



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



# Εισαγωγή



# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ

## ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

- ❑ 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.



# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ

## ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

- ❑ 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

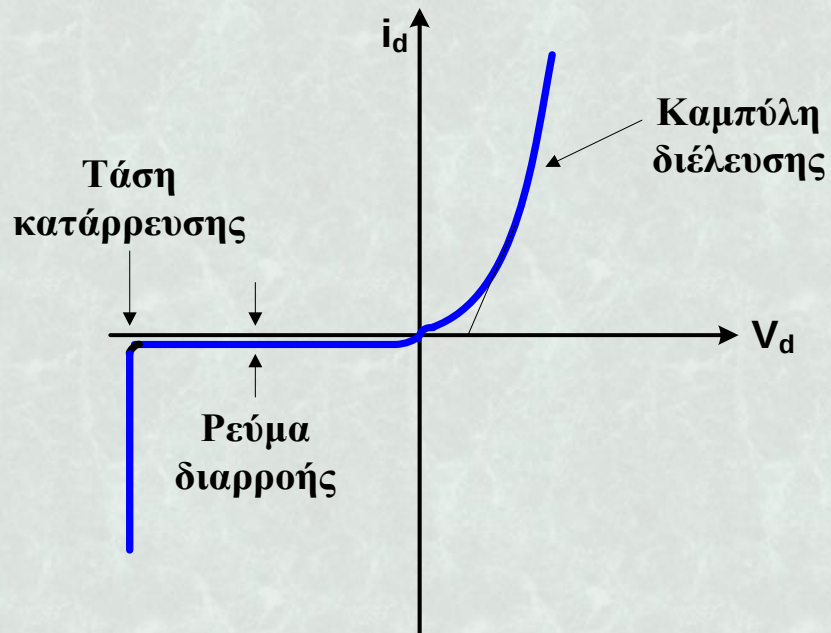
- Στην πράξη δεν υπάρχει στοιχείο που να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω δυνατότητες.
- Γίνεται κατάλληλη επιλογή του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την εφαρμογή:
  - ❖ Δηλαδή, τις επιθυμητές προδιαγραφές, την απόδοση, τον όγκο και το βάρος της συσκευής, το κόστος, τη διαθεσιμότητα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



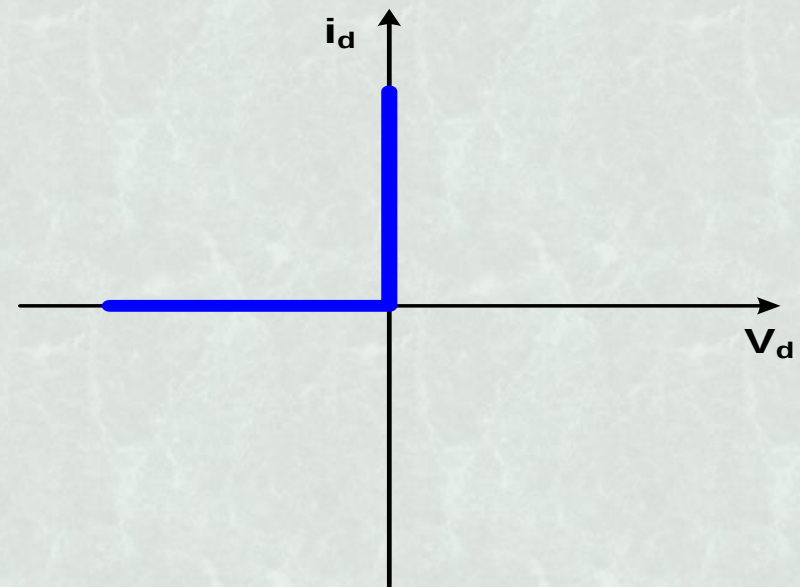
# Δίοδοι Ισχύος



# ΔΙΟΔΟΙ ΙΣΧΥΟΣ



Τυπική στατική χαρακτηριστική  
διόδου ισχύος

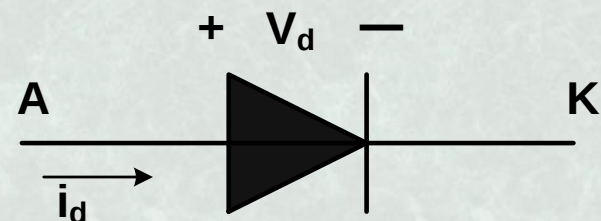


Ιδανική στατική χαρακτηριστική  
διόδου ισχύος

□ 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*



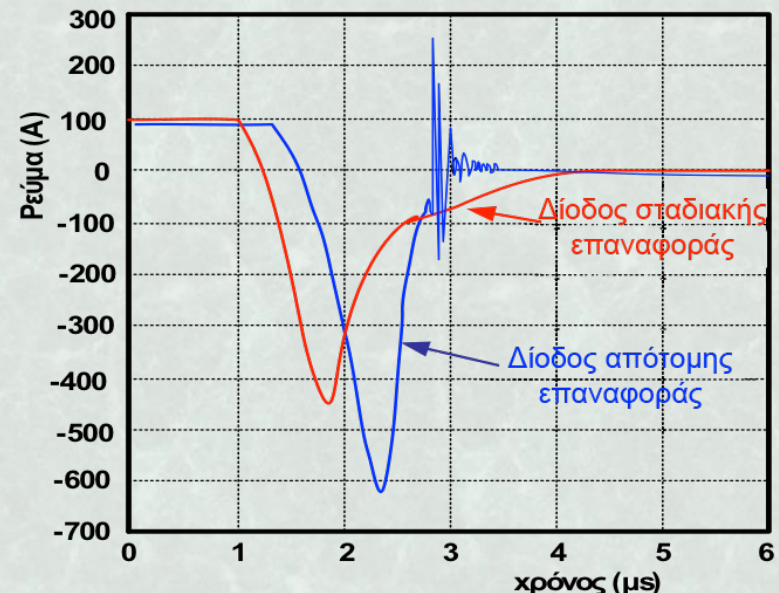
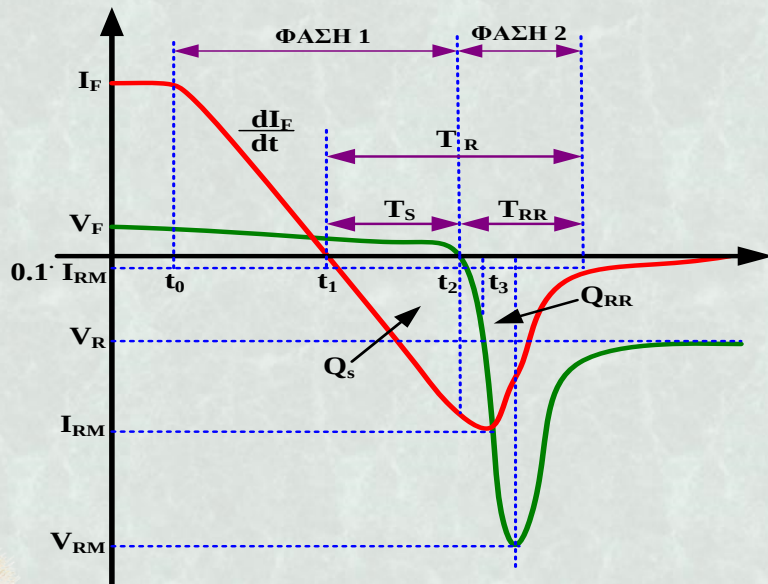
# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- ❑ 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 διόδος 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 διόδοι 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.

