφράζεται ως εξής [8,15]:

$$S_I = \frac{\alpha_H I_{dc}^a}{N f^\gamma} = \frac{K_{1/f} I_{dc}^a}{f^\gamma}.$$

*Εξίσωση 2-5[8]*

Σε αυτή την σχέση,  $N$  είναι ο αριθμός των μεταβολών που δημιουργούν τον  $1/f$  θόρυβο, α και  $\gamma$  μεταβλητές ανάλογες προς την φυσική διαδικασία και κυμαίνονται ως εξής:  $\alpha=2$  και  $0.5 < \gamma < 1.5$  [15,16],  $\alpha_H$  η παράμετρος Hooge η οποία εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού,  $f$  η συχνότητα,  $K_{1/f}$  η αναλογία της παραμέτρου Hooge με τον αριθμό των μεταβολών, και  $I_{dc}$  το ρεύμα του απαγωγού. Παρατηρήθηκε ότι για υλικά υψηλής ποιότητας, η παράμετρος  $\alpha_H$  είναι μικρότερη κατά 2-3 τάξεις μεγέθους από την προτεινόμενη τιμή:  $2 \times 10^{-3}$  [Γ17]. Το διάγραμμα του φάσματος ισχύος του flicker θορύβου, είναι όπως το παρακάτω σχήμα 2-1, ενός MOSFET n-καναλιού.



Σχήμα 2-1. Διάγραμμα φάσματος ισχύος flicker θορύβου ενός MOSFET n-καναλιού [8].

### 2.3 Θόρυβος δημιουργίας - ανασυνδυασμού

Ο θόρυβος δημιουργίας - ανασυνδυασμού στους ημιαγωγούς προέρχεται από παγίδες που συλλαμβάνουν και εκπέμπουν τυχαία φορείς, προκαλώντας έτσι μεταβολές στον αριθμό των διαθέσιμων φορέων για την μεταφορά του ρεύματος στο εσωτερικό των συγκεκριμένων υλικών. Εάν οι φορείς παγιδευτούν σε ορισμένα κρίσιμα σημεία του υλικού, τότε εκείνο το παγιδευμένο φορτίο μπορεί επίσης να προκαλέσει μεταβολές στην κινητικότητα των φορέων, στον συντελεστή διάχυσης, στο ηλεκτρικό πεδίο, στο ύψος του φραγμού, καθώς και σε άλλα μεγέθη. Ως παγίδες αναφέρονται οι ηλεκτρονικές καταστάσεις εντός του απαγορευμένου εύρους ανάμεσα στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους, και η παρουσία τους οφείλεται στην παρουσία διαφόρων ατελειών στον ημιαγωγό και στις εξωτερικές επιφάνειές του. Σε έναν ημιαγωγό, όπως αναφέρθηκε και στο 2.1.3, μπορεί να συμβούν μεταβάσεις των παρακάτω μορφών:

- ανα-συνδυασμός ελεύθερου ηλεκτρονίου με οπή
- δημιουργία ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου και μίας ‘ελεύθερης’ οπής
- παγίδευση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου σε μία ‘ελεύθερη’ παγίδα
- παγίδευση μίας ελεύθερης οπής σε μία ‘κατειλημμένη’ παγίδα.

Ας σημειωθεί ότι μία παγίδα μπορεί να είναι ‘ελεύθερη’ (ουδέτερη), ή ‘κατειλημμένη’ (φορτισμένη). Η πυκνότητα του φάσματος ισχύος (PSD), των μεταβολών στον αριθμό των φορέων, σε αυτού του είδους τον θόρυβο, βρίσκεται ως εξής [18]:

$$S_N(f) = 4\overline{\Delta N^2} \frac{\tau}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2}.$$

*Εξίσωση 2-6[18]*

Όπου  $\tau$  είναι η σταθερά χρόνου των μεταβάσεων. Το σχήμα του συγκεκριμένου φάσματος είναι ουσιαστικά μία λορεντζιανή και απεικονίζεται στο σχήμα 2-5. Ο θόρυβος G-R είναι σημαντικός όταν το επίπεδο ενέργειας Fermi είναι κοντά στο επίπεδο ενέργειας της παγίδας μόνο κατά λίγα kT. Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος παγίδευσης  $\tau_c$  και έκλυσης  $\tau_e$  είναι σχεδόν ίσοι. Εάν το επίπεδο Fermi είναι αρκετά πιο πάνω ή πιο κάτω από το επίπεδο της ενέργειας της παγίδας, η παγίδα θα φορτιστεί ή θα γίνει ουδέτερη αρκετές φορές, με αποτέλεσμα να συμβαίνουν αρκετές μεταβάσεις που παράγουν θόρυβο. Η διακύμανση μπορεί να εκφραστεί ως εξής [11]:

$$\frac{1}{\overline{\Delta N^2}} = \frac{1}{N} + \frac{1}{N_{T,full}} + \frac{1}{N_{T,empty}}$$

*Εξίσωση 2-7[11]*

όπου  $N_{T,full}$ ,  $N_{T,empty}$  οι μέσες τιμές των κατειλημμένων, και μη, παγίδων αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου το επίπεδο της ενέργειας της παγίδας είναι ίση με το επίπεδο της ενέργειας Fermi, και υποθέτοντας ότι  $N \gg N_T$  ( $N_T = N_{T,full} + N_{T,empty}$ ),

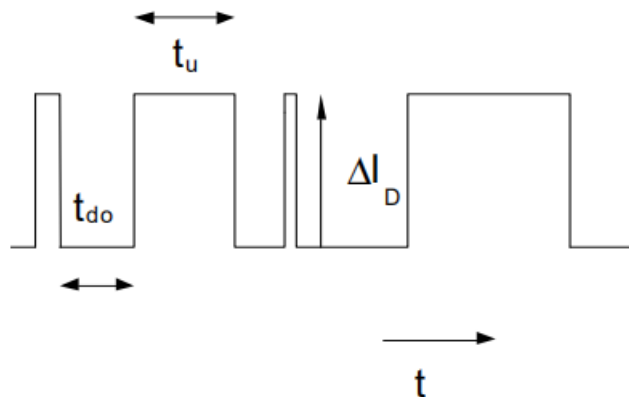
$$S_I = \frac{S_N}{N^2} I^2 = I^2 \frac{N_T}{N^2} \frac{\tau}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2}.$$

*Εξίσωση 2-8[15]*

Όπως φαίνεται από την εξίσωση 2-8, το PSD είναι ανάλογο με τον αριθμό των παγίδων και αντίστροφα ανάλογο με τον αριθμό των φορέων εις το τετράγωνο. Η σταθερά χρόνου και η σχετική ισχύς των παγίδων διαφέρουν (εξαρτάται από το επίπεδο ενέργειας της παγίδας και τη χωρική θέση). Για μια συγκεκριμένη κατανομή των σταθερών χρόνου, το PSD γίνεται ανάλογο με το  $1/f$ .

#### 2.4 Θόρυβος RTN σε διατάξεις MOS

Ο τυχαίος τηλεγραφικός θόρυβος RTN, ή θόρυβος ‘έκρηξης’, ή ‘popcorn’, είναι γνωστός από την εποχή των ηλεκτρονικών κενού. Παρατηρήθηκε για πρώτη φορά, σε διατάξεις βασισμένες σε MOS, το 1984 [19], και έχει γίνει αντικείμενο μελέτης και έρευνας για πάνω από 2 δεκαετίες [20,21,22]. Το σήμα του RTN θορύβου, μπορεί να παρατηρηθεί σε διατάξεις MOS, όπου το μέγεθος της περιοχής της πύλης είναι μικρότερο από  $1 \mu\text{m}^2$  [23]. Στην πιο βασική του μορφή, ένα σήμα θορύβου RTN αποτελείται από μία τυχαία ανταλλαγή θέσεως της τιμής του ρεύματος, ανάμεσα σε μία υψηλή και χαμηλή κατάσταση, όπως αποτυπώνεται στο σκίτσο του σχήματος 2-2.



*Σχήμα 2-2. Βασική μορφή σήματος RTN [24].*

Στην περίπτωση του σήματος των 2 επιπέδων, το σήμα RTN χαρακτηρίζεται από 3 παραμέτρους: τον χρόνο στον οποίο βρίσκεται το ρεύμα στην υψηλή κατάσταση ( $t_u$ ), τον χρόνο στον οποίο βρίσκεται στην λεγόμενη χαμηλή κατάσταση ( $t_{do}$ ), καθώς και το εύρος του σήματος του ρεύματος ( $\Delta I_D$ ). Οι χρόνοι της υψηλής και χαμηλής κατάστασης,  $t_u$  και  $t_{do}$ , κατανέμονται τυχαία μέσα στο σήμα, εν τούτοις βέβαια το εύρος  $\Delta I_D$  είναι συνήθως συγκεκριμένο και μπορεί να διασαφηνισθεί από το ίχνος του σήματος στον χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος του σήματος του ρεύματος του απαγωγού, είναι εύκολο να δειχθεί ότι σε πρώτης τάξης προσέγγιση, το σχετικό εύρος του σήματος RTN δίνεται από την εξίσωση [20]:

$$\frac{\Delta I_d}{I_d} = \frac{g_m}{I_d} \frac{q}{WLC_{ox}} \cdot (1 - \frac{x_t}{t_{ox}}),$$

*Εξίσωση 2-9[20]*

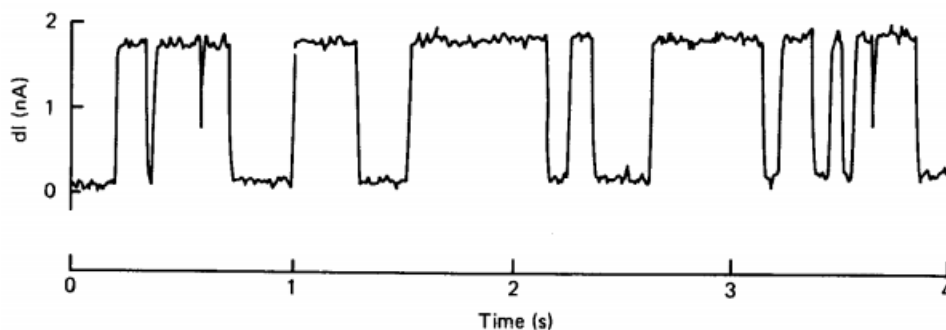
όπου  $x_t$  το βάθος στο οποίο βρίσκεται η παγίδα μέσα στο οξειδίο,  $g_m$  η διαγωγιμότητα,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου, και  $W, L, C_{ox}, t_{ox}$  τα χαρακτηριστικά του MOS τρανζίστορ (Σχήμα 2-4).

Στην ανάλυση του σήματος για επαρκώς μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι δυνατή η εύρεση της συνάρτησης της κατανομής της πιθανότητας αυτών των χρονικών διαστημάτων,  $t_u$  και  $t_{do}$ , η οποία φαίνεται να είναι η κατανομή Poisson, και μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$P_1(t) = \frac{1}{\tau_1} \exp(-\frac{t}{\tau_1})$$

*Εξίσωση 2-10[7]*

όπου  $\tau_1$  η μέση σταθερά χρόνου, και  $P_1(t)dt$  η πιθανότητα η υψηλή κατάσταση 1 να μην υποστεί μετάβαση για χρόνο  $t$ , και μετά θα γίνει η μετάβαση στο χρονικό διάστημα  $t$  και  $t+dt$ . Η μέση σταθερά χρόνου εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του MOS transistor, όπως τις τάσεις στην πύλη ( $V_{GS}$ ), στο υπόστρωμα ( $V_{BS}$ ), και στον απαγωγό ( $V_{DS}$ ). Με αυτό το δεδομένο της εξάρτησης, ένας μπορεί να υπολογίσει τις μέσες σταθερές χρόνου αντίστοιχα για την υψηλή κατάσταση και την χαμηλή, με τις σταθερές χρόνου παγίδευσης ( $\tau_c$ ) και έκλυσης ( $\tau_e$ ) φορέων από τις υπεύθυνες, για αυτά, παγίδες [22,7]. Με αυτά τα δεδομένα, είναι δυνατή η ανάλυση του σήματος RTN του ρεύματος του καναλιού, και η μελέτη των παγίδων του οξειδίου, δηλαδή η εύρεση πληροφοριών για το επίπεδο ενέργειας, τις διατομές τους, ακόμη και για τη θέση τους στο υλικό. Ειδικά, σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται μία ενεργή παγίδα, τότε που το σήμα RTN είναι 2 επιπέδων, και είναι σαν το σχήμα 2-2, ή σαν το, πιο αληθοφανές σχήμα 2-3, και σε αυτή την περίπτωση η παγίδα είναι σταθερή.

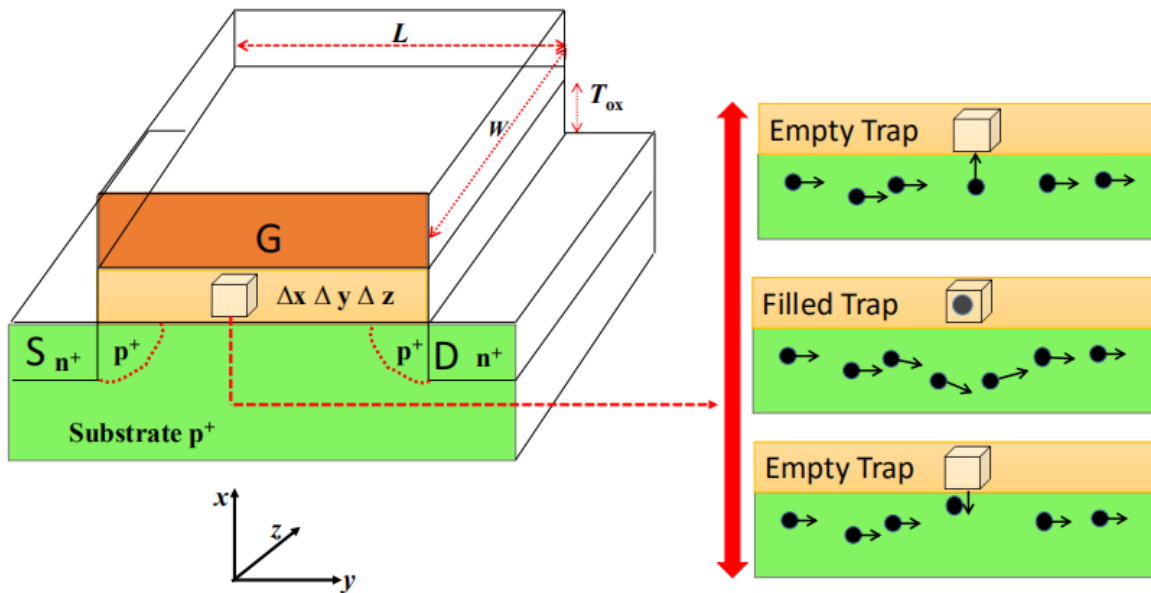


*Σχήμα 2-3. Σήμα RTN 2 επιπέδων [7].*

Ο θόρυβος RTN είναι ειδική περίπτωση του G-R θορύβου, ο οποίος προέρχεται από τα συνεχόμενα συμβάντα παγίδευσης και, αντίστοιχα, τα συνεχόμενα συμβάντα έκλυσης μεμονωμένων ή πολλαπλών φορέων, οι οποίοι βρίσκονται σε κέντρα ατελειών στην διεπιφάνεια



ανάμεσα στο Si και το SiO<sub>2</sub>, ή στο εσωτερικό του οξειδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-4 [22]. Αυτά τα κέντρα ατελειών ουσιαστικά είναι οι λεγόμενες παγίδες, που βρίσκονται στο οξείδιο.



Σχήμα 2-4. Συμβάντα παγίδευσης/έκλυσης ενός ηλεκτρονίου σε διάταξη MOSFET [25].

Η πιθανότητα παγίδευσης ενός φορέα από μία ατέλεια, η οποία βρίσκεται στο διηλεκτρικό της πύλης, θα είναι αρκετά μικρότερη στην περίπτωση της ενέργειας της παγίδας, στο ενεργειακό χάσμα του SiO<sub>2</sub>, η οποία είναι πιο κάτω από το ενεργειακό επίπεδο Fermi κατά λίγα  $k_B T$ . Αυτό επηρεάζει την πιθανότητα παρατήρησης σήματος RTN στην διάταξη MOS. Η πιθανότητα να βρεθεί μία παγίδα ‘κατειλημμένη’, στο οξείδιο της πύλης, ή στην διεπιφάνεια ανάμεσα στο Si και το SiO<sub>2</sub>, μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κατανομή Fermi – Dirac [26]:

$$f_t(E) = \frac{1}{1 + g e^{(E-E_F)/k_B T}},$$

Εξίσωση 2-11[26]

όπου  $E_F$  το ενεργειακό επίπεδο Fermi, και  $g$  ο παράγοντας εκφυλισμού μίας παγίδας, που τυπικά είναι ουσιαστικά η μονάδα ( $g = 1$ ). Αντιθέτως, η πιθανότητα να βρεθεί μία παγίδα ‘ελεύθερη’, είναι ουσιαστικά ίση με  $(1 - f_t(E))$ .

Το αντίστοιχο φάσμα θορύβου ενός σήματος RTN ακολουθεί τον τύπο της Λορεντζιανής (Σχήμα 2-5), και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση 2-12 [22]:

$$S_I = \frac{2(\Delta I_D)^2 \tau_0}{[4 + (\omega \tau_0)^2]}$$

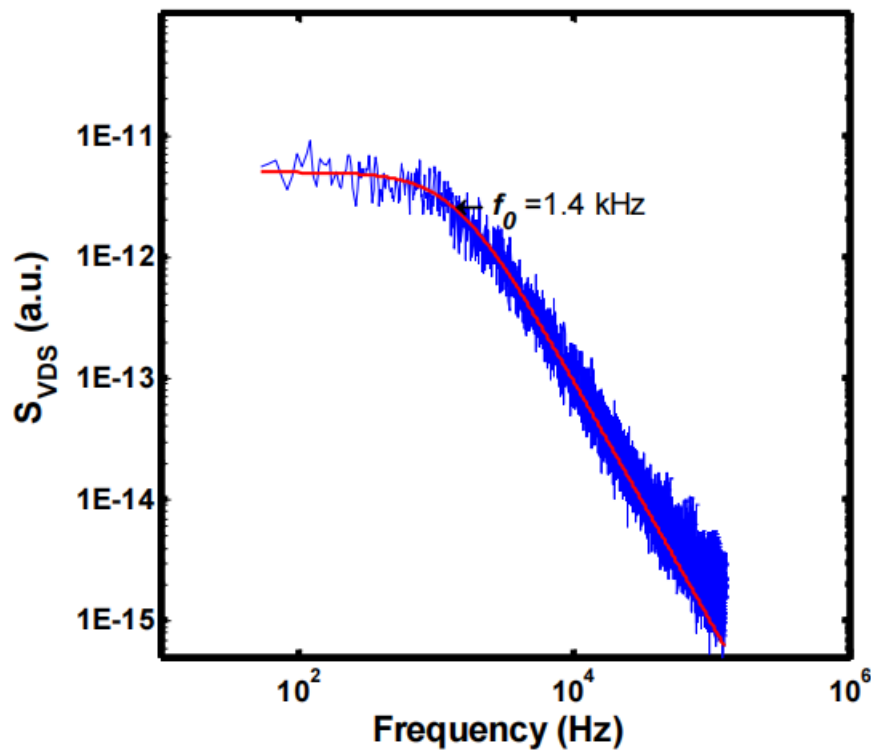
Εξίσωση 2-12[22]

όπου  $\Delta I_D$  το εύρος του σήματος,  $\tau_0$  η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου, και η ακτινική συχνότητα δίνεται από το  $\omega = 2\pi f$ . Από αυτόν τον τύπο, γίνεται κατανοητό ότι η πυκνότητα του φάσματος ισχύος του θορύβου του ρεύματος είναι σταθερή στις χαμηλές συχνότητες:  $f \ll f_c$ , και μειώνεται με σταθερό ρυθμό:  $1/f^2$  σε υψηλότερες συχνότητες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-3. Η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου  $\tau_0$  μπορεί να υπολογιστεί από την συχνότητα  $f_c$  η οποία, όπως φαίνεται και από το σχήμα 2-5, είναι η συχνότητα που αντιστοιχεί σε αυτήν στην γωνία, της γραμμής της πυκνότητας, που σχηματίζεται ανάμεσα στο σταθερό μέρος και στο φθίνων [24]. Για αυτή την συχνότητα, μπορεί να ειπωθεί ότι βρίσκεται από το μέγιστο του  $fS_I$ , με αποτέλεσμα:

$$2\pi f_c = \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_c}$$

Εξίσωση 2-13[24]

όπου  $\tau_e$ ,  $\tau_c$  είναι ουσιαστικά οι σταθερές χρόνου έκλυσης και παγίδευσης αντίστοιχα.



Σχήμα 2-5. Διάγραμμα φάσματος ισχύος σήματος RTN, το οποίο έχει σχήμα λορεντζιανής [25].

Αυτές οι σταθερές χρόνου, οι οποίες φαίνονται και στο σχήμα 2-2, καθορίζονται από την Shockley – Read – Hall στατιστική, και δίνονται από τις εξής εξισώσεις [22]:

$$\tau_c = \frac{1}{\sigma \cdot n_s \cdot v_{th}}$$

$$\tau_e = \frac{1}{\sigma \cdot n_l \cdot v_{th}}$$

*Εξίσωση 2-14[22]*

όπου  $v_{th}$  είναι η θερμική ταχύτητα,  $n_s$  η συγκέντρωση των φορέων στο οξειδίο της πύλης, ή στην επιφάνεια ανάμεσα στο Si και το SiO<sub>2</sub>, και  $n_l$  η ίδια συγκέντρωση όταν η ενέργεια της παγίδας ισούται με την ενέργεια του επιπέδου Fermi. Η παράμετρος  $\sigma$  μπορεί να υπολογιστεί από τον εξής τύπο:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{x_t}{\lambda}}$$

*Εξίσωση 2-15[22]*

όπου  $\sigma_0$  είναι η ενδογενής διατομή, μία αρκετά σημαντική ποσότητα η οποία χαρακτηρίζει την παγίδα,  $x_t$  το βάθος στο οποίο βρίσκεται η παγίδα μέσα στο οξειδίο, και  $\lambda$  το μήκος κατά το οποίο έχουμε εξασθένηση κατά την διάρκεια της διαδικασίας του φαινομένου της σήραγγος.

## 2.5 Διατάξεις μνήμης ReRAM

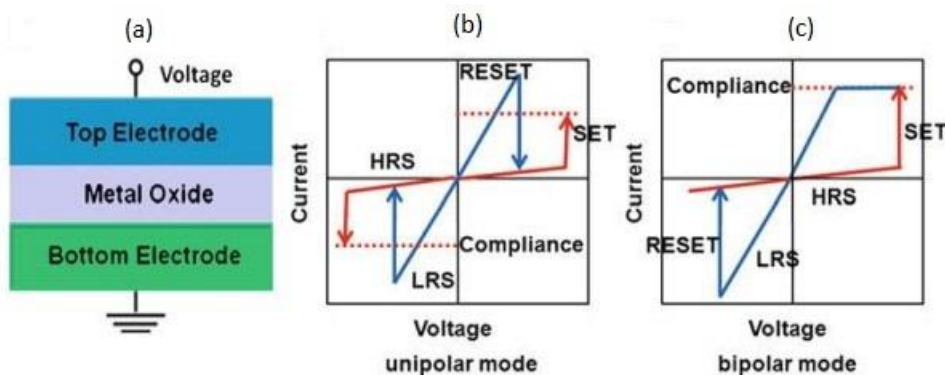
### 2.5.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις μνήμης έχουν καταστεί μία από τις μεγαλύτερες κατηγορίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Βασίζονται στην τεχνολογία CMOS (Complementary Metal – Oxide Semiconductor), ή αλλιώς στην τεχνολογία ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, και ταξινομούνται με κύριο κριτήριο την πτητικότητα τους. Περιγράφοντας αυτόν τον όρο της πτητικότητας, μπορεί να αναφερθεί ότι είναι η δυνατότητα μιας μνήμης να κρατάει την πληροφορία αποθηκευμένη, ειδικά κιόλας μετά από τη στιγμή της διακοπής της ηλεκτρικής τροφοδοσίας της μνήμης. Έτσι, σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, αυτού του είδους οι μνήμες χωρίζονται σε πτητικές (volatile), και μη-πτητικές (non - volatile) μνήμες [39].

Ο διαχωρισμός των ηλεκτρονικών διατάξεων μνήμης μπορεί να γίνει και με ένα άλλο κριτήριο. Αυτό το κριτήριο είναι, ουσιαστικά, και ο τρόπος λειτουργίας τους, αλλιώς ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εγγραφή, η αναζήτηση, η ανάγνωση, και η διαγραφή της πληροφορίας στην και από την μνήμη. Έτσι σύμφωνα με αυτά, έχουμε τις μνήμες να μπορούν να διαχωριστούν σε RAM (Random Access Memory), ή αλλιώς μνήμες τυχαίας προσπέλασης, και ROM (Read – Only Memory), ή αλλιώς μνήμες μόνο για ανάγνωση. Το είδος μνήμης τυχαίας προσπέλασης RAM, το οποίο έχει μεγαλύτερη απήχηση την δεδομένη χρονική στιγμή, είναι η DRAM (Dynamic RAM), ή αλλιώς μνήμη δυναμικής τυχαίας προσπέλασης, ενώ για την ROM είναι η FLASH (μνήμη ‘αστραπή’). Όσον αφορά την SRAM (Static Random Access Memory), μνήμη στατικής τυχαίας προσπέλασης, αποτελεί ένα εξαιρετικά γρήγορο είδος προσωρινής μνήμης στο

εσωτερικό συνήθως των επεξεργαστών (για παράδειγμα τα επίπεδα L1, L2 cache) με ταχύτητες προσπέλασης μικρότερες των 10 ns, αλλά πολύ μικρής πυκνότητας, δηλαδή της τάξης των KB – MB, και αρκετά μεγάλους κατασκευής [39].

Η παρατήρηση ότι τα οξειδία γενικά λειτουργούν σαν μονωτές, και ότι μπορούν να συμβάλλουν σε ένα απότομο γεγονός μετάβασης σε μία αγώγιμη κατάσταση, είναι γνωστή για πάνω από 40 χρόνια [27]. Αυτή η παρατήρηση για τα φαινόμενα αυτά, οδηγεί στις μνήμες ReRAM, ή αλλιώς τις μνήμες τυχαίας προσπέλασης εναλλαγής αντίστασης. Η δομή των συσκευών αυτών είναι ένα κομμάτι υλικού διηλεκτρικού, το οποίο είναι μεταξύ δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων, όπως στο σχήμα 2-6 στο (a), δομή η οποία ονομάζεται MIM (Metal – Insulator – Metal) δομή, ή αλλιώς δομή μέταλλο – μονωτή – μέταλλο. Η λειτουργία των μνημών ReRAM απαιτεί, κυρίως δύο διακριτές καταστάσεις αντίστασης, την υψηλή (High Resistance State – HRS) και τη χαμηλή (Low Resistance State – LRS). Η διαδικασία αλλαγής από την HRS κατάσταση στην LRS ονομάζεται SET, ενώ η αντίστροφη διαδικασία RESET (Σχήμα 2-6, (b) και (c)). Παρά το γεγονός ότι ο μηχανισμός μετάβασης από την μία κατάσταση στην άλλη δεν είναι πλήρως κατανοητός, έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια έχουν φανερώσει τη δημιουργία ενός αγώγιμου μονοπατιού (Conducting Filament – CF) εντός του διηλεκτρικού στρώματος που ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια μεταξύ τους [28].



Σχήμα 2-6. (a) Δομή διάταξης ReRAM. (b) Διαδικασίες SET, RESET σε μονοπολικό και (c) διπολικό τρόπο λειτουργίας [37].

## 2.5.2 Ιστορία

Οι πρώτες αναφορές σχετικά με αυτά τα φαινόμενα εναλλαγής αντίστασης χρονολογούνται από την δεκαετία του 1960, όπου τότε γινόντουσαν διάφορες μελέτες σε διάφορες ReRAM με διάφορα υλικά οξειδίου, όπως  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , και άλλα. Όμως, αυτόν τον καιρό αυτές οι μελέτες δεν έδειχναν προς την κατεύθυνση μίας συγκεκριμένης εφαρμογής, με αποτέλεσμα να παραμένουν μόνο στον τομέα των θεωρητικών επιστημονικών μελετών. Η πρόσφατη αναβίωση του ενδιαφέροντος για το φαινόμενο της εναλλαγής αντίστασης, ήλθε στα τέλη της δεκαετίας του 1990, αρχικά με σύνθετα οξειδία μετάλλου, όπως τα οξειδία του περοβσκίτη των  $\text{SrTiO}_3$  [29],  $\text{SrZrO}_3$  [30]. Η ερευνητική δραστηριότητα άρχισε να εντείνεται μετά το 2004, όταν η εταιρία Samsung παρουσίασε ένα έγγραφο [31] στην Διεθνή Συνάντηση Ηλεκτρονικών Συσκευών (International Electron Devices Meeting - IEDM), που παρουσίαζε μονάδες μνήμης οξειδίου του νικελίου (NiO), οι οποίες ήταν ενσωματωμένες με συμβατικά 0,18 μm ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα τεχνολογίας CMOS, σε συσκευή δομής ενός τρανζίστορ - μιας

αντίστασης (one – transistor – one – resistor, ή αλλιώς 1T1R). Αυτή η μελέτη, περιλάμβανε ένα πιο πλήρες σύνολο δεδομένων προσανατολισμένων στην τεχνολογία μνήμης, όπως διατήρηση δεδομένων, αντοχή, και χαρακτηριστικά προγραμματισμού που υποδηλώνουν ότι μια τεχνολογία μνήμης που βασίζεται στην εναλλαγή αντίστασης μπορεί να είναι εφικτή.

