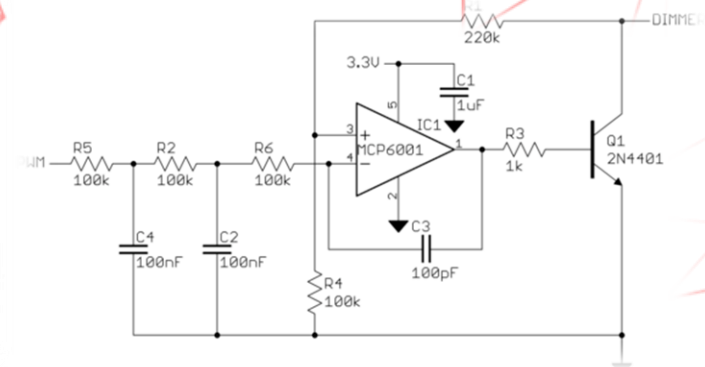
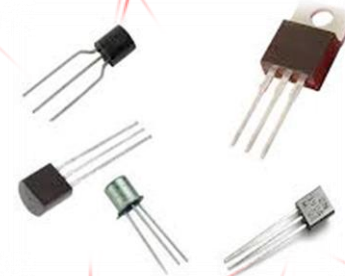
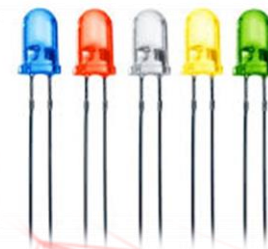
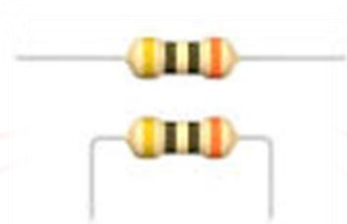
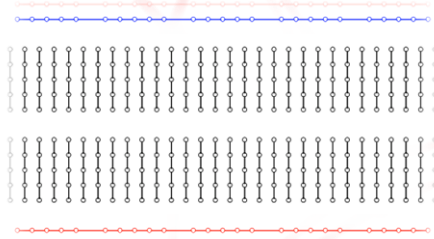


# Ηλεκτρονική

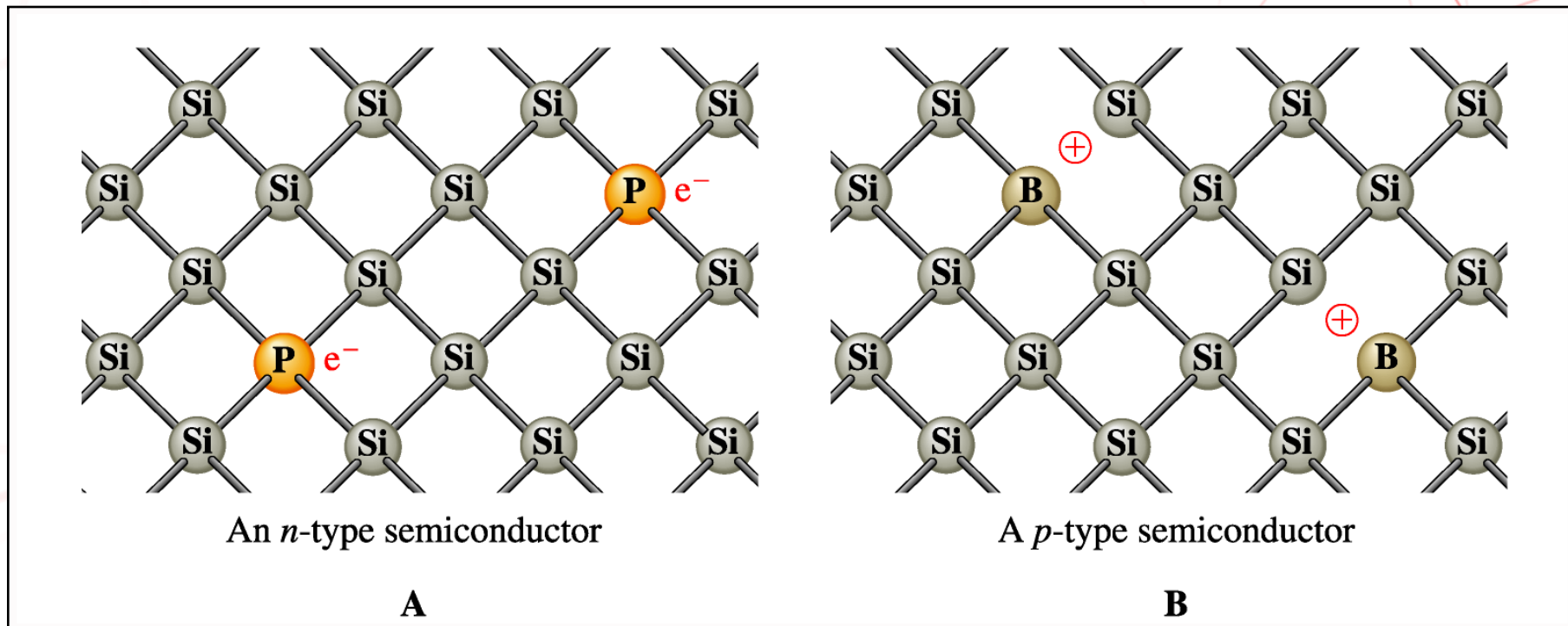
➔ Νικόλαος Γιαννακέας



# Περιεχόμενα του μαθήματος

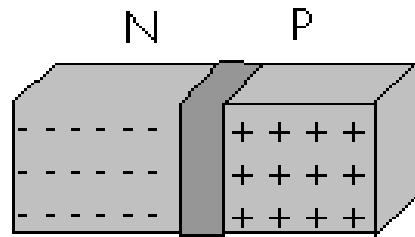
- Κρυσταλοδίοδος
- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά
- Θεωρητικό μοντέλο
- Μοντέλα λειτουργίας
  - Ιδανική δίοδος
  - Τυπική Δίοδος
  - Πραγματική δίοδος
- Πρακτικά

# Κρυσταλλοδίοδος

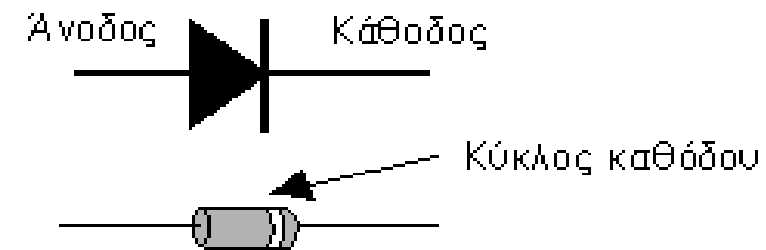


# Κρυσταλλοδίοδος

**Δίοδος:** συνδυασμός ημιαγωγών *τύπου p & n*



Τομή μιας διόδου  
επαφής



Σχηματικό σύμβολο της  
διόδου και πραγματική διόδος

## Κρυσταλλοδίοδος

- Η υλοποίηση μιας **επαφής  $p-n$**  σε διακριτή ή ολοκληρωμένη μορφή ονομάζεται **κρυσταλλοδίοδος ή απλά δίοδος (diode)**
- Την ονομασία της την οφείλει στο γεγονός ότι μια επαφή  $p-n$  επιτρέπει, γενικά, τη διέλευση του ρεύματος κατά την ορθή φορά ενώ την απαγορεύει κατά την ανάστροφη
- **Διάταξη που ελέγχει τη διέλευση (τη δίοδο) του ηλεκτρικού ρεύματος**

## Κρυσταλλοδίοδος

- Οι περισσότερες εφαρμογές των διόδων βασίζονται στην ιδιότητα αυτή
- Ο όρος **κρυσταλλοδίοδος** χρησιμοποιείται για να αντιδιαστείλει την **δίοδο στερεάς κατάστασης** που βασίζει τη λειτουργία της στην **επαφή  $p-n$**  με τη **δίοδο ηλεκτρονική λυχνία**, μια διάταξη με παρόμοια συμπεριφορά που λειτουργεί με βάση τις αρχές της αγωγιμότητας στο κενό
- Οι **ηλεκτρονικές λυχνίες κενού (electronic vacuum tubes)** έτυχαν ευρύτατης εφαρμογής στην εποχή πριν την εμφάνιση των διατάξεων ημιαγωγών, έχουν όμως σχεδόν εγκαταλειφθεί για πολλούς λόγους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι ο όγκος τους & οι υψηλές τάσεις τροφοδοσίας που απαιτούν για τη λειτουργία τους

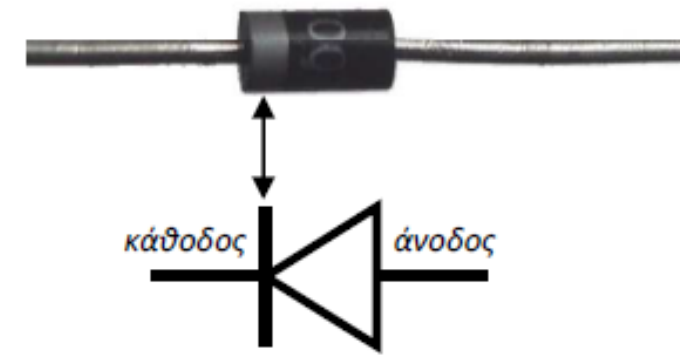


## Κρυσταλλοδίοδος

- Οι δίοδοι είναι **ασύμμετρες ηλεκτρονικές διατάξεις με δύο ακροδέκτες**
- Η ασυμμετρία αυτή πηγάζει από το γεγονός ότι, ως **επαφές  $p$ - $n$** , οι δίοδοι συμπεριφέρονται με άλλον τρόπο στην ορθή και με άλλον τρόπο στην ανάστροφη πόλωση
- Το άκρο μιας διόδου που αντιστοιχεί στο τμήμα **τύπου  $p$**  της επαφής ονομάζεται **άνοδος**, ενώ το άκρο που αντιστοιχεί στο τμήμα **τύπου  $n$**  καλείται **κάθοδος**

