



Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη δομή και λειτουργία των κρυσταλλοδίοδων. Στο τέλος του κεφαλαίου, ο μαθητής πρέπει να:

- Μάθει και κατανοεί το μηχανισμό διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων σε μια επαφή PN.
- Σχεδιάζει την περιοχή απογύμνωσης,
- Συνδέει τη δίοδο σε ορθή και ανάστροφη πόλωση και να σχεδιάζει τη χαρακτηριστική της καμπύλη,
- Γνωρίζει τη λειτουργία και τον τρόπο σύνδεσης της δίοδου Varicap και της δίοδου Zener,
- Χρησιμοποιεί την δίοδο Zener σε κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης,
- Εφαρμόζει τη δίοδο PN για παραγωγή ημιανορθωμένης και ανορθωμένης τάσης, καθώς και σε κυκλώματα ψαλιδισμού, πολλαπλασιασμού τάσης κ.α.

3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΔΙΟΔΟΙ

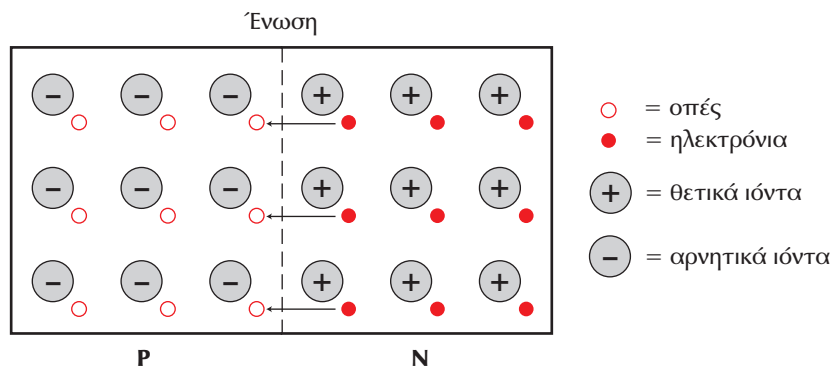
## 3.1 Επαφή / Δίοδος PN

### 3.1.1 Φυσική Λειτουργία

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

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

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

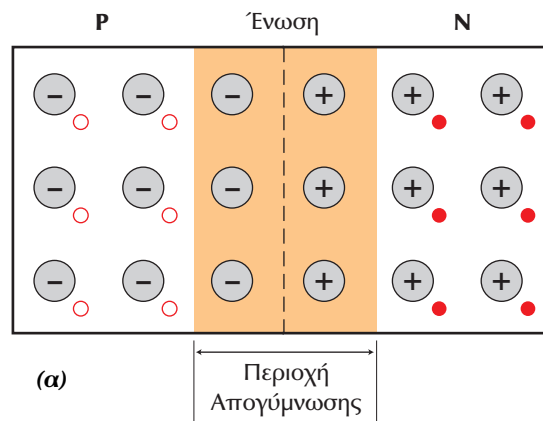


Σχήμα 3.1.1. Επαφή PN

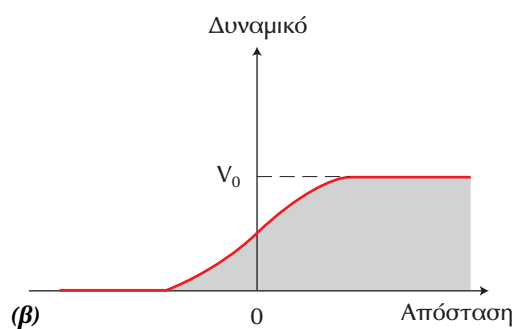
Την στιγμή της δημιουργίας της επαφής PN, τα ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου N που ευρίσκονται κοντά στο σημείο της ένωσης θα κινηθούν προς τον ημιαγωγό τύπου P με σκοπό να επανασυνδεθούν με τις οπές που υπάρχουν εκεί. Έτσι δημιουργείται επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων στα δύο τμήματα, δεξιά και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

Έξω από την περιοχή απογύμνωσης η δομή των ημιαγωγών δεν έχει αλλάξει και αποτελείται από ιόντα και φορείς. Αυτό συμβαίνει διότι για να μπορέσει ένα ηλεκτρόνιο να επανασυνδεθεί με μία οπή ή αντίστροφα, πρέπει να υπερπηδήσει την περιοχή απογύμνωσης η οποία όμως με τη συγκέντρωση των ιόντων σ' αυτήν, αποτελεί ένα εμπόδιο και δημιουργεί ένα **φραγμό δυναμικού**. Το **δυναμικό φραγμού** παριστάνεται με  $V_0$  στο σχήμα 3.1.2(β) και είναι μία διαφορά δυναμικού που η πολικότητα της αντιτίθεται στη διάχυση των φορέων.

Η επαφή PN που δημιουργήθηκε με τον πιο πάνω τρόπο λέγεται **δίοδος PN** διότι αφήνει να διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από αυτήν μόνο προς μία κατεύθυνση όπως θα δούμε στη συνέχεια.



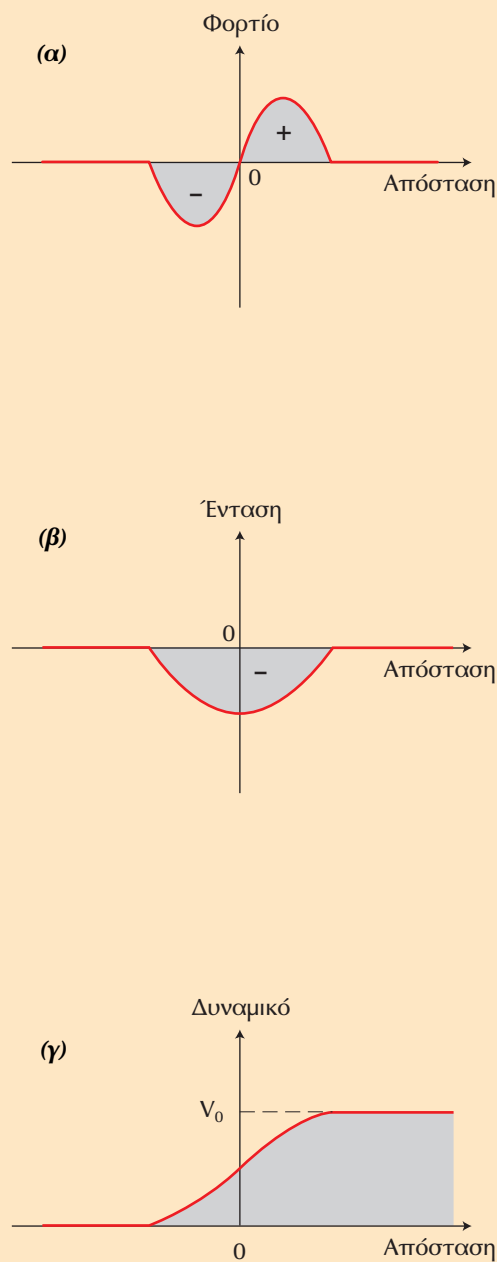
(α)



(β)

**Σχήμα 3.1.2**

(α) Περιοχή απογύμνωσης (β) Δυναμικό φραγμού



**Σχήμα 3.1.3**

(α). Κατανομή φορτίου (β). Ηλεκτρικό πεδίο.  
(γ). Δυναμικό φραγμού.

**Ελεύθερο ανάγνωσμα:**

Το δυναμικό φραγμού δημιουργείται με τον κάτωθι μηχανισμό:

Στην περιοχή απογύμνωσης υπάρχουν θετικά φορτία από την πλευρά του ημιαγωγού τύπου N και αρνητικά φορτία από την πλευρά του ημιαγωγού τύπου P. Με τον τρόπο αυτό το φορτίο του ημιαγωγού ποικίλλει ανάλογα με την απόσταση από το σημείο επαφής και ενώ είναι μηδενικό στην αρχή του ημιαγωγού P όσο πλησιάζουμε προς το σημείο επαφής, γίνεται αρνητικό. Μετά το σημείο επαφής γίνεται θετικό και κατόπιν μηδενίζεται πάλι μέσα στον ημιαγωγό τύπου N.

Η εναλλαγή του φορτίου φαίνεται στο σχήμα 3.1.3. (α). Με μαθηματικούς υπολογισμούς μπορεί να βρεθεί και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει κατά μήκος της περιοχής απογύμνωσης καθώς και το δυναμικό φραγμού (σχήματα 3.1.3.(β),(γ)).

### 3.1.2 Συμβολισμός διόδου και χωρητικότητα φραγμού.

Για να δημιουργηθεί μια διάδος PN, συνδέονται τα άκρα των δύο ημιαγωγικών τμημάτων τύπου P και N με μεταλλικές επαφές και έτσι δημιουργείται η άνοδος της διόδου στην πλευρά του ημιαγωγού P και η κάθοδος της διόδου στην πλευρά N. Η διάδος PN συμβολίζεται με ένα βέλος στην πλευρά P και μία γραμμή στην πλευρά N για λόγους που θα εξηγήσουμε πιο κάτω.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην περιοχή απογύμνωσης υπάρχουν αρνητικά και θετικά φορτία, αποτελούμενα από ιόντα, στα δύο τμήματα της. Τα φορτία αυτά συνδυαζόμενα με το δυναμικό φραγμού που επίσης υπάρχει στα άκρα της περιοχής αυτής, δημιουργεί ένα πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα δίδεται από τη σχέση (3.1.1)

$$C_T = \frac{\text{Μεταβολή φορτίου}}{\text{Διαφορά δυναμικού}} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad 3.1.1$$

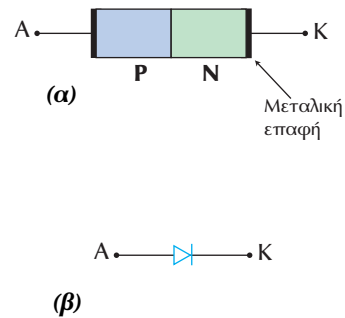
Η διαφορά δυναμικού που υπάρχει στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης εξαρτάται από την εξωτερική τάση  $V$  που τυχόν θα εφαρμοσθεί στα άκρα της διόδου και του δυναμικού φραγμού  $V_0$  σύμφωνα με τη σχέση (3.1.2)

$$\Delta V = (V_0 - V) \quad 3.1.2$$

Η χωρητικότητα αυτή ονομάζεται **χωρητικότητα επαφής ή στατική χωρητικότητα φραγμού** και εξαρτάται, όπως και σε κάθε πυκνωτή, από την γεωμετρία της περιοχής απογύμνωσης δηλαδή από το μήκος της  $L$ , την επιφάνεια της  $S$  καθώς και τη διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού,  $\epsilon$ , σύμφωνα με τη σχέση (3.1.3):

$$C_T = \epsilon \frac{S}{L} \quad 3.1.3$$

Η τιμή της χωρητικότητας επαφής  $C_T$  κυμαίνεται από 1-100 pF.



**Σχήμα 3.1.4.**

(α) Δίοδος PN

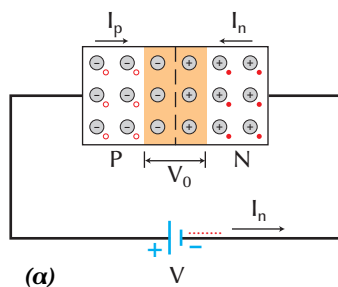
(β) Το σύμβολό της.

## 3.2 Δίοδος PN σε όρθη και αναστροφή πόλωση

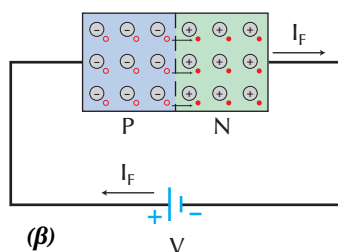
Στην προηγούμενη παράγραφο η επαφή PN ήταν ανοικτή, δηλαδή δεν υπήρχε εξωτερική τάση στα άκρα της. Όταν εφαρμοσθεί εξωτερική τάση στα άκρα μιάς διόδου, υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης της πηγής: κατά την ορθή και κατά την αναστροφή φορά.

### 3.2.1 Πόλωση κατά την ορθή φορά.

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



(α)



(β)

**Σχήμα 3.2.1**

Ορθή πόλωση διόδου PN  
(α).  $V < V_0$ , (β)  $V > V_0$

Συνεπώς τα θετικά φορτία θα κινηθούν από το θετικό πόλο της πηγής προς το τμήμα P της διόδου. Η μετακίνηση αυτή δίδει το ρεύμα  $I_p$  των οπών εντός του τμήματος P. Η κίνηση των ηλεκτρονίων από τον αρνητικό πόλο της πηγής προς το τμήμα N της διόδου θα δώσει το ρεύμα ηλεκτρονίων  $I_n$  εντός του τμήματος N, το οποίο έχει την ίδια φορά με το ρεύμα των οπών λόγω αρνητικού φορτίου των ηλεκτρονίων.

Με τον τρόπο αυτό η συγκέντρωση των οπών στο τμήμα P μεγαλώνει, η περιοχή απογύμνωσης γίνεται στενότερη και ορισμένες οπές με μεγάλη κινητική ενέργεια καταφέρνουν να υπερπηδήσουν το φραγμό δυναμικού και να μπουν στο τμήμα N της διόδου. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει και με τα ηλεκτρόνια της περιοχής N που εισέρχονται στο τμήμα P.

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

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

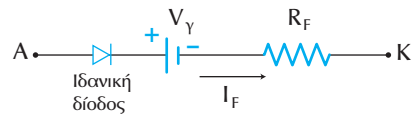
Όσον αφορά δε το ρεύμα του εξωτερικού κυκλώματος αυτό είναι:

$$I_D = I_F - I_0$$

3.2.1

όπου  $I_0$  λέγεται **ανάστροφο ρεύμα κόρου** και είναι το ρεύμα που προέρχεται από την θερμική διέγερση του ημιαγωγού και η τιμή του είναι της τάξης των μικροαμπερ ( $\mu A$ ).

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



**Σχήμα 3.2.2**

Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου PN  
 $V_G$  = Τάση γόνατος,  
 $R_F$  = αντίσταση ορθής φοράς.

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

	Τάση φραγμού $V_0$ , Τάση γόνατος $V_G$	Αντίσταση διόδου ορθής φοράς, $R_F$
<b>Ιδανική δίοδος</b>	0 V	0 $\Omega$
<b>Μη Ιδανική δίοδος (εμπορίου)</b>	0,1 V Ge 0,5 V Si 0,3 V Ge 0,7 V Si	100 -1000 $\Omega$

**Πίνακας 3.2.1.** Χαρακτηριστικές τιμές διόδων

### Παράδειγμα 3.2.1

Μία ιδανική δίοδος πυριτίου συνδέεται σε ορθή πόλωση με πηγή τάσης  $V_i = 12\text{ V}$ , και αντίσταση φόρτου  $R_L = 1\text{ k}\Omega$ .

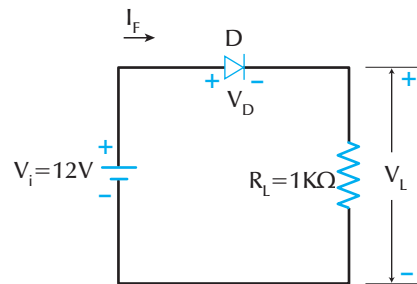
α) Να σχεδιασθεί το κύκλωμα.

β) Να υπολογισθεί το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.