Με την διαρκή μείωση του μεγέθους της διαστάσεως (2 - D) μνήμης flash NAND [32], ήταν απαραίτητη η εύρεση τεχνολογίας η οποία θα επέτρεπε την αύξηση αυτής της μείωσης ακόμη και σε αρκετά υψηλότερη πυκνότητα, ακόμη πιο γρήγορη ταχύτητα, και ακόμη χαμηλότερο κόστος, και αυτή η εύρεση τέθηκε στη συζήτηση μεταξύ της βιομηχανίας και της ακαδημίας. Η ReRAM, ως μία από τις προτάσεις για συνέχιση αυτής της μείωσης της μνήμης flash NAND ως μαζικό χώρο αποθήκευσης, άρχισε να προσελκύει ξανά την προσοχή.

Η δεκαετία μεταξύ 2005 και 2015 ήταν η χρυσή εποχή της έρευνας και της ανάπτυξης της ReRAM. Υπήρχαν τα κύρια ορόσημα της ανάπτυξης των ReRAM, όπως η πρώτη ReRAM με βάση το NiO με πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά, και αξιοσημείωτη αξιοπιστία συσκευής [31], το πρώτο ενσωματωμένο chip 16 - Gb CBRAM, ή αλλιώς μνήμη τυχαίας προσπέλασης αγωγίμης γέφυρας [33], το πρώτο ενσωματωμένο προϊόν ReRAM κόμβου 40 - nm [34] κ.λπ.

Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος σε ότι αφορά την ανακάλυψη νέων ενεργών υλικών, πέραν του κυρίαρχου  $TiO_2$ , όπως και των  $HfO_2$ ,  $Al_2O_3$ , και  $Ta_2O_5$ . Έχει γίνει ιδιαίτερη προσπάθεια στη μείωση των τάσεων και των ρευμάτων λειτουργίας, ενώ παράλληλα έχουν παρατηρηθεί πολύ γρήγοροι χρόνοι εναλλαγής (~ns). Η δυνατότητα ευκρινούς προσδιορισμού πολλαπλών στάθμων αντίστασης καθιστά τις μνήμες αυτές ικανές για αποθήκευση παραπάνω του ενός bit πληροφορίας ανά κελί (Multi - Level Cell – MLC), όταν παράλληλα διατάξεις υψηλής πυκνότητας, όπως οι crossbar, δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλης χωρητικότητας ReRAM.

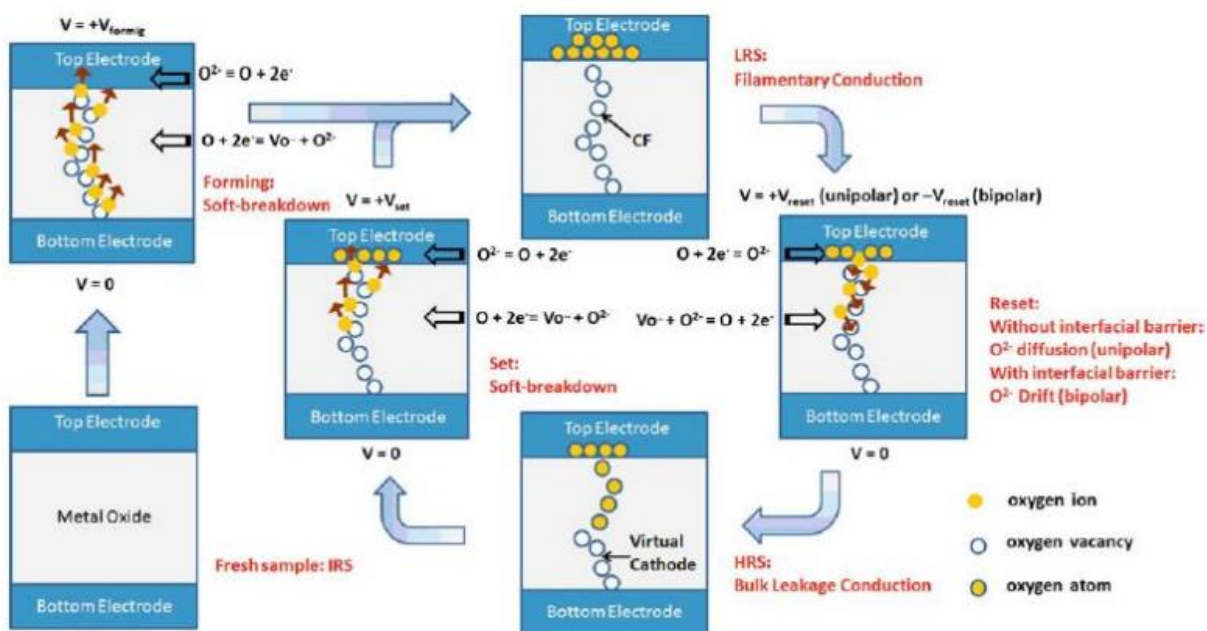
### 2.5.3 Η αρχή λειτουργίας (Το φαινόμενο εναλλαγής αντίστασης)

Το φαινόμενο αυτό της εναλλαγής αντίστασης (Resistive Switching - RS) μελετήθηκε αρκετά πριν τις πρώτες διατάξεις μνήμης. Το φαινόμενο της υστέρησης ανακαλύφθηκε από τον Sir James Alfred Ewing στα τέλη του 19ου αιώνα, ο οποίος ερεύνησε και μελέτησε τη συμπεριφορά που είχαν τα μέταλλα κατά την έκθεσή τους σε μαγνητικό πεδίο. Έπειτα από αυτό, αποκαλύφθηκαν βρόγχοι υστέρησης στη συμπεριφορά των μαγνητικών, σιδηροηλεκτρικών, ελαστομερών, και άλλων υλικών. Αυτό το φαινόμενο, πρόκειται για εκείνο ακριβώς που παρατηρείται σε συστήματα και διατάξεις που εμπεριέχουν κάποιου είδους αδράνεια, έτσι ώστε η μεταβολή της τιμής μιας φυσικής ποσότητας να «αργεί» να γίνει πραγματικότητα, εν αντιθέσει με τον μηχανισμό που την προκαλεί [35].

Με τον ίδιο περίπου τρόπο έγινε και η πρώτη παρατήρηση της μεταβολής της αντίστασης το 1938, από τους Reich και Depp, όπου σημειώθηκε η δυναμική απόκριση της αντίστασης σωλήνων εκκένωσης. Το 1971 ήρθε η πρώτη θεώρηση ενός νέου ηλεκτρονικού στοιχείου που συνδύαζε τον βρόγχο υστέρησης και τη δυναμική συμπεριφορά της αντίστασης από τον Chua [Γ6]. Αυτό το στοιχείο το ονόμασε memristor, από τη σύνθεση των λέξεων memory και resistor, γιατί θεώρησε πως η αντίσταση δεν είναι σταθερή, αλλά είναι εξαρτώμενη από το ιστορικό της διάταξης, όσον αφορά το ρεύμα που προηγουμένως έχει περάσει από αυτήν. Δηλαδή όπως

συμπεραίνεται, η αντίσταση, εξαρτάται από την ποσότητα και την κατεύθυνση του ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο στο παρελθόν διέρρηε τη διάταξη. Με λίγα λόγια, η διάταξη έχει μνήμη.

Οι ερευνητές, αργότερα, θεώρησαν πως το φαινόμενο της μεταβολής της αντίστασης προέρχεται από την ανακατανομή των οπών μέσα στο διηλεκτρικό. Αυτό δίνει ως αποτέλεσμα, τον σχηματισμό περιοχών διαφορετικής αντίστασης (Σχήμα 2-7). Δηλαδή, μία περιοχή, η οποία είναι πλούσια σε οξυγόνο (undoped) η οποία συμπεριφέρεται ως μονωτής, και μία όπου υπάρχουν πάρα πολλές κενές θέσεις οξυγόνου (doped), η οποία έχει μικρότερη αντίσταση. Για παράδειγμα, με την διάταξη ReRAM Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt, ήδη από την κατασκευή της το λεπτό στρώμα του TiO<sub>2</sub> έχει πολλές V<sub>o</sub><sup>+2</sup>, δηλαδή οπές, στο εσωτερικό του. Με την εφαρμογή θετικής τάσης στο πάνω ηλεκτρόδιο της MIM διάταξης, τα ιόντα οξυγόνου (O<sup>2-</sup>), τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα, καταλαμβάνουν τις οπές και προσεγγίζουν το ηλεκτρόδιο. Με αυτό το φαινόμενο, δημιουργείται ένας αγωγίμος δρόμος, ένα αγωγίμο μονοπάτι (conductive filament – CF), όπως δείχνει και το σχήμα 2-7, μέσα στον συνολικό όγκο του διηλεκτρικού. Τα O<sup>2-</sup> συσσωρεύονται κοντά στο ηλεκτρόδιο, και έτσι συντελείται μεταφορά των ηλεκτρονίων. Αυτή η κατάσταση αποτελεί την κατάσταση χαμηλής αντίστασης (Low Resistance State – LRS) ή αλλιώς την διαδικασία SET. Ενώ, με την εφαρμογή μιας τάσης αντίθετης πολικότητας, τα O<sup>2-</sup>, και κατά συνέπεια τα ηλεκτρόνια, απωθούνται στο σύνολο του όγκου του διηλεκτρικού «πηδώντας» από V<sub>o</sub><sup>+2</sup> σε V<sub>o</sub><sup>+2</sup>, ή αλλιώς από οπή σε οπή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ρήξη του CF στο πάνω μέρος. Η συγκεκριμένη κατάσταση δίνει μεγαλύτερη αντίσταση (High Resistance State – HRS), η οποία είναι γνωστή και ως διαδικασία RESET (Σχήμα 2-7) [37].



Σχήμα 2-7. Σχηματική αναπαράσταση διαδικασιών SET, RESET της διάταξης ReRAM Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt [38].

Σε ηλεκτρονικό επίπεδο, η ανάλυση του μηχανισμού αγωγιμότητας των διατάξεων ReRAM καθίσταται εφικτή προσαρμόζοντας τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος I-V. Στην LRS κατάσταση, οι περισσότερες αναφορές μιλάνε για ωμική σχέση. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά

αγωγιμότητας στην κατάσταση HRS μπορούν να έρθουν σε συμφωνία με διάφορα μοντέλα, όπως την ωμική συμπεριφορά ( $I \sim V$ ), την Poole-Frenkel εκπομπή ( $\log(I/V) \sim V^{1/2}$ ), την εκπομπή Schottky ( $\log(I) \sim V^{1/2}$ ), καθώς και με το μοντέλο του περιορισμένου ρεύματος λόγω φορτίων χώρου (Space Charge Limited Current-SCLC), το οποίο υπάρχει αρχικά ωμική περιοχή  $I \sim V$ , και από την περιοχή του τετραγωνικού νόμου του Child ( $I \sim V^2$ ) [37].

#### 2.5.4 Κατηγοριοποίηση

Με αυτά τα δεδομένα, η κατηγοριοποίηση των ReRAM πραγματοποιείται ανάλογα με τα χρησιμοποιημένα υλικά, και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, και με το αν χρειάζονται ηλεκτρο-μορφοποίηση (electroforming). Ξεκινώντας από τον τρόπο λειτουργίας, υπάρχει ο μονοπολικός (unipolar), όπου το φαινόμενο SET / RESET λαμβάνει χώρα ακόμα και σε συνθήκες ίδιας πολικότητας. Δηλαδή, η πιθανότητα η μνήμη να βρίσκεται σε κατάσταση SET / RESET εξαρτάται απλά και μόνο από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης και όχι από την πολικότητά της. Άρα, όταν η εξωτερική τάση που εφαρμόζεται είναι ίδια με την  $V_{RESET}$ , τότε η αντίσταση αυξάνει απότομα και η διάταξη μεταβαίνει στην κατάσταση υψηλής αντίστασης, δηλαδή την HRS. Αν η τάση συνεχίσει να αυξάνεται και φτάσει στην τάση  $V_{SET}$ , τότε η διάταξη μεταβαίνει στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης, δηλαδή την LRS. Συνήθως, ισχύει ότι η τάση  $V_{SET}$  είναι μεγαλύτερη από την  $V_{RESET}$ . Η καμπύλη I-V είναι συμμετρική ως προς την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση, και άρα από αυτό, συμπεραίνεται ότι αντίστοιχα φαινόμενα μπορούν να συμβούν και για θετικές και για αρνητικές τάσεις.

Σε αντίθεση με τον μονοπολικό, ο διπολικός (bipolar) τρόπος λειτουργίας, ο οποίος βρίσκεται και στις διατάξεις, εξαρτάται από την πολικότητα της τάσης, και μόνο με αυτήν (Σχήμα 2-6 (c)). Για τη μετάβαση στην κατάσταση RESET, απαιτείται εφαρμογή αρνητικής τάσης, η οποία οδηγεί τη διάταξη στην κατάσταση HRS. Αντίστοιχα, μία θετική τάση χρειάζεται για τη μετάβαση στην κατάσταση SET. Υπάρχει η πιθανότητα οι μεταβάσεις να συμβαίνουν και αντίστροφα, όπου η διαδικασία SET να λαμβάνει χώρα για αρνητικές τάσεις, όταν η RESET εμφανίζεται για θετικές. Σε ορισμένα υλικά έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα συνύπαρξης των δύο τύπων RS [40].

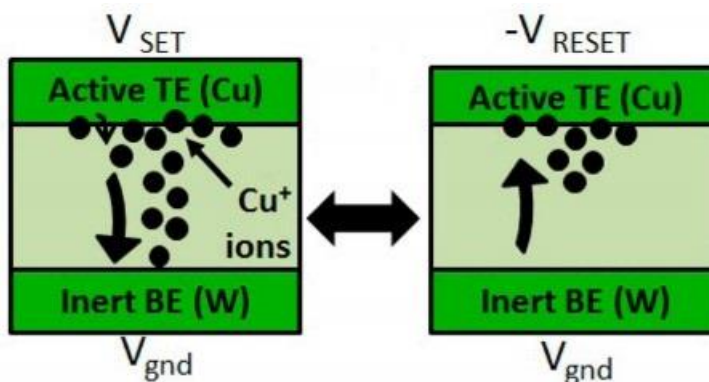
Η διαδικασία της ηλεκτρομορφοποίησης, είναι μια διαδικασία που απαιτείται για να ξεκινήσει να εμφανίζεται το φαινόμενο της εναλλαγής αντίστασης. Ουσιαστικά, εφαρμόζοντας μια σχετικά υψηλή τάση διαρρηγνύεται το διηλεκτρικό (dielectric breakdown), και δημιουργούνται τα πρώτα αγώγιμα μονοπάτια στον όγκο του [41]. Πρόκειται, δηλαδή, για μια διαδικασία όπου, τοπικά το μονωτικό υλικό μεταπίπτει σε αγώγιμο υπό την επίδραση ισχυρού εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Για την αποφυγή καταστροφικών, για το διηλεκτρικό, ρευμάτων που θα έχουν ως συνέπεια την πλήρη κατάρρευσή του (hard dielectric breakdown), ορίζεται σε κάθε μέτρηση ένα άνω όριο, μέχρι το οποίο θα αυξάνεται για το ρεύμα  $I_{cc}$  (compliance current).

Έχει γίνει η παρατήρηση πως μετά την κατάρρευση του  $\text{SiO}_2$ , σχηματίζεται υποστοιχειομετρικό  $\text{SiO}_x$  ( $x < 2$ ), με αποτέλεσμα την μείωση του ενεργειακού χάσματος, τη διάλυση χημικών δεσμών και την τοπική θέρμανση Joule (local Joule heating), λόγω του υψηλού ρεύματος που πέρασε από την διήθηση [42]. Στο διπολικό  $\text{TiO}_2$ , οι Yang et al. θεωρούν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά από το πεδίο λόγω φαινομένου Joule έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών θέσεων οξυγόνου, οι οποίες ολισθαίνουν προς το κάτω ηλεκτρόδιο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται

τα πρώτα τοπικά αγώγιμα μονοπάτια, ενώ ταυτόχρονα ιόντα οξυγόνου ολισθαίνουν προς την άνοδο [43].

Μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ταξινομήσεις, είναι η ταξινόμηση η οποία βασίζεται στους μηχανισμούς με τους οποίους επιτελείται η αρχή λειτουργίας των ReRAM, και η οποία περιλαμβάνει τον μηχανισμό ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης (electrochemical metallization mechanism - ECM) [44], τον μηχανισμό αλλαγής σθένους (valence change mechanism - VCM) [45], και τον θερμο-χημικό μηχανισμό (thermo - chemical mechanism-TCM) [46]. Μία εξήγηση αυτών των μηχανισμών γίνεται παρακάτω.

- Στον ECM μηχανισμό, οι ReRAM βασίζονται στην κίνηση που προκαλείται από το ηλεκτρικό πεδίο των μεταλλικών ιόντων, και είναι γνωστές ως ReRAM ηλεκτροχημικής επιμετάλλωσης (ECM-ReRAM), ή και ReRAM αγώγιμης γέφυρας (CBRAM) [47]. Η εναλλαγή, σε αυτή την περίπτωση, ενεργοποιείται από κατιόντα που οδηγούνται από το ηλεκτρικό πεδίο και σχηματίζουν ένα μεταλλικό αγώγιμο μονοπάτι (CF) στο διηλεκτρικό [47]. Σε μία ECM-ReRAM, η δομή MIM αποτελείται συνήθως από ένα ηλεκτροχημικά ενεργό ή μεταλλικό ηλεκτρόδιο όπως το χαλκό (Cu), ένα αδρανές, αντίθετα, ή ηλεκτρόδιο όπως ο λευκόχρυσος (Pt), και μεταξύ τους έναν ηλεκτρολύτη [48]. Όταν είναι σε SET η διάταξη, τα μεταλλικά ιόντα από το ενεργό ηλεκτρόδιο διαχέονται στον μονωτή και μειώνονται όταν φθάνουν στο αδρανές ηλεκτρόδιο, σχηματίζοντας έτσι ένα CF [47,48]. Ενώ, κατά το RESET, τα μεταλλικά άτομα στο CF οξειδώνονται, επέρχεται ρήξη του CF και εμποδίζεται η ροή του ρεύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-8 [47,48].

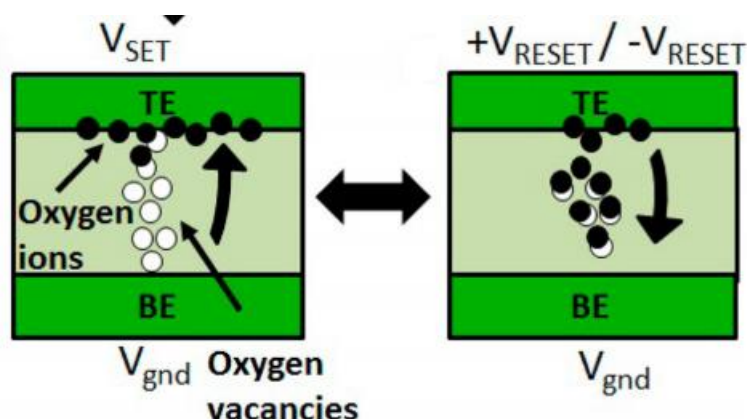


Σχήμα 2-8. SET, RESET σε ECM μηχανισμό [49].

- Στον VCM μηχανισμό, οι ReRAM βασίζονται στην κίνηση ιόντων οξυγόνου στο διηλεκτρικό, και είναι γνωστές ως ReRAM αλλαγής σθένους (VCM-ReRAM) [47]. Η δομή τους είναι ασύμμετρη, και αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο Schottky, το οποίο μπορεί να είναι συνήθως ένα ευγενές μέταλλο ή ένα αδρανές νιτρίδιο (TiN ή TaN), ένα ωμικό ενεργό ηλεκτρόδιο από αναγωγικό μέταλλο, όπως Ta, Hf ή Ti, και για μονωτή τα πιο συνηθισμένα οξείδια είναι τα TaO<sub>x</sub>, HfO<sub>x</sub> και TiO<sub>x</sub>, όπου ο δείκτης x χρησιμοποιείται για να υποδείξει ότι είναι υποστοιχειομετρικά. Όταν εφαρμόζεται κατάλληλη τάση, τα άτομα οξυγόνου απομακρύνονται από τον μονωτή και μετακινούνται προς το ηλεκτρόδιο αφήνοντας πίσω τους κενές θέσεις οξυγόνου στο διηλεκτρικό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-9. Κατά συνέπεια, δημιουργούνται ατέλειες, σχηματίζοντας CF [50]. Σε μία VCM-



ReRAM, αδρανή ηλεκτρόδια, όπως Pt, χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρεμπόδιση της ροής ιόντων από τα ηλεκτρόδια. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ενεργά ηλεκτρόδια που βοηθούν τη διαδικασία εναλλαγής αντίστασης [48], και παρουσιάζουν συμπεριφορά διπολική. Η κατηγορία αυτή έχει λάβει σημαντική έμφαση στο ερευνητικό επίκεντρο τα τελευταία χρόνια λόγω της επίδειξης υψηλής αντοχής, υψηλής ταχύτητας εναλλαγής, μεγάλης διάρκειας αντοχή μνήμης, και χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια εναλλαγής αντίστασης [51].

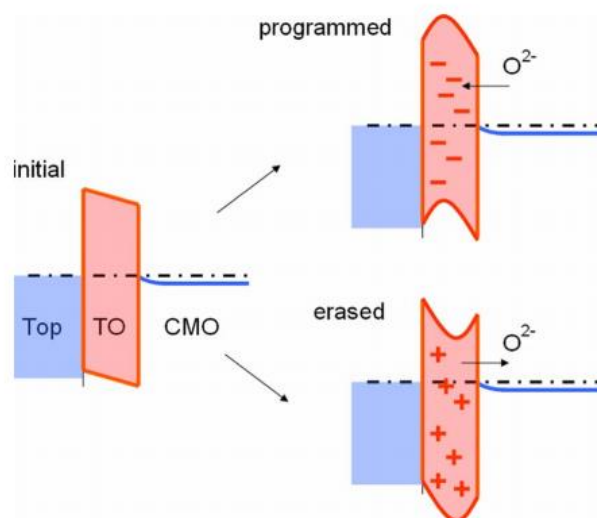


Σχήμα 2-9. SET, RESET σε VCM μηχανισμό [46].

- Στον TCM μηχανισμό, οι ReRAM εκμεταλλεύονται αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (reduction – oxidation - redox) που προκαλούνται από την θερμότητα, και είναι γνωστές ως θερμοχημικές ReRAM (TCM ReRAM) [47]. Σε αυτές τις διατάξεις η δομή δεν χρειάζεται να είναι απαραίτητα ασύμμετρη, και το πιο κοινό οξείδιο εδώ είναι το NiO. Οι διαδικασίες σχηματισμού / ρήξης του CF συμβαίνουν λόγω του φαινομένου της δημιουργίας - ανασυνδυασμού των ιόντων, το οποίο λαμβάνει χώρα από τις redox αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις redox επιταχύνονται με την θέρμανση Joule, και την επακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας στο διηλεκτρικό [47]. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας RESET, η αρχική διάλυση ενός CF σε ένα σημείο του, έχει ως αποτέλεσμα μια τοπική μείωση της περιοχής της διατομής που οδηγεί σε μία ξαφνική τοπική αύξηση ρεύματος [52]. Αυτό το φαινόμενο, αυξάνει τη θερμοκρασία του CF, η οποία επιταχύνει περαιτέρω τη διάλυσή του, με αποτέλεσμα μια αυτοεπιταχυνόμενη διαδικασία διάλυσης του CF [52]. Οι διατάξεις με αυτόν τον μηχανισμό είναι μονοπολικές, με αυτήν την μονοπολικότητα να είναι υπεύθυνη για την αύξηση του ενδιαφέροντος για ReRAM εναλλαγής αντίστασης οξειδίου, μετά την αναφορά μιας δοκιμαστικής δομής που χρησιμοποίησε μία μονοπολική διάταξη με NiO [31]. Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον για τον μονοπολικό μηχανισμό έχει μειώσει το αντίστοιχο για τις συσκευές διπολικού μηχανισμού, λόγω της υψηλής απαιτήσης RESET ρεύματος (απαιτείται 100 A για την διατήρησή του [52]), της αστάθειας της κατάστασης RESET [53], και της αδυναμίας επίδειξης αντοχής πέρα από  $10^6$  κύκλους.

Τέλος, υπάρχει και μία κατηγορία η οποία έχει μια ξεχωριστή διαφορά από τις άλλες τρεις κατηγορίες, πραγματεύεται στην διαδικασία εναλλαγής που πραγματοποιείται σε ολόκληρη την ενεργή περιοχή της συσκευής, και η οποία ονομάζεται διπολική χωρίς ουσιαστικά

αγώγιμο μονοπάτι. Η δομή έχει συνήθως ένα οξείδιο διπλής στιβάδας που περιβάλλεται από τα δύο ηλεκτρόδια. Και τα δύο ηλεκτρόδια είναι αδρανή, όπως για παράδειγμα τα Pt [54], και TiN [55]. Το οξείδιο διπλής στιβάδας αποτελείται από ένα αγώγιμο οξείδιο μετάλλου (conducting metal oxide - CMO), το οποίο είναι αγώγιμο λόγω έλλειψης ιόντων οξυγόνου, και ένα στοιχειομετρικό μονωτικό οξείδιο μετάλλου (insulating metal oxide - IMO). Σε αυτή την περίπτωση, η ηλεκτρο-μορφοποίηση δεν απαιτείται απαραίτητα [54], γεγονός το οποίο μπορεί να καταστεί ως ένα είδος διαφοροποίησης διαδικασίας από συσκευή σε συσκευή. Σε αυτή την κατηγορία, ο προτεινόμενος μηχανισμός βασίζεται στη δημιουργία και το διαχωρισμό ζευγαριών οπών κάτω από ένα μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο (10 MV / cm ή υψηλότερο), όπως στον μηχανισμό με αγώγιμο μονοπάτι. Οι πυκνότητες των ρευμάτων είναι πολύ χαμηλότερες από ότι στις συσκευές με CF [55]. Η προτεινόμενη μη - βασική διαδικασία μεταγωγής απεικονίζεται με διάγραμμα στο σχήμα 2-10 [54]. Η εναλλαγή συμβαίνει όταν μια θετική τάση τοποθετείται στο ηλεκτρόδιο, το οποίο είναι από την πλευρά του αγώγιμου μεταλλικού οξειδίου, αντλώντας ανιόντα οξυγόνου από το IMO και προσελκύοντας θετικά φορτισμένες οπές στο στρώμα IMO. Αυτό φαίνεται ως η κατάσταση ‘διαγραφής’ (‘erased’), στην οποία το στρώμα του IMO μειώνεται και η ηλεκτρονική αγωγιμότητα ενισχύεται σημαντικά. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας RESET, τα ανιόντα οξυγόνου παρασύρονται πίσω στο μονωτικό στρώμα, τροποποιώντας τη ζώνη, όπως φαίνεται στην ‘προγραμματισμένη’ (programmed) κατάσταση στο σχήμα 2-10. Σε αυτήν την περίπτωση, το φράγμα ηλεκτρονίων στο IMO είναι πολύ υψηλότερο (προκύπτει από την αρνητική φόρτιση των ανιόντων οξυγόνου), και η ηλεκτρονική αγωγιμότητα μειώνεται. Το καθοριστικό χαρακτηριστικό μίας διάταξης ReRAM χωρίς αγώγιμο μονοπάτι, είναι η γραμμική εξάρτηση του ρεύματος σε όλες τις καταστάσεις από την περιοχή της συσκευής, υποδεικνύοντας μια σταθερή πυκνότητα ρεύματος.



Σχήμα 2-10. Διπολική διαδικασία SET, RESET με μη-βασική διαδικασία μεταγωγής [54].

### 2.5.5 Γιατί τις μελετάμε?

Ένας πολύ μεγάλος λόγος που τις μελετάμε, είναι ότι οι ReRAM ακολουθούν μία εξαιρετικά απλή διαδικασία κατασκευής, καθώς αποτελούνται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια εκατέρωθεν

ενός διηλεκτρικού, και αυτό τις καθιστά απολύτως συμβατές με την τεχνολογία CMOS. Έτσι καθίσταται ως αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής τους να είναι χαμηλό.

