



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Η ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Κουνής Παναγιώτης

Επιβλέπων: Χροναίος Αλέξανδρος

Σεπτέμβριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

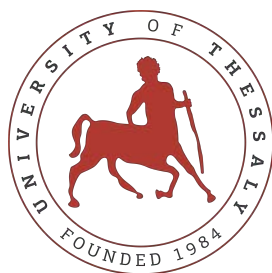
Η ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Κουνής Παναγιώτης

Επιβλέπων: Χροναίος Αλέξανδρος

Σεπτέμβριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

NANOELECTRONICS IN THE EVOLUTION OF COMPUTERS

Diploma Thesis

Kounis Panagiotis

Supervisor: Chroneos Alenandros

September 2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων **Χροναίος Αλέξανδρος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Μπαργιώτας Δημήτρης**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Καταρχάς θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Χροναίο Αλέξανδρο, για την δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την διπλωματική μου εργασία και την εμπιστοσύνη του όλο αυτόν τον καιρό. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και για την βοήθεια που μου προσέφερε. Οι σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του με κατεύθυναν σημαντικά.

Ευχαριστώ πολύ και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κο.Μπαργιώτα Δημήτρη και την κα.Δασκαλοπούλου Ασπασία, για την συνεισφορά τους, τις παρατηρήσεις και το χρόνο τους.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω, τους καθηγητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ, φυσικά, τους φίλους, τις φίλες και τους συμφοιτητές μου, που ήταν πάντα δίπλα μου σε ολόκληρη αυτή τη διαδρομή.

Πάνω απ' όλα όμως, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, για την αγάπη, την στήριξη που μου δίνουν καθημερινά, καθώς και για την πίστη που δείχνουν σε εμένα.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

«Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής».

Ο Δηλών

Κουνής Παναγιώτης

Διπλωματική Εργασία

Η ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Κουνής Παναγιώτης

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση του ρόλου της νανοηλεκτρονικής στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, εξετάζοντας τις τεχνολογίες που βρίσκονται στην αιχμή της επιστημονικής και τεχνολογικής καινοτομίας.

Αρχικά, αναλύονται οι βασικές αρχές της ηλεκτρονικής και της μικροηλεκτρονικής, παρέχοντας ένα πλαίσιο κατανόησης για την ανάπτυξη της νανοηλεκτρονικής. Οι ημιαγωγοί, τα τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα συζητούνται με έμφαση στη συμβολή τους στην πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ειδική αναφορά γίνεται στον Νόμο του Moore και πώς αυτός καθοδηγεί την εξέλιξη της τεχνολογίας.

Στη συνέχεια, η εργασία εξετάζει τις τεχνολογίες νανοηλεκτρονικής, όπως τα τρανζίστορ σε νανοκλίμακα και οι εξελιγμένες μέθοδοι αποθήκευσης δεδομένων, όπως η MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) και η GMR (Giant Magnetoresistance). Αυτές οι τεχνολογίες αναλύονται ως προς την επίδρασή τους στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ταχύτητας και της ενεργειακής κατανάλωσης των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων. Επιπλέον, διερευνώνται καινοτόμες τεχνολογίες, όπως τα MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) και οι μνημονικές αντιστάσεις (memristors), που προάγουν την ανάπτυξη νέων υπολογιστικών αρχιτεκτονικών και εφαρμογών.

Αναλύονται παράλληλα εφαρμογές της νανοηλεκτρονικής σε διάφορους τομείς, όπως η αποθήκευση δεδομένων, οι αισθητήρες και οι επικοινωνίες, τονίζοντας τη συμβολή τους στη δημιουργία πιο αποδοτικών και ευέλικτων υπολογιστικών συστημάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας, υπογραμμίζοντας τη σημασία της νανοηλεκτρονικής για το μέλλον της τεχνολογίας των υπολογιστών και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη.

Λέξεις-κλειδιά:

Νανοηλεκτρονική, ημιαγωγοί, τρανζίστορ, ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Diploma Thesis

NANOELECTRONICS IN THE EVOLUTION OF COMPUTERS

Kounis Panagiotis

Abstract

This paper focuses on investigating the role of nanoelectronics in the evolution of computer systems, examining technologies at the forefront of scientific and technological innovation.

Initially, it analyzes the basic principles of electronics and microelectronics, providing a framework for understanding the development of nanoelectronics. Semiconductors, transistors, and integrated circuits are discussed with an emphasis on their contribution to the advancement of computer systems. Special attention is given to Moore's Law and its influence on technology evolution.

Subsequently, the paper explores nanoelectronics technologies, such as nanoscale transistors and advanced data storage methods like MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) and GMR (Giant Magnetoresistance). These technologies are analyzed for their impact on improving the efficiency, speed, and energy consumption of modern computing systems. Additionally, innovative technologies like MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) and memristors are examined, highlighting their role in developing new computing architectures and applications.

The paper also investigates the applications of nanoelectronics in various fields, such as data storage, sensors, and communications, emphasizing their contribution to creating more efficient and flexible computing systems. Finally, the research findings are summarized, underscoring the significance of nanoelectronics for the future of computer technology, and directions for future research and development are suggested.

Keywords:

Nanoelectronics, semiconductors, transistors, integrated circuits.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xii
Abstract	xiii
Πίνακας περιεχομένων	xv
Κατάλογος σχημάτων	xix
Κατάλογος πινάκων	xxi
Συντομογραφίες	xxiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής	2
1.2 Στόχοι και κίνητρα Υλοποίησης	4
1.3 Διάρθρωση Κειμένου	5
2 Υπόβαθρο	7
2.1 Ηλεκτρονική	7
2.1.1 Ορισμός της ηλεκτρονικής	7
2.1.2 Ημιαγωγοί	9
2.1.3 Τρανζίστορ	9
2.1.4 Ηλεκτρονικές Δίοδοι	13
2.1.5 Ολοκληρωμένα Κυκλώματα	14
2.1.6 Νόμος του Moore	14
2.2 Μικροηλεκτρονική	15

2.2.1	Εισαγωγή στη Μικροηλεκτρονική	15
2.2.2	Ιστορική Αναδρομή και ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής	16
2.2.3	Τεχνολογίες Κατασκευής Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων	16
2.2.4	Σχεδίαση και Ανάλυση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων	17
2.2.5	Εφαρμογές της Μικροηλεκτρονικής	18
2.3	Νανοηλεκτρονική	19
2.3.1	Εισαγωγή στη Νανοηλεκτρονική	19
2.3.2	Θεμελιώδεις αρχές και ιδιότητες	20
2.3.3	Υλικά και Τεχνολογίες	20
2.3.4	Σχεδίαση και Ανάλυση Νανοηλεκτρονικών Συσκευών	21
2.3.5	Εφαρμογές της Νανοηλεκτρονικής	22
3	Εφαρμογές	25
3.1	MRAM	25
3.1.1	Κατηγορίες MRAM	29
3.1.2	Εφαρμογές MRAM	32
3.1.3	Προκλήσεις και Ζητήματα MRAM	34
3.2	Giant Magnetoresistance-GMR	36
3.2.1	Τύποι GMR	37
3.2.2	Εφαρμογές GMR	41
3.2.3	Τεχνολογικές εξελίξεις και προκλήσεις	42
3.3	High K	43
3.3.1	Σημασία και Χαρακτηριστικά High K	43
3.3.2	Εφαρμογές στην Τεχνολογία Ημιαγωγών	44
3.3.3	Προκλήσεις και Λύσεις	45
3.4	Mems and Nems	46
3.4.1	Τι είναι τα Mems and Nems	46
3.4.2	Εφαρμογές Mems and Nems	47
3.4.3	Τεχνολογίες Κατασκευής MEMS	48
3.4.4	Εφαρμογές και Προκλήσεις	49
3.5	Memristor	50
3.5.1	Εφαρμογές	52
3.5.2	Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	53

4	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις	57
4.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	57
4.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	58
	Βιβλιογραφία	63

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Σχηματική αναπαράσταση NPN και PNP τρανζίστορ	11
2.2	Σχηματική αναπαράσταση JFET τρανζίστορ	12
3.1	Η πρώτη μνήμη μαγνητικού πυρήνα που χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1950. Η μνήμη που εμφανίζεται εδώ αποθηκεύει 32×32 (1024) bit δεδομένων.	26
3.2	Δίσκος Corbino. Η αντίσταση από το εσωτερικό ηλεκτρόδιο στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο ποικίλλει ανάλογα με το εφαρμοσμένο πεδίο B.	27
3.3	Κατηγορίες MRAM	31
3.4	Χρήση των MEMS and NEMS	50

Κατάλογος πινάκων

2.1	Χρονολογική εξέλιξη της ολοκλήρωσης κλίμακας	15
3.1	Τύποι μαγνητοαντίστασης (MR)	29

Συντομογραφίες

ABS	Anti-lock Braking System
ALD	Atomic Layer Deposition
AMR	Anisotropic Magnetoresistance
BiMOS	Bipolar CMOS
BJT	Bipolar Junction Transistor
CAD	Computer-Aided Design
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CMR	Colossal Magnetoresistance
DRAM	Dynamic Random Access Memory
FET	Field Effect Transistor
FINFET	Fin Field Effect Transistor
GAA	Gate-All-Around
GMR	Giant Magnetoresistance
HAMR	Heat Assisted Magnetic Recording
HDD	Hard Disk Drive
IC	Ολοκληρωμένο Κύκλωμα, Integrated Circuit
JFET	Junction Field Effect Transistor
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MEMS	Micro-Electromechanical System
MOSFET	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor
MR	Magnetoresistance
MRAM	Magnetoresistance Random Access Memory
MTJ	Magnetic Tunnel Junction
NEMS	Nano-Electromechanical System
OE	Optoelectronics

PMA	Perpendicular Magnetic Anisotropy
RAM	Random Access Memory
SEM	scanning Electron Microscope
SRAM	Static Random Access Memory
STT-MRAM	Spin-transfer Torque MRAM
TMR	Tunnel Magnetoresistance
κ.λπ.	και λοιπά

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Μία από τις μεγαλύτερες επιστημονικές και τεχνολογικές επαναστάσεις των τελευταίων δεκαετιών, ακούει στο όνομα νανοτεχνολογία. Σκοπός της είναι η βελτίωση της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου. Αποτελεί μια από τις τεχνολογίες αιχμής στην οποία υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και προσπάθειες για ανακάλυψη συνεχώς νέων εφαρμογών.

Η ταχεία πρόοδος της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών βασίζεται στην εξέλιξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Με την αύξηση των απαιτήσεων για υπολογιστική ισχύ και αποδοτικότητα, η ανάγκη για μικρότερα, ταχύτερα και πιο αποδοτικά εξαρτήματα γίνεται επιτακτική. Η νανοηλεκτρονική, το πεδίο που ασχολείται με τις ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα σε νανοκλίμακα, αποτελεί τη βασική αιχμή της τεχνολογικής εξέλιξης και παρέχει τη δυνατότητα για σημαντικές καινοτομίες στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Στόχος της εργασίας αυτής είναι να εξετάσει πώς η νανοηλεκτρονική συμβάλλει στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αναλύοντας τις τεχνολογίες και τις εφαρμογές που καθορίζουν το μέλλον αυτής της βιομηχανίας.

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει τη συνεισφορά της νανοηλεκτρονικής στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και να κατανοήσει τις τεχνολογικές καινοτομίες που καθορίζουν τη μελλοντική ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων. Ειδικότερα, η εργασία θα επικεντρωθεί στην ανάλυση των βασικών τεχνολογιών που υποστηρίζουν τη νανοηλεκτρονική, όπως οι τρανζίστορ σε νανοκλίμακα, οι μεθοδολογίες κατασκευής και οι εφαρμογές τους στην αποθήκευση δεδομένων και στην επεξεργασία πληροφορίας. Η κατανόηση αυτών των τεχνολογιών είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη νέων ηλεκτρονικών συστημάτων που θα είναι πιο ισχυρά και αποδοτικά από τις τρέχουσες λύσεις.

Η κινητήρια δύναμη πίσω από αυτήν την ανάλυση είναι η ανάγκη για συνεχή βελτίωση

των υπολογιστικών δυνατοτήτων και η πρόβλεψη των τεχνολογικών εξελίξεων που θα καθορίσουν το μέλλον της πληροφορικής και της τεχνολογίας γενικότερα. Καθώς οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές γίνονται όλο και πιο ενσωματωμένοι στην καθημερινή ζωή και τη βιομηχανία, η αναζήτηση νέων μεθόδων για την αύξηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας γίνεται πιο επίκαιρη από ποτέ.

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής

Με τον όρο νανοτεχνολογία, αναφερόμαστε στην εκμετάλλευση της ύλης σε ατομικό και μοριακό επίπεδο. Ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους μεταξύ 1 και 100 νανομέτρων, της τάξεως του 10^{-9} μέτρων. Κατά παρόμοιο τρόπο ορίζεται και ο όρος νανοεπιστήμη αναφερόμενος σε επιστήμες οι οποίες μελετούν φαινόμενα στην κλίμακα αυτή.

Μέχρι σήμερα, η νανοτεχνολογία έχει καθιερωθεί να χωρίζεται σε τέσσερις κύριους κλάδους, που δρουν είτε ανεξάρτητα μεταξύ τους είτε σε συνεργασία. Οι τέσσερις αυτοί κλάδοι είναι η νανοϊατρική, η νανοβιοτεχνολογία, τα νανοϋλικά και η νανοηλεκτρονική. Παράλληλα, υπάρχει μια αυξητική τάση στην ανάπτυξη τεχνολογιών στρατιωτικών εφαρμογών.

Η νανοϊατρική είναι η ιατρική εφαρμογή της νανοτεχνολογίας. Εκτείνεται από τις ιατρικές εφαρμογές νανοϋλικών και βιολογικών συσκευών, έως τους νανοηλεκτρονικούς βιοαισθητήρες, ακόμη και πιθανές μελλοντικές εφαρμογές της μοριακής νανοτεχνολογίας. Με τον όρο νανοβιοτεχνολογία, αναφερόμαστε στη διασταύρωση της μηχανικής και της βιολογίας. Ο κλάδος των νανοϋλικών αφορά την προσέγγιση της νανοτεχνολογίας με βάση την επιστήμη των υλικών, αξιοποιεί τις προόδους στη μετρολογία των υλικών και τη σύνθεση που έχουν αναπτυχθεί με υποστήριξη της έρευνας της μικροκατασκευαστικής.

Η νανοηλεκτρονική αναφέρεται στη χρήση της νανοτεχνολογίας σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα για την κατασκευή υπολογιστικών συστημάτων στο νανομετρικό επίπεδο. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν νανοτρανζίστορ, νανοαισθητήρες, και νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υπολογιστικών συσκευών υψηλής απόδοσης.

Η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών έχει σημαντικές επιπτώσεις σε πολλούς τομείς, όπως η οικονομία, η τεχνολογία και η γεωπολιτική σκηνή. Με πιο απλά λόγια, τα υπολογιστικά συστήματα νανοκλίμακας μετασχηματίζουν την παγκόσμια αγορά, ενισχύουν τις τεχνολογικές καινοτομίες, και επηρεάζουν τις γεωπολιτικές ισορροπίες.

Οικονομική Σημασία

- **Οικονομική Ανάπτυξη και Καινοτομία:** Τα υπολογιστικά συστήματα νανοκλίμακας συμβάλλουν σημαντικά στην οικονομική ανάπτυξη μέσω της προώθησης της καινοτομίας και της αύξησης της παραγωγικότητας. Οι επιχειρήσεις που επενδύουν σε νανοτεχνολογίες και νανοϋλικά συχνά αποκτούν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, δημιουργώντας νέα προϊόντα και υπηρεσίες που δεν ήταν προηγουμένως εφικτά.
- **Μείωση του Κόστους Παραγωγής και Βελτίωση Απόδοσης:** Οι νανοτεχνολογίες επιτρέπουν τη μείωση του κόστους κατασκευής και τη βελτίωση της απόδοσης των υπολογιστικών συστημάτων. Η μικροποίηση των εξαρτημάτων οδηγεί σε οικονομία κλίμακας, ενώ οι νέες μέθοδοι κατασκευής μειώνουν την ανάγκη για ακριβά υλικά και ενέργεια.
- **Νέες Αγορές και Επενδυτικές Ευκαιρίες:** Η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων νανοκλίμακας έχει οδηγήσει στη δημιουργία νέων αγορών και ευκαιριών για επενδύσεις. Η ζήτηση για προηγμένα υλικά και τεχνολογίες αυξάνεται, δημιουργώντας νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες και ενισχύοντας την απασχόληση σε τομείς όπως η νανοηλεκτρονική, η νανοβιοτεχνολογία και η νανοϊατρική.

Τεχνολογική Σημασία

- **Εξέλιξη των Υπολογιστικών Δυνατοτήτων:** Τα υπολογιστικά συστήματα νανοκλίμακας επεκτείνουν τα όρια των υπολογιστικών δυνατοτήτων, επιτρέποντας την ανάπτυξη ταχύτερων, μικρότερων και πιο αποδοτικών συσκευών. Η νανοτεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη νέων τύπων επεξεργαστών και μνημών που αυξάνουν την υπολογιστική ισχύ και την αποδοτικότητα των συστημάτων.
- **Καινοτομίες στη Μηχανική και την Επιστήμη Υλικών:** Η ανάπτυξη των νανοδομημάτων έχει οδηγήσει σε σημαντικές καινοτομίες στη μηχανική και την επιστήμη υλικών. Τα νέα νανοϋλικά διαθέτουν μοναδικές ιδιότητες, όπως αυξημένη ανθεκτικότητα, αγωγιμότητα και ευκαμψία, επιτρέποντας την κατασκευή πιο αποδοτικών και ανθεκτικών συσκευών.
- **Εφαρμογές σε Διάφορους Τομείς:** Οι νανοτεχνολογίες βρίσκουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως η ιατρική, η ενέργεια, οι επικοινωνίες κλπ. Στην ιατρική, για παρά-

δειγμα, τα νανορομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στοχευμένη θεραπεία ασθενειών, ενώ στην ενέργεια, τα νανοϋλικά μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των ηλιακών κυψελών και των μπαταριών.

Γεωπολιτική Σημασία

- **Στρατηγική Υπεροχή και Εθνική Ασφάλεια:** Οι χώρες που επενδύουν στις νανοτεχνολογίες και στην ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων νανοκλίμακας μπορούν να αποκτήσουν στρατηγική υπεροχή και να ενισχύσουν την εθνική τους ασφάλεια. Οι προηγμένες τεχνολογίες προσφέρουν πλεονεκτήματα σε τομείς όπως η άμυνα, η κατασκοπεία και η κυβερνοασφάλεια.
- **Ανταγωνισμός και Συνεργασίες:** Ο ανταγωνισμός για την κυριαρχία στις νανοτεχνολογίες έχει οδηγήσει σε διεθνείς συνεργασίες και ανταγωνισμούς. Χώρες και επιχειρήσεις συνεργάζονται για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών, αλλά παράλληλα ανταγωνίζονται για την απόκτηση πλεονεκτημάτων στην παγκόσμια αγορά.
- **Επίδραση στις Διεθνείς Σχέσεις:** Η ανάπτυξη και διάδοση των νανοτεχνολογιών επηρεάζει τις διεθνείς σχέσεις και την παγκόσμια ισορροπία δυνάμεων. Οι χώρες που ηγούνται στην έρευνα και ανάπτυξη των νανοσυστημάτων μπορούν να ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στην παγκόσμια σκηνή και να διαμορφώνουν τις διεθνείς πολιτικές και οικονομικές τάσεις.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει μελέτη, ανάλυση της νανοηλεκτρονικής και των βασικών της όρων αλλά και αναφορά σε εφαρμογές της.

1.2 Στόχοι και κίνητρα Υλοποίησης

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη γύρω από τις έννοιες νανοτεχνολογίας και της νανοηλεκτρονικής, και το πως αυτές επηρεάζουν και θα επηρεάσουν τον τομέα της επιστήμης αλλά και την καθημερινή μας ζωή. Η διερεύνηση μας, περιλαμβάνει την μετάβαση από την ηλεκτρονική στη μικροηλεκτρονική, και από εκεί στη νανοηλεκτρονική, τις θεμελιώδεις αρχές, τις τεχνικές κατασκευής, τις ιδιότητες των νανοϋλικών και τις εφαρμογές της. Πιο συγκεκριμένα θα εμβαθύνουμε σε διάφορες πτυχές της νανοηλεκτρονικής, ξεκινώντας από τις βασικές έννοιες της έως τις αναδυόμενες τάσεις και τις μελλοντικές προκλήσεις στον τομέα.

1.3 Διάρθρωση Κειμένου

Τα κεφάλαια της εργασίας οργανώνονται ως εξής:

- **Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή:** Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή στο θέμα της παρούσας εργασίας. Παράλληλα αναφέρονται οι στόχοι και τα κίνητρα της υλοποίησης.
- **Κεφάλαιο 2 - Υπόβαθρο:** Στο δεύτερο κεφάλαιο, υπάρχει μια εκτενής αναφορά, η οποία απεικονίζει το θεωρητικό υπόβαθρο που είναι αναγκαίο τόσο για την κατανόηση του προς μελέτη προβλήματος.
- **Κεφάλαιο 3 - Εφαρμογές της νανοηλεκτρονικής:** Στο τρίτο κεφάλαιο, υπάρχει η μελέτη και η ανάλυση διαφόρων εφαρμογών της νανοηλεκτρονικής.
- **Κεφάλαιο 4 - Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις:** Στο τελευταίο κεφάλαιο, εξάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

Κεφάλαιο 2

Υπόβαθρο

2.1 Ηλεκτρονική

2.1.1 Ορισμός της ηλεκτρονικής

Ετυμολογικά ο όρος της νανοηλεκτρονικής μπορεί να αναλυθεί σε 2 όρους, το πρόθεμα νάνο και τον όρο ηλεκτρονική. Έτσι γίνεται εύκολα σαφές, ότι για να μπορέσουμε να κατονοήσουμε τι σημαίνει ο όρος της νανοηλεκτρονικής, θα πρέπει πρώτα να αναφερθούμε στον όρο της ηλεκτρονικής [1].

Ένας πρώτος ορισμός της ηλεκτρονικής θα μπορούσε να είναι: "Ο όρος ηλεκτρονική παραπέμπει στον κλάδο της επιστήμης της φυσικής, που ασχολείται με τη σχεδίαση και κατασκευή πρακτικών κυκλωμάτων και συσκευών που λειτουργούν με τον έλεγχο ροής ηλεκτρονίων και άλλων φορέων ηλεκτρικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιώντας ενεργά εξαρτήματα όπως οι ηλεκτρονικές λυχνίες και οι ημιαγωγοί (τρανζίστορ, δίοδοι, ολοκληρωμένα κυκλώματα, κτλ), υποστηριζόμενα και από παθητικά εξαρτήματα. Οι κύριες χρήσεις των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι ο έλεγχος συστημάτων, η δημιουργία και ο έλεγχος ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και παλμών και η μετατροπή ή επεξεργασία και διανομή πληροφοριών" [2].

