

# ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Διάλεξη 1: Ημιαγωγοί – Δίοδος pn

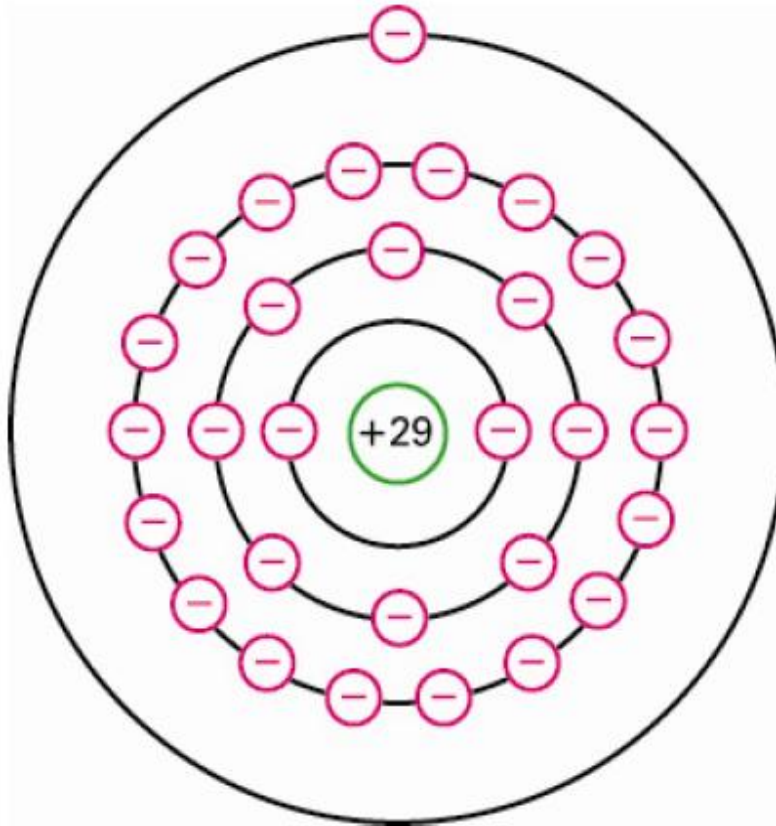
Δρ. Δ. ΛΑΜΠΑΚΗΣ

- 
- Ταλαντωτές. Πολυδονητές. Γεννήτριες συναρτήσεων. PLL. Πολλαπλασιαστές. Κυκλώματα μετατροπής και επεξεργασίας σημάτων. Εφαρμογές με υπολογιστικά προγράμματα ανάλυσης κυκλωμάτων

# Αγωγοί

- Πρόκειται για υλικά που επιτρέπουν την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος
- Παραδείγματα αγωγών: χαλκός, άργυρος, χρυσός
- Οι καλύτεροι αγωγοί έχουν 1 ηλεκτρόνιο σθένους

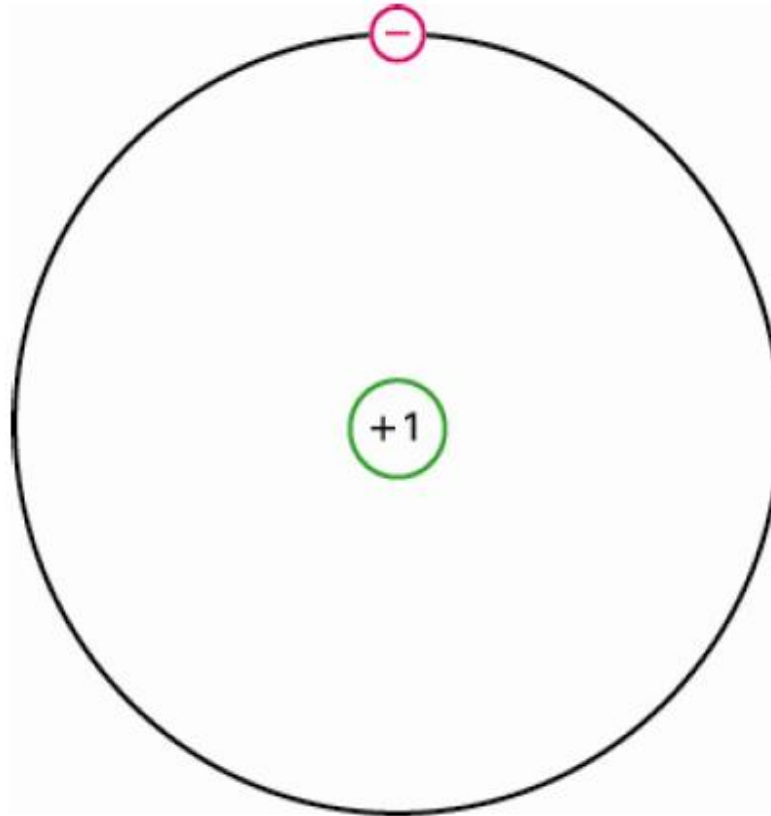
# Δομή του ατόμου χαλκού



# Πυρήνας

- Με μια πιο γενικευμένη προσέγγιση ο πυρήνας περιλαμβάνει και όλες τις στοιβάδες εκτός την εξωτερική
- Η στοιβάδα σθένους ή εξωτερική στοιβάδα ελέγχει τις ηλεκτρικές ιδιότητες
- Ο πυρήνας του ατόμου χαλκού έχει φορτίο + 1

# Πυρήνας χαλκού



# Ελεύθερο ηλεκτρόνιο

- Η έλξη μεταξύ του πυρήνα και του ηλεκτρονίου της εξωτερικής στοιβάδας είναι ασθενής
- Μια εξωτερική δύναμη μπορεί εύκολα να αποσπάσει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο από ένα άτομο

