

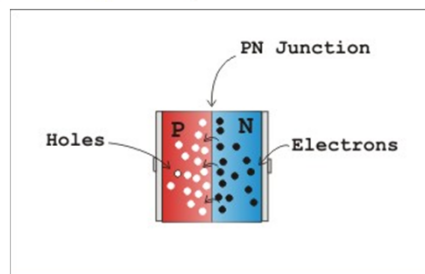


## Αναλογικά & Ψηφιακά Κυκλώματα

Διαφάνειες Μαθήματος  
Δρ. Μηχ. Μαραβελάκης Εμ.

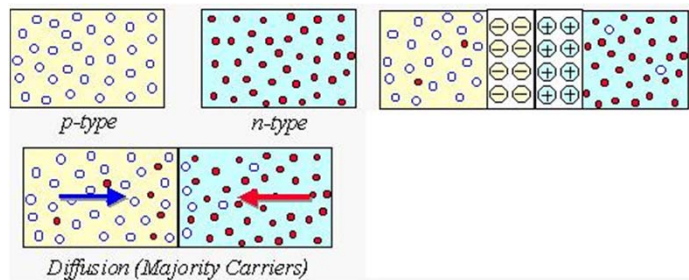


Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι ημιαγωγοί με προσμίξεις είναι δύο τύπων. Οι ημιαγωγοί τύπου N έχουν περισσότερους αρνητικούς φορείς, δηλαδή έχουν περίσσεια ηλεκτρονίων και για το λόγο αυτό ονομάζονται τύπου N (negative). Αντιθέτως οι ημιαγωγοί τύπου P (positive) έχουν περίσσεια θετικών φορέων ή οπών. Οι οπές είναι έλλειψη ηλεκτρονίων. Αρκετές φορές στην βιβλιογραφία οι ημιαγωγοί με προσμίξεις αναφέρονται ως τύπου p και τύπου n.

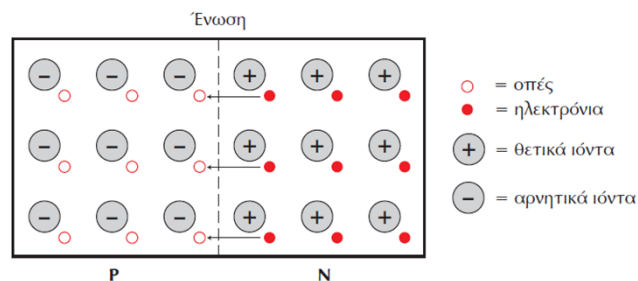




Όταν μικρό κομμάτι ημιαγωγού τύπου N έλθει σ' επαφή με κομμάτι ημιαγωγού τύπου P, τότε δημιουργείται **μια ένωση PN ή επαφή PN** η οποία αποτελεί ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα πολύ χρήσιμο και ονομάζεται **δίοδος PN**. Τα κομμάτια αυτά των ημιαγωγών μπορεί να μην είναι διαφορετικά, αλλά μέρη του ίδιου κομματιού κρυστάλλου πυριτίου όπου στη μία πλευρά έχει δημιουργηθεί με κατάλληλο τρόπο τύπος P, ενώ στην άλλη ο τύπος N.



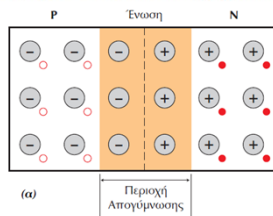
Η επαφή PN φαίνεται στο σχήμα 3.1.1. Το σημείο της ένωσης παρίσταται με μία κάθετη διακεκομμένη γραμμή. Το τμήμα τύπου N αποτελείται από θετικά ιόντα πεντασθενούς στοιχείου και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Υπάρχει επίσης μικρός αριθμός οπών. Στο τμήμα τύπου P υπάρχουν αρνητικά ιόντα τρισθενούς στοιχείου, αρκετές οπές και μικρός αριθμός ηλεκτρονίων.

