

Κβαντοφυσική

*Η φυσική των πολύ μικρών στοιχείων
με τις μεγάλες εφαρμογές*

Μέρος 2

ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



Μαθησιακός σταθμός VII: Ημιαγωγοί

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ:



Το Quantum Spin-Off χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση υπό το πρόγραμμα LLP Comenius (540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).
Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti
Επαφή: renaat.frans@khlim.be

Το παρόν υλικό αντικατοπτρίζει τις απόψεις των συγγραφέων και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δεν μπορεί να θεωρηθεί υπεύθυνη για τη χρήση οποιασδήποτε πληροφορίας περιέχεται στο παρόν

Πίνακας περιεχομένων

ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ VII: ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ	17
1 Ενεργειακά επίπεδα στα άτομα	18
2 Όχι όλα στη χαμηλότερη στάθμη	21
3. Ενεργειακά επίπεδα στα στερεά: ζώνες και κενές ζώνες	22
4 Αγωγοί, μονωτές και ημιαγωγοί	23
5 Γεφυρώνοντας το ενεργειακό χάσμα: εμπλουτισμός	24
5.α εμπλουτισμός τύπου n	24
5.β εμπλουτισμός τύπου p	26
6 Δίοδος	27
7 Κρυσταλλοτρίοδος (τρανζίστορ)	29
8 Εφαρμογή: LED	31
9 Εφαρμογή: Ηλιακό κελί	31
10 Εφαρμογές: μελλοντικές προοπτικές	32
11 Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης VII	32

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ:



Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές (CC BY-NC-SA 4.0)

Υπό τους ακόλουθους όρους:

- Αναφορά στον δημιουργό — Πρέπει να κάνετε [κατάλληλη μνεία](#), να παρέχετε σύνδεσμο στην άδεια και [να δηλώνετε τυχόν τροποποιήσεις](#). Αυτό μπορείτε να το κάνετε με οποιονδήποτε εύλογο τρόπο, χωρίς όμως να υπονοείται ότι ο αδειοδότης εγκρίνει εσάς ή τη χρήση σας.
- Μη-εμπορική — Δεν επιτρέπεται η χρήση του υλικού για [εμπορικούς σκοπούς](#).

Μπορείτε να:

- Μοιραστείτε - να αντιγράψετε και να αναδιανείμετε το υλικό με οποιοδήποτε μέσο ή μορφή
 - Προσαρμόσετε - να αναμείξετε, να τροποποιήσετε και να δημιουργήσετε πάνω στο υλικό
- Ο δικαιούχος δεν μπορεί να ανακαλέσει αυτές τις ελευθερίες, εφόσον τηρείτε τους όρους της άδειας.

Αναφορά στο έργο πρέπει να γίνεται ως εξής: Frans R., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Βέλγιο

Μαθησιακός σταθμός VII: Ημιαγωγοί

Εκ πρώτης όψεως, η κβαντική φυσική μοιάζει πολύ θεωρητική και χρειάστηκε χρόνος για να ανακαλύψει και να χρησιμοποιήσει η ανθρωπότητα την κβαντική φυσική. Σταδιακά, κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, κατέστη σαφές ότι αυτή ακριβώς η βαθιά κατανόηση της ύλης και του φωτός οδηγεί σε εκπληκτικές εφαρμογές, ασύλληπτες στο παρελθόν!

Οι *ημιαγωγοί* έχουν το μοναδικό χαρακτηριστικό να ελέγχουν το ρεύμα που διέρχεται μέσω αυτών. Αυτό τους καθιστά υψίστης σημασίας σε συσκευές, όπως τις κρυσταλλοτρίοδους, τα ηλιακά κελιά, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, τους μικροεπεξεργαστές, και άλλα συναφή, όπου ακριβώς η λειτουργία τους προϋποθέτει τον έλεγχο του ρεύματος.

Ο έλεγχος του ηλεκτρικού ρεύματος με ημιαγωγούς κατέστησε δυνατή τη δημιουργία **διακοπών χωρίς κινούμενα μέρη**. Ο όρος τρανζίστορ χρησιμοποιήθηκε ως συντομότερη εκδοχή του όρου "μεταφορά αντίστασης" (transfer resistor) Αυτό ήταν ένα πολύ σημαντικό άλμα για την ανθρωπότητα. Πριν από αυτό, όλες οι συσκευές, όπως οι υπολογιστικές μηχανές και οι πρώτοι υπολογιστές, είχαν μηχανικούς διακόπτες με *κινούμενα* μέρη. Το αποτέλεσμα ήταν οι τεράστιες διαστάσεις των συσκευών και η βραδεία λειτουργία τους. Όμως, οι διακόπτες ημιαγωγών κρυσταλλοτρίοδων με μη κινούμενα μέρη λειτουργούσαν γρήγορα, με ασφάλεια και χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος. Η πρώτη



κρυσταλλοτρίοδος (τρανζίστορ) κατασκευάστηκε το 1947 από τους John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley στο AT&T's Bell Labs στις Ηνωμένες Πολιτείες,

Μια ποικιλία διαφορετικών κρυσταλλοτρίοδων σε διάφορα σχήματα (Πηγή: Διασκευασμένο από το Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)

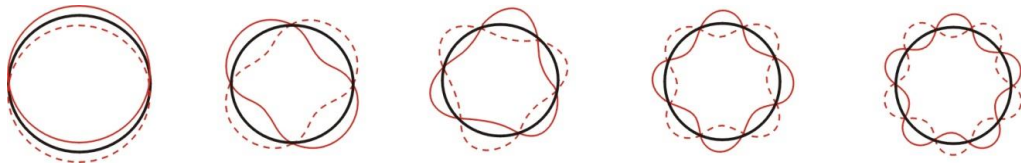
Αργότερα, πολλοί κρυσταλλοτρίοδοι ενσωματώθηκαν σε ένα τσιπ, γεγονός που επέφερε την ραγδαία ανάπτυξη του τομέα των ηλεκτρονικών και τηλεπικοινωνιακών συσκευών στην εποχή μας. Καμία από αυτές τις εφαρμογές δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τις γνώσεις που προσέφερε η κβαντική φυσική. Η πρακτική αξία αυτού είναι ανυπολόγιστη. Θα βρείτε διακόπτες με μη κινούμενα μέρη σε ιατρικά όργανα, οικιακές συσκευές, εξοπλισμό αποθήκευσης δεδομένων στο smartphone σας. Χωρίς τις εφαρμογές των ημιαγωγών πρακτικά δεν θα λειτουργούσε πια τίποτα από όσα υπάρχουν στην κοινωνία μας.

Ας προσπαθήσουμε λοιπόν να καταλάβουμε **γιατί κάποια στερεά είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού ενώ άλλα όχι**. Δείτε και τα υλικά που ονομάζουμε ημιαγωγούς και ας προσπαθήσουμε να καταλάβουμε πώς έφτασαν να διαδραματίζουν τόσο σημαντικό ρόλο σε όλες μας τις ηλεκτρονικές συσκευές. Πρώτα απ' όλα, η ουσία βρίσκεται στα διακριτά επίπεδα ενέργειας των ηλεκτρονίων στα άτομα.