γ) Να υπολογισθεί το ρεύμα, όταν η δίοδος δεν είναι ιδανική και έχει αντίσταση  $R_F = 200\ \Omega$

#### Λύση

α)

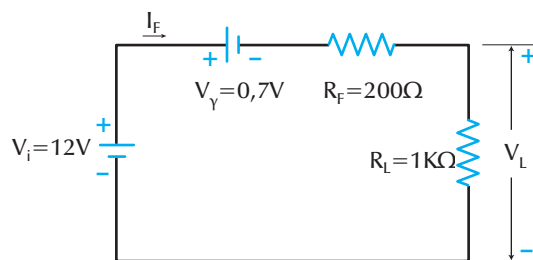


Σχήμα 3.2.3

β) Επειδή η δίοδος θεωρείται ιδανική έχουμε  $R_F = 0$ ,  $V_0 = 0$  οπότε δεν έχουμε πτώση τάσης στη δίοδο και εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm για την αντίσταση φόρτου θα έχουμε:

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

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



Σχήμα 3.2.4

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



### 3.2.2 Πόλωση κατά την ανάστροφη φορά

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

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

Ορισμένα ηλεκτρόνια που έχουν αρκετή κινητική ενέργεια διότι προκύπτουν από διάσπαση των δεσμών των ατόμων του ημιαγωγού, υπερπηδούν και τη νέα περιοχή απογύμνωσης και έτσι στο κύκλωμα υπάρχει ρεύμα  $I_0$  που λέγεται **ανάστροφο ρεύμα κόρου** και είναι πολύ μικρό (της τάξης των  $\mu\text{A}$ ). Το ρεύμα μπορεί να αυξηθεί με παροχή εξωτερικής ενέργειας όπως θερμική, ηλεκτρική ή φωτεινή. Συνεπώς:

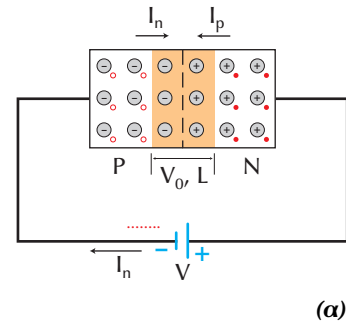
$$I_D = I_0$$

Στην περίπτωση της ανάστροφης πόλωσης το νέο δυναμικό φραγμού είναι:

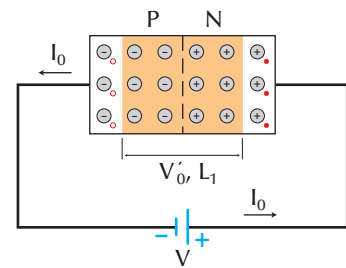
$$V_0' = V_0 + V$$

3.2.2

Σα συνέπεια της αύξησης του δυναμικού φραγμού και της αύξησης του μήκους της περιοχής απογύμνωσης ( $L_1 > L$ ), ελαττώνεται η χωρητικότητα φραγμού  $C_T$  παίρνοντας μια νέα τιμή:



(α)



**Σχήμα 3.2.5** (β)

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

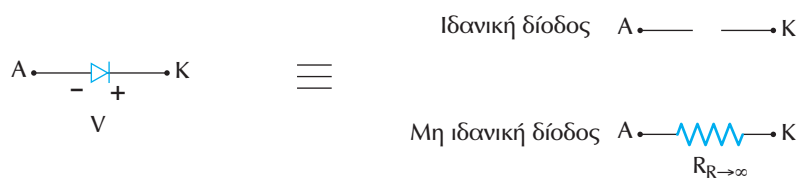
$$C_{T1} = \epsilon \frac{S}{L_1} = \frac{\Delta Q}{V + V_0}$$

3.2.3

όπου  $S$  = επιφάνεια περιοχής απογύμνωσης.

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

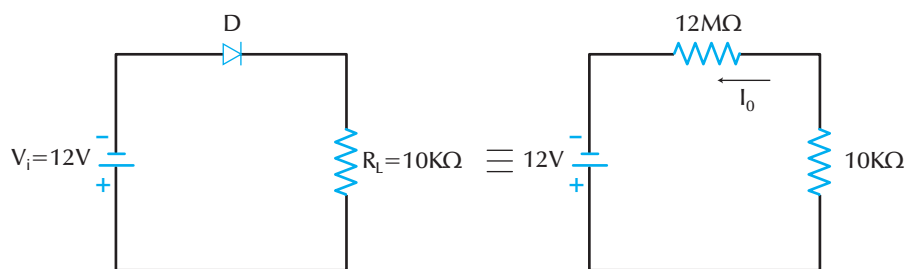
Η σύνδεση της διόδου στο κύκλωμα ισοδυναμεί με ανοικτό κύκλωμα ή με αντίσταση πολύ μεγάλης τιμής.



### Παράδειγμα 3.2.2

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

### Λύση



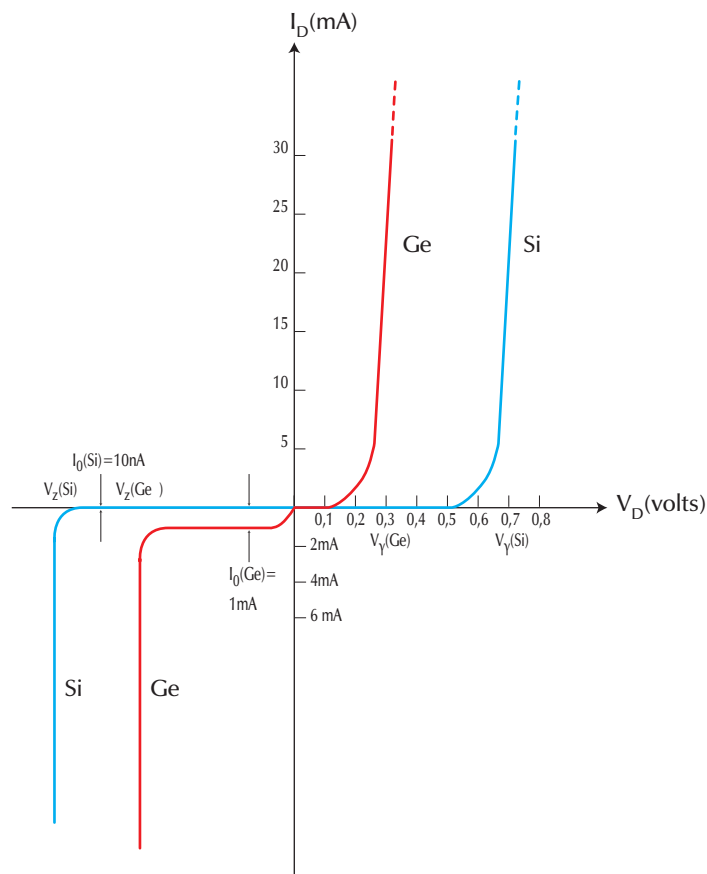
Σχήμα 3.2.6 Κύκλωμα παραδείγματος

$$I_0 = \frac{V_i}{R_R + R_L} \approx \frac{12V}{12M\Omega} = 1\mu A \quad R_R \gg R_L$$

### 3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη και ευθεία φόρτου

#### 3.3.1 Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου PN.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά την ορθή πόλωση της διόδου με την αύξηση της τάσης θα υπάρχει κατ' αρχή ένα μικρό ρεύμα και μετά την τάση γόνατος  $V_\gamma$  μια μεγάλη αύξηση του ρεύματος. Αντίθετα, κατά την ανάστροφη φορά θα υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα, σχεδόν σταθερό, το οποίο θα αυξησει ελάχιστα την τιμή του μέχρις ότου η τάση θα φθάσει μια ορισμένη τιμή, που καλείται τάση διάσπασης ή Zener, οπότε το ρεύμα αυξάνεται απότομα. Συνεπώς υπάρχουν τρεις περιοχές στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας διόδου: η περιοχή ορθής πόλωσης, η περιοχή ανάστροφης πόλωσης και η περιοχή διάσπασης. Στο σχήμα (3.3.1) φαίνονται τυπικές χαρακτηριστικές πυριτίου και γερμανίου.

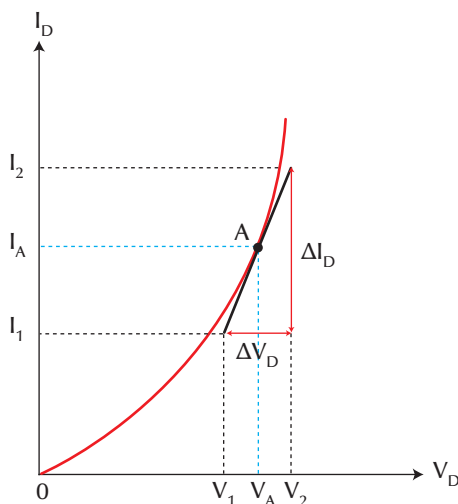


**Σχήμα 3.3.1.**  
Χαρακτηριστικές  
καμπύλες (I - V)  
Si και Ge.

Στο κάθετο άξονα παρίσταται το ρεύμα  $I_D$  σε mA, ενώ στον οριζόντιο η τάση  $V_D$  σε Volt. Σε κάθε σημείο A της χαρακτηριστικής, στην περιοχή της ορθής πόλωσης, μπορεί να ορισθεί η **δυναμική αντίσταση**  $R_{F,ac}$  ως το πηλίκο μιας μικρής μεταβολής της τάσης γύρω από το σημείο A προς την αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος. Οι μεταβολές αυτές είναι οι κάθετες πλευρές ενός ορθογωνίου τριγώνου με υποτείνουσα την εφαπτομένη της καμπύλης στο δεδομένο σημείο A (σχ. 3.3.2). Ορίζεται επίσης η **στατική αντίσταση**  $R_{F,dc}$  ως το πηλίκο της τάσης στο σημείο A προς το αντίστοιχο ρεύμα.

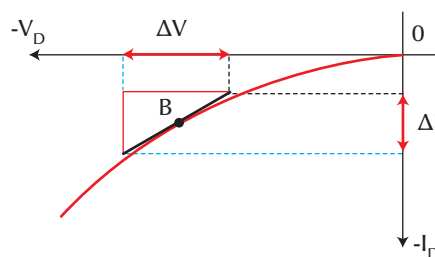
$$R_{F,ac} = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

$$R_{F,dc} = R_F = \frac{V_A}{I_A} \quad 3.3.1$$



**Σχήμα 3.3.2.**

Δυναμική και στατική αντίσταση ορθής φοράς



**Σχήμα 3.3.3.**

Αντίσταση ανάστροφης φοράς.

Με παρόμοιο τρόπο ορίζεται γραφικά και η **αντίσταση ανάστροφης φοράς** ή **πόλωσης**  $R_R$  ως το πηλίκο της μεταβολής της τάσης, στο σημείο B, στην ανάστροφη πόλωση προς την αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος (σχήμα 3.3.3):

$$R_{R,ac} = R_R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad 3.3.2$$

### Ελεύθερο ανάγνωσμα:

Η μαθηματική σχέση της παραπάνω χαρακτηριστικής, χωρίς την περιοχρή διάσπασης, δίνεται από μία εκθετική συνάρτηση :

$$I_D = I_0 (e^{(V/nKT)} - 1) \quad 3.3.3$$

όπου  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου  $K$  η σταθερά Boltzman,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία και  $n$  συντελεστής ιδανικότητας,  $n=1$  για ιδανική δίοδο και  $n=2$  για κακής ποιότητας δίοδο. Για πραγματικές διόδους  $1 < n < 2$ .

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $\Theta=25^\circ\text{C}$  ή  $T=298^\circ\text{K}$  τότε η σχέση (3.3.3) απλοποιείται και γίνεται:(για  $n=1$ )

$$I_D = I_0 (e^{39V_D} - 1) \quad 3.3.4$$

όπου  $I_0$  είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου  $V_D$ ,  $I_D$  είναι η τάση στα άκρα και το ρεύμα της διόδου και  $e$  είναι η βάση των νεπέριων λογάριθμων.

Η χαρακτηριστική στην ορθή πόλωση μπορεί να προσεγγισθεί με ευθύγραμμο τμήμα. Αρκετές φορές χρησιμοποιείται κυρίως για επίλυση ασκήσεων, η προσεγγιστική χαρακτηριστική καμπύλη η οποία προκύπτει αν προεκτείνουμε το τμήμα αυτό στο σημείο καμπής μέχρι να τμήσει τον άξονα των τάσεων. Το σημείο τομής δίνει την τάση γόνατος  $V_Y$ . Έτσι η χαρακτηριστική αποτελείται από δύο ευθύγραμμα τμήματα στην περιοχή της ορθής πόλωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.4. Η περιοχή της ανάστροφης φοράς αποτελείται από άλλα δύο ευθύγραμμα τμήματα :

Ισχύουν:

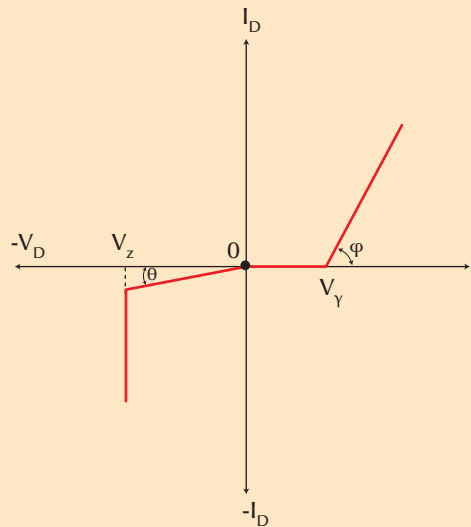
$$\begin{aligned} 0 < V_D < V_Y &\Rightarrow I_D = 0 \\ V_Y < V_D &\Rightarrow I_D = \frac{1}{R_F} V_D \\ V_Z < V_D < 0 &\Rightarrow I_D = \frac{1}{R_R} V_D \\ V_D = V_Z & \quad 3.3.5 \end{aligned}$$

Στην προσεγγιστική καμπύλη και στην περιοχή της ορθής πόλωσης ισχύει:

$$R_{F,ac} = R_{F,dc} = R_F = \frac{1}{\epsilon\phi(\phi)} \quad 3.3.6$$

δηλαδή έχει κλίση  $1/R_F$  ενώ στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης ισχύει:

$$R_R = \frac{1}{\epsilon\phi(\theta)} \quad 3.3.7$$

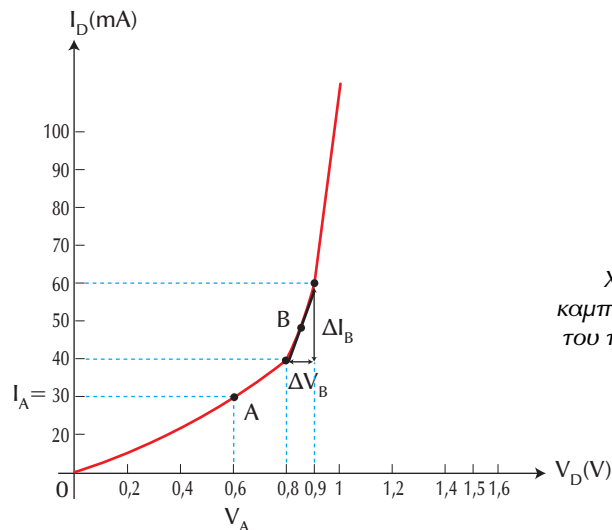


Σχήμα 3.3.4.

Προσεγγιστική καμπύλη διόδου.

### Παράδειγμα 3.3.1:

Δίδεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου. Να ευρεθεί η στατική αντίσταση στο σημείο A και η δυναμική αντίσταση στο σημείο B.



