

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ**  
**ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ**

**ΦΡΑΓΚΟΥ Α. ΒΑΣΙΛΙΚΗ**



**Επιβλέπων : Δ.Μανωλάκος , Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**ΑΘΗΝΑ 2010**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον Καθηγητή Δ.Ε.Μανωλάκο, για την πολύτιμη βοήθειά του καθ'όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της συγκεκριμένης εργασίας καθώς επίσης και τον Δρ. Άγγελο Μαρκόπουλο για τις πολύτιμες διορθώσεις του. Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου για την υπομονή και τις θυσίες που έκαναν κατά τη φοίτησή μου στο Ε.Μ.Π.

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Στο εξώφυλλο της διπλωματικής εργασίας απεικονίζονται νανοκαλώδια  $\text{SiO}_2$  που έχουν αναπτυχθεί σε γάλλιο και είναι μόνο μερικά εκατομμυριοστά του μέτρου. Η λήψη της φωτογραφίας έγινε στο πανεπιστήμιο του Hong-Kong και είναι διαθέσιμη στην ιστοσελίδα <http://gizmodocom/384372/nanomaterials-photos>.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή των νανοϋλικών σε ημιαγωγούς και υπεραγωγούς. Τα νανουλικά αντικαθιστούν τα συμβατικά υλικά στην βιομηχανία των ημιαγωγών και υπεραγωγών αφού οι ιδιότητες τους είναι κατάλληλες για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Στο πρώτο κεφάλαιο εξετάζουμε τις τεχνικές παρασκευής των νανουλικών, τα νανουλικά που εφαρμόζονται καθώς επίσης αναλύονται διεξοδικά και οι ιδιότητες αυτών των υλικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα φαινόμενα φυσικής που εκμεταλλευόμαστε για τη δημιουργία αυτών των εφαρμογών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναπτύσσονται οι εφαρμογές των νανουλικών σε ημιαγωγούς. Σ' αυτό το κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά οι εφαρμογές που άλλαξαν τα δεδομένα στην τεχνολογία των ημιαγωγών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι εφαρμογές των νανουλικών σε υπεραγωγούς. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιλαμβάνονται οι ιδιότητες των υπεραγωγών καθώς επίσης και τα στοιχεία και οι ενώσεις που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία των υπεραγωγών με το πέρασμα των χρόνων.

Επιπλέον υπάρχει ένα υπόμνημα με ορισμούς εννοιών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική. Οι λέξεις που έχουν το σύμβολο \* περιέχονται στο συγκεκριμένο υπόμνημα. Τέλος υπάρχουν οι επεξηγήσεις για τις συντομογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

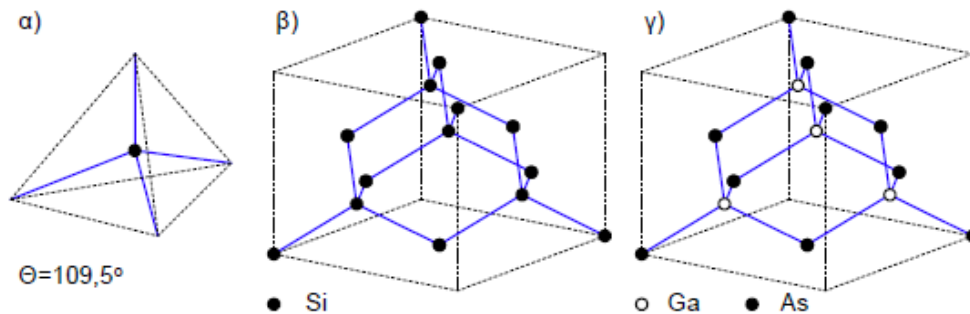
1.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ.....	6
1.1ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7-10
1.2. ΕΝΩΣΗ p-n ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.....	10-12
1.3 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ.....	12-15
1.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ.....	15-19
1.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	19-26
1.6ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΑΝΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	26-30
2.ΒΑΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΣΕ ΝΑΝΟΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	31
2.1ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ..	32-37
2.2 ΔΙΑΒΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ FOWLER-NORDHEIM.....	37-39
2.3ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΔΙΠΛΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	39-41
2.4ΦΡΑΓΗ COULOMB.....	41-43
3.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ.....	44
3.1ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ.....	45
3.2ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ- ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ.....	45-46
3.3ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΚΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΟΙ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ.....	46
3.4ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	47
3.5ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	47-55
3.6 ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΟΙ ΝΑΝΟΑΓΩΓΟΙ ΣΕ ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ FET ΚΑΙ SET.....	55-57
3.7ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	57-65
3.8 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ.....	65-72
3.9 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ.....	72-78
3.10 ΝΑΝΟΜΕΤΑΡΟΠΕΙΣ.....	78-79
3.11 ΝΑΝΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	79-80
3.12 ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ.....	81-83
3.13 ΝΑΝΟΔΙΟΔΟΙ.....	83-85
3.14 ΝΑΝΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ, ΜΟΡΙΑΚΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	85-86
3.15ΛΕΙΖΕΡΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ.....	87-90
3.16QUANTUM CASCADE LASERS.....	90-91
3.17ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ.....	92
3.18 ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΝΗΜΕΣ .....	93
3.19ΝΑΝΟΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ.....	93-94
3.20 ΚΑΜΙΝΑ ΜΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.....	94-95
4.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ.....	96
4.1 ΘΕΩΡΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	97-98
4.2ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΑΓΩΓΩΝ.....	99
4.3ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MEISSNER.....	100
4.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	101-102
4.5 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ.....	102-104
4.6ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΓΩΓΙΜΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	104-106

4.7.ΠΥΛΕΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ JOSEPHSON.....	106-107
4.8RSJ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	107-108
4.9ΜΕΤΑΓΩΓΙΜΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	109
4.10ΛΟΓΙΚΕΣ ΠΥΛΕΣ.....	109-114
4.11ΚΕΛΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ.....	114-115
4.12SQUID.....	115-118
4.13ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΑ READ OUT ΚΕΛΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ.....	118-119
4.14ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΚΕΛΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ.....	119-122
4.15ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ.....	122-123
4.16ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 1JOSEPHSON.....	123-124
4.17D FLIP-FLOP.....	125
4.18ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ SFQ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	125-126
4.19ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	126-129
4.20ΑΝΑΛΟΓΟΨΗΦΙΑΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ.....	129-130
4.21ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	130
4.22ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ.....	130-133
4.23ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΑΙΩΡΗΣΗ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ.....	134
4.24ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟ ΝΑΝΟΨΥΓΕΙΟ.....	134-135
4.25ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΜΟΡΙΑΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ.....	135-136
4.26ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΑ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	136-138
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	139-140
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	141-142
ΟΡΙΣΜΟΙ ΕΝΝΟΙΩΝ.....	143-146
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	147-149

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ [1]

**Ημιαγωγός** είναι κάθε υλικό όπως το γερμάνιο ή το πυρίτιο που επιτρέπει να περνά το ηλεκτρικό φορτίο από μέσα του με κάποιες προϋποθέσεις όπως είναι η αύξηση της θερμοκρασίας ή η πρόσπτωση του φωτός. Οι ημιαγωγοί είναι υλικά που έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ αυτής ενός αγωγού και ενός μονωτή και είναι της τάξης  $10^3$  Siemens /cm και  $10^{-8}$  S/cm. Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) ή ακόμη και χημικές ενώσεις με τετραεδρική μορφή (σχήμα 1.1 ) όπως το αρσενιούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο.



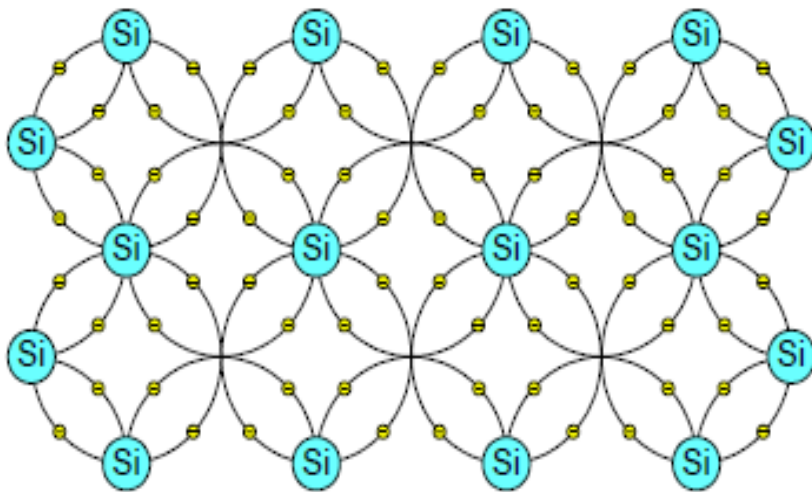
Σχήμα 1.1 Στη μέση του σχήματος βλέπουμε τη δομή του πυριτίου και δεξιά βλέπουμε τη δομή του αρσενιούχου γάλλιου.

α) Η κρυσταλλική δομή των κυριότερων ημιαγωγών είναι τετραεδρική δηλαδή τα γειτονικά άτομα βρίσκονται σε θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος που αντιστοιχούν στο κέντρο και στις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου.

β) Στους στοιχειακούς ημιαγωγούς (π.χ Si) όλα τα άτομα του πλέγματος είναι ίδια

γ) Στις ημιαγωγίμες χημικές ενώσεις (π.χ GaAs) τα άτομα που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις είναι διαφορετικά .

Συγκεκριμένα το πυρίτιο αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ημιαγωγίμου στοιχείου, καθώς η χρήση του έχει επικρατήσει στο σύνολο των ηλεκτρονικών εφαρμογών. Όπως φαίνεται από την επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου (σχήμα 1.2) κάθε άτομο πυριτίου είναι ενωμένο με τέσσερα άτομα με ομοιοπολικούς δεσμούς (Στο πλέγμα τα ηλεκτρόνια σθένους αλλάζουν συνεχώς θέσεις μεταξύ τους κινούμενα από και προς τους γειτονικούς δεσμούς του Si)



**Σχήμα 1.2:**Επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος πυριτίου.

Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων πυριτίου είναι δεσμευμένα στους ομοιοπολικούς δεσμούς με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο στην περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή στην κατάσταση εκείνη όπου το ενεργειακό του περιεχόμενο είναι πολύ χαμηλό.

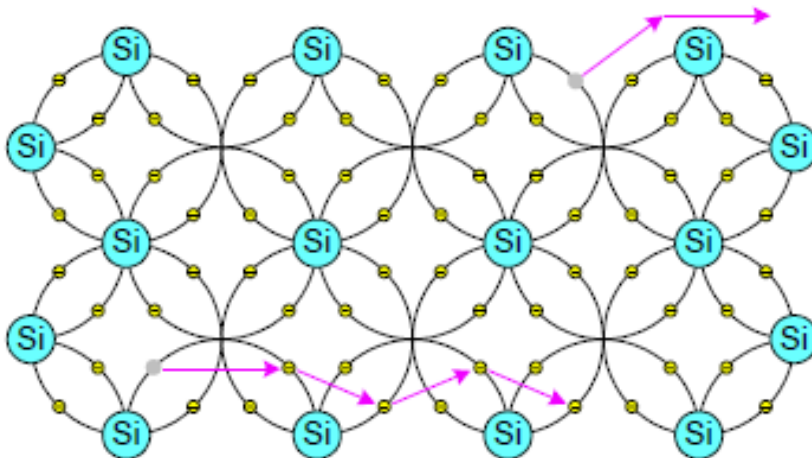
Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποιο ποσό ενέργειας, μέσω θερμότητας ή ακτινοβολίας, τότε διαταράσσονται οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ ατόμων πυριτίου. Έτσι σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομα του προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους ομοιοπολικούς δεσμούς. Αναλυτικότερα η συνεχής ανακατανομή της θερμικής ενέργειας από το ένα άτομο στο άλλο είναι δυνατό να προκαλέσει στιγμιαία και σε τυχαίες θέσεις, τη διέγερση δεσμευμένων ηλεκτρονίων (στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου), με αποτέλεσμα αυτά να απελευθερωθούν και να αρχίσουν να κινούνται ελεύθερα. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα. Κατά συνέπεια ο ημιαγωγός διαθέτει πλέον ευκίνητους φορείς ηλεκτρισμού, οι οποίοι και του προσδίδουν αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσό της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από το δεσμό στο οποίο ανήκει είναι συγκεκριμένο και ισούται με το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγού. Ως ενεργειακό διάκενο ορίζεται η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των εξής δύο ζωνών:

- της ζώνης αγωγιμότητας η οποία περιλαμβάνει τις ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι υπεύθυνες για την ύπαρξη του ηλεκτρικού ρεύματος στον ημιαγωγό και
- της ζώνης σθένους, η οποία περιλαμβάνει τις διάφορες ενεργειακές στάθμες των ατόμων των ημιαγωγικών στοιχείων.



Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από κάποιο δεσμό δεν συνεπάγεται την καταστροφή του μεταλλικού πλέγματος (όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3), καθώς τα άτομα των οποίων έσπασε ο δεσμός εξακολουθούν να συνδέονται με γειτονικά τους άτομα με τρεις άθικτους δεσμούς καθώς και μεταξύ τους με έναν ατελή δεσμό ενός ηλεκτρονίου. Οι τρεις και ο ήμισυ δεσμός είναι ικανοί να συγκρατήσουν σε συνοχή το κρύσταλλο και μετά την ελευθέρωση του ηλεκτρονίου. Άλλωστε έχει αποδειχτεί ότι το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή το πλήθος των διασπασμένων δεσμών είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνόλου των δεσμών των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος .



**Σχήμα 1.3:** Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από ένα δεσμό δεν διαταράσσει τη συνοχή του κρυστάλλου.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (e) περιφέρονται άτακτα στο κρυσταλλικό σώμα , ανάμεσα στα άτομα και τους δεσμούς τους .Αυτό συμβαίνει για όσο διάστημα διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια.Όταν η ενέργεια τους μειωθεί σημαντικά , δεσμεύονται στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού, που μπορούν να συναντήσουν στο δρόμο τους και παύουν να είναι ελεύθερα.Ο ατελής δεσμός στον οποίο θα επιστρέψουν τα ηλεκτρόνια δεν είναι απαραίτητο να αντιστοιχεί σε εκείνον από τον οποίο έφυγαν.Όσο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόνια αυτά είναι ελεύθερα , συμβάλλουν στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σώματος για αυτό ονομάζονται ηλεκτρόνια αγωγιμότητας.

Οι κενές ηλεκτρονικές θέσεις των χημικών δεσμών, που ονομάζονται οπές (h), λειτουργούν σαν παγίδες δέσμευσης για όσα ηλεκτρόνια έχουν χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο.Αλλά ακόμη και αν δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή γύρω από την οπή δεν σημαίνει ότι η κενή θέση μένει ακίνητη, καθώς μπορεί να προσελκύσει κάποιο ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού δεσμού.Τότε το ηλεκτρόνιο αποδεσμεύεται από τον δεσμό που άνηκε , δημιουργώντας ταυτόχρονα μια κενή θέση και συμπληρώνει την κενή θέση της γειτονικής οπής.Η μετατόπιση της οπής μπορεί να εξακολουθεί να πραγματοποιείται,εκτός εαν κάποια στιγμή δεσμευθεί από αυτή ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο.Τότε η οπή εξαφανίζεται και ο ομοιοπολικός δεσμός γίνεται πλήρης.

Οι οπές διαγράφουν και αυτές μια άτακτη κίνηση στο σώμα , από τον ένα δεσμό στον άλλο, αφού είναι τυχαία η κατεύθυνση από την οποία θα έρθει το γειτονικό ηλεκτρόνιο που θα συμπληρώνει τον ατελή δεσμό. Όταν όμως επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο, το ηλεκτρόνιο θα προσέλθει από την κατεύθυνση που ευνοείται ενεργειακά. Τότε η κίνηση των οπών είναι προσανατολισμένη και αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς υψηλότερα δυναμικά.

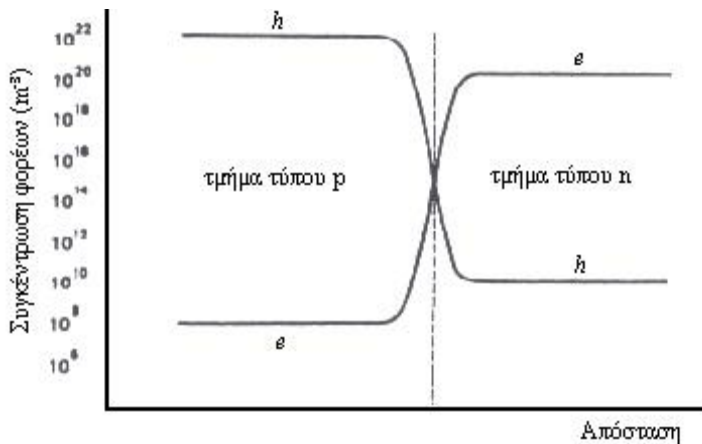
Παρατηρούμε δηλαδή ότι στους ημιαγωγούς εκδηλώνονται δύο μηχανισμοί η απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς και η ταυτόχρονη δέσμευση ελεύθερων ηλεκτρονίων στις οπές. Η συγκέντρωση (πλήθος φορέων ανά μονάδα όγκου) των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών ενός ημιαγωγού παραμένει αμετάβλητη και εξαρτάται μόνο από το υλικό και τη θερμοκρασία του. Όσο ασθενέστεροι είναι οι δεσμοί μέσα στο υλικό και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του , τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η συγκέντρωση των φορέων του, δηλαδή των ηλεκτρονίων και των οπών του.

## 1.2 ΕΝΩΣΗ p-n ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Χαρακτηριστική ιδιότητα των ημιαγωγών ενός στοιχείου είναι η εξίσωση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων ( $e$ ) και της συγκέντρωσης των οπών ( $h$ ). Όμως σε ημιαγωγούς προσμίξεων η συγκέντρωση του ενός είδους φορέων (φορείς πλειονότητας) είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτή του άλλου είδους (φορείς μειονότητας), με αποτέλεσμα η συμβολή των φορέων μειονότητας στην αγωγιμότητα να θεωρείται αμελητέα. Όταν οι φορείς πλειονότητας είναι ηλεκτρόνια τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου n. Αντίθετα όταν οι φορείς πλειονότητας είναι οπές τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται τύπου p.

Ο θεμέλιος λίθος όλων των ημιαγωγίμων διατάξεων είναι η ένωση p-n. Αυτή η ένωση σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγίμου τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγίμου τύπου n. Εκείνη τη χρονική στιγμή, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την αρχική κατάσταση.

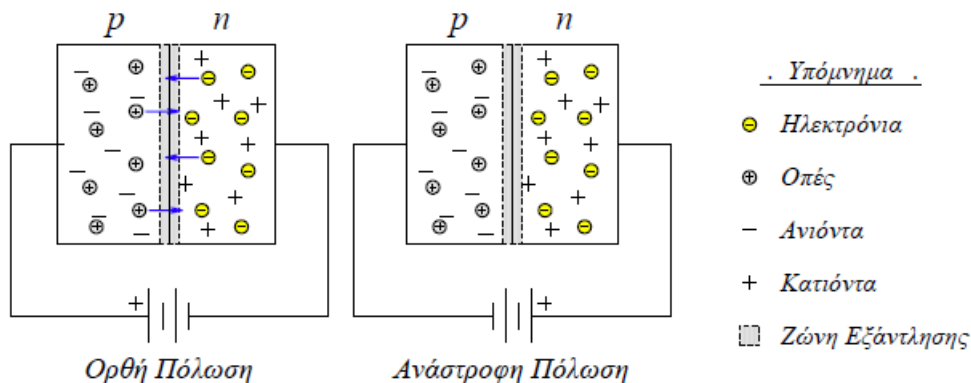
Η περιοχή μεταξύ του ημιαγωγού τύπου p και του ημιαγωγού τύπου n καλείται ζώνη εξάντλησης. Η ζώνη αυτή αποτελεί τη δίοδο διέλευσης των οπών και των ηλεκτρονίων από τον ένα ημιαγωγό στον άλλο. Μετά από ένα χρονικό διάστημα και αφού έχουν ολοκληρωθεί οι αντίστοιχες μετατοπίσεις φορέων , επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων έχουν σταθεροποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα.



**Σχήμα 1.4:** Μετά τις μετατοπίσεις φορέων επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων έχουν σταθεροποιηθεί.

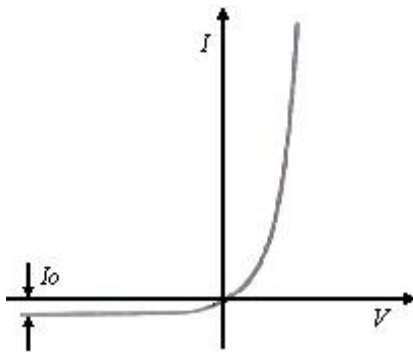
Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορείς των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες του τμήματος τύπου p και η συγκέντρωση θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και οι πλευρές της ένωσης φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού (συνήθως 0,6-0,8V) της οποίας το ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων προς το απέναντι τμήμα της ένωσης.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι ότι η ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με τη φορά αυτού και ανάλογα με την τάση που της χορηγείται εξωτερικά. Εξαιτίας αυτής της χαρακτηριστικής συμπεριφοράς της η ένωση p-n ονομάζεται και δίοδος.



**Σχήμα 1.5:** Στο σχήμα βλέπουμε μια ορθά πολωμένη δίοδος που δρα σαν κλειστός διακόπτης και μια ανάστροφα πολωμένη δίοδο που δρα σαν ανοιχτός διακόπτης.

Υπάρχουν δύο τρόποι επιβολής τάσεων σε μια ένωση p-n. Όταν εφαρμόσουμε το θετικό πόλο της πηγής στον ημιαγωγό τύπου p και τον αρνητικό ημιαγωγό τύπου n , τότε η δίοδος είναι ορθά πολωμένη οπότε και συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης , ενώ όταν ο θετικός πόλος της πηγής εφαρμοστεί στον ημιαγωγό τύπου n και ο αρνητικός στον τύπου p ημιαγωγό , τότε η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και δρα σαν ανοιχτός διακόπτης όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα.Στην εικόνα φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου p-n.



Σχήμα 1.6:Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου p-n.

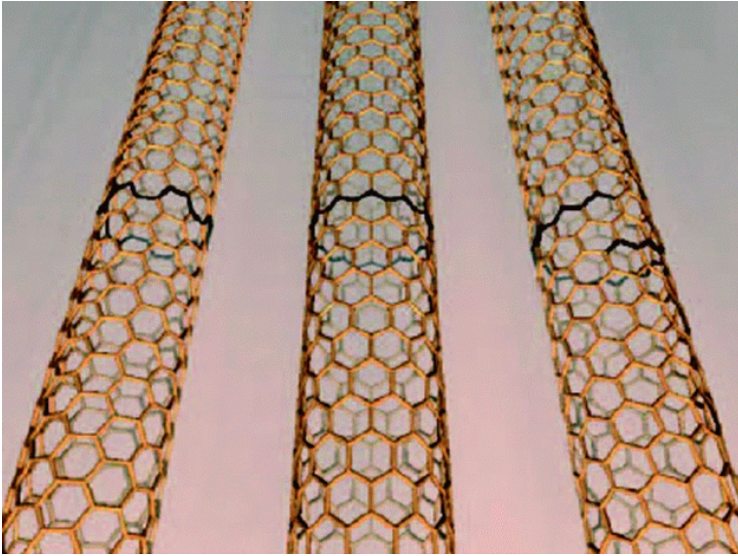
### 1.3 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ [2]

#### ➤ ΥΛΙΚΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ

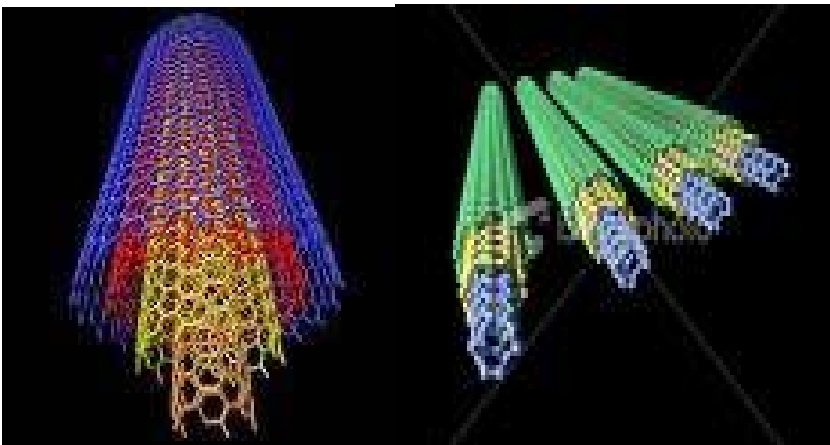
ΑΠΛΕΣ ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ		ΥΜΕΝΕΣ, ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ,ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ
Σωματίδια C	Νανοςωλήνες	Υμένες άνθρακα
Μαύρος άνθρακας	SWCNT	Ομοιοπολικά καρβίδια όπως SiC
Νανοσυμπλέγματα	MWCNT	Μεταλλικά καρβίδια όπως TiC
	Νανοκαλώδια	Νανοκαρβονιτρίδια

Ειδικότερα κάποιες ενώσεις που συναντάμε συχνά είναι οι εξής: καρβίδιο του βορίου, του χρωμίου, του μολυβδενίου, του νιοβίου, του τανταλίου, του τιτανίου, του βολφραμίου, του βαναδίου και του ζirkονίου.

Οι νανοςωλήνες άνθρακα είναι στρώματα τυλιγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα σωλήνα.Οι διαστάσεις ποικίλλουν (η εσωτερική διάμετρος είναι κάτω από 0,4nm).Υπάρχουν επίσης νανοςωλήνες άνθρακα μέσα στους νανοςωλήνες καταλήγοντας σε μια διάκριση μεταξύ των σωλήνων ενός τοιχώματος (SWCNT) και του σωλήνα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNT).



**Σχήμα 1.7:** Οι νανοσωλήνες που φαίνονται στην εικόνα είναι ενός τοιχώματος και παρουσιάζουν διαφορετική ηλεκτρονική συμπεριφορά εξαιτίας της δομής τους.



**Σχήμα 1.8:** Νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων όπου οι διάφοροι νανοσωλήνες έχουν διαφορετική διάμετρο.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα εκτός από αξιοσημείωτη εφελκυστική αντοχή παρουσιάζουν ποικίλλες ηλεκτρικές ιδιότητες (εξαρτάται από τον τρόπο που ο γραφίτης τυλίγεται γύρω από το σωλήνα) και έτσι μπορούν να είναι αγώγιμοι, ημιαγώγιμοι ή μονωτές.

Οι νανοϋμένες βασισμένοι σε άνθρακα είναι ένα πολλά υποσχόμενο υλικό. Υπάρχουν πολλά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματιστούν νανοστρώματα καρβιδίων και νανοκρυσταλλικούς υμένες άνθρακα όπως πυρίτιο, άζωτο, βόριο και τιτάνιο. Συνδιασμός αυτών των στοιχείων όπως  $C_3N_4$  και  $Si_3N_4$  καταλήγουν σε διαφορετικά υλικά με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Το νανοκρυσταλλικό διαμάντι τοποθετημένο σε νανοϋμένες άνθρακα συνδιάζει τις ιδιότητες του διαμαντιού με πολλή χαμηλή τριβή, υψηλή σκληρότητα και βιοσυμβατότητα.

## ΝΑΝΟΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΑ

Τα νανοσυμπλέγματα είναι υλικά τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά τα οποία παραμένουν διακριτά ενώ ταυτόχρονα αποτελούν ενιαίο συστατικό. Έχουμε δύο τύπους συνιστώντων υλικών τη μήτρα και την ενίσχυση. Τα νανοσυμπλέγματα μπορούν να χωριστούν με διάφορους τρόπους. Μερικά νανοσυμπλέγματα αποτελούνται από μια μη νανοκρυσταλλική μήτρα ενός υλικού γεμισμένη με κάποιο υλικό ή νανοσωματίδια ή νανοίνες ή κάποιο άλλο υλικό.

- 1.Κβαντικές τελείες
- 2.Άνθρακας με νανοκεραμική επικάλυψη
- 3.Μέταλλο και κεραμικά νανοσυμπλέγματα
- 4.Νανοσυμπλέγματα οξειδίου του δημητρίου

## ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ

### ➤ ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τα μέταλλα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα μέταλλα σιδήρου και τα υπόλοιπα μέταλλα. Τα υπόλοιπα μέταλλα χωρίζονται ως εξής.

ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ
Cu και κράματα Cu
Ni και κράματα Ni
Zn και κράματα Zn
Co και κράματα Co
Zr και κράματα Zr
Ευγενή μέταλλα
Ελαφρά μέταλλα
Άλλα

Τα πιο υποσχόμενα υλικά για μελλοντικές εφαρμογές σε ημιαγωγούς και υπεραγωγούς είναι τα εξής:

- Στερεά νανοδομημένα μέταλλα και σκόνη μετάλλων
  - Ti
  - Ti-Al
  - Κράματα Ti με Fe, Ni ή χαλκό
  - Mg-Ni
  - Fe-Cu-Nb-Si-B κράματα
  - Κράματα Fe με Co, Ni, Cr, Cu, Zr
  - Κράματα Al με Fe, Ni, Ti, Zr
  - Al, Mg και κράματα Al, Mg
- Νανοσκόνη ευγενών μετάλλων
  - Ag, Au, Pt, Rd

## NANOΚΕΡΑΜΙΚΑ

### ➤ ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει οποιοδήποτε κεραμικό υλικό που έχει μέγεθος κόκκου της τάξης του νανομέτρου. Τα κεραμικά υλικά είναι ανόργανα μη μεταλλικά υλικά. Μπορεί να είναι κρυσταλλικά ή εν μέρει κρυσταλλικά. Σχηματίζονται με θέρμανση αρχικά και κατόπιν με ψύξη. Τα υλικά που έχουν περιληφθεί σε αυτή την κατηγορία είναι κεραμικά υλικά οξειδία και μη οξειδία παράγωγα οξειδίου του πυριτίου και μέταλλα καθώς και συμπλέγματα αυτών των κατηγοριών υλικών. Τα κυριότερα μη οξειδία που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι τα καρβίδια και τα νιτρίδια.

- Καρβίδιο του βολφραμίου
- Αργιλία
- Ζιρκονία
- Τιτανία
- Οξείδιο του ψευδαργύρου
- Νιτρίδιο του πυριτίου
- Μαγνησία
- Οξείδιο του σιδήρου
- Δημήτρια
- Υδροξυαπατίτης
- Καρβίδιο του πυριτίου
- Αζωτούχο βόριο
- TiC
- Άμορφο νιτρίδιο του πυριτίου
- AlN, TiN, ZrN,  $TiC_xO_{1-x}$ ,  $ZrC_xN_{1-x}$ ,  $MgAl_2O_4$
- $Si_3N_4$ -TiN,  $Si_3N_4$ -AlN,  $Si_3N_4$ -ZrN, AlN-TiN, AlN-ZrN
- $Si_3N_4$ - $Y_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ -MgO, AlN- $Y_2O_3$
- $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ ,  $ZrO_2$ -MgO,  $ZrO_2$ - $Al_2O_3$ ,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
- $TiC_xN_{1-x}$ -Fe, Ni

### 1.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΥΛΙΚΩΝ

Η νανοτεχνολογία περιλαμβάνει τις περιοχές της σύνθεσης, του χαρακτηρισμού της εξερεύνησης και της εφαρμογής των νανουλικών. Η εφαρμογή των νανουλικών μπορεί να τοποθετηθεί ιστορικά πριν από την σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία. Τα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνταν ως υλικά βαφής στην κεραμική από τους αρχαίους [3]. Ο κολλοειδής χρυσός χρησιμοποιήθηκε στην ιατρική για τη θεραπεία της αθρίτιδας. Πειράματα που διεξάγονταν στα νανουλικά ξεκίνησαν από το Faraday το 1857 [4]. Το 1959 ο Richard Feynman έδωσε μια διάλεξη με τίτλο "There is plenty of room at the bottom" υποδεικνύοντας την πιθανότητα χειρισμού των ατόμων σε ατομικό επίπεδο. Αυτό θεωρήθηκε γενικά η πρόβλεψη της νανοτεχνολογίας [5]. Ωστόσο το πραγματικό ξέσπασμα της νανοτεχνολογίας ήρθε το 1990. Η ελαχιστοποίηση των

συσκευών στην ημιαγωγίμη βιομηχανία είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Καθώς το μέγεθος των συσκευών συνεχίζει να συρρικνώνεται θα υπάρξουν περιορισμοί εξαιτίας της φυσικής των υλικών και των τεχνολογικών δυσκολιών που θα αυξήσουν αναπόφευκτα το κόστος. Για παράδειγμα η υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων που χρειάζεται για μικρότερες συσκευές θα υπερβεί το όριο διαλυτότητας. Η υψηλή πυκνότητα ρεύματος και η υπερθέρμανση των συσκευών θα δημιουργήσει πρόβλημα στην κλίμακα των συσκευών. Η τεχνική της λιθογραφίας για μικρότερες κρίσιμες διατάξεις της τάξης των δέκατων του νανομέτρου για μαζική παραγωγή παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες [6]. Νανοηλεκτρονικές διατάξεις που βασίζονται σε νέα συστήματα νανουλκών θα συνεισφέρουν στην ανάπτυξη της νέας γενιάς των μικροηλεκτρονικών! Για παράδειγμα το τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου [7], [8] και το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου [9], [10] είναι κάποιες από τις εφαρμογές. Επιπλέον η νανοτεχνολογία επεκτάθηκε σε άλλες περιοχές εξαιτίας των νέων ιδιοτήτων των νανουλκών που ανακαλύφθηκαν και πρόκειται να ανακαλυφθούν. Για παράδειγμα νανοκαλώδια που χρησιμοποιούνται στα λείζερ, στα νανοηλεκτρονικά και στους συντονιστές. Τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καταλύτες, νανοηλεκτρονικά και για αποθήκευση ενέργειας. Οι νανοδομημένοι λεπτοί υμένες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίοδους φωτοεκπομπής (LED) και σε φωτοβολταϊκά. Αυτές είναι λίγες μόνο από τις εφαρμογές των νανουλκών.

Ο όρος νανουλικά καλύπτει διάφορους τύπους νανοδομημένων υλικών που έχουν τουλάχιστον μία διάσταση της τάξης του νανομέτρου. Ενώ τα περισσότερα υλικά σε κλίμακα μικρομέτρου έχουν παρόμοιες ιδιότητες με στερεά υλικά, οι ιδιότητες των υλικών στην κλίμακα του νανομέτρου είναι πολύ διαφορετικές από αυτές των ατόμων και των στερεών υλικών. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της νανομετρικής κλίμακας που σημαίνει υψηλή αναλογία επιφανειακών ατόμων, υψηλή ενέργεια επιφάνειας, μειωμένες ατέλειες σε σχέση με το αντίστοιχο συμπαγές υλικό [11]. Εξαιτίας των μικρών διαστάσεων τα νανουλικά έχουν μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο γεγονός που κάνει μια μεγάλη αναλογία ατόμων να είναι στην επιφάνεια καταλήγωντας σε ιδιότητες υλικών που σχετίζονται με την επιφάνεια. Ιδιαίτερα όταν το μέγεθος των νανουλκών είναι συγκρίσιμο με το μήκος προάσπισης του Debye\*, ολόκληρο το υλικό θα επηρεαστεί από τις επιφανειακές ιδιότητες του υλικού [12]. Αυτό μπορεί να βελτιώσει ή να τροποποιήσει τις ιδιότητες των στερεών υλικών. Για παράδειγμα μεταλλικά νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πολλοί δραστικοί καταλύτες. Χημικοί αισθητήρες από νανοσωματίδια και νανოსύρματα βελτίωσαν την ευαισθησία και την επιλεκτικότητα του αισθητήρα. Τα νανοσωματίδια μπορούμε να τα δούμε σαν κβαντικές τελείες μηδενικών διαστάσεων ενώ τα νανοςύρματα και τους νανοσωλήνες μπορούμε να τους δούμε σαν κβαντικά καλώδια. Η ενέργεια της ζώνης και η πυκνότητα φορτίου του φορέα στα υλικά μπορεί να τροποποιηθεί διαφορετικά από ότι στα συμπαγή υλικά και στη συνέχεια να τροποποιήσει τις ηλεκτρικές και τις οπτικές ιδιότητες των νανουλκών. Η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης πληροφοριών χρησιμοποιώντας στοιχεία κβαντικών τελειών είναι επίσης μια εξελισσόμενη περιοχή.

Εξαιτίας του μεγέθους της τάξης του νανομέτρου τα νανουλικά παρουσιάζουν αρκετές καινοτόμες ιδιότητες.



## ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ

Εξαιτίας της νανομετρικής κλίμακας πολλές από τις μηχανικές ιδιότητες τροποποιούνται σε σχέση με τα συμπαγή υλικά, συμπεριλαμβανομένων της σκληρότητας, το μέτρο ελαστικότητας, τη δυσθραυστότητα και την αντοχή κοπώσεως. Το μικρό μέγεθος κάποιες φορές απαλλάσσει τα υλικά από τις ατέλειες της εσωτερικής δομής όπως εξαρθρώσεις και προσμίξεις ιζηματοποιήσεων. Οι προσμίξεις στις νάνο-διαστάσεις έχουν υψηλή ενέργεια και πηγαίνουν στην επιφάνεια μετά από ανόπτηση καθαρίζοντας το υλικό και αφήνοντας τέλειες δομές υλικού μέσα στα νανουλικά. Επιπλέον οι εξωτερικές επιφάνειες των νανουλικών έχουν λιγότερες ή καθόλου ατέλειες σε σχέση με το συμπαγές υλικό, βελτιώνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Ανάμεσα στις άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού έχει παρατηρηθεί αυξημένη σκληρότητα. Ποικιλία από πολύ σκληρά νανοσυμπλέγματα μπορούν να φτιαχτούν με νιτρίδια, καρβίδια και βορίδια με χημική και φυσική εναπόθεση ατμού [13]. Η σκληρότητα των νανοσυμπλεγμάτων υπερβαίνει πολύ τη σκληρότητα που προκύπτει από το νόμο της ανάμιξης συμπαγών υλικών. Αυτά τα πολύ σκληρά νανοσυμπλέγματα έχουν εφαρμογή σε σκληρές προστατευτικές επικαλύψεις. Η υπερσκληρότητα προκύπτει επίσης από νανοσωματίδια χωρίς προσμίξεις. Για παράδειγμα σύμφωνα με την αναφορά του Gerbericha [56] η σκληρότητα νανοσφαιριδίων πυριτίου με διαμέτρους 20 έως 50 nm υπερβαίνει τα 50 GPa τέσσερις φορές μεγαλύτερη από το στερεό πυρίτιο [14]. Μετά την ανακάλυψη τους οι νανοσωλήνες άνθρακα [15] έχουν προκαλέσει τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον. Με την ανακάλυψη των μικρότερων ινών άνθρακα διαπιστώθηκε ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν σημαντικές μηχανικές ιδιότητες. Οι νανοσωλήνες άνθρακα που σχηματίζονται από κυλινδρικά στρώματα γραφίτη αντιπροσωπεύουν την ιδανική ίνα άνθρακα και έχουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στην κατηγορία ινών άνθρακα.

## ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η πρόσφατη πρόοδος στη νανοτεχνολογία έχει καταλήξει σε υποσχόμενες τεχνολογίες σύνθεσης και κατεργασίας που παρέχουν δυνατότητα παραγωγής μεγάλης ποικιλίας νανουλικών με ελεγχόμενη δομή και κατά συνέπεια και ιδιότητες. Ελέγχοντας τη δομή των υλικών στη νανομετρική κλίμακα οι ιδιότητες των νανοδομών μπορούν να ελεγχθούν και να τροποποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές.

Οι θερμικές ιδιότητες των νανουλικών δεν έχουν ερευνηθεί σε βάθος. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία της πειραματικής μέτρησης και ελέγχου της μεταφοράς θερμότητας σε νάνο-διαστάσεις. Μικροσκοπία ατομικής δύναμης (AFM)\* έχουν εισαχθεί για να μετρήσουν τη μεταφορά θερμότητας των νανοδομών με ανάλυση της κλίμακας του νανομέτρου αποτελώντας μια υποσχόμενη μέθοδος για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων τους. Άλλες προσεγγίσεις συμπεριλαμβανομένου αριθμητικών λύσεων του νόμου του Fourier, υπολογισμοί βασισμένοι στην εξίσωση μεταφοράς του Boltzman και

Πρόσφατες έρευνες σε πειράματα έδειξαν ότι συγκεκριμένα νανουλικά έχουν ασυνήθιστες θερμικές ιδιότητες σε σχέση με τα συμπαγή υλικά.Σ ' αυτό συμβάλλει το μικρό μέγεθος , το ξεχωριστό σχήμα,οι μεγάλες διεπιφάνειες που τροποποιούν τις ιδιότητες των νανουλικών.Καθώς οι διαστάσεις μικραίνουν το μέγεθος των νανουλικών είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος και οι ελεύθερες μέσες διαδρομές έτσι ώστε η μεταφορά φωτονίων μέσα στα υλικά θα αλλάξει σημαντικά εξαιτίας του περιορισμού των φωτονίων καταλήγοντας σε τροποποιημένες θερμικές ιδιότητες.Για παράδειγμα νανοκαλώδια από πυρίτιο έχουν πολλή μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από το στερεό υλικό [17].Η ιδιαίτερη δομή των νανოსωλήνων άνθρακα προκαλεί πολλή υψηλή θερμική αγωγιμότητα σε αξονικές διευθύνσεις δημιουργώντας υψηλή ανισοτροπία στη μεταφορά θερμότητας στα υλικά [18].Οι εσωτερικές επιφάνειες είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τις θερμικές ιδιότητες των νανουλικών.Γενικά οι εσωτερικές επιφάνειες εμποδίζουν τη ροή της θερμότητας εξαιτίας της σκέδασης των φωτονίων.Στη διεπιφάνεια ή στο σύνορο των κόκκων ανάμεσα σε παρόμοια υλικά η διεπιφανειακή αταξία σκεδάζει φωνόνια .Σαν αποτέλεσμα οι δομές νανουλικών με υψηλή πυκνότητα διεπιφάνειας μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητα των υλικών [19].

Οι νανοςωλήνες άνθρακα είναι δομές άνθρακα που σχετίζονται με το διαμάντι και το γραφίτη που είναι γνωστοί για τις υψηλές τους θερμικές αγωγιμότητες. Οι δεσμοί στη δομή του διαμαντιού καταλήγουν σε υψηλή ταχύτητα φωνονίων και ως αποτέλεσμα αυτού σε υψηλές θερμικές αγωγιμότητες του υλικού.Στους νανοςωλήνες άνθρακα τα άτομα άνθρακα συγκρατούνται με ακόμη πιο ισχυρούς δεσμούς έτσι ώστε οι δομές νανοςωλήνων να έχουν παρα πολλή υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

Από την άλλη πλευρά τα μονοδιάστατα νανοκαλώδια παρέχουν πολύ χαμηλές θερμικές αγωγιμότητες.Στα νανοκαλώδια τα φωνόνια συμπεριφέρονται διαφορετικά σε σχέση με τα συμπαγή υλικά εξαιτίας του περιορισμού σε δομές μιας διάστασης.Η μεταφορά φωνονίων σε ημιαγώγιμα καλώδια έχει μελετηθεί πειραματικά [20] και θεωρητικά [21].Ο Debye [59] υπολόγισε τη θερμική αγωγιμότητα των νανοκαλωδίων πυριτίου χρησιμοποιώντας μια μικροσυσκευή σε εύρος θερμοκρασίας από 20-320°K. Παρόλο που τα νανοκαλώδια έχουν σαφώς ορισμένη κρυσταλλική τάξη όπως στα στερεά υλικά , η θερμική αγωγιμότητα που παρατηρείται ήταν δύο τάξεις μικρότερη από αυτή του στερεού πυριτίου το οποίο έδειχνε μια μεγάλη εξάρτηση από την κλίμακα των

νανοκαλωδίων. Για ένα νανοκαλώδιο πυριτίου με διάμετρο 22nm η θερμική αγωγιμότητα μειώθηκε ώστε να είναι κάτω από 10W/m. Η αλλαγή της θερμικής αγωγιμότητας οφείλεται στη σκέδαση των φωνονίων και στην μεταβολή του διασκεδασμού των φωνονίων εξαιτίας του περιορισμού μέσα στη νανοδομή.

Η ίδια ερευνητική ομάδα υπολόγισε τη θερμική αγωγιμότητα σε ένα πλέγμα νανοκαλωδίων Si/SiGe με μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από ότι σε νανοκαλώδια καθαρής σιλικόνης. Αυτά τα πειράματα συμφωνούσαν αρκετά με τους θεωρητικούς υπολογισμούς βασισμένους στην προσέγγιση του διασκεδασμού των φωνονίων [22]. Εκτός από τα μονοδιάστατα νανοκαλώδια, πλέγματα και πολυστρώματα ένας άλλος τύπος νανοδομών προσφέρει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Ο David G. Cahilla έγραψε [60] μια εξαιρετικά αναφορά σε σχέση με τη θερμική μεταφορά των νανουλικών και ανέπτυξε τη θερμική μεταφορά σε πολυστρώματα και πλέγματα [23]. Τα πολυστρώματα και τα πλέγματα είναι δομές λεπτών στρωμάτων που περιέχουν εναλλακτικά στρώματα διαφορετικών υλικών κολλημένα το ένα πάνω στο άλλο. Στα πολυστρώματα οι υμένες μπορεί να είναι άμορφοι ή πολυκρυσταλλικοί ενώ στα πλέγματα οι υμένες είναι απλοί κρύσταλλοι. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες μεταφοράς φωνονίων των υλικών. Όταν διαφορετικά στρώματα υλικών ενώνονται μεταξύ τους ένας συλλογικός τρόπος ταλάντωσης των φωνονίων εμφανίζεται εκτός από τον τρόπο ταλάντωσης των φωνονίων σε κάθε απλό στρώμα. Οι διεπιφάνειες μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικά πλέγματα μπορεί να περιέχουν εξαρθρώσεις και ατέλειες που μπορούν επίσης να μειώσουν τη θερμική αγωγιμότητα. Στη διεπιφάνεια να δημιουργήσουν τραχύτητα και επηρεάζοντας τη μεταφορά των φωνονίων. Η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων στην μεταφορά φωνονίων έχει ως αποτέλεσμα τη γενική μείωση της θερμικής αγωγιμότητας.

## ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

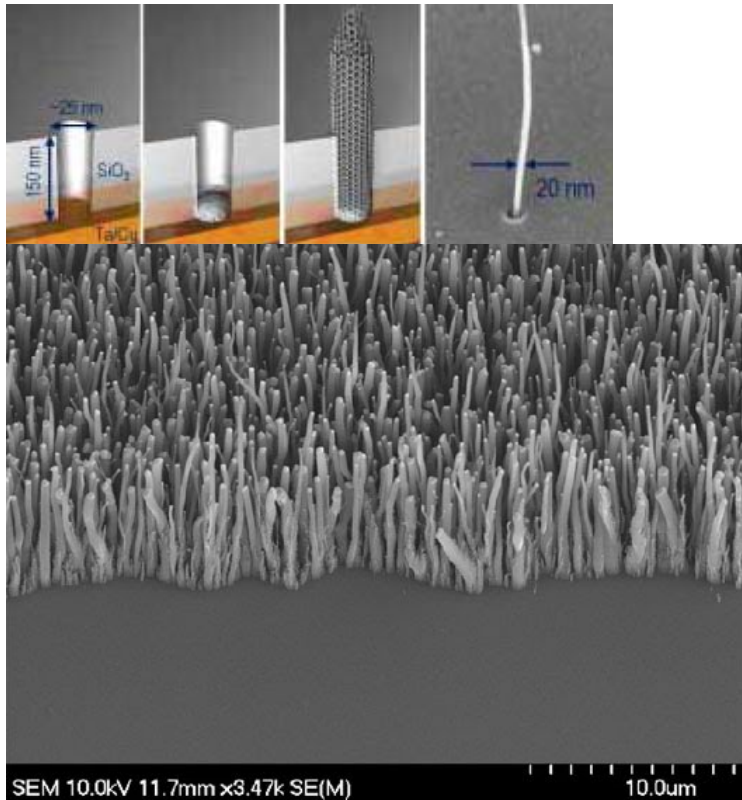
Αυτές περιλαμβάνουν εκπομπή φωτός, μετάδοση, αδιαφάνεια, φθορισμό, αντανάκλαση και άλλες. Μερικά λεπτά στρώματα έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν φως χωρίς την ανάγκη για φωτισμό αντίθετης κατεύθυνσης. Τα λεπτά στρώματα μπορούν να σχεδιαστούν να είναι διάφανα ή αδιάφανα. ή και τα δύο σε εξάρτηση με την εφαρμοζόμενη τάση. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πολλαπλά στρώματα για επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων. Λεπτά στρώματα διηλεκτρικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν επιφανειακό συντονισμό πλασμονίων\*. Η νανοτεχνολογία παρέχει μια ακριβή γνώση στο ακριβές πάχος που απαιτείται για επιθυμητές οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες [23].

### 1.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ [24]

Με την πρώτη ματιά ένα νανοσωματίδιο ορίζεται σαν μια σφαίρα ή ένα μόριο με μορφή σφαίρας το οποίο αποτελείται από 10 έως 10000 άτομα συνδεδεμένα με δυνάμεις μεταξύ τους αλλά με μικρή ή καθόλου σχέση προς την στερεά κατάσταση. Ωστόσο υπάρχουν νανοσωματίδια τα οποία συμπεριφέρονται σε κεραμική μάζα ή επιφανειακά στρώματα. Τα στρώματα από νανοσωματίδια διαφέρουν από ομοιόμορφα στρώματα εξαιτίας της παρουσίας συνόρων από κόκκους που καταλήγουν σε διαφορετική ηλεκτρική και οπτική συμπεριφορά.

## ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

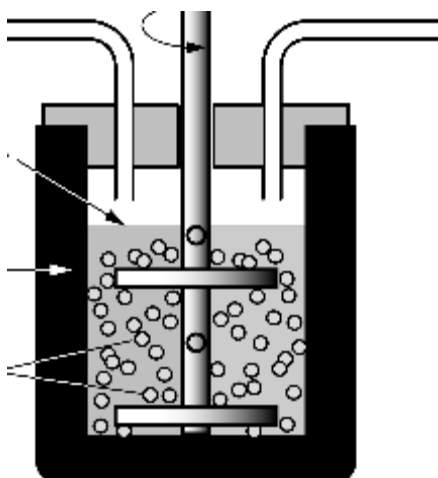
Η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων αποτελεί προτεραιότητα για τις εργαστηριακές εφαρμογές λόγω του ότι παράγει νανοδομές υψηλής ανάλυσης. Η λιθογραφία είναι μια διαδικασία αποτύπωσης γεωμετρικών σχημάτων σε μια επιφάνεια. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται μια ηλεκτρονική δέσμη αντί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων μπορεί να παρέχει ακριβή σχέδια.



Σχήμα 1.9: Βλέπουμε την κατασκευή νανοσωλήνων άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων με αυτή τη μέθοδο.

## ΑΛΕΣΗ ΜΕ ΣΦΑΙΡΙΔΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ

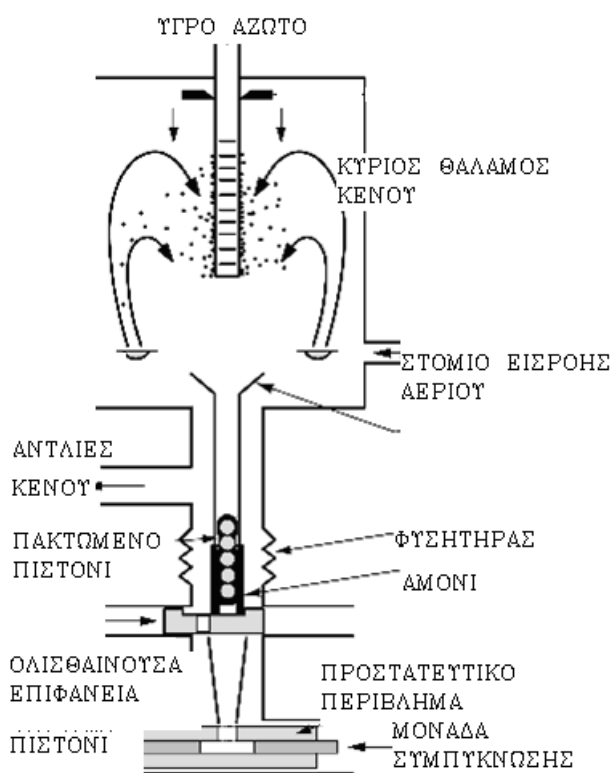
Αρχικά ένα κοντέινερ γεμίζεται με ανοξειδωτες μπάλες από ατσάλι με διάμετρο λίγων χιλιοστών. Το υλικό που θα αλεστεί προστίθεται με μορφή σκόνης διαμέτρου κόκκου 50μm. Μετά το γέμισμα του κοντέινερ με υγρό άζωτο ένας περιστρεφόμενος άξονας αλέθει το υλικό. Οι περίοδοι άλεσης είναι από μερικά λεπτά έως 100ώρες. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι με αυτή τη μέθοδο αυξάνεται ο αριθμός των προσμίξεων.



Σχήμα 1.10: Άλεση με σφαιρίδια σιδήρου.

### ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΑΕΡΙΟΥ

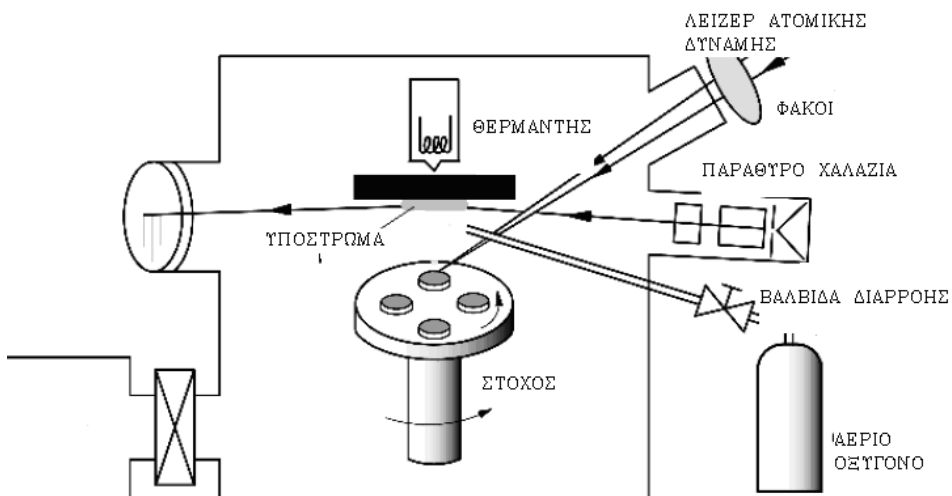
Ένα τυπικό σύστημα φαίνεται στο σχήμα. Η λειτουργία γίνεται σε έναν εκκενωμένο θάλαμο με πίεση  $10^{-5}$  Pa. Μετά την επίθεση της πρώτης ύλης πάνω σε ένα ή περισσότερα δοχεία σε σχήμα χοάνης εξατμίζεται. Τα εξατμιζόμενα άτομα ή μόρια ενώνονται και σχηματίζουν σωματίδια διαφορετικών μεγεθών. Η διάμετρος των σωματιδίων είναι της κλίμακας των 15nm.



Σχήμα 1.11: Τυπικό σύστημα συμπύκνωσης αερίου.

## ΕΚΤΟΜΗ ΜΕ ΛΕΙΖΕΡ

Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία , μια δέσμη παλμών laser εξαερώνει τμήμα του μετάλλου και το αέριο που δημιουργείται εναποτίθεται στο υπόστρωμα δημιουργώντας ένα λεπτό υμένα..Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μεταφορά 1:1 της σύνθεσης του υλικού από την πρώτη ύλη στα σωματίδια.



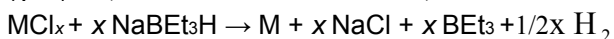
Σχήμα 1.12:Εκτομή με laser.

## ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Σαν παράδειγμα της θερμικής αποσύνθεσης λαμβάνουμε το πεντακαρβονυλικό σίδηρο.Αυτός αποσυντίθεται σε ένα πολυμερικό διάλυμα πχ πολυβουταδιένιο που παράγει σωματίδια σιδήρου 7-8nm διαμέτρου.Το υλικό μπορεί να αποσυντεθεί σε δεκάνιο  $C_{10}H_{22}$  από ακτινοβολία με υπερήχους που καταλήγει σε μέγεθος σωματιδίου ανάμεσα στα 6 και 240nm.

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ

Μερικές μεταλλικές ενώσεις μπορούν να μειωθούν σε στοιχειώδη μεταλλική νανοσκόνη από την εφαρμογή  $NaBEtH$ ,  $LiBEtH$  και  $NaBH_4$  για παράδειγμα..Η αντίδραση μπορεί να γραφεί (M:Μέταλλο, Et:Αιθύλιο)

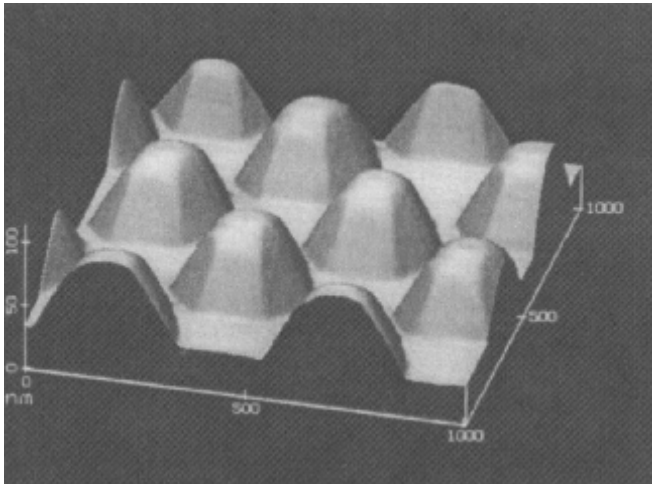


## ΑΥΤΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ

Αυτό το φαινόμενο συναντάται συνήθως στην ετεροεπιταξία\*. Τρισδιάστατες νησίδες σχηματίζονται με μια εκπληκτική κανονικότητα πάνω στο υπόστρωμα. Εξαιτίας της ενέργειας των ελεύθερων επιφανειών μπορούν να συμβούν δύο περιπτώσεις (σχηματισμός στρώμα-στρώμα και σχηματισμός συμπλέγματος) Η πρώτη περίπτωση είναι συγκρίσιμη με την εικόνα του βουτύρου πάνω στο ψωμί και η δεύτερη με το νερό που στάζει πάνω σε βούτυρο. Στην περίπτωση που στο πλέγμα συμβεί ένα μη πετυχημένο ταίριασμα, θα προκύψει μια μέση κατάσταση.

## ΧΑΜΗΛΗ ΠΙΕΣΗ, ΠΛΑΣΜΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μια συσκευή ραδιοσυχνότητας. Ένα αέριο αφήνεται έτσι ώστε να αναπτυχθεί πίεση από 1 έως 200 Pa. Το αέριο ιονίζεται από το εφαρμοσμένο πεδίο. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αποκτούν κινητική ενέργεια και στην επιστροφή ιονίζουν ουδέτερα μόρια. Εξαιτίας της μάζας τους τα ιόντα είναι αργά και διατηρούν τη θερμοκρασία του αερίου. Αυτό δικαιολογεί την ονομασία πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.13: Αυτοσυναρμολογούμενες νησίδες  $\text{As}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  πάνω σε  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ .

Στις εφαρμογές που περιγράφηκαν το ενδιαφέρον εστιάζεται πάνω στα στρώματα που εναποτίθενται. Τα σωματίδια που παράγονται συσσωρεύονται κοντά στο στρώμα πλάσματος του ηλεκτροδίου. Μετά τη σβέση του πλάσματος είναι πιθανό να μαζέψουμε σωματίδια που έχουν πέσει πάνω στο υπόστρωμα.

## ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (ΘΕΥΓΟΝΟΥ, ΣΚΟΝΗΣ, ΚΑΥΣΙΜΟΥ)

Θερμικός ψεκασμός είναι μια διαδικασία για ναοκρυσταλλικά στρώματα επικάλυψης. Μια αντίδραση καύσης παράγει υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση με μια σκόνη ψεκασμού. Η πίεση οδηγεί σωματίδια ναοσκόνης πάνω σε μια επιφάνεια η οποία θα καλυφτεί. Ένα παράδειγμα όπλου ψεκασμού φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 1.14: Όπλο ψεκασμού

## ΟΠΤΙΚΑ ΑΤΟΜΟΥ

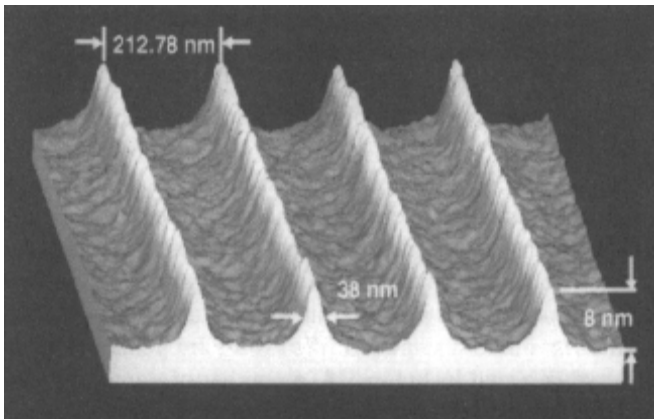
Μια δέσμη που παράγεται από θέρμανση υλικού οδηγείται πάνω στο υπόστρωμα. Στο επόμενο βήμα η δέσμη εκτίθεται σε διπολικές δυνάμεις ενός σταθερού κύματος που παράγεται από μια δέσμη λέιζερ. Τα άτομα θα παρεκκλίνουν στους κόμβους όπου αυτά υπόκεινται μικρότερες δυνάμεις. Ένα πλέγμα παράγεται που αντανακλά το μήκος κύματος του λέιζερ. Ένα δεύτερο κύμα ίσως χρησιμοποιηθεί κάθετο στο πρώτο και στη διεύθυνση της δέσμης.

## ΤΕΧΝΙΚΗ ΛΥΜΑΤΟΣ ΠΗΚΤΗΣ (Sol-gel)

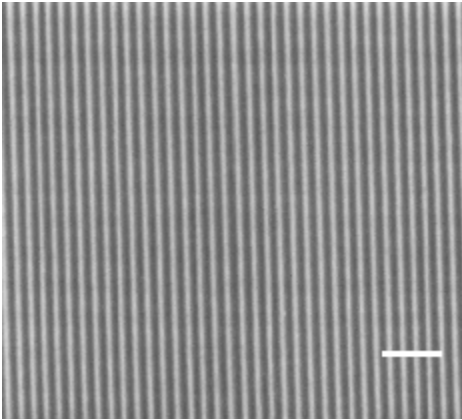
Ένα λύμα είναι μια κολλοειδή διασπορά σε υγρό. Ένας πήκτης είναι ένα ζελλοειδές υλικό που σχηματίζεται από κροκίδωση του λύματος μέσα στον πήκτη. Η κροκίδωση είναι μια σταθερή κατάσταση συσσωμάτωσης που εμφανίζεται σε κολλοειδή συστήματα.

Το καλύτερο παράδειγμα της διαδικασίας είναι η παραγωγή  $\text{SiO}_2$ . Ένας καταλύτης οξύ ή βάση προστίθεται σε διάλυμα τετραμεθοξυσιλανίου νερού και μεθανόλης. Υδρόλυση των δεσμών του Si-OMe καταλήγει στο σχηματισμό Si-OH ομάδων.

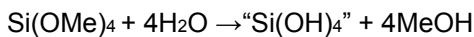




Σχήμα 1.15: Διαδικασία παραγωγής SiO<sub>2</sub>.



Σχήμα 1.16: Φωτογραφίες ενός μονοδιάστατου πλέγματος σχηματισμένου από εναπόθεση χρωμίου με λέιζερ.



Περαιτέρω αφυδάτωση μειώνει το Si(OH)<sub>4</sub> σε SiO<sub>2</sub>. Έαν η υδρόλυση και η συμπύκνωση ολοκληρωθούν ένα ξηρό οξείδιο πυριτίου παράγεται. Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης ο πήκτης φτάνει σε πολύ χαμηλό ιξώδες. Όταν κάνουμε ανόπτηση πάνω από 800°C τότε μπορούν να παραχθούν ομοιογενή οξείδια.

Τα επόμενα νανοσυστατικά έχουν ήδη παραχθεί νανο-Co/Mo, Cu, Fe, Ni, Pd, Pt και Ru σε Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> και ZrO<sub>2</sub> τζελς, νανο-C, Cu/Ni, Pd/Ni, και Pt σε τζελ πυριτίας, νανο-Ag, Ge, Os, C, Fe, Mo, Pd, Pt, Re, Ru και PtSn σε ξηρό τζελ πυριτίας.

## ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ

Οι κβαντικές τελείες είναι τρισδιάστατες ημιαγωγικές δομές. Νανοςυνθέσεις από ημιαγωγικά υλικά και οι νησίδες που αυτοσυντίθενται ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Οι πιο πρόσφατες περιγραφές των κβαντικών τελειών πήραν μέρος με την ανακάλυψη ημιαγωγικών ιζηματοποιήσεων σε γυαλιά. Ιζηματοποίηση χρησιμοποιείται ακόμη στην κατασκευή CdS, CdSe, CdTe, GaAs, και νανοκρυστάλλους Si σε γυαλιά πυριτίας.

Μια άλλη διαδικασία είναι η εναπόθεση κβαντικών τελειών μαζί με λεπτά στρώματα. Υπάρχουν διάφορες τροποποιήσεις αλλά η βασική αρχή είναι η παραγωγή νανοκρυστάλλων σε ένα ξεχωριστό τμήμα. Αυτοί κατευθύνονται προς ένα υπόστρωμα.

Κβαντικές τελείες μπορούν να κατασκευαστούν από μέσα λιθογραφίας αφού απαιτείται υψηλή ανάλυση. Η διαδικασία παίρνει μέρος με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό που μετατρέπεται σε κβαντικές τελείες εναποτίθεται πάνω στο υπόστρωμα όπως το GaAs. Το μέγεθος της κηλίδας δέσμης ηλεκτρονίου καθορίζει το μικρότερο δυνατό μέγεθος της κβαντικής τελείας.

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ

Το πυρίτιο με κρυσταλλικούς κόκκους που έχουν μέγεθος από λίγα έως 1000nm αναφέρεται σαν νανοκρυσταλλικό πυρίτιο. Αυτή η μορφή πυριτίου συντίθεται συνήθως από στρώματα πάχους 1μm. Όταν υπερβαίνουμε τα 100nm σε μέγεθος κόκκου ερχόμαστε στην περιοχή μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Μπορεί να κατασκευαστεί με:

- ✚ Χημική εναπόθεση ατμού βελτιωμένη με πλάσμα (Plasma-enhanced CVD)
- ✚ Χημική εναπόθεση ατμού βελτιωμένη με απομακρυσμένο πλάσμα (Remote plasma-enhanced CVD)
- ✚ Χημική εναπόθεση με ρίζα υδρογόνου (Hydrogen radical CVD)
- ✚ Αυθόρμητη χημική εναπόθεση (Spontaneous CVD)
- ✚ Δραστική ανάβλυση (Reactive sputtering)

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΑΝΟΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΛΕΓΜΑΤΑ ΖΕΟΛΙΘΟΥ

Διαφορετικές τεχνικές αναπτύσσονται με σκοπό να συνθέσουν και να σταθεροποιήσουν μεταλλικά και ημιαγώγιμα σωματίδια ή νανοσυμπλέγματα με γεωμετρικές διαστάσεις στην κλίμακα του νανομέτρου. Για να ελέγξουμε το μέγεθος και τη διατομή του νανοσυμπλέγματος ο ζεόλιθος με τις διάφορες γεωμετρίες προσφέρει κατάλληλα πλέγματα για την παραγωγή μεγάλων διατάξεων νανοσυμπλεγμάτων.

Είναι αξιοσημείωτο ότι υπάρχει η πιθανότητα να παραχθούν στον περιορισμό ενός πόρου ζεόλιθου. Έτσι σχηματίζεται ένα υλικό που έχει τα χαρακτηριστικά ενός νανοσυμπλέγματος.

Η παραγωγή νανοσυμπλεγμάτων στα πλέγματα του ζεόλιθου μπορεί να γίνει για διάφορα μέταλλα όπως Pt, Pd, Ag, Ni, ημιαγώγιμες σουλφίδες, σεληνίδιο του Zn, Cd και Pb ή οξείδια όπως ZnO, CdO, SnO<sub>2</sub>. Το πλέγμα δουλεύει σαν ηλεκτρολύτης στερεής κατάστασης.

### 1.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΑΝΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

#### 1. ΦΥΣΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΟΥ

Γενικά η φυσική εναπόθεση ατμού χωρίζεται σε 4 ομάδες.

1. εξάτμιση 2. ανάβλυση 3. επιμετάλλωση ιόντων 4. λείζερ αφαίρεσης

## 1.1 ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Αυτή η διαδικασία εκτελείται σε ένα δοχείο σε σχήμα χοάνης. Το δοχείο θερμαίνεται από μια αντίσταση μέχρι να αναπτυχτεί ικανοποιητική πίεση ατμού. Σαν αποτέλεσμα το υλικό εναποτίθεται πάνω στο υπόστρωμα. Το όπλο ηλεκτρονίων παράγει μια δέσμη ηλεκτρονίων. Η δέσμη κατευθύνεται στο υλικό που πρόκειται να εναποτεθεί πάνω στο υπόστρωμα. Το πλεονέκτημα του όπλου είναι η απεριόριστη παροχή εξατμισμένου υλικού και η εφαρμογή μη αγωγίμων ή υλικών που λιώνουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

## 1.2 ΑΝΑΒΛΥΣΗ

Ένα άτομο ή μόριο συνήθως στην ιονισμένη μορφή χτυπάει μια στερεή κατάσταση και βγάζει επιφανειακά άτομα. Αυτή η διάβρωση συνοδεύεται από μια δεύτερη διαδικασία, την εναπόθεση ατόμων που βγήκαν από την πρώτη στερεή κατάσταση πάνω σε μια δεύτερη στερεή κατάσταση. Η τελευταία διαδικασία είναι σχετική με το σχηματισμό λεπτών στρωμάτων.

i) εκκένωση αίγλης: Στην πιο απλή της μορφή η ανάβλυση επιτυγχάνεται από εκκένωση αίγλης με συνεχή τάση. Μορφή αυτοτελούς ηλεκτρικής εκκένωσης μικρής έντασης ρεύματος και υψηλής σχετικά τάσης λειτουργίας που πραγματοποιείται σε σωλήνα που περιέχει αέριο υπό χαμηλή πίεση και θερμοκρασία ηλεκτροδίων και αερίου παράγεται φωτοβολία λόγω του ιονισμού των ατόμων και τη δημιουργία πλάσματος κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος.

ii) υψηλής συχνότητας εκκένωση: Όταν αντικαθιστούμε την συνεχή πηγή τάσης με υψηλής συχνότητας γεννήτρια ο στόχος και το υπόστρωμα διαβρώνονται εναλλάξ εξαρτημένα από την πολικότητα. Παρ' όλα αυτά δημιουργείται μια σοβαρή έλλειψη φορτίου εξαιτίας της μικρής επιφάνειας στόχου.

Για να ξεπεράσουμε αυτή την έλλειψη συνδέουμε ένα πυκνωτή ανάμεσα στη γεννήτρια υψηλής συχνότητας και το στόχο και ο αγωγίμος στόχος αντικαθίσταται από έναν μονωμένο. Κατά τη διάρκεια της φάσης θετικής τάσης του σήματος ραδιοσυχνότητας, τα ηλεκτρόδια από το διάστημα εκκένωσης προσελκύονται στο στόχο. Κατά τη διάρκεια της φάσης αρνητικής τάσης τα ηλεκτρόδια δε μπορούν να αφήσουν το στόχο. Έτσι το φορτίο στο στόχο παραμένει σταθερό.

## 1.3 ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΗ ΙΟΝΤΩΝ

Αυτή η διαδικασία τοποθετείται ανάμεσα στην εξάτμιση και στην εκκένωση αίγλης. Μια αρνητική τάση εμφανίζεται στο υπόστρωμα ενώ η άνοδος ενώνεται με την πηγή μεταλλικής ατμοποίησης ο θάλαμος γεμίζεται με Ag με πίεση λίγων Pa και το πλάσμα εκκινείται. Μετά την ανάβλυση το όπλο ηλεκτρονίων ξεκινάει και το υλικό ατμοποιείται. Τα πλεονεκτήματα της επιμετάλλωσης ιόντων είναι υψηλότερες ενέργειες των ατμοποιημένων ατόμων και καλύτερη προσκόλληση των παραγόμενων υμένων. Το μειονέκτημα είναι η θέρμανση του υποστρώματος και οι αλληλεπιδράσεις με στρώματα ευαίσθητα στην ακτινοβολία.

## 1.4 ΛΕΙΖΕΡ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ

Μια ακτίδα λέιζερ υψηλής ενέργειας εστίασης είναι ικανή να διαβρώσει την επιφάνεια ενός στόχου περιστρεφόμενη με ταχύτητα μιας περιστροφής ανά λεπτό. Το υλικό ατμοποιείται πάνω στο υπόστρωμα και σαν αποτέλεσμα ένας υμένας παράγεται πάνω σε αυτό με ρυθμό 0,07nm/παλμό λέιζερ. Η διαδικασία μπορεί να υποστηριχτεί με θέρμανση του υποστρώματος και χημικές αντιδράσεις.

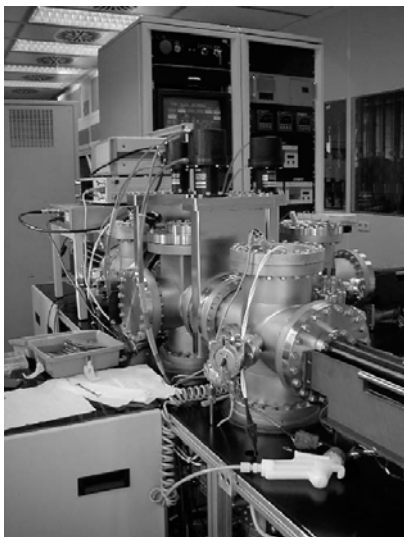
Τα πλεονεκτήματα της αφαίρεσης με λέιζερ είναι η εναπόθεση υλικών με υψηλά σημεία τήξης, ο καλός έλεγχος των προσμίξεων και η στοιχειωμετρική ατμοποίηση.

## 2.ΧΗΜΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΟΥ

Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται σε έναν εκκενωμένο θάλαμο. Ένας λεπτός δίσκος υλικού θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεταξύ 350°C και 800 °C. Ένα ή περισσότερα είδη αερίων τοποθετούνται μέσα έτσι ώστε να σχηματιστεί πίεση από πολλή χαμηλή έως και κανονική. Η ροή του αερίου χτυπάει το λεπτό δίσκο σε ένα κανονικό περιστατικό. Στην περίπτωση που έχουμε ένα αέριο συμβαίνει το φαινόμενο της διάστασης.

## ΕΠΙΤΑΞΙΑ

Ασχολούμαστε με την επιταξία αν ένα στρώμα τοποθετείται πάνω σ' ένα υπόστρωμα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το στρώμα να είναι επίσης μονοκρυσταλλικό. Το στρώμα αναφέρεται συχνά σαν υμένας. Εάν ο υμένας και το υπόστρωμα είναι από το ίδιο υλικό τότε μιλάμε για ομοεπιταξία αλλιώς για ετεροεπιταξία. Μια άλλη διάκριση γίνεται από από τη φάση στην οποία φτιάχνεται ο υμένας. Έτσι έχουμε επιταξία φάσης ατμού υγρή φάση επιταξίας και στερεά κατάσταση επιταξίας. Μια υποκατηγορία της φάσης επιταξίας ατμού είναι η μοριακή δέσμη επιταξίας.



Σχήμα 1.17: Θάλαμος για την τοποθέτηση ηλιακών κυψέλων.

Τα συστατικά του υμένα περιέχονται σε μικρές καμίνους. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης αναπτύσσεται πίεση ατμών και μια ατομική δέσμη εκπέμπεται. Η δέσμη χτυπά την επιφάνεια λεπτού δίσκου στην οποία τα άτομα παραμένουν μερικώς κολλημένα. Εκεί αυτά μπορούν να αντιδράσουν με άτομα δεύτερης ή τρίτης δέσμης η οποία κατευθύνεται επίσης προς την επιφάνεια λεπτού δίσκου. Μια ευνοϊκή αντίδραση εξαρτάται από την επιλογή παραμέτρων πχ θερμοκρασία λεπτού δίσκου, αναλογία της πυκνότητας δέσμης και καθαρότητα της επιφάνειας. Ο θάλαμος περιέχει πολλές συσκευές για την εσωτερική επίβλεψη των αναπτυσσόμενων στρωμάτων. Η ποιότητα του κενού ελέγχεται από αναλυτή καταλοίπων αερίων.

Το υλικό που θα εναποθέσουμε περιέχεται στο εσωτερικό κύτταρο που θερμαίνεται. Η θερμοκρασία ελέγχεται από θερμοαντήρες αντιστάσεων και η θερμότητα από όλες τις επιφάνειες που έχουν θερμοανθεί καταλήγει στην εκπομπή προσμίξεων στο υπόστρωμα και στην χειρότερη περίπτωση στην κατάρρευση του κενού.

## **ΕΜΦΥΤΕΥΣΗ ΙΟΝΤΩΝ**

### **Ο ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ**

Η εμφύτευση ιόντων είναι μια τεχνική προσμίξεων με την οποία τα ιόντα βάλονται σ' ένα υπόστρωμα χρησιμοποιώντας έναν επιταχυντή. Τα επιθυμητά ιόντα αφήνονται σε μια αεριώδη ένωση διαμέσου μιας βαλβίδας. Η ένωση διασπάται και ιονίζεται με μια δέσμη ηλεκτρονίων. Τα ιόντα που προκύπτουν τραβιούνται έξω από την πηγή και τα φέρνουν σε ενέργεια 30 keV με έναν αρχικό επιταχυντή. Τότε τα ιόντα περνούν διαμέσου ενός φίλτρου μαγνητικού πεδίου το οποίο προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο ο επιθυμητός τύπος ιόντων να μπορεί να τρέξει μέσα στον επιταχυντή. Το φίλτρο μαγνητικού πεδίου βασίζεται στην πραγματικότητα ότι η δύναμη Lorentz για ένα κινούμενο φορτισμένο σωματίδιο το αναγκάζει σε μια κυκλική διαδρομή.

Η ακτίνα του κύκλου εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο  $B$ , την ταχύτητα  $U$  και τη μάζα  $m$  του σωματιδίου. Πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από το λόγο  $m/e$  (όπου  $e$  είναι το στοιχειώδες φορτίο). Για το επιθυμητό είδος ιόντων και ένα δεδομένο  $m/e$  το μαγνητικό πεδίο προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το κυκλικό μονοπάτι αυτών των σωματιδίων να τερματίζει ακριβώς στο τέλος του σωλήνα επιτάχυνσης. Εκεί τα ιόντα αποκτούν συνολική ενέργεια 36 keV. Αυτή η ενέργεια μπορεί να διπλασιαστεί ή να πολλαπλασιαστεί από τη χρήση διπλών ή πολλαπλών φορτισμένων ιόντων. Ωστόσο το διαθέσιμο ρεύμα ιόντων μειώνεται εκθετικά με την κατάσταση του φορτίου. Το ρεύμα της δέσμης μετρείται με ένα αμπερόμετρο το οποίο συνδέεται στη βάση του υποστρώματος μονωμένο στο έδαφος. Η βάση του υποστρώματος σχεδιάζεται σαν καρουζέλ.

## **ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΑΝΟΠΤΗΣΗ**

Τα διεισδύοντα ιόντα που περνούν διαμέσου του πλέγματος εξαρτώνται από το λόγο μάζας ιόντων/μάζα ατόμων πλέγματος και τη στιγμιαία ταχύτητα σε μια διαδρομή ζιγκζαγκ. Τα ιόντα προσκρούουν πάνω σε πλέγματα ατόμων τα οποία ανήκουν στη θέση

τους και πηγαίνουν σε θέση παρεμβολής. Το συνηθέστερο ελάττωμα που εμφανίζεται στο πλέγμα προέρχεται από τη λάθος τοποθέτηση ατόμων πλέγματος σε μια θέση παρεμβολής. Τα κενά μπορούν να κατέχουν διαφορετικές καταστάσεις φορτίου (πχ ουδέτερο, θετικό, αρνητικό, διπλά αρνητικό). Επιπλέον μπορούν να σχηματίσουν συσσωματώματα με άλλα άτομα και να επηρεάσουν τη διάχυση τους. Διπλά κενά μπορούν να σχηματιστούν εάν ένα ιόν προσκρούσει και εκτοπίσει δύο γειτονικά άτομα στο πλέγμα. Τα διπλά κενά είναι σταθερά έως τους 500K.

Εξαρθρώσεις μπορούν να αναπτυχθούν από τη συμμετοχή άλλων κενών ή από την καταπόνηση ανοπτημένης ακτινοβολίας σε μη καταπονημένη περιοχή. Γραμμές εξαρθρώσεων μπορούν να υποστούν ανόπτηση σε θερμοκρασία 1000°C και πολύ συχνά δεν κάνουν ανόπτηση σε εμφυτευμένα στρώματα. Εάν πολλά άτομα στο πλέγμα τοποθετηθούν σε λάθος θέση από ένα ιόν που προσκρούεται σε μικρό όγκο τότε αναπτύσσεται μια περιοχή χωρίς μορφή. Συχνά, αυτή η περιοχή είναι γνωστή σε σύμπλεγμα και η ακριβής δομή της είναι άγνωστη.

Η ανόπτηση εμφανίζεται για τα ελαττώματα και την επανατοποθέτηση των ατόμων της πρόσμιξης από παρεμβαλλόμενες περιοχές μέσα σε δομές πλέγματος. Η αναλογία των ηλεκτρικά ενεργών ιόντων που είναι σε δομές πλέγματος σε σχέση με το συνολικό αριθμό εμφυτευμένων ιόντων ονομάζεται ενεργοποίηση. Συνήθως η ενεργοποίηση αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Στην περίπτωση του φωσφόρου ολοκληρωμένη ενεργοποίηση συμβαίνει στους 700°C.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

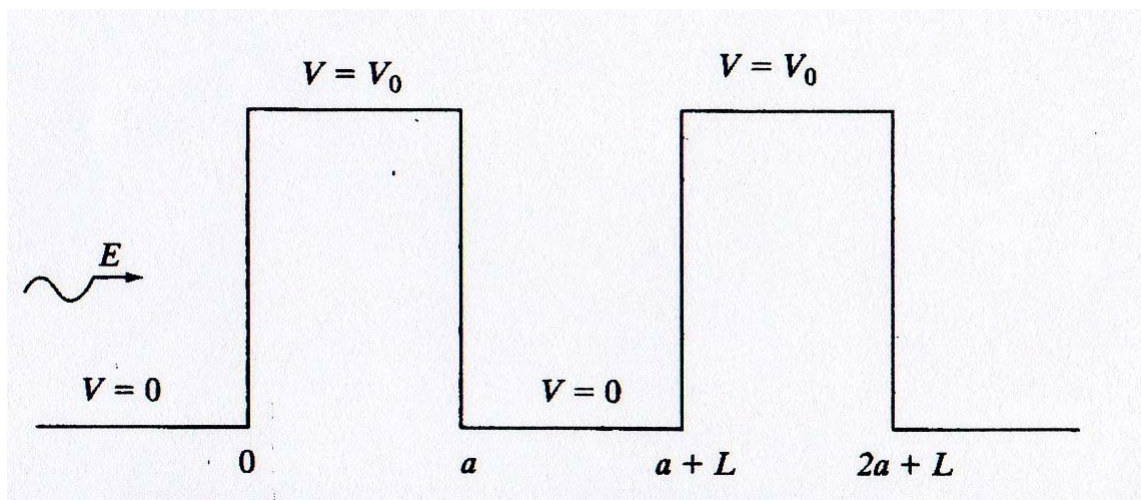
**ΒΑΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ**

**ΣΕ ΝΑΝΟΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ**

## 2.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ [25]

Το φαινόμενο της σήραγγας είναι πολύ σημαντικό για τις νανοηλεκτρονικές διατάξεις και χρησιμοποιείται με ποικίλους τρόπους σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Αν θεωρήσουμε ένα ηλεκτρόνιο που προσπίπτει στο φράγμα δυναμικού στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1: Ένα ηλεκτρόνιο που προσπίπτει σε φράγμα δυναμικού.

Η δυναμική ενέργεια δίνεται από τη σχέση

$$V=V_0 \text{ για } 0 \leq x \leq a$$

$$V=0, \text{ για } x < 0, x > a,$$

Μια τέτοια μορφή περιγράφει το δυναμικό μιας επαφής μετάλλου –μονωτή – μετάλλου. Υπάρχουν και άλλοι παρόμοιοι τύποι δυναμικής ενέργειας που περιγράφουν διατάξεις περιορισμένες στο χώρο όπως την προσάρτηση ενός ηλεκτρονίου στο άτομο ή ενός ατόμου στο μόριο ή ακόμη τη δέσμευση ενός ηλεκτρονίου εντός των ορίων μιας κβαντικής τελείας. Θα υποθέσουμε ότι το φράγμα δεν δημιουργεί προϋποθέσεις σκέδασης συνεπώς τα σωματίδια που διαπερνούν το φράγμα είναι συμφασικά.

Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την επίλυση της εξίσωσης Schrödinger με χρήση οριακών συνθηκών στα όρια και όχι στο εσωτερικό του δυναμικού φράγματος.

Το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται σε δύο περιπτώσεις. Την περίπτωση που η συνολική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια φράγματος,  $E > V_0$  και την περίπτωση που είναι μικρότερη,  $E < V_0$ . Όταν είναι  $E > V_0$  σύμφωνα με την κλασική φυσική το σωματίδιο θα υπερβεί το φράγμα δυναμικού με πιθανότητα 100%. (Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής διέλευσης θα είναι 1 ενώ ο συντελεστής ανάκλασης 0). Όταν  $E < V_0$  το σωματίδιο ανακλάται από το φράγμα δυναμικού με πιθανότητα 100% (στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής διέλευσης θα είναι 0 ενώ ο συντελεστής ανάκλασης 1). Σύμφωνα



όμως με τις αρχές της κβαντικής μηχανικής η συμπεριφορά του σωματιδίου είναι πιο πολύπλοκη.

Ας ξεκινήσουμε από την εξίσωση του Schrodinger

$$\{(-\hbar^2/2m)(d^2/dx^2)+V(x)\}\psi(x)=E\psi(x) \quad (1)$$

Παρατηρούμε ότι είναι δύσκολο να επιλύσουμε την (1) όταν η ενέργεια  $V(x)$  μεταβάλλεται ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  (Πρόκειται για μια διαφορική εξίσωση με μη σταθερούς συντελεστές). Ωστόσο όταν η  $V(x)$  έχει σταθερή τιμή κατά διαστήματα (όπως δηλαδή συμβαίνει στην περίπτωση μας), η εξίσωση μπορεί να επιλυθεί τμηματικά για κάθε περιοχή εντός της οποίας η  $V$  είναι σταθερή. Η τελική λύση θα προκύψει από το συνδιασμό των επιμέρους λύσεων με χρήση των οριακών συνθηκών της κυματοσυνάρτησης.

Ακολουθώντας αυτή τη μέθοδο αναδιατυπώνουμε για την περιοχή I ( $x<0, V=0$ ), την εξίσωση Schrodinger, ως ακολούθως:

$$(-\hbar^2/2m^*)(d^2/dx^2)\psi_1(x)=E\psi_1(x)$$

Οι λύσεις της είναι

$$\psi_1(x)=Ae^{ikx}+Be^{-ikx} \quad \text{όπου } k_1^2=2m^*E/\hbar^2$$

Για την περιοχή II ( $0\leq x\leq\alpha, V=V_0$ ) η εξίσωση του Schrödinger αναδιατυπώνεται ως εξής

$$\{(-\hbar^2/2m^*)(d^2/dx^2)+V_0\}\psi_2(x)=E\psi_2(x)$$

Οι λύσεις της είναι  $\psi_2(x)=Ce^{ikx}+De^{-ikx}$  όπου  $k=2m^*(E-V_0)/\hbar^2$

Επισημαίνουμε ότι για την περίπτωση  $E < V_0$  ή  $E > V_0$  ισχύει αντίστοιχα,

$$k_2^2=2m^*(E-V_0)/\hbar^2$$

Έτσι ο κυματαριθμός  $k_2$  είναι είτε φανταστικός είτε πραγματικός.

Τέλος για την περιοχή III ( $x>\alpha$ ) η εξίσωση του Schrödinger αναδιατυπώνεται ως ακολούθως

$$(-\hbar^2/2m^*)(d^2/dx^2)\psi_3(x)=E\psi_3(x)$$

Οι λύσεις της είναι  $\psi_3(x)=Fe^{ikx}+Ge^{-ikx}$  όπου  $k^2=2m^*E/\hbar^2=k_1^2$

Εφόσον δεν υπάρχει στην περιοχή III φράγμα δυναμικού που να προκαλεί την ανάκλαση του σωματιδίου είναι  $G=0$ .

Έτσι καταλήγουμε στις λύσεις:

$$\psi_1(x)=Ae^{ikx}+Be^{-ikx}$$

$$\psi_2(x)=Ce^{ikx}+De^{-ikx}$$

$$\psi_3(x)=Fe^{ikx}$$

Παρατηρούμε ότι στην περιοχή III, η  $\psi_3^2$  είναι σταθερή και άρα η πιθανότητα ανίχνευσης του σωματιδίου είναι η ίδια για κάθε σημείο της περιοχής.

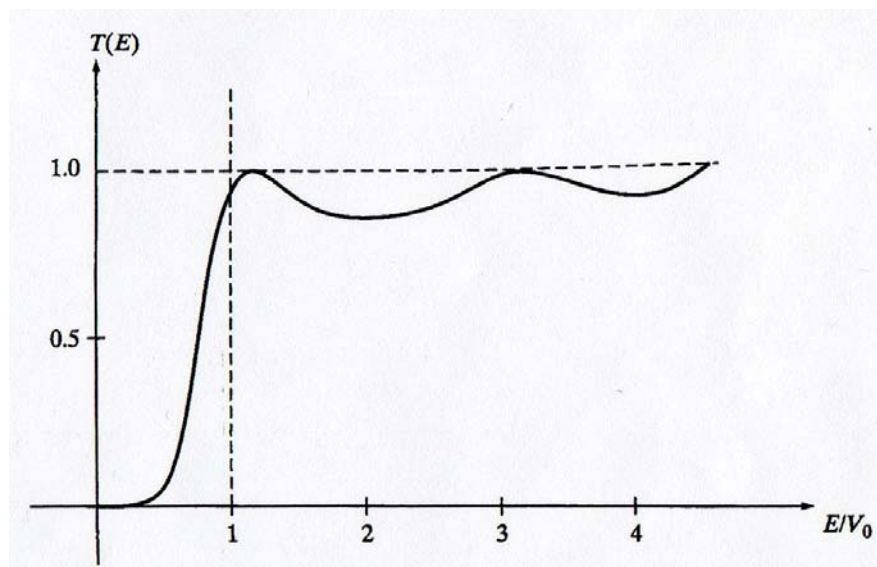
Ορίζουμε την πιθανότητα διάβασης της σήραγγας ως,

$$T = \left| \frac{F}{A} \right|^2 = \frac{4E(E - V_0)}{V_0^2 \sin^2(k_2 a) + 4E(E - V_0)}$$

Η παραπάνω εξίσωση αναπαριστά το μέτρο (υψωμένο στο τετράγωνο) του λόγου της κυματοσυνάρτησης που αναπαριστά τη διέλευση του σωματιδίου, προς την κυματοσυνάρτηση που αναπαριστά την πρόσπτωση του στο φράγμα δυναμικού. Αντίστοιχα η πιθανότητα ανάκλασης είναι:

$$R = \left| \frac{B}{A} \right|^2 = \frac{V_0^2 \sin^2(k_2 a)}{V_0^2 \sin^2(k_2 a) + 4E(E - V_0)}$$

Η εξίσωση αναπαριστά το μέτρο του λόγου της κυματοσυνάρτησης ανάκλασης του σωματιδίου προς την κυματοσυνάρτηση πρόσπτωσης του στο φράγμα δυναμικού.



**Σχήμα 2.2:** Βλέπουμε την πιθανότητα ανάκλασης ενός σωματιδίου από το φράγμα δυναμικού σύμφωνα με την κβαντομηχανική.

Αν  $E < V_0$  τότε κατά την κλασική εκδοχή το σωματίδιο ανακλάται από το φράγμα δυναμικού ( $T=0, R=1$ ). Αν  $E > V_0$  σύμφωνα πάλι με την κλασική φυσική το σωματίδιο κινείται ανεμπόδιστα δια μέσου του φράγματος ( $T=1, R=0$ ). Η κβαντομηχανική αναλύει διαφορετικά το ίδιο φαινόμενο. Βλέποντας το σχήμα παρατηρούμε ότι οι κλασικές προβλέψεις αφορούν οριακές καταστάσεις. Ισχύουν δηλαδή όταν είναι  $E \ll V_0$  και  $E \gg V_0$ . Σε γενικές γραμμές για τις περισσότερες τιμές ενέργειας ισχύει  $0 < T < 1$  δηλαδή υπάρχει κάποια μη μηδενική πιθανότητα το ηλεκτρόνιο να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα μεγάλες τιμές ενέργειας εξασφαλίζουν μεγάλες αντίστοιχα πιθανότητες διάβασης χωρίς όμως να μπορούν να αποκλείσουν εντελώς την πιθανότητα ανάκλασης του σωματιδίου από το φράγμα δυναμικού.

Αν το ηλεκτρόνιο υπερβεί το φράγμα δυναμικού στην περίπτωση  $E < V_0$  αναδύεται το φαινόμενο σήραγγας το οποίο ερμηνεύεται ως ακολούθως :η συνολική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας

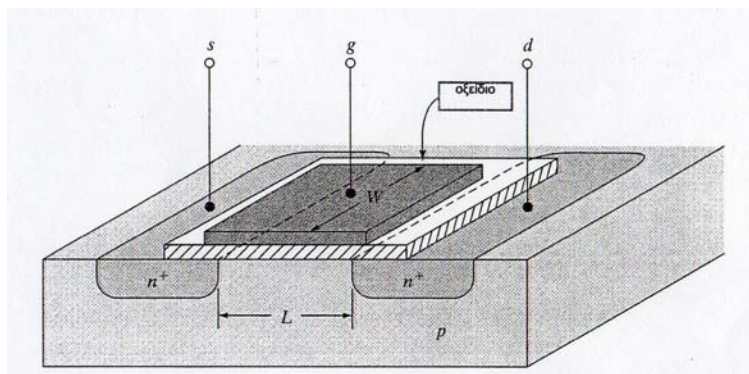
$$E = E_{KE} + E_{PE} = E_{KE} + V_0, \text{ εντός της περιοχής του φράγματος}$$

$$E = E_{KE} + 0, \text{ εκτός της περιοχής φράγματος}$$

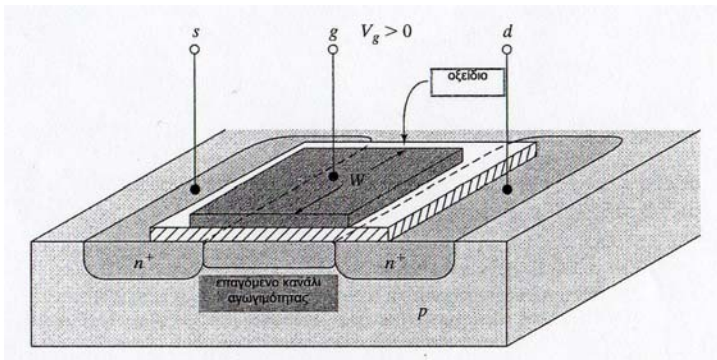
## ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΤΗΝ ΠΥΛΗ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΤΑ MOSFETs

Το φαινόμενο σήραγγας επηρεάζει σημαντικά τις διατάξεις που βασίζονται στην τεχνολογία των MOSFETs. Οι επιδράσεις αυτές γίνονται όλο και πιο εμφανείς λόγω της βαθμιαίας μείωσης του μεγέθους των κυκλωμάτων .Ας εξετάσουμε την στοιχειώδη δομή ενός MOSFET τύπου n στο σχήμα 2.3. Τα σύμβολα s,d και g αντιστοιχούν στην πηγή (source), την υποδοχή (drain) και την πύλη (gate) του τρανζίστορ.

Συνήθως το στρώμα οξειδίου διαμορφώνεται με οξείδωση του υποστρώματος του πυριτίου,μορφοποιώντας έτσι ένα φράγμα δυναμικού από μονωτικό υλικό  $\text{SiO}_2$  μεταξύ της πύλης και της υπόλοιπης διάταξης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 όταν το δυναμικό της πύλης  $V_g$  είναι μηδενικό δεν άγεται ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ της πηγής και της υποδοχής (είναι και οι δύο τύπου - n ημιαγωγοί Si). Δηλαδή  $I_{ds} = 0$ , ανεξάρτητα από την τιμή του  $V_{ds}$ . Όταν στη πύλη εφαρμόζεται κατάλληλη μη μηδενική τάση  $V_g > 0$  εμφανίζεται κάτω από αυτή ένα στρώμα αντιστροφής που συνδέει την πηγή και την υποδοχή. Το στρώμα αυτό δημιουργείται επειδή το δυναμικό  $V_g$ , απωθεί τις οπές του υποστρώματος τύπου- p που βρίσκεται κάτω από την πύλη και ουσιαστικά εγκαθιστά έναν αγωγό τύπου -n όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.3:Στοιχειώδης μορφή ενός MOSFET τύπου n.



**Σχήμα 2.4:** Με την εφαρμογή κατάλληλης μη μηδενικής τάσης  $V_g > 0$  εμφανίζεται κάτω από αυτή ένα στρώμα αντιστροφής που συνδέει την πηγή και την υποδοχή. Το στρώμα αυτό δημιουργείται επειδή το δυναμικό  $V_g$ , απωθεί τις οπές του.

Έτσι με την προϋπόθεση ότι  $V_{ds} > 0$  μπορεί να δημιουργηθεί ρεύμα με κατεύθυνση από την υποδοχή προς την πηγή. Ας εξετάσουμε τώρα το φαινόμενο από τη σκοπιά του φράγματος δυναμικού μεταξύ πηγής και υποδοχής. Όταν το δυναμικό  $V_g$  είναι μηδενικό

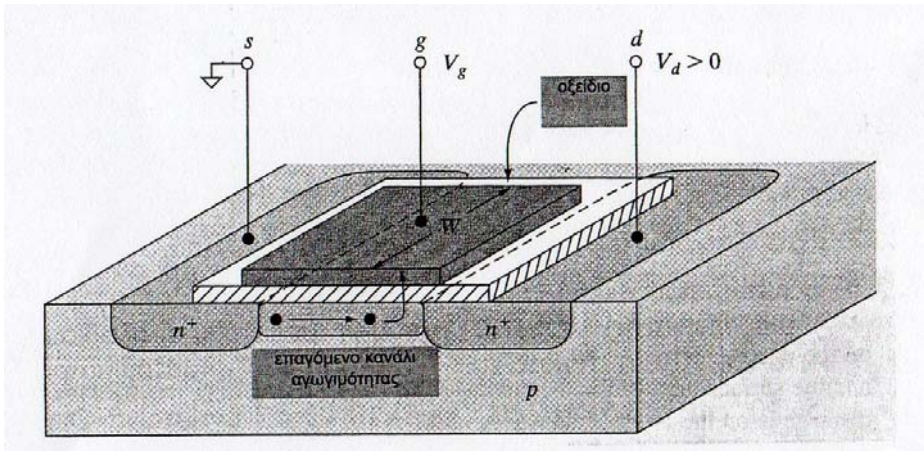
το εν λόγω φράγμα είναι ανυπέρβλητο. Καθώς όμως η τάση  $V_g$  αυξάνεται το ενεργειακό φράγμα σταδιακά υποβιβάζεται και τελικά γίνεται πιο χαμηλό ακόμα κι από τις πλήρως κατειλημμένες ενεργειακές ζώνες της πύλης και της πηγής. Αυτό γίνεται αιτία εμφάνισης των φαινομένων αγωγιμότητας που περιγράψαμε.

Η επαφή πύλης- οξειδίου-αγωγίμου καναλιού (αντίστροφο στρώμα) είναι παρόμοια με την επαφή μέταλλου- μονωτή- μέταλλου. Σε μια κλασσική ιδανική διάταξη MOSFET τα ηλεκτρόνια δε διαφεύγουν προς την πύλη ( $I_g = 0$ ) εξαιτίας του μονωτικού στρώματος οξειδίου. Ωστόσο, η βαθμιαία μείωση των μεγεθών και του πάχους του στρώματος του οξειδίου συνακόλουθα – μπορεί να προκαλέσει φαινόμενο σήραγγας. Μπορεί δηλαδή τα ηλεκτρόνια να υπερβούν το φράγμα δυναμικού του μονωτή με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ρεύμα  $I_g \neq 0$ . Στη συνέχεια θα εξετάσουμε δύο από τα φαινόμενα που εμφανίζονται ως συνέπεια του φαινομένου της σήραγγας της εν λόγω διάταξης.

## ΘΕΡΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ

Το ρεύμα μεταξύ πηγής και υποδοχής εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων από το οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί η τάση  $V_{ds}$  κατά μήκος του καναλιού. Καθώς τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη κινητική ενέργεια. Αν η κινητική τους ενέργεια ξεπεράσει κάποιο όριο, ρέουν μέσω του οξειδίου προς την πύλη λόγω του φαινομένου της διάβασης σήραγγας. Τα αίτια της υπερβολικής αύξησης της κινητικής ενέργειας θα πρέπει να αναζητηθούν στη σχέση που συνδέει την ένταση  $E_{ds}$  του ηλεκτρικού πεδίου εντός του καναλιού με την τάση  $V_{ds}$ . Από τη σχέση αυτή μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων οφείλεται

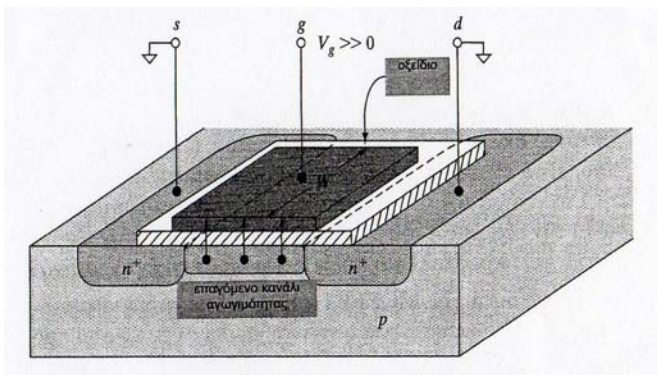
είτε στη μεγάλη τιμή της  $V_{ds}$  είτε στη μικρή τιμή του μήκους του καναλιού  $L$ . Θα πρέπει να επισημάνουμε βέβαια ότι το φαινόμενο που εξετάζουμε επηρεάζεται επιπρόσθετα από το κάθετο ηλεκτρικό πεδίο στο οξειδίο, που οφείλεται στην τάση  $V_g$ . Το συμπέρασμα στο οποίο τελικά καταλήγουμε είναι ότι τα ηλεκτρόνια που κινούνται από την πηγή προς την υποδοχή μπορεί λόγω της μεγάλης κινητικής τους ενέργειας και του φαινομένου σήραγγας να συνεισφέρουν σε ανεπιθύμητα ρεύματα πύλης. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο θερμών ηλεκτρονίων και παρουσιάζεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.5: Το φαινόμενο των θερμών ηλεκτρονίων.

## 2.2 ΔΙΑΒΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ FOWLER-NORDHEIM

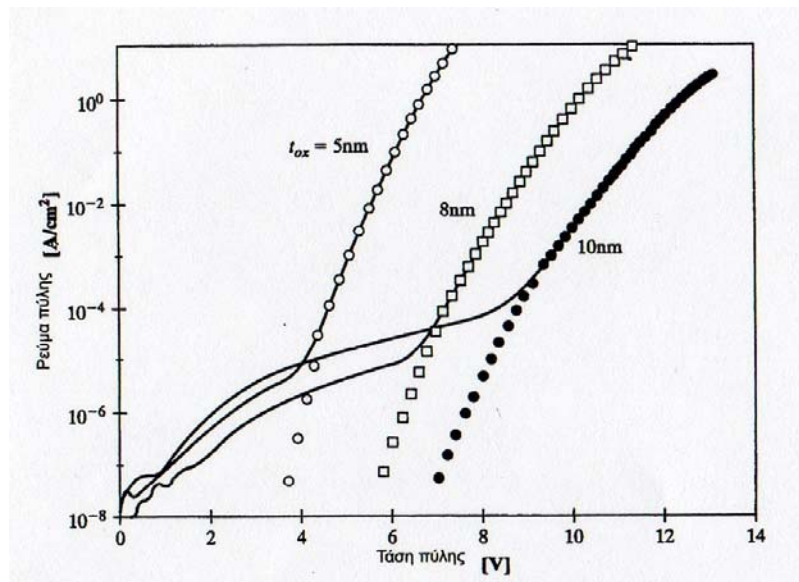
Εάν εφαρμόσουμε στην πύλη μια ισχυρή τάση, τότε υπάρχει πιθανότητα να απορροφήσουν τα ηλεκτρόνια επαρκή ποσότητα ενέργειας και μέσω του φαινομένου της σήραγγας να διαπεράσουν το μονωτικό οξειδίο προς την πύλη. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.6: Με την εφαρμογή στην πύλη μιας ισχυρής τάσης, υπάρχει πιθανότητα να απορροφήσουν τα ηλεκτρόνια επαρκή ποσότητα ενέργειας και μέσω του φαινομένου της σήραγγας να διαπεράσουν το μονωτικό οξειδίο προς την πύλη.

Κατανοούμε βέβαια ότι μη μηδενικά ρεύματα πύλης, δεν μπορεί να οφείλονται σε ένα και μοναδικό αίτιο. Αντίθετα εμφανίζονται ως αποτέλεσμα του συνδιασμού διαφόρων παραγόντων που προκαλούν φαινόμενα διάβασης σήραγγας (δομικές ατέλειες, παγιδευμένα φορτία κλπ). Μειώνοντας αρκετά το πάχος του οξειδίου καθένas από αυτούς τους παράγοντες, επαρκεί για να προκαλέσει ρεύματα που δεν μπορούν να παραβλεφτούν. Μια ακριβής ανάλυση των φαινομένων αυτών μπορεί να επιχειρηθεί μέσω των αυτοσυνεπών αριθμητικών λύσεων των συζευγμένων εξισώσεων Poisson και Schrödinger. Συγκεκριμένα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Poisson για να περιγράψουμε τη μορφή δυναμικού και την εξίσωση του Schrödinger, για να καταστρώσουμε την κυματοσυνάρτηση που θα μας οδηγήσει στον υπολογισμό του ρεύματος πιθανότητας. Το μοντέλο Fowler-Nordheim αποδεικνύεται αρκετά ανακριβές για μερικές περιπτώσεις. (Η αποτυχία του μοντέλου οφείλεται εν μέρει στο ότι η μορφή της δυναμικής ενέργειας διαμορφώνεται με την χρήση υποθέσεων και όχι αυστηρών προσδιορισμών).

Για τυπικά οξειδία ελάχιστο επιτρεπτό πάχος είναι περίπου 1.5nm. Για μικρότερα πάχη θεωρείται δεδομένη η εμφάνιση σημαντικά μεγάλων ρευμάτων σήραγγας. Ωστόσο ακόμα και για μεγαλύτερα του 1,5nm πάχη μπορεί να έχουμε επιθυμητά αποτελέσματα, αν η τάση στην πύλη είναι μεγάλη.



**Σχήμα 2.7: Η εξάρτηση του ρεύματος σήραγγας από την τάση στην πύλη.**

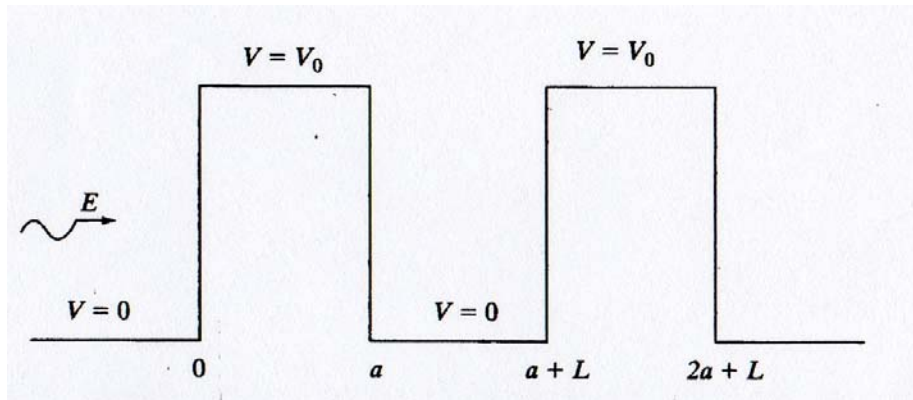
Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που αναπαριστά την εξάρτηση του ρεύματος σήραγγας από την τάση στην πύλη. Αναφέρεται στην πολυκρυσταλλική πύλη τύπου -n (συγκέντρωση νόθευσης ίση με  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ) μιας διάταξης MOSFET τύπου -n, με στρώμα οξειδίου πάχους 5,8 και 10nm, κατά περίπτωση. Διαπιστώνουμε ότι οι τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο Fowler-Nordheim (κύκλοι συμπαγείς ή κενοί και τετράγωνα) συμφωνούν με τις μετρούμενες τιμές (συνεχείς γραμμές)

Τα ρεύματα πύλης επηρεάζουν αισθητά τόσο τη λειτουργικότητα των διατάξεων όσο και τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας. Η βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών αναζητά διάφορους τρόπους για να αντιμετωπίσει τέτοιου είδους δυσχέρειες. Μεταξύ αυτών

συγκαταλέγονται η χρήση διαφορετικών οξειδίων και η αναθεώρηση της δομής των MOSFETs.

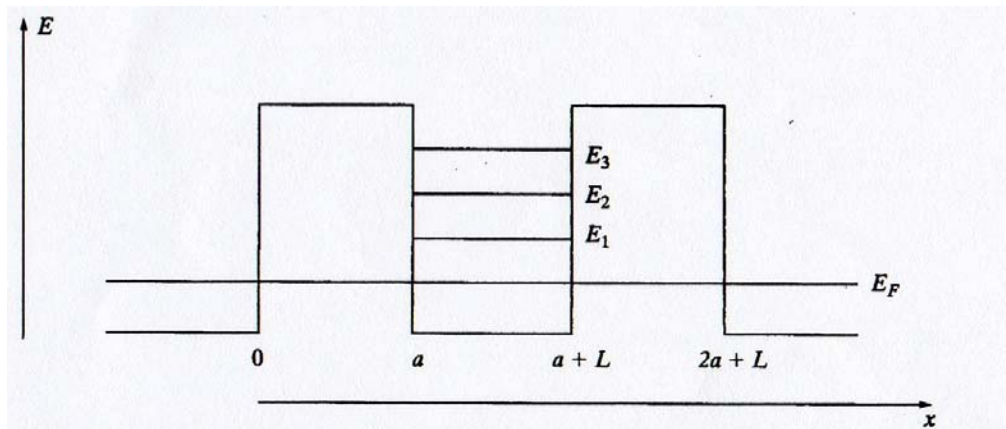
### 2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΔΙΠΛΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Μια άλλη ενδιαφέρουσα ενεργειακή διαμόρφωση , προκύπτει όταν δυο φράγματα δυναμικής ενέργειας βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους , δημιουργώντας ένα πηγάδι δυναμικού όπως αυτό του σχήματος 2.8.



Σχήμα 2.8: Όταν δύο φράγματα δυναμικού είναι σε πολλή κοντινή απόσταση σχηματίζουν ένα πηγάδι δυναμικού.

Μια τέτοια διαμόρφωση προκαλεί το φαινόμενο που είναι γνωστο ως συντονισμός σήραγγας. Υποθέτουμε ότι τα φράγματα είναι αρκετά λεπτά για να επιτρέψουν την εμφάνιση ρευμάτων σήραγγας. Επιπλέον υποθέτουμε ότι η διαχωριστική περιοχή είναι επαρκώς στενή έτσι ώστε να διαμορφώνονται εντός της διακριτές ενεργειακές στάθμες όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.9: Η εμφάνιση του φαινομένου συντονισμού σήραγγας.

Η ανάλυση της διάταξης διπλού φράγματος του σχήματος 2.9 είναι άμεση αλλά και αρκετά επίπονη. Ο συντελεστής διάβασης του διπλού συμμετρικού φράγματος του σχήματος είναι.

$$T = \left( 1 + \frac{4R_1}{T_1^2} \sin^2(k_1 L - \theta) \right)^{-1} \quad (1) \text{ όπου } T_1 \text{ και } R_1 \text{ είναι οι συντελεστές διέλευσης και}$$

ανάκλασης ενός απλού φράγματος με πλάτος  $a$ . Το  $L$  συμβολίζει το πλάτος του πηγαδιού που χωρίζει τα δύο φράγματα.

Επίσης,

$$\tan \theta = \frac{2k_1 k_2 \cos(k_2 a)}{(k_1^2 + k_2^2) \sin(k_2 a)}, \quad (2)$$

$$k_1^2 = 2m_e E / \hbar^2 \qquad k_2^2 = \frac{2m_e^* (E - V_0)}{\hbar^2}$$

Από την (1) εύκολα συνεπάγεται ότι η πιθανότητα διέλευσης είναι μονάδα όταν  $\sin(k_1 L - \theta) = 0$  δηλαδή όταν  $k_1 L - \theta = n\pi$ ,  $n=0,1,2$

Αποδεικνύεται ότι η μέγιστη διέλευσης ( $T=1$ ) συμβαίνει όταν η ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου ταυτίζεται με μία από τις ενεργειακές στάθμες των ημιδésμιων καταστάσεων του πηγαδιού. Ας εξετάσουμε μια απλή ειδική περίπτωση. Υποθέτουμε ότι  $V_0 \gg E$  έτσι ώστε  $|k_1| \gg |k_2|$ . Τότε  $\tan \theta \rightarrow 0$  και άρα  $\theta \rightarrow 0$ . Συνεπώς

$$k_1 L = n\pi$$

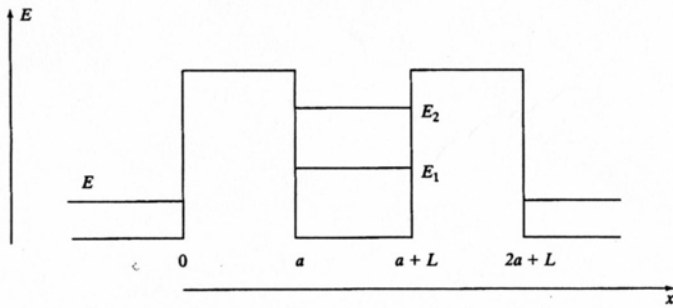
Χρησιμοποιώντας την παραπάνω έκφραση συνάγουμε ότι

$$E = E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \text{ που είναι ακριβώς η ίδια σχέση με αυτή που περιγράφει τις}$$

ενεργειακές στάθμες ενός μονοδιάστατου κβαντικού πηγαδιού.

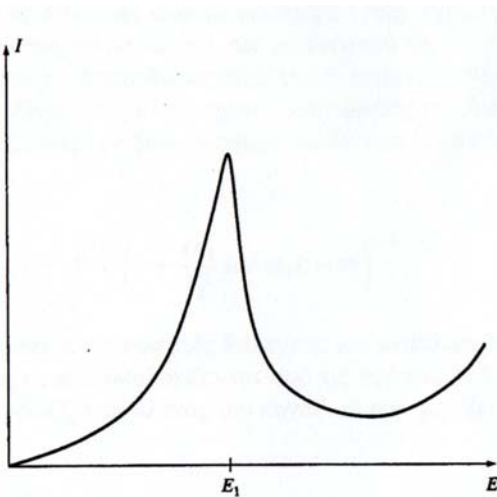
Το φαινόμενο σήραγγας ενός διπλού φράγματος δυναμικού, έχει μια πολλή σημαντική εφαρμογή που είναι γνωστή ως δίοδος συντονισμού σήραγγας (Resonant Tunneling Diode-RTD). Η λειτουργία της RTD μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα αν εξετάσουμε την επίδραση ενός εξωγενούς ηλεκτρικού πεδίου στις ενεργειακές στάθμες ενός διπλού φράγματος δυναμικού. Υπενθυμίζουμε ότι όταν η προσπίπτουσα ενέργεια διαφέρει από την ενέργεια  $E_n$  των σταθμών του πηγαδιού, τότε η διάβαση σήραγγας διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Καθώς  $E \rightarrow E_n$ , η διάβαση γίνεται πιο έντονη παίρνοντας τη μέγιστη τιμή της για  $E = E_n$ . Ας υποθέσουμε για παράδειγμα, ότι η προσπίπτουσα ενέργεια έχει μια τιμή  $E$  που είναι μικρότερη από όλες τις στάθμες  $E_n$ . Η κατάσταση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10.





Σχήμα 2.10: Η προσπίπτουσα ενέργεια έχει μια τιμή  $E$  που είναι μικρότερη από όλες τις στάθμες  $E_n$ .

Καθώς η ενέργεια  $E$  αυξάνεται, το ρεύμα διάβασης σήραγγας αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή του, στο σημείο  $E=E_1$ . Μετά από αυτό το σημείο, το ρεύμα μειώνεται παρόλο που η ενέργεια αυξάνεται όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Καθώς η ενέργεια  $E$  αυξάνεται, το ρεύμα διάβασης σήραγγας αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή του, στο σημείο  $E=E_1$ .

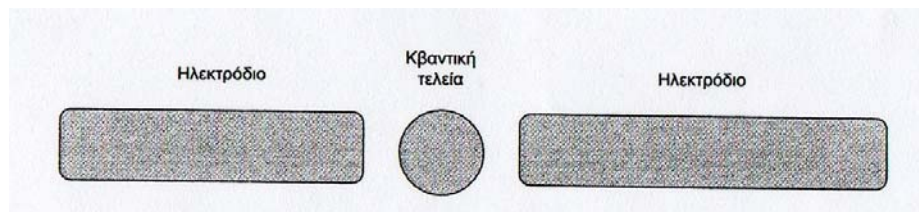
Αυτή η μείωση του ρεύματος με ταυτόχρονη αύξηση του πεδίου χαρακτηρίζει μια περιοχή αρνητικής αντίστασης. Βέβαια αν συνεχίσουμε να αυξάνουμε την  $E$ , θα παρατηρήσουμε και άλλες διαδοχικές κορυφώσεις και βυθίσεις του ρεύματος στο διάγραμμα, οι οποίες αντιστοιχούν στις άλλες ενεργειακές στάθμες του πηγαδιού δυναμικού.

Μια τυπική διάταξη κατασκευάζεται με χρήση GaAs τύπου  $-n$  για το αριστερό και το δεξί τοίχωμα των φραγμάτων ενδογενές GaAs για την περιοχή του πηγαδιού και Al GaAs ή AlAs για το σώμα κάθε φράγματος. Το φαινόμενο σήραγγας ελέγχεται μέσω της τάσης που εφαρμόζεται στη διάταξη. Όταν δεν εφαρμόζεται τάση, η ενεργειακή διαμόρφωση είναι παρόμοια με αυτή του σχήματος 2.10. Όταν όμως εφαρμόζεται τάση  $V_0$ , θετική στη δεξιά πλευρά της διπλής επαφής, η ενεργειακή στάθμη του πηγαδιού

χαμηλώνει και πλησιάζει τη στάθμη Fermi της αριστερής πλευράς της διάταξης .Η διάταξη τότε διαρρέεται από ρεύμα , το οποίο μεγιστοποιείται όταν η στάθμη του πηγαδιού δυναμικού, μέχρι να εξισωθεί με το όριο της ζώνης αγωγιμότητας της αριστερής περιοχής.

## 2.4 ΦΡΑΓΗ COULOMB

Πρόκειται να εξετάσουμε τη σύνδεση μιας κβαντικής τελείας με ηλεκτρόδια όπως παρουσιάζεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.12:Σύνδεση κβαντικής τελείας με ηλεκτρόδια.

Όπως είναι αναμενόμενο το φαινόμενο σήραγγας εκδηλώνεται ως ροή φορτίων μεταξύ των ηλεκτροδίων και διαμέσου της κβαντικής τελείας, το οποίο στην περίπτωση αυτή ονομάζεται κβαντική νησίδα ή νησίδα Coulomb.Θα εξετάσουμε την κβαντική τελεία χρησιμοποιώντας ως μοντέλο ένα πυκνωτή .Ωστόσο θα θεωρήσουμε ότι η αγωγιμότητα είναι αποτέλεσμα ενός κβαντικού φαινομένου , του φαινομένου της σήραγγας.Θα χρησιμοποιήσουμε δηλαδή ένα μικτό μοντέλο με στοιχεία τόσο από την κλασική όσο και από την κβαντική φυσική.

