

ΔΙΟΔΟΙ

Οι δίοδοι είναι οι απλούστερες αλλά και οι πιο βασικές διατάξεις ημιαγωγών. Μια Δίοδος αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p και έναν ημιαγωγό τύπου n σε επαφή. Η επαφή αυτή δεν είναι μηχανική. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα κομμάτι ημιαγωγού υλικού (συνήθως Si ή Ge), στο ένα τμήμα του οποίου έχουν προστεθεί προσμίξεις ενός τρισθενούς στοιχείου (p-τύπος) και στο υπόλοιπο προσμίξεις πεντασθενούς στοιχείου (n-τύπος).

Στην περιοχή της επαφής, ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου-n διαχέονται προς τον ημιαγωγό τύπου-p και εξουδετερώνονται από ισάριθμες οπές. Αντίστοιχα, οπές από τον ημιαγωγό τύπου-p διαχέονται προς τον ημιαγωγό τύπου-n και εξουδετερώνονται από ισάριθμα ηλεκτρόνια. Απομένουν έτσι στον ημιαγωγό τύπου-p και κοντά στην επαφή ακίνητα αρνητικά φορτισμένα ιόντα και αντίστοιχα στον ημιαγωγό τύπου-n ακίνητα θετικά φορτισμένα ιόντα. Όταν οι ημιαγωγοί τύπου-n και τύπου-p τοποθετηθούν μαζί το πλεόνασμα ηλεκτρονίων από τη n-περιοχή μετακινείται προς τη p-περιοχή για να γεμίσει τις οπές που έμειναν από το έλλειμμα των ηλεκτρονίων στο υλικό τύπου-p. Τα ηλεκτρόνια σταματούν να κινούνται προς την περιοχή τύπου-p όταν αρκετά από αυτά αρχίζουν να απωθούν ηλεκτρόνια που μετακινούνται προς αυτή τη περιοχή (τα ηλεκτρόνια, καθώς έχουν το ίδιο φορτίο απωθούνται μεταξύ τους). Αυτός ο σχηματισμός φορτίων δημιουργεί ένα δυναμικό που εμποδίζει τη ροή του ρεύματος μέσα στην επαφή. Έτσι ο n-τύπου ημιαγωγός αποκτά ένα μικρό θετικό φορτίο $+Q$ και ο p-τύπου ημιαγωγός ένα μικρό αρνητικό φορτίο $-Q$.

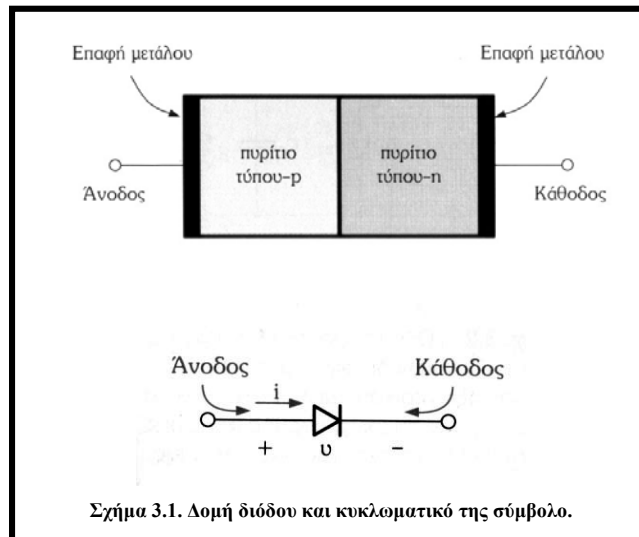
Η κατανομή αυτή των φορτίων στη διαχωριστική ζώνη μεταξύ των δύο ημιαγωγών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου έντασης \vec{E} και την εμφάνιση μιας διαφοράς δυναμικού, που ονομάζεται «φράγμα δυναμικού». Εξ αιτίας του φράγματος αυτού, εμποδίζεται η περαιτέρω διάχυση φορέων και αποκαθίσταται μια κατάσταση ηλεκτρικής ισορροπίας.

Είναι ευνόητο, ότι στην κατάσταση αυτή της ισορροπίας ελάχιστοι είναι οι κινητοί φορείς, που υπάρχουν στην περιοχή επαφής. Μπορούμε λοιπόν σε πρώτη προσέγγιση να δεχτούμε, ότι οι κινητοί φορείς απουσιάζουν τελείως και υπάρχουν μόνο ακίνητα θετικά (στον n-τύπο) και αρνητικά (στον p-τύπο) φορτία. Εξ αιτίας αυτού η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή εκκενώσεως ή απογυμνώσεως ή περιοχή φορτίου χώρου.

Προκύπτει λοιπόν σε μια επαφή p-n η παρακάτω κατάσταση για το κάθε είδος φορέων:

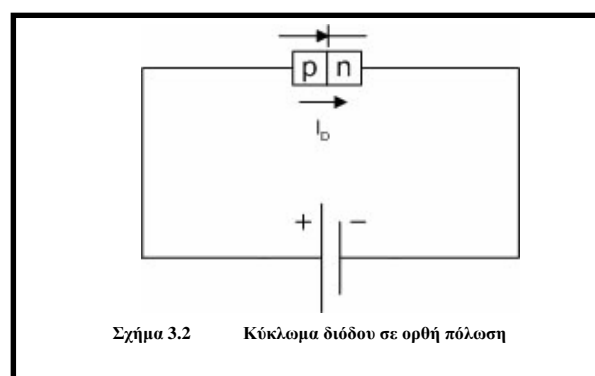
- Οι φορείς πλειονότητας του n-τύπου (ηλεκτρόνια), που απωθούνται από το αρνητικό φορτίο $-Q$ του p-τύπου.
- Οι φορείς πλειονότητας του p-τύπου (οπές), που απωθούνται από το θετικό φορτίο $+Q$ του n-τύπου.
- Οι φορείς μειονότητας του n-τύπου (οπές), που έλκονται από το φορτίο $-Q$ του p-τύπου.
- Οι φορείς μειονότητας του p-τύπου (ηλεκτρόνια), που έλκονται από το φορτίο $+Q$ του n-τύπου.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω η απουσία κινητών φορέων από την περιοχή απογύμνωσης αποτελεί μια ιδανική κατάσταση. Στην πραγματικότητα λόγω της θερμικής ενέργειας του κρυστάλλου υπάρχει μια σταθερή ροή διαμέσου της επαφής. Η ροή αυτή συνίσταται από φορείς μειονότητας, οι οποίοι έλκονται διαμέσου της επαφής και από ένα μικρό ρεύμα φορέων πλειονότητας, οι οποίοι στατιστικά έχουν αρκετή ενέργεια, ώστε να υπερνικήσουν το φράγμα δυναμικού. Αυτά τα ρεύματα είναι αντίθετα και το ολικό ρεύμα διαμέσου της επαφής είναι μηδέν. Το άκρο που συνδέεται με την περιοχή p της ένωσης p-n ονομάζεται άνοδος, ενώ το άκρο που συνδέεται με την περιοχή n ονομάζεται κάθοδος.



Στο σχήμα 3.1 εμφανίζεται μια διόδος και το κυκλωματικό σύμβολό της.

Όταν συνδέσουμε στα άκρα της διόδου μια πηγή με τάση ίση ή μεγαλύτερη από κάποια συγκεκριμένη τιμή (0.3 Volt για το γερμάνιο και 0.7 Volt για το πυρίτιο) και με την πολικότητα του σχήματος 3.2 (η πολικότητα αυτή ονομάζεται «ορθή πόλωση» (forward bias), τότε το φράγμα ξεπερνιέται και τα ηλεκτρόνια ρέουν από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p. Όταν η πολικότητα της πηγής αναστραφεί (η πολικότητα αυτή ονομάζεται «ανάστροφη πόλωση» (reverse bias) δεν έχουμε διέλευση ηλεκτρονίων. Η διόδος επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων μόνο κατά τη μία διεύθυνση.



Στην ορθή πόλωση, η διόδος διαρρέεται από το ορθό ρεύμα, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το κύκλωμα και τη μέγιστη επιτρεπτή ισχύ στη διόδου. Σε ανάστροφη πόλωση παρατηρείται ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα που οφείλεται κυρίως σε διαρροή. Αν η ανάστροφη τάση ξεπεράσει κάποια μεγάλη τιμή (για παράδειγμα, 80 Volt), τότε το ανάστροφο ρεύμα αυξάνεται απότομα και η διόδου καταστρέφεται. Σε επόμενες παραγράφους η λειτουργία αυτή περιγράφεται πιο αναλυτικά.

Ο έλεγχος καλής λειτουργίας της διόδου μπορεί να γίνει με ένα ωμόμετρο που υπάρχει σε ένα αναλογικό πολύμετρο. Μετράμε την αντίσταση της διόδου α) στην ορθή και β) στην ανάστροφη πόλωση. Στην περίπτωση (α) η αντίσταση που θα δείξει το ωμόμετρο θα είναι μικρή (της τάξης 10 Ω μέχρι 200 Ω). Στην περίπτωση (β) η αντίσταση που θα δείξει το ωμόμετρο θα είναι μεγάλη (της τάξης 100KΩ μέχρι MΩ).

Οι τεχνικές παρασκευής που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό p- και n- τύπου περιοχών περιλαμβάνουν ειδικές διαδικασίες και περιγραφή αυτών παρουσιάζεται στο σχετικό κεφάλαιο στο τέλος του βιβλίου.

Η Περιοχή Εκκένωσης ή Απογύμνωσης (depletion region).

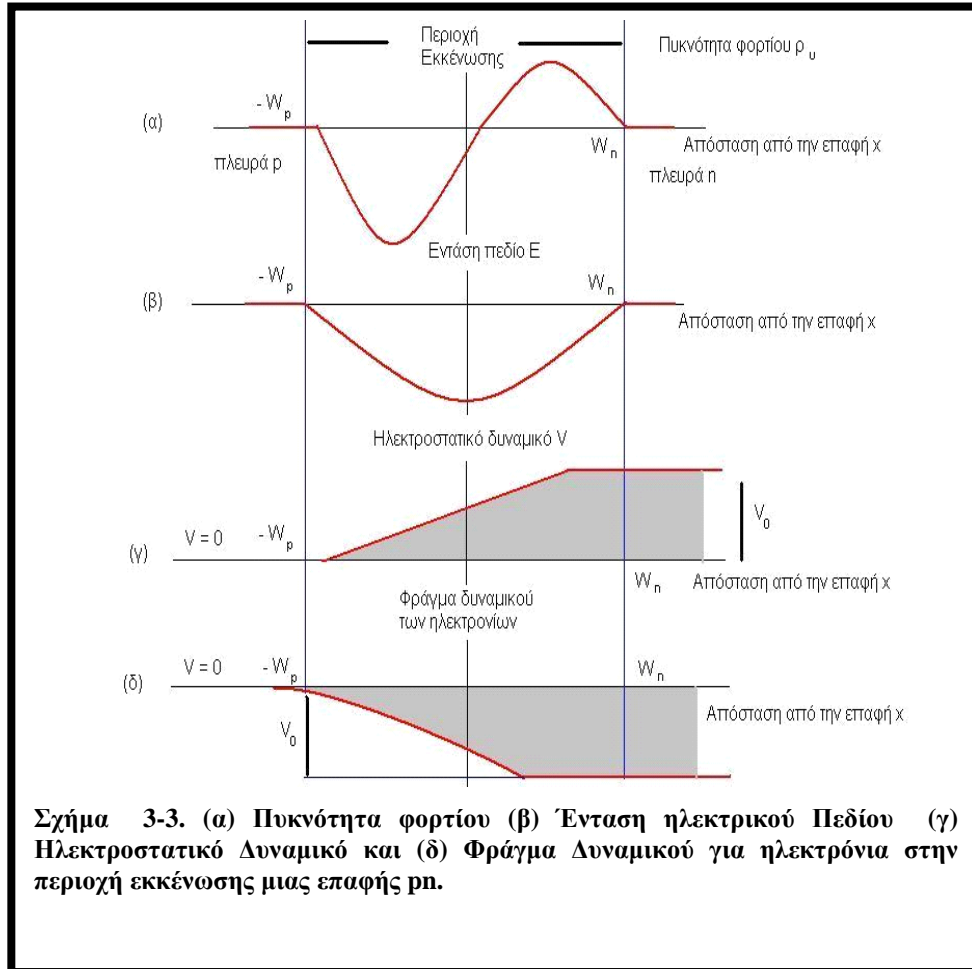
Στην αρχή, κατά μήκος της επαφής υπάρχει μια βαθμίδα συγκέντρωσης, που προκαλεί διάχυση οπών προς τα δεξιά και ηλεκτρονίων προς τα αριστερά. Βλέπουμε ότι οι οπές που εξουδετέρωσαν τα ιόντα δεκτών κοντά στην επαφή με το πυρίτιο τύπου p έχουν εξαφανιστεί σαν αποτέλεσμα της ένωσης τους με ηλεκτρόνια που έχουν διαχυθεί μέσα από την επαφή. Με όμοιο τρόπο, ηλεκτρόνια στο πυρίτιο τύπου n έχουν ενωθεί με οπές που έχουν περάσει από την επαφή από το υλικό p. Τα μη ουδέτερα ιόντα κοντά στην επαφή, που αναφέρονται σαν μη καλυμμένα φορτία, δίνουν μια πυκνότητα φορτίου ρ_v όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3α. Επειδή η περιοχή αυτή είναι κενή από κινητά φορτία ονομάζεται *περιοχή εκκένωσης*, *περιοχή φορτίου χώρου* ή *περιοχή απογύμνωσης*. Το πλάτος της περιοχής είναι της τάξης των μερικών δεκάτων του μικρομέτρου (περίπου το μήκος κύματος του ορατού φωτός). Φορείς υπάρχουν μόνο έξω από την περιοχή εκκένωσης. Προς τα αριστερά είναι κυρίως οπές ($p \equiv N_A$) και προς τα δεξιά ηλεκτρόνια ($n \equiv N_D$).

Είναι γνωστό από την βασική Φυσική ότι το ηλεκτρικό πεδίο και η διαφορά δυναμικού επαφής προκύπτουν από μη ομογενή συγκέντρωση φορτίου. Η κατανομή φορτίου, που είναι μηδέν στην επαφή, αποτελεί ένα ηλεκτρικό δίπολο, δηλαδή είναι θετικό στην μια πλευρά και αρνητικό στην άλλη. Η συγκεκριμένη μορφή της καμπύλης ρ_v και x εξαρτάται από τον τρόπο που κλιμακώνεται η επαφή. Οι μεταβολές έντασης ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού λαμβάνονται από την κατανομή φορτίου και την εξίσωση Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (3-1)$$

όπου ε είναι η επιδεκτικότητα (διηλεκτρική σταθερά) του μέσου. Συνήθως το ε εκφράζεται σαν $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ όπου ε_r είναι η σχετική επιδεκτικότητα και ε_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού. Επειδή το ηλεκτρικό πεδίο E είναι ίσο με $E = -(dV/dx)$, η ολοκλήρωση της 3-1 δίνει και την μορφή του πεδίου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3β, το E είναι αρνητικό επειδή το πεδίο κατευθύνεται από τα δεξιά (συν) προς τα αριστερά (μείον).