# Ημιαγωγός

- Πρόκειται για ένα στοιχείο με ηλεκτρικές ιδιότητες ανάμεσα σε αυτές ενός αγωγού και ενός μονωτή

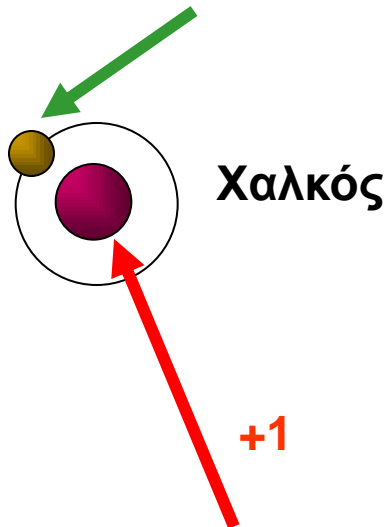


# Παραδείγματα ημιαγωγών

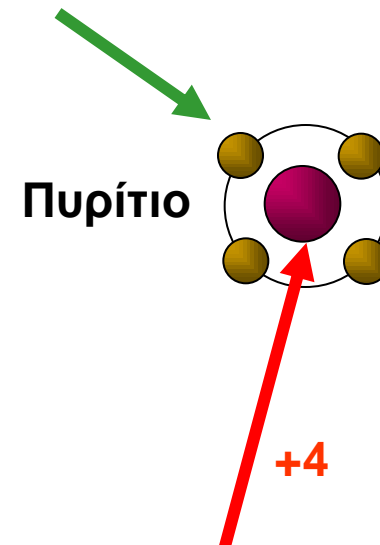
- Οι ημιαγωγοί έχουν 4 ηλεκτρόνια σθένους
- Δημοφιλείς ημιαγωγοί:
  - Γερμάνιο (Germanium)
  - Πυρίτιο (Silicon)

