

**Δίοδος Επαφής p-n (συν.)**

- *Μηχανισμοί κατάρρευσης επαφής*
- *Είδη διόδων*

Λευτέρης Καπετανάκης



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Χειμώνας 2010

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότοπό τους.

Ανακεφαλαίωση: I - V Επαφής pn

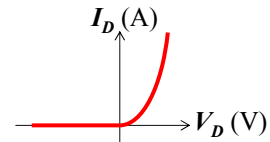
- Υπό ορθή πόλωση, ο δυναμικός φραγμός στην επαφή ελαττώνεται, και έτσι φορείς ρέουν (μέσω διάχυσης) δια μέσου της επαφής.
 - Το ρεύμα αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της ορθής πόλωσης
 - Οι φορείς γίνονται φορείς μειονότητας μόλις αυτοί περνούν την επαφή, καθώς αυτοί διαχέονται μέσα στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές, επανασυνδέονται με τους φορείς πλειονότητας (οι οποίοι παρέχονται από τις μεταλλικές επαφές)

“έγχυση” των φορέων μειονότητας

- Υπό ανάστροφη πόλωση, ο δυναμικός φραγμός στην επαφή αυξάνεται, έτσι οι ελάχιστοι φορείς της περιοχής απογύμνωσης ρέουν δια μέσου της επαφής
 - Αν ένας φορέας εισέλθει μέσα στην περιοχή απογύμνωσης (με θερμική γένεση ή με διάχυση από τις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές), θα παρασυρθεί δια μέσου της επαφής από το ενυπάρχον ηλεκτρικό πεδίο.

“συλλογή” των φορέων μειονότητας

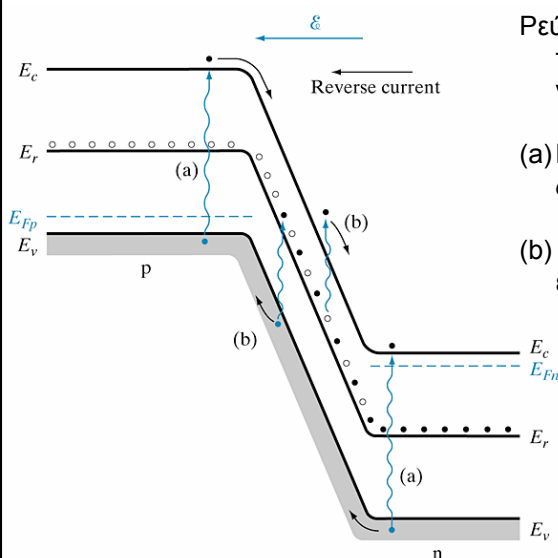
→ ανάστροφο ρεύμα



TL1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Ανάστροφη Πόλωση επαφής pn



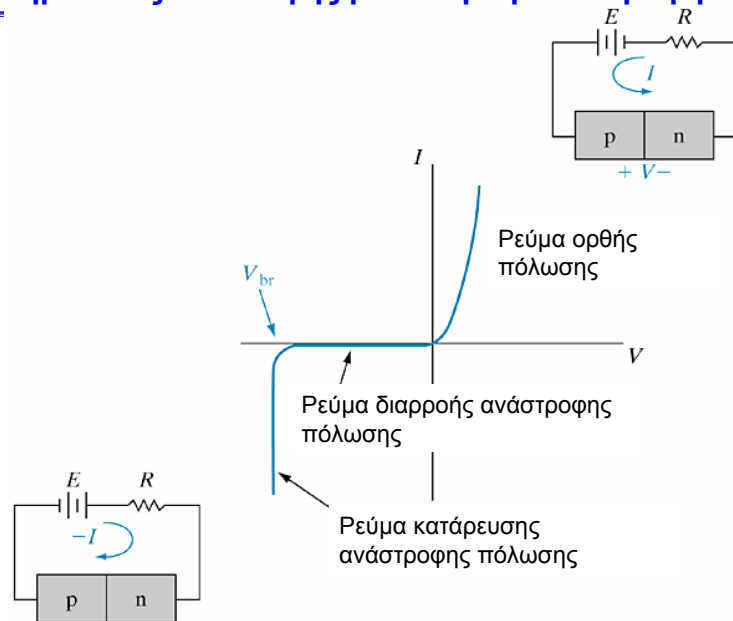
Ρεύμα σε μια ανάστροφα πολωμένη επαφή p - n εξαιτίας γένεσης των φορέων με:

- (a) Γένεση ΖΗΟ με γένεση από ζώνη-σε-ζώνη, και
- (b) Γένεση από ένα επίπεδο επανασύνδεσης.