## Γενικά (2)

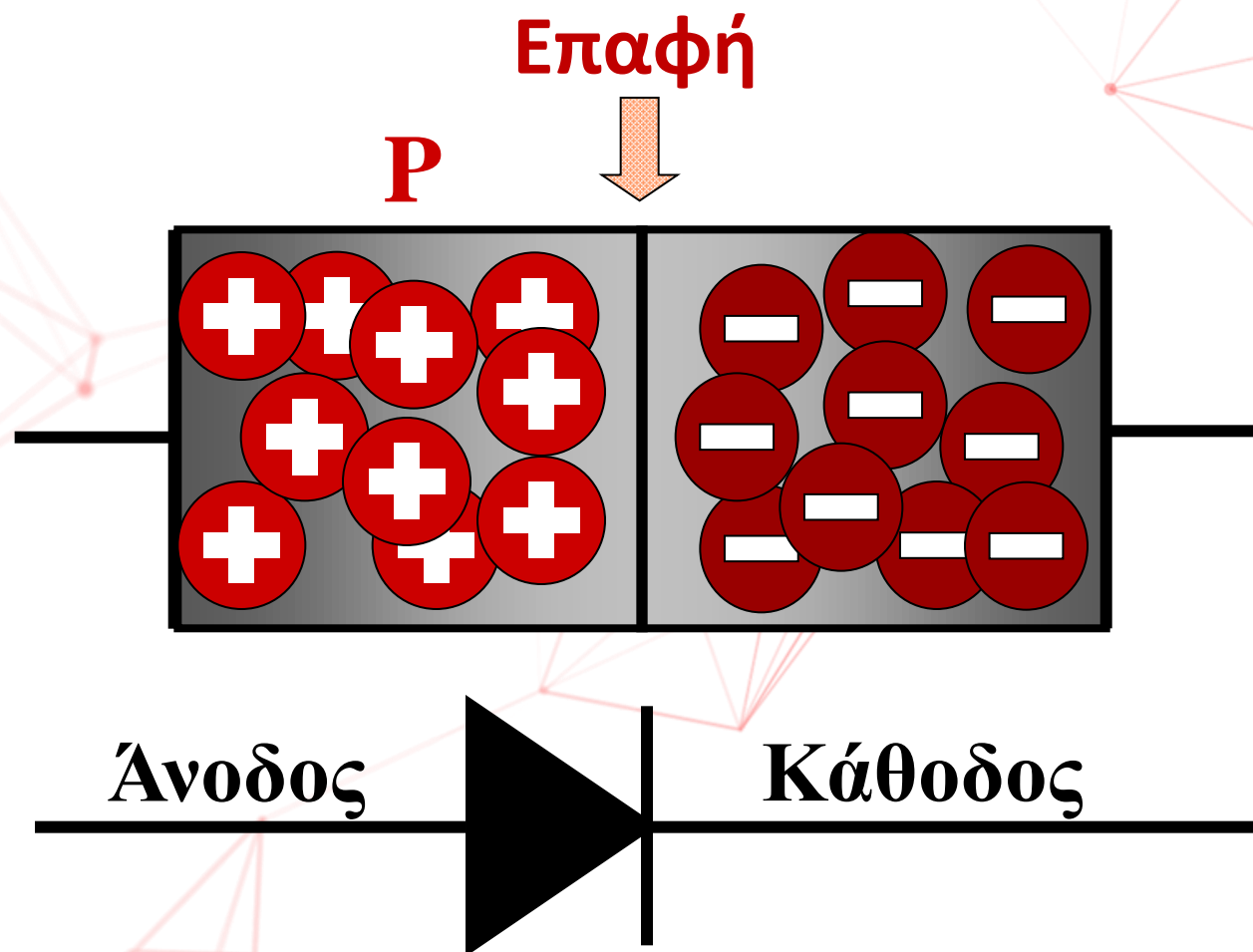
- Η κάθοδος σε μια διακριτή δίοδο σημειώνεται με μια γραμμή (που παριστάνει το σημείο «-») στο αντίστοιχο άκρο
- Το ηλεκτρονικό σύμβολο μιας διόδου αποτελείται από ένα βέλος που δείχνει την επιτρεπτή φορά του ρεύματος και μια κάθετη γραμμή που συμβολίζει την κάθοδο
- Η αγωγιμότητα της **επαφής  $p-n$**  στην ορθή της πόλωση εξασφαλίζεται όταν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της είναι μεγαλύτερη από τον φραγμό δυναμικού  $V_0$



Τυπική διακριτή δίοδος & κυκλωματικό σύμβολο



# Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

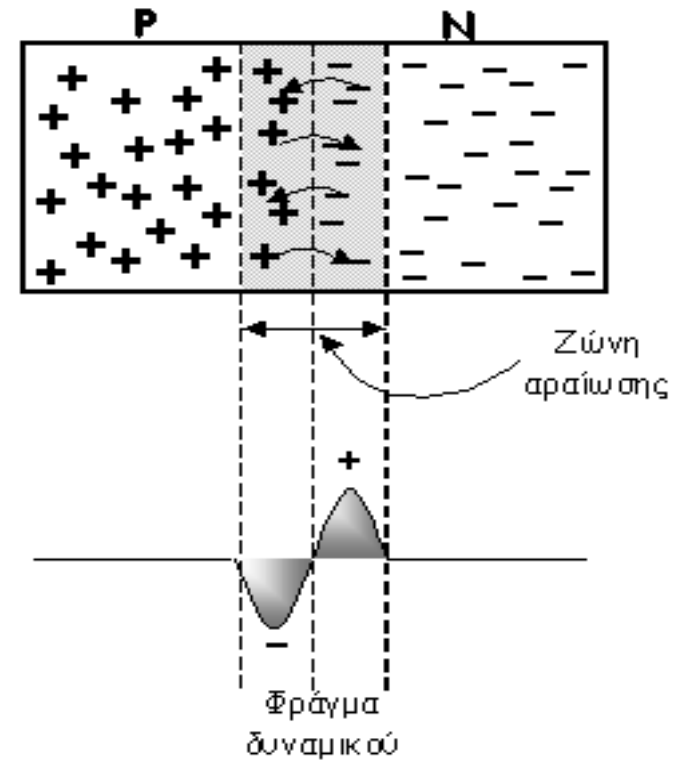


## Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Χωρίς πόλωση η ένωση απογυμνώνεται  
από φορτία: **ζώνη αραίωσης ή περιοχή  
απογύμνωσης**

Μεταξύ  $p$  &  $n$  το φράγμα δυναμικού 0,6-  
0,7 V

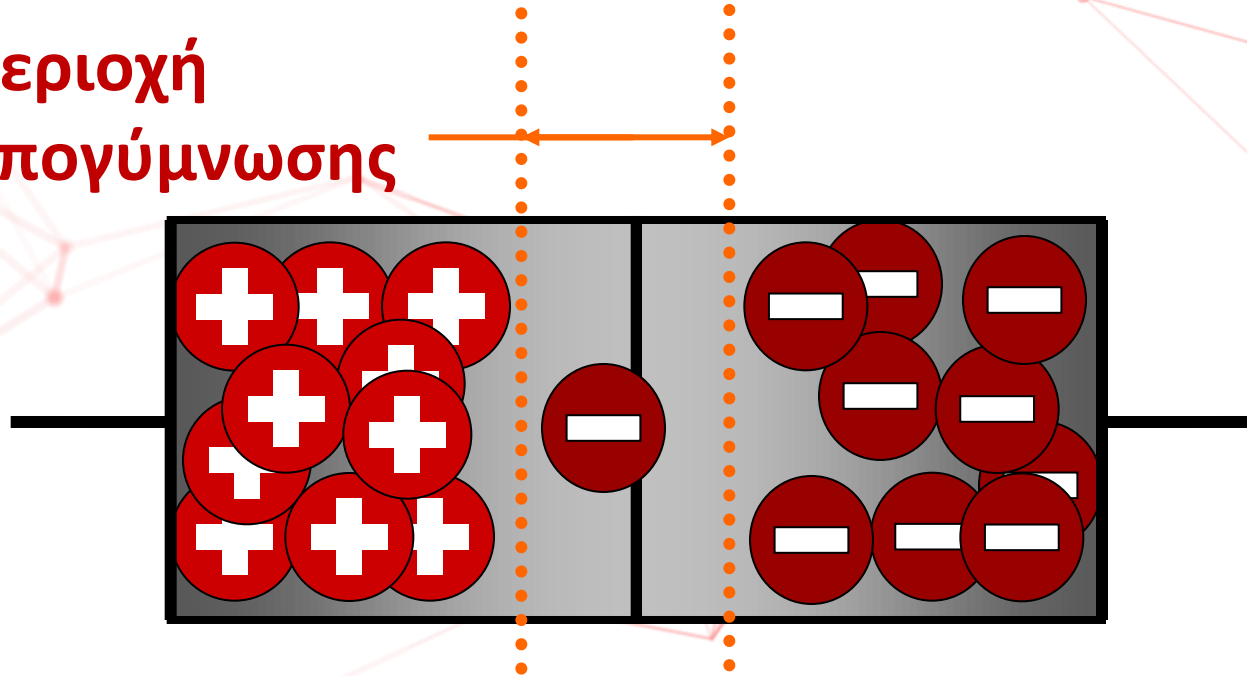
για Si **Συνολικό φορτίο διόδου= 0**



# Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Τα ηλεκτρόνια κοντά στην επαφή εξουδετερώνουν τις οπές στην p- πλευρά