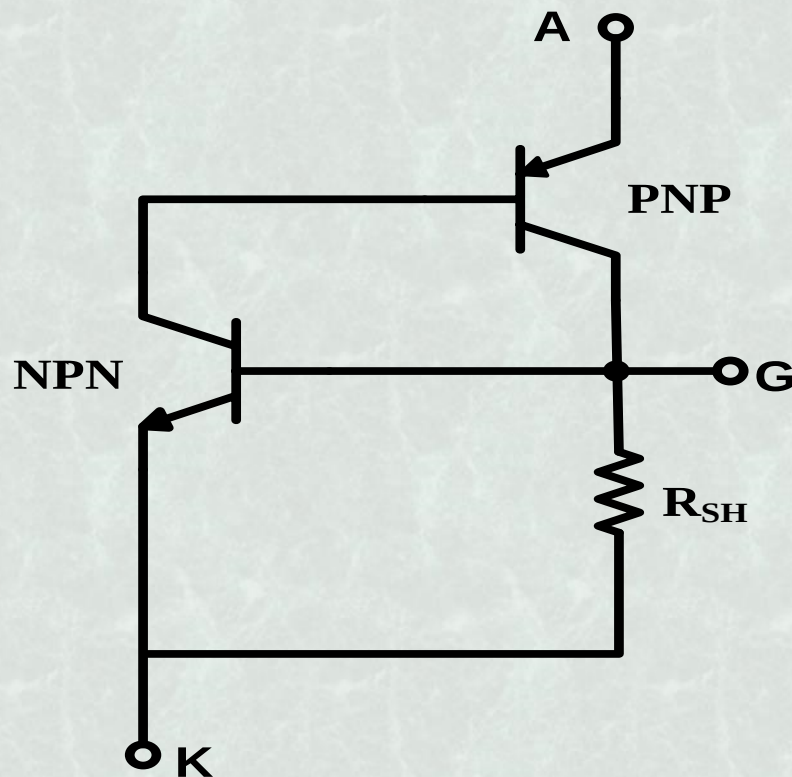
## ***□ Δίοδοι Schottky:***

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

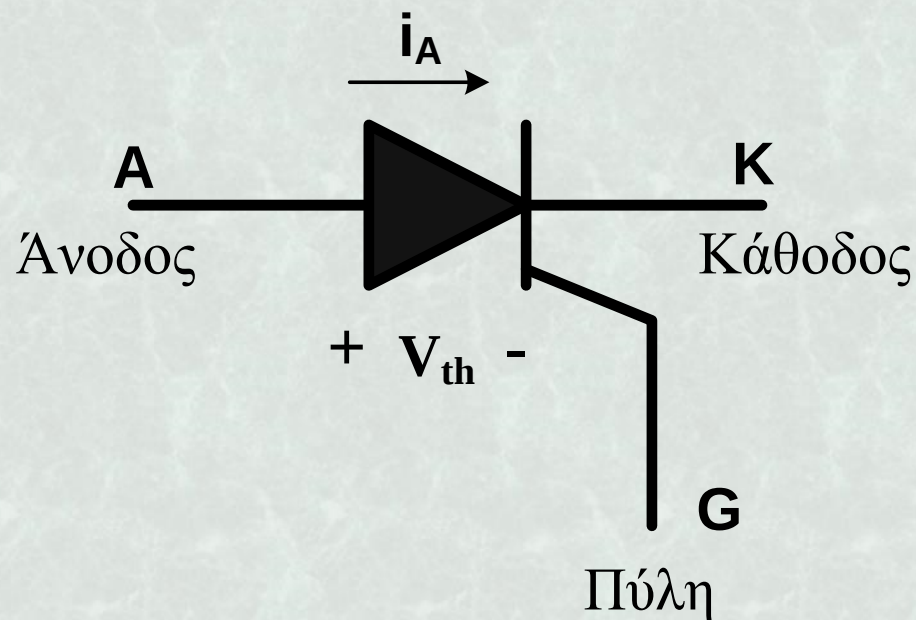


# Θυρίστορ





Ισοδύναμο κύκλωμα ενός  
θυρίστορ