# Διαγράμματα πυρήνα για χαλκό και πυρίτιο

1 e στην εξ. στοιβάδα

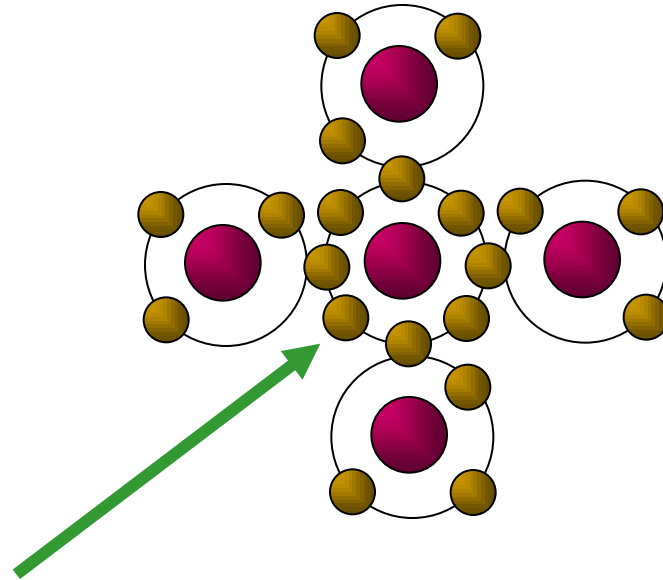


4 e στην εξ. στοιβάδα



**Πυρήνας + εσωτ. τροχιές ηλεκτρονίων**

Τα άτομα σε ένα κρύσταλλο πυριτίου μοιράζονται  
ηλεκτρόνια



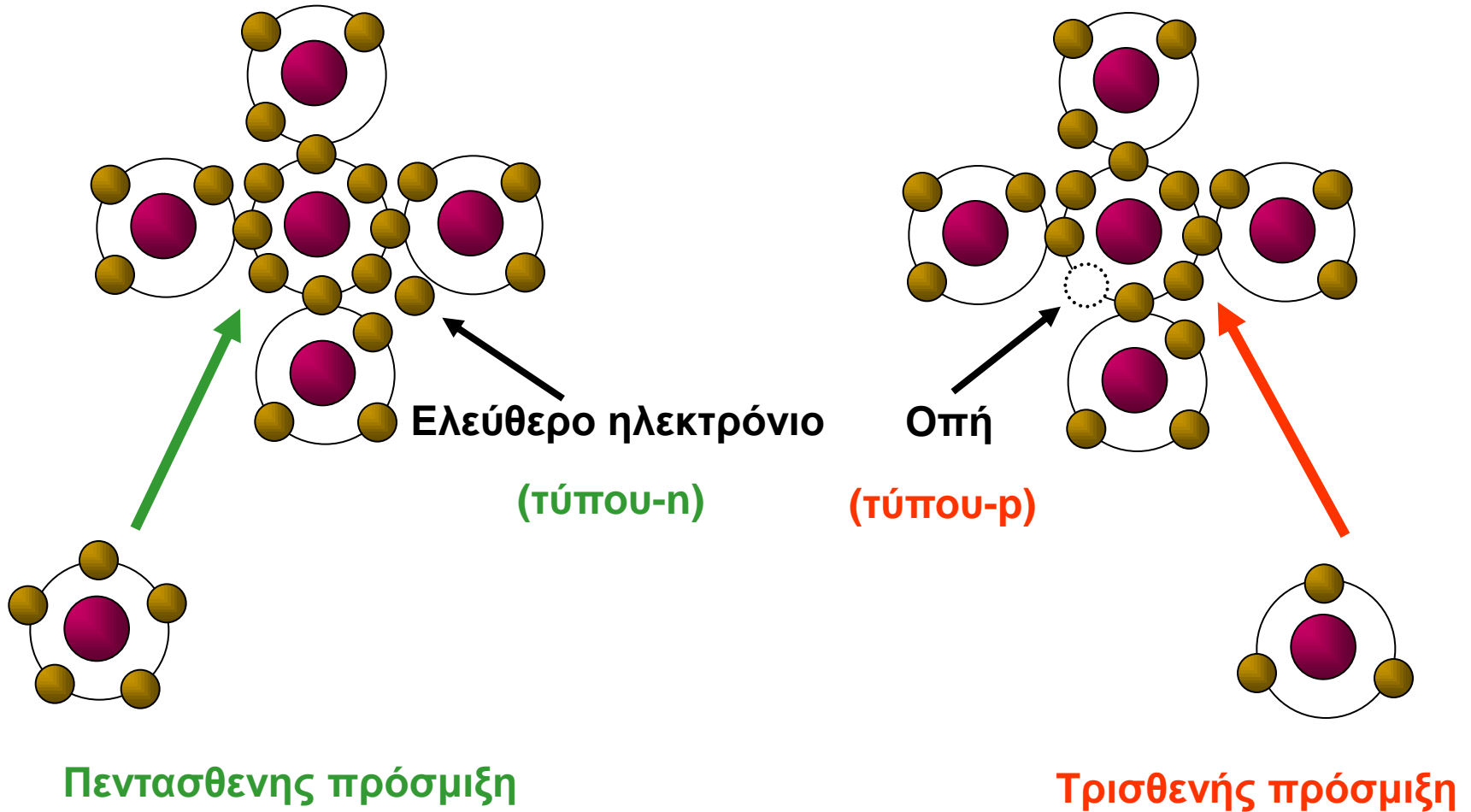
**Κορεσμός εξ. στοιβάδας:  $n = 8$**

**Επειδή τα ηλεκτρόνια της εξ. στοιβάδας είναι δεσμευμένα, ένας κρύσταλλος πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου είναι σχεδόν ένας τέλειος μονωτής**

# Τι συμβαίνει μέσα σε ένα κρύσταλλο πυριτίου

- Μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές σχηματίζονται από την θερμική ενέργεια
- Άλλα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές επανασυνδέονται (επανασυζευξη)
- Ο χρόνος επανασυζευξης κυμαίνεται μεταξύ μερικών nanoseconds (nsec) μέχρι μερικών microseconds (μsec)
- Μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές υπάρχουν προσωρινά, περιμένοντας επανασυζευξη