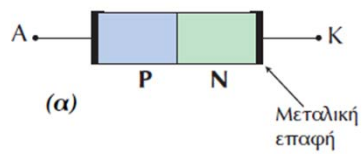


Σχήμα 3.1.1. Επαφή PN



Την στιγμή της δημιουργίας της επαφής PN, τα ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου N που ευρίσκονται κοντά στο σημείο της ένωσης θα κινηθούν προς τον ημιαγωγό τύπου P με σκοπό να επανασυνδεθούν με τις οπές που υπάρχουν εκεί. Έτσι δημιουργείται επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων στα δύο τμήματα, δεξιά και αριστερά του σημείου επαφής και στο μεν ημιαγωγό τύπου N δημιουργείται ένα τμήμα με θετικά μόνο ιόντα χωρίς ηλεκτρόνια, στο δε ημιαγωγό τύπου P δημιουργείται ένα τμήμα με αρνητικά μόνο ιόντα, χωρίς οπές. Αυτά τα δύο τμήματα είναι «απογυμνωμένα» από τους φορείς τους και αποτελούν μαζί την **περιοχή απογύμνωσης** όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.2(α).





(α)



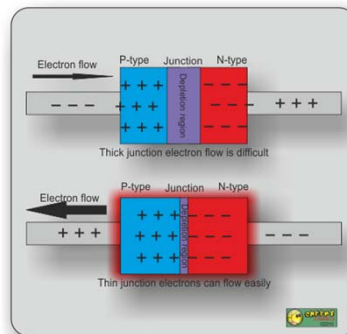
(β)

**Σχήμα 3.1.4.**  
(α) Δίοδος PN  
(β) Το σύμβολό της.



## Δίοδος σε ορθή και ανάστροφη πόλωση

Στην προηγούμενη παράγραφο η επαφή PN ήταν ανοικτή, δηλαδή δεν υπήρχε εξωτερική τάση στα άκρα της. Όταν εφαρμοσθεί εξωτερική τάση στα άκρα μιάς διόδου, υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης της πηγής: κατά την ορθή και κατά την ανάστροφη φορά.



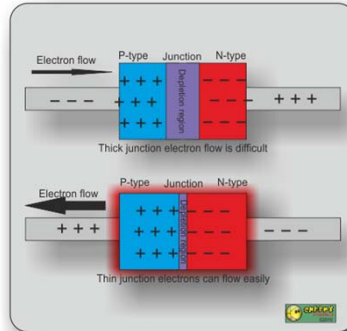
## Δίοδος – ορθή πόλωση

Μια διόδος είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά εάν η εξωτερική πηγή είναι συνδεδεμένη στο κύκλωμα ώστε ο θετικός πόλος της να είναι στο τμήμα P της διόδου και ο αρνητικός πόλος της στο τμήμα N της διόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1(α). Ως γνωστόν σε μιά ηλεκτρική πηγή υπάρχει μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων στον αρνητικό πόλο και μεγάλος αριθμός θετικών φορτίων στο θετικό πόλο. Με την αγωγή σύνδεση της πηγής με τη διόδο κατά την ορθή φορά, τα θετικά φορτία από τον θετικό πόλο της πηγής πηγαίνουν στο τμήμα P της διόδου και τα ηλεκτρόνια πηγαίνουν στο τμήμα N αντίστοιχα.



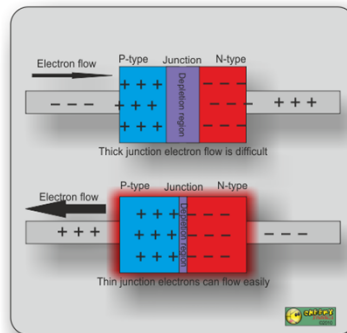
## Δίοδος – ορθή πόλωση

Όσο αυξάνει η εξωτερική τάση τόσο η περιοχή απογύμνωσης γίνεται μικρότερη μέχρι που μηδενίζεται και έχουμε ροή ρεύματος στο κύκλωμα, που ονομάζεται **κατευθείαν ρεύμα** ή **ρεύμα ορθής φοράς** ή **ρεύμα διάχυσης  $I_F$  (forward current)** και έχει καθιερωθεί να έχει διεύθυνση αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων (σχ 3.2.1.(β)).



