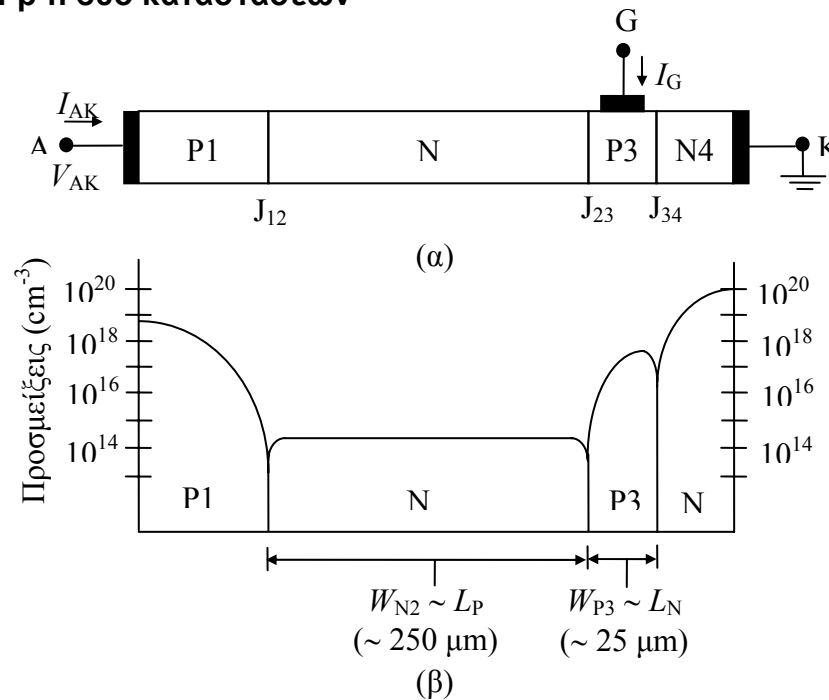


## 9. Ημιαγωγικά Στοιχεία Δύο Καταστάσεων

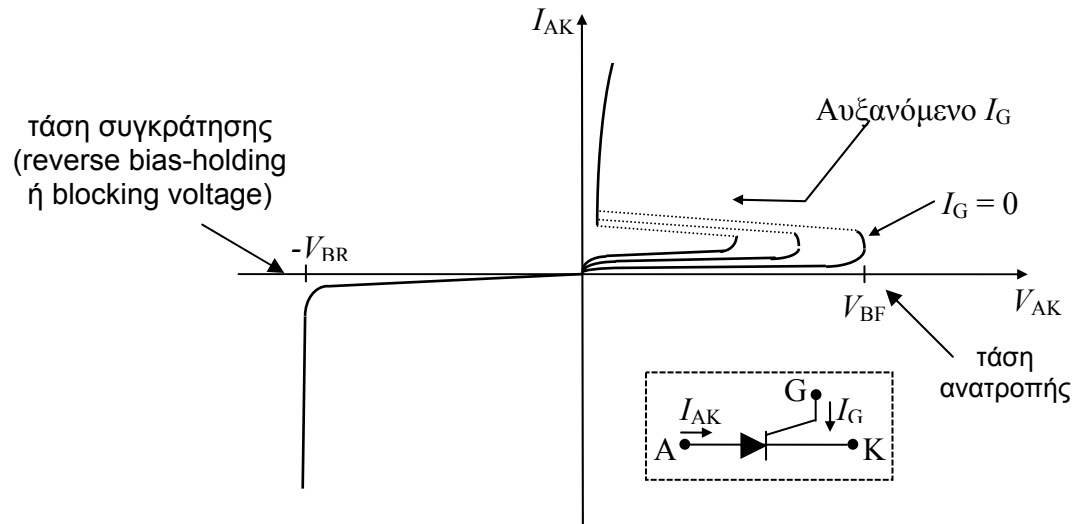
Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται διατάξεις p-n-p-n ή δίοδοι Shockley. Η πλέον διαδεδομένη μορφή δίοδου Shockley είναι το **θυρίστορ SCR (Silicon Controlled Rectifiers)**.

Τα θυρίστορ χρησιμοποιούνται, ευρέως, σε εφαρμογές, όπου πρέπει να ελεγχθεί φορτίο ισχύος DC και AC. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται, συχνά, για να τροφοδοτήσουν ένα συγκεκριμένο ποσό ισχύος σε ένα φορτίο ή για να το αφαιρέσουν, εντελώς, από το φορτίο.

### 9.1. Αρχή λειτουργίας δίοδου p-n-p-n δύο καταστάσεων



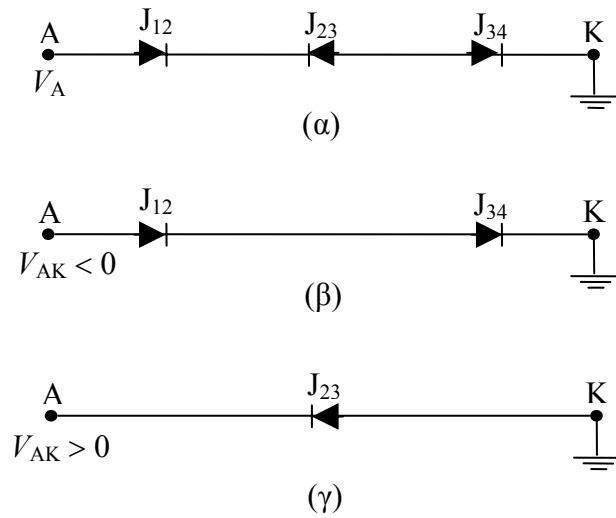
Σχ. 9.1. α) Σχηματικό διάγραμμα SCR, β) τυπικό προφίλ προσμίξεων.



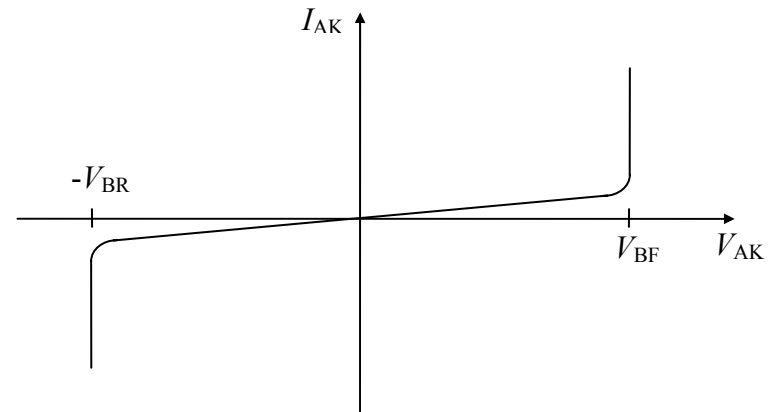
Σχ. 9.2. Στατική χαρακτηριστική θυρίστορ SCR και κυκλωματικός του συμβολισμός.

Εφαρμόζοντας ένα ρεύμα  $I_G > 0$ , μειώνεται η τάση ανατροπής και η διάταξη μπορεί να εισέλθει στην κατάσταση αγωγιμότητας για ένα μικρότερο δυναμικό  $V_{AK}$ . Ας σημειωθεί ότι οι τάσεις  $V_{BR}$  και  $V_{BF}$ , μπορούν να είναι της τάξης των εκατοντάδων ή ακόμα και χιλιάδων volts, ενώ η πτώση τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας πάνω στο SCR είναι συνήθως της τάξης του volt.

