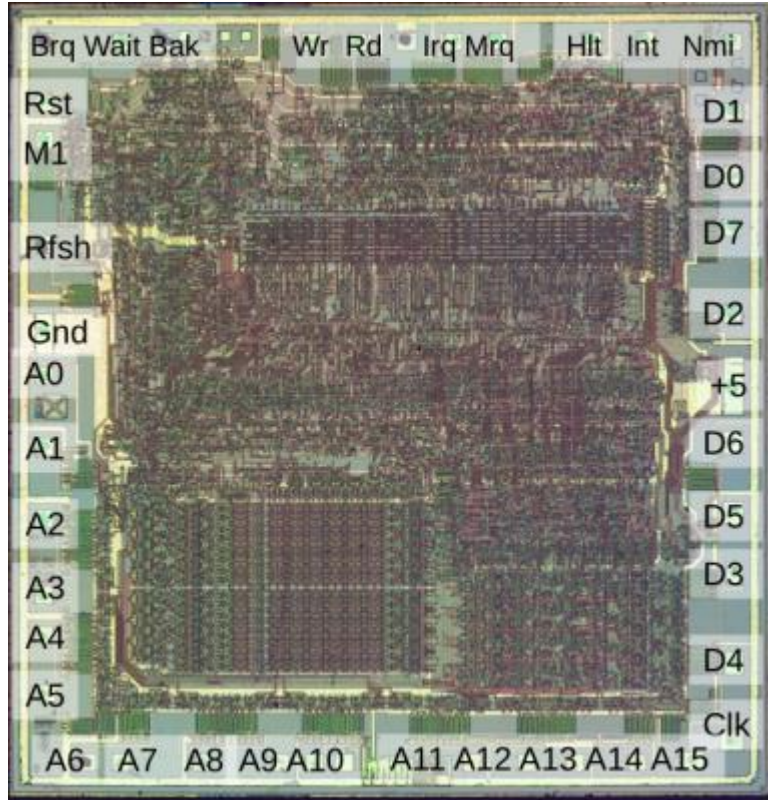


Η συμβολή των Ημιαγωγών στην Μικρο-Νανο-Ηλεκτρονική και οπτοηλεκτρονική

Σπύρος Γαρδέλης
Αναπληρωτής Καθηγητής

- **Μικροηλεκτρονική-Νανοηλεκτρονική:** Συμβολή στη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας της πληροφορίας (ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τηλεπικοινωνίες)- επιπτώσεις στην καθημερινότητά μας όπως είναι η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, κινητών τηλεφώνων και του διαδικτύου στις πιο πολλές από τις σημερινές δραστηριότητές μας.
- **Ημιαγωγοί:** Βασικό υλικό στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών, των τηλεπικοινωνιών, της οπτοηλεκτρονικής και των ηλιακών κυψελίδων.

Τι είναι Μικροηλεκτρονική;



- Η καρδιά ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή ή αλλιώς ο μικροεπεξεργαστής είναι η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) η οποία επεξεργάζεται δεδομένα, ελέγχει τη λειτουργία του υπολογιστή και εκτελεί βασικές λειτουργίες διασύνδεσης και μεταβίβασης εντολών. Αποτελείται από δισεκατομμύρια τρανζίστορ που βρίσκονται σε μια μικρή περιοχή στην μικροκλίμακα. Ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να ενσωματωθεί όχι μόνο σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, αλλά και σε κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες, κονσόλες ηλεκτρονικών παιχνιδιών και γενικά σε συσκευές που απαιτείται υπολογιστική ικανότητα.

Τι είναι Μικροηλεκτρονική;

Η Μικροηλεκτρονική περιλαμβάνει:

- Σχεδίαση και ανάλυση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Αποφυγή παθητικών στοιχείων σ' ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (π.χ. αντιστάσεων, πυκνωτών) και χρήση ενεργητικών στοιχείων όπως τρανζίστορ.
- Χρήση στερεών υλικών (ημιαγωγών, διηλεκτρικών, αγωγών) για την υλοποίηση ενός μονολιθικού κυκλώματος για έλεγχο ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων.
- Λιθογραφία (οπτική ή ηλεκτρονική ανάλογα με το μέγεθος του παραθύρου) για τη διάνοιξη περιοχών για επιλεκτική νόθευση και κατασκευή περιοχών τύπου n και τύπου p για την κατασκευή διόδων και τρανζίστορ, την επιλεκτική εγχάραξη, την επιλεκτική επιμετάλλωση κλπ.
- Χημεία (κατεργασία υλικών)

Προιστορία της Μικροηλεκτρονικής

Ηλεκτρονική λυχνία-Πρώτοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές



Η ηλεκτρονική λυχνία επιτρέπει την ελεγχόμενη ροή ηλεκτρονίων μέσα σ'ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

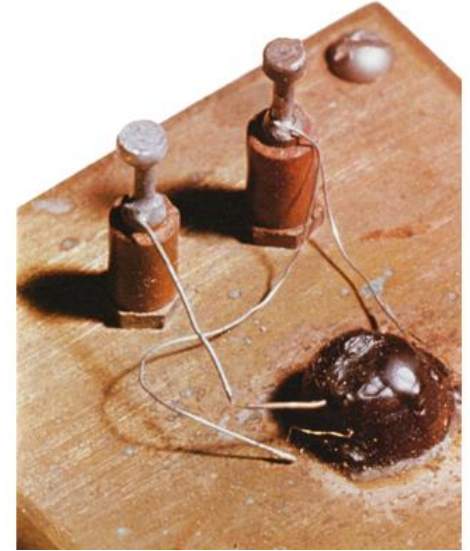
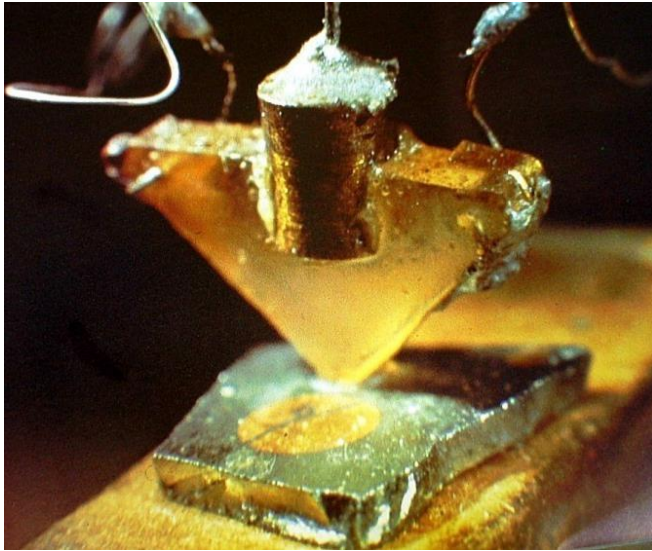
- Ανόρθωση
- Ενίσχυση
- Διακόπτης

Χρησιμοποιήθηκε σε:

- Ραδιόφωνα
- Τηλεοράσεις
- Ενισχυτές ισχύος
- Ραντάρ
- Ηλεκτρονικοί υπολογιστές



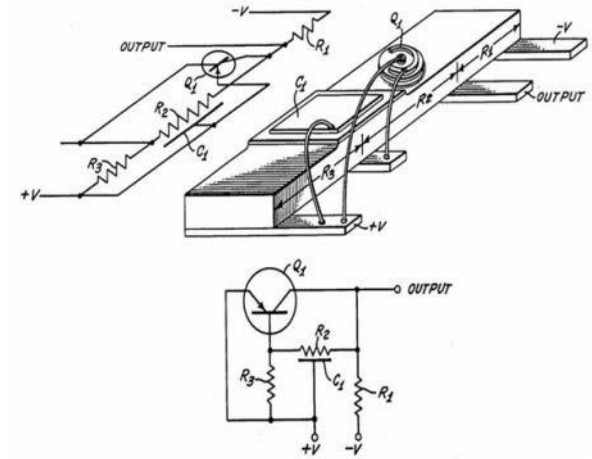
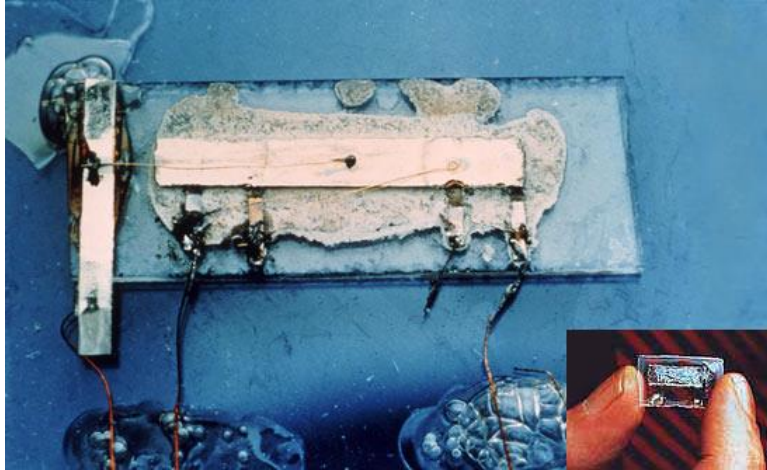
Ημιαγωγοί



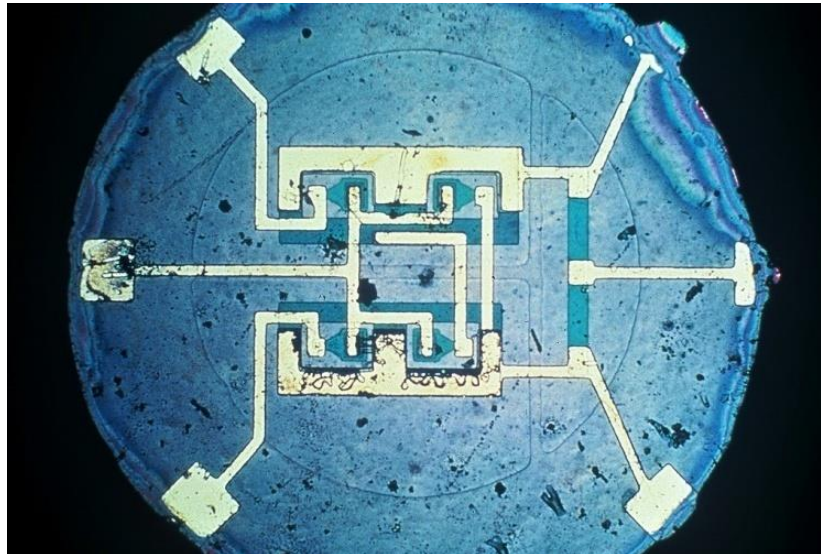
- 1947 Πρώτο τρανζίστορ στα εργαστήρια AT&TBellLabs (J.Bardeen,W.Brattain,W.Shockley) με Γερμάνιο (Ge)
- 1952 Πρώτο τρανζίστορ από μονοκρύσταλλο γερμανίου(Ge)
- 1954 Πρώτο τρανζίστορ από μονοκρύσταλλο πυριτίου(Si)

Ημιαγωγοί

- 1958 Πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα Si



- 1968 Πρώτο μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα Si



1955 Shockley Labs*

William Shockley,
eight others

Co-inventor of the transistor, Shockley recruited eight young men from East Coast labs to develop the technology. They left because of Shockley's erratic management style and became the founding cadre for the West Coast semiconductor industry.

1967 National Semiconductor

Charles Sporck, two others

After leaving Fairchild, Sporck ran National for 24 years, building it into a giant in analog and digital chips.

1981 Linear Technology

Robert Swanson,
Robert Dobkin

1983 Sierra Semiconductor

James Diller,
four others

1983 SDA Systems*

James Soloman

1957 Fairchild Semiconductor*



(From left) Gordon Moore, Sheldon Roberts, Eugene Kleiner, Robert Noyce, Victor Grinich, Julius Blank, Jean Hoerni, Jay Last

Founded by "The Traitorous Eight" from Shockley, Fairchild was the first company to work exclusively in silicon. It spawned more than 30 Silicon Valley companies, including Intel, Advanced Micro Devices, and National.

FAIRCHILD'S OFFSPRING



1961 Signetics*

(now Philips Semiconductor)
David Allison, David James,
Lionel Kattner, Mark
Weissenstern, two others

1985 Cirrus Logic

Michael Hackworth, Kamran Elahian, five others

1993 NeoMagic

Kamran Elahian,
Prakash Agarwal

1996 Planet Web

Kamran Elahian

1979 VLSI Technology

Jack Baleto,
Dan Floyd,
Gunnar Wetlesen

1983 Wafer Scale Integration

Eli Harari

1968 Computer Microtechnology*

John Schroeder,
Jack Schmidt, two others

1973 Synertek*

Robert Schreiner,
R. Barringer, six others

1974 Zilog*

Federico Faggin,
Ralph Ungermann

1984 Xilinx

Bernard Vonderschmitt

1986 Synaptics

Federico Faggin, Carver Mead

1969 Four Phase*

Lee Boysel, Jack Faith

1972 Kleiner Perkins Caufield & Byers

Eugene Kleiner

1980 LSI Logic

Wilfred Corrigan

1969 AMD

W.J. Sanders III, seven others
Flamboyant Sanders left Fairchild to found this up-and-down rival to Intel. The swing is up right now.

1983 Cypress

T. J. Rodgers, Lowell Turiff

1981 SEEQ

Gordon Campbell,
George Perlegos

1985 Chips & Technologies*

Gordon Campbell, Dado Banatao, two others

1989 S3

Ron Yara,
Dado Banatao

1985 Atmel

George Perlegos,
Tsung-Ching Wu

1994 3Dfx

Gordon Campbell,
Scott Sellers

- Η τεχνολογική επανάσταση που επιτεύχθηκε με τη σμίκρυνση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, την αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων που μπορούν να αποθηκεύσουν αλλά και την αύξηση της ταχύτητας με την οποία μπορούν να επεξεργαστούν αυτά τα δεδομένα δεν θα μπορούσε να συντελεστεί χωρίς την εξέλιξη των μικροηλεκτρονικών διατάξεων ή διαφορετικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Our World
in Data

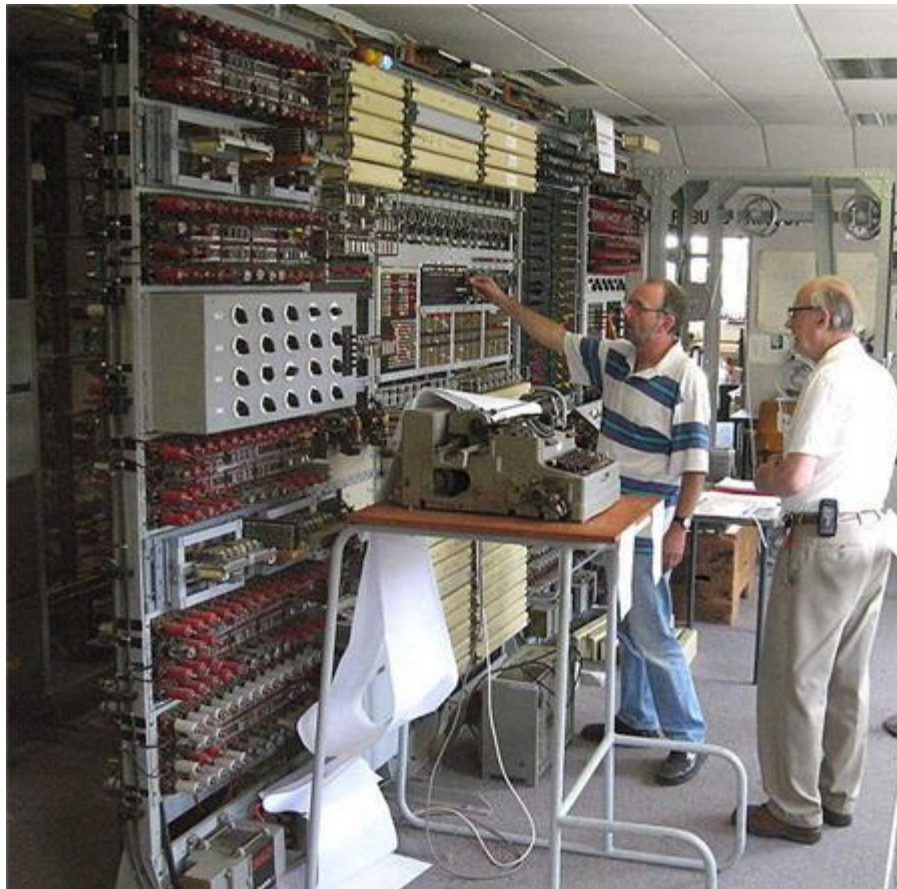
This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

50,000,000,000

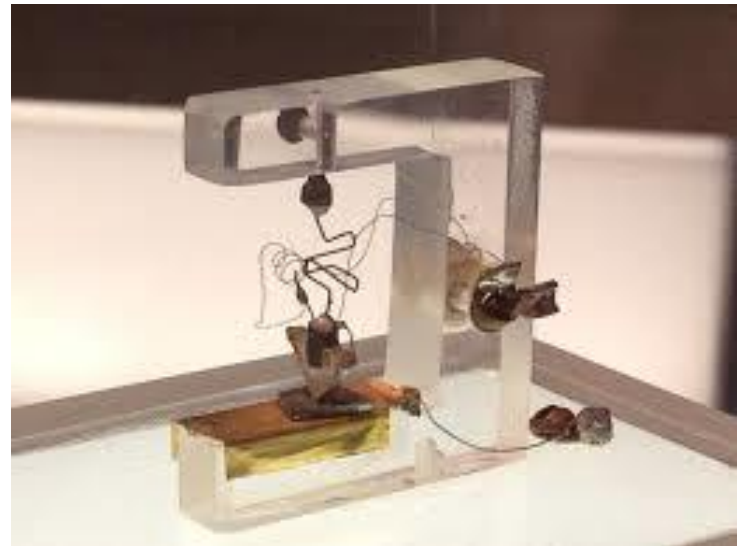


Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

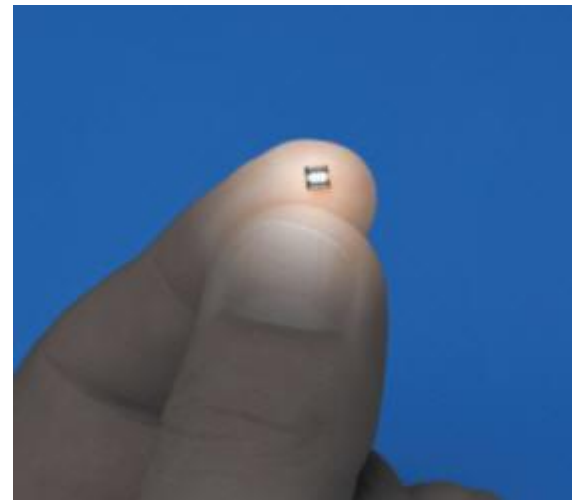
Σύγκριση μεγεθών (υπολογιστής με ηλεκτρονικές λυχνίες— πρώτο τρανζίστορ γερμανίου-σημερινή μονάδα CPU)



Αναπαραγωγή του υπολογιστή Colossus με ηλεκτρονικές λυχνίες. Χρησιμοποιήθηκε από τη Μεγάλη Βρετανία για την αποκωδικοποίηση μηνυμάτων της Γερμανίας στο Β' Παγκόσμιο πόλεμο.

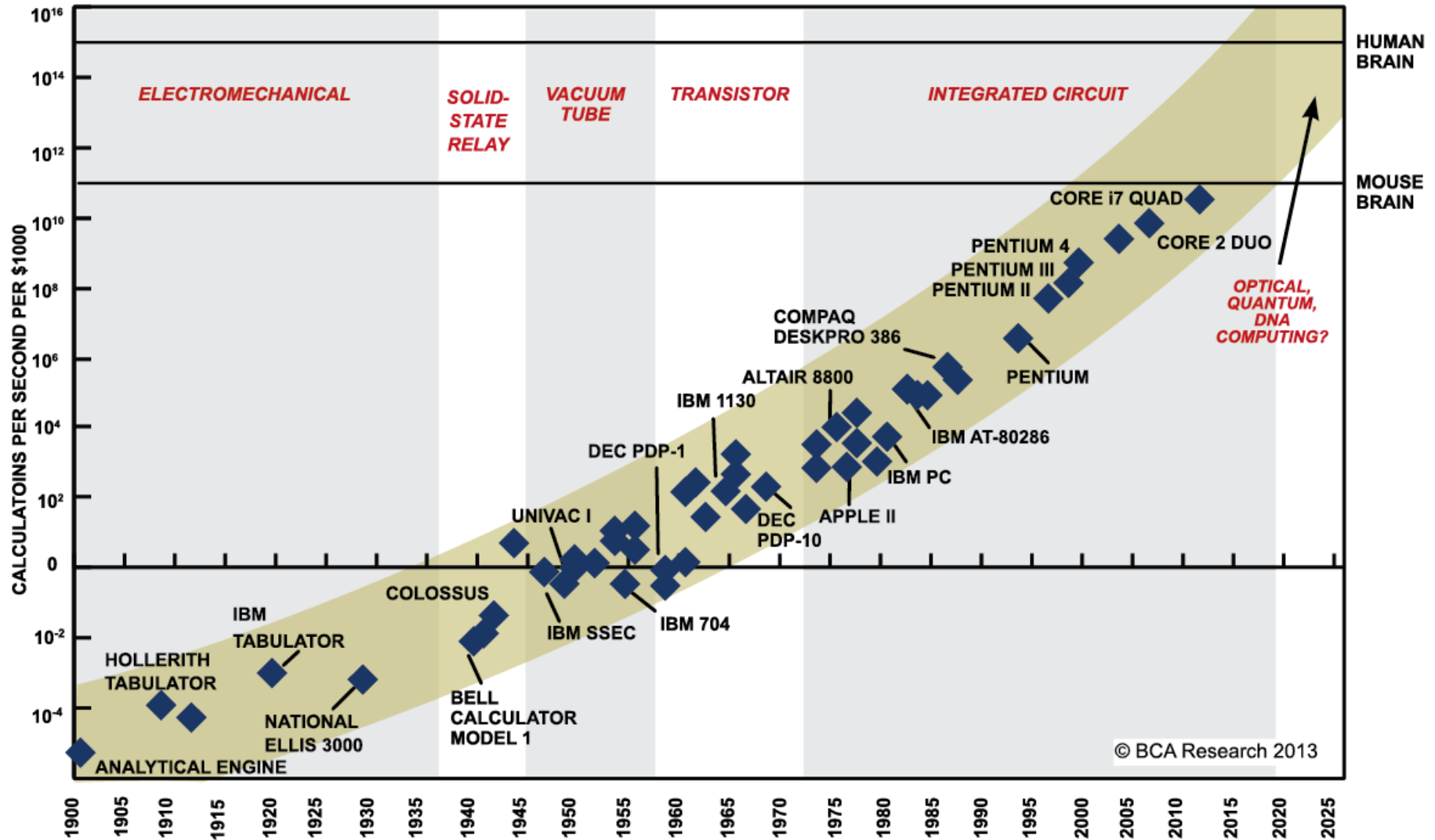


Πρώτο τρανζίστορ μονολιθικού γερμανίου (1952)



Μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος σήμερα

Υπολογισμοί/ sec



SOURCE: RAY KURZWEIL, "THE SINGULARITY IS NEAR: WHEN HUMANS TRANSCEND BIOLOGY", P.67, THE VIKING PRESS, 2006. DATAPPOINTS BETWEEN 2000 AND 2012 REPRESENT BCA ESTIMATES.

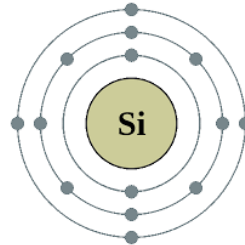
- Βασική μικροηλεκτρονική διάταξη που χρησιμοποιείται στους μικροεπεξεργαστές των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι το τρανζίστορ. Αυτό λειτουργεί σαν ένας διακόπτης με δύο καταστάσεις την on και την off που αντιστοιχούν στις καταστάσεις 1 και 0, που με κατάλληλη διάταξη πολλών τέτοιων τρανζίστορ μπορούν να κατασκευαστούν λογικές πύλες που κάνουν λογικές πράξεις.
- Για να καταλάβουμε τη λειτουργία του τρανζίστορ ως διακόπτη με δύο καταστάσεις θα πρέπει να μιλήσουμε για τις ιδιότητες του υλικού από το οποίο κατασκευάζονται, δηλ. τους ημιαγωγούς.

Άλλες εφαρμογές των ημιαγωγών

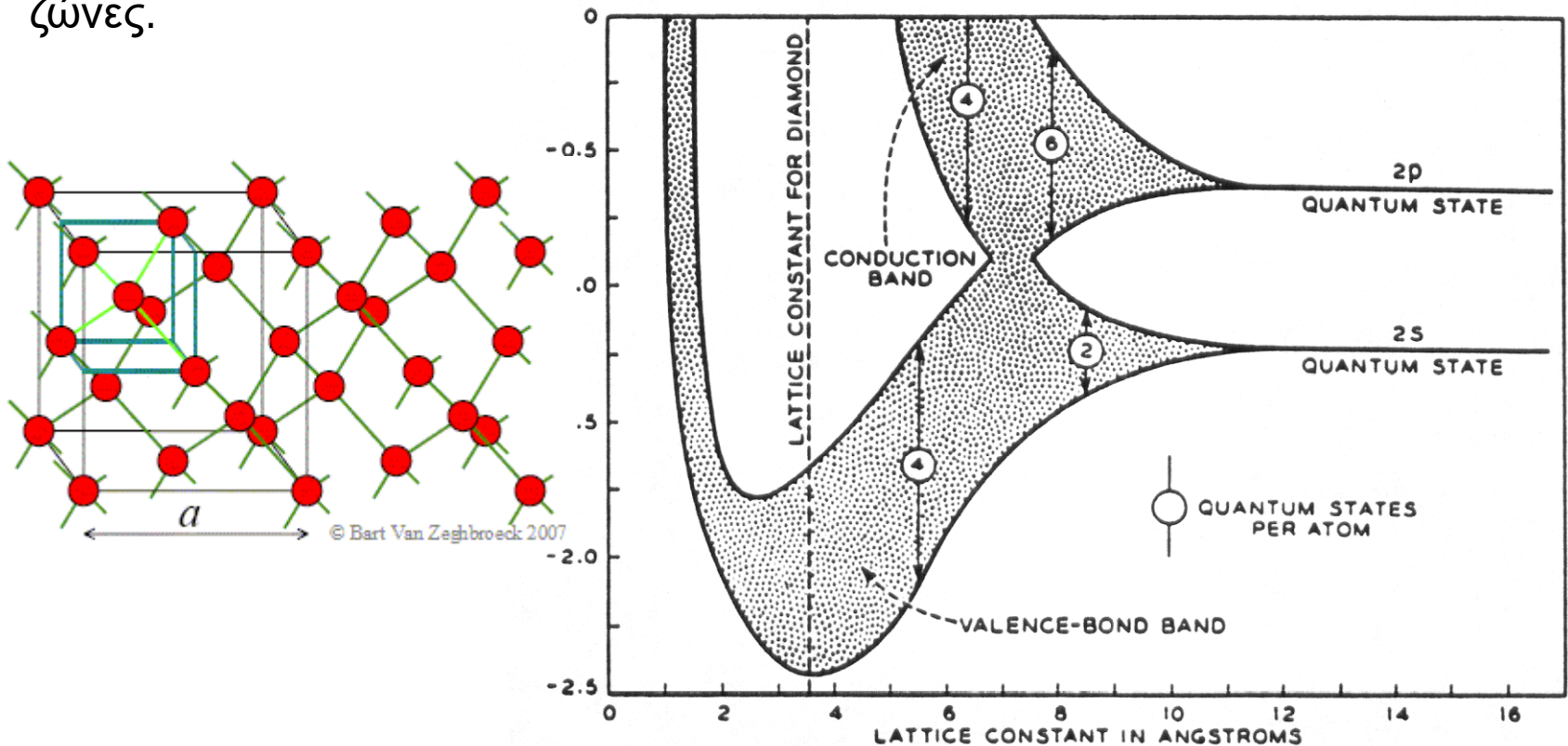
- Νέες διατάξεις (κβαντικά πηγάδια, διδιάστατο ηλεκτρονικό αέριο, κβαντικές τελείες και νανοσύρματα)
- Οπτοηλεκτρονική (δίοδοι φωτοεκπομπής LED, φωτροδίοδοι για ανίχνευση από το κοντινό υπέρυθρο ως το κοντινό υπεριώδες)
- Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (MEMS)
- Ηλιακές κυψελίδες για παραγωγή ενέργειας
- Εύκαμπτα υλικά με βάση τους οργανικούς ημιαγωγούς (LEDs, φωτοβολταικά)

ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ–ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ

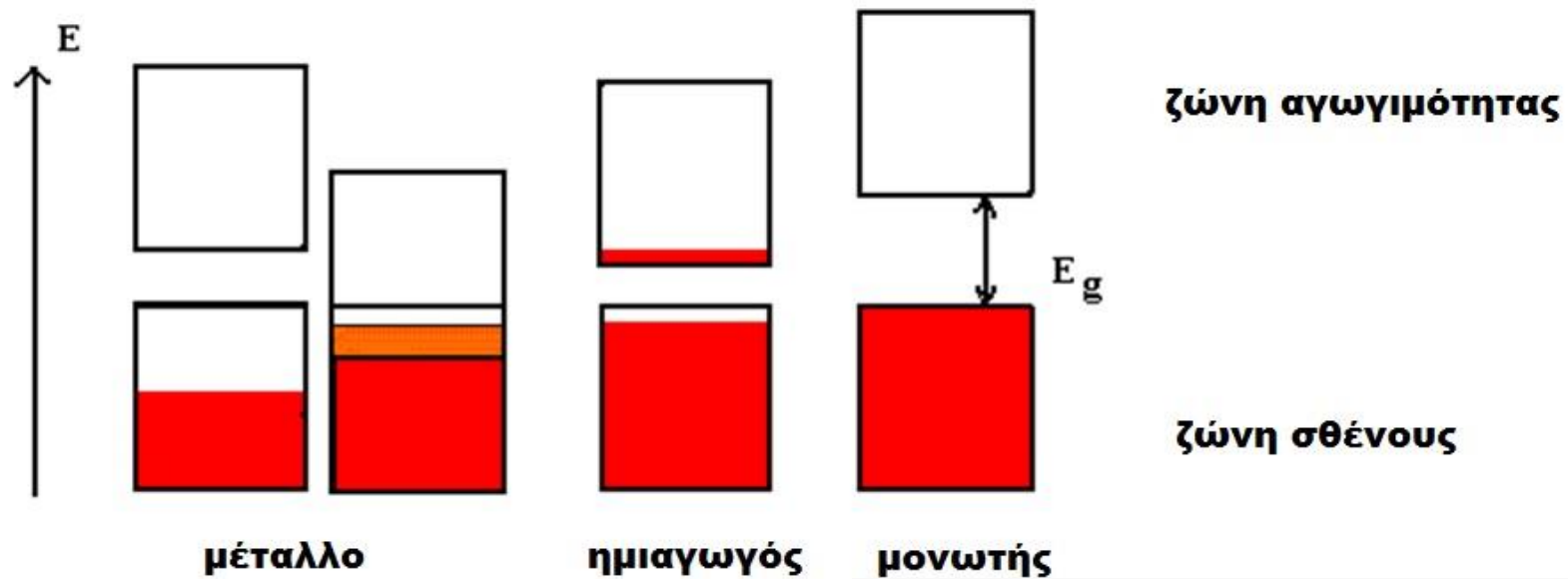
- Ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω του σε τροχιές. Τα ηλεκτρόνια στις εξωτερικές στοιβάδες είναι λιγότερο συνδεδεμένα με τον πυρήνα και ονομάζονται ηλεκτρόνια σθένους.



