

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου ο μαθητής θα πρέπει να:

- Έχει κατανοήσει τη δομή και αρχή λειτουργίας της διόδου τεσσάρων στρώσεων
- Έχει κατανοήσει τη δομή και αρχή λειτουργίας του ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου
- Γνωρίζει τα διάφορα είδη ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου
- Γνωρίζει τις βασικές συνδεσμολογίες και κυκλώματα του ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου
- Διαβάζει και να κατανοεί τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών
- Έχει κατανοήσει τη δομή και αρχή λειτουργίας του DIAC και TRIAC
- Μπορεί να εφαρμόζει τα παραπάνω σε απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ

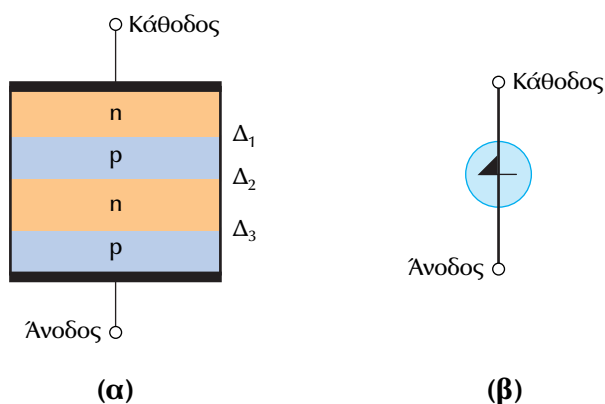
# ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

5

## 5.1 Ημιαγωγοί P-N-P-N

### 5.1.1 Δομή και γενικά χαρακτηριστικά

Ο ημιαγωγός P-N-P-N ή **δίοδος P-N-P-N**, είναι ένας κρύσταλλος με τέσσερις εμπλουτισμένες περιοχές, δύο τύπου N και δύο τύπου P, οι οποίες εναλλάσσονται διαδοχικά (σχ.5.1.1). Το πάχος και ιδιαίτερα το επίπεδο εμπλουτισμού διαφέρει σε κάθε περιοχή και συγκεκριμένα είναι πολύ υψηλό στις ακραίες περιοχές και πολύ χαμηλό στον ενδιάμεσο ημιαγωγό τύπου N. Η δίοδος P-N-P-N ονομάζεται και δίοδος Shockley.



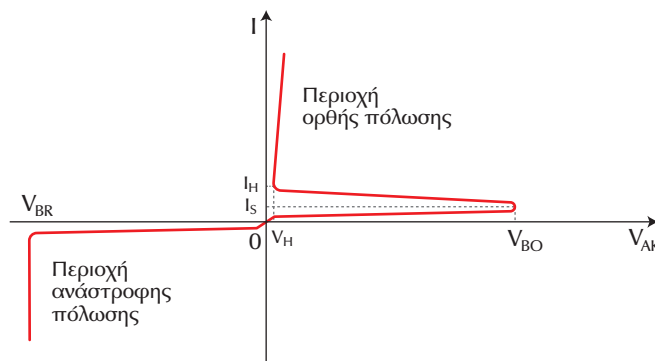
Σχήμα 5.1.1 (α) Δομή διόδου P-N-P-N και (β) κυκλωματικό διάγραμμα

Το ηλεκτρόδιο το οποίο συνδέεται στον ακραίο ημιαγωγό τύπου P ονομάζεται άνοδος (A). Αντίστοιχα το ηλεκτρόδιο το οποίο συνδέεται στον ακραίο N-τύπου ημιαγωγό ονομάζεται κάθοδος (K) (σχ.5.1.1β).

Βασικό χαρακτηριστικό τόσο αυτής της δομής όσο και όλων των άλλων δομών οι οποίες βασίζονται σε αυτή είναι το φαινόμενο της **εσωτερικής ανατροφοδότησης**, ανάδρασης, (internal feedback) την οποία παρουσιάζουν. Η ανατροφοδότηση αυτή οφείλεται αποκλειστικά στη δομή τους, δηλαδή την αλληλουχία των περιοχών καθώς και των διαστάσεων και επιπέδων εμπλουτισμού των περιοχών αυτών. Η εσωτερική ανατροφοδότηση αναγκάζει αυτές τις διατάξεις να λειτουργούν μόνο σε δύο σταθερές καταστάσεις, μία αγώγιμη (ON) και μία μη αγώγιμη (OFF). Στην κατάσταση ON η αντίσταση της διόδου είναι μικρότερη των 10 Ω ενώ στην κατάσταση OFF η αντίσταση της διόδου κυμαίνεται από 1 MΩ έως

100 ΜΩ. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό αυτών των διατάξεων είναι ότι και στις δύο σταθερές καταστάσεις τους η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ μικρή, γεγονός το οποίο τις κάνει ιδιαίτερα χρήσιμες σε εφαρμογές **ελέγχου της ισχύος**.

Όταν, λοιπόν, μια διόδος P-N-P-N συνδεθεί σε μία πηγή έτσι ώστε η άνοδος της να συνδεθεί στο θετικό πόλο πηγής και η κάθοδος της στον αρνητικό πόλο της πηγής, παρουσιάζει τις δύο σταθερές καταστάσεις αγωγιμότητας. Η πόλωση αυτή καλείται ορθή. Σε ανάστροφη πόλωση η διόδος συμπεριφέρεται όπως μια τυπική διόδος με πολύ χαμηλό ρεύμα κόρου και σε υψηλές τάσεις εμφανίζεται η τάση διάσπασης ( $V_{BR}$ ) (σχ.5.1.2).



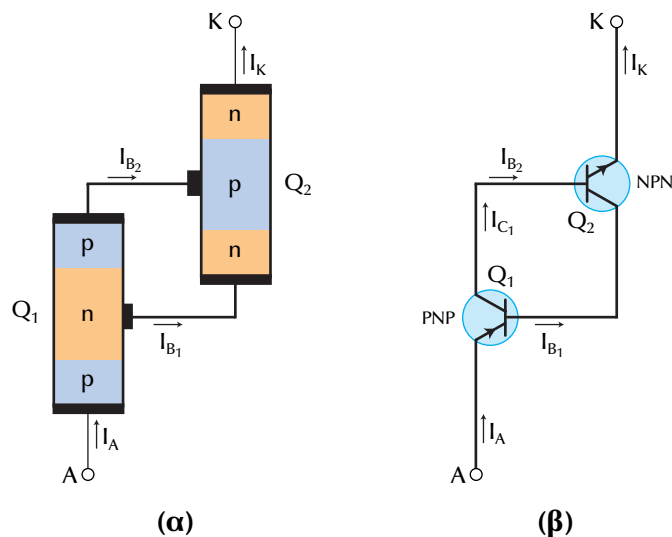
**Σχήμα 5.1.2** Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης διόδου P-N-P-N

Επειδή η διόδος αποτελείται από τέσσερα στρώματα μοιάζει σαν να αποτελείται από τρεις διόδους  $D_1$ ,  $D_2$  και  $D_3$  (σχ.5.1.1) συνδεδεμένες σε σειρά. Οι  $D_1$  και  $D_3$  έχουν την ίδια διεύθυνση και η  $D_2$  είναι αντίστροφα συνδεδεμένη. Όταν η διόδος συνδεθεί μέσω αντίστασης στα άκρα μιας πηγής και εφαρμοστεί ορθή πόλωση οι διόδοι  $D_1$  και  $D_3$  πολώνονται ορθά ενώ η  $D_2$  πολώνεται ανάστροφα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση να εμφανίζεται, σχεδόν όλη, στα άκρα της  $D_2$  και το ρεύμα, το οποίο διαρρέει τη διάταξη είναι μικρό. Αύξηση της τάσης της πηγής έχει ως αποτέλεσμα μικρή αύξηση του ρεύματος της διάταξης. Όταν η τάση της πηγής υπερβεί μια τιμή, η οποία ονομάζεται **ορθή τάση διάσπασης** (firing ή breakover voltage) και συμβολίζεται με  $V_{BO}$ , το ρεύμα αυξάνει απότομα και η τάση στα άκρα της διόδου ελαττώ-

νεται σχεδόν ακαριαία (Σχ.5.1.2). Σε αυτή την τάση σκανδαλισμού η διόδος μεταβαίνει από την κατάσταση OFF στην ON. Το ρεύμα το οποίο αντιστοιχεί στην τάση σκανδαλισμού είναι το  $I_{BO}$ . Η περιοχή στην οποία η διόδος βρίσκεται σε κατάσταση ON ονομάζεται **περιοχή κόρου** και λέμε ότι τότε η διάταξη έχει **μανδαλωθεί** (latched).

