

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**“ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ ΤΟΥ
ΠΥΡΙΤΙΟΥ ”**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

A.M : 36655

Επιβλέπων καθηγητής : Κος. Παύλος Πάχος,
Καθηγητής Εφαρμογών

Αθήνα 2012

©

Copyright © Α. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Α. Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών (ΣΤΕφ) του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά . Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Παύλο Πάχο για την ανάθεση της πτυχιακής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
SUMMARY	10
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	11
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	12
“ΕΙΣΑΓΩΓΗ”	12
1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ JFET	12
1.2 SEMI SOUTH – Η ΙΔΡΥΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΙΑ	12
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	14
“ΠΥΡΙΤΙΟ”	14
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	14
2.1.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	15
2.1.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	15
2.1.3 ΧΡΗΣΗ	15
2.2 ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	16
2.2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	17
2.2.1.1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ	17
2.2.1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	17
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	18
2.3.1 ΑΛΕΞΙΚΕΡΑΥΝΑ	18
2.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΙΣ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	19
2.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	19
2.3.4 ΕΙΔΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΑΡΒΙΔΙΩΝ	20
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	21
“SiC JFETs”	21
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
3.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ	21
3.1.2 ΤΥΠΟΙ JFET	24
3.1.2.1 ΔΙΑΦΟΡΕΣ – ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ Normally on και off	25
3.1.2.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ JFET	28
3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ SiC ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ – ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΥΣ	30
3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	31
3.3.1 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	33
3.3.2 ΔΟΜΗ	34

3.3.3 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ – ΔΙΟΔΟΙ SiC	36
3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ JFET	43
3.5 ΕΙΔΗ ΠΟΛΩΣΗΣ	47
3.5.1 ΠΟΛΩΣΗ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΤΗ ΤΑΣΗΣ	47
3.5.2 ΑΥΤΟΠΟΛΩΣΗ	48
3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ JFET	51
3.6.1 ΩΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ JFET ΓΙΑ ΜΙΚΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ U_{DS}	51
3.6.2 ΚΥΚΛΩΜΑ JFET ΥΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ	52
3.6.3 ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ	52
3.6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ	53
3.7 ΠΕΙΡΑΜΑ	53
3.7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	58
Πίνακας 3.7 : Χρησιμοποιούμενα μεγέθη για το πείραμα.	59
3.7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	60
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	61
“SiC MOSFETs”	61
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ	61
4.1.1 ΤΥΠΟΙ MOSFET	62
4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	62
4.3 ΔΟΜΗ	63
4.4 ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕ ΤΑ JFET	63
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	64
“MOSFET ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ”	64
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	64
5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	64
5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	65
5.4 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΩΝ	65
Πίνακας 5.4 : Ορισμοί των pin .	67
5.5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	68
5.5.2 BLOCK ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	69
6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	71
“ΟΠΤΙΚΟ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ”	71
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	71
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	71
6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	72
6.4 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ	72
6.4.1.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΑΚΕΤΟΥ	73
6.4.1.2 ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	74
6.4.1.3 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	75
7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	76
“ΔΙΟΔΟΣ SCHOTTKY”	76

7.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	76
7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	76
7.3 ΣΧΗΜΑ ΔΙΟΔΟΥ	76
Πίνακας 7.3 : Περιγραφή των pin της διόδου .	77
7.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	78
7.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	78
8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	81
“ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ PV”	81
8.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	81
8.2 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ	81
Πίνακας 8.2 : Αποδοτικότητα	81
8.3 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	83
8.4 ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1.1.1 : Κύκλωμα JFET .	22
Σχήμα 3.1.1.2 : Μορφή JFET .	22
Σχήμα 3.1.1.3 : Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική μεταφοράς.	23
Σχήμα 3.1.2 : Τύποι JFET .	24
Σχήμα 3.1.2.1.α : Κύκλωμα διακοπών με πηγή τροφοδοσίας .	25
Σχήμα 3.1.2.1.β : Κύκλωμα οδήγησης JFET σε κατάσταση Normally-on.	26
Σχήμα 3.1.2.1.γ : Κύκλωμα Mosfet σε κατάσταση Normally-off.	26
Σχήμα 3.1.2.1.δ : Κυματομορφές on και off κατά τη διάρκεια δυναμικού ελέγχου ενός SiC JFET, για ρεύμα $I_d(A)$, συναρτήσει του χρόνου $t(ns)$.	28
Σχήμα 3.1.2.2.α : Κύκλωμα μετατροπέα τροφοδότησης τάσης με χρήση Normally-off τρανζίστορ.	29
Σχήμα 3.1.2.2.β : Τρέχον ρεύμα στο μετατροπέα με χρήση Normally-on JFET	29
Σχήμα 3.3.α : Κανονική πόλωση JFET .	31
Σχήμα 3.3.β : Λειτουργία για μικρές τιμές της VDS .	32
Σχήμα 3.3.γ : Λειτουργία με αύξηση τιμής της VDS .	33
Σχήμα 3.3.2.1 : Κατασκευαστική δομή JFET .	35
Σχήμα 3.3.2.2 : JFET μονής και διπλής πύλης .	36
Σχήμα 3.3.3.1: Κύκλωμα οδήγησης JFET διακόπτη σε κατάσταση on.	37
Σχήμα 3.3.3.2.α : Κυματομορφές οδήγησης πύλης ενός JFET .	37
Σχήμα 3.3.3.2.β: Κυματομορφή ενός SiC JFET σε κατάσταση off .	38
Σχήμα 3.3.3.2.γ : Κυματομορφή ενός SiC JFET σε κατάσταση on .	39
Σχήμα 3.3.3.2.1: Κύκλωμα επαγωγικού φορτίο δοκιμής.	40
Σχήμα 3.3.3.2.2.α : Αντίστροφη ανάκτηση ρεύματος για Si και SiC διόδους, σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.	41
Σχήμα 3.3.3.2.2.β: Χαρακτηριστικές τάσεων – εντάσεων (I-V) .	42
α) Για SiC δίοδο και	42
β) Για Si δίοδο	42
Σχήμα 3.4.1 : Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος .	43
Σχήμα 3.4.2 : Χαρακτηριστική ρεύματος -τάσης $I_D = f(U_{GS})$	43
Σχήμα 3.4.3 : Χαρακτηριστική ρεύματος -τάσης (πειραματική) $I_D = f(U_{GS})$	44
Σχήμα 3.4.4: Εναλλαγή κυματομορφών.	45
Σχήμα 3.4.5 : Άνω JFET πύλη κυματομορφής στην κατάσταση απενεργοποίησης.	45
Σχήμα 3.4.6 : Κάτω κυματομορφή ενεργοποιημένου JFET .	46
Σχήμα 3.4.7 : Κάτω κυματομορφή απενεργοποιημένου JFET .	46
Σχήμα 3.5.1 : Πόλωση JFET με διαιρέτη τάσης .	47
Σχήμα 3.5.2 : Αυτοπόλωση του JFET .	48
Σχήμα 3.6.2 : Κύκλωμα υπό συνεχή τάση.	52
Σχήμα 3.7.α: Χαρακτηριστική Πύλης του JFET με δείγμα $T_j = 25^\circ C$ και $T_j = 125^\circ C$.	55
Σχήμα 3.7.β : SiC-JFET / Si-MOSFET	56
Σχήμα 3.7.γ : Απλοποιημένο κύκλωμα του προτεινόμενου κυκλώματος οδήγησης για την SiC-JFET.	57
Σχήμα 3.7.δ : Θεμελιώδη αρχή του προτεινόμενου κυκλώματος κίνησης της πύλης.	58
Σχήμα 3.7.1.1 : Σχηματική αναπαράσταση κυκλώματος του πειράματος.	59
Σχήμα 3.7.1.2 : Εναλλαγή απωλειών έναντι διαρροής ρεύματος για $T_j = 125^\circ C$.	60
Σχήμα 4.1 : Δομή MOSFET με κανάλι τύπου N	61
(α) MOSFET εκκένωσης (αραίωσης) και	61
(β) MOSFET ενίσχυσης (πύκνωσης) .	61
Σχήμα 4.4: SiC MOSFETs – JFETs	63
Σχήμα 5.5.1.α : Χρονικά διαγράμματα των Mosfets .	68
Σχήμα 5.5.1.β : Διάγραμμα δοκιμής χαρακτηριστικών .	68
Σχήμα 6.4 : Σχηματική επισκόπηση .	72
Σχήμα 6.4.1.1.α : Φωτογραφία από ψηλά.	73
Σχήμα 6.4.1.1.β : Φωτογραφία από μπροστά .	73
Σχήμα 6.4.1.1.γ : Φωτογραφία από πλάγια .	74
Σχήμα 6.4.1.2 : Κύκλωμα δοκιμής .	74
Σχήμα 7.3.α : Μορφή διόδου Schottky .	76
Σχήμα 7.3.β : Σχήμα - Συμβολισμός διόδου Schottky .	77
Σχήμα 7.5.1: Προπορευόμενο ρεύμα σε συνάρτηση με προπορευόμενη τάση, τυπικές τιμές.	78

Σχήμα 7.5.2 : Ανάστροφο ρεύμα σε συνάρτηση με ανάστροφη τάση, τυπικές τιμές. _____	79
Σχήμα 7.5.3 : Χωρητικότητα διόδου σε συνάρτηση με αντίστροφη τάση . _____	80
Σχήμα 8.2 : Αποδοτικότητα τριφασικού αντιστροφέα με SiC . _____	82
Σχήμα 8.4: Τριφασικός PV - αντιστροφέας. _____	84

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 3.7 : Χρησιμοποιούμενα μεγέθη για το πείραμα.</i>	<i>59</i>
<i>Πίνακας 5.4 : Ορισμοί των pin.</i>	<i>67</i>
<i>Πίνακας 7.3 : Περιγραφή των pin της διόδου.</i>	<i>77</i>
<i>Πίνακας 8.2 : Αποδοτικότητα</i>	<i>81</i>

SUMMARY

Object of this final work, is the growth of new transistors, with use of silicon carbide.

Are analyzed the types of these carbides (SiC), their uses, the applications, the schematic symbols, the graphic representations, circuits of trial, as well as their advantages, that it makes us to prefer them against the other.

It is new carbides of silicon (SiC), that circulated recently in the market, from various foreigner companies, for example mainly Semi South company. From this countries, I consider that we supply, relatively recently Greece this carbides, in our effort to have better output in the transistors, higher quality, lower relatively cost, saving of space, as well as reliability of these.

Based on publications of companies, useful information of the internet and files pdf which I received from the professor Mr Pachos Pavlos, I tried to record all the elements mentioned before, for their analysis, the comprehension, as well as the acquaintance of these transistors in our country, as well they are new transistors, that still are not familiar for the engineers of our country.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας, είναι η ανάπτυξη των νέων τρανζίστορ, με χρήση καρβιδίου του πυριτίου.

Αναλύονται οι τύποι των καρβιδίων (SiC) αυτών , οι χρήσεις τους , οι εφαρμογές , τα σχηματικά σύμβολα , οι γραφικές παραστάσεις , κυκλώματα δοκιμής , καθώς και τα πλεονεκτήματά τους , που μας κάνει να τα προτιμούμε έναντι των άλλων.

Πρόκειται για νέα καρβίδια του πυριτίου SiC που κυκλοφόρησαν πρόσφατα στην αγορά, από διάφορες ξένες εταιρίες , όπως για παράδειγμα είναι κυρίως η εταιρία Semi South . Από τις χώρες αυτές , θεωρώ ότι προμηθεύετε, σχετικά πρόσφατα και η Ελλάδα τα καρβίδια αυτά, στην προσπάθειά μας να έχουμε καλύτερη απόδοση στα τρανζίστορ , υψηλότερη ποιότητα , χαμηλότερο σχετικά κόστος , εξοικονόμηση χώρου , καθώς και αξιοπιστία αυτών.

Με βάση δημοσιεύσεις των εταιριών, χρήσιμες πληροφορίες του διαδικτύου και αρχεία pdf τα οποία παρέλαβα από τον καθηγητή κ. Πάχο Παύλο , προσπάθησα να καταγράψω όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία , για την ανάλυση τους , την κατανόηση , καθώς και την γνωριμία αυτών των τρανζίστορ στην χώρα μας, αφού πρόκειται για νέα τρανζίστορ , που ακόμη δεν είναι οικεία για τους μηχανικούς της χώρας μας.

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΙΣΑΓΩΓΗ”

1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ JFET

Το JFET προβλέφθηκε από το Julius Lilienfeld το 1925 και ως τα μέσα του 1930 η θεωρία λειτουργίας του ήταν αρκετά γνωστή .

Το 1947, οι ερευνητές John Bardeen, Walter Houser Brattain, και William Shockley προσπαθούσαν να κάνουν ένα JFET όταν ανακάλυψαν την κρυσταλλολογία σημείου-επαφών.

Το πρώτο πρακτικό JFET έγινε πολλά έτη αργότερα, παρά το ότι η ιδέα είχε συλληφθεί πολύ πριν από την κρυσταλλολογία συνδέσεων. Ως ένα ορισμένο βαθμό μπορεί να αντιμετωπιστεί ως υβρίδιο MOSFET και ενός BJT αν και ένα IGBT μοιάζει με τα περισσότερα των υβριδικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.

1.2 SEMI SOUTH – Η ΙΔΡΥΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΙΑ

Τα εργαστήρια SemiSouth A.E. , είναι ο κύριος κατασκευαστής της τεχνολογίας κρυσταλλολογιών καρβιδίου του πυριτίου (SiC) , για την υψηλή ισχύ, υψηλή απόδοση, εφαρμογές διαχείρισης και μετατροπής δύναμης περιβάλλοντος, όπου έχουν προωθήσει μια νέα οικογένεια FET με το χαμηλότερο κόστος , γνωστά ως ‘SiC JFETs’ με την πολύ καλή γραμμικότητα που διαθέτουν, και στοχεύουν στις ακουστικές εφαρμογές υψηλών σημείων.

Το συμβατό σύστημα με τα τυποποιημένα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδηγών πυλών, και οι δύο εκδόσεις των καρβιδίων αυτών, χαρακτηρίζουν έναν θετικό συντελεστή θερμοκρασίας για την ευκολία παραλλήλησης μίας εξαιρετικά γρήγορης μετατροπής ρεύματος μέχρι μια μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (150 °C) και ενός χαμηλού RDS (επάνω) ανώτατου 0.100Ω και 0.063Ω αντίστοιχα.

Οι συσκευές είναι διαθέσιμες σε TO-247 συσκευασίες. Οι αντιστάσεις των 100mΩ είναι επίσης διαθέσιμες υπό την μορφή κύβων για την ένταξη στις ενότητες. Τα σχόλια του Nelson Pass, (ιδρυτή του κύριου ακουστικού περάσματος του Nelson κατασκευαστών ενισχυτών, A.E.,) είναι : «κατά τη διάρκεια των τελευταίων σαράντα ετών έχω εκτιμήσει πολύ τις ιδιότητες της δύναμης των JFET στα ακουστικά κυκλώματα, και ο πειραματισμός αυτών αλλά και της δύναμης των JFETs με έχει πείσει για τις μεγάλες δυνατότητες τους» .

Με τη νέα δύναμη JFETs SiC από SemiSouth, αυτή η δυνατότητα έχει πραγματοποιηθεί στους αξιόπιστους γραμμικούς ενισχυτές δύναμης.

Στις αντιφατικές τοπολογίες, εκθέτουν μια βελτίωση από 50% έως 70% στη διαστρέβλωση, και στα single-ended κυκλώματα η βελτίωση είναι σχεδόν δεκαπλάσια.

Αυτήν την περίοδο παράγουμε επικερδώς έναν μικρό ακουστικό ενισχυτή υψηλών σημείων χρησιμοποιώντας (τις συσκευές SJEP120R100A) και συμμετέχουμε στην ανάπτυξη άλλων ενισχυτών υψηλότερης δύναμης χρησιμοποιώντας αυτό και τις συσκευές τρόπου μείωσης (SJDP120R085) .

Τα σχόλια Dieter Liesabeths, ο αντιπρόεδρος SemiSouth των πωλήσεων & το μάρκετινγκ, «αυτά τα μέρη είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για τα ακουστικά σχέδια ενισχυτών υψηλών σημείων που απαιτούν την καλύτερη απόδοση γραμμικότητας και τη χαμηλότερη διαστρέβλωση.

Έναντι του συμβατικού SIC JFET για τις εφαρμογές δύναμης, οι αξίες αυτών των ακουστικών μερών έχουν μειωθεί κατά περίπου 15% προκειμένου να ικανοποιηθεί το αίτημα των πελατών.»

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΠΥΡΙΤΙΟ”

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το **πυρίτιο** είναι το χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο **Si**, ατομικό αριθμό 14 και ατομική μάζα 28,0855 amu. Είναι ένα μεταλλοειδές που ανήκει στην ομάδα IV^A του περιοδικού πίνακα μαζί με τον Άνθρακα, το Γερμάνιο, τον Κασσίτερο και το Μόλυβδο.

Αυτό σημαίνει ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και είναι τετρασθενές και ηλεκτροθετικότερο από τον άνθρακα. Είναι το όγδοο (8^ο) κατά σειρά αφθονίας μάζας στοιχείο στο σύμπαν και δεύτερο στο φλοιό της Γης, αποτελώντας συγκεκριμένα το 25,7% της μάζας του, όπου όμως σπάνια βρίσκεται σε ελεύθερη στοιχειακή κατάσταση. Η πιο συνηθισμένη μορφή του στη διαστρική σκόνη, σε αστεροειδείς, δορυφόρους και πλανήτες είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) και διάφορες πυριτικές ενώσεις.

Το πυρίτιο και οι ενώσεις του έχουν πολλές βιομηχανικές χρήσεις. Το ίδιο το πυρίτιο είναι κύριο συστατικό των περισσότερων ημιαγωγικών συστημάτων και των μικροτσιπ. Οι ημιαγωγικές ιδιότητες των ημιαγωγών πυριτίου παραμένουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με των αντίστοιχων του γερμανίου. Ακόμη, το φυσικό του οξείδιο είναι πιο εύρηστο και έτσι σχηματίζεται καλύτερο ζεύγος ημιαγωγών - διηλεκτρικών, σε σχέση με κάθε άλλο γνωστό υλικό. Ακόμη, στη μορφή του χαλαζία και διαφόρων πυριτικών ενώσεων σχηματίζει χρήσιμα υαλικά, τσιμέντα και κεραμικά προϊόντα. Είναι ακόμη ένα κύριο συστατικό των σιλικονών, μια τάξη πολυμερών που περιέχουν πυρίτιο, άνθρακα, οξυγόνο και υδρογόνο (με γενικό τύπο [R₂SiO]_n, όπου R μονοσθενής οργανική ρίζα και όχι αποκλειστικά αλκύλιο).

Το πυρίτιο είναι απαραίτητο στοιχείο στη βιολογία, αν και ειδικά για τα ζώα αποτελεί απλά ιχνοστοιχείο. Είναι όμως πιο σημαντικό για το μεταβολισμό των φυτών, ειδικότερα για πολλά ποώδη από αυτά. Το πυριτικό οξύ αποτελεί ακόμη τη βάση για το σχηματισμό των κελυφών των μικροσκοπικών διατομών.

2.1.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ

Ως στοιχείο, το πυρίτιο σπάνια βρίσκεται ελεύθερο στη φύση. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το 87% του φλοιού της Γης, ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη γήινη φύση μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28% και το έβδομο (7^ο) πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν.

Κυριότερα ορυκτά του είναι ο χαλαζίας (παραλλαγές του είναι ο καπνίας, ο αμέθυστος, ο αχάτης, ο χαλκηδόνιος, ο σπάλιος και ο ίασπις), οι άστριοι, οι μαρμαρυγίες, ενώ είναι βασικό συστατικό της άμμου και του αμιάντου και πολλών άλλων πυριτικών ορυκτών.

2.1.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το πυρίτιο απαντά σε δύο «αλλοτροπικές» μορφές:

Μια άμορφη και μια κρυσταλλική.

Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεταλλική λάμψη, είναι σκληρό και έχει σκούρο γκρι χρώμα. Είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και δεν είναι ούτε ελατό ούτε όλκιμο. Είναι ημιαγωγός και την ιδιότητα αυτή διατηρεί ακόμη και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας.

2.1.3 ΧΡΗΣΗ

Το καθαρό Πυρίτιο είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και χρησιμοποιείται ευρέως στους ημιαγωγούς, καθώς παραμένει ημιαγωγός σε υψηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με το Γερμάνιο, και επειδή τα οξείδιά του υφίστανται επεξεργασία εύκολα σε κλίβανο και σχηματίζουν καλύτερες διεπιφάνειες ημιαγωγού/διηλεκτρικού από σχεδόν όλους τους άλλους συνδυασμούς στοιχείων.

2.2 ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι α ένωση από πυρίτιο και άνθρακα, αλλά εμφανίζεται επίσης στη φύση ως εξαιρετικά σπάνιο μέταλλευμα moissanite.

- Έχει σημείο τήξεως τους 2730°C
- Είναι αδιάλυτος
- Εμφανίζεται ως μαύρη-πράσινη σκόνη
- Έχει πυκνότητα 3,22 g/cm³, στερεό

Λόγω της σπανιότητας του (φυσικού moissanite), το καρβίδιο του πυριτίου είναι χαρακτηριστική ένωση η οποία γίνεται από τον άνθρωπο. Συχνότερα χρησιμοποιείται με το γνωστό (συχνά από το εμπόριο) σήμα carborundum, και πιο πρόσφατα ως ‘α ημιαγωγός’.

Η απλούστερη διαδικασία κατασκευής του, είναι να συνδυαστεί : **πυρίτιο, άμμος και άνθρακας** σε ένα καλούπι από γραφίτη, σε ηλεκτρικό φούρνο αντίστασης Acheson σε υψηλή θερμοκρασία, μεταξύ 1600 και 2500 °C.

Το υλικό που διαμορφώνεται στο φούρνο Acheson, ποικίλλει στην αγνότητα, σύμφωνα με την απόστασή του από το γραφίτη, (αντιστάτης πηγή θερμότητας).

Υπάρχουν αλλαγές χρώματος, από μπλε και μαύρο και αυτά τα σκοτεινότερα κρύσταλλα είναι λιγότερο καθαρά. Το άζωτο και το αλουμίνιο είναι κοινοί τύποι, οι οποίοι έχουν συνήθως επιπτώσεις στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του SiC.

Το καθαρότερο καρβίδιο του πυριτίου μπορεί να γίνει με την ακριβότερη διαδικασία απόθεση χημικού ατμού (CVD). Το καρβίδιο του πυριτίου (carbide glass), αυξάνεται χρησιμοποιώντας την ‘α φυσική μεταφορά ατμού’, μέθοδος γνωστή συνήθως ως τροποποιημένη μέθοδος Lely.

Το καθαρότερο καρβίδιο του πυριτίου μπορεί επίσης να προετοιμαστεί από θερμική αποσύνθεση από ένα πολυμερές σώμα, πολύ (methylsilane), κάτω από αδρανής ατμόσφαιρα στις χαμηλές θερμοκρασίες. Σχετικά με τη CVD διαδικασία, η μέθοδος πυρόλυσης είναι συμφέρουσα επειδή το πολυμερές σώμα μπορεί να διαμορφωθεί στις διάφορες μορφές πριν από θέρμανση στον κεραμικό.

2.2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το καρβίδιο του πυριτίου υπάρχει με τουλάχιστον 70 κρυστάλλινες μορφές. Το άλφα καρβίδιο του πυριτίου (α -SiC) είναι ο συνηθέστερος τύπος, διαμορφώνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 2000°C και έχει την ‘ **α εξαγωνική δομή**’ κρυστάλλου (παρόμοιος με Wurtzite).

Η **βήτα τροποποίηση** (β -SiC), κυβική δομή κρυστάλλου (παρόμοια με το διαμάντι), διαμορφώνεται στις θερμοκρασίες κάτω από το 2000°C. Μέχρι σήμερα, η βήτα μορφή είχε σχετικά λίγες εμπορικές χρήσεις, αν και υπάρχει τώρα αυξανόμενο ενδιαφέρον για χρήση του ως υποστήριξη για τους ετερογενείς καταλύτες, λόγω της «**περιοχής υψηλότερης επιφάνειάς**» του έναντι της ‘ **α εξαγωνική δομής**’.

Το καρβίδιο του πυριτίου έχει μια συγκεκριμένη πυκνότητα 3.2, και η υψηλή θερμοκρασία εξάχνωσής της (περίπου 2700°C) την καθιστά χρήσιμη για ρουλεμάν και μέρη φούρνων. Το καρβίδιο του πυριτίου δεν λειώνει σε οποιαδήποτε γνωστή τιμή πίεσης. Είναι επίσης ιδιαίτερα αδρανές χημικά.

Υπάρχει αυτήν την περίοδο πολύ ενδιαφέρον για τη χρήση του ως **α υλικό ημιαγωγών** στην ηλεκτρονική, για την υψηλή του θερμική αγωγιμότητα, το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο (δύναμη διακοπής) και την υψηλή πυκνότητα, η οποία το κάνει πιο ελπιδοφόρο από το πυρίτιο για τις συσκευές μεγάλης ισχύος. Επιπλέον, έχει ισχυρή σύζευξη, η οποία μαζί με το υψηλό σημείο εξάχνωσής της, επιτρέπει την πρακτική χρήση στη θέρμανση και τη μορφοποίηση των μετάλλων. Το SiC έχει επίσης έναν πολύ χαμηλό συντελεστή ‘**θερμικής διαστολής**’.

Το καθαρό SiC είναι άχρωμο. Στο βιομηχανικό προϊόν, συναντάται στο μαύρο χρώμα και λίγο καφέ, το οποίο προκύπτει λόγω των ακαθαρσιών του σιδήρου. Η τόξο-όπως λαμπρότητα των κρυστάλλων, όπου προκαλείται από το **α στρώμα** του διοξειδίου του πυριτίου, όπως αυτό διαμορφώνεται στην επιφάνεια του.

2.2.1.1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

Το καθαρό α -SiC είναι εγγενής ημιαγωγός με χάσματα ζωνών από το eV 3.28 (4H) και το eV 3.03 (6H) αντίστοιχα.