Ειδικότερα, ο όρος της ηλεκτρονικής σε συνάρτηση με την τεχνολογία της πληροφορίας θα μπορούσε να οριστεί ως: "το σύνολο των τεχνικών που χρησιμοποιούν τις μεταβολές ηλεκτρικών μεγεθών για τη συλλογή, τη διαβίβαση και την εκμετάλλευση της πληροφορίας".

Με πιο απλά λόγια θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ηλεκτρονική είναι ο τομέας της επιστήμης που ασχολείται με τη συμπεριφορά και τον έλεγχο ηλεκτρονίων ή φορέων φορτίου σε

διάφορα υλικά και συσκευές. Περιλαμβάνει τη μελέτη, το σχεδιασμό και την εφαρμογή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, εξαρτημάτων και συστημάτων για διάφορους σκοπούς, από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τις τηλεπικοινωνίες έως τον έλεγχο και την αυτοματοποίηση. Έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του σύγχρονου κόσμου, επιτρέποντας την ανάπτυξη μιας εκτεταμένης σειράς συσκευών και τεχνολογιών.

Τα πρώτα βήματα της ηλεκτρονικής εντοπίζονται στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν επιστήμονες όπως ο James Clerk Maxwell και ο Michael Faraday [3] έκαναν θεμελιώδεις ανακαλύψεις στον ηλεκτρομαγνητισμό. Η εφεύρεση της ηλεκτρονικής λυχνίας ή λυχνίας κενού στις αρχές του 20ου αιώνα σηματοδότησε ένα σημαντικό ορόσημο, ανοίγοντας το δρόμο για την ηλεκτρονική ενίσχυση και μεταγωγή. Η ηλεκτρονική λυχνία είναι μια διάταξη σε χαμηλή πίεση, σχεδόν κενό, που επιτρέπει την ελεγχόμενη μεταβλητή ροή ηλεκτρονίων μέσα σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα και αποτέλεσε την αρχή των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων.

Το 1947 οι John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley ανακαλύπτουν το τρανζίστορ, μια μικρότερη, πιο αξιόπιστη και λιγότερο ενεργοβόρα συσκευή από τη την ηλεκτρική λυχνία [3].

Η εφεύρεση του τρανζίστορ άνοιξε το δρόμο στον Jack Kilby, έτσι ώστε το 1958 [4] να παρουσιάσει το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC), συμπιέζοντας αρκετά τρανζίστορ, αντιστάσεις και συνδέσεις σε ένα μικρό κύβο σιλικόνης. Οι εφευρέσεις αυτές έφεραν επανάσταση στον τομέα, επιτρέποντας τη σμίκρυνση και τη μαζική παραγωγή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Η συνέχεια τις επόμενες δεκαετίες ήταν εξίσου συναρπαστική. Τις δεκαετίες 1960 – 1970 έχουμε την χρήση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε υπολογιστές, τηλεοπτικές συσκευές και άλλες εφαρμογές. Παράλληλα αναπτύσσεται η τεχνολογία MOSFET για τα ψηφιακά κυκλώματα. Τη δεκαετία του 1980 έχουμε την εμφάνιση των πρώτων προσωπικών υπολογιστών με μικροεπεξεργαστές. Έπειτα την επόμενη δεκαετία έχουμε και την ανάπτυξη του διαδικτύου, που άλλαξε σε τρομερό βαθμό τον τρόπο επικοινωνίας και πρόσβασης στις πληροφορίες [2].

Στη σύγχρονη εποχή η ηλεκτρονική βρίσκεται σε σχεδόν κάθε πτυχή της καθημερινής μας ζωής, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων συσκευών, των αυτοκινήτων, και των ιατρικών εφαρμογών και σε πολλά άλλα.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ηλεκτρονική συνεχίζει να εξελίσσεται με γρήγορους ρυθμούς, επεκτείνοντας τα όρια της τεχνολογίας και δημιουργώντας νέες δυνατότητες για το

μέλλον. Αυτή η συνεχής εξέλιξη σηματοδοτεί τη σημαντική σημασία της ηλεκτρονικής στον σύγχρονο κόσμο.

2.1.2 Ημιαγωγοί

Με τον όρο ημιαγωγός, ορίζουμε κάθε υλικό που παρουσιάζει ενδιάμεσα χαρακτηριστικά ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ των μονωτών (που αντιστέκονται στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, έχουν δηλαδή μεγάλη τιμή αντίστασης) και των αγωγών (που επιτρέπουν εύκολα τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, που έχουν δηλαδή μικρή τιμή αντίστασης).

Η αγωγιμότητα των ημιαγωγών μπορεί να ρυθμιστεί και να ελεγχθεί μέσω εξωτερικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία ή η εφαρμοζόμενη τάση. Ακόμη μία σημαντική ιδιότητα των ημιαγωγών είναι η ύπαρξη σε αυτούς δυο διαφορετικών ειδών φορέων ηλεκτρικού ρεύματος, των ηλεκτρονίων και των οπών. Τα ηλεκτρόνια αποτελούν τους φορείς του αρνητικού φορτίου, ενώ οι οπές φορείς θετικού φορτίου. Η απόλυτη τιμή των φορτίων των δύο φορέων είναι ίση.

Η σημαντική χαρακτηριστική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα να ρυθμίζουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ελέγχου της συγκέντρωσης ή της κινητικότητας των φορτίων στο εσωτερικό τους. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για χρήση σε ηλεκτρονικές συσκευές και κυκλώματα, καθώς οι ημιαγωγοί μπορούν να λειτουργήσουν ως διακόπτες, ενισχυτές και άλλα βασικά εξαρτήματα στον τομέα των σύγχρονων ηλεκτρονικών.

Οι πιο γνωστοί ημιαγωγοί στην εποχή μας είναι τα στοιχεία πυρίτιο(Si) και το γερμάνιο (Ge.) και ορισμένες ακόμη χημικές ενώσεις. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές των ημιαγωγών είναι τα τρανζίστορ, οι δίοδοι και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα [5].

Η χρήση των ημιαγωγών σε διάφορες εφαρμογές, έχει αλλάξει ριζικά την τεχνολογία και την καθημερινή μας ζωή, επιτρέποντας την ανάπτυξη των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων [5].

2.1.3 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ αποτελεί μια ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιείται κυρίως ως ενισχυτής σήματος και διακόπτης στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Είναι μία από τις πιο σημαντικές εφευρέσεις στον τομέα της ηλεκτρονικής και έχει επανασχεδιάσει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι ηλεκτρονικές συσκευές. Είναι το κυριότερο συστατικό όλων σχεδόν των σύγχρονων ηλεκτρονικών κατασκευών. Η πλατιά χρήση του οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα

παραγωγής του σε τεράστιες ποσότητες που μειώνουν το κόστος ανά μονάδα.

Πρακτικά είναι μία διάταξη ημιαγωγών, με ακροδέκτες σε τρία ή περισσότερα σημεία, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των οποίων είναι διαφορετικά. Ετυμολογικά ο όρος τρανζίστορ(transistor), προκύπτει από τις λέξεις TRANSfer και resISTOR. Ο όρος υιοθετήθηκε διότι περιγράφει ουσιαστικά την πραγματική λειτουργία του τρανζίστορ. Ένα τρανζίστορ μεταφέρει ένα σήμα ρεύματος εισόδου από ένα κύκλωμα χαμηλής αντίστασης σε ένα κύκλωμα εξόδου υψηλής αντίστασης [6].

Οι βασικές λειτουργίες του τρανζίστορ, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, είναι αυτές του ενισχυτή και του διακόπτη. Στη λειτουργία ενισχυτή, το τρανζίστορ μπορεί να ελέγξει το ρεύμα που ρέει από τον εκπομπο προς το συλλέκτη (IEC). Το μικρό ρεύμα εισόδου (στη βάση) μπορεί να ελεγχθεί για να επηρεάσει το μεγάλο ρεύμα εξόδου (από τον εκπομπο προς το συλλέκτη). Στη λειτουργία διακόπτη, το τρανζίστορ μπορεί να είναι σε ενεργοποιημένη (ON) ή απενεργοποιημένη (OFF) κατάσταση. Το ρεύμα στη βάση ελέγχει την κατάσταση αυτή, επιτρέποντας ή αποκόπτοντας τη ροή του ρεύματος μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη.

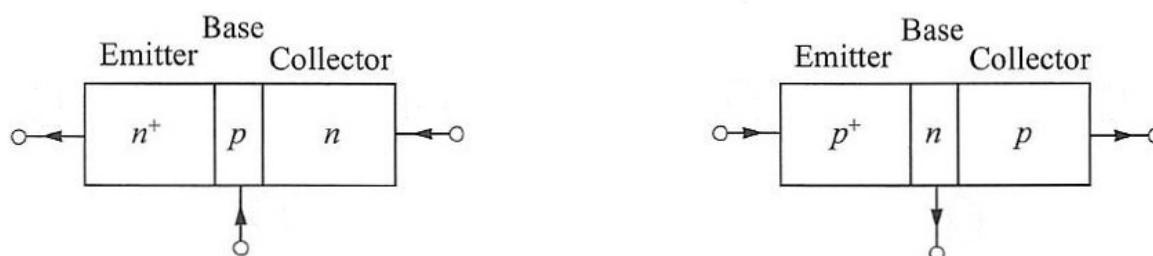
Τα τρανζίστορ χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως στην κατασκευή ενισχυτών ή ανισόρροπων ενισχυτών, στην κατασκευή διακοπών και λογικών κυκλωμάτων, αλλά και σε ψηφιακές εφαρμογές.

Διπολικά Τρανζίστορ Επαφής

Ένα διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor-BJT) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή τριών ακροδεκτών που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση σήματος και τη μεταγωγή σε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Αποτελείται από ημιαγωγούς n-τύπου και p-τύπου ενωμένους μεταξύ τους, δημιουργώντας τρία διακριτικά στρώματα: τον πομπό, τη βάση και τον συλλέκτη [7].

Αποτελείται συνήθως από τρεις στρώσεις ημιαγωγικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, το μεσαίο λεπτό στρώμα ονομάζεται βάση (Base) που συμβολίζεται με το γράμμα B. Στα αριστερά της βάσης έχουμε τον εκπομπο (Emitter) που συμβολίζεται με το γράμμα E, και στα δεξιά τον συλλέκτη (Collector) που συμβολίζεται με το γράμμα C. Οι διάφοροι συνδυασμοί και δομές αυτών των στρωσεών καθορίζουν τον τύπο του τρανζίστορ, όπως τον NPN ή PNP που βλέπουμε και στο Σχήμα 2.1. Όταν ένα μικρό ρεύμα ρέει μεταξύ των ακροδεκτών εκπομπού και βάσης, ελέγχει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα που ρέει μεταξύ των ακροδεκτών συλλέκτη

και εκπομπού, καθιστώντας τα BJT βασικά στοιχεία σε διάφορες ηλεκτρονικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων ενισχυτών, ταλαντωτών και ψηφιακών λογικών κυκλωμάτων [7].



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση NPN και PNP τρανζίστορ

Το πρώτο διπολικό τρανζίστορ εφευρέθηκε στα Bell Telephone Laboratories από τους William Shockley, Walter Brattain και John Bardeen το 1948. Για την εφεύρεση τους αυτή, τιμήθηκαν με το Νόμπελ Φυσικής το 1956.

Τρανζίστορ Εκπομπής Πεδίου

Το Τρανζίστορ Εκπομπής Πεδίου (Field Effect Transistor) είναι μια συσκευή ημιαγωγών τριών ακροδεκτών που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση και τον έλεγχο ηλεκτρονικών σημάτων σε διάφορες εφαρμογές [8]. Σε αντίθεση με τα Διπολικά Τρανζίστορ Επαφής (BJT), τα FET λειτουργούν με βάση τη διαμόρφωση ενός ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε ένα υλικό ημιαγωγών και όχι με βάση την κίνηση των φορέων φορτίου. Τα FET χρησιμοποιούνται ευρέως στην ηλεκτρονική για εφαρμογές όπως η ενίσχυση σήματος, η μεταγωγή, η ρύθμιση τάσης, οι λειτουργίες ψηφιακής λογικής κλπ. Αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία των σύγχρονων μικροεπεξεργαστών και των κυκλωμάτων μνήμης των σημερινών ηλεκτρονικών υπολογιστών [9].

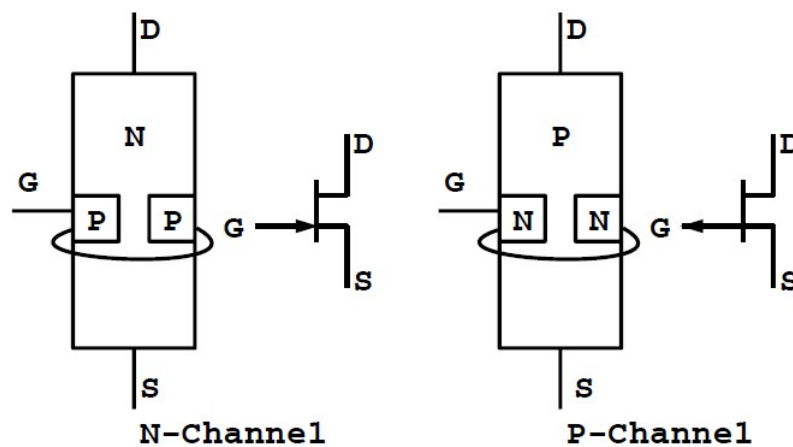
Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι FET, το καθένα με μοναδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές:

- τα Τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (Junction Field Effect Transistor, JFET),
- και τα FET Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού (Metal-Oxide-Semiconductor FET, MOSFET).

Το τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (JFET) είναι μια ζωτικής σημασίας συσκευή ημιαγωγών στη σύγχρονη ηλεκτρονική, γνωστή για τις μοναδικές του ιδιότητες και τις διάφορες εφαρμογές. Αποτελεί έναν από τους πιο απλούς τύπους τρανζίστορ πεδίου επαφής,

καθώς είναι ένα μονοπολικό τρανζίστορ. Το JFET είναι συσκευή ελεγχόμενης τάσης. Αυτό συμβαίνει διότι βασίζει τη λειτουργία του σε ένα μόνο είδος φορέων (στα ηλεκτρόνια ή τις οπές) σε αντίθεση με το κοινό τρανζίστορ ή συχνά ονομαζόμενο ως διπολικό τρανζίστορ, που η λειτουργία του βασίζεται και στα δυο αυτά είδη φορέων [9].

Ένα τρανζίστορ JFET (Σχήμα 2.2) είναι μια συσκευή τριών ακροδεκτών με ένα κανάλι από υλικό ημιαγωγού, συνήθως αρσενίδιο πυριτίου ή γαλλίου, και δύο συνδέσεις pn. Οι ακροδέκτες περιλαμβάνουν την πηγή (Source), την πύλη (Gate) και τον απαγωγό (Drain). Η αρχή κατασκευής ενός JFET βασίζεται στην επιλογή ενός τμήματος ημιαγωγού, π.χ. τύπου-N, στο οποίο προστίθενται στις δυο πλευρές του, περιοχές τύπου-P. Η συγκέντρωση των προσμίξεων στις περιοχές τύπου-P είναι πολύ ψηλότερες από αυτή του καναλιού. Κάθε μια από τις περιοχές τύπου-P καλείται πύλη. Τα δυο άκρα του τμήματος τύπου-N ονομάζονται πηγή και απαγωγός, ενώ το τμήμα του ημιαγωγού τύπου-N το οποίο βρίσκεται μέσα στις περιοχές τύπου-P ονομάζεται κανάλι ή διάυλος. Τα JFET μπορούν να ταξινομηθούν σε τύπους N-καναλιού και P-καναλιού (n-channel και p-channel).



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση JFET τρανζίστορ

Το τρανζίστορ MOSFET αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης ηλεκτρονικής, διευκολύνοντας την ενίσχυση του σήματος και την εναλλαγή ανάμεσα σε διάφορες εφαρμογές. Ένα MOSFET διαθέτει μια δομή τριών ακροδεκτών, που περιλαμβάνει μια πηγή (S), μία πύλη (G) και έναν απαγωγό (D). Αυτοί οι ακροδέκτες διευκολύνουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Το βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός MOSFET είναι η παρουσία μιας μονωμένης πύλης, που χωρίζεται από το υλικό ημιαγωγών (συνήθως πυρίτιο) με ένα λεπτό στρώμα οξειδίου (συνήθως διοξείδιο του πυριτίου). Ο χώρος μεταξύ της πηγής και

του απαγωγού κάτω από το οξείδιο ονομάζεται κανάλι. Ακόμη χαρακτηρίζεται από την ικανότητά του να ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ της πηγής και του ακροδέκτη απαγωγού, διαμορφώνοντας την τάση που εφαρμόζεται σε έναν ακροδέκτη διαύλου.

Τα MOSFET μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους με βάση την αγωγιμότητα του υλικού του καναλιού. Στο MOSFET N-Channel, το υλικό καναλιού είναι ημιαγωγός τύπου N. Εφαρμόζοντας μια θετική τάση στην πύλη (V_{gs}), δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο, που προκαλεί ροή ηλεκτρονίων από την πηγή προς τον απαγωγό, επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος. Το P-Channel MOSFET [10] χρησιμοποιεί ημιαγωγό τύπου P για το υλικό του καναλιού του. Στην πύλη έχουμε την εφαρμογή μίας αρνητικής τάσης, με σκοπό την δημιουργία ενός καναλιού για οπές (απουσία ηλεκτρονίων) μεταξύ της πηγής και του απαγωγού επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος.

Οι εφαρμογές που συναντάμε τα τρανζίστορ MOSFET είναι πάρα πολλές, πράγμα που αποδεικνύει και τον πολύ σημαντικό ρόλο τους στη σύγχρονη ηλεκτρονική. Αρχικά, αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία των ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, που χρησιμεύουν ως διακόπτες και ενισχυτές σε μικροεπεξεργαστές, κυψέλες μνήμης και άλλες ψηφιακές λογικές συσκευές. Παράλληλα στα αναλογικά κυκλώματα, τα τρανζίστορ MOSFET χρησιμοποιούνται ευρέως για ενίσχυση λόγω της υψηλής σύνθετης αντίστασης εισόδου και των χαρακτηριστικών χαμηλού θορύβου. Ακόμη τα MOSFET υψηλής ισχύος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως ο έλεγχος κινητήρα και η ρύθμιση τάσης.

2.1.4 Ηλεκτρονικές Δίοδοι

Στην ηλεκτρονική, η δίοδος αποτελεί ένα στοιχείο, το οποίο περιορίζει τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας. Με πιο απλά λόγια, η δίοδος επιτρέπει στο ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια κατεύθυνση, αλλά μπλοκάρει την κίνηση από την αντίθετη κατεύθυνση.

Οι περισσότερες δίοδοι βασίζονται στον ημιαγωγό p-n επαφών. Σε μια p-n δίοδο, συμβατικό ρεύμα μπορεί να ρέει από τη μεριά τύπου p (η άνοδος) στην άλλη μεριά τύπου n (η κάθοδος), αλλά δεν μπορεί να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως σε κυκλώματα ανόρθωσης αλλά και σε οπτοηλεκτρονικά στοιχεία. Στη σημερινή εποχή, οι περισσότεροι δίοδοι είναι κατασκευασμένες από υλικά ημιαγωγών όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο.

2.1.5 Ολοκληρωμένα Κυκλώματα

Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC), ή όπως εναλλακτικά αναφέρεται τσιπ ή μικροτσίπ, είναι μια μικροσκοπική ηλεκτρονική συσκευή που ενσωματώνει πολλαπλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως τρανζίστορ, πυκνωτές και αντιστάσεις, σε ένα μόνο υπόστρωμα ημιαγωγών. Αυτά τα εξαρτήματα διασυνδέονται μέσω περίπλοκων μοτίβων μεταλλικών ιχνών, επιτρέποντας στο ολοκληρωμένο κύκλωμα να εκτελεί διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας σήματος, της ενίσχυσης και των λογικών λειτουργιών.

Τα ολοκληρωμένα κύκλωμα έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα των ηλεκτρονικών επιτρέποντας τη δημιουργία πολύπλοκων και συμπαγών ηλεκτρονικών συστημάτων, το εύρος των οποίων επεκτείνεται από μικροεπεξεργαστές ηλεκτρονικών υπολογιστών έως εξειδικευμένα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται σε συσκευές επικοινωνίας και αισθητήρες.

2.1.6 Νόμος του Moore

Ο Gordon Earle Moore (3 Ιανουαρίου 1929 – 24 Μαρτίου 2023) ήταν Αμερικανός επιχειρηματίας, μηχανικός και συνιδρυτής και επίτιμος πρόεδρος της Intel Corporation.

Το 1965, ο Moore εργαζόταν ως διευθυντής έρευνας και ανάπτυξης στην Fairchild Semiconductor. Το περιοδικό Electronics του ζήτησε να προβλέψει τι επρόκειτο να συμβεί στη βιομηχανία εξαρτημάτων ημιαγωγών τα επόμενα δέκα χρόνια [11].

Έτσι, στις 19 – 04 – 1965 δημοσιεύτηκε στο περιοδικό η εμπειρική παρατήρηση και πρόβλεψη του Gordon Moore, με την οποία δήλωνε ότι: "ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούν να τοποθετηθούν οικονομικά σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) θα διπλασιάζεται περίπου κάθε χρόνο, οδηγώντας σε αναλογική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και μείωση του κόστους ανά τρανζίστορ."

Ο ίδιος το 1975, με βάση τα δεδομένα της δεκαετίας που πέρασε, επαναδιατύπωσε την αρχική του τοποθέτηση δηλώνοντας τελικά ότι: "ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούν να τοποθετηθούν οικονομικά σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) θα διπλασιάζεται περίπου κάθε δύο χρόνια, οδηγώντας σε αναλογική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και μείωση του κόστους ανά τρανζίστορ".

Αυτό το φαινόμενο υπήρξε η κινητήρια δύναμη πίσω από την ταχεία πρόοδο της ψηφιακής τεχνολογίας και συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη ολοένα και πιο ισχυρών και συμπαγών ηλεκτρονικών συσκευών.

Η αποτύπωση του νόμου του Moore, περιλαμβάνεται ουσιαστικά στον όρο ολοκλήρωση

κλίμακας(Scale Integration). Η ολοκλήρωση κλίμακας είναι μια θεμελιώδης έννοια στην ηλεκτρονική, που αντιπροσωπεύει την εξέλιξη από μεμονωμένα ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε εξαιρετικά ολοκληρωμένα κυκλώματα σε ένα μόνο τσιπ [12].

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ολοκλήρωσης κλίμακας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Πίνακας 2.1: Χρονολογική εξέλιξη της ολοκλήρωσης κλίμακας

Δεκαετία	Ολοκλήρωση κλίμακας	Αριθμός Τρανζίστορ ανά τσίπ
1960	Ολοκλήρωση μικρής κλίμακας	$1 < N < 100$
1970	Ολοκλήρωση μεσαίας κλίμακας	$100 < N < 1000$
1980	Ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας	$1000 < N < 100000$
1990	Ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας	$100000 < N < 1000000$
2000	Ολοκλήρωση εξαιρετικά μεγάλη κλίμακας	$1000000 < N < 1000000000$

2.2 Μικροηλεκτρονική

2.2.1 Εισαγωγή στη Μικροηλεκτρονική

Η μικροηλεκτρονική είναι ο τομέας της επιστήμης της ηλεκτρονικής που ασχολείται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και την εφαρμογή μικροσκοπικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και κυκλωμάτων σε μικρή κλίμακα. Αυτά τα εξαρτήματα και τα κυκλώματα κατασκευάζονται συνήθως από υλικά ημιαγωγών. Με την χρήση αυτών των κυκλωμάτων, έχει καταστεί δυνατή η ανάπτυξη και η κατασκευή συμπαγών, ελαφριών και υψηλής απόδοσης ηλεκτρονικών συσκευών.