Αν στη συνέχεια ελαττωθεί η τάση στα άκρα της διόδου, η διάταξη παραμένει στην κατάσταση ON έως ότου το ρεύμα ελαττωθεί στην τιμή  $I_H$ , που ονομάζεται **ρεύμα συγκράτησης** (holding ή latching current). Το ρεύμα  $I_H$  είναι το ελάχιστο ρεύμα για να διατηρηθεί η κατάσταση ON. Στο ρεύμα συγκράτησης αντιστοιχεί η **τάση συγκράτησης**  $V_H$ .

### 5.1.2 Αρχή λειτουργίας



**Σχήμα 5.1.3** (α) Ισοδύναμη δομή μιας διόδου P-N-P-N και (β) ισοδύναμο κύκλωμα

Η λειτουργία της διόδου P-N-P-N είναι δυνατό να εξηγηθεί με την αναγωγή της σε ένα κύκλωμα όπως αυτό του σχήματος (5.1.3β). Το κύκλωμα αυτό προκύπτει από το διαχωρισμό της διόδου P-N-P-N σε δύο τμήματα έτσι ώστε στο ένα να έχουμε μια διαδοχή στρωμάτων P-N-P και στο άλλο N-P-N (σχ.5.1.3α). Κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε ένα τρανζίστορ, το P-N-P στο  $Q_1$  και το N-P-N στο  $Q_2$ . Η περιοχή τύπου N που είναι η βάση του  $Q_1$  είναι ο συλλέκτης του  $Q_2$  και η περιοχή τύπου P που είναι η βάση του  $Q_2$

είναι ο συλλέκτης του  $Q_1$ . Έτσι το ρεύμα συλλέκτη του ενός «τρανζίστορ» είναι ρεύμα βάσης για το άλλο (σχ.5.1.3β) δημιουργώντας ένα βρόχο ο οποίος ξεκινά από τη βάση του  $Q_1$ , περνά από το συλλέκτη του  $Q_1$ , τη βάση του  $Q_2$  και το συλλέκτη του  $Q_2$  και καταλήγει πάλι στη βάση του  $Q_1$ .

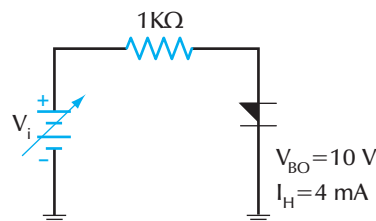
Με βάση τα παραπάνω, η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ερμηνεύεται ως εξής. Όταν η τάση στα άκρα της διόδου P-N-P-N είναι μηδέν, τα τρανζίστορ δεν διαρρέονται από ρεύμα και βρίσκονται σε κατάσταση OFF. Αυξάνοντας την τάση στα άκρα της διόδου, η διόδος συλλέκτη-βάσης κάθε τρανζίστορ πολώνεται ανάστροφα. Έτσι, το ρεύμα, το οποίο διαρρέει κάθε διόδο συλλέκτη είναι το ρεύμα κόρου (ανάστροφης πόλωσης) το οποίο είναι πολύ μικρό και δεν μπορεί να διεγείρει το σύστημα.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διόδος να παραμένει στη κατάσταση OFF. Η δομή της διόδου P-N-P-N είναι τέτοια ώστε τα χαρακτηριστικά των τρανζίστορ να μεταβάλλονται με την τάση συλλέκτη-εκπομπού. Έτσι όταν η τάση στα άκρα της διόδου P-N-P-N υπερβεί την τάση σκανδαλισμού τότε τα χαρακτηριστικά των τρανζίστορ και το ρεύμα κόρου κάθε διόδου συλλέκτη-βάσης είναι τέτοια ώστε να επιτρέψει στον ανατροφοδότηση να οδηγήσει τη διόδο P-N-P-N σε κατάσταση ON.

Η επιστροφή από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF είναι δυνατή μόνο όταν τα ρεύματα, τα οποία τα διαρρέουν τα τρανζίστορ, είναι μικρά και οι χαρακτηριστικές των τρανζίστορ έχουν λάβει τις θέσεις, τις οποίες έχουν σε χαμηλές τάσεις. Αυτό συμβαίνει όταν η τάση στα άκρα της διόδου P-N-P-N και το ρεύμα της έχουν γίνει μικρότερα της τάσης συγκράτησης και του ρεύματος συγκράτησης, αντίστοιχα.

### Παράδειγμα 5.1.1

Στο διπλανό σχήμα η τάση της πηγής μεταβάλλεται από 0 έως 20 V. Σε ποιά τάση θα αρχίσει να διέρχεται ρεύμα από το κύκλωμα; Όταν η τάση της πηγής είναι 15 V ποίο θα είναι το ρεύμα το οποίο θα διέρχεται από το κύκλωμα; Ποία θα είναι η ελάχιστη τάση της πηγής πριν να μηδενιστεί το



ρεύμα του κυκλώματος; Να θεωρήσετε αμελητέα την πτώση τάσης στα άκρα της διόδου όταν βρίσκεται σε κατάσταση ON.

### Λύση

Η διάδος P-N-P-N έχει τα εξής χαρακτηριστικά: τάση σκανδαλισμού  $V_{BO}=10\text{ V}$  και ρεύμα συγκράτησης  $I_H=4\text{ mA}$ .

Επειδή από μια διάοδο P-N-P-N στην κατάσταση OFF δεν διέρχεται ρεύμα, η πτώση τάση στην αντίσταση  $1\text{ K}\Omega$  θα είναι μηδέν μέχρι να ξεκινήσει η μανδάλωση. Συνεπώς για  $0\text{ V} < V < 10\text{ V}$  το ρεύμα του κυκλώματος είναι μηδέν. Για  $V > 10\text{ V}$  το ρεύμα του κυκλώματος θα είναι μη μηδενικό. Άρα θα αρχίσει να διέρχεται ρεύμα από το κύκλωμα όταν η τάση της πηγής υπερβεί τα  $10\text{ V}$ .

Στην κατάσταση ON η διάδος P-N-P-N παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση. Συνεπώς το ρεύμα του κυκλώματος θα καθορίζεται από την αντίσταση  $1\text{ K}\Omega$ . Άρα, όταν  $V=15\text{ V}$  το ρεύμα του κυκλώματος θα προσδιορίζεται από τον νόμο του Ωμ

$$I = \frac{V}{R} = \frac{15\text{ V}}{1\text{ K}\Omega} = 15\text{ mA}$$

Η διάδος P-N-P-N μεταβαίνει στην κατάσταση OFF όταν το ρεύμα, το οποίο την διαρρέει γίνει μικρότερο του ρεύματος συγκράτησης  $I_H$ . Επειδή η διάδος είναι ακόμη στην κατάσταση ON το ρεύμα του κυκλώματος θα καθορίζεται από την αντίσταση  $1\text{ K}\Omega$ . Έτσι η απαιτούμενη τάση της πηγής θα προσδιοριστεί από τον νόμο του Ωμ:

