

## Εισαγωγή

**Ημιαγωγός** είναι κάθε υλικό που έχει ειδική αντίσταση με τιμές ανάμεσα σε αυτές των μονωτών (μεγάλη) και των αγωγών (μικρή) και που εμφανίζει ραγδαία μείωση της ειδικής του αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασία του.

Σήμερα με δεδομένη την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, η πλειονότητα των σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων και συστημάτων αποτελείται από κυκλώματα ημιαγωγικών στοιχείων σε διακριτή ή ολοκληρωμένη μορφή.

Θα παρουσιαστεί η φυσική υπόσταση και οι ιδιότητες αγωγιμότητας των διαφόρων τύπων ημιαγωγών, καθώς και της τυπικής μορφής της διόδου επαφής pn, δίνοντας μια πρώτη εικόνα για τις δυνατότητες χρήσης τους στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

## Ηλεκτρικό φορτίο - Ένταση ηλεκτρικού πεδίου - Δυναμικό

Το φυσικό μέγεθος που προκαλεί ηλεκτρικές ιδιότητες ονομάζεται **ηλεκτρικό φορτίο** ( $Q$  ή  $q$ ).

**Αγωγιμότητα** ονομάζεται η ικανότητα των σωμάτων να επιτρέπουν την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων μέσα στη μάζα τους.

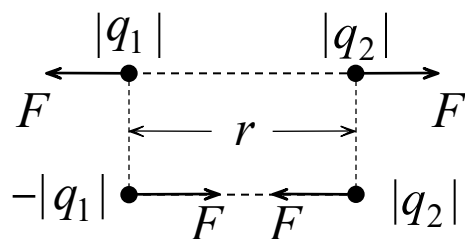
Βάση της αγωγιμότητάς των, τα σώματα διακρίνονται σε

**Αγωγούς** που είναι τα σώματα εκείνα που επιτρέπουν στα ηλεκτρικά φορτία να μετακινούνται μέσα στη μάζα τους.

**Μονωτές** ή διηλεκτρικά που είναι τα σώματα εκείνα που δεν επιτρέπουν στα ηλεκτρικά φορτία να μετακινούνται μέσα στη μάζα τους.

**Ημιαγωγοί** που είναι τα σώματα εκείνα των οποίων η αγωγιμότητα εξαρτάται από τις συνθήκες στις οποίες βρίσκονται (θερμοκρασία, φωτισμός, κ.α.) Οι ημιαγωγοί, δηλαδή παρουσιάζουν ιδιότητες ενδιάμεσες μεταξύ αγωγών και μονωτών.

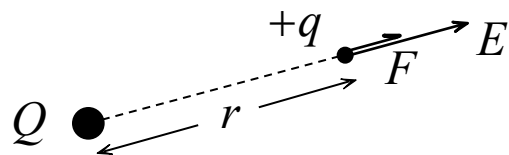
Ο **νόμος του Coulomb** δίνει το μέτρο της απωστικής ή ελκτικής δύναμης η οποία ασκείται μεταξύ δύο ηλεκτρικών φορτίων.



$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

**Ηλεκτρικό πεδίο** είναι ο χώρος σε κάθε σημείο του οποίου αν βρεθεί ηλεκτρικό φορτίο ασκείται σε αυτό ηλεκτρική δύναμη.

Ονομάζουμε **ένταση ηλεκτρικό πεδίο** σε ένα σημείο του το ανυσματικό μέγεθος το οποίο έχει διεύθυνση και φορά το άνυσμα της δύναμης που ασκείται σε θετικό φορτίο, που βρίσκεται στο σημεία αυτό και μέτρο το σταθερό πηλίκο της δύναμης δια του φορτίου



$$E \equiv \frac{F}{+q} \quad F = E \cdot q \quad E = k \frac{Q}{r^2}$$

Ονομάζουμε **δυναμικό** σε σημείο  $A$  ηλεκτρικού πεδίου το σταθερό πηλίκο του έργου που παράγεται για τη μεταφορά ενός ηλεκτρικού φορτίου  $q$  από το σημείο  $A$  μέχρι το άπειρο (όπου το δυναμικό λαμβάνεται ίσο με μηδέν) προς το ηλεκτρικό φορτίο.

$$V_A \equiv \frac{W_A^\infty}{q} \quad W_A^\infty = V_A \cdot q \quad V_A = k \frac{Q}{r}$$

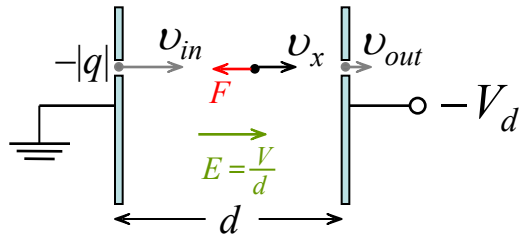
Ονομάζουμε **διαφορά δυναμικό** μεταξύ δύο σημείων  $A$  και  $B$  ηλεκτρικού πεδίου το σταθερό πηλίκο του έργου που παράγεται για τη μεταφορά ενός ηλεκτρικού φορτίου  $q$  από το σημείο  $A$  στο σημείο  $B$  προς το ηλεκτρικό φορτίο.

$$\Delta V = V_A - V_B = \frac{W_A^B}{q} = -\int_A^B E(x) dx \quad W_A^B = (V_A - V_B) q$$

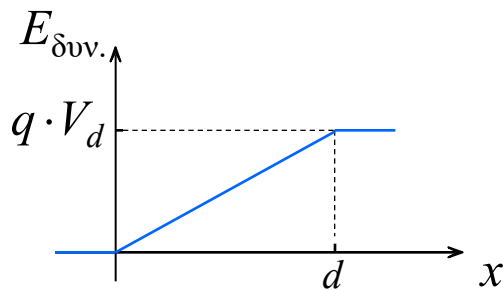
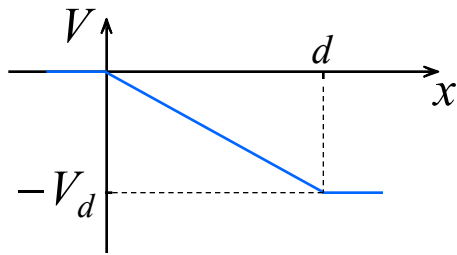
Ως **δυναμική ενέργεια** ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα, ή σύστημα, λόγω της θέσεως (σε σχέση με κάποια άλλη), ή της κατάστασής του. Είναι δηλαδή η δυνατότητα ενός σώματος, ή συστήματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων.

$$U = q \cdot V$$

## Παράδειγμα

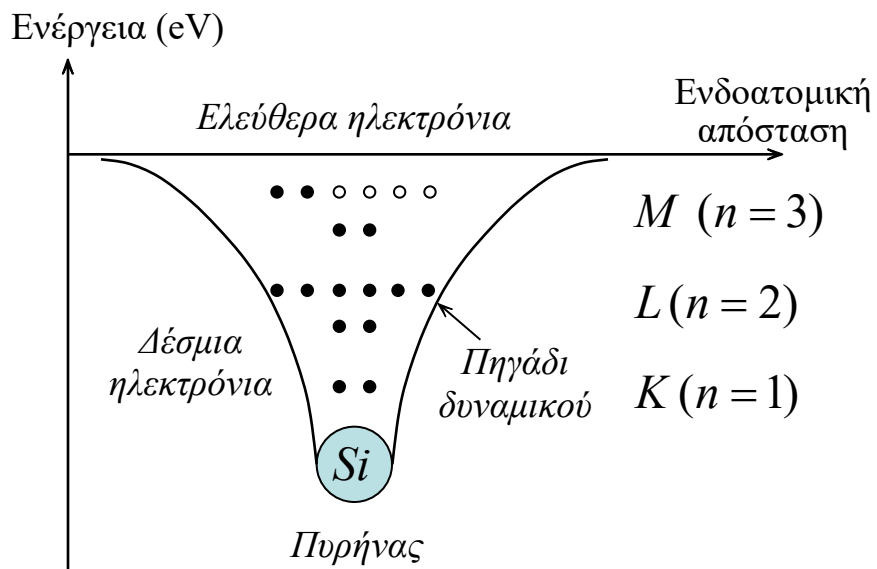


$$W_{ολικ.} = \frac{1}{2} m v_{in}^2 = U_x + \frac{1}{2} m v_x^2 = \text{σταθ.}$$



**Φράγμα δυναμικού** είναι μια περιοχή δυναμικής ενέργειας  $U$  που περιβάλλεται από περιοχές χαμηλότερης ή μηδενικής δυναμικής ενέργειας.

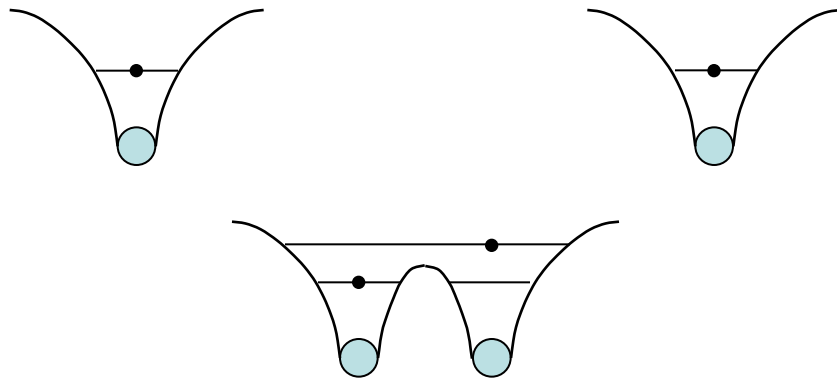
## Στάθμες και ζώνες ενέργειας σε κρυστάλλους



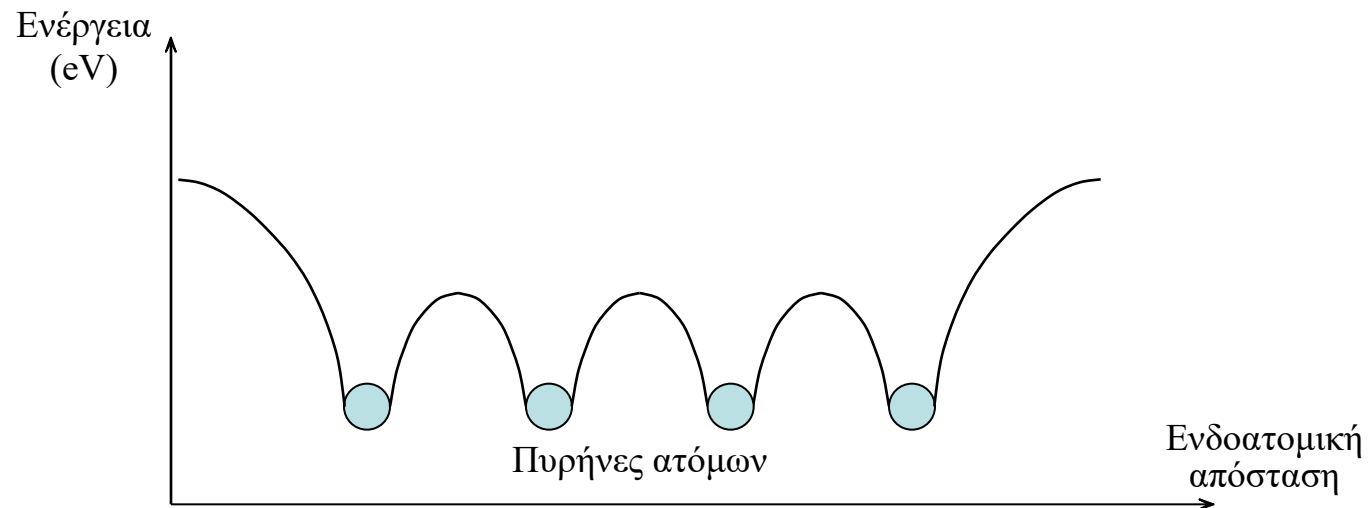
Τα ηλεκτρόνια των ατόμων των στοιχείων κινούνται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου σε προκαθορισμένες τροχιές. Κάθε τροχιά χαρακτηρίζεται από μία διακριτή (επιτρεπτή) στάθμη ενέργειας σχηματίζοντας τους λεγόμενους **φλοιούς** ή **στοιβάδες**.

Κάθε ηλεκτρόνιο χαρακτηρίζεται μονοσήμαντα από τους τέσσερις κβαντικούς αριθμούς. Σύμφωνα με την **αρχή του Pauli**, δύο ηλεκτρόνια δεν μπορούν να έχουν την ίδια τετράδα κβαντικών αριθμών.

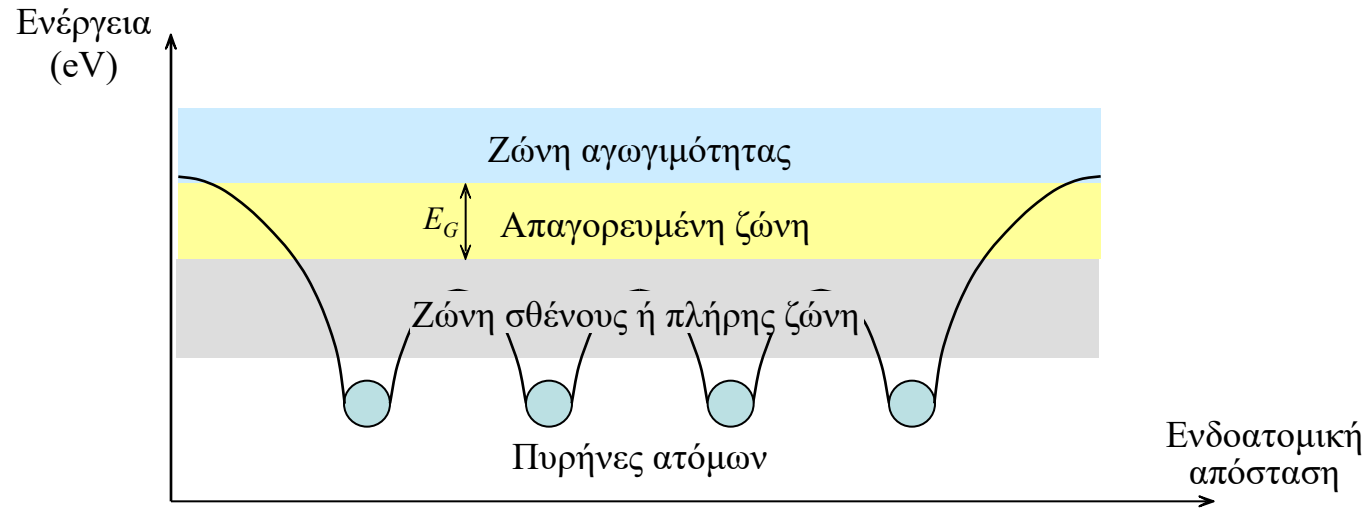
Τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών φλοιών, δηλαδή αυτά τα οποία βρίσκονται κοντά στον πυρήνα δύσκολα μπορούν να αλλάξουν κατάσταση. Τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού φλοιού είναι αυτά τα οποία συμμετέχουν στους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των ατόμων των ιδίων ή διαφορετικών στοιχείων.



Ο σχηματισμός των δεσμών έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό κάθε ενεργειακής στάθμης σε δύο νέες..



Όταν ο αριθμός των ατόμων είναι μεγάλος, όπως στην περίπτωση των κρυστάλλων, οι νέες αυτές στάθμες θα είναι τόσο πολλές που, αν και διακριτές δίνουν την αίσθηση **ενεργειακής ζώνης**.



*Ενεργειακές ζώνες ατόμων σε έναν κρύσταλλο.*

**Ζώνη σθένους ή πλήρης ζώνη** στην οποία βρίσκονται τα ηλεκτρόνια σθένους που συμμετέχουν στους ομοιοπολικούς δεσμούς.

**Ζώνη αγωγιμότητας** στην οποία μπορούν να βρεθούν εκείνα τα ηλεκτρόνια τα οποία, αφού προσλάβουν κατάλληλη ποσότητα ενέργειας, διασπών τους ομοιοπολικούς δεσμούς τους.

**Απαγορευμένη ζώνη** ή **περιοχή** είναι η περιοχή στην οποία δεν υπάρχουν επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες.

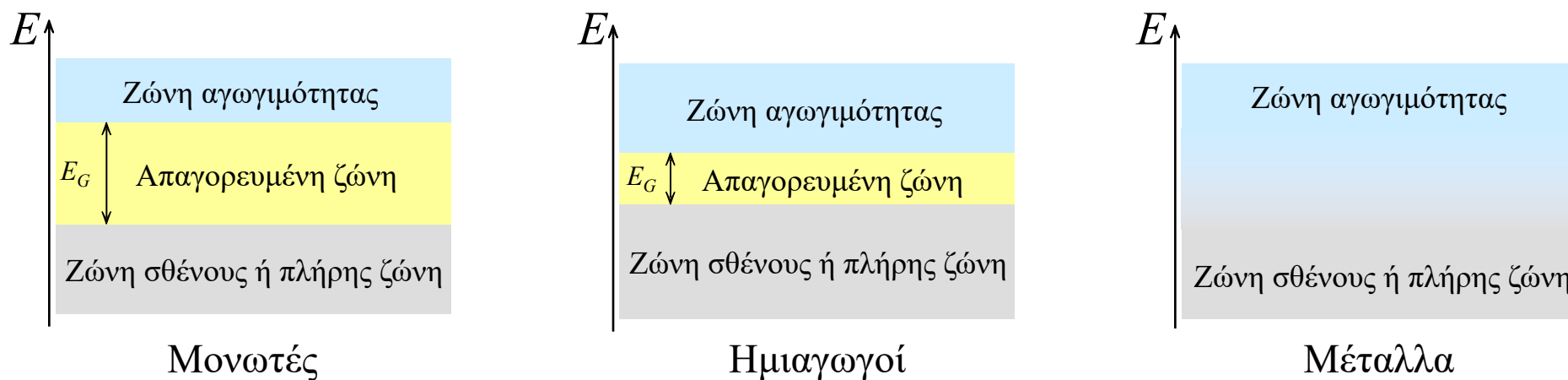


## Αγωγοί Μονωτές Ημιαγωγοί

Στους **μονωτές** η απαγορευμένη ζώνη είναι τόσο διευρυμένη που, για τη θραύση των ομοιοπολικών δεσμών και τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη ποσότητα ενέργειας, γεγονός που καθιστά τη δυνατότητα εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος αδύνατη.

Στους **αγωγούς** ή **μέταλλα** η ζώνη αγωγιμότητας επικαλύπτεται εν μέρει από την ζώνη σθένους, οπότε πολλά από τα ηλεκτρόνια σθένους βρίσκονται και κινούνται τυχαία μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας, έτσι με την επίδραση έστω και ενός ασθενούς ηλεκτρικού πεδίου, αυτά θα κινηθούν προς την κατεύθυνσή του δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Στους **ημιαγωγούς** η απαγορευμένη ζώνη είναι αρκετά στενή, οπότε και μία μικρή προσφορά ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια.

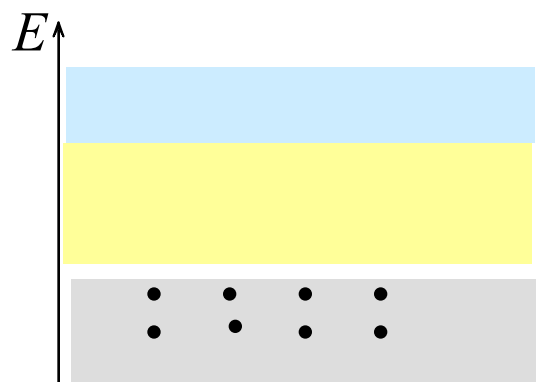


## Αγωγοί Μονωτές Ημιαγωγοί

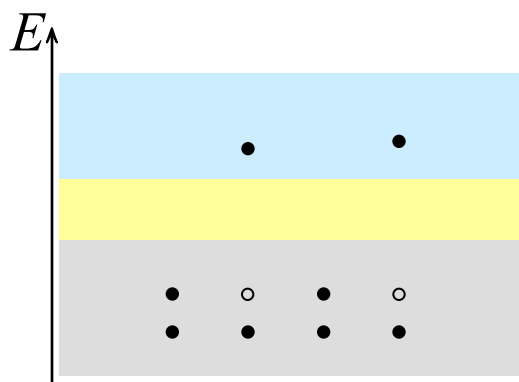
Στους **μονωτές** η απαγορευμένη ζώνη είναι τόσο διευρυμένη που, για τη θραύση των ομοιοπολικών δεσμών και τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη ποσότητα ενέργειας, γεγονός που καθιστά τη δυνατότητα εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος αδύνατη.

Στους **αγωγούς** ή **μέταλλα** η ζώνη αγωγιμότητας επικαλύπτεται εν μέρει από την ζώνη σθένους, οπότε πολλά από τα ηλεκτρόνια σθένους βρίσκονται και κινούνται τυχαία μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας, έτσι με την επίδραση έστω και ενός ασθενούς ηλεκτρικού πεδίου, αυτά θα κινηθούν προς την κατεύθυνσή του δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα.