1 Τα ενεργειακά επίπεδα στα άτομα

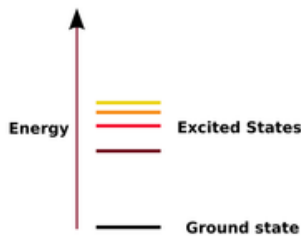
Στον μαθησιακό σταθμό V μάθατε ότι, σύμφωνα με την κβαντομηχανική, αντικείμενα της πραγματικότητας (όπως τραπέζια, ηλεκτρόνια και τουλίπες) έχουν τόσο κυματική όσο και σωματιδιακή υπόσταση. Ως αποτέλεσμα, όποτε ένα ηλεκτρόνιο **περιορίζεται** σε ένα άτομο, δεν μπορεί να έχει μήκος κύματος. Όπως τα κύματα στα μουσικά όργανα, *κβάντωση προκύπτει* μόνο επειδή **είναι δυνατή η ύπαρξη κυμάτων που συμβάλλουν εποικοδομητικά**. Ως αποτέλεσμα, το μήκος κύματος του σωματιδίου πρέπει να υπακούει στη συνθήκη του De Broglie:

$$n \lambda = 2 \pi r$$



Όπως γνωρίζετε, λ είναι το μήκος κύματος του ηλεκτρονίου, r είναι η ακτίνα του ατόμου και n είναι ένας θετικός ακέραιος (ονομάζεται κβαντικός αριθμός). Το παραπάνω σχήμα δείχνει το κύμα του ηλεκτρονίου (η κόκκινη γραμμή) για $n=1$, $n=2$, $n=3$, $n=4$ και $n=5$. Κάθε ένα από αυτά τα κύματα ηλεκτρονίων έχει μια αντίστοιχη κβαντισμένη ενέργεια, την οποία υπολογίσατε στον μαθησιακό σταθμό V για ένα άτομο υδρογόνου:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}$$



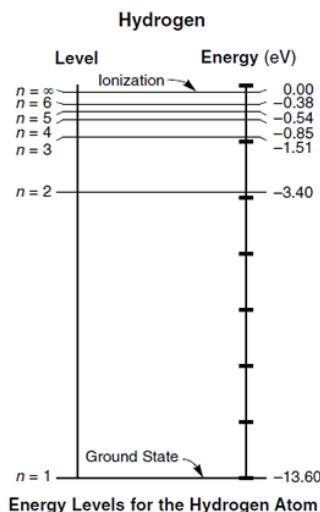
Όπου e είναι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου, h είναι η σταθερά του Πλανκ και ϵ_0 είναι μια σταθερά της φύσης γνωστή ως διηλεκτρική σταθερά του κενού (permittivity of empty space) και n είναι ξανά ο αντίστοιχος ακέραιος κβαντικός αριθμός του προσδοκώμενου ενεργειακού επιπέδου.

Αντί να σχεδιάζουμε κύματα ηλεκτρονίων διαρκώς, αποτυπώνουμε απλά τα **κβαντισμένα ενεργειακά επίπεδα** σε έναν κάθετο άξονα όπως στο διπλανό σχήμα (Πηγή: Διασκευασμένο από το Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia).

Η χαμηλότερη γραμμή αντιστοιχεί στο κύμα ηλεκτρονίου με τη μικρότερη δυνατή ποσότητα ενέργειας, αντίστοιχης του κύματος ηλεκτρονίου που βρίσκεται στο πιο αριστερό σημείο του σχήματος στην κορυφή της σελίδας. Η δεύτερη γραμμή πιο πάνω αντιστοιχεί στο δεύτερο σχήμα από τα αριστερά και ούτω καθεξής. Αυτά ονομάζονται ενεργειακά επίπεδα.

Ποιες είναι οι ενέργειες των 3 πρώτων επιπέδων ενέργειας των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο υδρογόνου (σε Joule); Υπολογίστε χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση.

$E_1 =$
 $E_2 =$
 $E_3 =$



Δίπλα, αποτυπώνονται τα ενεργειακά επίπεδα του υδρογόνου σε κάθετο άξονα.

Στο άτομο του υδρογόνου τα ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν μόνο τα ενεργειακά επίπεδα που απεικονίζονται δίπλα. Έτσι, συνάγουμε **δυνατά επίπεδα ενέργειας** και μια ολόκληρη σειρά ενδιάμεσων ενεργειών, όπου δεν μπορεί να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο.

Προσέξτε ότι ο άξονας ενέργειας είναι σε *μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ*, και σημειώνεται ως eV αντί για Joules (η οποία είναι η συνήθης μονάδα ενέργειας). Επειδή το Joule είναι μια μικροσκοπική μονάδα, ακόμη και για τις ενέργειες

των ηλεκτρονίων, είναι πιο πρακτικό να χρησιμοποιούνται αντ' αυτού ηλεκτρονιοβόλτ.

Κβαντισμένα ενεργειακά επίπεδα υδρογόνου - πηγή: www.aplusphysics.com/

Βρείτε: τι σημαίνει eV;

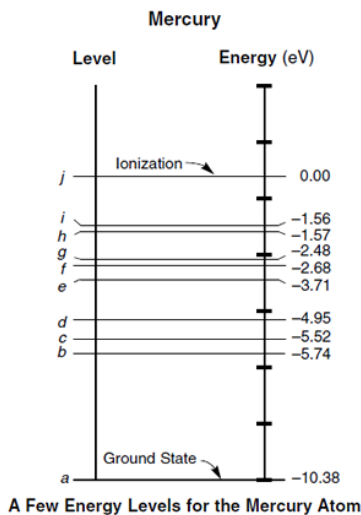
Πόσα Joules ισούνται με ένα eV;

Κάθε στοιχείο στον περιοδικό πίνακα του Mendeleev έχει τη δική του μοναδική "κλίμακα" ενεργειακών επιπέδων ηλεκτρονίων. Το ονομάζουμε *ενεργειακό φάσμα* του συγκεκριμένου *στοιχείου*. Κάθε πυρήνας έχει πράγματι το δικό του ηλεκτρικό πεδίο στο οποίο περιορίζονται τα κύματα ηλεκτρονίων. Το υδρογόνο είναι φυσικά το ελαφρύτερο στοιχείο: έχει μόνο πρωτόνιο στον πυρήνα του και ηλεκτρόνιο συνδεδεμένο με αυτό. Το ήλιο έχει πρωτόνια και ηλεκτρόνια Γι 'αυτό και ανεβαίνει ψηλά. Και όλα αυτά αποτελούν διακριτά επίπεδα ενέργειας, συγκεκριμένα για κάθε στοιχείο.

Αυτό οδηγεί στη διαμόρφωση των επιτρεπόμενων ενεργειών, που είναι συγκεκριμένες για κάθε στοιχείο. Αυτή η συγκεκριμένη **διαμόρφωση των επιτρεπόμενων ενεργειακών επιπέδων θα καθορίσει τις χημικές ιδιότητες** κάθε στοιχείου που παρατηρούμε στη φύση.

The image shows a periodic table of elements with energy levels indicated by color coding. The table is organized into Hauptgruppen (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII) and Neben-gruppen (Ia, IIa, IIIa, IVa, Va, VIa, VIIa, VIIla). The energy levels are indicated by the color of the cells: red for the highest energy level, yellow for the next, green for the next, and blue for the lowest. The table also includes the atomic number and the name of the element in each cell.

(Πηγή: Διασκευασμένο από το Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)



Εδώ βλέπετε τα πιθανά επίπεδα ενέργειας του υδραργύρου.

Ο Αυστριακός φυσικός *Erwin Schrödinger* γενίκευσε τη θεωρία σωματιδίων-κυμάτων του De Broglie. Άλλωστε, το μοντέλο De Broglie επέτρεπε τον υπολογισμό μόνο των επιπέδων ενέργειας του υδρογόνου. Η εξίσωση Schrödinger είναι πιο γενική και περιγράφει τρισδιάστατα κύματα ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα, γνωστά ως "τροχιακά ηλεκτρονίων".

Τα πιθανά τροχιακά ηλεκτρονίων με τις **κβαντισμένες ενέργειες** τους θα μπορούσαν να υπολογιστούν, όχι μόνο για το υδρογόνο αλλά και για *κάθε χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα*. Η εξίσωση του Schrödinger αποδείχθηκε πως περιγράφει ουσιαστικά τα κύματα-σωματίδια τόσο μέσα

όσο και έξω από το άτομο.



