



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών  
Επιστημών

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ  
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΚΑΙ  
ΕΚΤΑΤΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ**

Διδακτορική διατριβή

**Χαράλαμπος Παπακωνσταντινόπουλος**

Επιβλέπων

Δημήτρης Τσουκαλάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022



**ΕΛΙΔΕΚ.**  
Ελληνικό Ίδρυμα  
Έρευνας & Καινοτομίας





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών  
Επιστημών

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΚΑΙ ΕΚΤΑΤΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Διδακτορική διατριβή

**Χαράλαμπος Παπακωνσταντινόπουλος**

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

Τσουκαλάς Δημήτρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Κέννου Στυλιανή, Καθηγήτρια Π.Π

Τσέτσερης Λεωνίδα, Καθηγητής Ε.Μ.Π

**Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Τσουκαλάς Δημήτρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Κέννου Στυλιανή, Καθηγήτρια Π.Π

Τσέτσερης Λεωνίδα, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ιωάννα Ζεργιώτη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Ιωάννης Ράπτης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Απόστολος Κυρίσης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Pascal Normand, Director of Research NCSR

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022



# Ηλεκτρονικές Διατάξεις Εναλλαγής Αντίστασης και Αισθητήρες Νανοσωματιδίων σε εύκαμπτα και εκτατά υποστρώματα

Διδακτορική διατριβή

του

**Χαράλαμπου Παπακωνσταντινόπουλου**

## **Copyright**

**© Παπακωνσταντινός Χαράλαμπος, 2022**

Με επιφύλαξη παντός νόμιμου δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσεως, 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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Sustine et Abstine

✠ Epictetus ✠





## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχώς επιταχυνόμενη ανάπτυξη του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) έχει δημιουργήσει ένα νέο πεδίο έρευνας συγχωνεύει τομείς διαφόρων επιστημών. Η ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών συσκευών (hardware) καθώς και λογισμικού (software), ικανών για τη συλλογή και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων με στόχο τη σύνδεσή τους και την ανταλλαγή των συλλεγόμενων δεδομένων με άλλες συσκευές και συστήματα, είτε μέσω του διαδικτύου (internet) είτε μέσω άλλων πρωτόκολλων επικοινωνιών (communications protocols) γίνεται επιτακτική.

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που για πολλές δεκαετίες κατασκευάζονταν σε συμβατικά υποστρώματα πυριτίου, δεν ανταποκρίνονται πλέον στις απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών. Έτσι, τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με την ανάπτυξη καινοτόμων ηλεκτρονικών διατάξεων όπου εξυπηρετούν ανάγκες της σύγχρονης εποχής αλλά και βελτιωμένων ηλεκτρονικών διατάξεων σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες, έχει αναπτυχθεί έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον προς την κατεύθυνση της κατασκευής ηλεκτρονικών διατάξεων σε εύκαμπτα και εικατά υποστρώματα. Η ραγδαία ανάπτυξη του τομέα των φορετών ηλεκτρονικών (wearable electronics), έχει επιβάλλει την εστίαση ενός μεγάλου μέρους της έρευνας, στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων με βασικούς εκπροσώπους τις μνήμες τυχαίας προσπέλασης (RAM) και τους αισθητήρες (sensors). Ο συνδυασμός αυτών των δύο διατάξεων μπορεί να οδηγήσει σε ένα ενοποιημένο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο (real-time monitoring). Οι εφαρμογές αυτού του συστήματος, μπορεί να περιλαμβάνουν καταγραφή διαφόρων φυσιολογικών παραμέτρων της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως καταπόνησης, καρδιακούς παλμούς, θερμοκρασία σώματος, υγρασίας ή και καταγραφή της γλυκόζης του αίματος. Αυτό ορίζεται από την κατασκευή και το είδος του ελάχιστου αισθητήρα. Στη συνέχεια με τη βοήθεια μιας μη πτητικής μνήμης (non-volatile RAM), τα δεδομένα που ανιχνεύθηκαν από τον αισθητήρα, μπορούν να αποθηκευθούν.

Ο στόχος της συγκεκριμένης διατριβής, είναι η κατασκευή μη πτητικών μνημών εναλλαγής αντίστασης σε εύκαμπτα υποστρώματα, η ανάπτυξη αισθητήρων σε εύκαμπτα και εικατά υποστρώματα καθώς και η ανάπτυξη της μεταξύ τους επικοινωνίας. Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκαν μνήμες εναλλαγής αντίστασης αγωγίμης γέφυρας (CBRAM), όπου ύστερα από μελέτη διαφόρων υλικών, τόσο για την κατασκευή της μνημών, όσο και του υποστρώματος στο οποία αυτές αναπτύχθηκαν, επιτεύχθηκε η ανάπτυξη πλήρως λειτουργικών μνημών υπό συνθήκες υψηλής καταπόνησης. Οι μνήμες αναπτύχθηκαν σε υποστρώματα ναφθαλικού πολυαιθυλενίου (PEN), υλικό το οποίο κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος

στην παγκόσμια αγορά, λόγω των ιδιοτήτων του. Το σημαντικότερο σημείο στην κατασκευή αυτών των διατάξεων, είναι η εναπόθεση ενός πυκνού στρώματος νανοσωματιδίων πλατίνας (Pt NPs) στο υποστρώμα, σαν πρώτο βήμα στην κατασκευή των μνημών. Αυτό οδηγεί τις διατάξεις, να παραμένουν πλήρως λειτουργικές ύστερα από μεγάλα ποσοστά καταπόνησης, καθώς τα Pt NPs βοηθούν στο να παραμένει το κάτω ηλεκτρόδιο (BE) αγωγίμο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μνημών, είναι Pt NPs και νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) για το κάτω ηλεκτρόδιο, διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) σαν το ενεργό υλικό και άργυρος (Ag) για το πάνω ηλεκτρόδιο (TE). Οι διατάξεις παραμένουν πλήρως λειτουργικές ύστερα από πολλούς κύκλους καταπόνησης, παρουσιάζοντας μεγάλο παράθυρο μνήμης, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπροσθέτως, καταγράφηκαν διάφορες νευρομορφικές ιδιότητες, σημαντικές για την ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων με εφαρμογές σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Έχοντας αναπτύξει αξιόπιστη διαδικασία ανάπτυξης εύκαμπτων τεχνητών συνάψεων, η έρευνα συνεχίστηκε στην κατεύθυνση της κατασκευής εύκαμπτων και εκτατών αισθητήρων παραμόρφωσης. Οι αισθητήρες κατασκευάστηκαν σε υποστρώματα polydimethylsiloxane (PDMS). Μετά τη σύνθεση του υποστρώματος, και εφαρμόζοντας σε αυτό προ-ένταση, εναποτέθηκε Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ενώ στη συνέχεια έγινε εναπόθεση ενός πυκνού υμενίου Pt NPs. Μετά την επαναφορά του υποστρώματος στο αρχικό του μήκος, έγινε ο σχηματισμός των ηλεκτροδίων με εναπόθεση Ag. Οι αισθητήρες παρουσιάζουν τρεις με τέσσερις διαφορετικές περιοχές ευαισθησίας, ανάλογα με την αρχική προ-ένταση του υποστρώματος κατά την κατασκευή του αισθητήρα. Η αρχική προ-ένταση του υποστρώματος, δεν καθορίζει μόνο τον αριθμό των περιοχών ευαισθησίας, αλλά και το εύρος τους. Έτσι, μπορούμε να ρυθμίσουμε την περιοχή ευαισθησίας του κάθε αισθητήρα ανάλογα με την εφαρμογή. Τέλος, η εύκαμπτη μνήμη και ο αισθητήρας συνδέθηκαν σε κύκλωμα με τη μνήμη να αποθηκεύει την πληροφορία του αισθητήρα, όταν αυτός εντείνεται σε κάποια κρίσιμη τιμή.

## Abstract

In recent years, the continuous accelerating development of the Internet of Things has created a new field of research, merging various scientific fields. The development of modern hardware as well as software technologies, capable of collecting and processing big data sets to connect them and exchange the collected data with other devices and systems, either via the internet or other communications protocols, becomes imperative.

The electronic devices which for many decades were fabricated on conventional silicon substrates, no longer meet the requirements of current human needs. Thus, in recent years, in parallel with the development of innovative electronic devices that serve the needs of modern times but also improved electronic devices to existing ones, there has been strong research interest in the fabrication of electronic devices on flexible and stretchable substrates. The rapid development of wearable electronics has forced the focus towards research on the development of electronic devices, with random access memory (RAM) and sensors being the key representatives. The combination of these two devices can lead to an integrated system for recording and storing information in real-time (real-time monitoring). Applications of this system may include the recording of various physiological parameters of human activity, such as strain, heart rate, body temperature, humidity or even recording blood glucose. Depending on the application, is defining the requirements that each sensor should meet. Then, by employing a non-volatile memory (non-volatile RAM), the data detected by the sensor can be stored.

The aim of this dissertation is the fabrication of non-volatile resistive random access memories on flexible substrates, the fabrication of strain and stretchable sensors on flexible and stretchable substrates, and the development of communication between them. In the present work, conductive bridge random access memories (CBRAM) were developed, where after the study of various materials, for both fabrication of the memories and the substrate to which they were developed, the development of fully functional resistive memories under high strain load was achieved. Resistive memories were developed on polyethylene naphthalate (PEN) substrates, a material that is gaining ground in the global market due to its unique properties. The most important step in the fabrication of these devices, is the deposition of a dense film of platinum nanoparticles (Pt NPs) on the substrate, as a first step towards the fabrication of the resistive memories. This leads the devices to remain fully functional

even after high mechanical strain since Pt NPs assist the bottom electrode (BE) to remain conductive. The materials that were used to fabricate memristors are a dense film of Pt NPs and a thin film of titanium nitride (TiN) for the lower electrode, silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) as an active material, and silver (Ag) for the top electrode (TE). The devices remain fully functional after many strain cycles, presenting a large memory window, while at the same time having low power consumption. In addition, various neuromorphic properties were recorded, important for the development of electronic devices with applications in artificial neural networks.

After the development of a reliable process for the fabrication of flexible artificial synapses, our research continued in the direction of the stretchable sensors. The sensors were fabricated on polydimethylsiloxane (PDMS) substrates. After the synthesis of the substrate, pre-stretched was applied to it, a thin film of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was deposited and then a dense film of Pt NPs. After the samples' relaxation to their' initial length, Ag electrodes were patterned. The sensors show three to four different areas of sensitivity, depending on their initial pre-stretch during their fabrication. The initial pre-stretch of the substrate determines not only the number of areas of sensitivity but also their width. Thus, we can adjust the sensitivity area of each sensor depending on the application. Finally, the flexible memory and the sensor are connected in a circuit with the memory storing the sensor information when it is amplified to a critical value.

## Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου κ. Δημήτρη Τσουκαλά, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένη διδακτορική διατριβής καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη χρονική διάρκεια αυτής. Οι συμβουλές του και η καθοδήγησή του ήταν πολύτιμες καθώς χωρίς αυτές, δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη εργασία. Στη συνέχεια, τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κ. Στυλιανή Κέννου, καθηγήτρια Π.Π και κ. Λεωνίδα Τσέτσερη, καθηγητή Ε.Μ.Π, για την συνεργασία και τη βοήθειά τους όταν αυτή χρειάστηκε.

Η βοήθεια του μεταδιδακτορικού ερευνητή Παναγιώτη Μπούσουλα υπήρξε αμέριστη και η συνεργασία που είχαμε ήταν εξαιρετική. Η βοήθεια του Βαγγέλη Ασλανίδη και του Λάμπρου Πατσιούρα ήταν πολύ σημαντική για την ενσωμάτωσή μου στην ερευνητική ομάδα. Ευχαριστώ επίσης τους μεταδιδακτορικούς ερευνητές, Μενέλαο Τσιγκουράκο, Βαγγέλη Σκοτάδη και Μαριάνθη Παναγοπούλου για την άψογη συνεργασία. Τους διδακτορικούς φοιτητές Σταύρο Κίτσιο, Χάρη Τσιούστα και Μαρία Κουνουργιάκη. Ευχαριστώ επίσης τον Oleh Talayevych.

Οι συζητήσεις και η ανταλλαγή απόψεων σε διάφορα θέματα, ερευνητικά και μη, με τον Λεωνίδα Μαδιανό, τον Διονύση Σακελλαρόπουλο και τον Παναγιώτη Καραδήμα, πρώην μέλη της ερευνητικής ομάδας, υπήρξαν πολύτιμες. Ο Γιάννης Θεοδωράκος υπήρξε πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει στην κατασκευή διατάξεων χρήσιμων στην συγκεκριμένη εργασία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον φοιτητή μου Κωστή Μουστάκα για την άψογη συνεργασία που είχαμε και τη βοήθειά του στη συγκεκριμένη εργασία. Ευχαριστώ επίσης την Λαμπρινή Σύγιελλου, ερευνήτρια του ΙΤΕ και τον Γιάννη Καρτσωνάκη, ερευνητή Ε.Μ.Π για την πολύτιμη συμβολή τους.

Τα μέλη της βιολογικής μου οικογένειας. Τη μητέρα μου Σοφία, για όλα όσα μου προσέφερε όσο ήταν εν ζωή και για όλα όσα με βοήθησε να συνειδητοποιήσω μετά τον θάνατό της. Χωρίς τον σπόρο της, δεν θα είχα καταφέρει τίποτα απ' όσα έχω καταφέρει. Τον πατέρα μου Παναγιώτη, για την κατανόηση που έδειξε σε οποιαδήποτε επιλογή μου και την αδερφή μου, Κάτια, για την αμέριστη υποστήριξή της, από πάντα και μέχρι τώρα.

Την Νάξο και τους ανθρώπους της, που πάντα αποτελούν αστείρευτη πηγή έμπνευσης.

Την Φωτεινή Ζαρόκωστα, για την απερίσπαστα αισιόδοξη και βυθισμένη στην πίστη ματιά της και τη στήριξή της, από τότε που την γνώρισα.

Τους φίλους μου Μπάμπη Νίκου, Αλέξανδρο Πάνου, Γιώργο Λευϊτικό, Χρίστο Τρομπούκη, Ζωή Κολλιού, Αλέξανδρο Κυριακίδη, Θάνο Κολοκυθά, Μαλβίνα Αποστόλου, Χριστίνα Τρουμπούκη, Αντρέα Γεροντάκη και Κώστα Καλογερά.

Τους φίλους μου από Κοπεγχάγη, Νίκο Σιδηρόπουλο, Βασίλη Μανδράκη, Alessio Locallo και Nicolai Jensen.

Την Δέσποινα Καπίρη, μαρμαρογλύπτρια από τη Μονή της Νάξου, για την εσωτερική και μεταδιδόμενη φλόγα της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μερικούς ανθρώπους, σημαντικά μέλη, μιας από τις σημαντικότερες εκ των οικογενειών μου, αυτήν της ποίησης και της πεζογραφίας. Τον φίλο, ποιητή και εκδότη μου Στάθη Ιντζέ για όλα όσα μου έχει προσφέρει καθώς και όλη την οικογένεια του Ενυπνίου. Τον ποιητή Γιώργο Λίλλη, την ποιήτρια Αριστέα Παπαλεξάνδρου και τους λογοτέχνες Γιώργο Χατζελένη και Μίκη Αναστασίου. Η παρέα τους, τα λόγια και τα έργα τους, υπήρξαν πολύτιμα όταν τίποτε άλλο δεν στάθηκε ικανό να νοηματοδοτήσει την καθημερινότητα.

Η διδακτορική διατριβή υλοποιήθηκε με υποτροφία στο πλαίσιο της 1ης Προκήρυξης Υποψήφιων Διδακτόρων του ΕΛΙΔΕΚ (2016).

# Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος</b> .....	1
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b> .....	3
1.1 Ο ρόλος της νανοτεχνολογίας στις εφαρμογές του μέλλοντος.....	3
1.2 Τεχνικές ανάπτυξης νανοδιατάξεων.....	4
1.2.1 Φυσική εναπόθεση ατμών (Physical Vapor Deposition - PVD).....	5
1.2.1.1 Η μέθοδος της ιοντοβολής (Sputtering).....	5
1.2.1.2 RF Sputtering.....	6
1.2.1.3 Magnetron Sputtering.....	6
1.2.1.4 DC Sputtering.....	8
1.2.1.4.1 Ανάπτυξη Νανοσωματιδίων μέσω DC Sputtering.....	9
1.2.2 Ατομική Εναπόθεση Στρωμάτων (Atomic Layer Deposition - ALD).....	11
1.2.3 Οπτική Λιθογραφία.....	13
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	15
<b>Κεφάλαιο 2: Οι τεχνολογίες μνήμης</b> .....	19
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Dynamic Random Access Memory.....	20
2.3 FLASH Memory.....	21
2.4 Ανερχόμενες τεχνολογίες.....	22

2.4.1 Ferroelectric Random Access Memory.....	22
2.4.2 Magnetic Random Access Memory.....	24
2.4.3 Spin Torque Transfer Random Access Memory.....	24
2.4.4 Phase Change Memory.....	26
2.4.5 Μοριακή μνήμη.....	27
2.4.6 Μνήμη Εναλλαγής Αντίστασης (Resistive Random Access Memory).....	28
2.4.6.1 Εισαγωγή.....	28
2.4.6.2 Η τεχνολογία των ReRAM.....	29
2.4.6.3 Φαινόμενο εναλλαγής της αντίστασης.....	31
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	33
<b>Κεφάλαιο 3: Νευρομορφική υπολογιστική.....</b>	<b>36</b>
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Βιολογικά δομικά στοιχεία και λειτουργίες την νευροεπιστήμης.....	36
3.2.1 Νευρώνας.....	37
3.2.2 Βιολογική σύναψη.....	38
3.2.3 Δυναμικό ηρεμίας – Δυναμικό δράσης.....	39
3.2.4 Hebbian Theory.....	42
3.2.5 Συναπτική πλαστικότητα.....	42
3.2.6 Paired Pulse Facilitation - Paired Pulse Depression.....	43
3.3 Νευρομορφική μηχανική.....	43
3.3.1 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	44
3.3.2 Αναδυόμενες νευρομορφικές συσκευές.....	46
3.3.3 Το memristor σαν τεχνητή σύναψη.....	48



Βιβλιογραφικές αναφορές.....	51
------------------------------	----

**Κεφάλαιο 4: Κατασκευή και χαρακτηρισμός μνημών εναλλαγής αντίστασης σε εύκαμπτα υποστρώματα.....**56

4.1 Εισαγωγή.....	56
-------------------	----

4.2 Κατασκευή των εύκαμπτων μνημών.....	59
---	----

4.3 Χαρακτηρισμός των εύκαμπτων διατάξεων μνήμης.....	60
---	----

4.3.1 Υπολογισμός της καταπόνησης των διατάξεων.....	60
--	----

4.3.2 Χαρακτηρισμός του στρώματος των Pt NPs.....	62
---	----

4.3.2.1 Transmission Electron Microscopy.....	62
---	----

4.3.2.2 Atomic Force Microscopy.....	64
--------------------------------------	----

4.3.3 Χαρακτηριστικές I – V - Επίδραση της εφαρμοζόμενης τάσης.....	65
---	----

4.3.4 Απόκριση των διατάξεων σε παλμούς.....	71
--	----

4.3.5 Σχηματισμός των ρωγμών.....	72
-----------------------------------	----

4.3.6 Χαρακτηριστικά Τεχνητών Συναπτικών Ιδιοτήτων.....	74
---	----

4.3.6.1 Paired-Pulsed Facilitation και Paired-Pulse Depression Effects.....	74
---	----

4.3.6.2 Non-overlap STDP.....	78
-------------------------------	----

4.4 Συμπεράσματα.....	80
-----------------------	----

Βιβλιογραφικές αναφορές.....	88
------------------------------	----

**Κεφάλαιο 5: Κατασκευή και χαρακτηρισμός εύκαμπτου και εικτατού αισθητήρα παραμόρφωσης και συνδυασμός του με εύκαμπτη μνήμη για επίδειξη ιδιοτήτων τεχνητού μηχανοϋποδοχέα.....**96

5.1 Εισαγωγή.....	96
-------------------	----

5.2 Κατασκευή των εκτατών αισθητήρων.....	99
5.2.1 Διαμόρφωση της κυματοειδούς επιφάνειας.....	101
5.2.2 Χαρακτηρισμός της κυματοειδούς επιφάνειας με την τεχνική AFM.....	102
5.3 Χαρακτηρισμός των διατάξεων.....	105
5.3.1 Χαρακτηρισμός των εκτατών ηλεκτροδίων.....	105
5.3.2 Χαρακτηρισμός των εκτατών αισθητήρων.....	108
5.3.3 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) του στρώματος των Pt NPs.....	113
5.3.4 Ευαισθησία των εκτατών αισθητήρων.....	116
5.4 Χαρακτηριστικά Τεχνητού Μηχανοϋποδοχέα.....	119
5.5 Συμπεράσματα.....	124
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	125
<b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προοπτικές.....</b>	<b>133</b>
<b>Δημοσιεύσεις.....</b>	<b>135</b>



## Πρόλογος

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η ανάπτυξη διατάξεων μνήμης και αισθητήρων σε εύκαμπτα και εικατά υποστρώματα, αντίστοιχα. Αρχικά κατασκευάστηκαν εύκαμπτες μνήμες εναλλαγής αντίστασης, ικανές να παραμένουν λειτουργικές ακόμα και μετά από πολλούς κύκλους και μεγάλα ποσοστά καταπόνησής τους, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν νευρομορφικές ιδιότητες. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν εικατοί αισθητήρες καταπόνησης, ρυθμιζόμενου εύρους ευαισθησίας, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετικές περιοχές ευαισθησίας, με την τελευταία να είναι εξαιρετικά ευαίσθητη. Οι εξαιρετικές ιδιότητες που παρουσιάζουν οι δύο διαφορετικού τύπου διατάξεις, βασίζεται στην παρουσία των νανοσωματιδίων πλατίνας, τα οποία βοηθούν στην αντοχή των διατάξεων σε σχέση με τα συμβατικά συνεχή λεπτά μεταλλικά υμένα που έχουν επικρατήσει. Στη συνέχεια οι δύο διατάξεις συνδέθηκαν σε κύκλωμα για την κατασκευή ενός τεχνητού μηχανοποδοχέα, οποίος μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία ενός βιολογικού μηχανοποδοχέα.

Η δομή που ακολουθείται στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή είναι η εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της νανοτεχνολογίας και ως αυτή λειτουργεί ως ενοποιητικός παράγοντας μεταξύ των επιστημών για την κατασκευή καινοτόμων διατάξεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μερικές από τις βασικές τεχνικές της νανοτεχνολογίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διατάξεων σε αυτή την εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικές και επικρατούσες τεχνολογίες στο χώρο των μνημών καθώς και οι ανερχόμενες, οι οποίες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Δίνεται ωστόσο ιδιαίτερη βάση στις μνήμες εναλλαγής αντίστασης και στην τεχνολογία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παραθέτονται τα βασικά δομικά στοιχεία της νευροεπιστήμης καθώς και κάποιες από τις λειτουργίες αυτών. Ακολουθούνται από την περιγραφή της νευρομορφικής υπολογιστικής σε επίπεδο λογισμικού αλλά και hardware, αλλά και τη σύνδεσή τους με την νευροεπιστήμη. Τέλος παρουσιάζεται η προοπτική των μνημών εναλλαγής αντίστασης σαν δομική μονάδα των μελλοντικών τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται μια εκτενής παρουσίαση της κατασκευής και του χαρακτηρισμού των εύκαμπτων μνημών εναλλαγής αντίστασης και των ιδιοτήτων τους. Οι ιδιότητες τους τόσο ως διατάξεις

όσο και οι συναπτικές τους ιδιότητες, τις καθιστούν κατάλληλες για την κατασκευή και εκμετάλλευσή τους ως τεχνητές συνάψεις.

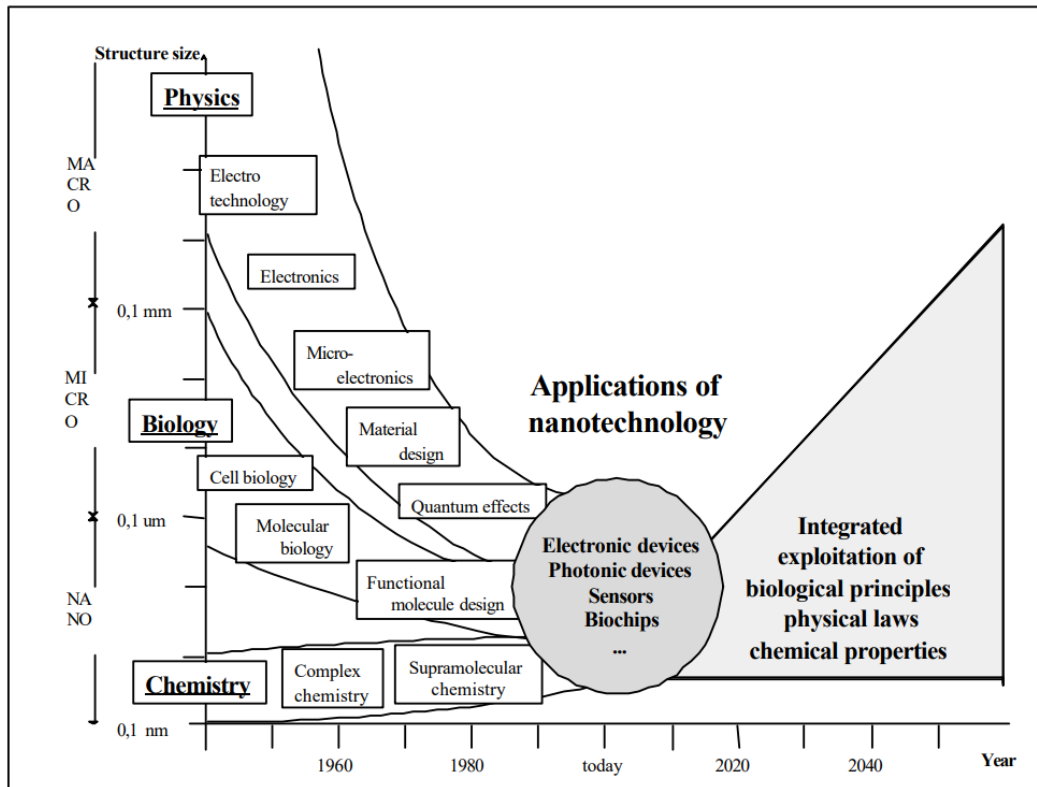
Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός των εκτατών αισθητήρων αντίστασης, καθώς και ο συνδυασμός τους με τις μνήμες που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την υλοποίηση ενός τεχνητού μηχανοποδοχέα, ικανού για την καταγραφή και επεξεργασία εξωτερικής πληροφορίας καταπόνησης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα συμπεράσματα καθώς και οι μελλοντικές προοπτικές για την βελτιστοποίηση των κατασκευασθέντων διατάξεων.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Ο ρόλος της νανοτεχνολογίας στις εφαρμογές του μέλλοντος

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης της νανοτεχνολογίας έχει απασχολήσει μεγάλα κομμάτια των επί μέρους επιστημών, με κυρίαρχες τη φυσική, τη βιολογία και τη χημεία [1]. Η διερεύνηση της εφαρμογής της έχει ενταθεί τόσο σε επίπεδο ανάπτυξης θεωρητικών μοντέλων για την ερμηνεία και κατανόηση βασικών λειτουργιών της φύσης [2-4], όσο και σε επίπεδο κατασκευής καινοτόμων τεχνολογικών εφαρμογών [5-11]. Παράλληλα, μέσω της νανοτεχνολογίας, αναζητούνται απαντήσεις στις διεπιφάνειες μεταξύ των επιστημών, πράγμα που απαιτεί την έντονη ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ τους [1].



**Εικόνα 1.1:** Η εξέλιξη των επί μέρους τομέων της Φυσικής, Χημείας και Βιολογίας και η σύγκλιση τους στην ανάπτυξη εφαρμογών στη νανοτεχνολογία σήμερα [1].

Η ανακάλυψη του πρώτου τρανζίστορ από τον J. Bardeen, W. Shockley και W. Brattain στα εργαστήρια της Bell Telephone το 1948 [12], ήταν η αρχή για την εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών που επακολούθησε. Έκτοτε και με την πάροδο των ετών, οι ανακαλύψεις που έγιναν καθώς και οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν στον τομέα των ημιαγωγών, οδήγησαν στην επί μέρους ανάπτυξη τεχνολογιών για την εξυπηρέτηση της ανθρώπινης δραστηριότητας την εκάστοτε χρονική περίοδο.

Δύο σημαντικές, εν εξελίξει, τεχνολογίες είναι αυτές των μνημών και των αισθητήρων. Οι μνήμες αποτελούν εδώ και δεκαετίες ένα από τα βασικά στοιχεία των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και των κινητών τηλεφώνων [13], ενώ οι αισθητήρες, αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο για την ανάπτυξη των έξυπνων συστημάτων [14]. Ακολουθώντας την εμπειρική παρατήρηση του Moore, με βάση το νόμο του οποίου, ο αριθμός των τρανζίστορ σε ένα πυκνό ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιάζεται κάθε περίπου δύο χρόνια [15], θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτή η θεώρηση, επεκτείνεται και στις υπόλοιπες ηλεκτρονικές συσκευές. Η ανάγκη συλλογής και διαχείρισης του τεράστιου όγκου δεδομένων, επιβάλλει την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, βασικά χαρακτηριστικά των οποίων θα είναι η απόκριση τους σε πραγματικό χρόνο στα εξωτερικά ερεθίσματα που δέχονται, καθώς και η ολοκλήρωσή τους σε όσο το δυνατόν μικρότερο χώρο [16-20]. Αυτό δεν θα ήταν δυνατό να επιτευχθεί, εάν παράλληλα δεν αναπτύσσονταν ο εξοπλισμός και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των υλικών από τα οποία αποτελούνται οι διάφορες ηλεκτρονικές διατάξεις. Έτσι, κατά τη διάρκεια των ετών, εκτός από την περαιτέρω ανάπτυξη των ήδη εδραιωμένων τεχνολογιών [21], [22], αναπτύχθηκαν νέες [23], [24]. Αυτό έδωσε πρόσβαση στην κατασκευή και επεξεργασία υλικών και διαδικασιών στην κλίμακα των νανομέτρων, ενώ παράλληλα πολλές από τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί, διασφαλίζουν μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία [25], [26].

## 1.2 Τεχνικές ανάπτυξης νανοδιατάξεων

Οι δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νανοδιατάξεων, είναι οι top-down και οι bottom-up [27]. Οι top-down τεχνικές, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δομών μέχρι και κλίμακας νανομέτρων, έχοντας ως αφετηρία ένα λεπτό υμένιο υλικού το οποίο τελικά σχηματοποιούν, ενώ οι bottom-up τεχνικές αναπτύχθηκαν με σκοπό να δημιουργήσουν δομές νανομέτρων, οργανώνοντας την ύλη από το ατομικό ή μοριακό επίπεδο. Στα παρακάτω υποκεφάλαια,

περιγράφονται ορισμένες από αυτές τις τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διατάξεων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

## 1.2.1 Φυσική εναπόθεση ατμών (Physical Vapor Deposition - PVD)

Η φυσική εναπόθεση ατμών, είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα υλικό, μεταβαίνει από τη στερεά κατάσταση του, σε αέρια και στη συνέχεια πάλι σε στερεά, αναπτυσσόμενο ως μορφή λεπτού υμενίου στο υπόστρωμα που θέλουμε να το εναποθέσουμε. Αποτελεί μια εκ των βασικών τεχνικών εναπόθεσης υλικών, ευρέως χρησιμοποιούμενη στον χώρο της βιομηχανίας.

### 1.2.1.1 Η μέθοδος της ιοντοβολής (Sputtering)

Η μέθοδος της ιοντοβολής, ανήκει στην κατηγορία των bottom up τεχνικών, ενώ χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη λεπτών υμενίων οξειδίων και μετάλλων, καθώς και για την ανάπτυξη νανοσωματιδίων. Η ιοντοβολή, ορίζεται ως ο βομβαρδισμός κάποιου υλικού στόχου από φορτισμένα ιόντα που οδηγεί στην απόσπαση ατόμων από το υλικό του στόχου. Τα βασικά στάδια της μεθόδου της ιοντοβολής είναι τα παρακάτω:

- i. Αδρανές αέριο που βρίσκεται εντός του θαλάμου υψηλού κενού, ιονίζεται από μια εξωτερική πηγή τάσης, παράγοντας πλάσμα
- ii. Τα φορτισμένα ιόντα του αερίου, επιταχύνονται προς τον στόχο, ο οποίος βρίσκεται στην κάθοδο
- iii. Άτομα από το υλικό του στόχου απομακρύνονται και διαχέονται στον θάλαμο κενού
- iv. Τα άτομα από το υλικό του στόχου εναποτίθενται στο υπόστρωμα υπό τη μορφή λεπτού υμενίου



Η πολλαπλή ελαστική σκέδαση ιόντων στον στόχο, παράγει δευτερεύοντα ηλεκτρόνια καθώς και εκπομπή ακτίνων X και φωτονίων άλλων συχνοτήτων, λόγω της διέγερσης και αποδιέγερσης των ατόμων στόχου.

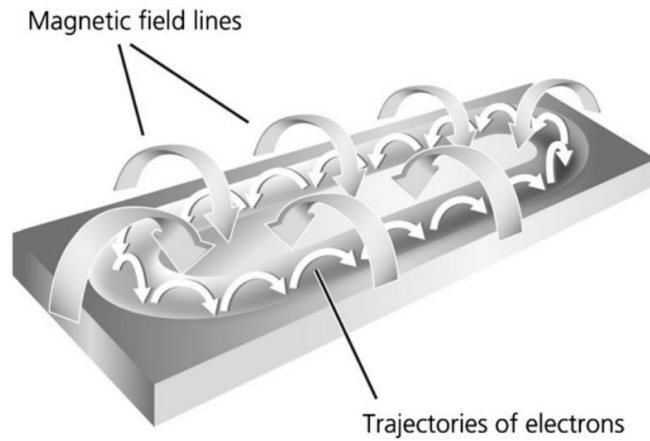
### 1.2.1.2 RF Sputtering

Η τεχνική RF sputtering, χρησιμοποιείται όταν το υλικό του στόχου είναι αγωγίμο αλλά και στην περίπτωση που είναι μονωτικό. Η διαφορά με τη DC sputtering τεχνική, είναι ότι στην περίπτωση της RF, εφαρμόζεται εναλλαγή του ηλεκτρικού δυναμικού του ρεύματος στο περιβάλλον κενού στις ραδιοσυχνότητες, για να αποφευχθεί η συσσώρευση φορτίου σε μονωτικά υλικά - στόχους, που με την πάροδο του χρόνου μπορεί να οδηγήσει στην απόσβεση του πλάσματος. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου συχνότητας, υπάρχει ένας συνεχής βομβαρδισμός της επιφάνειας στόχου με ιόντα καθώς είναι πιο δυσκίνητα στην απόκρισή τους στο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, ενώ τα ηλεκτρόνια ακολουθούν τις εναλλαγές του ηλεκτρικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση, η συσσώρευση θετικού φορτίου στην επιφάνεια στόχου, εξουδετερώνεται από τη σύγκρουση ηλεκτρονίων στο δεύτερο μισό της περιόδου της εναλλασσόμενης τάσης. Αυτό επιτρέπει στα θετικά ιόντα να χτυπούν ανεμπόδιστα την επιφάνεια του μονωτή και το πλάσμα να είναι σταθερό στον θάλαμο.

### 1.2.1.3 Magnetron Sputtering

Στην τεχνική magnetron sputtering, δημιουργείται ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του στόχου, το οποίο είναι πιο ισχυρό από το ηλεκτρικό που υπάρχει λόγω της τάσης στα ηλεκτρόδια. Χωρίς την ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου, η πλειονότητα των ηλεκτρονίων χάνει την ενέργειά της προτού ιονιστούν τα άτομα του, αρχικώς, αδρανούς αερίου. Έτσι, επειδή τα κινούμενα ηλεκτρόνια υπόκεινται στη δύναμη Lorentz στο μαγνητικό πεδίο, οι διαδρομές κίνησής τους κάμπτονται ή είναι ακόμα και σπειροειδείς οπότε οι διαδρομές κίνησής τους γίνονται μεγαλύτερες [28]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση του αριθμού των συγκρούσεων με τα μόρια του αερίου αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα του

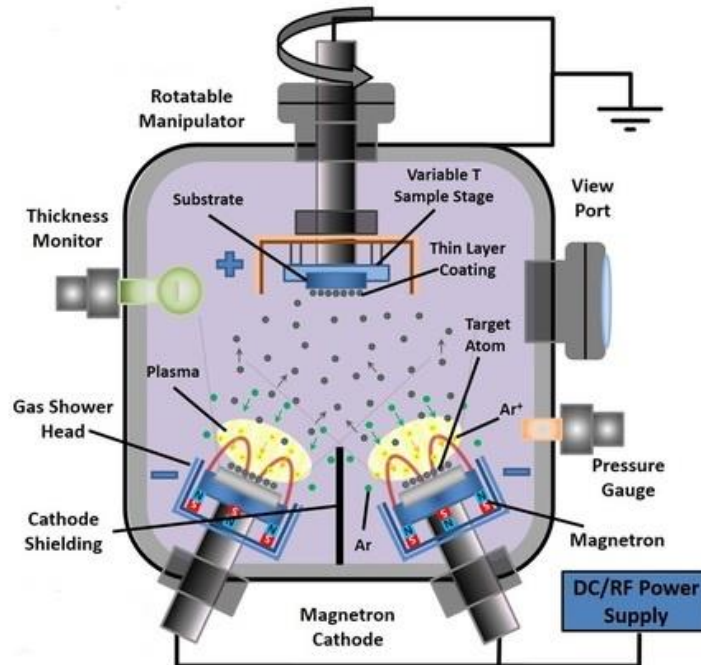
πλάσματος οδηγώντας συνεπώς στη σημαντική βελτίωση του ρυθμού εναπόθεσης του υλικού, ενώ παράλληλα μπορεί να πραγματοποιηθεί εναπόθεση σε χαμηλότερη τάση λειτουργίας και πίεσης.



**Εικόνα 1.2:** Σχηματική αναπαράσταση της τροχιάς των ηλεκτρονίων λόγω της δύναμης Lorentz σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα τον ενισχυμένο ιονισμό των ατόμων αργού, σε ένα σύστημα magnetron sputtering [28].

Η αύξηση της πυκνότητας του πλάσματος, ενισχύει επίσης την ενέργεια των ατόμων που προσπίπτουν στην επιφάνεια του υποστρώματος, βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του υμενίου. Ταυτόχρονα, τα ηλεκτρόνια που έχασαν ενέργεια μετά από πολλές συγκρούσεις γίνονται ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας όταν φτάνουν στην άνοδο, έτσι ώστε το υπόστρωμα να μην υπερθερμαίνεται. Επομένως, η εναπόθεση μέσω magnetron sputtering έχει τα πλεονεκτήματα της «υψηλής ταχύτητας» και της «χαμηλής θερμοκρασίας».

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου στην περίπτωση του DC magnetron sputtering, είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μονωτικούς στόχους. Το ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο που χρησιμοποιείται στο μαγνητικό ηλεκτρόδιο ελέγχου, προκαλεί σημαντική ανομοιογενή χάραξη του στόχου που έχει ως αποτέλεσμα το χαμηλό ποσοστό χρησιμοποίησης του υλικού στόχου, σε ποσοστό της τάξης του 20% - 30%.



**Εικόνα 1.3:** Σχηματική απεικόνιση του θαλάμου εναπόθεσης με τη μέθοδο της ιοντοβολής μέσω magnetron sputtering, όπου η πηγή τάσης μπορεί να είναι είτε DC, είτε RF [29].

### 1.2.1.4 DC Sputtering

Κατά την εναπόθεση μέσω DC sputtering, αδρανές αέριο (π.χ. Ar) εισάγεται στον θάλαμο, ενώ έχει προηγηθεί η δημιουργία κενού εντός του θαλάμου (της τάξης των millitorr). Ο στόχος από τον οποίο θέλουμε να εξάγουμε υλικό βρίσκεται στην κάθοδο ενώ το υπόστρωμα στο οποίο θέλουμε να εναποθέσουμε το υλικό, στην άνοδο. Με την εφαρμογή υψηλής και συνεχούς τάσης μεταξύ ανόδου και καθόδου δημιουργείται πλάσμα λόγω του ιονισμού των ατόμων του αρχικά αδρανούς αερίου, ενώ τα θετικά φορτισμένα ιόντα έλκονται από την κάθοδο στην οποία βρίσκεται ο στόχος, προσκρούουν πάνω του και εν τέλει, απομακρύνουν άτομα από το υλικό του στόχου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για αγωγιμα υλικά - στόχους. Η εφαρμογή συνεχούς τάσης στην περίπτωση μονωτικών υλικών, όπως οξειδία μετάλλων, θα είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση φορτίου στην επιφάνεια του μονωτή λόγω της σύγκρουσης ιόντων αερίου που θα εμπόδιζε τα επόμενα ιόντα να φτάσουν στην επιφάνεια, μειώνοντας την εφαρμοζόμενη τάση προς τον στόχο και οδηγώντας τελικά στην απόσβεση του πλάσματος. Για να

αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα, η μόνωση του στόχου πολώνεται με εναλλασσόμενη τάση με ραδιοσυχνότητα, όπου τότε έχουμε την εναπόθεση RF Sputtering, τεχνική που εξηγήθηκε σε προηγούμενη υποπαράγραφο.

#### 1.2.1.4.1 Ανάπτυξη Νανοσωματιδίων μέσω DC Sputtering

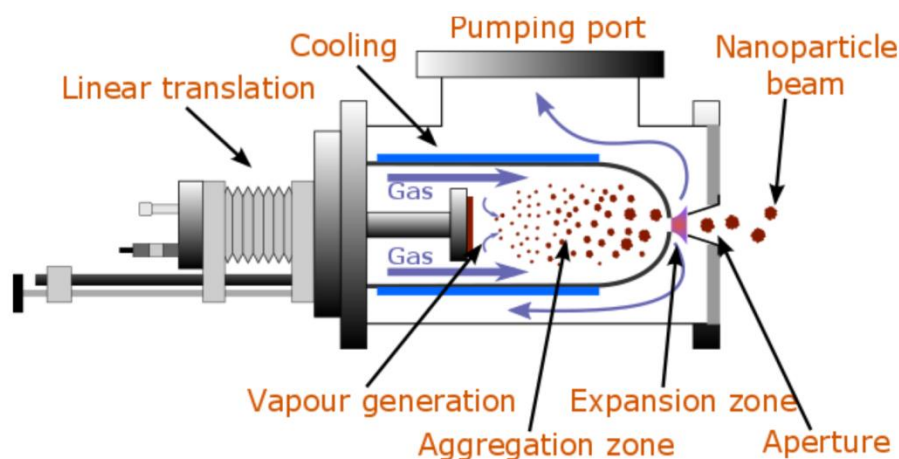
Η τεχνική του DC sputtering, μπορεί να επίσης χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη νανοσωματιδίων. Στον τομέα της φυσικής των υλικών, συστάδες ονομάζονται τα μικρά αντικείμενα που αποτελούνται από πολλά άτομα. Στην περίπτωση που αυτές οι συστάδες έχουν διαστάσεις μεταξύ 0 – 100 nm, ονομάζονται νανοσωματίδια. Μια από τις τεχνικές για τη δημιουργία νανοσωματιδίων είναι η συμπύκνωση αερίων, όπου θεωρείται ως μια bottom-up τεχνική. Η μέθοδος αυτή, συνίσταται στη συμπύκνωση ενός υπερκορεσμένου ατμού (που λαμβάνεται από το υλικό που μας ενδιαφέρει) χρησιμοποιώντας μια ροή ψυχρού αδρανούς αερίου. Με την τεχνική της ιοντοβολής, λόγω του βομβαρδισμού ενός στερεού στόχου υλικού με ιόντα που παράγονται στο πλάσμα, παράγονται άτομα από το υλικό του στόχου. Η σύνθεση των νανοσωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε δύο διαδοχικά στάδια. Αρχικά αυτό της συμπύκνωσης και εν συνεχεία της πυρήνωσης. Τα παραχθέντα νανοσωματίδια τείνουν να κατέχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο που επιτρέπει τον ηλεκτροστατικό χειρισμό τους.

Συγκεκριμένα η διαδικασία ανάπτυξης των νανοσωματιδίων είναι η εξής:

Το αδρανές αέριο που βρίσκεται στην ζώνη συμπύκνωσης, ιονίζεται λόγω του μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται κοντά στον στόχο, δημιουργώντας πλάσμα. Το πλάσμα που δημιουργείται κοντά στον στόχο του υλικού, οδηγεί στη δημιουργία υπερκορεσμένων ατμών, από άτομα του υλικού του στόχου. Τα άτομα του στόχου που βρίσκονται σε αέρια μορφή και έχοντας υψηλές κινητικές ενέργειες, καθώς απομακρύνονται από το υλικό στόχο, συμπυκνώνονται λόγω της ψύξης τους από το αδρανές αέριο, ενώ μειώνεται παράλληλα η κινητική τους ενέργεια. Έτσι συντελείται η πυρήνωση των ατόμων του υλικού στόχου και η δημιουργία συστάδων. Περνώντας μέσω μιας μικρής οπής, από τη ζώνη συμπύκνωσης στον θάλαμο κενού στον οποίο βρίσκεται το υπόστρωμα στο οποίο θέλουμε να εναποθέσουμε τα νανοσωματίδια, οι συστάδες που έχουν δημιουργηθεί δεν αλληλεπιδρούν πλέον μεταξύ τους, καθώς

βρίσκονται υπό κενό. Συνεπώς, με το πέρασμά τους μέσω της οπής, οι συστάδες του υλικού του στόχου που έχουν αναπτυχθεί διατηρούν το μέγεθος τους και αποτελούν τα παραγόμενα νανοσωματίδια.

Το σύστημα ανάπτυξης νανοσωματιδίων, αποτελείται από μια πηγή συστάδας νανοσωματιδίων που καταλήγει σε μια μικρή οπή, προσαρτημένη σε ένα θάλαμο υψηλού κενού παρόμοιο με εκείνους που χρησιμοποιούνται για την εναπόθεση λεπτής μεμβράνης. Το περίβλημα της πηγής ανάπτυξης νανοσωματιδίων, είναι ένας κυλινδρικός σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα με υδρόψυκτα τοιχώματα. Ένα σύστημα magnetron sputtering είναι τοποθετημένο αξονικά σε αυτό, με τον στόχο στραμμένο προς το άνοιγμα εξόδου. Η σύνθεση των νανοσωματιδίων λαμβάνει χώρα στο μεταξύ τους χώρο (Εικόνα 1.4). Ένα αδρανές αέριο (συνήθως Ar) εισέρχεται στο σύστημα του θαλάμου παραγωγής νανοσωματιδίων και εκκενώνεται από ένα σύστημα άντλησης κενού που είναι συνδεδεμένο στον θάλαμο εναπόθεσης. Λόγω της μικρής της διαμέτρου (συνήθως μερικά χιλιοστά), η οπή επιτρέπει μικρή ροή αερίου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφορετικής πίεσης μεταξύ του θαλάμου της πηγής των νανοσωματιδίων και του θαλάμου εναπόθεσης. Κατά συνέπεια, τα νανοσωματίδια που αναπτύσσονται στο θάλαμο που λαμβάνει χώρα η συμπύκνωση των νανοσωματιδίων, έχοντας υψηλότερη πίεση λόγω της ροής του Ar ( $\sim 5 \times 10^{-3} \text{ mBar}$ ), εκτινάσσονται στον θάλαμο εναπόθεσης που βρίσκεται σε αρκετά χαμηλότερη πίεση ( $\sim 5 \times 10^{-5} \text{ mBar}$ ) και έτσι συλλέγονται στο υπόστρωμα.



**Εικόνα 1.4:** Σχηματική αναπαράσταση της ανάπτυξης νανοσωματιδίων με την τεχνική του DC magnetron sputtering [30].

Το μέγεθος των νανοσωματιδίων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, μεταξύ των οποίων είναι η απόσταση του υλικού στόχου παραγωγής νανοσωματιδίων από την οπή που συνδέει του δύο θαλάμους

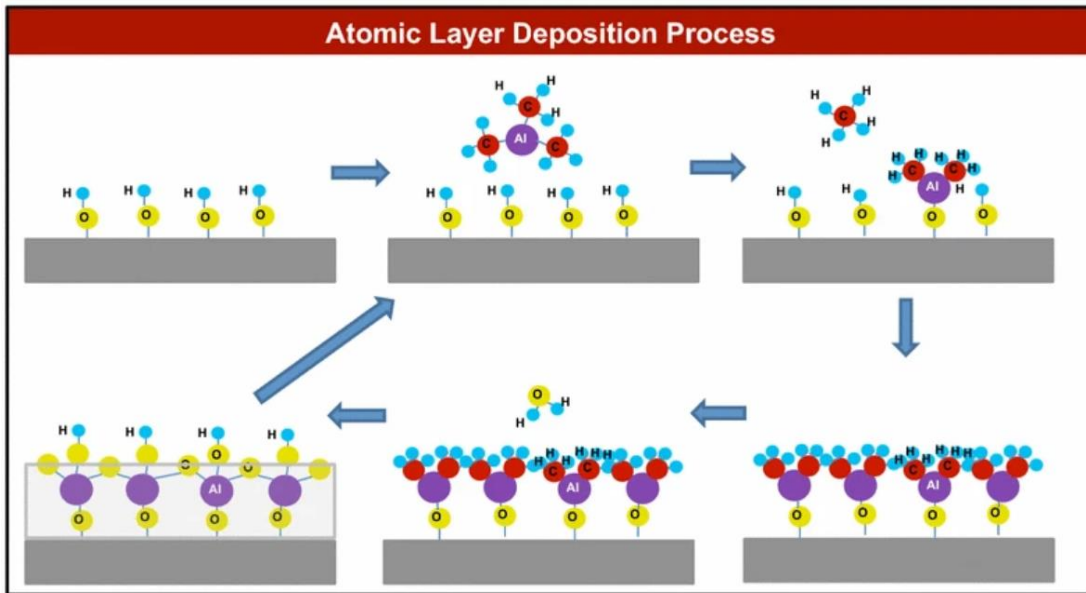
καθώς και ο ρυθμός ροής του αδρανούς αερίου. Η κεφαλή του συστήματος magnetron sputtering, στην οποία βρίσκεται ο στόχος, μπορεί να μετακινηθεί κατά μήκους του θαλάμου παραγωγής των νανοσωματιδίων, ρυθμίζοντας έτσι την απόσταση μεταξύ της πηγής παραγωγής των νανοσωματιδίων και της οπής από την οποία εξέρχονται τα νανοσωματίδια προς τον θάλαμο στον χαμηλότερης πίεσης, όπου βρίσκεται το δείγμα στο οποίο θέλουμε να πραγματοποιήσουμε την εναπόθεση. Αυξάνοντας την απόσταση του στόχου παραγωγής νανοσωματιδίων από την οπή που εξέρχονται τα νανοσωματίδια, αυξάνεται και το μέγεθος των νανοσωματιδίων καθώς έχουν να διανύσουν μεγαλύτερη διαδρομή μέχρι να εξέλθουν από την οπή και άρα μεγαλύτερη πιθανότητα να συσσωματωθούν με άλλες συστάδες παραγόμενου υλικού. Αυξάνοντας το ρυθμό ροής του αδρανούς αερίου παρατηρείται μείωση του μέσου μεγέθους των παραγόμενων νανοσωματιδίων, λόγω της μείωσης του χρόνου παραμονής τους στον θάλαμο παραγωγής τους (ζώνη συμπύκνωσης).

## 1.2.2 Ατομική Εναπόθεση Στρωμάτων (Atomic Layer Deposition - ALD)

Η ατομική εναπόθεση στρωμάτων (Atomic Layer Deposition - ALD) αποτελεί υποκατηγορία της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) αλλά με κάποια χαρακτηριστικά που τη διαφοροποιούν. Η ALD είναι μια σύγχρονη τεχνική που προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις CVD και PVD τεχνικές, όπως τον πλήρη έλεγχο του πάχους και της σύνθεσης του υλικού εναπόθεσης, προσφέροντας μεγαλύτερη ομοιογένεια ακόμα σε εναποθέσεις λεπτών υμενίων της τάξης μερικών νανομέτρων.

Η διαδικασία της ALD περιλαμβάνει την έκθεση της επιφάνειας ενός υποστρώματος σε εναλλασσόμενες πρόδρομες ουσίες, οι οποίες δεν εισάγονται ταυτόχρονα, όπως στις άλλες μεθόδους CVD, αλλά αντίθετα εισάγονται διαδοχικά. Τα αντιδρώντα αέρια (πρόδρομες ουσίες) εισάγονται στον θάλαμο αντίδρασης για τον σχηματισμό του επιθυμητού υλικού μέσω χημικών επιφανειακών αντιδράσεων. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της ALD είναι ότι οι παλμοί των πρόδρομων αερίων, λαμβάνουν χώρα εναλλάξ (ένας κάθε φορά) και διαχωρίζονται με καθαρισμό αδρανούς αερίου ( $N_2$  ή Ar) προκειμένου να αποφευχθούν αντιδράσεις αέριας φάσης (Εικόνα 1.5). Αρχικά, εισάγεται το πρώτο πρόδρομο υλικό μέσα στον θάλαμο υπό συνθήκες κενού. Στη συνέχεια ο θάλαμος καθαρίζεται με κάποιο αδρανές αέριο για να καθαριστούν τα υποπροϊόντα της αντίδρασης αλλά και μέρος του πρόδρομου υλικού που δεν αντέδρασε

με την επιφάνεια. Έπειτα στο θάλαμο εισέρχεται ο παλμός του άλλου αντιδρώντος πρόδρομου υλικού, ενώ στο τέλος εισέρχεται ένας ακόμη παλμός εκκαθάριση, αδρανούς αερίου.



