

Εισαγωγή στην νανοτεχνολογία, νανοηλεκτρονική και εφαρμογές

Λάππας Αθανάσιος 2 - 2017

Για το μάθημα της Επιστήμης Των Υλικών, ΣΕΜΦΕ

Διδάσκοντες: Κυρίτσης Απόστολος & Μπουρουσιάν Μιρτάτ

Πίνακας περιεχομένων

[Περίληψη 2](#_Toc475021966)

[ΕΙΣΑΓΩΓΗ 3](#_Toc475021967)

[Γενικά περί νανοτεχνολογίας 3](#_Toc475021968)

[Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας 4](#_Toc475021969)

[Πλεονεκτήματα της Νανοτεχνολογίας. 4](#_Toc475021970)

[… και κάποια μειονεκτήματα: 5](#_Toc475021971)

[Εισαγωγή στην νανοηλεκτρονική 6](#_Toc475021972)

[Συσκευές στερεάς κατάστασης και μονού ηλεκτρονίου 6](#_Toc475021973)

[Κβαντικές τελείες (quantum dots) 7](#_Toc475021974)

[Συσκευές συντονισμού σήραγγας 8](#_Toc475021975)

[Τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου (Single-Electron Transistor, SET) 8](#_Toc475021976)

[Συσκευές μοριακής ηλεκτρονικής 9](#_Toc475021977)

[Μοριακά καλώδια 9](#_Toc475021978)

[Μοριακά ηλεκτρονικά κυκλώματα 10](#_Toc475021979)

[Μοριακή Οπτοηλεκτρονική 11](#_Toc475021980)

[Βιβλιογραφία 11](#_Toc475021981)

# Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξαμήνου για το μάθημα κατεύθυνσης Επιστήμη των Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, γίνεται μια σύντομη γενική εισαγωγή στην νανοτεχνολογία και μια σχετικά εκτενέστερη εισαγωγή στην νανοηλεκτρονική και τις εφαρμογές της.

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Γενικά περί νανοτεχνολογίας

«**Nanotechnology is the art and science of manipulating matter at the nanoscale»**

-Η νανοτεχνολογία είναι η τέχνη και η επιστήμη της διαχείρισης της ύλης στη νανοκλίμακα.

Νανοτεχνολογία ( nanotechnology ) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους μεταξύ 1 και 100 νανομέτρων ( nm ), της τάξεως δηλαδή των 10-9 μέτρων. Οι διαστάσεις γίνονται ευκολότερα αντιληπτές αναφέροντας πως ένα νανόμετρο ισούται περίπου με το 1/100.000 μιας ανθρώπινης τρίχας ή με το μήκος 10 ατόμων υδρογόνων σε σειρά.

Κατά παρόμοιο τρόπο ορίζεται και ο όρος νανοεπιστήμη (nanoscience) αναφερόμενος σε επιστήμες οι οποίες μελετούν φαινόμενα στην κλίμακα αυτή. Αν και το πεδίο της νανοτεχνολογίας μόλις πρόσφατα άρχισε να αναπτύσσεται ουσιαστικά, οι δυνατότητες της είχαν αρχίσει να γίνονται ήδη εμφανείς από την εποχή που ο φυσικός Richard Feynman έδωσε το λόγο με τίτλο "There's Plenty of room at the Bottom", μιλώντας για τα μεγάλα περιθώρια που αφήνουν οι νόμοι τις φύσης για τον έλεγχο της ύλης σε ατομικό επίπεδο.

Στη μέχρι τώρα ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας σημαντικό ρόλο έπαιξε η βελτίωση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, ενώ σταθμοί μπορούν να θεωρηθούν οι ανακαλύψεις δομών άνθρακα σε μορφή σφαίρας γνωστές ως φουλερένια (buckminister fullerenes ή fullerenes ή buckyballs ) καθώς και σε μορφή σωλήνα γνωστές ως νανοσωλήνες άνθρακα ( carbon nanotubes ) με ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα.

Ο όρος νανοτεχνολογία είναι πολύ γενικός για να περιγράψει οτιδήποτε συμβαίνει στις διαστάσεις του νανομέτρου. Κατά συνέπεια, μπορεί να χωρισθεί σε πιο ειδικά θέματα όπως αυτό της νανοηλεκτρονικής, των νανοϋλικών και άλλων. Οι εφαρμογές της είναι αναρίθμητες, ενώ οι επιπτώσεις της γίνονται αντιληπτές σε πολλαπλά επίπεδα. Κατά κύριο λόγο στον οικονομικό τομέα επηρεάζοντας παγκόσμιες βιομηχανίες και οικονομίες, αλλά και στο κοινωνικό βελτιώνοντας το επίπεδο ζωής μας.

Δε θα πρέπει ωστόσο να φανταστεί κάποιος πως η νανοτεχνολογία πρόκειται για επιστημονική επανάσταση. Τα περισσότερα θέματα όπου αυτή περικλείει προκύπτουν σαν συνέπεια της εξελικτικής ικανότητας της επιστήμης και της τεχνολογίας να ερευνά και να εργάζεται σε όλο και μικρότερη κλίμακα. Εξάλλου, ολόκληρα επιστημονικά πεδία όπως η χημεία ή η βιολογία ανέκαθεν δούλευαν σε τέτοιες διαστάσεις παρόλο που ο όρος νανοεπιστήμη εισήχθη μόλις πρόσφατα.

### Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας

Οι κύριες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας σήμερα, συνοπτικά, είναι οι ακόλουθες:

**Ηλεκτρονικά**

* Νάνο Transistors
* Νάνο Δίοδοι
* OLED (Organic Light Emitting Diode – Οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός)
* Plasma Displays (Οθόνες Πλάσματος)
* Κβαντικοί υπολογιστές

**Ενέργεια**

* Μπαταρίες
* Fuel Cells (Ενεργειακές κυψελίδες)
* Solar Cells (Φωτοσυλεκτικές Κυψελίδες)

**Υλικά**

* Νάνο σωλήνες
* Aerogel
* Νάνο Σωματίδια

Επιστήμες Υγείας

* Στοχευμένη - Εστιασμένη έκχυση φαρμάκων
* Τεχνητός αμφιβληστροειδής
* Ανάπλαση ιστών

### Πλεονεκτήματα της Νανοτεχνολογίας.

Με την νανοτεχνολογία, μπορούμε να δημιουργήσουμε μοναδικά υλικά και προϊόντα που είναι:

* Ισχυρότερα
* Ελαφρύτερα
* Φθηνότερα
* Ανθεκτικότερα
* Ακριβέστερα

**Βιομηχανικά πλεονεκτήματα:**

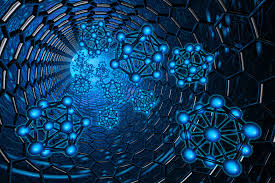
* Οι υπολογιστές μπορούν να γίνουν ένα δισεκατομμύριο φορές ταχύτεροι και ένα εκατομμύριο φορές μικρότεροι
* Αυτόματος καθαρισμός ρύπων/μόλυνσης
* Κατασκευή με σχεδόν μηδενικό κόστος

**Ιατρικά**

* Τέλος ασθενειών (όπως ο καρκίνος, οι καρδιοπάθειες κα..)
* Καθολική ανοσία (όπως HIV, κρύωμα)
* Σωματογλυπτική (π.χ. Αλλαγή του παρουσιαστικού μας)

### … και κάποια μειονεκτήματα:

* Μείωση θέσεων εργασίας (στην βιομηχανική, αγροτική παραγωγή, κλπ)
* Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορεί να προκαλέσουν πνευμονική μόλυνση.
* Το πετρέλαιο και τα διαμάντια μπορεί να γίνουν ευτελή υλικά/προϊόντα. (Αρνητικό;)
* Τα ατομικά όπλα μπορεί να γίνουν πιο προσιτά και καταστροφικά



# Εισαγωγή στην νανοηλεκτρονική

Η Νανοηλεκτρονική είναι ο διάδοχος της Μικροηλεκτρονικής, όπου πλέον οι γνώσεις της Νανοτεχνολογίας συνδυάζονται με γνώσεις από την επιστήμη των Υλικών, την Φυσική, την Χημεία και την Ηλεκτρονική, καθιστώντας τον χώρο της Νανοηλεκτρονικής έναν πολύ ελπιδοφόρο επιστημονικό τομέα. Υπό κάποια έννοια, η σμίκρυνση των ηλεκτρονικών γενικότερα, υπήρξε η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας και τις εφαρμογές της. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της Νανοηλεκτρονικής έχει το γεγονός πως η μικροηλεκτρονική των ημιαγωγών τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει υποστεί εκθετική μείωση στο μέγεθος και στο κόστος παραγωγής, με αντίστοιχη αύξηση της απόδοσης και βαθμού ολοκλήρωσης (ο γνωστός νόμος του Moore). Η Νανοηλεκτρονική χρησιμοποιεί τις επιστημονικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί σε ατομική κλίμακα με σκοπό τη μείωση του μεγέθους και των επιφανειών των υλικών και κάνει εφικτή την κατασκευή μικρότερων και γρηγορότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, οδηγεί στην δημιουργία νέων διατάξεων, (π.χ. τα νανοτρανζίστορ). Όλα αυτά έχουν πολλαπλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή με αποτελέσματα όπως γρηγορότερες επικοινωνίες, νέα πολύ ισχυρά συστήματα αποθήκευσης πληροφορίας, μικρότερα μεγέθη υπολογιστικών συστημάτων, νέες συσκευές πολλαπλών λειτουργιών, συστήματα έξυπνων αισθητήρων, κ.α. [1] Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι κατασκευής των νανοηλεκτρονικών αυτών εξαρτημάτων και συσκευών. Η μέθοδος <> (bottom up approach) και η μέθοδος <> (bottom down approach) η ενασχόληση με τις οποίες ξεφεύγει του εύρους τούτου του πονήματος. Έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από νανοηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη από αυτές αναφέρεται στις συσκευές κβαντικού φαινομένου στερεάς κατάστασης (solid-state-quantum-effect) και στις συσκευές μονού ηλεκτρονίου (single-electron). Ενώ η δεύτερη αναφέρεται στις μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές. Η λειτουργία των συσκευών και των δύο παραπάνω κατηγοριών βασίζεται στα διάφορα κβαντικά φαινόμενα που εμφανίζονται στην νανομετρική κλίμακα.