**Σχήμα 3.3.5.**  
Χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου του παραδείγματος

### Λύση

Η στατική αντίσταση στο σημείο A είναι :

$$R_{F,dcA} = \frac{V_A}{I_A} = \frac{0,6V}{30mA} = \frac{6 \times 10^{-1}V}{3 \times 10^{-2}A} = 20 \Omega$$

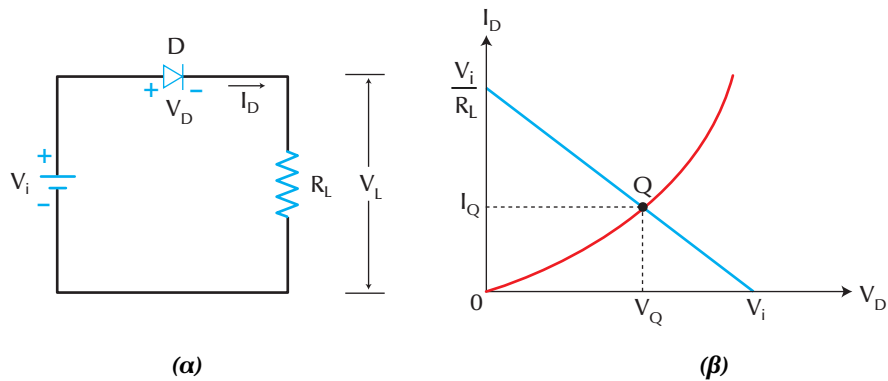
Η δυναμική αντίσταση στο σημείο B είναι:

$$R_{F,acB} = \frac{\Delta V_B}{\Delta I_B} = \frac{(0,9 - 0,8) V}{(60 - 40) mA} = \frac{0,1V}{20 mA} = \frac{1 \times 10^{-1}V}{2 \times 10^{-2}A} = 5 \Omega$$

### 3.3.2 Ευθεία φόρτου

Στην παράγραφο 3.2.1 αναφέρθηκε ότι για να επιλυθεί ένα κύκλωμα που περιέχει διόδο σε ορθή πόλωση, χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο κύκλωμα του. Υπάρχει όμως και ένας δεύτερος τρόπος για την επίλυση του εν λόγω κυκλώματος, ο οποίος είναι γραφικός και όχι υπολογιστικός, και έχει ως εξής:

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



**Σχήμα 3.3.6.** Γραφική επίλυση. (α) Κύκλωμα (β) Ευθεία φόρτου

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

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

Αντικαθιστώντας θα είναι:

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

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

Για να βρεθεί το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με τον άξονα των τάσεων, θα πρέπει να τεθεί στην σχέση (3.3.9),  $I_D = 0$  οπότε:

$$V_D = V_i - 0 R_L = V_i \quad 3.3.10$$

Δηλαδή, το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με τον οριζόντιο άξονα των τάσεων είναι το σημείο όπου η τάση γίνεται ίση με την τάση της πηγής.

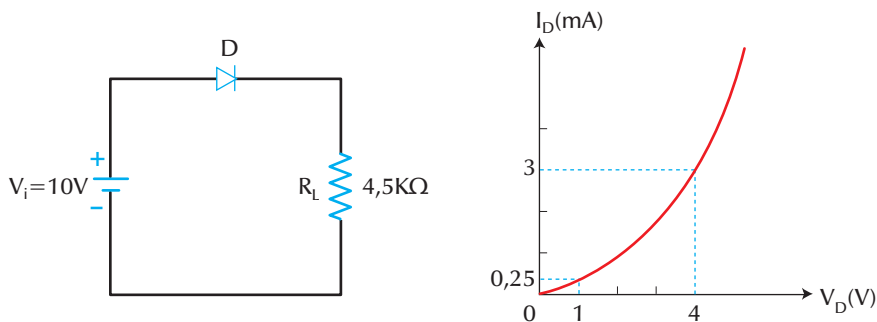
Για να βρεθεί το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με τον άξονα των ρευμάτων, θα πρέπει να τεθεί στη σχέση (3.3.9),  $V_D = 0$  οπότε:

$$V_i = 0 + I_D R_L \Rightarrow I_D = \frac{V_i}{R_L} \quad 3.3.11$$

Οι τιμές αυτές που δίδονται στις σχέσεις (3.3.10) και (3.3.11) προσδιορίζουν την ευθεία φόρτου που χαράχθηκε στο σχήμα 3.3.6. Στο ίδιο σχήμα μπορεί να χαραχθεί και η χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου. Η τομή της χαρακτηριστικής με την ευθεία φόρτου είναι ένα σημείο **Q** που ονομάζεται **σημείο ηρεμίας** ή **σημείο λειτουργίας** του κυκλώματος. Η τάση  $V_Q$  και το ρεύμα  $I_Q$  είναι η τάση και το ρεύμα ηρεμίας της διόδου αντίστοιχα.

### Παράδειγμα 3.3.2

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



Σχήμα 3.3.7

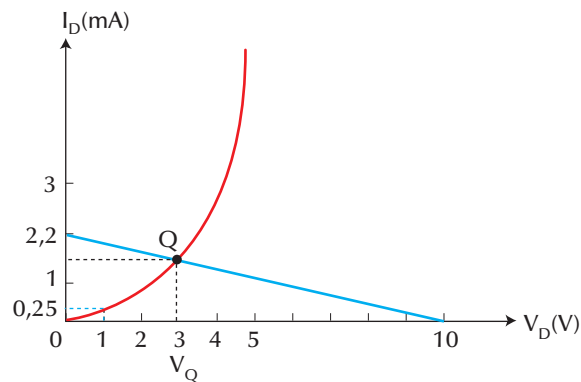
### Λύση

Σχεδιάζουμε την ευθεία φόρτου. Αυτή θα τέμνει τον άξονα των τάσεων στο σημείο  $V_D = 10V$  και τον άξονα των ρευμάτων στο σημείο

$$I_D = \frac{V_i}{R_L} = \frac{10V}{4,5 \times 10^3 \Omega} = 2,22mA$$

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





**Σχήμα 3.3.8** Εύρεση σημείου ηρεμίας (λειτουργίας)

### Παράδειγμα 3.3.3

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

### Λύση

Η καταναλισκομένη ισχύς στη δίοδο είναι:

$$P_D = I_Q \cdot V_Q = 1,6 \text{ mA} \times 2,8 \text{ V} = 4,48 \text{ mW}.$$

Η καταναλισκομένη ισχύς στον φόρτο είναι :

$$P_L = I_Q^2 \cdot R_L = (1,6 \times 10^{-3})^2 \times 2,8 \times 10^3 = 7,168 \text{ mW} \times 10^{-3} = 7,168 \text{ mW}$$

### 3.3.3 Δίοδοι Εμπορίου

Η κατασκευή των διόδων/επαφών PN γίνεται με διάφορες τεχνικές που θα αναλυθούν στο μάθημα Τεχνολογία Ηλεκτρονικών Διατάξεων. Ενδεικτικά αναφέρονται η επαφή με ανάπτυξη, η επαφή κράματος, η επαφή διάχυσης και η ανάπτυξη με μέθοδο επίταξης.

Στο παράρτημα του βιβλίου δίδονται τεχνικά φυλλάδια των διόδων όπως περιγράφονται από τους κατασκευαστές. Οι τιμές που δίδονται για τα κύρια χαρακτηριστικά των διόδων είναι μέγιστες τιμές ανοχής (ratings) πέραν των οποίων η διάδος καταστρέφεται :

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

Οι διάοδοι περιγράφονται με ορισμένους κωδικούς οι οποίοι προδιαγράφουν το είδος του ημιαγωγού π.χ πυριτίου ή γερμανίου, τη σειρά παραγωγής, κ.λ.π. Οι κωδικοί αυτοί περιλαμβάνουν γράμματα του λατινικού αλφαβήτου και αριθμούς. Στον επόμενο πίνακα δίδονται ενδεικτικά τα χαρακτηριστικά ορισμένων διόδων:

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

Πίνακας 3.3.1 Χαρακτηριστικά διόδων εμπορίου

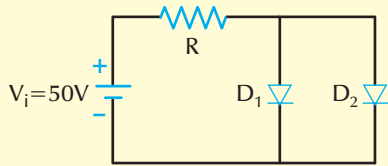
## ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3.1 - 3.3

- Μια δίοδος **άγει** όταν η **τάση** που εφαρμόζεται **στην άνοδο** είναι **θετικότερη** από την **τάση της καθόδου** και συμπεριφέρεται σαν ένας κλειστός διακόπτης. Όταν η **τάση ανόδου** είναι **αρνητικότερη** από την **τάση της καθόδου** η δίοδος είναι πολωμένη ανάτροφα, **δεν** άγει και συμπεριφέρεται σαν ένας ανοικτός διακόπτης.
- Κατά τη δημιουργία επαφής PN δημιουργείται μια περιοχή που καλείται **περιοχή απογύμνωσης**, με θετικά φορτία στον ημιαγωγό τύπου N και αρνητικά φορτία στον ημιαγωγό τύπου P. Η τάση που δημιουργείται στην περιοχή απογύμνωσης ονομάζεται τάση φραγμού ( $V_0$ ).
- Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας δίοδου PN χωρίζεται σε τρεις περιοχές:
  - α. **περιοχή ορθής φοράς** που χαρακτηρίζεται από θετική μικρή τάση και θετικό μεγάλο ρεύμα (mA ή A) μετά την τάση κατωφλίου ή γόνατος.
  - β. **περιοχή ανάστροφης φοράς** που χαρακτηρίζεται από αρνητική τάση και αρνητικό μικρό ρεύμα ( $\mu\text{A}$  ή nA).
  - γ. **περιοχή διάσπασης** που χαρακτηρίζεται από την (αρνητική) τάση Zener και μεγάλο ρεύμα.
- Η **αντίσταση** συνεχούς ρεύματος μιας δίοδου PN είναι **μικρή** κατά την **ορθή φορά** και πολύ **μεγάλη** κατά την **ανάστροφη φορά**.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΑΣΚΗΣΕΙΣ 3.1 - 3.3

- |   |  |
|---|--|
| 3.1.1. Πότε μια δίοδος είναι ορθά πολωμένη;   | 50V. Να ευρεθούν οι αντιστάσεις ορθής και ανάστροφης φοράς.  |
| 3.1.2. Πότε μια δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη;  |  |
| 3.1.3. Περιγράψτε την δημιουργία της περιοχής απογύμνωσης.  | 3.1.5. Αν μια δίοδος μετρηθεί με αναλογικό ωμόμετρο και παρουσιάσει μεγάλη αντίσταση και κατά την ορθή και κατά την ανάστροφη φορά τι συμβαίνει; |
| 3.1.4. Μία δίοδος διαρρέεται από ρεύμα 100 mA όταν είναι ορθά πολωμένη με τάση 2V και από ρεύμα 5 $\mu\text{A}$ όταν είναι ανάστροφα πολωμένη με τάση | α) Είναι ανοικτή<br>β) Είναι βραχυκυκλωμένη<br>γ) Είναι ελαττωματική   |

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



Σχήμα 3.3.9 Κύκλωμα άσκησης 3.6.

3.1.7. Να γίνει η σωστή αντιστοίχιση μεταξύ των κάτωθι στοιχείων:

Τάση φραγμού  $I_R$   
 Τάση γόνατος  $V_0$   
 Ρεύμα ορθής φοράς  $V_\gamma$   
 Ρεύμα ανάστροφης φοράς  $I_F$

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

3.1.9. Η πτώση τάσης στα άκρα μιας καλής δίοδου πυριτίου ορθά πολωμένης είναι:

α.  $0,3V$  γ.  $0,3-0,7V$   
 β.  $5-7V$  δ.  $0,5-0,7V$   
 Σημειώστε την ορθή τιμή.

3.1.10. Στο κύκλωμα του σχήματος 3.3.6, η είσοδος είναι  $V_i = 25$  ημ (ωt). Αν η έξοδος έχει πλάτος  $V_L = 25V$ , να δικαιολογήσετε τι συμβαίνει:

α. Η δίοδος είναι ανοικτή

β. Η αντίσταση είναι βραχυκυκλωμένη

γ. Η δίοδος είναι βραχυκυκλωμένη

δ. Το β και γ.

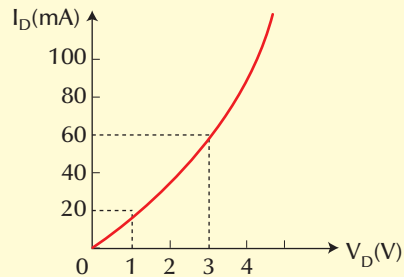
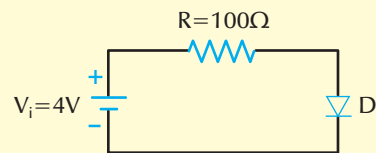
3.1.11. Να σχεδιασθεί η χαρακτηριστική μιας δίοδου με τα εξής στοιχεία:

$V_D = 0$	$V_D = 10$	$V_D = 30$	Volt
$I_D = 0$	$I_D = 2$	$I_D = 10$	mA

$V_D = 50$	$V_D = 65$	$V_D = 90$	Volt
$I_D = 20$	$I_D = 35$	$V_D = 50$	mA

Να βρεθεί το σημείο λειτουργίας, με την γραφική μέθοδο, αν η δίοδος είναι συνδεδένη σε ορθή πόλωση με αντίσταση  $R = 2000\Omega$  και πηγή συνεχούς ρεύματος  $V_i = 100V$ .

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



Σχήμα 3.3.10 Κύκλωμα άσκησης 3.1.12.

## 3.4 Δίοδος μεταβλητής χωρητικότητας (Varicap ή Varactor)

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.2, η περιοχή απογύμνωσης μιας διόδου επαφής PN αποτελεί ένα πυκνωτή με “οπλισμούς” τα δύο τμήματα της περιοχής τύπου P και N που περιέχουν αρνητικά και θετικά φορτία αντίστοιχα. Η χωρητικότητα  $C_T$  του πυκνωτή αυτού εξαρτάται από τη διατομή  $S$  της διόδου, το μήκος  $L$  της περιοχής απογύμνωσης και το διηλεκτρικό  $\epsilon$ , σύμφωνα με τη σχέση (3.1.3):

$$C_T = \epsilon \frac{S}{L} \quad 3.4.1$$

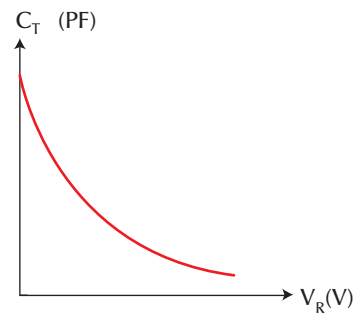
Αποδεικνύεται ότι η χωρητικότητα  $C_T$  μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της τιμής της εξωτερικής τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου, όταν συνδέεται σε ανάστροφη πόλωση, σύμφωνα με τη σχέση (3.4.2) και το σχήμα 3.4.1.

$$C_T = \frac{K}{\sqrt{V_0 + V_R}} \quad 3.4.2$$

όπου  $K$  είναι μία σταθερά η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία και το υλικό του ημιαγωγού,  $V_0$  είναι το δυναμικό φραγμού και  $V_R$  είναι η εφαρμοζόμενη ανάστροφη τάση.

Η διάδος δηλαδή, όταν πολώνεται ανάστροφα, αντιστοιχεί με ένα μεταβλητό πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται με την εξωτερική τάση, σε αντίθεση με ένα πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την εφαρμοζόμενη στα άκρα του τάση.

**Η διάδος αυτή ονομάζεται διάδος μεταβλητής χωρητικότητας ή διάδος Βάρικαπ (Varicap) ή Varactor.**



**Σχήμα 3.4.1**  
Μεταβολή της χωρητικότητας  
διόδου Varicap

### Ελεύθερο ανάγνωσμα:

Εάν δεν υπάρχει εξωτερική τάση ( $V_R = 0$ ), η σχέση (3.4.2) γράφεται:

$$C_T(0) = \frac{K}{\sqrt{V_0}} \Rightarrow K = C_T(0) \cdot \sqrt{V_0} \quad 3.4.3$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του  $K$  η σχέση (3.4.2) γράφεται:

$$C_T(V_R) = \frac{C_T(0) \cdot \sqrt{V_0}}{\sqrt{V_0 + V_R}} = \frac{C_T(0)}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_R}{V_0}\right)}} \quad 3.4.4$$

Η σχέση (3.4.4) δίνει την τιμή της χωρητικότητας με εξωτερική (ανάστροφη) τάση, συναρτήσει της αρχικής τιμής χωρίς εξωτερική τάση και του λόγου των τάσεων πηγής και φραγμού.

### Παράδειγμα 3.4.1

Δίνεται η χωρητικότητα χωρίς εξωτερική τάση μιάς διόδου Varicap,  $C_T(0) = 1,6 \text{ pF}$ . Να ευρεθεί η χωρητικότητα της διόδου όταν η εφαρμοζόμενη στα άκρα τάση της είναι 24 φορές μεγαλύτερη από το φραγμό δυναμικού της.