TL1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Χαρακτηριστικές I-V επαφής pn σε ορθή-ανάστροφη πόλωση

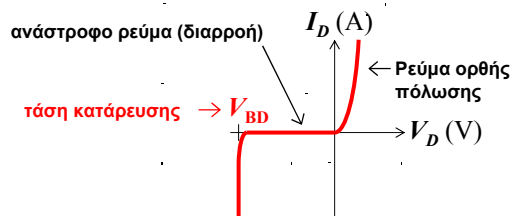


ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Ανάστροφη Κατάρρευση επαφής pn

- Καθώς η τάση ανάστροφης πόλωσης αυξάνει, το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή απογύμνωσης αυξάνει. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή το ανάστροφο ρεύμα επιδεικνύει μια δραματική αύξηση:



ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Ανάστροφη Κατάρρευση επαφής pn

- ❑ Η ανάστροφη κατάρρευση μπορεί να συμβεί με δύο μηχανισμούς, καθένας από αυτούς απαιτεί ένα κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή της επαφής
- ❑ - Κατάρρευση (ή φαινόμενο) Zener: συμβαίνει σε χαμηλές ανάστροφες τάσεις ($\leq 5V$)
- ❑ - Κατάρρευση χιονοστιβάδας (Avalanche) : συμβαίνει σε υψηλότερες ανάστροφες τάσεις ($\geq 8V$)

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Κατάρρευση Zener

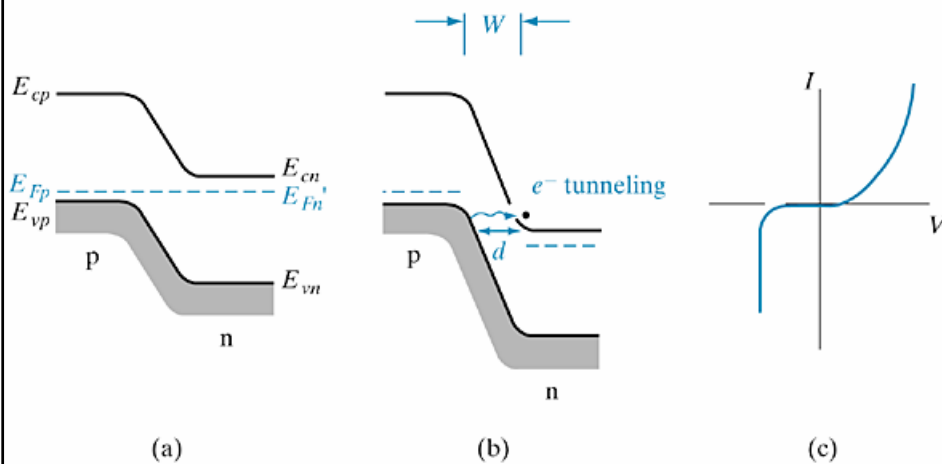
- ❑ Φαινόμενο Zener:

Όταν μια επαφή υψηλής νόθευσης είναι ανάστροφα πολωμένη, οι ενεργειακές ζώνες αρχίζουν να έρχονται απέναντι η μια με την άλλη σε σχετικά χαμηλές τάσεις (δες επόμενο σχήμα). Η αντιπαράθεση των ζωνών ευθυγραμμίζει ένα μεγάλο αριθμό από άδειες καταστάσεις στη ζώνη αγωγιμότητας της n-πλευράς με πολλές γεμάτες καταστάσεις της ζώνης σθένους της p-πλευράς. Αν ο φραγμός ο οποίος χωρίζει αυτές τις ζώνες είναι στενός, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τα ηλεκτρόνια να μπορούν να διέλθουν μέσα από αυτόν με το μηχανισμό σήραγγας. Η διέλευση των ηλεκτρονίων με σήραγγα από τη ζώνη σθένους της p-πλευράς στη ζώνη αγωγιμότητας της n-πλευράς δημιουργεί ένα ανάστροφο ρεύμα από την περιοχή n στην περιοχή p.