2.2.1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται για τα μπλε LEDs, εξαιρετικά γρήγορα, υψηλής τάσεως Δίοδοι Schottky, MOSFETs και υψηλής θερμοκρασίας θυρίστορ για την υψηλής ισχύος μετατροπή. Ένα έγγραφο από τον Jayan Baliga κατέδειξε τη δυνατότητα του SiC ως υλικό συσκευών δύναμης.

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.3.1 ΑΛΕΞΙΚΕΡΑΥΝΑ

Η πιο πρόωρη ηλεκτρική εφαρμογή του SIC, ήταν μέσα σε καλύπτρες αστραπής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι συσκευές, αρχικά πρέπει να εκθέσουν υψηλή αντίσταση, μέχρι η τάση τους να φθάνει σε ένα ορισμένο κατώτατο όριο B_T , στη συνέχεια, η αντίστασή τους πρέπει να μειωθεί σε ένα χαμηλότερο επίπεδο και να διατηρήσει το επίπεδο αυτό μέχρι την εφαρμοσμένη πτώση τάσης (κατωτέρω B_T).

Αναγνωρίστηκε αρχικά, ότι εκείνο το SIC είχε μια τέτοια τάση η οποία ήταν εξαρτώμενη από αντίσταση, και έτσι τα SIC συνδέθηκαν μεταξύ υψηλής τάσεως, ηλεκτροφόρα καλώδια και της γείωσης. Όταν η αστραπή στη γραμμή τους, θα αυξήσει την τάση γραμμών αρκετά, η στήλη SIC θα διευθύνει, επιτρέποντας στο ρεύμα α (I_α) να περάσει ακίνδυνα στη γη σύμφωνα με το ηλεκτροφόρο καλώδιο.

Τέτοιες στήλες SIC, απέδειξαν ότι διευθύνουν σημαντικά στις κανονικές τάσεις λειτουργίας των ρευματοδοτών και έπρεπε έτσι να τοποθετηθούν απευθείας με το **‘α χάσμα σπινθήρων’**. Αυτό το χάσμα σπινθήρων είναι ιονισμένο και αγωγίμο όταν αυξάνει η αστραπή την τάση του αγωγού ηλεκτροφόρων καλωδίων, κατά συνέπεια συνδέοντας αποτελεσματικά τη στήλη SIC μεταξύ του αγωγού ισχύος και της γης. Τα χάσματα σπινθήρων που χρησιμοποιούνται στα ανασχετικά μέσα αστραπής είναι αναξιόπιστα, είτε αποτυγχάνουν να χτυπήσουν ένα τόξο όταν απαιτείται, είτε αποτυγχάνουν να κλείσουν, (στην τελευταία περίπτωση λόγω της υλικής αποτυχίας) είτε τη μόλυνση από τη σκόνη είτε το άλας.

Οι χρήσεις των στηλών SIC προορίστηκαν αρχικά ως τρόπος για να εξαλειφτεί η ανάγκη για το χάσμα σπινθήρων σε μια καλύπτρα αστραπής. Τα δημιουργημένα **‘επικαλύμματα αστραπής’** του SIC χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλείο αστραπής-προστασίας και πωλήθηκαν στην κάτω Γερμανία και σε εμπορικά σήματα, μεταξύ των άλλων.

2.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΙΣ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Λόγω της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας, το SIC χρησιμοποιείται επίσης ως υπόστρωμα για άλλα υλικά ημιαγωγών όπως νιτρίδιο γαλλίου. Λόγω του εύρους χάσματος ζωνών. Οι συσκευές SIC κατέχουν επίσης την αυξανόμενη ανοχή ακτινοβολίας, κάνοντας το SIC ένα επιθυμητό υλικό για την υπεράσπιση και τις αεροδιαστημικές εφαρμογές. Το νιτρίδιο γαλλίου είναι ο ίδιος επίσης ένα εναλλακτικό υλικό σε πολλές εφαρμογές. Αν και διαμάντι, οι συσκευές SIC είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν επειδή είναι καταλληλότερες και μπορούν να αυξήσουν ένα στρώμα μόνωσης διοξειδίου του πυριτίου στην επιφάνεια μιας γκοφρέτας καρβιδίου του πυριτίου, όπου είναι στο διαμάντι.

Το καθαρό SIC είναι φτωχός ηλεκτρικός αγωγός. Με την προσθήκη κατάλληλου υλικού πρόσμιξης ενισχύει σημαντικά την αγωγιμότητά του.

Χαρακτηριστικά, αυτό το υλικό έχει έναν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας όπου είναι μεταξύ της θερμοκρασίας δωματίου και περίπου 900°C, και θετικό συντελεστή στις υψηλότερες θερμοκρασίες, που το καθιστούν ως ένα κατάλληλο υλικό για υψηλής θερμοκρασίας στοιχεία θέρμανσης.

2.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Το καρβίδιο χρησιμοποιείται, λόγω της σκληρότητάς του και της υψηλής εφαρμογής σημείου τήξης του (όπως Λειαντικός) και ως συστατικό για τις πυρίμαχες ύλες.

Οι μεγάλες ποσότητες ,του λιγότερο καθαρού SIC γίνονται από *μεταλλουργικό* SIC για το κράμα των χυτοσιδηρών με τις χρήσεις Si και άνθρακα. Εφαρμογή αυτών είναι επίσης : **Μονωτής, Στοιχεία καυσίμων σε υψηλής θερμοκρασίας πυρηνικούς αντιδραστήρες.**

Επιπλέον χρησιμεύει στο μίγμα με άλλα υλικά από το σκληρό συγκεκριμένο υλικό προσθηκών, προκειμένου να κατασταθούν τα βιομηχανικά χρώματα ανθεκτικά στην τριβή.

Τα δαχτυλίδια στις υψηλής ποιότητας ράβδους, κατασκευάζονται συνήθως από το SIC. Το πλεονέκτημα είναι επίσης εδώ έναντι από άλλα υλικά, στη σκληρότητα, η οποία αποτρέπει ότι η γραμμή αυτή κάτω από τις υψηλές περικοπές φορτίων (και τελικά από το γδάρισμα), σχίζει μια εγκοπή επάνω στο δαχτυλίδι.

Το κεραμικό SIC αντιπροσωπεύεται, σε ένα από τα πολύ συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά λόγω των διάφορων χαρακτηριστικών του.

2.3.4 ΕΙΔΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΑΡΒΙΔΙΩΝ

Ανάλογα με την κατασκευή του, (περισσότερο κεραμική) πρέπει να διαφοροποιηθεί με το καρβίδιο του πυριτίου ως εξής:

- **Open silicon carbide ceramic :**
 - Συνδεδεμένο καρβίδιο του πυριτίου
 - Επανακρυσταλλωμένο καρβίδιο του πυριτίου (RSiC)
 - Νιτρίδιο καρβίδιο του πυριτίου (NSiC)

- **Silicon Carbide ceramic seals**
 - Συνδεδεμένο, καρβίδιο του πυριτίου (SiSiC)
 - Συμπυκνωμένο καρβίδιο του πυριτίου (SSiC)
 - Καντό (ISO-στατικό) πιεσμένο καρβίδιο του πυριτίου (HpSiC, HipSiC)
 - Καρβίδιο του πυριτίου υγρής φάσης (LPSiC)

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“SiC JFETs”

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το JFET, είναι ίσως το πιο απλούστερο τρανζίστορ που υπάρχει. Έχει κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά, κυρίως μια πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου. Δυστυχώς, ωστόσο (για τα JFET), το MOSFET έχει μία ακόμη μεγαλύτερη αντίσταση εισόδου. Αυτό, μαζί με τα πολυάριθμα άλλα πλεονεκτήματα των τρανζίστορ MOS, έκανε τα JFET πρακτικά, απηρχαιωμένα. Επί του παρόντος, τις εφαρμογές, περιορίζονται σε διακριτό κύκλωμα σχεδίασης, όπου χρησιμοποιείται ως ένας ενισχυτής και ως ένας διακόπτης. Ένας άλλος σημαντικός λόγος για τα JFET, συμπεριλαμβανομένης της μελέτης των ηλεκτρονικών, είναι ότι βοηθά στην κατανόηση της λειτουργίας των συσκευών γαλλίου του Αρσενίου.

3.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ

Η σύνδεση πυλών jfet ή jugfet, είναι ο πιο απλούστερος τύπος από τα field-effect τρανζίστορ.

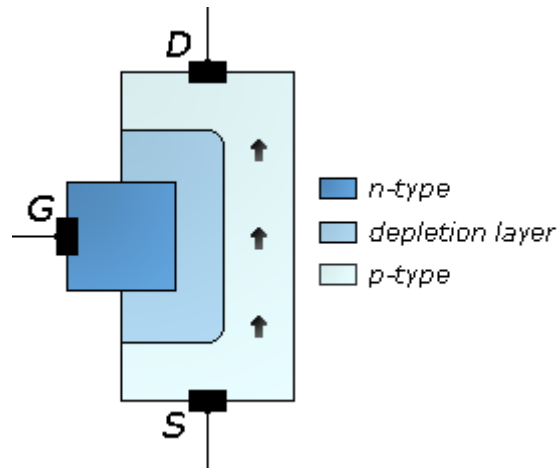
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως:

- ηλεκτρονικά-ελεγχόμενος διακόπτης ή
- σαν μια ελεγχόμενη-τάση, αντίσταση.

Η ηλεκτρική ροή διαρρέει μεταξύ ενός ημιαγωγικού καναλιού μεταξύ των τερματικών «πηγής» (source) και «αγωγών» (drain).

Με την εφαρμογή μιας τάσης σε ένα τερματικό «πύλη» (gate), το κανάλι «pinched off» ενεργοποιείται, έτσι ώστε το ηλεκτρικό ρεύμα εμποδίζεται ή σβήνει εντελώς.

Παρακάτω, φαίνεται το κύκλωμα του jfet :



Σχήμα 3.1.1.1 : Κύκλωμα JFET .

Όπου: **G**: Gate
D: Drain
S: Source

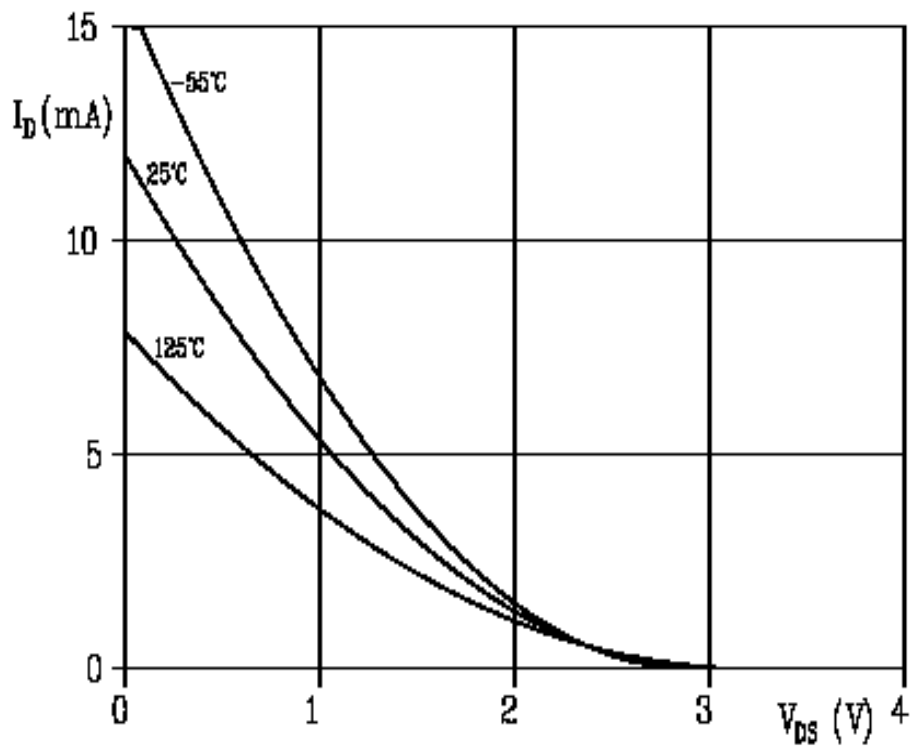
Το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέεται από την πηγή(source), στους αγωγούς(drain), όταν δοθεί μία τάση στην πύλη(gate).
Το jfet έχει την πιο κάτω μορφή:



Σχήμα 3.1.1.2 : Μορφή JFET .

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ενός JFET για διάφορες θερμοκρασίες. Παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί αύξηση ή μείωση του ρεύματος I_D , ανάλογα με τη θέση του σημείου λειτουργίας του JFET. Υπάρχει βέβαια κάποιο σημείο της χαρακτηριστικής που παραμένει σταθερό σε μεταβολές της θερμοκρασίας (σημείο Z) . Αποδεικνύεται ότι το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε τάση $|V_D| -0,63V$.

Στην γραφική παράσταση που ακολουθεί, φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας, στη χαρακτηριστική της μεταφοράς.

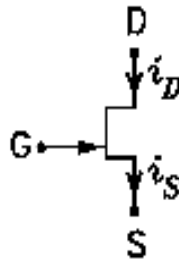


Σχήμα 3.1.1.3 : Επίδραση θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική μεταφοράς.

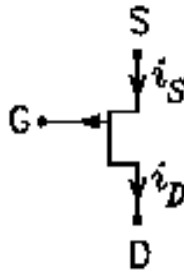
3.1.2 ΤΥΠΟΙ JFET

Τα JFET έχουν δύο τύπους, οι οποίοι είναι οι εξής :

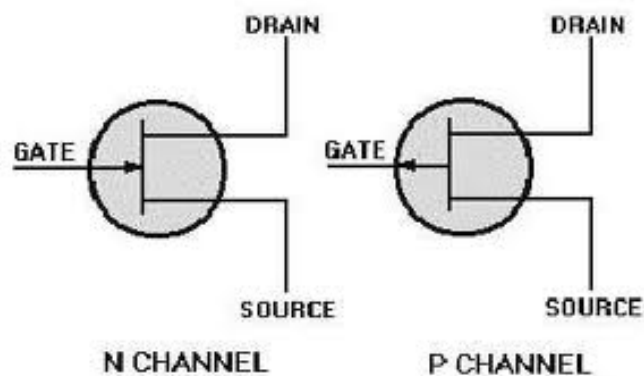
- Τύπου ν (n-channel) , όπου $U_{GS} < 0$



- Τύπου π (p-channel) , όπου $U_{GS} > 0$



Και με άλλη μορφή (οι ίδιοι τύποι), με τον κύκλο στη μέση :

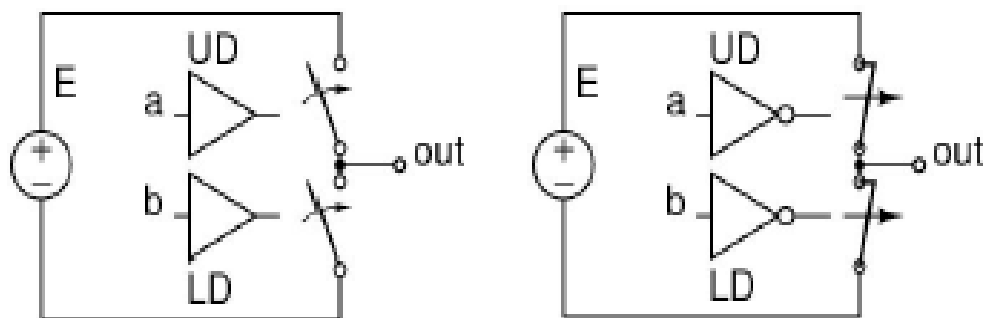


Σχήμα 3.1.2 : Τύποι JFET .

3.1.2.1 ΔΙΑΦΟΡΕΣ – ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ Normally on και off

α) Στην πλευρά ενέργειας

Η πιο κοινή δομή του μετατροπέα είναι το πόδι του αντιστροφέα, δύο διακόπτες τροφοδοσίας είναι συνδεδεμένοι σε μια πηγή τάσης και ελέγχονται ώστε να είναι εναλλακτικά αγωγή τη, παράγοντας μια τετραγωνική κυματομορφή τάσης για τα δεδομένα εξόδου του τερματικού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1.2.1.α**:



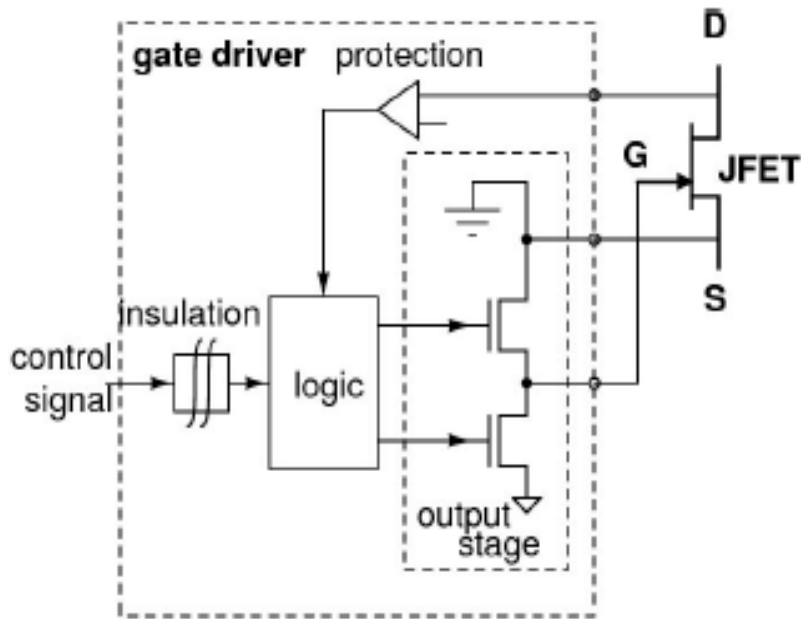
Σχήμα 3.1.2.1.α : Κύκλωμα διακοπών με πηγή τροφοδοσίας .

Με χρήση normally-on ή normally off συσκευών δεν έχει επιπτώσεις στην «πλευρά ενέργειας», αλλά χρησιμοποιείται ένας οδηγός αντιστροφέα για να διατηρήσει ίδια λογική. Η βασική διαφορά έγκειται στη συμπεριφορά των προγραμμάτων οδήγησης κατά τη διάρκεια του power-up.

β) Στην πλευρά ελέγχου

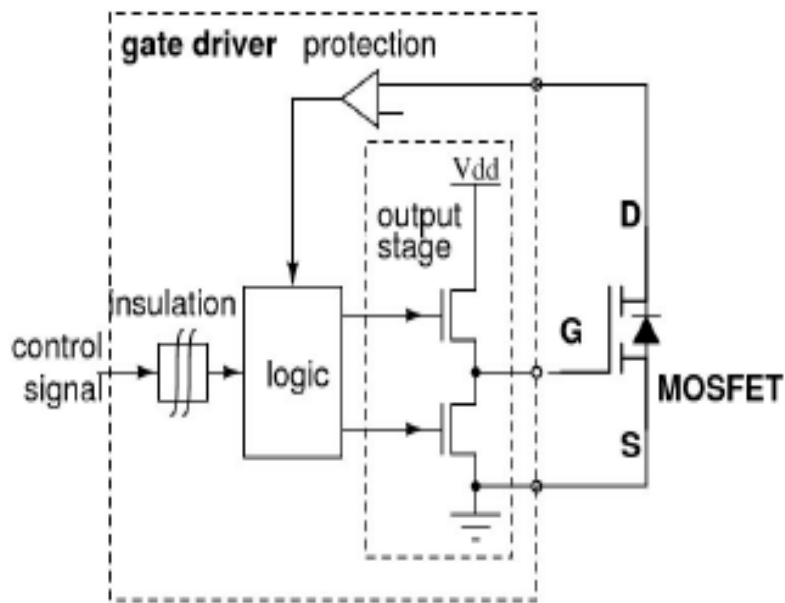
Οι διακόπτες ενέργειας Normally-on, ελέγχονται όπως ακριβώς και οι συσκευές Normally-off, χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα οδήγησης πύλης. Αυτό το υποσύστημα λαμβάνει ένα μήνυμα ελέγχου για να ορίσετε την κατάσταση του διακόπτη. Το σήμα ελέγχου του, παρέχεται από τον ελεγκτή του μετατροπέα. Στο **Σχήμα 3.1.2.1.β** παρουσιάζει έναν οδηγό πύλης, συμπεριλαμβάνοντας ένα είδος προστασίας του κυκλώματος αντίχενωσης της brain voltage. Μια λογική πυρήνα επεξεργάζεται πληροφορίες ελέγχου και προστασίας. Η πύλη ισχύος JFET είναι βασισμένη στο στάδιο εξόδου. Μπορεί να σημειωθεί ότι η αρνητική τάση είναι απαραίτητη για να ενεργοποιηθεί το JFET στην κατάσταση Off.

Η μόνωση είναι απαραίτητη, ως τάση διακοπών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με πηγές διαφορετική υψηλής τάσης. Η αναφορά πηγής είναι συνδεδεμένη με το υψηλότερο σημείο της εξόδου.



Σχήμα 3.1.2.1.β : Κύκλωμα οδήγησης JFET σε κατάσταση Normally-on.

Οι Normally-off συσκευές όπως τα MOSFETs συνδέονται και αυτά με ένα πρόγραμμα οδήγησης πύλης. Η διαφορά τους είναι στη σύνδεση της τάσης αναφοράς της φάσης εξόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.2.1.γ.



Σχήμα 3.1.2.1.γ : Κύκλωμα Mosfet σε κατάσταση Normally-off.

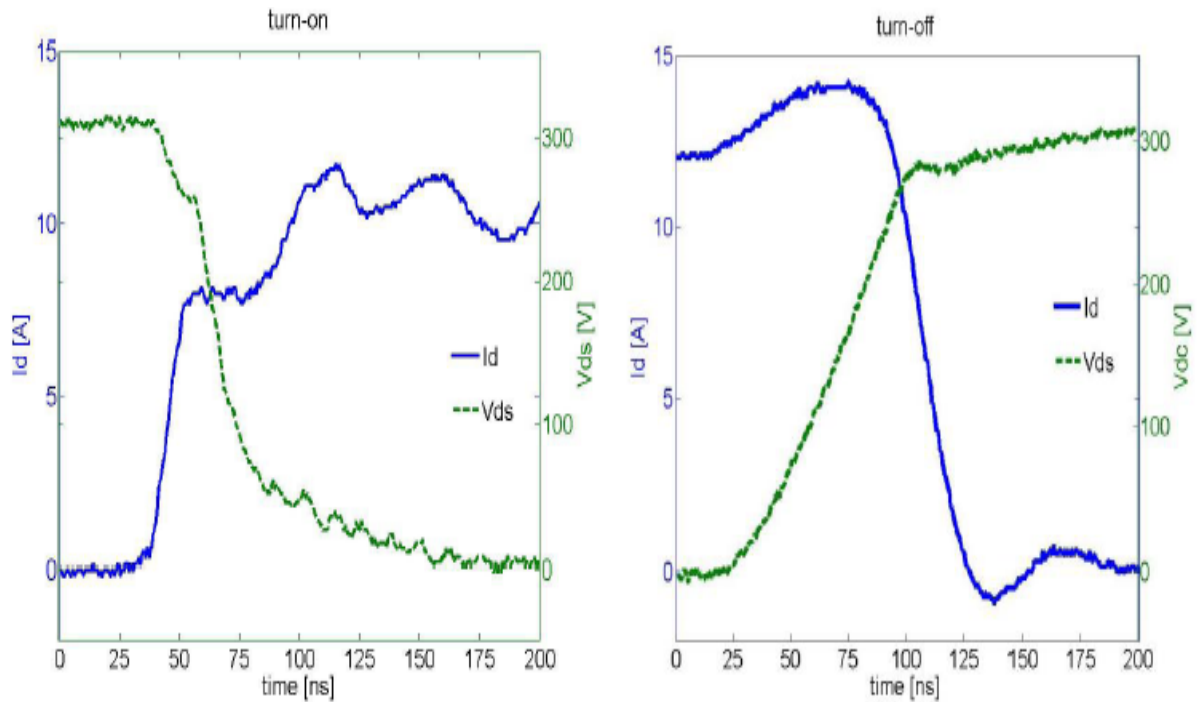
ΔΙΑΦΟΡΑ : Για ένα JFET, έδαφος και πηγή είναι στο υψηλότερο επίπεδο τάσης, ενώ για το MOSFET πηγή και έδαφος, είναι στο κατώτατο επίπεδο. Ένα MOSFET απαιτεί μια θετική τάση στην πύλη, να είναι 'ανοιχτό', (θέση on) ενώ μια αρνητική φορά θα γυρίσει το JFET σε θέση off.

ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ : Και για τις δύο συσκευές, υψηλό επίπεδο πύλης, σημαίνει σε λειτουργία, ενώ χαμηλό επίπεδο πύλης, σημαίνει εκτός λειτουργίας. Έτσι το λογικό κύκλωμα χωρίς οδήγηση πύλης είναι το ίδιο και για τις δύο, δηλαδή MOSFET και JFET.

Η προστασία κυκλώματος ανιχνεύει μια τάση (Drain voltage) ως προς την πηγή. Για τα MOSFET η αναφορά είναι το χαμηλότερο επίπεδο, ώστε το κύκλωμα προστασίας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ίδια παροχή τάσης, όπως στο στάδιο εξόδου. Για το JFET, το πρόγραμμα οδήγησης πύλης «βρίσκεται κάτω από» την τάση αναφοράς (αρνητική) ώστε να έχουμε μια θετική τάση με χρήση op-amp (για παράδειγμα, πρέπει να προστεθεί μία θετική παροχή) .

Καταλήγοντας: ο ίδιος οδηγός δομής, μπορεί να λειτουργήσει (οδηγήσει) και τα Normally-off MOSFET και τα Normally-on JFET : αρκεί μια αλλαγή σύνδεσης για την πηγή αναφοράς . Ακόμη και αν οι αντιστάσεις χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή της περιστροφής on και off, τοποθετούνται στον ίδιο τρέχων βρόχο. Η διαφορά θα εμφανιστεί στην παρεχόμενη τάση της φάσης εξόδου ως πύλη κατώτατου ορίου τάσης που διαφέρει μεταξύ JFET και MOSFET. Ο εφοδιασμός μιας περαιτέρω (έξτρα) θετικής τάσης θα μπορούσε να είναι αναγκαία για την ανίχνευση μιας «**Drain voltage**» στο πρόγραμμα οδήγησης JFET.