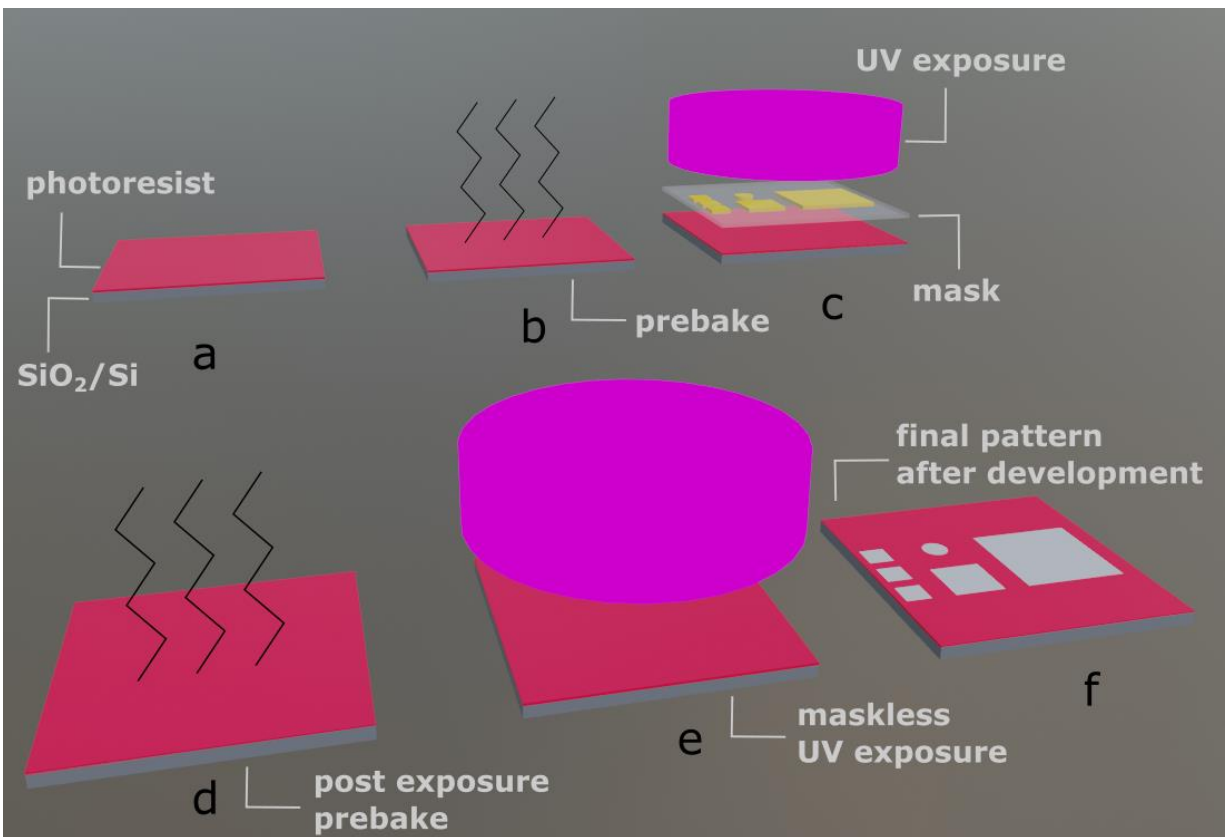
**Εικόνα 1.5:** Η διαδικασία της Ατομικής Εναπόθεσης Στρωμάτων [31].

Σε κάθε εναλλακτικό παλμό, το πρόδρομο μόριο αντιδρά με την επιφάνεια με τρόπο αυτοπεριοριζόμενο, το οποίο διασφαλίζει ότι η αντίδραση σταματά μόλις χρησιμοποιηθούν όλες οι δυνατές θέσεις στο υπόστρωμα, στις οποίες θα μπορούσαν να λάβουν μέρος οι χημικές αντιδράσεις. Ένας πλήρης κύκλος ALD καθορίζεται από τη φύση της αλληλεπίδρασης πρόδρομου-επιφάνειας. Ο κύκλος ALD μπορεί να εκτελεστεί πολλές φορές για να αυξηθούν τα στρώματα της λεπτής μεμβράνης, ανάλογα με την απαίτηση. Οι διαδοχικές, αυτοτερματιζόμενες επιφανειακές αντιδράσεις των αντιδρώντων, επιτρέπουν την ελεγχόμενη ανάπτυξη του επιθυμητού υλικού. Ο μοναδικός αυτοπεριοριζόμενος μηχανισμός ανάπτυξης, έχει ως αποτέλεσμα την τέλεια συμμόρφωση και ομοιομορφία πάχους της μεμβράνης ακόμη και σε περίπλοκες δομές 3D.

### 1.2.3 Οπτική Λιθογραφία

Η οπτική λιθογραφία (φωτολιθογραφία ή UV λιθογραφία), είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική λιθογραφίας, λόγω της απλής διαδικασίας καθώς και του χαμηλού κόστους της. Η αρχή της βασίζεται στην απεικόνιση μιας δομής που έχει σχεδιαστεί σε μια μάσκα λιθογραφίας, σε μια φωτοευαίσθητη ρητίνη αφού προηγουμένως αυτή, έχει εναποτεθεί σε κάποιο υπόστρωμα.

Το φως προβάλλει την εικόνα του σχεδίου στη μάσκα πάνω στη ρητίνη. Ορισμένα μέρη είναι φωτεινά ενώ άλλα είναι σκοτεινά. Η ρητίνη αλλάζει τη διαλυτότητά της στα σημεία όπου εκτίθενται στην υπεριώδη ακτινοβολία. Υπάρχουν δύο τύποι ρητίνης: η θετική και η αρνητική. Στη θετική ρητίνη, οι περιοχές που εκτίθενται στην ακτινοβολία, αφαιρούνται μετά την ανάπτυξη. Ενώ στην αρνητική ρητίνη, οι περιοχές που εκτίθενται στην ακτινοβολία παραμένουν. Μετά την ανάπτυξη, το σχέδιο της μάσκας, αποτυπώνεται στη ρητίνη [32].



**Εικόνα 1.6:** Η διαδικασία της αρνητικής λιθογραφίας η οποία χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των διατάξεων αυτής της εργασίας.



Η ανάλυση της οπτικής λιθογραφίας μπορεί να φτάσει το 0.5  $\mu\text{m}$  γεγονός που αποτελεί το κύριο μειονέκτημά της σε σχέση με την λιθογραφία ακτίνων X [33], την DUV λιθογραφία [34] και την λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης [35]. Ωστόσο, λόγω της απλής και χαμηλού κόστους διαδικασίας της, συνεχίζουν να γίνονται προσπάθειες για την βελτίωση της ανάλυσής της [36] καθώς και να αναπτύσσονται τεχνικές για την οπτική λιθογραφία διαφόρων υλικών και δομών [37], [38].

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] G. Tegart, “Nanotechnology: The technology of the 21<sup>st</sup> century”, *The second international conference on technology*, Tokyo, 27-28 Feb. 2003.
- [2] S. M. Musa, “Computational Nanotechnology: Modeling and Applications with MATLAB®”, CRC Press, Inc., 2012.
- [3] O. V. Neto, “Intelligent Computational Nanotechnology: The Role of Computational Intelligence in the Development of Nanoscience and Nanotechnology”, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 11, no. 4, pp. 928-944, Apr. 2014.
- [4] W. Liu, Y. Wu, Y. Hong, Z. Zhang, Y. Yue, J. Zhang, “Applications of machine learning in computational nanotechnology”, *Nanotechnology*, vol. 33, no. 16, 162501, Jan. 2022.
- [5] B. Panchapakesan, E. Wickstrom, “Nanotechnology for sensing, imaging, and treating cancer”, *Surg Oncol Clin N Am.*, vol. 16, no. 2, pp. 293-305, Apr. 2007.
- [6] S. Wu, P. Wang, C. Xiao, Z. Li, B. Yang, J. Fu, J. Chen, N. Wan, C. Ma, M. Li, X. Yang, Y. Zhan, “A Quick-responsive DNA Nanotechnology Device for Bio-molecular Homeostasis Regulation”, *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, 31379, Aug. 2016.
- [7] H. Jeong, L. Shi, “Memristor devices for neural networks”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 52, 023003, Oct. 2018.
- [8] D. Ielmini, Z. Wang, Y. Liu, “Brain-inspired computing via memory device physics”, *APL Materials*, vol. 9, no. 5, 050702, May 2021.
- [9] Z. Gong, Y. Zhang, X. Yu, “Review on Bio-inspired Materials with Nanotechnology Applications in Medical Devices”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1, 1948, 012227, Jun. 2021.
- [10] M. Meneghini, C. D. Santi, I. Abid, M. Buffolo, M. Cioni, R. A. Khadar, L. Nela, N. Zagni, A. Chini, F. Medjdoub, G. Meneghesso, G. Verzellesi, E. Zanoni, E. Matioli, “GaN-based power devices: Physics, reliability, and perspectives”, *Journal of Applied Physics*, vol. 130, no. 18, 181101, Nov. 2021.

- [11] M. A. Shah, B.M. Pirzada, G. Price, A. L. Shibiru, A. Qurashi, “Applications of Nanotechnology in Smart Textile Industry: A Critical Review”, *Journal of Advanced Research*, Jan. 2022.
- [12] M. Tanenbaum, L. B. Valdes, E. Buehler, N. B. Hannay, “Silicon n-p-n Grown Junction Transistors”, *J. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 6, pp. 86-92, Jun. 1955.
- [13] A. Sharma, “Semiconductor Memories, Technology, Testing and Reliability”, *John Wiley & Sons*, Inc. 1997
- [14] E.T. Powner, F. Yalcinkaya, “Intelligent sensors: structure and system”, *Sensor Review*, vol. 15, no. 3, pp. 31-35, Sept. 1995.
- [15] G. E. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.”, *IEEE Solid State Circuits Soc. Newsl.*, vol. 11, no. 3, pp. 33–35, Sep. 2006.
- [16] M. Motornov, J. Zhou, M. Pita, I. Tokarev, V. Gopishetty, E. Katz, S. Minko, “An Integrated Multifunctional Nanosystem from Command Nanoparticles and Enzymes”, *Small*, vol. 5, no. 7, pp. 817 - 820, Apr. 2009.
- [17] D. Shi, “Integrated Multifunctional Nanosystems for Medical Diagnosis and Treatment”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 23, *Advanced Functional Materials*, Dec. 2009.
- [18] H. E. Nilsson, H. A. Andersson, A. Manuilskiy, T. Unander, K. Hammarling, J. Siden, M. Gulliksson, “Printed Write Once and Read Many Sensor Memories in Smart Packaging Applications”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 9, pp. 1759-1767, Sept. 2011.
- [19] D. Ielmini, “Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling”, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 6, 063002, May 2016.
- [20] G. Pedretti, D. Ielmini, “In-Memory Computing with Resistive Memory Circuits: Status and Outlook”, *Electronics*, vol. 10, no. 9, 1063, Apr. 2021
- [21] R. Coquand, S. Monfray, J. Pradelles, L. Martin, M.-P. Samson, J. Bustos, S. Barraud, F. Boeuf, T. Skotnicki, G. Ghibaudo, T. Poiroux, O. Faynot, “On the optimization of ebeam lithography using Hydrogen SilsesQuioxane (HSQ) for innovative self-aligned CMOS process”, *ECS Transactions*, vol. 53, no. 3, 223th ECS Meeting, May 2013

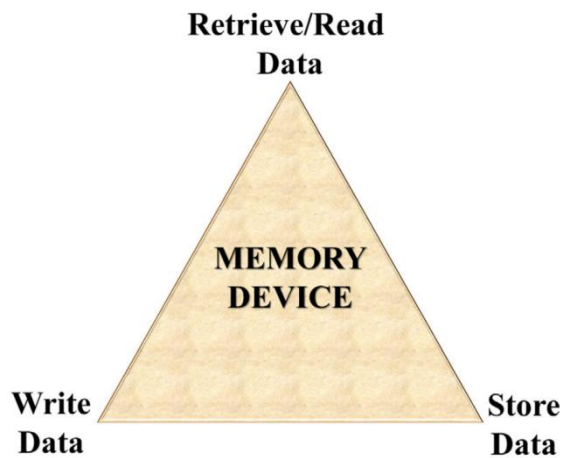
- [22] N. H. Paulson, A. Yanguas-Gil, O. Y. Abuomar, J. W. Elam, “Intelligent Agents for the Optimization of Atomic Layer Deposition”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 14, pp. 17022-17033, Apr. 2021.
- [23] A. Han, D. Vlassarev, J. Wang, J. A. Golovchenko, D. Branton, “Ice lithography for nanodevices”, *Nano Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 5056-5059, 2010.
- [24] Maissa K. S. Barr, P. Wiesner, I. Kunderata, S. Tymek, M. Plakhotnyuk and J. Bachmann, “Fabrication of Free-Standing Three-Dimensional Structures by Atomic Layer 3D Printing”, *ECS Meet. Abstr. MA2021-02 870*, Nov. 2021.
- [25] Y. Chen, “Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: A review”, *Microelectronic Engineering*, vol. 135, pp. 57-72, Mar. 2015.
- [26] B. C. Mallick, C. T. Hsieh, K. M. Yin, Y. A. Gandomi, K. T. Huang, “Review—On Atomic Layer Deposition: Current Progress and Future Challenges”, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 8, no. 4, May 2019.
- [27] A. Biswas, I. S. Bayer, A. S. Biris, T. Wang, E. Dervishi, F. Faupel, “Advances in top–down and bottom–up surface nanofabrication: Techniques, applications & future prospects”, *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 170, no. 1–2, pp. 2-27, Jan. 2012.
- [28] G. Bräuer, B. Szyszka, M. Vergöhl, R. Bandorf, “Magnetron sputtering – Milestones of 30 years”, *Vacuum*, vol. 84, no. 12, pp. 1354–1359, Jun. 2010.
- [29] <https://angstromengineering.com/>
- [30] E. Aslanidis, “Nanoparticle Sensor Arrays on Flexible Substrates”, PhD thesis, N.T.U.A, Apr. 2021.
- [31] A.E. Marquardt, E.M. Breitung, T. Drayman-Weisser, G. Gates and R. J. Phaneuf, “Protecting silver cultural heritage objects with atomic layer deposited corrosion barriers”, *Herit Sci*, vol. 3, no. 37, 2015.
- [32] S. Franssila, “Introduction to Microfabrication”, Second Edition, *John Wiley & Sons*, Nov. 2010.

- [33] M. Feldman, J. Sun, “Resolution limits in x-ray lithography”, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 10, pp. 3173-3176, Jul. 1992.
- [34] S. J. Holmes, P. H. Mitchell, M. C. Hakey, “Manufacturing with DUV lithography”, *Ibm Journal of Research and Development*, vol. 41, no 1.2, pp. 7 - 19, Jan. 1997.
- [35] M. Altissimo, “E-beam lithography for micro-nanofabrication”, *Biomicrofluidics*, vol. 4, no. 2, 026503, Jun. 2010.
- [36] Y. Song, C. Gui, Z. Huo, S. W. R. Lee, S. Liu, “Mechanical system and dynamic control in photolithography for nanoscale fabrication: a critical review”, *Int J Mech Syst Dyn.*, vol. 1, no. 1, pp. 35-51, Nov. 2021.
- [37] B. K. Naggay, K. Frey, M. Schneider, K. Athanasopulu, G. Lorenz, R. Kemkemer, “Low-cost photolithography system for cell biology labs”, *Current Directions in Biomedical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 550-553, Oct. 2021.
- [38] D. G. Kasi , M. N. S. de Graaf , P. A. Motreuil-Ragot, J. M. S. Frimat, M. D. Ferrari, P. M. Sarro, M. Mastrangeli, A. M. J. M. van den Maagdenberg, C. L. Mummery, V. V. Orlova, “Rapid Prototyping of Organ-on-a-Chip Devices Using Maskless Photolithography”, *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 1, Dec. 2021.

## Κεφάλαιο 2: Οι τεχνολογίες μνήμης

### 2.1 Εισαγωγή

Ένα από τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία που έχουν αναπτυχθεί στη βιομηχανία των ημιαγωγών ενώ παράλληλα συνεχίζεται η βελτιστοποίησή τους, είναι οι μνήμες. Βασίζονται στην τεχνολογία CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) και αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες κατηγορίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η ανάγκη για αποθήκευση και επεξεργασία ενός συνεχώς αυξανόμενου όγκου πληροφοριών, έχει στρέψει μεγάλο μέρος της έρευνας στην αναζήτηση μνημών νέας τεχνολογίας, ενώ παράλληλα η ενσωμάτωσή τους σε διάφορων τύπων ηλεκτρονικές συσκευές, γίνεται επιτακτική.



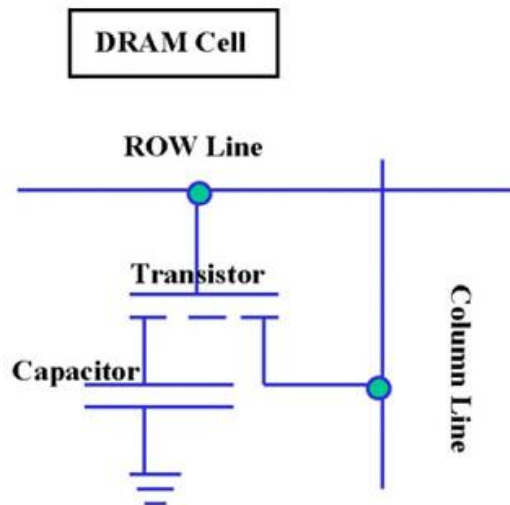
**Εικόνα 2.1:** Οι τρεις βασικές απαιτήσεις μιας συσκευής μνήμης [1].

Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μνήμες, είναι οι πτητικές (Volatile Memories - VM) και οι μη πτητικές (Non Volatile Memories - NVM) όπου η διαφορά τους είναι στην απαίτηση ή μη, τροφοδοσίας ρεύματος για τη διατήρηση της αποθηκευμένης πληροφορίας [2]. Οι δύο επικρατέστεροι τύποι μνημών μεταξύ των δύο βασικών κατηγοριών, είναι η DRAM (VM) και η FLASH (NVM). Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους δύο αυτούς τύπους μνημών και ορίζουν τελικά σε ποια από τις δύο κατηγορίες εντάσσονται οι τεχνολογίες μνημών, είναι η ταχύτητα

εγγραφής/ανάγνωσης (write/read speed) και η αντοχή τους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους λειτουργίας (endurance). Οι NVM απαιτούν γρήγορες ταχύτητες εγγραφής/ανάγνωσης (~ns) έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αναντιστοιχία απόδοσης (latency) με το logic chip ενώ παράλληλα θα πρέπει να αντέχουν σε απεριόριστους κύκλους λειτουργίας [3]. Στις παρακάτω παραγράφους, ακολουθεί περιγραφή των επικρατέστερων μνημών καθώς και των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών τους.

## 2.2 Dynamic Random Access Memory

Η Dynamic Random Access Memory (DRAM), αποτελεί έναν από τους πιο ευρέως διαδεδομένους τύπους πτητικών μνημών (VM). Η μνήμη αποτελείται από bits δεδομένων που είναι διατεταγμένα σε ένα δισδιάστατο πλέγμα. Η DRAM αποθηκεύει κομμάτια δεδομένων σε αυτό που ονομάζεται κυψέλη μνήμης και που αποτελείται από έναν πυκνωτή και ένα τρανζίστορ (1T1C). Τα κελιά αποθήκευσης είναι συνήθως οργανωμένα σε ορθογώνια διαμόρφωση. Όταν μια φόρτιση αποστέλλεται μέσω μιας στήλης (column line), το τρανζίστορ στη στήλη ενεργοποιείται. Μια κυψέλη αποθήκευσης DRAM είναι δυναμική, που σημαίνει ότι χρειάζεται ανανέωση ή νέα ηλεκτρονική φόρτιση κάθε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου για να αντισταθμιστεί η διαρροή φόρτισης από τον πυκνωτή.



**Εικόνα 2.2:** Σχηματικό διάγραμμα του βασικού στοιχείου μιας DRAM [4].

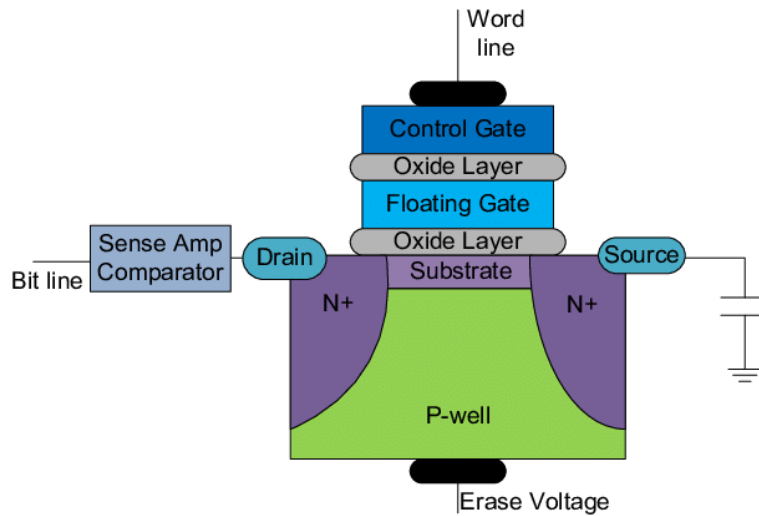
Η κατάσταση του πυκνωτή, καθορίζει εάν η λογική κατάσταση της μονάδας DRAM είναι 1 ή 0, αλλά παράλληλα ο πυκνωτής που χρησιμοποιείται, είναι επίσης και το μειονέκτημά της μνήμης. Ένας πυκνωτής μπορεί να αποθηκεύσει μια ορισμένη ποσότητα ηλεκτρονίων ή φορτίου. Ένας φορτισμένος πυκνωτής θεωρείται λογικό 1 στα ψηφιακά ηλεκτρονικά, ενώ ένας κενός πυκνωτής θεωρείται 0. Ο πυκνωτής δεν μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη φόρτιση για μεγάλο χρονικό διάστημα, επομένως η μνήμη πρέπει να ανανεώνεται τακτικά, μέσω τροφοδοσίας, για να διατηρηθούν τα προσωρινά δεδομένα. Ταυτόχρονα, χρειάζεται συγκεκριμένος χρόνος για να φορτιστεί και να εκφορτιστεί ο πυκνωτής. Αν και ο χρόνος για τον πυκνωτή στη βασική μονάδα μνήμης είναι πολύ μικρός, μόνο περίπου 0.18 – 0.2 μs, δεν είναι δυνατή η πρόσβαση στη μνήμη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου [5].

### 2.3 FLASH Memory

Η μνήμη flash, αποτελεί την πιο διαδεδομένη μη πτητικού τύπου μνήμη (NVM), όπου τα αποθηκευμένα δεδομένα διατηρούνται αφού διακοπεί η τροφοδοσία της. Τα τρανζίστορ στη μνήμη flash είναι σαν τα MOSFET με τη διαφορά ότι έχουν δύο πύλες στην κορυφή αντί για μία. Αποτελείται από δομή υλικών n-p-n type με δύο πύλες στην κορυφή, μια που ονομάζεται πύλη ελέγχου (control gate) και μια που ονομάζεται αιωρούμενη πύλη (floating gate). Οι δύο πύλες χωρίζονται από στρώματα οξειδίου από τα οποία κανονικά δεν μπορεί να περάσει ρεύμα. Σε αυτή την κατάσταση, το τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο — και ουσιαστικά αποθηκεύει ένα μηδέν.

Τόσο η περιοχή πηγής (source) όσο και η περιοχή αποστράγγισης (drain), είναι πλούσιες σε ηλεκτρόνια (επειδή είναι κατασκευασμένες από πυρίτιο τύπου n), αλλά τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να ρέουν από την περιοχή της πηγής στην περιοχή της αποστράγγισης, λόγω του υλικού τύπου p που μεσολαβεί μεταξύ τους και το οποίο έχει έλλειψη ηλεκτρονίων. Εφαρμόζοντας όμως μια θετική τάση στις δύο επαφές του τρανζίστορ, που ονομάζονται bitline και wordline, τα ηλεκτρόνια έλκονται βιαστικά από την περιοχή της πηγής, στην περιοχή αποστράγγισης. Μερικά ηλεκτρόνια επίσης, καταφέρνουν να διεισδύσουν μέσα από το στρώμα οξειδίου με μια διαδικασία που ονομάζεται διάνοιξη σήραγγας και να κολλήσουν στην πλωτή πύλη, γεγονός που ενεργοποιεί τη μνήμη [6].





**Εικόνα 2.3:** Σχηματική απεικόνιση μιας μνήμης flash [7].

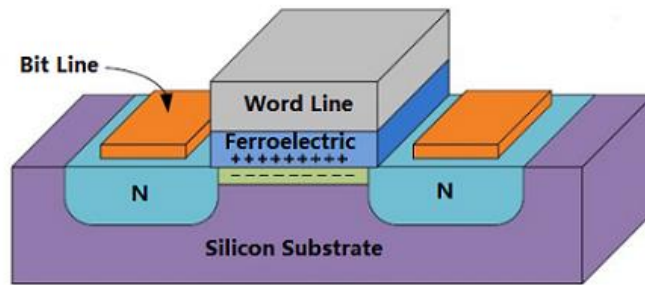
Η παρουσία ηλεκτρονίων στην πλωτή πύλη, είναι ο τρόπος με τον οποίο ένα τρανζίστορ flash αποθηκεύει την πληροφορία, δηλαδή το 1. Τα ηλεκτρόνια θα παραμείνουν εκεί επ' αόριστον, ακόμη και όταν αφαιρεθούν οι θετικές τάσεις ανεξάρτητα από το αν υπάρχει τροφοδοσία στο κύκλωμα ή όχι. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να απομακρυνθούν βάζοντας μια αρνητική τάση στη γραμμή λέξεων (wordline) - η οποία απωθεί τα ηλεκτρόνια πίσω, καθαρίζοντας την αιωρούμενη πύλη και κάνοντας το τρανζίστορ να αποθηκεύσει ξανά το 0. Η ταχύτητα εγγραφής σε αυτού του τύπου τις μνήμες είναι  $\mu\text{s} - \text{ms}$ , ενώ η αντοχή τους σε κύκλους λειτουργίας (endurance) είναι  $\sim 10^5$ , χαρακτηριστικά που την καθιστούν ακατάλληλη για VM τύπου μνήμη [3].

## 2.4 Ανερχόμενες τεχνολογίες

### 2.4.1 Ferroelectric Random Access Memory

Η σιδηροηλεκτρική μνήμη FeRAM, είναι μια μη πτητική (NVM) μνήμη, που βασίζεται στη δομή 1T1C. Η δομή μιας FeRAM είναι αρκετά παρόμοια με τη DRAM με μόνη διαφορά το υλικό του

πυκνωτή μεταξύ των δύο μνημών. Σε αντίθεση με το συμβατικό διηλεκτρικό που υπάρχει στη DRAM, η μη πτητικότητα της FeRAM, εξαρτάται κυρίως από τον πυκνωτή που βασίζεται σε σιδηροηλεκτρικό υλικό. Γενικά, σε σύγκριση με τη διηλεκτρική σταθερά της DRAM, η διηλεκτρική σταθερά των σιδηροηλεκτρικών υλικών είναι υψηλή λόγω του σχηματισμού ημιμόνιμου ηλεκτρικού διπόλου [8].



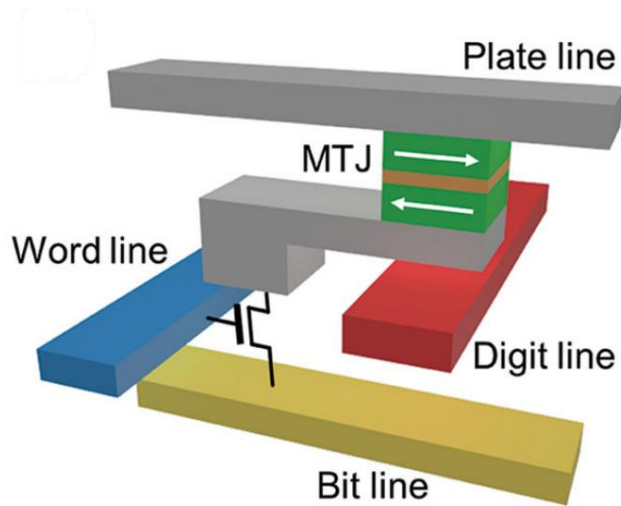
**Εικόνα 2.4:** Σχηματική απεικόνιση μιας μνήμης FeRAM [9].

Ο μηχανισμός μεταγωγής των συσκευών FeRAM καθοδηγείται από την πόλωση του σιδηροηλεκτρικού πυκνωτή. Με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τα δίπολα ευθυγραμμίζονται σύμφωνα με την κατεύθυνση του πεδίου, με αποτέλεσμα μια μικρή μετατόπιση στις ατομικές θέσεις. Ταυτόχρονα, μια αλλαγή στην ηλεκτρονική κατανομή φορτίου θα επιτευχθεί στην κρυσταλλική δομή. Μετά την αφαίρεση του πεδίου, τα δίπολα απομνημονεύονται από την κατάσταση πόλωσης.

Ψηφιακά, οι καταστάσεις ηλεκτρικής πόλωσης μπορούν να χαρακτηριστούν ως 0 ή 1. Αν και η βασική λειτουργία είναι παρόμοια με το DRAM, στη FeRAM, η καταστροφική ανάγνωση είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα. Σε σύγκριση με την DRAM, η FeRAM είναι εξαιρετικά μη πτητική, καθώς μπορεί να διατηρήσει αποθηκευμένες πληροφορίες για 10 χρόνια, με μεγάλη αντοχή ( $\cong 10^{13}$ ) κύκλων. Σε σύγκριση με τη μνήμη flash, η FeRAM είναι ταχύτερη με ταχύτητα εγγραφής και ανάγνωσης  $\sim 50$  ns [10]. Μια τυπική flash μπορεί να λειτουργήσει στα 15 V για εγγραφή και 4.5 V για ανάγνωση ενώ η FeRAM μπορεί να λειτουργήσει μόνο στα 3.3 V για εγγραφή και 1.5 V για ανάγνωση. Ωστόσο, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα, η FeRAM έχει μεγάλα προβλήματα επεκτασιμότητας [11].

## 2.4.2 Magnetic Random Access Memory

Η MRAM, ανήκει στην κατηγορία των μη πτητικών μνημών, ενώ η αρχή λειτουργίας της βασίζεται σε διασταυρώσεις μαγνητικής σήραγγας (MTJs). Το MTJ, αποτελείται από δύο σιδηρομαγνητικά (Ferromagnetic - FM) υμένια, όπου το ένα έχει σταθερό μαγνητικό προσανατολισμό (magnetic pinned layer) και το άλλο έχει ελεύθερο μαγνητικό προσανατολισμό (magnetic free layer), ενώ συνήθως διαχωρίζονται από ένα φράγμα οξειδίου της σήραγγας (barrier). Ο παράλληλος μαγνητικός προσανατολισμός και των δύο στρωμάτων FM (συνήθως 1–2 nm MgO) είναι το LRS της κυψέλης και η αντιπαράλληλη μαγνητική ευθυγράμμιση αλλάζει την κυψέλη σε HRS [12].

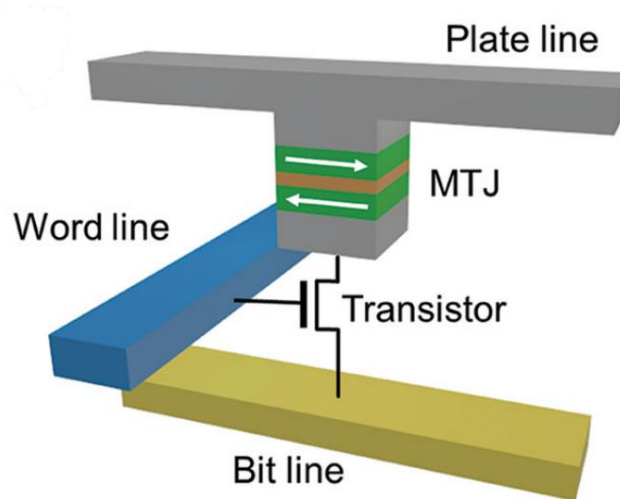


Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση μιας μνήμης MRAM [3].

## 2.4.3 Spin Torque Transfer Random Access Memory

Η Spin Torque Transfer Random Access Memory (STTRAM) είναι ένας τύπος MRAM που βασίζεται σε διασταυρώσεις μαγνητικής σήραγγας (MTJs) [3], [13], με τη διαμόρφωση 1T1MTJ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Στο MTJ έχοντας δύο σιδηρομαγνητικά (FM) στρώματα. Το ένα έχει σταθερό μαγνητικό προσανατολισμό και το άλλο έχει ελεύθερο μαγνητικό προσανατολισμό, που συνήθως διαχωρίζονται από ένα φράγμα οξειδίου της σήραγγας. Ο παράλληλος μαγνητικός προσανατολισμός και

των δύο στρωμάτων FM (συνήθως 1–2 nm MgO) είναι η κατάσταση χαμηλής αντίστασης (Low Resistant State – LRS) της κυψέλης και η αντιπαράλληλη μαγνητική ευθυγράμμιση αλλάζει την κυψέλη σε κατάσταση υψηλής αντίστασης (High Resistant State – HRS).



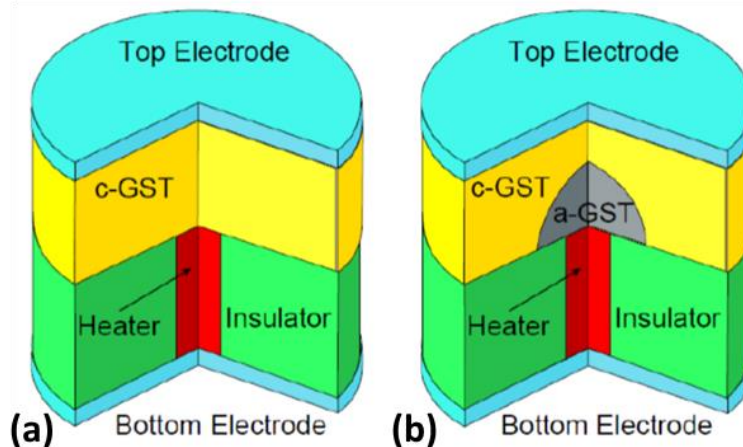
**Εικόνα 2.6:** Σχηματική απεικόνιση μιας μνήμης MRAM [3].

Σε σύγκριση με τον τυπικό σχεδιασμό της MRAM, η STTRAM έχει υψηλή επεκτασιμότητα, απλή αρχιτεκτονική, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και ταχύτερη λειτουργία. Η ταχύτητα εγγραφής του STTRAM είναι μεγαλύτερη από την τεχνολογία φλας, FeRAM και PCM. Η αντοχή της STTRAM είναι μεγαλύτερη ( $>10^{12}$  κύκλοι) από της FLASH και της PCM, με καλές ιδιότητες διατήρησης των δεδομένων. Μια συσκευή STTRAM 64 MB με 90 nm διαδικασία CMOS βρίσκεται ήδη στο αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης [14].

Η τεχνολογία STTRAM ωστόσο, εξακολουθεί να αντιμετωπίζει ορισμένες κρίσιμες προκλήσεις, όπως η μικρή αναλογία μαγνητικής αντίστασης σήραγγας ON/OFF, καλά σχεδιασμένο σχήμα ανάγνωσης, μέγεθος και κλιμάκωση ρεύματος που εξαρτάται από τον επιλογέα, χωρίς να επηρεάζει τη θερμική σταθερότητα. Για τη βελτίωση αυτών των κρίσιμων αναγκών, η έρευνα σε αυτό το θέμα είναι ακόμα σε εξέλιξη [13].

## 2.4.4 Phase Change Memory

Η μνήμη Phase Change Memory (PCM) είναι τύπου NVM, που βασίζεται κυρίως σε γυαλί χαλκογονιδίου ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) και μερικές φορές αναφέρεται ως CRAM. Η εναλλαγή στην PCM βασίζεται στην παρουσία δύο διαφορετικών φάσεων στερεάς κατάστασης, δηλαδή κρυσταλλικής και άμορφης με διαφορετική ηλεκτρική ειδική αντίσταση. Η ικανότητα αποθήκευσης πληροφοριών στο PCM παρέχεται από τη μετάβαση μεταξύ των κρυσταλλικών φάσεων χαμηλής αντίστασης σε άμορφη φάση υψηλής αντίστασης [15]. Η μετάβαση από την άμορφη στην κρυσταλλική φάση, είναι το βήμα προσδιορισμού της ταχύτητας, δηλαδή της μετάβασης από την κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS) στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS), γνωστή ως μεταγωγή SET. Η αντίστροφη μετάβαση από την κρυσταλλική στην άμορφη φάση και συνεπώς από την κατάσταση LRS στην HRS, είναι η διαδικασία περιορισμού ισχύος, που είναι γνωστή ως μεταγωγή RESET. Η σχηματική αναπαράσταση ενός απλού κελιού PCM φαίνεται στο Εικόνα 2.7. Γενικά, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας επεξεργασίας, μια κυψέλη PCM μετά την κατασκευή βρίσκεται σε κρυσταλλική φάση με κατάσταση χαμηλής αντίστασης. Ο εξωτερικός παλμός ηλεκτρικού ρεύματος για μικρότερο χρονικό διάστημα μπορεί να επαναφέρει την κατάσταση της μνήμης από την LRS στην HRS, και έτσι να αλλάξει την PCM από κρυσταλλική σε άμορφη. Για την αποκατάσταση της κρυσταλλικής φάσης με μεταγωγή SET, απαιτείται ένας παλμός μεσαίου ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης και τήξης, με αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την κρυστάλλωση. Μέχρι στιγμής, ο μηχανισμός μεταγωγής συσκευών PCM που βασίζονται σε Ge-Sb-Te (GST) έχει μελετηθεί διεξοδικά.

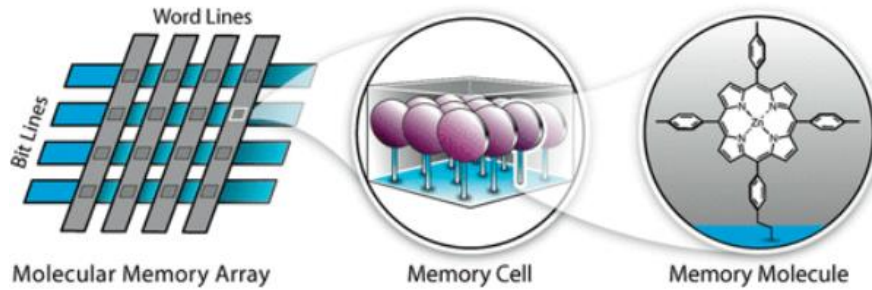


**Εικόνα 2. 7:** Σχηματική απεικόνιση της διατομής ενός κυττάρου μνήμης PCM (a) στην κρυσταλλική φάση και (b) στην άμορφη [16].

Η PCM είναι μια πιο γρήγορης τεχνολογίας μνήμη σε σύγκριση με την flash [2], [17]. Συνήθως η PCM μπορεί να λειτουργήσει με υψηλή ταχύτητα της τάξης των 100 ns, με χαμηλότερη τάση λειτουργίας και καλύτερες δυνατότητες αντοχής από τις μνήμες flash. Πρωτοπόροι στον χώρο της ανάπτυξης μνημών, όπως η IBM, η Infineon, η Samsung και η Macronix έχουν επιδείξει πρωτότυπα τσιπ PCM και έχουν προωθήσει περαιτέρω τη μαζική παραγωγή με τρισδιάστατες συστοιχίες cross-bar μέσω συνεργασιών μεταξύ Intel και Micron. Ωστόσο, η έρευνα συνεχίζεται για την απλοποίηση της επεξεργασίας του PCM, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ισχύος, τη μείωση του ρεύματος RESET και τη μείωση της ισχύος μεταγωγής. Μέχρι σήμερα, οι συσκευές PCM διαθέτουν μετάβαση φάσης σε κλίμακα νανομέτρων, μεγαλύτερη συγκράτηση και αντοχή σε μικρότερες διαστάσεις, υψηλή απόδοση ισχύος χρησιμοποιώντας λεπτότερα φιλμ, κλιμάκωση της τάσης κατωφλίου ( $V_{TH}$ ) κ.λπ. Ωστόσο, το μέγεθος της κυψέλης PCM περιορίζεται πολύ από τις συσκευές επιλογής, όπως το διπολικό τρανζίστορ διασταύρωσης (Bipolar junction transistor - BJT), το κάθετο τρανζίστορ και τη δίοδο [2].

#### 2.4.5 Μοριακή μνήμη

Μια μοριακή μνήμη αποτελείται από μια δομή άνω ηλεκτροδίου/μοριακού στρώματος/κάτω ηλεκτροδίου. Λόγω της εύκολα κατανοητής συμπεριφοράς οξειδοαναγωγής, τα οξειδοαναγωγικά ενεργά μόρια μελετώνται ενεργά για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας [18]. Επιπρόσθετα, η δομή υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης δεδομένων που προσφέρουν, οι γρήγορες ταχύτητες εγγραφής/ανάγνωσης και ο μεγάλος χρόνος διατήρησης της πληροφορίας, τις καθιστούν ακόμα ένα πεδίο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας στο χώρο των μνημών [19]. Ωστόσο, οι συσκευές μοριακής μνήμης εξακολουθούν να είναι υπό διερεύνηση, καθώς ο μηχανισμός αποθήκευσης δεδομένων μπορεί να ποικίλλει με το σχεδιασμό της δομής, όπως η ενεργή μοριακή μνήμη οξειδοαναγωγής, η μοριακή μνήμη στερεάς κατάστασης, η μοριακή μνήμη που βασίζεται σε νανοσύρματα ή νανοσωλήνες κ.λπ. [2].



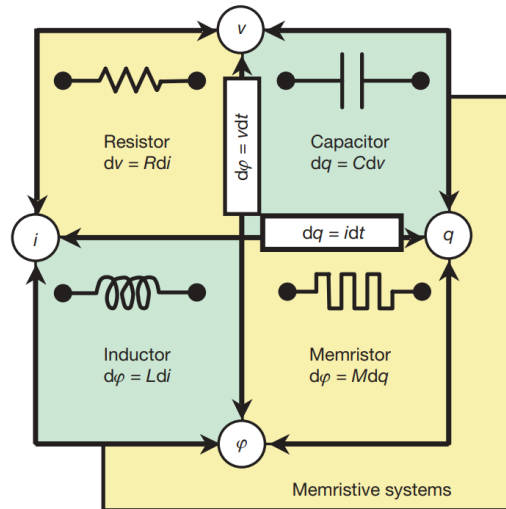
Εικόνα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση μιας μοριακής μνήμης [18].

## 2.4.6 Μνήμη Εναλλαγής Αντίστασης (Resistive Random Access Memory)

### 2.4.6.1 Εισαγωγή

Τα τρία θεμελιώδη παθητικά στοιχεία ενός κυκλώματος είναι η αντίσταση, ο πυκνωτής και το πηνίο. Ωστόσο, το 1971, ο Leon Chua, σκέφτηκε ότι για λόγους συμμετρίας θα έπρεπε να υπάρχει και ένα τέταρτο θεμελιώδες στοιχείο, το οποίο ονόμασε memristor, συντομογραφία του συνδυασμού των λέξεων memory και resistor. Πιο συγκεκριμένα ο Chua σημείωσε ότι υπάρχουν έξι διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις που συνδέουν τα ζεύγη τεσσάρων θεμελιωδών μεταβλητών ενός κυκλώματος, του ρεύματος  $I$ , της τάσης  $V$ , του φορτίου  $Q$  και της μαγνητικής ροής  $\psi$ .

Το φορτίο (όπου είναι το χρονικό ολοκλήρωμα του ρεύματος) καθορίζεται από τους ορισμούς δύο εκ των τεσσάρων μεταβλητών, ενώ η ροή (όπου είναι το χρονικό ολοκλήρωμα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης ή της τάσης) προσδιορίζεται από τον νόμο επαγωγής του Faraday. Έτσι, θα πρέπει να είναι τέσσερα βασικά στοιχεία κυκλώματος που περιγράφονται από τις υπόλοιπες σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών (Εικόνα 2.9). Το στοιχείο που "έλλειπε", το memristor με memristance  $M$ , παρέχει μια σχέση μεταξύ του φορτίου  $q$  και της ροής  $\psi$  [20].



**Εικόνα 2.9:** Τα τέσσερα θεμελιώδη στοιχεία ενός κυκλώματος: resistor, capacitor, inductor and memristor [20].

Επειδή οι πιο σημαντικές λειτουργίες ενός κυκλώματος αποδίδονται σε μη γραμμικά χαρακτηριστικά, memristors συμβατά με ολοκληρωμένα κυκλώματα, θα μπορούσαν να παρέχουν νέες λειτουργίες κυκλώματος, όπως εναλλαγή ηλεκτρονικής αντίστασης σε εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες συσκευών δύο ακροδεκτών.

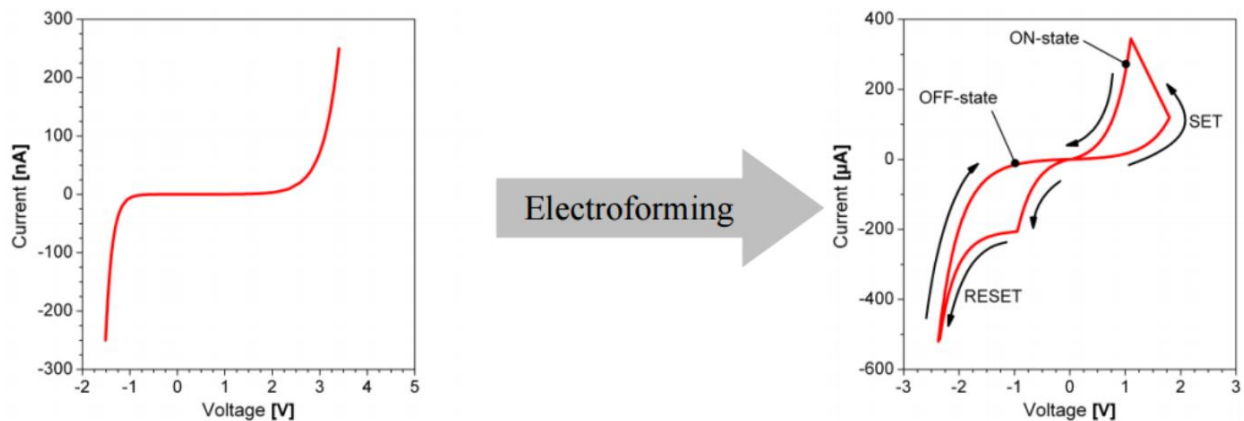
### 2.4.6.2 Η τεχνολογία των ReRAM

Οι μνήμες εναλλαγής αντίστασης, αποτελούν ένα μεγάλο μέρος των μη πτητικών μνημών, με έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον. Αυτό οφείλεται στην απλή δομή τους, όπου το ενεργό υλικό της μνήμης είναι συνήθως κάποιο οξείδιο μετάλλου με δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια εκατέρωθεν αυτού, ενώ παράλληλα στην πλήρη συμβατότητά τους με την τεχνολογία CMOS [21]. Οι δύο ακροδέκτες από τους οποίους αποτελούνται οι μνήμες εναλλαγής αντίστασης, τις καθιστά ελιυστικές λόγω της δυνατότητας τους να κατασκευαστούν σε σταυρωτές συστοιχίες, μειώνοντας έτσι δραματικά το χώρο που καταλαμβάνουν σε σχέση με τις συμβατικές μνήμες DRAM και flash [2], [21].



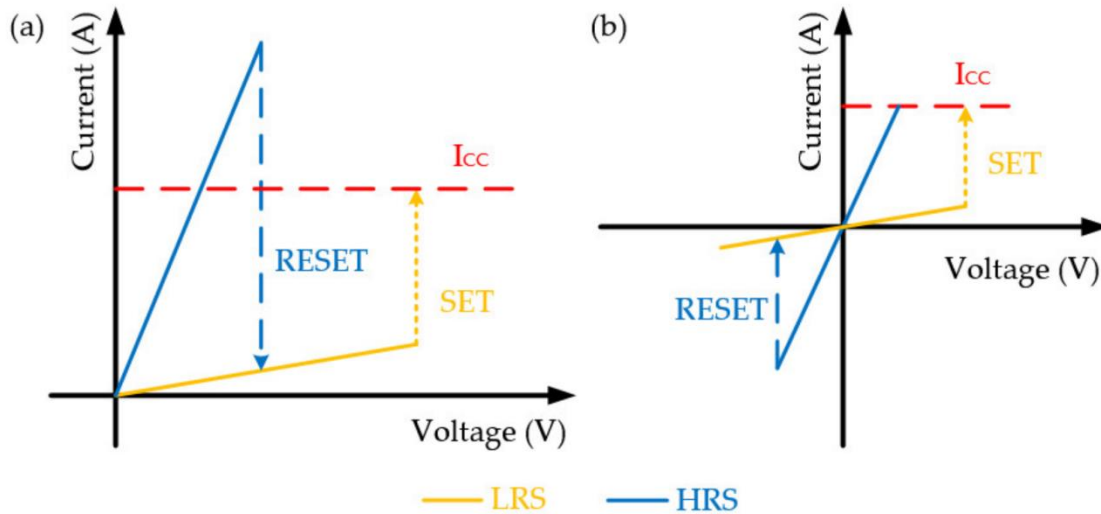
Η βασική λειτουργία μιας μνήμης ReRAM, βασίζεται σε δύο διακριτές καταστάσεις της αντίστασης του διηλεκτρικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, οι οποίες οφείλονται στη δημιουργία ενός αγώγιμου νήματος στο εσωτερικό του (Conductive Filament - CF) κατά την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων. Έτσι, κατά τη δημιουργία του αγώγιμου νήματος, το διηλεκτρικό μεταβαίνει από την κατάσταση υψηλής αντίστασης (High Resistant State - HRS) στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (Low Resistant State - LRS), διαδικασία που ονομάζεται SET, ενώ κατά την καταστροφή του, το διηλεκτρικό μεταβαίνει από την κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS) στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS), διαδικασία που ονομάζεται RESET.

Οι μνήμες εναλλαγής αντίστασης, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο τύπους, ανάλογα με το αν χρειάζονται τη διαδικασία της ηλεκτροδιαμόρφωσης (electroforming) για τη δημιουργία του αγώγιμου δρόμου στο διηλεκτρικό ή όχι. Κατά τη διαδικασία της ηλεκτροδιαμόρφωσης, εφαρμόζεται στο διηλεκτρικό μια σχετικά μεγάλη τάση, με αποτέλεσμα την κατάρρευση του διηλεκτρικού και τη δημιουργία αγώγιμων μονοπατιών σε αυτό. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει το μονωτικό υλικό σε αγωγό υπό την επίδραση ισχυρού εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Ωστόσο, σε αυτή τη διαδικασία ορίζεται πάντα ένα άνω όριο του ρεύματος (compliance current -  $I_{cc}$ ) για την προστασία του διηλεκτρικού από την πλήρη κατάρρευση του διηλεκτρικού και την μόνιμη μετατροπή του σε αγωγό.



**Εικόνα 2.7:** Η διαδικασία της ηλεκτροδιαμόρφωσης [22].

Ανάλογα με το αν οι καταστάσεις των SET και RESET συμβαίνουν λόγω του πλάτους της εφαρμοζόμενης τάσης ή εξαρτώνται και από την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης, υπάρχει η μονοπολική (unipolar) και η διπολική συμπεριφορά (bipolar) του διηλεκτρικού της μνήμης, αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.8:** (a) Μονοπολική και (b) διπολική συμπεριφορά μιας μνήμης ReRAM [23].

### 2.4.6.3 Φαινόμενο εναλλαγής της αντίστασης

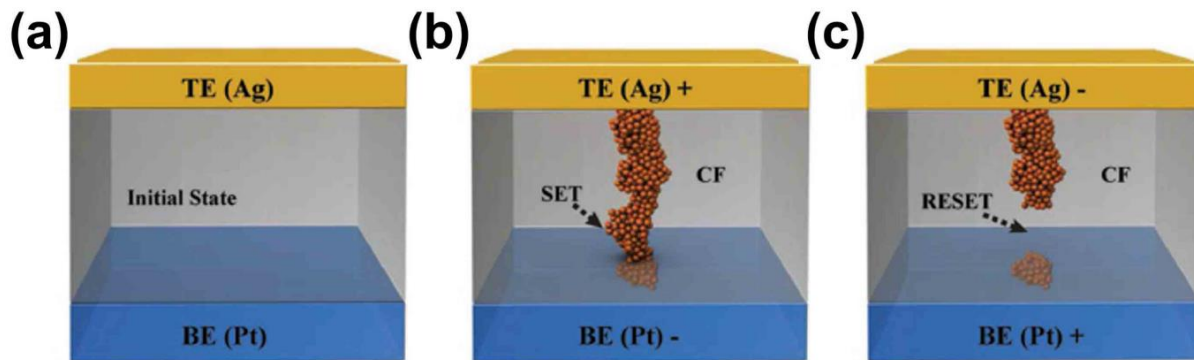
Το φαινόμενο της εναλλαγής της αντίστασης, αν και δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, αποδίδεται στην δημιουργία και την καταστροφή ενός αγώγιμου νήματος στο εσωτερικό του διηλεκτρικού, κατά την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων της μνήμης.

Ο αγώγιμος δρόμος που δημιουργείται στο διηλεκτρικό, ερμηνεύεται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με τη διάταξη και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή. Στην περίπτωση που το πάνω ηλεκτρόδιο είναι αδρανές, τότε η δημιουργία του αγώγιμου δρόμου αποδίδεται στη μετανάστευση, συσσώρευση και αναδιάταξη των κενών θέσεων οξυγόνου (oxygen vacancy -  $V_O$ ) του μεταλλικού οξειδίου, δηλαδή του διηλεκτρικού της μνήμης. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται μνήμες αλλαγής σθένους (Valence Change Memory - VCM).