Ας σημειωθεί ότι το $E(-W_p)=E(W_n)=0$ δηλαδή θεωρείται ότι δεν υπάρχει πεδίο έξω από την περιοχή εκκένωσης. Στο Σχήμα 3-3γ φαίνεται η μεταβολή ηλεκτροστατικού δυναμικού στην περιοχή εκκένωσης, που είναι το αρνητικό ολοκλήρωμα του $E(x)$ του Σχήμα 3-3β. Η μεταβολή αποτελεί ένα φράγμα δυναμικής ενέργειας ενάντια στην παραπέρα διάχυση οπών από το φράγμα. Στο Σχήμα 3-3δ φαίνεται η μορφή του φράγματος δυναμικής ενέργειας ενάντια στην ροή ηλεκτρονίων από την πλευρά n μέσα στην επαφή. Είναι όμοια με την μορφή του Σχήματος 3-3γ, εκτός ότι είναι αντεστραμμένη, αφού το φορτίο ηλεκτρονίου είναι αρνητικό.



Σχήμα 3-3. (α) Πυκνότητα φορτίου (β) Ένταση ηλεκτρικού Πεδίου (γ) Ηλεκτροστατικό Δυναμικό και (δ) Φράγμα Δυναμικού για ηλεκτρόνια στην περιοχή εκκένωσης μιας επαφής pn.

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος το συνολικό ρεύμα οπών πρέπει να είναι μηδέν. Αν αυτό δεν ίσχυε, η πυκνότητα οπών στο ένα άκρο του ημιαγωγού θα αυξανόταν συνεχώς με τον χρόνο, πράγμα που φαίνεται εύκολα ότι δεν είναι δυνατό. Αφού η συγκέντρωση οπών στην πλευρά p είναι πολύ μεγαλύτερη από την συγκέντρωση στην πλευρά n, ένα πολύ μεγάλο ρεύμα διάχυσης οπών τείνει να περάσει την επαφή από το υλικό p στο υλικό n. Άρα πρέπει να εμφανιστεί στην επαφή ένα ηλεκτρικό πεδίο που θα έχει τέτοια κατεύθυνση ώστε ένα ρεύμα μετατόπισης οπών να τείνει να περάσει την επαφή από την πλευρά n προς την πλευρά p για να αντισταθμίσει το ρεύμα διάχυσης. Αυτή η συνθήκη ισορροπίας μηδενικού συνολικού ρεύματος οπών μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το ύψος του φράγματος δυναμικού V_0 σαν συνάρτηση των συγκεντρώσεων δοτών και δεκτών.

Επίσης πρέπει να είναι μηδέν και το συνολικό ρεύμα ηλεκτρονίων, άρα η διάχυση ηλεκτρονίων από τον τύπο n στον τύπο p πρέπει να αντισταθμίζεται με μετατόπιση ηλεκτρονίων από τον τύπο p στον τύπο n .

Η ΠΟΛΩΜΕΝΗ ΕΠΑΦΗ pn

Η βασική ηλεκτρική ιδιότητα μιας επαφής pn είναι ότι η ροή φορέων επιτρέπεται προς την μια κατεύθυνση και ουσιαστικά εξαφανίζεται προς την άλλη. Ας δούμε τώρα τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται αυτή η *μονομερής ή ανορθωτική*, δράση εξετάζοντας την συμπεριφορά της επαφής όταν εφαρμοστεί εξωτερική τάση.

Επαφή pn πολωμένη κατά την ορθή φορά

Στο Σχήμα 3-4a η τάση V_D εφαρμόζεται στην επαφή με τον θετικό πόλο της πηγής συνδεδεμένο στην πλευρά p και τον αρνητικό πόλο στην πλευρά n . Σύμφωνα με το Σχήμα 3-3, θεωρούμε ότι έξω από την περιοχή εκκένωσης ή κατά μήκος των μεταλλικών επαφών δεν εμφανίζεται πτώση τάσης στο σώμα του ημιαγωγού. Έτσι, η τάση που εφαρμόζεται ελαττώνει το φράγμα δυναμικού κατά qV_D , καταστρέφοντας την ισορροπία που υπήρχε μεταξύ διάχυσης και μετατόπισης φορέων στην επαφή. Το αποτέλεσμα της ελάττωσης του δυναμικού επαφής είναι να επιτρέψει οπές να διαχυθούν από την πλευρά p της επαφής στην πλευρά n . Παρόμοια, τώρα μπορούν να διαχυθούν ηλεκτρόνια από την πλευρά n στην πλευρά p . Οπές που κινούνται προς τα δεξιά και ηλεκτρόνια προς τα αριστερά αποτελούν ρεύμα προς την ίδια κατεύθυνση. Έτσι το συνολικό ρεύμα που διέρχεται από την επαφή είναι το άθροισμα των ρευμάτων οπών και ηλεκτρονίων. Μόλις περάσουν την επαφή, τα ηλεκτρόνια (αντίστοιχα οι οπές) γίνονται φορείς μειονότητας στην περιοχή p (n) και αποτελούν ρεύμα μειονότητας. Αυτό το ρεύμα διάχυσης μπορεί να είναι μεγάλο όσο είναι μεγάλος ο αριθμός διαθέσιμων φορέων. Η τάση που εφαρμόζεται με πολικότητα που φαίνεται στο Σχήμα 3-4a και παράγει το ρεύμα αυτό ονομάζεται ορθή πόλωση και λέμε ότι η επαφή είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά.

Επαφή pn πολωμένη κατά την ανάστροφη φορά

Η πολικότητα της τάσης που εφαρμόζεται στο Σχήμα 3-4b (αντίθετη από αυτή του σχήματος 3-4a) πολώνει την επαφή κατά την ανάστροφη φορά. Το αποτέλεσμα της τάσης αυτής είναι να αυξήσει το φράγμα δυναμικού κατά qV_D με αποτέλεσμα να ελαττώνει την ροή των φορέων πλειονότητας (οπών στον τύπο p και ηλεκτρονίων στον τύπο n). Όμως, οι φορείς μειονότητας (ηλεκτρόνια στον τύπο p και οπές στον τύπο n), επειδή «κατηφορίζουν» από τον λόφο δυναμικού, δεν επηρεάζονται από την αύξηση του φράγματος δυναμικού. Όπως και να είναι όμως, οι αρχικές συνθήκες ισορροπίας διαταράσσονται και υπάρχει ένα μικρό ρεύμα στην επαφή από το n προς το p (αντίθετα από την ορθή πόλωση). Το ρεύμα αυτό, που παριστάνεται με I_s και ονομάζεται ρεύμα ανάστροφου κορεσμού ή ρεύμα κλίμακας, είναι πολύ μικρό γιατί υπάρχουν λίγοι φορείς μειονότητας. Από τα παραπάνω αναμένεται ότι το I_s θα πρέπει να είναι ανεξάρτητο του μεγέθους της ανάστροφης πόλωσης.

Ο μηχανισμός αγωγιμότητας κατά την ανάστροφη πόλωση μπορεί να περιγράψει και με άλλο τρόπο ως εξής : η πολικότητα V_D είναι τέτοια που αναγκάζει και τις οπές στον τύπο p και τα ηλεκτρόνια στον τύπο n να απομακρυνθούν από την επαφή. Έτσι, η περιοχή πυκνότητας αρνητικού φορτίου επεκτείνεται περισσότερο προς τα αριστερά της επαφής και η περιοχή πυκνότητας θετικού φορτίου απλώνει προς τα δεξιά. Η διεργασία αυτή δεν μπορεί να συνεχιστεί επ'άοριστο γιατί σταθερή ροή οπών προς τα αριστερά απαιτεί παροχή οπών μέσα από την επαφή από το πυρίτιο τύπου n . Επειδή υπάρχουν λίγοι τέτοιοι φορείς, το ρεύμα που προκύπτει είναι ουσιαστικά μηδέν. Το μικρό ρεύμα κορεσμού που

υπάρχει προέρχεται από ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που παράγονται θερμικά. Οπές που παράγονται με τον τρόπο αυτό στο πυρίτιο τύπου n «περιπλανώνται» προς την επαφή και «έλκονται» μέσα απ' αυτήν από το ηλεκτρικό πεδίο. Για τα ηλεκτρόνια, επίσης, που παράγονται θερμικά στο υλικό τύπου p ισχύει ανάλογη διατύπωση.

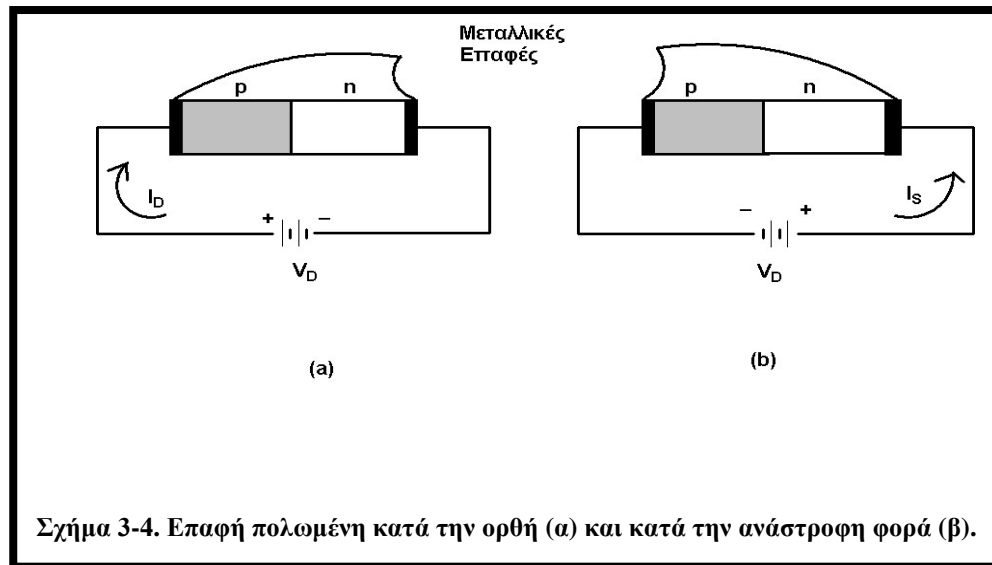
Ωμικές επαφές

Στην εξέταση της ορθής και της ανάστροφης πόλωσης, θεωρήσαμε ότι η εξωτερική τάση πόλωσης V_D εμφανίστηκε ακριβώς κατά μήκος της επαφής. Με τον τρόπο αυτό η V_D μεγάλωνε ή μίκρυνε το ηλεκτροστατικό δυναμικό κατά μήκος της επαφής. Για να δικαιολογηθεί η υπόθεση αυτή, πρέπει να προσδιορίσουμε τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η ηλεκτρική επαφή στον ημιαγωγό από το εξωτερικό κύκλωμα πόλωσης. Στο Σχήμα 3-4 αναφέρονται μεταλλικές επαφές με τις οποίες είναι εφοδιασμένα τα ομογενή υλικά τύπου p και τύπου n. Με τον τρόπο αυτό έχουν εισαχθεί δύο επαφές μετάλλου – ημιαγωγού, μια σε κάθε άκρη της διόδου και αναμένεται ένα δυναμικό επαφής στα άκρα αυτών των επιπλέον επαφών. Θα θεωρήσουμε, όμως ότι οι επαφές μετάλλου – ημιαγωγού στο Σχήμα 3-4 έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε να μην ανορθώνουν. Με άλλα λόγια, το δυναμικό επαφής κατά μήκος των επαφών αυτών είναι σταθερό, ανεξάρτητο από την κατεύθυνση και το μέγεθος του ρεύματος. Επαφή αυτού του τύπου αναφέρεται σαν ωμική επαφή. Εφόσον η τάση κατά μήκος των ωμικών επαφών μετάλλου – ημιαγωγού παραμένει σταθερή και η πτώση τάσης μέσα στο σώμα του κρυστάλλου είναι αμελητέα, σχεδόν όλη η τάση που εφαρμόζεται θα εμφανιστεί στην πραγματικότητα σαν μεταβολή του ύψους φράγματος δυναμικού στην επαφή pn.

Η Επαφή pn κλειστού και ανοιχτού κυκλώματος.

Αν η τάση V_D στο Σχήμα 3-4 γίνει μηδέν, η επαφή pn θα βραχυκυκλωθεί. Τότε δεν υπάρχει ρεύμα ($I=0$) και το ηλεκτροστατικό δυναμικό V_0 παραμένει αμετάβλητο και ίσο με την τιμή που έχει σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος. Αν υπήρχε ρεύμα ($I \neq 0$) το μέταλλο θα θερμαινόταν. Αφού δεν υπάρχει εξωτερική πηγή ενέργειας, η ενέργεια που χρειάζεται για την θέρμανση του μεταλλικού σύρματος πρέπει να προέλθει από το κομμάτι του ημιαγωγού στο οποίο αναπτύσσεται η επαφή pn. Άρα, το σώμα του ημιαγωγού θα πρέπει να κρυώσει. Σίγουρα σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, είναι αδύνατη η ταυτόχρονη θέρμανση μετάλλου και η ψύξη της ράβδου και καταλήγουμε ότι $I=0$. Επειδή το άθροισμα των τάσεων στον κλειστό βρόγχο πρέπει να είναι μηδέν, το δυναμικό επαφής V_0 πρέπει να αντισταθμίζεται ακριβώς από τα δυναμικά επαφής μετάλλου – ημιαγωγού στις ωμικές επαφές.

Έστω η περίπτωση που η V_D στο Σχήμα 3-4a αυξάνεται μέχρι να γίνει V_0 . Όταν το V_D εξισωθεί με το V_0 , το φράγμα εξαφανίζεται και το ρεύμα τείνει σε πολύ μεγάλες τιμές. Στην πράξη, το φράγμα ποτέ δεν μπορεί να γίνει μηδέν γιατί το ρεύμα περιορίζεται από την αντίσταση του σώματος του κρυστάλλου καθώς και από την αντίσταση των ωμικών επαφών. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορούμε πια να θεωρούμε ότι όλη η V_D εμφανίζεται κατά μήκος της επαφής. Συμπεραίνουμε ότι, όσο το V_D πλησιάζει προς το V_0 , το ρεύμα σε μια πραγματική επαφή pn εξαρτάται από την ωμική επαφή και από την αντίσταση του σώματος του κρυστάλλου.



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΕΝΤΑΣΗΣ

Στην προηγούμενη παράγραφο αναπτύχθηκε η βασική λειτουργία της επαφής pn. Σειρά έχει η ποσοτική περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης – έντασης που συνδέει την τάση που εφαρμόζεται στην επαφή με το ρεύμα που παράγει. Η επαφή pn και οι ωμικές της επαφές, δηλαδή οι ακροδέκτες της, σχηματίζουν μια συσκευή δύο στοιχείων που ονομάζεται *δίοδος επαφής*. Η θεωρητική ανάλυση της επαφής pn δίνει την σχέση (3-3):

$$I_D = I_s (e^{(V_D / n V_T)} - 1) \quad (3-2)$$

Η έννοια του θετικού I_D είναι από τον τύπο p προς τον τύπο n (μέσα στο ημιαγωγό) και η V_D είναι θετική για επαφή πολωμένη κατά την ορθή φορά. Ένας από τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η παράμετρος η στην (3-2) είναι το είδος του ημιαγωγού που χρησιμοποιείται. Για το πυρίτιο το η είναι περίπου 2 σε κανονικά ρεύματα. Το ισοδύναμο τάσης της θερμοκρασίας V_T σε θερμοκρασία δωματίου ($T = 293$ K), είναι $V_T = 25$ mV.