Επίσης, η προσδοκία για τις ReRAM, είναι ότι αυτή η τεχνολογία μνήμης, θα είναι αυτή η οποία χρησιμοποιώντας ένα σύνολο υλικών, το οποίο θα μπορεί να συνεργάζεται με το συμβατικό περιβάλλον κατασκευής CMOS, αλλά και με τις θερμοκρασίες επεξεργασίας που του επιτρέπουν να κατασκευαστεί στα στρώματα μετάλλου, ή και εντός του διακένου της επαφής μεταξύ πηγής και απαγωγού μίας δομής τρανζίστορ MOS (MOSFET), ενός τσιπ CMOS. Επειδή, όμως, η θερμοκρασία κατασκευής είναι συμβατή με την τεχνολογία Back – End – Of – the – Line (BEOL), συχνά θεωρείται επιπλέον ότι οι ReRAM μπορούν να ‘στοιβαχθούν’ σε τρισδιάστατη αρχιτεκτονική, με αποτελεσματική περιοχή κυψελών μνήμης  $4F^2/n$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των τρισδιάστατα στοιβαγμένων στοιβάδων μνήμης [56]. Σε επίπεδο συστήματος, οραματίζεται μια επανάσταση στην ιεραρχία μνήμης και την αρχιτεκτονική του συστήματος, η οποία και θα πραγματοποιηθεί από αυτήν τη χαμηλού κόστους, συμβατή με BEOL, μη πτητική μνήμη, με δεκάδες νανοδευτερόλεπτα, μεταβαλλόμενης ανά bit ταχύτητας ανάγνωσης / εγγραφής, πάνω από  $10^6$  κύκλους αντοχής, και δυνητικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Δύο, ακόμη, σημαντικές εφαρμογές που έχουν είναι σε νευρομορφικά συστήματα,, όπως στους νευρομορφικούς υπολογιστικούς επιταχυντές, έχοντας ως ρόλο το στοιχείο της σύναψης [57], αλλά και πιο πρόσφατα, του memristor στους προσομοιωτές κβαντικού υπολογιστή, για την αποθήκευση qubit [58].

## 2.6 Αναφορές

- [1] J. B. Johnson. Thermal Agitation of Electricity in Conductors. *Phys. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 97–109, Jul. 1928.
- [2] H. Nyquist. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors. *Phys. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 110–113, Jul. 1928.
- [3] Y. Tsidividis. Operation and modeling of the MOS transistor. 2nd ed. The McGraw-Hill Companies, 1999.
- [4] W. Schottky. Über spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elektrizitätsleitern. *Ann. Phys.*, vol. 362, no. 23, pp. 541–567, 1918.
- [5] M. Von Haartman and M. Östling. Low-frequency noise in advanced MOS devices. Springer, 2007.
- [6] K. S. Ralls et al. Discrete Resistance Switching in Submicrometer Silicon Inversion Layers: Individual Interface Traps and Low-Frequency (1/f) Noise. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 52, no. 3, pp. 228–231, Jan. 1984.
- [7] M. J. Kirton, M. J. Uren, S. Collins, M. Schulz, A. Karmann, and K. Scheffer. Individual defects at the Si:SiO<sub>2</sub> interface. *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 12, pp. 1116–1126, Dec. 1989.
- [8] K. K. Hung, P. K. KO, C. Hu, and Y. C. Cheng. A unified model for the flicker noise in metal-oxide-semiconductor field effect transistors. *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 37, no. 3, p. 654, 1990.
- [9] L. K. J. Vandamme and F. N. Hooge. What do we certainly know about 1/f noise in MOSTs?. *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 55, no. 11, pp. 3070-3085, Nov. 2008.
- [10] E. P. Vandamme and L. K. J. Vandamme. Critical discussion on unified 1/f noise models for MOSFETs. *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 47, no. 11, pp. 2146-2152, Nov. 2000.
- [11] F. N. Hooge. 1/f noise sources. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 41, no. 11, pp. 1926–1935, Nov. 1994.
- [12] A. L. McWhorter. *Semiconductor Surface Physics*. R. H. Kingston, Ed. Philadelphia, PA: Univ. Pennsylvania Press, 1957.
- [13] A. Nemirovsky and A. Ron. A revised model for carrier trapping-detrapping 1/f noise. *Solid-State Electronics*, vol. 41, no. 11, pp. 1811-1818, 1997.
- [14] S. C. Sun, and J. D. Plummer. Electron mobility in inversion and accumulation layers on thermally oxidized silicon surfaces. *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. ED-27, pp. 1497, 1980.
- [15] M. V. Haartman, and M. Ostling. low-frequency noise in advance MOS devices. Springer, 2007, Netherland.

- [16] F. N. Hooge, T. G. M. Kleinpenning, and L. K. J. Vandamme. Experimental studies on  $1/f$  noise. *Rep. Prog. Phys.*, vol. 44, pp. 479 - 532, 1981.
- [17] C.-Y. Chen. Low frequency noise in advanced CMOS technology. Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Stanford University, Stanford, CA, 2010.
- [18] A. van der Ziel. *Noise in solid state devices and circuits*. John Wiley & Sons, 1986, New York.
- [19] K.S. Ralls, W.J. Skocpol, L.D. Jackel, R.E. Howard, L.A. Fetter, R.W. Epworth and D.M. Tennant. *Phys. Rev. Lett.*, 52, 228, 1984.
- [20] G. Ghibaudo, O. Roux-dit-Buisson, and J. Brini. Impact of Scaling Down on Low Frequency Noise in Silicon MOS Transistors. *Phys. Status Solidi*, vol. 132, no. 2, pp. 501–507, Aug. 1992.
- [21] A. Asenov, R. Balasubramaniam, A. R. Brown, and J. H. Davies. RTS amplitudes in decananometer MOSFETs: 3—D simulation study. *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 50, pp. 839 -845, 2003.
- [22] M. J. Kirton, and M. J. Uren. Noise in solid-state microstructures: A new perspective on individual defects, interface states and low-frequency ( $1/f$ ) noise. *Adv. Phys.*, vol. 38, no. 4, pp. 367 - 468, 1989.
- [23] P. M. Gonthier, V. Goiffon, and P. Magnan. In-pixel source follower transistor RTS noise behavior under ionization radiation in CMOS image sensors. *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 59, p. 1686, 2012.
- [24] Eddy Simoen *et al.* *ECS Trans.*, 39, 3, 2011.
- [25] Nour, M. Measurements, modeling, and simulation of semiconductor/gate dielectric defects using random telegraph signals. PhDT, 2015.
- [26] D. K. Schroder. *Semiconductor Material and Devices Characterization*. John Wiley & Sons Inc., 3rd edition, 2006.
- [27] J. F. Gibbons and W. E. Beadle. Switching properties of thin NIO films. *Solid-State Electron.*, vol. 7, no. 11, pp. 785–790, 1964.
- [28] Waser, R., Dittmann, R., Staikov, C. & Szot. Redox-based resistive switching memories nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. *Adv. Mater.* 21, 2632–2663, 2009.
- [29] Y. Watanabe, J. G. Bednorz, A. Bietsch, Ch. Gerber, D. Widmer, A. Beck, and S. J. Wind. Current-driven insulator-conductor transition and nonvolatile memory in chromium-doped SrTiO<sub>3</sub> single crystals. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, pp. 3738–3740, Jun. 4, 2001.

- [30] A. Beck, J. G. Bednorz, C. Gerber, C. Rossel, and D. Widmer. Reproducible switching effect in thin oxide films for memory application. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, pp. 139–141, 2000.
- [31] I. G. Baek, M. S. Lee, S. Seo, M. J. Lee, D. H. Seo, D.-S. Suh, J. C. Park, S. O. Park, H. S. Kim, I. K. Yoo, U.-In. Chung, and J. T. Moon. Highly scalable nonvolatile resistive memory using simple binary oxide driven by asymmetric unipolar voltage pulses. *Tech. Dig. IEEE Int. Electron Devices Meeting*, 2004, pp. 587–590.
- [32] S. Sivaram. Storage class memory: Learning from 3D NAND. *Flash Memory Summit*, San Jose, CA, USA, Tech. Rep., 2016.
- [33] S. Sills et al. A copper ReRAM cell for storage class memory applications. *Proc. Symp. VLSI Tech.*, pp. 80–81, Jun. 2014.
- [34] Y. Hayakawa et al. Highly reliable TaOx ReRAM with centralized filament for 28-nm embedded application. *Proc. Symp. VLSI Technol. (VLSI Technol.)*, pp. 14–15, Jun. 2015.
- [35] Prodromakis, T., Toumazou, C. & Chua, L. Two centuries of memristors. *Nat. Mater.* 11, 478–481, 2012.
- [36] Chua L. O. Memristor—The Missing Circuit Element. *IEEE Trans. Circuit Theory*, 18, 507–519, 1971.
- [37] Yu, S., Lee, B. & Wong, H.-S. P. Metal Oxide Resistive Switching Memory. in *Functional Metal Oxide Nanostructures*. Springer, 303–335, 2012.
- [38] H.-S. P. Wong, H.-Y. Lee, S. Yu, Y.-S. Chen, Y. Wu, P.-S. Chen, B. Lee, F. T. Chen, and M.-J. Tsai. Metal–oxide RRAM. *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 6, p. 1951–1970, 2012.
- [39] Shimeng Yu. *Resistive Random Access Memory (RRAM)*. Morgan & Claypool, 2016.
- [40] Jeong, D. S., Schroeder, H. & Waser, R. Coexistence of Bipolar and Unipolar Resistive Switching Behaviors in a Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt Stack. *Electrochem. solid-state Lett.* 10, G51–G53, 2007.
- [41] Gomez-Marlasca, F., Ghenzi, N., Rozenberg, M. J. & Levy, P. Understanding electroforming in bipolar resistive switching oxides. *Appl. Phys. Lett.* 98, 2011.
- [42] Li, X., Tung, C. H. & Pey, K. L. The nature of dielectric breakdown. *Appl. Phys. Lett.* 93, 072903, 2008.
- [43] Joshua Yang, J. et al. The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches. *Nanotechnology* 20, 215201, 2009.
- [44] M. N. Kozicki, M. Mitkova. *Nanotechnology*. Wiley-VCH, Vol. 3 (Ed: R. Waser), 2008, Weinheim.
- [45] R. Oligschlaeger, R. Waser, R. Meyer, S. Karthaus, R. Dittmann. Resistive switching and data reliability of epitaxial (Ba,Sr) TiO<sub>3</sub> thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 88, 42901, 2006.

- [46] L. Nagarajan, R. A. De Souza, D. Samuelis, I. Valov, A. Borger, J. Janek, K. D. Becker, P. C. Schmidt, M. Martin. A chemically driven insulator–metal transition in non-stoichiometric and amorphous gallium oxide. *Nat. Mater.*, 7, 391–398, 2008.
- [47] M. A. Villena, J. B. Roldn, F. Jimnez-Molinos, E. Miranda, J. Su, and M. Lanza. SIM2 RRAM: A physical model for RRAM devices simulation. *J. Comput. Electron.*, Vol. 16, no. 4, pp. 1095–120, 2017.
- [48] R. Waser and M. Aono. Nanoionics-based resistive switching memories. *Nat. Mater.*, Vol. 6, no. 11, pp. 833–40, 2007.
- [49] Varshita Gupta, Shagun Kapur, Sneha Saurabh & Anuj Grover. Resistive Random Access Memory: A Review of Device Challenges. *IETE Technical Review*, 2019.
- [50] F. Pan, C. Chen, Z.-S. Wang, Y.-C. Yang, J. Yang, and F. Zeng. Nonvolatile resistive switching memories-characteristics, mechanisms and challenges. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, Vol. 20, pp. 1–15, 2010.
- [51] L. F. Liu et al. Multilevel set/reset switching characteristics in Al/CeO<sub>x</sub>/Pt RRAM devices. 2012 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC). Bangkok, Thailand: IEEE, pp. 1–3, 2012.
- [52] U. Russo, D. Ielmini, C. Cagli, and A. L. Lacaita. Self-accelerated thermal dissolution model for reset programming in unipolar resistive-switching memory (RRAM) devices. *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 56, no. 2, pp. 193–200, 2009.
- [53] F. Nardi, C. Cagli, S. Spiga, and D. Ielmini. Reset instability in pulsed-operated unipolar resistive-switching random access memory devices. *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, no. 6, pp. 719–721, Jun. 2011.
- [54] R. Meyer et al. Oxide dual-layer memory element for scalable non-volatile cross-point memory technology. *Proc. 9<sup>th</sup> Annu. Non-Volatile Memory Technol. Symp.*, 2008.
- [55] B. Govoreanu et al. Vacancy-modulated conductive oxide resistive RAM (VMCO-RRAM): An area-scalable switching current, self-compliant, highly nonlinear and wide on/off-window resistive switching cell. *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting*, pp. 10.2.1–10.2.4, 2013.
- [56] I. G. Baek, D. C. Kim, M. J. Lee, H.-J. Kim, E. K. Yim, M. S. Lee, J. E. Lee, S. E. Ahn, S. Seo, J. H. Lee, J. C. Park, Y. K. Cha, S. O. Park, H. S. Kim, I. K. Yoo, U.-In. Chung, J. T. Moon, and B. I. Ryu. Multi-layer cross-point binary oxide resistive memory (OxRRAM) for post-NAND storage application. *Tech. Dig. IEEE Int. Electron Devices Meeting*, pp. 750–753, 2005.
- [57] Qiangfei Xia and J. Joshua Yang. Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing. *Nature Materials* 18, 309–323, 2019.
- [58] I.G. Karafyllidis, G.C. Sirakoulis, P. Dimitrakis. Memristive Quantum Computing Simulator. *IEEE Trans. Nanotechnology* 18, 1015–1022, 2019.





### 3 Τεχνικές μέτρησης και ανάλυσης του θορύβου RTN

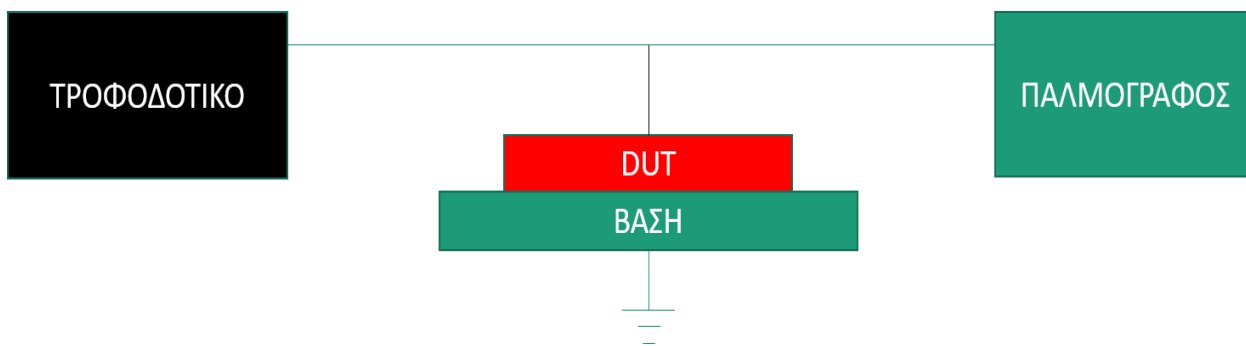
#### 3.1 Τεχνικές μέτρησης του θορύβου RTN

Η διεξαγωγή δυναμικών, και επαναλαμβανόμενων μετρήσεων ακριβείας, είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη και μοντελοποίηση του θορύβου, γνωστού και RTN. Γενικά, οι μετρήσεις θορύβου είναι μία ευαίσθητη διαδικασία, η οποία χρειάζεται αρκετή προσοχή. Το ληφθέν σήμα πρέπει να προκύπτει κατευθείαν από την συσκευή, την οποία έχουμε υπό μέτρηση (Device Under Test - DUT), και όχι με εξωτερικές παρεμβολές, όπως άλλη πηγή ηλεκτρονικών σημάτων. Επομένως, η προστασία από τον εξωτερικό θόρυβο, και η γείωσή του, είναι πλήρως απαραίτητα. Με αυτά τα ζητούμενα, πρέπει να υιοθετηθεί μία μη καταστροφική διαδικασία, η οποία να μετράει το RTN. Έτσι, μπορούν να γίνουν μετρήσεις σε θερμοκρασία δωματίου, ή και σε διάφορες θερμοκρασίες, με μία διάταξη η οποία να αποτελείται από μία συσκευή τροφοδοσίας, ένα σύστημα ‘κλωβού’, δηλαδή όσο το δυνατόν γίνεται απομονωμένο από το περιβάλλον, το οποίο θα περιέχει την DUT, και έναν παλμογράφο που θα μπορεί να πάρει αρκετά ‘γρήγορες’ μετρήσεις, δηλαδή να παίρνει πολλά δείγματα μέτρησης, του μεγέθους που χρειάζεται, στην μονάδα του χρόνου. Αυτό το χαρακτηριστικό του παλμογράφου είναι σημαντικό γιατί υπάρχει η ανάγκη διάκρισης, όσο το δυνατόν περισσότερο, όλων των μεταβάσεων του σήματος RTN, οι οποίες και θα αναλυθούν.

Με αυτά τα δεδομένα, υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης του RTN, παίρνοντας το σήμα σαν τάση ή σαν ρεύμα, με τις κατάλληλες αλλαγές στην διάταξη αντίστοιχα.

##### 3.1.1 Τεχνική μέτρησης τάσης με τροφοδοσία ρεύματος

Αυτή η διάταξη, έχει συνδεδεμένο το τροφοδοτικό παράλληλα με τον παλμογράφο, και τα δύο σε σειρά με την DUT, και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3-1.

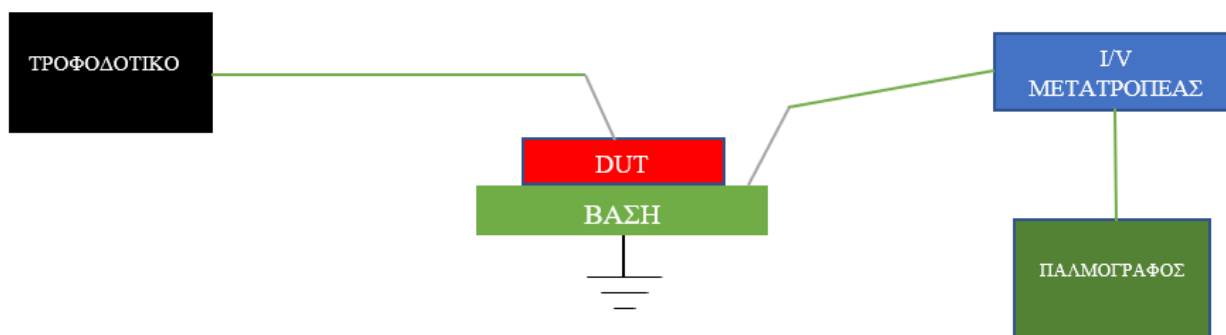


Σχήμα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας για μέτρηση με ρεύμα.

Με αυτήν την διάταξη, οι μετρήσεις διεξάγονται έχοντας ως τροφοδοσία ρεύμα, και ως σήμα για ανάλυση την τάση. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την μείωση των στοιχείων του κυκλώματος, τα οποία θα μπορούσαν να γίνουν πηγή θορύβου, όπως τον I / V μετατροπέα, ο οποίος θα βοηθούσε στην ενίσχυση του σήματος. Επίσης, η μέτρηση της διαφοράς του δυναμικού βοηθάει στην μεγαλύτερη εξάλειψη του θερμικού θορύβου της διάταξης. Άρα, για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων αυτών, και την εξαγωγή του σήματος του RTN, δίνοντας σταθερό ρεύμα στο πάνω ηλεκτρόδιο της διάταξης ReRAM, είναι δυνατή η παρατήρηση των μεταβολών της διαφοράς του δυναμικού.

### 3.1.2 Τεχνική μέτρησης ρεύματος με τροφοδοσία τάσης

Με την τεχνική μετρήσεως του ρεύματος, καθίσταται απαραίτητη η εισαγωγή του  $I / V$  μετατροπέα (Σχήμα 3-2), για την ενίσχυση του σήματος, αλλά και για την μετατροπή του σήματος του ρεύματος στο αντίστοιχο τάσης, το οποίο διατίθεται στον παλμογράφο. Με αυτή την διάταξη υπάρχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας του επακριβώς υπολογισμού της αντίστασης της ReRAM εκείνη την χρονική διάρκεια της μέτρησης, ενώ με την μέτρηση του ρεύματος δεν υπήρχε αυτή η δυνατότητα, λόγω της μη ομικής συμπεριφοράς των  $I - V$  χαρακτηριστικών.



Σχήμα 3-2. Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας για μέτρηση με τάση.

## 3.2 Τεχνικές ανάλυσης του θορύβου RTN

### 3.2.1 Εισαγωγή

Η διαθεσιμότητα των ReRAM, αλλά και των διατάξεων MOS, έχει δώσει την δυνατότητα για την μελέτη του θορύβου ο οποίος παράγεται από μεμονωμένες παγίδες, οι οποίες βρίσκονται στο οξείδιο, και στο οξείδιο πύλης για τις διατάξεις MOS. Είναι πιθανό να υπάρχει μία παγίδα, στο οξείδιο, ή ακόμη και αρκετές ενεργές παγίδες, κοντά στην ενεργειακή στάθμη Fermi σε ολόκληρο το κανάλι, για τις MOS [1]. Ο RTN, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.4, προέρχεται από τα διαδοχικά συμβάντα ‘παγίδευσης’ και εκπομπής ενός, ή και περισσότερων ηλεκτρονίων από σημεία, τα οποία ήταν οι ατέλειες στην διεπιφάνεια ανάμεσα σε ημιαγωγό και οξείδιο, ή στο σύνολο του όγκου του οξειδίου πύλης, για τις MOS [2]. Με τον θόρυβο RTN υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το σήμα του ως διαγνωστικό εργαλείο για την μελέτη της ενέργειας και της χωρικής κατανομής των παγίδων του οξειδίου. Ωστόσο, οι υπάρχουσες τεχνικές παίρνουν ως προσέγγιση την ομοιόμορφη κατανομή των παγίδων, και την μη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών των παγίδων μεταξύ τους. Το σήμα του RTN, ουσιαστικά αποτελείται από αυτά τα συμβάντα πραγματικού χρόνου, τα οποία περιεγράφηκαν με τους φορείς, και γίνονται στο ρεύμα, ή στην τάση, που διαρρέει την ReRAM, ή του ρεύματος του απαγωγού για τις MOS. Επομένως, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των ενεργών παγίδων, κάθε μίας ξεχωριστά. Άλλο ένα χαρακτηριστικό, είναι ότι ο RTN έχει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των μελλοντικών περιορισμών των διατάξεων ReRAM, οι οποίες και ελαχιστοποιούνται συνεχώς στην κλίμακα μεγέθους τους [3]. Η μέθοδος αυτή με τον RTN, υιοθετείται για τη μελέτη της μεταβλητότητας των παγίδων, και άλλων ηλεκτρικά ενεργών ατελειών, μέσα από την ίδια τεχνολογική διαδικασία, και για την μελέτη των μεταβολών, οι

οποίες υπάρχουν σε πολλαπλά επίπεδα, που προκαλούνται από ανεξάρτητες ή συσχετισμένες, μεταξύ τους, παγίδες.

Για αυτόν τον σκοπό, για την ανάλυση του σήματος RTN, το αυθεντικό σήμα μπορεί να μοντελοποιηθεί και να αναλυθεί, και επίσης μπορεί να υπολογιστεί το φάσμα πυκνότητας ισχύος (Power Spectral Density - PSD), και μέσω αυτού να αναλυθεί περαιτέρω. Επίσης, αναλύεται από διάφορα ιστογράμματα, τα οποία παράγονται από το σήμα, όπως το πόσες φορές βρέθηκε το σήμα σε κάθε επίπεδο ρεύματος. Τέλος, άλλο ένα εργαλείο ανάλυσης είναι το χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (Time Lag Plot – TLP).

### 3.2.2 Σήμα RTN – PSD

Το σήμα του RTN που εξάγεται από την μέτρηση θορύβου που γίνεται, το οποίο είναι συνήθως σαν το σχήμα 2-3, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάλυση με διάφορους τρόπους, και την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων.

Η πρώτη ανάλυση, που μπορεί να γίνει, είναι η ανάλυση του σήματος στο φάσμα πυκνότητας ισχύος (PSD) του. Στην γενική έκφρασή της, η πυκνότητα ισχύος, του θορύβου του ρεύματος της ReRAM, περιγράφεται από την παρακάτω σχέση 3-1, η αλλιώς από την παραλλαγμένη εξίσωση 2-12 [4]:

$$S_i(\omega) = \overline{(\Delta I)^2} \cdot \frac{4\tau}{1 + \omega^2\tau^2},$$

*Εξίσωση 3-1[4]*

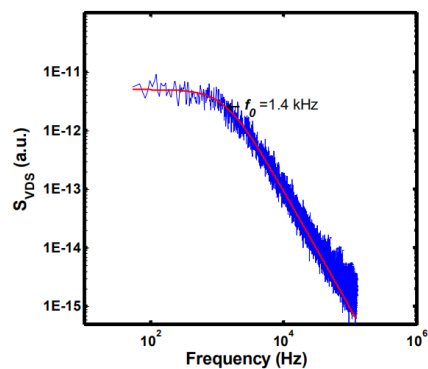
ή διαφορετικά:

$$S_I(f) = \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\langle N \rangle^2} \frac{4/f_T}{1+(f/f_T)^2}$$

*Εξίσωση 3-2*

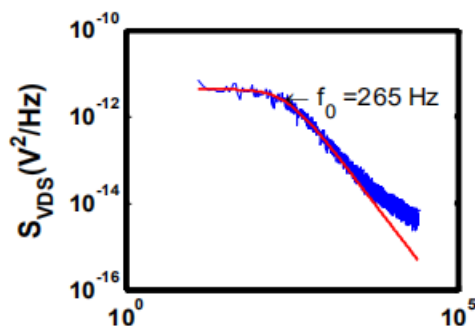
όπου  $\omega = 2\pi f$  η γωνιακή συχνότητα,  $\overline{(\Delta I)^2}$  η τιμή της μέσης τετραγωνικής ρίζας του ρεύματος του σήματος του RTN,  $\tau$  ο χρόνος χαλάρωσης, ο οποίος ορίζεται ως ο χρόνος που κάνει να πάει ο φορέας από το ηλεκτρόδιο στην παγίδα μέσω του φαινομένου της σήραγγας,  $\langle \Delta N^2 \rangle$  και  $\langle N \rangle^2$  η μέση τετραγωνική τιμή της διακύμανσης των φορέων και η μέση συγκέντρωση των διαθέσιμων φορέων αντίστοιχα,  $f$  και  $f_T$  η συχνότητα μέτρησης και η συχνότητα απελευθέρωσης κατά την παγίδευση / έκκλιση (όπου το  $S_I$  εκφράζεται σε  $\text{nA}^2 / \text{Hz}$ ).

Αυτό το φάσμα ουσιαστικά είναι η πυκνότητα ισχύος του σήματος συναρτήσει της συχνότητας, σε λογαριθμική κλίμακα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-3.

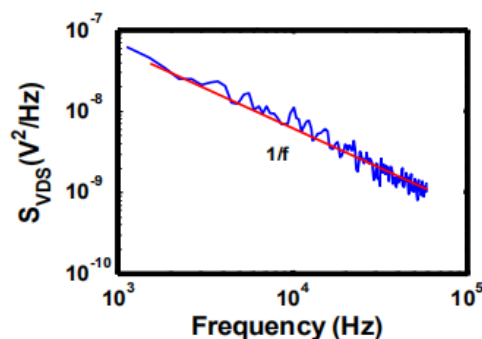


Σχήμα 3-3. Φάσμα πυκνότητας ισχύος σήματος RTN [5].

Αυτή η διαδικασία, της μετατροπής, είναι αυτοματοποιημένη μέσω ενός ειδικού προγράμματος, και υπολογίζει ουσιαστικά το διάγραμμα μίας λορεντζιανής, που με το σχήμα της μπορεί να βρεθεί η φύση του θορύβου, δηλαδή αν είναι flicker θορύβος, ή RTN, η οποία διαφορά είναι συνήθως αυτή που φαίνεται στα σχήματα 3-4 και 3-5, όπου έχουμε το φάσμα της πυκνότητας ισχύος του RTN και του flicker θορύβου, αντίστοιχα.



Σχήμα 3-4. Φάσμα πυκνότητας ισχύος σήματος RTN [5].



Σχήμα 3-5. Φάσμα πυκνότητας ισχύος flicker θορύβου [5].