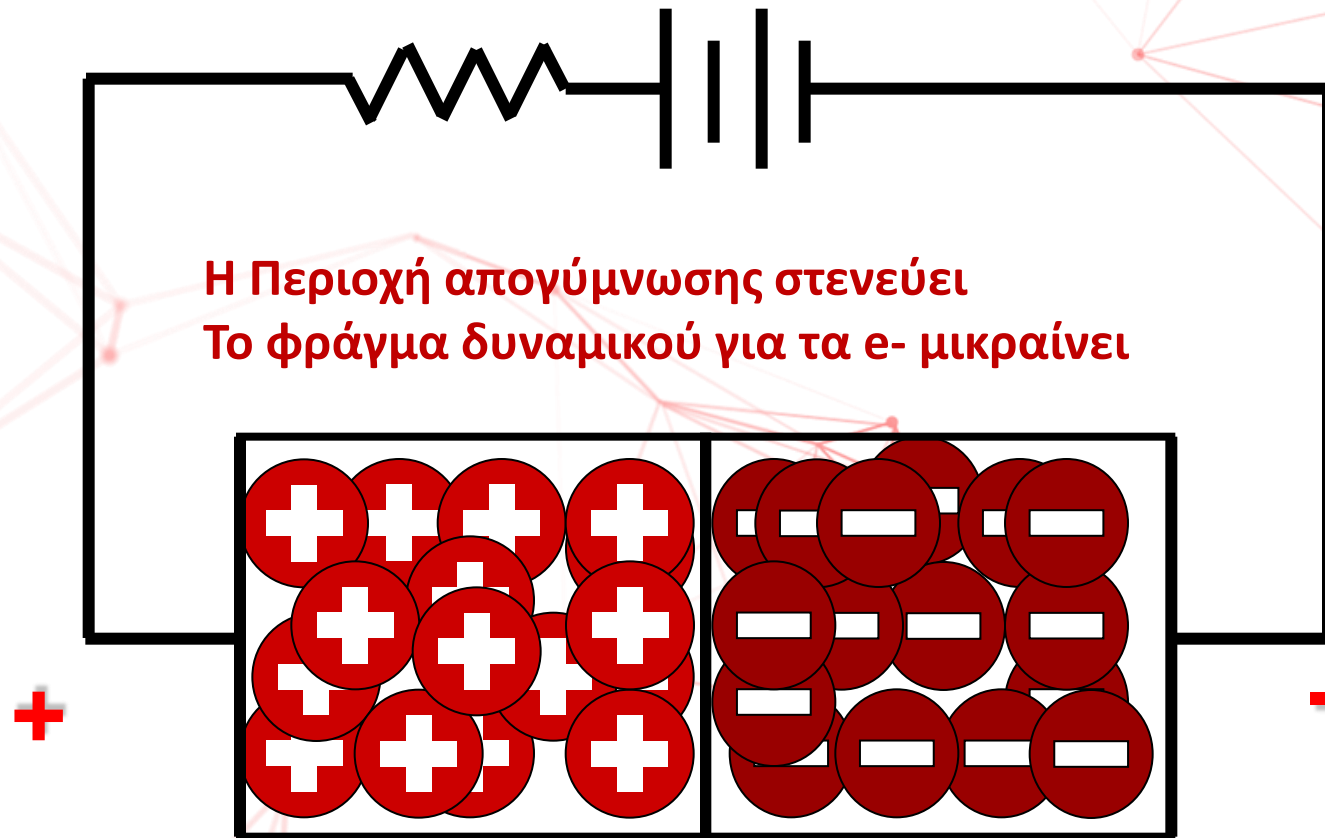
Περιοχή  
απογύμνωσης



Η περιοχή απογύμνωσης δρά σα μονωτής

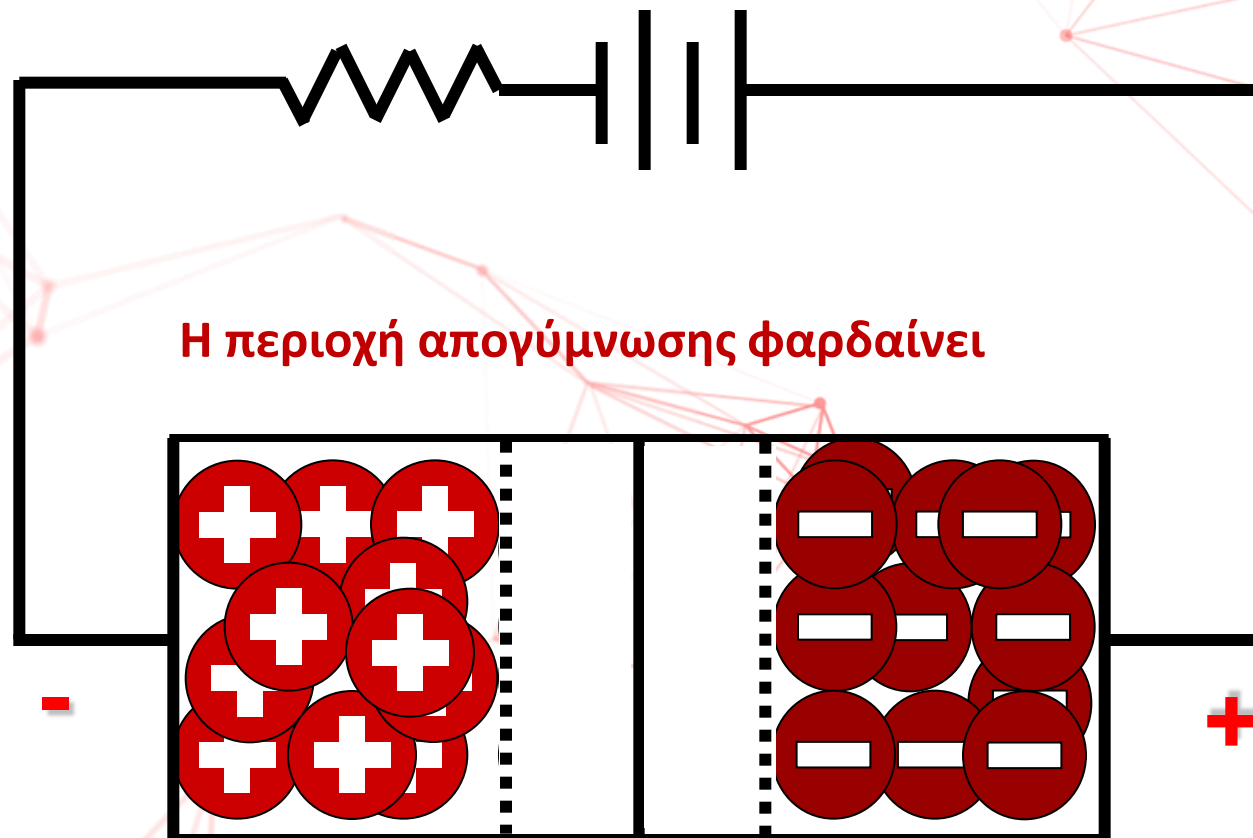
# Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Ορθή πόλωση



# Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

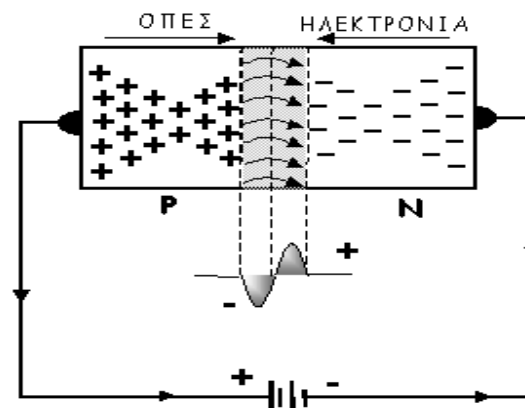
Ανάστροφη πόλωση



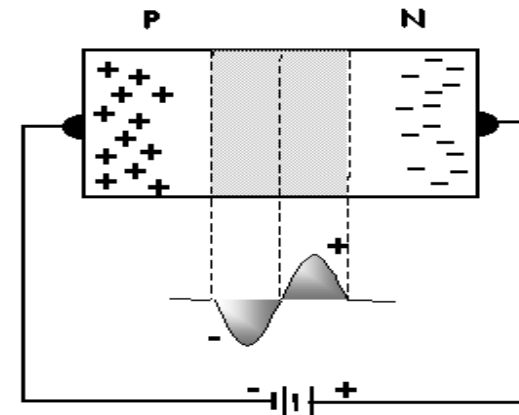
# Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

**Ορθή πόλωση:** ο θετικός πόλος συνδέεται με **άνοδο**, ο αρνητικός πόλος με **κάθοδο**

**Ανάστροφη πόλωση:** ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται με **κάθοδο**, ενώ ο αρνητικός με **άνοδο**