Η μικροηλεκτρονική βρίσκεται σε κάθε πτυχή της καθημερινότητας μας και της σύγχρονης εποχής. Την συναντάμε στη λειτουργία smartphone, υπολογιστών, ιατρικών συσκευών, συστημάτων επικοινωνίας, ηλεκτρονικών εξαρτημάτων αυτοκινήτων και αμέτρητων άλλων τεχνολογιών. Η δυνατότητα δημιουργίας μικρότερων αλλά και πιο αποδοτικών συσκευών με περισσότερες λειτουργίες έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την προσβασιμότητα.

2.2.2 Ιστορική Αναδρομή και ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής

Η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής ξεκίνησε με την εφεύρεση του τρανζίστορ το 1947 από τους John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley, στο Bell Labs [13]. Αυτή η ανακάλυψη άνοιξε το δρόμο για την εξέλιξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, επιτρέποντας τη δημιουργία συσκευών που ήταν πιο αποδοτικές και οικονομικές από τις προηγούμενες τεχνολογίες που βασίζονταν σε λυχνίες κενού. Το τρανζίστορ έγινε η βάση για την ανάπτυξη των μετέπειτα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Κατά τη δεκαετία του 1960, η μετάβαση από τα διακριτά τρανζίστορ στα ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits - ICs) έφερε την επανάσταση στον τομέα της ηλεκτρονικής. Αυτή η μετάβαση κατέστη δυνατή χάρη στις καινοτομίες στην κατασκευή ημιαγωγών και στη φωτολιθογραφία, που επέτρεψαν την τοποθέτηση πολλών τρανζίστορ και άλλων ηλεκτρονικών στοιχείων σε ένα ενιαίο τσιπ. Ο Jack Kilby [14] της Texas Instruments και ο Robert Noyce της Fairchild Semiconductor αναγνωρίζονται ως οι εφευρέτες των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, με τον Kilby να επιδεικνύει το πρώτο λειτουργικό ολοκληρωμένο κύκλωμα το 1958.

2.2.3 Τεχνολογίες Κατασκευής Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Η κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) περιλαμβάνει μια σειρά από σύνθετες και ακριβείς διαδικασίες, οι οποίες απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και καθαρά περιβάλλοντα εργασίας. Οι βασικές διαδικασίες περιλαμβάνουν τη φωτολιθογραφία, τη διάχυση, την οξείδωση και την ιοντική εμφύτευση. Η κατασκευή αρχίζει με την προετοιμασία του πυριτίου, του υλικού που αποτελεί τη βάση για τα περισσότερα ολοκληρωμένα κυκλώματα λόγω των άριστων ημιαγωγικών του ιδιοτήτων.

Προετοιμασία του Πυριτίου

Το πυρίτιο προετοιμάζεται με τη δημιουργία καθαρών υποστρωμάτων. Αρχικά εξευγενίζεται σε πολύ υψηλή καθαρότητα και στη συνέχεια σχηματίζονται μονοκρυσταλλικά δισκία, γνωστά ως wafers, μέσω της μεθόδου Czochralski ή άλλων μεθόδων ανάπτυξης κρυστάλλων [15]. Αυτά τα δισκία κόβονται και λειαινούνται ώστε να δημιουργηθεί μια εξαιρετικά λεία και καθαρή επιφάνεια για τα επόμενα στάδια κατασκευής [16].

Φωτολιθογραφία

Λιθογραφία είναι η διαδικασία αποτύπωσης (patterning) ορισμένων δομών, δηλαδή γεωμετρικών σχημάτων, πάνω σε κάποια επιφάνεια. Για να αποτυπωθούν αυτές οι δομές απαιτεί-

ται η χρήση ενός πρότυπου μοτίβου, το οποίο έχει αποτυπωμένο πάνω του το σχέδιο αυτών των δομών.

Κατά την φωτολιθογραφία ή οπτική λιθογραφία [17] η αποτύπωση γίνεται με τη διέλευση φωτός μέσα από τη μάσκα, η οποία είναι κατασκευασμένη από χαλαζία ή πλαστικό. Η διαδικασία αποτύπωσης χρησιμοποιείται για να σχηματιστούν τα πρότυπα των κυκλωμάτων πάνω στο πυριτιούχο υπόστρωμα. Το πυρίτιο καλύπτεται με ένα φωτοευαίσθητο υλικό που ονομάζεται φωτοαντίσταση. Ένα μοτίβο, το οποίο περιέχει το σχέδιο του κυκλώματος, προβάλλεται στο υπόστρωμα μέσω υπεριώδους φωτός. Το φως τροποποιεί τις χημικές ιδιότητες της φωτοαντίστασης, επιτρέποντας την απομάκρυνση των εκτεθειμένων ή μη εκτεθειμένων περιοχών (ανάλογα με τον τύπο της φωτοαντίστασης). Μετά την ανάπτυξη του μοτίβου, τα μη καλυμμένα μέρη του πυριτίου είναι έτοιμα για επεξεργασία.

Διάχυση και Οξείδωση

Η διάχυση είναι η διαδικασία εισαγωγής προσμίξεων στο πυρίτιο για να μεταβάλλει τις ημιαγωγικές του ιδιότητες. Οι προσμίξεις αυτές μπορεί να είναι στοιχεία όπως το βόριο ή το φώσφορο, τα οποία εισάγονται στο πυρίτιο μέσω θερμικών διαδικασιών. Κατά τη διάρκεια της διάχυσης, τα άτομα των προσμίξεων κινούνται μέσα στο πυρίτιο, δημιουργώντας περιοχές με συγκεκριμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Η οξείδωση είναι η διαδικασία σχηματισμού ενός στρώματος διοξειδίου του πυριτίου στην επιφάνεια του πυριτίου μέσω χημικής αντίδρασης με το οξυγόνο. Το στρώμα αυτό χρησιμεύει ως μονωτικό υλικό και προστατευτικό στρώμα κατά την κατασκευή των κυκλωμάτων.

Ιοντική Εμφύτευση

Η ιοντική εμφύτευση είναι μια πιο ακριβής μέθοδος εισαγωγής προσμίξεων στο πυρίτιο. Σε αυτή τη διαδικασία, ιόντα των προσμίξεων επιταχύνονται και "βομβαρδίζονται" στην επιφάνεια του πυριτίου. Η ενέργεια των ιόντων ελέγχει το βάθος στο οποίο εισάγονται στο πυρίτιο, ενώ η δόση των ιόντων καθορίζει τη συγκέντρωση των προσμίξεων. Η ιοντική εμφύτευση επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των ημιαγωγών και είναι κρίσιμη για τη δημιουργία των ενεργών περιοχών των τρανζίστορ.

2.2.4 Σχεδίαση και Ανάλυση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Η σχεδίαση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και εργαλεία CAD (Computer-Aided Design), τα οποία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη

και βελτιστοποίηση των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στους μηχανικούς να δημιουργήσουν αναλυτικά σχέδια κυκλωμάτων που πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές απόδοσης και αξιοπιστίας. Πιο συγκεκριμένα, προσφέρουν δυνατότητες όπως η σχεδίαση σε επίπεδο συστήματος, η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς και η ανάλυση της ακεραιότητας σήματος.

Η ανάλυση και η δοκιμή των σχεδιασμένων κυκλωμάτων πραγματοποιούνται μέσω εξομοίωσης και πρωτοτυποποίησης για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία πριν τη μαζική παραγωγή. Η εξομοίωση επιτρέπει στους μηχανικούς να ελέγξουν την απόδοση του κυκλώματος σε διάφορες συνθήκες και να εντοπίσουν πιθανά σφάλματα ή προβλήματα. Η πρωτοτυποποίηση, από την άλλη πλευρά, επιτρέπει τη φυσική κατασκευή και δοκιμή ενός πρωτοτύπου του κυκλώματος για να επιβεβαιωθεί η λειτουργικότητά του στην πράξη.

Η χρήση τους είναι κρίσιμη για την επιτυχή ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, από τις ηλεκτρονικές συσκευές καθημερινής χρήσης μέχρι τις βιομηχανικές και ιατρικές συσκευές. Χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού και εργαλείων CAD, η ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων θα ήταν πολύ πιο αργή, δαπανηρή και επιρρεπής σε σφάλματα.

2.2.5 Εφαρμογές της Μικροηλεκτρονικής

Η μικροηλεκτρονική έχει επηρεάσει σημαντικά την ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογιών, μεταμορφώνοντας πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής αλλά και της βιομηχανίας. Οι υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, οι αισθητήρες και οι συσκευές υγειονομικής περίθαλψης είναι μόνο μερικά παραδείγματα εφαρμογών που επωφελούνται της ανάπτυξης και χρήσης μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Στους σύγχρονους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, τα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα επιτρέπουν την ανάπτυξη μικρότερων, ταχύτερων και πιο αποδοτικών επεξεργαστών, οι οποίοι οδηγούν σε αυξημένη υπολογιστική ισχύ και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας [18].

Άλλο ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μεταμόρφωση των κινητών τηλεφώνων χάρη στην μικροηλεκτρονική τεχνολογία. Τα κινητά τηλέφωνα έχουν γίνει πιο ισχυρά, πιο γρήγορα και πολυλειτουργικά, επιτρέποντας την ενσωμάτωση προηγμένων χαρακτηριστικών όπως οι υψηλής ανάλυσης κάμερες, οι γρήγορες συνδέσεις στο διαδίκτυο, η αναπαραγωγή πολυμέσων, οι μονάδες πλοήγησης GPS κ.λπ. Επίσης, η μικροηλεκτρονική παίζει ζωτικό ρόλο στην ανάπτυξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων και των τεχνολο-

γιών διαδικτύου, καθιστώντας δυνατές τις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και την αξιόπιστη συνδεσιμότητα που απαιτούνται στις σημερινές κοινωνίες.

Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, οι μικροηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι φορητές συσκευές παρακολούθησης και τα εμφυτεύσιμα ιατρικά όργανα, επιτρέπουν την καλύτερη διαχείριση και παρακολούθηση των ασθενών, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής, μειώνοντας παράλληλα το κόστος της φροντίδας.

Επιπλέον, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, από την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών μέχρι την ανίχνευση κίνησης, έχουν βελτιωθεί σημαντικά χάρη στη μικροηλεκτρονική, προσφέροντας υψηλότερη ακρίβεια και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η συμβολή της μικροηλεκτρονικής στις τεχνολογικές εξελίξεις είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς συνεχίζει να διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην πρόοδο της τεχνολογίας και της επιστήμης, οδηγώντας σε καινοτομίες που βελτιώνουν τη ζωή και την εργασία των ανθρώπων παγκοσμίως.

2.3 Νανοηλεκτρονική

2.3.1 Εισαγωγή στη Νανοηλεκτρονική

Η νανοηλεκτρονική είναι ο κλάδος της ηλεκτρονικής που ασχολείται με το σχεδιασμό, την κατασκευή, και εφαρμογή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και συσκευών σε νανοκλίμακα. Πρόκειται για μία σημαντική μετάβαση από τη μικροηλεκτρονική, εστιάζοντας στον χειρισμό μεμονωμένων ατόμων και μορίων για τη δημιουργία νέων ηλεκτρονικών λειτουργιών [19].

Η μικροηλεκτρονική, όπως αναφερθήκαμε και προηγουμένως, έχει συμβάλει καθοριστικά στη συρρίκνωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και κυκλωμάτων, οδηγώντας στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με εκατομμύρια έως δισεκατομμύρια τρανζίστορ. Ωστόσο, καθώς πλησιάζουν τα φυσικά όρια της μικρογραφίας, η νανοηλεκτρονική εμφανίζεται ως η επόμενη μεγάλη πρόκληση. Οι συσκευές νανοκλίμακας εκμεταλλεύονται τα κβαντικά μηχανικά φαινόμενα και τις νέες φυσικές ιδιότητες που εντοπίζονται σε τέτοιες κλίμακες, επιτρέποντας ακόμη πιο βελτιωμένη απόδοση και λειτουργικότητα [20].

Η νανοηλεκτρονική έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε διάφορους κλάδους και τεχνολογίες. Υπόσχεται πολλή μεγάλη πρόοδο στην υπολογιστική ισχύ, την ενεργειακή

απόδοση, την ανίχνευση, την ιατρική, τις στρατιωτικές εφαρμογές και πολλά άλλα. Οι μοναδικές συμπεριφορές που επιδεικνύονται από υλικά σε νανοκλίμακα ανοίγουν ευκαιρίες για σχεδιασμό καινοτόμων συσκευών με πρωτοφανείς δυνατότητες.

2.3.2 Θεμελιώδεις αρχές και ιδιότητες

Οι συσκευές νανοηλεκτρονικής τεχνολογίας εκμεταλλεύονται τις κβαντομηχανικές ιδιότητες της ύλης, προσφέροντας νέες δυνατότητες και εφαρμογές σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ηλεκτρονικές συσκευές.

Στις μικρές κλίμακες, οι ηλεκτρονικές ιδιότητες των υλικών διαφοροποιούνται σημαντικά σε σύγκριση με τις κλίμακες μεγαλύτερων διαστάσεων. Οι κβαντομηχανικές επιδράσεις, όπως η κβαντική διεμπλοκή και το φαινόμενο της σήραγγας, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία των νανοηλεκτρονικών συσκευών.

Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα φαινόμενα στις νανοηλεκτρονικές συσκευές είναι το φαινόμενο σήραγγας, χάρη στο οποίο σωματίδια μπορούν να υπερπηδήσουν φράγματα δυναμικού και να βρεθούν σε περιοχές του χώρου απαγορευμένες από την κλασική μηχανική. Το φαινόμενο της σήραγγας εκμεταλλεύεται τις κβαντομηχανικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων και έχει οδηγήσει σε σημαντικές προόδους στις τεχνολογίες τρανζίστορ και μνήμης.

Η κβαντική διεμπλοκή, από την πλευρά της, περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρονίων σε νανοδομές, η οποία μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην αγωγιμότητα και τη συμπεριφορά των ηλεκτρονικών συσκευών.

Η αξιοποίηση αυτών των κβαντομηχανικών φαινομένων στις νανοηλεκτρονικές συσκευές έχει δημιουργήσει νέες προοπτικές στην τεχνολογία και την επιστήμη των υλικών, επιτρέποντας την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών που είναι ακόμη πιο γρήγορες, μικρές και αποδοτικές.

2.3.3 Υλικά και Τεχνολογίες

Η νανοηλεκτρονική βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών, όπως το γραφένιο, οι νανοσωλήνες άνθρακα, και οι νανοδομές από ημιαγωγούς. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μοναδικές ηλεκτρικές, μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές στη νανοηλεκτρονική [21].

Το γραφένιο είναι ένα δισδιάστατο υλικό που αποτελείται από ένα μόνο στρώμα ατόμων άνθρακα διατεταγμένων σε εξαγωνικό πλέγμα. Προσφέρει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

τητα, μηχανική αντοχή, και θερμική αγωγιμότητα. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό για χρήση σε διατάξεις υψηλής απόδοσης και χαμηλής ισχύος, όπως τρανζίστορ και αισθητήρες.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι κυλινδρικές νανοδομές που αποτελούνται από ένα ή περισσότερα στρώματα γραφενίου τυλιγμένα σε σωλήνες. Έχουν εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή, και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ευκαμψία και αντοχή σε ακραίες συνθήκες [22].

Οι νανοδομές από ημιαγωγούς, όπως οι νανοςύρματα από πυρίτιο ή το οξείδιο του ψευδαργύρου, χρησιμοποιούνται επίσης εκτενώς στη νανοηλεκτρονική. Μπορούν να τροποποιηθούν εύκολα σε ατομικό επίπεδο, επιτρέποντας τον ακριβή καθορισμό των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων, πράγμα που τις κάνει απαραίτητες για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η κατασκευή νανοηλεκτρονικών συσκευών περιλαμβάνει τεχνικές όπως η νανολιθογραφία, η χημική εναπόθεση ατμών (CVD), και η αυτοσυναρμολόγηση. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν τη δημιουργία εξαιρετικά λεπτών και ακριβών δομών σε νανοκλίμακα.

Η νανολιθογραφία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία λεπτομερών σχεδίων νανοκλίμακας επάνω σε επιφάνειες υλικών. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την κατασκευή δομών με διαστάσεις κάτω από 10 νανόμετρα, επιτρέποντας την ανάπτυξη εξαιρετικά μικρών και ακριβών ηλεκτρονικών συσκευών [23].

Η αυτοσυναρμολόγηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα μόρια οργανώνονται αυτόματα σε δομές χωρίς την παρέμβαση εξωτερικών παραγόντων. Αυτή η τεχνική εκμεταλλεύεται τις φυσικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων, όπως οι βαν ντερ Βάαλς δυνάμεις, για τη δημιουργία οργανωμένων νανοδομών. Η αυτοσυναρμολόγηση επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων δομών με μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα [24].

2.3.4 Σχεδίαση και Ανάλυση Νανοηλεκτρονικών Συσκευών

Η σχεδίαση νανοηλεκτρονικών συσκευών απαιτεί τη χρήση σύνθετων εργαλείων προσομοίωσης που μπορούν να αναλύσουν και να προβλέψουν τον τρόπο λειτουργίας μίας συσκευής στο νανοεπίπεδο. Καθώς οι διαστάσεις των συσκευών μειώνονται δραματικά, τα κβαντομηχανικά φαινόμενα γίνονται κυρίαρχα και πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση. Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι απαιτείται η χρήση προχωρημένων υπολογιστικών αλγορίθμων και λογισμικών που ενσωματώνουν τις αρχές της κβαντομηχανικής για την ακριβή προσομοίωση της λειτουργίας των νανοηλεκτρονικών συσκευών [25].

Έτσι, οι μηχανικοί έχουν την ευχέρεια να μοντελοποιούν τις φυσικές ιδιότητες των υλικών σε νανοκλίμακα, να προσομοιώνουν τις ηλεκτρικές και θερμικές συμπεριφορές των συσκευών, και να αναλύουν την απόδοσή τους υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας [26]. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη, καθώς οι νανοηλεκτρονικές συσκευές μπορεί να παρουσιάζουν ιδιόμορφες και μη αναμενόμενες συμπεριφορές λόγω των κβαντομηχανικών επιδράσεων, καθιστώντας την προσομοίωση ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία για την ανάπτυξή τους και την αντιμετώπιση και την πρόληψη διάφορων σφαλμάτων. Επιπλέον, η δοκιμή των νανοηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι μια κρίσιμη διαδικασία για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας τους και της ανθεκτικότητάς τους σε διάφορες συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η ακτινοβολία, και η μηχανική καταπόνηση.

2.3.5 Εφαρμογές της Νανοηλεκτρονικής

Η νανοηλεκτρονική αποτελεί ένα από τα πιο καινοτόμα και ταχέως αναπτυσσόμενα πεδία της σύγχρονης επιστήμης. Η αξιοποίηση της δυναμικής της, είναι ικανή να μετασχηματίσει πολλούς τομείς της καθημερινότητας. Με την εκμετάλλευση των νανουλικών στη δημιουργία νέων συσκευών, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί μπορούν να αναπτύξουν εξαιρετικά αποδοτικές και ευέλικτες τεχνολογίες.

Ίσως το πιο υποσχόμενο πεδίο εφαρμογής της νανοηλεκτρονικής επιστήμης, είναι η ανάπτυξη υπολογιστών κβαντικής επεξεργασίας. Οι κβαντικοί υπολογιστές αναμένεται να φέρουν επανάσταση στην επεξεργασία δεδομένων, πράγμα που μέχρι τώρα είναι αδύνατο να επιτευχθεί με τους κλασσικούς υπολογιστές [27].

Ένας ακόμη τομέας, που επωφελείται των καινοτομιών της νανοηλεκτρονικής είναι αυτός της κατασκευής αισθητήρων υψηλής ακρίβειας. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν εξαιρετικά μικρές περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως μεταβολές της θερμοκρασίας, της πίεσης, την παρουσία χημικών ουσιών και καπνού με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα. Τέτοιου είδους δυνατότητες, βρίσκουν πεδίο εφαρμογής σε κλάδους όπως η παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος, η πυρασφάλεια αλλά και η εθνική ασφάλεια.

Στον τομέα των ενεργειακών εφαρμογών, η νανοηλεκτρονική μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πιο αποδοτικών συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, η χρήση νανουλικών σε ηλιακά(φωτοβολταϊκά) κύτταρα μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επίσης, είναι δυνατή η ενίσχυση της επίδοσης των μπαταριών, καθιστώντας τις πιο ελαφριές, ανθεκτικές

και με αυξημένη διάρκεια ζωής βοηθώντας στην ανάπτυξη και την εξέλιξη project όπως αυτό της ηλεκτροκίνησης.

Τέλος, υπόσχεται να δώσει σημαντικές λύσεις στις σύγχρονες επικοινωνίες αλλά και στην αποθήκευση δεδομένων. Υλικά όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα, το γραφένιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη ταχύτατων και πυκνότερων διατάξεων αποθήκευσης δεδομένων και επικοινωνιών, επιτρέποντας τη μεταφορά και την αποθήκευση τεράστιων ποσοτήτων πληροφορίας με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

Κεφάλαιο 3

Εφαρμογές

3.1 MRAM

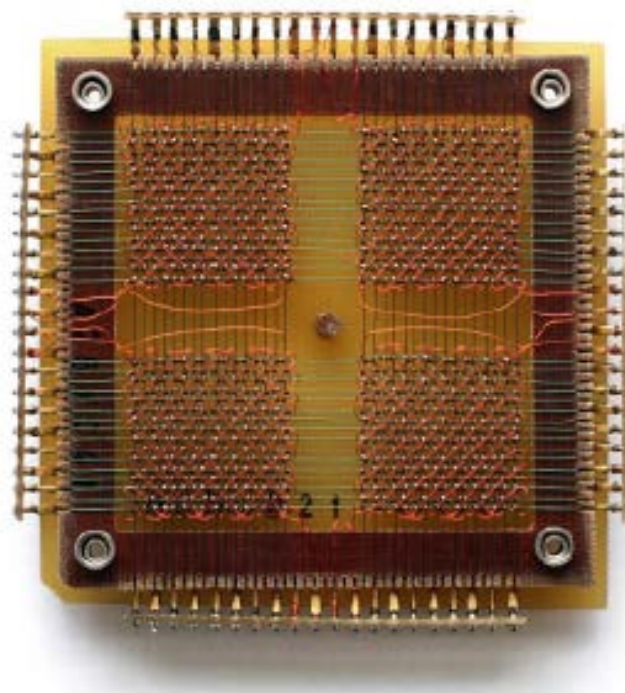
Διάφοροι τύποι μνήμης ενσωματώνονται στη σημερινή τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει γιατί ηλεκτρονικά συστήματα όπως υπολογιστές, κάμερες κινητών τηλεφώνων και πολλά άλλα, χρησιμοποιούν συνδυασμό από διάφορες μνήμες όπως DRAM (Dynamic RAM), SRAM (Static RAM) και μνήμης flash. Κάθε μία από αυτές τις μνήμες έχει τη δική της δύναμη στο να εκτελεί συγκεκριμένες εργασίες.