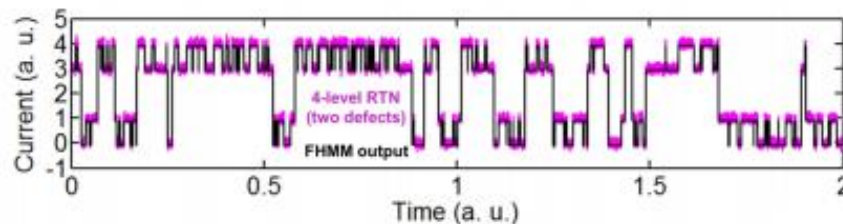
Εάν το σήμα RTN οφείλεται σε περισσότερα από ένα επίπεδα παγίδευσης (δηλαδή παγίδες με διαφορετικές ενέργειες ενεργοποίησης) τότε ισχύει η σχέση:

$$S_i(f) = \sum S_i(f) = \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\langle N \rangle^2} \frac{4/f_T}{1+(f/f_T)^n}$$

### Εξίσωση 3-3

όπου  $S_i(f)$  είναι το PSD του  $i$ -οστού επιπέδου παγίδευσης, και ο εκθέτης  $n$  βρίσκεται στην περιοχή  $1 \leq n < 2$ . Ο McWhorter [6] απέδειξε ότι εάν έχουμε μεγάλο αριθμό διαφορετικών επιπέδων παγίδευσης τότε  $n \sim 1$ , και συνεπώς ο θόρυβος G-R συμπεριφέρεται όπως ο flicker θόρυβος  $1/f$ , όπου είναι αδύνατο να γίνει επίλυση όπως σε θόρυβο με μεμονωμένα επίπεδα παγίδων. Ο Hooge [7] απέδειξε ότι η εξίσωση 3-3 είναι σωστή όταν ο αριθμός των ελεύθερων φορέων είναι μεγαλύτερος από τους παγιδευμένους φορείς.

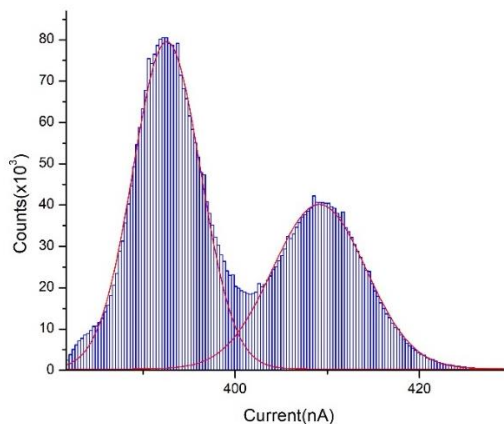
Υπάρχει η δυνατότητα μοντελοποίησης του αυθεντικού σήματος του RTN, με την βοήθεια ειδικών αλγορίθμων οι οποίοι κατασκευάζουν ειδικά μοντέλα, όπως το Monte - Carlo Markov Chain (MCMC) μοντέλο [8], ή το Factorial Hidden Markov (FHM) μοντέλο [9]. Αυτές οι προηγμένες τεχνικές - μοντέλα, οι οποίες είναι βασισμένες σε μεθόδους μάθησης μηχανών που εκμεταλλεύονται τις αυτό-συσχετίσεις των σημάτων RTN, συμβάλλουν ιδιαίτερα στην ποσοτική ανάλυση τέτοιων πολύπλοκων σημάτων. Συγκεκριμένα, για παράδειγμα, το FHM μοντέλο επιτρέπει εγγενώς την ανάλυση των σημάτων RTN πολλαπλών επιπέδων σε άθροισμα πολλών συστατικών RTN δύο επιπέδων, όπως αποδεικνύεται στο σχήμα 3-6, στο οποίο το μωβ το οποίο είναι το σήμα, ενώ η μαύρη είναι το ταίριασμα με την ανάλυση του FHM μοντέλου.



Σχήμα 3-6. Σήμα RTN (μωβ) με την αντίστοιχη ανάλυση του FHM μοντέλου (μαύρο) [10].

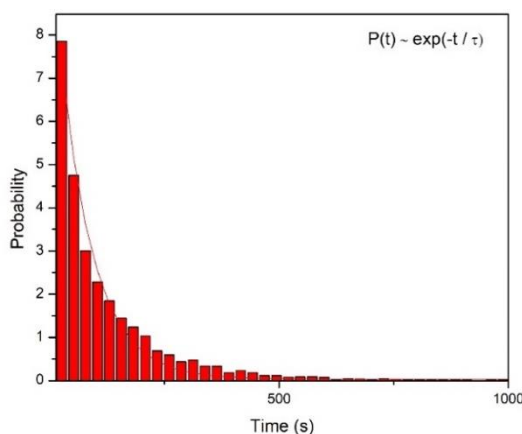
### 3.2.3 Ιστογράμματα

Υπάρχει η δυνατότητα, από το σήμα RTN της εξαγωγής διαφόρων ειδών ιστογραμμάτων, όπως του ιστογράμματος των τιμών του σήματος του RTN (Σχήμα 3-7), το οποίο δείχνει πόσες φορές έχει βρεθεί στην συγκεκριμένη τιμή του σήματος, και αυτό βοηθάει στο γεγονός ότι αυτές οι τιμές ουσιαστικά δείχνουν τις καταστάσεις στις οποίες μεταπηδάνε οι φορείς, και άρα στο γεγονός του αν υπάρχουν, και εφόσον υπάρχουν στο πόσες παγίδες μπορεί να είναι.



Σχήμα 3-7. Ιστόγραμμα τιμών του σήματος του RTN.

Μπορεί να εξαχθεί το ιστόγραμμα στο οποίο φαίνεται η κατανομή των χρόνων παραμονής σε κάθε επίπεδο (Σχήμα 3-8). Αυτό το ιστόγραμμα δείχνει ουσιαστικά ποια είναι η πιθανότητα, στο σήμα, να βρίσκεται στο κάθε επίπεδο μία συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.



Σχήμα 3-8. Ιστόγραμμα κατανομής χρόνων παραμονής σε κάθε επίπεδο.

Ακολουθώντας, μεθοδολογία όμοια με το [11], η κατανομή των χρόνων παραμονής για κάθε επίπεδο, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2-4, μπορεί να αναχθεί σε μια κατανομή Poisson, όπως:

$$P(t) = \frac{\Delta t}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Εξίσωση 3-4

όπου  $\tau$  είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος [11]. Οι χαρακτηριστικοί χρόνοι είναι ενδεικτικοί για την διάρκεια ζωής ενός ηλεκτρονίου σε κάθε επίπεδο παγίδευσης. Η προσαρμογή των πειραματικών κατανομών σε κατανομές Poisson υποδηλώνει ότι το RTN οφείλεται σε στοχαστικά γεγονότα όπως η παγίδευση και απελευθέρωση των ηλεκτρονίων, τα οποία είναι εγγύς του CF. Επιπλέον, η χαρακτηριστική συχνότητα  $1 / \tau$  είναι εξαρτώμενη από την θερμοκρασία σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση Arrhenius [11],

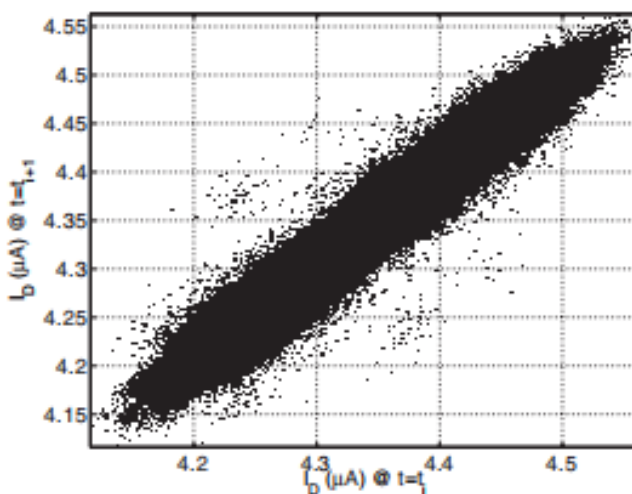
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \exp(-E_A/k_B T)$$

*Εξίσωση 3-5[11]*

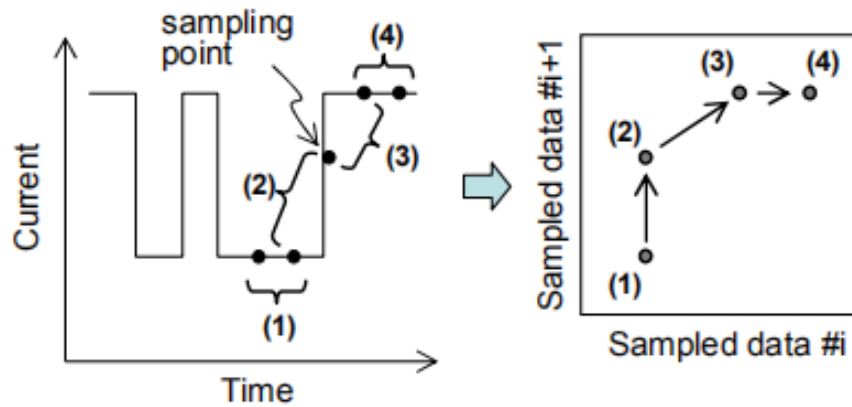
όπου το  $1/\tau_0$  η μέση συχνότητα θερμικής δόνησης του πλέγματος, δηλ.  $10^{13}\text{Hz}$  [12]. Από την Εξίσωση 3-5, και χρησιμοποιώντας τις εκτιμώμενες τιμές του  $\tau$ , μπορεί να εκτιμηθεί η ενέργεια ενεργοποίησης των παγίδων που αντιστοιχεί στα διακριτά επίπεδα.

### 3.2.4 Χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP)

Η πολυπλοκότητα του σήματος του RTN είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για την κατανόηση της συμπεριφοράς του. Έτσι είναι δυνατόν, για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα, να εφαρμοστεί η χρήση του χρονοδιαγράμματος χρονικής υστέρησης (TLP) (Σχήμα 3-9). Το TLP μπορεί να πραγματοποιηθεί απλά σχεδιάζοντας σημεία σε ένα επίπεδο  $x - y$ , όπου ο άξονας  $x$  έχει οριστεί με δεδομένα δειγματοληψίας, π.χ.  $i$ , και ο  $y$  με ακριβώς το επόμενο στοιχείο ( $i + 1$ ) του σήματος, τρόπος ο οποίος περιγράφεται στο σχήμα 3-10. Με αυτή την διαδικασία, τα TLP καθιστούν δυνατή την εύκολη μέτρηση του αριθμού πολλαπλών παγίδων. Επίσης, με αυτά τα χρονοδιαγράμματα γίνεται δυνατή και η αναγνώριση και η ύπαρξη παγίδων, οι οποίες έχουν γρηγορότερο ρυθμό παγίδευσης – έκλυσης από τον ρυθμό δειγματοληψίας του παλμογράφου.

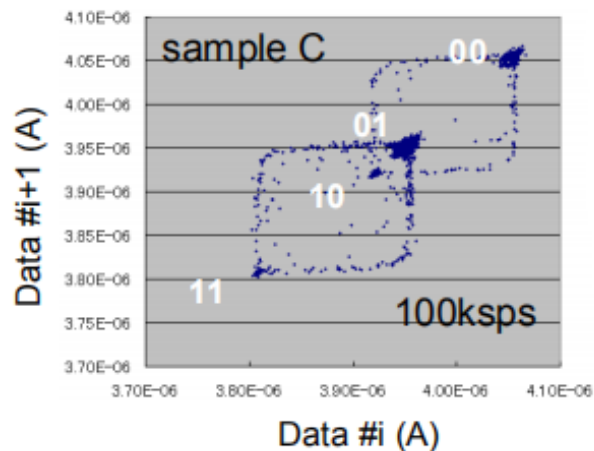


*Σχήμα 3-9. Χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP) [13].*



Σχήμα 3-10. Περιγραφή τρόπου σχεδιασμού χρονοδιαγράμματος TLP [14].

Για την εξαγωγή του αριθμού των ενεργών παγίδων  $N_T$ , είναι απαραίτητη η ανίχνευση του αριθμού των διακριτών επιπέδων που υπάρχουν στο μετρούμενο σήμα RTN. Τα επίπεδα αυτά αναγνωρίζονται κατά μήκος της γραμμής της διαγωνίου του TLP, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-11. Η διαγώνιος του TLP παρέχει, επίσης, πληροφορίες σχετικά με τη συχνότητα με την οποία καταλαμβάνεται κάθε σημείο, και ο αριθμός των τοπικών μεγίστων που εξάγονται κατά μήκος της διαγωνίου (πυκνώματα στο σχήμα 3-11) αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ανιχνευόμενων επιπέδων του RTN,  $N_L$ . Τα τοπικά μέγιστα είναι γενικά καλά καθορισμένα, λόγω του μεγάλου αριθμού δειγμάτων σε κάθε σήμα RTN, και μπορούν εύκολα να εξαχθούν χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ανίχνευσης μεγίστων με βάση το όριο.



Σχήμα 3-11. Χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP) με εμφανή πυκνώματα – επίπεδα [14].

Για την εξαγωγή του αριθμού των υπαρκτών παγίδων, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση 3-6[14]:

$$N_T = \text{ceil}(\log_2(N_L))$$

Εξίσωση 3-6[14]



όπου η  $\text{ceil}(x)$  είναι η ceiling συνάρτηση, η οποία στρογγυλοποιεί το  $x$  στην πλησιέστερη ακέραια τιμή. Εκείνη η εξίσωση βασίζεται στην υπόθεση ότι τα αποτελέσματα πολλαπλών παγίδων είναι πρόσθετα. Για παράδειγμα, η υπέρθεση δύο παγίδων οδηγεί σε τέσσερα επίπεδα στο RTN, και η υπέρθεση τριών παγίδων οδηγεί σε οκτώ επίπεδα. Η συνάρτηση  $\text{ceil}(x)$  χρησιμοποιείται για να υπολογίσει αυτό που δεν μπορεί να εκφραστεί με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς διαθεσιμότητας των παγίδων εντός του χρονικού διαστήματος μέτρησης.

Για να έχει καλά αποτελέσματα το TLP, χρειάζεται να είναι αρκετά μειωμένος ο θόρυβος του περιβάλλοντος. Όταν είναι αρκετά μεγάλος ο θόρυβος, τότε το TLP μπορεί να βγει σαν το σχήμα 3-9, και δεν μπορούν να διακριθούν τα επίπεδα. Για αυτόν τον λόγο, υπάρχει η μέθοδος του σταθμισμένου χρονοδιαγράμματος χρονικής υστέρησης (weighted – TLP ή  $w$  - TLP), η οποία μειώνει σημαντικά την επίδραση του θορύβου, και επιτρέπει την μεγαλύτερη ακριβή εξαγωγή στοιχείων για τις παγίδες.

Για τον ορισμό της μεθόδου του  $w$  – TLP, έχοντας ένα σημείο από το TLP με συντεταγμένες  $(I_i, I_{i+1})$ , ορίζεται η συνάρτηση  $\phi_i$  ως:

$$\phi_i(x, y) = \frac{1}{2\pi\alpha^2} \exp\left(\frac{-[(I_i - x)^2 + (I_{i+1} - y)^2]}{2\alpha^2}\right)$$

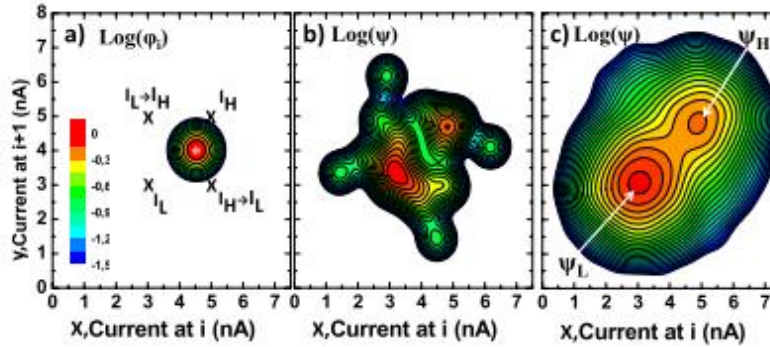
*Εξίσωση 3-7[15]*

όπου  $x$  και  $y$  είναι οι συντεταγμένες του χώρου του TLP. Έχοντας ως σημείωση ότι η  $\phi_i$  είναι μία κανονική διμερή κατανομή με τυπική απόκλιση  $\alpha$  και συντελεστή συσχέτισης 0. Η συνάρτηση αντιπροσωπεύει την πιθανότητα το σημείο με τις συντεταγμένες  $(I_i, I_{i+1})$  να αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο, ή σε μία μετάβαση στη θέση  $(x, y)$  του TLP. Το σχήμα 3-12 (a) δείχνει την γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης  $\phi_i(x, y)$  σε λογαριθμική κλίμακα για ένα μόνο σημείο του TLP. Μετά τον ορισμό της, ορίζεται και η συνάρτηση της σταθμισμένης χρονικής υστέρησης, ως:

$$\Psi(x, y) = K \sum_{i=1}^{N-1} \phi_i$$

*Εξίσωση 3-8[15]*

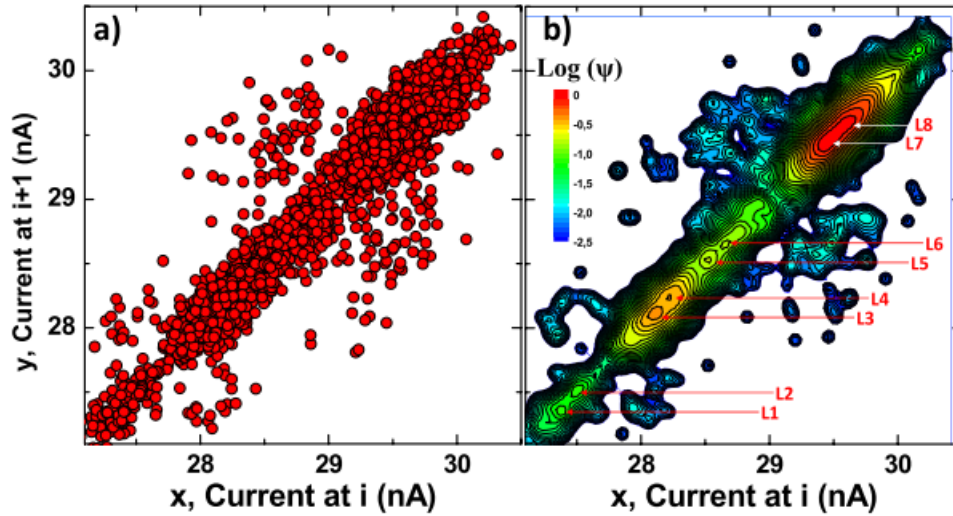
όπου η  $K$  είναι μία σταθερά κανονικοποίησης που επιλέγεται για να πάρει τη μέγιστη τιμή η  $\Psi$ , δηλαδή ίση με 1, και  $N$  ο αριθμός των σημείων του RTN. Εάν η  $\Psi$  σχεδιαστεί για λίγα σημεία [Σχήμα 3-12 (b)], τότε δύο τοπικά ανώτατα όρια ορίζονται κατά προσέγγιση των οποίων οι τιμές είναι πιο κοντά μεταξύ τους, τα  $I_L$  και  $I_H$ .



Σχήμα 3-12. (α) Γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης  $\varphi_i(x, y)$ . (β) Γραφική αναπαράσταση μερικών σημείων της συνάρτησης  $\Psi(x, y)$ . (γ) Γράφημα σταθμισμένου TLP ( $w$  - TLP) της  $\Psi(x, y)$  [15].

Για την καλύτερη κατανόηση των κορυφών, χρειάζεται η σημείωση ότι η συμβολή κάθε σημείου του TLP, που οδηγεί στην  $\Psi$ , σταθμίζεται από την απόσταση μεταξύ της θέσης αυτού του σημείου και του  $(x, y)$ . Επομένως, η συνάρτηση λαμβάνει υψηλότερες τιμές στις πιο πυκνές περιοχές του TLP. Αυτό είναι πιο εμφανές στο σχήμα 3-12 (c), όπου η συνάρτηση  $\Psi$  παράγεται για όλα τα σημεία του TLP. Συνεχίζοντας, σημειώνεται ότι το γράφημα του σχήματος 3-12 (c) είναι, ουσιαστικά, το γράφημα του σταθμισμένου TLP ( $w$  - TLP). Στην διαγώνιο του  $w$  - TLP του σχήματος 3-12 (c) μπορούν να ανιχνευθούν δύο καλά καθορισμένα τοπικά μέγιστα ( $\Psi_L$  και  $\Psi_H$ ) στις θέσεις, για παράδειγμα 3.05nA και 4.89nA. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στα δύο επίπεδα του RTN, τα οποία είναι πολύ κοντά στις τιμές των  $I_L$  και  $I_H$ , που εισήχθησαν κατά τη δημιουργία του συγκεκριμένου σήματος RTN. Η κατασκευή της συνάρτησης  $\Psi$  είναι χρήσιμη για την ανίχνευση επιπέδων του RTN που δεν μπορούν να προσδιοριστούν από συμβατικές μεθόδους, όπως το ιστόγραμμα (Σχήμα 3-7), ή το TLP (Σχήμα 3-9), όταν ο θόρυβος, του περιβάλλοντος είναι σχετικά μεγάλος. Ορίζοντας τον λόγο  $\tau_e / \tau_c$ , όπου  $\tau_e$  είναι ο χρόνος έκλυσης, και  $\tau_c$  ο χρόνος παγίδευσης του φορέα από την παγίδα, μπορούμε να πούμε ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι αρκετός για τη λήψη των σχετικών φυσικών πληροφοριών της ατέλειας [16]. Αυτό το κλάσμα, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από το  $w$  - TLP με την αξιολόγηση της αναλογίας των δύο τοπικών μεγίστων που βρέθηκαν ( $\Psi_H / \Psi_L$ ).

Στην μέθοδο σταθμισμένης χρονικής υστέρησης, η επιλεγμένη τιμή του  $\alpha$  (της τυπικής απόκλισης της  $\varphi_i$ ), η οποία είναι η μόνη παράμετρος που εφαρμόζεται στην μέθοδο, είναι ένα βασικό σημείο για τον σωστό προσδιορισμό των επιπέδων του RTN. Για υψηλές τιμές του  $\alpha$ , εμφανίζεται μόνο μία κορυφή, και οι δύο κορυφές αποκαλύπτονται μόνο όταν μειωθεί το  $\alpha$ . Ωστόσο, εάν το  $\alpha$  είναι πολύ χαμηλό, αυτή η διαδικασία αποτυγχάνει επειδή κάθε σημείο συμβάλλει στην  $\Psi$  μόνο σε μια περιοχή πολύ κοντά σε αυτό, οδηγώντας σε ένα όριο, σε ένα συμβατικό ιστόγραμμα με μικρό μέγεθος περιοχών κατάτμησης. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, η σωστή επιλογή του  $\alpha$  είναι ζωτικής σημασίας για τον σωστό προσδιορισμό και τον εντοπισμό της ατέλειας - παγίδας του RTN.



Σχήμα 3-13. (a) Διάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP). (b) Το (a) σε γράφημα  $w - \text{TLP}$  [15].

Στο σχήμα 3-13 δείχνεται πως από ένα απλό TLP, όπου ουσιαστικά δεν μπορεί να γίνει διάκριση των επιπέδων στην διαγώνιο λόγω θορύβου, στο  $w - \text{TLP}$  γίνεται εφικτή η διάκριση των 8 επιπέδων (L1 – L8) του RTN σήματος με την βοήθεια χρωματικού κώδικα.

### 3.3 Αναφορές

- [1] K. K. Hung, P. K. Ko, C. Hu, Y. C. Cheng. Random telegraph noise of deep - submicrometer MOSFET's. *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 11, pp. 90-92, 1990.
- [2] M. J. Kirton, and M. J. Uren. Noise in solid-state microstructures: A new perspective on individual defects, interface states and low-frequency ( $1/f$ ) noise. *Adv. Phys.*, vol. 38, no. 4, pp. 367 - 468, 1989.
- [3] Z. Shi, J.-P. Mieville, and M. Dutoit. Random telegraph signals in deep submicron n-MOSFET's. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 41, pp. 1161-1168, 1994.
- [4] P. Dutta and P. M. Horn. Low-frequency fluctuations in solids:  $1/f$  noise. *Rev. Mod. Phys.* 53, 497, 1981.
- [5] Nour. Measurements, modeling, and simulation of semiconductor/gate dielectric defects using random telegraph signals. PhDT, 2015.
- [6] Alain McWhorter.  $1/f$  noise and related surface defects in Germanium. PhD Thesis, MIT, 1955.
- [7] F. N. Hooge. On the additivity of generation-recombination spectra. Part 2:  $1/f$  Noise. *Physica B: Condensed Matter*, 336(3-4), 236–251, 2003.
- [8] H. Awano, H. Tsutsui, H. Ochi and T. Sato. Multi-trap RTN parameter extraction based on Bayesian inference. *International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)*, Santa Clara, CA, pp. 597-602, 2013.
- [9] F. M. Puglisi, P. Pavan. RTN analysis with FHMM as a tool for multi-trap characterization in HfOx RRAM. *IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, pp. 1 - 2, 2013.
- [10] F. M. Puglisi. Measuring and analyzing Random Telegraph Noise in Nanoscale Devices: The case of resistive random access memories. *17th Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS)*, Aachen, pp. 1-5, 2017.
- [11] Shinhyun Choi, Yuchao Yang and Wei Lu. Random telegraph noise and resistance switching analysis of oxide based resistive memory. *Nanoscale*, 6, 400–404, 2014.
- [12] Arkady V. Yakimov, Dmitry O. Filatov, Oleg N. Gorshkov, Dmitry A. Antonov, Dmitry A. Liskin, Ivan N. Antonov, Alexander V. Belyakov, Alexey V. Klyuev, Angelo Carollo, and Bernardo Spagnolo. Measurement of the activation energies of oxygen ion diffusion in yttria stabilized zirconia by flicker noise spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 114, 253506, 2019.
- [13] S. Realov and K. L. Shepard. Analysis of Random Telegraph Noise in 45-nm CMOS Using On-Chip Characterization System. *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 5, pp. 1716-1722, May 2013.
- [14] T. Nagumo, K. Takeuchi, S. Yokogawa, K. Imai, and Y. Hayashi. New analysis methods for comprehensive understanding of Random Telegraph Noise. *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting*, pp. 32.1.1–32.1.4, Dec. 2009.

- [15] J. Martin-Martinez, J. Diaz, R. Rodriguez, M. Nafria and X. Aymerich. New Weighted Time Lag Method for the Analysis of Random Telegraph Signals. *IEEE Electron Device Letters*, vol. 35, no. 4, pp. 479-481, April 2014.
- [16] K. Abe, A. Teramoto, S. Shigetoshim, et al. Understanding of traps causing random telegraph noise based on experimentally extracted time constants and amplitude. *Proc. IRPS*, pp. 4A.4.1–4A.4.6, 2011.

## 4 Πειραματική διαδικασία, πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση

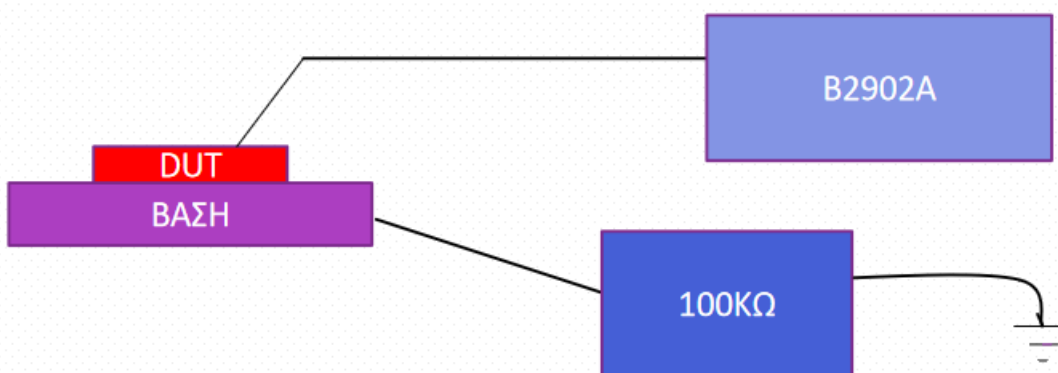
### 4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η διάταξη της μνήμης ReRAM, η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 4.3, που προορίζεται προς μέτρηση, περιέχονταν μέσα σε έναν μεταλλικό κλωβό κατά την διάρκεια των μετρήσεων, έτσι ώστε το περιβάλλον, και οι παρεμβολές του, να επηρεάζουν όσο το δυνατόν λιγότερο.

