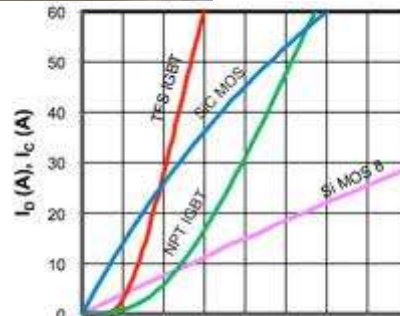


Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

“ΝΕΟΙ ΤΥΠΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ SiC, ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ, ΧΑΜΗΛΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ”



Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωαννίδης Γεώργιος
Σπουδαστής: Γκόντος Δημοσθένης

Αν. Καθηγητής
ΑΜ:32189


Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο


ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης


ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Αθήνα
Σεπτέμβριος – 2012

Copyright © Ανώτατο 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 της 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Ιωαννίδη κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την υπομονή που έκανε κατά την διάρκεια υλοποίησης αυτής της πτυχιακής εργασίας, όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του στην επίλυση διάφορων θεμάτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν κατά την διάρκεια αυτής της πτυχιακής εργασίας και γενικά καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Η πτυχιακή εργασία συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους, δράση «Αρχιμήδης ΙΙΙ- ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΣΤΑ ΤΕΙ» στα πλαίσια του προγράμματος «Εκπαίδευση και δια βίου μάθηση».



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	ii
Περιεχόμενα	iii
Λίστα σχημάτων	v
Λίστα πινάκων	viii
Summary	ix
Πρόλογος	x
1^ο Κεφάλαιο “Καρβίδιο του Πυριτίου”.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Δομή και ιδιότητες.....	2
1.2.1 Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	4
1.3 Χρήσεις.....	4
1.3.1 Λειαντικά και εργαλεία κοπής.....	4
1.3.2 Δομικά υλικά	5
1.3.3 Ανταλλακτικά αυτοκινήτων	5
1.3.4 Ηλεκτρικά συστήματα.....	5
1.3.5 Ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος.....	6
1.3.6 LEDs.....	6
1.3.7 Αστρονομία	6
1.3.8 Πυρομετρία λεπτού νήματος	6
1.3.9 Θερμαντικά στοιχεία	6
1.3.10 Κοσμήματα	7
1.3.11 Παραγωγή χάλυβα	7
1.3.12 Χαρακτική (printmaking) με ανθρακοπυρίτιο	7
1.3.13 Παραγωγή γραφένιου.....	7
2^ο Κεφάλαιο “Απαιτήσεις Εφαρμογών και Τεχνολογικές Τάσεις”	8
2.1 Απαιτήσεις τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών	8
2.2 Απαιτήσεις εφαρμογών αυτοκινητοβιομηχανίας	10
2.3 Απαιτήσεις στην ενέργεια και σε εφαρμογές δύσκολων εγκαταστάσεων	13
3^ο Κεφάλαιο “Τεχνολογία Αιχμής”	16
3.1 Χάρτης πορείας των ημιαγώγιμων εξαρτημάτων ισχύος	16
3.1.1 Ημιαγωγοί υψηλού ενεργειακού διακένου (wide band-gap).....	16
3.1.2 Τεχνολογία και ιδιότητες του SiC	17
3.1.3 Συσκευές μετατροπής ισχύος βασισμένες στον ημιαγωγό SiC.....	20
4^ο Κεφάλαιο “Σμίκρυνση και ολοκλήρωση στα Ηλεκτρονικά Ισχύος”.....	24
4.1 Βελτιωμένη θερμική διαχείριση στους μετατροπείς ισχύος SiC.....	26
4.2 Παθητικά εξαρτήματα σε λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας	28
5^ο Κεφάλαιο “SiC JFET Τρανζίστορ Ισχύος: Τεχνολογία Αιχμής”	31
5.1 Επισκόπηση	31
5.1.1 Αρχή λειτουργίας.....	31
5.1.2 Μοντελοποίηση SPICE των SiC JFETs.....	32
5.1.3 Λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας.....	32
5.2 Το SiC VJFET τρανζίστορ	33
5.2.1 Στατικά χαρακτηριστικά.....	35
5.2.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά.....	37
5.2.3 Πρόβλημα με Normally On και το κύκλωμα Cascode JFET-MOSFET	38
5.3 Μοντέλο SiC VJFET	40
5.4 Παραλληλισμός των VJFET τρανζίστορ.....	42
6^ο Κεφάλαιο “Σχεδιασμός & Μοντελοποίηση του τρανζίστορ DIMOS”	44
6.1 Εισαγωγή	44
6.2 Μοντελοποίηση του κάθετου εξαρτήματος DIMOS.....	46