Τέλος, απεικονίζονται κυματομορφές, κατά την δυναμική ελέγχου.



Σχήμα 3.1.2.1.δ : Κυματομορφές on και off κατά τη διάρκεια δυναμικού ελέγχου ενός SiC JFET, για ρεύμα I_d (A), συνάρτησε του χρόνου t (ns).

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Το διάγραμμα αυτό μας δείχνει τις απώλειες ενός ανοιχτού και ενός κλειστού SiC JFET.

3.1.2.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ JFET

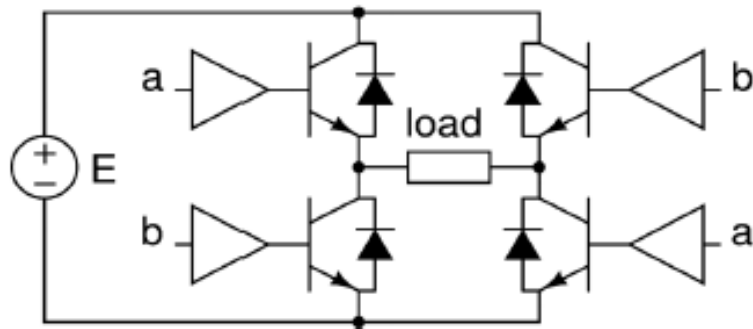
Τα JFET έχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας , οι οποίες είναι:

- α) Normally off (Κανονικά απενεργοποιημένη)**
- β) Normally on (Κανονικά ενεργοποιημένη)**

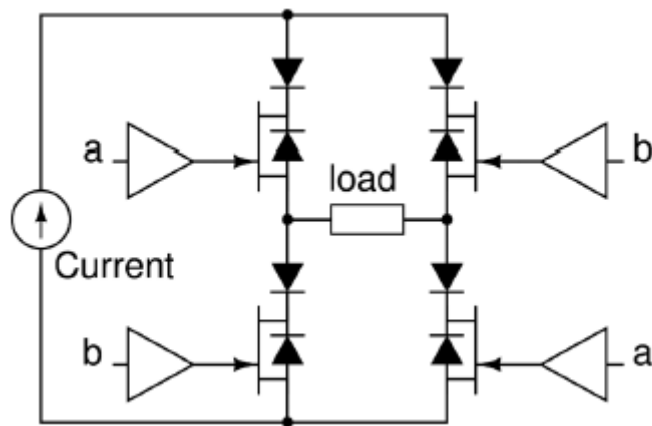
Μέχρι πρόσφατα, την εξουσία ημιαγωγών σε διακόπτες συσκευών είχαν οι Normally-Off, δηλαδή, σε περίπτωση έλλειψης ενέργειας στον έλεγχο του ηλεκτροδίου, η δομή ημιαγωγού, ήταν στο Off-μέλος.

Οι σημερινοί υψηλής απόδοσης μετατροπείς ενέργειας JFETs για υψηλή συχνότητα, υψηλή θερμοκρασία ή υψηλού βαθμού απόδοσης JFETs ενέργειας είναι συνήθως στις συσκευές. Αυτό έχει επιπτώσεις για το πρόγραμμα οδήγησης πύλης και την συμπεριφορά του μετατροπέα. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι οι βραχυκυκλωμένοι υπό τάση αναστροφείς (VFI). Το πρόβλημα και η λύση αυτού περιγράφονται πιο κάτω.

Συνήθως, αναστροφείς τροφοδότησης τάσης (VFI) εφαρμογή Normally-Off συσκευών, όπως το IGBT, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι Normally-Off συσκευές είναι σχεδόν οι μόνες διαθέσιμες συσκευές. Φαίνεται φυσικό να συνδεθεί ένα πόδι μετατροπέα τοποθετημένο σε σειρά, συνδεδεμένο με διακόπτες, παράλληλα σε μια πηγή τάσης, όπως φαίνεται πιο κάτω στο **Σχήμα 3.1.2.2.α**.



Σχήμα 3.1.2.2.α : Κύκλωμα μετατροπέα τροφοδότησης τάσης με χρήση Normally-off τρανζίστορ.



Σχήμα 3.1.2.2.β : Τρέχων ρεύμα στο μετατροπέα με χρήση Normally-on JFET

- Στο Σχήμα 3.1.2.2.α, έχουμε Normally-off, ενώ
- Στο Σχήμα 3.1.2.2.β, έχουμε Normally-on .

3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ SiC ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ – ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΥΣ

Η σημερινή τεχνολογία Si φθάνει τα όρια του θεωρητικού υλικού. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί αυτοί, νέα ημιαγωγικά στοιχεία ερευνώνται. Η τεχνολογία των SiC είναι η πιο κατάλληλη ανάμεσα στα ποικίλα είδη ημιαγωγών τα οποία εξετάζονται. Ορισμένα πλεονεκτήματα του SiC ενέργειας βασισμένα σε συσκευές σε σύγκριση με Si βασισμένο σε συσκευές ενέργειας είναι οι εξής:

- Οι συσκευές SiC έχουν υψηλότερη ανάλυση των τάσεων, επιτρέποντας έτσι τη μείωση στην αντίσταση στον κλάδο Ron. Χαμηλότερη Ron σημαίνει επίσης μικρότερες απώλειες αγωγιμότητας, ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται υψηλότερη συνολική απόδοση μετατροπής.
- Το SiC ημιαγωγών έχει μεγαλύτερο κενό και έτσι μπορεί να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά, οι συσκευές Si, μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα σύνδεσμο μέγιστης θερμοκρασίας των 150 °C .
- Κατά την ορθή και ανάστροφη πόλωση, τα χαρακτηριστικά των συσκευών SiC, ποικίλουν ελαφρά με την διαφορά θερμοκρασίας. Οπότε είναι πάρα πολύ αξιόπιστα.
- Οι συσκευές SiC, έχουν τέλεια χαρακτηριστικά ανάστροφης ανάκτησης. Με μικρό ρεύμα ανάστροφης ανάκτησης, εναλλάσσοντας τις απώλειες και μειώνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, υπάρχει μικρότερη ανάγκη για αποκοπή. Σαν αποτέλεσμα, δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές απλού διακόπτη για να μειώσουμε τις απώλειες εναλλαγής.
- Λόγω της χαμηλής μεταγωγής απώλειες, οι συσκευές SiC μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες, που δεν είναι δυνατή με συσκευές Si σε επίπεδα ισχύος, τα οποία είναι περισσότερες από μερικές δεκάδες των KW.

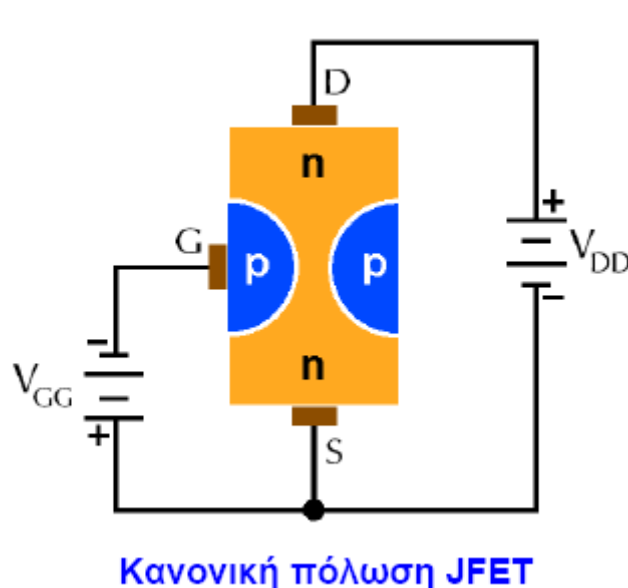
3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Η λειτουργία των JFET είναι όπως αυτή μιας μάνικας κήπων.

Η ροή του νερού μέσω μιας μάνικας μπορεί να ελεγχθεί με τη συμπίεση του, για να μειώσει τη διατομή η ροή της ηλεκτρικής φόρτισης μέσω ενός JFET ελέγχεται με το μεταφέρων ρεύματος κανάλι. Το ρεύμα εξαρτάται επίσης, από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ της πηγής και του αγωγού .

Η λειτουργία τους βασίζεται στο γεγονός ότι ένα κανάλι ημιαγωγού με πρόσμιξη συμπεριφέρεται σαν ωμική αντίσταση, της οποίας όμως η τιμή μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τη διατομή του καναλιού.

Η διατομή του καναλιού μπορεί να διαμορφώνεται με την εφαρμογή κάποιου εξωτερικού πεδίου, γεγονός στο οποίο τα fet επαφής, δηλαδή τα JFET, οφείλουν και το όνομα τους.



Σχήμα 3.3.α : Κανονική πόλωση JFET .

Αν και η εξέτασή μας επικεντρώνεται σε συσκευή τύπου-n, ισχύει εξίσου και στο JFET καναλιού-p αν αναγνωρίσουμε ότι οι πολικότητες τάσης και οι κατευθύνσεις ρευμάτων στις συσκευές τύπου p είναι αντίθετες από τις αντίστοιχες πολικότητες και κατευθύνσεις των JFET καναλιού τύπου n. Παρατηρούμε ότι οι περιοχές πύλης και το κανάλι αποτελούν μια επαφή pn που, στην λειτουργία του JFET, διατηρούνται σε κατάσταση ανάστροφης πόλωσης.

Αν εφαρμοστεί μια αρνητική τάση πύλης – πηγής η επαφή πολώνεται κατά την ανάστροφη φορά. Το ίδιο συμβαίνει αν εφαρμοστεί μια θετική τάση απαγωγού – πηγής. Στις δυο πλευρές της επαφής pn με ανάστροφη πόλωση υπάρχουν περιοχές φορτίων χώρου.

Οι φορείς ρεύματος έχουν διαχυθεί κατά μήκος της επαφής, αφήνοντας μόνο ακάλυπτα θετικά ιόντα στην πλευρά n και αρνητικά ιόντα στην πλευρά p. Καθώς αυξάνει η ανάστροφη πόλωση κατά μήκος της επαφής, αυξάνει και το πάχος της περιοχής των ακίνητων ακάλυπτων φορτίων.

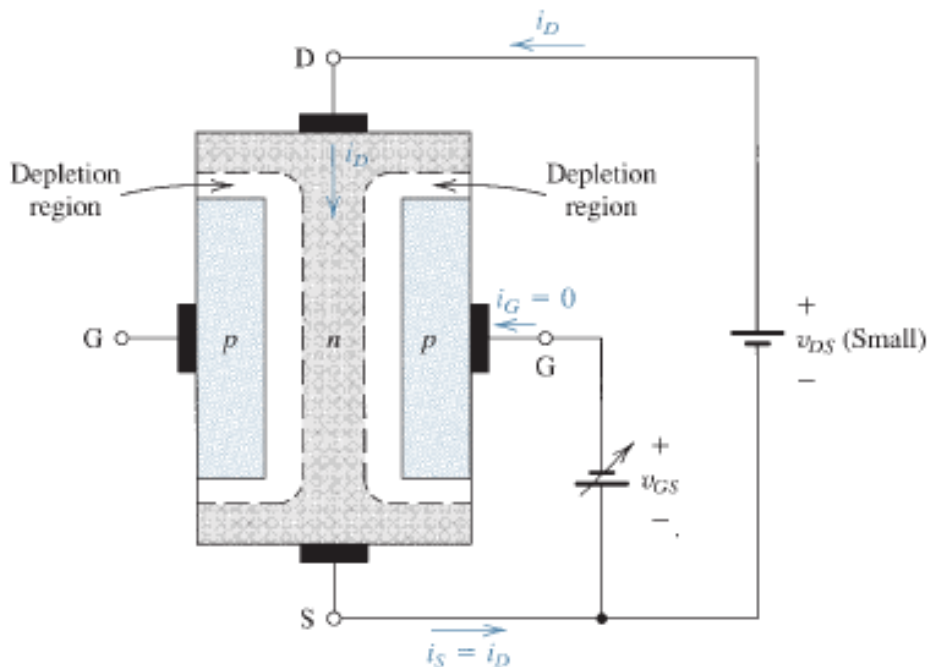
Έτσι το αποτέλεσμα είναι ένα στρώμα φορτίων χώρου που βρίσκεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο κανάλι n. Η αγωγιμότητα της περιοχής αυτής είναι μηδέν επειδή δεν υπάρχουν διαθέσιμοι φορείς ρεύματος. Έτσι, βλέπουμε ότι όταν η ανάστροφη τάση αυξάνει το ενεργό πλάτος του καναλιού στο παρακάτω σχήμα ελαττώνεται.

Σε τάση πύλης – πηγής $V_{GS} = V_p$, που ονομάζεται τάση «διάτρησης», το πλάτος του καναλιού γίνεται μηδέν επειδή όλο το ελεύθερο φορτίο έχει απομακρυνθεί από το κανάλι.

Έτσι, για σταθερή τάση απαγωγού – πηγής, το ρεύμα απαγωγού θα είναι συνάρτηση της τάσης ανάστροφης πόλωσης κατά μήκος της επαφής πύλης. Επειδή ο μηχανισμός ελέγχου του ρεύματος είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης του πεδίου που σχετίζεται με την περιοχή εκκένωσης, στην ονομασία της διάταξης χρησιμοποιείται ο όρος «φαινόμενο πεδίου» (field effect).

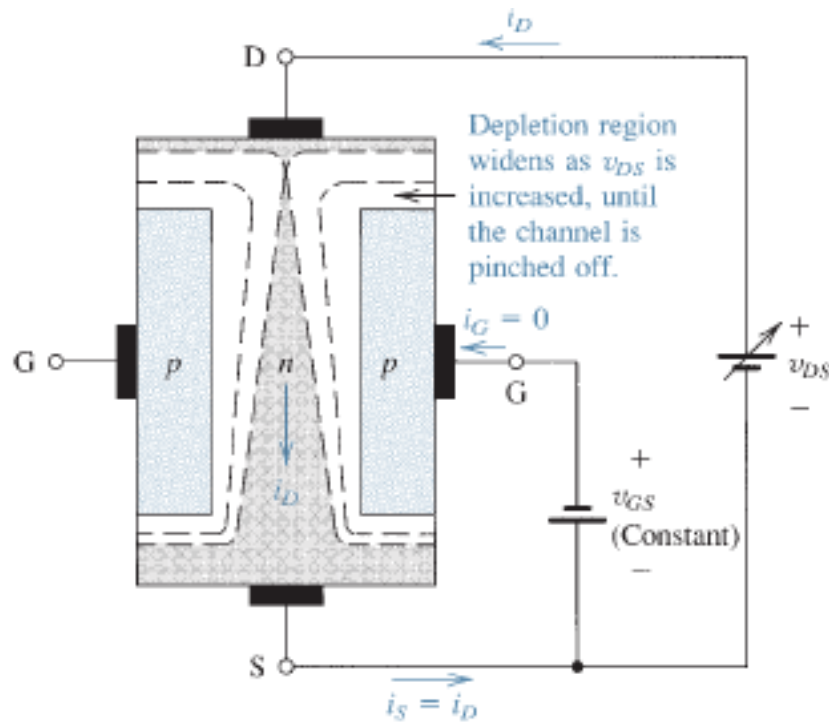
Και έτσι έχουμε, τα **junction field effect transistors**, γνωστά και ως **JFETs**.

Στη συνέχεια ακολουθεί η φυσική λειτουργία των JFETs n-τύπου :



Σχήμα 3.3.β : Λειτουργία για μικρές τιμές της V_{DS} .

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Για μικρές τιμές της V_{DS} , το κανάλι είναι ομοιόμορφο, και η συσκευή λειτουργεί ως αντίσταση, της οποίας η τιμή ελέγχεται από την V_{DS} .



Σχήμα 3.3.γ : Λειτουργία με αύξηση τιμής της V_{DS} .

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Αυξάνοντας την τιμή της V_{DS} , το κανάλι στην προσπάθειά του να γίνει ομοιόμορφο, πιέζεται και έχουμε τελικά «pinch off». Σημειώνεται, ότι αν και δεν εμφανίζεται, οι δύο περιοχές πυλών είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες μεταξύ τους.

3.3.1 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

α) Ωμική περιοχή : Είναι εκείνη η περιοχή λειτουργίας, όπου κάποια μεταβολή της τάσης συνεπάγεται μεταβολή στο ρεύμα εκροής. Η περιοχή αυτή περικλείεται από τους δύο άξονες του διαγράμματος, την καμπύλη που προκύπτει για $U_{GS} = 0$ και την παραβολή που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} * V_{DS}^2 \quad (1)$$

Για κάθε σημείο της ωμικής περιοχής ισχύει: $V_{DS} < V_P - V_{GS}$ και σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα εκροής θα δίνεται όπως αποδεικνύεται από τη σχέση:

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} * \left[2(V_P - V_{GS}) * V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$

Φυσικά η ωμική αντίσταση του καναλιού εξαρτάται από το σημείο πόλωσης του JFET. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει η ωμική αντίσταση για πολύ μικρές τάσεις ($V_{DS} \rightarrow 0$) που βρίσκεται από την παράγωγο, για $V_{DS} = 0$.

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} * (V_P - V_{GS})$$

Και συνεπώς:

$$I_{ON} = \frac{V_P^2}{(I_{DSS} * V_P) - V_{GS}}$$

β) Περιοχή κόρου : Καλύπτει την υπόλοιπη περιοχή των χαρακτηριστικών εξόδου. Όπως προκύπτει από τη σχέση (1), για $V_{GS} \gg V_P$ προκύπτει $I_p = 0$, ενώ σε διαφορετική περίπτωση για $V_{DS} > V_P - V_{GS}$ το ρεύμα I_D θα είναι ανεξάρτητο της τάσης V_{DS} και θα δίνεται από τη σχέση (1).

γ) Περιοχή κατάρρευσης : Όπως και στα διπολικά τρανζίστορ, σε όλες τις χαρακτηριστικές καμπύλες, το ρεύμα I_D διατηρείται σταθερό περίπου σε όλη την περιοχή του κόρου. Ωστόσο σε κάποια οριακή μεγάλη τάση, το που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του JFET, προκαλείται κατάρρευση χιονοστιβάδας, με αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση του ρεύματος. Η τάση αυτή με βραχυκυκλωμένες την πύλη με την πηγή, δίνεται από τους κατασκευαστές.

3.3.2 ΔΟΜΗ

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι ηλεκτρονικά στοιχεία στα οποία οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ενός είδους (οι φορείς πλειονότητας ενός αγώγιμου διαύλου που σχηματίζεται) σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ όπου συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα τόσο οι φορείς πλειονότητας όσο και οι φορείς μειονότητας. Οι φορείς αυτοί είναι ελεύθεροι να κινούνται σε μια περιοχή (κανάλι, δίαυλος) που οριοθετείται από τις περιοχές φορτίων χώρου (διακένωσης) δύο ανάστροφα πολωμένων pn επαφών.

Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, αποτελείται από έναν κρύσταλλο πυριτίου τύπου n στις δύο πλευρές του οποίου έχουν σχηματιστεί p-περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης προσμείξεων (p+). Ένα τέτοιο FET ονομάζεται n-τύπου JFET.

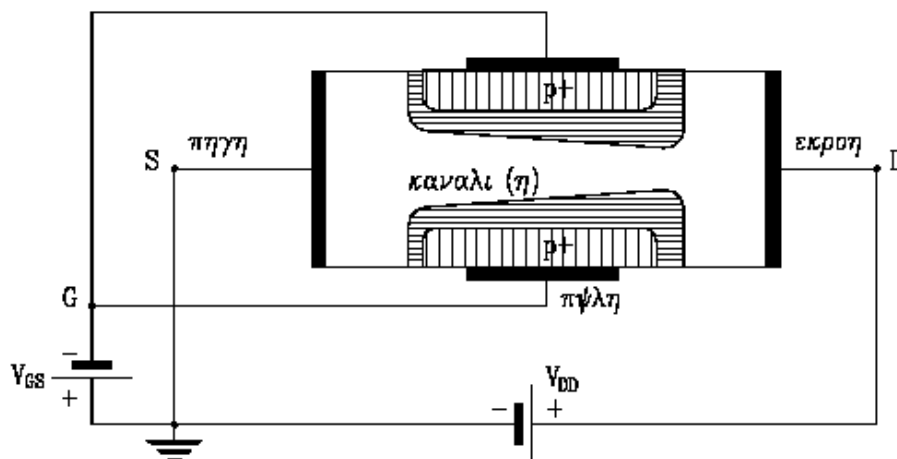
Οι δύο αυτές περιοχές βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους και καταλήγουν σε έναν ακροδέκτη που ονομάζεται **πύλη**.

Στα δύο άκρα του κρυστάλλου υπάρχουν δύο ακροδέκτες.

Τα δύο άκρα του κρυστάλλου είναι εν γένει ισοδύναμα μεταξύ τους (σε αντίθεση με το διπολικό τρανζίστορ όπου ο εκπομπός διαφέρει από το συλλέκτη στα επίπεδα προσμείξεων). Στους ακροδέκτες του FET αποδίδεται ονομασία ανάλογα με τη συνδεσμολογία.

Έτσι, το άκρο στο οποίο κατευθύνονται οι φορείς πλειονότητας ονομάζεται **απαγωγός (Drain)** και καταδεικνύεται με το γράμμα **D** ενώ το άλλο άκρο ονομάζεται **πηγή (Source)** και καταδεικνύεται με το γράμμα **S**.

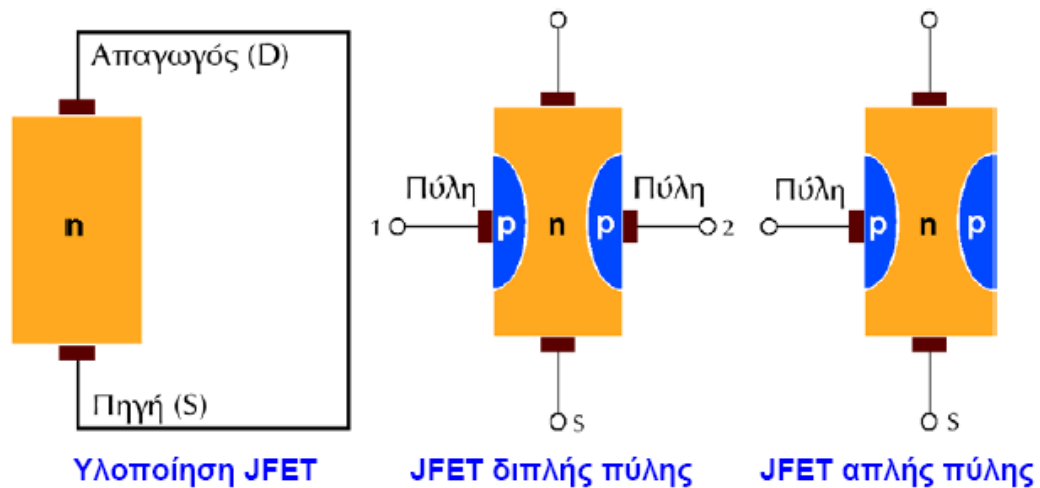
Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η κατασκευαστική δομή ενός JFET:



Σχήμα 3.3.2.1 : Κατασκευαστική δομή JFET .

Ένα JFET μπορεί να έχει 1 ή 2 πύλες. Ευρύτερη εφαρμογή συναντούν οι διατάξεις με 1 πύλη.

Σχηματικά φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3.2.2 : JFET μονής και διπλής πύλης .

Με βάση τα παραπάνω, για να θεωρείται ο δεξιός ακροδέκτης του n-τύπου JFET ,ως απαγωγός θα πρέπει να συνδέεται σε υψηλότερο δυναμικό από ότι ο αριστερός ακροδέκτης που χαρακτηρίζεται ως πηγή.

Σε περίπτωση που εναλλάσσεται η πολικότητα της τάσης μεταξύ των δύο ακροδεκτών εναλλάσσεται και η ονομασία τους.

Όπως και να ναι πάντως θα πρέπει οι δύο p+-n επαφές να είναι **ανάστροφα πολωμένες**.

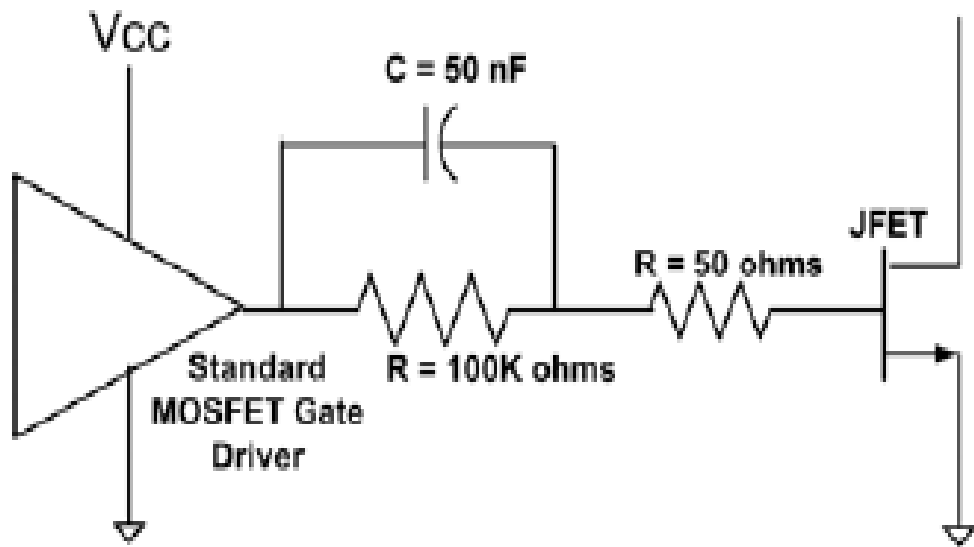
3.3.3 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ – ΔΙΟΔΟΙ SiC

Μεταξύ των διαφόρων SiC με βάση τους διακόπτες που έχουν ερευνηθεί από το SiC (Σύνδεσμος πεδίου εφέ τρανζίστορ), τα JFET έχουν δείξει ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Η τιμή της αντίστασης R_{dson} είναι περίπου 600 mΩ για ένα SiC JFET των 600V που είναι πολύ λιγότερο από εκείνο των Si με βάση την εξουσία του MOSFET που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής τάσης.