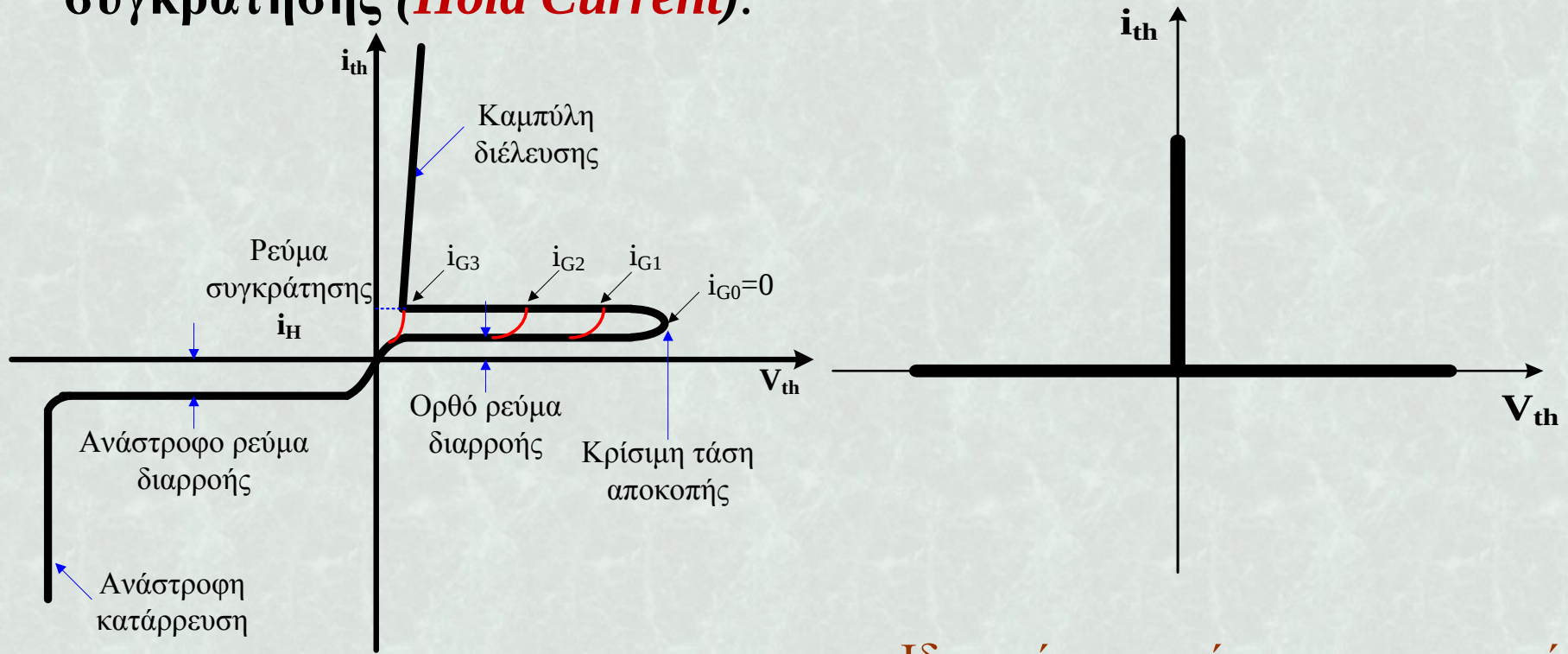


Κυκλωματικό σύμβολο ενός  
θυρίστορ

- 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.



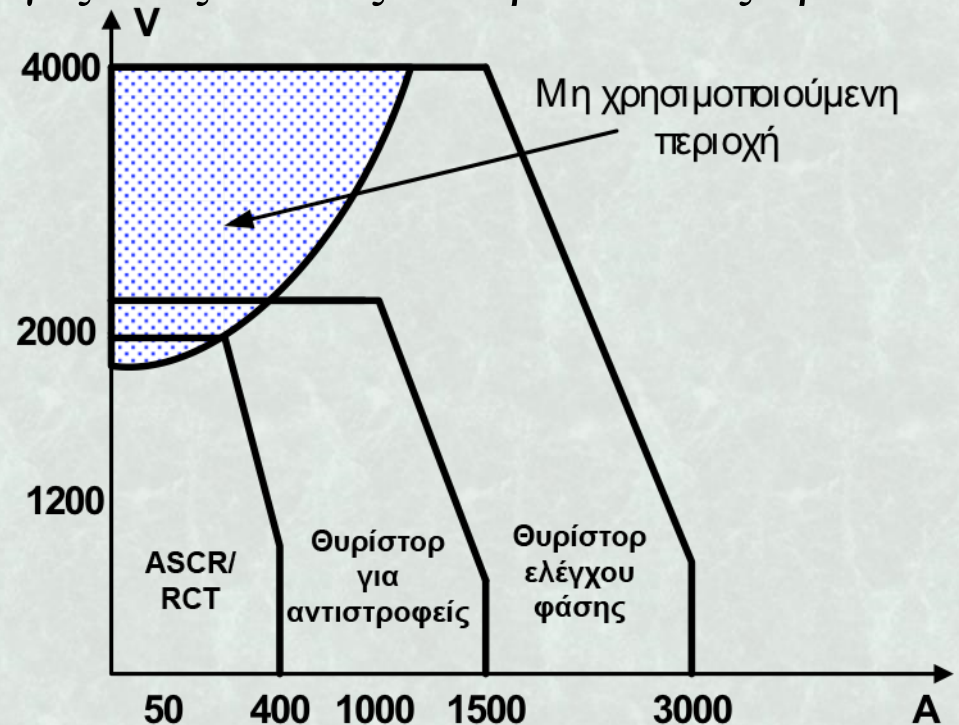
# ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