# Οι κρύσταλλοι πυριτίου εμπλουτίζονται ώστε να παρέχουν μόνιμους φορείς



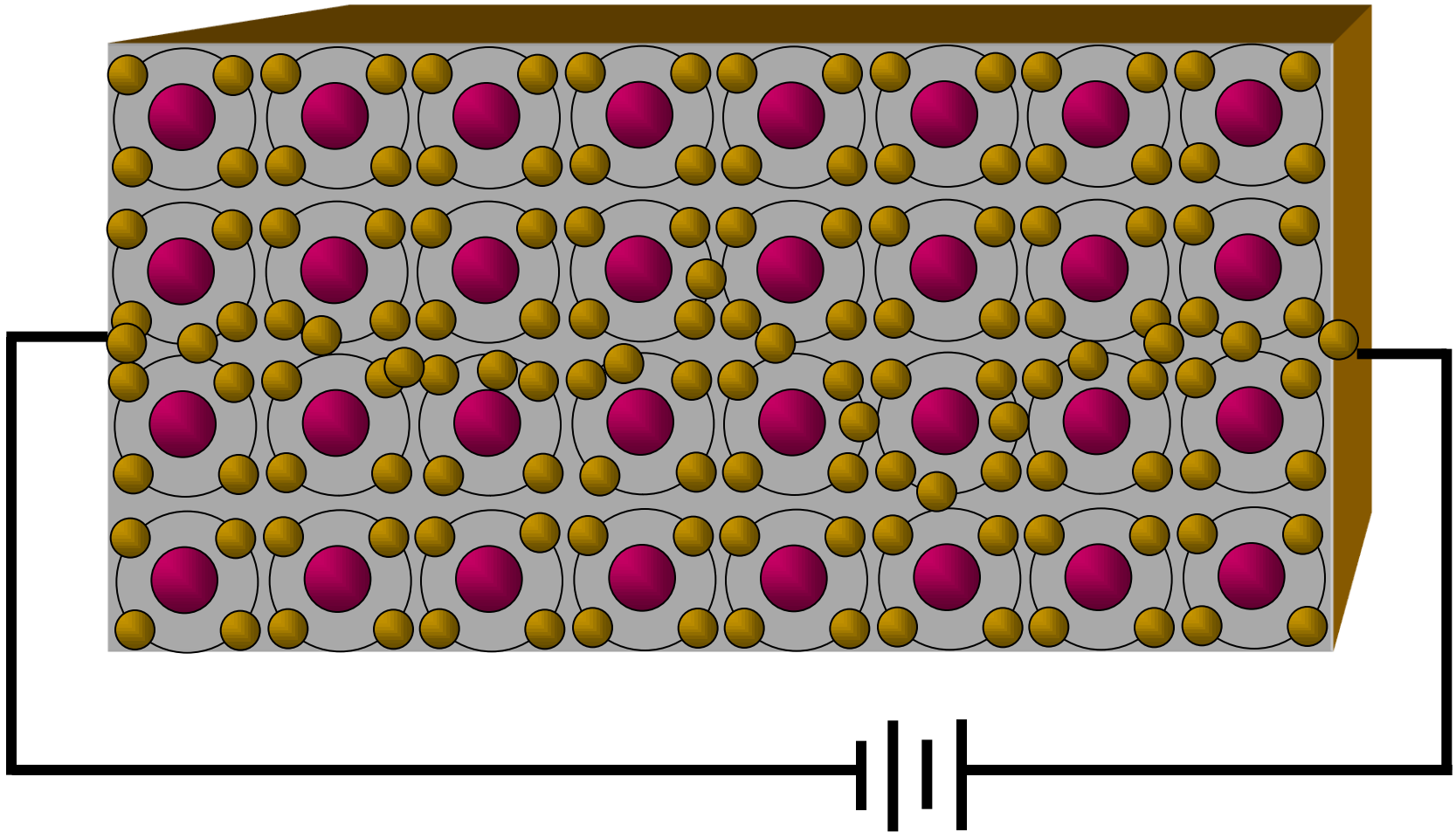
# Αμιγής ημιαγωγός

- Δεν περιέχει προσμίξεις
- Ένας κρύσταλλος πυριτίου είναι εγγενής (αμιγής) εάν κάθε άτομο του κρυστάλλου είναι άτομο πυριτίου
- Δυο τύποι ροής ηλεκτρικού ρεύματος: ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές

# Ημιαγωγός με προσμίξεις (εξωγενής ημιαγωγός)

- Προσθέτουμε άτομα προσμίξεων σε έναν αμιγή ημιαγωγό ώστε να αλλάξουμε την ηλεκτρική του αγωγιμότητα

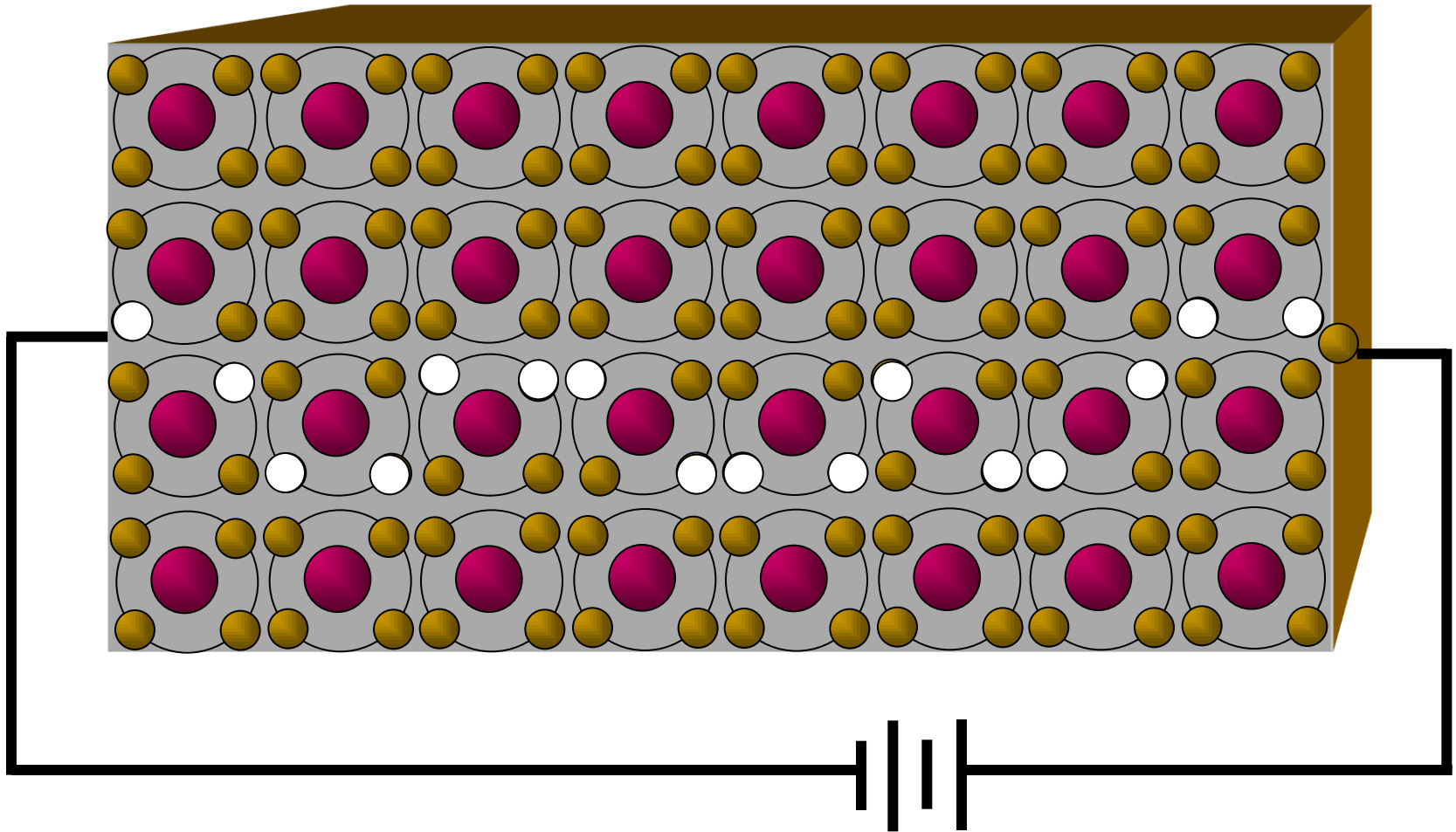
## Πρόσμιξη κρύσταλλου πυριτίου με πεντασθενες στοιχείο



Τα ελεύθερα  $e^-$  σε ημιαγωγό πυριτίου τύπου-n υποστηρίζουν την ροή ηλ. ρεύματος



Παρατηρούμε ότι το ρεύμα των οπών είναι αντίθετο σε κατεύθυνση από το ρεύμα των  $e$