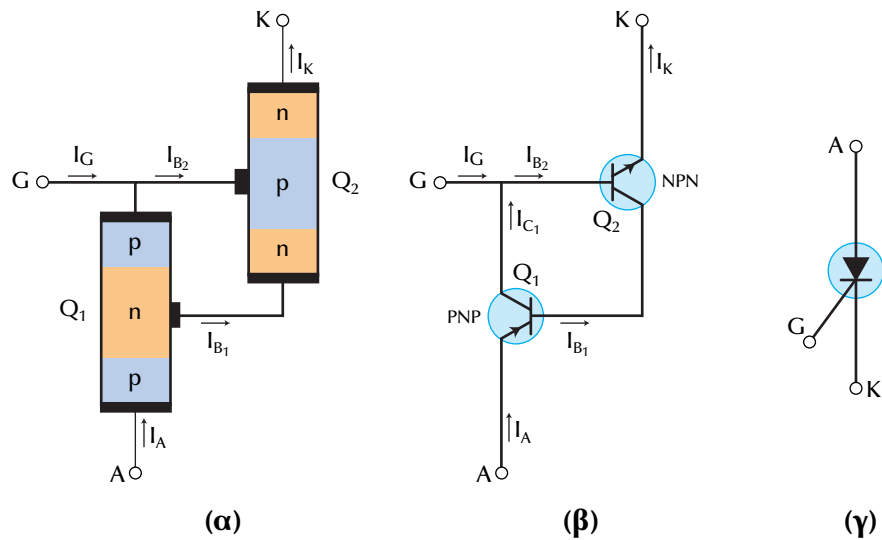
$$V = I \cdot R = (4\text{ mA}) \times (1\text{ K}\Omega) = 4\text{ V}$$

## 5.2 Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR)

### 5.2.1 Δομή και γενικά χαρακτηριστικά

Ο ελεγχόμενος **ανορθωτής πυριτίου** ή **θυρίστορ** (Silicon Controlled Rectifier ή thyristor, SCR) είναι και αυτός μια διάταξη τεσσάρων στρωμάτων. Έχει την ίδια βασική δομή με τη διάοδο P-N-P-N, μόνο που έχει προστεθεί ένα τρίτο ηλεκτρόδιο η **πύλη** (gate), το οποίο έχει συνδεθεί με το

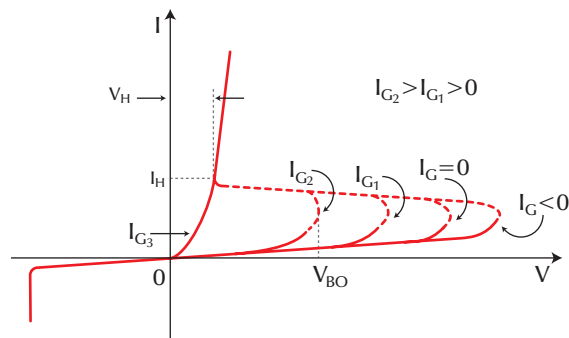
ενδιάμεσο στρώμα ημιαγωγού τύπου P (σχ.5.2.1α) με αποτέλεσμα ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου να έχει τρία ηλεκτρόδια, την άνοδο (A), την κάθοδο (K) και την πύλη (G) (σχ.5.2.1γ).



**Σχήμα 5.2.1** (α) Ισοδύναμη δομή, (β) ισοδύναμο κύκλωμα και (γ) κυκλωματικό διάγραμμα ενός ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου (SCR)

Ονομάζεται ελεγχόμενος ανορθωτής διότι στην ανάστροφη πόλωση συμπεριφέρεται όπως μια κοινή διόδος ενώ στην ορθή πόλωση είναι δυνατός ο καθορισμός και έλεγχος της τάσης σκανδαλισμού μέσω του ρεύματος της πύλης. Η εξάρτηση της τάσης σκανδαλισμού από το ρεύμα πύλης φαίνεται στο σχήμα (5.2.2). Βασικό χαρακτηριστικό της διάταξης είναι ότι όταν το ρεύμα της πύλης είναι μηδέν τότε το SCR συμπεριφέρεται ως διόδος P-N-P-N. Όταν διαβιβαστεί ένα θετικό ρεύμα μέσα από την πύλη τότε η τάση σκανδαλισμού ελαττώνεται και η ελάττωση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα. Για μεγάλες τιμές του ρεύματος πύλης ( $I_{G3}$  στο σχ 5.2.2) η τάση σκανδαλισμού είναι τόσο μικρή ώστε το SCR να παρουσιάζει μια χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης όμοια με αυτή των διόδων. Αντίθετα, για αρνητικές τιμές του ρεύματος πύλης η τάση σκανδαλισμού αυξάνει. Σε ένα SCR η τάση συγκράτησης και το ρεύμα συγκράτησης δεν εξαρτώνται από το ρεύμα πύλης.





**Σχήμα 5.2.2** Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης ενός ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου για διάφορες τιμές του ρεύματος πύλης

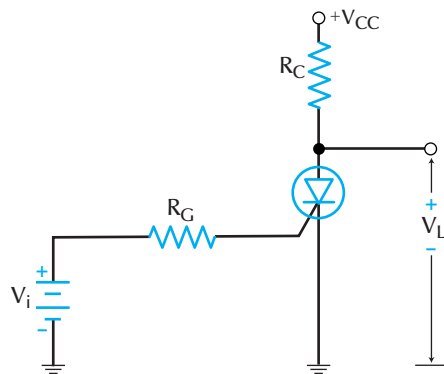
### 5.2.2 Αρχή λειτουργίας

Η ερμηνεία της λειτουργίας του SCR βασίζεται στη συμπεριφορά της διόδου P-N-P-N. Όπως προαναφέρθηκε, το SCR είναι μια διάταξη τεσσάρων στρωμάτων, όπως η διόδος P-N-P-N, στην οποία έχει προστεθεί μία επαφή στο ενδιάμεσο P-τύπου στρώμα. Το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχ. (5.2.1α) και (5.2.1β). Έτσι, όταν το ρεύμα της πύλης είναι μηδέν τότε η λειτουργία του SCR είναι ίδια με αυτή της διόδου P-N-P-N, δηλαδή βασίζεται στα ρεύματα κόρου (ανάστροφης πόλωσης) και τη μεταβολή των χαρακτηριστικών των τρανζίστορ του ισοδύναμου κυκλώματος. Επειδή μεταξύ πύλης και καθόδου σχηματίζεται μια απλή διόδος, αρκεί να εφαρμοστεί μια τάση 0,7 V για να αρχίσει να άγει το τρανζίστορ  $Q_2$  και κατά συνέπεια και το  $Q_1$ , δηλαδή το SCR.

Η παρουσία της πύλης παρέχει τη δυνατότητα διοχέτευσης ρεύματος στο τρανζίστορ  $Q_2$  του ισοδύναμου κυκλώματος. Έτσι, αν διοχετευθεί ρεύμα  $I_G$  όταν το SCR βρίσκεται σε κατάσταση OFF τότε είναι δυνατή η έναρξη της διαδικασίας μανδάλωσης. Στην κατάσταση OFF το ρεύμα  $I_G$  προστίθεται στο ρεύμα του συλλέκτη του τρανζίστορ  $Q_1$ , το οποίο είναι το ρεύμα κόρου της διόδου του συλλέκτη. Το άθροισμα των δύο ρευμάτων δίδουν το ρεύμα βάσης του  $Q_2$ . Συνεπώς το μέτρο του  $I_G$  θα καθορίσει την τάση στην οποία τα χαρακτηριστικά των τρανζίστορ είναι τέτοια ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία μανδάλωσης. Είναι προφανές ότι η τιμή της νέας τάσης σκανδαλισμού θα είναι μικρότερη από εκείνη, η



οποία αντιστοιχεί σε μηδενικό ρεύμα πύλης. Όταν το ρεύμα της πύλης είναι πολύ μεγάλο το  $Q_1$  άγει «συνεχώς» με αποτέλεσμα η τάση σκανδαλισμού να είναι πάρα πολύ μικρή και το SCR να βρίσκεται σε κατάσταση ON για πολύ μικρές τάσεις. Εάν το SCR έχει μεταβεί σε κατάσταση ON, παραμένει σ' αυτήν ακόμα και αν μηδενιστεί το ρεύμα της πύλης.