*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

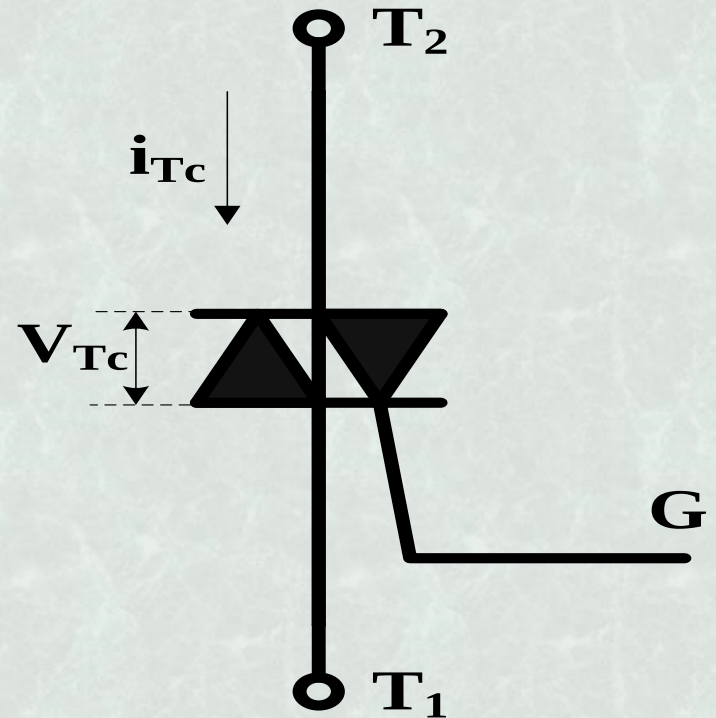


# TRIAC



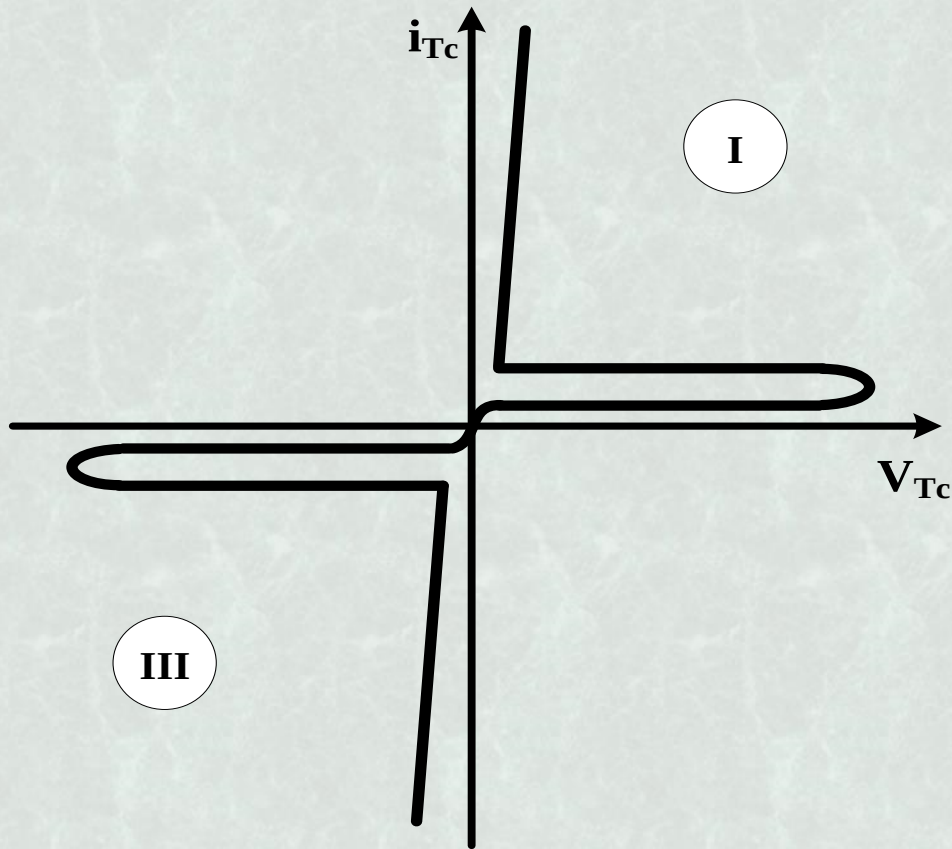
## ❑ Μειονεκτήματα:

- ✎ 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*

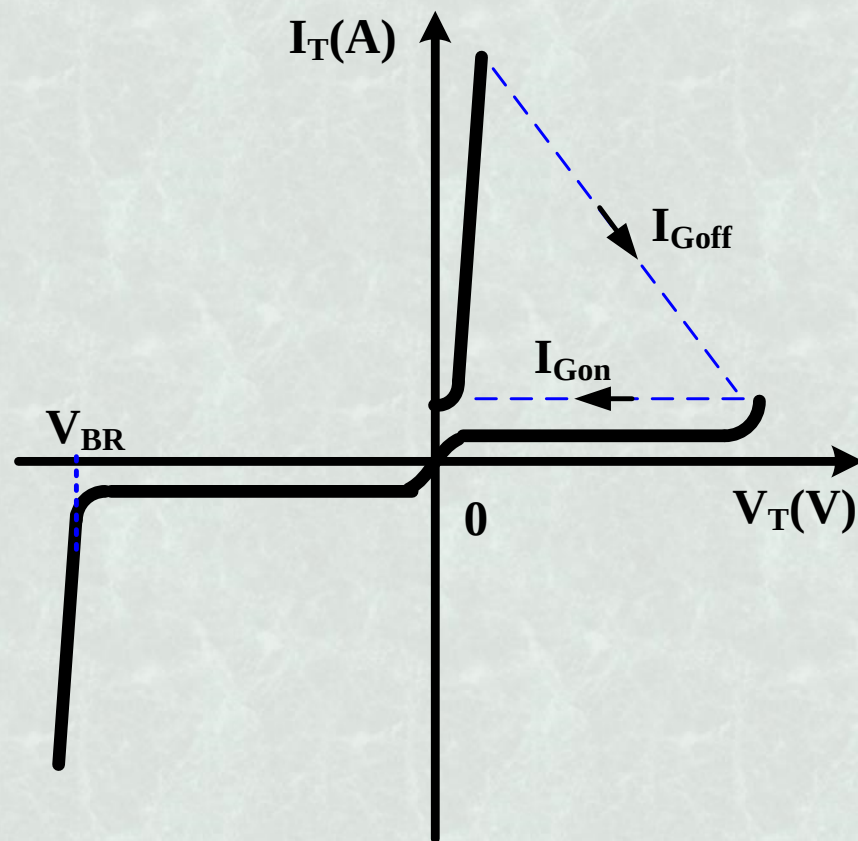


# GTO Thyristor



# GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ

- 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.