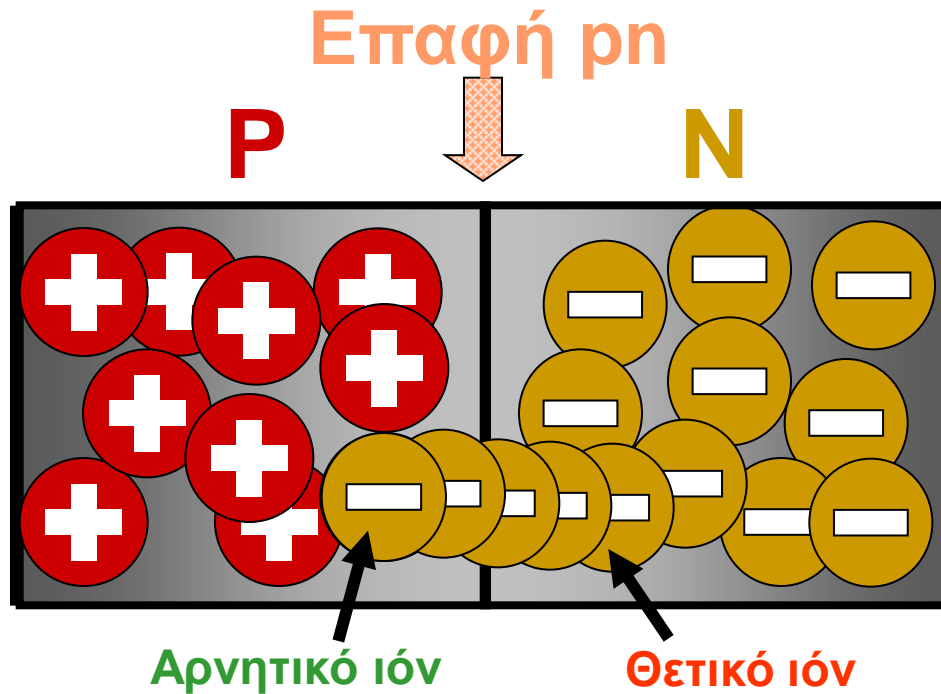


**Οι οπές σε ημιαγωγό πυριτίου τύπου-p υποστηρίζουν την ροή ηλ. ρεύματος**

# Ημιαγωγοί: Περίληψη

- Το πιο δημοφιλές υλικό είναι το πυρίτιο
- Οι καθαροί κρύσταλλοι πυριτίου ονομάζονται και αμιγείς ημιαγωγοί
- Οι εμπλουτισμένοι κρύσταλλοι πυριτίου ονομάζονται και εξωγενείς ημιαγωγοί
- Ένας ημιαγωγός μπορεί να εμπλουτιστεί ώστε να έχει είτε περίσσειμα οπών είτε ελευθέρων ηλεκτρονίων
- Οι εμπλουτισμένοι κρύσταλλοι πυριτίου είναι είτε τύπου n είτε τύπου p
- Ένας ημιαγωγός τύπου n θα έχει μερικούς φορείς μειονότητας (οπές)
- Ένας ημιαγωγός τύπου p θα έχει μερικούς φορείς μειονότητας (ηλεκτρόνια)

Εμπλουτίζοντας έναν κρύσταλλο Si και με τους 2 τύπους ημιαγωγών δημιουργείται μια επαφή (δίοδος) pn

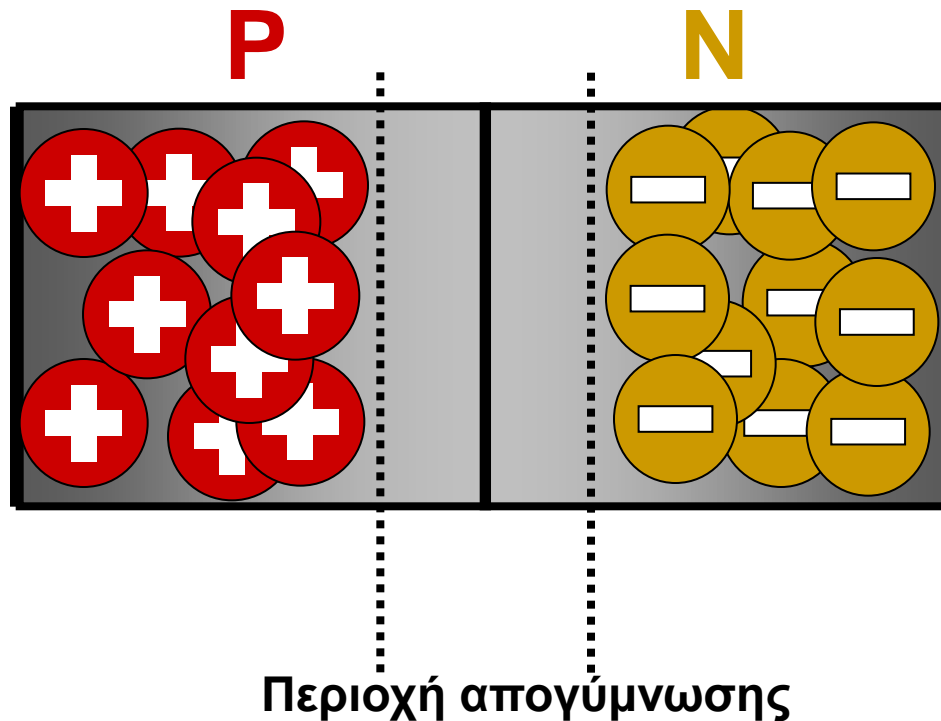


Μερικά ηλεκτρόνια θα διασχίσουν την επαφή και θα «γεμίσουν» τις οπές.  
Ένα ζευγάρι ιόντων δημιουργείται κάθε φορά που συμβαίνει αυτό  
Όσο αυξάνει αυτή η φόρτιση των ιόντων, εμποδίζει  
επιπλέον «μετανάστευση» e κατά μήκος της επαφής pn