6.2.1	Μοντέλο	46
6.2.2	Δομή του εξαρτήματος.....	48
6.2.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης	49
6.3	Έλεγχος, χαρακτηρισμός και εξαγωγή παραμέτρων	51
6.3.1	Διάταξη Δοκιμής-Ελέγχου	53
6.3.2	Δεδομένα και αποτελέσματα δοκιμών	55
6.4	Ανάπτυξη μοντέλου SPICE	57
6.4.1	Μοντέλο SPICE.....	57
6.4.2	Επαλήθευση Μοντέλου	59
7^ο	Κεφάλαιο “Οι Δίοδοι Schottky από SiC και οι Εφαρμογές τους”.....	61
7.1	Περίληψη	61
7.2	Χαρακτηριστικές της διόδου Schottky από SiC.....	64
7.3	Μελέτες αξιοπιστίας της διόδου Schottky από SiC	68
7.4	Διόρθωση συντελεστή ισχύος (PFC).....	70
7.5	Συμπεράσματα	79
8^ο	Κεφάλαιο “Συμπεράσματα”	81
	Βιβλιογραφία.....	85

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Δομή του β-3C-SiC polytype.....	3
Σχήμα 1.2 Δομή του 4H-SiC polytype.....	3
Σχήμα 1.3 Δομή του α-6H-SiC polytype.....	4
Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική Κατανεμημένου Συστήματος Ισχύος με ανορθωτή απομόνωσης AC/DC που παρέχει δίαυλο 48 V DC, ο οποίος τροφοδοτεί μη απομονωμένους DC/DC μετατροπείς POL.....	8
Σχήμα 2.2 Τάσεις της τεχνολογίας για AC/DC ανορθωτές: Κατά τα τελευταία 5 χρόνια οι απαιτήσεις ισχύος σε κάθε κατηγορία διακομιστών (server) έχουν αυξηθεί 4-6 φορές συνοδευόμενοι από 5% αυξημένη απόδοση.....	9
Σχήμα 2.3 GM EV1 – Τα ηλεκτρονικά ισχύος στα υβριδικά αυτοκίνητα.....	11
Σχήμα 2.4 Σχηματικό διάγραμμα της γραμμής ισχύος υψηλής τάσης και εγκατάσταση μετατροπέων DC-DC και DC-AC για διαφορετικά επίπεδα ισχύος σε υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.....	11
Σχήμα 2.5 α) Στα επόμενα χρόνια το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο θα παραμείνουν ως η κυρίαρχη πηγή ενέργειας ([28]). β) Η μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών μετατροπέων δείχνει τις ίδιες τάσεις όπως για φωτοβολταϊκές μονάδες, καθιστώντας τους κατασκευαστές μετατροπέων ισχύος να βρουν εύκολες και οικονομικά ανταγωνιστικές λύσεις ([52])......	13