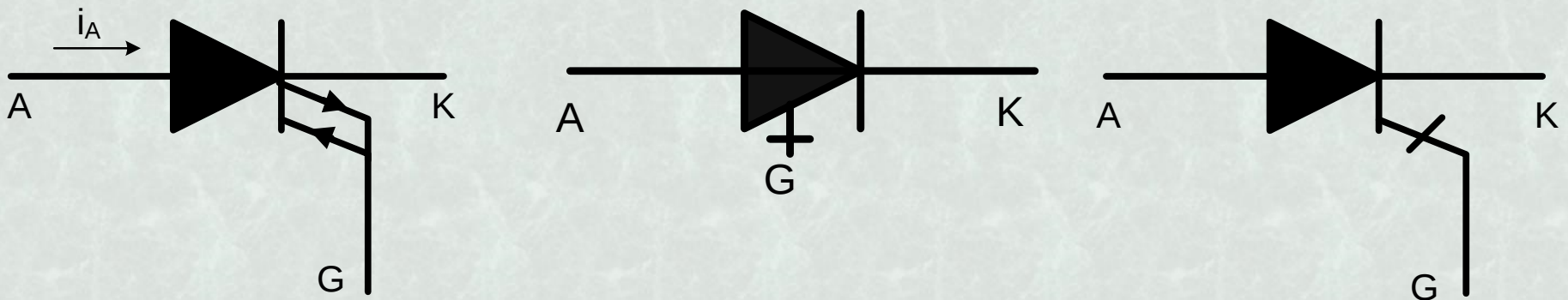


Τυπική στατική χαρακτηριστική ενός GTO θυρίστορ



# 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)



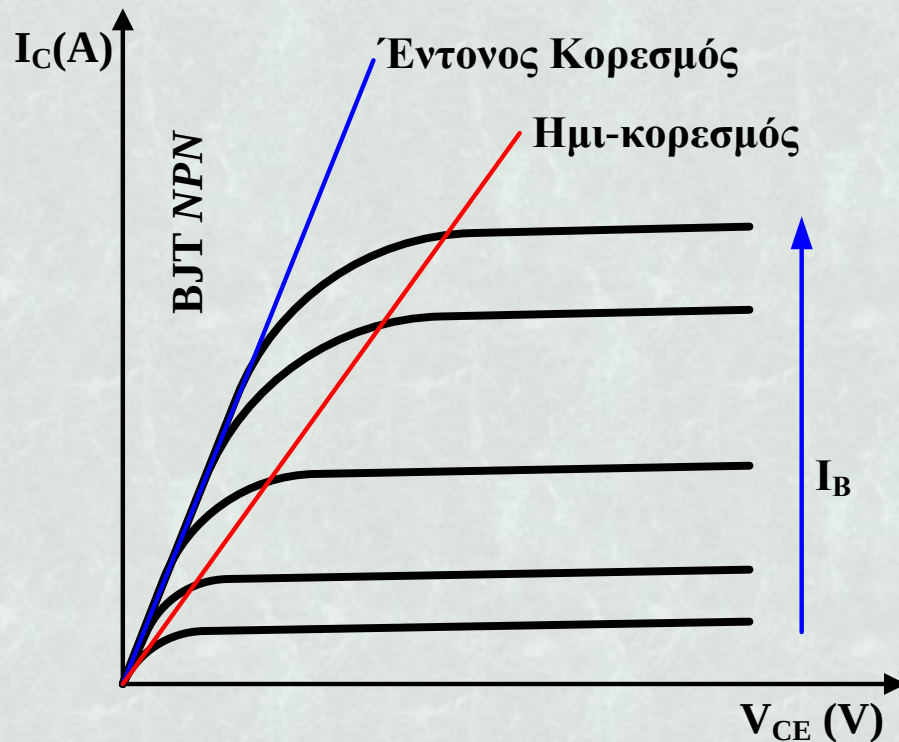
# BJT ΙΣΧΥΟΣ

- 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.*

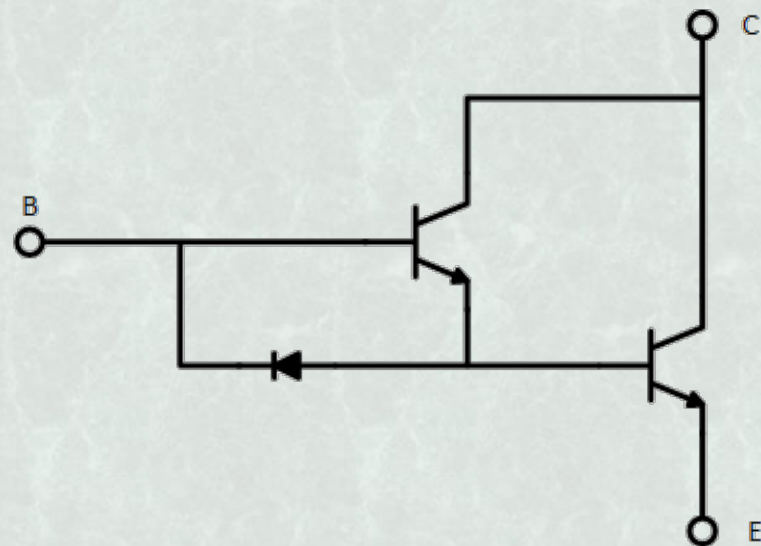
## ❑ Λύση στο πρώτο πρόβλημα αποτελεί η χρήση της συνδεσμολογίας *Darlington*.

## ❑ Τα υπόλοιπα προβλήματα αντιμετωπίζονται με πολύπλοκότερο σχεδιασμό της δομής των διπολικών τρανζίστορ ισχύος.

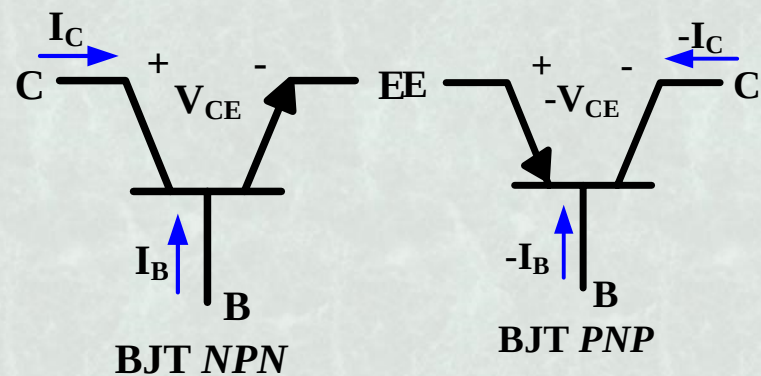


# BJT ΙΣΧΥΟΣ

- 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*



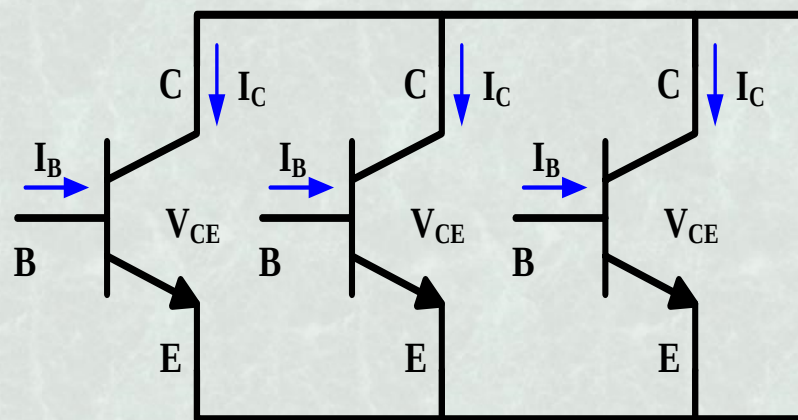
# ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ BJT ΙΣΧΥΟΣ

- Παραλληλισμός 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



*Παραλληλισμός 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 τρανσίστορ για τις στατικές καταστάσεις.