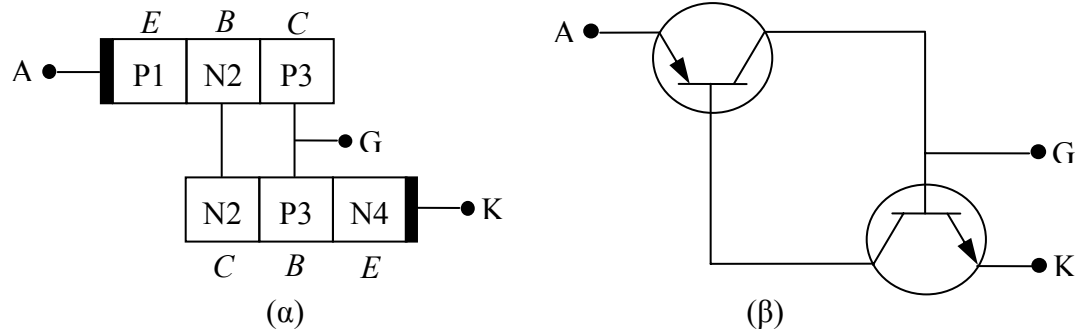
### 9.1.1. Λειτουργική Περιγραφή Θυρίστορ SCR



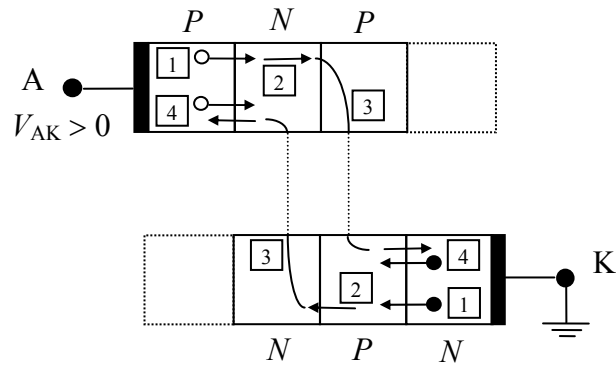
Σχ. 9.3. Το μοντέλο των διόδων: α) Τυχαία τάση  $V_{AK}$ , β)  $V_{AK} < 0$ , γ)  $V_{AK} > 0$ .



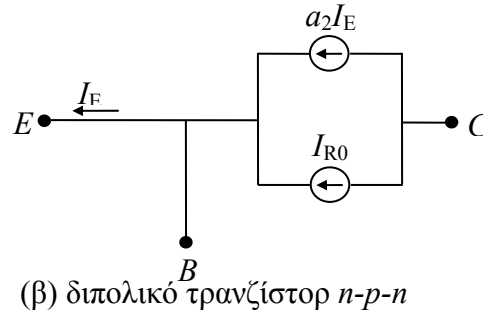
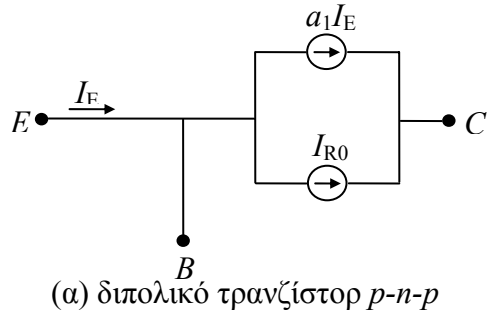
Σχ. 9.4. Χαρακτηριστική του θυρίστορ όπως αυτή προβλέπεται από το μοντέλο των διόδων.



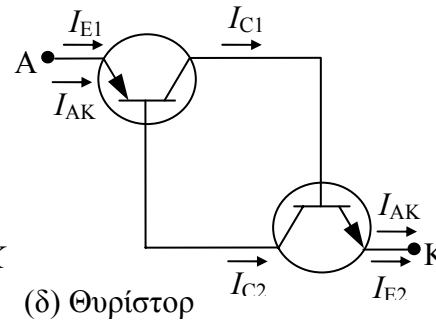
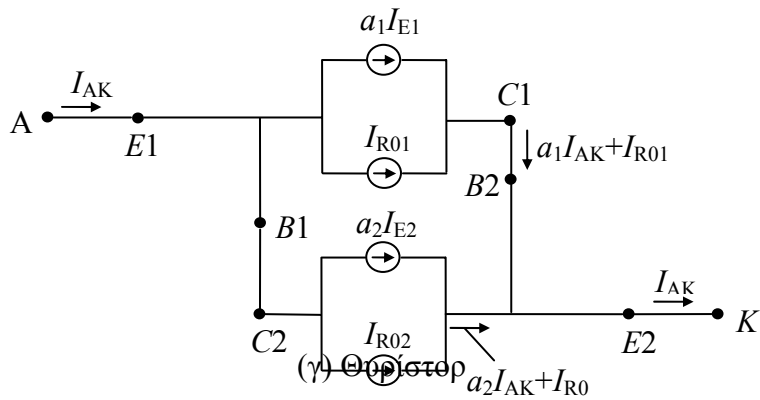
Σχ. 9.5. Το μοντέλο των δύο τρανζίστορ: α) Σχηματικό διάγραμμα, και β) ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου.



Σχ. 9.6. Χρησιμοποίηση του μοντέλου των δύο τρανζίστορ για την εξήγηση του μηχανισμού ανατροφοδότησης που οδηγεί σε μεταγωγή.  
 [1] Αρχική έγχυση φορέων. [2] Διάχυση κατά μήκος της περιοχής βάσης. [3] Οι εγχεόμενοι φορείς εισέρχονται στη βάση του άλλου τρανζίστορ.  
 [4] Επιπρόσθετη έγχυση η οποία ενεργοποιείται λόγω της περίσσειας φορέων πλειονότητας στη βάση.



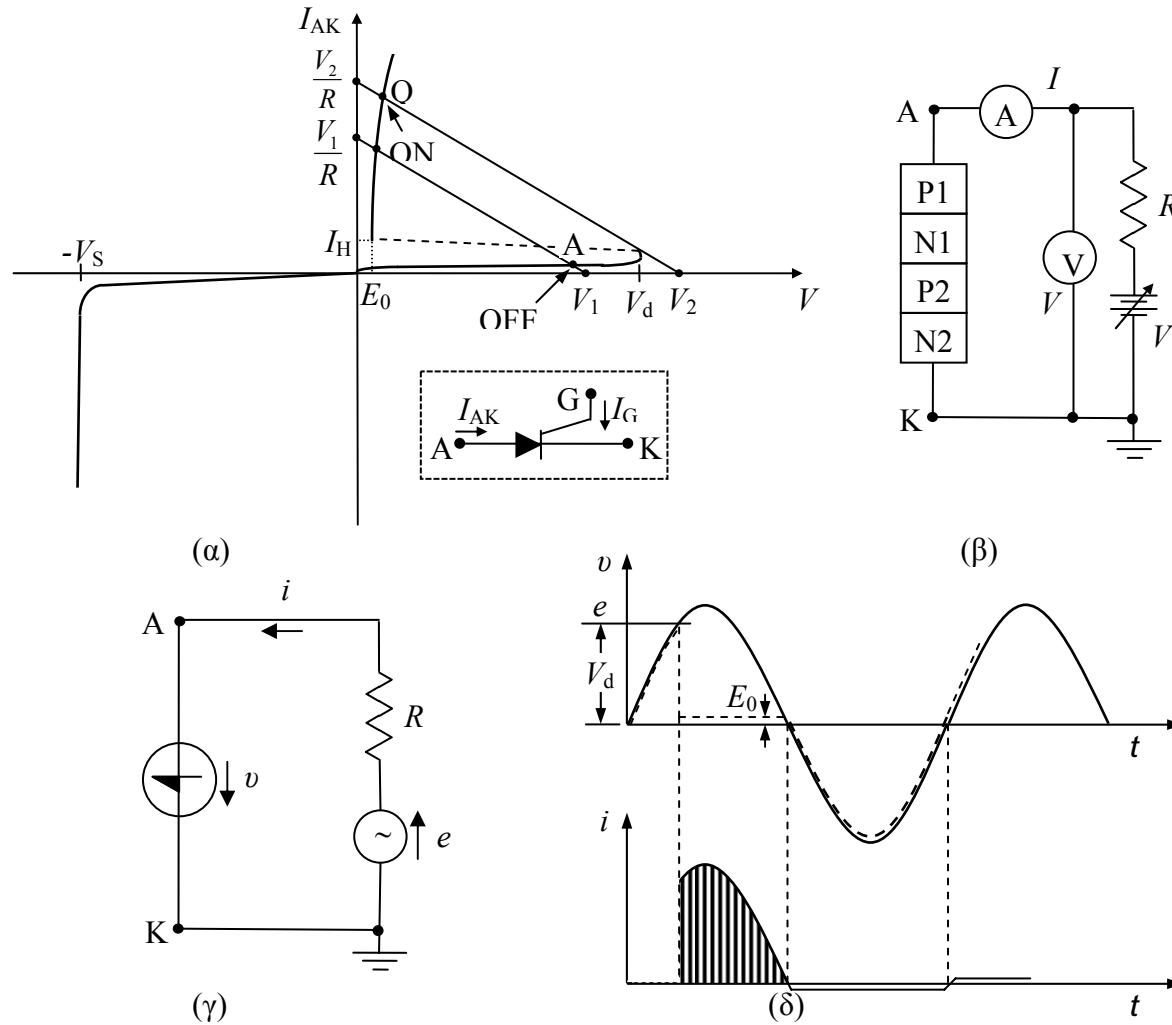
Σχ. 9.7. Ισοδύναμα κυκλώματα μεγάλου σήματος για α) ένα διπολικό τρανζίστορ *p-n-p* πολωμένο στην ενεργό περιοχή, β) ένα διπολικό τρανζίστορ *n-p-n* πολωμένο στην ενεργό περιοχή, γ) ένα θυρίστορ στην κατάσταση αποκοπής με  $I_G = 0$  και  $V_{AK} > 0$ , δ) ισοδύναμο κύκλωμα θυρίστορ.