### Λύση

Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.4.4) θα έχουμε:

$$C_T(V_R) = \frac{1,6 \text{ pF}}{\sqrt{1 + 24}} = \frac{1,6}{\sqrt{25}} \text{ pF} = 0,32 \text{ pF}$$



**Σχήμα 3.4.2.**  
Συμβολισμός διόδου Varicap

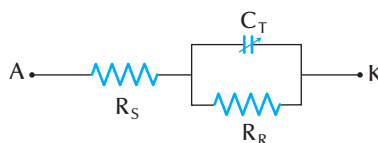
Η διάδος Varicap συμβολίζεται με ένα βέλος στην άνοδο και με ένα πυκνωτή στην κάθοδο που δείχνει ότι η διάδος είναι ένας μεταβλητός πυκνωτής (σχήμα 3.4.2)

Το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου Varicap αποτελείται από μια αντίσταση  $R_s$  που είναι η αντίσταση ορθής πόλωσης, σε σειρά με την παράλληλη συνδεσμολογία της μεταβλητής χωρητικότητας  $C_T$  και της αντίστα-

σης ανάστροφης φοράς ή ανάστροφης πόλωσης  $R_R$ .

Η τιμή της  $R_S$  είναι πολύ μικρή (μερικά  $\Omega$ ), η τιμή της  $R_R$  είναι της τάξης των  $M\Omega$  ενώ η τιμή της  $C_T$  κυμαίνεται από 1 έως και 200 pF.

Στον πίνακα 3.4.1 περιγράφονται



**Σχήμα 3.4.3.**

Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου Varicap.

Varicap	$R_S$ (max)	$C_T$ σε τάση $V_R$	$I_R/V_R$
BB 417	0,75 $\Omega$	$C_{T(4V)} / C_{T(15V)} = 3,5$	10 nA/28 V
BBY 51	0,37 $\Omega$	2,7 - 7,5 pF/7 V $C_{T1}/C_{T4} = 1,75$	10 nA/7 V
BB 119	1,5 $\Omega$	17 pF/10 V $C_{T4}/C_{T10} = 1,3$	50 nA/15 V

ορισμένα χαρακτηριστικά διόδων Varicap του εμπορίου:

**Πίνακας 3.4.1** Varicap εμπορίου

#### Ελεύθερο ανάγνωσμα:

Η διάδος Varicap εφαρμόζεται στη διαμόρφωση σήματος κατά F.M. καθώς και σε άλλες τηλεπικοινωνιακές τεχνικές για την επιλογή συχνότητας .

Σ' ένα συντονιζόμενο κύκλωμα LC, η συχνότητα συντονισμού δίδεται από τη σχέση (3.4.5)

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad 3.4.5$$

Όταν μεταβάλλεται η χωρητικότητα, μεταβάλλεται και η συχνότητα του συντονισμένου κυκλώματος. Όταν δε η χωρητικότητα μεταβάλλεται αντίστροφως ανάλογα με μια μεταβαλλόμενη τάση, τότε και η συχνότητα συντονισμού ακολουθεί με τρόπο ανάλογο την μεταβολή της τάσης. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιείται στη μετάδοση ακουστικού σήματος με διαμόρφωση κατά συχνότητα (F.M.). Με τον ίδιο τρόπο επιλέγεται η συχνότητα συντονισμού ενός ραδιοφωνικού ή τηλεοπτικού δέκτη.

Η ευαισθησία των δεκτών αυτών είναι πολύ μεγάλη και για μικρή μεταβολή της χωρητικότητας υπάρχει μεγάλη μεταβολή της συχνότητας και αντίστροφα. Αποδεικνύεται ότι για μεταβολή της συχνότητας κατά  $\Delta f$ , η χωρητικότητα θα μεταβληθεί κατά  $\Delta C$  όπου:

$$\Delta C \approx 2 \cdot \frac{\Delta f \cdot C}{f} \quad 3.4.6$$

### Παράδειγμα 3.4.2

Ένα συντονισμένο κύκλωμα σε συχνότητα  $f=100$  MHz αποτελείται από πηνίο και πυκνωτή χωρητικότητας  $C=75$  pF. Να υπολογισθεί η μεταβολή της χωρητικότητας, ώστε το κύκλωμα να συντονίζεται σε άλλη συχνότητα με απόκλιση 80 KHz από την αρχική.

### Λύση

Η σχέση (3.4.6) γίνεται :

$$\Delta C \approx 2 \cdot \frac{\Delta f \cdot C}{f} = \frac{2 \times 8 \times 10^4 \times 75 \times 10^{-12}}{100 \times 10^6} = 0,12 \text{ pF}$$

## 3.5 Δίοδος σότκυ (Schottky)

Εκτός από διόδους που σχηματίζονται με επαφή δύο ημιαγωγών, υπάρχουν και διόδοι με επαφή μετάλλου και ημιαγωγού τύπου N. Τα μέταλλα συμπεριφέρονται ηλεκτρονικά σαν τον ημιαγωγό τύπου P. Η διάδος αυτή **καλείται διάδος σότκυ (Schottky)** από τον ομώνυμο ερευνητή. Η διάδος Schottky παρουσιάζει χαρακτηριστικά παραπλήσια με μια απλή διάοδο PN, αλλά έχει αρκετά πλεονεκτήματα.

Σε αντίθεση με την διάοδο PN, όταν πολώνεται κατά την ορθή φορά, οι φορείς πλειονότητας του ημιαγωγού τύπου N, που είναι τα ηλεκτρόνια, εισέρχονται στο μέταλλο και ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει συσσώρευση φορτίων όπως συμβαίνει στην περιοχή απογύμνωσης μιας διόδου PN. Επομένως ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων, μέχρι την επανασύνδεση τους με τις οπές, είναι ελάχιστος σε αντίθεση με την διάοδο PN.

Όταν μια διάodos PN αλλάξει πολικότητα από ορθή σε ανάστροφη, το ανάστροφο ρεύμα, στιγμιαία είναι ίσο με το ρεύμα ορθής φοράς. Μετά όμως από ορισμένο χρόνο, που καλείται **χρόνος αποκατάστασης  $t_r$** , το ανάστροφο ρεύμα γίνεται πολύ μικρό. Η διάδος Schottky είναι μία διάodos με πάρα πολύ μικρό χρόνο αποκατάστασης (της τάξης nsec) λόγω της μη συσσώρευσης φορτίων.

Η διάodos Schottky, για τους ανωτέρω λόγους, χρησιμοποιείται στα ψηφιακά κυκλώματα όπου απαιτείται γρήγορη μετάβαση από την αγωγιμότητα (ορθή πόλωση) στην αποκοπή (ανάστροφη πόλωση) και σε



διακοπτόμενα τροφοδοτικά (παλμοτροφοδοτικά) για τους ίδιους λόγους. Επίσης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής τάσης, γιατί η επαφή μετάλλου -ημιαγωγού παρουσιάζει μικρότερο φραγμό δυναμικού (0,3V) από την επαφή PN (0,7 V) (Low power Schottky TTL).

Το σύμβολο της διόδου Schottky μοιάζει με το σύμβολο της διόδου PN αλλά έχει στο μέρος της καθόδου το γράμμα S (σχήμα 3.5.1):

Η διόδος Schottky είχε ανακαλυφθεί από τη δεκαετία του '50 αλλά μόνο γύρω στα 1970, με την ανάπτυξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, άρχισε να κατασκευάζεται και να χρησιμοποιείται ευρέως.



**Σχήμα 3.5.1.**  
Σύμβολο διόδου Schottky

## 3.6 Δίοδος Ζένερ (Zener) και εφαρμογές

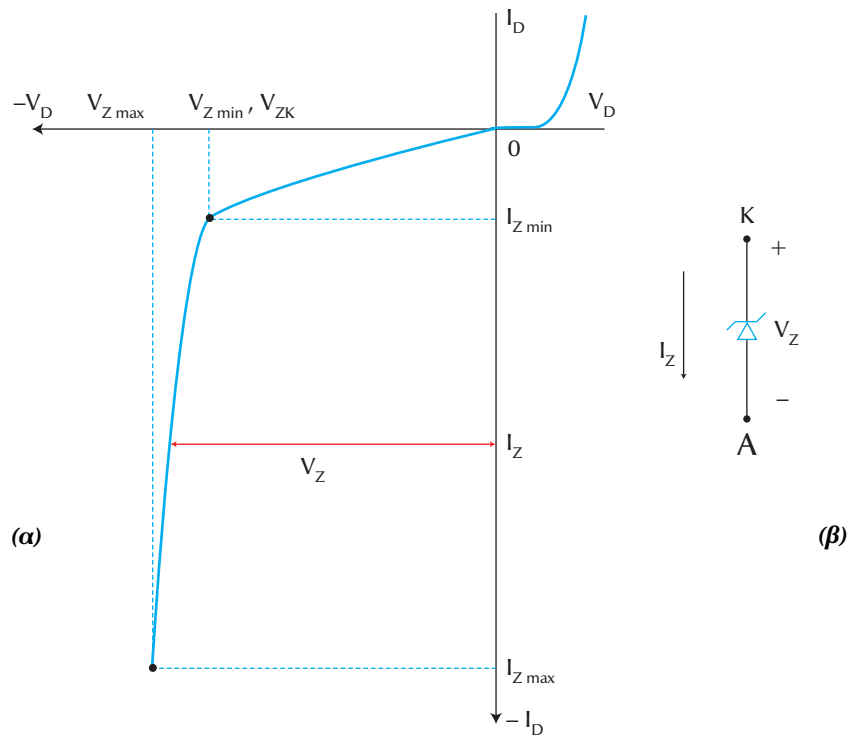
### 3.6.1 Δίοδος Zener

Κατά την ανάστροφη πόλωση μιας διόδου PN με εξωτερική συνεχή τάση, το ρεύμα που διέρχεται μέσα από την διόδο  $I_R$  είναι πολύ μικρό. Όσο αυξάνεται η τιμή της εξωτερικής τάσης, τόσο αυξάνεται (ελαφρά) και το ανάστροφο ρεύμα, μέχρι μια ορισμένη τιμή της τάσης πέραν από την οποία το ρεύμα αυξάνεται απότομα. Η ανάστροφη αυτή τάση ονομάζεται **τάση Zener** προς τιμή του επιστήμονα που ανακάλυψε το ομώνυμο φαινόμενο.

Πράγματι, με την αύξηση της ανάστροφης τάσης αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο και τα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα στη διόδο αποκτούν αρκετά μεγάλη κινητική ενέργεια. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι σε κάποια τιμή της τάσης τα ηλεκτρόνια σπάνε τους δεσμούς των ατόμων του ημιαγωγού και απελευθερώνεται μεγάλος αριθμός νέων ηλεκτρονίων που συμβάλλει στη δημιουργία ισχυρού ρεύματος. Η περιοχή τάσεων και ρευμάτων όπου συμβαίνει **το φαινόμενο Zener**, λέγεται περιοχή διάσπασης (breakdown) της διόδου.

Αν σε μία κοινή διόδο, όπως αυτές που εξετάστηκαν μέχρι τώρα, εφαρμοσθεί ανάστροφη τάση μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης, η διόδος καταστρέφεται. Για τον λόγο αυτό, κατασκευάζονται ειδικές διόδοι που λειτουργούν στην περιοχή διάσπασης και λέγονται **διόδοι Zener** και χαρακτηρίζονται από την **τάση Zener ( $V_Z$ )**.

Στο σχήμα 3.6.1(α) φαίνεται η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης (I-V) μιας διόδου Zener και στο σχήμα 3.6.1(β) φαίνεται το σύμβολο της διόδου αυτής.



Σχήμα 3.6.1. Δίοδος Zener (α) Χαρακτηριστική. (β) Σύμβολο

Από την καμπύλη φαίνεται ότι μετά από την τάση κατωφλίου ( $V_{ZK}$ ) ή ελάχιστη τάση Zener ( $V_{Zmin}$ ), η χαρακτηριστική καμπύλη είναι σχεδόν ένα ευθύγραμμο τμήμα με κλίση  $1/R_Z$ , όπου  $R_Z$  είναι η αντίσταση της διόδου και ισχύει:

$$R_Z = \frac{V_{Zmax} - V_{Zmin}}{I_{Zmax} - I_{Zmin}} \quad 3.6.1$$

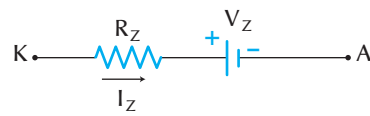
Η αντίσταση  $R_Z$  είναι πολύ μικρή (0 - 500 Ω). Η τάση **Zener**,  $V_Z$  ορίζεται ως η τάση που αντιστοιχεί στο ρεύμα  $I_Z$  όπου :

$$I_Z = \frac{I_{Zmax} + I_{Zmin}}{2} \quad 3.6.2$$

δηλαδή το  $I_Z$  είναι το ημιάθροισμα των ακραίων τιμών του ρεύματος της διόδου.

Αντίθετα, η ελάχιστη και μέγιστη τάση Zener δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και πρακτικά  $V_{Zmax} \approx V_{Zmin} \approx V_Z$

Το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου Zener αποτελείται από μία πηγή τάσης  $V_Z$  σε σειρά με αντίσταση  $R_Z$  όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.2.



**Σχήμα 3.6.2.**  
Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου Zener

Τα χαρακτηριστικά των διόδων Zener, τα οποία προδιαγράφονται από τους κατασκευαστές, είναι τα ακόλουθα:

- α. Η τάση Zener ( $V_Z$ ) η τιμή της οποίας κυμαίνεται από 2,4 έως και 200V.
- β. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα  $I_{Zmax}$  ή η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς  $P_{max}$ .
- γ. Η δυναμική αντίσταση της διόδου  $R_Z$  και
- δ. Ο συντελεστής θερμοκρασίας  $a$ , ο οποίος δηλώνει το ρυθμό μεταβολής της τάσης  $V_Z$  με τη θερμοκρασία. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής είναι είτε αρνητικός, είτε θετικός και εκφράζεται σε ποσοστό ανά βαθμούς Κελσίου ( $\pm\% / ^\circ C$ ).

Οι τιμές της τάσης Zener των διόδων Zener του εμπορίου κυμαίνονται από 2,4 έως 200V και ακολουθούν κατα προσέγγιση τους πίνακες E12 και E24 των αντιστάσεων.

### Παράδειγμα 3.6.1

Για τη δίοδο Zener 1N5233, που έχει  $a = 3,8 \times 10^{-4} / ^\circ C$  και  $V_Z = 6 V$ , να ευρεθεί η αύξηση της τάσης  $V_Z$ , όταν η θερμοκρασία αυξηθεί κατά  $\theta = 50 ^\circ C$ .

### Λύση

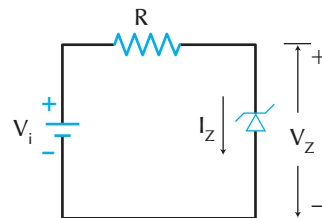
Η αύξηση της τάσης Zener για αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $50 ^\circ C$  θα είναι:

$$\Delta V = V_Z \times a \times \theta = 6,0 \times 0,00038 \times 50 = 0,114 V.$$

### Παράδειγμα 3.6.2

Στο κάτωθι κύκλωμα να υπολογισθεί το ρεύμα  $I_Z$ , όταν η δίοδος Zener έχει τάση  $V_Z = 6,8 V$ , η αντίσταση είναι  $R = 950 \Omega$  και η τάση της πηγής εισόδου είναι  $V_i = 10 V$  και για τις περιπτώσεις:

- α)  $R_Z = 0$
- β)  $R_Z = 50 \Omega$



### Λύση

Εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα θα είναι:

$$\alpha) R_z = 0$$

$$I_z = \frac{V_i - V_z}{R} \Rightarrow I_z = \frac{10 - 6,8V}{950 \Omega} = \frac{3,2V}{950 \Omega} = 3,36mA.$$

$$\beta) R_z = 50\Omega$$

$$V_i = (R + R_z) I_z + V_z \text{ ó } I_z = \frac{V_i - V_z}{R + R_z} \Rightarrow I_z = \frac{10 - 6,8V}{(950 + 50) \Omega} = \frac{3,2V}{1000 \Omega} = 3,2mA.$$

Παρατηρούμε ότι η τιμή του  $I_z$  δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Να σχολιασθεί.