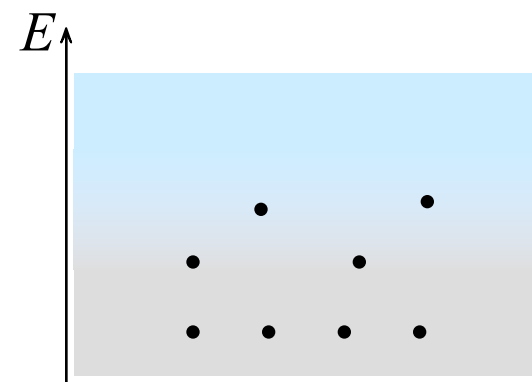
Στους **ημιαγωγούς** η απαγορευμένη ζώνη είναι αρκετά στενή, οπότε και μία μικρή προσφορά ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια.



Μονωτές



Ημιαγωγοί



Μέταλλα

## Καθαροί ή ενδογενείς ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί που είναι τελείως απαλλαγμένοι από ξένα άτομα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα ονομάζονται **καθαροί** ή **ενδογενείς ημιαγωγοί**.

Με την πρόσληψη ενέργειας, τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους διεγείρονται και σπάζοντας τους ομοιοπολικούς δεσμούς τους μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας όπου κινούνται τυχαία ως ελεύθερα ηλεκτρόνια στο μεταλλικό πλέγμα.

Τα ηλεκτρόνια αυτά αποτελούν τους ηλεκτρικούς φορείς στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού και για το λόγο αυτό λέγονται **ηλεκτρόνια αγωγιμότητας**.

Κάθε φορά που από ένα άτομο “γεννιέται” ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας η θέση του στη ζώνη σθένους μένει κενή, οπότε το άτομο είναι θετικά φορτισμένο. Η κενή αυτή θέση ονομάζεται **οπή** και συμπεριφέρεται ως ένα αυτοτελές θετικό φορτίο

Οι οπές αποτελούν τους ηλεκτρικούς φορείς στη ζώνη σθένους του ημιαγωγού.

Οι αγωγιμότητα των καθαρών ημιαγωγών οφείλεται σε δύο είδη φορέων, ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και οπές που δημιουργούνται με συνεχείς “εσωτερικές” ενεργειακές ανακατατάξεις των ηλεκτρονίων σθένους και χαρακτηρίζεται ως **ενδογενείς αγωγιμότητα**.

## Καθαροί ή ενδογενείς ημιαγωγοί

Σε θερμική ισορροπία η πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου ( $\text{cm}^3$ ) είναι  $n$  και των οπών είναι  $p$ . Ισχύει ότι :

$$n = p = n_i \quad n_i = BT^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad pn = n_i^2$$

where  $B$  is a material-dependent parameter that is  $7.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$  for silicon;  $T$  is the temperature in  $K$ ;  $E_g$ , a parameter known as the **bandgap energy**, is 1.12 electron volt (eV) for silicon<sup>2</sup>; and  $k$  is Boltzmann's constant ( $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ). It is interesting to know that the bandgap energy  $E_g$  is the minimum energy required to break a covalent bond and thus generate an electron-hole pair.

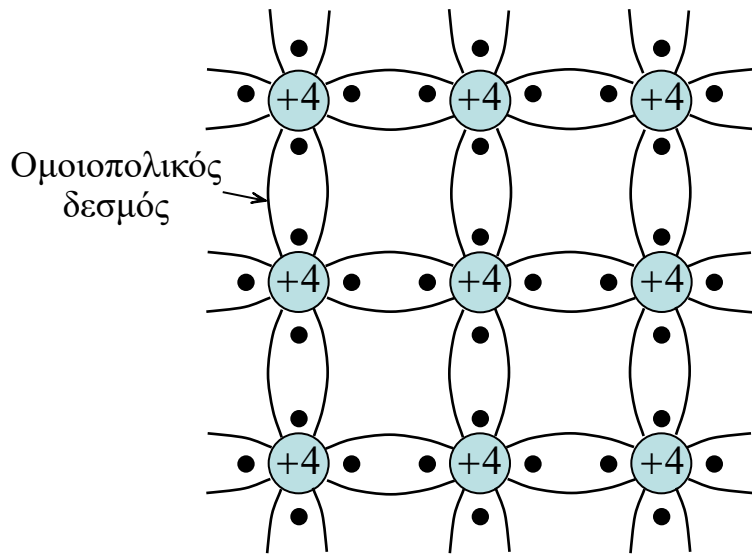
## Ημιαγωγοί με προσμίξεις ή εξωγενείς ημιαγωγοί

Τα πιο γνωστά ημιαγωγά υλικά, το γερμάνιο (Ge) και το πυρίτιο (Si), βρίσκονται στη φύση με μορφή διάφορων χημικών ενώσεων και για τη λήψη τους σε καθαρή μορφή χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές.

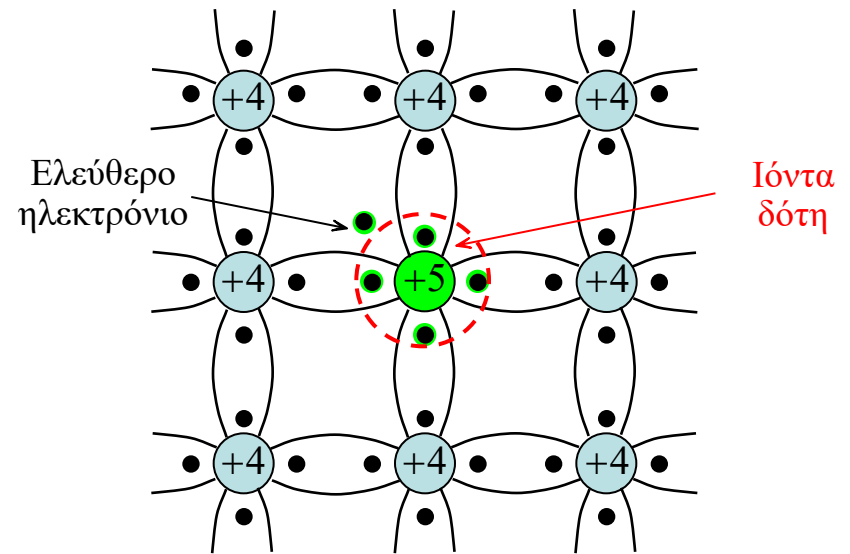
Αν στον κρύσταλλο ενός θεωρητικώς καθαρού ημιαγωγού προστεθούν προσμίξεις κατάλληλων ατόμων κατασκευάζονται ημιαγωγοί οι οποίοι παρουσιάζουν περίσσεια φορέων του ενός ή του άλλου είδους. Οι μη καθαροί ημιαγωγοί ονομάζονται **εξωγενείς ημιαγωγοί** ή **ημιαγωγοί με προσμίξεις** και διακρίνονται σε ημιαγωγούς **τύπου  $n$**  και **τύπου  $p$**  ανάλογα με το είδος των φορέων που πλεονάζουν

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των εξωγενών ημιαγωγών είναι διαφορετικές από αυτές του αντίστοιχου καθαρού. Επίσης επειδή το ποσοστό των προσμίξεων είναι πολύ μικρό δεν μεταβάλλονται οι χημικές και μηχανικές τους ιδιότητες.

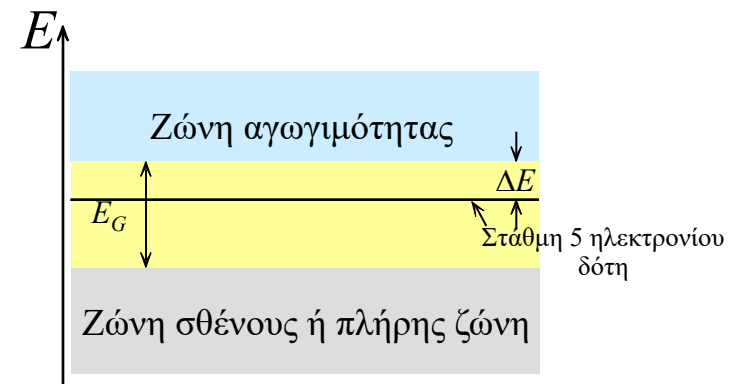
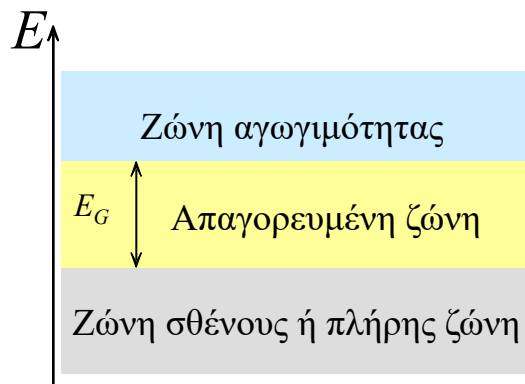
# Ημιαγωγοί τύπου-n.



Τομή στο πλέγμα ενός καθαρού κρυστάλλου Si ή Ge



Προσθήκη πεντασθενούς ατόμου P ή As σε κρύσταλλο τετρασθενούς στοιχείου.



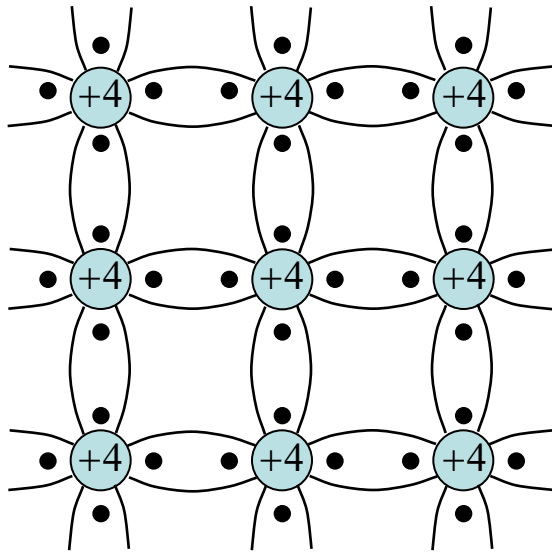
Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τα άτομα των προσμίξεων δεν συνοδεύονται από δημιουργία αντίστοιχης οπής.

Ο εξωγενής αγωγός θα χαρακτηρίζεται από περίσσεια ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, ή όπως αλλιώς λέγονται φορέων **τύπου n**.

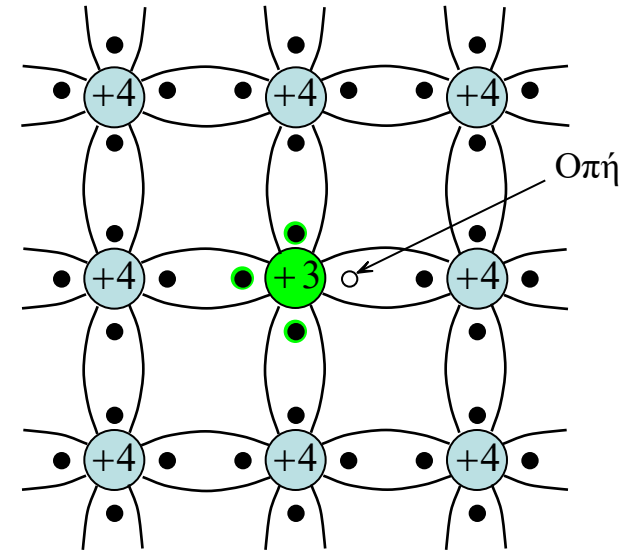
Τα άτομα του πεντασθενούς στοιχείου πρόσμιξης θα λέγονται **προσμίξεις τύπου n** ή απλώς **δότες** (ηλεκτρονίων) και ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως **ημιαγωγός τύπου n**,

Στους ημιαγωγούς τύπου n, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας χαρακτηρίζονται ως **φορείς πλειονότητας** οι δε οπές ως **φορείς μειονότητας**.

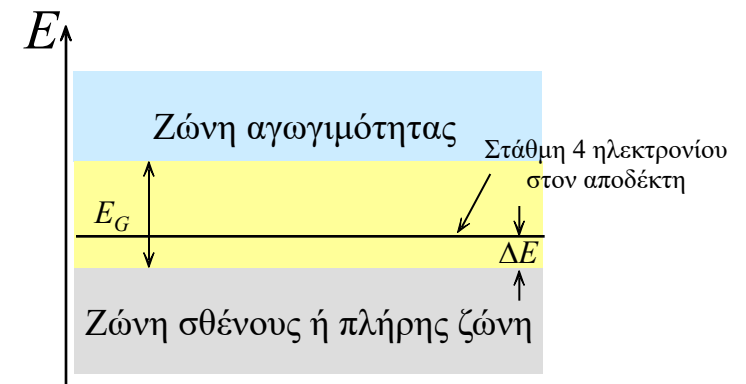
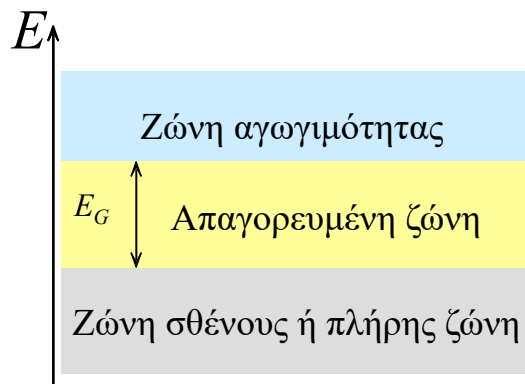
## Ημιαγωγοί τύπου-p.



Τομή στο πλέγμα ενός καθαρού κρυστάλλου Si ή Ge

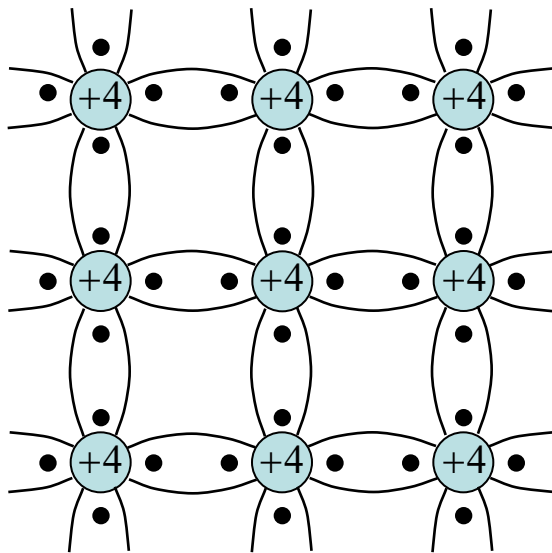


Προσθήκη τρισθενούς ατόμου B ή Al σε κρύσταλλο τετραθενούς στοιχείου.

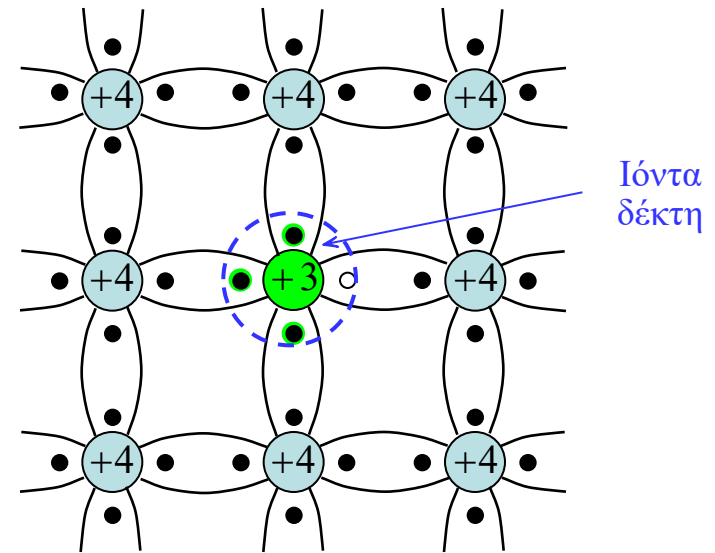




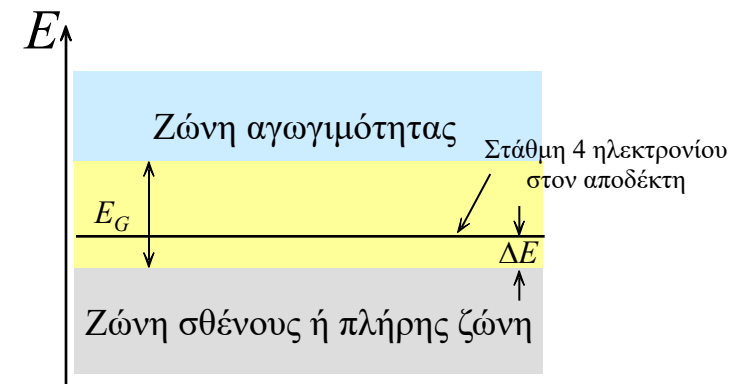
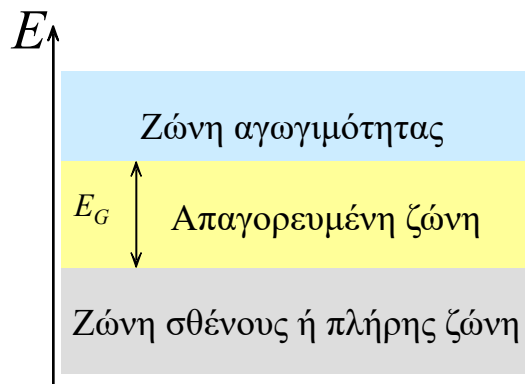
## Ημιαγωγοί τύπου-p.



Τομή στο πλέγμα ενός καθαρού κρυστάλλου Si ή Ge



Προσθήκη τρισθενούς ατόμου B ή Al σε κρύσταλλο τετραθενούς στοιχείου.



Τα τρία ηλεκτρόνια των ξένων ατόμων μετέχουν σε τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τετρασθενή άτομα του κρυστάλλου και ο τέταρτος δεσμός παραμένει ασυμπλήρωτος. Η έλλειψη τέταρτου ηλεκτρονίου στο άτομο της πρόσμιξης αποτελεί το αίτιο γένεσης οπών στον κρύσταλλο.

Η επιλογή των τρισθενών προσμίξεων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη μέσα στην απαγορευμένη ζώνη και κοντά στη ζώνη σθένους του καθαρού υλικού.

Οι κενές θέσεις που εμφανίζονται στα άτομα του καθαρού υλικού λόγω της μετακίνησης των ηλεκτρονίων του για την κάλυψη των ασυμπλήρωτων δεσμών αποτελούν **οπές**, η εμφάνιση των οποίων δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη εμφάνιση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας.

Τα άτομα των προσμίξεων εμφανίζονται ως αρνητικά και ακίνητα (δέσμια) φορτία που δεν συμμετέχουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ελεύθεροι φορείς του συγκεκριμένου ημιαγωγού είναι οι οπές.

Στον **ημιαγωγό τύπου p** υπάρχει περίσσεια οπών, δηλαδή, **φορέων τύπου p**, ως αποτέλεσμα προσμίξεων με άτομα που λέγονται **προσμίξεις τύπου p** ή απλώς **αποδέκτες** (ηλεκτρονίων).

Στους ημιαγωγούς τύπου p, οι οπές θα χαρακτηρίζονται ως **φορείς πλειονότητας** και τα ηλεκτρόνια ως **φορείς μειονότητας**.

