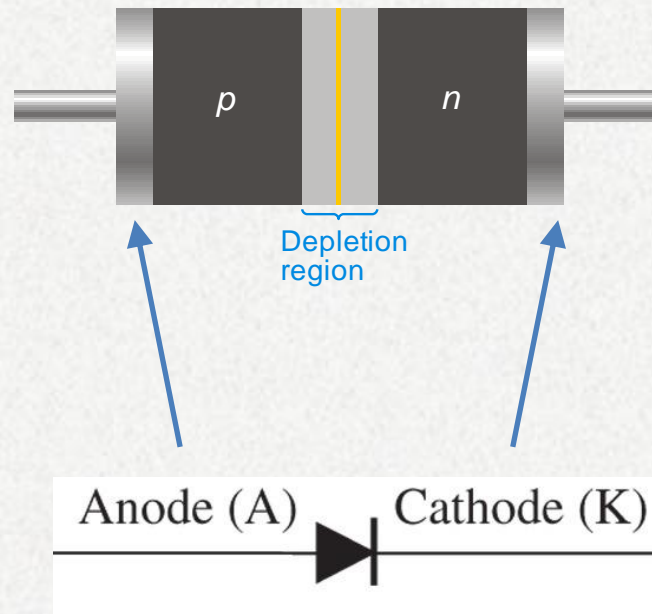


# Κρυσταλλοδίοδος

# Λειτουργία κρυσταλλοδιόδου

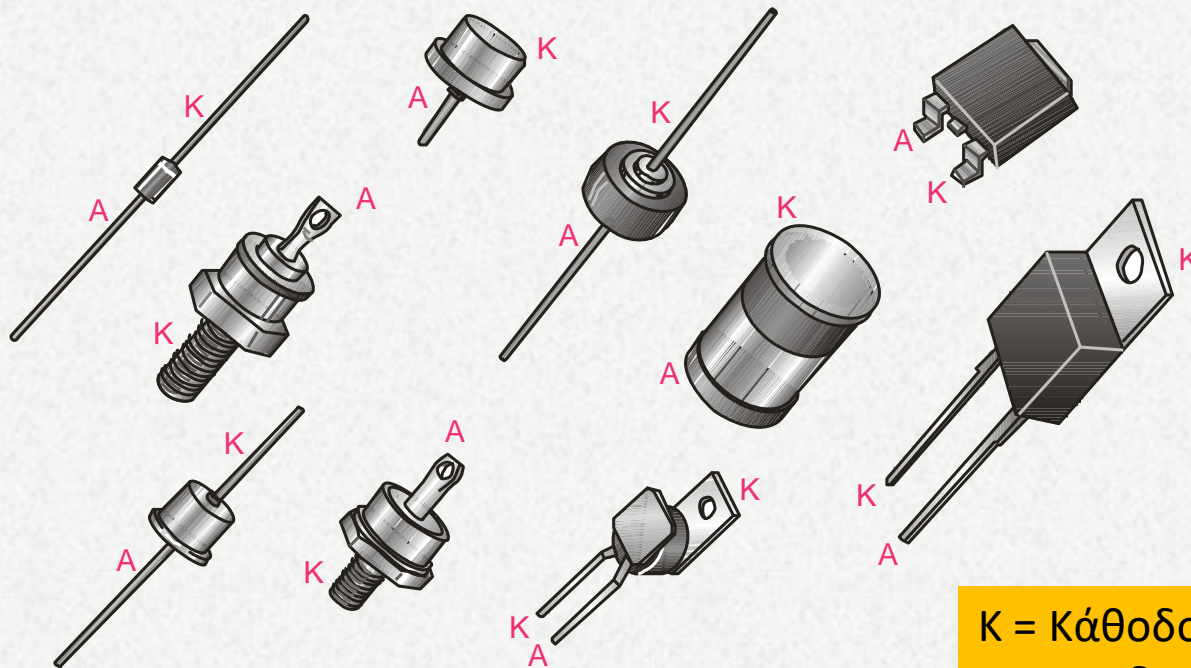
Μια δίοδος (**diode** που προέρχεται από τον όρο **di-electrode**, που σημαίνει δύο ηλεκτρόδια) είναι μια ημιαγωγική διάταξη με μία μόνο ένωση pn και μεταλλικές συνδέσεις με ακροδέκτες. Έχει τη δυνατότητα να άγει το ρεύμα σε μία μόνο κατεύθυνση.



# Λειτουργία κρυσταλλοδιόδου

## Τυπικές συσκευασίες διόδων

Μερικές τυπικές συσκευασίες διόδων είναι:



K = Κάθοδος (υλικό  $n$ )  
A = Άνοδος (υλικό  $p$ )

# Λειτουργία κρυσταλλοδιόδου

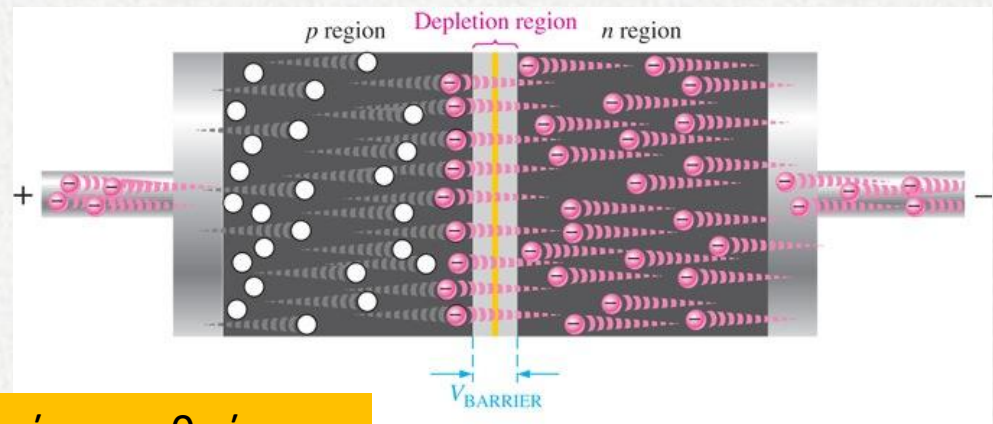
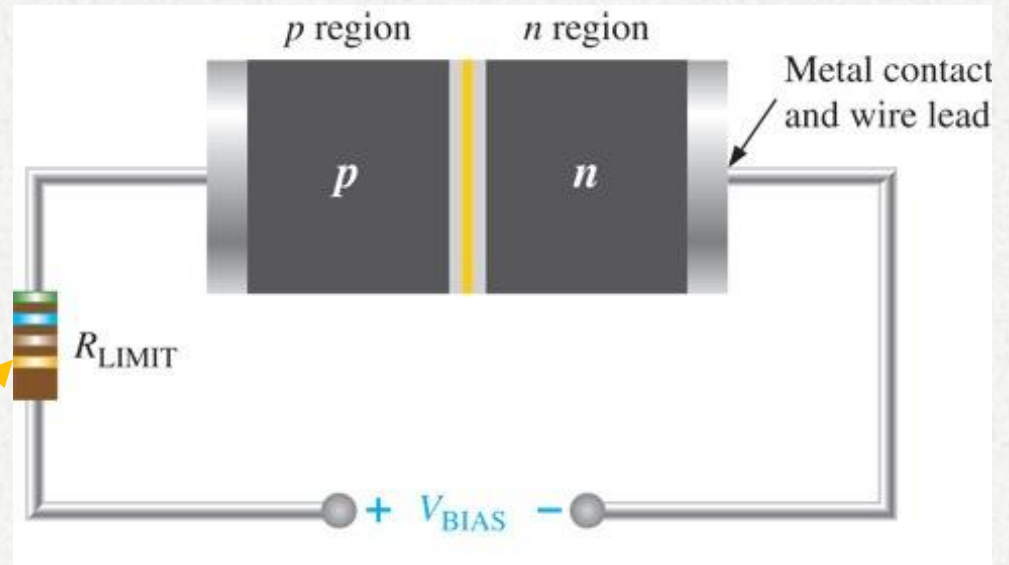
## Ορθή πόλωση

Δίοδος συνδεδεμένη σε ορθή πόλωση.

Η αντίσταση περιορίζει το ρεύμα και προστατεύει τη δίοδο.

Μια ορθά πολωμένη δίοδος που φαίνεται η ροή των φορέων πλειονότητας και η πτώση τάσης λόγω του φράγματος δυναμικού σε όλη την περιοχή απογύμνωσης.

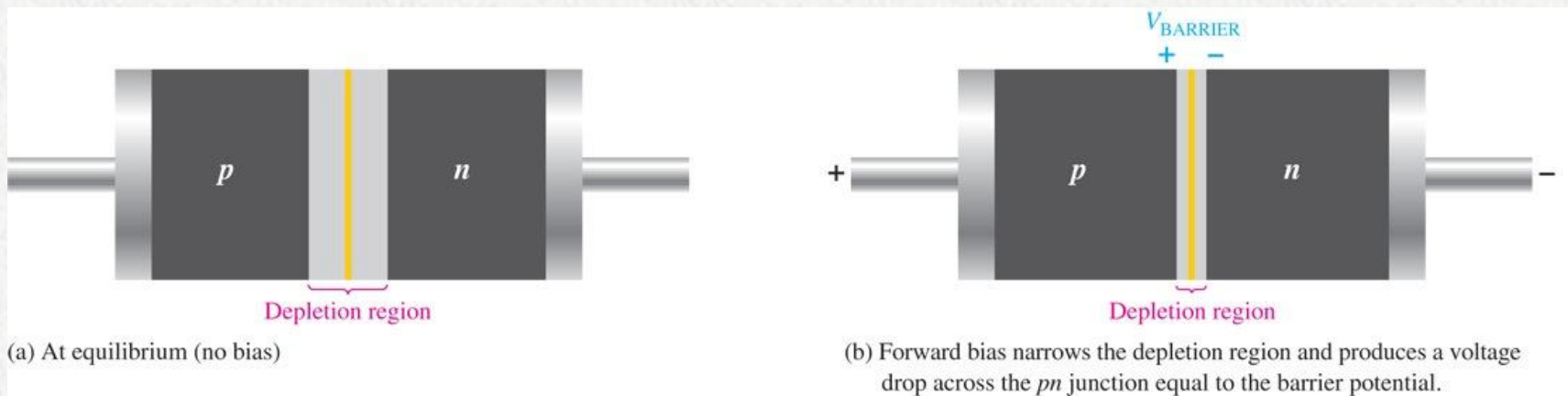
Τα όμοια φορτία απωθούνται.



# Λειτουργία κρυσταλλοδιόδου

## Ορθή πόλωση

Η ορθή πόλωση είναι η κατάσταση που επιτρέπει τη ροή ρεύματος διαμέσου της διόδου. Η τάση πόλωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού ( $\approx 0.7 \text{ V}$  για το Si και  $\approx 0.3 \text{ V}$  για το Ge).



Η περιοχή απογύμνωσης μικραίνει και αναπτύσσεται πτώση τάσης κατά μήκος της ένωσης  $pn$  όταν η διόδος είναι ορθά πολωμένη.