Σχήμα 2.6 Φωτοβολταϊκές εφαρμογές ενέργειας, όπου το κόστος συντήρησης οποιουδήποτε εξαρτήματος μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλό. α) Σταθμός παροχής νερού στην Αυστραλία και β) Alpine cot Ponti στην Ιταλία ([47])......	14
Σχήμα 3.1 Η περιοχή της ειδικής αντίστασης αγωγής ενός μονοπολικού εξαρτήματος SiC, δείχνει θεωρητικά 400 φορές μεγαλύτερη ικανότητα τάσης διάσπασης από το αντίστοιχο Si ([7])......	16
Σχήμα 3.2 α) Σχηματική διατομή του "polytype" SiC και β) η 3D εικόνα του ([4]).....	17
Σχήμα 3.3 Πρόοδος στα εξαρτήματα SiC που συνδέονται με την πρόοδο του υλικού SiC ως τεχνολογία ευρείας διάδοσης ([51]).....	19
Σχήμα 3.4 α) Πολύ μικρότερο πάχος του στρώματος ολίσθησης στους ημιαγωγούς SiC οδηγεί σε εξαιρετικά χαμηλή αντίσταση αγωγής(θεωρητικά 300 φορές). β) Περιοχή ειδικής αντίστασης του διακόπτη SiC σε σύγκριση με το φορτίο αντιστάθμισης Si MOSFETs δείχνει 50 φορές βελτίωση.....	20
Σχήμα 3.5 Σχετικές περιοχές τάσης, ρεύματος και συχνότητας για διαφορετικούς ημιαγωγίμους διακόπτες ισχύος και η επέκταση των περιοχών εφαρμογής τους μέσω του ημιαγωγού SiC.....	23
Σχήμα 4.1 Ένα σύστημα επεξεργασίας σήματος σε αντίθεση με ένα σύστημα επεξεργασίας ισχύος.....	24
Σχήμα 4.2 Ένα όραμα για ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά ισχύος- 4 βήματα για την ανάπτυξη υψηλής πυκνότητας ισχύος ολοκληρωμένων μονάδων ηλεκτρονικών ισχύος	25
Σχήμα 4.3 α) Το απλουστευμένο θερμικό μοντέλο του ολοκληρωμένου κυκλώματος ισχύος συσκευάζεται και επικολλάται σε ψήκτρα β) Η αυξημένη θερμοκρασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος του υλικού SiC (350°C) έναντι του Si (150°C) επιτρέπει την αλλαγή της ψύξης του από συναγωγή μέσω εξαναγκασμένου αέρα σε φυσική συναγωγή χρησιμοποιώντας το ίδιο εμβαδό ψήκτρας.....	26
Σχήμα 5.1 α) JFET N-καναλιού β) JFET P-καναλιού και γ) η αρχή λειτουργία του.....	31
Σχήμα 5.2 Η συμβολή της αντίστασης αγωγής των συσκευών MOS σε υλικό Si και SiC.....	33