*Κατανομή φορτίου διόδου  
κατά την ορθή πόλωση*



*Κατανομή φορτίου διόδου  
κατά την ανάστροφη πόλωση*

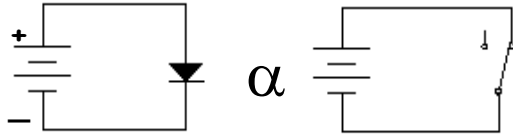


## Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

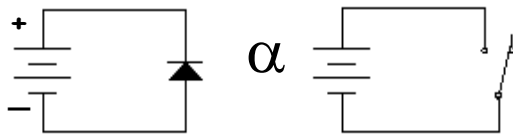
**Ορθή πόλωση:** μικρή αντίσταση ( $\sim 50\text{-}100\Omega$ )

**Ανάστροφη πόλωση:** μεγάλη αντίσταση ( $> 10\text{ k}\Omega$ )

# Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά



Η δίοδος πολώνεται ορθά & δρα σαν κλειστός διακόπτης



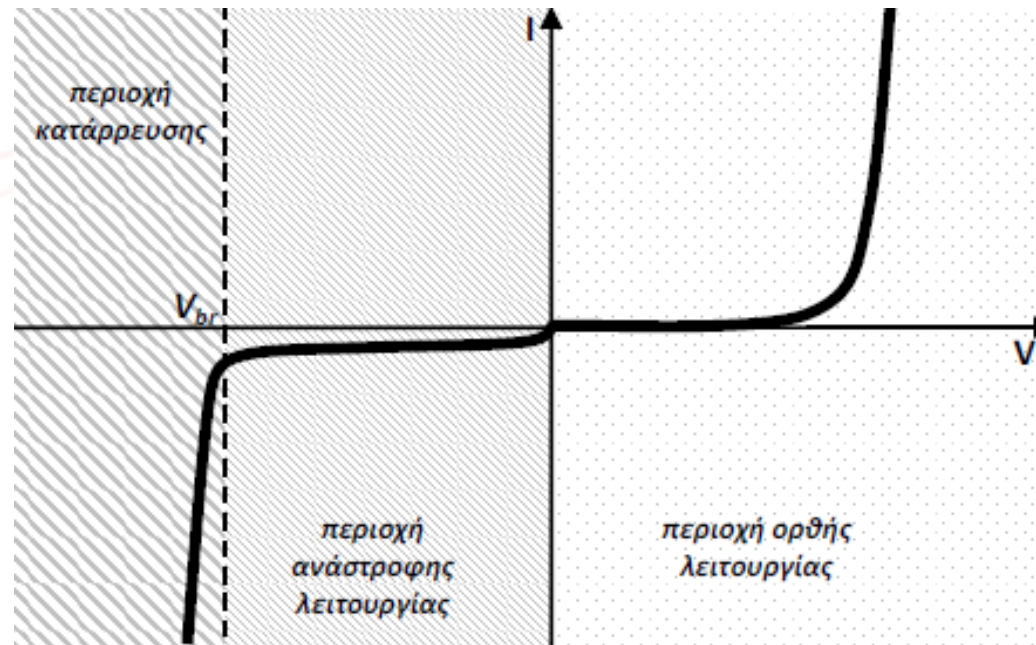
Η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και δρα σαν ανοιχτός διακόπτης

## Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

- Το όριο (κατώφλι) της εξωτερικής τάσης πάνω από το οποίο μια ορθά πολωμένη δίοδος θα επιτρέπει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι ίσο με την τιμή του φραγμού δυναμικού
- Το όριο αυτό ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold voltage) & συμβολίζεται συνήθως με  $V_T$
- Μια τυπική τιμή για την **τάση κατωφλίου μιας διόδου πυριτίου (Si)** είναι **0.7Volts**
- Για **διόδους γερμανίου (Ge)** η τιμή αυτή είναι μικρότερη (**0.2Volts**)

## Θεωρητικό μοντέλο διόδου (1)

- Στην πραγματικότητα η διάδος **επαφής  $p-n$**  είναι στοιχείο μη γραμμικό, η τάση δηλαδή μεταξύ των ακροδεκτών της δεν είναι ανάλογη του ρεύματος που τη διαρρέει



**Χαρακτηριστική I-V πραγματικής διόδου**

## Θεωρητικό μοντέλο διόδου (2)

- Για τέτοιες διόδους, ο λόγος της αντίστασης στην ανάστροφη πόλωση προς την αντίσταση στην ορθή είναι πολύ μεγαλύτερος από  $1000 \div 1$
- Στο σημείο αυτό αξίζει να παρατηρήσουμε πως όταν η **ανάστροφη τάση ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή (τάση κατάρρευσης – breakdown voltage -  $V_{br}$ ) το ανάστροφο ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο γίνεται εξαιρετικά μεγάλο**
- Η δίοδος έχει εισέλθει στην περίπτωση αυτή στην **περιοχή κατάρρευσης (breakdown region)**
- Όταν συμβαίνει αυτό μια κοινή δίοδος καταστρέφεται
- Σε ειδικούς τύπους διόδων γίνεται εκμετάλλευση της μεγάλης τιμής του ρεύματος στην περιοχή κατάρρευσης

## Χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου

➔ Η εξίσωση αυτή, που προκύπτει από τη θεωρητική μελέτη μιας **επαφής p-n** & ονομάζεται & **νόμος της επαφής p-n**, έχει ως εξής:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{nV_\theta}} - 1 \right),$$

όπου

$V_D$  η τάση στα άκρα της διόδου,

$I_D$  το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο,

$I_S$  το **ανάστροφο ρεύμα κόρου** (το μέγιστο δηλαδή ρεύμα στην περιοχή ανάστροφης λειτουργίας),

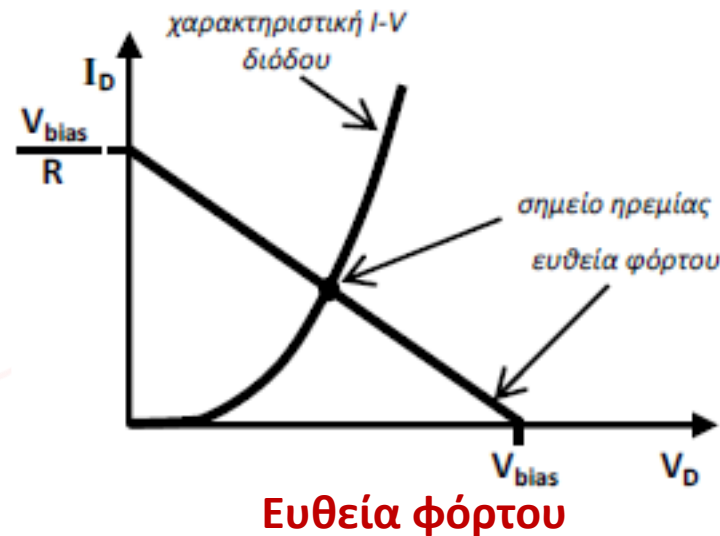
$V_\theta$  η θερμική τάση που υπολογίζεται από τη σχέση  $V_\theta = kT/q$  ( $k$  η σταθερά του Boltzmann,  $q$  το στοιχειώδες φορτίο και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία) και ισούται περίπου με 26mV στους 25°C,

$n$  ο **συντελεστής ιδανικότητας** της διόδου που εξαρτάται από το υλικό της και τυπικά παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.



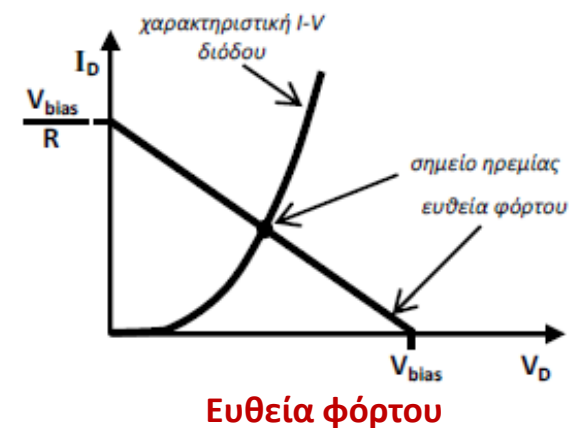
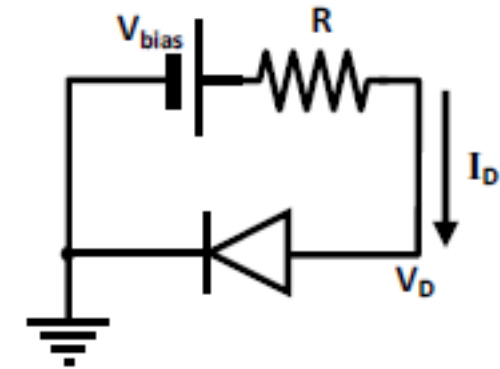
## Χαρακτηριστικά λειτουργίας-Ευθεία φόρτου (1)

- Όταν η διόδος βρίσκεται σε ορθή πόλωση τότε η τάση αγωγής ( $V_D$ ) στα άκρα της είναι σχετικά ανεξάρτητη από το ρεύμα ( $I_D$ ) που διαρρέει τη διόδο, όπως προκύπτει από τη μεγάλη κλίση της χαρακτηριστικής στην περιοχή ορθής λειτουργίας
- Η τάση αυτή είναι περίπου ίση με την τάση κατωφλίου της διόδου, δηλαδή 0.7V για μια διόδο πυριτίου & 0.3V για μια διόδο γερμανίου