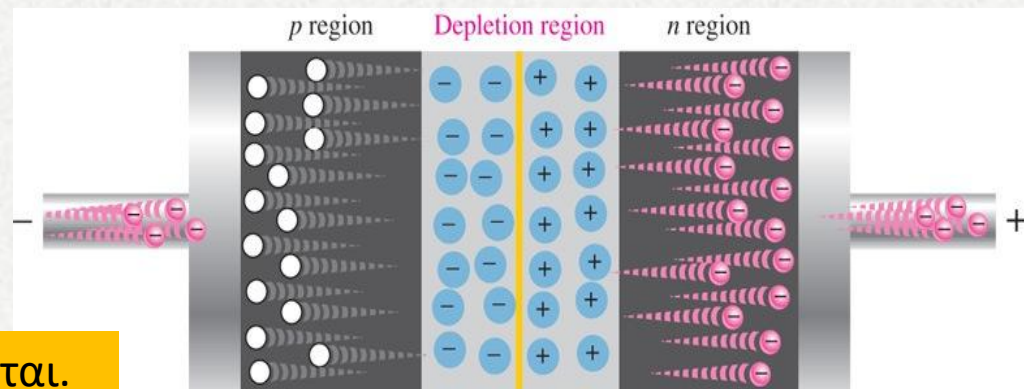
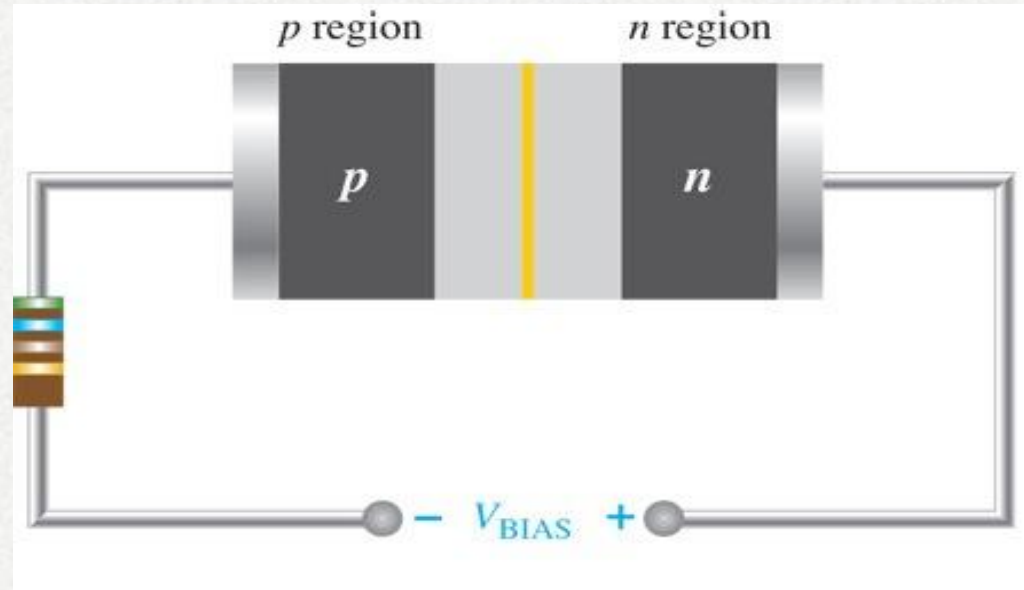
# Λειτουργία κρυσταλλοδιόδου

## Ανάστροφη πόλωση

Μια δίοδος συνδεδεμένη ανάστροφα. Τοποθετείται μια περιοριστική αντίσταση αν και δεν είναι σημαντική στην ανάστροφη πόλωση επειδή ουσιαστικά δεν υπάρχει ρεύμα.

Η δίοδος κατά τη διάρκεια του σύντομου χρόνου μετάβασης αμέσως μετά την εφαρμογή της τάσης ανάστροφης πόλωσης.

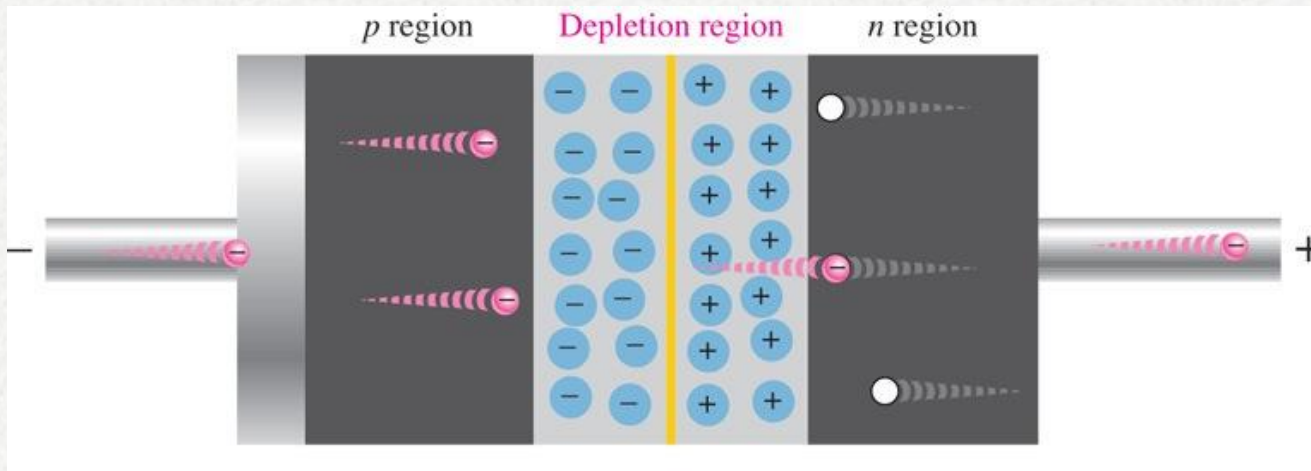
Τα αντίθετα φορτία έλκονται.



# Λειτουργία κρυσταλλοδιόδου

## Ανάστροφη πόλωση

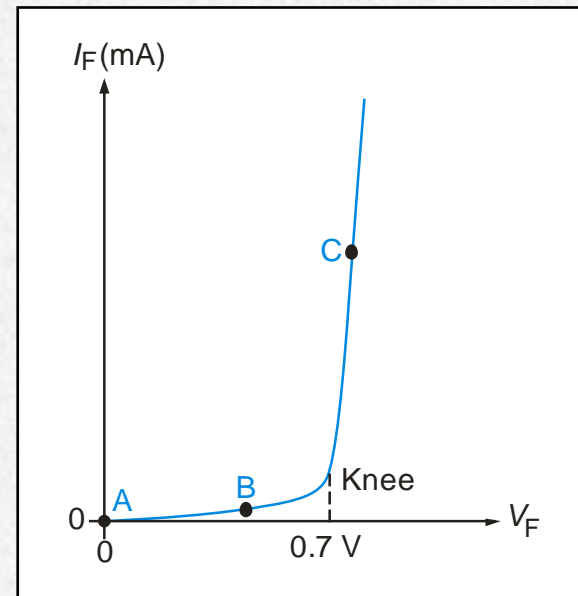
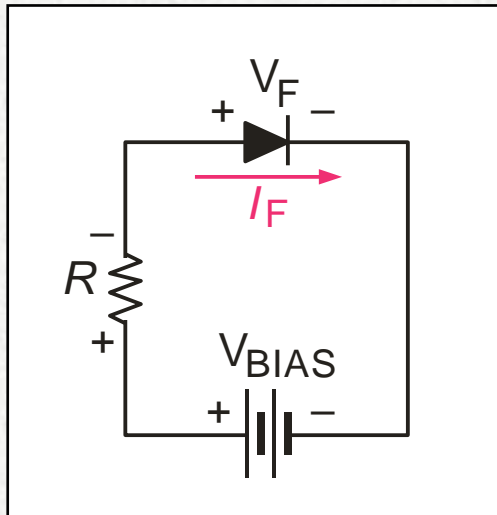
Ανάστροφη πόλωση είναι η κατάσταση κατά την οποία το ρεύμα σταματάει.



Το εξαιρετικά μικρό ανάστροφο ρεύμα σε μια ανάστροφα πολωμένη δίοδο οφείλεται στους φορείς μειονότητας από θερμικά παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών.

# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

## Ορθή πόλωση



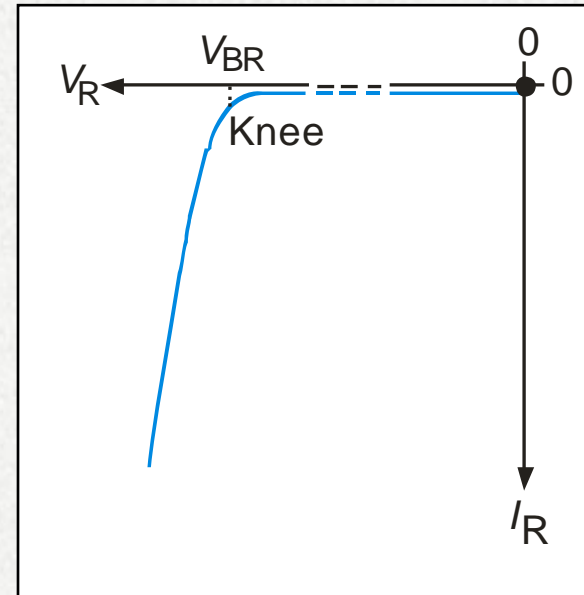
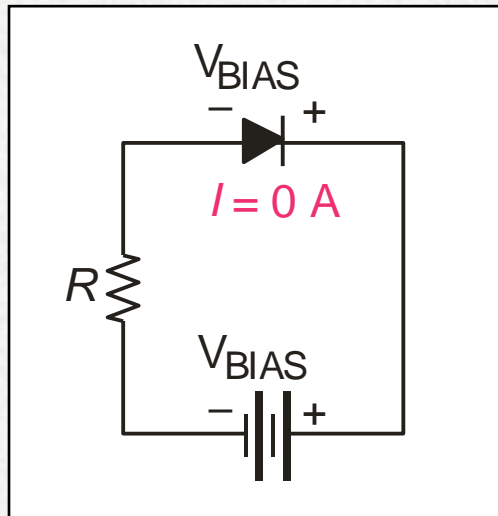
Σχέση τάσης και ρεύματος σε δίοδο με ορθή πόλωση:

- Σημείο A: χωρίς πόλωση ( $V_F = I_F = 0$ ).
- Σημείο B: η ορθή πόλωση είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού ( $V_F < 0,7 \text{ V}$ ).
- Σημείο C: η ορθή πόλωση ισούται περίπου με το φράγμα δυναμικού.



# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

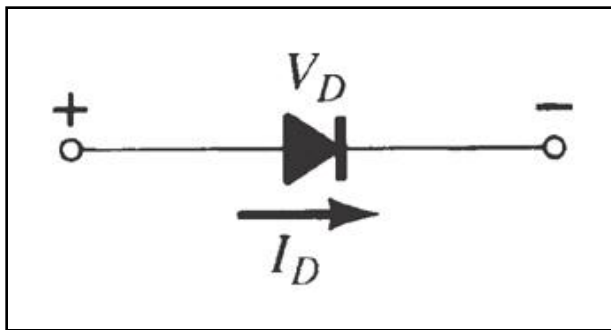
## Ανάστροφη πόλωση



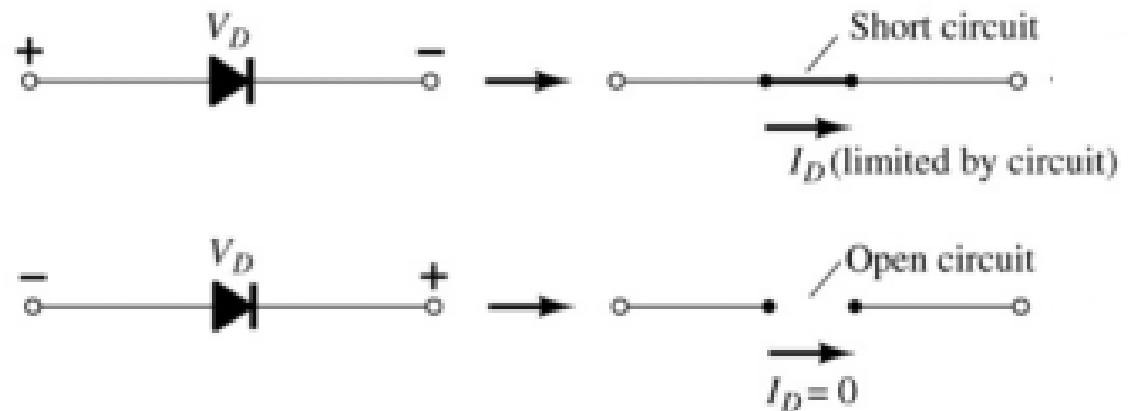
Χαρακτηριστική I-V ανάστροφα πολωμένης  
διόδου ( $I_R \approx 0 \text{ A}$ ).

# Δίοδοι

Η δίοδος είναι διάταξη 2- ακροδεκτών.

