

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 5^ο – Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

(Επιλογές θεωρίας από τις «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος»
του Δρ.-Μηχ. Νικολάου Π. Πολύζου, Επίκουρου Καθηγητή, έτος 2008)

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σημερινή εποχή είναι δύσκολο να φανταστούμε ένα κόσμο με μετατροπή και έλεγχο της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την παρουσία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. **Τα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος αποτελούν την καρδιά των ηλεκτρονικών αυτών μετατροπέων.** Ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος είναι στην πραγματικότητα το πιο σύνθετο, το πιο ευαίσθητο, το πιο ευπαθές και το πιο επισφαλές στοιχείο σε ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Γι' αυτούς τους λόγους, είναι κατανοητό πως η ολοκληρωμένη και σε βάθος γνώση της συμπεριφοράς των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος είναι απαραίτητη για έναν αποδοτικό, αξιόπιστο και χαμηλού κόστους σχεδιασμό ενός μετατροπέα ισχύος καθώς και για τον εντοπισμό και την αποκατάσταση των βλαβών που ίσως έχει υποστεί κατά τη λειτουργία του.

Ιστορικά η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος ακολούθησε, σε γενικές γραμμές, την εξέλιξη των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, αν και ορισμένες τοπολογίες προϋπήρχαν από την εποχή των λυχνιών υδραργύρου. Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος αναπτύχθηκαν παράλληλα και σε συνεργασία με την ανάπτυξη των υλικών και της τεχνολογίας κατασκευής τους. Μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της τεχνολογίας κατασκευής καθώς και της ανάπτυξης διαφόρων τύπων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος παρουσιάζεται στη συνέχεια [9-13, 24-25].

Η αρχή γίνεται με την ανακάλυψη του τρανζίστορ επαφή σημείου (*point contact transistor*) και του τρανζίστορ ενώσεως (*junction transistor*) στα τέλη της δεκαετίας του 1940 στα Bell Laboratories, ενώ το 1952 επινοούνται από τον R.N.Hall τα πρώτα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος με βάση το ημιαγωγικό στοιχείο γερμάνιο, ενώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους έφταναν τα σε ονομαστικό ρεύμα 35A και ανάστροφη τάση διάσπασης 200V. Στα μέσα της δεκαετίας του 1950 άρχισε να χρησιμοποιείται το πυρίτιο και έγινε εφικτή η κατασκευή ημιαγωγικών στοιχείων με υψηλότερες τάσης διάσπασης και υψηλότερες αντοχές σε θερμοκρασία. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 κατασκευάστηκαν ανορθωτές με τάση διάσπασης 500V. Η εισαγωγή της τεχνολογίας των επαφών διάχυσης σε συνδυασμό με την τεχνολογία "*mesa*" (*metal-semiconductor alloy*), στα τέλη της δεκαετίας του 1950, αποδείχθηκε το βασικό βήμα για τη δημιουργία ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος με αντοχή σε τάσεις διάσπασης της τάξης μερικών kV.

Ένα από τα πρώτα ημιαγωγικά στοιχεία, που εμφανίστηκε στο εμπόριο, ήταν το **θυρίστορ** ή ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (*Silicon Controlled Rectifier, SCR*), το 1958 από τον κατασκευαστικό οίκο General Electric. Το ονομαστικό ρεύμα διέλευσης του στοιχείου αυτού ήταν 25A και η τάση διάσπασης 300V. Το 1961 εμφανίστηκε το **GTO θυρίστορ** (*Gate Turn-Off Thyristor*), το οποίο συνδύαζε τις διακοπτικές ιδιότητες ενός τρανζίστορ, δηλαδή τη δυνατότητα σβέσης και από το ηλεκτρόδιο πύλης, και τις χαμηλές

απώλειες αγωγής ενός θυρίστορ. Το 1964 η General Electric παρουσίασε ένα δικατευθυντήριο στοιχείο, το **Triac**. Στη συνέχεια και μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970, διάφορα είδη θυρίστορ, καθώς και νέες κατασκευαστικές γεωμετρίες και τεχνικές, έκαναν την εμφάνισή τους με στόχο την βελτίωση των στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών του στοιχείου. Τα στοιχεία αυτά ήταν : τα θυρίστορ που σκανδαλίζονται οπτικά (*Light-Triggered Thyristor*), τα ασύμμετρα θυρίστορ (*Asymmetrical Thyristor, ASCR*), τα θυρίστορ ανάστροφης αγωγής (*Reverse Conducting Thyristor, RCT*) και τα θυρίστορ στατικής επαγωγής (*Static Induction Thyristor, SITh*).

Εξαιτίας των δυσκολιών στον έλεγχο της σβέσης ενός θυρίστορ και της επιθυμίας ανάπτυξης στοιχείων με μικρότερους χρόνους μετάβασης ξεκίνησε, από ερευνητικά κέντρα και εταιρίες κατασκευής ημιαγωγικών στοιχείων, η έρευνα και η ανάπτυξη των τρανζίστορ ισχύος. Παρόλο που τα διπολικά τρανζίστορ σήματος (*Signal Bipolar Junction Transistor, signal BJT*) διατέθηκαν στην αγορά από το 1954 από την Texas Instruments, απαιτήθηκαν περίπου δεκαπέντε χρόνια εντατικής έρευνας για την εμφάνιση των πρώτων **διπολικών τρανζίστορ ισχύος** (*Power Bipolar Junction Transistor, power BJT*) με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά 500V και 200A και με απολαβή ρεύματος $\beta=50$. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 παρουσιάστηκε το **MOSFET ισχύος** (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET*) το οποίο άνοιξε νέους ορίζοντες στη λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας (μέχρι λίγα MHz). Η πιο πρόσφατη τάση στην κατασκευή ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος συνίσταται στην εφαρμογή της τεχνολογίας VLSI (*Very Large Scale Integration*), που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας νέας γενιάς ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος. Η αρχή έγινε με το MOSFET ισχύος, στη συνέχεια εμφανίστηκε ένα θυρίστορ ελεγχόμενο από πύλη τύπου MOS (*MOS-gated Thyristor*) και φθάνει μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 με την παρουσίαση του **IGBT** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Με την εμφάνιση των στοιχείων αυτών, που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες και έχουν υψηλή αντίσταση στο ηλεκτρόδιο ελέγχου (άρα απαιτούν και χαμηλή ισχύ ελέγχου) τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος άρχισαν να μην χρησιμοποιούνται πλέον σε διάφορες εφαρμογές.

Το μέλλον των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος είναι η κατασκευή ολοκληρωμένων στοιχείων ισχύος ή και διατάξεων, σε ένα «πακέτο». Επίσης, γίνεται έντονη προσπάθεια για την ολοκλήρωση, σε ένα και μόνο «πακέτο» να εμπεριέχονται εκτός από το στοιχείο ισχύος και τα απαραίτητα κυκλώματα οδήγησης και προστασίας του.

Τα προς το παρόν διαθέσιμα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό ελεξιμότητάς τους :

- 1) Μη ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία: Είναι τα ημιαγωγικά στοιχεία στα οποία δε μπορεί να ελεγχθεί η κατάσταση αγωγιμότητάς τους, αλλά το κύκλωμα ισχύος καθορίζει το αν θα είναι σε κατάσταση αγωγής (κλειστό, on) ή σε κατάσταση αποκοπής (ανοιχτό, off). Σ' αυτή τη κατηγορία ανήκουν οι δίοδοι ισχύος.
- 2) Ημι-ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία: Είναι τα ημιαγωγικά στοιχεία στα οποία μπορεί να ελεγχθεί (με τη βοήθεια ενός σήματος) η μετάβασή τους από

κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής αλλά δεν μπορεί να ελεγχθεί η αντίστροφη μετάβαση (δηλαδή από αγωγή σε αποκοπή). Το κύκλωμα ισχύος καθορίζει πότε το ημιαγωγικό στοιχείο θα οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής. Σ' αυτή τη κατηγορία ανήκουν τα *θυρίστορ*.

- 3) Πλήρως ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία: Είναι τα ημιαγωγικά στοιχεία στα οποία μπορεί να ελεγχθεί (με τη βοήθεια ενός σήματος) τόσο η μετάβασή τους από την κατάσταση αποκοπής σε κατάσταση αγωγής καθώς και η αντίστροφη μετάβαση. Σ' αυτή τη κατηγορία ανήκουν όλα τα υπόλοιπα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, δηλαδή το *BJT*, το *MOSFET*, το *IGBT*, το *GTO Thyristor*, το *MOS Thyristor*, κ.α..