(Ο Erwin Schrödinger διατύπωσε το 1926 την εξίσωσή του που προσδιορίζει την κυματική λειτουργία ως θεμελιώδη για κάθε

κβαντισμένο σωματίδιο - (Πηγή: Διασκευασμένο από το Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)

2 Όχι όλα στη χαμηλότερη στάθμη

Εξαιτίας του περιορισμού στα άτομα και του κυματικού χαρακτήρα των ηλεκτρονίων οι ενέργειες των ηλεκτρονίων στα άτομα είναι σαφώς κβαντισμένες. Ωστόσο, η θεμελιώδης ερώτηση που διατύπωσε ο Niels Bohr παραμένει: **γιατί η κατώτερη ενεργειακή στάθμη δεν καταλαμβάνεται από όλα τα ηλεκτρόνια** του συγκεκριμένου ατόμου;

Είναι προφανές ότι εάν όλα τα ηλεκτρόνια των στοιχείων βρίσκονταν στο χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, οι χημικές ιδιότητες όλων των στοιχείων θα ήταν ίδιες, δεν θα υπήρχαν φασματικές γραμμές ούτε χρώματα και δεν θα μπορούσε να γίνει λόγος για διαφορετικά στοιχεία, πόσο μάλλον για μόρια. Πράγματι, ένα μόριο δημιουργείται από ξεχωριστά άτομα, διότι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας (εκείνα που βρίσκονται στις *υψηλότερες* στάθμες) σχηματίζουν μια κοινή κυματική λειτουργία με χαμηλότερη ενέργεια συνδέοντας ακριβώς τα ξεχωριστά άτομα από τα οποία προήλθαν. Έτσι, αν όλα τα ηλεκτρόνια βρίσκονταν στο χαμηλότερο επίπεδο, σχεδόν κανέναν χημικός δεσμός δεν θα ήταν δυνατός: θα ζούσαμε σε ένα ανιαρό σύμπαν ή πιθανότατα δεν θα υπήρχε ίχνος ζωής!

Το στοιχείο που λείπει για να κατανοήσουμε τον πλούτο της ατομικής και μοριακής δομής που παρατηρούμε γύρω μας, δόθηκε από τον Wolfgang Pauli με την *απαγορευτική αρχή* του.

Η απαγορευτική αρχή του Pauli για τα ηλεκτρόνια μπορεί να γίνει κατανοητή αν σκεφτούμε τους μαθητές που προσπαθούν να βρουν θέση σε μια μεγάλη αίθουσα. Πολλοί μαθητές έχουν την τάση να κάθονται όσο το δυνατόν πιο μακριά από το δάσκαλο. Δυστυχώς, για κάποιους μαθητές, δεν μπορούν όλοι να κάθονται στη θέση που είναι πιο απομακρυσμένη από το δάσκαλο. Τι θα κάνει ένας μαθητής, αν μπει στην τάξη και η καλύτερη θέση είναι πιασμένη;

Κάθε μαθητής που μπαίνει στην τάξη πρέπει να αρκεστεί στην πιο απομακρυσμένη θέση που είναι ακόμα κενή. Αν υπήρχαν περισσότερες θέσεις από ό,τι μαθητές, η αίθουσα θα είχε γεμίσει από πίσω προς τα μπροστά μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο.

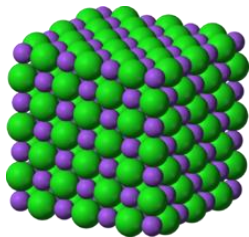
Τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο. *Κάθε ενεργειακό επίπεδο (στοιβάδα) έχει έναν συγκεκριμένο αριθμό "θέσεων", που ονομάζονται 'καταστάσεις/στάθμες', όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόνια. Αν είναι όλες γεμάτες, το ηλεκτρόνιο αναγκάζεται να μπει σε κάποια άλλη στάθμη, πιθανώς υψηλότερη ενεργειακά. Το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια απαγορεύεται να βρίσκονται στην ίδια στάθμη είναι πράγματι γνωστό ως απαγορευτική αρχή του Pauli¹. Αν κοιτάξουμε τις διαθέσιμες ενεργειακές ζώνες, τα ηλεκτρόνια θα τις γεμίσουν ξεκινώντας από τις χαμηλότερες και πηγαίνοντας προς τις υψηλότερες ενέργειες. Η χαμηλότερη ζώνη περικλείει στάθμες χαμηλότερης ενέργειας, επίπεδα τα οποία γεμίζουν πρώτα με ηλεκτρόνια (υπό κανονικές συνθήκες).*

¹ Πράγματι, όλα τα σωματίδια της ύλης, όπως τα ηλεκτρόνια, τα νετρόνια, τα πρωτόνια κ.ά. υποτάσσονται στην απαγορευτική αρχή του Pauli. Τα σωματίδια που υποτάσσονται στην απαγορευτική αρχή του Pauli ονομάζονται "φερμιόνια". Τα φωτόνια από την άλλη μπορούν να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση. Σωματίδια όπως τα φωτόνια που δεν υποτάσσονται στην απαγορευτική αρχή του Pauli ονομάζονται μποζόνια.

Όπως γνωρίζετε από τη Χημεία, τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας ενός στοιχείου είναι σημαντικά για τον χημικό δεσμό και ονομάζονται *ηλεκτρόνια σθένους*. Είναι πράγματι δυνατή η αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων σθένους κοντινών ατόμων, προκειμένου να σχηματίσουν ένα κοινό δεσμικό ενεργειακό επίπεδο. Θα εμβαθύνουμε στο φαινόμενο των στερεών στην επόμενη παράγραφο

3 Ενεργειακά επίπεδα στα στερεά: ζώνες και κενές ζώνες

Το ερώτημα που θέλουμε να συζητήσουμε τώρα είναι τι συμβαίνει με τα ενεργειακά επίπεδα (στοιβάδες) όταν υπάρχουν πολλά άτομα μαζί όπως συμβαίνει στην περίπτωση των στερεών. Πολλά



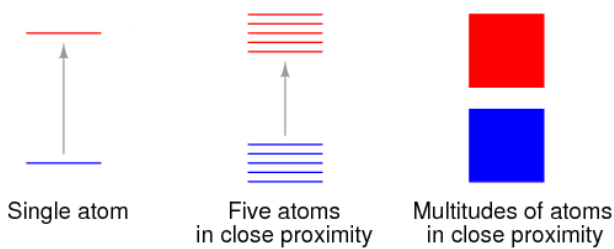
στερεά αποτελούνται από έναν τεράστιο αριθμό ατόμων διατεταγμένων σε ένα δομημένο πλέγμα για τη δημιουργία ενός κρυστάλλου. Ποιος κρύσταλλος απεικονίζεται εδώ, για παράδειγμα; (Συμβουλή: τα μπλε και πράσινα άτομα αντιπροσωπεύουν το Na και Cl)

(Πηγή: Διασκευασμένο από το Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)

Ας ξεκινήσουμε εξετάζοντας μια απλούστερη περίπτωση, όπου παίρνουμε μόνο 5 άτομα σε κοντινή απόσταση. Κάθε ένα από τα άτομα έχει το δικό του ενεργειακό επίπεδο. Τα ενεργειακά επίπεδα των μεμονωμένων ηλεκτρονίων επικαλύπτονται με εκείνα των ηλεκτρονίων που περιορίζονται σε γειτονικά άτομα. Σχηματίζουν ένα νέο κοινό τροχιακό. Βάσει της απαγορευτικής αρχής του Pauli, η φύση δεν επιτρέπει στα ηλεκτρόνια ενός κρυστάλλου να βρίσκονται στην ίδια ακριβώς στάθμη. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα ενεργειακά επίπεδα των ατόμων σε έναν κρύσταλλο **μεταβάλλονται**. Κάποια από αυτά λίγο προς τα πάνω και κάποια προς τα κάτω.

Εξαιτίας αυτής της μεταβολής, άλλοτε μεταβαίνουν σε υψηλότερη και άλλες φορές σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Σύμφωνα με την αρχή του Pauli, πρώτα γεμίζουν οι χαμηλότερες δυνατές στάθμες. Πράγματι, αυτές οι **στάθμες χαμηλής ενέργειας** των ηλεκτρονίων σθένους συγκρατούν, συνδέουν τα άτομα στο στερεό. Προκαλούν τον **χημικό δεσμό**². Γι' αυτό είναι δυνατή η ύπαρξη στερεών!