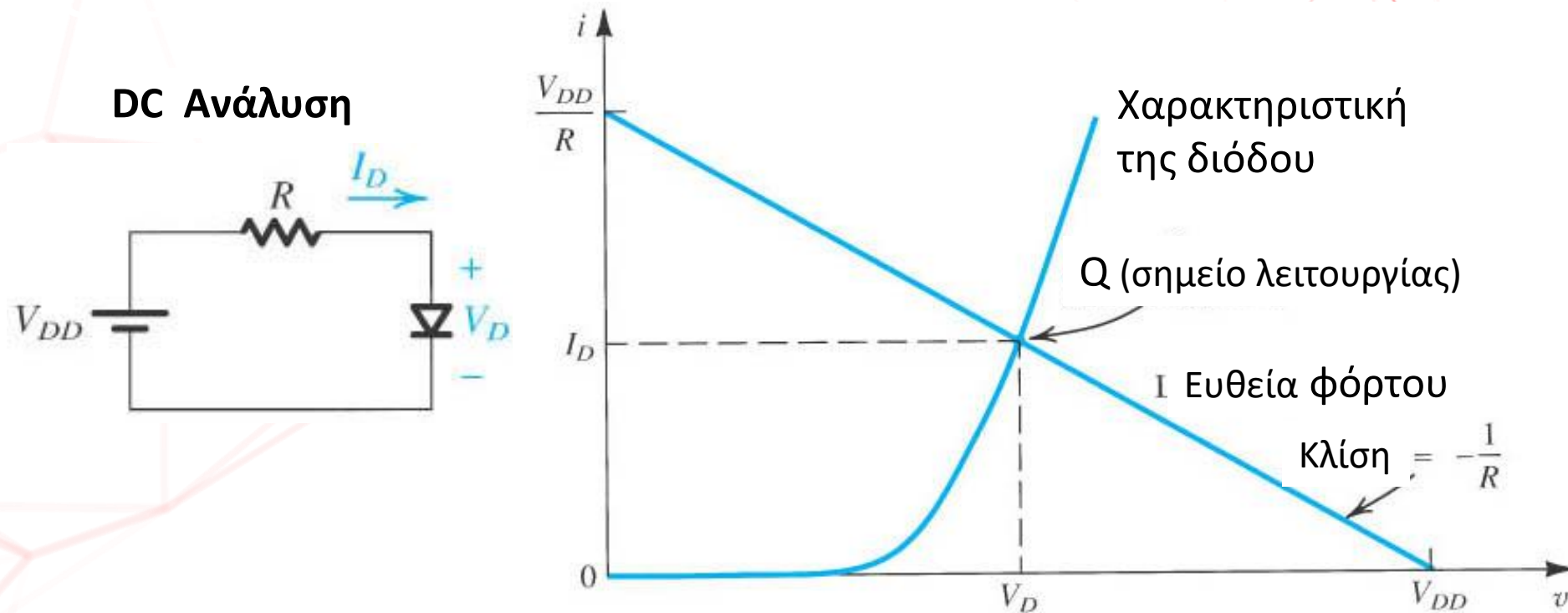
## Χαρακτηριστικά λειτουργίας-Ευθεία φόρτου (2)

- Έστω το απλό κύκλωμα με δίοδο του Σχήματος
- Η ευθεία φόρτου συσχετίζει το ρεύμα & την τάση στα σημεία του κυκλώματος που είναι συνδεμένη η δίοδος
- Το σημείο τομής της ευθείας φόρτου & της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου καθορίζει το σημείο λειτουργίας (ή ηρεμίας)



Ευθεία φόρτου

## Χαρακτηριστικά λειτουργίας - Ευθεία φόρτου (3)



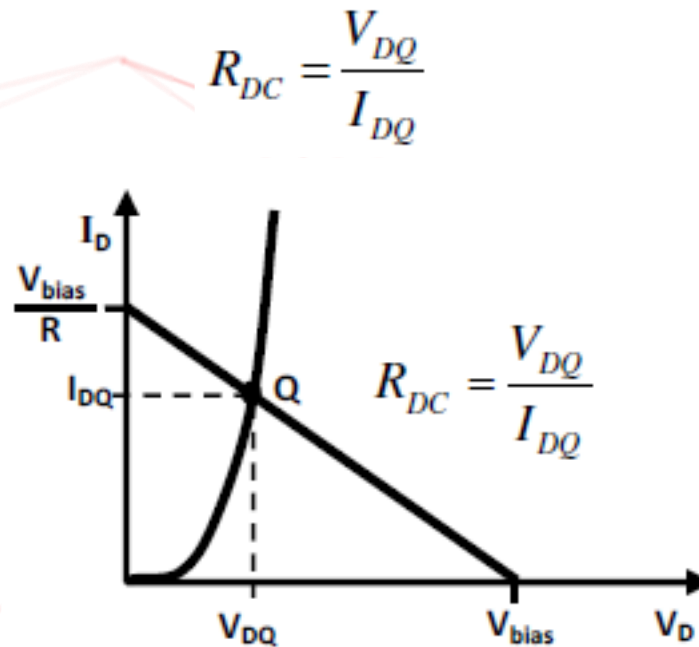
Χαρακτηριστική της Διόδου:  $I_D = I_s \exp\left(\frac{V_D}{\eta V_T}\right)$

Ευθεία φόρτου:  $V_{DD} = I_D R + V_D \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$

Το σημείο λειτουργίας **Q** βρίσκεται από τη λύση του συστήματος.

## Χαρακτηριστικά λειτουργίας - Ευθεία φόρτου (3)

- ➔ Η στατική αντίσταση (ή DC αντίσταση -  $R_{DC}$ ) μιας διόδου σε κάποιο σημείο ηρεμίας προσδιορίζεται από τον λόγο της τάσης  $V_{DQ}$  στα άκρα της διόδου στο σημείο αυτό & του ρεύματος  $I_{DQ}$  που διαρρέει τη δίοδο, δηλαδή

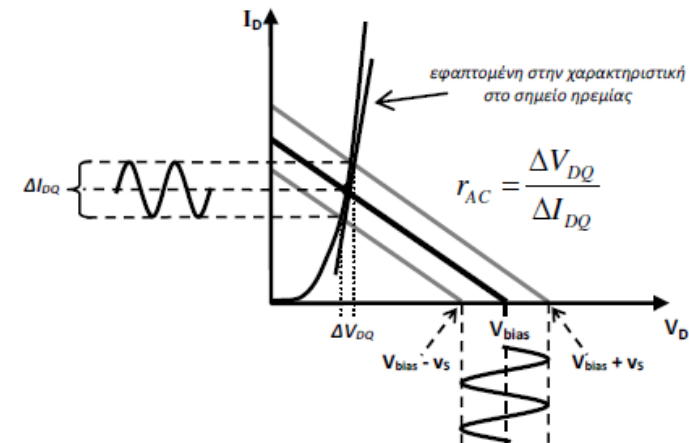
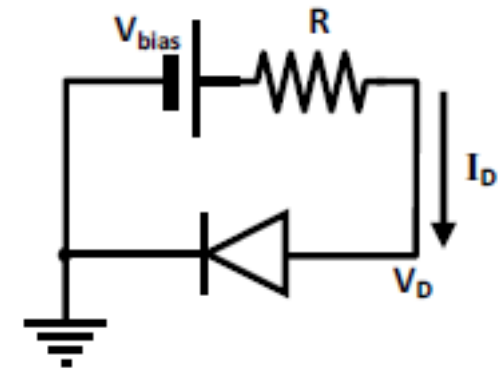


Στατική (DC) αντίσταση διόδου

## Χαρακτηριστικά Λειτουργίας - Ευθεία φόρτου (4)

- Αν στο κύκλωμα του Σχήματος προσθέσουμε και μια AC πηγή σήματος σχετικά μικρού πλάτους η δυναμική αντίσταση (ή AC αντίσταση -  $r_{AC}$ ) της διόδου μπορεί να προσδιοριστεί από την εφαπτομένη της χαρακτηριστικής της καμπύλης στο σημείο ηρεμίας του κυκλώματος
- Η εφαπτομένη αυτή μπορεί να προσεγγιστεί λαμβάνοντας μικρές αποκλίσεις γύρω από το σημείο αυτό, οπότε η τιμή της δυναμικής αντίστασης μπορεί να προκύψει με βάση τη σχέση:

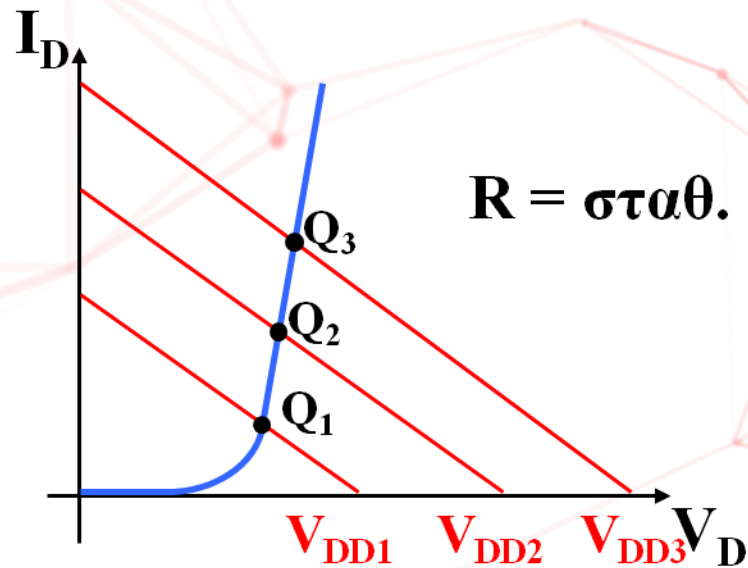
$$r_{AC} = \frac{\Delta V_{DQ}}{\Delta I_{DQ}}$$