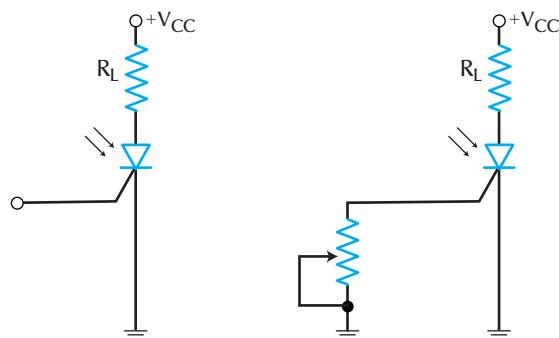
**Σχήμα 5.2.3** Τυπικό κύκλωμα πόλωσης ενός SCR

Όταν το ρεύμα πύλης είναι αρνητικό, το συνολικό ρεύμα βάσης του  $Q_2$  θα μειωθεί με αποτέλεσμα να απαιτηθεί μεγαλύτερη τάση στα άκρα του SCR για να ικανοποιηθούν οι συνθήκες οι οποίες θα οδηγήσουν τη διάταξη σε κατάσταση μανδάλωσης. Η εφαρμογή αρνητικού ρεύματος στην πύλη αποτελεί μέθοδο εξαναγκασμένης μετάβασης ενός SCR από την κατάσταση ON σε κατάσταση OFF.

Για να διοχετευθεί ένα ρεύμα στην πύλη ενός SCR απαιτείται η χρησιμοποίηση πηγής τάσης και αντίστασης περιορισμού του ρεύματος πύλης, αφού μεταξύ πύλης και καθόδου υπάρχει διάοδος, η οποία πολώνεται ορθά. Ένα τυπικό κύκλωμα πόλωσης SCR παρουσιάζεται στο σχ.5.2.3. Οι αντιστάσεις  $R_G$  και  $R_C$  περιορίζουν το ρεύμα πύλης και SCR. Έτσι η τάση εισόδου για να επιτευχθεί η μανδάλωση του SCR υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_i = V_T + I_T \cdot R_G \quad 5.2.1$$

όπου  $V_T$  είναι η **τάση σκανδαλισμού** (trigger voltage) και  $I_T$  είναι το **ρεύμα σκανδαλισμού** (trigger current) του SCR. Τα στοιχεία αυτά παρέχονται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών. Στο κύκλωμα του σχ.5.2.3 το SCR θα μεταβεί στην κατάσταση OFF μόνο όταν η τάση της πηγής ελαττωθεί τόσο ώστε το ρεύμα, το οποίο διαρρέει το SCR γίνει μικρότερο του  $I_H$  ή μηδενιστεί η τάση της πηγής.



**Σχήμα 5.2.4** Φωτο-SCR (α) χωρίς και (β) με ρυθμιζόμενο επίπεδο σκανδάλης

### 5.2.3 Άλλοι τύποι SCR

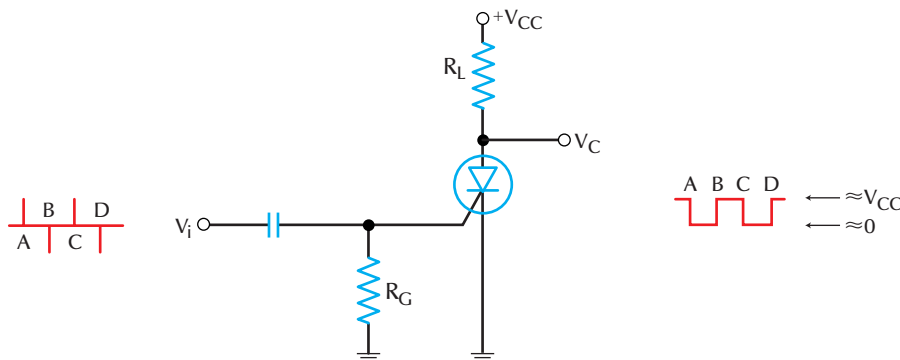
Πέραν των συνηθισμένων SCR, λόγω της σημαντικής συμβολής τους στον έλεγχο της ισχύος, έχουν κατασκευαστεί και άλλοι τύποι όπως SCR στα οποία ο σκανδαλισμός επιτυγχάνεται με φως, η διακοπή λειτουργίας με παλμό στην πύλη και ο ελεγχόμενος διακόπτης ο οποίος διαθέτει δύο πύλες. Στη συνέχεια θα γίνει σύντομη αναφορά σ' αυτούς τους τύπους των SCR.

#### **Φωτο - SCR**

Το **φωτο-SCR** (photo-SCR) ή φωτο-ενεργοποιούμενο SCR (Light-Activated SCR, LASCR) ή φωτο-θυρίστορ (photo-thyristor) παρουσιάζεται στο σχ.5.2.4. Τα φωτο-SCR έχουν παράθυρο από το οποίο μπορεί να εισέλθει το φως και να δημιουργήσει, όπως στις φωτοδιόδους, το κατάλληλο ρεύμα σκανδαλισμού. Το φωτόρευμα επάγεται στη δίοδο βάσης του τρανζίστορ Q2, σχ.5.2.1. Όταν το φωτο-SCR μανδαλωθεί, παραμέ-

νει στην κατάσταση ON ακόμα και αν διακοπεί η παροχή φωτός. Το επίπεδο της έντασης του φωτός για το οποίο επιτυγχάνεται ο σκανδαλισμός του φωτο-SCR ρυθμίζεται με τη βοήθεια εξωτερικής ρυθμιζόμενης αντίστασης, η οποία συνδέεται μεταξύ πύλης και γης. Η αντίσταση διαχτεύει μέρος του φωτορεύματος στη γη και μειώνει την φωτοευαισθησία του SCR.

Τα φωτο-SCR βρίσκουν εφαρμογές σε χώρους όπου το SCR πρέπει να είναι πλωτό και να βρίσκεται σε πολύ υψηλό δυναμικό ως προς τη γη του συστήματος ελέγχου της ισχύος. Έτσι αποφεύγεται η χρήση μετασχηματιστή για την οδήγηση παλμών στην πύλη, οπότε αποφεύγουμε το πρόβλημα ότι η διηλεκτρική αντοχή μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ενός μετασχηματιστή είναι πεπερασμένη. Επιπλέον, η μεταφορά φωτός με οπτική ίνα επιτρέπει την τοποθέτηση του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου της ισχύος σε σημαντική απόσταση από το φωτο-SCR.



**Σχήμα 5.2.5** Κύκλωμα και λειτουργία διακόπτη, που ελέγχεται από την πύλη

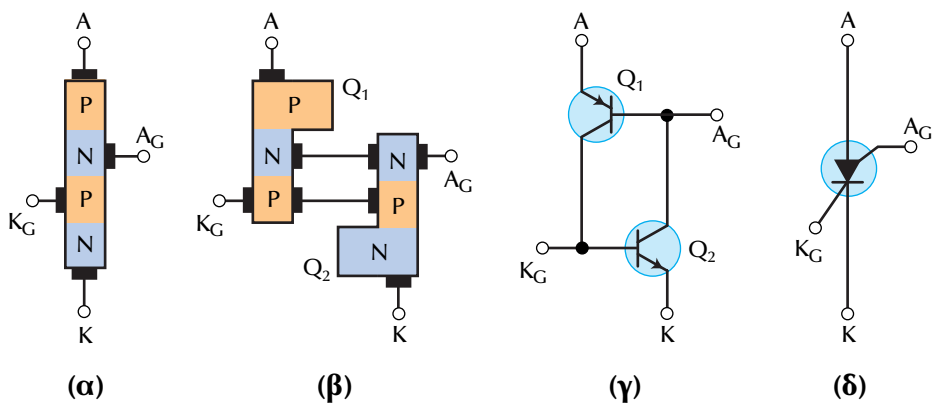
### Διακόπτης ο οποίος ελέγχεται από την πύλη

Ο διακόπτης που ελέγχεται από την πύλη (Gate-Controlled Switch, GCS ή Gate Turn-Off, GTO) έχει σχεδιαστεί με στόχο να μεταβαίνει στην κατάσταση ON με εφαρμογή θετικών παλμών στην πύλη και όταν βρίσκεται στην κατάσταση ON να μεταβαίνει στην κατάσταση OFF με εφαρμογή αρνητικών παλμών στην πύλη, χωρίς να απαιτείται η ελάττωση του ρεύματος σε επίπεδα χαμηλότερα του ρεύματος συγκράτη-

σης. Αυτός ο τύπος SCR χρησιμοποιείται σε ψηφιακά συστήματα, όπου υπάρχει η δυνατότητα διοχέτευσης θετικών και αρνητικών παλμών. Επίσης χρησιμοποιείται σε συστήματα όπου απαιτείται η εξοικονόμηση ενέργειας και η τροφοδοσία γίνεται από συνεχές, όπως π.χ. στα φλας των φωτογραφικών μηχανών τα οποία μετρούν την ένταση φωτισμού του αντικειμένου το οποίο πρόκειται να φωτογραφηθεί. Εκεί το GCS διακόπτει την παροχή ρεύματος στη λυχνία (φλας) την κατάλληλη στιγμή και εξοικονομείται η ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη με μορφή υψηλής τάσης σε έναν πυκνωτή. Έτσι αποφεύγεται η επαναφόρτιση του πυκνωτή και συνεπώς η εξάντληση των μπαταριών.

### Ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου

Ο **ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου** (Silicon Controlled Switch, SCS) έχει την ίδια δομή με το SCR, μόνο που σ' αυτό έχει προστεθεί μια ακόμη επαφή (σχ 5.2.6). Η διάταξη αυτή έχει δύο πύλες την **πύλη καθόδου** (- Cathode Gate) και την **πύλη ανόδου** (Anode Gate).



**Σχήμα 5.2.6** (α) Λειτουργική δομή, (β) ισοδύναμη δομή, (γ) ισοδύναμο κύκλωμα και (δ) κυκλωματικό διάγραμμα ενός ελεγχόμενου διακόπτη πυριτίου (SCS)

Η πρώτη συνδέεται με τον ενδιάμεσο ημιαγωγό τύπου P, δηλαδή την πύλη του τρανζίστορ  $Q_2$ , και η δεύτερη συνδέεται με το ενδιάμεσο ημιαγωγό τύπου N, δηλαδή την πύλη του τρανζίστορ  $Q_1$  (σχ 5.2.6β και γ). Σ' αυτή τη διάταξη η μετάβαση από κατάσταση OFF σε κατάσταση ON προκαλείται με θετικούς παλμούς στην πύλη καθόδου και με αρνητικούς

παλμούς στην πύλη ανόδου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσω της πύλης καθόδου αρχίζει να άγει, ως γνωστόν, το τρανζίστορ  $Q_2$  ενώ μέσω της πύλης ανόδου και με εφαρμογή τάσης χαμηλότερης από την άνοδο (αρνητικός παλμός) αρχίζει να άγει το τρανζίστορ  $Q_1$ . Και στις δύο περιπτώσεις η διάταξη οδηγείται σε μανδάλωση.

### **Παράδειγμα 5.2.1**

Στο κύκλωμα του σχ.5.2.3 δίδεται  $V_T=0,7\text{ V}$ ,  $I_T=5\text{ mA}$ ,  $I_H=8\text{ mA}$ ,  $R_G=1\text{ K}\Omega$ ,  $R_C=100\ \Omega$  και  $V_{CC}=20\text{ V}$ . Να προσδιοριστεί η τάση εξόδου  $V_O$ , όταν το SCR είναι σε κατάσταση OFF. Να υπολογιστεί η τάση εισόδου για την οποία το SCR μεταβαίνει στην κατάσταση ON. Ποία θα πρέπει να είναι η τάση τροφοδοσίας για να μεταβεί το SCR σε κατάσταση OFF, όταν στην κατάσταση ON το SCR διατηρεί στα άκρα του τάση  $0,7\text{ V}$ .

### **Λύση**

Στην κατάσταση OFF το SCR δεν άγει με αποτέλεσμα η πτώση τάσης στα άκρα της  $R_C$  να είναι μηδέν και συνεπώς η τάση εξόδου να είναι  $20\text{ V}$ .

Για να μεταβεί στη κατάσταση ON, δηλαδή για να επιτευχθεί ο σκανδαλισμός, θα πρέπει η τάση και το ρεύμα της πύλης να είναι ίσα με τις αντίστοιχες τιμές σκανδαλισμού, δηλαδή

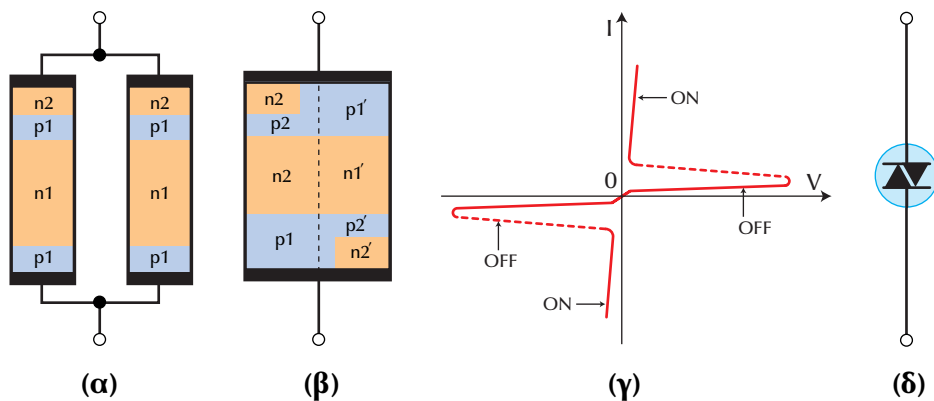
$$V_i = V_T + I_T \cdot R_G = 0,7\text{ V} + (5\text{ mA}) \times (1\text{ K}\Omega) = 0,7\text{ V} + 5\text{ V} = 5,7\text{ V}$$

Το SCR στην κατάσταση ON διατηρεί στα άκρα του πτώση τάσης  $V_H=0,7\text{ V}$ . Συνεπώς για να μεταβεί στην κατάσταση OFF θα πρέπει το ρεύμα να ελαττωθεί στο ρεύμα συγκράτησης, δηλαδή

$$V_{CC} = V_H + I_H \cdot R_C = 0,7\text{ V} + (8\text{ mA}) \times (100\ \Omega) = 0,7\text{ V} + 0,8\text{ V} = 1,5\text{ V}$$

## 5.3 Αρχές λειτουργίας και χαρακτηριστικά των Νταϊακ (DIAC) και Τραϊακ (TRIAC)

### 5.3.1 Δομή και λειτουργία DIAC



**Σχήμα 5.3.1** (α) Αρχή κατασκευής, (β) τελική δομή, (γ) κυκλωματικό σύμβολο και (δ) χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ενός DIAC

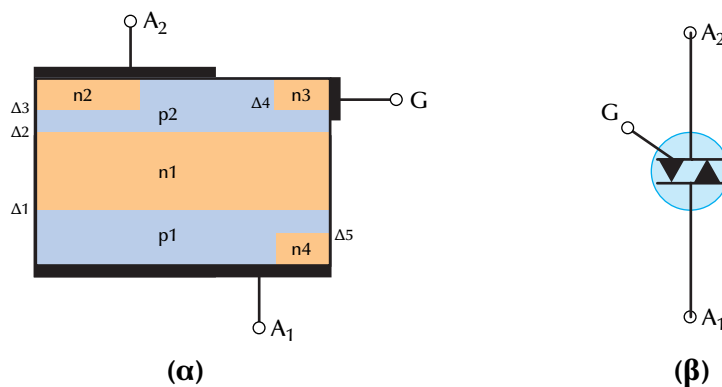
Ένα DIAC είναι μία αμφίδρομη διάταξη. Η δομή της μοιάζει σαν να έχουν συνδεθεί δύο δίοδοι P-N-P-N παράλληλα και αντίστροφα (σχ.5.3.1α). Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας σύνδεσης (σχ 5.3.1β) είναι μια διάταξη της οποίας το αριστερό μέρος, διαβάζοντας από πάνω προς τα κάτω, μοιάζει με μία δίοδο N-P-N-P (δηλ. μια ανάστροφα τοποθετημένη δίοδο P-N-P-N) και το δεξιό με μια δίοδο P-N-P-N. Το κυκλωματικό σύμβολο της διόδου DIAC παρουσιάζεται στο σχ. 5.3.1γ. Πέραν αυτού του συμβόλου υπάρχουν και άλλα.