Θα διαπιστώσουμε στη συνέχεια , ότι ένα από τα θεμελιώδη φαινόμενα της νανοηλεκτρονικής , συνδέεται με τη μεταβολή που υφίσταται η ενέργεια , κατα τη διέλευση ενός ηλεκτρονίου μέσα από νανοσκοπικές περιοχές όπως είναι παράδειγμα οι κβαντικές τελείες .Το εν λόγω φαινόμενο είναι γνωστό ως φραγή Coulomb.

Οι πρώτες μελέτες της φραγής Coulomb, προέκυψαν από την ανάλυση της συμπεριφοράς της ροής των ηλεκτρονίων μέσα σε κοκκώδη μεταλλικά υλικά.Διαπιστώθηκε μια αναστολή του ρεύματος διαμέσου του υλικού, στην περίπτωση που η χωρητικότητα των μεταλλικών στοιχείων ήταν χαμηλή.Το φαινόμενο αυτό , ωστόσο μόλις πρόσφατα μελετήθηκε ολοκληρωμένα , με τη συνδρομή σύγχρονων πειραματικών διατάξεων και μεθόδων.Αρχικά θα εξετάσουμε την γενική περίπτωση μιας επαφής σήραγγας που συνίσταται από δύο αγώγιμα ηλεκτρόδια ανάμεσα στα οποία παρεμβάλλεται μονωτικό διάκενο.Στη συνέχεια θα μελετήσουμε πιο πολύπλοκες δομές για να οδηγηθούμε τελικά στην ανάλυση του τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου.

Η τάση μεταξύ δύο αγώγιμων σωμάτων που διαχωρίζονται από μονωτικό υλικό είναι μεγέθη ανάλογα.

$$Q=CV(1)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Τιμές χωρητικότητας πυκνωτών με παράλληλους οπλισμούς. Στην τελευταία στήλη υπολογίζεται η μεταβολή της ενέργειας που υφίσταται το σύστημα από τη μεταφορά ενός μόνο ηλεκτρονίου μεταξύ των οπλισμών του αντίστοιχου πυκνωτή.

	A(nm <sup>2</sup> )	d(nm)	C(F)	ΔE(ev)
νανοπυκνωτής	5 <sup>2</sup>	2	1.1×10 <sup>-19</sup>	0.73
νανοπυκνωτής	80 <sup>2</sup>	1	5.7×10 <sup>-17</sup>	0.0014
μικροπυκνωτής	(5×10 <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	2	1.1×10 <sup>-13</sup>	7.3×10 <sup>-7</sup>
μιλιπυκνωτής	(5×10 <sup>6</sup> ) <sup>2</sup>	2×10 <sup>6</sup>	1.1×10 <sup>-13</sup>	7.3×10 <sup>-7</sup>

Στη σχέση (1) συμβολίζουμε το φορτίο με Q(+Q για τον ένα αγωγό και -Q για τον άλλο), την συνεχή τάση μεταξύ των αγωγών με V και τη χωρητικότητα με C.

Η ηλεκτροστατική ενέργεια που συσσωρεύεται στο σύστημα είναι,

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

Η ενέργεια αυτή είναι ίση με την ενέργεια που καταβάλλεται για την απομόνωση των φορτίων των αγωγών με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης (δηλαδή το έργο που παράγεται για τη διαμόρφωση της συγκεκριμένης κατανομής φορτίου στις επιφάνειες του πυκνωτή).

Ο απλούστερος πυκνωτής αποτελείται από δύο ίσες παράλληλες πλάκες (οπλισμοί πυκνωτή) επιφάνειας A, που απέχουν μεταξύ τους d μονάδες μήκους. Για την απλή αυτή δομή η χωρητικότητα υπολογίζεται από τη σχέση.

$$C = \frac{\epsilon A}{d},$$

Όπου ε είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του παρεμβαλλόμενου υλικού (ε=ε<sub>r</sub>ε<sub>0</sub>). Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τιμές χωρητικότητας για διάφορους απλούς πυκνωτές (παράλληλων οπλισμών). Μεταξύ των οπλισμών παρεμβάλλεται κενό ε=ε<sub>0</sub>.

Οι δύο πρώτοι πυκνωτές έχουν διαστάσεις νανομετρικής κλίμακας. Ο τρίτος έχει διαστάσεις οπλισμών μικροσκοπικής κλίμακας και απόσταση μεταξύ οπλισμών νανομετρικής κλίμακας ενώ ο τελευταίος έχει διαστάσεις οπλισμών μικροσκοπικής κλίμακας. Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι οι νανοσκοπικοί πυκνωτές έχουν εξαιρετικά μικρή χωρητικότητα.

Η μικρή χωρητικότητα των νανοσκοπικών πυκνωτών, έχει ως αποτέλεσμα μια αξιοσημείωτη μεταβολή της ενέργειας ακόμη και στην περίπτωση μεταφοράς ενός και μόνο ηλεκτρονίου από οπλισμό σε οπλισμό. Λόγου χάριν, για ένα νανοσκοπικό πυκνωτή χωρητικότητας 1.1×10<sup>-19</sup> F υπολογίζεται ότι η μεταφορά ενός ηλεκτρονίου επιφέρει μεταβολή της ενέργειας ίση με 1 eV. Για ένα πυκνωτή μακροσκοπικών μεγεθών (C=1.1×10<sup>-13</sup> F), η μεταβολή της ενέργειας είναι αμελητέα. Αυτή η ευαισθησία που επιδεικνύουν οι νανοσκοπικοί πυκνωτές στη μεταφορά απειροελάχιστου φορτίου, επιτρέπει το σχεδιασμό και την υλοποίηση των λεγόμενων διατάξεων ενός ηλεκτρονίου. Για τις εξαιρετικά μικρές αυτές τιμές της χωρητικότητας είναι χρήσιμο να υιοθετήσουμε το πρόθεμα femto (f) που εισάγει ένα συντελεστή ίσο με 10<sup>-15</sup> και το πρόθεμα atto(a) που εισάγει ένα συντελεστή ίσο με 10<sup>-18</sup>.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

### 3.1 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ [26]

Εξαιτίας της σημαντικότητας της νανοτεχνολογίας στην οπτοηλεκτρονική και της κατασκευής κβαντικών συσκευών η νανολιθογραφία των ημιαγωγών (ιδιαίτερα των σύνθετων ημιαγωγών) είναι μεγάλης σημασίας. Πολλές δομές έχουν δημιουργηθεί διαμέσου ενός συνδιασμού λιθογραφίας με χάραξη δέσμης ιόντων ή τεχνικές lift off\*, για παράδειγμα καλώδια GaAs 10nm. Δομές σιλικόνης κατασκευάστηκαν επικαλύπτοντας επιφάνειες πυριτίου με νανοσωματίδια από χρυσό και χάραξη ιόντων σε SiCl<sub>4</sub>. Μικρά σωματίδια των 2nm είναι ακόμη ικανοποιητικές μάσκες χάραξης.

Λεπτές ράβδοι πυριτίου με πολύ μικρές διαμέτρους κατασκευάστηκαν από ένα συνδιασμό τεχνικών που αποκαλούνται VLS\* (ατμού, υγρού, στερεού) με χάραξη από δέσμες ιόντων. Αρχικά κατασκευάστηκαν ράβδοι πυριτίου με αρκετά μικρόμετρα μήκος αλλά μόλις λίγα μικρόμετρα σε διάμετρο από καταλυτική εναπόθεση πάνω στο πυρίτιο από μια αέρια ανάμειξη SiCl<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>. Στο δεύτερο βήμα οι ράβδοι έγιναν πιο αιχμηρές χρησιμοποιώντας ιόντα Ar ή N στα 30keV καταλήγοντας σε διαμέτρους στην άκρη των ράβδων περίπου 2nm. Συγκρίσιμες τιμές πήραν οι ερευνητές από την εναπόθεση σωματιδίων χρυσού επάνω σε μονούς κρυστάλλους πυριτίου σε υπόστρωμα πυριτίου.

Το πυρίτιο έχει χρησιμοποιηθεί σε ποικιλία πειραμάτων νανολιθογραφίας. Η προτεινόμενη προσέγγιση ήταν η οξειδωση Si-H επιφανειών. Μια άλλη προσέγγιση εφαρμόζει την απευθείας εναπόθεση ατόμων πυριτίου. Παρόμοια με τα μέταλλα, τα ημιαγωγά νανουκικά είναι ενδιαφέροντα για την κατασκευή συσκευών που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της σήραγγας. Κατασκευάστηκαν ράβδοι με μεγάλο ποσοστό από προσμίξεις σιλικόνης με μήκος 800nm και διατομή 24nm\*80nm.

Εξαιρετικά καλές δομές μέσα στο GaAs δημιουργήθηκαν διαμέσου εμφύτευσης κατιόντων\* Ga. Έκθεση με υψηλή εστίαση κατιόντων\* (FIB) παρήγαγε καλώδια 2-3nm πλάτους σε επιφάνεια GaAs. Η χαρτογράφηση αυτών των γραμμών βασίστηκε στην αυξανόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για την κατασκευή νανοτρανζίστορ χρησιμοποιήθηκε μια εξαιρετικά λεπτή στρώση SiO<sub>2</sub> σε συνδιασμό με έκθεση δέσμης ηλεκτρονίων με χάραξη σε πλάσμα υψηλής πυκνότητας καταλήγοντας σε μια δομή μεγαλύτερου πάχους με διαστάσεις 60nm και 170nm.

### 3.2 ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ- ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Η πρόσφατη νανοτεχνολογία είναι ένας τομέας συνεχών εξελίξεων που καλύπτουν την τεχνολογία και τα υπολογιστικά μαθηματικά. Ο τελικός στόχος είναι κατασκευή νανοδομών με ιδιότητες που καθορίζονται από την κβαντική μηχανική. Ένα μόνιμο ενδιαφέρον σ' αυτή την κατηγορία τεχνητών υλικών προκαλείται από την πραγματικότητα ότι οι φυσικές ιδιότητες τέτοιων στερεών μπορούν να ελεγχθούν και να ποικίλουν. Είναι δυνατό να παραχθεί υλικό με οποιαδήποτε προκαθορισμένη αγωγιμότητα σ' ένα εύρος από καλό μέταλλο έως καλό διηλεκτρικό.

Οι κβαντικές τελείες έχουν ανοίξει λαμπρές προοπτικές για καινούρια λέιζερ και τεχνολογίες για οπτικούς αισθητήρες. Η νανοτεχνολογία βασίζεται στην ανάπτυξη υλικών που θα μπορεί να εκμεταλλευτεί και το εσωτερικό spin των ηλεκτρονίων (spintronics). Τα συγκεκριμένα υλικά βασίζονται στη χρήση μαγνητικών ημιαγωγών.

Η σημασία των spintronics βρίσκεται στην προοπτική για ανάπτυξη νέου τύπου μνήμης με τυχαία προσπέλαση (MRAM) για δομές μονών ηλεκτρονίων και αποθήκευση πολλή πυκνής πληροφορίας. Η στοιχειώδης αποθήκευση πληροφοριών θα αντιπροσωπεύεται από ένα spin ηλεκτρονίου. Σ' αυτή την περίπτωση θα έχει επιτευχθεί η μέγιστη καταγραφή πληροφορίας. Η μεταφορά πολωμένου spin ρεύματος δημιουργεί νέες δυνατότητες στα ηλεκτρονικά. Υπάρχουν παρατηρήσεις για spin πολωμένη φωτεινότητα καθώς και διόδων υψηλής συχνότητας τα χαρακτηριστικά των οποίων μπορούν να αλλάξουν με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η δημιουργία νέας γενιάς ηλεκτρονικών χιλιοστού και κάτω από χιλιοστό εύρους κύματος, όπως γεννήτριες, ενισχυτές δέκτες και φίλτρα τροποποιημένα και συντονισμένα με το μαγνητικό πεδίο και πλήρως ελεγχόμενα από ρεύμα.

Η ανακάλυψη της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης από τον Perit και τους συνεργάτες του το 1988 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα καινούριο βήμα για την ανάπτυξη των spintronics. Το φαινόμενο\* GMR έχει δείξει ξεκάθαρα ότι τα ηλεκτρόνια που είναι πολωμένα με spin μπορούν να μεταφέρουν μια μαγνητική ροπή διαμέσου μη μαγνητικών υλικών. Στις μέρες μας η τάση στην ανάπτυξη των spintronic συσκευών βασίζεται στην ανάπτυξη νανοδομών σιδηρομαγνητικών ημιαγωγών που παρουσιάζουν ιδιότητες που δεν είναι διαθέσιμες για τις αναλογίες τους. Υπάρχουν διάφορες ιδιότητες όπως η δυνατότητα ελέγχου της μαγνητικής κατάστασης του υλικού με ηλεκτρικό πεδίο.

### 3.3 ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΚΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΟΙ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ [27]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει εστιαστεί στους νανοσωλήνες άνθρακα σαν πολύτιμο ενσύρματο στοιχείο στην κλίμακα του nm. Αυτές οι ίνες άνθρακα μπορούν να δημιουργηθούν με τεχνικές όπως εκτομή λέιζερ, εκκένωση τόξου ή χημική εναπόθεση ατμών. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες εξαρτώνται από τη γεωμετρία, ιδιαίτερα η διάμετρος των νανοσωλήνων που είναι ανάμεσα σε ένα και λίγα δέκατα του νανομέτρου. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις νανοσωλήνων βρέθηκαν να είναι ανάμεσα σε 0,2KΩ/m και 500MΩ/m. Μια μεγάλη μείωση στην αντίσταση παρατηρήθηκε με τη μείωση της θερμοκρασίας σε επιλεγμένους σωλήνες, άλλοι εμφάνισαν μια γραμμική μείωση της αντίστασης μεταξύ των 4 και 300K της τάξης του 10%. Γενικά μια ημιαγωγίμη εξάρτηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς παρατηρείται. Βρέθηκε πειραματικά ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι δομές περιτοιχισμένες με εξωτερικά κελύφη διαμέτρου 10nm. Η αγωγή ρεύματος σ' ένα νανοσωλήνα άνθρακα περιορίζεται στο εξωτερικό τοίχωμα του νανοσωλήνα. Οι αθρακούχοι νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων είναι μεταλλικοί. Οι νανοσωλήνες άνθρακα ενός τοιχώματος μπορούν να είναι είτε μεταλλικοί είτε ημιαγωγά. Περίπου το 1/3 των σωλήνων ενός τοιχώματος καταλήγουν να είναι μεταλλικοί και τα 2/3 ημιαγωγά. Όταν οι αθρακούχοι σωλήνες κατασκευάζονται με τη μέθοδο εκκένωσης τόξου\*, είτε με τη μέθοδο απόθεσης χημικού ατμού σχηματίζεται μια μίξη μεταλλικών και ημιαγωγιμων σωλήνων. Αυτοί οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ημιαγωγοί φωτοεκπομπής. Δύο επαφές σιδήρου/τιτανίου με κενό 1μm μπορούν να γεφυρωθούν από νανοσωλήνες άνθρακα. Το λεπτό στρώμα σιδήρου δρα ως καταλύτης για τη δημιουργία νανοσωλήνα. Τα περισσότερα νανοςύρματα 1μm μήκους και διαμέτρου 40-50nm εμφανίζουν ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ 50 και 80Ω.

Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου ή FET(Field effect transistor) είναι μια ηλεκτρονική διάταξη με τρεις ακροδέκτες η οποία περιλαμβάνει μια επαφή p-n.Η λειτουργία του βασίζεται στον έλεγχο ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με την εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού στον ένα από τους τρεις ακροδέκτες που ονομάζεται πύλη.Το πεδίο αυτό ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων δύο ακροδεκτών που ονομάζονται υποδοχή και πηγή.Το ρεύμα που διέρχεται από αυτούς τους δύο ακροδέκτες ελέγχεται από το πεδίο αυτό και έτσι ενώ στα διπολικά τρανζίστορ ο έλεγχος του ρεύματος στην έξοδο γίνεται με το ρεύμα βάσης στα FETs ο έλεγχος γίνεται με το δυναμικό της πύλης.Επίσης η αγωγιμότητα γίνεται με ένα τύπο φορέων (οπές ή ηλεκτρόνια) ανάλογα με την πολικότητα τους, οπότε τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται ως μονοπολικά.Υπάρχουν δύο τύποι FET που ονομάζονται FET επαφής και FET μονωμένης πύλης ή Μετάλλου-Οξειδίου- Ημιαγωγού.

### **3.5ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ [25]**

#### **➤ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ**

Ημιαγωγάμοι CNTs(ανθρακούχοι νανοσωλήνες) έχουν χρησιμοποιηθεί για να κατασκευάσουν τρανζίστορς επίδρασης πεδίου CNTFETs που είναι πολλά υποσχόμενα εξαιτίας των ηλεκτρονικών χαρακτηριστικών των MOSFET που κατασκευάζονται κυρίως από πυρίτιο.Οι CNT συσκευές είναι υψηλής ταχύτητας και λειτουργούν σε συχνότητες της τάξης των GHz.Πρόσφατη έρευνα που αναφέρει με λεπτομέρειες τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μορφών CNTFETs έχει δείξει ότι οι συσκευές που βασίζονται στο φαινόμενο της σήραγγας προσφέρουν καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλες CNTFETs δομές.Αυτές οι συσκευές είναι μια πολλή καλή ιδέα για εφαρμογές χαμηλής ισχύος.

#### **➤ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ (ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ FET ΚΑΙ SET)**

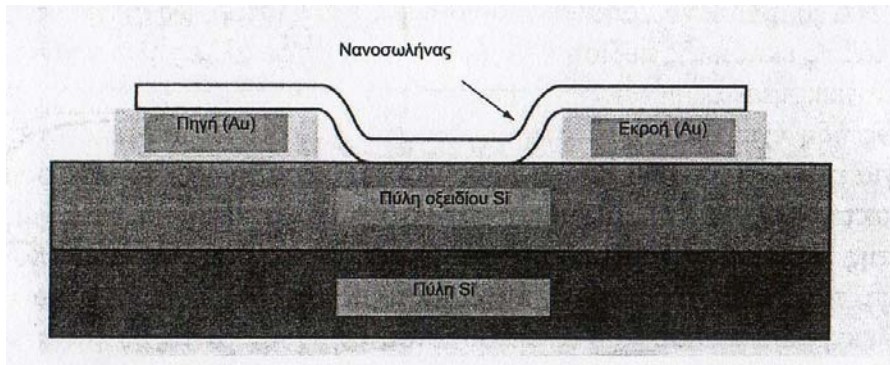
Οι νανοσωλήνες άνθρακα (NA) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τρανζίστορ, ως ανιχνευτές αερίων,ως διατάξεις εκπομπής πεδίου ή ως ένθετες δομές σε άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Οι NA αποτελούν ελκυστική λύση για την κατασκευή επίπεδων οθονών και διατάξεων εκπομπής ορατού φωτός ή ακτινοβολίας X.Η μεγάλη αγωγιμότητα και η εστίαση του ηλεκτρικού πεδίου σε μια πολύ μικρή περιοχή τους καθιστά ιδανικές πηγές εκπομπής ηλεκτρονίων.Λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται ενισχύονται τα ρεύματα σήραγγας που διαπερνούν το φράγμα δυναμικού του κενού.

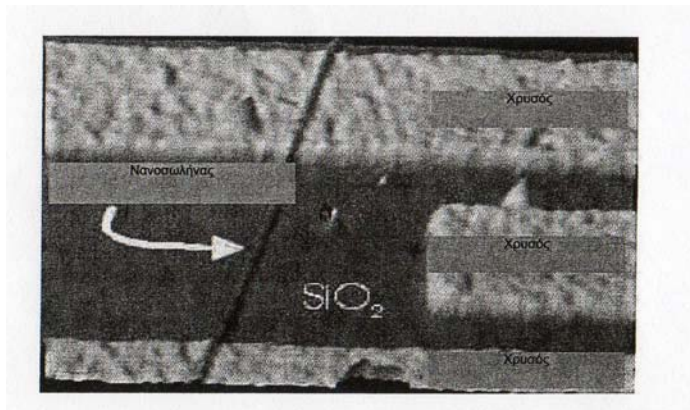
Οι NA είναι φυσικές διατάξεις ανίχνευσης αερίων.Διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση ενός ημιαγωγικού NA επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία μορίων στην περιοχή του.Η μεταβολή που υφίστανται , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και ταυτοποίηση του χημικού περιβάλλοντος του νανοσωλήνα.

Οι ΝΑ που συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως κανάλια σε κυκλώματα τρανζίστορ. Για όλες τις παραπάνω κατηγορίες εφαρμογών έχουν κατασκευαστεί πρότυπες διατάξεις. Ωστόσο αναμένεται η ανάπτυξη φθηνής και υψηλής απόδοσης τεχνικών διαδικασιών παραγωγής.

Η χρήση ενός ημιαγωγικού ΝΑ ως νανοαγωγού σ' ένα FET παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η αποτύπωση μέσω μικροσκοπίου AFM μια πρώιμης εφαρμογής των ΝΑ στην κατασκευή ενός FET. Η πηγή η υποδοχή και η πύλη υλοποιούνται με χρήση Au. Η πύλη αντιστοιχεί στη μεσαία επαφή από χρυσό, η οποία είναι συνεπίπεδη με το ΝΑ, σε αντίθεση με το προηγούμενο σχήμα στο οποίο ήταν τοποθετημένη από κάτω.

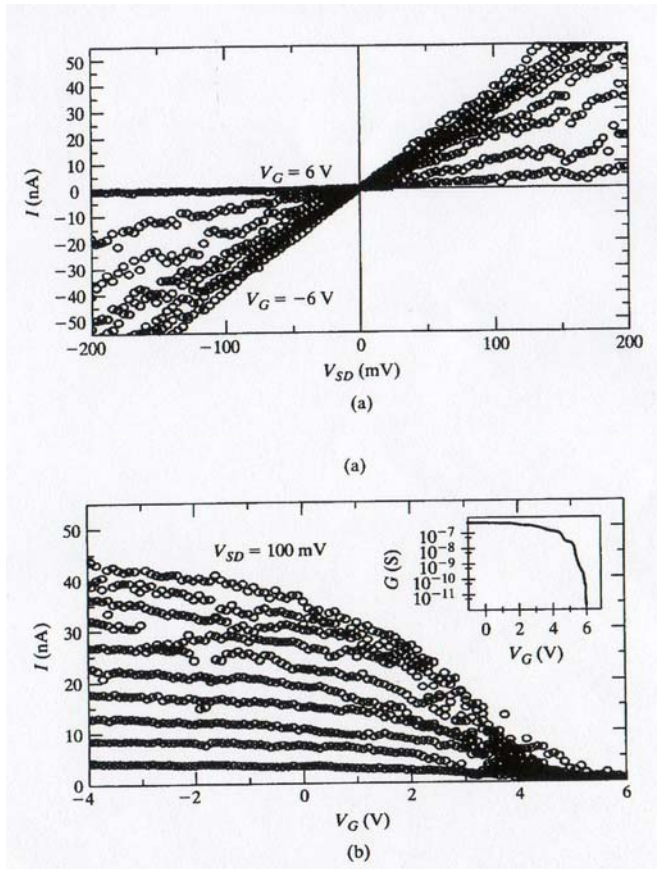


Σχήμα 3.1: Χρήση νανოსωλήνα άνθρακα ως ημιαγωγού.



Σχήμα 3.2: Αποτύπωση μιας εφαρμογής των νανοςωλήνων άνθρακα στην κατασκευή ενός FET.





Σχήμα 3.3: Το ρεύμα πηγής υποδοχής  $I_{SD}$  που ρέει στο νανοαγωγό , μεταβάλλεται δραματικά ως συνάρτηση της τάσης  $V_{GATE}$  .

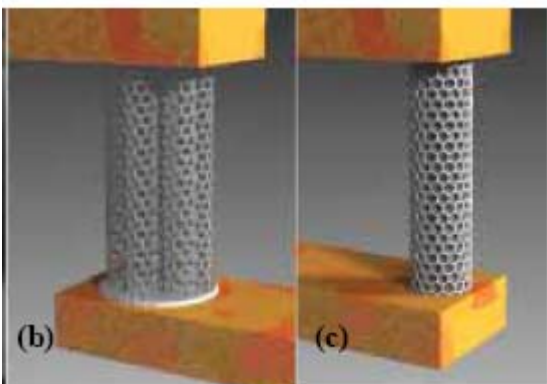
Αρχικά υποτέθηκε ότι η τάση στην πύλη μεταβάλλει την αντίσταση του NA , με τον ίδιο τρόπο που η τάση πύλης ενός MOSFET μεταβάλλει την αντίσταση του καναλιού του. Σχετικές έρευνες , ωστόσο απέδειξαν ότι η λειτουργία των FET που υλοποιούνται με NA βασίζεται στα φράγματα Schottky\* που εμφανίζονται στις μεταλλικές επαφές οι οποίες συνδέουν το NA με το περιβάλλον του. Η αύξηση της τάσης πύλης, για παράδειγμα υποβιβάζει εν μέρει τα φράγματα Schottky, με αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης του ρεύματος . Η φυσική των διατάξεων εξαρτάται εφενός από τη μέθοδο κατασκευής αφετέρου από τις συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου, δεδομένου μάλιστα ότι οι επαφές Schottky, είναι ευαίσθητες στην απορρόφηση αερίων. Ωστόσο τα χαρακτηριστικά αυτών των διατάξεων είναι παρόμοια με αυτά των συνηθισμένων FET. Οι πρώιμες υλοποιήσεις των FET με NA μειονεκτούσαν λόγω της χαμηλής διαγωγιμότητας\*. Οι πρόσφατες όμως θετικές εξελίξεις στην κατασκευή τους , τους έφεραν σε πλεονεκτική θέση έναντι των συμβατικών διατάξεων MOSFET της ίδιας κλίμακας μεγέθους.

Από μετρήσεις προέκυψε ότι η διάταξη συμπεριφέρεται ως ένα συνηθισμένο FET , έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου. Σε θερμοκρασία ωστόσο 4K , η διάταξη υιοθετεί τη συμπεριφορά ενός SET . Η κατασκευή διατάξεων NA που να συμπεριφέρονται ως SET σε θερμοκρασία δωματίου , εξασφαλίζεται με τη δημιουργία κάποιου είδους δομική ατέλεια

στο νανοσωλήνα.Μια απότομη κάμψη της δομής δρα ως μονωτικό διάκενο στην επαφή σήραγγας της νησίδας Coulomb.

#### ➤ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ [27]

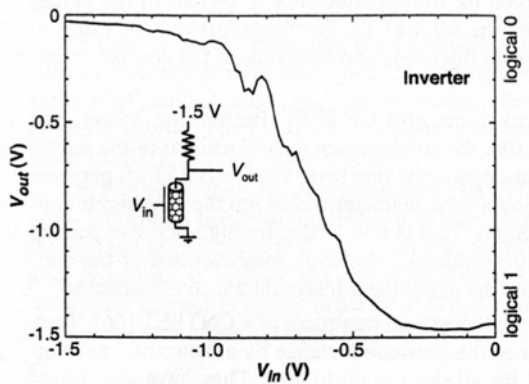
Η κλίμακα των διαστάσεων στην τεχνολογία πυριτίου επηρεάζει τόσο τα τρανζίστορς όσο και τις διασυνδέσεις τους.Η μείωση του πλάτους των καλωδίων αυξάνει την αντίσταση όχι μόνο εξαιτίας της μειωμένης διατομής αλλά επίσης της αυξανόμενης σκέδασης από την επιφάνεια .Το μέταλλο με την καλύτερη αγωγιμότητα είναι το ασήμι.Αν ωστόσο καλώδια μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς εσωτερικές ατέλειες και με τέλειες επιφάνειες θα μπορούσαμε να αποφύγουμε την επιπλέον σκέδαση.Οι νανοσωλήνες άνθρακα εκπληρώνουν αυτές τις προϋποθέσεις σε μεγάλο βαθμό.Προσφέρουν μη παράλληλη συμμετρία στη μια διάσταση με μια ενδογενή τέλεια επιφάνεια.Έχει αποδειχτεί ότι η μεταφορά ηλεκτρονίων κατά μήκος των σωλήνων είναι βαλλιστική μέσα στο μήκος σκέδασης ηλεκτρονίων φωνονίων που είναι της τάξης των μικρομέτρων σε θερμοκρασία δωματίου.Η απουσία σκέδασης επιτρέπει επίσης πολύ μεγαλύτερες πυκνότητες ρευμάτων από ότι στα μέταλλα.



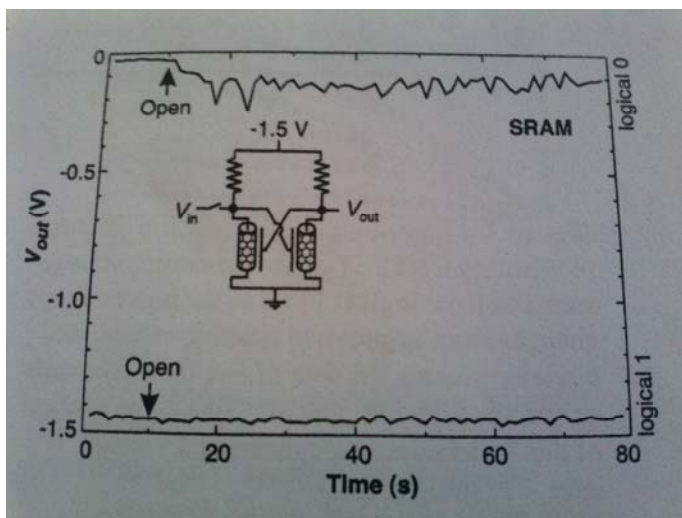
Σχήμα 3.4:Διασυνδέσεις νανοσωλήνων άνθρακα.

#### ➤ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ [29]

Χρησιμοποιώντας το CNTFET σε συνδιασμό με εξωτερικές αντιστάσεις δημιουργήθηκε ένας αντιστροφέας σχήμα 3.5 .Όταν η τάση πύλης μεταβάλλεται από 0 έως -1,5V η εξωτερική τάση αλλάζει από -1,5V σε 0V.Με ένα παρόμοιο τρόπο συνδέοντας 2CNT-FETs παράλληλα με μια κοινή αντίσταση δημιουργήθηκε μια πύλη NOR όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.5: Αντιστροφέας με βάση το CNTFET.



Σχήμα 3.6: Πύλη NOR με χρήση του CNTFET.

Εξαιτίας των υψηλών αντιστάσεων και χωρητικοτήτων η μεταγωγή είναι αργή σε σχέση με τις τυπικές τιμές των σημερινών μικροηλεκτρονικών. Ο διακόπτης από μόνος του έχει ελάχιστες διαστάσεις 1nm και η αντίσταση πρέπει να συγκριθεί με τη χαμηλότερη αντίσταση που ένα κβαντικό σύστημα μπορεί να φτάσει.

## ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ

Η βαλλιστική μεταφορά σε ένα νανოსωλήνα άνθρακα σημαίνει ότι δεν υπάρχει σκέδαση μέσα σ' ένα χαρακτηριστικό μήκος σκέδασης. Η απώλεια ισχύος θα περιοριστεί στην περιοχή επαφής αν το μήκος του σύρματος δεν υπερβαίνει το μήκος σκέδασης. Οι ίδιοι οι νανοςωλήνες πρέπει να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ρευμάτων από ένα πολυκρυσταλλικό μέταλλο. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί σε πολλές εκδόσεις όπου έχει αναφερθεί πυκνότητα πάνω από  $10^{10}$  A/cm<sup>2</sup>.

Σε πειράματα που έγιναν οι νανοςωλήνες άνθρακα άντεξαν σε πυκνότητες ρευμάτων  $5 \cdot 10^9$  A/cm<sup>2</sup> ενώ σε αντίθεση οι χάλκινες διασυνδέσεις απέτυχαν σε πυκνότητες

ρευμάτων περίπου  $10^7$  A/cm<sup>2</sup>. Αυτό δείχνει ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν πολλή μεγαλύτερη αντοχή ενάντια στη φθορά.

## **CNTFET ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ MOSFET**

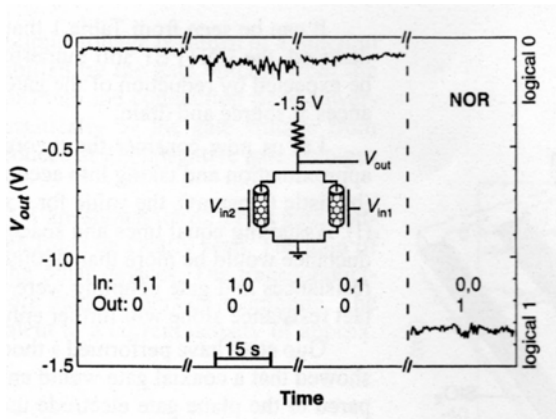
Η επιτυχία στα MOSFET και τα CMOS είναι ότι αποτελούν τα βασικά συστατικά για κυκλώματα χαμηλής ισχύος όπως επεξεργαστές και ελεγκτές. Οι ημιαγωγάιμοι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να λειτουργήσουν με παρόμοιο τρόπο με τα MOSFET πυριτίου. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια σχηματίζουν ένα σύστημα p-ηλεκτρονίων με υψηλή αγωγιμότητα. Αντίθετα με τα MOSFETs πυριτίου το σύστημα ηλεκτρονίων ενός νανοσωλήνα είναι μονοδιάστατο. Τοποθετώντας ένα πεδίο ηλεκτροδίου δίπλα στο νανοσωλήνα μπορεί να επηρεαστεί η αγωγιμότητα. Αυτή η απεικόνιση ονομάζεται CNTFET σε αναλογία με το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου. Καθώς τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των νανοσωλήνων άνθρακα εξαρτώνται από τη χειρομορφία, τη διάμετρο και τις προσμίξεις, τα χαρακτηριστικά των CNTFET μπορούν να ελεγχθούν επιλέγοντας την κατάλληλη μορφολογία του CNT. Οι ημιαγωγάιμοι σωλήνες ενός τοιχώματος ταιριάζουν καλύτερα σε CNTFETs επειδή το σύστημα ηλεκτρονίων δεν παρακάμπτεται από εσωτερικά κελύφη.

### **➤ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΝΗΜΗΣ**

Οι συσκευές μνήμης για αποθήκευση δεδομένων παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές μικροηλεκτρονικών. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας καλής ιδέας είναι η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης, η γρήγορη και τυχαία προσπέλαση δεδομένων, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και η μη πτητικότητα των δεδομένων μετά το κλείσιμο του διακόπτη. Για την τεχνολογία Si αυτό έχει επιτευχθεί διαμέσου συσκευών όπως DRAM, SRAM, EPROM.

### **CNT-SRAMs**

Μετά την κατασκευή μιας NOR πύλης είναι δυνατό προσθέτοντας μια ακόμη αντίσταση και με ενδοσύζευξη των εξόδων στις εισόδους κατασκευάζουμε ένα SRAM κελί όπως φαίνεται στο σχήμα.3.7.

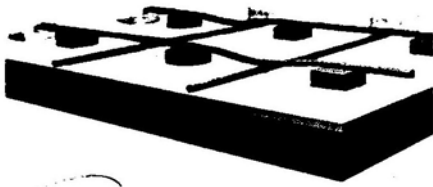


Σχήμα 3.7:Κατασκευή ενός SRAM κελλιού.

Η στατική λειτουργία μνήμης απεικονίζεται γράφοντας ένα λογικό 1 ή λογικό 0 στην είσοδο αποσυνδέοντας την τάση εισόδου.

### ΑΛΛΕΣ ΙΔΕΕΣ ΜΝΗΜΗΣ

Κάθε ιδέα αποθήκευσης πληροφοριών που χρησιμοποιεί τις μεταγωγίμες συσκευές μπορεί να δημιουργηθεί επίσης με στοιχεία που βασίζονται στα CNTFET.Ωστόσο είναι προκλητικό να αναζητάμε νέες ιδέες για μνήμη που ενσωματώνουν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μακρομοριακής συσκευής με πολύ ευεργετικό τρόπο.Μια τέτοια προσπάθεια έχει γίνει από το Harvard πανεπιστήμιο.Η βασική τους ιδέα είναι μια διάταξη νανοσωλήνων άνθρακα με καλώδια νανοσωλήνων χωρισμένα από το άλλο από μικρή απόσταση που παρέχεται από μη αγώγιμα υποστηρικτικά τετράγωνα.(σχήμα 3.8)



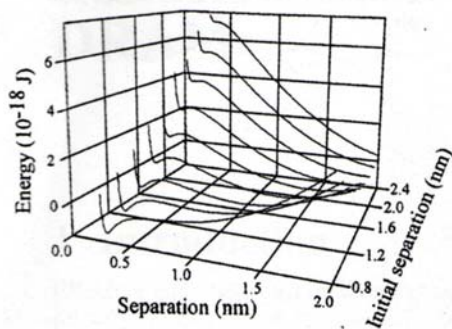
Σχήμα 3.8: Διάταξη νανοσωλήνων άνθρακα με καλώδια νανοσωλήνων χωρισμένα από το άλλο από μικρή απόσταση που παρέχεται από μη αγώγιμα υποστηρικτικά τετράγωνα.

Μπορούμε εύκολα να δούμε από το σχήμα 3.9 ότι για καλύτερο διαχωρισμό των καλωδίων τα πάνω καλώδια έχουν δύο σταθερές θέσεις μία στην ελάχιστη ελαστική τους ενέργεια χωρίς επαφή με τα χαμηλότερα καλώδια που διασταυρώνονται και την άλλη σε επαφή με τα χαμηλότερα καλώδια εξαιτίας των δυνάμεων Van der Waals.Εάν φτάσουμε στο σημείο επαφής , η ηλεκτρική αντίσταση στο σταθερό σημείο αλλάζει τάξεις μεγέθους.Αυτό μπορεί να ανιχνευτεί από ένα αισθητήριο πίνακα και να αξιοποιηθεί για

αποθήκευση bit. Έχουμε έτσι μια συσκευή μη πτητικής μνήμης που διατηρεί τις πληροφορίες μετά το κλείσιμο του διακόπτη.

Εκτιμάται ότι το ελάχιστο μέγεθος κελλιού είναι τετράγωνο μήκους 5nm ,παρέχοντας πυκνότητα σύμπτυξης  $10^{12}$  στοιχεία/cm<sup>2</sup> .Η συχνότητα μεταγωγής εκτιμήθηκε να είναι της τάξης των 100GHz. Το λύγισμα των νανοσωλήνων δεν υπερβαίνει το ελαστικό όριο.

Ακολουθώντας την αρχή της EEPROM μνήμης έχει προταθεί η κατασκευή μνήμης από νανοσωλήνες συνδιάζοντας ημιαγώγιμους και μεταλλικούς νανοσωλήνες σε μια διάταξη με διασταυρωμένους νανοσωλήνες με ένα στρώμα διηλεκτρικού ικανό να αποθηκεύει φορτίο ενδιάμεσα. Κάθε σημείο διασταύρωσης αντιπροσωπεύει ένα τρανζίστορ με πύλες σχηματισμένες από τμήματα των μεταλλικών σωληνών και το κανάλι αντιπροσωπεύεται από τους ημιαγώγιμους νανοσωλήνες.



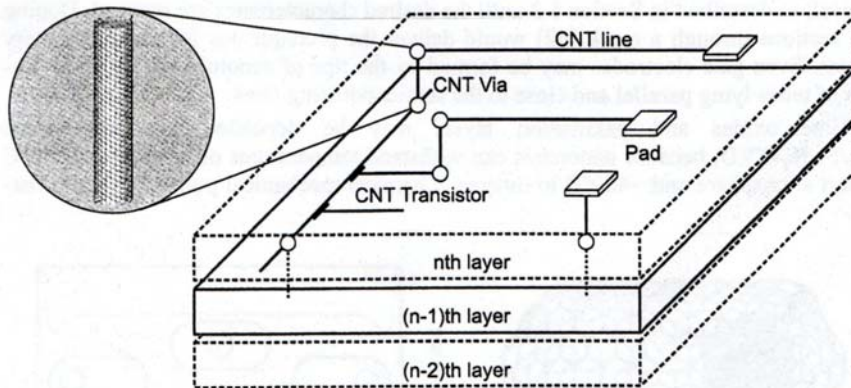
**Σχήμα 3.9:** Τα πάνω καλώδια έχουν δύο σταθερές θέσεις μία στην ελάχιστη ελαστική τους ενέργεια χωρίς επαφή με τα χαμηλότερα καλώδια που διασταυρώνονται και την άλλη σε επαφή με τα χαμηλότερα καλώδια εξαιτίας των δυνάμεων Van der Waals.

Εφαρμόζοντας μια αρκετά υψηλή τάση στο σημείο διασταύρωσης τα φορτία επάγονται στο SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> διηλεκτρικό και παγιδεύονται στο άζωτο τροποποιώντας την κατώτατη τάση του τρανζίστορ .Η αλλαγή κατώτατης τάσης χρησιμοποιείται και αντιπροσωπεύει τις δύο λογικές καταστάσεις.Όπως όλα τα τρανζίστορ συνδέονται σε σειρά.Χρησιμοποιώντας μια συνηθισμένη πύλη και ένα στρώμα διηλεκτρικού SiO<sub>2</sub> πέτυχαν να μεταφέρουν ηλεκτρόνια από ένα νανοσωλήνα στο διηλεκτρικό μιας πύλης.Αυτό το επιπλέον φορτίο θα άλλαζε την τάση ενός CNTFET, το οποίο θα χρησίμευε για λειτουργία μνήμης.

Η αποθήκευση πληροφοριών σε συσκευές νανοσωλήνων αναμφισβήτητα φαίνεται να είναι ελκυστική επειδή η αποθήκευση μπορεί να φτάσει σε διαστάσεις μορίου.Ωστόσο τα στοιχεία αποθήκευσης πρέπει να συνδεθούν σε συγκεκριμένα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα για να ανιχνεύσουν την αποθηκευμένη πληροφορία.Πρέπει να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση νανοσωλήνων σε κανονικές διασταυρωμένες διατάξεις θα είναι πιο εύκολη από τυχαία δίκτυα.

## ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΜΙΑΣ ΕΞ΄ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ CNT ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΤΗ ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Υποθέτοντας ότι είναι δυνατό να τοποθετήσουμε τους νανოსωλήνες με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά στην κορυφή ενός επίπεδου μονωτικού στρώματος μπορούμε να φανταστούμε την εικόνα που φαίνεται στο σχήμα 3.10 .



Σχήμα 3.10:Νανοςωλήνες στην κορυφή ενός επίπεδου μονωτικού στρώματος.

Τα τρανζίστορ όπως και οι διασυνδέσεις φτιάχνονται από τους νανοςωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων με συνδιασμό ημιαγωγίων και μεταλλικών νανοςωλήνων. Ακόμη ηλεκτρόδια πυλών ίσως σχηματιστούν από τις άκρες των νανοςωλήνων ή από μικρές τομές σωλήνων που βρίσκονται παράλληλα και κοντά στους ημιαγωγίους.

Είναι γνωστό ότι οι νανοςωλήνες μπορούν να θεωρηθούν σα μακρομοριακές δομές και η εναπόθεση συγκεκριμένων σωλήνων ίσως επιτευχτεί χρησιμοποιώντας μεθόδους συναρμολόγησης που παρέχονται από τη χημεία.

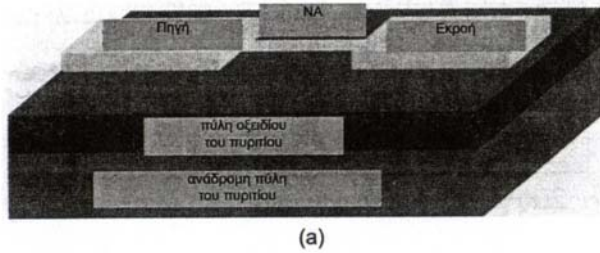
### 3.6 ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΟΙ ΝΑΝΟΑΓΩΓΟΙ ΣΕ ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ FET ΚΑΙ SET [25]

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάσαμε την υλοποίηση ηλεκτρικά αγωγίων οδεύσεων (καναλιών) σε διατάξεις FET και SET μέσω ημιαγωγίων νανοςωλήνων άνθρακα. Στην ενότητα αυτή θα συζητήσουμε παρόμοιες χρήσεις των κβαντικών καλωδίων ως νανοκαλωδίων με ιδιότητες ημιαγωγού. Η διάμετρος ενός τυπικού ημιαγωγίμου NW κυμαίνεται από 10-100nm.

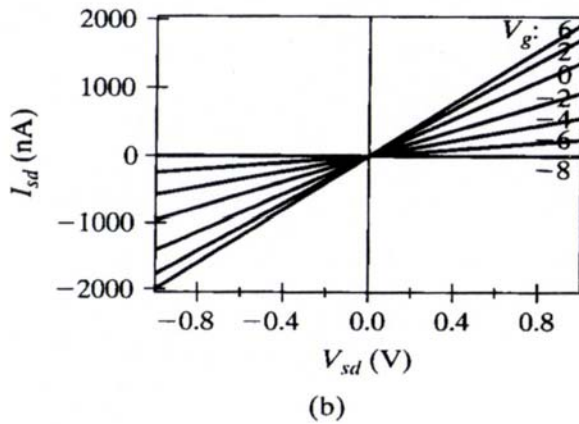
Η συναφής αναπτυσσόμενη τεχνολογία μπορεί να εξασφαλίσει νανοκαλώδια με αρκετά μεγάλο μήκος και μικρό αριθμό δομικών ατελειών. Επιπλέον είναι εφικτή η κατασκευή νανοκαλωδίων τύπου -n ή -p. Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί ποικίλλες διατάξεις που τα χρησιμοποιούν.

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ένα FET που υλοποιείται με χρήση νανοκαλωδίου. Η γεωμετρική του δομή είναι παρόμοια με αυτή του FET στο οποίο χρησιμοποιείται

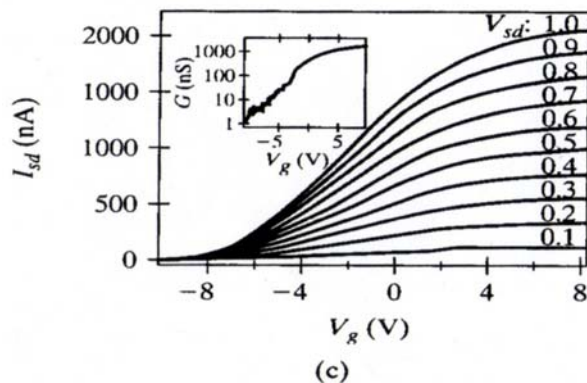
NA. Στην περίπτωση αυτή το νανοκαλώδιο αντικαθιστά το νανοσωλήνα και λειτουργεί ως κανάλι μεταξύ πηγής και υποδοχής. Η σχέση του ρεύματος πηγής-εκροής με την τάση πηγής υποδοχής για ένα καλώδιο από GaN διαμέτρου 17,6nm παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12. Επίσης η σχέση του ρεύματος με την τάση πύλης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13. Οι μετρήσεις από τις οποίες προκύπτουν τα εν λόγω διαγράμματα, διενεργήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.



Σχήμα 3.11: FET με χρήση νανοκαλωδίων.

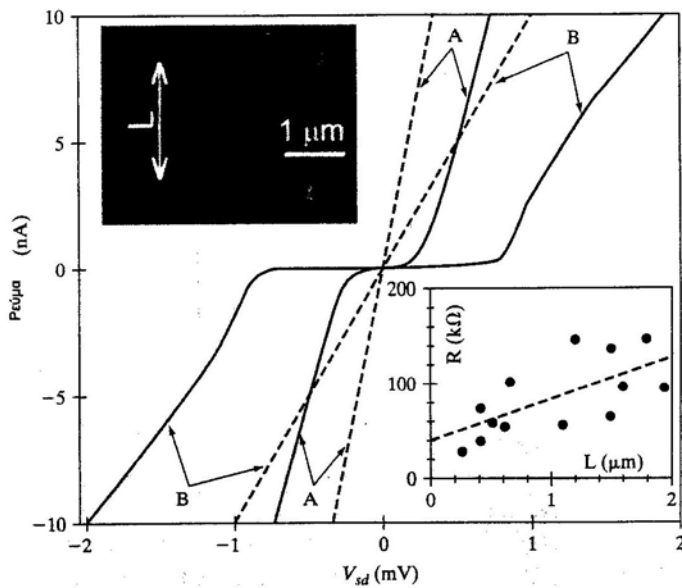


Σχήμα 3.12: Η σχέση του ρεύματος πηγής-εκροής με την τάση.



Σχήμα 3.13: Η σχέση του ρεύματος με την τάση πύλης.





**Σχήμα 3.14:** Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος τάσης σε θερμοκρασία δωματίου , FET νανοσωλήνων InP τύπου -n.

Όπως με τα FETs NA , ημιαγωγία FETs νανοκαλωδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή SETs σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες .Οι διακεκομμένες γραμμές για παράδειγμα στο διάγραμμα του σχήματος 3.14 περιγράφουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος τάσης σε θερμοκρασία δωματίου , FET νανοσωλήνων InP τύπου - n.Είναι φανερό ότι το κανάλι είναι ωμικό.

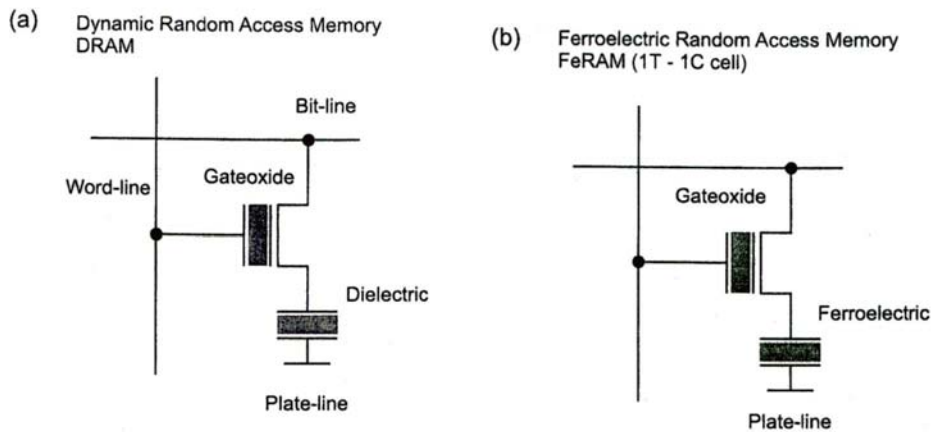
### 3.7 ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΛΙΟΥ [29]

Η δισταθής υστέρηση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού προσφέρει τη δυνατότητα να αναπτυχθούν ηλεκτρικά μεταγωγίμες , μη πτητικές συσκευές αποθήκευσης δεδομένων.Το στοιχείο που εμπλέκεται στην σιδηρομαγνητική αποθήκευση δεδομένων είναι ένας πυκνωτής που αποτελείται από ένα λεπτό σιδηρομαγνητικό υμένα ανάμεσα σε δύο αγώγιμα ηλεκτρόδια .Η διεύθυνση πόλωσης καθορίζεται από ένα παλμό τάσης στο σιδηρομαγνητικό πυκνωτή.Ο σιδηρομαγνητικός πυκνωτής έχει να αντιμετωπίσει την καταστροφή δεδομένων κατά τη διάρκεια της ανάγνωσης και τον επαναπρογραμματισμό των bits έπειτα από κάθε κύκλο ανάγνωσης.Η διαδικασία της ανάγνωσης δεδομένων είναι καταστροφική.Το αποτέλεσμα στη FeRAM (Σιδηρομαγνητική μνήμη τυχαίας προσπέλασης ) είναι μια μεγάλη συσσώρευση κύκλων διαβάσματος γεγονός που ίσως μειώσει τη διάρκεια ζωής της FeRAM εξαιτίας της κόπωσης του σιδηρομαγνητικού υλικού.Επιπλέον κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάγνωσης η αποθήκευση είναι πτητική και τα δεδομένα μπορούν να χαθούν αν γίνει διακοπή ρεύματος.Για να

ξεπεραστεί το καταστρεπτικό σχήμα ανάγνωσης της FeRAM έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες. Αυτή η συσκευή προσφέρει ένα μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με το σιδηρομαγνητικό πυκνωτή. Η ανάγνωση τιμών δεδομένων σ' ένα FeFET είναι μη καταστροφική και δε χρειάζεται επαναπρογραμματισμό. Επιπλέον πλεονέκτημα είναι η μειωμένη κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον το FeFET δεν έχει μόνο λειτουργία μνήμης αλλά επίσης έχει τη λειτουργία των τρανζίστορ. Μπορεί να θεωρηθεί σαν μια λογική συσκευή που απομνημονεύει την κατάσταση της σε μη πτητική διαμόρφωση. Η αρχή λειτουργίας ενός σιδηρομαγνητικού τρανζίστορ επίδρασης πεδίου βασίζεται στο παραδοσιακό Si MOSFET που το διηλεκτρικό της πύλης είναι σιδηρομαγνητικό υλικό.

### ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ

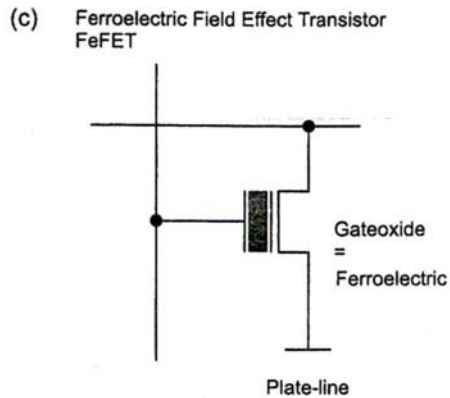
Οι σιδηρομαγνητικές μνήμες βασίζονται στην προσέγγιση 1 τρανζίστορ 1 πυκνωτής (1T1C). Η μνήμη αυτού του τύπου έχει δομή κελιού παρόμοια με αυτή της δυναμικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης. Το τρανζίστορ χωρίζεται από ένα παχύ στρώμα διηλεκτρικού από τον σιδηρομαγνητικό πυκνωτή. Ο πυκνωτής και το τρανζίστορ είναι δύο ξεχωριστές συσκευές που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 100nm. Το πρόβλημα της κατασκευής ενός κελιού 1T1C έχει να κάνει με την αξιοπιστία του σιδηρομαγνητικού υμένα και του τρανζίστορ. Ο λόγος είναι ότι και οι δύο συσκευές χρειάζονται διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης.



Σχήμα 3.15

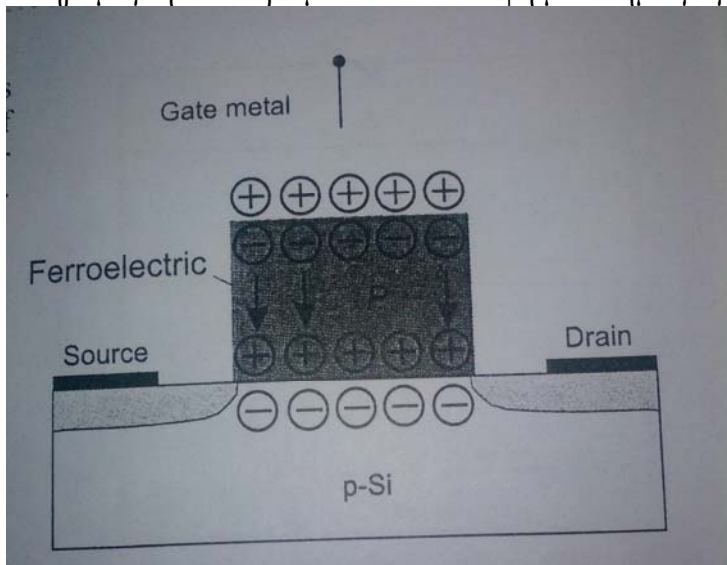
Σχήμα 3.16

Τα σχήματα 3.15-3.16-3.17 αντιπροσωπεύει το σχέδιο ενός 1T1C DRAM κελιού



**Σχήμα 3.17**

Για ένα 1T1C FeRAM κελλί το διηλεκτρικό αντικαθίσταται από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό όπως  $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$  ή  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 15. Το τρανζίστορ σιδηρομαγνητικού πεδίου αποτελείται από ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου που το διηλεκτρικό της πύλης είναι σιδηρομαγνητικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι το σιδηρομαγνητικό στρώμα είναι σε επαφή με το ημιαγώγιμο κανάλι.



**Σχήμα 3.18: Το σχήμα του FeFET.**

Οι ενδιαφέρουσες λειτουργίες μνήμης ενός σιδηρομαγνητικού τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι:

- η μη πτητική αποθήκευση δεδομένων.
- η μη καταστροφική ανάγνωση.
- ο συμπαγής σχεδιασμός του κελλιού με τη δυνατότητα υψηλής πυκνότητας.

## Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ

Η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται ο σχεδιασμός ενός FET βασίζεται πάνω σε ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο πύλης ένα σιδηρομαγνητικό και το ημιαγωγικό υλικό.

Για να αναπτυχθούν ανταγωνιστικά τρανζίστορ σιδηρομαγνητικής πύλης είναι απαραίτητο η διεπιφάνεια ανάμεσα στο πυρίτιο και το σιδηρομαγνητικό υλικό να εκπληρώνει τις επόμενες προδιαγραφές .

- Το πλέγμα ανάμεσα στο Si και τον περοβσκίτη πρέπει να είναι αρκετά μικρό.
- Χημικές αντιδράσεις πρέπει να αποφευχθούν γιατί αυτό θα σήμαινε επιπλέον φάσεις στη διεπιφάνεια Si-σιδηρομαγνήτη..
- Ο αριθμός των διεπιφανειακών καταστάσεων (παγίδες) πρέπει να είναι μικρότερος από  $10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
- Ο σχηματισμός διηλεκτρικών στρωμάτων χαμηλού  $-ε$  κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης πρέπει να αποφευχθεί.

Αν λάβουμε υπόψιν μας όλους αυτούς τους παράγοντες μόνο λίγα οξειδία περοβσκίτη είναι κατάλληλα να αναπτυχθούν κατευθείαν πάνω στο πυρίτιο. Στο παρελθόν αποδείχτηκε ότι η ανάπτυξη περοβσκίτη πάνω στο πυρίτιο είναι μια δουλειά με πολλά εμπόδια .Οι ιδιότητες της διεπιφάνειας Si-περοβσκίτη είναι σημαντική για τη λειτουργία και τις ιδιότητες του σιδηρομαγνητικού τρανζίστορ επίδρασης πεδίου. Στην πραγματικότητα η διεπιφάνεια σιδηρομαγνήτη πυριτίου είναι το πιο κρίσιμο σημείο στην κατασκευή ενός σιδηρομαγνητικού τρανζίστορ επίδρασης πεδίου.

Για να ξεπεράσουμε τα προβλήματα της διεπιφάνειας περοβσκίτη πυριτίου έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές στοιβάδες στρωμάτων και ενδιάμεσα στρώματα.

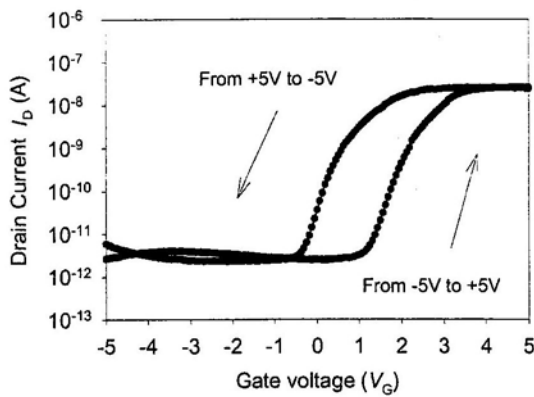
Οι στοιβάδες πυλών σιδηρομαγνητικών τρανζίστορ φαινομένου πεδίου κατηγοριοποιούνται με τον επόμενο τρόπο.

- MFS-μέταλλο-σιδηρομαγνητικό-ημιαγωγός
- MFIS-μέταλλο –σιδηρομαγνητικό-μονωτής-ημιαγωγός
- FMFIS-μέταλλο-σιδηρομαγνητικό-μέταλλο-μονωτής-ημιαγωγός
- MF-ABO<sub>3</sub> Σιδηρομαγνητικό πάνω σε αγωγικό οξείδιο

## ΔΟΜΕΣ MFIS

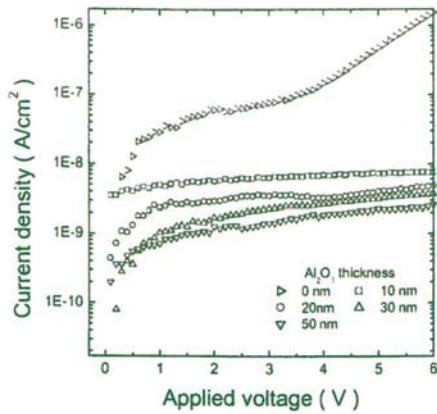
Στις δομές MFIS είναι σημαντικό να επιλέγουμε ένα σιδηρομαγνητικό υμένα με μια μικρή παραμένουσα πολικότητα και να το χρησιμοποιούμε στην κορεσμένη κατάσταση πόλωσης. Για αυτή την εφαρμογή ο KIJIMA χρησιμοποίησε  $(\text{Bi,La})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  [48].