Σχήμα 5.3 α) Η βασική δομή του SiC JFET. Από κάτω προς τα πάνω: Απαγωγός επιμετάλλωσης, υψηλή πρόσμιξη n+ στρώματος επαφής, n πεδίο διακοπής και n-στρωμάτων διολίσθησης, υψηλή πρόσμιξη p πυλών (Κόκκινο), n κανάλι, p+ στρώμα πηγής επαφής, επιμετάλλωση κορυφής β) Η εικόνα του JFET ([10])....	33
Σχήμα 5.4 α) Η αντίσταση αγωγής του SiC VJFET για διαφορετικές τάσεις αποκοπής β) ειδική αντίσταση του SiC JFET και του Si CoolMOS συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	35
Σχήμα 5.5 Η ισχύς εξόδου έναντι της τάσης αποκοπής για διαφορετικές τεχνολογίες ισχύος FET	36
Σχήμα 5.6 Οι χαρακτηριστικές εξόδου των Si MOSFET και SiC JFET. α) Η πρώτη γενιά SiC JFET παρουσιάζει σχετικά χαμηλό ρεύμα κορεσμού . β) η τέταρτη γενιά έχει φτάσει τα 700A/cm ²	36
Σχήμα 5.7 Κλάδος μιας φάσης (phase leg) της διάταξης με SiC JFETs μόνο α),γ),ε) και με εξωτερική ανάστροφη δίοδο SiC β),δ),στ). Κατά την μετάβαση αγωγής γ),δ) και κατά την μετάβαση αποκοπής ε),στ) κυματομορφές στον κλάδο μιας φάσης του SiC JFET.....	37
Σχήμα 5.8 α) Το SiC JFET στο κύκλωμα Cascode, β) διαφορετικές προσεγγίσεις περιβλήματος για υψηλή τάση και υψηλή θερμοκρασία και γ) κύρια χαρακτηριστικά. *Οι τιμές καθορίζονται από το LV(Low Voltage) MOSFET...	39
Σχήμα 5.9 Οι κυματομορφές μεταγωγής των SiC JFET - Si MOSFET στην διαμόρφωση του κυκλώματος Cascode ([44])	40
Σχήμα 5.10 α) Το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου SiC VJFET και β) τα χαρακτηριστικά φόρτισης της πύλης.....	41
Σχήμα 5.11 Ρεύμα διαρροής ανάστροφης πόλωσης της πύλης και “punch-trough” ρεύματα των δύο δειγμάτων JFET	43
Σχήμα 6.1 Δομή του DIMOS για τη μοντελοποίηση. Οι ετικέτες περιγράφουν τις διάφορες περιοχές και διαστάσεις της κάθετης δομής.....	45
Σχήμα 6.2 Σχηματική εγκάρσια τομή της κάθετης δομής DIMOS που χρησιμοποιείται σε συσκευή προσομοίωσης Medici	47
Σχήμα 6.3 Χαρακτηριστικές εξόδου του (α) Αναλυτικό μοντέλο, (β) προσομοίωση Medici, (γ) Μεταβολή της τάσης διάσπασης με προσμίξεις πυκνότητας, (δ) Μεταβολή της ειδικής αντίστασης αγωγής με το πλάτος της πύλης.....	50
Σχήμα 6.4 Διάταξη δοκιμής ελέγχου για (α) DC χαρακτηριστικά, (β) μέτρηση χωρητικότητας, (γ) διακοπτικά χαρακτηριστικά	52
Σχήμα 6.5 Στιγμιότυπο καταγραφής του προγράμματος LabVIEW: (α) χαρακτηριστικά DC, (β) μέτρηση χωρητικότητας.....	53
Σχήμα 6.6(α) χαρακτηριστικές εξόδου, (β) χαρακτηριστικές μεταφοράς, (γ) αγωγιμότητα εξόδου, (δ) Αντίσταση αγωγής της δοκιμαστικής συσκευής DIMOS	55
Σχήμα 6.7(α) Χαρακτηριστικές εξόδου στα 200°C, (β) Χαρακτηριστικές Μεταφοράς σε διαφορετικές θερμοκρασίες, (γ) Υπολογισμός της τάσης κατωφλίου, (δ) Μεταβολή της τάσης κατωφλίου με τις θερμοκρασίες του δοκιμαστικού ημιαγωγού DIMOS.....	56
Σχήμα 6.8 Μοντέλο SPICE για 4H-SiC DIMOS τρανζίστορ	57
Σχήμα 6.9 Κύκλωμα αναστροφέα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των διακοπτικών χαρακτηριστικών.	59
Σχήμα 6.10(α) Προσομοίωση και (β) μετρούμενα διακοπτικά χαρακτηριστικά στα 10kHz, (γ) προσομοίωση και (δ) μετρούμενα διακοπτικά χαρακτηριστικά στα 20kHz.....	60
Σχήμα 7.1 Ειδική αντίσταση αγωγής του Si, GaAs και 4H-SiC SBDs ως συνάρτηση της τάσης διάσπασης.....	63