Το αποτέλεσμα αυτής της δομής είναι μια συμμετρική συμπεριφορά σε ότι αφορά τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης. Σε κάθε πολικότητα η αρχή λειτουργίας της διόδου DIAC είναι όμοια με αυτή της διόδου P-N-P-N. Όταν η τάση στα άκρα της υπερβεί την **τάση διάσπασης**  $V_{BO}$  δεν έχει νόημα να χρησιμοποιούμε πλέον τον όρο ορθή) το αντίστοιχο τμήμα το οποίο βρίσκεται υπό ορθή πόλωση αρχίζει η διαδικασία μανδάλωσης ώστε η διάταξη να μεταβεί στην κατάσταση ON. Όταν η διάταξη βρίσκεται στην κατάσταση ON και το ρεύμα, το οποίο τη διαρρέει, ελαττωθεί κάτω του **ρεύματος συγκράτησης** τότε η διάταξη μεταβαίνει στην

κατάσταση OFF. Αυτό συμβαίνει σε οποιαδήποτε πολικότητα, όπως φαίνεται στο σχ.5.3.1δ

Οι δίοδοι DIAC χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στα κυκλώματα ολίσθησης φάσης για τη σκανδάλη διατάξεων TRIAC στον έλεγχο ισχύος εναλλασσόμενου.

### 5.3.2 Δομή και λειτουργία TRIAC



Σχήμα 5.3.2 (α) Δομή και (β) κυκλωματικό σύμβολο ενός TRIAC

Και το TRIAC είναι μια αμφίδρομη διάταξη. Η δομή του είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τις προηγούμενες. Στο σχ.5.3.2α παρουσιάζεται η δομή αυτή, η οποία αποτελείται πλέον από πέντε επαφές P-N. Στο αριστερό τμήμα υπάρχει μια διαδοχή ημιαγωγών N-P-N-P ενώ στο δεξιό μια διαδοχή ημιαγωγών P-N-P-N. Τα δύο τμήματα αυτά σε συνδυασμό με την πύλη (G), η οποία είναι συνδεδεμένη με ένα ανεξάρτητο τμήμα ημιαγωγό τύπου N και με τον ημιαγωγό τύπου P ( $P_2$  στο σχ.5.3.2α), σχηματίζουν δύο SCR. Αυτά με τη σειρά τους είναι συνδεδεμένα παράλληλα και με αντίθετες φορές και επίσης έχουν ενωμένες τις πύλες τους. Ανάλογα με την πολικότητα της τάσης, η οποία εφαρμόζεται στα άκρα του TRIAC, είναι δυνατή η ενεργοποίηση του ενός ή του άλλου "SCR".

Ένα TRIAC, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια αμφίδρομη διάταξη. Έτσι δεν έχουν νόημα οι έννοιες άνοδος και κάθοδος, όπως στο SCR, και γι' αυτό οι βασικοί ακροδέκτες συμβολίζονται ως  $A_1$  και  $A_2$ . Η μόνη και βασι-

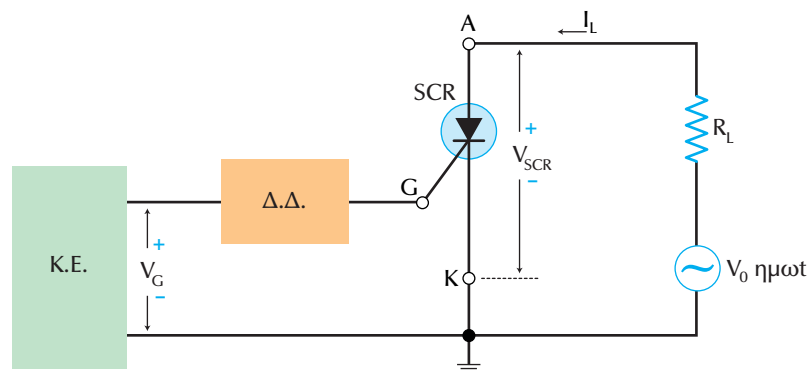


κή διαφοροποίηση η οποία υπάρχει μεταξύ των ακροδεκτών αυτών είναι ότι ο ακροδέκτης  $A_2$  αποτελεί το σημείο αναφοράς. Ως προς αυτό εφαρμόζεται η τάση στην πύλη και ως προς αυτό μετράται η τάση στον ακροδέκτη  $A_1$ . Με απλά λόγια, ο ακροδέκτης  $A_2$  παίζει ρόλο αντίστοιχο με εκείνο της καθόδου στα SCR. Για να μεταβεί ένα TRIAC από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON, η ιδιαίτερη δομή του επιβάλλει εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη όταν ο ακροδέκτης  $A_1$  είναι θετικός και αρνητική όταν ο ακροδέκτης  $A_1$  είναι αρνητικός ως προς τον  $A_2$ . Ένα TRIAC επανέρχεται στην κατάσταση OFF όταν το ρεύμα το οποίο το διαρρέει γίνεται μικρότερο του ρεύματος συγκράτησης.

## 5.4 Εφαρμογή των ανωτέρω για τον έλεγχο της ισχύος

Υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός εφαρμογών, οι οποίες απαιτούν τον έλεγχο του ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα. Σ' αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνονται η ηλεκτροσυγκόλληση μετάλλων, ο έλεγχος φωτισμού, ο έλεγχος κινητήρων, και διάφορες άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Ο έλεγχος του ρεύματος, το οποίο τροφοδοτεί ένα φόρτο, μπορεί κατ' αρχήν να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- μέσω της τάσης τροφοδοσίας, στην απλούστερη περίπτωση μέσω του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή τροφοδοσίας, ή
- με την παρεμβολή, σε σειρά με το κύκλωμα, μιας ελεγχόμενης αντίστασης.



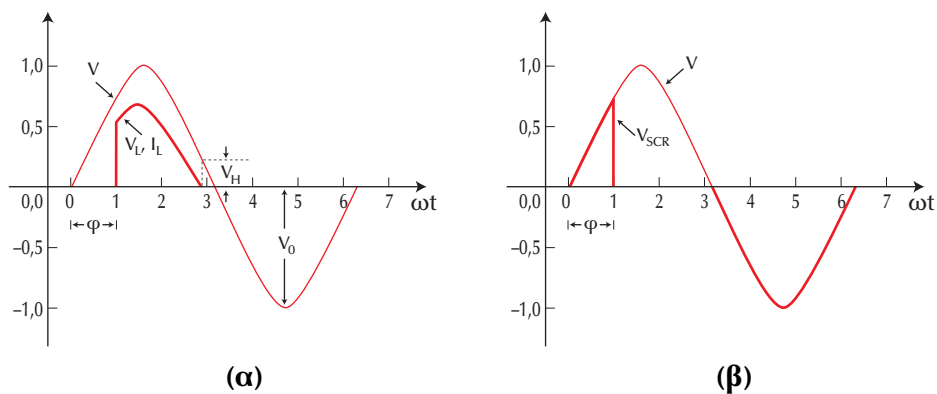
Σχήμα 5.4.1 Κύκλωμα ελέγχου ισχύος με SCR

Και οι δύο λύσεις όμως θεωρούνται μη επιτυχείς, διότι η πρώτη χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος ενώ η δεύτερη από χαμηλή απόδοση, αφού σημαντικό ποσοστό ισχύος δαπανάται στην αντίσταση. Η χρησιμοποίηση των SCR και των TRIAC μειώνουν σημαντικά το κόστος της διαδικασίας ελέγχου του ρεύματος.

### Έλεγχος με SCR

Αν στην άνοδο ενός SCR εφαρμοστεί μια ημιτονική τάση, η διάταξη μπορεί να μεταβεί στην κατάσταση ON μόνο σε κάθε θετική ημιπερίοδο. Η μετάβαση στην κατάσταση OFF θα γίνεται στο τέλος της συγκεκριμένης ημιπεριόδου. Στην αρνητική ημιπερίοδο το SCR δεν θα λειτουργεί.