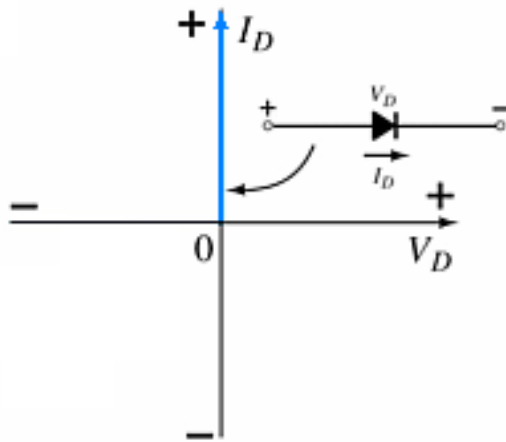


Η δίοδος ιδανικά άγει προς μία μόνο κατεύθυνση.



# Ιδανική κρυσταλλοδίοδος

## Περιοχή Αγωγής



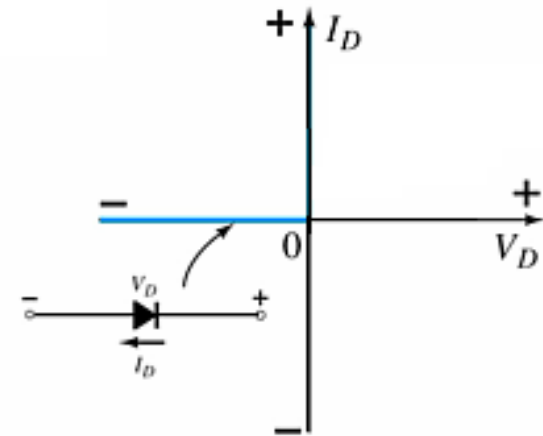
Η τάση κατά μήκος της διόδου είναι 0 V.

Το ρεύμα είναι άπειρο.

Η αντίσταση ορθής πόλωσης ορίζεται ως  $R_F = V_F / I_F$ .

Η διόδος ενεργεί σαν βραχυκύκλωμα.

## Περιοχή Μη-Αγωγής



Όλη η τάση εφαρμόζεται στη δίοδο.

Το ρεύμα είναι 0 A.

Η αντίστροφη αντίσταση ορίζεται ως  $R_R = V_R / I_R$ .

Η διόδος λειτουργεί σαν ανοιχτοκύκλωμα.

# Ημιαγωγικά Υλικά

Υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάπτυξη διατάξεων ημιαγωγών:

Πυρίτιο (Si) ; Γερμάνιο (Ge) ;

Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)

## Νόθευση

- Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πυριτίου και του γερμανίου βελτιώνονται με την προσθήκη υλικών σε μια διαδικασία που ονομάζεται νόθευση.
- Υπάρχουν μόνο δύο τύποι εμπλουτισμένων ημιαγωγών υλικών:

### **ΤΥΠΟΥ-n**

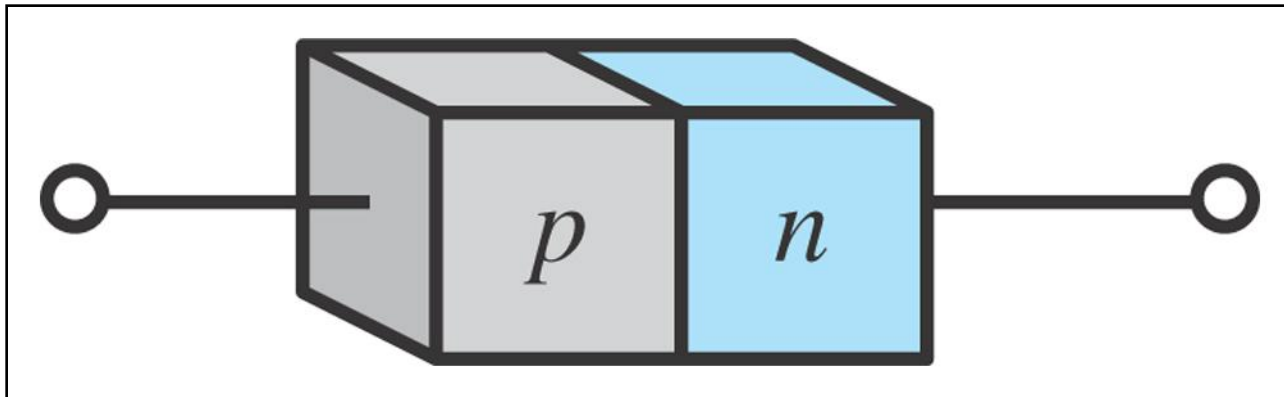
Τα υλικά **τύπου-n** περιέχουν περίσσεια ηλεκτρονίων αγωγιμότητας.

### **ΤΥΠΟΥ-p**

Τα υλικά **τύπου-p** περιέχουν περίσσεια οπών σθένους.

# Ενώσεις p-n

Το ένα άκρο ενός κρυστάλλου πυριτίου ή γερμανίου μπορεί να νοθευτεί ως υλικό τύπου p και το άλλο άκρο ως υλικό τύπου n.



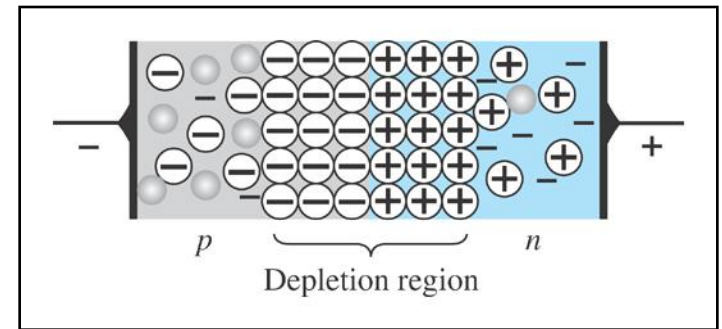
Το αποτέλεσμα είναι μια  
**ένωση p-n**

# Ενώσεις p-n

Στην ένωση p-n, τα ηλεκτρόνια περισσείας της ζώνης αγωγιμότητας στην πλευρά τύπου n προσελκύονται από τις οπές ζώνης σθένους στην πλευρά τύπου p.

Τα ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-n μεταναστεύουν κατά μήκος της ένωσης προς το υλικό τύπου p (ροή ηλεκτρονίων).

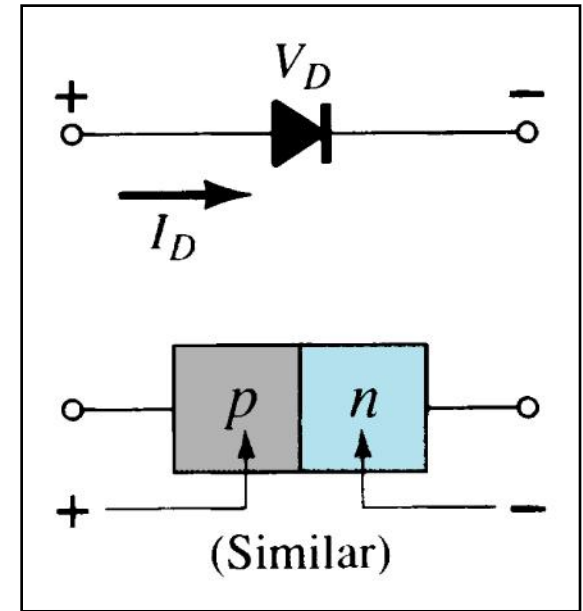
Η μετανάστευση ηλεκτρονίων οδηγεί σε αρνητικό φορτίο στην πλευρά τύπου p της ένωσης και θετικό φορτίο στην πλευρά τύπου n της ένωσης.



**Το αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός μιας περιοχής απογύμνωσης από την ένωση.**

## Ορθή Πόλωση

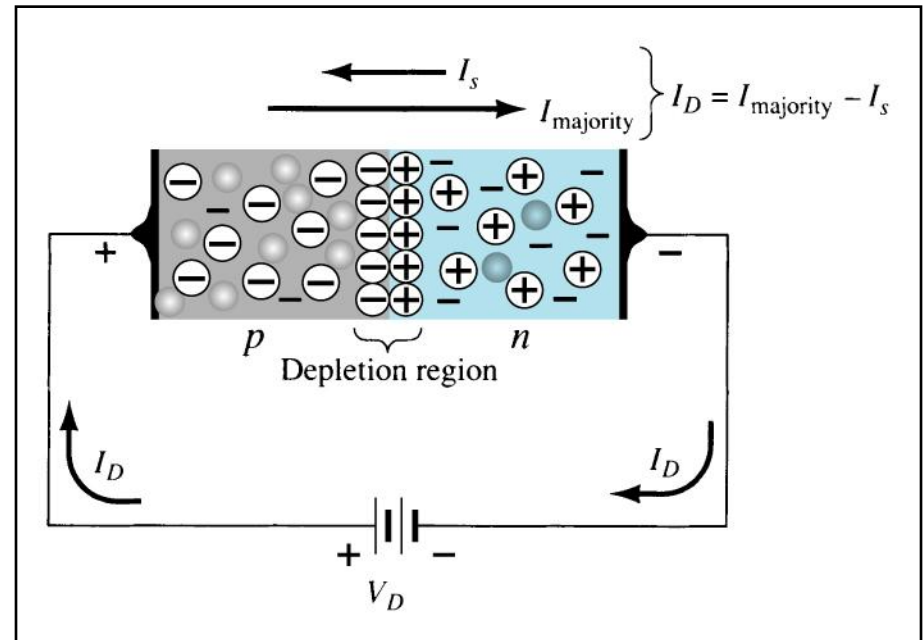
Η εξωτερική τάση εφαρμόζεται κατά μήκος της ένωσης p-n στην ίδια πολικότητα με τα υλικά τύπου p- και n.



Η ορθή πόλωση προκαλεί τη μείωση της περιοχής απογύμνωσης.

Τα ηλεκτρόνια και οι οπές ωθούνται προς την ένωση p-n.

Τα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν αρκετή ενέργεια για να διασχίσουν την ένωση p-n.



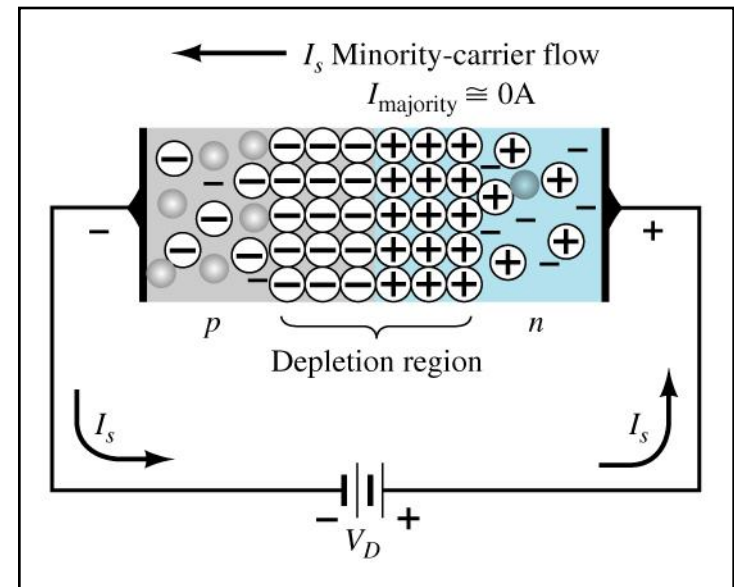
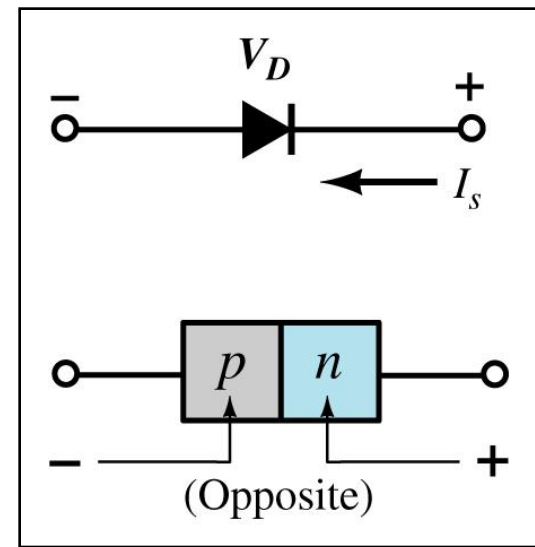
## Ανάστροφη Πόλωση

Η εξωτερική τάση εφαρμόζεται κατά μήκος της ένωσης p-n με αντίθετη πολικότητα με τα υλικά τύπου p- και n.