Σε αυτή την ενότητα, πρόκειται να μιλήσουμε για μια νέα τεχνολογία μνήμης που ονομάζεται MRAM (Magnetoresistance RAM) η οποία προβλέπεται ότι θα μπορεί να αντικαταστήσει ή να ξεπεράσει τους υπάρχοντες τύπους μνήμης μετατρέποντας την σε καθολική μνήμη. Υπάρχουν πολλοί περιορισμοί που σχετίζονται με τους ήδη υπάρχοντες τύπους μνήμης, οι οποίοι αποθαρρύνουν την ευρεία χρήση τους, αλλά τέτοιοι περιορισμοί δεν υπάρχουν στην MRAM [19].

Η μνήμη MRAM έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες μνήμες. Αρχικά, καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από τη DRAM. Δεύτερον κοστίζει λιγότερα χρήματα και έχει μικρότερη κυψέλη μνήμης σε σύγκριση με τη SRAM. Επιπλέον, η MRAM είναι πολύ πιο γρήγορη από τη μνήμη flash, ενώ η τελευταία διατηρεί επίσης περιορισμένο αριθμό κύκλων με δυνατότητα επανεγγραφής. Παράλληλα, η MRAM αποθηκεύει απεριόριστες επαναγραφές λειτουργεί πιο γρήγορα και επίσης αντλεί λίγη ισχύ δεδομένου ότι έχει μικρές σε μέγεθος κυψέλες.

Η πρώτη μορφή μαγνητικών μνημών (Σχήμα 3.1) εισήχθησαν τη δεκαετία του 1950 και ήταν γνωστές ως "μνήμες μαγνητικού πυρήνα". Αυτές οι μνήμες χρησιμοποιούνταν ως επί

το πλείστον ως μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '70. Η δομή αυτών των μνημών περιελάμβανε τοροειδή φερρίτη διατεταγμένο σε ένα πλέγμα $x - y$ με τέσσερα καλώδια που περνούσαν από κάθε πυρήνα που περιελάμβανε καλώδια $X, Y, Sense$ και $Inhibit$ για την επιλογή bits, την αλλαγή καταστάσεων και την ανάγνωση τους αντίστοιχα. Κάθε πυρήνας μεταδίδει ένα bit πληροφοριών που αντιπροσωπεύει ένα μαγνητικό πεδίο που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του στοιχείου μνήμης σε αυτόν. Η κατεύθυνση των επαγόμενων τάσεων σε ένα κύκλωμα ανίχνευσης έδειξε εάν ήταν αποθηκευμένο ένα 0 ή 1 [19].

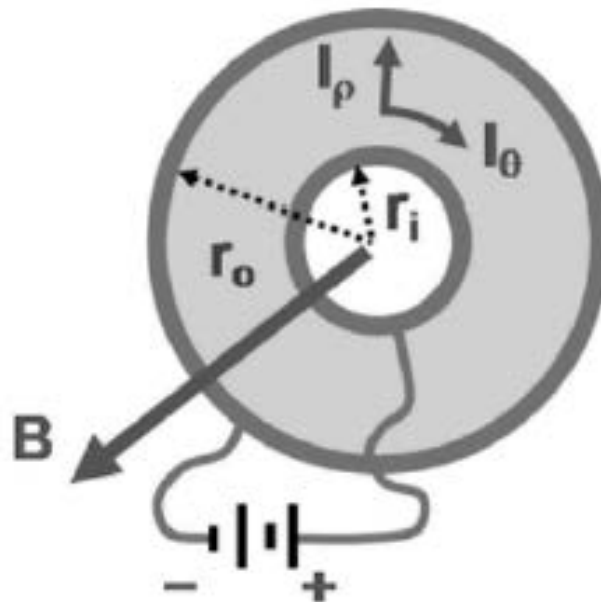


Σχήμα 3.1: Η πρώτη μνήμη μαγνητικού πυρήνα που χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1950. Η μνήμη που εμφανίζεται εδώ αποθηκεύει 32×32 (1024) bit δεδομένων.

Μόνο τη δεκαετία του 1980 χρησιμοποιήθηκαν σιδηρομαγνητικά υλικά λεπτής μεμβράνης/α για την κατασκευή *MRAM*. Στην αρχή τους, τα *MRAM* εκμεταλλεύτηκαν την *AMR* (ανισότροπη μαγνητοαντίσταση), της οποίας η αντίσταση εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ του εφαρμοζόμενου ρεύματος και της μαγνητικής του πόλωσης. Αυτές ήταν οι πρώτες σπιντρονικές, καθώς ίσχυαν τόσο το σπιν ενός ηλεκτρονίου όσο και το φορτίο του. Εταιρείες όπως η *NonVolatile Electronics Inc.*, το κρατικό πανεπιστήμιο της *Iowa* μεταξύ άλλων που πρωτοστάτησαν σε αυτά τα πρώτα συστήματα *AMR MRAM*. Σε αντίθεση με τα συστήματα μνήμης μαγνητικού πυρήνα του 1950 και του 1960 που ήταν βασικά μηχανικές συσκευές,

αυτά αποτελούνταν από ολοκληρωμένα κυκλώματα που ήταν MRAM λεπτής μεμβράνης κατασκευασμένα με σύγχρονες φωτολιθογραφικές διαδικασίες ένα κύκλωμα ελέγχου CMOS.

Ο δίσκος Corbino (Σχήμα 3.2) [28] απεικονίζει τα πρώτα συστήματα MRAM που χρησιμοποίησαν AMR. Ανισότροπος σημαίνει ότι βασίζεται στην κατεύθυνση για την επίδρασή του (δηλαδή το ισχυρότερο όπου το μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα είναι στην πραγματικότητα κάθετα μέχρι το μηδέν όταν είναι παράλληλα). Το εσωτερικό και το εξωτερικό ηλεκτρόδιο συγκρατούνται μεταξύ τους από σιδηρομαγνητικό υλικό φραγμού για αυτόν τον δίσκο. Όταν εφαρμόζεται τάση, το σιδηρομαγνητικό υλικό προκαλεί αντίσταση παράγοντας ρεύμα I_ρ . Η εφαρμογή ενός κάθετου μαγνητικού πεδίου έχει ως αποτέλεσμα τη μαγνητική δύναμη που επενεργεί στα κινούμενα φορτία προσθέτοντας μια συνιστώσα ρεύματος I_θ που μειώνει τη ροή του I_ρ και αυξάνει την αντίσταση μέσα στο δίσκο.



Σχήμα 3.2: Δίσκος Corbino. Η αντίσταση από το εσωτερικό ηλεκτρόδιο στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο ποικίλλει ανάλογα με το εφαρμοσμένο πεδίο B .

Ωστόσο, με μια αλλαγή αντίστασης της τάξεως του 2% για το φαινόμενο AMR, δεν υπήρχε περίπτωση να είναι εμπορικά βιώσιμο ως MRAM. Η μεγαλύτερη συσκευή της Honeywell που χρησιμοποιεί αυτή την τεχνολογία ήταν μόλις 16 kb. Ωστόσο, προσαρμόστηκε στις κεφαλές σκληρού δίσκου όπου χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 οι ερευνητές πειραματίζονταν με πολυστρωματικές δο-

μές, επομένως παρατηρήθηκε ότι θα μπορούσαν να συμβούν πολύ μεγαλύτερες αλλαγές αντίστασης (δηλ. 50% αντί για 2%). Έτσι φτάσαμε στην ανακάλυψη της Giant Magnetoresistance (GMR). Κατά συνέπεια, τα εφέ spin tunneling δεν μπορούσαν να εξαλειφθούν εντελώς και οι τεχνολογίες AMR εγκαταλείφθηκαν για χρήση μνήμης (αν και εξακολουθούσαν να εφαρμόζονται σε κεφαλές ανάγνωσης σκληρού δίσκου).

Το 2007 το Νόμπελ Φυσικής απονεμήθηκε στους Albert Fert και Peter Grünberg για την ανεξάρτητη ανακάλυψη της GMR. Αυτές οι δομές περιλαμβάνουν δομές λεπτής μεμβράνης με εναλλασσόμενα στρώματα κατασκευασμένα από σιδηρομαγνητικά και μη μαγνητικά υλικά (δηλ. Fe/Cr/Fe). Απεικονίζουν διαμορφώσεις ρεύματος σε επίπεδο, όπου το ρεύμα ρέει από αριστερά προς τα δεξιά και όχι από πάνω προς τα κάτω. Ευθυγραμμίζοντας τις μαγνητικές ροπές των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων, θα μπορούσε κανείς να αλλάξει τις διασκορπίσεις spin των ηλεκτρονίων που πηγαίνουν είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω. Με τη μέτρηση των μαγνητισμών διαπιστώνει κανείς ότι η ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται όταν οι μαγνητίσεις είναι παράλληλες παρά αντιπαράλληλες. Σε αυτές τις δομές παρατηρήθηκαν αλλαγές στην αντίσταση έως και 50 τοις εκατό, ωστόσο σε πρακτικούς σκοπούς οι σημερινές εφαρμογές κυψελών μνήμης συνήθως παρέχουν μόλις 4 – 8%.

Η κολοσσιαία μαγνητοαντίσταση (CMR) ξεπερνά ακόμη και τη γιγάντια μαγνητοαντίσταση (GMR) στην ικανότητά της να προκαλεί σημαντικές αλλαγές στην αντίσταση κάτω από μαγνητικά πεδία. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως σε συγκεκριμένες ενώσεις οξειδίου του μαγγανίου. Παρά την αρχική του ανακάλυψη που χρονολογείται από τη δεκαετία του 1950, η CMR παραμένει ελάχιστα κατανοητή μέχρι σήμερα. Η αινιγματική του φύση, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις εξωτικού υλικού, έχουν περιορίσει την υιοθέτησή του στην αγορά της μνήμης. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των διαφόρων τύπων μαγνητοαντίστασης (MR) και της αντίστοιχης αύξησης της αντίστασης που αυτοί συνεπάγονται:

Πίνακας 3.1: Τύποι μαγνητοαντίστασης (MR)

Όνομα	Αύξηση στην Αντίσταση
Anisotropic (AMR)	2%
Giant (GMR)	25 – 50%
Tunnel (TMR)	50 – 70%
Colossal (CMR)	100 + %

3.1.1 Κατηγορίες MRAM

Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες "οικογένειες" MRAM, οι οποίες έχουν εξελιχθεί χάρη στην πρόοδο στην έρευνα της σπιντρονικής. Ειδικότερα, δύο σημαντικές καινοτομίες έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο σε αυτή την εξέλιξη: η γιγάντια μαγνητοαντίσταση σήραγγας (TMR) σε κόμβους σήραγγας MgO και το φαινόμενο της μεταφοράς ροπής σπιν (Spin-Transfer Torque, STT). Η γιγάντια TMR έχει επιτρέψει την επίτευξη υψηλότερων επιπέδων αντίστασης σε μαγνητικές σήραγγες, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και την απόδοση των MRAM. Από την άλλη, το φαινόμενο STT έχει επιτρέψει τη χρήση χαμηλότερης ενέργειας για την εγγραφή δεδομένων στις μνήμες MRAM, καθιστώντας τις πιο ενεργειακά αποδοτικές και επιτρέποντας την περαιτέρω σμίκρυνση των συσκευών.

Το ενδιαφέρον για την MRAM αναζωπυρώθηκε μετά τις πρώτες επιτυχείς προσπάθειες το 1995 να κατασκευαστούν μαγνητικές συνδέσεις σήραγγας (MTJ) που παρουσιάζουν μεγάλο εύρος μαγνητοαντίστασης σήραγγας (TMR). Εκτός από το μεγαλύτερο πλάτος μαγνητοαντίστασης, οι MTJs είναι πιο κατάλληλες από τις μεταλλικές δομές GMR για εφαρμογές μνήμης λόγω της μεγαλύτερης σύνθετης αντίστασής τους, η οποία επιτρέπει την ευκολότερη ενσωμάτωση με συμπληρωματικά στοιχεία μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (CMOS).

Οι διάφορες κατηγορίες MRAM διαφέρουν ως προς τον τρόπο εγγραφής των πληροφοριών στη μνήμη.

Field Driven MRAM

Πριν από την ανακάλυψη της μεταγωγής STT και την σταδιακή εφαρμογή της σε MTJ μετά το 2004, ο μοναδικός τρόπος ελέγχου της μαγνήτισης μιας μαγνητικής νανοδομής ήταν με τη χρήση του μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από παλμούς ρεύματος που διαρρέουν αγωγίμες γραμμές τοποθετημένες κάτω και πάνω από το MTJ. Μια εξέλιξη της MRAM που βασίζεται στην εγγραφή με μαγνητικό πεδίο είναι η θερμικά υποβο-

ηθούμενη MRAM (thermally-assisted MRAM, TA-MRAM), η οποία αναπτύχθηκε κυρίως από την Crocus Technology. Στην TA-MRAM, η επιλεκτικότητα εγγραφής επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού προσωρινής θέρμανσης του επιλεγμένου κελιού, που προκαλείται από το ρεύμα σήραγγας που διαρρέει το κελί, και ενός παλμού μαγνητικού πεδίου.

Η κατανάλωση ενέργειας για την εγγραφή αυτών των στοιχείων μνήμης είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τη συμβατική MRAM που βασίζεται σε μαγνητικό πεδίο, λόγω της δυνατότητας χρήσης ασθενέστερων μαγνητικών πεδίων και του επιμερισμού κάθε παλμού πεδίου σε πολλά κελιά, επιτρέποντας την εγγραφή πολλών bit ταυτόχρονα. Η τεχνολογία εγγραφής με πεδίο είναι ιδιαίτερα ανθεκτική και ήδη αξιοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπου η αξιοπιστία, η αντοχή και η αντίσταση στην ακτινοβολία είναι ζωτικής σημασίας, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία και τις διαστημικές εφαρμογές.

Ωστόσο, η δυνατότητα κλιμάκωσης που προσφέρει η εγγραφή με πεδίο στη συμβατική τεχνολογία περιορίζεται σε διαστάσεις MTJ περίπου $60 \text{ nm} \times 120 \text{ nm}$, εξαιτίας της ηλεκτρομετανάστευσης στις αγώγιμες γραμμές που δημιουργούν το πεδίο. Επιπλέον, το παραγόμενο πεδίο εκτείνεται σε όλο το μήκος της αγώγιμης γραμμής και μειώνεται σταδιακά στον χώρο, ανάλογα με την απόσταση από τη γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι τα γειτονικά μη επιλεγμένα bits μπορεί να εκτεθούν σε σημαντική ποσότητα πεδίου εγγραφής, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ακούσια μεταγωγή τους. Στην TA-MRAM, επιτυγχάνονται μικρότερες διαστάσεις, χάρη στον διαμοιρασμό του πεδίου, στο χαμηλότερο απαιτούμενο πλάτος πεδίου εγγραφής και στον διαφορετικό μηχανισμό επιλεκτικότητας κατά την εγγραφή.

Spin Transfer Torque MRAM

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ενδιαφέρον για τη χρήση της STT ως νέα μεθόδου εγγραφής στη μνήμη MRAM έχει αυξηθεί, κυρίως επειδή η εγγραφή με STT προσφέρει πολύ καλύτερη κλιμάκωση μεγέθους σε σύγκριση με την εγγραφή με μαγνητικό πεδίο. Αυτό συμβαίνει επειδή το κρίσιμο ρεύμα που απαιτείται για την εγγραφή μέσω STT μειώνεται αναλογικά με την επιφάνεια του κελιού, ενώ στην εγγραφή με πεδίο τείνει να αυξάνεται. Επιπλέον, η STT παρέχει υψηλή επιλεκτικότητα κατά την εγγραφή, καθώς το ρεύμα STT διέρχεται μόνο από τα επιλεγμένα κελιά. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την STT-MRAM εστιάζεται πλέον στη μαγνήτιση εκτός επιπέδου, καθώς απαιτεί σημαντικά μικρότερο ρεύμα εγγραφής σε σχέση με τις αντίστοιχες δομές εντός επιπέδου, διατηρώντας ταυτόχρονα το ίδιο επίπεδο σταθερότητας μνήμης.

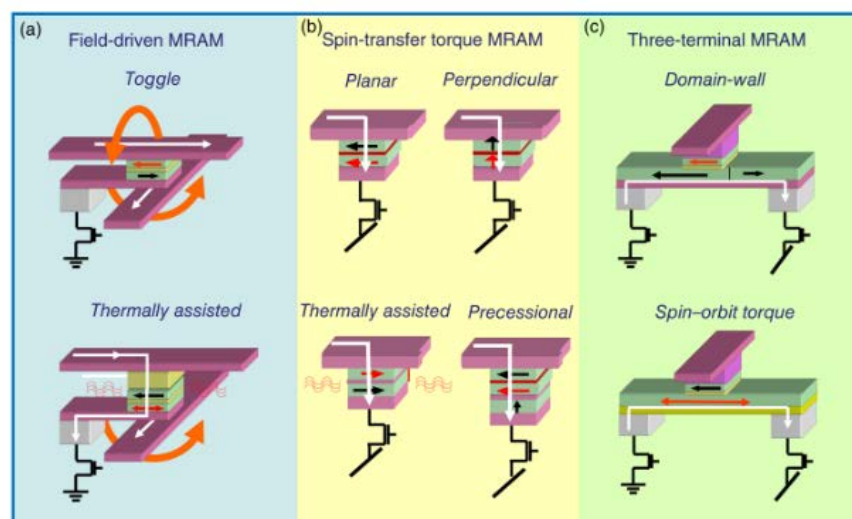
Η θερμική υποστήριξη μπορεί επίσης να συνδυαστεί με την προσέγγιση εγγραφής STT.

Σε αυτή την περίπτωση, η θερμότητα Joule που παράγεται από το ρεύμα εγγραφής STT, το οποίο διαρρέει το φράγμα σήραγγας MTJ, αξιοποιείται για να διευκολύνει την αλλαγή της μαγνήτισης. Αυτό επιτρέπει την αντιμετώπιση μιας κλασικής πρόκλησης στην αποθήκευση δεδομένων: την ισορροπία μεταξύ της ευκολίας εγγραφής και της σταθερότητας της μνήμης.

Three Terminal MRAM

Μια τρίτη κατηγορία MRAM που βρίσκεται υπό διερεύνηση και ανάπτυξη είναι η MRAM τριών τερματικών. Ο βασικός στόχος αυτής της προσέγγισης είναι ο διαχωρισμός των διαδρομών εγγραφής και ανάγνωσης, με σκοπό τη βελτίωση της αξιοπιστίας της μνήμης. Αυτές οι τεχνικές δημιουργούν νέες δυνατότητες για τον σχεδιασμό αρχιτεκτονικών μνήμης και λογικών εφαρμογών. Η διαδικασία εγγραφής βασίζεται είτε στην επαγόμενη διάδοση ρεύματος μέσω του τοίχου τομέα είτε σε φαινόμενα όπως η ροπή spin-orbit.

Στο Σχήμα 3.3, παρουσιάζονται οι τρεις κατηγορίες MRAM που αναφέρθηκαν πιο πάνω.



Σχήμα 3.3: Κατηγορίες MRAM

3.1.2 Εφαρμογές MRAM

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες [29], η αγορά της μνήμης στερεάς κατάστασης (Solid State Drive-SSD) ξεπερνά τα 50 δισεκατομμύρια δολάρια, ενώ το τμήμα της μη πτητικής μνήμης (Non Volatile Memory, NVM) καταλαμβάνει ένα πολύ μικρότερο μέρος της αγοράς. Οι περισσότεροι φορητοί υπολογιστές σήμερα χρησιμοποιούν μνήμες τύπου NVM, οι οποίες διατηρούν δεδομένα όταν η τροφοδοσία είναι απενεργοποιημένη, συνήθως με τη μορφή μιας μονάδας στερεάς κατάστασης στη θέση ενός σκληρού δίσκου. Τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές χρησιμοποιούν επίσης μνήμες τύπου NVM, ωστόσο υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ κόστους και απόδοσης. Η πιο οικονομική NVM είναι η μνήμη flash, η οποία, μεταξύ άλλων χρήσεων, αποτελεί τη βάση για τα μικρά, φορητά flash memory sticks. Η μνήμη flash, ωστόσο, είναι αργή και έχει περιορισμένη δυνατότητα εγγραφής, που φτάνει τους 10^5 κύκλους, η οποία είναι επαρκής για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών αποθήκευσης, από memory sticks έως μνήμη ψηφιακών καμερών.

Εκτός από τους υπολογιστές, τα σημερινά φορητά ηλεκτρονικά έχουν εξελιχθεί σε ισχυρές υπολογιστικές συσκευές, καθώς η διεπαφή χρήστη έχει μετατραπεί σε μια πλήρη εμπειρία πολυμέσων. Για να παρέχουν την απόδοση που απαιτείται για αυτές τις εφαρμογές, οι σχεδιαστές φορητών ηλεκτρονικών χρησιμοποιούν πολλούς τύπους μνήμης: μια μέσης ταχύτητας μνήμη τυχαίας προσπέλασης για συνεχείς αλλαγές δεδομένων, μια μνήμη υψηλής ταχύτητας για την προσωρινή αποθήκευση εντολών στην CPU, και μια πιο αργή NVM για μακροχρόνια αποθήκευση δεδομένων. Ο συνδυασμός όλων αυτών των τύπων μνήμης σε μια ενιαία μονάδα ήταν ένας μακροχρόνιος στόχος της βιομηχανίας ημιαγωγών. Με μια τέτοια μνήμη, οι υπολογιστικές συσκευές θα γίνονταν πολύ πιο απλές και μικρές, πιο αξιόπιστες, ταχύτερες και λιγότερο ενεργοβόρες.

Ως αποτέλεσμα, τα προηγμένα τσιπ NVM αναμένεται να σημειώσουν εντυπωσιακή ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια, με την παγκόσμια αγορά να αυξάνεται από 209 εκατομμύρια δολάρια το 2012 σε 2028 δισεκατομμύρια δολάρια το 2018. Αυτή η ανάπτυξη θα πραγματοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές: ενσωματωμένες κάρτες συστήματος-σε-τσιπ (SoC), ετικέτες αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID) που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση εμπορευμάτων με ανιχνευτές υψηλής ταχύτητας, έξυπνους αερόσακους σε αυτοκίνητα, σκληρυμένες από την ακτινοβολία μνήμες για αεροδιαστημικές και πυρηνικές εγκαταστάσεις, πλατφόρμες έντυπης μνήμης (όπως έξυπνες κάρτες, παιχνίδια, αισθητήρες), οθόνες, και σε προηγμένα έξυπνα κινητά τηλέφωνα.