✎ Χρήση μικρών επαγωγών σε σειρά με κάθε τρανσίστορ 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



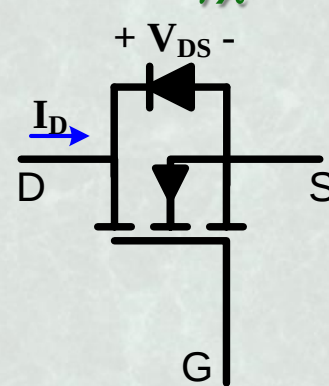
# MOSFET Ισχύος



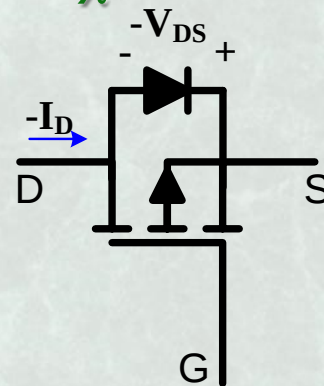
# MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

- 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.
- *To MOSFET ισχύος έχει εσωτερικά μια δίοδο*, η οποία εμφανίζεται μεταξύ πηγής και υποδοχής, με αποτέλεσμα να μην έχει τη δυνατότητα συγκράτησης ανάστροφων τάσεων.
- Η δίοδος αυτή αποδεικνύεται επωφελής για διατάξεις όπως οι αντιστροφείς, στους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιπαράλληλη δίοδος.



# 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

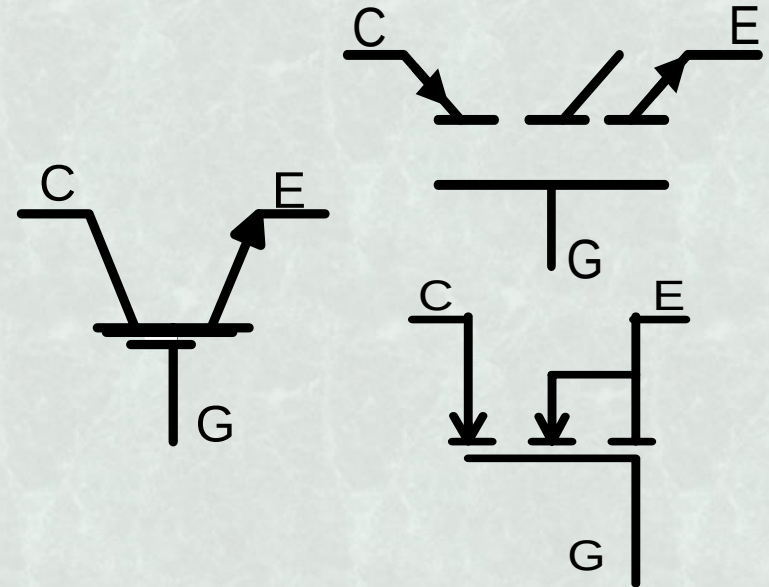
- Το διπολικό τρανζίστορ ισχύος με απομονωμένη πύλη (**Insulated Gate Bipolar Transistor, **IGBT**), συνδυάζει τα χαρακτηριστικά ενός MOSFET και ενός BJT Ισχύος. Έχει τρεις ακροδέκτες:**

- ☞ 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.

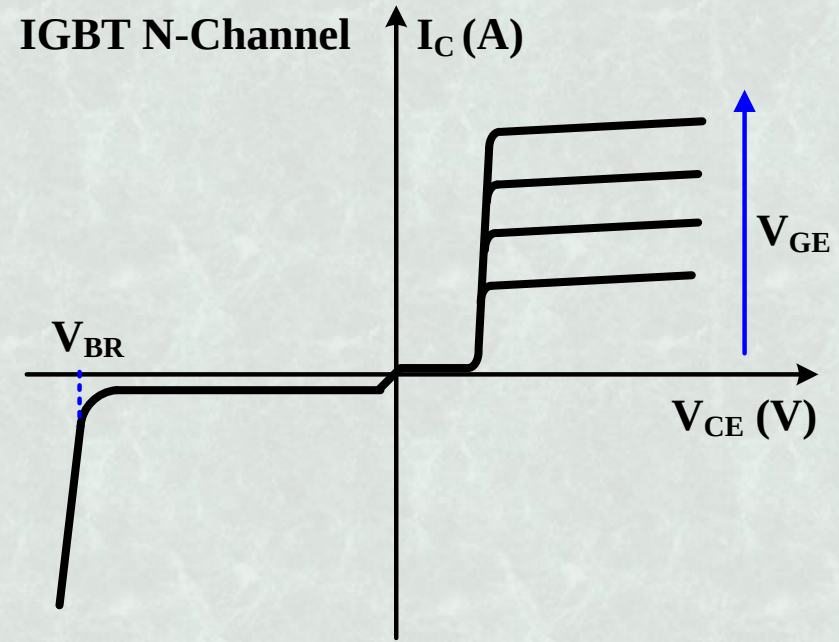


Κυκλωματικά σύμβολα ενός MOSFET Ισχύος



# IGBT

- 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.





