



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές

## Ενότητα 1: Ημιαγωγικά Στοιχεία Ισχύος

Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής  
Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας  
Υπολογιστών

# Σκοποί ενότητας

- Παρουσίαση βασικών και ειδικών ημιαγωγικών στοιχείων στα οποία βασίζονται οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος
- Παρουσίαση κριτηρίων επιλογής των κατάλληλων στοιχείων ανάλογα με την εφαρμογή



# Περιεχόμενα ενότητας

- Δομή και λειτουργικά χαρακτηριστικά των βασικών ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (δίοδος ισχύος, θυρίστορ, Triac, GTO, BJT, MOSFET, IGBT, FCT) καθώς και ειδικών ημιαγωγικών στοιχείων.
- Επίδραση παραμέτρων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος στις επιδόσεις των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος
- Σύγκριση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος





# Πρόλογος



- ❑ Σκοπός της επιστήμης των Ηλεκτρονικών Ισχύος
- ❑ Στόχος του μαθήματος “Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές”
- ❑ Η ιστορία των Ηλεκτρονικών Ισχύος:
  - Περιστρεφόμενοι Μετατροπείς
  - Ανορθωτής Υδραργύρου
  - Μαγνητικός Ενισχυτής
  - Ανορθωτής Πυριτίου (Θυρίστορ)
  - Νέου τύπου ημιαγωγικά στοιχεία



## ***Μέρος Α:***

- ❑ Σύντομη περιγραφή και σύγκριση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος:
  - Thyristor, Fast Diode, BJT, MOSFET, IGBT, MCT κλπ.
- ❑ Ανάλυση της φυσικής δομής και μελέτη της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.
- ❑ Αναλυτική παρουσίαση των κυκλωμάτων παλμοδότησης και προστασίας των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.
- ❑ Εξομοίωση των ηλεκτρονικών στοιχείων και κυκλωμάτων ισχύος με ηλεκτρονικό υπολογιστή.





## ***Μέρος Β:***

- ❑ Ανάλυση της λειτουργίας και των μεθόδων παλμοδότησης ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές. Αναλύονται μετατροπείς:
  - Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση
  - Συνεχούς Τάσης σε Εναλλασσόμενη Τάση
- ❑ Σχεδιασμός υψίσυχνων μετασχηματιστών.
- ❑ Εφαρμογές ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος σε βιομηχανικά και οικιακά συστήματα.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., “Power Electronics Converters, Applications and Design”, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, New York, 1995.
- Billings K.H., “Switchmode Power Supply Handbook”, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1989.
- Philips Power Semiconductor Applications Group, “ An Introduction to Switched Mode Power Supply Topologies”, Power Semiconductor Applications Handbook 1995, Philips Semiconductors, 1995.
- Severns R.P., Bloom G.E., “ Modern DC-to-DC Switch Mode Power Converter Circuits”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1985.
- Sen P.C., “Power Electronics”, Tata McGraw-Hill Publishing Company, New Delhi, 1987.
- Taylor B.E., “Power MOSFET Design”, John Wiley and Sons Inc, 1993.
- Sze S.M., “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons Inc., Second Edition, New York, 1981.
- Cyril W. Lander., “Power Electronics”, McGraw-Hill Publishing Co ., Second Edition, London, New York, 1993, ISBN: 0077077148.
- Albert Kloss., “Basic Guide to Power Electronics”, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, New York, Toronto, 1984, ISBN: 0471904325.



# Εισαγωγή



- ❑ Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο για κάθε ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος.
- ❑ Παράγοντες που καθορίζουν τις εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος:
  - ❖ Η μείωση του κόστους παραγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος.
  - ❖ Η βελτίωση των χαρακτηριστικών και η αύξηση των δυνατοτήτων και της απόδοσης των ήδη γνωστών στοιχείων ισχύος (δίοδοι, θυρίστορ, GTO, BJT, MOSFET κλπ).
  - ❖ Η εισαγωγή νέων στοιχείων ισχύος (**IGBT**, SIT, SITh, MCT κλπ) με εξαιρετικές επιδόσεις και σχετικά χαμηλό κόστος.

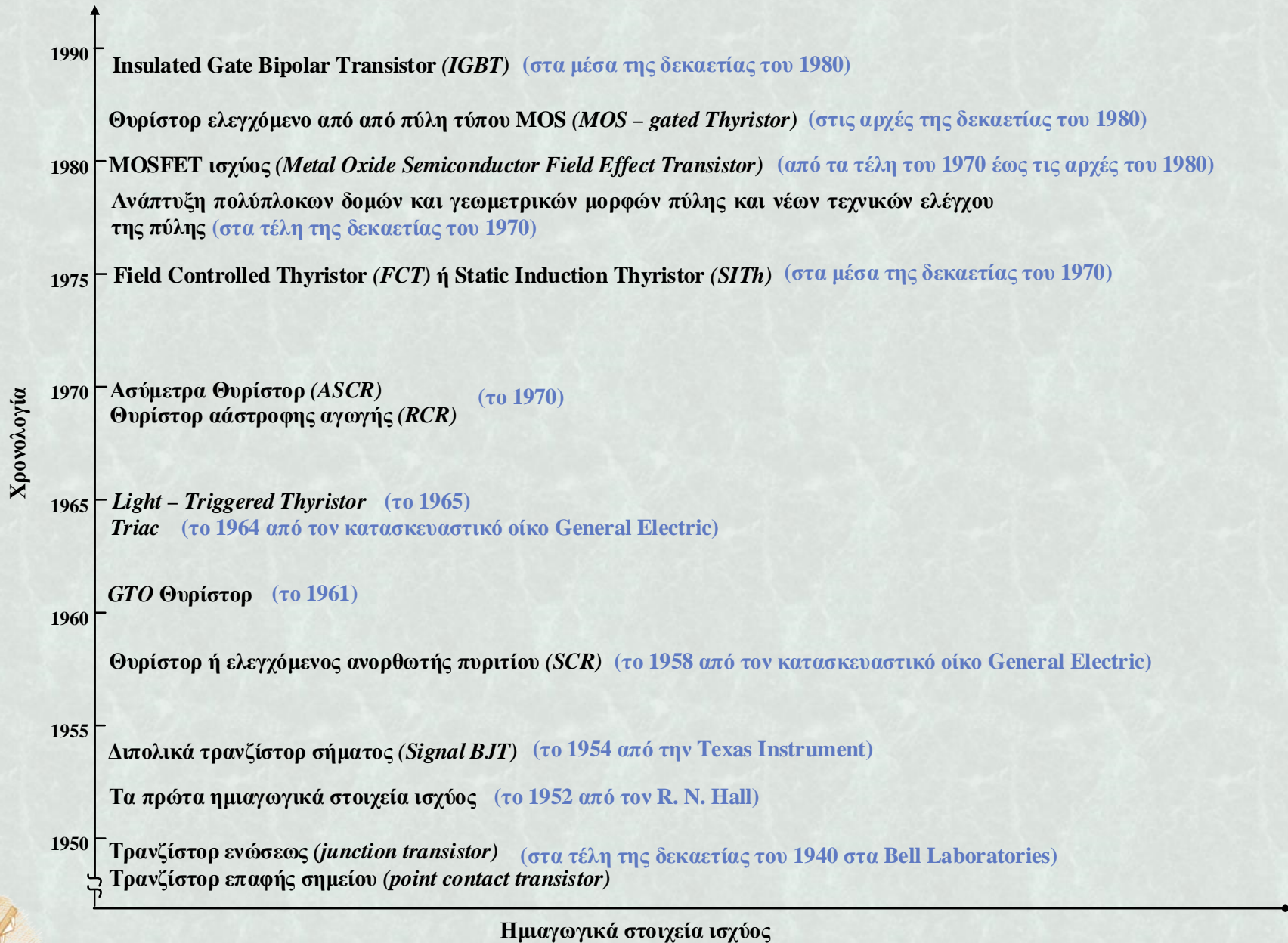


- ❑ Θα μελετηθεί η στατική και η δυναμική συμπεριφορά, των ευρύτερα διαδεδομένων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και θα αναλυθεί η εσωτερική φυσική δομή τους.
- ❑ Θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους οδήγησης και προστασίας αυτών των στοιχείων.
- ❑ Τέλος, θα αναφερθεί η χρησιμότητα της εξομοίωσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων ισχύος με ηλεκτρονικό υπολογιστή.





# ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ



# ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Η δομή των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους είναι πολυπλοκότερα από αυτά των αντίστοιχων στοιχείων χαμηλής τάσης.
- Τα ιδιαίτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, που απαιτείται να διαθέτουν τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, είναι:
  - ❖ Οι υψηλές τάσης διάσπασης
  - ❖ Η ικανότητα διέλευσης υψηλών τιμών ρεύματος
  - ❖ Οι μικρές πτώσεις τάσης σε κατάσταση αγωγής
  - ❖ Οι χαμηλές αντιστάσεις αγωγής
  - ❖ Οι μικρές τιμές του ρεύματος διαρροής
  - ❖ Οι μικροί διακοπτικοί χρόνοι κατά την έναυση και τη σβέση



# ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Στα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά θα πρέπει να προστεθούν:
  - ❖ η ικανότητα αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολίες
  - ❖ οι χαμηλές απαιτήσεις ισχύος στο κύκλωμα ελέγχου (για τα ελεγχόμενα στοιχεία ισχύος)
  - ❖ ο υψηλός μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών καταστροφών του στοιχείου (*MTBF Mean Time Between Failures*), που επιδρά στην αξιοπιστία της συσκευής
  - ❖ και το χαμηλότερο δυνατό κόστος





# ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Στην πράξη δεν υπάρχει στοιχείο που να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω δυνατότητες.
- Γίνεται κατάλληλη επιλογή του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την εφαρμογή:
  - ❖ Δηλαδή, τις επιθυμητές προδιαγραφές, την απόδοση, τον όγκο και το βάρος της συσκευής, το κόστος, τη διαθεσιμότητα των στοιχείων κλπ.



# Δίοδοι Ισχύος



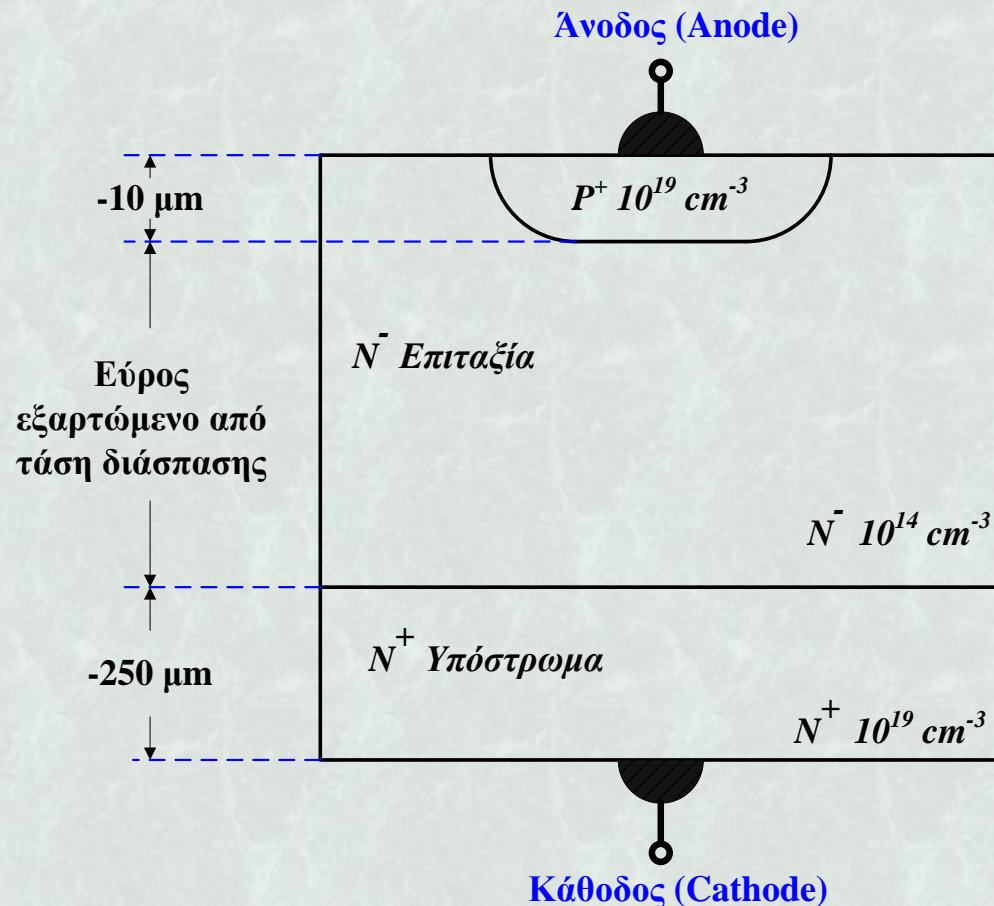
# ΔΙΟΔΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

- Η δίοδος είναι ένα μη ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο:
  - ❖ Η συμπεριφορά της εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της ή το ρεύμα που τη διαρρέει.

- Συνήθως, η δίοδος ισχύος κατασκευάζεται με βάση το πυρίτιο.

Αποτελείται:

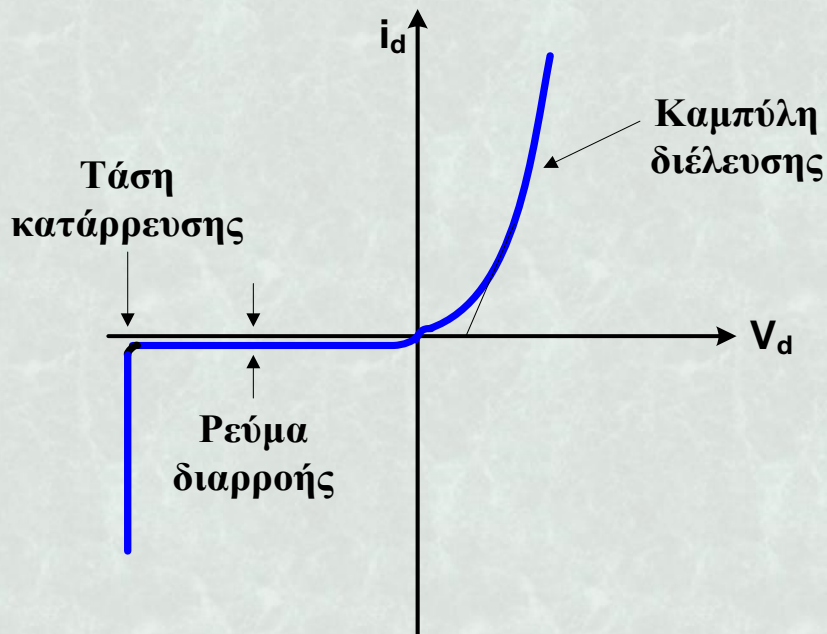
- ✓ από δύο ημιαγωγούς τύπου  $P^+$  και  $N^+$ , με υψηλό ποσοστό προσμίξεων
- ✓ από μια περιοχή τύπου  $N^-$ , με χαμηλό ποσοστό προσμίξεων (επιταξία), η οποία βρίσκεται μεταξύ των δύο προαναφερθέντων ημιαγωγών.



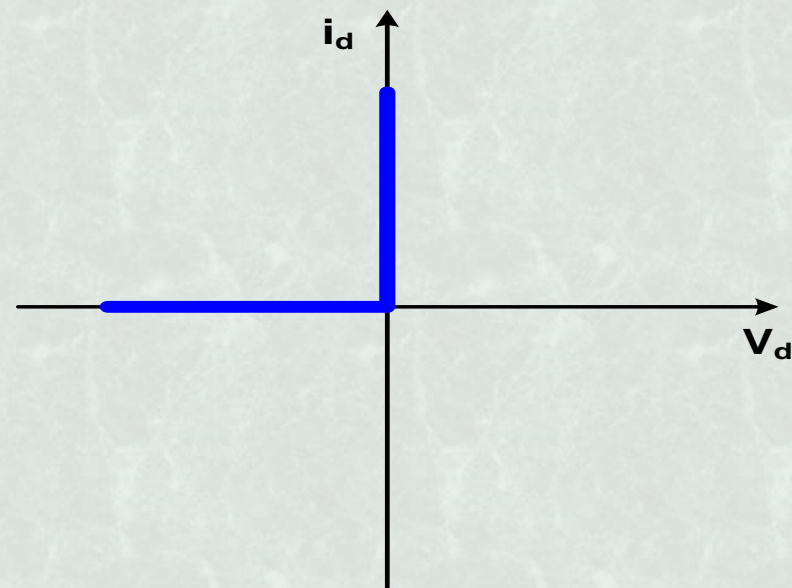
Δομή μιας δίοδου ισχύος



# ΔΙΟΔΟΙ ΙΣΧΥΟΣ



Τυπική στατική χαρακτηριστική  
διόδου ισχύος

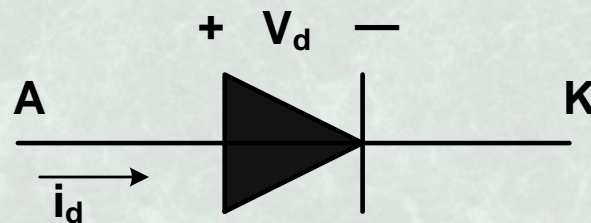


Ιδανική στατική χαρακτηριστική  
διόδου ισχύος

□ Η ημιαγώγιμη επαφή επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος προς μία κατεύθυνση. Άρα, η δίοδος είναι ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής:

⇒ για το λόγο αυτό αναφέρεται συχνά με αυτήν την ονομασία.

Κυκλωματικό σύμβολο μιας διόδου



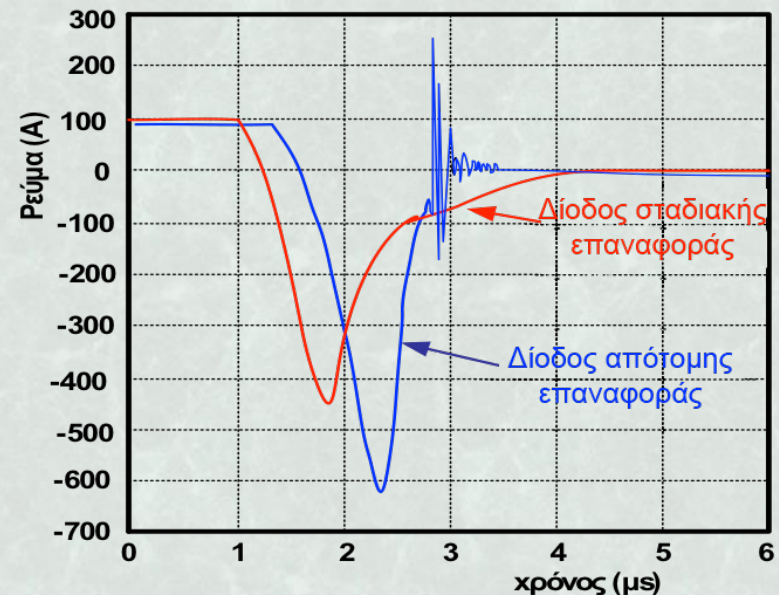
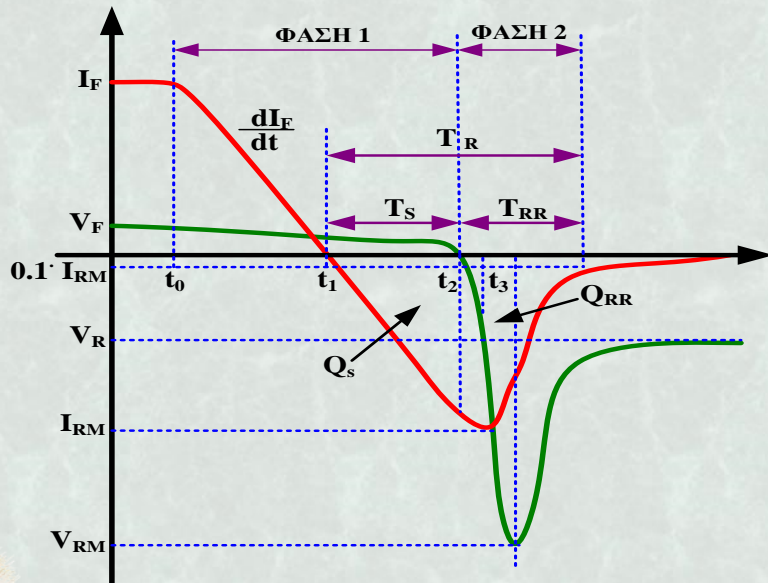
# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- ❑ για ανόρθωση, σε διαφορετικές τοπολογίες ανορθωτικών διατάξεων
- ❑ ως δίοδοι ελεύθερης διέλευσης, όταν συνδέονται παράλληλα με το φορτίο, αλλά με ανάστροφη πολικότητα:
  - ↳ για τη δημιουργία κυκλωματικού βρόχου ροής του ρεύματος, όταν διακόπτεται η αγωγή του/των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος
- ❑ στα κυκλώματα προστασίας (snubbers) των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος:
  - ❖ σε κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις ή υπερρεύματα
  - ❖ σε κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης ή της σβέσης ενός ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος.



# ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Όταν η διάδος ισχύος πολωθεί ορθά (έναυση-αγωγή) συμπεριφέρεται ως ιδανικός διακόπτης.
- Κατά τη σβέση της όμως παρουσιάζεται το φαινόμενο της ανάστροφης ανάκτησης (reverse recovery effect). Ανάλογα με την κλίση του ανάστροφου ρεύματος οι διάοδοι διακρίνονται σε:
  - ❖ Διόδους απότομης επαναφοράς (*snap recovery diodes*)
  - ❖ Διόδους σταδιακής επαναφοράς (*soft recovery diodes*)





# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

**Με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά:**

## □ *Ανορθωτικές Δίοδοι (rectifier or line-frequency diodes)*

- ❖ Παρουσιάζουν: υψηλές τιμές ονομαστικού ρεύματος διέλευσης και τάσης διάσπασης.
- ❖ Χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανόρθωση της τάσης του δικτύου.

## □ *Δίοδοι ταχείας ή υπερταχείας ανάκτησης (fast or ultra fast recovery diodes):*

- ❖ Παρουσιάζουν: χαμηλούς χρόνους ανάστροφης ανάκτησης.
- ❖ Χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες.

## □ *Δίοδοι Schottky:*

- ❖ Παρουσιάζουν: πολύ μικρή πτώση τάσης κατά την αγωγή, χαμηλούς χρόνους έναυσης και σβέσης αλλά και μικρή τιμή τάσης διάσπασης.



# Θυρίστορ





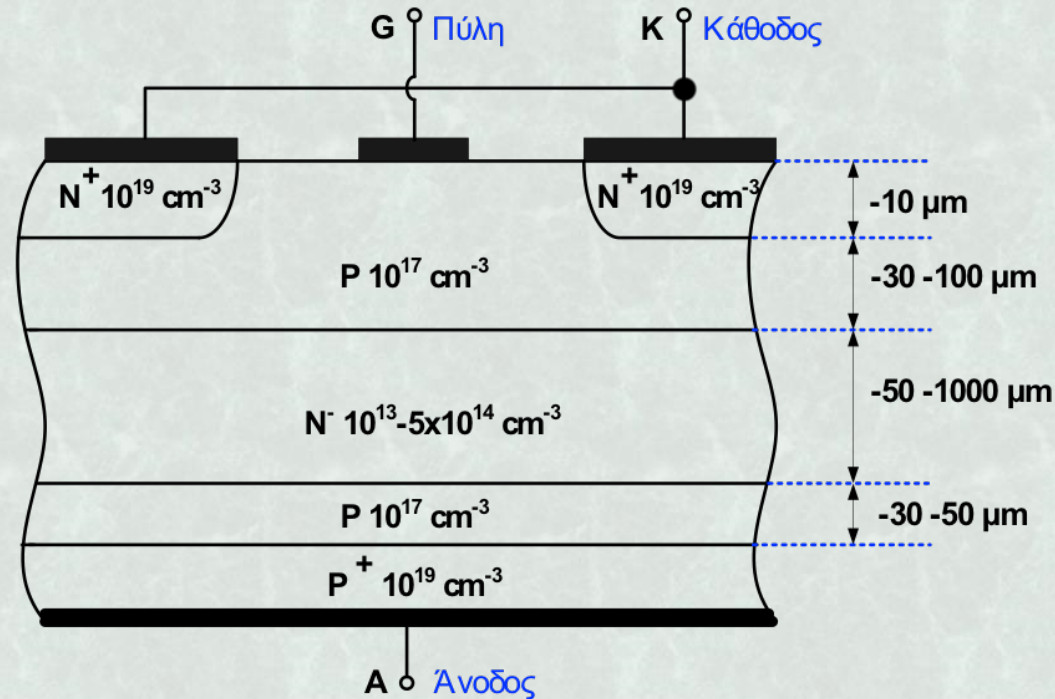
➤ Το θυρίστορ ή ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (*Silicon Controlled Rectifier, SCR*) είναι ένα ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος:

- ❖ Μπορεί να διαχειρισθεί ισχύ από μερικές δεκάδες Watt ως μερικές εκατοντάδες MWatt.
- ❖ Η συχνότητα λειτουργίας του φθάνει μέχρι τα 2 με 3 kHz.

➤ Πρόκειται για ένα στοιχείο τεσσάρων ημιαγωγικών στρώσεων *PNPN*.

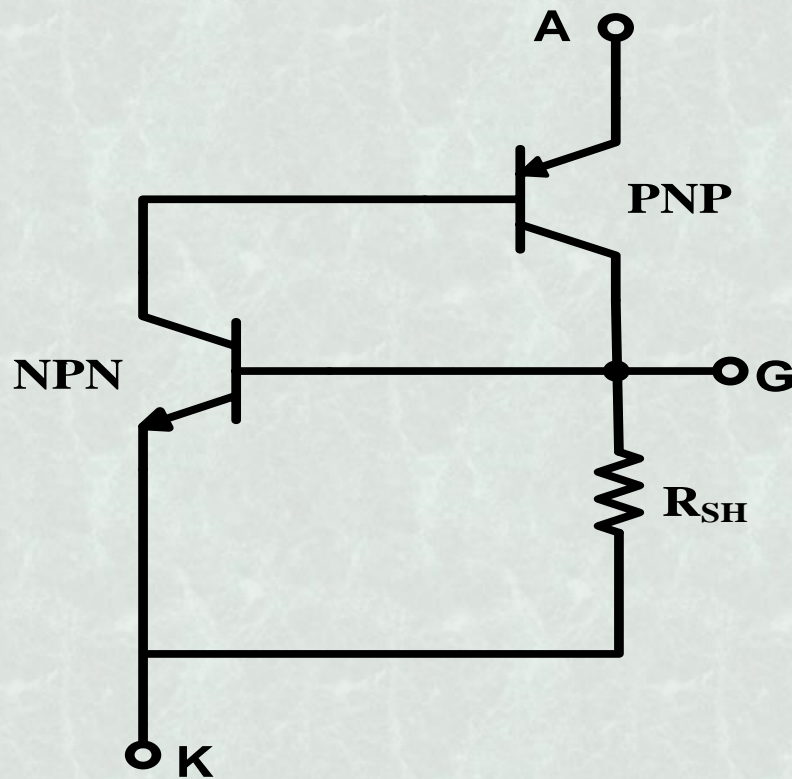
➤ Οι ακροδέκτες του είναι:

- ✓ η άνοδος (anode)
- ✓ η κάθοδος (cathode)
- ✓ η πύλη (gate)

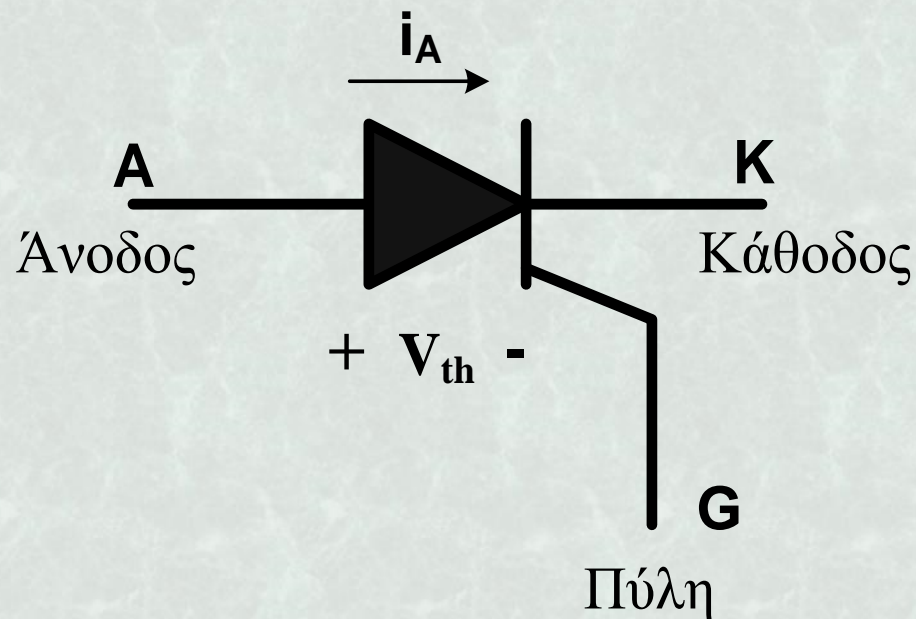


Δομή ενός θυρίστορ





Ισοδύναμο κύκλωμα ενός  
θυρίστορ

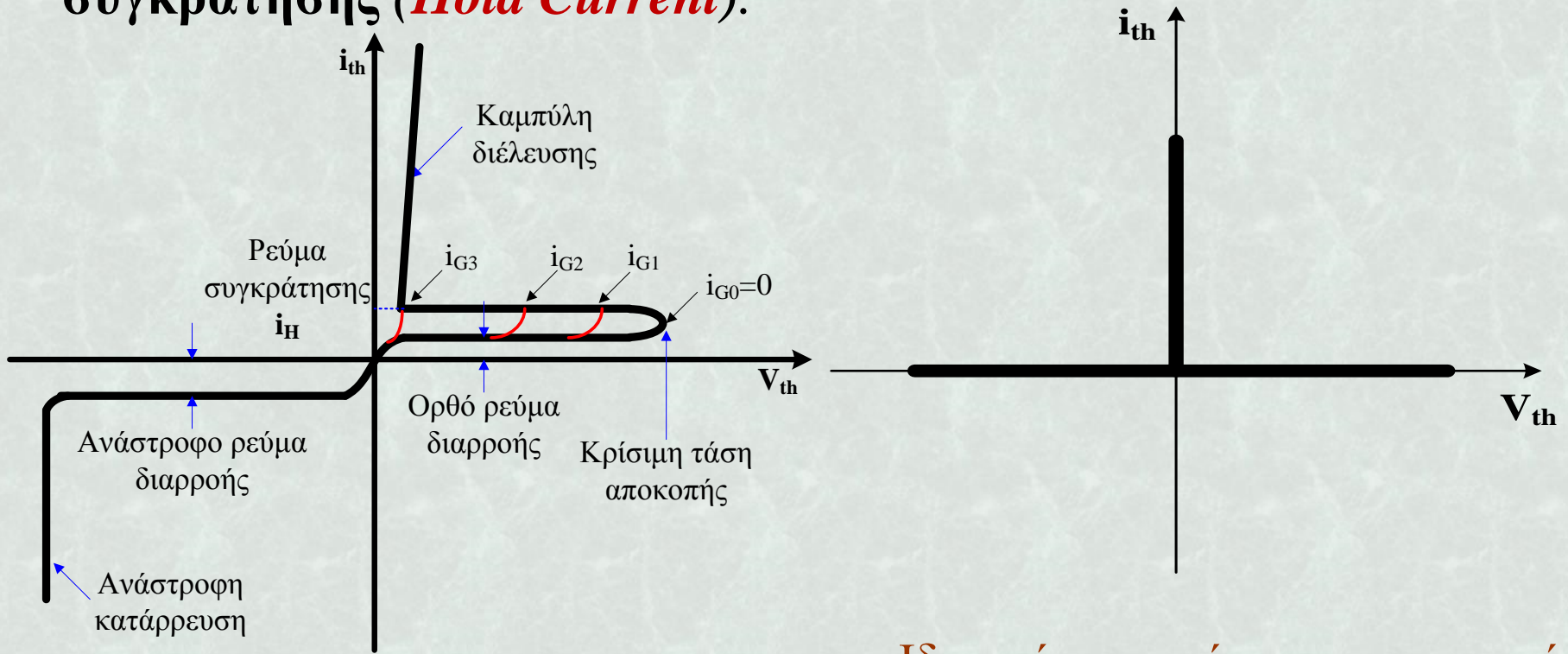


Κυκλωματικό σύμβολο ενός  
θυρίστορ

- Η ροή του ρεύματος μεταξύ ανόδου και καθόδου γίνεται προς μια μόνο φορά, από την άνοδο προς την κάθοδο, εφόσον βέβαια το στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και δοθεί παλμός έναυσης.



- ❑ Η έναυση του στοιχείου επιτυγχάνεται μ' έναν απλό θετικό παλμό, χαμηλής ισχύος, στην πύλη του.
- ❑ Η σβέση του στοιχείου απαιτεί τη μείωση του ρεύματος που το διαρρέει κάτω από μια ορισμένη τιμή, που καλείται **ρεύμα συγκράτησης (*Hold Current*)**.



Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός θυρίστορ

Ιδανική στατική χαρακτηριστική ενός θυρίστορ

# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

***Με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά:***

## ***□ Θυρίστορ ελέγχου φάσης (Phase Control Thyristor):***

- ❖ Παρουσιάζουν: υψηλούς χρόνους σβέσης αλλά τα ονομαστικά τους ρεύματα και οι τάσεις διάσπασης είναι αρκετά υψηλά.
- ❖ Χρησιμοποιούνται σε μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο.

## ***□ Θυρίστορ για αντιστροφείς (Inverter Thyristor) :***

- ❖ Παρουσιάζουν: σημαντικά μικρότερους χρόνους σβέσης, αλλά και χαμηλότερα ονομαστικά ρεύματα και τάσεις διάσπασης.
- ❖ Χρησιμοποιούνται σε μετατροπείς εξαναγκασμένης σβέσης, στους οποίους η σβέση του στοιχείου επιτυγχάνεται με κάποιο βοηθητικό κύκλωμα σβέσης.





# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

**Με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά:**

□ Ασύμμετρα θυρίστορ (Asymmetrical Thyristor, ASCR). Κυριότερα χαρακτηριστικά των ασύμμετρων θυρίστορ είναι:

- ❖ η μη αντοχή τους σε υψηλές ανάστροφες τάσεις.
  - ❖ η ελαχιστοποίηση του χρόνου ανάστροφης ανάκτησης.
  - ❖ η ελαχιστοποίηση του χρόνου του χρόνου έναυσης.
  - ❖ η ελαχιστοποίηση της πτώσης τάσης κατά την αγωγή.
  - ❖ η δυνατότητα αύξησης της συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα.
- ☞ Η βασική διαφορά ενός ασύμμετρου και ενός συμβατικού θυρίστορ συνίσταται στην εισαγωγή μιας στρώσης τύπου  $N$  μεταξύ της περιοχής βάσης και της περιοχής υποστρώματος.
- ☞ Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αντιστροφείς, όπου η ύπαρξη της αντιπαράλληλης διόδου είναι απαραίτητη.



# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

*Με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά:*

## □ Θυρίστορ ανάστροφης αγωγής (Reverse Conduction Thyristor, RCT):

- ❖ Μονολιθική ολοκλήρωση, στο ίδιο ημιαγωγικό υπόβαθρο, ενός ασύμμετρου θυρίστορ και μιας αντιπαράλληλης διόδου.
- ❖ Έτσι, περιορίζεται σημαντικά ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σ' έναν αντιστροφέα:
  - ↳ όμως, περιορίζεται και η ανάστροφη τάση του θυρίστορ στην τιμή της τάσης αγωγής μιας διόδου.

## □ Θυρίστορ που σβήνουν με τη βοήθεια της πύλης (Gate-Assisted Turn-off Thyristor, GATT):

- ❖ Η σβέση του θυρίστορ υποβοηθείται από την εφαρμογή ενός αρνητικού παλμού στην πύλη:
  - ↳ Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του χρόνου σβέσης για ίδιες τιμές της τάσης αγωγής.
- ❖ Η συχνότητα λειτουργίας μπορεί να φθάσει τα 20kHz.





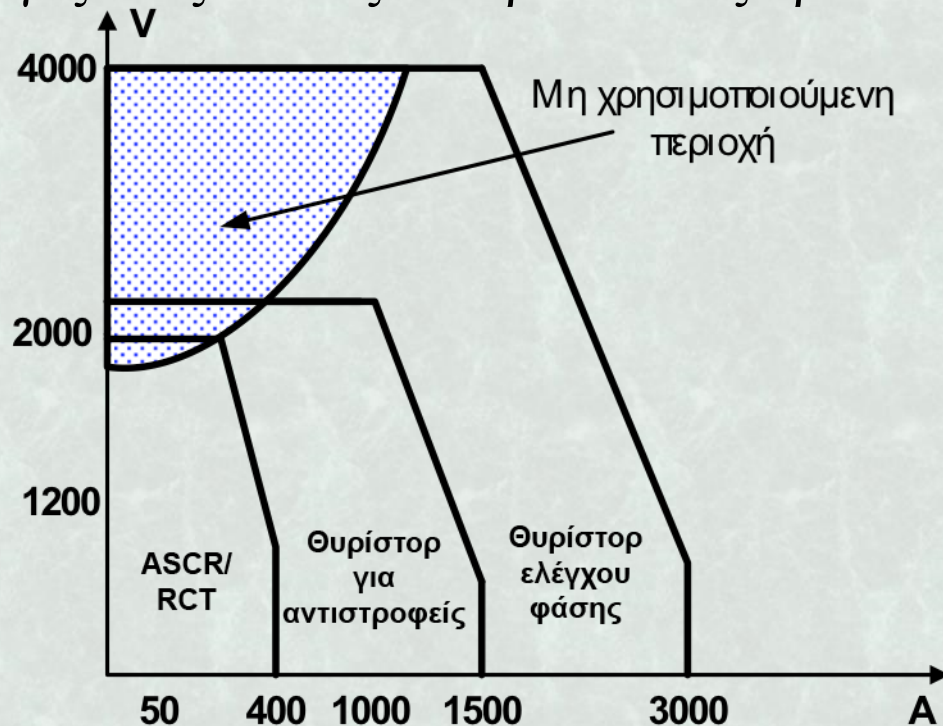
# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΩΡ

Με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά:

## □ Θυρίστωρ που σκανδαλίζονται οπτικά (Light-Triggered Thyristor):

- ❖ Η άμεση ακτινοβολία του πυριτίου δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών, τα οποία, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου παράγουν ένα ρεύμα ικανό να σκανδαλίσει το θυρίστωρ και να το οδηγήσει σε αγωγή.
- ❖ Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες επικρατούν εξαιρετικά υψηλές τάσεις.

Ονομαστικές δυνατότητες  
διαφόρων τύπων θυρίστωρ





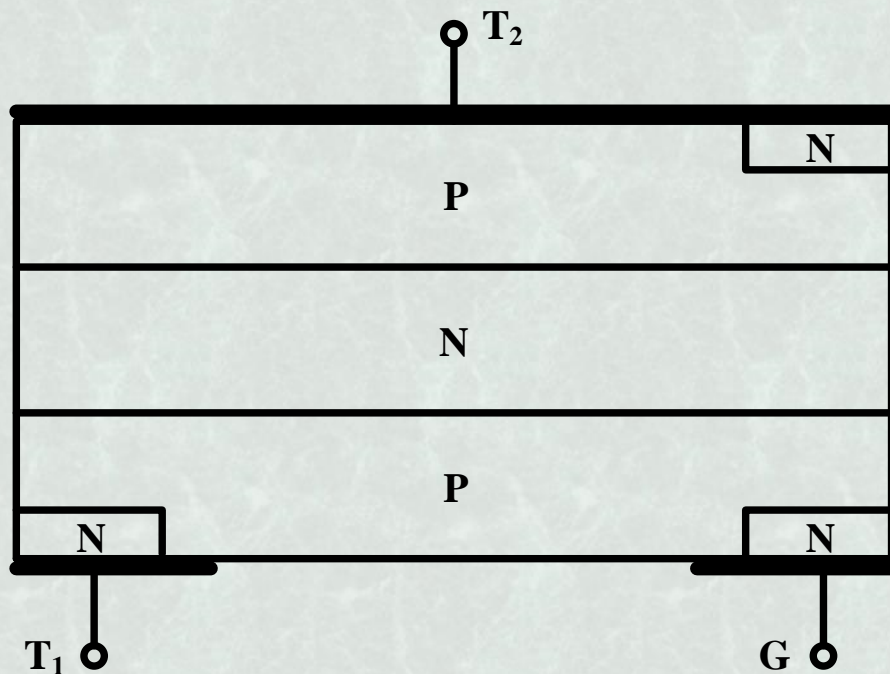


# TRIAC



# TRIAC

- Πρόκειται για ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος με τρεις ακροδέκτες το οποίο μπορεί να χειριστεί εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Μπορεί να θεωρηθεί ως δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ, δηλαδή η άνοδος του ενός συνδέεται με την κάθοδο του άλλου, με συνδεδεμένους τους ακροδέκτες πύλης.