Η ανάστροφη πόλωση προκαλεί την αύξηση του πάχους της περιοχής απογύμνωσης.

Τα ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-n προσελκύονται προς το θετικό ακροδέκτη της πηγής τάσης.

Οι οπές στο υλικό τύπου-p προσελκύονται προς τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής τάσης.





# Συνθήκες Λειτουργίας Διόδου

Η δίοδος έχει τρεις τρόπους (συνθήκες) λειτουργίας:

## Χωρίς πόλωση

Δεν εφαρμόζεται εξωτερική τάση:  $V_D = 0 \text{ V}$

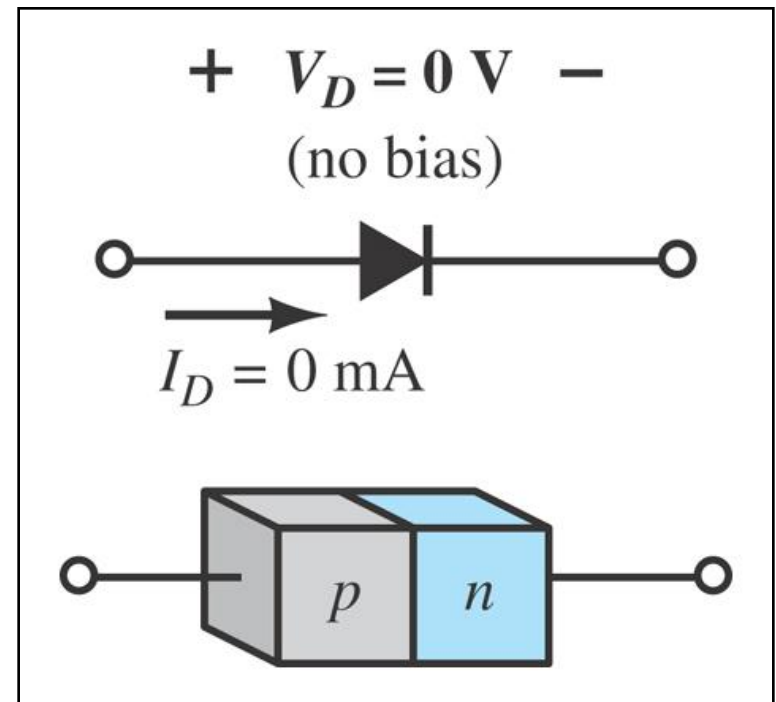
Δεν υπάρχει ρεύμα διόδου:  $I_D = 0 \text{ A}$

Υπάρχει μια μεσαίου πάχους περιοχή απογύμνωσης

Χωρίς πόλωση

Ανάστροφη πόλωση

Ορθή πόλωση



# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

## Εξίσωση διόδου

$$I_D = I_S (e^{V_D/V_T} - 1)$$

$I_D$  = ρεύμα διόδου

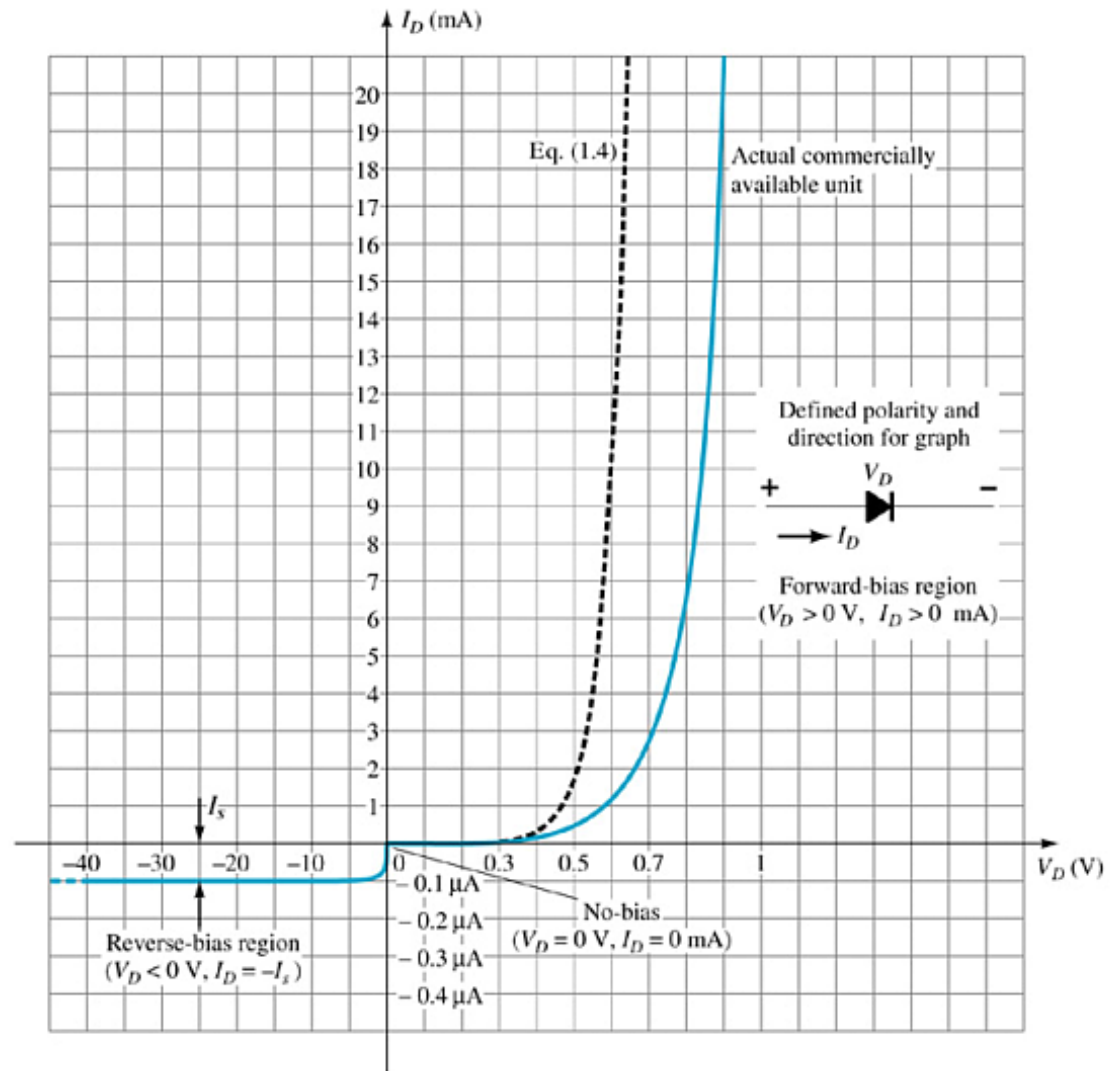
$V_D$  = τάση διόδου

$I_S$  = ανάστροφο ρεύμα κόρου

$V_T$  = τάση

θερμοκρασίας =  $kT/Q$   
= 0.025 V @ 25°C

**Η διόδος είναι μη γραμμική διάταξη!**



# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

## Ανάλυση με ευθεία φορτίου

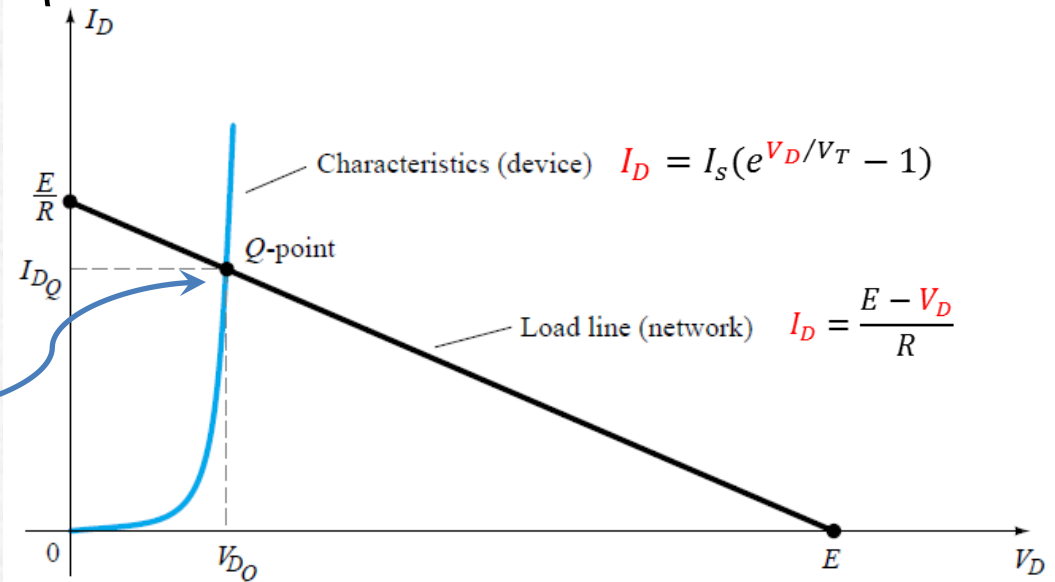
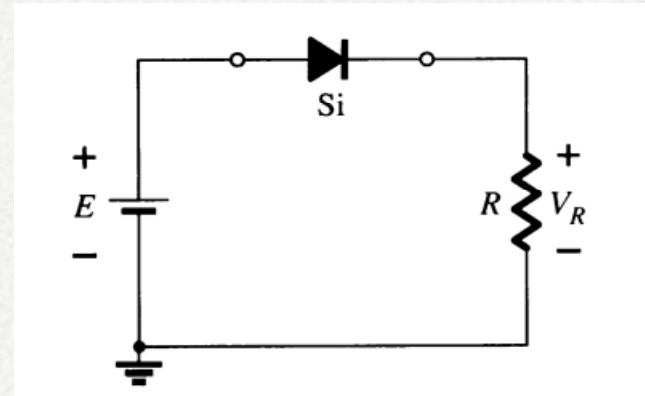
- Εξίσωση διόδου

$$I_D = I_s (e^{V_D/V_T} - 1)$$

- Εξίσωση δικτύου (εξίσωση ευθείας φορτίου)

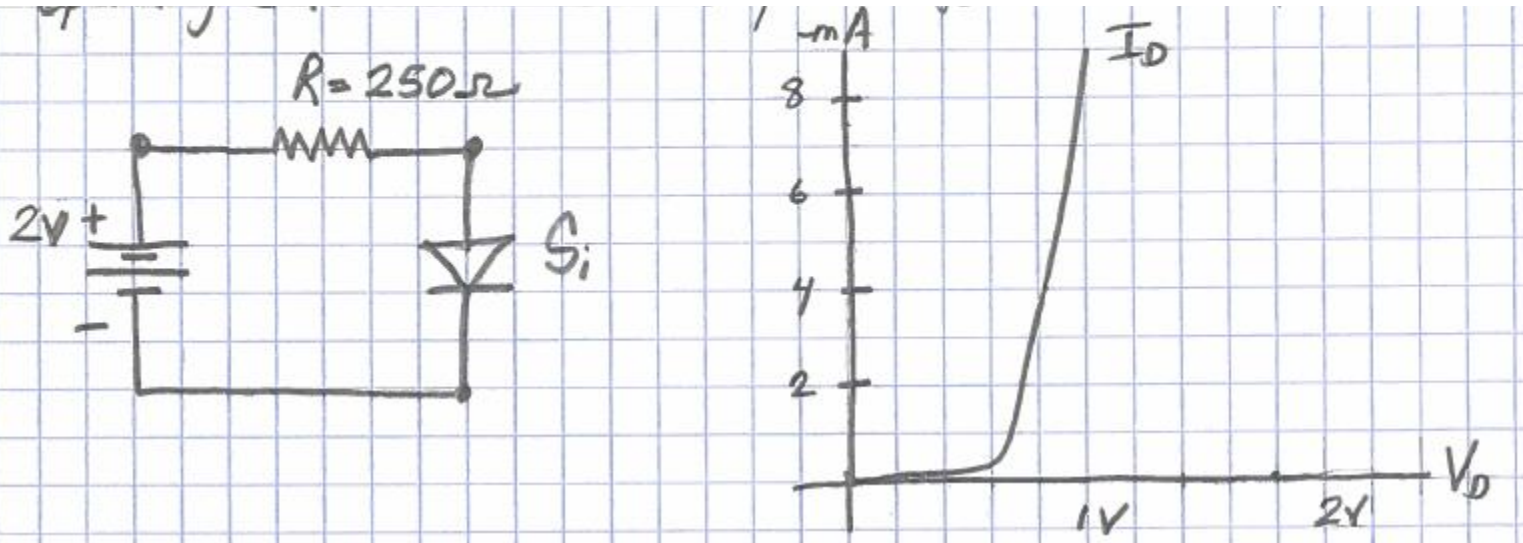
$$I_D = \frac{E - V_D}{R}$$

Σημείο Λειτουργίας  
(Q-point)



# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

Με δεδομένη την παρακάτω χαρακτηριστική της διόδου, προσδιορίστε το σημείο λειτουργίας Q του κυκλώματος.