### 3.6.2 Χρήση της διόδου Zener για σταθεροποίηση τάσης

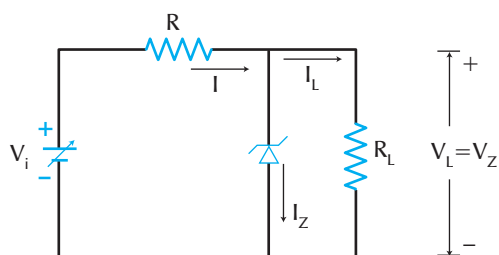
Οι εφαρμογές της διόδου Zener είναι πολλές. Η σημαντικότερη όμως εφαρμογή είναι η σταθεροποίηση τάσης. Πολλές φορές είναι ανάγκη να υπάρχει μία σταθερή τάση, ανεξάρτητη από τις όποιες μεταβολές των τιμών των στοιχείων του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Σταθερή τάση μπορεί να χρειασθεί π.χ. είτε ως τάση αναφοράς σε άλλα κυκλώματα, είτε για να προστατευθεί ένα ευαίσθητο όργανο μέτρησης, όπως το μιλιαμπερόμετρο,

από υπερεντάσεις οι οποίες μπορεί να είναι καταστροφικές.

Ένα κλασικό απλό κύκλωμα σταθεροποίησης φαίνεται στο σχήμα 3.6.3.

Στο παραπάνω κύκλωμα, η τάση στα άκρα της αντίστασης φόρτου  $R_L$  πρέπει να μένει σταθερή ανεξάρτητα από τις μεταβολές της τάσης  $V_i$  ή της αντίστασης  $R$ . Η αντίστα-

ση φόρτου μπορεί να είναι η αντίσταση εισόδου είτε μιας τροφοδοτικής διάταξης είτε ενός οργάνου μέτρησης. Θεωρούμε  $R_z = 0$ .



Σχήμα 3.6.3.

Κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης

Εφαρμόζοντας τους νόμους των τάσεων και ρευμάτων, καθώς και το νόμο του Ωμ (Ohm) στο κύκλωμα του σχήματος ( 3.6.3.) θα ισχύει :

$$V_i = IR + V_Z, \quad I = I_Z + I_L, \quad I_L = \frac{V_Z}{R_L}, \quad V_L = V_Z \quad 3.6.3$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των I και I<sub>L</sub> θα είναι:

$$V_i = I_Z R + \frac{V_Z}{R_L} R + V_Z \quad 3.6.4$$

Η εξίσωση (3.6.4) δίνει τη μεταβολή της τάσης εισόδου συναρτήσει του ρεύματος και τάσης της διόδου Zener και παριστάνει γραφικά μία ευθεία γραμμή πάνω στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου. Η ευθεία αυτή καλείται **ευθεία φόρτου**, κατ' αναλογία με ότι ισχύουν για την δίοδο PN.

Στη σχέση (3.6.4) το μόνο σταθερό μέγεθος είναι η τάση της διόδου Zener V<sub>Z</sub>. Όλα τα άλλα μεγέθη μπορούν να μεταβάλλονται. Έτσι υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις:

- α. Η αντίσταση φόρτου R<sub>L</sub> ή το ρεύμα φόρτου I<sub>L</sub> παραμένει σταθερό και μεταβάλλεται η τάση εισόδου V<sub>i</sub> καθώς και το ρεύμα της διόδου I<sub>Z</sub>.
- β. Η τάση εισόδου V<sub>i</sub> παραμένει σταθερή και μεταβάλλονται τα ρεύματα φόρτου I<sub>L</sub> και διόδου I<sub>Z</sub>.

Στην περίπτωση (α) που η αντίσταση φόρτου R<sub>L</sub> παραμένει σταθερή, η σχέση (3.6.4) γράφεται:

$$V_i = I_Z R + \frac{V_Z}{R_L} R + V_Z \Rightarrow V_i = \left( I_Z + \frac{V_Z}{R_L} \right) R + V_Z \Rightarrow$$

$$R = \frac{V_i - V_Z}{I_Z + \frac{V_Z}{R_L}} \quad 3.6.5$$

Από την εξίσωση (3.6.5) μπορεί να υπολογισθεί η αντίσταση R.

Η μέγιστη τιμή της αντίστασης R είναι όταν ο αριθμητής της σχέσης (3.6.5) μεγιστοποιηθεί και ο παρονομαστής ελαχιστοποιηθεί. Συνεπώς θα έχουμε:

$$R_{\max} = \frac{V_{i\max} - V_Z}{I_{Z\min} + \frac{V_Z}{R_L}} \quad 3.6.6$$

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης  $R_{\min}$  όταν ο αριθμητής της σχέσης (3.6.5) ελαχιστοποιηθεί και ο παρονομαστής μεγιστοποιηθεί.

$$R_{\min} = \frac{V_{i\min} - V_Z}{I_{Z\max} + \frac{V_Z}{R_L}} \quad 3.6.7$$

### Παράδειγμα 3.6.3

Η τάση της πηγής εισόδου  $V_i$  του σχήματος 3.6.3 μεταβάλλεται από  $V_{i\min} = 15 \text{ V}$  μέχρι  $V_{i\max} = 25 \text{ V}$ . Εάν  $R_L = 10\text{K}\Omega$  και  $V_Z = 10\text{V}$ ,  $R_Z = 0$ ,  $I_{Z\min} = 1\text{mA}$ , να ευρεθεί η μέγιστη τιμή της εν σειρά αντίστασης  $R$ .

#### Λύση

Τα δεδομένα είναι:  $15\text{V} < V_i < 25\text{V}$ ,  $V_Z = 10\text{V}$ ,  $I_{Z\min} = 1\text{mA}$ ,  $R_Z = 0$ .  
Η σχέση (3.6.6) δίνει :

$$R_{\max} = \frac{V_{i\max} - V_Z}{I_{Z\min} + \frac{V_Z}{R_L}} = \frac{25 - 10\text{V}}{10^{-3} + \frac{10}{10 \times 10^3}} = \frac{15\text{V}}{2 \times 10^{-3}} = 7,5 \times 10^3 \Omega = 7,5\text{K}\Omega$$

### Παράδειγμα 3.6.4

Στο κύκλωμα του προηγούμενου παραδείγματος, το ρεύμα φόρτου πρέπει να παραμένει σταθερό  $I_L = 75 \text{ mA}$ . Δίδονται οι τιμές:  $R = 200 \Omega$ ,  $V_Z = 7.5 \text{ V}$ ,  $I_{Z\min} = 2 \text{ mA}$ ,  $I_{Z\max} = 30 \text{ mA}$ . Να ευρεθούν η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης εισόδου  $V_i$  ώστε το ρεύμα φόρτου να παραμείνει σταθερό.

#### Λύση

Επειδή το ρεύμα φόρτου παραμένει σταθερό και η αντίσταση φόρτου είναι σταθερή, διότι:

$$R_L = \frac{V_Z}{I_L} = \frac{7,5\text{V}}{75 \times 10^{-3}\text{A}} = 0,1 \times 10^3 \text{K}\Omega = 100\text{K}\Omega.$$

Η σχέση (3.6.4.) γράφεται :

$$V_i = R I_Z + \left( \frac{R}{R_L} + 1 \right) V_Z \quad \text{όπου μόνο το ρεύμα Zener μεταβάλλεται.}$$

Επομένως η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της  $V_i$  είναι :

$$V_{i\min} = 200 \times 2 \times 10^{-3} + \left( \frac{200}{100} + 1 \right) \times 7,5 = 0,4 + 22,5 = 22,9V$$

$$V_{i\max} = 200 \times 30 \times 10^{-3} + \left( \frac{200}{100} + 1 \right) \times 7,5 = 6 + 22,5 = 28,5V$$

### Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η 3.4 - 3.6

- **Η δίοδος Varactor ή Varicap** είναι μια δίοδος που πολώνεται ανάστροφα και η χωρητικότητα της μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την εξωτερική τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της.
- **Η δίοδος Varicap αντιστοιχεί με ένα μεταβλητό πυκνωτή** σε αντίθεση με ένα σταθερό πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα παραμένει σταθερή.
- **Η δίοδος Schottky** είναι μια επαφή μετάλλου και ημιαγωγού και το πλεονέκτημα της από την επαφή PN είναι ότι χρειάζεται πολύ μικρότερο χρόνο για να μεταβεί από την κατάσταση αγωγιμότητας (ορθή πόλωση) στην κατάσταση αποκοπής (ανάστροφη πόλωση).
- **Η δίοδος Schottky χρησιμοποιείται σε ψηφιακά κυκλώματα** χαμηλής τάσης διότι η τάση φραγμού της περιοχής απογύμνωσης είναι μικρότερη από αυτή μιας κοινής διόδου PN ( 0,25 -0,3 V ).
- **Η δίοδος Zener λειτουργεί στην περιοχή διάσπασης**, πολώνεται ανάστροφα και χαρακτηρίζεται από την απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος, όταν η τάση στα άκρα της φθάσει μια ορισμένη τιμή που λέγεται τάση Zener.
- **Η δίοδος Zener μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση τάσης**, επειδή παρέχει σταθερή τάση στα άκρα της, ανεξάρτητα από τη μεταβολή στην τάση εισόδου ή τη μεταβολή του ρεύματος φόρτου.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ 3.4 - 3.6

3.4.1. Τι είναι η δίοδος μεταβλητής χωρητικότητας;

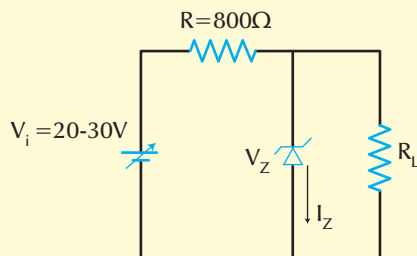
3.4.2. Δώστε τη μεταβολή της χωρητικότητας μιας διόδου μεταβλητής χωρητικότητας με τη μεταβολή της ανάστροφης τάσης.

3.4.3. Πώς γίνεται η σταθεροποίηση τάσης με Zener;

3.4.4. Αν σε ένα σταθεροποιητή τάσης με Zener, η τάση εισόδου παίρνει μια ελάχιστη τιμή, να υπολογισθεί η μεταβολή στο συνολικό ρεύμα του κυκλώματος, στο ρεύμα φόρτου και Zener.

3.4.5. Δίδεται το κύκλωμα. Η δίοδος θεωρείται ιδανική. Αν  $R_L = 1000 \Omega$ ,  $V_Z = 6,8V$  να υπολογισθούν το ρεύματα:

$$I_L, I_{Zmin}, I_{Zmax}.$$



3.4.6. Να υπολογισθεί η τιμή της χωρητικότητας  $C_T$  σε μια δίοδο Varicap όταν η τιμή της χωρητικότητας χωρίς τάση είναι  $C_T(0) = 100 \text{ pF}$ , η τάση

φραγμού  $V_0 = 0,7 \text{ V}$  και η αντίστροφη τάση  $V_R = 8,3 \text{ V}$ .

3.4.7. Αν μια δίοδος Zener μετρηθεί με αναλογικό ωμόμετρο και συνδεθεί σε ανάστροφη φορά, η αντίσταση της είναι :

α. Πολύ μεγάλη

β. Μηδενική

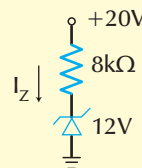
γ. Μικρή.

3.4.8. Να γίνει η σωστή αντιστοίχιση:

Χωρητικότητα δίοδου	$I_R$
Varactor	
Τάση Zener	$V_R$
Ρεύμα φόρτου	$V_Z$
Ρεύμα δίοδου	$I_L$
Ανάστροφη Τάση	$C_T$
Ανάστροφο ρεύμα	$I_Z$

3.4.9. Για συντονισμό ενός ραδιοφώνου στη ζώνη FM (88MHz - 108MHz), χρησιμοποιείται δίοδος μεταβαλλόμενης χωρητικότητας. Να ευρεθεί η περιοχή μεταβολής της χωρητικότητας, όταν για συντονισμό σε συχνότητα  $f = 100 \text{ MHz}$  είναι  $C = 100 \text{ pF}$ .

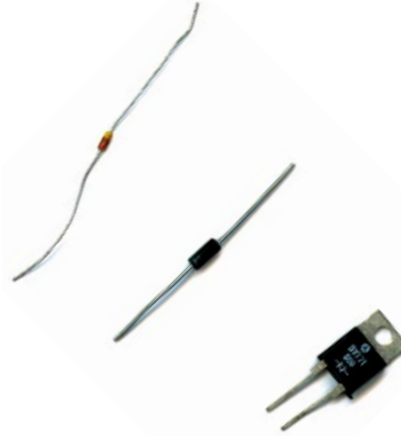
3.4.10. Να ευρεθεί το ρεύμα  $I_Z$  στο κύκλωμα:





### 3.7 Εφαρμογές των διόδων

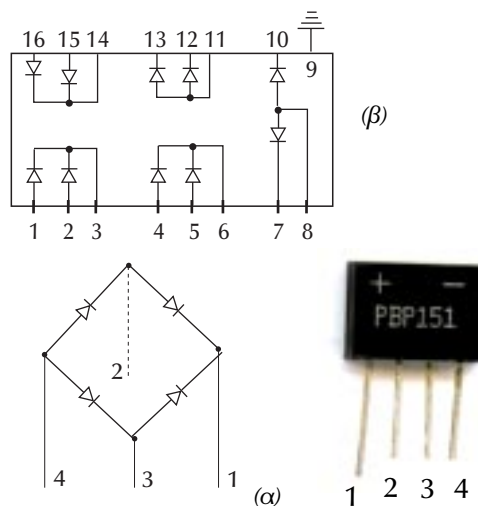
Οι εφαρμογές των διόδων (κρυσταλλοδιόδων) είναι πάρα πολλές. Χρησιμοποιούνται π.χ. στα αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα **σαν ανωρθωτές**, δηλαδή σαν ελεγχόμενοι διακόπτες για τη διέλευση ή όχι του ηλεκτρικού ρεύματος (ημιανόρθωση, πλήρης ανόρθωση) και στα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα για την παραγωγή παλμικών σημάτων (**ψαλιδιστές**). Επίσης χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία και την τηλεόραση για την επιλογή της συχνότητας εκπομπής (**δίοδοι μεταβλητής χωρητικότητας**) καθώς και για ανύψωση της τάσης (**πολλαπλασιαστής τάσης**).



**Σχήμα 3.7.1.**  
Δίοδοι σε διακριτή μορφή

Παλαιότερα οι δίοδοι κατασκευάζονταν σε διακριτή μόνο μορφή όπως φαίνεται στο σχήμα (3.7.1) όπου το σχήμα και το μέγεθος τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τους (τάση, ρεύμα, ισχύς κ.λ.π.)

Με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, κυρίως μετά το 1970, οι δίοδοι κατασκευάζονται και υπό μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος (I.C.) το οποίο περιέχει 2, 4 ή και 8 δίοδους είτε ασύνδετες μεταξύ τους, είτε σε συνδεσμολογία κοινής ανόδου ή κοινής καθόδου ή γέφυρας. Αυτές οι διατάξεις διόδων λέγονται **παρατάξεις ή πίνακες διόδων (diode arrays)**. Στο σχήμα (3.7.2) φαίνονται δίοδοι γέφυρας ή σε διατάξη και ο.κ.