3.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Η δομή των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους είναι πολυπλοκότερα από αυτά των αντίστοιχων στοιχείων χαμηλής ισχύος. Αυτό οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στις τροποποιήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από τους κατασκευαστές στη δομή των στοιχείων χαμηλής ισχύος, ώστε τα στοιχεία υψηλής ισχύος ν' αποκτήσουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για τη λειτουργία τους σε υψηλές ηλεκτρικές καταπονήσεις. Τα ιδιαίτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, που απαιτείται να διαθέτουν τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος είναι :

- α) υψηλή τάση διάσπασης
- β) ικανότητα διέλευσης υψηλών τιμών ρευμάτων
- γ) μικρή πτώση τάσης στην κατάσταση αγωγής
- δ) χαμηλή αντίσταση αγωγής
- ε) μικρό ρεύμα διαρροής
- στ) μικροί διακοπτικοί χρόνοι κατά την έναυση και κατά τη σβέση του στοιχείου
- ζ) μικρή απαίτηση ισχύος ελέγχου
- η) όσο το δυνατό πιο τετράγωνη ασφαλή περιοχή λειτουργίας (*Safe Operation Area, SOA*) δηλαδή ταυτόχρονη λειτουργία σε ονομαστικό ρεύμα και ονομαστική τάση
- θ) αντοχή κατά τη λειτουργία με υψηλούς ρυθμούς μεταβολής της τάσης (dv/dt) και ρεύματος (di/dt).
- ι) αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολίες

Σε γενικές γραμμές, τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθορίζουν την ικανότητα διέλευσης μεγάλης ισχύος (α, β, η, θ), τις απώλειες αγωγής (γ, δ), τις διακοπτικές απώλειες (στ), άρα και την απόδοση της συσκευής και φυσικά τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (στ, θ) και το περιβάλλον λειτουργίας (ι) του ημιαγωγικού στοιχείου και κατ' επέκταση του μετατροπέα στον οποίο χρησιμοποιείται. Επίσης, βασικό χαρακτηριστικό είναι ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών καταστροφών του στοιχείου (*Mean Time Between Failures, MTBF*), που επιδρά στην αξιοπιστία της συσκευής καθώς και στο χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Στην πράξη, δεν υπάρχει στοιχείο που να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω δυνατότητες. Άρα θα πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή του στοιχείου που θα

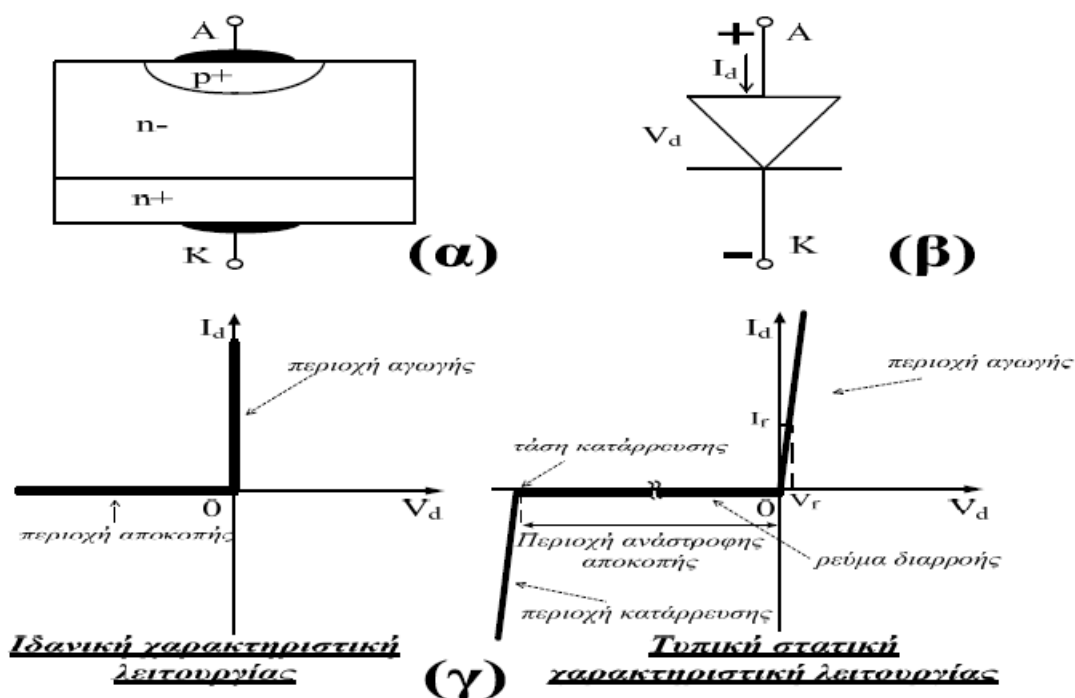
χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την εφαρμογή, δηλαδή τις επιθυμητές προδιαγραφές (ηλεκτρικές και μηχανικές), την απόδοση, τον όγκο και το βάρος της συσκευής, το κόστος, τη διαθεσιμότητα των υλικών, κ.α.. Επομένως, γίνεται αντιληπτό, ότι η εκτενής γνώση των στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος αποκτά πρωτεύουσα σημασία για τον μηχανικό που επιθυμεί να ασχοληθεί με τη μελέτη και την κατασκευή των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν, εν συντομία, τα κυριότερα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος και θα εξετασθούν η δομή τους, ο συμβολισμός τους και τα κυριότερα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά.

3.3 ΔΙΟΔΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

Η δίοδος είναι ένα μη ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο, δηλαδή δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της λειτουργίας της μέσω άλλων ηλεκτρικών σημάτων. Η συμπεριφορά της εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της ή το ρεύμα που τη διαρρέει, δηλαδή από τις τάσεις και τα ρεύματα του κυκλώματος, στο οποίο συνδέεται. Η δίοδος ισχύος κατασκευάζεται συνήθως με βάση το πυρίτιο και αποτελείται από δύο ημιαγωγούς, τύπου p και n, με υψηλό ποσοστό προσμίξεων, μεταξύ των οποίων υπάρχει μία περιοχή τύπου n, με χαμηλό ποσοστό προσμίξεων. Οι δύο αυτοί ημιαγωγοί συνδέονται εξωτερικά με τους ακροδέκτες της, την *άνοδο* και τη *κάθοδο*. Έτσι, η δομή αυτή, που φαίνεται στο *σχήμα 3.1.α*, επιτρέπει αφ' ενός μεν υψηλές ανάστροφες τάσεις διάσπασης, αφ' ετέρου δε τη ροή ρευμάτων υψηλής πυκνότητας. Στα *σχήματα 3.1.β και γ* δίνονται ο συμβολισμός και η ιδανική και μια τυπική στατική χαρακτηριστική των διόδων ισχύος. Η ημι-αγώγιμη επαφή επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος προς μία κατεύθυνση με αποτέλεσμα οι δίοδοι να μην επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος στην αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι η δίοδος είναι ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής και για το λόγο αυτό αναφέρεται συχνά με αυτή την ονομασία.

Στις διάφορες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος οι δίοδοι χρησιμοποιούνται για ανόρθωση και ως δίοδοι ελεύθερης διέλευσης, όταν συνδέονται παράλληλα με το φορτίο, αλλά με αντίστροφη πολικότητα. Σκοπός της συνδεσμολογίας αυτής, είναι να παρέχει ένα δρόμο διέλευσης για τα ρεύματα, που δημιουργούνται από την ενέργεια που συσσωρεύεται στις επαγωγές του κυκλώματος, όταν ο κύριος ημιαγωγικός διακόπτης παύει να άγει. Έτσι αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες υπερτάσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καταστροφή των στοιχείων του κυκλώματος. Επίσης, οι δίοδοι χρησιμοποιούνται και στα κυκλώματα προστασίας από μεταβατικές καταστάσεις των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος. Τόσο κατά την έναυσή της, δηλαδή όταν πολωθεί θετικά, όσο και κατά τη σβέση της, η δίοδος ισχύος συμπεριφέρεται ως ένας σχεδόν ιδανικός διακόπτης (μικρή πτώση τάσης κατά την αγωγή, και πολύ μικρό ρεύμα διαρροής κατά την αποκοπή). Κατά τη σβέση της, όμως, επίσης παρουσιάζεται το φαινόμενο της ανάστροφης ανάκτησης (*reverse recovery effect*) η οποία μπορεί να προκαλέσει υπερτάσεις, αν το κύκλωμα περιέχει επαγωγικά στοιχεία ή λόγω των αγωγών διασύνδεσης των στοιχείων του κυκλώματος. Οι δίοδοι ισχύος διακρίνονται σε διόδους απότομης επαναφοράς (*snap recovery diodes*) και σταδιακής επαναφοράς (*soft recovery diodes*).