Αν η συγκέντρωση των δοτών σε ένα ημιαγωγό είναι  $N_D$ , ( $N_D \gg n_i$ ) τότε σε ένα n-τύπου ημιαγωγό ισχύει  $n_n \sim N_D$ . Επομένως για ένα ημιαγωγό τύπου n ισχύει :

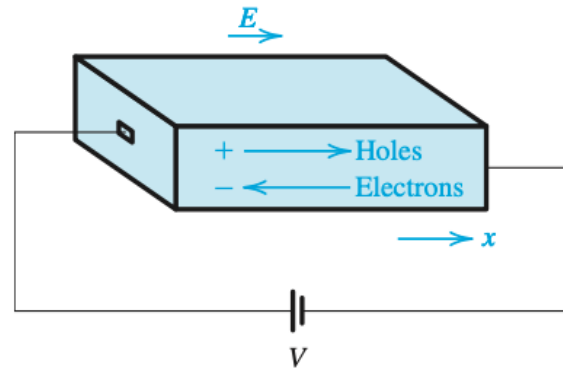
$$p_n n_n = n_i^2 \quad p_n \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$$

Ομοίως για ένα ημιαγωγό με πυκνότητα δεκτών  $N_A$  ισχύει :

$$p_p \simeq N_A \quad p_p n_p = n_i^2 \quad n_p \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$$

## ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟ

### I. Ρεύματα ολίσθησης υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου



Ταχύτητα ολίσθησης οπής  $v_{p\text{-drift}} = \mu_p E$  Όπου  $\mu_p$  η ευκινησία οπής  $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

Ταχύτητα ολίσθησης ηλεκτρονίου  $v_{n\text{-drift}} = -\mu_n E$  Όπου  $\mu_n$  η ευκινησία ηλεκτρονίου  $1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

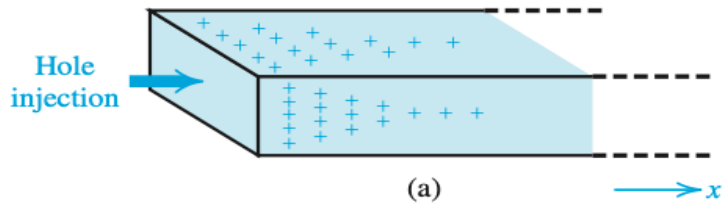
Ρεύμα ολίσθησης οπών  $I_p = Aqpv_{p\text{-drift}}$   $I_p = Aqp\mu_p E$   $J_p = \frac{I_p}{A} = qp\mu_p E$

Ρεύμα ολίσθησης ηλεκτρονίων  $I_n = -Aqn v_{n\text{-drift}}$   $J_n = qn\mu_n E$

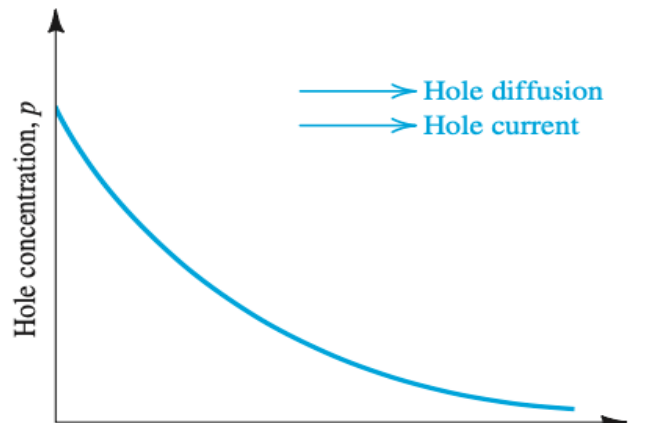
Συνολικό Ρεύμα ολίσθησης  $J = J_p + J_n = q(p\mu_p + n\mu_n)E$   $J = \sigma E$

Όπου  $\sigma$  η αγωγιμότητα  $\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n)$   $\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$

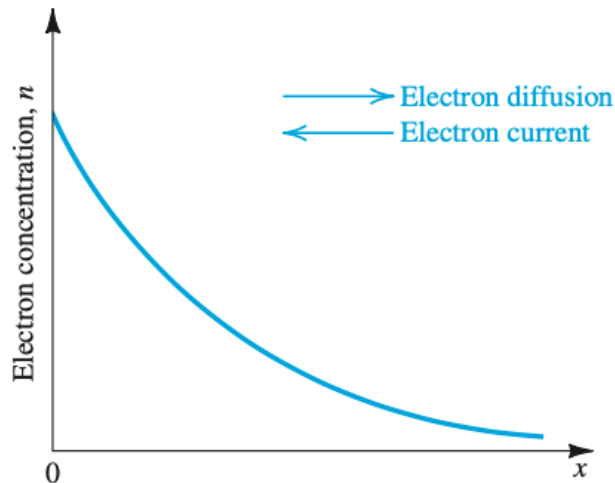
## ΡΕΥΜΑΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ



$$J_p = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$



$$J_n = qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$



ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ  
ΣΧΕΣΗ :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

Όπου  $V_T = kT/q = 25,9 \text{ mV}$  για  
 $T=300 \text{ K}$

## Δημιουργία επαφής pn

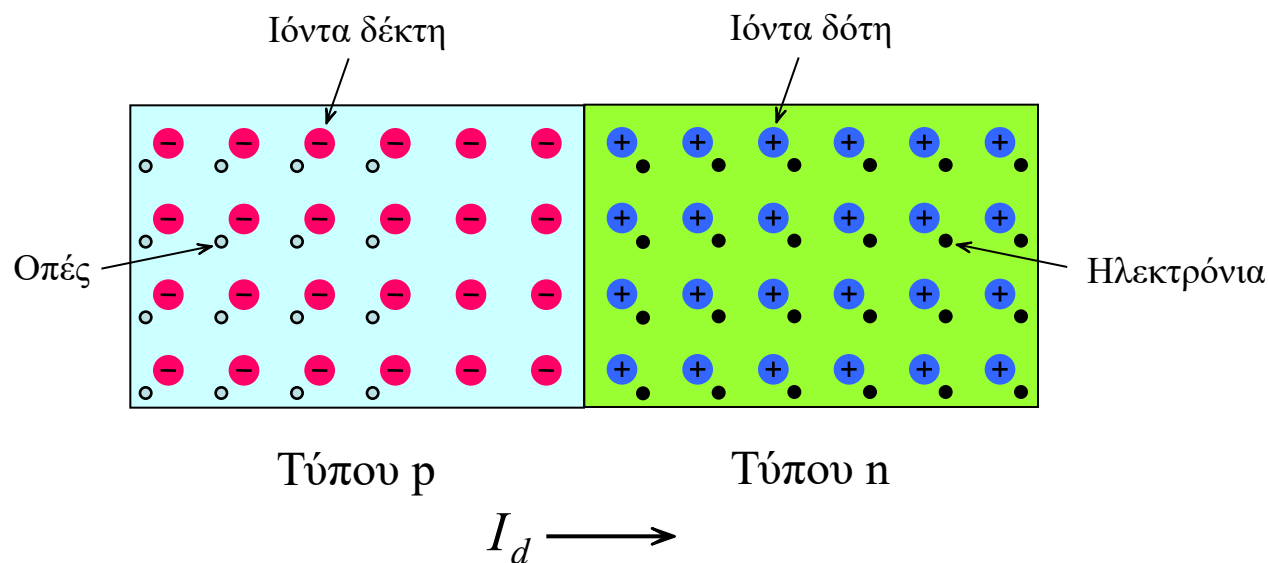


Με “ο” σε ένα υλικό τύπου p δηλώνονται οι οπές που είναι φορείς πλειονότητας. Το φορτίο αυτών των οπών είναι εξουδετερωμένο από ένα ίσο πλήθος αρνητικών δεσμευμένων φορτίων που σχετίζεται με τα άτομα των αποδεκτών.

Σε ένα υλικό τύπου n η πλειονότητα των ηλεκτρονίων δηλώνεται “•”. Υπάρχουν επίσης τα αντίστοιχα θετικά δεσμευμένα φορτία που εξουδετερώνουν το φορτίο των ηλεκτρονίων πλειονότητας.

Μια επαφή pn μπορεί να προκύψει είτε με την επαφή δύο εξωγενών ημιαγωγών αντιθέτου τύπου, δηλαδή, τύπου p και τύπου n, είτε με τη δημιουργία δυο περιοχών με προσμίξεις αντιθέτου τύπου στον κρύσταλλο ενός ημιαγωγού.

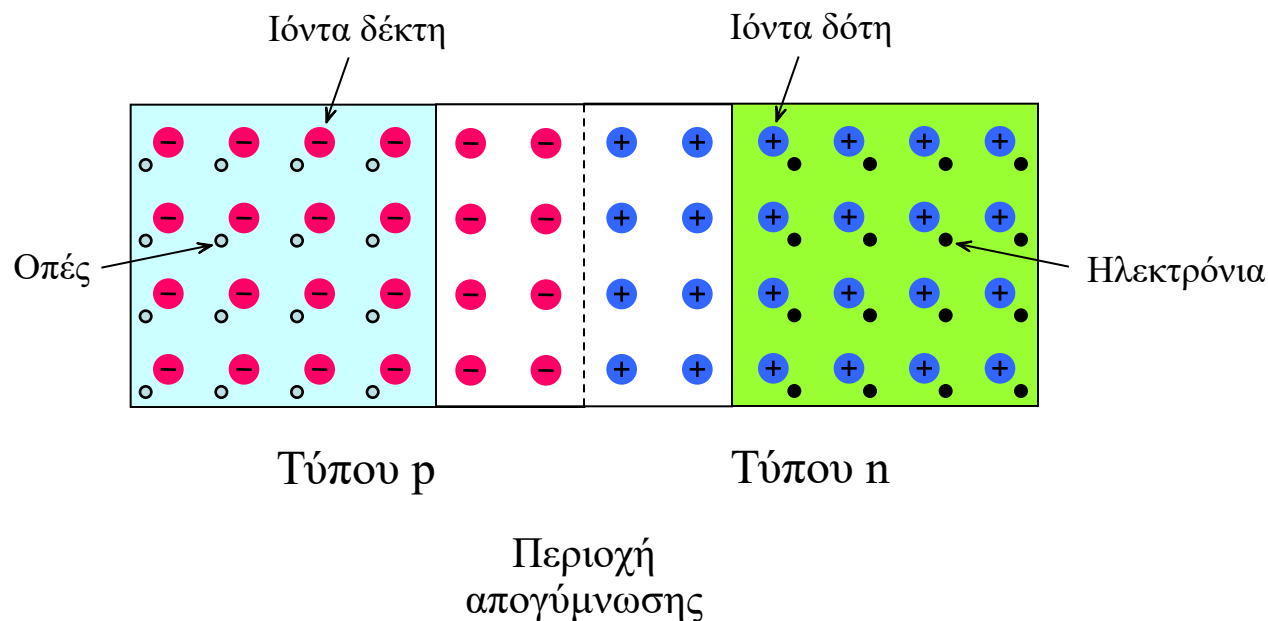
## Διάχυση ή έγχυση φορέων – Περιοχή έλλειψης φορέων



Παρατηρείται διάχυση οπών μέσα από την επαφή από την πλευρά τύπου p προς την πλευρά τύπου n. Ομοίως, ηλεκτρόνια διαχέονται μέσα από την επαφή από την πλευρά τύπου n προς την πλευρά τύπου p. Το άθροισμα των δύο αυτών συνιστωσών δίνει το ρεύμα διάχυσης  $I_d$ .

Η διάχυση των φορέων πλειονότητας της μιας περιοχής στην άλλη, δηλαδή οπών της περιοχής p προς την περιοχή n και ηλεκτρονίων της περιοχής n προς την περιοχή p, ονομάζεται και **έγχυση** των φορέων, περιορίζεται δε από τις ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των ετερόνυμων φορτίων που εμφανίζονται στις δύο πλευρές της επαφής.

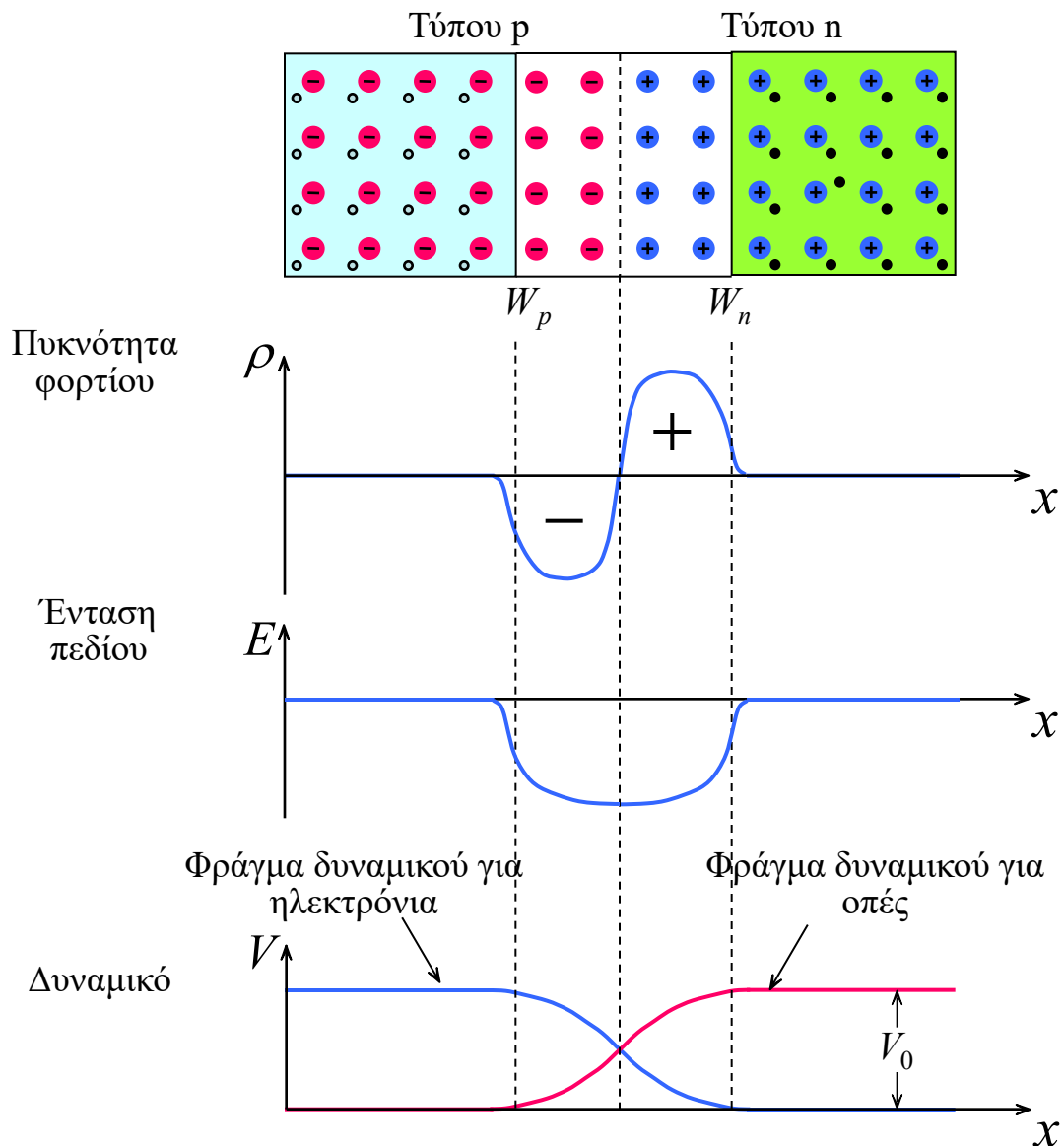
## Διάχυση ή έγχυση φορέων – Περιοχή έλλειψης φορέων



Στην περιοχή γύρω από την επαφή δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς πλειονότητας (παρά μόνο φορείς μειονότητας που προέρχονται από θερμική γένεση) η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή έλλειψης φορέων** ή **περιοχή απογύμνωσης** ή ακόμα, **περιοχή φορτίων χώρου** λόγω των ίσων και αντιθέτων ακίνητων ιόντων και στα δύο τμήματα.



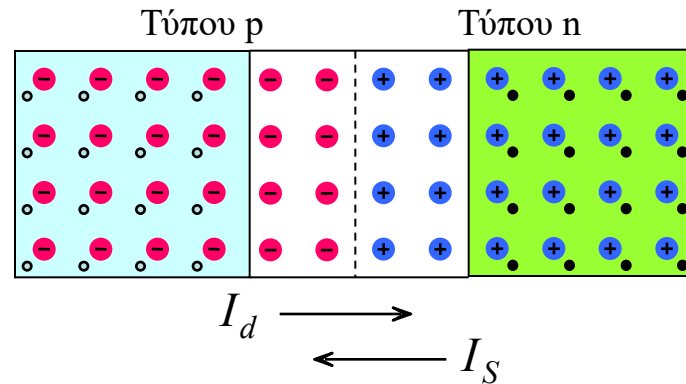
## Διάχυση ή έγχυση φορέων – Περιοχή έλλειψης φορέων



Η τιμή  $V_0$  εξαρτάται τόσο από τις συγκεντρώσεις των φορέων πλειονότητας των δύο περιοχών της επαφής όσο και τη θερμοκρασία.

Το υφιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο αντιτίθεται στη διάχυση οπών προς την περιοχή τύπου n και ηλεκτρονίων προς την περιοχή τύπου p.

## Διάχυση ή έγχυση φορέων – Περιοχή έλλειψης φορέων



Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το φράγμα δυναμικού, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα διάχυσης  $I_d$ .

Μερικές από τις θερμικά παραγόμενες οπές στο υλικό τύπου n διαχέονται μέσα στο υλικό τύπου n ως το άκρο της περιοχής απογύμνωσης και λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου επιταχύνονται προς την πλευρά p.

Παρόμοια, κάποια από τα θερμικά παραγόμενα ηλεκτρόνια μέσα στην περιοχή τύπου p διαχέονται ως το άκρο της περιοχής απογύμνωσης και λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου επιταχύνονται προς την πλευρά n.

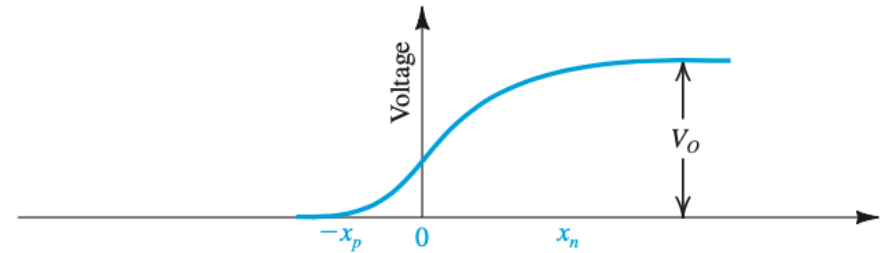
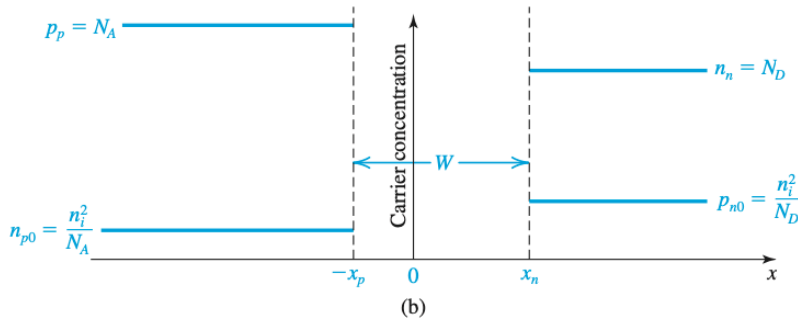
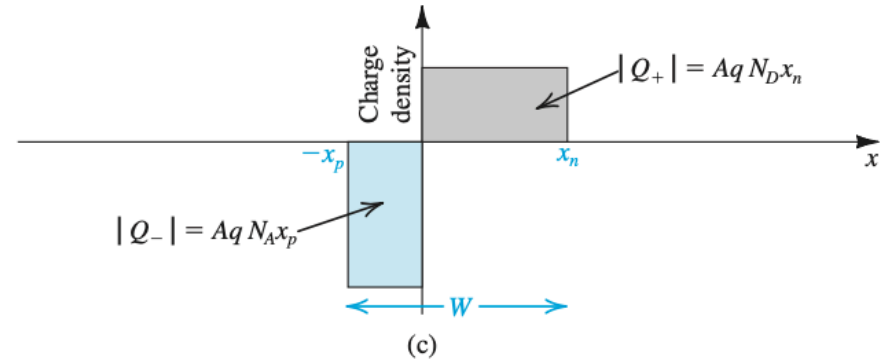
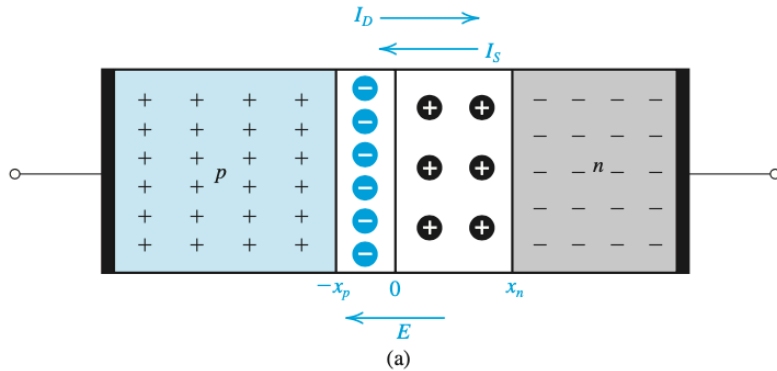
Το άθροισμα των δύο αυτών συνιστωσών ρεύματος αποτελεί το ρεύμα ολίσθησης  $I_s$ , του οποίου η φορά είναι από την πλευρά n στην πλευρά p.