## Δίοδος – ορθή πόλωση

Η τιμή της εξωτερικής τάσης που πρέπει να εφαρμοσθεί στη δίοδο για να διέλθει ρεύμα στο κύκλωμα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το δυναμικό φραγμού που είναι μερικά δέκατα του Volt ( $V \geq V_0 = 0,1$  για γερμάνιο και  $0,5V$  για πυρίτιο). Το ρεύμα έχει μικρή τιμή μέχρι μια τάση που λέγεται **τάση κατοφλίου ή γόνατος  $V_g$** , μετά την οποία αυξάνεται εκθετικά. Η τάση γόνατος για μεν το γερμάνιο είναι  $0,3V$  για δε το πυρίτιο είναι  $0,7V$ .

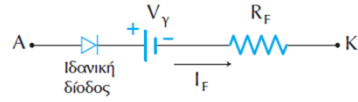




## Δίοδος – ορθή πόλωση

Το ηλεκτροτεχνικό ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου σε ορθή πόλωση φαίνεται στο σχήμα 3.2.2:

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τάσεις φραγμού, κατωφλίου και η αντίσταση διόδου κατά την ορθή πόλωση, όταν η διόδος θεωρείται ιδανική και όταν είναι εμπορίου:



**Σχήμα 3.2.2**  
Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου PN  
 $V_{\gamma}$  = Τάση γόνατος,  
 $R_f$  = αντίσταση ορθής φοράς.

	Τάση φραγμού $V_{\theta}$ , Τάση γόνατος $V_{\gamma}$	Αντίσταση διόδου ορθής φοράς, $R_f$
<b>Ιδανική διόδος</b>	0 V	0 Ω
<b>Μη Ιδανική διόδος (εμπορίου)</b>	0,1 V Ge 0,5 V Si 0,3 V Ge 0,7 V Si	100 -1000 Ω



## Δίοδος σε ορθή πόλωση - παράδειγμα

Μία ιδανική διόδος πυριτίου συνδέεται σε ορθή πόλωση με πηγή τάσης  $V_i = 12$  V, και αντίσταση φόρτου  $R_L = 1$  KΩ .

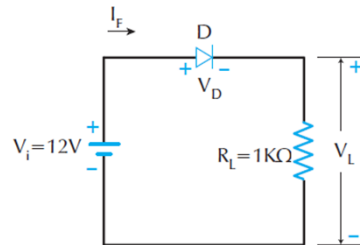
- Να σχεδιασθεί το κύκλωμα .
- Να υπολογισθεί το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.
- Να υπολογισθεί το ρεύμα, όταν η διόδος δεν είναι ιδανική και έχει αντίσταση  $R_f = 200$  Ω

α)





## Δίοδος σε ορθή πόλωση - παράδειγμα



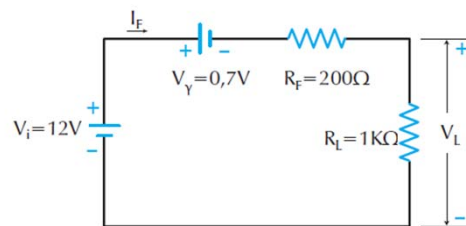
β) Επειδή η δίοδος θεωρείται ιδανική έχουμε  $R_F = 0$ ,  $V_D = 0$  οπότε δεν έχουμε πτώση τάσης στη δίοδο και εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm για την αντίσταση φόρτου θα έχουμε:

$$I_F = \frac{V_i}{R_L} = \frac{12V}{1000\Omega} = 12mA$$



## Δίοδος σε ορθή πόλωση - παράδειγμα

γ) Για μη ιδανική δίοδο  $V_Y = 0.7V$  και  $R_F = 200\Omega$  οπότε έχουμε το εξής ισοδύναμο κύκλωμα:



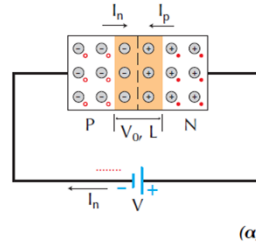
$$I_F = \frac{V_i - V_Y}{R + R_F} = \frac{(12 - 0,7)V}{(1000 + 200)\Omega} = 9,4mA$$