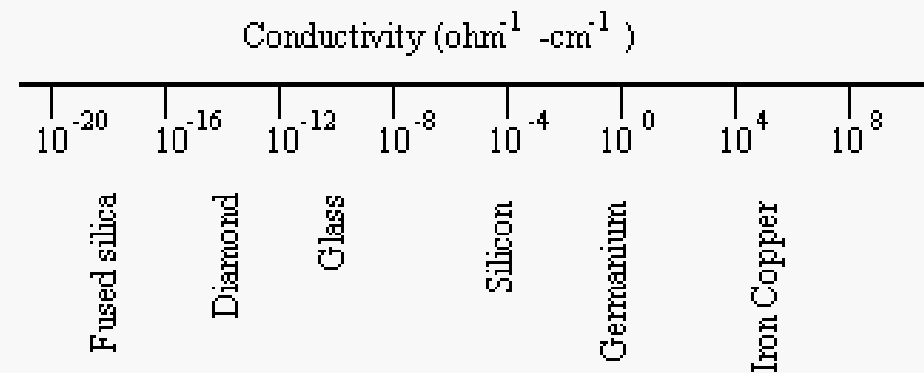
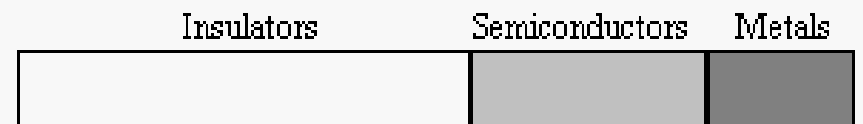
- Όταν τα άτομα έρθουν πολύ κοντά ($< 1 \text{ nm}$) και φτιάχνουν κρυσταλλικές δομές οι κβαντισμένες ενεργειακές καταστάσεις των ατόμων μετατρέπονται σε ενεργειακές ζώνες.



- Τα ηλεκτρόνια σθένους φτιάχνουν τη ζώνη σθένους. Πάνω από τη ζώνη σθένους υπάρχει η ζώνη αγωγιμότητας. Μεταξύ των δύο ζωνών απαγορεύεται ενεργειακά να βρεθεί το ηλεκτρόνιο.



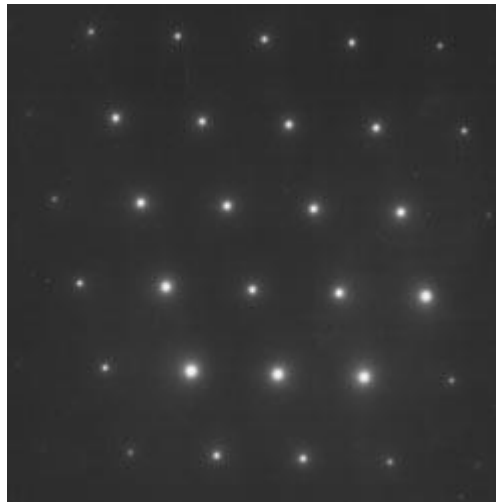
- Συνέπεια αυτού είναι η αγωγιμότητα στα υλικά.



- Η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος είναι συνέπεια της σκέδασης Bragg. Η σκέδαση Bragg είναι μετρήσιμο φαινόμενο στην κρυσταλλογραφία και εμφανίζεται με τη μορφή κουκίδων με συγκεκριμένη κατανομή. Η κάθε κουκίδα αντιστοιχεί σ' ένα σύνολο παράλληλων ατομικών επιπέδων του κρυστάλλου με συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους d τα οποία ανακλούν τις ακτίνες x , ή τη δέσμη ηλεκτρονίων προς ορισμένη κατεύθυνση και συμβάλλουν ενισχυτικά. Για να ισχύει αυτό πρέπει:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

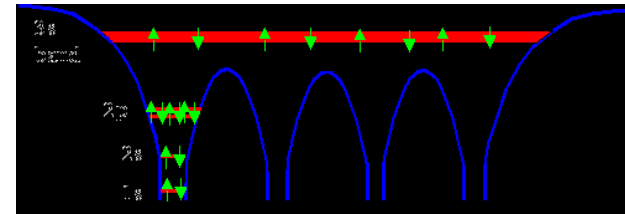
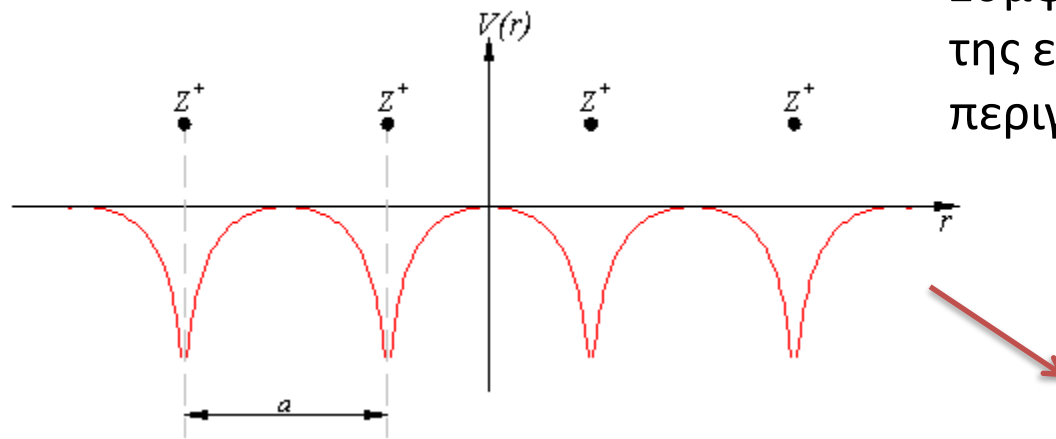
- Οι κουκίδες αυτές φτιάχνουν το αντίστροφο πλέγμα ενός κρυστάλλου.
- Βάσει του αντίστροφου πλέγματος συνθέτουμε τις ενεργειακές ζώνες.



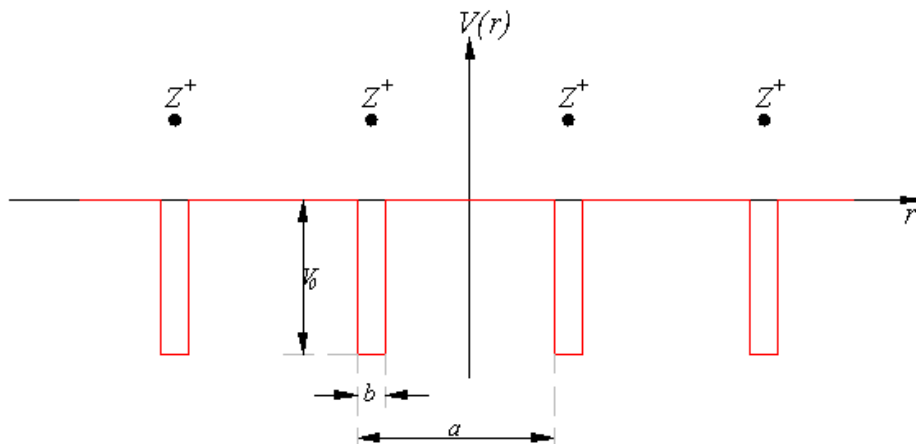
Περιοδικό δυναμικό

Σύμφωνα με το θεώρημα Bloch και τη λύση της εξίσωσης Schrodinger το σύστημα περιγράφεται από περιοδικό δυναμικό:

$$\Psi(x) = e^{ikx}u(x)$$

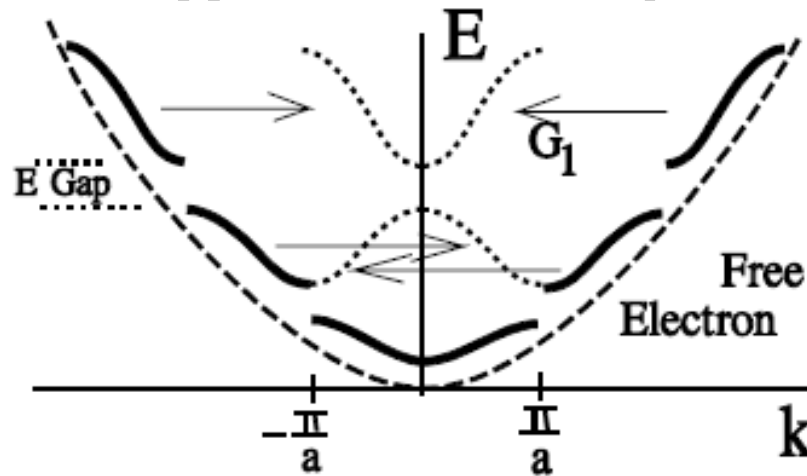


Μοντέλο Kronig-Penny



Το μοντέλο Kronig-Penney αποτελεί μια απλοποίηση του παραπάνω προβλήματος και επιτρέπει τον προσδιορισμό των ζωνών στις οποίες επιτρέπεται η κατάληψη θέσης από ένα ηλεκτρόνιο με ενέργεια E και ορμή P .

Μοντέλο του σχεδόν ελεύθερου ηλεκτρονίου



- Στο μοντέλο αυτό τα N άτομα ενός κρυστάλλου με περιοδική δομή βρίσκονται πάνω σε μονοδιάστατη αλυσίδα σε απόσταση a . Το μήκος $L=N\alpha$. Το αντίστροφο πλέγμα στο χώρο των κυματανυσμάτων k αποτελείται από κυματανύσματα της μορφής $k = \frac{2\pi n}{L}$. Η πρώτη ζώνη Brillouin είναι η περιοχή:

$$-\frac{\pi}{a} \leq k \leq \frac{\pi}{a}$$

- Στα όρια της ζώνης Brillouin ένα ηλεκτρόνιο σκεδάζεται. Έτσι έχουμε για το ηλεκτρόνιο ένα κύμα που διαδίδεται στην ορθή φορά $e^{i\pi x/a}$ και το ανακλώμενο $e^{-i\pi x/a}$. Τα δύο κύματα συμβάλλουν για να φτιάξουν δύο στάσιμα κύματα της μορφής:

$$\psi(+)=e^{i\pi x/a}+e^{-i\pi x/a}=2\cos(\pi x/a)$$

$$\psi(-)=e^{i\pi x/a}-e^{-i\pi x/a}=2i\sin(\pi x/a)$$

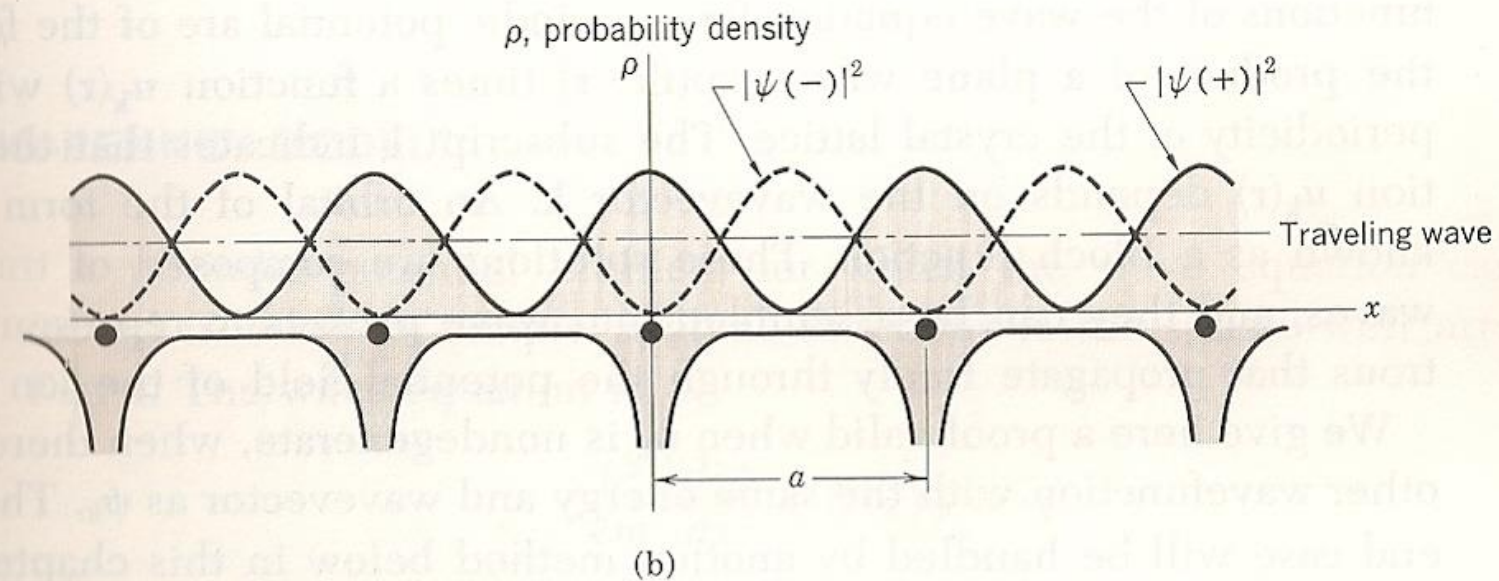
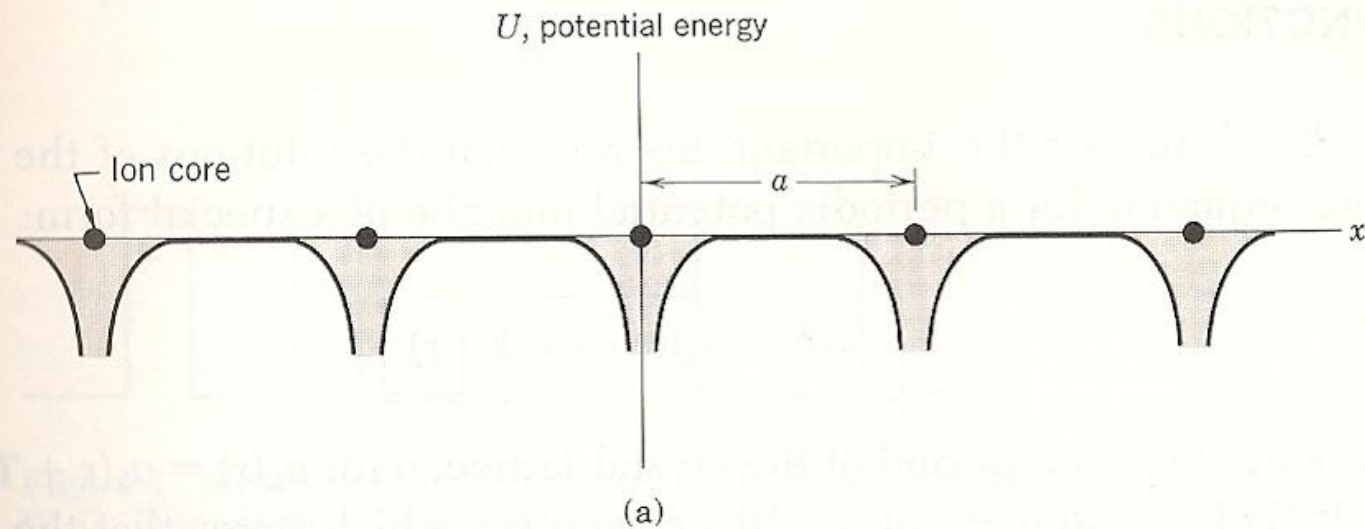
- Τα δύο στάσιμα κύματα αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της δυναμικής ενέργειας.

- $\rho = |\psi(x)|^2$: πιθανότητα να βρεθεί ένα σωματίδιο (στην προκείμενη περίπτωση ηλεκτρόνιο) στο χώρο.
- Επομένως για το στάσιμο κύμα $\psi(+)$:

$$\rho = |\psi(+)|^2 \propto (\cos(\pi x/a))^2$$

- Όπου δηλώνει ότι τα ηλεκτρόνια ή αλλιώς η πυκνότητα αρνητικού φορτίου συσσωρεύεται στα θετικά ιόντα του κρυστάλλου στις θέσεις $x=0, a, 2a, \dots$. Η δυναμική ενέργεια $-\frac{e^2}{r}$ είναι ένας μεγάλος αρνητικός αριθμός (r μικρό).
- Για το στάσιμο κύμα $\psi(-)$:

$$\rho = |\psi(-)|^2 \propto (\sin(\pi x/a))^2$$
- Όπου τα ηλεκτρόνια συσσωρεύονται μεταξύ των θετικών ιόντων. Η δυναμική ενέργεια $-\frac{e^2}{r}$ είναι ένας μικρότερος αρνητικός αριθμός (r μεγάλο).
- Η διαφορά αυτή στη δυναμική ενέργεια είναι το ενεργειακό χάσμα E_g .



ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Στη στήλη **IV** Ge και το Si αποτελούν τους πιο γνωστούς ημιαγωγούς.

Από την στήλη **III** το Ga και από την στήλη το As συνιστούν τον σύνθετο ημιαγωγό **III-V, GaAs**.
Από την στήλη **II** το Cd και από την **VI** το Te συνιστούν τον σύνθετο ημιαγωγό II-VI, **CdTe**.

Ο συνδυασμός στοιχείων της στήλης **III**, όπως τα Al και Ga με στοιχεία της στήλης **V**, όπως το As, οδηγούν στο ημιαγωγικό κράμα **Al_xGa_{1-x}As**.

Αυτή η γενική ιδιότητα σχετίζεται με τους χημικούς δεσμούς στους ημιαγωγούς όπου, κατά μέσον όρο, υπάρχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους ανά άτομο.

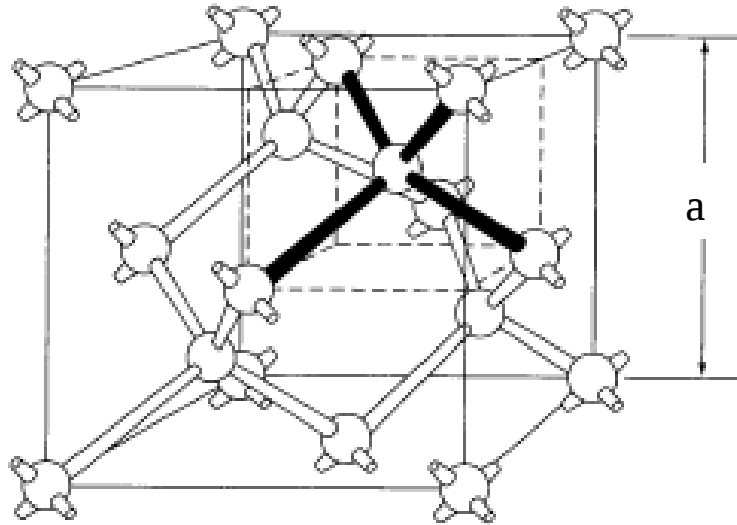
Συνοπτικός περιοδικός πίνακας

II	III	IV	V	VI
⁴ Be	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O
¹² Mg	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S
³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se
⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te
⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po

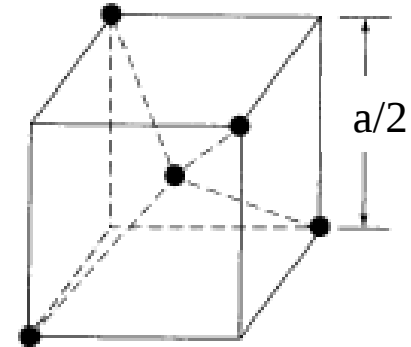
(1) Στοιχειώδεις ...	Si/Ge	Silicon/ Germanium
(2) Σύνθετοι		
IV-IV.....	SiC	Silicon carbide
III-V	AlP AlAs AlSb GaP GaAs GaSb InP InAs InSb	Aluminium phosphide Aluminium arsenide Aluminium antimonide Galium phosphide Galium arsenide Galium antimonide Indium phosphide Indium arsenide Indium antimonide
II-VI	ZnO ZnS ZnSe ZnTe CdS CdSe SdTe HgS	Zinc oxide Zinc sulfide Zinc selenide Zinc telluride Cadmium sulfide Cadmium selenide Cadmium telluride Mercury sulfide
IV-VI	PbS PbSe PbTe	Lead sulfide Lead selenide Lead telluride
(3) Κράματα		
(α) Διμερή	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	
(β) Τριμερή	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	(ή $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$) (ή $\text{In}_{1-x}\text{As}_x$) (ή $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$) (ή $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$)
(γ) Τετραμερή	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$	

◀ ◀ Ημιαγωγοί

Δομές διαμαντιού και σφαλερίτη



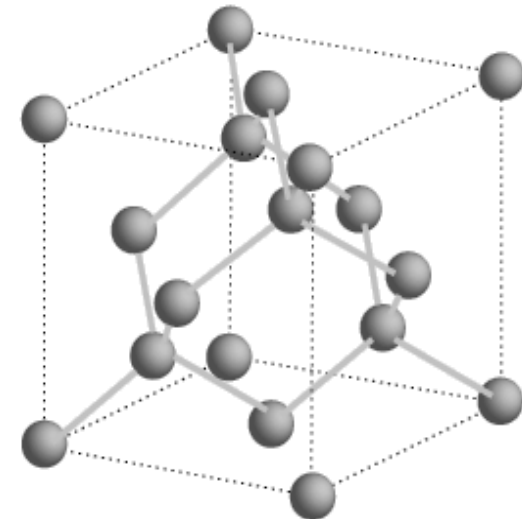
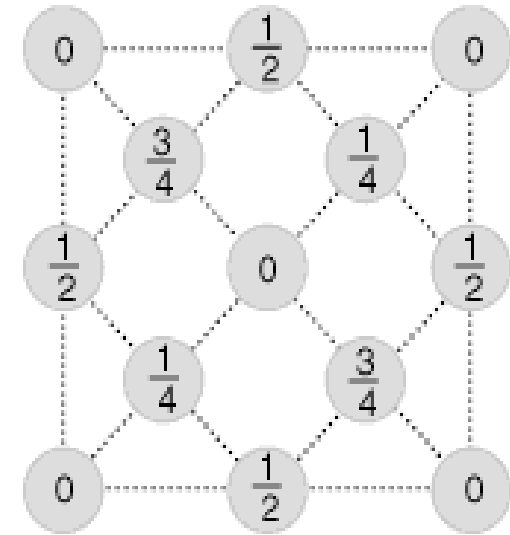
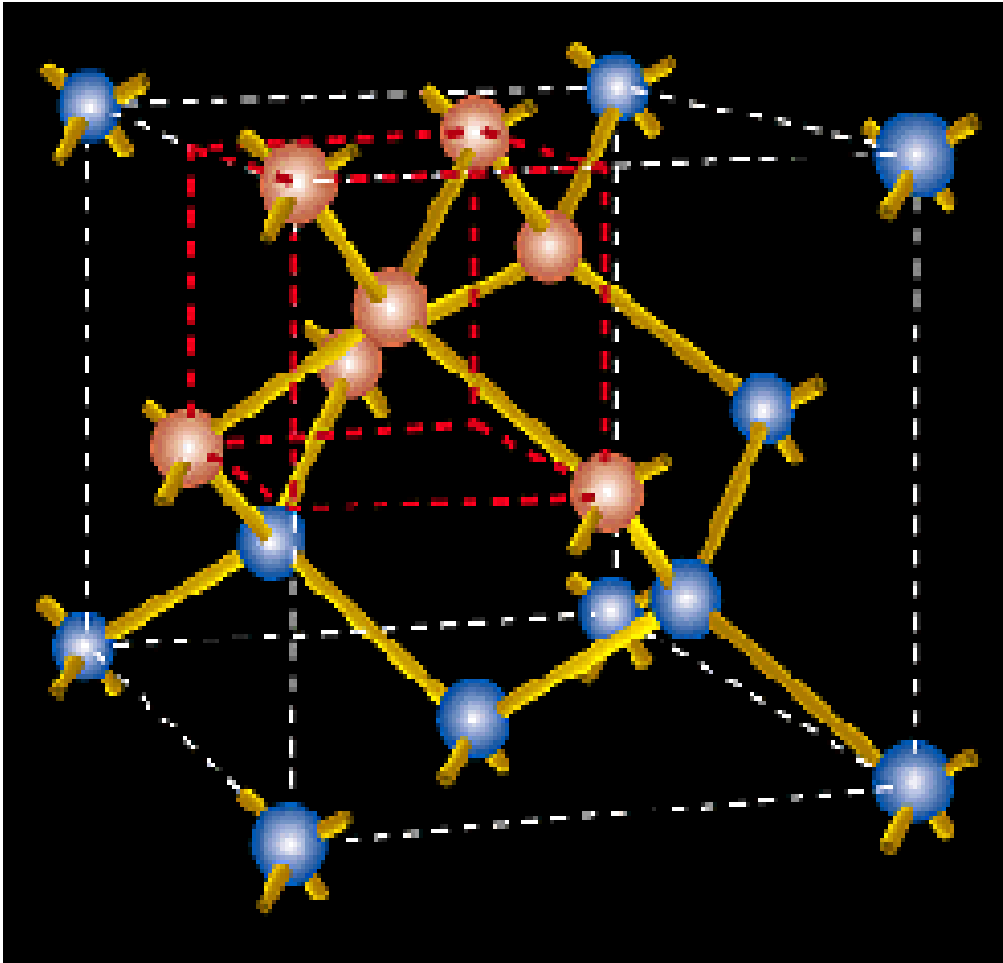
(α) Η δομή διαμαντιού.



(β) Η τετραεδρική δομή των πλησιεστέρων γειτόνων στο πλέγμα διαμαντιού.

Ουσιαστικά όλοι οι ημιαγωγοί που μας ενδιαφέρουν στην ηλεκτρονική και οπτοηλεκτρονική έχουν δομή fcc. Όμως, έχουν δύο άτομα ανά βάση. Οι συντεταγμένες των δύο ατόμων της βάσης είναι (000) και $(a/4)(111)$. Επειδή κάθε άτομο βρίσκεται στο δικό του πλέγμα fcc, μια τέτοια δομή δύο ατόμων βάσης μπορεί να θεωρηθεί ως δύο πλέγματα fcc, τα οποία διαπερνούν το ένα το άλλο, το ένα μετατοπισμένο από το άλλο με μία μετάθεση κατά μήκος της διαγωνίου κατά $(a/4)(111)$.

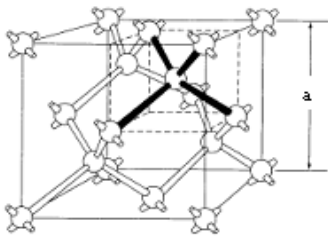
Η κρυσταλλική δομή του διαμαντιού



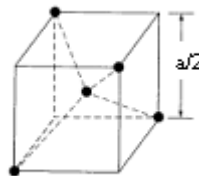
Εάν τα δύο άτομα της βάσης είναι ίδια (Σχ. (α)), η δομή καλείται **δομή διαμαντιού**. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ημιαγωγοί όπως Si, και το Ge της ομάδας IV. Μπορούμε να καταλάβουμε την δομή του διαμαντιού παρατηρώντας την τετραεδρική δομή η οποία παρουσιάζεται στο Σχ. (β).

Αυτή η δομή είναι βασικά ένα χωροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα στο οποίο λείπουν τέσσερα από τα γωνιακά του άτομα. Κάθε άτομο σε αυτή την τετραεδρική δομή έχει τέσσερεις πλησιέστερους γείτονες και αποτελεί την βασική δομική μονάδα του πλέγματος του διαμαντιού.

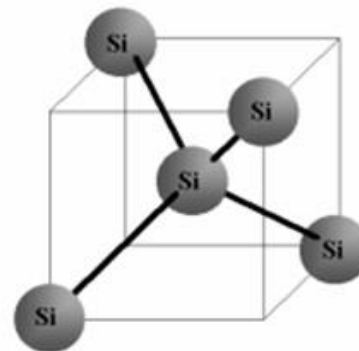
Κρυσταλλικό πυρίτιο



(α) Η δομή διαμαντιού.

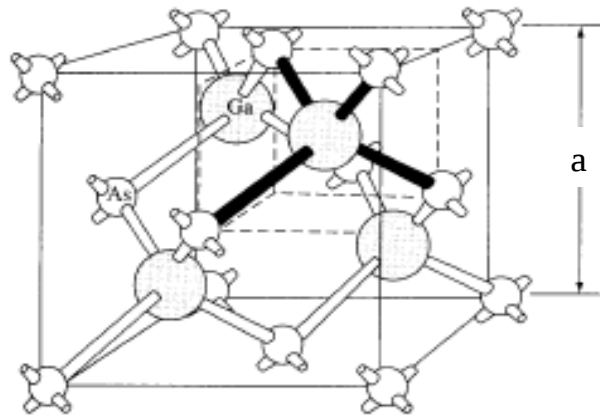


(β) Η τετραεδρική δομή των πλησιεστέρων γειτόνων στο πλέγμα διαμαντιού.

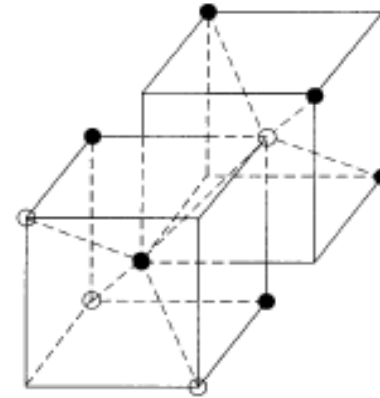


Εάν τα δύο άτομα είναι διαφορετικά η δομή ονομάζεται **δομή σφαλερίτη**.

