

ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

ΓΙΩΡΓΟΣ ΤΣΙΓΑΡΙΔΑΣ

E-mail: gtsigaridas@teilam.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

- Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΕΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΕ ΟΛΟΕΝΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΝΑ ΜΗΝ ΙΣΧΥΟΥΝ ΠΛΕΟΝ ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
- Π.Χ. ΜΟΡΙΑΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ (MOLECULAR TRANSISTORS), ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ (CARBON NANOTUBES), ΚΛΠ.

ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

- **ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΗ ΝΑΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ**
 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ
 - ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ
 - ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ
 - ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ
 - ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ – ΘΕΩΡΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ
- **ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΕΝΟΣ Η ΜΙΚΡΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ**
 - ΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
 - ΦΡΑΓΗ COULOMB ΚΑΙ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ
- **ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ**
 - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ, ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ
 - ΝΑΝΟΚΑΛΩΔΙΑ, ΒΑΛΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΡΟΦΟΡΜΗΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Site μαθήματος:** «<http://www.eln.teilam.gr/el/courseview/53/10>»
- “Fundamentals of Nanoelectronics”, G. Hanson, μετάφραση Α.Καναπίτσας, Χ.Τσώνος, εκδόσεις Τζιόλα, 2008.
- Marc Baldo, “Introduction to Nanoelectronics”, MIT Open Course Ware Publication, May 2011 (<http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-701-introduction-to-nanoelectronics-spring-2010/>)
- “Nanoelectronics: Principles and Devices”, M. Dragoman, D. Dragoman, Artech House Publishers, 2005.
- “Nanoscale Transistors: Device Physics, Modeling and Simulations” M. Lundstrom, J. Guo, Springer, 2005.
- “Nanoelectronics and Nanosystems: From Transistors to Molecular and Quantum Devices”, K. Gosser, P. Gloesekoetter, Springer, 2005.
- “Emerging Nanoelectronics: life with and after CMOS”, A. Ionescu, K. Banerjee, Springer, 2004,
- “Nanotechnology and Nanoelectronics: Materials, Devices, Measurement Techniques”, W.R. Fahrner, Springer, 2004.
- “Nanotechnology for electronic materials and devices”, A. Korkin, E. Gusev, J.K. Labanowski, S. Luryi, Springer, 2007.

ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΓΕΘΩΝ

TABLE 1.1 TYPICAL LENGTH UNITS OF INTEREST IN NANOTECHNOLOGY.

Name	Symbol	Size
Meter	m	1
Millimeter	mm	10^{-3} m
Micrometer	μm	10^{-6} m
Nanometer	nm	10^{-9} m
Picometer	pm	10^{-12} m
Femtometer	fm	10^{-15} m
Attometer	am	10^{-18} m

TABLE 1.2 COMMON SMALL OBJECTS AND THEIR TYPICAL DIMENSIONS.

Object	Typical dimension
Atom	$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$
DNA (diameter)	1 nm
Protein	10 nm
Transistor oxide thickness	1.2 nm
Transistor gate length	35 nm
Virus	100 nm
Red blood cell	$10 \mu\text{m} = 10,000 \text{ nm}$
Human hair dia.	$150 \mu\text{m} = 150,000 \text{ nm}$
Grain of sand	$1 \text{ mm} = 1,000,000 \text{ nm}$

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

TABLE 1.3 ELECTROMAGNETIC SPECTRUM.