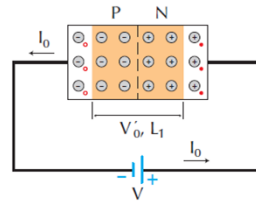
## Δίοδος – ανάστροφη πόλωση

Μια δίοδος PN είναι πολωμένη κατά την ανάστροφη φορά εάν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής είναι συνδεδεμένος με το τμήμα N της δίοδου και ο αρνητικός πόλος με το τμήμα P, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.5(α). Μετά την αγωγίμη σύνδεση, τα θετικά φορτία από τον θετικό πόλο της πηγής εισέρχονται στο τμήμα N, σαν οπές, και επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν εκεί σε μεγάλη συγκέντρωση. Με τον ίδιο μηχανισμό, τα ηλεκτρόνια από τον αρνητικό πόλο της πηγής εισέρχονται στο τμήμα P και επανασυνδέονται με τις οπές που υπάρχουν εκεί σε μεγάλη συγκέντρωση.

Με τις επανασυνδέσεις αυτές η περιοχή απογύμνωσης αυξάνει διότι δημιουργούνται περισσότερα “απογυμνωμένα” θετικά και αρνητικά ιόντα (σχ. 3.2.5(β)).



(α)



(β)

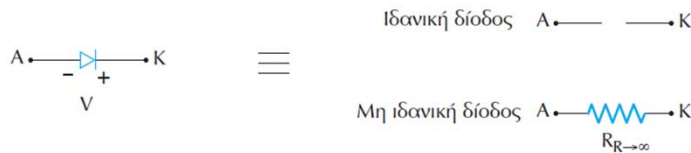
Σχήμα 3.2.5  
Ανάστροφη πόλωση δίοδου PN  
(α)  $V < V_0$  (β)  $V_0 > V_0$



## Δίοδος – ανάστροφη πόλωση

Η αντίσταση της δίοδου κατά την ανάστροφη πόλωση είναι για την ιδανική δίοδο  $R_R = \infty$ , ενώ για δίοδους του εμπορίου λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές (μερικά MΩ).

Η σύνδεση της δίοδου στο κύκλωμα ισοδυναμεί με ανοικτό κύκλωμα ή με αντίσταση πολύ μεγάλης τιμής.



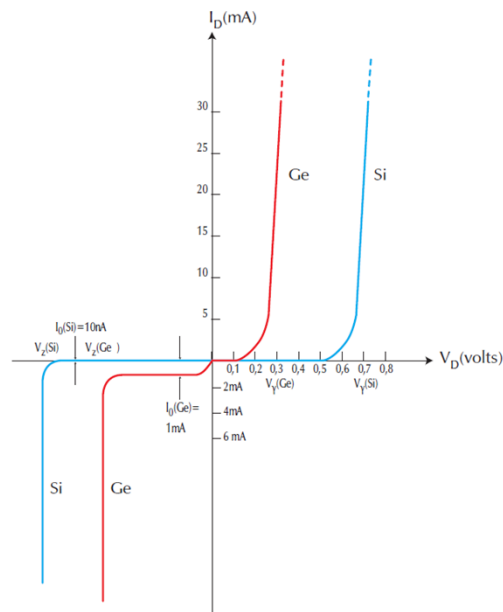


## Δίοδος – ανάστροφη πόλωση – παράδειγμα

Μια δίοδος PN συνδέεται σε ανάστροφη πόλωση με πηγή τάσης  $V_i = 12V$  και αντίσταση φόρτου  $R_L = 10 K\Omega$ . Η αντίσταση της διόδου είναι  $R_R = 12M\Omega$ . Να ευρεθεί το ρεύμα του κυκλώματος.