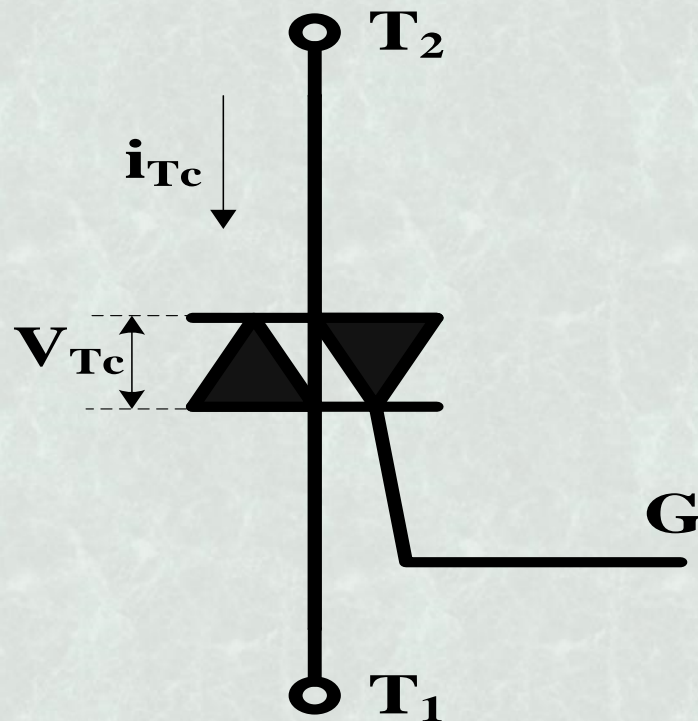


- Επιτρέπει τη ροή του ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις χωρίς διάκριση.
- Η αγωγή ή μη του ρεύματος ελέγχεται με σήμα στο ηλεκτρόδιο πύλης.

## *Δομή ενός Triac*

## □ Μειονεκτήματα:

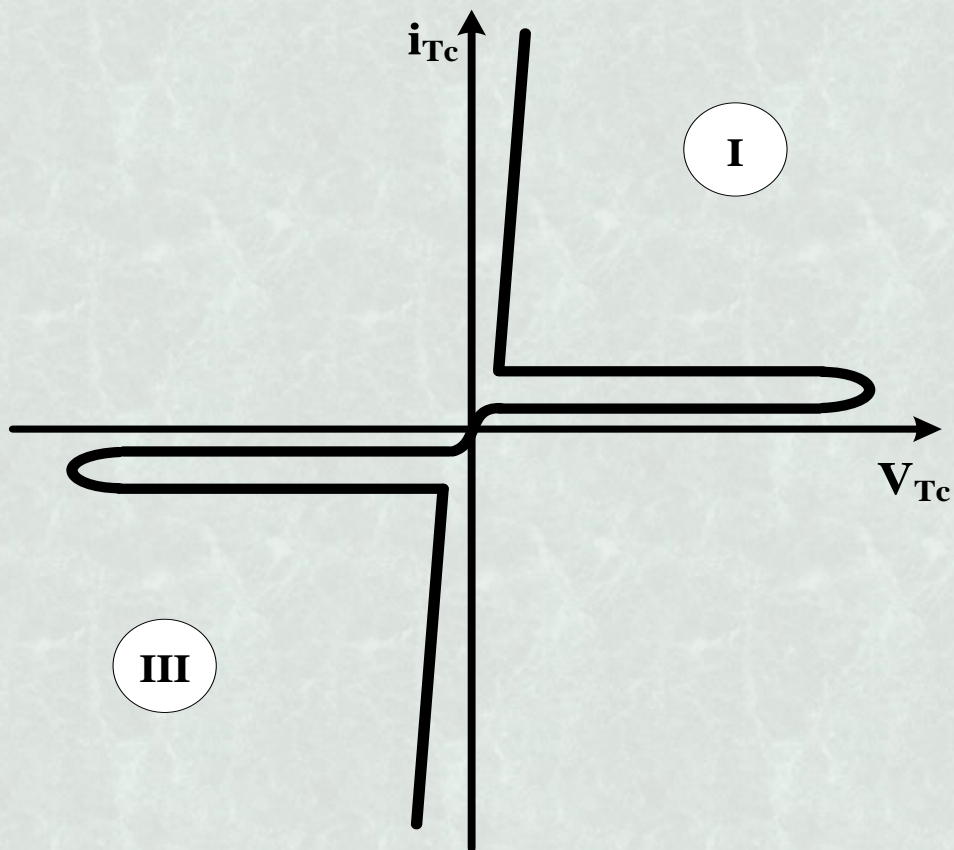
- ✎ χαμηλή ευαισθησία του ρεύματος πύλης
  - ✎ μεγαλύτεροι χρόνοι ανάστροφης ανάκτησης
  - ✎ χαμηλές τιμές σε επαναλαμβανόμενη μεταβολή τάσης  $du/dt$
- Η μέγιστη ισχύς που έχει τη δυνατότητα να διαχειρισθεί, φθάνει μέχρι αρκετές δεκάδες kW.
  - Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο φωτισμού, θερμοκρασίας και μικρών επαγωγικών κινητήρων.
  - Έχει χαμηλότερο κόστος από ένα ζευγάρι αντιπαράλληλων θυρίστορ του ίδιου επιπέδου ισχύος και ο έλεγχός του είναι απλούστερος.



*Κυκλωματικό σύμβολο  
ενός Triac*







- 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  $T_1$  είναι υψηλότερο και η έναυση επιτυγχάνεται με αρνητικό παλμό.

Τυπική στατική χαρακτηριστική  
ενός *Triac*

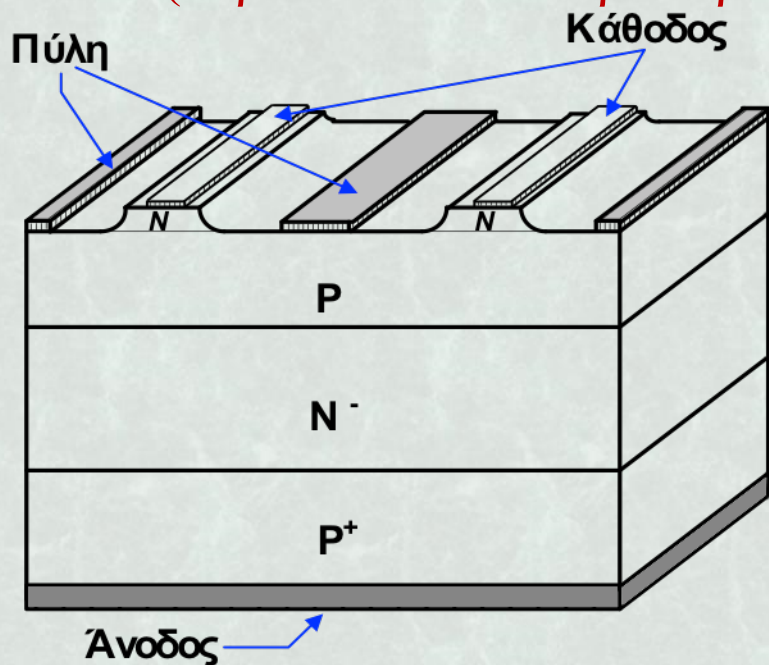


# GTO Thyristor



# GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ

- Το στοιχείο αυτό σκανδαλίζεται και έρχεται σε αγωγή με ένα μικρό θετικό παλμό στην πύλη του όπως όλα τα θυρίστορ.
- Για να τεθεί σε κατάσταση αποκοπής απαιτείται ένας αρνητικός παλμός στο ηλεκτρόδιο πύλης:
  - ✎ Χρειάζεται όμως αρκετά μεγάλο αρνητικό ρεύμα πύλης για να σβήσει (περίπου  $\frac{1}{4}$  του κύριου ρεύματος).



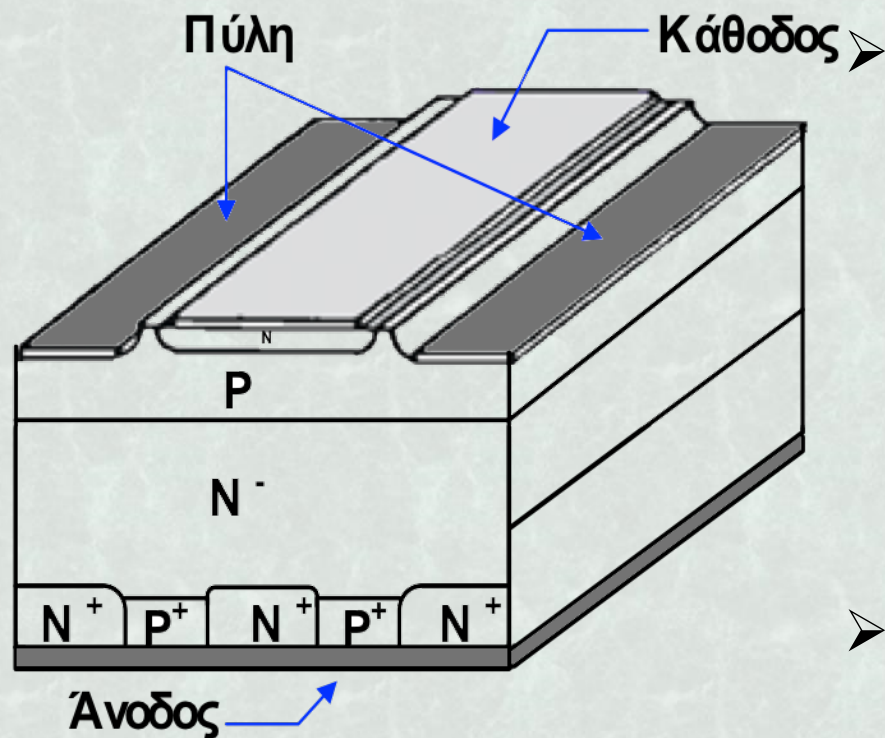
Απλουστευμένη δομή ενός GTO  
θυρίστορ

- Διατηρεί τη βασική δομή των τεσσάρων στρώσεων ενός θυρίστορ. Υπάρχουν όμως σημαντικές διαφορές όσον αφορά τη γεωμετρική μορφή των δομών πύλη-καθόδου.
- Αυξάνεται η περιφέρεια των περιοχών καθόδου και ελαχιστοποιείται η απόσταση της πύλης από το κέντρο των περιοχών καθόδου.



# GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ - Πολυπλοκότερη δομή

- Ο στόχος αυτής της πολύπλοκης δομής είναι διττός:
  - ❖ Η διακοπή του φαινομένου της θετικής ανατροφοδότησης
  - ❖ Η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μετάβασης, υψηλών τάσεων διάτρησης και η διευκόλυνση της σύνδεσης των περιοχών καθόδου.



*Πολυπλοκότερη δομή ενός GTO  
θυρίστορ*

➤ Ο χρόνος σβέσης σε ένα GTO θυρίστορ εξαρτάται από:

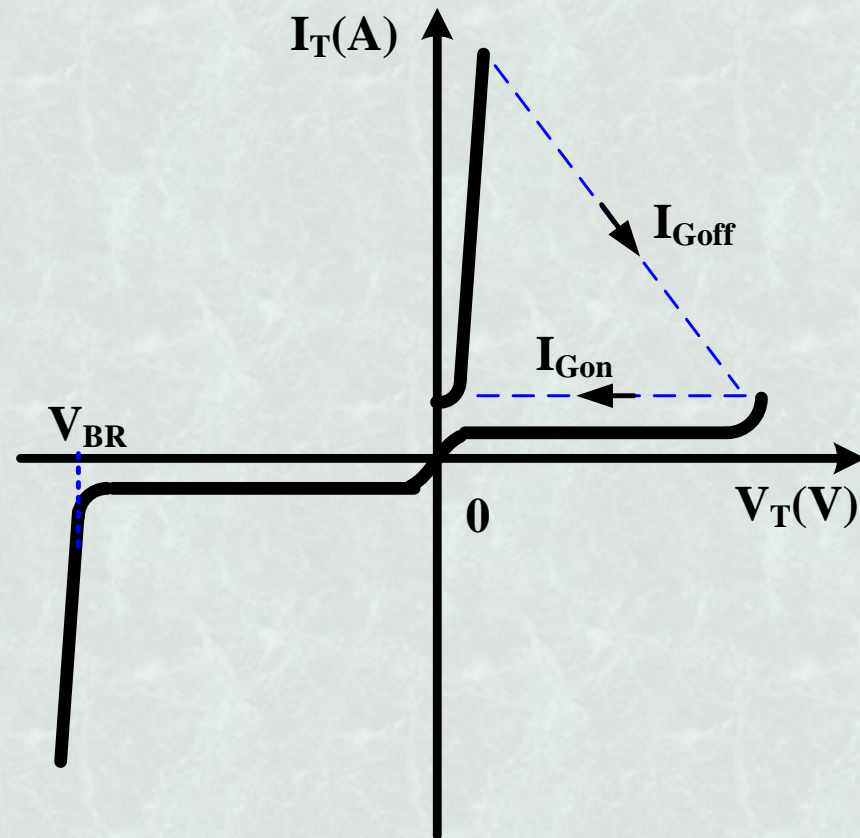
- ☞ το γεωμετρικό σχεδιασμό της περιοχής πύλης-καθόδου
- ☞ το σχεδιασμό της ανόδου
- ☞ τον έλεγχο του χρόνου ζωής των φορέων φορτίου στην περιοχή N-, που έχει σχετικά μεγάλο εύρος.

➤ Λόγω του σχεδιασμού της ανόδου τα GTO θυρίστορ αυτής της δομής, δεν αντέχουν ανάστροφες τάσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα ασύμμετρα θυρίστορ.



# GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ

- Κατά την ορθή πόλωση η χαρακτηριστική του GTO θυρίστορ είναι παρόμοια με αυτή ενός θυρίστορ.
- Τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος των GTO θυρίστορ βρίσκονται μεταξύ των συμβατικών θυρίστορ και των διπολικών τρανζίστορ ισχύος.
- Η ισχύς που μπορούν να διαχειρισθούν είναι μικρότερη από αυτή των θυρίστορ, αλλά μεγαλύτερη από αυτή των BJT.
- Οι χρόνοι μετάβασης, είναι μεγαλύτεροι από αυτούς των διπολικών τρανζίστορ ισχύος και μικρότεροι από αυτούς των συμβατικών θυρίστορ.

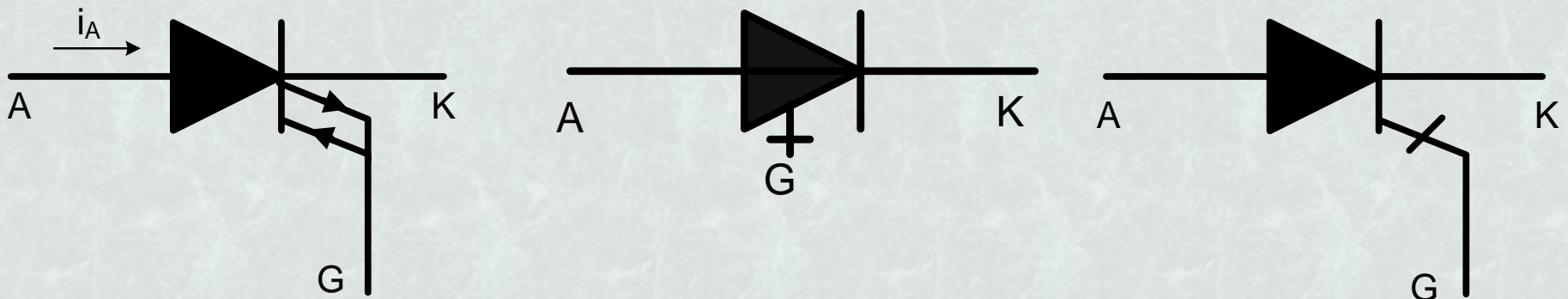


Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός GTO θυρίστορ



# GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ

- Η σβέση ενός GTO θυρίστορ είναι μια πολύπλοκη διεργασία:
  - ↳ *Απαιτείται η ύπαρξη βοηθητικών κυκλωμάτων υποβοήθησης της σβέσης.*
- Όπως και στο διπολικό τρανζίστορ ισχύος, το ρεύμα εμφανίζει μια “ουρά” (tailing current) κατά τη σβέση, με αποτέλεσμα την αύξηση των διακοπτικών απωλειών.
- Η συχνότητα λειτουργίας του περιορίζεται στα 2 kHz



*Κυκλωματικά σύμβολα ενός  
GTO θυρίστορ*



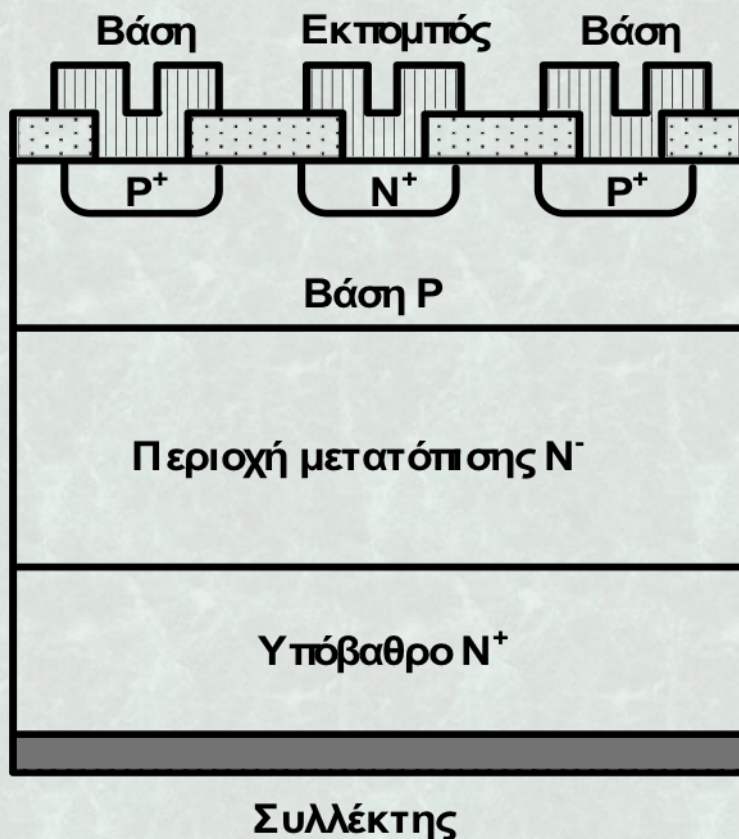


# Διπολικά Transistor (BJT)



# BJT 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 (δύο επαφών) και τριών ακροδεκτών.



- Το εύρος και η ειδική αντίσταση της ημιαγωγικής στρώσης  $N^-$ , που ονομάζεται και περιοχή μετατόπισης (*drift region*), καθορίζουν την τάση διάσπασης του τρανζίστορ σε ορθή πόλωση.
- Η δυνατότητα διαχείρισης ρεύματος στα διπολικά τρανζίστορ ισχύος μειώνεται όσο αυξάνεται η αντοχή σε τάση διάσπασης.



Δομή ενός (NPN) BJT Ισχύος



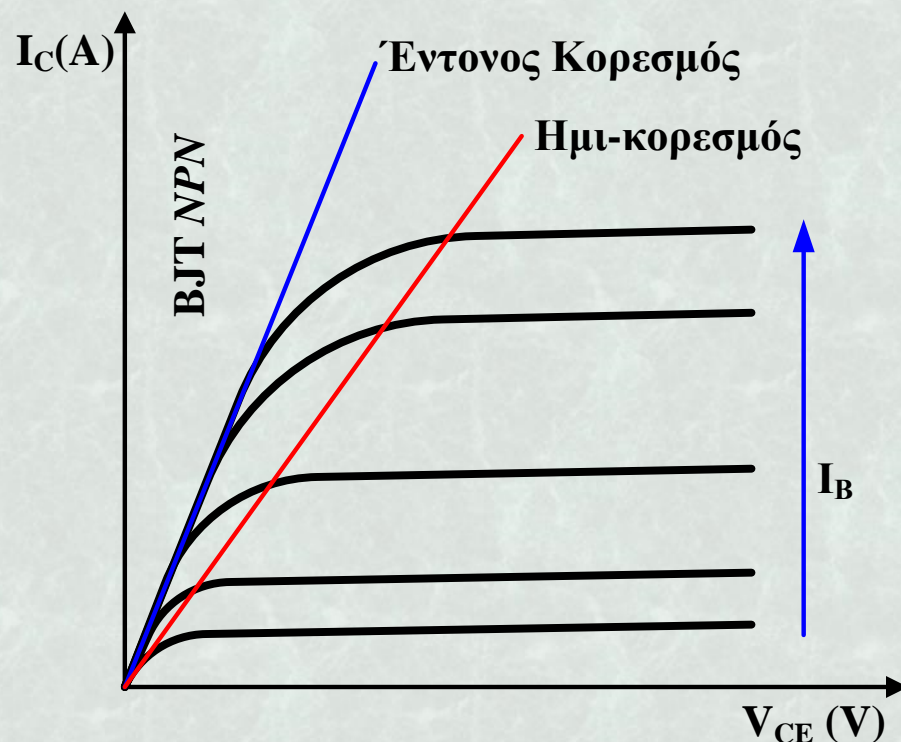
# BJT ΙΣΧΥΟΣ

➤ Είναι ασύμμετρο στοιχείο:

↳ Δεν έχει την ικανότητα αντοχής σε ανάστροφες τάσεις, λόγω του ποσοστού των προσμίξεων που είναι διαφορετικό σε κάθε ημιαγωγική περιοχή του στοιχείου.