Ημιαγωγοί όπως GaAs, AlAs, Cds, ανήκουν στην κατηγορία αυτή.



Η δομή σφαλερίτη του GaAs.



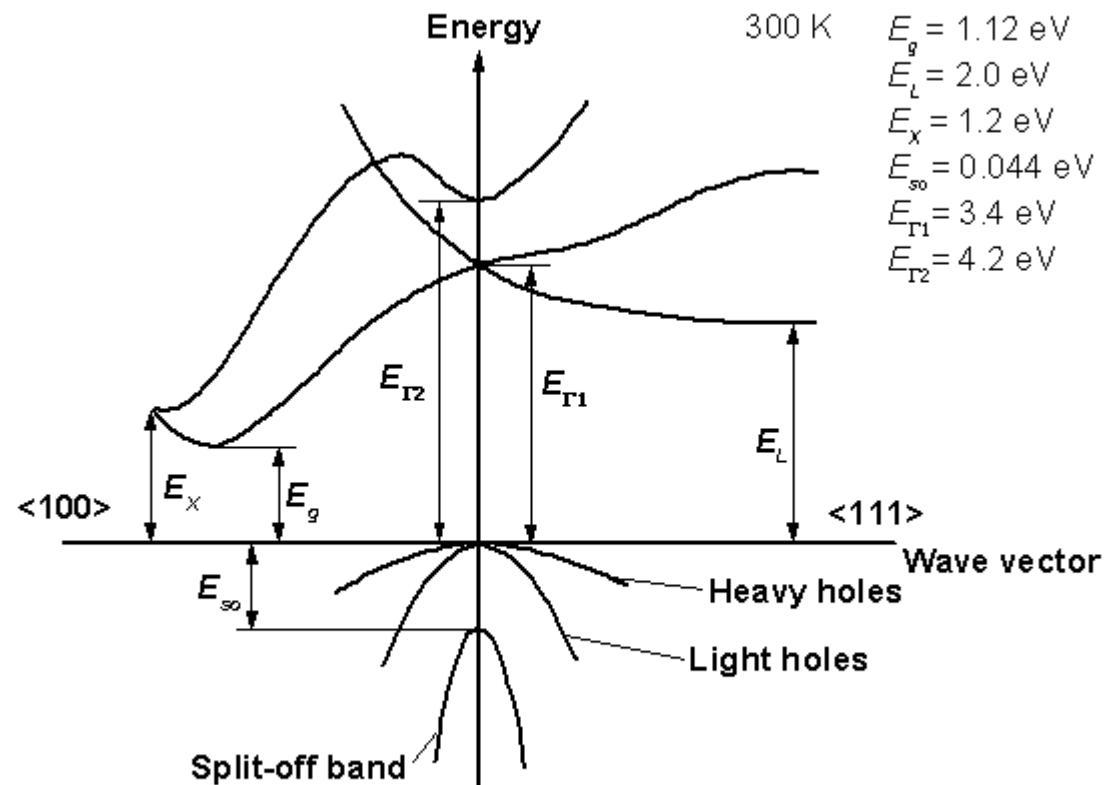
Η τετραεδρική δομή των πλησιεστέρων γειτόνων στο πλέγμα σφαλερίτη.

Η **δομή σφαλερίτη**, διαφέρει από εκείνη του αδάμαντα μόνο κατά το ότι στο πλέγμα υπάρχουν δύο είδη ατόμων. Το σημαντικό κοινό χαρακτηριστικό και των δύο δομών είναι το ότι τα άτομά τους ενώνονται έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα τετράεδρο. Στην τετραεδρική δομή του GaAs κάθε άτομο Ga έχει τέσσερα άτομα As ως πλησιέστερους γείτονες και κάθε άτομο As έχει τέσσερα άτομα Ga ως πλησιέστερους γείτονες.

Η ακμή του κύβου έχει μήκος, a , ίσο με $5.43\text{\AA}$ για το Si και $5.65\text{\AA}$ για το GaAs, σε θερμοκρασία δωματίου.

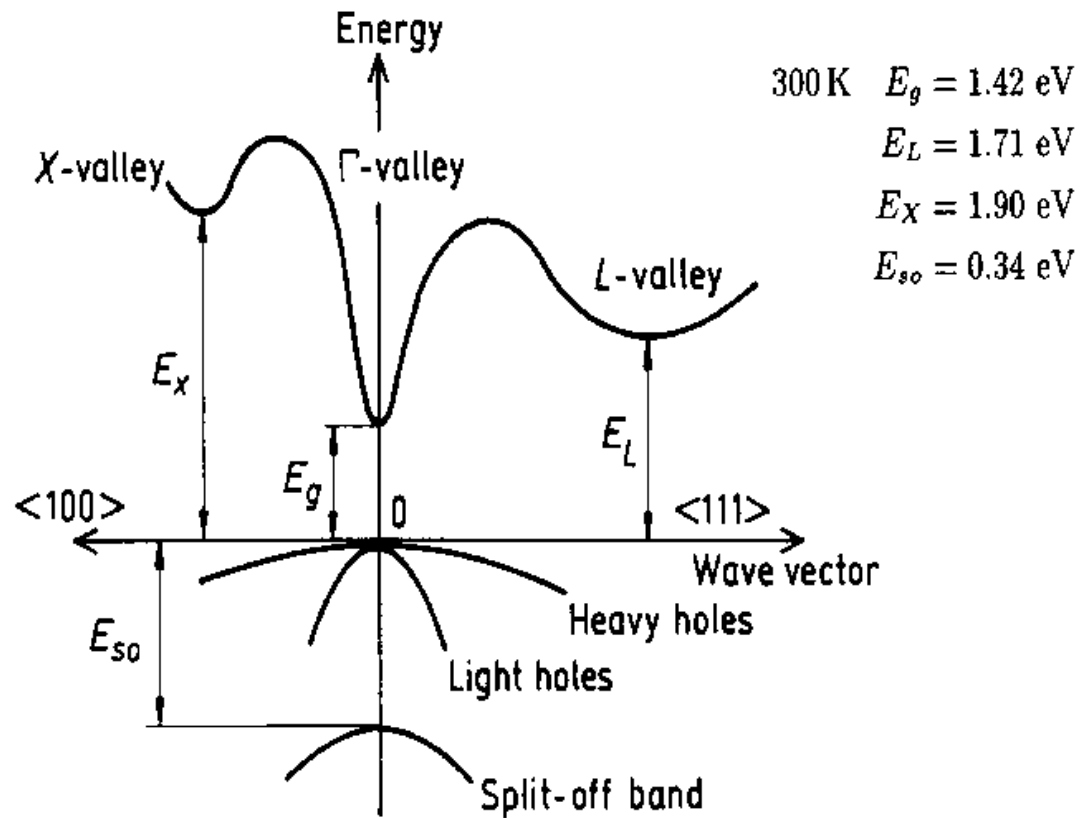
Επειδή υπάρχουν οκτώ άτομα Si σε κάθε στοιχειώδη κυψελίδα (όγκου a^3), θα υπάρχουν 5×10^{22} άτομα/cm³ Si.

Δεδομένου ότι το ατομικό βάρος του Si είναι 28.1 η πυκνότητά του είναι 2.33 g/ cm³.



Ενεργειακό χάσμα Si

Δομή ZnS, GaAs



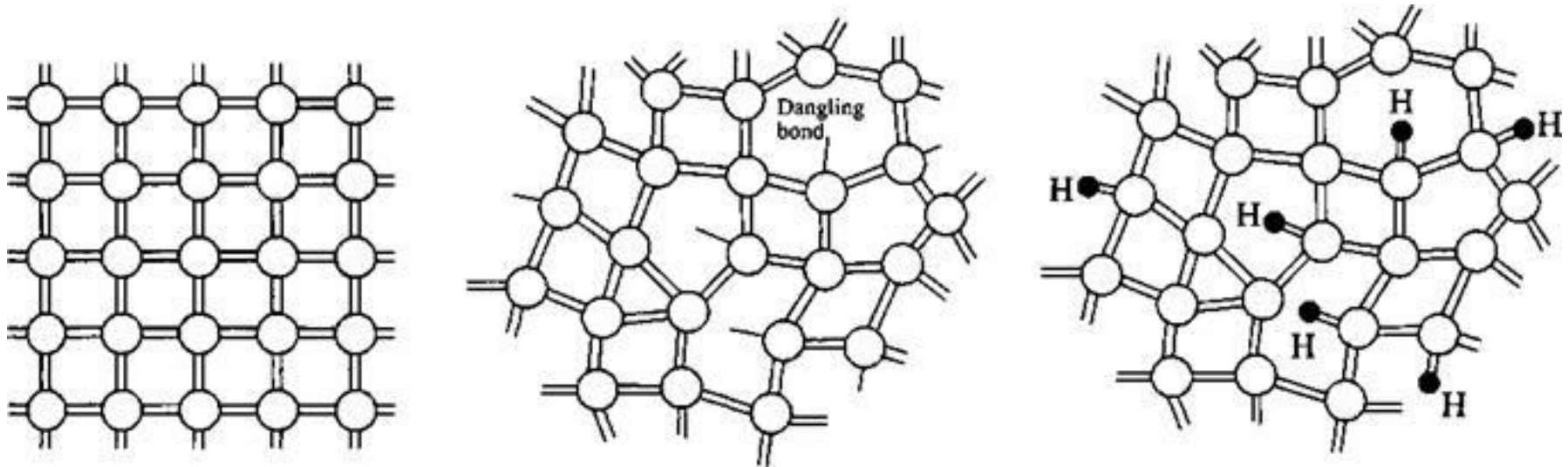
Band Gaps and Longest Wavelengths for Various Semiconductors

Material	Band Gap (eV)	Longest Wavelength (μm)
ZnS	3.6	0.345
CdS	2.41	0.52
CdSe	1.8	0.69
CdTe	1.5	0.83
Si	1.12	1.10
Ge	0.67	1.85
PbS	0.37	3.35
InAs	0.35	3.54
Te	0.33	3.75
PbTe	0.3	4.13
PbSe	0.27	4.58
InSb	0.18	6.90

- Οι ημιαγωγοί σε χαμηλή θερμοκρασία έχουν μονωτική συμπεριφορά, ενώ σε θερμοκρασία δωματίου μπορούν να άγουν, γιατί υπάρχει κάποια πιθανότητα κάποια ηλεκτρόνια να αποκτήσουν κατάλληλη θερμική ενέργεια και να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα και να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας συνεισφέροντας στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού.
- Οι κενές θέσεις στη ζώνη σθένους ονομάζονται οπές και μπορούν να κινούνται στη ζώνη αυτή. Έτσι οι ημιαγωγοί έχουν δύο είδη φορέων που συνεισφέρουν στο ρεύμα, τα ηλεκτρόνια και τις οπές.

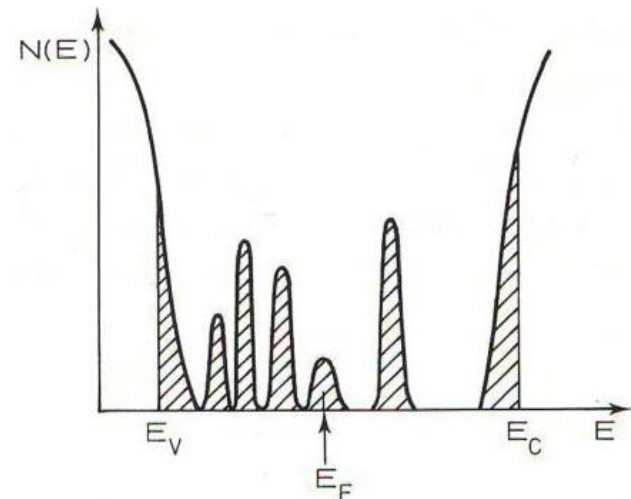
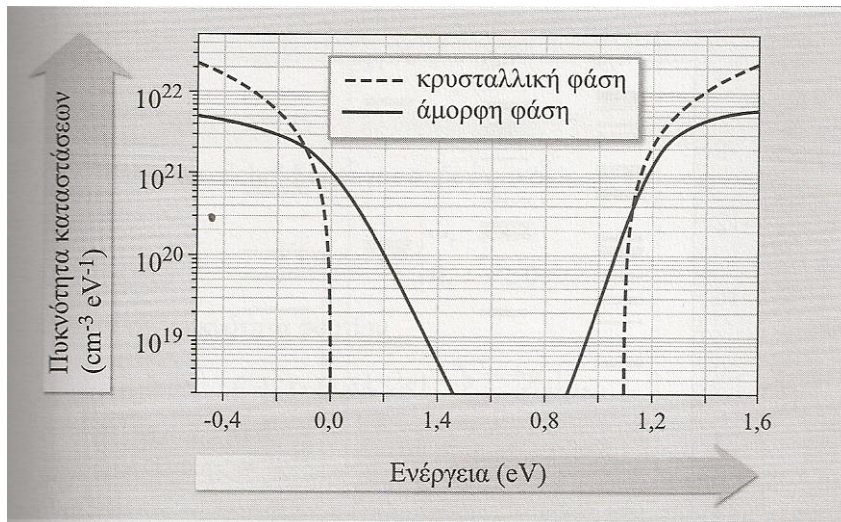
ΑΜΟΡΦΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

- Οι άμορφοι ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται από αταξία στη δομή τους ή τάξη μικρότερης εμβέλειας από ότι στην περίπτωση των κρυσταλλικών ημιαγωγών.

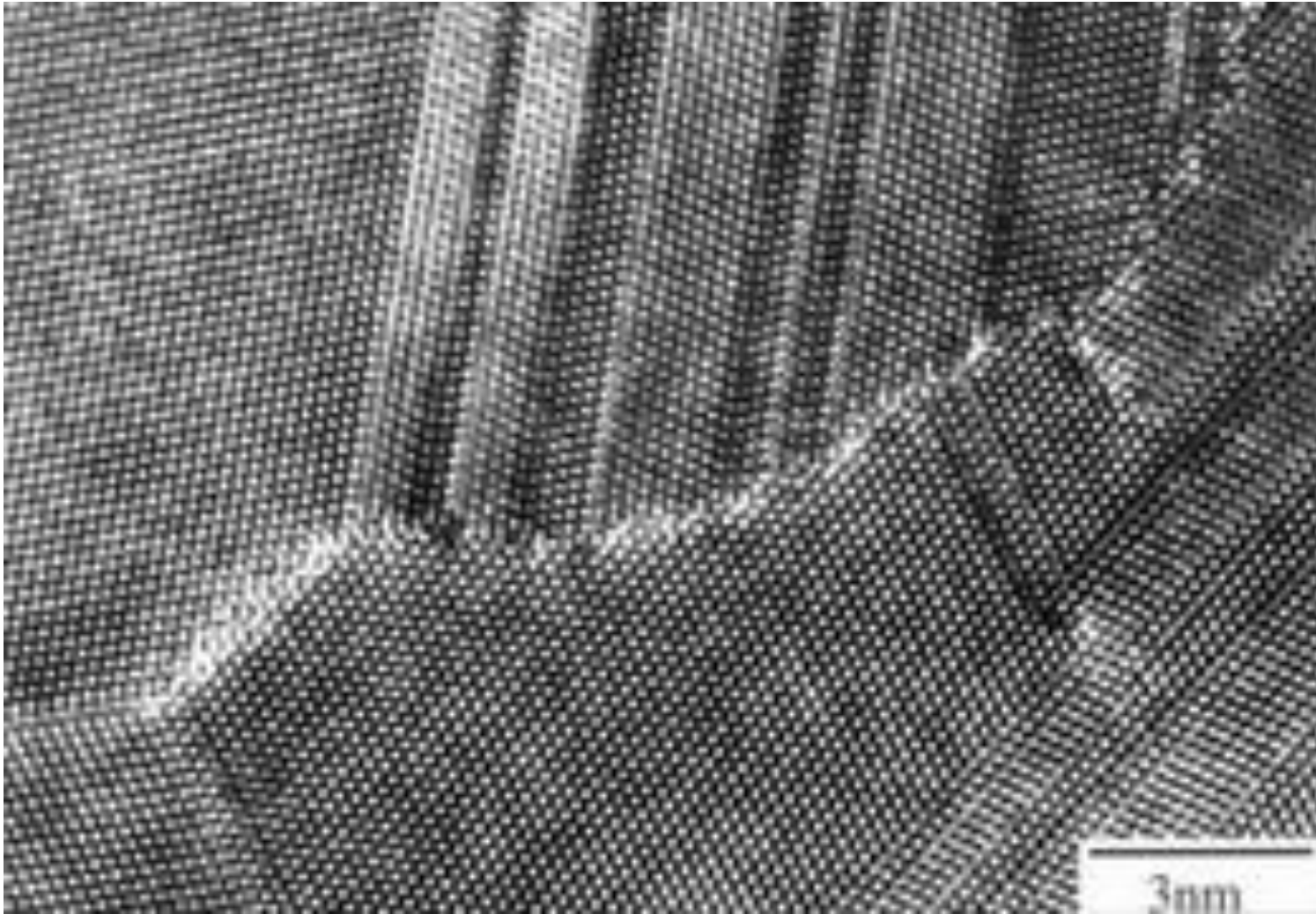


- Οι φορείς, τα ηλεκτρόνια και οι οπές υπόκεινται κατά την κίνησή τους σε σκέδαση από την άτακτη δομή που είναι ισχυρότερη από ότι σ' ένα κρύσταλλο και έτσι η μέση ελεύθερη διαδρομή τους είναι της τάξης της ενδοατομικής απόστασης, δηλ. πολύ μικρότερη από ότι στον αντίστοιχο κρυσταλλικό ημιαγωγό.

- Αν και οι ηλεκτρονικές καταστάσεις δεν μπορούν να χαρακτηριστούν με καλά καθορισμένα κυματανύσματα $\mathbf{k}$, στα υλικά αυτά μπορούμε να έχουμε ζώνες όπου επιτρέπεται η κατάληψή τους από ηλεκτρόνια καθώς και ενεργειακά χάσματα.
- Κοντά στα άκρα των ζωνών οι ενεργειακές καταστάσεις είναι εντοπισμένες (localized) και όχι συνεχείς (delocalized) όπως στους κρυσταλλικούς ημιαγωγούς και εκτείνονται βαθύτερα μέσα στο ενεργειακό χάσμα και η αγωγιμότητα των φορέων γίνεται με θερμική διέγερση από μια κατειλημμένη ενεργειακή κατάσταση σε μια γειτονική μη κατειλημμένη ενεργειακή κατάσταση (thermally-assisted hopping conductivity).
- Η ύπαρξη ελεύθερων δεσμών (dangling bonds) εισάγει ενεργειακές καταστάσεις βαθιά μέσα στο ενεργειακό χάσμα.

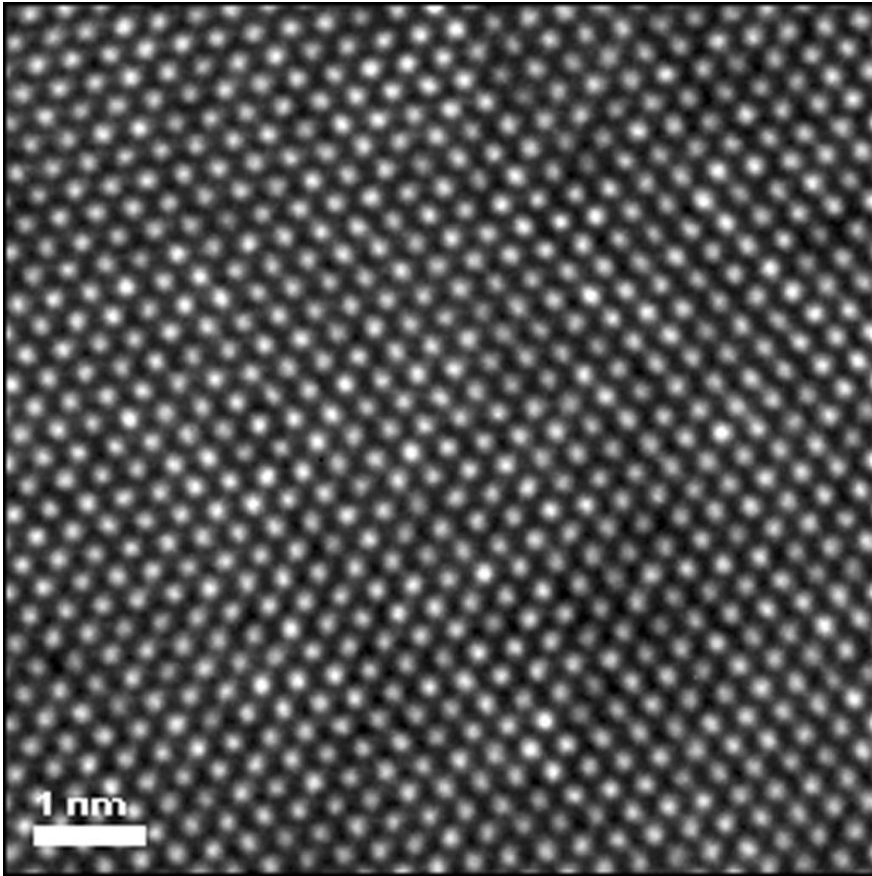


ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ



Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

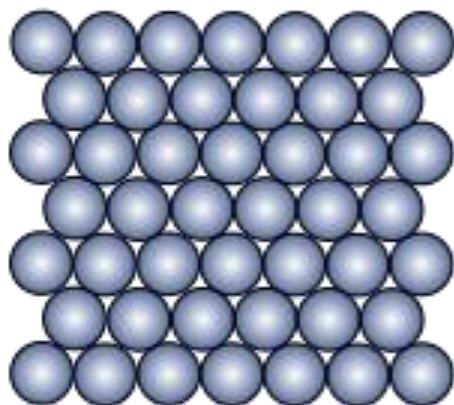
ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ



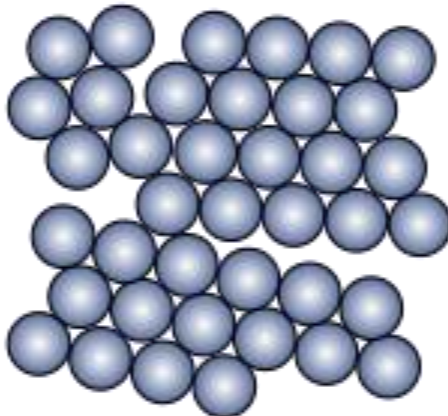
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο



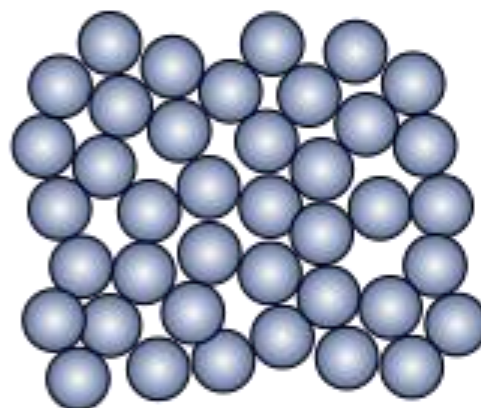
Monocrystalline



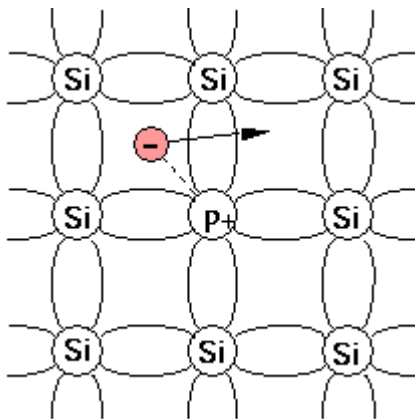
Polycrystalline



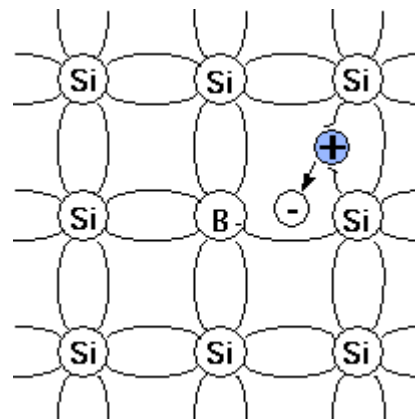
Amorphous



- Η ύπαρξη του ενεργειακού χάσματος έχει σαν συνέπεια όταν ένα ηλεκτρόνιο σθένους φύγει από τη ζώνη σθένους και μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει πίσω του ένα κενό ηλεκτρονίου που το ονομάζουμε οπή. Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο η οπή μπορεί να κινείται μέσα στη ζώνη σθένους ενώ το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι ένας ημιαγωγός έχει δύο είδη φορέων, ηλεκτρόνια και οπές όπου τα ρεύματά τους προστίθενται. Τα μέταλλα έχουν μόνο ένα είδος φορέων τα ηλεκτρόνια.
- **Εμπλουτισμός:** Όμως οι ημιαγωγοί από μόνοι τους έχουν λίγους φορείς. Για να αποκτήσουν τις επιθυμητές ηλεκτρικές ιδιότητες και να γίνουν πιο αγωγιμα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ολοκληρωμένα κυκλώματα πρέπει να εμπλουτιστούν με κατάλληλους φορείς, ηλεκτρόνια ή οπές. Αυτό γίνεται με την κατάλληλη προσθήκη προσμίξεων.



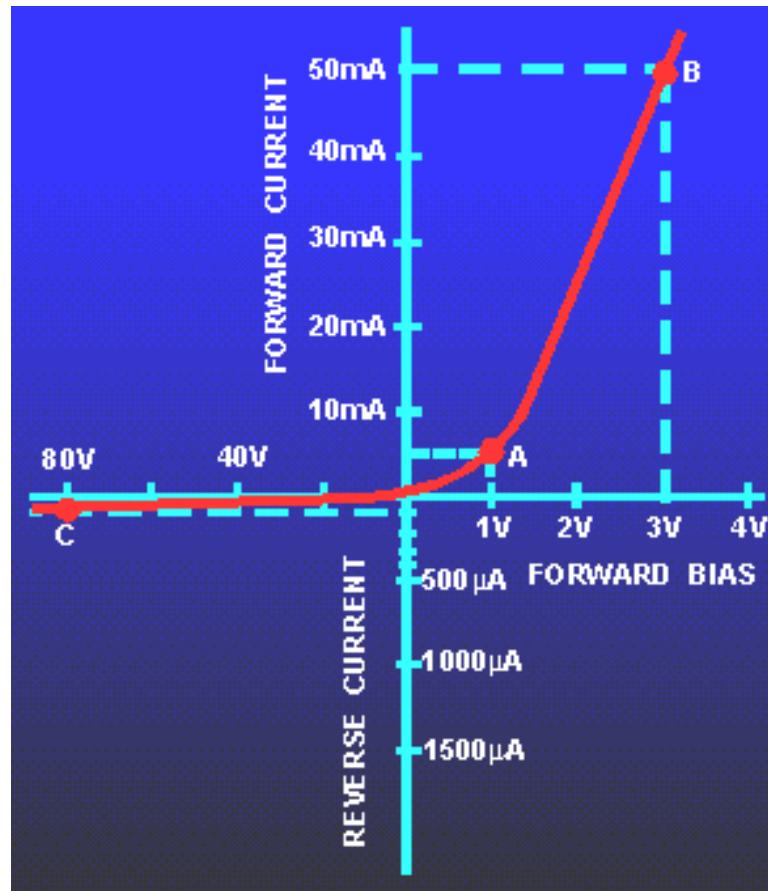
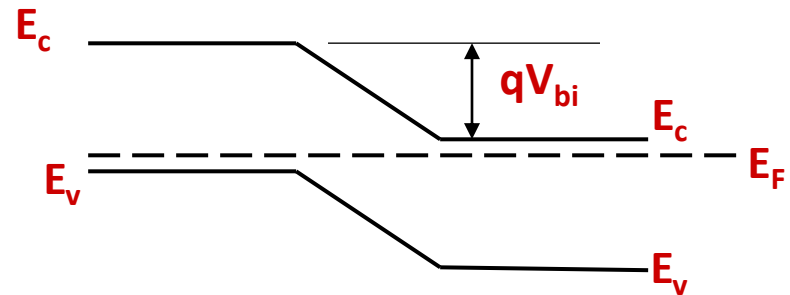
Εμπλουτισμός με άτομα-δότες.
Ημιαγωγός τύπου n.



Εμπλουτισμός με άτομα-αποδέκτες.
Ημιαγωγός τύπου p.