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Κατάρρευση Zener



Φαινόμενο Zener : (a) ισχυρά νοθευμένη επαφή στην ισορροπία, (b) ανάστροφη πόλωση με διέλευση ηλεκτρονίων με σήραγγα από την πλευρά p στην πλευρά n; (c) χαρακτηριστική $I-V$.

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Κατάρρευση Χιονοστοιβάδας

❑ Α) Ιονισμός με σύγκρουση :

Για **επαφές με ελαφριά νόθευση**, η διέλευση των ηλεκτρονίων με σήραγγα είναι αμελητέα, και αντί αυτής, ο μηχανισμός κατάρρευσης περιλαμβάνει τον “**ιονισμό με σύγκρουση**” πλήθους ατόμων από ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας. Τα συνηθισμένα γεγονότα σκέδασης-πλέγματος μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία **ΖΗΟ (ζευγών ηλεκτρονίου-οπής)** αν οι φορείς οι οποίοι σκεδάζονται έχουν μεγάλη ενέργεια. Αν το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή της επαφής είναι μεγάλο, ένα ηλεκτρόνιο το οποίο εισέρχεται από την p-πλευρά είναι δυνατόν να επιταχυνθεί σε πολύ υψηλή κινητική ενέργεια ώστε να προκαλέσει **μια σύγκρουση ιονισμού με το πλέγμα** (Δες επόμενο σχήμα). Μια τέτοια μεμονωμένη αλληλεπίδραση έχει σαν αποτέλεσμα τον **πολλαπλασιασμό των φορέων**. Το αρχικό ηλεκτρόνιο και το ηλεκτρόνιο που δημιουργείται και τα δύο ολισθαίνουν στην n-πλευρά της επαφής, ενώ η οπή που δημιουργήθηκε ολισθαίνει στην p-πλευρά.

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Κατάρρευση Χιονοστιβάδας

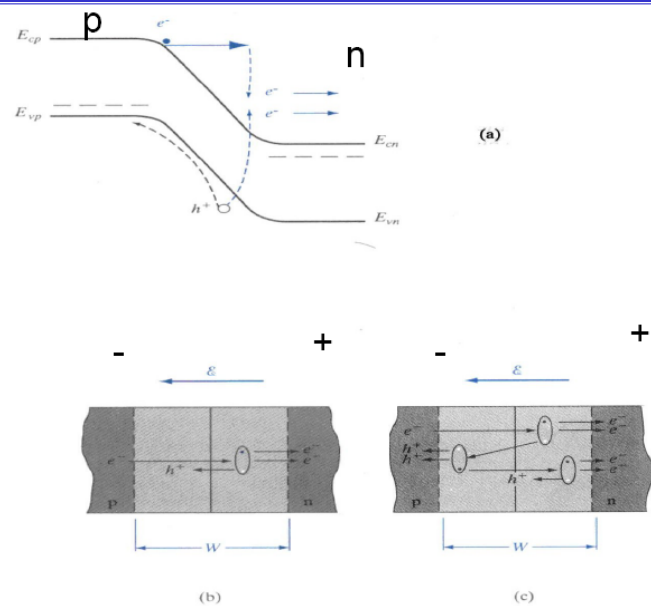
□ B) Διαδικασία Χιονοστιβάδας:

Με αυτόν τον τρόπο, ένα εισερχόμενο ηλεκτρόνιο **μπορεί να έχει μια σύγκρουση με το πλέγμα και να δημιουργηθεί ένα ΖΗΟ**. Στη συνέχεια, κάθε ένας από αυτούς τους φορείς έχει την ευκαιρία να δημιουργήσει ένα νέο ΖΗΟ, και καθένα από αυτά μπορούν επίσης να δημιουργήσουν ένα ΖΗΟ, κοκ. Αυτή είναι μια διαδικασία χιονοστιβάδας, καθώς κάθε εισερχόμενος φορέας μπορεί να ξεκινήσει τη δημιουργία ενός μεγάλου αριθμού νέων φορέων.