**Σχήμα 3.7.2.**  
Διατάξεις διόδων (α) Γέφυρα, (β) CA3141(RCA)

### 3.7.1 Ημιανόρθωση

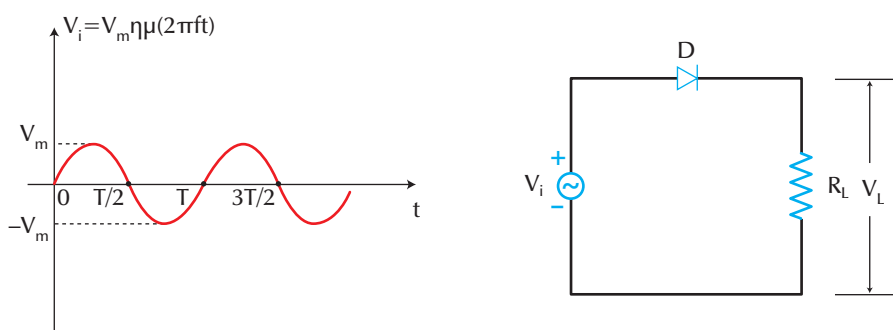
Στα κυκλώματα που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου, η πηγή τάσης εισόδου ήταν πηγή συνεχούς τάσης η οποία παραμένει σταθερή με το χρόνο. Συνεχή τάση χρησιμοποιούν σχεδόν όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές.

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν εναλλασσόμενη τάση, η τιμή της οποίας δεν παραμένει σταθερή με τον χρόνο αλλά μεταβάλλεται. Η εναλλασσόμενη τάση έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της συνεχούς, κυρίως στην διαδικασία μεταφοράς από τα εργοστάσια παραγωγής προς τα κέντρα κατανάλωσης και χρησιμοποιείται ευρέως.

Απαιτούνται, συνεπώς, ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες θα μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή. Οι διατάξεις αυτές λέγονται τροφοδοτικά και θα μελετηθούν στη Β' Τάξη. Τα **τροφοδοτικά** περιέχουν μεταξύ των άλλων ηλεκτρονικών στοιχείων και τους λεγόμενους **ανορθωτές**.

Οι ανορθωτές ή ανορθωτικές διατάξεις παρουσιάζουν μικρή αντίσταση όταν πολωθούν κατά την ορθή φορά και μεγάλη αντίσταση όταν πολωθούν κατά την ανάστροφη φορά. Παλαιότερα σαν ανορθωτές χρησιμοποιούντο χημικά στοιχεία ή χημικές ενώσεις όπως το σελήνιο, το γερμάνιο, το οξειδίο του χαλκού κ.λ.π. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως δίοδοι επαφής PN διότι η αντίσταση ανάστροφης φοράς είναι πάρα πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση ορθής φοράς. ( $R_R / R_F = 10.000 - 1.000.000$ )

Το απλούστερο κύκλωμα ανόρθωσης φαίνεται στο σχήμα (3.7.3). Όπως βλέπουμε, αποτελείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης  $V_i$  ημιτονοειδούς μορφής με μέγιστη τιμή (πλάτος  $V_m$ ), συχνότητα  $f$ , περίοδο



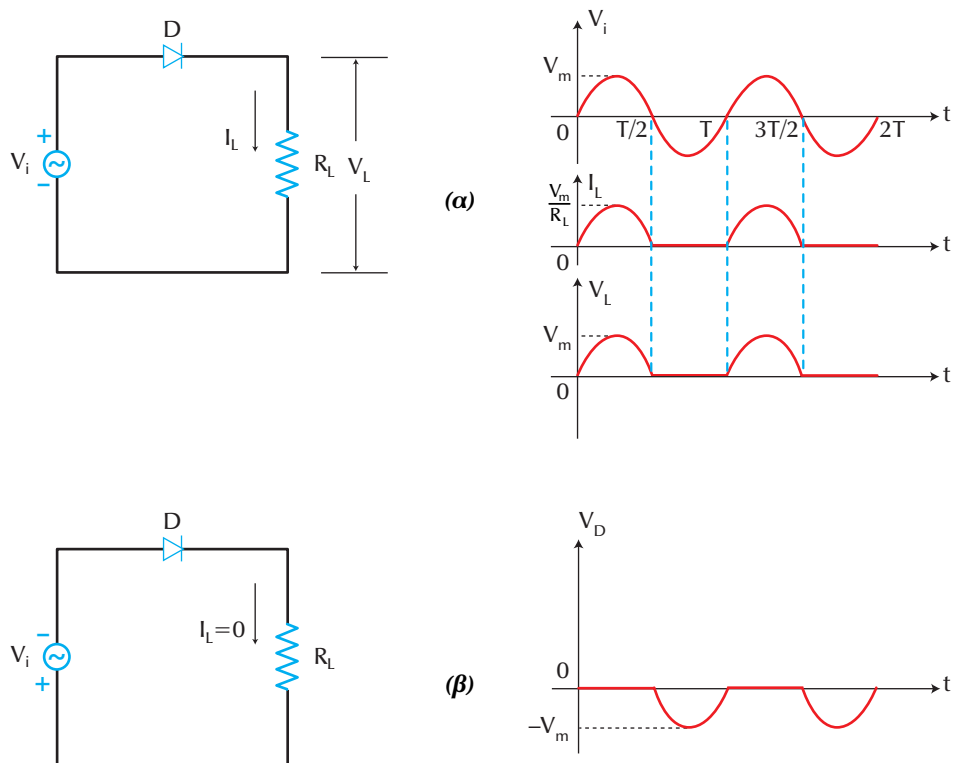
Σχήμα 3.7.3. Κύκλωμα απλής ανόρθωσης ή ημιανόρθωσης

$T$  και κυκλική συχνότητα  $\omega=2\pi f$ , μία ιδανική δίοδο  $D$  ( $V_\gamma = 0, R_D = 0$ ) καθώς και μια αντίσταση φόρτου  $R_L$ .

**Το κύκλωμα ονομάζεται κύκλωμα απλής ανόρθωσης ή ημιανόρθωσης και η τάση εξόδου  $V_L$  λέγεται ημιανορθωμένη τάση.**

Όταν η τάση εισόδου έχει θετική τιμή, δηλαδή όταν  $0 < V_i < V_m$  και  $0 < t < T/2$  η δίοδος είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά και συνεπώς **άγει**. Επειδή η δίοδος θεωρείται ιδανική δεν υπάρχει πτώση τάσης στα άκρα της και έτσι όλη η τάση εισόδου μεταφέρεται στην έξοδο. Στο σχήμα 3.7.4(α) φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου.

Όταν η τάση εισόδου είναι αρνητική, δηλαδή  $-V_m < V_i < 0$  και στην ημιπερίοδο  $T/2 < t < T$ , η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και **δεν άγει**



**Σχήμα 3.7.4.** Τάσεις και ρεύματα κατά την ημιανόρθωση  
(α) Θετική τάση εισόδου (β) Αρνητική τάση εισόδου

οπότε το κύκλωμα είναι ανοικτό και το ρεύμα που διαρρέει το φόρτο είναι μηδέν και συνεπώς και η τάση εξόδου μηδενίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.4(β). Τα ίδια συμβαίνουν και κατά τη δεύτερη ( $T < t < 2T$ ), τρίτη ( $2T < t < 3T$ ) κ.λ.π. περίοδο.

Από την παραπάνω ανάλυση διαπιστώνεται ότι έχουμε τάση και ρεύμα εξόδου μόνο κατά τις ημιπεριόδους θετικής πολικότητας της τάσης εισόδου και για το λόγο αυτό η τάση εξόδου είναι **ημιανορθωμένη** δηλαδή μισο-ανορθωμένη.

Όταν η δίοδος δεν είναι ιδανική θα έχει, ως γνωστό, τάση γόνατος  $V_\gamma$  και μία αντίσταση ορθής φοράς  $R_f \neq 0$ . Στην περίπτωση αυτή το μέγιστο ρεύμα εξόδου θα είναι:

$$I_{mL} = \frac{V_m - V_\gamma}{R_f + R_L} \quad 3.7.1$$

και η μέγιστη τάση εξόδου:

$$V_L = I_{mL} R_L = \frac{V_m - V_\gamma}{R_f + R_L} R_L \quad 3.7.2$$

Όπως είναι γνωστό, ένα συνεχές ρεύμα μετρείται με αμπερόμετρο συνεχούς ρεύματος (dc), ενώ ένα εναλλασσόμενο ρεύμα μετρείται με ένα αμπερόμετρο εναλλασσομένου (ac). Το ημιανορθωμένο ρεύμα παρουσιάζει δύο διαφορετικές τιμές όταν μετρηθεί με όργανα συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος και τούτο, διότι περιέχει και συνεχή και εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος. Το ίδιο ισχύει και για την ημιανορθωμένη τάση.

Η συνεχής (dc) συνιστώσα του ημιανορθωμένου ρεύματος ορίζεται σαν τη μέση τιμή του ημιανορθωμένου ρεύματος σε όλη την περίοδο  $0 < t < T$ . Με μαθηματικούς υπολογισμούς βρίσκεται ότι η τιμή αυτής της συνιστώσας είναι:

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} \approx 0,318 I_m \quad 3.7.3$$

όπου  $I_m = \frac{V_m}{R_L}$  και  $\pi = 3,1415\dots$

Η συνεχής (dc) συνιστώσα της τάσης που μετράει ένα βολτόμετρο συνεχούς είναι:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \approx 0,318 V_m = \frac{I_m}{\pi} R_L \quad 3.7.4$$

Η ενεργός (rms) τιμή του ρεύματος και της τάσης, τα μεγέθη που μετريούνται με αμπερόμετρο και βολτόμετρο εναλλασσομένου αντίστοιχα, δίδονται από την σχέση:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{2} = 0,5 I_m \quad V_{rms} = \frac{V_m}{2} = 0,5 V_m \quad 3.7.5$$

### Παράδειγμα 3.7.1

Για το κύκλωμα του σχήματος 3.7.3 δίδονται: Μέγιστη τιμή (τιμή κορυφής) της τάσης ac πηγής  $V_m = 50 \text{ V}$ , αντίσταση φόρτου  $R_L = 100 \Omega$ ,  $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$ ,  $R_f = 50 \Omega$ . Να ευρεθούν η συνεχής τάση φόρτου, το συνεχές ρεύμα φόρτου και η ενεργός τιμή του ημιανορθωμένου ρεύματος.

### Λύση

Από την σχέση (3.7.1) έχουμε:

$$I_m = \frac{V_m - V_\gamma}{R_L + R_f} = \frac{50 - 0,7}{100 + 50} = \frac{49,3}{150} = 329 \text{ mA}$$

Από τις σχέσεις (3.7.3) και (3.7.4) έχουμε :

$$I_{dc} = 0,318 \cdot I_m = 105 \text{ mA.}$$

$$V_{dc} = I_{dc} R_L = 105 \text{ mA} \times 100 \Omega = 10,5 \text{ V.}$$

Τέλος, η σχέση (3.7.5) δίνει:

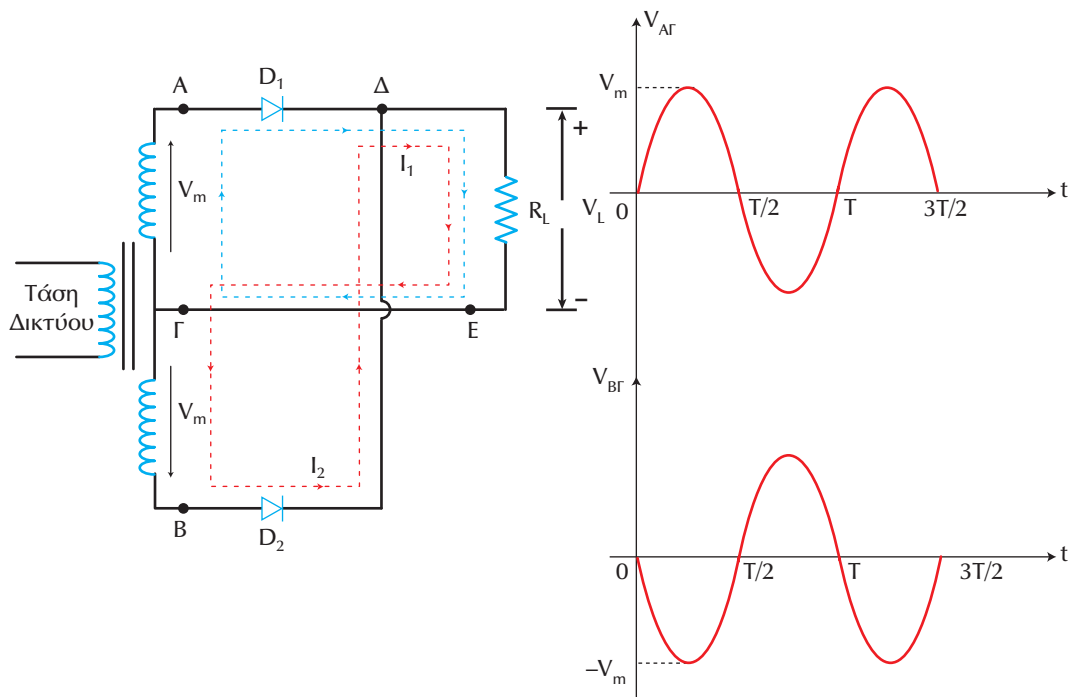
$$I_{L,rms} = \frac{I_m}{2} = \frac{329}{2} = 164,5 \text{ mA}$$

### 3.7.2 Διπλή ή Πλήρης Ανόρθωση

Στην περίπτωση της ημιανορθωμένης τάσης, η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος και της τάσης εξόδου, όπως προκύπτει από τις σχέσεις (3.7.3) και (3.7.4), είναι μόνο το  $1/\pi$  ήτοι το 31.8% του μέγιστου ρεύματος και της τάσης εισόδου αντίστοιχα. Το μικρό ποσοστό αυτό οφείλεται στο ότι η διάδος του κυκλώματος άγει μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο και επομένως υπάρχει ρεύμα και τάση στον φόρτο μόνο κατά την ημιπερίοδο αυτή.

#### 3.7.2.1 Διπλή ανόρθωση με δύο (2) διόδους

Μια λύση για να αυξηθεί το ποσοστό αυτό, θα είναι να προστεθεί μια δεύτερη διάδος στο κύκλωμα η οποία να δίνει ρεύμα στον φόρτο κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα (3.7.5). Το κύκλωμα αυτό παρέχει την λεγόμενη **διπλή ή πλήρη ανόρθωση**.



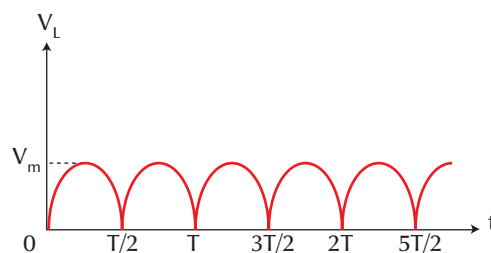
**Σχήμα 3.7.5.** Κύκλωμα διπλής ή πλήρους ανόρθωσης. (α) Κύκλωμα (β) Κυματομορφές εισόδου

Η τάση του δικτύου (220V, 50 Hz) μετασχηματίζεται σε χαμηλότερη τάση στο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστού, το οποίο έχει μεσαία λήψη και παρέχει δύο ίσες τάσεις με μέγιστη τιμή  $V_m$  στους δύο βρόχους του κυκλώματος.

Η μεσαία λήψη του δευτερεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή (σημείο Γ) συνδέεται με το ένα άκρο της αντίστασης φόρτου  $R_L$  ενώ το άλλο άκρο της αντίστασης συνδέεται με τις καθόδους των διόδων  $D_1$  και  $D_2$  (σημείο Δ). Οι διόδοι θεωρούνται ιδανικές.