# Το φράγμα δυναμικού της επαφής pn

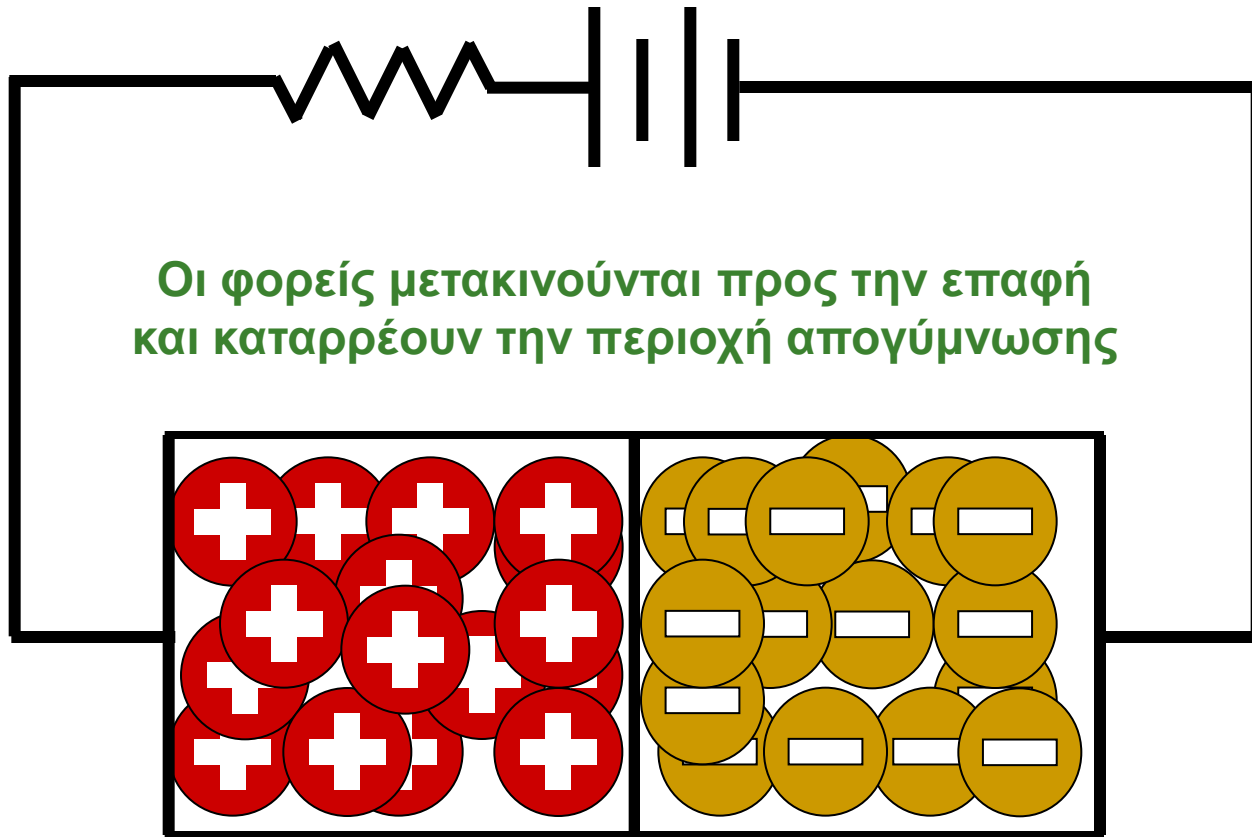
- Η διάχυση των ηλεκτρονίων στην επαφή pn δημιουργεί ζεύγη θετικών και αρνητικών ιόντων τα οποία ονομάζονται δίπολα
- Συνεπώς σε κάθε δίπολο αντιστοιχεί ένα ηλεκτρικό πεδίο
- Η επαφή pn εξισορροπεί όταν το φράγμα δυναμικού εμποδίζει περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων στην επαφή pn
- Στους 25 βαθμούς κελσίου, το φράγμα δυναμικού για μια επαφή pn πυριτίου είναι περίπου 0.7 volts

Κάθε  $e$  που διασχίζει την επαφή και «γεμίζει» μια οπή στην ουσία εξαλείφει και τους 2 φορείς