Το  $\text{Pb}_3\text{Ge}_5\text{O}_{11}$  (PGO) είναι γνωστό ως σιδηρομαγνητικό με μικρή παραμένουσα πολικότητα. Η πολικότητα είναι της τάξης των  $10\mu\text{C}/\text{cm}^2$  και αποτελεί ένα ενδιαφέρον υλικό για MFIS δομή. Τοποθετήθηκε PGO σε ενδιάμεσο στρώμα  $(\text{Zr,Hf})\text{O}_2$ . Το σχήμα 3.19 δείχνει το ρεύμα υποδοχής σε σχέση με την τάση της πύλης. Επιπλέον ο χρόνος συγκράτησης για την MFIS δομή ήταν περίπου 60'.



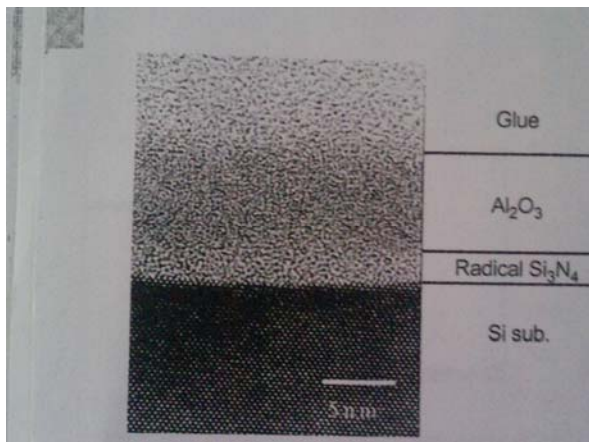
Σχήμα 3.19: Το ρεύμα υποδοχής σε σχέση με την τάση πύλης.

Άλλοι επιστήμονες ανέφεραν τα πλεονεκτήματα του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ως ενδιάμεσου στρώματος [49]. Σε συνδιασμό με το  $\text{Sr}_{0,85}\text{Bi}_{2,4}\text{Ta}_2\text{O}_9$ , η παραμένουσα πολικότητα ήταν  $10\mu\text{C}/\text{cm}^2$  και το απομαγνητίζον πεδίο  $E_c$  ήταν  $37,5\text{kV}/\text{cm}$ . Χρησιμοποιώντας 400nm και 10nm υμένες  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και SBT ένα παράθυρο μνήμης 2,2V έχει επιτευχθεί. Το ρεύμα διαρροής είναι περίπου  $7,6 \cdot 10^{-9} \text{ A}/\text{cm}^2$  στα 6V και ήταν δύο τάξεις μικρότερο από το Pt/SBT. Περισσότερες λεπτομέρειες που αφορούν τη διαρροή φαίνονται στο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Η διαρροή ρευμάτων ανάλογα με το πάχος του  $Al_2O_3$ .

Για την αποφυγή μιας πιθανής οξείδωσης στη διεπιφάνεια του  $Al_2O_3$  ο Fujisaki και ο Ishiwara [50] εισήγαγε ένα ενδιάμεσο στρώμα  $Si_3N_4$  ανάμεσα σε  $Al_2O_3$  και Si. Στο σχήμα 3.20 φαίνεται ότι η επιφάνεια  $Si_3N_4/Si$  δεν οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της μετοξείδωσης του στρώματος  $Al_2O_3$  στους 700 °C.

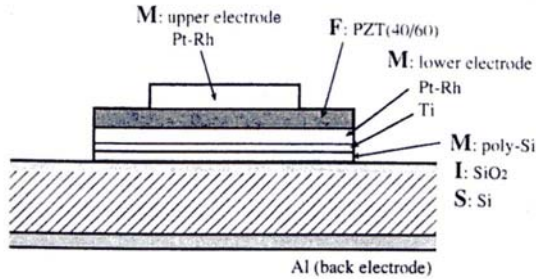


Σχήμα 3.21: Όψη της διατομής MFMIS.

#### ΔΟΜΕΣ MFMIS (μέταλλο, σιδηρομαγνητικό, μέταλλο, μονωτής, ημιαγωγός)

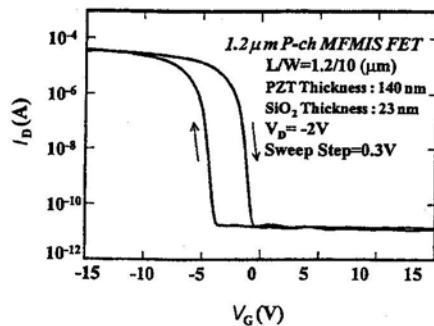
Σ' αυτή τη δομή χρησιμοποιούνται επιπλέον από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη MIS δομή  $Ti/Pt-Rh(M)/PbZr_xTi_{1-x}O_3(F)/Pt-RhTi(M)$ . Το κράμα Pt-Rh δρα σαν φράγμα

μεταξύ Pb και Si. Το πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι η υψηλή ποιότητα της  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  διεπιφάνειας σε σχέση με την παραδοσιακή τεχνολογία MIS σε συνδιασμό με τη μη πτητικότητα της MFM δομής. Η ολοκληρωμένη όψη της διατομής φαίνεται στο σχήμα 3.22.



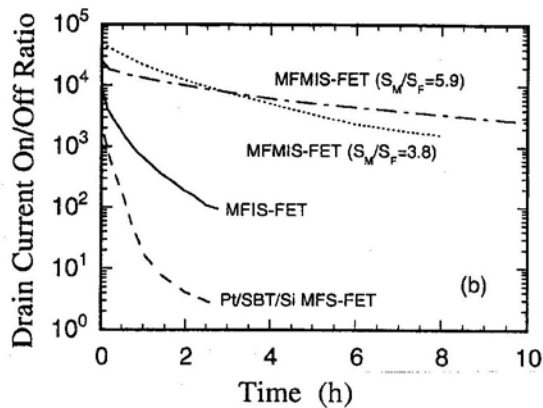
Σχήμα 3.22: Όψη της διατομής MF-MIS δομής.

Η γραφική παράσταση C-V απεικονίζει μια διαφορά σε σχέση με αυτή της δομής MIS. Οι δυο τιμές της χωρητικότητας (max και min) καθορίζονται από την κατεύθυνση της τάσης. Ο χαρακτήρας υστέρησης της C-V καμπύλης είναι αποτέλεσμα της υστέρησης της καμπύλης πόλωσης του σιδηρομαγνητικού στρώματος. Στο σχήμα 3.23 ένα άλλο χαρακτηριστικό του FeFET παρουσιάζεται, το ρεύμα  $I_d$  της πηγής-υποδοχής και της τάσης πύλης  $V_{GS}$ .



Σχήμα 3.23: Το ρεύμα  $I_d$  της πηγής-υποδοχής και της τάσης πύλης  $V_{GS}$ .

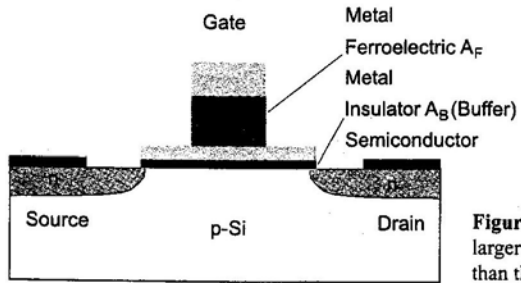
Η καμπύλη υπολογίστηκε πάνω σε μια στοίβα  $\text{Ir}/\text{IrO}_2/\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3/\text{Ir}/\text{IrO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Τα ρεύματα  $I_{on}$  και  $I_{off}$  υπολογίστηκαν στα  $-15$  και  $15\text{V}$  αντίστοιχα. Η αναλογία της κατάστασης off είναι  $10^{-6}$  και χρησιμοποιείται για τη μη πτητική δυαδική αποθήκευση δεδομένων. Εάν το κανάλι πηγής υποδοχής είναι στην κατάσταση on ή στην κατάσταση off ανιχνεύεται από περιφερειακούς αισθητήρες on. Το παράθυρο μνήμης είναι ορατό και είναι στα  $3,3\text{V}$ . Η τάση υποδοχής πηγής σταθεροποιήθηκε στα  $-2\text{V}$  [51]. Το κλάσμα του ρεύματος on-off της υποδοχής χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο χρόνος συγκράτησης ενός FeFET. Το σχήμα 3.24 συγκρίνει τα αποτελέσματα μερικών παραδειγμάτων βασισμένα σε διαφορετικά FeFET.



**Σχήμα 3.24:** Ο λόγος on-off του ρεύματος πηγής υποδοχής σαν συνάρτηση του χρόνου για δομές MFS, MFIS και MFMS –FETs.

Με σκοπό τη βελτίωση της MFMS δομής η χωρητικότητα του ενδιάμεσου στρώματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη π.χ ένα λεπτό στρώμα με υψηλό διηλεκτρικό είναι προτιμότερο. Από την άλλη πλευρά, το σιδηρομαγνητικό στρώμα πρέπει να έχει μια παραμένουσα πολικότητα που δεν είναι μεγάλη. Το  $\epsilon$  πρέπει να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με το  $I$  και η πυκνότητα πρέπει να είναι μεγάλη για να διατηρηθεί ικανοποιητική πτώση τάσης κατά μήκος του σιδηρομαγνητικού στρώματος. Το σχήμα 24 δείχνει μια δομή MIMFS στην οποία το MFMS έχει μικρότερη περιοχή από το MIS. Χρησιμοποιώντας αυτή τη δομή το MFMS FeFET κατασκευάστηκε από τον Tokumitsu [52]. Η στοίβα πύλης ήταν  $\text{Pt}(M) / \text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9(\text{F})\text{Pt}(M) / \text{SrTa}_2\text{O}_6(\text{I}_1) / \text{SiON}(\text{I}_2) / \text{Si}$ . Οι λόγοι για να χρησιμοποιηθεί μια τόσο πολύπλοκη αλληλουχία στρώματος είναι οι ακόλουθοι:





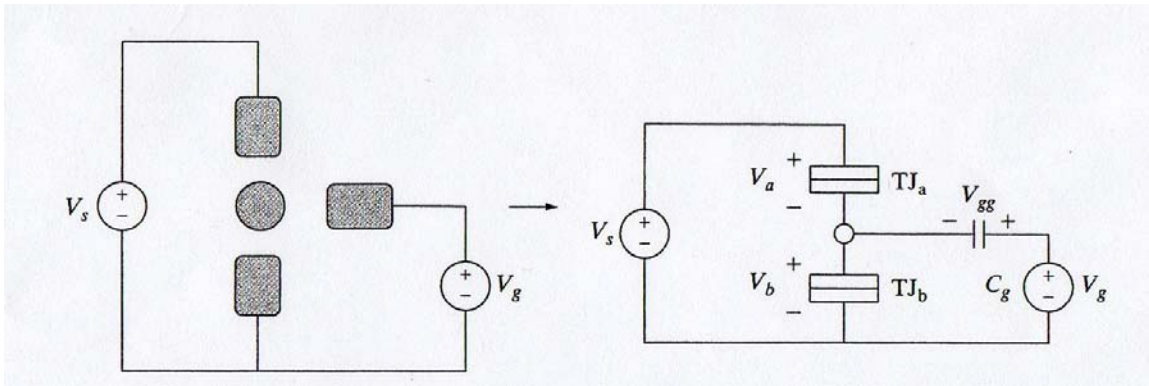
**Figure 18:** FeFET with a larger area  $A_B$  of the MIS than that of the MFM  $A_F$ .

**Σχήμα 3.25:** Μια δομή MIMFS στην οποία το MFM έχει μικρότερη περιοχή από το MIS. Χρησιμοποιώντας αυτή τη δομή το MFMIS FeFET κατασκευάστηκε από τον Tokumitsu.

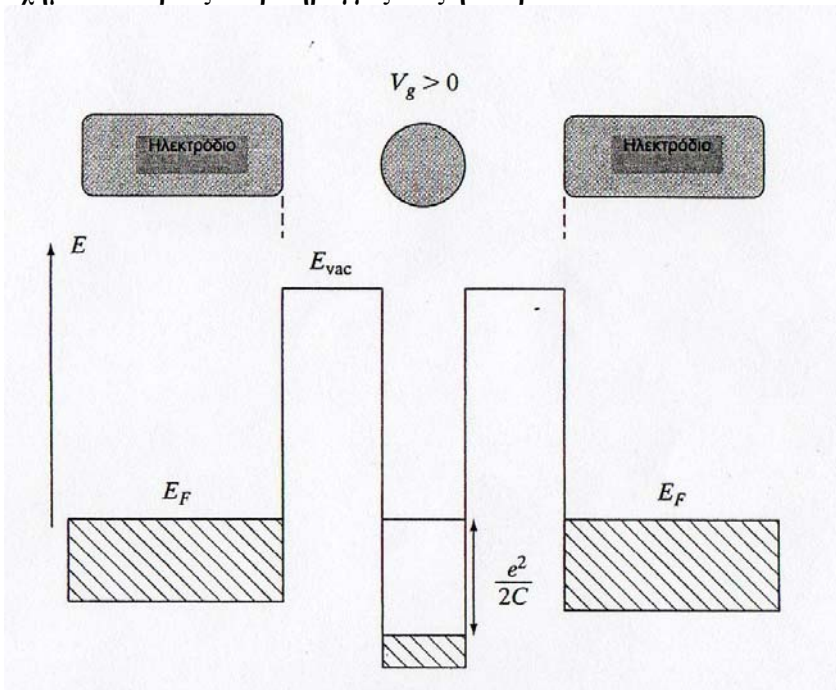
α) Το  $\text{SiON}$  σχηματίζει καλή διεπιφάνεια με το Si με χαμηλή πυκνότητα παγίδευσης. β) Επιπλέον είναι ένα φράγμα διάχυσης για το οξυγόνο και εμποδίζει το σχηματισμό  $\text{SiO}_2$  πάνω στην επιφάνεια Si. γ) Το  $\text{SrTa}_2\text{O}_6$  παίζει το ρόλο ενός διηλεκτρικού μονωτή με υψηλό  $\epsilon$  ( $\epsilon=110$ ). Η Pt είναι ένα σύνηθες υλικό για σιδηρομαγνητικούς πυκνωτές. Η περιοχή MFM ήταν 6 φορές μικρότερη από αυτή της δομής  $\text{MI}_1\text{I}_2$ . Σ. Με αυτόν τον τρόπο η ισοδύναμη παραμένουσα πολικότητα  $P_r$  και ακολουθεί η χωρητικότητα του MFM.

### 3.8 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ [25]

Για να ελέγξουμε πιο αποτελεσματικά τη διπλή επαφή σήραγγας, μπορούμε να προσθέσουμε έναν ακροδέκτη πύλης στον οποίο εφαρμόζουμε μια τάση πύλης  $V_g$ . Ο ακροδέκτης είναι απομονωμένος από τη νησίδα, μέσω ενός ιδανικού πυκνωτή (που δεν εμφανίζει ρεύμα σήραγγας) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.26. Η διάταξη αυτή καλείται τρανζίστορ σήραγγας ενός ηλεκτρονίου (SET).



Σχήμα 3.26: Τρανζίστορ σήραγγας ενός ηλεκτρονίου.



Σχήμα 3.27: Η εφαρμογή της τάσης  $V_g > 0$ , μειώνει τη στάθμη Fermi της νησίδας.

Ανάλογα με το μέγεθος της τάσης που εφαρμόζεται, το άνω όριο του ενεργειακού φράγματος μπορεί να βρίσκεται πάνω, κάτω ή στο ίδιο ύψος με τις στάθμες Fermi των ηλεκτροδίων αριστερά και δεξιά της νησίδας. Έτσι το μέγεθος της τάσης πηγής υποδοχής  $V_s$ , που απαιτείται για την οδήγηση του ρεύματος της διάταξης, ελέγχεται από την πύλη.

Η θερμοκρασία παίζει και στην περίπτωση που εξετάζουμε, καταλυτικό ρόλο σε ότι αφορά την εκδήλωση των φαινομένων. Όταν είναι χαμηλή τα φαινόμενα εύκολα παρατηρούνται, αφού εκδηλώνονται με τρόπο εμφανή. Καθώς όμως αυξάνεται τείνουν να απαλειφθούν. Ωστόσο με την κατάλληλη επιλογή μιας επαρκώς μικρή χωρητικότητα, τα φαινόμενα είναι επαρκώς παρατηρήσιμα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27.

Το τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου περιγράφουν την πιθανή υλοποίηση ηλεκτρονικών διατάξεων μεγάλης πυκνότητας και ταχύτητας. Ταυτόχρονα εξασφαλίζουν χαμηλό επίπεδο θερμικών απωλειών. Ωστόσο, συνήθως χαρακτηρίζονται από μικρή απόδοση και ευαισθησία στις τυχαίες διακυμάνσεις φορτίου. Για να εξετάσουμε τις επιδράσεις της

τυχαίας διακύμανσης φορτίου, ως θεωρήσουμε μια δομική ατέλεια που οφείλεται σ' ένα φορτίο  $q_e$  παγιδευμένο μέσα στο μονωτικό οξειδίο ενός SET. Το πεδίο αυτού του φορτίου πολώνει τη νησίδα δημιουργώντας πάνω σε αυτή φορτίο-είδωλο. Αυτό το είδωλο αλληλεπιδρά με το πραγματικό φορτίο, προκαλώντας μεταβολές. Μεταβάλλει για παράδειγμα τις συνθήκες φραγής Coulomb.

Στα μακροσκοπικά κυκλώματα η παρουσία αυτών των σποραδικών φορτίων, δεν επηρεάζει υπο φυσιολογικές συνθήκες τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα στο κενό το

ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί το φορτίο  $q_e$  είναι,  $E = \Gamma q_e \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ,

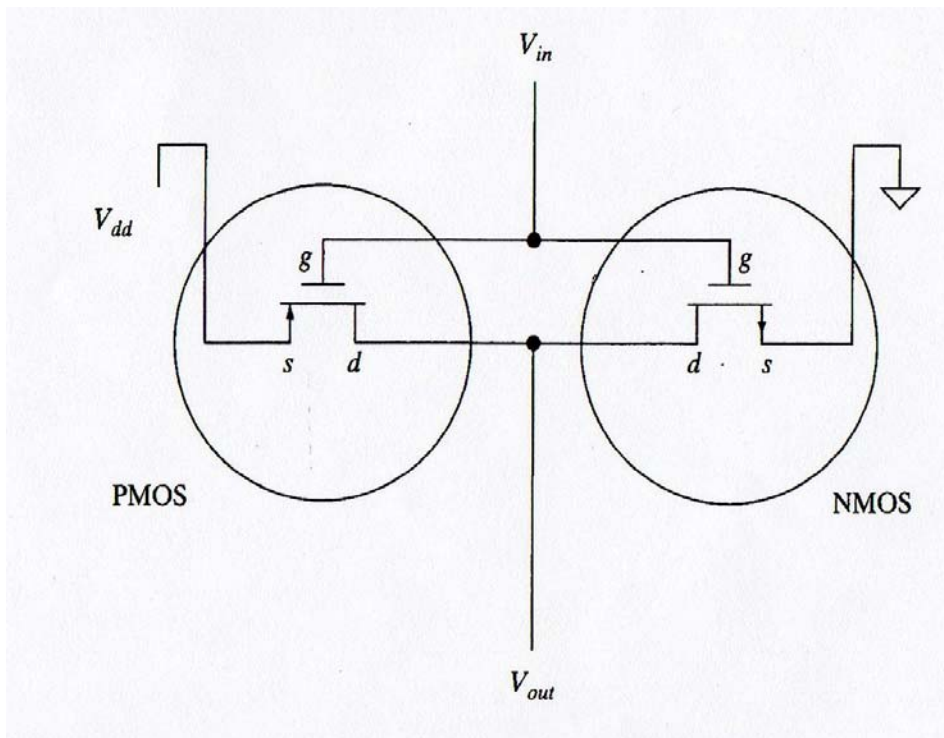
Η προηγούμενη σχέση υπολογίζει την ένταση του πεδίου στα σημεία  $r$  όπου  $r$  η ακτινική απόσταση από το φορτίο. Σε μια απόσταση 1000nm για παράδειγμα το μέτρο της έντασης είναι  $|E| = 1.4 \times 10^3$  V/m. Ωστόσο αν η απόσταση μειωθεί στο 1nm το μέτρο της έντασης είναι  $1.4 \times 10^9$ . Δηλαδή στη νανομετρική κλίμακα το πεδίο ενός μόνο ηλεκτρονίου είναι ισχυρό. Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι οι διατάξεις που λειτουργούν με ακρίβεια ενός ηλεκτρονίου δεν έχουν μόνο πλεονεκτήματα. Η αρνητική τους όψη εμφανίζεται ξεκάθαρα, λόγω χάριν στη λειτουργία λογικών κυκλωμάτων που βασίζονται σε τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου. Στην περίπτωση αυτή μια τυχαία διακύμανση φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε λογικά σφάλματα ή μη αξιόπιστη λειτουργία. Τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που εμφανίζουν οι μνήμες SET. Επίσης προτάθηκαν νέοι τρόποι κατασκευής λογικών κυκλωμάτων SET, που αποσκοπούν στη μείωση της ευαισθησίας τους στις τυχαίες διακυμάνσεις φορτίου.

Το πολύ κοντινό πεδίο που δημιουργούν τα απλά αυτά φορτία, είναι τόσο ισχυρό, ώστε οι σημειακές νοθεύσεις μπορεί να μετακινηθούν εκτός του στρώματος του οξειδίου, με αποτέλεσμα την ελάττωση των επιδράσεων τους. Το φαινόμενο αυτό καλείται αυτοφυής απονόθευση. Ωστόσο αυτή η ερμηνεία αποτελεί ακόμη σημείο αντιπαραθέσεων. Επιπλέον, η μετακίνηση αυτών των σποραδικών νοθεύσεων φορτίου, ανεξάρτητα από το αν συνεισφέρουν ή όχι στην απονόθευση, καθιστά τη συμπεριφορά του κυκλώματος χρονικά εξαρτώμενη γεγονός που δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό ως λειτουργικό χαρακτηριστικό.

Η χρήση μιας και μόνο νησίδας Coulomb για την υλοποίηση ενός SET, δεν αποτελεί μονόδρομο. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον ίδιο σκοπό ολόκληρες περιοχές αποτελούμενες από τέτοιες νησίδες (arrays of islands). Αυτές οι περιοχές επαφών σήραγγας, εμφανίζουν συνήθως καλύτερη συμπεριφορά από τα SET μιας νησίδας. Είναι βέβαια μεγαλύτερες και αρκετά πολύπλοκες ως προς τη λειτουργία τους.

## ΛΟΓΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ SET

Η πλειοψηφία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων της τρέχουσας γενιάς χρησιμοποιεί την τεχνολογία CMOS. Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζεται ένας αντιστροφείας CMOS, στον οποίο η τάση  $V_{dd}$  αναπαριστά τη λογική τιμή 1.



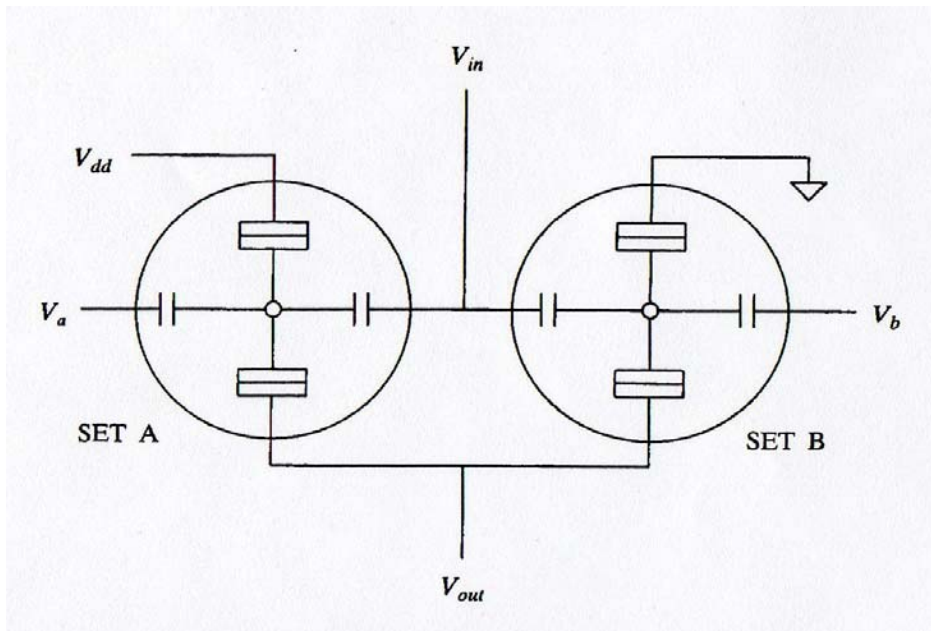
Σχήμα 3.28: Αντιστροφέας CMOS.

Το κύκλωμα λειτουργεί ως ακολούθως. Αν η τάση  $V_{in}$  είναι περίπου ίση με τη  $V_{dd}$  τότε  $V_{gs} \approx 0$ , για τη διάταξη PMOS. Για να ενεργοποιηθεί το τρανζίστορ PMOS πρέπει να είναι  $V_{gs} < -|V_t|$  όπου  $|V_t|$  είναι το μέτρο του κατωφλιού τάσης με τιμή 1 ή 2V. Επειδή  $|V_t| < V_{dd}$  η διάταξη δεν ενεργοποιείται. Ωστόσο αφού είναι  $V_{gs} \approx V_{dd} > V_t$  για το NMOS το τρανζίστορ αυτό ενεργοποιείται και συνεπώς  $V_{out} \approx 0$ . Παράγεται δηλαδή το λογικό 0.

Αν η τάση εισόδου είναι χαμηλή ( $V_{in} \approx 0$ ), τότε αντίστοιχα είναι  $V_{gs} \approx 0$  για το NMOS τρανζίστορ, καθιστώντας το ανενεργό. Ωστόσο  $V_{gs} \approx -V_{dd} < -|V_t|$  για τη διάταξη PMOS, συνεπώς το τρανζίστορ αυτό είναι ενεργό συνδέοντας την έξοδο με τη  $V_{dd}$ . Άρα η έξοδος αντιστοιχεί στη λογική τιμή 1.

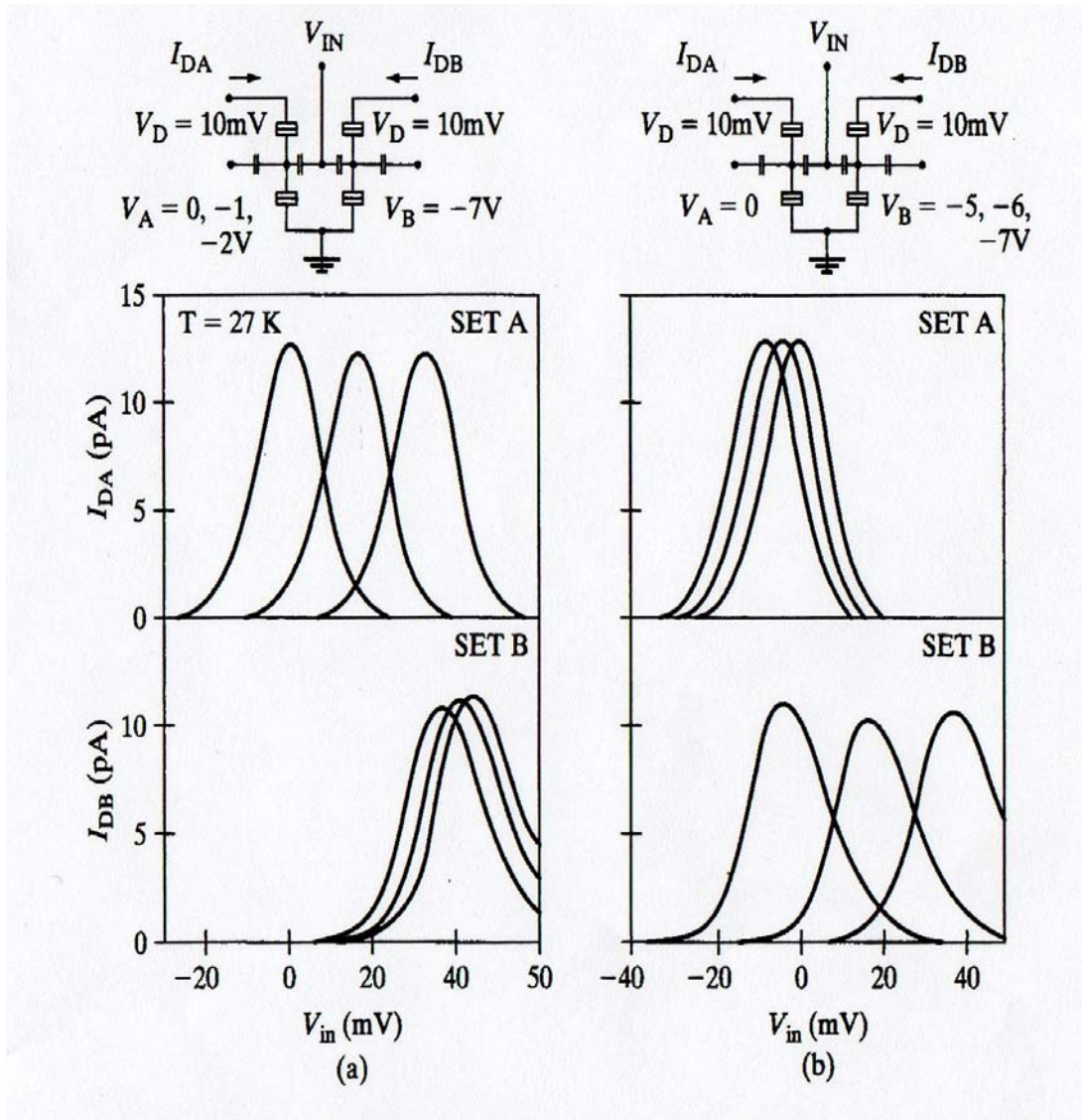
Τα τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου προτείνονται ως κατάλληλα για υλοποίηση λογικών συναρτήσεων όπως οι αναστροφείς, διότι λόγω του μικρού τους μεγέθους επιτρέπουν την κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων μεγάλης πυκνότητας. Στην πραγματικότητα η προσοχή μας εστιάζεται στην κατασκευή λογικών κυκλωμάτων SET που χρησιμοποιούν τυπολογίες παρόμοιες με αυτές των διατάξεων CMOS.

Αυτού του είδους τα κυκλώματα ονομάζονται λογικές διατάξεις ελέγχου τάσης, αφού τα χαρακτηριστικά τους βασίζονται στον έλεγχο της στάθμης δυναμικού, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα κυκλώματα CMOS. Μια άλλη κατηγορία διατάξεων είναι οι λεγόμενες λογικές διατάξεις ελέγχου φορτίου, στις οποίες η μονάδα πληροφορίας (bit) αναπαρίσταται με βάση την παρουσία ή την απουσία φορτίου. Τα τρανζίστορ SET έχουν τη δυνατότητα υλοποίησης και αυτών των διατάξεων.

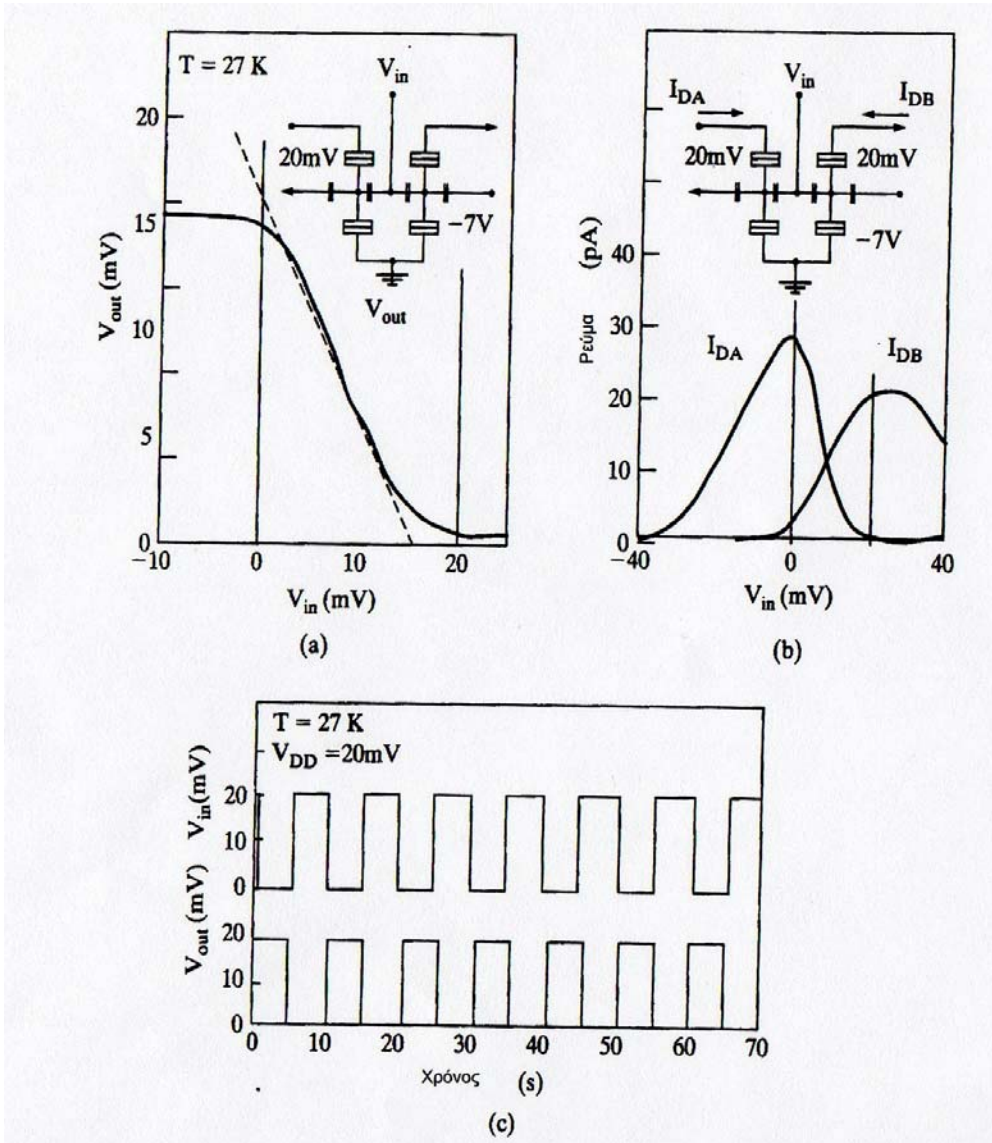


Σχήμα 3.29: Αντιστροφέας SET μέσω τρανζίστορ set.

Στο σχήμα 3.29 παρουσιάζεται ένας αντιστροφέας SET που υλοποιείται με βάση τον έλεγχο τάσης. Έστω ότι η διάταξη SET A είναι ανενεργός (το κύκλωμα μεταξύ βάσης και κορυφής είναι ανοιχτό γιατί είναι στην περιοχή της φραγής Coulomb) και η διάταξη SET B ενεργός (υπάρχει ρεύμα σήραγγας μεταξύ των ηλεκτροδίων βάσης και κορυφής). Τότε  $V_{out} = 0$ , δηλαδή αποδίδεται από το λογικό κύκλωμα τιμή 0. Αν συμβαίνει το αντίθετο τότε  $V_{out} = V_{dd}$  αποδίδοντας τη λογική τιμή 1. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις τάσεις  $V_a$  και  $V_b$ , μπορούμε να εξασφαλίσουμε την επιθυμητή κατάσταση των τρανζίστορ SET όπως φαίνεται στο σχήμα 3.30 και 3.31. Επισημαίνουμε ωστόσο ότι η χαρακτηριστική καμπύλη εισόδου-εξόδου της διάταξης εμφανίζει πολλαπλά σημεία αιχμής. Δηλαδή η τάση εισόδου δεν προκαλεί στη διάταξη σημείο κορεσμού. Συνεπώς μια τέτοιου τύπου σχεδίαση είναι ευαίσθητη τόσο στο θόρυβο όσο και στις διακυμάνσεις της τάσης.



Σχήμα 3.30:Μετρήσιμα ρεύματα  $I_{DA}$  και  $I_{DB}$  της εκροής μιας διάταξης SET , ως συνάρτηση της τάσης εισόδου  $V_{in}$  που εφαρμόζεται στην πύλη που βρίσκεται στην κορυφή του διαγράμματος.α)Η μεταβολή της  $V_A$  από 0 σε  $-2\text{V}$  , μετατοπίζει την καμπύλη ρεύματος στο SET A προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα  $V_{in}$ .Το αντίστοιχο ρεύμα του SET B υφίσταται πολλή μικρότερη μετατόπιση.β) Στην περίπτωση αυτή η  $V_B$  μεταβάλλεται αντίθετα από την περίπτωση α.

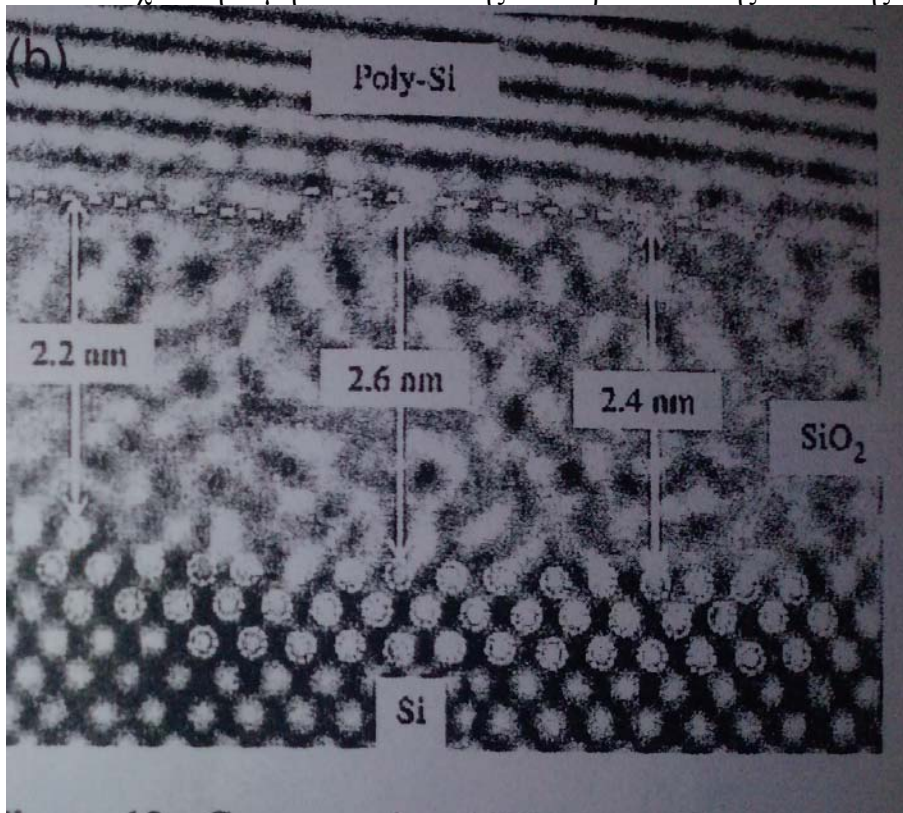


Σχήμα 3.31:α)Χαρακτηριστική καμπύλη εισόδου εξόδου του αντιστροφέα όταν για την παροχή ισχύος εφαρμόζεται τάση 20 mV.β)Οι αντίστοιχες καμπύλες ρεύματος τάσης των SET του αντιστροφέα όταν η τάση στην υποδοχή είναι 20 mV.γ) Κυματομορφή τάσης εξόδου όταν στην είσοδο εφαρμόζεται κυματομορφή τετραγωνικών παλμών πλάτους 20mV. Οι τάσεις  $V_a$  και  $V_b$  είναι 0 και -7V αντίστοιχα για όλα τα διαγράμματα του σχήματος.

Οι λογικές διατάξεις ελέγχου τάσης που υλοποιούνται με χρήση SET, παρουσιάζουν απώλειες που οφείλονται στη διαρροή στατικών ρευμάτων. Από την εξέταση ορισμένων διατάξεων προέκυψαν απώλειες της τάξης του  $10^{-7}$  W/τρανζίστορ. Η τιμή αυτή της ισχύος φαίνεται μεν σχετικά μικρή μπορεί όμως να είναι αρκετά μεγάλη αν ληφθεί υπόψη ο βαθμός ολοκλήρωσης των κυκλωμάτων. Αν υποθέσουμε ότι κάθε SET καταλαμβάνει επιφάνεια  $5\text{nm}^2$  δηλαδή ότι σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό περιέχονται  $4 \times 10^{12}$  τρανζίστορ, οι απώλειες ανέρχονται στην κολοσσιαία τιμή των  $4 \times 10^5$  w/cm<sup>2</sup>.

### 3.9 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ [29]

Το οξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται σαν διηλεκτρικό πυλόν από το 1957. Για τα σημερινά MOSFETs χρησιμοποιείται πάχος οξειδίου για την πύλη 1,5-2nm. Αυτά τα πολύ λεπτά διηλεκτρικά στρώματα αναπτύσσονται με μια συγκεκριμένη θερμική διάχυση\* χρησιμοποιώντας οξυγόνο ή μια μίξη από οξειδωτικά αέρια σε θερμοκρασίες ανάμεσα στους 900° και τους 1000°C. Πριν από την οξείδωση η επιφάνεια του πυριτίου πρέπει να καθαριστεί προσεκτικά με χημικά υψηλής καθαρότητας. Το σχήμα 3.32 δείχνει μικρογραφίες MOS δομών με στρώμα οξειδίου 2,4 και 2,7nm πάχους αντίστοιχα. Η εικόνα δείχνει τη δομή του κόκκου της πολυκρυσταλλικής σιλικόνης στην επαφή πυλών.



Σχήμα 3.32: Μικρογραφίες MOS δομών με στρώμα οξειδίου 2,4 και 2,7nm πάχους αντίστοιχα.



Ωστόσο η λέπτυνση του πάχους του οξειδίου αυξάνει σοβαρά τα τεχνολογικά προβλήματα.

1)Μεταβολή του διηλεκτρικού πάχους

2)Διείσδυση ακαθαρσιών ιδιαίτερα βορίου από την πύλη πολυπυριτίου με υψηλές προσμίξεις.

3)Αξιοπιστία και μικρό μήκος ζωής για συσκευές με πολύ λεπτά οξείδια.

4)Η διαρροή ρεύματος των πυλών αυξάνει εκθετικά με τη μείωση του πάχους

Η διαρροή ρεύματος μιας πύλης πόλωσης 1V μεταβάλλεται από  $1 \cdot 10^{-12}$  A/cm<sup>2</sup> στα 3,5nm στα 10 A/cm<sup>2</sup> που είναι 13 τάξεις μεγέθους διαφορά. Το πρακτικό όριο της πυκνότητας SiO<sub>2</sub> σε μια συσκευή MOSFET επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα διαρροής γίνεται ίσο με την κατάσταση off της πηγής .

Για τις εφαρμογές της χαμηλής ισχύος στην περιοχή του φορητού εξοπλισμού(κινητά τηλέφωνα) η διαρροή της πύλης πάνω από το ρεύμα off είναι μη αποδεκτή. Η διαρροή ρεύματος πύλης μειώνει τη ζωή της μπαταρίας στην κατάσταση stand-by. Το ρεύμα on ρέει κατά τη διάρκεια της μεταγωγής . Τα ρεύματα διαρροής πάνω από 1 A/cm<sup>2</sup> δεν είναι αποδεκτά. Για εφαρμογές υψηλής απόδοσης όπως οι desktop υπολογιστές η κατανάλωση ισχύος στην κατάσταση stand-by είναι μεγάλο θέμα. Ωστόσο οι απώλειες ισχύος γίνονται κρίσιμες στα 10 A/cm<sup>2</sup> .

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για να βελτιωθεί η πυκνότητα του οξειδίου .Μια πετυχημένη προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε στην προχωρημένη CMOS παραγωγή και είναι η εισαγωγή του αζώτου μέσα στο SiO<sub>2</sub> που καταλήγει στο σχηματισμό SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>. Το άζωτο χαμηλώνει το θερμικό ρυθμό ανάπτυξης και βελτιώνει την ομοιομορφία της διεπιφάνειας .Επιπλέον μειώνει τη διείσδυση του βορίου και κάνει το οξείδιο λιγότερο ευαίσθητο στα θερμά ηλεκτρόνια. Η ενσωμάτωση του βορίου στο οξείδιο προκαλεί μια μη επιθυμητή αλλαγή της κατώτατης τάσης . Η ενσωμάτωση του αζώτου πρέπει να γίνει με ελεγχόμενο τρόπο αφού απαιτείται ικανοποιητική ποσότητα κατά προτίμηση στην πλευρά του πολυπυριτίου για να σταματήσει τη διείσδυση του βορίου μέσα στο οξείδιο αλλά το υπερβολικό άζωτο στη διεπιφάνεια πυριτίου μειώνει την κινητικότητα του φορέα .Υμένες που αναπτύσσονται σε οξείδιο του αζώτου ή σε μονοξείδιο του αζώτου υπερέρχουν σε ποιότητα .Αξίζει να σημειωθεί ότι το αζωτούχο οξείδιο πυριτίου μειώνει τη διαρροή πύλης κατά μία ή κατά δύο τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με το SiO<sub>2</sub> .

## **ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΟΥ Κ ΓΙΑ CMOS [29]**

Ο όρος CMOS αναφέρεται σε ηλεκτροτεχνικές διατάξεις επίδρασης πεδίου μετάλλου ημιαγωγού , στα τρανζίστορ των οποίων υπάρχουν διάλογοι προσαύξησης τύπου p(pmos) αλλά και τύπου n (nmos).

Τα υλικά υψηλού-K είναι υλικά με υψηλή διηλεκτρική σταθερά K συγκρινόμενη με το διοξείδιο του πυριτίου που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία ημιαγωγών .Μπορούν να λύσουν το πρόβλημα διαρροής των διηλεκτρικών που βασίζονται σε διοξείδιο του πυριτίου αφού η πυκνότητα τους μπορεί να γίνει σημαντικά μεγαλύτερη .Η ισοδύναμη

πυκνότητα οξειδίου  $t_{eq}$  δίνεται από τη σχέση  $t_{eq} = Eq \cdot \Omega$ . Ωστόσο πρέπει να προσέξουμε ότι η διαρροή ρεύματος περιορίζεται από το ρεύμα που οφείλεται στο φαινόμενο της σήραγγας μόνο στα τέλεια υλικά. Υπάρχουν αρκετοί άλλοι μηχανισμοί διαρροής που σχετίζονται με τις ατέλειες των υλικών που μπορούν να συνεισφέρουν στη διαρροή.

Ο πίνακας δείχνει ένα αξιολογικό αριθμό δυνητικών υλικών υψηλού  $K$  και οι αντίστοιχες διηλεκτρικές σταθερές. Νέα διηλεκτρικά πρέπει να εκπληρώνουν έναν αριθμό απαιτήσεων με σκοπό να είναι συμβατά με την τεχνολογία πυριτίου που ήδη υπάρχει.

### ΔΥΑΔΙΚΑ ΟΞΕΙΔΙΑ

$Al_2O_3$	9-11,5
BaO	31-37
$CeO_2$	18-26
$HfO_2$	20-22
$La_2O_3$	25-30
$Ta_2O_5$	25-45
$TiO_2$	80-95
$Y_2O_3$	11-14
$HfO_2$	22-25

### ΣΥΝΘΕΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΟΞΕΙΔΙΟΥ

$HfO_2 \cdot SiO_2$	10-13
$La_2O_3 \cdot SiO_2$	16-20
$Y_2O_3 \cdot SiO_2$	10-11
$ZrO_2 \cdot SiO_2$	10-13
$HfO_2 \cdot ZrO_2$	20-25
$HfO_2 \cdot Al_2O_3$	14-17

### ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΑ ΟΞΕΙΔΙΑ

$LaAlO_3$	25
$SrZrO_3$	25
$SrTiO_3$	<250
$(Ba,Sr)TiO_3$	<400

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

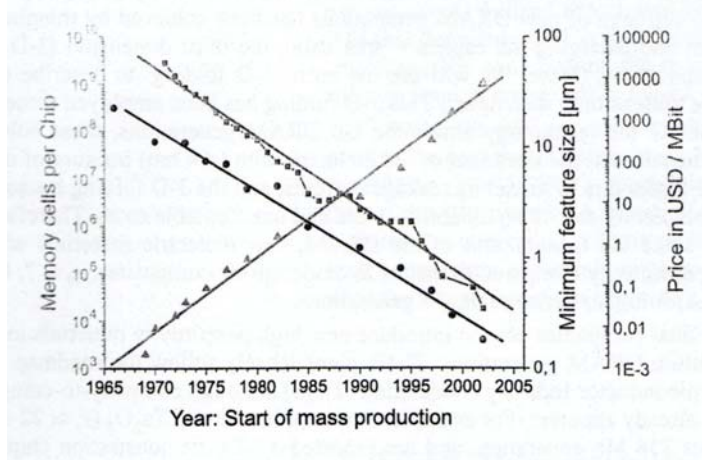
Η διηλεκτρική σταθερά των νέων διηλεκτρικών πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3,9$ ) και το πάχος του διηλεκτρικού στρώματος πρέπει να είναι ισοδύναμο με το με το διοξείδιο του πυριτίου πάχους 1nm που αντιστοιχεί σε επιφανειακή χωρητικότητα  $32\text{pF}/\mu\text{m}^2$ .

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες σχετίζονται άμεσα με την κρυσταλλική δομή. Τα άμορφα οξείδια δείχνουν σχετικά χαμηλές διηλεκτρικές σταθερές, ενώ μερικά από τα οξείδια που γίνονται με τη μέθοδο της επιταξίας παρουσιάζουν πραγματικά υψηλές διηλεκτρικές σταθερές. Εξαιτίας των πολύ χαμηλών πυκνοτήτων διεπιφάνειας  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  το πρώτο μονόστρωμα των διηλεκτρικών της πύλης πρέπει να είναι  $\text{SiO}_2$  ακόμη και αν εμπλέκονται οξείδια υψηλού K.

## ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΓΙΑ DRAM [29]

Αποτελεσματική και φτηνή αποθήκευση δεδομένων σε ημιαγώγιμα κελιά είναι μια από τις κύριες αιτίες για την επιτυχία της τεχνολογίας που βασίζεται στο πυρίτιο τις τελευταίες δεκαετίες. Επιπλέον η μνήμη DRAM παρουσιάστηκε το 1967 και εισήχθη στην αγορά από την Intel το 1972, ήταν η δύναμη για την εκθετική ανάπτυξη κυκλωμάτων μνήμης σε διαστάσεις μικρομέτρου και προώθησε παρόμοια πρόοδο σε λογικά chips. Επιπλέον η απλότητα ενός κελιού DRAM με ένα τρανζίστορ σαν διακόπτη ένα πυκνωτή σαν στοιχείο αποθήκευσης δεδομένων και διηλεκτρικά βασισμένα σε πυρίτιο έδιναν εγγύηση για την τεράστια και διαρκή επιτυχία των DRAMs.

Η επιτυχία της DRAM απεικονίζεται στο σχήμα 3.33.



Σχήμα 3.33: Νόμος του Moore δηλώνει ότι ο μέγιστος αριθμός ανεξάρτητων ολοκληρωμένων στοιχείων που μπορούν να περιληφθούν μέσα στο πιο εξελιγμένο τσιπ πυριτίου διπλασιάζεται κάθε χρόνο.

Για περισσότερες από 3 δεκαετίες μια εκθετική ανάπτυξη του αριθμού των κελιών μνήμης /τσιπ έχει παρατηρηθεί και περιγραφεί από το νόμο του Moore. Μέχρι σήμερα η αναγκαστικά αυξανόμενη πυκνότητα αποθήκευσης φορτίου του πυκνωτή με τη μείωση

του κελλιού των νέων γεννιών DRAM έχει επιτευχθεί με την λέπτυνση του διηλεκτρικού υμένα και μεγενθύνοντας την περιοχή του πυκνωτή. Καθώς η τεχνολογία εισέρχεται στις γενιές DRAM των Gb, αυτές οι λύσεις φτάνουν στα όρια πάχους του διηλεκτρικού υμένα <4nm εξαιτίας της διαρροής ρευμάτων.

Οι εταιρείες σκέφτονται να εισάγουν νέα υλικά [53,54] σύμφωνα με συνέδριο που έγινε από το συνεταιρισμό ημιαγωγικής βιομηχανίας. Η Samsung εισήγαγε το  $Ta_2O_5$  με  $\epsilon_r \approx 22$  και ανέφερε τσιπ 1 Gb βασισμένο στο ίδιο υλικό. Φαίνεται ότι τα υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς υλικά με τη δομή περοβσκίτη θα απαιτηθούν.

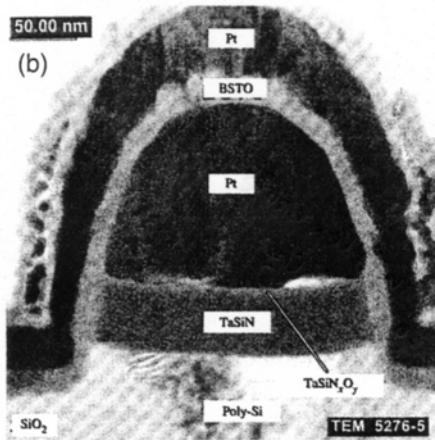
## Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ [29]

Το 2002 οι κατασκευαστές DRAM αντικατέστησαν τη μαζική παραγωγή της γενιάς των 64Mb από τη γενιά των 256Mb που γενικά χρησιμοποιούσε παραδοσιακά διηλεκτρικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι μια σημαντική διαφορά στα προϊόντα διαφόρων κατασκευαστών ήταν ο σχεδιασμός του κελιού. Ενώ η Toshiba χρησιμοποιούσε ακόμη την παλιά τεχνολογία άλλες όπως η Samsung, η Micron ενσωματώνουν περίπλοκες τρισδιάστατες δομές κολλημένες πάνω στην επιφάνεια Si-CMOS. Επιπλέον η Samsung ήταν καινοτόμος χρησιμοποιώντας το  $Ta_2O_5$  με διηλεκτρική σταθερά 22 πάνω σε μια δομή πολυπυριτίου.

Στο μέλλον θεωρείται ότι ένα σύνθετο οξειδίο θα εισαχθεί  $(Ba,Sr)TiO_3$  με πολλή υψηλή διηλεκτρική σταθερά. Για παράδειγμα ερευνητές από τη Samsung έχουν δηλώσει ότι η ενσωμάτωση του BST είναι αναπόφευκτη για τεχνολογία κόμβων των DRAM των 70nm. Το  $Ta_2O_5$  έχει μελετηθεί ως διηλεκτρικό πύλης και DRAM για παραπάνω από 10 χρόνια. Η εισαγωγή των  $Ta_2O_5$  πυκνωτών έχει γίνει πολύ πιο αργά από ότι περιμέναμε γιατί η χαμηλή διηλεκτρική σταθερά μειώνει την πυκνότητα ηλεκτρικής χωρητικότητας. Πρέπει ωστόσο να βρεθούν συμβιβαστικές λύσεις συμπεριλαμβανομένου γρήγορη θερμική ανόπτηση της διεπιφάνειας σε  $N_2$  πριν από την εναπόθεση διηλεκτρικού με σκοπό να αυξηθεί η αντίσταση οξείδωσης της επιφάνειας.

Περισσότερη προσπάθεια αφιερώθηκε στο  $Ta_2O_5$  που βασίζεται σε MIM πυκνωτές για DRAMs. Η δομή MIM έχει το πλεονέκτημα να περιορίζει την απογύμνωση φορέων στη διεπιφάνεια Si και επίσης το σχηματισμό του  $SiO_2$  στη διεπιφάνεια. Ελκυστικές δομές περιλαμβάνουν TiN ή Ru ηλεκτρόδια. Οι MIM δομές σε Ru ηλεκτρόδια έχουν καταλήξει στο απροσδόκητο πλεονέκτημα της αυξανόμενης διηλεκτρικότητας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες παρασκευής. Έχει δείχτει ότι η τοπική ετεροεπιταξία του  $Ta_2O_5$  μπορεί να προωθηθεί στο εξαγωνικό ηλεκτρόδιο Ru. Η διηλεκτρική σταθερά είναι περίπου 40.

Μια μελέτη της μηχανικής σταθερότητας του κυλινδρικού ηλεκτροδίου από την ομάδα Fujitsu/Toshiba δείχνει ότι η  $Ru/Ta_2O_5/Ru$  τεχνολογία θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε κλίμακα κάτω από την τεχνολογία κόμβων των 100nm [61]. Για παράδειγμα ο υπάρχων κυλινδρικός λόγος όψης 8 θα επιτρέψει την τεχνολογία 65nm να γίνει εφικτή.



Σχήμα 3.34: Τομή BST πυκνωτή πάνω σε στήλο Pt.

Ένα άλλο διηλεκτρικό που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια είναι το  $Al_2O_3$ . Αυτό το υλικό αποτελεί έκπληξη καθώς έχει πιο χαμηλή διηλεκτρική σταθερά από το  $Ta_2O_5$  γύρω στο 9 με 10. Ωστόσο υπάρχουν 2 λόγοι που ευνοούν αυτό το υλικό είναι η χαμηλή πυκνότητα διαρροής ρεύματος και επίσης η υψηλή αξιοπιστία ανάπτυξης MOCVD στρώμα με στρώμα. Η Samsung έχει παρουσιάσει μια πλήρως λειτουργική DRAM 1 Gb χρησιμοποιώντας  $Al_2O_3$  που εναποτίθεται με τη μέθοδο της ατομικής εναπόθεσης στρώματος. Η χαμηλή θερμοκρασία διεργασίας των  $350^\circ C$  είναι ελκυστική για να ελαχιστοποιήσει το σχηματισμό στρώματος  $SiO_2$  χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς στη διεπιφάνεια Si. Ακόμη δεν έχουν γίνει προβλέψεις σε ότι αφορά την κλίμακα των νέων γενιών.

Πρόσφατα οι κατασκευαστές DRAM έχουν αναπτύξει διηλεκτρικά σε στρώματα ή σε ελάσματα με σκοπό να κερδίσουν το μέγιστο πλεονέκτημα από κάθε διηλεκτρικό υλικό. Για παράδειγμα οι  $Al_2O_3/HFO_2$  δομές ελασμάτων έχουν παρουσιαστεί από τη Samsung. Το προφανές πλεονέκτημα είναι ότι το Al μπορεί να εναποτεθεί με ελάχιστη συνοδευόμενη ανάπτυξη του βλαβερού  $SiO_2$  διεπιφανειακού στρώματος ενώ το  $HFO_2$  έχει υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά.

Οι δυσκολίες της διεργασίας BST έχει προκαλέσει τους κατασκευαστές να μελετήσουν το  $SrTiO_3$ . Αυτό το υλικό μπορεί να επεξεργαστεί σε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι το BST ελαχιστοποιώντας τα σοβαρά προβλήματα του στοιχειομετρικού ελέγχου. Για παράδειγμα μια δομή κελλιού  $Ru/SrTiO_3/Ru$  MIM έχει αναφερθεί με εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα χωρητικότητας. Αυτό το διηλεκτρικό σε συνδιασμό με ηλεκτρόδια τα οποία σχηματίζουν μια αγωγίμη διεπιφάνεια οξειδίου παρουσιάζουν μικρότερη εξάρτηση διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με την πυκνότητα από το BST. Σαν αποτέλεσμα για τις επόμενες γενιές και πιο λεπτά διηλεκτρικά το πλεονέκτημα διηλεκτρικής σταθεράς του BST σε σχέση με το  $SrTiO_3$  μειώνεται. Άξιζει να δώσουμε έμφαση στη σημασία της δομής πάνω στην οποία μπορεί να εναποτεθεί με επιτυχία.

Το σχήμα 3.34 δείχνει την τομή ενός BST πυκνωτή πάνω σε ένα στήλο Pt. Αυτός ο στήλος αποτελείται από το SiN φράγμα διάχυσης ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο Pt και το ρευματολήπτη πολυπυριτίου.

Για τις επόμενες γεννιές Gb των DRAMs υλικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς θα χρησιμοποιηθούν. Το αρχικό υλικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς είναι το Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> σε μια MIS απεικόνιση. Οι MIM απεικονίσεις θα ακολουθήσουν με BST ή SrTiO<sub>3</sub> σε απλούς στήλους συναγονιζόμενοι με Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> σε κυλίνδρους με υψηλό λόγο όψης.