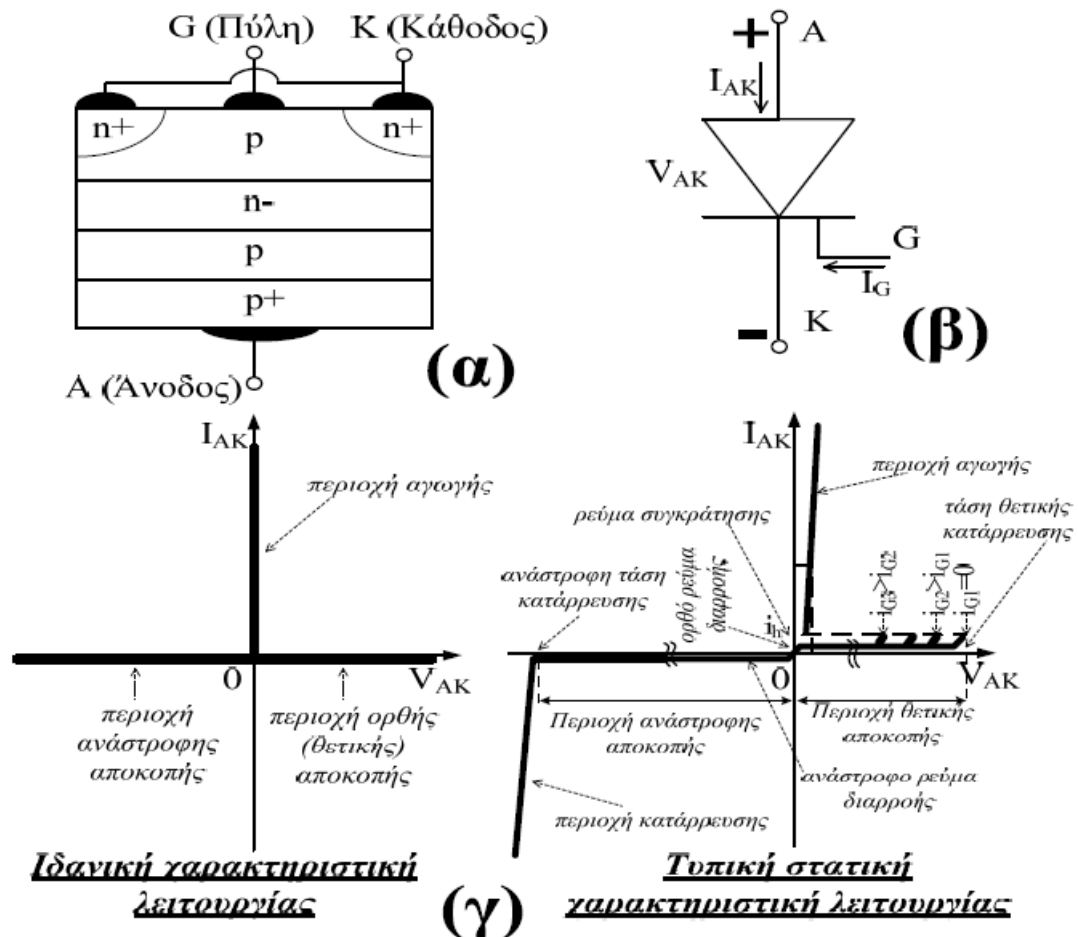
Σχήμα 3.1: α) Δομή, β) σύμβολο και γ) στατική (ιδανική και τυπική) χαρακτηριστική λειτουργίας μια διόδου ισχύος.

Στο εμπόριο υπάρχουν διάφοροι τύποι διόδων ισχύος, με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και η επιλογή της κατάλληλης διόδου εξαρτάται από την εφαρμογή. Οι υπάρχουσες διόδοι ισχύος μπορούν, γενικά, να κατηγοριοποιηθούν ως εξής :

- Ανορθωτικές διόδοι (rectifier or line-frequency diodes) :** Οι διόδοι αυτοί έχουν υψηλές τιμές ονομαστικού ρεύματος διέλευσης και τάσεις διάσπασης (μερικές εκατοντάδες kA και kV, αντίστοιχα) και χρησιμοποιούνται κυρίως για ανορθώσεις δικτύου. Επειδή, κατά την κατασκευή τους, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην ελάττωση της πτώσης τάσης κατά την αγωγή (για να έχουν χαμηλές απώλειες αγωγής) έχουν μεγάλους χρόνους ανάστροφης ανάκτησης και επομένως δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας.
- Δίοδοι ταχείας ή υπερταχείας ανάκτησης (fast or ultra-fast recovery diodes):** Οι διόδοι αυτής της κατηγορίας έχουν χαμηλούς χρόνους ανάστροφης ανάκτησης και χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε κυκλώματα που λειτουργούν σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας. Το ονομαστικό ρεύμα διέλευσης και η τάση διάσπασης είναι της τάξης των μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων A και V αντίστοιχα.
- Δίοδοι Schotkky :** Πρόκειται για διόδους που κατασκευάζονται με την επαφή ενός μετάλλου με έναν ημιαγωγό και έχουν πολύ χαμηλή πτώση τάσης κατά την αγωγή τυπικά (0,3V), αλλά η τάση διάσπασης τους δε ξεπερνά τα 100V. Οι χρόνοι έναυσης και σβέσης τους είναι πολύ χαμηλότεροι από αυτούς των αντίστοιχων διόδων επαφής P-N.

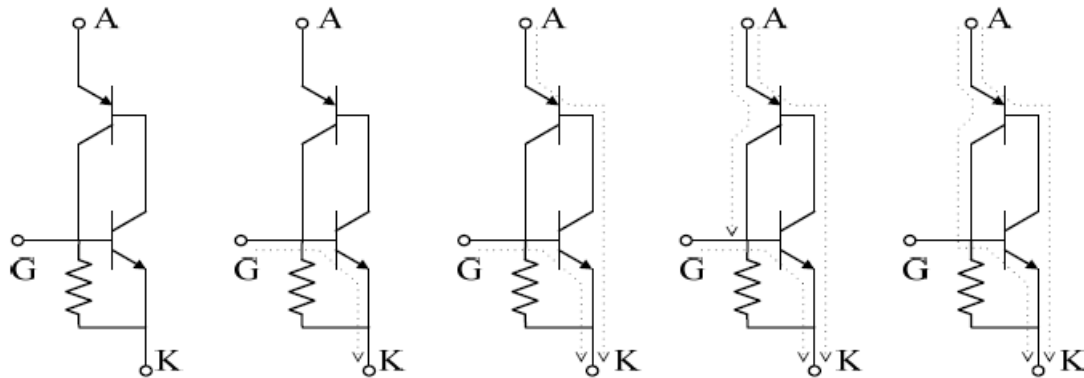
3.4 ΘΥΡΙΣΤΟΡ

Το **θυρίστωρ** ή **ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου** (*Silicon Controlled Rectifier, SCR*) είναι ένα ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος το οποίο αποτελείται από τέσσερις ημιαγωγικές στρώσεις και έχει τρεις ακροδέκτες. Μπορεί να διαχειρισθεί ισχύ από μερικές δεκάδες W ως μερικές εκατοντάδες MW, τη μεγαλύτερη απ' όλα τ' άλλα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος. Η συχνότητα λειτουργίας τους φθάνει μέχρι 2-3 kHz (για τα γρήγορα θυρίστωρ), ενώ για θυρίστωρ που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές δικτύου, η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας τους φθάνει τα 400 Hz. Στο **σχήμα 3.2.α** φαίνεται η δομή ενός θυρίστωρ, στο **σχήμα 3.2.β** δίνεται το σύμβολό του, ενώ στο **σχήμα 3.2.γ** δίνονται η ιδανική και η στατική χαρακτηριστική ενός θυρίστωρ. Το θυρίστωρ πρόκειται για ένα στοιχείο τεσσάρων ημιαγωγικών στρώσεων pnpn. Οι ακροδέκτες του είναι η άνοδος (*anode*), η κάθοδος (*cathode*) και η πύλη (*gate*). Μεταξύ ανόδου και καθόδου διέρχεται το κύριο ρεύμα του στοιχείου, ενώ ο έλεγχος της ροής του ρεύματος πραγματοποιείται από την πύλη, μ' ένα μικρό σχετικά ρεύμα. Η ροή του ρεύματος μεταξύ ανόδου και καθόδου γίνεται προς μία μόνο φορά, από την άνοδο προς την κάθοδο, εφόσον βέβαια το στοιχείο είναι θετικά πολωμένο και του έχει δοθεί παλμός έναυσης.



Σχήμα 3.2: α) Δομή, β) σύμβολο και γ) στατική (ιδανική και τυπική) χαρακτηριστική λειτουργίας ενός θυρίστωρ.

Αν και η ομαλή έναυση του στοιχείου επιτυγχάνεται με έναν απλό θετικό παλμό ρεύματος χαμηλής ισχύος στην πύλη του, ενώ είναι θετικά πολωμένο, και τότε έχουμε μετάβαση του σημείου λειτουργίας του ημιαγωγικού στοιχείου από την περιοχή θετικής αποκοπής στην περιοχή αγωγής, η σβέση του δεν μπορεί να γίνει από την πύλη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με τη βοήθεια του ισοδύναμου του ηλεκτρικού κυκλώματος που φαίνεται στο *σχήμα 3.3*. Το κύκλωμα αυτό, αποτελείται από δύο τρανζίστορ, ένα τύπου pnp και ένα τύπου npn, η συνδεσμολογία των οποίων εμφανίζει μία θετική ανάδραση. Για να σβήσει ένα θυρίστορ θα πρέπει να μειώσουμε το ρεύμα που το διαρρέει κάτω από μία ορισμένη τιμή, που καλείται **ρεύμα συγκράτησης** (*Hold Current, i_h*) ή **κρίσιμο ρεύμα διέλευσης**.



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα του θυρίστορ που δείχνει τη λειτουργία της θετικής ανάδρασης και το λόγο που οδηγείται σε αποκοπή μόνο όταν το ρεύμα που το διαρρέει γίνεται μικρότερο από το ρεύμα συγκράτησης.