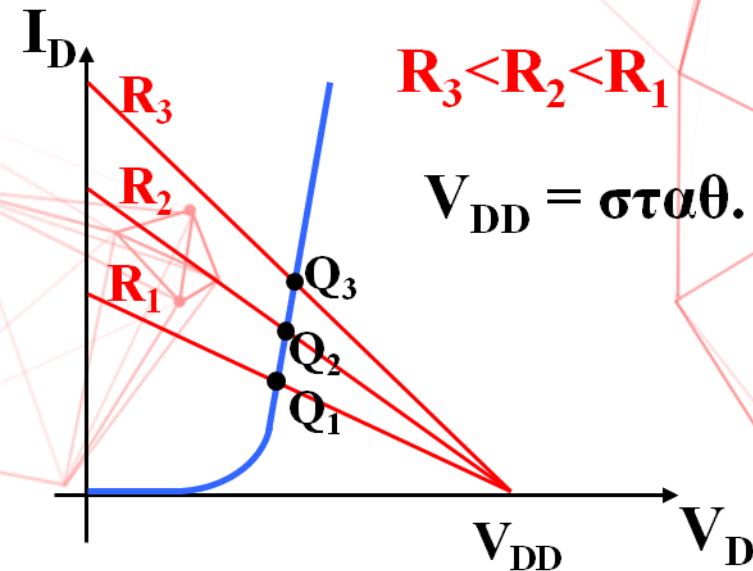
Στατική (DC) αντίσταση διόδου

## Χαρακτηριστικά λειτουργίας - Ευθεία φόρτου (4)

Μεταβολή Τάσης Πόλωσης



Μεταβολή Αντίστασης





## Μοντέλα Λειτουργίας

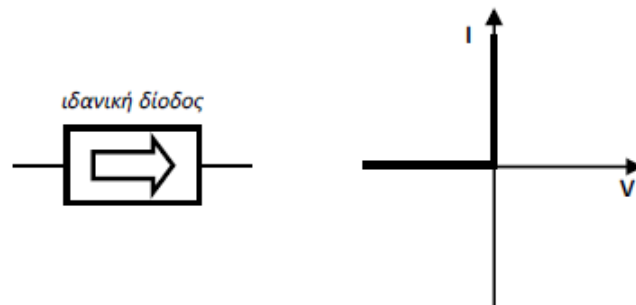
- Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις οι οποίες μπορούν να περιγράψουν τη λειτουργία μιας διόδου
- Η επιλογή μιας από αυτές τις εναλλακτικές προσεγγίσεις εξαρτάται από την ακρίβεια της περιγραφής που απαιτούμε
- Μερικά μοντέλα για την περιγραφή μιας διόδου:
  - Ιδανική δίοδος
  - Τυπική δίοδος
  - Τυπική δίοδος με αντίσταση (πραγματική)

## Ιδανική δίοδος - 1<sup>η</sup> Προσέγγιση

- Ως ιδανική θεωρούμε μια δίοδο με μηδενική τάση κατωφλίου & μηδενική αντίσταση κατά την ορθή πόλωση
- Στο μοντέλο αυτό η δίοδος θεωρείται ως βραχυκύκλωμα όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι ορθής φοράς & ως ανοικτό κύκλωμα στην ανάστροφη πόλωση

## Ιδανική δίοδος - 1<sup>η</sup> Προσέγγιση

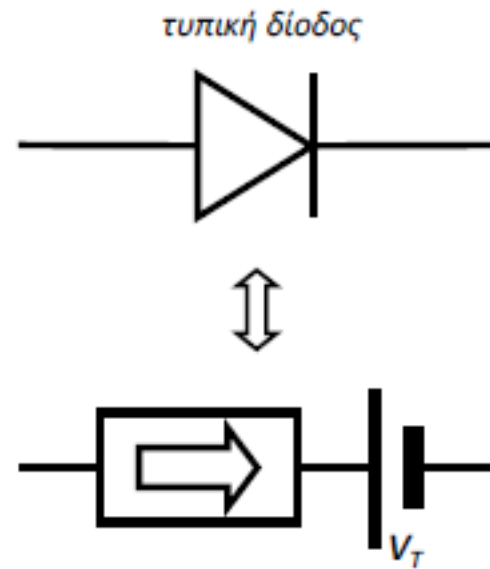
- Με βάση τις υποθέσεις αυτές, προκύπτει η χαρακτηριστική I-V του Σχήματος
- Για ανάστροφες (αρνητικές) τάσεις το **ρεύμα  $I$**  είναι μηδενικό, ενώ για **ορθές (θετικές) τάσεις το ρεύμα γίνεται άπειρο** (εξαιτίας της μηδενικής αντίστασης της ιδανικής διόδου)
- Μια ιδανική δίοδος λειτουργεί, ουσιαστικά, ως μια **βαλβίδα ρεύματος, επιτρέποντας τη ροή κατά τη μία μόνο κατεύθυνση**



Σύμβολο & χαρακτηριστική I-V ιδανικής διόδου

## Τυπική δίοδος - 2<sup>η</sup> Προσέγγιση

- Ως τυπική θεωρούμε μια δίοδο με τάση κατωφλίου ( $V_T$ ) διάφορη του μηδενός & μηδενική αντίσταση κατά την ορθή πόλωση



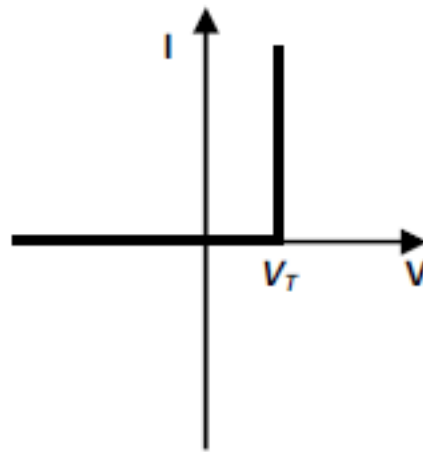
Ισοδύναμο κύκλωμα

## Τυπική δίοδος - 2<sup>η</sup> Προσέγγιση

- Μια τυπική δίοδος μπορεί να θεωρηθεί ως **μία ιδανική δίοδος συνδεδεμένη σε σειρά με μια ιδανική πηγή σταθερής τάσης** με τιμή ίση με την τάση κατωφλίου της διόδου
- Κατά την **ανάστροφη πόλωση** είναι προφανές πως το **ρεύμα** που θα διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι **μηδενικό**
- Κατά την ορθή πόλωση της τυπικής διόδου, όσο η τάση στα άκρα της είναι μικρότερη της τάσης  $V_T$  της πηγής η ιδανική δίοδος θα είναι πολωμένη ανάστροφα & το ρεύμα που θα διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι μηδενικό

## Τυπική δίοδος - 2<sup>η</sup> Προσέγγιση

- ➔ Όταν η τάση στα άκρα της τυπικής διόδου **υπερβεί την τάση  $V_T$**  της πηγής, η ιδανική δίοδος θα είναι πολωμένη ορθά & το ρεύμα που θα διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι άπειρο, μιας & οι αντιστάσεις της ιδανικής διόδου & της πηγής τάσης είναι μηδενικές