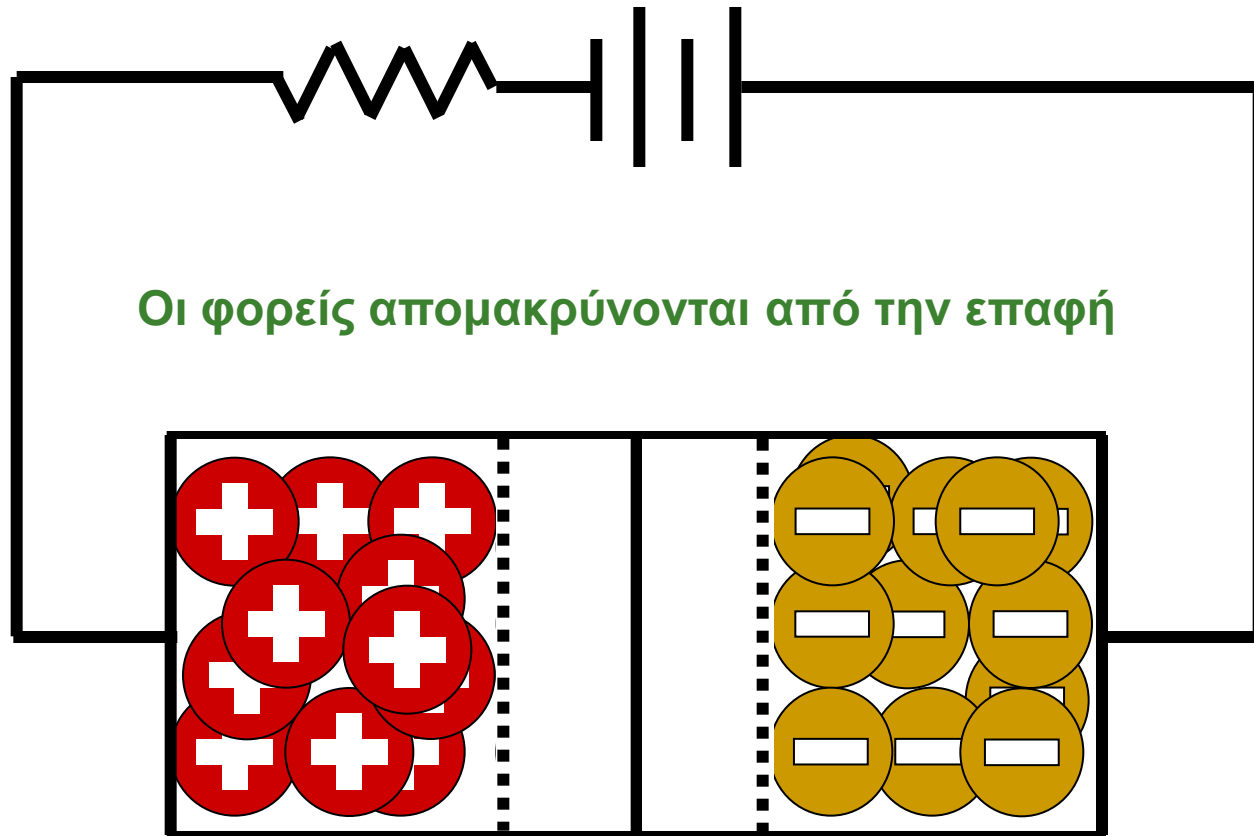
Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας περιοχής στην επαφή στην οποία δεν υπάρχουν φορείς και συμπεριφέρεται σαν μονωτής

# Ορθή πόλωση



**Εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού, η δίοδος ρη άγει**

# Ανάστροφη πόλωση



Η περιοχή απογύμνωσης ξαναδημιουργείται  
και η δίοδος δεν άγει

# Πόλωση διόδου pn

- Οι διόδοι πυριτίου άγουν με την εφαρμογή ορθής πόλωσης περίπου 0.7 volts
- Με την εφαρμογή ανάστροφης πόλωσης, η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται και η διάδος δεν άγει
- Ένα μικρό ρεύμα φορέων μειονότητας δημιουργείται με την ανάστροφη πόλωση
- Το ανάστροφο ρεύμα που προκαλείται από τους φορείς μειονότητας καλείται ρεύμα κόρου



# Ανάστροφη πόλωση διόδου pn

- Οι δίοδοι pn δεν μπορούν να αντέξουν μεγάλες τιμές ανάστροφου ρεύματος
- Για υψηλές τιμές τάσης στην ανάστροφη πόλωση μιας διόδου pn, το φαινόμενο της χιονοστιβάδας εμφανίζεται, το οποίο οφείλεται στην ξαφνική εμφάνιση και κίνηση μεγάλου αριθμού φορέων μειονότητας
- Τυπικές τιμές της τάσης διάσπασης ή κατάρρευσης της διόδου pn είναι από 50 volts μέχρι 1 kV

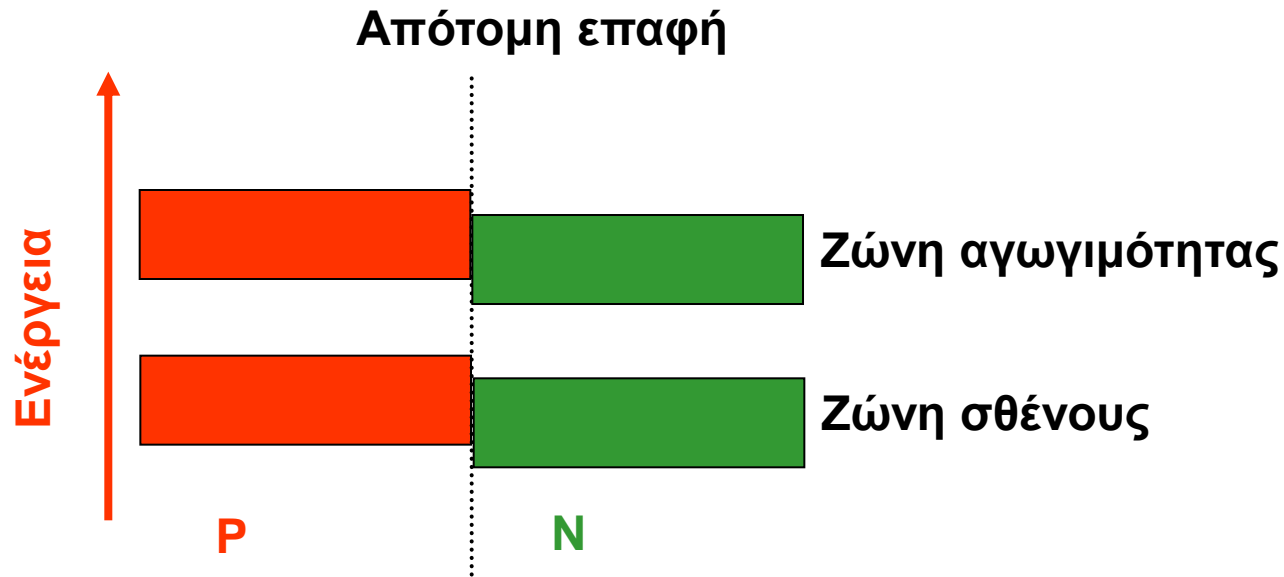
# Ενεργειακά επίπεδα

- Επιπλέον ενέργεια απαιτείται για να μεταφερθεί ένα ηλεκτρόνιο σε μια υψηλότερη τροχιά
- Τα ηλεκτρόνια που δεν είναι κοντά στο πυρήνα έχουν υψηλότερη ενέργεια
- Όταν ένα ηλεκτρόνιο πέφτει σε μια χαμηλότερη τροχιά, χάνει ενέργεια με την μορφή θερμότητας, φωτός ή άλλης ακτινοβολίας
- Οι δίοδοι LED αποτελούν ένα παράδειγμα όπου μια ποσότητα της ενέργειας μετατρέπεται σε φως