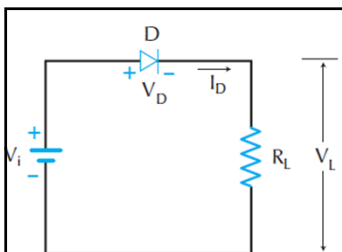
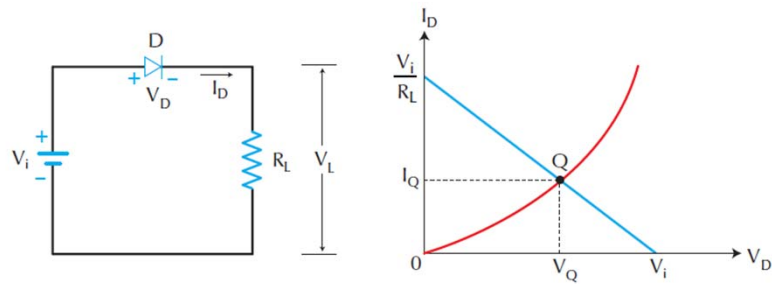


## Χαρακτηριστική καμπύλη δίοδου pn





Σ' ένα κύκλωμα συνδέεται μια διάδος  $D$  σε ορθή πόλωση με πηγή συνεχούς ρεύματος  $V_i$  και αντίσταση φόρτου  $R_L$ . Δίδεται επίσης και η χαρακτηριστική της διόδου (σχήμα 3.3.6).



Ευθεία φόρτου

Αν  $V_D$  είναι η τάση στα άκρα της διόδου και  $I_D$  το ρεύμα του κυκλώματος, εφαρμόζοντας τον κανόνα των τάσεων του Kirchhoff θα είναι :

$$V_i = V_D + V_L \quad \text{όπου} \quad V_L = I_D R_L \quad 3.3.8$$

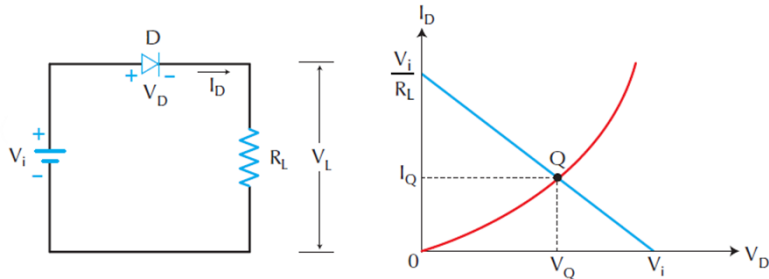
Αντικαθιστώντας θα είναι:

$$V_i = V_D + I_D R_L \Rightarrow V_D = V_i - I_D R_L \quad 3.3.9$$

Η σχέση (3.3.8) είναι μια γραμμική εξίσωση πρώτου βαθμού και περισταίνει την μεταβολή της τάσης στα άκρα της διόδου  $V_D$  συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος  $I_D$ . Σχηματικά η εξίσωση αυτή παριστάνεται με μία ευθεία γραμμή, η οποία ονομάζεται **ευθεία φόρτου** (σχήμα 3.3.6β).



## Ευθεία φόρτου



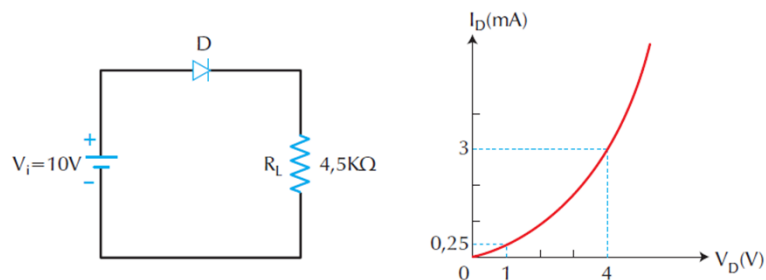
$$V_D = V_i - I_D R_L$$

Η σχέση (3.3.8) είναι μια γραμμική εξίσωση πρώτου βαθμού και περιγράφει την μεταβολή της τάσης στα άκρα της διόδου  $V_D$  συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος  $I_D$ . Σχηματικά η εξίσωση αυτή παριστάνεται με μία ευθεία γραμμή, η οποία ονομάζεται **ευθεία φόρτου** (σχήμα 3.3.6β).