Σχήμα 7.2 Τυπικές χαρακτηριστικές μιας 10A/600V 4H-SiC SBD της εταιρείας CREE με παράμετρο την θερμοκρασία.	65
Σχήμα 7.3 Οι χαρακτηριστικές ανάστροφης πόλωσης μιας 10A/600V 4H-SiC SBD της εταιρείας CREE.	65
Σχήμα 7.4 Μείωση του ρεύματος αγωγής συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβλήματος για 10A/600V SiC SBD. της εταιρείας CREE	66
Σχήμα 7.5 Η καμπύλη χωρητικότητας συναρτήσει της ανάστροφης τάσης για το 10 A/600 V SiC SBD της εταιρείας CREE.	66
Σχήμα 7.6 Κυματομορφή μεταγωγής σε κατάσταση αποκοπής της 10A/600V SiC SBD σε σύγκριση με την Si FRED (IXYS DSEI 12-06A).	67
Σχήμα 7.7 Επαναλαμβανόμενο απότομο ρεύμα κορυφής στους 25 ° C χρησιμοποιώντας μισό ημιτονοειδές κύμα (CREE).....	68
Σχήμα 7.8 Ολοκληρωμένο κύκλωμα (single chip) SiC 600 V / 30 A Schottky Diode Barrier.	69
Σχήμα 7.9 Δίοδοι SiC 80 A / 600 V αποτελούμενοι από τρία ολοκληρωμένα κυκλώματα. ...	69
Σχήμα 7.10 Απλοποιημένο κύκλωμα διόρθωσης συντελεστή ισχύος.....	71
Σχήμα 7.11 Σύγκριση των διακοπτικών απωλειών στα κυκλώματα PFC με Si και SiC δίοδους.	72
Σχήμα 7.12 Σύγκριση της συνολικής απόδοσης του PFC με Si και SiC δίοδους.	73
Σχήμα 7.13 Η θερμοκρασία περιβλήματος του MOSFET σε ένα κύκλωμα PFC με δίοδους Si και SiC	74
Σχήμα 7.14 Στάδιο ανύψωσης του PFC	75
Σχήμα 7.15 Tyco Electronics module: V23990-P800-D30.....	76
Σχήμα 7.16 Διάγραμμα του flowPFC0. Στο σημείο αναφοράς μόνο 1 φάση ανύψωσης χρησιμοποιείται	76
Σχήμα 7.17 Σύγκριση Απόδοσης: ενιαία υπερταχεία FRED έναντι διόδου SiC.....	77
Σχήμα 7.18 Σύγκριση Απόδοσης: 2 εν σειρά γρήγορες FRED 300V έναντι διόδου SiC	78

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Ιδιότητες των σημαντικότερων SiC polytypes ([74],[76])	3
Πίνακας 2.1 Μέγιστες θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	12
Πίνακας 3.1 Σύγκριση του πυριτίου (Si) με ημιαγωγούς ισχύος υψηλού ενεργειακού διακένου:.....	18
Πίνακας 3.2 Περίληψη των μέχρι σήμερα γνωστών τεχνολογιών για τρανζίστορ υψηλής θερμοκρασίας.....	22
Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά τεχνολογίας ημιαγωγών υψηλής θερμοκρασίας: Το θεωρητικό όριο της θερμοκρασίας που προέρχεται από το ενεργειακό διάκενο και την κινητικότητα του φορέα των ημιαγωγών, και το πρακτικό όριο επιτεύχθηκαν σε πειράματα πάνω σε μη συσκευασμένα εργαστηριακά δείγματα ([29], [37], [55])	29
Πίνακας 4.2 Μέγιστες θερμοκρασίες και περιοριστικοί παράγοντες των επιλεγμένων μεταλλουργικών συνδυασμών των συνδετικών αγωγών ([19], [20]).....	30
Πίνακας 5.1 Οι τρεις γενιές των τρανζίστορ SiC VJFET και οι βασικές τους ιδιότητες.....	34
Πίνακας 6.1 Διαστάσεις ημιαγωγού για το προτεινόμενο 4H-SiC DIMOS	48
Πίνακας 6.2 Περίληψη του Αναλυτικού Μοντέλου και αποτελέσματα του προσομοιωμένου εξαρτήματος.....	49
Πίνακας 6.3 Προδιαγραφές δοκιμαστικού ημιαγωγού 4H-SiC DIMOSFET	51
Πίνακας 6.4 Λίστα εισόδου του Υπο-κυκλώματος Μοντέλου.....	58
Πίνακας 7.1 Βασικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του Si, GaAs, και 4H-SiC.....	62