# ΣΤΑΤΙΚΉ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΑΦΗΣ (ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ)

Τα ρεύματα διάχυσης και ολίσθησης είναι ίσα.  
Το δυναμικό της επαφής δίνεται από τη σχέση

$$I_D = I_S$$

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$



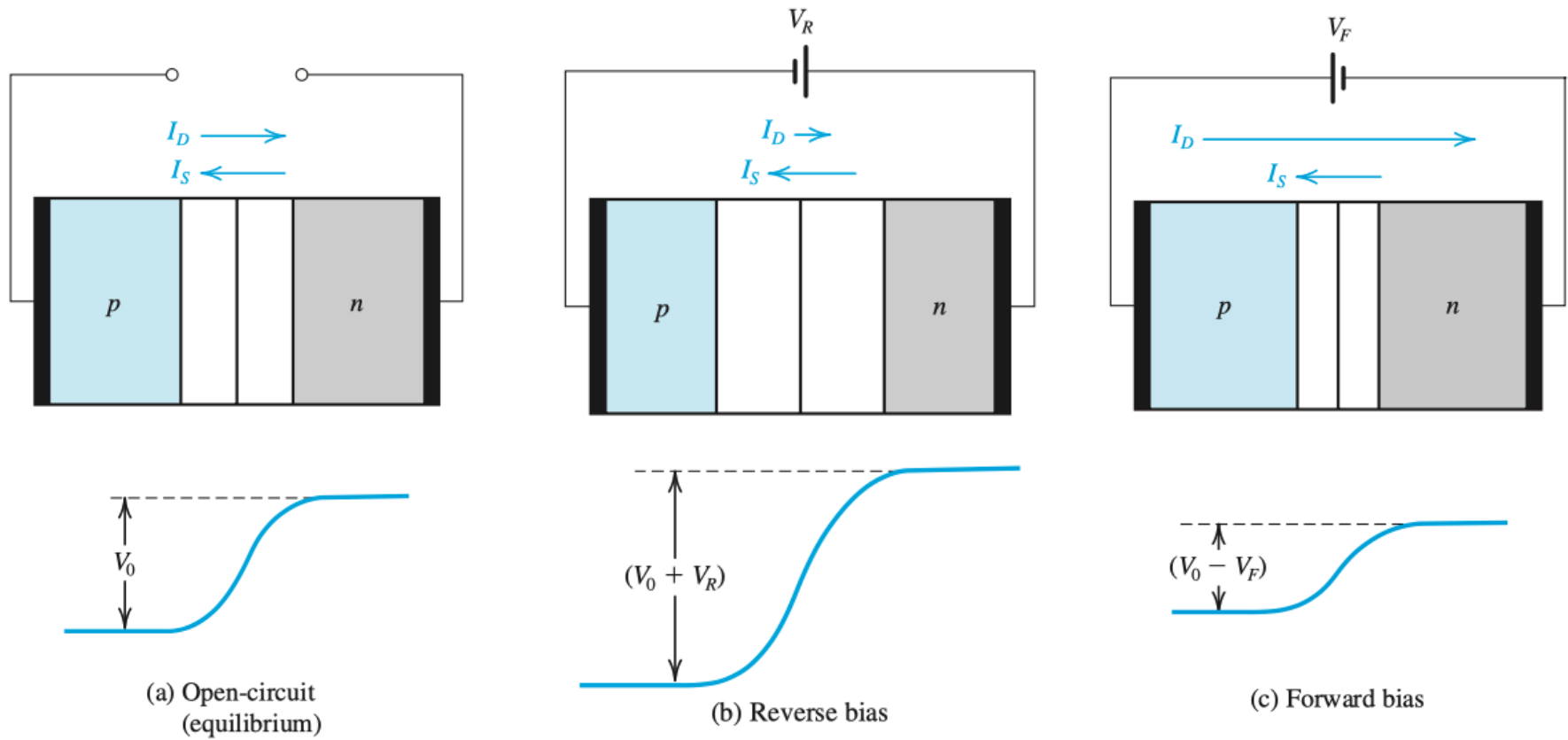
$$|Q_+| = qAx_nN_D \quad |Q_-| = qAx_pN_A \quad qAx_nN_D = qAx_pN_A \quad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

Εύρος περιοχής απογύμνωσης

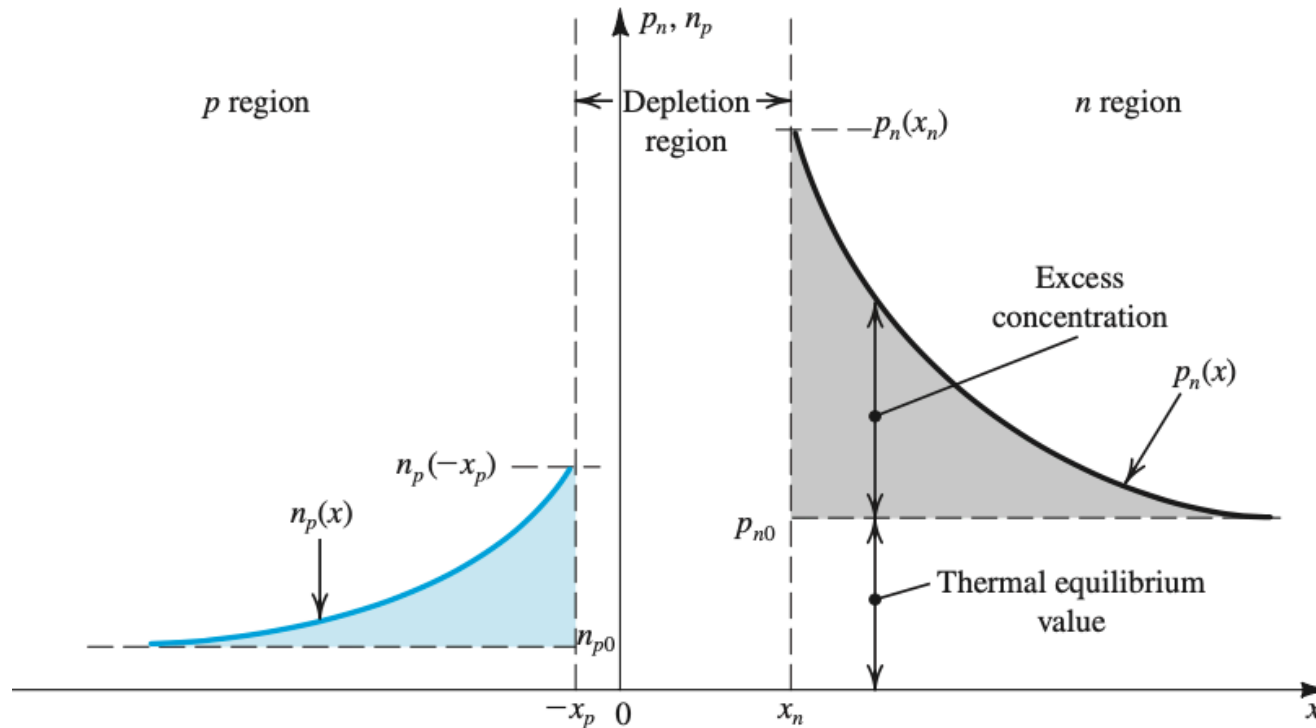
$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}$$

$$Q_J = A \sqrt{2\epsilon_s q \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) V_0}$$

## Λειτουργία της επαφής pn με τάση



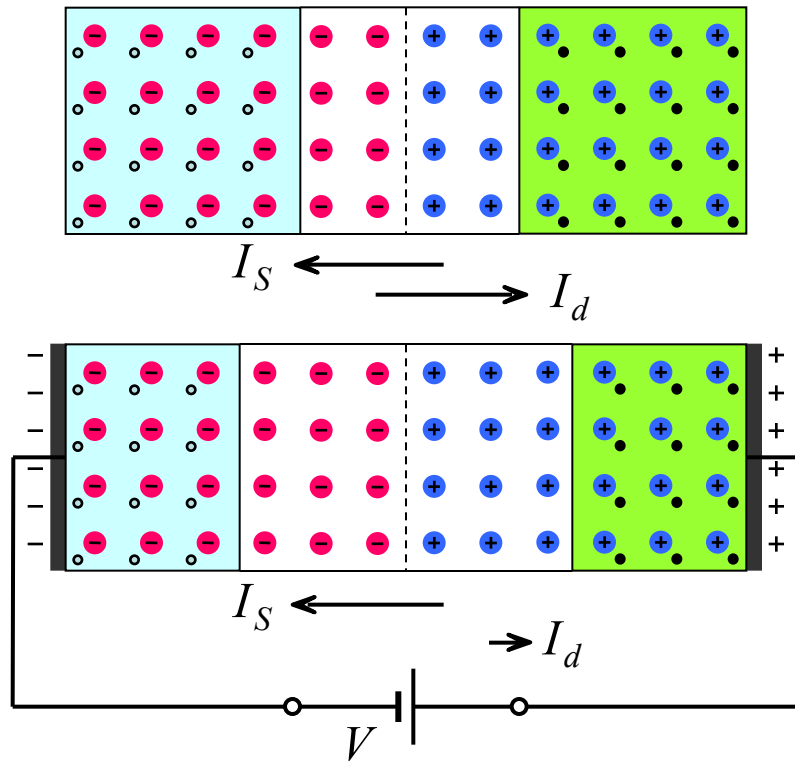
## Λειτουργία της επαφής pn με τάση



$$I = Aqn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) (e^{V/V_T} - 1)$$

$$I = I_S (e^{V/V_T} - 1) \quad I_S = Aqn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

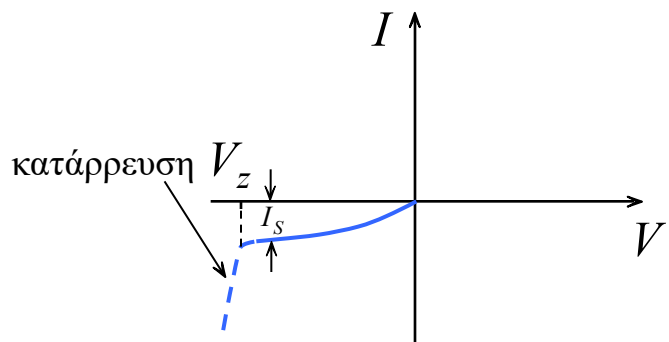
## Λειτουργία της επαφής pn με τάση - Ανάστροφη πόλωση της επαφής pn



Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή έλλειψης φορέων αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνονται και τα φορτία χώρου.

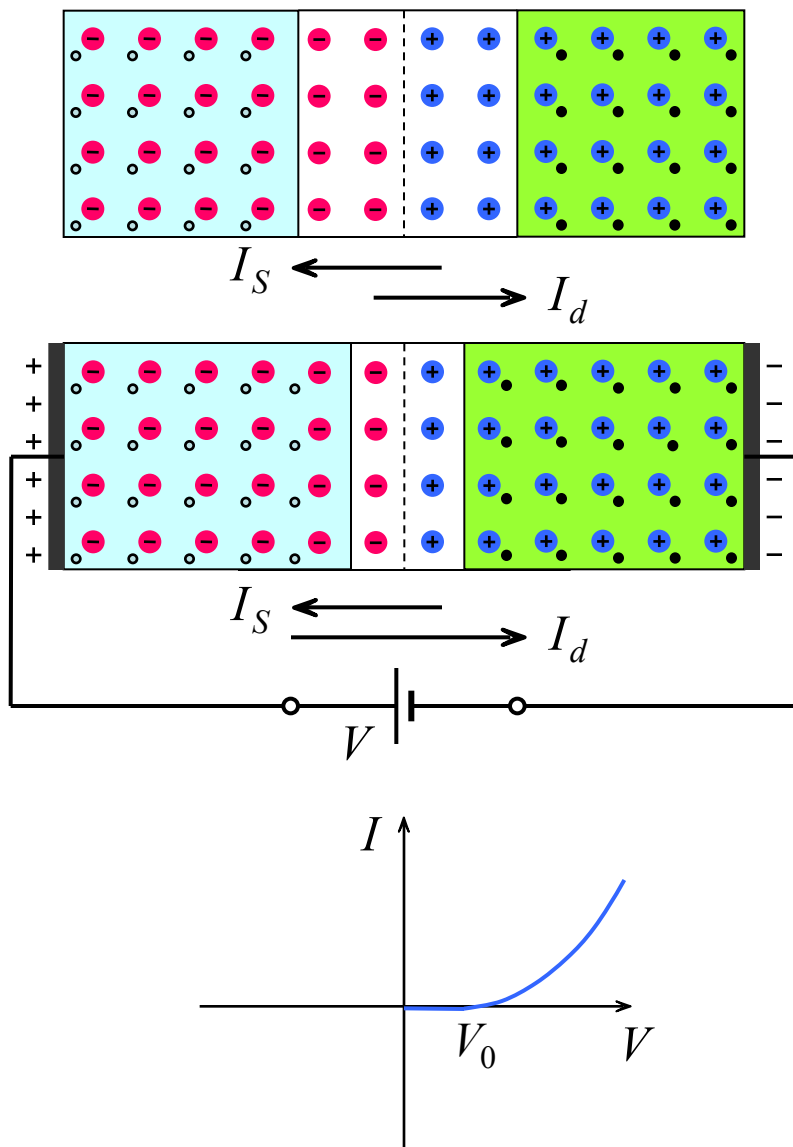
Αύξηση του φράγματος δυναμικού κατά  $V_D$ .

Η αύξηση του δυναμικού της επαφής προκαλεί σχεδόν μηδενισμό του ρεύματος διάχυσης  $I_d$ . Το αντίστροφο ρεύμα κόρου  $I_S$  παραμένει σχεδόν αμετάβλητο καθώς η έντασή του εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και όχι από την τάση που εφαρμόζεται.



Όταν η τάση ανάστροφης πόλωσης αυξηθεί πέρα από μία ορισμένη τιμή, παρατηρείται μία απότομη αύξηση του ρεύματος αυτού με αποτέλεσμα η επαφή να λέγεται ότι βρίσκεται σε **κατάσταση κατάρρευσης**.

## Λειτουργία της επαφής pn με τάση - Ορθή πόλωση της επαφής pn



Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή έλλειψης φορέων μειώνεται με αποτέλεσμα να ελαττώνονται και τα φορτία χώρου.

Μείωση του φράγματος δυναμικού κατά  $V_D$ .

Με τη μείωση του φράγματος δυναμικού, οι φορείς πλειονότητας κάθε περιοχής του ημιαγωγού περνούν εύκολα την περιοχή έλλειψης φορέων και εισέρχονται στην αντίθετου τύπου περιοχή, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένα μεγάλο ρεύμα διάχυσης  $I_d$ . Το ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_s$  παραμένει αμετάβλητο καθώς εξαρτάται μόνον από τη θερμοκρασία.

Το συνολικό ρεύμα αποτελείται από τις δύο αντίρροπες συνιστώσες,  $I_S$  και  $I_d$ , δηλαδή,

$$i = I_d - I_S$$

## Χωρητικότητα της επαφής p-n

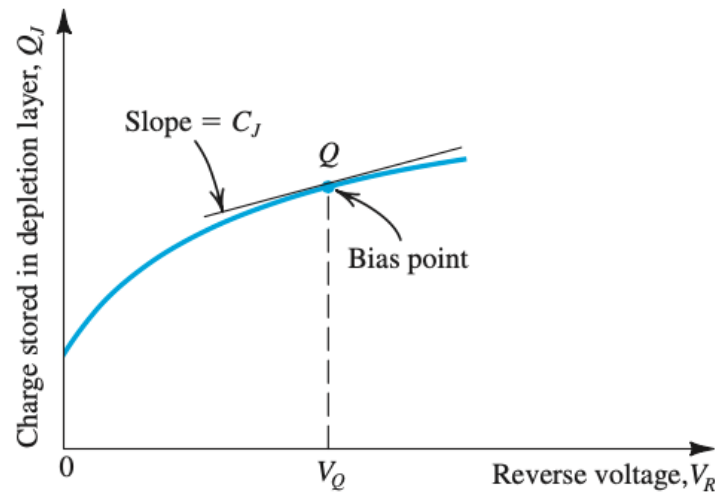
Δύο μηχανισμοί αποθήκευσης φορτίων : Αποθήκευση στην περιοχή απογύμνωσης λόγω ανάστροφης πόλωσης και αποθήκευση λόγω των φορέων μειονότητας στις περιοχές p και n σε κατάσταση ορθής πόλωσης.

### Ανάστροφη πόλωση

$$Q_J = A \sqrt{2\epsilon_s q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} (V_0 + V_R)}$$

$$Q_J = \alpha \sqrt{V_0 + V_R}$$

$$\alpha = A \sqrt{2\epsilon_s q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}$$



$$C_J = \left. \frac{dQ_J}{dV_R} \right|_{V_R=V_Q}$$

$$C_J = \frac{\alpha}{2\sqrt{V_0 + V_R}}$$

$$C_{j0} = \frac{\alpha}{2\sqrt{V_0}}$$

$$C_J = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}$$



## Χωρητικότητα της επαφής pn υπο ορθή πόλωση

Το φορτίο της επαφής στην περίπτωση αυτή είναι το άθροισμα των φορτίων των φορέων μειονότητας στις περιοχές p και n.

$$Q_p = \tau_p I_p \quad Q_n = \tau_n I_n$$

Όπου  $\tau_n$  και  $\tau_p$  οι χρόνοι ζωής των φορέων μειονότητας οπών και ηλεκτρονίων

$$Q = \tau_p I_p + \tau_n I_n \quad Q = \tau_T I$$

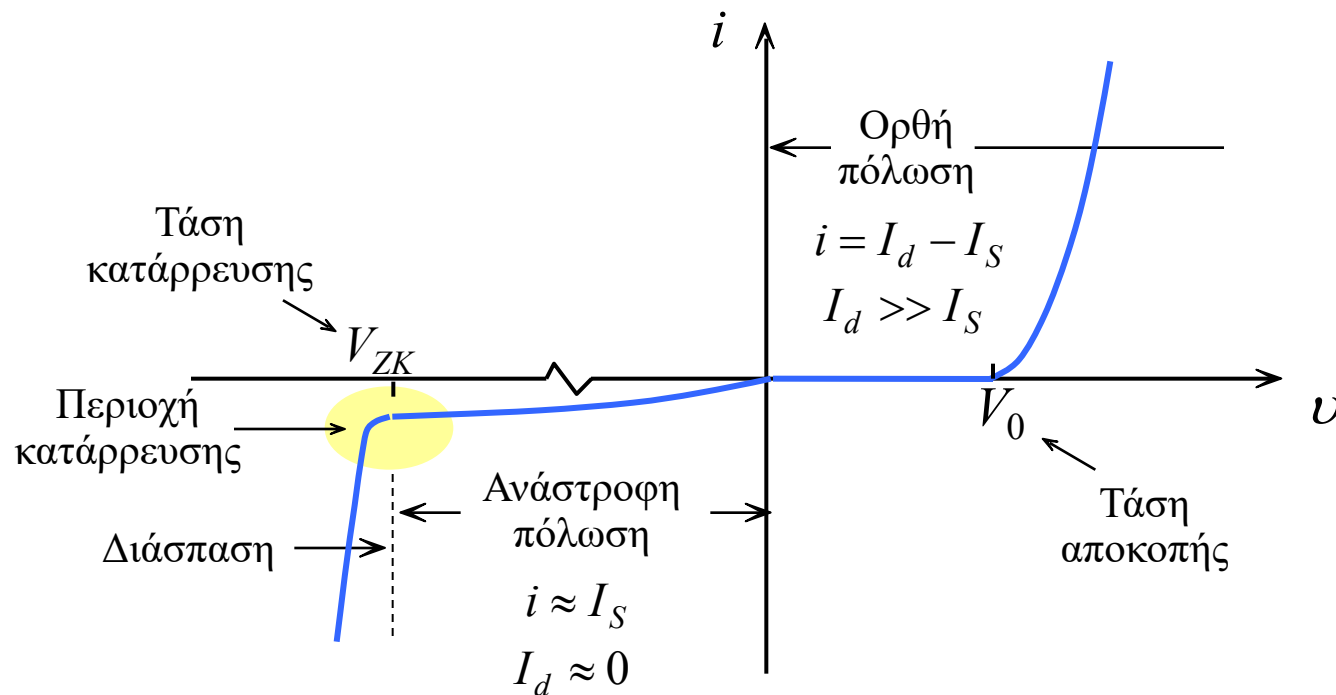
$$C_d = \frac{dQ}{dV}$$

$$C_d = \left( \frac{\tau_T}{V_T} \right) I$$

Η χωρητικότητα ορθής πόλωσης είναι ανάλογη του ρεύματος ορθής πόλωσης και του μέσου χρόνου ζωής οπών και ηλεκτρονίων

# Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος της επαφής pn - Στατική χαρακτηριστική διόδου

Δίοδος = Επαφή pn + Ακροδέκτες

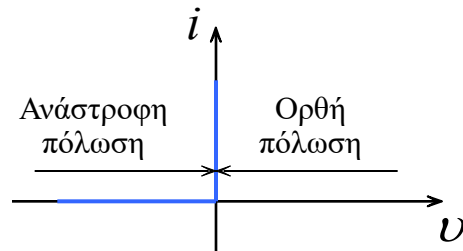


Η χαρακτηριστική έντασης ρεύματος – τάσης ( $i - v$ ) διόδου.

## Η ιδανική διάδος



Το κυκλωματικό σύμβολο διόδου



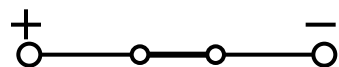
Η χαρακτηριστική έντασης τάσης ιδανικής διόδου

Όταν στην διάοδο εφαρμοστεί μία αρνητική τάση, η διάδος δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, η διάδος συμπεριφέρεται ως ανοικτό κύκλωμα. Λέμε ότι η διάδος είναι **ανάστροφα πολωμένη** ή σε **αποκοπή**.