## **ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟ [29]**

Παρόλο που οι συσκευές CNT και οι συνδέσεις νανοσωλήνων άνθρακα έχουν αποδειχτεί ότι είναι πολλά υποσχόμενες έχουν γίνει ελάχιστες προσπάθειες να τις συνδιάσουν επιτυχημένα σ' ένα ρεαλιστικό κύκλωμα. Οι περισσότερες CNT δομές περιλαμβάνουν το υπόστρωμα σιλικόνης. Ωστόσο υπάρχουν αρκετές προκλήσεις σε σχέση με τη διαδικασία που χρειάζεται να διευθετηθούν πριν οι συσκευές βασισμένες στα CNT και οι διασυνδέσεις μπουν μέσα στην VLSI (Πολύ Μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης) διεργασία. Προβλήματα όπως το ξεκαθάρισμα προσμίξεων, διαχωρισμός νανοσωλήνων άνθρακα, έλεγχος πάνω στο μήκος νανοσωλήνα, επιθυμητή ευθυγράμμιση και χαμηλός θερμικός προϋπολογισμός Αυτό τις κάνει ένα ανοιχτό και συναρπαστικό πεδίο για έρευνα. Επιπλέον έχουν γίνει προτάσεις για να κατασκευαστούν τρανζίστορες εκτός νανοδικτύων. Η έλλειψη ελέγχου στη χειρομορφία\* παράγει μια τάξη μεταλλικών καθώς επίσης και ημιαγωγικών CNTs από οποιαδήποτε παραγωγική διαδικασία. Τυχαίες διατάξεις νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχώματος έχουν προταθεί για να κατασκευαστούν λεπτά τρανζίστορες σε μορφή υμενίου. Αυτή η ιδέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστούν τρανζίστορες βασισμένα σε σωλήνες άνθρακα και κυκλώματα χωρίς την ανάγκη για συναρμολόγηση ακριβείας.

### **3.10 ΝΑΝΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ [30]**

Οι νανομετατροπείς περιλαμβάνουν όλους τους μετατροπείς που η μία τουλάχιστον διάσταση τους είναι μικρότερη από 100nm ή είναι συνολικά μικρότεροι από 1μm. Οι μετατροπείς δεν μετατρέπουν μόνο ένα σήμα σε ηλεκτρικό αλλά περιλαμβάνουν όλα τα είδη μετατροπής.

Οι νανομετατροπείς διαφέρουν από τους παραδοσιακούς και επίσης από τους μικρομετατροπείς στο γεγονός ότι το πρωτεύον σήμα λαμβάνεται μόνο σε χαμηλή ισχύ. Οι νανομετατροπείς είναι ενδιαφέροντες για όλες τις διαδικασίες και τα αντικείμενα που μεταδίδουν χαμηλή ισχύ ή παρέχουν μόνο χαμηλή ισχύ για δημιουργία σήματος. Σε αντίθεση με τη συνολική χαμηλή ισχύ πρέπει η πυκνότητα ισχύος να είναι υψηλή έτσι ώστε στις μικρές περιοχές να παράγεται ένα επεξεργάσιμο και εύκολο σε ανάλυση σήμα.

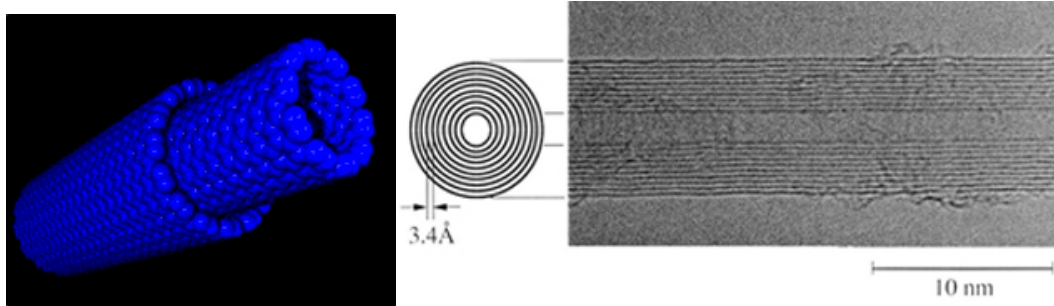
Εφαρμογές με νανομετατροπείς δεν είναι εφαρμόσιμες σε διαδικασίες με χαμηλές πυκνότητες ισχύος. Ωστόσο οι νανομετατροπείς περιλαμβάνουν μόνο αισθητήρες που ανήκουν στη νανοτεχνολογία με βάση τις γεωμετρικές τους διαστάσεις. Αισθητήρες που υπολογίζουν στη νανοκλίμακα όπως μετρήσεις ισχύος σε nW, μετρήσεις απόστασης σε nm, μετρήσεις θερμοκρασίας σε nK, μετρήσεις συγκέντρωσης στην κλίμακα του nm.

Το ξεκίνημα για το σχεδιασμό ενός συστήματος ή ενός μετατροπέα είναι πάντα η απαιτούμενη λειτουργία. Έπειτα αποφασίζεται το σχήμα του μετατροπέα και το υλικό του ανάλογα με τη λειτουργία του. Για το σχεδιασμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα προγράμματα τύπου CAD.

Ο σχεδιασμός των νανοσυσκευών απαιτεί μια άμεση σύνδεση με τις τεχνικές απαιτήσεις. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες. Οι μέθοδοι για μοριακό σχεδιασμό είναι διαφορετικοί από τις μεθόδους για σχεδιασμό μικροσυστημάτων. Επαρκής προτυποποίηση σχημάτων υλικών και διαδικασίες δεν έχουν εδραιωθεί στην τεχνολογία μικροσυστημάτων. Οι αρχικές απαιτήσεις σχεδιασμού διατυπώθηκαν για συγκεκριμένους τύπους στοιχείων.

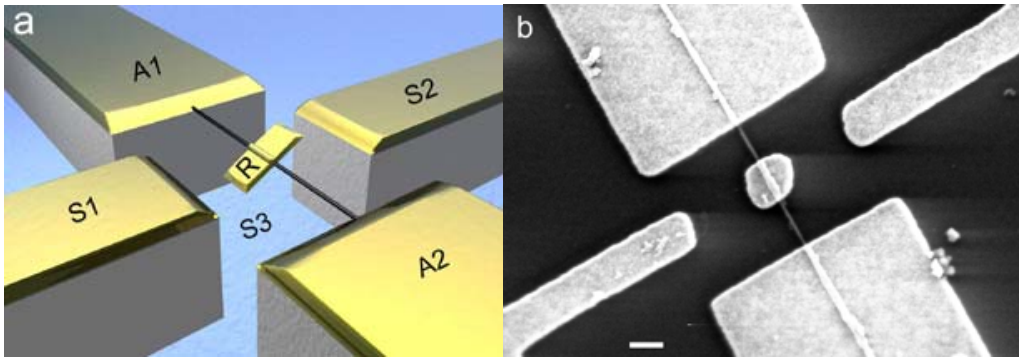
### 3.11 NANOKΙΝΗΤΗΡΕΣ

Ο συγκεκριμένος νανοκινητήρα σχεδιάστηκε να λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, θερμοκρασίας και περιβαλλοντικών συνθηκών. Βασίζεται σε νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων.



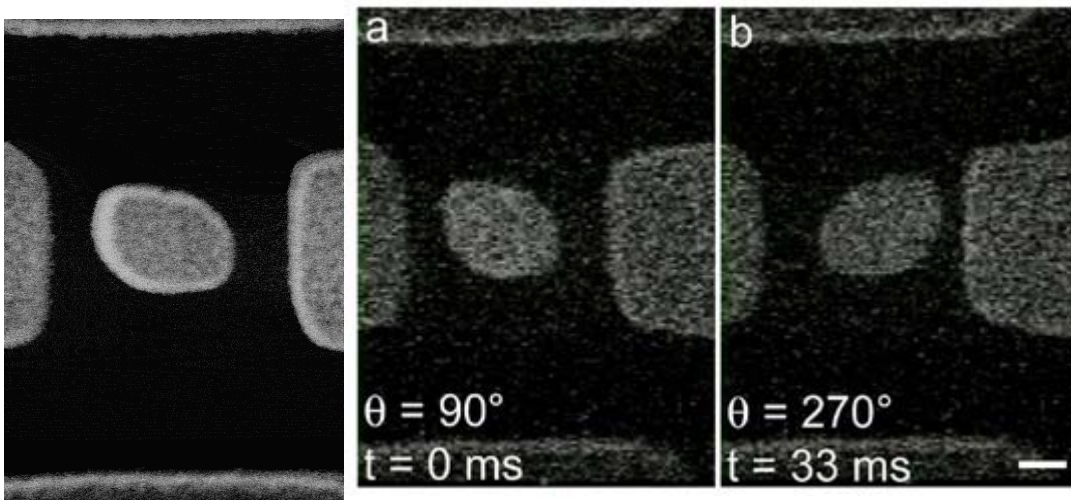
Σχήμα 3.35: Νανοσωλήνας άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων.

Μετά την τοποθέτηση νανοσωλήνων πολλαπλών τοιχωμάτων σε μια επιφάνεια οξειδίου του πυριτίου στάτορες και ρότορες φτιαγμένοι από χρυσό προσκολλώνται στους νανοσωλήνες χρησιμοποιώντας λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων. Ηλεκτρόδια στάτορα τοποθετούνται σε κάθε πλευρά του ρότορα για να παρέχουν ένα μηχανισμό οδήγησης του ρότορα.



Σχήμα 3.35: Στο σχήμα βλέπουμε το νανοσωλήνα να περιστρέφεται.

Εφαρμόζοντας μια μικρή τάση περίπου 1V στους τρεις στάτορες S1,S2,S3 μπορούμε να περιστρέψουμε τον ρότορα σε οποιαδήποτε επιθυμητή θέση. Ο νανοκινητήρας μπορεί να οδηγηθεί είτε με συνεχή είτε με εναλασσόμενα σήματα.

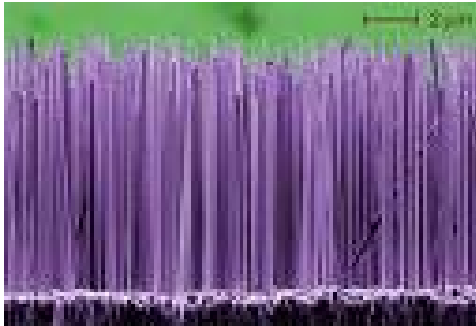


Σχήμα 3.36: Μια πλήρης περιστροφή του κινητήρα χρησιμοποιώντας συνεχή τάση.



### 3.12 ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ [30]

#### Ηλεκτρικές επαφές και νανοκαλώδια



Σχήμα 3.37: Νανοκαλώδια

Ο λόγος που τα ηλεκτρονικά έχουν γίνει η θεμελιώδης τεχνική για την εκμετάλλευση της πληροφορίας δεν στηρίζεται μόνο στα τρανζίστορ και στην ελαχιστοποίηση αυτών των συσκευών. Αυτό επίσης βασίζεται στις ειδικές ιδιότητες του ηλεκτρονίου καθώς είναι το πιο φωτεινό στοιχειώδες σωματίδιο για τεχνικές εφαρμογές οι οποίες είναι το κλειδί σε όλες τις χημικές αλληλεπιδράσεις. Ένα ηλεκτρόνιο περιέχει φορτίο και είναι διακριτό από άλλα ιόντα. Οι αναλογίες μεταφοράς ηλεκτρονίων ελέγχονται από ηλεκτρικά πεδία και είναι αρκετά εξαρτημένες από το μέσο έτσι ώστε η ηλεκτρική αγωγιμότητα να ποικίλλει από μέσο σε μέσο.

Οι πρώτες συσκευές για ελεγχόμενη μεταφορά ηλεκτρονίων ήταν οι συσκευές κενού. Η αντικατάσταση από ημιαγωγικές συσκευές ξεκίνησε το 1950. Αυτές οι συσκευές έγιναν το κλειδί στη μεταφορά ηλεκτρονίων ιδιαίτερα στην περιοχή των τρανζίστορ. Η τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορεί να φτάσει κάτω από 100nm για εφαρμογές μνήμης και εφαρμογές επεξεργαστών.

Ημιαγωγικές συσκευές βασίζονται στο σχηματισμό ξεχωριστών περιοχών φορτίου. Ο μινιμαλισμός αυτών των συσκευών απαιτεί ελαχιστοποίηση των διαστάσεων αυτών των περιοχών. Έτσι συνδιασμοί υλικών με υψηλή και χαμηλή αγωγιμότητα έχουν ιδιαίτερη σημασία. Εκτός από τους κλασικούς ημιαγωγούς η επερχόμενη ελαχιστοποίηση έχει οδηγήσει σε ημιαγωγικά υλικά με πολλές προσμίξεις καθώς επίσης και συστήματα με νανοδομή καθαρού μετάλλου. Τα τελευταία είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για την ελεγχόμενη μεταφορά ξεχωριστών ηλεκτρονίων από φράγμα φαινομένου σήραγγας και δια μέσου αγώγιμων νησίδων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ημιαγωγικές συσκευές οι συσκευές μονού ηλεκτρονίου έχουν το πλεονέκτημα λιγότερης παραγωγής θερμότητας στις ίδιες αναλογίες μεταγωγής εξαιτίας της εξαιρετικά χαμηλής απώλειας ισχύος.

Κυκλώματα με διαστάσεις νανομέτρου αποτελούν στοιχειώδη συστατικά των νανοηλεκτρονικών ιδιαίτερα για μεταγωγούς και μετατροπείς που ελέγχουν τη μεταφορά απλών ηλεκτρονίων.

Επαφές με πλάτος στη μέση νανομετρική κλίμακα μπορούν να κατασκευαστούν από λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων. Χάλκινες επαφές των 50nm κατασκευάστηκαν από ένα

συνδιασμό EBL (Λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων) , ξηρή χάραξη και χημική στίλβωση.Μια απλή τεχνική για την κατασκευή στενών μεταλλικών επαφών βασίζεται στην εναπόθεση μεταλλικών ταινιών κατά μήκος μονοατομικών κρυσταλλικών διηλεκτρικών υλικών τα οποία είναι κομμένα σε μια συγκεκριμένη γωνία στα κρυσταλλικά επίπεδα.Αυτές οι ταινίες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν σε ένα πλάτος 2-3nm.Δυστυχώς οι γεωμετρίες τέτοιων επαφών είναι προκαθορισμένες από τη διάταξη των κρυσταλλικών επιπέδων έτσι ώστε να μη μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μορίων με κινητά ηλεκτρόνια είναι η απαιτούμενη κατάσταση για την προετοιμασία των νανοσυρμάτων .Τα μακρομόρια που προκύπτουν από πολυμερισμό μπορούν να σχηματίσουν μια ποικιλία διαμορφώσεων.Για κατασκευές νανοσυρμάτων απαιτούνται άκαμπτα μόρια.

Η ερώτηση για την αγωγιμότητα του DNA είναι ακόμη αντικείμενο διαφωνίας .Τα πειραματικά στοιχεία δείχνουν μεταφορά ηλεκτρονίων σε κοντινές αποστάσεις.Τα βήματα που παρατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου δείχνουν τη μεταφορά ανεξάρτητων ηλεκτρονίων.Το ρεύμα μπορεί να αυξηθεί σε πάνω από 100nA, δείχνοντας μια υψηλή αγωγιμότητα.Η αναλογία μεταφοράς φορτίου είναι περίπου 100 ηλεκτρόνια για κάθε nm και κάθε picosecond.Μια θεωρητική και πειραματική μελέτη έδειξε ότι ικανοποιητική αγωγιμότητα μπορεί να επιτευχτεί μετά από μια συγκεκριμένη έκθεση σε ηλεκτρόνια.

Αντί της απευθείας χρήσης ξεχωριστών μακρομορίων στις νανολιθογραφικές διαδικασίες μόρια μπορούν να εφαρμοστούν ως μάσκες με σκοπό το σχηματισμό νανοκαλωδίων βασισμένα σε απλά μόρια.Ένα παράδειγμα είναι η κατασκευή νανοσυρμάτων χρυσού από ξηρή χάραξη λεπτού στρώματος χρυσού.

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι ο συνδιασμός επιφανειών chip ή μικροηλεκτρόδια κατασκευασμένα με τη μέθοδο της λιθογραφίας με μόρια και μεταλλικά νανοσωματίδια.Μια συναρμολόγηση επιφανειακών σωματιδίων μετάλλου θα μπορούσε να δημιουργήσει ηλεκτρικές επαφές με διαστάσεις νανομέτρων .Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου τα μικρο και νανοσωματίδια μπορούν να τοποθετηθούν σε επιφάνειες υποστρώματος .Χρυσά σωματίδια διαμέτρου 70-350nm και 8μm μήκους τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε χρυσά ηλεκτρόδια εκτός διηλεκτρικού διαλύτη .Η εναπόθεση μεταλλικών σωματιδίων πάνω σε μόρια που έχει σταματήσει η κίνηση τους μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση μοριακών αλληλεπιδράσεων .Μόρια DNA ξεχωριστά τοποθετημένα ανάμεσα σε μικροηλεκτρόδια θα μπορούσε να είναι ενδιαφέρουσα λύση για μια τέτοια προσέγγιση.

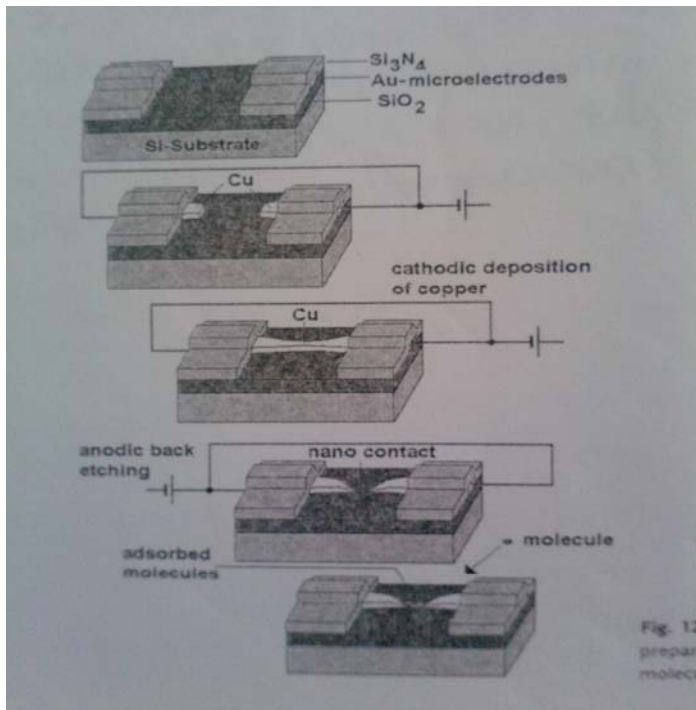
Νανοκαλώδια μπορούν να βασιστούν σε μόρια χρησιμοποιώντας μια επέκταση μορίου σαν αλυσίδα για τη σύνδεση μεταλλικών νανοσωματιδίων.Ένα παράδειγμα χρησιμοποιεί συσσωματώματα DNA που διακοσμήθηκαν με χρυσά νανοσωματίδια καταλήγοντας σε αλυσίδες χρυσών νανοσωματιδίων .

Νανοκαλώδια με πλάτος 20nm κατασκευάστηκαν από δέσμη ηλεκτρονίων , εναπόθεση βελόνων άνθρακα στην άκρη ενός στρώματος χρυσού που καταλήγει σε νανοδιόδους με πλάτος κενού περίπου 5nm.Ηλεκτρικές επαφές που αποτελούνται από αλυσίδες αγώγιμων νανοσωματιδίων είναι τεχνολογικού και λειτουργικού ενδιαφέροντος. Σωματίδια με διάμετρο κάτω από 100nm είναι συγκρίσιμα με μόρια ως αναφορά τη συμπεριφορά δέσμευσης που σημαίνει ότι το δέσιμο τους σε επιφάνειες μπορεί να ανασταλλεί και συγκεκριμένοι δεσμοί μπορούν να δημιουργηθούν διαμέσου συμπληρωματικών γκρουπ σύζευξης πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος ή άλλων

νανοσωματιδίων. Τα αγώγιμα σωματίδια παρουσιάζουν φραγμούς στη μεταφορά ηλεκτρονίων στα σημεία επαφής τους. Διηλεκτρικά μοριακά επιφανειακά στρώματα πάνω σε χρυσά νανοσωματίδια μπορούν να αυξήσουν επιπλέον το φαινόμενο του φράγματος. Το ύψος του φράγματος μπορεί να ελεγχθεί από την επιλογή πάχους και σύνθεσης του μοριακού μονοστρώματος. Τέτοιες αλυσίδες σωματιδίων δεν είναι μόνο ενδιαφέρουσες σαν απλά ενσύρματα στοιχεία αλλά επίσης για ελεγχόμενη μεταφορά ηλεκτρονίων. Αλυσίδες νανοσωματιδίων διαμέτρου 10nm και κενά εύρους 30-150nm αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά κενά ηλεκτροδίων αρκετών nm μπορούν να συνδεθούν διαμέσου της συναρμολόγησης μεταλλικών νανοσωματιδίων.

### 3.13 ΝΑΝΟΔΙΟΔΟΙ [30]

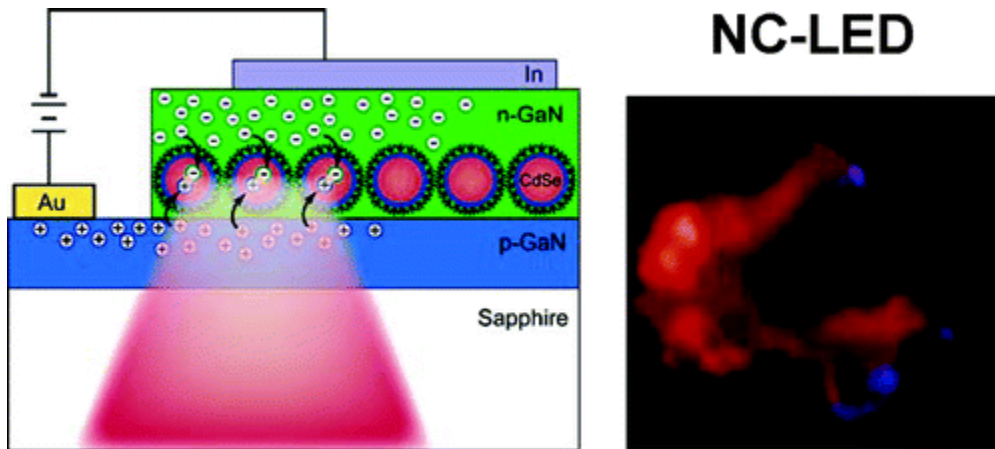
Οι νανοδίοδοι αποτελούνται από ένα στερεό με δύο ηλεκτρικά αγώγιμα ηλεκτρόδια τα οποία χωρίζονται από μια λιγότερο αγώγιμη ζώνη. Αντί για μειωμένη κλασσική αγωγιμότητα ένα φράγμα με βάση το φαινόμενο της σήραγγας είναι επίσης δυνατό. Μια επαφή μετάλλου –μονωτή-μετάλλου κατασκευάστηκε από οξείδωση δομών νιοβίου 3-4nm πάχους σε λουρίδες πλάτους περίπου 76nm. Η τοπική οξείδωση στρωμάτων τιτανίου πάχους 3nm από δίοδους παραγόμενους από STM είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για διαδικασίες μεταγωγής που διαρκούν κάτω από picosecond.



Σχήμα 3.38: Ηλεκτροχημικά ελεγχόμενη προετοιμασία νανοκενών για τον εγκλωβισμό μορίων.

Μια νανοδιόδος με ένα μοριακό στρώμα σαν φράγμα και ένα χρυσό νανοςύμπλεγμα για περιορισμό ηλεκτρονίων δημιουργήθηκε από την εναπόθεση ενός στρώματος διφαινυλίου πάνω σ'ένα υπόστρωμα χρυσού.Χρησιμοποιώντας μια άκρη STM τοποθετημένη πάνω σ'ένα σύμπλεγμα χρυσού μπορεί να διεξαχτεί ελεγχόμενη μεταφορά ενός μόνο ηλεκτρονίου.Ένα ισχυρό φαινόμενο διόδου βρέθηκε πάνω σε ένα στρώμα θειοακετυλιδιφαινυλίου.Η διόδος παρουσίαζε ένα ρεύμα πάνω από 400nA στα 0,4V σε αντίθεση με τα -1,3 nA στα -0,4V.Η ασυμμετρία στη μοριακή δομή είναι πιθανώς ο κύριος λόγος για την ασύμμετρη γραφική παράσταση ρεύματος τάσης.Έρευνες πάνω στη μεταφορά ηλεκτρονίων σε στρώματα οργανικών μορίων με υψηλή αναλογία σε π-ηλεκτρόνια κατέληγε στην πρόταση ότι ξεχωριστά μόρια θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ηλεκτρονικοί νανοπεριορισμοί που χωρίζονται από φράγματα.Ωστόσο ένα μοριακό μονόστρωμα μορίων πλούσια σε π ηλεκτρόνια δείχνει μια παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της 2-στατης διάταξης επαφών που εμφανίζουν το φαινόμενο της σήραγγας.Νανοηλεκτρόδια με εξαιρετικά μικρά κενά προετοιμάστηκαν από καθοδική εναπόθεση χαλκού σε καλυμμένα επίπεδα χρυσά μικροηλεκτρόδια.Αυτά τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν για την απορρόφηση μικρών συλλογών μορίων.Η απορρόφηση μπορεί να ανιχνευτεί από αλλαγές στην αγωγιμότητα. Μια νανοδιόδος με ένα μοριακό στρώμα σαν φράγμα και ένα χρυσό νανοςύμπλεγμα για ηλεκτρονικό περιορισμό ηλεκτρονίων προετοιμάστηκε από την εναπόθεση ενός στρώματος διφαινυλίου πάνω σ'ένα υπόστρωμα χρυσού .Χρησιμοποιώντας μια άκρη STM τοποθετημένη πάνω σ'ένα σύμπλεγμα χρυσού μπορεί να διεξαχτεί ελεγχόμενη μεταφορά ενός μόνο ηλεκτρονίου.Ένα ισχυρό φαινόμενο διόδου βρέθηκε πάνω σ'ένα στρώμα θειοακετυλοδιφαινυλίου.Αυτή η δομή προετοιμάστηκε διαμέσου ενός ανοίγματος 30nm σε μια μεμβράνη αζωτούχου πυριτίου .Η διόδος εμφάνιζε ένα ρεύμα πάνω από 400nA, στα 0,4V σε αντίθεση με τα -1,3nA, στα -0,4V.Η ασυμμετρία στη μοριακή δομή είναι πιθανώς ο κύριος λόγος για τη ασύμμετρη γραφική παράσταση ρεύματος τάσης .Έρευνες πάνω στη μεταφορά ηλεκτρονίων σε στρώματα οργανικών μορίων με υψηλή αναλογία σε π-ηλεκτρόνια κατέληγε στην πρόταση ότι ξεχωριστά μόρια θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ηλεκτρονικοί νανοπεριορισμοί που χωρίζονται από φράγματα .Ωστόσο ένα μοριακό μονόστρωμα μορίων πλούσια σε π-ηλεκτρόνια παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της δισδιάστατης δάταξης επαφών που εμφανίζουν το φαινόμενο της σήραγγας.Νανοηλεκτρόδια προετοιμάστηκαν από καθοδική εναπόθεση χαλκού πάνω σε καλυμμένα χρυσά μικροηλεκτρόδια.Αυτά τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν για την απορρόφηση μικρών συλλογών μορίων .Η απορρόφηση μπορεί να ανιχνευτεί από αλλαγές στην αγωγιμότητα.Διαφοροποιήσεις πάνω στους υποκαταστάτες του βενζολίου προσαρμόζουν το ύψος των διόδων που βασίζονται στο φαινόμενο της σήραγγας με μοριακούς φραγμούς.

## ΝΑΝΟΔΙΟΔΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ



Σχήμα 3.39: Νανοδίοδοι εκπομποί φωτός.

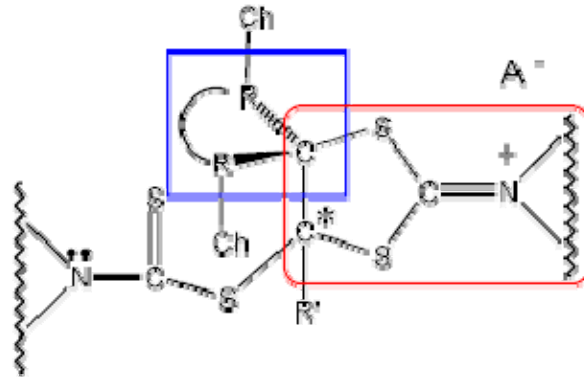
Διάφορες τεχνολογίες όπως απεικονίσεις, φωτεινοί σηματοδότες μπορούν να επωφεληθούν από πηγές επιλογής φωτός που ελέγχονται ηλεκτρικά. Ημιαγώγιοι νανοκρυστάλλοι είναι ελκυστικοί τύποι χρωμοφόρων που συνδιάζουν εκπομπή φωτός ελεγχόμενη από το μέγεθος των κρυστάλλων με εξαιρετική φωτοσταθερότητα και χημική ελαστικότητα. Η εφαρμογή των νανοκρυστάλλων σε εφαρμογές εκπομπής φωτός έχει εμποδιστεί από την απευθείας έγχυση φορέων. Αναφέρουμε την πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια ηλεκτροφωταυγείας στην οποία ημιαγώγιοι νανοκρυστάλλοι ενσωματώνονται σε μια επαφή p-n τύπου σχηματισμένη από στρώματα GaN. Το κρίσιμο βήμα στην κατασκευή νανοκρυστάλλων / GaN είναι η χρησιμοποίηση καινούριων τεχνικών εναπόθεσης όπως επιταξία και λιθογραφία δέσμης ουδέτερων ατόμων. Απεικονίζουμε την ηλεκτροφωταυγεία σε περιοχές δύο χρωμάτων χρησιμοποιώντας δομές που συμπεριλαμβάνουν είτε ένα απλό μονόστρωμα είτε ένα διπλό στρώμα νανοκρυστάλλων.

### 3.14 ΝΑΝΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ, ΜΟΡΙΑΚΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ [30]

Οι διαδικασίες μεταγωγής μπορούν να υποστηριχτούν από αλλαγές ηλεκτρονικές μηχανικές ή υλικών. Όταν πλησιάζουμε τις διαστάσεις απλών μορίων τα όρια ανάμεσα σε αυτές τις αλλαγές εξαφανίζονται. Μοριακές μετακινήσεις συνδέονται με ηλεκτρονικές μεθόδους και μεταφορές ηλεκτρονίων οδηγούν σε αλλαγές στη χημική δομή.

Οι μέθοδοι για τη δημιουργία νανοδιακοπών δεν περιορίζονται στο φαινόμενο της σήραγγας ή σε απλές μοριακές μεθόδους. Επιπλέον η νανομορφολογία σύνθετων υλικών παρέχει δυνατότητες για νανοηλεκτρονικούς μεταγωγούς. Ένα παράδειγμα είναι η οργάνωση των περιοχών σε αδρομερή με αλληλουχία ηλεκτρικών αγωγίμων τομέων που ελέγχουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο τομέας της μοριακής ηλεκτρονικής αναζητά ξεχωριστά μόρια για να εκτελούν λειτουργίες στα ηλεκτρικά κυκλώματα που μέχρι τώρα εκτελούνται από ημιαγώγιοι στοιχεία. Τα ξεχωριστά μόρια είναι εκατοντάδες φορές μικρότερα από τα μικρότερα χαρακτηριστικά που είναι εφικτά από την ημιαγώγιο νανοτεχνολογία. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία που κατασκευάζονται από μόρια είναι

εκατοντάδες φορές μικρότερα από τα πανομοιότυπα τους. Επιπλέον τα ξεχωριστά μόρια κατασκευάζονται ακριβώς ίδια σε δισεκατομμύρια και τρισεκατομμύρια. Στην καρδιά της ημιαγωγικής βιομηχανίας είναι ο ημιαγωγικός διακόπτης που είναι το βασικό στοιχείο σε όλα τα μοντέρνα ηλεκτρονικά. Αυτός ο διακόπτης είναι ένα απλό μόριο που έχει εξαιρετικές μεταγωγικές ιδιότητες.

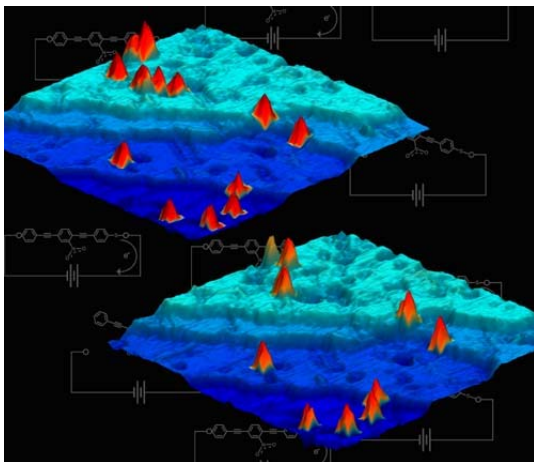


Σχήμα 3.40: Μοριακός διακόπτης.

Σπειροειδή άτομα άνθρακα= Τα άτομα που βρίσκονται στα κουτιά εξαναγκάζονται να βρίσκονται σε κάθετα επίπεδα βελτιώνοντας την ισχύ του σήματος.

Δράση χρωμοφόρων= Η επιλογή των χρωμοφόρων ομάδων παρέχουν οπτικό συντονισμό.

Έλεγχος κατιόντων= Ελέγχοντας τη σταθερότητα των κατιόντων μπορούμε να ελέγξουμε και την ταχύτητα του διακόπτη.

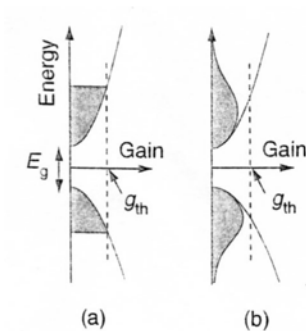


Σχήμα 3.41: Μόρια μέσα σε στρώμα. Στο κάτω σχήμα κάποιοι διακόπτες έχουν κλείσει.

### 3.15 ΛΕΙΖΕΡΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ (INJECTION LASER) [26]

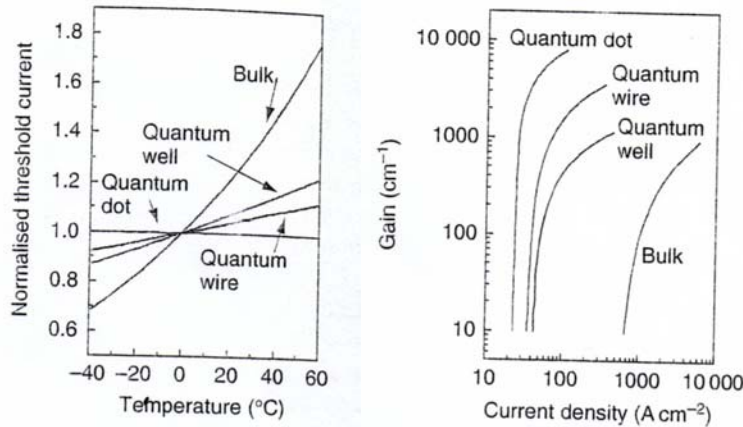
Τα ημιαγωγία λείζερ με έγχυση είναι μικρά, μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε φως με υψηλή αποτελεσματικότητα, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να ανοίξουν και να κλείσουν πολύ γρήγορα. Αυτό τα κάνει κατάλληλα για πολλές χρήσεις όπως μεταφορά και αποθήκευση δεδομένων ιατρικές χρήσεις και εκτυπώσεις.

Ένα λείζερ είναι ένας οπτικός ταλαντωτής και περιέχει ένα μηχανισμό ενίσχυσης σήματος με τον οποίο το φως ενισχύεται. Η ενίσχυση της απορρόφησης σε έναν ημιαγωγό συμβαίνει όταν υπάρχουν πολλά ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους\* μια κατάσταση γνωστή ως αναστροφή πληθυσμού\*.



Σχήμα 3.42: Η κατάσταση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.42a με κατειλημμένες μόνο τις χαμηλότερες ενεργειακά καταστάσεις αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες στο απόλυτο 0. Στις μη μηδενικές θερμοκρασίες οι φορείς διεγείρονται θερμικά σε υψηλότερες καταστάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα.3.42b

Καθώς η θερμοκρασία μεγαλώνει ένα αυξανόμενο κλάσμα από τους φορείς διεγείρεται θερμικά. Ως αποτέλεσμα ένα υψηλότερο ρεύμα πρέπει να εφαρμοστεί για να επιτευχθεί το απαιτούμενο κέρδος. Αυτός ο μηχανισμός είναι ο λόγος που το κατώτερο ρεύμα ενός λείζερ αυξάνει καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Στο όριο της κβαντικής τελείας με μια μόνο συγκεκριμένη κατάσταση ηλεκτρονίων όλοι οι φορείς πρέπει να έχουν την ίδια ενέργεια σε όλες τις θερμοκρασίες, δεν υπάρχουν καταστάσεις διαθέσιμες για θερμική διέγερση και το λείζερ πρέπει να εκπέμπει ένα πολύ χαμηλό και μη ευαίσθητο ρεύμα στις μεταβολές θερμοκρασίας.

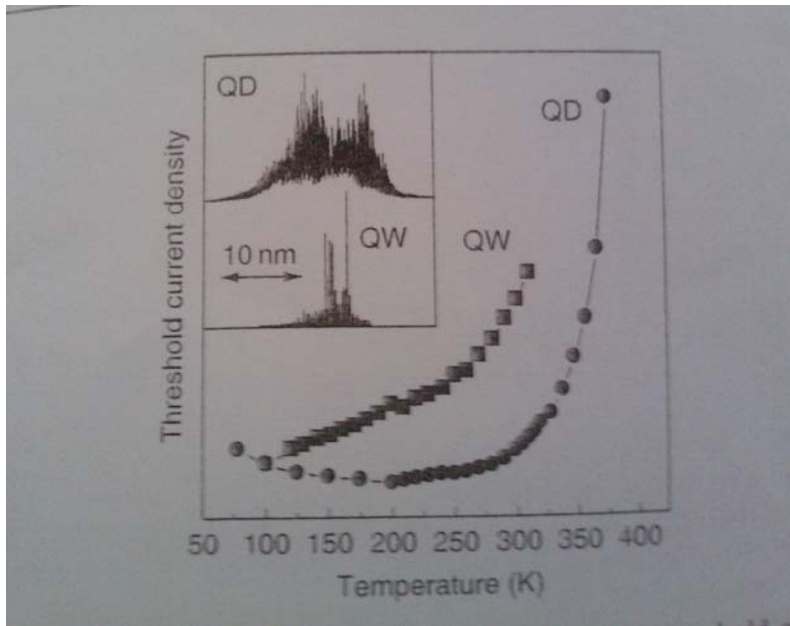


**Σχήμα 3.43:** Το σχήμα δείχνει πως το κέρδος συστημάτων που έχουν διαφορετικές διαστάσεις εξαρτάται από την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος.

Τα πιθανά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση νανοδομών σε ένα λέιζερ προβλέφθηκαν πρώτα από υπολογισμούς που έγιναν για ιδανικά συστήματα. Επίσης δείχνει την εξάρτηση του κατώτατου ρεύματος από τη θερμοκρασία. Η εξάρτηση της θερμοκρασίας από την πυκνότητα του κατώτατου ρεύματος μπορεί να περιγραφεί από μια εξίσωση της μορφής  $J_{th} = J_{th}^0 \exp(T/T_0)$  όπου  $J_{th}^0$  είναι η κατώτατη πυκνότητα ρεύματος στους  $0^\circ\text{C}$  και  $T_0$  είναι μία παράμετρος που καθορίζει τη θερμοκρασιακή ευαισθησία. Μια μεγαλύτερη  $T_0$  οδηγεί σε μικρότερη ευαισθησία. Για τα ιδανικά λέιζερς το  $T_0$  παίρνει τιμές  $104,285,481^\circ\text{C}$  και άπειρο. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται αποδεικνύοντας μια μειωμένη ευαισθησία στερεο  $\rightarrow$ πηγάδι  $\rightarrow$ καλώδια  $\rightarrow$ τελείες.

Ημιαγώγιμα λέιζερς βασισμένα σε κβαντικά πηγάδια χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε πολλές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένου αποθήκευση δεδομένων σε CD και DVD και μεταφορά δεδομένων μέσω οπτικών ινών. Τα λέιζερς βασισμένα σε κβαντικά καλώδια έχουν κατασκευαστεί παρόλο που η αποδοσή τους είναι περιορισμένη. Μεγαλύτερη πρόοδος έχει γίνει στα λέιζερς που βασίζονται στις κβαντικές τελείες. Σε θερμοκρασία δωματίου η κατώτατη πυκνότητα ρεύματος είναι περίπου το  $1/3$  της τιμής των λέιζερς βασισμένα σε κβαντικά πηγάδια και η ευστάθεια των κατώτατων ρευμάτων διπλασιάζεται.





**Σχήμα 3.44:** Σύγκριση φασμάτων λέιζερ με κβαντικές τελείες και φάσματα λέιζερ με κβαντικά πηγάδια.

Εκτός από χαμηλής πυκνότητας ρεύματα και θερμοκρασιακή σταθερότητα τα λέιζερ με κβαντικές τελείες προσφέρουν έναν μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων σε σχέση με τα υπόλοιπα λέιζερ. Όταν οι φορείς παγιδεύονται σε μια κβαντική τελεία η κίνηση τους περιορίζεται σε αντίθεση με τα λέιζερ κβαντικών πηγαδιών όπου οι φορείς που αιχμαλωτίζονται μέσα στο πηγάδι είναι ελεύθεροι να κινούνται μέσα στο επίπεδο του πηγαδιού. Οι κβαντικές τελείες είναι ιδιαίτερες κατάλληλες για την κατασκευή πολύ μικρών λέιζερ και λέιζερ για χρήση σε δύσκολο ραδιενεργό περιβάλλον. Η σταθερή θέση του φορέα εμποδίζει τους φορείς σε διαφορετικές κβαντικές τελείες από το να αλληλεπιδράσουν και υποσύνολα κβαντικών τελειών να δράσουν ως ανεξάρτητα λέιζερ.

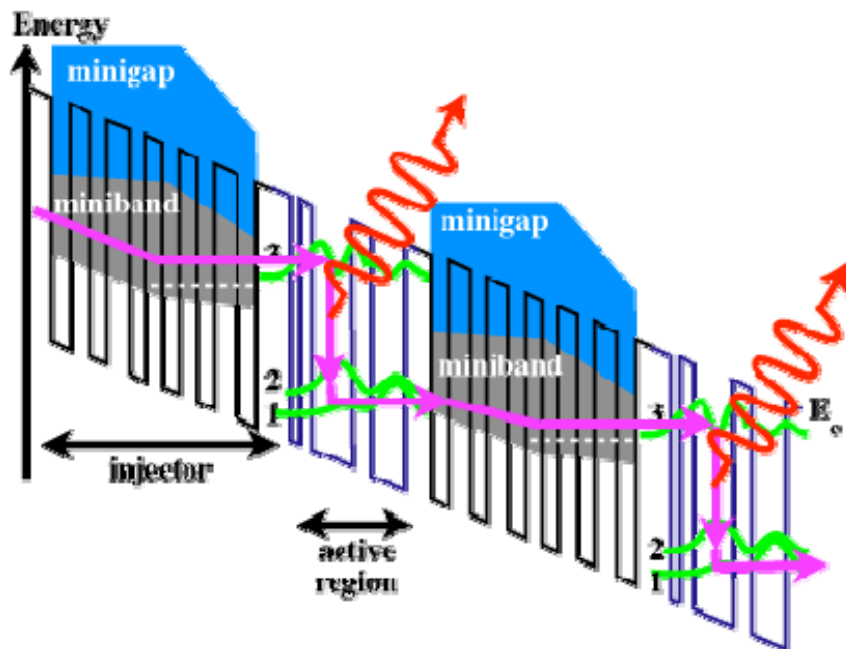
Το σχήμα 3.44 συγκρίνει φάσματα λέιζερ με κβαντικές τελείες και φάσματα λέιζερ με κβαντικά πηγάδια. Το αυξανόμενο πλάτος ενός φάσματος με κβαντικές τελείες είναι ξεκάθαρα ορατό. Οι κβαντικές τελείες επιτρέπουν την εκπομπή σε νέα μήκη κύματος. Λέιζερ κβαντικών πηγαδιών από GaInAs περιορίζονται σε 1,2μm από το κρίσιμο πάχος. Παρ'όλα αυτά κβαντικές τελείες InAs επιτρέπουν την παραγωγή λέιζερ που λειτουργούν στα 1,3μm με μερικές προοπτικές για συσκευές που λειτουργούν στα 1,55μm. Τα σύγχρονα λέιζερ των 1,3 και 1,55μm απαιτούν τη χρήση κβαντικών πηγαδιών.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος ημιαγωγίου λέιζερ βασίζεται στη γεωμετρία που στηρίζεται στην πλάγια ευθεία όπου το φως μεταδίδεται στο επίπεδο που ορίζεται από τα κβαντικά πηγάδια ή από τις κβαντικές τελείες. Σ' αυτή τη γεωμετρία τα κάτοπτρα σχηματίζονται σχίζοντας τον ημιαγωγό κατά μήκος μιας συγκεκριμένης κρυσταλλικής διεύθυνσης. Η διαφορά του δείκτη διάθλασης ανάμεσα στον αέρα και στον ημιαγωγό παράγει κάτοπτρα με αντανάκλαση 30%. Παρόλο που η αντανάκλαση είναι σχετικά χαμηλή και αντανάκλα μεγάλη απώλεια σε φωτόνια το κέρδος του συστήματος μπορεί να αυξηθεί για να ανταπεξέρθει σ' αυτή την απώλεια αυξάνοντας το μήκος της κοιλότητας. Τα τυπικά μήκη της κοιλότητας είναι ~1mm. Ένας βελτιωμένος τύπος laser είναι αυτός της κάθετης

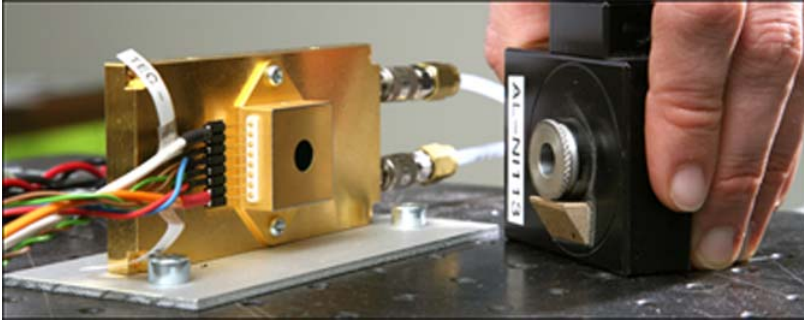
κοιλότητας.(VCSEL=vertical cavity surface emitting laser ).Σ' αυτή τη γεωμετρία το διαθέσιμο κέρδος είναι είναι πολύ μικρότερο από τα εγκάρσια λέιζερ καθώς το φως περνάει μόνο μια φορά διαμέσου ενός στρώματος κβαντικών τελειών αντί κατά μήκος του στρώματος.Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες να μειώνονται σημαντικά και μια αντανάκλαση 99,9% απαιτείται, μια τιμή που δεν μπορεί να επιτευχθεί με απλό ημιαγωγό.Αντί για αυτό τα κάτοπτρα σχηματίζονται εναποθέτοντας εναλλακτικά στρώματα δύο ημιαγωγών έχοντας διαφορετικούς δείκτες διάθλασης.

### 3.16 QUANTUM CASCADE LASERS [26]

Τα quantum cascade λέιζερς είναι ημιαγωγίμα λέιζερς που εκπέμπουν από το μέσο έως το μακρινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα λέιζερς που παρουσιάστηκαν προηγουμένως βασίζονται σε μετάβαση μεταξύ διαφορετικών ζωνών και κατατάσσονται σε διπολικά επειδή ο χειρισμός τους απαιτεί και ηλεκτρόνια και κενά.Είναι βασισμένα σε διάφορους συνδιασμούς ημιαγωγών και είναι ικανά να καλύψουν ένα πεδίο φάσματος από υπέρυθρη έως υπεριώδη ~2-0.4μm.Παρ'όλα αυτά τα λέιζερς που λειτουργούν στην υπέρυθρη περιοχή μεταξύ 2-100 μm είναι πιο δύσκολο να δημιουργηθούν εξαιτίας της έλλειψης ημιαγωγών με ικανοποιητικά μικρό χάσμα ζωνών.Αυτή η περιοχή φάσματος είναι τεχνολογικά σημαντική καθώς περιέχει πολλές μοριακές ζώνες απορρόφησης .Ποσοτική ανίχνευση ενός συγκεκριμένου αερίου είναι πιθανή αν ένα λέιζερ μπορεί να συντονιστεί σε μια από τις ζώνες απορρόφησης.Πρόσφατα ένας νέος τύπος ημιαγωγίμου λέιζερ έχει αναπτυχθεί που παρέχει εκπομπή στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας .



Σχήμα 3.45: Η μετάδοση λέιζινγκ συμβαίνει ανάμεσα στα επίπεδα 3 και 2 ο διαχωρισμός των οποίων είναι τυπικά σ'ένα εύρος 12-350meV αντιστοιχώντας σε μήκη κύματος 3,5-106μm



**Σχήμα 3.46:** Το σχήμα δείχνει μια τυπική δομή ενός κβαντικού cascade λέιζερ.

Το μήκος κύματος μπορεί να διαφοροποιηθεί επιλέγοντας ένα κατάλληλο πλάτος πηγαδιού.

Ηλεκτρόνια τοποθετούνται στο ανώτερο λείζινγκ επίπεδο 3 παίρνοντας από το σύνορο Β πριν μεταπέσουν στο χαμηλότερο επίπεδο 2 εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Το κέρδος που παρέχεται από μια βαθμίδα δεν είναι γενικά ικανοποιητικό για να υπερνικήσει τις απώλειες του συστήματος και οι δομές είναι βασισμένες σε 25 διπλές βαθμίδες παρόλο που έχουν αναφερθεί συσκευές με 100 βαθμίδες.

Τα συγκεκριμένα λέιζερ είναι βασισμένα σε ένα αριθμό διαφορετικών σχεδίων και λειτουργούν θαυμάσια με μήκος κύματος από 3.5-106 $\mu\text{m}$ . Παρ' όλα αυτά λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου έχει μόνο επιτευχτεί για πιο περιορισμένο εύρος από 4,5 έως 16  $\mu\text{m}$  και μόνο στα 4,5 και 16  $\mu\text{m}$  είχε διαρκώς θερμοκρασία δωματίου. Η συνεχής λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου σε μόνο 2 μήκη κύματος δεν είναι ικανοποιητική γι' αυτό γίνονται προσπάθειες να βελτιωθούν οι σχετικές συσκευές και ο χειρισμός γύρω από όλο το εύρος 6-9.1  $\mu\text{m}$  θα είναι δυνατός. Η λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου είναι δύσκολη εξαιτίας της παραγωγής θερμότητας, ένα αποτέλεσμα της πυκνότητας των ρευμάτων στα κατώτερα στρώματα που είναι περίπου διπλάσια από αυτή των λέιζερ με μεγάλο εύρος ζώνης. Αυτή η μη αποτελεσματικότητα προκύπτει επειδή τα ηλεκτρόνια είναι ικανά να ηρεμούν ανάμεσα στα επίπεδα λείζινγκ εκπέμποντας ένα φωτόνιο αντί για ένα φωτόνιο καταλήγοντας σε μια μεγάλη κατηγορία ηλεκτρονίων που σπαταλιούνται. Επιπλέον ηλεκτρόνια διεγείρονται θερμικά έξω από το κβαντικό πηγάδι. Παρά τις πυκνότητες ρευμάτων\* αυτά τα λέιζερ χρησιμοποιούνται για έναν αριθμό εφαρμογών συμπεριλαμβανομένου της καταγραφής αερίων, συστημάτων επικοινωνιών και ιατρικές απεικονίσεις. Στην περιοχή των τηλεπικοινωνιών το quantum cascade laser αναμένεται να αλλάξει ριζικά τα δεδομένα αφού δε θα χρειάζεται να σκαφτούν οι κεντρικοί δρόμοι ώστε να τοποθετηθούν καλώδια οπτικών ινών. Η σύνδεση θα γίνεται μέσω οπτικών συνδέσεων για τις οποίες δεν απαιτείται χώρος. Το μεγάλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου laser ότι μπορεί να διαπερνά την ομίχλη πολύ εύκολα κάνοντας τις συνδέσεις πολύ αποτελεσματικές.

### 3.17 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ [26]

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε μια πολύ σπουδαία εφαρμογή της που σχετίζεται με τη βιολογία και την ιατρική, τη χρήση της κβαντικής τελείας ως βιολογικού ανιχνευτή. Η βασική ιδέα αυτής της εφαρμογής είναι απλή. Δημιουργούμε γύρω από την τελεία ένα περίβλημα, από υλικό που προκαλεί τη σύζευξη της με προεπιλεγμένες βιολογικές δομές, όπως για παράδειγμα με ένα καρκινικό κύτταρο. Στη συνέχεια, η κβαντική τελεία απορροφά και εκπέμπει φως (μέσω της διαδικασίας του φθορισμού), αποκαλύπτοντας την παρουσία της αναζητούμενης βιολογικής δομής. Κατά την απορρόφηση φωτός τα ηλεκτρόνια μέσα στην κβαντική τελεία μεταβαίνουν σε καταστάσεις υψηλότερης ενέργειας. Στη γενική περίπτωση εμφανίζονται ενεργειακές απώλειες και είναι σημαντικό ότι τα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να επανέρχονται στις πρότερες, χαμηλότερης ενέργειας καταστάσεις, εκπέμποντας φωτόνια. Η δυνατότητα ακριβούς ρυθμίσεων των τιμών των ενεργειακών σταθμών σε μια κβαντική τελεία είναι αποφασιστικής σημασίας.

Για την κατασκευή κβαντικών τελειών χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί των ομάδων II-VI, όπως ο ZnSe, ο ZnS και το CdSe. Το πλεονέκτημα των παραπάνω υλικών είναι το μεγάλο ενεργειακό τους χάσμα. Επιπλέον, μπορούν να κατασκευαστούν με ποικίλους τρόπους. Ειδικά εάν αποβλέπουμε στην αυτοοργάνωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα σύστημα CdSe /ZnSe, αφού η μεγάλη ομοιογένεια των πλεγμάτων ZnSe και CdSe καταλήγει στην δημιουργία κβαντικών τελειών.

**Η επίδραση του μεγέθους:** Όταν ένα υλικό αποκτά νανοσκοπικό μέγεθος οι ιδιότητες του μεταβάλλονται. Αυτό οφείλεται σε πολλούς λόγους, όπως είναι η αύξηση του αριθμού των ατόμων της επιφάνειας σχετικά με τα άτομα στο εσωτερικό του υλικού. Ένας άλλος λόγος είναι η μεταβολή της δομής των ενεργειακών ζωνών. Αυτή οφείλεται στον πεπερασμένο χαρακτήρα της περιοδικότητας του κρυσταλλικού πλέγματος, η οποία για ένα κοινό μακροσκοπικό υλικό μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ότι εκτείνεται απεριόριστα.

Επιπλέον η δομή καθαυτή του κρυσταλλικού πλέγματος, μπορεί να μεταβληθεί στα νανοσκοπικά υλικά. Για παράδειγμα, τόσο ο χρυσός όσο και ο άργυρος, εμφανίζουν ως μακροσκοπικά υλικά κρυσταλλικό πλέγμα τύπου fcc. Για τεμάχια όμως 5-8nm, η απόκλιση από τη δομή fcc είναι εμφανής με αποτέλεσμα τη μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών.

Τελειώνοντας θα πρέπει να επισημανουμε, ότι ο ρόλος της νόθευσης των ημιαγωγικών υλικών, διαφοροποιείται από τα γνωστά, όταν αναφερόμαστε σε μεγέθη της κλίμακας του νανομέτρου. Για τους κοινούς ημιαγωγούς η συγκέντρωση των ατόμων νόθευσης είναι  $10^{16}$ - $10^{18}$  άτομα/cm<sup>3</sup>. Αυτό σημαίνει ότι μια κβαντική τελεία με ακμή 10nm δηλαδή όγκου  $10^3$  nm<sup>3</sup> διαθέτει έναν επιπλέον φορέα αγωγιμότητας. (ηλεκτρόνιο ή οπή)

### 3.18 ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΝΗΜΕΣ [26]

Η αποθήκευση φορτίου σε μια κβαντική τελεία έχει τη δυνατότητα να παρέχει συστήματα μνήμης υψηλής χωρητικότητας με τη δυνατότητα οπτικού και ηλεκτρικού διαβάσματος και γραψίματος. Αυτά τα συστήματα παρέχουν μια εναλλακτική λύση στις ηλεκτρονικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης που χρησιμοποιούν στις μέρες μας οι Η/Υ. Οι κβαντικές τελείες έχουν τυπικές πυκνότητες  $1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ένα στοιχείο το οποίο μπορεί να αυξηθεί τουλάχιστον 10 φορές χρησιμοποιώντας πολλαπλά στρώματα. Για εφαρμογές μνήμης η ανομοιογενής διασπορά κβαντικών τελειών είναι ένα πλεονέκτημα καθώς επιτρέπει στις ξεχωριστές κβαντικές τελείες να έχουν συγκεκριμένη διεύθυνση με τη χρήση ενός λέιζερ. Σε θερμοκρασία 145K είναι δυνατό να γίνει αποθήκευση φορτίου στις κβαντικές τελείες για πάνω από 8 ώρες. Αυτό το διάστημα αποθήκευσης μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όπου τα κενά διεγείρονται θερμικά. Παρόλα αυτά αποθήκευση φορτίου σε θερμοκρασία πάνω από 200K έχει παρατηρηθεί. Στις σύγχρονες συσκευές ένας σημαντικός αριθμός κβαντικών τελειών πρέπει να διεγερθεί καθώς η επίδραση μιας φορτισμένης κβαντικής τελείας στην αγωγιμότητα των 200DHZ είναι πολύ μικρή για να μετρηθεί. Αυτό υποδεικνύει ένα σημαντικό πρόβλημα με αυτές τις συσκευές παρόλο που το γράψιμο σε μια μόνο κβαντική τελεία είναι δυνατό. Μέθοδοι για διάβασμα και σβήσιμο πάνω στην κβαντική τελεία δεν έχουν ξεκαθαριστεί. Στις υψηλές θερμοκρασίες εκτός από τις απώλειες των φορέων από τη θερμική διέγερση των κβαντικών τελειών, η ομογενής διεύρυνση των μεταπτώσεων των κβαντικών τελειών εμφανίζεται να εμποδίζει το οπτικό γράψιμο σε ξεχωριστές κβαντικές τελείες.

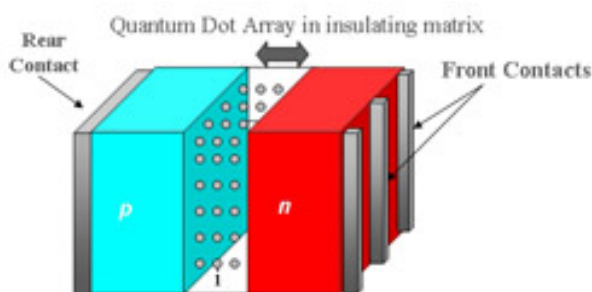
I

### 3.19 ΝΑΝΟΪΛΙΚΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ

Η χρήση των φωτοβολταϊκών είναι ένα όργανο για την ανθρώπινη εξερεύνηση και ανάπτυξη του διαστήματος. Στην εποχή μας έχουν σχεδιαστεί νέες συσκευές και χρησιμοποιούνται καινούργια υλικά ώστε να εξελιχτούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα στο διάστημα. Σκοπός είναι να μειώσουμε το βάρος των συσκευών και να διατηρήσουμε τη δομική τους ακεραιότητα. Η νέα προσέγγιση στο σχεδιασμό συσκευών είναι η χρήση νανουλικών σε PV κυψέλες.

#### ΚΥΨΕΛΗ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΛΕΙΑΣ

Η βάση στην ανάπτυξη των ημιαγωγικών συσκευών έγινε γύρω από το γεγονός ότι οι ηλεκτρικές θερμικές και οπτικές ιδιότητες αυτών των υλικών μπορούν να ελεγχθούν αλλάζοντας το μέγεθος του σωματιδίου. Μια μελέτη έδειξε ότι μια PV κυψέλη τοποθετημένη σε i-περιοχή μιας συνηθισμένης p-i-n επαφής προσφέρει αποτελεσματικότητα αντιστροφής 63,2%. Μια νέα μελέτη έχει επεκτείνει τη θεωρία σε δύο ζώνες και υπολόγισε μια οριακή αποτελεσματικότητα της τάξης του 71,7%.