Ένα JFET, είναι κανονικά ανοιχτός διακόπτης (Normally On) , οπότε για να απενεργοποιήσουμε το JFET, πρέπει η τάση της πύλης να γίνει αρνητική, κάτω δηλαδή και από την πηγή.

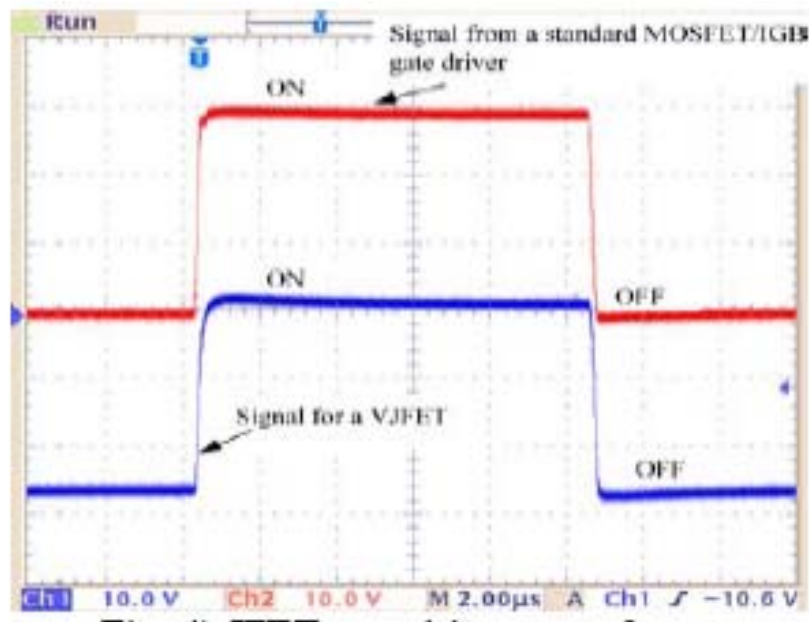
Όμως, το πρότυπο ισχύος MOSFET του προγράμματος οδήγησης της πύλης, εναλλάσσεται από 0V (κατάσταση off) , στο + Vcc (κατάσταση on). Μία παράλληλη αντίσταση και ένα δίκτυο πυκνωτή, απαιτούνται για να συνδεθεί ένα JFET ισχύος σε ένα πρόγραμμα οδήγησης MOSFET. Αυτό το δίκτυο, μεταφράζει το σήμα οδήγησης της πύλης, να παρέχει με αρνητική τάση την πύλη, έτσι ώστε να απενεργοποιήσει το JFET.

Σχήμα 3.3.3.1, που φαίνεται πιο κάτω, απεικονίζεται αυτό το δίκτυο.



Σχήμα 3.3.3.1: Κύκλωμα οδήγησης JFET διακόπτη σε κατάσταση on.

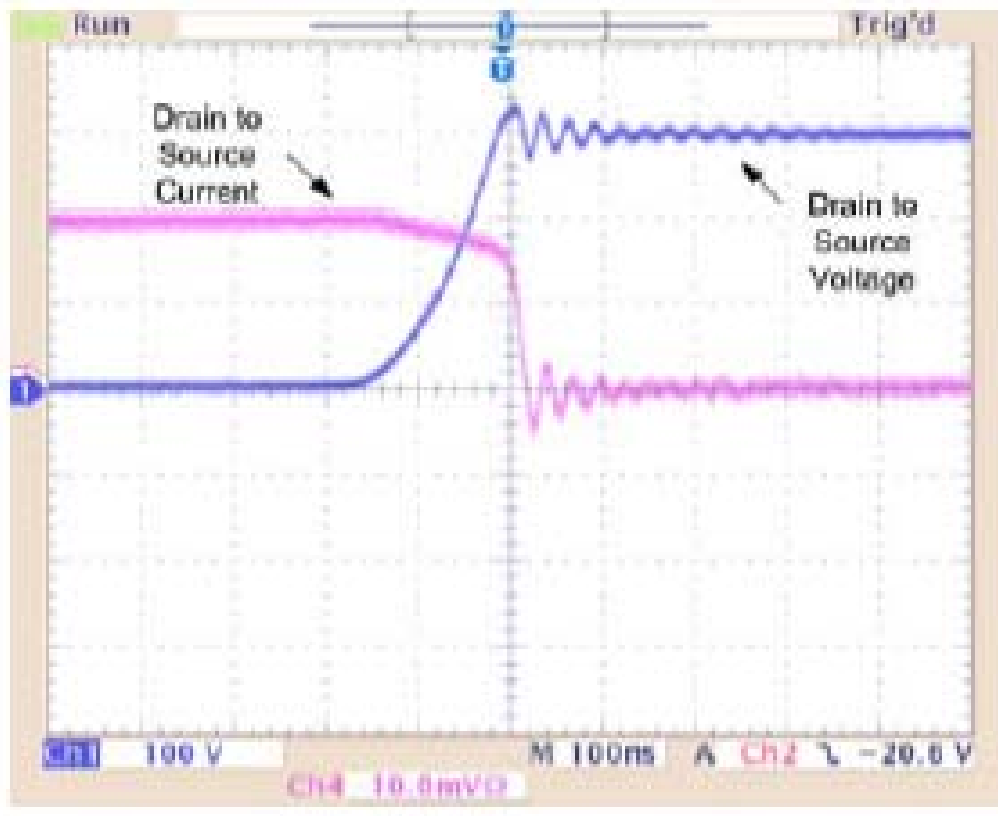
Οι πειραματικές κυματομορφές για ένα τέτοιο κύκλωμα, φαίνονται πιο κάτω αναλυτικά.



Σχήμα 3.3.3.2.α : Κυματομορφές οδήγησης πύλης ενός JFET .

Όπου:

- Μπλε κυματομορφή : Κανάλι 1 (Ch 1) – Σήμα ενός VJFET
- Κόκκινη κυματομορφή : Κανάλι 2 (Ch 2) – Σήμα ενός MOSFET

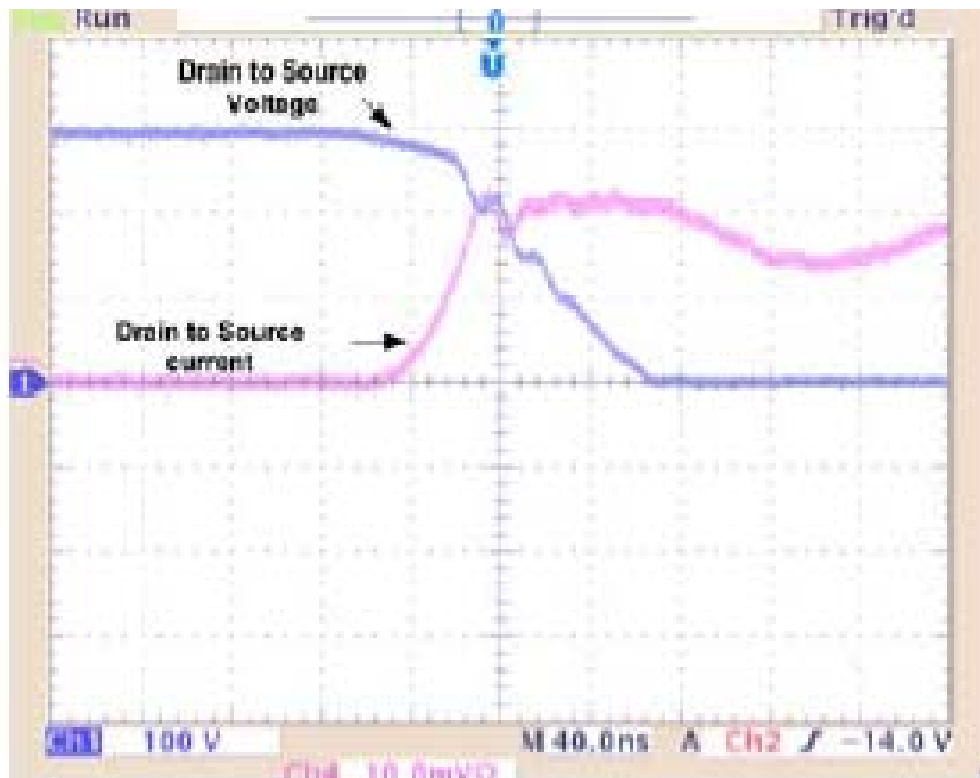


Σχήμα 3.3.3.2.β: Κυματομορφή ενός SiC JFET σε κατάσταση off .

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Στο πιο πάνω σχήμα, βλέπουμε ότι αρχικά το ρεύμα αυξάνεται, παραμένοντας στην peak τιμή του για κάποιο χρονικό διάστημα, ενώ η τάση είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει διότι το SiC JFET είναι εκείνη τη στιγμή κλειστό.

Ενώ, όταν το JFET ανοίγει, ταυτόχρονα το ρεύμα ξεκινά να μειώνεται σταδιακά έως τη στιγμή που, μηδενίζεται ενώ η τάση αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά έως ότου φτάσει στην peak τιμή της, στην οποία τιμή παραμένει τελικά.

Το σημείο διακλάδωσης του ρεύματος και της τάσης, είναι η στιγμή όπου το JFET ανοίγει και ξεκινά σιγά σιγά να αλλάζει κατάσταση, ώσπου τελικά παύει να διαρρέεται από ρεύμα και στο κύκλωμα υπάρχει μόνο η τάση, η οποία και παραμένει στην peak τιμή της.



Σχήμα 3.3.3.2.γ : Κομματομορφή ενός SiC JFET σε κατάσταση on .

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Στο πιο πάνω σχήμα, βλέπουμε ότι αρχικά η τάση αυξάνεται, παραμένοντας στην peak τιμή της για κάποιο χρονικό διάστημα, ενώ το ρεύμα είναι μηδενικό. Αυτό συμβαίνει διότι το SiC JFET είναι εκείνη τη στιγμή ανοιχτό. Ενώ, όταν το JFET κλείνει, ταυτόχρονα η τάση ξεκινά να μειώνεται σταδιακά έως τη στιγμή που, μηδενίζεται ενώ το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά έως ότου φτάσει στην peak τιμή του, στην οποία τιμή παραμένει τελικά. Το σημείο διακλάδωσης του ρεύματος και της τάσης, είναι η στιγμή όπου το JFET κλείνει και ξεκινά σιγά σιγά να αλλάζει κατάσταση, ώσπου τελικά παύει να διαρρέεται από τάση και στο κύκλωμα υπάρχει μόνο το ρεύμα, το οποίο και παραμένει στην peak τιμή του.

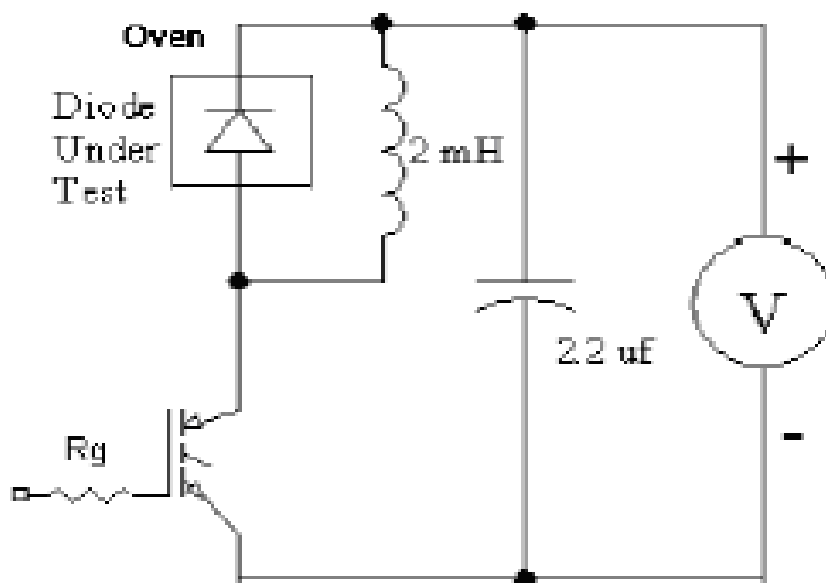
Σε αυτήν την ενότητα συγκρίνουμε ένα Si pn (εξαιρετικά γρήγορη δίοδο), με μια δίοδο SiC Schottky. Οι δίοδοι SiC Schottky που χρησιμοποιούμε, έχουν τιμές, τάση 300 V και ένταση 10 A.

Για να αποκτήσουν τα χαρακτηριστικά αντίστροφης ανάκτησης, κύκλωμα ψαλιδιστή το οποίο φαίνεται παρακάτω στο **Σχήμα 3.3.3.2.1**, δημιουργήθηκε με δοκιμή διόδων σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας. Οι θερμοκρασίες αυτές, ποικίλουν από τους 27°C έως τους 175°C.

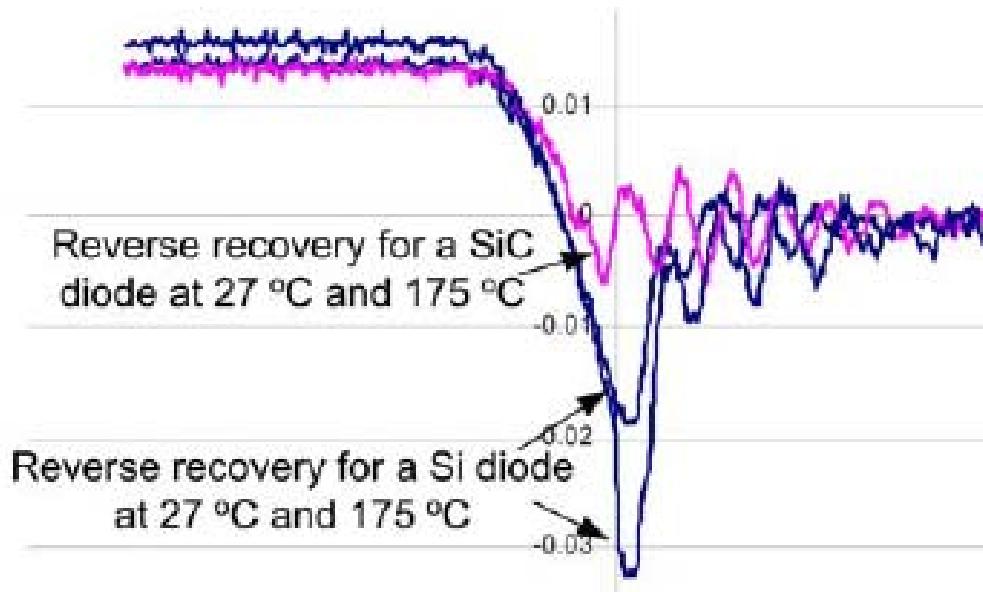
Οι πειραματικές κυματομορφές (**Σχήμα 3.3.3.2.2.α**), δείχνουν ότι οι απώλειες μεταγωγής στη δίοδο Si, είναι σχεδόν τρεις φορές περισσότερες από εκείνες της διόδου SiC.

Επίσης, η τιμή κορυφής (peak), της αντίστροφης ανάκτησης του ρεύματος I_R της διόδου Si, είναι υψηλότερη από εκείνη της διόδου SiC, χωρίς καθόλου θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η διαφορά αυξάνεται, διότι το I_R της διόδου Si αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ το ρεύμα της διόδου SiC παραμένει σταθερό. Τα χαρακτηριστικά τάσεων-εντάσεων (V-I) των διόδων για τις διάφορες καταστάσεις της θερμοκρασίας, φαίνονται στο **Σχήμα 3.3.3.2.2.β**.

Η μπροστινή τάση της SiC διόδου, είναι συγκρίσιμη, με αυτή της Si, σε θερμοκρασία δωματίου, όμως σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η πτώση τάσης της SiC είναι μεγαλύτερη από αυτή της Si. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, τα χαρακτηριστικά της διόδου Si αυξάνονται ραγδαία, ενώ της διόδου SiC παραμένουν καθορισμένα σε ένα μικρό σχετικά εύρος.



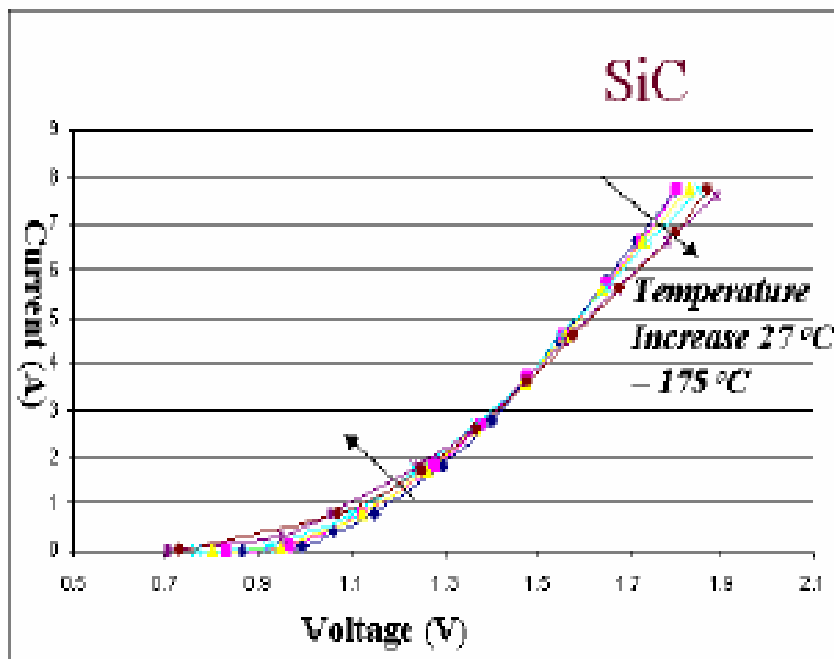
Σχήμα 3.3.3.2.1: Κύκλωμα επαγωγικού φορτίο δοκιμής.



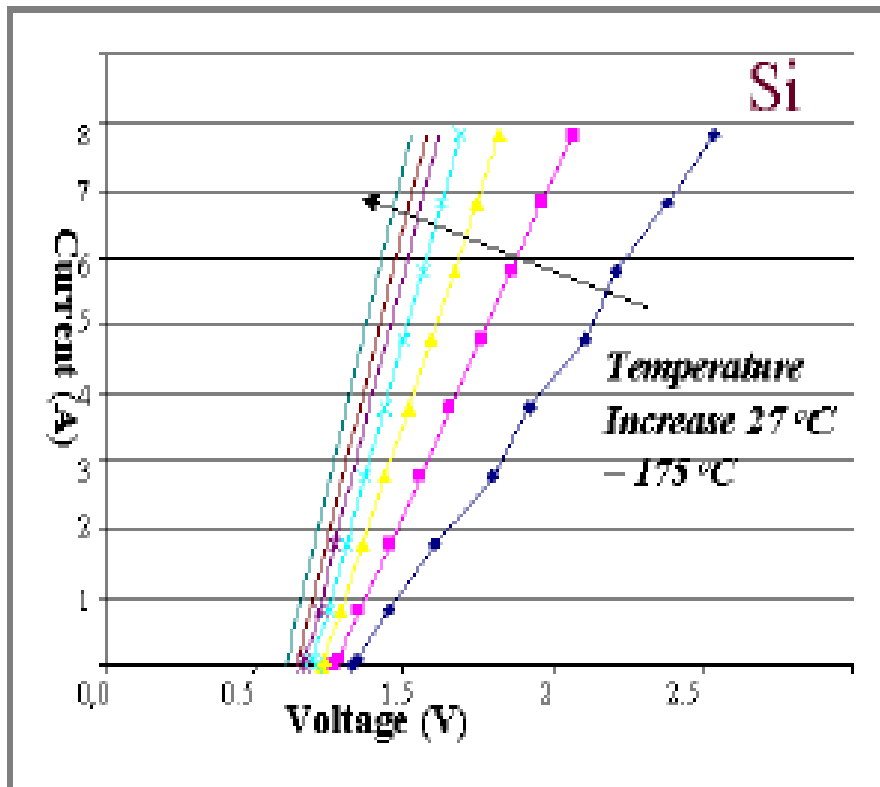
Σχήμα 3.3.3.2.2.α : Αντίστροφη ανάκτηση ρεύματος για Si και SiC διόδους, σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Όπου : Μπλε κυματομορφή : διόδος Si
 Μωβ κυματομορφή : διόδος SiC

α)

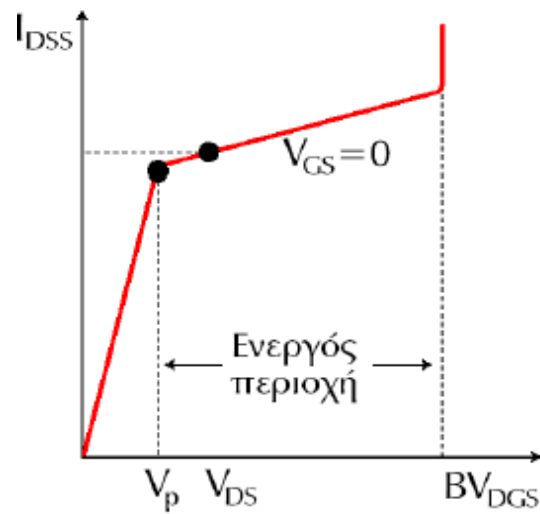


β)



Σχήμα 3.3.3.2.2.β: Χαρακτηριστικές τάσεων – εντάσεων (I-V) .
α) Για SiC δίοδο και
β) Για Si δίοδο

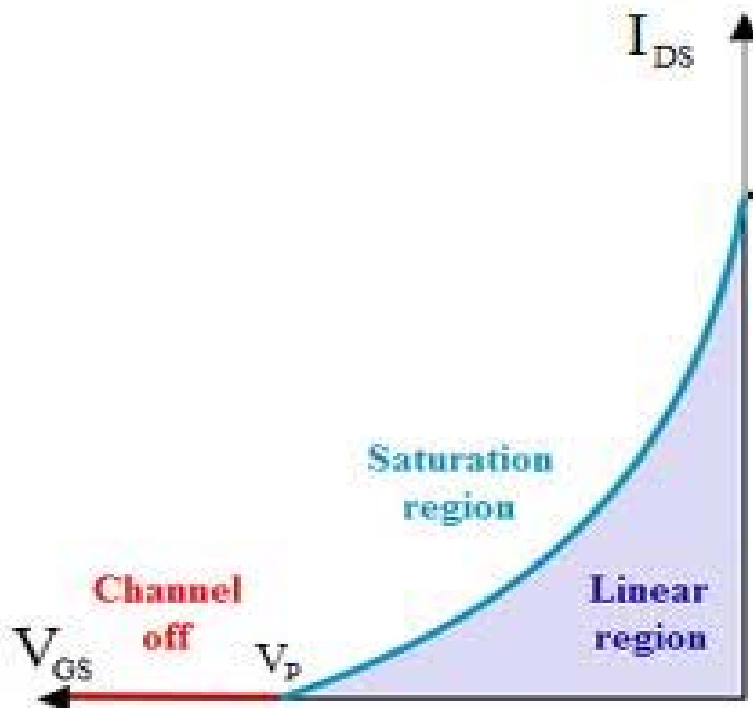
3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ JFET



Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος

Σχήμα 3.4.1 : Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος .

- $I_D = f(U_{GS})$

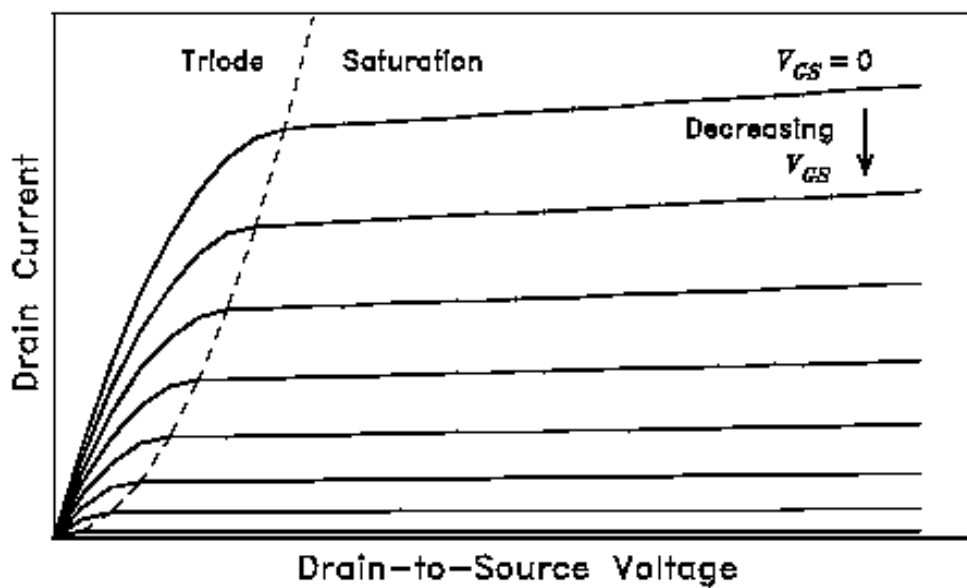


Σχήμα 3.4.2 : Χαρακτηριστική ρεύματος -τάσης $I_D = f(U_{GS})$

Όπου:

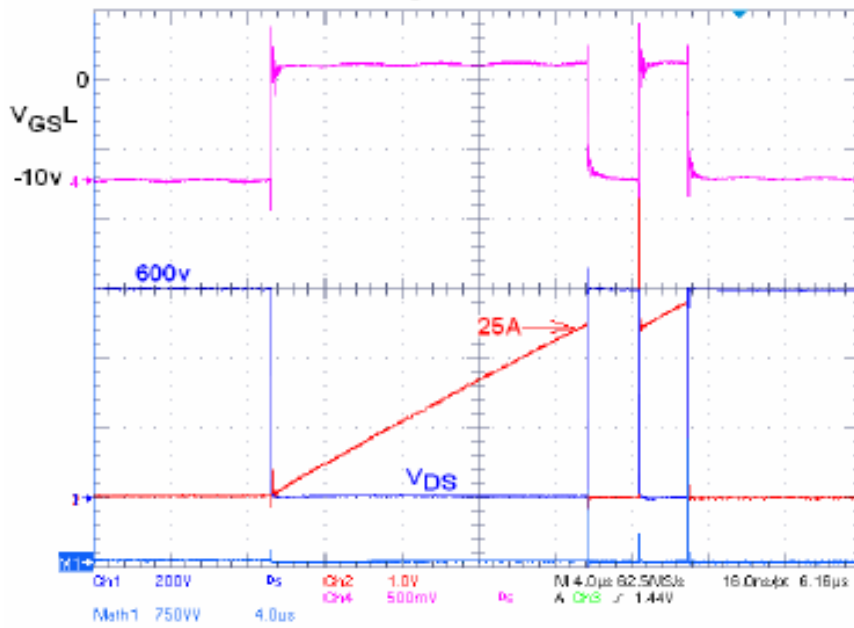
- Linear region = Γραμμική ή Ωμική περιοχή
- Saturation region = Περιοχή κόρου ή Κορεσμού
- Channel off = Περιοχή αποκοπής ή Κατάρρευσης

- $I_D = f(U_{DS})$, για 8 διαφορετικές τιμές του U_{GS}

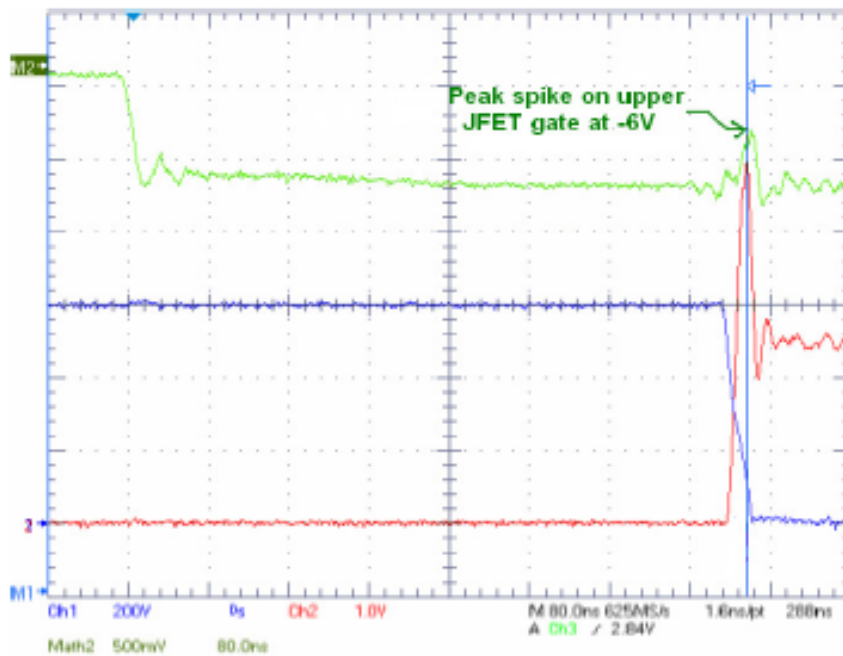


Σχήμα 3.4.3 : Χαρακτηριστική ρεύματος -τάσης (πειραματική) $I_D=f(U_{GS})$

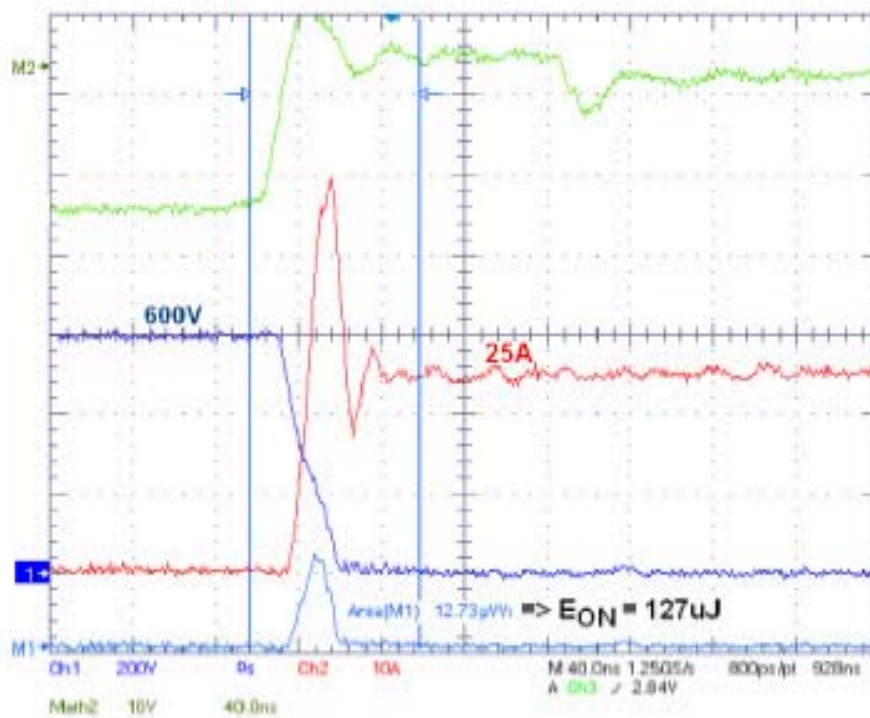
Στη συνέχεια, ακολουθούν οι κυματομορφές των JFET σε διάφορες καταστάσεις .



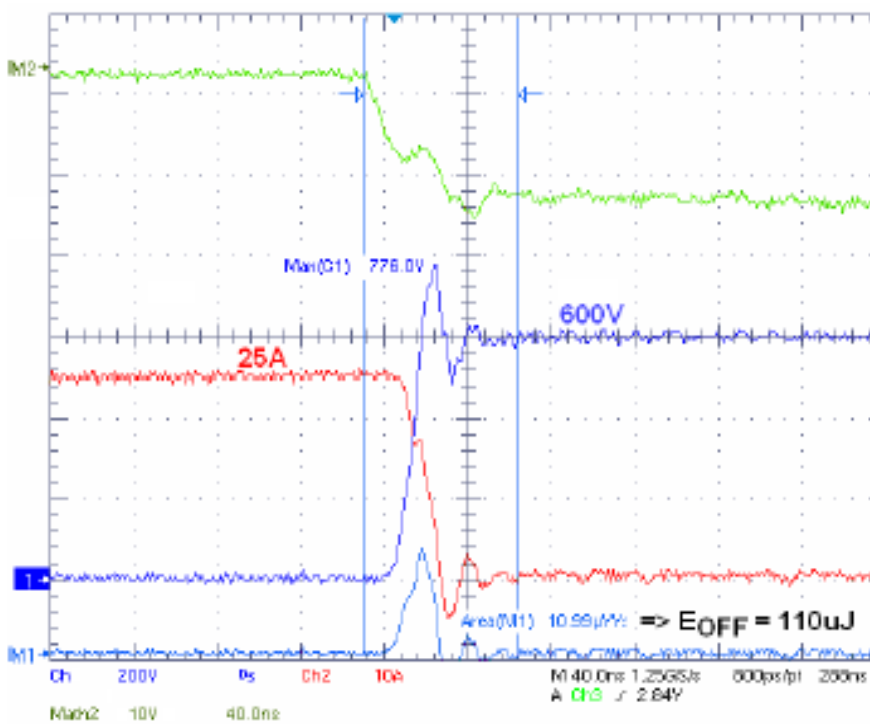
Σχήμα 3.4.4: Εναλλαγή κυματομορφών.



Σχήμα 3.4.5 : Άνω JFET πύλη κυματομορφής στην κατάσταση απενεργοποίησης.



Σχήμα 3.4.6 : Κάτω κυματομορφή ενεργοποιημένου JFET .

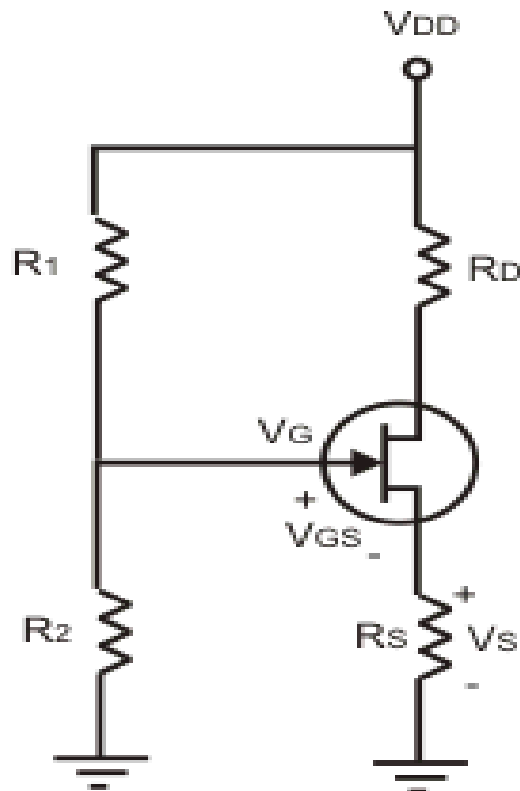


Σχήμα 3.4.7 : Κάτω κυματομορφή απενεργοποιημένου JFET .

3.5 ΕΙΔΗ ΠΟΛΩΣΗΣ

3.5.1 ΠΟΛΩΣΗ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΤΗ ΤΑΣΗΣ

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.5.1), φαίνεται ένας άλλος τρόπος πόλωσης του JFET με διαιρέτη τάσης. Η λογική της πόλωσης είναι ανάλογη με αυτήν της πόλωσης με διαιρέτη τάσης που χρησιμοποιείται στα διπολικά τρανζίστορ.



Σχήμα 3.5.1 : Πόλωση JFET με διαιρέτη τάσης .

Η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη είναι:

$$V_G = \frac{V_{DD} * R_2}{R_1 + R_2}$$

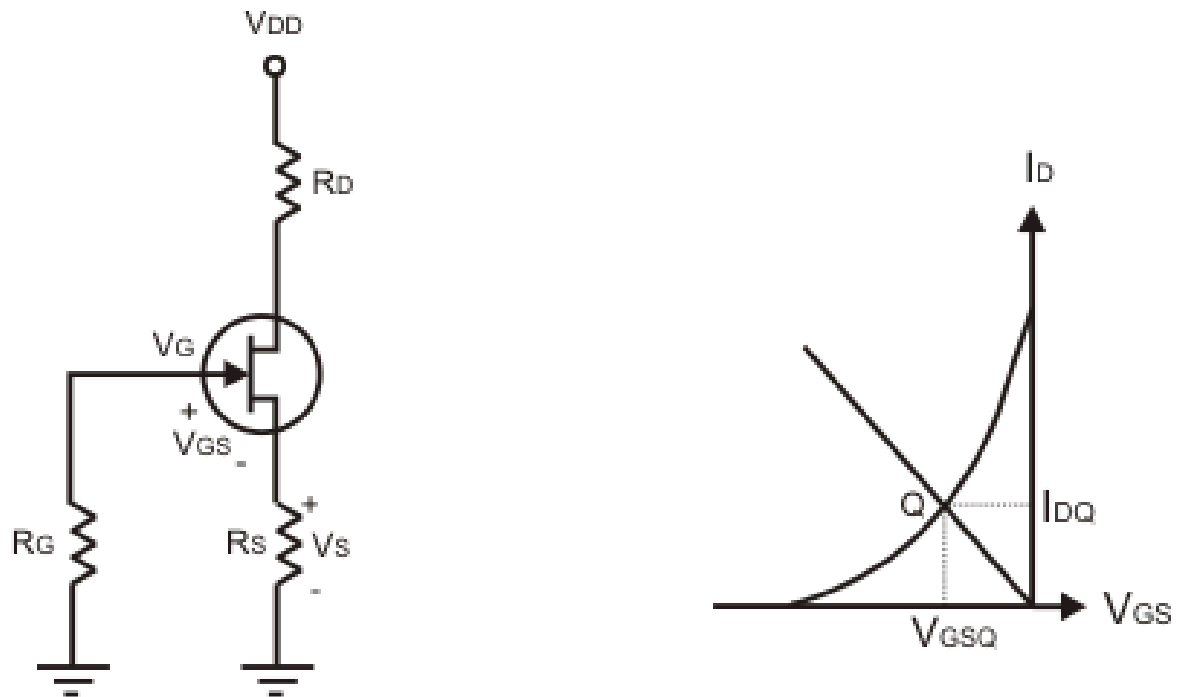
Η τάση V_S στα άκρα της αντίστασης της πηγής R_S είναι : $V_S = V_G - V_{GS}$, επομένως το ρεύμα απαγωγού θα είναι ίσο με :

$$I_D = \frac{V - V_{GS}}{R_S}$$

Αν η V_G είναι πολύ μεγαλύτερη από την V_{GS} το ρεύμα απαγωγού θα είναι περίπου σταθερό για κάθε JFET. Όμως η V_{GS} μπορεί να διαφέρει αρκετά Volt από το ένα JFET στο άλλο, με αποτέλεσμα για τις τάσεις τροφοδοσίας που χρησιμοποιούνται, η εξουδετέρωση της επίδρασης της V_{GS} δεν είναι πλήρης. Έτσι για το λόγο αυτό η πόλωση με διαιρέτη τάσης είναι λιγότερο αποτελεσματική στα JFET από ότι στα διπολικά τρανζίστορ.

3.5.2 ΑΥΤΟΠΟΛΩΣΗ

Ένας τρόπος πόλωσης του JFET είναι με την αυτοπόλωση. Η μέθοδος βασίζεται στην πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση της πηγής για τη δημιουργία της απαιτούμενης ανάστροφης τάσης μεταξύ πύλης - πηγής όπως φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 3.5.2**.



Σχήμα 3.5.2 : Αυτοπόλωση του JFET .

Επειδή η πύλη είναι ανάστροφα πολωμένη, το ρεύμα που διέρχεται από την R_G είναι αμελητέο. Επομένως η τάση της πύλης είναι μηδέν.

Από το σχήμα προκύπτει ότι:

$$V_{GS} + V_S = 0 \quad \text{ή} \quad V_{GS} + I_D R_S = 0 \quad \text{ή} \quad V_{GS} = -I_D R_S$$

Έτσι όταν τείνει να αυξηθεί το ρεύμα του απαγωγού με την αύξηση της θερμοκρασίας ή με την αντικατάσταση του JFET, αυξάνει η πτώση τάση στην αντίσταση της πηγής, με επακόλουθο την αύξηση της ανάστροφης τάσης V_{GS} πύλης - πηγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος απαγωγού I_D .

Όταν τείνει να μειωθεί το ρεύμα του απαγωγού, μειώνεται η πτώση τάσης στην αντίσταση της πηγής, με επακόλουθο την μείωση της ανάστροφης τάσης V_{GS} πύλης - πηγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος απαγωγού I_D .

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης $V_{GS} = -I_D R_S$ είναι ευθεία στο διάγραμμα διαγωγιμότητας $V_{GS} - I_D$ που διέρχεται από την αρχή των αξόνων.

Το σημείο τομής της ευθείας αυτής με τη χαρακτηριστική διαγωγιμότητας (είναι η γραφική παράσταση του ρεύματος απαγωγού I_D με την τάση πύλης - πηγής V_{GS}), μας δίνει το σημείο λειτουργίας Q, το οποίο έχει συντεταγμένες V_{GSQ} και I_{DQ} . Αυτές ικανοποιούν τη σχέση :

$$V_{GSQ} = -I_{DQ} R_S \quad \text{ή} \quad R_S = -\frac{V_{GSQ}}{I_{DQ}},$$

από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση πόλωσης της πηγής.

Για να εκλέξουμε την κατάλληλη τιμή της αντίστασης πηγής R_S του JFET, χαράζουμε την κατάλληλη ευθεία $V_{GS} = -I_D R_S$ στο διάγραμμα, ώστε να μην έχει μεγάλη αλλά ούτε μικρή κλίση, και από της συντεταγμένες του σημείου τομής της με την χαρακτηριστική διαγωγιμότητας, βρίσκουμε την αντίσταση της πηγής όπως υποδείξαμε προηγουμένως.

Αν η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας δεν δίνεται στα φυλλάδια των κατασκευαστών, αλλά γνωρίζουμε την τάση αποκοπής πύλης - πηγής $V_{GS(off)}$ και το ρεύμα απαγωγού βραχυκυκλωμένης πύλης I_{DSS} , η αντίσταση της πηγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_S = -\frac{V_{GS(off)}}{I_{DSS}}$$

Για την διαγωγιμότητα ας αναφέρουμε τα εξής :

Κάθε JFET έχει μια ας παράμετρο που ονομάζεται διαγωγιμότητα και συμβολίζεται με g_m . Μαθηματικά ορίζεται ως:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

όπου ΔI_D : μεταβολή στο ρεύμα απαγωγού και

ΔV_{GS} : μεταβολή στην τάση πύλης - πηγής.

Η παραπάνω σχέση μας λέει ότι η διαγωγιμότητα ισούται με τη μεταβολή του ρεύματος απαγωγού δια την αντίστοιχη μεταβολή της τάσης πύλης πηγής, όταν η τάση απαγωγού - πηγής είναι σταθερή.

Για παράδειγμα, αν μια μεταβολή στην τάση της πύλης κατά 0,2V προκαλεί μια μεταβολή στο ρεύμα απαγωγού κατά 0,4mA, τότε :

$$g_m = 0,4\text{mA} / 0,2\text{V} = 2\text{mS}$$

Συνήθως τα φυλλάδια κατασκευαστών των JFET περιλαμβάνουν μια γραφική παράσταση που δείχνει τη μεταβολή του g_m με το ρεύμα απαγωγού.

Αν δεν δίνεται από τον κατασκευαστή, η γραφική παράσταση του g_m ως προς το I_D , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$g_m = -2 \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) * \left(\frac{I_{DSS}}{V_{GS(off)}} \right)$$

3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ JFET

Πρόκειται για τη σχέση μεταξύ του ρεύματος I_D του JFET και της τάσης U_{GS} που ελέγχει τη λειτουργία του, όταν το τρανζίστορ λειτουργεί πέρα από το pinch off. Όταν δηλαδή το ρεύμα μέσα στο διάυλο έχει αποκτήσει σταθερή τιμή ανεξάρτητη της U_{DS} . Η περιοχή αυτή ονομάζεται και περιοχή ρεύματος κόρου (current-saturation region).

Πειραματικά έχει επιβεβαιωθεί η ακόλουθη εμπειρικά παραβολική έκφραση:

$$I_D = I_{DSS} = I_{DSS} \left(\frac{1 - U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

Όπου, ο διπλός δείκτης στο ρεύμα τέθηκε για να χαρακτηρίσει την κατάσταση κόρου (saturation). Η χαρακτηριστική αυτή είναι εν γένει συνάρτηση του U_{DS} , αλλά η μεταβολή που παρουσιάζει συναρτήσει του U_{DS} είναι μικρή.

Η χαρακτηριστική μεταφοράς του JFET επιτελεί ρόλο αντίστοιχο προς τη χαρακτηριστική ρεύματος βάσης – τάσης U_{BE} του διπολικού τρανζίστορ επαφής.

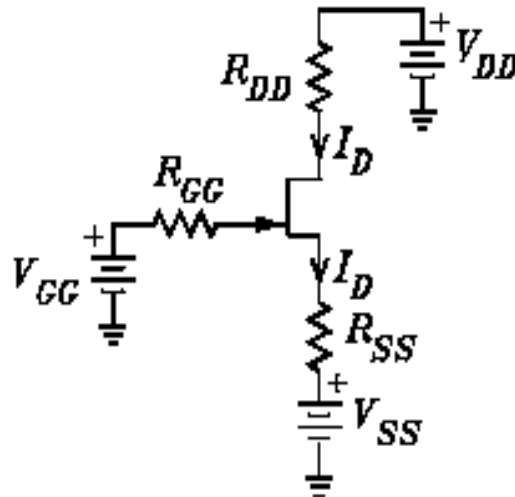
Η τιμή ρεύματος I_{DSS} εκφράζει το ρεύμα κόρου του JFET όταν η πύλη βραχυκυκλώνεται με την πηγή ($U_{GS}=0$).

3.6.1 ΩΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ JFET ΓΙΑ ΜΙΚΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ U_{DS}

Για μικρές τιμές της U_{DS} , της τάξης μερικών δεκάδων μέχρι περίπου και δύο εκατοντάδες mV, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαμόρφωση που υφίσταται ο διάυλος (το κανάλι) λόγω της πτώσης τάσης στο σώμα του είναι αμελητέα.

Παρατηρούμε δηλαδή ότι για μικρές τιμές της U_{DS} , το JFET συμπεριφέρεται σαν ωμική αντίσταση ελεγχόμενη από τάση, $r = r(U_{DS})$.

3.6.2 ΚΥΚΛΩΜΑ JFET ΥΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ



Σχήμα 3.6.2 : Κύκλωμα υπό συνεχή τάση.

3.6.3 ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

Η πύλη JFET παρατηρείται μερικές φορές στη μέση του καναλιού (αντί στον αγωγό ή το ηλεκτρόδιο πηγής, όπως σε αυτά τα παραδείγματα).

Επίσημα, το ύφος του συμβόλου πρέπει να παρουσιάσει το συστατικό μέσα σε έναν κύκλο (που αντιπροσωπεύει το φάκελο μιας ιδιαίτερης συσκευής).

Αυτό ισχύει και στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη. Το σύμβολο παρατηρείται συνήθως χωρίς τον κύκλο κατά το σχεδιασμό των σχηματικών αναπαραστάσεων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Πιο πρόσφατα, το σύμβολο παρατηρείται συχνά χωρίς κύκλο του ακόμη και για τις συσκευές.

Σε κάθε περίπτωση το κεφάλι βελών παρουσιάζει την πολικότητα της σύνδεσης PN που διαμορφώνεται μεταξύ του καναλιού και της πύλης. Όπως με μια συνηθισμένη δίοδο, το βέλος δείχνει από το P στο N, την κατεύθυνση του συμβατικού ρεύματος. Για να «**pinch off**» από το κανάλι, χρειάζεται μια ορισμένη αντίστροφη τάση (VGS) της σύνδεσης. Αυτό «**pinch off voltage**» (V_p) ποικίλλει αρκετά, ακόμη και μεταξύ των συσκευών του ίδιου τύπου. Παραδείγματος χάριν, VGS (off) για τη J201 συσκευή Temic ποικίλλει από **-0.8V έως -4V**.

Οι χαρακτηριστικές τιμές ποικίλλουν από -0.3V έως -10V. Για να σβήσει η n-channel συσκευή, απαιτεί μια αρνητική τάση πύλη-πηγής (VGS).

Αντιθέτως, για να σβήσει μια p-channel συσκευή απαιτεί το θετικό VGS.

Σε κανονική λειτουργία, το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται από την πύλη πρέπει να εμποδίσει τη διεξαγωγή μεταξύ της πηγής και του αγωγού.

3.6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Το ρεύμα πυλών JFET (η αντίστροφη διαρροή της σύνδεσης πύλη-καναλιών) είναι συγκρίσιμο με αυτό MOSFET (που έχει το μονώνοντας οξειδίο μεταξύ της πύλης και του καναλιού), αλλά πολύ λιγότερο από το ρεύμα βάσεων μιας διπολικής κρυσταλλολυχνίας συνδέσεων. Το JFET έχει την υψηλότερη υπέρ-αγωγιμότητα από το MOSFET και επομένως χρησιμοποιείται σε κάποια χαμηλού θορύβου, υψηλή σύνθετη αντίσταση op -op-amps.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ JFET ΚΑΙ BJT

Τα FET έχουν σχεδιαστεί για να παρακάμπτουν κάποια από τα προβλήματα των διπολικών τρανζίστορ. Ο έλεγχος ενός ρεύματος εξόδου μέσω μιας τάσης εισόδου είναι προτιμότερος εκεί όπου δεν είναι δυνατό να προσφερθεί ποσότητα ρεύματος ικανή για να διεγείρει το τρανζίστορ.

Επίσης, οι μεγάλες απώλειες που συμβαίνουν (με τη μορφή θερμότητας) επάνω στα διπολικά τρανζίστορ μειώνονται με τη χρήση των FET.

Άρα το FET είναι καταλληλότερο για έλεγχο συσκευών μέσω του υπολογιστή, ο οποίος μπορεί, στέλνοντας ένα σήμα, να το θέσει σε λειτουργία (ή να διακόψει τη λειτουργία του). Ακόμα, το FET προτιμάται από το BJT εκεί όπου χρειάζεται μεγάλη αντίσταση εισόδου (π.χ. σε όργανα μέτρησης).

Επειδή το FET είναι λιγότερο ευαίσθητο στις μεταβολές του σήματος εισόδου έχει μικρότερη απολαβή (κέρδος) από το BJT. Αυτό σημαίνει πως οι δυνατότητές του για ενίσχυση είναι πιο περιορισμένες.

Οι δύο κυρίως διαφορές των FET σε σχέση με τα BJT, είναι οι εξής :

α) ο έλεγχος του ρεύματος εξόδου από τάση εισόδου (ενώ στο BJT, είχαμε ρεύμα εισόδου) και

β) η εφαρμογή ανάστροφης τάσης μεταξύ πύλης-πηγής (ενώ στο BJT είχαμε ορθή πόλωση μεταξύ βάσης-εκπομπού). Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως η ορθή πόλωση πύλης-πηγής, στις περισσότερες περιπτώσεις, σημαίνει καταστροφή του τρανζίστορ.

3.7 ΠΕΙΡΑΜΑ

Πιο κάτω αναλύεται, ένα κύκλωμα οδήγησης πύλης JFET για 1300V/4A SiC-JFET, προτείνεται και αξιολογείται πειραματικά για ένα μεταγωγής συχνοτήτων του 200kHz. Επιπλέον, συγκρίνεται η αλλαγή συμπεριφοράς ενός

cascode SiC-JFET/Si-MOSFET και της SiC-JFET οδηγείται από το προτεινόμενο κύκλωμα οδήγησης πύλης που υπάρχει στις πιο κάτω εικόνες.