Επίσης, σε ένα θυρίστορ, όπως φαίνεται και από τη στατική χαρακτηριστική λειτουργίας του, αν η τάση στα άκρα του (V_{AK}) μεταξύ ανόδου και καθόδου σε θετική πόλωση φθάσει την οριακή, κρίσιμη τιμή της **θετικής τάσης κατάρρευσης** τότε το θυρίστορ μεταβαίνει από την καμπύλη θετικής αποκοπής στην καμπύλη αγωγής (ή καμπύλη διελεύσεως) χωρίς να απαιτείται παλμός έναυσης. Η τάση αυτή ονομάζεται και **κρίσιμη τάση αποκοπής**. Επιπλέον, αν η τάση στα άκρα του (V_{AK}) μεταξύ ανόδου και καθόδου, σε αρνητική πόλωση όμως, φθάσει την οριακή, κρίσιμη τιμή της **ανάστροφης τάσης κατάρρευσης** το θυρίστορ χάνει την ικανότητα αποκοπής και το ρεύμα που το διαρρέει αποκτά μεγάλες τιμές, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζει και μεγάλη τάση στα άκρα του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την καταστροφή του ημιαγωγικού στοιχείου από υπερθέρμανση λόγω απωλειών. Η τάση αυτή ονομάζεται και **τάση διάσπασης**. Ακόμα, στην **περιοχή θετικής αποκοπής** ένα ρεύμα στην πύλη του θυρίστορ μη ικανό να το οδηγήσει στην περιοχή αγωγής επιδρά με τέτοιο τρόπο, ώστε να περιορίζεται η ικανότητα θετικής αποκοπής που έχει το στοιχείο (όσο πιο μεγάλο το ρεύμα τόσο πιο μικρή η ικανότητα θετικής αποκοπής). Τέλος, η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει πολύ λίγο τη περιοχή αγωγής ενώ περιορίζει σημαντικά την ικανότητα θετικής αποκοπής (μπορεί να οδηγήσει σε έναυση) αλλά επιπλέον, αυξάνει και σημαντικά το ανάστροφο ρεύμα διαρροής. Γι' αυτό το λόγο, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του στοιχείου κάτω από ένα ανώτατο όριο.

Σημαντικά μεγέθη για την λειτουργία ενός; θυρίστορ είναι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος (di_{AK}/dt) και της τάσης (dv_{AK}/dt). Αν ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος γίνει μεγαλύτερος από κάποιο όριο (καθορίζεται από τον κατασκευαστή κάθε συγκεκριμένου στοιχείου) τότε μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του στοιχείου λόγω τοπικής υπερθέρμανσης. Επίσης, αν ο ρυθμός μεταβολής της τάσης πάρει τιμές μεγαλύτερες από κάποια μέγιστη τιμή (εξαρτάται από το συγκεκριμένο στοιχείο) μπορεί να οδηγήσει σε έναυση το στοιχείο ακόμα και αν βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής.

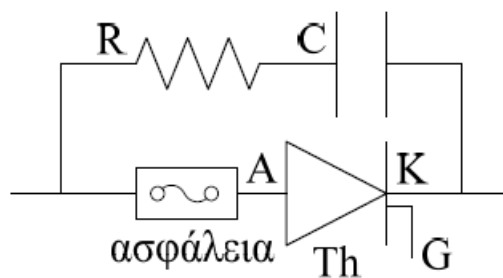
Εναυση του ημιαγωγικού στοιχείου εξαιτίας της θερμοκρασίας ή εξαιτίας υψηλής τάσης (μεγαλύτερης της θετικής τάσης κατάρρευσης) ή εξαιτίας ρυθμού μεταβολής της τάσης στα άκρα του είναι συνήθως εναύσεις σε χρονικές στιγμές που δεν είναι απαραίτητες, γιατί αν ήταν απαραίτητες θα χρησιμοποιούνταν ο εύκολος τρόπος έναυσης μέσω του παλμού στην πύλη, και γι' αυτό αποκαλούνται και ανεπιθύμητες εναύσεις. Για να προστατέψουμε το στοιχείο από αυτού του είδους της εναύσεις χρησιμοποιούμε ειδικά κυκλώματα προστασίας από μεταβατικές καταστάσεις (*snubber*), όπως αυτό που βλέπουμε στο *σχήμα 3.4*; όπου το κύκλωμα πυκνωτής - αντίσταση (*RC*) προστατεύει το στοιχείο από υπερτάσεις ενώ η ασφάλεια (συνήθως ασφάλεια υπερταχείας τήξης) προστατεύει το στοιχείο από υπερρεύματα. Επίσης, θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερο βάρος στη διαδικασία ψύξης του.

Το θυρίστορ είναι το πρώτο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος που κατασκευάστηκε. Λόγω της ισχύος που μπορεί να διαχειρισθεί χρησιμοποιείται κυρίως σε ηλεκτρονικούς μετατροπείς υψηλής ισχύος. Απαιτείται όμως ιδιαίτερη φροντίδα για την προστασία του από απότομες μεταβολές τόσο της τάσης στα άκρα του, όσο και του ρεύματος που το διαρρέει, καθώς και από υπερτάσεις.

Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογών τους, τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες τους και τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, τα υπάρχοντα στο εμπόριο θυρίστορ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως :

- α) **Θυρίστορ ελέγχου φάσης (Phase Control Thyristor)**
- β) **Θυρίστορ για αντιστροφείς (Inverter Thyristor)**
- γ) **Θυρίστορ που σβήνουν με τη βοήθεια της πύλης (Gate-Assisted Turn-Off Thyristor, GATT)**
- δ) **Θυρίστορ που σκανδαλίζονται οπτικά (Light-Triggered Thyristor)**

Τα θυρίστορ ελέγχου φάσης χρησιμοποιούνται σε μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο και σβήνουν λόγω φυσικής σβέσης. Οι χρόνοι σβέσης είναι υψηλοί ($>200 \mu\text{sec}$) , αλλά τα ονομαστικά τους ρεύματα και οι τάσεις διάσπασης είναι αρκετά υψηλά (ως 3500 A και 6000 V αντίστοιχα). Η πτώση τάσης κατά την αγωγή είναι χαμηλές και ενδεικτικά κυμαίνονται από 1,5 V, για ένα θυρίστορ με τάση διάσπασης 600 V, ως 2,3 V, για ένα θυρίστορ με τάση διάσπασης 3000 V και ως 2,6 V, για ένα θυρίστορ με τάση διάσπασης 4000 V.

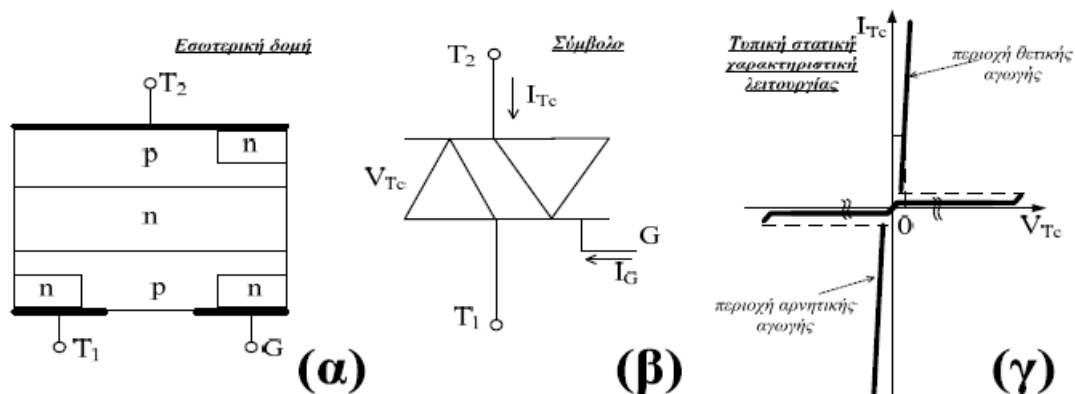


Σχήμα 3.4: Κύκλωμα προστασίας ενός θυρίστορ από ανεπιθύμητες εναύσεις και υπερρεύματα.

3.5 TRIAC

Το **TRIAC** είναι ένα στοιχείο το οποίο έχει τρεις ακροδέκτες και μπορεί να χειρισθεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο απλούστερος τρόπος περιγραφής της λειτουργίας του **TRIAC** είναι να θεωρηθεί ως δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ, δηλαδή η άνοδος του ενός συνδέεται με την κάθοδο του άλλου, με συνδεδεμένους τους ακροδέκτες πύλης (άρα έχει μία πύλη). Το **TRIAC** επιτρέπει τη ροή του ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις χωρίς διάκριση, ενώ η αγωγή ή μη του ρεύματος ελέγχεται με σήμα στο ηλεκτρόδιο πύλης. Το **TRIAC** έχει χαμηλότερο κόστος από ένα ζευγάρι αντιπαράλληλων θυρίστορ -του ίδιου, προφανώς, επιπέδου ισχύος -και ο έλεγχος του είναι απλούστερος και διατίθεται στο εμπόριο για χαμηλά επίπεδα ισχύος (μέχρι κάποιες δεκάδες kWatt).