Επιπλέον, αν πάρουμε έναν πολύ μεγάλο αριθμό ατόμων οι μετατοπισμένες ενεργειακές στάθμες θα



σχηματίσουν στα αλήθεια ένα **πυκνό σύνολο πιθανών ενεργειακών καταστάσεων** (η κόκκινη και μπλε ζώνη στο σχήμα δεξιά). Με περισσότερα άτομα στο πλέγμα, τα ενεργειακά επίπεδα των μεμονωμένων ατόμων δεν είναι πλέον διακριτά: σχηματίζουν μια **ενεργειακή**

ζώνη.

² Πράγματι, η κβαντική φυσική μας επιτρέπει να κατανοήσουμε την ύπαρξη όλων των χημικών δεσμών που βλέπουμε γύρω μας.

Πηγή σχήματος www.allaboutcircuits.com

Αυτό επιτρέπει στα ηλεκτρόνια εντός του κρυστάλλου να βρίσκονται σε διαφορετικές στάθμες απότι τα ατομικά; Πώς;

Επιπλέον, σε έναν κρύσταλλο υπάρχει επανάληψη, μια διαδοχική σειρά ατόμων: ένας κρύσταλλος είναι *περιοδικός*. Τα ηλεκτρόνια περιορίζονται σε μια περιοδική διάταξη των ατόμων του πλέγματος. Αυτό επηρεάζει τα ενεργειακά επίπεδα με τρόπο που ορισμένα αλληλοαναιρούνται. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι η πιθανή εμφάνιση ενός **ενεργειακού χάσματος**. Έτσι τα *ενεργειακά επίπεδα ομαδοποιούνται σε ζώνες* και λίγο-πολύ *χωρίζονται από ενεργειακά χάσματα*.

Όπου βρίσκονται οι πιθανές ενέργειες, έχουμε ενεργειακά φάσματα (το κόκκινο και μπλε τμήμα στο σχήμα), με ένα κενό ανάμεσα όπου δεν υπάρχουν ενέργειες. Το ενεργειακό χάσμα έχει μεγάλη σημασία για την ηλεκτρική συμπεριφορά των στερεών.

Κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα έγινε σαφές ότι μπορούμε να φτιάξουμε ηλεκτρικούς διακόπτες με μη κινούμενα μέρη και "βαλβίδες" εκμεταλλευόμενοι αυτά τα ενεργειακά κενά. Θα δούμε παρακάτω πώς αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί στην τεχνολογία.

4 Αγωγοί, μονωτές και ημιαγωγοί

Με βάση το ενεργειακό χάσμα μπορούμε να καταλάβουμε επίσης γιατί ορισμένα υλικά είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού ενώ άλλα όχι.

Προφανώς απαιτείται ενέργεια προκειμένου ένα ηλεκτρόνιο να ξεφύγει από την χαμηλότερη **ζώνη σθένους** για να μεταπηδήσει στην υψηλότερη ζώνη: την **ζώνη αγωγιμότητας** όπως ονομάζεται. Σε αυτήν την υψηλότερη ενεργειακή ζώνη, τα ηλεκτρόνια *δεν είναι πλέον συνδεδεμένα με ένα άτομο* αλλά λίγο-πολύ *διάχυτα* σε όλο τον κρύσταλλο. Μπορούν να "κινούνται" μέσα στο πλέγμα και να προκαλούν ηλεκτρική **αγωγιμότητα**.

Με ποιους τρόπους μπορούν τα ηλεκτρόνια να απορροφήσουν ενέργεια και να μεταπηδήσουν σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο;

Αν αυτή η αλλαγή στάθμης (απλά ρίχνοντας φως πάνω στο υλικό) οφείλεται στη λήψη *ενέργειας υπό μορφή φωτός* κάνουμε λόγο για **εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**. Το φαινόμενο χρησιμοποιείται στις **φωτοδιόδους** και τους **ηλιακούς συλλέκτες**.

Ποια είναι η ποσότητα ενέργειας του φωτός που προϋποτίθεται, για να μεταπηδήσει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας;

Πράγματι, επειδή το χάσμα είναι ένα *ακριβές* ενεργειακό χάσμα, το φως πρέπει να δώσει αρκετή ενέργεια στο ηλεκτρόνιο για να υπερβεί το χάσμα. Όσο μικρότερο είναι το χάσμα τόσο πιο εύκολο είναι για τα ηλεκτρόνια να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας.

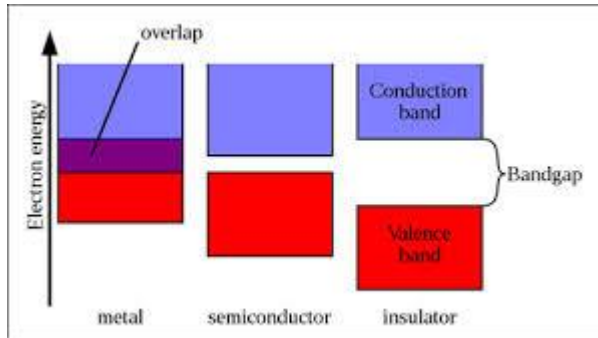
Όπως γνωρίζετε κάποια υλικά είναι καλύτερα και άγουν τα ηλεκτρικά ρεύματα καλύτερα από άλλα. Ποια υλικά είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού;

Ποια υλικά είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού;

Μπορεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών να ερμηνευθεί με βάση τη κβαντική θεωρία του ενεργειακού χάσματος;

Η διαφορά μεταξύ ενός αγωγού και ενός μονωτή οφείλεται ακριβώς *στο μέγεθος* του ενεργειακού χάσματος. Πιστεύετε ότι μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα θα έχουν οι μονωτές ή οι αγωγοί;

Τα μέταλλα δεν έχουν καθόλου ενεργειακό χάσμα, γεγονός που καθιστά ευκολότερη τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Εξαιτίας αυτού, τα ηλεκτρόνια κινούνται ευκολότερα στο εσωτερικό των μετάλλων. **Οι μονωτές** από την άλλη έχουν **μεγάλο** ενεργειακό χάσμα, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.



Ημιαγωγός είναι ένα υλικό που ναί μεν έχει ενεργειακό χάσμα αλλά **μικρό**. Όταν παρέχονται πολύ μικρές ποσότητες ενέργειας στα ηλεκτρόνια του, συμπεριφέρεται ως μονωτής. Όταν, όμως, παρέχονται μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας οι ημιαγωγοί αρχίζουν να άγουν ηλεκτρισμό. Εξ ου και το όνομά τους.

(Πηγή: solarcellcentral.com)

Στον περιοδικό πίνακα θα βρείτε ημιαγωγούς στην ομάδα 14. Ποια στοιχεία είναι ημιαγωγοί;

Παλαιότερα αυτή η ομάδα ονομάζονταν IV. Τι σημαίνει το "IV" όσον αφορά στα ηλεκτρόνια σθένους;

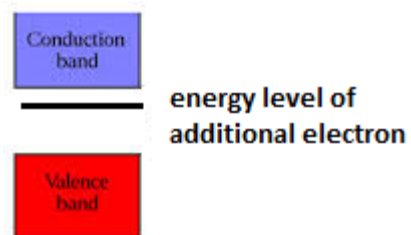
Σε έναν καθαρό ημιαγωγό που αποτελείται από στοιχεία της ομάδας 14, κάθε άτομο στον κρύσταλλο είναι φορές συνδεδεμένο με το επόμενο.