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Κατάρρευση Χιονοστιβάδας

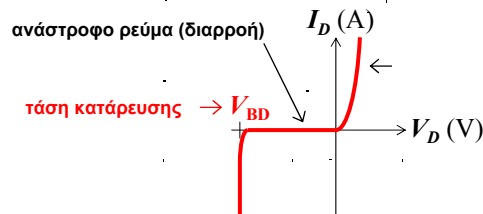


ΤΛ1001

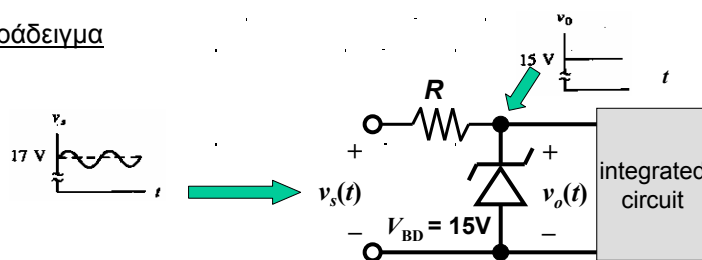
L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Δίοδος Zener

Μια **δίοδος Zener** είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί στην περιοχή κατάρρευσης.



Παράδειγμα



ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Άλλες σημαντικές δίοδοι

Δίοδος εκπομπής-φωτός (LEDs): Τυπικά, φτιάχνεται από ημιαγωγούς III-V, όπως είναι το γάλλιο (III)-αρσενικό (V) GaAs. Τα LEDs εκπέμπουν φως χαρακτηριστικού χρώματος (μήκους κύματος) όταν είναι ορθά πολωμένα. Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα

Δίοδοι Laser : Παρόμοια με το LED, ένα λέιζερ δίοδου έχει Ενσωματωμένα κάτοπτρα τα οποία επαυξάνουν σταδιακά το πλάτος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια δίοδο σε ισχυρή ορθή πόλωση. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι συμφασική και μονοχρωματική (LASER = light amplification by the stimulated emission of radiation)

Ηλιακά Κύτταρα: Δίοδος pn εκτεταμένης-επιφάνειας η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα φορτίο το οποίο είναι συνδεδεμένο με αυτήν. Η ενέργεια των φωτονίων, $h\nu$, της οπτικής ακτινοβολίας που απορροφάτε παρέχει την αρχική ενέργεια (h = σταθερά Planck, 6.63×10^{-34} Js, ν = συχνότητα ακτινοβολίας).

ΤΛ1001

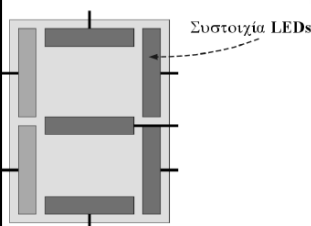
L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Light Emitting Diode (LED)

- Τα LEDs κατασκευάζονται από ενώσεις ημιαγωγών
 - Οι φορείς διαχέονται δια μέσου μιας ορθά πολωμένης επαφής και επανασυνδέονται στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές
 - εκπομπή ορατού φωτός