SUMMARY

The subject of this thesis is the application of new power devices, manufactured by silicon carbide (SiC) in power electronics. The complete utilization of SiC semiconductors leads to increased power density and performance.

In chapter 1, a first introduction to the silicon carbide material, its structure, properties and uses at the industry is attempted.

In chapter 2, the requirements of several application areas such as telecommunications, automotive and energy applications are presented.

In Chapter 3, a roadmap of the semiconductor power devices, based on the material silicon carbide (SiC) like MOSFET and JFET devices is presented.

The miniaturization and integration in power electronics is presented in chapter 4.

In Chapter 5, the advantages of MOSFET against JFETs are presented, one of them and most important, is that the MOSFET devices are NORMALLY OFF compared to JFETs which are in NORMALLY ON mode. This means that the JFET is on when no voltage is applied to the gate and the sudden loss of control can lead to a short circuit. A method to overcome the fact that the Si JFET is NORMALLY ON, is the "pair Baliga" or combined circuit "Cascode" where the JFET-MOSFET pair can operate in NORMALLY OFF mode.

In chapter 6, an analytical model for a vertical double implanted metal-oxide semiconductor (Double Implanted MOS, DIMOS) transistor structure in 4H-Silicon Carbide (SiC) is presented. Furthermore, its modeling and SPICE model development is also presented. This work was implemented by researchers at the University of Tennessee and Oak Ridge National Laboratory.

SiC Schottky Barrier diodes (SBD) and their applications are presented in chapter 7 and the way of utilizing the advantages of SiC Schottky Barrier diodes (SBD) in commercial module applications is investigated.

Finally, the conclusions based on the above information and data are presented in Chapter 8.

Keywords: Silicon Carbide, Si diodes SiC diodes, JFETs, SiC SPICE models, SiC JFETs

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η χρήση των νέων εξαρτημάτων ισχύος κατασκευασμένα από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος. Η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων των ημιαγωγών SiC στους μετατροπείς αυτούς οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσής τους.

Στο κεφάλαιο 1 επιχειρείται μια πρώτη εισαγωγή στο υλικό καρβίδιο του πυριτίου, στην δομή, τις ιδιότητές του και στις χρήσεις του στην βιομηχανία.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις μερικών τομέων εφαρμογής όπως στις τηλεπικοινωνίες, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στις ενεργειακές εφαρμογές.

Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει το χάρτη πορείας των ημιαγωγικών εξαρτημάτων ισχύος, με βάση το υλικό καρβίδιο του πυριτίου SiC. Π.χ. σε συσκευές MOSFET και JFET.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η σμίκρυνση και η ενσωμάτωση στα ηλεκτρονικά ισχύος.

Στο κεφάλαιο 5 επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα των MOSFET έναντι των JFETs ένα εκ των οποίων, και πιο σημαντικό, είναι ότι τα MOSFET αποτελούν συσκευές NORMALLY OFF σε σχέση με τα JFETs τα οποία είναι σε κατάσταση NORMALLY ON. Αυτό σημαίνει ότι τα JFET άγουν εάν δεν εφαρμόζεται τάση στην πύλη και η ξαφνική απώλεια του ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα. Μια μέθοδος για να ξεπεραστεί το γεγονός ότι το Si JFET είναι NORMALLY ON, είναι το "ζευγάρι Baliga" ή συνδυασμένο κύκλωμα "Cascode"¹ όπου το ζευγάρι JFET-MOSFET μπορεί να λειτουργήσει στην κατάσταση αποκοπής (NORMALLY OFF).