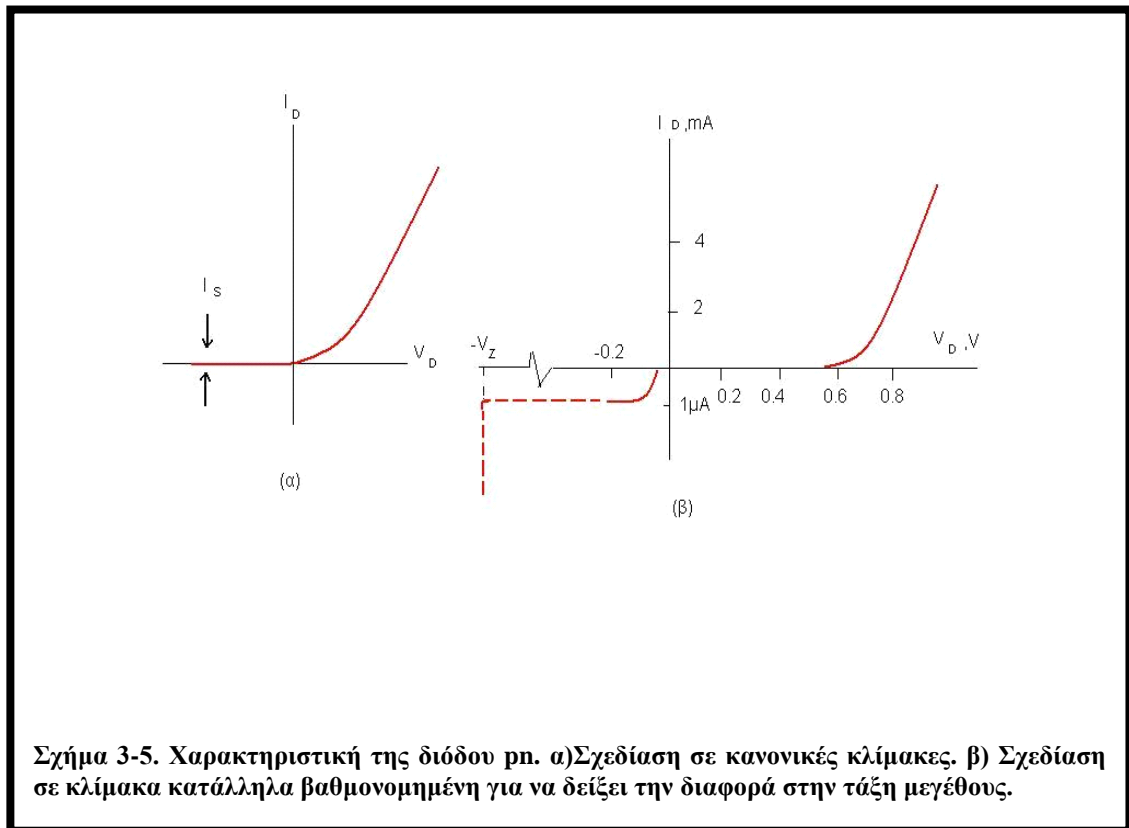
Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού I_s εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις οπών και ηλεκτρονίων και από την επιφάνεια της επαφής. Έτσι το I_s είναι «παράγοντας κλίμακας» για τα ρεύματα επαφής. Για συγκεκριμένες πυκνότητες φορέων, αύξηση της επιφάνειας έχει αποτέλεσμα την αύξηση της ικανότητας ρεύματος της επαφής.

Η εξέταση της (3-2) δείχνει ότι για ορθή πόλωση και για V_D αρκετές φορές την V_T κάνει την παράσταση $e^{V_D / n V_T} \gg 1$, το I_D μεταβάλλεται εκθετικά με την εφαρμοσμένη τάση. Για την περίπτωση αυτή, η (3-2) προσεγγίζεται από την:

$$I_D = I_s e^{V_D / n V_T}$$

Το αποτέλεσμα αναμένεται γιατί η ελάττωση του φράγματος δυναμικού επιτρέπει την ευκολότερη διάχυση των φορέων κατά μήκος της επαφής. Με τον ίδιο τρόπο, το I_D είναι αρνητικό με την τιμή I_s , για ανάστροφη πόλωση όταν η V_D έχει τιμή αρκετές φορές την V_T και το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ρεύμα από το n προς το p.

Συχνά, επειδή τα ορθά και τα ανάστροφα ρεύματα διαφέρουν κατά αρκετές τάξεις μεγέθους, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές κλίμακες για την παράσταση της χαρακτηριστικής της επαφής, όπως στο Σχήμα 3-5b. Το διακεκομμένο τμήμα της χαρακτηριστικής ανάστροφης πόλωσης (όχι η ασυνεχής κλίμακα) δείχνει ότι σε τάση $-V_Z$ η επαφή εμφανίζει απότομη απομάκρυνση από την (3-3). Στην τάση αυτή μπορεί να εμφανιστεί ένα πολύ μεγάλο ανάστροφο ρεύμα και η επαφή βρίσκεται στην περιοχή κατάρρευσης.



ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Για να περιγράψουμε την λειτουργία μιας απλής διόδου, μας ενδιαφέρουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά της: 1) Ποιες είναι οι κατανομές φορέων για ηλεκτρόνια και για οπές στο υλικό και 2) Ποιες φυσικές διαδικασίες είναι υπεύθυνες για την ροή του ρεύματος στην δομή αυτή όταν εφαρμόζεται πόλωση.

Ας συζητήσουμε πρώτα τις ιδιότητες της διόδου στην απουσία εξωτερικής πόλωσης όπου προφανώς δεν διαρρέει κανένα ρεύμα την διόδο. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια και οι οπές δεν δέχονται δυνάμεις οι οποίες προκαλούν την μετακίνησή τους. Στη πραγματικότητα υπάρχει μεγάλη δραστηριότητα, παρόλο που δεν υπάρχει ρεύμα. Στην αρχή μπορούμε να θεωρήσουμε τον p- τύπο και τον n- τύπο ημιαγωγών χωρίς να είναι σε επαφή μεταξύ τους. Τι συμβαίνει όταν ο p- και n- τύπος πλησιάσουν και δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο; Καταρχήν, αν δεν είναι σε επαφή ακόμη, τρεις περιοχές μπορούν να διακριθούν:

1) Η p-τύπου περιοχή στο αριστερό άκρο της διόδου όπου το υλικό είναι ουδέτερο και η πυκνότητα των αποδεκτών είναι ίση με αυτή των οπών.

II) Η n-τύπου περιοχή στο αριστερό άκρο της διόδου όπου και πάλι το υλικό είναι ουδέτερο και η πυκνότητα των ακίνητων δοτών είναι ίση με αυτή των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

III) Οι μεταλλικές επαφές που σχηματίζουν τα ηλεκτρόδια, που ονομάζονται Άνοδος (επαφή στον p-τύπο) και Κάθοδος (επαφή στον n-τύπο).

Όταν έρθουν σε επαφή τα δύο μέρη, τότε λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων στην περιοχή της επαφής, συμβαίνουν μετακινήσεις φορέων από το ένα τμήμα στο άλλο.

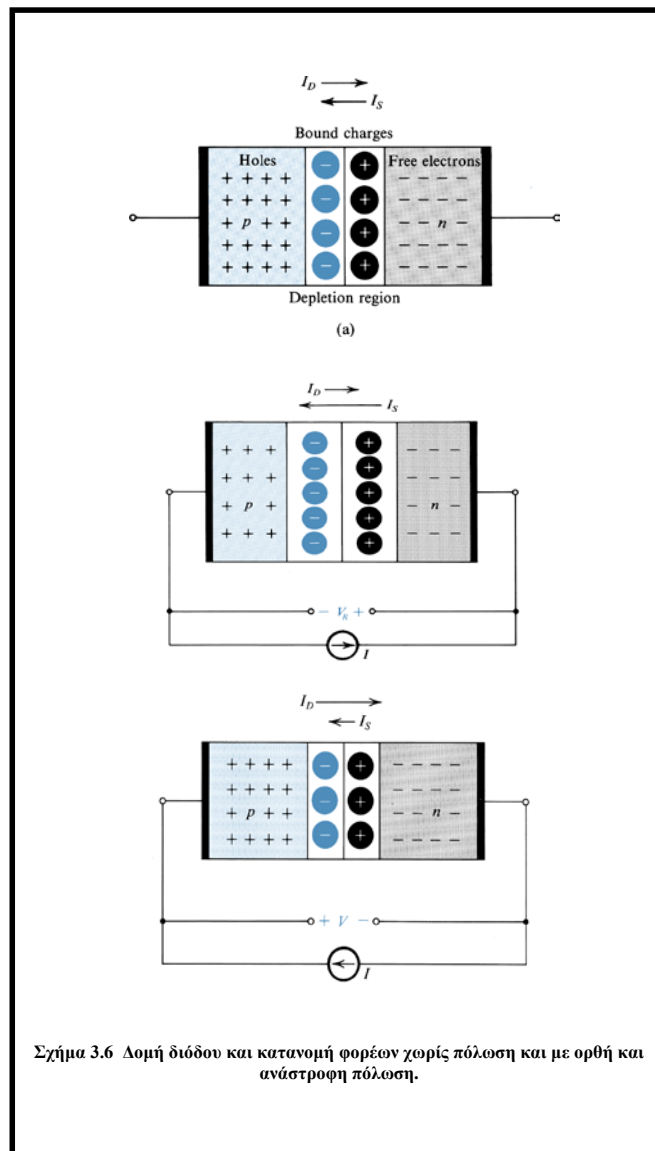
Στην ζώνη απογύμνωσης επικρατεί ένα πεδίο το οποίο έχει απομακρύνει όλους τους ευκίνητους φορείς αφήνοντας αρνητικά φορτισμένους αποδέκτες στην p- περιοχή και θετικά φορτισμένους δότες στη n- περιοχή.

Στην περιοχή απογύμνωσης, η οποία εκτείνεται σε μια απόσταση W_p στην p- περιοχή και W_n στην n περιοχή, υπάρχει ένα ηλεκτρικό πεδίο. Οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο ή οπή βρίσκεται στην περιοχή απογύμνωσης διώχνεται από το πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει ένα φέρον ρεύμα το οποίο όμως αντισταθμίζεται από ένα ρεύμα διάχυσης το οποίο δημιουργείται από την διαφορά στις πυκνότητες οπών και ηλεκτρονίων στο σώμα της διόδου. Για να περιγράψουμε τις ιδιότητες της διόδου πρέπει να ξέρουμε το πλάτος της ζώνης απογύμνωσης, την κατανομή του φορτίου των ηλεκτρονίων και των οπών, και το ηλεκτρικό πεδίο. Ενώ αρχικά το πρόβλημα αυτό φαίνεται απλό, αναλυτικά αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν μόνο αν κάνουμε ορισμένες απλουστευτικές υποθέσεις. Αυτές οι υποθέσεις είναι αρκετά λογικές και έχουν ελεγχθεί από λεπτομερείς αριθμητικούς υπολογισμούς:

I) Η φυσική διόδος είναι ασυνεχής και κάθε κομμάτι της είναι ομοιόμορφα ντοπαρισμένο

II) Ενώ η πυκνότητα των ευκίνητων φορτίων στη περιοχή απογύμνωσης δεν είναι μηδέν (αλλιώς δεν θα ήταν δυνατή η ύπαρξη ρεύματος), είναι όμως πολύ μικρότερη από αυτή των σταθερών φορτίων του υποστρώματος (π.χ. πυριτίου). Άρα μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι κατά προσέγγιση ίση με μηδέν. Βέβαια, αυτή η προσέγγιση, που καλείται προσέγγιση απογύμνωσης, δεν χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ροής του ρεύματος.

III) Θα υποθέσουμε επίσης ότι η μετάβαση από το σώμα της ουδέτερης περιοχής n- ή p- τύπου στην ζώνη απογύμνωσης είναι ασυνεχής. Ενώ στη πραγματικότητα η μετάβαση είναι βαθμιαία, οι λεπτομερείς υπολογισμοί δείχνουν ότι δεν είναι και πολύ κακή προσέγγιση.



Σχήμα 3.6 Δομή διόδου και κατανομή φορέων χωρίς πόλωση και με ορθή και ανάστροφη πόλωση.

Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση όπου ένα εξωτερικό δυναμικό ασκείται στην διόδο επί των περιοχών p και n. Με παρουσία εξωτερικής πόλωσης, η ισορροπία ανάμεσα στα δύο ρεύματα, το φέρων και της διάχυσης, δεν υφίσταται πια και υπάρχει μια καθαρή ροή ρεύματος. Γενικότερα, χρειάζεται αριθμητική μέθοδος για να κατανοήσει κανείς την συμπεριφορά της διόδου κάτω από πόλωση. Για να μελετήσουμε λοιπόν το πρόβλημα αυτό θα κάνουμε μερικές προσεγγίσεις :

I) Η δομή της διόδου μπορεί να περιγραφεί από «ψευδό-ουδέτερες» n και p περιοχές και μια περιοχή απογύμνωσης. Παρόλο ότι, όπως θα δειχθεί και αργότερα, σε ορθή πόλωση, φορτίο μειονότητας εισέρχεται στην ψευδό-ουδέτερες περιοχές, θα υποθέσουμε ότι η πυκνότητα του εισερχόμενου φορτίου είναι πολύ μικρότερη από αυτή της πλειονότητας.

II) Θα υποθέσουμε ότι στην περιοχή απογύμνωσης, οι κατανομές των οπών και των ηλεκτρονίων περιγράφονται από μια κατανομή Boltzmann και η αρχή των ψεύδο-Fermi σταθμών είναι δυνατή και για τα ηλεκτρόνια και για τις οπές. Αυτή η προσέγγιση είναι δυνατή αν τα ρεύματα είναι μικρά.

III) Σε όλη την περιοχή απογύμνωσης η πυκνότητα των ευκίνητων φορέων είναι μικρή και, γι' αυτό, το εξωτερικό δυναμικό πέφτει κυρίως σε αυτή την περιοχή. Αυτή είναι μια γενική υπόθεση και εξαρτάται από το γεγονός ότι εφόσον η ροή ρεύματος είναι συνεχής, οπουδήποτε η πυκνότητα των ευκίνητων φορέων είναι χαμηλή και άρα εκεί πρέπει να υπάρχει υψηλό ηλεκτρικό πεδίο.

Στους υπολογισμούς για το ρεύμα της διόδου, το ρεύμα διάχυσης των επιπλέον φορέων μειονότητας υπολογίζεται να έχει την μεγαλύτερη τιμή του στις άκρες της περιοχής απογύμνωσης. Όμως, το ρεύμα διάχυσης αυξάνεται ραγδαία στην περιοχή πλειονότητας λόγω επανασύνδεσης. Καθώς οι οπές επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια στη n περιοχή, ένας ίσος αριθμός ηλεκτρονίων εισέρχεται στην περιοχή. Αυτά τα ηλεκτρόνια δίνουν ένα ρεύμα διάχυσης στην n πλευρά για να ισορροπήσει ακριβώς το ρεύμα των οπών που χάνονται μέσω της επανασύνδεσης. Το τμήμα διάχυσης των φορέων μειονότητας είναι αμελητέο λόγω της σχετικά χαμηλής πυκνότητας φορέων και του πολύ μικρού ηλεκτρικού πεδίου στην ουδέτερη περιοχή. Ας μελετήσουμε το ρεύμα διάχυσης λόγω των οπών στην περιοχή n . Το ρεύμα αυτό δίνεται από σχέσεις που αποδεικνύονται στην Στατιστική Φυσική και δεν χρειάζεται να αποδειχτούν εδώ και το αποτέλεσμα για το συνολικό ρεύμα είναι :

$$I \cong I_o \left[e^{\left(\frac{eV}{nK_B T} \right)} - 1 \right]$$

Ο συντελεστής I_{GR} μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερος από το I_0 για πραγματικές συσκευές. Έτσι σε χαμηλές εφαρμοζόμενες τάσεις στο ρεύμα της διόδου κυριαρχεί ο δεύτερος όρος. Παρόλα αυτά, καθώς αυξάνεται η εφαρμοζόμενη τάση, το ρεύμα έκχυσης αρχίζει να κυριαρχεί, έχουμε συνεπώς δύο περιοχές στην χαρακτηριστική ορθής πόλωσης της διόδου όπως φαίνεται στο σχήμα 3. 10.