$$I_{AK} = \alpha_1 I_{AK} + I_{R01} + \alpha_2 I_{AK} + I_{R02} \rightarrow I_{AK} = \frac{I_{R01} + I_{R02}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

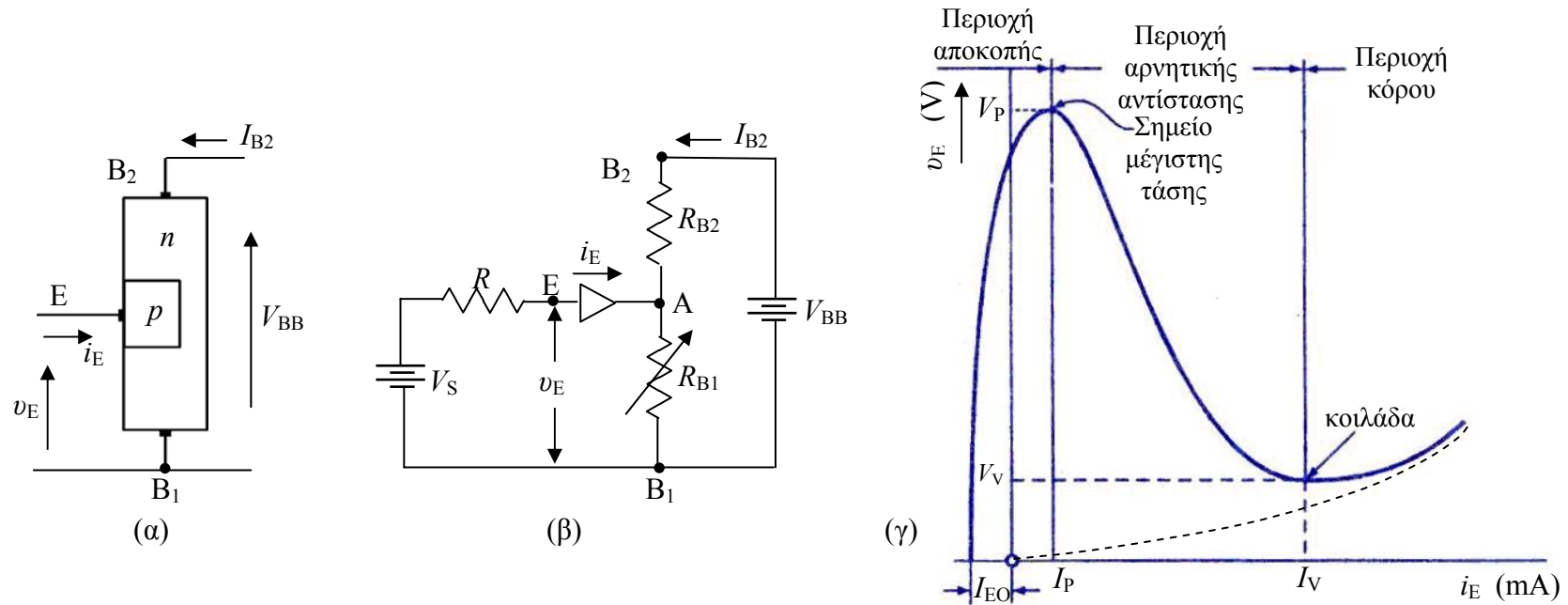
$$\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$$

### 9.1.2. Κυκλωματική Λειτουργία Θυρίστορ SCR



Σχ. 9.8. α) Χααρακτηριστική θυρίστορ για  $V_{AK} > 0$  και αντίστοιχη γραμμή φορτίου. β) Κύκλωμα πόλωσης του θυρίστορ. γ) Κύκλωμα ελέγχου ρεύματος φορτίου με θυρίστορ. δ) Μεταβολή της ac τάσης και ρεύματος στα άκρα του θυρίστορ.

### 9.2. Τρανζίστορ μιας ένωσης (UniJunction Transistor, UJT)



Σχ. 9.9. α) Τρανζίστορ μιας ένωσης (UJT). β) Ισοδύναμο κύκλωμα τρανζίστορ UJT. γ) Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης τρανζίστορ UJT.

$$\text{Λόγος παραμονής εκτός } \eta = \frac{V_{B1}}{V_{BB}}$$

Καθώς η τάση στις αντιστάσεις R<sub>B1</sub> και R<sub>B2</sub> είναι ανάλογη των τιμών τους, ο λόγος παραμονής εκτός, είναι επίσης, ίσος με το λόγο της R<sub>B1</sub> προς τη συνολική αντίσταση, μεταξύ των ακροδεκτών B<sub>1</sub> και B<sub>2</sub> (R<sub>B1</sub> + R<sub>B2</sub>). Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά, σαν :

$$\eta = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_{B1} = \eta \cdot V_{BB}$$

$$\text{Τάση κορυφής } (V_P) = \eta \cdot V_{BB} + V_F$$

Για παράδειγμα, εάν ένα UJT έχει ( $\eta$ ) ίσο με 0,6 και  $V_{BB}$  ίση με 10 volts, η τάση κορυφής του θα είναι :