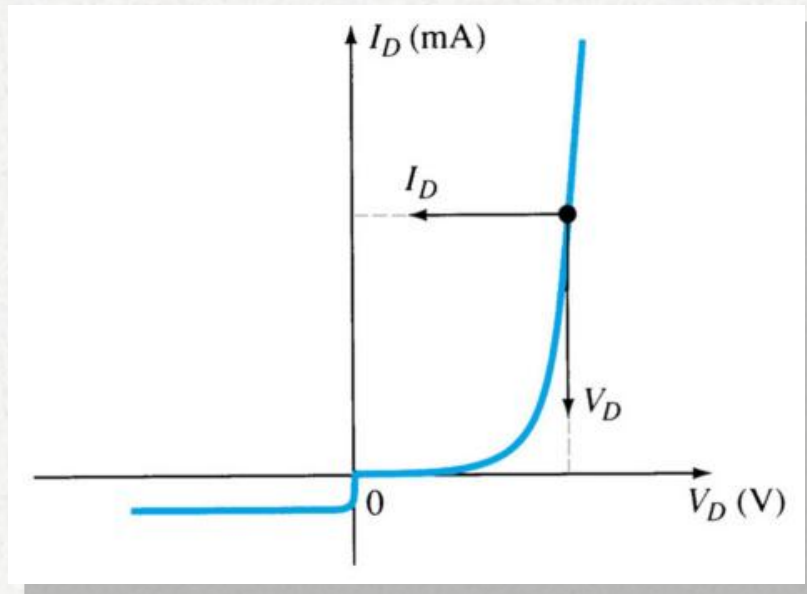
# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

## Αντίσταση συνεχούς

Για μια συγκεκριμένη εφαρμοσμένη τάση DC  $V_D$ , η διόδος διαρρέεται από ένα συγκεκριμένο ρεύμα.

Η στατική αντίσταση (DC),  $R_D$ , της διόδου δίνεται από:

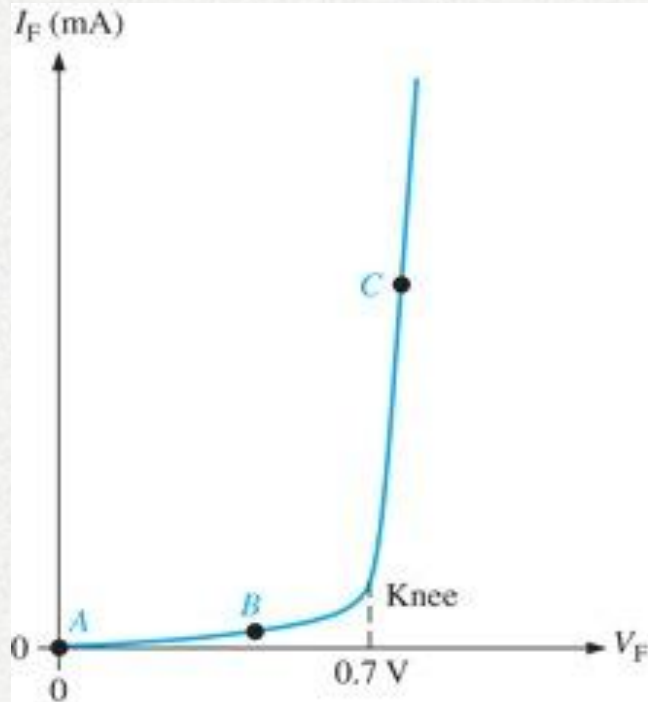
$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$



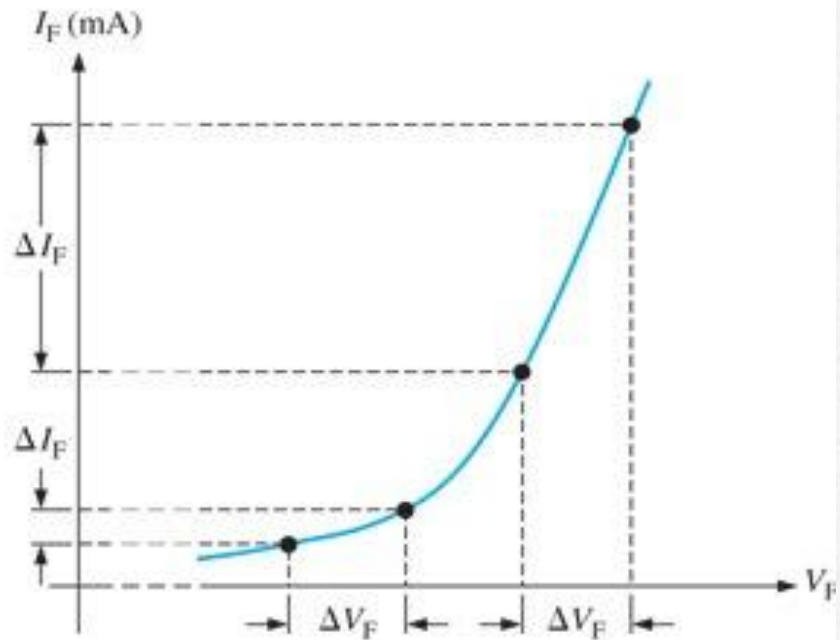
# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

## Δυναμική αντίσταση

$$r'_d = \frac{dv_D}{di_D} \cong \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \cong \frac{25 \text{ mV}}{I_D}$$



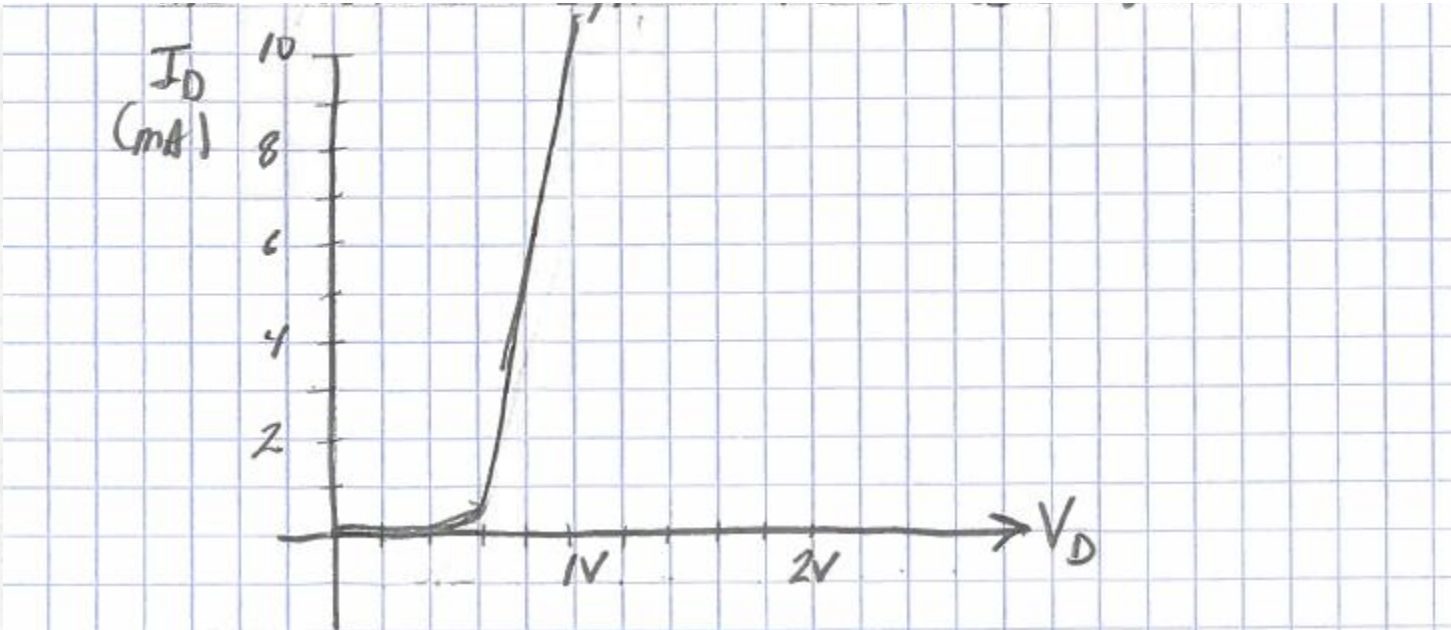
(a)  $V$ - $I$  characteristic curve for forward bias.



(b) Expanded view of a portion of the curve in part (a). The dynamic resistance  $r'_d$  decreases as you move up the curve, as indicated by the decrease in the value of  $\Delta V_F / \Delta I_F$ .

# Χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου

Με δεδομένη την παρακάτω χαρακτηριστική της διόδου, προσδιορίστε την αντίσταση συνεχούς και εναλλασσομένου στα 8 mA.



# Example 1:

Προσδιορίστε την αντίσταση συνεχούς για την παρακάτω δίοδο στα εξής ρεύματα:

- (a)  $I_D = 2 \text{ mA}$
- (b)  $I_D = 20 \text{ mA}$
- (c)  $V_D = -10 \text{ V}$

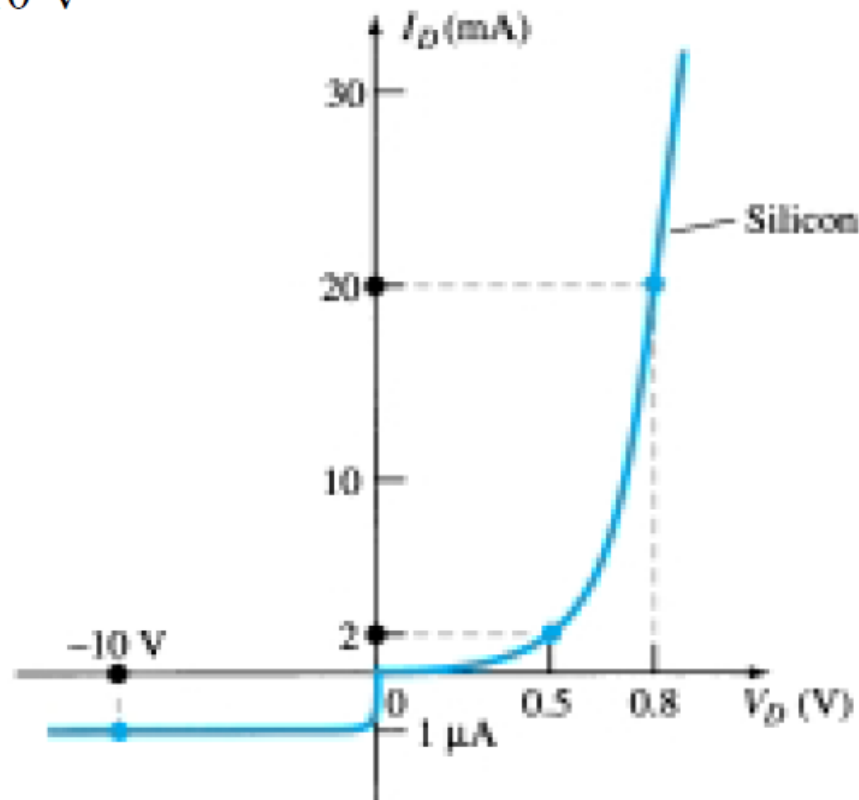


Figure 1.1



# Λύση:

(a) At  $I_D = 2 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.5 \text{ V}$  (from the curve) and

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.5 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \mathbf{250 \ \Omega}$$