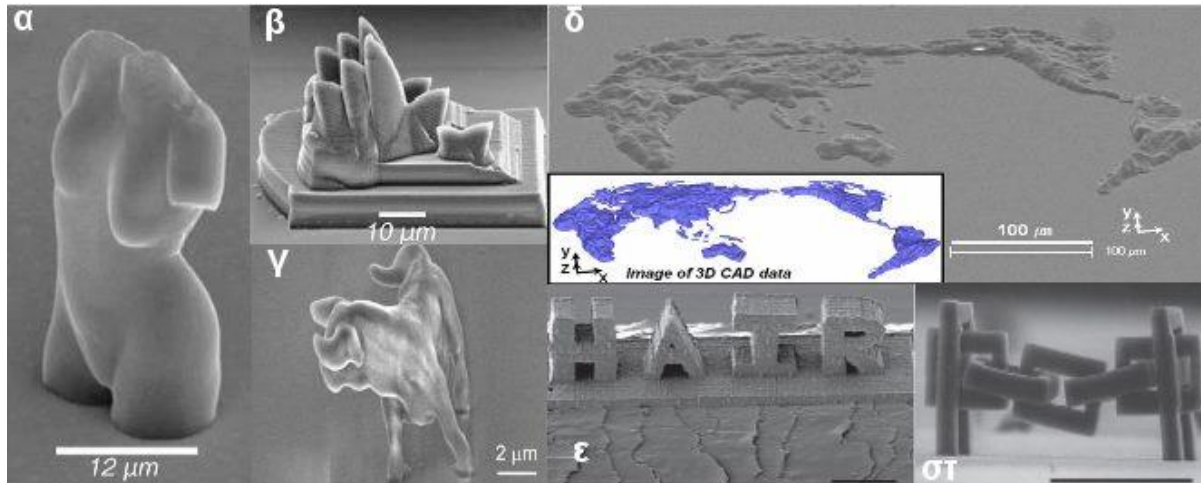
Common name ²	λ (m)	λ (nm)	f (GHz)
AM radio	10^4	10^{13}	0.00003
FM radio	1	10^9	0.3
Microwaves	10^{-2}	10^7	30
Infrared	10^{-4}	10^5	3,000
Visible—red	7×10^{-7}	700	428,571
Visible—violet	4×10^{-7}	400	750,000
Ultraviolet	10^{-8}	10	30,000,000
X-rays	10^{-10} (1 Å)	0.1	3,000,000,000
γ -rays	10^{-12}	0.001	300,000,000,000

The common name denotes a range of frequencies; in the table a typical value is provided.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad c = 3 \times 10^8 \frac{m}{\text{sec}}$$

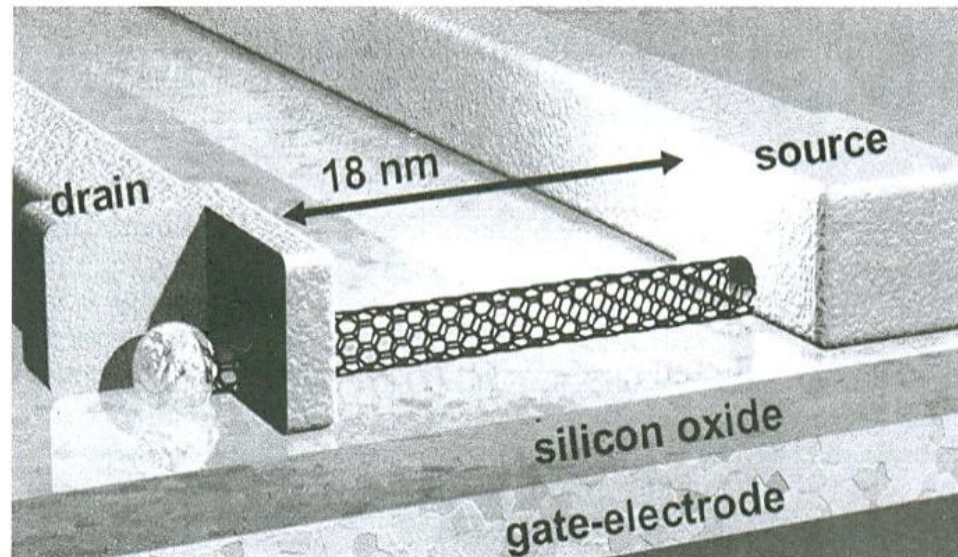
ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

- ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ
- ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΑ
- ΝΑΝΟ-ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ
- ΝΑΝΟ-ΟΠΤΙΚΗ
- ΝΑΝΟ-ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ
- ΝΑΝΟ-ΒΙΟ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟ ΕΠΑΝΩ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ (TOP-DOWN APPROACH)

- Η ΣΜΙΚΡΥΝΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΔΗΓΕΙ ΣΤΗΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΝΕΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ, Η ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ ΑΠΑΙΤΕΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ **ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**



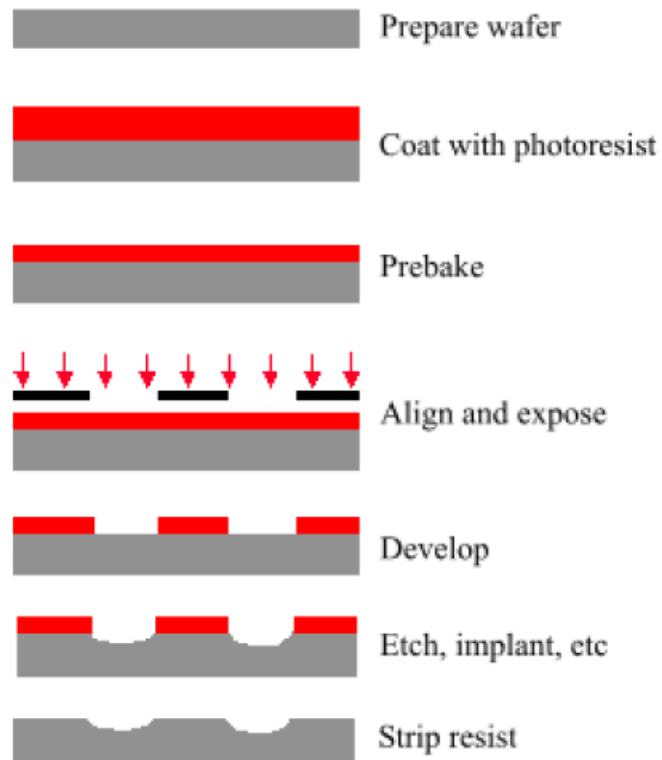
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟ ΚΑΤΩ ΠΡΟΣ ΤΑ ΕΠΑΝΩ (BOT TOM-UP APPROACH)

- Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΕΧΕΙ ΤΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΥΛΗΣ ΣΕ ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΑΝΟΙΓΟΝΤΑΣ ΝΕΟΥΣ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΚΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
- Π.Χ. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY, SEM)
- ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY, TEM)
- ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (SCANNING TUNNELING MICROSCOPY, STM)
- ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ (ATOMIC FORCE MICROSCOPY, AFM)

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ - ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

- ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΑΡΚΕΤΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ, Π.Χ. ΟΠΤΙΚΗ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