➤ Η χρήση του σε μετατροπείς που τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση απαιτεί τη χρησιμοποίηση μιας διόδου σε σειρά με το ελεγχόμενο στοιχείο ισχύος.

➤ Η αγωγή του ρεύματος επιτυγχάνεται οδηγώντας ρεύμα στη βάση του. Η ενίσχυση ρεύματος ( $\beta = I_C / I_B$ ) στην περιοχή κόρου, μεταβάλλεται με το ρεύμα συλλέκτη και τη θερμοκρασία του πλακιδίου και καθορίζεται από την αποδοτικότητα έγχυσης του εκπομπού και τους συντελεστές μεταφοράς ελεύθερων φορέων φορτίου στη βάση.



Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός BJT Ισχύος





## □ Μειονεκτήματα:

- ✎ απαιτούνται σημαντικές τιμές ρευμάτων στο κύκλωμα οδήγησης κατά τη διάρκεια αγωγής
- ✎ εμφάνιση του φαινομένου της δεύτερης κατάρρευσης (*second breakdown effect*)
- ✎ πύκνωση του ρεύματος στην περιφέρεια της επαφής βάσης-εκπομπού (*emitter crowding effect*) κατά την αγωγή
- ✎ πύκνωση του ρεύματος στην επαφή του συλλέκτη κατά τη σβέση.

## □ Τα προαναφερθέντα φαινόμενα οδηγούν:

- ✎ *στην αύξηση του χρόνου σβέσης του στοιχείου*
- ✎ *στην αύξηση της πτώσης τάσης κατά την αγωγή*
- ✎ *και κυρίως στον περιορισμό της περιοχής ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας του.*

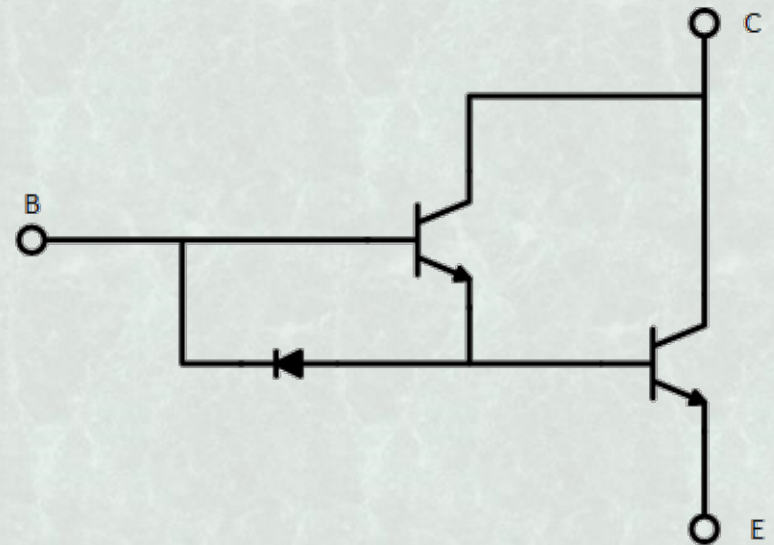
## □ Λύση στο πρώτο πρόβλημα αποτελεί η χρήση της συνδεσμολογίας *Darlington*.

## □ Τα υπόλοιπα προβλήματα αντιμετωπίζονται με πολυπλοκότερο σχεδιασμό της δομής των διπολικών τρανζίστορ ισχύος.

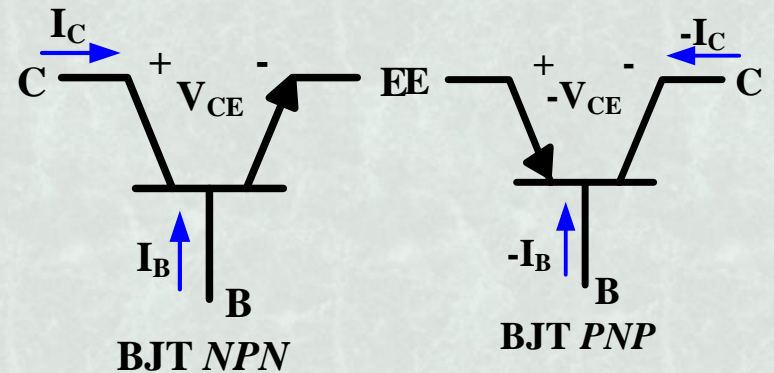


# BJT ΙΣΧΥΟΣ

- Η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία των BJT ισχύος απαιτεί τη χρήση κυκλωμάτων υποβοήθησης της σβέσης και προστασίας από υπερτάσεις, με αποτέλεσμα την αύξηση των διαστάσεων και του βάρους της διάταξης.
- Έχει πολύ χαμηλότερους χρόνους σβέσης από τα θυρίστορ, διότι παρέχεται η δυνατότητα σβέσης με έναν αρνητικό παλμό στο ηλεκτρόδιο πύλης
- Η χρήση του, σε μετατροπείς που τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση, απαιτεί τη χρησιμοποίηση μιας διόδου σε σειρά με το ελεγχόμενο στοιχείο ισχύος.



## *Συνδεσμολογία Darlington*



## *Κυκλωματικά σύμβολα ενός BJT Ισχύος*



# ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ BJT ΙΣΧΥΟΣ

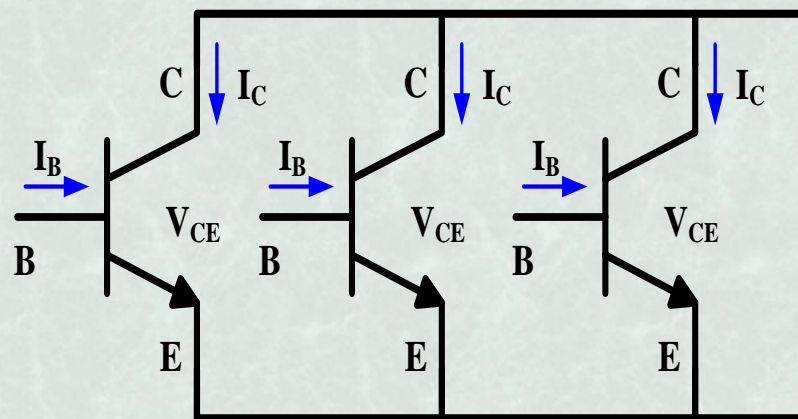
➤ Παράλληλισμός BJT για τη διαχείριση υψηλότερων τιμών ρεύματος και μεγαλύτερης ισχύος.

➤ Στόχος: ισοκατανομή ρευμάτων σε στατικές και δυναμικές καταστάσεις:

✎ ταίριασμα ορισμένων παραμέτρων των στοιχείων

✎ χρήση κυκλωματικής υποβοήθησης

*Παράλληλισμός BJT Ισχύος*



➤ Τα BJT Ισχύος έχουν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας:

✎ κίνδυνος απώλειας ελέγχου (*thermal run-away condition*)

✎ κίνδυνος έντονης ανισοκατανομής των ρευμάτων.

➤ Πρακτική επίλυση του προβλήματος:

✎ Χρήση μικρών αντιστάσεων σε σειρά με κάθε τρανζίστορ για τις στατικές καταστάσεις.

✎ Χρήση μικρών επαγωγών σε σειρά με κάθε τρανζίστορ για τις δυναμικές καταστάσεις.





# Απώλειες στα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος



# ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

- Επιλογή ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος με βάση:
  - ❖ Τη μέση ή/και την ενεργό τιμή του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο.
  - ❖ Τη μέγιστη στιγμιαία τιμή της τάσης η οποία εμφανίζεται στους ακροδέκτες του στοιχείου.
- **Στόχος:** η μείωση των συνολικών απωλειών, ώστε η θερμοκρασία επαφής (εσωτερική θερμοκρασία) του στοιχείου να διατηρείται κάτω από μία οριακή τιμή.

$$T_j = T_{amb} + P_{loss} \cdot R_{th}$$

$$P_{loss} = P_{cond} + P_{sw}$$

$$P_{cond} = V_{on} \cdot I_{AVG} + R_{on} \cdot I_{RMS}^2$$

- Για τον υπολογισμό των **απωλειών αγωγής** θεωρούμε ότι το ισοδύναμο κύκλωμα ενός στοιχείου που άγει είναι μια πηγή τάσης και μία αντίσταση σε σειρά.





# ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

- Διακοπτικές απώλειες: αιχμή ισχύος (απωλειών) λόγω ταυτόχρονης ύπαρξης υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος στο στοιχείο, τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση αυτού.
- Οι διακοπτικές απώλειες εξαρτώνται:
  - ☞ από τη συχνότητα λειτουργίας (έναυσης και σβέσης) του στοιχείου
  - ☞ από τους χρόνους έναυσης και σβέσης του στοιχείου
  - ☞ από τις μέγιστες τιμές της τάσης και του ρεύματος, που εμφανίζονται κατά την έναυση και τη σβέση του στοιχείου.
- Οι διακοπτικές απώλειες περιορίζουν το ανώτατο όριο στο οποίο μπορεί να φθάσει η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας ενός μετατροπέα.
- Κατανάλωση στο κύκλωμα ελέγχου ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος:
  - ☞ έλεγχος από ρεύμα
  - ☞ έλεγχος από τάση



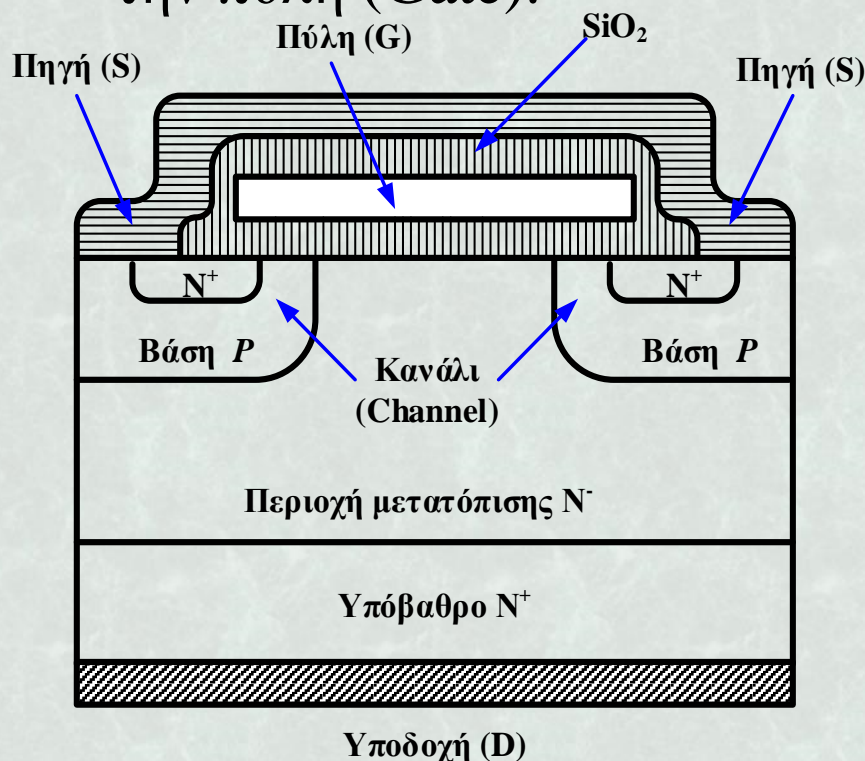


# MOSFET Ισχύος



# MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

- Το MOSFET (τρανζίστορ μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού με επίδραση πεδίου, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) είναι ένα ελεγχόμενο από τάση ημιαγωγικό στοιχείο τριών ακροδεκτών. Την υποδοχή (Drain), την πηγή (Source) και την πύλη (Gate).



- Η πύλη του, απομονώνεται από το αγώγιμο κανάλι με μονωτικό διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) και ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ υποδοχής και πηγής.

- Τα MOSFET πύκνωσης με κανάλι τύπου-N, χρησιμοποιούνται ευρύτερα λόγω του ότι οι τιμές ευκινησίας των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερες από αυτές των οπών.

Δομή ενός MOSFET ισχύος με κανάλι τύπου-N



# MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

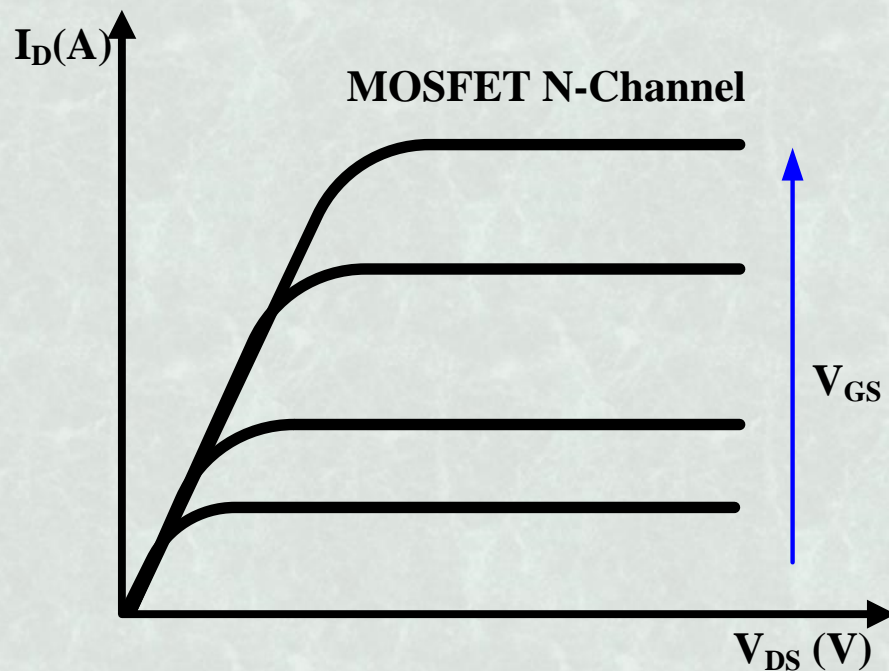
- Ανάπτυξη δομών **κατακόρυφης αγωγής ρεύματος:**

- ↳ υψηλότερες τιμές τάσης διάσπασης
- ↳ υψηλότερες τιμές ονομαστικών ρευμάτων διέλευσης.

- Γεωμετρικά η υποδοχή βρίσκεται στην απέναντι πλευρά από αυτήν που είναι η πηγή και η πύλη.

- Η δομή ενός MOSFET ισχύος κατασκευάζεται εκκινώντας από μια περιοχή υψηλής νόθευσης  $N^+$  (το λεγόμενο υπόβαθρο ή υπόστρωμα), επί της οποίας αναπτύσσεται, με διαδικασία επίταξης, μια περιοχή χαμηλής νόθευσης  $N^-$ . Αυτή η περιοχή ονομάζεται “**περιοχή μετατόπισης**”.

- Το πάχος της περιοχής μετατόπισης καθορίζει την τάση διάσπασης σε ορθή πόλωση.



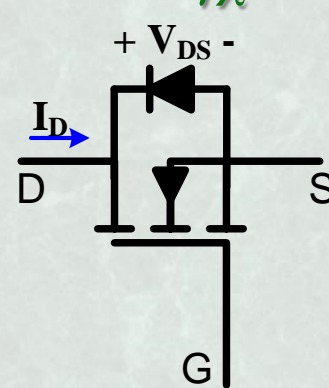
*Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός MOSFET Ισχύος*



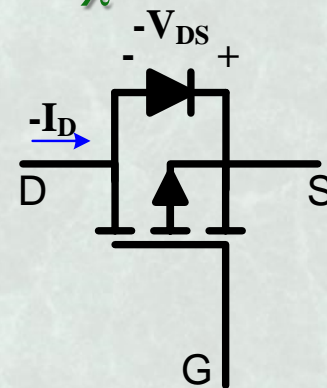
# MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

- Η δομή που επικρατεί σήμερα είναι η *Vertical Double-Diffused MOS (VDMOS)*. Η διαδικασία της διπλής διάχυσης επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του μήκους του καναλιού, γεγονός που καθορίζει το ρεύμα διέλευσης, καθώς το μήκος του καναλιού και το ονομαστικό ρεύμα διέλευσης είναι μεγέθη **αντιστρόφως ανάλογα**.
- Για να επιτευχθεί υψηλό ρεύμα διέλευσης, το MOSFET ισχύος αποτελείται από πολλές “κυψέλες”, τοποθετημένες παράλληλα.
- Η πύλη του ενός MOSFET Ισχύος συμπεριφέρεται ως πυκνωτής, δηλαδή παρουσιάζει υψηλή εμπέδηση εισόδου.
- ↳ Η ισχύς που απαιτείται για τον έλεγχο του στοιχείου είναι εξαιρετικά χαμηλή.

*Κυκλωματικά σύμβολα ενός  
MOSFET Ισχύος*



MOSFET N-Channel



MOSFET P-Channel

# MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

- Στο MOSFET ισχύος η ροή του ρεύματος οφείλεται στη ροή φορέων πλειονότητας.
- Οι χρόνοι καθυστέρησης και μετάβασης από την αποκοπή στην αγωγή και τανάπαλιν είναι αρκετά χαμηλοί και δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία:
  - ↪ *οι συχνότητες λειτουργίας του είναι εξαιρετικά υψηλές.*
- Η τάση διάσπασης  $V_{BR}$  είναι αρκετά υψηλή και η αντίσταση αγωγής καθορίζεται κυρίως από τις ιδιότητες της περιοχής μετατόπισης  $N^-$ , δηλαδή το εύρος της και το ποσοστό προσμίξεων:
  - ↪ Η αντίσταση αγωγής μεταβάλλεται σύμφωνα με την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:  $R_{DSon} = k_r V_{BR}^{2,5-2,7}$
- Για χαμηλές τάσεις διάσπασης, η αντίσταση αγωγής καθορίζεται από την αντίσταση του καναλιού.
- Η αντίσταση αγωγής αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του πλακιδίου (θετικός θερμοκρασιακός συντελεστής):
  - ↪ *τούτο καθιστά αρκετά εύκολο τον παραλληλισμό τους.*





# MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

- Λόγω του θετικού συντελεστή θερμοκρασίας, το φαινόμενο της δεύτερης κατάρρευσης είναι αμελητέο στα MOSFET ισχύος.
- Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας του (*Safe Operating Area, SOA*) καθορίζεται μόνο από τα όρια θερμοκρασιακής αντοχής του.
- Η μέγιστη τιμή των απωλειών ισχύος μπορεί να λάβει αρκετά υψηλή τιμή, ανάλογα με το λόγο κατάτμησης.
- *Το MOSFET ισχύος έχει εσωτερικά μια diode*, η οποία εμφανίζεται μεταξύ πηγής και υποδοχής, με αποτέλεσμα να μην έχει τη δυνατότητα συγκράτησης ανάστροφων τάσεων.
- Η diode αυτή αποδεικνύεται επωφελής για διατάξεις όπως οι αντιστροφείς, στους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιπαράλληλη diode.





# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

Λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας τους, τα MOSFET Ισχύος χρησιμοποιούνται:

- ☞ σε εφαρμογές σχετιζόμενες με τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών
- ☞ σε διακοπτικά τροφοδοτικά
- ☞ για έλεγχο κινητήρων Brushless
- ☞ σε ηλεκτρονικά Ballast για λαμπτήρες φθορισμού
- ☞ σε μικρές συσκευές επαγωγικής θέρμανσης και ηλεκτροσυγκόλλησης
- ☞ σε ηλεκτρονικές διατάξεις αυτοκινήτων
- ☞ σε διάφορες φορητές συσκευές, κλπ.