Στην περίπτωση που το πάνω ηλεκτρόδιο, είναι ηλεκτροχημικά ενεργό (συνήθως  $Ag^+$  ή  $Cr^+$ ), εφαρμόζοντας μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων, έχουμε διάχυση ιόντων του υλικού από το οποίο αποτελείται το πάνω ηλεκτρόδιο, μέσα στο διηλεκτρικό. Το αγώγιμο νήμα σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από μεταλλικά ιόντα, τα οποία θα διαταχθούν με τέτοιο τρόπο, ώστε τελικά θα ενώσουν ηλεκτρικά το πάνω με το κάτω ηλεκτρόδιο και έτσι πραγματοποιείται η μετάβαση της διάταξης, από την HRS στη LRS. Η μνήμη αυτού του τύπου ονομάζεται μνήμη αγώγιμης γέφυρας (Conductive Bridge RAM - CBRAM).

Ο λόγος της μετάβασης από την κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS) προς την κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS), ονομάζεται παράθυρο μνήμης (MW), και είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μνημών εναλλαγής αντίστασης, αφού καθορίζει τελικά τον αριθμό των διακριτών επιπέδων στον οποίο μια μνήμη μπορεί να προγραμματιστεί.

$$\frac{HRS}{LRS} = MW \quad (2.1)$$



**Εικόνα 2.9:** Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας SET - RESET στο διηλεκτρικό μιας CBRAM μνήμης εναλλαγής αντίστασης [24].

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] S. Bhatti, R. Sbiaa, A. Hirohata, H. Ohno, S. Fukami, S. N. Piramanayagam, “Spintronics based random access memory: a review”, *Materials Today*, vol. 20, no. 9, pp. 530-548, Nov. 2017.
- [2] W. Banerjee, “Challenges and Applications of Emerging Nonvolatile Memory Devices”, *Electronics*, 9, 1029, Jun. 2020.
- [3] C. S. Hwang, “Prospective of Semiconductor Memory Devices: from Memory System to Materials”, *Adv. Electron. Mater.*, vol. 1, no. 6, 1400056, May 2015.
- [4] <https://ee-paper.com/the-working-principle-of-dram-memory-is-introduced-in-detail/>
- [5] S. K. Kurinec, K. Iniewski, “Nanoscale Semiconductor Memories, Technology and Applications”, *CRC Press*, Apr. 2017.
- [6] S. S. Kim, S. K. Yong, W. Kim, S. Kang, H. W. Park, K. J. Yoon, D.S. Sheen, S. Lee, C. S. Hwang, “Review of Semiconductor Flash Memory Devices for Material and Process Issues”, *Adv. Mater.*, 2200659, Mar. 2022.
- [7] J. Wang, K. Vakili, T. Y. Chen, T. Courtade, G. Dong, T. Zhang, H. Shankar, R. D. Wesel, “Enhanced Precision Through Multiple Reads for LDPC Decoding in Flash Memories”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 5, Sept. 2013.
- [8] H.J. Ishiwara, “Ferroelectric random access memories”, *Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 12, no. 10, pp. 7619–7627, Oct. 2012.
- [9] [Ferroelectric Random Access Memory \(FeRAM / FRAM\) Technique \(apogeeweb.net\)](#)
- [10] Y. Nishi, “Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology”, *Woodhead Publishing*, 2014.
- [11] D. Takashima, “Overview of FeRAMs: Trends and perspectives”, *11th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium Proceeding*, pp.1-6, Nov. 2011.
- [12] K. Inomata, “Present and Future of Magnetic RAM Technology”, *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*, vol. E84-C, no.6, pp. 740-746, Jun. 2001.

- [13] T. Kawahara, K. Ito, R. Takemura, H. Ohno, “Spin-transfer torque RAM technology: Review and prospect”, *Microelectron. Reliab.*, vol. 52, pp. 613–627, Apr. 2012.
- [14] J.M. Slaughter, N.D. Rizzo, J. Janesky, R. Whig, F. B. Mancoff, D. Houssameddine, J. J. Sun, S. Aggarwal, N. Nagel, S. Deshpande, S., S. Alam, T. Andre, P. LoPresti, “High density ST-MRAM technology”, *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.*, pp. 673–676, Dec. 2012.
- [15] S. Raoux, W. Welnic, D. Ielmini, “Phase change materials and their application to nonvolatile memories”, *Chem. Rev.*, vol. 110, pp. 240–267, Jan. 2010.
- [16] Δ. Σακελλαρόπουλος, “Ηλεκτρονικές Διατάξεις Νανοσωματιδίων”, Ε.Μ.Π, 2021.
- [17] N. Statt, “IBM’s Phase-Change Memory Is Faster than Flash and More Reliable than RAM”. Available online: <https://defence.pk/pdf/threads/ibms-phase-change-memory-is-faster-than-flash-and-more-reliablethan-ram.431184/> (accessed on 1 May 2020).
- [18] J. S. Lindsey, D. F. Bocian, “Molecules for Charge-Based Information Storage”, *Acc. Chem. Res.*, vol. 44, no. 8, pp. 638-650, Apr. 2011.
- [19] J. Han, H. Lian, X. Cheng, Q. Dong, Y. Qu, W.-Y. Wong, “Study of Electronic and Steric Effects of Different Substituents in Donor–Acceptor Molecules on Multilevel Organic Memory Data Storage Performance”, *Adv. Electron. Mater.*, 7, 2001097, Feb. 2021.
- [20] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, R. S. Williams, “The missing memristor found”, *Nature*, vol. 453, no. 7191, pp. 80-83, May 2008.
- [21] D. Ielmini, “Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling”, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 6, 063002, May 2016.
- [22] C. Nauenheim, “Integration of resistive switching devices in crossbar structures,” RWTH Aachen, 2009.
- [23] Z. Shen, C. Zhao, Y. Qi, W. Xu, Y. Liu, I. Z. Mitrovic, L. Yang, C. Zhao, “Advances of RRAM Devices: Resistive Switching Mechanisms, Materials and Bionic Synaptic Application”, *Nanomaterials (Basel)*, vol. 10, no. 8, 1437, Jul. 2020.

[24] J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, R. Huang, “A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 7, no. 1, 011312, Feb. 2020.

## **Κεφάλαιο 3: Νευρομορφική υπολογιστική**

### **3.1 Εισαγωγή**

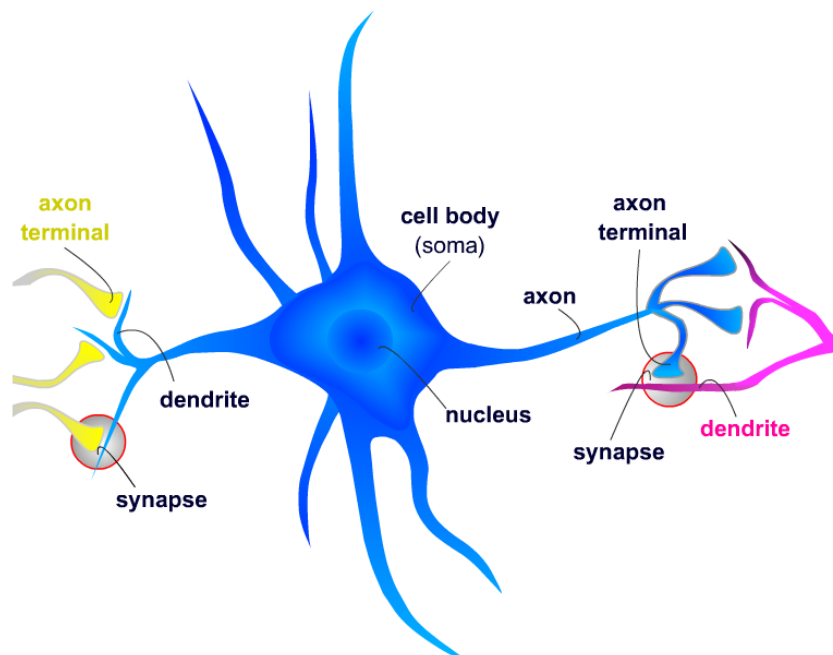
Σε αυτό το κεφάλαιο, παραθέτουμε μια σύντομη περιγραφή των βασικών δομικών βιολογικών στοιχείων και λειτουργιών της νευροεπιστήμης, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι απαιτήσεις για την υλοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks - ANNs) καθώς και η ερευνητική προσπάθεια που γίνεται μέσω των καινοτόμων διατάξεων μνήμης που αναπτύσσονται. Ο σκοπός της παρουσίασης των δομικών βιολογικών στοιχείων και λειτουργιών, είναι για να κατανοηθούν οι βασικές βιολογικές λειτουργίες της νευροεπιστήμης και πως αυτές μπορούν να προσομοιωθούν μέσω της προβολής τους σε ηλεκτρονικές διατάξεις. Τα υλικά και η τροποποίηση των ιδιοτήτων τους που η σημερινή τεχνολογία μπορεί να προσφέρει, μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξης διατάξεων που μιμούνται βιολογικές λειτουργίες συμπεριλαμβανομένων αυτών της νευροεπιστήμης.

### **3.2 Βιολογικά δομικά στοιχεία και λειτουργίες την νευροεπιστήμης**

Η νευροεπιστήμη είναι ένα επιστημονικό πεδίο που ασχολείται με τη μελέτη του νευρικού συστήματος. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα επιστημονικό πεδίο στο οποίο τέμνονται διάφορες επιστήμες ή τομείς επιστημών όπως, η μοριακή βιολογία, την αναπτυξιακή βιολογία, την κυτταρολογία, τη φυσική, την επιστήμη των υπολογιστών, τη χημεία και τη μαθηματική μοντελοποίηση για την κατανόηση των θεμελιωδών και αναδύμενων ιδιοτήτων των νευρώνων και των νευρικών κυκλωμάτων. Η κατανόηση της βιολογικής βάσης της μάθησης, της μνήμης, της συμπεριφοράς, της αντίληψης και της συνείδησης αποτελούν ακόμα και σήμερα μηχανισμούς που δεν έχουν αποκρυπτογραφηθεί πλήρως και συνεπώς έντονα πεδία ερευνητικής δραστηριότητας.

### 3.2.1 Νευρώνας

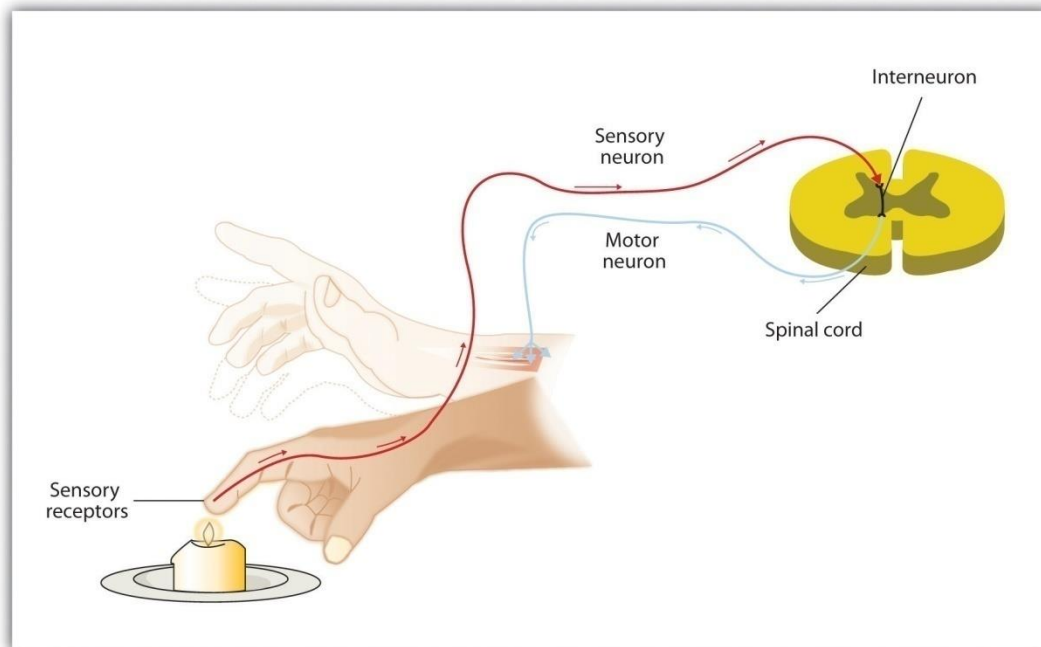
Ο νευρώνας ή νευρικό κύτταρο, είναι ένα κύτταρο το οποίο μπορεί να διεγερθεί ηλεκτρικά και αποτελείται από τα δομικά και λειτουργικά μέρη, σώμα, άξονα και δενδρίτες, ενώ επικοινωνεί με άλλα κύτταρα μέσω μικροσκοπικών δομών που ονομάζονται συνάψεις.



**Εικόνα 3.1:** Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του αισθητήριου, του συνδετικού και του κινητήριου νευρώνα και της διαδικασίας λήψης, μετάδοσης και απόκρισης σε ένα εξωτερικό ερέθισμα [1].

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες νευρώνων ανάλογα με τη λειτουργία τους. Η πρώτη αποτελείται από τους αισθητήριους νευρώνες (προσαγωγοί), οι οποίοι λαμβάνουν ερεθίσματα από το περιβάλλον, μεταφέροντας τις πληροφορίες από τα αισθητήρια όργανα στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Η δεύτερη είναι οι ενδιάμεσοι ή συνδετικοί νευρώνες, οι οποίοι βρίσκονται αποκλειστικά στο εσωτερικό του κεντρικού νευρικού συστήματος, ενσωματώνουν τις πληροφορίες που παρέχουν οι αισθητήριοι νευρώνες και τις μεταδίδουν στους κινητικούς νευρώνες. Η τρίτη είναι οι κινητήριοι/κινητικοί νευρώνες (απαγωγός νευρώνας), οι οποίοι μεταφέρουν τα μηνύματα στα δραστικά κύτταρα.





**Εικόνα 3.2:** Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του αισθητήριου, του συνδετικού και του κινητήριου νευρώνα και της διαδικασίας λήψης, μετάδοσης και απόκρισης σε ένα εξωτερικό ερέθισμα [2].

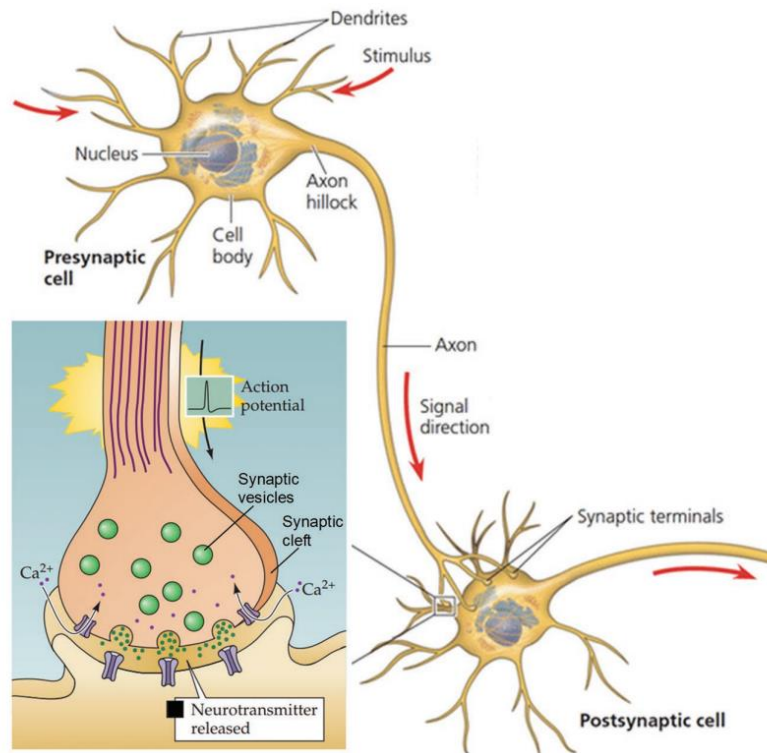
### 3.2.2 Βιολογική σύναψη

Στο νευρικό σύστημα, η νευρική σύναψη είναι μια μικροσκοπική δομή που επιτρέπει σε έναν νευρώνα, δηλαδή σε ένα νευρικό κύτταρο, να μεταδώσει ένα ηλεκτρικό ή χημικό σήμα σε έναν άλλο νευρώνα ή ένα κύτταρο επιφορέα (το οποίο επιφέρει κάποια μεταβολή κατάστασης).

Η διαδικασία μετάδοσης των σημάτων μεταξύ των νευρώνων είναι εν μέρει ηλεκτρική και εν μέρει χημική. Οι νευρώνες είναι ηλεκτρικά διεγερσιμοι, λόγω της διατήρησης των βαθμίδων τάσης στις μεμβράνες τους. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ του εσωτερικού των ηλεκτρικά διεγερμένων νευρώνων (νευρικών κυττάρων) και του περιβάλλοντός τους [3].

Έτσι, η δράση συμβαίνει στη σύναψη όπου είναι το σημείο επικοινωνίας μεταξύ δύο νευρώνων ή μεταξύ ενός νευρώνα και ενός κυττάρου στόχου, όπως ένας μυς ή ένας αδένας. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή ενός δυναμικού δράσης σε έναν νευρώνα που ονομάζεται προσυναπτικός ή αποστέλλοντας νευρώνας

(presynaptic neuron), προκαλεί στη σύναψη τη μετάδοση ενός σήματος σε έναν άλλο νευρώνα - τον μετασυναπτικό νευρώνα (postsynaptic neuron) ή τον νευρώνα λήψης - καθιστώντας τον μετασυναπτικό νευρώνα, περισσότερο ή λιγότερο πιθανό να πυροδοτήσει το δικό του δυναμικό δράσης [4].



**Εικόνα 3.3:** Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του αισθητήριου, του συνδετικού και του κινητήριου νευρώνα και της διαδικασίας λήψης, μετάδοσης και απόκρισης σε ένα εξωτερικό ερέθισμα [4].

### 3.2.3 Δυναμικό ηρεμίας – Δυναμικό δράσης

Το δυναμικό ηρεμίας, είναι η διαφορά του ηλεκτρικού φορτίου που υπάρχει μεταξύ του εσωτερικού των ηλεκτρικά διεγερμένων νευρώνων (νευρικών κυττάρων) και του περιβάλλοντος τους. Το δυναμικό ηρεμίας των ηλεκτρικά διεγερσιμων κυψελών κυμαίνεται από -60 έως -95 mV (συνήθως -70 mV) με το εσωτερικό του στοιχείου να είναι αρνητικά φορτισμένο [5],[6]. Εάν το εσωτερικό ενός κυττάρου γίνει πιο ηλεκτραρνητικό (δηλαδή, εάν το δυναμικό είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό ηρεμίας), η μεμβράνη ή το στοιχείο λέγεται ότι είναι υπερπολωμένο. Εάν το εσωτερικό του κυττάρου γίνει λιγότερο αρνητικό (δηλαδή, το δυναμικό μειώνεται κάτω από το δυναμικό ηρεμίας), η διαδικασία ονομάζεται εκπόλωση.

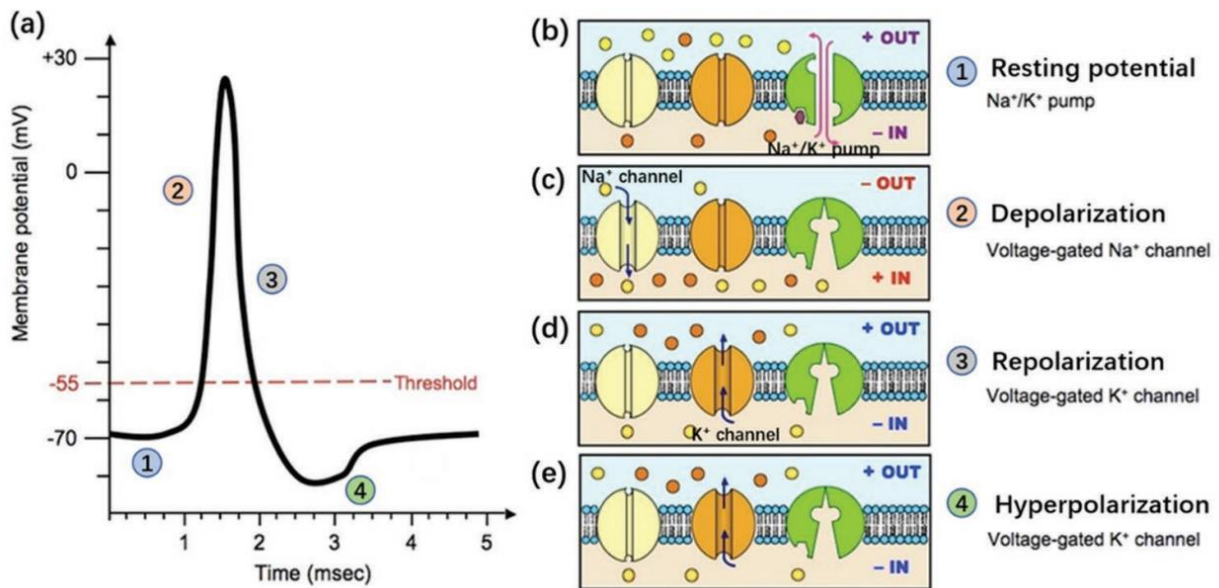
Κατά τη μετάδοση των νευρικών ερεθισμάτων, η σύντομη (περίπου κατά ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου) εκπόλωση που συμβαίνει όταν το εσωτερικό της ίνας των νευρικών κυττάρων φορτίζεται θετικά, ονομάζεται δυναμικό δράσης. Αυτή η σύντομη αλλαγή της πόλωσης, που πιστεύεται ότι προκαλείται από τη μετατόπιση θετικά φορτισμένων ιόντων νατρίου ( $\text{Na}^+$ ) από το εξωτερικό προς το εσωτερικό του κυττάρου, έχει ως αποτέλεσμα τη μετάδοση νευρικών ερεθισμάτων. Μετά την εκπόλωση, η κυτταρική μεμβράνη γίνεται σχετικά διαπερατή από θετικά φορτισμένα ιόντα καλίου ( $\text{K}^+$ ), τα οποία διαχέονται προς τα έξω από το εσωτερικό του κυττάρου, όπου συνήθως εμφανίζονται σε σχετικά υψηλή συγκέντρωση [7], [8]. Στη συνέχεια, το στοιχείο επαναλαμβάνει την αρνητικά φορτισμένη κατάσταση που είναι χαρακτηριστική του δυναμικού ηρεμίας.

Τα δυναμικά δράσης είναι νευρικά σήματα. Οι νευρώνες δημιουργούν και μεταφέρουν αυτά τα σήματα κατά μήκος των διεργασιών τους προκειμένου να τα μεταδώσουν στους ιστούς στόχους. Αυτά τα δυναμικά ταξιδεύουν γρήγορα κατά μήκος του άξονα και ενεργοποιούν τις συναπτικές συνδέσεις καθώς φτάνουν σε αυτές. Τα συναπτικά σήματα μπορεί να είναι διεγερτικά ή ανασταλτικά, αυξάνοντας ή μειώνοντας την καθαρή τάση που φτάνει στο σώμα. Μόνο οι νευρώνες και τα μυϊκά κύτταρα είναι ικανά να δημιουργήσουν δυναμικό δράσης και αυτή η ιδιότητα ονομάζεται διεγερσιμότητα. Στον νευρώνα ένα δυναμικό δράσης παράγει τη νευρική ώθηση και στο μυϊκό κύτταρο παράγει τη σύσπαση που απαιτείται για κάθε κίνηση. Μερικές φορές ονομάζεται δυναμικό διάδοσης επειδή ένα κύμα διέγερσης μεταδίδεται ενεργά κατά μήκος της νευρικής ή μυϊκής ίνας. Ένα δυναμικό δράσης διεξάγεται σε ταχύτητες που κυμαίνονται από 1 έως 100 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με τις ιδιότητες της ίνας και το περιβάλλον του.

Κατά τη δημιουργία του δυναμικού δράσης, η διέγερση του κυττάρου από νευροδιαβιβαστές ή από αισθητήρια κύτταρα υποδοχέα, ανοίγει μερικώς τα μόρια πρωτεΐνης σχήματος καναλιού στη μεμβράνη. Το νάτριο διαχέεται στο κύτταρο, μετατοπίζοντας αυτό το τμήμα της μεμβράνης προς μια λιγότερο αρνητική πόλωση. Εάν αυτό το τοπικό δυναμικό φτάσει σε μια κρίσιμη κατάσταση που ονομάζεται δυναμικό κατωφλίου (περίπου στα  $-55 \text{ mV}$ ), τότε τα κανάλια νατρίου ανοίγουν εντελώς. Το νάτριο πλημμυρίζει αυτό το τμήμα του κυττάρου, το οποίο εκπολώνεται (depolarization) αμέσως σε δυναμικό δράσης περίπου  $+30 \text{ mV}$ . Η εκπόλωση ενεργοποιεί τα κανάλια νατρίου σε γειτονικά μέρη της μεμβράνης, έτσι ώστε η ώθηση να κινείται κατά μήκος της ίνας.

Εάν η είσοδος νατρίου στην ίνα, δεν εξισορροπηθεί με την έξοδο ενός άλλου ιόντος θετικού φορτίου, ένα δυναμικό δράσης δεν θα μπορούσε να μειωθεί από την τιμή κορυφής του και να επιστρέψει στο δυναμικό ηρεμίας. Η φθίνουσα φάση του δυναμικού δράσης προκαλείται από το κλείσιμο των καναλιών

νατρίου και το άνοιγμα των διαύλων καλίου, το οποίο επιτρέπει σε ένα φορτίο περίπου ίσο με αυτό που εισάγεται στο κύτταρο να φύγει με τη μορφή ιόντων καλίου, διαδικασία που ονομάζεται επαναπόλωση (repolarization). Στη συνέχεια, τα μόρια μεταφοράς πρωτεϊνών αντλούν ιόντα νατρίου έξω από το κύτταρο και ιόντα καλίου μέσα. Η τάση συνήθως «υποεκτείνεται» κάτω από τα δυναμικά ηρεμίας λόγω της εκροής  $K^+$ . Αυτό ονομάζεται υπερπόλωση (hyperpolarization) [9]. Αυτό αποκαθιστά τις αρχικές συγκεντρώσεις ιόντων και προετοιμάζει το κύτταρο για ένα νέο δυναμικό δράσης.



**Εικόνα 3.4:** Σχηματική απεικόνιση ενός δυναμικού δράσης. α) Απεικόνιση της αλλαγής του δυναμικού της μεμβράνης κατά τη διάρκεια ενός δυναμικού δράσης. β) αρχική κατάσταση στο δυναμικό ηρεμίας γ) Διαδικασία κατά την εκπόλωση. δ) διαδικασία κατά την επαναπόλωση ε) διαδικασία κατά την υπερπόλωση [10].

### 3.2.4 Hebbian Theory

Η θεωρία Hebbian, είναι μια θεωρία στον τομέα της νευροεπιστήμης, που υποστηρίζει ότι η αύξηση της συναπτικής αποτελεσματικότητας προκύπτει από την επαναλαμβανόμενη και επίμονη διέγερση ενός μετασυναπτικού κυττάρου από ένα προσυναπτικό κύτταρο. Είναι μια προσπάθεια εξήγησης της συναπτικής πλαστικότητας, της προσαρμογής των νευρώνων του εγκεφάλου κατά τη διάρκεια της μαθησιακής διαδικασίας [11],[12].

### 3.2.5 Συναπτική πλαστικότητα

Συναπτική πλαστικότητα (Synaptic Plasticity) είναι η ικανότητα των συνάψεων να ενισχύονται ή να εξασθενούν με την πάροδο του χρόνου, ως απόκριση σε αυξήσεις ή μειώσεις της δραστηριότητάς τους [13]. Δεδομένου ότι οι μνήμες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύονται από πολλά διασυνδεδεμένα νευρικά κυκλώματα στον εγκέφαλο, η συναπτική πλαστικότητα είναι ένα από τα σημαντικά νευροχημικά θεμέλια της μάθησης και της μνήμης σύμφωνα με τη θεωρία Hebbian [14].

Η πλαστική αλλαγή, προκύπτει συχνά από την αλλαγή του αριθμού των υποδοχέων νευροδιαβιβαστών που βρίσκονται σε μια σύναψη. Υπάρχουν αρκετοί υποκείμενοι μηχανισμοί που συνεργάζονται για την επίτευξη συναπτικής πλαστικότητας, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στην ποσότητα των νευροδιαβιβαστών που απελευθερώνονται σε μια σύναψη και των αλλαγών στον τρόπο με τον οποίο τα κύτταρα ανταποκρίνονται αποτελεσματικά σε αυτούς τους νευροδιαβιβαστές [15]. Η συναπτική πλαστικότητα τόσο στις διεγερτικές όσο και στις ανασταλτικές συνάψεις έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από τη μετασυναπτική απελευθέρωση ασβεστίου και χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στην μακροπρόθεσμη και στην βραχυπρόθεσμη ενδυνάμωση και απόδυνάμωση [13]. Η μακροπρόθεσμη ενδυνάμωση (Long Term Potentiation - LTP) και η μακροπρόθεσμη αποδυνάμωση (Long Term Depression - LTD) είναι δύο μορφές μακροπρόθεσμης πλαστικότητας (Long Term Plasticity), διάρκειας λεπτών ή περισσότερο, που εμφανίζονται σε διεγερτικές συνάψεις. Η βραχυπρόθεσμη ενδυνάμωση (Short Term Potentiation - STP) και η βραχυπρόθεσμη αποδυνάμωση (Short Term Depression - STD) είναι δύο μορφές βραχυπρόθεσμης πλαστικότητας (Short Term Plasticity), διάρκειας μερικών δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου [13-15].

### 3.2.6 Paired Pulse Facilitation - Paired Pulse Depression

Σε πειράματα συζευγμένων παλμών, ένα ερέθισμα (δηλαδή ένας παλμός) ακολουθείται από ένα δεύτερο ερέθισμα. Στην περίπτωση που το μέγεθος της απόκρισης (δηλαδή το μετασυναπτικό ρεύμα) στο δεύτερο ερέθισμα, είναι μεγαλύτερο από αυτό της απόκρισης στο πρώτο ερέθισμα, τότε υπάρχει ενδυνάμωση μέσω σύζευξης παλμών (Paired-Pulse Facilitation - PPF). Στην περίπτωση που το μέγεθος της απόκρισης στο δεύτερο ερέθισμα είναι μικρότερο από αυτό της απόκρισης στο πρώτο ερέθισμα, τότε υπάρχει αποδυνάμωση μέσω σύζευξης παλμών (Paired-Pulse Depression - PPD) [16].

Σε πειράματα συζευγμένων παλμών ενδυνάμωσης (PPF) ή αποδυνάμωσης (PPD), το ερέθισμα ακολουθείται από ένα δεύτερο ερέθισμα, συνήθως 20 έως 80 ms αργότερα. Το μέγεθος της απόκρισης του πληθυσμού στο δεύτερο ερέθισμα συγκρίνεται με αυτό του πρώτου, το οποίο είναι υψηλότερο στην περίπτωση PPF, ή χαμηλότερο στην περίπτωση PPD [13].

### 3.3 Νευρομορφική μηχανική

Τα τελευταία χρόνια, με την εκθετική αύξηση των παραγόμενων δεδομένων και της ανάγκης επεξεργασίας αυτών, έχει γίνει επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης τόσο καινούργιων τεχνικών και μοντέλων για την βελτιστοποίηση των αλγορίθμων, όπως η μηχανική μάθηση (machine learning) και άρα σε επίπεδο λογισμικού [17-19], όσο και στην ανάπτυξη προηγμένων ηλεκτρονικών συσκευών που θα καθιστούν δυνατή την ταυτόχρονη συλλογή και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων [20-22].

Όπως έχει συμβεί πολλές φορές στο παρελθόν, πίσω από μεγάλα τεχνολογικά επιτεύγματα βρίσκεται η έμπνευση και η προσπάθεια ανάπτυξης μηχανισμών, που μιμούνται φυσικές λειτουργίες. Έχοντας κατανοήσει εδώ και πολλά χρόνια την πολυπλοκότητα και παράλληλα την ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων στον ανθρώπινο εγκέφαλο, ένα μεγάλο μέρος της έρευνας, έχει στραφεί στην ανάπτυξη δομών, που μιμούνται τις λειτουργίες του εγκεφάλου με εφαρμογές σε διάφορα πεδία [23-29]. Οι δομές που έχουν

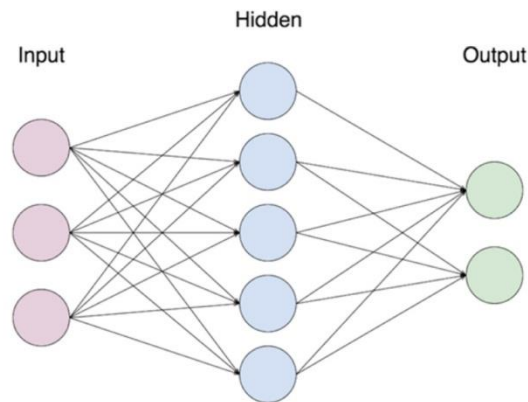
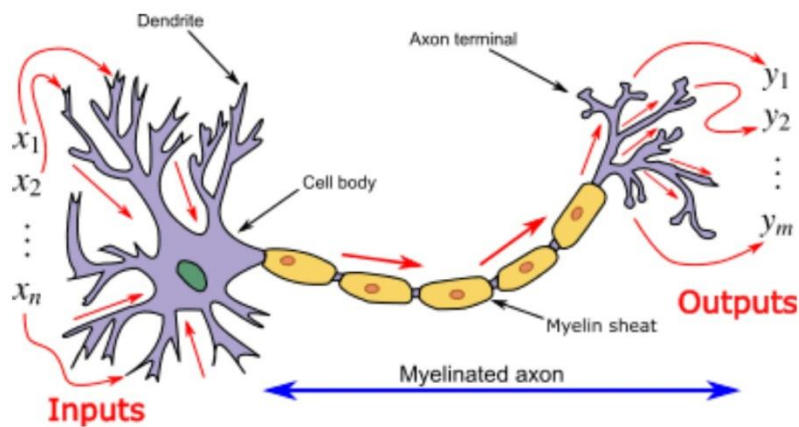
αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι στιγμής, είναι βασισμένες στα transistor, τα οποία λειτουργούν έχοντας δύο διακριτές καταστάσεις, on/off ή αλλιώς μηδέν και ένα [30-35].

Σε επίπεδο λογισμικού, τα νευρομορφικά υπολογιστικά μοντέλα προσπαθούν να προσομοιώσουν τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος λειτουργεί μέσω των νευρωνικών δικτύων [17],[18]. Στο επίπεδο της ανάπτυξης καινοτόμων ηλεκτρονικών συσκευών, πραγματοποιείται έρευνα σχετικά με το πώς μπορούν να αναπτυχθούν νευρωνικά δίκτυα, αποτελούμενα από επί μέρους διατάξεις που παίζουν τον ρόλο των αντίστοιχων βιολογικών δομών των νευρωνικών δικτύων [20],[25],[27].

### 3.3.1 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANN) είναι υπολογιστικά συστήματα εμπνευσμένα από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα που υπάρχουν στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Ένα ANN βασίζεται σε μια συλλογή συνδεδεμένων μονάδων ή κόμβων που ονομάζονται τεχνητοί νευρώνες, οι οποίοι μοντελοποιούν τους νευρώνες που υπάρχουν σε έναν βιολογικό εγκέφαλο [36]. Κάθε σύνδεση, όπως οι συνάψεις σε έναν βιολογικό εγκέφαλο, μπορεί να μεταδώσει ένα σήμα σε άλλους νευρώνες [37]. Τα ANN έχουν την ικανότητα να μαθαίνουν, να θυμούνται και στη συνέχεια να γενικεύουν τα δεδομένα για να παράγουν νέες πληροφορίες και να ανιχνεύουν τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών [38]. Τα ANN, δεδομένου ότι είμαι μια γενικότερη φιλοσοφία καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων, βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς [39-42].

Το κρυφό στρώμα σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (hidden layer) είναι ένα στρώμα μεταξύ των στρωμάτων εισόδου (input) και των στρωμάτων εξόδου (output), όπου οι τεχνητοί νευρώνες λαμβάνουν ένα σύνολο σταθμισμένων εισόδων και παράγουν μια έξοδο μέσω μιας συνάρτησης ενεργοποίησης [43].



**Εικόνα 3.5:** Σχηματική απεικόνιση των εισόδων, του μετασχηματισμού τους και των εξόδων σε έναν νευρώνα και πως αυτά μεταφράζονται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [44].

Ένας τεχνητός νευρώνας λαμβάνει ένα σήμα, το επεξεργάζεται και εν συνεχεία μπορεί να σηματοδοτήσει τους νευρώνες που συνδέονται με αυτόν. Το σήμα σε μια σύνδεση, είναι ένας πραγματικός αριθμός και η έξοδος κάθε νευρώνα υπολογίζεται από κάποια μη γραμμική συνάρτηση του αθροίσματος των εισόδων του. Οι συνδέσεις ονομάζονται ακμές. Οι νευρώνες και τα άκρα έχουν συνήθως ένα βάρος που προσαρμόζεται καθώς προχωρά η μάθηση. Το βάρος αυξάνει ή μειώνει την ισχύ του σήματος σε μια σύνδεση. Οι νευρώνες μπορεί να έχουν ένα κατώφλι τέτοιο ώστε ένα σήμα να αποστέλλεται μόνο εάν το αθροιστικό σήμα υπερβεί αυτό το κατώφλι. Τυπικά, οι νευρώνες συγκεντρώνονται σε στρώματα. Διαφορετικά επίπεδα μπορεί να εκτελούν διαφορετικούς μετασχηματισμούς στις εισόδους τους. Τα

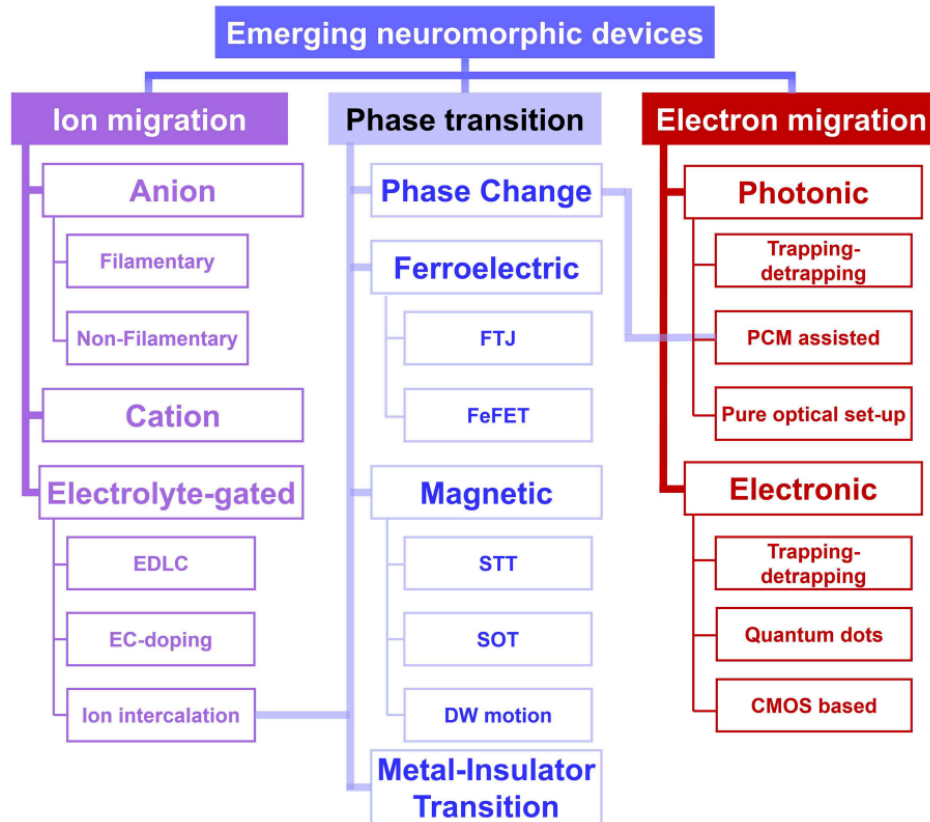


σήματα ταξιδεύουν από το πρώτο στρώμα (το επίπεδο εισόδου), στο τελευταίο στρώμα (το επίπεδο εξόδου), πιθανώς αφού διασχίσουν τα επίπεδα πολλές φορές [36].

### 3.3.2 Αναδυόμενες νευρομορφικές συσκευές

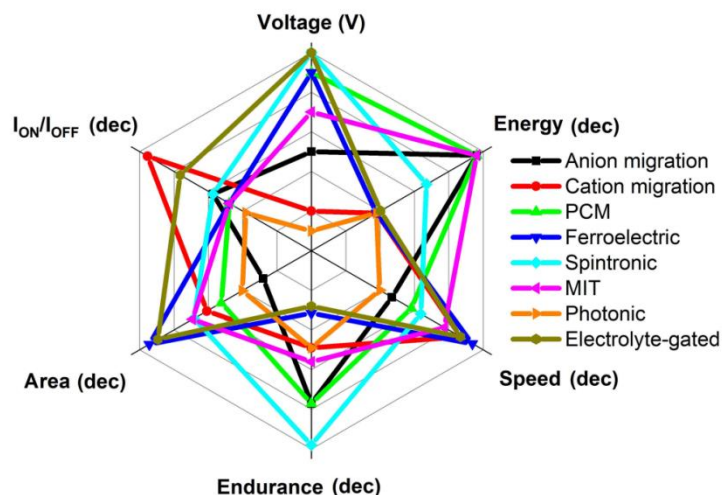
Η κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων που μιμούνται τις βιολογικές συναπτικές λειτουργίες, είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή των ANNs. Δεδομένου ότι οι πληροφορίες στο νευρικό δίκτυο του εγκεφάλου, μεταδίδονται μεταξύ των νευρώνων μέσω των συνάψεων, υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα για την ανάπτυξη διατάξεων, που μιμούνται τη λειτουργία των συνάψεων [45]. Πιο συγκεκριμένα, όταν μια συναπτική διάταξη λάβει κάποιο εξωτερικό ερέθισμα, το συναπτικό βάρος της διάταξης θα αλλάξει, αλλά δεν θα επανέλθει αμέσως στην αρχική του κατάσταση. Ωστόσο, όταν μια συναπτική διάταξη διεγείρεται συνεχώς, το συναπτικό βάρος της αλλάζει, παρουσιάζοντας ένα συσσωρευτικό αποτέλεσμα που μπορεί να αποθηκευθεί. Έτσι, έχουν κατασκευασθεί διάφορες συναπτικές διατάξεις, βασισμένες στις συναπτικές ιδιότητες των βιολογικών συνάψεων, όπου μελετάται η συναπτική συμπεριφορά τους ως απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα. Τα εξωτερικά ερεθίσματα, μπορεί να είναι ηλεκτρικοί [45] ή οπτικοί παλμοί [46], οι οποίοι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα στη ρύθμιση των φυσικών ιδιοτήτων αυτών των συσκευών που βασίζονται σε υλικά και ως εκ τούτου μιμούνται συναπτικές λειτουργίες.

Έχουν προταθεί διάφορες συναπτικές διατάξεις, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την αρχή λειτουργίας τους. Έτσι, οι συναπτικές συσκευές μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, τις διατάξεις μετανάστευσης ιόντων, αλλαγής φάσης και μετανάστευσης ηλεκτρονίων [47]. Οι διατάξεις αποτελούνται από οξειδία μετάλλου, ημιαγωγούς, υλικά αλλαγής φάσης και περοβσκίτες [48]. Βασισμένες στη δομή τους, οι διατάξεις μπορούν να ταξινομηθούν σε συναπτικές διατάξεις τύπου δύο ακροδεκτών και σε συναπτικές διατάξεις τρανζίστορ [49]. Οι συναπτικές συσκευές δύο τερματιών μπορούν να ενσωματωθούν ευκολότερα σε σχέση με τις συναπτικές συσκευές τύπου τρανζίστορ οι οποίες όμως μπορούν να ρυθμίσουν καλά τις ηλεκτρικές συμπεριφορές μέσω των τάσεων της πύλης.



**Εικόνα 3.6:** Ταξινόμηση των αναδυόμενων νευρομορφικών συσκευών με βάση την αρχή λειτουργίας τους [47].

Εκτός από την πολυπλοκότητα της διαδικασίας κατασκευής της κάθε συσκευής, καθοριστικό ρόλο στο ποιες από όλες τις τεχνολογίες θα επικρατήσουν στο μέλλον, παίζουν οι επί μέρους ιδιότητες των νευρομορφικών συσκευών, όπως ο χώρος που καταλαμβάνουν, η τάση λειτουργίας τους, η κατανάλωση ενέργειας, το παράθυρο μνήμης τους, η ταχύτητά τους, η ικανότητά τους διατήρησης της πληροφορίας και η αντοχή τους σε κύκλους λειτουργίας. Παρακάτω απεικονίζεται ένα αντιπροσωπευτικό ιστόγραμμα σχετικά με τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τεχνολογιών των μνημών που έχουν αναπτυχθεί, όπου φαίνονται συγκριτικά τα διάφορα επιμέρους χαρακτηριστικά τους.



**Εικόνα 3.7:** Επιδόσεις των διαφορετικών νευρομορφικών τεχνολογιών [47].

### 3.3.3 Το memristor σαν τεχνητή σύναψη

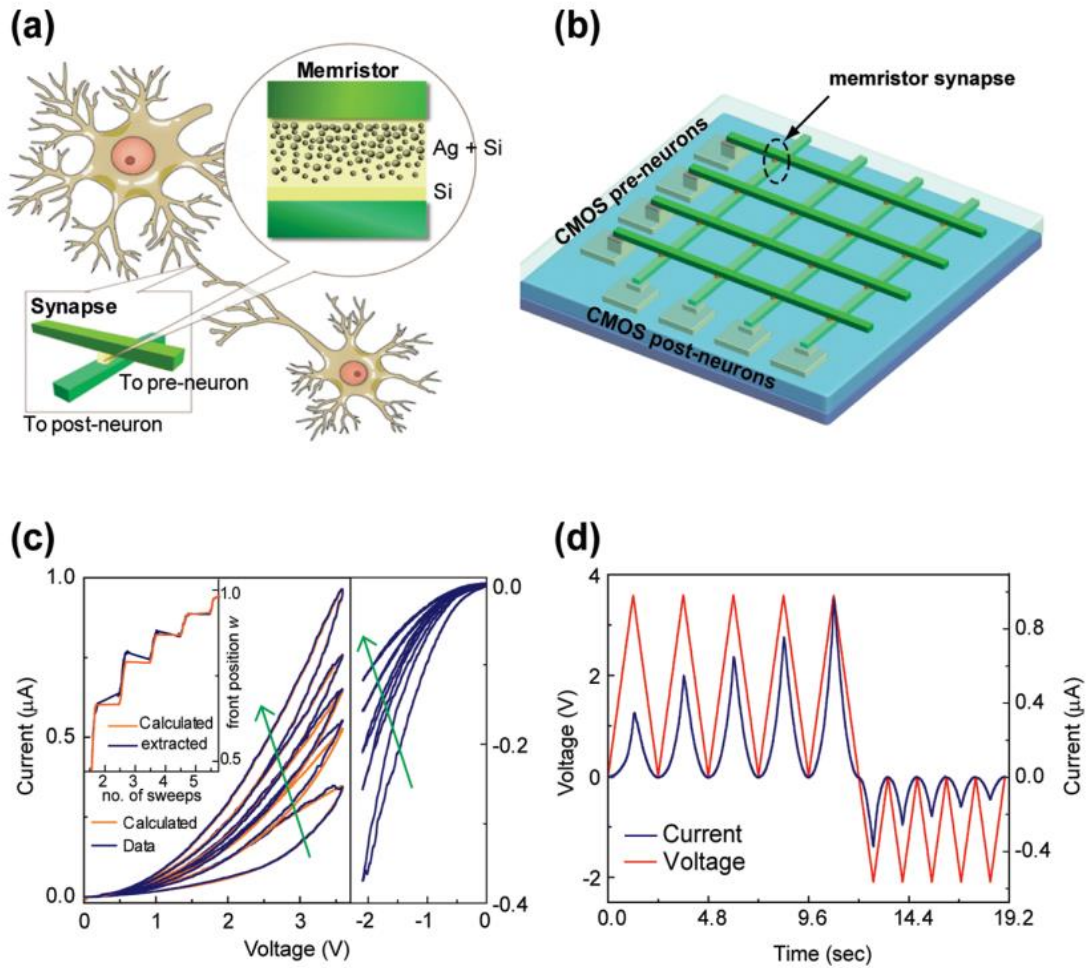
Στα πλαίσια της αναζήτησης νέων αρχιτεκτονικών για την κατασκευή τεχνητών νευρωνικών δικτύων, το memristor ή μνήμη εναλλαγής αντίστασης, είναι ένα από τα πιο δημοφιλή πεδία έρευνας. Αυτό οφείλεται στην απλή δομή του και συνεπώς στην απλή διαδικασία κατασκευής του, την υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης καθώς και την αξιόπιστη λειτουργία του επιλέγοντας την κατάλληλη δομή [50], [51]. Αυτή η απλή δομή, που αποτελείται από αγωγό/ημιαγωγό/αγωγό, κάνει τα κύτταρα μνήμης ReRAM να ενσωματώνονται εύκολα σε διασταυρούμενες συστοιχίες (crossbar). Η αρχιτεκτονική crossbar, αποτελείται από κάθετες αγωγίμες γραμμές (wordlines) και στήλες (bitlines), όπου υπάρχει ένα στοιχείο μνήμης στη διασταύρωση μεταξύ κάθε γραμμής και στήλης, μεγέθους  $4F^2$ , όπου F το ελάχιστο μέγεθος που μπορεί να κατασκευασθεί και ορίζεται από την ελάχιστη τεχνική λιθογραφίας που θα χρησιμοποιηθεί. Το εξαιρετικά μικρό μέγεθος της συσκευής ReRAM δύναται να αυξήσει την πυκνότητα συνάψεων των ANN, η οποία αναμένεται να φτάσει την πυκνότητα συνάψεων ίδιας τάξης μεγέθους με αυτών που υπάρχουν στον ανθρώπινο εγκέφαλο ( $\sim 10^{10}$  συνάψεις/cm<sup>2</sup>) [52], [53].

Το στοιχείο μνήμης μπορεί να προσπελαστεί για ανάγνωση και εγγραφή πολώνοντας την αντίστοιχη wordline και bitline [50]. Έτσι στην τεχνητή σύναψη, το κάθε wordline και bitline, αντιστοιχούν σε ένα pre-neuron και post-neuron (Εικόνα 3.8) [54].

Οι δύο τύποι συμπεριφοράς αλλαγής της αντίστασης του διηλεκτρικού ενός memristor, η απότομη και η σταδιακή, μπορούν να θεωρηθούν ότι αντιστοιχούν σε ψηφιακή και αναλογική συμπεριφορά, αντίστοιχα. Η απότομη αλλαγή της αντίστασης σε ένα memristor, πιστεύεται ότι είναι συνεπής με ένα ψηφιακό σήμα, ενώ η σταδιακή με ομαλές αλλαγές της αγωγιμότητας, έχοντας έτσι παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά της βιολογικής σύναψης [55].

Η αγωγιμότητα του διηλεκτρικού μιας μνήμης εναλλαγής αντίστασης, μπορεί να τροποποιηθεί με της εφαρμογή θετικών και αρνητικών παλμών. Εφαρμόζοντας όμοιους διαδοχικούς παλμούς, παρατηρούνται συμπεριφορές ενδυνάμωσης ή αποδυνάμωσης, όπου οι καταστάσεις αγωγιμότητας στο διηλεκτρικό αλλάζουν, το οποίο δείχνει τη δυνατότητα τροποποίησης της αγωγιμότητας και συνεπώς προσομοιώνουν την αλλαγή του συναπτικού βάρους.

Τα ηλεκτρόδια ενός memristor μπορούν να θεωρηθούν σαν νευρώνες, που συνδέονται με μία σύναψη (το διηλεκτρικό του μεμρίστορ), δηλαδή σαν υποδοχέας για τη διέγερση του σήματος. Η αλλαγή της αγωγιμότητας στο διηλεκτρικό ενός memristor και συγκεκριμένα ενός memristor αγώγιμου νήματος, γίνεται με την εφαρμογή διαδοχικών θετικών ή αρνητικών παλμών, διαδικασία που προσομοιώνει την αλλαγή του δυναμικού εντός των βιολογικών νευρώνων, με την εναλλαγή της συγκέντρωσης των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{K}^+$  εντός του νευρικού κυττάρου.



**Εικόνα 3.8:** Χαρακτηριστικά του memristor και η εφαρμογή του ως συνάψη. (α) Σχηματική απεικόνιση της έννοιας της χρήσης memristors ως συνάψεων μεταξύ νευρώνων. Τα ένθετα δείχνουν τα σχηματικά σχήματα της γεωμετρίας της συσκευής των δύο ακροδεκτών και τη δομή σε στρώματα του memristor. (β) Σχηματική απεικόνιση ενός νευρομορφικού με νευρώνες CMOS και συνάψεις μεμρίστορ σε διαμόρφωση crossbars. (γ) Χαρακτηριστικές I-V του memristor (δ) μεταβολή της αγωγιμότητας του memristor σε διαδοχικές σαρώσεις τάσης [54].