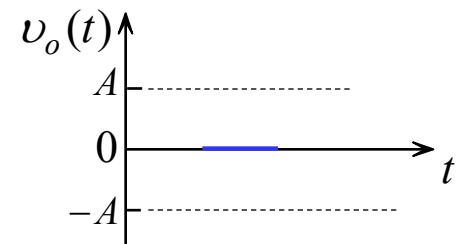
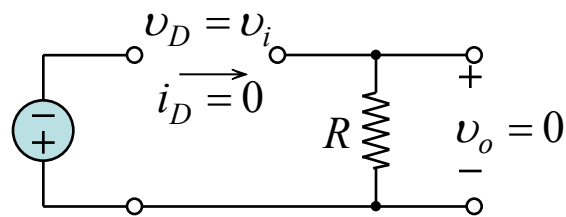
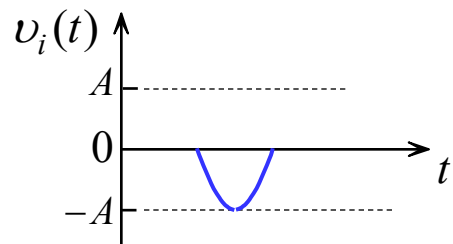
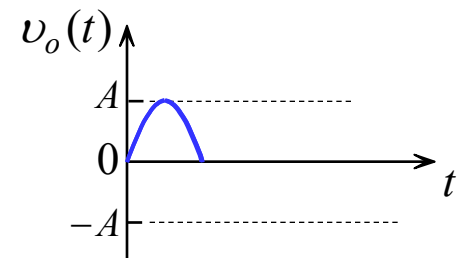
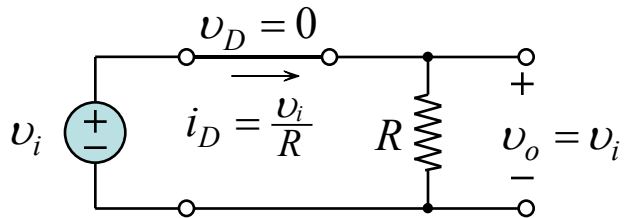
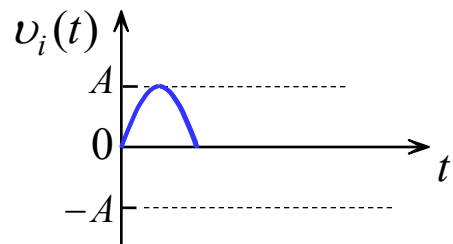
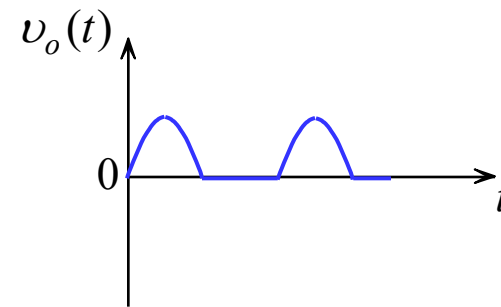
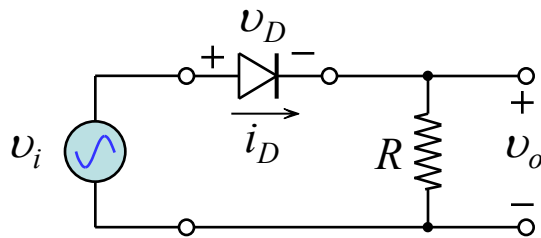
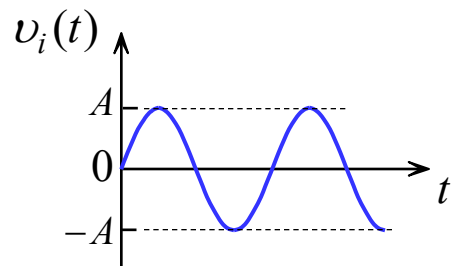
Ισοδύναμο κύκλωμα ανάστροφα πολωμένης ιδανικής διόδου

Όταν στην διάοδο εφαρμοστεί μία θετική τάση, κατά μήκος της διόδου εμφανίζεται μηδενική τάση, η διάδος συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα. Λέμε ότι η διάδος είναι ορθά πολωμένη ή ότι άγει.

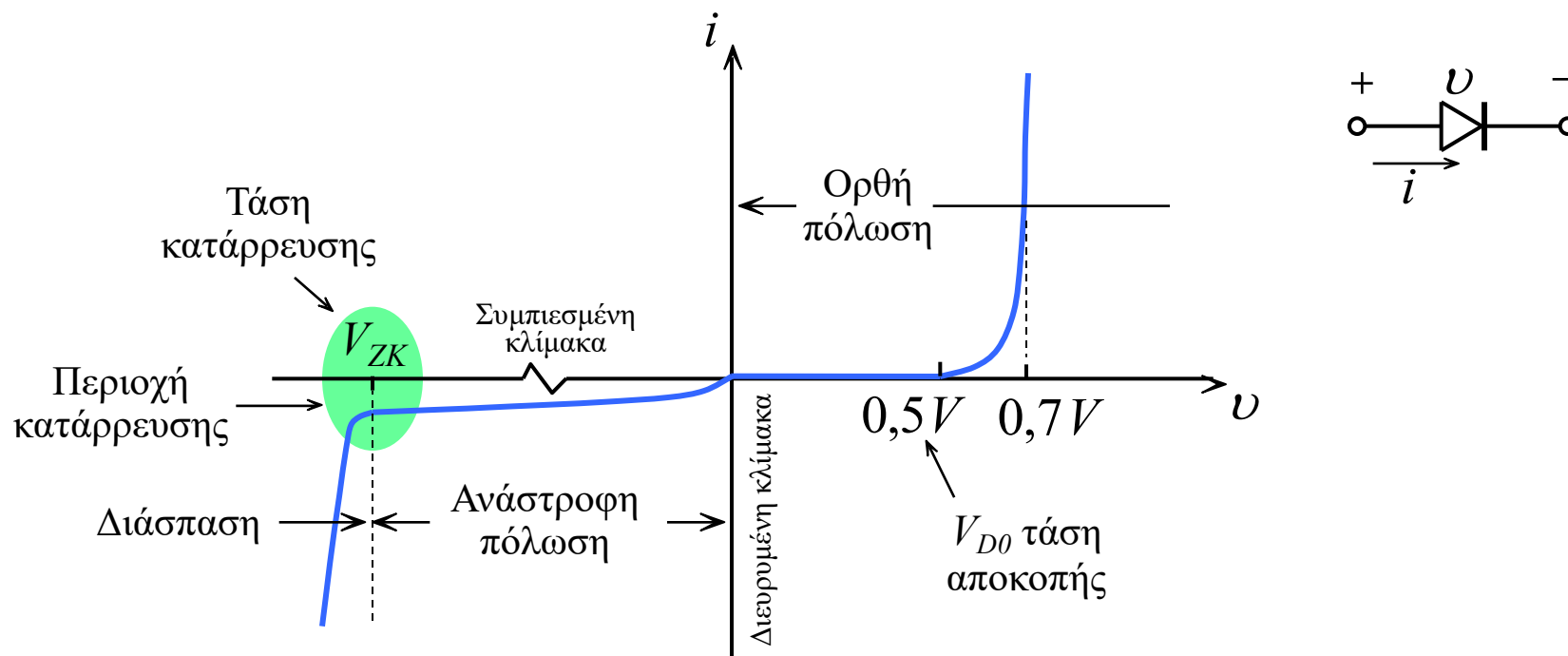


Ισοδύναμο κύκλωμα ορθά πολωμένης ιδανικής διόδου

# Η ιδανική δίοδος σε ανόρθωση



## Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος διόδου ένωσης πυριτίου



Η χαρακτηριστική  $i - v$  της διόδου πυριτίου με τους άξονες σε διαφορετικές κλίμακες

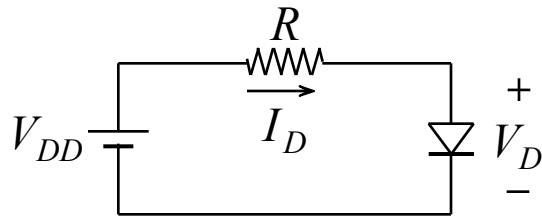
$$i = I_S \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right)$$

Νόμος της επαφής p-n

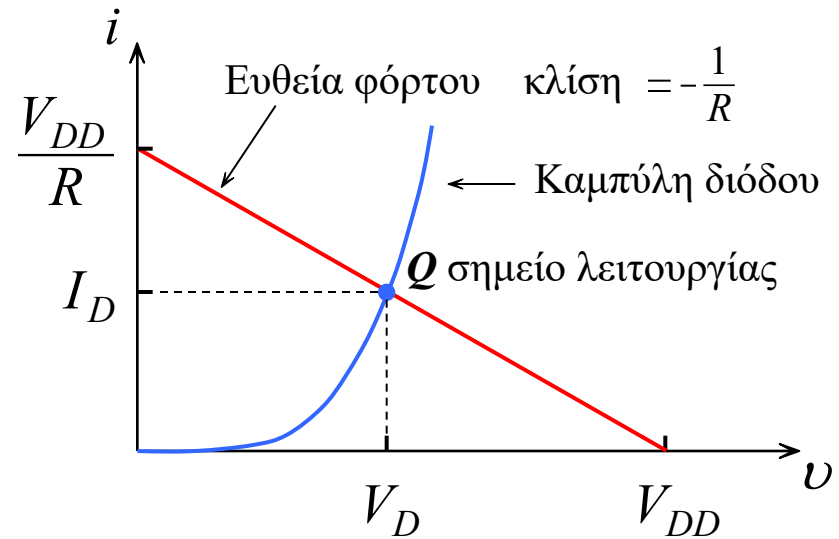
$I_S$  καλείται ρεύμα κόρου και έχει σταθερή τιμή για δεδομένη δίοδο και θερμοκρασία. Το  $I_S$  διπλασιάζεται κάθε φορά που η θερμοκρασία ανεβαίνει κατά  $5^{\circ}C$ .

$V_T$  είναι η θερμική τάση  $\approx 25 mV$  και  $T = 293^{\circ}K$   $n = 2$  για Si

## Ανάλυση κυκλωμάτων διόδων DC ανάλυση



Ένα απλό κύκλωμα με διάοδο

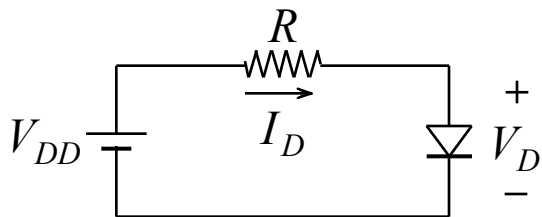


$$V_{DD} = I_D R + V_D \implies I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{V_{DD}}{R} - \frac{1}{R} V_D \quad \text{Ευθεία φόρτου}$$

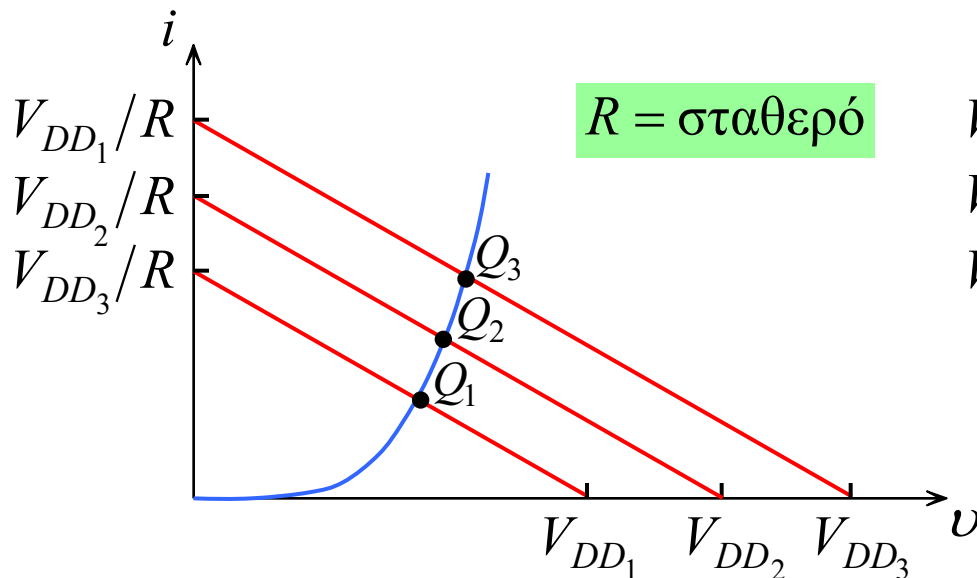
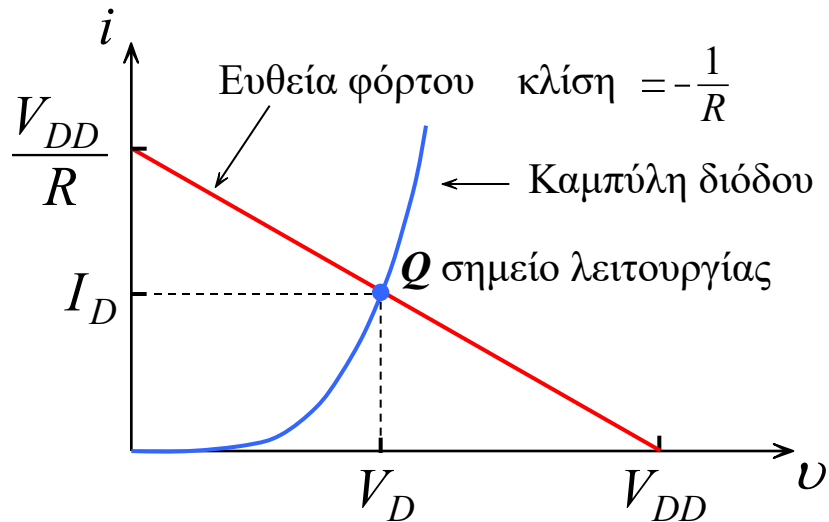
$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \xrightarrow{I_D \gg I_S} I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad \text{Καμπύλη διόδου}$$

Η γραμμή φορτίου τέμνει την καμπύλη της διόδου στο σημείο  $Q$ , που είναι το **σημείο λειτουργίας** του κυκλώματος.

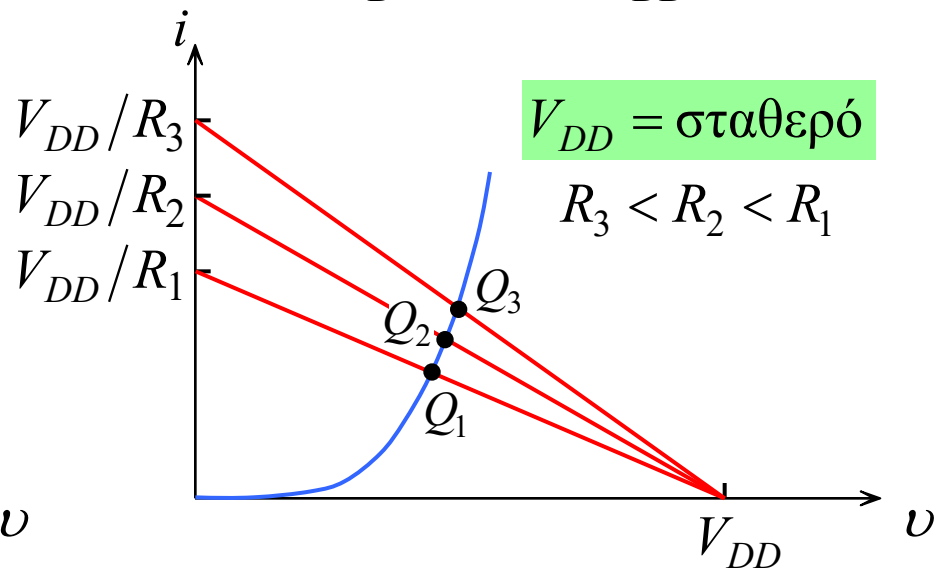
# Ανάλυση κυκλωμάτων διόδων DC ανάλυση



Ένα απλό κύκλωμα με διάοδο



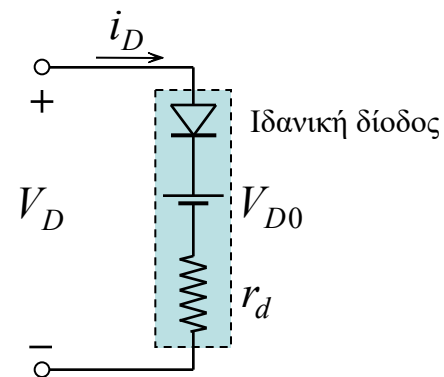
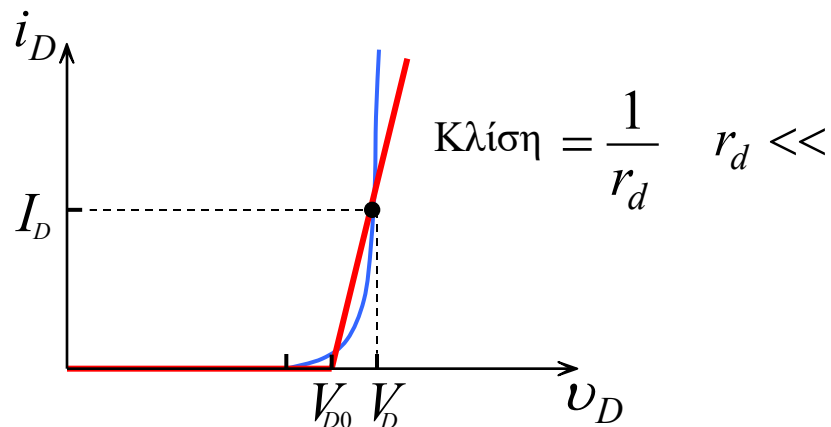
Μεταβολή τάσης πόλωσης



Μεταβολή αντίστασης

## Απλουστευμένα μοντέλα διόδων

Η ανάλυση ενός κυκλώματος το οποίο περιέχει δίοδο απλοποιείται αν βρεθούν γραμμικές σχέσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διόδου.



*Προσέγγιση του τμήματος της χαρακτηριστικής της διόδου, που αντιστοιχεί στην ορθή πόλωση, με δύο ευθύγραμμα τμήματα και το ισοδύναμο κύκλωμα.*

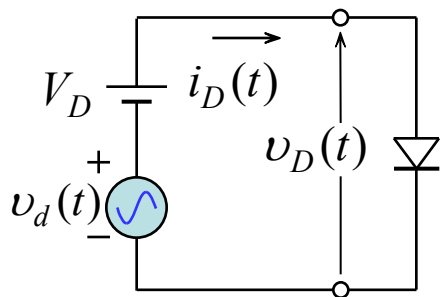
Η ιδανική δίοδος περιλαμβάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα προκειμένου να περιορίσει τη ροή ρεύματος  $i_D$  κατά την ορθή φορά μόνο.

Το τμηματικά γραμμικό μοντέλο περιγράφεται από την εξίσωση

$$i_D = \begin{cases} 0, & V_D \leq V_{D0} \\ (V_D - V_{D0})/r_D, & V_D \geq V_{D0} \end{cases}$$



## Το μοντέλο ασθενούς σήματος και οι εφαρμογές του



Αν  $v_d(t) = 0$ , η διαφορά δυναμικού στα άκρα της διόδου είναι  $V_D$  και το ρεύμα που τη διαρρέει είναι

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

Αν  $v_d(t) \neq 0$ , η στιγμιαία διαφορά δυναμικού στα άκρα της διόδου  $v_D(t)$  είναι

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

και το στιγμιαίο ρεύμα που τη διαρρέει είναι

$$i_D(t) = I_S e^{\frac{v_D(t)}{nV_T}} = I_S e^{\frac{V_D + v_d(t)}{nV_T}} = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} e^{\frac{v_d(t)}{nV_T}} = I_D e^{\frac{v_d(t)}{nV_T}}$$

Αν το πλάτος του σήματος  $v_d(t)$  κρατηθεί αρκετά μικρό έτσι ώστε  $\frac{v_d(t)}{nV_T} \ll 1$ , έχουμε

$$i_D(t) \approx I_D \left( 1 + \frac{v_d(t)}{nV_T} \right)$$

Η προσέγγιση αυτή καλείται **προσέγγιση ασθενούς σήματος**.

## Το μοντέλο ασθενούς σήματος και οι εφαρμογές του

$$i_D(t) = I_D \left( 1 + \frac{v_d(t)}{nV_T} \right) \quad \Longrightarrow \quad i_D(t) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$$

Στο dc ρεύμα  $I_D$  προστίθεται η ένταση του ρεύματος που οφείλεται στο σήμα  $v_d(t)$ , δηλαδή,

$$i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

όπου  $i_d(t)$  είναι

$$i_d(t) = \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$$

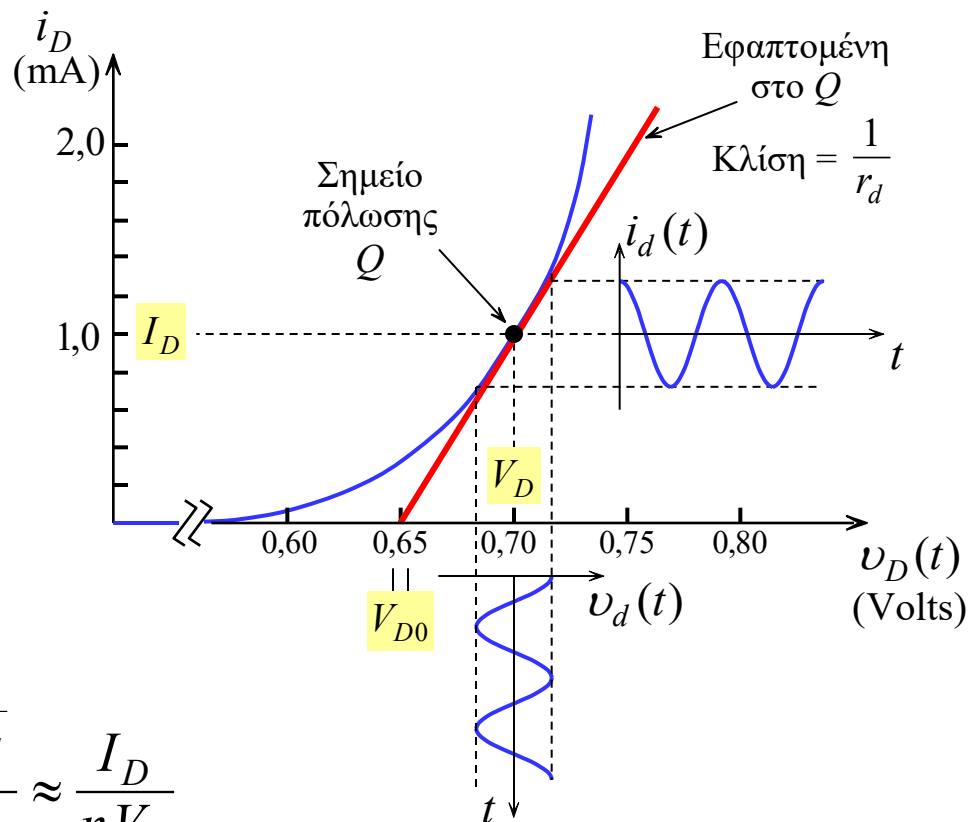
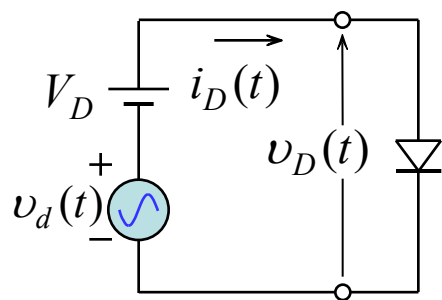
Ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ έντασης ρεύματος και διαφοράς δυναμικού έχει διαστάσεις αγωγιμότητας, mhos, και καλείται **αγωγιμότητα ασθενούς σήματος της διόδου**.