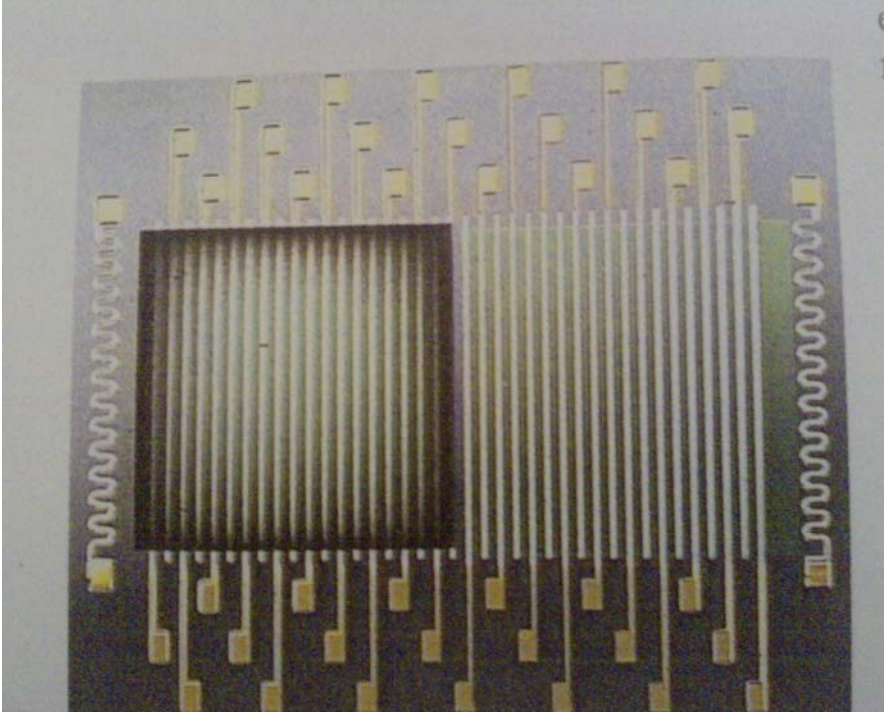
Σχήμα 3.47:Κυψέλη κβαντικής τελείας.  
**ΚΥΨΕΛΗ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ**

Εκτός από βελτίωση αποτελεσματικότητας οι φωτοβολταϊκές συσκευές πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών έδειξαν πρόσφατα βελτιωμένη αντοχή στην ακτινοβολία και βελτιωμένους θερμικούς συντελεστές σαν αποτέλεσμα της ένθετης νανοδομής. Τελικά οι κβαντικές τελείες και άλλα νανουλικά έχουν δείξει ότι παρέχουν μεγάλη βελτίωση στην κατασκευή λεπτών υμένων φωτοβολταϊκών και υβριδικών πολυμερών βασισμένων σε ηλιακές κυψέλες.

### 3.20 ΚΑΜΙΝΑ ΜΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Για την ανίχνευση οργανικών οσμών η ΚΑΜΙΝΑ (Karlsruhe micro nose) είναι εφοδιασμένη με ημιαγωγία οξείδια [29]. Κάθε τσιπ εξοπλίζεται με 2x20 στοιχεία αισθητήρα και δυο ανιχνευτές θερμοκρασίας στην μπροστινή πλευρά. Τρία διαφορετικά υλικά μπορούν να συνδιαστούν όπως οξείδιο του κασσιτέρου με ή χωρίς προσθήκη λευκόχρυσου, οξείδιο του βολφραμίου με ή χωρίς προσθήκη χρυσού και οξείδιο του σιδήρου. Στη συνέχεια τα στοιχεία καλύπτονται από μία λεπτή κεραμική μεμβράνη λίγων νανομέτρων επιλεκτικής διαπερατότητας είτε  $\text{SiO}_2$  ή  $\text{AlO}_3$ . Το τελικό αποτέλεσμα επιτρέπει την ανίχνευση απλών ενώσεων σε σύνθετο περιβάλλον. Οι επόμενες εφαρμογές είναι οι εξής.

- Ποιοτικός έλεγχος στην παραγωγή τροφίμων.
- Ανάλυση της οσμής της αναπνοής και του σώματος.
- Ανίχνευση διαρροής σωλήνων φυσικού αερίου.
- Περιβαλλοντική καταγραφή π.χ μολυσμένο έδαφος.



Σχήμα 3.48: KAMINA τσιπ πυριτίου 8mm x9mm.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ

## ΣΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ



## ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

### 4.1 ΘΕΩΡΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Από την ανακάλυψη του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας μεγάλες προσπάθειες έχουν γίνει για να ανακαλυφθούν οι αιτίες του φαινομένου. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 κάποιοι φυσικοί εξήγησαν την υπεραγωγιμότητα μέσω σημαντικών θεωριών όπως η θεωρία Ginzburg-Landau και τη θεωρία BCS. Γενικεύσεις αυτών των θεωριών σχηματίζουν τη βάση για την κατανόηση των φαινομένων που σχετίζονται με την υπεραγωγιμότητα.

### ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Heike Kamerlingh Onnes, που μελετούσε την αντίσταση στερεού υδραργύρου σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας το ήλιο ως ψυκτικό. Στη θερμοκρασία των 4.2K παρατήρησε ότι η αντίσταση εξαφανίστηκε [32]. Στις επόμενες δεκαετίες η υπεραγωγιμότητα παρουσιάστηκε σε αρκετά άλλα υλικά. Το 1913 ο μόλυβος βρέθηκε να είναι υπεραγωγίμος στα 7K και το 1941 το αζωτούχο νιόβιο βρέθηκε να είναι υπεραγωγίμο στα 16K.

Το επόμενο σημαντικό βήμα στη κατανόηση της υπεραγωγιμότητας συνέβη το 1933 όταν ο Meissner και ο Ochsenfeld διαπίστωσαν ότι οι υπεραγωγοί εξωθούν εφαρμοσμένα μαγνητικά πεδία, ένα φαινόμενο που έχει μείνει γνωστό ως φαινόμενο Meissner [33]. Το 1935 ο F. και H. London απέδειξαν ότι το φαινόμενο Meissner ήταν μια συνέπεια της ελαχιστοποίησης της ελεύθερης ενέργειας που μεταφέρεται από το υπεραγωγίμο ρεύμα [34]. Το 1950 η θεωρία Ginzburg-Landau τροποποιήθηκε από τους ίδιους [35]. Ο Abrikosov έδειξε ότι η θεωρία Ginzburg-Landau προβλέπει το διαχωρισμό των υπεραγωγών σε 2 κατηγορίες τύπου 1 και τύπου 2. Ο Abrikosov και ο Ginzburg τιμήθηκαν με βραβείο Νόμπελ το 2003 για τη δουλειά τους.

Το 1950 ο Maxwell και ο Reynolds ανακάλυψαν ότι η κρισιμη θερμοκρασία ενός υπεραγωγού εξαρτάται από την ισοτοπική μάζα\* του συστατικού στοιχείου [36] [37]. Αυτή η σημαντική ανακάλυψη βασίστηκε στην αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων φωτονίων καθώς ο μικροσκοπικός μηχανισμός είναι υπεύθυνος για την υπεραγωγιμότητα.

Η ολοκληρωμένη θεωρία της υπεραγωγιμότητας προτάθηκε τελικά το 1957 από τους Bardeen, Cooper, και Schrieffer [38]. Ανεξάρτητα από αυτούς το φαινόμενο εξηγήθηκε από το Nikolay Bogolybov. Αυτή η θεωρία BCS από τα αρχικά των εμπνευστών της παρουσίασε το υπεραγωγίμο ρεύμα σαν υπερυγρό\*. Ζευγάρια ηλεκτρονίων αλληλεπιδρούν ανάμεσα στην ανταλλαγή φωνονίων. Για αυτή τη δουλειά οι συγγραφείς βραβεύτηκαν με Νόμπελ το 1972.

Η θεωρία BCS ξεκίνησε το 1958 όταν ο Bogolybov απέδειξε ότι με την κυματοσυναρτηση μπορούσε να παραχθεί ένας μετασχηματισμός του ηλεκτρονικού Hamiltonian [39].

Το 1962 κατασκευάστηκε το πρώτο υπεραγωγίμο καλώδιο από κράμα τιτανίου-νιοβίου στη Westinghouse. Την ίδια χρονιά ο Josephson έκανε τη σημαντική θεωρητική πρόβλεψη ότι ένα υπερέυμα μπορεί να ρέει μεταξύ δύο κομματιών υπεραγωγών

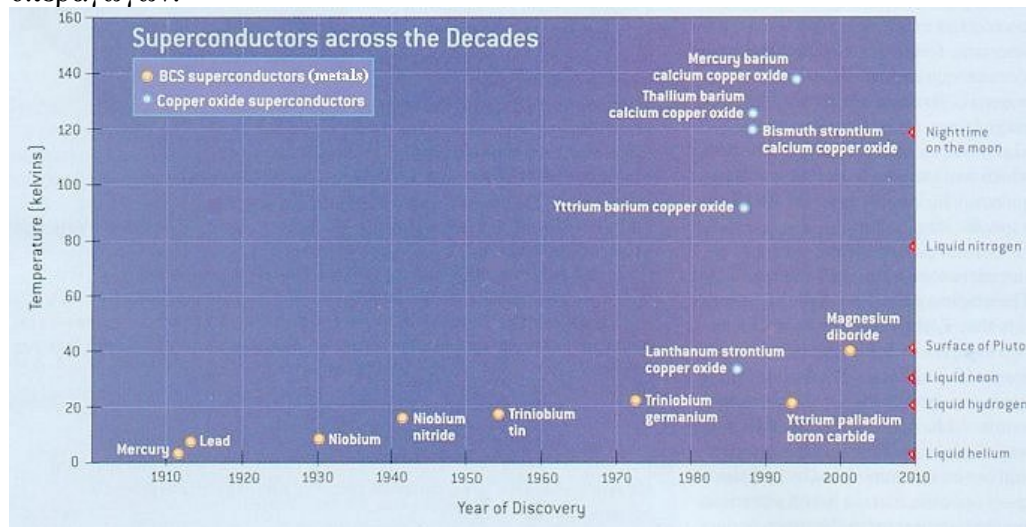
χωρισμένα από ένα στρώμα μονωτή [40]. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Josephson και χρησιμοποιείται από υπεραγωγίμες συσκευές όπως οι SQUIDS. Χρησιμοποιείται στις πιο ακριβείς μετρήσεις της μαγνητικής ροής. Ο Josephson τιμήθηκε με νόμπελ για τη δουλειά του το 1973.

Το 2008 ανακαλύφθηκε από τη Vallerii Vinokur και την Tatyana Baturina ότι ο ίδιος μηχανισμός που παρουσιάζει μια υπεραγωγιμότητα μπορούσε να παράγει μια υπεραγωγίμη κατάσταση σε κάποια υλικά με σχεδόν άπειρη ηλεκτρική αντίσταση [41].

## ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΕ "ΥΨΗΛΕΣ" ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Μέχρι το 1968 οι φυσικοί πίστευαν ότι η θεωρία BCS απαγόρευε υπεραγωγιμότητα σε θερμοκρασία πάνω από 30K. Εκείνη τη χρονιά ο Bednzort ανακάλυψε ότι η υπεραγωγιμότητα σε ένα περοβσκίτη με βάση το λανθάνιο είχε θερμοκρασία μετάπτωσης στα 35K [42]. Βρέθηκε ότι αντικαθιστώντας το λανθάνιο με ίτριο, φτιάχνοντας YBCO, η κρίσιμη θερμοκρασία ανέβαινε στα 92K, σημαντική ανακάλυψη αφού το υγρό άζωτο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τότε ως ψυκτικό (σε ατμοσφαιρική πίεση το σημείο βρασμού του αζώτου είναι 77K) [43]. Αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού το υγρό άζωτο μπορεί να παραχθεί φτηνά και δεν εμφανίζει κάποια από τα προβλήματα του ηλίου στα δίκτυα σωληνών. Πολλοί άλλοι υπεραγωγοί έχουν ανακαλυφτεί από τότε και η θεωρία της υπεραγωγιμότητας σε αυτά τα υλικά είναι μια από τις προκλήσεις των θεωρητικών θεμάτων φυσικής.

Από το 1993 ο υπεραγωγός της υψηλότερης θερμοκρασίας ήταν ένα κεραμικό υλικό που αποτελείται από θάλλιο υδράργυρο ασβέστιο και οξυγόνο με κρίσιμη θερμοκρασία 138K [44]. Το Φεβρουάριο του 2008 ανακαλύφθηκε μια οικογένεια υπεραγωγών βασισμένη στο σίδηρο [45], [46]. Ο Hideo Hosono από το Ινστιτούτο του Τόκιο και οι συνάδελφοι του βρήκαν ότι το οξειδίο του λανθανίου με σίδηρο, φθόριο και αρσενικό γίνεται υπεραγωγός κάτω από τους 26K. Οι επακόλουθες έρευνες από άλλες ομάδες δείχνουν ότι αντικαθιστώντας το λανθάνιο με άλλα σπάνια στοιχεία της γης όπως το δημήτριο, το σαμάριο, το νεοδύμιο και το πρασινοδύμιο καταλήγει σε υπεραγωγούς που δουλεύουν στα 52K. Οι ειδικοί ελπίζουν ότι έχοντας μια οικογένεια ακόμη να μελετήσουν θα καταλήξουν στην τελική θεωρία των υπεραγωγών.



Σχήμα 4.1: Στο σχήμα βλέπουμε ότι με το πέρασμα των χρόνων χρησιμοποιούνται υπεραγωγοί υψηλότερης θερμοκρασίας.

## 4.2 ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΑΓΩΓΩΝ

Οι περισσότερες ιδιότητες των υπεραγωγών ποικίλουν από υλικό σε υλικό, όπως η θερμοχωρητικότητα \*, η κρίσιμη θερμοκρασία, το κρίσιμο πεδίο και η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος στην οποία η υπεραγωγιμότητα καταστρέφεται.

Από την άλλη πλευρά υπάρχουν μια σειρά από ιδιότητες οι οποίες είναι ανεξάρτητες από το υλικό. Για παράδειγμα όλοι οι υπεραγωγοί έχουν μηδενική αντίσταση σε χαμηλά εφαρμοσμένα ρεύματα όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Η ύπαρξη αυτών των κοινών ιδιοτήτων σημαίνει ότι η υπεραγωγιμότητα είναι μια κατέχει διακεκριμένες ιδιότητες οι οποίες είναι ανεξάρτητες από μικροσκοπικές λεπτομέρειες.

Η πιο απλή μέθοδος να μετρησουμε την ηλεκτρική αντίσταση ενός δείγματος κάποιου υλικού είναι να τοποθετήσουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά με μία ηλεκτρική πηγή και να υπολογίσουμε την τάση στο δείγμα. Η αντίσταση στο δείγμα δίνεται από τον τύπο του Ohm  $R=V/I$ . Εάν η τάση είναι μηδενική αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση είναι μηδενική και το δείγμα είναι στην υπεραγωγίμη κατάσταση.

Οι υπεραγωγοί είναι επίσης ικανοί να διατηρήσουν ένα ρεύμα χωρίς να εφαρμόζεται τάση, μια ιδιότητα που εκμεταλλεύονται στους υπεραγωγίμους ηλεκτρομαγνήτες. Πειράματα έχουν δείξει ότι τα ρεύματα σε υπεραγωγίμα πηνία μπορούν να εξακολουθούν για χρόνια χωρίς σημαντικό υποβιβασμό. Πειραματικά στοιχεία δείχνουν ότι η διάρκεια ζωής ενός παραμένουτος ρεύματος ξεπερνάει την υπολογισμένη διάρκεια του σύμπαντος.

Σε έναν υπεραγωγό το ρεύμα ηλεκτρονίων δε μπορεί να αναλυθεί σε ξεχωριστά ηλεκτρόνια. Αποτελείται από δεσμευμένα ζευγάρια ηλεκτρονίων γνωστά ως ζευγάρια Cooper. Γι' αυτό αν το  $\Delta E$  είναι μεγαλύτερο από τη θερμική ενέργεια του πλέγματος που δίνεται από τη σχέση  $\Delta E=K*T$  όπου  $K$  είναι η σταθερά του Boltzmann και  $T$  είναι η θερμοκρασία δε θα διαχυθεί από το πλέγμα. Το ρευστό που αποτελείται από Cooper ζευγάρια είναι ένα υπερυγρό\* που σημαίνει ότι μπορεί να ρέει χωρίς ενεργειακές απώλειες.

Στα υπεραγωγίμα υλικά τα χαρακτηριστικά της υπεραγωγιμότητας εμφανίζονται όταν η θερμοκρασία  $T$  πέσει κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$ . Η τιμή αυτής της κρίσιμης θερμοκρασίας διαφέρει από υλικό σε υλικό. Ο στερεός υδράργυρος για παράδειγμα έχει κρίσιμη θερμοκρασία 42K. Το 2001 η υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία βρέθηκε για ένα συμβατικό υπεραγωγό στους 39K. Οι υπεραγωγοί που περιέχουν ανιόντα χαλκού (cuprate) μπορούν να έχουν πολύ υψηλότερες κρίσιμες θερμοκρασίες. Για παράδειγμα η ένωση  $YBa_2Cu_3O_7$  έχει κρίσιμη θερμοκρασία 92K και κάποι άλλοι υπεραγωγοί με βάση τον υδράργυρο έχουν κρίσιμες θερμοκρασίες πάνω από 130K. Η εξήγηση για αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες παραμένει άγνωστη. Τα ζευγάρια ηλεκτρονίων με την ανταλλαγή φωνονίων εξηγούν την υπεραγωγιμότητα στους συμβατικούς υπεραγωγούς αλλά όχι στους νεότερους που έχουν πολλή υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία.

### 4.3 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MEISSNER.

Όταν ένας υπεραγωγός τοποθετείται σε ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο  $H$ , το πεδίο διεισδύει στον υπεραγωγό μόνο σε μια μικρή απόσταση  $\lambda$  που ονομάζεται βάθος διείσδυσης. Μέσα στη μάζα του υλικού το μαγνητικό πεδίο εξασθενεί εκθετικά ως το 0. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο Meissner και είναι χαρακτηριστικό της υπεραγωγιμότητας. Για τους περισσότερους υπεραγωγούς το βάθος διείσδυσης είναι της τάξης των 100nm. Σύμφωνα με το νόμο του Lenz όταν ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σ'ένα αγωγό θα επάγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργεί ένα αντίθετο μαγνητικό πεδίο. Σ'ένα τέλειο αγωγό, ένα αυθαίρετα μεγάλο ρεύμα μπορεί να επαχθεί και το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει ακυρώνει το εφαρμοσμένο πεδίο.

Το φαινόμενο Meissner διακρίνεται από αυτό επειδή ένας υπεραγωγός εξωθεί όλα τα μαγνητικά πεδία όχι μόνο αυτά που μεταβάλλονται. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα υλικό στην κανονική του κατάσταση που περιέχει ένα σταθερό εσωτερικό μαγνητικό πεδίο μετά την ψύξη του υλικού θα περιμέναμε την αιφνίδια έξοδο από το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο που δε θα περιμέναμε σύμφωνα με το νόμο του Lenz.

Το φαινόμενο Meissner εξηγήθηκε από τους αδερφούς Fritz και Heinz London που έδειξαν ότι η ηλεκτρομαγνητική ελεύθερη ενέργεια σ'ένα υπεραγωγό ελαχιστοποιείται. Η εξίσωση του London προβλέπει ότι το μαγνητικό πεδίο σ'ένα υπεραγωγό εξασθενεί εκθετικά από την τιμή που έχει στη επιφάνεια.

Το φαινόμενο Meissner δεν ισχύει όταν το μαγνητικό πεδίο είναι πολύ μεγάλο. Οι υπεραγωγοί μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Στους υπεραγωγούς τύπου I η υπεραγωγιμότητα καταστρέφεται απότομα όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου ανεβαίνει παραπάνω από μια κρίσιμη τιμή  $H_c$ . Ανάλογα με τη γεωμετρία του δείγματος μπορούν να υπάρχουν δύο περιοχές, στη μια το υλικό να μεταφέρει το μαγνητικό πεδίο και στην άλλη περιοχή το υπεραγωγίμο υλικό να μην περιέχει καθόλου πεδίο. Στον τύπο II οι υπεραγωγοί αυξάνουν το εφαρμοσμένο πεδίο σε μια κρίσιμη τιμή  $H_c$  που καταλήγει σε μία κατάσταση στην οποία ένα αυξανόμενο ποσό μαγνητικής ροής διαπερνά το υλικό αλλά δεν υπάρχουν ίχνη αντίστασης αφού το υλικό είναι πολύ μεγάλο.

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού μειώνεται σταδιακά καθώς η θερμοκρασία πέφτει. Ωστόσο στους συνηθισμένους αγωγούς όπως ο χαλκός και το ασήμι οι προσμίξεις εμποδίζουν ένα χαμηλότερο όριο. Ακόμη κοντά στο απόλυτο μηδέν ένα δείγμα χαλκού δείχνει μια μη μηδενική αντίσταση. Η αντίσταση ενός υπεραγωγού από την άλλη πέφτει απότομα στο μηδέν όταν το υλικό ψύχεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία. Ένα ρεύμα σε ένα βρόγχο υπεραγωγίμου σύρματος μπορεί να εξακολουθήσει να υπάρχει χωρίς πηγή ισχύος.

Η υπεραγωγιμότητα είναι ένα κβαντικό μηχανικό φαινόμενο. Δε μπορεί να κατανοηθεί απλά σαν την τέλεια αγωγιμότητα στην κλασική φυσική. Η υπεραγωγιμότητα συμβαίνει σε μια μεγάλη ποικιλία υλικών συμπεριλαμβανομένου απλών υλικών όπως χαλκός και αλουμίνιο, διάφορα μεταλλικά κράματα και μερικούς ημιαγωγούς με προσμίξεις. Η υπεραγωγιμότητα δεν εμφανίζεται σε ευγενή μέταλλα όπως χρυσός και ασήμι ούτε σε καθαρά δείγματα σιδηρομαγνητικών μετάλλων.

Το 1986 η ανακάλυψη μιας οικογένειας κεραμικών υλικών γνωστά ως υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας με κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από 90K ώθησε τη έρευνα στην υπεραγωγιμότητα για πολλούς λόγους. Ξαν θέμα έρευνας αυτά τα υλικά

αντιπροσωπεύουν ένα νέο φαινόμενο που δεν εξηγείται από την τρέχουσα θεωρία. Επιπλέον επειδή η υπεραγώγιμη κατάσταση περνάει σε θερμοκρασίες που μπορούν να επιτευχθούν πιο εύκολα δίνει τη δυνατότητα σε εμπορικές εφαρμογές να πραγματοποιηθούν πιο εύκολα.

#### 4.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Από τη στιγμή που ο Josephson προέβλεψε την πιθανότητα της εμφάνισης του φαινομένου της σήραγγας του υπεραγώγιμου ζεύγους ηλεκτρονίων σε ένα σύστημα υπεραγωγού-μονωτή υπεραγωγού η τεχνολογία υπεραγώγιμων ηλεκτρονικών έχει επιτύχει μεγάλη πρόοδο. Υπεραγώγιμα ηλεκτρονικά βασισμένα στο φαινόμενο Josephson καλύπτουν ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά, οι αναλογικές εφαρμογές περιλαμβάνουν SQUIDS\* και σταθεροποιητές τάσης. Ψηφιακές εφαρμογές είναι ακόμη υπό ανάπτυξη επειδή η κλίμακα της τεχνολογίας είναι μεγαλύτερη από αυτή των αναλογικών εφαρμογών. Ωστόσο η υπεραγώγιμη ψηφιακή τεχνολογία είναι μια τεχνολογία οδηγός για τις άλλες εφαρμογές όπως SQUIDS και σταθεροποιητές τάσης. Η τεχνολογία κατασκευής δίδων υψηλής ποιότητας έχει αναπτυχθεί κυρίως για ψηφιακές εφαρμογές αλλά αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται για ανάπτυξη αναλογικών συσκευών υψηλής απόδοσης.

Η ιδέα της εφαρμογής υπεραγωγών σε μεταγώγιμη συσκευή προτάθηκε στα μέσα του 1950. Μια συσκευή με όνομα κρυστατικός διακόπτης ήταν η πρώτη στην οποία η μετάβαση ανάμεσα στην υπεραγώγιμη και στην κανονική κατάσταση σε ένα υπεραγώγιμο καλώδιο χρησιμοποιήθηκε για την μεταγωγή μιας διαδρομής ρεύματος. Ωστόσο η ταχύτητα μεταγωγής του κρυστατικού διακόπτη ήταν αρκετά αργή πάνω από 1ns.

Λίγο αργότερα από την πρόβλεψη του Josephson η πρώτη μεταγώγιμη συσκευή παρουσιάστηκε από τον J. Matisoo της IBM το 1963. Η συσκευή παρουσίαζε ταχύτητα μεταγωγής κάτω από 1ns πολύ καλός χρόνος για τα μέχρι τότε δεδομένα. Ακολουθώντας αυτή την εξέλιξη η IBM έκανε συστηματική προσπάθεια να κατασκευάσει έναν υπολογιστή με βάση τη θεωρία του Josephson αλλά το 1983 ανακοινώθηκε ότι σταματούσαν οι έρευνες. Κατά τη διάρκεια της έρευνας αναπτύχθηκαν λογικά κυκλώματα κυκλώματα μνήμης και τεχνολογίες για κατασκευή της συσκευής.

Ενθουσιασμένοι από τα αποτελέσματα της IBM, άλλα μέρη του κόσμου όπως η Ευρώπη και η Ιαπωνία, ενδιαφέρθηκαν για την τεχνολογία Josephson και ξεκίνησαν έρευνα και ανάπτυξη σ' αυτό τον τομέα. Το υπουργείο διεθνούς εμπορίου και βιομηχανίας της Ιαπωνίας κανόνισε ένα ερευνητικό πρόγραμμα για την ανάπτυξη υπολογιστών στο οποίο οι συσκευές Josephson και οι συσκευές HEMT (Τρανζίστορ υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων) επιλέχθηκαν να είναι υποψήφια για τις συσκευές υψηλής ταχύτητας που θα χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικά συστήματα υπολογιστών. Τα ηλεκτροτεχνικά εργαστήρια NEC, Fujitsu και Hitachi έγιναν μέλη του προγράμματος με σκοπό να εξελίξουν τις συσκευές Josephson. Την ίδια στιγμή η εταιρεία τηλεφωνίας Nippon ξεκίνησε έρευνα για την ψηφιακή τεχνολογία Josephson. Το ερευνητικό πρόγραμμα του υπουργείου στην Ιαπωνία συνέχισε την έρευνα από το σημείο που την είχε σταματήσει η

IBM. Οι Ιαπωνικές προσπάθειες κατέληξαν σε μεγάλη πρόοδο στην τεχνολογία υλικών και συστημάτων.

Η πιο σημαντική καινοτομία στις τεχνολογίες Josephson είναι ότι τώρα τα κυκλώματα μπορούν να κατασκευαστούν με διόδους Nb ή NbN αντί για κράμα Pb. Η εισαγωγή πυρίμαχων διόδων έχει αλλάξει ολοκληρωτικά τη διαδικασία κατασκευής συσκευών επιτρέποντας την κατασκευή κυκλωμάτων με LSI. (Μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση).

#### 4.5 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ

##### Μέταλλα

Αργίλιο	Κασσίτερος	Ίνδιο	Λίθιο
Άφνιο	Λανθάνιο	Ιρίδιο	Ζιρκόνιο
Βολφράμιο	Μολυβδαίνιο	Όσμιο	Ψευδάργυρος
Βανάδιο	Μόλυβδος	Ρόδιο	Τιτάνιο
Κάδμιο	Νίοβιο	Υδράργυρος	Ταντάλιο

##### Οξειδία

Οξείδιο του γαλλίου	Μονοξείδιο του πυριτίου
Οξείδιο του γερμανίου	Πεντοξείδιο του τανταλίου
Οξείδιο του αφνίου	Οξείδιο του τελλουρίου
Οξείδιο του ινδίου	Οξείδιο του κασσιτέρου
Οξείδιο του κασσίτερου-ινδίου	Οξείδιο του τιτανίου
Οξείδιο του λανθανίου	Οξείδιο του βολφραμίου
Οξείδιο του λιθίου	Οξείδιο του βαναδίου
Οξείδιο του μαγνησίου	Οξείδιο του υτρίου
Οξείδιο του μολυβδαίνιου	Οξείδιο του βαρίου υτρίου Χαλκού YBCO
Πεντοξείδιο του νιοβίου	Οξείδιο του ψευδαργύρου-αργιλίου

Οξείδιο σπάνιας γαίας	Οξείδιο του ψευδαργύρου
Οξείδιο του ρουθηνίου	Οξείδιο του ζirkονίου
Οξείδιο του σκανδίου	Οξείδιο του στροντίου

### **Βορίδια**

Χρωμιούχο βορίδιο	Βορίδιο του λανθανίου	Βορίδιο του νιοβίου	Βορίδιο του βολφραμίου
Βορίδιο του αφνίου	Βορίδιο του μαγνησίου	Βορίδιο του τανταλίου	Βορίδιο του βαναδίου
Βορίδιο του σιδήρου	Βορίδιο του μολύβδου	Βορίδιο του τιτανίου	Βορίδιο του ζirkονίου

### **Καρβίδια**

Καρβίδιο του βορίου	Καρβίδιο του μολύβδου	Καρβίδιο του τανταλίου	Καρβίδιο του βολφραμίου κοβαλτίου
Χρωμιούχο καρβίδιο	Καρβίδιο του νιοβίου	Καρβίδιο του τιτανίου	Καρβίδιο του βαναδίου
Καρβίδιο του αφνίου	Καρβίδιο του πυριτίου	Καρβίδιο του βολφραμίου	Καρβίδιο του ζirkονίου

### **Φθορίδια**

Φθορίδιο του αργιλίου	Φθορίδιο του γαδολινίου	Φθορίδιο του καλίου	Φθορίδιο του τερβίου
Φθορίδιο του χρωμίου	Φθορίδιο του λανθανίου	Φθορίδιο του πρασινοδύμιου	Φθορίδιο του θορίου
Φθορίδιο του ασβεστίου	Φθορίδιο του μολύβδου	Φθορίδιο του σαμαρίου	Φθορίδιο του θουλίου
Φθορίδιο του δημητρίου	Φθορίδιο του λιθίου	Φθορίδιο του αργιλίου νατρίου	Φθορίδιο του υττέρβιου
Φθορίδιο του καισίου	Φθορίδιο του μαγνησίου	Φθορίδιο του νατρίου	Φθορίδιο του υτρίου
Φθορίδιο του ευρωπαϊού	Φθορίδιο του νεοδυμίου	Φθορίδιο του στροντίου	

### **Νιτρίδια**

Νιτρίδιο του αργιλίου	Νιτρίδιο του γαλλίου	Νιτρίδιο του πυριτίου	Νιτρίδιο του πυριτίου
Νιτρίδιο του βορίου	Νιτρίδιο του αφνίου	Νιτρίδιο του τιτανίου	
Νιτρίδιο του νιοβίου	Νιτρίδιο του τανταλίου	Νιτρίδιο του ζirkονίου	

### Πυριτίδια

Πυριτίδιο του χρωμίου	Πυριτίδιο του μαγγανίου	Πυριτίδιο του λευκόχρυσου
Πυριτίδιο του κοβαλτίου	Πυριτίδιο του μολύβδου	Πυριτίδιο του τανταλίου
Πυριτίδιο του αφνίου	Πυριτίδιο του νιοβίου	Πυριτίδιο του τιτανίου

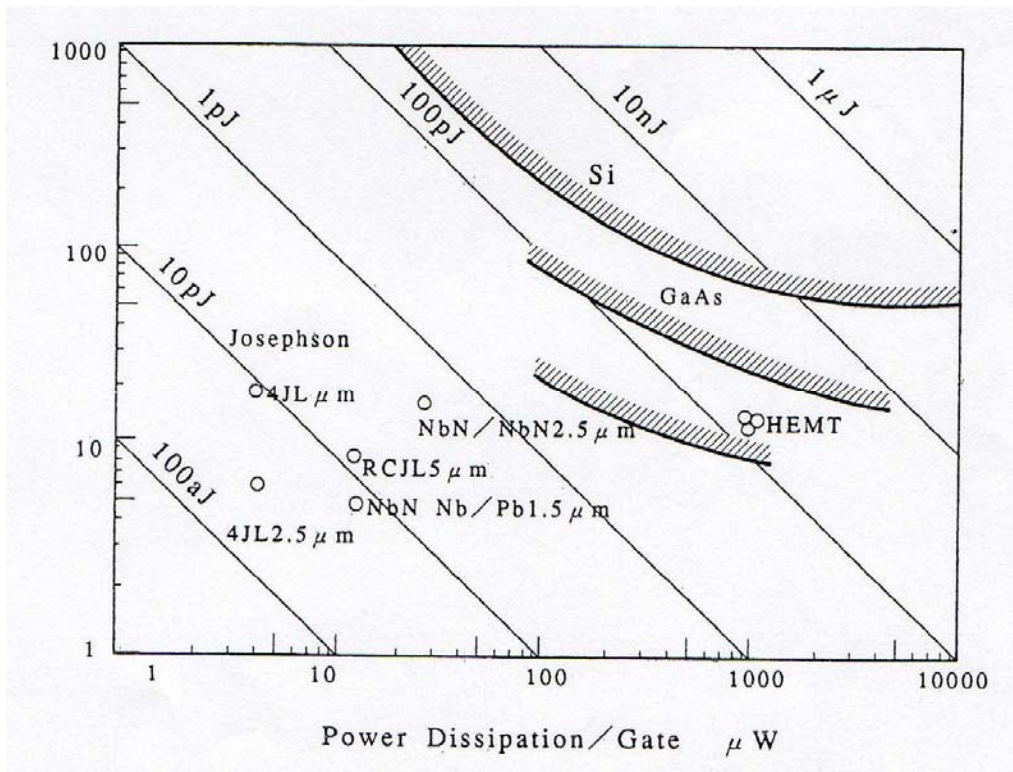
### Σεληνίδια, σουλφίδια, τελλουρίδια

Σεληνίδιο του αντιμονίου	Σουλφίδιο του ευρωπαϊού	Σεληνίδιο του μολυβδαινίου	Τελλουρίδιο του τανταλίου
Τελλουρίδιο του αντιμονίου	Σουλφίδιο του γαδολινίου	Σουλφίδιο του μολυβδαινίου	Σεληνίδιο του Βολφραμίου
Σουλφίδιο του αρσενικού	Σεληνίδιο του γερμανίου	Τελλουρίδιο του μολυβδαινίου	Σουλφίδιο του βολφραμίου
Σεληνίδιο του βισμούθιου	Τελλουρίδιο του γερμανίου	Σεληνίδιο του Νιοβίου	Τελλουρίδιο του βολφραμίου
Τελλουρίδιο του βισμούθιου	Σεληνίδιο του ινδίου	Σουλφίδιο του νιοβίου	Σεληνίδιο του ψευδαργύρου
Σεληνίδιο του καδμίου	Σεληνίδιο του μολύβδου	Τελλουρίδιο του νιοβίου	Σουλφίδιο του ψευδαργύρου
Σουλφίδιο του καδμίου	Σουλφίδιο του μολύβδου	Σεληνίδιο του τανταλίου	Τελλουρίδιο του ψευδαργύρου
Τελλουρίδιο του καδμίου	Τελλουρίδιο του μολύβδου	Σουλφίδιο του τανταλίου	

### 4.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΓΩΓΙΜΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ [47]

Το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό των επαφών Josephson είναι ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν μεταγωγή με υψηλή ταχύτητα και χαμηλή απώλεια ισχύος.





**Σχήμα 4.2:** Στο σχήμα τα χαρακτηριστικά καθυστέρησης ισχύος συγκρίνονται σε διάφορα ημιαγώγιμα στοιχεία.

Όπως φαίνεται στο σχήμα οι καθυστερήσεις μεταγωγής των στοιχείων Josephson κυμαίνονται σε τιμές κάτω από 10ps που είναι μια τάξη μεγέθους γρηγορότερη από οποιαδήποτε άλλη ημιαγώγιμη συσκευή. Επιπλέον η απώλεια ισχύος είναι μερικά  $\mu W$  δύο ή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από εκείνες των ημιαγώγιμων συσκευών.

Η μικρή απώλεια ισχύος των στοιχείων Josephson είναι εξαιρετικά σημαντική για την επίτευξη υψηλής ταχύτητας συστήματος. Για τη μείωση της καθυστέρησης του συστήματος είναι απαραίτητο να έχουμε πολύ συνεπυγμένες συσκευές. Η χαμηλή απώλεια ισχύος των συσκευών Josephson κάνει δυνατές τις πολύ συνεπυγμένες συσκευές μειώνοντας την ολική αλληλοσύνδεση ή το μήκος καλωδίων καταλήγοντας σε ένα σύστημα με υψηλή ταχύτητα. Ένα άλλο πλεονέκτημα των H/Y Josephson είναι ότι οι υπεραγώγιμες απογυμνωμένες γραμμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύνδεση chips. Η υπεραγώγιμη γραμμή μπορεί να μεταδώσει σήματα χωρίς απώλεια μέχρι τη συχνότητα που αντιστοιχεί στο ενεργειακό κενό. Αυτό σημαίνει ότι οι υπεραγώγιμες γραμμές παρέχουν ένα ιδανικό μέσο μετάδοσης των παλμών.

Φυσικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την καλωδίωση των ημιαγώγιμων συσκευών. Ωστόσο είναι δύσκολο για ημιαγώγιμες συσκευές να χρησιμοποιούν υπεραγώγιμη καλωδίωση σε θερμοκρασία He 4.2K επειδή η απώλεια ισχύος των ημιαγώγιμων συσκευών είναι πολύ υψηλή για να ψύξει τις συσκευές με υγρό He. Η πρόσφατη ανακάλυψη ενός υπεραγώγιμου οξειδίου με υψηλή  $T_c$  μεγαλύτερη από 77K κάνουν εφικτή την εφαρμογή τους για την καλωδίωση συσκευών που λειτουργούν στους 77K.

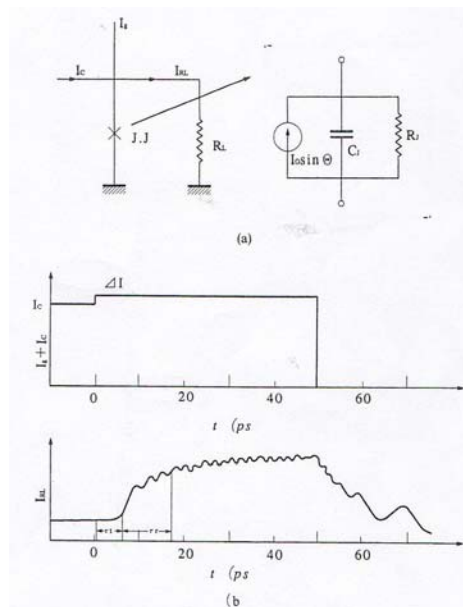
Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων Josephson έχει θετικές και αρνητικές συνέπειες. Η χρήση χαμηλής θερμοκρασίας για τη λειτουργία συστημάτων Josephson αυξάνει τη δυσκολία συνδέσεων με συστήματα θερμοκρασίας δωματίου καθώς επίσης αυξάνει και τα κόστη συντήρησης. Ωστόσο η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας παρέχει μερικά πλεονεκτήματα για ένα μεγάλο σύστημα υπολογιστών. Για παράδειγμα η μικρή απώλεια ισχύος των συσκευών Josephson προκαλείται από τη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πολλή χαμηλή κατανάλωση ισχύος επιβεβαιώνεται από την πολλή χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Στη χαμηλή θερμοκρασία υγρού He, ηλεκτροχημικές αντιδράσεις όπως η μετανάστευση ηλεκτρονίων αναστέλλονται γεγονός που κάνει την αξιοπιστία του συστήματος μεγάλη.

Έχοντας αυτά τα πλεονεκτήματα, οι συσκευές Josephson με γρήγορες ταχύτητες μεταγωγής μικρότερες από 10ps και χαμηλή απώλεια ισχύος αρκετών  $\mu W$  έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν ένα σύστημα υπολογιστών που η αποδοσή του δε μπορεί να συγκριθεί με ημιαγωγικό σύστημα.

#### 4.7 ΠΥΛΕΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ JOSEPHSON [48]

Συνήθως οι πύλες Josephson κάνουν χρήση της μεταγωγής σε μια δίοδο που εμφανίζει το φαινόμενο της σήραγγας ανάμεσα σε μια υπεραγωγίμη κατάσταση και μια κατάσταση τάσης που αντιστοιχεί σε λογικές καταστάσεις 0 και 1 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: Η αρχή λειτουργίας των πυλών Josephson.

Αρχικά μια απλή δίοδος Josephson πολώνεται με ένα ρεύμα πόλωσης  $I_g$  κάτω από το κρίσιμο ρεύμα  $I_0$  της διόδου. Εάν ένα ρεύμα εισόδου  $I_c$  προστεθεί στο  $I_g$  η δίοδος περνάει στην μόνιμη κατάσταση.

Η καθυστέρηση ανοίγματος ορίζεται από το χρόνο που απαιτείται για να αυξηθεί η τάση σε  $t_o = \frac{\pi}{2} + 0,5$ . Για να υπολογίσουμε την καθυστέρηση turn-on υποθέτουμε μια κατάσταση στην οποία η διόδος πολώνεται  $I_g = I_0$  αφού η φάση διόδου είναι  $\theta = \pi/2$ . στο αρχικό στάδιο και τότε το ρεύμα πόλωσης αυξάνεται σε  $\Delta I$ .

Η ώρα που απαιτείται για να φτάσει σε  $\frac{\pi}{2} + 0,5$  γράφεται σαν  $\tau_t = \sqrt{\frac{c_j \Phi_0}{I_0 \Delta I}}$  (I) όπου

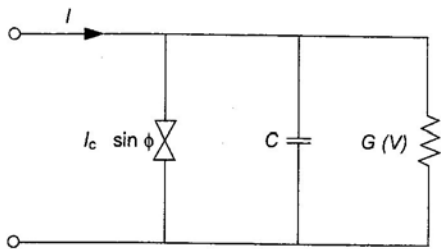
$c_j$  και  $\Phi_0$  είναι η χωρητικότητα της διόδου και η κβαντική ροή αντίστοιχα. Η εξίσωση (I) δείχνει ότι η καθυστέρηση turn on είναι ανάλογη στη  $\sqrt{C_j}$  και αντιστρόφως ανάλογη στο  $\sqrt{\Delta I}$ .

Το σχήμα 4.3b δείχνει μια τυπική κυματομορφή που έγινε με προσομείωση υπολογιστή υποθέτοντας μια διόδο που οι παράμετροι είναι  $I_0 = 100 \text{mA}$ ,  $R_{SG} = 150 \Omega$ ,  $R_N = 15 \Omega$ ,  $c_j = 1 \text{pF}$  και  $R_L = 10 \Omega$ . Σε αυτό τον υπολογισμό το ρεύμα πόλωσης αρχικά είναι  $I_g = I_0$  και το  $\Delta I = 0,1 I_0$  εφαρμόζεται για τη μεταγωγή της διόδου. Η ολική καθυστέρηση είναι  $\tau = \tau_r + \tau_t = 10 + 6 = 16 \text{ps}$ .

Όπως περιγράφηκε η καθυστέρηση μεταγωγής εξαρτάται από τη χωρητικότητα διόδου  $c_j$ . Για να πετύχουμε μια μικρότερη καθυστέρηση μεταγωγής και μια μεγαλύτερη ταχύτητα μεταγωγής είναι σημαντικό να μειώσουμε την χωρητικότητα διόδου.

#### 4.8 RSJ MONTELO [29]

Η δυναμική συμπεριφορά μπρεί να γίνει αντιληπτή σε μια ισοδύναμη επαφή που προστέθηκε από τους Stewart και McCumber.



Σχήμα 4.4: Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας επαφής Josephson.

Η δυναμική εξίσωση της διόδου μπορεί να γραφτεί σαν άθροισμα των τεσσάρων συνιστωσών του ρεύματος.

$$I = I_c \sin \phi + C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} + I_f \quad (1)$$

Όπου C είναι η χωρητικότητα της διόδου και R η αντίσταση. Το κυμαινόμενο ρεύμα δίνεται από το I. Μια λεπτομερής ανάλυση δείχνει ότι αυτές οι συσκευές επιτρέπουν δημιουργία κυματομορφών της τάξης των picosecond.

## ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΑΦΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΕΣ ΕΠΑΦΕΣ [29]

Για μια τυπική δίοδο Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb με πάχος φράγματος περίπου 2nm και διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r \approx 10$  πετυχαίνουμε χωρητικότητα/μονάδα επιφάνειας  $\epsilon_0 \epsilon_r / d \approx 0,05 \text{pF}/\mu\text{m}^2$ . Ωστόσο για μια τυπική επιφάνεια επαφής των 10 $\mu\text{m}^2$  έχουμε  $c \approx 0,5 \text{pF}$ . Με μια τυπική πυκνότητα ρεύματος 10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> και το κρίσιμο ρεύμα  $I_c \approx 100 \mu\text{A}$ . Χρησιμοποιώντας τη σχέση  $I_c R_N = \pi \Delta / 2e$  ( $\Delta_{Nb} = 1,28 \text{meV}$ ) υπολογίζουμε την κανονική αντίσταση  $R_N \approx 20 \Omega$ . Η χαρακτηριστική χρονική σταθερά αυτής της διόδου θα είναι  $RC \approx 10 \text{ps}$ . Χρησιμοποιώντας τη σχέση  $\beta_c = 2eR^2$  το  $\beta_c$  υπολογίζεται  $\beta_c \approx 60$ . Αυτή η μεγάλη τιμή του  $\beta_c$  καταλήγει σε μια υστέρηση στη χαρακτηριστική ρεύματος τάσης. Για μερικές εφαρμογές όπως λογική μονής ροής ή υπεραγώγιμες κβαντικές συσκευές συμβολής SQUID χρειάζονται επαφές χωρίς υστέρηση\*. Αυτό μπορεί να επιτευχτεί χρησιμοποιώντας μια επιπλέον αντίσταση διακλάδωσης  $R_s$  η οποία μειώνει το  $\beta_c$ . Για  $\beta_c < 0,8$  η παράλληλη αντίσταση θα έπρεπε να είναι  $R_s \leq 6 \Omega$  καταλήγωντας στο  $I_c R_N \approx 200 \mu\text{V}$ . Μια τέτοια επαφή θα έχει χαρακτηριστική σταθερά  $RC \leq 1 \text{ps}$ . Μια μείωση του χρόνου μεταγωγής μπορεί να επιτευχτεί μειώνοντας τη χωρητικότητα της διόδου. Μια μείωση της επιφάνειας της επαφής απαιτεί αύξηση της πυκνότητας ρεύματος για να διατηρήσει το κρίσιμο ρεύμα σταθερό. Οι μέγιστες τιμές του  $I_c R_N \approx 1,5 \text{mV}$  για υπεραγωγούς χαμηλής θερμοκρασίας έχουν επιτευχτεί με πυκνότητα ρεύματος  $2 \cdot 10^5 \text{A}/\text{cm}^2$ . Ο χρόνος μεταγωγής για αυτή τη συσκευή είναι 0,17ps καταλήγωντας σε μια συχνότητα λειτουργίας 770Hz ενός T-Flip Flop. Οι δίοδοι υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας παρουσιάζουν  $I_c R_N \approx 5 \mu\text{V}$  στους 4,2K και  $I_c R_N \approx 3 \mu\text{V}$  στους 20K. Αυτά τα προϊόντα καταλήγουν σε πολύ μικρούς χρόνους μεταγωγής και αυξάνουν το ενδιαφέρον για πολύ γρήγορες εφαρμογές.

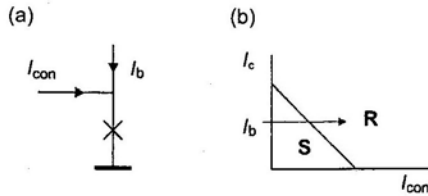
Η απώλεια ενέργειας της διόδου με  $I_c \approx 100 \mu\text{A}$  μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας

την εξίσωση  $\Delta W = \frac{\Phi_0}{2\pi} \int I d\phi = \frac{\Phi_0}{2\pi} I_c 2\pi = I_c \Phi_0$ . Σε ημιαγώγιμες επαφές η χαμηλότερη

απώλεια ενέργειας είναι περίπου  $\Delta E = 10^{-6} \text{J}$ . Οι υπεραγώγιμες συσκευές είναι τουλάχιστον 10 φορές πιο γρήγορες και έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος. Αυτό καταλήγει σε ένα συντελεστή 100 χαμηλότερης απώλειας ισχύος σε υπεραγώγιμα κυκλώματα.

#### 4.9 ΜΕΤΑΓΩΓΙΜΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ [29]

Μια επαφή Josephson μεταπίπτει από την υπεραγώγιμη στην κατάσταση αντίστασης εάν το ρεύμα διαμέσου της διόδου υπερβεί το κρίσιμο ρεύμα.



Σχήμα 4.5: Εάν ένα ρεύμα ελέγχου  $I$  εφαρμοστεί στη συσκευή το σημείο λειτουργίας θα περάσει στην κατάσταση αντίστασης.

Η διαφορά ανάμεσα στη δίοδο υστέρησης και στη δίοδο μη υστέρησης είναι ότι η δίοδος μη υστέρησης θα επιστρέψει σε μηδενική κατάσταση τάσης. Για να μεταγάγουμε μια δίοδο υστέρησης πίσω στην κατάσταση τάσης 0 το ρεύμα πόλωσης πρέπει να μειωθεί στο 0.

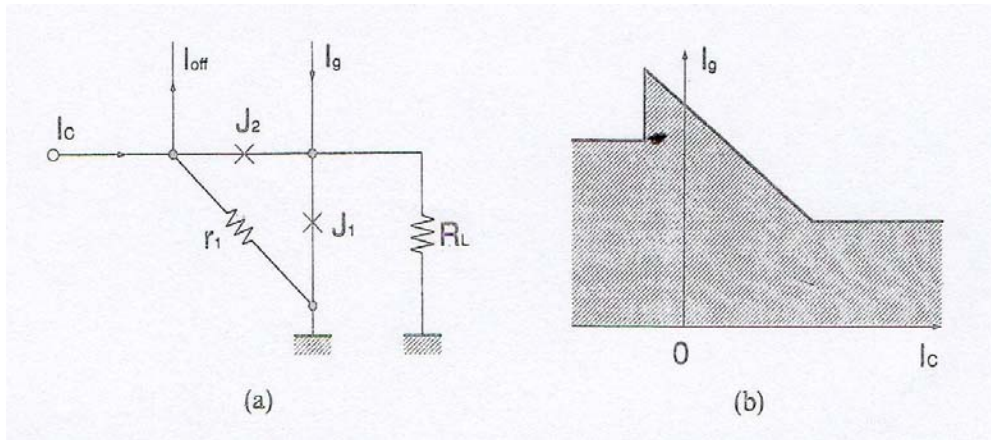
#### 4.10 ΛΟΓΙΚΕΣ ΠΥΛΕΣ [29]

Για το σχεδιασμό λογικών πυλών πρέπει απαραίτητα να υπάρχει μόνωση ρεύματος. Εάν ρεύματα χωρίς μόνωση χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα το ρεύμα που μεταγύγεται από μια πύλη μπορεί να κατευθυνθεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω κάνοντας πολύ δύσκολο να βρεθεί η κατεύθυνση του λογικού σήματος στο κύκλωμα.

Εκτός από τη λειτουργία μόνωσης ρεύματος υπάρχουν πολλά κριτήρια που απαιτούνται για το σχεδιασμό λογικών πυλών. Τα σημαντικότερα κριτήρια για την αξιολόγηση λογικών θυρών είναι 1)μεγαλύτερο κέρδος 2)μικρότερο μέγεθος 3)γρήγορη μεταγωγή 4)μικρότερη κατανάλωση.

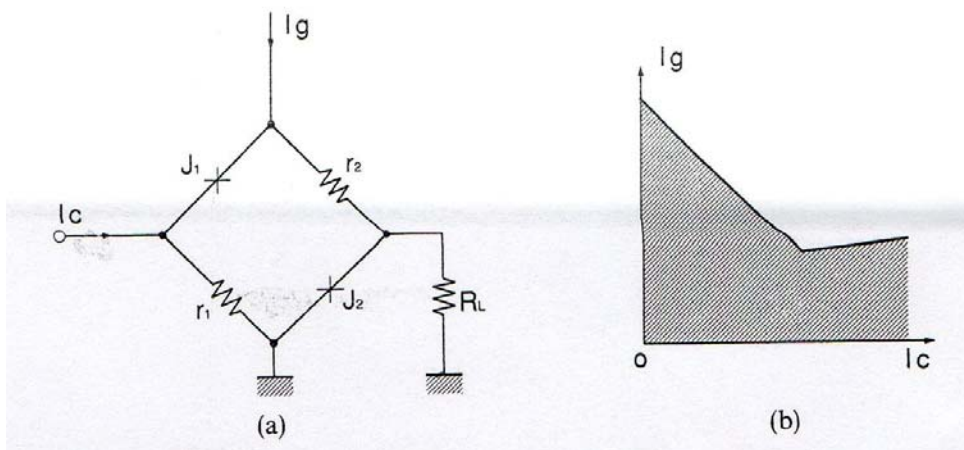
#### ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΕΣ ΠΥΛΕΣ [47]

Οι απευθείας συζευγμένες πύλες ελέγχονται από την απευθείας έγχυση ρευμάτων εισόδου. Η συσκευή έγχυσης ρεύματος βασίζεται πάνω σε SQUID έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη ροή του ρεύματος σε ένα βρόγχο να παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταγωγή της πύλης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των απευθείας συζευγμένων θυρών είναι ότι οι αυτεπαγωγές μπορούν να απαλειφθούν από τις πύλες καταλήγοντας σε ένα πλεονέκτημα για το μικρό μέγεθος των πυλών. Σε πύλες απευθείας σύζευξης είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία μόνωσης ρεύματος. Η πρώτη συσκευή μόνωσης ρεύματος φτιάχτηκε από 2 κόμβους και μια αντίσταση και ονομάζεται JAWS.



Σχήμα 4.6: Το σχήμα δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα και τις χαρακτηριστικές κατώτατες τιμές του ρεύματος.

Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής. Ένα ρεύμα πύλης πολώνεται και παίρνει τιμή λίγο μικρότερη από το κρίσιμο ρεύμα της διόδου  $J_1$ . Όταν το ρεύμα έχει αυτή την τιμή η πύλη μένει στην υπεραγωγίμη κατάσταση. Όταν ένα ρεύμα εισόδου  $I_c$  εφαρμόζεται στη θύρα διαμέσου  $J_2$  μέσω, τότε το ρεύμα διαμέσου της  $J_1$  αυξάνεται σε  $I_g + I_c$ . Έπειτα το ρεύμα  $I_g$  ρέει διαμέσου της  $J_2$  και μια μικρή αντίσταση  $r_1$  που καταλήγει στο έδαφος καταφέρνει να μεταγάγει τη  $J_2$  στην μόνιμη κατάσταση. Σ' αυτό το σημείο το  $I_g$  μεταφέρεται σ' έναν αντιστάτη φορτίου και το  $I_c$  πηγαίνει στο έδαφος μέσω της  $r_1$  ολοκληρώνοντας τη μόνωση ρεύματος.



Σχήμα 4.7: Η πύλη που απεικονίζεται ονομάζεται λογική πύλη απευθείας σύζευξης.

και είναι ένα ακόμη παράδειγμα της θύρας μόνωσης ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας της DCL είναι παρόμοια με αυτή του JAWS. Στις πύλες μόνωσης ρεύματος JAWS και DCL οι γραφικές παραστάσεις των κατώτατων ρευμάτων στην υπεραγώγιμη ξεχωρίζουν από τις γραφικές παραστάσεις στη μόνιμη κατάσταση από την κλίση που είναι -1. Εάν η κλίση γίνει μεγαλύτερη μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ευαισθησία. Οι θύρες RCJL (Λογική πύλη Josephson συζευγμένης αντίστασης) και RCL (Αντίσταση συζευγμένης λογικής).

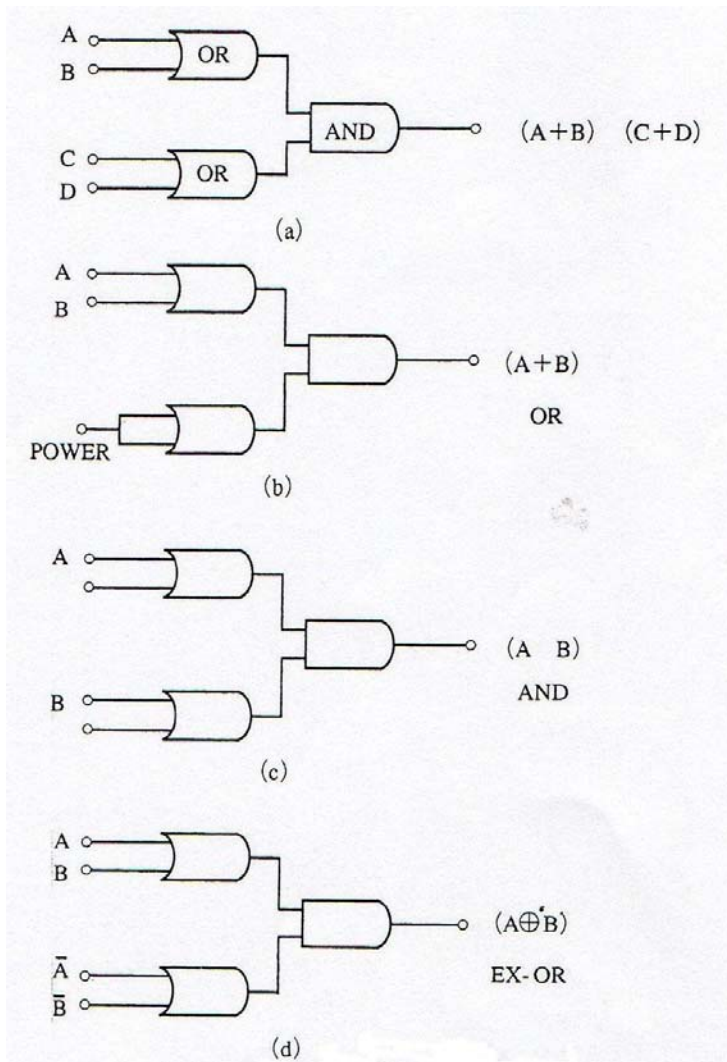
## **ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΛΟΓΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝ**

Η καθυστέρηση μεταγωγής έχει υπολογιστεί σε έναν αριθμό λογικών πυλών που περιγράφηκαν παραπάνω. Η καθυστέρηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια σειρά από πύλες. Όταν ένα σήμα μεταγάγει μια πύλη  $Q_1$ , το εξερχόμενο  $Q_1$  πηγαίνει σε δύο πύλες. Η μία πύλη τροφοδοτείται από την πρώτη πύλη της αλυσίδας  $G_1$ , η άλλη τροφοδοτείται από την πύλη  $Q_2$  που το εξερχόμενο ρεύμα τροφοδοτεί την  $Q_4$ . Εάν το ρεύμα της πύλης  $Q_2$  εφαρμοστεί, το σήμα ενεργοποιεί την  $Q_4$  δημιουργώντας μια τάση. Εάν το ρεύμα της θύρας δεν εφαρμοστεί στην  $Q_2$ , το σήμα που μεταδίδεται μέσα στην αλυσίδα ενεργοποιεί την  $Q_4$ . Συγκρίνοντας τη χρονική διαφορά ανάμεσα στο συντομευμένο σήμα και το σήμα μετάδοσης, μπορεί να εκτιμηθεί η λογική καθυστέρηση ανά θύρα.

Η απώλεια ισχύος της θύρας είναι εξαρτημένη από το ρεύμα της θύρας. Στα πραγματικά λογικά κυκλώματα Josephson η περισσότερη ενέργεια χάνεται σε αντίσταση μείωση τάσης. Συνήθως η αντίσταση πτώσης τάσης πρέπει να επιλεγεί να είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση φορτίου  $R_d \geq 5R_L$ . Υποθέτοντας  $I_g = 200 \mu A$ ,  $R_L = 10 \Omega$ , και  $R_d = 50 \Omega$ , η απώλεια ισχύος της θύρας είναι  $24 \mu W$ .