#### 4.1.1 Πειραματική διάταξη με την τεχνική μέτρησης τάσης

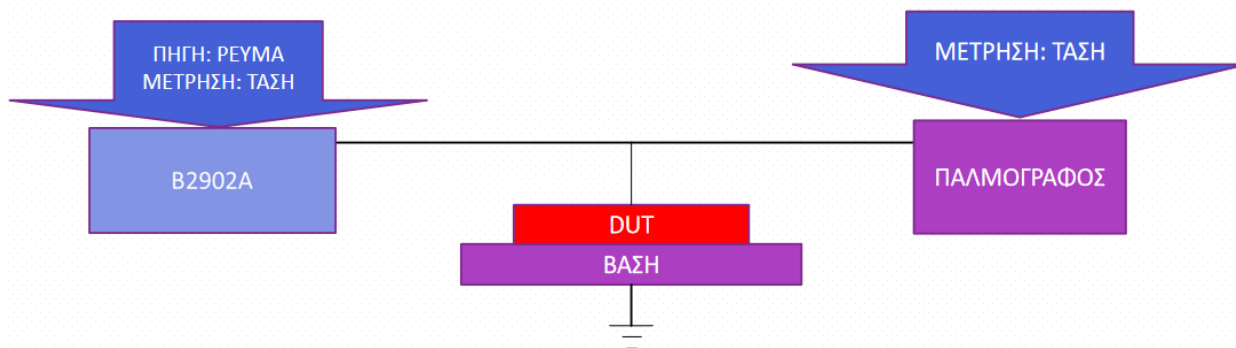
Στις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν, σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με την τεχνική της μέτρησης της τάσης, οι οποίες και περιεγράφηκαν στην παράγραφο 3.1.1. Για αρχή, πριν τις μετρήσεις, εφαρμοζόταν μία συνεχώς αυξανόμενη τάση στην ReRAM, η οποία εκκινούσε από τα 0 V, έφθανε μέχρι τα +5 V, και στο τέλος γυρνούσε πάλι στα 0 V. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάναμε SET, θέτοντάς την σε κατάσταση LRS για τις μετρήσεις.

Για να υπήρχε η δυνατότητα της διάταξης ReRAM να έλθει σε κατάσταση LRS, γινόταν σύνδεση της πηγής τροφοδοσίας (Keysight B2902A) με το πάνω ηλεκτρόδιο της διάταξης, και το κάτω ηλεκτρόδιο με την γείωση, παρεμβάλλοντας όμως, μεταξύ τους, μία αντίσταση της τάξεως των 100 kΩ, όπως το σχήμα 4-1. Όταν χρειαζόταν να επιτευχθεί η κατάσταση του RESET, στην ReRAM, τότε η αντίσταση γίνονταν της τάξης του 1 kΩ.



Σχήμα 4-1. Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας για την θέση της διάταξης σε κατάσταση SET.

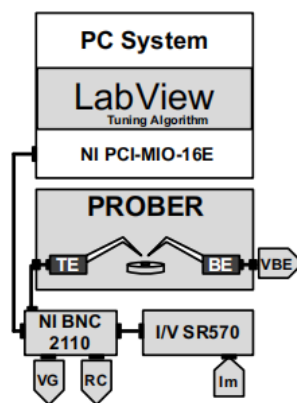
Στην συνέχεια, για τις μετρήσεις και την λήψη του σήματος RTN, έτσι όπως ήταν η προηγούμενη μορφή της διάταξης, γινόταν αφαίρεση της αντίστασης, έχοντας παράλληλα το κάτω ηλεκτρόδιο απευθείας συνδεδεμένο με την γείωση, και το πάνω ηλεκτρόδιο στην πηγή τροφοδοσίας, με τον ψηφιακό Agilent 7000 series παλμογράφο (DSO) για την εξαγωγή του σήματος, όπως στο σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2. Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας, πηγής ρεύματος, και μέτρησης με τάσης.

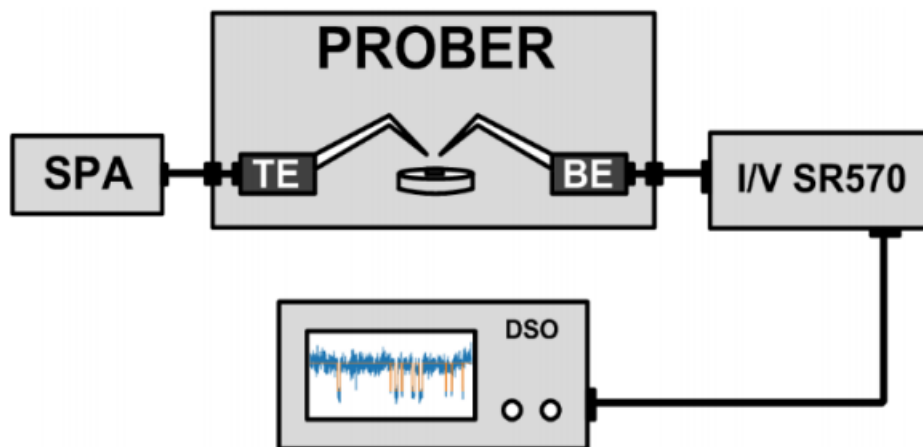
#### 4.1.2 Πειραματική διάταξη με την τεχνική μέτρησης ρεύματος

Κάνοντας την παρατήρηση ότι δεν ελήφθησαν ακριβείς μετρήσεις όσον αφορά την αντίσταση, όπως ειπώθηκε στην 3.1.2, για τις τελικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση και για διερεύνηση του θορύβου, η τεχνική μέτρησης του σήματος του ρεύματος κρίνοντας ότι, παρά την προσθήκη θορύβου με την προσθήκη περισσότερων στοιχείων στο κύκλωμα, υπήρχε δυνατότητα για περισσότερο αξιόπιστες πληροφορίες, οι οποίες και εν τέλει αποκτήθηκαν μέσω επίτευξης αντιστάσεων πολλαπλών επιπέδων στην ReRAM. Δηλαδή, δημιουργήθηκε μια προσαρμοσμένη διάταξη όπου κάρτα DAQ, NI-PCIO-MIO-16E συνδέεται με I / V μετατροπέα SR570, μέσω του κουτιού διακλάδωσης χαμηλού θορύβου (NI BNC 2110). Το σχήμα 4-3 δείχνει στο σύνολό του το διάγραμμα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε. Για την επίτευξη γρήγορου αλλά και συνάμα ακριβούς παθητικού μηχανισμού ελέγχου, χρησιμοποιήθηκε ζεύγος τρανζίστορ NMOS-PMOS (ALD1116, ALD1117). Κατά την διαδικασία του SET, γίνεται σύνδεση του NMOS με το κύκλωμα, και αποσύνδεση του PMOS, ενώ στην διαδικασία του RESET ακολουθείται ο αντίστροφος τρόπος. Αυτή η αυτοματοποιημένη επιλογή μεταξύ NMOS και PMOS πραγματοποιείται από ρελέ τύπου reed (HE3321C0500), ενώ στην διάταξη του memristor υπάρχει μηδενικό ρεύμα. Η ίδια προσέγγιση με ρελέ πραγματοποιήθηκε και για την σύνδεση, ή αντίστοιχα την αποσύνδεση του I / V κατά την διάρκεια του SET / RESET, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-3. Ο απαγωγός των τρανζίστορ είναι συνδεδεμένος με το BE του memristor, ενώ οι τάσεις για τα ρελέ, αλλά και οι παλμοί που εφαρμόζονται στο TE του memristor και στις πύλες του ζεύγους των τρανζίστορ NMOS – PMOS, παρέχονται από την κάρτα DAQ.



Σχήμα 4-3. Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας της πειραματικής διάταξης για την επίτευξη πολλαπλών αντιστάσεων.

Με αυτά τα δεδομένα, στο σχήμα 4-4 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις RTN μετρήσεις, με την οποία, συγκεκριμένα, αφού γίνει η κατάλληλη ρύθμιση, του memristor, στην αντίσταση σε ένα καθορισμένο επίπεδο, η μέτρηση του RTN καταγραφόταν από τον ψηφιακό παλμογράφο, για 100 s με χρόνο δειγματοληψίας 25  $\mu$ s, μέσω του I / V μετατροπέα.



Σχήμα 4-4. Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας για τις RTN μετρήσεις.

Στην εικόνα 4-1 είναι η πειραματική διάταξη σε φωτογραφία, όπου A είναι ο I / V μετατροπέας SR570, B η κάρτα DAQ NI-PCIO-MIO-16E, C το κουτί διακλάδωσης χαμηλού θορύβου (NI BNC 2110), D ο ψηφιακός Agilent 7000 series παλμογράφος (DSO), E η πηγή τροφοδοσίας, ή αλλιώς το Keysight B2902A, και στο F ένα μέρος του μεταλλικού κλωβού, στον οποίο περιέχεται μέσα το δείγμα προς μέτρηση.





Εικόνα 4-1. Φωτογραφία του συνόλου της πειραματικής διάταξης.

## 4.2 Ανάπτυξη software

### 4.2.1 Software για την απόκτηση των πειραματικών αποτελεσμάτων

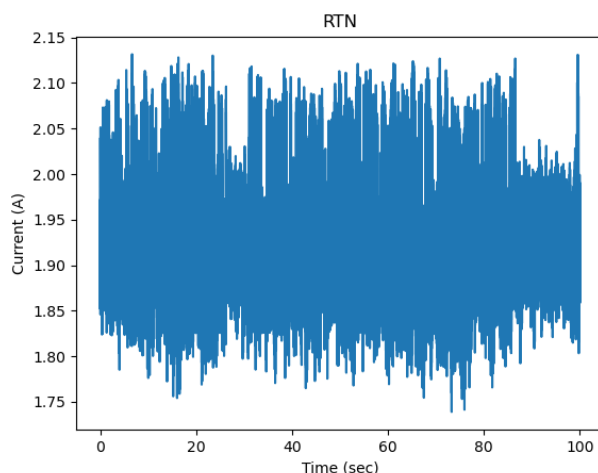
Ο έλεγχος της πειραματικής διάταξης πραγματοποιούταν από το λογισμικό LabView, το οποίο επέτρεπε την εφαρμογή οποιασδήποτε ακολουθίας παλμών συντονισμού. Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος ευαίσθητος στην αλλαγή της αγωγιμότητας, για τον ακριβή συντονισμό στην επιθυμητή αντίσταση. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος συνεχώς αναζητεί την κατάλληλη τάση συντονισμού, μέσω μικρών αυξήσεων της εφαρμοζόμενης τάσης. Ορίζοντας ο χρήστης εύρος αντιστάσεων, μεταξύ  $R_{max}$  και  $R_{min}$ , μέσα στο οποίο είναι επιθυμητή η εύρεση της αντίστασης του memristor, εφαρμόζονται παλμοί θετικής τάσης όταν παραμένει μεγαλύτερη της  $R_{max}$ , ενώ αρνητικής τάσης σε περίπτωση παραμονής της μικρότερη της  $R_{min}$ . Στην περίπτωση της παρατήρησης ενός σημαντικού άλματος  $\Delta R$ , όπου  $\Delta R > n|R_{max} - R_{min}|$ , τότε η τάση συντονισμού επιστρέφει στην αρχική της τιμή. Διαφορετικά στην πραγματοποίηση ενός προκαθορισμένου αριθμού από προσπάθειες συντονισμού ( $n$ ) χωρίς την ουσιαστική πραγματοποίηση άλματος στην αντίσταση ( $\Delta R < n|R_{max} - R_{min}|$ ), γίνεται αύξηση της τάσης συντονισμού. Συγκεκριμένα επιτυγχάνεται μία μέθοδος μη γραμμικής αύξησης της τάσης η οποία περιγράφεται από την εξής σχέση  $Ramp(\log(|\Delta L| / |\Delta R|))$ , η οποία λαμβάνει υπόψιν της το άλμα της αντίστασης ( $\Delta R$ ) ως μέρος της συνολικής διαφοράς που πρέπει να καλυφθεί στην αντίσταση ( $\Delta L$ ), έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή  $((R_{max} - R_{min}) / 2)$ . Λόγω της λογαριθμικής φύσης της, η παραπάνω εμπειρική σχέση χρησιμοποιήθηκε για ταχύτερη σύγκλιση στην επιθυμητή αντίσταση, ενώ παράλληλα εξασφαλίστηκε και η παράταση της αντοχής της ικανότητας εναλλαγής αντίστασης του υλικού, η οποία υπήρχε η πιθανότητα να μειωθεί λόγω θερμικής βλάβης [1]. Για την αποφυγή παρερμηνειών, ο αλγόριθμος παρέχει παλμό τάσης ανάγνωσης τιμής  $+0.1$  V, και εύρους 200  $\mu s$  μετά από κάθε παλμό συντονισμού, και σταματάει να εφαρμόζει παλμούς συντονισμού όταν επιτευχθεί ο στόχος ( $R_m \in [R_{min}, R_{max}]$ ). Μετά από την

επίτευξη αυτού του στόχου, εφαρμόζονται παλμοί τάσης ανάγνωσης μέχρι το πρόγραμμα να το σταματήσει ο χρήστης.

#### 4.2.2 Software για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων

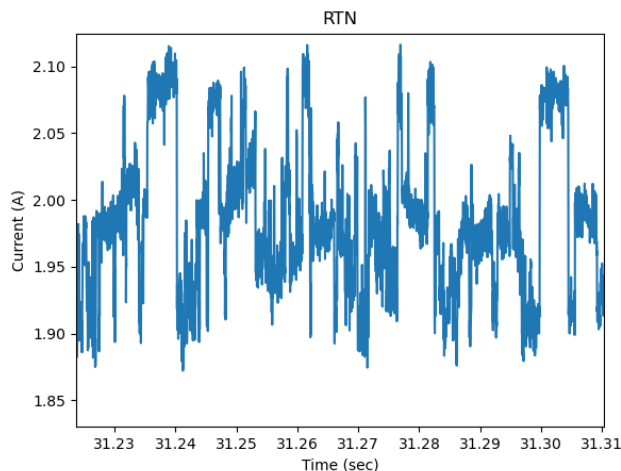
Για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, έγινε ανάπτυξη, από τον διδακτορικό φοιτητή κ. Νικόλαο Βασιλειάδη, και αξιοποίηση ενός προγράμματος, το οποίο γράφτηκε σε γλώσσα Python, και ονομάστηκε RTN\_Analyzer. Με την χρήση του προγράμματος, κατέστη δυνατή η παραγωγή διαφόρων διαγραμμάτων, καθώς και οι πίνακες που περιέχουν τα στοιχεία των διαγραμμάτων. Με την ανάλυση των στοιχείων επετεύχθη η εξαγωγή συμπερασμάτων για τα χαρακτηριστικά των διατάξεων ReRAM, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.

Τα διαγράμματα είναι, πρώτον, το σήμα του RTN (Σχήμα 4-5), το οποίο μετράτε με την πειραματική διάταξη, ανάλυση της οποίας έγινε στην παράγραφο 4.1.



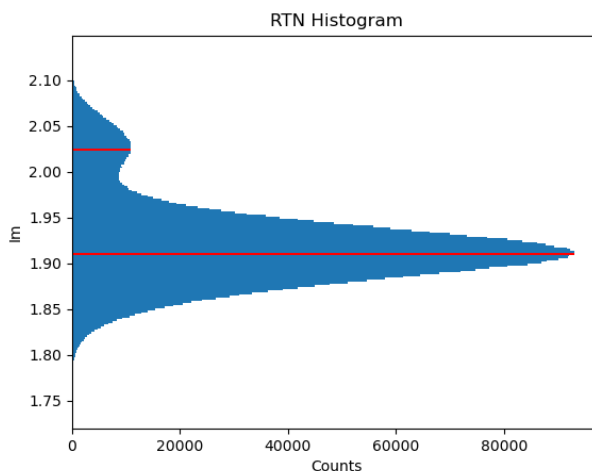
Σχήμα 4-5. Εξαχθέν διάγραμμα RTN από το πρόγραμμα.

Σε αυτό το πρόγραμμα παρέχεται η δυνατότητα της εστίασης σε ένα μικρό μέρος του σήματος, για την καλύτερη παρατήρηση της μορφής του σήματος, όπως στο σχήμα 4-6.



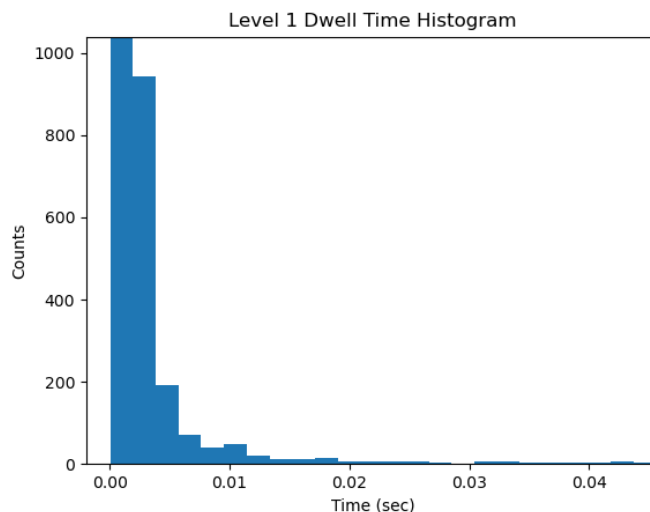
Σχήμα 4-6. Μέρος σήματος σχήματος 3-5.

Το ιστόγραμμα των τιμών του σήματος (Σχήμα 4-7), το οποίο, όπως λέχθηκε στην παράγραφο 3.2.3, δείχνει πόσες φορές έχει βρεθεί κάθε συγκεκριμένη τιμή του σήματος.



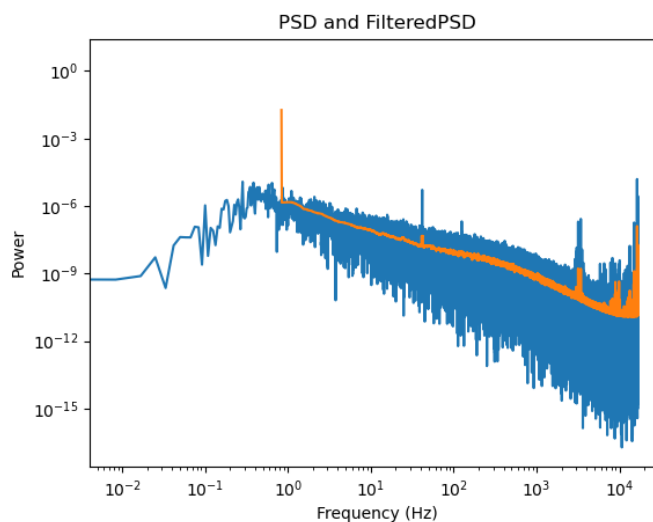
Σχήμα 4-7. Εξαχθέν ιστόγραμμα τιμών σήματος.

Επομένως, στο σχήμα 4-7 παρατηρούνται οι κορυφές από τις τιμές οι οποίες εμφανίζονται περισσότερο, ή διαφορετικά, που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα παγίδευσης. Το πρόγραμμα προσαρμόζεται ανάλογα με το πλήθος των κορυφών, και τις τιμές που αντιστοιχούν στις κορυφές. Με την εισαγωγή των συγκεκριμένων τιμών, το πρόγραμμα εξάγει τα υπόλοιπα διαγράμματα, από τα οποία το ένα είναι το ιστόγραμμα με την κατανομή των χρόνων παραμονής σε κάθε επίπεδο (Σχήμα 4-8).



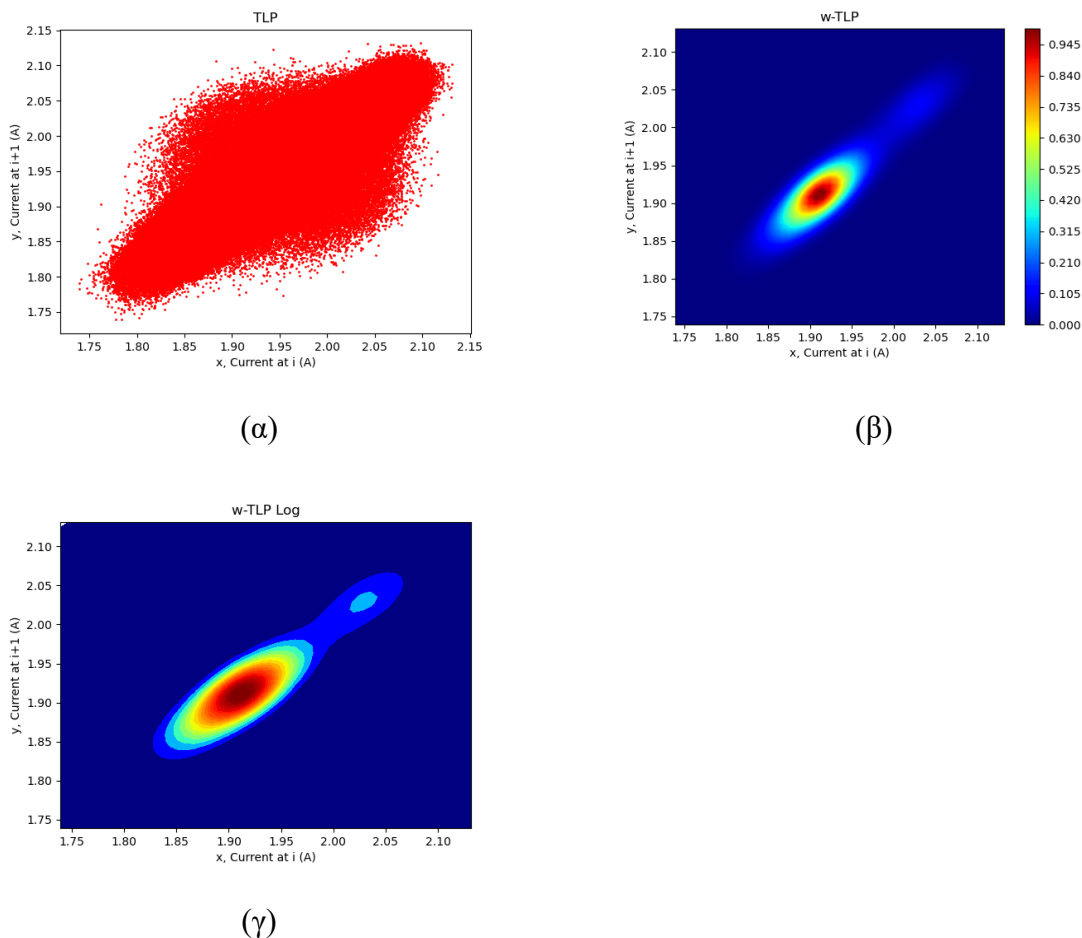
Σχήμα 4-8. Εξαχθέν ιστόγραμμα στο οποίο φαίνεται η κατανομή των χρόνων παραμονής σε κάθε επίπεδο.

Το διάγραμμα, καθώς και ο πίνακας στοιχείων του, το οποίο δείχνει το φάσμα της πυκνότητας ισχύος του RTN (PSD), με την πορτοκαλί περιοχή να είναι αποτέλεσμα εφαρμογής αλγορίθμου εύρεσης μέσης τιμής (Σχήμα 4-9).



Σχήμα 4-9. Εξαχθέν φάσμα της πυκνότητας ισχύος του RTN (PSD).

Το χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP), το αντίστοιχο της σταθμικής χρονικής υστέρησης ( $w$  - TLP), αλλά και το αντίστοιχο σε λογαριθμική κλίμακα, στα σχήματα 4-10 (α-γ) αντίστοιχα, τα οποία και έχουν εξηγηθεί αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.4.



Σχήμα 4-10. (α) Εξαχθέν χρονοδιάγραμμα χρονικής υστέρησης (TLP), (β, γ) της σταθμικής χρονικής υστέρησης (w-TLP), και το αντίστοιχο σε λογαριθμική κλίμακα.

### 4.3 Περιγραφή των δειγμάτων που μελετήθηκαν

#### 4.3.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης, διεξήχθησαν μετρήσεις, οι οποίες και πραγματοποιήθηκαν μέσω δύο ειδών διατάξεων ReRAM. Διατάξεις οι οποίες συνδεόμενες με μία αλληλουχία στοιχείων, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.1.2, δίνουν την δυνατότητα της έρευνας του φαινομένου της εναλλαγής της αντίστασης (RS), το οποίο εξηγήθηκε στην παράγραφο 2.5, και το οποίο ουσιαστικά θα αναλυθεί μέσα από τα πειραματικά αποτελέσματα, δηλαδή τα σήματα RTN.

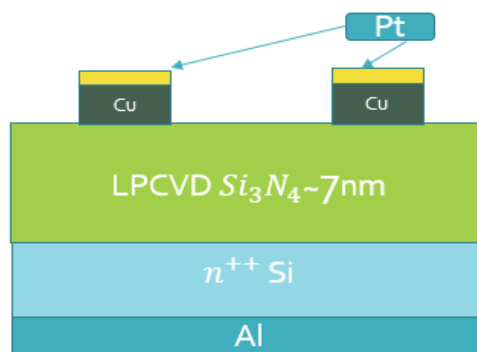
Ως κύριο υλικό του διηλεκτρικού, των συγκεκριμένων διατάξεων ReRAM, είναι το νιτρίδιο του πυριτίου ( $\text{Si}_x\text{Ni}_y$ ). Αυτό το είδος διηλεκτρικού, είναι αρκετά γνωστό στην τεχνολογία των μη πτητικών μνημών και χρησιμοποιείται αρκετά στην αγορά των διατάξεων μνήμης παγίδευσης φορτίου (π.χ. SONOS, BiCS). Συμμετέχει στο πλαίσιο στο οποίο τα υλικά έχουν χαμηλή διάχυση οξυγόνου, και άρα οξειδώνονται πολύ δύσκολα, με αποτέλεσμα να είναι αρκετά ανθεκτικά στην υγρασία, γεγονός το οποίο είναι πρωταρχικής σημασίας. Η υγρασία έχει τις πιο σοβαρές επιπτώσεις στην αξιοπιστία των μηχανισμών εναλλαγής αντίστασης, ECM και VCM, οι οποίοι εξηγήθηκαν στη παράγραφο 2.5. Αυτοί οι μηχανισμοί, είναι οι πιο ελκυστικοί υποψήφιοι για τις

ReRAM, και το φαινόμενο αυτό με την υγρασία συμβαίνει κυρίως επειδή το διηλεκτρικό είναι ένα υλικό οξειδίου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτού του είδους του διηλεκτρικού είναι η πλήρης συμβατότητα με την τεχνολογία CMOS [2,3].

Με αυτά τα δεδομένα, μελετήθηκαν οι παρακάτω διατάξεις.

#### 4.3.2 Διάταξη MIS

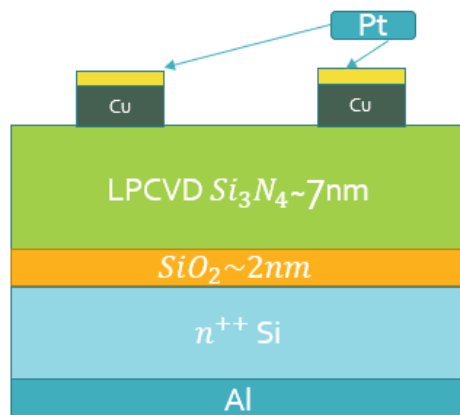
Στην διάταξη MIS (Metal – Insulator - Si), κάτω από το υπόστρωμα, ως βάση, βρίσκεται το υλικό του αλουμινίου (Al). Το υπόστρωμα, το οποίο χρησιμοποιείται ως το κάτω ηλεκτρόδιο (BE), αποτελείται από το ημιαγωγικό υλικό του πυριτίου, στο οποίο έχει εμφυτευθεί μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων ( $n^{++}\text{Si}$ ). Πάνω από το Si, έχει εναποτεθεί, στους +800 °C, με την μέθοδο LPCVD το υλικό  $\text{Si}_3\text{N}_4$  πάχους περίπου 7 nm, το οποίο ουσιαστικά είναι το διηλεκτρικό της ReRAM. Έπειτα, επάνω από το διηλεκτρικό βρίσκεται υλικό του χαλκού (Cu) πάχους 30 nm, που λειτουργεί ως το πάνω ηλεκτρόδιο (TE) της διάταξης, και τέλος, επάνω από τον Cu είναι τοποθετημένο ένα φύλλο λευκόχρυσου (Pt) πάχους 30 nm, για την αποφυγή οξείδωσης του Cu. Αυτή η διάταξη παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα 4-11.



Σχήμα 4-11. Σχηματική αναπαράσταση της ReRAM διάταξης MIS.

#### 4.3.3 Διάταξη MIOS

Αυτή η διάταξη MIOS (Metal – Insulator – Oxide - Si), είναι πανομοιότυπη με την MIS, με την μόνη διαφορά ότι ανάμεσα στο Si και το  $\text{Si}_3\text{N}_4$  έχει τοποθετηθεί το υλικό του οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) πάχους περίπου 2 nm (Σχήμα 4-12).

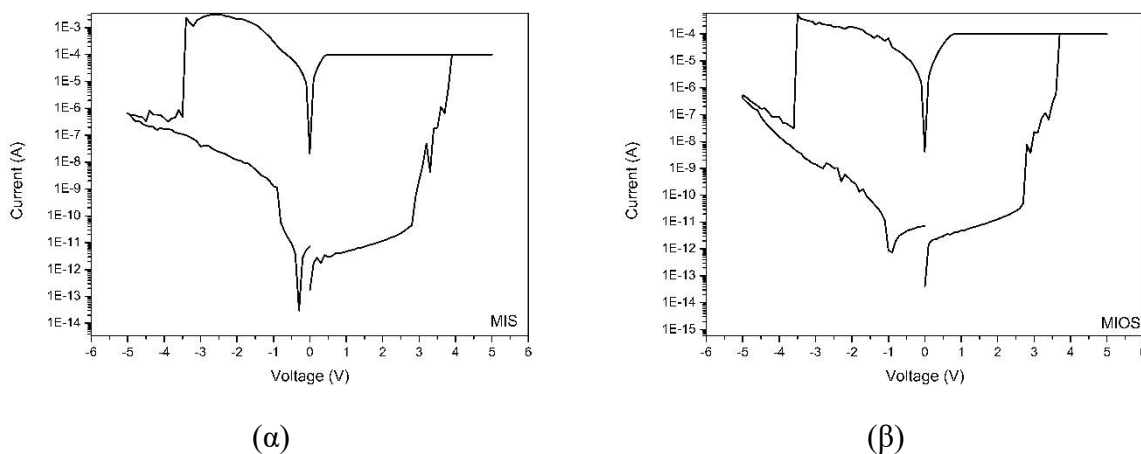


Σχήμα 4-12. Σχηματική αναπαράσταση της ReRAM διάταξης MIOS.