Στο *σχήμα 3.5* φαίνεται η δομή, το σύμβολο και η στατική χαρακτηριστική λειτουργίας ενός **TRIAC**. Οι δύο ακροδέκτες του κύριου κυκλώματος δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία και συμβολίζονται ως T_1 και T_2 . Στο πρώτο τεταρτημόριο το δυναμικό του ακροδέκτη T_2 είναι υψηλότερο και η έναυση του στοιχείου επιτυγχάνεται με θετικό παλμό. Στο τρίτο τεταρτημόριο το δυναμικό του ακροδέκτη T_1 πρέπει να είναι υψηλότερο και η έναυση επιτυγχάνεται με αρνητικό παλμό. Κύριες εφαρμογές του στοιχείου αυτού είναι ο έλεγχος φωτισμού, θερμοκρασίας και μικρών επαγωγικών κινητήρων (π.χ. για ανεμιστήρες), σε διατάξεις εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 3.5: α) Δομή, β) σύμβολο και γ) τυπική στατική χαρακτηριστική λειτουργίας ενός **TRIAC**.

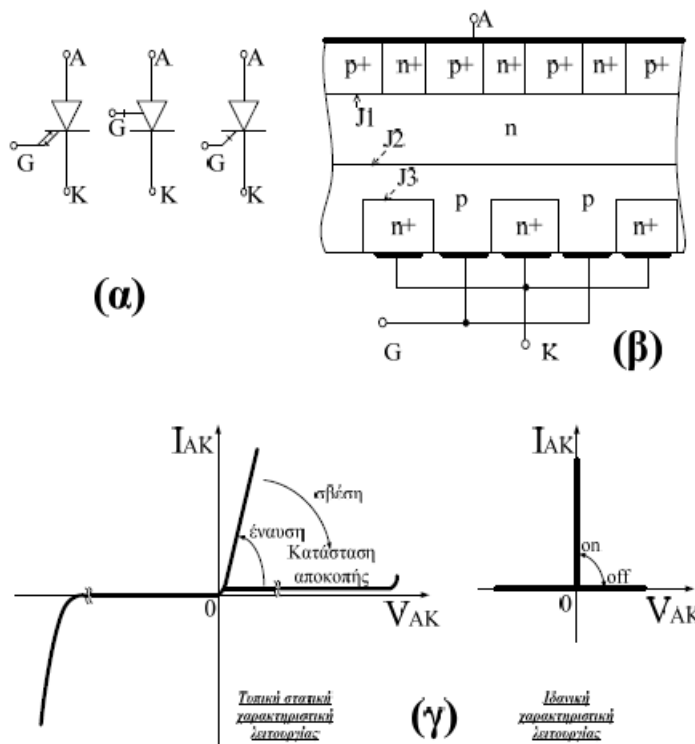
3.6 GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ

Το **GTO θυρίστορ** (*GTO Thyristor*), ανήκει στην οικογένεια των θυρίστορ, όπως υποδηλώνει και τ' όνομα του, με τη διαφορά ότι μπορεί να τεθεί σε κατάσταση αποκοπής με έναν αρνητικό παλμό στο ηλεκτρόδιο πύλης του. Όμως η ενίσχυση ρεύματος του GTO θυρίστορ κατά τη σβέση του είναι μικρή, μ' άμεσο αποτέλεσμα να απαιτείται αρκετά μεγάλο αρνητικό ρεύμα από τη πύλη του για να σβήσει (περίπου στο 1/3 της τιμής του ρεύματος που το διαρρέει εκείνη τη στιγμή). Όπως και τα θυρίστορ, το στοιχείο αυτό σκανδαλίζεται και έρχεται σε αγωγή με ένα μικρό θετικό παλμό στην πύλη του. Έτσι η σχεδίαση μετατροπέων με τη χρήση του στοιχείου αυτού είναι απλούστερη, αφού δεν απαιτείται πια η ύπαρξη βοηθητικών κυκλωμάτων σβέσης. Ιστορικά το GTO θυρίστορ εμφανίστηκε λίγα χρόνια μετά την εμφάνιση του συμβατικού θυρίστορ ενώ μέχρι σήμερα

έχει σημειώσει σημαντική εξέλιξη. Στο *σχήμα 3.6* δίδονται διάφοροι συμβολισμοί, η εσωτερική δομή και οι στατικές (ιδανική και τυπική) χαρακτηριστική λειτουργίας για ένα GTO θυρίστορ.

Κατά την ορθή πόλωση το στοιχείο αυτό παρουσιάζει μία χαρακτηριστική παρόμοια με αυτή ενός συμβατικού θυρίστορ. Τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος των GTO θυρίστορ βρίσκονται μεταξύ αυτών των συμβατικών θυρίστορ και των διπολικών τρανζίστορ ισχύος. η συχνότητα λειτουργίας του περιορίζεται στα 2 kHz, η αντοχή του σε απότομες μεταβολές τάσης είναι της τάξης των 1000 V/μsec και η αντοχή του σε απότομες μεταβολές ρεύματος είναι της τάξης των 250-300 A/μsec.

Οι ονομαστικές τιμές τάσης διάσπασης και ρεύματος είναι της τάξης των 4500 V και 3000 A, αντίστοιχα.



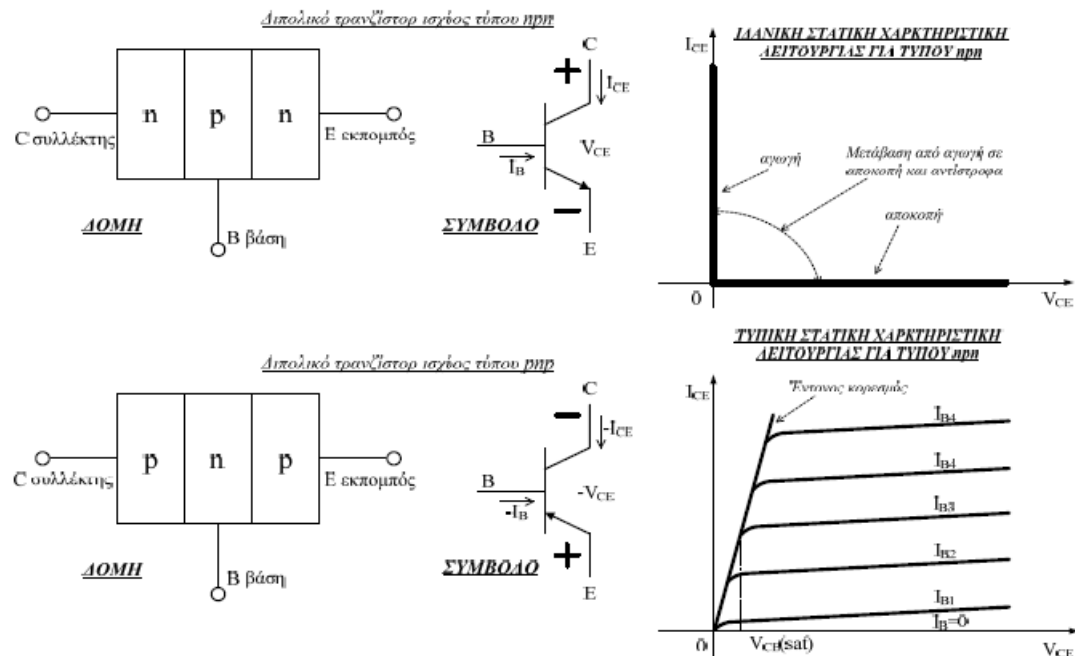
Σχήμα 3.6: α) Διάφορα σύμβολα, β) δομή και γ) στατική (τυπική και ιδανική) χαρακτηριστική λειτουργίας ενός GTO θυρίστορ.

3.7 ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΙΣΧΥΟΣ

Το **τρανζίστορ ισχύος διπολικής επαφής** ή **διπολικό τρανζίστορ ισχύος** (*power Bipolar Junction Transistor, power BJT*), είναι ένα ελεγχόμενο από ρεύμα ημιαγωγικό στοιχείο τριών ημιαγωγικών στρώσεων και τριών ακροδεκτών (συλλέκτης, βάση και εκπομπός). Στην ουσία είναι ένας ενισχυτής ρεύματος, στον οποίο το ρεύμα συλλέκτη ελέγχεται από το ρεύμα βάσης. Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσέφερε σε σχέση με τα θυρίστορ (πλήρης έλεγχος έναυσης και σβέσης, υψηλότερη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας), η χρήση του ήταν ευρεία σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, ως τις αρχές της δεκαετίας του 1990, οπότε και οι δυνατότητες του άρχισαν να υπερκαλύπτονται από ελεγχόμενα από τάση ημιαγωγικά στοιχεία που εμφανίστηκαν, μ' αποτέλεσμα, σήμερα, η χρήση του να έχει περιοριστεί πάρα πολύ (εκτός από την χρήση του για την κατασκευή γραμμικών κυκλωμάτων ισχύος).

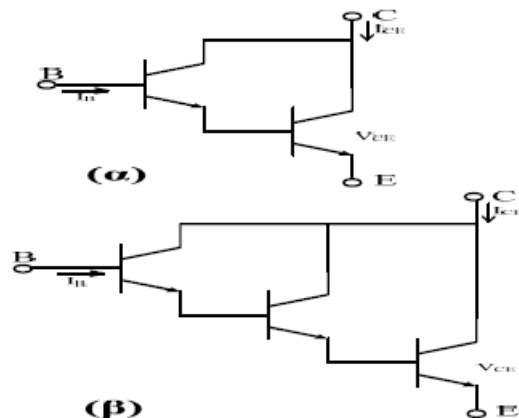
Στο *σχήμα 3.7* φαίνεται η δομή ενός διπολικού τρανζίστορ ισχύος (τόσο για npn όσο και για pnp επαφή) καθώς και τα αντίστοιχα σύμβολα και οι στατικές χαρακτηριστικές λειτουργίας (μόνο για npn τρανζίστορ).