Το αντίστροφο της αγωγιμότητας ασθενούς σήματος της διόδου είναι **η αντίσταση διόδου ασθενούς σήματος** ή **αντίσταση μικρών μεταβολών** ή **δυναμική αντίσταση**,  $r_d$ .

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D}$$

Η τιμή της  $r_d$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του ρεύματος πόλωσης  $I_D$ .

## Το μοντέλο ασθενούς σήματος και οι εφαρμογές του



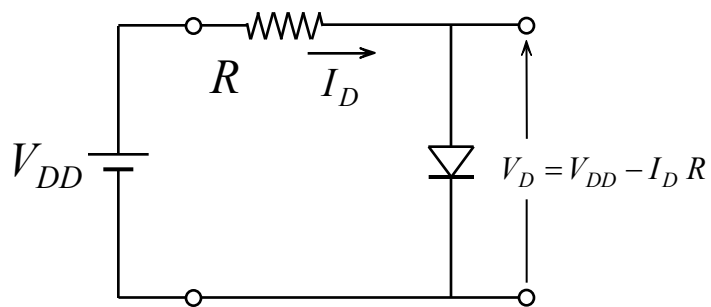
Ισχύει ότι

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{d i_D(t)}{d v_D(t)} \right|_{V_D} = \frac{I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}}}{nV_T} \approx \frac{I_D}{nV_T}$$

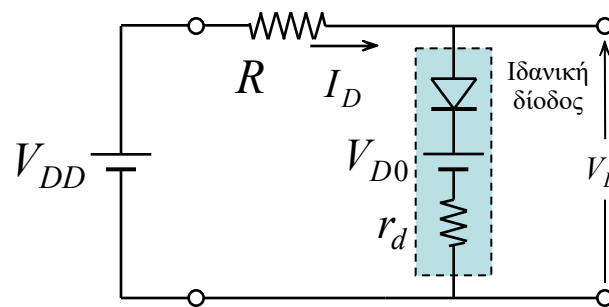
Η εξίσωση της εφαπτομένης στο σημείο λειτουργίας  $Q$  της χαρακτηριστικής της διόδου είναι

$$i_D = \frac{1}{r_d} (v_D - V_{D0})$$

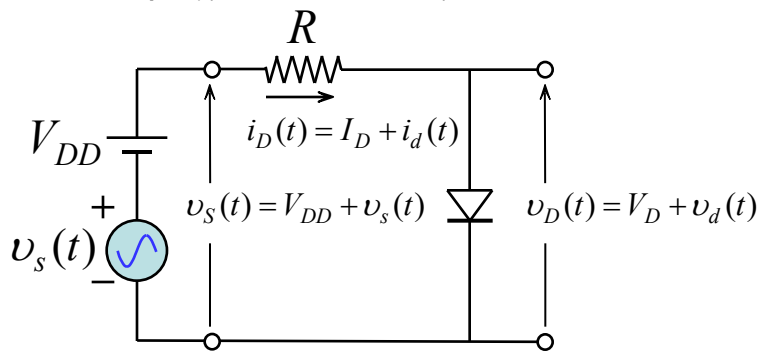
# Ανάλυση κυκλώματος διόδου που περιέχει τόσο dc όσο και ac ποσότητες



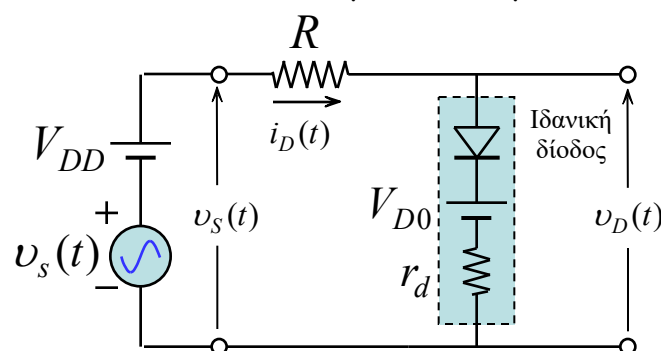
Πραγματικό κύκλωμα



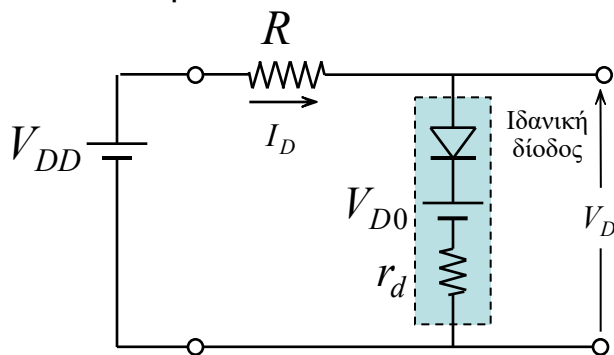
Ισοδύναμο κύκλωμα



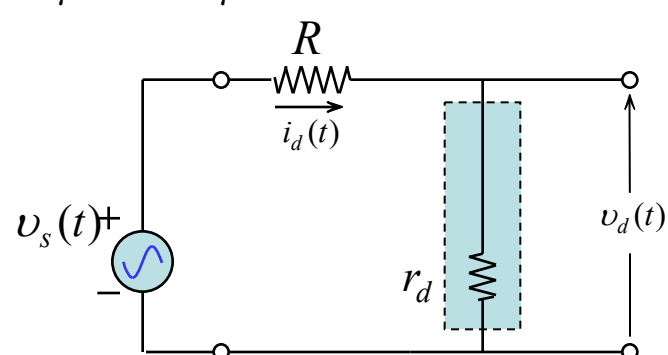
Αρχικό κύκλωμα για ανάλυση



Ισοδύναμο κύκλωμα



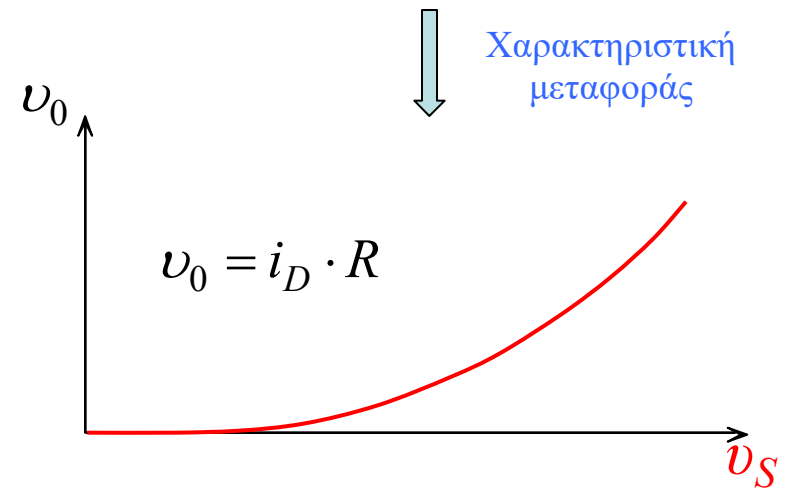
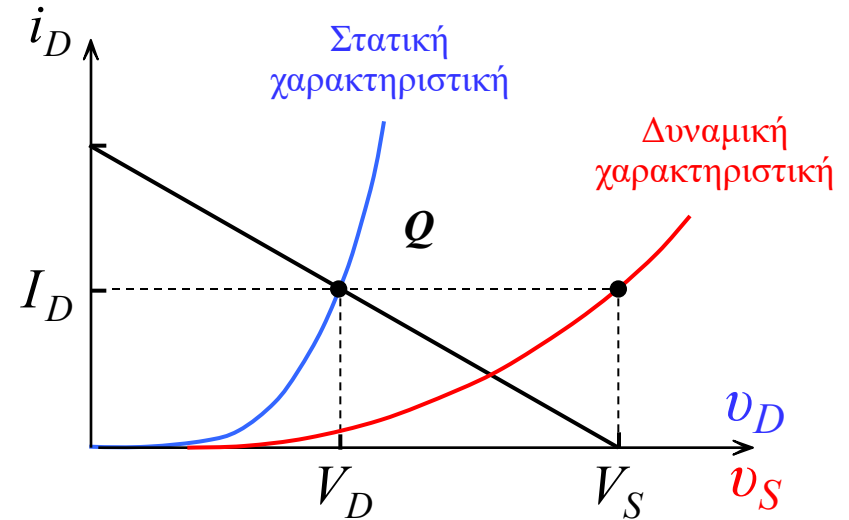
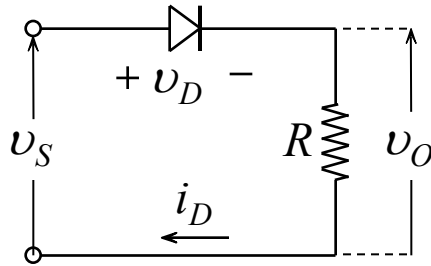
Κύκλωμα για DC ανάλυση



Κύκλωμα για AC ανάλυση

## Χαρακτηριστική μεταφοράς

Η χαρακτηριστική μεταφοράς δίνει γραφικά τη σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου  $v_O$  και της τάσης εισόδου  $v_S$ .



## Χρήση της πτώσης τάσης ορθά πολωμένης διόδου για σταθεροποίηση τάσης

Ένας ρυθμιστής ή σταθεροποιητής τάσης είναι μία διάταξη που έχει σκοπό να διατηρεί μία σταθερή συνεχή διαφορά δυναμικού (dc τάση) μεταξύ των ακροδεκτών της.

Η τάση αυτή εξόδου θα πρέπει να παραμένει σταθερή (α) παρά τις μεταβολές στην ένταση του ρεύματος που διαρρέει το φόρτο και (β) παρά τις μεταβολές της διαφοράς δυναμικού τροφοδοσίας του σταθεροποιητή.

Το dc ρεύμα της διόδου είναι

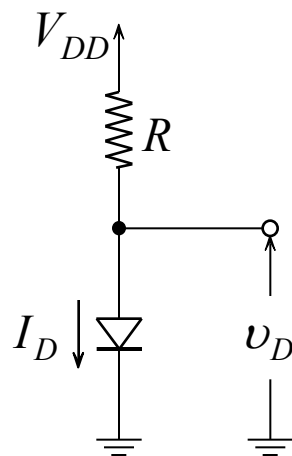
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$$

Η δυναμική αντίσταση της διόδου είναι

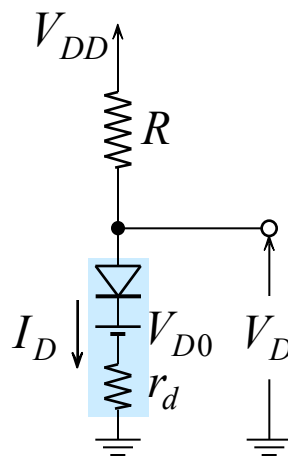
$$r_d = \frac{n \cdot V_T}{I_D}$$

Η τάση από κορυφή σε κορυφή στα άκρα της διόδου είναι

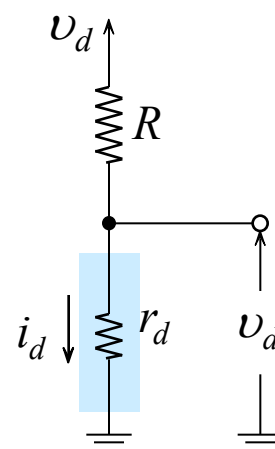
$$v_{d(p-p)} = 2\Delta V_{DD} \frac{r_d}{R + r_d}$$



Διάταξη σταθεροποίησης τάσης με δίοδο



Κύκλωμα για DC ανάλυση



Κύκλωμα για AC ανάλυση

## Λειτουργία στην περιοχή κατάρρευσης – Δίοδοι Zener

Οι δίοδοι zener κατασκευάζονται για να λειτουργούν στην περιοχή κατάρρευσης. Η σχεδόν σταθερή πτώση τάσης καθιστά τη diode κατάλληλη για χρήση στη σχεδίαση ρυθμιστών τάσης.

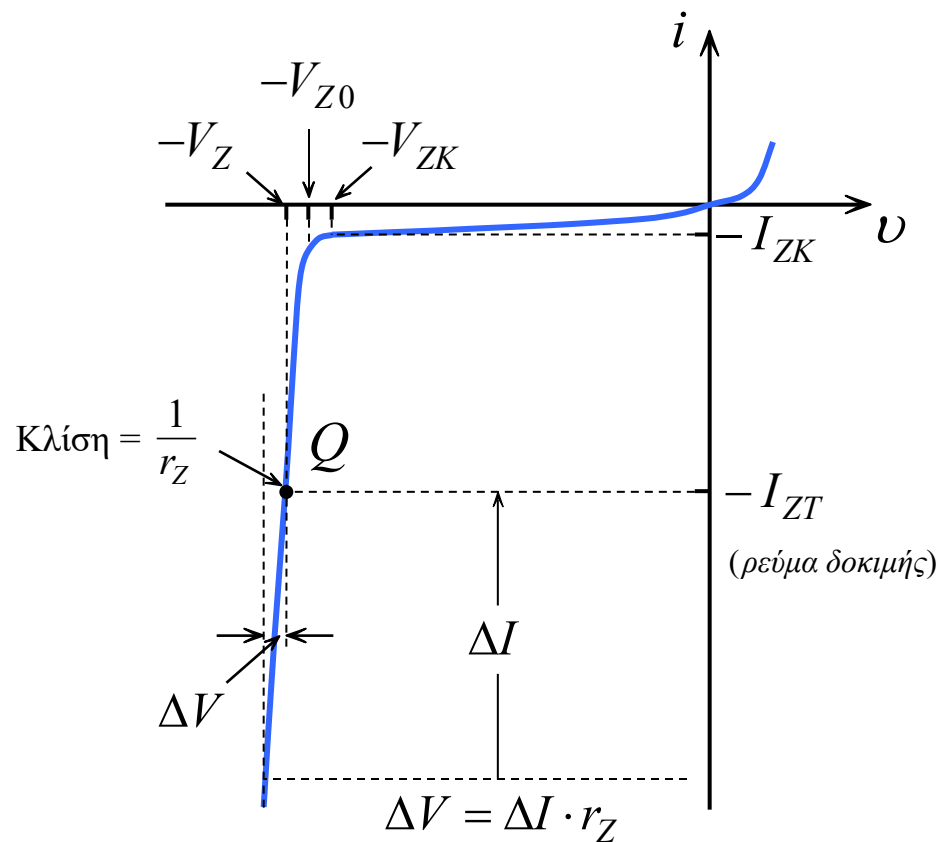
Η καμπύλη είναι ευθεία γραμμή για ρεύματα μεγαλύτερα από εκείνο που αντιστοιχεί στο “γόνατο” της χαρακτηριστικής,  $(V_{ZK}, I_{ZK})$ .

Οι συντεταγμένες του σημείου λειτουργίας είναι  $(V_Z, I_{ZT}$  (ρεύμα δοκιμής)) και δίνονται από τον κατασκευαστή.

Όταν το ρεύμα της diode μεταβάλλεται περί την τιμή  $I_{ZT}$ , η τάση της μεταβάλλεται επίσης, αλλά ελάχιστα

$$\Delta V = r_Z \cdot \Delta I.$$

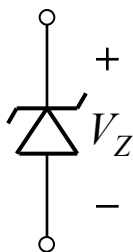
όπου η,  $r_Z$  είναι το αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής στο σημείο  $Q$  και ονομάζεται **αντίσταση μικρών μεταβολών** της zener ή η **δυναμική αντίσταση** της diode.



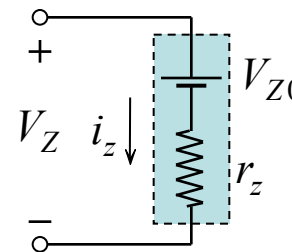
Η χαρακτηριστική  $i - v$  της diode με λεπτομερή παράσταση της περιοχής κατάρρευσης.

## Λειτουργία στην περιοχή κατάρρευσης – Δίοδοι Zener

Η τιμή της  $r_z$  παραμένει μικρή και σχεδόν σταθερή για μία μεγάλη περιοχή ρεύματος, η τιμή της αυξάνεται σημαντικά κοντά στο γόνατο της καμπύλης. Ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει τη λειτουργία της zener στη σχεδόν γραμμική χαρακτηριστική έντασης – τάσης είναι



Το κυκλωματικό σύμβολο της Zener



Το ισοδύναμο κύκλωμα Zener

Με  $V_{Z0}$  υποδηλώνεται το σημείο στο οποίο η ευθεία με κλίση  $1/r_z$  τέμνει τον άξονα των τάσεων. Η τάση αυτή διαφέρει από την τάση στο γόνατο της καμπύλης  $V_{ZK}$ . Στην πράξη οι τιμές δεν διαφέρουν σημαντικά.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα παρατηρούμε ότι

$$V_Z = V_{Z0} + r_z \cdot I_Z$$

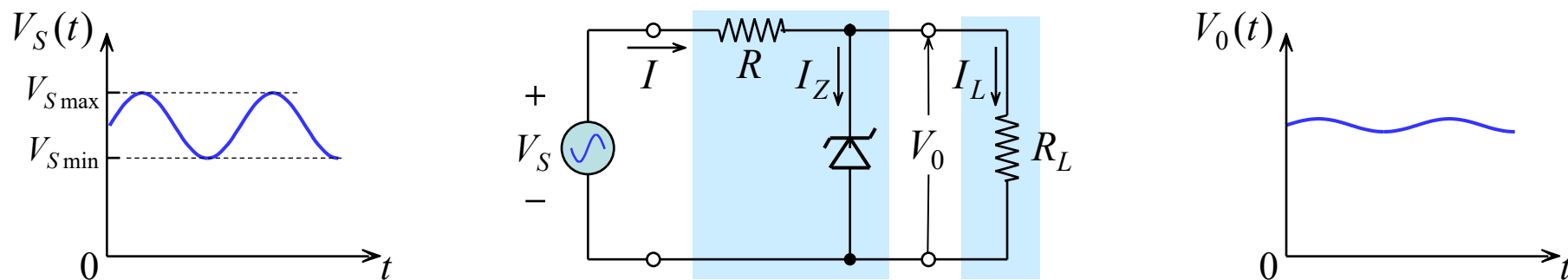
που είναι η εξίσωση ευθείας με κλίση ίση με  $1/r_z$  που διέρχεται από το σημείο  $Q$ .

Για να έχουμε λειτουργία της Zener στη περιοχή κατάρρευσης πρέπει  $I_Z > I_{ZK}$ , και  $V_Z > V_{Z0}$ .



## Παράλληλος σταθεροποιητής τάσης με Zener

Ο σκοπός του ρυθμιστή τάσης είναι να παρέχει μία τάση εξόδου που να παραμένει όσο πιο σταθερή γίνεται παρά τις διακυμάνσεις της τάση τροφοδοσίας  $V_S(t)$  και της έντασης του ρεύματος  $I_L(t)$  που διαρρέει την αντίσταση φόρτου  $R_L$



Ένας παράλληλος σταθεροποιητής τάσης με zener, και οι αντίστοιχες κυματομορφές των σημάτων εισόδου–εξόδου.