#### 4.4 Πειραματικά αποτελέσματα - συμπεράσματα

##### 4.4.1 I – V μετρήσεις και ανάλυση

Πραγματοποιήθηκαν τυπικές μετρήσεις κύκλων σάρωσης τάσης για την αρχική κατανόηση του μηχανισμού RS στο νιτρίδιο, οι οποίες και φαίνονται στο σχήμα 4-13, πριν από την περαιτέρω εμφάθυνση με την μέτρηση των σημάτων RTN, και την ανάλυσή των. Σε αυτές είναι εμφανής ο διπολικός (bipolar) τρόπος λειτουργίας, ανάμεσα σε SET / RESET, όπως και το ότι δεν απαιτείται το βήμα της ηλεκτρομορφοποίησης. Το ρεύμα  $I_{cc}$  είναι στο μέγεθος των +100  $\mu$ A. Το  $I_{cc}$  επιτρέπει τον έλεγχο του μεγέθους της περιοχής χαμηλής αντίστασης (LRS), και την πρόληψη από την πλήρη κατάρρευση του διηλεκτρικού. Παρατηρείται μια συνηθισμένη αύξηση του ρεύματος χαμηλής αντίστασης, κατά την διάρκεια της RESET διαδικασίας. Αυτό οφείλεται τόσο στο γεγονός ότι το όργανο μέτρησης δεν μπορεί να σταματήσει την γρήγορη αύξηση του ρεύματος, όσο και την εκφόρτιση της χωρητικότητας της διάταξης [4].



Σχήμα 4-13. I-V χαρακτηριστικές των διατάξεων MIS (α) και MIOS (β).

Όπως παρατηρείται, η χαρακτηριστική I-V των διατάξεων MIS (Σχήμα4-13 (α)) εμφανίζει μεγαλύτερες μεταβολές ρεύματος κατά την διάρκεια των διαδικασιών SET και RESET, σε σύγκριση με την αντίστοιχη της MIOS (Σχήμα 4-13 (β)), γεγονός το οποίο συνάδει με τις διαφορές μεταξύ τους στον σχεδιασμό της διηλεκτρικής στοιβάδας τους. Η εφαρμογή θετικού

ρεύματος στο TE των διατάξεων προκαλεί την δημιουργία κατιόντων  $\text{Cu}^+$ , οπών αζώτου  $\text{V}_\text{N}$  και / ή την έγχυση ηλεκτρονίων από το υπόστρωμα. Το γεγονός ότι οι μεταβολές του ρεύματος είναι αρκετά μικρότερες με την εισαγωγή του λεπτού στρώματος  $\text{SiO}_2$  (περίπτωση MIOS), υποδηλώνει ότι ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για τις μεταβολές στο MIS οφείλεται στην ανταλλαγή ηλεκτρονίων μεταξύ του  $\text{n}^{++}\text{Si}$  υποστρώματος και των παγίδων νιτριδίου στο  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Τα ηλεκτρόνια μπορούν εύκολα να εγχυθούν σε παγίδες οι οποίες βρίσκονται κοντά στην διεπιφάνεια των Si και  $\text{SiN}_x$ , γεγονός το οποίο προκαλείται από το χαμηλό ενεργειακό φράγμα το οποίο υπάρχει μεταξύ τους, που είναι περίπου στα +5.1eV με +5.3eV [5], αλλά και από την μεγάλη συγκέντρωση των εσωτερικών παγίδων του διηλεκτρικού [6].

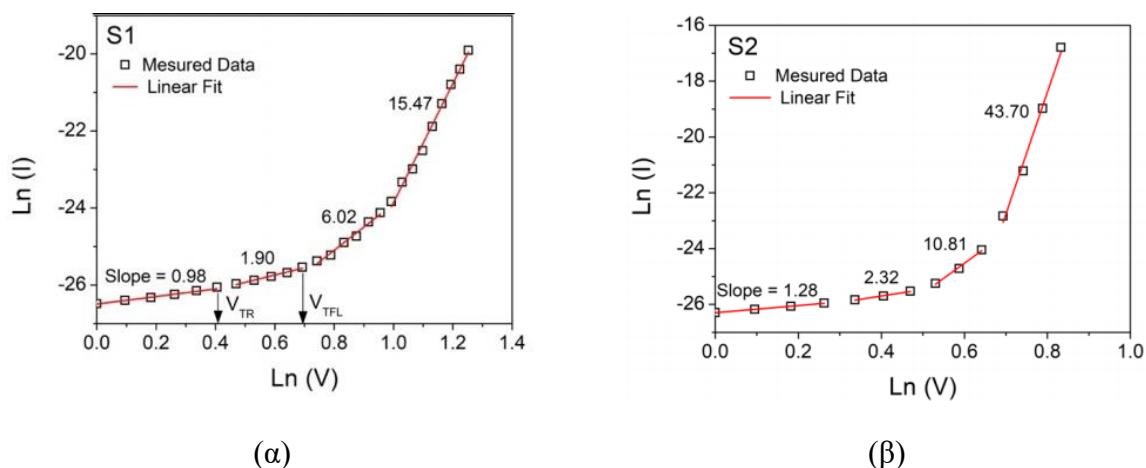
Η προέλευση του μηχανισμού της εναλλαγής αντίστασης (RS) στο νιτρίδιο του πυριτίου δεν είναι ακόμη πολύ γνωστή. Ωστόσο, στην πλειονότητά τους τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ερευνών συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός του RS προέρχεται από έναν μηχανισμό υποβοηθούμενο από παγίδες [4], εκτός από [7] την περίπτωση όπου ο πιο πιθανός μηχανισμός αποδίδεται στην κίνηση των πρωτονίων λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης των ατόμων υδρογόνου. Αυτό οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές τεχνικές εναπόθεσης οι οποίες επηρεάζουν τις θερμοδυναμικές παραμέτρους του σχηματισμού των ατελειών [8]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο μηχανισμός SCLC ταιριάζει καλύτερα με τις μετρήσεις IV (Σχήμα 4-14), και αυτός είναι ο πιο συνηθισμένος μηχανισμός ευρισκόμενος στην βιβλιογραφία για  $\text{Si}_x\text{N}_y$  memristors [4]. Συμπερασματικά, τα ηλεκτρόνια περνάνε στις παγίδες οι οποίες βρίσκονται κοντά στην διεπιφάνεια του πυριτίου με το στρώμα του νιτριδίου (νόμος του Ohm), και καθώς αυξάνεται η τάση, παραπάνω παγίδες, οι οποίες βρίσκονται βαθύτερα στο διηλεκτρικό, συμπληρώνονται προκαλώντας την μετάβαση, υπό τάση  $V_{\text{TR}}$ , από την γραμμικής στην παραβολικής μορφής I-V. Όταν συμπληρωθούν όλες οι παγίδες, υπό τάση  $V_{\text{TFL}}$ , το ρεύμα αυξάνεται αμέσως. Σύμφωνα με την θεωρία SCLC η συγκέντρωση παγίδων μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση:

$$N_t = \frac{2\varepsilon V_{\text{TFL}}}{qd^2}$$

#### *Εξίσωση 4-1*

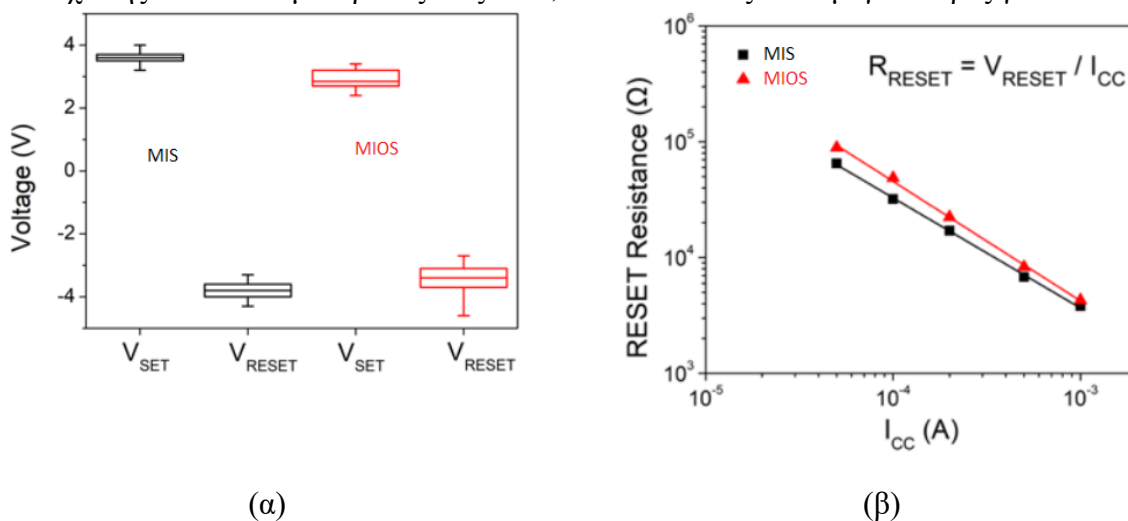
όπου  $\varepsilon$  η διηλεκτρική σταθερά κενού του νιτριδίου του πυριτίου,  $q$  το θεμελιώδες ηλεκτρονικό φορτίο, ενώ  $d$  και  $V_{\text{TFL}}$  υποδηλώνουν το πάχος του διηλεκτρικού και την τάση του ορίου για την συμπλήρωση των παγίδων αντίστοιχα. Σύμφωνα με την εξίσωση 4-1, η συγκέντρωση των παγίδων σε  $\text{Si}_x\text{N}_y$  στρώματα εκτιμήθηκε σε  $1.14 \times 10^{20}\text{cm}^{-2}$  και  $1.2 \times 10^{20}\text{cm}^{-2}$  για τα δείγματα MIS και για τα MIOS αντίστοιχα, οι οποίες είναι τυπικές τιμές για τέτοια υλικά, υποδηλώνοντας επίσης ότι τα στρώματα νιτριδίου έχουν παρόμοιες ιδιότητες [6]. Λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα, οι διαφορές των παραμέτρων λειτουργίας μεταξύ MIS και MIOS αποδίδονται κυρίως στην παρουσία του στρώματος του οξειδίου. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις καμπύλες IV των MIS και MIOS στο σχήμα 4-13, συμπεραίνεται ότι στην διαδικασία του RESET του MIS εμφανίζονται μεταβάσεις σε μεγαλύτερα επίπεδα ρεύματος. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει λόγω της θερμικής ανάκτησης του υλικού από την διαδικασία επαναφοράς από το SET στο RESET [9].





Σχήμα 4-14. Ανάλυση τυπικών  $I$ - $V$  χαρακτηριστικών ακολουθώντας τον μηχανισμό αγωγιμότητας  $SCL$  για δείγματα (α) MIS και (β) MIOS.

Στο σχήμα 4-15(α) παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τα SET, RESET για τις δύο διατάξεις. Το παράθυρο αντίστασης είναι ελαφρώς υψηλότερο στην MIS σε σύγκριση με το αντίστοιχο της MIOS. Οι μεταβολές στις SET, RESET τάσεις είναι μεγαλύτερες για το MIOS.



Σχήμα 4-15. (α) Διαγράμματα στατιστικών πλαισίων για  $V_{SET}$  και  $V_{RESET}$  για τα εξεταζόμενα δείγματα. (β) Εξάρτηση της αντίστασης RESET με το ρεύμα  $I_{CC}$  για τις εξεταζόμενες διατάξεις.

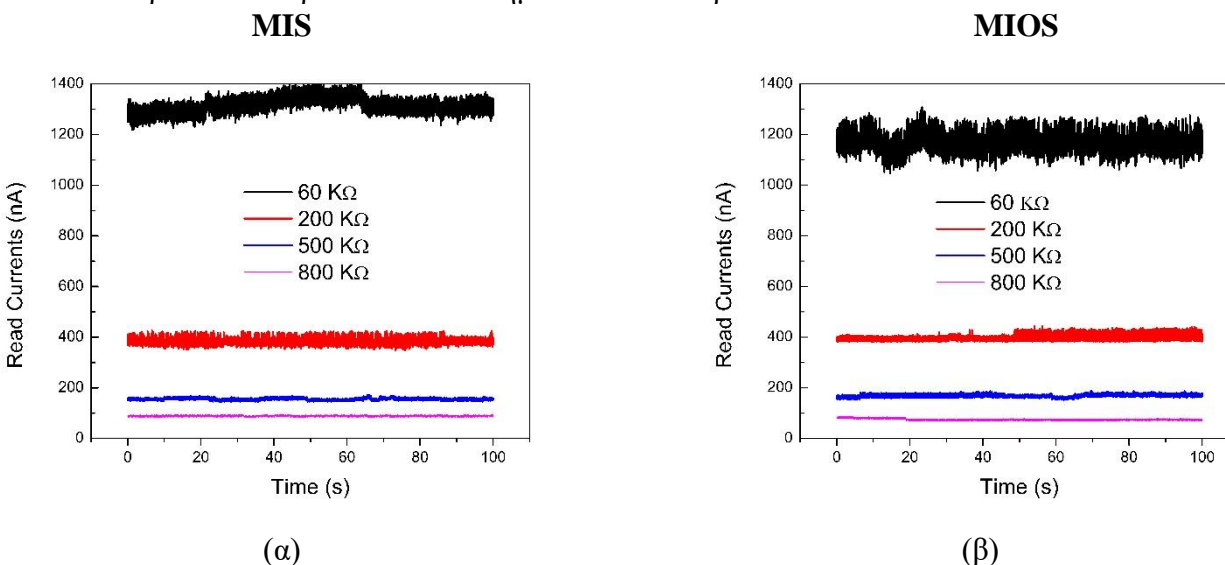
Στο σχήμα 4-15(β) παρουσιάζεται η γραμμική συμπεριφορά μεταξύ της RESET αντίστασης και του  $I_{CC}$  αξιοποιώντας τα αποτελέσματα του σχήματος 4-15 (α). Η κλίση για το MIS είναι  $(-0,961 \pm 0,016)$   $(\Omega / A)$  και η αντίστοιχη για το MIOS  $(-1,03 \pm 0,02)$   $(\Omega / A)$ . Σύμφωνα με το [10], τα συγκεκριμένα αποτελέσματα οδηγούν στην ένδειξη ότι ο μηχανισμός RS διέπεται από την δύναμη που παρέχεται στα memristor, και όχι από την ενέργεια.

#### 4.4.2 Πειραματική διαδικασία για ανάλυση και διερεύνηση του RTN

Μετά την επίτευξη μίας σταθερής αντίστασης, δηλαδή ενός σταθερού αγωγιμού μονοπατιού, με το software (παράγραφος 4.2.1), πραγματοποιείτε η μετάβαση στη διάταξη του σχήματος 4-4, με την οποία επιτυγχάνεται η λήψη της μέτρησης του RTN. Ο ημιαγώγιμος παραμετρικός αναλυτής Keysight B2902A χρησιμοποιήθηκε ως πηγή τάσης ακριβείας, και έδινε τάση στα +0.1V κατά την διάρκεια της μέτρησης RTN. Ο χρόνος δειγματοληψίας στην καταγραφή των δεδομένων του σήματος του RTN ήταν 25μs, η οποία καταγραφή γινόταν από έναν παλμογράφο Agilent 7000 σε λειτουργία υψηλής ανάλυσης με μέγεθος buffer μνήμης 4 Msamples, δίνοντας  $4 \text{ Msamples} \times 25 \mu\text{s} = 100\text{s}$  μήκους RTN σήματος. Ο μετατροπέας I / V ήταν ικανός για φιλτράρισμα χαμηλής διέλευσης -6db στα +10kHz. Σε κάθε μία από τις ReRAM διατάξεις έγινε ο συντονισμός κοντά σε τέσσερα κυρίαρχα επίπεδα αντίστασης, 60, 200, 500 και 800kΩ.

#### 4.4.3 Αποτελέσματα – ανάλυση σημάτων

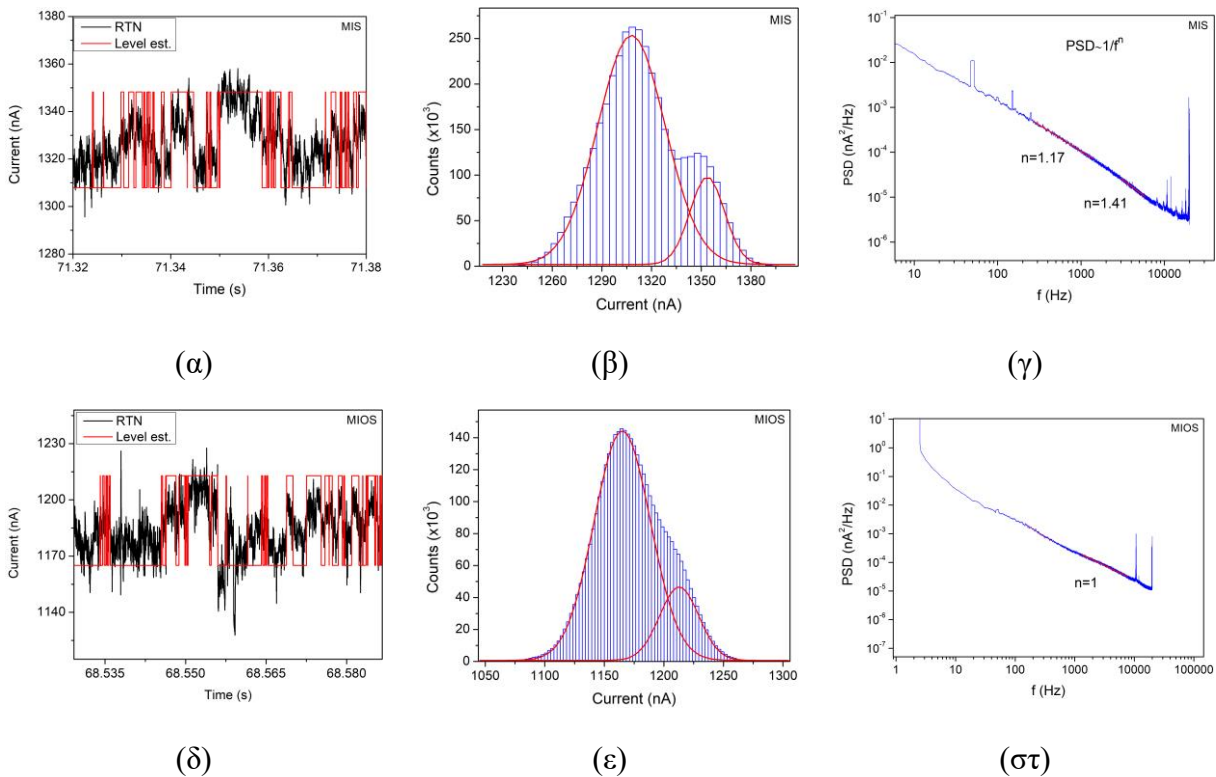
Στα σχήματα 4-16 (α, β), παρουσιάζονται μαζί τέσσερις μετρήσεις RTN του ρεύματος ανάγνωσης για καθεμία από τις MIS και MIOS αντίστοιχα. Τα χρώματα προσαρμόστηκαν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο ώστε τα σήματα να είναι ορατά.



Σχήμα 4-16. (α), (β) RTN σήματα σε διαφορετικά επίπεδα αντίστασης όπως καταγράφονται από τον παλμογράφο για τα δείγματα (α) MIS, (β) MIOS.

Παρακάτω, με την βοήθεια του software της παραγράφου 4.2.2, παρατίθενται σε σειρά ένα μέρος του σήματος κάθε διάταξης και αντίστασης, στο οποίο φαίνονται τα επίπεδα (κόκκινο σήμα) στα οποία κινείται χάρις την εφαρμογή του FHM μοντέλου από το software, και τα οποία είναι στα (α) και (δ). Στα (β) και (ε) είναι εξαχθέντα ιστογράμματα με τις κορυφές, στα οποία και φαίνονται οι κατανομές Gauss (κόκκινες κατανομές) οι οποίες ταιριάζουν στις κορυφές. Στα (γ), (στ), τέλος, είναι τα αντίστοιχα PSD καθώς και οι κλίσεις των αντίστοιχων ευθειών. Η ανάλυση των δεδομένων των ιστογραμμάτων, καθώς και του PSD, πραγματοποιείται σύμφωνα με το κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα με την βοήθεια της εξίσωσης 3-6 εξάγετε ο αριθμός των ενεργειακών επιπέδων παγίδευσης, και η ανάλυση των PSD πραγματοποιείται σύμφωνα με την παράγραφο 3.2.2.

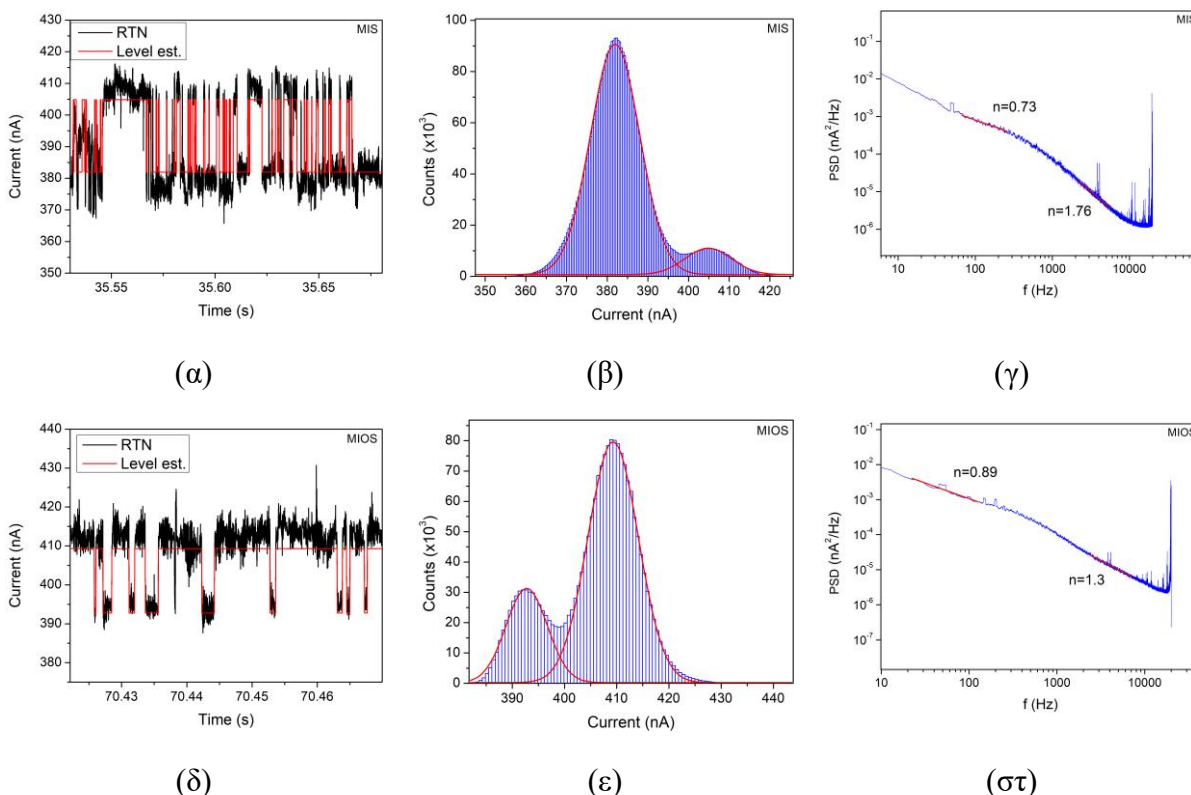
#### Αντίσταση Memristor : 60 kΩ



Σχήμα 4-17. (α,δ) RTN σήματα και τα εκτιμώμενα διακριτά επίπεδα του ρεύματος, (β,ε) ιστογράμματα του RTN, (γ,στ) οι σχετικές γραφικές παραστάσεις PSD στην αντίσταση των 60 kΩ στα δείγματα MIS, MIOS.

Στην μικρότερη αντίσταση των 60 kΩ παρουσιάζονται δύο σήματα, τα οποία στο επίπεδο των ιστογραμμάτων μοιάζουν σε μεγάλο βαθμό, όπου το επίπεδο στην θέση με το μεγαλύτερο ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ως αυτό που αντιστοιχεί στο CF, ενώ το άλλο στο επίπεδο της παγίδας, ενώ γίνεται και η παρατήρηση του πολύ μεγαλύτερου μεγέθους του επιπέδου της παγίδας σχετικά με το αντίστοιχο του CF. Σε συνδυασμό με την κλίση των PSD, οι οποίες είναι κοντά στην μονάδα (θόρυβος flicker), και όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 3.2.2, αυτό σημαίνει και μεγάλος αριθμός παγίδων διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων, εξάγετε το συμπέρασμα ότι το CF περικλείεται από έναν ικανά μεγάλο αριθμό παγίδων διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων, οι οποίες συνθέτουν το πολύ μεγαλύτερο επίπεδο, στο οποίο ουσιαστικά επικρατεί ένα ενεργειακό επίπεδο στην ανταλλαγή φορέων με το CF. Παρατηρείται αυτό το επίπεδο να ξεχωρίζει σε μεγαλύτερο βαθμό στο δείγμα MIS σχετικά με το MIOS, και αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί από την παρουσία του SiO<sub>2</sub>, το οποίο όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 4.4.1. μειώνει, και ρυθμίζει, την ανταλλαγή των ηλεκτρονίων μεταξύ του υποστρώματος (n<sup>++</sup>Si) και του νιτριδίου Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

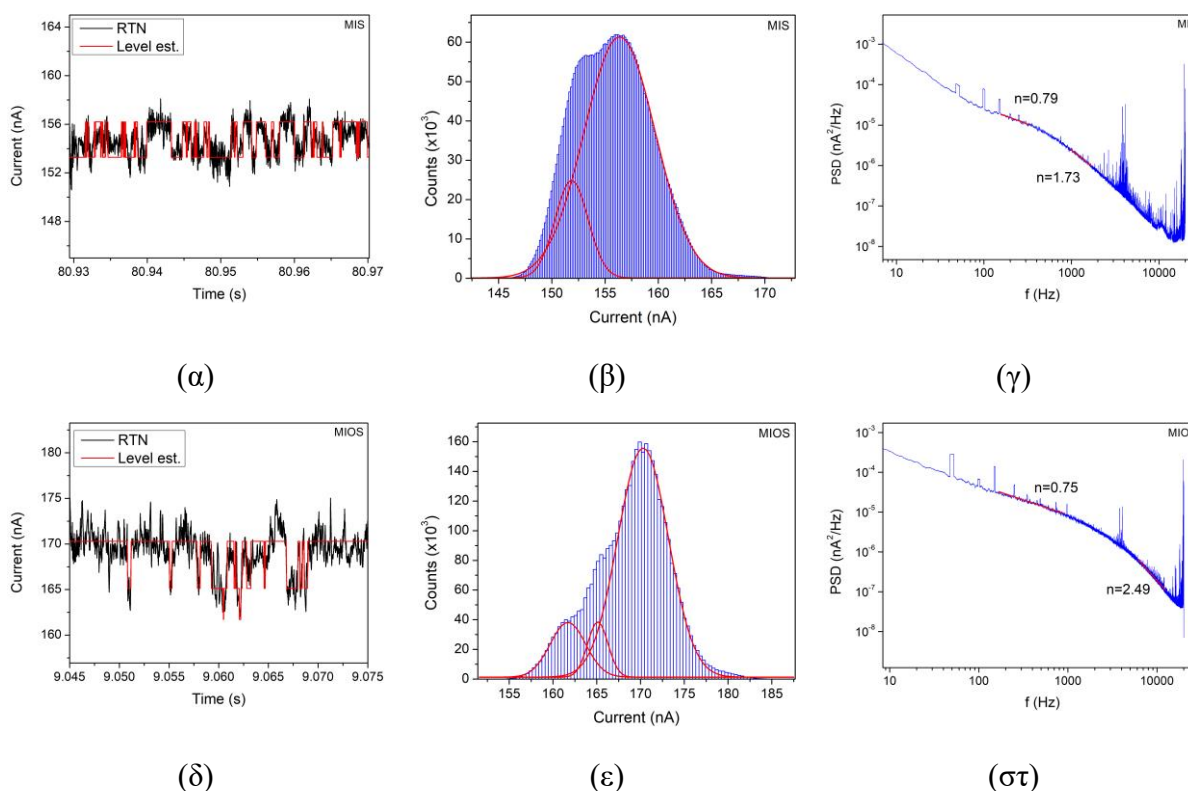
### Αντίσταση Memristor : 200 kΩ



Σχήμα 4-18. (α,δ) RTN σήματα και τα εκτιμώμενα διακριτά επίπεδα του ρεύματος, (β,ε) ιστογράμματα του RTN, (γ,στ) οι σχετικές γραφικές παραστάσεις PSD στην αντίσταση των 200 kΩ στα δείγματα MIS, MIOS.