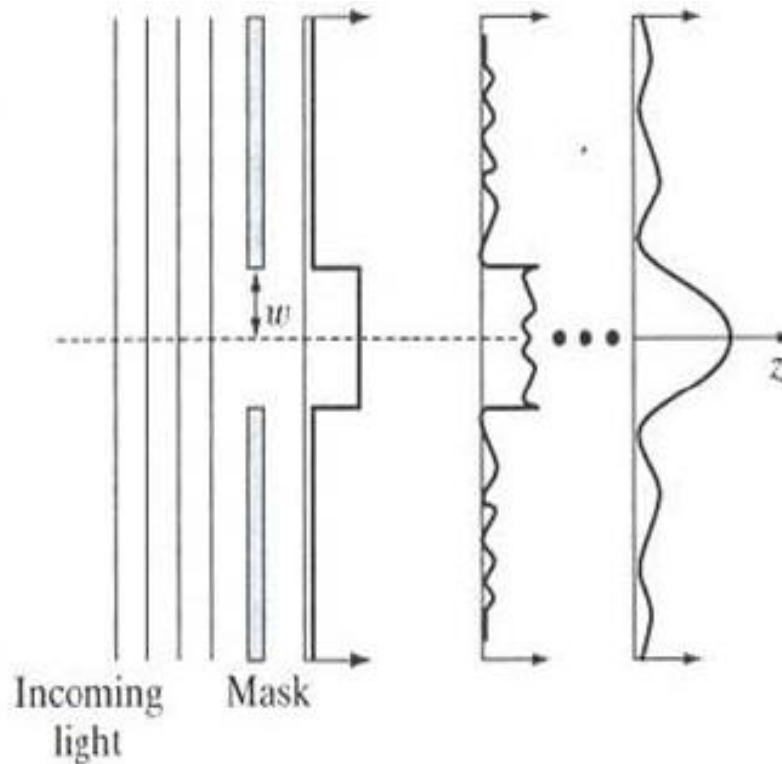
Optical lithography



- UV light breaks up polymer (**resist**) where not masked
- Dissolve exposed areas
- Etch unprotected areas of wafer, or deposit metal etc
- Resolution >50 nm
- Inflexible—mask expensive, cannot be changed
- Parallel process—fast

ΟΠΤΙΚΗ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ (2)

- ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΟΓΩ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ (***DIFFRACTION***)



ΟΠΤΙΚΗ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ (3)

- ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

$$R = \kappa \frac{\lambda}{(NA)n}$$

- κ συντελεστής (0.5 → 0.8)
- λ μήκος κύματος
- n δείκτης διάθλασης
- NA αριθμητικό άνοιγμα
($NA = \sin\theta$) (0.5 → 0.9)

- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

$$\kappa = 0.5$$

$$\lambda = 133 \text{ nm}$$

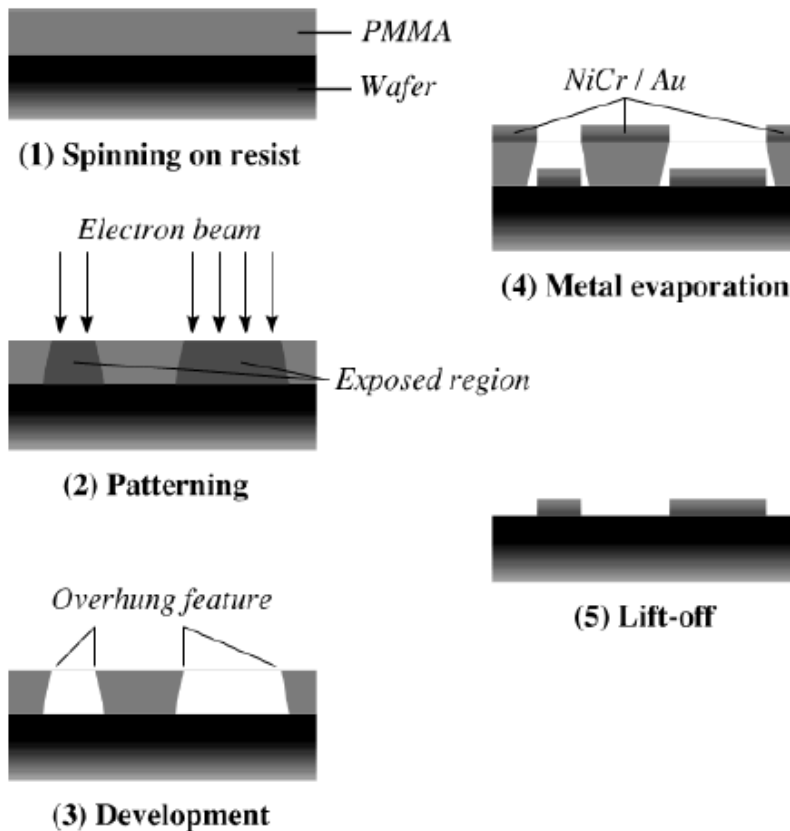
$$n = 1.33$$

$$NA = 0.9$$

$$R = 80 \text{ nm}$$

ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

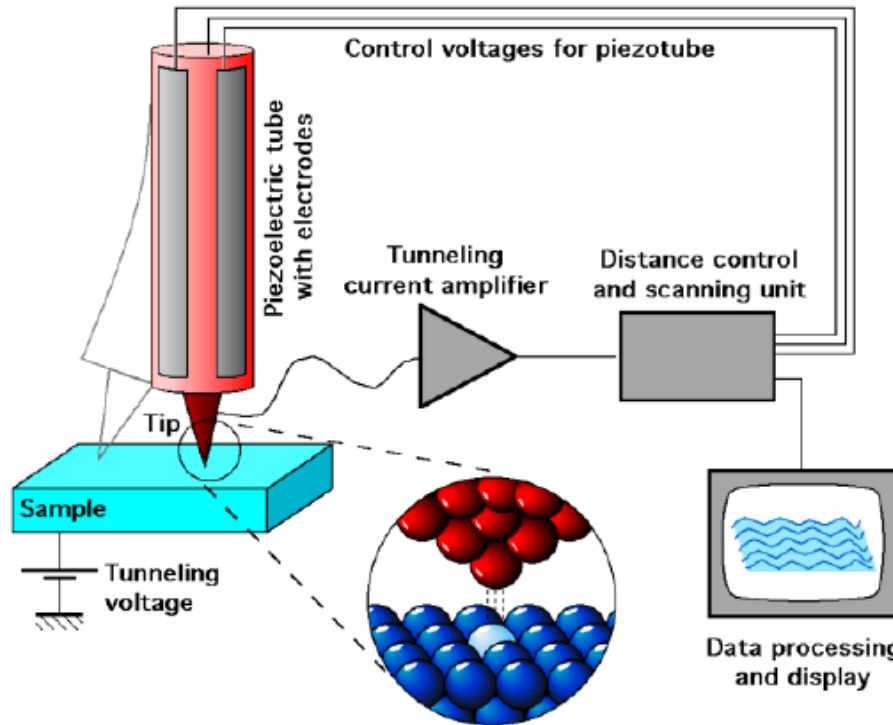
Electron-beam lithography



- Focussed beam, steered across chip
- Very high resolution (10 nm)
- Each pattern can be different, and changed at last minute
- Serial process—slow!
- Useful for research

ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ

Scanning-probe lithography

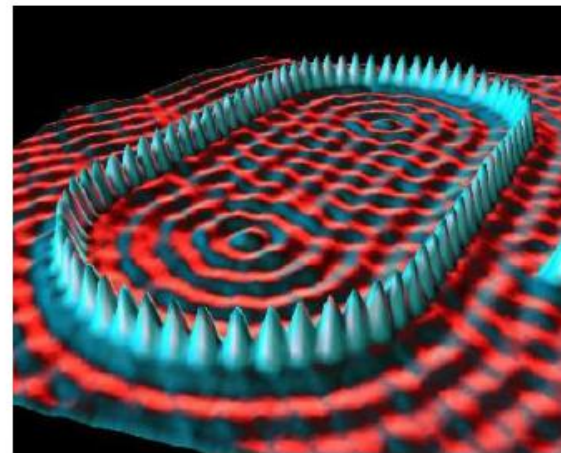
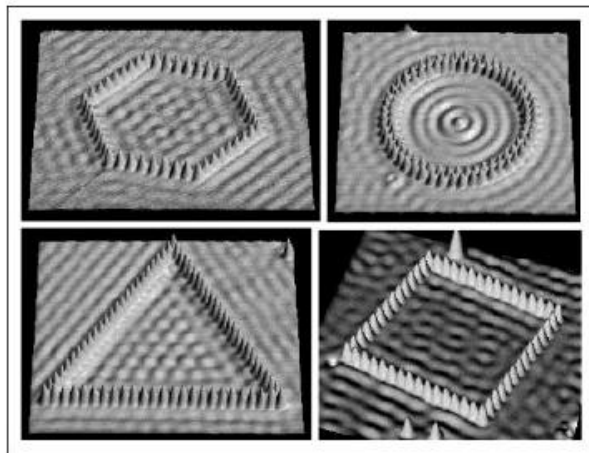
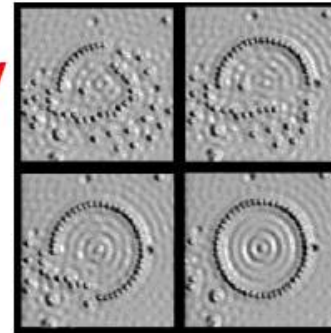


- Scanning-probe microscope (STM) and atomic-force microscope (AFM) revolutionised study of surfaces at the atomic scale
- Can move atoms (or resist) around
- Can oxidise surface
- Pretty pictures
- Demonstrations of QM effects
- Very limited uses!

ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (2)

STM lithography

- Attract atoms on surface to tip
- Move tip, release atom
- Confine electrons in “quantum corral”



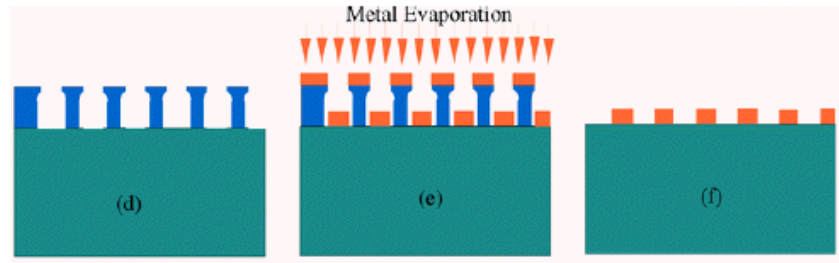
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Pattern transfer

- Methods of pattern transfer:
 - Deposit metal (“lift-off”)
 - Etch unprotected parts of substrate
 - Plating—more useful in industry
- Alignment between layers is vital

ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ

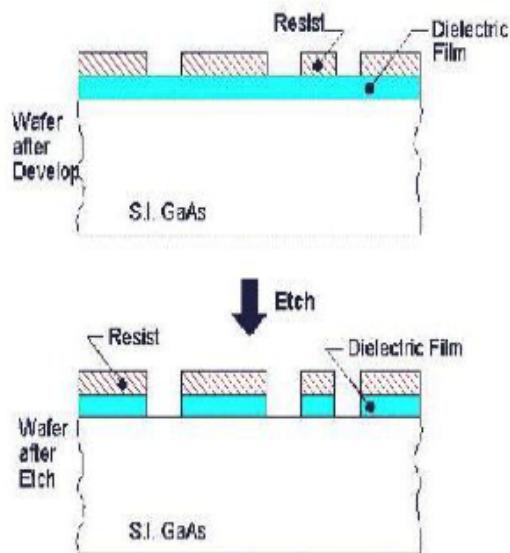
Lift-off



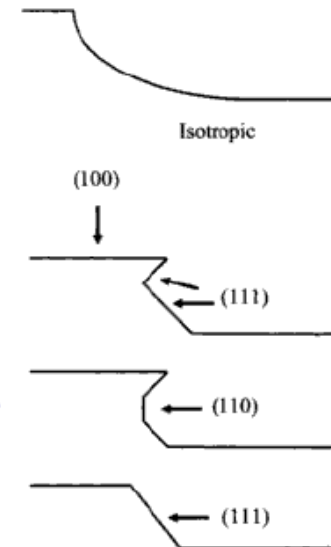
- Deposit metal on to patterned resist:
 - Evaporate metal in a vacuum chamber
 - Atoms travel in straight lines, solidify on landing
 - Monitor thickness accurately during deposition
 - Layer is amorphous
- Remove metal:
 - Dissolve resist, metal on top of it “**lifts off**”
 - Metal on surface remains