Ημιαγωγοί-Βασικές διατάξεις

Δίοδος

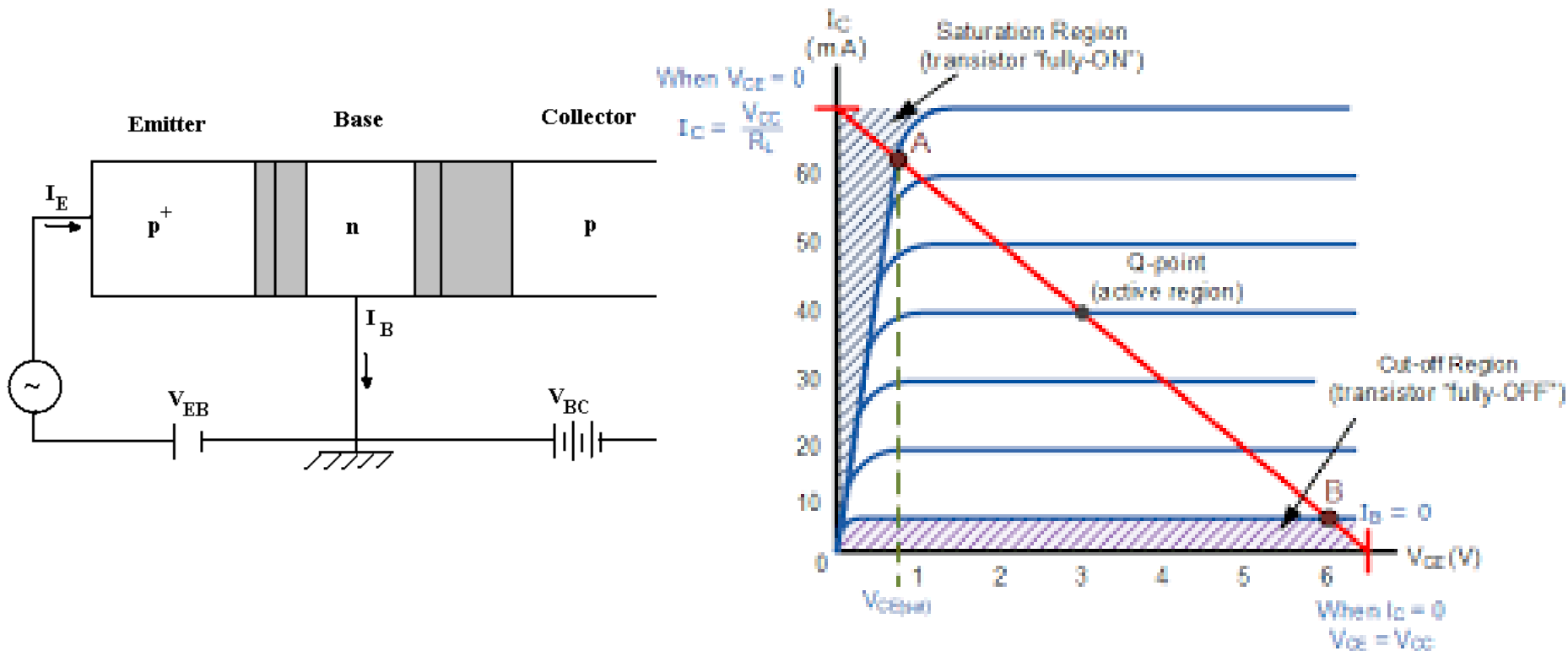


Η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος είναι και η αιτία που το τρανζίστορ λειτουργεί ως διακόπτης που καθορίζει τα λογικά 1 και 0 προκειμένου να φτιάξουμε τις λογικές πύλες που κάνουν λογικές πράξεις στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ημιαγωγοί-Βασικές διατάξεις

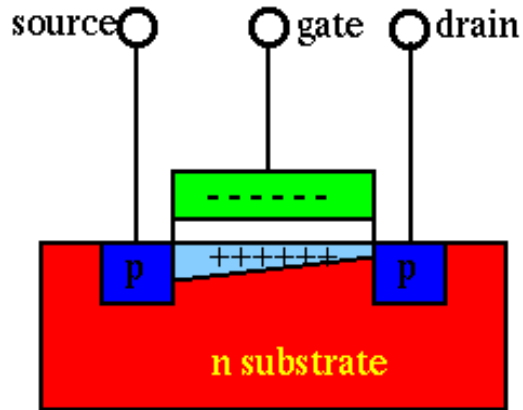
Διπολικό (bipolar) Τρανζίστορ

- Η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος είναι και η αιτία που το τρανζίστορ λειτουργεί ως διακόπτης που καθορίζει τα λογικά 1 και 0 προκειμένου να φτιάξουμε τις λογικές πύλες που κάνουν λογικές πράξεις στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Το τρανζίστορ εκτός από διακόπτης λειτουργεί και ως ενισχυτής.

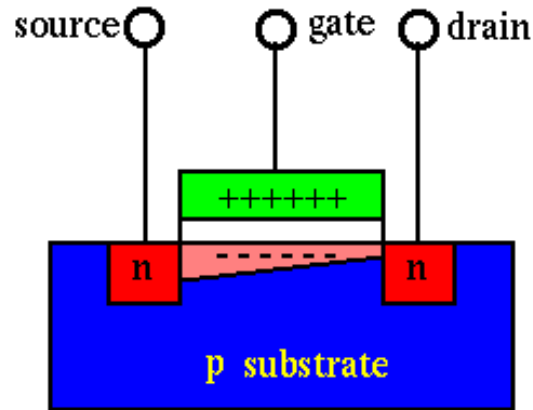


Ημιαγωγοί-Βασικές διατάξεις

Μονοπολικό (unipolar) Τρανζίστορ MOSFET

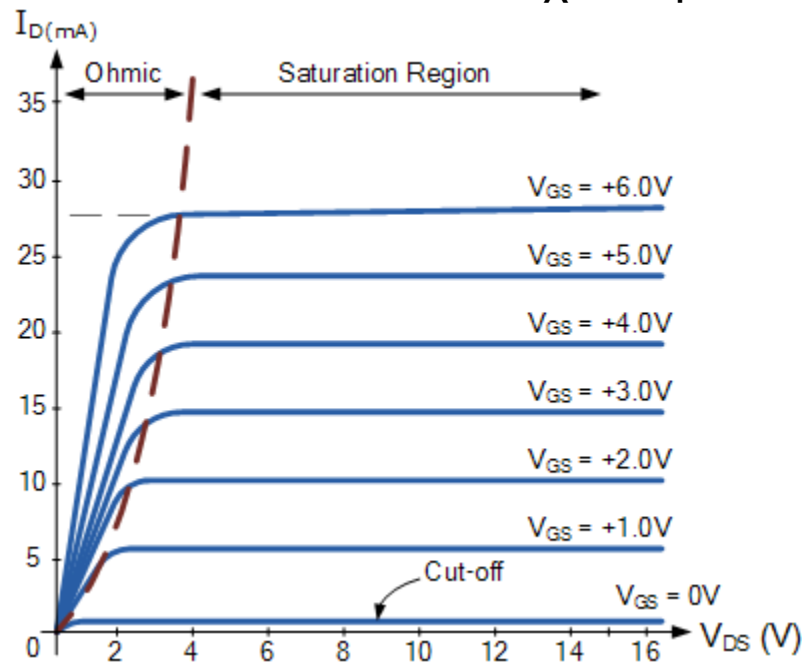


pMOS

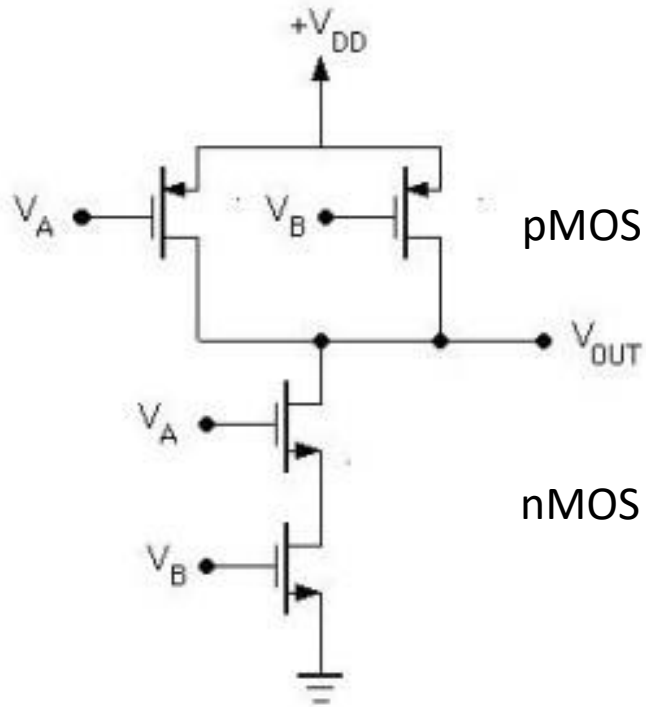


nMOS

- Η τεχνολογία των τρανζίστορ που χρησιμοποιείται σήμερα στους μικροεπεξεργαστές είναι τύπου MOSFET. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται CMOS.

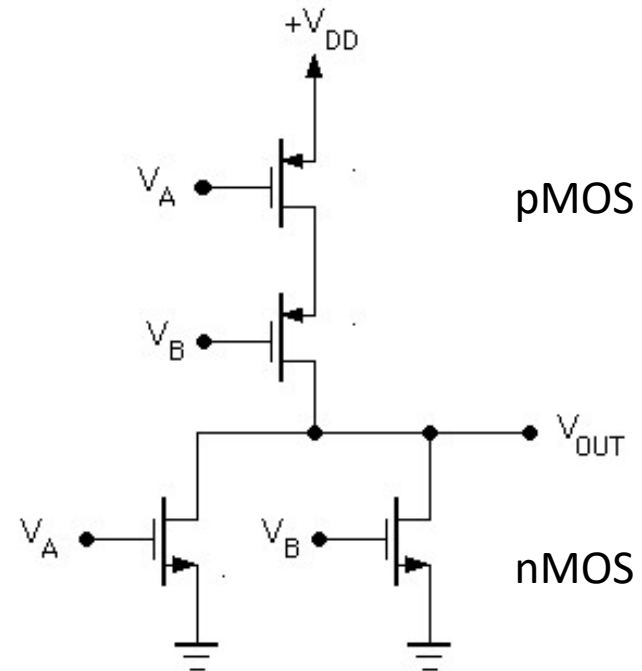


Λογικές πύλες (logic gates)-NAND-NOR



NAND Gate using CMOS

A	B	output
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



NOR Gate using CMOS

A	B	output
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Γιατί χρησιμοποιούμε πυρίτιο στην μικροηλεκτρονική;

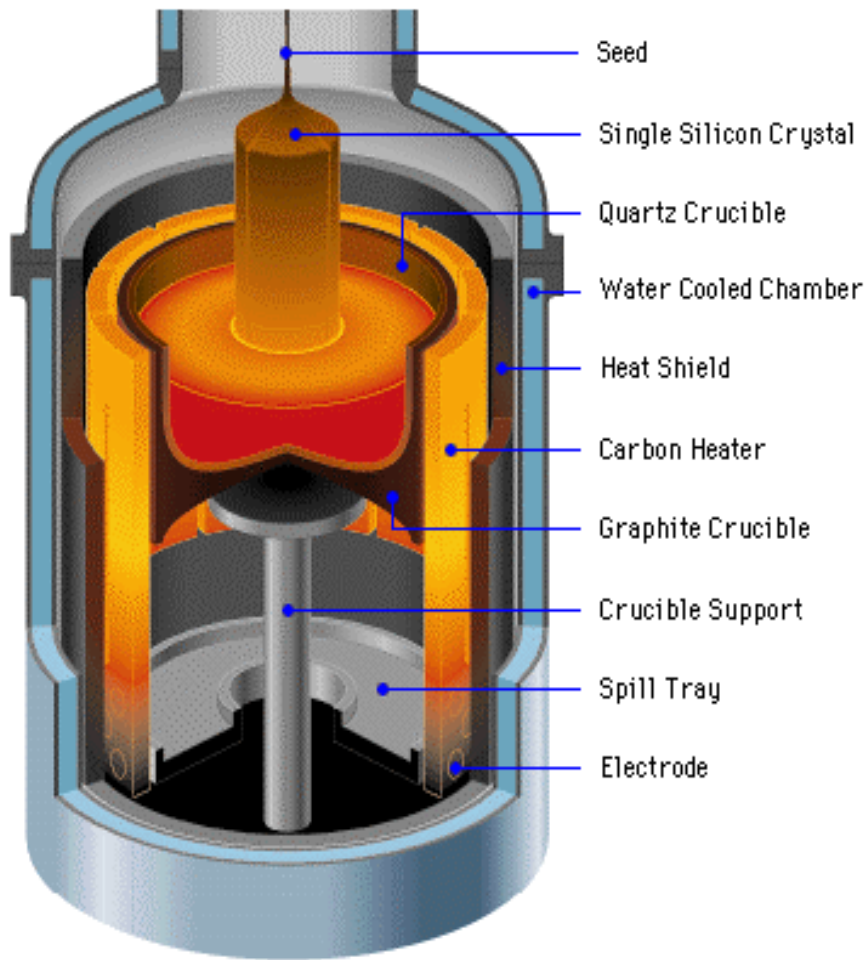
Αν και το γερμάνιο ήταν ο ημιαγωγός που κατασκευάστηκε το πρώτο τρανζίστορ, το γερμάνιο εγκαταλείφθηκε γρήγορα για χάρη του πυριτίου για τους πιο κάτω λόγους:

- Τα γερμάνιο έχει μικρότερο ρεύμα αποκοπής με μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε σύγκριση με το πυρίτιο και μικρότερη ικανότητα να αντέχει τη θερμότητα. Αντίθετα οι διατάξεις πυριτίου μπορεί να λειτουργούν καλύτερα από τις αντίστοιχες γερμανίου σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Όλα αυτά κατανοούμε ότι οφείλονται στο μικρότερο ενεργειακό χάσμα του γερμανίου.
- Το πυρίτιο αν και δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση σαν ορυκτό, μπορεί να παραχθεί από την άμμο, που αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου. Αυτό καθιστά το υλικό άφθονο και επομένως φτηνό στην παρασκευή του.
- Επίσης το διοξείδιο του πυριτίου για την κατασκευή της πύλης του τρανσζίστορ στην περίπτωση του πυριτίου είναι πολύ σταθερό διηλεκτρικό και αναπτύσσεται εύκολα. Δεν συμβαίνει το ίδιο με το γερμάνιο.
- Επίσης η τεχνολογία πυριτίου έχει εξελιχθεί τόσο πολύ ώστε να καθίσταται η δυνατότητα ολοκλήρωσης όλων των διατάξεων από πυρίτιο (τρανζίστορ, διόδων, κλπ), σ'ένα μόνο τσιπάκι, εφικτή. Αυτή η δυνατότητα καθώς εξελίσσεται ακολουθεί τον κανόνα του Moore που ήδη αναφέραμε, οδηγώντας σε όλο και μεγαλύτερη πυκνότητα τρανζίστορ μέσα σ' ένα επεξεργαστή ώστε να κάνει όλο και πιο πολύπλοκες διεργασίες καθώς και σε ολοένα και πιο μικρά τρανζίστορ (απόσταση πηγής-καταβόθρας και πάχος πύλης) τα οποία επιταχύνουν την επεξεργασία δεδομένων.

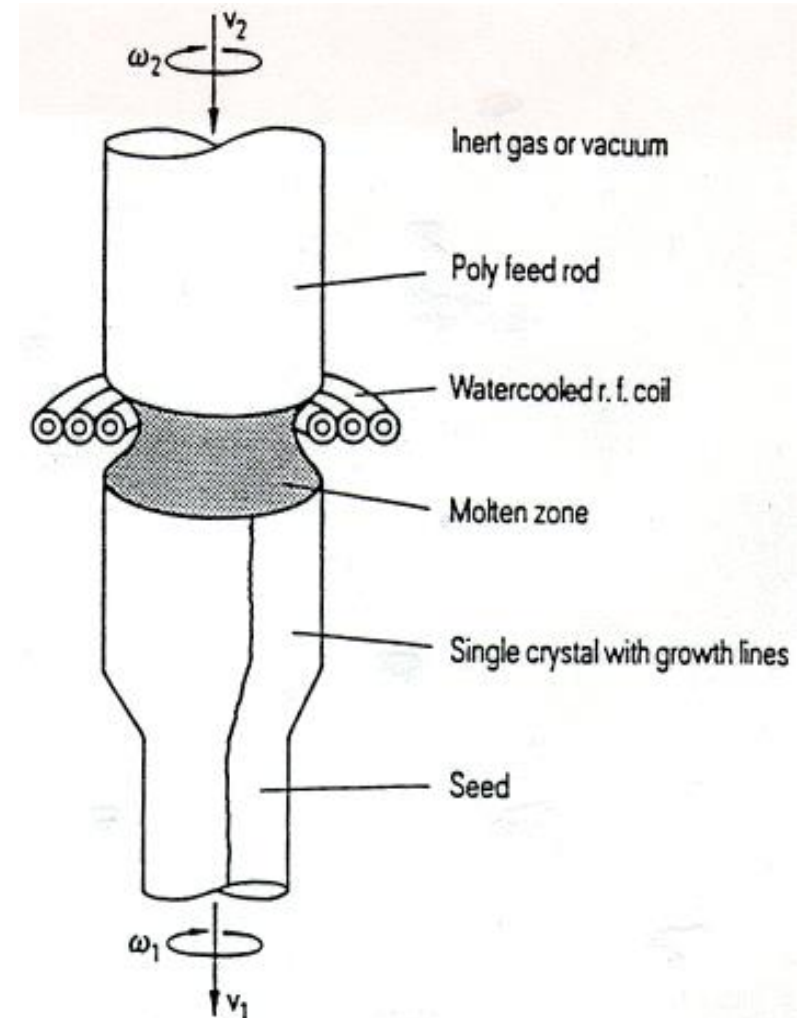
Πώς παρασκευάζουμε κρυσταλλικό πυρίτιο από άμμο;

Κατασκευή δισκίων πυριτίου (I)

Czochralski (CZ).

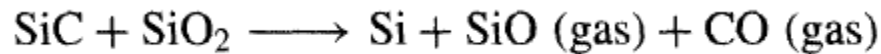


Float-Zone (FZ)



Μέθοδος Czochralski (CZ)

Τοποθετείται μέσα σε ειδικό κλίβανο καθαρή άμμος (SiO_2) μαζί με υλικά που εκπέμπουν άνθρακα κατά την κάυση τους όπως γαιάνθρακας. Μέσα στον κλίβανο γίνονται αρκετές αντιδράσεις και η καθαρή χημική αντίδραση που δίνει το πυρίτιο είναι:



Το πυρίτιο που προκύπτει από αυτή την αντίδραση ονομάζεται «μεταλλουργικό» (metallurgical-grade silicon, MGS), το οποίο περιέχει προσμίξεις 2% . Κατόπιν, το πυρίτιο που προκύπτει αντιδρά με HCl και σχηματίζει SiHCl_3 :



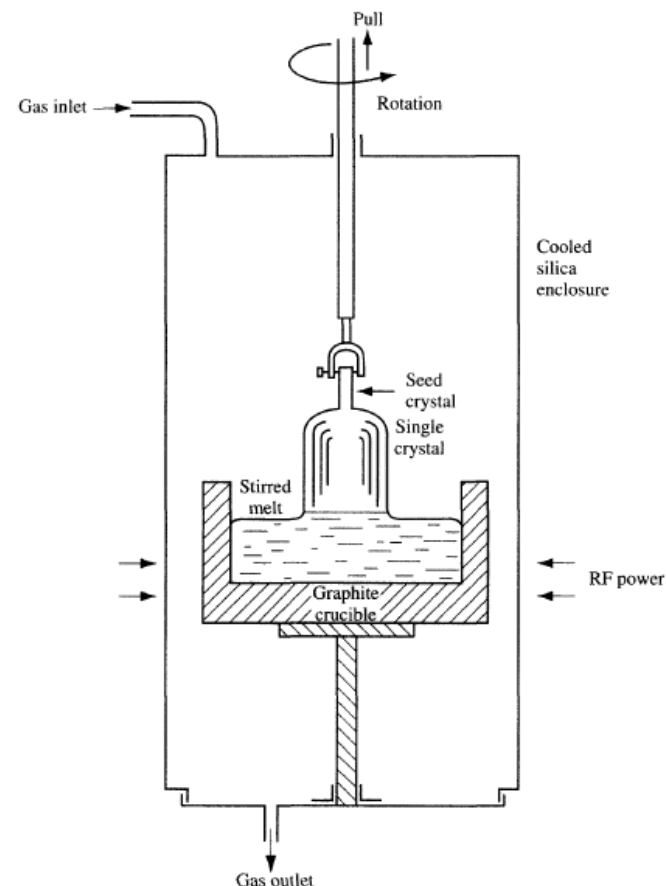
Το SiHCl_3 είναι υγρό σε θερμοκρασία δωματίου. Με κλασματική απόσταξη απομακρύνονται οι προσμίξεις και το καθαρό υγρό ανάγεται σε ατμόσφαιρα υδρογόνου και δίνει καθαρό πυρίτιο (electronic grade silicon, EGS) μέσω της πιο κάτω αντίδρασης:



Το πυρίτιο EGS είναι πολυκρυσταλλικό μεγάλης καθαρότητας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή υψηλής ποιότητας υποστρωμάτων κρυσταλλικού πυριτίου (silicon wafers).

Στη μέθοδο Czochralski χρησιμοποιείται η συσκευή του σχήματος. Αποτελείται από τρία μέρη:

1. Ο κλίβανος αποτελείται από το χωνευτήρι (crucible) που έχει τοιχώματα από γυαλί και περιέχει το τήγμα (melt), που περιβάλλεται από γραφίτη, ένα θερμαντικό στοιχείο και την πηγή τροφοδοσίας.
2. Ένα μηχανισμό κατάλληλο να τραβά τον κρύσταλλο πυριτίου που σχηματίζεται από το τήγμα προς τα πάνω και μπορεί να περιστρέφεται και επίσης περιλαμβάνει το seed γύρω από το οποίο αναπτύσσεται το κρυσταλλικό πυρίτιο.
3. Ένα σύστημα το οποίο ελέγχει το αέριο περιβάλλον μέσα στο οποίο αναπτύσσεται ο κρύσταλλος. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τη πηγή του αερίου και ένα σύστημα απαγωγής του.

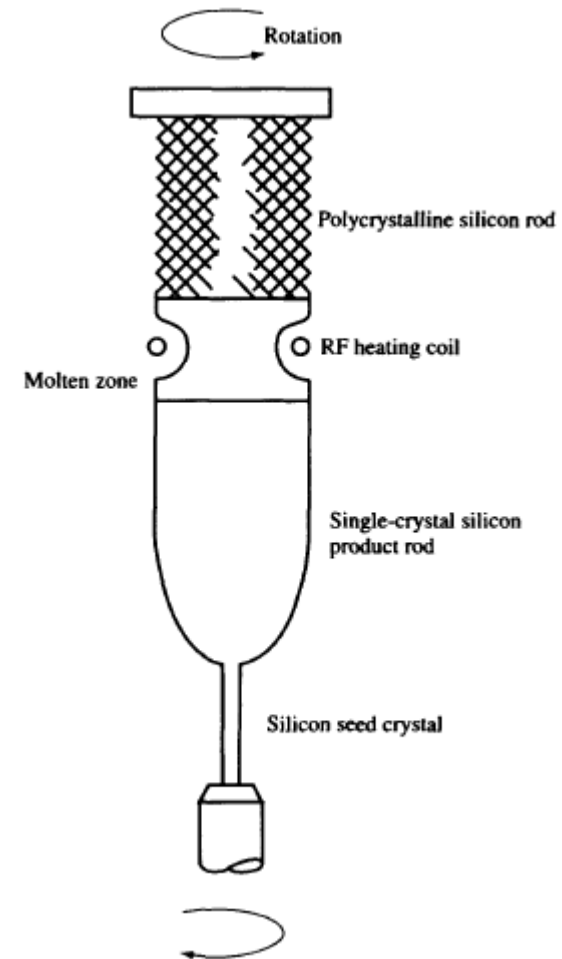


Κατά την ανάπτυξη του κρυστάλλου το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο EGS τοποθετείται στο χωνευτήρι και ο κλίβανος θερμαίνεται στη θερμοκρασία τήξης του πυριτίου. Ένας κατάλληλα προσανατολισμένος κρυσταλλίτης (seed) π.χ. με κρυσταλλογραφική διεύθυνση [100] τοποθετείται πάνω σε κατάλληλο στήριγμα πάνω από το χωνευτήρι. Ο κρυσταλλίτης βυθίζεται στο τήγμα. Μέρος του κρυσταλλίτη τήκεται ενώ η άκρη του εναπομέναντος κρυσταλλίτη εξακολουθεί να αγκίζει την επιφάνεια του τήγματος. Ο κρυσταλλίτης σιγά σιγά τραβιέται από το τήγμα, ενώ το υλικό του τήγματος που έχει εναποτεθεί πάνω στον κρυσταλλίτη παγώνει και δημιουργείται μονοκρυσταλλικό πυρίτιο με την κρυσταλλική διεύθυνση του κρυσταλλίτη. Ο ρυθμός με τον οποίο τραβιέται ο κρυσταλλίτης έξω από το τήγμα είναι μερικά χιλιοστά ανά λεπτό.

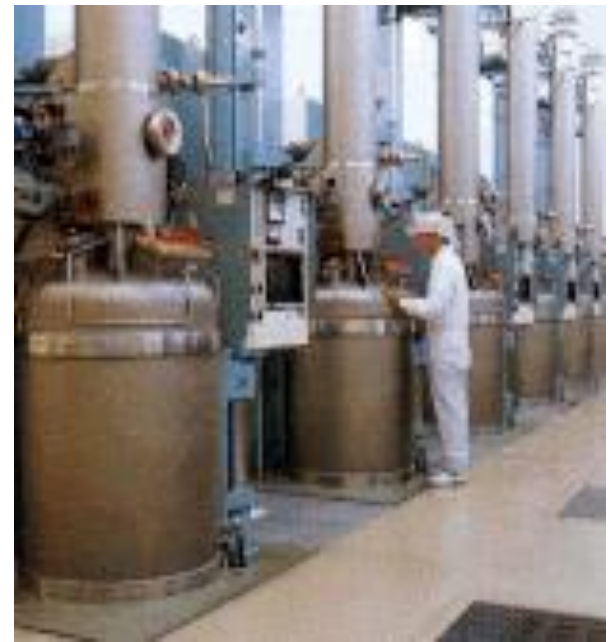
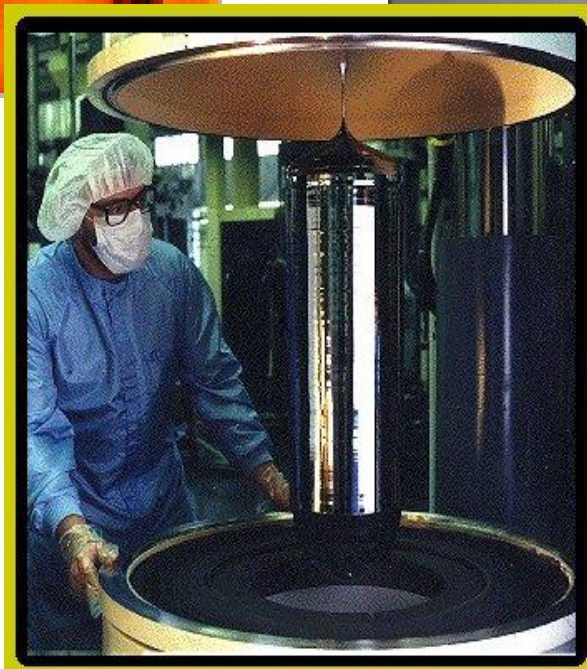
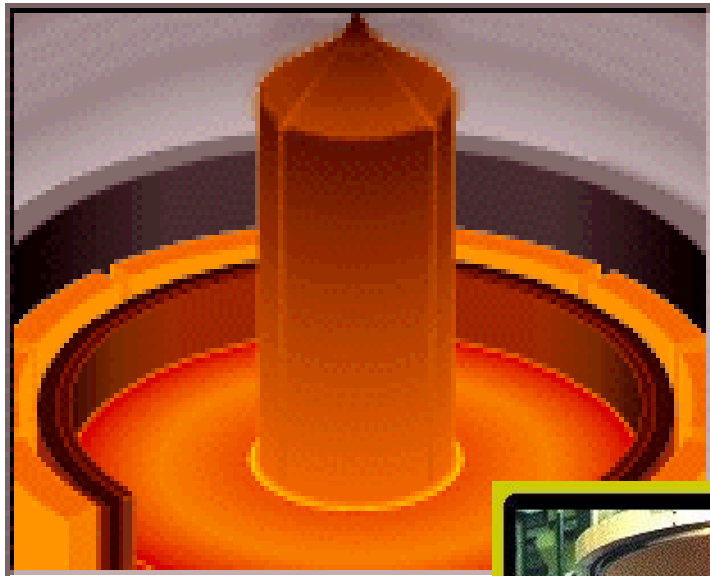


Μέθοδος Float Zone (FZ)

Μια εναλλακτική μέθοδος ανάπτυξης κρυσταλλικού πυριτίου είναι η μέθοδος Float-Zone. Η μέθοδος αυτή είναι πιο ακριβή αλλά δίνει κρυσταλλικό πυρίτιο με μεγαλύτερη καθαρότητα. Οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται με διεύθυνση (100) ή (111). Η ράβδος πολυκρυσταλλικού πυριτίου λιώνει στο κάτω μέρος της ράβδου όπου εφαρμόζεται θέρμανση με ένα θερμαντικό στοιχείο RF. Η περιοχή αυτή που έχει τηχθεί έρχεται σε επαφή με τον κρυσταλλίτη seed. Ο κρυσταλλίτης περιστρέφεται και τραβιέται καθώς η περιοχή της ράβδου που λιώνει μετακινείται προς τα πάνω κατά μήκος της ράβδου μέχρι όλη η ράβδος να μετατραπεί σε μονοκρυσταλλικό πυρίτιο με την κρυσταλλογραφική διεύθυνση του seed.