Η MRAM έχει τη δυνατότητα να γίνει μια «καθολική» συσκευή μνήμης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Στην πράξη, μπορεί να προσφέρει απόδοση παρόμοια με την Cache SRAM 3 (χρόνος μεταγωγής περίπου 5 ns), αλλά είναι μη πτητική. Επιπλέον, έχει παρόμοια πυκνότητα με τη DRAM, αλλά με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς δεν χρειάζεται ανανέωση και παρουσιάζει μειωμένη διαρροή, δεδομένου ότι η MRAM μπορεί να απενεργοποιηθεί σε κατάσταση αναμονής. Εκτός αυτού, είναι μη πτητική όπως η μνήμη flash, αλλά πολύ ταχύτερη και δεν υφίσταται υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου. Αυτός ο συνδυασμός χαρακτηριστικών καθιστά την MRAM ιδιαίτερα ελκυστική. Κάποιοι προτείνουν ότι θα μπορούσε να αντικαταστήσει τις SRAM, e-FLASH και DRAM, τόσο σε ενσωματωμένες όσο και σε αυτόνομες μορφές, καθώς και ορισμένες μνήμες κατηγορίας αποθήκευσης, οδηγώντας σε άμεσα μη πτητικούς υπολογιστές και μικροσκοπικές, εξαιρετικά γρήγορες και αξιόπιστες φορητές συσκευές.

Σε κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, tablet, προσωπικούς ψηφιακούς βοηθούς (PDA) και άλλες μορφές φορητών συσκευών, η MRAM αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση τόσο της μνήμης Flash όσο και της DRAM, καθώς μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα και χώρο. Με τις εφαρμογές λογισμικού αποθηκευμένες στη μνήμη, οι φορητές συσκευές θα μπορούσαν να ενεργοποιούνται ακαριαία στην ίδια ακριβώς κατάσταση που βρίσκονταν όταν απενεργοποιήθηκαν. Στους γενικούς υπολογιστές και τα δίκτυα, η MRAM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθούν καθυστερήσεις κατά την εκκίνηση και να παρέχει ταχύτερη πρόσβαση σε σκληρούς δίσκους, καθώς και δυνατότητες μη πτητικής δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας. Προς το παρόν, το BIOS τείνει να χρησιμοποιεί ακριβή και χαμηλής πυκνότητας μνήμη EEPROM ή SRAM με εφεδρική μπαταρία, ενώ η πτητική μνήμη χρησιμοποιείται για να μετριάσουν τα σημεία συμφόρησης εισόδου/εξόδου. Σε τέτοιες εφαρμογές, η MRAM θα μπορούσε να αποδειχθεί μια πιο οικονομική λύση.

Στα εργοστασιακά συστήματα αυτοματισμού, οι μικροελεγκτές και τα ρομπότ συνήθως χρησιμοποιούν τόσο RAM όσο και PROM/Flash. Η αντικατάσταση αυτών των δύο τσιπ με μία συσκευή MRAM θα μπορούσε να μειώσει το κόστος. Οι ετικέτες RFID απαιτούν χαμηλού κόστους NVM, και η επίτευξη μιας τιμής που καθιστά την MRAM οικονομικά βιώσιμη για εφαρμογές RFID θα μπορούσε να οδηγήσει στη χρήση της και σε άλλους τομείς όπου το κόστος είναι κρίσιμο. Στην αεροδιαστημική, η MRAM είναι ανθεκτική στην ακτινοβολία, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να αντέξει την ιονίζουσα ακτινοβολία, σε αντίθεση

με τις περισσότερες μνήμες ημιαγωγών που βασίζονται σε φορτίο πυκνωτή. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για χρήση σε αεροπλάνα (ήδη χρησιμοποιείται σε ελεγκτές πτήσης της Airbus), δορυφόρους και διαστημόπλοια. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί σε πυρηνικά περιβάλλοντα, όπως σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, όπου οι συμβατικές ηλεκτρονικές συσκευές CMOS αποτυγχάνουν όταν εκτίθενται σε ακτινοβολία.

3.1.3 Προκλήσεις και Ζητήματα MRAM

Ανάπτυξη και Πυκνότητα

Ένα από τα κυριότερα εμπόδια για την MRAM [30] περιλαμβάνει τη μείωση του μεγέθους των MTJ (Magnetic Tunnel Junction) και της συνολικής κυψέλης μνήμης που θα οδηγήσει σε υψηλή πυκνότητα. Ωστόσο, έχει επιτευχθεί μέσω αξιοσημείωτης προόδου στα υλικά και τις μεθόδους κατασκευής. Ένα αξιοσημείωτο επίτευγμα στην κάθετη μαγνητική ανισοτροπία (PMA) παρέχει μια πιο μόνιμη μαγνητική τάξη σε νανοσκοπικές διαστάσεις. Η PMA επιτρέπει στις μαγνητικές ροπές να βρίσκονται στις κατακόρυφες θέσεις τους παράλληλα με την έκδοση ενίσχυσης, αλλά επίσης καθιστά δυνατή τη μείωση των αποτυπωμάτων των κυψελών, επομένως έχουν ενεργοποιηθεί υψηλότερες πυκνότητες μνήμης. Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνικές λιθογραφίας και χάραξης έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση της κλιμάκωσης των κελιών MRAM, έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν τις τρέχουσες ηλεκτρονικές ανάγκες [30].

Power Writing and Speed

Μια δεύτερη σημαντική πρόκληση είναι η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με την εγγραφή δεδομένων σε κελιά MRAM. Οι παραδοσιακές τεχνολογίες MRAM είχαν τις χειρότερες στιγμές τους όταν επρόκειτο για την εξοικονόμηση ενέργειας, με αποτέλεσμα την έλλειψη ευρείας διάδοσης. Ωστόσο, η Spin-Transfer Torque MRAM (STT-MRAM) ήρθε για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα. Στην STT-MRAM, αυτό γίνεται με τη χρήση του φαινομένου της ροπής μεταφοράς σπιν για την αλλαγή της μαγνητικής κατάστασης του ελεύθερου στρώματος που μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις. Έχουν επίσης αναπτυχθεί νέα σχέδια και υλικά που βελτιώνουν την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητα κατά τη διάρκεια της εγγραφής [30].

Θερμική σταθερότητα

Για να διατηρηθεί η μαγνητική κατάσταση των MRAM σε μικρές κλίμακες πρέπει να επιτευχθεί θερμική σταθερότητα. Όταν τα μεγέθη των κυψελών μνήμης μειώνονται, η θερ-

μότητα θα κάνει τα δεδομένα πιο ασταθή από ό,τι πριν αυτό είναι αποτέλεσμα θερμικών διακυμάνσεων. Αυτό το πρόβλημα προκύπτει από προηγμένα υλικά που έχουν υψηλότερες ιδιότητες θερμικής σταθερότητας καθώς και από καινοτόμους σχεδιασμούς κυψελών. Για παράδειγμα, η προσθήκη υλικών με υψηλή ενέργεια μαγνητικής ανισοτροπίας θα μπορούσε να βοηθήσει στη διατήρηση σταθερής μαγνήτισης σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, εργάζονται σε καινοτόμες αρχιτεκτονικές κελιών που είναι σε θέση να μειώσουν τον αντίκτυπο των θερμικών διαταραχών, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα παραμένουν άθικτα ακόμη και κάτω από διαφορετικές θερμικές συνθήκες. Η δυναμική θερμική διαχείριση και η χρήση ανθεκτικών στη θερμότητα υλικών είναι μερικές από τις τεχνικές που μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας του MRAM σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Προκλήσεις Υλικών και Κατασκευής

Παρά αυτές τις εξελίξεις, οι διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου των τρανζίστορ συνεχίζουν να απειλούν την ακεραιότητα αυτών των εξελίξεων. Η συνεχής παραγωγή υψηλής ποιότητας μαγνητικών υλικών παραμένει ζωτικής σημασίας για την αξιοπιστία της συσκευής MRAM. Ασυμφωνίες στη μαγνητική συμπεριφορά συμβαίνουν όταν οι ιδιότητες του υλικού ποικίλλουν στα MTJ λόγω διαφορών στην ποιότητα, οι οποίες διακυβεύουν τη συνολική απόδοση και την αξιοπιστία του τσιπ μνήμης. Ως εκ τούτου, πρέπει να παρέχουν αυστηρό έλεγχο των διαδικασιών κατασκευής καθώς και να αναπτύξουν ισχυρές τεχνικές διασφάλισης ποιότητας. Επιπλέον, ο συνδυασμός του MRAM με τις υπάρχουσες τεχνολογίες CMOS έχει τις δικές του προκλήσεις. Οι τρέχουσες διαδικασίες CMOS πρέπει να είναι συμβατές με το MRAM ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί σε μεγάλη κλίμακα για σκοπούς εμπορικής βιωσιμότητας. Η έρευνα στις διαδικασίες υβριδικής παραγωγής επικεντρώνεται στον συγχρονισμό του MRAM με την παραδοσιακή κατασκευή ημιαγωγών για βιώσιμη εμπορική παραγωγή χωρίς να θυσιάζεται η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία του.

Χρήση Ενέργειας

Όντας μη πτητική, η MRAM έχει συνήθως καλύτερη διαχείριση ισχύος από άλλες τεχνολογίες μνήμης στερεάς κατάστασης. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι απαραίτητη η μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για ευκολότερο ανταγωνισμό με όσους ειδικεύονται σε αυτό. Ενώ η MRAM έχει εγγενώς χαμηλές απαιτήσεις ισχύος λόγω της μη πτητικής φύσης του, απαιτούνται περαιτέρω μειώσεις για να ανταγωνιστούν άλλες τεχνολογίες μνήμης χαμηλής κατανάλωσης. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, οι ερευνητές εργάζονται για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ισχύος τόσο της γραφής όσο και της ανάγνωσης στην

MRAM. Ορισμένα μέτρα από πάνω προς τα κάτω έχουν αναπτύξει περιφερειακά κυκλώματα αποδοτικής ισχύος, ενώ γίνεται διαχείριση ενέργειας που ρυθμίζει την ενέργεια που δαπανάται σε περιόδους χωρίς εργασία. Για το σκοπό αυτό, υπάρχει ανάγκη να προχωρήσουμε σε μεθοδολογίες σχεδιασμού αποδοτικής ισχύος για εφαρμογές ευαίσθητες στην ενέργεια, όπως κινητές συσκευές και συστήματα Internet of Things(IoT) [30].

3.2 Giant Magnetoresistance-GMR

Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) ανακαλύφθηκε το 1988, από τους Grunberg και Fert, οι οποίοι δούλευαν ανεξάρτητα με τις ομάδες του, και θεωρήθηκε ως μία από τις πιο συναρπαστικές προόδους στη φυσική στερεάς κατάστασης.

Σε συστήματα πολυστρωματικών μαγνητικών στοιχείων παρατήρησαν πολύ μεγάλες αλλαγές αντίστασης κατά την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτή η ανακάλυψη πυροδότησε τις έρευνες ώστε να κατανοηθεί πλήρως το φαινόμενο και να αξιοποιηθούν οι τεχνολογικές του δυνατότητες. Περίπου δέκα χρόνια μετά ήρθε η πρώτη εμπορική υλοποίηση του φαινομένου, με τη μορφή κεφαλών ανάγνωσης σκληρού δίσκου και αισθητήρων μαγνητικού πεδίου [31].

Επειδή η παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου αλλάζει την τροχιά ενός ηλεκτρονίου που κινείται μέσα σε αυτό το πεδίο, η αντίσταση ενός μετάλλου είναι διαφορετική παρουσία μαγνητικού πεδίου, μια επίδραση που είναι ιδιαίτερα έντονη στα μαγνητικά μέταλλα. Η αλλαγή της αντίστασης για ρεύμα παράλληλο προς το εφαρμοζόμενο πεδίο και η μεταβολή της αντίστασης για ένα ρεύμα κάθετο στο εφαρμοζόμενο πεδίο είναι διαφορετική και αυτή η διαφορά είναι το κλασικό φαινόμενο μαγνητοαντίστασης. Για πολλά μέταλλα αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα μικρό, στην πιο ακραία περίπτωση η γωνιακή απόκλιση είναι της τάξης του 5% [32].

Η Giant Magnetoresistance (GMR) αντιστοιχεί απλώς σε ένα φαινόμενο μαγνητοαντίστασης, μέσω της κβαντικής μηχανικής, το οποίο είναι παρατηρήσιμο σε δομές λεπτής μεμβράνης με την τάση να υπάρχουν εναλλασσόμενα στρώματα σιδηρομαγνητικών και μη μαγνητικών υλικών. Η GMR ανακαλύφθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και είχε μεγάλη επίδραση στην αποθήκευση δεδομένων, όπως στην κατασκευή μονάδων σκληρού δίσκου. Στην τελευταία περίπτωση, η τεχνολογία GMR θεωρείται ότι φέρνει επανάσταση στις τρέχουσες συσκευές υψηλής τεχνολογίας μνήμης χρόνος που θέτει τα θεμέλια για τη σπιντρο-

νική (spintronics). Αυτή η έρευνα πρόκειται να διερευνήσει τη σημασία του GMR στις επιστημονικές μελέτες καθώς και στις τεχνολογικές προόδους συζητώντας την ανακάλυψή του, την εφαρμογή αρχών και στη συνέχεια αναλύει το μέλλον του [31].

Η μεμονωμένη ανακάλυψη έγινε από τον γάλλο Albert Fert και τον γερμανό Peter Grünberg το 1988. Για αυτές τις ιδέες και οι δύο τιμήθηκαν μετά θάνατον με το βραβείο Νόμπελ φυσικής το 2007. Η εργασία τους έδειξε ότι η ηλεκτρική αντίσταση σε ορισμένα υλικά θα μπορούσε να αλλάξει σε μεγάλο βαθμό από μαγνητικό πεδίο που ήταν η αρχή της σπιντρονικής.

Η βασική φιλοσοφία πίσω από την GMR έγκειται στη σκέδαση σπιν ηλεκτρονίων μέσα στις πολυστρωματικές δομές χρησιμοποιώντας λεπτές στρώσεις. Αυτή η δομή αποτελείται από διαδοχικά σιδηρομαγνητικά (π.χ. σίδηρος, κοβάλτιο) και ένα μαγνητικό στρώμα (π.χ. χρώμιο). Η αντίσταση αυτών των νανοστρωμάτων ποικίλλει λόγω των διαφορετικών διατάξεων που γίνονται από τις μαγνητικές ροπές από τα σιδηρομαγνητικά. Όταν οι μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται παράλληλα, η αντίσταση είναι μικρότερη από ό,τι όταν είναι ευθυγραμμισμένες αντιπαράλληλα [32].

Αυτή η διαφορά στην ειδική αντίσταση συχνά εξαρτάται από το εάν το ηλεκτρόνιο έχει μια κατάσταση σπιν προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Τέτοια σπιν είναι χαρακτηριστικά όλων των φερμιονίων όπως τα ηλεκτρόνια, αλλά μπορούν να λάβουν μόνο δύο τιμές, όπως "πάνω" ($+\frac{1}{2}$) εάν δείχνει κατά μήκος της κατεύθυνσης της κίνησής του ή "κάτω" ($-\frac{1}{2}$) εάν κινείται αντίθετα με την τροχιά του. Σε παράλληλες διαμορφώσεις, τα σκεδασμένα ηλεκτρόνια με παρόμοια σπιν έχουν μικρότερες μέσες ελεύθερες διαδρομές από ότι σε αντιπαράλληλες. Ως εκ τούτου περισσότερο ρεύμα ρέει εύκολα μέσω μαγνητισμένων στρωμάτων λόγω, εν μέρει, του γεγονότος ότι λιγότερα ηλεκτρόνια έχουν την ανεπιθύμητη κατεύθυνσή τους αντιστροφή άλλη φορά με αθροιστική συνολική επίδραση ήταν χαμηλή πτώση τάσης σε όλο το μήκος του. Αντίθετα με τον αντιπαράλληλο προσανατολισμό μεταξύ αυτών των δύο υλικών εμφανίζεται μεγαλύτερη σκέδαση, αυξάνοντας την ηλεκτρική αντίσταση πάνω του [33].

3.2.1 Τύποι GMR

Multilayer GMR

Στην πολυστρωματική GMR (Multilayer Giant Magnetoresistance), δύο ή περισσότερα σιδηρομαγνητικά στρώματα, όπως σίδηρος (Fe), διαχωρίζονται από ένα πολύ λεπτό στρώμα μη σιδηρομαγνητικού υλικού, όπως το χρώμιο (Cr), με πάχος περίπου 1 νανόμετρο. Αυτό

το λεπτό διαχωριστικό στρώμα παίζει κρίσιμο ρόλο στη σύζευξη των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων μέσω της αλληλεπίδρασης RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida), η οποία είναι μια έμμεση αλληλεπίδραση που επιτρέπει την αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων, όταν το πάχος του διαχωριστικού είναι κατάλληλο.

Η αντισιδηρομαγνητική σύζευξη σημαίνει ότι οι μαγνητικές ροπές των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων ευθυγραμμίζονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, κάτι που είναι ενεργειακά πιο σταθερό σε αυτά τα συστήματα. Η κατάσταση αυτή έχει άμεση επίδραση στην ηλεκτρική αντίσταση της συσκευής. Όταν τα σιδηρομαγνητικά στρώματα είναι ευθυγραμμισμένα αντιπαράλληλα, η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται, καθώς τα ηλεκτρόνια με σπιν βρίσκονται σε λιγότερο ευνοϊκές καταστάσεις διάχυσης [34].

Αντίθετα, όταν οι μαγνητικές ροπές των στρωμάτων είναι παράλληλες, η αντίσταση μειώνεται, αφού η διάχυση των ηλεκτρονίων είναι πιο ευνοϊκή. Η διαφορά στην ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ της παράλληλης και της αντιπαράλληλης ευθυγράμμισης είναι αξιοσημείωτη, με τη διαφορά να μπορεί να ξεπεράσει το 10% σε θερμοκρασία δωματίου, γεγονός που καθιστά την GMR τεχνολογικά χρήσιμη. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τη βάση για πολλές σύγχρονες εφαρμογές, όπως οι αισθητήρες ανάγνωσης σκληρών δίσκων και οι μνήμες MRAM, όπου η αλλαγή της μαγνητικής κατάστασης μπορεί να ανιχνευτεί μέσω της μεταβολής της αντίστασης.

Spin Valve GMR

Στην Spin Valve GMR, δύο σιδηρομαγνητικά στρώματα διαχωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα μη σιδηρομαγνητικού υλικού, με πάχος περίπου 3 nm. Το μη σιδηρομαγνητικό στρώμα λειτουργεί ως διαχωριστής, αλλά σε αντίθεση με το πολυστρωματικό GMR, δεν υπάρχει σύζευξη RKKY μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο σιδηρομαγνητικά στρώματα δεν συνδέονται έμμεσα μαγνητικά και μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα.

Εάν τα δύο σιδηρομαγνητικά στρώματα έχουν διαφορετικά καταναγκαστικά πεδία (coercive fields), που καθορίζουν την ευκολία με την οποία η μαγνήτισή τους μπορεί να αντιστραφεί, τότε είναι δυνατή η ανεξάρτητη εναλλαγή της μαγνήτισής τους. Ένα από τα στρώματα, συνήθως το «ελεύθερο στρώμα», μπορεί να αλλάξει τη μαγνητική του κατεύθυνση εύκολα υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ενώ το άλλο στρώμα, το «σταθερό» ή «καρφωμένο» στρώμα, διατηρεί τη μαγνητική του κατεύθυνση σταθερή [35].

Αυτή η ανεξάρτητη ρύθμιση των δύο στρωμάτων επιτρέπει την επίτευξη δύο διαφορετι-

κών καταστάσεων: την παράλληλη και την αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων. Στην παράλληλη κατάσταση, οι μαγνητικές ροπές των δύο στρωμάτων δείχνουν προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ στην αντιπαράλληλη κατάσταση δείχνουν προς αντίθετες κατευθύνσεις.

Η διαφορά αυτή στην ευθυγράμμιση έχει άμεσο αποτέλεσμα στην ηλεκτρική αντίσταση του συστήματος. Όταν οι μαγνητικές ροπές είναι παράλληλες, τα ηλεκτρόνια με σπιν μπορούν να περάσουν πιο εύκολα, γεγονός που μειώνει την αντίσταση. Αντίθετα, στην αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση, τα ηλεκτρόνια συναντούν μεγαλύτερη αντίσταση, καθώς οι μαγνητικές ροπές των στρωμάτων λειτουργούν αντίθετα. Έτσι, η ηλεκτρική αντίσταση είναι υψηλότερη στην αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση, φαινόμενο που αξιοποιείται για την ανίχνευση των διαφορετικών καταστάσεων μαγνήτισης.

Αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται ευρέως σε τεχνολογίες αποθήκευσης δεδομένων, όπως στους αισθητήρες ανάγνωσης σκληρών δίσκων και στις μαγνητικές μνήμες MRAM, όπου η διαφορά στην ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να μεταφραστεί σε δυαδικές καταστάσεις 0 και 1, απαραίτητες για την αποθήκευση και ανάγνωση δεδομένων [36].

Pseudo spin valve

Οι συσκευές βαλβίδας ψευδοπεριστροφής αποτελούν μια ειδική κατηγορία συσκευών που έχουν σχεδιαστεί για να εκμεταλλεύονται τις μαγνητικές ιδιότητες διαφορετικών τύπων σιδηρομαγνητικών στρωμάτων, προκειμένου να επιτύχουν προηγμένα χαρακτηριστικά απόδοσης. Αν και οι συσκευές αυτές μοιάζουν με τις βαλβίδες περιστροφής, η κύρια διαφορά τους βρίσκεται στην ειδική δομή των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων που χρησιμοποιούνται.

Στις βαλβίδες ψευδοπεριστροφής, χρησιμοποιούνται δύο τύποι σιδηρομαγνητικών στρωμάτων, ένας μαλακός μαγνήτης και ένας σκληρός σιδηρομαγνήτης. Ο μαλακός μαγνήτης, γνωστός και ως μαλακός σιδηρομαγνήτης, έχει την ικανότητα να αλλάζει εύκολα την κατεύθυνση της μαγνήτισής του υπό την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Από την άλλη πλευρά, ο σκληρός σιδηρομαγνήτης είναι λιγότερο ευαίσθητος σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία και διατηρεί τη μαγνήτισή του πιο σταθερή.

Αυτή η διαφορά στη συμπεριφορά των δύο τύπων μαγνητών επιτρέπει την αναστροφή της μαγνήτισης του ενός στρώματος πριν από το άλλο όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η διαχείριση αυτής της διαδικασίας συντελεί στη δημιουργία της απαραίτητης αντισιδηρομαγνητικής επίδρασης, η οποία είναι κρίσιμη για τη λειτουργία των συσκευών GMR. Οι συσκευές GMR χρησιμοποιούν αυτήν την αντίσταση που εξαρτάται από το μα-

γνητικό πεδίο για να λειτουργούν σε διάφορες εφαρμογές, όπως σε σκληρούς δίσκους και αισθητήρες μαγνητικού πεδίου.