Σε χαμηλή εφαρμοζόμενη τάση οι γραφικές του $(eV/K_B T)$ και $\log(I)$ έχουν κλίση $\frac{1}{2}$ η οποία γίνεται 1 και 0 σε υψηλότερες τάσεις. Η παράμετρος n καλείται συντελεστής ιδανικότητας της διόδου. Αν η διόδος είναι υψηλής ποιότητας, το n είναι κοντά στο 1, αλλιώς πλησιάζει την τιμή του 2.

Βλέπουμε ότι η ροή του ρεύματος μέσα από την p - n διόδο έχει πολύ ενδιαφέροντες ιδιότητες. Δεν έχουμε μια απλή ωμική συμπεριφορά, αλλά μια ισχυρή μη γραμμική συμπεριφορά. Το ρεύμα φτάνει σε κόρο στην τιμή I_0 όταν μια ανάστροφη πόλωση εφαρμοστεί. Εφόσον η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή, η διόδος είναι απαραίτητα μη αγωγίμη. Από την άλλη πλευρά, όταν μια θετική πόλωση εφαρμόζεται, το ρεύμα της διόδου αυξάνει εκθετικά και η διόδος γίνεται ισχυρά αγωγίμη.

Η τιμή της ορθής πόλωσης για την οποία το ρεύμα της διόδου γίνεται σημαντικό ($\sim mA$) ονομάζεται τάση αγωγής, ή τάση αποκοπής, ή τάση έναυσης (cut-in τάση) ή κατώφλι δυναμικού και συμβολίζεται με V_γ . Η τιμή της είναι χαρακτηριστική του υλικού κατασκευής της διόδου και για διόδους πυριτίου είναι ίσο περίπου με 0.7 V (για την ακρίβεια 0.65V). Για διόδους γερμανίου είναι 0.2V. Για άλλους ημιαγωγούς (π.χ. III-V), ποικίλει ανάλογα με το υλικό.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΟΔΩΝ ΓΙΑ ΙΣΧΥΡΑ ΣΗΜΑΤΑ

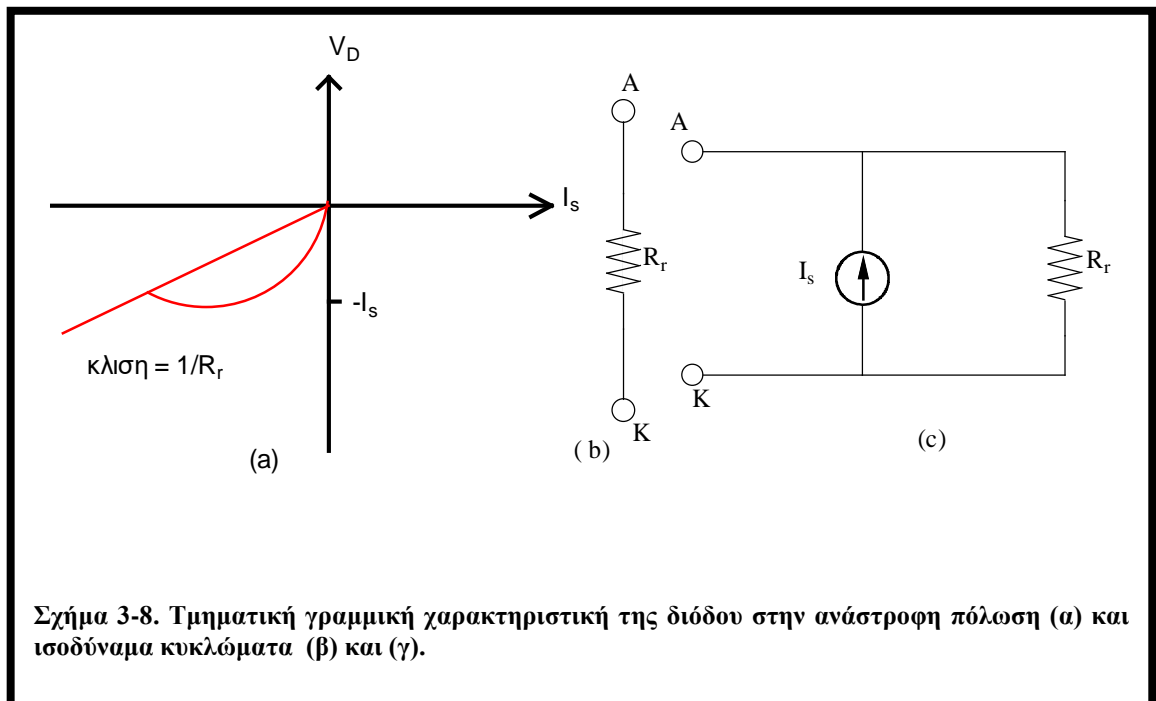
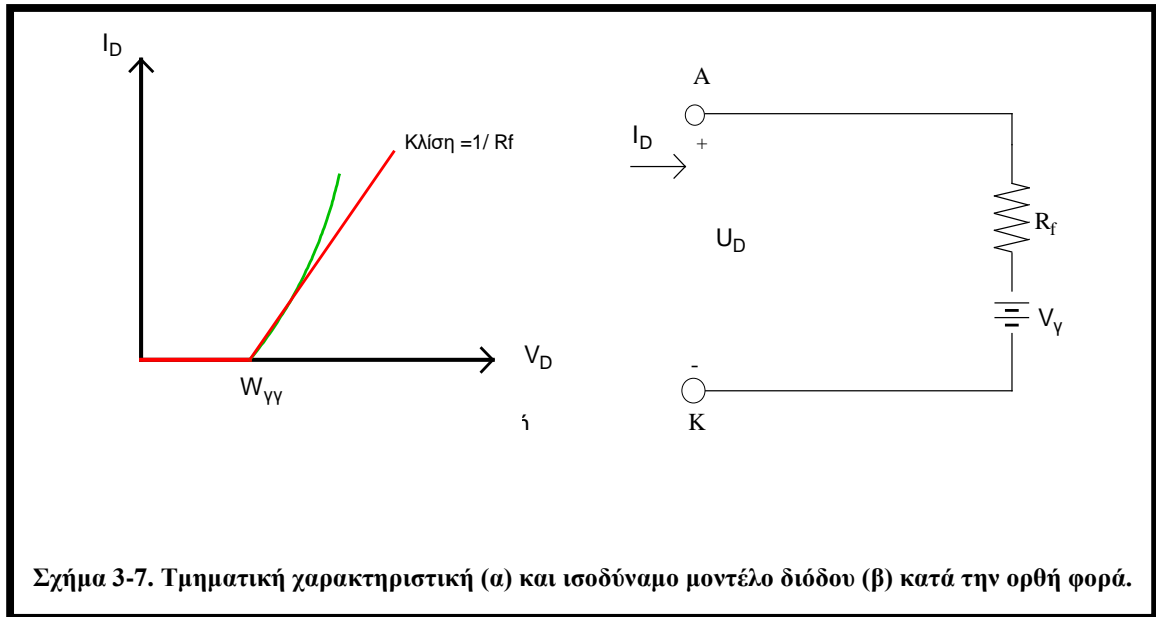
Η παράσταση της διόδου από ένα συνδυασμό ιδανικών γραμμικών στοιχείων κυκλώματος που ονομάζονται ισοδύναμο κύκλωμα ή μοντέλο κυκλώματος είναι πολύ εξυπηρετική. Καθώς χρησιμοποιείται η δίοδος με άλλα στοιχεία κυκλωμάτων ή συσκευές, το μοντέλο μας επιτρέπει να εκτιμούμε τα ρεύματα και τις τάσεις στο κύκλωμα χρησιμοποιώντας τυπικές μεθόδους ανάλυσης κυκλωμάτων.

Η ιδανική δίοδος είναι δυαδική συσκευή από την άποψη ότι υπάρχει μόνο σε μια από δύο δυνατές καταστάσεις, δηλαδή η δίοδος βρίσκεται σε δεδομένη χρονική στιγμή είτε σε κατάσταση ON είτε σε κατάσταση OFF. Έστω μια πραγματική δίοδος όπως αυτή που αναλύσαμε προηγουμένως. Αν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου ξεπεράσει την τάση V_{γ} , με την άνοδο A (πλευρά p) περισσότερο θετική από την κάθοδο K (πλευρά n), η δίοδος πολώνεται κατά την ορθή φορά και βρίσκεται σε κατάσταση ON. Η κατάσταση OFF υπάρχει όταν η τάση που εφαρμόζεται είναι μικρότερη από V_{γ} και στην ουσία πολώνει την δίοδο κατά την ανάστροφη φορά.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7α, τα δύο τμήματα της γραμμής προσεγγίζουν την χαρακτηριστική της διόδου κατά την ορθή φορά. Αυτή η παράσταση κατά τμήματα παριστάνεται από μια πηγή τάσης V_{γ} σε σειρά με μια αντίσταση R_f (που για διόδους πυριτίου είναι συνήθως 5 ως 50Ω), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7b. Με τον δείκτη f συμβολίζουμε την ορθή πόλωση (forward) ενώ με τον δείκτη r την ανάστροφη (reverse). Αυτή η τμηματική γραμμική χαρακτηριστική είναι αξιόλογη γιατί για $V_D < V_{\gamma}$, το ρεύμα κατά την ορθή φορά είναι αρκετά μικρό ώστε να μπορεί να αγνοηθεί. Επιπλέον, η πτώση της τάσης στην δίοδο είναι γενικά μικρή σε σύγκριση με τις τάσεις που εμφανίζονται στο κύκλωμα, έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ ευθείας γραμμής και της πραγματικής χαρακτηριστικής να εισάγει ένα αμελητέο σφάλμα. Στην πραγματικότητα, η κατάσταση ON μπορεί να θεωρηθεί σαν ιδανική δίοδος σε σειρά με πηγή τάσης V_{γ} και αντίσταση R_f . Είναι όμως σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μόνοι προσπελάσιμοι ακροδέκτες για μέτρηση είναι ο A και ο K.

Για την κατάσταση OFF, η χαρακτηριστική της διόδου προσεγγίζεται από την ευθεία γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8α και της οποίας η κλίση είναι $1/R_r$. Η παράσταση αυτή δίνει το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3-8b.

Επειδή η R_r είναι γενικά μερικές εκατοντάδες ΚΩ ή περισσότερο, μπορούμε συχνά να θεωρήσουμε ότι είναι άπειρη και να θεωρήσουμε την ανάστροφα πολωμένη δίοδο σαν ανοιχτό κύκλωμα. Όπου χρειάζονται μεγαλύτεροι βαθμοί ακρίβειας είναι χρήσιμο το μοντέλο του Σχήματος 3-8c όπου η αντίσταση R_r μπορεί να λάβει υπόψη την αύξηση του ανάστροφου ρεύματος όταν αυξάνει η ανάστροφη τάση από την διαρροή ρευμάτων επιφανείας.



Ανάλυση Κυκλωμάτων Διόδων με χρήση του Μοντέλου για ισχυρά Σήματα

Μια γενική μέθοδος ανάλυσης ενός κυκλώματος που περιέχει αρκετές διόδους, αντιστάσεις και πηγές είναι να υποθέσουμε την κατάσταση της κάθε διόδου και μετά να ελέγξουμε αν υποθέσαμε σωστά. Για την κατάσταση ON, η διόδος αντικαθίσταται από το κύκλωμα του Σχήματος 3-7β. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για όλες τις διόδους σε κατάσταση OFF. Όταν οι διόδους έχουν αντικατασταθεί από τα ισοδύναμα κυκλώματά τους, όλο το δίκτυο είναι γραμμικό και μπορούν να υπολογιστούν όλες οι τάσεις και όλα τα ρεύματα από τους κανόνες του Kirchhoff. Η υπόθεσή μας ότι μια διόδος είναι ON επαληθεύεται παρατηρώντας αν το ρεύμα σ' αυτήν είναι κατά την ορθή φορά. Αν το ρεύμα έχει κατεύθυνση από την άνοδο προς την κάθοδο, δικαιολογείται η αρχική

υπόθεση. Αν όμως το ρεύμα έχει αντίθετη κατεύθυνση (από την κάθοδο προς την άνοδο) η υπόθεση ότι η διόδος είναι ON είναι λάθος και πρέπει να ξαναγίνει η ανάλυση θεωρώντας την διόδο σε κατάσταση OFF.

Κατά ανάλογο τρόπο, δοκιμάζουμε την υπόθεση ότι η διόδος είναι σε κατάσταση OFF βρίσκοντας την τάση στα άκρα της. Αν η τάση αυτή έχει είτε ανάστροφη φορά ή μικρότερη από V_{γ} κατά την ορθή φορά η διόδος είναι σε κατάσταση OFF. Αν η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από V_{γ} κατά την ορθή φορά, η υπόθεση μας είναι λάθος και όταν ξαναγίνει η ανάλυση αυτή η διόδος πρέπει να θεωρηθεί σε κατάσταση ON.

ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ

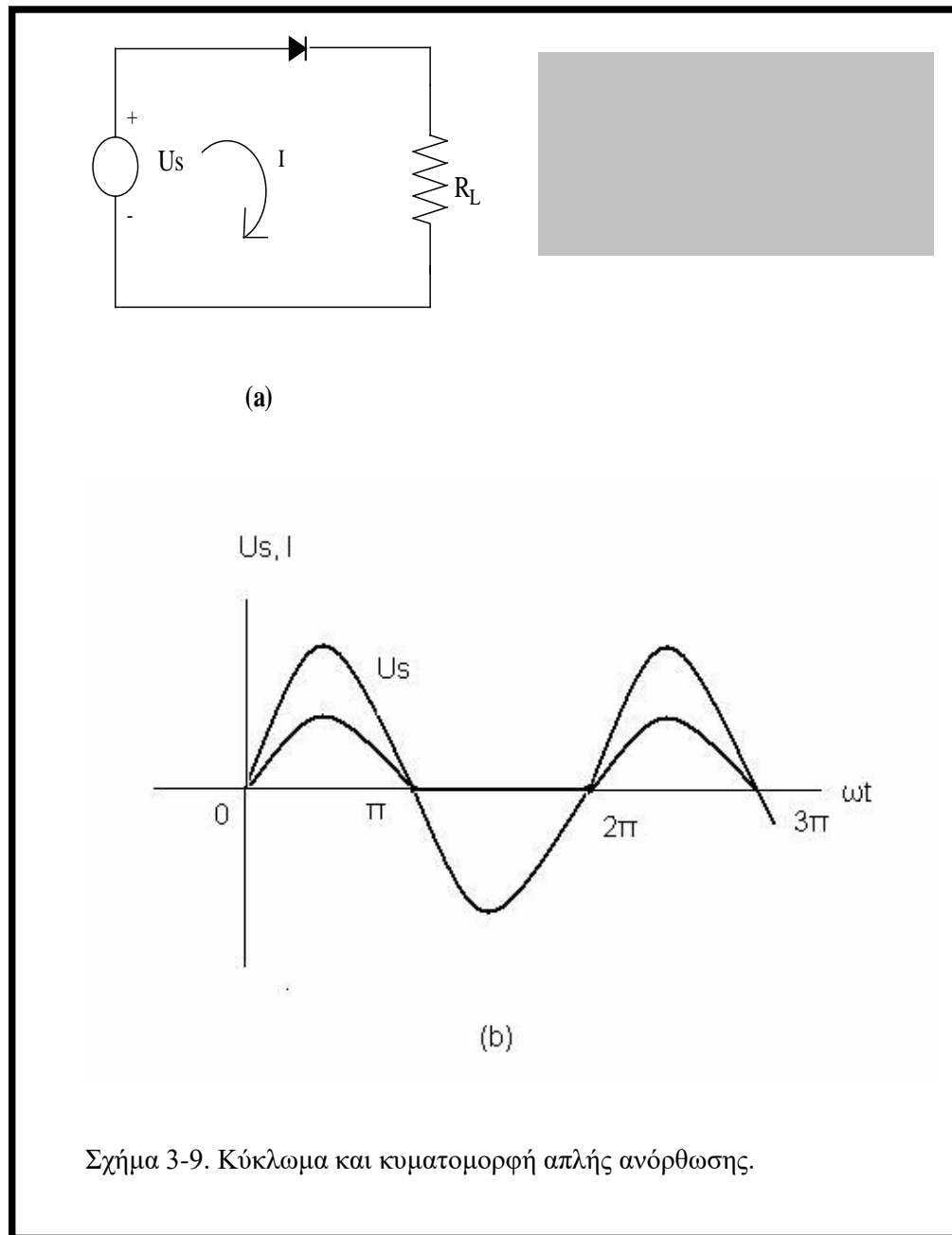
Αρκετές κατηγορίες κυκλωμάτων εκμεταλλεύονται την συμπεριφορά ON- OFF των διόδων για να μεταβάλλουν ουσιαστικά ηλεκτρικές κυματομορφές. Εδώ κάνουμε την εισαγωγή της αρχής τέτοιων κυκλωμάτων. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές εξετάζονται παρακάτω.