Τα διπολικά τρανζίστορ τύπου n είναι πιο συνηθισμένα και χρησιμοποιούνται ευρύτερα, λόγω των καλύτερων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν. Το διπολικό τρανζίστορ είναι ένα ασύμμετρο στοιχείο, δηλαδή δεν έχει την ικανότητα αντοχής σε ανάστροφες τάσεις (παρά για λίγες δεκάδες Volt μόνο) και αυτό το γεγονός αποκλείει τη χρήση τους σε τοπολογίες μετατροπών που τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση, εκτός και αν συνδεθεί και μία δίοδος σε σειρά μ' αυτό.



Σχήμα 3.7 Δομή και συμβολισμοί για τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος και στατικές (ιδανική και τυπική) ενός τύπου npn διπολικού τρανζίστορ ισχύος.

Η αγωγή ρεύματος σ' ένα διπολικό τρανζίστορ ισχύος επιτυγχάνεται οδηγώντας ρεύμα στη βάση του. Η ενίσχυση ρεύματος $\beta = I_C/I_B$ του διπολικού τρανζίστορ ισχύος στην περιοχή κόρου, που μεταβάλλεται αρκετά με το ρεύμα συλλέκτη και τη θερμοκρασία του πλακιδίου, έχει τυπικές τιμές μεταξύ 10 και 20, για υψηλές τιμές ρεύματος συλλέκτη. Οι τιμές αυτές μειώνονται όσο η αντοχή του τρανζίστορ σε τάση διάσπασης αυξάνεται. Λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η χρήση της συνδεσμολογίας Darlington, που επιτρέπει την αύξηση της απολαβής σε ρεύμα (σχήμα 3.8). Όμως η συνδεσμολογία αυτή έχει ως μειονεκτήματα μεγαλύτερα ρεύματα διαρροής, υψηλότερες πτώσεις τάσης κατά την αγωγή και μικρότερη συχνότητα λειτουργίας (λόγω των μεγαλύτερων χρόνων έναυσης και σβέσης).



Σχήμα 3.8: Συνδεσμολογίες Darlington (α) και τριπλό Darlington (β).

Επιπλέον, θα πρέπει να προσθέσουμε ότι τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος, των οποίων, ως γνωστόν, η λειτουργία βασίζεται στη ροή φορέων μειονότητας, παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση όταν είναι σε κατάσταση αγωγής (και λιγότερες απώλειες αγωγής) η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του πλακιδίου (άρα έχουν *αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή της αντίστασης αγωγιμότητας*), γεγονός που καθιστά τον παραλληλισμό των ημιαγωγικών αυτών στοιχείων ισχύος εξαιρετικά δύσκολο. Αυτό οφείλεται στο ότι, το τρανζίστορ από το οποίο θα διέλθει κάποια στιγμή μεγαλύτερο ρεύμα (λόγω π.χ. ανομοιομορφίας των παραμέτρων των παράλληλων στοιχείων) θα θερμανθεί, μ' άμεσο αποτέλεσμα να μειωθεί η αντίσταση αγωγής του και συνεπώς το ρεύμα που διέρχεται από αυτό να αυξηθεί ακόμα περισσότερο και είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει την καταστροφή του.

Επίσης, το διπολικό τρανζίστορ ισχύος έχει πολύ χαμηλότερους χρόνους σβέσης από τα θυρίστορ, διότι παρέχεται η δυνατότητα σβέσης του μ' έναν αρνητικό παλμό στο ηλεκτρόδιο πύλης. Τέλος, η αύξηση της αντίστασης αγωγής με την τάση διάσπασης οδηγεί σε περιορισμό της τάσης διάσπασης σε ορθή πόλωση, που είναι πρακτικά δυνατό να αντέξουν τα στοιχεία αυτά στα 1000-1200 V περίπου, με εξαίρεση τα τρανζίστορ πολύ χαμηλών ρευμάτων, όπου η τάση διάσπασης φθάνει τα 1500 V.

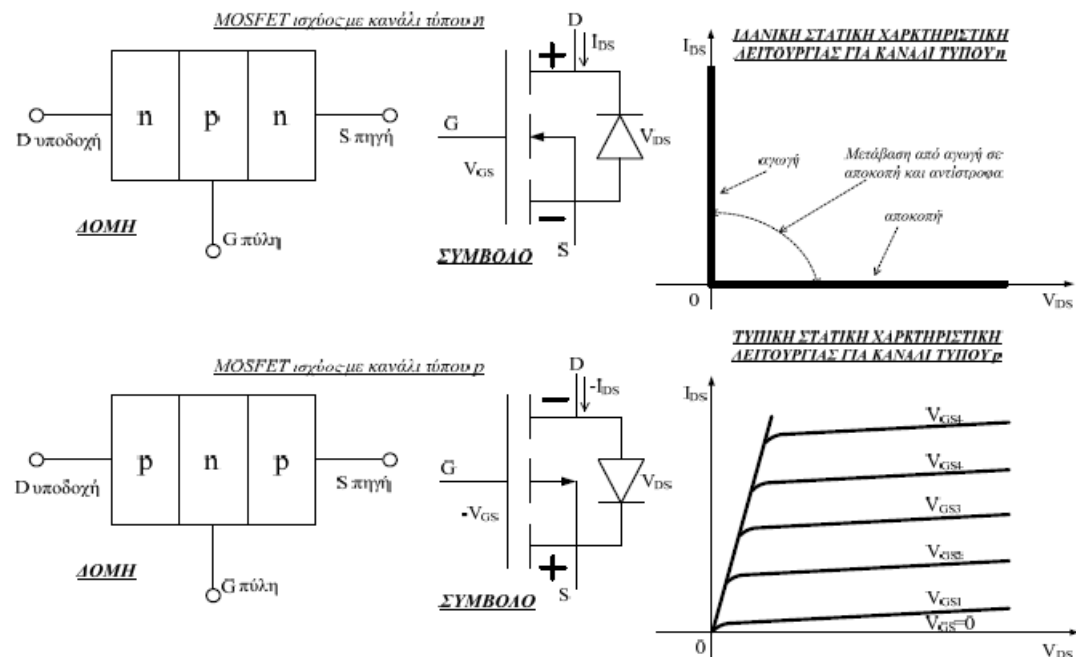
Κατά την περίοδο της άνθισης του το διπολικό τρανζίστορ ισχύος χρησιμοποιήθηκε στη βιομηχανία σε διατάξεις ισχύος (chopper, αντιστροφείς τάσης, παλμοτροφοδοτικά κλπ) από μερικές δεκάδες W ως μερικές εκατοντάδες kW και για συχνότητες από 10-15 kHz. Οι ονομαστικές τιμές τάσης διάσπασης και ρεύματος είναι της τάξης των 1200 V και 800 A, αντίστοιχα.

3.8 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΟΞΕΙΔΙΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Το **τρανζίστορ μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγών με επίδραση πεδίου ισχύος** (*power Metal Oxide Semiconductor Effect Transistor- power MOSFET*) σήμερα κατέχει ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς των ημιαγωγών ισχύος. Είναι ένα ελεγχόμενο από τάση ημιαγωγικό στοιχείο και έχει τρεις ακροδέκτες, την υποδοχή (*Drain*), την πηγή (*Source*) και την πύλη (*Gate*) και μπορεί να είναι είτε τύπου npn είτε τύπου pnp. Στο *σχήμα 3.9* δίνονται η εσωτερική δομή και οι συμβολισμοί των *MOSFET* ισχύος, τόσο για ένα *MOSFET* με κανάλι τύπου-n όσο και για ένα *MOSFET* με κανάλι τύπου-p, καθώς και η στατική χαρακτηριστική του, ιδανική και τυπική για ένα *MOSFET* με κανάλι τύπου-n.

Το *MOSFET* ισχύος, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα ελεγχόμενο από τάση ημιαγωγικό στοιχείο, λόγω της κατασκευής της πύλης, που συμπεριφέρεται ως πυκνωτής, η εμπέδηση εισόδου του είναι υψηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς που απαιτείται για τον έλεγχο του στοιχείου να είναι εξαιρετικά χαμηλή. Στην πραγματικότητα το ημιαγωγικό στοιχείο διατηρείται σε κατάσταση αγωγής ή αποκοπής χωρίς πρακτικά να απαιτείται ισχύς από το κύκλωμα παλμοδότησης, ενώ κατά τις μεταβατικές καταστάσεις απαιτείται ένας μικρός ισχύος παλμός για τη φόρτιση και την εκφόρτιση του πυκνωτή της πύλης. Το *MOSFET* ισχύος είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο στο οποίο η ροή του ρεύματος οφείλεται στη ροή φορέων πλειονότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι χρόνοι καθυστέρησης και μετάβασης του στοιχείου από την αποκοπή στην αγωγή και τανάπαλιν

να είναι εξαιρετικά χαμηλοί και να μην εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Άμεση συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι οι συχνότητες λειτουργίας του στοιχείου να είναι εξαιρετικά υψηλές (μπορούν να φθάσουν και τα 100 MHz), περιοριζόμενες, στις διάφορες εφαρμογές, μόνο από τις διακοπτικές απώλειες του κυκλώματος. Μέχρι σήμερα, στα κυκλώματα ισχύος δεν έχουν παρουσιαστεί εφαρμογές με διακοπτική συχνότητα λειτουργίας μεγαλύτερη από τα 10 MHz.