Κατά την ημιπερίοδο  $0 < t < T/2$ , το σημείο Α είναι θετικότερο από το σημείο Γ ( $V_{AG} = +V_m$ ), ενώ το σημείο Β είναι αρνητικότερο από το σημείο Γ ( $V_{BG} = -V_m$ ). Αυτό συμβαίνει διότι τα τυλίγματα του δευτερεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή είναι τυλιγμένα με αντίθετη φορά. Η διάδος  $D_1$  άγει και υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα ΑΔΕΓΑ και επομένως και στο φόρτο  $R_L$ , που είναι το ρεύμα ημιανόρθωσης με μέση τιμή  $I_{1dc} = I_m/2$ . Η διάδος  $D_2$  δεν άγει, γιατί είναι ανάστροφα πολωμένη.

Κατά την ημιπερίοδο  $T/2 < t < T$  είναι:  $V_{AG} = -V_m$ ,  $V_{BG} = +V_m$ . Επομένως η διάδος  $D_2$  άγει ενώ η διάδος  $D_1$  δεν άγει, διότι είναι σε ανάστροφη πόλωση. Έτσι, στο κύκλωμα ΒΔΕΓΒ διέρχεται ρεύμα  $I_2$  με μέση τιμή  $I_{2dc} = I_m/2$ . Επομένως υπάρχει τάση και ρεύμα στο φόρτο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.6.



**Σχήμα 3.7.6.**

Τάση και ρεύμα φόρτου στην πλήρη ανόρθωση

Η μέση τιμή της ανορθωμένης τάσης και του ανορθωμένου ρεύματος δίδονται από τις σχέσεις (3.7.6) και (3.7.7) αντίστοιχα.

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0,636 V_m \quad 3.7.6$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R_L} = \frac{2V_m}{\pi R_L} = 0,636 I_m \quad 3.7.7$$

**Αρα, η μέση τιμή (dc) της τάσης και του ρεύματος στην πλήρη ανόρθωση είναι διπλάσια από ότι στην ημιανόρθωση.**

Η αντίστοιχη ενεργός (rms) τιμή της τάσης και του ρεύματος στην πλήρη ανόρθωση είναι :

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \quad I_{\text{rms}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad 3.7.8$$

### Παράδειγμα 3.7.2

Στο σχήμα 3.7.5. η τάση  $V_m = 50 \text{ V}$ , η αντίσταση φόρτου  $R_L = 100 \Omega$  και η διόδος έχει τάση γόνατος  $V_Y = 0,7 \text{ V}$  και αντίσταση ορθής φοράς  $R_F = 50 \Omega$ . Να ευρεθούν τα  $I_{\text{dc}}$ ,  $V_{\text{dc}}$ ,  $I_{\text{rms}}$ .

### Λύση

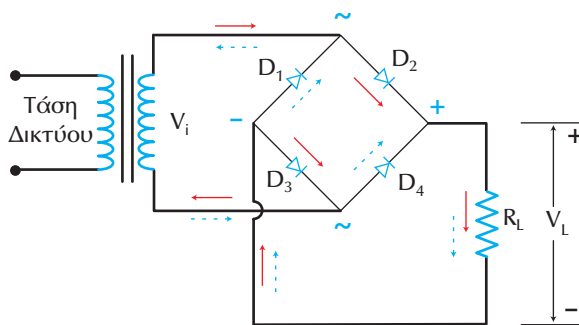
Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (3.7.6), (3.7.7) και (3.7.8) θα είναι :

$$I_{\text{dc}} = 0,636 I_m = 0,636 \times 329 \text{ mA} = 209 \text{ mA}.$$

$$V_{\text{dc}} = I_{\text{dc}} R_L = 209 \text{ mA} \times 100 \Omega = 20,9 \text{ V}.$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{20,9}{1,4142} = 14,78 \text{ mA}$$

### 3.7.2.2 Διπλή ανόρθωση με γέφυρα διόδων



**Σχήμα 3.7.7.**  
Πλήρης ανόρθωση με γέφυρα διόδων

Για την πλήρη ανόρθωση, χρησιμοποιείται σήμερα συχνά η διάταξη της **γέφυρας διόδων**. Η γέφυρα διόδων αποτελείται από 4 διόδους συνδεδεμένες όπως στο σχήμα 3.7.7. Με το κύκλωμα της γέφυρας αποφεύγεται η χρήση του μετασχημα-



τιστή με μεσαία λήψη που είναι ανεπιθύμητη λόγω κόστους μετασχηματιστή.

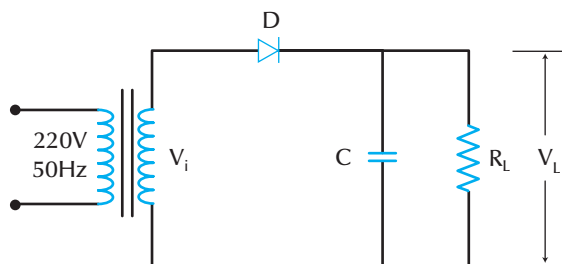
Κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, οι δίοδοι  $D_2$  και  $D_3$  άγουν (κόκκινα βέλη), ενώ οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_4$  είναι σε αποκοπή. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_4$  άγουν (μπλε διακεκομμένα βέλη), ενώ οι δίοδοι  $D_2$  και  $D_3$  είναι σε αποκοπή. Έτσι από τον φορτίο  $R_L$  διέρχεται πάντα ρεύμα της αυτής φοράς και τιμής ίσης με τη μέση τιμή που δίνεται από την σχέση (3.7.7).

Κατά την πλήρη ανόρθωση με γέφυρα η μέση τιμή τόσο της τάσης, όσο και του ρεύματος παραμένουν οι ίδιες όπως και στη πλήρη ανόρθωση με 2 δίοδους, καθώς και η ενεργός τιμή της τάσης ( σχέσεις 3.7.6, 3.7.7, 3.7.8 ). Η γέφυρα διόδων θα αναλυθεί στην Β' τάξη.

### 3.7.3 Ανιχνευτής κορυφής (Φίλτρο Πυκνωτή)

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους 3.7.1 και 3.7.2, η ανόρθωση είναι μια ηλεκτρονική διαδικασία για την εξομάλυνση της εναλλασσόμενης τάσης και την παραγωγή συνεχούς. Η παραγόμενη τάση είναι μεν συνεχής αλλά όχι σταθερή και κυμαίνεται με διαφορετικό ποσό διακύμανσης στην ημιανόρθωση και στην πλήρη ανόρθωση. Η κυμαινόμενη αυτή τάση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία ηλεκτρονικών συσκευών, διότι δημιουργεί προβλήματα θορύβου, βόμβου ή παραμόρφωσης σε ενισχυτές, πομπούς, δέκτες κ.λ.π.

Η παραπάνω διακύμανση της τάσης μπορεί να ελαττωθεί με την τοποθέτηση κατάλληλων **φίλτρων**. Τα φίλτρα είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που εξομαλύνουν μια τάση, αποκόπτουν ανεπιθύμητες συχνότητες σημά-



Σχήμα 3.7.8.

Φίλτρο πυκνωτή σε κύκλωμα ημιανόρθωσης

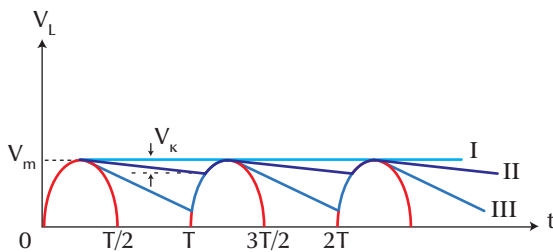
των επιτρέποντας να περάσουν χρήσιμες συχνότητες. Το απλούστερο και σπουδαιότερο φίλτρο είναι **το φίλτρο πυκνωτή**. Τοποθετείται δηλαδή ένας πυκνωτής στην έξοδο του κυκλώματος ημιανόρθωσης ή πλήρους ανόρθωσης παράλληλα με την αντίσταση φορτίου όπως στο σχήμα 3.7.8.

Κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, ο πυκνωτής φορτίζεται και παίρνει τη μέγιστη τιμή του,  $V_m$ , στην κορυφή της τάσης εισόδου. Όταν η τάση ελαττώνεται ο πυκνωτής αρχίζει να εκφορτίζεται πάνω στην αντίσταση φόρτου  $R_L$ . Η εκφόρτιση του πυκνωτή συνεχίζεται και κατά την διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου και σταματά μόνο στην επόμενη θετική ημιπερίοδο.

Στο σχήμα 3.7.9 η εκφόρτιση παρίσταται με ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία ξεκινούν από την κορυφή της ημιανορθωμένης τάσης και φθάνουν μέχρι κάποιο σημείο του επόμενου ημικύματος.

Η κλίση των ευθύγραμμων αυτών τμημάτων εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου ( $\tau=CR$ ) του πυκνωτή και της αντίστασης. Για δεδομένη τιμή της χωρητικότητας  $C$ , διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- α. Η αντίσταση φόρτου είναι πάρα πολύ μεγάλη, θεωρητικά άπειρη ( $R = \infty$ ). Τότε ο πυκνωτής δεν εκφορτίζεται και η τάση εξόδου παραμένει σταθερή σε τιμή και  $V_L = V_m$  (περίπτωση I).
- β. Η σταθερά χρόνου της αντίστασης και του πυκνωτή,  $\tau = CR$ , είναι πολύ μεγαλύτερη από την περίοδο της ημιτονοειδούς τάσης εισόδου ( $\tau \gg T$ ). Τότε ο πυκνωτής εκφορτίζεται πολύ αργά και η κλίση της ευθείας εκφόρτισης είναι πολύ μικρή (περίπτωση II).
- γ. Η σταθερά χρόνου δεν είναι πολύ μεγάλη και είναι συγκρίσιμη με την περίοδο της τάσης ( $\tau > T$ ). Τότε ο πυκνωτής εκφορτίζεται γρήγορα και η τιμή της τάσης του σχεδόν μηδενίζεται πριν ξαναφορτισθεί από την επόμενη θετική ημιπερίοδο της τάσης (περίπτωση III).



**Σχήμα 3.7.9.**

Τάσεις ημιανορθωτή με φίλτρο πυκνωτή

Είναι προφανές ότι για να έχουμε καλή ανόρθωση θα πρέπει να προτιμήσουμε την περίπτωση I ( $V_k = 0$ ) ή έστω την II ( $V_k > 0$ ), οπότε η τάση εξόδου (τάση στα άκρα του πυκνωτή) πλησιάζει περισσότερο στην **τιμή κορυφής** της ημιανορθωμένης τάσης.

**Τάση κυμάτωσης,  $V_k$ , είναι τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνεται η τάση εξόδου ή η τάση του πυκνωτή.**

Αποδεικνύεται ότι:

$$V_k = \frac{I_{dc}}{fC} \quad 3.7.9$$

όπου:  $I_{dc}$  = η μέση τιμή ρεύματος εξόδου  
 $f$  = η συχνότητα της τάσης εισόδου  
 $C$  = η χωρητικότητα του πυκνωτή.

Επομένως, η συνεχής τάση εξόδου είναι:

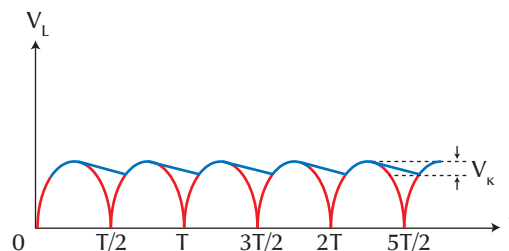
$$V_{dc} = V_m - \frac{V_k}{2} \quad 3.7.10$$

Ο ημιανορθωτής με το φίλτρο πυκνωτή που εξετάστηκε παραπάνω λέγεται και **ανιχνευτής κορυφής** επειδή η τάση εξόδου έχει τιμή ίση με την κορυφή της τάσης ανόρθωσης.

Στην περίπτωση της πλήρους ανόρθωσης, η κυμάτωση είναι μικρότερη γιατί υπάρχει τάση εξόδου και κατά τις θετικές και κατά τις αρνητικές ημιπεριόδους, οπότε ο πυκνωτής έχει στην διάθεσή του πολύ μικρότερο χρόνο να εκφορτισθεί μέχρι την επόμενη φόρτιση του. Στην περίπτωση αυτή είναι :

$$V_k = \frac{I_{dc}}{2fC} \quad \text{και} \quad V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC} \quad 3.7.11$$

**Σχήμα 3.7.10**  
 Τάση εξόδου πλήρους  
 ανορθωτή με φίλτρο πυκνωτή



Υπάρχουν και άλλα φίλτρα εξομάλυνσης της τάσης όπως φίλτρο πηνίου, φίλτρο τύπου Π με πυκνωτή και αντίσταση ή πυκνωτές και πηνίο, φίλτρο τύπου L κ.α. αλλά με αυτά δεν θα ασχοληθούμε εδώ.

### Παράδειγμα 3.7.3

Για τον πλήρη ανορθωτή του σχήματος 3.7.5 με φίλτρο πυκνωτή, η μέγιστη τάση εισόδου είναι  $V_m = 24 \text{ V}$ . Η τάση φόρτου πρέπει να έχει μέση τιμή  $V_{dc} = 18 \text{ V}$  και το συνεχές ρεύμα φόρτου  $I_{dc} = 500 \text{ mA}$ . Αν η συχνότητα της τάσης δικτύου είναι  $f = 50 \text{ Hz}$ , να ευρεθεί ο απαιτούμενος πυκνωτής για ικανοποιητική εξομάλυνση της τάσης εξόδου.

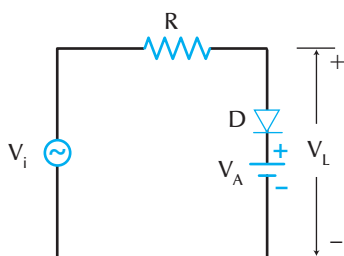
### Λύση

Από τη σχέση (3.7.11) θα είναι :

$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC} \Rightarrow \frac{I_{dc}}{4fC} = V_m - V_{dc} \Rightarrow C = \frac{I_{dc}}{4f(V_m - V_{dc})} \Rightarrow$$
$$C = \frac{500 \times 10^{-3} \text{ A}}{4 \times 50 (24 - 18)} = \frac{0,1 \text{ A}}{4 \times 6 \text{ Hz} \times \text{V}} = 4,1 \text{ mF} = 4100 \mu\text{F}.$$

### 3.7.4. Ψαλιδιστής

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή των διόδων είναι ο **ψαλιδιστής ή περιοριστής τάσης**. Σ' ένα κύκλωμα ψαλιδισμού, η τάση εξόδου περιορίζεται σε κάποια στάθμη και εμποδίζεται ν' αναπτυχθεί πέρα από μία ορισμένη θετική ή αρνητική τιμή. Μια ψαλιδισμένη τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας ψηφιακός παλμός σε ψηφιακά κυκλώματα ή στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



**Σχήμα 3.7.11.**  
Κύκλωμα θετικού ψαλιδιστή

Το κύκλωμα του σχήματος 3.7.11 είναι ένα κύκλωμα θετικού ψαλιδιστή και περιορίζει την τάση εξόδου σε μια τιμή κάτω από μια ορισμένη στάθμη π.χ. κάτω από  $5,7 \text{ V}$ , αν  $V_A = 5 \text{ V}$ .