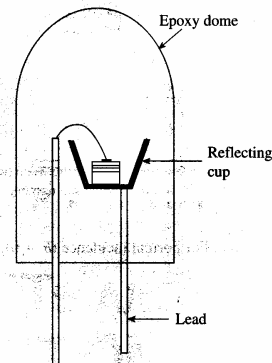


Σύμβολο διόδου LED



Συστοιχία LEDs

Σύστημα απεικόνισης επτά συστοιχιών LEDs



Δομή διόδου LED

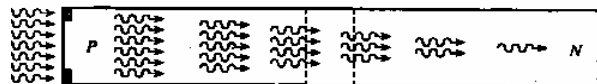
Semiconductor	Color	Peak λ (μm)
GaAs _{0.6} P _{0.4}	Red	0.650
GaAs _{0.35} P _{0.65} :N	Orange-Red	0.630
GaAs _{0.14} P _{0.86} :N	Yellow	0.585
GaP:N	Green	0.565
GaP:Zn-O	Red	0.700
AlGaAs	Red	0.650
AlInGaP	Orange	0.620
AlInGaP	Yellow	0.585
AlInGaP	Green	0.570
SiC	Blue	0.470
GaN	Blue	0.450

TA1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Οπτοηλεκτρονικές Δίοδοι

- Το φως το οποίο προσπίπτει σε μια επαφή pn δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής (ZHO)
- Οι φορείς μειονότητας που δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης, και οι φορείς μειονότητας που δημιουργούνται στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές και μετά διαχέονται στην περιοχή απογύμνωσης, παρασύρονται διαμέσου της επαφής από το ηλεκτρικό πεδίο.



- Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια επιπλέον συνεισφορά στο ρεύμα το οποίο ρέει διαμέσου της διόδου:

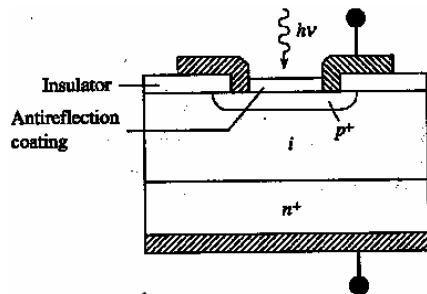
$$I_D = I_S (e^{qV_D/kT} - 1) - I_{optical}$$

όπου $I_{optical}$ είναι ανάλογο της έντασης του φωτός

TA1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Φωτοδίοδος



□ Μια ενδογενής περιοχή τοποθετείται μεταξύ των περιοχών p-τύπου και n-τύπου

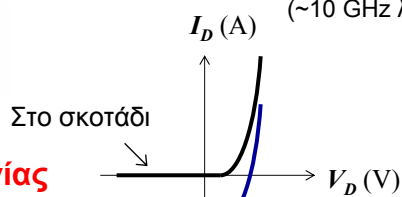
- $W_j \cong W_{i\text{-region}}$, έτσι ώστε τα πιο πολλά ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης

→ ταχύτερος χρόνος απόκρισης (~10 GHz λειτουργία)



Σημείο λειτουργίας

Με πρόσπτωση φωτός

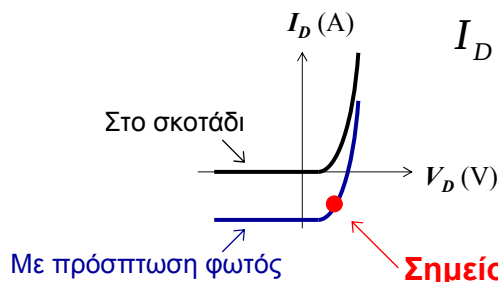


TA1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Φωτοβολταϊκό (Ηλιακό) Κύτταρο

Όταν επαρκής φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω σε δίοδο με μηδενική πόλωση, τότε, στα άκρα της βαθμίδας αναπτύσσεται μια τάση V_D , που δημιουργεί ρεύμα ορθής πόλωσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φωτοβολταϊκό** και αποτελεί την αρχή λειτουργίας των **φωτοβολταϊκών κυττάρων**, (solar cells).