# Παράμετροι Στοιχείων Ισχύος και Επιδόσεις Μετατροπών 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*).



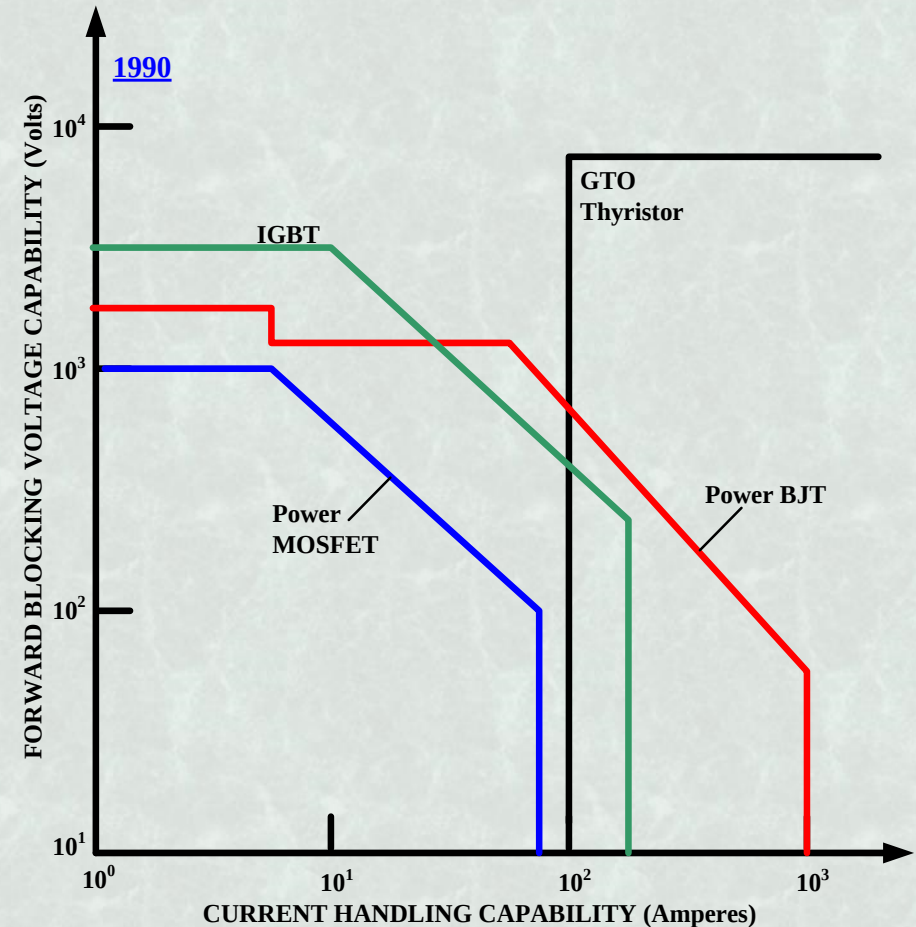
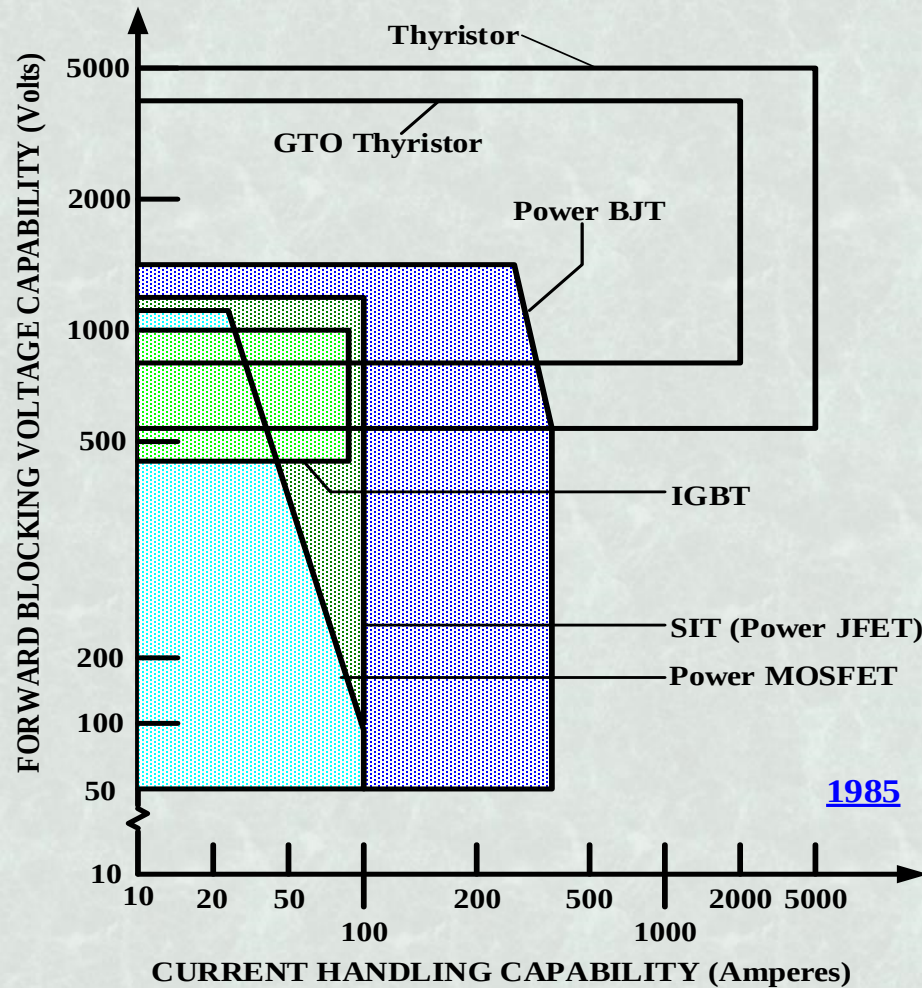
# Σύγκριση Ημιαγωγικών Στοιχείων Ισχύος



- 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.