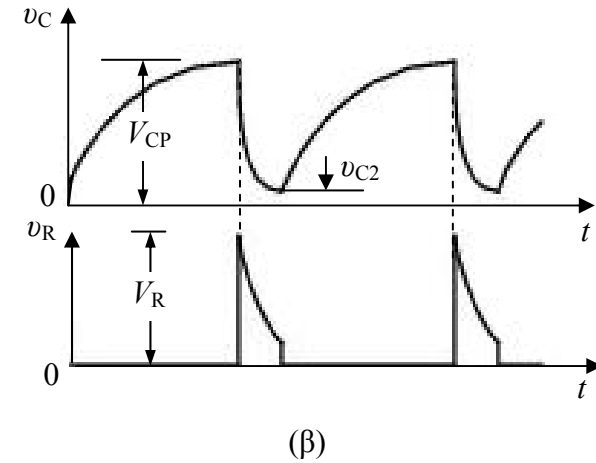
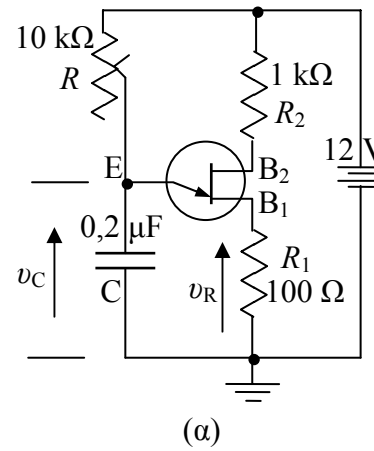
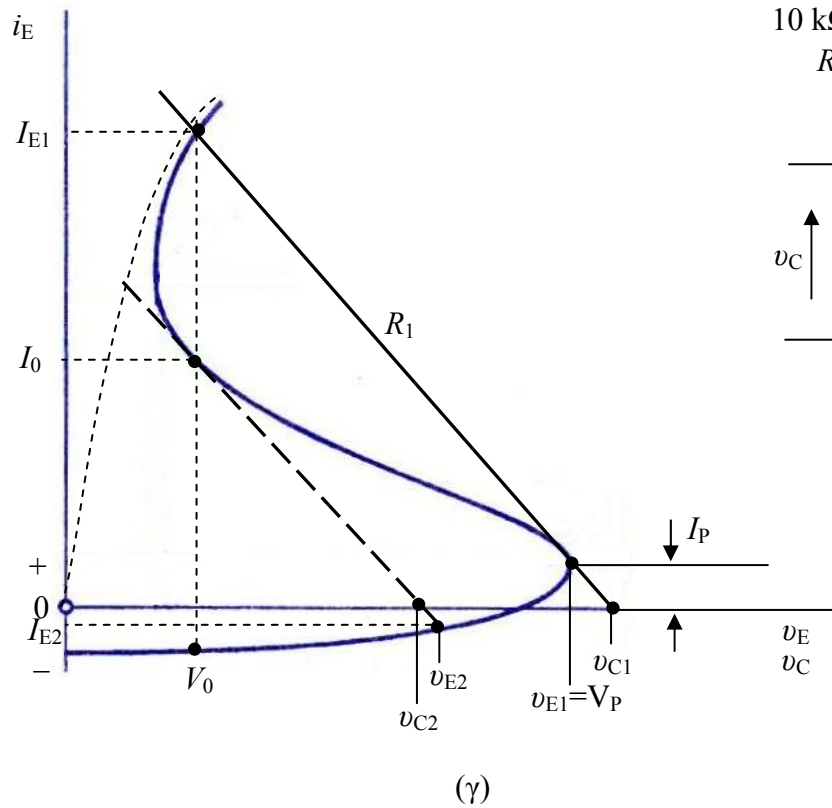
$$(V_P) = 0,6 \cdot 10 + 0,7 = 6,7 \text{ Volts}$$

Αυτό σημαίνει ότι η διάδος θα ενεργοποιηθεί, όταν η τάση εισόδου  $v_E$  φθάσει τα 6,7 volts.



**Εφαρμογή:**

$$v_E = v_C = V \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$



Σχ. 9.10. α) Κύκλωμα παραγωγής παλμών με τρανζίστορ UJT. β) Παλμοί εξόδου. γ) Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης τρανζίστορ UJT και εξήγηση του τρόπου παραγωγής παλμών.

$$\frac{v_C}{V} = \frac{V_{CP} - v_{C2}}{V} = \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = n \Rightarrow e^{-\frac{t}{RC}} = (1 - n) \Rightarrow t = RC \ln\left(\frac{1}{1 - n}\right)$$

Η χρονική περίοδος  $T$  της κυματομορφής παλμών εξόδου θα είναι:

$$T = \text{χρόνος φόρτισης} + \text{χρόνος εκφόρτισης}$$

$$T = t + t_d$$

Επειδή, όπως είπαμε η χρονική διάρκεια εκφόρτισης  $t_d$  είναι πολύ μικρή (αμελητέα), προκύπτει ότι

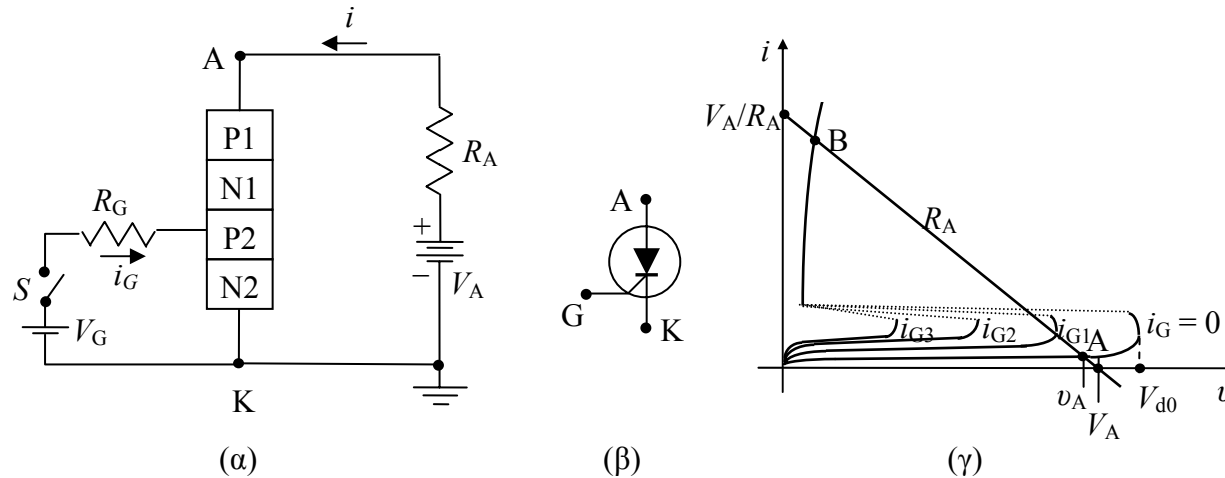
$$T \approx t$$

Και επομένως η συχνότητα των παλμών εξόδου

$$f = \frac{1}{RC \ln\left(\frac{1}{1 - n}\right)}$$

Ο αριθμός των ολοκληρωμένων κυματομορφών ή παλμών, που παράγεται κάθε δευτερόλεπτο (συχνότητα του ταλαντωτή), μπορεί να ελεγχθεί, μεταβάλλοντας την  $R$ . Αν η αντίσταση  $R$  μειωθεί, ο πυκνωτής  $C$  θα φορτισθεί πιο γρήγορα και το κύκλωμα θα λειτουργήσει σε μία υψηλότερη συχνότητα. Όταν η τιμή της  $R$  αυξάνεται, ο πυκνωτής  $C$  χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να φορτισθεί έως την τιμή  $V_P$  και η συχνότητα ελαττώνεται. Η συχνότητα μπορεί, επίσης, να μεταβληθεί, αντικαθιστώντας τον πυκνωτή  $C$  με ένα μικρότερο ή μεγαλύτερο πυκνωτή. Ένας μεγαλύτερος πυκνωτής θα φορτισθεί πιο αργά, ενώ ένας μικρότερος πυκνωτής θα φορτισθεί με γρηγορότερο ρυθμό.