Ανορθωτές.

Έστω το κύκλωμα του Σχήματος 3-9α στο οποίο ο συνδυασμός σε σειρά μιας ιδανικής διόδου και μιας αντίστασης φορτίου R_L διεγείρονται από μια ημιτονοειδή τάση. Κατά την διάρκεια της πρώτης ημιπεριόδου εισόδου η διόδος είναι ON και υπάρχει ένα ρεύμα U_s/R_L . Κατά την διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου της U_s η διόδος είναι OFF έτσι ώστε το ρεύμα να είναι μηδέν (Σχήμα 3-9). Επειδή υπάρχει ρεύμα μόνο για το μισό της περιόδου, το κύκλωμα του Σχήματος 3-10α ονομάζεται *ανορθωτής μισού κύματος*. Είναι σημαντικό ότι η μέση τιμή (η συνεχής συνιστώσα) του ρεύματος για μια περίοδο δεν είναι μηδέν, ενώ η μέση τάση για μια περίοδο είναι μηδέν. Ο παράγοντας αυτός είναι η βάση των κυκλωμάτων ανόρθωσης που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα, το οποίο και καταναλώνεται από τα περισσότερα ηλεκτρονικά συστήματα.

Το κύκλωμα του Σχήματος 3-10α χρησιμοποιεί τον πυκνωτή C σαν απλό φίλτρο για την μετατροπή της κυματομορφής του Σχήματος 3-9b στην σχεδόν σταθερή (DC) στάθμη του 3-10b. Τα παρακάτω αποτελούν μια ποιοτική περιγραφή της επίδρασης του πυκνωτή στην απόκριση του κυκλώματος. Στην σταθερή κατάσταση σε χρόνο $t = t_1$, η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι V_1 και την στιγμή αυτή η τάση εισόδου είναι V_1 , ανοίγοντας την διόδο. Αμέσως μετά την χρονική στιγμή t_1 , η τάση του πυκνωτή, δηλαδή η τάση εξόδου U_0 , ακολουθεί την τάση εισόδου μέχρι την t_2 για την οποία η U_0 είναι V_m . Μετά την t_2 , η τάση εισόδου μειώνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από την εκφόρτιση του πυκνωτή, κλείνοντας την διόδο. Το γεγονός αυτό περιορίζει την εκφόρτιση του C μόνο μέσα από την R_L . Αν η σταθερά χρόνου $R_L C$ είναι πολύ μεγαλύτερη από την περίοδο T της κυματομορφής εισόδου, η εκφόρτιση είναι αργή. Έτσι, μεταξύ t_2 και t_3 υπάρχει μια μικρή ελάττωση του U_0 , οπότε και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Στα πραγματικά κυκλώματα ανόρθωσης- φίλτρου η μεταβολή (που ονομάζεται *κυμάτωση*) της κυματομορφής εξόδου είναι αισθητά μικρότερη από αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3-10b και η U_0 είναι ουσιαστικά σταθερή.

Αν στο Σχήμα 3-9α χρησιμοποιηθεί πραγματική διόδος έχουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3-11a, που ισχύει για πόλωση κατά την ορθή φορά. Το ρεύμα I λαμβάνεται από τον 2^ο Κανόνα του Kirchhoff:



$$I = (U_s - V_\gamma) / R_L = (V_m \sin(\omega t) - V_\gamma) / R_L$$

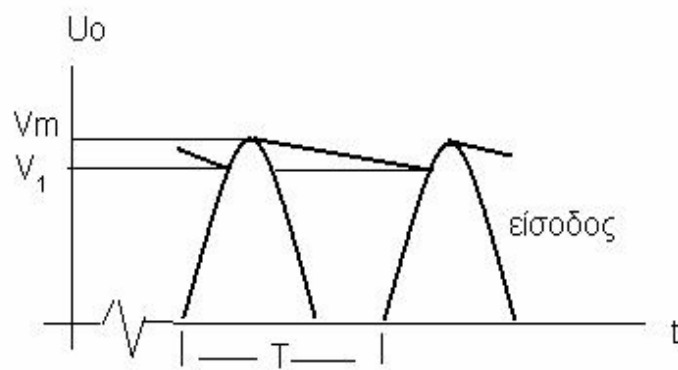
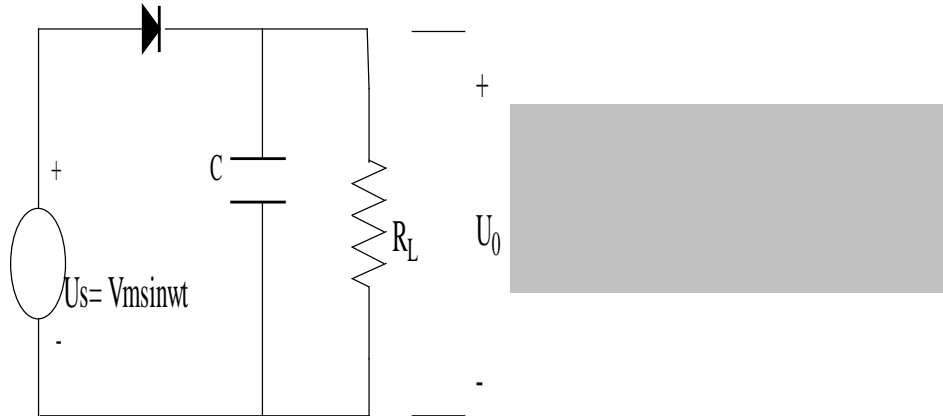
και είναι θετικό μόνο όταν $U_s > V_\gamma$. Έτσι, η κυματομορφή ρεύματος, που φαίνεται στο Σχήμα 3-11b, δεν αρχίζει όταν $\omega t = 0$ αλλά έχει μια γωνία αποκοπής ή έναυσης Φ_i , που δίνεται από την:

$$\Phi_i = \sin^{-1} (V_\gamma / V_m) \quad (\text{σε rad})$$

Αντίστοιχα στο τέλος της θετικής ημιπεριόδου υπάρχει μια γωνία απόσβεσης, με τιμή $(\pi - \Phi_i)$.

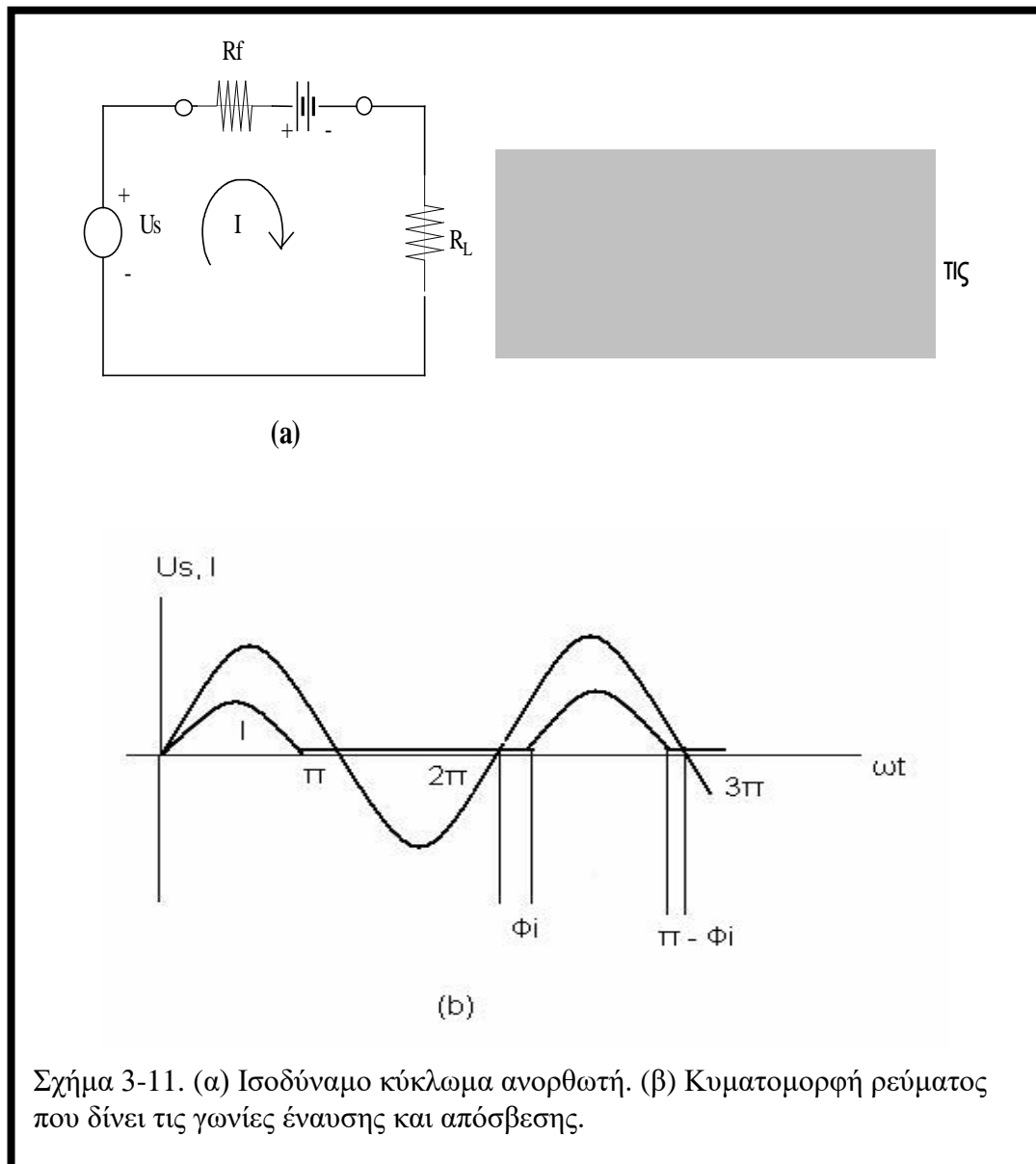
Αν αντικατασταθεί η R_L στο Σχήμα 3-9a από την V_{BB} , την τάση της μπαταρίας σε σειρά με μια αντίσταση R_s περιορισμού του ρεύματος, το κύκλωμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φορτωτής μπαταριών όπως αυτές του κινητού τηλεφώνου. Στην

περίπτωση αυτή, η γωνιά έναυσης δίνεται από την σχέση που αναφέρθηκε πιο πάνω όταν η V_{γ} αντικατασταθεί από την $V_{\gamma} + V_{BB}$.



(b)

Σχήμα 3-10. Ανορθωτής με φίλτρο πυκνωτή (α) και τάση εξόδου του κυκλώματος (β).



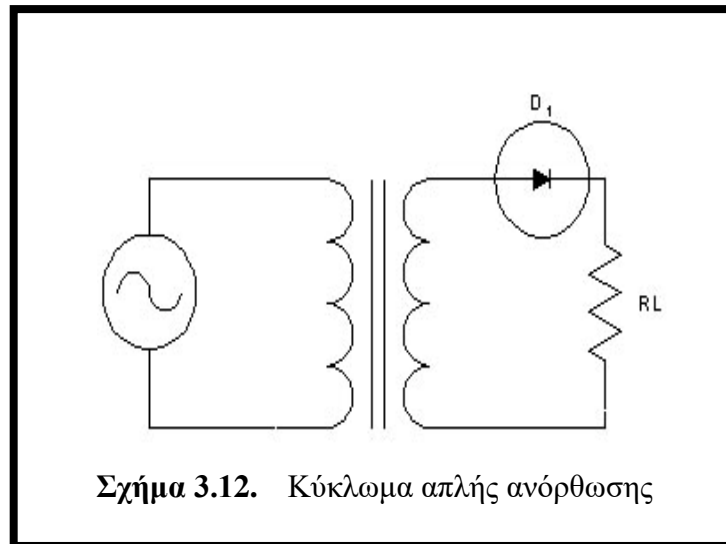
ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ.

Απλή ανόρθωση

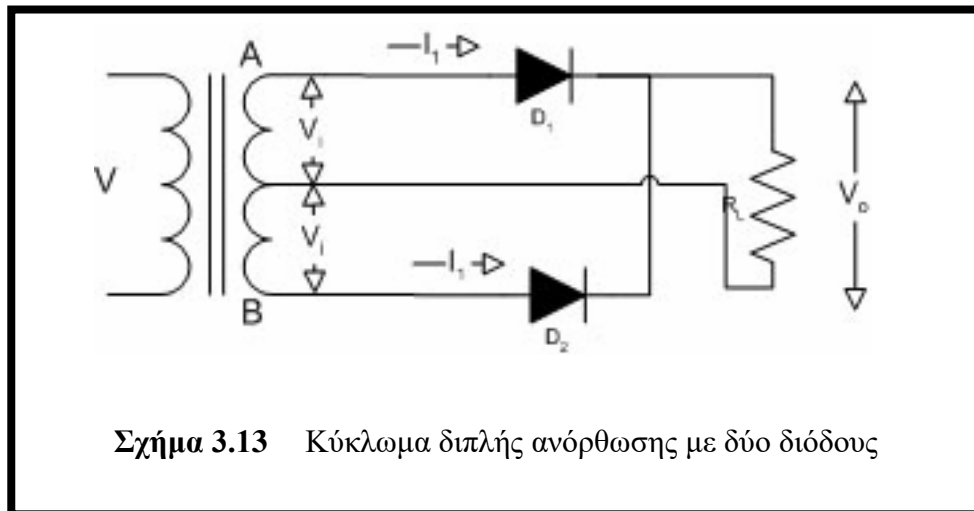
Το πιο απλό κύκλωμα ανόρθωσης αποτελείται από ένα μετασχηματιστή και μία δίοδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Ο μετασχηματιστής χρησιμεύει για τη μείωση ή την αύξηση της τάσης στην επιθυμητή τιμή. Ακόμη όμως και αν η τάση που θα ανορθωθεί είναι 220 Volt, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής για λόγους ασφαλείας. Στην έξοδο εμφανίζεται τάση μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο. Η τάση στην έξοδο με αυτή τη συνδεσμολογία είναι συνεχής, αλλά έχει αρκετά μεγάλη κυμάτωση. Αν χρησιμοποιηθεί αυτό το κύκλωμα σε ηλεκτρονικές συσκευές, αυτές δεν θα λειτουργούν κανονικά. Η κυμάτωση (ripple) ορίζεται σαν :

$$r = V_{ev} / V_{dc}$$

όπου V_{ev} είναι η τιμή της ενεργής τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος και V_{dc} η τιμή τάσης του συνεχούς. Η κυμάτωση είναι ένα μέτρο των «παρασίτων» που εμφανίζονται στην έξοδο και είναι στενά συνδεδεμένη με την παρουσία αρμονικών συνιστωσών στο ανορθωμένο σήμα. Η κυμάτωση μεγαλώνει όσο πιο πολλά «παρασίτα» υπάρχουν. Λεπτομερής ανάλυση είναι πέρα από τους στόχους αυτών των σημειώσεων καθώς απαιτεί την γνώση ειδικών μαθηματικών (σειρές Fourier).