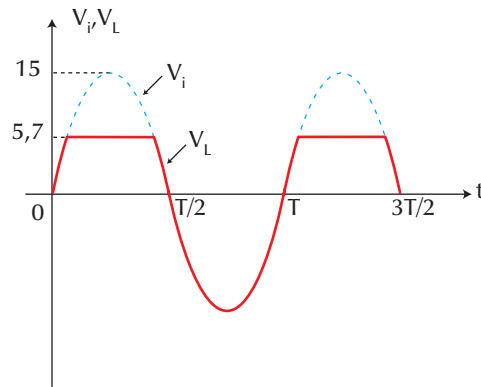
Έστω ότι η πηγή εισόδου έχει τάση  $V_i = 15 \text{ ημ}(\omega t)$  και η τιμή της τάσης  $V_A$  είναι  $5 \text{ V}$ . Κατά τη θετική ημιπερίοδο ( $0 < t < T/2$ ), η τάση εξόδου ακολουθεί την τάση εισόδου, διότι δεν υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα (αφού η δίοδος δεν άγει) μέχρι που η τάση εισόδου γίνεται  $V_i > 5,7 \text{ V}$ . Τότε κυκλοφορεί ρεύμα στο κύκλωμα και είναι:

$$I = \frac{V_i - V_A - V_Y}{R}, \quad V_L = V_A + V_Y = 5V + 0,7V = 5,7V$$

3.7.12

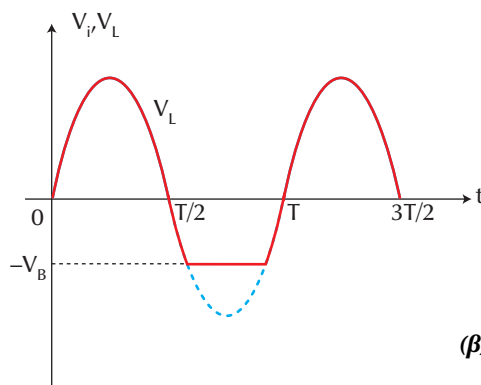
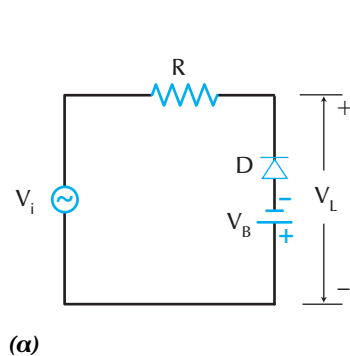
Στο σχήμα 3.7.12 φαίνονται οι τάσεις εισόδου και εξόδου.

Το σχήμα 3.7.13 δίνει το κύκλωμα αρνητικού ψαλιδιστή καθώς και τις τάσεις εισόδου και εξόδου. Κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης η διάδος δεν άγει και η τάση εξόδου ισούται με την τάση εισόδου. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, η τάση περιορίζεται σε τιμή:  $V_L > -V_B$ .



**Σχήμα 3.7.12**

Τάσεις εισόδου και εξόδου (κόκκινη) θετικού ψαλιδιστή.

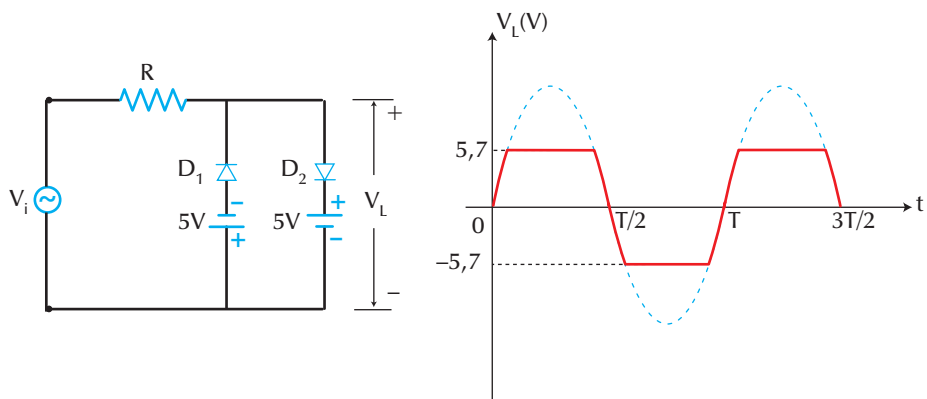


**Σχήμα 3.7.13.**

Αρνητικός ψαλιδιστής. (α) Κύκλωμα (β) Κυματομορφές εισόδου και εξόδου

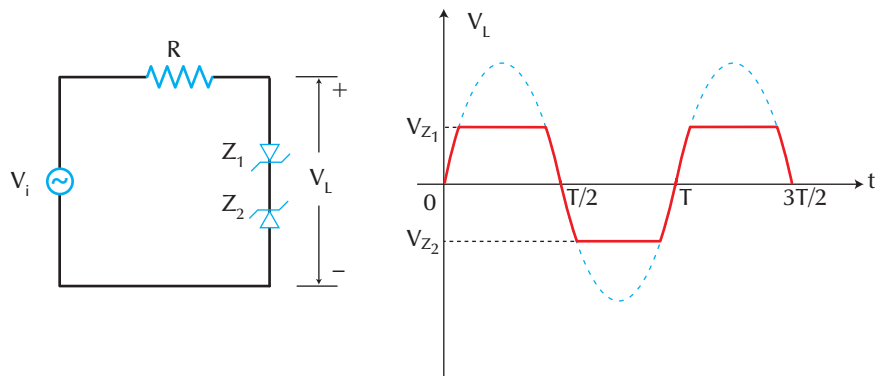
Με συνδυασμό των δύο παραπάνω κυκλωμάτων, όπως δείχνει το σχήμα 3.7.14, δημιουργείται ένας **διπλός ψαλιδιστής**.

Ο διπλός ψαλιδιστής μπορεί να γίνει **και με 2 διόδους Zener** συνδεδεμένες όπως στο σχήμα 3.7.15.



**Σχήμα 3.7.14.**

Διπλός ψαλιδιστής με κοινές διόδους (α) Κύκλωμα (β) Κυματομορφή εξόδου



**Σχήμα 3.7.15.** Διπλός ψαλιδιστής με Zener. (α) Κύκλωμα, (β) Κυματομορφή εξόδου

### Παράδειγμα 3.7.4

Στο κύκλωμα του σχήματος 3.7.15 η μέγιστη τιμή της τάσης εισόδου είναι  $V_m = 15 \text{ V}$ . Οι δίοδοι Zener έχουν την ίδια τάση  $V_z = 10 \text{ V}$ . Δίδεται  $R = 10 \text{ K}\Omega$ . Να σχεδιασθεί η τάση εξόδου  $V_L$ .

### Λύση

Εξετάζουμε τις πιο κάτω περιπτώσεις :

$0 < V_i < 10\text{V}$ : Τότε η δίοδος Zener  $Z_1$  άγει διότι είναι πολωμένη ορθά, ενώ η δίοδος Zener  $Z_2$  δεν άγει διότι δεν έχει φθάσει στην τάση διάσπασης. Επομένως  $V_L = V_i$ .

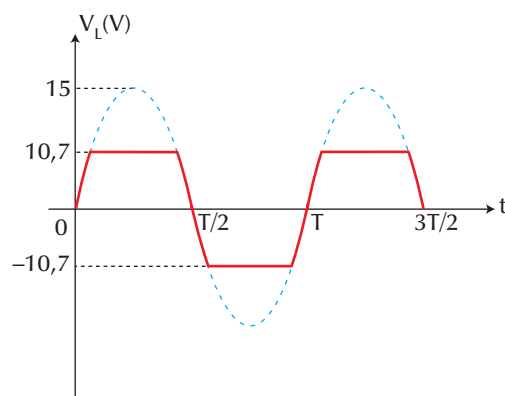
$10 < V_i < 15\text{V}$ : Τότε  $V_{Z2} = 10\text{V}$ ,  $V_{Z1} = 0,7\text{V}$ .  
Άρα  $V_L = 10,7 \text{ V}$ .

$-10 < V_i < 0$ : Τότε κατ' αναλογία με την πρώτη περίπτωση  $V_L = V_i$ .

$-15 < V_i < -10$ : Θα ισχύει  $V_{Z1} = -10\text{V}$ ,  $V_{Z2} = -0,7\text{V}$ . Επομένως

$$V_L = -10,7\text{V}.$$

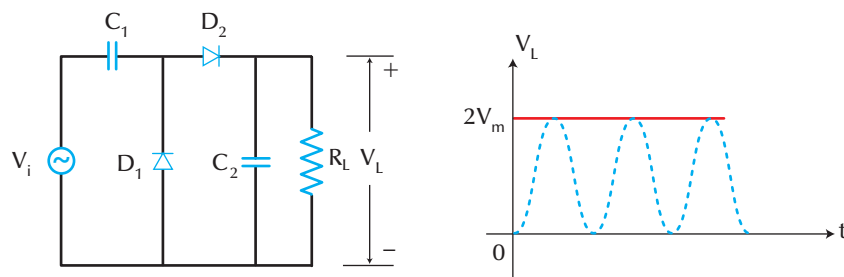
Η τάση εξόδου φαίνεται στο σχήμα 3.7.16



Σχήμα 3.7.16 Τάση εξόδου παραδείγματος

### 3.7.5. Διπλασιαστής τάσης

Σε μερικές εφαρμογές, όπως π.χ. σε παλμογράφο ή σε οθόνη υπολογιστή, η ηλεκτρική ισχύς είναι μικρή αλλά χρειάζεται ανύψωση της τάσης του κυκλώματος 2, 3 ή και περισσότερες φορές. Τα κυκλώματα που ανυψώνουν, άρα πολλαπλασιάζουν, την τάση λέγονται **πολλαπλασιαστές τάσης** και εάν η τάση διπλασιάζεται το κύκλωμα λέγεται **διπλασιαστής τάσης**. Στο σχήμα 3.7.17 φαίνεται ένας διπλασιαστής τάσης και η προκύπτουσα κυματομορφή εξόδου  $V_L$ .



**Σχήμα 3.7.17** Διπλασιαστής τάσης (α) Κύκλωμα, (β) Κυματομορφές

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο η διάδος  $D_1$  πολώνεται ορθά, ενώ η  $D_2$  πολώνεται ανάστροφα. Ο πυκνωτής  $C_1$  φορτίζεται με την μέγιστη τάση εισόδου  $V_m$ . Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, η διάδος  $D_2$  άγει ενώ η  $D_1$  είναι ανάστροφα πολωμένη. Οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και φορτίζονται έτσι ώστε:

$$V_{C1} + V_{C2} = V_m \quad 3.7.13$$

Το φορτίο του ήδη φορτισμένου πυκνωτή  $C_1$  μεταφέρεται στον πυκνωτή  $C_2$  και επομένως:

$$V_{C2} = 2V_m \quad 3.7.14$$

Η τάση αυτή του πυκνωτή  $C_2$  εφαρμόζεται και στα άκρα της αντίστασης φόρτου. Εάν η αντίσταση φόρτου  $R_L$  έχει μεγάλη τιμή, τότε η σταθερά χρόνου εκφόρτισης του πυκνωτή είναι μεγάλη με συνέπεια η **τάση εξόδου** να παραμένει **σταθερή** και **διπλάσια της τάσης εισόδου**.

Εκτός του διπλασιαστή τάσης, υπάρχει τριπλασιαστής, τετραπλασιαστής ή πολλαπλασιαστής τάσης, αλλά με τα κυκλώματα αυτά θ' ασχοληθούμε στη Β' και Γ' έτος.

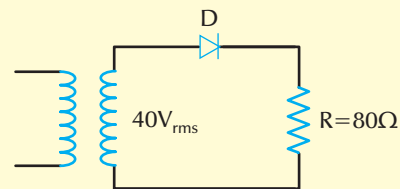


## ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3.7

- Οι **εφαρμογές των διόδων** είναι αρκετές, εκ των οποίων οι σπουδαιότερες είναι η **ανόρθωση**, ο **ψαλιδισμός** και ο **πολλαπλασιασμός τάσης**.
- **Ανορθωτικές διατάξεις** είναι διατάξεις διόδων που χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση ή και σταθεροποίηση μιας μεταβαλλόμενης ή εναλλασσόμενης τάσης. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :
  - α. **Ημιανόρθωση**
  - β. **Πλήρη ανόρθωση**
  - γ. **Ανόρθωση γέφυρας**.
- Στην **ημιανόρθωση**, η συνεχής συνιστώσα της τάσης εξόδου είναι το ένα τρίτο περίπου της μέγιστης τιμής της τάσης εισόδου.
- Στην **πλήρη ανόρθωση** και στην **ανόρθωση με γέφυρα** η συνεχής συνιστώσα της τάσης εξόδου αυξάνει και είναι τα δύο τρίτα περίπου της μέγιστης τιμής της τάσης εισόδου.
- Για την επιπλέον **εξομάλυνση της τάσης εξόδου**, χρησιμοποιείται **πυκνωτής** εξομάλυνσης, ο οποίος αποτελεί ένα **φίλτρο**.
- Ο **ψαλιδιστής** αποκόπτει ανεπιθύμητα κομμάτια της τάσης εισόδου ενός κυκλώματος και μπορεί να υπάρχει θετική ή αρνητική ψαλίδιση του σήματος ή και τα δύο μαζί. Ο **ψαλιδισμός** επιτυγχάνεται με **διόδους PN ή διόδους Zener** σε κατάλληλη συνδεσμολογία.
- Ο **διπλασιαστής τάσης** είναι ένα πολύ χρήσιμο κύκλωμα και με κατάλληλη συνδεσμολογία διόδων διπλασιάζεται η τάση εισόδου ενός κυκλώματος. Υπάρχει επίσης τριπλασιαστής ή πολλαπλασιαστής τάσης.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ 3.7

- 3.7.1. Ποια είναι η μέση τιμή της τάσης εξόδου ημιανορθωτή και πλήρη ανορθωτή;
- 3.7.2. Στο κύκλωμα του σχήματος να ευρεθούν η συνεχής τιμή της τάσης και η συνεχής τιμή του ρεύματος. Η δίοδος θεωρείται ιδανική.



- 3.7.3. Στο ανορθωτικό κύκλωμα του σχήματος 3.7.8, ο πυκνωτής

εχει  $C=50 \mu\text{F}$ . Η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του φόρτου είναι  $V_{dc} = 40\text{V}$  και η μέση τιμή του ρεύματος φόρτου είναι  $I_{dc} = 50 \text{ mA}$ . Να υπολογισθεί η μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου.

3.7.4. Η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου σε ένα διπλασιαστή τάσης είναι  $220 \sqrt{2} \text{ Volt}$ . Πόση είναι

η τάση εξόδου ;

3.7.5. Να γίνει η σωστή αντιστοίχιση:

Μέση τιμή τάσης	$V_{rms}$
Μέση τιμή ρεύματος	$I_{rms}$
Ενεργός τιμή τάσης	$I_{dc}$
Μέγιστη τιμή τάσης	$V_{\gamma}$
Ενεργός τιμή ρεύματος	$V_{dc}$
Τάση γόνατος	$V_m$

## Γ Ε Ν Ι Κ Ε Σ Α Σ Κ Η Σ Ε Ι Σ Ε Π Α Ν Α Λ Η Ψ Η Σ

1. Το βέλος στον συμβολισμό μιας διόδου PN:

A. Δείχνει την κάθοδο της διόδου.

B. Δείχνει ότι η τάση μπορεί να μεταβάλλεται.

Γ. Δείχνει ότι το ρεύμα μπορεί να μεταβάλλεται.

Δ. Δείχνει την διεύθυνση της ορθής φοράς του ρεύματος.

2. Μια διάδος PN είναι ανάστροφα πολωμένη όταν:

A. Η κάθοδος είναι αρνητικότερη της ανόδου.

B. Η άνοδος είναι αρνητικότερη της καθόδου.

Γ. Ούτε το (A) ούτε το (B).

Δ. Και το (A) και το (B).

3. Σημειώστε το γράμμα Σ ή Λ, αν κάθε πρόταση είναι ΣΩΣΤΗ ή ΛΑΘΟΣ.

α. Οι διάοδοι PN είναι επαφές πυριτίου και γερμανίου.

Σ Λ

β. Οι διάοδοι Varicap είναι επαφές ημιαγωγού και μετάλλου.

Σ Λ

γ. Η κρυσταλλοδιάδος χρησιμοποιείται για ανόρθωση λόγω της ιδιότητας να άγει προς μία κατεύθυνση.

Σ Λ

δ. Η διάδος Zener χρησιμοποιείται για σταθεροποίηση τάσης.

Σ Λ

ε. Ο πυκνωτής στην έξοδο ενός κυκλώματος απλής ανόρθωσης ανυψώνει τάση

Σ Λ

στ. Ένας διπλασιαστής τάσης, διπλασιάζει την τάση εξόδου

Σ Λ