Σε αυτό το επίπεδο της αντίστασης, καθώς το αγώγιμο μονοπάτι μικραίνει, και δημιουργείται μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ LRS και HRS, παρατηρείται ο σαφής διαχωρισμός του επικρατέστερου ενεργειακού επιπέδου παγίδευσης με το αντίστοιχο του CF και για τα δύο δείγματα. Στο MIS παρατηρείται ένα ασθενές CF το οποίο ανταλλάσσει φορτία με το πολύ περισσότερο συμπαγές σύνολο των παγίδων των διαφόρων ενεργειακών επιπέδων, το οποίο βρίσκεται τριγύρω του. Σε αυτή την περίπτωση, στο PSD και στις υψηλές συχνότητες το  $n$  είναι πιο κοντά στο  $-2$ , γεγονός το οποίο φανερώνει ένα κυρίαρχο και καλά καθορισμένο ενεργειακό επίπεδο παγίδευσης, το οποίο όμως συνοδεύεται και από άλλα σε αρκετά χαμηλότερη συγκέντρωση δηλαδή το φαινόμενο των παγίδων πολλών ενεργειακών επιπέδων, λόγω και των χαμηλών συχνοτήτων στις οποίες παρατηρείται συμπεριφορά που τείνει περισσότερο στον flicker θόρυβο ( $n \approx -1$ ). Στο MIOS, αντίθετα, παρατηρείται ένα πιο συμπαγές CF από τα επίπεδα παγίδευσης, τα οποία τώρα είναι ένα αρκετά ασθενέστερο σύνολο από αρκετά μικρά τα οποία βρίσκονται τριγύρω από ένα κυρίαρχο, γεγονός που δείχνει και το  $n \approx -1.3$  στις υψηλές συχνότητες.

### Αντίσταση Memristor : 500 k $\Omega$

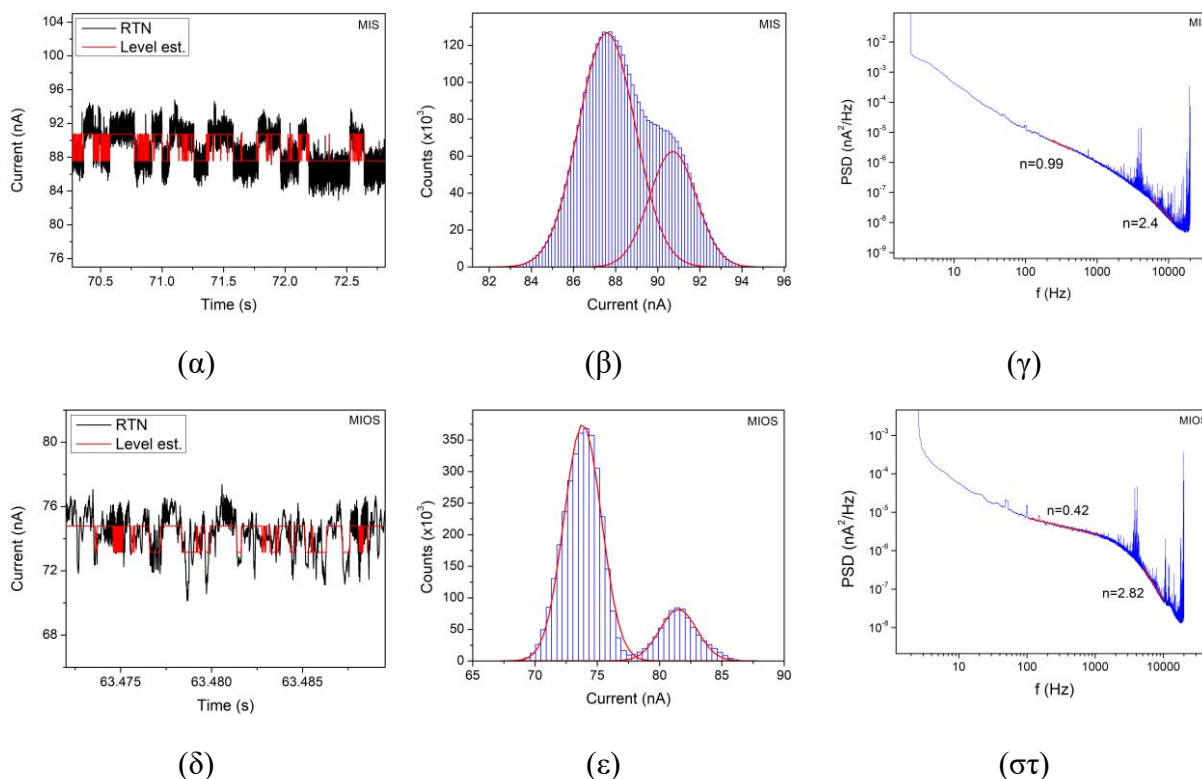


Σχήμα 4-19. (α,δ) RTN σήματα και τα εκτιμώμενα διακριτά επίπεδα του ρεύματος, (β,ε) ιστογράμματα του RTN, (γ,στ) οι σχετικές γραφικές παραστάσεις PSD στην αντίσταση των 500 k $\Omega$  στα δείγματα MIS, MIOS.

Σε αυτή την περίπτωση, των σημάτων που κινούνται σε αντίσταση 500k $\Omega$ , σε μία ενδιάμεση δηλαδή κατάσταση μεταξύ των καταστάσεων LRS και HRS, και που υφίσταται ένα αρκετά ασχημάτιστο CF, παρατηρείται η μη ύπαρξη ξεκάθαρων διαφορετικών επιπέδων, όπως στα σήματα των 60 k $\Omega$ , όμως πάλι διάφορων ενεργειακών επιπέδων, όπως φαίνεται στα ιστογράμματα και στα PSD. Στην περίπτωση του MIS, με το συγκεκριμένο ιστόγραμμα και PSD, μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβάλουν στην ροή των ηλεκτρονίων ένα κύριο επίπεδο παγίδευσης, το οποίο και βρίσκεται στα τμήματα του ασχημάτιστου CF, και ένα δευτερεύον επίπεδο το οποίο και βρίσκεται πολύ κοντά στο πρώτο. Παραμένουν και τα διάφορα άλλα πολύ μικρότερα επίπεδα, τα οποία φαίνονται και από την κλίση του PSD στις χαμηλές συχνότητες, ενώ από την κλίση  $n \approx -1.73$  στις υψηλές, γίνονται ευκρινή τα δύο πολύ καλά καθορισμένα επίπεδα παγίδων. Στο MIOS, από το ιστόγραμμα, παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση η προσθήκη ενός ακόμη ενεργειακού επιπέδου, δηλαδή ενός παραπάνω επιπέδου παγίδευσης το οποίο συνεισφέρει και αυτό σημαντικά στην ροή των ηλεκτρονίων. Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε την κατάσταση όπως στο MIS, με την διαφορά του ότι τώρα αναδεικνύεται ένα επίπεδο παγίδευσης, μαζί με το κύριο στα τμήματα του ασχημάτιστου CF και του δευτερεύοντος εκτός, αλλά και του φαινομένου αρκετά μεγαλύτερου ποσοστού θορύβου στο περιβάλλον λόγω της κλίσης του PSD στα  $-2.49$  στις υψηλές συχνότητες. Από το σήμα του RTN παρατηρείται κυρίως το φαινόμενο ανταλλαγής ηλεκτρονίων μεταξύ του κυρίου με το πρώτο δευτερεύον, και του πρώτου με του

δευτέρου δευτερεύοντος επιπέδου., μπορεί να εξηγηθεί από την συσσώρευση Το φαινόμενο αυτό των δύο επιπέδων, με το ένα κύριο, σε αντίθεση με το αντίστοιχο του ενός λιγότερου του MIS, εξηγείται από την παρουσία το  $\text{SiO}_2$ , το οποίο με την μείωση της ανταλλαγής φορέων μεταξύ του υποστρώματος ( $\text{n}^{++}\text{Si}$ ) και του νιτριδίου  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , δεν καταστεί δυνατή την ανακατανομή των παγίδων σε μεγάλο βαθμό.

### Αντίσταση Memristor : 800 k $\Omega$



Σχήμα 4-20. (α,δ) RTN σήματα και τα εκτιμώμενα διακριτά επίπεδα του ρεύματος, (β,ε) ιστογράμματα του RTN, (γ,στ) οι σχετικές γραφικές παραστάσεις PSD στην αντίσταση των 800 k $\Omega$  στα δείγματα MIS, MIOS.

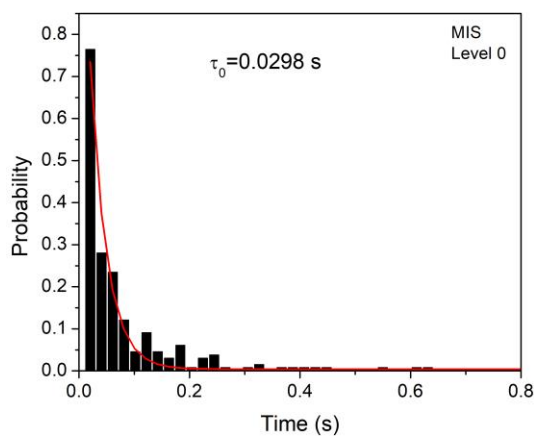
Στην περίπτωση της αντίστασης 800k $\Omega$ , δηλαδή στην πλήρως HRS κατάσταση, όπου υφίσταται ένα πλήρως αποσχηματισμένο CF, στην MIS διάταξη παρατηρείται όπως στα 500k $\Omega$ , η ύπαρξη δύο κύριων επιπέδων παγίδευσης, τα οποία και συμβάλλουν στην περιορισμένη ροή των ηλεκτρονίων λόγω της HRS κατάστασης, με την διαφορά του ότι δεν συμβάλλουν το ίδιο, και ότι είναι διασκορπισμένα στον ίδιο χώρο κοντά. Όπως παρατηρείται από το σήμα RTN οι παγίδες είναι αργές, ενώ στο PSD φανερώνεται η ύπαρξη διαφόρων επιπέδων παγίδευσης, αλλά και η ύπαρξη σημαντικού ποσοστού θορύβου, όπως στο MIOS στα 500k $\Omega$ . Στην διάταξη MIOS, παρατηρείται μία ασταθή περίπτωση, και ήταν αδύνατη η εύρεση συγκεκριμένων ενεργειακών επιπέδων παγίδων. Οι δύο κορυφές που απεικονίζονται αντιστοιχούν σε μια σημαντική αλλαγή της αντίστασης στα 20s της μέτρησης, αλλά και στα 5s. Επίσης, δεν υφίσταται επιμέρους εμφάνιση επιπέδων, αλλά μόνο εμφάνιση θερμικού θορύβου (Thermal noise).

4.4.3 Ανάλυση των χαρακτηριστικών των παγίδων και της συσχέτισης των σημάτων RTN

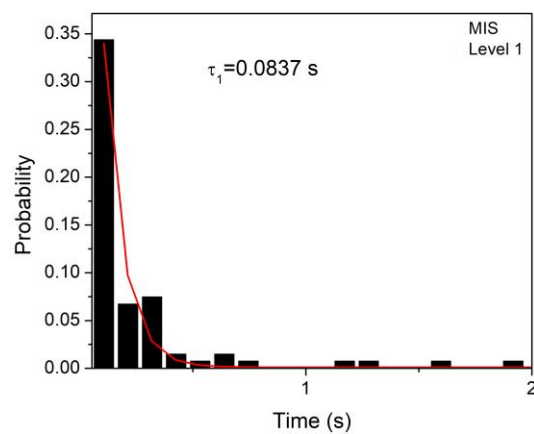
Παρακάτω παρατίθενται τα ιστογράμματα στα οποία παρουσιάζεται η κατανομή των χρόνων παραμονής σε κάθε επίπεδο για κάθε αντίσταση και διάταξη. Σε αυτές τις πειραματικές κατανομές παρατηρείται η δυνατότητα στην αναγωγή και την προσαρμογή τους σε κατανομή Poisson, όπως στην εξίσωση 3-4. Όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 3.2.3 μπορεί να βρεθεί ο χαρακτηριστικός χρόνος  $\tau$ , ο οποίος με την βοήθεια της εξίσωσης 3-5, παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης της ενέργειας ενεργοποίησης των παγίδων που αντιστοιχεί στα διακριτά επίπεδα.

Μαζί με τα ιστογράμματα παρατίθενται και τα  $w - TLP$ , καθώς και τα διαγράμματα στα οποία πραγματώνεται η απεικόνιση των στοιχείων της διαγώνιου των  $w - TLP$ . Στα μεν  $w - TLP$  διακρίνονται με χρωματικό κώδικα τα επίπεδα των παγίδων, τα οποία και απεικονίζονται και στην τομή της διαγώνιου του  $w - TLP$ . Επίσης, ένας πίνακας στον οποίο συνοψίζονται οι θέσεις των κορυφών, σε  $nA$ , των γκαουσιανών, ή των επιπέδων, καθώς και η τυπική απόκλισή τους, οι κλίσεις στα διαγράμματα PSD στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες, οι χαρακτηριστικοί χρόνοι  $\tau$  κάθε επιπέδου, αλλά και, τέλος, οι ενέργειες ενεργοποίησης κάθε επιπέδου.

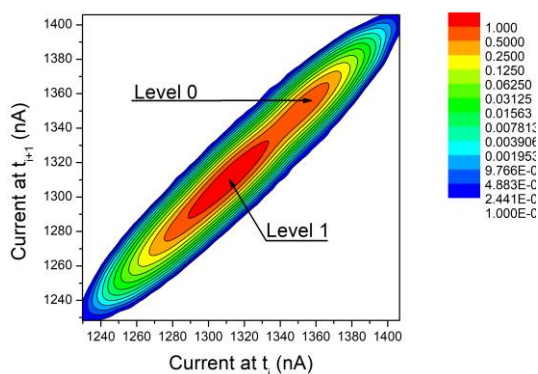
## Αντίσταση Memristor : 60 kΩ



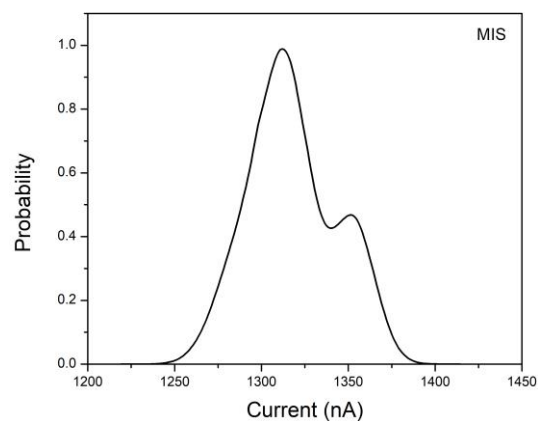
(α)



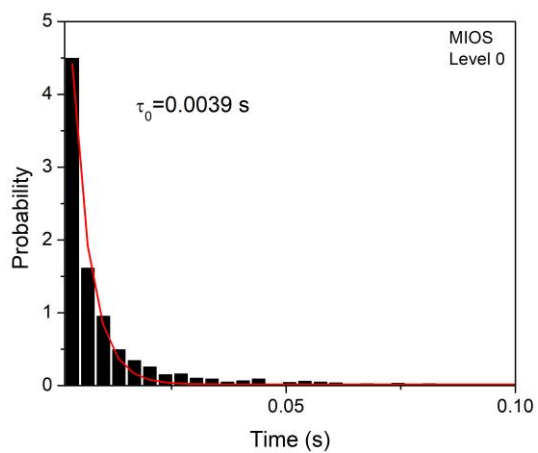
(β)



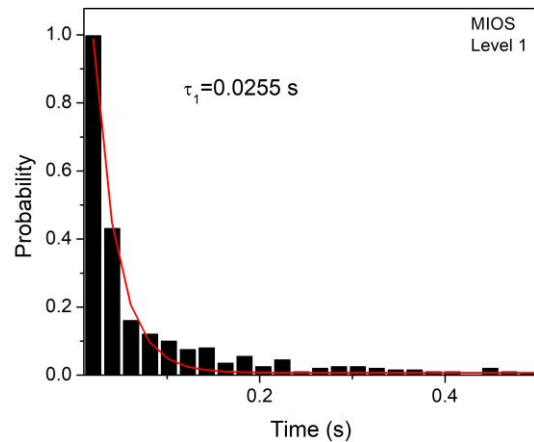
(γ)



(δ)

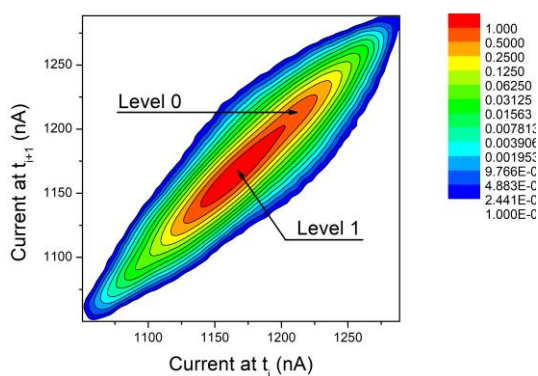


(ε)

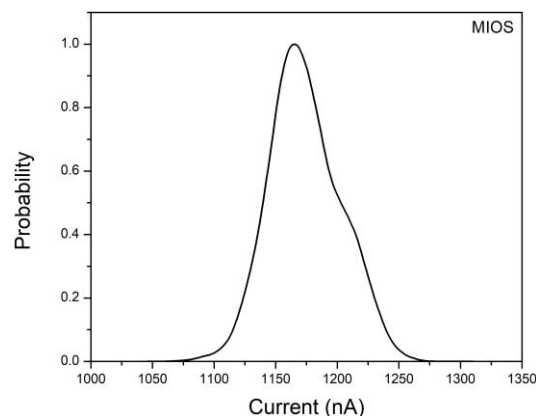


(στ)





(ζ)



(η)

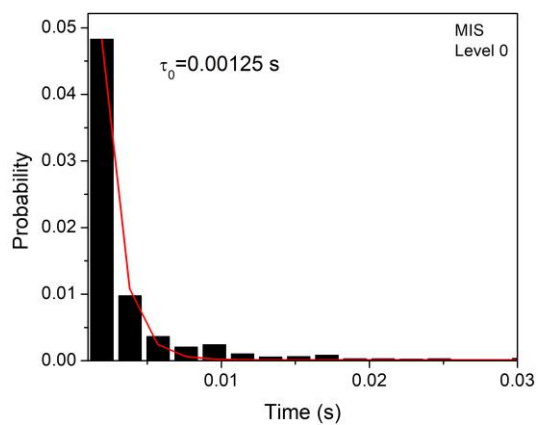
Σχήμα 4-21. (α,β,ε,στ) Ιστογράμματα των εκτιμώμενων χρόνων παραμονής για τα παρατηρούμενα διακριτά επίπεδα ρεύματος των MIS, MIOS και MIOS. (γ,ζ) Σταθμισμένα χρονικά διαγράμματα ( $w$ -TLP) των RTN σήματος στην κατάσταση των 60 kΩ των δειγμάτων MIS και MIOS αντίστοιχα. (δ,η) Διαγράμματα κάθετης τομής των αντίστοιχων  $w$  – TLP.

Πίνακας 4-1. Σύνοψη των εκτιμώμενων παραμέτρων από την ανάλυση δεδομένων των σημάτων RTN στην 60 kΩ κατάσταση

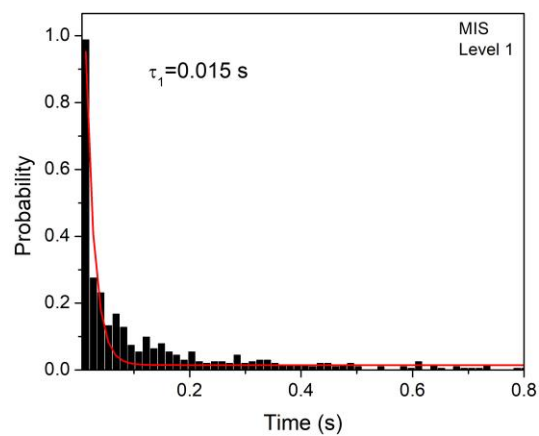
Διάταξη	MIS	MIOS
Gauss. επίπεδο 0, μέση τιμή (nA)	$1353.65 \pm 0.55$	$1212.85 \pm 0.34$
Gauss. επίπεδο 0, τυπική απόκλιση (nA)	10	16
Gauss. επίπεδο 1, μέση τιμή (nA)	$1307.88 \pm 0.31$	$1165.06 \pm 0.16$
Gauss. επίπεδο 1, τυπική απόκλιση (nA)	20	24
Κλίση PSD χαμηλών f	$1.1729 \pm 0.0003$	$1.0035 \pm 0.0001$
Κλίση PSD υψηλών f	$1.4099 \pm 0.0005$	$1.0035 \pm 0.0001$
Επίπεδο 0, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	$0.0298 \pm 0.0012$	$0.0039 \pm 0.0001$
Επίπεδο 1, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	$0.0837 \pm 0.0039$	$0.0255 \pm 0.0008$
Επίπεδο 0, Ενέργεια παγίδας (eV)	$0.683 \pm 0.001$	$0.630 \pm 0.001$

Επίπεδο 1, Ενέργεια παγίδας (eV)	$0.709 \pm 0.001$	$0.679 \pm 0.001$
----------------------------------	-------------------	-------------------

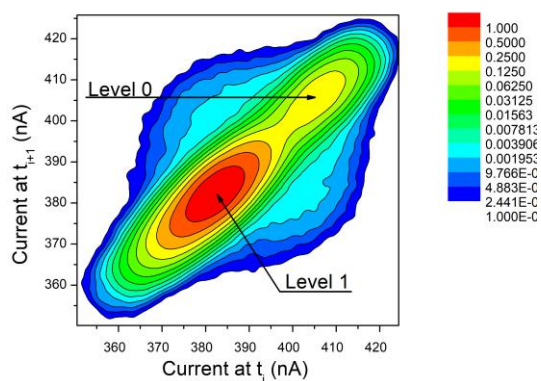
### Αντίσταση Memristor : 200 kΩ



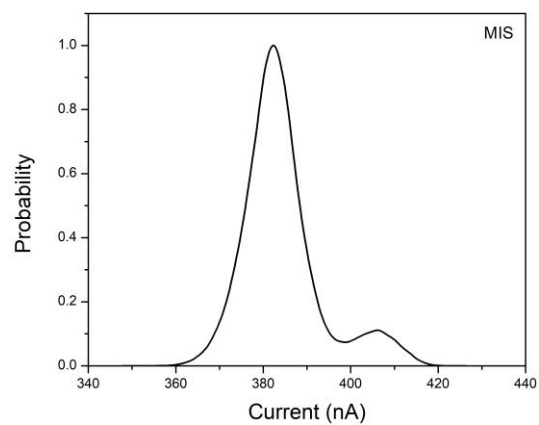
(α)



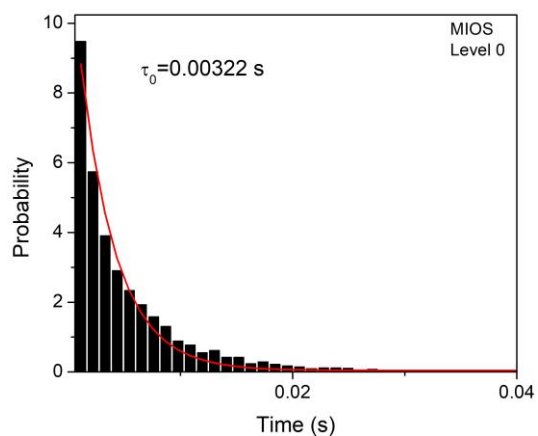
(β)



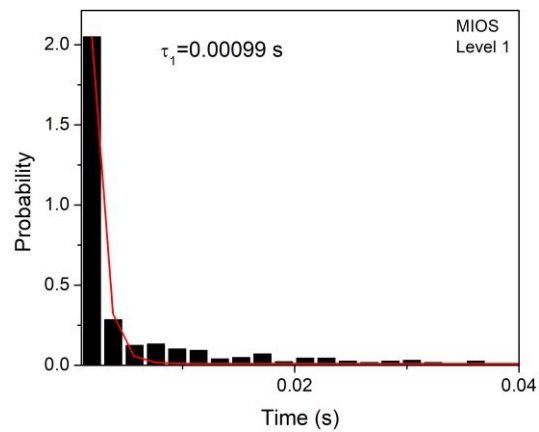
(γ)



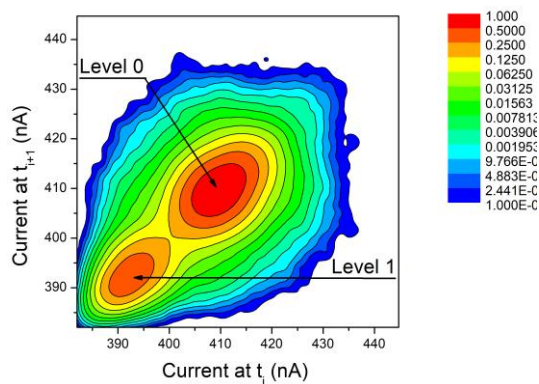
(δ)



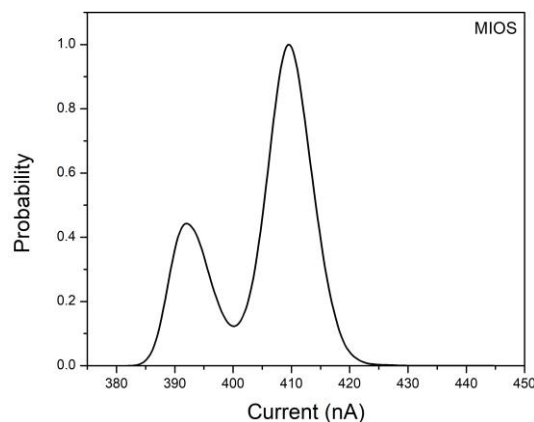
(ε)



(σ)



(ζ)



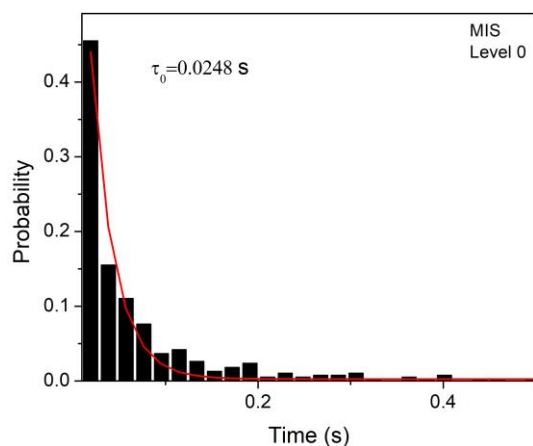
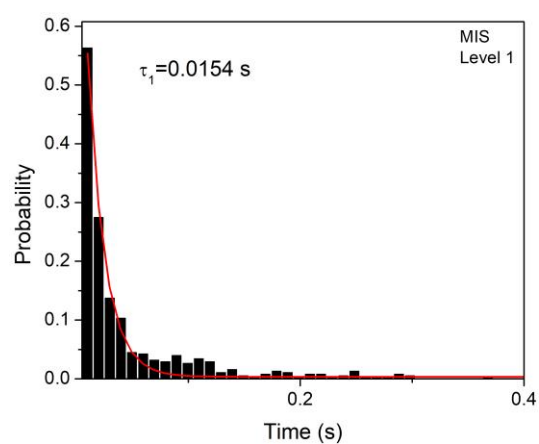
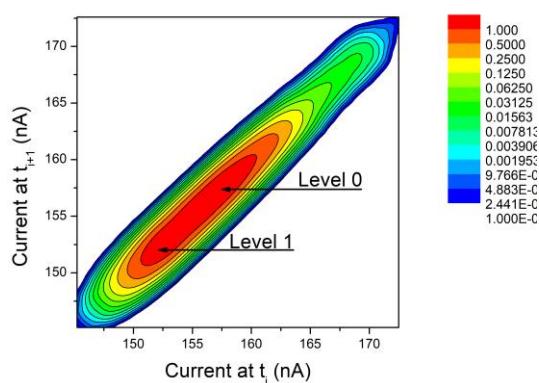
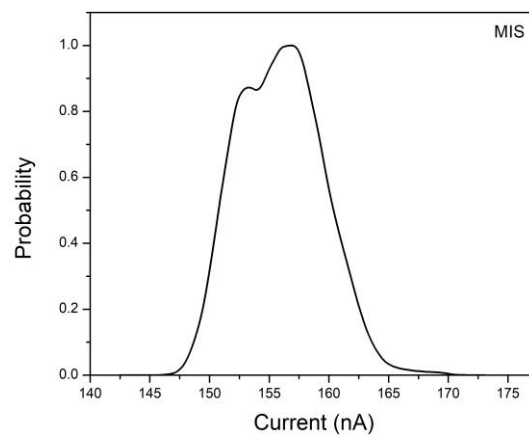
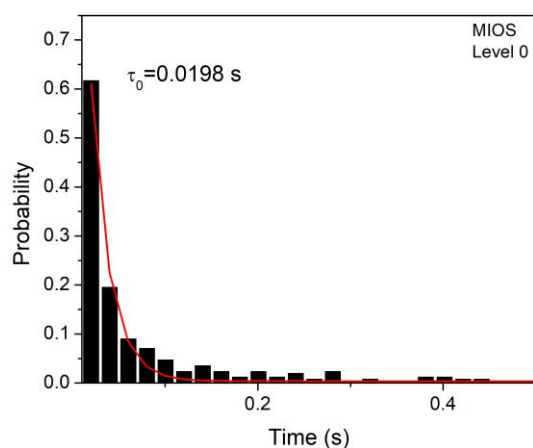
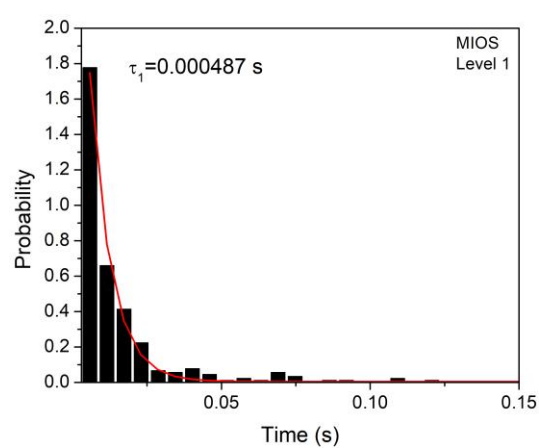
(η)

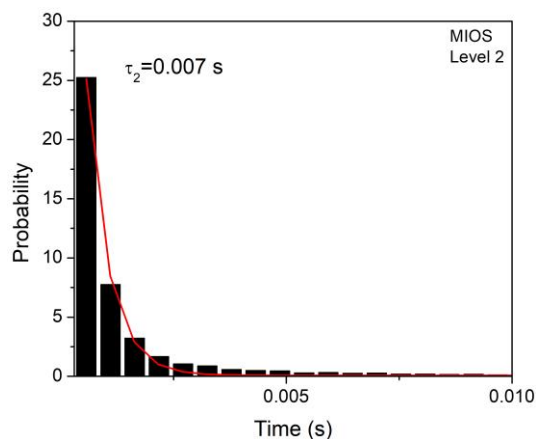
Σχήμα 4-22. (α,β,δ,ε) Ιστογράμματα των εκτιμώμενων χρόνων παραμονής για τα παρατηρούμενα διακριτά επίπεδα ρεύματος των MIS, MIOS και MIOS. (γ,στ) Σταθμισμένα χρονικά διαγράμματα ( $w$ -TLP) των RTN σήματος στην κατάσταση των 200 k $\Omega$  των δειγμάτων MIS και MIOS αντίστοιχα.