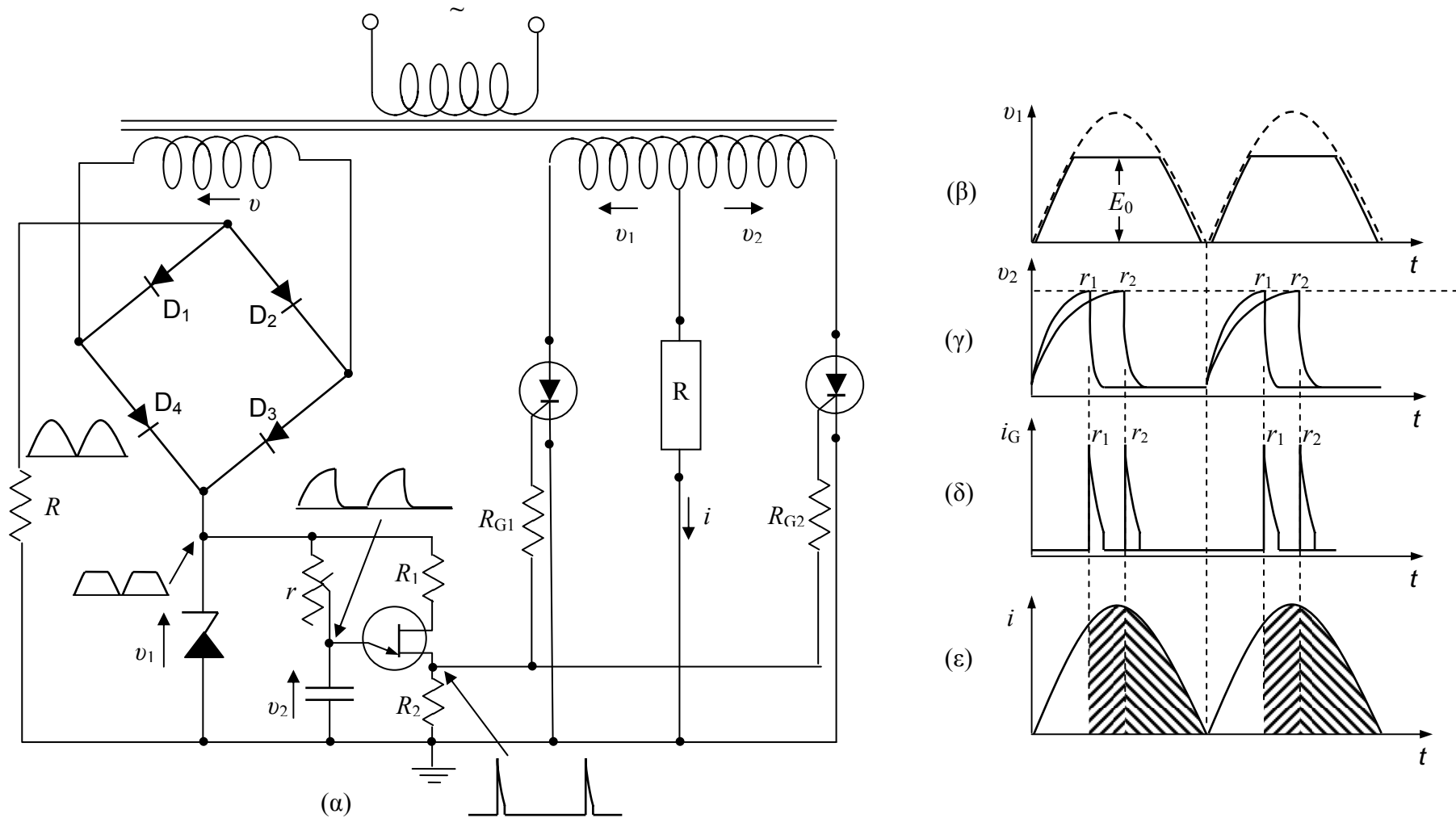
### 9.3. Θυρίστορ ή SCR (Silicon Controlled Rectifier)



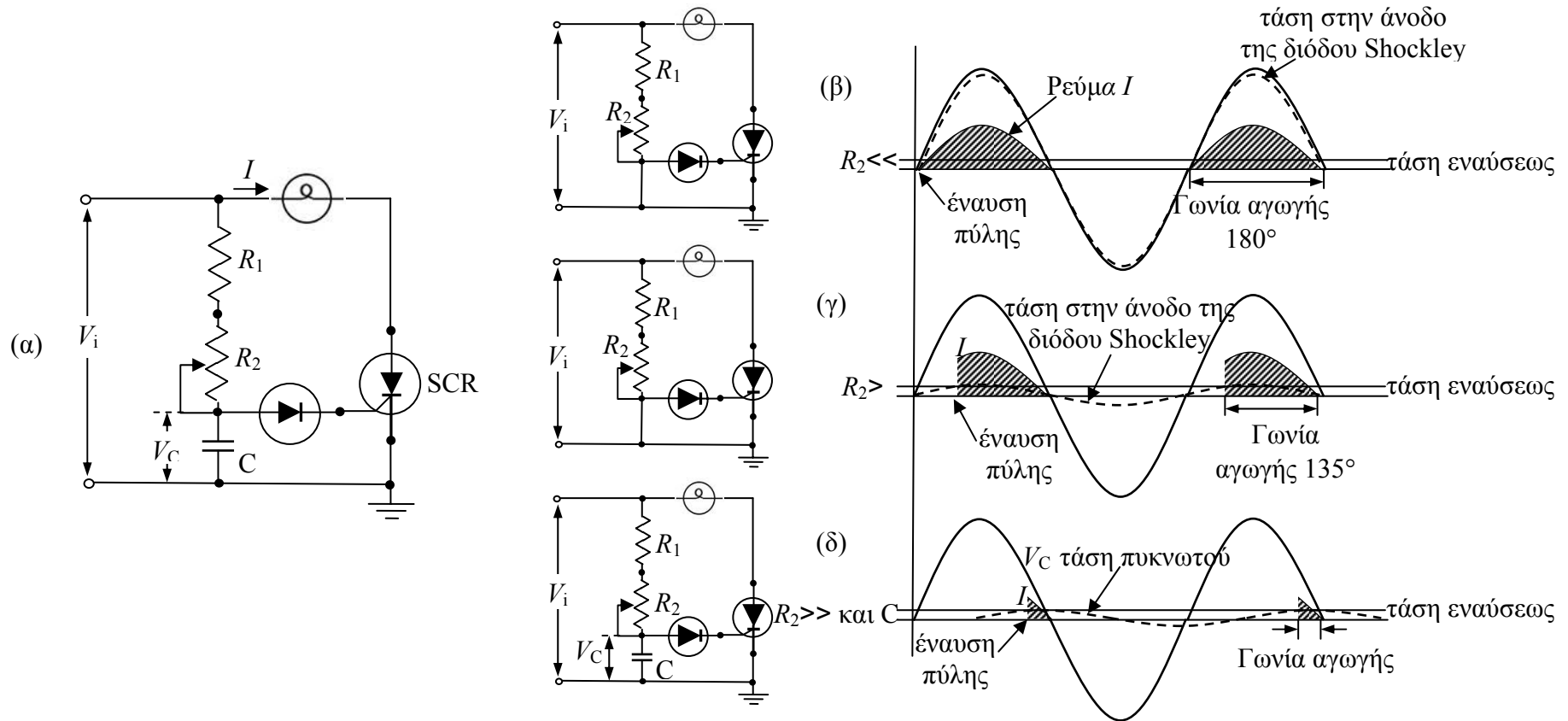
Σχ. 9.11. α) Κύκλωμα θυρίστορ. β) Κυκλωματικό σύμβολο θυρίστορ. γ) Χαρακτηριστικές εξόδου θυρίστορ.

#### Εφαρμογές του θυρίστορ:

Μια εφαρμογή των ελεγχόμενων ανορθωτών πυριτίου (SCR) ή θυρίστορ είναι ο έλεγχος του συνεχούς ρεύματος που διαρρέει ένα ηλεκτρικό φορτίο, π.χ. μια αντίσταση θέρμανσης ή ένα κινητήρα κλπ., χωρίς την παρεμβολή σε σειρά αντιστάσεων. Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγονται απώλειες ενέργειας, αφού η ρύθμιση γίνεται με διακοπή του κυκλώματος σε ένα μέρος της περιόδου κατά το οποίο ο ανορθωτής δεν άγει διόλου και επομένως, έτσι ελέγχεται η μέση τιμή του ρεύματος χωρίς απώλειες.