# IGBT



# IGBT

➤ Το διπολικό τρανζίστορ ισχύος με απομονωμένη πύλη (*Insulated Gate Bipolar Transistor, *IGBT*), συνδυάζει τα χαρακτηριστικά ενός MOSFET και ενός BJT Ισχύος.*

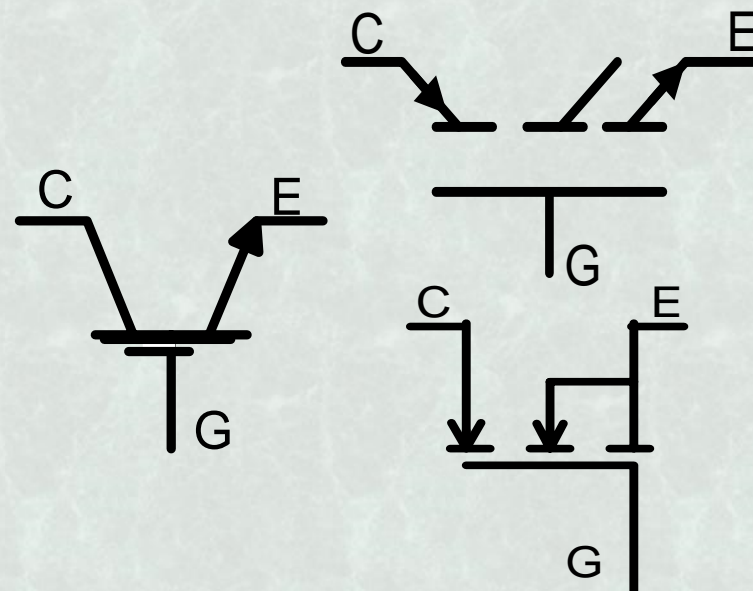
Έχει τρεις ακροδέκτες:

- ☞ το συλλέκτη (*collector*)
- ☞ τον εκπομπό (*emitter*)
- ☞ και την πύλη (*gate*)

➤ Η δομή του είναι παρόμοια με αυτή του MOSFET ισχύος:

➤ **Διαφορά στη δομή:** η περιοχή του υποστρώματος  $N^+$ , που έρχεται σε επαφή με τον ακροδέκτη του συλλέκτη, έχει αντικατασταθεί από μια στρώση  $P^+$ .

➤ Παρουσιάζει υψηλή εμπέδηση εισόδου, όπως το MOSFET ισχύος, αλλά τα χαρακτηριστικά αγωγής του μοιάζουν με αυτά ενός BJT ισχύος.



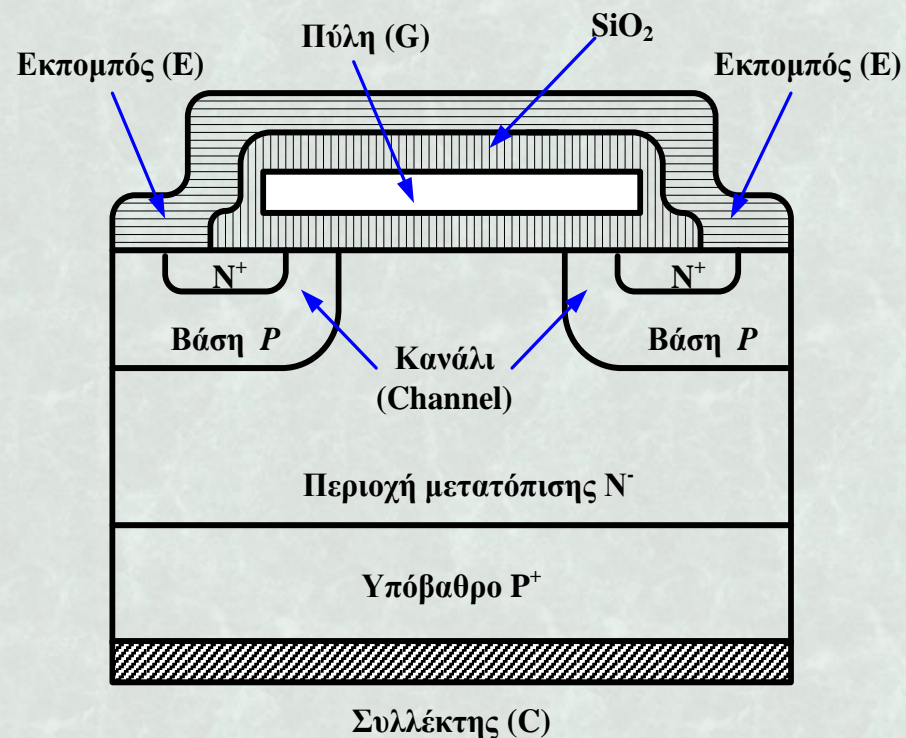
Κυκλωματικά σύμβολα ενός *MOSFET* Ισχύος





# IGBT

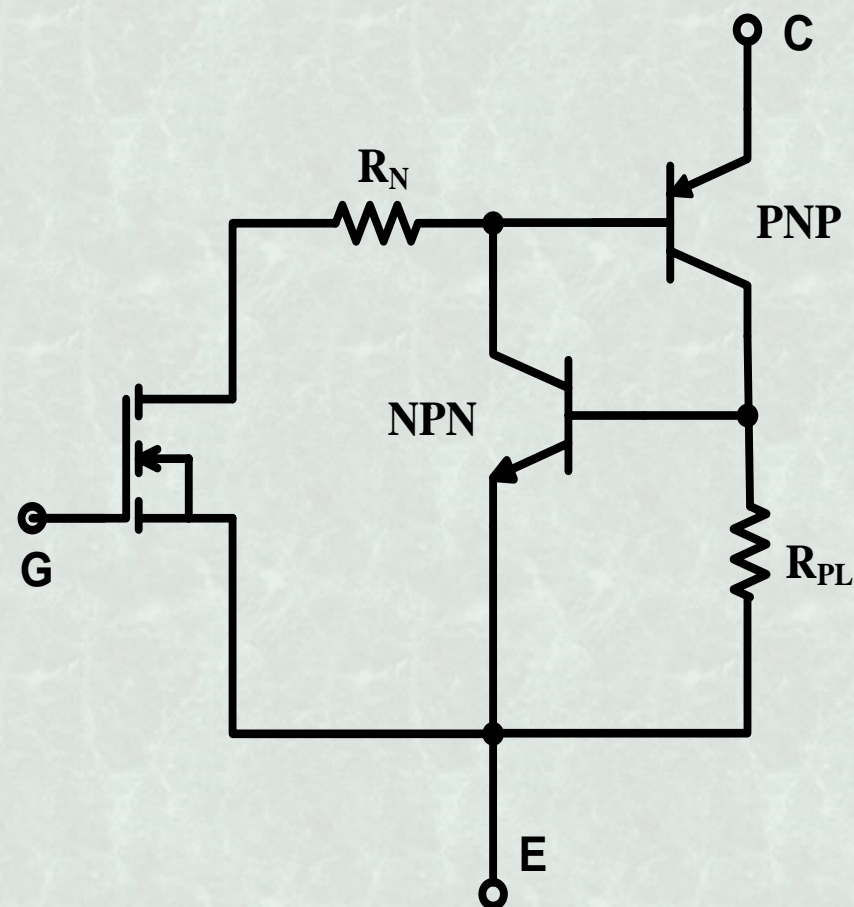
- Όταν η πύλη πολωθεί θετικά σε σχέση με τον εκπομπό, επάγεται ένα κανάλι τύπου-N στην επιφάνεια της περιοχής βάσης.
- Το κανάλι αυτό πολώνει ορθά την επαφή βάσης-εκπομπού του PNP τρανζίστορ και το καθιστά αγώγιμο.
- Δημιουργείται λοιπόν μια σύνδεση μεταξύ της περιοχής του εκπομπού  $N^+$  και της περιοχής μετατόπισης  $N^-$  όπως και στα MOSFET ισχύος.
- Η θετική πόλωση του συλλέκτη προκαλεί έγχυση μεγάλου αριθμού φορέων μειονότητας από την περιοχή του υποστρώματος  $P^+$  προς την περιοχή μετατόπισης  $N^-$ , διαμορφώνοντας την αγωγιμότητά της.
- Η πτώση τάσης κατά την αγωγή είναι πολύ μικρότερη από αυτή ενός MOSFET ισχύος.



*Δομή ενός IGBT*

# IGBT

- Η αντικατάσταση του υποστρώματος  $N^+$ , ενός MOSFET ισχύος, από μια στρώση  $P^+$ , οδηγεί σε μια δομή τεσσάρων στρώσεων  $P^+NPN^+$ , παρόμοια με αυτή ενός θυρίστορ.
- Όταν το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_{PL}$  ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, προκαλείται σκανδαλισμός του θυρίστορ, οπότε δημιουργείται μια μόνιμη αγωγή ρεύματος μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού του στοιχείου και χάνεται ο έλεγχος του από την πύλη.
- Η  $R_{PL}$  εκφράζει την εγκάρσια αντίσταση της περιοχής βάσης P.



*Ισοδύναμο κύκλωμα ενός IGBT*



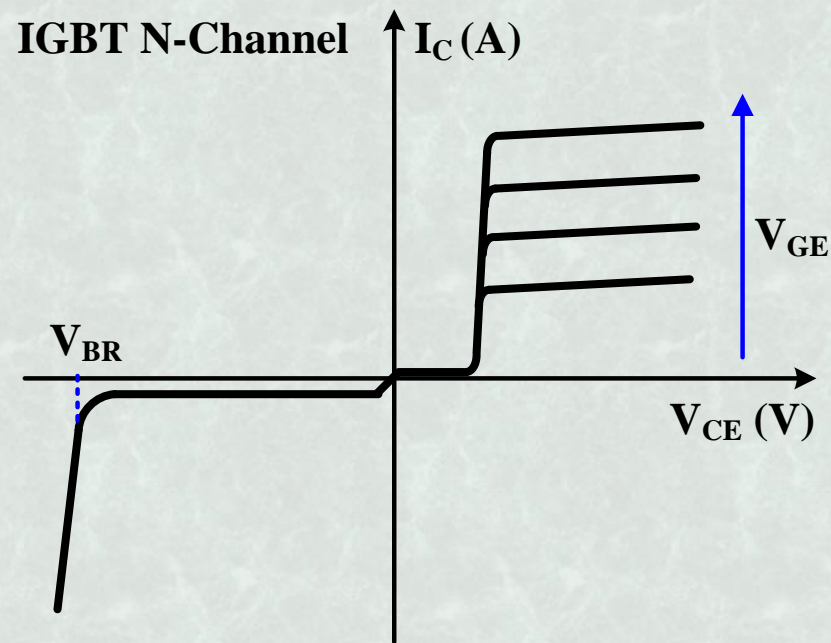
- Η απενεργοποίηση του προαναφερθέντος θυρίστορ μπορεί να επιτευχθεί ως εξής:
  - ☞ με μείωση του μεγέθους του εκπομπού
  - ☞ με τη μεταβολή της γεωμετρικής μορφής και δομής της περιοχής του εκπομπού και την εφαρμογή πολυπλοκότερων γεωμετρικών μορφών
  - ☞ με την εισαγωγή μιας περιοχής υψηλής νόθευσης  $P^+$ , στο κέντρο κάθε κυψέλης MOSFET, ώστε να μειωθεί η εγκάρσια αντίσταση της περιοχής βάσης P.
- Η επικάλυψη της επιφάνειας της περιοχής βάσης P με την επιμετάλλωση του εκπομπού συνεισφέρει στο σκοπό αυτό.
- Επειδή το IGBT έχει ουσιαστικά τέσσερις ημιαγωγικές στρώσεις είναι ικανό να αποκόπτει συμμετρικά τόσο θετικές όσο και αρνητικές τάσεις (**συμμετρικά IGBT**).
- Η εισαγωγή μιας στρώσης υψηλής νόθευσης  $N^+$ , μεταξύ υποστρώματος  $P^+$  και της περιοχής μετατόπισης  $N^-$ , μειώνει την ικανότητα αποκοπής ανάστροφης τάσης (**ασύμμετρα IGBT**).





# IGBT

- Η ροή ρεύματος οφείλεται στη ροή φορέων μειονότητας, οι οποίοι, κατά τη σβέση, επανασυνδέονται εντός της περιοχής μετατόπισης.
- Οι χρόνοι μετάβασης είναι μεγαλύτεροι από αυτούς των MOSFET ισχύος.
- Κατά τη σβέση παρατηρείται στην κυματομορφή του ρεύματος μια “ουρά”, παρόμοια με αυτή των BJT ισχύος.
- Σημαντική μείωση του χρόνου σβέσης επιτυγχάνεται ως εξής:
  - ☞ με χρήση ειδικών τεχνικών ελέγχου του χρόνου ζωής των φορέων μειονότητας κατά τη διαδικασία κατασκευής του στοιχείου
  - ☞ με εισαγωγή μιας στρώσης υψηλής νόθευσης  $N^+$ , μεταξύ του υποστρώματος  $P^+$  και της περιοχής μετατόπισης  $N^-$ .



*Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός IGBT*

- Η αντίσταση αγωγής των IGBT μεταβάλλεται αργά με την τάση διάσπασης (λόγω της διαμόρφωσης της περιοχής μετατόπισης), οπότε δίνεται η δυνατότητα κατασκευής τέτοιων στοιχείων ισχύος με υψηλές αντοχές σε τάση.
- Για τιμές ρευμάτων που δεν απέχουν πολύ από τις ονομαστικές τιμές, η πτώση τάσης σε κατάσταση αγωγής αυξάνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία του πλακιδίου:
  - ↳ Έτσι ο παραλληλισμός των IGBT πραγματοποιείται χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.
- Για τιμές ρευμάτων που είναι πολύ μικρότερες από το ονομαστικό ρεύμα, η πτώση τάσης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.
- Ο πυκνωτής εισόδου των IGBT και ο λόγος των τιμών του πυκνωτή πύλης-εκπομπού προς τον πυκνωτή πύλης-συλλέκτη έχουν τιμές χαμηλότερες από αυτές των MOSFET ισχύος, με αποτέλεσμα το φαινόμενο Miller να μην είναι τόσο έντονο στα στοιχεία αυτά.



# IGBT

- Τα IGBT δεν εμφανίζουν το φαινόμενο δεύτερης κατάρρευσης και η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των MOSFET ισχύος.
- Σε σχέση με τα BJT και τα MOSFET ισχύος, το IGBT προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές μέσης ισχύος και μέσης συχνότητας.

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ IGBT

Τα IGBT μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- ☞ ως διακόπτες ισχύος
- ☞ ως γραμμικοί ενισχυτές

Συνήθεις εφαρμογές τους είναι οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή και οι αντιστροφείς.





# SIT ή JFET Ισχύος



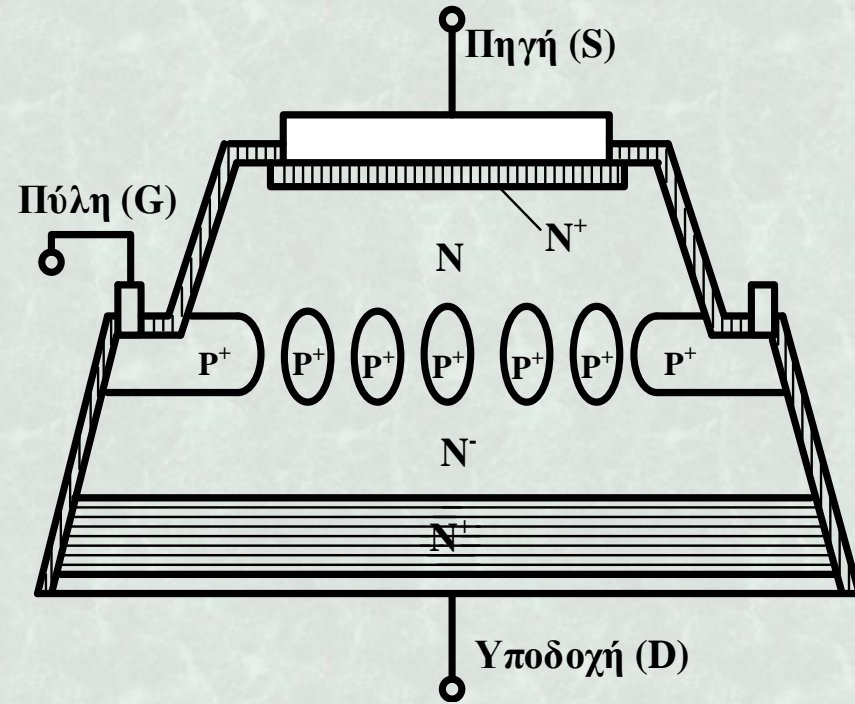
# SIT ή JFET ΙΣΧΥΟΣ

➤ Το τρανζίστορ στατικής επαγωγής (Static Induction Transistor, SIT) ονομάζεται επίσης και τρανζίστορ ισχύος επαφής με επίδραση πεδίου (power Junction Field Effect Transistor, power JFET), ενίοτε δε και δίοδος ελεγχόμενη από το πεδίο (Field Controlled Diode, FCD).

➤ Υπάρχουν SIT με κανάλι τύπου-N, που είναι πιο διαδεδομένα και SIT με κανάλι τύπου-P.

➤ Το SIT με κανάλι τύπου-N είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος με κατακόρυφη ροή ρεύματος:

❖ τα ηλεκτρόδια πύλης τύπου-P<sup>+</sup> είναι τοποθετημένα ανάμεσα από τις επιταξιακές στρώσεις τύπου-N<sup>+</sup> της υποδοχής και της πηγής.



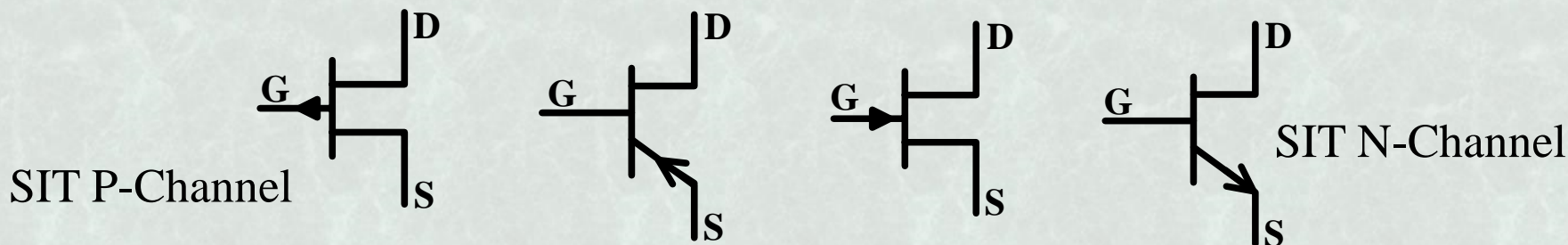
Δομή ενός SIT (JFET Ισχύος)





# SIT ή JFET ΙΣΧΥΟΣ

- Το εύρος του καναλιού είναι στενό.
- Η ροή του ρεύματος ελέγχεται από ένα φράγμα δυναμικού, το οποίο επάγεται ηλεκτροστατικά στην στρώση τύπου-N μεταξύ των περιοχών της πύλης  $P^+$ .
- Το ημιαγωγικό στοιχείο SIT είναι σε αγωγή όταν η εφαρμοζόμενη μεταξύ πύλης και πηγής τάση είναι μηδενική.
- Όταν η τάση πύλης-πηγής γίνει αρνητική, η περιοχή αραίωσης της ανάστροφα πολωμένης επαφής  $P^+N$  εμποδίζει τη ροή του ρεύματος μεταξύ υποδοχής και πηγής.
- Σε ακόμα μεγαλύτερες αρνητικές τάσεις το κανάλι αποκόπτει τελείως τη ροή του ρεύματος.

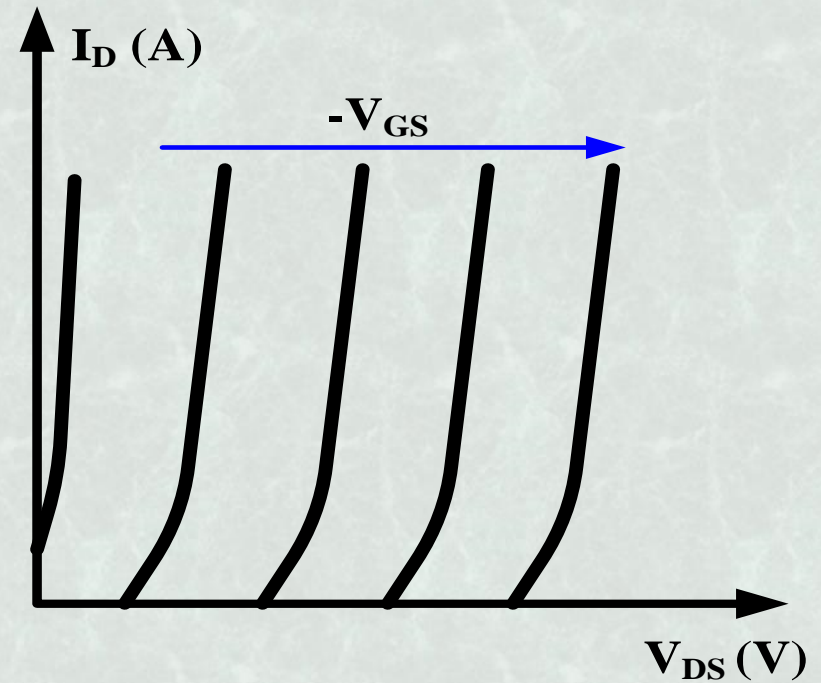


*Κυκλωματικά σύμβολα ενός SIT (JFET Ισχύος)*



# SIT ή JFET ΙΣΧΥΟΣ

- Η επίδραση του στενού καναλιού στις χαρακτηριστικές λειτουργίας του SIT έχει ως αποτέλεσμα να είναι εκθετική η σχέση μεταξύ ρεύματος, που διαρρέει το στοιχείο και τάσης υποδοχής-πηγής.
- Οι χαρακτηριστικές του το καθιστούν κατάλληλο για λειτουργία τόσο ως διακόπτης όσο και ως γραμμικός ενισχυτής.
- Η λειτουργία του βασίζεται στη ροή φορέων πλειονότητας, με αποτέλεσμα να έχει μικρούς χρόνους μετάβασης και να μπορεί να λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες.
- Η περιοχή αξιόπιστης λειτουργίας του εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του πλακιδίου και δεν εμφανίζει το φαινόμενο της δεύτερης κατάρρευσης.



*Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός SIT (JFET Ισχύος)*



# SIT ή JFET ΙΣΧΥΟΣ

- Ο παραλληλισμός των στοιχείων αυτών είναι εύκολος, λόγω του θετικού συντελεστή θερμοκρασίας που έχει η αντίσταση αγωγής τους.
- Μπορούν να διαχειριστούν υψηλές τιμές ισχύος και παρουσιάζουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τα MOSFET ισχύος.

## ❑ Μειονεκτήματα:

- 👉 υψηλές πτώσεις τάσης κατά την αγωγή
- 👉 το γεγονός ότι το ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος SIT είναι σε αγωγή σε κατάσταση ηρεμίας, μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα κατά την εκκίνηση των διαφόρων μετατροπών
- 👉 παρουσιάζει υψηλή αντίσταση αγωγής

## ❑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ SIT:

- 👉 μεταδότες AM /FM
- 👉 συσκευές επαγωγικής θέρμανσης
- 👉 τροφοδοτικά υψηλής τάσης και χαμηλού ρεύματος
- 👉 γραμμικούς ενισχυτές ισχύος





# SITh ή FCT



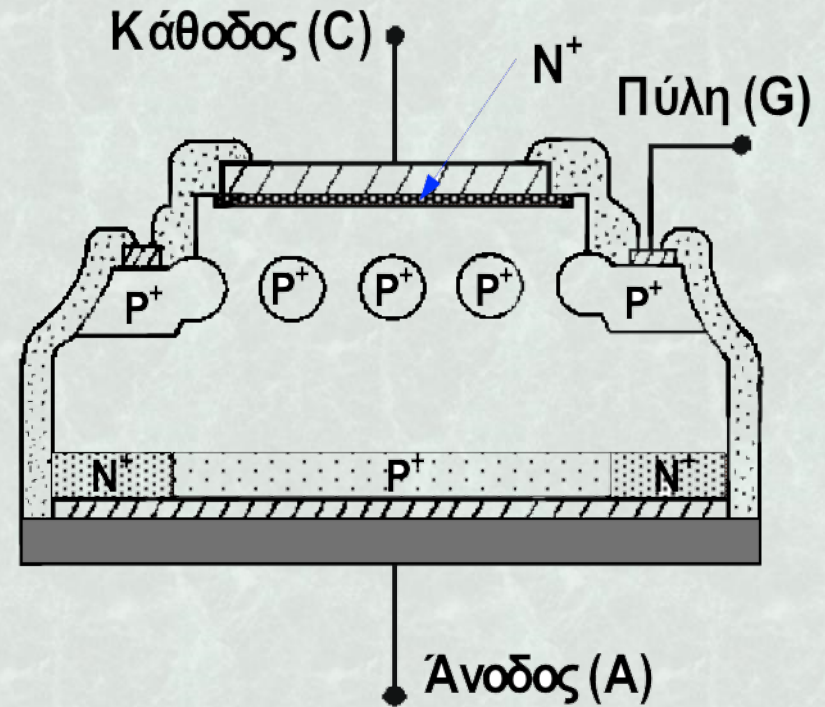


# SITh ή FCT

➤ Το θυρίστορ στατικής επαγωγής (Static Induction Thyristor, SITh) ονομάζεται επίσης και θυρίστορ ελεγχόμενο από το πεδίο (Field Controlled Thyristor, FCT).

➤ Η δομή του είναι παρόμοια με αυτή του SIT, με τη διαφορά ότι προστίθεται μια επιπλέον στρώση P<sup>+</sup>, μεταξύ της περιοχής N<sup>+</sup> και του ακροδέκτη υποδοχής του στοιχείου αυτού.

➤ Πρόκειται για μια δομή P<sup>+</sup>NN<sup>+</sup>, όμοια με αυτή μιας διόδου, στην οποία η ροή του ρεύματος ελέγχεται από μια πύλη τύπου P<sup>+</sup>, που έχει μορφή πλέγματος τοποθετημένου εντός της περιοχής N.

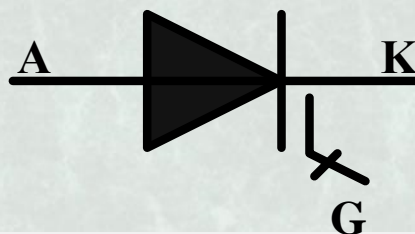
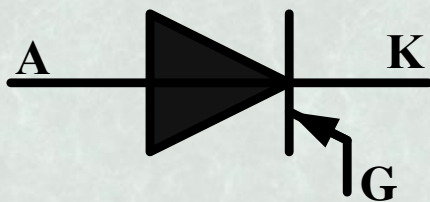


*Δομή ενός SITh (FCT)*



# SITh ή FCT

- Για τη μείωση των χρόνων μετάβασης χρησιμοποιείται στην άνοδο μια δομή παρόμοια με αυτή του GTO θυρίστορ, στην οποία ημιαγωγικές περιοχές  $N^+$  τοποθετούνται εντός της περιοχής ανόδου  $P^+$  (*anode shorts*):
  - ☞ Στην περίπτωση αυτή το SITh δεν έχει την ικανότητα ν' αντέξει υψηλές ανάστροφες τάσεις (**ασύμμετρα SITh**).
- Το SITh, όπως και το SIT, σε ηρεμία ( $V_{GK}=0$ ) είναι σε αγωγή.
- Αν το SITh πολωθεί ορθά ( $V_{AK}>0$ ), η περιοχή  $P^+$  προκαλεί έγχυση οπών στην περιοχή  $N^-$ , με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται η αγωγιμότητα της περιοχής αυτής και να υπάρχει ροή ρεύματος μεταξύ ανόδου και καθόδου:
  - ☞ οπότε το στοιχείο συμπεριφέρεται ως μια δίοδος.
- Αν η τάση πύλης-καθόδου γίνει αρνητική, τότε η σχηματιζόμενη στρώση αραίωσης (*depletion layer*) εμποδίζει τη ροή του ρεύματος, αποκόπτοντας την εάν γίνει αρκετά αρνητική.



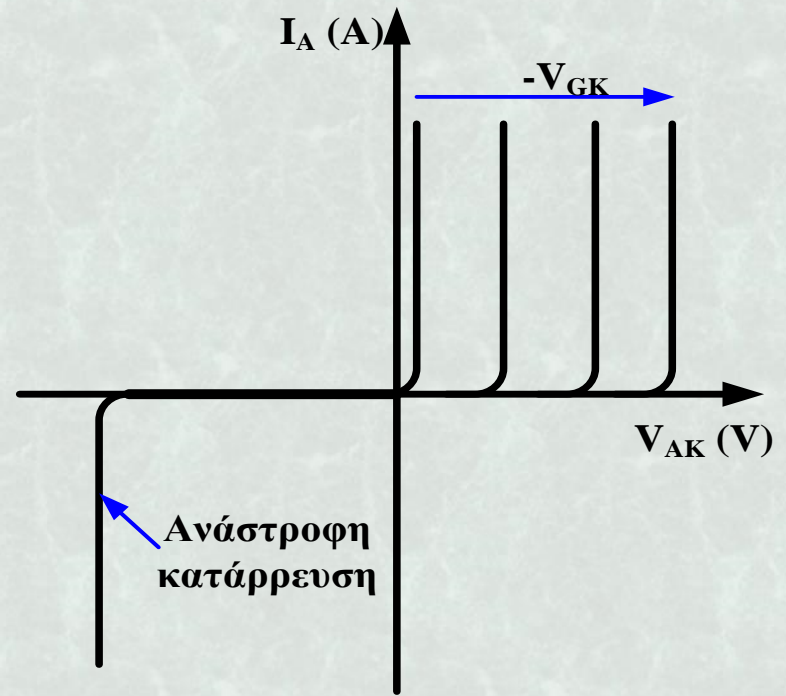
Κυκλωματικά σύμβολα  
ενός SITh (FCT)





# SITh ή FCT

- Οι χαρακτηριστικές λειτουργίας του, μοιάζουν περισσότερο με αυτές του SIT παρά με αυτές ενός θυρίστορ που σκανδαλίζεται από έναν παλμό έναυσης.
- Η διακοπτική του συμπεριφορά και οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης κατά την έναυση και τη σβέση του μοιάζουν με αυτές ενός GTO θυρίστορ.
- Για να σβήσει το στοιχείο απαιτείται ένα υψηλό αρνητικό ρεύμα στην πύλη.
- Το κύριο ρεύμα, που το διαρρέει, παρουσιάζει μια “ουρά” οφειλόμενη στην επανασύνδεση των φορέων μειονότητας.
- Η επίτευξη υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας πραγματοποιείται με διάχυση προσμίξεων πλατίνας, επιφέροντας όμως αύξηση της πτώσης τάσης κατά την αγωγή.



*Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός SITh (FCT Ισχύος)*





# SITh ή FCT

## □ Σύγκριση του SITh με το GTO θυρίστορ:

- ☞ σε αντίθεση με το GTO θυρίστορ, σε κατάσταση ηρεμίας είναι σε αγωγή
- ☞ στα SITh η πτώση τάσης κατά την αγωγή είναι μεγαλύτερη
- ☞ στα SITh η ενίσχυση του ρεύματος πύλης κατά τη σβέση είναι μικρότερη, οπότε το αρνητικό ρεύμα πύλης για τη σβέση του στοιχείου είναι μεγαλύτερο. Η μέση ισχύς είναι μικρότερη γιατί στην περίπτωση αυτή έχουμε πολύ χαμηλότερο λόγο κατάτμησης
- ☞ κατά τη σβέση τους και τα δύο στοιχεία εμφανίζουν μια “ουρά” στην κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο
- ☞ η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του SITh είναι μεγαλύτερη
- ☞ οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές της μεταβολής της τάσης  $du/dt$  και του ρεύματος  $di/dt$  είναι μεγαλύτερες στα SITh
- ☞ η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας του SITh είναι μεγαλύτερη



# SITh ή FCT

## □ Παρατηρήσεις:

- ☞ Οι ονομαστικές τιμές τάσης διάσπασης και ρεύματος αγωγής είναι ανάλογες των τιμών που εμφανίζουν τα SIT.
- ☞ Λόγω των σοβαρών μειονεκτημάτων που εμφανίζει δεν έχει γίνει ευρέως αποδεκτό από τους κατασκευαστές διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος.

## □ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ SITh:

- ☞ διατάξεις επαγωγικής θέρμανσης
- ☞ ρυθμιστές άεργου ισχύος στο δίκτυο
- ☞ αντιστροφείς τάσης



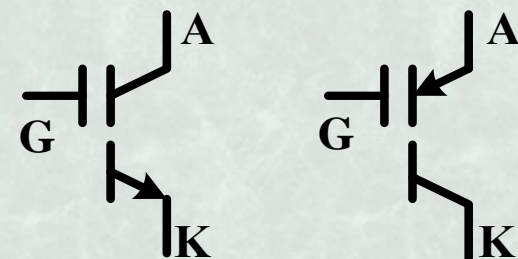
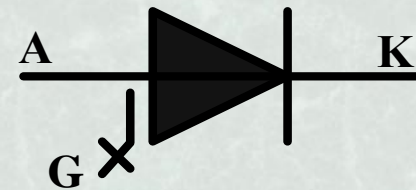


MCT

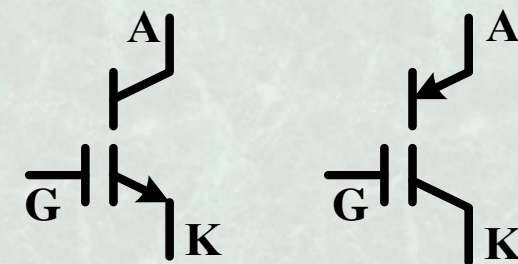




- Το ελεγχόμενο από MOS θυρίστορ (***MOS Controlled Thyristor, MCT***) ανήκει στην οικογένεια των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος που περιέχουν στη δομή τους ένα θυρίστορ και ελέγχονται κατά την έναυση ή/και κατά τη σβέση τους από τρανζίστορ τύπου MOS.
- Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι όμοια με αυτά ενός θυρίστορ. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα σβέσης του μέσω στενών παλμών εφαρμοζόμενων στην πύλη του, η οποία είναι τύπου MOS.
- Οι χαρακτηριστικές εξόδου του δεν είναι πλήρως ελεγχόμενες από το ηλεκτρόδιο ελέγχου.
- Η απολαβή ρεύματος κατά τη σβέση είναι πολύ υψηλή, λόγω της υψηλής εμπέδησης εισόδου του ηλεκτροδίου ελέγχου.
- Το MCT αντιστοιχεί περισσότερο σε ένα GTO θυρίστορ.



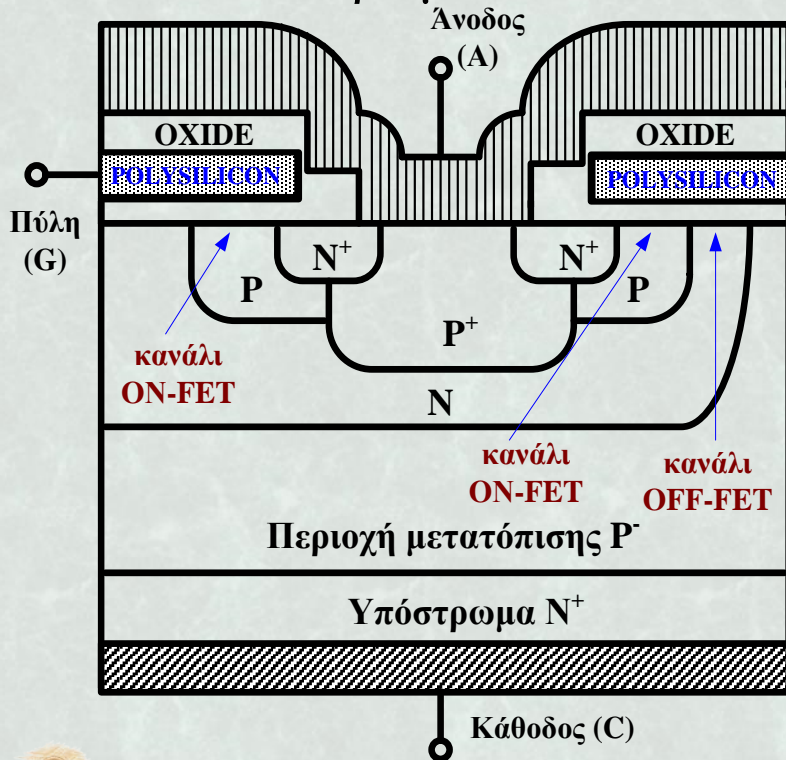
P-MCT



N-MCT

*Κυκλωματικά  
σύμβολα ενός MCT*

- Υπάρχουν δύο είδη MCT, το MCT τύπου-N και το MCT τύπου-P το οποίο κυκλοφορεί σήμερα στην αγορά και του οποίου η δομή θα αναλυθεί στη συνέχεια. Στη δομή του N-MCT οι ημιαγωγικές περιοχές είναι ακριβώς αντίθετου τύπου.
- Συνίσταται από χιλιάδες μικροκυψελίδες συνδεδεμένες παράλληλα στο ίδιο υπόστρωμα.



Δομή ενός P-MCT

- Μεταξύ ανόδου και καθόδου υπάρχουν τέσσερις στρώσεις P-N-P-N, όπως ακριβώς σε ένα thyristor.
- Η διακοπτική του συμπεριφορά και οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης κατά την έναυση και τη σβέση του μοιάζουν με αυτές ενός GTO thyristor.
- Σχηματίζεται μια δομή ισοδύναμη με δύο διπολικά τρανζίστορ, τα οποία παρουσιάζουν, όπως στα thyristor, θετική ανάδραση. Ο σκανδαλισμός του στοιχείου το οδηγεί σε πλήρη αγωγή.

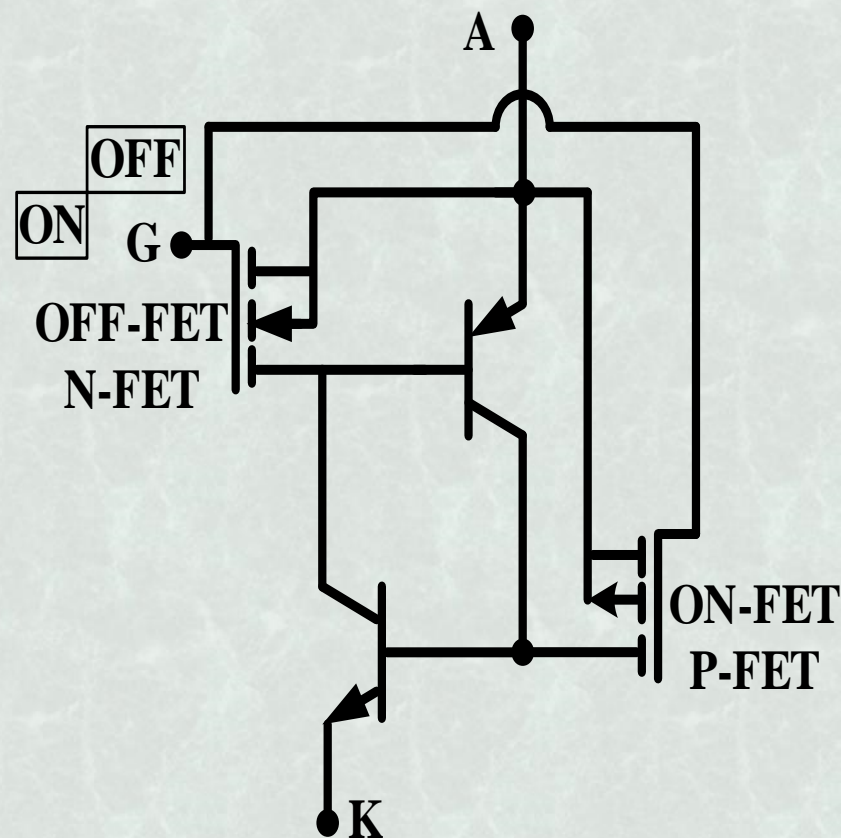


- Σε ορθή πόλωση η τάση αποκόπτεται από την περιοχή μετατόπισης P<sup>-</sup> (για τα P-MCT), η οποία έχει χαμηλή νόθευση και το εύρος της οποίας καθορίζει την τάση διάσπασης σε ορθή πόλωση.
- Σε ανάστροφη πόλωση η τάση αποκόπτεται από την επαφή των περιοχών μετατόπισης P<sup>-</sup> και του υποστρώματος N<sup>+</sup>. Μεταξύ των περιοχών αυτών τοποθετείται μια περιοχή τύπου-P, για τη μείωση των χρόνων μετάβασης και της πτώσης τάσης κατά την αγωγή.
  - ↪ Στην περίπτωση αυτή το MCT έχει περιορισμένες δυνατότητες αντοχής σε ανάστροφη πόλωση (μερικές δεκάδες Volt).
- Η έναυση του P-MCT επιτυγχάνεται επιβάλλοντας έναν αρνητικό παλμό στην πύλη του, ως προς την άνοδο και η σβέση του επιβάλλοντας ένα θετικό παλμό. Το MOSFET που ενεργοποιείται για την έναυση έχει κανάλι τύπου-P (*ON-FET*), ενώ το MOSFET που ενεργοποιείται για τη σβέση (*OFF-FET*) έχει κανάλι τύπου-N.