## **ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ OR- AND ΚΕΛΛΙΑ [47]**

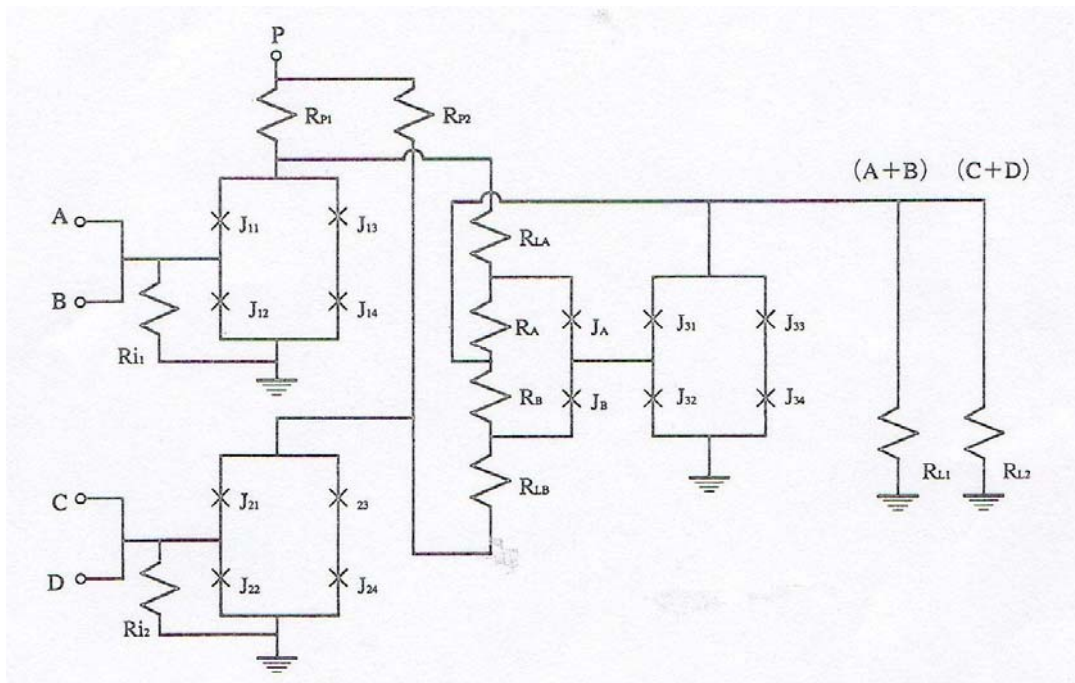
Λογικά κυκλώματα φτιάχνονται από λογικές πύλες. Στις πύλες διπλής εισόδου συμπληρωματικά σήματα συνοδεύουν τα αληθινά σήματα σε λογικές λειτουργίες.



**Σχήμα 4.8:** Χρησιμοποιώντας το σύστημα διπλής εισόδου μπορεί να κατασκευαστεί ένα κελί που συντίθεται από δύο πύλες OR και μια AND πύλη.

Σ'αυτή τη σύνθεση οι πύλες OR δρουν ως μονωτικές πύλες εισόδου εξόδου αφού η θύρα AND συνήθως δεν έχει λειτουργία μόνωσης. Χρησιμοποιώντας AND, OR, XOR πραγματοποιούνται εύκολα όλες οι λογικές λειτουργίες.





Σχήμα 4.9: Το σχήμα δείχνει μια σύνθεση κυκλώματος των πυλών OR και AND. Συνδιάζοντας τα κελία OR και AND ένας αριθμός λογικών κυκλωμάτων όπως αθροιστής και πολλαπλασιαστής έχουν δημιουργηθεί.

Πρόσφατα αποτελέσματα σε πολλαπλασιαστή  $16 \times 16$  bit κατασκευασμένο από σύγχρονη τεχνολογία βασισμένη σε διόδους Nb απέδειξαν ότι η θύρα Josephson μπορεί να λειτουργήσει με καθυστέρηση θύρας σε ένα σύστημα LSI.

## ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ [47]

Για να φτιάξουμε ένα πλήρως αποκωδικοποιημένο chip μνήμης, μια καλώς ορισμένη τεχνολογία ολοκλήρωσης που έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει κυκλώματα με LSI χρειάζεται. Το κύκλωμα μνήμης αποτελείται από μια διάταξη κελλιού μνήμης και περιφερειακά λογικά κυκλώματα συμπεριλαμβανομένου αποκωδικοποιητές διευθύνσεων X-Y και ένα κύκλωμα ελέγχου του χρόνου. Ένα κελί για να γράψει και να διαβάσει πληροφορίες γίνεται προσβάσιμο από δυο γραμμές που επιλέγονται από τους X-Y αποκωδικοποιητές. Ο αποκωδικοποιητής συντίθεται από διάφορα στάδια πυλών AND από τις οποίες επιλέγεται μια γραμμή.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για να επιτύχουμε αποκωδικοποιημένα κελία μνήμης. Χρησιμοποιώντας κράμα Pb ο Yamamoto κατασκεύασε 1Kbit RAM με μια NDRD διάταξη κελλιού χρησιμοποιώντας κράμα μολύβου [57]. Ο χρόνος πρόσβασης της μνήμης υπολογίστηκε να είναι 3.3ns. Ένα κράμα  $2,5\mu\text{m}$  χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή chip 4kbit NDRORAM. Από τις μετρήσεις των ξεχωριστών στοιχείων των κυκλωμάτων ο χρόνος πρόσβασης ενός τσιπ RAM 4kbit εκτιμήθηκε σε περίπου 800ps.

Πρόσφατα αναπτύχθηκε τεχνολογία βασισμένη σε Nb με αυξημένη ομοιομορφία και σταθερότητα. Ο χρόνος προσπέλασης υπολογίστηκε να είναι 570ps και η απώλεια ισχύος

13Mw. Το 40% των κελιών στη RAM 1kbit λειτούργησαν ικανοποιητικά αποδεικνύοντας ότι η τεχνολογία Nb είναι ανώτερη της τεχνολογίας κράμματος μολύβου.

#### 4.11 ΚΕΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ

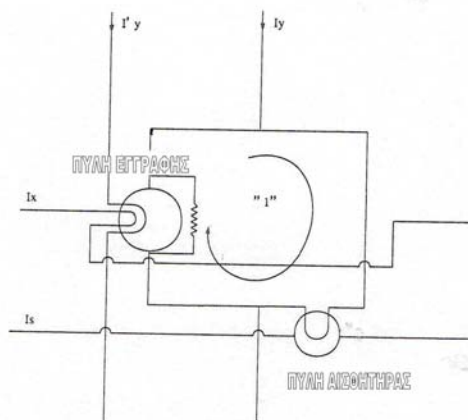
Για να φτιάξουμε ολοκληρωμένα υπεραγωγίμα ψηφιακά συστήματα, η μνήμη είναι αναπόφευκτα σημαντική. Στις ημιαγωγίμες συσκευές οι μνήμες φτιάχνονται χρησιμοποιώντας φορτία αποθηκευμένα σε κουτί μεταβλητής χωρητικότητας\*. Στις υπεραγωγίμες συσκευές από την άλλη πλευρά το ρεύμα μεταισθήματος ή η μαγνητική ροή σε υπεραγωγίμους βρόγχους χρησιμοποιείται για την αποθήκευση πληροφοριών. Οι πύλες Josephson χρησιμοποιούνται σαν μεταγωγοί που μεταφέρουν τη μαγνητική ροή μέσα ή έξω από τους βρόγχους.

Διάφοροι τύποι κελιών μνήμης έχουν προταθεί. Αυτές γενικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες μη καταστρεπτική read out μνήμη και καταστρεπτική read-out μνήμη.

#### ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΜΝΗΜΗ READ OUT [47]

Το μη καταστρεπτικό read out κελί έχει τη δυνατότητα να διαβάζει αποθηκευμένες πληροφορίες χωρίς να αλλάζει την κατάσταση του κελιού. Η NDRO μνήμη είναι κατάλληλη για cache\* μνήμη που επικοινωνεί κατευθείαν με τη CPU, έτσι η ταχύτητα είναι ιδιαίτερος σημαντική.

Το πιο πρόσφατο κελί μνήμης παρουσιάστηκε από τον Zappe [58]. Πραγματοποιήθηκε μεγάλη προσπάθεια για να αναπτυχθούν κελιά μνήμης με ευρύτερα περιθώρια λειτουργίας.



Σχήμα 4.10: Ένα βελτιωμένο κελί μνήμης.

Το κελλί κάνει χρήση μιας πύλης διπλής διόδου σαν πύλη εγγραφής και μια SQUID πύλη διπλής διόδου σαν πύλη αισθητήρας. Για να βρεθεί το κελλί στην κατάσταση 1 χρειάζεται να εφαρμοστεί ένα ρεύμα  $I_x$  και ένα ρεύμα  $I_y$ . Για να διαβάσουμε το κελί, εφαρμόζονται το ρεύμα θύρας  $I_s$  της θύρας αισθητήρα και το  $I I_y$ . Εάν το κελί είναι στην κατάσταση 1 το ρεύμα που κυκλοφορεί αποθηκεύεται στο κελί ενώ η πύλη αισθητήρας πηγαίνει στην μόνιμη κατάσταση. Εάν έχει αποθηκευτεί 0, η θύρα αισθητήρας παραμένει στην υπεραγώγιμη κατάσταση. Η πληροφορία στο κελί μπορεί να διαβαστεί με ένα μη καταστροφικό τρόπο. Για τη θύρα αισθητήρα χρησιμοποιείται μια θύρα SQUID ώστε να διευρύνει το περιθώριο για λειτουργίες αισθητήρα. Αυτό το κελί μνήμης NDRO συνήθως περιέχει διάφορα κβάντα ροής.

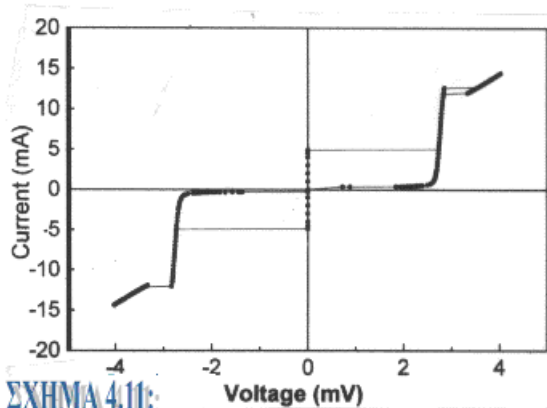
#### **4.12 SQUID – SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ**

Τα SQUID είναι οι πλέον ευαίσθητοι ανιχνευτές μαγνητικών σημάτων παγκοσμίως. Πέρα από την εργαστηριακή τους χρήση, έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε τομείς όπως η γεωφυσική, ο βιομαγνητισμός και ο μη καταστρεπτικός έλεγχος υλικών.

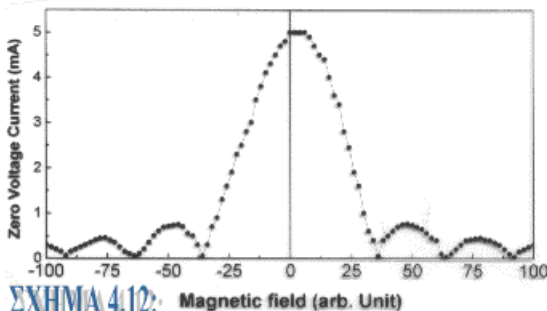
Βασικές αρχές:

Τα βασικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη λειτουργία των SQUID είναι η κβάντωση ροής σε υπεραγώγιμους βρόχους και το φαινόμενο Josephson. Εδώ θα ασχοληθούμε με το DC SQUID αντί για το RF μιας και τα DC έχουν επιδείξει μεγαλύτερη ευαισθησία.

Το φαινόμενο Josephson αναφέρεται στην δυνατότητα δύο ασθενώς συζευγμένων υπεραγωγών να διατηρούν υπό μηδενική τάση ένα υπεραγώγιμο ρεύμα που συνδέεται με την μεταφορά ζευγών Cooper, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο υπεραγωγών. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αντέξει μία επαφή Josephson, χωρίς να εμφανιστεί τάση είναι γνωστό σαν κρίσιμη ένταση  $I_c$ . Όταν το ρεύμα περάσει την κρίσιμη τιμή τότε εμφανίζεται τάση, και η καμπύλη  $I - V$  είναι



**ΣΧΗΜΑ 4.11:**  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΜΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ  
JOSEPHSON ΣΤΟΥΣ 4,2Κ.



**ΣΧΗΜΑ 4.12:**  
ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ  
ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.

χαρακτηριστική της επαφής. Όταν η επαφή είναι πηγάδι δυναμικού, η συνάρτηση φάσης του ρεύματος είναι ημιτονοειδής και εμφανίζεται βρόχος υστέρησης όπως φαίνεται στο σχήμα. Η υστέρηση μπορεί να εξαφανιστεί με τη χρήση ενός ωμικού αντιστάτη. Όταν εφαρμόσουμε, παράλληλα προς την επιφάνεια της επαφής, ένα μικρό μαγνητικό πεδίο, η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο υπεραγωγίων ηλεκτροδίων μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος μιας διεύθυνσης αντίθετης της διεύθυνσης του πεδίου. Έτσι τα «υπερρεύματα» συμβάλλουν μεταξύ τους και εμφανίζεται ένα φαινόμενο ανάλογο της περίθλασης Fraunhofer.

Τα DC SQUID αποτελούνται από ένα κλειστό υπεραγωγίμο βρόχο στον οποίο παρεμβάλλονται δύο επαφές Josephson. Όταν ένα συμμετρικό DC SQUID τροφοδοτείται με ένα εξωτερικό συνεχές ρεύμα  $I$ , ένα ρεύμα  $I/2$  διαρρέει τις δύο επαφές. Το κρίσιμο ρεύμα του SQUID  $2I_c$ . Όταν εφαρμοστεί μαγνητική ροή  $\Phi_{ext}$  κάθετα στην επιφάνεια του βρόχου τότε ο βρόχος αντιδρά με ένα προβολικό ρεύμα  $J$  ώστε να ικανοποιήσει την απαίτηση για κβάντωση της ροής.

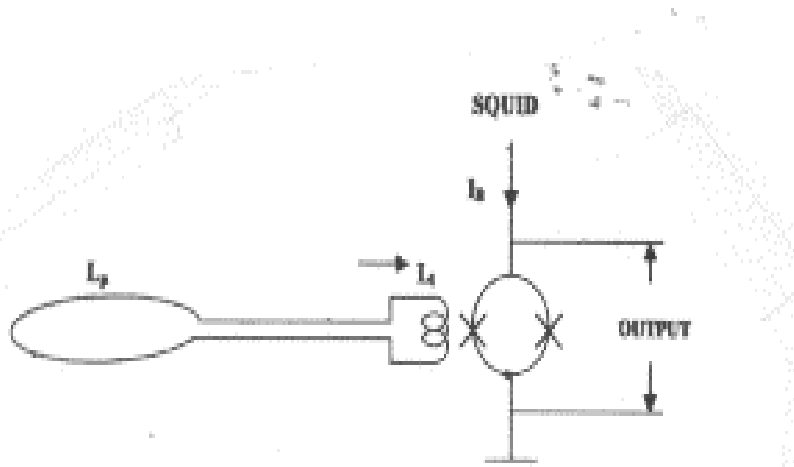
Εδώ το  $L$  είναι η επαγωγή του βρόχου, ο  $n$  είναι ένας ακέραιος και το  $\Phi_0$  είναι το κβάντο

της ροής με αριθμητική τιμή  $2 \times 10^{-15}$  Wb. Το κατοπτρικό ρεύμα  $J$  είναι 0 όταν η εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροή είναι  $n\Phi_0$  και  $\pm(\Phi_0/2L)$  όταν η εξωτερική ροή είναι  $(n +$

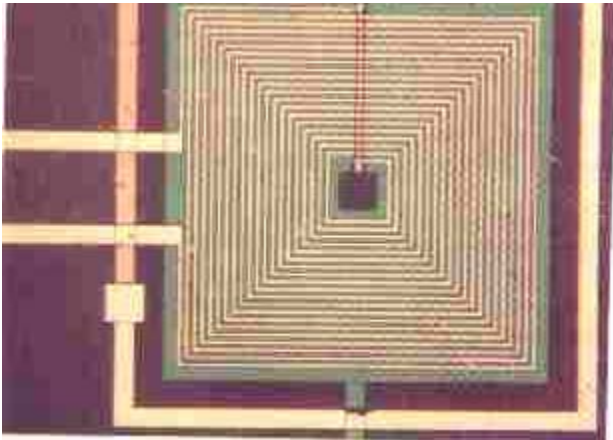
$\frac{1}{2}\Phi_0$  επιδεικνύοντας έτσι περιοδική μεταβολή συναρτήσει της εφαρμοζόμενης ροής. Το κατοπτρικό ρεύμα  $J$  διαρρέοντας το βρόχο του SQUID οδηγεί σε μια ελάττωση του κρίσιμου ρεύματος του SQUID από  $2I_c$  σε  $(2I_c - 2J)$ . Το κρίσιμο ρεύμα λοιπόν είναι μια περιοδική συνάρτηση της εξωτερικά εφαρμοζόμενης ροής. Αν το SQUID διαρρέει από ένα ρεύμα ελάχιστα μεγαλύτερο από το  $2I_c$  η τάση εξόδου του SQUID γίνεται περιοδική συνάρτηση της μαγνητικής ροής που εφαρμόζεται κάθετα στο επίπεδο του όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Η συσκευή λοιπόν λειτουργεί σαν ένας μετασχηματιστής και ενισχυτής της μαγνητικής ροής παράγοντας για μικρές μεταβολές της στην είσοδο μετρήσιμη τάση στην έξοδο. Μιας και η απόκριση του SQUID είναι περιοδική είναι απαραίτητο να την γραμμικοποιήσουμε κάνοντας χρήση των ειδικών ηλεκτρονικών βρόχου κλειστής ροής έτσι ώστε να μπορούμε να κατασκευάσουμε συστήματα μετρήσεων βασισμένα πάνω στα SQUID.

### Σχεδιασμός SQUID:

Όπως κάθε μετρητική συσκευή έτσι και τα SQUID εμφανίζουν θόρυβο παρουσία εισερχομένου ρεύματος. Το επίπεδο θορύβου είναι ανάλογο της επαγωγής, του κρίσιμου ρεύματος και της χωρητικότητας της επαφής ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογο της μαγνητικής ροής. Έτσι απαιτούμε ο βρόχος να έχει συντελεστή αυτεπαγωγής της τάξης των 100 –200 pH και επαφές μικρής χωρητικότητας. Λόγω της μικρής τους περιοχής ακόμα και οι καλύτερες συσκευές εμφανίζουν χαμηλή ανάλυση πεδίου. Για αυτό τον λόγο το SQUID συσχετίζεται με έναν υπεραγώγιμο μετασχηματιστή ροής.



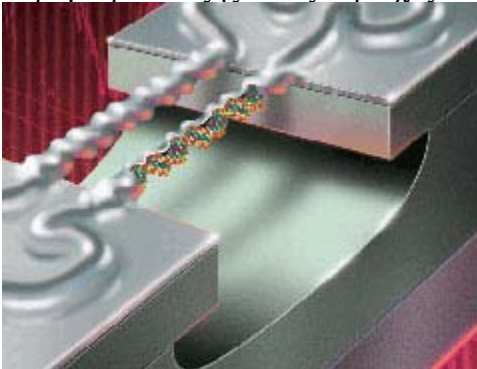
Σχήμα 4.13:Υπεραγώγιμος μετασχηματιστής ροής συζευγμένος επαγωγικά με SQUID.



**Σχήμα 4.14: Φωτογραφία ενός τυπικού αισθητήρα DC SQUID.**

### **NANOSQUIDS**

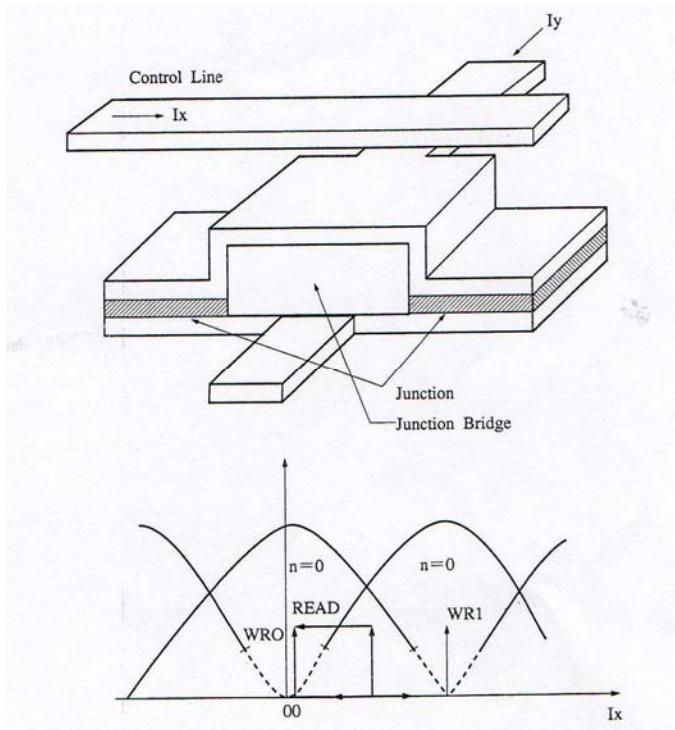
Σκέλη DNA έχουν χρησιμοποιηθεί σαν μικροσκοπικές σκαλωσιές για τη δημιουργία υπεραγωγίων στοιχείων που απεικονίζουν ένα νέο τύπο υπεραγωγίων καλωδίων τόσο λεπτά όσο τρεις με τέσσερις φορές τη διάμετρο των μορίων (5nm έως 15nm) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση μαγνητικών πεδίων και να χαρτογραφήσει τη φάση της παραμέτρου τάξης\* στις περιοχές υπεραγωγιμότητας.



**Σχήμα 4.15: NANOSQUID**

### **4.13 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΑ READ OUT ΚΕΛΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ [47]**

Ένα SQUID διπλής διόδου έχει αλληλοεπικαλυμμένες περιοχές.

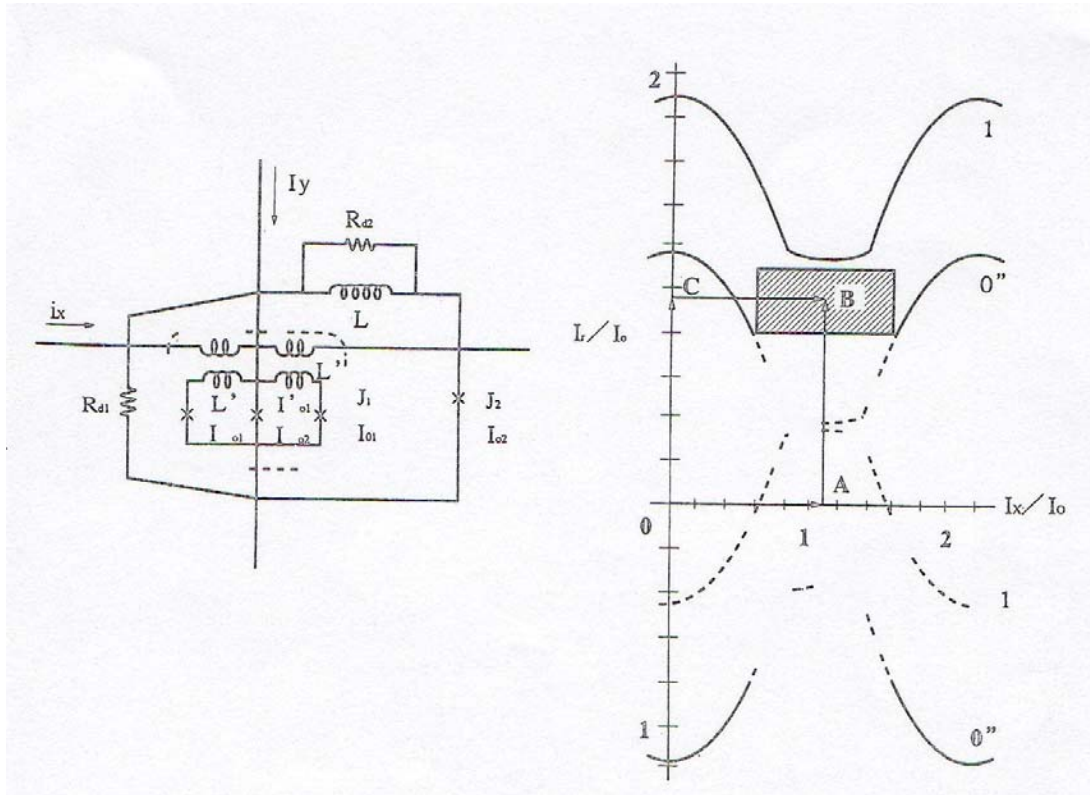


Σχήμα 4.16: Squid διπλής εισόδου.

Η λειτουργία της μνήμης στηρίζεται στην αλληλοεπικαλυμμένη περιοχή. Υπάρχουν 2 καταστάσεις μετάπτωσης όπου το σημείο λειτουργίας κινείται κατά μήκος της καμπύλης η μία ονομάζεται μετάπτωση δινών και η άλλη μετάπτωση τάσης. Για τη μετάπτωση δινών, η κατάσταση αλλάζει χωρίς τη γέννηση τάσεων όταν ένα σήμα λειτουργίας διασχίζει τις περιοχές που υποδεικνύονται από τις διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 4.16. Από τη άλλη πλευρά το κελί δημιουργεί τάσεις όταν το σημείο λειτουργίας διασχίζει περιοχές που στη γραφική παράσταση υποδεικνύονται από συνεχείς γραμμές. Για να γράψουμε 1, τα  $I_y$  και  $I_x$  εφαρμόζονται για να μετακινήσουν το σημείο λειτουργίας κατά μήκος της περιοχής μετάπτωσης τάσης όπως φαίνεται από το βέλος WR1 στο σχήμα 4.16. Εάν το κελί είναι στην κατάσταση 0 τότε περιέχει ροή κβάντων. Για να γράψουμε 0 τα  $I_y$  και  $I_x$  πρέπει να είναι αντίθετης πολικότητας για να μετακινήσουν το σημείο λειτουργίας κατά μήκος των δινών μετάπτωσης όπως φαίνεται από το σχήμα WR0 στο σχήμα 4.16. Για να διαβάσουμε το κελί τα  $I_y$  και  $I_x$  εφαρμόζονται να μετακινήσουν το σημείο λειτουργίας κατά μήκος της περιοχής μετάπτωσης τάσης όπως φαίνεται από το τόξο R1. Σ' αυτή τη λειτουργία το κελί δημιουργεί τάση αν ήταν στην κατάσταση 0 αλλά δεν αλλάζει τίποτα αν ήταν στην κατάσταση 1. Διαβάζοντας το κελί η πληροφορία που αποθηκεύεται συνήθως καταστρέφεται έτσι χρειάζεται μια λειτουργία ανανέωσης για να ξαναγραφτεί το κελί μετά από κάθε λειτουργία ανάγνωσης.

#### 4.14 ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΚΕΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ [47]

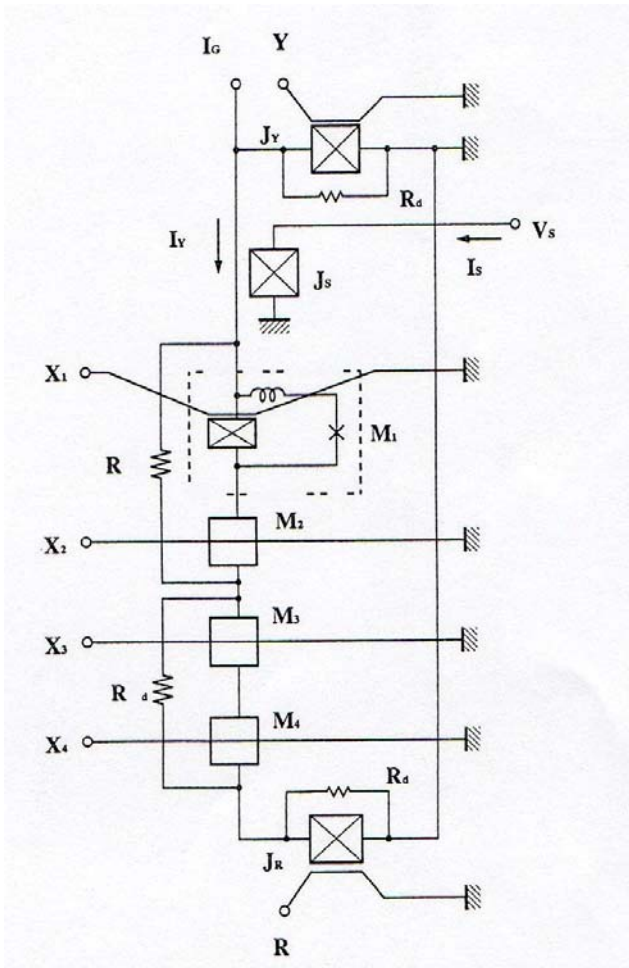
Το μεταβλητό κελί μνήμης έχει βασικά την ίδια δομή με ένα SQUID διπλής διόδου στο οποίο αποθηκεύεται μια ροή από κβάντα. Το ισοδύναμο κύκλωμα του κελιού απεικονίζεται στο σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Η κατάσταση δινών αλλάζει κατά το  $I_y$  άξονα περισσότερο από ότι στο  $I_x$  όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Για να γράψουμε 1, τα  $I_x$  και  $I_y$  εφαρμόζονται για να μετακινήσουν το σημείο λειτουργίας κατά μήκος του συνόρου  $0 \rightarrow A \rightarrow B$  όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι καμπύλες με διακεκομμένες γραμμές πάνω στην καμπύλη αντιπροσωπεύουν την μετάπτωση δινών.

Για να διαβάσουμε το κελί εφαρμόζονται το  $I_y$  και μετά το  $I_x$  για να μετακινήσουν το σημείο λειτουργίας κατά μήκος του συνόρου της τάσης μετάπτωσης  $0 \rightarrow C \rightarrow B$ . Αυτή η αλληλουχία ανάγνωσης είναι καταστροφική.



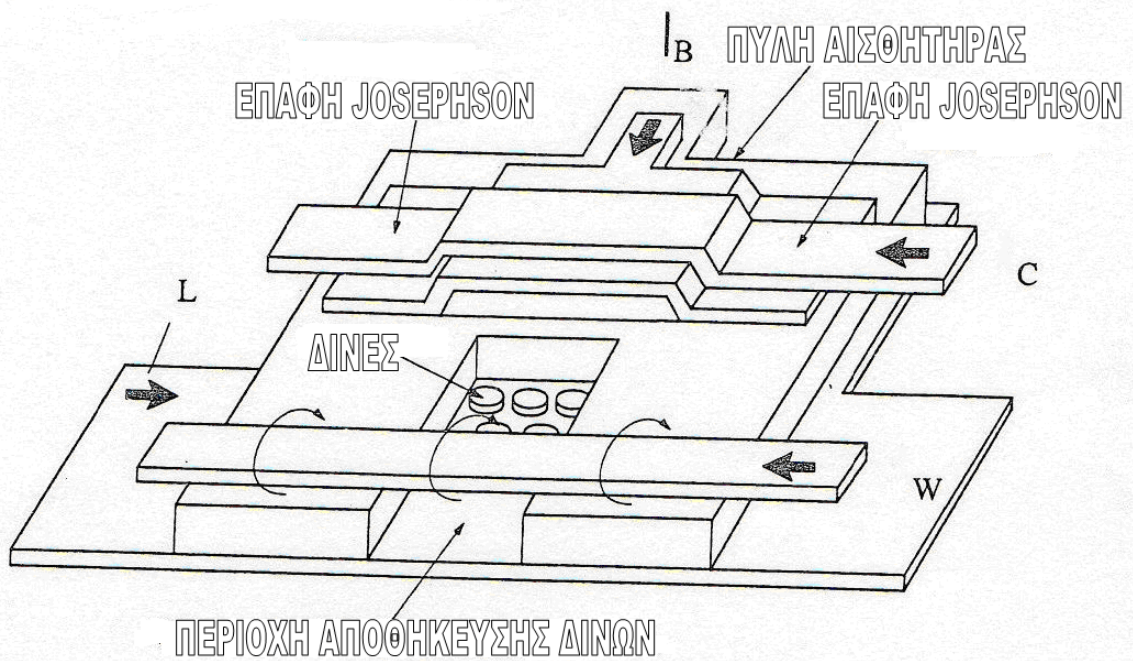


**Σχήμα 4.18:** Το σχήμα δείχνει μια διεύθετη των κελιών σε γραμμή bit για μη καταστρεπτική read out.

Η γραμμή bit αποτελείται από ένα μεγάλο υπεραγωγό βρόγχο που περιέχει κελιά. Με την εφαρμογή του  $I_x$  το  $I_y$  αυτόματα μετακινείται από τη γραμμή των bit καταλήγοντας στην επανεγγραφή 0 στο κελί.

### **ΑΒΡΙΚΟΣΟΝ ΚΕΛΙΑ ΜΝΗΜΗΣ [47]**

Είναι γνωστό ότι οι δίνες εισάγονται και παγιδεύονται σε υπεραγωγούς τύπου II με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Μια μνήμη που κάνει χρήση των δινών Abrikosov σαν bits πληροφοριών έχει προταθεί και παρουσιαστεί πειραματικά .



Σχήμα 4.19: Το σχήμα δείχνει τη σχηματική δομή της μνήμης.

Μια γραμμή ελέγχου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου με σκοπό να πάρουμε δίνες σε ένα υπεραγώγιμο λεπτό στρώμα. Για την ανίχνευση αυτών των δινών χρησιμοποιείται ένα SQUID διπλής διόδου πάνω από το λεπτό στρώμα στο οποίο οι δίνες αποθηκεύονται. Για να γράψουμε 0, δίνες με αντίθετη πολικότητα εισάγονται στο λεπτό στρώμα. Σ' αυτό τον τύπο μνήμης είναι σημαντικό να επιλέξουμε υπεραγώγιμα λεπτά στρώματα με μικρότερα επιφανειακά δυναμικά για τη μείωση του ρεύματος και του χρόνου εγγραφής. Ένα στρώμα Pb-In-Au με κόκκους και άμορφο υμένα Be έχουν εξεταστεί για αυτό το σκοπό.

#### 4.15 ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ [29]

Το συνέδριο που έγινε για τους ημιαγωγούς [55] προέβλεψε ότι η πυκνότητα των ημιαγώγιμων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων θα αυξηθεί 3 τάξεις μεγέθους την επόμενη δεκαετία. Ωστόσο η πρόβλεψη για τη συχνότητα του ρολογιού προβλέπει χαμηλή συχνότητα. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να αυξήσουμε τη συχνότητα του ρολογιού είναι να αυξήσουμε το ρεύμα εξόδου του driver. Ωστόσο αυτό θα αυξήσει αμέσως την κατανάλωση ισχύος των CMOS κυκλωμάτων.

$$P_0 = C_0 V^2 f_c$$

$P_0$ : η κατανάλωση ισχύος των CMOS κυκλωμάτων

$V$ : είναι κοντά στην τάση παροχής ισχύος  $V_{DD}$

$f_c$ : είναι η συχνότητα του ρολογιού

$c_0$ : η συνολική χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας

Η  $P_0$  ενός μικροεπεξεργαστή 1GHz είναι πάνω από 50W σε μια περιοχή  $1\text{cm}^2$ . Η απομάκρυνση τεράστιας ισχύος από ένα τσιπ χωρίς την υπερθέρμανση του είναι μια τεράστια τεχνική προκλήση. Το συνέδριο για τους ημιαγωγούς προβλέπει μόνο μια μικρή αύξηση αυτής της τιμής τα επόμενα 15 χρόνια. Ο μόνος τρόπος για να αυξηθεί η ταχύτητα των ημιαγωγίμων συσκευών και να διατηρηθεί η ισχύς μέσα στα όρια είναι να μειώσουμε την τάση παροχής. Ένας άλλος τρόπος είναι να χρησιμοποιήσουμε καινούριες ημιαγωγίμες επινοήσεις όπως τρανζίστορ συντονισμού με βάση το φαινόμενο της σήραγγας. Ωστόσο η έκλυση θερμότητας είναι ένα πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί για αυτές τις συσκευές.

Ο κορεσμός της ωρολογιακής συχνότητας μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας υπεραγωγία ολοκληρωμένα κυκλώματα που θα λειτουργούν σε συχνότητες κάτω από 100GHz με χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

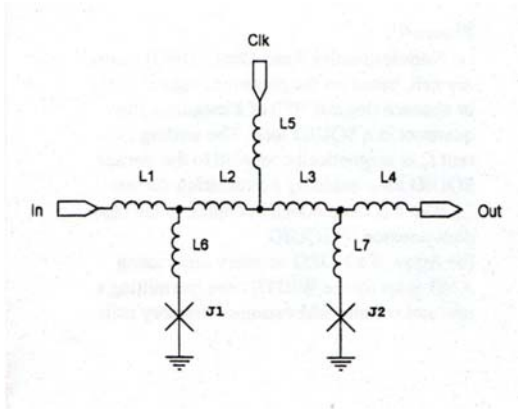
### **ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΛΟΓΙΚΗ ΜΟΝΗΣ ΡΟΗΣ**

Στην ηλεκτρονική η έννοια κβαντική λογική μονής ροής είναι μια ψηφιακή τεχνολογία των ηλεκτρονικών που βασίζεται σε κβαντικά αποτελέσματα των υπεραγωγίμων υλικών για εναλλαγή σημάτων αντί του τρανζίστορ.

- Βασίζεται σε υπεραγωγούς
- Αντί των επιπέδων τάσης τα ψηφιακά σήματα εκπροσωπούνται από παλμούς διαρκείας.
- Οι κβαντικοί παλμοί μεταπίπτουν από διόδους Josephson αντί για τρανζίστορ.

### **4.16 ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ JOSEPHSON [29]**

Η χρήση της γραμμής μετάδοσης Josephson είναι να συνδέει πιο πολύπλοκα κελιά σε κοντινές αποστάσεις ενώ μονώνει το ένα κελί με το άλλο. Σε δυναμικά κυκλώματα μονής κβαντικής ροής οι παλμοί διοχετεύονται σε ένα άλλο μέρος του κυκλώματος διαμέσου της γραμμής Josephson.



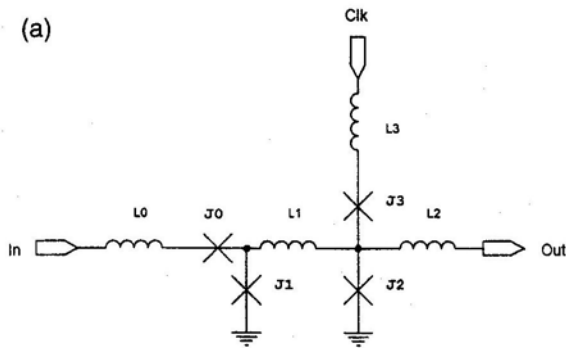
**Σχήμα 4.20:** Μια γραμμή Josephson αποτελείται από μια παράλληλη διάταξη πανομοιότυπων διόδων κάθε μία πολωμένη κοντά στο κρίσιμο ρεύμα  $I_c$  και συζευγμένη με αυτεπαγωγή  $L$ .

Ας ξεκινήσουμε από τη στιγμή της μεταγωγής της  $J_1$ . Για το βρόγχο που περιλαμβάνει αυτή τη δίοδο την αυτεπαγωγή  $L_2 + L_3$  και τη δίοδο  $J_2$  αυτό το γεγονός είναι ισοδύναμο με την προσθήκη εξωτερικής ροής  $\Delta\Phi \approx \Phi_0$ . Αυτή η αύξηση προκαλεί μια αύξηση του ρεύματος στο βρόγχο με  $\Delta I \approx \frac{\Phi_0}{L_{j_1} + L_{j_2} + L_2 + L_3}$  όπου  $L_j$  είναι οι αυτεπαγωγές των διόδων

Josephson.

Στη γραμμή μετάδοσης Josephson οι αυτεπαγωγές  $L_2 = L_3 = L$  είναι μικρές  $LI_c < \Phi_0$ . Ωστόσο η νέα τιμή ρεύματος διαμέσου της  $J_2$  που είναι το άθροισμα του  $\Delta I$  και του συνενεχούς ρεύματος  $I_{DC} \approx 0,75I_c$  υπερβαίνει το  $I_c$ . Ως αποτέλεσμα αυτή η δίοδος μεταγάγει σαν την προγενέστερη με καθυστέρηση  $\tau_d = 4\tau_0$ . (Τώρα  $\varphi_2 = \frac{\pi}{3} + 2\pi$ , η διαφορά ανάμεσα στο  $\varphi_1$  και στο  $\varphi_2$  είναι μικρή ξανά ενώ η διαφορά ανάμεσα στο  $\varphi_2$  και στο  $\varphi_3$  είναι κοντά στο  $2\pi$ ). Για το βρόγχο  $J_1 - L_2 - L_3 - J_2$  αυτό καταλήγει σε μείωση της ροής σε  $\Phi_0$  με όλα τα ρεύματα δίοδου κάτω από το  $I_c$  και το κελί γίνεται αδρανές, για τον επόμενο βρόγχο  $J_2 - L_3 - J_3$  αυτό σημαίνει αύξηση της ροής  $\Phi_0$  και ένα ξεκίνημα μεταγωγίμης διαδικασίας στη  $J_3$ . Παρατηρώντας ότι το πλάτος του SFQ παλμού είναι το ίδιο σε κάθε δίοδο παρά την απώλεια ενέργειας  $\Delta W \sim I_c \Phi_0$  κατά τη διάρκεια κάθε μεταγωγής. Αυτή η ενίσχυση του SFQ παλμού στη γραμμή μετάδοσης Josephson είναι εξαιτίας της κβαντοποίησης της ροής.

#### 4.17 D FLIP-FLOP



Σχήμα 4.21: Το σχήμα δείχνει το D flip-flop. Ο βρόγχος  $J_2-L_1-J_3$  μπορεί να είναι σε δύο καταστάσεις ροής 0 ή 1.

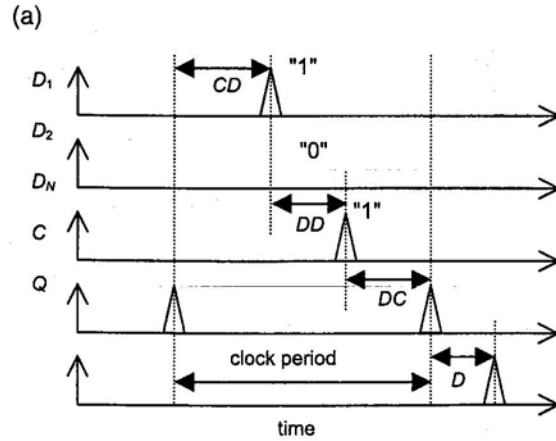
Στην κατάσταση 0 ένας SFQ παλμός τάσης εφαρμόζεται στην είσοδο εισβάλλει στο SQUID διαμέσου της διόδου  $J_1$  και αποθηκεύεται μέσα. Αυτή η μεταγωγή καταλήγει σε μια προσθήκη κβαντικής ροής στο βρόγχο  $J_1-L_1-J_2$ . Αφού σε αυτή την κατάσταση το παραμένον ρεύμα  $\Delta I$  κυκλοφορεί στο βρόγχο ωρολογιακά το  $J_2$  αφαιρείται από το αρχικές συνεχές ρεύμα πόλωσης  $I_1$  κάνοντας αυτή τη δίοδο σχεδόν μη πολωμένη. Ωστόσο η δίοδος  $J_2$  παραμένει στην υπεραγώγιμη κατάσταση. Εάν ένας άλλος παλμός SFQ εφαρμοστεί στην είσοδο και το D-flip flop παραμένει στην κατάσταση 1. Μια νέα είσοδος SFQ παλμού θα κατέληγε σε μεταγωγή του  $J_1$  που δε θα άλλαζε τη ροή που είναι αποθηκευμένη στο βρόγχο. Εάν αντι για αυτό εφαρμόσουμε ένα SFQ παλμό στην είσοδο όταν το d-flip-flop είναι στην κατάσταση 1 η δίοδος  $J_2$  θα απελευθέρωνε την αποθηκευμένη κβαντική ροή. Στην κατάσταση 0 η δίοδος  $J_3$  είναι πιο κοντά στην τιμή κατωφλιού από τη  $J_2$ .

#### 4.18 ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΩΝ SFQ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ [29]

Το πρωτόκολλο σήματος της RSFQ λογικής διαφέρει σημαντικά από την ημιαγώγιμη λογική. Δυο παράγοντες είναι υπεύθυνοι για αυτό

- Η φύση των SFQ παλμών
- Η φυσική εσωτερική λειτουργία μνήμης των κβαντισμένων βρόγχων. Τα τυποποιημένα RSFQ κυκλώματα βασίζονται στο πρωτόκολλο που φαίνεται στο σχήμα 4.22. Ένα σήμα στη γραμμή δεδομένων φέρεται σαν ψηφιακό 1 εάν μεταφέρει ένα SFQ παλμό μέσα στη δεδομένη περίοδο. Αντίθετα η

απουσία παλμού κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου γίνεται αντιληπτή ως ψηφιακό 0. Η πολλαπλή έξοδος του RSFQ κελλιού είναι 1.

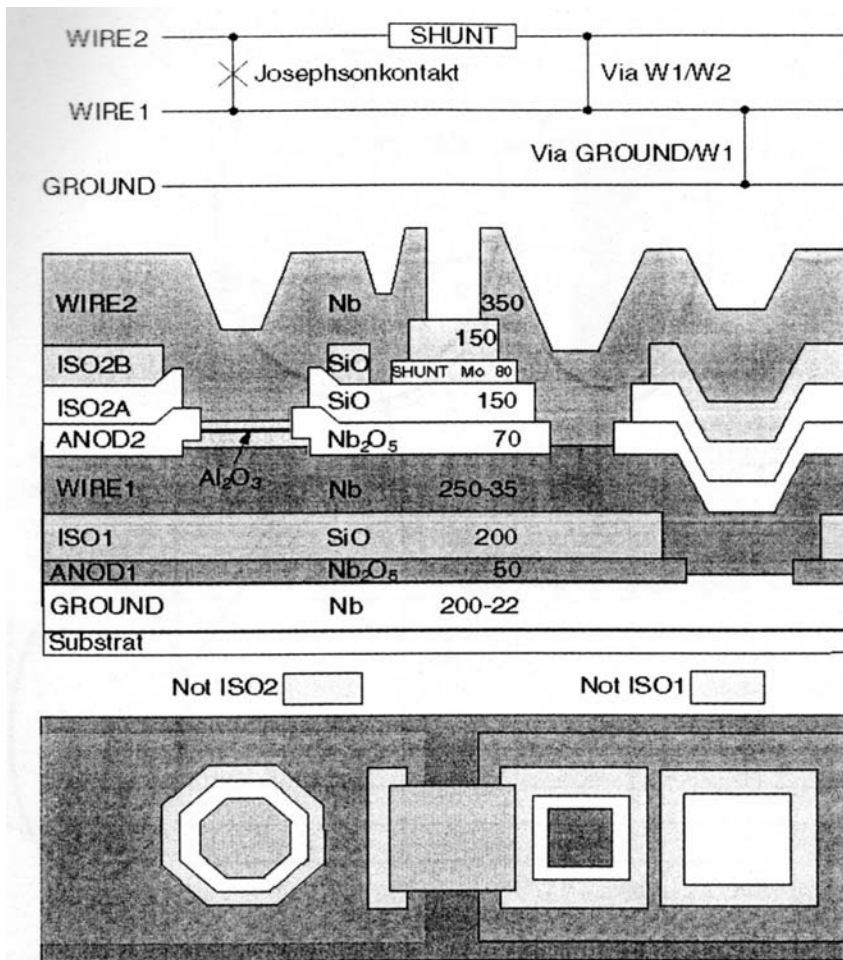


Σχήμα 4.22:RSFQ πρωτόκολλο.

#### 4.19 ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ [29]

Πρόσφατα δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα βασισμένο σε υμένα Nb και ένα τριπλό στρώμα διόδων Josephson. Το νιόβιο έχει κρίσιμη θερμοκρασία στους 92K που επιτρέπει τη λειτουργία των κυκλωμάτων σε θερμοκρασίες υγρού ηλίου ( $T=4,2K$ ). Η υπεραγώγιμη τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιείται για  $10^7$  στοιχεία ανά τσιπ. Η πυκνότητα κυκλώματος μπορεί να αυξηθεί χωρίς να χαθεί η ταχύτητα επειδή αρκετές υπεραγώγιμες επιφάνειες κατασκευάζονται σαν ένα ενσωματωμένο μέρος για το σχηματισμό γραμμών μετάδοσης. Η πυκνότητα των κυκλωμάτων περιορίζεται από τα κατασκευαστικά εργαλεία και τις διαδικασίες. Η TRW παρουσίασε μια διαδικασία κατασκευής υψηλής πυκνότητας ρεύματος με  $4kA/cm^2$ . Κατασκεύασαν κυκλώματα με 3000 διόδους ανά τσιπ και συχνότητες ρολογιού 200GHz. Αυτή η ταχύτητα λειτουργίας δεν απαιτεί λιθογραφία κάτω του  $\mu m$ . Για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας σε  $T \approx 10K$  το NbN χρησιμοποιείται ως υπεραγώγιμα ηλεκτρόδια. Η τεχνολογία κατασκευής κυκλώματος είναι παρόμοια με τη διαδικασία Nb.

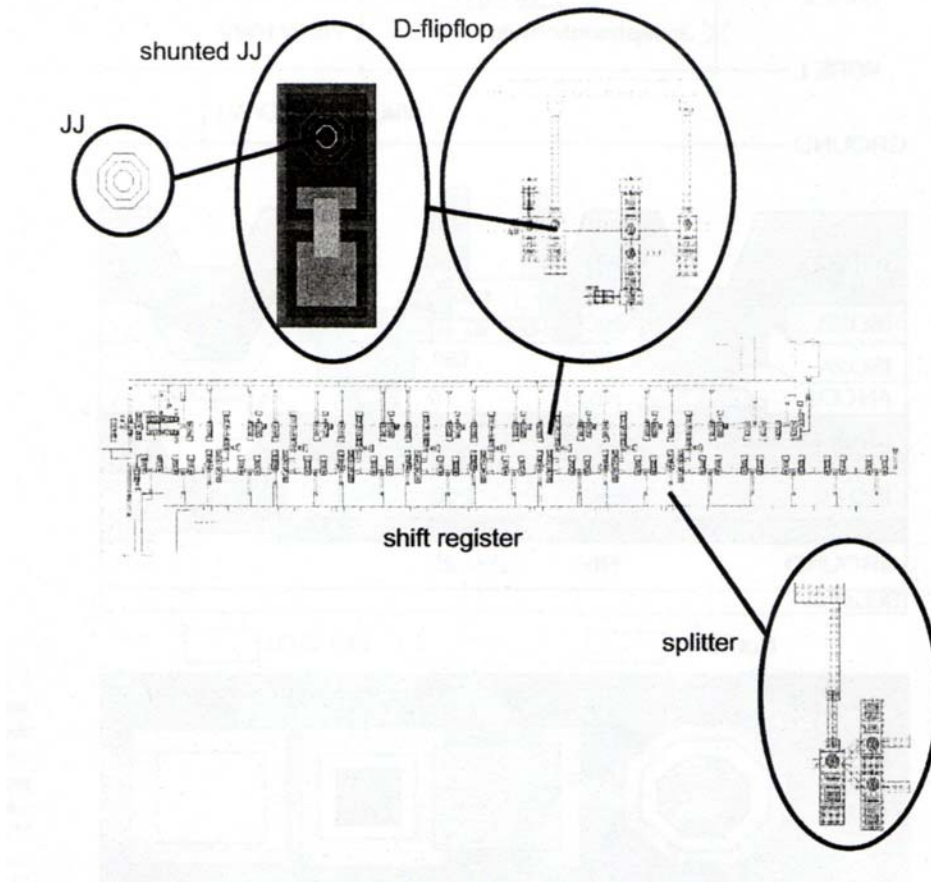
Τυπικά ολοκληρωμένη η διαδικασία περιλαμβάνει πάνω από 10 στρώματα. Αυτό περιλαμβάνει το τριπλό στρώμα Nb για την προετοιμασία των διόδων Josephson και σύρματα Nb και στρώμα αντιστάσεων. Τα ενσύρματα στρώματα χωρίζονται από  $SiO_2$  μονωτικά στρώματα. Το ελάχιστο μέγεθος διόδου είναι  $1,75\mu m$  και το ελάχιστο μέγεθος επαφών  $1,0\mu m$ .



Σχήμα 4.23: Το σχήμα δείχνει μια κάθετη τομή ενός LTS κυκλώματος

Η επαφή Josephson αποτελείται από βάση Nb και ένα ηλεκτρόδιο Nb που χωρίζεται από ένα λεπτό στρώμα φράγματος  $Al_2O_3$ . Ο σχηματισμός του φράγματος του οξειδίου είναι μια κρίσιμη διαδικασία. Η διαδικασία περιλαμβάνει εναπόθεση ενός πολύ λεπτού μεταλλικού στρώματος Al (6nm) στην κορυφή ενός υμενίου Nb. Τότε ένα ελεγχόμενο ποσό οξυγόνου εισάγεται στο σύστημα για να οξειδώσει το υμένιο Al σχηματίζοντας ένα φράγμα  $Al_2O_3$ .

Η ικανότητα του σχεδιασμού υπεραγώγιμων κυκλωμάτων είναι ένα κλειδί για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Διαφορετικά είναι τα πράγματα για την LTS τεχνολογία όπου τα μεγαλύτερης κλίμακας ολοκληρωμένα κυκλώματα έχουν ήδη γίνει εφικτά.



Σχήμα 4.23: Το σχήμα δείχνει το σχεδιασμό ενός RSFQ υπεραγωγίου καταχωρητή ολίσθησης για εφαρμογή σε  $Nb/AlO_x/Nb$  τεχνολογίες.

## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΠΕΡΑΓΩΓΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ [29]

Η τεχνολογία υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας βασίζεται κυρίως στο  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  και είναι ακόμη στα πρώτα στάδια. Οι δίοδοι Josephson βασισμένοι σε τεχνολογία υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας προσφέρουν 10 φορές υψηλότερη ταχύτητα κυκλώματος από ότι τα κυκλώματα με υπεραγωγούς χαμηλής θερμοκρασίας.

Επιπλέον τα συγκεκριμένα κυκλώματα μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασία 20K περίπου. Αυτό μειώνει το κόστος για ψύξη των υπεραγωγίων συσκευών σημαντικά. Τα ηλεκτρονικά τύπου HTS πρόκειται να έχουν εφαρμογή σε κινητά τηλέφωνα και σε δορυφόρους όπου το χαμηλό βάρος το μέγεθος και η κατανάλωση ισχύος για ψύξη αποτελούν ένα βασικό πρόβλημα για λύση. Μέσα στα επόμενα 10 χρόνια όλα τα RSFQ κυκλώματα με πολυπλοκότητα που ξεπερνά τις 10000 δίοδους θα χρησιμοποιεί LTS τεχνολογία βασισμένη σε Nb.

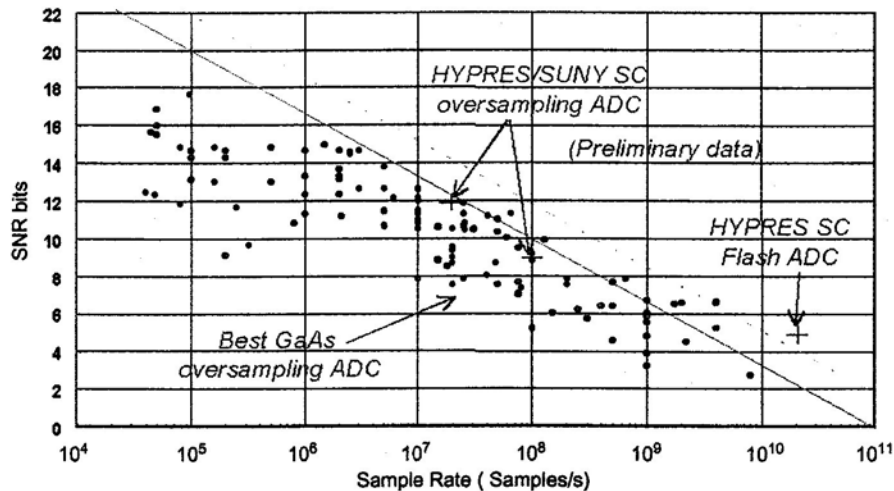


Προς το παρόν η πιο υποσχόμενη HTS τεχνολογία βασίζεται σε διόδους Josephson. Το πρώτο βήμα είναι η εναπόθεση του YBCO μονωτή με υψηλή ομοιογένεια. Μετά μια κλίση με γωνία μικρότερη των  $45^\circ$  σχηματίζεται για την αποφυγή φραγμάτων με κόκκους. Μια σημαντική δουλειά είναι ο καθαρισμός της περιοχής με κλίση πριν από την εναπόθεση του φράγματος.

#### 4.20 ΑΝΑΛΟΓΟΨΗΦΙΑΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ADCs [29]

Για υψηλής ταχύτητας ψηφιακή επικοινωνία απαιτούνται πολλοί γρήγοροι και ακριβείς μετατροπείς. Οι πολλοί γρήγοροι ADCs φτάνουν το όριο της ταχύτητας της σημερινής ημιαγωγικής τεχνολογίας.

Η απόδοση των ημιαγωγικών αναλογοψηφιακών μετατροπέων βελτιώνεται με ρυθμό  $\sim 1,5\text{bit}$  κάθε 6 χρόνια. Ένας αριθμός RSFQ ADC προσεγγίσεων έχουν σχεδιαστεί κατασκευαστεί και δοκιμαστεί. Μια πλήρη εφαρμογή υψηλής ανάλυσης φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 4.24: Το σχήμα αντιπροσωπεύει τα πραγματικά δεδομένα ενός ημιαγωγικού ADC και περιλαμβάνει νέα δεδομένα πάνω στον υπεραγωγό ADC.

#### ΨΗΦΙΑΚΟΙ-ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DACs

Υπάρχουν πολύ καλές προοπτικές για την ανάπτυξη ψηφιακών-αναλογικών μετατροπέων με υψηλή ακρίβεια. Για παράδειγμα τα επόμενα χρόνια ένα πολυτσιπ 20bit DAC με ακρίβεια καλύτερη από  $0,001\text{ppm}$  και μέγιστη εξωτερική τάση 1V ίσως είναι διαθέσιμο. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται για ρυθμιστές συνεχής τάσης σε μετεωρολογικά συστήματα.

#### **4.21 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ(29)**

Πολλοί γρήγοροι δικτυακοί διακόπτες.

Η ικανότητα μετάδοσης μιας οπτικής ίνας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 1Tbit/sec. Παρόλο που τα φωτόνια είναι ένας καλός τρόπος για την αποστολή σημάτων ωστόσο είναι δύσκολο να δημιουργήσουμε εξολοκλήρου οπτικούς διακόπτες. Η οπτική ικανότητα εισόδου εξόδου κάνει δυνατή την ανάπτυξη ενός οπτικού-ηλεκτρονικού διακόπτη δικτύου. Ένα SFQ 2 κόμβων έχει παρουσιαστεί με ροή δεδομένων πάνω από 16Gbit/sec.

#### **ΡΑΔΙΟ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ SOFTWARE (SDR)**

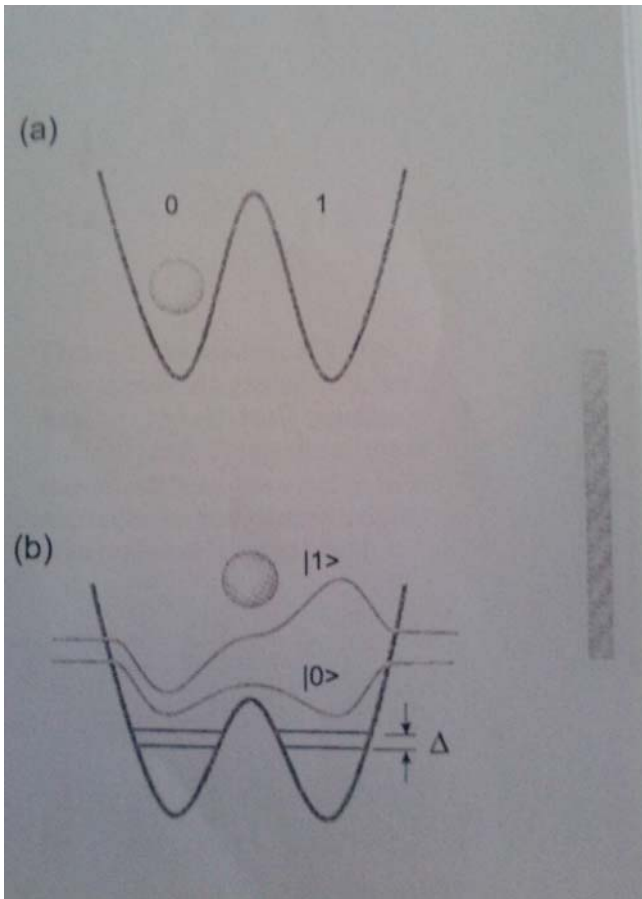
Το SDR έχει προσελκύσει την προσοχή επειδή απλοποιεί το δέκτη σημαντικά. Η ιδέα του SDR βασίζεται στην ψηφιοποίηση των κυματομορφών όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κεραία με μια επακόλουθη διαδικασία ψηφιοποίησης σήματος από το hardware και από το software.