Σχ. 9.12. α) Κύκλωμα ελέγχου συνεχούς ρεύματος κινητήρα, με θυρίστορ. β) Ανορθωμένη τάση στην έξοδο της γέφυρας (διακεκομμένη γραμμή) και τάση στα άκρα της Zener (συνεχής γραμμή). γ) Τάση στα άκρα του πυκνωτή. δ) Παλμοί εξόδου στα άκρα του τρανζίστορ UJT. ε) Ρεύμα που διαρρέει το φορτίο R.

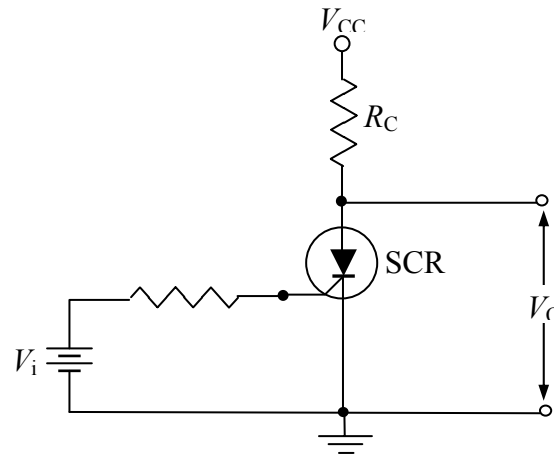


Σχ. 9.13. α) Κύκλωμα ελέγχου εντάσεως φωτισμού λαμπτήρα. Ρεύμα φορτίου και τάση πυκνωτή για διάφορες τιμές της αντίστασης  $R_2$  (περιπτώσεις β, γ και δ).

Παράδειγμα:

Δίνεται το παρακάτω κύκλωμα για το οποίο γνωρίζουμε ότι για να αρχίσει να άγει το θυρίστορ SCR, θα πρέπει η τάση της πύλης  $V_G=0,7\text{ V}$  και το ρεύμα πύλης  $I_G=5\text{ mA}$ . Δίνονται επίσης:  $I_H=8\text{ mA}$ ,  $R_G=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=100\ \Omega$ , και  $V_{CC}=20\text{ V}$ .

- 1) Να προσδιοριστεί η τάση εξόδου  $V_O$ , όταν το SCR είναι σε κατάσταση αποκοπής (OFF).
- 2) Να υπολογιστεί η τάση εισόδου για την οποία το SCR μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής (ON).
- 3) Ποια 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

- 1) Στην κατάσταση OFF το SCR δεν άγει. Επομένως, η τάση εξόδου είναι  $20\text{ V}$ .
- 2) Για να ενεργοποιηθεί το SCR θα πρέπει να ισχύσουν και οι δύο απαραίτητες προϋποθέσεις τάσης και ρεύματος στην πύλη του (δηλ.  $V_G=0,7\text{ V}$  και  $I_G=5\text{ mA}$ ). Επομένως, για να υπολογιστεί η αναγκαία τάση εισόδου θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση προστασίας  $R_G$ , λόγω του ρεύματος  $I_G=5\text{ mA}$  που θα διαρρέει την πύλη. Για να μεταβεί λοιπόν στην κατάσταση ON το SCR, θα πρέπει:

$$V_{in} = V_G + I_G R_G = 0,7\text{ V} + 5\text{ mA} \cdot 1\text{ k}\Omega = 0,7\text{ V} + 5\text{ V} = 5,7\text{ V}$$

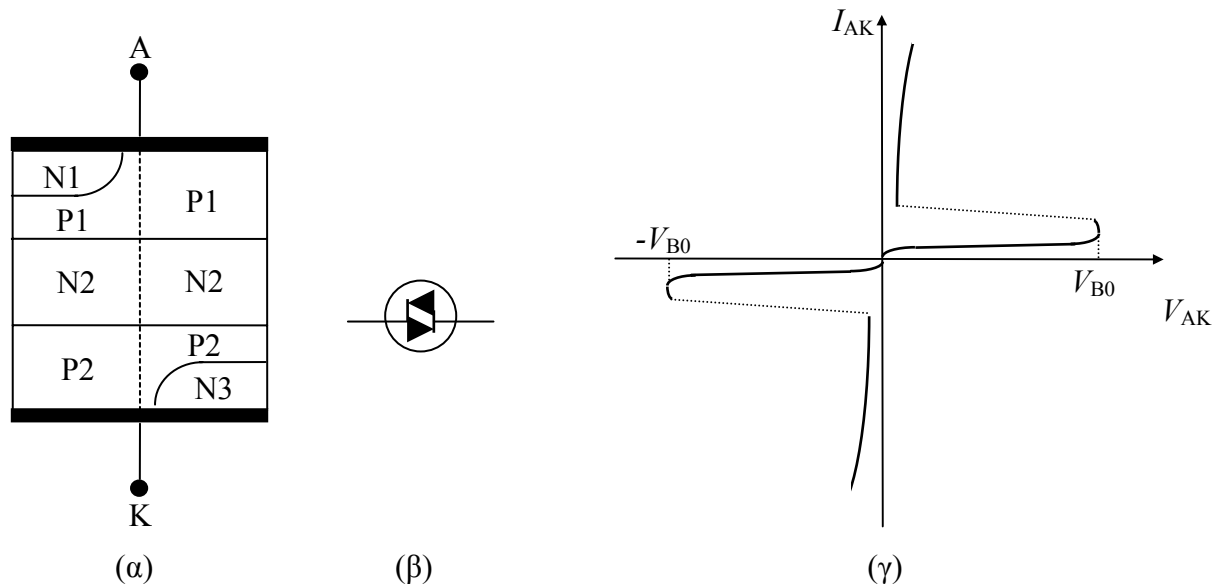
- 3) Για να μεταβεί στην κατάσταση OFF το SCR, θα πρέπει το ρεύμα να ελαττωθεί στο ρεύμα συγκράτησης  $I_H$ , δηλαδή:

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

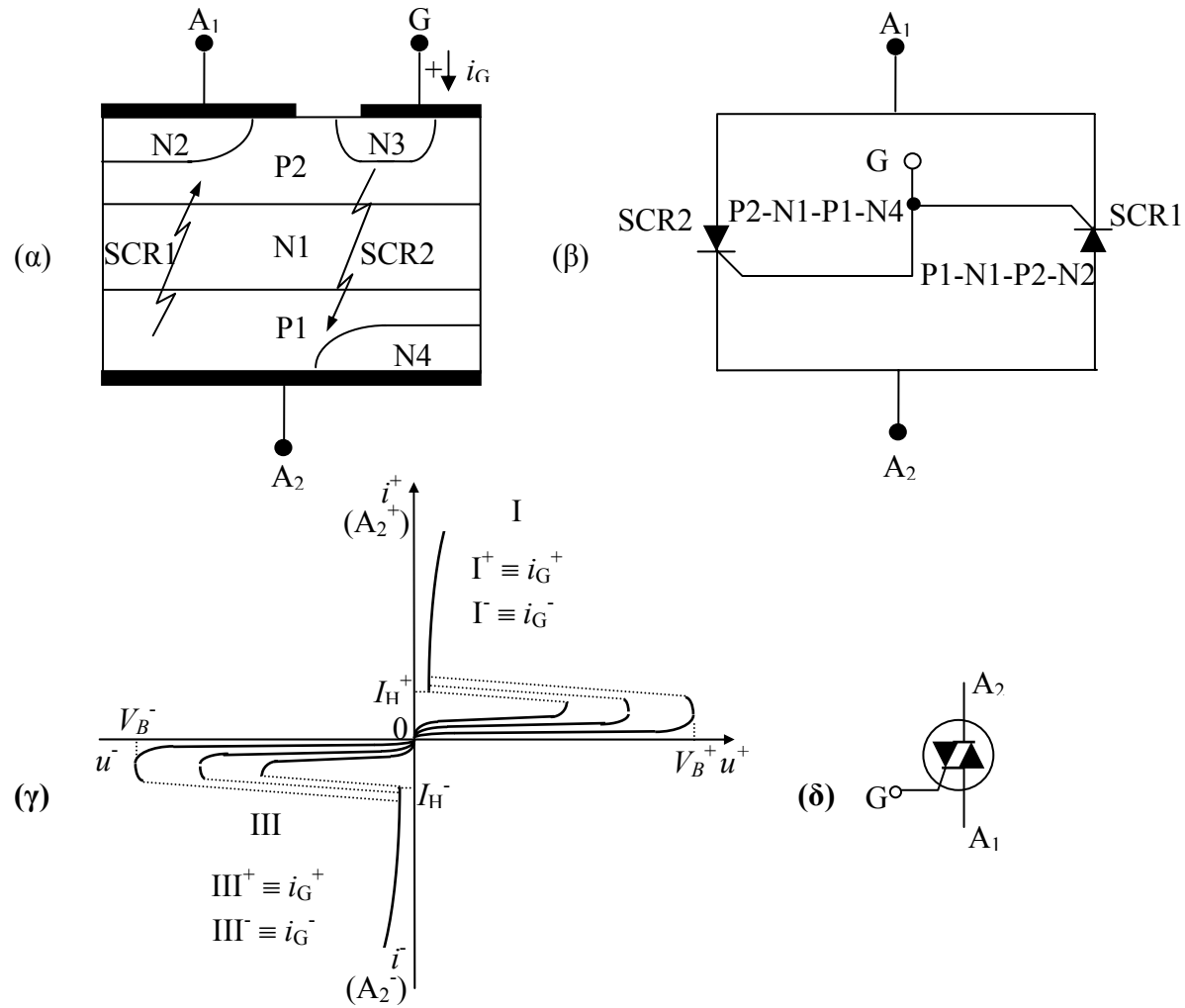
### 9.4. DIAC και TRIAC

Το θυρίστορ που μόλις εξετάσαμε, είναι ελεγχόμενος ανορθωτής, δηλαδή ελεγχόμενος διακόπτης μιας κατεύθυνσης, και χρησιμοποιείται σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος. Πολλές φορές όμως χρειάζονται τέτοιοι ελεγχόμενοι διακόπτες και για κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος, δηλαδή τότε οι διακόπτες αυτοί πρέπει να είναι δύο κατευθύνσεων. Αν συνδέσουμε **παράλληλα και σε αντίθετη φορά δύο διόδους Shockley** ή δύο θυρίστορς, θα πάρουμε διακόπτες δύο κατευθύνσεων για εναλλασσόμενο ρεύμα.

Με την παραπάνω συνδεσμολογία προκύπτουν δύο σύνθετα στοιχεία, αντίστοιχα με τη δίοδο Shockley και το θυρίστορ, δηλαδή το **DIAC** από τα αρχικά των λέξεων **Diode Alternating Current Switch** (το οποίο ουσιαστικά είναι η παράλληλη και σε αντίθετη φορά σύνδεση δύο διόδων Shockley σε ολοκληρωμένη μορφή), και το **TRIAC** από τα αρχικά των λέξεων **Triode Alternating Current Switch** (το οποίο ουσιαστικά είναι η παράλληλη και σε αντίθετη φορά σύνδεση δύο θυρίστορ σε ολοκληρωμένη μορφή).

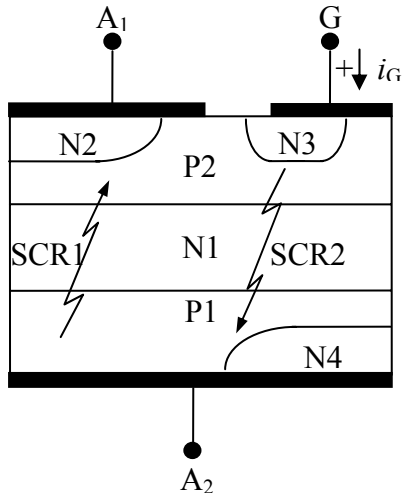


Σχ. 9.14. Η δίοδος DIAC: α) Τομή της DIAC, β) κυκλωματικό σύμβολο και γ) γενική μορφή της χαρακτηριστικής της.



Σχ. 9.15. Η τριόδος TRIAC: α) Τομή της TRIAC, β) ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα της TRIAC, γ) γενική μορφή της χαρακτηριστικής της, δ) κυκλωματικό σύμβολο της TRIAC.





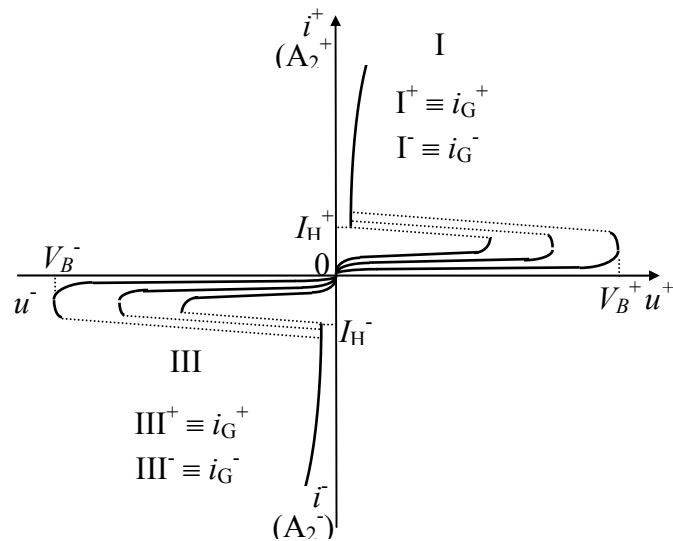
1. Τρόπος I<sup>+</sup>, (A<sub>2</sub><sup>+</sup>), (A<sub>1</sub><sup>-</sup>), i<sub>G</sub><sup>+</sup> (η πύλη είναι σε υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με τον ακροδέκτη A<sub>1</sub>). Όταν ο ακροδέκτης A<sub>2</sub> είναι θετικά πολωμένος ως προς τον ακροδέκτη A<sub>1</sub> το ρεύμα ρέει δια της οδού P1-N1-P2-N2. Οι δύο ενώσεις P1-N1 και P2-N2 είναι ορθά πολωμένες ενώ η ένωση N1-P2 είναι ανάστροφα πολωμένη. Η TRIAC θεωρείται θετικά πολωμένη.

Μια θετική τάση στην πύλη ως προς τον ακροδέκτη A<sub>1</sub> πολώνει ορθά την ένωση P2-N2 και διεγείρει το SCR1 το οποίο άγει.

2. Τρόπος I<sup>-</sup>, (A<sub>2</sub><sup>+</sup>), (A<sub>1</sub><sup>-</sup>), i<sub>G</sub><sup>-</sup> (η πύλη είναι σε χαμηλότερο δυναμικό σε σχέση με τον ακροδέκτη A<sub>1</sub>). Αν και η διαδρομή του ρεύματος παραμένει η ίδια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση 1, τώρα η ένωση P2-N3 είναι ορθά πολωμένη και οι φορείς που εγχέονται μέσα στην P2 διεγείρουν το SCR1 που τελικά άγει.

3. Τρόπος III<sup>-</sup>, (A<sub>2</sub><sup>-</sup>), (A<sub>1</sub><sup>+</sup>), i<sub>G</sub><sup>-</sup> (η πύλη είναι σε χαμηλότερο δυναμικό σε σχέση με τον ακροδέκτη A<sub>1</sub>). Όταν ο ακροδέκτης A<sub>2</sub> είναι αρνητικά πολωμένος ως προς τον ακροδέκτη A<sub>1</sub> το ρεύμα ρέει δια της οδού P2-N1-P1-N4. Οι δύο ενώσεις P2-N1 και P1-N4 είναι ορθά πολωμένες ενώ η ένωση N1-P1 είναι ανάστροφα πολωμένη. Η TRIAC θεωρείται αρνητικά πολωμένη.