Για να βελτιωθεί η συνεχής τάση στην έξοδο χρησιμοποιούνται φίλτρα. Το πιο απλό φίλτρο εφαρμόζεται με την τοποθέτηση ενός πυκνωτή C παράλληλα με το φορτίο R_L . Η απλή ανόρθωση έχει το μειονέκτημα της μεγάλης κυμάτωσης και του μικρού βαθμού απόδοσης (40.6%). Έτσι, χρησιμοποιείται η πλήρης ή διπλή ανόρθωση.

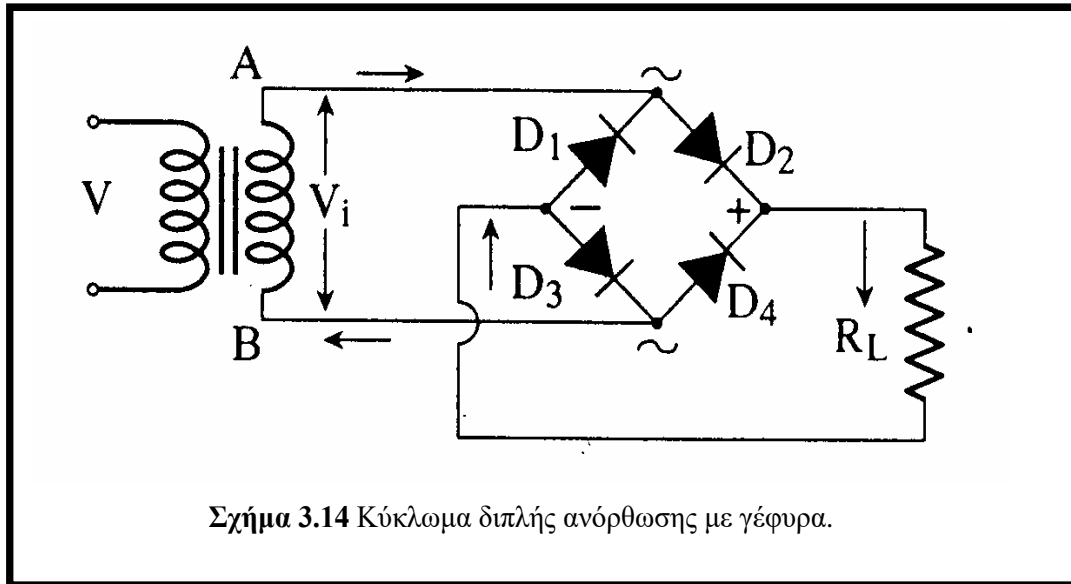


Διπλή ή πλήρης ανόρθωση

Πλήρης ονομάζεται η ανόρθωση στην οποία και στις δύο ημιπερίόδους της εναλλασσόμενης τάσης ρέει στο φορτίο ρεύμα με την ίδια φορά. Πλήρης ανόρθωση επιτυγχάνεται με κύκλωμα δύο διόδων και με κύκλωμα με γέφυρα. Στο κύκλωμα διπλής ανόρθωσης (σχήμα 3.13) η κυμάτωση είναι πολύ μικρότερη από ότι στην απλή και ο βαθμός απόδοσης φθάνει το 80%. Αυτό το κύκλωμα παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα: α)

ο μετασχηματιστής χρειάζεται μεσαία λήψη (π. χ. για 6 Volt πρέπει να δίνει 2x6 Volt) και συνεπώς έχει μεγαλύτερο κόστος και β) η φάση στις διόδους είναι διπλάσια στην ανάστροφη πόλωση.

Και τα δύο μειονεκτήματα καταργούνται αν χρησιμοποιηθεί κύκλωμα ανόρθωσης με γέφυρα, όπως στο σχήμα 3.14. Στο σχήμα 3.15 φαίνονται οι κυματομορφές για τις περιπτώσεις ανόρθωσης.



ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ ΣΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ

Η μείωση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου ενός κυκλώματος ανόρθωσης, που επιτυγχάνεται με τη χρήση πυκνωτή εξομάλυνσης, είναι αποτέλεσμα περιοδικής φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή, ενώ η διαφορά της μέγιστης από τη ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης τάσης στα άκρα του αποτελεί το από κορυφή σε κορυφή πλάτος της αποκαλούμενης τάσης κυμάτωσης που συμβολίζεται με $V_{r(p-p)}$. Παρακάτω δίνουμε τη μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας της εξομάλυνσης με πυκνωτή σ' ένα τυπικό κύκλωμα διπλής ανόρθωσης, μέσω της οποίας προσδιορίζεται ο τρόπος εξάρτησης της μείωσης που επιτυγχάνεται στην τάση κυμάτωσης τόσο από τα μεγέθη των στοιχείων όσο και από την ίδια τη λειτουργία του θεωρούμενου κυκλώματος.

Φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή εξομάλυνσης (smoothing capacitor).

Στο σχήμα 3.14(α) όπου φαίνεται ένα τυπικό κύκλωμα διπλής ανόρθωσης με γέφυρα διόδων, στην έξοδο του οποίου μπορούμε να συνδέσουμε έναν πυκνωτή παράλληλα με την συνδεδεμένη αντίσταση φορτίου R_L ο οποίος ονομάζεται πυκνωτής εξομάλυνσης. Κατά το διάστημα μιας περιόδου T του ημιτονικού σήματος εισόδου, θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} \text{για} \quad & t \text{ στο διάστημα } [t_1, \pi/2\omega] \rightarrow i_D = i_C + i_{RL} \\ & t \text{ στο διάστημα } [\pi/2\omega, t_2] \rightarrow i_D = -i_C + i_{RL} \\ \text{ενώ για} \quad & t \text{ στο διάστημα } [t_2, \pi/\omega + t_1] \rightarrow i_D = 0 - i_C = -i_{RL} \end{aligned}$$

Ειδικότερα, θεωρώντας τη λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος, οι διόδοι της γέφυρας ανόρθωσης θα άγουν μόνον όταν η τάση στα άκρα του πυκνωτή (και προφανώς,

στα άκρα της αντίστασης R_L) είναι αρκούντως μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της u_s . Αυτό σημαίνει ότι τελικώς, το όποιο ρεύμα i_D που εμφανίζεται να διαρρέει το κύκλωμα ανόρθωσης θα είναι ρεύμα που σχετίζεται με την τάση στα άκρα του πυκνωτή. Πράγματι, σε κάθε ημιπερίοδο της $u_s = V_s \sin \omega t$, δηλ. για $k\pi < \omega t < (k+1)\pi$, $k=0, 1, 2, \dots$, διακρίνονται τρία επιμέρους διαστήματα:

α) το διάστημα $k\pi < \omega t < k\pi + \theta_1$, $k=0, 1, 2, \dots$, κατά το οποίο η ημιτονική τάση εισόδου, αν και αυξανόμενη, παραμένει μικρότερη από την τάση στα άκρα του πυκνωτή και συνεπώς, αν και δεν υπάρχει ροή ρεύματος i_D , η τάση εξόδου u_o είναι η τάση εκφόρτισης του πυκνωτή μέσω της αντίστασης φορτίου R_L .

β) το διάστημα $k\pi + \theta_1 < \omega t < (k+1/2)\pi$, $k=0, 1, 2, \dots$, κατά το οποίο η ημιτονική τάση εισόδου συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη (απόλυτη) μέγιστη τιμή της $|V_s|$ οπότε, ξεπερνώντας την τιμή της τάσης του πυκνωτή (π. χ. τη στιγμή $t_1 = \theta_1/\omega$), οι αντίστοιχες δίοδοι αρχίζουν να άγουν και η τάση εξόδου ακολουθεί πλέον την τάση εισόδου και

γ) το διάστημα $(k+1/2)\pi < \omega t < (k+1/2)\pi + \theta_2$, $k=0, 1, 2, \dots$, κατά το οποίο η τάση εισόδου αρχίζει και πάλι να μειώνεται «παρασύροντας» σε μείωση την τάση εξόδου u_o (δηλ. την τάση του πυκνωτή u_c) και μέχρις ότου ο ρυθμός μείωσης της u_s γίνει μεγαλύτερος από το ρυθμό μείωσης της $u_c = u_{RL}$, οπότε παύουν να άγουν οι αντίστοιχες δίοδοι, μηδενίζεται το ρεύμα i_D , η δε τάση εξόδου είναι πλέον η τάση του πυκνωτή, όπως αυτός εκφορτίζεται μέσα από την αντίσταση R_L . Βλέπουμε δηλαδή, ότι οι μεταβολές (δηλ. η κυμάτωση) της πλήρως ανορθωμένης τάσης εξόδου u_o θα καθορίζονται είτε από τις μεταβολές του ρεύματος i_D που διαρρέει ανά ημιπερίοδο τις αντίστοιχες διόδους όταν αυτές άγουν, δηλ. στο διάστημα (t_3, t_1) , είτε από το προφανώς μειούμενο ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή στο διάστημα $(T/2 + t_1), t_2$.

Προσδιορισμός του μέγιστου ρεύματος των διόδων

Όταν οι δίοδοι άγουν (ανά δύο, ανά ημιπερίοδο), το εμφανιζόμενο στο κύκλωμα διπλής ανόρθωσης ρεύμα i_D θα έχει τη μορφή περιοδικών παλμών, το οποίο θα είναι το άθροισμα του ρεύματος i_{RL} που διαρρέει την αντίσταση R_L και δίνεται από τη σχέση:

$$i_{RL} = u_o/R_L = (V_s \sin \omega t)/R_L$$

και του ρεύματος i_c που φορτίζει τον πυκνωτή:

$$i_c = C \, du_c/dt = C \, du_o/dt = C \, d(V_s \sin \omega t)/dt = C\omega V_s \cos \omega t$$

Αν τώρα υποθέσουμε ότι η (ανά ημιπερίοδο) μέγιστη τιμή $i_{D, \max}$ του ρεύματος των διόδων εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t_1 = \theta_1/\omega$ κατά την οποία θεωρούμε ότι οι δίοδοι αρχίζουν να άγουν, η αντίστοιχη γωνία θ_1 προσδιορίζεται εύκολα μέσω του μηδενισμού της παραγώγου της έκφρασης για το συνολικό i_D :

$$di_D/dt = 0 \Leftrightarrow (\omega V_s/R_L) \cos \omega t_1 - (C\omega^2 V_s) \sin \omega t_1 = 0$$

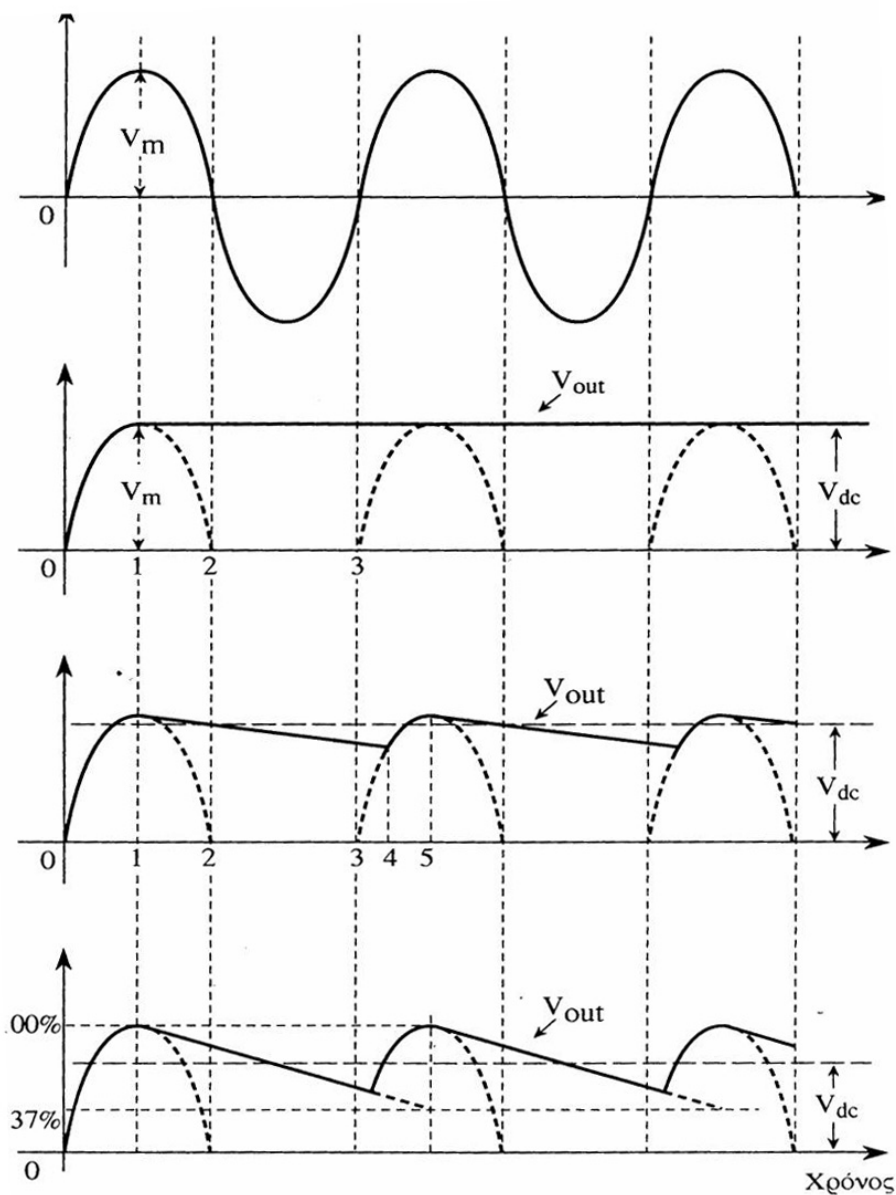
$$\text{οπότε} \quad \theta_1 = \omega t_1 = \tan^{-1} (1/R_L C \omega)$$

$$\text{και συνεπώς} \quad i_{D, \max} = V_s (C\omega \cos \theta_1 + 1/R_L \sin \theta_1)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε τα εξής:

1. Το πλάτος της τάσης κυμάτωσης σ'ένα κύκλωμα ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης είναι αντιστρόφως ανάλογο του διαστήματος αγωγιμότητας των αντίστοιχων διόδων

2. Στο διάστημα αγωγιμότητάς τους οι διόδους αρχίζουν να άγουν με τη μέγιστη τιμή ρεύματος $i_{D, \max}$ και συνεχίζουν με συνεχώς μειούμενο το αντίστοιχο ρεύμα
3. Η αύξηση είτε της χωρητικότητας του πυκνωτή εξομάλυνσης είτε της αντίστασης φορτίου μειώνει το διάστημα αγωγιμότητας των διόδων
4. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος i_D αυξάνεται με την αύξηση της χωρητικότητας C του πυκνωτή εξομάλυνσης αλλά και τη μείωση της αντίστασης R_L
5. Η μέση τιμή του ρεύματος των διόδων για κάθε διάστημα (t_3, t_1) είναι ίση με τη μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει την R_L κατά την αντίστοιχη ημιπερίοδο και
6. Η επιλογή των διόδων σε κάθε κύκλωμα (είτε διπλής, είτε απλής) ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης θα πρέπει να γίνεται και με το κριτήριο αντοχής τους στη μέγιστη τιμή του ρεύματος i_D .