## Συσκευές στερεάς κατάστασης και μονού ηλεκτρονίου

Οι συσκευές στερεάς κατάστασης βασίζουν τη λειτουργία τους, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στα κβαντικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη νανομετρική κλίμακα. Οι συσκευές αυτές κατασκευάστηκαν για να αντιμετωπιστούν κάποια από τα προβλήματα (ανάπτυξη υψηλών ηλεκτρικών πεδίων, υψηλή διάχυση της θερμότητας στα τρανζίστορ, κ.τ.λ.) που εμφανίζονται στα τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές της ηλεκτρονικής. Οι νανοηλεκτρονικές συσκευές αποτελούνται από μία πηγή, μία υποδοχή και μία νησίδα. Καθώς εφαρμόζεται μία τάση πόλωσης κατά μήκος της νησίδας ελεύθερα ηλεκτρόνια εισάγονται στη ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής της πηγής, τα οποία μέσω της νησίδας προσπαθούν να φτάσουν στην περιοχή της υποδοχής, που βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό. Το κυρίαρχο δομικό στοιχείο όλων αυτών των συσκευών είναι η νησίδα, η οποία συνήθως κατασκευάζεται από κάποιον ημιαγωγό ή μέταλλο, μέσα στην οποία τα ηλεκτρόνια μπορούν να περιοριστούν. Αυτή η νησίδα της νανοηλεκτρονικής διάταξης παίζει έναν ρόλο ανάλογο με αυτόν του καναλιού στο παραδοσιακό τρανζίστορ. Ανάλογα, λοιπόν, με το μέγεθος του περιορισμού των ηλεκτρονίων στη νησίδα διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες νανοηλεκτρονικών συσκευών στερεάς κατάστασης. Η πρώτη κατηγορία είναι οι κβαντικές τελείες (quantum dots), στις οποίες η νησίδα περιορίζει τα ηλεκτρόνια με μηδέν βαθμούς ελευθερίας. Η επόμενη κατηγορία είναι οι συσκευές συντονισμού σήραγγας (resonant tunneling devices), στις οποίες η νησίδα περιορίζει τα ηλεκτρόνια με έναν ή δύο βαθμού ελευθερίας. Τέλος, η τρίτη κατηγορία αναφέρεται στα τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου (single-electron transistor), στα οποία η νησίδα περιορίζει τα ηλεκτρόνια με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων νανοηλεκτρονικών συσκευών αυτής της κατηγορίας εξαρτώνται από τη σύνθεση, το σχήμα και το μέγεθος της νησίδας. Μεταβάλλοντας αυτούς τους παράγοντες η συσκευή χρησιμοποιεί τα διάφορα κβαντικά φαινόμενα με διαφορετικούς τρόπους ώστε να ελέγχει το πέρασμα των ηλεκτρονίων από και προς τη νησίδα.

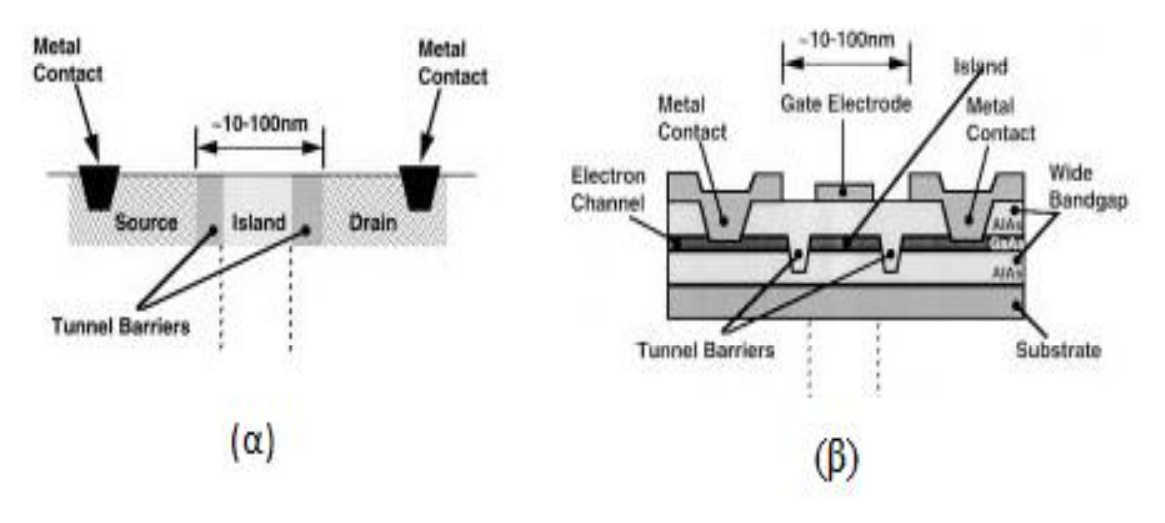
### 

### Κβαντικές τελείες (quantum dots)

Οι κβαντικές τελείες είναι πολύ μικρές συσκευές, οι οποίες περιέχουν ένα σταγονίδιο από ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από 1 έως 48 100nm. Μία κβαντική τελεία μπορεί να περιλαμβάνει από ένα μόνο ηλεκτρόνιο έως μία συλλογή από χιλιάδες. ‘Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το μέγεθος, το σχήμα και ο αριθμός των ηλεκτρονίων μπορούν να ελεγχθούν με εξαιρετική ακρίβεια. Η νησίδα των κβαντικών τελειών είναι κατασκευασμένη είτε από μέταλλο είτε από ημιαγωγό. Ένα κύριο χαρακτηριστικό των κβαντικών τελειών είναι η ενέργεια φόρτισής τους, η οποία είναι ανάλογη της ενέργειας ιονισμού ενός ατόμου. Με άλλα λόγια, είναι η ενέργεια που απαιτείται για να προστεθεί ή να αφαιρεθεί ένα ηλεκτρόνιο από την κβαντική τελεία. Εξαιτίας των αναλογιών που παρουσιάζουν οι κβαντικές τελείες με τα άτομα, συχνά αναφέρονται και ως τεχνητά άτομα.[2] Οι κβαντικές τελείες βρίσκουν εφαρμογή στις οπτικές και οπτοηλεκτρονικές συσκευές, στη κβαντική πληροφορική και στην αποθήκευση πληροφοριών. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία ημιαγωγών, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή λέιζερ και φωτοανιχνευτών.[3]