ΥΓΡΗ ΑΠΟΞΕΣΗ

Wet etching



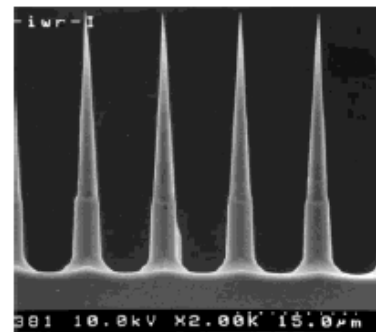
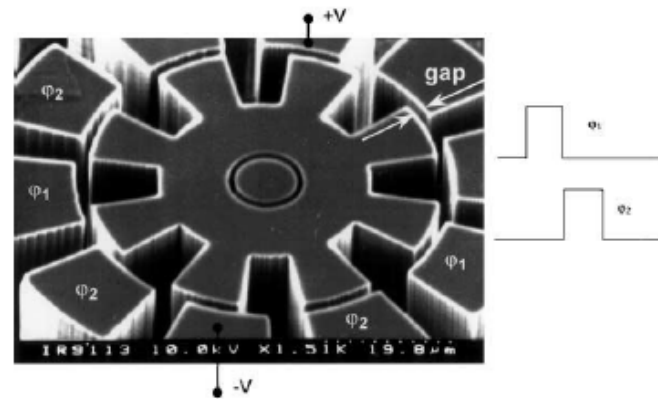
- Acid/alkali + oxidant
- Etch rate can depend on crystal facet directions
- Undercut and/or overcut profiles



ΞΗΡΗ ΑΠΟΞΕΣΗ

Reactive-ion (dry) etching (RIE)

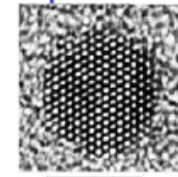
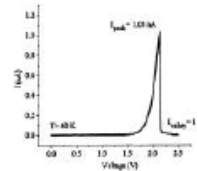
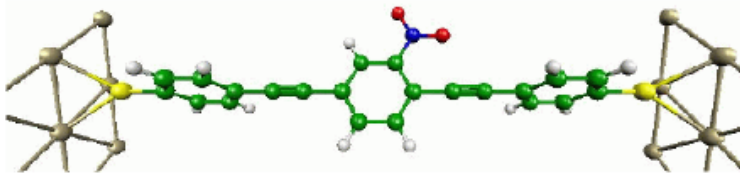
- Reactive gas accelerated towards wafer
- Etches vertical sidewalls (very deep!)
- Walls suffer damage (impurities)
- Trench capacitors
- Microelectromechanical systems (MEMS)
- Motors, field-emitters



ΑΥΤΟ-ΟΡΓΑΝΩΣΗ

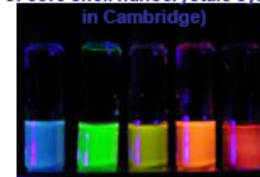
Self-assembly

- “**Top-down**” fabrication: big expensive equipment to make very small features
- “**Bottom-up**” approach: mimic nature and chemistry
 - molecules form from atoms etc, spontaneously or with catalyst, enzyme or chemist
 - made in vast quantities, all identical
- Need to find molecules with interesting electrical properties



- Nanocrystals of semiconductor or metal
 - uniform size (4–10 nm) controls band gap
 - unique spectrum, useful for labelling (DNA etc)

(UV excited photoluminescence from a size series of core shell nanocrystals synthesized in Cambridge)



Increasing diameter

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΝΑΝΟ- ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

- Why make devices small?
 - short transit time
 - more devices per chip
 - lower power consumption
 - each switching event requires less charge and hence dissipates less energy
 - quantum effects: energy levels far apart
 - quantised conductance in 1D channels
 - controllable optical transitions between states
 - Single-electron effects
 - tunnel barriers confine electrons (“quantum dot”)
 - number of electrons can only change by an integer
 - Coulomb blockade of tunnelling
 - current cannot flow unless there is enough energy to charge up dot by one electron, or, the two configurations, with and without an extra electron, become degenerate

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΠΙΛΥΘΟΥΝ

- **ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ**
- Κυρίως όσον αφορά την αύξηση της διακριτικής ικανότητας των μεθόδων ανάπτυξης των διατάξεων
- **ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ**
- Η μείωση των διαστάσεων οδηγεί στην εμφάνιση κβαντικών φαινομένων (π.χ. φαινόμενα σήραγγας), τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπισθούν κατάλληλα
- **ΘΕΡΜΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ**
- Η αύξηση στην πυκνότητα των διατάξεων οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση των θερμικών απωλειών, μειώνοντας την αξιοπιστία και τον χρόνο ζωής των συσκευών