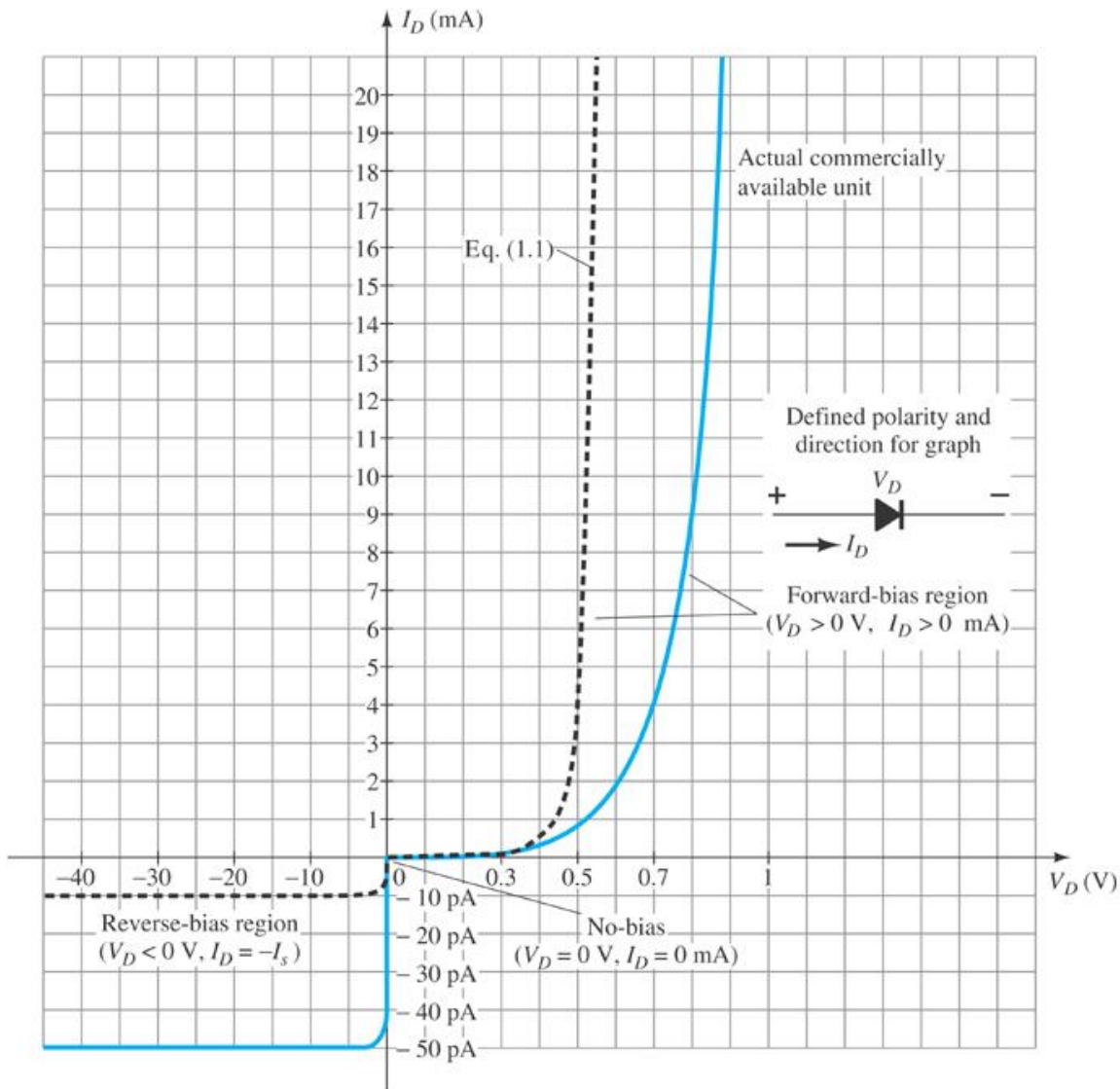
(b) At  $I_D = 20 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.8 \text{ V}$  (from the curve) and

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.8 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = \mathbf{40 \ \Omega}$$

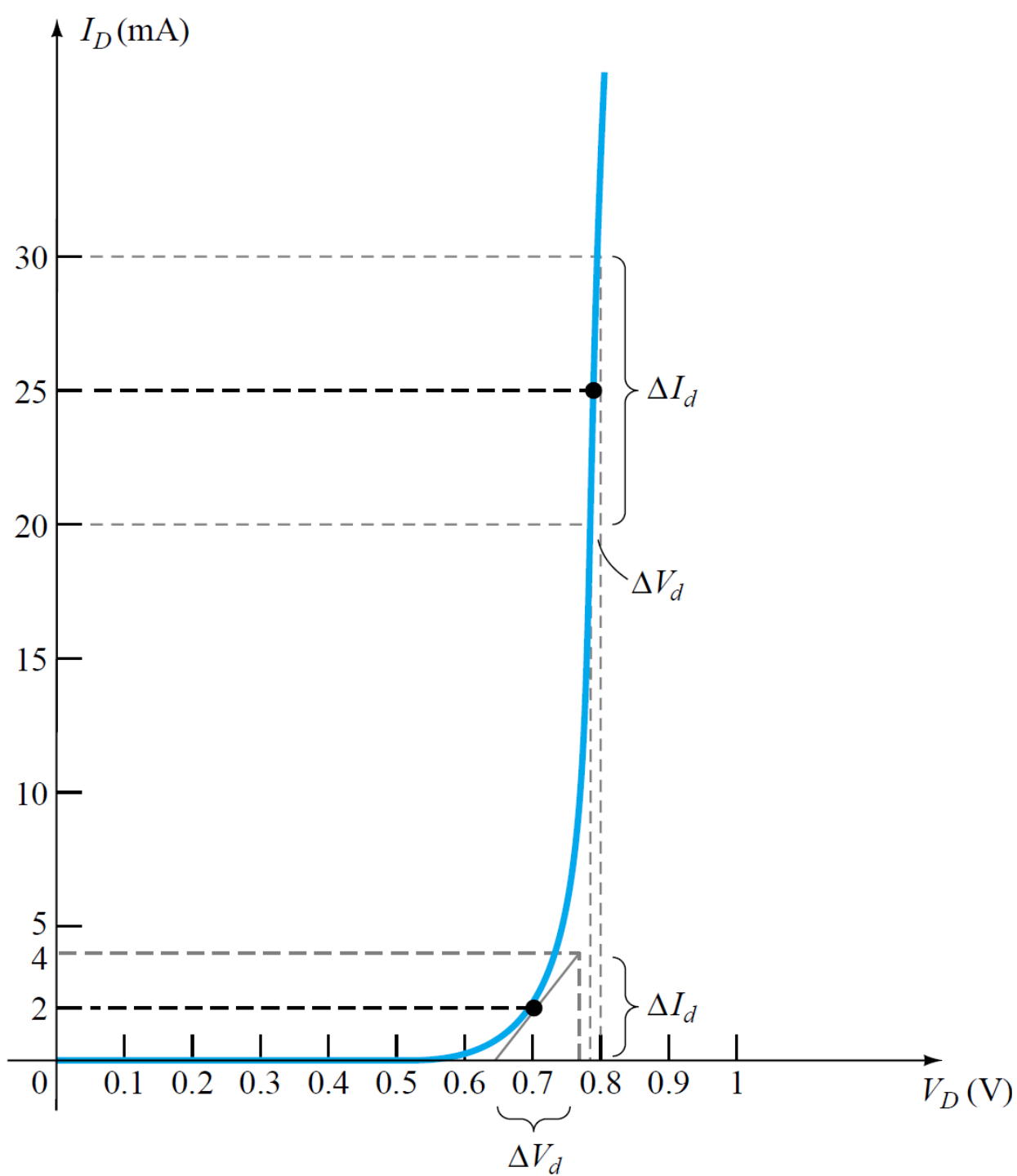
(c) At  $V_D = -10 \text{ V}$ ,  $I_D = -I_s = -1 \ \mu\text{A}$  (from the curve) and

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{10 \text{ V}}{1 \ \mu\text{A}} = \mathbf{10 \ \text{M}\Omega}$$

# Παράδειγμα



Προσδιορίστε τη στατική ή dc αντίσταση της διόδου του σχήματος, σε ρεύμα ορθής πόλωσης 2 mA, 10 mA και αντίστροφη τάση -30V.



Προσδιορίστε τη στατική ή dc αντίσταση της διόδου για ρεύμα ορθής πόλωσης 10 mA.

# Φορείς Μειονότητας και Πλειονότητας

*Μέσα στη δίοδο κυκλοφορούν δύο ρεύματα:*

## Φορείς Πλειονότητας

Οι φορείς πλειονότητας σε υλικά τύπου-n είναι ηλεκτρόνια.

Οι φορείς πλειονότητας σε υλικά τύπου-p είναι οπές.

## Φορείς Μειονότητας

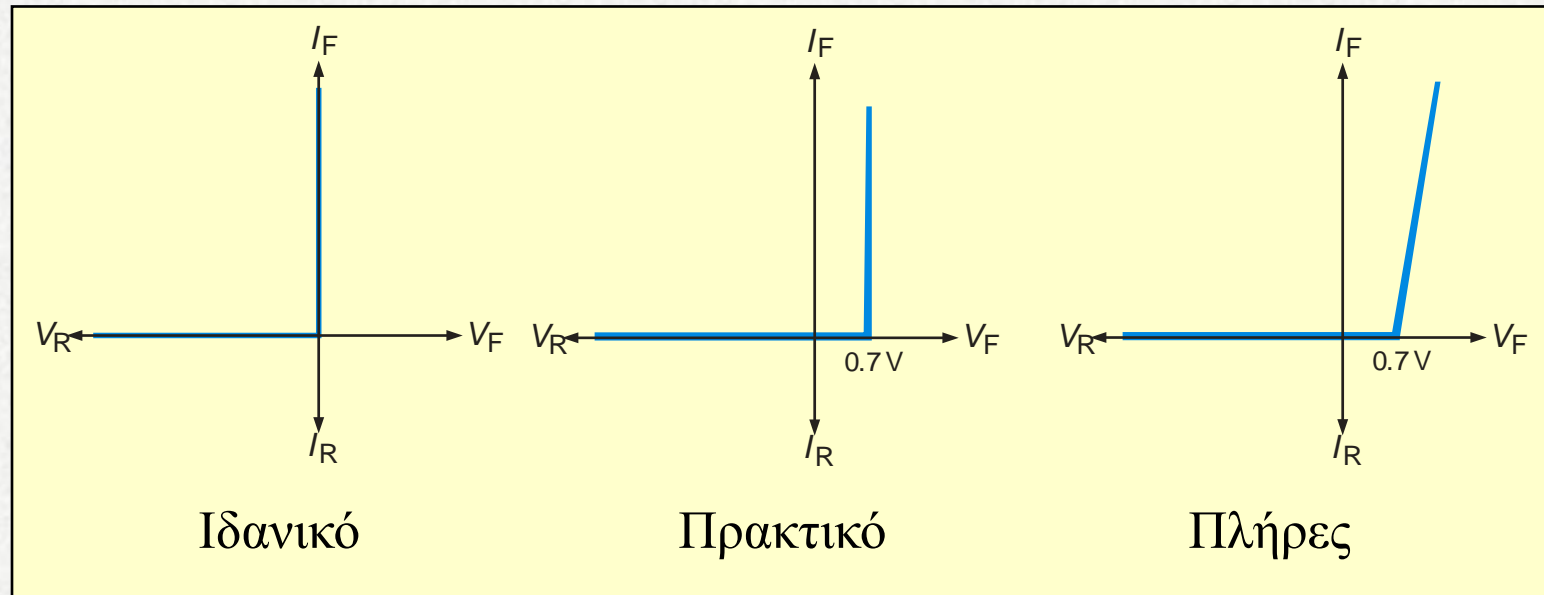
Οι φορείς μειονότητας σε υλικά τύπου-n είναι οπές.

Οι φορείς μειονότητας σε υλικά τύπου-p είναι ηλεκτρόνια.

# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

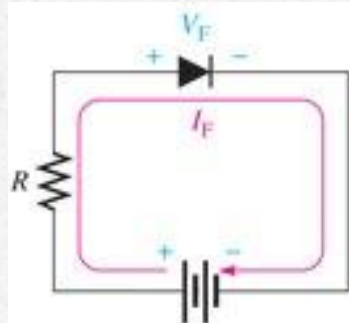
Για την απλοποίηση της καμπύλης της διόδου, υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις:

1. Ιδανικό μοντέλο
2. Πρακτικό μοντέλο
3. Πλήρες μοντέλο

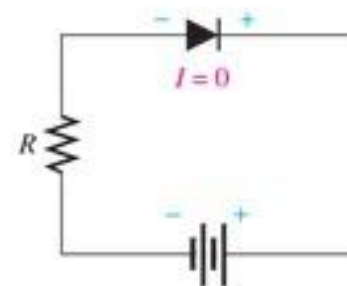
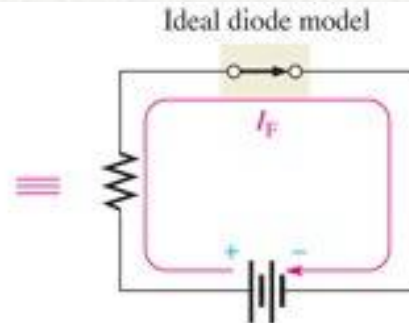


Επιπλέον, το πλήρες μοντέλο περιλαμβάνει μια μεγάλη ανάστροφη αντίσταση που αντιστοιχεί σε ένα μικρό ρεύμα όταν αντιστρέφεται η πόλωση.

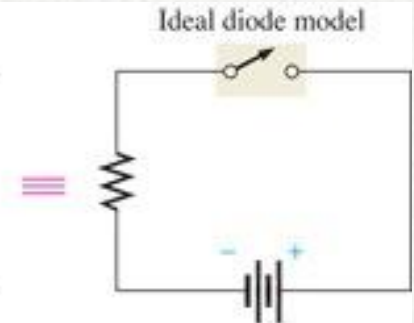
# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου



(a) Forward bias



(b) Reverse bias

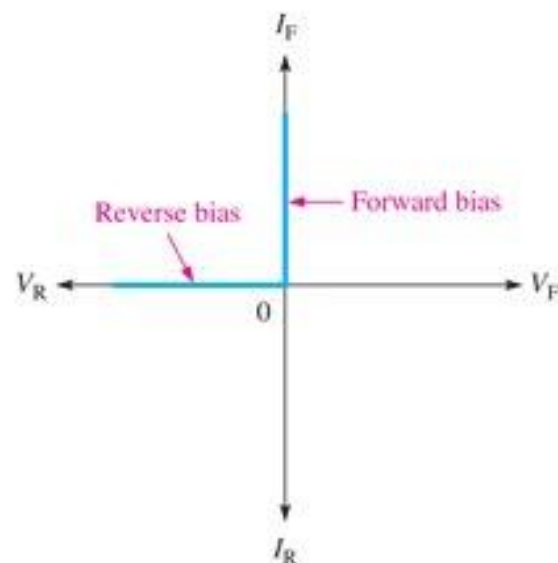


$$V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_{BIAS}}{R_{LIMIT}}$$

$$V_D = V_{BIAS}$$

$$I_D = 0$$



(c) Ideal V-I characteristic curve (blue)

Το **ιδανικό** μοντέλο της διόδου.

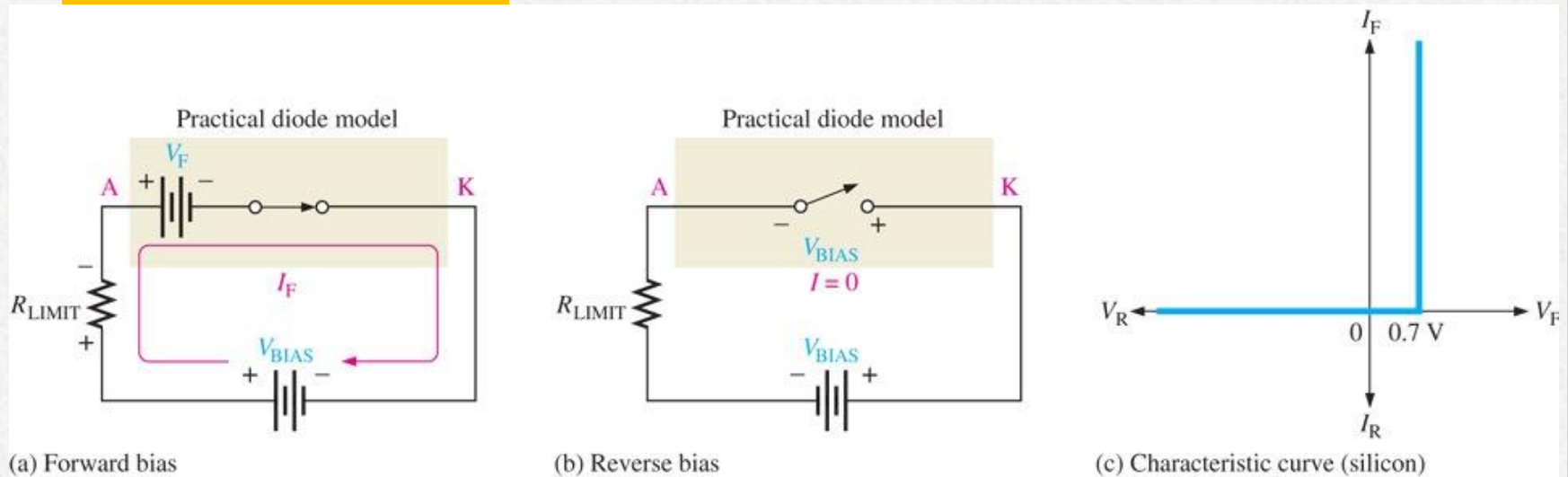
# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

$$V_D = 0.7$$

$$V_D = V_{BIAS}$$

$$I_D = \frac{V_{BIAS} - 0.7}{R_{LIMIT}}$$

$$I_D = 0$$



Το **πρακτικό** μοντέλο της διόδου.

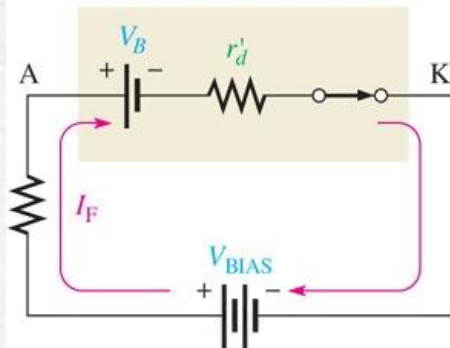
# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

$$V_D = 0.7 + I_D r'_d$$

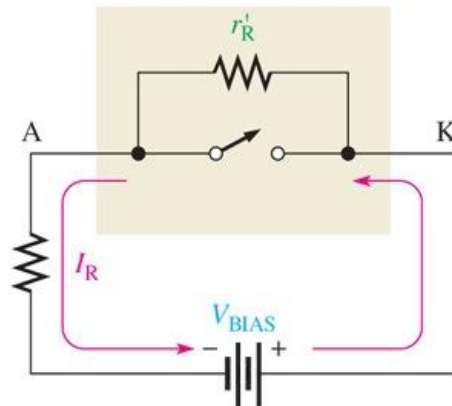
$$I_D = \frac{V_{BIAS} - 0.7}{R_{LIMIT} + r'_d}$$

$$V_D = V_{BIAS} - V_{RLIMIT}$$

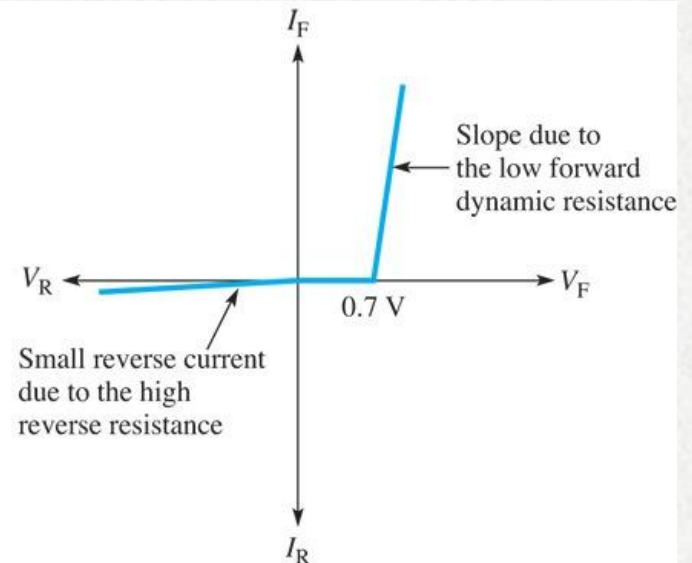
$$I_D = I_S$$



(a) Forward bias



(b) Reverse bias



(c) V-I characteristic curve

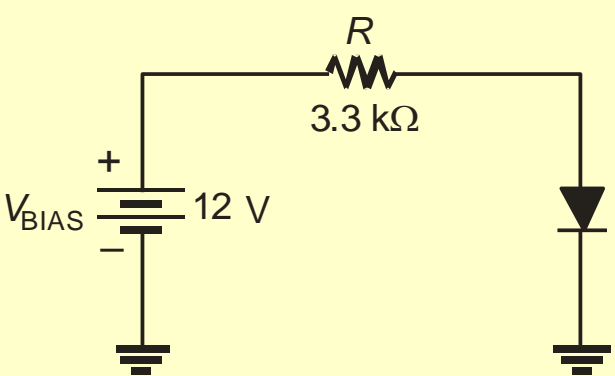
Το **πλήρες** μοντέλο της διόδου.



# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

## Παράδειγμα

Χρησιμοποιήστε το πρακτικό μοντέλο για να προσδιορίσετε το ρεύμα στο κύκλωμα:



**Λύση:**

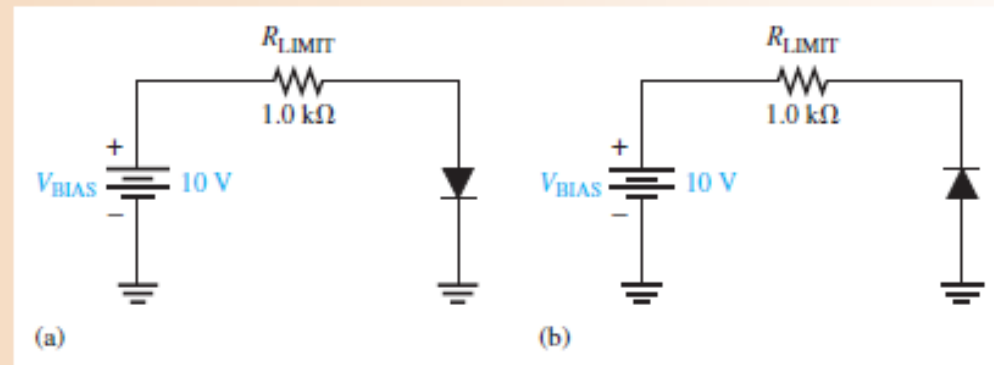
$$V_R = V_{\text{BIAS}} - 0.7 \text{ V} = 12 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 11.3 \text{ V}$$
$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{11.3 \text{ V}}{3.3 \text{ k}\Omega} = 3.4 \text{ mA}$$

# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

## Παράδειγμα

### EXAMPLE 2-1

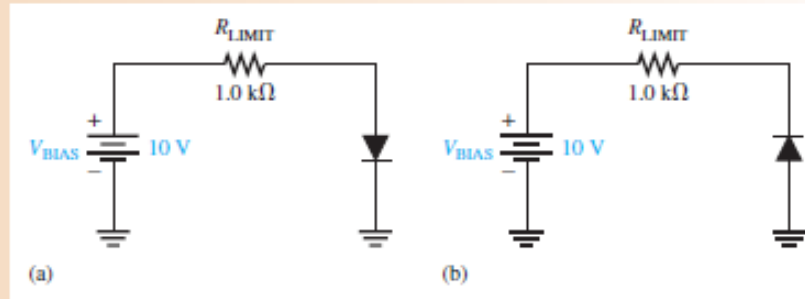
- (a) Determine the forward voltage and forward current for the diode in Figure 2-18(a) for each of the diode models. Also find the voltage across the limiting resistor in each case. Assume  $r'_d = 10 \Omega$  at the determined value of forward current.
- (b) Determine the reverse voltage and reverse current for the diode in Figure 2-18(b) for each of the diode models. Also find the voltage across the limiting resistor in each case. Assume  $I_R = 1 \mu\text{A}$ .