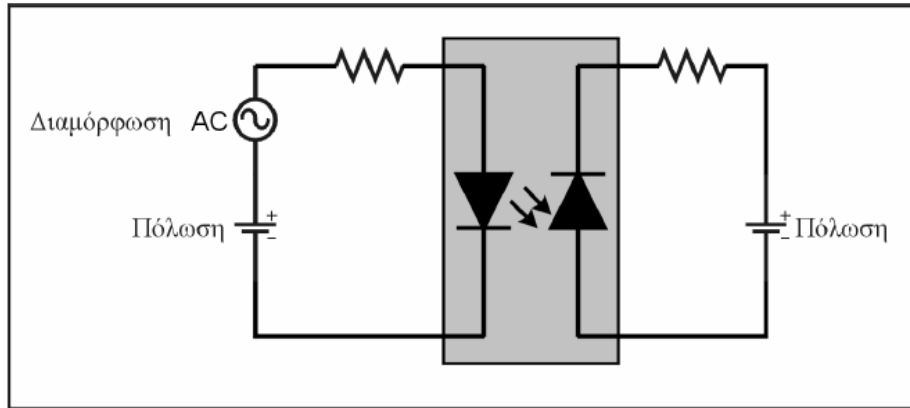
$$I_D = I_S (e^{qV_D/kT} - 1) - I_{optical}$$

Σημείο λειτουργίας

TA1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

ΟΠΤΟΖΕΥΚΤΕΣ



Διάταξη φωτοζεύκτη διόδων

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Δίοδοι varicap



Οι δίοδοι varicap είναι δίοδοι μεταβλητής χωρητικότητας, όπου η χωρητικότητα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ανάστροφη τάσης πόλωσης που εφαρμόζεται.

Όταν πολώσουμε μια δίοδο varicap κατά την ανάστροφη φορά, τότε η δίοδος συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, όπου η χωρητικότητά της θα είναι: $C_d = dQ/dV$, όπου C_d η χωρητικότητα της διόδου, dQ το μεταβαλλόμενο φορτίο και dV η μεταβλητή τάση που εφαρμόζεται. Όσο αυξάνεται η τάση, τόσο μειώνεται η χωρητικότητα της διόδου και όσο μειώνεται η τάση τόσο περισσότερο αυξάνεται η χωρητικότητα. Στην ελάχιστη τιμή της ανάστροφης τάσης, έχουμε την μέγιστη χωρητικότητα.

Τις διόδους varicap τις χρησιμοποιούμε σε συντονισμένα κυκλώματα, όπως σε δέκτες τηλεοράσεων ραδιοφώνων, εκεί δηλαδή που ο συντονισμός γίνεται με ψηφιακά κυκλώματα ελέγχου, κτλ.

Είναι κατασκευασμένες να λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες και χαρακτηρίζονται από την περιοχή συχνοτήτων που εργάζονται, από την μέγιστη τάση λειτουργίας τους και την μεταβολή της χωρητικότητάς τους ανά Volt.

Παράδειγμα: Η δίοδος BA141 εργάζεται στην περιοχή των UHF, έχει μέγιστη τάση τα 30V και η μεταβολή της χωρητικότητάς της είναι 4pF/Volt. Η δίοδος αυτή χρησιμοποιείται σε κυκλώματα tuner σε δέκτες τηλεοράσεων.

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Δίοδοι σύραγγας (tunnel)