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] [Neurons, Synapses, Action Potentials, and Neurotransmission \(ilstu.edu\)](#)
- [2] S. Walters, “Psychology – 1st Canadian Edition”, *Thomson Rivers University*, 2020.
- [3] J. Tang, F. Yuan, X. Shen, Z. Wang, M. Rao, Y. He, Y. Sun, X. Li, W. Zhang, Y. Li, B. Gao, H. Qian, G. Bi, S. Song, J. J. Yang, H. Wu, “Bridging Biological and Artificial Neural Networks with Emerging Neuromorphic Devices: Fundamentals, Progress, and Challenges”, *Adv. Mater.*, 1902761, Sept. 2019.
- [4] D. Purves, K. S. LaBar, Michael L. Platt, Marty Woldorff, Roberto Cabeza, and Scott A. Huettel, “Principles of Cognitive Neuroscience”, 2nd edition, *Oxford University Press*, Nov. 2012.
- [5] S. J. Bordes, I. V. Murray, S. M. Chrysafigides, S. Sharma, “Physiology, Resting Potential”, *StatPearls Publishing LLC*, Jun. 2020.
- [6] N. Sabah, “Origin of the resting potential”, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 18, no. 5, pp. 100-105, Sept. 1999.
- [7] A. Fletcher, “Action potential: generation and propagation”, *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, vol. 23, no. 3, pp. 183-187, Feb. 2022.
- [8] M. Chappell, S. Payne, “Physiology for Engineers - Applying Engineering Methods to Physiological Systems”, *Springer Cham*, Apr. 2020.
- [9] J. Tang, F. Yuan, X. Shen, Z. Wang, M. Rao, Y. He, Y. Sun, X. Li, W. Zhang, Y. Li, B. Gao, H. Qian, G. Bi, S. Song, J. J. Yang, H. Wu, “Bridging Biological and Artificial Neural Networks with Emerging Neuromorphic Devices: Fundamentals, Progress, and Challenges”, *Adv. Mater.*, 1902761, Sept. 2019.
- [10] BioNinja, Nervous System, <http://www.vce.bioninja.com.au/aos> 2-detecting-and-respond/coordination-regulation/nervous-system.html (accessed: August 2019).
- [11] D. O. Hebb, “The organization of behavior”, *New York Wiley*, 1949.

- [12] F. Attneave, M. B., and D. O. Hebb, “The Organization of Behavior; A Neuropsychological Theory,” *Am. J. Psychol.*, vol. 63, no. 4, p. 633, Oct. 1950
- [13] A. Citri, C. Malenka, “Synaptic Plasticity: Multiple Forms, Functions, and Mechanisms”, *Neuropsychopharmacol*, vol. 33, pp. 18-41, Aug. 2008.
- [14] J. H. Byrne, J. L. Roberts, M. Waxham “From molecules to Network - An Introduction to Cellular and Molecular Neuroscience”, 3<sup>rd</sup> edition, Academic Press, *Elsevier*, 2014.
- [15] C. Hammond, “Cellular and Molecular Neurophysiology”, 4th edition, Academic Press, *Elsevier*, Dec. 2015.
- [16] D. Debanne, N. C. Guerineau, B. H. Gähwiler, S. M. Thompson, “Paired-pulse facilitation and depression at unitary synapses in rat hippocampus: quantal fluctuation affects subsequent release”, *J. Physiol.*, 491, pp. 163-176, Feb. 1996.
- [17] L. E. Suárez, B. A. Richards, G. Lajoie, B. Misic, “Learning function from structure in neuromorphic networks”, *Nat Mach Intell*, vol. 3, pp. 771–786, Aug. 2021.
- [18] C. D. Schuman, S. R. Kulkarni, M. Parsa, J. P. Mitchell, P. Date, B. Kay, “Opportunities for neuromorphic computing algorithms and applications”. *Nat Comput Sci*, vol. 2, pp. 10–19, Jan. 2022.
- [19] J. D. Smith, A. J. Hill, L. E. Reeder, B. C. Franke, R. B. Lehoucq, O. Parekh, W. Severa, J. B. Aimone, “Neuromorphic scaling advantages for energy-efficient random walk computations”, *Nat Electron*, vol. 5, pp. 102–112, Feb. 2022.
- [20] A. Chen, J. Hutchby, V. Zhirnov, G. Bourianoff, “Emerging Nanoelectronic Devices”, *John Wiley & Sons*, Nov. 2014.
- [21] D. Crawley, K. Nikolic, M. Forshaw, “3D Nanoelectronic Computer Architecture and Implementation”, *CRC Press*, Jan. 2020.
- [22] M. Dragoman, D. Dragoman, “Atomic-Scale Electronics Beyond CMOS”, *Springer Cham*, 2021.
- [23] F. García-Córdova, A. Guerrero-González, “A Biologically Inspired Neural Network for Autonomous Underwater Vehicles”, International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2011, *Springer*, vol. 6691, pp. 166–173, 2011.

- [24] O. O. V. Villegas, M. Nandayapa, I. Soto, “Advanced Topics on Computer Vision, Control and Robotics in Mechatronics”, *Springer Cham*, 2018.
- [25] H. Zhang, C. Gang, C. Xu, G. Gong, H. Lu, “Brain-Inspired Spiking Neural Network Using Superconducting Devices”, *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 99, pp. 1-7, Jul. 2021.
- [26] M. Vieth, T. M. Stöber, J. Triesch, “PymoNNto: A Flexible Modular Toolbox for Designing Brain-Inspired Neural Networks”, *Front Neuroinform.*, Nov. 2021.
- [27] X. Wu, V. Saxena, K. Zhu, S. Balagopal “A CMOS Spiking Neuron for Brain-Inspired Neural Networks with Resistive Synapses and in Situ Learning”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 62, no. 11, pp. 1088-1092, Nov. 2015.
- [28] X. Liu, Y. Zeng, T. Zhang, B. Xu, “Parallel Brain Simulator: A Multi-scale and Parallel Brain-Inspired Neural Network Modeling and Simulation Platform”, *Cogn Comput*, vol. 8, pp. 967–981, Apr. 2016.
- [29] K. Kumarasinghe, N. Kasabov, D. Taylor, “Brain-inspired spiking neural networks for decoding and understanding muscle activity and kinematics from electroencephalography signals during hand movements”, *Sci Rep*, vol. 11, 2486, Jan. 2021.
- [30] E. J. Fuller, Y. Li, C. Bennet, S. T. Keene, A. Melianas, S. Agarwal, M. J. Marinella, A. Salleo, A. A. Talin, “Redox transistors for neuromorphic computing”, *IBM Journal of Research and Development*, vol. 63, no. 6, pp. 9:1-9:9, 1 Nov.-Dec. 2019.
- [31] H. Zhong, Q.-C. Sun, G. Li, J.-Y. Du, H.-Y. Huang, E.-J. Guo, M. He, C. Wang, G.-Z. Yang, C. Ge, “High-performance synaptic transistors for neuromorphic computing”, *Chinese Phys. B.*, vol. 29, no. 4, 040703, Jan. 2020.
- [32] M.-K. Song, Y.-W. Song, T. Sung, S. D. Namgung, J. H. Yoon, Y.-S. Lee, K. T. Nam, J.-Y. Kwon, “Synaptic transistors based on a tyrosine-rich peptide for neuromorphic computing”, *RSC Adv.*, vol.11, no.63, pp. 39619-39624, Dec. 2021.
- [33] Y. Li, H. Xu, J. Lu, Z. Wu, S. Wu, X. Zhang, Q. Liu, D. Shang, “Electrolyte-gated transistors with good retention for neuromorphic computing”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 120, no. 2, 021901, Jan. 2022.



- [34] T. Guo, K. Pan, Y. Jiao, B. Sun, C. Du, P. Mills, Z. Chen, X. Zhao, L. Wei, Y. N. Zhou, Y. A. Wu, “Versatile memristor for memory and neuromorphic computing”, *Nanoscale Horiz.*, vol. 7, no. 3, pp. 299-310, Jan. 2022.
- [35] M. Jin, H. Lee, C. Im, H.-J. Na, J. H. Lee, W. H. Lee, J. Han, E. Lee, J. Park, Y. S. Kim, “Interfacial Ion-Trapping Electrolyte-Gated Transistors for High-Fidelity Neuromorphic Computing”, *Adv. Funct. Mater.*, 2201048, Mar. 2022.
- [36] S. M. Reddy, P. A. Babu, G. CH. S. S. Maharshi, B. P. Kumar, P. B. Shankar, “A Review on Artificial Neural Networks”, *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 3, no. 4, pp. 166-169, Apr. 2022.
- [37] B. Fasel, “An introduction to bio-inspired artificial neural network architectures”, *Acta Neurol Belg.*, vol. 103, no. 1, pp. 6-12, Mar. 2003.
- [38] A.C. Yazici, E. Öğüş, S. Ankarali, S. Canan, H. Ankarali, Z. Akkuş, “Artificial neural networks: Review”, *Türkiye Klinikleri J Med Sci*, vol. 27, no. 1, pp. 65-71, Feb. 2007.
- [39] J. E. Dayhoff, J. M. DeLeo, “Artificial neural networks”, *Cancer*, vol. 91, no. 8, pp. 1615-1635, Apr. 2001.
- [40] T. B. Lopez-Garcia, A. Coronado-Mendoza, J. A. Domínguez-Navarro, “Artificial neural networks in microgrids: A review”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 95, 103894, Aug. 2020.
- [41] S. Kujawa, G. Niedbala “Artificial Neural Networks in Agriculture”, *Agriculture*, vol. 11, no. 6, 497, May 2021.
- [42] J. de D. R. Olvera, I. Gómez-Vargas, J. A. Vázquez. 2022. “Observational Cosmology with Artificial Neural Networks”, *Universe*, vol. 8, no. 2, 120, Feb. 2022.
- [43] M. Kubat, “An Introduction to Machine Learning”, *Springer Cham*, 2015.
- [44] [What is Artificial Neural Network\(ANN\) | Data Warehouse | OBIEE | Informatica | Hadoop \(obicetips.com\)](#)

- [45] D. Kuzum, S. Yu, H.-S. P. Wong, “Synaptic electronics: materials, devices and applications”, *Nanotechnology*, vol. 24, no. 38, 382001, Sept. 2013.
- [46] Y. Wang, Y. Zhu, Y. Li, Y. Zhang, D. Yang, X. Pi, “Dual-Modal Optoelectronic Synaptic Devices with Versatile Synaptic Plasticity”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 32, 2107973, Sept. 2021.
- [47] J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, R. Huang, “A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 7, no. 1, 011312, Feb. 2020.
- [48] F. Chen, Y. Zhou, Y. Zhu, R. Zhu, P. Guan, J. Fan, L. Zhou, N. Velanoor, F. von Wegner, E. Saribatir, I. Birznieks, T. Wan, D. Chu, “Recent progress in artificial synaptic devices: materials, processing and applications”, *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 9, no. 27, pp. 8372–8394, Jun. 2021.
- [49] S. Jiang, S. Nie, Y. He, R. Liu, C. Chen, Q. Wan, “Emerging Synaptic Devices: From Two-terminal Memristors to Multi-terminal Neuromorphic Transistors”, *Materials Today Nano*, 100059, Sept. 2019.
- [50] D. Ielmini, “Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling”, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 6, 063002, May 2016.
- [51] D. Ielmini, H.-S. P. Wong, “In-memory computing with resistive switching devices”. *Nat. Electron.*, vol. 1, pp. 333–343, Jun. 2018.
- [52] T.-M. Tsai, C.-C. Lin, W.-C. Chen, C.-H. Wu, C.-C. Yang, Y.-F. Tan, P.-Y. Wu, H.-C. Huang, Y.-C. Zhang, L.-C. Sun, S.-Y. Chou, “Utilizing compliance current level for controllability of resistive switching in nickel oxide thin films for resistive random-access memory”, *J. Alloy. Compd.*, vol. 826, pp. 154126–154151, Jun. 2020.
- [53] B. Kim, H.-S. Choi, Y. Kim, “A Study of Conductance Update Method for Ni/SiNx/Si Analog Synaptic Device”, *Solid State Electron.*, vol. 171, pp. 107772–107799, Sept. 2020.
- [54] S. H. Jo, T. Chang, I. Ebong, B. B. Bhadviya, P. Mazumder, W. Lu, “Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems”, *Nano Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 1297-1301, Apr. 2010.
- [55] Z. Shen, C. Zhao, Y. Qi, W. Xu, Y. Liu, I. Z. Mitrovic, L. Yang, C. Zhao, “Advances of RRAM Devices: Resistive Switching Mechanisms, Materials and Bionic Synaptic Application”, *Nanomaterials (Basel)*, vol. 10, no. 8, 1437, Jul. 2020.

## Κεφάλαιο 4: Κατασκευή και χαρακτηρισμός μνημών εναλλαγής αντίστασης σε εύκαμπτα υποστρώματα

### 4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται έντονη διενεργούμενη έρευνας προς την κατεύθυνση αναζήτησης εναλλακτικών υποστρωμάτων για την κατασκευή των νανοηλεκτρονικών διατάξεων. Η χρήση των δισκίων πυριτίου, αν και αποτελεί πάντα μια ασφαλή και δοκιμασμένη λύση καθώς το Si έχει μελετηθεί πολύ σαν υλικό, παράλληλα αποτελεί και έναν περιοριστικό παράγοντα, όταν οι αναπτυσσόμενες νανοδιατάξεις προσανατολίζονται στην κατεύθυνση των εύκαμπτων εφαρμογών. Έτσι, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, διάφορα υποστρώματα έχουν δοκιμασθεί και χρησιμοποιηθεί, μελετώντας το κατά πόσο θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σαν βάση των νέων τεχνολογικών εφαρμογών, ευρείας παραγωγής. Τα υποψήφια υποστρώματα θα πρέπει να πληρούν ένα σύνολο βασικών ιδιοτήτων, μέσω των οποίων θα είναι δυνατή η κατασκευή των εύκαμπτων διατάξεων. Στη συνέχεια, ανάλογα με την επί μέρους εφαρμογή, περεταίρω ιδιότητες των υποστρωμάτων θα πρέπει να πληρούνται, όπως η όσο το δυνατόν ελάχιστη τραχύτητα της επιφάνειάς τους, η αντοχή τους στην καταπόνηση, τη θερμοκρασία, την υγρασία κλπ.

Η ανάπτυξη των εύκαμπτων διατάξεων μνήμης που παράλληλα παρουσιάζουν εγγενείς νευρομορφικές ιδιότητες, προσελκύει τεράστια προσοχή λόγω της ευρείας διάδοσης των φορητών ηλεκτρονικών ειδών. Η κατασκευή τεχνητών συναπτικών δομών που θα έχουν την ικανότητα να παραμένουν λειτουργικές μετά από μεγάλο αριθμό καταπονήσεων ενώ παράλληλα θα εκτελούν διαδικασίες τεχνητής διαμόρφωσης συναπτικού βάρους, θεωρείται ο ακρογωνιαίος λίθος για την ανάπτυξη φορητών νευρομορφικών υπολογιστικών συστημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται η κατασκευή μιας διάταξης Ag/SiO<sub>2</sub>/TiN κατασκευασμένης με διαδικασίες χαμηλής θερμοκρασίας, σε ένα υπόστρωμα ναφθαλικού πολυαιθυλενίου (polyethylene naphthalate - PEN) στο οποίο έχουν εναποτεθεί νανοσωματίδια πλατίνας (Pt NPs) με μέση διάμετρο 5 nm. Οι συσκευές μνήμης που αναπτύχθηκαν, δεν χρειάζονται διαδικασία ηλεκτροδιαμόρφωσης, λειτουργούν σε χαμηλή τάση 500 mV και παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα μετά από μεγάλο αριθμό καταπονήσεων στην υψηλή μηχανικής καταπόνησης 4,16%, χωρίς κάποια σημαντική υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σημαντική συμβολή των Pt

NPs στην καταστολή της επίδρασης των ρωγμών του υποστρώματος στην διάταξη. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια ενδελεχής ανάλυση των νευρομορφικών ιδιοτήτων των διατάξεων, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής βραχυπρόθεσμης πλαστικότητας, PPF και PPD, που έχουν μεγάλη σημασία για τις διαδικασίες πρόβας των νευρώνων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας εκμάθησης καθώς και για τη γραμμική κατανομή της αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια εργασιών συναπτικής ενίσχυσης και αποδυνάμωσης. Επιπλέον, καταγράφησαν αποκρίσεις πλαστικότητας Hebbian STDP.

Οι πρόσφατες ανακαλύψεις στα τεχνητά νευρομορφικά δίκτυα και η δυνατότητα εκτέλεσης υπολογισμών στη μνήμη, έχουν τονώσει την ανάπτυξη νέων ηλεκτρονικών συναπτικών στοιχείων, ικανά να πραγματοποιούν διάφορες νευρομορφικές και γνωστικές διαδικασίες, με υψηλό βαθμό ακρίβειας [1]. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες μνημών σε αυτή την κατεύθυνση, μεγάλο μέρος της έρευνας, έχει εστιαστεί γύρω από τα μεμρίστορ [2], λόγω του μικρού αποτυπώματός τους, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και το πιο σημαντικό, την συμβατότητά τους με την τεχνολογία CMOS [3].

Το συγκριτικό πλεονέκτημα των memristors από την άποψη της ανάπτυξης τεχνητών συναπτικών συσκευών, είναι η ικανότητά τους να συντονίζουν συνεχώς το συναπτικό τους βάρος, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας σημασία για την πραγματοποίηση διαφόρων βιοσυναπτικών ιδιοτήτων [4],[5]. Παράλληλα, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για μεταφορά των νανοηλεκτρονικών συσκευών σε εύκαμπτα υποστρώματα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση, αποθήκευση και επεξεργασία διαφόρων δεδομένων σε φορητές εφαρμογές, εξαιρένοντας έτσι την ανάγκη για cloud based υπολογισμούς [6]. Στον τομέα των εύκαμπτων μνημών εναλλαγής αντίστασης, έχουν αναπτυχθεί διατάξεις σε διάφορα εύκαμπτα υποστρώματα. Ένα μεγάλο μέρος αυτών, έχουν αναπτυχθεί σε πολυϊμίδιο (PI) [7–9], τρεφεθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) [10–13] και ναφθαλικό πολυαιθυλένιο (PEN) [14]. Η κατασκευή λεπτών υμενίων χωρίς ρωγμές, θεωρείται μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της βιομηχανίας εύκαμπτων υποστρωμάτων. Οι ρωγμές αναδύονται υπό την εφαρμογή εγκάρσιου εφελκυσμού ή θλίψης στο επίπεδο μιας λεπτής μεμβράνης, όταν το μέγιστο φορτίο καταπόνησης είναι μεγαλύτερο από την αντοχή δεσμού των ατόμων που αποτελούν τη δομή του λεπτού υμενίου [15]. Η έναρξη του σχηματισμού ρωγμών, έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από την πυκνότητα των ατόμων, το πραγματικό πάχος του υμενίου και το μέτρο του Young του υλικού [16]. Η παρουσία ρωγμών μπορεί να θεωρηθεί γενικά επιζήμια για την αξιόπιστη λειτουργία των ηλεκτρονικών διατάξεων και διάφορες τεχνικές έχουν επινοηθεί σε προκειμένου να αποφευχθεί ο σχηματισμός τους, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής χημείας [17], [18], της τροποποίησης των ιδιοτήτων του πλαστικού υποστρώματος [19], [20] και της χρήσης ενός λεπτού στρώματος NPs [21–23]. Η τελευταία προσέγγιση

έχει αποκαλύψει σημαντικά αποτελέσματα λόγω της φύσης των NPs χωρίς ρωγμές και της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται με τη μορφολογία της επιφάνειας του υποκείμενου πλαστικού υποστρώματος. Αυτό το φαινόμενο προέρχεται από τη χαμηλή τιμή του συντελεστή Young των μεταλλικών NPs που μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις διαδικασίες προοδευτικής συσσώρευσης τάσεων μεταξύ των μαλακών πλαστικών υποστρωμάτων και των σχετικά σκληρότερων συνδυασμών οξειδίου-μετάλλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενσωμάτωση μεταλλικών NPs εντός διατάξεων μνήμης, έχουν αναφερθεί ευρέως στη βιβλιογραφία, ωστόσο με διαφορετικούς στόχους από τη συγκεκριμένη εργασία. Τα NPs έχουν αναφερθεί είτε ως στρώμα παγίδευσης φορτίου [24], [25] είτε ενσωματωμένα στο ενεργό υλικό μεταγωγής [26] για τη βελτίωση της εγγενούς μεταβλητότητας των συσκευών λόγω της τοπικής ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου [27]. Στις περισσότερες από τις αναφερόμενες μελέτες, οι μέθοδοι βασίζονται σε διάλυμα που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση μεταλλικών NPs [28], οι οποίες είναι διαφορετικές από την εναπόθεση NPs στο κενό που καταδεικνύεται στην εργασία μας. Αυτές οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν συνήθως χημικές μεθόδους σύνθεσης, αποτελούν εμπόδιο ως προς την επεκτασιμότητα των συσκευών στις οποίες χρησιμοποιούνται μεταλλικά NPs. Εν αντιθέσει, η τεχνική που χρησιμοποιούμε σε αυτή την εργασία, προσφέρει το πλεονέκτημα της πλήρους κατασκευής της διάταξης υπό κενό, που είναι ελκυστική για ενδεχόμενη μαζική τους παραγωγή. Μεταξύ των εύκαμπτων υποστρωμάτων, το PEN είναι το κυρίαρχο για μελλοντικές εφαρμογές, αφού εμφανίζει χαμηλότερη τραχύτητα σε σύγκριση με το PI και το PET [29]. Η τοπογραφία της επιφάνειας του υποστρώματος υπαγορεύει το πάχος της λεπτής μεμβράνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κάτω ηλεκτρόδιο (BE) αφού έχει ισχυρή επιρροή στην κατανομή της αντοχής του [30]. Το PEN παρουσιάζει υψηλότερη θερμοκρασία τήξης καθώς και υψηλότερη τάση κατάρρευσης σε σύγκριση με το PET [31]. Επιπλέον, η διαφάνειά του, το καθιστά επίσης ιδανικό υποψήφιο και για οπτικές εφαρμογές [32]. Παρόλο που το SiO<sub>2</sub> έχει μελετηθεί εκτενώς ως ενεργό υλικό για μνήμες αλλαγής σθένους σε υποστρώματα πυριτίου [33] και εύκαμπτα υποστρώματα [7], δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά ως ενεργό υλικό της CBRAM σε εύκαμπτα υποστρώματα. Ωστόσο, το SiO<sub>2</sub> παρουσιάζει χαμηλότερο συντελεστή Young σε σύγκριση με τα άλλα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενεργά υλικά μνημών. Παράλληλα, το μεγάλο παράθυρο μνήμης αυτής της διάταξης σε συνδυασμό με τις χαμηλές απαιτήσεις παροχής ρεύματος, καθιστούν το SiO<sub>2</sub> ιδανικό υλικό για multibit εφαρμογές. Επιπλέον, το SiO<sub>2</sub> είναι ένα αρκετά καλά μελετημένο υλικό με τυπικές διαδικασίες κατασκευής και εξαιρετικά συμβατό με την κύρια τεχνολογία CMOS. Παρόλο που πολλές εύκαμπτες CBRAM διατάξεις μνήμης έχουν προταθεί, οι διαδικασίες κατασκευής τους είναι είτε περίπλοκες [13], είτε χρησιμοποιούν μη συμβατικά υλικά που αυξάνουν το κόστος της διάταξης [9], ενώ κατά τη διαδικασία κατασκευής τους,

συχνά απαιτείται και βήμα ανόπτησης [8]. Επιπλέον, η επιβολή μηχανικής καταπόνησης μεγαλύτερη από 3% οδηγεί σε σοβαρά προβλήματα λειτουργίας, για την πλειοψηφία των αναφερόμενων διατάξεων [7–13].

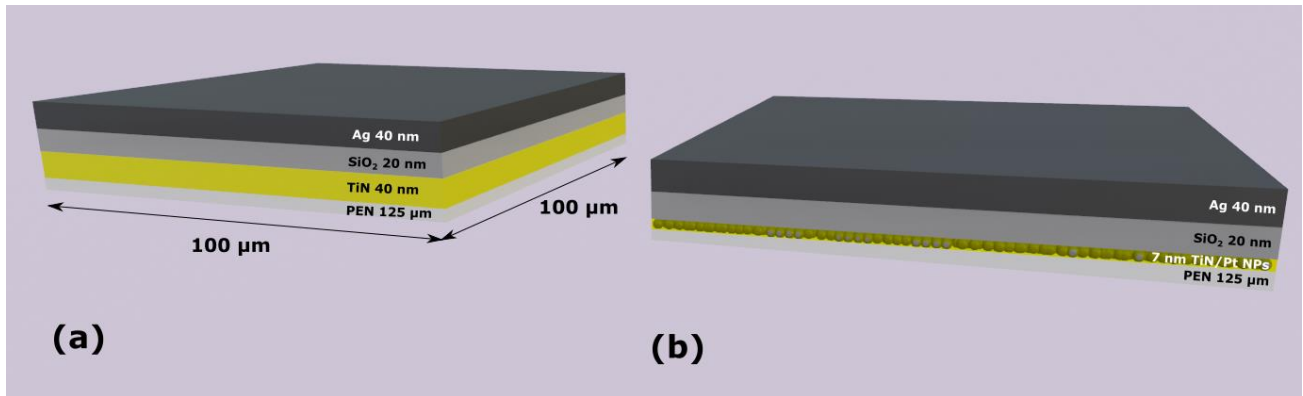
Υπό αυτή την προοπτική, διερευνήσαμε την ενσωμάτωση του SiO<sub>2</sub>, αναπτυσσόμενου σε θερμοκρασία δωματίου και ενσωματωμένου σε CBRAM διάταξη, σε υποστρώματα PEN, καλυμμένα με ένα πυκνό υμένιο από Pt NPs. Κατασκευάσαμε επίσης ένα δείγμα αναφοράς χωρίς Pt NPs, για να αναδείξουμε τον κρίσιμο ρόλο του μεταλλικού στρώματος των NPs ως παράγοντα αντιστάθμισης στο σχηματισμό ρωγμών και τη διάδοσή τους στα λεπτά υμένια από τα οποία αποτελείται η διάταξη.

## 4.2 Κατασκευή των εύκαμπτων μνημών

Η κατασκευή των διατάξεων δειγμάτων αναφοράς επιτεύχθηκε με την εναπόθεση 40 nm TiN σε υποστρώματα PEN, υλικό κατασκευής των BE, ενώ στη συνέχεια για την κατασκευή του ενεργού υλικού της μνήμης, 20 nm SiO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αρνητική λιθογραφία για τη σχηματοποίηση των TE και τέλος πραγματοποιήθηκε εναπόθεση 40 nm Ag, υλικό κατασκευής των TE. Όλες οι εναποθέσεις έγιναν με τη μέθοδο της ιοντοβολής σε θερμοκρασία δωματίου.

Για την κατασκευή των δειγμάτων με τα Pt NPs, έγινε αρχικά εναπόθεση ενός πυκνού στρώματος Pt NPs σε υποστρώματα PEN, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εναπόθεση 7 nm TiN. Η υπόλοιπη διαδικασία που ακολούθηθηκε, για την εναπόθεση του ενεργού υλικού και των TE των διατάξεων, ήταν η ίδια με αυτή των δειγμάτων αναφοράς.

Η γεωμετρία των διατάξεων είναι τετράγωνες επαφές, διαστάσεων 100 x 100 μm, κατασκευασμένες σε κοινό υπόστρωμα.

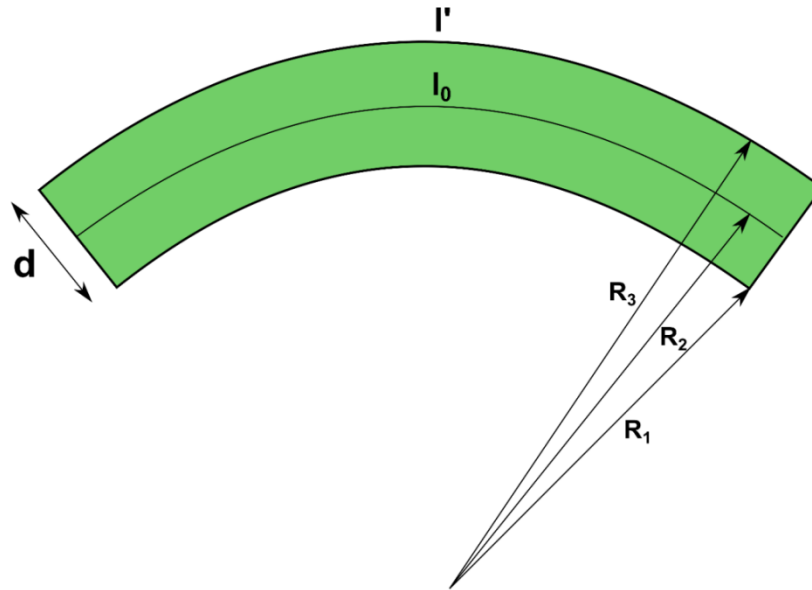


Εικόνα 4.1: (a) Δείγμα αναφοράς και (b) δείγμα με Pt NPs στο BE.

### 4.3 Χαρακτηρισμός των εύκαμπτων διατάξεων μνήμης

#### 4.3.1 Υπολογισμός της καταπόνησης των διατάξεων

Ο υπολογισμός του ποσοστού καταπόνησης των εύκαμπτων υποστρωμάτων, πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την παρακάτω μέθοδο υπολογισμού. Όταν η διάταξη βρίσκεται υπό κάμψη, τότε η άνω επιφάνεια της λόγω εφαρμογής μηχανικής τάσης, θα αυξήσει την απόστασή της από  $l_0$  σε  $l'$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



**Εικόνα 4.2:** Σχηματική αναπαράσταση ενός υποστρώματος υπό κάμψη, πάχους  $d$ .

Η απόσταση  $l_0$  υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$l_0 = R_2 \theta \quad (4.1)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία που αντιστοιχεί στο μήκος του τόξου. Η απόσταση  $l'$  μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$l' = \left( R_2 + \frac{d}{2} \right) \theta \quad (4.2)$$

Ο ορισμός της καταπόνησης, δίνεται από τον τύπο:



$$\varepsilon = \frac{l' - l_0}{l_0} \quad (4.3)$$

Έτσι αντικαθιστώντας στον παραπάνω τύπο τα  $l_0$  και  $l'$  έχουμε:

$$\varepsilon = \frac{d}{2R} \quad (4.4)$$

όπου παίρνουμε τελικά και την τελική εξίσωση υπολογισμού του ποσοστού καταπόνησης των διατάξεων.

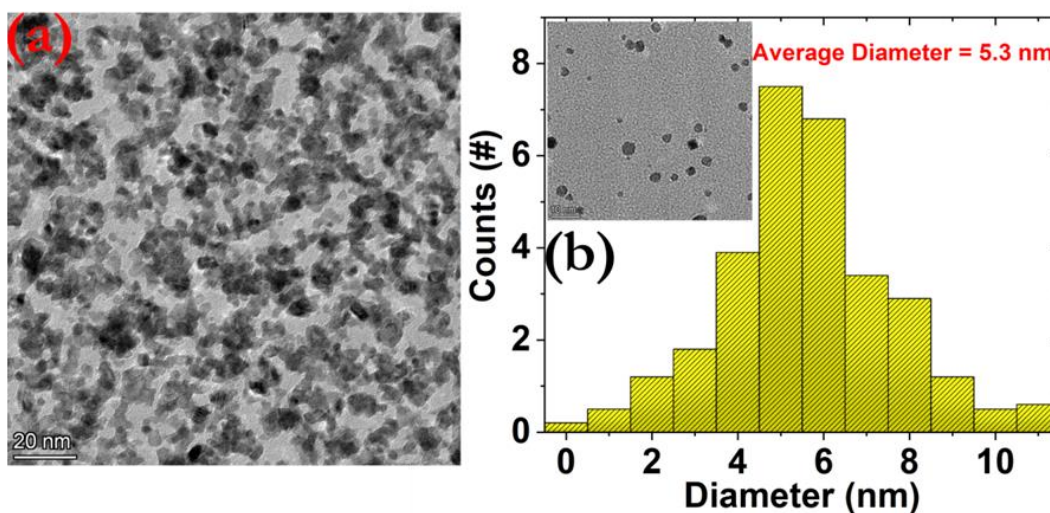
### 4.3.2 Χαρακτηρισμός του στρώματος των Pt NPs

Αρχικά, παρουσιάζουμε των χαρακτηρισμό των Pt NPs που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία εύκαμπτου BE, το οποίο αποτελεί το πρώτο και πολύ σημαντικό βήμα για τη δημιουργία των εύκαμπτων διατάξεών μας ακόμη και σε πολύ υψηλές καταπονήσεις. Για τον χαρακτηρισμό του στρώματος των Pt NPs, Χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διέλευσης (Transmission Electron Microscopy - TEM) και μικροσκοπίας ατομικής δύναμης (Atomic Force Microscopy - AFM).

#### 4.3.2.1 Transmission Electron Microscopy

Τα στρώμα των Pt NPs που χρησιμοποιήθηκε ως το πρώτο αγώγιμο στρώμα των BE των διατάξεων, χαρακτηρίστηκε με την τεχνική της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διέλευσης (Transmission Electron Microscopy - TEM), αφού προηγουμένως έγινε εναπόθεσή του σε TEM grid, χρησιμοποιώντας συνθήκες εναπόθεσης, ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μνημών. Στην Εικόνα 4.3(a),

απεικονίζεται η κάτοψη των Pt NP που εναποτέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου σε TEM grids, ενώ τοποθετήθηκαν κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης μαζί με τις διατάξεις μνήμης που κατασκευάστηκαν. Το σχήμα των NP δεν εμφανίζει κάποια προτιμώμενη μορφολογία και ως εκ τούτου μπορούν να βρεθούν σε σφαιρικά, κυβικά, τετραεδρικά, καθώς και σε άλλα ακανόνιστα σχήματα. Τα εναποτιθέμενα NPs, όπως φαίνεται και από το ιστόγραμμα στην Εικόνα 4.3(b), όπου παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των κατανομών των πλευρικών μεγεθών τους, παρουσιάζουν μέση διάμετρο περίπου 5 nm και αρκετά υψηλή επιφανειακή πυκνότητα.

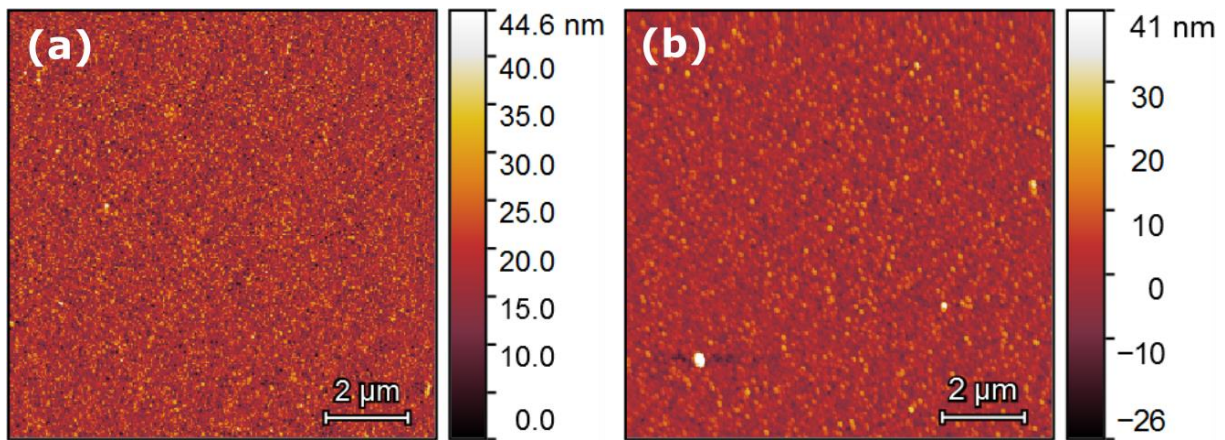


**Εικόνα 4.3:** (a) Εικόνα κάτοψης TEM του πυκνού στρώματος των Pt NPs. Η γραμμή κλίμακας της εικόνας αντιστοιχεί σε 20 nm, (b) ιστόγραμμα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με μικρότερο χρόνο εναπόθεσης προκειμένου να εξαχθεί η αντίστοιχη κατανομή μεγέθους των Pt NPs. Η γραμμή κλίμακας στο ένθετο σχήμα TEM αντιστοιχεί σε 10 nm.

Η επιφανειακή κάλυψη στα πειράματά μας ήταν πάνω από 70% προκειμένου να επιτύχουμε μεταλλική συμπεριφορά και επαρκή αντοχή σε υψηλές τιμές καταπόνησης. Όσον αφορά το μέγεθος των Pt NPs, αυτό μπορεί επίσης να επηρεάσει την απαιτούμενη επιφανειακή πυκνότητα, καθώς επηρεάζει το κατώφλι διήθησης (percolation threshold) όπως δείξαμε πρόσφατα μέσω προσομοιώσεων [34], ωστόσο, δεν είναι κρίσιμος παράγοντας για την πρόκληση της επιθυμητής μεταλλικής απόκρισης.

### 4.3.2.2 Atomic Force Microscopy

Για να διαπιστωθεί η επιφανειακή τραχύτητα του πυκνού στρώματος των Pt NPs στα υποστρώματα PEN, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της μικροσκοπίας ατομικής δύναμης AFM. Τα δείγματα που μετρήθηκαν ήταν ένα υπόστρωμα PEN στο οποίο είχε εναποτεθεί ένα πυκνό στρώμα Pt NPs όμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις διατάξεις που κατασκευάστηκαν καθώς και ένα όμοιο στο οποίο όμως εναποτέθηκαν επίσης 7 nm TiN μετά την εναπόθεση των Pt NPs, όπου ήταν και το τελικό BE που χρησιμοποιήθηκε στις διατάξεις μας.



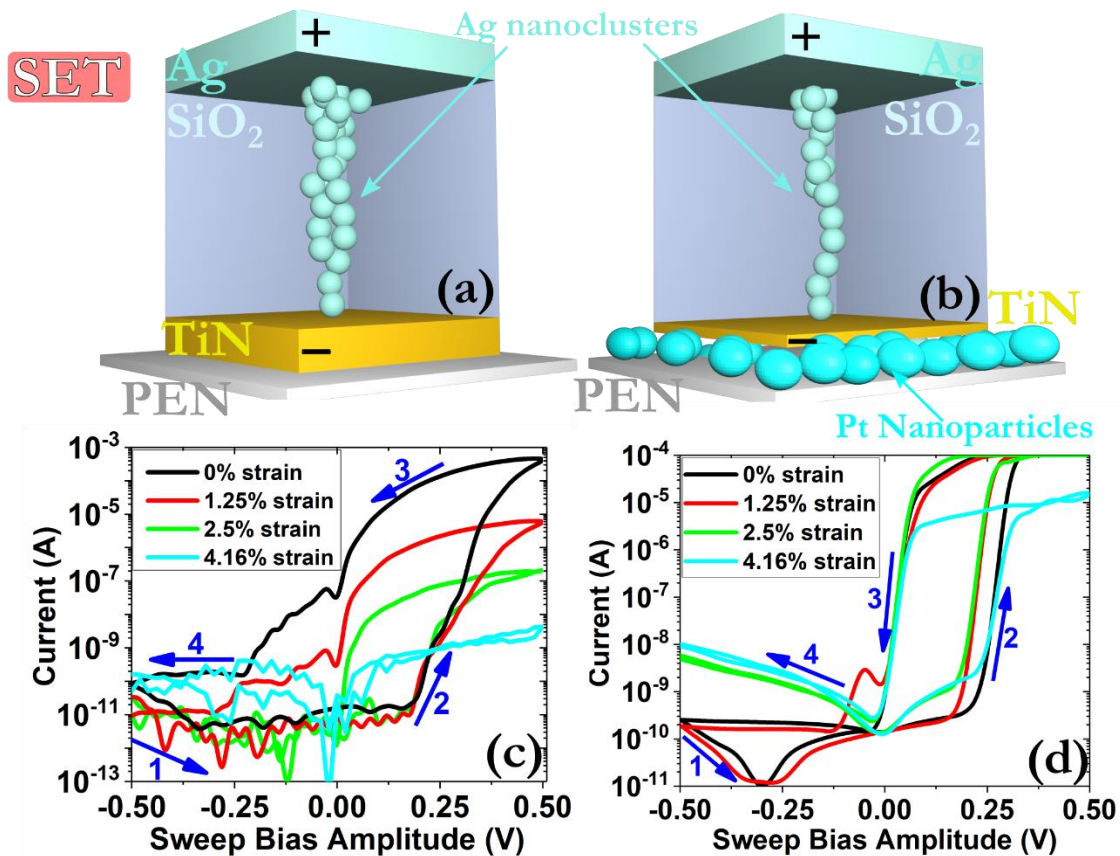
**Εικόνα 4.4:** Εικόνες AFM της επιφάνειας των δειγμάτων (α) Pt NPs/PEN και (β) 7 nm TiN/Pt NPs/PEN

Η μέτρηση αυτή έγινε επειδή, όπως θα δούμε στη συνέχεια, στα δείγματα με τα Pt NPs, παρατηρήθηκε πιο απότομη μετάβαση των διατάξεων από την HRS την LRS σε σχέση με τα δείγματα αναφοράς που για BE είχαν 40 nm TiN. Το RMS roughness του δείγματος στο οποίο είχε μόνο Pt NPs μετρήθηκε στα 4.5 nm, ενώ του δείγματος που είχε και τα 7 nm TiN πάνω από το στρώμα των Pt NPs, μετρήθηκε στα 4.1 nm.

### 4.3.3 Χαρακτηριστικές I – V - Επίδραση της εφαρμοζόμενης τάσης

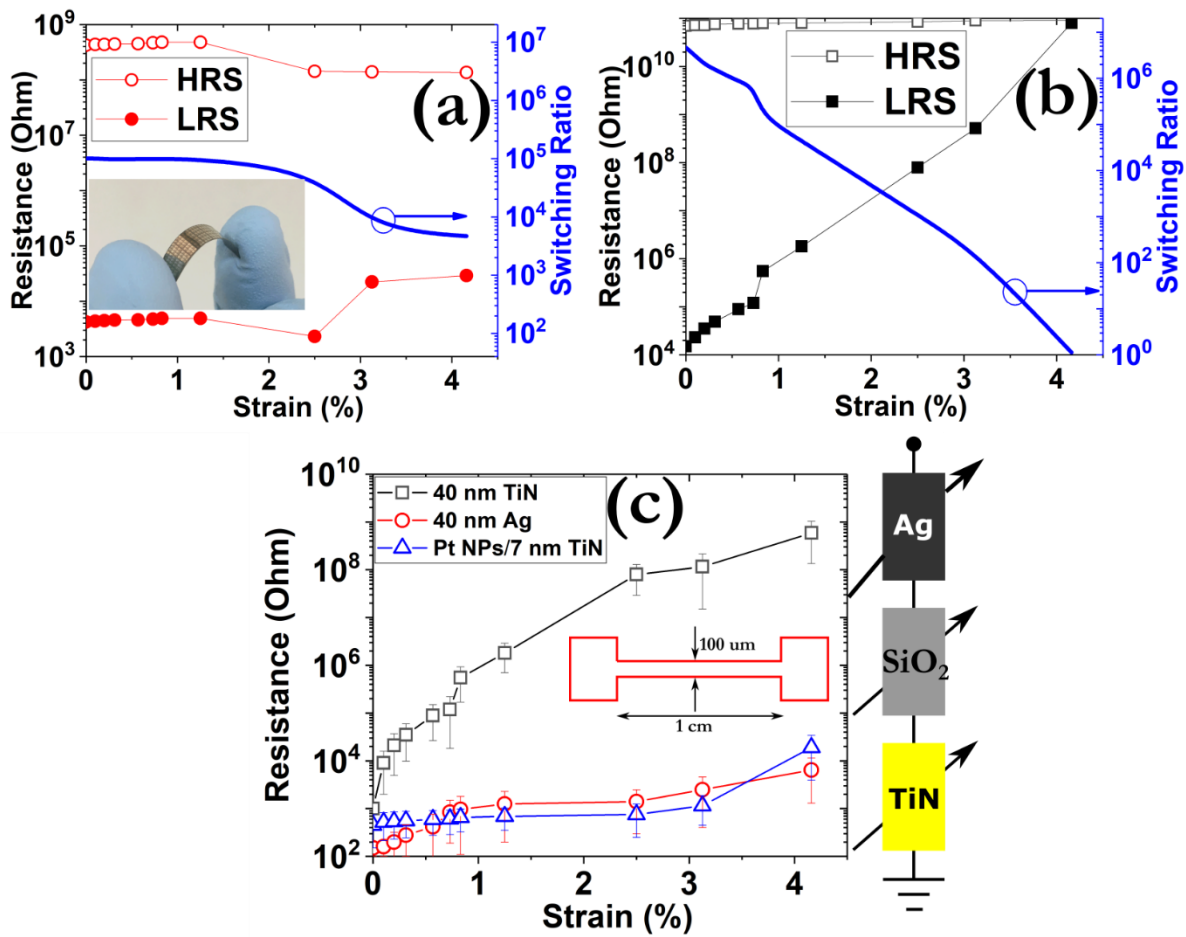
Στην Εικόνα 4.5(a), (b) απεικονίζεται μια σχηματική αναπαράσταση του δείγματος αναφοράς και του δείγματος που περιέχει Pt NPs ως BE, αντίστοιχα. Όλες οι διατάξεις κατασκευάστηκαν σε εμπορικά διαθέσιμα υποστρώματα PEN, πάχους 125  $\mu\text{m}$ . Το λεπτό υμένιο TiN, πάχους 7 nm που εναποτέθηκε στις διατάξεις με τα Pt NPs, χρησιμοποιήθηκε για να διατηρηθεί η διπολική συμπεριφορά των διατάξεων, ενώ εξηγείται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Οι διατάξεις αρχικά χαρακτηρίστηκαν ηλεκτρικά, με την εφαρμογή βρόχων σάρωσης τάσης και μετρήθηκε το συνεχές ρεύμα (DC).

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, τα δείγματα αναφοράς αλλά και τα δείγματα με τα Pt NPs, έχουν κοινό BE. Αυτό σημαίνει ότι σε μια περιοχή, υπάρχουν πολλές επαφές TE που μετρήθηκαν, οι οποίες είχαν κοινό BE.



**Εικόνα 4.5:** Σχηματική αναπαράσταση (a) του δείγματος αναφοράς και (b) του δείγματος με τα Pt NPs. Η πραγματική διάμετρος του CF στο BE έχει σχεδιαστεί η ίδια για τις δύο διαμορφώσεις συσκευών, καθώς οι μέγιστες τιμές ρεύματος είναι συγκρίσιμες. Η υπόθεση εδώ είναι ότι τα Pt NPs μπορούν να προκαλέσουν το σχηματισμό CF σε συγκεκριμένες περιοχές και όχι παντού μέσα στον ενεργό πυρήνα της συσκευής. Για το λόγο αυτό, το κύριο σώμα του CF απεικονίζεται ελαφρώς μικρότερο σε αντίθεση με τη δομή της συσκευής αναφοράς. Καμπύλες υστέρησης I-V για διάφορες εξωτερικές μηχανικές καταπονήσεις που κυμαίνονται από 0% έως 4.16% (c) Ag/SiO<sub>2</sub>/TiN (40 nm)/PEN και (d) Ag/SiO<sub>2</sub>/TiN (7 nm)/Pt NPs/PEN συσκευές μνήμης. Τα βέλη στα γραφήματα υποδηλώνουν την κατεύθυνση μεταγωγής ενώ επιλέχθηκε ρυθμός σάρωσης 50 mV/s κατά τη διάρκεια των διαδοχικών διαδικασιών σάρωσης. Παρόμοια μοτίβα μεταγωγής καταγράφηκαν ξεκινώντας τις σαρώσεις από 0 V σε  $|V_{\max}|$ . Για το δείγμα με τα Pt NPs επιβλήθηκε σταθερό  $I_{cc} = 10^{-4}$  A κατά τη λειτουργία της συσκευής.

Στην Εικόνα 4.5(c), (d), παρουσιάζονται οι καμπύλες I-V για βρόχους σάρωσης τάσης 500 mV για τις μη καταπονημένες συσκευές καθώς και για συσκευές που καταπονήθηκαν 500 φορές με θλιπτική τάση, για ακτίνα κάμψης 5, 2.5 και 1.5 mm, που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 1.25% , 2.5% και 4.16%, αντίστοιχα. Παρόμοιες αποκρίσεις καταγράφηκαν και κατά την εφαρμογή των διαδικασιών εφελκυστικής τάσης. Αρκετά πειράματα πραγματοποιήθηκαν επίσης για ένα ευρύ φάσμα παραμορφώσεων (Εικόνα 4.6(a)) προκειμένου να επιβεβαιωθεί η γραμμικότητα της απόκρισης των διατάξεων στις ενδιάμεσες παραμορφώσεις.

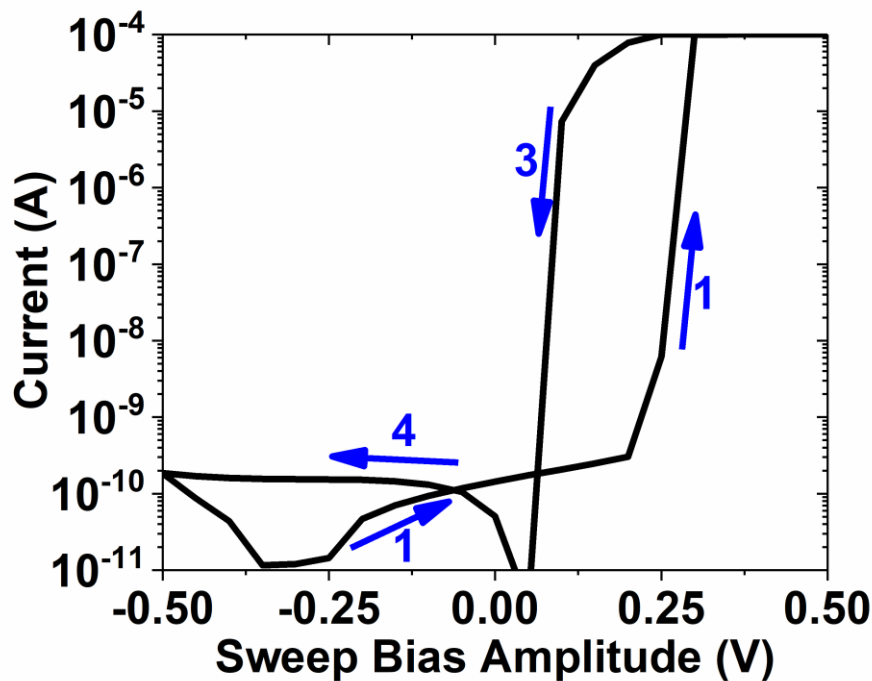


**Εικόνα 4.6:** Κατανομή των καταστάσεων HRS και LRS (αριστερός άξονας) καθώς και του λόγου τους (δεξιός άξονας) ως συνάρτηση του μεγέθους της εφαρμοζόμενης μηχανικής καταπόνησης για τις διατάξεις (a) με τα Pt NPs και (b) CBRAM αναφοράς. Οι τιμές εξήχθησαν σε τάση ανάγνωσης 100 mV. Τα ανοιχτά σύμβολα αντιστοιχούν στο HRS και τα συμπληρωμένα στο LRS, (c) Κατανομή της αντίστασης των ηλεκτροδίων ως συνάρτηση της εφαρμοσμένης μηχανικής καταπόνησης και σχηματική αναπαράσταση της έννοιας του διαιρέτη τάσης.

Είναι πολύ ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε τα εντελώς διαφορετικά μοτίβα εναλλαγής τη αντίστασης των δύο δειγμάτων. Το δείγμα με τα Pt NPs (Εικόνα 4.5(d)) παρουσιάζει αρκετά απότομες μεταβάσεις από την κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS) στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS), με μια αρκετά μικρή κλίση μετάβασης  $<1$  mV/dec(A). Η προέλευση αυτού του φαινομένου είναι υπό διερεύνηση, αλλά πιστεύουμε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του στρώματος των NPs ( $\sim 4$  nm) θα μπορούσε να οδηγήσει στη δημιουργία αιχμηρών άκρων, που μπορούν τοπικά να ενισχύσουν το ηλεκτρικό πεδίο [35]. Επιπλέον, η μειωμένη θερμική αγωγιμότητα των Pt NPs θα μπορούσε να επηρεάσει τις διαδικασίες τοπικής

απαγωγής θερμότητας και να επιταχύνει τη μετανάστευση των ιόντων Ag. Πιο συγκεκριμένα, εάν η διαμόρφωση του BE δεν μπορεί να διαχέει αποτελεσματικά την παραγόμενη θερμότητα Joule, θα αναπτυχθεί μια ισχυρή διαβάθμιση θερμοκρασίας εντός του ενεργού πυρήνα της συσκευής που θα μπορούσε να επηρεάσει άμεσα τις ροές θερμικής διάχυσης και ταχύτητας μετατόπισης [36].

Τα αντίστοιχα μοτίβα υστέρησης, των δειγμάτων που περιέχουν μόνο Pt NPs σαν BE, δείχνουν μια λειτουργία μεταγωγής κατωφλίου (threshold switching), η οποία δείχνει ότι η τιμή θερμικής αγωγιμότητας του BE επηρεάζει σημαντικά τη συνολική συμπεριφορά της μνήμης (Εικόνα 4.7).



**Εικόνα 4.7:** Καμπύλη υστέρησης I-V του δείγματος που περιέχει μόνο Pt NPs ως BE.

Δεδομένου ότι το δείγμα αναφοράς, έχει διπολική συμπεριφορά υπό την επιβολή ενός ορίου ρεύματος υψηλής συμμόρφωσης ( $I_{cc}$ ) [36], κατασκευάστηκαν διατάξεις με ένα λεπτό στρώμα 7 nm TiN ακριβώς πάνω από το πυκνό στρώμα των Pt NPs, για να αλλάξουμε τη λειτουργία του δείγματος με τα Pt NPs, σε διπολική λειτουργία. Το δείγμα αναφοράς (Εικόνα 4.5(a)) παρουσιάζει πιο ομαλές μεταβάσεις (κλίση μετάβασης  $\sim 20$  mV/dec(A)), ενώ το παράθυρο μνήμης του μειώνεται δραματικά μετά από την εφαρμογή στη διάταξη, μηχανικών καταπονήσεων (Εικόνα 4.5(c)).