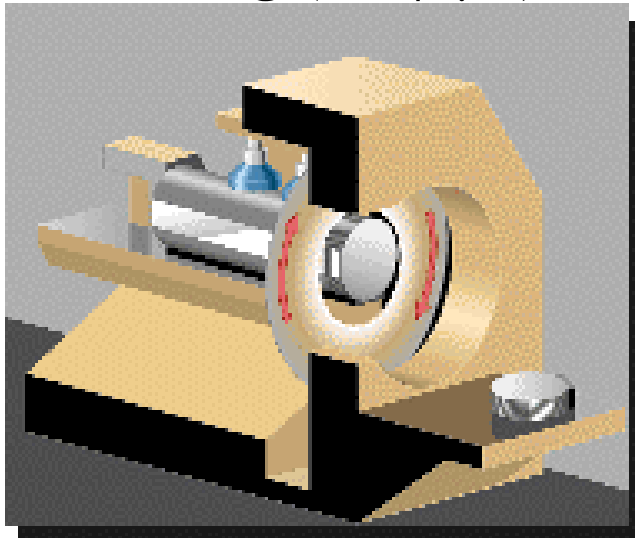


Κατασκευή δισκίων πυριτίου (II)

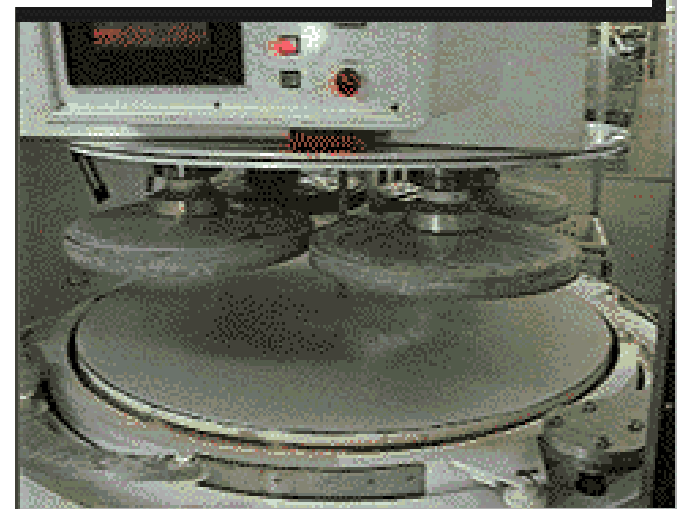
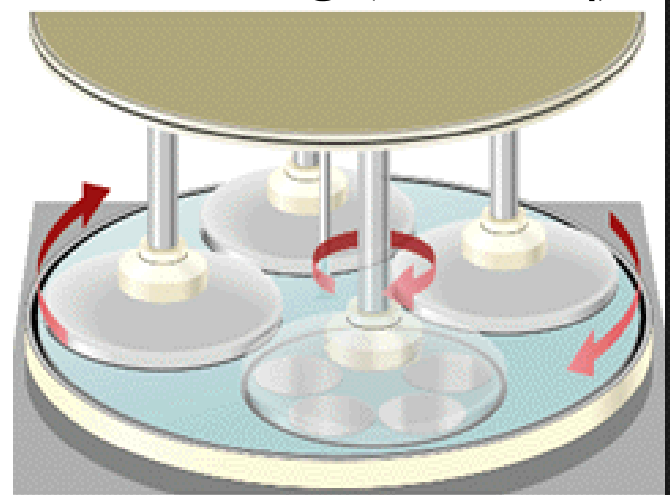


Κατασκευή δισκίων πυριτίου (III)

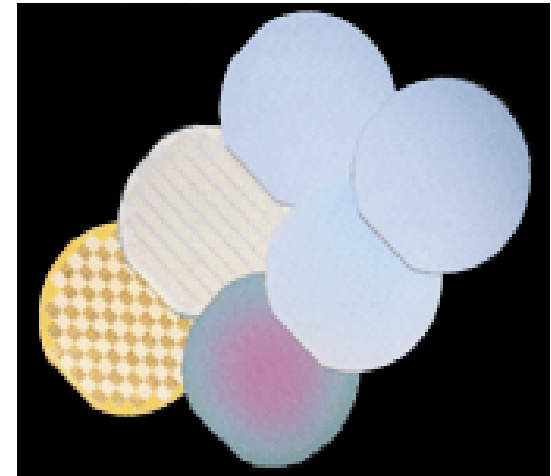
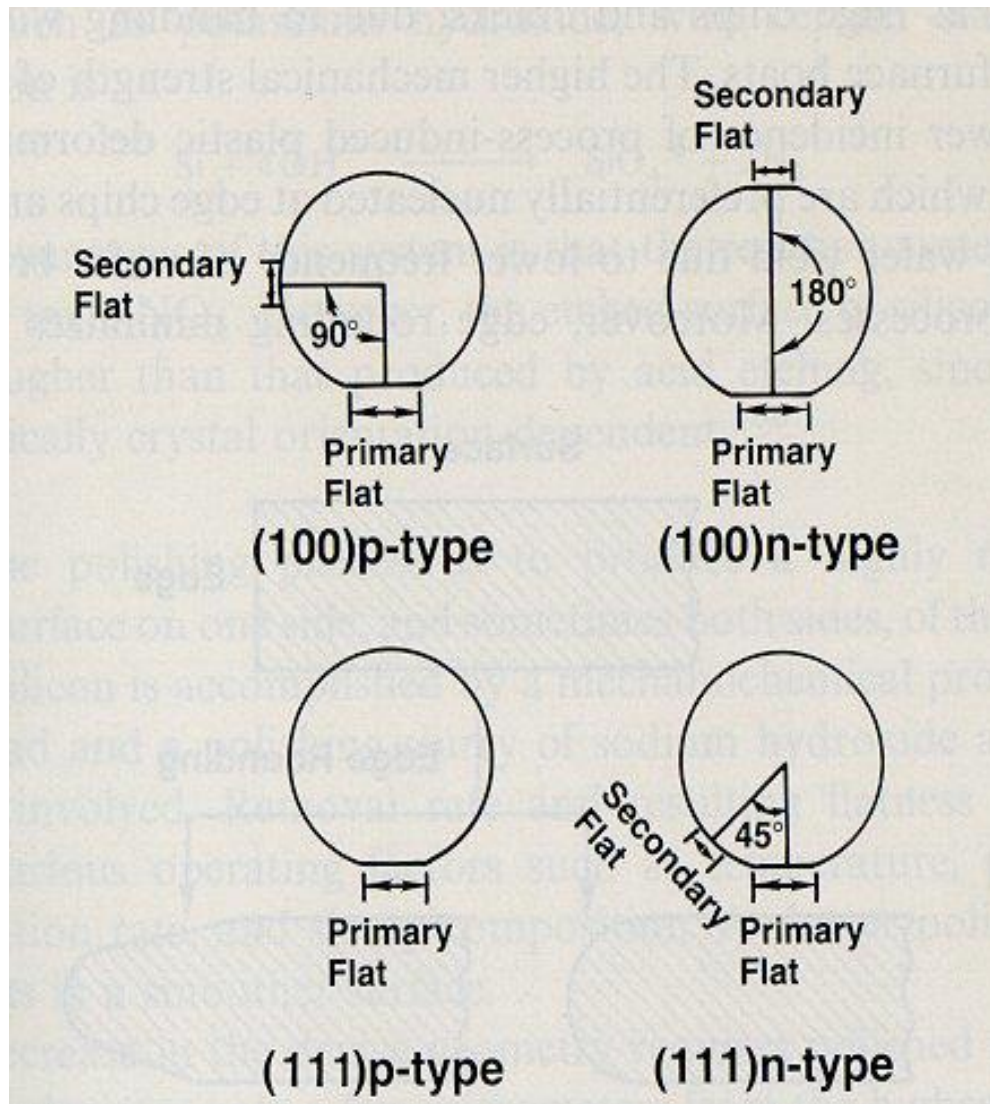
Dicing (Κόψιμο)



Polishing (Λείανση)

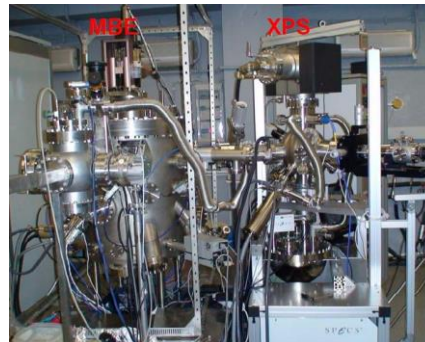


Κατασκευή δισκίων πυριτίου (IV)



Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

- Οι διεργασίες κατασκευής ημιαγωγικών διατάξεων περιλαμβάνουν εμπλουτισμό με φορείς σε συγκεκριμένες περιοχές του δισκίου πυριτίου για να φτιαχτούν οι περιοχές τύπου p ή τύπου n. Διαδικασίες οξείδωσης που παρέχουν ηλεκτρική μόνωση μεταξύ γειτονικών διατάξεων σ' ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ή για τη δημιουργία του διηλεκτρικού της πύλης σ' ένα τρανζίστορ. Η διάνοιξη παραθύρων όπου γίνονται επιλεκτικά αυτές οι διεργασίες γίνεται με τη βοήθεια της οπτικής λιθογραφίας (υπομικρονικές διαστάσεις) ή με λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης (διαστάσεις μερικών νανομέτρων). Οι διεργασίες αυτές γίνονται σε συνθήκες καθαρού χώρου.



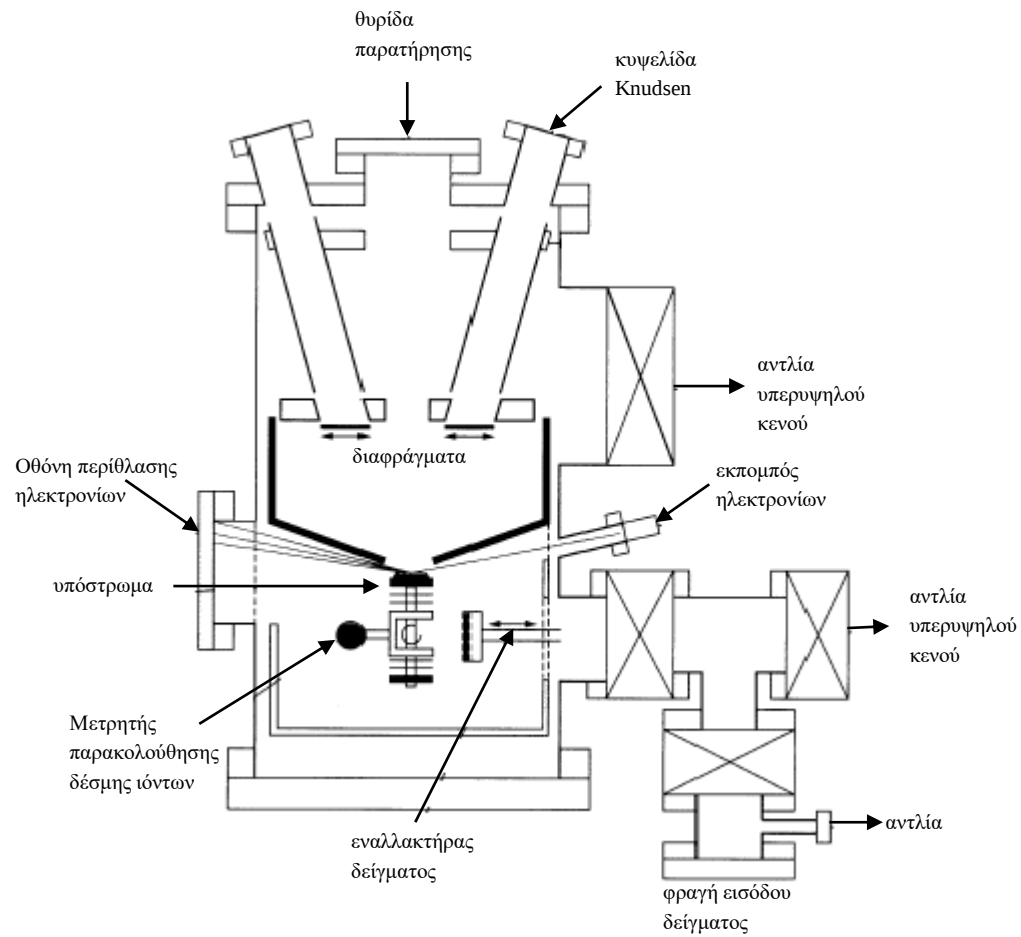
Καθαρός χώρος διεργασιών πυριτίου ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

Μέθοδοι ανάπτυξης υμενίων.

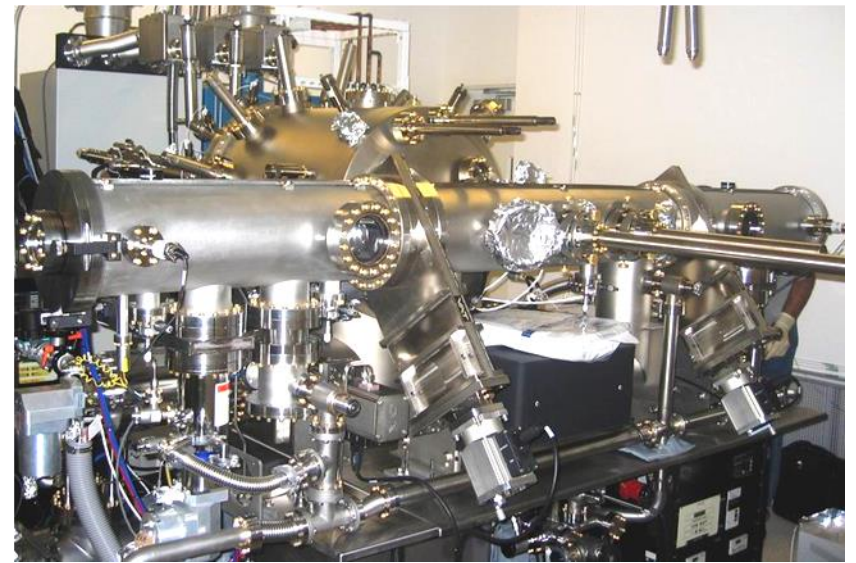
- Η ελεγχόμενη ανάπτυξη υμενίων ημιαγωγών με πάχος στην ατομική κλίμακα ($\sim \text{nm}$) οδήγησε στην ανάπτυξη πολυστρωματικών δομών με διαστάσεις τέτοιες ώστε να παρατηρούνται κβαντικά φαινόμενα περιορισμού των φορέων όπως κβαντικά πηγάδια, κβαντικά νήματα και κβαντικές τελείες. Οι δομές αυτές έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη οπτοηλεκτρονικών διατάξεων όπως lasers και σε νανοηλεκτρονικές διατάξεις όπως μη-πτητικές μνήμες και τρανζίστορ με φορείς μεγάλης ευκινησίας.

Κατά τη *χημική εναπόθεση ατμού* τα αντιδρώντα μοριακά συστατικά τα οποία βρίσκονται σε κατάσταση ατμού, αντιδρούν ομογενώς στην αέρια φάση ή ετερογενώς στην ενδοεπιφάνεια στερεού-αερίου σε ένα υπόστρωμα, παράγοντας ένα υμένιο του οποίου η σύσταση είναι διαφορετική από τα αρχικά υλικά.

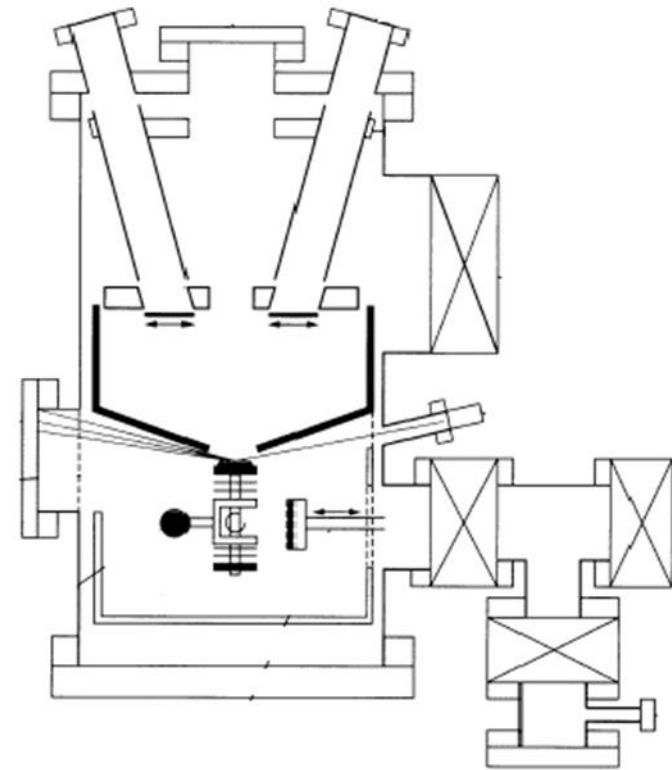
Μια από τις σημαντικότερες συνθετικές μεθόδους εναπόθεσης ατμού η οποία επιτρέπει έναν ακριβή έλεγχο της σύστασης του υλικού είναι αυτή της *Επιταξίας Μοριακής Δέσμης* .



**Σχηματική αναπαράσταση ενός θαλάμου ανάπτυξης
Επιταξίας Μοριακής Δέσμης.**

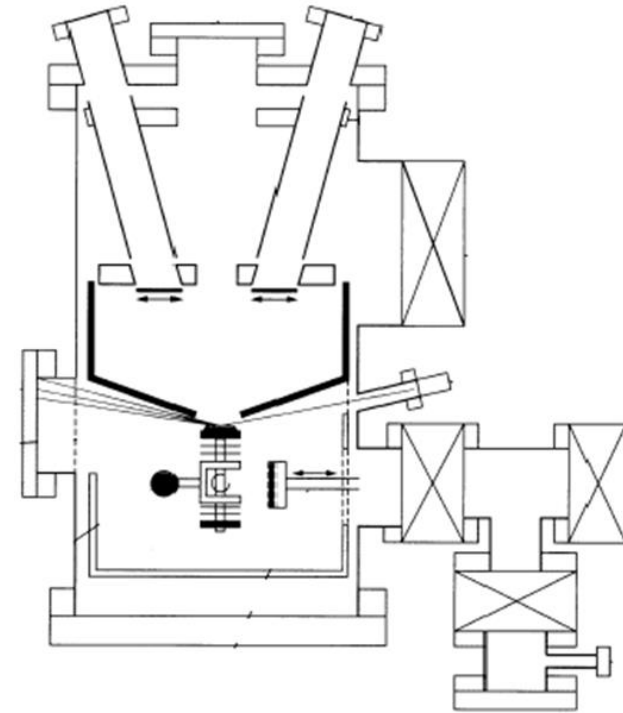


Κατ' αυτήν, ξέχωρες, καλά ευθυγραμμισμένες μοριακές δέσμες καθενός από τα απαιτούμενα συστατικά (π.χ. Ga, Al και As για την παρασκευή υμενίου $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), κάθε μία ξεκινώντας από ένα μικρό στόμιο μιας ηλεκτρικά θερμαινόμενης κυψελίδας διάχυσης Knudsen η οποία περιέχει το συστατικό και κατευθύνονται σε ένα υπόστρωμα.

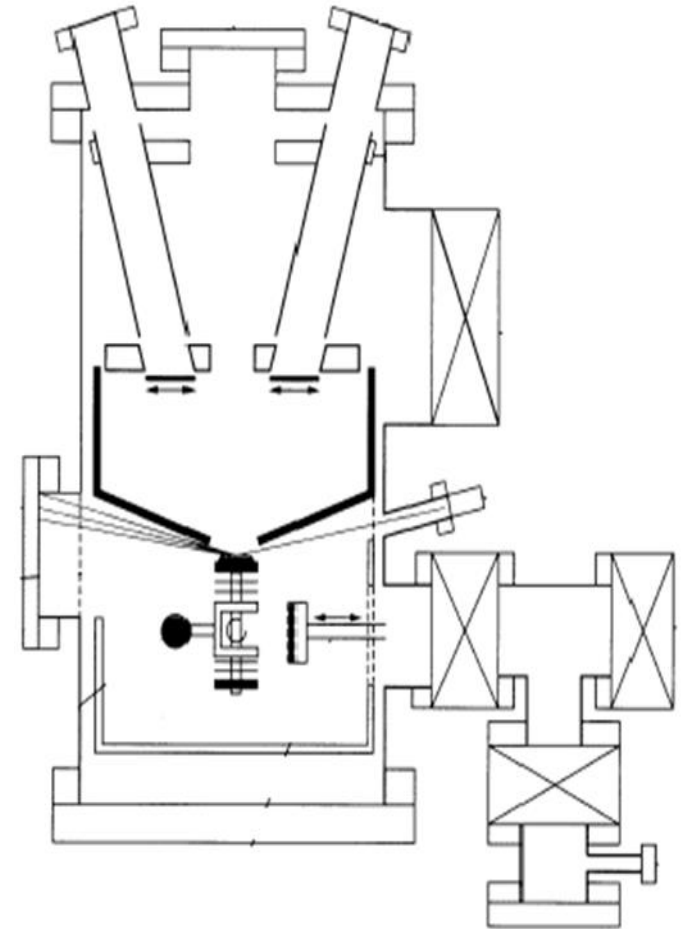


Η διαδικασία της ατμοποίησης λαμβάνει χώρα σε ένα χώρο υπερυψηλού κενού υπό πίεση μικρότερη 10^{-9} Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/cm}^2$) ή 10^{-11} millibar:. Αυτό το κενό εμποδίζει τη «μόλυνση» του υμενίου από την αέρια φάση και επίσης επιτρέπει την βαλλιστική μεταφορά μοριακής δέσμης στο υπόστρωμα.

Κάθε κυψελίδα Knudsen είναι εφοδιασμένη με ένα διάφραγμα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο, ώστε η σύνθεση και το πάχος του αναπτυσσόμενου υμενίου να είναι ελεγχόμενα με ακρίβεια. **Ο τυπικός ρυθμός ανάπτυξης** λεπτών υμενίων με τη μέθοδο της Επιταξίας Μοριακής Δέσμης είναι **$1 \mu\text{m h}^{-1}$** ($\sim 0.3 \text{ nm s}^{-1}$), περίπου δηλαδή ένα μονατομικό στρώμα ανά δευτερόλεπτο.

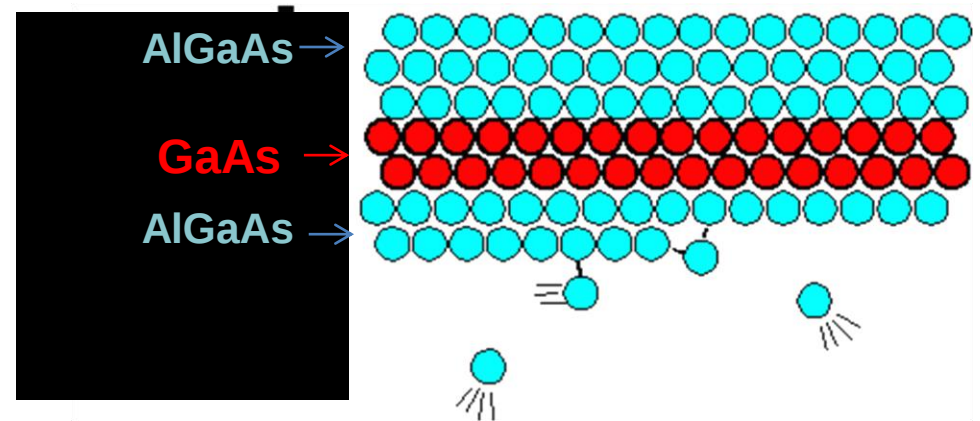
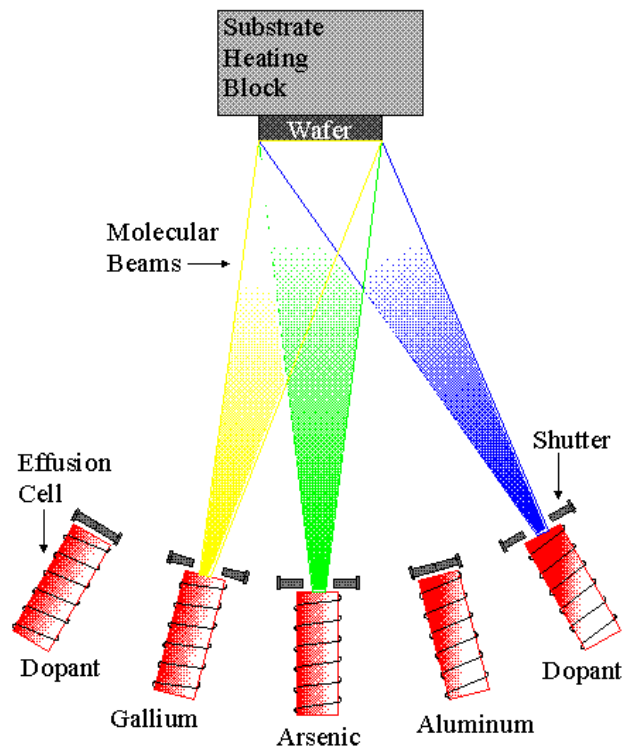
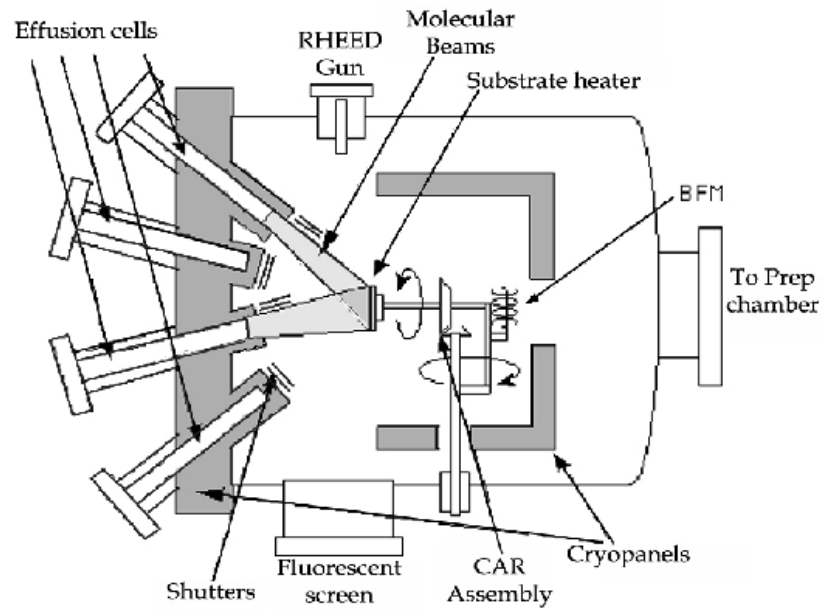


Εάν ο χρόνος εναλλαγής μεταξύ των ατομικών πηγών που σχετίζεται με το άνοιγμα και κλείσιμο των διαφραγμάτων είναι αρκετά μικρότερος του ενός δευτερολέπτου, τότε μπορεί να γίνουν απότομες αλλαγές, της τάξης των ατομικών διαστάσεων, στα προφίλ της σύνθεσης αλλάζοντας το πάχος του υμένιου. Η σύνθεση ενός στρώματος καθορίζεται από τη ροή των ατόμων κάθε μοριακής δέσμης, ελεγχόμενη από τη θερμοκρασία της κυψελίδας Knudsen.

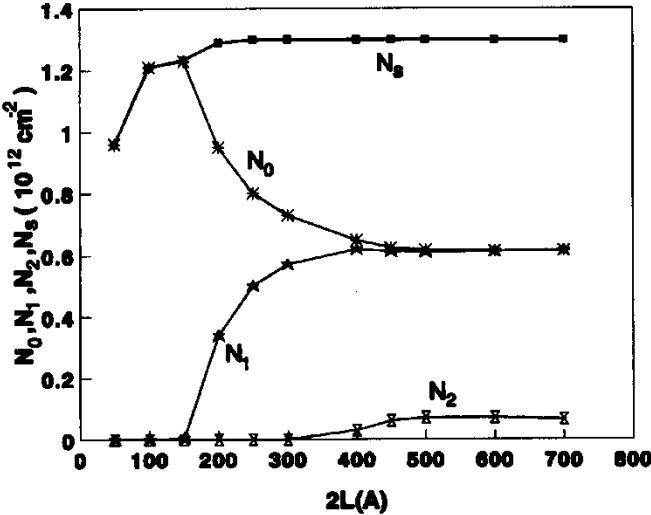
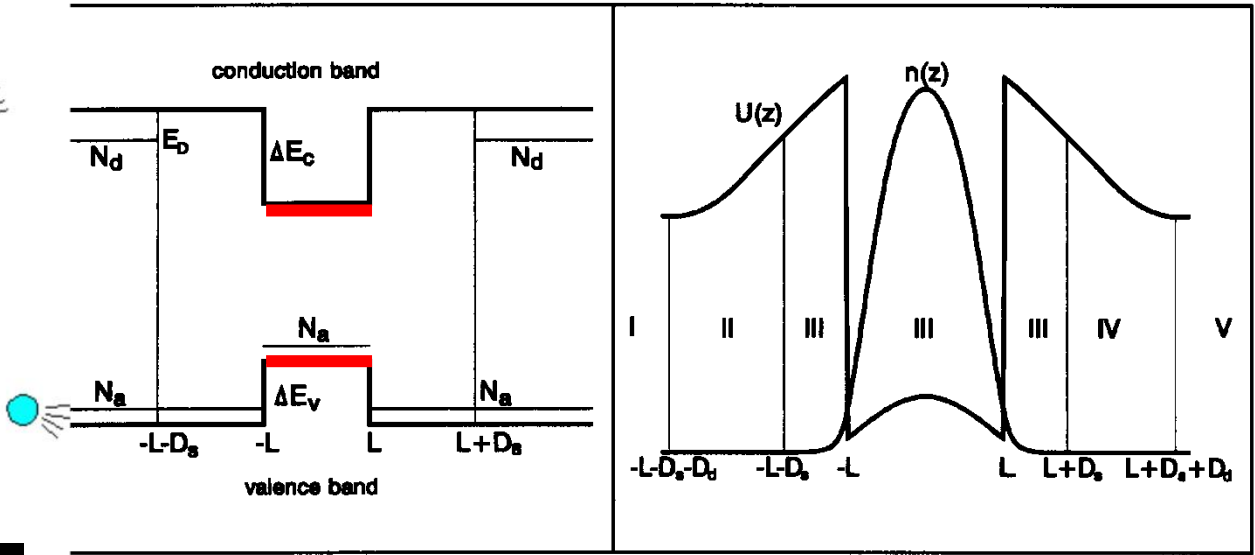
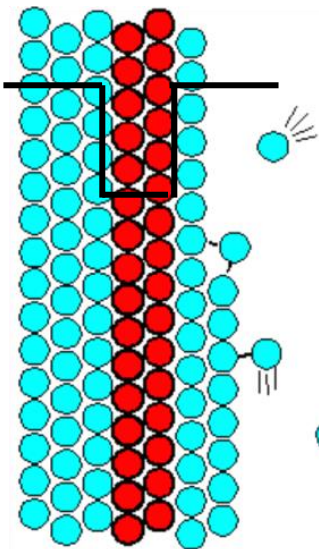


. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται πολύπλοκες «**τεχνητές δομές**» οι οποίες συνίστανται από πολυστρωματικά (**ετεροεπιταξιακά**) και διαφορετικού είδους υλικά, π.χ. ημιαγωγοί GaAs πάνω σε $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Επίσης ηλεκτρικά ενεργά άτομα (**προσμίξεις**) άλλων στοιχείων π.χ. Si ή Be στο GaAs, μπορούν να εισαχθούν σε διάφορα στρώματα μητρικού στρώματος χρησιμοποιώντας πηγές μοριακών δεσμών αυτών των στοιχείων.