Για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των συσκευών βαλβίδας ψευδοπεριστροφής, είναι απαραίτητο το πάχος του μη μαγνητικού στρώματος που τοποθετείται ανάμεσα στους σιδηρομαγνητικούς σχηματισμούς να είναι επαρκές. Αυτό συμβάλλει στη διατήρηση της σύζευξης ανταλλαγής (exchange coupling) στο ελάχιστο επίπεδο. Όταν το μη μαγνητικό στρώμα είναι πάρα πολύ λεπτό, μπορεί να συμβεί ανεπιθύμητη αλληλεπίδραση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων, που θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση της συσκευής.

Granular GMR

Η κοκκώδης GMR (Giant Magnetoresistance) είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την παρουσία μαγνητικών ιζημάτων σε στερεά υλικά, όπου αυτά τα ιζήματα είναι ενσωματωμένα σε μια μη μαγνητική μήτρα. Η κύρια ιδιαιτερότητα της, έγκειται στο γεγονός ότι η ανάλυση της μαγνητικής αντίστασης προκύπτει από τη διαφορά των μαγνητικών χαρακτηριστικών μεταξύ των κόκκων του μαγνητικού υλικού και της γύρω μη μαγνητικής μήτρας.

Μέχρι στιγμής, το φαινόμενο κοκκώδους GMR έχει παρατηρηθεί κυρίως σε συστήματα που περιλαμβάνουν μήτρες κόκκων κοβαλτίου με χαλκό. Η βασική αιτία αυτής της περιορισμένης παρατήρησης είναι η καλή συμβατότητα του κοβαλτίου με τον χαλκό λόγω της αδυναμίας τους να αναμειγνύονται πλήρως. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δημιουργία μικρών, διακριτών ιζημάτων του κοβαλτίου μέσα σε μια μήτρα χαλκού. Για να επιτευχθεί αυτή η δημιουργία, το μείγμα χαλκού και κοβαλτίου λιώνεται και στη συνέχεια ψύχεται γρήγορα, ώστε να σχηματιστούν τα στερεά ιζήματα.

Τα μεγέθη των κόκκων που σχηματίζονται μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης που εφαρμόζεται και την ποσότητα ανόπτησης (θερμικής επεξεργασίας) που ακολουθεί. Ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει τη μεγέθυνση και τη διανομή των κόκκων, ενώ η ανόπτηση μπορεί να βελτιώσει ή να τροποποιήσει τη δομή και τις μαγνητικές ιδιότητες των κόκκων.

Παρά τη σημασία του φαινομένου κοκκώδους GMR, τα κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του δεν έχουν καταφέρει να επιτύχουν τις υψηλές αναλογίες GMR που παρατηρούνται σε πολυστρωματικά συστήματα. Η μειωμένη απόδοση του κοκκώδους GMR σε σύγκριση με τα πολυστρωματικά συστήματα υποδηλώνει ότι η βελτίωση της δομής και των υλικών αυτών είναι απαραίτητη για την επίτευξη ανάλογης απόδοσης.

3.2.2 Εφαρμογές GMR

Μαγνητικοί Σκληροί Δίσκοι

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του GMR είναι στις κεφαλές ανάγνωσης των μονάδων σκληρού δίσκου (HDD). Αυτή η τεχνολογία, η οποία εισήχθη τη δεκαετία του 1990, έπαιξε βασικό ρόλο στην επανάσταση στην αποθήκευση δεδομένων αυξάνοντας σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης των HDD. Οι κεφαλές ανάγνωσης GMR είναι ικανές να ανιχνεύουν τις μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές στην επιφάνεια του δίσκου που αντιστοιχούν σε bits δεδομένων, επειδή είναι εξαιρετικά ευαίσθητες σε μικρές αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο που τις περιβάλλει. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία, είναι δυνατή η παραγωγή σκληρών δίσκων υψηλής χωρητικότητας των οποίων η χρήση έχει προωθήσει εφαρμογές υψηλής έντασης δεδομένων και ανάπτυξη βιομηχανιών.

Μαγνητικοί Αισθητήρες

Οι μαγνητικοί αισθητήρες που βασίζονται στην τεχνολογία GMR βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων αυτοκινήτων, βιομηχανικών αυτοματισμών καθώς και βιοϊατρικών οργάνων μεταξύ άλλων. Τα συστήματα αντιμπλοκαρίσματος πέδησης (ABS), τα ταχύμετρα και άλλες συσκευές ασφαλείας για οχήματα μπορούν να επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από αυτές τις συσκευές, καθώς αυτή η ομάδα είναι αρκετά ευαίσθητη για την ανίχνευση ασθενών μαγνητικών πεδίων. Ο ιατρικός τομέας τα χρησιμοποιεί επίσης για τη δημιουργία τρισδιάστατων εικόνων ζωντανών οργάνων, επιτρέποντας έτσι στους γιατρούς να προσδιορίσουν ακριβώς πόσο μεγάλοι είναι οι όγκοι και πού βρίσκονται σε αντιστοιχία με υγιή όργανα ή ιστούς γύρω τους, χωρίς να βλάψουν ασθενείς που υποβάλλονται σε τέτοιες επεμβάσεις καθημερινά κατά τα αρχικά στάδια, όταν υπάρχει ακόμα ελπίδα για την επιβίωσή τους [32].

Spintronics

Ένας τομέας όπου η GMR ήταν ιδιαίτερα σημαντική είναι η σπιντρονική, η οποία χρησιμοποιεί το ενδογενές σπιν των ηλεκτρονίων καθώς και το φορτίο τους για το χειρισμό των πληροφοριών [33]. Μεταξύ των εφαρμογών της σπιντρονικής περιλαμβάνεται η μαγνητική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (MRAM), η οποία χρησιμοποιεί αυτό το φαινόμενο GMR για να επιτύχει γρήγορες, υψηλής ταχύτητας και μη πτητικές λύσεις μνήμης. Ως εκ τούτου, αρκετοί ερευνητές και εταιρείες πιστεύουν ότι η MRAM μπορεί να αντικαταστήσει τις παραδοσιακές τεχνολογίες μνήμης στο μέλλον λόγω των πλεονεκτημάτων της όσον αφορά την ταχύτητα, την αντοχή και την κατανάλωση ενέργειας [37].

3.2.3 Τεχνολογικές εξελίξεις και προκλήσεις

Υλικές Καινοτομίες

Αρχικά, πολυστρωματικές δομές σιδηρομαγνητικών και μη μαγνητικών υλικών χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογές GMR. Ωστόσο, οι σύγχρονες διαδικασίες κατασκευής οδήγησαν στην ανάπτυξη προηγμένων κατασκευών, συμπεριλαμβανομένων των βαλβίδων περιστροφής και των MTJ (Magnetic Tunnel Junction) [32]. Ως εκ τούτου, αυτά τα σχέδια έχουν αυξήσει ακόμη περισσότερο την αποτελεσματικότητα καθώς και την επεκτασιμότητα των συσκευών GMR. Επιπλέον, η βελτιωμένη ομοιομορφία και αξιοπιστία των δομών GMR είναι πλέον δυνατή μέσω συνθετικών αντισιδηρομαγνητικών στρωμάτων και καλύτερων μεθόδων εναπόθεσης που επιτρέπουν την ενσωμάτωση αυτών των υλικών σε εμπορικές συσκευές [33].

Τεχνικές Κατασκευής

Η διαδικασία κατασκευής συσκευών GMR απαιτεί τη δυνατότητα ελέγχου του πάχους και της σύνθεσης των στρωμάτων με μεγάλη ακρίβεια. Ως αποτέλεσμα μιας τέτοιας προόδου, η χρήση τεχνικών όπως η επιταξία μοριακής δέσμης (MBE) ή η εναπόθεση διασκορπισμού κατέστησαν εφικτή την παραγωγή υψηλής ποιότητας πολυστρωματικών GMR με ακρίβεια ατομικής κλίμακας. Αυτές οι μέθοδοι μας βοηθούν να κάνουμε σαφώς καθορισμένες μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών επιπέδων αυτών των ταινιών, κάτι που είναι απαραίτητο για την επίτευξη της επιθυμητής GMR. Επιπλέον, οι πρόσφατες εξελίξεις στη μικρομηχανική μαζί με τη χάραξη, έχουν επίσης προωθήσει τη σμίκρυνση τέτοιων συσκευών, καθιστώντας τα έτσι συμβατά με μικροηλεκτρονικά κυκλώματα.

Θερμική σταθερότητα και αξιοπιστία

Μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας GMR είναι η διασφάλιση της θερμικής σταθερότητας και αξιοπιστίας στις συσκευές GMR. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας οδηγούν σε χειροτέρευση των χαρακτηριστικών του μαγνητισμού και αυξάνουν την πιθανότητα απώλειας δεδομένων λόγω θερμικών διακυμάνσεων, επομένως αστοχία της συσκευής. Από την άλλη πλευρά, οι ερευνητές εργάζονται σε νέα υλικά με βελτίωση στη θερμική σταθερότητα και σε νέες αρχιτεκτονικές συσκευών που θα μειώσουν κατά κάποιο τρόπο την επίδραση της θερμότητας. Επιπλέον, διεξάγονται μελέτες που στοχεύουν στην εξεύρεση τρόπου ενίσχυσης αξιόπιστων συσκευών που βασίζονται σε GMR σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, κυρίως με την ενθυλάκωση ή την κατάλληλη ψύξη τους.

Προηγμένη αποθήκευση δεδομένων

Το μέλλον της τεχνολογίας GMR στην αποθήκευση δεδομένων είναι πολλά υποσχόμενο. Στο προσεχές, οι κεφαλές ανάγνωσης GMR θα συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της πυκνότητας του σκληρού δίσκου, διατηρώντας παράλληλα μια ανοδική τάση που προκαλείται από τις υψηλότερες απαιτήσεις των καταναλωτών για περισσότερη αποθήκευση δεδομένων. Άλλωστε, τρέχουν οι εξελίξεις προς τις τεχνολογίες αποθήκευσης επόμενης γενιάς, ειδικά μέσω της μαγνητικής καταγραφής με υποβοήθηση θερμότητας (HAMR) και του bit.

3.3 High K

Τα υλικά High-K, γνωστά και ως υλικά με υψηλές διηλεκτρικές σταθερές, έχουν γίνει πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη καλύτερων ηλεκτρονικών συσκευών, ειδικά στην τεχνολογία ημιαγωγών. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για πιο ισχυρά και μικρότερα ολοκληρωμένα μικροκυκλώματα κλιμακώνει την εξερεύνηση εναλλακτικών υλικών που έχουν σχετικά υψηλές διηλεκτρικές σταθερές αφού το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) έχει φανεί ότι δεν λειτουργεί πλέον καλά ως διηλεκτρικό πύλης στα τρανζίστορ. Αυτό το άρθρο ερευνά τη σημασία, τα χαρακτηριστικά, τις εφαρμογές και τη μελλοντική κατεύθυνση αυτών των υλικών υψηλής K στη βιομηχανία ημιαγωγών [38].

3.3.1 Σημασία και Χαρακτηριστικά High K

Τα υλικά High-K διαφέρουν από το διοξείδιο του πυριτίου στο γεγονός ότι μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερο ηλεκτρικό φορτίο ακόμα και όταν το φυσικό τους πάχος είναι το ίδιο. Η ικανότητα του υλικού να μονώνει τα ηλεκτρικά πεδία ενώ εξακολουθεί να φροντίζει λίγη ηλεκτρική ενέργεια ποσοτικοποιείται από τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού K. Το διοξείδιο του πυριτίου που παραδοσιακά χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό πύλης έχει διηλεκτρική σταθερά περίπου 3,9. Αντίθετα, τα υλικά High-K έχουν τιμές Dk που κυμαίνονται από 10s έως πάνω από 50. Παραδείγματα τέτοιων υλικών με υψηλή περιεκτικότητα σε K περιλαμβάνουν HfO_2 (οξείδιο του αφνίου), ZrO_2 (οξείδιο ζirkονίου) και Al_2O_3 (οξείδιο αλουμινίου) [33].

Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης υλικών High-K είναι ότι επιτρέπει σε ένα συγκεκριμένο διηλεκτρικό στρώμα να επιτύχει υψηλότερη χωρητικότητα χωρίς να αυξάνει το φυσικό

πάχος. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τον έλεγχο των ρευμάτων διαρροής, επειδή η μείωση του πάχους του διηλεκτρικού στρώματος προκαλεί τα λεπτά διηλεκτρικά να επιδεινώσουν τυχόν ρεύματα διαρροής. Με τη χρήση υλικών High-K, τα τρανζίστορ μπορούν να συνεχίσουν να μειώνονται ακόμη και ως προς τις διαστάσεις, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση και την πυκνότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [33].

3.3.2 Εφαρμογές στην Τεχνολογία Ημιαγωγών

Η εισαγωγή υλικών High-K έχει μεταμορφώσει την τεχνολογία των ημιαγωγών, κυρίως στον σχεδιασμό και την κατασκευή τρανζίστορ MOSFET. Η ροή του ρεύματος μέσω του καναλιού ρυθμίζεται σε αυτά τα τρανζίστορ από το διηλεκτρικό πύλης.

Τεχνολογία CMOS

Ο συμπληρωματικός ημιαγωγός οξειδίου μετάλλου (CMOS) που είναι η ραχοκοκαλιά των σύγχρονων ψηφιακών ηλεκτρονικών έχει ωφεληθεί πολύ από διηλεκτρικά υλικά High-K. Η ενσωμάτωση μεταλλικών πυλών μαζί με υλικά High-K έχουν επιλύσει ζητήματα που σχετίζονται με τη διαρροή πύλης και την κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που καθιστά δυνατή την περαιτέρω συρρίκνωση του μεγέθους των τρανζίστορ βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση για μικροεπεξεργαστές ή συσκευές μνήμης.

Πυκνωτές DRAM

Στην περίπτωση των δυναμικών κυκλωμάτων μνήμης τυχαίας πρόσβασης (DRAM), οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των bits πληροφορίας. Με τη χρήση υλικών High-K στους πυκνωτές DRAM, επιτυγχάνεται αύξηση της χωρητικότητας των πυκνωτών, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης δεδομένων σε μικρότερο χώρο. Επιπλέον, η χρήση αυτών των υλικών συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, κάτι που είναι κρίσιμο για την ενεργειακή αποδοτικότητα των σύγχρονων συστημάτων μνήμης.

Τρισδιάστατα τρανζίστορ

Τα υλικά High-K έχουν επίσης επηρεάσει την ανάπτυξη τρισδιάστατων (3D) αρχιτεκτονικών τρανζίστορ, όπως τα FinFET και τα τρανζίστορ gate-all-around (GAA). Οι αρχιτεκτονικές αυτές απαιτούν ακριβή έλεγχο του καναλιού, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση πυλών που διαθέτουν ανώτερες διηλεκτρικές ιδιότητες, οι οποίες παρέχονται μόνο από υλικά High-K. Η ενσωμάτωσή τους επιτρέπει τη βελτίωση της απόδοσης και της πυκνότητας των τρισδιάστατων τρανζίστορ, ενισχύοντας την αποδοτικότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και τη συνολική απόδοση των ηλεκτρονικών συσκευών.

Συνολικά, τα υλικά High-K έχουν καταστεί ουσιαστικά εργαλεία στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην απόδοση, την αποδοτικότητα και τη συνέχιση της εξέλιξης των ψηφιακών και αναλογικών συστημάτων.

3.3.3 Προκλήσεις και Λύσεις

Ωστόσο, παρά τα οφέλη τους τα υλικά High-K αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε ηλεκτρονικές συσκευές που βασίζονται σε Ημιαγωγούς.

Θερμική σταθερότητα

Συχνά τα διηλεκτρικά High-K χάνουν τη σταθερότητά τους κατά τη θέρμανση και κατά την επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες. Προς το παρόν, πολλοί ερευνητές εργάζονται σε διαφορετικές επιλογές υλικών και σύνθετες συνθέσεις που θα ενίσχυαν αυτή τη σταθερότητα για διηλεκτρικά High-K.

Ποιότητα διεπαφής

Για την απόδοση της συσκευής, η διασύνδεση του υλικού High-K με την γκοφρέτα πυριτίου καθορίζει πολλά. Οι ατέλειες σε αυτή τη διεπαφή αυξάνουν τα ελαττώματα και διαταράσσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του τρανζίστορ. Οι τεχνικές εναπόθεσης όπως η εναπόθεση ατομικού στρώματος (ALD) χρησιμοποιούνται για την επίτευξη διεπαφών υψηλής ποιότητας.

Συμβατότητα με υπάρχουσες διεργασίες

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο με τον οποίο τα υλικά High-K ταιριάζουν στις ήδη υπάρχουσες διαδικασίες παραγωγής ημιαγωγών όσον αφορά άλλα στάδια κατασκευής διεργασιών ή υλικά που χρησιμοποιούνται.

Το μέλλον των υλικών High-K είναι λαμπρό στην τεχνολογία ημιαγωγών, δεδομένου ότι οι τρέχουσες έρευνες και ανάπτυξη στοχεύουν στην αντιμετώπιση υφιστάμενων προβλημάτων αναζητώντας επιπλέον χρήσεις. Η βιομηχανία εξερευνά υλικά πέρα από το πυρίτιο, όπως ενώσεις γερμανίου $III - V$, τα διηλεκτρικά High-K θα είναι απαραίτητα για τρανζίστορ υψηλής απόδοσης με αυτά τα εναλλακτικά υποστρώματα. Άλλοι τομείς στους οποίους μπορεί να διερευνηθεί η χρήση αυτών των υλικών περιλαμβάνουν τα εύκαμπτα ηλεκτρονικά όπου η μεγάλη χωρητικότητα και η μηχανική ευελιξία τους μπορούν να οδηγήσουν σε καινοτόμες εφαρμογές στις οθόνες καθώς και wearable τεχνολογία .

Έχει αποδειχθεί ότι τα υλικά υψηλής ποιότητας διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην πρό-

οδο της τεχνολογίας ημιαγωγών αντιμετωπίζοντας κρίσιμα ζητήματα για την κλιμάκωση συσκευών και τη βελτίωση της απόδοσής τους. Τα υλικά επιτρέπουν αυξημένη χωρητικότητα, ελαχιστοποιούν τα ρεύματα διαρροής ενώ ταυτόχρονα παραμένουν συμβατά με νεότερες αρχιτεκτονικές τρανζίστορ, υπογραμμίζοντας έτσι τη σημασία του για την περαιτέρω ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής. Καθώς οι ερευνητές συνεχίζουν να τα βελτιώνουν και να ανακαλύπτουν νέες χρήσεις για αυτά, τα διηλεκτρικά High-K είναι πιθανό να διαδραματίσουν ακόμη μεγαλύτερο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων [39].

3.4 Mems and Nems

3.4.1 Τι είναι τα Mems and Nems

Τα μικρο και νανοηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS/NEMS) είναι συσκευές όπου η κίνηση μιας δομής μικρού ή νανοκλίμακας διέπεται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ή αντίστροφα. Αυτά τα συστήματα είναι απαραίτητα για τη δημιουργία πολύ ευαίσθητων αισθητήρων και αξιόπιστων συσκευών χρονισμού. Τα νανοσυστήματα λειτουργούν σε μοριακό επίπεδο, περιλαμβάνοντας τόσο τις τρέχουσες εφαρμογές όσο και τις πιο προηγμένες θεωρητικές έννοιες. Ουσιαστικά, η νανοτεχνολογία περιλαμβάνει την ικανότητα κατασκευής αντικειμένων από την αρχή χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες τεχνικές και εργαλεία που έχουν σχεδιαστεί για τη δημιουργία πλήρως λειτουργικών προϊόντων υψηλής απόδοσης. Η ιδέα των νανοσυστημάτων περιλαμβάνει την ιδέα των αυτοαναπαραγόμενων συγκροτημάτων νανοκλίμακας. Άλλες πτυχές των Νανο Συστημάτων επικεντρώνονται στην επίτευξη πολυπλοκότητας με έλεγχο ατομικού επιπέδου, καθιστώντας τα ευρέως διαδεδομένα και πρακτικά. Τα υποσύνολα των νανοσυστημάτων περιλαμβάνουν νανοϋπολογιστές και νανοσυναρμολογήτες.

Τα νανοςωματίδια, θεμελιώδη για όλα τα νανοσυστήματα, παράγονται μέσω της νανοτεχνολογίας αλλάζοντας τις ατομικές ιδιότητες. Στη νανοκλίμακα, η συμπεριφορά και οι αντιδράσεις των ατόμων διαφέρουν σημαντικά από εκείνες σε μοριακό επίπεδο λόγω αλλαγών στις φυσικές ιδιότητες των υλικών, παρόμοιες με την ανταλλαγή ενός τύπου μπάλας με έναν άλλο σε έναν θάλαμο. Αυτή η διαφορά είναι τόσο έντονη που ιδιότητες όπως το χρώμα, το σημείο τήξης και τα χημικά χαρακτηριστικά ποικίλλουν πολύ εκτός της νανοκλίμακας.

Ο στόχος είναι να αναπτυχθούν συσκευές NEMS κατασκευασμένες εξ ολοκλήρου από

κρυσταλλικά οξείδια μετάλλων, ενώσεις γνωστές για τις ποικίλες φυσικές τους ιδιότητες, να εισαχθούν νέες κατηγορίες μετατροπών με νέους μηχανισμούς και να ενσωματωθούν περισσότερες δυνατότητες σε νανομηχανικά συστήματα. Αυτή η προσέγγιση θα βελτιώσει το τρέχον πεδίο MEMS/NEMS ενσωματώνοντας πολυλειτουργικά οξείδια.

Η πρόοδος στην επιστήμη και την τεχνολογία αναμένεται να υλοποιήσει συσκευές NEMS που βασίζονται σε πολύ ευαίσθητα οξείδια για την ανίχνευση βιομαγνητικών πεδίων. Το πεδίο MEMS/NEMS στοχεύει στην εφαρμογή υπερευαίσθητων ανιχνευτών ικανών να μετρούν εξαιρετικά αδύναμα μαγνητικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που δημιουργούνται από τη δραστηριότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου, με σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια από τα υπάρχοντα συστήματα MEMS/NEMS [40].

3.4.2 Εφαρμογές Mems and Nems

Τα νανο- και μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα, μαζί με όργανα μέτρησης ακριβείας, διαδραματίζουν κρίσιμους ρόλους σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών υψηλής απόδοσης για σχεδιασμό λογισμικού και αποδοτικών υπολογιστικών περιβάλλοντων. Ο σχεδιασμός συστημάτων μικρο-νανοκλίμακας περιλαμβάνει τη δημιουργία υποσυστημάτων, συσκευών και δομών για την ενοποίηση νέων φαινομένων και πολύπλοκων διαδικασιών χωρίς να απαιτείται πλήρης ενοποίηση του συστήματος. Τα MEMS συνδυάζουν μηχανικά στοιχεία, αισθητήρες, ενεργοποιητές και νανοηλεκτρονικές συσκευές με βάση το πυρίτιο που παράγονται μέσω της νανοτεχνολογίας. Αυτές οι ηλεκτρονικές συσκευές, σχεδιασμένες για χρήση σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC), χρησιμοποιούν διαδικασίες όπως η μικρομηχανική κατασκευή BICMOS και είναι κατάλληλες για διεργασίες μικρομηχανικής κατεργασίας. Περιλαμβάνουν επιλεκτική προσθήκη ή αφαίρεση στρωμάτων σε υποστρώματα πυριτίου για τη δημιουργία μηχανικών συσκευών [40].