Στο δείγμα με τα 7nm TiN/Pt NPs ως BE, η μηχανική καταπόνηση που εφαρμόζεται σε αυτό, δεν επηρεάζει σημαντικά το παράθυρο μνήμης του. Πιο συγκεκριμένα, όπως διαπιστώνεται και από την Εικόνα 4.6(a), στο δείγμα με τα Pt NP, μετά την εφαρμογή της υψηλής καταπόνησης του 4.16%, το παράθυρο μνήμης του μειώνεται κατά περίπου 15% ενώ η διάταξη διατηρεί ακόμα ένα παράθυρο μνήμης 4 τάξεων μεγέθους. Αντίθετα, το παράθυρο μνήμης του δείγματος αναφοράς (40 nm TiN ως BE), μέχρι την καταπόνηση 3.12% διατηρεί ένα παράθυρο μνήμης 1.5 τάξεων, ενώ στη συνέχεια και αυξάνοντας το ποσοστό καταπόνησης, η διάταξη δεν παρουσιάζει κάποιο παράθυρο μνήμης, έχοντας βραχυκυκλώσει και άρα καταστραφεί (Εικόνα 4.6(b)).

Όλες οι διατάξεις είναι διπολικής λειτουργίας, ενώ για το δείγμα με τα Pt NPs, η επιβολή ενός ορίου  $I_{cc}$  των 100  $\mu$ A είναι απαραίτητο για να αποφευχθεί η πλήρης κατάρρευση του διηλεκτρικού. Δεν απαιτείται  $I_{cc}$  για το δείγμα αναφοράς, λόγω των ομαλότερων μεταβάσεων που καταγράφονται. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής διαδοχικών τάσεων στο δείγμα αναφοράς, παρατηρήθηκε συμπεριφορά αυτό-συμμόρφωσης (self-compliance) σε συνδυασμό με ιδιότητες αυτό-διόρθωσης (self-rectification). Το πρώτο φαινόμενο, αποδίδεται στον σχηματισμό μικρότερων αγώγιμων νημάτων (CF) ως προς την αποτελεσματική κατανομή διαμέτρου τους [37], ενώ το δεύτερο, προέρχεται από την ύπαρξη truncated-cone CFs [36].

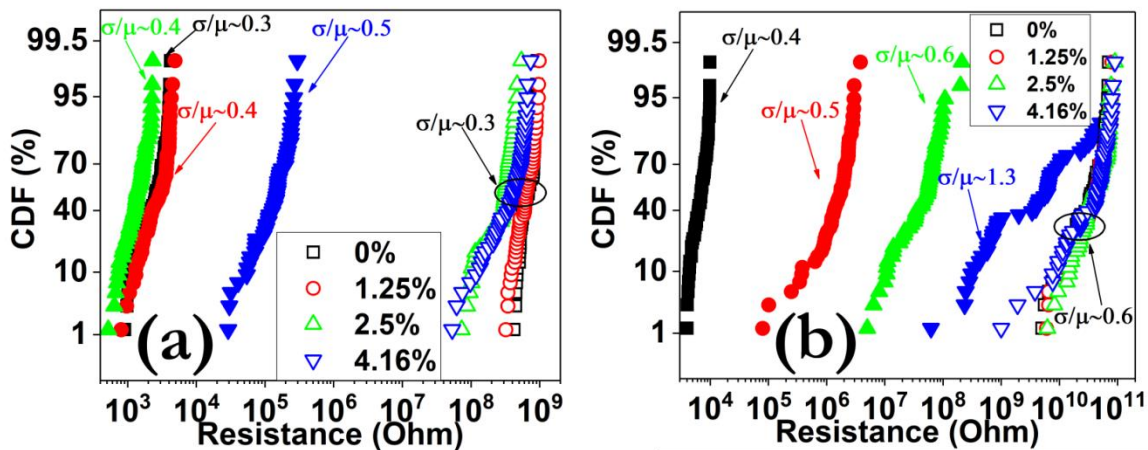
Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε την εκδήλωση συμπεριφοράς αυτό-συμμόρφωσης και για το δείγμα με τα Pt NPs μετά την εφαρμογή καταπόνησης 4.16%. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί, ότι δεν εφαρμόστηκε καμία διαδικασία ηλεκτροδιαμόρφωσης, γεγονός που κάνει ελκυστικές τις συγκεκριμένες διατάξεις, λόγω της εύκολης ολοκλήρωσής τους σε περιφερειακά κυκλώματα. Το γεγονός ότι οι διατάξεις δεν χρειάζονται ηλεκτροδιαμόρφωση, συνδέεται ίσως με το σχηματισμό προτιμώμενων μονοπατιών για την κίνηση των ιόντων αργύρου. Οι υψηλές πιέσεις κατά την διαδικασία κατασκευής του SiO<sub>2</sub> με την τεχνική της ιοντοβολής, καθώς και η υψηλή ισχύς κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του, έχει ως αποτέλεσμα μια δομή που μοιάζει με κοκκώδη [38]. Επίσης, έχει επιβεβαιωθεί ότι το RF-sputtered SiO<sub>2</sub> που αναπτύσσεται σε τέτοιες πιέσεις, έχει τελικά χαμηλή πυκνότητα μάζας και πορώδη δομή [38]. Σε υψηλή πίεση εργασίας, οι συγκρούσεις ατόμων Si και O με τα γύρω άτομα αδρανούς αερίου αυξάνονται και επομένως εμφανίζεται ένα αξιοσημείωτο φαινόμενο σιέδασης, με αποτέλεσμα την τυχαία κατανομή τους στο υπόστρωμα [39]. Η διάχυση μεταλλικών ιόντων σε αυτά τα υμένα ενισχύεται με μείωση του αντίστοιχου φραγμού διάχυσης [40], [41]. Επιπλέον, από τις καμπύλες I-V, είναι εμφανές ότι το V<sub>SET</sub> λαμβάνει χώρα γύρω στα 250 mV για όλα τα δείγματα ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τις εφαρμοσμένες μηχανικές καταπονήσεις.



Προκειμένου να εξετάσουμε την επίδραση της μηχανικής καταπόνησης στην αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιήσαμε συγκεκριμένες γεωμετρίες ηλεκτροδίων και κατασκευάσαμε τρία διαφορετικά δείγματα με πάχη ισοδύναμα εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν στις μνήμες που κατασκευάστηκαν.

Το ηλεκτρόδιο των 40 nm TiN, παρουσιάζει ταχύτερη αύξηση των τιμών αντίστασής του σε σύγκριση με αυτό των 40 nm Ag. Λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουν το ίδιο πάχος, αυτή η συμπεριφορά αναμένεται, καθώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το μέτρο Young του TiN είναι υψηλότερο σε σύγκριση με αυτό του Ag [42], [43]. Έτσι, στο TiN αρχίζουν να δημιουργούνται ρωγμές σε μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με το Ag, το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 4.6(c). Όσον αφορά το ηλεκτρόδιο με τα Pt NPs, είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι μέχρι την παραμόρφωση του 3.12%, δεν παρατηρείται αύξηση της αντίστασής του και μόνο για μεγαλύτερα ποσοστά καταπόνησεων σημειώνεται αύξηση.

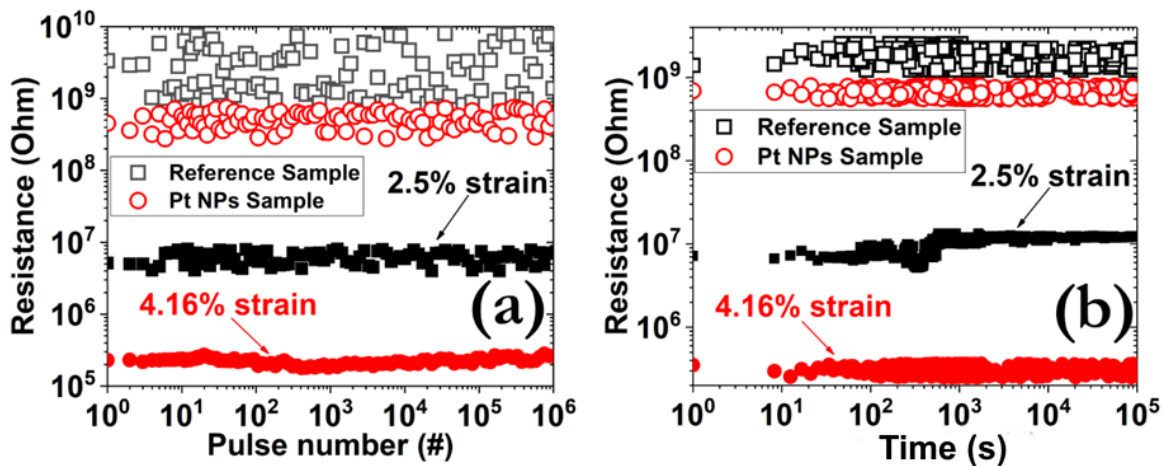
Η κατανομή των τιμών της αντίστασης ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης καταπόνησης σε όλα τα μεταλλικά υμένα, επηρεάζει αποφασιστικά τις τιμές του LRS αφού τα ραγισμένα ηλεκτρόδια αυξάνουν την αντίσταση σειράς της συσκευής CBRAM, περιορίζοντας έτσι τη ροή του ρεύματος. Αυτό το αποτέλεσμα θα μπορούσε να δικαιολογήσει τη συμπεριφορά αυτό-συνμόρφωσης που παρατηρήθηκε για το δείγμα αναφοράς καθώς και για το δείγμα με τα Pt NPs, μετά από την εφαρμογή της υψηλής καταπόνησης 4.16%. Επιπλέον, η παρουσία των Pt NPs διευκολύνει τη λειτουργία της συσκευής υπό την εφαρμογή υψηλών μηχανικών καταπονήσεων, καθώς μπορούν να αντέξουν την εξωτερική καταπόνηση χωρίς να επηρεάσουν την ακεραιότητα ολόκληρης της διάταξης. Αυτή η συμπεριφορά αποκαλύπτεται επίσης κατά τη διάρκεια διαδοχικών κύκλων λειτουργίας (Εικόνα 4.8).



**Εικόνα 4.8:** Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής των αποκρίσεων LRS και HRS κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας DC ρεύματος για τις διατάξεις (a) με τα Pt NPs και (b) CBRAM αναφοράς. Όλες οι συσκευές καταπονήθηκαν με 500 διαδοχικούς κύκλους μηχανικής καταπόνησης. Οι τιμές εξήχθησαν σε τάση ανάγνωσης 100 mV. Τα ανοιχτά σύμβολα αντιστοιχούν στο HRS και τα συμπληρωμένα στο LRS.

#### 4.3.4 Απόκριση των διατάξεων σε παλμούς

Δύο βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τις NV μνήμες, είναι η αντοχή τους σε παλμούς (endurance) και η ικανότητά τους διατήρησης του φορτίου (retention) και συνεπώς της πληροφορίας. Κατά την εφαρμογή τετραγωνικών παλμών πλάτους 1.5 V και εύρους 100 ns, το δείγμα αναφοράς εμφάνισε πιο σταθερή συμπεριφορά για καταπόνηση έως και 2.5%, ενώ για μεγαλύτερες καταπονήσεις, το παράθυρο μνήμης ήταν κάτω από μια τάξη μεγέθους. Το δείγμα με τα Pt NPs διαθέτει παράθυρο μνήμης τουλάχιστον δύο τάξεων μεγέθους, ακόμη και μετά την εφαρμογή καταπόνησης 4.16%. Σε κάθε περίπτωση, αν και καταγράφονται ορισμένες διακυμάνσεις, το παράθυρο μνήμης διατηρείται μετά την εφαρμογή  $10^6$  διαδοχικών κύκλων SET/RESET. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για την διατήρηση φορτίου, όπου δεν σημειώθηκαν σημαντικές αλλαγές κατά τη διάρκεια  $10^5$  δευτερολέπτων σε θερμοκρασία δωματίου, υποδεικνύοντας τη διακριτή φύση των δύο καταστάσεων αντίστασης. Τα αποτελέσματα για τα δύο δείγματα φαίνονται στην Εικόνα 4.9.

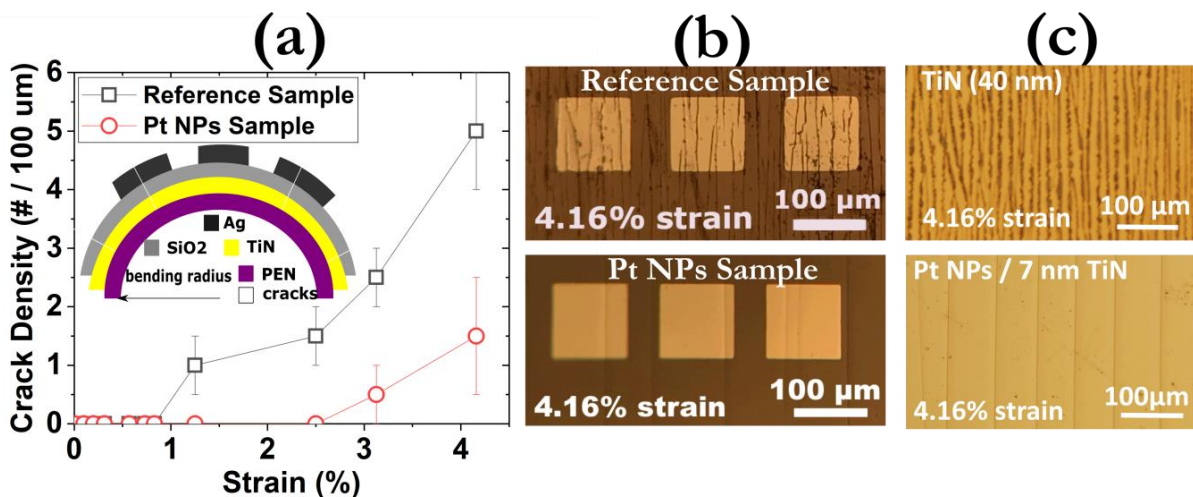


**Εικόνα 4.9:** (α) Μετρήσεις παλμικής αντοχής υπό την εφαρμογή τετραγωνικών παλμών με πλάτος  $\pm 1.5$  V και πλάτος 100 ns και για τα δύο δείγματα και (β) μετρήσεις διατήρησης του φορτίου (παλμός τάσης

ανάγνωσης 100 mV/100 ms). Τα ανοιχτά σύμβολα αντιστοιχούν στο HRS και τα συμπληρωμένα στο LRS. Στο δείγμα με τα Pt NPs, η μέτρηση πραγματοποιήθηκε μετά την εφαρμογή μηχανικής καταπόνησης 4,16%, ενώ για στο δείγμα αναφοράς επιβλήθηκε χαμηλότερη τάση 2.5% προκειμένου να επιτευχθεί πιο σταθερή απόδοση μνήμης.

### 4.3.5 Σχηματισμός των ρωγμών

Είναι εμφανές σύμφωνα με την Εικόνα 4.6(c), ότι η εφαρμοζόμενη καταπόνηση έχει μεγαλύτερη επίδραση στο TiN BE παρά στο Ag TE, ενώ το Pt NP BE δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά. Έτσι, πιστεύουμε ότι σε χαμηλές εφαρμοζόμενες παραμορφώσεις (έως 2.5%), το TiN είναι το πρώτο υμένιο εκ των υλικών που αποτελούν τη διάταξη μνήμης, που ραγίζει, λόγω του υψηλότερου μέτρου Young που έχει (~300 GPa) [42] και που τελικά καθορίζει ολόκληρη τη συμπεριφορά της διάταξης. Για μεγαλύτερες καταπονήσεις, ο συνδυασμός της συμπεριφοράς του SiO<sub>2</sub> και του Ag TE, επηρεάζει επίσης σημαντικά το παραθύρου μνήμης της διάταξης. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο συντελεστής του Young του SiO<sub>2</sub> (~73 GPa) [43] είναι συγκρίσιμος με τον αντίστοιχο συντελεστή Ag (~65 GPa) [44], το οποίο υποδεικνύει ότι τα δύο υλικά παρουσιάζουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το SiO<sub>2</sub> παρουσιάζει μικρότερη τιμή μέτρου Young σε σύγκριση με άλλα υλικά, τα οποία έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία ως ενεργά υλικά εντός εύκαμπτων διατάξεων μνήμης και συγκεκριμένα, TiO<sub>2</sub> (~160 GPa) [45], TaO<sub>x</sub> (~133 GPa) [46], HfO<sub>x</sub> (~130 GPa) [47]. Αυτή η παράμετρος, κάνει το SiO<sub>2</sub> αρκετά ελκυστικό για την ανάπτυξη ευέλικτων ηλεκτρονικών συσκευών. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφέρουμε ότι για καταπονήσεις μεγαλύτερες του 4.16%, το ίδιο το υπόστρωμα PEN, αρχίζει να εμφανίζει ρωγμές. Η Εικόνα 4.10(a), απεικονίζει την κατανομή πυκνότητας ρωγμών και για τα δύο δείγματα υπό την εφαρμογή μιας ποικιλίας μηχανικών καταπονήσεων, ενώ στην Εικόνα 4.10(b), (c) παρουσιάζουμε εικόνες κάτοψης των TE και των BEs, αντίστοιχα, μετά την εφαρμογή μηχανικής καταπόνησης 4.16%.



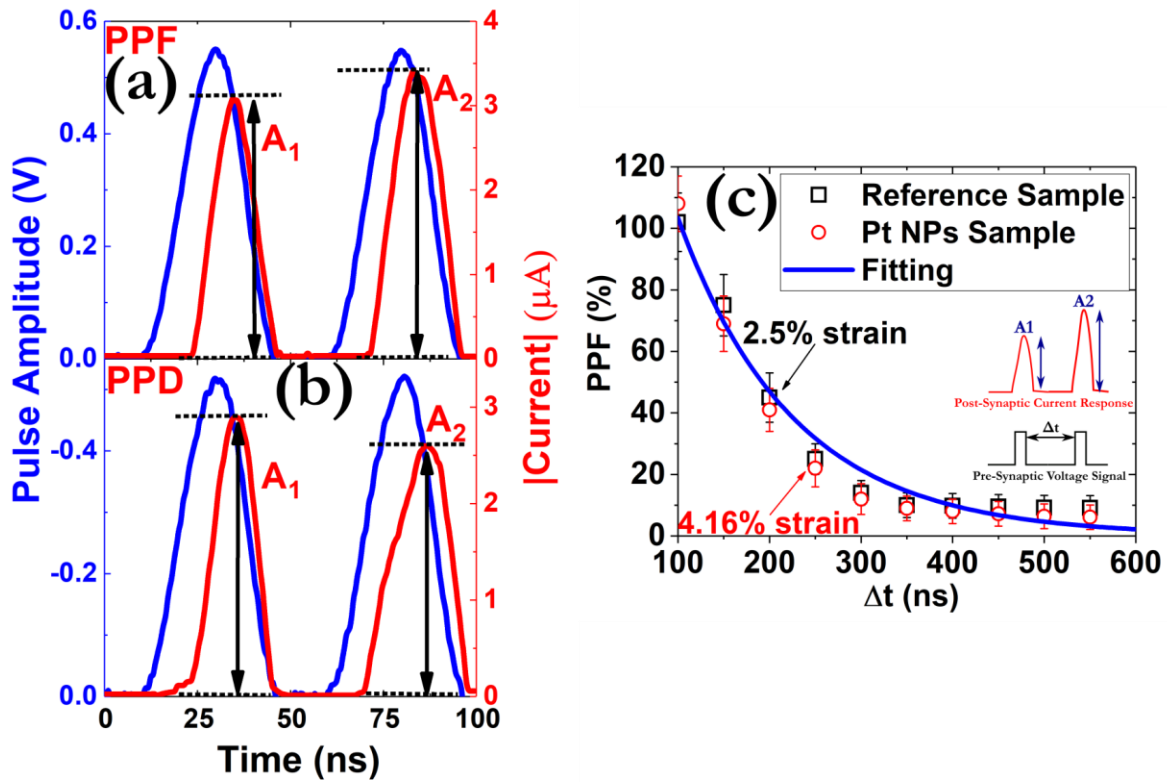
**Εικόνα 4.10:** (α) Κατανομή της πυκνότητας ρωγμών από την εφαρμοζόμενη μηχανική καταπόνηση στο δείγμα αναφοράς και στο δείγμα με τα Pt NPs, (β) εικόνες κάτοψης από οπτικό μικροσκόπιο του δείγματος αναφοράς υπό την εφαρμογή μηχανικής καταπόνησης 4.16%, καθώς και του δείγματος με τα Pt NP μετά από μηχανική καταπόνηση 4.16%, (γ) εικόνες κάτοψης από οπτικό μικροσκόπιο ενός TiN (πάχους 40 nm) σε υπόστρωμα PEN και ενός λεπτότερου υμενίου TiN (πάχους 7 nm) που έχει εναποτεθεί σε Pt NPs/PEN.

Είναι προφανές ότι ο αριθμός των ρωγμών μειώνεται όταν υπάρχουν Pt NPs και το χειρότερο σενάριο είναι η εμφάνιση δύο ρωγμών ανά τετραγωνικό επιφάνεια πλευρικής διάστασης 100  $\mu\text{m}$ , σε αντίθεση με το δείγμα αναφοράς όπου υπάρχουν τουλάχιστον πέντε ρωγμές ανά επιφάνεια. Έτσι, η παρουσία Pt NPs καθορίζει αποφασιστικά τις διαδικασίες σχηματισμού και διάδοσης ρωγμών εντός της διάταξης μνήμης και κατά συνέπεια διευκολύνει τη λειτουργία της συσκευής ακόμη και μετά την εφαρμογή μεγάλων καταπονήσεων.

### 4.3.6 Χαρακτηριστικά Τεχνητών Συναπτικών Ιδιοτήτων

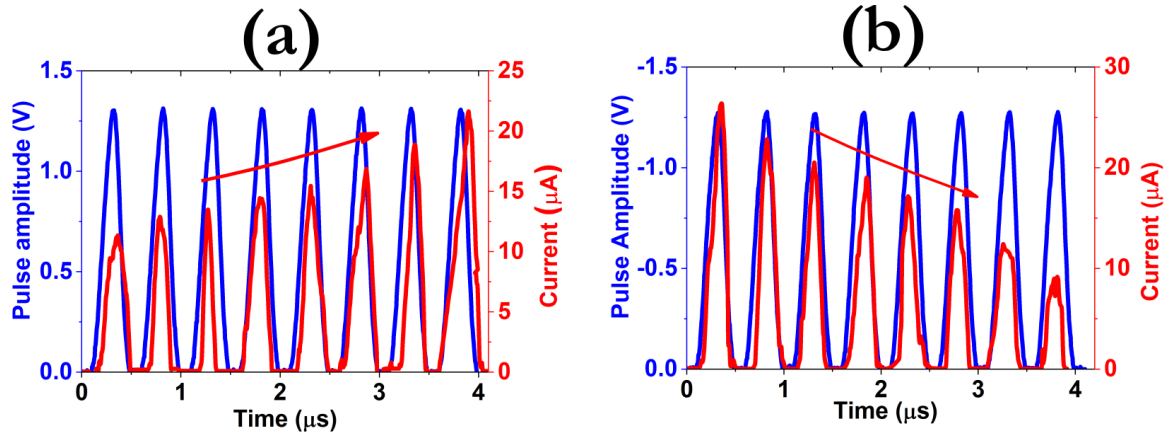
#### 4.3.6.1 Paired-Pulsed Facilitation και Paired-Pulse Depression Effects

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των συσκευών, είναι ότι παρόμοια με τις βιολογικές συνάψεις, έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τις τιμές αγωγιμότητάς τους με την εφαρμογή πανομοιότυπων ερεθισμάτων. Οι αντίστοιχες ιδιότητες συναπτικής ενδυνάμωσης/αποδυνάμωσης, είναι αρκετά σημαντικές βραχυπρόθεσμες επιδράσεις που ειδηλώνονται μέσα σε ένα εύρος χιλιοστών του δευτερολέπτου. Έτσι, εξετάσαμε την κατανομή της ενδυνάμωσης και αποδυνάμωσης μέσω σύζευξης παλμών, PPF και PPD αντίστοιχα, οι οποίες διαδραματίζουν βασικό ρόλο σε ένα νευρωνικό δίκτυο, καθώς ανταποκρίνονται γρήγορα στα σήματα εισόδου και εκτελούν τις διαδικασίες συναπτικής προσαρμογής και φιλτραρίσματος [48]. Η υποκείμενη ιδέα πίσω από τα αποτελέσματα PPF/PPD είναι ότι η απόκριση μετασυναπτικού σήματος, γίνεται μεγαλύτερη/μικρότερη κατά την εφαρμογή δύο διαδοχικών ερεθισμάτων με εσωτερικό χρόνο μικρότερο από το relaxation time του CF. Το αποτέλεσμα για το δείγμα αναφοράς παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11(a), (b) μετά την εφαρμογή 2.5% μηχανικής καταπόνησης, ενώ παρόμοιες αποκρίσεις καταγράφηκαν και για το δείγμα με τα Pt NPs υπό υψηλότερα φορτία παραμόρφωσης (Εικόνα 4.11(c)).



**Εικόνα 4.11:** (a) Ενδυνάμωση PPF και (b) αποδυνάμωση PPD μέσω δύο διαδοχικών παλμών 0,5 και -0,5 V/100 ns, αντίστοιχα. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από το δείγμα αναφοράς που υποβλήθηκε σε 500 κύκλους μηχανικής παραμόρφωσης με παραμόρφωση 2.5%. (c) Κατανομή των φαινομένων PPF ως συνάρτηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ των προσυναπτικών παλμών. Δοκιμάστηκαν 10 διαφορετικά διαστήματα παλμών εφαρμόζοντας δύο διαδοχικούς παλμούς 0,5 V/100 ns. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί τόσο από το δείγμα με τα Pt NPs όσο και από το δείγμα αναφοράς, με την εφαρμογή 500 κύκλων μηχανικών παραμορφώσεων 4.16% και 2.5%, αντίστοιχα. Το ένθετο απεικονίζει μια σχηματική αναπαράσταση του την ακολουθία παλμών και την απόκριση μεταυναπτικού ρεύματος κατά την εφαρμογή του φαινομένου PPF.

Παρόμοιες αποκρίσεις ενδυνάμωσης και αποδυνάμωσης παρατηρήθηκαν επίσης όταν εφαρμόστηκε μια σειρά οκτώ θετικών/αρνητικών παλμών στο δείγμα αναφοράς στο οποίο είχαν προηγηθεί 500 κύκλοι καταπόνησης 2.5% (Εικόνα 4.12).



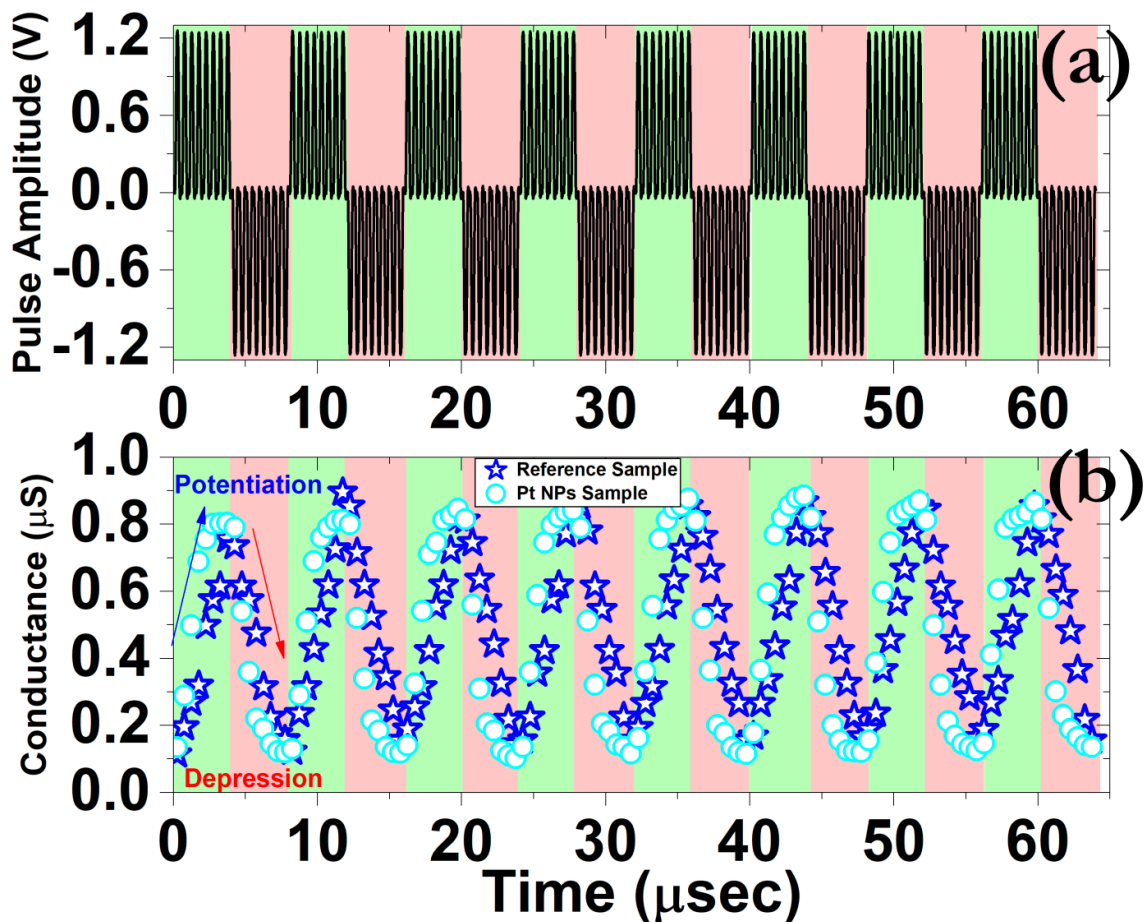
**Εικόνα 4.12:** Επίδειξη συναπτικών αποκρίσεων (α) ενδυνάμωσης και (β) αποδυνάμωσης εφαρμόζοντας ένα σύνολο οκτώ διαδοχικών παλμών  $\pm 1.2 \text{ V} / 100 \text{ ns}$ , αντίστοιχα. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από δείγμα αναφοράς που υποβλήθηκε σε 500 κύκλους μηχανικής καταπόνησης 2.5%.

Μια ενδιαφέρουσα πτυχή του φαινομένου PPF αναδύεται κατά τη διερεύνηση της επίδρασης της προσυναπτικής τάσης διάρκειας ( $\Delta t$ ) στην κατανομή PPF ( $A2/A1$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.11(c), όπου μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι η αναλογία ενδυνάμωσης πέφτει γρήγορα καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών παλμών [49]. Η κατανομή της διαδικασίας ενδυνάμωσης μπορεί να προσομοιωθεί καλά από την ακόλουθη έκφραση [50]:

$$PPF = C_1 e^{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} + C_2 e^{\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (4.5)$$

όπου  $C_1$  και  $C_2$  είναι οι σταθερές προσαρμογής και  $\tau_1$  και  $\tau_2$  είναι οι αντίστοιχες χρονικές κλίμακες που δηλώνουν την εξέλιξη αυτού του φαινομένου. Από την ανάλυσή μας, έχουμε εξαγάγει 80 και 100 ns για τα χαρακτηριστικά  $\tau_1$  και  $\tau_2$ , αντίστοιχα, τα οποία είναι συγκρίσιμα με τα relaxation time των CFs που έχουμε μετρήσει σε προηγούμενη εργασία μας [36]. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι η σταθερότητα του CF όχι μόνο επηρεάζει τις ιδιότητες της μνήμης, αλλά παρέχει επίσης δυνατότητα για μίμηση ενός ευρέος φάσματος βιολογικών συναπτικών ιδιοτήτων. Έχοντας υπόψη ότι η διαδικασία τροποποίησης συναπτικού βάρους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή των διαδικασιών ενδυνάμωσης και

αποδυνάμωσης, ένας υψηλός βαθμός γραμμικότητας μπορεί να μειώσει δραματικά την διαδικασία της εκμάθησης και της απόδοσης, προς την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANNs) [51]. Για το λόγο αυτό, υποβάλαμε τις καταπονημένες συσκευές μας σε 128 διαδοχικούς παλμούς προκειμένου να αξιολογήσουμε την απόκρισή τους και τη γραμμικότητα των μετρούμενων χαρακτηριστικών αγωγιμότητας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.13 δεν αποκαλύπτουν καμία υποβάθμιση στην διαδικασία της αγωγιμότητας και για τα δύο δείγματα. Ωστόσο, οι αποκρίσεις των δύο δειγμάτων όσον αφορά τη γραμμικότητα του μετασυναπτικού ρεύματος είναι αρκετά διαφορετικές, καθώς το δείγμα αναφοράς παρουσιάζει συμπεριφορά αναλογικού τύπου με διακριτές καταστάσεις αγωγιμότητας [52], ενώ το δείγμα με τα Pt NPs οδηγείται στον κορεσμό γρήγορα μετά την εφαρμογή του πέμπτου παλμού σε κάθε κύκλο, γεγονός που θα μπορούσε να υποβαθμίσει την ενεργειακή απόδοση ενός ANN [53].



**Εικόνα 4.13:** (a) Προφίλ των προσυναπτικών σημάτων τάσης κατά την εφαρμογή 128 παλμών με  $\pm 1,2$  V, πλάτους 100 ns και χρόνο καθυστέρησης 100 ns. Το πρόσημο της αλληλουχίας παλμών αντιστρέφεται

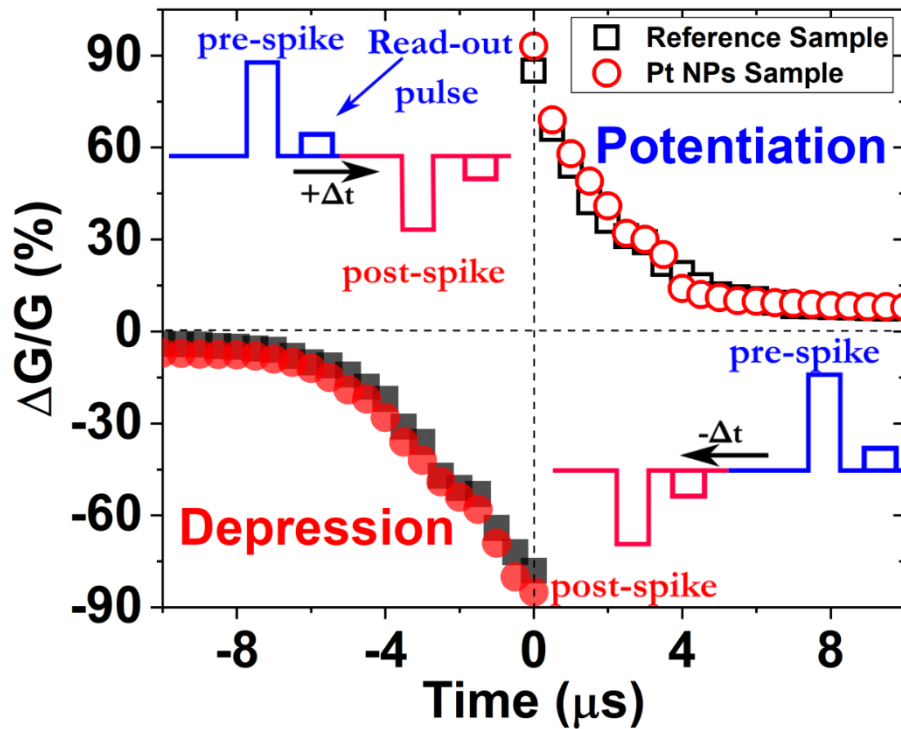


μετά την εφαρμογή οκτώ πανομοιότυπων παλμών, (b) συνεχής διαμόρφωση της μετασυναπτικής αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ενίσχυσης και κατάθλιψης. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί τόσο από το δείγμα με τα Pt NPs όσο και από το δείγμα αναφοράς με την εφαρμογή 500 κύκλων μηχανικών παραμορφώσεων 4.16% και 2.5%, αντίστοιχα. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί χρησιμοποιώντας παλμό τάσης ανάγνωσης 100 mV/100 ns.

Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να εξεταστεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης προκειμένου να βελτιωθεί αυτή η ιδιότητα, δηλαδή να συσχετίζεται στενά με την απότομη εναλλαγή SET και τις πολύ μικρές κλίσεις μετάβασης. Το παραπάνω ζήτημα έχει αντιμετωπιστεί στη βιβλιογραφία χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο στρώμα θερμικής ανταλλαγής [54] ή ενσωματώνοντας πιο περίπλοκες διαδικασίες προγραμματισμού [55]. Στην πρόσφατα δημοσιευμένη εργασία μας [56] εξετάσαμε τον αντίκτυπο της διαμόρφωσης υλικού προκειμένου να βελτιώσουμε τη συνολική συναπτική απόδοση.

#### 4.3.6.2 Non-overlap STDP

Οι δύο κύριες αρχιτεκτονικές προς την ανάπτυξη των ANN είναι τα deep neural networks (DNN) και τα spiking neural networks (SNN) που λειτουργούν με τους αλγόριθμους οπίσθιας διάδοσης και STDP, αντίστοιχα [57]. Έτσι, με τα SNN να κερδίζουν την προσοχή λόγω των εξαιρετικών – σε πραγματικό χρόνο - γνωστικών ιδιοτήτων τους, εξετάσαμε την εκδήλωση του φαινομένου STDP στις διατάξεις μας. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 4.14 όπου η συναπτική διαμόρφωση βάρους ρυθμίζεται από τη σχετική χρονική διαφορά μεταξύ του pre- και post voltage spike.



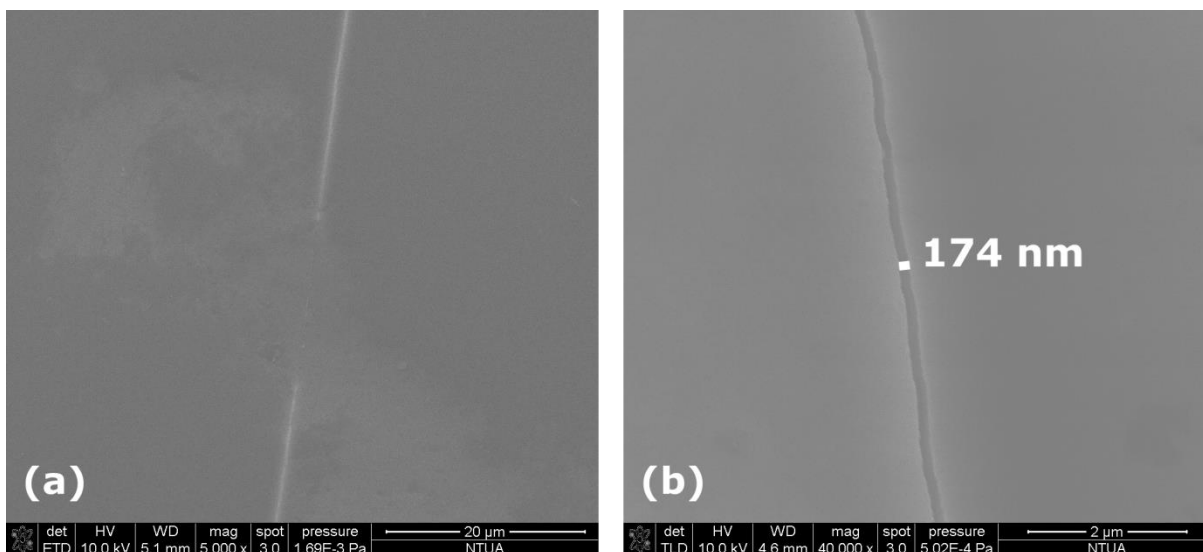
**Εικόνα 4.14:** Απόδοση STDP τόσο για το δείγμα με τα Pt NPs όσο και για το δείγμα αναφοράς, υπό την εφαρμογή μηχανικής καταπόνησης 4.16% και 2.5%, αντίστοιχα. Το πλάτος των μη επικαλυπτόμενων παλμών ήταν +1,2 V και -0,9 V αντίστοιχα, το πλάτος τους επιλέχθηκε να είναι 100 ns, ενώ εξετάστηκε η επίδραση ενός μεταβλητού χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του εύρους 0 και 10  $\mu$ s. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί χρησιμοποιώντας παλμό τάσης ανάγνωσης 100 mV/100 ns.

Πιο συγκεκριμένα, εάν ο προ-νευρώνας δώσει ένα spike στη σύναψη πριν από τον μετα-νευρώνα (δηλαδή,  $\Delta t = t_{\text{post}} - t_{\text{pre}} > 0$ ), τότε η σύναψη ενισχύει τη συναπτική ισχύ μεταξύ αυτών των δύο νευρώνων και αυξάνει την κατανομή συναπτικού βάρους. Στην αντίθετη περίπτωση ( $\Delta t = t_{\text{post}} - t_{\text{pre}} < 0$ ), η συναπτική ισχύς μειώνεται. Ένα μη επικαλυπτόμενο σχήμα μάθησης υιοθετήθηκε προκειμένου να αναπαραχθεί το STDP και για τα δύο δείγματα, καθώς χρειάζεται να καταναλώσει λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τον συμβατικό αλγόριθμο επικαλυπτόμενων spikes και δεν απαιτεί διαδικασίες διαμόρφωσης σταθερού πλάτους παλμού [58]. Η βασική ιδέα της μη επικαλυπτόμενης (non-overlapped) παλμικής προσέγγισης, είναι να αξιοποιήσει τον αντίκτυπο της τοπικής κατανομής θερμοκρασίας στις ιδιότητες διαμόρφωσης αγωγιμότητας. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα spike τάσης από τον προ-νευρώνα φθάνει νωρίτερα από το αντίστοιχο spike από τον μετα-νευρώνα (δηλαδή, στην περίπτωση  $\Delta t > 0$ ), καταγράφεται αύξηση στην

αγωγιμότητα της συσκευής (δηλαδή, ενίσχυση). Αυτή η επίδραση λαμβάνει χώρα αφού ο δεύτερος μετασυναπτικός παλμός δεν μπορεί να μεταβάλει πλήρως την ενεργή διάμετρο των CF αφού έχει μικρότερο πλάτος (0,9 V). Επιπλέον, η συμπεριφορά που εξαρτάται από τη συχνότητα, αποδίδεται στο ενισχυμένο άθροισμα θερμότητας που προκαλείται από την εφαρμογή των δύο διαδοχικών παλμών (memristors δεύτερης τάξης) [58]. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο παλμών είναι αρκετά μικρή ( $\Delta t \sim 1 \mu s$ ), προκαλείται ισχυρότερη τοπική κατανομή θερμότητας, η οποία προκαλεί συνολική αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας της συσκευής. Από την άλλη πλευρά, μια μεγαλύτερη χρονική απόσταση μεταξύ των δύο παλμών θα οδηγήσει σε μικρότερες αλλαγές στο συναπτικό βάρος, καθώς η επίδραση της θερμοκρασίας του πρώτου προσυναπτικού παλμού είναι πλέον αμελητέα.

#### 4.4 Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία, αποδεικνύουμε ότι η ενσωμάτωση Pt NPs στο BE, μπορεί να βοηθήσει στην ενίσχυση της συνολικής συμπεριφοράς των διατάξεων μνήμης, υπό την εφαρμογή υψηλής μηχανικής καταπόνησης 4.16%. Για να κατανοήσουμε τον κρίσιμο ρόλο των NPs, ας εξετάσουμε πρώτα την περίπτωση του δείγματος αναφοράς με TiN BE, αλλά χωρίς Pt NPs. Το υμένιο του TiN, ως σκληρό κεραμικό υλικό αρχίζει να σπάει σε πολύ χαμηλές τιμές παραμόρφωσης, ενώ για τιμή παραμόρφωσης 3.12%, η αντίσταση του TiN είναι ήδη σημαντική (Εικόνα 4.6(c)). Σε αυτή την παραμόρφωση, παρόλο που υπάρχουν αρκετές ρωγμές στην επιφάνεια του φιλμ και ενώ η αγωγιμότητα μειώνεται, υπάρχουν ακόμα αγώγιμες διαδρομές καθώς οι ρωγμές δεν είναι συνεχείς (Εικόνα 4.15(a)).

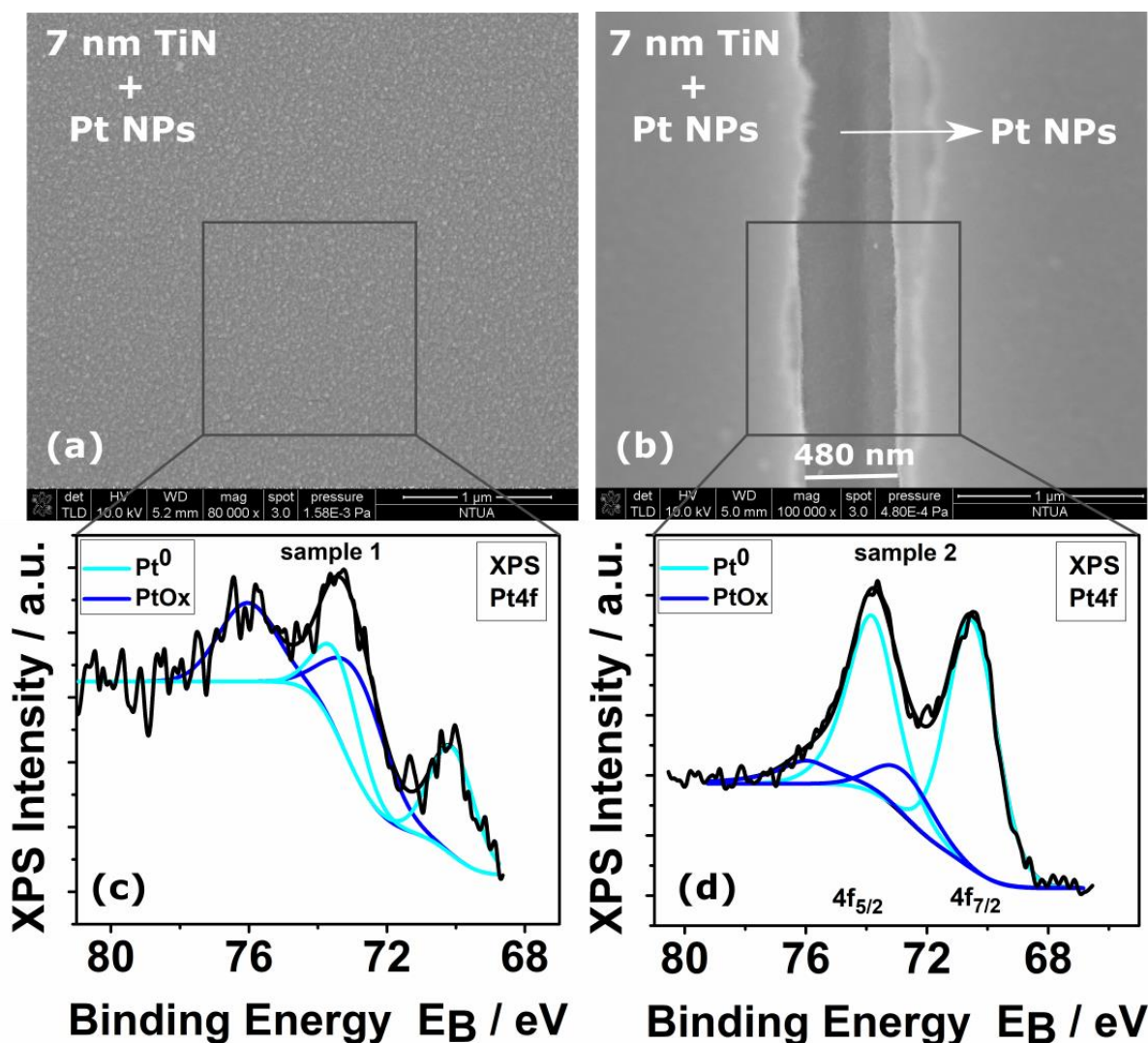


**Εικόνα 4.15:** Εικόνα SEM μιας ρωγμής σε υμένιο 40 nm TiN/PEN που (α) καταπονήθηκε για 500 κύκλους σε μηχανική καταπόνηση 3.12% και (β) καταπονήθηκε για 500 κύκλους σε μηχανική καταπόνηση 4.16%.

Το πλαστικό υπόστρωμα PEN, δεν παρουσιάζει ρωγμές για μηχανική καταπόνηση μέχρι και 3.12%. Αυξάνοντας την παραμόρφωση στο 4.16%, αρχίζουν να εμφανίζονται ρωγμές στο υπόστρωμα PEN, οι οποίες διαδίδονται επίσης στα εναποτιθέμενα σε αυτό υμένια. Η συνολική πυκνότητα ρωγμών είναι συνεπώς η υπέρθεση των ρωγμών που έχουν ήδη σχηματιστεί στο υμένιο του TiN και των αντίστοιχων ρωγμών του υποστρώματος PEN. Σε αυτό το ποσοστό μηχανικής καταπόνησης (4.16%), οι ρωγμές μέσα στο υμένιο TiN είναι συνεχείς όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4.15(b) και ως αποτέλεσμα, το υμένιο του TiN λειτουργεί ως μονωτής.

Το πυκνό υμένιο των Pt NPs λόγω της κοκκώδους μορφολογίας του [59], δεν παρουσιάζει ρωγμές μέχρι και την μηχανική καταπόνηση του 3.12%. Η διάδοση ρωγμών για το υμένιο των Pt NPs συμβαίνει μόνο λόγω των ρωγμών του υποστρώματος PEN για τιμές παραμόρφωσης 4.16% και άνω. Ωστόσο, οι διατάξεις με Pt NPs, ακόμη και μετά από την εφαρμογή της τελευταίας υψηλής μηχανικής καταπόνησης (4.16%), εξακολουθούν να παρουσιάζουν παράθυρο μνήμης 4 τάξεων μεγέθους (Εικόνα 4.5(d)) λόγω της αντοχής του BE στην καταπόνηση (Εικόνα 4.6(a)). Για να κατανοήσουμε την προέλευση αυτού του αποτελέσματος, εξετάσαμε με μικροσκοπία SEM, τη μορφολογία εντός περιοχής ρωγμής ενός υποστρώματος PEN καλυμμένου με Pt NPs και 7 nm TiN από πάνω από αυτό, στο οποίο προηγήθηκε καταπόνηση 500 κύκλων με ποσοστό παραμόρφωσης 4.16%.

Ως δείγμα αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε μέρος από το προαναφερθέν δείγμα, σε περιοχή όμως που δεν είχε ρωγμή. Στην εικόνα 4.16(a) φαίνεται μέρος από την επιφάνεια του δείγματος αναφοράς, ενώ στην εικόνα Εικόνα 4.16(b) φαίνεται το καταπονημένο δείγμα, όπου η εστίαση της δέσμης έχει γίνει στον πάτο της ρωγμής. Έτσι, φαίνεται εμφανώς η παρουσία των Pt NPs στον πάτο της ρωγμής, που όμως για να διερευνηθεί περαιτέρω και να επιβεβαιωθεί, πραγματοποιήσαμε μετρήσεις XPS συγκρίνοντας το ίδιο υμένιο 7 nm TiN / Pt NPs πριν από την παραμόρφωση (χωρίς ρωγμές – sample 1) και μετά από παραμόρφωση σε ποσοστό 4.16% (με ρωγμή – sample 2).



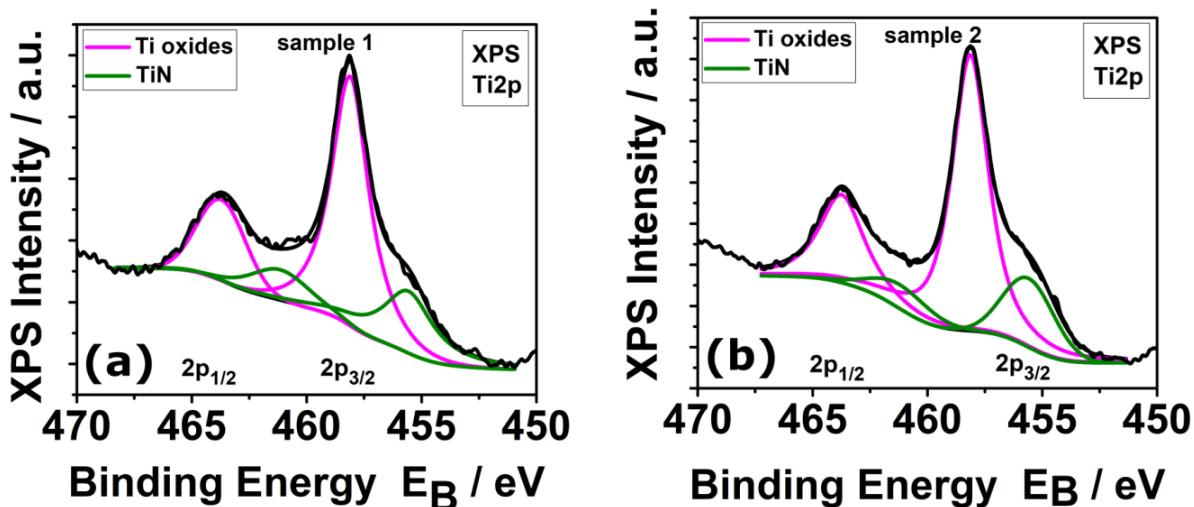
**Εικόνα 4.16:** Εικόνες SEM σε περιοχή δείγματος με Pt NPs όπου (a) η εστίαση είναι στην επιφάνεια του φιλμ στο επάνω μέρος του δείγματος και εκτός της περιοχής που είναι η ρωγμή ενώ (b) η εστίαση είναι στον πάτο της ρωγμής όπου η παρουσία των Pt NPs είναι ευδιάκριτη. (c) Φάσματα XPS αποσυμμετρημένων (deconvoluted) κορυφών Pt 4f υμενίου 7 nm TiN/Pt NPs χωρίς ρωγμή (sample 1) και (d) υμενίου 7 nm TiN/Pt NP που παρουσιάζει με ρωγμή (sample 2).

Τα φάσματα XPS των αποσυνελεγμένων κορυφών Pt 4f του Pt που βασίζονται στα δύο δείγματα με τα NPs, χωρίς την παρουσία και με την παρουσία ρωγμής απεικονίζονται στην Εικόνα 4.16(c)-(d), αντίστοιχα. Το φάσμα αναλύεται σε δύο διπλές κορυφές με διάσπαση τροχιάς spin στα 3.35 eV, με ενέργειες δέσμευσης Pt 4f<sub>7/2</sub> στα  $70.5 \pm 0.1$  eV που αποδίδεται στο Pt<sup>0</sup> και στα  $73.4 \pm 0.1$  eV που αποδίδεται στο PtO<sub>x</sub>, όπου  $x \sim 2$  [60]. Η διαφορά στην αναλογία των Pt<sup>+</sup>/Pt<sup>0</sup> οφείλεται στην χωρίς κάλυψη του Pt από TiN στις περιοχές εντός της ρωγμής. Η ένταση της κορυφής Pt 4f εντός της ρωγμής, είναι υψηλότερη από αυτή του δείγματος των 7 nm TiN/Pt NPs, λόγω της παρουσίας περιοχών που δεν υπάρχει TiN, αλλά μόνο Pt NPs. Όπως παρουσιάζεται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), ο λόγος έντασης XPS του Pt 4f/Ti 2p είναι 0.24 στο δείγμα με ρωγμές και 0.05 στο δείγμα χωρίς ρωγμές, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία των Pt NPs μέσα στις περιοχές των ρωγμών.