Σχήμα 3.9: Δομή και συμβολισμοί για τα MOSFET ισχύος και στατικές (ιδανική και τυπική) ενός MOSFET ισχύος με κανάλι τύπου n.

Η τάση διάσπασης των MOSFET ισχύος περιορίζεται, σήμερα, στα 1200-1500 V. Ένα βασικό μειονέκτημα των ημιαγωγικών αυτών στοιχείων ισχύος είναι η υψηλή σχετικά αντίσταση αγωγής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες αγωγής να είναι αρκετά υψηλές. Επίσης, η αντίσταση αγωγής ενός MOSFET ισχύος αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του πλακιδίου, επειδή η λειτουργία του στοιχείου βασίζεται στη ροή φορέων πλειονότητας. Τούτο καθιστά αρκετά εύκολο τον παραλληλισμό των ημιαγωγικών αυτών στοιχείων ισχύος, καθότι οποιαδήποτε ανισοκατανομή του ρεύματος θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του στοιχείου από το οποίο διέρχεται το μεγαλύτερο ρεύμα, μ' άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του, προκαλώντας την εκ νέου εξισορρόπηση των ρευμάτων. Επίσης, η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (*Safe Operating Area, SOA*) καθορίζεται μόνο από τα όρια θερμοκρασιακής αντοχής του πλακιδίου, μ' αποτέλεσμα η μέγιστη τιμή των απωλειών ισχύος να μπορεί να λάβει αρκετά υψηλή τιμή, ανάλογα με το λόγο κατάτμησης.

Λόγω της δομής του το MOSFET ισχύος έχει εσωτερικά μία διόδο, η οποία εμφανίζεται μεταξύ πηγής και υποδοχής (άνοδος στην πηγή), μ' αποτέλεσμα να μην έχει τη δυνατότητα συγκράτησης ανάστροφων τάσεων. Όμως, η παρουσία της διόδου αυτής

αποδεικνύεται επωφελής για διατάξεις όπως οι αντιστροφείς, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως, η απαραίτητη, αντιπαράλληλη δίοδος.

Οι τυπικές ονομαστικές τιμές τάσης διάσπασης και ρεύματος ενός *MOSFET* ισχύος είναι της τάξης των 1000 V και 200 A, αντίστοιχα. Όμως στην αγορά υπάρχουν και στοιχεία που το ονομαστικό ρεύμα διέλευσης φθάνει τα 500 A (για τάσεις διάσπασης έως 100 V) και οι αντιστάσεις αγωγής τα μερικά mΩ. Τα χαρακτηριστικά ισχύος των στοιχείων αυτών περιορίζουν, ως επί το πλείστον, τη χρήση τους σε εφαρμογές από μερικά W ως μερικές εκατοντάδες W (ενίοτε και λίγα kW).

Λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας τους είναι στοιχεία κατάλληλα για εφαρμογές σχετιζόμενες με τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (*Pulse Width Modulation, PWM*), διακοπτικά τροφοδοτικά, έλεγχο κινητήρων τύπου *Brushless*, ηλεκτρονικές διατάξεις αυτοκινήτων, ηλεκτρονικά *Ballast* για λαμπτήρες φθορισμού, μικρές συσκευές επαγωγικής θέρμανσης και ηλεκτροσυγκόλλησης, διάφορες φορητές συσκευές κλπ..

3.9 ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΠΥΛΗΣ

Λίγα χρόνια μετά την ανακάλυψη του *MOSFET* ισχύος, με την επιβεβαίωση του γεγονότος ότι το ημιαγωγικό αυτό στοιχείο δεν ήταν σε θέση ν' αντικαταστήσει πλήρως τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος, κυρίως λόγω της υψηλής τιμής της αντίστασης αγωγής του, πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν εντατικά με τις δυνατότητες συνδυασμού των δύο αυτών τεχνολογιών, με στόχο ν' αναπτυχθεί ένα υβριδικό στοιχείο που να έχει υψηλή εμπέδηση εισόδου και χαμηλή αντίσταση αγωγής. Η προσπάθεια αυτή οδήγησε στην ανακάλυψη του **διπολικού τρανζίστορ απομονωμένης πύλης** (*Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT*). Το διπολικό τρανζίστορ ισχύος με απομονωμένη πύλη συνδυάζει τα χαρακτηριστικά ενός *MOSFET* και ενός *BJT* ισχύος. Από τα πρώτα χρόνια εισαγωγής του στην αγορά οι ονομαστικές τιμές του σε τάση διάσπασης και ρεύμα διέλευσης και οι χαρακτηριστικές λειτουργίας του παρουσίασαν σημαντικές βελτιώσεις. Στο *σχήμα 3.10* δίνονται διάφοροι συμβολισμοί για το στοιχείο, η δομή του και η τυπική στατική χαρακτηριστική του καθώς και η ιδανική χαρακτηριστική του. Το στοιχείο αυτό έχει τρεις ακροδέκτες, που στον ευρύτερα διαδεδομένο συμβολισμό του (*σχήμα 3.10.α3*) ονομάζονται συλλέκτης (*collector*), εκπομπός (*emitter*) και πύλη (*gate*). Το ημιαγωγικό αυτό στοιχείο ισχύος έχει μία υψηλή εμπέδηση εισόδου, όπως το *MOSFET* ισχύος, αλλά τα χαρακτηριστικά αγωγής του μοιάζουν με αυτά ενός *BJT* ισχύος (εξ' ου και ο συμβολισμός του).

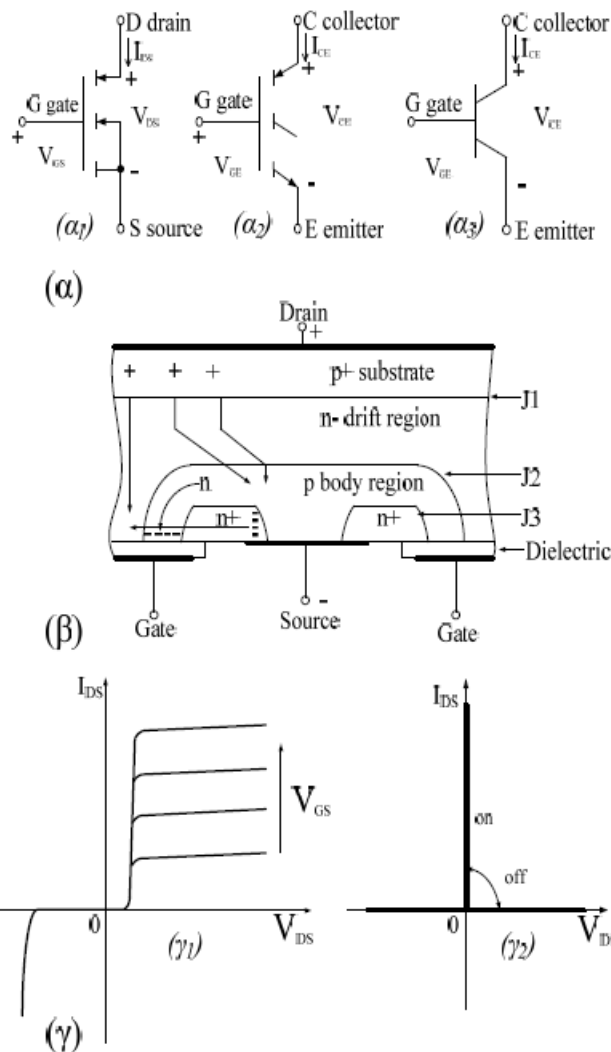
Επειδή το *IGBT* έχει ουσιαστικά τέσσερις ημιαγωγικές στρώσεις είναι ικανό να αποκόπτει συμμετρικά τόσο θετικές όσο και αρνητικές τάσεις.

Η ροή ρεύματος στα *IGBT* οφείλεται κατά κύριο λόγο στη ροή φορέων μειονότητας, γεγονός που οδηγεί σε χρόνους μετάβασης υψηλότερους από αυτούς των *MOSFET* ισχύος και μικρότερους από αυτούς των *BJT* ισχύος.

Σήμερα οι μέγιστες τιμές τάσης διάσπασης για τα *IGBT* φθάνουν τα 2 kV. Επίσης, για τιμές ρευμάτων που δεν απέχουν πολύ από τις ονομαστικές τιμές ενός στοιχείου, η πτώση τάσης σε κατάσταση αγωγής αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του

πλακιδίου. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τον παραλληλισμό των *IGBT* χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και εγγύεται μία καλή ισοκατανομή των ρευμάτων μεταξύ των παραλληλισθέντων στοιχείων. Για τιμές ρευμάτων που είναι πολύ μικρότερες από το ονομαστικό ρεύμα του στοιχείου η πτώση τάσης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία (όπως στα *BJT* ισχύος). Στην περίπτωση όμως αυτή μία ανισοκατανομή ρευμάτων δεν δημιουργεί πρόβλημα στον παραλληλισμό των στοιχείων.