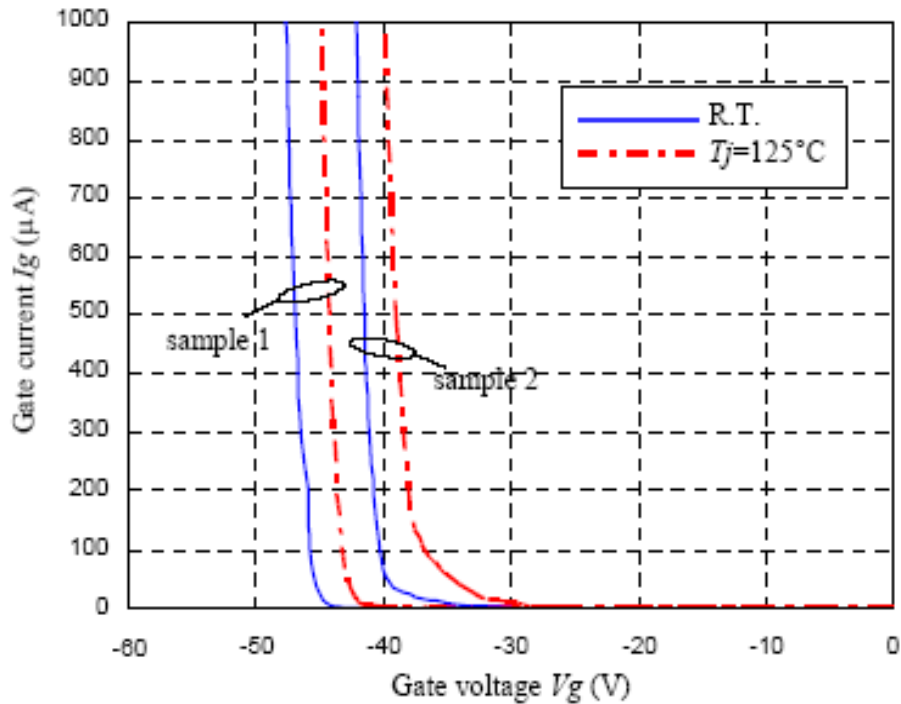
Novel καρβίδιο του πυριτίου (SiC) ημιαγωγών ηλεκτρισμού χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές επιδόσεις όσον αφορά:

- α) τάση αποκλεισμού,**
- β) δυνατότητα,**
- γ) σε κατάσταση πτώση τάσης,**
- δ) η αλλαγή ταχύτητας, και**
- ε) η θερμική αντίσταση.**

Κατά συνέπεια, στο μέλλον, στις SiC συσκευές θα επιτραπεί η υλοποίηση των πολύ μικρών μετατροπέων στα συστήματα με χαμηλή αλλαγή και την απώλεια αγωγιμότητας. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου χάσματος και / ή το κλείδωμα SiC ικανότητα ,συσκευές που είναι κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής τάσης. Οι SiC Schottky-δίοδοι είναι ήδη διαθέσιμοι στο εμπόριο και το **SiC κατάστασης off** ημιαγωγών ηλεκτρισμού είναι σήμερα υπό ανάπτυξη.

Τα χαρακτηριστικά της **πύλης ρεύματος I_g** σε σχέση με την **πύλη τάσης V_g** (με αναφορά στην πηγή) και τα SiC-JFET εμφανίζονται στο **Σχήμα 3.7.α**.

Δεδομένου ότι το SiC-JFET είναι συνδεδεμένο στη συσκευή, μια αρνητική πύλη τάσης απαιτείται για την περιστροφή της συσκευής. Η pinch-off τάση είναι περίπου $V_g = -30V$. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση της τάσης pinch-off με τη θερμοκρασία και την επιρροή της, έχουμε πολύ δυναμικές αλλαγές από τον αγωγό-πηγή τάσης. σε V_g και μέσω της χωρητικότητας Miller, έχουμε μια μεγαλύτερη αρνητική τάση, όπου θα πρέπει να εφαρμοστεί για τη διασφάλιση της ισχύς τρανζίστορ στην κατάσταση απενεργοποίησης. Αυτό περιπλέκεται από το γεγονός ότι το όριο κατανομής της πύλης-πηγής, συνήθως είναι περίπου $-40V$ και / ή κοντά στην τάση pinch-off και δείχνει μια εξάρτηση από τις τιμές της θερμοκρασίας.



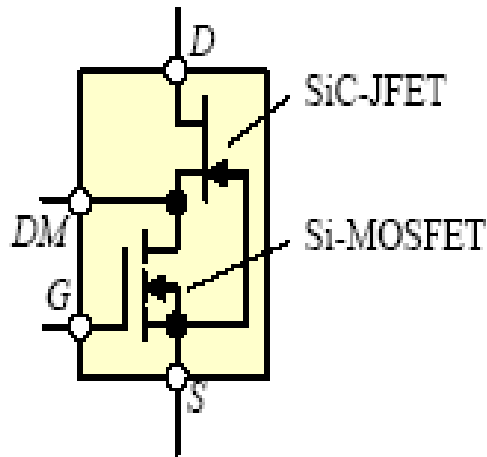
Σχήμα 3.7.α: Χαρακτηριστική Πύλης του JFET με δείγμα $T_j = 25^\circ\text{C}$ και $T_j = 125^\circ\text{C}$.

Όπου, sample 1 : δείγμα 1 και sample 2 : δείγμα 2.

Ένα SiC-JFET/Si-MOSFET (τύπου cascode) που φαίνεται στο **Σχήμα 3.7.β** ,μπορεί να απενεργοποιηθεί με τη χρήση του πυριτίου MOSFET (Si-MOSFET) συνδεδεμένο σε σειρά με SiC-JFET.

Ωστόσο, πρέπει να τηρούνται οι εξής προϋποθέσεις :

- 1) η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του να περιορίζεται από την Si-MOSFET,
- 2) το Si-MOSFET να περιορίζει την ταχύτητα μεταγωγής για εφαρμογές σε γέφυρα (τύπου διαμορφώσεις κυκλώματος) , και
- 3) οι απώλειες αγωγής να μην αυξάνουν, όταν οι δύο συσκευές είναι συνδεδεμένες σε σειρά.



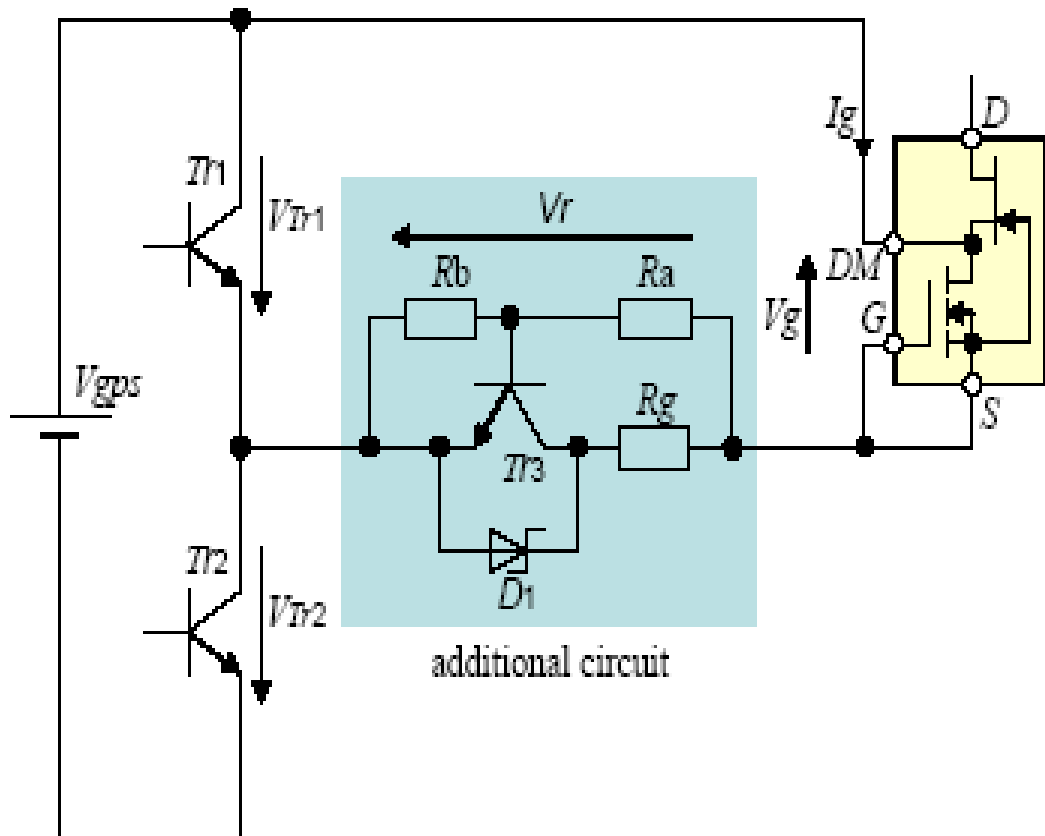
Σχήμα 3.7.β : SiC-JFET / Si-MOSFET

ΚΥΚΛΩΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΠΥΛΗΣ ΓΙΑ SiC – JFET

Μια απλουστευμένη σχηματική διάταξη του προτεινόμενου κυκλώματος κίνησης απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.7.γ**. Το SiC-JFET είναι ενεργοποιημένο (λόγω του τρανζίστορ TR1) (**Σχήμα 3.7.δ**) και απενεργοποιείται από TR2 όπου ένα επιπλέον κύκλωμα παρέχεται για τον περιορισμό της πύλης, δηλαδή ρεύματος I_g , τα οποία περιγράφονται στα ακόλουθα:

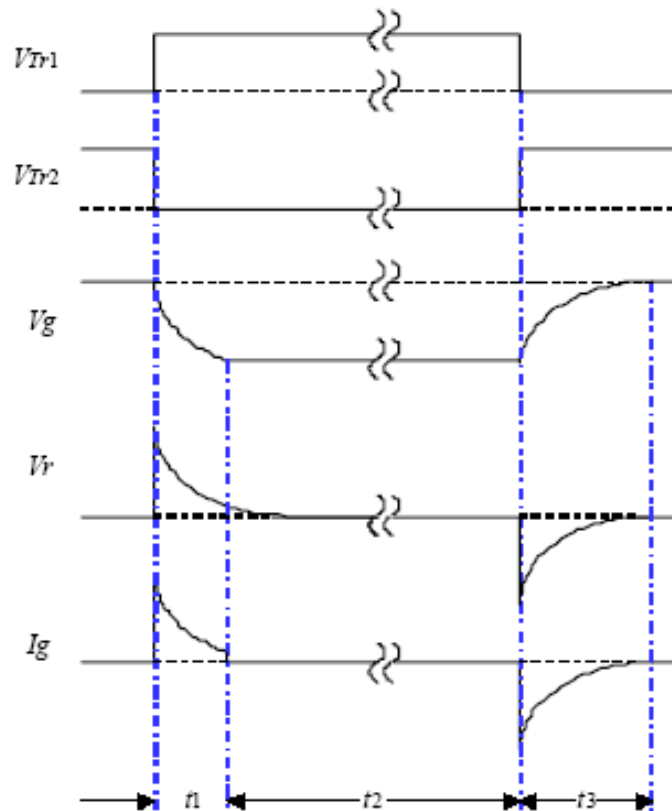
t1: έχουμε $V_g \approx 0V$, μετά TR2 είναι ενεργοποιημένη, με αποτέλεσμα τάση V_r σε όλη την περιορισμού κύκλωμα συμμερίζονται R_a και R_b και TR3 είναι ενεργοποιημένη.

Το ρεύμα πύλης I_g περιορίζεται από τη R_g όπου $R_b \ll R_a + R_g$.
 Η πύλη του SiC-JFET κλείνει όταν η V_g υπερβεί το pinch-off.



Σχήμα 3.7.γ : Απλοποιημένο κύκλωμα του προτεινόμενου κυκλώματος οδήγησης για την SiC-JFET.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το **Σχήμα 3.7.δ** όπου φαίνεται η αρχή του προτεινόμενου κυκλώματος κίνησης της πύλης.

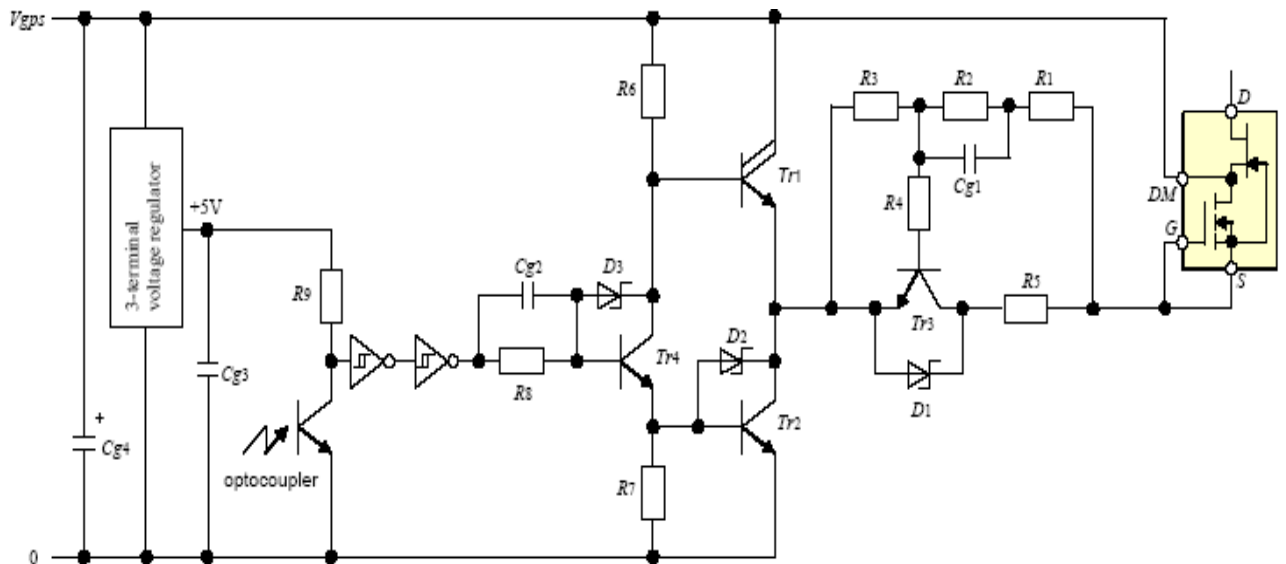


Σχήμα 3.7.δ : Θεμελιώδη αρχή του προτεινόμενου κυκλώματος κίνησης της πύλης.

3.7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το κύκλωμα οδήγησης πύλης που χρησιμοποιείται για την πειραματική ανάλυση παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.7.1.1 πιο κάτω**. Προκειμένου να αυξηθεί η (off) ταχύτητα του SiC-JFET, η R_a χωρίζεται σε $R1$ και $R2$, και προσθέτουμε έναν πυκνωτή $CG1$ ο οποίος συνδέεται παράλληλα με τη $R2$. Επιπλέον, μια αντίσταση $R4$ προβλέπεται για τον περιορισμό της αντιστροφής του ρεύματος στη διασταύρωση βάσης-εκπομπού του $TR3$. Σε $t1$ περίοδο, η βάση στην τρέχουσα $TR3$ ρέει σε μεγάλο βαθμό μέσω $CG1$, ως $R2$ δείχνει μια συγκριτικά υψηλή αντίσταση που θα έχει ως αποτέλεσμα μια γρήγορη μεταγωγή δράση των $TR3$ και σε μια γρήγορη σειρά-off του SiC-JFET. Η τάση τροφοδοσίας DC για το κύκλωμα κίνησης πύλη $V_{gps} = 45V$ και η V_{gps} μετατρέπεται σε $5V$ για την παροχή των οδήγησης optocoupler παρέχοντας απομόνωση του σήματος του δίσκου πύλη.

Οι δίοδοι Schottky $D3$ και $D2$ χρησιμοποιούνται για την αύξηση η σειρά της-off ταχύτητας σε $Tr4$ και $TR2$. Τα συστατικά που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα κίνησης πύλης παρατίθενται στον **Πίνακα 3.7**. Κατά την πύλη αντίσταση, είναι τέσσερις $20\Omega/250$ mW αντιστάσεις που συνδέονται παράλληλα ($R5 = 5\Omega$ συνολικά), επειδή ο σχεδιασμός είναι για μια αλλαγή συχνότητας $200kHz$. Με βάση την (2), $I_g < 370\mu A$ είναι εγγυημένη για τάση κατανομή των $V_g < 35V$.



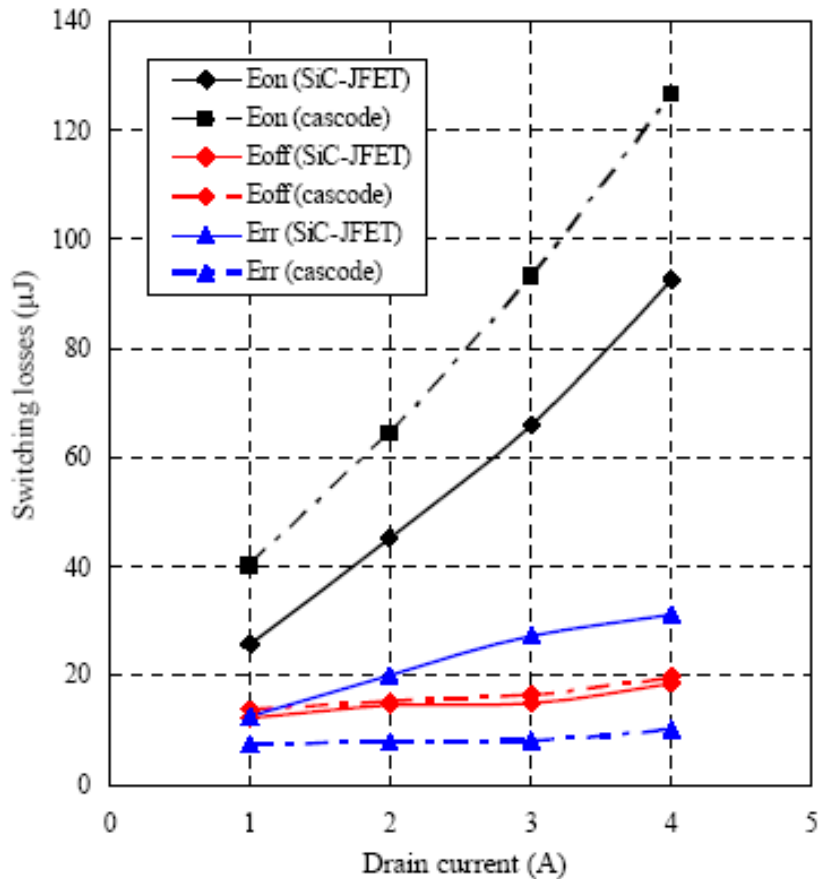
Σχήμα 3.7.1.1 : Σχηματική αναπαράσταση κυκλώματος του πειράματος.

items	Symbols	Parameters / footprints
transistor	$Tr3$	BC639, 80V,1A / TO-92
diode	$D1$	1N5711, 70V, 250mW
resistor	$R1$	200Ω, 250mW / 1206
	$R2$	27kΩ, 250mW / 1206
	$R3$	100Ω, 250mW / 1206
	$R4$	30Ω, 250mW / 1206
	$R5$	20Ω, 250mW, 4 parallel / 1206
capacitor	$Cg1$	220pF / 1206

Πίνακας 3.7 : Χρησιμοποιούμενα μεγέθη για το πείραμα.

Όπου:

- transistor = Τρανζίστορ
- Diode = Δίοδος
- Resistor = Αντίσταση
- Capacitor = Χωρητικότητα ή Πυκνωτής



Σχήμα 3.7.1.2 : Εναλλαγή απωλειών έναντι διαρροής ρεύματος για $T_j=125^{\circ}\text{C}$.

3.7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Μια πύλη Novel, κύκλωμα οδήγησης για SiC-JFETs είναι σε θέση να λειτουργεί σε 200kHz συχνότητα εναλλαγής και προτάθηκε για την εξασφάλιση υψηλής ταχύτητας. Σε σύγκριση με SiC-JFET/Si-MOSFET cascode το SiC-JFET σε συνδυασμό με το novel πύλης που δείχνει χαμηλότερη μεταγωγή και απώλειες αγωγής και μειωμένης κλήσης στην εναλλαγή μεταβατικά.

Εν ολίγοις, μια Si-MOSFET μπορεί να παραλειφθεί για την υλοποίηση του SiC ημιαγωγών (turn-off), χωρίς να θίγει την εναλλαγή των επιδόσεων. Αυτό την κάνει σημαντικά να μειώσει την προσπάθεια υλοποίησης και κάνει εφικτή μία λειτουργία σε υψηλές διασταυρώσεις ή ψήκτρα θερμοκρασίας και δεν καθιστά δυνατή την υλοποίηση του μετατροπέα συστημάτων που παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“SiC MOSFETs”

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ

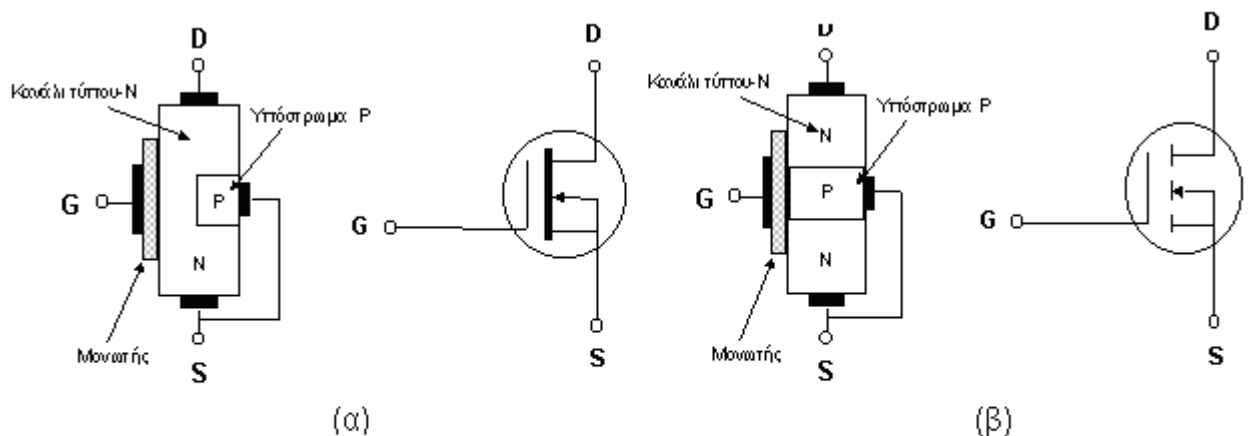
Το MOSFET είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο τρανζίστορ.

Όπως το JFET, αποτελείται και αυτό από τα ίδια στοιχεία (πηγή, απαγωγό και πύλη) όμως αντίθετα από το JFET, η πύλη είναι απομονωμένη από το κανάλι.

Συναντούμε δύο είδη MOSFET:

- α) τα MOSFET εκκένωσης (ή αραίωσης) και
- β) τα MOSFET ενίσχυσης (ή πύκνωσης).

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η δομή των MOSFET: στο πρώτο, το κανάλι -N είναι ενιαίο (δηλαδή, το κύκλωμα μεταξύ απαγωγού-πηγής είναι κανονικά κλειστό) ενώ στο δεύτερο, το κύκλωμα μεταξύ απαγωγού και πηγής είναι κανονικά ανοιχτό. Ακόμη, η πύλη βρίσκεται απομονωμένη από το κανάλι (με μια μόνωση από διοξείδιο του πυριτίου), το οποίο βρίσκεται πάνω από ένα υπόστρωμα P.



Σχήμα 4.1 : Δομή MOSFET με κανάλι τύπου N
(α) MOSFET εκκένωσης (αραίωσης) και
(β) MOSFET ενίσχυσης (πύκνωσης) .

4.1.1 ΤΥΠΟΙ MOSFET

Τα MOSFET μπορούν να κατασκευαστούν τόσο μεμονωμένα (διακριτά τρανζίστορ) όσο και ως μέρη ενός ευρύτερου ολοκληρωμένου κυκλώματος.

- α) Η ενεργή περιοχή τους μπορεί να είναι ένα κανάλι p-τύπου, οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως **PMOS**, ή
- β) ένα κανάλι n-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως **NMOS**.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των δομών MOSFET είναι η πολύ μικρή ισχύς τους λόγω του μονωτικού στρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ πύλης και καναλιού. Λόγω αυτής της μόνωσης τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται και ως "Insulated Gate Field Effect Transistors" (IGFET) μια ονομασία πιο γενική με δεδομένο ότι οι πύλες δεν είναι πάντα μεταλλικές.

Αρχικά οι δομές MOSFET χρησιμοποιούσαν μεταλλική πύλη, κανάλι πυριτίου και διοξείδιο του πυριτίου ως μονωτικό στρώμα. Στη συνέχεια, οι μεταλλικές πύλες αντικαταστάθηκαν από πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου (γενιά κόμβων πύλης των 65nm) και οι πιο εξελιγμένες τεχνολογίες έκαναν χρήση οξυνιτριδίου του πυριτίου ως μονωτικού υλικού αντί του διοξειδίου του πυριτίου.

Οι μεταλλικές πύλες επανέρχονται στο προσκήνιο σε συνδυασμό με τη χρήση διηλεκτρικών υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς ως μονωτικών πύλης, στις τεχνολογίες πύλης των 45nm και κάτω. Αναφορικά τώρα με τον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται, αυτός είναι κυρίως το πυρίτιο ενώ κατασκευαστές όπως η IBM χρησιμοποιούν και το SiGe. Ημιαγωγοί με υψηλές επιδόσεις, λόγω αυξημένης ευκινησίας φορέων σε σχέση με το πυρίτιο, όπως το GaAs, δεν είναι κατάλληλοι για την κατασκευή MOS τρανζίστορ λόγω της αδυναμίας ανάπτυξης του αντίστοιχου οξειδίου του ημιαγωγού.

4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των MOSFET είναι η ακόλουθη:

Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαπερνά το διηλεκτρικό της πύλης και δημιουργεί (MOSFET προσαύξησης) ή τροποποιεί (MOSFET διακένωσης) ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτόν του υποβάθρου και ταυτόσημο με αυτόν των διαχύσεων σε πηγή και απαγωγό .