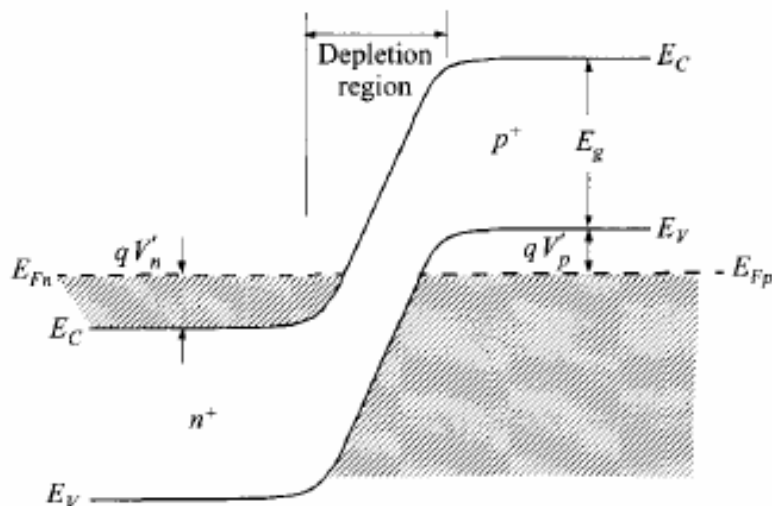
Οι δίοδοι σύραγγας χαρακτηρίζονται έτσι από το φαινόμενο "σύραγγας" που παρουσιάζουν σύμφωνα με το οποίο οι ελεύθεροι φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) υπερνικούν το δυναμικό φραγμού δίχως να έχουν την ενέργεια που απαιτείται γι' αυτό. Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευαστικά από ένα υψηλό ποσοστό προσμίξεων το οποίο είναι κατά εκατοντάδες φορές μεγαλύτερο από τις συνηθισμένες τιμές. Το ημιαγωγό υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το γερμάνιο ή το πυρίτιο, αλλά και άλλα υλικά τα οποία εμφανίζουν μικρές τιμές ενεργούς μάζας και διηλεκτρικής σταθεράς.

Οι δίοδοι σύραγγας χρησιμοποιούνται σε ενισχυτές χαμηλού θορύβου, σε ταλαντωτές και σε κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων.

ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

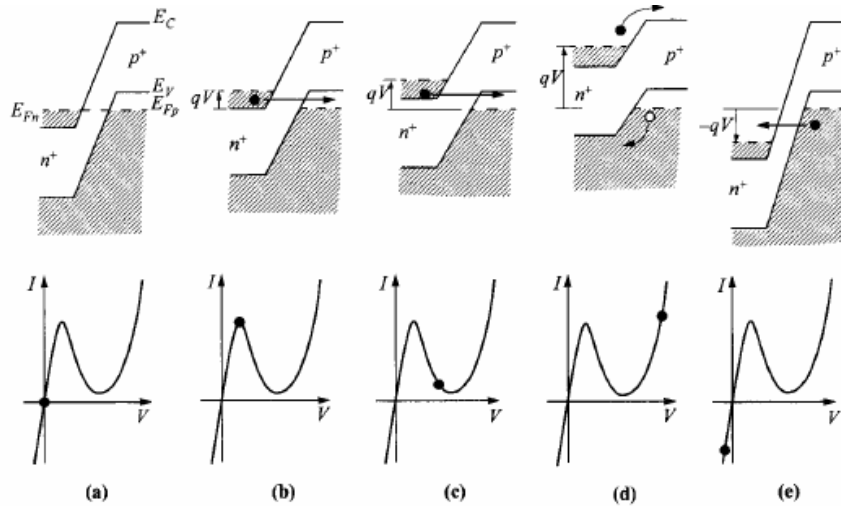
Δίοδοι σύραγγας (tunnel)



ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

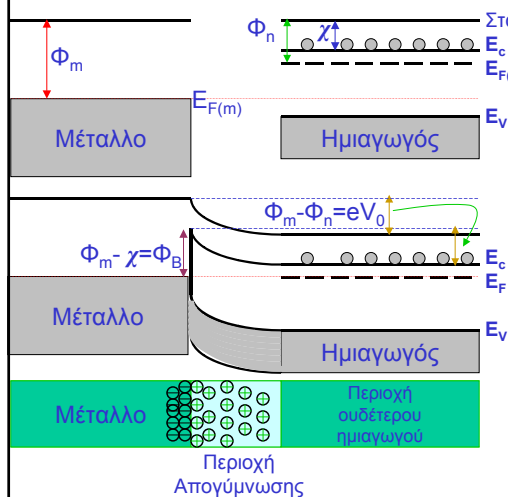
Δίοδοι σύραγγας (tunnel)



TL1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Επαφή Schottky ($\Phi_m > \Phi_n$) $\Rightarrow$ Φραγμός Schottky



Κανόνες σχηματισμού επαφής :

- 1) Κοινό επίπεδο Fermi παντού
- 2) Συνεχής στάθμη κενού
- 3) Διατήρηση χαρακτηριστικών μακριά από την επαφή