5 Γεφυρώνοντας το ενεργειακό χάσμα: εμπλουτισμός

Το **ενεργειακό χάσμα των καθαρών ημιαγωγών είναι πολύ μεγάλο**, για να μπορέσει το ρεύμα να διέλθει μέσω του κρυστάλλου: υπάρχουν πολύ λίγα ηλεκτρόνια που μπορούν να γεφυρώσουν το ενεργειακό χάσμα. Υπό κανονικές συνθήκες, στους καθαρούς ημιαγωγούς μόνο ένα άτομο στα χίλια εκατομμύρια περίπου διαθέτει ηλεκτρόνια που συμβάλλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στα μέταλλα σχεδόν κάθε άτομο προσφέρει ηλεκτρόνια, συνεισφέροντας στην αγωγιμότητα του υλικού. Θα μπορούσαμε να δημιουργήσουμε κάτι ενδιάμεσο;

5.a Εμπλουτισμός τύπου n

Θα μπορούσαμε να μικρύνουμε το ενεργειακό χάσμα; Θα μπορούμε να προσθέσουμε ηλεκτρόνια με ενεργειακά επίπεδα μέσα στο ενεργειακό χάσμα; Εννοούμε, όπως απεικονίζεται στο διπλανό σχήμα.



Αυτό πράγματι μπορεί να επιτευχθεί εάν εμπλουτιστεί ο κρύσταλλος με κάποια "ξένα" στοιχεία **με ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο**

(συγκριτικά με την ομάδα IV). Όπως γνωρίζετε, τα ηλεκτρόνια που δεν είναι συνδεδεμένα μέσω χημικών δεσμών διαθέτουν υψηλότερη ενεργειακή στάθμη συγκριτικά με τα συνδεδεμένα. Γι' αυτό το λόγο η καινούργια ενεργειακή στάθμη που επέρχεται από τον εμπλουτισμό βρίσκεται υψηλότερα, πάνω από τη ζώνη σθένους και λίγο πιο κάτω από την υπάρχουσα ζώνη αγωγιμότητας.

Σε ποια ομάδα θα βρούμε στοιχεία με ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο σθένους;

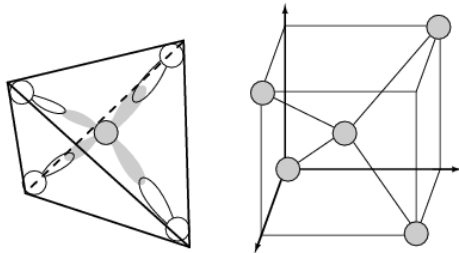
.....

Ποια στοιχεία θα ήταν θεωρητικά κατάλληλα για τη διαδικασία εμπλουτισμού;

.....

Συνήθως αντικαθίσταται ένα κάθε ένα εκατομμύριο άτομα στον κρύσταλλο. Το νέο άτομο είναι συχνά P (φώσφορος). Το P έχει ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα.από αυτά τα ηλεκτρόνια θα σχηματίσουν δεσμό με τα γειτονικά τους άτομα (Si ή Ge). Το πέμπτο όμως δεν έχει άλλο ηλεκτρόνιο για να σχηματίσουν από κοινού δεσμό. Ουσιαστικά, χαμηλώσαμε τη ζώνη αγωγιμότητας, με την εισαγωγή αυτών των μη συνδεδεμένων ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη νέα ενεργειακή στάθμη για να ελευθερωθούν και να κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Ένας τέτοιος ημιαγωγός εμπλουτισμένος με στοιχεία της ομάδας V (επιπλέον ηλεκτρόνιο) ονομάζεται **ημιαγωγός τύπου n** επειδή αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του υλικού.



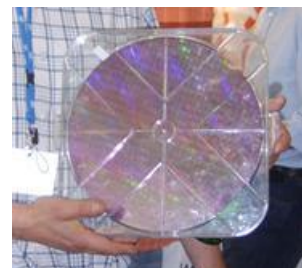
Σε ηλεκτρονικές εφαρμογές υψηλής απόδοσης, η σιλικόνη χρησιμοποιείται στην κρυσταλλική της μορφή. Η κρυσταλλική μορφή του Si είναι ουσιαστικά αυτή του διαμαντιού όπου κάθε άτομο σιλικόνης συνδέεται με τα τέσσερα γειτονικά άτομα, σχηματίζοντας ένα τετράεδρο.

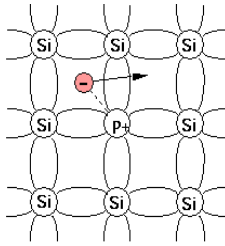
Ο σχηματισμός τετραεδρικού δεσμού των ατόμων Si οδηγεί στο 1/4 της κυβικής μονάδας κυττάρων - Πηγή: www.allaboutcircuits.com



Κρυστάλλινη σιλικόνη έτοιμη για την κοπή δίσκων πυριτίου. (Πηγή: Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)

Κατασκευαστές τσιπ όπως η Intel, κατασκευάζουν τους Μικροεπεξεργαστές Πολύ Μεγάλης Κλίμακας Ολοκλήρωσης (Very Large Scale Integration Microprocessor) πάνω σε ένα μονοκρυσταλλικό δίσκο πυριτίου

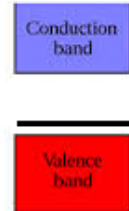




Παρότι η κρυσταλλική δομή της σιλικόνης είναι τετράεδρη, ο εμπλουτισμένος κρύσταλλος κάποιες φορές απεικονίζεται επίπεδος. (Πηγή σχήματος: Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)

5.β Εμπλουτισμός τύπου p

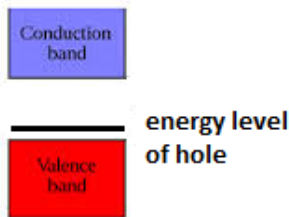
Θα μπορούσαμε να μικρύνουμε το ενεργειακό χάσμα, προσθέτοντας ένα ενεργειακό επίπεδο στη χαμηλότερη τμήμα του ενεργειακού χάσματος, όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα;



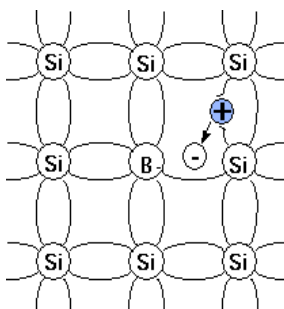
Θα μπορούσαμε ίσως τώρα να εξετάσουμε και το αντίθετο: αντί για ένα ηλεκτρόνιο παραπάνω, ψάχνουμε τώρα στοιχεία **με ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο** (συγκριτικά με την ομάδα IV). Σε ποια ομάδα θα βρούμε στοιχεία με ένα ηλεκτρόνιο σθένους λιγότερο;

.....
 Ποια στοιχεία θα ήταν θεωρητικά κατάλληλα για αυτή τη διαδικασία εμπλουτισμού;

.....
 Αυτά τα χημικά στοιχεία έχουν μόνο ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα. από αυτά τα ηλεκτρόνια θα σχηματίσουν δεσμούς με τα γειτονικά τους άτομα (Si ή Ge).



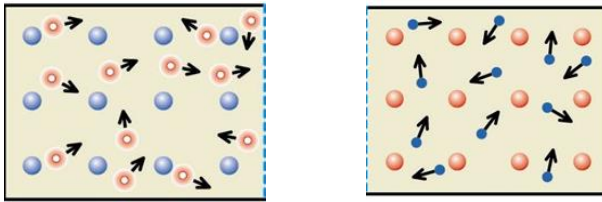
Ο εμπλουτισμός με άτομα της ομάδας III, προκαλεί σε ορισμένα σημεία την *απουσία δεσμού*. Όπως γνωρίζετε, τα δεσμικά τροχιακά έχουν λιγότερη ενέργεια από τα μη δεσμικά. Έτσι, η έλλειψη δεσμού εδώ δημιουργεί ένα (μη κατειλημμένο) ενεργειακό επίπεδο με ελαφρώς υψηλότερη ενέργεια, ακριβώς πάνω από τη ζώνη σθένους. Εφόσον πρόκειται για ένα πολύ μικρό άλμα προκειμένου άλλα ηλεκτρόνια σθένους να εισέλθουν σε αυτό το μη κατειλημμένο επίπεδο (ορισμένες φορές ονομάζεται "οπή"), ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους μετακινούνται σε αυτήν την "οπή". Τότε, όμως, αφήνουν μια άλλη "οπή" (απουσία δεσμού) πίσω τους, σε άλλο σημείο του κρυστάλλου. Αυτό δημιουργεί ένα "εύκολα προσιτό" ενεργειακό επίπεδο κοντά στη ζώνη σθένους, όπου και πάλι μπορούν να εισέλθουν άλλα ηλεκτρόνια σθένους. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα!