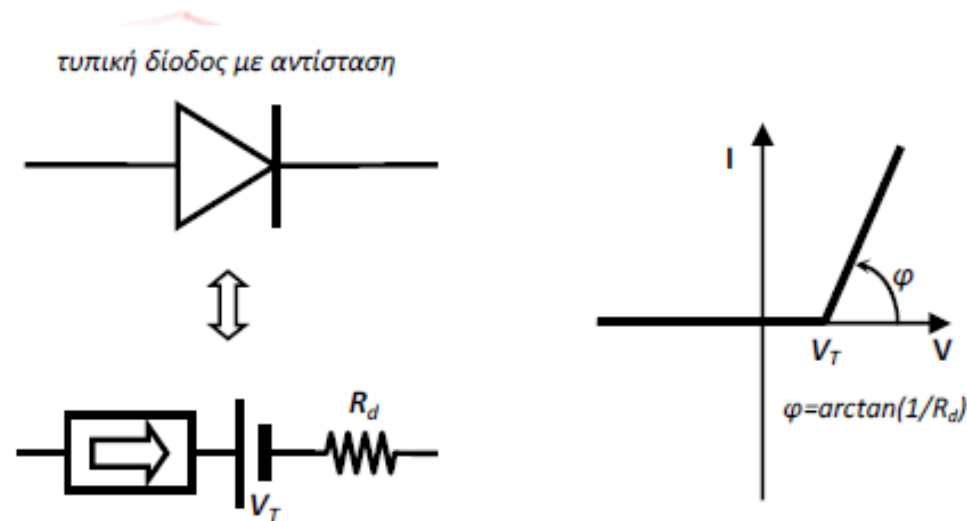


Χαρακτηριστική I-V τυπικής διόδου



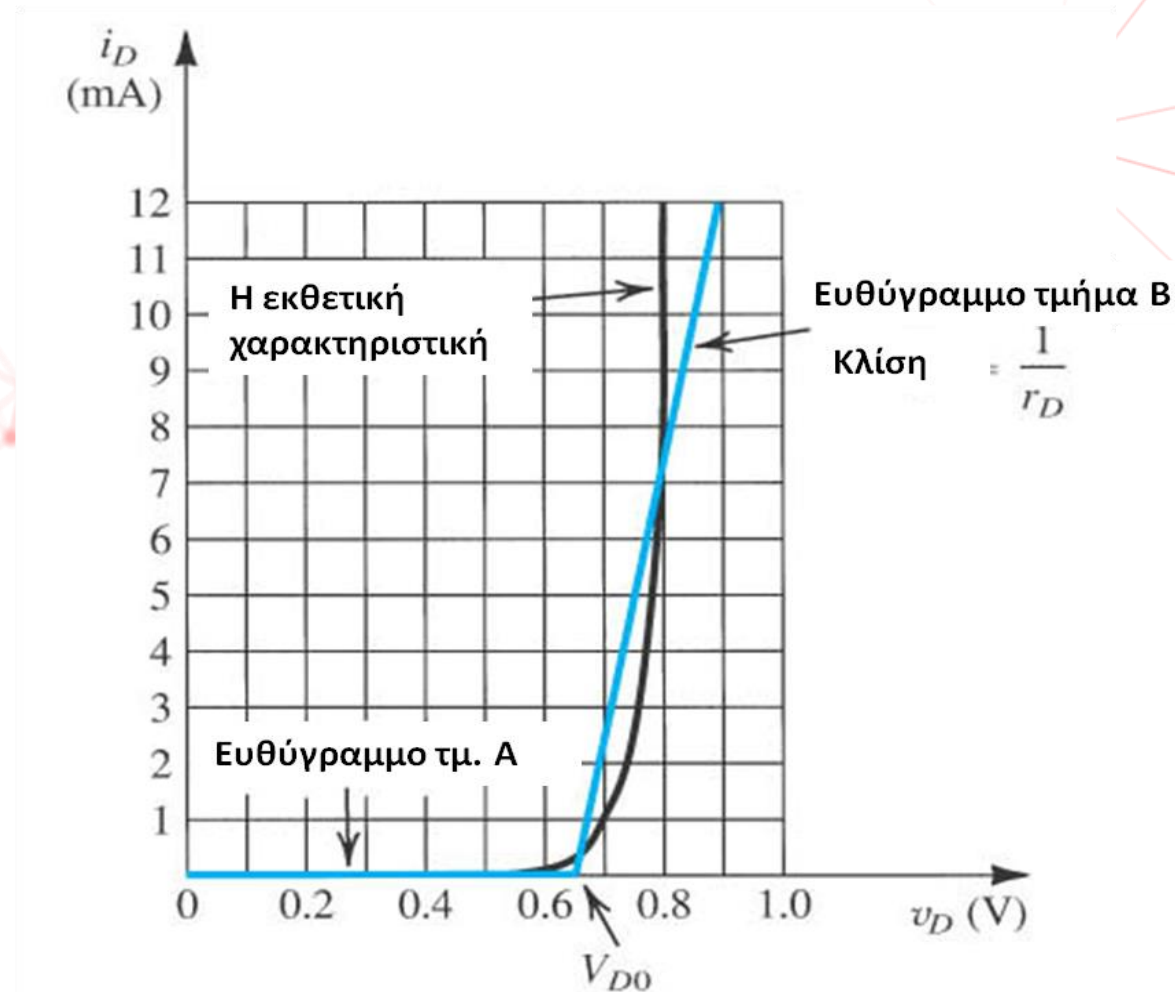
## Τυπική δίοδος με αντίσταση - 3<sup>η</sup> Προσέγγιση

- Το μοντέλο αυτό αποτελεί τροποποίηση του προηγούμενου μοντέλου προκειμένου να ληφθεί υπόψη & η πτώση τάσης στη δίοδο λόγω της αντίστασής της
- Η αντίσταση αυτή, εδώ, θεωρείται σταθερή και αντιπροσωπεύεται από την αντίσταση  $R_d$



Ισοδύναμο κύκλωμα & χαρακτηριστική I-V τυπικής διόδου με αντίσταση

# Τυπική δίοδος με αντίσταση - 3<sup>η</sup> Προσέγγιση



# Προσεγγίσεις

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τρεις προσεγγίσεις (μοντέλα) για να κατασκευάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου. Αυτές είναι:

## 1<sup>η</sup> προσέγγιση

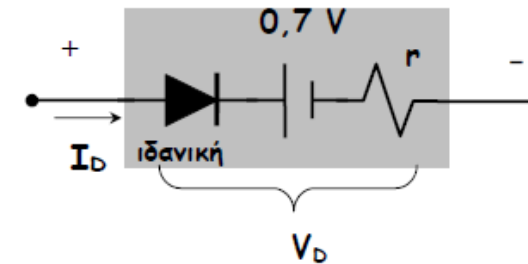
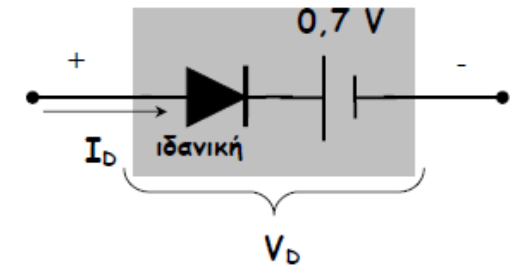
Η διόδος θεωρείται ιδανική δηλαδή, δεν υπάρχει πτώση τάσης στα άκρα της & η αντίστασή της είναι μηδενική. Ισοδυναμεί με κλειστό (όταν άγει) ή ανοιχτό (όταν δεν άγει) διακόπτη

## 2<sup>η</sup> προσέγγιση

Λαμβάνει υπόψη την πτώση τάσης των 0,7 V στα άκρα της διόδου

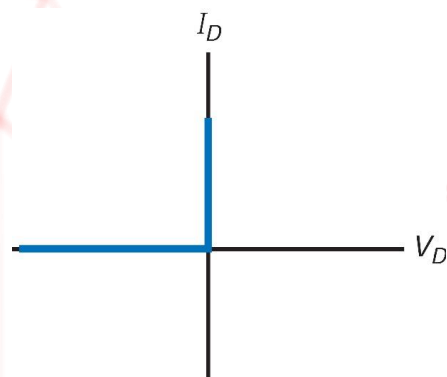
## 3<sup>η</sup> προσέγγιση

Λαμβάνει υπόψη της & τη δυναμική αντίσταση  $r$  που παρουσιάζει η διόδος

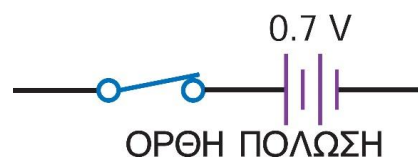
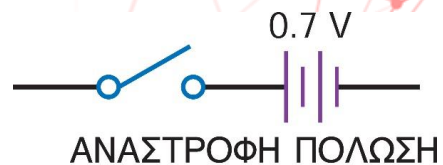
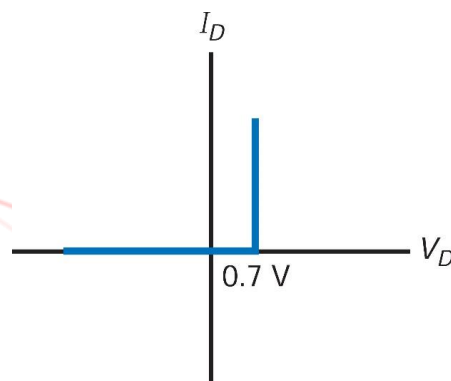


# Προσεγγίσεις

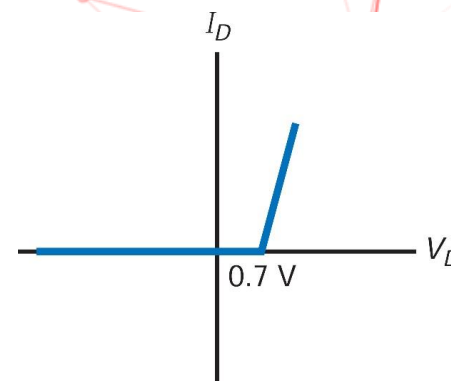
1<sup>η</sup> Προσέγγιση  
(Ιδανική Δίοδος)



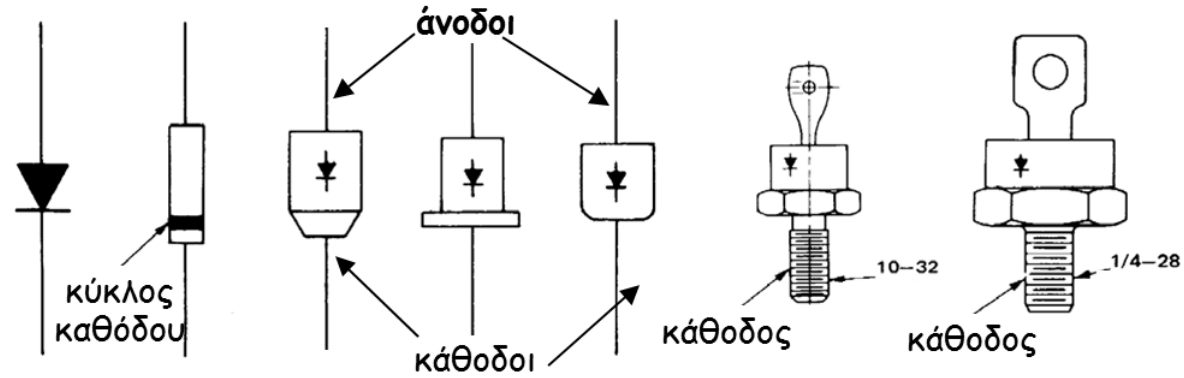
2<sup>η</sup> Προσέγγιση  
(Τυπική Δίοδος)