Τάση Επαφής :

$$V_0 = (\Phi_m - \Phi_n)/e$$

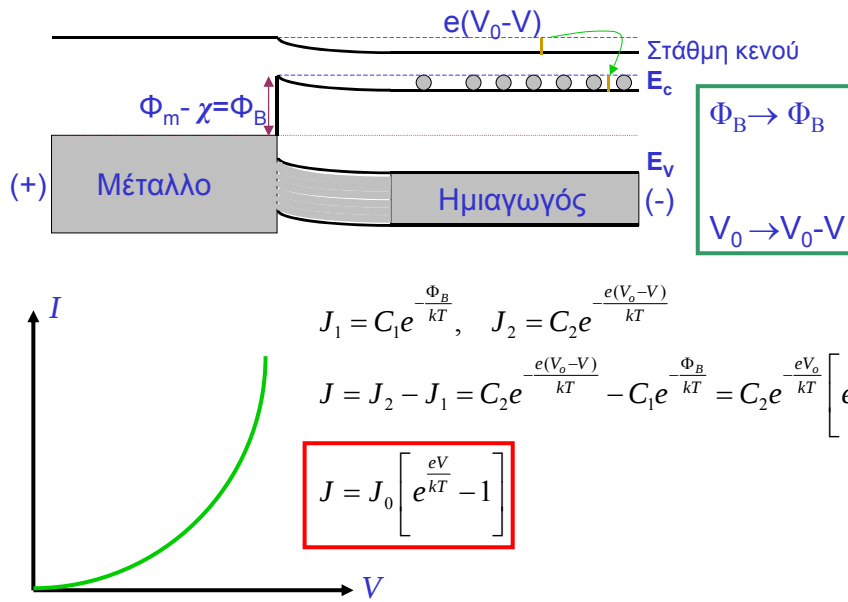
$$J_1 = C_1 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}, \quad J_2 = C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

$$J_1 = J_2 \Rightarrow C_2 = C_1 e^{-\frac{eV_0 - \Phi_B}{kT}}$$

TL1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

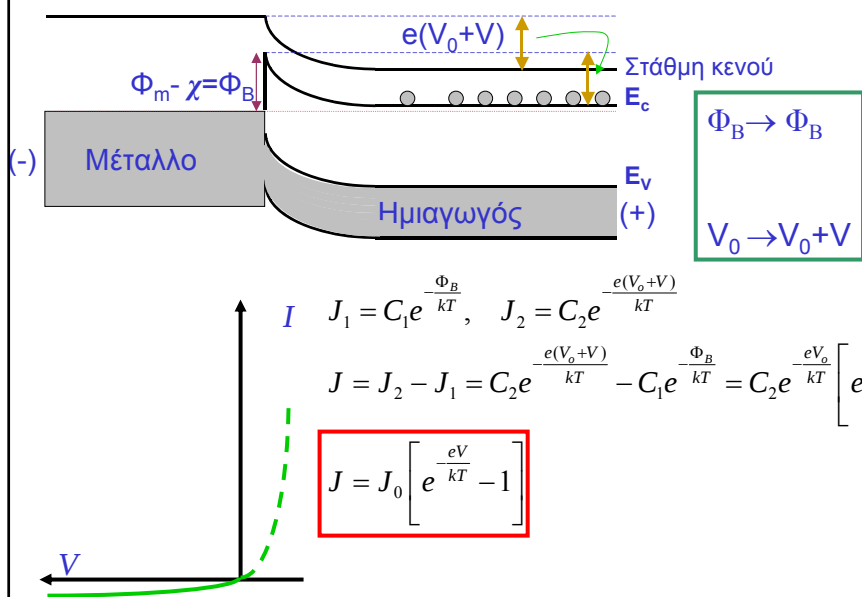
Επαφή Schottky σε ορθή πόλωση



ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

Επαφή Schottky σε ανάστροφη πόλωση



ΤΛ1001

L9: Η Ημιαγωγός Δίοδος