Οι παράμετροι οι οποίοι προσδιορίζουν τις επιδόσεις ενός ρυθμιστή τάσης είναι η **ρύθμιση γραμμής** και η **ρύθμιση φορτίου**

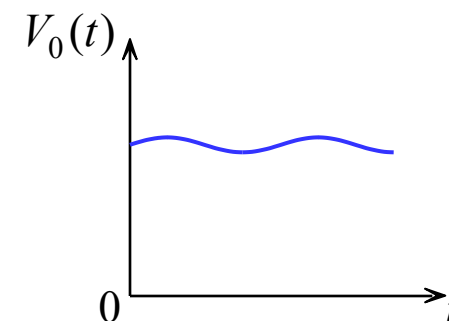
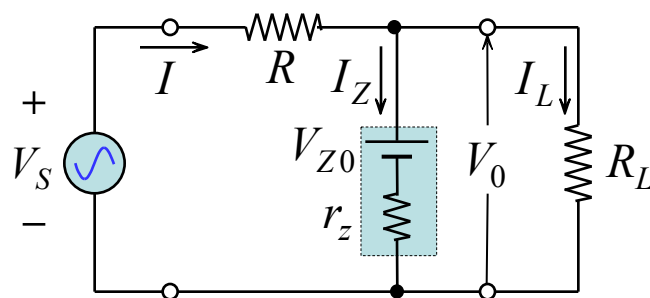
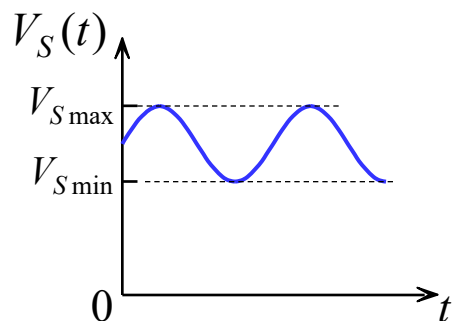
Η ρύθμιση γραμμής ορίζεται ως η μεταβολή της  $V_0$  που αντιστοιχεί σε μία μεταβολή κατά ένα Volt της  $V_S$  (εκφράζεται σε mV/V).

$$\text{Ρύθμιση γραμμής} \equiv \frac{\Delta V_0}{\Delta V_S}$$

Η ρύθμιση φορτίου ορίζεται ως η αλλαγή της  $V_0$  που αντιστοιχεί σε μία μεταβολή κατά ένα mA της  $I_L$ .

$$\text{Ρύθμιση φορτίου} \equiv \frac{\Delta V_0}{\Delta I_L}$$

## Παράλληλος σταθεροποιητής τάσης με Zener



Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της Zener είναι

$$V_0 = V_{Z0} \frac{R}{R + r_z} + V_S \frac{r_z}{R + r_z} - I_L \frac{R \cdot r_z}{R + r_z}$$

Η ρύθμιση γραμμής και η ρύθμιση φορτίου είναι

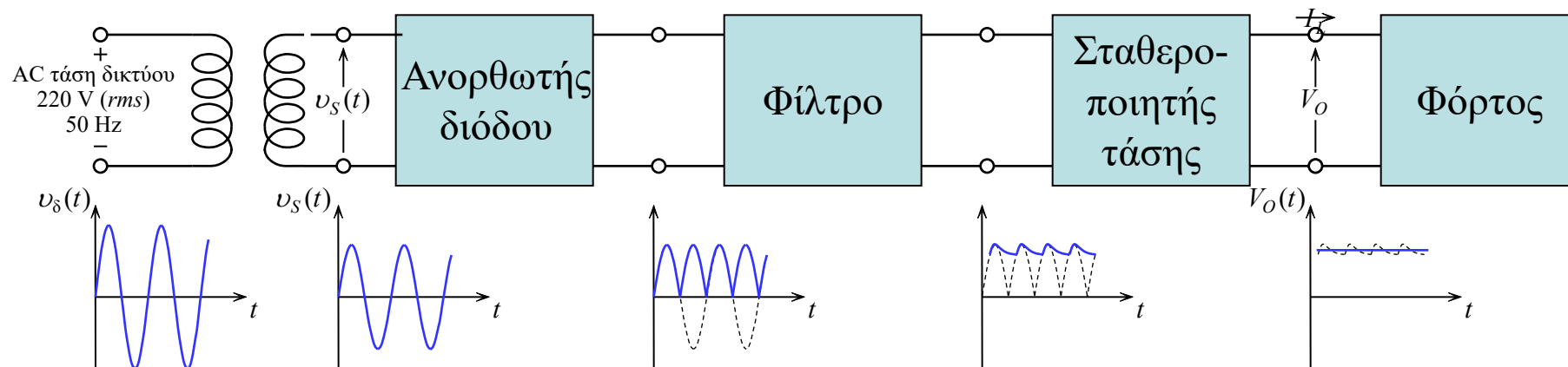
$$\text{Ρύθμιση γραμμής} \equiv \frac{\Delta V_0}{\Delta V_S} = \frac{r_z}{R + r_z} \quad \text{Ρύθμιση φορτίου} \equiv \frac{\Delta V_0}{\Delta I_L} = -\frac{R \cdot r_z}{R + r_z}$$

Η αντίσταση  $R$  επιλέγεται έτσι ώστε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την Zener να μη γίνεται μικρή, οπότε η δυναμική αντίσταση  $r_z$  αυξάνεται και ρυθμιστής γίνεται λιγότερο αποτελεσματικός.

$$R = \frac{\Delta V_R}{I} = \frac{V_{S\min} - V_{Z0} - r_z \cdot I_{Z\min}}{I_{Z\min} + I_{L\max}}$$

## Κυκλώματα ανορθωτών

Η δίοδος χρησιμοποιείται στους ανορθωτές. Ο ανορθωτής διόδων αποτελεί βασικό μέρος των γεννητριών συνεχούς τάσης (τροφοδοτικά) που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών κυκλωμάτων.



Σχηματικό διάγραμμα γεννήτριας dc ρεύματος και οι αντίστοιχες κυματομορφές σήματος.

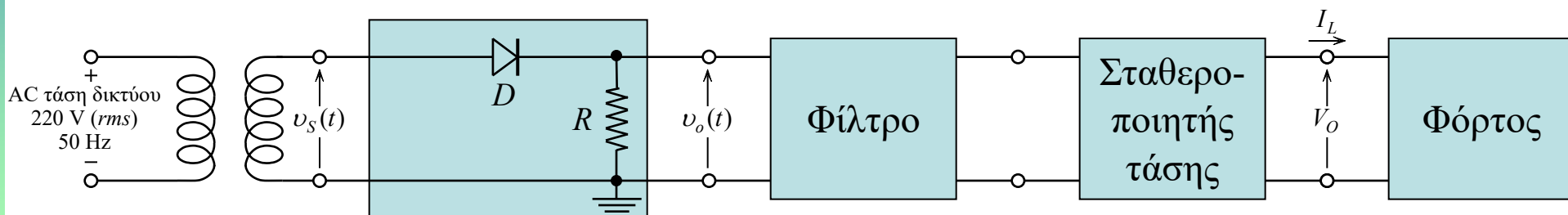
Θα πρέπει η τάση στο άκρο του φορτίου να είναι σταθερή, δηλαδή, να μην επηρεάζεται από τις μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας  $v_s(t)$  και από την ένταση του ρεύματος  $I_L$  που διαρρέει την αντίσταση φορτίου.

Με την επιλογή του λόγου  $n_1/n_2$  του μετασχηματιστή ισχύος επιτυγχάνεται η συνεχής τιμή της τάσης εξόδου  $V_o$  της dc γεννήτριας.

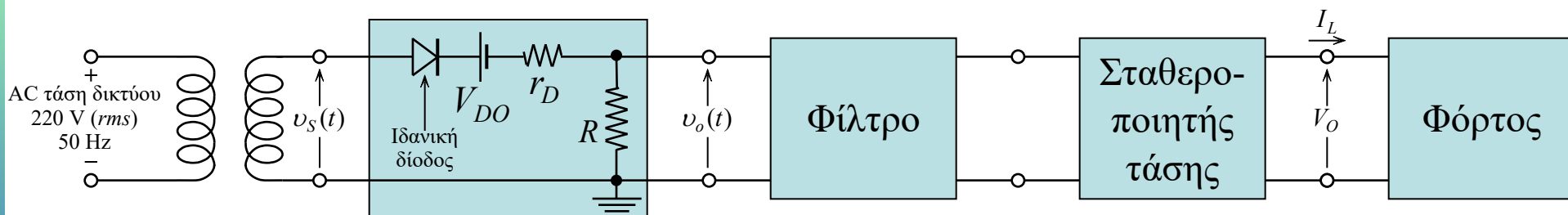
Επίσης ο μετασχηματιστής εξασφαλίζει την ηλεκτρονική απομόνωση μεταξύ του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και του κυκλώματος της γραμμής μεταφοράς.

## Ανορθωτής ημικύματος ή Ημιανορθωτής

Ο ανορθωτής διόδου μετατρέπει την ημιτονοειδή τάση εισόδου  $v_s(t)$  σε τάση μιας φοράς είτε με απλή ανόρθωση  $v_o(t) = v_s(t) \cdot u(t)$  είτε με διπλή ανόρθωση  $v_o(t) = |v_s(t)|$ .

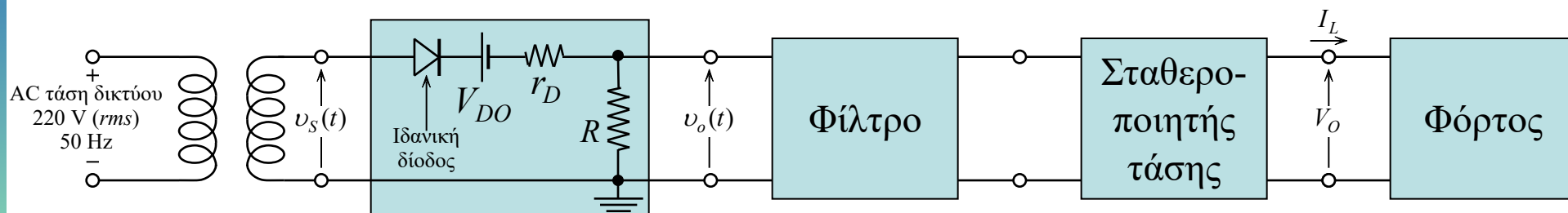


Σχηματικό διάγραμμα γεννήτριας dc ρεύματος με ανορθωτή ημικύματος.



Το ισοδύναμο κύκλωμα του ημιανορθωτή μετά την αντικατάσταση της διόδου με το τμηματικά γραμμικό μοντέλο της.

## Ανορθωτής ημικύματος ή Ημιανορθωτής

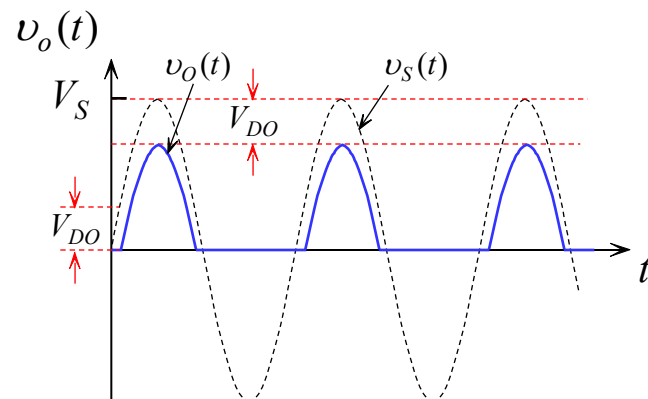
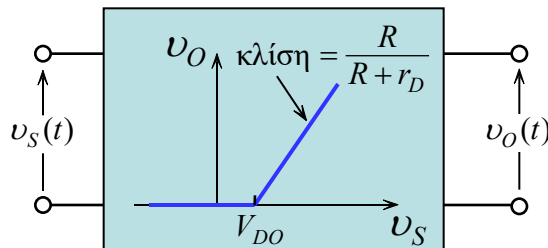
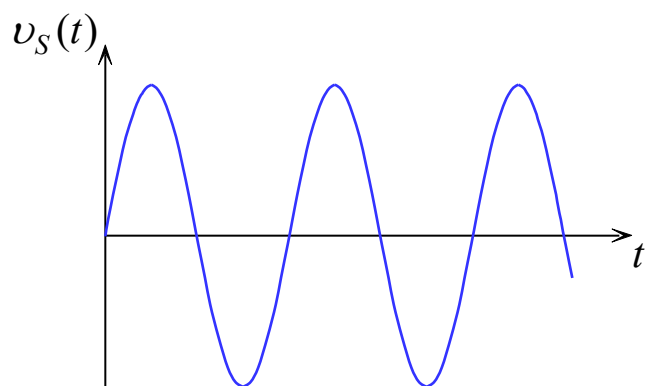


Η τάση στην έξοδο του ημιανορθωτή είναι

$$V_o = \begin{cases} 0, & V_S < V_{D0} \\ V_S \frac{R}{R+r_D} - V_{D0} \frac{R}{R+r_D}, & V_S \geq V_{D0} \end{cases}$$

Παρατηρούμε ότι για  $r_D \ll R \implies v_o \approx v_s - V_{D0}$  με  $V_{D0} \approx 0,7$  Volts

## Ανορθωτής ημικύματος ή Ημιανορθωτής



Οι κυματομορφές εισόδου εξόδου και η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του ημιανορθωτή για την περίπτωση όπου  $r_D \ll R$ , δηλαδή, για την περίπτωση που η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος είναι ίση με 1.

Σημαντικά χαρακτηριστικά για την επιλογή της διόδου είναι

**α)** το μέγιστο ρεύμα από το οποίο διαρρέεται η διάδος κατά την ορθή πόλωση και

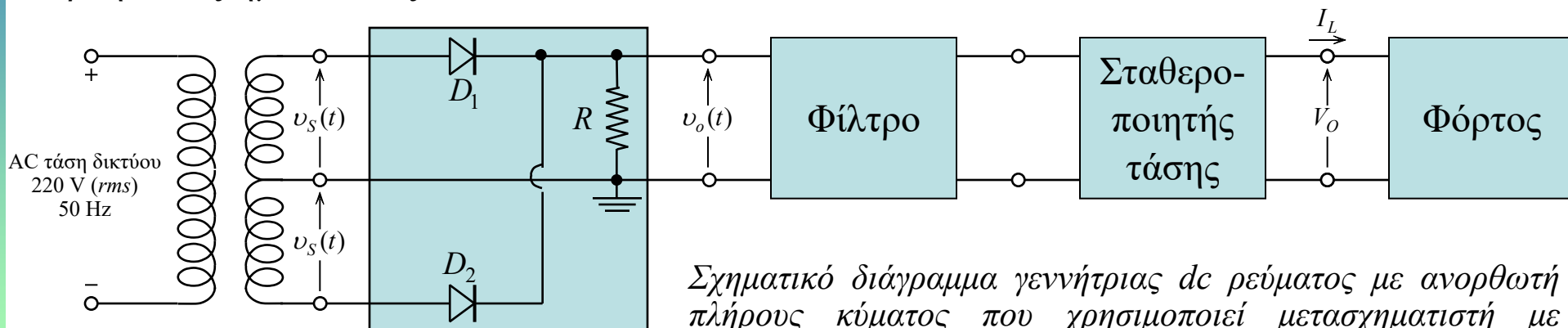
**β)** η **μέγιστη ανάστροφη τάση** (*peak inverse voltage (PIV)*) πόλωσης για την οποία η διάδος δεν οδηγείται στην περιοχή κατάρρευσης.

Για τον ημιανορθωτή είναι

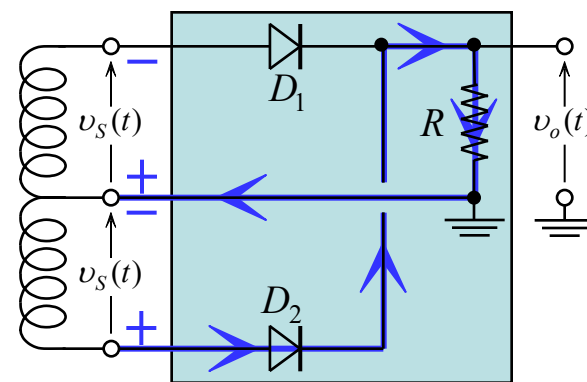
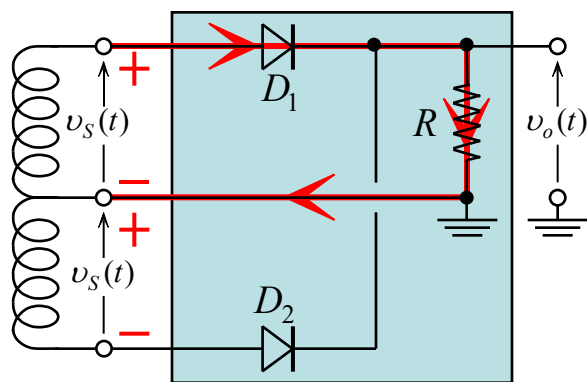
$$PIV = V_S$$

## Ανορθωτής πλήρους κύματος ή πλήρης ανορθωτής

Ο ανορθωτής πλήρους κύματος χρησιμοποιεί και τους δύο ημικύκλους, αντιστρέφοντας τους αρνητικούς ημικύκλους.

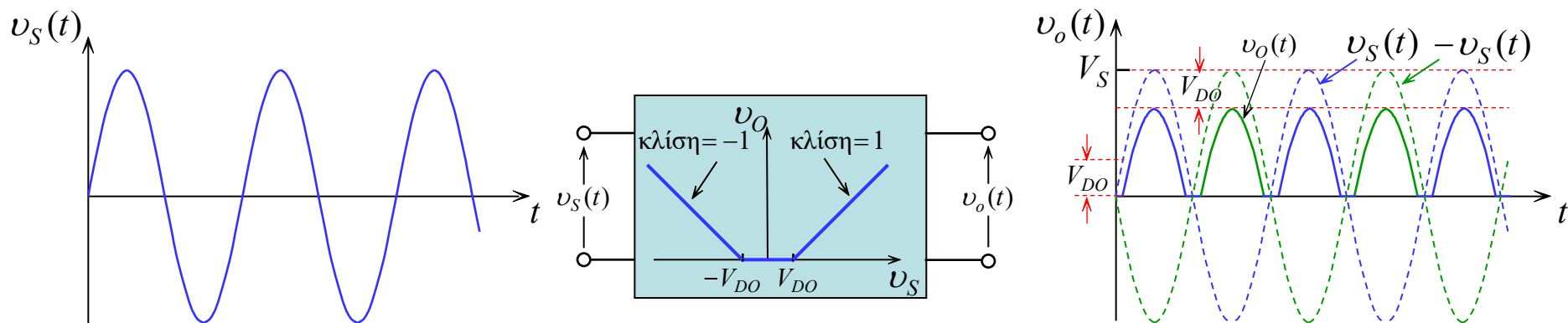


Σχηματικό διάγραμμα γεννήτριας dc ρεύματος με ανορθωτή πλήρους κύματος που χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με δευτερεύον πηνίο χωρισμένο στην μέση (μεσαία λήψη).



Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση  $R$  όταν η τάση που τροφοδοτεί το πρωτεύον είναι θετική (η διάδος  $D_1$  άγει και η  $D_2$  είναι αναστροφή πολωμένη) και όταν η τάση είναι αρνητική. Και στις δύο περιπτώσεις η  $R$  διαρρέεται από ρεύμα που έχει την ίδια φορά.

## Ανορθωτής πλήρους κύματος ή πλήρης ανορθωτής



Οι κυματομορφές εισόδου εξόδου και η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος που χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με μεσαία λήψη, για την περίπτωση όπου  $r_D \ll R$ , δηλαδή, για την περίπτωση που η κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων είναι ίση με  $\pm 1$ .

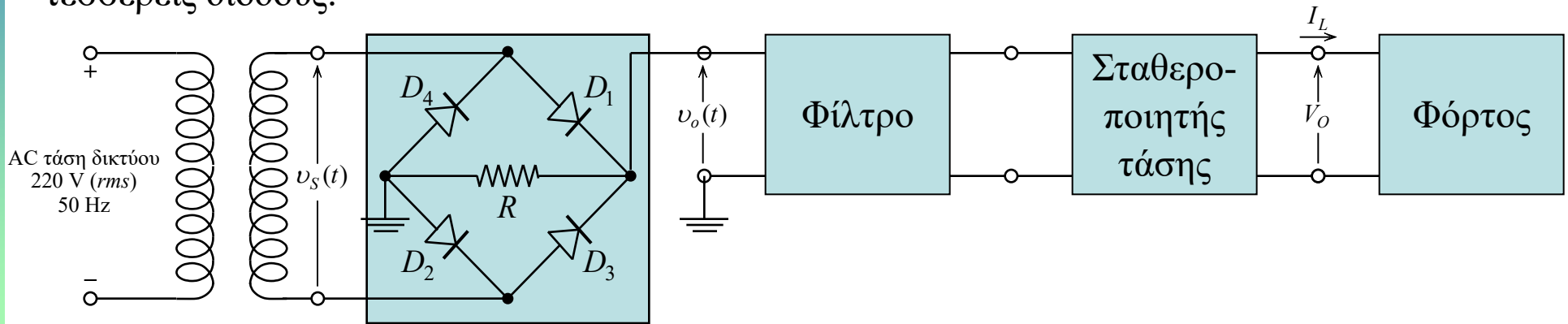
Κατά τους θετικούς ημικύκλους η D1 άγει και η D2 είναι σε ανακοπή. Η τάση στην κάθοδο της D2 είναι  $v_O$  και στην άνοδο  $-v_S$ . Η ανάστροφη πόλωση της D2 θα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή όταν η  $v_O$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή  $V_S - V_{DO}$  και η  $v_S$  τη μέγιστη τιμή  $V_S$ . Επομένως

$$PIV = 2V_S - V_{DO}$$

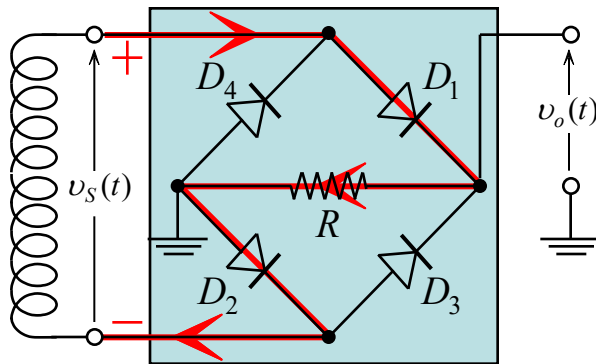


## Ανορθωτής γέφυρας

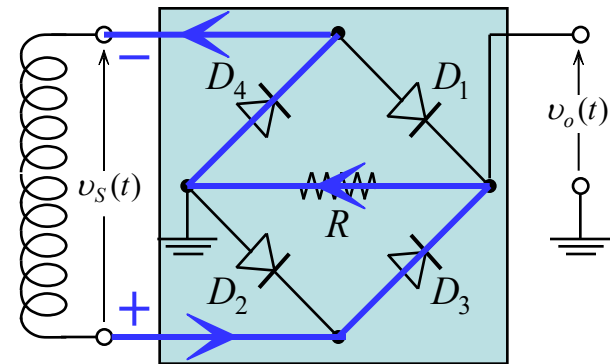
Μία εναλλακτική υλοποίηση του ανορθωτή πλήρους κύματος είναι ο ανορθωτής γέφυρας. Ο ανορθωτής δεν χρειάζεται μετασχηματιστή με μεσαία λήψη (πλεονέκτημα) χρειάζεται όμως τέσσερις διόδους.