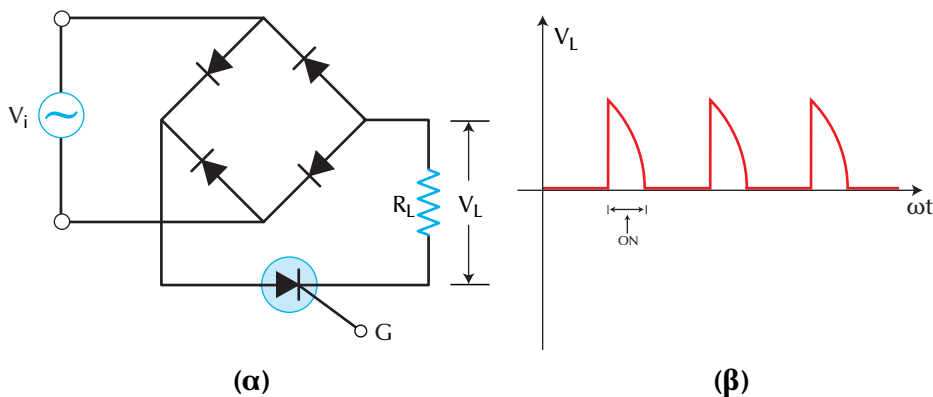
Στο σχ.5.4.1 παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου ισχύος με ένα SCR. Το κύκλωμα αποτελείται από το SCR, την αντίσταση φόρτου ( $R_L$ ), το κύκλωμα ελέγχου (Κ.Ε.) και τη διάταξη διακόπτη (Δ.Δ.), η οποία μπορεί να είναι μία δίοδος P-N-P-N ή μια δίοδος DIAC. Το κύκλωμα ελέγχου τροφοδοτεί με παλμούς, οι οποίοι μεταφέρονται στην πύλη του SCR όταν υπερβούν την τάση διάσπασης της διόδου P-N-P-N ή της διόδου DIAC. Όταν μεταφερθεί ένας παλμός στην πύλη και το SCR μεταβεί στην κατάσταση ON, τότε η τάση στα άκρα του SCR θα μηδενιστεί και θα διέρχεται ρεύμα  $I_L$  μέσα από την  $R_L$ .



**Σχήμα 5.4.2** Κυματομορφές τάσεων (α) τροφοδοσίας και στα άκρα του φόρτου και (β) τροφοδοσίας και στα άκρα του SCR

Οι κυματομορφές των τάσεων τροφοδοσίας στα άκρα του φόρτου και στα άκρα του SCR παρουσιάζονται στο σχ.5.4.2. Παρατηρούμε ότι το SCR μεταβαίνει στην κατάσταση ON, δηλαδή άγει, μόνο στη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου. Στη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου δεν άγει, άρα είναι σε κατάσταση OFF. Αν ο παλμός σκανδαλισμού εφαρμοστεί στη χρονική στιγμή, που αντιστοιχεί σε γωνία  $\varphi$ , το SCR μεταβαίνει στην κατάσταση ON και η τάση και το ρεύμα στα άκρα του φόρτου αυξάνονται αμέσως (σχ.5.4.2α) ενώ η τάση στα άκρα του SCR μηδενίζεται (σχ.5.4.2β). Το SCR μεταβαίνει στην κατάσταση OFF στο τέλος της ημιπεριόδου και το ρεύμα και η τάση στα άκρα του φόρτου μηδενίζονται έως ότου, στη διάρκεια μιας θετικής ημιπεριόδου, εφαρμοστεί στην πύλη του SCR ένας παλμός σκανδαλισμού.

Σε ότι αφορά τον έλεγχο του ρεύματος φόρτου, επειδή στο SCR το ρεύμα έχει συγκεκριμένη φορά, μόνο η **μέση τιμή** του ρεύματος θα καθορίζεται από τη γωνία σκανδαλισμού  $\varphi$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία  $\varphi$  τόσο πιο μικρή θα είναι η μέση τιμή του ρεύματος, διότι το SCR θα άγει (ON) επί λιγότερο χρόνο.



**Σχήμα 5.4.3** (α) Κύκλωμα και (β) κυματομορφή τάσης στο φόρτο

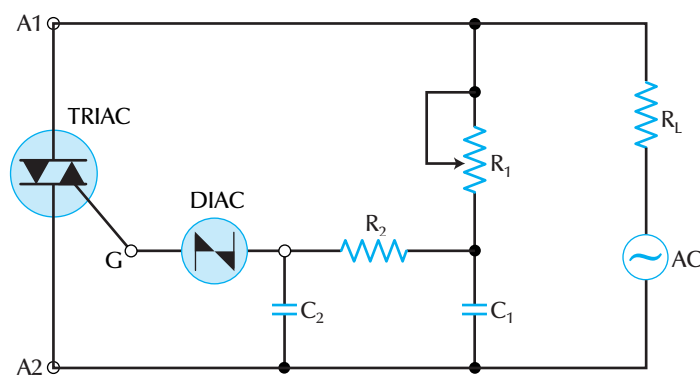
Το κύκλωμα του σχ.(5.4.1) μειονεκτεί σε ότι αφορά την απόδοση διότι μπορεί να λειτουργήσει μόνο στο 50% μιας περιόδου. Στην περίπτωση κατά την οποία πρέπει να λειτουργεί σε όλη τη διάρκεια της περιόδου χρησιμοποιείται το κύκλωμα του σχ.5.4.3 ή ένα TRIAC, το οποίο θα συζητηθεί στην επόμενη παράγραφο.

Στο σχ.5.4.3 χρησιμοποιείται μια γέφυρα ανόρθωσης με «φόρτο» το σύστημα: SCR, αντίσταση φόρτου και κύκλωμα ελέγχου. Με αυτό το κύκλωμα στο SCR εφαρμόζεται η πλήρως ανορθωμένη τάση, η οποία σύμφωνα με το σχ.5.4.3α έχει μόνο θετικές τιμές. Αυτό δίνει στο κύκλωμα τη δυνατότητα να λειτουργεί στο 100% της περιόδου.

### Έλεγχος με TRIAC

Ο έλεγχος με TRIAC δε διαφέρει σημαντικά από τον έλεγχο με SCR. Η μόνη διαφορά που υπάρχει οφείλεται στο γεγονός ότι το TRIAC είναι μια αμφιπολική διάταξη και συνεπώς μπορεί να λειτουργήσει τόσο στη θετική όσο και στην αρνητική ημιπερίοδο. Ο έλεγχος της φάσης εφαρμογής του παλμού σκανδάλης σε ένα TRIAC επιτυγχάνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός DIAC, μιας και αυτό είναι μια αμφιπολική διάταξη. Λόγω της αμφιπολικής λειτουργίας του TRIAC επιτυγχάνεται ο έλεγχος της **ενεργού τιμής** της τάσης ή του ρεύματος στο φόρτο μέσω της γωνίας σκανδαλισμού  $\varphi$ . Όπως και στο SCR, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία  $\varphi$  τόσο πιο μικρή είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος διότι το TRIAC θα άγει (ON) επί λιγότερο χρόνο.

Ένα κύκλωμα ελέγχου της ενεργού τιμής ρεύματος, το οποίο διαρρέει την αντίσταση φόρτου  $R_L$ , παρουσιάζεται στο σχ.5.4.4



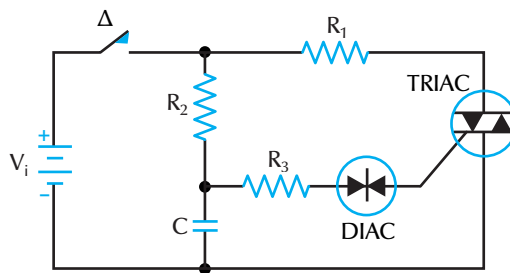
**Σχήμα 5.4.4** Κύκλωμα ρύθμισης ενεργού τιμής τάσης (ρεύματος) στο φόρτο  $R_L$

Στο κύκλωμα του σχ.5.4.4 η καθυστέρηση φάσης  $\varphi$  καθορίζεται από τα στοιχεία  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  και  $C_2$ . Ο πυκνωτής  $C_2$  φορτίζει με καθυστέρηση

χρόνου και όταν η τάση στα άκρα του υπερβεί το άθροισμα της τάσης σκανδαλισμού του TRIAC συν την τάση διάσπασης του DIAC ο  $C_2$  θα εκφορτιστεί μέσω του DIAC και συνεπώς εξαναγκάζει το TRIAC να μεταβεί στην κατάσταση ON. Η γωνία καθυστέρησης  $\varphi$  αυξάνει όσο αυξάνει η αντίσταση  $R_1$ . Συνεπώς η ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα της  $R_L$  ελαττώνεται όσο αυξάνει η  $R_1$ .