### Συσκευές συντονισμού σήραγγας

Οι συσκευές συντονισμού σήραγγας χαρακτηρίζονται από μακριές και στενές νησίδες με την μικρότερη από τις διαστάσεις τους να κυμαίνεται μεταξύ των 5-10nm. Για τη λειτουργία των συσκευών αυτών εφαρμόζεται μία τάση πόλωσης στην περιοχή της νησίδας με αποτέλεσμα ελεύθερα ηλεκτρόνια να εισάγονται στη ζώνη αγωγιμότητας της πηγής τα οποία προσπαθούν μέσω της νησίδας να περάσουν στην περιοχή της υποδοχής που βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό. Η ενέργεια των κβαντικών καταστάσεων στην περιοχή της νησίδας θα πρέπει να είναι παρόμοια με αυτή της πηγής και της υποδοχής έτσι ώστε να λάβει χώρα το φαινόμενο της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, όταν η πόλωση ελαττώσει την ενέργεια μίας μη κατειλημμένης κβαντικής κατάστασης μέσα στο ενεργειακό πηγάδι ώστε να είναι παρόμοια με αυτή της ζώνης αγωγιμότητας της πηγής τότε το κβαντικό πηγάδι «ανοίγει» και τα ηλεκτρόνια μπορούν να διέλθουν μέσα από τη νησίδα. Αντίθετα, υπάρχουν αρκετές κατειλημμένες ενεργειακές στάθμες στην περιοχή της υποδοχής με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων προς τη νησίδα, δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα. Μεταβάλλοντας, λοιπόν, την πόλωση στην περιοχή της νησίδας ώστε να ελεγχθεί το ρεύμα σήραγγας δημιουργείται μία συσκευή συντονισμού σήραγγας, η οποία ονομάζεται δίοδος συντονισμού σήραγγας (Resonant Tunneling Diode, RTD). 49 Ακόμη, μεταβάλλοντας την πόλωση σε μία τρίτη υποδοχή, που ονομάζεται πύλη (gate), κατασκευάζεται ακόμη μία συσκευή συντονισμού σήραγγας, η οποία ονομάζεται τρανζίστορ συντονισμού σήραγγας (Resonant Tunneling Transistor, RTT). Η λειτουργία του τρανζίστορ αυτού είναι παρόμοια με αυτή του MOSFET οπότε μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν διακόπτης όσο και ενισχυτής.



(α) Δίοδος συντονισμού σήραγγας (RTD), (β) Τρανζίστορ συντονισμού σήραγγας (RTT) [4]

### 

### Τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου (Single-Electron Transistor, SET)

Ένα SET είναι μία συσκευή με τρείς ακροδέκτες, η δομή του οποίου προσομοιάζει αρκετά με αυτή του MOSFET. Τα SET διαθέτουν, επίσης, μία νησίδα η οποία είναι κατασκευασμένη από μέταλλο. Η νησίδα περιλαμβάνει περίπου ένα εκατομμύριο ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι δυνάμεις Coulomb που εμφανίζονται ανάμεσα στα ηλεκτρόνια εμποδίζουν το φαινόμενο της σήραγγας όταν η τάση πόλωσης είναι χαμηλή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «αποκλεισμός Coulomb». Για να ελεγχθεί ο αριθμός των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη νησίδα, τοποθετείται δίπλα σε αυτή ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο πύλη. Κάθε φορά που η τάση στην πύλη αυξάνεται περνάει ένα ηλεκτρόνιο από την πηγή στην υποδοχή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα να υπάρχει και πάλι δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. 50 Τα τρανζίστορ αυτά μελετώνται για να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων καθώς είναι πολύ μικρά σε μέγεθος και μπορούν να ανιχνεύουν την κίνηση του κάθε ηλεκτρονίου ξεχωριστά. Παρουσιάζουν, βέβαια και κάποια μειονεκτήματα, όπως είναι το χαμηλό κέρδος τάσης, υψηλή αντίσταση εισόδου, κ.τ.λ. οπότε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη σε εφαρμογές που τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου χρησιμοποιούνται. [5]