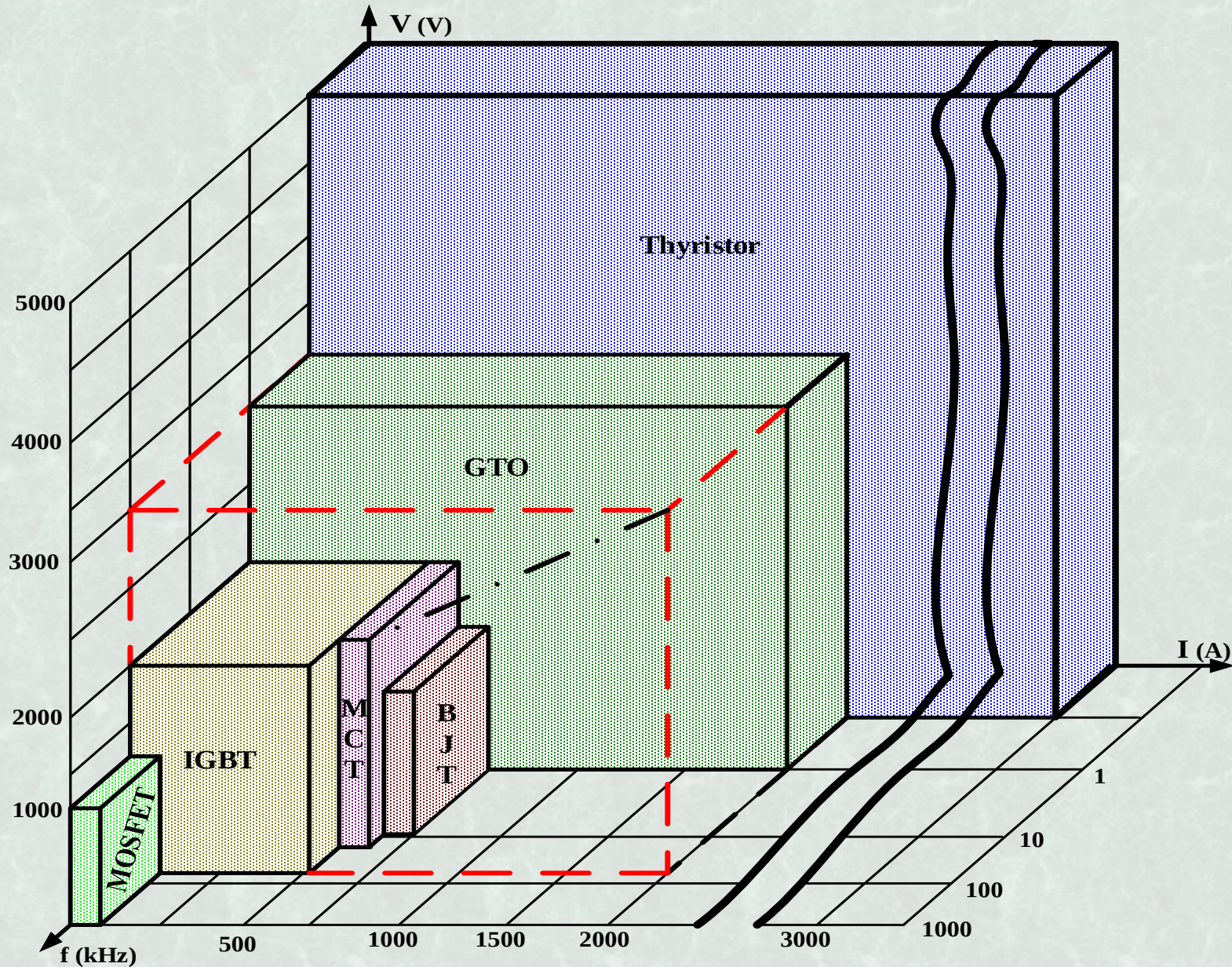


# ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΡΕΥΜΑ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ



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/ $\mu$ s)                                   | 30                                                    | 500                                                   | 5                                                     | Περιορίζεται μόνο από τις απώλειες (~1500)                                                                                                                |
| 9   | Μέγιστο $di/dt$ (A/ $\mu$ s)                                   | 200                                                   | 1000                                                  | 0,02                                                  | 300                                                                                                                                                       |
| 10  | Διακοπτική συχνότητα λειτουργίας (Hz) (σε πρακτικές εφαρμογές) | ως 400                                                | ως 3000                                               | ως 400                                                | ως 2000                                                                                                                                                   |
| 11  | Χρόνος έναυσης ( $\mu$ s)                                      | 1,1                                                   | 0,8                                                   | 1,7                                                   | 4                                                                                                                                                         |
| 12  | Χρόνος σβέσης ( $\mu$ s)                                       | 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<br>-Απαιτούνται ογκώδη snubber για περιορισμό των διακοπτικών απωλειών<br>-Χαμηλή διακοπτική συχνότητα σε υψηλές ισχείς |



# 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<br>(ανάλογη της αντίστασης αγωγής)                                    | 2 - 4                                           |
|     | Συντελεστής Θερμοκρασίας                                          | Αρνητικός                                                                | Θετικός                                                                    | Αρνητικός<br>(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)<br>(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 διόδος, λόγω της δομής, που αντέχει το ονομαστικό ρεύμα |                                                 |

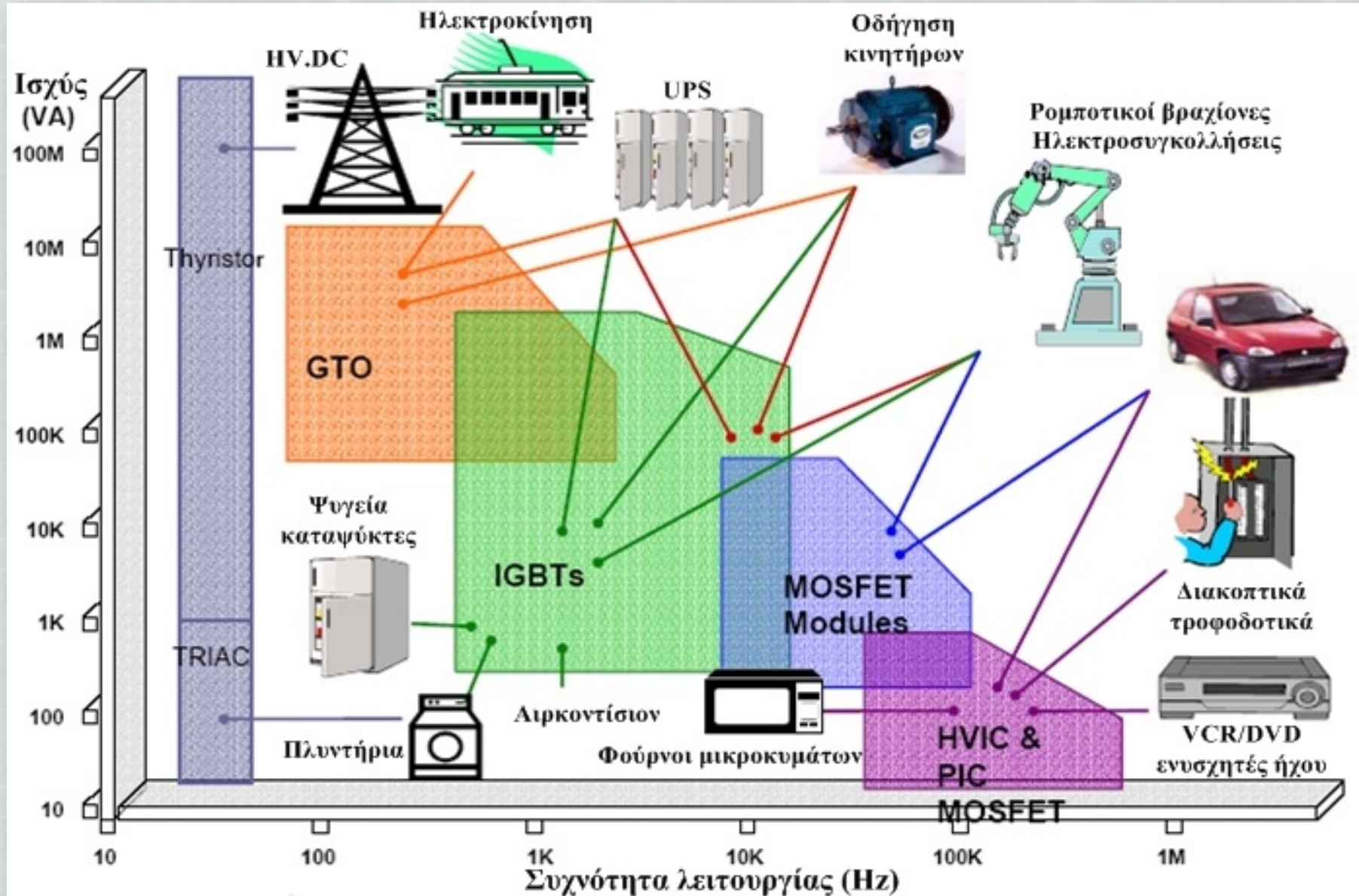


# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

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