▲ FIGURE 2-18

# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

## Παράδειγμα



▲ FIGURE 2-18

**Solution** (a) Ideal model:

$$V_F = 0 \text{ V}$$

$$I_F = \frac{V_{\text{BIAS}}}{R_{\text{LIMIT}}} = \frac{10 \text{ V}}{1.0 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{R_{\text{LIMIT}}} = I_F R_{\text{LIMIT}} = (10 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 10 \text{ V}$$

Practical model:

$$V_F = 0.7 \text{ V}$$

$$I_F = \frac{V_{\text{BIAS}} - V_F}{R_{\text{LIMIT}}} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.0 \text{ k}\Omega} = \frac{9.3 \text{ V}}{1.0 \text{ k}\Omega} = 9.3 \text{ mA}$$

$$V_{R_{\text{LIMIT}}} = I_F R_{\text{LIMIT}} = (9.3 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 9.3 \text{ V}$$

Complete model:

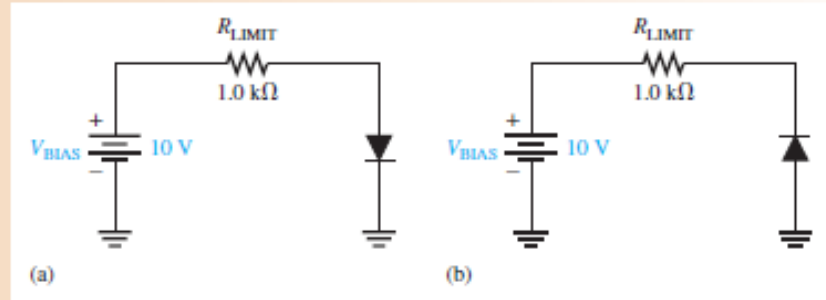
$$I_F = \frac{V_{\text{BIAS}} - 0.7 \text{ V}}{R_{\text{LIMIT}} + r'_d} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.0 \text{ k}\Omega + 10 \Omega} = \frac{9.3 \text{ V}}{1010 \Omega} = 9.21 \text{ mA}$$

$$V_F = 0.7 \text{ V} + I_F r'_d = 0.7 \text{ V} + (9.21 \text{ mA})(10 \Omega) = 792 \text{ mV}$$

$$V_{R_{\text{LIMIT}}} = I_F R_{\text{LIMIT}} = (9.21 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 9.21 \text{ V}$$

# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

## Παράδειγμα



▲ FIGURE 2-18

(b) Ideal model:

$$\begin{aligned}I_R &= 0 \text{ A} \\V_R &= V_{\text{BIAS}} = 10 \text{ V} \\V_{R_{\text{LIMIT}}} &= 0 \text{ V}\end{aligned}$$

Practical model:

$$\begin{aligned}I_R &= 0 \text{ A} \\V_R &= V_{\text{BIAS}} = 10 \text{ V} \\V_{R_{\text{LIMIT}}} &= 0 \text{ V}\end{aligned}$$

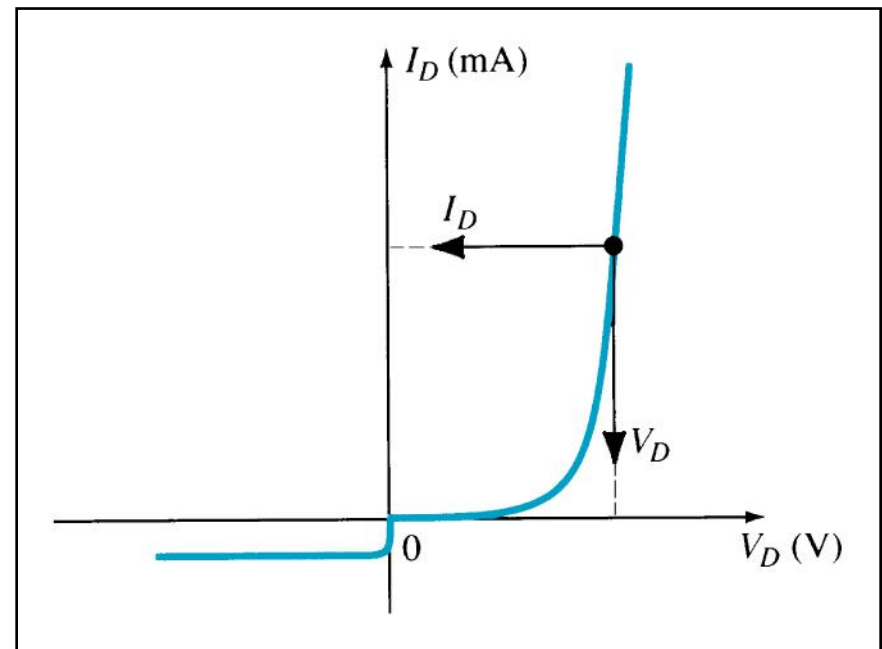
Complete model:

$$\begin{aligned}I_R &= 1 \mu\text{A} \\V_{R_{\text{LIMIT}}} &= I_R R_{\text{LIMIT}} = (1 \mu\text{A})(1.0 \text{ k}\Omega) = 1 \text{ mV} \\V_R &= V_{\text{BIAS}} - V_{R_{\text{LIMIT}}} = 10 \text{ V} - 1 \text{ mV} = 9.999 \text{ V}\end{aligned}$$

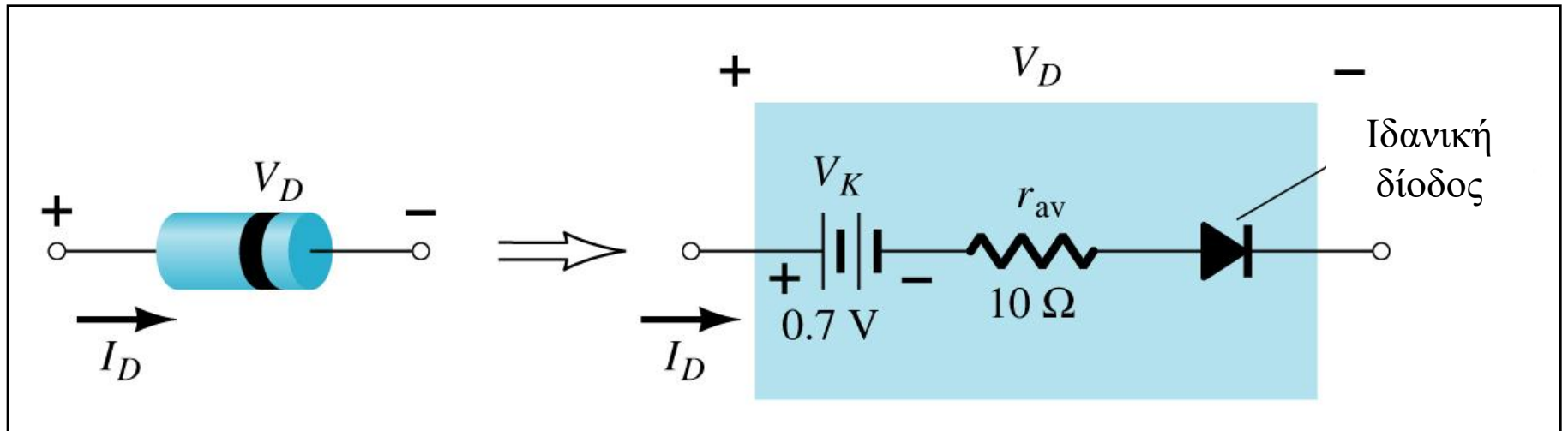
# Αντίσταση στο DC (Συνεχούς)

Για μια συγκεκριμένη εφαρμοζόμενη τάση DC ( $V_D$ ) η δίοδος έχει ένα συγκεκριμένο ρεύμα ( $I_D$ ) και μια συγκεκριμένη αντίσταση ( $R_D$ ).

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$



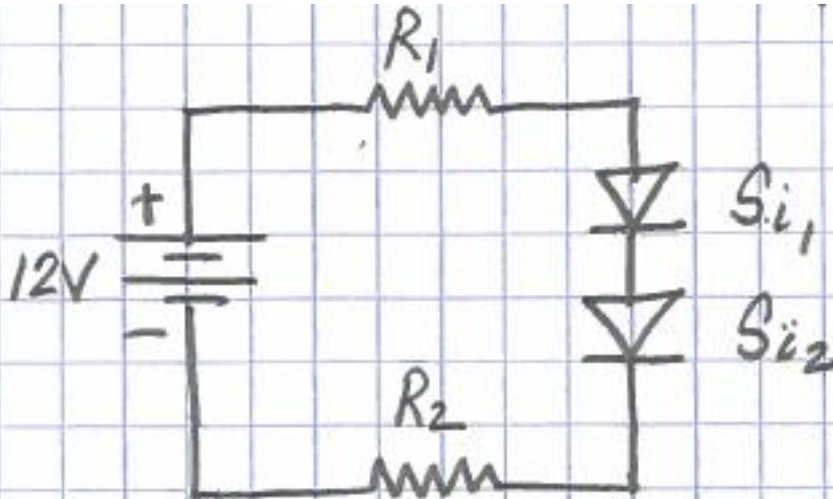
# Ισοδύναμο Κύκλωμα Διόδου



# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

Προσδιορίστε την τάση ορθής πόλωσης και το ρεύμα ορθής πόλωσης της διόδου για καθένα από τα μοντέλα της διόδου.

Θεωρήστε:  $r_d = 8\Omega$ , για κάθε μοντέλο.

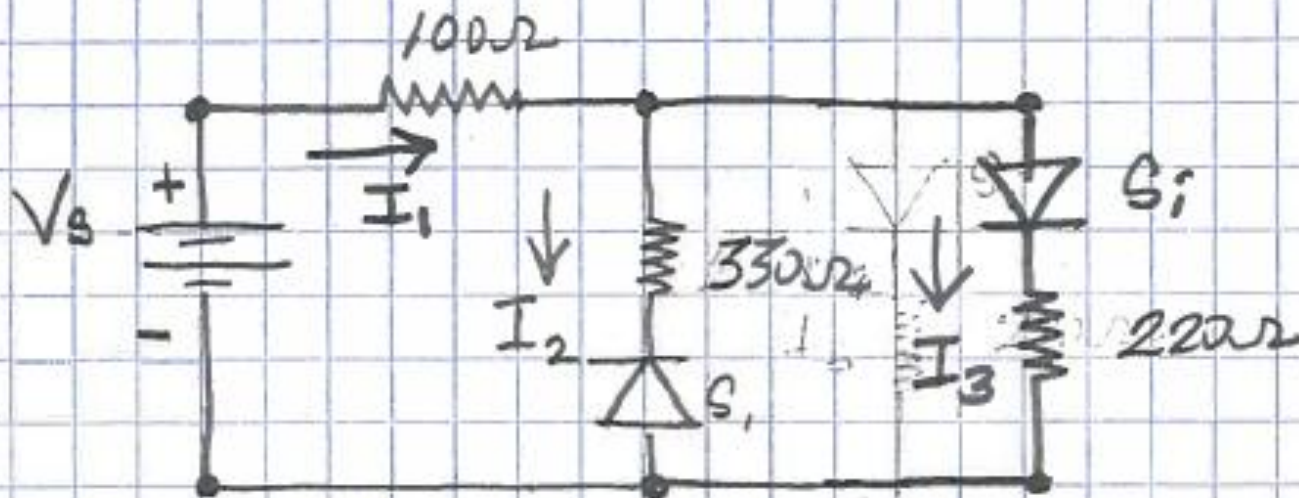


$$R_1 = 100\Omega,$$

$$R_2 = 2.2\text{k}\Omega$$

# Μοντέλα Κρυσταλλοδιόδου

Δίνεται το παρακάτω κύκλωμα:  $V_S = 6V$ ,  
 $S_i$  – πρακτικό μοντέλο.



Βρείτε τα ρεύματα:  $I_1, I_2, I_3$ .