# Ενεργειακός «λόφος»

- Αντιστοιχεί στο φράγμα δυναμικού μιας διόδου pn
- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια χρειάζονται επαρκή ποσότητα ενέργειας για να διασχίσουν την επαφή pn
- Μια εξωτερική πηγή τάσης η οποία πολώνει ορθά την δίοδο pn παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας

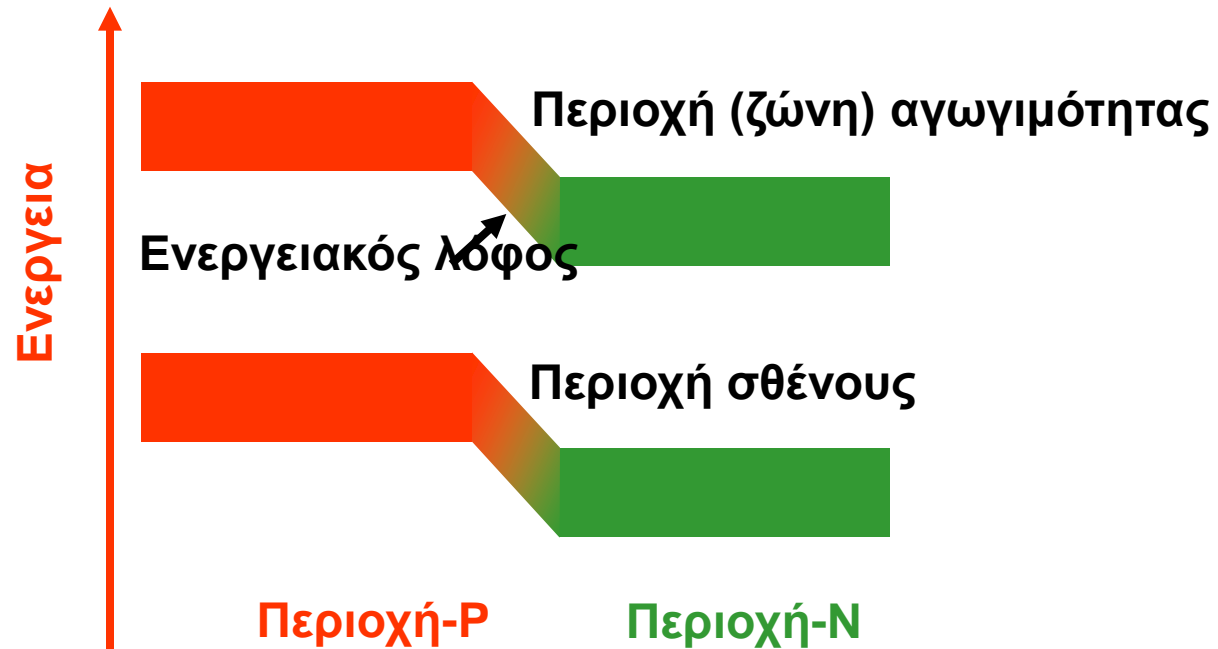
Η πλευρά p μιας επαφής pn έχει τρισθενή άτομα με φορτίο πυρήνα +3. Αυτός ο πυρήνας προσελκύει e λιγότερο απ' ότι ένας πυρήνας με φορτίο +5 .



Σε μια απότομη επαφή, η p πλευρά βρίσκεται σε ένα ελαφρώς υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο.

Οι πραγματικές δίοδοι εμφανίζουν μια σταδιακή αλλαγή από το ένα υλικό στο άλλο. Η έννοια της απότομης επαφής είναι θεωρητική.

# Ενεργειακές περιοχές μετά την δημιουργία της περιοχής απογύμνωσης



Σε ένα  $e$  που προσπαθεί να διαχυθεί στην επαφή  $pn$ , η διαδρομή που θα πρέπει να ακολουθηθεί μοιάζει με ενεργειακό λόφο. Θα πρέπει να λάβει την επιπλέον ενέργεια από μια εξωτερική πηγή.

# Θερμοκρασία επαφής pn

- Η θερμοκρασία της επαφής pn είναι η θερμοκρασία μέσα στην δίοδο, ακριβώς στην επαφή pn.
- Όταν η δίοδος άγει, η θερμοκρασία της επαφής είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Η τιμή του φράγματος δυναμικού είναι μικρότερη για αυξημένες θερμοκρασίες της επαφής pn.
- Γενικά η τιμή του φράγματος δυναμικού μειώνεται κατά 2 mV για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1 βαθμό Κελσίου.

# Ρεύματα ανάστροφης πόλωσης διόδου pn

- Το  $I_S$ , το ανάστροφο ρεύμα κόρου, διπλασιάζεται για κάθε 10 βαθμούς Celsius αύξηση της θερμοκρασίας. Δεν είναι ανάλογο της ανάστροφης τάσης.
- Η επιφάνεια ενός κρυστάλλου πυριτίου δεν έχει ολοκληρωμένους ομοιοπολικούς δεσμούς. Οι οπές που δημιουργούνται παράγουν ένα επιφανειακό ρεύμα διαρροής το οποίο είναι ανάλογο με την ανάστροφα εφαρμοζόμενη τάση.