### Παράδειγμα 5.4.1

Στο διπλανό κύκλωμα δίδεται  $R_1 = 12 \Omega$ ,  $R_2 = 68 \text{ K}\Omega$ ,  $R_3 = 2 \text{ K}\Omega$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$ ,  $V_i = 80 \text{ V}$ , η τάση διάσπασης του DIAC είναι  $35 \text{ V}$  και η τάση και ρεύμα σκανδαλισμού του TRIAC  $1 \text{ V}$  και  $10 \text{ mA}$ . Να υπολογίσετε:



A) Ποίο θα είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει το TRIAC όταν βρίσκεται στην κατάσταση ON.

B) Ποία είναι η ελάχιστη τάση του πυκνωτή  $C$ , που προκαλεί σκανδαλισμό του TRIAC.

### Λύση

A) Θεωρούμε ότι η τάση στα άκρα του TRIAC είναι μηδέν όταν βρίσκεται σε κατάσταση ON. Έτσι:

$$I = \frac{V}{R_1} = \frac{80\text{V}}{12\text{K}\Omega} = 6,67\text{A}$$

B) Ο πυκνωτής φορτίζει μέσω της  $R_2$ . Για να γίνει σκανδαλισμός του TRIAC θα πρέπει η τάση στα άκρα του DIAC να υπερβεί την τάση διάσπασης. Επειδή η τάση σκανδαλισμού του TRIAC είναι  $1 \text{ V}$  και η τάση διάσπασης του DIAC  $35 \text{ V}$  θα έχουμε:

$$V_C = V_{BO} + V_T = 35 \text{ V} + 1 \text{ V} = 36 \text{ V}$$

Αυτή είναι η ελάχιστη τάση η οποία προκαλεί σκανδαλισμό στο TRIAC.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5

- Η **δίοδος P-N-P-N** είναι μια διάταξη η οποία εμφανίζει εσωτερική (θετική) ανατροφοδότηση ή ανασύζευξη, με αποτέλεσμα να έχει δυο δυνατές καταστάσεις λειτουργίας, την κατάσταση ON και την κατάσταση OFF.
- Η **δίοδος P-N-P-N** μεταβαίνει από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON όταν η τάση στα άκρα της υπερβεί την ορθή τάση διάσπασης.
- Η **δίοδος P-N-P-N** μεταβαίνει από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF όταν η τάση στα άκρα της ελαττωθεί και γίνει μικρότερη της τάσης συγκράτησης.
- Το **SCR** μοιάζει με τη δίοδο P-N-P-N αλλά έχει ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο, την πύλη. Η πύλη παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της ορθής τάσης διάσπασης.
- Με εφαρμογή **θετικών παλμών**, το ρεύμα των οποίων υπερβαίνει το ρεύμα σκανδαλισμού, στην πύλη το **SCR** μεταβαίνει στην κατάσταση **ON**. Η επιστροφή στην κατάσταση OFF γίνεται όταν η τάση στα άκρα του ελαττωθεί και γίνει μικρότερη της τάσης συγκράτησης.
- Το **DIAC** είναι μια **αμφιπολική διάταξη** και αποτελεί το αντίστοιχο της δίοδου P-N-P-N. Στο DIAC έχουμε την τάση διάσπασης, μιας και δεν υπάρχει ορθή πόλωση, και την τάση συγκράτησης.
- Το **TRIAC** είναι και αυτό μια **αμφιπολική διάταξη** και αποτελεί το αντίστοιχο του SCR. Οι παλμοί οι οποίοι οδηγούν το TRIAC στην κατάσταση ON είναι θετικοί όταν ο ακροδέκτης  $A_1$  είναι θετικός ως προς τον  $A_2$  και αρνητικοί όταν ο  $A_1$  είναι αρνητικός ως προς το  $A_2$ .

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ 5

5.1. Μια δίοδος P-N-P-N μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ως

α. αντίσταση

β. ενισχυτής

γ. διακόπτης

δ. πηγή ισχύος

Να σημειώσετε το σωστό.

5.2. Για να μεταβεί στην κατάσταση

ON μια δίοδος P-N-P-N πρέπει να εφαρμόσετε

α. ένα θετικό παλμό σκανδάλης

β. ένα μικρό ρεύμα

γ. μια τάση διάσπασης

δ. έναν ανάστροφο παλμό σκανδάλης

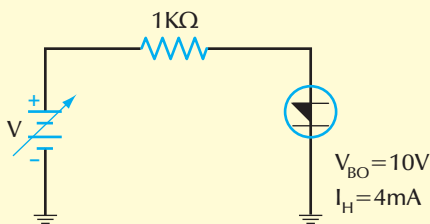
Να σημειώσετε το σωστό.

5.3. Ένα SCR μεταβαίνει στην κατάσταση ON με

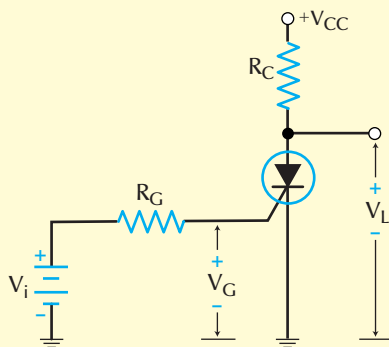
- α. ορθή τάση διάσπασης
- β. παλμό στην πύλη
- γ. τάση διάσπαση
- δ. ρεύμα συγκράτησης

Να σημειώσετε το σωστό.

5.4. Στο διπλανό κύκλωμα η δίοδος βρίσκεται σε κατάσταση ON. Αν σ' αυτή την κατάσταση η πτώση τάσης στα άκρα της είναι 0,7 V, ποιά πρέπει να είναι η τάση της πηγής για να μεταβεί στην κατάσταση OFF.



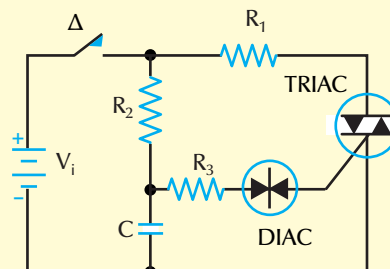
5.5. Στο διπλανό κύκλωμα είναι  $R_C=56 \Omega$ ,  $R_G=2,7 \text{ K}\Omega$ ,  $V_{CC}=15 \text{ V}$ ,  $I_T=2 \text{ mA}$ ,  $I_H=2 \text{ mA}$  και η πτώση τάσης



στα άκρα του SCR στην κατάσταση ON και η  $V_G$  είναι 0,7 V. Ποια είναι η τάση εξόδου όταν το SCR βρίσκεται σε κατάσταση OFF; Ποια είναι η τάση σκανδαλισμού πύλης του SCR; Αν η  $V_{CC}$  μειωθεί έως ότου το SCR μεταβεί στην κατάσταση OFF, ποια θα είναι η τιμή στην οποία θα συμβεί αυτό;

5.6. Αν στην προηγούμενη άσκηση υποδιπλασιάζουμε τις αντιστάσεις και έχουμε  $I_T=1,5 \text{ mA}$ , ποια θα είναι η τάση η οποία θα προκαλέσει σκανδαλισμό του SCR;

5.7. Στο κύκλωμα του διπλανού σχήματος δίδεται  $R_1=12 \Omega$ ,  $R_2=39 \text{ K}\Omega$ ,  $R_3=1 \text{ K}\Omega$ ,  $V=60 \text{ V}$ ,  $C=1 \mu\text{F}$ , τάσης διάσπασης DIAC 32 V και τάση σκανδάλης πύλης TRIAC 1 V. Αν το TRIAC βρίσκεται σε κατάσταση ON ποιο είναι το ρεύμα, το οποίο διαρρέει την  $R_1$ ;



5.8. Στην άσκηση 5.7, αν το TRIAC έχει στα άκρα του τάση 1 V όταν άγει και το ρεύμα συγκράτησης είναι 50 mA, ποια πρέπει να είναι η τάση της πηγής ώστε να μεταβεί στην κατάσταση OFF.