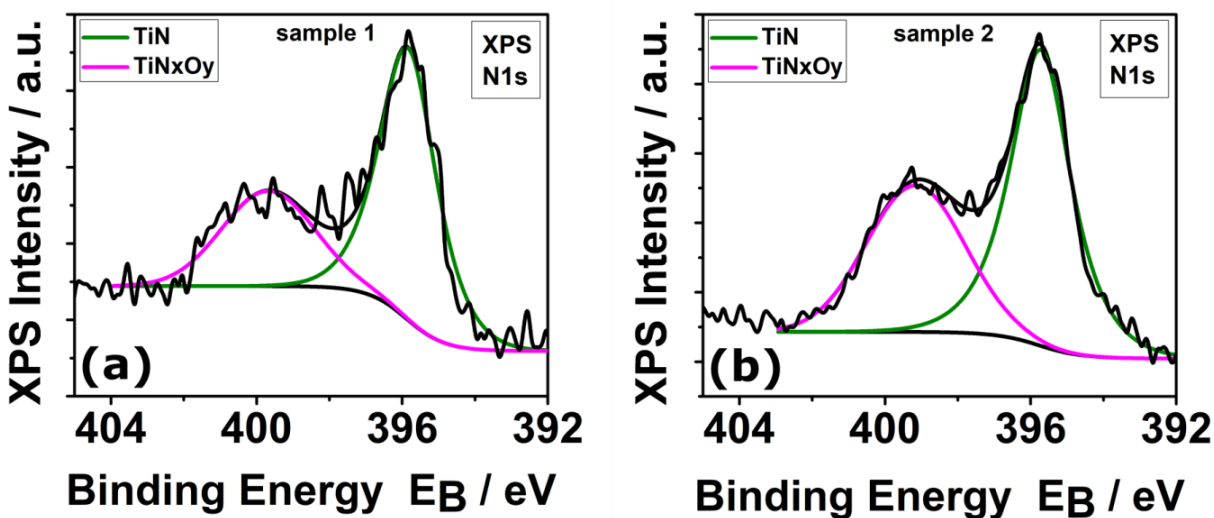
	Ti:N atomic ratio	Pt4f/Ti2p XPS intensity ratio
Sample 1	1:1.13 ( $\pm 0.05$ )	0.05
Sample 2	1:0.87 ( $\pm 0.05$ )	0.24

**Πίνακας 4.1:** Σχετικός ατομικός λόγος Ti:N και λόγος έντασης XPS του Pt4f/Ti2p του δείγματος 1 και του δείγματος 2

Μετρήσεις XPS, διεξήχθησαν για το φιλμ TiN (7 nm) τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.17 και 4.18. Στα φάσματα XPS, εμφανίζονται οι αποσυνελεγμένες κορυφές Ti2p, που αποτελούνται από δύο διπλές κορυφές με διάσπαση τροχιάς spin στα 5,6 eV. Η ενέργεια δέσμευσης ( $E_B$ ) του Ti2p<sub>3/2</sub> στα  $455.8 \pm 0.1$  eV, αποδίδεται στο TiN και στα  $458.2 \pm 0.1$  eV που σχετίζεται με την παρουσία οξειδωμένου Ti (TiO<sub>2</sub>, TiN<sub>x</sub>O<sub>y</sub>). Στην Εικόνα 4.16, οι κορυφές αποτελούνται από δύο στοιχεία με  $E_B$   $395.6 \pm 0.1$  eV που αποδίδεται στο N του TiN και  $399.5 \pm 0.2$  eV που σχετίζεται με κάποιο TiN<sub>x</sub>O<sub>y</sub> [61].



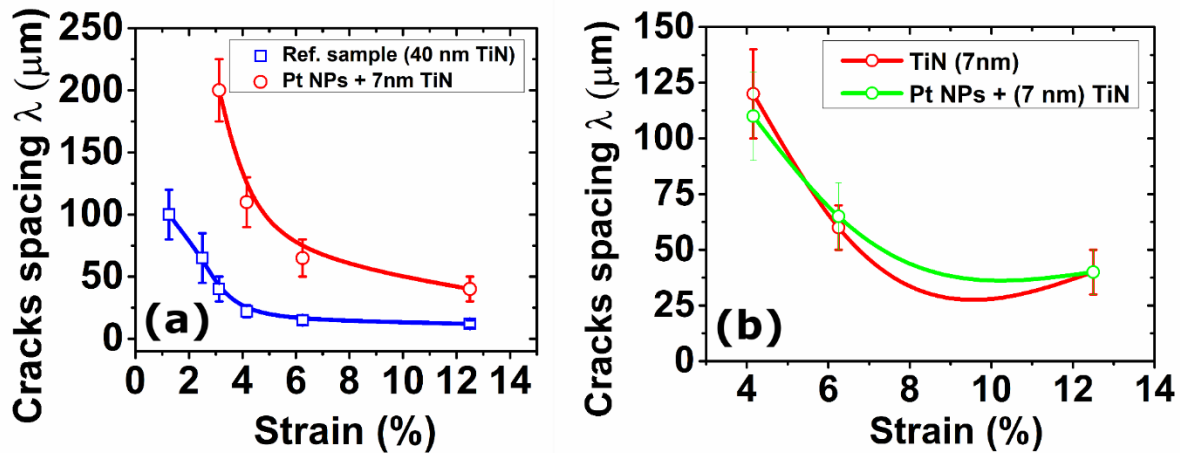
Εικόνα 4.17: Αποσυνελεγμένο XPS Ti2p δείγματος με Pt NPs σε περιοχή (a) χωρίς της παρουσία ρωγμής και (b) με την παρουσία ρωγμής, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.18: Αποσυνελεγμένο XPS N1s δείγματος με Pt NPs σε περιοχή (a) χωρίς της παρουσία ρωγμής και (b) με την παρουσία ρωγμής, αντίστοιχα.

Έτσι, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τα NPs, μπορούν να γεφυρώσουν τις παραγόμενες, από το πλαστικό υπόστρωμα, ρωγμές και έτσι να εξασφαλιστεί ηλεκτρική συνέχεια στο BE. Επιπλέον, το η διάδοση των ρωγμών σταματά στο στρώμα των NP, το οποίο θεωρείται μεγάλης σημασίας

για τη στιβαρή λειτουργία της συσκευής, δεδομένου ότι η πιθανή εξάπλωση των ρωγμών στα άλλα σκληρά υλικά θα δημιουργήσει μόνιμη βλάβη της διάταξης. Οι πυκνότητες των ρωγμών, υπολογίστηκαν από τα δεδομένα μας για το δείγμα αναφοράς με τα 40 nm TiN BE και για το δείγμα με τα 7 nm TiN / Pt NPs BE και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.19. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί, μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των αποστάσεων των ρωγμών και της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης των διατάξεων.



**Εικόνα 4.19:** (a) Απόσταση ρωγμών του δείγματος αναφοράς (40 nm TiN) και του δείγματος, (b) πειραματικά δεδομένα της απόστασης ρωγμών για το υμένιο των 7 nm TiN και του υμενίου 7 nm TiN / Pt NPs.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάταξη που βασίζεται στα NPs, δεν σχηματίζει ρωγμές έως και τη μηχανική καταπόνηση 4.16%, ενώ για ακραίες παραμορφώσεις (περίπου 12%) εμφανίζονται ρωγμές με απόσταση 50  $\mu\text{m}$ . Αυτή η συμπεριφορά είναι αρκετά σημαντική από την άποψη της προοπτικής της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής καθώς η κατασκευή μικρότερων - σε μέγεθος - διατάξεων, θα μπορούσε να αποφέρει δομή μνήμης χωρίς δημιουργία ρωγμών για μηχανικές καταπονήσεις μεγαλύτερες του 4.16%. Είναι επίσης ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η εφαρμοζόμενη μηχανική καταπόνηση στη συγκεκριμένη εργασία, υπερβαίνει τα ποσοστά μηχανικών καταπονήσεων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία όσον αφορά την ανάπτυξη των εύκαμπτων memristors. Στον Πίνακα 4.2, παρουσιάζονται μερικές από τις εύκαμπτες μνήμες που έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα.



Switching Material	Bedding Radius (mm)	SET/RESET Voltage (V)	Switching Ratio	Endurance (number of cycles)	Synaptic Properties	Substrate	Reference
PEDOT:PSS – Pd interlayer	5	4/10	$10^3$	600	X	PI	[7]
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	1.3/-0.65	$10^5$	1400	X	PI	[8]
WSe <sub>2-x</sub> O <sub>y</sub>	4	X	10	X	√	PI	[9]
HfO <sub>x</sub>	5	0.4/-0.2	$10^2$	1200	X	PET	[10]
ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.1	2.2	$10^3$	X	X	PET	[11]
ZrN	4	1.3/-0.8	$10^2$	$10^7$	X	PET	[12]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	0.6/-0.3	$10^5$	X	X	PET	[13]
TaO <sub>x</sub> /AlN	2	2/-3.8	$10^2$	$10^7$	X	PEN	[14]
Cu-pMSSQ	10	X	10	X	√	PET	[62]
SiO <sub>x</sub>	2.3	1.1/-0.6	$10^8$	350	X	PI	[63]
WO <sub>x</sub>	7.5	2/-2	10	X	√	PEN	[64]
MgO-GOQDs	7.5	0.18/-0.19	$10^2$	$10^3$	√	PET	[65]
TaO <sub>x</sub>	6	1.5/- 0.6	$10^3$	$2*10^6$	X	St. Steel	[66]
HfO <sub>x</sub>	10	1/-1	10	$10^3$	√	PEN	[67]
BN	10	0.67/-0.62	$10^2$	$10^4$	√	PET	[68]
ZnO:N	15	4/-4	10	$10^6$	√	PET	[69]
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>1.5</b>	<b>0.25/-0.05</b>	<b><math>10^5</math></b>	<b><math>10^6</math></b>	√	<b>PEN</b>	<b>This work</b>

**Πίνακας 4.2:** Χαρακτηριστικά εύκαμπτων διατάξεων μνήμων ReRAM σε πλαστικά υποστρώματα πάχους 125 μm, που έχουν αναφερθεί πρόσφατα στη βιβλιογραφία.

Στις περισσότερες από τις αναφερόμενες διατάξεις μνήμης, οι συναπτικές ιδιότητες των ενεργών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των διατάξεων, δεν έχουν μελετηθεί [7], [8], [10–14], [63]. Σε ορισμένες δημοσιευμένες μελέτες, στις οποίες οι συναπτικές ιδιότητες του ενεργού υλικού της μνήμης μελετήθηκαν, απαιτείται μεταφορά του υλικού ή ακόμα και ολόκληρης της συσκευής [9], [64]. Σε

ορισμένες εργασίες, η μηχανική καταπόνηση των συσκευών είναι χαμηλή [66–69] ενώ σε άλλες, η προετοιμασία του ενεργού υλικού είναι χρονοβόρα [62], [70]. Αυτά τα βήματα περιπλέκουν την διαδικασία κατασκευής μιας διάταξης και θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως εμπόδιο για την ευρείας κλίμακας παραγωγή τους. Οι διατάξεις που αναπτύχθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, κατασκευάζονται με τη χρήση συμβατικών τεχνικών στο κενό, ενώ παρουσιάζουν πολύ χαμηλό  $V_{SET}$  ( $\sim 200$  mV), μεγάλο παράθυρο μνήμης ( $\sim 10^5$ ), μεγάλης αντοχής σε επαναλαμβανόμενους παλμούς (pulse endurance) και ιδιότητες διατήρησης φορτίου (retention) για ένα ευρύ φάσμα εφαρμοζόμενων τάσεων και για καταστάσεις εφελκυσμού και θλίψης. Ακόμα και μετά από 1000 κύκλους επαναλαμβανόμενων καταπονήσεων με ακτίνας κάμψης 1.5 mm, η οποία αντιστοιχεί σε καταπόνηση του 4.16%, εξακολουθεί να υπάρχει ένα παράθυρο μνήμης κοντά στις 4 τάξεις μεγέθους, χαρακτηριστικό που τις κάνει ελκυστικές για πιθανές εφαρμογές που απαιτούν multibit ιδιότητες. Επιπλέον, διάφορες συναπτικές ιδιότητες μελετήθηκαν σχολαστικά, συμπεριλαμβανομένων των STP και STDP, όπου παρατηρήθηκε σταθερή απόκριση για όλες τις καταπονήσεις μέχρι την ακραία καταπόνηση 4.16%, επίδοση που υπερβαίνει τις αναφερόμενες οριακές τιμές καταπόνησης των εύκαμπτων memristors [14]. Τέλος, η ανάλυση του φάσματος X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) και των εικόνων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), αποκάλυψαν ότι η παρουσία των NPs, μπορεί να μειώσει το ενεργό πλάτος της ρωγμής στο υπόστρωμα PEN και έτσι, η αξιοποίησή τους να θέσει νέα όρια αντοχής των εύκαμπτων διατάξεων.

Η προτεινόμενη διάταξη, είναι χαμηλής ισχύος και παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά μεταγωγής και συναπτικών ιδιοτήτων, με απλή κατασκευή, πλήρως συμβατή με την τεχνολογία CMOS, χωρίς τη χρήση επίπλων βημάτων ανάπτυξης. Ο συνδυασμός των παραπάνω χαρακτηριστικών, καθιστά τη διάταξη ελκυστική και ισχυρό υποψήφιο για ευρεία παραγωγή της στον τομέα των εύκαμπτων διατάξεων ReRAM.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Z. Sun, G. Pedretti, E. Ambrosi, A. Bricalli, D. Ielmini, “In - Memory Eigenvector Computation in Time  $O(1)$ ”, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, no.8, 2000042, May 2020.
- [2] D. Jana, S. Roy, R. Panja, M. Dutta, S. Z. Rahaman, R. Mahapatra, S. Maikap, “Conductive-bridging random access memory: challenges and opportunity for 3D architecture”, *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 10, no. 188, Apr. 2015.
- [3] D. Ielmini, S. Ambrogio, “Emerging neuromorphic devices”, *Nanotechnology*, vol. 31, no. 9, 092001, Mar. 2020.
- [4] T.-Y. Wang, Z.-Y. He, H. Liu, L. Chen, H. Zhu, Q.-Q. Sun, S.-J. Ding, P. Zhou, D. W. Zhang, “Flexible Electronic Synapses for Face Recognition Application with Multimodulated Conductance States”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 43, pp. 37345–37352, Oct. 2018.
- [5] S. Ginnaram, J. T. Qiu, S. Maikap, “Role of the Hf/Si Interfacial Layer on the High Performance of MoS<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge RAM for Artificial Synapse Application”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no. 5, pp. 709–712, May 2020.
- [6] X. Ji, X. Zhao, M. C. Tan, R. Zhao, “Artificial Perception Built on Memristive System: Visual, Auditory, and Tactile Sensations”, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, 1900118, 2020.
- [7] G. Wang, A.-R. O. Raji, J.-H. Lee, J. M. Tour, “Conducting -Interlayer SiO<sub>x</sub> Memory Devices on Rigid and Flexible Substrates”, *ACS Nano*, vol. 8, no. 2, pp. 1410–1418, Feb. 2014.
- [8] K.-J. Gan, P. T. Liu, T.C. Chien, D. B. Ruan, S. M. Sze, “Highly durable and flexible gallium-based oxide conductive-bridging random access memory”, *Sci. Rep.*, vol. 9, no.1, 14141, Oct. 2019.
- [9] H.-K. He, F.-F. Yang, R. Yang, “Flexible full two-dimensional memristive synapses of graphene/WSe<sub>2</sub>-xO<sub>y</sub>/graphene”. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 22, no. 36, pp. 20658–20664, Sept. 2020.
- [10] J. Shang, W. Xue, Z. Ji, G. Liu, X. Niu, X. Yi, L. Pan, Q. Zhan, X.-H. Xu, R.-W Li, “Highly flexible resistive switching memory based on amorphous-nanocrystalline hafnium oxide films”, *Nanoscale*, vol. 9, no. 21, pp. 7037–7046, Mar. 2017.

- [11] B. R. Lee, J. H. Park, T. H. Lee, T. G. Kim, “Highly Flexible and Transparent Memristive Devices Using Cross-Stacked Oxide/Metal/Oxide Electrode Layers”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 5, pp. 5215–5222, Jan. 2019.
- [12] D. Kumar, U. Chand, L. W. Siang, T.-Y. Tseng, “ZrN-Based Flexible Resistive Switching Memory”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no. 5, pp. 705–708, May 2020.
- [13] M. Kim, K. C. Choi, “Transparent and Flexible Resistive Random Access Memory Based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Film with Multilayer Electrodes”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 64, no. 8, pp. 3508–3510, Aug. 2017.
- [14] S. Rajasekaran, F. M. Simanjuntak, D. Panda, S. Chandrasekaran, R. Aluguri, A. Saleem, T.-Y. Tseng, Fast, “Highly Flexible, and Transparent TaO<sub>x</sub>-Based Environmentally Robust Memristors for Wearable and Aerospace Applications”, *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 2, no. 10, pp. 3131–3140, Aug. 2020.
- [15] E. R. Dufresne, E. I. Corwin, N. A. Greenblatt, J. Ashmore, D. Y. Wang, A. D. Dinsmore, J. X. Cheng, X. S. Xie, J. W. Hutchinson, D. A. Weitz, “Flow and Fracture in Drying Nanoparticle Suspensions”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 91, no. 22, 224501, Nov. 2003.
- [16] M. S. Tirumkudulu, W. B. Russel, “Role of Capillary Stresses in Film Formation” *Langmuir*, vol. 20, no.7, pp. 2947–2961, Dec. 2004.
- [17] E. Santanach Carreras, F. Chabert, D. E. Dunstan, G. V. Franks, “Avoiding “mud” cracks during drying of thin films from aqueous colloidal suspensions”, *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 313, no. 1, pp. 160–168, June 2007.
- [18] J. Y. Kim, K. Cho, S.-A. Ryu, S. Y. Kim, B. M. Weon, “Crack formation and prevention in colloidal drops”, *Sci. Rep.*, vol. 5, 13166, Aug. 2015.
- [19] M. I. Smith, J. S. Sharp, “Effects of Substrate Constraint on Crack Pattern Formation in Thin Films of Colloidal Polystyrene Particles”, *Langmuir*, vol. 27, no. 13, pp. 8009–8017, June 2011.
- [20] S.-Y. Lee, K. R. Park, S.-G. Kang, J.-H. Lee, E.-C. Jeon, C.-H. Shim, J.-P. Ahn, D.-I. Kim, H. N. Han, Y.-C. Joo, C. Kim, I.-S. Choi, “Selective crack suppression during deformation in metal films on polymer substrates using electron beam irradiation”, *Nat. Commun.*, vol. 10, 4454, Oct. 2019.

- [21] J. H. Prosser, T. Brugarolas, S. Lee, A. J. Nolte, D. Lee, “Avoiding Cracks in Nanoparticle Films”, *Nano Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 5287–5291, Oct. 2012.
- [22] X. Wang, M. Xi, F. Zheng, B. Ding, H. Fong, Z. Zhu, “Reduction of crack formation in TiO<sub>2</sub> mesoporous films prepared from binder-free nanoparticle pastes via incorporation of electrospun SiO<sub>2</sub> or TiO<sub>2</sub> nanofibers for dye-sensitized solar cells”, *Nano Energy*, vol. 12, pp. 794–800, Mar. 2015.
- [23] C. Zhu, E. Chalmers, L. Chen, Y. Wang, B. B. Xu, Y. Li, X. Liu, “Flexible Devices: A Nature - Inspired, Flexible Substrate Strategy for Future Wearable Electronics”, *Small*, vol. 15, no. 35, 1970189, Aug. 2019.
- [24] M. Kang, K.-J. Baeg, D. Khim, Y.-Y. Noh, D.-Y. Kim, “Printed, Flexible, Organic Nano-Floating-Gate Memory: Effects of Metal Nanoparticles and Blocking Dielectrics on Memory Characteristics”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, no. 28, pp. 3503–3512, Mar. 2013.
- [25] Y. Zhou, S.-T. Han, Z.-X. Xu, V. A. L. Roy, “The strain and thermal induced tunable charging phenomenon in low power flexible memory arrays with a gold nanoparticle monolayer”, *Nanoscale*, vol. 5, pp. 1972–1979, Jan. 2013.
- [26] J. Jang, F. Pan, K. Braam, V. Subramanian, “Resistance Switching Characteristics of Solid Electrolyte Chalcogenide Ag<sub>2</sub>Se Nanoparticles for Flexible Nonvolatile Memory Applications”, *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 26, pp. 3573–3576, July 2012.
- [27] D. Sakellaropoulos, P. Bousoulas, D. Tsoukalas, “Impact of Pt embedded nanocrystals on the resistive switching and synaptic properties of forming free TiO<sub>2</sub> - x/TiO<sub>2</sub> - y-based bilayer structures”, *J. Appl. Phys.*, vol. 126, no. 4, 044501, Jul. 2019.
- [28] T. Islam, M. M. Hasan, A. Awal, M. Nurunnabi, A. J. S. Ahammad, “Metal Nanoparticles for Electrochemical Sensing: Progress and Challenges in the Clinical Transition of Point-of-Care Testing”, *Molecules*, vol. 25, no. 24, 5787, Dec. 2020.
- [29] A. Pietrikova, P. Lukacs, D. Jakubeczyova, B. Balloková, J. Potencki, G. Tomaszewski, J. Pekarek, K. Prikrylova, M. Fides, “Surface analysis of polymeric substrates used for inkjet printing technology”, *Circuit World*, vol. 42, no. 1, pp. 9–16, Feb. 2016.

- [30] T. Königer, H. Münstedt, “Coatings of indium tin oxide nanoparticles on various flexible polymer substrates: Influence of surface topography and oscillatory bending on electrical properties”, *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 16, no.4, pp. 559–568, Apr. 2008.
- [31] F. Mebarki, E. David, “Dielectric characterization of thermally aged recycled Polyethylene Terephthalate and Polyethylene Naphthalate reinforced with inorganic fillers”, *Polym. Eng. Sci.*, vol. 58, no.5, pp. 701–712, May 2018.
- [32] J. Zhang, S. Dai, Y. Zhao, J. Zhang, J. Huang, “Recent Progress in Photonic Synapses for Neuromorphic Systems”, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, no. 3, 1900136, Mar. 2020.
- [33] A. Mehonic, A. L. Shluger, D. Gao, I. Valov, E. Miranda, D. Ielmini, A. Bricalli, E. Ambrosi, C. Li, J. J. Yang, Q. Xia, A. J. Kenyon, “Silicon Oxide (SiO<sub>x</sub>): A Promising Material for Resistance Switching?”, *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 43, 1801187, Oct. 2018.
- [34] E. Aslanidis, E. Skotadis, D. Tsoukalas, “Simulation tool for predicting and optimizing the performance of nanoparticle based strain sensors”, *Nanotechnology*, vol. 32, no. 27, 275501, Apr. 2021.
- [35] Q. Liu, S. Long, H. Lv, W. Wang, J. Niu, Z. Huo, J. Chen, M. Liu, “Controllable Growth of Nanoscale Conductive Filaments in Solid Electrolyte-Based ReRAM by Using a Metal Nanocrystal Covered Bottom Electrode”, *ACS Nano*, vol. 4, no. 10, pp. 6162–6168, Sept. 2010.
- [36] P. Bousoulas, D. Sakellaropoulos, C. Papakonstantinopoulos, S. Kitsios, C. Arvanitis, E. Bagakis, D. Tsoukalas, “Investigating the origins of ultra-short relaxation times of silver filaments in forming free SiO<sub>2</sub>-based conductive bridge memristors”, *Nanotechnology*, vol. 31, 454002, Aug. 2020.
- [37] D. Sakellaropoulos, P. Bousoulas, C. Papakonstantinopoulos, S. Kitsios, D. Tsoukalas, “Spatial Confinement Effects of Embedded Nanocrystals on Multibit and Synaptic Properties of Forming Free SiO<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge Random Access Memory”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no.7, pp. 1013–1016, July 2020.
- [38] X. Ma, J. Zhang, W. Cai, H. Wang, J. Wilson, Q. Wang, Q. Xin, A. Song, “A Sputtered Silicon Oxide Electrolyte for High Performance Thin Film Transistors”, *Sci. Rep.*, vol. 7, 809, Apr. 2017.

- [39] K. Kim, S. Kim, S. An, G.-H. Lee, D. Kim, S. Han, “Anti-reflection porous SiO<sub>2</sub> thin film deposited using reactive high-power impulse magnetron sputtering at high working pressure for use in a Si:H solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 582–586, Nov. 2014.
- [40] J. D. McBrayer, R. M. Swanson, T. W. Sigmon, “Diffusion of Metals in Silicon Dioxide”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 133, 1242, Feb. 1986.
- [41] I. Fisher, M. Eizenberg, “Copper ion diffusion in porous and nonporous SiO<sub>2</sub>-based dielectrics using bias thermal stress and thermal stress tests”, *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 12, pp. 4111–4121, Apr. 2008.
- [42] P. Patsalas, C. Charitidis, S. Logothetidis, “The Effect of Substrate Temperature and Biasing on the Mechanical Properties and Structure of Sputtered Titanium Nitride Thin Films”, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 125, no. 1-3, pp. 335–340, Mar. 2000.
- [43] H. Ni, X. Li, H. Gao, “Elastic modulus of amorphous SiO<sub>2</sub> nanowires”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 043108, Jan. 2006.
- [44] H. Huang, F. Spaepen, “Tensile testing of free-standing Cu, Ag and Al thin films and Ag/Cu multilayers”, *Acta Mater.*, vol. 48, no. 12, pp. 3261–3269, July 2000.
- [45] O. Zywitzki, T. Modes, H. Sahm, P. Frach, K. Goedicke, D. Glöß, “Structure and properties of crystalline titanium oxide layers deposited by reactive pulse magnetron sputtering”, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 180–181, pp. 538–543, Mar. 2004.
- [46] E. Çetinörgü, B. Baloukas, O. Zabeida, J. E. Klemberg-Sapieha, L. Martinu, “Mechanical and thermoelastic characteristics of optical thin films deposited by dual ion beam sputtering”, *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 23, pp. 4536–4544, Aug. 2009.
- [47] J. T. Gaskins, P. E. Hopkins, D. R. Merrill, S. R. Bauers, E. Hadland, D. C. Johnson, D. Koh, J. H. Yum, S. Banerjee, B.J. Nordell, M. M. Paquette, A. M.; Caruso, W. A. Lanford, P. Henry, L. Ross, H. Li, L. Li, M. French, A. M. Rudolph, S. W. King, “Review - Investigation and Review of the Thermal, Mechanical, Electrical, Optical, and Structural Properties of Atomic Layer Deposited High-k Dielectrics: Beryllium Oxide, Aluminum Oxide, Hafnium Oxide, and Aluminum Nitride”, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 6, no. 189, Oct. 2017.

- [48] Thomson, A. M. “Facilitation, augmentation and potentiation at central synapses Trends”, *Neurosci*, vol. 23, no. 7, pp. 305–312, Jul. 2000.
- [49] Y. Zhang, S. Zhong, L. Song, X. Ji, R. Zhao, “Emulating dynamic synaptic plasticity over broad timescales with memristive device”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 113, no. 20, 203102, Nov. 2018.
- [50] Zucker, R. S.; Regehr, W. G. “Short-term synaptic plasticity”, *Annu. Rev. Physiol.*, vol. 64, pp. 355–405, 2002.
- [51] J. D. Kendall, S. Kumar, “The building blocks of a brain-inspired computer”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 7, 011305, Jan. 2020.
- [52] I.-T. Wang, C.-C. Chang, L.-W. Chiu, T. Chou, T.-H. Hou, “3D Ta/TaOx/TiO2/Ti synaptic array and linearity tuning of weight update for hardware neural network applications”, *Nanotechnology*, vol. 27, 365204, Aug. 2016.
- [53] J.-W. Jang, S. Park, G. W. Burr, H. Hwang, Y.-H. Jeong, “Optimization of Conductance Change in Pr<sub>1-x</sub>CaxMnO<sub>3</sub>-Based Synaptic Devices for Neuromorphic Systems”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 36, no. 5, pp. 457–459, Apr. 2015.
- [54] J. Woo, K. Moon, J. Song, S. Lee, M. Kwak, J. Park, H. Hwang, “Improved Synaptic Behavior Under Identical Pulses Using AlO<sub>x</sub>/HfO<sub>2</sub> Bilayer RRAM Array for Neuromorphic Systems”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 37, no. 8, pp. 994–997, Jun. 2016.
- [55] S. Chandrasekaran, F. M. Simanjuntak, D. Panda, T.-Y. Tseng, “Enhanced Synaptic Linearity in ZnO-Based Invisible Memristive Synapse by Introducing Double Pulsing Scheme”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 66, no. 11, pp. 4722–4726, Sep. 2019.
- [56] P. Bousoulas, D. Sakellaropoulos, D. Tsoukalas, “Tuning the analog synaptic properties of forming free SiO<sub>2</sub> memristors by material engineering”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 118, no. 14, pp. 143502–143506, Apr. 2021.
- [57] Y. Li, K.-W. Ang, “Hardware Implementation of Neuromorphic Computing Using Large-Scale Memristor Crossbar Arrays”, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 3, no. 1, 2000137, Nov. 2020.



- [58] S. Kim, C. Du, P. Sheridan, W. Ma, S. Choi, W. D. Lu, “Experimental Demonstration of a Second-Order Memristor and Its Ability to Biorealistically Implement Synaptic Plasticity”, *ACS Nano Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 2203–2211, Mar. 2015.
- [59] B. Fan, A. V. Rodriguez, D. G. Vercosa, C. Kemere, J. T. Robinson, “Sputtered porous Pt for wafer-scale manufacture of low-impedance flexible microelectrodes”, *J. Neural.*, vol. 17, no. 3, 036029, June 2020.
- [60] D. J. Miller, H. Oberg, S. Kaya, H. S. Casalongue, D. Friebe, T. Anniyev, H. Ogasawara, H. Bluhm, L. G. M. Pettersson, A. Nilsson, “Oxidation of Pt(111) under near-ambient conditions”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, no. 19, 195502, Nov. 2011.
- [61] L. Duta, G. E. Stan, A. C. Popa, M. A. Husanu, S. Moga, M. Socol, I. Zgura, F. Miculescu, I. Urzica, A. C. Popescu, and I. N. Mihailescu, “Thickness Influence on In Vitro Biocompatibility of Titanium Nitride Thin Films Synthesized by Pulsed Laser Deposition”, *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 38, Jan. 2016.
- [62] C. Wu, T. W. Kim, H. Y. Choi, D. M. Strukov, J. J. Yang, “Flexible three-dimensional artificial synapse networks with correlated learning and trainable memory capability”, *Nat. Commun.*, vol. 8, 752, Sept. 2017.
- [63] P. Li, D. Wang, Z. Zhang, Y. Guo, L. Jiang, C. Xu, “Room Temperature, Solution Processed SiO<sub>x</sub> via Photochemistry Approach for Highly Flexible Resistive Switching Memory”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 50, pp. 56186–56194, Dec. 2020.
- [64] Y. Lin, T. Zeng, H. Xu, Z. Wang, X. Zhao, W. Liu, J. Ma, Y. Liu, “Transferable and Flexible Artificial Memristive Synapse Based on WO<sub>x</sub> Schottky Junction on Arbitrary Substrates”, *Adv. Electron. Mater.*, vol. 4, no. 12, 1800373, Dec. 2018.
- [65] T. Chen, S. Yang, J. Wang, W. Chen, L. Liu, Y. Wang, S. Cheng, X. Zhao, “Flexible Artificial Memristive Synapse Constructed from Solution-Processed MgO-Graphene Oxide Quantum Dot Hybrid Films”, *Adv. Electron. Mater.*, vol. 7, no. 3, 2000882, Mar. 2021.
- [66] L. Zhang, H. Yu, L. Xiong, J. Si, L. Wang, W. Zhu, “Flexible and thermally stable resistive switching memory in a Ta/TaO<sub>x</sub>/stainless steel structure”, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 11, 115021, Oct. 2020.

- [67] A. Liang, J. Zhang, F. Wang, Y. Jiang, K. Hu, X. Shan, Q. Liu, Z. Song, K. Zhang, “Transparent HfO<sub>x</sub>-based memristor with robust flexibility and synapse characteristics by interfacial control of oxygen vacancies movement”, *Nanotechnology*, vol. 32, no. 14, 145202, Apr. 2021.
- [68] J.-L. Meng, T.-Y. Wang, Z.-Y. He, L. Chen, H. Zhu, L. Ji, Q.-Q. Sun, S.-J. Ding, W.-Z. Bao, P. Zhou, D. W. Zhang, “Flexible boron nitride-based memristor for in situ digital and analogue neuromorphic computing applications”, *Mater. Horiz.*, vol. 8, no. 2, 538–546, Jan. 2021.
- [69] Y. Lin, J. Liu, J. Shi, T. Zeng, X. Shan, Z. Wang, X. Zhao, H. Xu, Y. Liu, “Nitrogen-induced ultralow power switching in flexible ZnO-based memristor for artificial synaptic learning”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 118, no. 10, 103502, Mar. 2021.
- [70] M. Wang, W. Wang, W. R. Leow, C. Wan, G. Chen, Y. Zeng, J. Yu, Y. Liu, P. Cai, H. Wang, D. Ielmini, X. Chen, “Enhancing the Matrix Addressing of Flexible Sensory Arrays by a Highly Nonlinear Threshold Switch”, *Adv. Mater.*, vol. 30, 1802516, July 2018.

## Κεφάλαιο 5: Κατασκευή και χαρακτηρισμός εύκαμπτου και εκτατού αισθητήρα παραμόρφωσης και συνδυασμός του με εύκαμπτη μνήμη για επίδειξη ιδιοτήτων τεχνητού μηχανοϋποδοχέα

### 5.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη αισθητήρων υψηλής απόδοσης που μιμούνται την απόκριση του ανθρώπινου δέρματος σε εξωτερικά μηχανικά ερεθίσματα, είναι ύψιστης σημασίας στην εποχή της τεχνητής νοημοσύνης και της ρομποτικής. Για την υλοποίηση του τεχνητού δέρματος, πρέπει να πληρούνται διάφορες παράμετροι, όπως η ευκαμψία, η βιοσυμβατότητα και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων. Παράλληλα, απαιτείται μια πλατφόρμα εξοπλισμένη με αισθητήρες, τόσο για την ανίχνευση όσο και για την αποθήκευση των εξωτερικών ερεθισμάτων, για την εξομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων του ανθρώπινου δέρματος. Υπό αυτή την προοπτική, σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένας εξαιρετικά ευαίσθητος εύκαμπτος και εκτατός αισθητήρας παραμόρφωσης, που μπορεί να επιτύχει υψηλές ευαισθησίες (Gauge Factor - GF)  $\sim 10^7$ . Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση υποστρώματος πολυδιμεθυλοσιλοξανίου (PDMS) στο οποίο εναποτέθηκαν νανοσωματίδια πλατίνας (Pt NPs) που λειτουργούν ως το αισθητήριο στοιχείο, τοποθετημένα ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια αργύρου (Ag). Ένα κρίσιμο βήμα για την επίτευξη μιας τέτοιας απόδοσης, είναι ο σχηματισμός μιας κυματοειδούς επιφάνειας με πτυχώσεις του υποστρώματος PDMS, μέσω της συνδυασμένης χρήσης προ-έντασης του υποστρώματος και εναπόθεσης λεπτού υμενίου  $Al_2O_3$ , με την τεχνική εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD). Αυτή η τεχνική επιτρέπει την κατασκευή υψηλής ελαστικότητας ηλεκτροδίων. Το μήκος κύματος των κυματισμών καθώς και το ύψος μεταξύ τους από κορυφή σε κοιλάδα (peak-to-valley), μπορούν να ελεγχθούν άμεσα ρυθμίζοντας το εφαρμοζόμενο ποσοστό προ-έντασης επί του αρχικού μήκους του PDMS. Εκμεταλλευόμενοι την εξαιρετική ευαισθησία του αισθητήρα που επιτεύχθηκε, αποδείχθηκε περαιτέρω η εξομοίωση της λειτουργικότητας ενός βιολογικού μηχανοϋποδοχέα (mechanoreceptor) συνδέοντας τον αισθητήρα, σε διάταξη παράλληλου κυκλώματος με μνήμη αγωγίμης γέφυρας που βασίζεται σε  $SiO_2$ . Επιδείχθηκαν επίσης διάφορες συναπτικές ιδιότητες του παραπάνω αισθητηριακού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των συζευγμένων

παλμών ενδυνάμωσης (PPF) και της μακροπρόθεσμης πλαστικότητας (LTP), υποδεικνύοντας τις ικανότητες του συστήματός μας να εκτελεί νευρομορφικούς υπολογισμούς.

Τα τελευταία χρόνια σημαντικό κομμάτι της έρευνας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών σε εύκαμπτα και εκτατά υποστρώματα [1], [2]. Παρά την εξαιρετική πρόοδο που έχει επιτευχθεί στην ανάπτυξη καινοτόμων συσκευών σε υποστρώματα πυριτίου, εξακολουθεί να υπάρχει συνεχής ανάγκη για την κατασκευή ηλεκτρονικών στοιχείων σε εύκαμπτα και εκτατά υποστρώματα, αφού οι εφαρμογές τους στον τομέα των φορητών ηλεκτρονικών έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον [3]. Επιπλέον, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπου οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενεργά, ξεκινώντας από αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καθημερινές δραστηριότητες για την παρακολούθηση διαφόρων ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων, έως πιο πολύπλοκα ολοκληρωμένα συστήματα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολύπλοκες εφαρμογές, όπως έξυπνα τεχνητά προσθετικά δέρματος [4]. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν βελτιωμένη αντοχή στην καταπόνηση, υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια, καθώς και δυνατότητες παρακολούθησης των εξωτερικών ερεθισμάτων σε πραγματικό χρόνο. Για το σκοπό αυτό, βρίσκεται σε εξέλιξη εντατική έρευνα για την ανάπτυξη νέων τεχνικών, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να ξεπεραστούν οι σημερινοί περιορισμοί των συσκευών. Επιπλέον, καθώς οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών, η πρόκληση του μέλλοντος δεν είναι μόνο η κατασκευή νανοδιατάξεων σε εύκαμπτα και ελαστικά υποστρώματα, αλλά και η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα με άλλες νανοδιατάξεις. Ο στόχος της αξιοποίησης τέτοιων διατάξεων στα βιολογικά συστήματα, είναι για την παρακολούθηση διαφορετικών εξωτερικών σημάτων (π.χ. θερμοότητα, πίεση) και τη μετάδοση των συλλεγόμενων πληροφοριών, στα αισθητήρια νεύρα για περαιτέρω επεξεργασία [5-8]. Για το λόγο αυτό, διάφορα εξελιγμένα αισθητηριακά συστήματα έχουν αναφερθεί στο βιβλιογραφία [9-14]. Ωστόσο, απαιτείται ακόμη περαιτέρω πρόοδος για τη μονολιθική ολοκλήρωση των αισθητήριων και νευρομορφικών συστατικών για τη μείωση του συνολικού αποτυπώματος ενός τέτοιου συστήματος και συνεπώς την ενίσχυση της απόδοσης των έξυπνων φορητών ηλεκτρονικών. Η κατασκευή ελαστικών αισθητήριων νευρομορφικών συστημάτων (Stretchable Sensory Neuromorphic Systems - SSNSs), θεωρείται ως ένας πολλά υποσχόμενος υποψήφιος στην ανάπτυξη ελαστικών ηλεκτρονικών με νευρομορφικές λειτουργίες, ικανών για γρήγορη προσαρμογή στον εξωτερικό περιβάλλον [15]. Επιπλέον, η ανάπτυξη των SSNS, είναι ελκυστική καθώς μπορεί να βελτιώσει την μηχανική επαφή ολόκληρου του συστήματος [16], η οποία θα μπορούσε να είναι μεγάλης σημασίας για τη μακροχρόνια λήψη σήματος [17], [18]. Οι δυνατότητες υπολογισμού εντός μνήμης, θα μπορούσαν να βελτιώσουν την καθυστέρηση

της επεξεργασίας των δεδομένων καθώς και την κατανάλωση ενέργειας, ενώ παράλληλα είναι πιο ανθεκτικές στα σφάλματα επεξεργασίας. Η επεξεργασία και διαχείριση των δεδομένων μέσω της χρήσης cloud, επιβάλλει καθυστερήσεις οδηγώντας τη συνολική διεργασία να έχει χαμηλή απόδοση. Αυτό έχει άμεσο ανασταλτικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη ταχύτατων συστημάτων απόκρισης, όπως εξελιγμένα ρομποτικά δέρματα και προσθετικά, το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη της ιδέας του edge computing, που φέρνει τον υπολογισμό και την αποθήκευση δεδομένων πιο κοντά στις πηγές δεδομένων. Έτσι, με την ανάπτυξη αυτής της ιδέας, αναμένεται να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ αίσθησης και επεξεργασίας, να αμβλυθούν τα προβλήματα περιορισμένου εύρους ζώνης των δεδομένων προς επεξεργασία καθώς και να βελτιωθεί η υψηλή κατανάλωση ενέργειας [19]. Όταν το edge computing είναι σε συνδυασμό με εύκαμπτα και εκτατά ηλεκτρονικά στοιχεία, η υλοποίηση της τεχνητής αντίληψης (artificial perception) γίνεται πιο εφικτή [2].

Έτσι, σύμφωνα με το πρωτόκολλο του edge computing, η τεχνητή αντίληψη μετατοπίζει το βάρος της επεξεργασίας των δεδομένων, από τις εξωτερικές μονάδες επεξεργασίας (cloud) στα εύκαμπτα υποστρώματα. Η επεξεργασία των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από αισθητήρες, μπορεί να πραγματοποιηθεί τοπικά, από διατάξεις ενσωματωμένες στα εύκαμπτα υποστρώματα. Είναι επίσης ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε, ότι αυτό το μοτίβο ταξινόμησης, μπορεί να ενισχύσει δραματικά την ακρίβεια της ανίχνευσης ενώ παράλληλα παρέχει καλύτερη απόκριση ανατροφοδότησης στους ενεργοποιητές (actuators) [20-22]. Όσον αφορά τους αισθητήρες καταπόνησης τύπου αντίστασης, το PDMS είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως ως υπόστρωμα μεταξύ διαφόρων υλικών που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, ως βάση για τη δημιουργία καινοτόμων υλικών, ευαίσθητων σε παραμορφώσεις. Η ενσωμάτωση στο PDMS, νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) [23], [24], [25-30], γραφενίου ή οξειδίου του γραφενίου [31-33], σκόνης αργύρου [34], νανοσωματιδίων αργύρου [35], ασημένια νανοσωματιδίων σε σχήμα αχινού [36] και νανοσωματιδίων χρυσού [37], έχουν επίσης αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Είναι ενδιαφέρον όμως να παρατηρήσουμε, ότι αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν υγρές διεργασίες κατά την κατασκευή του υλικού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως το αισθητήριο στοιχείο. Οι διεργασίες αυτές, θα μπορούσαν να αποτελέσουν εμπόδιο προς την παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα αυτού του τύπου των αισθητήρων. Επιπλέον, σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις, είτε οι διατάξεις είναι χαμηλής ευαισθησίας [31], είτε το εύρος ευαισθησίας των αισθητήρων είναι περιορισμένο [37]. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια νέα τεχνική για την κατασκευή κυματοειδούς επιφάνειας του PDMS η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια τεράστια αύξηση στην ευαισθησία του αισθητήρα, με πιθανές εφαρμογές της σε εύκαμπτα και εκτατά ηλεκτρονικά.

Υστερα από την πρώτη αναφερόμενη εργασία σχετικά με το σχηματισμό κυματοειδούς επιφάνειας υμενίου μεταλλικής μεμβράνης στην επιφάνεια του PDMS [38] για το σχηματισμό διατεταγμένων πτυχώσεων, ακολούθησε πολλή έρευνα καθώς η κυματοειδής επιφάνεια του PDMS, μπορεί να οδηγήσει σε εύκαμπτα και εκτατά μεταλλικά ηλεκτρόδια που υπερβαίνουν το όριο καταπόνησης σε σύγκριση με αυτό μιας μη επεξεργασμένης επιφάνειας [39], [40]. Επιπλέον, έχει αναφερθεί, ότι η κυματοειδής επιφάνεια στο PDMS, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πλάσματος οξυγόνου [41-43], πλάσματος αέρα [44], πλάσματος φθοράνθρακα [45], [46], βομβαρδισμού με δέσμη ιόντων [47] ή με ακτίνα λέιζερ [48]. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, η επεξεργασία πλάσματος προκαλεί ρωγμές στην οξειδωμένη ζαρωμένη επιφάνεια του PDMS και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται παχύτερα μεταλλικά υμένα για την κατασκευή των διατάξεων.

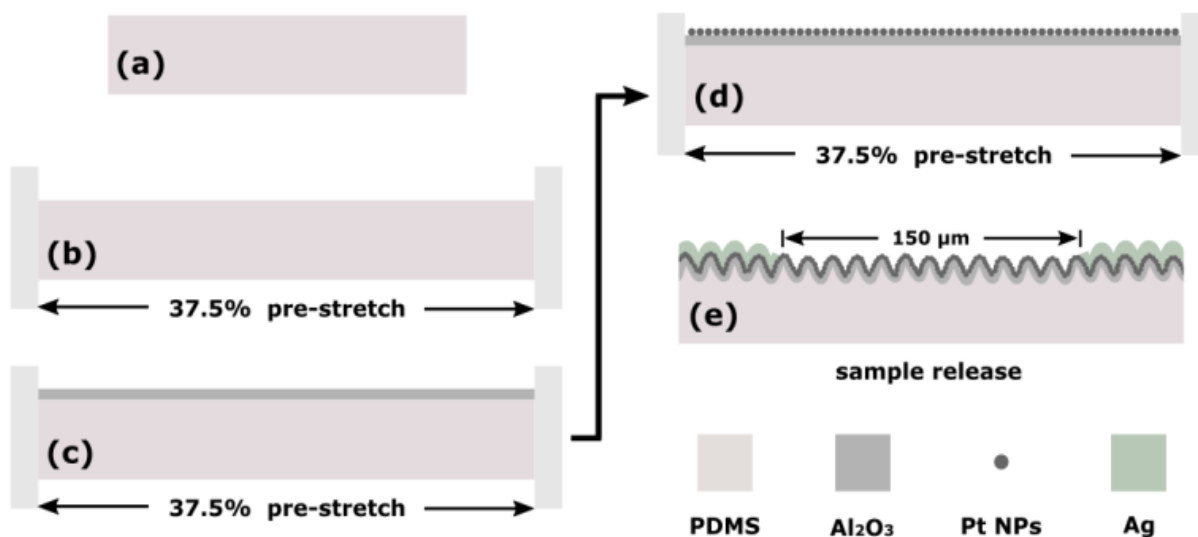
Η διαδικασία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιώντας την τεχνική ALD, δεν έχει αναφερθεί στο παρελθόν, ενώ είναι μια απλή διαδικασία παραγωγής. Επιπλέον, σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές, η ALD προσφέρει ταυτόχρονη ανάπτυξη κυματισμών και στις δύο πλευρές του δείγματος. Η απόδοση του αισθητήρα παρουσιάζει σταδιακή και ελεγχόμενη ευαισθησία σε μεγάλο εύρος τάνυσης με ένα εξαιρετικά υψηλό GF στο τέλος του εύρους μέτρησης, λόγω των ρωγμών που σχηματίζονται από την τάνυση της συσκευής. Παράλληλα, ο αισθητήρας παρουσιάζει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες και στο ίδιο εύρος εξωτερικών ερεθισμάτων με το φυσικό δέρμα [49]. Αυτή η κλιμακούμενη συμπεριφορά του αισθητήρα, δημιουργεί άλλο ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, όταν συνδυάζεται με την εξαιρετικά εύκαμπτη διάταξη μνήμης που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο [50]. Έτσι, παρουσιάζουμε έναν τεχνητό μηχανοϋποδοχέα για τη μετατροπή των μηχανικών φορτίων τάνυσης σε ηλεκτρικές εξόδους που εν συνεχεία χρησιμοποιούνται από συναπτικά στοιχεία για την εκτέλεση διαφόρων νευρομορφικών λειτουργιών. Οι έξοδοι του προτεινόμενου συστήματος, που παρουσιάζουν συμπεριφορά spikes, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου καθώς και για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών ταξινόμησης.

## 5.2 Κατασκευή των εκτατών αισθητήρων

Οι εκτατοί αισθητήρες καταπόνησης αναπτύχθηκαν με βάση τα Pt NPs. Συγκεκριμένα, η διαδικασία κατασκευής τους, είχε την ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά, εναποτέθηκε ένα λεπτό υμένιο αλουμίνιας

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) με την τεχνική ALD, σε ένα προτεταμένο υπόστρωμα PDMS (όπου εφαρμόστηκε προ-ένταση κατά 25%, 37.5% και 75% επί του αρχικού μήκους των υποστρωμάτων). Μετά την εναπόθεση του ALD και ενώ τα δείγματα ήταν ακόμα σε προ-ένταση, ακολούθησε εναπόθεση πυκνού υμενίου Pt NPs υπό κενό, με τη μέθοδο της ιοντοβολής. Στη συνέχεια, ακολούθησε χαλάρωση των δειγμάτων και επαναφορά τους στο αρχικό τους μήκος. Χρησιμοποιώντας μάσκες σκίασης που σχεδιάστηκαν σε φύλλα stainless steel πάχους 80 mm, ενώ τα σχέδια των ηλεκτροδίων μεταφέρθηκαν με τη χρήση laser ( $\mu\text{s}$ ), ακολούθησε στα δείγματα εναπόθεση Ag πάχους 150 nm.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας, διαμορφώθηκαν διατεταγμένοι κυματισμοί στην επιφάνεια του PDMS, όπου το μήκος κύματος και το ύψος των κυματισμών (peak-to-valley) παρουσιάζουν ισχυρή εξάρτηση από το - ει των προτέρων - ποσοστό προ-έντασης του αρχικού μήκους των δειγμάτων. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή ελαστικών ηλεκτροδίων Ag χωρίς υποβάθμιση της ειδικής αντίστασής τους, μετά από την εφαρμογή υψηλών τιμών τάσης. Μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας κατασκευής απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1.

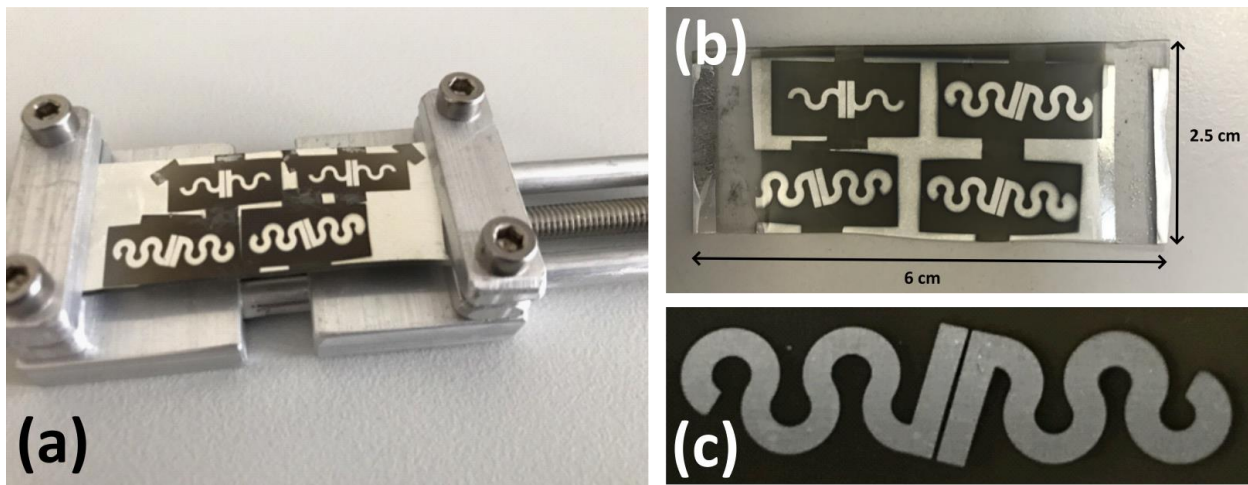


**Εικόνα 5.1:** Σχηματική αναπαράσταση της διατομής της διάταξης (cross-section), κατά τη διαδικασία κατασκευής των αισθητήρων. (a) υπόστρωμα PDMS σε κατάσταση ηρεμίας (b) 37.5% προ-ένταση του PDMS (c) εναπόθεση υμενίου  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3 nm) ενώ το PDMS βρίσκεται σε προ-ένταση (d) εναπόθεση πυκνού στρώματος Pt NPs ενώ το PDMS βρίσκεται ακόμα σε προ-ένταση και (e) χαλάρωση και επιστροφή του δείγματος στην κατάσταση ηρεμίας. Εναπόθεση Ag (150 nm) για διαμόρφωση ηλεκτροδίων.

### 5.2.1 Διαμόρφωση της κυματοειδούς επιφάνειας

Παρόλο που πολλά εύκαμπτα και εκτατά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ως υποστρώματα για εύκαμπτες και εκτατές ηλεκτρονικές συσκευές όπως αισθητήρες και μικροροϊκές διατάξεις, το PDMS είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο, λόγω των ενισχυμένων χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων του. Πιο συγκεκριμένα είναι χημικά αδρανές, βιοσυμβατό και διαφανές, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για βιοεφαρμογές, εμφυτεύματα και οπτικές εφαρμογές [51]. Παράλληλα, η σκληρότητα του PDMS μπορεί να ελεγχθεί κατά τη διαδικασία σύνθεσής του.

Σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιήθηκε Sylgard 184 (Dow Corning) για την προετοιμασία των δειγμάτων. Τα υποστρώματα PDMS, κατασκευάστηκαν μετά από ανάμιξη αναλογίας 10:1 μερών της βάσης προς τον παράγοντα σκλήρυνσης, σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή. Έχει αναφερθεί ότι η θερμοκρασία σκλήρυνσης του PDMS επηρεάζει τις μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον, η τάση εφελκυσμού και το μέτρο Young, αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας σκλήρυνσης [52]. Ως εκ τούτου, το PDMS επιλέχθηκε να σκληρυνθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Κατασκευάστηκαν επίσης δείγματα που σκληρύνθηκαν στους 90 °C για 2 ώρες και στους 120 °C για 1 ώρα, αλλά δεν ήταν ανθεκτικά για τάυση υψηλότερη του 50% του αρχικού τους μήκους. Το πάχος του υποστρώματος PDMS που χρησιμοποιήθηκε στις διατάξεις μας ήταν 1 mm. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μηχανική συσκευή αλουμινίου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την προ-ένταση των υποστρωμάτων του PDMS κατά την εναπόθεση ALD αλλά και κατά τον ηλεκτρικό χαρακτήρισμό των συσκευών μας (Εικόνα 5.2).



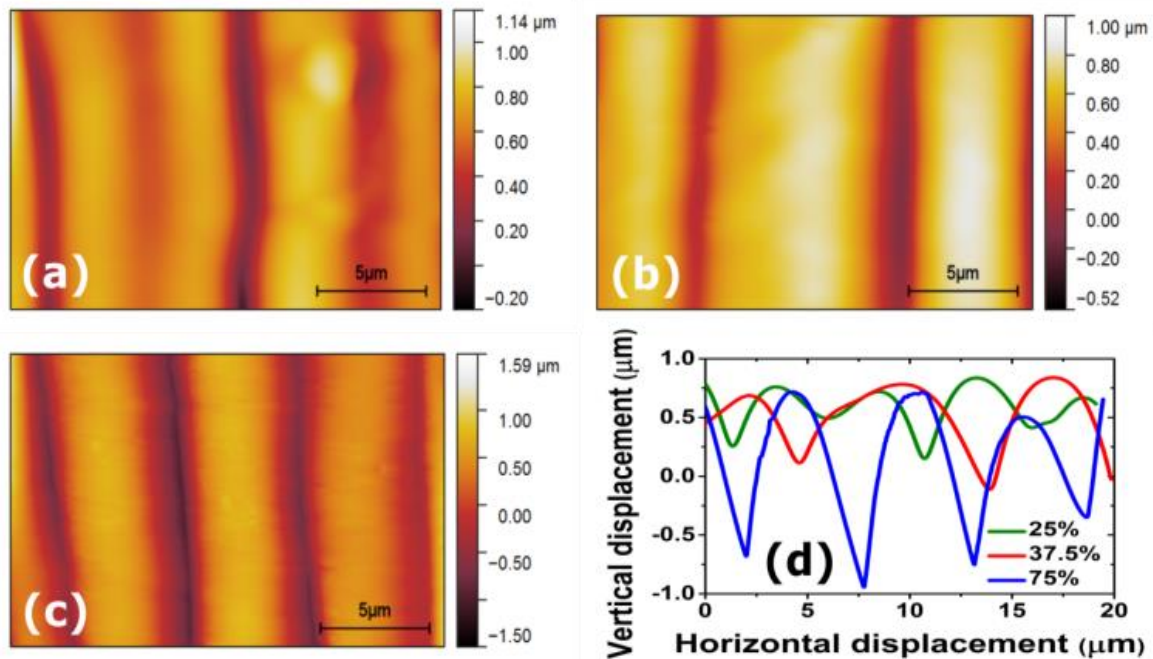


**Εικόνα 5.2:** Εικόνες (a) της συσκευής αλουμινίου που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και τάνυση των αισθητήρων (b) ενός δείγματος με τέσσερις εκατοσούς αισθητήρες και (c) ενός εκαταού αισθητήρα.

Δεδομένου ότι οι κυματισμοί σχηματίζονται όταν μια λεπτή και άκαμπτη μεμβράνη εναποτίθεται πάνω από ένα μηχανικά προτεταμένο ή θερμικά διογκωμένο ελαστομερές, σχετικά παχύτερο σε σύγκριση με το λεπτό υμένιο που θα του εναποτεθεί, μια λεπτή μεμβράνη  $Al_2O_3$  εναποτέθηκε με τη μέθοδο ALD. Τα αρχικά πειράματα αποκάλυψαν ότι 80 κύκλοι  $Al_2O_3$  (~ 8 nm), δεν μπορούσαν να οδηγήσουν στο σχηματισμό κυματισμών μετά τη χαλάρωση του δείγματος. Ως εκ τούτου, μετά από διάφορα πειράματα, βρέθηκε ότι το βέλτιστο πάχος του οξειδίου που θα έπρεπε να εναποτεθεί, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας 30 κύκλους ALD (~ 2.7 nm). Ωστόσο, έγινε αντιληπτό ότι όταν η θερμοκρασία εναπόθεσης αυξανόταν, η λεπτή μεμβράνη συνήθως δημιουργούσε ρωγμές μετά τη χαλάρωση του υποστρώματος. Έτσι, η θερμοκρασία εναπόθεσης διατηρήθηκε στους 80 °C, η οποία ήταν η χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορούσε να επιτευχθεί από το σύστημα ALD.

## 5.2.2 Χαρακτηρισμός της κυματοειδούς επιφάνειας με την τεχνική AFM

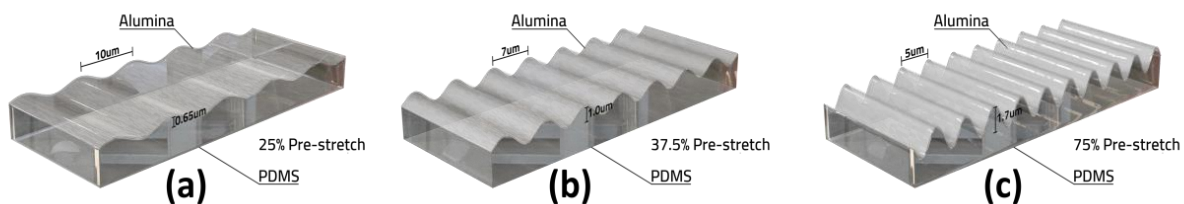
Η διαδικασία σχηματοποίησης της κυματοειδούς επιφάνειας χρησιμοποιώντας την τεχνική ALD, είναι λιγότερο περίπλοκη σε σύγκριση με αυτή του πλάσματος οξυγόνου, καθώς το μήκος κύματος των κυματισμών μπορεί να ελεγχθεί μόνο από την αρχική προ-ένταση του δείγματος. Τα αποτελέσματά μας υποδεικνύουν ότι υπό την επιβολή υψηλότερων φορτίων προ-έντασης, το μήκος κύματος των κυματισμών μειώνεται, ενώ το ύψος τους αυξάνεται. Επιπλέον, καθώς η προ-ένταση γίνεται μεγαλύτερη, οι κυματισμοί σχηματοποιούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην Εικόνα 5.3 (a) – (c), απεικονίζονται εικόνες AFM, δειγμάτων που είχαν εκ των προ-ενταθεί κατά 25%, 37.5% και 75% πριν από την επεξεργασία ALD αντίστοιχα, ενώ στην Εικόνα 5.3 (d) παρουσιάζονται οι σαρώσεις από το προφίλ των δειγμάτων.



**Εικόνα 5.3:** Εικόνες AFM του μοτίβου κυματισμού της επιφάνειας του PDMS μετά την εναπόθεση ALD (a) του δείγματος που έχει προ-ενταθεί κατά 25% επί του αρχικού του μήκους (b) του δείγματος που έχει προ-ενταθεί κατά 37.5% επί του αρχικού του μήκους (c) του δείγματος που έχει προ-ενταθεί κατά 75% επί του αρχικού του μήκους. (d) Σαρώσεις από το προφίλ κάθε δείγματος.

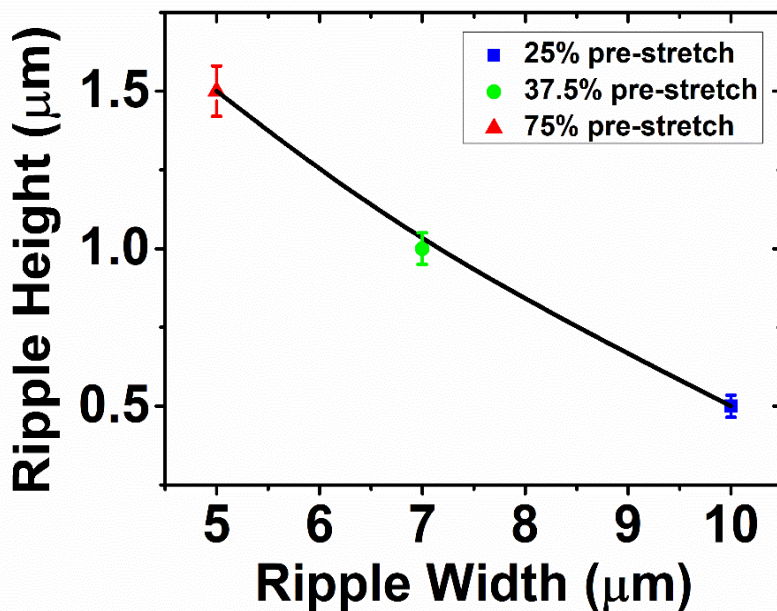
Στην Εικόνα 5.4, παρουσιάζονται τρισδιάστατα μοντέλα των δειγμάτων μετά την εναπόθεση ALD και την επαναφορά των δειγμάτων στο αρχικό τους μήκος, όπου απεικονίζεται το μήκος κύματος μεταξύ των κυματισμών αλλά και το ύψος τους. Προηγήθηκε προ-ένταση των δειγμάτων κατά 25%, 37.5% και 75%. Είναι εμφανές, ότι το δείγμα με τη χαμηλότερη προ-ένταση, 25%, έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος μεταξύ των κυματισμών (~10 μm), ενώ παράλληλα και ύψος τους είναι το μικρότερο σε σύγκριση με τα άλλα δείγματα (~650 nm). Το δείγμα με προ-ένταση 37.5% έχει μήκος κύματος μεταξύ των κυματισμών ~ 7 μm και ύψος κυματισμών ~ 1 μm και τέλος δείγμα με προ-ένταση 75% έχει μήκος κύματος μεταξύ των κυματισμών ~ 5 μm και ύψος κυματισμών ~ 1.7 μm.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι εφόσον σε αυτή την τεχνική η μόνη παράμετρος που καθορίζει τα μοτίβα των κυματισμών στην επιφάνεια του PDMS είναι η προ-ένταση του δείγματος, δεν είναι δυνατό να διαμορφωθούν καλά καθορισμένοι κυματισμοί, χρησιμοποιώντας χαμηλές τιμές προ-έντασης. Για προεντάσεις < 15% επί του αρχικού μήκους του δείγματος, η επιφάνεια του PDMS σχηματίζεται με ακαθόριστους κυματισμούς.



**Εικόνα 5.4:** Τρισδιάστατη απεικόνιση υποστρωμάτων PDMS που προ-εντάθηκαν κατά (a) 25% (b) 37.5% και (c) 75%, πριν από την εναπόθεση ALD και στη συνέχεια επαναφέρθηκαν στο αρχικό τους μήκος.

Στην Εικόνα 5.5, απεικονίζεται η γραμμική σχέση μεταξύ της προ-έντασης του δείγματος, με το μήκος κύματος και το ύψος των κυματισμών.

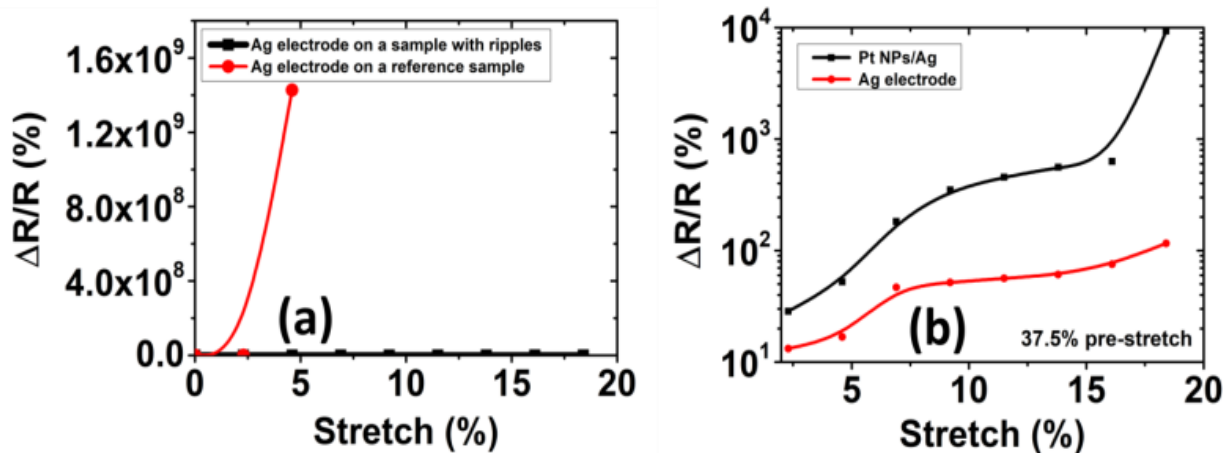


**Εικόνα 5.5:** Σχέση μεταξύ του ποσοστού προ-έντασης του δείγματος και του μήκους κύματος καθώς και του ύψους των κυματισμών, για δείγματα που προ-εντάθηκαν κατά 25%, 37.5% και 75% επί του αρχικού τους μήκους. Τα error bars αντιπροσωπεύουν τη μεταβλητότητα μεταξύ 10 διαφορετικών δειγμάτων κάθε ποσοστού προ-έντασης.

## 5.3 Χαρακτηρισμός των διατάξεων

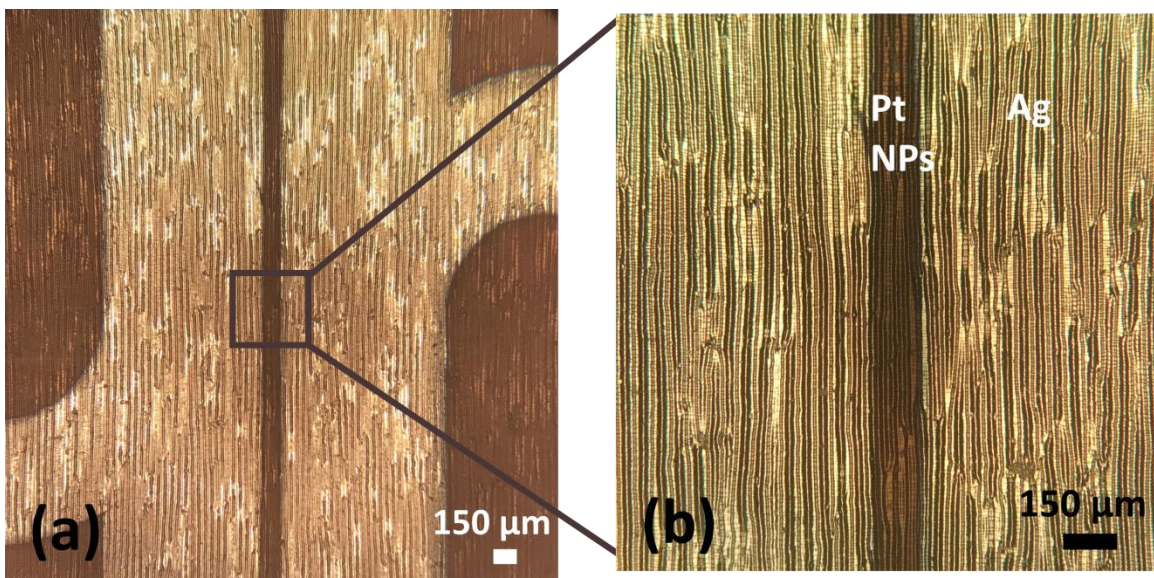
### 5.3.1 Χαρακτηρισμός των εκτατών ηλεκτροδίων

Το στάδιο εναπόθεσης του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  δεν προκαλεί μόνο κυματισμούς σε μια προεταμμένη επιφάνεια PDMS μετά τη διαδικασία χαλάρωσης, αλλά είναι επίσης ένα ουσιαστικό βήμα για τη μετατροπή της υδρόφοβης επιφάνειας PDMS σε υδρόφιλη και ως εκ τούτου για την προώθηση της πρόσφυσης του μεταλλικού υμενίου στο PDMS [53]. Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι οι κυματισμοί στην επιφάνεια του PDMS ενισχύουν την ευελιξία των ηλεκτροδίων που κατασκευάζονται σε ένα ελαστικό υπόστρωμα σε σύγκριση με αυτή μιας μη επεξεργασμένης επιφάνειας [3], [54], [55]. Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες, κατασκευάσαμε ένα δείγμα αναφοράς, που αποτελείται από ένα υπόστρωμα PDMS όπου εναποθέσαμε 3 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και ενώ το υπόστρωμα ήταν σε κατάσταση ηρεμίας. Στη συνέχεια εναποτέθηκαν ηλεκτρόδια Ag πάχους 150 nm με τη χρήση της τεχνικής της ιοντοβολής. Παράλληλα με το δείγμα αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα PDMS, το οποίο είχε προ-ενταθεί κατά 37.5% επί του αρχικού του μήκους. Μετά την εναπόθεση 3 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  με τη μέθοδο ALD, επαναφέραμε το δείγμα σε κατάσταση ηρεμίας και εναποθέσαμε ηλεκτρόδια Ag πάχους 150 nm με τη χρήση της ιοντοβολής. Τα ηλεκτρόδια και στα δύο δείγματα ήταν όμοια ενώ σχηματοποιήθηκαν με χρήση μάρσας σκίασης. Στην Εικόνα 5.6 (a) απεικονίζεται η σχετική αλλαγή στην αντίσταση των δύο δειγμάτων υπό εφαρμοζόμενη τάση. Είναι προφανές ότι στο δείγμα χωρίς κυματισμούς (δείγμα αναφοράς), για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 1%, η αντίσταση του ηλεκτροδίου Ag αυξάνεται γρήγορα. Στο δείγμα με κυματισμούς, η αντίσταση του Ag δεν επηρεάζεται σημαντικά από την εφαρμοζόμενη τάση και για παραμόρφωση έως 20%. Στην Εικόνα 5.6 (b), απεικονίζεται η σχετική μεταβολή στην αντίσταση ενός αισθητήρα και ενός ηλεκτροδίου Ag που εναποτέθηκε μετά τη δημιουργία κυματισμών (χρησιμοποιώντας 37.5% προέκταση).



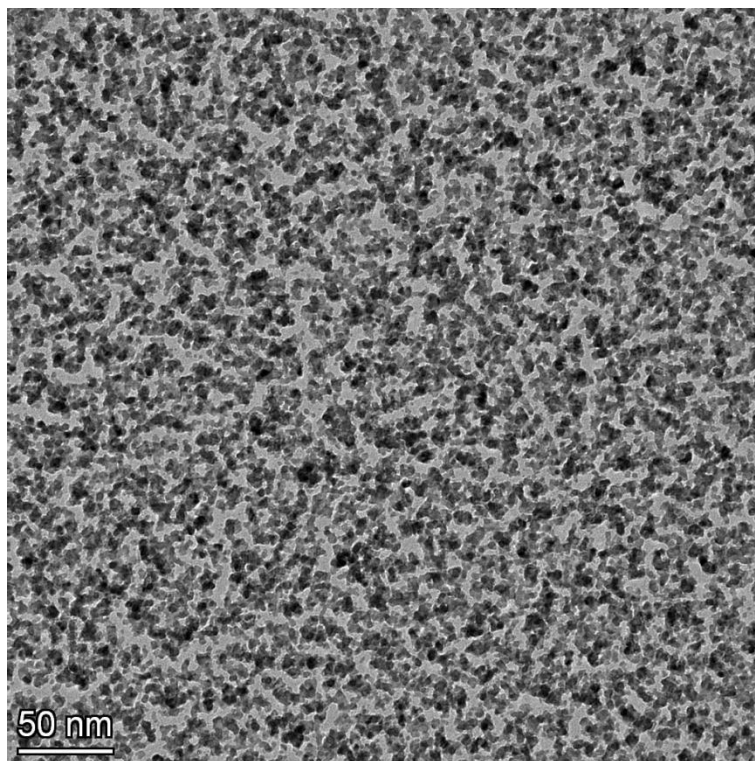
**Εικόνα 5.6:** (a) Σχετική αλλαγή της αντίστασης του ηλεκτροδίου Ag για ένα δείγμα αναφοράς και για ένα δείγμα με κυματισμούς στην επιφάνεια του PDMS (b) σχετική αλλαγή στην αντίσταση ενός αισθητήρα (με NPs) που κατασκευάστηκε με διαδικασία προεντάσεως 37.5% που φαίνεται στην Εικόνα 5.1 και ενός ηλεκτροδίου Ag με κυματισμούς (χωρίς NPs).

Στη συνέχεια προχωρήσαμε στην κατασκευή αισθητήρα τάυσης ακολουθώντας την ακολουθία διεργασίας που απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1. Ένα υπόστρωμα PDMS προ-εντάθηκε κατά 37.5% επί του αρχικού του μήκους και στη συνέχεια εναποτέθηκαν 3 nm  $Al_2O_3$  με την τεχνική ALD. Μετά την εναπόθεση ALD και ενώ τα δείγματα ήταν ακόμα σε προ-ένταση, ένα πυκνό φιλμ Pt NP εναποτέθηκε και στη συνέχεια, επαναφέραμε το δείγμα σε κατάσταση ηρεμίας για να πραγματοποιήσουμε την εναπόθεση των ηλεκτροδίων Ag με τη χρήση της ιοντοβολής (Εικόνα 5.1 (b), (c)). Για τη σχηματοποίηση των ηλεκτροδίων χρησιμοποιήθηκαν μάσκες σκίασης, ενώ το κενό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ήταν 150  $\mu m$  (Εικόνα 5.7).



**Εικόνα 5.7:** (a) Διάκενο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων του αισθητήρα και (b) Η περιοχή των Pt NPs και η περιοχή των ηλεκτροδίων Ag.

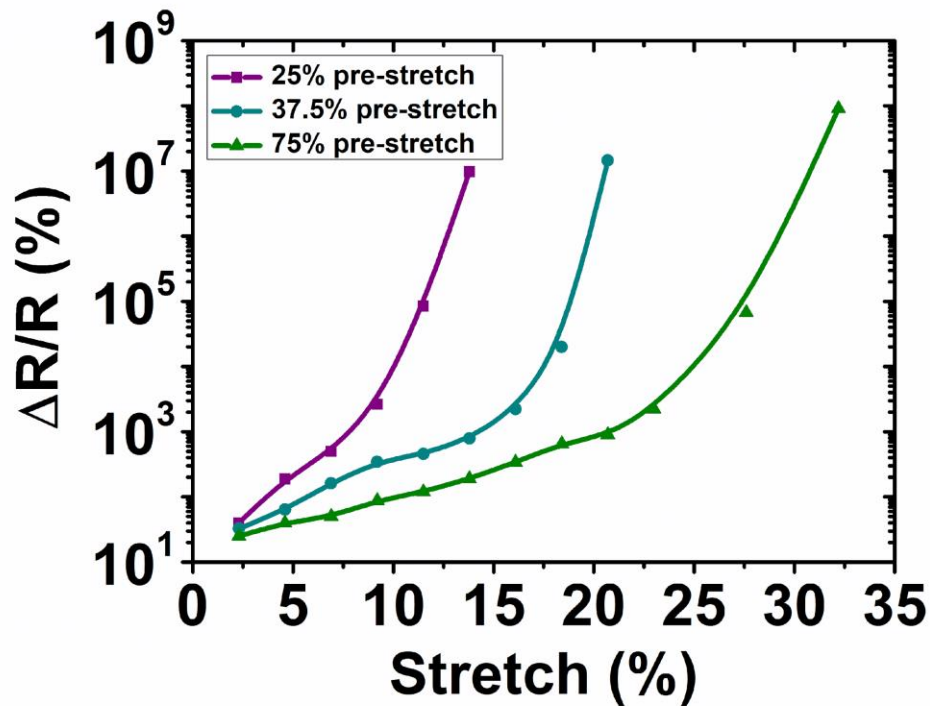
Πραγματοποιήθηκε επίσης εναπόθεση του πυκνού στρώματος των Pt NPs που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του αισθητήρα και σε TEM grid, ώστε να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του στρώματος των Pt NPs μέσω TEM και τον υπολογισμό της επιφανειακής τους κάλυψης. Η απεικόνισή τους φαίνεται στη Εικόνα 5.8, όπου υπολογίσαμε την επιφανειακή τους κάλυψη περίπου στο 76%. Μπορούμε να παρατηρήσουμε από την εικόνα 5.6 (b) ότι το στρώμα των Pt NPs, αυξάνει την ευαισθησία του αισθητήρα κατά δύο τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με το μεταλλικό υμένιο. Η κοκκώδης μορφολογία του στρώματος των Pt NPs βοηθά στη σταθερή αύξηση της αντίστασης του αισθητήρα καθώς αυξάνεται η εφαρμοζόμενη τάση σε αυτόν.



**Εικόνα 5.8:** Εικόνα TEM του πυκνού στρώματος των Pt NPs. Η επιφανειακή κάλυψη είναι 76%.

### 5.3.2 Χαρακτηρισμός των εκτατών αισθητήρων

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της αρχικής προ-έντασης του υποστρώματος στην τελική απόδοση της συσκευής, κατασκευάσαμε αισθητήρες με Pt NPs, χρησιμοποιώντας δείγματα PDMS που υποβλήθηκαν σε τρεις διαφορετικές προ-εντάσεις (25%, 37.5% και 75%), ακολουθώντας για κάθε δείγμα τη διαδικασία που φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Στην Εικόνα 5.9, απεικονίζεται η σχετική απόκριση της αντίστασης των τριών δειγμάτων, ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάνυσής τους. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μπορούμε να συναγάγουμε το συμπέρασμα ότι το δείγμα με τη μέγιστη προ-ένταση κατά τη διαδικασία κατασκευής του, έχει μεγαλύτερο εύρος απόκρισης, πριν υποβαθμιστεί πλήρως. Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι οι διατάξεις, είναι λειτουργικές στο μισό περίπου της αρχικής τιμής προ-έντασης τους κατά την κατασκευή. Παρατηρήσαμε ότι αυτό το μοτίβο είναι παρόμοιο για όλα τα δείγματα που κατασκευάστηκαν για κάθε τιμή προ-έντασης, επιτρέποντας έτσι τη ρύθμιση του εύρους ευαισθησίας του αισθητήρα, προσαρμόζοντας την τιμή προ-έντασης.



**Εικόνα 5.9:** Σχετική απόκριση αντίστασης δειγμάτων που είχαν προ-ενταθεί 25%, 37.5% και 75% επί του αρχικού τους μήκους, ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάνυσης.

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα καταπόνησης ορίζεται από τον παράγοντα GF και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (5.1)$$

όπου,  $\varepsilon$  είναι η εφαρμοζόμενη τάνυση και μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ ,  $L_0$  είναι το αρχικό μήκος του αισθητήρα, ενώ  $\frac{\Delta R}{R}$  είναι η σχετική μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα. Σε αυτή την περίπτωση, η τάνυση είναι εφαρμόζεται τεντώνοντας τους αισθητήρες. Η ευαισθησία κάθε αισθητήρα χωρίζεται σε τρεις ή τέσσερις περιοχές ανάλογα με την αρχική προ-ένταση που εφαρμόστηκε κατά την κατασκευή τους. Ο αισθητήρας με 25% αρχική προ-ένταση, εμφανίζει τρεις διαφορετικές περιοχές



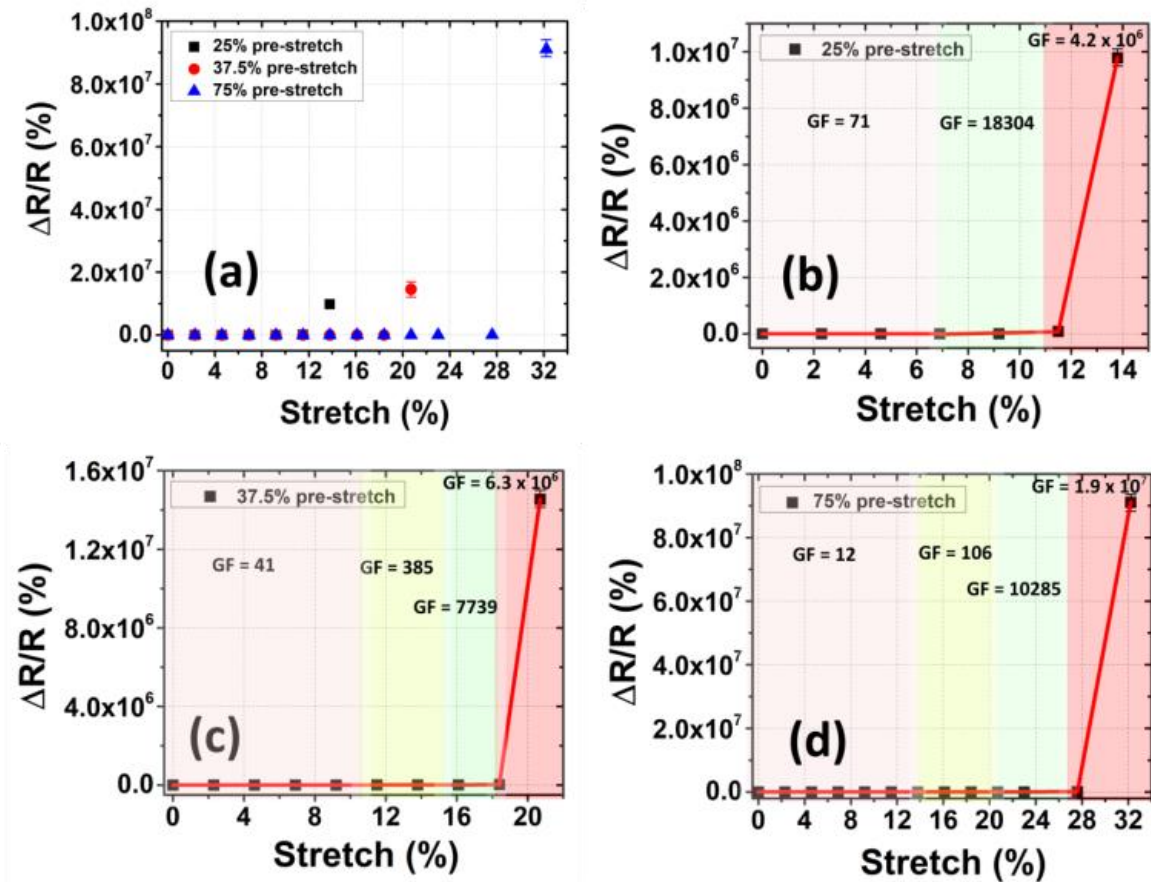
ευαισθησίας, ενώ οι αισθητήρες με 37.5% και 75% αρχικής προ-ένταση, παρουσιάζουν τέσσερις διαφορετικές περιοχές ευαισθησίας.

Στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζονται οι διαφορετικές περιοχές ευαισθησίας για τους τρεις διαφορετικούς αισθητήρες. Είναι σαφές, ότι αυξάνοντας την εφαρμοζόμενη προ-ένταση κατά τη διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα, διευρύνεται το εύρος μέτρησης της τάνυσης, ενώ μπορούν να επιτευχθούν αισθητήρες με εξαιρετικά υψηλά GF σε συγκεκριμένες περιοχές τάνυσης. Παρατηρείται λοιπόν ότι το υψηλό GF, αυξάνεται με την επιβολή μεγαλύτερων τιμών προ-έντασης, ενώ η αντίθετη τάση παρατηρείται για τις χαμηλότερες τιμές.

Pre-stretch	Stretch (%)															
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
25%				18304		4.2 x 10 <sup>6</sup>		X								
37.5%	G				41		385		7739		6.3 x 10 <sup>6</sup>		X			
75%	F				12		106		10285		1.9 x 10 <sup>7</sup>					

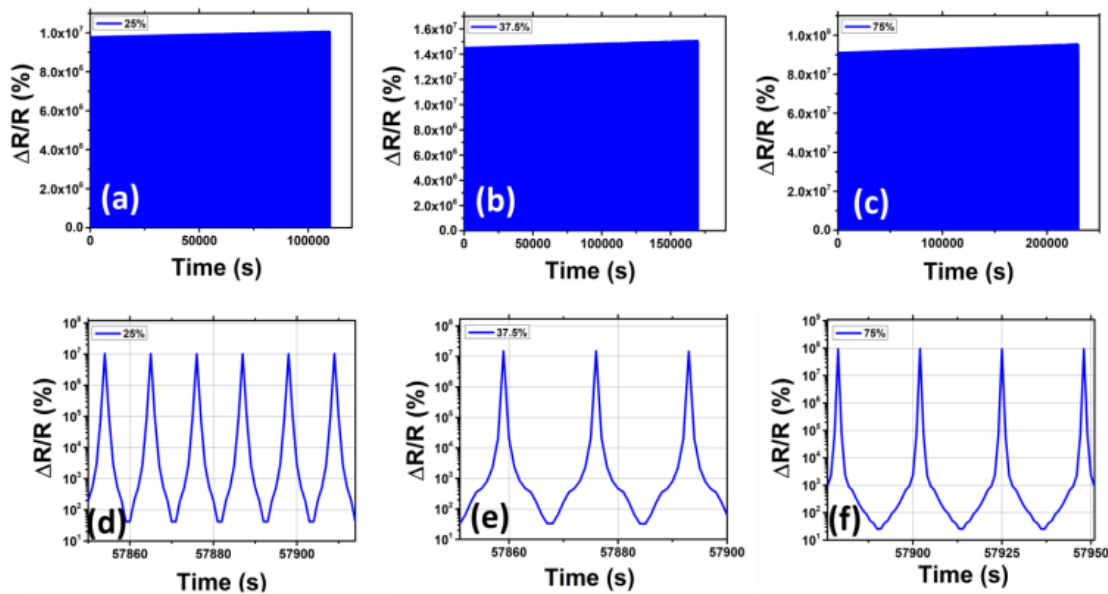
**Πίνακας 5.1:** Ευαισθησίες αισθητήρων στο εύρος τάνυσης 0 - 32%.

Στο σχήμα 5.10(a) φαίνονται τα γραφήματα  $\Delta R/R$  (%) έναντι της παραμόρφωσης (%) και για τους τρεις αισθητήρες, ενώ στο σχήμα 5.10 (b)-(d), απεικονίζεται το  $\Delta R/R$  (%) έναντι της παραμόρφωσης (%) για κάθε αισθητήρα.



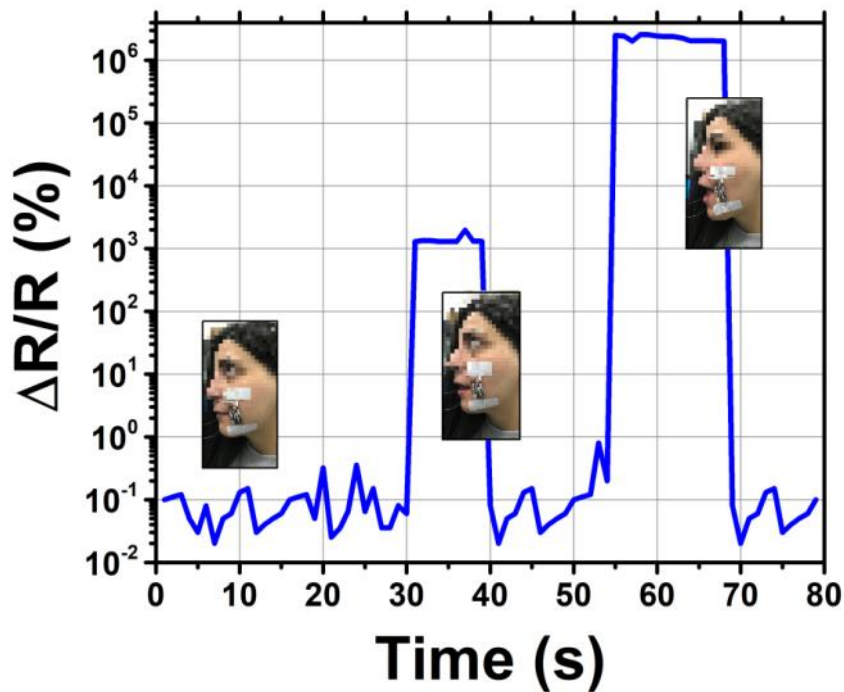
**Εικόνα 5.10:**  $\Delta R/R\%$  συναρτήσεως της τάνυσης για (a) όλους τους αισθητήρες έως και 32% τάνυσης και για τους αισθητήρες που είχε προενταθεί κατά (b) 25% (c) 37.5% και (d) 75%, κατά την κατασκευή. Τα error bars αντιπροσωπεύουν τη μεταβλητότητα μεταξύ 10 διαφορετικών δειγμάτων για κάθε προ-ένταση.

Πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα καταπόνησης, αφού προσαρμόστηκε η συσκευή για την τάνυση των αισθητήρων σε βηματικό κινητήρα, ο οποίος τροφοδοτήθηκε και ελεγχόταν από μικροελεγκτή (Arduino Uno) και επιτρέπει την εκτέλεση αξιόπιστων δοκιμών κόπωσης. Οι αισθητήρες εμφανίζουν επαναλαμβανόμενη απόδοση μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τάνυσης. Επιπλέον, στην Εικόνα 5.11(a) - (c) παρουσιάζεται η σχετική αλλαγή αντίστασης των αισθητήρων κατά τη διάρκεια 10000 κύκλων τάνυσης. Όπως παρατηρείται, η απόδοσή τους παραμένει σταθερή. Αυτή η αξιόπιστη συμπεριφορά των αισθητήρων ήταν αναμενόμενη, καθώς το μαλακό και πορώδες στρώμα των Pt NPs επιτρέπει την επαναφορά της αγωγιμότητας του φιλμ στην αρχική του κατάσταση, μετά την παραμόρφωση του αισθητήρα. Επιπλέον, στην Εικόνα 5.11(d) - (f) απεικονίζεται ένας περιορισμένος αριθμός κύκλων για κάθε δείγμα.



**Εικόνα 5.11:**  $\Delta R/R$  (%) συναρτήσε του χρόνου για 10000 κύκλους τάνυσης για τον αισθητήρα που είχε προ-ενταθεί κατά (a) 25% (b) 37.5% και (c) 75% κατά την κατασκευή. Τα γραφήματα (d) – (f) δείχνουν έναν περιορισμένο αριθμό κύκλων τάνυσης για τους αισθητήρες που είχαν προ-ενταθεί κατά την κατασκευή κατά 25%, 37.5% και 75%, αντίστοιχα.

Για να επιβεβαιωθεί η λειτουργικότητα των αισθητήρων υπό πραγματικές συνθήκες, σχεδιάσαμε ένα πείραμα, με σκοπό να διαπιστώσουμε την ικανότητα του προτεινόμενου αισθητήρα να λειτουργεί ως τεχνητό δέρμα που είναι σε θέση να ανιχνεύει την κίνηση της κάτω γνάθου. Σε αυτό το πείραμα, ένας εκατός αισθητήρας PDMS (κατασκευασμένος με 75% προ-ένταση κατά την κατασκευή του) τοποθετήθηκε πάνω από ένα ανθρώπινο μάγουλο. Η τοποθέτηση του αισθητήρα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μονωτικής ταινίας όταν η σιαγόνα του ατόμου ήταν κλειστή, επομένως χωρίς τέντωμα του υποστρώματος PDMS. Πρέπει να επισημάνουμε ότι η μονωτική ταινία παρείχε καλή πρόσφυση στο δέρμα, εξασφαλίζοντας σωστή επιμήκυνση και ανάκτηση του υποστρώματος μετά από οποιαδήποτε κίνηση της κάτω γνάθου. Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στην Εικόνα 5.12.



**Εικόνα 5.12:**  $\Delta R/R\%$  συναρτήσεως του χρόνου για 2 κινήσεις/γωνίες της κάτω γνάθου που αντιστοιχούν σε τάνυση του PDMS 20% και 27% αντίστοιχα. Ο εκτατός αισθητήρας κατασκευάστηκε με 75% προ-ένταση υποστρώματος.

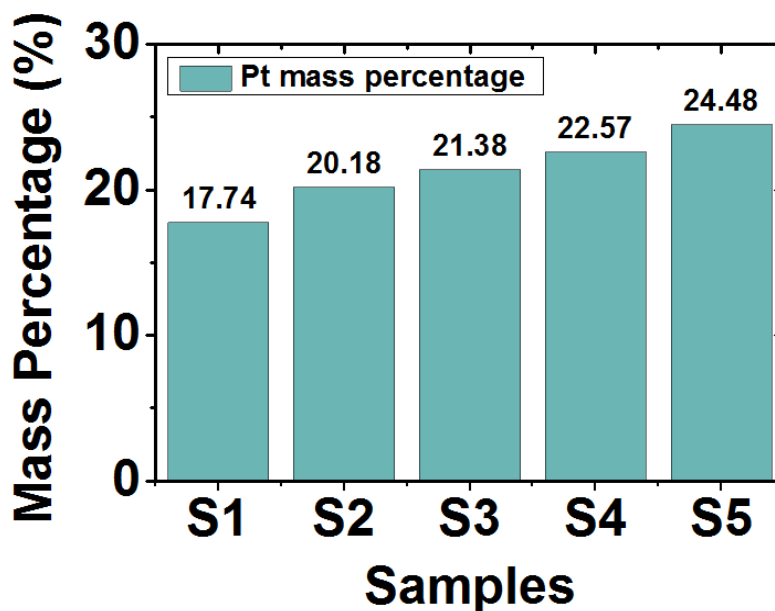
### 5.3.3 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) του στρώματος των Pt NPs

Δεδομένου ότι ο κυματισμός σχηματίζεται όταν μια λεπτή και άκαμπτη μεμβράνη εναποτίθεται πάνω από ένα μηχανικά προτεταμένο υπόστρωμα, θα μπορούσε να υποθεθεί ότι ο σχηματισμός κυματισμού, θα μπορούσε επίσης να επιτευχθεί με την απευθείας εναπόθεση ενός πυκνού στρώματος Pt NPs σε ένα προτεταμένο υπόστρωμα, χωρίς προηγούμενη εναπόθεση ALD. Προκειμένου να καταλήξουμε στο συμπέρασμα εάν η εναπόθεση ALD είναι ένα ουσιαστικό βήμα για το σχηματισμό κυματισμού, για την προώθηση της αγωγιμότητας του στρώματος των Pt NPs, αλλά και για να κατανοήσουμε την επίδραση της προ-έντασης στη συμπεριφορά του αισθητήρα, πραγματοποιήσαμε μετρήσεις EDS. Στον Πίνακα 2, απεικονίζονται τα διαφορετικά δείγματα και η αντίστοιχη επεξεργασία τους, πριν από τις μετρήσεις EDS.

Sample Code	Processing Conditions
S1	3 nm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Pt NPs
S2	37.5% pre-stretch / Pt NPs
S3	25% pre-stretch / 3 nm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Pt NPs
S4	37.5% pre-stretch / 3 nm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Pt NPs
S5	75% pre-stretch / 3 nm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Pt NPs

**Πίνακας 5.2:** Τα δείγματα και η επεξεργασία τους που μετρήθηκαν με EDS

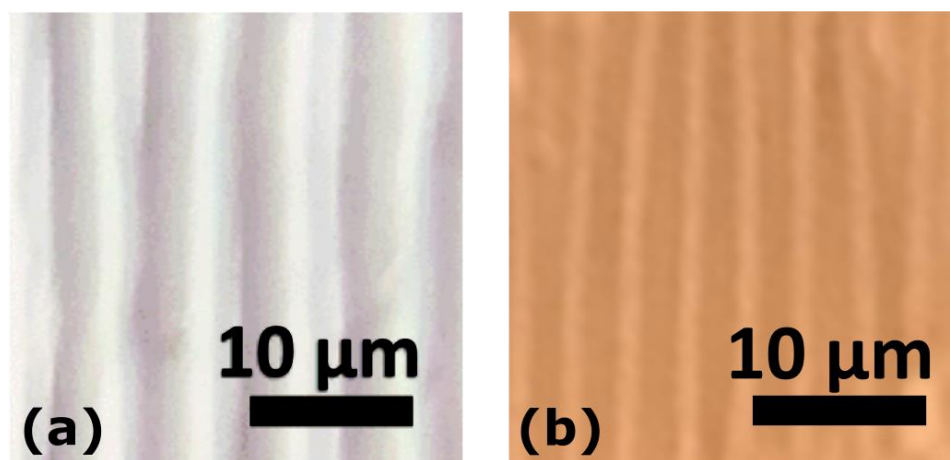
Το δείγμα S1, ήταν ένα υπόστρωμα PDMS στο οποίο εναποτέθηκαν 3 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και στη συνέχεια, ακολούθησε εναπόθεση πυκνού φιλμ Pt NPs. Το δείγμα S2 προ-εντάθηκε κατά 37.5% επί του αρχικού μήκους του υποστρώματος PDMS, στο οποίο εναποτέθηκε στη συνέχεια ένα πυκνό φιλμ από Pt NPs, ενώ τα δείγματα S3, S4 και S5, ήταν προ-ενταμένα υποστρώματα PDMS κατά 25%, 37.5% και 75% επί του αρχικού τους μήκους, αντίστοιχα, στα οποία εναποτέθηκαν 3 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ενώ ακολουθήθηκε εναπόθεση ενός πυκνού φιλμ Pt NPs. Ο σκοπός της χρήσης του δείγματος S1 ήταν να διερευνηθεί το ποσοστό μάζας των Pt NPs στην επιφάνεια των δειγμάτων χωρίς κυματισμούς. Όλες οι συνθήκες εναπόθεσης των Pt NPs ήταν ίδιες για όλα τα δείγματα. Στο Εικόνα 5.13, απεικονίζεται το ποσοστό μάζας Pt ανά μονάδα μήκους (βάρος % του Pt) για όλα τα δείγματα.



**Εικόνα 5.13:** Ανάλυση EDS για το ποσοστό μάζας Pt ανά μονάδα μήκους των πέντε διαφορετικών δειγμάτων.

Συγκρίνοντας το δείγμα S1 με το S2, μπορούμε ξεκάθαρα να παρατηρήσουμε ότι η προ-ένταση του υποστρώματος παίζει πιο κρίσιμο ρόλο σε σύγκριση με την εναπόθεση ενός  $\text{Al}_2\text{O}_3$  πάχους 3 nm σε ένα υπόστρωμα που βρίσκεται σε ηρεμία, στο ποσοστό μάζας Pt και ως εκ τούτου, στην αγωγιμότητα του στρώματος των Pt NPs. Ωστόσο, η εναπόθεση ALD ενισχύει το σήμα Pt του EDS, το οποίο μπορεί να ληφθεί υπόψη από το μετρούμενο ποσοστό μάζας του Pt μεταξύ των δειγμάτων S2 και S3. Επιπλέον, συγκρίνοντας τα S3, S4 και S5, συμπεραίνουμε ότι για υψηλότερες τιμές προ-έντασης, προκύπτει μεγαλύτερο ποσοστό Pt ανά μονάδα μήκους στην επιφάνεια των δειγμάτων, κάτι που έχει ήδη επιβεβαιωθεί και πειραματικά σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων που έγιναν σε αυτά τα πέντε δείγματα, έδειξαν ότι η αντίσταση του στρώματος των Pt NPs των S1 και S2, είναι της τάξης μεγέθους των GOhm και MOhm, αντίστοιχα, ενώ η αντίσταση των S3, S4, S5 είναι της τάξης των Ohm. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εναπόθεση ενός πυκνού στρώματος Pt NPs σε ένα προεταμένο υπόστρωμα PDMS (δείγμα S2), δημιουργεί κυματισμούς μετά τη χαλάρωση του δείγματος με μειωμένο μήκος κύματος σε σύγκριση με αυτό που δημιουργεί μια λεπτή μεμβράνη  $\text{Al}_2\text{O}_3$  που αποδίδεται στην κοκκώδη μορφολογία της μεμβράνης Pt NPs (Εικόνα 5.14(a), (b)) [56].



**Εικόνα 5.14:** Οπτική εικόνα της επιφάνειας PDMS που προ-εντάθηκε κατά 37.5% επί του αρχικού του μήκους, ακολουθούμενο από εναπόθεση (α) 3 nm  $Al_2O_3$  και (β) από ένα πυκνό στρώμα Pt NPs. Οι εικόνες λήφθηκαν μετά τη επαναφορά των δειγμάτων στην κατάσταση ηρεμίας τους.

Ως αποτέλεσμα, στο δείγμα S2, το στρώμα των Pt NPs δεν είναι αρκετά πυκνό μετά από προ-ένταση και χαλάρωση του δείγματος και κατά συνέπεια μετράται υψηλή τιμή αντίστασης στα Pt NPs σε σύγκριση με τα φιλμ S3, S4, S5 NP.

### 5.3.4 Ευαισθησία των εκτατών αισθητήρων

Οι εκτατοί αισθητήρες, παρουσιάζουν μια σταδιακή αύξηση της ευαισθησίας τους μέχρι μια κρίσιμη τιμή, στην οποία οι αισθητήρες εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλό GF (Πίνακας 5.1 και Εικόνα 5.10 (b) - (d)). Από προηγούμενες έρευνες σε αισθητήρες βασισμένους σε NP που πραγματοποιήθηκαν είτε σε υποστρώμα πυριτίου [57], είτε σε εύκαμπτο υποστρώμα πολυϊμιδίου [58], γνωρίζουμε ότι το GF βρίσκεται στην περιοχή 30-40 για μικρές τιμές καταπόνησης (στην περίπτωση υποστρώματος πυριτίου), ενώ μπορεί να πάει έως και στην περιοχή 50-70 για υψηλότερες καταπονήσεις που εφαρμόζονται σε εύκαμπτα υποστρώματα. Ο περιορισμός της τιμής του GF, προέρχεται από τον μηχανισμό διάνοιξης σήραγγας (tunneling mechanism) που διέπει τη μεταφορά φορτίου μέσω του δικτύου νανοσωματιδίων που έχει επίσης διερευνηθεί θεωρητικά [59]. Η αυξημένη ευαισθησία που παρατηρείται στην περίπτωση των αισθητήρων που κατασκευάζονται σε υποστρώματα πολυϊμιδίου, έχει αποδοθεί στη δημιουργία και σταδιακή διαστολή των ρωγμών μετά την καταπόνηση του υποστρώματος της διάταξης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την «κατάρρευση» ορισμένων από τις διαθέσιμες αγωγίμες οδούς [60]. Με τη σειρά μας, έχουμε προτείνει ότι η κρίσιμη τιμή της ευαισθησίας των αισθητήρων (ή αλλιώς εξαιρετικά υψηλού GF), σχετίζεται με τη διακοπή της πλειονότητας των διαθέσιμων αγωγίμων δρόμων, λόγω του σχηματισμού απόστασης μεταξύ των ρωγμών, που δεν μπορεί να «γεφυρωθεί» μέσω του φαινομένου της κβαντικής σήραγγας. Στον Πίνακα 5.3, παρουσιάζεται η ευαισθησία προσφάτως αναφερθέντων αισθητήρων καταπόνησης, που έχουν κατασκευασθεί σε υποστρώματα PDMS. Στις περισσότερες από τις αναφερόμενες μελέτες, είτε το GF είναι χαμηλό [24], [26], [28], [30], [34], [36], είτε ο αισθητήρας πρέπει να τεντωθεί σε εξαιρετικά υψηλές τιμές [33], για να παρουσιάσει υψηλό GF, κάτι που δεν είναι ελκυστικό

για εφαρμογές τεχνητού δέρματος, καθώς το ανθρώπινο δέρμα δεν μπορεί να τεντωθεί σε τόσο υψηλές τιμές.

Sensing materials	Sensing range (%)	Maximum GF	Substrate	Stability	Reference
VACNT/PDMS	30	6436,80	PDMS	>10000	[24]
CNT/PDMS	80	1362,70	PDMS	>10000	[26]
CNT	45	35,75	PDMS	1000	[28]
CNT-GR	120	186,50	PDMS	10000	[30]
rGO	300	167665,60	PDMS	10000	[33]
Ag/PDMS	50	939,00	PDMS	-	[34]
Ag NPs	25	60,00	PDMS	>2500	[36]
<b>Pt NPs</b>	<b>32</b>	<b>6,3 x 10<sup>6</sup></b>	<b>PDMS</b>	<b>10000</b>	<b>this work</b>

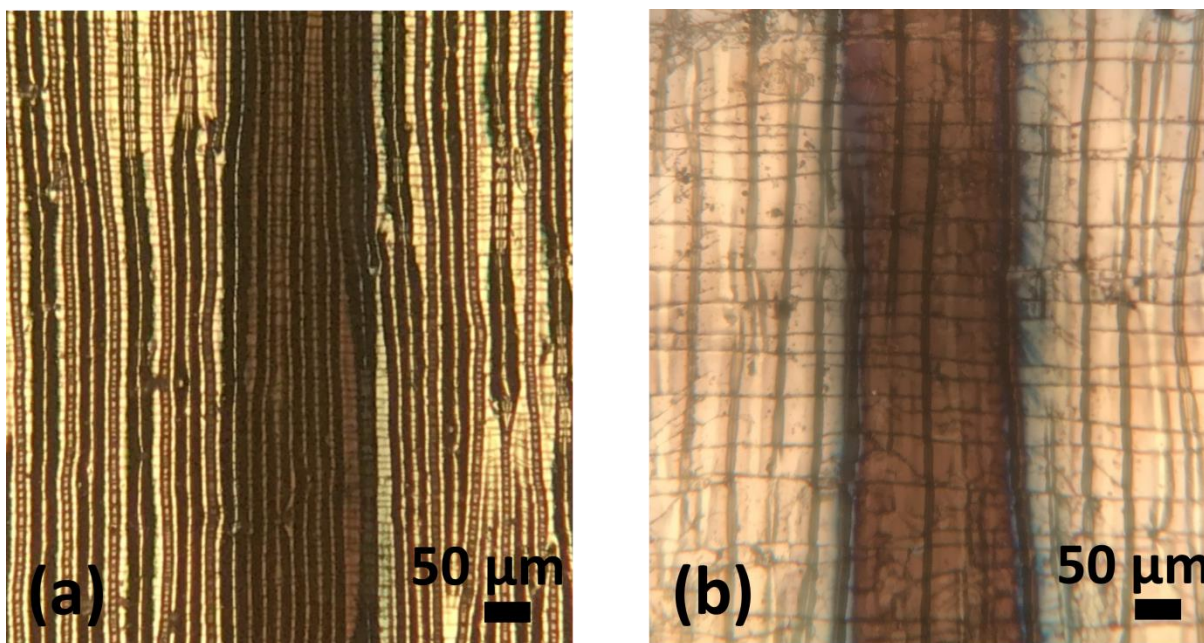
**Πίνακας 5.3:** Ευαισθησία προσφάτως αναφερθέντων αισθητήρων καταπόνησης, κατασκευασμένων σε υποστρώματα PDMS.