Τα μικροηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα λειτουργούν ως ο εγκεφαλος ενός συστήματος, ενώ το MEMS ενισχύει αυτή την ικανότητα με λειτουργίες αισθητηρίου και ενεργοποιητή, επιτρέποντας στα μικροσυστήματα να εκτελούν διάφορες περιβαλλοντικές μετρήσεις, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, θερμοκρασιακών, βιολογικών, χημικών και οπτικών. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρονικά επεξεργάζονται αυτές τις πληροφορίες και καθοδηγούν τους ενεργοποιητές να ανταποκριθούν κατάλληλα μετακινώντας, σταθεροποιώντας, ρυθμίζοντας, αντλώντας και φιλτράροντας, ελέγχοντας έτσι το περιβάλλον ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Σε όλη την ιεραρχία σχεδιασμού, η αποδοτικότητα του συ-

στήματος αξιολογείται, βελτιστοποιείται και διορθώνεται για την ανακάλυψη νέων λύσεων. Τα IC πρέπει να πληρούν τα πρότυπα απόδοσης MEMS, ενσωματώνοντας ηλεκτρομηχανικά όργανα και δομές, κανάλια εισόδου-εξόδου και μετατροπές αναλογικού σε ψηφιακό και αναλογικό σε αναλογικό [41].

3.4.3 Τεχνολογίες Κατασκευής MEMS

Η κατασκευή Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS) [40] βασίζεται κυρίως σε διαδικασίες μικροηλεκτρονικής επεξεργασίας, οι οποίες επιτρέπουν την ακριβή και λεπτομερή δημιουργία μικροσκοπικών μηχανικών και ηλεκτρονικών στοιχείων. Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

Φωτολιθογραφία

Η φωτολιθογραφία είναι μια βασική διαδικασία στη μικροηλεκτρονική κατασκευή, η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μοτίβων πάνω σε υλικά. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την επίστρωση του υποστρώματος με ένα φωτοευαίσθητο υλικό (φωτοαντιστάτη). Στη συνέχεια, το υπόστρωμα εκτίθεται σε φως μέσω μιας φωτομάσκας, η οποία έχει το επιθυμητό μοτίβο. Το φως αλλάζει τις ιδιότητες του φωτοαντιστάτη στις περιοχές που έχει εκτεθεί, επιτρέποντας την επόμενη διαδικασία της ανάπτυξης να αφαιρέσει τις εκτεθειμένες ή μη εκτεθειμένες περιοχές (ανάλογα με τον τύπο του φωτοαντιστάτη), αφήνοντας πίσω το επιθυμητό μοτίβο πάνω στο υπόστρωμα [41].

Χάραξη

Η χάραξη είναι η διαδικασία αφαίρεσης υλικού από την επιφάνεια του υποστρώματος. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι χάραξης [42]:

- Χημική Χάραξη: Χρησιμοποιεί χημικά διαλύματα για την επιλεκτική διάλυση των υλικών. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι υγρή (χρήση υγρών χημικών) ή ξηρή (χρήση αερίων χημικών αντιδραστηρίων).
- Φυσική Χάραξη: Περιλαμβάνει τη χρήση φυσικών μέσων, όπως η εκτόξευση ιόντων σε υψηλή ταχύτητα για την αφαίρεση υλικού από το υπόστρωμα.

Επιμετάλλωση

Η επιμετάλλωση είναι η διαδικασία προσθήκης λεπτών στρωμάτων υλικών πάνω στο υπόστρωμα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπως:

- Ηλεκτρολυτική Επιμετάλλωση: Χρησιμοποιεί ηλεκτροχημικές αντιδράσεις για την απόθεση μετάλλων πάνω στο υπόστρωμα.
- Χημική Ατμοαπόθεση (CVD): Περιλαμβάνει την εναπόθεση υλικών μέσω χημικών αντιδράσεων αερίων φάσης.
- Φυσική Ατμοαπόθεση (PVD): Περιλαμβάνει την απόθεση υλικών μέσω φυσικών διαδικασιών, όπως η εξάτμιση ή η εκτόξευση ιόντων.

Συμπληρωματικές Τεχνολογίες

Εκτός από τις βασικές διαδικασίες, υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες που συχνά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή MEMS:

- Ανοδίωση: Μια διαδικασία που δημιουργεί ένα στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μονωτικό υλικό ή ως προστατευτικό στρώμα.
- Λιθογραφία Επανασύνθεσης: Μια προηγμένη μορφή λιθογραφίας που επιτρέπει την κατασκευή τρισδιάστατων δομών με μεγάλη ακρίβεια.

3.4.4 Εφαρμογές και Προκλήσεις

Οι τεχνολογίες κατασκευής MEMS επιτρέπουν τη δημιουργία διατάξεων με εξαιρετική ακρίβεια και ανάλυση, γεγονός που οδηγεί σε πολλές εφαρμογές, όπως:

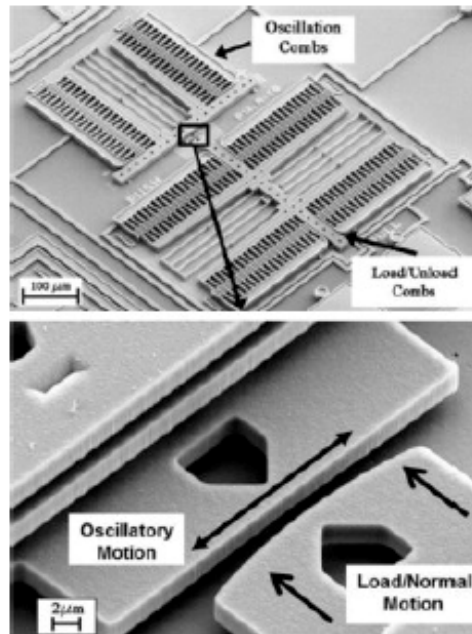
- Αισθητήρες: Πίεσης, επιτάχυνσης, γυροσκόπια και μικροκαθρέπτες.
- Ιατρικές Συσκευές: Μικροαντλίες για χορήγηση φαρμάκων και βιοαισθητήρες για ανίχνευση βιομορίων.
- Βιομηχανία Αυτοκινήτων: Αισθητήρες αερόσακων και συστήματα ελέγχου ευστάθειας.

Ωστόσο, η κατασκευή MEMS αντιμετωπίζει και αρκετές προκλήσεις:

- Ακρίβεια Κατασκευής: Η ανάγκη για εξαιρετικά ακριβείς διαδικασίες κατασκευής.
- Αξιοπιστία και Ανθεκτικότητα: Τα MEMS πρέπει να είναι ανθεκτικά στη φθορά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

- Κόστος Παραγωγής: Η ανάγκη για μείωση του κόστους παραγωγής για την ευρεία υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών.

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η χρήση των MEMS and NEMS.



Σχήμα 3.4: Χρήση των MEMS and NEMS

Με τη συνεχή εξέλιξη των τεχνολογιών κατασκευής, τα MEMS συνεχίζουν να ανοίγουν νέους δρόμους και να προσφέρουν καινοτόμες λύσεις σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας και της επιστήμης.

3.5 Memristor

Ο memristor, συντομογραφία του "memory resistor" (αντιστάτης μνήμης), είναι το τέταρτο θεμελιώδες ηλεκτρονικό στοιχείο, προστιθέμενο στους ήδη γνωστούς αντιστάτη, πυκνωτή και πηνίο. Ανακαλύφθηκε θεωρητικά από τον Leon Chua το 1971 και επιβεβαιώθηκε πειραματικά από ερευνητές της HP Labs το 2008. Το memristor διακρίνεται από τα άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία καθώς διαθέτει την ικανότητα να "θυμάται" το ιστορικό του ηλεκτρικού φορτίου που έχει διαρρεύσει μέσω αυτού, επηρεάζοντας την αντίστασή του [43].

Θεωρία του Memristor

Ο Leon Chua σημείωσε ότι υπάρχουν έξι διαφορετικές μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν ανά ζεύγη τις τέσσερις θεμελιώδεις μεταβλητές του κυκλώματος: το ηλεκτρικό ρεύμα i ,

την τάση v , το φορτίο q και τη μαγνητική ροή Q .

Η θεωρητική βάση του memristor συνδέεται με τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού φορτίου q και της μαγνητικής ροής ϕ .

Συγκεκριμένα, η βασική εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία του memristor είναι:

$$M(q) = \frac{d\phi}{dq},$$

όπου $M(q)$ είναι η memristance (αντίσταση μνήμης) η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσό του φορτίου που έχει περάσει μέσω του στοιχείου. Αυτή η ιδιότητα του memristor του επιτρέπει να διατηρεί πληροφορίες ακόμη και όταν η ισχύς είναι εκτός λειτουργίας, καθιστώντας τον ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές μνήμης και αποθήκευσης δεδομένων.

Στην περίπτωση γραμμικών στοιχείων, όπου το M είναι σταθερό, η αντίσταση μνήμης (memristance) ταυτίζεται με την αντίσταση και, επομένως, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ωστόσο, αν το M είναι συνάρτηση του q , αποδίδοντας ένα μη γραμμικό στοιχείο κυκλώματος, τότε η κατάσταση γίνεται πιο ενδιαφέρουσα. Το χαρακτηριστικό *iv* μιας τέτοιας μη γραμμικής σχέσης μεταξύ q και Q για μια ημιτονοειδή είσοδο εξαρτάται από τη συχνότητα και κανένας συνδυασμός μη γραμμικής αντίστασης, χωρητικότητας και επαγωγής δεν μπορεί να αναπαράγει τις ιδιότητες ενός μη γραμμικού memristor (αν και στοιχεία ενεργού κυκλώματος, όπως οι ενισχυτές, μπορούν να το επιτύχουν). Επειδή οι περισσότερες πολύτιμες λειτουργίες κυκλωμάτων προκύπτουν από μη γραμμικά χαρακτηριστικά συσκευών, τα memristors, τα οποία είναι συμβατά με ολοκληρωμένα κυκλώματα, θα μπορούσαν να παρέχουν νέες λειτουργίες, όπως η εναλλαγή ηλεκτρονικής αντίστασης σε εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες συσκευών δύο ακροδεκτών.

Τεχνολογία και Κατασκευή

Το 2008, τριάντα επτά χρόνια μετά την εισαγωγή της θεωρίας του Leon Chua, η οποία περιέγραψε για πρώτη φορά το θεωρητικό υπόβαθρο του memristor, τα ερευνητικά εργαστήρια της Hewlett-Packard (HP) κατασκεύασαν την πρώτη υλοποίηση αυτής της συσκευής. Το memristor είναι το τέταρτο θεμελιώδες παθητικό στοιχείο σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, μαζί με την αντίσταση, την χωρητικότητα και την επαγωγή, και συνδέει τη ροή ηλεκτρικού φορτίου με τη μαγνητική ροή.

Το HP memristor αποτελείται από ένα λεπτό φιλμ διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2), τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια πλατίνας. Η λειτουργία του βασίζεται σε δύο φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με το διοξείδιο του τιτανίου. Το πρώτο αφορά την ευαισθησία της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του TiO_2 στην παρουσία ή απουσία οξυγόνου. Σε φυσιολο-

γική κατάσταση, το TiO_2 είναι μονωτής, δηλαδή δεν επιτρέπει την εύκολη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, όταν υπάρχουν κενές θέσεις οξυγόνου, η δομή του υλικού αλλάζει, δημιουργώντας την ένωση TiO_{2-x} , η οποία συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός τύπου n. Αυτή η μεταβολή της αγωγιμότητας του TiO_{2-x} είναι καθοριστική για τη λειτουργία του memristor.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό στο οποίο βασίζεται η λειτουργία του HP memristor είναι η ανιοντική μετανάστευση, η οποία αναφέρεται στην κίνηση των ανιόντων (στη συγκεκριμένη περίπτωση των κενών θέσεων οξυγόνου) μέσα στο φιλμ TiO_2 , όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η μετακίνηση των κενών θέσεων οξυγόνου αλλάζει την ηλεκτρική αντίσταση της συσκευής, επιτρέποντας στο memristor να “θυμάται” την προηγούμενη ηλεκτρική κατάσταση του κυκλώματος, ακόμη και όταν δεν εφαρμόζεται τάση. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το memristor ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές μνήμης και αποθήκευσης δεδομένων.

Η φυσική δομή του HP memristor, όπως περιγράφηκε, αποτελείται από μια μεμβράνη δύο στρωμάτων TiO_2 . Ένα από τα στρώματα έχει εμπλουτιστεί (ντοπαριστεί) με κενές θέσεις οξυγόνου, και για τον λόγο αυτό συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός. Το δεύτερο στρώμα είναι μη ντοπαρισμένο, και έτσι λειτουργεί ως μονωτής. Το μήκος της συσκευής ορίζεται από το D , το οποίο είναι της τάξης των 10 με 30 νανομέτρων, ενώ το μήκος της ντοπαρισμένης περιοχής συμβολίζεται με w .

Όταν η ντοπαρισμένη περιοχή εκτείνεται σε όλο το μήκος της συσκευής ($w = D$), η αντίσταση της συσκευής είναι χαμηλή, μια κατάσταση που συμβολίζεται με RON. Αντιθέτως, όταν η ντοπαρισμένη περιοχή έχει μηδενικό μήκος ($w = 0$), η αντίσταση της συσκευής είναι υψηλή και συμβολίζεται ως ROFF. Αυτές οι δύο καταστάσεις είναι αντίστοιχες με τις λογικές τιμές 0 και 1 σε συστήματα ψηφιακής μνήμης, καθιστώντας τα memristors κατάλληλα για χρήση σε αποθήκευση δεδομένων υψηλής πυκνότητας.

3.5.1 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές των memristors είναι πολλές και ποικίλες, μερικές από τις σημαντικότερες περιλαμβάνουν [43]:

- Μη Πτητικές Μνήμες: Οι memristors μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μη πτητικών μνημών (non-volatile memories), όπως οι Resistive Random Access Memories (ReRAM), οι οποίες προσφέρουν υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης και ταχύτητα πρόσβασης.

- Ψηφιακές Μνήμες: Ένα bit πληροφοριών μπορεί να αποθηκευτεί χρησιμοποιώντας ένα μόνο memristor. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εξαναγκάζοντας το memristor στις ακραίες τιμές αντίστασής του (RON και ROFF), κάθε κατάσταση αντιστοιχεί είτε σε 1 είτε σε 0. Οι τάσεις συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της αντίστασης ενός στοιχείου memristor. Για την ανάγνωση των αποθηκευμένων δεδομένων, χρησιμοποιούνται σήματα εναλλασσόμενου ρεύματος έτσι ώστε να μην διαταράσσονται τα αποθηκευμένα δεδομένα.
- Υπολογιστές Νευρωνικών Δικτύων: Λόγω της ιδιότητάς τους να διατηρούν την ιστορία των ηλεκτρικών σημάτων, οι memristors είναι ιδανικοί για την κατασκευή νευρωνικών δικτύων και συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης, μιμούμενοι τη λειτουργία των συνάψεων στον ανθρώπινο εγκέφαλο.
- Επεξεργασία Σήματος: Στην επεξεργασία σήματος, οι memristors μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία προγραμματιζόμενων φίλτρων και κυκλωμάτων ενίσχυσης, τα οποία προσαρμόζουν τις ιδιότητές τους ανάλογα με το σήμα εισόδου.
- Αναλογικά Υπολογιστικά Συστήματα: Ο memristor μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αναλογικά υπολογιστικά συστήματα, προσφέροντας νέες δυνατότητες για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων και άλλων αναλογικών υπολογιστικών προβλημάτων.

3.5.2 Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Παρά τις πολλές υποσχέσεις του, ο memristor αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις στην πρακτική του εφαρμογή. Η κύρια πρόκληση είναι η αξιόπιστη κατασκευή σε μεγάλη κλίμακα, καθώς και η βελτίωση της σταθερότητας και της ανθεκτικότητάς του. Επίσης, η κατανόηση και η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των memristors σε περίπλοκα κυκλώματα παραμένει ένα πεδίο ενεργούς έρευνας [44].

Ο memristor, με την ιδιότητα του να διατηρεί το ιστορικό του ηλεκτρικού φορτίου, αποτελεί μια καινοτομία στην ηλεκτρονική τεχνολογία με πολλές εφαρμογές, από την αποθήκευση δεδομένων έως την τεχνητή νοημοσύνη. Παρά τις προκλήσεις, η συνεχής έρευνα και εξέλιξη στον τομέα αυτό υποδεικνύει ότι οι memristors θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Οι Torkashvand, Shayeganfar και Ramazani [45] σε έρευνα τους εξετάζουν τεχνικές κατασκευής και ο χαρακτηρισμός μικρο- και νανοδομών, εστιάζοντας στην ανάπτυξη και βελ-

τιστοποίηση δομών νανοδιάκενου χρησιμοποιώντας διαφορετικές λιθογραφικές μεθόδους. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων λιθογραφία νανοσφαιρών, λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων και φωτολιθογραφία. Περιλαμβάνει επίσης την κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών αυτών των τεχνικών για την κατασκευή ακριβών και ομοιόμορφων νανοδομών που είναι απαραίτητες σε συσκευές που σχετίζονται με πεδία όπως η οπτοηλεκτρονική (OE), οι αισθητήρες (S) και τα μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS). Στην έρευνα εξετάζεται διάφορες διαδικασίες κατασκευής και του χαρακτηρισμού δομών μικροκλίμακας και νανοκλίμακας, δίνοντας έμφαση στην ανάπτυξη και αποτελεσματικότητα των δομών νανοδιάκενου μέσω διαφόρων λιθογραφικών προσεγγίσεων.

Νανοσφαιρική λιθογραφία (NSL): Περιλαμβάνει τη χρήση αυτοσυναρμολογούμενων νανοσφαιρών για τη δημιουργία ταξινομημένων μασκών ενώ χαράσσονται μοτίβα μεγέθους νανομέτρων. Η μελέτη θα συζητήσει τη διαδικασία από την πρώτη μονοστιβάδα νανόσφαιρας πολυστυρενίου σε απιονισμένο νερό μέχρι το τελικό στάδιο εναπόθεσης μετάλλων και σχηματισμό νανοκενών.

Λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων (EBL): Αυτό συμβαίνει επειδή το EBL διαθέτει ικανότητα υψηλής ανάλυσης που μπορεί να χειριστεί νανοδομές τόσο μικρές όσο $2nm$. Η διαδικασία περιλαμβάνει την έκθεση μιας πολυμερικής μεμβράνης σε μια έντονα εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων η οποία αλλάζει τη διαλυτότητα της αντίστασης επιτρέποντας ακριβή χάραξη.

Φωτολιθογραφία: Η φωτολιθογραφία μεταξύ άλλων θεμάτων που σχετίζονται με τα μοτίβα μεταφοράς συσκευών μεγάλης κλίμακας οπτομηχανικών συστημάτων bit από μια μάσκα σε υλικό ευαίσθητο στο φως.

Τεχνικές χαρακτηρισμού: Η έρευνα τονίζει τη σημασία του χαρακτηρισμού των συσκευών που κατασκευάζονται για την κατανόηση της συμπεριφοράς και των επιδόσεων τους. Σύμφωνα με την Nanostructures, SEM(Scanning Electron Microscopy) και περίθλαση ακτίνων X (XRD) έχουν χρησιμοποιηθεί στη δομική και οπτική ανάλυση των νανοδομών. Από άλλες έρευνες υπογραμμίζεται η αποτελεσματικότητα της λιθογραφίας NSLNanosphere είναι αποτελεσματική στη δημιουργία ομοιόμορφων νανομετρικών δομών και είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή μοτίβο, όπως στην κατασκευή οργανικών ηλεκτρονικών και ηλιακών κυψελών. Η Υψηλή ανάλυση EBL αποτελεί το εργαλείο που παρέχει εξαιρετικά υψηλή ανάλυση, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές που αναζητούν λεπτές νανοδομές. Ωστόσο, όσον αφορά την ταχύτητα λειτουργίας, χρειάζεται περισσότερος χρόνος σε σύγκριση με ορισμένες άλλες μεθόδους.

Ευρεία εφαρμογή της φωτολιθογραφίας: Αυτή η τεχνική είναι σχετική για παραγωγή μεγάλης κλίμακας, επειδή είναι εύκολο να δημιουργηθούν μοτίβα μικροκλίμακας χρησιμοποιώντας αυτήν. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνουν την αναγκαιότητα τοξικών υλικών και ειδικές περιβαλλοντικές συνθήκες [45].

Πλήρης χαρακτηρισμός συσκευής: Για τη σωστή λειτουργία και απόδοση των κατασκευασμένων συσκευών, ο χαρακτηρισμός είναι ζωτικής σημασίας. Σχετικά με αυτήν την ενέργεια, η ποιότητα και οι ιδιότητες των νανοδομών καθορίζονται συνήθως χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως το SEM και το XRD.

Συνολικά, επομένως, η έρευνα προσφέρει μια εικόνα για την παραγωγή και τον χαρακτηρισμό μικρο- και νανοδομών δίνοντας έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφορετικών λιθογραφικών τεχνικών για υψηλής ποιότητας ακριβείς νανοδομές σε τεχνολογικές εφαρμογές αιχμής [45].

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

4.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία έχει εξετάσει εκτενώς τον ρόλο της νανοηλεκτρονικής στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, προσφέροντας ένα πλήρες πλαίσιο κατανόησης για τις τεχνολογικές καινοτομίες του σύγχρονου χώρου. Η ανάλυση των βασικών αρχών της ηλεκτρονικής και της μικροηλεκτρονικής έθεσε τις βάσεις για την κατανόηση της εξέλιξης προς τη νανοηλεκτρονική. Επιπλέον, η εστίαση στους ημιαγωγούς, τα τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αναδείχθηκε σημαντική, καθώς αυτά συμβάλλουν στη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας υπολογιστών, υπογραμμίζοντας την επίδραση του Νόμου του Moore σε αυτήν τη διαδικασία.

Η εξέταση των επί μέρους τεχνολογιών νανοηλεκτρονικής, όπως οι νανοκλίμακες εκδόχες των τρανζίστορ και οι προηγμένες μέθοδοι αποθήκευσης δεδομένων όπως η MRAM και η GMR, αποκάλυψε το δυναμικό τους για βελτίωση της αποδοτικότητας και της ενεργειακής απόδοσης των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων. Παράλληλα, η μελέτη καινοτόμων τεχνολογιών όπως τα MEMS και οι memristors ανοίγει νέους ορίζοντες για την αρχιτεκτονική και τις εφαρμογές των μελλοντικών υπολογιστών.

Επιπλέον, η ανάλυση των εφαρμογών της νανοηλεκτρονικής σε τομείς όπως η αποθήκευση δεδομένων, οι αισθητήρες και οι επικοινωνίες, κατέδειξε τη συμβολή της τεχνολογίας αυτής στη δημιουργία πιο αποδοτικών και ευέλικτων υπολογιστικών συστημάτων, ενισχύοντας την καινοτομία σε πολλαπλούς τομείς εφαρμογής.