4.3 ΔΟΜΗ

Τα τρανζίστορ MOSFET είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση, οι οποίες δεν απαιτούν μεγάλα ρεύματα οδήγησης όπως οι αντίστοιχες διπολικές διατάξεις. Πρόκειται για τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) που λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου επαφής (JFET).

4.4 ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕ ΤΑ JFET

Η βασική τους διαφορά έναντι των JFET είναι ότι το δυναμικό που ελέγχει τη λειτουργία τους (δυναμικό πύλης) εφαρμόζεται στην ενεργό περιοχή (κανάλι) διαμέσου ενός μονωτικού στρώματος από κατάλληλο οξείδιο αντί να εφαρμόζεται μέσω μιας p-n επαφής.

Παρακάτω στο **Σχήμα 4.4** φαίνονται οι τιμές λειτουργίας και οι τύποι των SiC MOSFETs και JFETs .

SiC-MOSFET

- $V_{(BR)DSS}$: 1200 V
- I_D : 20 / 40 A
- $R_{DS(on)}$: 100 / 50 mΩ
- Package: TO 247
- Normally off



SiC-JFETs

- $V_{(BR)DSS}$: 1200 V
- I_D : 15 / 30 A
- $R_{DS(on)}$: 125 / 63 mΩ
- Package : TO 247
- Normally off



Σχήμα 4.4: SiC MOSFETs – JFETs

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“MOSFET ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ”

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι υψηλής ταχύτητας οδηγοί πυλών IXDD609/IXDI609/IXDN609, είναι ιδιαίτερος κατάλληλοι για την οδήγηση της προσφάτων IXYS MOSFETs και IGBTs. Έχοντας υψηλό ρεύμα, η έξοδος IXD_609 μπορεί να διαρρέει και να βυθίζεται 9A του ρεύματος κορυφής (peak), ενώ η παραγόμενη τάση μπορεί να αυξομειώνεται για λιγότερο από 25ns .

Η είσοδος είναι συμβατή με το CMOS, και σχεδόν άτρωτη να κλειδώσει. Χαμηλή καθυστέρηση μεταβίβασης και γρήγορη, αντιστοιχισμένης ανόδου και πτώση ανά διαστήματα, κάνει την οικογένεια των IXD_609 ιδανική για εφαρμογές υψηλής συχνότητας και υψηλής ισχύος.

Το IXDD609 έχει ρυθμιστεί ως ένα μη αντιστρεφόμενο πρόγραμμα οδήγησης με μία ενεργοποίηση, το IXDN609 έχει ρυθμιστεί ως σύντομης-αντιστροφής πρόγραμμα οδήγησης, και το IXDI609 είναι ρυθμισμένο σαν πρόγραμμα οδήγησης αναστροφής .

Η οικογένεια IXD_609 είναι διαθέσιμα σε ένα πρότυπο 8-οδηγών DIP (PI), ένα 8-οδηγών SOIC (SIA), ένα 8-οδηγών ισχύος SOIC με ένα εκτεθειμένο μέταλλο πίσω (SI), ένα 8-οδηγών DFN (D2), ένα 5-οδηγών TO-263 (YI), και ένα 5-οδηγών TO-220 (CI) .

5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

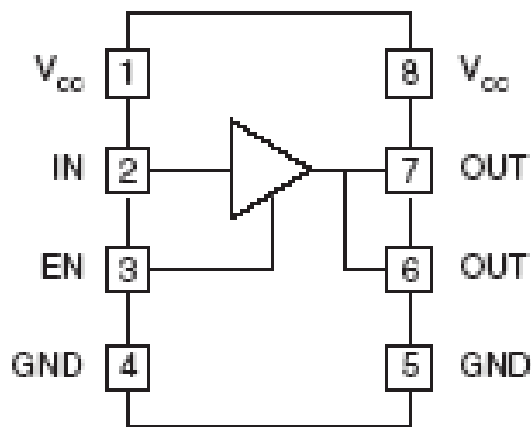
- Τάση κορυφής(peak) : 9 A
- Τάση λειτουργίας Εύρους : 4.5V έως 35V
- Εκτεταμένη θερμοκρασία λειτουργίας Εύρους : - 40°C έως +125°C
- Λογική εισόδου αντοχής αρνητικής ταλάντευσης : 5V
- Η αντιστοίχιση άλλες φορές ανυψώνεται και άλλες φορές πέφτει
- Χαμηλός χρόνος καθυστέρησης πολλαπλασιασμού
- Χαμηλή, 10mA παροχής ρεύματος
- Χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

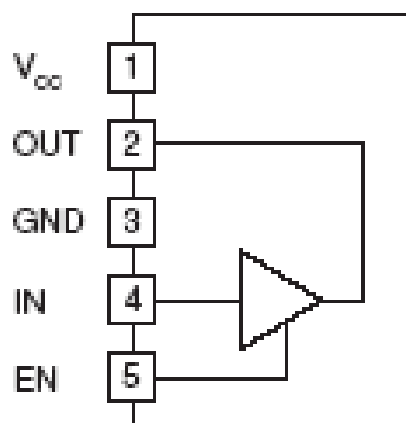
- Αποτελεσματική ισχύς MOSFET και διακόπτης IGBT
- Διακόπτη λειτουργίας με παροχή κινητήρα ισχύος
- Έλεγχος μηχανών
- Σε DC / DC μετατροπείς
- Εναλλαγή ενισχυτών κλάσης D
- Οδηγός μετασχηματισμού παλμών

5.4 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΩΝ

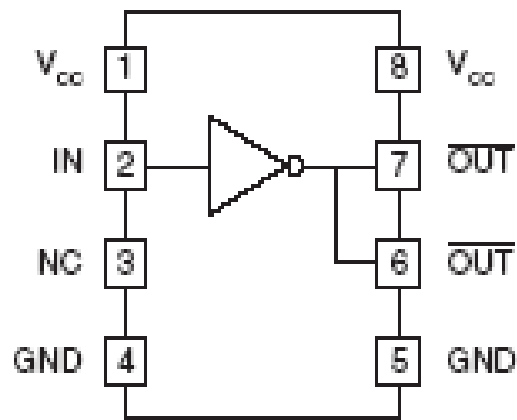
- IXDD609 D2 / PI / SI / SIA



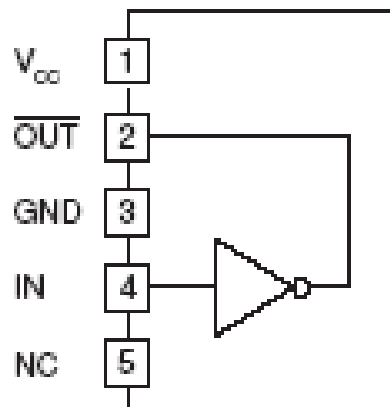
- IXDD609 CI / YI



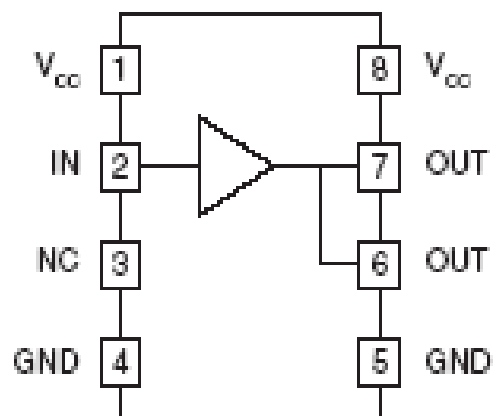
- IXDI609 PI / SI / SIA



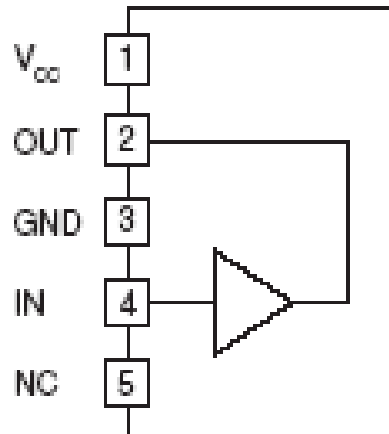
- IXDI609 CI / YI



- IXDN609 PI / SI / SIA



- IXDN609 CI / YI

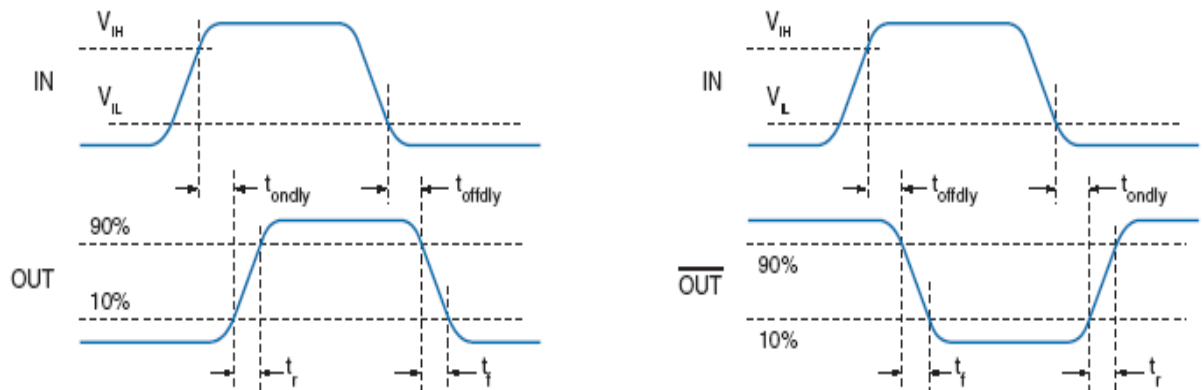


ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΠΙΝ

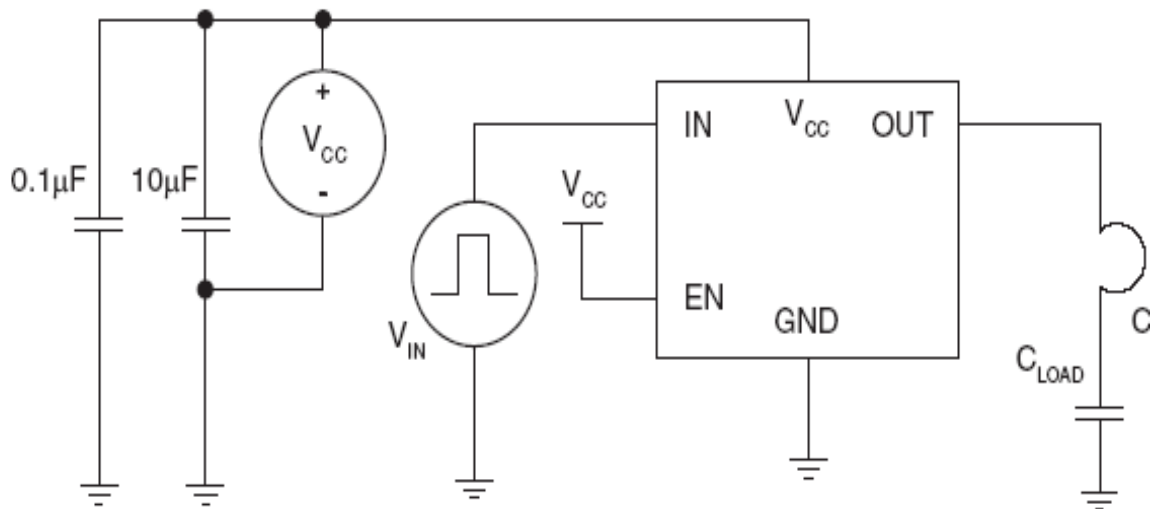
ΟΝΟΜΑ ΠΙΝ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
IN	ΛΟΓΙΚΗ ΕΙΣΟΔΟΣ(INPUT)
EN	ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΟΔΟΥ(ENABLE OUTPUT)
OUT	ΕΞΟΔΟΣ(OUTPUT)
$\overline{\text{OUT}}$	ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΕΞΟΔΟΣ(INVERTED OUTPUT)
VCC	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ(SUPPLY VOLTAGE)
GND	ΓΕΙΩΣΗ(GROUND)
NC	ΜΗ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ(NOT CONNECTED)

Πίνακας 5.4 : Ορισμοί των pin .

5.5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



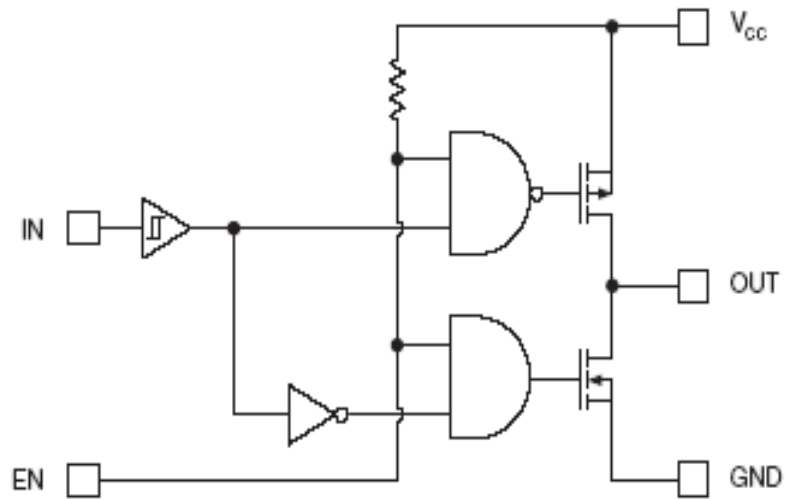
Σχήμα 5.5.1.α : Χρονικά διαγράμματα των Mosfets .



Σχήμα 5.5.1.β : Διάγραμμα δοκιμής χαρακτηριστικών .

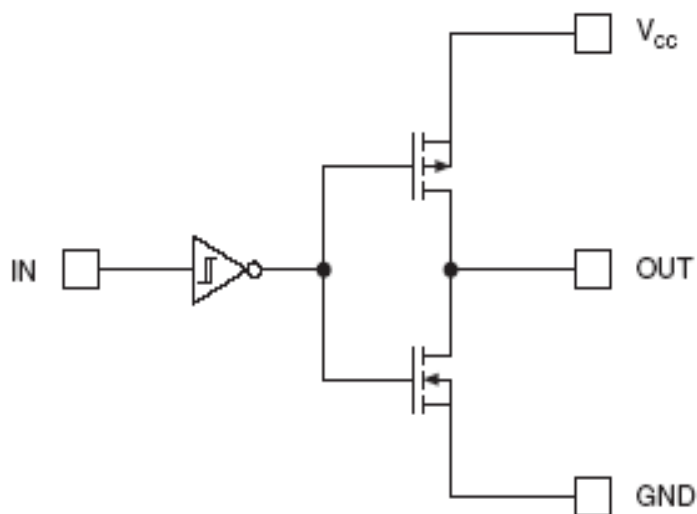
5.5.2 BLOCK ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- IXDD609



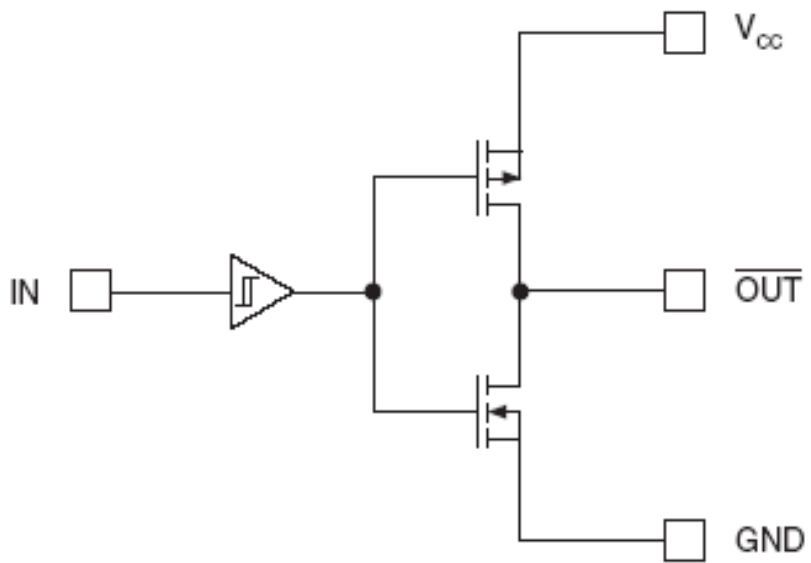
IN	EN	OUT
0	1 or open	0
1	1 or open	1
x	0	Z

- IXDN609



IN	OUT
0	0
1	1

- IXDI609



IN	$\overline{\text{OUT}}$
0	1
1	0

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΟΠΤΙΚΟ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ”

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το SGDR600P1, είναι ένα οπτικό-μονωμένο δύο σταδίων κύκλωμα οδήγησης πύλης, βελτιστοποιημένο για μεγάλη ταχύτητα, σκληρής εναλλαγής της εταιρίας Semi South (SJEP120R050 και SJEP120R063), κλειστά σε κατάσταση ηρεμίας (normally-off) των SiC VJFETs.

Το πρόγραμμα οδήγησης πύλης SGDR600P1, παρέχει ρεύμα εξόδου κορυφής +6/-3A για γρήγορη ενεργοποίηση εγγραφής, με χαμηλές απώλειες ενέργειας.

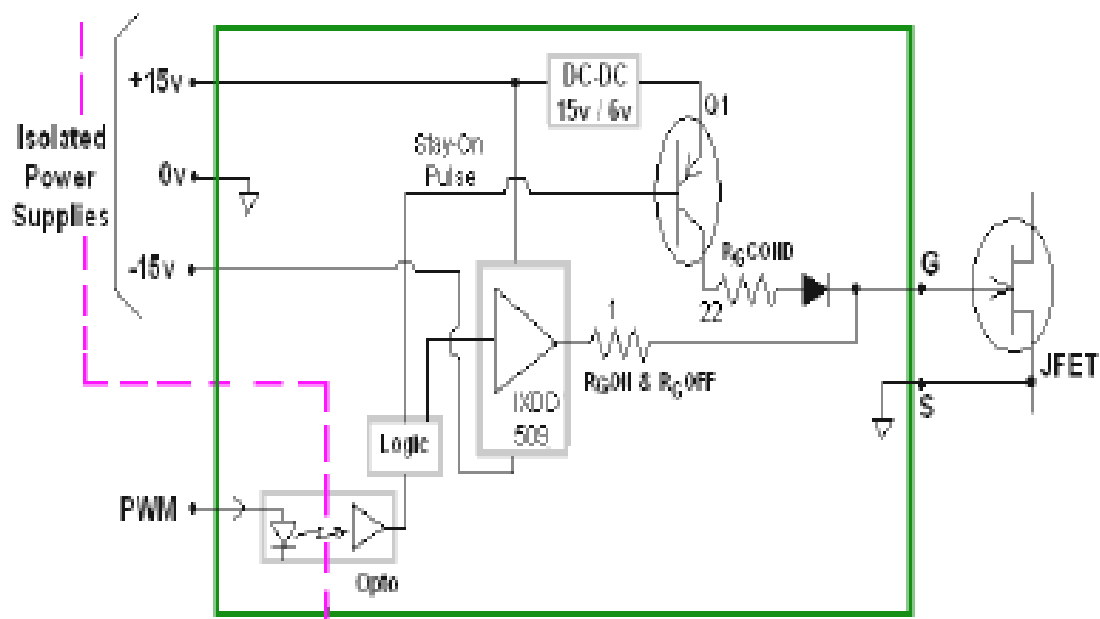
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Κατάλληλο για SJEP120R063 ή SJEP120R050.
- Οδηγός-Διακόπτης δύο σταδίων και αγωγιμότητα.
- Ρεύμα κορυφής πύλης +6/- 3A.
- Συχνότητα εναλλαγής έως 250 kHz.
- Κύκλος λειτουργίας 0 - 100% .
- Χαμηλό κόστος τεχνικής προδιαγραφής.

6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

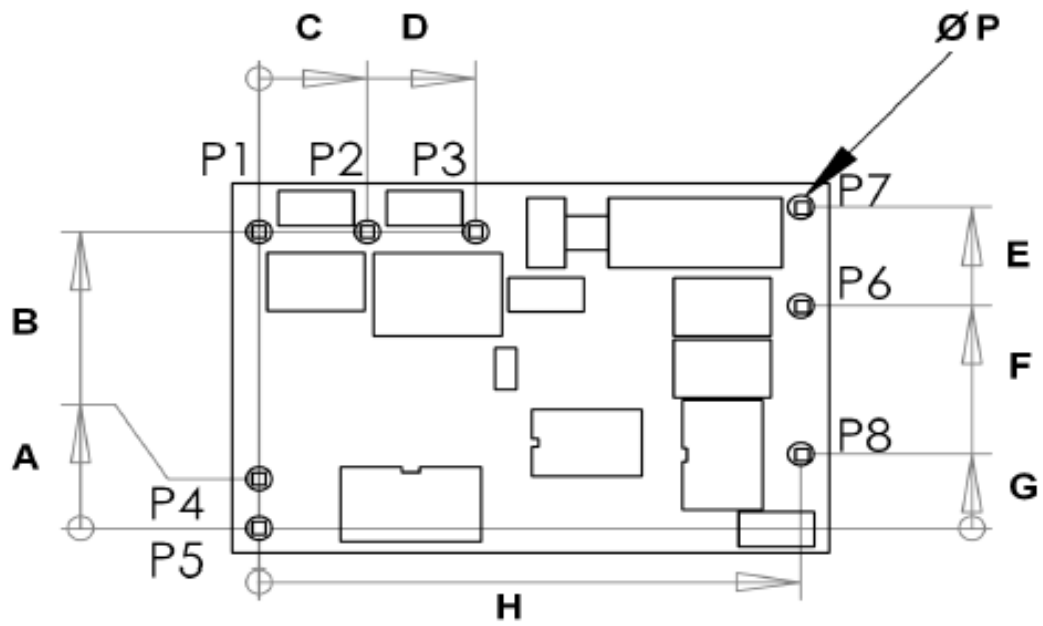
- Τοπολογίες γέφυρας σκληρής μεταγωγής.
- Μετατροπείς / Αντιστροφείς.
- Τροφοδοτικά Telecom.
- Αξιολόγηση προϊόντων.
- Έρευνα.

6.4 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

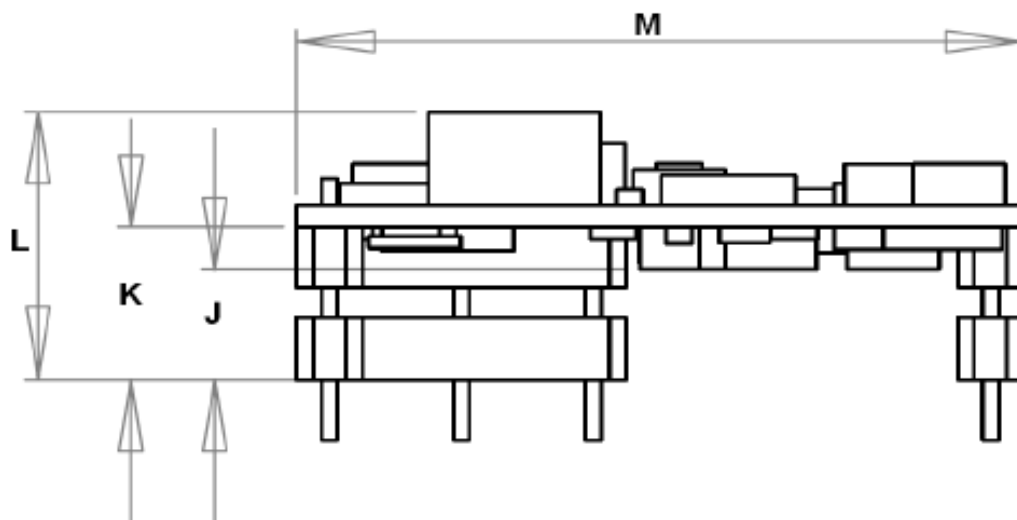


Σχήμα 6.4 : Σχηματική επισκόπηση .

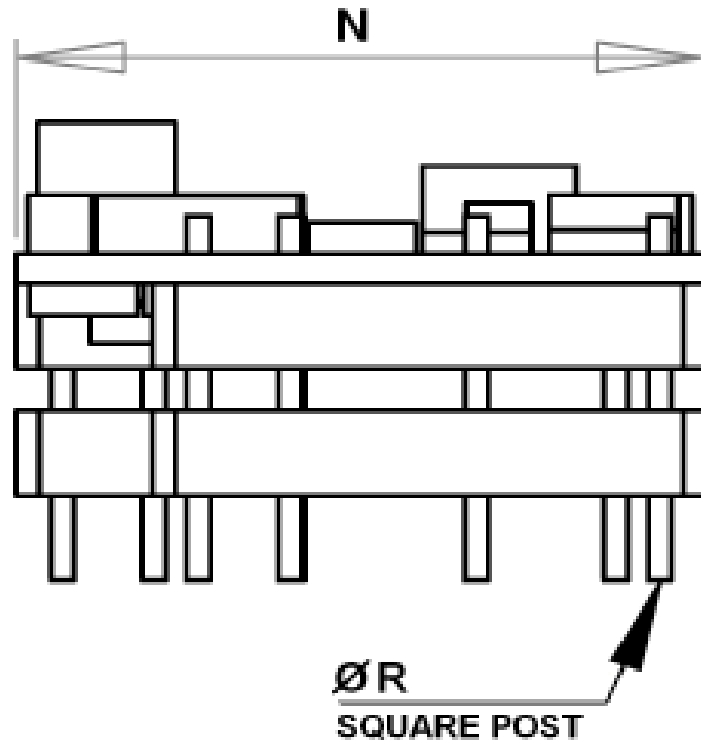
6.4.1.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΑΚΕΤΟΥ



Σχήμα 6.4.1.1.α : Φωτογραφία από ψηλά.