Το βόριο, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτόν τον **εμπλουτισμό τύπου p** (το "p" σημαίνει "θετικό" επειδή κατά μία έννοια οι θετικές οπές προκαλούν την αγωγιμότητα). Μπορείτε να σκεφτείτε το μη κατειλημμένο ενεργειακό επίπεδο, την οπή, ως θετικά φορτισμένο σωματίδιο. Μπορείτε, λοιπόν, να φανταστείτε τους ημιαγωγούς τύπου p ως "κινούμενη οπή ρεύματος".

Μην ξεχνάτε, όμως, ότι από φυσικού τους τα ηλεκτρόνια κινούνται μεταξύ γειτονικών ατόμων καταλαμβάνοντας τις οπές και αφήνοντας πίσω τους μια νέα "μη κατειλημμένη" οπή.

Ποιο από τα σχήματα απεικονίζει τον ημιαγωγό τύπου p; Ποιο απεικονίζει τον ημιαγωγό τύπου n;



.....

6 Δίοδος

Αφού μπορούμε να εξασφαλίσουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα ημιαγωγίμο υλικό, πάμε να πετύχουμε περισσότερα: υφιστάμενες συσκευές που μπορούν να *ελέγξουν* το ηλεκτρικό ρεύμα!

Ένα από τα απλούστερα πράγματα που μπορούμε να κάνουμε είναι να κατασκευάσουμε μια συσκευή στην οποία θα βάλουμε έναν ημιαγωγό τύπου p και έναν τύπου n κολλημένους μαζί (αυτό ονομάζεται **ένωση-pn**). Κατ' αυτόν τον τρόπο θα κατασκευάσουμε μια δίοδο, ένα είδος **ηλεκτρονικής βαλβίδας** όπου επιτρέπεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση και όχι προς την άλλη. Αυτό καθιστά δυνατή, για παράδειγμα, τη διατήρηση μέρους του κυκλώματος υπό υψηλή ένταση (λογική, πάντα) χωρίς να αποτρέπει την αντίστροφη ροή του ρεύματος. Η αρχή όλων των ηλεκτρονικών συσκευών! Ας δούμε πώς λειτουργεί!

Αν συνδέσουμε ένα ημιαγωγίμο υλικό τύπου p με ένα τύπου n, σε ποιο μέρος θα υπάρχουν περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια;

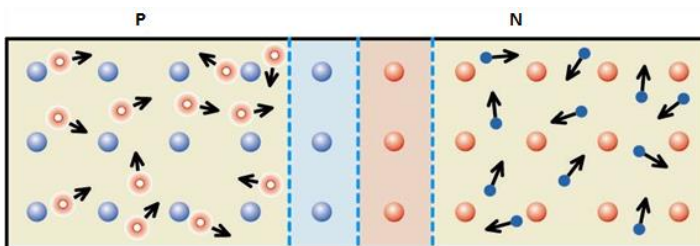
.....

Σε ποιο μέρος θα υπάρχουν περισσότερες οπές;

.....

Τι θα συμβεί τότε στο όριο μεταξύ των δύο ημιαγωγών;

.....



Diffusion

Αυτό που θα συμβεί στο μέσον φαίνεται λίγο σαν αυτό που συμβαίνει όταν χύνεται μια μικρή σταγόνα μελανιού σε ένα ποτήρι νερό. Τι θα συμβεί στη σταγόνα αν δεν ανακατέψετε;

.....

Πηγή Εικόνας: Κοινό κτήμα της Wikipedia

Η εξάπλωση της σταγόνας μελανιού στο νερό ονομάζεται διάχυση. Διάχυση, αλλά φορτίων τώρα αντί για σταγόνες μελανιού, θα υπάρξει και στο όριο (επιφάνεια επαφής) μεταξύ των δύο ημιαγωγών. Ελεύθερα ηλεκτρόνια από τον τύπο n θα μετακινηθούν στον τύπο p για να γεμίσουν τις οπές.

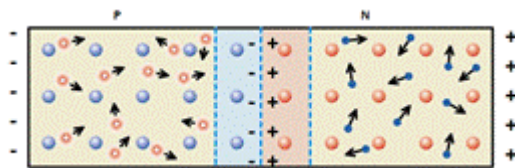
Ως αποτέλεσμα, στο μέσον δεν θα υπάρχουν πλέον φορείς κενού φορτίου. Μπορούμε λοιπόν να το ονομάσουμε **ζώνη εξάντλησης**.

Αν όμως μετακινήθηκαν τα ηλεκτρόνια, μετακινήθηκαν και τα ηλεκτρικά φορτία.

Αν τα ηλεκτρόνια μετακινούνται στη ζώνη p, αυτή η ζώνη φορτίζεται (Θετικά/Αρνητικά).

Αν τα ηλεκτρόνια βγουν από τη ζώνη τύπου n, αυτή η ζώνη φορτίζεται (Θετικά/Αρνητικά).

Τα φορτία που μετακινήθηκαν δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο που μειώνει τη διάχυση (βλέπε το όριο στο σχήμα της ένωσης pn). Τότε, δυσχεραίνεται η μετακίνηση νέων ηλεκτρονίων. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί;



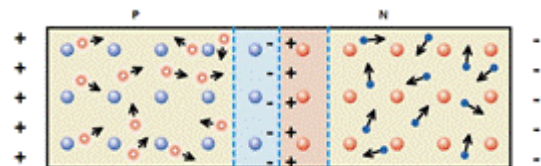
Αν τώρα συνδέσουμε στον ημιαγωγό μια μπαταρία με τρόπο που ο αρνητικός της πόλος να συνδέεται με τον τύπο p και ο θετικός με τον τύπο n.

Πιστεύετε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα θα

διέλθει μέσω της ζώνης εξάντλησης; Γιατί;

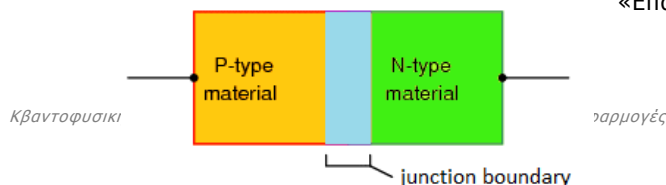
Πράγματι, η αρνητική πλευρά της μπαταρίας είναι συνδεδεμένη στην αρνητική πλευρά του ορίου εξάντλησης (και η θετική πλευρά στη θετική πλευρά) και ισοδύναμα φορτία αλληλοαπωθούνται: έτσι, φορτίο από τη μπαταρία δεν είναι δυνατό να περάσει από το όριο και να υπάρξει ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Θα ονομάσουμε αυτήν την περίπτωση: «Επαφή p-n σε ανάστροφη πόλωση».

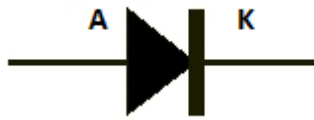
Αν, από την άλλη πλευρά, η μπαταρία αντιστραφεί η κατάσταση θα διαμορφωθεί ως εξής:



Θα υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα τώρα; Εξηγήστε:

Πράγματι, η θετική πλευρά της μπαταρίας θα έλξει τα ηλεκτρόνια που μετακινήθηκαν στο όριο της πλευράς τύπου p. Η αρνητική πλευρά της μπαταρίας θα έλξει τις, ας πούμε, θετικά φορτισμένες οπές στην πλευρά τύπου n του ορίου (στην πραγματικότητα, τα ηλεκτρόνια κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση). Η μεταπήδηση που αρχικά είχα σταματήσει λόγω της παρουσίας των φορτίων στο όριο, μπορεί τώρα να ξαναρχίσει και άρα ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσω της διόδου. Θα ονομάσουμε αυτήν την περίπτωση «Επαφή p-n σε ορθή πόλωση».