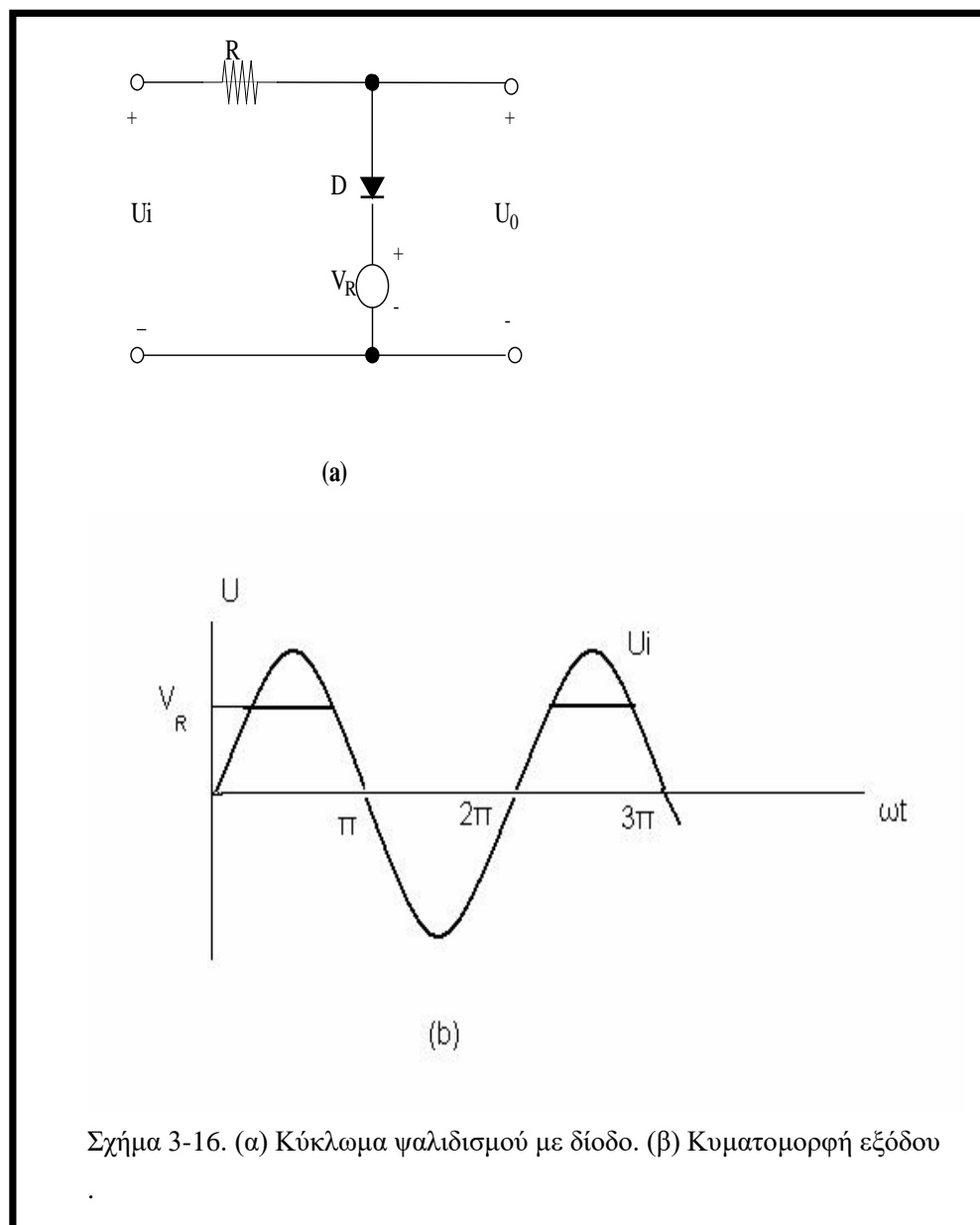
Σχήμα 3.15. Κυματομορφές Εναλλασσόμενου και Ανορθωμένων Ρευμάτων.

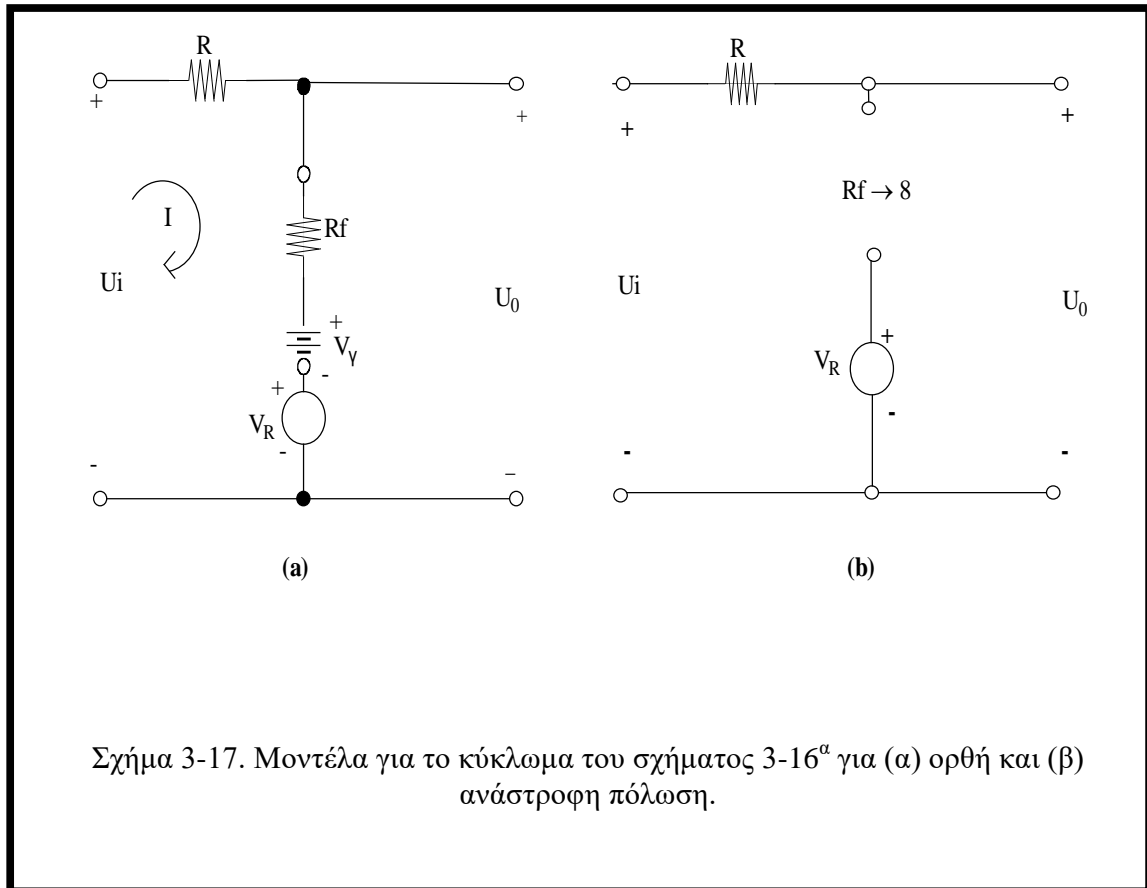
Κυκλώματα ψαλλιδισμού και αναρρίχησης.

Τα κυκλώματα ψαλλιδισμού χρησιμοποιούνται στην μετάδοση και την επιλογή εκείνου του μέρους της κυματομορφής που βρίσκεται πάνω ή κάτω από κάποια στάθμη αναφοράς. Από την άποψη αυτή, ο ανορθωτής είναι ένα κύκλωμα ψαλλιδισμού γιατί μόνο οι στάθμες της τάσης εισόδου πάνω από την V_R δίδονται στην έξοδο. Οι δίοδοι που χρησιμοποιούνται πολώνονται από μια τάση αναφοράς που προσδιορίζει το μέρος του σήματος που θα μεταδοθεί.

Το κύκλωμα του Σχήματος 3-16α είναι ένα απλό κύκλωμα ψαλλιδισμού. Αν η δίοδος θεωρηθεί ιδανική, βλέπουμε ότι η U_0 είναι ίση με V_R όταν η δίοδος D είναι ON και ίση με U_i όταν η δίοδος είναι OFF.

Η μετάβαση από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON συμβαίνει την στιγμή που η τάση εισόδου φτάνει στην στάθμη αναφοράς V_R όπως φαίνεται από τις κυματομορφές του Σχήματος 3-16β.





Όταν χρησιμοποιείται πραγματική διόδος το κύκλωμα ψαλλιδισμού του Σχήματος 3-16a χαρακτηρίζεται από τα ισοδύναμα κυκλώματα του 3-17. Στο Σχήμα 3-17b φαίνεται ότι η U_0 είναι ίση με U_i όταν η D βρίσκεται σε κατάσταση OFF. Από το 2^ο Κανόνα του Kirchhoff λαμβάνεται τι ρεύμα I :

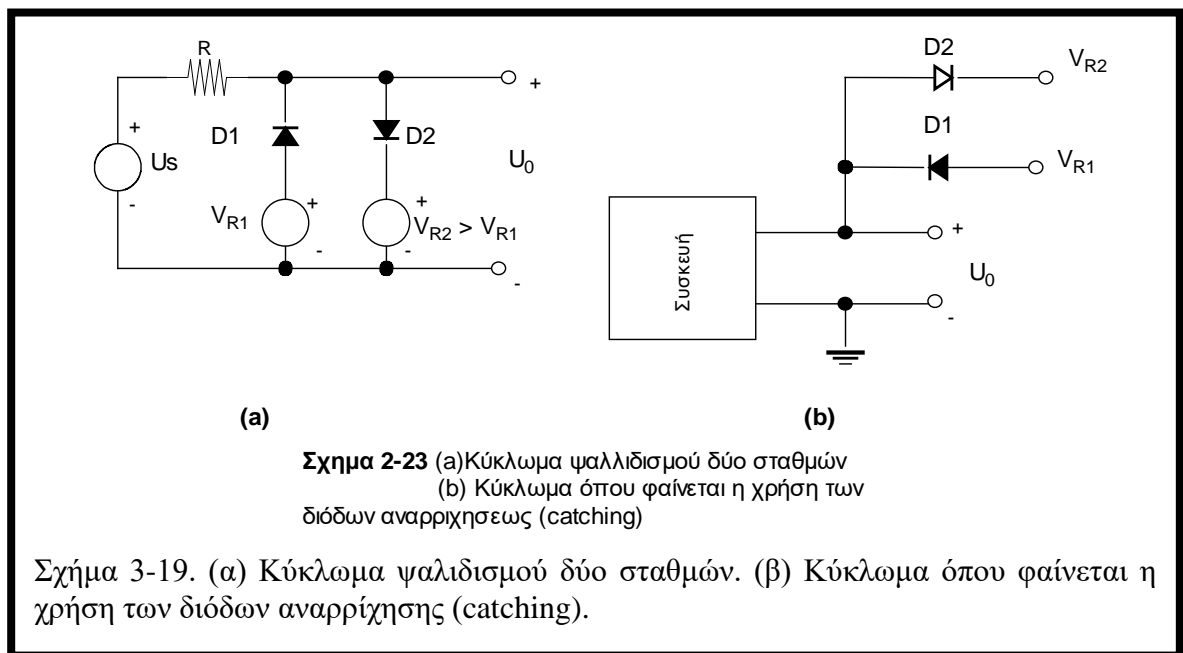
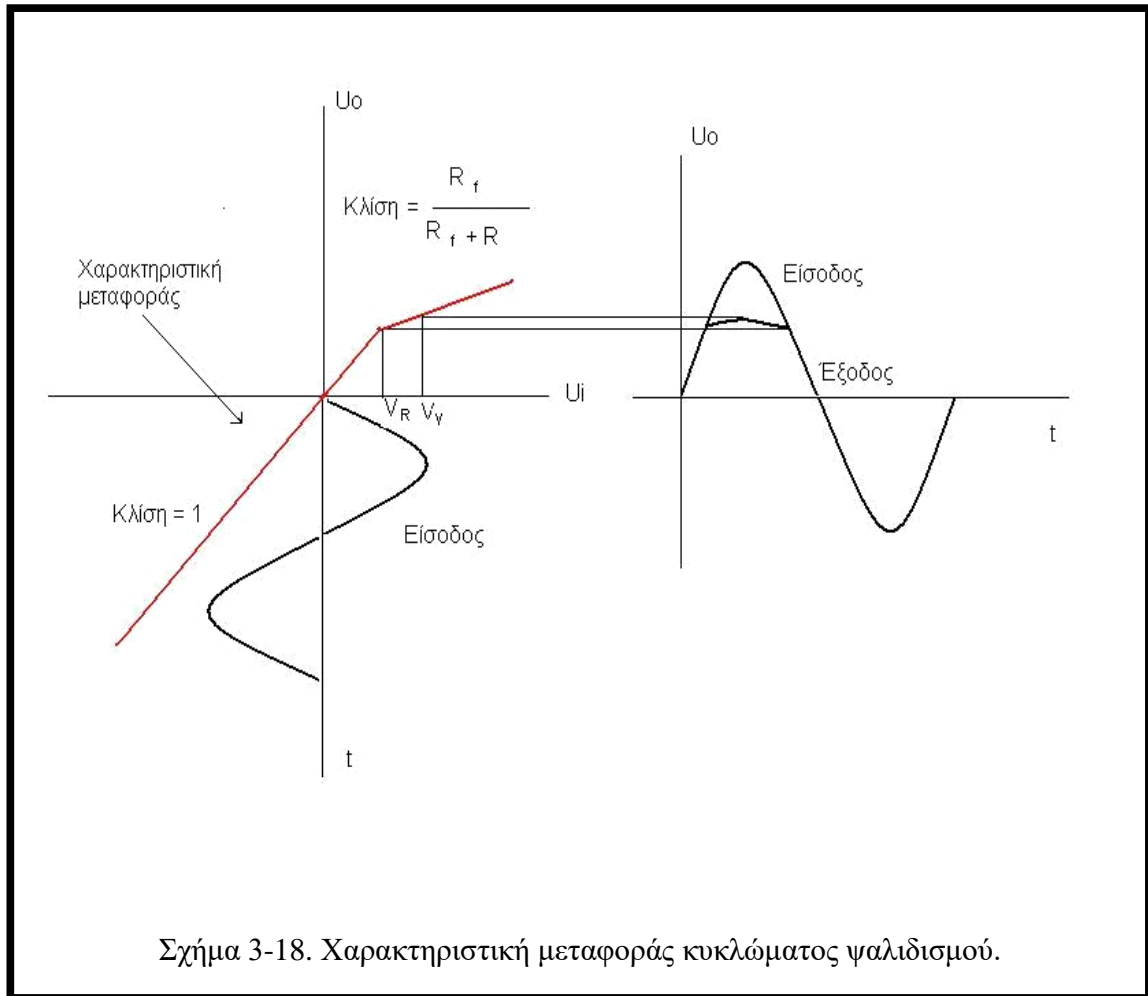
$$I = (U_i - V_R - V_\gamma) / (R_f + R)$$