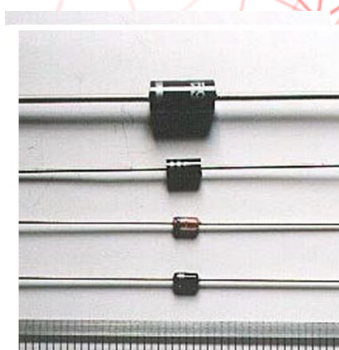
3<sup>η</sup> Προσέγγιση  
(Πραγματική Δίοδος)



# Πρακτικά



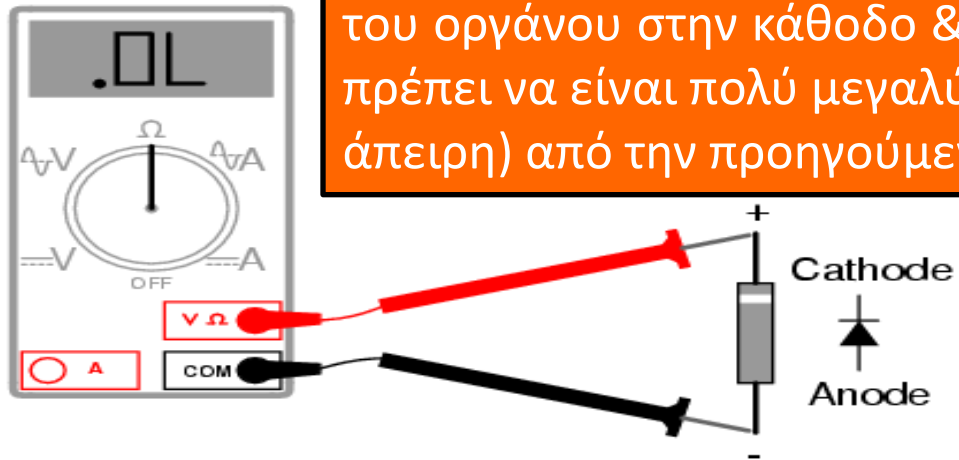
Διάφορες συσκευασίες διόδων



Δίοδοι διαφόρων μεγεθών

## Πρακτικά

Εάν πολώσουμε με το ωμόμετρο τη δίοδο ανάστροφα, δηλ. το θετικό ακροδέκτη του οργάνου στην κάθοδο & τον αρνητικό στην άνοδο η ένδειξη του ωμομέτρου πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη (έως άπειρη) από την προηγούμενη





## Πρακτικά - Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τεχνικά χαρακτηριστικά της **διόδου 1N4001** όπως δίνονται από τον κατασκευαστή


Χαρακτηριστικό μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Working peak reverse voltage (Μέγιστη ανάστροφη τάση λειτουργίας)	$V_{RWM}$	50	V
Peak repetitive reverse voltage (Επαναληπτική ανάστροφη τάση κορυφής)	$V_{RRM}$	50	V
Average forward current (Μέγιστη μέση τιμή ρεύματος ορθής φοράς)	$I_{FO}$	1	A
Nonrepetitive peak surge current (Μη επαναληπτικό μέγιστο ρεύμα έξαρσης)	$I_{FSM}$	30	A
Operating ambient temperature (Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος για σωστή λειτουργία)	$T_{amb}$	65 έως +17	$^{\circ}\text{C}$

# Πρακτικά - Τεχνικά χαρακτηριστικά

# 1N4001 - 1N4007

## Features

- Low forward voltage drop.
- High surge current capability.



DO-41

COLOR BAND DENOTES CATHODE

## General Purpose Rectifiers

### Absolute Maximum Ratings\*

$T_A = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
$V_{RRM}$	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current, .375" lead length @ $T_A = 75^{\circ}\text{C}$	1.0							A
$I_{FSM}$	Non-repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	30							A
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	$-55$ to $+175$							$^{\circ}\text{C}$
$T_J$	Operating Junction Temperature	$-55$ to $+175$							$^{\circ}\text{C}$

\*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

## Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
$P_D$	Power Dissipation	3.0	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	50	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

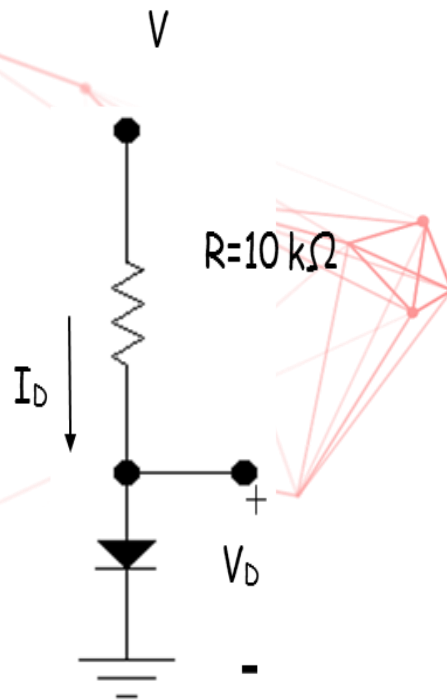
## Electrical Characteristics

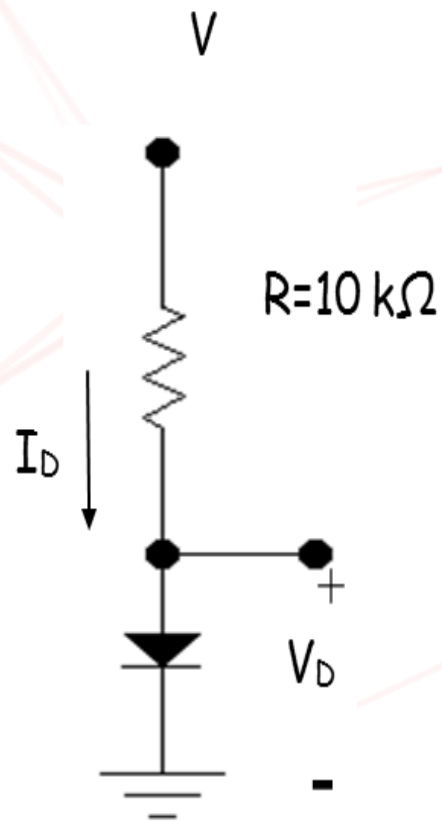
$T_A = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Device							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
$V_F$	Forward Voltage @ 1.0 A	1.1							V
$I_{rr}$	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle $T_A = 75^{\circ}\text{C}$	30							$\mu\text{A}$
$I_R$	Reverse Current @ rated $V_R$ $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ $T_A = 100^{\circ}\text{C}$	5.0 500							$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
$C_T$	Total Capacitance $V_R = 4.0\text{ V}$ , $f = 1.0\text{ MHz}$	15							pF

## Παράδειγμα

Να υπολογισθεί το ρεύμα  $I_D$  στο κύκλωμα, όταν (α)  $V_+=10\text{ V}$  και (β)  $V_+=1\text{ V}$ . Να χρησιμοποιηθούν & οι τρεις προσεγγίσεις. Η εσωτερική αντίσταση της διόδου είναι  $200\ \Omega$ .



Λύση (1)

(α): Όταν  $V^+ = 10\text{ V}$

1<sup>η</sup> προσέγγιση:

$$V_D = 0 \text{ και } I_D = \frac{V^+}{R} = \frac{10\text{V}}{10\text{k}\Omega} = 1 \text{ mA}$$

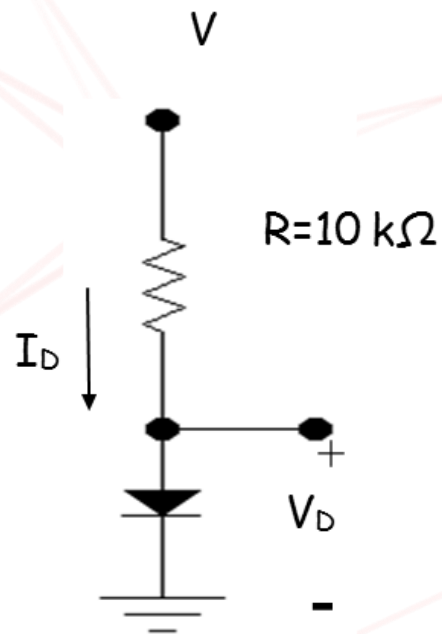
2<sup>η</sup> προσέγγιση:  $V_D = 0,7\text{ V}$  και

$$I_D = \frac{V^+ - V_D}{R} = \frac{(10 - 0,7)\text{V}}{10\text{k}\Omega} = 0,93 \text{ mA}$$

3<sup>η</sup> προσέγγιση:

$$I_D = \frac{V^+ - 0,7\text{V}}{R + r} = \frac{(10 - 0,7)\text{V}}{(10 + 0,2)\text{k}\Omega} = 0,912 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,7 + I_D r = 0,88 \text{ V}$$

Λύση (2)

(β): Όταν  $V^+ = 1\text{ V}$

1<sup>η</sup> προσέγγιση:

$$V_D = 0 \text{ και } I_D = \frac{V^+}{R} = \frac{1\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}$$

2<sup>η</sup> προσέγγιση:

$$V_D = 0,7 \text{ V και } I_D = \frac{V^+ - V_D}{R} = \frac{(1 - 0,7)\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 0,03 \text{ mA}$$

3<sup>η</sup> προσέγγιση:

$$I_D = \frac{V^+ - 0,7\text{ V}}{R + r} = \frac{(1 - 0,7)\text{ V}}{(10 + 0,2)\text{ k}\Omega} = 0,029 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,7 + I_D r = 0,7058 \text{ V}$$