Σύμβολο για δίοδο που χρησιμοποιείται σε κυκλώματα.



Μια δίοδος με ρίγα που σηματοδοτεί την αρνητική κάθοδο. Ξέρετε, έτσι, πώς να την συνδέσετε σε κάποιο κύκλωμα. (Κοινό Κτήμα της

Wikipedia)

Η δίοδος έχει και απλές εφαρμογές: χρησιμοποιείται, λόγου χάρη, σε σχεδόν κάθε συσκευή όπου πρέπει να εισάγετε μπαταρίες. Η δίοδος αποτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, αν τοποθετήσετε τις μπαταρίες με τους πόλους προς λάθος κατεύθυνση.

Επίσης, δίοδοι χρησιμοποιούνται σε διορθωτές που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Όπως, όμως, προαναφέρθηκε, τις πιο προηγμένες εφαρμογές τις βρίσκουμε στα ηλεκτρονικά κυκλώματα όπου αποτρέπουν την αντίστροφη ροή του ρεύματος. Οι δίοδοι σε ανάστροφη πόλωση χρησιμοποιούνται επίσης στην κατασκευή ανιχνευτών ακτινοβολίας: αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται σε βασική έρευνα φυσικής όπως σε μετρήσεις ραδιενέργειας κοντά σε πυρηνικά εργοστάσια ή νοσοκομεία.

7 Κρυσταλλοτρίοδος (τρανζίστορ)

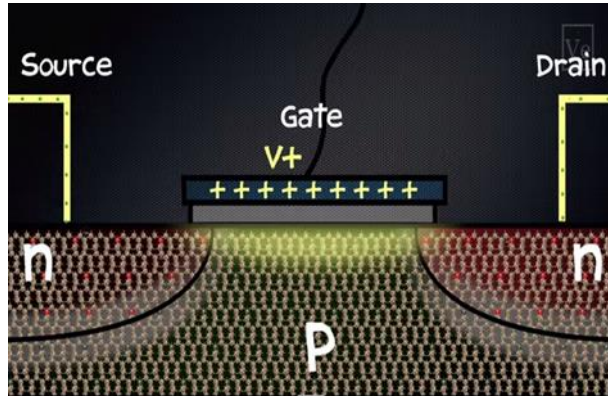
Έχει περάσει πολύς καιρός από τα κύματα πιθανότητας του De Broglie μέχρι τους σύγχρονους υπολογιστές και τις ηλεκτρονικές συσκευές. Αυτό ακριβώς, όμως, συμβαίνει στη φυσική: στην προσπάθεια να ερμηνευθεί ο κόσμος, διατυπώνονται νέες απόψεις και ανοίγουν δυνατότητες που κανείς δεν μπορούσε μέχρι τότε να φανταστεί.

Γνωρίζουμε, λοιπόν, πώς να κατασκευάσουμε μια συσκευή που επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει προς μία κατεύθυνση αλλά όχι προς την αντίθετη: τη δίοδο. Τι θα συμβεί, τώρα, αν τοποθετήσουμε σαν σάντουιτς δύο διόδους; Ας τοποθετήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου p μεταξύ δύο διόδων τύπου n.

Μια τέτοια συσκευή ονομάζεται κρυσταλλοτρίοδος (τρανζίστορ) και η σημασία της για όλες σχεδόν τις ηλεκτρικές μας συσκευές είναι ανυπολόγιστη (μπορείτε επίσης να τοποθετήσετε έναν ημιαγωγό τύπου n ανάμεσα σε δύο διόδους τύπου p).

Σε κάθε περίπτωση, θα εξασφαλίσετε δύο ενώσεις pn αντί για μία, με τη δίοδο. Κατά κάποιον τρόπο, αυτό που κάναμε είναι να τοποθετήσουμε 2 διόδους σε αντίθετες κατευθύνσεις τη μία μετά την άλλη. Εκ πρώτης όψεως, δεν φαίνεται και πολύ χρήσιμο αυτό που κάναμε, αφού δεν ταξιδεύει ρεύμα προς καμία κατεύθυνση, καθώς οι δίοδοι εμποδίζουν το ρεύμα προς μια κατεύθυνση.

Πράγματι, στο μέσο υπάρχει ένα υλικό τύπου p το οποίο είναι αρνητικά φορτισμένο από τα ηλεκτρόνια που μεταπήδησαν σε αυτό από τους περιβάλλοντες ημιαγωγούς τύπου n. Τα ηλεκτρόνια που προσπαθούν να περάσουν από την πηγή (αριστερά) στην υποδοχή εμποδίζονται από αυτά τα αρνητικά φορτία στις ενώσεις pn. Μέσω της κρυσταλλοτρίοδου δεν διέρχεται ρεύμα. Είναι σε θέση "κλειστή" ή "ανάστροφης φοράς".



Όμως, κάθε ένας από τους εξωτερικούς ημιαγωγούς είναι

Πηγή Veritasium Science Blog: Πώς λειτουργεί μια κρυσταλλοτρίοδος;

συνδεδεμένος με ένα καλώδιο (στο σχήμα είναι τύπου n). Η αριστερή πλευρά ονομάζεται πηγή, η δεξιά υποδοχή και το υλικό p στο μέσο ονομάζεται "βάση" ή "πύλη".

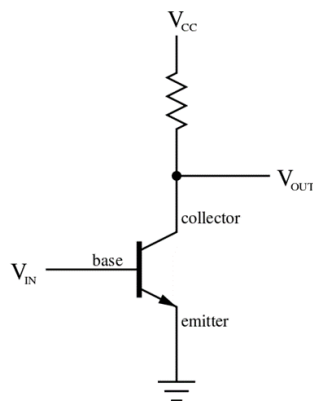
Στόχος είναι τώρα να διέλθει κάπως ρεύμα από την πηγή (αριστερά) στο άλλο καλώδιο που είναι γνωστό ως υποδοχή.

Τι θα συμβεί, όμως, αν εφαρμόσουμε ηλεκτρική τάση στον ημιαγωγό που βρίσκεται στη μέση (στο σχήμα είναι τύπου p).

Αν εφαρμοστεί θετική τάση στην πύλη, η επίδραση του αρνητικού φορτίου στις ενώσεις pn εξουδετερώνεται και είναι δυνατή η ροή του ρεύματος από την πηγή προς την υποδοχή. Η κρυσταλλοτρίοδος βρίσκεται "ανοιχτή" ή σε κατάσταση "διέλευσης".

Αν διακόψετε την τάση, οι κρυσταλλοτρίοδοι ξανασβήνουν. Έτσι, κατασκευάσατε έναν διακόπτη χωρίς κινούμενο μέρος! Οι κρυσταλλοτρίοδοι μπορούν να παραχθούν μαζικά πιο εύκολα από τους μηχανικούς διακόπτες. Επιπλέον, μπορούν να κατασκευαστούν σε μικροκλίμακα.

Αξιοσημείωτο είναι ότι απλά αξιοποιώντας τις ιδιότητες του κρυστάλλου, είμαστε σε θέση να φτιάξουμε έναν διακόπτη που μπορεί να ανάβει και να σβήνει με ή χωρίς εφαρμογή ρεύματος στην πύλη. Επειδή, τα πάντα σχεδόν λειτουργούν με ηλεκτρισμό στη φύση (δεν υπάρχουν μηχανικά κινούμενα μέρη) οι κρυσταλλοτρίοδοι μπορούν να ανοίξουν και να σβήσουν τόσο γρήγορα ώστε να είναι δυνατή η εκτέλεση πολλών λειτουργιών σε πολύ σύντομο χρόνο. Επίσης, απαιτείται λιγότερη ενέργεια από ό,τι αν εργαζόσασταν με πραγματικούς μηχανικούς διακόπτες ή ηλεκτρονόμους (ρελέ).