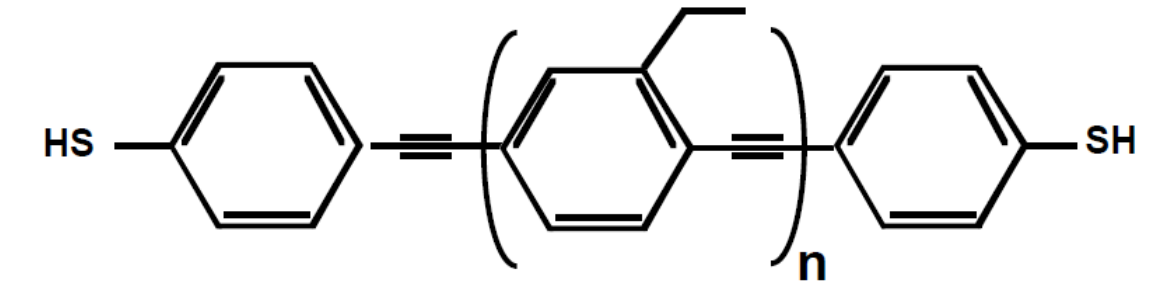
## 

## Συσκευές μοριακής ηλεκτρονικής

Ο όρος μοριακή ηλεκτρονική χρησιμοποιείται γενικά για να χαρακτηρίσει τις συσκευές αυτές της ηλεκτρονικής των οποίων οι ηλεκτρονικές ιδιότητες προσομοιάζουν την συμπεριφορά των μορίων. Από τη στιγμή που το μέγεθος των μορίων κυμαίνεται από 0.2 έως 20nm, οι μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές πρέπει να διαθέτουν τουλάχιστον μία διάσταση που να βρίσκεται σε αυτή τη νανομετρική κλίμακα. Οι μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές που έχουν ήδη κατασκευαστεί συμπεριλαμβάνουν εκτός των άλλων, μοριακούς αγωγούς, ανορθωτές, τρανζίστορ, διόδους εκπομπής φωτός (LED), κ.τ.λ. Επειδή τα μόρια έχουν χαρακτηριστικά μεγέθη στην νανομετρική κλίμακα, οι ηλεκτρονιακές ενεργειακές του στάθμες είναι κβαντισμένες και διαθέτουν ενεργειακά κενά με μεγάλο φάσμα ενεργειών. Ελέγχοντας, λοιπόν, τα ενεργειακά αυτά κενά το μόριο που κατασκευάζεται διαθέτει συγκεκριμένο ενεργειακό κενό και ηλεκτρονική κατανομή φόρτισης. Οι εφαρμογές της μοριακής ηλεκτρονικής εκμεταλλεύονται ακριβώς αυτόν τον κατακερματισμό ενέργειας που λαμβάνει χώρα στη νανομετρική κλίμακα.[6] Όλες οι ηλεκτρονικές διαδικασίες στη φύση, από τη φωτοσύνθεση έως τη μετάδοση των σημάτων, λαμβάνουν χώρα στις μοριακές δομές. Για τις ηλεκτρονικές εφαρμογές οι μοριακές δομές εμφανίζουν τέσσερα σημαντικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο από αυτά είναι το μέγεθος τους. Το μέγεθος των μορίων κυμαίνεται από 1 έως 100nm, μία κλίμακα που επιτρέπει λειτουργικές νανοδομές που πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών ηλεκτρονικών συσκευών στο κόστος κατασκευής τους, την αποτελεσματικότητά τους και την διάχυση της θερμότητας. Ακόμη ένα πλεονέκτημα είναι ότι χρησιμοποιώντας τις ενδομοριακές αλληλεπιδράσεις τα μόρια μπορούν να αυτοσυναρμολογηθούν και τροποποιώντας την ηλεκτρονική τους συμπεριφορά μπορούν να φέρουν σε πέρας παραπάνω από μία λειτουργίες. Για παράδειγμα, ένα μόριο μπορεί να λειτουργεί τόσο σαν διακόπτης όσο και σαν αισθητήρας. Επόμενο 51 πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι μοριακές δομές είναι η δυναμική στερεοχημεία τους. Πολλά μόρια έχουν πολλαπλές ξεχωριστές γεωμετρικές δομές ή ισομερή. Αυτά τα γεωμετρικά ισομερή διαθέτουν ξεχωριστές οπτικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες. Τέλος, η συνθετική τους προσαρμοστικότητα είναι ένα ιδιαίτερο σημαντικό πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι μοριακές δομές. Επιλέγοντας τη σύνθεση και τη γεωμετρία του κάθε μορίου, οι μεταφορικές, δομικές και οπτικές ιδιότητες του μεταβάλλονται ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία κατασκευάζονται. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι μοριακές δομές είναι η έλλειψη σταθερότητάς τους όταν εφαρμόζονται σε αυτά υψηλές θερμοκρασίες.[7]

Μοριακά καλώδια

Τα μοριακά καλώδια είναι αντικείμενα μοριακής κλίμακας, τα οποία άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Είναι βασικά δομικά συστατικά των μοριακών ηλεκτρονικών συσκευών. Η διάμετρος τους δεν ξεπερνάει τα 3nm ενώ το μήκος τους μπορεί να είναι μερικά cm ή και παραπάνω. Τα μοριακά καλώδια συντίθενται από επαναλαμβανόμενες μοριακές μονάδες, οι οποίες μπορεί να είναι είτε οργανικές (όπως το DNA) ή ανόργανες. Οι υψηλές αγωγιμότητες παράγονται από συστήματα υψηλής σύζευξης, ενώ οι αλυσίδες της ομάδας των αλκανίων θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές στην κατανόηση των βασικών φαινομένων μεταφοράς και σήραγγας. Ένα μοριακό καλώδιο που υπάρχει στη φύση είναι το DNA. [8] Τα σημαντικότερα παραδείγματα ανόργανων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μοριακών καλωδίων είναι το Li2Mo6Se6 [9] και Mo6S9-xIx [80, 81] και οι ενός μορίου μεταλλικές ατομικές αλυσίδες. [12] Συγκεκριμένες ιδιότητες θα πρέπει να διαθέτουν τα μοριακά καλώδια ώστε να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση των διαφόρων μοριακών συσκευών. Κατ’ αρχήν οι σύνδεσμοι μεταξύ των μοριακών συσκευών θα πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα αυτοσυναρμολόγησης και την ικανότητα να σχηματίζουν αξιόπιστες ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ τους. Για να αυτοσυναρμολογηθεί ένα πολύπλοκο κύκλωμα, η δομή του οποίου βασίζεται σε ξεχωριστά μόρια, οι σύνδεσμοι θα πρέπει να διαθέτουν αναγνωριστική ικανότητα. Ακόμη, θα πρέπει να μπορούν να συνδέουν ποικίλα υλικά, όπως είναι οι χρυσές μεταλλικές επιφάνειες (για συνδέσεις που αφορούν τον μακρόκοσμο), βιομόρια (για τους νανοαισθητήρες, τα νανοηλεκτρόδια, τους μοριακούς διακόπτες) και κυρίως να επιτρέπουν τη δημιουργία διακλαδώσεων. 52 Ακόμη, το μήκος και η διάμετρος των συνδέσμων θα πρέπει να είναι προκαθορισμένη. Τα μοριακά καλώδια θα πρέπει να συγκρατούνται από ομοιοπολικούς δεσμούς ώστε να διασφαλιστούν οι ιδιότητες μεταφοράς και σύνδεσης. Τα μοριακά καλώδια μπορούν να ενσωματωθούν, ακόμη, μέσα σε πολυμερή ενισχύοντας τις μηχανικές και αγώγιμες ιδιότητες τους. Η ενίσχυση των ιδιοτήτων αυτών βασίζεται βασίζεται στην ομοιόμορφη διασπορά των καλωδίων στο πολυμερές. [8]