Πίνακας 4-2. Σύνοψη των εκτιμώμενων παραμέτρων από την ανάλυση δεδομένων των σημάτων RTN στην 200 k $\Omega$  κατάσταση

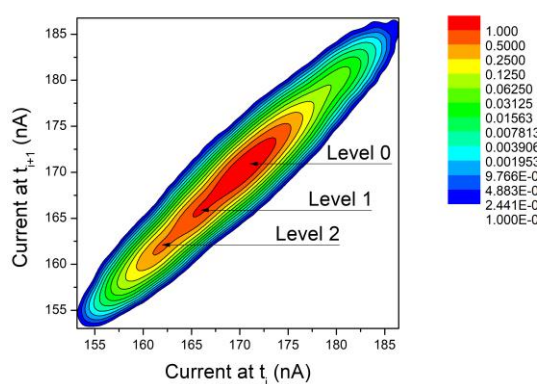
Διάταξη	MIS	MIOS
Gauss. επίπεδο 0, μέση τιμή (nA)	404.86 $\pm$ 0.19	409.30 $\pm$ 0.02
Gauss. επίπεδο 0, τυπική απόκλιση (nA)	6	5
Gauss. επίπεδο 1, μέση τιμή (nA)	381.94 $\pm$ 0.02	392.76 $\pm$ 0.05
Gauss. επίπεδο 1, τυπική απόκλιση (nA)	6	4
Κλίση PSD χαμηλών f	0.727 $\pm$ 0.001	0.893 $\pm$ 0.003
Κλίση PSD υψηλών f	1.758 $\pm$ 0.001	1.2988 $\pm$ 0.0005
Επίπεδο 0, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	0.00125 $\pm$ 0.00003	0.00322 $\pm$ 0.00008
Επίπεδο 1, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	0.015 $\pm$ 0.001	0.00099 $\pm$ 0.00004
Επίπεδο 0, Ενέργεια παγίδας (eV)	0.602 $\pm$ 0.001	0.625 $\pm$ 0.001
Επίπεδο 1, Ενέργεια παγίδας (eV)	0.666 $\pm$ 0.002	0.595 $\pm$ 0.001

### Αντίσταση Memristor : 500 k $\Omega$

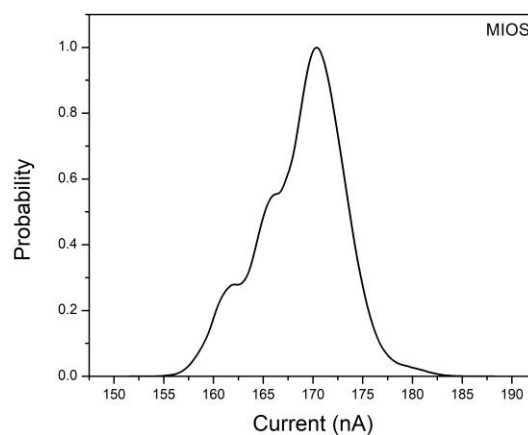
 $(\alpha)$  $(\beta)$  $(\gamma)$  $(\delta)$  $(\epsilon)$  $(\sigma)$



(ζ)



(η)



(θ)

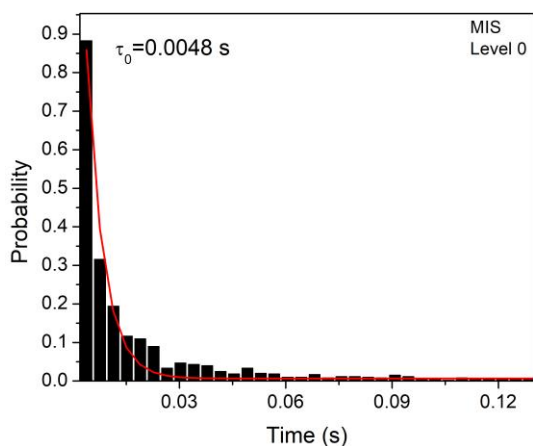
Σχήμα 4-23. (α,β,δ,ε,ζ) Ιστογράμματα των εκτιμώμενων χρόνων παραμονής για τα παρατηρούμενα διακριτά επίπεδα ρεύματος των MIS, MIOS και MIOS. (γ,στ) Σταθμισμένα χρονικά διαγράμματα (*w*-TLP) των RTN σήματος στην κατάσταση των 500 kΩ των δειγμάτων MIS και MIOS αντίστοιχα.

Πίνακας 4-3. Σύνοψη των εκτιμώμενων παραμέτρων από την ανάλυση δεδομένων των σημάτων RTN στην 500 kΩ κατάσταση

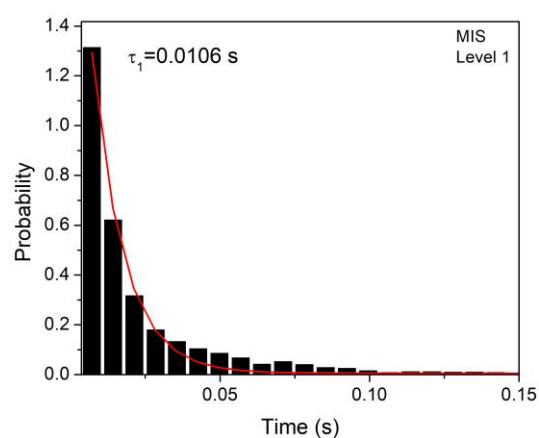
Device	MIS	MIOS
Gauss. επίπεδο 0, μέση τιμή (nA)	$156.37 \pm 0.03$	$170.29 \pm 0.03$
Gauss. επίπεδο 0, τυπική απόκλιση (nA)	3	3
Gauss. επίπεδο 1, μέση τιμή (nA)	$151.86 \pm 0.01$	$165.12 \pm 0.09$
Gauss. επίπεδο 1, τυπική απόκλιση (nA)	2	1
Gauss. επίπεδο 2, μέση τιμή (nA)	-	$161.7 \pm 0.2$

Gauss. επίπεδο 2, τυπική απόκλιση (nA)	-	2
Κλίση PSD χαμηλών f	$0.795 \pm 0.003$	$0.7502 \pm 0.0008$
Κλίση PSD υψηλών f	$1.728 \pm 0.001$	$2.4950 \pm 0.0005$
Επίπεδο 0, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	$0.0248 \pm 0.0009$	$0.0198 \pm 0.0006$
Επίπεδο 1, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	$0.0154 \pm 0.0004$	$0.000487 \pm 0.000008$
Επίπεδο 2, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	-	$0.0070 \pm 0.0002$
Επίπεδο 0, Ενέργεια παγίδας (eV)	$0.678 \pm 0.001$	$0.672 \pm 0.001$
Επίπεδο 1, Ενέργεια παγίδας (eV)	$0.666 \pm 0.001$	$0.5766 \pm 0.0004$
Επίπεδο 2, Ενέργεια παγίδας (eV)	-	$0.646 \pm 0.001$

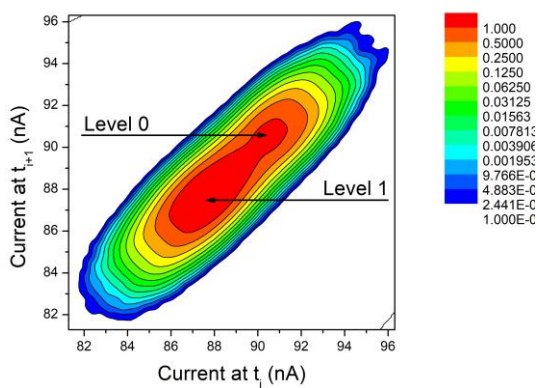
### Αντίσταση Memristor : 800 kΩ



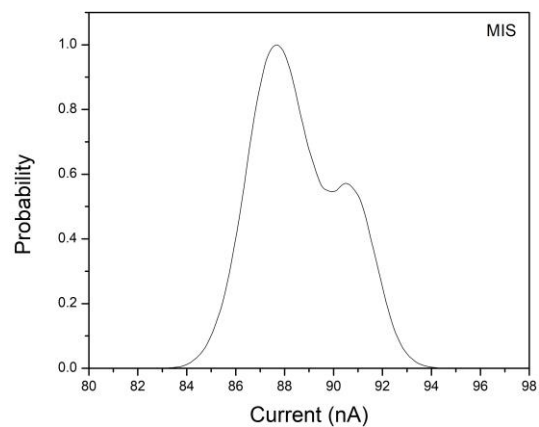
(α)



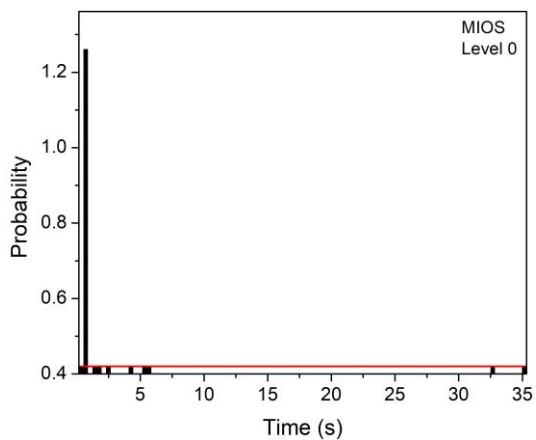
(β)



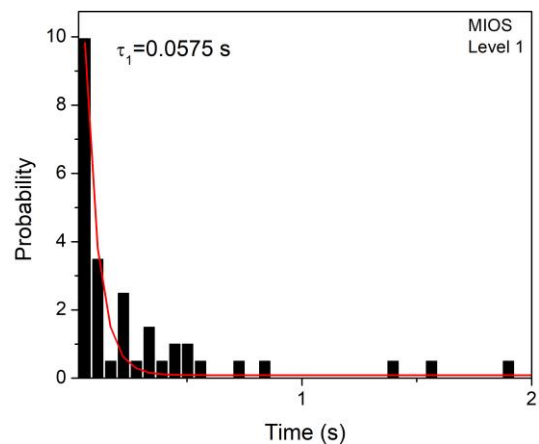
(γ)



(δ)

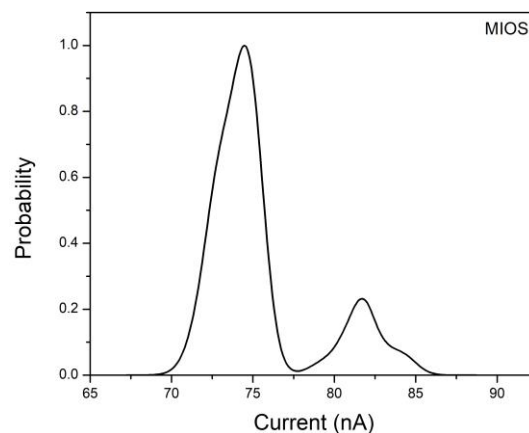
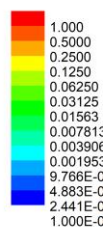
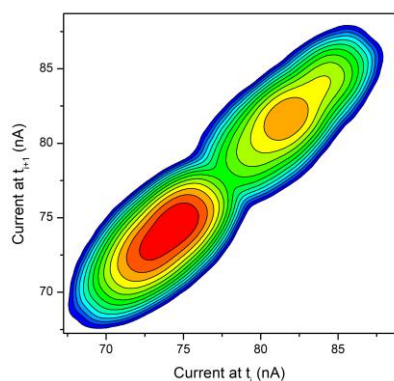


(ε)



(στ)





(ζ)

(η)

Σχήμα 4-24 (α,β,δ,ε) Ιστογράμματα των εκτιμώμενων χρόνων παραμονής για τα παρατηρούμενα διακριτά επίπεδα ρεύματος των MIS, MIOS και MIOS. (γ,στ) Σταθμισμένα χρονικά διαγράμματα ( $w$ -TLP) των RTN σήματος στην κατάσταση των 800 kΩ των δειγμάτων MIS και MIOS αντίστοιχα.

Πίνακας 4-4. Σύνοψη των εκτιμώμενων παραμέτρων από την ανάλυση δεδομένων των σημάτων RTN στην 800 kΩ κατάσταση

Διάταξη	MIS	MIOS
Gauss. επίπεδο 0, μέση τιμή (nA)	$90.714 \pm 0.006$	$73.83 \pm 0.02$
Gauss. επίπεδο 0, τυπική απόκλιση (nA)	1	1
Gauss. επίπεδο 1, μέση τιμή (nA)	$87.582 \pm 0.003$	$81.5 \pm 0.1$
Gauss. επίπεδο 1, τυπική απόκλιση (nA)	1	1
Κλίση PSD χαμηλών f	$0.989 \pm 0.001$	$0.4195 \pm 0.0002$
Κλίση PSD υψηλών f	$2.409 \pm 0.001$	$2.8204 \pm 0.6986$
Επίπεδο 0, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	$0.0048 \pm 0.0002$	-
Επίπεδο 1, χαρακτηριστικός χρόνος $\tau$ (s)	$0.0106 \pm 0.0002$	-
Επίπεδο 0, Ενέργεια παγίδας (eV)	$0.636 \pm 0.001$	-
Επίπεδο 1, Ενέργεια παγίδας (eV)	$0.6562 \pm 0.0005$	-

Από τους πίνακες και τα διαγράμματα των δύο δειγμάτων, παρατηρείται αρχικά με την προσαρμογή των πειραματικών κατανομών σε κατανομές Poisson, το RTN να οφείλεται σε στοχαστικά γεγονότα όπως η παγίδευση και η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων, τα οποία είναι

εγγύς του CF. Επίσης, παρατηρείτε οι ενέργειες των επίπεδων παγίδευσης γενικά να βρίσκονται ανάμεσα στο μισό με ένα eV.

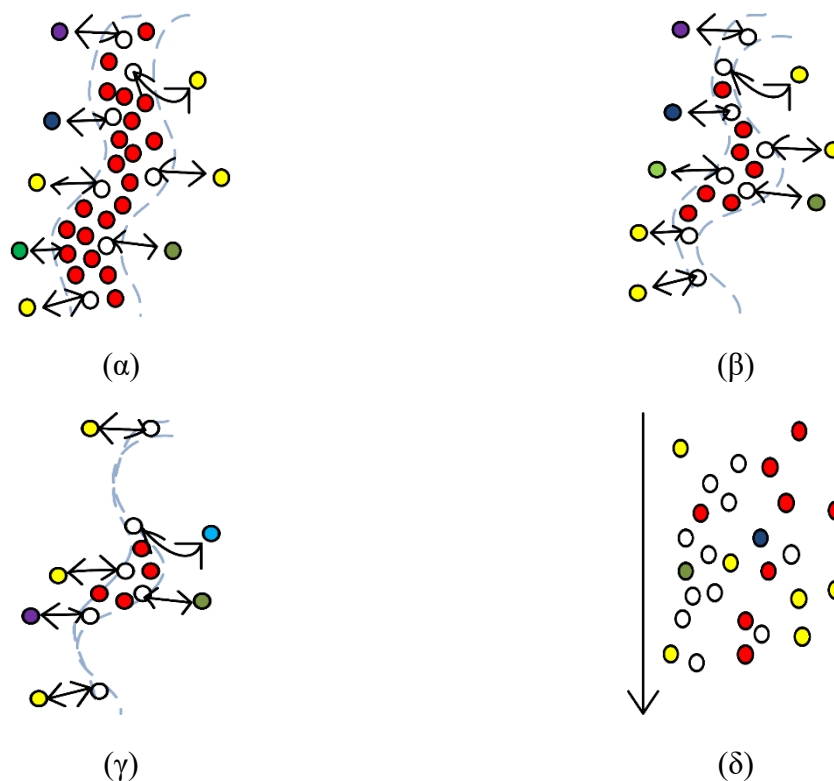
#### 4.4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τα δύο ειδών δείγματα, παρατηρείται να έχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά στα διάφορα επίπεδα αντιστάσεων, με τις διαφορές των παραμέτρων λειτουργίας μεταξύ MIS και MIOS να αποδίδονται κυρίως στην παρουσία του στρώματος του οξειδίου. Παρατηρείται, επίσης, η ανάπτυξη των περισσότερο διακρίσιμων παγίδων στα 200kΩ, ενώ στις διατάξεις MIOS ο καλύτερος έλεγχος στην ανταλλαγή των ηλεκτρονίων από το νιτρίδιο και το πυρίτιο, παρατήρηση η οποία έγινε λόγω της παρουσίας του οξειδίου. Ένα άλλο παρατηρούμενο χαρακτηριστικό είναι οι μεγαλύτερες, κατά ένα μικρό ποσοστό, ενέργειες ενεργοποίησης των παγίδων στην διάταξη MIS, από τις αντίστοιχες της MIOS.

#### 4.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια διερεύνησης των χαρακτηριστικών των ReRAM τα οποία είναι βασισμένα στο  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , μέσω της πολυεπίπεδης ανάλυσης των σημάτων RTN. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών δείγματα, των MIS και MIOS, με το MIOS να έχει επιπλέον την προσθήκη του οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), όπως περιεγράφηκαν. Αρχικά, με την DC ανάλυση επετεύχθη η ανάλυση των μηχανισμών αγωγιμότητας, με τον μηχανισμό SCLC να ταιριάζει καλύτερα με τις μετρήσεις I-V, καθώς και η περιγραφή τους. Εν συνεχεία, με την μέτρηση και την ανάλυση σημάτων RTN μεγάλης χρονικής διάρκειας 100s σε διάφορα επίπεδα αντίστασης, έγινε προσπάθεια εμβάθυνσης στον μηχανισμό RS στο εσωτερικό των δειγμάτων, καθώς και την εκτεταμένη σύγκριση μεταξύ των δύο δειγμάτων στα ίδια επίπεδα αντίστασης.

Παρακάτω, στο σχήμα 4-25 παρατίθενται εικόνες – σχήματα κατά αντιστοιχία με την εξήγηση που έγινε στην παράγραφο 4.4.3, και ουσιαστικά η οπτικοποίηση της λειτουργίας του CF, σε γενικό πλαίσιο, σε κάθε επίπεδο αντίστασης, σύμφωνα με την επεξεργασία και ανάλυση των σημάτων RTN μέσω των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 4.4.3 και 4.4.4.



Σχήμα 4-25. (α,β,γ,δ) Σχήματα αναπαράστασης της κατάστασης του CF στα επίπεδα αντιστάσεων 60, 200, 500, 800 kΩ αντίστοιχα. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το CF, τα στρογγυλά σχήματα τις παγίδες (κόκκινα το κύριο ενεργειακό επίπεδο, κίτρινα το δευτερεύον, και άλλα χρώματα τα διάφορα λοιπά επίπεδα).

Στην εξήγηση των εικόνων, οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν το CF, τα στρογγυλά σχήματα αντίστοιχα τις παγίδες, με τις κόκκινες να είναι το κύριο ενεργειακό επίπεδο, τις κίτρινες το δευτερεύον, τα υπόλοιπα χρώματα τα διάφορα άλλα επίπεδα, και τα κενά οι 'άδειες' παγίδες. Με τα βελάκια δείχνεται η ανταλλαγή φορέων μεταξύ των παγίδων. Στα 800kΩ το μεγάλο βελάκι δείχνει ουσιαστικά την μικρή συνολική ροή των φορέων, η οποία γίνεται μεταξύ του κυρίου, του δευτερεύοντος, και των διαφόρων άλλων παγίδων, και των 'άδειων' παγίδων, οι οποίες είναι διασκορπισμένες στο νιτρίδιο.

#### 4.6 Αναφορές

- [1] J. Chen, H. Wu, B. Gao, J. Tang, X. S. Hu and H. Qian. A Parallel Multibit Programming Scheme With High Precision for RRAM-Based Neuromorphic Systems. *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 5, pp. 2213-2217, May 2020.
- [2] S. V. Tikhov, A. N. Mikhaylov, A. I. Belov, D. S. Korolev, I. N. Antonov, V. V. Karzanov, O. N. Gorshkov, D. I. Tetelbaum, P. Karakolis, and P. Dimitrakis. Role of highly doped Si substrate in bipolar resistive switching of silicon nitride MIS-capacitors. *Microelectronic Engineering*, vol. 187–188, pp. 134 –138, 2018.
- [3] S. Kim, S. Jung, M.-H. Kim, S. Cho, and B.-G. Park. Resistive switching characteristics of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based resistive-switching random-access memory cell with tunnel barrier for high density integration and low-power applications. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 21, pp. 212106-1–212106-4, May 2015.
- [4] S Kim, YF Chang, BG Park. Understanding rectifying and nonlinear bipolar resistive switching characteristics in Ni/SiN<sub>x</sub>/p-Si memory devices. *RSC Advances* 7, 17882, 2017.
- [5] Yan Ny Tan, W.K. Chim, Wee Kiong Choi, Moon Sig Joo, Byung Jin Cho. Hafnium aluminum oxide as charge storage and blocking-oxide layers in SONOS-type nonvolatile memory for high-speed operation. *IEEE Trans. Electr. Dev.*, 53, 654 – 662, 2006.
- [6] Vyacheslav I. Belyi and Alexander A. Rastorguyev. A New View on the Nature of Electron Levels in Amorphous Silicon Nitride. *Chemistry for Sustainable Development*, 8, pp.13-20, 2000.
- [7] Jiang, X., Ma, Z., Xu, J. *et al.* a-SiN<sub>x</sub>:H-based ultra-low power resistive random access memory with tunable Si dangling bond conduction paths. *Sci Rep* 5, 15762, 2015.
- [8] Alain E. Kaloyeros, Youlin Pan, Jonathan Goff and Barry Arkles. Review—Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: State-of-the-Art Processing Technologies, Properties, and Applications. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 9, 063006, 2020.
- [9] K Hong, KK Min, MH Kim, S Bang, TH Kim, DK Lee, YJ Choi, CS Kim. Investigation of the Thermal Recovery from Reset Breakdown of a SiN<sub>x</sub>-Based RRAM. *IEEE Transactions on Electron Devices* 67 (4), 1600-1605, 2020.
- [10] An Chen. Switching control of resistive switching devices. *Appl. Phys. Lett.* 97, 263505, 2010.

## 5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Σε αυτήν την διπλωματική διατριβή, γίνεται η προσπάθεια εξήγησης του φαινομένου της εναλλαγής της αντίστασης σε συγκεκριμένες διατάξεις ReRAM, που έχουν ως βάση το νιτρίδιο του πυριτίου. Μέσω της μελέτης που πραγματοποιήθηκε με τις I – V πειραματικές μετρήσεις, αλλά κυρίως τις λήψεις των RTN σημάτων στα διαφορετικά επίπεδα αντίστασης, εξάχθηκαν αρκετά ενδιαφέροντα και ικανά προς περαιτέρω μελέτη συμπεράσματα.

Οι διατάξεις ReRAM, όπως εξηγήσαμε, είναι πολύτιμες με τις ιδιότητές τους για την εξέλιξη των μελλοντικών μη πτητικών μνημών, αλλά και για άλλες εξίσου σημαντικές εφαρμογές, γεγονός το οποίο αναγάγει την μελέτη του μηχανισμού αγωγιμότητας στα διάφορα είδη των ReRAM σε σημαντική πρόκληση για την επιστήμη της μικροηλεκτρονικής και της νανοτεχνολογίας. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των συγκεκριμένων διατάξεων, είναι η δυνατότητα για αξιοποίηση μεγάλου εύρους διαφορετικών υλικών, έτσι ώστε συνδυάζοντάς τα και κατασκευάζοντας διαφορετικές διατάξεις, επιτυγχάνετε και διαφορετικός τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού αγωγιμότητας, όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο. Η εύρεση και η εις βάθος ανάλυση αυτών των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας είναι δυνατή με την λήψη και ανάλυση RTN σημάτων. Η μέτρηση του θορύβου είναι αρκετά περίπλοκη, γιατί γίνεται μέτρηση των πολύ μικρών μεταβολών στο σήμα, γεγονός το οποίο την κάνει αρκετά ευαίσθητη. Με αποτέλεσμα να χρειάζεται προσμέτρηση αρκετών παραγόντων ώστε να υπάρξει ένα σωστό, σε μεγάλο βαθμό, αποτέλεσμα. Για την παρούσα διατριβή, έπρεπε να επιτευχθεί η ακύρωση του θορύβου του περιβάλλοντος, αλλά και η μεγαλύτερη δυνατή μείωση του θορύβου που εισέρχεται στις μετρήσεις από τα διαφορετικά στοιχεία του κυκλώματος, αλλά και η λήψη του σωστού σήματος θορύβου από την σωστή πειραματική διάταξη. Υπήρξε δυσκολία στην εύρεση της κατάλληλης πειραματικής διάταξης, η οποία οδήγησε και σε εκ νέου σχεδιασμό της, αλλά και σε αλλαγή του τρόπου λήψης του σήματος. Στην γενίκευση τους, οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να εξαχθούν ως συμπεράσματα τα οποία πηγάζουν και από την προσπάθεια λήψης σημάτων θορύβου για άλλες διατάξεις ReRAM.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, με την συγκεκριμένη λειτουργία του αγωγίου μονοπατιού στις διαφορετικές αντιστάσεις, καθώς και τα αριθμητικά αποτελέσματα για την φύση των παγίδων, βρέθηκαν για τις συγκεκριμένες διατάξεις ReRAM, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.3. Η φύση της ReRAM, είναι τέτοια ώστε ακόμη και στην αλλαγή του μεγέθους των ίδιων υλικών κατασκευής, να επιτυγχάνεται διαφορετική φύση του CF. Αυτές οι διαφοροποιήσεις, μπορούν να γίνουν αντικείμενο μελέτης για διαφορετικές διατάξεις ReRAM.

Επίσης, τα αποτελέσματα, από την ανάλυση που έγινε, ως προς την φύση του μηχανισμού αγωγιμότητας, αλλά και ως προς τα συγκεκριμένα αριθμητικά χαρακτηριστικά του και των παγίδων, προσφέρονται προς επεξεργασία και ανάλυση των διατάξεων ReRAM που έχουν ως βάση το νιτρίδιο του πυριτίου, τέτοιων ώστε να υπάρξει μεν μία καλύτερη κατανόηση του συνολικού τρόπου λειτουργίας, και ακολούθως μια καλύτερα αξιοποιήσιμη χρήση του στις ποικίλες εφαρμογές που μπορεί να εφαρμοστεί.