AlGaAs / GaAs / AlGaAs

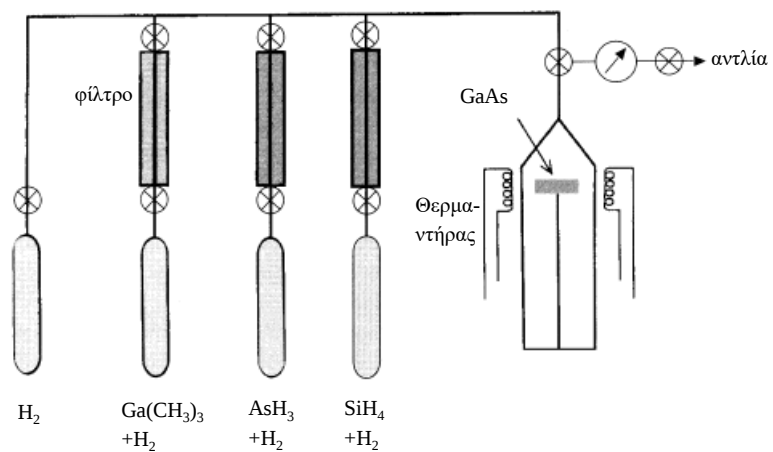


Σύνθετοι ημιαγωγοί, όπως υλικά III-IV (π.χ. GaAs, InP ή GaP), μπορούν επίσης να αναπτυχτούν επιταξιακά υπό μορφή μονοκρυσταλλικών υμενίων χρησιμοποιώντας Θερμική-Χημική Εναπόθεση Ατμού, αλλά στην περίπτωση αυτή τα αρχικά υλικά είναι αέρια οργανικά μόρια.

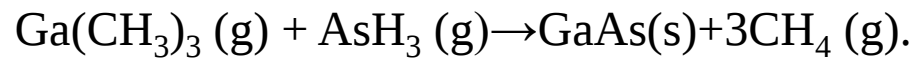
Αυτή η εκδοχή της Θερμικής-Χημικής Εναπόθεσης Ατμού, ονομάζεται *Μεταλλο-οργανική-Χημική Εναπόθεση Ατμού*.

Π.χ. για την σύνθεση υμενίων GaAs, μπορούν να χρησιμοποιηθούν trimethylgallium $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ (g) και AsH_3 (g) ως αρχικά υλικά:





Σχηματική αναπαράσταση μιας διάταξης ανάπτυξης
Μεταλλο-οργανικής-Χημικής Εναπόθεσης Ατμού.



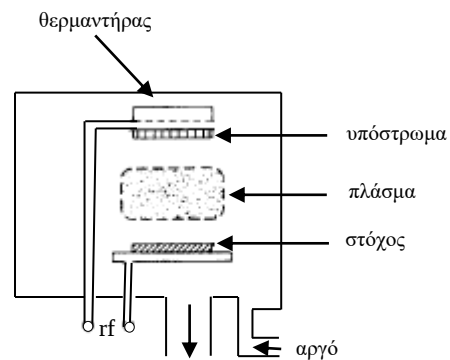


Η Μεταλο-οργανική-Χημική Εναπόθεση Ατμού, σε σύγκριση με την Επιταξία Μοριακής Δέσμης, έχει **το πλεονέκτημα** ότι η διάταξη είναι φτηνή και ότι η ροή των διαφόρων ατόμων ελέγχεται με ρυθμιστές ροής αερίου.

Το **μειονέκτημα** όμως είναι το γεγονός ότι πρέπει να ανταλλάσσεται ολόκληρη η πηγή του αερίου όταν θέλουμε να φτιάξουμε υμένα διαφορετικής σύνθεσης. Ο σχετιζόμενος με αυτή τη διαδικασία χρόνος ανταλλαγής καθορίζει το ελάχιστο πάχος του υμένιου.

Το γεγονός όμως ότι ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε χαμηλή πίεση αερίου, επιτρέπει στο χρόνο εναλλαγής να μειωθεί αισθητά έτσι ώστε να μπορούν να παραχθούν απότομες ετεροεπαφές μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών (π.χ. GaAs και $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) όπως και με την Επιταξίας Μοριακής Δέσμης.

Τέλος, στην κατηγορία αυτή ανήκει και η μέθοδος ιοντοβολής (**sputtering**) με την οποία, αφαιρείται από ένα στερεό (στόχο) υλικό βομβαρδίζοντάς το με ενεργητικά ιόντα που προέρχονται από ένα ηλεκτρικό, χαμηλής πίεσης πλάσμα. Το εκτινασσόμενο υλικό από τον στόχο, υπό μορφή ιονισμένων ατόμων ή συσσωματωμάτων ατόμων, περνά σε ένα υπόστρωμα όπου αποτίθεται το υμένιο του υλικού του στόχου.



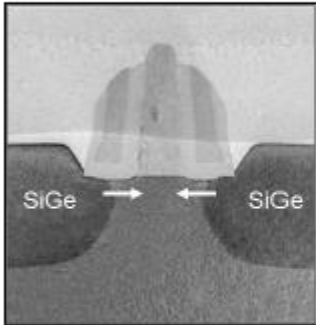
Σχηματική αναπαράσταση ενός θαλάμου sputtering.

Μέχρι ποια διάσταση θα μπορούμε να μειώνουμε τις διαστάσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων;

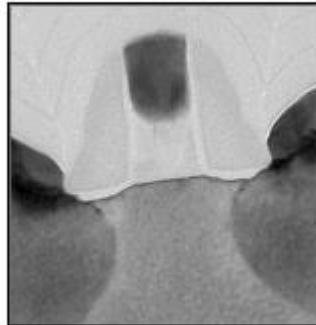
- Μέχρι πότε θα μπορούμε να μειώνουμε τις διαστάσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων; Σήμερα οι διαστάσεις των τρανζίστορ έχουν φτάσει σε οριακό σημείο (μερικά νανόμετρα) όπου μια μεγαλύτερη σμήκρυνση θα οδηγούσε σε κβαντικά φαινόμενα καθώς και σε φαινόμενα διαρροής του ρεύματος στην κατάσταση off του τρανζίστορ, έτσι ώστε το τρανζίστορ να μην μπορεί να είναι σε πραγματικά κατάσταση off.
- Καινούργιες κατευθύνσεις έρευνας δημιουργούνται προκειμένου να βρεθούν εναλλακτικοί τρόποι για να μικρύνουν ακόμα περισσότερο τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ένα παράδειγμα είναι να χρησιμοποιηθούν αντί διοξείδιο του πυριτίου ως διηλεκτρικό πύλης του τρανζίστορ, άλλα διηλεκτρικά με μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά όπου θα βοηθούσε στην ανάπτυξη λεπτότερων διηλεκτρικών πύλης. Επίσης να φτιαχτούν τρανζίστορ τρισδιάστατα και όχι επίπεδα όπως είναι σήμερα.
- Επίσης άλλες καινούργιες εντελώς εξωτικές διαδικασίες σε σχέση με την υφιστάμενη τεχνολογία πυριτίου μελετούνται παράλληλα. Όπως η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα ή η χρήση διχαλκογενιδίων και εμπλουτισμένου γραφενίου σε δομές τρανζίστορ FET.
- Όλα αυτά οδηγούν ή έχουν οδηγήσει ήδη την τεχνολογία ανάπτυξης ολοκληρωμένων διατάξεων από την μικροκλίμακα στην νανοκλίμακα. Η ιστορία της νανοηλεκτρονικής έχει ήδη αρχίσει.

Κλιμάκωση της δομής MOSFET.

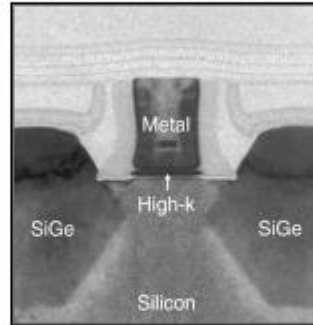
90 nm
2003



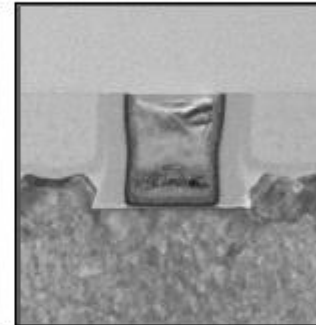
65 nm
2005



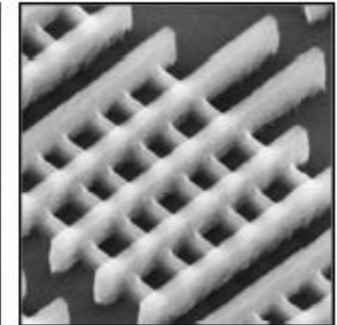
45 nm
2007



32 nm
2009



22 nm
2011



Strained Silicon

High-k Metal Gate

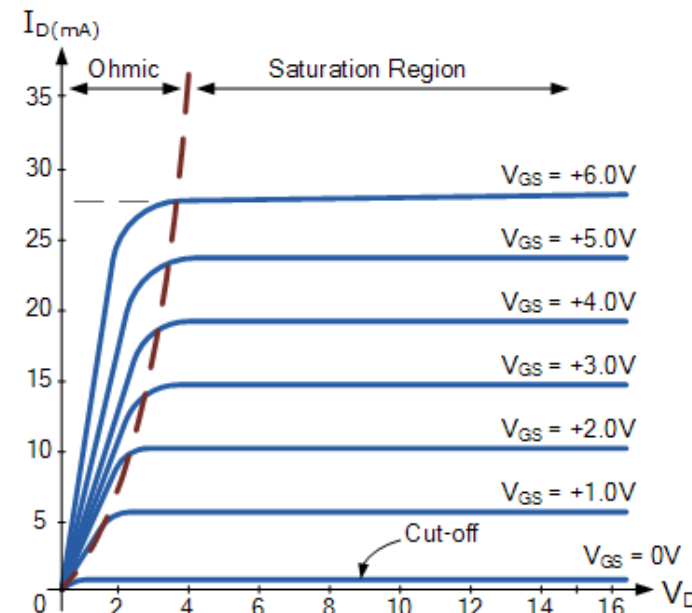
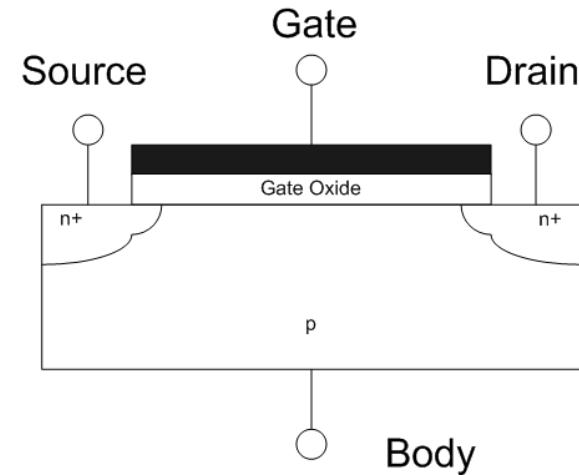
Tri-Gate

- **Τεχνολογία strained silicon.** Ανάπτυξη πυριτίου πάνω σε SiGe. Τα άτομα του πυριτίου απομακρύνονται με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη ευκινησία των φορέων κατά 75%, που οδηγεί σε κατά 35% γρηγορότερη μετάβαση του τρανζίστορ από τη κατάσταση on στην κατάσταση off.
- **Τεχνολογία High-k dielectrics.** Αντικατάσταση του διοξειδίου του πυριτίου ως διηλεκτρικού πύλης με διηλεκτρικό υψηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς k . $C = \frac{k\epsilon_0 A}{t}$. Μείωση του πάχους του διηλεκτρικού οδηγεί σε μεγαλύτερα ρεύματα διαρροής (λόγω φαινομένου σήραγγος) που καταστρέφουν τη λειτουργία του τρανζίστορ. Η χρήση διηλεκτρικού με μεγαλύτερο k οδηγεί στη δυνατότητα μικρότερων παχών διηλεκτρικού κρατώντας τη χωρητικότητα σε τιμές που να μην υπάρχει θέμα ρεύματος διαρροής.

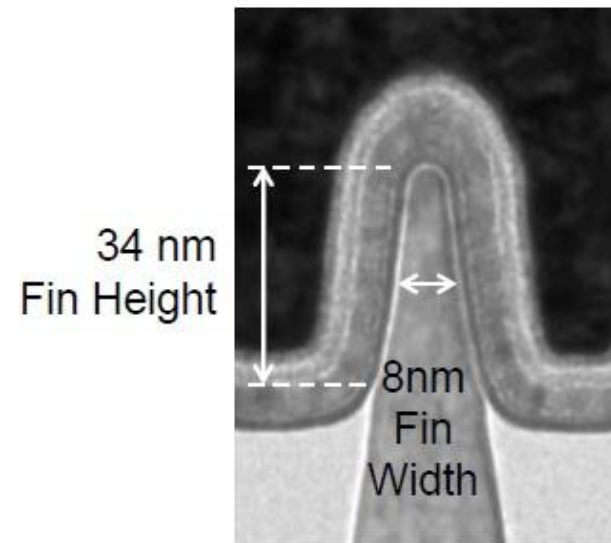
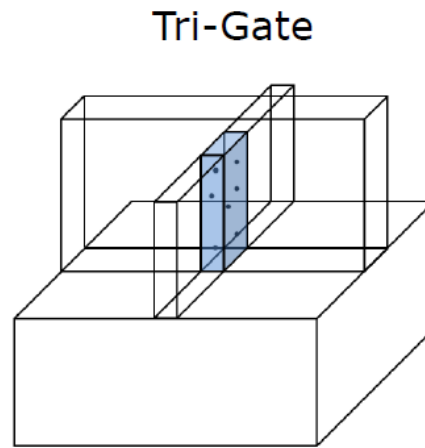
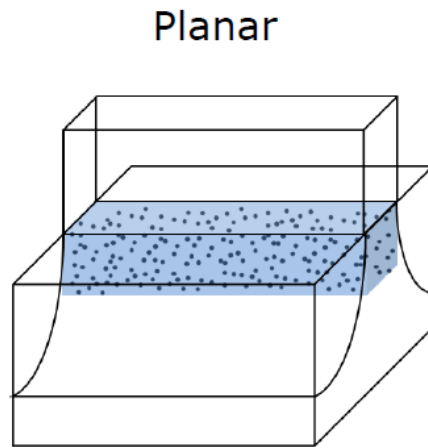
$$I_{D,sat} = \frac{W}{L} C_{inv} \mu \frac{(V_G - V_{th})^2}{2}$$

- Επειδή το $V_G - V_{th}$ πρέπει να μείνει σε ορισμένα όρια, αφού το V_G δεν μπορεί να μεγαλώσει πολύ για να μην δημιουργήσει μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο στο οξείδιο (πιθανή κατάρρευση)

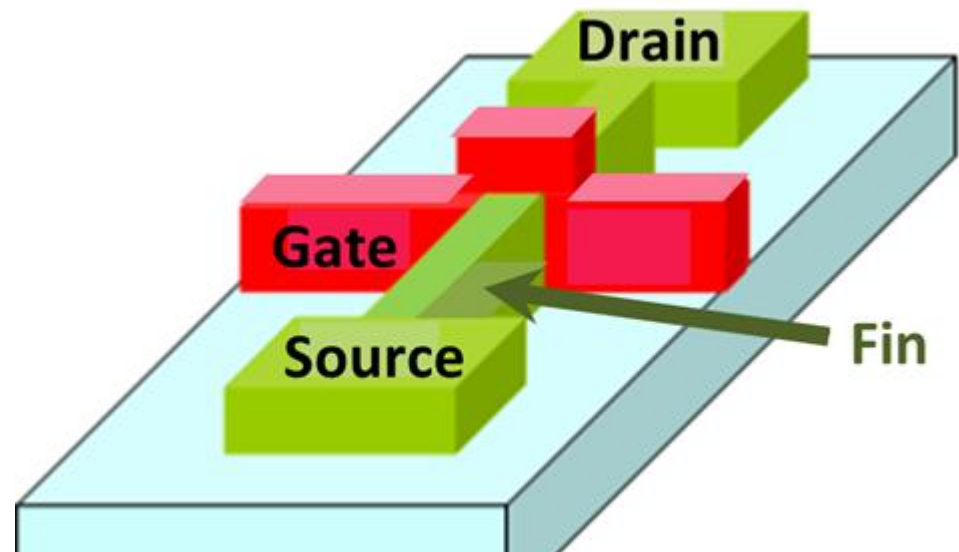
Επίσης και το V_{th} δεν μπορεί να γίνει μικρότερο από κάποια τιμή (200 mV) . Άρα μπορούμε να μεταβάλλουμε τα υπόλοιπά.



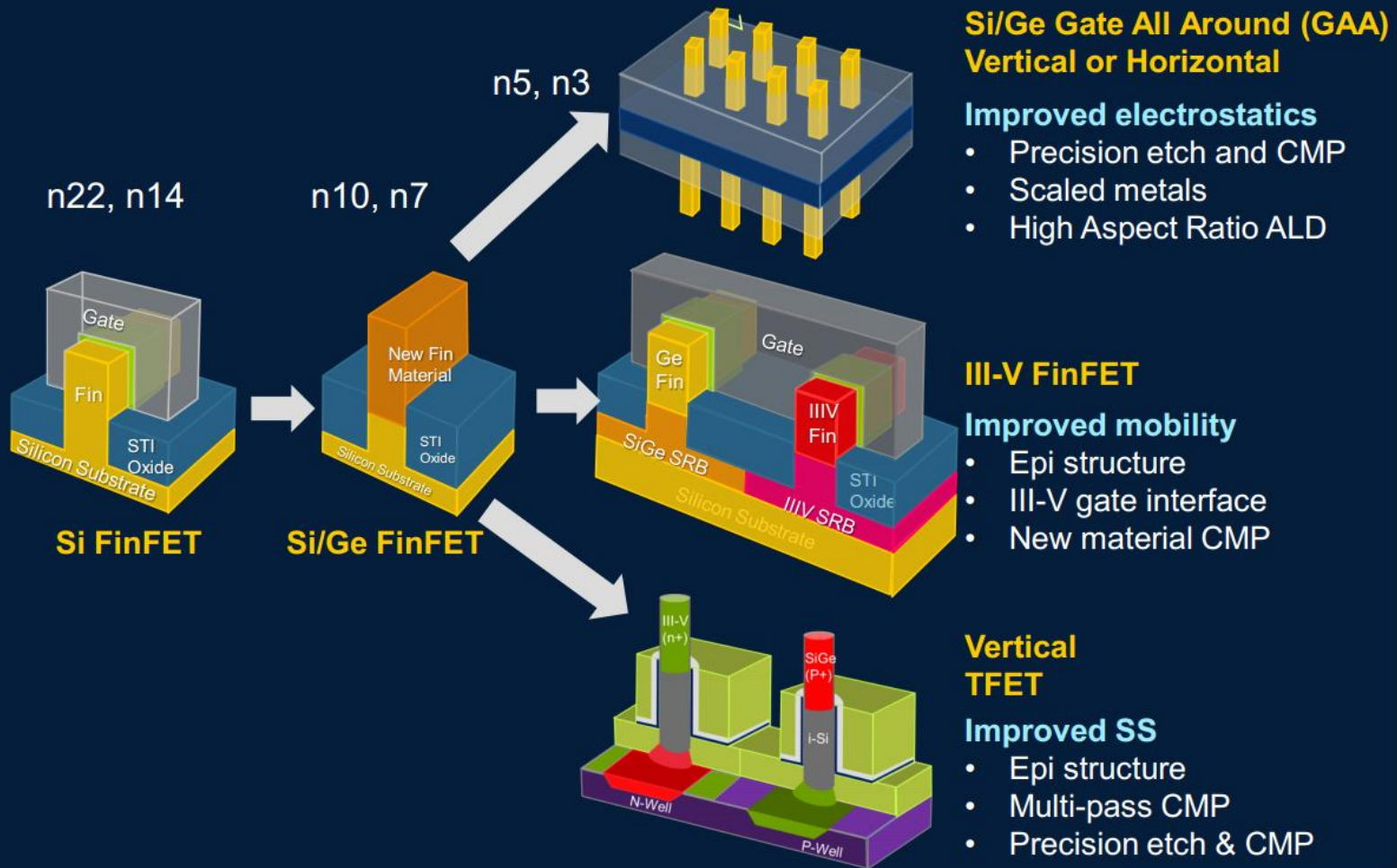
Σύγκριση δομών MOSFET.



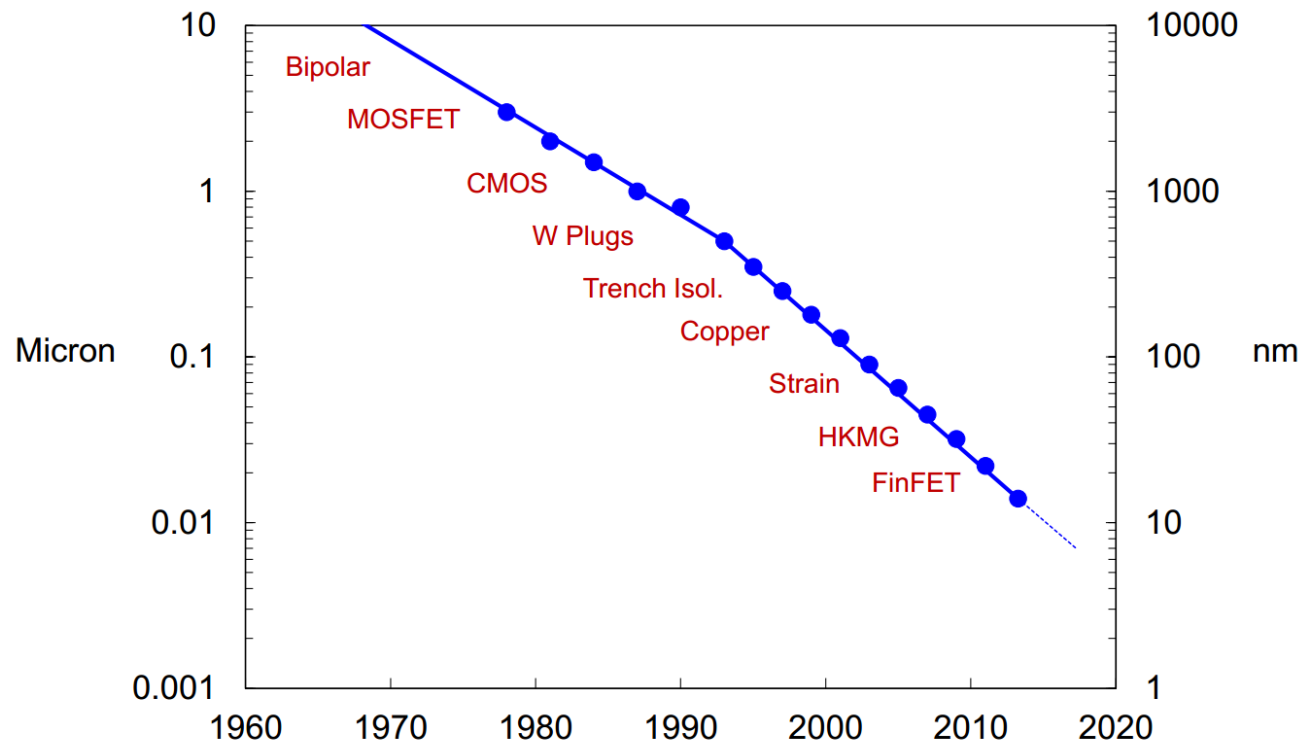
- **Τεχνολογία FinFET/Tri-Gate.** Ανάπτυξη πυριτίου τρισδιάστατα σε μορφή πτερυγίου (fin) (πηγή-καταβόθρα) και περιτύλιξη της πύλης γύρω από το κανάλι πυριτίου. Επιτυγχάνεται μείωση του μεγέθους του τρανζίστορ αλλά το πλάτος του καναλιού παραμένει το ίδιο. Επίσης μειώνονται σημαντικά τα ρεύματα διαρροής. Το πάχος του Fin καθορίζει το μήκος του καναλιού.



Transistor Pathway



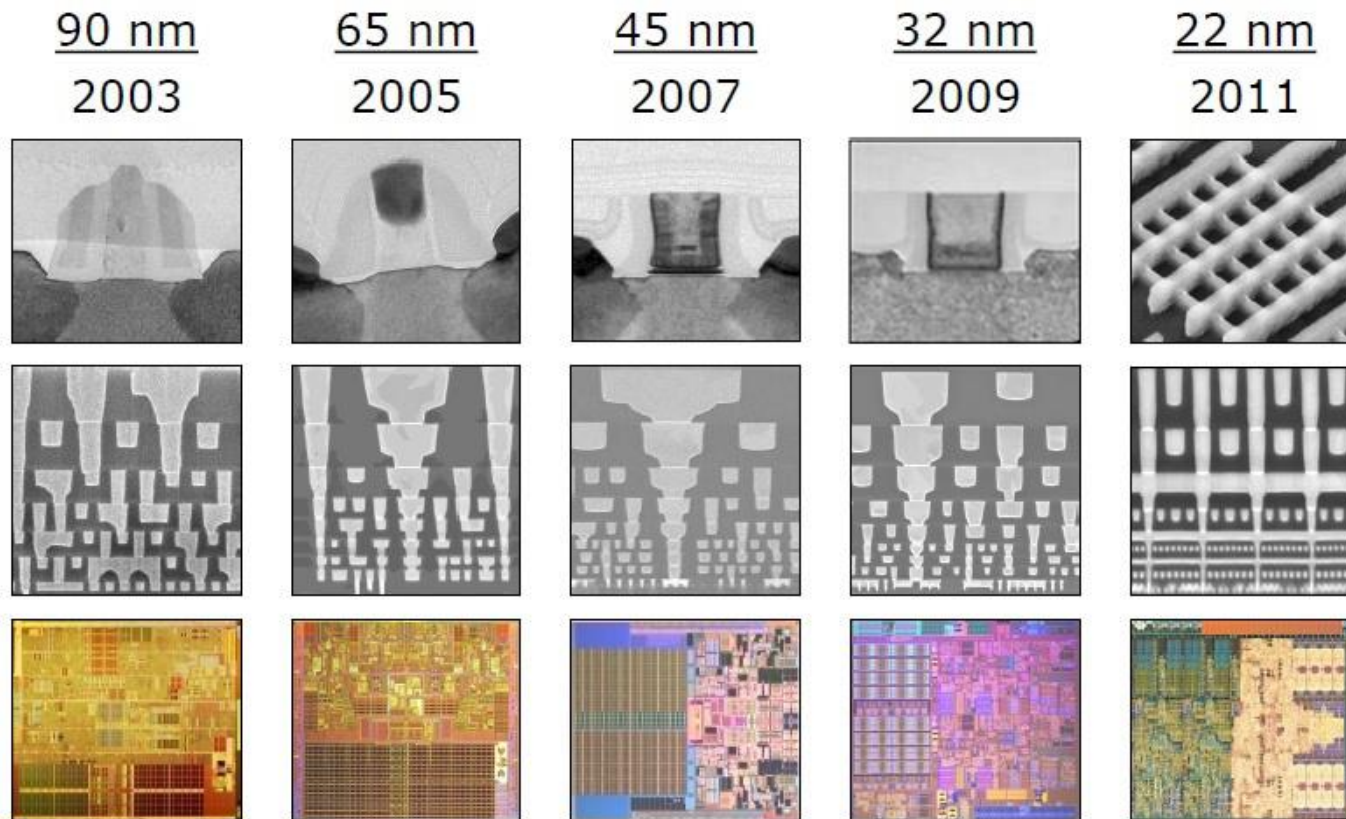
(EP1) Moore's Law Challenges Below 10nm: Technology, Design and Economic Implications



Process/device innovation has always been an indispensable part of scaling

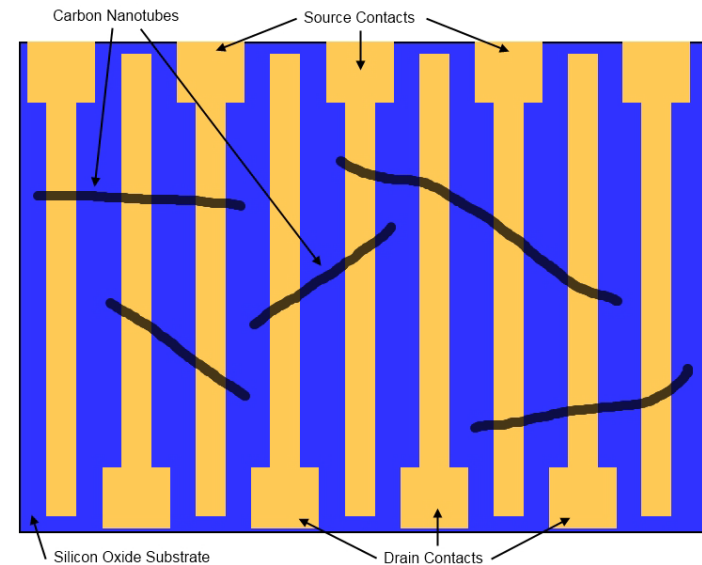
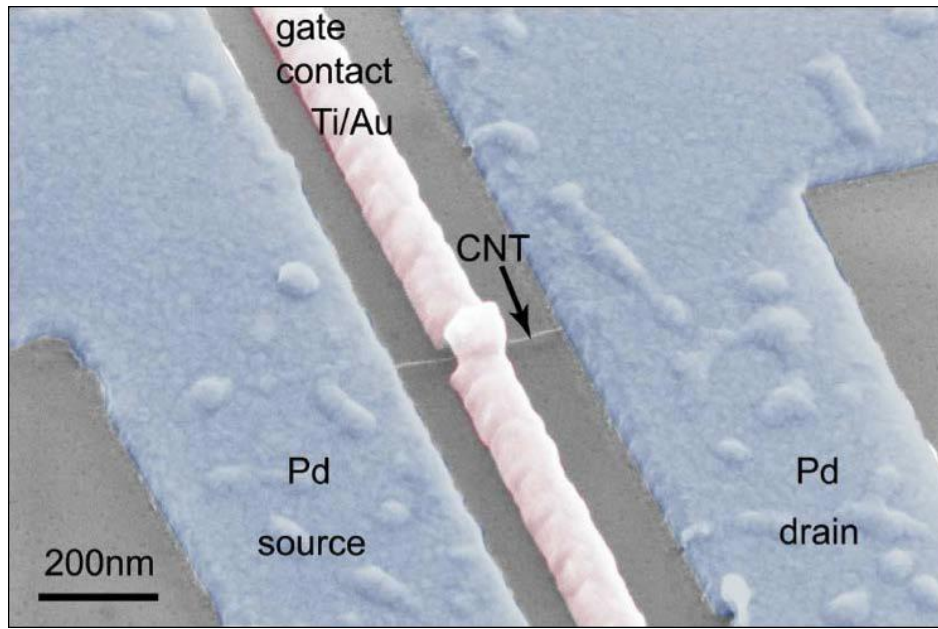
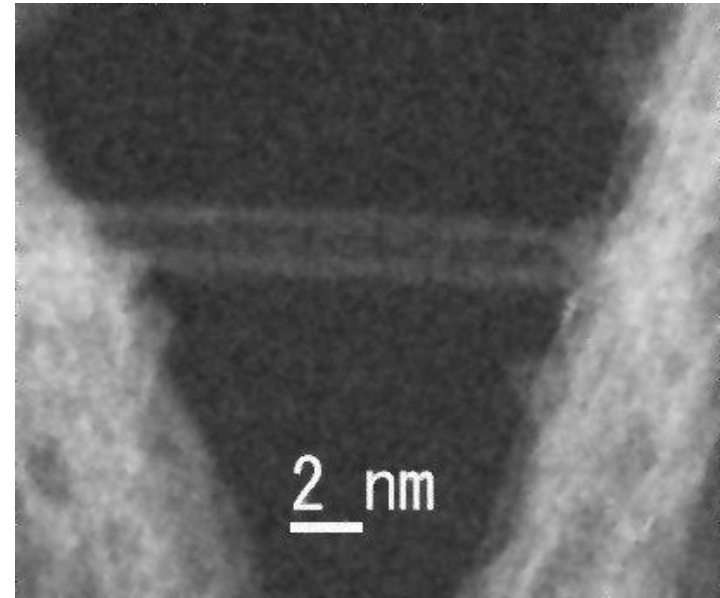
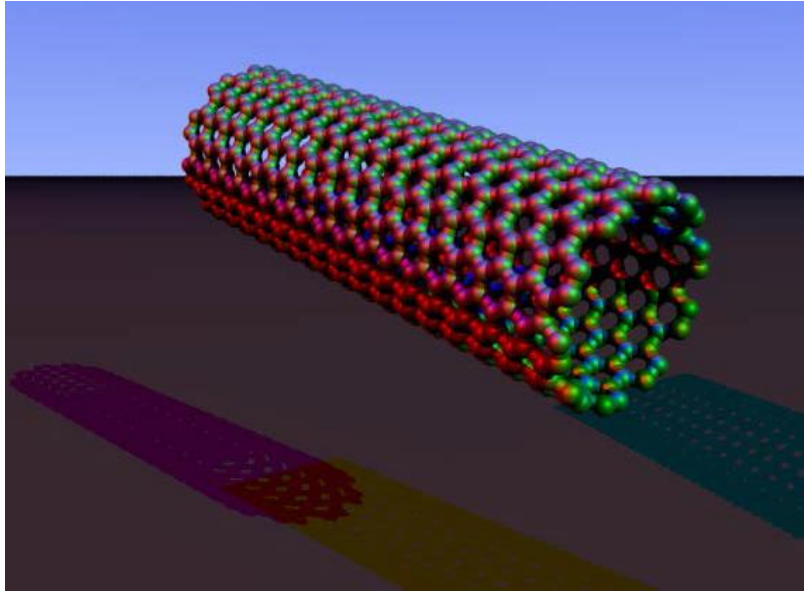
As of 2019, the largest transistor count in a commercially available single-chip microprocessor is 32 billion MOSFETs, in [AMD](#)'s Zen-based [Epyc](#) Rome, which uses [TSMC](#)'s [7 nm FinFET semiconductor manufacturing process](#)