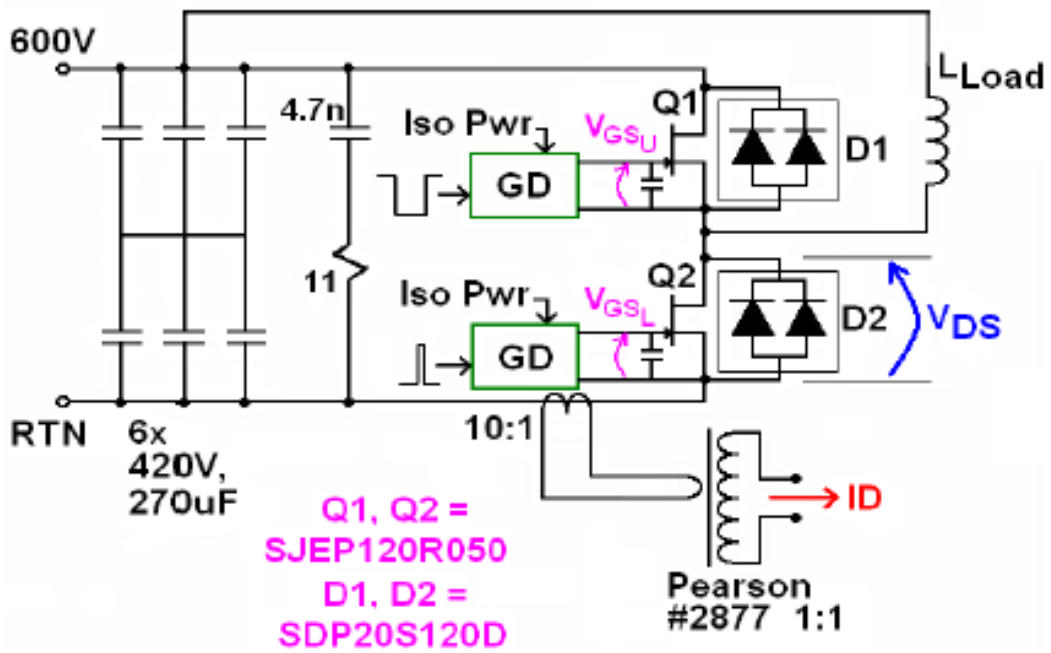


Σχήμα 6.4.1.1.β : Φωτογραφία από μπροστά .



Σχήμα 6.4.1.1.γ : Φωτογραφία από πλάγια .

6.4.1.2 ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΟΚΙΜΗΣ



Σχήμα 6.4.1.2 : Κύκλωμα δοκιμής .

6.4.1.3 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

- 1) Αποτελέσματα του SJEP120R050 .
- 2) Φάση-Άκρα ρύθμιση παραμέτρων.
- 3) VDC = 600V , ILPK = 25A , TA = 25°C .
- 4) RC ίση με 11Ω και 4.7nF .
- 5) 400 uH επαγωγικό φορτίο .
- 6) Κάθε συσκευή οδηγείτε από ξεχωριστό SGDR600P1 .
- 7) Παροχή ισχύος κυκλώματος οδήγησης +/- 15V .
- 8) Πρόγραμμα οδήγησης πύλης, περίπου 5mm από την πύλη του τερματικού.
- 9) Χωρητικότητα πύλης – πηγής 3,3nF.

7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΔΙΟΔΟΣ SCHOTTKY”

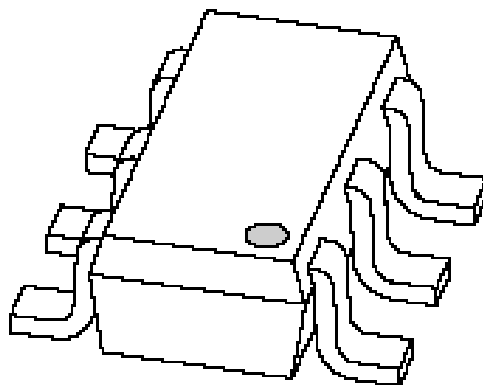
7.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Χαμηλές απώλειες εναλλαγής .
- Ικανότητα τρέχουσας απορρόφησης πολύ υψηλού κύματος .
- Γρήγορος χρόνος ανάκτησης.
- Προστατευόμενη φρουρά δακτυλιδιών.
- Πλαστικό πακέτο SMD.

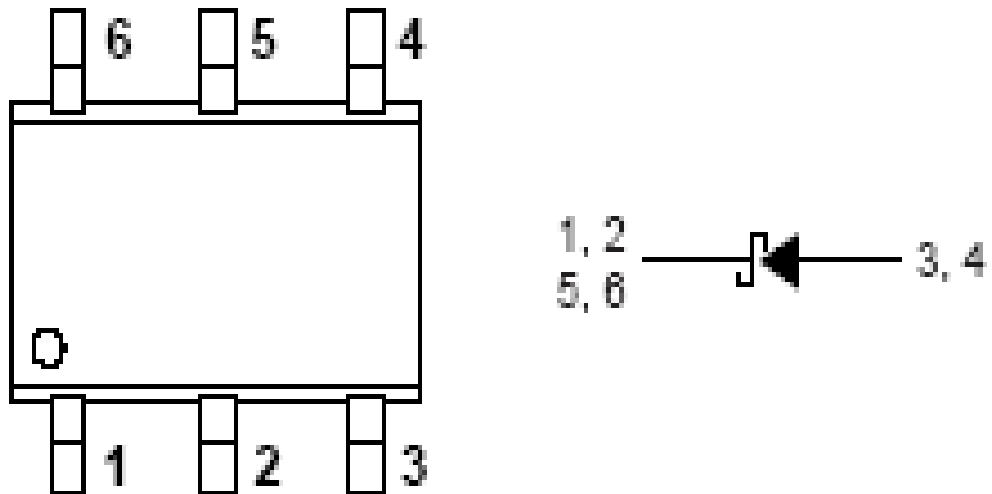
7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- Εναλλαγή λειτουργίας, τροφοδοτικά χαμηλής ισχύος .
- Διόρθωση – Αναχαίτιση.
- Προστασία πολικότητας.

7.3 ΣΧΗΜΑ ΔΙΟΔΟΥ



Σχήμα 7.3.α : Μορφή διόδου Schottky .



Σχήμα 7.3.β : Σχήμα - Συμβολισμός διόδου Schottky .

PIN	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Κάθοδος
2	Κάθοδος
3	Άνοδος
4	Άνοδος
5	Κάθοδος
6	Κάθοδος

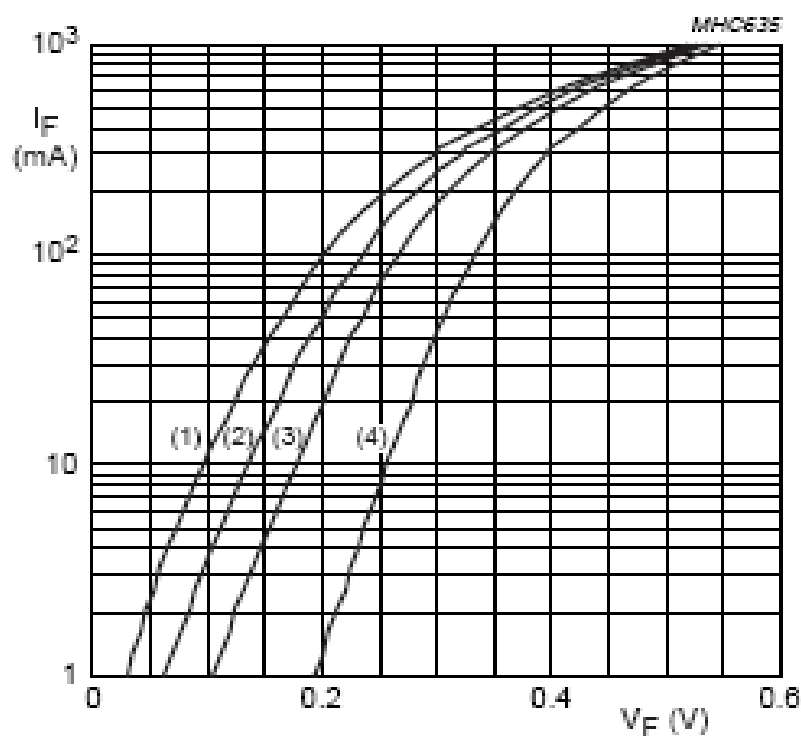
Πίνακας 7.3 : Περιγραφή των pin της διόδου .

7.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, εκτός αν υπάρχει κάποια άλλη καθορισμένη τιμή.

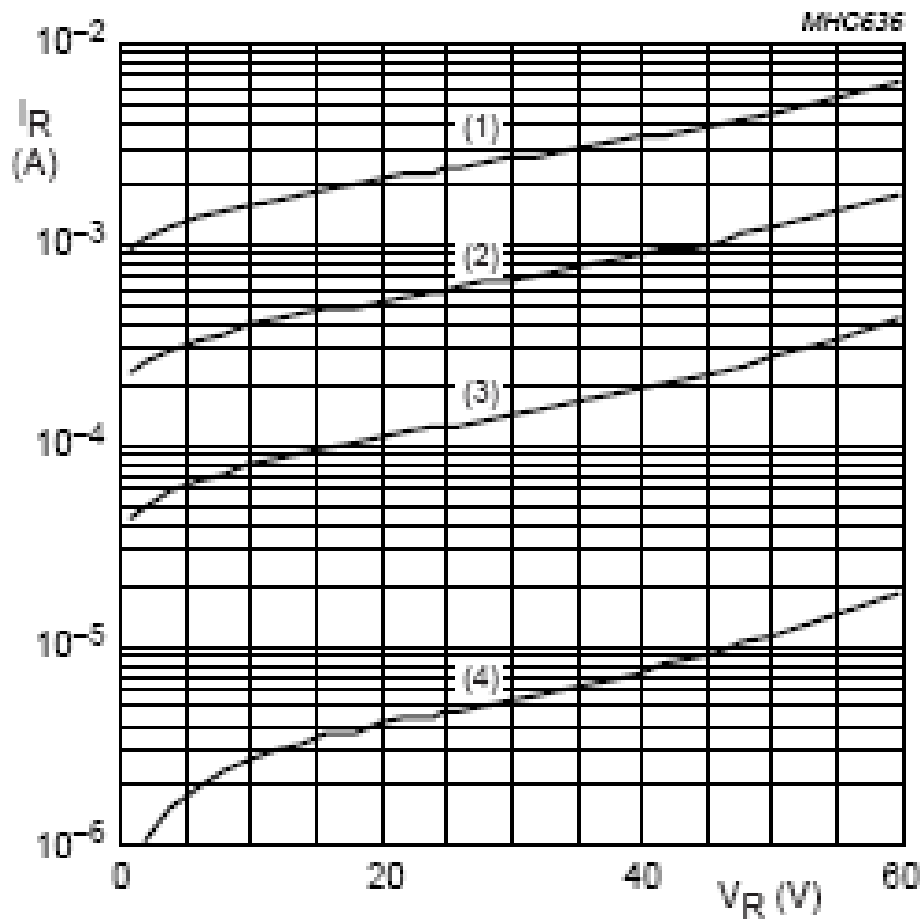
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MAX.	UNIT
V_F	continuous forward voltage	$I_F = 0.1\text{ A}$	400	mV
		$I_F = 1\text{ A}$	650	mV
I_R	continuous reverse current	$V_R = 60\text{ V}$; see Fig.3	350	μA
		$V_R = 60\text{ V}$; $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; notes 1 and 2	8	mA
C_d	diode capacitance	$V_R = 4\text{ V}$; $f = 1\text{ MHz}$; see Fig.4	60	pF

7.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



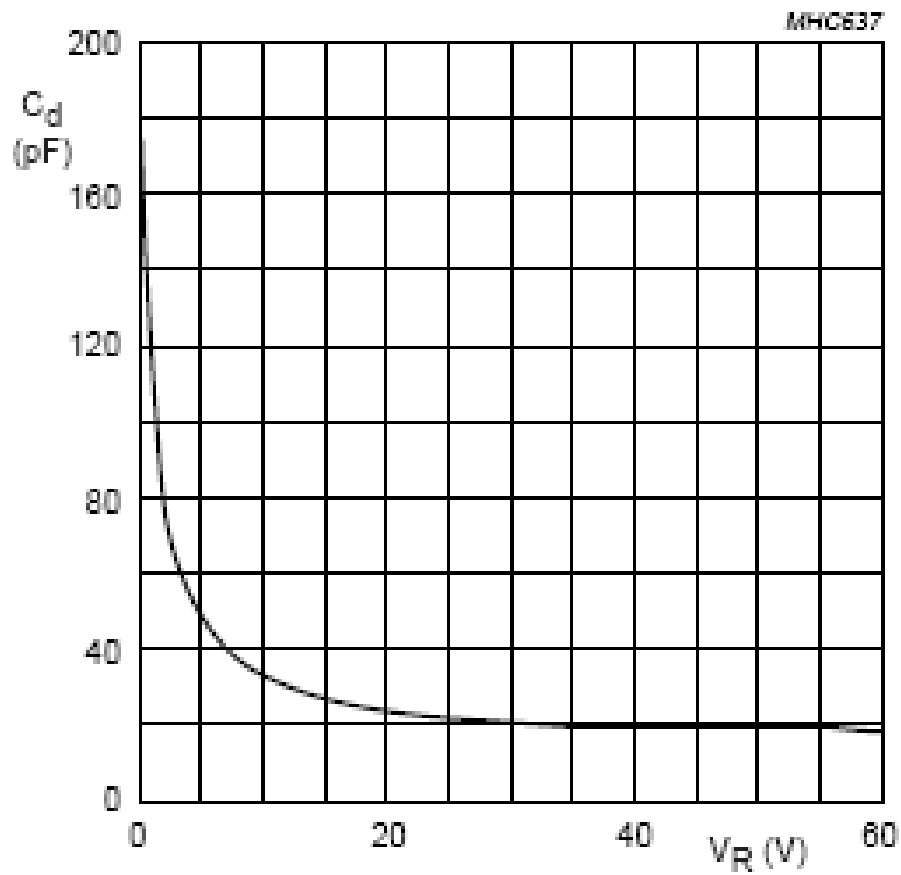
- (1) $T_{amb} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$. (3) $T_{amb} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 (2) $T_{amb} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. (4) $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Σχήμα 7.5.1: Προπορευόμενο ρεύμα σε συνάρτηση με προπορευόμενη τάση, τυπικές τιμές.



- (1) $T_{amb} = 125^\circ\text{C}$. (3) $T_{amb} = 75^\circ\text{C}$.
 (2) $T_{amb} = 100^\circ\text{C}$. (4) $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$.

Σχήμα 7.5.2 : Ανάστροφο ρεύμα σε συνάρτηση με ανάστροφη τάση, τυπικές τιμές.



$f = 1 \text{ MHz}; T_{\text{amb}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$

Σχήμα 7.5.3 : Χωρητικότητα διόδου σε συνάρτηση με αντίστροφη τάση .

8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ PV”

8.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Με τα SiC MOSFETs, επιτυγχάνουμε 98,5% βαθμό απόδοσης στον αντιστροφέα .

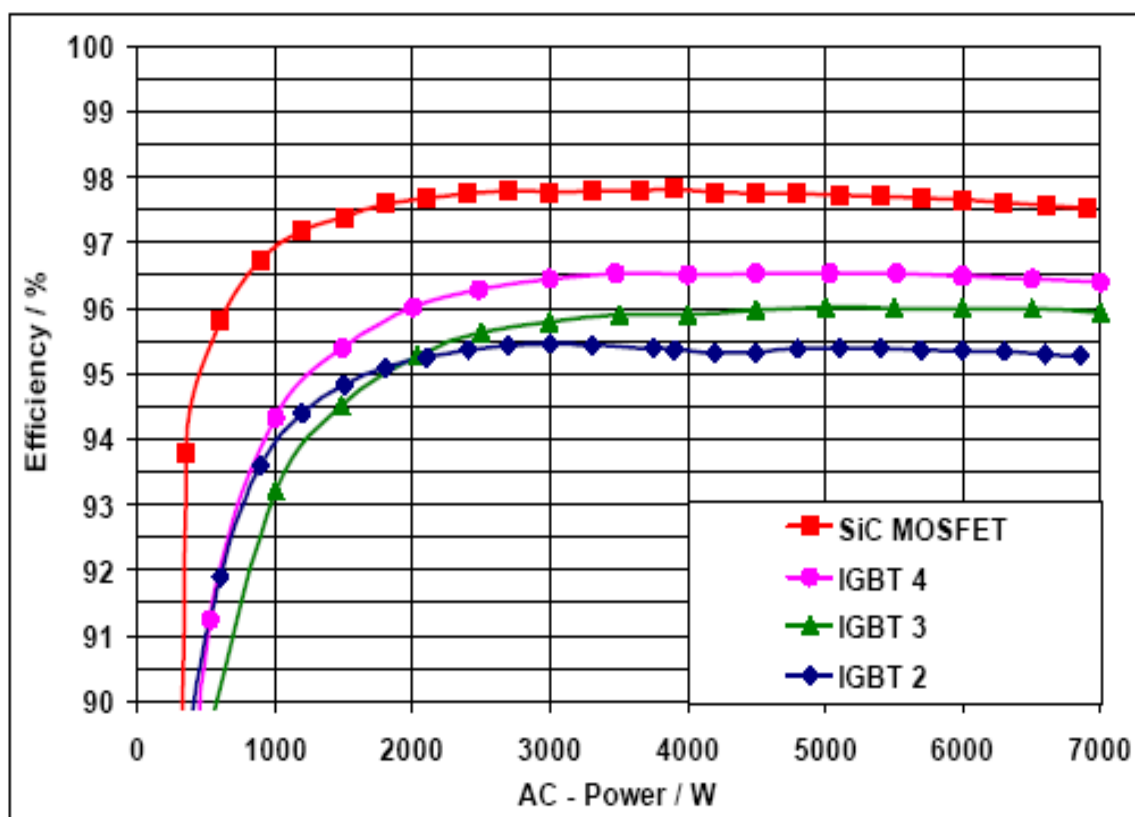
Τα χαρακτηριστικά αυτού είναι:

- Β6 – Γέφυρα
- Διπολικός διακόπτης (+ , -)
- 750 VDC
- Διακοπτική συχνότητα 16,6 kHz
- IGBT 2 (BSM15GD120DN2), IGBT 3 (FS25R12YT3), IGBT 4 (FS25R12W1T4)
- SiC-MOSFET (CNM 1009)
- Ισχύς ημιαγωγών

8.2 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ

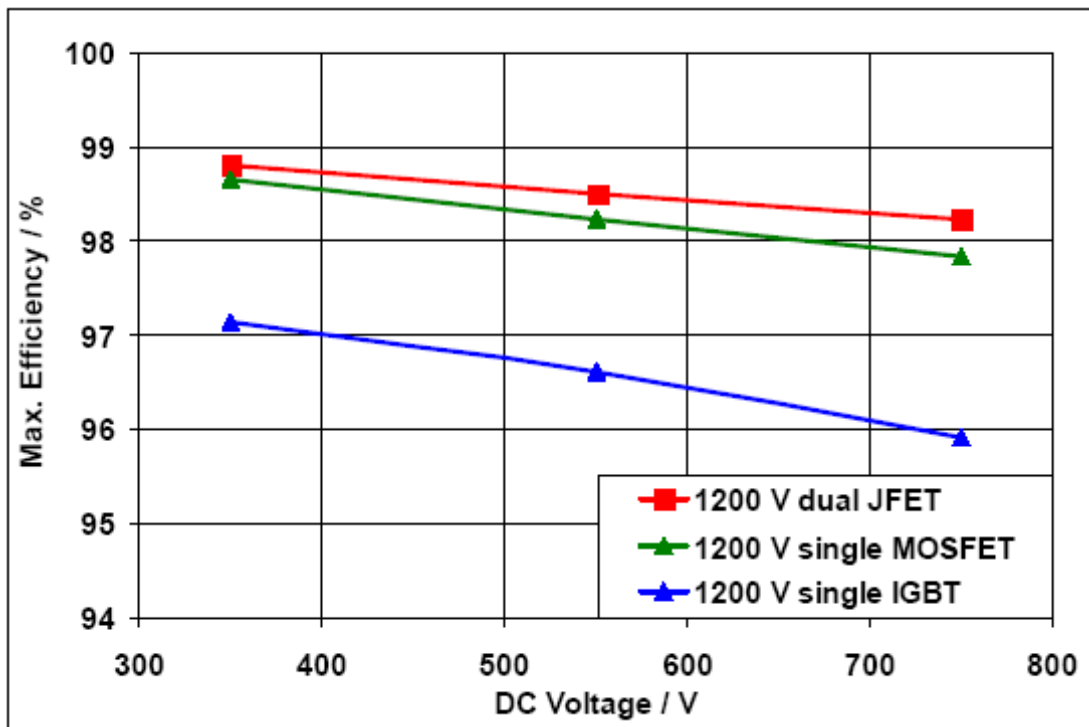
	Eta Max [%]	Eta Euro [%]
SiC-MOSFET	97.81	97.5
IGBT 4	96.54	95.5
IGBT 3	96.01	95.0
IGBT 2	95.44	94.9

Πίνακας 8.2 : Αποδοτικότητα



Σχήμα 8.2 : Αποδοτικότητα τριφασικού αντριστροφέα με SiC .

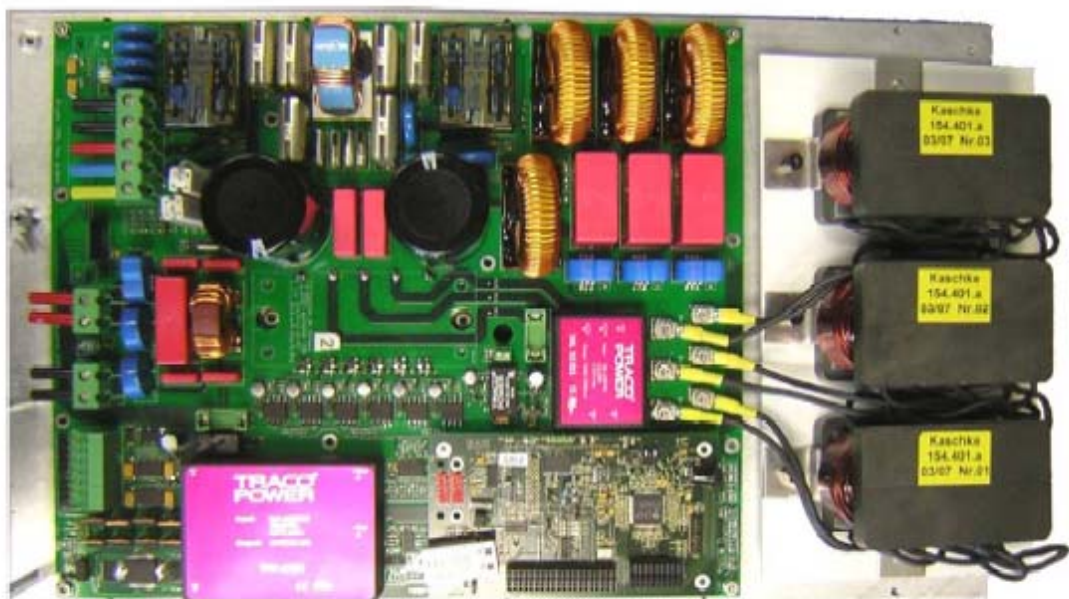
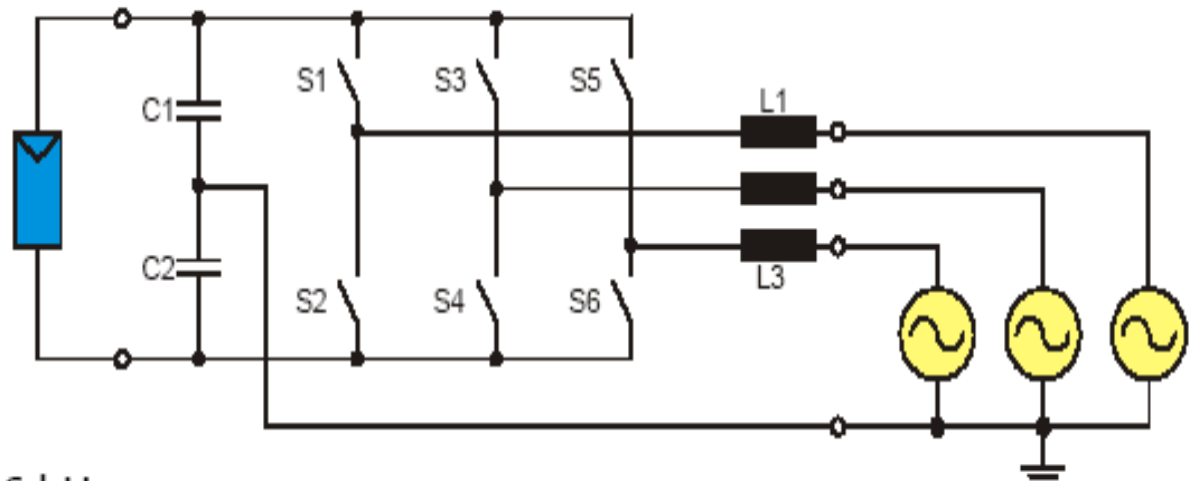
8.3 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 8.3 : Σχέση τάσης – αποδοτικότητας με IGBT , JFET , MOSFET.

8.4 ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ PV ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ



Σχήμα 8.4: Τριφασικός PV - αντιστροφέας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) <http://www.siced.de/>
- 2) www.Philips.com
- 3) <http://www.cree.com/>
- 4) <http://search.digikey.com/gr/en/cat/discrete-semiconductor-products/jfets>
- 5) <http://clare.com>
- 6) <http://electronicslab.eu/index.php/el/analogika-hlektronika-2/307-polosi-tou-jfet>
- 7) <http://www.wikipedia.org>
- 8) <http://en.wikipedia.org/wiki/JFET>
- 9) <http://www-g.eng.cam.ac.uk/mmg/teaching/linearcircuits/jfet.html>
- 10) <http://socrates.berkeley.edu/~phylabs/bsc/PDFFiles/bsc5.pdf>
- 11) <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/parametrics.do?id=806>
- 12) <http://ampere-lab.cnrs.fr>
- 13) <http://el.wikipedia.org/>
- 14) <http://courses.engr.illinois.edu/ece343/jfet.pdf>
- 15) <http://13epal-esp-thess.thess.sch.gr/info-pn5.htm>
- 16) <http://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY482/notes/mosfet.pdf>
- 17) www.semisouth.com
- 18) http://semisouth.com/wp-content/uploads/2011/05/Applications_of_SiC_Transistors_in_Photovoltaic_Inverters_Fraunhofer.pdf
- 19) <http://semisouth.com/>