Σε σχέση με τα *BJT* ισχύος και τα *MOSFET* ισχύος, το *IGBT*, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές μέσης ισχύος (μερικά kW ως μερικές εκατοντάδες kW) και μέσης συχνότητας (ως 50 kHz περίπου). Οι ονομαστικές τιμές τάσης διάσπασης και ρεύματος ενός *IGBT* είναι της τάξης των 2000 V και 500A, αντίστοιχα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως διακόπτης ισχύος αλλά και ως γραμμικός ενισχυτής. Συνήθεις εφαρμογές του είναι οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή και οι αντιστροφείς.



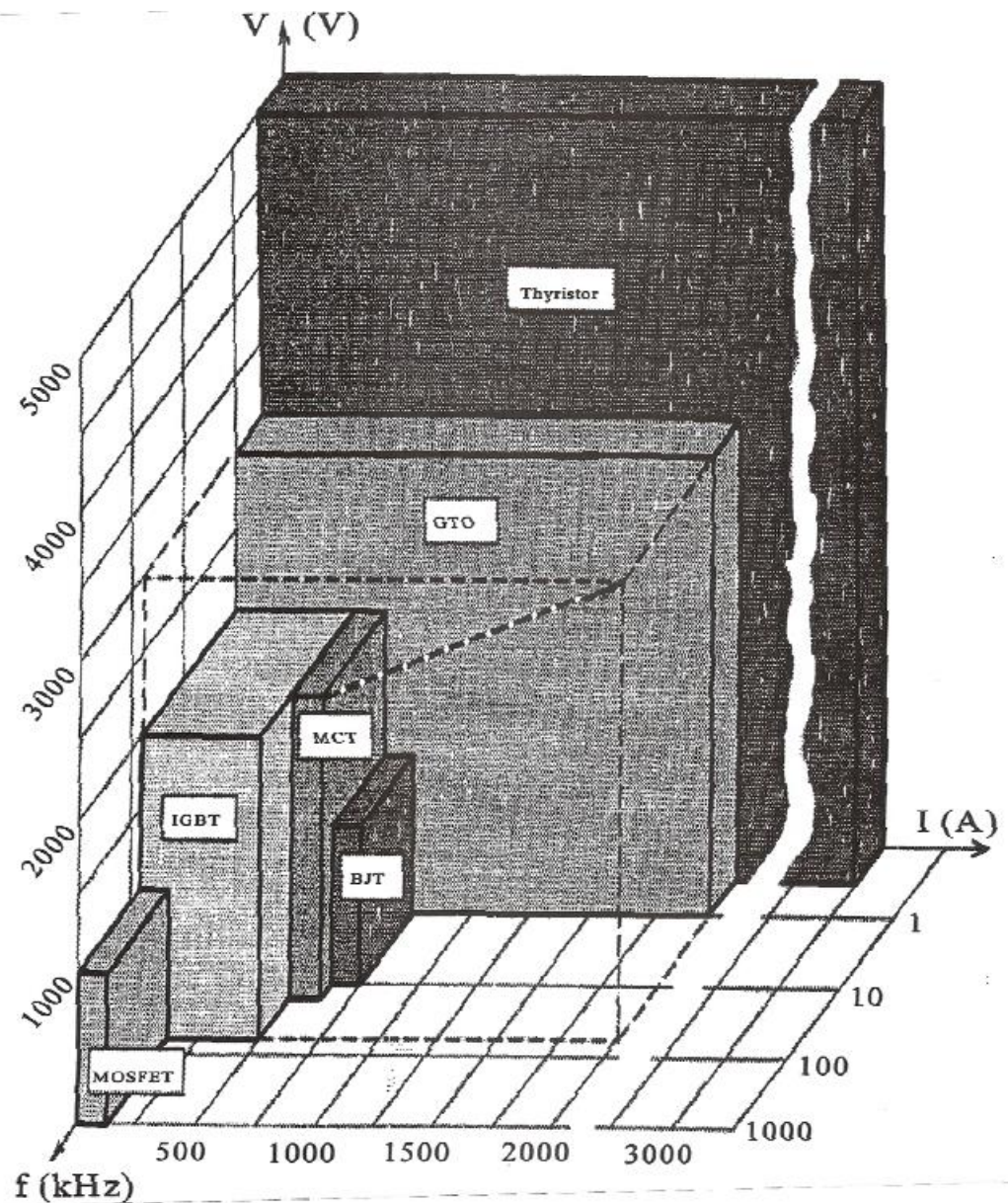
Σχήμα 3.10: Διάφοροι συμβολισμοί (α), δομή (β), τυπική (γ1) και ιδανική (γ2) στατική χαρακτηριστική λειτουργίας ενός *IGBT*.

3.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες σύγκρισης των διαφόρων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, σε γενικές γραμμές όμως είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει μία ακριβής ποσοτική σύγκριση μεταξύ αυτών, αφού οι παράμετροι τους παρουσιάζουν, ακόμα και για ένα συγκεκριμένου τύπου στοιχείο, μία σημαντική διασπορά τιμών. Στη συνέχεια, τα στοιχεία που περιγράφηκαν παραπάνω, συγκρίνονται με βάση διαφορετικά κριτήρια.

Αρχικά, τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος που άγουν σε κατάσταση ηρεμίας είναι ανεπιθύμητα για εφαρμογές σε ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, επειδή απαιτείται μία αρνητική τάση στο ηλεκτρόδιο ελέγχου κατά τη διαδικασία εκκίνησης της συσκευής.

Επίσης, ένα άλλος σημαντικός παράγων είναι οι απαιτήσεις στο κύκλωμα ελέγχου. Τα *BJT* ισχύος απαιτούν σημαντική ισχύ ελέγχου, τόσο σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και κατά τις μεταβάσεις (ιδίως κατά τη σβέση του στοιχείου). Αντίθετα, τα *MOSFET* ισχύος και τα *IGBT* απαιτούν ελάχιστη ισχύ ελέγχου και μπορούν να οδηγηθούν ακόμα και από ολοκληρωμένα κυκλώματα.



Σχήμα 3.14: Δυνατότητες των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος όσον αφορά το ονομαστικό ρεύμα, την ονομαστική τάση διάσπασης και τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας [2].

Παρατηρούμε ότι τα στοιχεία που αντέχουν υψηλές τάσεις διάσπασης και έχουν υψηλά ρεύματα αγωγής δεν έχουν τη δυνατότητα έναυσης και σβέσης σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες. Η πρόοδος στην τεχνολογία των ημιαγωγών θα οδηγήσει αναμφισβήτητα σε υψηλότερες ονομαστικές τιμές ισχύος, μεγαλύτερες ταχύτητες μετάβασης και χαμηλότερο κόστος. Τέλος σημειώνετε ότι, κατά τη σχεδίαση ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πάρα πολλά κριτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στη βέλτιστη επιλογή της τοπολογίας όσο και του είδους των ημιαγωγικών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν (λειτουργικές απαιτήσεις, κόστος, όγκος, βάρος, δυνατότητες ελέγχου, ευκολία κατασκευής, πολυπλοκότητα κυκλώματος, κ.α.).

3.13 ΕΡΓΑΣΙΑ

- 3) Ποιο είδος διόδου θα χρησιμοποιούσατε αν σε ένα κύκλωμα αν θέλατε τη μικρότερη δυνατή πτώση τάσης και ποιο αν σας ενδιέφερε να αυξήσετε τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος;
- 4) Να αναφέρετε πολύ συνοπτικά τι γνωρίζετε για ένα θυρίστορ (σύμβολο, δομή, περιοχές λειτουργίας, εφαρμογές,...).
- 8) Αναφέρετε κατά τη γνώμη σας τα επίπεδα ισχύος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε στοιχείο ισχύος που μελετήσαμε. Σε τι μέγιστη συχνότητα λειτουργίας θα μπορούσε να λειτουργεί το κάθε στοιχείο;
- 9) Ποια ημιαγωγικά στοιχεία δίνουν τη δυνατότητα του ευκολότερου ελέγχου και γιατί;
- 12) Επιλέξτε τα κατάλληλα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία για τις ακόλουθες εφαρμογές :
 - α) Για ένα κύκλωμα ισχύος με τάση λειτουργίας 3000Volt και ισχύος 100kW. Επίσης, ποια κατά τη γνώμη σας θα ήταν η μέγιστη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας που θα μπορούσε να επιτευχθεί σ' αυτή την εφαρμογή;
 - β) Για ένα κύκλωμα ισχύος 290Watt και επιθυμούσατε διακοπτική συχνότητα λειτουργίας 300kHz.
 - γ) Για ένα κύκλωμα με τάση λειτουργίας 1000Volt και ισχύος 25kW και επιθυμούσατε διακοπτική συχνότητα λειτουργίας 20kHz.
 - δ) Για ένα κύκλωμα ισχύος με τάση λειτουργίας 48Volt και ισχύος 1000W και επιθυμούσατε σχεδίαση για να ελαττωθεί όσο το δυνατό περισσότερο το μέγεθος του κυκλώματος. Να προσδιορίσετε το μέγεθος της συχνότητας λειτουργίας του συγκεκριμένου κυκλώματος.
 - δ) Υπάρχουν για όλες τις παραπάνω εφαρμογές κατάλληλες διόδοι λειτουργίας στο εμπόριο και ποιο είδος διόδου θα χρησιμοποιούσατε σε καθεμία από τις παραπάνω εφαρμογές;