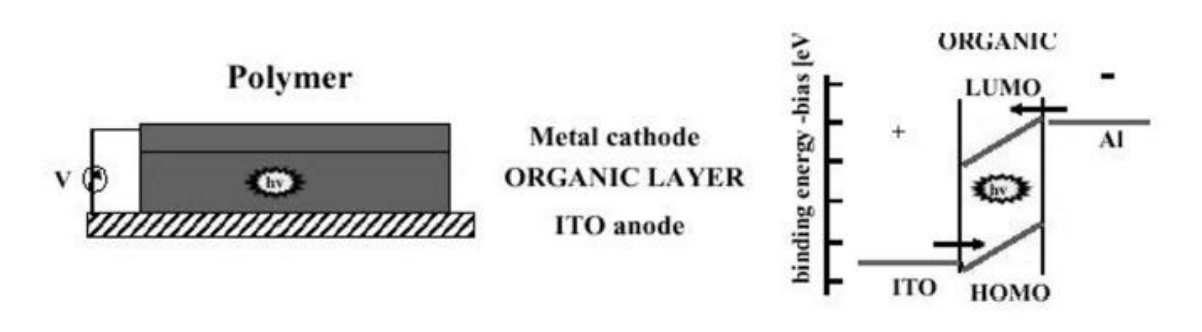
Σχηματική αναπαράσταση ενός μοριακού καλωδίου. [13]

Μοριακά ηλεκτρονικά κυκλώματα

Η κατασκευή μοριακών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι ακόμη ένας αναπτυσσόμενος τομέας της νανοηλεκτρονικής. Οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές κυκλωμάτων, που έχουν μελετηθεί μέχρι σήμερα, ασχολούνται με την επίλυση πέντε βασικών ζητημάτων που αφορούν τα μοριακά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Κατ’ αρχήν, μελετούν τη δυνατότητα κλιμάκωσης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στη νανομετρική κλίμακα, την ανοχή τους σε τυχόν κατασκευαστικά ελαττώματα, την εισαγωγή μη παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής τους, όπως είναι η χημικά κατευθυνόμενη συναρμολόγηση. Επιπλέον, προσπαθούν να γεφυρώσουν το χάσμα ανάμεσα στις πυκνότητες των συσκευών που είναι δυνατόν να επιτευχθούν στη μοριακή κλίμακα με αυτές που επιτυγχάνονται στην παραδοσιακή λιθογραφία. Τέλος, η απλότητα κατασκευής των κυκλωμάτων αυτών είναι ιδιαίτερα επιθυμητή.[6] Μία κυρίαρχη δομή κυκλώματος που προέκυψε από τις παραπάνω απαιτήσεις είναι η διασταυρούμενη ράβδος (crossbar)[14], η οποία ουσιαστικά είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα με διακλαδούμενα καλώδια τα οποία περιλαμβάνουν μεμονωμένες μοριακές συσκευές στους διάφορους κόμβους τους. Η διασταυρούμενη ράβδος είναι ένα εξαιρετικά ευέλικτο κύκλωμα το οποίο είναι ιδιαίτερα ανεκτικό στα 53 κατασκευαστικά ελαττώματα. Με τη βοήθεια των κυκλωμάτων αυτών έχουν κατασκευαστεί λογικά κυκλώματα και κυκλώματα μνήμης.[85,86] Μία συνεχώς αναπτυσσόμενη περιοχή έρευνας που αφορά την αρχιτεκτονική υπολογιστών προσανατολίζεται στη διασύνδεση πολλών τέτοιων κυκλωμάτων ώστε να δημιουργηθεί μία επαρκής υπολογιστική πλατφόρμα.[17]

### Μοριακή Οπτοηλεκτρονική

Η μοριακή οπτοηλεκτρονική αναφέρεται στο συνδυασμό των ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων μετάδοσης στα μόρια. Τα φαινόμενα που μελετώνται ιδιαίτερα στον τομέα αυτόν περιλαμβάνουν τις ηλεκτρικές και οπτικές διαδικασίες διαμόρφωσης, κατά τις οποίες τα μόρια διεγείρονται από συντονισμένη ακτινοβολία με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η αγωγιμότητά τους ή τα μόρια που βρίσκονται σε ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλουν τις οπτικές ιδιότητές τους παρέχοντας, συνεπώς, την απαραίτητη διαμόρφωση των οπτικών και ηλεκτρονικών σημάτων. Η σημαντικότερη εφαρμογή στον τομέα αυτόν είναι μοριακές δίοδοι εκπομπής φωτός (light-emitting diode, LED). Η αρχή λειτουργίας των LED είναι απλή. Τα ηλεκτρόνια εισάγονται από την κάθοδο και οι οπές από την άνοδο. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές διαχέονται μαζί και ξαναενώνονται στο μοριακό κέντρο εκπομπής, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από οργανικά υλικά. Η συνολική κατασκευή δημιουργεί ένα οπτικό σήμα, το οποίο προκαλείται από ένα ηλεκτρονικό ρεύμα. Τα μοριακά LEDs λειτουργούν σε συχνότητες που καλύπτουν το ορατό και κοντά στο υπεριώδες φάσμα ακτινοβολίας. Οι εξωτερικές κβαντικές αποδόσεις τους φτάνουν κοντά στο 4% και μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως και για το φωτισμό ενός ολόκληρου δωματίου.[6]



Σχηματική αναπαράσταση ενός μοριακού LED[6]

## Νανοηλεκτρονικά: Τεχνολογίες-μέθοδοι υπό έρευνα-εξέλιξη

Ερευνητές ασχολούνται με τα ακόλουθα projects στην νανοηλεκτρονική:

* Νανοκρύσταλλοι σεληνιούχου Κάδμιου (Cadmium selenide) που αποτίθεται επί φύλλα πλαστικού έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν εύκαμπτα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ερευνητές στοχεύουν για ένα συνδυασμό της ευελιξίας μια απλή διαδικασία κατασκευής και χαμηλές απαιτήσεις ισχύος.
* Ενσωμάτωση στοιχείων πυριτίου νανοφωτονικής σε CMOS ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτή η οπτική τεχνική αναμένεται να παρέχει υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων μεταξύ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων από ότι είναι δυνατόν με ηλεκτρικά σήματα.
* Οι ερευνητές στο UC Berkeley έχουν επινοήσει μια μέθοδο χαμηλής ισχύος χρησιμοποιώντας νανομαγνήτες ως διακόπτες-εναλλαγείς, όπως τρανζίστορ, σε ηλεκτρικά κυκλώματα. Η μέθοδός τους θα μπορούσε να οδηγήσει σε ηλεκτρικά κυκλώματα με πολύ χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τα κυκλώματα με βάση τρανζίστορ.
* Ερευνητές στο Georgia Tech, το Πανεπιστήμιο του Τόκιο και το τμήμα έρευνας της Microsoft έχουν αναπτύξει μια μέθοδο εκτύπωσης πρωτότυπων πλακετών κυκλωμάτων με τη χρήση εκτυπωτών inkjet τρέχουσας τεχνολογίας. Μελάνι από ασήμι με νανοσωματίδια χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό αγώγιμων γραμμών σε πλακέτες κυκλωμάτων.
* Ερευνητές στο Caltech έχουν παρουσιάσει ένα λέιζερ που χρησιμοποιεί νάνο-πατρόν επιφάνειας σιλικόνης που βοηθά στην παραγωγή φωτός με πολύ ακριβέστερο έλεγχο συχνότητας από ό,τι έχει επιτευχθεί στο παρελθόν. Αυτό μπορεί να επιτρέψει πολύ υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων για μετάδοση πληροφοριών μέσω οπτικών ινών.
* Η κατασκευή τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα επιτρέπει την κατασκευή τρανζίστορ με ελάχιστες διαστάσεις μερικών νανομέτρων και ανάπτυξη τεχνικών για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατασκευασμένων με τρανζίστορ από νανοσωλήνες.
* Ερευνητές στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ έχουν παρουσιάσει μια μέθοδο για την λειτουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με χρήση νανοσωλήνων άνθρακα. Για να λειτουργήσει το κύκλωμα ανέπτυξαν μεθόδους για την αφαίρεση μεταλλικών νανοσωλήνων, αφήνοντας μόνο ημιαγώγιμους νανοσωλήνες, καθώς και έναν αλγόριθμο για να αντιμετωπίσει τους μη ευθυγραμμισμένους νανοσωλήνες. Το πρωτότυπο κύκλωμα που κατασκευάστηκε στα πανεπιστημιακά εργαστήρια περιέχει 178 λειτουργικά τρανζίστορ.
* Ανάπτυξη συγκόλλησης χωρίς μόλυβδο αρκετά αξιόπιστης για διαστημικές αποστολές και άλλα κρίσιμα περιβάλλοντα χρησιμοποιώντας νανοσωματίδια χαλκού.
* Χρήση ηλεκτροδίων από νανοσύρματα που θα επιτρέψει την δημιουργία ευέλικτων επίπεδων οθονών, καθώς και λεπτότερες από τις τρέχουσες επίπεδες οθόνες.
* Χρήση ημιαγωγώγιμων νανοσυρμάτων για την κατασκευή τρανζίστορ και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
* Τρανζίστορ φτιαγμένα σε ταινία πάχους ενός ατόμου γραφενίου για την ανάπτυξη τρανζίστορ πολύ υψηλής ταχύτητας.
* Ερευνητές έχουν αναπτύξει μια ενδιαφέρουσα μέθοδο σχηματισμού ένωσης PN, ένα βασικό συστατικό των τρανζίστορ, σε γραφένιο. Βρήκαν τα μοτίβα των p και n περιοχών στο υπόστρωμα. Όταν η ταινία γραφενίου εφαρμόσθηκε στο υπόστρωμα ηλεκτρόνια είτε προστίθενται είτε αφαιρούνται από το γραφένιο, ανάλογα με το ντοπάρισμα του υποστρώματος. Οι ερευνητές πιστεύουν ότι αυτή η μέθοδος μειώνει την διάρρηξη του πλέγματος γραφενίου που μπορεί να συμβεί με άλλες μεθόδους.
* Συνδυασμός νανοσωματίδια χρυσού με οργανικά μόρια για την δημιουργία τρανζίστορ γνωστών ως NOMFET (Nanoparticle Organic Memory Field-Effect Transistor).
* • Χρήση νανοσωλήνων άνθρακα για την κατεύθυνση ηλεκτρονίων ώστε να φωτίζουν εικονοστοιχεία (pixels), με αποτέλεσμα μια ελαφριά, πάχους χιλιοστών "nanoemmissive" οθόνη.
* Χρήση κβαντικές τελείες για να αντικαταστήσει τα φθορίζοντα τελείες χρησιμοποιούνται στην τρέχουσα οθόνες. Εμφανίζει χρησιμοποιώντας κβαντικές κουκίδες θα πρέπει να είναι πιο απλό να κάνει από τις τρέχουσες ενδείξεις, όπως και χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια.
* Ολοκληρωμένα κυκλώματα με στοιχεία που μπορούν να μετρηθούν σε νανόμετρα (nm), όπως είναι η διαδικασία που επιτρέπει την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με πύλες τρανζίστορ εύρους 22 nm.

• Χρησιμοποιώντας μαγνητικά δαχτυλίδια μεγέθους nm για την δημιουργία μαγνητικά προστατευμένων μνημών τυχαίας προσπέλασης (MRAM), κάτι που η έρευνα δείχνει ότι μπορεί να επιτρέψει πυκνότητα μνήμης των 400 GB ανά τετραγωνική ίντσα (!).

* Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει χαμηλότερης ισχύος, υψηλότερης πυκνότητας μέθοδο χρησιμοποιώντας μαγνήτες νανοκλίμακας που ονομάζεται μαγνητοηλεκτρική (magnetoelectric) μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Meram).
* Ανάπτυξη μοριακού μεγέθους τρανζίστορ που μπορεί να μας επιτρέψει την συρρίκνωση του πλάτους των πυλών τρανζίστορ σε περίπου ένα nm, κάτι που μπορεί να αυξήσει σημαντικά την πυκνότητα τρανζίστορ σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.
* Χρήση αυτο-ευθυγραμμιζόμενες νανοδομές για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων νανοκλίμακας.
* Χρήση νανοσυρμάτων για την κατασκευή τρανζίστορ χωρίς κόμβους p-n.
* Χρησιμοποίηση buckyballs για την κατασκευή πυκνών, χαμηλής κατανάλωσης συσκευών μνήμης.
* • Χρησιμοποίηση μαγνητικών κβαντικές τελειών σε spintronic συσκευές ημιαγωγών. Οι spintronic συσκευές αναμένεται να είναι σημαντικά υψηλότερης πυκνότητας και μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας, επειδή μετρούν την ιδιοστροφορμή (spin) των ηλεκτρονικών για να καθορίσουν ένα 1 ή 0, και όχι την μέτρηση ομάδων ηλεκτρονικών όπως γίνεται στις τρέχουσες συσκευές ημιαγωγών.
* Χρήση νανοσυρμάτων κατασκευασμένων από κράμα σιδήρου και νικελίου για τη δημιουργία πυκνών συσκευών μνήμης. Με την εφαρμογή ρεύματος μαγνητίζονται τμήματα κατά μήκος του σύρματος. Καθώς τα μαγνητισμένα τμήματα κινούνται κατά μήκος του σύρματος, τα δεδομένα διαβάζονται από έναν στάσιμο αισθητήρα. Αυτή η μέθοδος καλείται race track memory.
* Nανοσύρματα από ασήμι ενσωματωμένα σε πολυμερές για να κάνουν αγώγιμα στρώματα που μπορούν να λυγίσουν, χωρίς να καταστραφεί ο αγωγός.
* Οι IMEC και Nantero αναπτύσσουν ένα τσιπ μνήμης που χρησιμοποιεί νανοσωλήνες άνθρακα. Αυτή η μνήμη είναι επονομασμένη NRAM (Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory) και προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σε υψηλής πυκνότητας τσιπ μνήμης Flash.
* Ερευνητές έχουν αναπτύξει μια οργανική νανοκόλλα που σχηματίζει ένα φιλμ πάχους νανομέτρων μεταξύ ενώ τσιπ υπολογιστή και μιας ψήκτρας. Αναφέρουν ότι η χρήση αυτής της νανοκόλλας αυξάνει σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του τσιπ υπολογιστή και της ψήκτρας, η οποία θα μπορούσε να βοηθήσει να κρατήσει τα τσιπ και άλλα μέρη υπολογιστών κρύα.

# Βιβλιογραφία

[1] Παπασσάβα Π, Σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις με οργανικά ημιαγώγιμα υλικά, Ηράκλειο 2010

[2] M. Kastner, Physics Today 46, 24 (1993).

[3] <http://wolfweb.unr.edu/homepage/bruch/Phys461/6.pdf>

[4] D. Goldhaber-Gordon, M. S. Montemerlo, J. C. Love, G. J. Opiteck, J. C. Ellenbogen, Overview of Nanoelectronic Devices, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 85, NO. 4, APRIL 1997.

[5] A. Rasmi, U. Hashim, Single-Electron Transistor (SET):Literature review,2005

[6] M. A. Ratner, M. A. Reed, Molecular Electronics, Encyclopedia of Physical Science and Technology,2003, pp. 123-139

[7] J. R. Heath, M. A. Ratner, Molecular Electronics, 2003 American Institute of Physics.

[8] Bombis, Ample, Lafferentz, Yu, Hecht, Joachim, Grill, Single Molecular Wires Connecting Metallic and Insulating Surface Areas, Communications DOI: 10.1002/anie.200904645, 2009 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

[9] J.M. Tarascon, G.W. Hull and F.J. Di Salvo (1984). Mater. Res. Bull. 19: 915

[10] D. Vrbanic et al. (2004). Air-stable monodispersed Mo6S3I6 nanowires. Nanotechnology 15: 635–638. doi:10.1088/0957-4484/15/5/039

[11] D. Mihailovic. Inorganic molecular wires: Physical and functional properties of transition metal chalco-halide polymers. Progress in Materials Science 54: 309–350 (2009)

[12] F. Albert Cotton, Carlos A. Murillo and Richard A. Walton (2005). Multiple Bonds Between Metal Atoms (3 ed.). Springer. pp. 669–706. ISBN 0387258299

[13] L. A. Bumn, Are Single Molecular Wires Conducting?, Science, Vol. 271, pp. 1705-1707, 22 March 1996.

[14] J. R. Heath, P. J. Kuekes, G. Snider, R. S. Williams, Science 280, 1716 (1998)

[15] C. P. Collier et al., Science 289, 1172 (2000); Y. Luo et al., ChemPhysChem 3, 519 (2002)

[16] A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi, C. Dekker, Science 294, 1317 (2001); Y. Huang, Science 294, 1313 (2001); P. Avouris et al., Physica B 323, 6 (2002); Y. Chen et al., Nanotechnology 14, 462 (2003)

[17]A. DeHon, in Proc. First Workshop on Non-Silicon Computation http://www.cs.caltech.edu/research/ic/ pdf/molecular\_nsc2002.pdf

[18] <http://www.slideshare.net/BalayathBalayath/nanotechnology-introduction-01>

[19]<http://www.understandingnano.com/nanotechnology-electronics.html>

[20] Πτυχιακή εργασία «Νανοτεχνολογία και εφαρμογές», Λούρου Σταυρούλα, επιβλέπων καθηγητής Αθανάσιος Καναπίτσας, ΤΕΙ Λαμίας 2012