Επιστρέφοντας στον αισθητήρα κατασκευάσαμε με τα Pt NPs στο PDMS, τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 5.13, δείχνουν ότι για μεγαλύτερες τιμές προ-έκτασης, επιτυγχάνονται υψηλότερες επιφανειακές πυκνότητες των Pt NPs μετά τη χαλάρωση του δείγματος. Αυτή η υψηλότερη πυκνότητα των NPs είναι που επιτρέπει την επέκταση του εύρους μέτρησης παραμόρφωσης του προτεταμένου δείγματος στο 75% (S5), σε σύγκριση με τα άλλα δύο δείγματα (S3, S4) που φαίνονται στην Εικόνα 5.10. Στην πραγματικότητα, η σχετική αλλαγή της αντίστασης με την τάνυση της διάταξης, εξαρτάται από τη μείωση των αγώγιμων δρόμων του δικτύου των NP. Συνεπώς, σε ένα πιο πυκνό στρώμα NPs θα υπάρχουν διαθέσιμοι αγώγιμοι δρόμοι για υψηλότερες τιμές τάνυσης σε σχέση με αυτούς που θα υπάρχουν σε ένα χαμηλότερης πυκνότητας στρώμα NPs, σύμφωνα με αυτό που παρατηρείται στην Εικόνα 5.10 και απεικονίζεται στον Πίνακα 5.1. Στον ίδιο πίνακα επίσης, μπορούμε να δούμε ότι για χαμηλότερες τιμές



τάνυσης, ο αισθητήρας εμφανίζει τιμές GF μεταξύ 12-71, οι οποίες είναι παρόμοιες με τους αισθητήρες που κατασκευάζονται σε υποστρώματα πυριτίου ή πολυϊμιδίου. Καθώς το εφαρμοζόμενη τάνυση αυξάνεται, θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα ένας μηχανισμός παρόμοιος με αυτόν που συζητήθηκε προηγουμένως και διέπεται από επιφανειακές ρωγμές [60], που οδηγεί σε υψηλή τιμή του GF, που τελικά γίνεται κολοσσιαία. Ο σχηματισμός επιφανειακών ρωγμών στο PDMS συζητείται στη συνέχεια παρακάτω. Μετά την εναπόθεση ALD (κατά τη διάρκεια της οποίας το υπόστρωμα προ-εντάθηκε) ακολουθούμενη από χαλάρωση και επαναφορά των δειγμάτων σε κατάσταση ηρεμίας, η κυματισμένη επιφάνεια του υποστρώματος δεν παρουσιάζει ρωγμές (Εικόνα 5.14(a)).

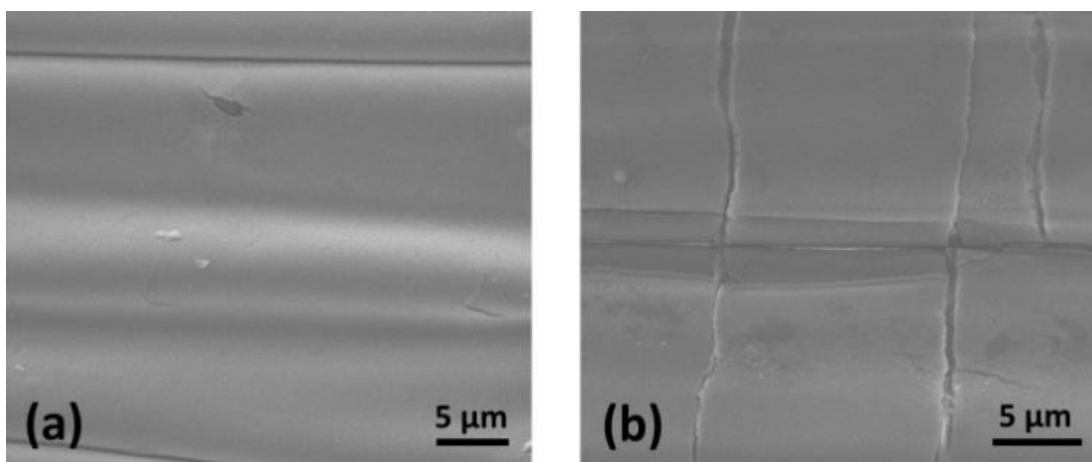
Ακόμη και μετά την εναπόθεση Pt NPs και ενώ το δείγμα είναι ακόμα σε προ-ένταση αλλά και μετά τη χαλάρωση του δείγματος και την εναπόθεση του Ag για το σχηματισμό των ηλεκτροδίων, το δείγμα παρουσιάζει μικρές ρωγμές (Εικόνα 5.15(a)). Ωστόσο, μετά τον πρώτο κύκλο τάνυσης, αρχίζουν να εμφανίζονται ρωγμές στο δείγμα. Η επιφάνεια του αισθητήρα έχει σημαντικό αριθμό ρωγμών μετά από 10000 κύκλους με τάνυση 20% (Εικόνα 5.15(b)). Ωστόσο αυτό, δεν επηρεάζει την επαναληψιμότητα της απόδοσής του, αφού ακόμα και μετά από 10000 κύκλους τάνυσης και την επαναφορά του στην αρχική κατάσταση ηρεμίας του, η αντίσταση του αισθητήρα παραμένει της τάξης μεγέθους των Ohms.



**Εικόνα 5.15:** Οπτική εικόνα του διάκενου μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα, που προ-εντάθηκε κατά 37.5% επί του αρχικού του μήκους κατά την κατασκευή. (a) αμέσως μετά την κατασκευή και τη

χαλάρωση του δείγματος στην κατάσταση ηρεμίας και (b) μετά από 10000 κύκλους καταπονήσεων σε ποσοστό τάνυσης 20%.

Στην Εικόνα 5.16(a), απεικονίζεται μια εικόνα SEM του διάκενου μεταξύ των ηλεκτροδίων (περιοχή Pt NPs) που λήφθηκε αμέσως μετά τη επαναφορά ενός αισθητήρα στην κατάσταση ηρεμίας, που είχε προ-ενταθεί κατά 37.5% κατά την κατασκευή του. Το διάκενο από τον ίδιο αισθητήρα υπό τάνυση κατά 20%, απεικονίζεται στην Εικόνα 5.16(b). Από τη σύγκριση μεταξύ των δύο εικόνων SEM, γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ των δημιουργούμενων ρωγμών κατά την τάνυση του δείγματος και του αντίκτυπου που αυτή έχει, στην μετρούμενη αντίσταση της διάταξης.

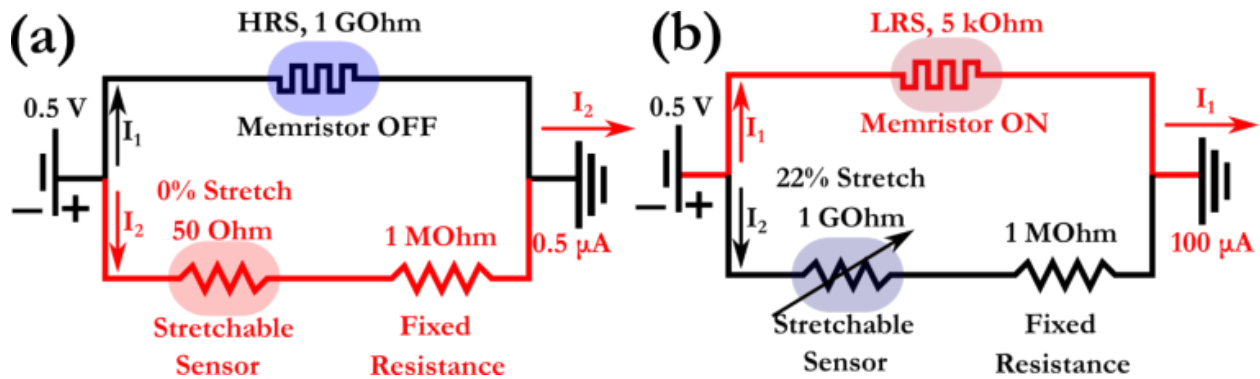


**Εικόνα 5.16:** Εικόνες SEM του διάκενου (περιοχή με Pt NPs) μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός αισθητήρα που προ-εντάθηκε κατά 37.5% κατά την κατασκευή του (a) αμέσως μετά τη χαλάρωση και επαναφορά του δείγματος στην κατάσταση ηρεμίας του και (b) ενώ ο αισθητήρας τεντώνεται κατά 20% επί του αρχικού του μήκους.

#### 5.4 Χαρακτηριστικά Τεχνητού Μηχανοϋποδοχέα

Η διάταξη του αισθητήρα που αναπτύξαμε, διερευνήθηκε στη συνέχεια ως στοιχείο, ενταγμένο σε μια αρχιτεκτονική παράλληλου κυκλώματος με ένα memristor ως μηχανοϋποδοχέα. Η συσκευή μνήμης αγωγίμης γέφυρας, κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα στρώμα οξειδίου του πυριτίου και

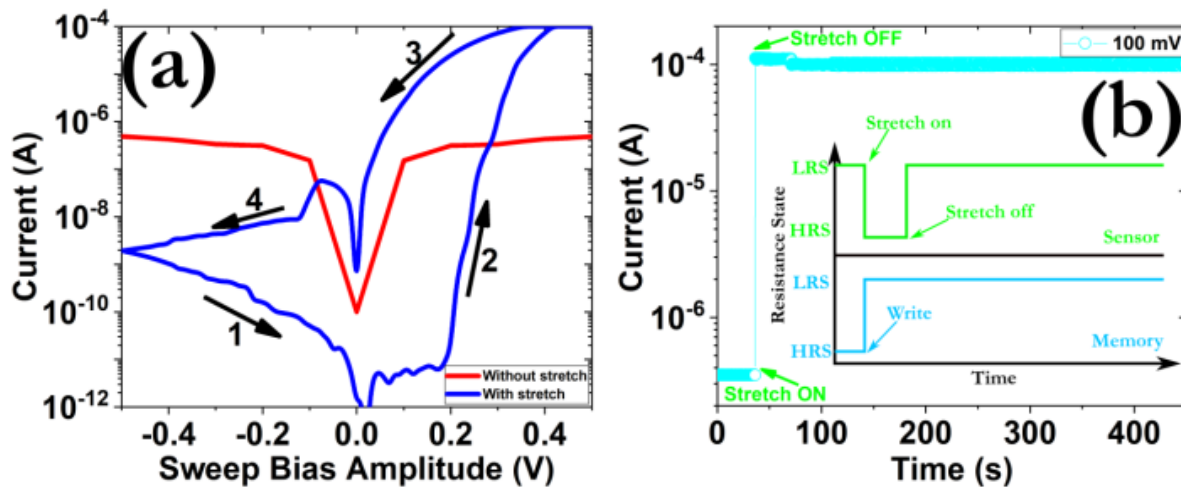
ηλεκτροχημικά ενεργό άνω ηλεκτρόδιο Ag, που κατασκευάζεται σε θερμοκρασία δωματίου σε πλαστικό υπόστρωμα ναφθαλικού πολυαιθυλενίου (PEN), διαδικασία που περιγράφεται εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο [50]. Στη συνέχεια, αποδεικνύεται ότι το κύκλωμα μιμείται τις λειτουργίες καθορισμένων υποδοχέων που βρίσκονται κάτω από το ανθρώπινο δέρμα και έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν ερεθίσματα μηχανικής παραμόρφωσης [61]. Αυτοί οι βιολογικοί υποδοχείς που ανταποκρίνονται στην εφαρμογή μηχανικής τάνυσης ονομάζονται απολήξεις Ruffini [62]. Προσθέτοντας ανατροφοδότηση στον αισθητήρα μας μέσω του memristor, είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε τεχνητά ευφείς δομές που θα ανταποκρίνονται στην τάνυση όταν αυτή υπερβεί μια τιμή κατωφλίου [4], [63], [64]. Αν και τα συμβατικά ηλεκτρονικά CMOS έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αυτόνομων συστημάτων, απαιτούν ενέργεια και δεν είναι αποτελεσματικά όταν καλούνται να αντιμετωπίσουν μεγάλο όγκο μη ταξινομημένων δεδομένων [4]. Ωστόσο, τα memristors εμφανίζονται ως υποσχόμενοι υποψήφιοι λόγω των υψηλών υπολογιστικών τους δυνατοτήτων καθώς και της χαμηλής, απαιτούμενης από αυτά, κατανάλωση ενέργειας [63]. Η βασική ιδέα της προσέγγισής μας παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.17. Το memristor ελέγχου συμβάντων, συνδέεται παράλληλα με τον εκτατό αισθητήρα, ενώ αντίσταση επαφής 1 MOhm βρίσκεται επίσης συνδεδεμένη σε σειρά με το αισθητήριο στοιχείο, για να διατηρείται έτσι ένα χαμηλό ρεύμα διαρροής ακόμα και όταν δεν επιβάλλονται φορτία τάνυσης [65].



**Εικόνα 5.17:** Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος κυκλώματος (α) με και (β) χωρίς την εφαρμογή φορτίου τάνυσης, που υποδηλώνει το φαινόμενο ωμικής μεταγωγής που προκαλείται από μηχανική παραμόρφωση.

Όταν δεν εφαρμόζεται καμία μηχανική παραμόρφωση, το συνολικό ρεύμα σε όλο το σύστημα είναι περίπου 0.5  $\mu$ A ( $I_2$ ) αφού το HRS του memristor έχει αρκετά υψηλή τιμή, περίπου 1 GOhm (Εικόνα

5.17(a)). Είναι ενδιαφέρον ότι όταν ο αισθητήρας υποβάλλεται σε εξωτερικά φορτία τάνυσης, η αντίστασή του αυξάνεται γρήγορα και ως αποτέλεσμα ενεργοποιείται το μεμρίστορ. Κατά συνέπεια, το στοιχείο μνήμης μεταβαίνει στην κατάσταση ON και το συνολικό ρεύμα ολόκληρου του συστήματος είναι τώρα 100  $\mu\text{A}$  (Εικόνα 5.17(b)). Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η μηχανική παραμόρφωση επιβάλλει μια ηλεκτρική έξοδο που είναι μεγαλύτερη από 2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της κατάστασης ηρεμίας. Η εκδήλωση ενός τέτοιου τύπου απόκρισης, θεωρείται αρκετά σημαντική και αξιοποιείται ενεργά από τους βιολογικούς οργανισμούς προκειμένου να ενεργοποιηθούν διάφορες κινητικές αντιδράσεις [15]. Τα αντίστοιχα μοτίβα υστέρησης I-V πριν και μετά την εφαρμογή του μηχανικού τεντώματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.18(a).

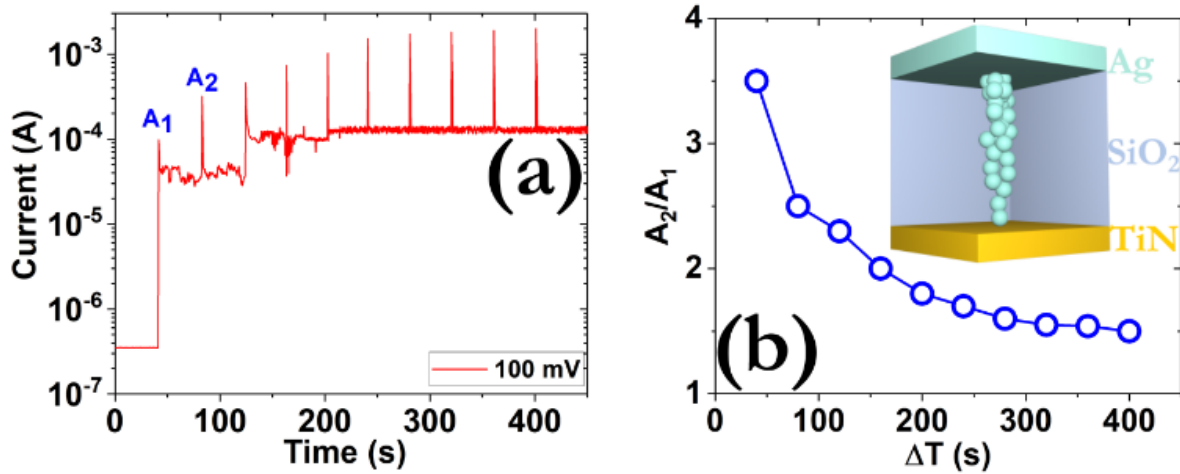


**Εικόνα 5.18:** (α) Επίδειξη της ηλεκτρικής απόδοσης του τεχνητού μηχανοϋποδοχέα με και χωρίς την επιβολή μηχανικής τάνυσης, (β) Μηχανικά επιβαλλόμενη απόδοση διατήρησης της πληροφορίας (φορτίου) μετά την εφαρμογή τάνυσης 22% στον αισθητήρα και κατά συνέπεια παρακολούθηση της απόκρισης ρεύματος με τάση ανάγνωσης των 100 mV. Το ένθετο παρουσιάζει τη γενική ιδέα του συστήματος.

Στην διάταξη μνήμης, δεν απαιτείται διαδικασία ηλεκτροδιαμόρφωσης πριν από τη λειτουργία της συσκευής, ενώ επιβάλλονταν συνεχώς ένα όριο ρεύματος συμμόρφωσης 100  $\mu\text{A}$  [66]. Όσον αφορά το στοιχείο μνήμης, η μετάβαση από την κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS) στις καταστάσεις υψηλής αντίστασης (HRS) γίνεται σε  $V_{\text{SET}} \sim 190 \text{ mV}$ , ενώ η αντίθετη μετάβαση καταγράφεται σε  $V_{\text{RESET}} \sim -50 \text{ mV}$ . Πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι καταγράφεται ένας αρκετά μεγάλος λόγος μεταγωγής ( $\sim 10^6$ ), ο

ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προγραμματίσουμε τη συσκευή μας σε μια ποικιλία καταστάσεων αντίστασης (multibit states) [67]. Επιπλέον, για να δείξουμε τη μηχανικά επαγόμενη ιδιότητα προγραμματισμού του συστήματός μας, εξετάσαμε την απόδοσή του στη διατήρηση της πληροφορίας (φορτίου). Πιο συγκεκριμένα, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από την Εικόνα 5.18(b) ένα φορτίο τάνυσης 22% επιβλήθηκε αρχικά στον αισθητήρα, σε  $t \sim 40$  s και στη συνέχεια στα  $t \sim 80$  s αφαιρέθηκε το εξωτερικό ερέθισμα και ταυτόχρονα, η τροφοδοσία τάσης άλλαξε από 500 mV σε 100 mV, για να διαβαστεί απλώς το τρέχον προφίλ του μηχανοϋποδοχέα. Από τα ληφθέντα αποτελέσματα, μπορούμε να συναγάγουμε το συμπέρασμα ότι η μηχανικά επιβαλλόμενη κατανομή ρεύματος μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα με αμελητέα υποβάθμιση [68]. Με άλλα λόγια, το προτεινόμενο σύστημα έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει την τελευταία τιμή του εξωτερικού ερεθίσματος, ακόμη και όταν το ερέθισμα έχει αφαιρεθεί. Επιπλέον, με την επιβολή ενός αρνητικού σήματος πολικότητας μπορούμε να διαγράψουμε τη μνήμη και να προκαλέσουμε ξανά την κατάσταση HRS.

Μια άλλη αρκετά ενδιαφέρουσα ιδιότητα του προτεινόμενου συστήματος, είναι η ικανότητα εκτέλεσης βιολογικών λειτουργιών, όπως το PPF και το LTP. Ως εκ τούτου, τα λαμβανόμενα αισθητηριακά δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία στην ίδια λειτουργική μονάδα μέσω διαδοχικών διαδικασιών μάθησης και εκπαίδευσης [69]. Για το φαινόμενο PPF, η βασική ιδέα είναι ότι το λαμβανόμενο (μετασυναπτικό) σήμα από το σύστημα γίνεται συνεχώς μεγαλύτερο όταν εφαρμόζονται πανομοιότυποι παλμοί ενεργοποίησης (προσυναπτικοί). Αυτή η συμπεριφορά συλλαμβάνεται ομαλά από τον μηχανοϋποδοχέα μας, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικόνα 5.19(a). Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν παρόμοιες μηχανικές παραμορφώσεις μετά από περίπου 40s και μετά την εφαρμογή του 10ου ερεθίσματος, η τροφοδοσία τάσης μετατοπίστηκε στα 100 mV για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία ανάγνωσης [70]. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη την επίδραση της προσυναπτικής άφιξης στον δείκτη PPF ( $A2/A1$ ), εξάγουμε το αντίστοιχο γράφημα που εμφανίζεται στην Εικόνα 5.19(b), όπου είναι προφανές ότι ο λόγος διευκόλυνσης μειώνεται καθώς το χρονικό διάστημα για την εφαρμογή του μηχανικού σήματος αυξάνεται.



**Εικόνα 5.19:** (α) Κατανομή PPF του τεχνητού μηχανοϋποδοχέα υπό την επιβολή δέκα διαδοχικών φορτίων τάσης 22%. Κάθε κορυφή ρεύματος αντιστοιχεί στην εφαρμογή ενός φορτίου τάσης, ενώ το τελευταίο αφαιρείται γρήγορα και στη συνέχεια παρακολουθούνται οι τιμές ρεύματος. (β) ο λόγος PPF ως συνάρτηση των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των εφαρμοζόμενων φορτίων τάσης. Το ένθετο απεικονίζει σχηματικά, τη λειτουργία της χρησιμοποιούμενης διάταξης μνήμης.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί καλά από την ακόλουθη εξίσωση [71]:

$$PPF = C_1 e^{\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)} + C_2 e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)} \quad (5.2)$$

όπου  $C_1$  και  $C_2$  είναι σταθερές προσαρμογής και  $\tau_1$  και  $\tau_2$  είναι οι αντίστοιχες χρονικές κλίμακες που υποδεικνύουν την εξέλιξη αυτού του φαινομένου. Από την ανάλυσή μας, αντλήσαμε τις τιμές των 38 s και 45 s για τις  $\tau_1$  και  $\tau_2$  φορές, αντίστοιχα, οι οποίες είναι παρόμοιες με τους χρόνους απόκρισης των βιολογικών μηχανοϋποδοχέων [72]. Επιπλέον, είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι το σύστημά μας δεν επιστρέφει στην αρχική κατάσταση χαλάρωσης, αλλά διατηρεί μια τρέχουσα τιμή περίπου 15  $\mu\text{A}$ . Αυτό το φαινόμενο είναι μια άμεση επίδειξη του φαινομένου LTP, το οποίο παρουσιάζει τυπική διάρκεια από αρκετά λεπτά έως χρόνια [73].

## 5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάσαμε την ανάπτυξη καινοτόμων αισθητήρων καταπόνησης με ρυθμιζόμενο εύρος ευαισθησίας και εξαιρετικά υψηλό GF. Η αρχικά επιβαλλόμενη προ-ένταση επηρεάζει τον τελικό σχηματισμό των κυματισμών, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει το εύρος ευαισθησίας του αισθητήρα, το οποίο τελικά μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η διάταξή μας μπορεί να λειτουργήσει ως αισθητήρας τάνυσης με πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι έχει παρόμοια λειτουργία, με εφαρμογές στην εξομοίωση αποκρίσεων ενός βιολογικού μηχανοϋποδοχέα. Πιο συγκεκριμένα, η εξωτερική μηχανική παραμόρφωση επιβάλλει μια αρκετά μεγάλη απόκριση ρεύματος που αποθηκεύεται αποτελεσματικά στο στοιχείο μνήμης με το οποίο βρίσκεται σε κύκλωμα. Επιπλέον, το memristor μπορεί να εκτελέσει διάφορες νευρομορφικές διεργασίες προκειμένου να καταλήξει σε μια απόφαση και συνεπώς να ενεργοποιήσει τους αντίστοιχους μηχανισμούς αντίδρασης. Αυτά τα αποτελέσματα είναι πολύ σημαντικά για την κατασκευή καινοτόμου τεχνητού δέματος, με εγγενείς ιδιότητες ανάδρασης. Η προσέγγισή μας παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ανάπτυξη τεχνητά ευφυών αισθητηριακών δικτύων που θα καταναλώνουν χαμηλή ισχύ και θα μιμούνται πολύπλοκες βιολογικές λειτουργίες.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Y. Gu, T. Zhang, H. Chen, F. Wang, Y. Pu, C. Gao, S. Li, “Mini review on flexible and wearable electronics for monitoring human health information” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 14, no. 263, Aug. 2019.
- [2] H.-L. Park, Y. Lee, N. Kim, D.-G. Seo, G.-T. Go, T.-W. Lee, “Flexible neuromorphic electronics for computing, soft robotics, and neuroprosthetics” *Adv. Mater.*, vol. 32, 1903558, Sept. 2019.
- [3] X. Y. Hu, Y. Y. Dou, J. J. Li, Z. F. Liu, “Buckled structures: fabrication and applications in wearable electronics”, *Small*, vol. 15, 1804805, Feb. 2019.
- [4] A. Chortos, J. Liu, Z. Bao, “Pursuing prosthetic electronic skin”, *Nature Mater.*, vol. 15, pp. 937–950, July 2016.
- [5] Y. Kim, A. Chortos, W. Xu, Y. Liu, J. Y. Oh, D. Son, J. Kang, A.M. Foudeh, C. Zhu, Y. J. Lee, S. Niu, J. Liu, R. Pfattner, Z. Bao, T.-W. Lee, “A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve”, *Science*, vol. 360, no. 6392, pp. 998-1003, June 2018.
- [6] H. Shim, K. Sim, F. Ershad, P. Yang, A. Thukral A, Z. Rao, H.-J. Kim, Y. Liu, X. Wang, G. Gu, L. Gao, X. Wang, Y. Chai, C. Yu, “Stretchable elastic synaptic transistors for neurologically integrated soft engineering systems”, *Sci Adv.*, vol. 5, no. 10, pp. 1-11, Oct. 2019.
- [7] H. Zhao, K. O'Brien, S. Li, R. F. Shepherd, “Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides”, *Sci. Rob.*, vol. 1, no. 1, Dec. 2016.
- [8] D.-H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y.-S. Kim, R.-H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T.-I. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H.-J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y.-W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman and J. A. Rogers, “Epidermal electronics”, *Science*, vol. 333, no. 6044, pp. 838-843, Aug. 2011.
- [9] X. Zhang, Y. Zhuo, Q. Luo, Z. Wu, R. Midya, Z. Wang, W. Song, R. Wang, N. K. Upadhyay, Y. Fang, F. Kiani, M. Rao, Y. Yang, Q. Xia, Q. Liu, M. Liu, J. J. Yang, “An artificial spiking afferent nerve based on Mott memristors for neurorobotics”, *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 51, Jan. 2020.
- [10] C. Wan, P. Cai, X. Guo, M. Wang, N. Matsuhisa, L. Yang, Z. Lv, Y. Luo, X. J. Loh, X. Chen X, “An artificial sensory neuron with visual-haptic fusion”, *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 4602, Sept. 2020.



- [11] M. Wang, Z. Yan, T. Wang, P. Cai, S. Gao, Y. Zeng, C. Wan, H. Wang, L. Pan, J. Yu, S. Pan, K. He, J. Lu, X. Chen, “Gesture recognition using a bioinspired learning architecture that integrates visual data with somatosensory data from stretchable sensors”, *Nat. Electron.*, vol. 3, pp. 563–570, June 2020.
- [12] M. Kumar, J. Kim, C.-P. Wong, “Transparent and flexible photonic artificial synapse with piezophotonic modulator: Versatile memory capability and higher order learning algorithm”, *Nano Energy*, vol. 63, 103843, Sept. 2019.
- [13] R. A. John, N. Tiwari, M. I. B. Patdillah, M. R. Kulkarni, N. Tiwari, J. Basu, S. K. Bose, Ankit, C. J. Yu, A. Nirmal, S. K. Vishwanath, C. Bartolozzi, A. Basu, N. Mathews, “Self healable neuromorphic memtransistor elements for decentralized sensory signal processing in robotics”, *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 4030, Aug. 2020.
- [14] S. Sundaram, P. Kellnhofer, Y. Li, J.-Y. Zhu, A. Torralba, W. Matusik, “Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove”, *Nature*, vol. 569, pp. 698–702, May 2019.
- [15] S. H. Kim, G. W. Baek, J. Yoon, S. Seo, J. Park, D. Hahm, J. H. Chang, D. Seong, H. Seo, S. Oh, K. Kim, H. Jung, Y. Oh, H. W. Baac, B. Alimkhanuly, W. K. Bae, S. Lee, M. Lee, J. Kwak, J. H. Park, D. Son, “A bioinspired stretchable sensory-neuromorphic system”, *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 44, 2104690, Sept. 2021.
- [16] C. Dagdeviren, Y. Shi, P. Joe, R. Ghaffari, G. Balooch, K. Usgaonkar, O. Gur, P. L. Tran, J. R. Crosby, M. Meyer, Y. Su, R. C. Webb, A. S. Tedesco, M. J. Slepian, Y. Huang, J. A. Rogers, “Conformal piezoelectric systems for clinical and experimental characterization of soft tissue biomechanics”, *Nature Mater.*, vol. 14, 4289, pp. 728–736, May 2015.
- [17] T. Someya, M. Amagai, “Toward a new generation of smart skins”, *Nat. Biotechnol.*, vol. 37, pp. 382–388, Apr. 2019.
- [18] M. Sugiyama, T. Uemura, M. Kondo, M. Akiyama, N. Namba, S. Yoshimoto, Y. Noda, T. Araki, T. Sekitani, “An ultraflexible organic differential amplifier for recording electrocardiograms”, *Nat. Electron.*, vol. 2, pp. 351–360, Aug. 2019.
- [19] M. Satyanarayanan, “Take it to the edge”, *Nat. Electron.*, vol. 2, no. 1, Jan. 2019.

- [20] S. Seo, S.-H. Jo, S. Kim, J. Shim, S. Oh, J.-H. Kim, K. Heo, J.-W. Choi, C. Choi, S. Oh, D. Kuzum, H.-S. P. Wong, J.-H. Park, “Artificial optic-neural synapse for colored and color-mixed pattern recognition”, *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 5106, Nov. 2018.
- [21] Y. J. Lee, J. Y. Oh, W. Xu, O. Kim, T. R. Kim, J. Kang, Y. Kim, D. Son, J. B.-H. Tok, M. J. Park, Z. Bao, T. W. Lee, “Stretchable organic optoelectronic sensorimotor synapse”, *Sci Adv.*, vol. 4, no. 11, Nov. 2018.
- [22] H. H. Chou, A. Nguyen, A. Chortos, J. W. F. To, C. Lu, J. Mei, T. Kurosawa, W. G. Bae, J. B.-H. Tok, Z. Bao, “A chameleon-inspired stretchable electronic skin with interactive colour changing controlled by tactile sensing”, *Nat. Commun.*, vol. 6, no. 8011, Aug. 2015.
- [23] T. S. Braga, N. C. S. Vieira, E. Antonelli, F. M. Rosa, M. V. Donadon, E. J. Corat, “Development and study of low-cost VACNT/PDMS stretchable and resistive strain sensor”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 315, no. 112358, Nov. 2020.
- [24] S. J. Paul, I. Elizabeth, B. K. Gupta, “Ultrasensitive wearable strain sensors based on a VACNT/PDMS thin film for a wide range of human motion monitoring”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 7, pp. 8871-8879, Feb. 2021.
- [25] J. Chen, Y. Zhu, W. Jiang, “A stretchable and transparent strain sensor based on sandwich-like PDMS/CNTs/PDMS composite containing an ultrathin conductive CNT layer”, *Composites Science and Technology*, vol. 186, no. 107938, Jan. 2020.
- [26] Y. Gao, X. Fang, J. Tan, T. Lu, L. Pan, F. Xuan, “Highly sensitive strain sensors based on fragmentized carbon nanotube/polydimethylsiloxane composites”, *Nanotechnology*, vol. 29, no. 235501, Apr. 2018.
- [27] M. Nankali, N. M. Nouri, M. Navidbakhsh, N. G. Malek, M. A. Amindehghan, A. M. Shahtoori, M. Karimi, M. Amjadi, “Highly stretchable and sensitive strain sensors based on carbon nanotube–elastomer nanocomposites: the effect of environmental factors on strain sensing performance”, *J. Mater. Chem. C*, vol. 18, no. 8, pp. 6185-6195, Mar. 2020.
- [28] X. Wang, J. Li, H. Song, H. Huang, J. Gou, “Highly stretchable and wearable strain sensor based on printable carbon nanotube layers/polydimethylsiloxane composites with adjustable sensitivity”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 8, pp. 7371-7380, Nov. 2018.

- [29] X. Xu, Y. Chen, P. He, S. Wang, K. Ling, L. Liu, P. Lei, X. Huang, H. Zhao, J. Cao, J. Yang, “Wearable CNT/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene/PDMS composite strain sensor with enhanced stability for real-time human healthcare monitoring”, *Nano Res.*, vol. 14, pp. 2875–2883, May 2021.
- [30] Y. He, D. Wu, M. Zhou, Y. Zheng, T. Wang, C. Lu, L. Zhang, H. Liu, C. Liu, “Wearable strain sensors based on a porous polydimethylsiloxane hybrid with carbon nanotubes and Graphene”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 13 pp. 15572-15583, Apr. 2021.
- [31] S. Riyajuddin, S. Kumar, S. P. Gaur, A. Sud, T. Maruyama, M. E. Ali, K. Ghosh, “Linear piezoresistive strain sensor based on graphene/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PDMS heterostructure”, *Nanotechnology* vol. 31, no. 295501, May 2020.
- [32] P. Puneetha, S. P. R. Mallem, Y.-W. Lee, J. Shim, “Strain-controlled flexible Graphene/GaN/PDMS sensors based on the piezotronic effect”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 32, pp. 36660-36669, Aug. 2020.
- [33] Z. Chu, W. Jiao, Y. Huang, Y. Zheng, R. Wang, X. He, “Superhydrophobic gradient wrinkle strain sensor with ultra-high sensitivity and broad strain range for motion monitoring”, *J. Mater. Chem. A.*, vol. 9, no. 15, pp. 9634-9643, Mar. 2021.
- [34] H. Li, J. Zhang, J. Chen, Z. Luo, J. Zhang, Y. Alhandarish, Q. Liu, W. Tang, L. Wang, “A supersensitive, multidimensional flexible strain gauge sensor based on Ag/PDMS for human activities monitoring”, *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 4639, Mar. 2020.
- [35] H. M. Soe, A. A. Manaf, A. Matsuda, M. Jaafar, “Development and fabrication of highly flexible, stretchable, and sensitive strain sensor for long durability based on silver nanoparticles–polydimethylsiloxane composite”, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, vol. 31, pp. 11897–11910, June 2020.
- [36] Q. Zou, K. He, J. Ou-Yang, Y. Zhang, Y. Shen, C. Jin “Highly sensitive and durable sea-urchin-shaped silver nanoparticles strain sensors for human-activity monitoring”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 12, pp. 14479-14488, Mar. 2021.
- [37] W.-W. Jheng, Y.-S. Su, Y.-L. Hsieh, Y.-J. Lin, S.-D. Tzeng, C.-W. Chang, J.-M. Song, W. Kuo, “Gold nanoparticle thin film-based strain sensors for monitoring human pulse”, *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 1712–1718, Jan. 2021.

- [38] N. B. Bowden, S. T. Brittain, A. G. Evans, J. W. Hutchinson, G. M. Whitesides, “Spontaneous formation of ordered structures in thin films of metals supported on an elastomeric polymer”, *Nature*, vol. 393, pp. 146–149, May 1998.
- [39] Y. Sun, W. M. Choi, H. Jiang, Y. Y. Huang, J. A. Rogers, “Controlled buckling of semiconductor nanoribbons for stretchable electronics”, *Nature Nanotech.*, vol. 1, pp. 201–207, Dec. 2006.
- [40] D. P. Qi, K. Y. Zhang, G. W. Tian, B. Jiang, Y. D. Huang, “Stretchable electronics based on PDMS substrates”, *Adv. Mater.*, vol. 33, no.6, Feb. 2021.
- [41] P.-C. Lin, S. Yang, “Spontaneous formation of one dimensions ripples in transit to highly ordered two-dimensional herringbone structures through sequential and unequal biaxial mechanical stretching”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 24, June 2007.
- [42] W. Kaczorowski, W. Szymanski, D. Batory, P. Niedzielski, “Effect of plasma treatment on the surface properties of polydimethylsiloxane”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 41635, Nov. 2014.
- [43] J. S. Lee, H. Hong, S. J. Park, S. J. Lee, D. S. Kim, “A simple fabrication process for stepwise gradient wrinkle pattern with spatially-controlled wavelength based on sequential oxygen plasma treatment”, *Microelectron. Eng.*, vol. 176, no. C, pp. 101–105, May 2017.
- [44] M. Nania M, O. K. Matar, J. T. Cabral, “Frontal vitrification of PDMS using air plasma and consequences for surface wrinkling”, *Soft Matter*, vol. 11, pp. 3067–3075, Feb. 2015.
- [45] X. Cheng, L. Miao, Z. Su, H. Chen, Y. Song, X. Chen, H. Zhang, “Controlled fabrication of nanoscale wrinkle structure by fluorocarbon plasma for highly transparent triboelectric nanogenerator”, *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 3, no. 16074, Jan. 2017.
- [46] L. Miao, X. Cheng, H. Chen, Y. Song, H. Guo, J. Zhang, X. Chen, H. Zhang, “Fabrication of controlled hierarchical wrinkle structures on polydimethylsiloxane via one-step C4F8 plasma treatment”, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 28, no. 015007, Dec. 2018.
- [47] H.-G. Park, H.-C. Jeong, Y. H. Jung, D.-S. Seo, “Control of the wrinkle structure on surface-reformed poly(dimethylsiloxane) via ion-beam bombardment”, *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 12356, July 2015.

- [48] D. Yu, H. Wensheng, G. Zhongning, H. Zhigang, C. Ying, “Laser Preparing Tunable Wrinkles on the Surface of PDMS with Assistance of Pre-strain Stress”, *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 168–171, Apr. 2018.
- [49] E. Jacquet, J. Chambert, J. Pauchot, P. Sandoz, “Intra- and inter-individual variability in the mechanical properties of the human skin from in vivo measurements on 20 volunteers” *Skin Res Technol.*, vol. 23, pp. 491–499, Mar. 2017.
- [50] C. Papakonstantinou, P. Bousoulas, M. Tsigkourakos, D. Sakellaropoulos, L. Sygellou, D. Tsoukalas, “Highly flexible artificial synapses from SiO<sub>2</sub>-based conductive bridge memristors and Pt nanoparticles through a crack suppression technique”, *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 3, no. 6, pp. 2729–2737. Apr. 2021.
- [51] J. Chen, J. Zheng, Q. Gao, J. Zhang Zhang J, O. M. Omisore, L. Wang and H. Li, “Polydimethylsiloxane (PDMS)-based flexible resistive strain sensors for wearable applications”, *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, Feb. 2018.
- [52] D. Johnston, D. K. McCluskey, C. K. L. Tan, M. C. Tracey, “Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering”, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 24, no. 035017, Feb. 2014.
- [53] J. C. Spagnola, B. Gong, G. N. Parsons, “Surface texture and wetting stability of polydimethylsiloxane coated with aluminum oxide at low temperature by atomic layer deposition”, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 28, no. 6, pp. 1330-1337, Aug. 2010.
- [54] J. Tang, H. Guo, M. Zhao, J. Yang, D. Tsoukalas, B. Zhang, J. Liu, C. Xue, W. Zhang, “Highly Stretchable Electrodes on Wrinkled Polydimethylsiloxane Substrates”, *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 16527, Nov. 2015.
- [55] Y. Yang, Z. D. Deng, “Stretchable sensors for environmental monitoring”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 6, no. 011309, Mar. 2019.
- [56] B. Fan, A. V. Rodriguez, D. G. Vercosa, C. Kemere, J. T. Robinson, “Sputtered porous Pt for wafer-scale manufacture of low-impedance flexible microelectrodes”, *J. Neural. Eng.*, vol. 17, no. 3, June 2020.

- [57] J. L. Tanner, D. Mousadakos, K. P. Giannakopoulos, E. Skotadis, D. Tsoukalas, “High strain sensitivity controlled by the surface density of platinum nanoparticles”, *Nanotechnology*, vol. 32, no. 28, July 2012.
- [58] E. Aslanidis, E. Skotadis, E. Moutoulas, D. Tsoukalas, “Thin film protected flexible nanoparticle strain sensors: experiments and modeling”, *Sensors*, vol. 20, no. 9, May 2020.
- [59] E. Aslanidis, E. Skotadis, D. Tsoukalas, “Simulation tool for predicting and optimizing the performance of nanoparticle based strain sensors”, *Nanotechnology*, vol. 32, no. 275501, Apr. 2021.
- [60] E. Aslanidis, E. Skotadis, D. Tsoukalas, “Resistive crack-based nanoparticle strain sensors with extreme sensitivity and adjustable gauge factor, made on flexible substrates”, *Nanoscale*, vol. 13, no. 5, pp. 3263-3274, Jan. 2021.
- [61] P. Bousoulas, Ch. Papakonstantinou, D. Tsoukalas, “Emulating artificial mechanoreceptor functionalities from SiO<sub>2</sub>-based memristor and PDMS stretchable sensor for artificial skin applications”, *ESSCIRC 2021 - IEEE 47th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, pp. 91-94, Dec. 2021.
- [62] E. V. Abaira, D. D. Ginty, “The Sensory Neurons of Touch”, *Neuron*, vol. 79, no. 4, pp. 618-639, Aug. 2013.
- [63] X. Ji, X. Zhao, M. C. Tan, R. Zhao, “Artificial perception built on memristive system: visual, auditory, and tactile sensations”, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, no. 1900118, 2020.
- [64] C. Wan, P. Cai, M. Wang, Y. Qian, W. Huang, X. Chen, “Artificial sensory memory”, *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 1902434, 2020.
- [65] M. A. Rahman, S. Walia, S. Naznee, M. Taha, S. Nirantar, F. Rahman, M. Bhaskaran, S. Sriram, “Artificial somatosensors: feedback receptors for electronic skins”, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, 2000094, 2020.
- [66] P. Bousoulas, D. Sakellaropoulos, C. Papakonstantinou, S. Kitsios, C. Arvanitis, E. Bagakis, D. Tsoukalas, “Investigating the origins of ultra-short relaxation times of silver filaments in forming-free SiO<sub>2</sub>-based conductive bridge memristors”, *Nanotechnology*, vol. 31, no. 45, Aug. 2020.

- [67] D. Sakellaropoulos, P. Bousoulas, C. Papakonstantinou, S. Kitsios, D. Tsoukalas, “Spatial Confinement Effects of Embedded Nanocrystals on Multibit and Synaptic Properties of Forming Free SiO<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge Random Access Memory”, *IEEE Electron Device Letters*, vol. 41, no. 7, pp. 1013-1016, July 2020.
- [68] D. Son, J. Lee, S. Qiao, R. Ghaffari, J. Kim, J. E. Lee, C. Song, S. J. Kim, D. J. Lee, S. W. Jun, S. Yang, M. Park, J. Shin, K. Do, M. Lee, K. Kang, C. S. Hwang, N. Lu, T. Hyeon, D.-H. Kim, “Multifunctional wearable devices for diagnosis and therapy of movement disorders”, *Nat. Nanotechnol.*, vol. 9, pp. 397-404, Mar. 2014.
- [69] S. Sundaram, P. Kellnhofer, Y. Li, J. Y. Zhu, A. Torralba, W. Matusik, “Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove”, *Nature*, vol. 569, pp. 698-702, May 2019.
- [70] P. Bousoulas, D. Sakellaropoulos, D. Tsoukalas, “Tuning the analog synaptic properties of forming free SiO<sub>2</sub> memristors by material engineering”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 118, no. 143502, Apr. 2021.
- [71] R. S. Zucker, W. G. Regehr, “Short-term synaptic plasticity”, *Annu. Rev. Physiol.*, vol. 64, pp. 355–405, 2002.
- [72] B. C.-K. Tee, A. Chortos, A. Berndt, A. K. Nguyen, A. Tom, A. McGuire, Z. Lin, K. Tien, W. G. Bae, H. Wang, P. Mei, H.-H. Chou, B. Cui, K. Deisseroth, T. N. Ng, Z. Bao, “A skin-inspired organic digital mechanoreceptor”, *Science*, vol. 350, no. 6258, pp. 313-316, 2015.
- [73] P. Bousoulas, M. Panagopoulou, N. Boukos, D. Tsoukalas, “Emulating artificial neuron and synaptic properties with SiO<sub>2</sub>-based memristive devices by tuning threshold and bipolar switching effects”, *J. Phys. D*, vol. 54, no. 22530, Mar. 2021.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προοπτικές

Διανύοντας μια μεταβατική περίοδο, όπου οι ανάγκες της ανθρώπινης δραστηριότητας έχουν αυξηθεί ειθετικά, απαιτώντας την ανάλογη απόκριση των τεχνολογικών επιτευγμάτων, οι προκλήσεις που θέτονται στην επιστημονική κοινότητα αναμένοντας αντίστοιχες απαντήσεις υπό τη μορφή καινοτόμων τεχνολογικών προϊόντων, είναι συνεχείς. Η παρούσα διδακτορική διατριβή, είχε ως στόχο τη συνεισφορά στη έρευνα καινοτόμων εύκαμπτων και εκτατών διατάξεων, με πεδίο εφαρμογής τους, τα φορητά ηλεκτρονικά.

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, αναπτύχθηκαν εύκαμπτες διατάξεις μνήμης αγώγιμης γέφυρας, οι οποίες παραμένουν λειτουργικές ακόμα και μετά από έναν μεγάλο αριθμό καταπονήσεων σε στο υψηλό ποσοστό καταπόνησης 4.16%. Οι διατάξεις που αναπτύχθηκαν στο πρώτο μέρος αυτής της διατριβής, έρχονται ως απάντηση σε δύο μεγάλες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής. Αρχικά της ανάγκης για ανάπτυξη μνημών καινούργιας τεχνολογίας, οι οποίες θα είναι ικανές για αποθήκευση και επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών εντός διάταξης και έπειτα της ανάγκης ενσωμάτωσής τους σε επιφάνειες που μέχρι τώρα, δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθούν.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάστηκε η ανάπτυξη εκτατών αισθητήρων καταπόνησης με ένα ευρύ και ρυθμιζόμενο κατά της κατασκευή τους, εύρος ευαισθησίας. Παράλληλα, στην τελευταία περιοχή του εύρους ευαισθησίας τους, παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές ευαισθησίας GF. Οι συγκεκριμένες διατάξεις, έρχονται ως πρόταση στην ανάγκη ανάπτυξης καινοτόμων διατάξεων για τεχνητές εφαρμογές ρομποτικής, όπως τεχνητό δέρμα, ενώ παράλληλα μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλα πεδία εφαρμογών, όπως την ανίχνευση ανθρώπινων δραστηριοτήτων που ενδεχομένως να χρειάζεται συχνή παρακολούθηση.

Οι δύο τύποι διατάξεων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας, ενσωματώθηκαν στη συνέχεια σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για την ανάπτυξη ενός τεχνητού μηχανοϋποδοχέα που μιμείται αποκρίσεις σε εξωτερικά ερεθίσματα, όμοιες με αυτές ενός βιολογικού. Η πληροφορία που δέχεται από το περιβάλλον, καταγράφεται στη μνήμη, η οποία με τη σειρά της μπορεί να εκτελέσει διάφορες νευρομορφικές διεργασίες προκειμένου να καταλήξει σε μια απόφαση και να ενεργοποιήσει τους αντίστοιχους μηχανισμούς αντίδρασης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι πολύ σημαντικό για την κατασκευή νέων τεχνητών δερμάτων με εγγενείς ιδιότητες ανάδρασης. Έτσι, η προσέγγισή μας, παρέχει χρήσιμες



πληροφορίες για την ανάπτυξη τεχνητά ευφών αισθητηριακών δικτύων που θα καταναλώνουν χαμηλή ισχύ και θα μιμούνται πολύπλοκες βιολογικές λειτουργίες.

Η ραγδαία ανάπτυξη ωστόσο των διαθέσιμων προς εκμετάλλευση και επεξεργασία πληροφοριών, απαιτεί την ανάπτυξη διατάξεων, που θα μπορούν να δέχονται και να επεξεργάζονται, μεγάλο όγκο πληροφοριών σε μια ενσωματωμένη πλατφόρμα. Αυτό δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί, χωρίς την ανάπτυξη αξιόπιστων διατάξεων μνήμης, σταυροειδούς αρχιτεκτονικής, που προσφέρουν μεγάλη πυκνότητα ολοκλήρωσης και συνεπώς την ταυτόχρονη λήψη και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων. Παράλληλα όμως, θα πρέπει να αναπτυχθούν ολοκληρωμένες πλατφόρμες που θα ενσωματώνουν τα στοιχεία της μνήμης και του αισθητήρα σε κοινά υποστρώματα, τόσο εύκαμπτα όσο και εκτατά, τα οποία θα εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές. Αυτό απαιτεί εκτεταμένη έρευνα, κυρίως στην ανάπτυξη και αντοχή υλικών σε μη συμβατικά υποστρώματα. Τα συμβατικά υλικά από τα οποία κατασκευάζεται η συντριπτική πλειοψηφία των εμπορεύσιμων ηλεκτρονικών διατάξεων είναι μεν αξιόπιστα, αλλά παράλληλα έχουν πολύ μικρό εύρος ανθεκτικότητας σε καταπονήσεις. Η εύρεση λύσεων μέσω της έρευνας τόσο στην ανάπτυξη και αξιοποίηση καινοτόμων υλικών όσο και της τροποποίησης των επιφανειών πάνω στις οποίες αναπτύσσονται ώστε να είναι ανθεκτικά σε καταπονήσεις, θα ανοίξει νέους ορίζοντες στις τεχνολογικές εφαρμογές του μέλλοντος.

## Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά

[1] P. Bousoulas, **C. Papakonstantinopoulos**, D. Tsoukalas, “Emulating artificial mechanoreceptor functionalities from SiO<sub>2</sub>-based memristor and PDMS stretchable sensor for artificial skin applications”, *ESSCIRC 2021 - IEEE 47th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, Sept. 2021.

[2] **C. Papakonstantinopoulos**, P. Bousoulas, M. Tsigkourakos, D. Sakellaropoulos, L. Sygellou, D. Tsoukalas, “Highly Flexible Artificial Synapses from SiO<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge Memristors and Pt Nanoparticles through a Crack Suppression Technique”, *ACS Applied Electronic Materials*, vol. 3, no. 6, 2729–2737, June 2021.

[3] P. Bousoulas, **C. Papakonstantinopoulos**, S. Kitsios, K. Moustakas, G. Ch. Sirakoulis, D. Tsoukalas, “Emulating Artificial Synaptic Plasticity Characteristics from SiO<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge Memories with Pt Nanoparticles”, *Micromachines*, vol. 12, no. 3, 306; Mar. 2021.

[4] D. Sakellaropoulos, P. Bousoulas, **C. Papakonstantinopoulos**, S. Kitsios, D. Tsoukalas, “Impact of Active Electrode on the Synaptic Properties of SiO<sub>2</sub>-Based Forming-Free Conductive Bridge Memory”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, PP(99):1-6, Feb. 2021.

[5] P. Bousoulas, D. Sakellaropoulos, **C. Papakonstantinopoulos**, S. Kitsios, C. Arvanitis, E. Bagakis D. Tsoukalas, “Investigating the origins of ultra-short relaxation times of silver filaments in forming-free SiO<sub>2</sub>-based conductive bridge memristors”, *Nanotechnology*, vol. 31, no. 45, Aug. 2020.

[6] D. Sakellaropoulos, P. Bousoulas, **C. Papakonstantinopoulos**, S. Kitsios, D. Tsoukalas, “Spatial Confinement Effects of Embedded Nanocrystals on Multibit and Synaptic Properties of Forming

Free SiO<sub>2</sub>-Based Conductive Bridge Random Access Memory”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no. 7, pp. 1013-1016, July 2020.

## Παρουσιάσεις σε συνέδρια

[1] **C. Papakonstantinopoulos**, P. Bousoulas, D. Tsoukalas, “Artificial synaptic devices based on SiO<sub>2</sub> and a Pt nanoparticle layer to suppress crack formation on flexible substrates”, *MNE 2021*.

[2] **C. Papakonstantinopoulos**, P. Bousoulas, D. Tsoukalas, “Demonstration of strain sensors with memory effect”, *XXXV Panhellenic Conference on Solid State Physics & Materials Science*, Sept. 2021.

[3] E. Skotadis, E. Aslanidis, **C. Papakonstantinopoulos**, N. Kalatzis, F. Chatzipapadopoulos, N. Marianos, D. Tsoukalas, “Gas sensors based on self-assembled nanoparticles for environmental pollutants detection”, *XXXV Panhellenic Conference on Solid State Physics & Materials Science*, Sept. 2021.