Σχηματικό διάγραμμα γεννήτριας dc ρεύματος με ανορθωτή γέφυρας.

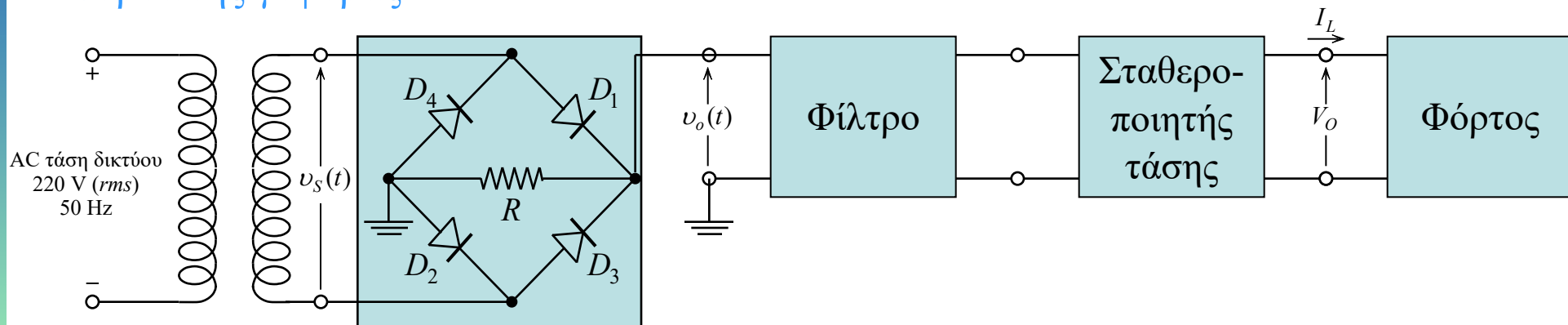


Η λειτουργία του ανορθωτή γέφυρας κατά τη διάρκεια των θετικών ημικυκλίων εισόδου,  $v_s > 0$ .

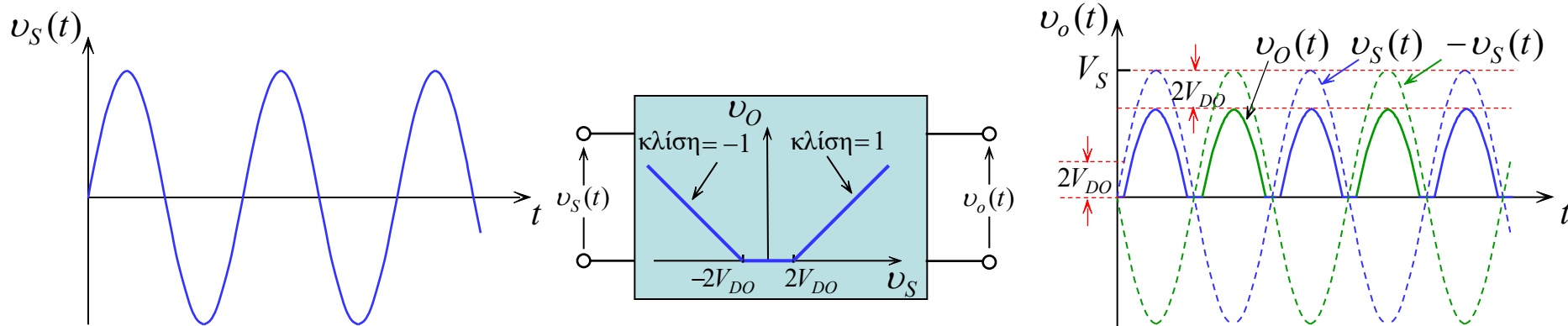


Η λειτουργία του ανορθωτή γέφυρας κατά τη διάρκεια των αρνητικών ημικυκλίων εισόδου,  $v_s < 0$ .

# Ανορθωτής γέφυρας



Σχηματικό διάγραμμα γεννήτριας dc ρεύματος με ανορθωτή γέφυρας.



Οι κυματομορφές εισόδου εξόδου και η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος που ανορθωτή γέφυρας, για την περίπτωση όπου  $r_D \ll R$ .

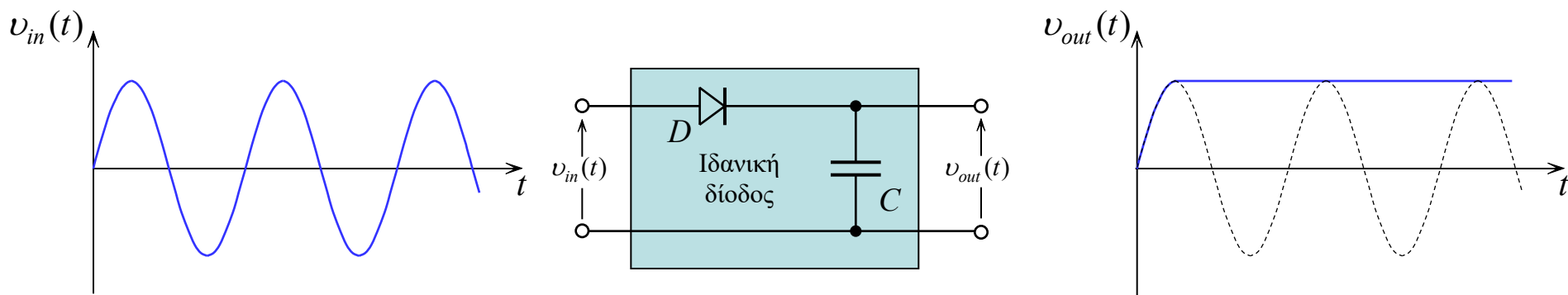
Η PIV είναι περίπου μισή από την αντίστοιχη τιμή για τον ανορθωτή πλήρους κύματος με μεσαία λήψη

$$PIV = V_S - 2V_{DO} + V_{DO} = V_S - V_{DO}$$

## Ανορθωτής με φίλτρο πυκνωτή

Η έξοδος του ανορθωτή εκτός από την συνεχή συνιστώσα περιέχει και πλήθος αρμονικών οι οποίες την καθιστούν ακατάλληλη για την τροφοδοσία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων συνεχούς τάσης.

Με τη βοήθεια ενός **φίλτρου πυκνωτή**, δηλαδή με τη τοποθέτηση ενός φίλτρου κατά μήκος της αντίστασης φορτίου ελαττώνονται σημαντικά οι μεταβολές στην τάση εξόδου του ανορθωτή.

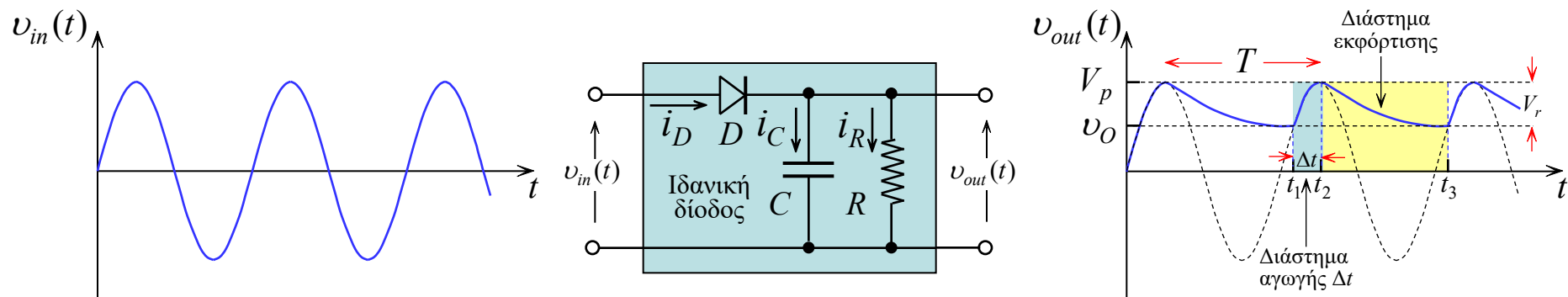


*Η λειτουργία του φίλτρου πυκνωτή. Κυματομορφές εισόδου και εξόδου υποθέτοντας ιδανική δίοδο.*

Η τάση κατά μήκος του πυκνωτή διατηρείται σταθερή δεδομένου ότι δεν υπάρχει τρόπος εκφόρτωσης του πυκνωτή. Το κύκλωμα παρέχει μία συνεχή τάση εξόδου ίση με το πλάτος του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου .

## Ανορθωτής με φίλτρο RC

Στην πράξη υπάρχει μία αντίσταση φορτίου  $R$  συνδεδεμένη παράλληλα με τον πυκνωτή.



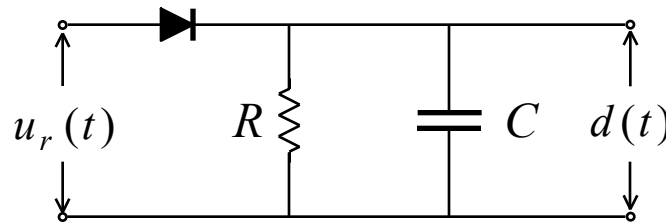
Η λειτουργία του φίλτρου RC με  $\tau = RC > T$ . Κυματομορφές εισόδου και εξόδου υποθέτοντας ιδανική δίοδο.

Η δίοδος άγει για ένα σύντομο διάστημα  $\Delta t = t_2 - t_1 \ll T$ , κοντά στην κορυφή της τάσης εισόδου και τροφοδοτεί τον πυκνωτή με φορτίο ίσο με το φορτίο που ο πυκνωτής έχασε κατά την διάρκεια του διαστήματος εκφόρτισης  $t_3 - t_2$  που είναι περίπου ίσο με την περίοδο της ημιτονοειδούς τάσης.

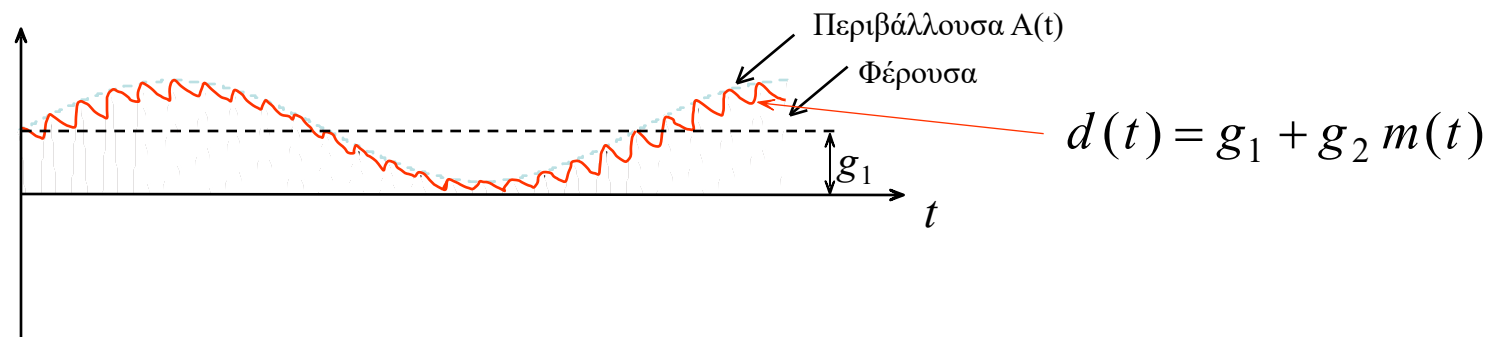
Κατά τη διάρκεια που η δίοδος είναι σε αποκοπή, ο πυκνωτής εκφορτίζεται διαμέσου της αντίστασης  $R$  και έτσι η τάση εξόδου φθίνει εκθετικά με τη σταθερά χρόνου  $\tau = RC$ . Το διάστημα της εκφόρτισης αρχίζει σχεδόν στην κορυφή της τάσης  $v_I$ . Στο τέλος του διαστήματος  $v_O = V_p - V_r$ , όπου  $V_r$  είναι η τιμή της κυμάτωσης από κορυφή σε κορυφή. Όταν  $RC \gg T$  η τιμή της  $V_r$  είναι μικρή.

## Αποδιαμόρφωση Συμβατικών AM Σημάτων.

Με τη βοήθεια του παρακάτω απλού κυκλώματος μπορούμε ανακτήσουμε από το συμβατό AM σήμα  $u_r(t)$  το σήμα  $m(t)$  μηνύματος βασικής ζώνης.

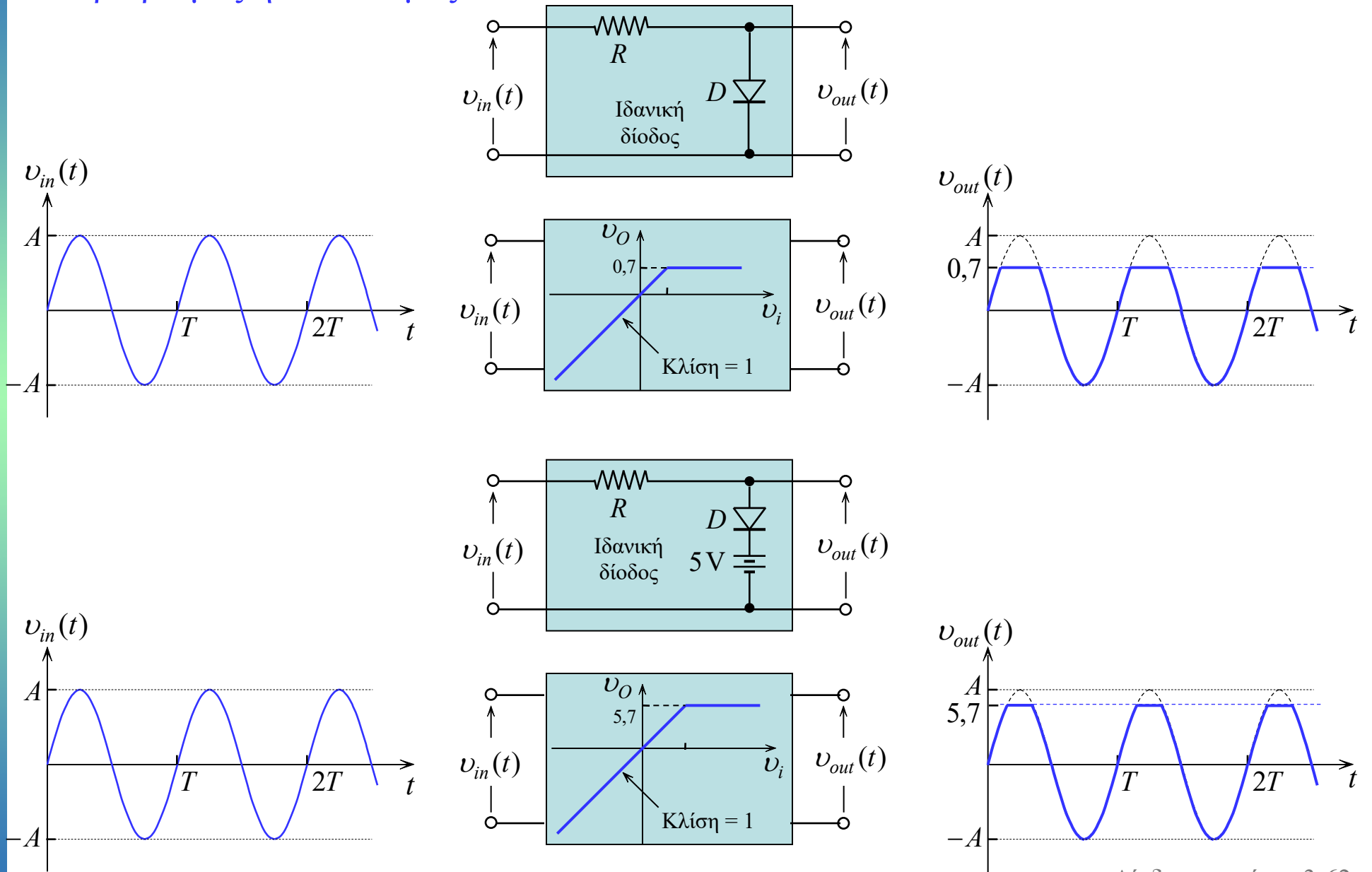


Φωρατής περιβάλλουσας



Κατά το διάστημα κατά το οποίο το σήμα εισόδου στον αποδιαμορφωτή περιβάλλουσας είναι θετικό η διόδος άγει και ο πυκνωτής φορτίζεται στην τιμή κορυφής του σήματος εισόδου. Όταν το σήμα εισόδου μειωθεί σε σχέση με την τιμή κορυφής τότε η διόδος παύει να άγει και ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης  $R$ . Η εκφόρτιση συνεχίζεται μέχρι το σήμα εισόδου να αποκτήσει τιμή μεγαλύτερη της στιγμιαίας τάσης του πυκνωτή, οπότε άγει ξανά η διόδος και ο πυκνωτής φορτίζεται στην επόμενη τιμή κορυφής. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται.

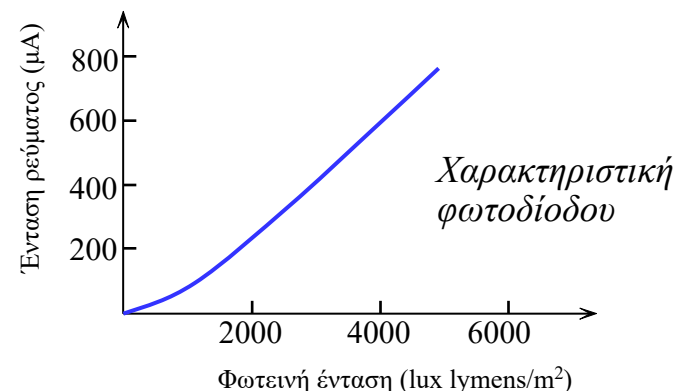
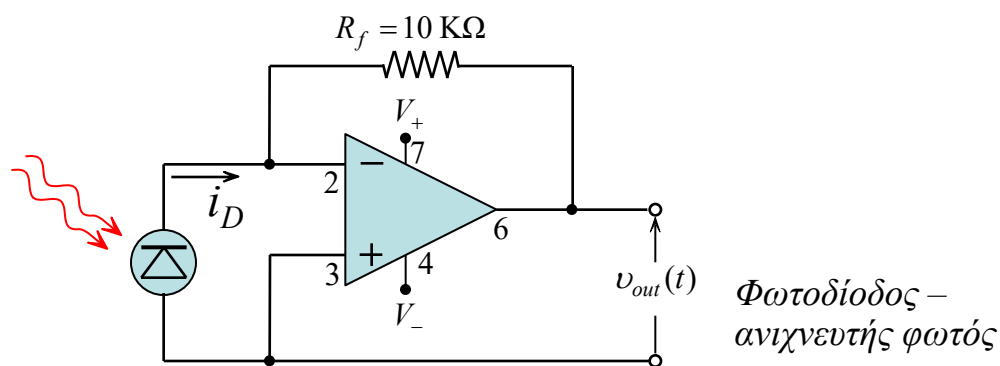
# Περιορισμός ή Ψαλιδισμός



## Φωτοдиодοι

Μία **φωτοδιόδος** (*Photodiode*) αποτελείται από μία επαφή pn η οποία λειτουργεί σε ανάστροφη πόλωση. Αν η περιοχή απογύμνωσης της επαφής pn φωτιστεί από φως υψηλής συχνότητας, τα φωτόνια δίδουν την ενέργεια στα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους που απαιτείται να περάσουν την απαγορευμένη ζώνη του ημιαγωγού και να δημιουργήσουν ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων.

Με άλλα λόγια οι φωτοδιόδοι μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα (φωτοφωρατές).



Όταν η φωτοδιόδος πολωθεί ανάστροφα τότε το ρεύμα που την διαρρέει είναι ανεξάρτητο από την εφαρμοζόμενη τάση και εξαρτάται αποκλειστικά από τον φωτισμό της φωτοδιόδου. Η γραμμική απόκριση στο φως έχει σημαντικότερες τεχνολογικές εφαρμογές καθώς μπορεί να μετατρέψει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο φωτεινό σήμα σε ηλεκτρικό ή να μετρήσει τα επίπεδα φωτισμού ή ακόμα να ανιχνεύει κίνηση σε συστήματα συναγερμού.

Τα ηλιακά κύτταρα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.

## Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED)

**Δίοδος εκπομπής φωτός**, (LED, *Light Emitting Diode*), είναι μία επαφή pn η οποία εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν είναι ορθά πολωμένη.



Όταν ηλεκτρόνια και οπές επανασυνδέονται, απελευθερώνουν ενέργεια. Αυτή η ενέργεια συχνά απελευθερώνεται ως θερμότητα στον κρύσταλλο, αλλά σε μερικά υλικά μετατρέπεται σε φως.

Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγώγιμου υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο.

Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται, δηλαδή, το χρώμα του, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της επαφής pn. Η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων,  $h\nu$ , ισούται κατά προσέγγιση με το ενεργειακό χάσμα  $E_g$ . Το πλαστικό περίβλημα βοηθάει στην κατευθυντικότητα της δέσμης.