#### **4.21 ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ [29]**

#### **Η ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΚΒΑΝΤΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ**

Οι κβαντικοί υπολογιστές αποτελούν ένα καινούριο θέμα τα τελευταία χρόνια. Η ιδέα του QC έχει αναπτυχθεί θεωρητικά τις προηγούμενες δεκαετίες για να απαντήσει σε ερωτήσεις που αφορούν τα όρια και τους περιορισμούς των μηχανών στην οποία η πληροφορία χειρίζεται με την κβαντομηχανική. Σε αντίθεση με τους υπολογιστές που γνωρίζουμε το QC ασχολείται με τη διεργασία κβαντικής πληροφορίας. Στους κβαντικούς υπολογιστές το 0 και το 1 των κλασικών ψηφιακών υπολογιστών αντικαθίσταται από την κβαντική κατάσταση ενός συστήματος δύο επιπέδων.

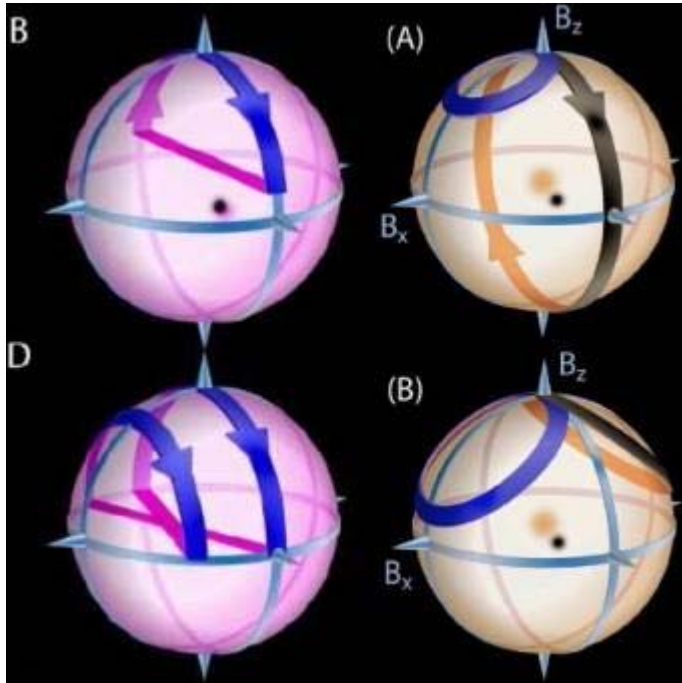
Οι κλασικοί υπολογιστές λειτουργούν με bits, οι κβαντικοί υπολογιστές λειτουργούν με κβαντικά bits που έχουν ονομαστεί qubits. Αντίθετα με τα bits που έχουν καταστάσεις 0 και 1 τα qubits μπορούν να βρίσκονται σε μια πολύπλοκη γραμμική υπέρθεση μέχρι να διαβαστούν. Για παράδειγμα οι καταστάσεις ενός σωματιδίου με Spin  $\frac{1}{2}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κβαντικούς υπολογιστές. Για ένα qubit οι δύο τιμές του κλασικού bit 0 και 1 αντικαθίσταται από την κατάσταση ( $|0\rangle$ ) και την πρώτη διεγερμένη ( $|1\rangle$ ) κατάσταση του κβαντικού συστήματος δύο επιπέδων.



Σχήμα 4.25: Το σχήμα απεικονίζει τη διαφορά ανάμεσα σε ένα κλασσικό bit και ένα κβαντικό bit.

Ένα κλασσικό σύστημα δύο καταστάσεων μπορεί να προετοιμαστεί και να αποθηκευτεί σε οποιαδήποτε από τις καταστάσεις 0 και 1. Αυτό το σύστημα χαρακτηρίζεται από δύο σταθερές καταστάσεις π.χ. ένα σωματίδιο τοποθετείται σε ένα διπλό πηγάδι δυναμικού. Στην κβαντική μηχανική ένα σωματίδιο περιγράφεται από μια κβαντομηχανική συνάρτηση και μπορεί να περάσει από το φράγμα που χωρίζει δύο πηγάδια. Σαν συνέπεια ένα σωματίδιο μπορεί να είναι σε δύο ή περισσότερες καταστάσεις ταυτόχρονα κατάσταση που ονομάζεται ως υπέρθεση καταστάσεων. Ένα κβαντικό σύστημα χαρακτηρίζεται από το διπλό πηγάδι δυναμικού που έχει τις δύο χαμηλότερες ενέργειες 0 και 1. Η κυματοσυνάρτηση για την κατάσταση  $|0\rangle$  είναι συμμετρική ενώ για τη διεγερμένη κατάσταση 1 είναι αντισυμμετρική. Η κβαντική θεωρία προβλέπει ότι ένα σύστημα στην υπέρθεση πρέπει να ακολουθεί σύμφωνες ταλαντώσεις ανάμεσα στα δύο πηγάδια. Όταν γίνεται μια μέτρηση η πιθανότητα να βρούμε το σωματίδιο στο συγκεκριμένο πηγάδι αριστερά ή δεξιά ταλαντώνεται περιοδικά με την ώρα. Η συχνότητα  $\omega$  των ταλαντώσεων είναι ανάλογη με τον κβαντικό αριθμό εμφάνισης του φαινομένου σήραγγας ανάμεσα στα πηγάδια. Αυτό καταλήγει στο χωρισμό του επιπέδου κατώτατης ενέργειας από το ονομαζόμενο κενό συμφωνίας  $\Delta = \hbar \cdot \omega$ .

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΜΕ QUBITS [29]



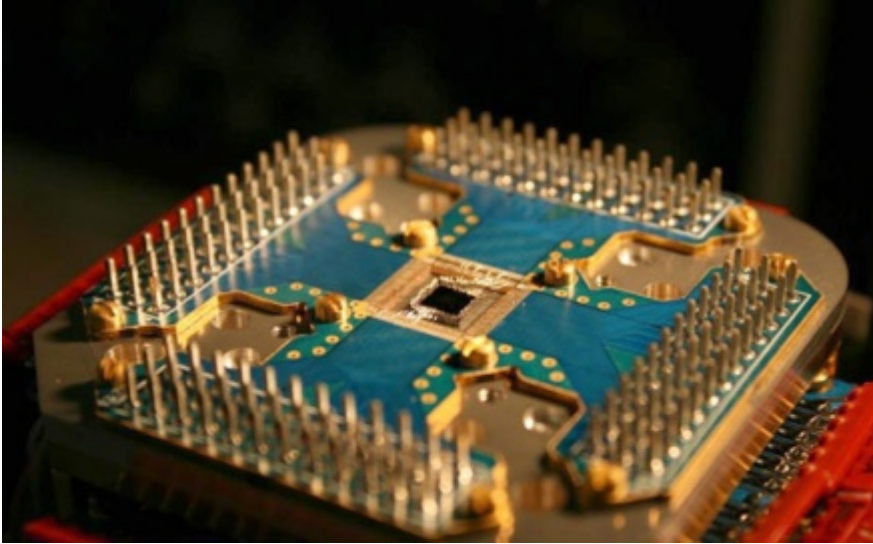
Σχήμα 4.29: Qubits

Το μεγάλο ενδιαφέρον στους QC σχετίζεται με την πραγματικότητα ότι μερικά προβλήματα τα οποία είναι πρακτικώς δύσκολο να τα χειριστούμε με κλασσικούς αλγόριθμους μπορεί να λυθεί πιο γρήγορα με QC. Η ανάλυση σε πρώτους παράγοντες μεγάλων πολωνύμων για τους οποίους ένας κβαντικός αλγόριθμος προτάθηκε από τον P. Shor είναι το πιο γνωστό παράδειγμα σε αυτόν τον τομέα. Ο Shor απέδειξε ότι οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να αναλύσουν σε πρώτους παράγοντες μεγάλους αριθμούς σε ένα πολωνυμικό αριθμό βημάτων σε σχέση με τον εκθετικό ρυθμό βημάτων σε κλασσικούς υπολογιστές. Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας ένα σύγχρονο υπολογιστή μια ανάλυση πρώτων παραγόντων ενός αριθμού  $N$  με  $L=400$  ψηφία θα απαιτήσει  $10^{10}$  χρόνια το οποίο είναι μεγαλύτερο από την ηλικία του σύμπαντος. Ένας υποθετικός κβαντικός υπολογιστής θα ήταν ικανός να κάνει αυτή τη δουλειά σε λιγότερο από 3 χρόνια.

Η ανάλυση σε πρώτους παράγοντες είναι ένα σημαντικό μέρος των κρυπτογραφικών πρωτοκόλλων που αφορούν την ασφάλεια στον ηλεκτρονικό κόσμο. Καθώς οι κβαντικοί υπολογιστές εκτελούν τη διαδικασία σε πολύ λιγότερα βήματα από ότι οι κλασσικοί υπολογιστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σπάσουν οποιοδήποτε σύγχρονο κρυπτογραφικό πρωτόκολλο. Ένα άλλο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί πολύ αποτελεσματικά είναι η διαλογή. Οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να ψάξουν βάσεις δεδομένων σε  $\sqrt{N}$  βήματα από ότι σε  $N$  σε συνηθισμένους υπολογιστές.

Τώρα θα αναλύσουμε τις λειτουργίες του H/Y με ένα σύστημα spin των qubits. Η ελεγχόμενη εξέλιξη ανάμεσα στις δύο καταστάσεις 0 και 1 επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας μικροκύματα συντονισμού στο σύστημα αλλά ο έλεγχος των καταστάσεων μπορεί να επιτευχτεί με ένα γρήγορο συνεχές παλμό υψηλής ενίσχυσης. Επιλέγοντας τα κατάλληλα

πλάτη παλμών η λειτουργία NOR μπορεί να απεικονιστεί ως  $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ ;  $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$ . Αυτές οι μεμονωμένες λειτουργίες απλών bit δεν φτιάχνουν ένα κβαντικό υπολογιστή ακόμη. Μαζί με λειτουργίες μονών bit είναι κεφαλαιώδους σημασίας να κατασκευάσουμε δύμπιτες κβαντικές λειτουργίες.



**Σχήμα 4.30:** Στο σχήμα βλέπουμε ένα δεκαεξάμπιτο κβαντικό υπολογιστή που μπορεί να εκτελεί κάποιες απλές λειτουργίες όπως το λύσιμο ενός Sudoku. Για πιο πολύπλοκες λειτουργίες απαιτούνται υπολογιστές με πολύ μεγαλύτερο αριθμό bits.

#### 4.22 ΓΙΑΤΙ ΠΡΟΤΙΜΑΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ;

Το πλεονέκτημα των μικροσκοπικών κβαντικών συστημάτων (άτομα, spins, φωτόνια) είναι ότι μπορούν εύκολα να απομονωθούν από το περιβάλλον. Το μειονέκτημα είναι η ολοκλήρωση πολλών qubits σε ένα πιο πολύπλοκο κύκλωμα για να κατασκευαστεί ένας υπολογιστής. Από αυτή την άποψη τα μακροσκοπικά κβαντικά συστήματα προσφέρουν περισσότερη ευελιξία για το σχεδιασμό ενός κβαντικού υπολογιστή χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη τεχνολογία ολοκληρωμένου κυκλώματος. Μέχρι τώρα τα προτεινόμενα μακροσκοπικά qubits βασίζονται σε νανοδομημένα ηλεκτρονικά κυκλώματα που μπορεί να αποτελούνται από κβαντικές τελείες ή υπεραγώγιμες διόδους Josephson. Ο μεγάλος αριθμός βαθμών ελευθερίας που σχετίζεται με τη στερεή κατάσταση της συσκευής κάνει δύσκολη τη διατήρηση συνάφειας.

#### 4.23 ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΑΙΩΡΗΣΗ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

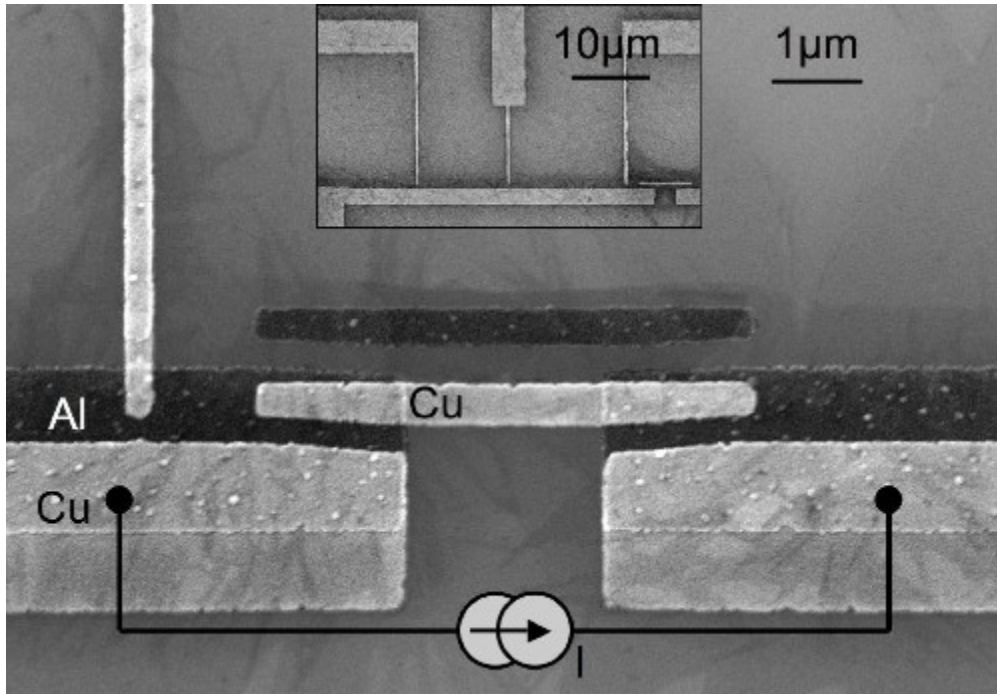
Χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Meissner που εμφανίζεται σε υπεραγωγούς στην ιαπωνία κατασκεύασαν τρένο που κινείται σε μαγνητικές γραμμές. Τα επαγόμενα ρεύματα στην επιφάνεια του υπεραγωγού δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στο μαγνητικό πεδίο από το νόμο του Lenz.



Σχήμα 4.31: Στην εικόνα βλέπουμε τη φωτογραφία ενός από τα τρένα που δοκιμάστηκαν.

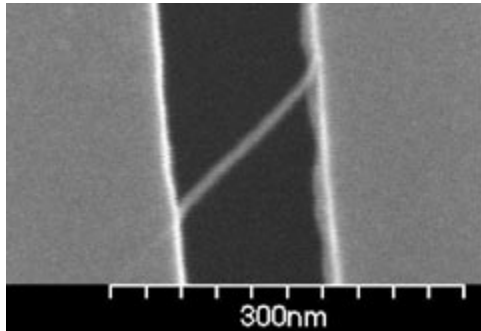
#### 4.24 ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟ ΝΑΝΟΨΥΓΕΙΟ

Μελετώντας τις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες στη νανοκλίμακα της επαφής κανονικού μετάλλου-μονωτή-υπεραγωγού παρατητήθηκε ότι μόνο τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας μπορούσαν να διαπεράσουν την επαφή. Η απομάκρυνση καυτών σωματιδίων δημιουργεί μία ροή από το κανονικό μέταλλο στον υπεραγωγό ανεξάρτητα από τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Το σχήμα δείχνει ένα νανοψυγείο με δύο επαφές Al/AlO<sub>x</sub>/Cu.



Σχήμα 4.32: Υπεραγωγίμο νανοψυγείο.

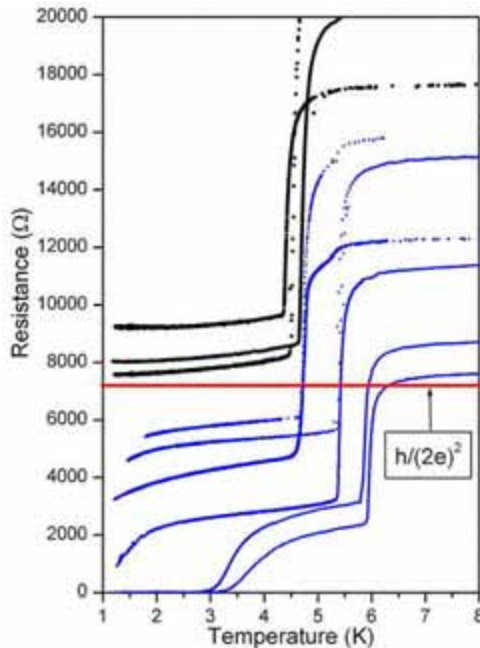
#### 4.25 ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΜΟΡΙΑΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ



Σχήμα 4.33: Υπεραγωγίμο MoGe νανοκαλώδιο.

Η εικόνα δείχνει ένα υπεραγωγίμο MoGe νανοκαλώδιο που παράγεται από τη μέθοδο sputtering. Ένας νανοςωλήνας άνθρακα μονού τοιχώματος τοποθετείται μέσα σε ένα βαθύ αυλάκι που είναι χαραγμένο στο υπόστρωμα. Το αυλάκι φαίνεται μαύρο στη φωτογραφία. Το καλώδιο που φαίνεται στη φωτογραφία έχει διάμετρο 8nm περίπου. Η πιο μικρή διάμετρος που επιτεύχθηκε με αυτή τη διαδικασία είναι 5nm. Μια κβαντική υπεραγωγίμη φάση μόνωσης παρουσιάζεται σε πολύ λεπτά υπεραγωγίμα καλώδια αυτού του τύπου. Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν τις μετρήσεις σε νανοκαλώδια διαφορετικού παχους. Μια μετάπτωση στην κατάσταση μόνωσης φαίνεται. Αυτό συμβαίνει όταν η κανονική αντίσταση του καλωδίου φτάνει την κβαντική αντίσταση των

ζευγών Cooper  $R = \frac{h}{4e^2} \approx 6,45 \text{K}\Omega$ .



Σχήμα 4.34:Μετρήσεις σε νανοκαλώδια διαφορετικού πάχους.

#### 4.26 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΑ-ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (47)

Σ'αυτού του είδους συσκευές είναι λογικό να παίρνουμε τις αρχές λειτουργίας από την ημιαγώγιμη τεχνολογία και να την εφαρμόζουμε σε υβριδικές υπεραγώγιμες – ημιαγώγιμες συσκευές. Πολλές τέτοιες συσκευές έχουν προταθεί.

Οι ημιαγώγιμες συσκευές μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες τρανζίστορ μέσω διόδου και τρανζίστορ φαινομένου πεδίου (FETs). Η πιο πολλή δουλειά για κατασκευή υβριδικών συσκευών έγινε σε αυτές τις κατηγορίες.

Η κλίμακα της τάσης λειτουργίας σε υπεραγώγιμες συσκευές είναι είναι λίγα meV ή λιγότερο για παραδοσιακούς ημιαγωγούς. Οι τυπικές τιμές τάσεις που απαιτούνται για λειτουργία ημιαγώγιμης συσκευής είναι της τάξης του 1V. Ωστόσο οι μικρότερες διαστάσεις που απαιτούνται για τη συσκευή ώστε να έχουμε πιο πυκνά κυκλώματα απαιτούν μείωση της τάσης της συσκευής. Αυτή η κλίμακα επιτυγχάνεται καλύτερα σε συσκευές τύπου MOS οι οποίες καταλήγουν σε τάση λίγων εκατοντάδων mV σε κυκλώματα 0,25μm.

#### ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΕ ΒΑΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ(47)

Η αντίσταση της βάσης ενός τρανζίστορ αποτελούσε ένα πρόβλημα στα τρανζίστορ διόδου. Η μελέτη πάνω σε αυτό το θέμα κατέληξε στην κατασκευή μιας υπεραγώγιμης βάσης που θα εξάλειφε την αντίσταση.

Ο Tonouchi είχε μελετήσει μια συσκευή με μεταλλική βάση την οποία ονόμασε Super-HET[62]. Η συσκευή είχε μια SmSuSm(semiconducting-superconducting-



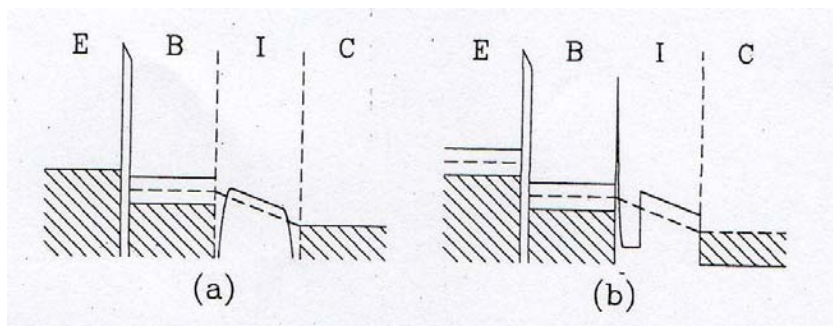
semiconducting) δομή. Ο εκπομπός είναι εκφυλισμένος ημιαγωγός (GaAs), ο μονωτής βάσης εκπομπού είναι σε περιοχή απογύμνωσης φορέων \*(GaAs-Nb).

Η βάση είναι ένας υπεραγωγός (Nb ή NbN) ο φραγμός της βάσης συλλέκτη είναι μια δεύτερη περιοχή απογύμνωσης φορέων (Nb-InSb) και ο συλλέκτης είναι ένας δεύτερος ημιαγωγός απογυμνωμένων φορέων. Πάνω στη βάση τοποθετείται InSb σε πολυκρυσταλλική δομή.

Η συσκευή που περιγράψαμε χρησιμοποίησε μια αντεστραμμένη δομή SmSuSm με τον εκπομπό στη βάση. Η συσκευή μπορεί να κατασκευαστεί με το συλλέκτη σαν το στρώμα της βάσης. Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιήσουμε έναν εκπομπό δομής NISu (N: κανονικό μέταλλο, I: μονωτής, Su: υπεραγωγός). Με αυτή τη δομή, ο εκπομπός, το φράγμα βάσης εκπομπής και η βάση μπορεί να είναι πολυκρυσταλλική ή άμορφα στρώματα τοποθετημένα πάνω στον ημιαγωγό συλλέκτη απλού κρυστάλλου. Τεχνικές για τη δημιουργία φραγμών καλά ελεγχόμενων και λεπτών υπεραγωγίων υμένων είναι διαθέσιμα από την τεχνολογία Josephson. Ο εκπομπός μπορεί να είναι υπεραγωγός. Τότε ο συλλέκτης μπορεί να είναι κάθε κατάλληλος ημιαγωγός. Συλλέκτης ετεροεπαφής είναι μια δομή που επιτρέπει χαμηλές τάσεις. Η τάση λειτουργίας των συσκευών ετεροεπαφής μπορεί να είναι αρκετά μικρή γεγονός που τις κάνει ενδιαφέρουσες από την πλευρά της απώλειας ισχύος.

#### ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΟ ΜΟΝΩΜΕΝΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΒΑΣΗ [47]

Ο Frank [63] πρότεινε το υπεραγωγό μονωμένο τρανζίστορ με βάση το μέταλλο που αποφεύγει τις δυσκολίες των κβαντικών μηχανικών ανακλάσεων και που μοιάζει στην πραγματικότητα με διπολικό τρανζίστορ. Η δομή απεικονίζεται στο σχήμα.



Σχήμα 4.35: Υπεραγωγό μονωμένο τρανζίστορ με βάση μέταλλο.

Η συσκευή έχει δομή μετάλλου-μονωτή-υπεραγωγού-ημιαγωγού.Ο εκπομπέας –βάση αποτελείται από μέταλλο μονωτή υπεραγωγό.Στη βάση τοποθετούνται ηλεκτρόνια με βάση το φαινόμενο της σήραγγας.Αυτά τα ηλεκτρόνια δε χρειάζεται να είναι θερμά...Μπορούν να τοποθετηθούν με ενέργειες λίγο πάνω από το ενεργειακό κενό στη βάση.Τα μονά ηλεκτρόνια διαχέονται κατά μήκος της βάσης.Σ'αυτή την κατηγορία τρανζίστορ τα μονά ηλεκτρόνια δε χρειάζεται να εισέλθουν στο συλλέκτη από την πρώτη προσπάθεια.Αυτό βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της συλλογής αλλά αυξάνει το χρόνο μετάπτωσης στη βάση.Ωστόσο αυτός ο χρόνος δεν είναι που επηρεάζει την ταχύτητα της συσκευής.Προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν χρόνο μεταφοράς και χρόνο φόρτισης δείχνουν ότι η συγκεκριμένη συσκευή είναι γρήγορη με χρόνο ανταπόκρισης στην κλίμακα των 10ps.Το κέρδος σε ρεύμα εξαρτάται από το χρόνο μετάπτωσης στη βάση και από το συντελεστή μετάδοσης.Αυτή η συσκευή αποτελεί τη βάση για την κατασκευή ενός υπεραγωγίμου διπολικού τρανζίστορ που θα είναι με βάση χωρίς ηλεκτρική αντίσταση.

Το κλειδί της λειτουργίας αυτού του τρανζίστορ είναι η επαφή βάσης συλλέκτη.Οι επαφές πρέπει να είναι ομικές και χωρίς φράγματα αφού η παρουσία ενός φράγματος θα παγίδευε τα μονά ηλεκτρόνια στη βάση μειώνοντας το κέρδος σε ρεύμα και κάνοντας τη συσκευή πιο αργή.Η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή ώστε τα μονά ηλεκτρόνια στη βάση να μη συνεισφέρουν ένα μεγάλο ρεύμα διαρροής.

Υπάρχουν δύο συσκευές μια που απλά ένας υπεραγωγός αντικαθιστά το κανονικό στρώμα και το ημιαγωγίμο μονωμένο τρανζίστορ με υπεραγωγίμη βάση.Για το συγκεκριμένο τρανζίστορ η τάση λειτουργίας εξαρτάται από το υπεραγωγίμο ενεργειακό κενό αλλά το πρόβλημα είναι στο πολύ χαμηλό φράγμα της επαφής μετάλλου ημιαγωγού.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εφαρμογές των νανοϋλικών σε ηλεκτρονικές εφαρμογές αυξήθηκαν κατά 40% μέσα στο 2009 ενώ αναμένεται να παρουσιαστεί ανάπτυξη στην αγορά νανοϋλικών πάνω από 40% ανάμεσα στο 2008 και το 2015. Η χρήση των νανοϋλικών σε ημιαγωγικές εφαρμογές θα έχει ένα μερίδιο της τάξης του 62,6% σε μία αγορά 800εκατομμυρίων δολαρίων μέσα στο 2010. Από τα παραπάνω στοιχεία καταλαβαίνουμε πόσο προσεκτικά πρέπει να γίνεται η επιλογή νανοϋλικών σε μια βιομηχανία που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία είδαμε για τις νέες μεθόδους παρασκευής νανοϋλικών που συνεχώς εξελίσσονται βοηθώντας μας να προχωράμε όλο και σε μικρότερες διαστάσεις. Οι νάνο-διαστάσεις συνεπάγονται νέες ξεχωριστές ιδιότητες για τα υλικά που είναι πάρα πολύ χρήσιμες τόσο στην βιομηχανία υπεραγωγών και ημιαγωγών. Κάποιες από τις πιο σπουδαίες μηχανικές ιδιότητες των νανοϋλικών είναι οι εξής: η αυξημένη σκληρότητα, η ανθεκτικότητα ενάντια στην οξειδωση και στη διάβρωσή και το μειωμένο βάρος. Επιπλέον έχουν σπουδαίες οπτικές ιδιότητες όπως αδιαφάνεια, φθορισμό και παγίδευση του φωτός. Στις θερμικές ιδιότητες τους περιλαμβάνεται η υψηλή θερμική αγωγιμότητα και η ικανότητα τους να παρέχουν θερμική μόνωση. Τέλος στις μαγνητικές ιδιότητες περιλαμβάνεται η δυνατότητα τους να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση δεδομένων καθώς επίσης και ο υψηλός μαγνητισμός.

Το στοιχείο που χρησιμοποιείται κατεξοχήν στην τεχνολογία των ημιαγωγών είναι το πυρίτιο. Τρανζίστορ αλλά και ολοκληρωμένα κυκλώματα βασίζονται στην τεχνολογία του πυριτίου. Συνεχείς έρευνες όμως προτείνουν την αντικατάσταση του  $\text{SiO}_2$  από νέα υλικά όπως το  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  που έχει μελετηθεί ως διηλεκτρικό πύλης και DRAM για παραπάνω από 10 χρόνια. Η διηλεκτρική του σταθερά είναι περίπου 40 σε σχέση με του  $\text{SiO}_2$  που είναι 3,9 περίπου.

Ένα άλλο διηλεκτρικό που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια είναι το  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Αυτό το υλικό αποτελεί έκπληξη καθώς έχει πιο χαμηλή διηλεκτρική σταθερά από το  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  γύρω στο 9 με 10. Ωστόσο υπάρχουν 2 λόγοι που ευνοούν αυτό το υλικό είναι η χαμηλή πυκνότητα διαρροής ρεύματος και επίσης η υψηλή αξιοπιστία ανάπτυξης MOCVD στρώμα με στρώμα. Η Samsung έχει παρουσιάσει μια πλήρως λειτουργική DRAM 1 Gb χρησιμοποιώντας  $\text{Al}_2\text{O}_3$  που εναποτίθεται με τη μέθοδο της ατομικής εναπόθεσης στρώματος.

Επιπλέον οι νανοσωλήνες άνθρακα με τις εκπληκτικές τους ιδιότητες κερδίζουν έδαφος στην βιομηχανία των ημιαγωγών. Τρανζίστορ νανοσωλήνων άνθρακα έχουν κατασκευαστεί καθώς επίσης και κυκλώματα νανοσωλήνων άνθρακα. Επιπλέον χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μνήμης που παίζουν σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές μικροηλεκτρονικών.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή στον τομέα των ημιαγωγών είναι το κβαντικό cascade laser το οποίο αναμένεται να αλλάξει ριζικά τα δεδομένα αφού δε θα χρειάζεται να σκαφτούν οι κεντρικοί δρόμοι ώστε να τοποθετηθούν καλώδια οπτικών ινών. Η σύνδεση θα γίνεται μέσω οπτικών συνδέσεων για τις οποίες δεν απαιτείται χώρος. Το μεγάλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου laser ότι μπορεί να διαπερνά την ομίχλη πολύ εύκολα κάνοντας τις συνδέσεις πολύ αποτελεσματικές.

Επιπλέον οι νανοδιόδοι εκπομπής φωτός μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες απεικονίσεις καθώς επίσης και σε φωτεινούς σηματοδότες. Οι ημιαγωγάμοι νανοκρύσταλλοι είναι ελκυστικοί τύποι χρωμοφόρων που συνδιάζουν εκπομπή φωτός ελεγχόμενη από το μέγεθος των κρυστάλλων με εξαιρετική φωτοσταθερότητα και χημική ελαστικότητα.

Οι μοριακοί διακόπτες αποτελούν πλέον μια νέα πραγματικότητα αφού ξεχωριστά μόρια εκτελούν λειτουργίες που μέχρι τότε εκτελούνταν από ημιαγωγάμο στοιχεία. Τα ξεχωριστά μόρια είναι εκατοντάδες φορές μικρότερα από τα μικρότερα χαρακτηριστικά που είναι εφικτά από την ημιαγωγάμη νανοτεχνολογία. Επιπλέον τα ξεχωριστά μόρια μπορούν να κατασκευαστούν ίδια ακριβώς σε δισεκατομμύρια και τρισεκατομμύρια.

Μια επιπλέον πολύ ενδιαφέρουσα ημιαγωγάμη εφαρμογή είναι η KAMINA μια ημιαγωγάμη διάταξη αισθητήρα που ανιχνεύει τη διαρροή φυσικού αερίου. Πρόκειται για μια πάρα πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή εφόσον ελαχιστοποιεί τους κινδύνους που ελλοχεύει η χρήση φυσικού αερίου.

Οι υπεραγωγοί έχουν επίσης συναρπαστικές ιδιότητες που εκμεταλλευόμαστε για τις παρακάτω εφαρμογές όπως είναι η μηδενική αντίσταση σε ασθενή ρεύματα όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, μπορούν να διατηρήσουν ένα ρεύμα χωρίς να εφαρμόζεται τάση, μια ιδιότητα που εκμεταλλευόμαστε στους υπεραγωγάμους ηλεκτρομαγνήτες. Τέλος το ρεύμα δεν μπορεί να αναλυθεί σε ξεχωριστά ηλεκτρόνια αποτελείται από δεσμευμένα ηλεκτρόνια γνωστά ως ζευγάρια Cooper.

Αντίστοιχα στον τομέα των υπεραγωγών βλέπουμε ότι με την πάροδο των χρόνων χρησιμοποιούνται υπεραγωγοί υψηλότερων θερμοκρασιών. Βλέπουμε λοιπόν ότι ενώ το 1920 και 1930 χρησιμοποιούνται το νιόβιο και ο μόλυβος που εμφάνιζαν υπεραγωγάμότητα στους 10K από το 2010 και μετά χρησιμοποιούνται το οξειδίο βαρίου υτρίου χαλκού YBCO με κρίσιμη θερμοκρασία στους 92K αλλά και οξειδίο του χαλκού, ασβεστίου, βαρίου και υδραργύρου με κρίμη θερμοκρασία 138K.

Πράλληλα εφαρμογές με νανοσωλήνες άνθρακα αναμένεται να κυκλοφορήσουν ευρέως μέσα στο 2010. Οι κυριότερες εφαρμογές που αναφέρθηκαν στην παρούσα διπλώματική και πρόκειται να αλλάξουν τα δεδομένα είναι τα υπεραγωγάμα καλώδια που θα έχουν μηδενική αντίσταση απαλάσσοντας μας από τις ανεπιθύμητες απώλειες ενέργειας. Σημαντικότερη εφαρμογή στον τομέα των υπεραγωγών είναι οι κβαντικοί υπολογιστές. Οι συγκεκριμένοι υπολογιστές αντικαθιστώντας τα κλασσικά bit από κβαντικά μπιτ μπορούν να επιτύχουν ανάλυση πρώτων παραγόντων ενός αριθμού N με  $L=400$  ψηφία σε 3 χρόνια κάτι που με τον κλασσικό υπολογιστή θα απαιτούσε  $10^{10}$  χρόνια. Επιπλέον μπορούν να ψάξουν βάσεις δεδομένων σε  $\sqrt{N}$  βήματα από ότι σε N σε συνηθισμένους υπολογιστές.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πόσο χρήσιμες είναι οι εφαρμογές των νανουλικών αφού αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία αυτών των δομών. Η χρήση των νανουλικών ανοίγει νέους δρόμους για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και η συνεχή επαφή με τις εξελίξεις, μας βοηθάει να είμαστε όλο και πιο ανταγωνιστικοί στον τομέα της μηχανολογίας που είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τις εφαρμογές των υλικών για τις επιθυμητές ιδιότητες της κάθε κατασκευής.

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ADC=Αναλογοψηφιακός μετατροπέας(Analog to digital converter)  
AFM=Μικροσκόπιο ατομικής δύναμης(Atomic Force Microscope)  
BST=(Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>  
CMOS= Διάταξη οξειδίου μετάλλου ημιαγωγού (Complementary metal oxide semiconductor)  
CNT=Νανοςωλήνες άνθρακα (Carbon Nanotubes)  
CPU=Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central processing unit)  
DAC=Ψηφιαναλογικός μετατροπέας(Digital to analog converter)  
DUV=Βαθιά υπεριώδης (Deep ultraviolet)  
EEPROM=Ηλεκτρικά διαγραφόμενη προγραμματιζόμενη μνήμη ανάγνωσης(Electrically erasable programmable read only memory)  
EUV=Υπεριώδης ακτινοβολία πολύ χαμηλού μήκους κύματος (Extreme ultraviolet)  
FIB=Εστίαση δέσμης ιόντων (Focused ion beam)  
GMR=Γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση(Giant Magnetoresistance)  
HTS=Υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας(High temperature superconductors)  
LSI=Μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση (Large scale integration)  
LTS=Υπεραγωγοί χαμηλής θερμοκρασίας ( Low temperature superconductors)  
MIM=Μέταλλο μονωτής μέταλλο(metal-insulator-metal)  
MF-ABO<sub>3</sub> = Σιδηρομαγνητικό πάνω σε αγώγιμο οξείδιο (metal-ferromagnetic)  
MFIS=μέταλλο –σιδηρομαγνητικό-μονωτής-ημιαγωγός (metal-ferromagnetic-insulator-semiconducting)  
MFMIS=μέταλλο-σιδηρομαγνητικό-μέταλλο-μονωτής-ημιαγωγός (metal-ferromagnetic-metal-insulator-semiconducting)  
MFS=μέταλλο-σιδηρομαγνητικό-ημιαγωγός(metal-ferromagnetic- semiconducting)  
MOCVD=Μέταλλο-οργανική χημική εναπόθεση ατμού(Metal organic chemical vapour deposition)  
MRAM=Μαγνητική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Magnetic RAM)  
MWCNT=Νανοςωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (Multi wall carbon nanotubes)  
NDRO=Μη καταστροφική μνήμη ανάγνωσης (Non destructive read out)  
QC=Κβαντικοί υπολογιστές (Quantum computing)  
RSFQ=Κβάντα ταχείας μονής ροής(Rapid single flux quantum)  
RTD= Δίοδος συντονισμού σήραγγας(Resonant Tunneling Diode)  
SDR=Ψηφιακό ράδιο βασισμένο σε software( Software digital radio)  
SEM=Μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων(Scanning electron microscope)  
SFQ=Λογική μονής ροής(Single Flux quantum logic)  
SQUID=Υπεραγωγιμες κβαντικές συσκευές συμβολής (superconducting-quantum-interference device)  
STM=Μικροσκόπιο σάρωσης με βάση το φαινόμενο της σήραγγας (Scanning tunneling microscope)  
SUSMSU=Υπεραγωγός-ημιαγωγός-υπεραγωγός(Superconducting-semiconducting-superconducting)  
SUNSU=Υπεραγωγός μέταλλο υπεραγωγός(Superconductor-normal metal-superconductor)

SWCNT=Νανοσωλήνες άνθρακα ενός τοιχώματος (Single wall carbon nanotubes)

VLS=Ατμού υγρού στερεού(Vapor liquid solid)

VLSI=Ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας (Very large scale integration)

2DEG=Αέριο ηλεκτρονίων δύο διαστάσεων ( two-dimensional electron gas )

## ΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΞΕΩΝ

**Αναστροφή πληθυσμού**=Η συνθήκη σύμφωνα με την οποία σε ένα ατομικό σύστημα σε κατάσταση μη ισορροπίας, ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων στα υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα θα είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των σωματιδίων στα χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα

**Ανόπτηση**=Η διαδικασία μείωσης της ψαθυρότητας και των εσωτερικών τάσεων μέσω της θέρμανσης του σε κατάλληλη θερμοκρασία και κατόπιν ομαλής επαναφοράς του σε συνθήκες περιβάλλοντος

**Απογύμνωση φορέων**=Σε έναν ημιαγωγό είναι η μείωση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων ή των οπών σε σχέση με τη θερμοκρασία και τις προσμίξεις του. Συμβαίνει στην περιοχή της επαφής των δύο ημιαγωγών τύπου p-n.

**Αποτέλεσμα προσέγγισης** = Είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στον τομέα της υπεραγωγιότητας για να περιγράψει φαινόμενα που συμβαίνουν όταν ένας υπεραγωγός τοποθετείται σε επαφή με έναν μη υπεραγωγό. Συνήθως η κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  του υπεραγωγού μειώνεται και ενδείξεις ασθενούς υπεραγωγιότητας παρατηρούνται στο κανονικό υλικό.

**Αποτελεσματική μάζα**=Στη φυσική στερεάς κατάστασης τα ηλεκτρόνια και τα κενά ανταποκρίνονται στα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία σαν να ήταν σωματίδια με μάζα εξαρτημένη από την κατεύθυνση της διαδρομής. Αυτή η μάζα δίνεται συνήθως σε μονάδες κανονικής μάζας ηλεκτρονίου. Σε αυτές τις μονάδες η αποτελεσματική μάζα είναι της τάξης του 0,01 ή 10 αλλά μπορεί να είναι χαμηλότερες ή και μεγαλύτερες.

**Γραμμή εκπομπής**= Στην περίπτωση που ο ανιχνευτής βλέπει το αέριο αλλά όχι την πηγή φωτονίων ο ανιχνευτής θα δει τα φωτόνια να εκπέμπουν σε μια συχνότητα μικρού εύρους. Αυτό αποτελεί μια γραμμή εκπομπής.

**Διαγωγιμότητα**=Το μέτρο για το πόσο καλά μετατρέπεται μια τάση στην πύλη σε ρεύμα στην υποδοχή.

**Διαμόρφωση**=Περιγράφει την προτιμώμενη θέση που λαμβάνουν τα άτομα ή ομάδες ατόμων κατά την περιστροφή στο χώρο γύρω από ένα απλό δεσμό.

**Εκκένωση τόξου**=Είναι η ηλεκτρική κατάρρευση ενός αερίου που παράγει μια εκκένωση πλάσματος καταλήγοντας από μια ροή ρεύματος σε ένα μη αγώγιμο μέσο όπως ο αέρας.

**Εκτός άξονα φωτισμός**=Ο φωτισμός εκτός άξονα είναι μια τεχνολογία βελτίωσης της λιθογραφίας βύθισης διαμέσου της εφαρμογής γκρι τόνου

**Εμφύτευση κατιόντων**=Αποτελεί μια διεργασία στην οποία τα ιόντα από ένα υλικό μπορούν να εμφυτευτούν σε ένα άλλο στερεό αλλάζοντας τις φυσικές ιδιότητες του. Η εμφύτευση ιόντων χρησιμοποιείται για την κατασκευή ημιαγωγικών στοιχείων.

**Ετεροεπιταξία**=Είναι ένα είδος επιταξίας που εκτελείται με υλικά που είναι διαφορετικά το ένα από το άλλο. Ένας κρυστάλλινος υμένος αναπτύσσεται σε ένα κρυσταλλικό υπόστρωμα ή σε άλλο υλικό. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για να αυξηθούν οι κρυσταλλικοί υμένες των υλικών. Παραδείγματα περιλαμβάνουν νιτρίδιο του γαλλίου ζαφείρι

**Ζεύγος Cooper**=Ζεύγος ηλεκτρονίων τα οποία διατηρούνται συζευγμένα μέσω φωνονίων.Στα ζεύγη αυτά οφείλεται η υπεραγωγιμότητα μετάλλων σύμφωνα με τη θεωρία Bardeen-Cooper-Schrieffer.

**Ζώνη σθένους**=Η ψηλότερη ζώνη η οποία καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνια

**Θερμική διάχυση**=Φυσικοχημική ιδιότητα ρευστών σύμφωνα με την οποία μίγματα ρευστών όταν βρίσκονται σε χώρο όπου η θερμοκρασία διαφοροποιείται από σημείο σε σημείο το ρευστό με τα μικρότερα μόρια τείνει να συγκεντρωθεί στα θερμότερα σημεία του χώρου.

**Θερμική χωρητικότητα**=Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται από κάποιο σώμα όταν η θερμοκρασία του μεταβληθεί κατά ένα βαθμό κελσίου.

**Ισοτοπική μάζα**=Η μάζα ενός από τα ισότοπα ενός στοιχείου

**Κας μνήμη**=Βοηθητική μνήμη η οποία προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες σε H/Y, βελτιστοποιώντας διαδικασίες της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας όπως ανταλλαγή δεδομένων επιταχύνοντας τον επεξεργαστή ή συγκεκριμένα προγράμματα που τυχαίνει να χρησιμοποιεί εξειδικευμένες υπηρεσίες.

**Κουτί μεταβλητής χωρητικότητας**=Διπολική διάταξη η χωρητικότητα της οποίας μεταβάλλεται μέσω μηχανικών ή ηλεκτρονικών διακοπών συνδέοντας ή αποσυνδέοντας μεταξύ των άκρων της ή αλλάζοντας τη χωρητικότητα των μεταβλητών πυκνωτών που περιέχει

**Λιθογραφία βύθισης**=Είναι μια τεχνολογία βελτίωσης της λιθογραφίας που αντικαθιστά το κενό αέρα ανάμεσα στον τελικό φακό και την επιφάνεια υποστρώματος με ένα υγρό μέσο διάθλασης που έχει δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από 1.Η ευκρίνεια αυξάνεται από ένα συντελεστή ισοδύναμο του δείκτη διάθλασης του υγρού.

**Μάσκες αλλαγής φάσης**=Πρόκειται για φωτομάσκες που επωφελούνται από την συμβολή που δημιουργείται από τη διαφορά των φάσεων ώστε να βελτιωθεί η ευκρίνεια της εικόνας στη φωτολιθογραφία.

**Μέση ελεύθερη διαδρομή**=Ορίζεται ως η μέση απόσταση που διανύει ένα μόριο αερίου πριν συγκρουστεί με άλλο μόριο.

**Μήκος πρόσπινσης του Debye**=Χαρακτηριστικό μήκος πέρα του οποίου εξουδετερώνεται το πεδίο που παράγεται από ένα θετικό ιόν του πλάσματος.

**Μήκος συμφωνίας**=χαρακτηριστική απόσταση στα όρια της οποίας επιδρά και μεταδίδεται κάθε τοπική μεταβολή μιας ιδιότητας ενός σώματος.

**Μικροσκόπιο ατομικής δύναμης**=Μικροσκόπιο εξαιρετικής μεγεθυντικής ικανότητας.Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέτρηση και καταγραφή της θέσης μιας πολλή λεπτής ακίδας καθώς αυτή κινείται πάνω στην επιφάνεια του δείγματος

**Παράμετρος τάξης**=Μια φυσική ποσότητα η οποία σχετίζεται με τις αλλαγές φάσης που παρουσιάζει ένα σύστημα και η οποία είναι μη μηδενική όταν το σύστημα μεταβαίνει σε μια φάση τάξης.Τυπικό παράδειγμα παραμέτρου τάξης είναι η μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού η οποία κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία είναι μη μηδενική.

**Περοβσκίτης**=Ορυκτό σε αποχρώσεις του κόκκινου , κίτρινου καστανού ή και περισσότερο σκούρου με τύπο  $CaTiO_3$ .Η κρυσταλλική του δομή είναι κοινή με ένα μεγάλο αριθμό τριαδικών ενώσεων του τύπου  $AB\Gamma_3$  με ιδεώδη στοιχειώδη κυψελίδα κυβική.Στην πραγματικότητα η δομή του είναι μονοκλινική ,αλλά οι παράμετροι



ελάχιστα διαφέρουν από αυτές ενός κυβικού πλέγματος. Άλλα παραδείγματα περοβσκιτών:  $KIO_3$ ,  $KMgF_3$ ,  $AlBiO_3$ .

**Πιγμέντο**=Είδος χρωστικής ουσίας που χρησιμοποιείται σε αιώρημα για να προσδώσει χρώμα σε άλλο υλικό σαν χρώμα επιστρώσεως.

**Πλασμόνια**=Ονομάζουμε την ποσότητα ενέργειας  $h \cdot \omega_p / 2\pi$  με ακέραια πολλαπλάσια της οποίας ταλαντώνεται το πλάσμα όπου  $\omega_p$  είναι η συχνότητα ταλάντωσης του πλάσματος.

**Πυκνότητα ρεύματος**= Ορίζεται σαν ένα διάνυσμα που το μέτρο του είναι το ηλεκτρικό ρεύμα σε κάθε διατομή.

$$I = \vec{J} \cdot \vec{A}$$

I= το ρεύμα στον αγωγό

J=η πυκνότητα ρεύματος

A= η διατομή

**Ρεύμα μεταισθήματος**=Μαγνητικά αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει κάποιο υπεραγωγίμο υλικό ή κυκλώμα και η ένταση του παραμένει αμείωτη ακόμη και μετά την αφαίρεση της τάσης.

**Στάθμη Fermi**=Η στάθμη Fermi είναι μια ενεργειακή στάθμη στη οποία ο παράγοντας της κατανομής Fermi των ηλεκτρονίων που βρίσκονται ενεργειακά στη στάθμη αυτή ισούται με  $1/2$ .

**Σύγχροτρο**=Για την επίτευξη υψηλών ενεργειών στα σωματίδια υπάρχει ένας τύπος μηχανής που ονομάζεται σύγχροτρο. Τα σωματίδια κινούνται σε θάλαμο κενού που έχει το σχήμα λεπτού κουλουριού και ονομάζεται δακτύλιος επιτάχυνσης. Η δέσμη των σωματιδίων καμπυλώνεται με τη βοήθεια σειράς ηλεκτρομαγνητών τοποθετημένων γύρω γύρω -γύρω από το δακτύλιο καθώς τα σωματίδια επιταχύνονται, το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται ώστε να παραμείνουν συνεχώς στην ίδια τροχιά.

**Υπερυγρό**=Υγρό χωρίς ιξώδες και εσωτερική τριβή. Για να γίνει ένα υγρό υπερυγρό πρέπει τα μόρια να ψυχτούν σε τέτοιο σημείο ώστε όλα να βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση. Τα ύγρα αυτά είναι αντίστοιχα των υπεραγωγίμων υλικών.

**Υστέρηση**=Το φαινόμενο που παρουσιάζεται στα σιδηρομαγνητικά υλικά κατά το οποίο οι μεταβολές της μαγνήτισης και κατ'ακολουθία της έντασης του μαγνητικού πεδίου δεν συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες μεταβολές του διεγείροντος αυτές πεδίου αλλά καθυστερούν χρονικά.

**Φράγμα Schottky**=Αποτελεί δυνητικό εμπόδιο που σχηματίζεται στην επαφή μετάλλου ημιαγωγού που έχει χαρακτηριστικά κατάλληλα για τη χρήση του ως δίοδος. Η μεγαλύτερη διαφορά του από ένα p-κόμβο n είναι η χαμηλότερη τάση διόδου.

**Χάσμα ζωνών**=Η ελάχιστη διαφορά ενέργειας δύο ενεργειακών ζωνών ενός κρυσταλλικού υλικού

**Χειρομορφία**=Χαρακτηριστικό σωμάτων μορίων τα οποία δεν έχουν συμμετρία κατοπτρισμού ή αντιστροφής σημείου. Το φαινόμενο συμβαίνει σε πολλά οργανικά μόρια και φυσικά σώματα.

**Bulk laser**=Αναφέρεται σε λέιζερ στερεής κατάστασης με μέσο απολαβής ένα στερεό κρυσταλλικό κομμάτι ή ένα κομμάτι γυαλιού

**CMOS**=Ηλεκτρονικές διατάξεις , επίδρασης πεδίου μετάλλου ημιαγωγού (MOSFET) , στα τρανζίστορ των οποίων υπάρχουν δίαυλοι προσαύξησης τύπου p (PMOS) αλλά και τύπου n (NMOS).

**GMR**=Γιγαντιαία Μαγνητοαντίσταση=Η πιο απλή μέθοδος δημιουργίας ρεύματος spin πολωμένου είναι να διαπεράσουμε το ρεύμα εντός ενός σιδηρομαγνητικού υλικού

**Lift off**=Η διεργασία lift off στην ναυοτεχνολογία είναι μια μέθοδος δημιουργίας δομών ενός συγκεκριμένου υλικού στην επιφάνεια του υποστρώματος χρησιμοποιώντας ένα θυσιαζόμενο υλικό

**MOCVD**=Τεχνική για εναπόθεση λεπτών στρωμάτων ατόμων πάνω σε ημιαγωγική επιφάνεια.Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο μπορούμε να τοποθετήσουμε πολλά στρώματα το ένα πάνω στο άλλο, το καθένα από αυτά με ελεγχόμενο πάχος για τη δημιουργία υλικού με ξεχωριστές ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες.

**VLS**=Μέθοδος ατμού υγρού στερεού .Είναι ένας μηχανισμός για την ανάπτυξη δομών μιας διάστασης όπως νανοσύρματα από τη χημική εναπόθεση ατμού.Η ανάπτυξη ενός κρυστάλλου διαμέσου της απορρόφησης της αέριας φάσης πάνω σε μια στερεή επιφάνεια είναι γενικά πολλή αργή.Ο μηχανισμός VLS καταστρατηγεί αυτό το φαινόμενο εισάγοντας μια καταλυτική υγρή φάση κράματος που μπορεί να απορροφά τον ατμό σε υπερκορρεσμένα επίπεδα από την οποία η ανάπτυξη κρυστάλλου μπορεί να συμβεί.

**2DEG**= Ένα αέριο ηλεκτρονίων δύο διαστάσεων είναι ένα αέριο ηλεκτρονίων ελεύθερο να κινείται στις δύο διαστάσεις αλλά περιορισμένο απόλυτα στην τρίτη.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1.heliosteiathr/patheogk/anadromhfiles/semiconductors-PV.pdf
2. www.nanoroad.net/download/overview\_nanomaterials.pdf
- 3.Zhao H. and Ning Y. ,Gold bull ,p.p 103-105, 2000
- 4.Faraday.M ,Philosophical Transactions of the Royal Society of London, p.p 79-124,1857
- 5.Feynman, R P, "There is plenty of room at the bottom",Miniaturization,p.p 282-296, 1961
- 6.Moore G. , "Progress in digital integrated electronics," IEDM Technical Digest, Vol. 21, pp 11-13, 1975.
- 7.Postman H W C ,Teepen T,Yao Z, Griformi M και Dekker C Science Vol.293,2001
- 8.Tans S J, Devoret M H,Dai H, Thess A, Smalley R E , Geerlings L G και Dekker C "Individual single-wall nanotubes as quantum wires", Nature 386,1997
- 9.Tans S J,Verschueren A R M και Dekker C ,Nature 393,1998
- 10.Keren K, Berman R S , Buchstab E, Sivan U και Braun E "DNA-Templated Carbon-Nanotube Field Effect Transistor", Science 302, 2003
- 11.Cao J , Nanostructures and nanomaterials :Synthesis, properties and applications Imperial College Press,2004
- 12.Ogawa H, Nishicavra M.και Abe A. ,Journal of applied Physics,1982
- 13.Veprek S και Argon A S , "Mechanical properties of superhard nanocomposites",Surface and coatings technology ,2001
- 14.Gerberich W W and W.M.Mook, Pour la science, 41: p.19,2003
- 15.Iijima S και Ichihashi T, "Single shell carbon nanotubes of one nanometer diameter",Nature, p.p 603-605,1993
16. David G C, Wayne K F, Kenneth E G, Gerald D M, Arun M, Humphrey J M, Roberto M ,Journal of applied Physics,pp 93-793 ,2003.
- 17.Deyu L, Yiyang W, Philip K ,Peidong Y και Arun M , Applied Physics Letters, 2003
- 18.Dresselhaus M S , Dresselhaus G και Avouris P Carbon Nanotubes , Synthesis, Structures, Properties and Applications, Phaedon editions,2001
- 19.Costescu R M, Cahill D G, Fabreguette F H, Sechrist Z A και George S M, "Ultra-low thermal conductivity in  $W/Al_2O_3$  ", Science, 2004
- 20.Mingo N, Yang L, Li D, και Majumdar A, Nano Letters, p.p 3-877,2003
- 21.Deyu L, Yiyang W, Rong F, Peidong Y και Arun M , Applied Physics Letters,pp83-3186, 2003
- 22..Mingo N ,Physical Review B Vol.68, 2003
- 23.Fujii M, Zhang X, Xie H, Ago H, Takakashi k, Ikuta T, Abe H , Physical Review Letters ,2005
- 24.W.R Fahner , "Nanotechnology and nanoelectronics",Springer Berlin Heidelberg, 2004
- 25.George W.Hanson Αρχές νανοηλεκτρονικής ,Εκδόσεις Τζιόλα, 2009
- 26.Cao Guozhong,Nanostructures and nanomaterials.Synthesis, properties and Applications,World scientific,2004.
- 27.F.Kreupl , A.P Graham, E.Unger, G.S Duesberg,M.Liebau , "Carbon nanotubes in interconnect applications",Microelectronics engineering, Vol 64, 2002
28. [http://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect_transistor),9 February 2010

29. Rainer Waser "Nanoelectronics and information technology", Publisher Wiley-VCH, 2003
30. M.Kohler, W.Fritzsche, "Nanotechnology", Publisher Wiley-VCH, 2004
31. <http://rt.grc.nasa.gov/power-in-space-propulsion/photovoltaics-power-technologies/technology-thrusts>
32. K.Onnes, "The resistance of pure mercury at helium temperatures", Comm. Leiden. 120b, 1911.
33. W.Meissner and R.Ochsenfeld, "Ein neuer Effect bei Eintritt der Supraleitfähigkeit", Naturwiss, pp 787-788(1933).
34. F.London and H.London, " The electromagnetic equations of the superconductor" Proc. Roy. Soc. London Ser. A vol. 149 , pp 71-88, (1935).
35. L.Ginzburg and L.D.Landau On the theory of superconductivity, Zh. Eksp. Teor. Fiz. (USSR), pp. 1064–1082,(1950).
36. E.Maxwell, "Isotope effect in the superconductivity of Mercury" (1950).
37. C.A.Reynolds, B.Serin, W.H.Wright and L.B Nesbitt, " Superconductivity of Isotopes of Mercury ", Physics Review, (1950)
38. J.Bardeen , L.N.Cooper and J.R Schrieffer , "Theory of superconductivity", Phys. Rev. 106, pp 162-164, (1957).
39. N.N Bogoliubov, " A new method in the theory of superconductivity" Journal of experimental and theoretical Physics 34, (1958).
40. B.D Josephson , "Possible new effects in superconductive tunneling" , Physics Letters Vol 1, pp 251, (1962).
41. <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080408160614.htm>, Newly discovered fundamental state of matter , a superinsulator , has been created, Science daily (April 9, 2008)
42. J.G Bednorz and K.A Muller , "Possible high TC superconductivity in the Ba-La-Cu-O system ", Z. Phys. B: Condensed Matter, Vol. 64, pp. 189-193 (1986).
43. M.K Wu , J.R.Ashburn, C.J.Torng, P.H.Hor , R.L.Meng, L.Gao, Z.J.Huang, , Y.Q.Wang , "Superconductivity at 93K in a new mixed phase Y-Ba-Cu-O Compound system at Ambient Pressure", Physics review letters, Vol 58 (1987).
44. P.Dai, B.C.Chakoumakos, G.F.Sun , K.W.Wong, Y.Xin and D.F.Lu "Synthesis and neutron powder diffraction study of the superconductor HgBaCaO" Physica C 243, p. 201. (1995)
45. Hiroki Takahashi , Kazumi Igawa, Kazunobu Arii, Yoichi Karmihara, Masahiro Hirano, Hideo Hosono, " Superconductivity at 43K in an iron based- layered compound  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ " Jpn.suppl.77Sc,(2008).
46. Adrian Cho, " Second Family of High-Temperature superconductors Discovered" Science now daily news, 2008.
47. Steven T.Ruggiere, " Superconducting devices", David A.Rudman, 2001
47. T.Kijima and H.Matsunaga, Jpn.J.Appl.Phys 38., p.p 127 (1999).
48. B.H.Park, B.S.Kang, S.D.Bu, T.W.Noh. Nature, pp401-682 (1999)
49. J.H.Choi, J.W.Kim and T.S.Oh, Mat, Res. Soc. Symp. Proc. (2002)
50. Y.Fujisaki and H.Ishiwara, Mat. Res. Soc. Symp. proc. (2002)
51. E.Tokomitsu, G.Fuji and H.Ishiwara, Jpn.J.Appl.Physics, pp39-2125 (2000)
52. E.Tokomitsu, G.Fuji and H.Ishiwara, Appl.Phys.Letters, pp75-575 (1999)
53. [http://www.itrs.net/1999\\_SIA\\_Roadmap/Home](http://www.itrs.net/1999_SIA_Roadmap/Home).

54. <http://publicitrs.net/InternationalTechnologyRoadmapforsemiconductors> (2001)
55. P.W. Shor, Proc. of the 35<sup>th</sup> Annual Symposium of the Foundations of Computer Science, Goldwasser IEEE Computer Society Press, (1994).
56. Deneen J, Mook W.M, Minor A., Gerberich W.W, In situ deformation of silicon nanospheres, Journal of materials science, (2006)
57. Sakai, T. Yamamoto, Y. Kobayashi, Y. Kawarada, Y. Hayashi, , "A 3ns 1kbit Ram using super self aligned process technology", solid-state circuits, IEEE (2003)
58. H.H. Zappe, , " A single flux quantum Josephson junction memory cell" Appl. Phys. Lett. (1984)
59. Debye, , " Temperature of metallic nanowires ", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, pp1867-1870, 2007.
60. David.G. Cahil, Thermal transport in Au core Polymer Shell Nanoparticles, Nanoletters, pp531-535 (2005).
61. Siemens, , " Backend process for cylindrical Ru/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Ru capacitor for future DRAM solid state and Integrated Circuit Technology" (2002)
62. H. Tonouchi, M. Osaka, , "Monolithic superconductor-base-hot-electron transistors with large current gain ", Electronics Letters, (2007)
63. Frank Schwierz, , " Modern Microwave Transistors: Theory, Design and Performance," Wiley, (2008)