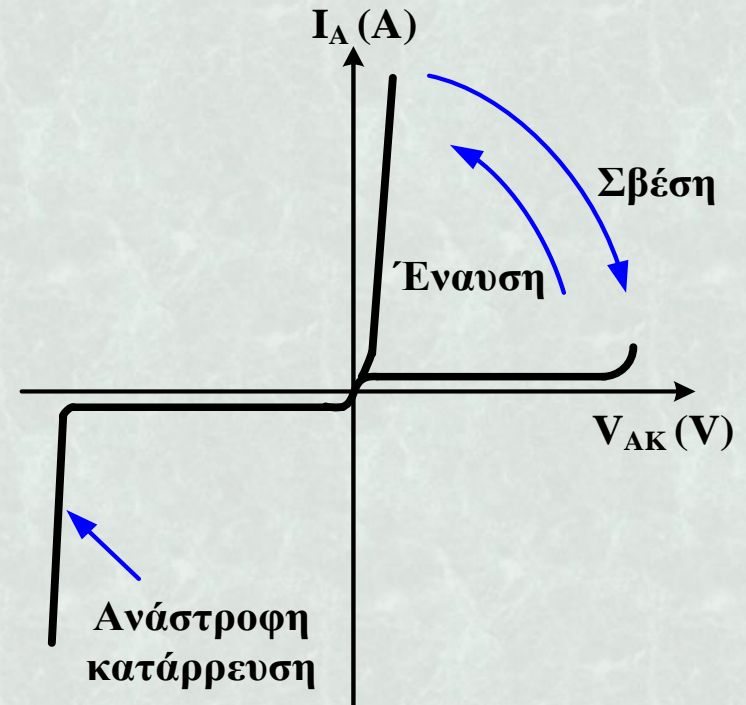
- Όταν η πύλη ενός P-MCT γίνει αρνητική ως προς την άνοδο, επάγεται ένα κανάλι τύπου-P στο ON-FET, το οποίο πολώνει ορθά το διπολικό τρανζίστορ NPN.
- Η ροή ηλεκτρονίων από τη στρώση N<sup>+</sup> πολώνει ορθά την επαφή μεταξύ των ημιαγωγικών στρώσεων της ανόδου P<sup>+</sup> και της βάσης N.
- Το στοιχείο μεταβαίνει σε πλήρη αγωγή (κόρος) λόγω του φαινομένου θετικής ανατροφοδότησης των δύο διπολικών τρανζίστορ του ισοδύναμου κυκλώματος.
- Κατά την αγωγή οι περιοχές βάσης N και μετατόπισης P<sup>-</sup>, πλημμυρίζουν από φορείς μειονότητας, με άμεσο αποτέλεσμα η πτώση τάσης του στοιχείου κατά την αγωγή να είναι χαμηλή.



*Ισοδύναμο κύκλωμα  
ενός P-MCT*



- Όταν η πύλη του P-MCT γίνει θετική ως προς την άνοδο το κανάλι τύπου-N, που επάγεται στο *OFF-FET*, βραχυκυκλώνει την επαφή βάσης-εκπομπού του διπολικού τρανζίστορ PNP του ισοδύναμου κυκλώματος:
  - ↳ Έτσι διακόπτεται ο βρόχος θετικής ανάδρασης, που σχηματίσθηκε κατά την αγωγή μεταξύ των δύο διπολικών τρανζίστορ και το στοιχείο αποκόπτει.
- Η σβέση επιταχύνεται μόνο με επανασύνδεση των φορέων μειονότητας των περιοχών βάσης N και μετατόπισης P<sup>-</sup>:
  - ☞ Το φαινόμενο της επανασύνδεσης ελέγχεται με ειδικές τεχνικές (*proton irradiation*), κατά τη διαδικασία κατασκευής, ώστε η πτώση τάσης κατά την αγωγή να παραμείνει χαμηλή.
- Η στατική χαρακτηριστική ενός MCT και στους δύο τύπους, είναι παρόμοια με αυτή ενός GTO θυρίστορ.



Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός P-MCT



## □ Πλεονεκτήματα:

- 👍 το MCT είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο υψηλής ισχύος
- 👍 λειτουργεί σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες (η συχνότητα λειτουργίας του είναι συγκρίσιμη με αυτή ενός IGBT)
- 👍 έχει χαμηλή πτώση τάσης κατά την αγωγή (μικρότερη από αυτή ενός IGBT της ίδιας ισχύος)
- 👍 η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας του είναι ευρεία
- 👍 οι δυνατότητες του να αντέχει υψηλές τιμές  $di/dt$  και  $du/dt$  είναι υψηλότερες από τα άλλα στοιχεία
- 👍 η τιμή του πυκνωτή πύλης είναι μικρότερη από αυτή των MOSFET ισχύος και σταθερή, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται φαινόμενο Miller





## □ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜCT:

- ✎ διατάξεις οδήγησης κινητήρων
- ✎ διατάξεις επαγωγικής θέρμανσης
- ✎ μετατροπείς DC - DC
- ✎ συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS)
- ✎ διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος και αρμονικών στο δίκτυο κλπ.



# Ειδικά Ημιαγωγικά Στοιχεία Ισχύος



Τα τελευταία χρόνια δύο στοιχεία μονοπωλούν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας:

## ❑ Το IGCT (*Integrated Gate - Commutated Thyristor*)

- ❖ Αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του GTO θυρίστορ με ενσωματωμένο το κύκλωμα οδήγησης του (παρουσιάστηκε το 1997).

## ❑ Το ETO Thyristor (*Emitter Turn - Off Thyristor*)

- ❖ Είναι ένα υβριδικό στοιχείο στο οποίο συνδυάζονται ένα GTO θυρίστορ και δύο MOSFET. Ένα σε σειρά με το GTO θυρίστορ και το άλλο συνδεδεμένο με την πύλη του (παρουσιάστηκε το 1998)





# Ολοκληρωμένα Κυκλώματα Ισχύος (Power Integrated Circuits, PICs)

- Σε αυτά, τα κυκλώματα ελέγχου, οδήγησης και προστασίας, καθώς και η διάταξη ισχύος ολοκληρώνονται στο ίδιο chip (μονολιθική ολοκλήρωση, *monolithic integration*). Η ανάπτυξη ειδικών τεχνικών ολοκλήρωσης αισθητήρων (θερμοκρασίας, ρεύματος κ.λ.π) επέκτεινε τις δυνατότητες των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ισχύος.
- Κίνητρα για την ανάπτυξη των κυκλωμάτων αυτών είναι:
  - ⇒ η μείωση του κόστους
  - ⇒ η αύξηση της αξιοπιστίας της όλης διάταξης
  - ⇒ η εξοικονόμηση ενέργειας
  - ⇒ η βελτίωση της απόκρισης ελέγχου
  - ⇒ η μείωση του θορύβου
  - ⇒ η μείωση του μεγέθους και του βάρους του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος
- Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές των PIC είναι η απομόνωση μεταξύ στοιχείων υψηλής και χαμηλής τάσης και η ψύξη τους.



# Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Ισχύος (Power Integrated Circuit, PIC)

Οι διάφορες τεχνικές και αρχιτεκτονικές που αναπτύχθηκαν για την κατασκευή των PIC μπορούν να διαχωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

## □ Μονάδες Ισχύος (Power Modules)

⇒ Αναφέρονται στη διασύνδεση δύο ή και περισσότερων διακριτών στοιχείων σε ένα και μόνο περίβλημα.

## □ Ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής τάσης (High Voltage Integrated Circuits, HVIC)

⇒ Αποτελούνται από κυκλώματα αναλογικά ή ψηφιακά χαμηλής τάσης σε συνδυασμό με στοιχεία ισχύος υψηλής τάσης και οριζόντιας αγωγής, που ολοκληρώνονται στο ίδιο chip (*monolithic integration*).

⇒ Σε αυτά τα κυκλώματα ισχύος η τάση είναι υψηλή (~1200V) αλλά τα ρεύματα πολύ χαμηλά (< 0,1A).





# Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Ισχύος (Power Integrated Circuit, PIC)

## □ Ευφυή διακριτά ολοκληρωμένα στοιχεία ισχύος (Smart Discrete PICs)

- ⇒ Συνδυάζουν στοιχεία ισχύος κατακόρυφης αγωγής με τα κυκλώματα οδήγησής τους, ελέγχου τους και τα κυκλώματα προστασίας τους στο ίδιο chip (*monolithic integration*). Επίσης μπορούν να ενσωματωθούν και αισθητήρες υπερέντασης, υπέρτασης, ή υπερθέρμανσης.
- ⇒ Τα στοιχεία ισχύος μπορεί να είναι διπολικά τρανζίστορ ή MOSFET κατακόρυφης αγωγής.
- ⇒ Διάφορα στοιχεία χαμηλής τάσης NMOS, CMOS και διπολικά, προστίθενται με ευκολία κατά τη διαδικασία κατασκευής, ώστε να παρέχουν τα επιθυμητά ψηφιακά ή αναλογικά σήματα.

## □ Ευφυείς Μονάδες Ισχύος (Intelligent Power Modules, IPM)

- ⇒ Αναφέρονται στη διασύνδεση στοιχείων ισχύος, αισθητήρων, κυκλωμάτων οδήγησης και προστασίας σε ένα περίβλημα και υλοποιούνται με βάση την τεχνική της υβριδικής ολοκλήρωσης (*hybrid integration*).





# Παράμετροι Στοιχείων Ισχύος και Επιδόσεις Μετατροπέων Ισχύος



# ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Η κατασκευή ημιαγωγικών στοιχείων με υψηλότερες τιμές ονομαστικών τάσεων διάσπασης και ονομαστικών ρευμάτων αγωγής, αποσκοπεί στη χρήση τους σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, χωρίς να παρίσταται η ανάγκη συνδυασμού τους σε παράλληλη ή σε σειρά σύνδεση.
- Από οικονομικής πλευράς, για στοιχεία της ίδιας ισχύος, μπορούμε να πούμε ότι τα στοιχεία υψηλότερης τάσης και χαμηλότερου ρεύματος είναι φθηνότερα από τα στοιχεία χαμηλότερης τάσης και υψηλότερου ρεύματος.
- Η ανάπτυξη και χρήση ημιαγωγών και στοιχείων που αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες επαφής οδηγεί σε μείωση των διαστάσεων του απαιτούμενου ψυκτικού και συμβάλλει στη μείωση του όγκου, του βάρους και του κόστους του μετατροπέα.





# ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Οι χαμηλότερες τιμές της πτώσης τάσης κατά την αγωγή και του ρεύματος διαρροής συμβάλλουν στην αύξηση της απόδοσης ενός μετατροπέα, και την μείωση των απαιτήσεων για ψύξη των στοιχείων.
- Η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, επιτρέπει τη μείωση του όγκου και του βάρους της διάταξης, καθώς και τη βελτίωση των επιδόσεών της.
- Κατά τη διάρκεια της έναυσης και της σβέσης ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος καταναλώνεται κάποια ενέργεια στο στοιχείο, που συνεισφέρει στην αύξηση της μέσης καταναλισκόμενης ισχύος, άρα και στην αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Συνεπώς, αύξηση της συχνότητας σημαίνει αύξηση των διακοπτικών απωλειών.





# ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

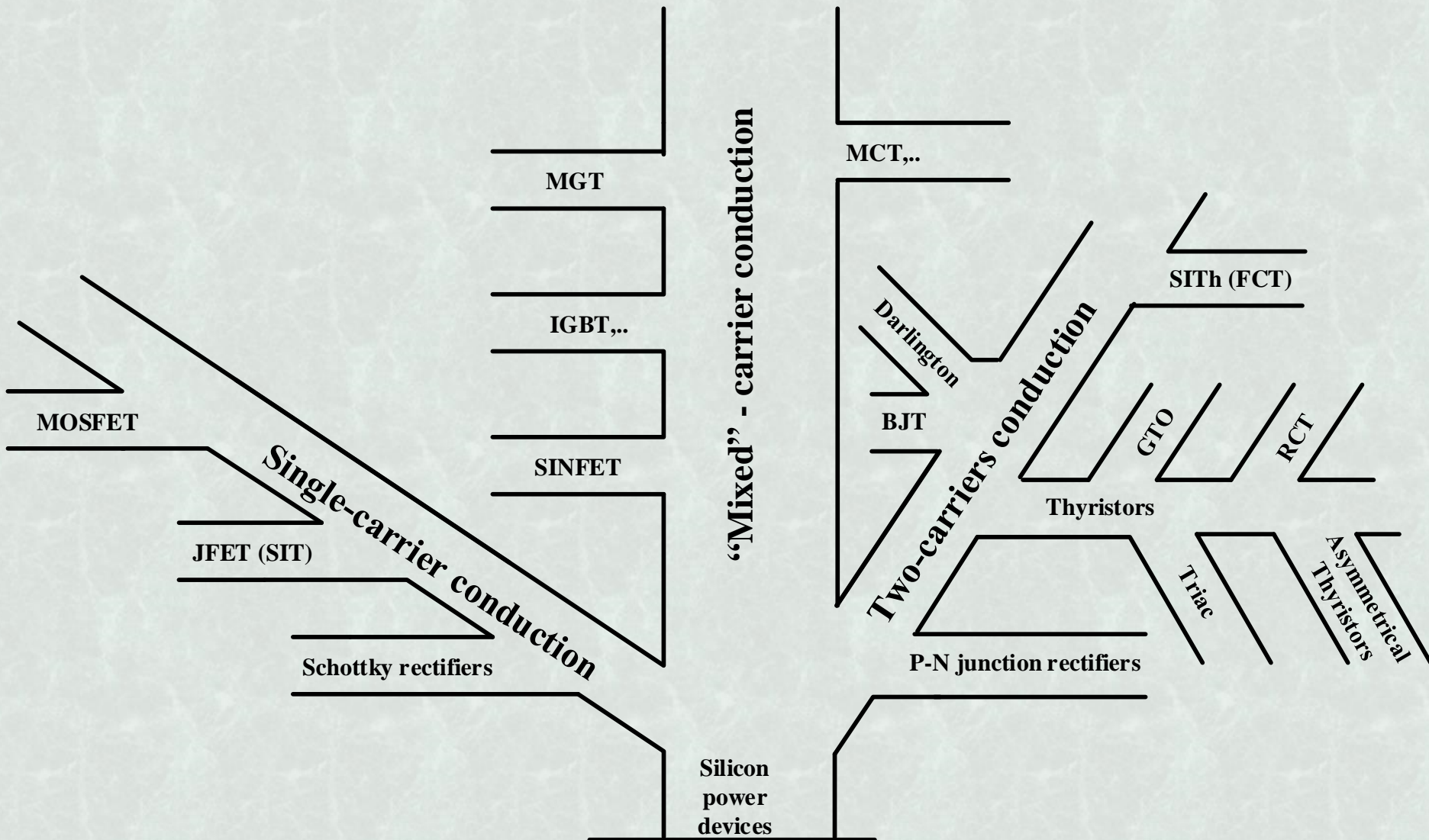
- Τα κυκλώματα υποβοήθησης των μεταβάσεων (*Snubber Circuit*) συνεισφέρουν στη μείωση των διακοπτικών απωλειών στο στοιχείο, αλλά αυξάνουν τις συνολικές διακοπτικές απώλειες.
- Επιπλέον, τα κυκλώματα αυτά προσθέτουν όγκο, βάρος και κόστος και συμβάλλουν στην πιθανή εμφάνιση υπερτάσεων επί του ημιαγωγικού στοιχείου.
- Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος με μικρότερους χρόνους μετάβασης εμφανίζουν λιγότερες διακοπτικές απώλειες, παρέχοντας το πλεονέκτημα της χρήσης κυκλωμάτων υποβοήθησης μικρότερων διαστάσεων ή ακόμα και της απαλοιφής αυτών.
- Πλήρης εξάλειψη των διακοπτικών απωλειών μπορεί να επιτευχθεί με μετάβαση κατά το μηδενισμό της τάσης ή του ρεύματος σε μετατροπείς συντονισμού (*Resonant Converters*).



# Σύγκριση Ημιαγωγικών Στοιχείων Ισχύος



# ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ



*Κατηγοριοποίηση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, με βάση το είδος και τον αριθμό των φορέων φορτίου που συμμετέχουν στην αγωγή*





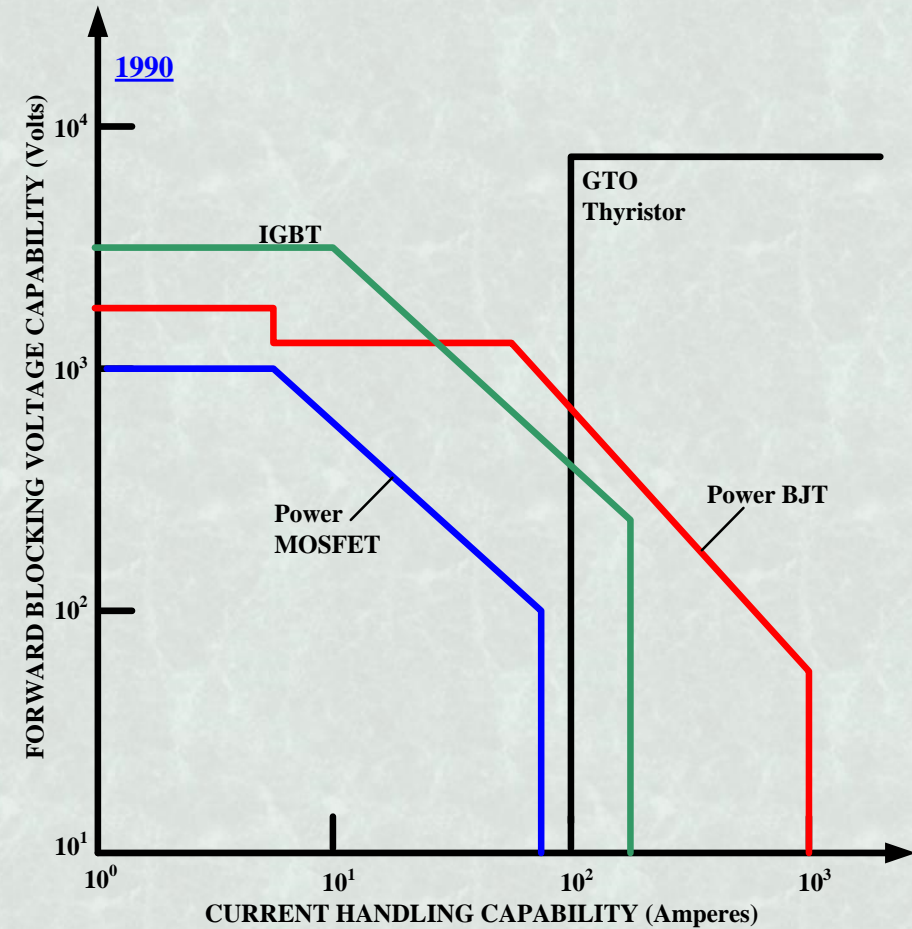
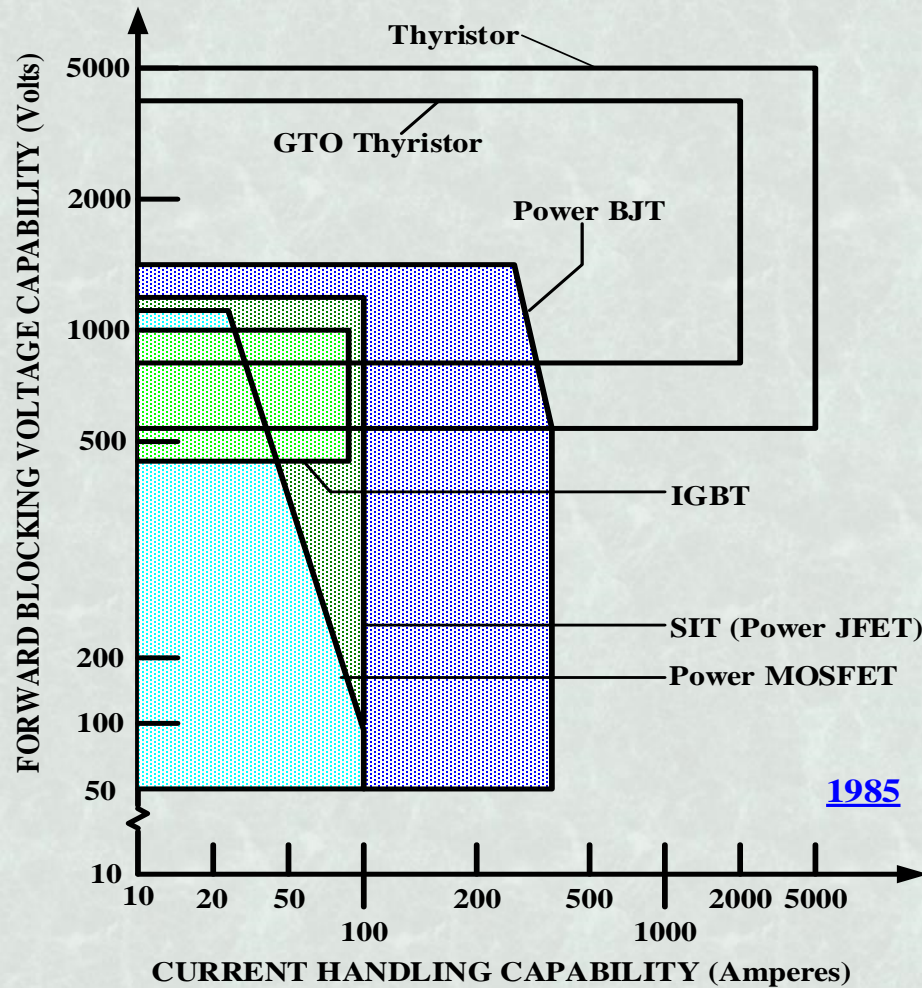
- Στα στοιχεία του αριστερού κλάδου η ροή ρεύματος οφείλεται μόνο στη ροή φορέων πλειονότητας, με αποτέλεσμα τα στοιχεία αυτά να εμφανίζουν μικρότερους διακοπτικούς χρόνους και να λειτουργούν σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες.
- Στα στοιχεία του δεξιού κλάδου η ροή ρεύματος οφείλεται στη ροή φορέων μειονότητας, η οποία προκαλεί αντίστοιχη ροή φορέων πλειονότητας. Τα στοιχεία αυτά λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες, αλλά παρουσιάζουν υψηλότερες ονομαστικές τιμές ρεύματος αγωγής και τάσης διάσπασης.
- Τα νεώτερα στοιχεία ισχύος εμφανίζονται ως παρακλάδια του κεντρικού κλάδου, όπου η αγωγή του ρεύματος οφείλεται στην ταυτόχρονη αγωγή ενός διπολικού στοιχείου ισχύος (φορείς μειονότητας) και ενός στοιχείου με πύλη MOS (φορείς πλειονότητας).



- Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος που άγουν σε κατάσταση ηρεμίας, όπως τα JFET (SIT) και τα SITh (FCT), απαιτούν την εφαρμογή αρνητικής τάσης στο ηλεκτρόδιο ελέγχου κατά τη διαδικασία εκκίνησης ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα.
  - ↪ Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές εφαρμογές, για τις οποίες ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν κρίνονται απαραίτητα.
- Τα BJT ισχύος απαιτούν σημαντική ισχύ ελέγχου, τόσο σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και κατά τις μεταβάσεις (ιδίως κατά τη σβέση του στοιχείου).
- Τα MOSFET ισχύος και τα IGBT μπορούν να οδηγηθούν ακόμα και από ολοκληρωμένα κυκλώματα, με αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος και της πολυπλοκότητας του κυκλώματος οδήγησης.



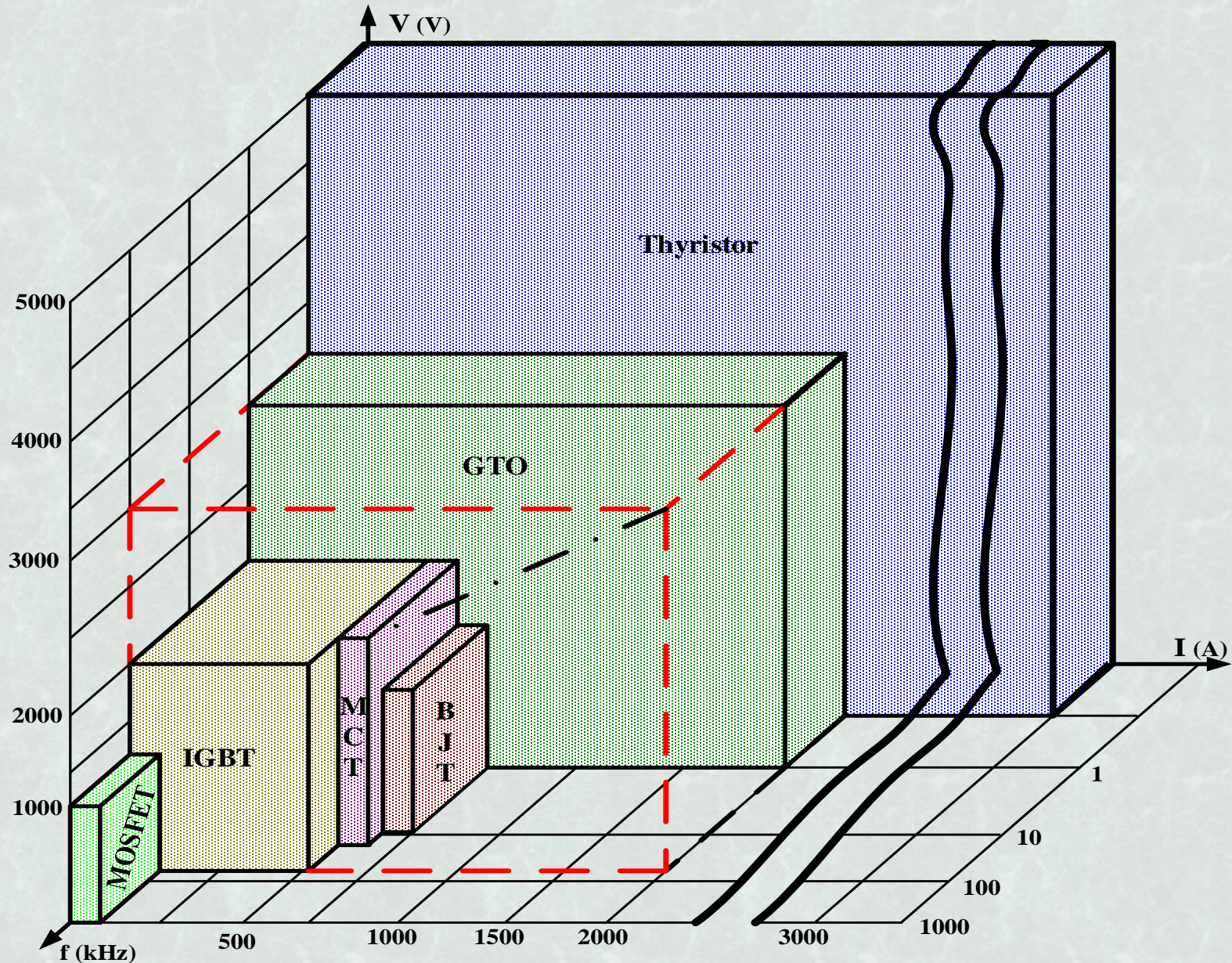
# ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΡΕΥΜΑ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ



Τα στοιχεία με υψηλές τάσεις διάσπασης και υψηλά ρεύματα αγωγής δεν έχουν τη δυνατότητα έναυσης και σβέσης σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες



# ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΡΕΥΜΑ ΑΓΩΓΗΣ, ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ



# ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

α/α		ΘΥΡΙΣΤΟΡ		TRIAC	GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ
		Phase Control (Slow)	Inverter (Fast)		
1	Μέγιστη τάση (V)	6500	2500	800	4500
	Μέγιστο ρεύμα (A)	3500	1500	40	3000
2	Ορθή. Ανάστροφη τάση διάσπασης	Συμμετρικά ή Ασύμμετρα	Ασύμμετρα	Συμμετρικά	Συμμετρικά ή Ασύμμετρα
3	Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA)	Μη εφαρμόσιμη	Μη εφαρμόσιμη	Μη εφαρμόσιμη	Περιορίζεται από δεύτερη κατάρρευση κατά τη σβέση
4	Χαρακτηριστικά παλμοδότησης	Σκανδαλισμός	Σκανδαλισμός	Σκανδαλισμός	Σκανδαλισμός
5	Μέθοδος Παλμοδότησης	Ρεύμα	Ρεύμα	Ρεύμα	Ρεύμα
6	Απολαβή ρεύματος στη σβέση	-	-	-	4-5
7	Πτώση τάσης κατά την αγωγή (V) (ονομαστικό ρεύμα)	1,9	1,5	1,4	4
	Συντελεστής Θερμοκρασίας	Αρνητικός	Αρνητικός	Αρνητικός	Αρνητικός
8	Μέγιστο du/dt (V/μs)	30	500	5	Περιορίζεται μόνο από τις απώλειες (~1500)
9	Μέγιστο di/dt (A/μs)	200	1000	0,02	300
10	Διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (Hz) (σε πρακτικές εφαρμογές)	ως 400	ως 3000	ως 400	ως 2000
11	Χρόνος έναυσης (μs)	1,1	0,8	1,7	4
12	Χρόνος σβέσης (μs)	220	5 - 50	220	10
13	Ρεύμα διαρροής (mA)	3	3	1	30
14	Συντελεστής υπερφόρτισης ρεύματος	15	15	15	10
15	Προστασία	Διακοπτική παλμοδότηση ή ασφάλειες υπερταχείας τήξης	Διακοπτική παλμοδότηση ή ασφάλειες υπερταχείας τήξης	Διακοπτική παλμοδότηση ή ασφάλειες υπερταχείας τήξης	Διακοπτική παλμοδότηση ή ασφάλειες υπερταχείας τήξης
16	Παρατηρήσεις	-Μεγάλες δυνατότητες στιγμιαίας υπερφόρτισης ρεύματος	-Μεγάλες δυνατότητες στιγμιαίας υπερφόρτισης ρεύματος	-Μεγάλες δυνατότητες στιγμιαίας υπερφόρτισης ρεύματος	-Ανεξέλεγκτη υπερφόρτιση ρεύματος -Απαιτούνται ογκώδη snubber για περιορισμό των διακοπτικών απωλειών -Χαμηλή διακοπτική συχνότητα σε υψηλές ισχύς



# ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

α/α		DARKINGTON BJT	POEWR MOSFET	IGBT
1	Μέγιστη τάση (V)	1500	1000	1200
	Μέγιστο ρεύμα (A)	1000	10	400
2	Ορθή. Ανάστροφη τάση διάσπασης	Ασύμμετρα	Ασύμμετρα	Ασύμμετρα
3	Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA)	Περιορίζεται από δεύτερη κατάρρευση και θερμοκρασία επαφής	Περιορίζεται από θερμοκρασία επαφής	Περιορίζεται από θερμοκρασία επαφής
4	Χαρακτηριστικά παλμοδότησης	Γραμμική (συνεχής παλμός όσο άγει)	Γραμμική (συνεχής παλμός όσο άγει)	Γραμμική (συνεχής παλμός όσο άγει)
5	Μέθοδος Παλμοδότησης	Ρεύμα	Τάση	Τάση
6	Απολαβή ρεύματος στη σβέση	200	-	-
7	Πτώση τάσης κατά την αγωγή (V) (ονομαστικό ρεύμα)	1,9	>3,2 (ανάλογη της αντίστασης αγωγής)	2 - 4
	Συντελεστής Θερμοκρασίας	Αρνητικός	Θετικός	Αρνητικός (Θετικός σε υψηλές τιμές ρεύματος)
8	Μέγιστο du/dt (V/μs)	Περιορίζεται από τις απώλειες και την SOA (~3000)	Περιορίζεται από φαινόμενο Miller (>10000)	Περιορίζεται από τις απώλειες (~3000 – 10000)
9	Μέγιστο di/dt (A/μs)	1000	Πολύ υψηλό (>10000)	Πολύ υψηλό (~10000)
10	Διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (Hz) (σε πρακτικές εφαρμογές)	ως 10000	ως 200000	ως 20000
11	Χρόνος έναυσης (μs)	1,7	0,09	0,9
12	Χρόνος σβέσης (μs)	2 - 5	0,14	1,4
13	Ρεύμα διαρροής (mA)	2,5	0,2	1,0
14	Συντελεστής υπερφόρτισης ρεύματος	5	5	3
15	Προστασία	Διακοπή παλμοδότησης (έλεγχος από βάση)	Διακοπή παλμοδότησης (έλεγχος από πύλη)	Διακοπή παλμοδότησης (έλεγχος από πύλη)
16	Παρατηρήσεις	-Η απολαβή ρεύματος μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και το ρεύμα συλλέκτη	-Υπάρχει εσωτερική διάδος, λόγω της δομής, που αντέχει το ονομαστικό ρεύμα	





# ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

α/α		SIT (Power JFET)	SITh (FCT)	MCT
1	Μέγιστη τάση (V)	1200	1000	1200
	Μέγιστο ρεύμα (A)	300	300	150
2	Ορθή. Ανάστροφη τάση διάσπασης	Ασύμμετρα	Ασύμμετρα	Ασύμμετρα
3	Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA)	Περιορίζεται από θερμοκρασία επαφής	Περιορίζεται από θερμοκρασία επαφής	Περιορίζεται από θερμοκρασία επαφής
4	Χαρακτηριστικά παλμοδότησης	Γραμμική (συνεχής παλμός όσο άγει)	Γραμμική (συνεχής παλμός όσο άγει)	Σκανδαλισμός
5	Μέθοδος Παλμοδότησης	Τάση	Ρεύμα	Τάση
6	Απολαβή ρεύματος στη σβέση	-	<3	-
7	Πτώση τάσης κατά την αγωγή (V) (ονομαστικό ρεύμα)	18	4	1,1
	Συντελεστής Θερμοκρασίας	Θετικός	Αρνητικός	Αρνητικός
8	Μέγιστο du/dt (V/μs)	Πολύ υψηλό (>20000)	2000	10000
9	Μέγιστο di/dt (A/μs)	Πολύ υψηλό (>10000)	900	2000 - 80000
10	Διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (Hz) (σε πρακτικές εφαρμογές)	ως 70000	2000 - 4000	2000 - 20000
11	Χρόνος έναυσης (μs)	0,25	2	1,0
12	Χρόνος σβέσης (μs)	0,30	9	2,1
13	Ρεύμα διαρροής (mA)	0,1	25	1,0
14	Συντελεστής υπερφόρτισης ρεύματος	3		30
15	Προστασία	Διακοπή παλμοδότησης (έλεγχος από πύλη)	Διακοπή παλμοδότησης ή ασφάλειες υπερταχείας τήξης	Διακοπή παλμοδότησης ή ασφάλειες υπερταχείας τήξης
16	Παρατηρήσεις		-Στοιχεία κατά παραγγελία μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες συχνότητες	-Τα MCT έχουν χαρακτηριστικά συγκρίσιμα με τα IGBT, αλλά έχουν χαμηλότερες πτώσεις τάσης -Τα MCT είναι νέα στοιχεία και υπάρχει μικρός αριθμός εμπορικά διαθέσιμων τύπων



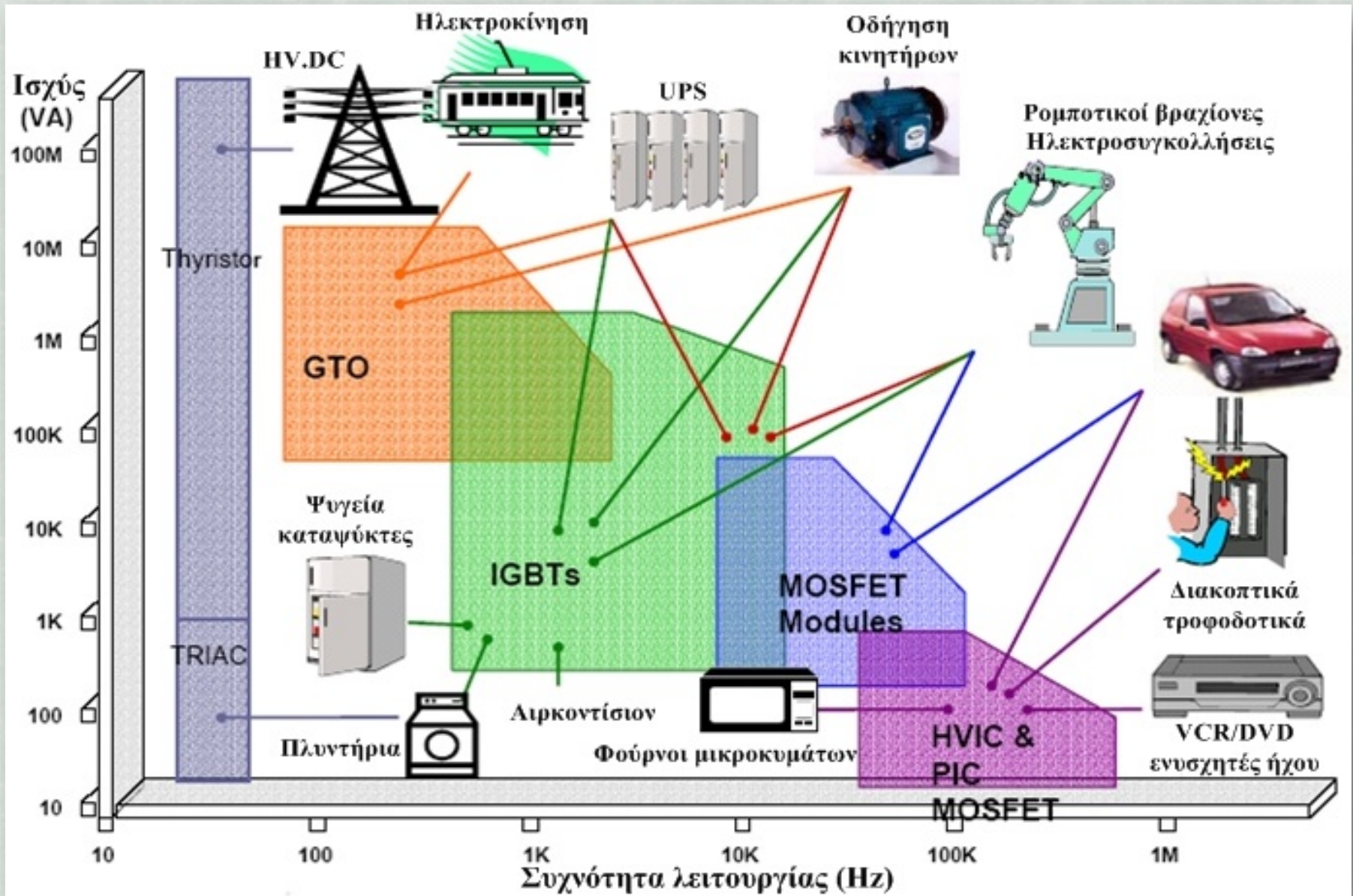
# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Εφαρμογές		
ΘΥΡΙΣΤΟΡ	Phase Control (Slow)	Διατάξεις οδήγησης κινητήρων Σ.Ρ Συστήματα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος Φωτισμός και θέρμανση Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος Ηλεκτρονικοί διακόπτες
	Inverter (Fast)	Χρήση σε μετατροπείς εξαναγκασμένης σβέσης (choppers, inverters κ.λ.π.) για διατάξεις οδήγησης κινητήρων Σ.Ρ και Ε.Ρ Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος
TRIAC		Ρυθμιζόμενα φωτιστικά Έλεγχος θέρμανσης Διατάξεις εκκίνησης και ελέγχου μηχανών Ε.Ρ Ηλεκτρονόμοι εναλλασσομένου με μετάβαση κατά το μηδενισμό της τάσης
GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ		Διατάξεις οδήγησης κινητήρων Συστήματα αδιάλειπτης παροχής τροφοδοσίας Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος Διατάξεις επαγωγικής θέρμανσης
DARLINGTON BJT		Διατάξεις οδήγησης κινητήρων Σ.Ρ και Ε.Ρ Συστήματα αδιάλειπτης παροχής τροφοδοσίας (UPS) Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος και ανώτερων αρμονικών Παλμοτροφοδοτικά
Power MOSFET		Παλμοτροφοδοτικά Διατάξεις οδήγησης κινητήρων DC Brushless και βηματικών Ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι συνεχούς Συστήματα αδιάλειπτης παροχής τροφοδοσίας (UPS)
IGBT		Διατάξεις οδήγησης κινητήρων Σ.Ρ και Ε.Ρ Συστήματα αδιάλειπτης παροχής τροφοδοσίας (UPS) Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος και ανώτερων αρμονικών Παλμοτροφοδοτικά
SIT (Power JFET)		Επαγωγική θέρμανση Γεννήτριες υπερήχων Γεννήτριες AM/FM
SITh (FCT)		Επαγωγική θέρμανση Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος
MCT		Διατάξεις οδήγησης κινητήρων Ε.Ρ Συστήματα αδιάλειπτης παροχής τροφοδοσίας (UPS) Διατάξεις αντιστάθμισης άεργου ισχύος και ανώτερων αρμονικών





# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ





# ΠΟΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ;

Η βέλτιστη επιλογή βασίζεται σε τεχνικούς και οικονομικούς κανόνες:

- ☞ Η ισχύς του μετατροπέα, δηλαδή η τάση και το ρεύμα, καθορίζουν τις ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος που θα πρέπει να διαχειρίζεται το ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος.
- ☞ Η ευκολία παράλληλης ή σε σειρά σύνδεσης καθορίζει τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων ρευμάτων ή τάσεων.
- ☞ Η τάση και η αντίσταση αγωγής του στοιχείου καθορίζουν τις απώλειες αγωγής και σε μεγάλο βαθμό την απαιτούμενη ψύξη.
- ☞ Οι χρόνοι μετάβασης καθορίζουν τις διακοπτικές απώλειες και επομένως την απαιτούμενη ψύξη, τη συχνότητα λειτουργίας της διάταξης και το μέγεθος των παθητικών στοιχείων.
- ☞ Η ισχύς που απαιτείται από το κύκλωμα ελέγχου καθορίζει την ευκολία κατασκευής του κυκλώματος παλμοδότησης του στοιχείου.
- ☞ Το κόστος του στοιχείου και η διαθεσιμότητα του στην αγορά.



# Τέλος Ενότητας



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Σημειώματα



# Σημείωμα Αναφοράς

Τα σχήματα είναι δημιουργημένα από το Δρ. Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκη στα πλαίσια του έργου *Ανοιχτά Μαθήματα*.

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Εμμανουήλ Τατάκης 2014. Εμμανουήλ Τατάκης. «Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές. Περιγραφή Ημιαγωγικών Στοιχείων». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.upatras.gr/courses/EE894/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.





# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