Μια κρυσταλλοτρίοδος (τρανζίστορ) έχει 2 κύριες λειτουργίες: λειτουργεί ως διακόπτης που μπορεί να ανάβει και να σβήσει ή μπορούμε να την ενσωματώσουμε σε ένα σύστημα όπου θα λειτουργεί ως ενισχυτής. Εδώ βλέπετε ένα στοιχειώδες κύκλωμα που περιλαμβάνει μια κρυσταλλοτρίοδο.

8 Εφαρμογή: LED

Σε μια διοδο που εκπέμπει φως, ηλεκτρόνια από την υψηλότερη ζώνη αγωγιμότητας χάνουν ενέργεια υπό μορφή φωτός. Το γεγονός τα κάνει να "πέφτουν" μέσα στο ενεργειακό χάσμα και να εκπέμπουν φως ενόσω το κάνουν.

Μπορεί αυτή η αποβολή φωτός να συμβαίνει κατά ένα ορισμένο ποσό ή τα ηλεκτρόνια είναι δυνατό να χάσουν οποιαδήποτε ποσότητα ενέργειας;

.....

Κατ' επέκταση, η θεωρία του κβαντικού κενού στα στερεά από κοινού με τη σχέση Αϊνστάιν-Πλανκ προβλέπει ότι το ενεργειακό κενό είναι (ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ/ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ/ΙΣΟ) για το μπλε φως συγκριτικά με το κόκκινο φως. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί;

.....



Για να ανάψει ένα μπλε led, θα χρειαζόταν μεγαλύτερη τάση από ένα κόκκινο; (Ναι / Όχι) Γιατί;

Πείραμα: Πάρτε ένα led και μια ρυθμιζόμενη πηγή τάσης. Μετρήστε με ένα πολύμετρο σε ποια τάση αρχίζει να φωτίζει το led. (Φροντίστε να εφαρμόσετε συνεχές ρεύμα προς τη σωστή κατεύθυνση στο led).

Χρώμα του led	U (V)
Κόκκινο	
Κίτρινο	
Πράσινο	
Μπλε	

Επιβεβαιώνεται η πρόβλεψη από την κβαντική θεωρία και τη θεωρία του ενεργειακού χάσματος ή όχι; (Ναι / Όχι)

9 Εφαρμογή: Ηλιακό κελί

Γνωρίζετε ότι τα ηλιακά κελιά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια;

Μπορείτε να φανταστείτε - βασιζόμενοι στη θεωρία του ενεργειακού χάσματος - τι μπορεί θεωρητικά να συμβαίνει στο στερεό υλικό του ηλιακού κελιού, ώστε να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια;

.....

Συνεπώς, τα ηλιακά πάνελ λειτουργούν με βάση το εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Λογικά, υπάρχει σχέση μεταξύ του μεγέθους του ενεργειακού χάσματος και του χρώματος του φωτός με το οποίο λειτουργεί το πάνελ; Εξηγήστε.

.....



Οι ημιαγωγοί στα ηλιακά κελιά βασίζονται στη σιλικόνη ή το γερμάνιο. Προς στιγμή, υπάρχει ένα διευρυνόμενο ερευνητικό πεδίο για τα ηλιακά πάνελ που κατασκευάζονται από οργανικούς ημιαγωγούς με βάση τον άνθρακα. Οι ημιαγωγοί αυτοί έχουν πιθανότατα πολλά υποσχόμενες ιδιότητες, όπως την ικανότητα αναδίπλωσης. Έτσι, διευκολύνεται η εφαρμογή τους σε επιφάνειες όπως στέγες, τέντες, βάρκες, αυτοκίνητα κλπ. Για την ώρα, ωστόσο, η αποδοτικότητα και σταθερότητά τους είναι ακόμα (πολύ) μικρότερη από ό,τι των μη οργανικών.

Τα οργανικά ηλιακά κελιά μας θυμίζουν, κατά κάποιον τρόπο, φυσικές διαδικασίες, όπως τη φωτοσύνθεση στα φυτά, όπου επίσης παράγεται

ενέργεια από το φως σε μοριακό επίπεδο.

Πηγή: plasticphotovoltaics.org

10 Εφαρμογές: μελλοντικές προοπτικές

Η τρέχουσα έρευνα προσπαθεί να κατασκευάσει κρυσταλλοτριόδους στη νανοκλίμακα ή και κλίμακα μικρότερη των νάνο. Οι διαστάσεις αυτές είναι στην ατομική κλίμακα και νέοι φυσικοί περιορισμοί ανακύπτουν όπως δημιουργία ρεύματος διαρροής λόγω του κβαντικού φαινομένου σήραγγας ή εξαιρετικά βραδεία επεξεργασία σημάτων λόγω της περιορισμένης ταχύτητας του φωτός. Αν δεν εμβαθύνουμε στη γνώση και δεν επινοήσουμε τεχνικές για την υπέρβασή τους, ο ρυθμός της εξέλιξης μπορεί να επιβραδυνθεί σε σχέση με τα τελευταία 50 χρόνια.

Σχεδόν 5 δισεκατομμύρια κρυσταλλοτριόδοι εμπεριέχονται σήμερα στους επεξεργαστές 22nm της Intel (η λεγόμενη Xeon Phi οικογένεια επεξεργαστών). Οι δομές στα τσιπ έχουν γίνει πολύ μικρότερες ακόμα και από τα ανθρώπινα κύτταρα, τα βακτήρια ή ακόμη και τους ιούς. Προβλέπονται συνταρακτικές ανακαλύψεις στον τομέα ακριβώς των βιο-αισθητήρων και νέες εφαρμογές στους τομείς της υγειονομικής περίθαλψης και της επιστήμης της ζωής. Καθίσταται δυνατή η αντικατάσταση όλου του εξοπλισμού εργαστηρίων από μικρά, σχετικά φθηνά, γρήγορα και ακριβή "εργαστήρια σε τσιπ" χειρός. Έτσι, ασθένειες όπως ο καρκίνος θα ανιχνεύονται εγκαίρως και αν χρειάζεται συνεχιζόμενα. Κάποιες μετρήσεις που τώρα γίνονται στο ιατρείο ή στο νοσοκομείο θα μπορούν να γίνονται στο σπίτι ή οπουδήποτε αλλού.

Είναι σαφές ότι οι εφαρμογές των ημιαγωγών, που πρόκειται να αναπτυχθούν, θα μπορούσαν να συμβάλουν στην υπέρβαση σύγχρονων προκλήσεων, όπως προβλήματα υγείας, την κλιματική αλλαγή και μελλοντικά βιώσιμες πηγές ενέργειας.

Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης VII

Κλασσικές έννοιες

.....

Κβαντικές έννοιες

Κάθε ενεργειακό επίπεδο των ηλεκτρονίων έχει έναν καθορισμένο αριθμό 'καταστάσεων' στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα ηλεκτρόνια. Αν είναι όλες κατειλημμένες, ένα ηλεκτρόνιο θα πρέπει να μεταβεί στο επόμενο ελεύθερο ενεργειακό επίπεδο. Η απαγόρευση για τα ηλεκτρόνια να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση είναι γνωστή ως.....

Η κατανομή των επιτρεπτών ενεργειακών επιπέδων καθορίζει την κάθε στοιχείου στον περιοδικό πίνακα.

Σε έναν κρύσταλλο, τα ενεργειακά επίπεδα των μεμονομένων ηλεκτρονίων σε γειτονικά άτομα Και σχηματίζουν ένα νέο κοινό τροχιακό. Λόγω τα ηλεκτρόνια δεν επιτρέπεται να βρίσκονται ακριβώς στην ίδια ενεργειακή κατάσταση. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα ενεργειακά επίπεδα των ατόμων σε έναν κρύσταλλο είναι Αυτά τα μετατοπισμένα ενεργειακά επίπεδα σχηματίζουν ένα πυκνά συγκεντρωμένο σετ πιθανών ενεργειακών καταστάσεων και τα ενεργειακά επίπεδα του κάθε ατόμου δεν είναι πλέον διακριτά: σχηματίζουν μία

Οι ενεργειακές ζώνες σε έναν κρύσταλλο χωρίζονται από