Τέλος, η εργασία αυτή επιβεβαιώνει τη σημασία της νανοηλεκτρονικής για το μέλλον της τεχνολογίας των υπολογιστών. Οι προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη προορίζονται να ενισχύσουν αυτήν την εξέλιξη, ενσωματώνοντας τη νέα γνώση και τις τεχνολογικές προκλήσεις που ανακύπτουν, προς όφελος της παγκόσμιας τεχνολογικής κοινότητας.

4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η νανοηλεκτρονική αναμένεται να διαδραματίσει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην επόμενη φάση της εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιώσεις στην αποδοτικότητα, την απόδοση και τη λειτουργικότητα των υπολογιστικών συστημάτων. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της νανοηλεκτρονικής θα είναι κρίσιμη για την επίτευξη αυτών των προοπτικών, ενώ παράλληλα θα χρειαστεί να αντιμετωπιστούν οι τεχνολογικές και κοινωνικές προκλήσεις που προκύπτουν. Το μέλλον της νανοηλεκτρονικής είναι γεμάτο προκλήσεις και ευκαιρίες, και η επιτυχής αξιοποίησή της μπορεί να φέρει επανάσταση στην τεχνολογία και την κοινωνία. Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε τις μελλοντικές προεκτάσεις της νανοηλεκτρονικής και το πώς αυτές θα επηρεάσουν την ανάπτυξη και τη λειτουργία των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η νανοηλεκτρονική έχει ήδη αφήσει το αποτύπωμά της στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, ωστόσο οι προοπτικές για το μέλλον είναι ακόμα πιο συναρπαστικές. Οι νέες τεχνολογίες και οι επιστημονικές καινοτομίες που αναδύονται συνεχώς υπόσχονται να διαμορφώσουν την επόμενη γενιά υπολογιστικών συστημάτων με τρόπους που μόλις αρχίζουμε να κατανοούμε.

Νανοηλεκτρονική και Κβαντική Υπολογιστική

Η νανοηλεκτρονική και οι κβαντική υπολογιστική αποτελούν δύο από τους πιο ραγδαία αναπτυσσόμενους τομείς της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας, οι οποίοι, αν και διακριτοί, συνδέονται άμεσα και αλληλοτροφοδοτούνται σε πολλαπλά επίπεδα [46].

Η νανοηλεκτρονική εξετάζει και αναπτύσσει ηλεκτρονικές διατάξεις σε νανοκλίμακα, επιτρέποντας την κατασκευή συσκευών με εξαιρετικά μικρές διαστάσεις με υψηλή ακρίβεια λειτουργίας και απόδοση. Αυτό καθιστά δυνατή τη δημιουργία πιο αποδοτικών και ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων, όπως αυτά που απαιτούνται για την υλοποίηση της κβαντικής

υπολογιστικής.

Η κβαντική υπολογιστική αντιπροσωπεύει μία από τις πιο καινοτόμες και υποσχόμενες προοπτικές για το μέλλον των υπολογιστικών συστημάτων [47]. Είναι ένας τομέας που εκμεταλλεύεται τις αρχές της κβαντικής μηχανικής για την επεξεργασία της πληροφορίας.

Οι βασικές αρχές της κβαντικής μηχανικής που χρησιμοποιούνται στην κβαντική υπολογιστική περιλαμβάνουν:

- Υπέρθωση: Ένα qubit(κβαντικό bit) μπορεί να είναι σε κατάσταση 0, 1 ή και στις δύο καταστάσεις ταυτόχρονα.
- Εμπλοκή: Qubits μπορούν να είναι αλληλένδετα, έτσι ώστε η κατάσταση ενός qubit να επηρεάζει άμεσα την κατάσταση ενός άλλου, ανεξάρτητα από την απόσταση μεταξύ τους.

Οι κβαντικοί υπολογιστές χρησιμοποιούν κβαντικά bit, τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε πολλαπλές καταστάσεις ταυτόχρονα, επιτρέποντας την παράλληλη επεξεργασία πληροφοριών [48].

Η κβαντική υπολογιστική βρίσκει πολλαπλά πεδία εφαρμογής, όπως:

- Κβαντική κρυπτογραφία: Η κβαντική κρυπτογραφία υπόσχεται αυξημένη προστασία σε σχέση με την κλασσική κρυπτογραφία.
- Κβαντική προσομοίωση: Επιτρέπει την προσομοίωση κβαντικών συστημάτων, κάτι που είναι δύσκολο για κλασσικούς υπολογιστές.
- Κβαντική Βελτιστοποίηση: Χρησιμοποιείται για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς.

Η νανοηλεκτρονική διαδραματίζει καίριο ρόλο σε αυτή την εξέλιξη, καθώς τα κβαντικά bits συχνά απαιτούν εξαιρετικά μικρές και ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις για τη διαχείρισή τους. Τα κβαντικά τρανζίστορ και άλλες νανοηλεκτρονικές διατάξεις θα μπορούσαν να καταστήσουν εφικτή την κατασκευή πιο σταθερών και αποδοτικών κβαντικών υπολογιστών, επιταχύνοντας την πρακτική εφαρμογή της κβαντικής υπολογιστικής.

Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο τομέων υπόσχεται να σηματοδοτήσει την επανάσταση τόσο σε τεχνολογικό όσο και σε επιστημονικό επίπεδο. Η συνέργεια μεταξύ τους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές εξελίξεις στην υπολογιστική ικανότητα και την αποδοτικότητα των

ηλεκτρονικών συστημάτων. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτούς τους τομείς είναι απαραίτητη για την επίτευξη των στόχων της επόμενης γενιάς υπολογιστικών συστημάτων.

Νανοηλεκτρονική και Νευρομορφική Υπολογιστική

Παράλληλα με την κβαντική υπολογιστική, η νευρομορφική υπολογιστική αντιπροσωπεύει έναν άλλο καινοτόμο τομέα που αποσκοπεί στη μίμηση της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου για την επεξεργασία της πληροφορίας. Οι νευρομορφικοί υπολογιστές χρησιμοποιούν αρχιτεκτονικές που προσομοιώνουν τις βιολογικές συνάψεις και νευρώνες, με στόχο την επίτευξη υπολογιστικών μοντέλων που μπορούν να μαθαίνουν και να προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο, με υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [49].

Οι νανοηλεκτρονικές τεχνολογίες διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο και σε αυτόν τον τομέα. Συγκεκριμένα, τα memristors, τα οποία λειτουργούν ως τεχνητές συνάψεις, επιτρέπουν την αποθήκευση και επεξεργασία πληροφορίας με τρόπο που προσομοιώνει τη βιολογική μάθηση [50]. Επιπλέον, οι εξελιγμένοι ημιαγωγοί και τα νανοσύρματα παρέχουν τις απαραίτητες υποδομές για την κατασκευή νευρομορφικών κυκλωμάτων που μπορούν να επιτύχουν μεγάλη πυκνότητα συνδέσεων, παρόμοια με αυτή του ανθρώπινου εγκεφάλου [51].

Η συνέργεια μεταξύ νανοηλεκτρονικής και νευρομορφικής υπολογιστικής ανοίγει τον δρόμο για την ανάπτυξη νέων μορφών τεχνητής νοημοσύνης που δεν είναι απλώς πιο αποδοτικές, αλλά και πιο "ευφυείς", καθώς είναι ικανές να προσαρμόζονται και να μαθαίνουν σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η εξέλιξη έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε πολλούς τομείς, όπως η ρομποτική, τα αυτόνομα συστήματα και οι διασυνδεδεμένες τεχνολογίες, προσφέροντας λύσεις που είναι τόσο ισχυρές όσο και ενεργειακά αποδοτικές [52].

Νανοηλεκτρονική και Εξελιγμένες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Δεδομένων

Οι σύγχρονες απαιτήσεις για αποθήκευση δεδομένων αυξάνονται ραγδαία, καθώς η ψηφιακή εποχή συνεχίζει να αναπτύσσεται με εκθετικούς ρυθμούς. Η ανάγκη για μεγαλύτερη χωρητικότητα, ταχύτερη πρόσβαση και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας είναι πιο επιτακτική από ποτέ, ιδίως με την εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης (AI), του διαδικτύου των αντικειμένων (IoT), και των μεγάλων δεδομένων (Big Data).

Η νανοηλεκτρονική υπόσχεται να φέρει επαναστατικές αλλαγές στις τεχνολογίες αποθήκευσης μέσω νέων υλικών και αρχιτεκτονικών, όπως τα memristors και τα δισδιάστατα υλικά (όπως το γραφένιο). Τα memristors μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή προηγμένων αποθηκευτικών συστημάτων που υπερβαίνουν τους περιορισμούς των σημερινών τεχνολογιών, όπως η μνήμη RAM και οι σκληροί δίσκοι. Το γραφένιο, ένα από τα πλέον

ελπιδοφόρα δισδιάστατα υλικά, χαρακτηρίζεται από την εξαιρετική του αγωγιμότητα, την ευελιξία και την ανθεκτικότητα του. Οι μοναδικές ιδιότητες του γραφενίου επιτρέπουν την ανάπτυξη εξαιρετικά λεπτών και ταυτόχρονα ισχυρών αποθηκευτικών μέσων, με σημαντικά βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά.

Αυτές οι τεχνολογίες όχι μόνο βελτιώνουν την απόδοση των υφιστάμενων συστημάτων αποθήκευσης, αλλά και ανοίγουν το δρόμο για την ανάπτυξη νέων μορφών αποθήκευσης δεδομένων που θα ανταποκρίνονται στις ανάγκες των μελλοντικών υπολογιστικών συστημάτων. Με την εισαγωγή των memristors και δισδιάστατων υλικών όπως το γραφένιο, η νανοηλεκτρονική έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίσει ριζικά τον τομέα της αποθήκευσης δεδομένων, επιτρέποντας τη δημιουργία αποθηκευτικών λύσεων που θα είναι πιο ταχείες, αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον.

Νανοηλεκτρονική και Ενεργειακή Αποδοτικότητα

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονοι υπολογιστές, καθώς η αυξανόμενη ζήτηση για επεξεργαστική ισχύ οδηγεί σε σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η αύξηση ενέργειας όχι μόνο επιβαρύνει το περιβάλλον, αλλά επίσης δημιουργεί προβλήματα υπερθέρμανσης και αυξάνει το λειτουργικό κόστος των υπολογιστικών συστημάτων. Η νανοηλεκτρονική μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Με την εισαγωγή νανοϋλικών είναι δυνατόν να κατασκευαστούν τρανζίστορ χαμηλής κατανάλωσης που παρουσιάζουν σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα παραδοσιακά πυριτιούχα τρανζίστορ. Αυτές οι βελτιώσεις περιλαμβάνουν τη μείωση της διαρροής ρεύματος και τη βελτιωμένη κινητικότητα των ηλεκτρονίων, γεγονός που μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας χωρίς την απώλεια απόδοσης. Επιπλέον, νέες αρχιτεκτονικές κυκλωμάτων που βασίζονται σε αυτά τα νανοϋλικά επιτρέπουν την ανάπτυξη συστημάτων υψηλής αποδοτικότητας. Τα συστήματα αυτά μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι στην αειφόρο ανάπτυξη της τεχνολογίας και στην αντιμετώπιση των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής.

Κοινωνικές και Οικονομικές Προεκτάσεις

Οι εξελίξεις στη νανοηλεκτρονική δεν αφορούν μόνο το τεχνολογικό επίπεδο, αλλά έχουν επέκταση και σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν διάφορους τομείς της κοινωνίας. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, στην ενίσχυση της βιομηχανίας υψηλής τεχνο-

λογίας, στην προώθηση της καινοτομίας οδηγώντας σε μεγαλύτερη οικονομική ανάπτυξη.

Ωστόσο, η ταχεία εξέλιξη της νανοηλεκτρονικής θέτει επίσης σημαντικές προκλήσεις, όπως η ανάγκη για συνεχή εκπαίδευση και προσαρμογή του εργατικού δυναμικού σε νέες δεξιότητες. Η απαίτηση για εξειδικευμένη γνώση και κατάρτιση είναι κρίσιμη, καθώς οι εργαζόμενοι θα χρειαστεί να αναπτύξουν νέες δεξιότητες που θα συνάδουν με τις τεχνολογικές εξελίξεις, προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικοί στην αγορά εργασίας.

Επιπλέον, η πρόσβαση σε πιο αποδοτικά και προσιτά υπολογιστικά συστήματα μέσω της νανοηλεκτρονικής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα ζωής. Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να προσφέρουν νέες δυνατότητες σε κρίσιμους τομείς όπως η εκπαίδευση, η υγεία και η επικοινωνία.

Συνοψίζοντας, οι επιπτώσεις της νανοηλεκτρονικής εκτείνονται πέρα από τις τεχνολογικές και οικονομικές διαστάσεις, επηρεάζοντας την κοινωνική δομή και απαιτώντας νέες προσεγγίσεις σε θέματα εκπαίδευσης, απασχόλησης και κοινωνικής πολιτικής.

Βιβλιογραφία

- [1] Millman Jacob and Halkias Christos C. Integrated electronics: Analog and digital circuits and systems, 1972.
- [2] Roshni Yadav. Nanotechnology and nano computing. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, V:531–535, 10 2017.
- [3] Sergio Bittanti. James clerk maxwell, a precursor of system identification and control science. *International Journal of Control*, 88:1–17, 09 2015.
- [4] J. Partyka and M. Mazur. Prospects for the application of nanotechnologies to the computer system architecture. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 4:1–4, 03 2012.
- [5] Hyung-Sang Yuk, Jin-Heon Oh, and K.J. Lim. Sige synthesis by ge ion implantation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 51:09MF03, 09 2012.
- [6] Bruce Taylor. The transistor revolution. 10 2018.
- [7] Pouya Valizadeh. *Field Effect Transistors, A Comprehensive Overview: From Basic Concepts to Novel Technologies*. 03 2016.
- [8] Dragos Nicolau. How bipolar junction transistors work - contributions to the demythification of the bipolar junction transistor. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 29:113–122, 01 2020.
- [9] Houxuan Tan. Advancements and applications of field-effect transistors in modern electronics. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 81:318–322, 01 2024.
- [10] Milic Pejovic. P-channel mosfet as a sensor and dosimeter of ionizing radiation. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, 29:509–541, 01 2016.

- [11] Robert Schaller. Moore's law: Past, present and future. *Spectrum, IEEE*, 34:52 – 59, 07 1997.
- [12] D. Lockwood. (gordon e. moore medal for outstanding achievement in solid state science and technology award address) towards silicon-based photonic integrated circuits: The quest for compatible light sources. *ECS Transactions*, 89:3–35, 04 2019.
- [13] Michael Riordan and Lillian Hoddeson. Crystal fire: The invention, development and impact of the transistor, adapted from chapter 1 of crystal fire: The birth of the information age, by michael riordan and lillian hoddeson, published in 1997 by w. w. norton company. *IEEE Solid-state Circuits Newsletter*, 12:24–29, 04 2007.
- [14] Jack Kilby. Turning potential into realities: The invention of the integrated circuit (nobel lecture). *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry*, 2:482–489, 09 2001.
- [15] S.A. Campbell. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. Oxford series in electrical and computer engineering. Oxford University Press, 2001.
- [16] R.C. Jaeger. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. Number τ. 5 in Introduction to Microelectronic Fabrication. Prentice Hall, 2002.
- [17] Jim Plummer, Michael Deal, and Peter Griffin. *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling*. 07 2000.
- [18] J.M. Rabaey, A.P. Chandrakasan, and B. Nikolić. *Digital Integrated Circuits: A Design Perspective*. Prentice Hall electronics and VLSI series. Pearson Education, 2003.
- [19] Wookhyun Kwon. *Nano-electromechanical random access memory (RAM) devices*, pages 415–433. 12 2014.
- [20] Singathala Viswadha. Next generation computing using quantum dot cellular automata nano technology, new promising alternative to cmos. *Asian Journal of Computer Science and Technology*, 8:19–24, 06 2019.
- [21] K. Novoselov, A. Geim, S. Morozov, Da Jiang, Yanshui Zhang, S. Dubonos, Irina Grigorieva, and Anatoly Firsov. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Nat. Mater.*, 6, 01 2004.

- [22] Charles Lieber. Nanoscale science and technology: Building a big future from small things. *MRS Bulletin*, 28:486 – 491, 07 2003.
- [23] Stephen Chou, Peter Krauss, and Preston Renstrom. Nanoimprint lithography. *Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 14:4129 – 4133, 12 1996.
- [24] G. M. Whitesides and B. A. Grzybowski. Self-assembly at all scales. *Science*, 295:2418–2421, 3/29/02 2002. 793.
- [25] X. Zhao, Ching-Ming Wei, and M. Chou. Quantum confinement and electronic properties in silicon nanowires. -1:27009, 02 2003.
- [26] Francis Balestra and Gerard Ghibaudo. Physics and performance of nanoscale semiconductor devices at cryogenic temperatures. *Semiconductor Science and Technology*, 32:023002, 02 2017.
- [27] Rene Overney, George Tyndall, and Jane Frommer. Springer handbook of nanotechnology. 01 2004.
- [28] Michael Flatté. Voltage-driven magnetization control in topological insulator/magnetic insulator heterostructures. *AIP Advances*, 7:055923, 02 2017.
- [29] Bernard Dieny and I. Lucian Prejbeanu. *Magnetic Random-Access Memory*, chapter 5, pages 101–164. John Wiley Sons, Ltd, 2017.
- [30] Luc Thomas, Guenole Jan, Jian Zhu, Huanlong Liu, Yuan-Jen Lee, Shuting Le, Ru-Ying Tong, Keyu Pi, Yu-Jen Wang, Dongna Shen, Renren He, Jesmin Haq, Jeffrey Teng, Vinh Lam, Kenlin Huang, Tom Zhong, Terry Torng, and Po-Kang Wang. Perpendicular spin transfer torque magnetic random access memories with high spin torque efficiency and thermal stability for embedded applications (invited). *Journal of Applied Physics*, 115:172615–172615, 05 2014.
- [31] Inga Ennen, Daniel Kappe, Thomas Rempel, Claudia Glenske, and Andreas Hütten. Giant magnetoresistance: Basic concepts, microstructure, magnetic interactions and applications. *Sensors*, 16(6), 2016.

- [32] Joseph Bailey, Nicholas Long, and Arvid Hunze. Eddy current testing with giant magnetoresistance (gmr) sensors and a pipe-encircling excitation for evaluation of corrosion under insulation. *Sensors*, 17(10), 2017.
- [33] Sadhak Khanna. Amalgamation of high- κ dielectrics with graphene: A catalyst in the orbit of nano-electronics material sciences. *Frontiers in Physics*, 10:1214, 11 2022.
- [34] Peter M. Levy. Giant magnetoresistance in magnetic layered and granular materials**this work was supported in part by the office of naval research. volume 47 of *Solid State Physics*, pages 367–462. Academic Press, 1994.
- [35] Evgeny Tsymbal, Oleg Mryasov, and Patrick Leclair. Spin-dependent tunnelling in magnetic tunnel junctions. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15:R109, 01 2003.
- [36] J.M. Daughton. Gmr applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192(2):334–342, 1999.
- [37] Umesh Borole, Sasikala Subramaniam, Saravanan Padmanapan, Harish Barshilia, and prasanta Chowdhury. Highly sensitive giant magnetoresistance (gmr) based ultra low differential pressure sensor. *Sensors and Actuators A Physical*, 280:125–131, 07 2018.
- [38] Touati Zineeddine, Zahra Hamaizia, and Z. Messaï. Design and analysis of 10 nm t-gate enhancement-mode mos-hemt for high power microwave applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4, 03 2019.
- [39] Mengxing Wang, Yue Zhang, Xiaoxuan Zhao, and Weisheng Zhao. Tunnel junction with perpendicular magnetic anisotropy: Status and challenges. *Micromachines*, 6(8):1023–1045, 2015.
- [40] Mustafa Torunbalci, Pramey Upadhyaya, Sunil Bhawe, and Kerem Çamsarı. Modular compact modeling of mtj devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, PP:1–7, 08 2018.
- [41] Akhil Ramesh, Vaibhav Rana, Pintu Das, and Pushparaj Singh. Polycrystalline sense layer for magnetic tunnel junction (mtj) as ultrasensitive sensing element for mems pressure sensors. pages 99–102, 01 2019.

- [42] Christian Zorman, Xiao-An Fu, and Mehran Mehregany. *Deposition techniques for SiC MEMS*, pages 18–45. 06 2006.
- [43] Mahyar Shahsavari. Memristor technology and applications:an overview, 04 2013.
- [44] Afshin Rashid. Review of: "micro and nano-electromechanical systems (mems / nems) are devices in which the physical motion of a micro- or nano-scale structure is controlled by an electronic circuit". *Qeios*, 03 2024.
- [45] Ziba Torkashvand, Farzaneh Shayeganfar, and Ali Ramazani. Nanomaterials based micro/nanoelectromechanical system (mems and nems) devices. *Micromachines*, 15(2), 2024.
- [46] Hend Eissa, Haitham Abdelmula, Rania Alzubaidi, and Khari Armih. Nanotechnology and quantum computing synergy. 12 2023.
- [47] Frank Arute, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, Sergio Boixo, Fernando Brandao, David Buell, Brian Burkett, Yu Chen, Jimmy Chen, Ben Chiaro, Roberto Collins, William Courtney, Andrew Dunsworth, Edward Farhi, Brooks Foxen, Austin Fowler, Craig Michael Gidney, Marissa Giustina, Rob Graff, Keith Guerin, Steve Habegger, Matthew Harrigan, Michael Hartmann, Alan Ho, Markus Rudolf Hoffmann, Trent Huang, Travis Humble, Sergei Isakov, Evan Jeffrey, Zhang Jiang, Dvir Kafri, Kostyantyn Kechedzhi, Julian Kelly, Paul Klimov, Sergey Knysh, Alexander Korotkov, Fedor Kostritsa, Dave Landhuis, Mike Lindmark, Erik Lucero, Dmitry Lyakh, Salvatore Mandrà, Jarrod Ryan McClean, Matthew McEwen, Anthony Megrant, Xiao Mi, Kristel Michielsen, Masoud Mohseni, Josh Mutus, Ofer Naaman, Matthew Neeley, Charles Neill, Murphy Yuezhen Niu, Eric Ostby, Andre Petukhov, John Platt, Chris Quintana, Eleanor G. Rieffel, Pedram Roushan, Nicholas Rubin, Daniel Sank, Kevin J. Satzinger, Vadim Smelyanskiy, Kevin Jeffery Sung, Matt Trevithick, Amit Vainsencher, Benjamin Villalonga, Ted White, Z. Jamie Yao, Ping Yeh, Adam Zalcman, Hartmut Neven, and John Martinis. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574:505–510, 2019.
- [48] M.A. Nielsen and I.L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*. Cambridge University Press, 2010.

- [49] Giacomo Indiveri and Shih-Chii Liu. Memory and information processing in neuromorphic systems. *Proceedings of the IEEE*, 103(8):1379–1397, 2015.
- [50] Dmitri B. Strukov, Greg Snider, Duncan R. Stewart, and R. Stanley Williams. The missing memristor found. *Nature*, 453:80–83, 2008.
- [51] Carver Mead. Neuromorphic electronic systems. *Proc. IEEE*, 78:1629–1636, 1990.
- [52] Steve Furber. Large-scale neuromorphic computing systems. *Journal of Neural Engineering*, 13, 08 2016.