3D δόμηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

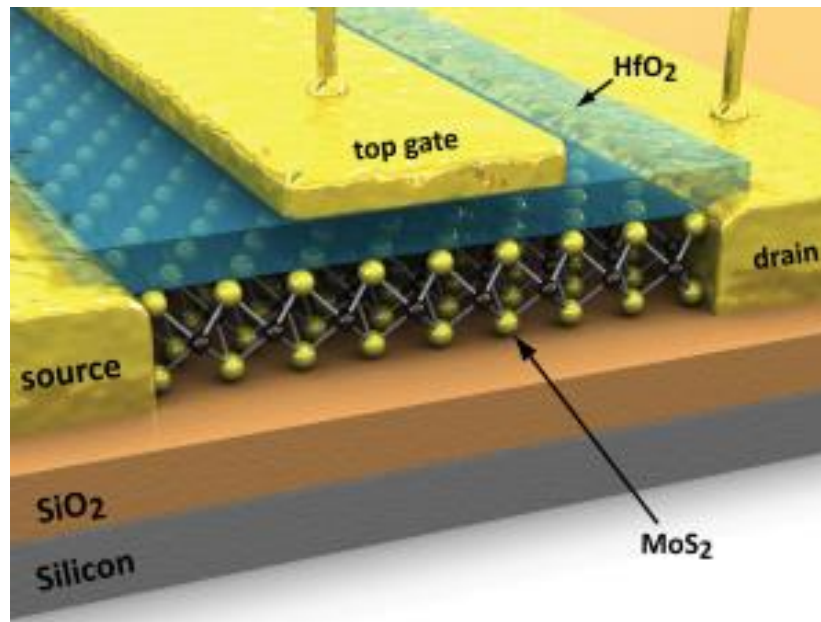
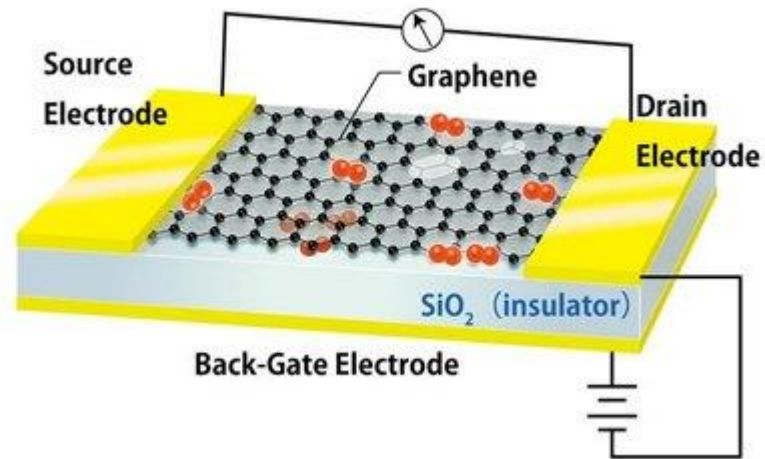


- Περισσότερες λειτουργίες σε μικρότερο χώρο.
- Δυνατότητα ανάπτυξης των διαφορετικών στρωμάτων που αποτελούν το τρισδιάστατο ολοκληρωμένο κύκλωμα με διαφορετικές τεχνολογίες ή και πάνω σε διαφορετικά υποστρώματα, που οδηγεί σε βελτιστοποίηση των συνιστώντων στρωμάτων από ότι αν αναπτύσσονταν σε επίπεδη τεχνολογία πάνω σ'ένα υπόστρωμα. Επίσης συνιστώσες που έχουν κατασκευαστεί με ασύμβατες μεταξύ τους τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν σ'ένα 3D ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- Πιο γρήγορη επικοινωνία μεταξύ των συνιστώντων περιοχών του chip αφού χρειάζεται μικρότερο μήκος.

1-D Νανοσωλήνες άνθρακα με ενεργειακό χάσμα για τρανζίστορ τύπου FET

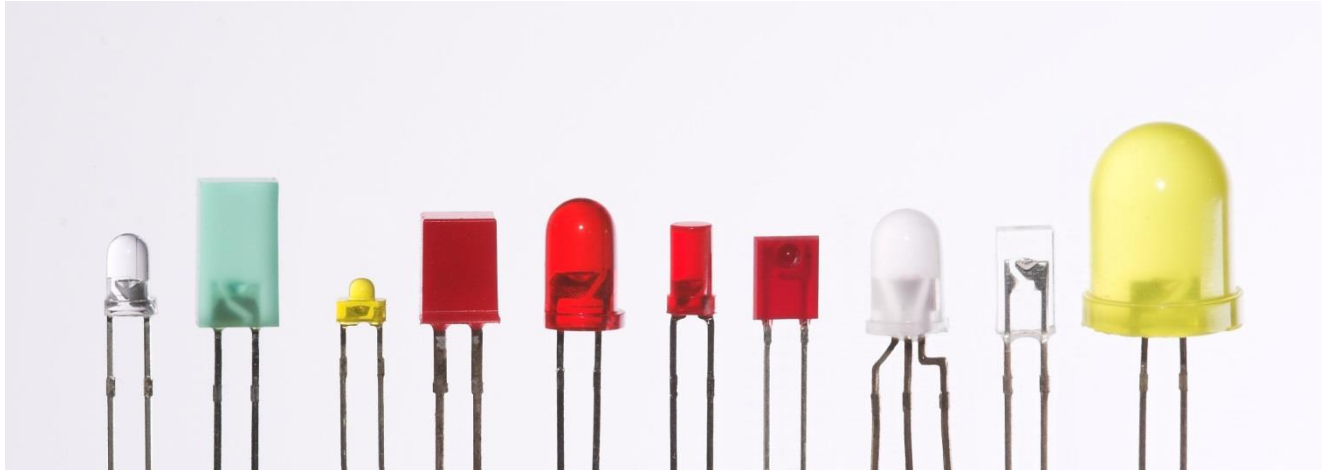


Εμπλουτισμένο γραφένιο και διχαλκογενίδια μετάλλων μετάπτωσης ως κανάλια φορέων για την κατασκευή τρανζίστορ FET



Χρήση των ημιαγωγών στην οπτοηλεκτρονική

- Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των ημιαγωγών είναι η χρήση τους ως δίοδοι φωτοεκπομπής (Light-Emitting Diodes/ LEDs) και laser

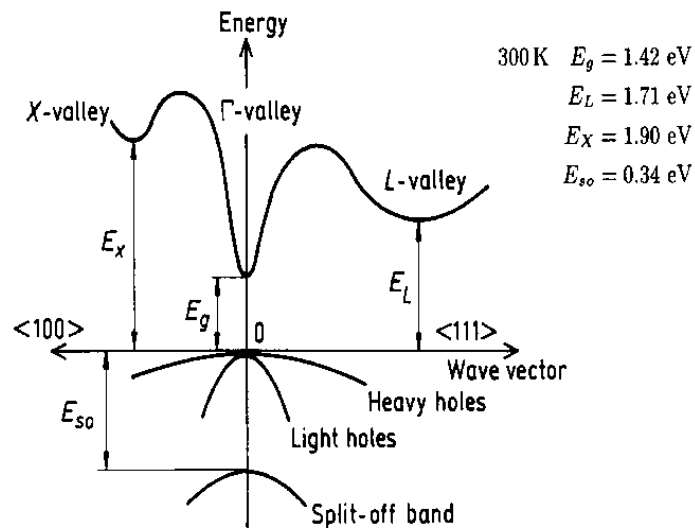


ή ως φωτοδίοδοι για ανίχνευση φωτός και ηλιακές κυψελίδες.

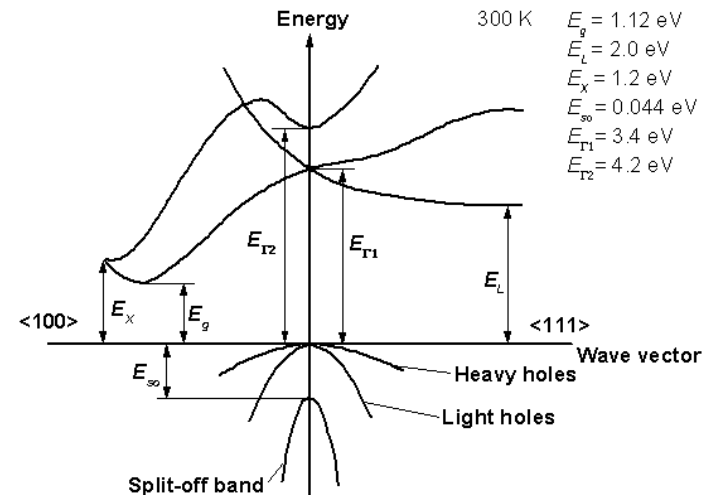


- Υπάρχουν δύο είδη ημιαγωγών:

Ο ημιαγωγός στον οποίο στο διάγραμμα των ενεργειακών καταστάσεων στο χώρο του κυματανύσματος k , E - k , το μέγιστο της ζώνης σθένους και το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας αντιστοιχούν στο ίδιο k λέγεται **ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού χάσματος** (πχ GaAs). Στην αντίθετη περίπτωση λέγεται **ημιαγωγός έμμεσου ενεργειακού χάσματος** (πχ Si).



Άμεσο ενεργειακό χάσμα-GaAs

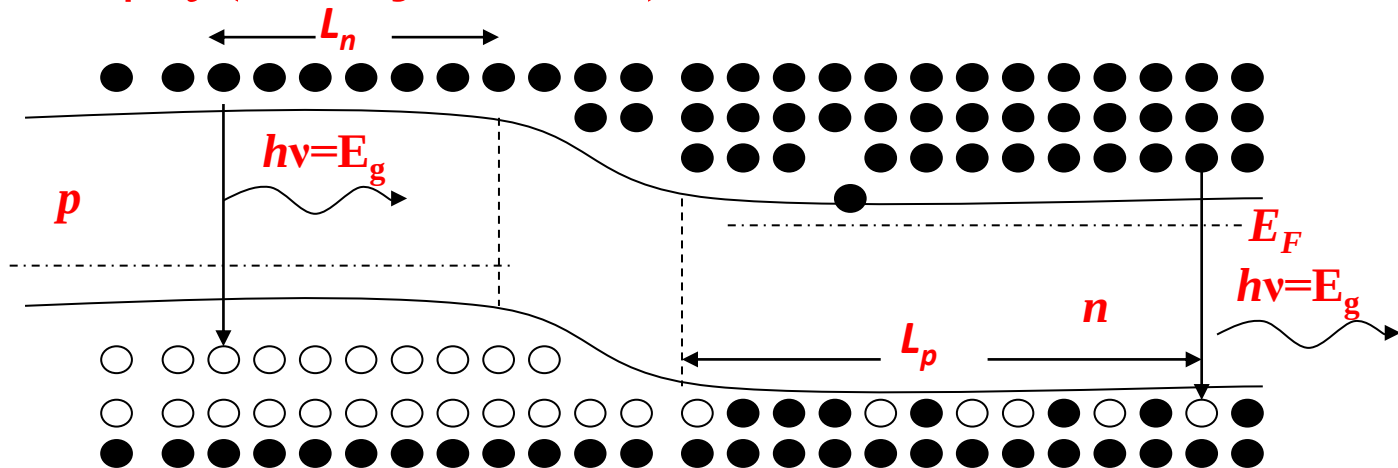


Έμμεσο ενεργειακό χάσμα-Si

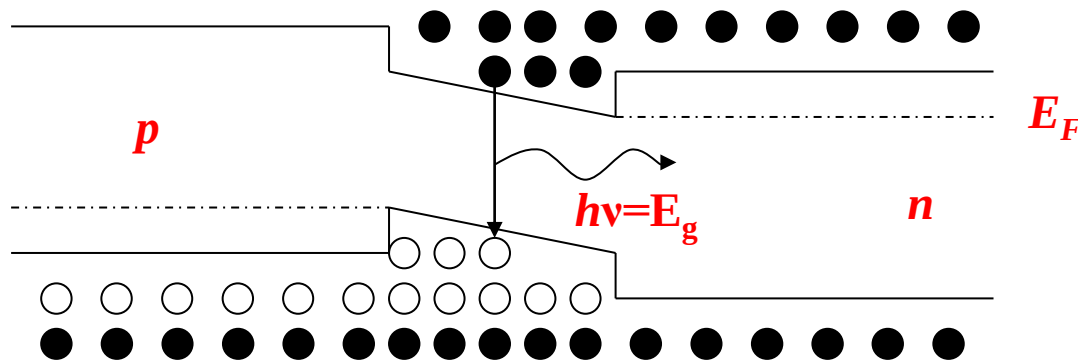
- Όταν ένα ηλεκτρόνιο απορροφήσει ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα μεταπηδά από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας μια οπή στη ζώνη σθένους. Όταν αποδιεγερθεί τότε λέμε ότι έχουμε επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής.
- Στην περίπτωση του ημιαγωγού άμεσου ενεργειακού χάσματος όλη η ενέργεια κατά την επανασύνδεση μετατρέπεται σε φως με ενέργεια ίση με το ενεργειακό χάσμα. Ημιαγωγοί άμεσου ενεργειακού χάσματος χρησιμοποιούνται σε οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές.
- Στην περίπτωση του ημιαγωγού έμμεσου ενεργειακού χάσματος μέρος της ενέργειας κατά την αποδιέγερση μετατρέπεται σε ταλαντώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος δηλαδή σε φωνόνια, με άλλα λόγια σε θερμότητα.

Δίοδος φωτοεκπομπής-Light Emitting Diode, LED

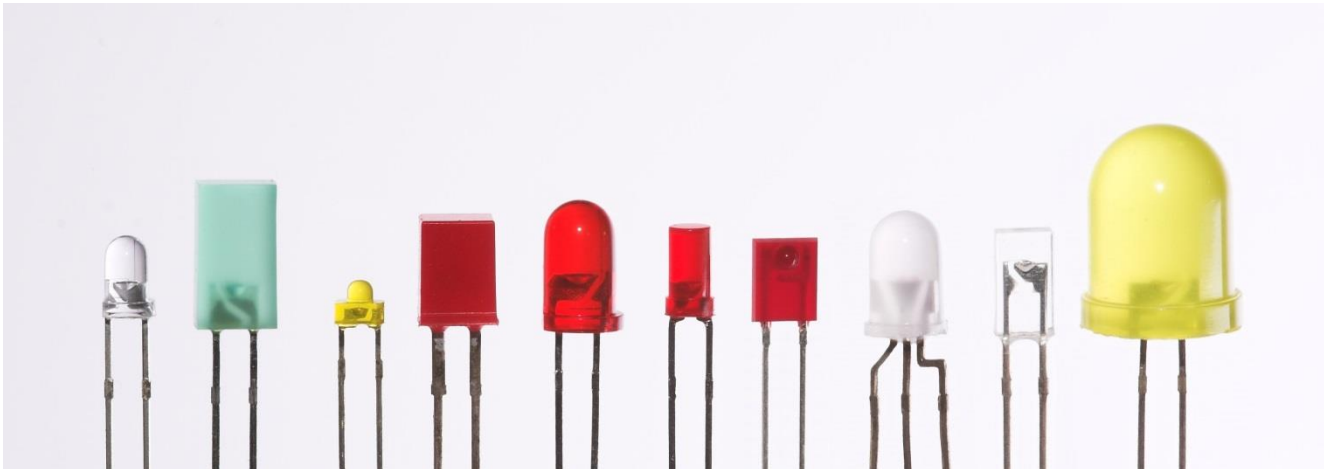
Σε μια επαφή p - n που αποτελείται από ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού χάσματος (πχ GaAs) όταν εφαρμοστεί ορθή πόλωση ηλεκτρόνια από την περιοχή n και οπές από την περιοχή p εγχέονται στην ενεργό περιοχή της διόδου και επανασυνδέονται εκπέμποντας φως με ενέργεια ίση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Αυτές οι διατάξεις είναι γνωστές ως **LED-Light Emitting Diodes** και επειδή η περιοχή p και η περιοχή n είναι από τον ίδιο ημιαγωγό λέγονται **ομοεπαφές (homojunctions)**.

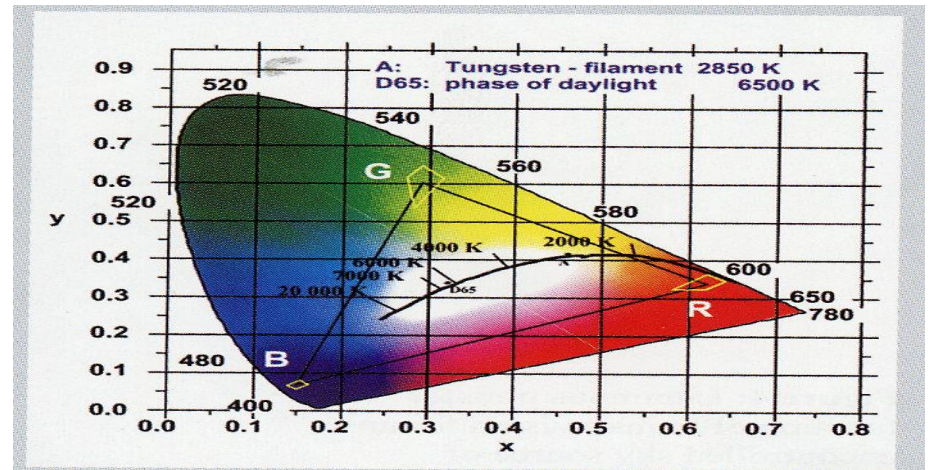
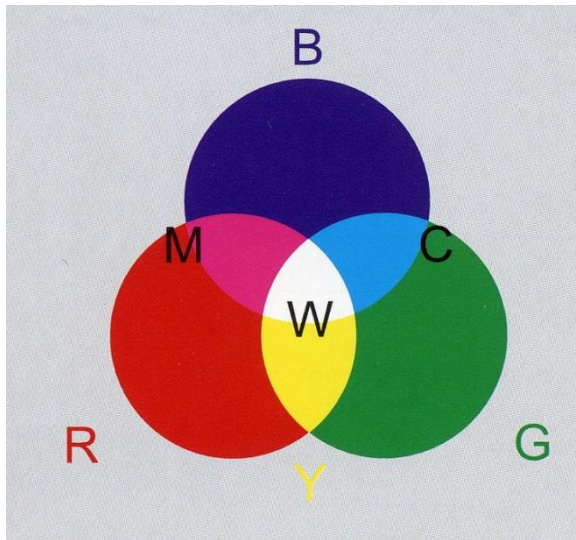


Για εκπομπή φωτός με υψηλή ένταση προτιμούνται οι **δίοδοι ετεροεπαφής** και όχι οι απλές ομοεπαφές. Οι δίοδοι ετεροεπαφής αποτελούνται από δύο ημιαγωγούς με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Δηλαδή ο ημιαγωγός μικρότερου ενεργειακού χάσματος βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα του ημιαγωγού μεγαλύτερου ενεργειακού χάσματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι φορείς εγχέονται και περιορίζονται πολύ εύκολα στο χώρο του ημιαγωγού μικρότερου ενεργειακού χάσματος και έτσι η επανασύνδεση τους είναι πιο αποτελεσματική από ότι στην περίπτωση της ομοεπαφής.



- Οι δίοδοι LED σήμερα καλύπτουν φάσμα από το κοντινό υπέρυθρο έως το κοντινό υπεριώδες. Οι δίοδοι LED χρησιμοποιούνται ως πηγές φωτός σε διάφορες εφαρμογές. Από displays (εφαρμογές απεικόνισης), οθόνες, laser pointers, DVD players μέχρι και φωτεινές πηγές σε δίκτυα LAN (local area communication networks) και οπτικές τηλεπικοινωνίες.
- Μια άλλη κατηγορία LEDs είναι αυτές λευκού φωτός για χρήση ως πηγών φωτός όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως ή φθορισμού. Η βασική ιδέα είναι η ανάμειξη περισσότερων από ένα συμπληρωματικών χρωμάτων.

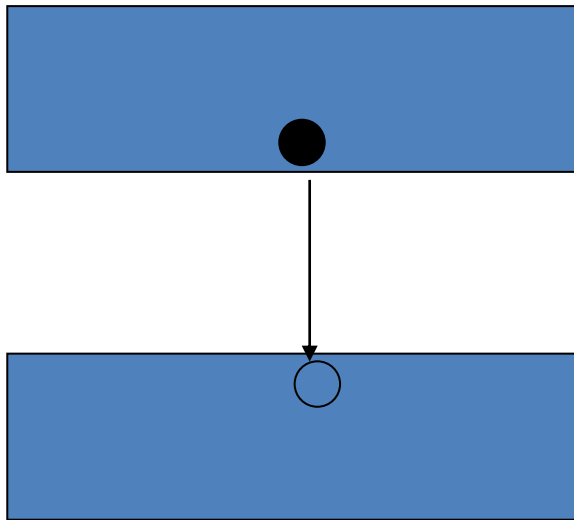




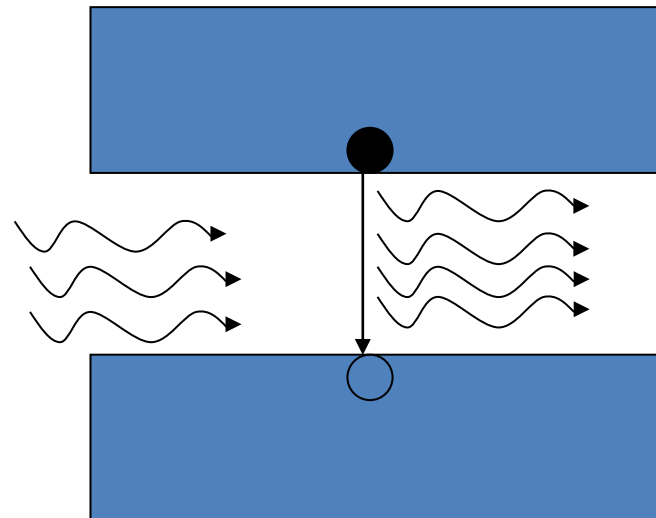
Laser ημιαγωγών

Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή

Στις διόδους LED η εκπομπή οφείλεται στη διαδικασία της **αυθόρμητης εκπομπής (spontaneous emission)**. Στις διόδους λέιζερ οφείλεται στην διαδικασία της **εξαναγκασμένης εκπομπής (stimulated emission)**. Η εξαναγκασμένη εκπομπή παρέχει φασματική καθαρότητα στην φωτονική έξοδο, παρέχει σύμφωνα φωτόνια, και προσφέρει επίδοση υψηλής ταχύτητας.



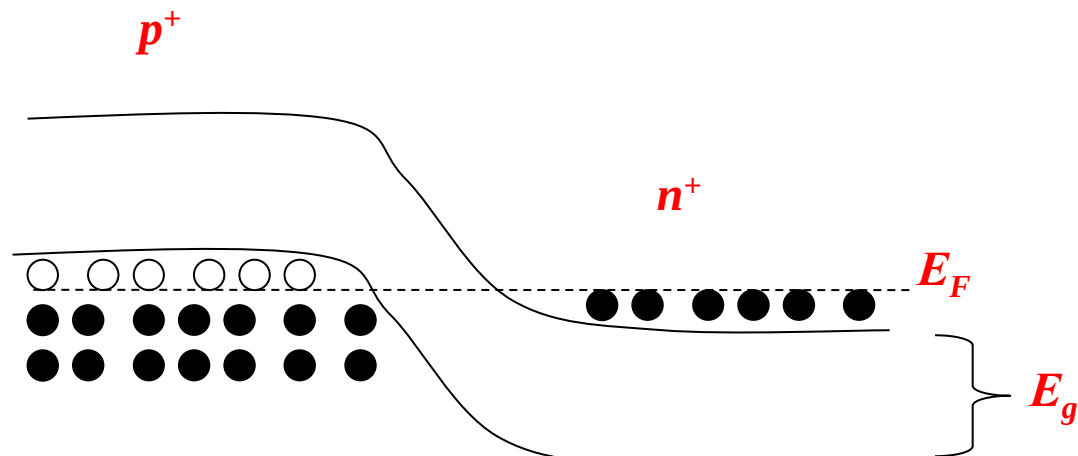
Αυθόρμητη Εκπομπή



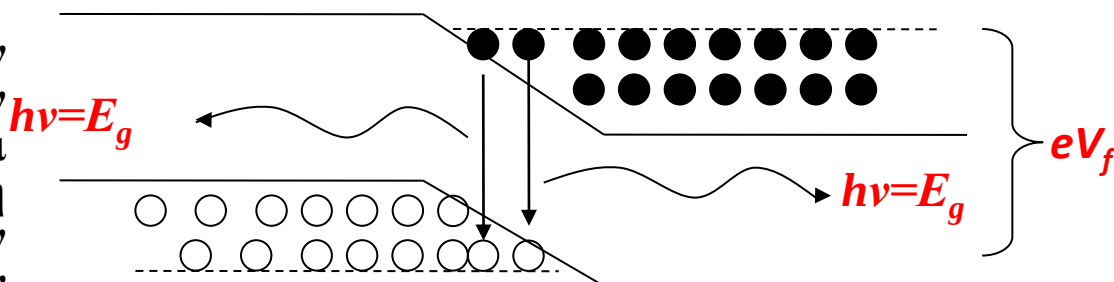
Εξαναγκασμένη Εκπομπή

Προϋποθέσεις για εξαναγκασμένη εκπομπή

- Δημιουργία **αντιστροφής πληθυσμού**. Αυτό επιτυγχάνεται με την ορθή πόλωση μιας επαφής p^+-n^+ . Η περιοχή αντιστροφής πληθυσμου ονομάζεται **ενεργός περιοχή**. Στην περιοχή αυτή τα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν μεγάλη πιθανότητα να επανασυνδεθούν (αυθόρμητη εκπομπή) και έτσι να εκπέμψουν φωτόνια με την χαρακτηριστική ενέργεια του χάσματος.
- Περιορισμός φωτονίων στην ενεργό περιοχή. Τα φωτόνια στην ενεργό περιοχή που εκπέμπονται κατά την αυθόρμητη εκπομπή μπορούν να προκαλέσουν την επανασύνδεση και άλλων ηλεκτρονίων και οπών με αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων με την ίδια ενέργεια και την ίδια φάση.