## Ευθεία φόρτου - παράδειγμα

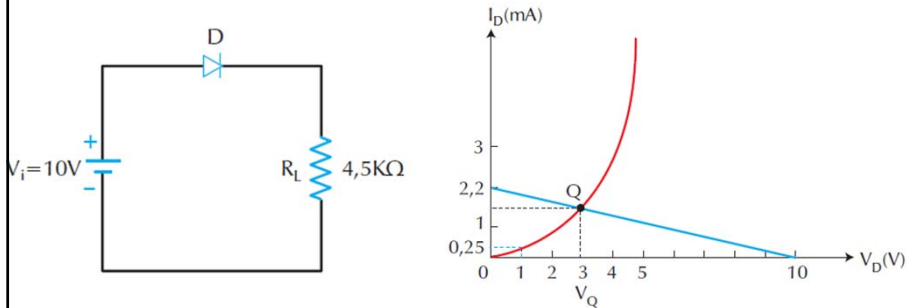
Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας ( $V_Q$ ,  $I_Q$ ) στο κάτωθι κύκλωμα, όταν δίδεται η χαρακτηριστική της διόδου στο σχήμα 3.3.7.



Σχήμα 3.3.7



## Ευθεία φόρτου - παράδειγμα



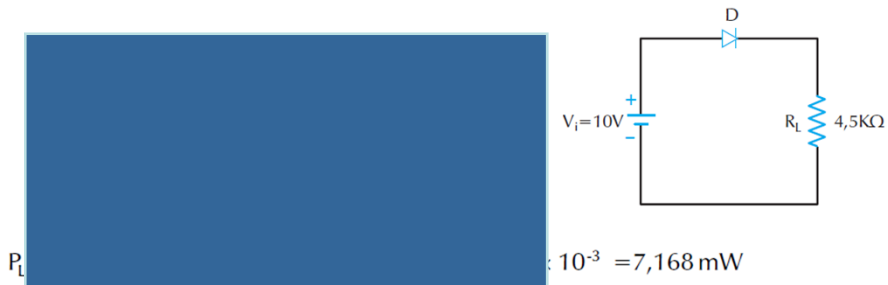
Το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική καμπύλη είναι το σημείο  $Q$ , του οποίου οι συντεταγμένες είναι  $I_Q$ ,  $V_Q$ . Άρα το σημείο ηρεμίας (λειτουργίας) είναι  $V_Q \approx 2,8\text{ Volt}$ ,  $I_Q \approx 1,6\text{ mA}$ .



## Ευθεία φόρτου - παράδειγμα

Για το παραπάνω κύκλωμα να υπολογισθούν οι ισχείς στη δίοδο και στο φόρτο.

Το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική καμπύλη είναι το σημείο  $Q$ , του οποίου οι συντεταγμένες είναι  $I_Q$ ,  $V_Q$ . Άρα το σημείο ηρεμίας (λειτουργίας) είναι  $V_Q \approx 2,8\text{ Volt}$ ,  $I_Q \approx 1,6\text{ mA}$ .