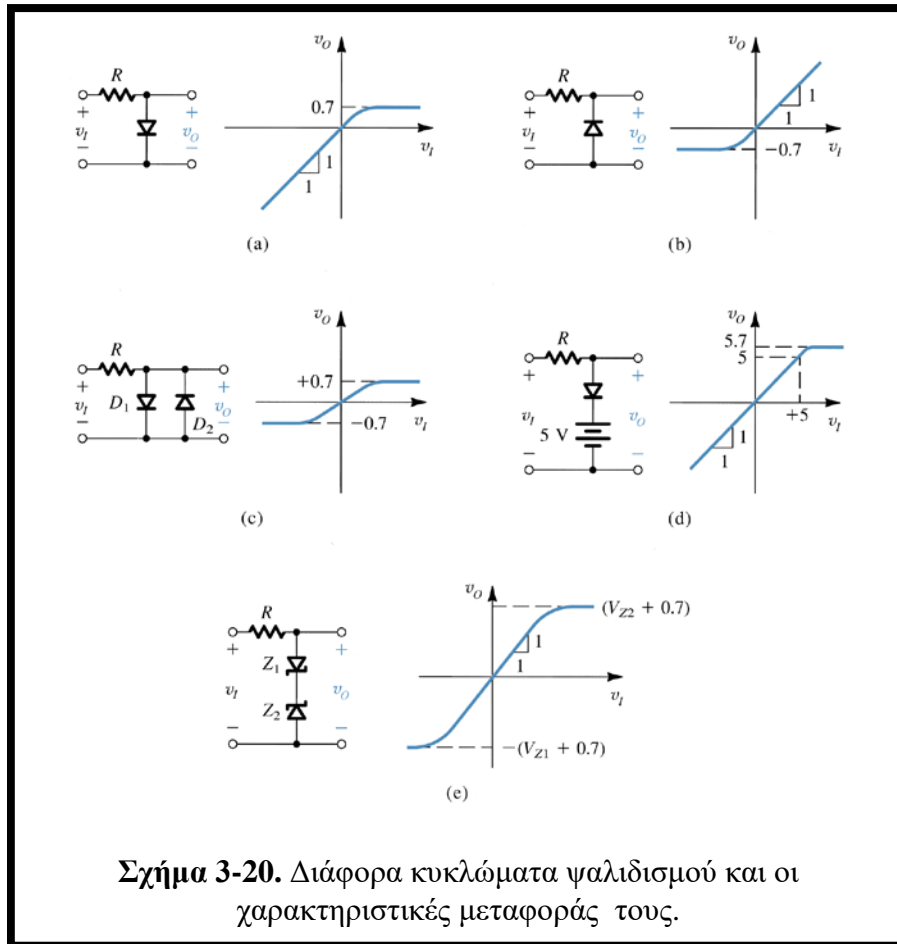
Από όπου,

$$U_0 = IR_f + V_\gamma + V_R = (R_f / (R_f + R)) U_i + ((R_f / (R_f + R)) (V_R + V_\gamma))$$

Η χαρακτηριστική μεταφοράς του Σχήματος 3-18 προκύπτει από την τμηματική γραμμική προσέγγιση της χαρακτηριστικής της διόδου που υποθέτει απότομη μεταβολή από την ανάστροφη στην ορθή πόλωση. Στην πραγματικότητα η μετάβαση αυτή δεν είναι απότομη αλλά βαθμιαία. Έτσι το σημείο διακοπής δεν είναι απότομο, αλλά πραγματοποιείται μέσα σε μια μικρή περιοχή τάσης, συνήθως 0,1 έως 0,2 V. Σε πολλές εφαρμογές η U_i είναι αισθητά μεγαλύτερη από μερικά δέκατα του Volt της περιοχής διάσπασης, έτσι ώστε να ισχύει η τμηματική γραμμική παράσταση.

Ο συνδυασμός των ιδιοτήτων των κυκλωμάτων ψαλλιδισμού καταλήγει σε ένα ψαλλιδιστή δύο επιπέδων που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-19a. Για τα κυκλώματα αυτά, η τάση εξόδου περιορίζεται μεταξύ V_{R1} και V_{R2} (περίπου). Η ανάλυση του κυκλώματος αυτού αφήνεται ως άσκηση. Επειδή οι D1 και D2 δεν αφήνουν την έξοδο να ξεπεράσει την V_{R2} ή να πέσει κάτω από V_{R1} ονομάζονται *δίοδοι αναρρίχησης ή σύλληψης (catching)*.





Σχήμα 3-20. Διάφορα κυκλώματα ψαλιδισμού και οι χαρακτηριστικές μεταφοράς τους.

ΕΙΔΙΚΕΣ ΔΙΟΔΟΙ

Δίοδος Zener.

Η δίοδος Zener αν πολωθεί ορθά λειτουργεί όπως και οι απλές διόδους. Με ανάστροφη όμως πόλωση παρουσιάζει περιοχή λειτουργίας όπου η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ το ρεύμα αυξάνεται απότομα. Η τιμή ανάστροφης τάσης για την οποία συμβαίνει αυτό το φαινόμενο λέγεται τάση Zener και συμβολίζεται με V_Z . Η τάση V_Z εξαρτάται από το ποσοστό των προσμίξεων του ημιαγωγού. Στο σχήμα 3.21 δίνεται η τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης της διόδου Zener. Από τη χαρακτηριστική φαίνεται ότι όταν η ανάστροφη τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της Zener είναι ίση με V_Z , τότε το ρεύμα που τη διαρρέει μπορεί να μεταβάλλεται από μία τιμή I_{\min} μέχρι την τιμή I_{\max} . Το ρεύμα I_{\max} καθορίζεται από τη μέγιστη ισχύ που δίνει ο κατασκευαστής για τη δίοδο, ενώ το I_{\min} , είναι το ελάχιστο ρεύμα για να αρχίσει η δίοδος να λειτουργεί για σταθεροποίηση τάσης.

Η βασική εφαρμογή της διόδου Zener είναι η σταθεροποίηση τάσης. Τυπικό κύκλωμα σταθεροποίησης δίνεται στο σχήμα 3.21β. Η δίοδος διατηρεί σταθερή την τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου R_L , ενώ μπορεί να μεταβάλλονται οι συνθήκες της εισόδου.

Οι τάσεις των διασπάσεων των διόδων Zener που υπάρχουν στο εμπόριο κυμαίνονται μεταξύ 1-1500 Volts. Από τη χαρακτηριστική της διόδου Zener που φαίνεται στο σχήμα 3.21 ορίζεται η δυναμική αντίσταση της Zener r_Z σαν:

$$r_Z = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Η αντίσταση r_Z , όταν η τάση V_Z είναι στην περιοχή 0 - 10 Volts είναι μεταξύ 1 και 15 Ω. Η δίοδος Zener χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση μιας συνεχούς τάσης. Η ικανότητα της διόδου αυτής να παρουσιάζει σταθερό δυναμικό στα άκρα της R_L για μεταβολές του ρεύματος i_L και για μεταβολές της τάσης παροχής V φαίνεται από τη χαρακτηριστική της. Για τιμές ρεύματος πάνω από μια τιμή I_{Zmin} η τάση στα άκρα της διόδου Zener είναι σχεδόν σταθερή και ίση με την τάση Zener, V_Z . Συνεπώς η τιμή ρεύματος I_{Zmin} είναι το ένα δέκατο της τιμής I_{Zmax} , δηλαδή.

$$I_{Zmin} = \frac{1}{10} I_{Zmax}$$

Η τάση στα άκρα της διόδου Zener, για μια τιμή ρεύματος, δίνεται από τη σχέση:

$$V'_Z = V_Z + r_Z \Delta I_Z$$

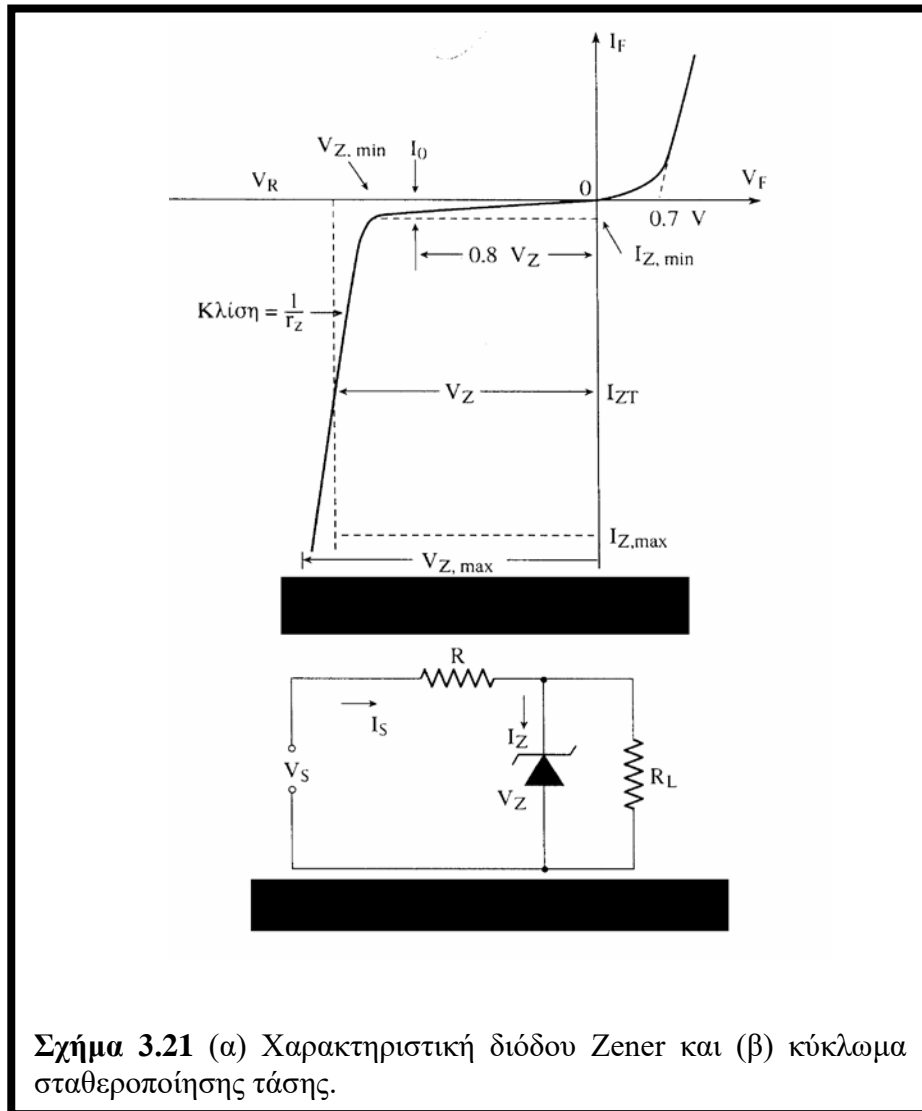
όπου V_Z είναι η τάση Zener σε μια δεδομένη τιμή ρεύματος, r_Z είναι αντίσταση της διόδου Zener & ΔI_Z η μεταβολή του ρεύματος που αντιστοιχεί στην τάση V_Z . Από τη σχέση αυτή η μεταβολή $\Delta V_Z = r_Z \Delta I_Z$ που προκαλεί η μεταβολή ΔI_Z είναι μικρή και η τάση στα άκρα της διόδου είναι περίπου σταθερή.

Δίοδος Σήραγγας Ή Δίοδος Esaki.

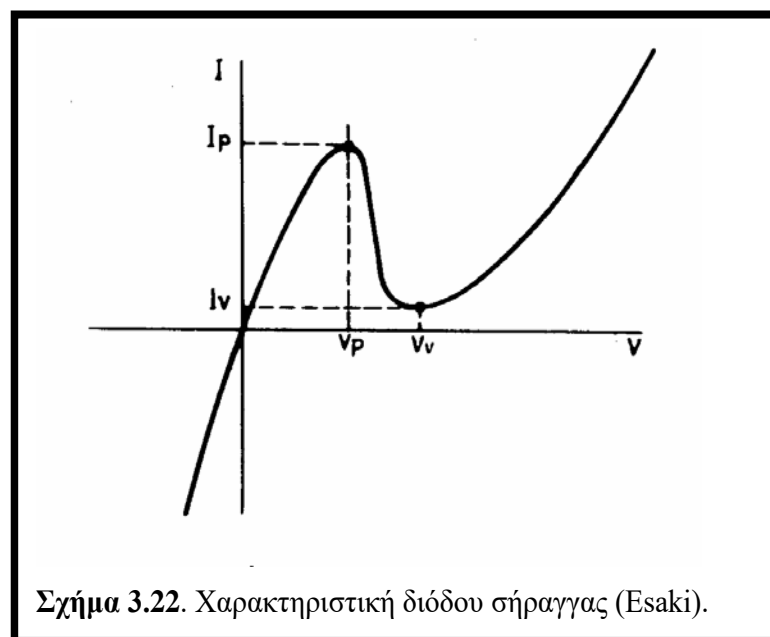
Η δίοδος σήραγγας (tunnel diode) ή δίοδος Esaki οφείλει την ονομασία της στο κβαντομηχανικό φαινόμενο σήραγγας, το οποίο όμως ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτών των σημειώσεων. Η δίοδος σήραγγας κατασκευάζεται με τη προσθήκη μεγάλου αριθμού προσμίξεων σε μία διάταξη επαφής p-n. Η συγκέντρωση των προσμίξεων στα δύο τμήματα είναι πάρα πολύ μεγάλη π.χ. $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Η χαρακτηριστική της διόδου σήραγγας φαίνεται στο σχήμα 3.22.

Σ' αυτή διακρίνουμε την τάση V_p όπου το ρεύμα παίρνει μια μέγιστη τιμή I_p (peak value). Ακολουθεί ένα κατερχόμενο τμήμα με αρνητική δυναμική αντίσταση dV/dI μέχρι την τιμή τάσης V_v όπου αντιστοιχεί μια ελάχιστη τιμή ρεύματος I_v (τιμή κοιλάδας, valley point), απ' όπου και πέρα πρακτικά έχουμε τη μορφή της κοινής διόδου.

Το μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η δίοδος σήραγγας δεν οφείλεται μόνο στην παρουσία τού τμήματος «αρνητικής αντίστασης» που προσφέρεται για τη χρήση σε λειτουργίες παραγωγής κυμάτων και ενίσχυσης, αλλά κυρίως στο ότι η διάταξη αυτή, έχει πολύ μεγάλη ταχύτητα απόκρισης (αντίληψη) πράγμα που την κάνει κατάλληλη για χρήση της σε πολύ υψηλές συχνότητες (μέχρι πολλές δεκάδες GHz) καθώς και για ταχύτατους διακόπτες, σε αντίθεση με τις συμβατικές διατάξεις, που είναι πολύ αργές. Τέτοιες διατάξεις χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα μικροκυματικών εφαρμογών.



Σχήμα 3.21 (α) Χαρακτηριστική διόδου Zener και (β) κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης.



Σχήμα 3.22. Χαρακτηριστική διόδου σήραγγας (Esaki).

Άλλες Δίοδοι

Άλλες χαρακτηριστικές δίοδοι που μπορούν να αναφερθούν είναι οι δίοδοι Schottky και οι δίοδοι μεταβλητής χωρητικότητας ή varactors ή varicaps.

Οι δίοδοι Schottky έχουν την ίδια σχεδόν χαρακτηριστική με αυτήν των p-n διόδων και αποτελούνται από επαφή μετάλλων-ημιαγωγών. Χρησιμοποιούνται για πιο γρήγορες διατάξεις από αυτές των p-n.

Οι Varicaps είναι απλές p-n δίοδοι οι οποίες με κατάλληλες προσμίξεις ελέγχεται η χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται σαν μεταβλητοί ηλεκτρονικοί «πυκνωτές». Η πιο γνωστή χρήση τους είναι στο κύκλωμα επιλογής συχνότητας (tuner), την διάταξη δηλαδή που επιλέγει τα κανάλια στις συσκευές τηλεόρασης και στα ραδιόφωνα. Οι varactors του εμπορίου έχουν ονομασίες που ξεκινούν με τα αρχικά BA (π. χ. BA 163) και το κυκλωματικό τους σύμβολο φαίνεται στο σχήμα 3-23.