Δίοδος p^+-n^+ σε κατάσταση ισορροπίας

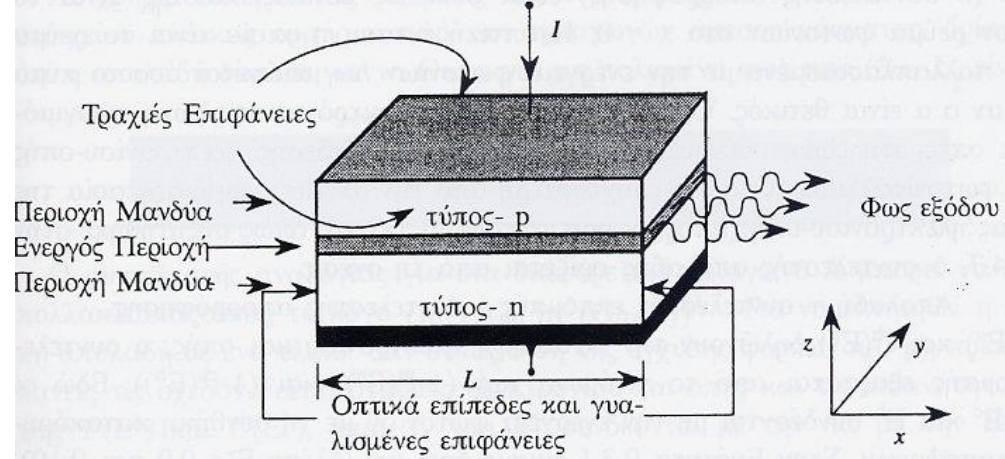


Δίοδος p^+-n^+ με εφαρμογή ορθής πόλωσης V_f

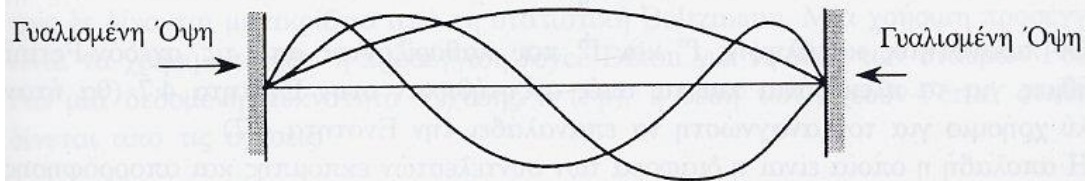
Οπτική κοιλότητα

Ο τρόπος περιορισμού των φωτονίων ορισμένης ενέργειας, που εκπέμπονται κατά την διαδικασία αυθόρμητης εκπομπής, στην περιοχή του ημιαγωγού γίνεται με την κατάλληλη επιλογή του δείκτη διάθλασης που αντιστοιχεί στην ενεργό περιοχή καθώς και στις περιοχές εκατέρωθέν της. Αφού τα φωτόνια είναι τώρα περιορισμένα στην ενεργό περιοχή με τη χρήση κατάλληλα σχεδιασμένης οπτικής κοιλότητας μπορούμε να αυξήσουμε τον αριθμό των φωτονίων.

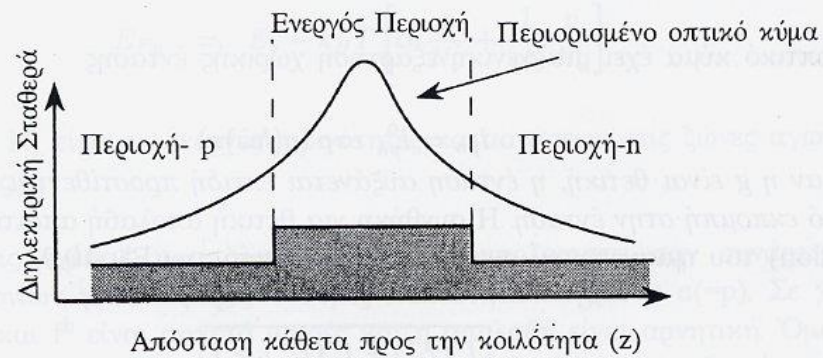
Η οπτική κοιλότητα είναι μια κοιλότητα συντονισμού στην οποία τα φωτόνια υφίστανται πολλαπλές ανακλάσεις στα τοιχώματά της. Έτσι όταν εκπέμπονται φωτόνια μόνο ένα μικρό ποσοστό μπορεί να αφήσει την κοιλότητα. Ως αποτέλεσμα η πυκνότητα των φωτονίων αυξάνει στην κοιλότητα και έτσι έχουμε τη λειτουργία του λέιζερ. **Μια κοιλότητα που χρησιμοποιείται ευρέως στα λέιζερ ημιαγωγού είναι η κοιλότητα Farby-Perot.**



(a)



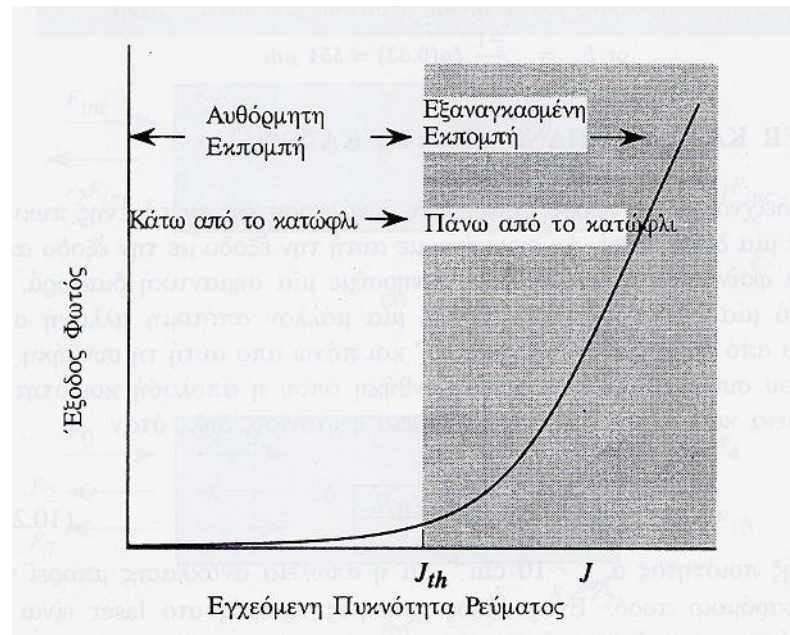
(b)



(c)

Το λείζερ κάτω και πάνω από το κατώφλι

Όταν το ρεύμα της ορθής πόλωσης είναι μικρό κάτω από μια τιμή που ονομάζεται **κατώφλι** τότε τα φωτόνια είτε απορροφώνται στην κοιλότητα είτε χάνονται προς τα έξω. Όταν αυξηθεί το ρεύμα της ορθής πόλωσης πάνω από το κατώφλι τότε ο αριθμός των φωτονίων στην κοιλότητα αυξάνει τόσο ώστε να προκληθεί εξαναγκασμένη εκπομπή και να κυριαρχήσει της αυθόρμητης εκπομπής.

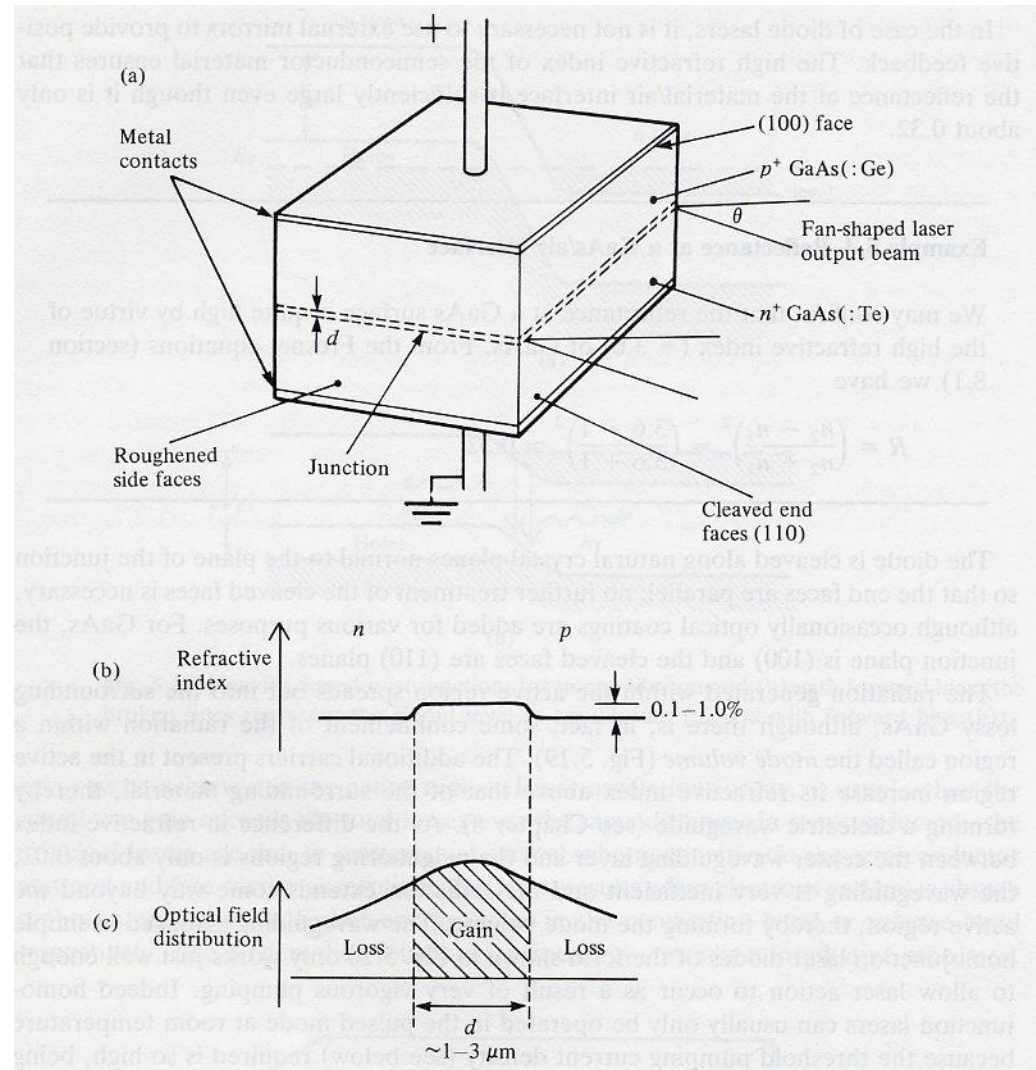


Τρόποι βελτίωσης της απόδοσης των λέιζερ

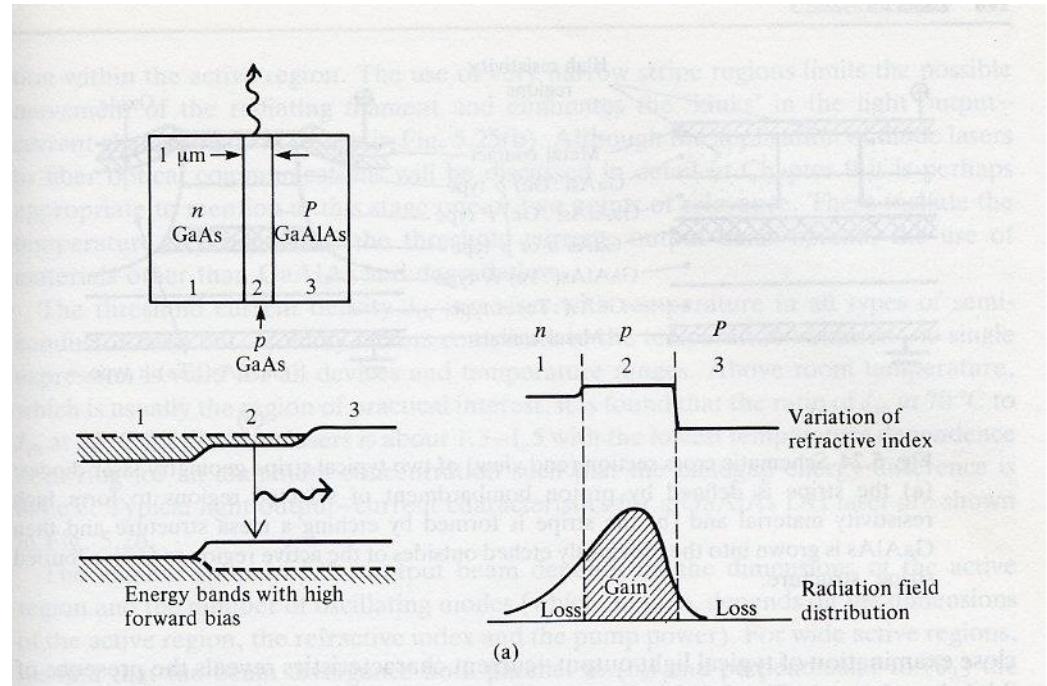
Μια από τις σημαντικές εφαρμογές των ημιαγωγικών λέιζερς είναι στην περιοχή των οπτικών επικοινωνιών. Στο σχεδιασμό νέων δομών λέιζερ στόχος είναι η μείωση της πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου πάνω από το οποίο έχουμε συνθήκες εξαναγκασμένης εκπομπής. Η πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου είναι ανάλογη του πάχους της ενεργού περιοχής που λαμβάνει χώρα η διαδικασία lasing. Είναι επίσης ανάλογη ενός συντελεστή απώλειας των φωτονίων που εκπέμπονται λόγω:

1. διαπέρασης κάποιων από αυτά από τους καθρέφτες της κοιλότητας
2. απορρόφησης και σκέδασης στους καθρέφτες
3. απορρόφησης από τον ημιαγωγό

Στις **διόδους λέιζερ ομοεπαφής** δεν μπορούμε να πετύχουμε μεγάλο εντοπισμό των παραγόμενων φωτονίων μέσα στην ενεργό περιοχή αφού δεν μπορούμε να πετύχουμε σημαντική αλλαγή του δείκτη διάθλασης. Έτσι για να μειώσουμε την πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου θα πρέπει να μειώσουμε την ενεργό περιοχή.

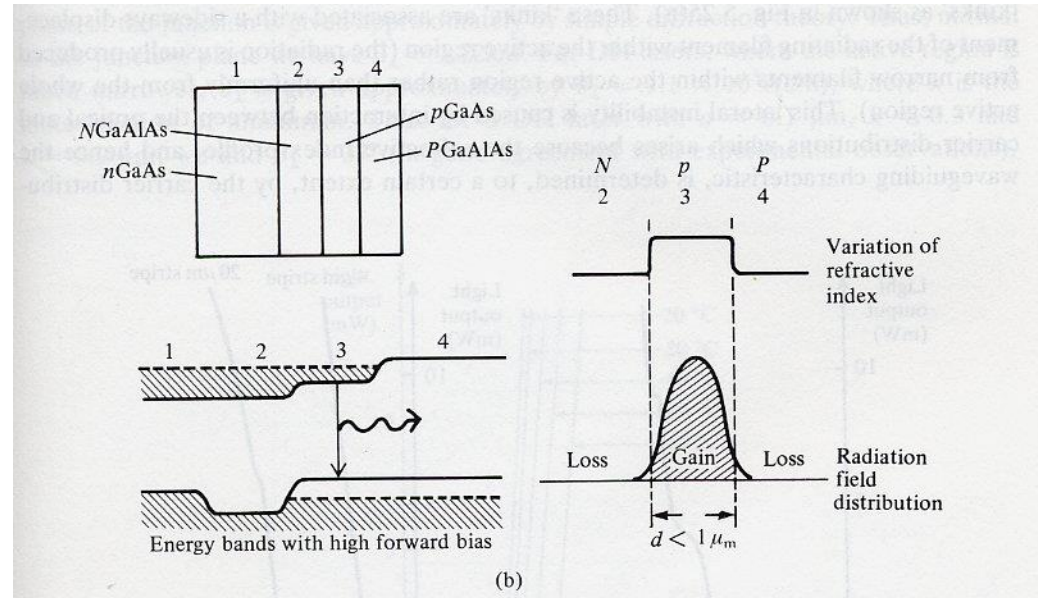


Μια προσέγγιση είναι η χρήση ετεροεπαφών. Στην **μονή ετεροεπαφή (Single Heterojunction, SH)** λόγω της χρήσης διαφορετικών ημιαγωγών πχ GaAs και AlGaAs επιτυγχάνουμε επαρκώς διαφορετικό δείκτη διάθλασης έτσι ώστε να περιορίσουμε σημαντικά τις απώλειες από τη μια μεριά της ενεργού περιοχής

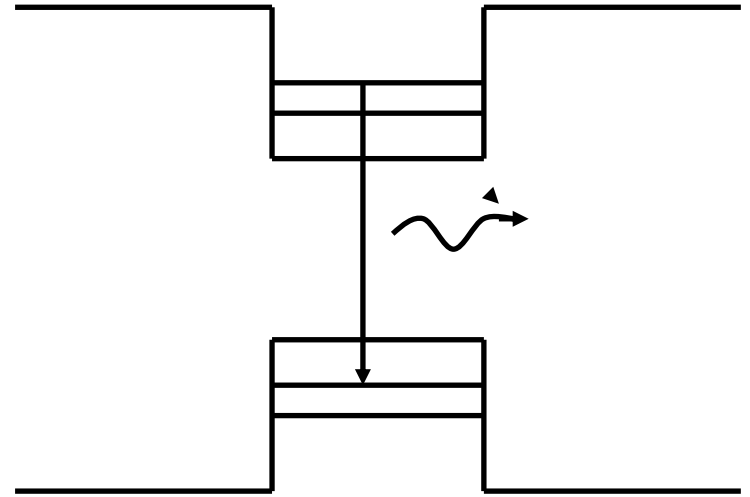


Στη διπλή ετεροεπαφή (Double Heterojunction, DH)

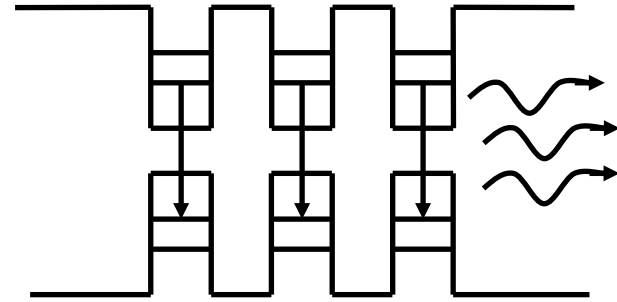
οι δείκτες διάθλασης εκατέρωθεν της ενεργού περιοχής είναι επαρκώς διαφορετικοί σε σχέση με αυτόν της ενεργού περιοχής με αποτέλεσμα να περιορίζονται ακόμα πιο πολύ οι απώλειες εκτός της ενεργού περιοχής. Λόγω της χρήσης ημιαγωγού με μεγαλύτερο χάσμα περιορίζονται και οι απώλειες λόγω απορρόφησης από τον ημιαγωγό.



Ένα άλλο είδος λείζερ είναι αυτό που η ενεργός περιοχή του είναι ένα **κβαντικό πηγάδι**. Σε μια τέτοια δομή μπορεί να επιτευχθεί ευκολότερα αντιστροφή πληθυσμού των φορέων στην ενεργό περιοχή και να πετύχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή με μικρότερες τιμές της πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου από ότι στις δομές διπλής ετεροεπαφής (DH).



Το πλεονέκτημα αυτό όμως της μικρής πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου αναιρείται από το γεγονός ότι λόγω του πολύ μικρού πλάτους της ενεργού περιοχής (μερικά νανόμετρα) ο περιορισμός των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι ανεπαρκής. Ένας τρόπος για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα είναι να χρησιμοποιηθεί **δομή πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών** που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργού περιοχής έτσι ώστε να είναι δυνατός ο αποτελεσματικός περιορισμός των φωτονίων. Με τις δομές αυτές επιτυγχάνεται ακόμα πιο μικρό ρεύμα κατωφλίου σε σχέση με τις δομές διπλής ετεροεπαφής (DH) της τάξης μερικών μιλιαμπέρ.





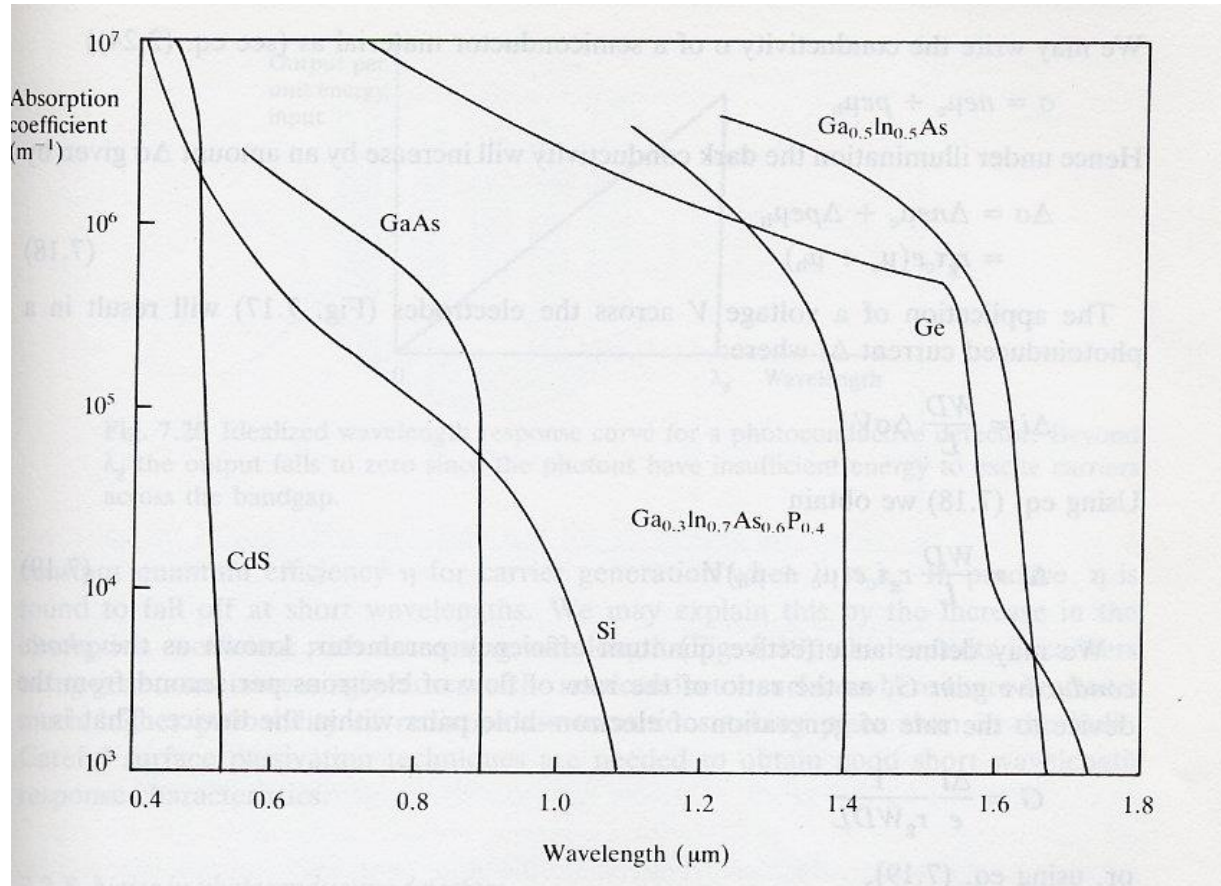
Φωτοαγώγιμοι ανιχνευτές

Η γενική λειτουργία ενός φωτοαγώγιμου ανιχνευτή είναι η μετατροπή των φωτεινών σημάτων σε ηλεκτρικά. Η λειτουργία του ανιχνευτή ημιαγωγού βασίζεται στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας. Η απορρόφηση ενός φωτονίου με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού προκαλεί τη μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και την αντίστοιχη δημιουργία οπής στη ζώνη σθένους. Με τη χρήση κατάλληλων ηλεκτροδίων τα ηλεκτρόνια και οι οπές συλλέγονται και έτσι το φωτεινό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό. Έστω ότι η ακτινοβολία που πέφτει πάνω σε έναν ημιαγωγό είναι μονοχρωματική με ένταση I_0 τότε η έντασή της, I , αφού διαπεράσει τμήμα πάχους D δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \exp(-\alpha D)$$

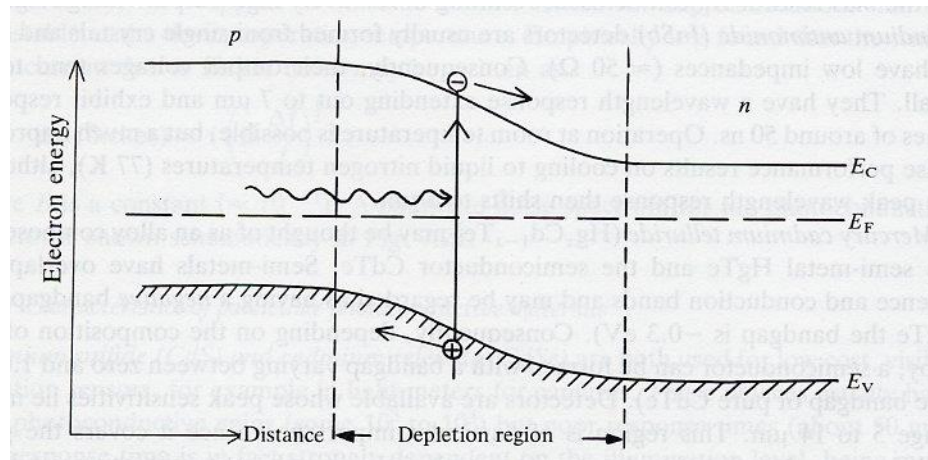
α είναι ο συντελεστής απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό για κάθε μήκος κύματος. Γενικά για μήκος κύματος μεγαλύτερο από αυτό που αντιστοιχεί στο χάσμα του ημιαγωγού το α είναι συγκριτικά μικρό. Για μήκη κύματος μικρότερα από αυτό το α αυξάνει γρήγορα και μπορεί να φτάσει σε τιμές της τάξης των 10^6m^{-1} .

Συντελεστής απορρόφησης για διάφορους ημιαγωγούς



Φωτοανιχνευτές διόδου p-n

Είναι δίοδος p-n σε ανάστροφη πόλωση. Όταν απορροφηθεί ένα φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα τότε στην περιοχή απογύμνωσης της διόδου δημιουργείται ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Το εσωτερικό πεδίο της διόδου στην περιοχή απογύμνωσης προκαλεί την αποσύνδεση του ζεύγους των φορέων με αποτέλεσμα αν η δίοδος είναι σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος να εμφανιστεί τάση μεταξύ των περιοχών p και n. Τότε λέμε ότι η δίοδος είναι σε **φωτοβολταϊκή κατάσταση**. Σε κατάσταση βραχυκυκλώματος ρέει ρεύμα και τότε λέμε ότι η δίοδος βρίσκεται σε **φωτοαγώγιμη κατάσταση**. Η ηλιακή κυψελίδα είναι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ. Το πιο συνηθισμένο υλικό για φωτοдиодους είναι το πυρίτιο.



Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (MEMS).

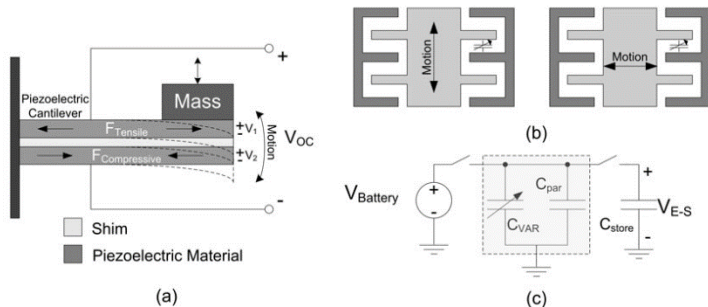
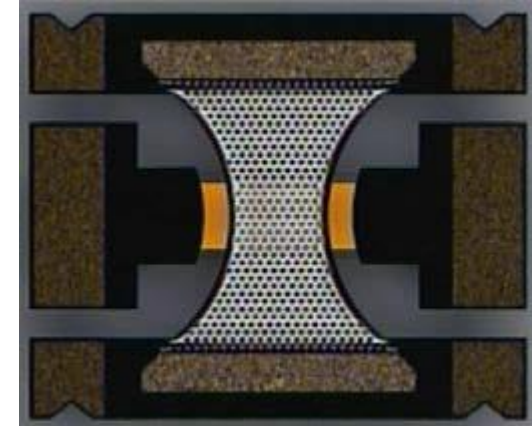
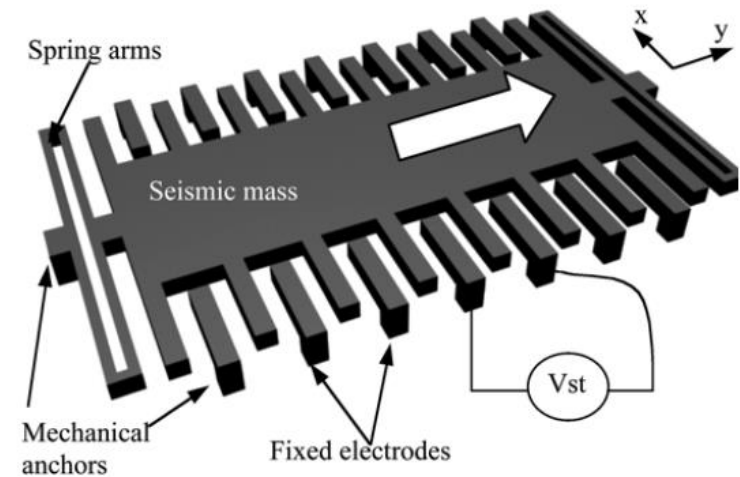
Χρησιμοποιούνται:

Αισθητήρες (sensors)

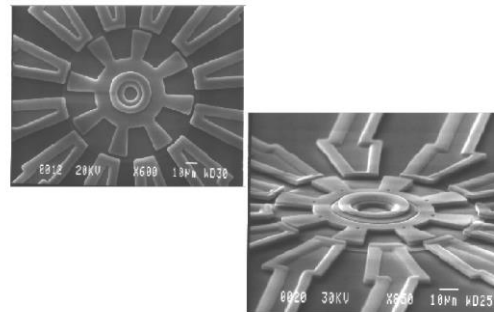
Ενεργοποιητές (actuators)

RF MEMS- Μικροδιακόπτες / φίλτρα

Συλλέκτες ενέργειας (Energy harvesting)



Ηλεκτροστατικά Μικρο-μοτέρ



Βραβεία Nobel στη Φυσική των Ημιαγωγών

The Nobel Prize in Physics 2014

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura

"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"

The Nobel Prize in Physics 2010

Andre Geim and Konstantin Novoselov

"for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene"

The Nobel Prize in Physics 2000

"for basic work on information and communication technology"

Zhores I. Alferov and Herbert Kroemer

"for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and optoelectronics"

Jack S. Kilby

"for his part in the invention of the integrated circuit"

The Nobel Prize in Physics 1977

Philip Warren Anderson, Sir Nevill Francis Mott and John Hasbrouck van Vleck

"for their fundamental theoretical investigations of the electronic structure of magnetic and disordered systems"

The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki and Ivar Giaever

"for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

Brian David Josephson

"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"

The Nobel Prize in Physics 1956

William Bradford Shockley, John Bardeen and Walter Houser Brattain

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"

Συμπεράσματα

- Η συμβολή των Ημιαγωγών στην Μικροηλεκτρονική, τις Τηλεπικοινωνίες και επομένως στην τεχνολογία της πληροφορίας και πιο πρόσφατα στην τεχνολογία των MEMS έγινε εφικτή γιατί προηγήθηκε η μελέτη των φυσικών τους ιδιοτήτων τους.
- Αυτή τη δυνατότητα παρέχει η Φυσική της Στερεάς Κατάστασης ή αλλιώς η Φυσική της Συμπυκνωμένης ύλης.