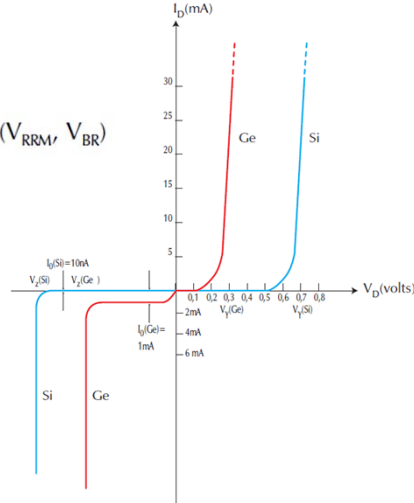




## Χαρακτηριστικά διόδων

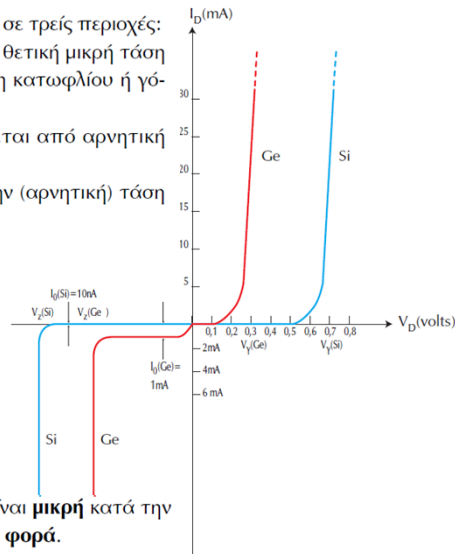
1. Μέγιστο ρεύμα ορθής φοράς ( $I_{F\text{MAX}}$ )
2. Μέγιστη τάση κατά την ορθή φορά ( $V_{F\text{MAX}}$ )
3. Μέγιστη τάση κατά την ανάστροφη φορά ( $V_{RRM}$ ,  $V_{BR}$ )
4. Μέγιστο ανάστροφο ρεύμα  $I_0$  ή  $I_R$
5. Μέγιστη ισχύς διόδου  $P_{MAX}$

Δίοδος	$I_{F\text{MAX}}$ (A)	$V_{F\text{MAX}}$ (V)	$V_{RRM}$ (V)	$I_0, I_R$ (A)
1N 4001	1	1.1	50	10 $\mu$ A
1N 3913	30	1.4	400	6mA
1N4148	2	1	100	25nA/20V
BAS20	0,6	5	200	100nA/150V
A15A	3	1,2	50	5 $\mu$ A
1N914	0,2	1	100	25nA /20V



## Δίοδος - Περίληψη

- Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου PN χωρίζεται σε τρεις περιοχές:
  - α. **περιοχή ορθής φοράς** που χαρακτηρίζεται από θετική μικρή τάση και θετικό μεγάλο ρεύμα (mA ή A) μετά την τάση κατωφλίου ή γόνατος.
  - β. **περιοχή ανάστροφης φοράς** που χαρακτηρίζεται από αρνητική τάση και αρνητικό μικρό ρεύμα ( $\mu$ A ή nA).
  - γ. **περιοχή διάσπασης** που χαρακτηρίζεται από την (αρνητική) τάση Zener και μεγάλο ρεύμα.



<http://utwired.engr.utexas.edu/rqd1/lesson10.cfm>

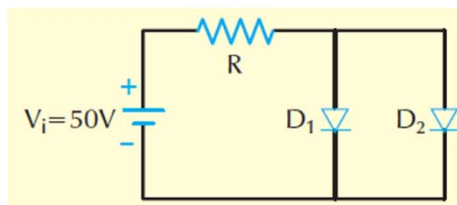
• Η αντίσταση συνεχούς ρεύματος μιας διόδου PN είναι **μικρή** κατά την **ορθή φορά** και πολύ **μεγάλη** κατά την **ανάστροφη φορά**.



Μία δίοδος διαρρέεται από ρεύμα 100 mA όταν είναι ορθά πολωμένη με τάση 2V και από ρεύμα 5  $\mu$ A όταν είναι ανάστροφα πολωμένη με τάση 50V. Να ευρεθούν οι αντιστάσεις ορθής και ανάστροφης φοράς.



Κάθε δίοδος στο πιο κάτω κύκλωμα περιγράφεται από μια αντίσταση και μια τάση κατωφλίου. Οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_2$  είναι δίοδοι πυριτίου και έχουν  $V_{\gamma 1} = V_{\gamma 2} = 0.7V$  και  $R_1 = 20\Omega$  και  $R_2 = 30\Omega$ . Να ευρεθούν τα ρεύματα στις δόδους όταν η αντίσταση  $R = 1K\Omega$ .





Δίοδος πυριτίου καταναλώνει ισχύ  $5W$  όταν διαρρέεται από ρεύμα  $1 A$  με πόλωση κατά την ορθή φορά. Πόση είναι η τάση στα άκρα της ;



Δίνεται το παρακάτω κύκλωμα και η χαρακτηριστική της διόδου. Να υπολογισθεί το σημείο λειτουργίας με γραφικό τρόπο.