Μια αρνητική τάση στην πύλη ως προς τον ακροδέκτη A<sub>1</sub> εγχέει φορείς πολώνοντας ορθά την ένωση P2-N3 και επομένως διεγείρει το SCR2 το οποίο άγει.

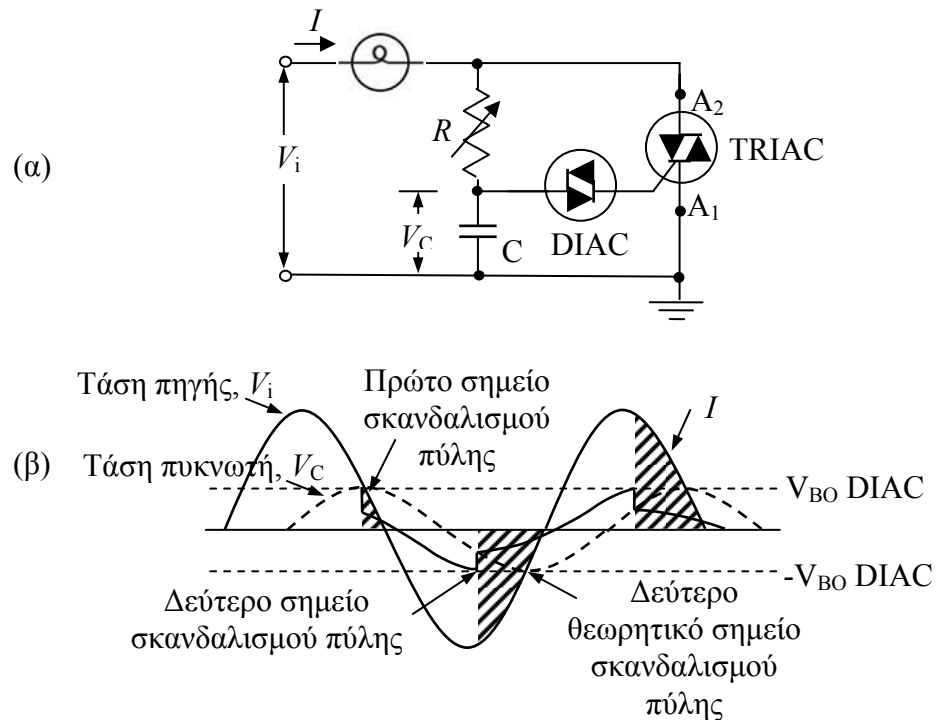


4. Τρόπος III<sup>+</sup>, (A<sub>2</sub><sup>-</sup>), (A<sub>1</sub><sup>+</sup>), i<sub>G</sub><sup>+</sup> (η πύλη είναι σε υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με τον ακροδέκτη A<sub>1</sub>). Αν και η διαδρομή του ρεύματος παραμένει η ίδια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση 3, τώρα η ένωση P2-N2 είναι ορθά πολωμένη και οι φορείς που εγχέονται μέσα στην P2 διεγείρουν το SCR2 που τελικά άγει.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι είναι δυνατή η διέγερση του TRIAC για οποιαδήποτε φορά του ρεύματος του κυρίως κυκλώματος και με οποιαδήποτε φορά του ρεύματος διεγέρσεως πύλης, δηλαδή το TRIAC ενεργοποιείται είτε με αρνητική είτε με θετική τάση πύλης.

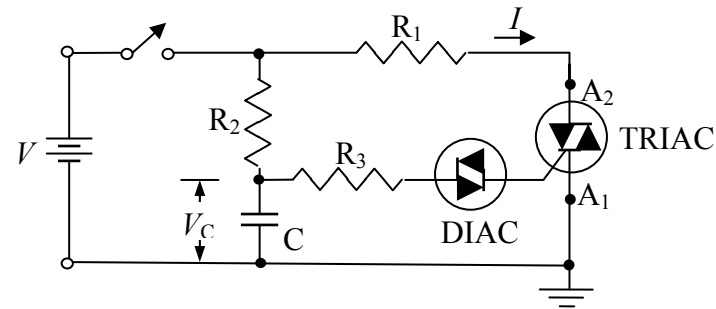
### Εφαρμογές των DIAC και TRIAC:

Καθώς το TRIAC άγει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, προσφέρεται περισσότερο για εφαρμογές όπου πρέπει να ελεγχθεί η AC ισχύς. Μια τυπική εφαρμογή είναι ο ρυθμιστής έντασης φωτισμού λυχνιών πυρακτώσεως. Στο Σχ. 9.16α φαίνεται ένα τέτοιο κύκλωμα στην απλή του μορφή. Σ' αυτό, το TRIAC είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το φορτίο που είναι μια λυχνία πυρακτώσεως. Στην αρχή κάθε ημιπεριόδου, το TRIAC δεν άγει και ολόκληρη σχεδόν η τάση της πηγής βρίσκεται στα άκρα του TRIAC. Έτσι, το φορτίο έχει αμελητέα τάση που οφείλεται μόνο στο μικρό ρεύμα διαρροής του TRIAC όταν αυτό δεν άγει, που είναι μερικά μόνο mA.



Σχ. 9.16. α) Κύκλωμα ελέγχου έντασης λυχνίας πυρακτώσεως. β) Τάση στα άκρα του πυκνωτή (διακεκομμένη γραμμή) και ρεύμα που διαρρέει τη λυχνία.

**Παράδειγμα:**



Στο κύκλωμα του παραπάνω σχήματος, δίνονται:  $R_1=12 \Omega$ ,  $R_2=68 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=2 \text{ k}\Omega$ ,  $C=1 \mu\text{F}$ ,  $V=80 \text{ V}$ , η τάση ανατροπής του DIAC είναι  $35 \text{ V}$  και η τάση και το ρεύμα σκανδαλισμού του TRIAC είναι  $1 \text{ V}$  και  $10 \text{ mA}$  αντίστοιχα.

- 1) Ποιο θα είναι το ρεύμα που διαρρέει το TRIAC όταν βρίσκεται στην κατάσταση ON;
- 2) Ποια είναι η ελάχιστη τάση του πυκνωτή C, που προκαλεί σκανδαλισμό του TRIAC;

**Λύση:**

- 1) Θεωρούμε ότι η τάση στα άκρα του TRIAC είναι μηδέν όταν αυτό άγει (ON). Έτσι:

$$I = \frac{V}{R_1} = \frac{80\text{V}}{12\Omega} = 6.67 \text{ A}$$

- 2) Ο πυκνωτής φορτίζεται μέσω της  $R_2$ . Για να γίνει σκανδαλισμός του TRIAC θα πρέπει η τάση στα άκρα του DIAC να ξεπεράσει την τάση ανατροπής. Επειδή η τάση σκανδαλισμού του TRIAC είναι  $1 \text{ V}$  και η τάση ανατροπής 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 του TRIAC. Επειδή, μόλις ξεπεραστεί η τάση ανατροπής  $35 \text{ V}$  του DIAC, αυτό άγει και ισοδυναμεί με βραχυκύκλωμα, εξασφαλίζεται η απαίτηση των  $10 \text{ mA}$  για το ελάχιστο ρεύμα σκανδαλισμού του TRIAC, το οποίο διαρρέει την αντίσταση προστασίας  $R_3$ , αφού η τάση στα άκρα του πυκνωτή θα είναι  $36 \text{ V}$  και θα δώσει ένα ρεύμα

$$I = \frac{V_C - V_G}{R_3} = \frac{36\text{V} - 1\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 17.5 \text{ mA}.$$