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για μία κάθετη διπλή εμφύτευση ημιαγωγού μετάλλου-οξειδίου (doubly-implanted MOS, DIMOS) δομής τρανζίστορ σε 4H-SiC, η μοντελοποίησή του και η ανάπτυξη του μοντέλου SPICE τα οποία αποτελούν μέρος των προσπαθειών της ομάδας ερευνητών για υλικά, συσκευές και ηλεκτρονικά ισχύος στο Πανεπιστήμιο του Τένεση και στην Εθνική βιβλιοθήκη του Oak Ridge.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι διόδοι SiC Schottky Barrier (SBD) και οι εφαρμογές τους και πραγματοποιείται διερεύνηση στον τρόπο αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων των διόδων SiC Schottky Barrier (SBD) σε εφαρμογές εμπορικών λειτουργικών μονάδων.

¹ Ζευγάρι Baliga ή Cascode : Ένα συνδυασμένο κύκλωμα το οποίο έχει ένα τρανζίστορ στην κορυφή του άλλου, όπου ένα τρανζίστορ κοινού εκπομπού οδηγεί ένα τρανζίστορ κοινής βάσης.

Εν τέλει, στο κεφάλαιο 8 γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων βάση των προαναφερθέντων στοιχείων και δεδομένων.

Λέξεις κλειδιά: Καρβίδιο του Πυριτίου, δίοδοι Si, δίοδοι SiC, μοντέλα SiC SPICE, SiC JFETs.

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ”

1.1 Εισαγωγή

Το Καρβίδιο του πυριτίου (SiC), επίσης γνωστό ως ανθρακοπυρίτιο, είναι μια χημική ένωση πυριτίου και άνθρακα με χημικό τύπο SiC. Εμφανίζεται στη φύση ως το εξαιρετικά σπάνιο ορυκτό moissanite. Το Καρβίδιο του πυριτίου ως σκόνη παράγεται από το 1893 για χρήση ως λειαντικό μέσο. Κόκκοι από καρβίδιο του πυριτίου μπορούν να συγκολληθούν μαζί με θερμοσυσσωμάτωση για να σχηματίσουν πολύ σκληρά κεραμικά που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή, όπως φρένα αυτοκινήτων, συμπλέκτες αυτοκινήτων και κεραμικές πλάκες σε αλεξίσφαιρα γιλέκα. Η χρησιμοποίηση του καρβιδίου πυριτίου σε ηλεκτρονικές εφαρμογές ως δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) και ως ανιχνευτές στα σημερινά ραδιόφωνα πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1907. Σήμερα το SiC χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλεκτρονικούς ημιαγωγούς υψηλής θερμοκρασίας / υψηλής τάσης. Μεγάλοι μονοκρύσταλλοι καρβιδίου του πυριτίου, μπορούν να παραχθούν με τη μέθοδο Lely και μπορούν να κοπούν σε πετράδια γνωστά ως συνθετικά moissanite. Η μέθοδος ανάπτυξης Lely χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα για την ανάπτυξη κρυστάλλων υψηλότερης ποιότητας. Στην CVD² η ανάπτυξη οδηγείται από την αρχική σύνθεση του φυσικού αερίου, ενώ στην μέθοδο Lely, η ανάπτυξη οφείλεται σε διαφορά θερμοκρασίας εντός του συστήματος. Το σύστημα είναι κοντά στην χημική ισορροπία και οι επιμέρους πιέσεις των ειδών που αποτελούν το SiC είναι υψηλότερες, εφόσον η θερμοκρασία είναι υψηλότερη. Αυτό οδηγεί σε μια βαθμίδα πίεσης που οδηγεί σε μαζικές μεταφορές από τα ζεστά τμήματα της χοάνης στα ψυχρότερα τμήματα της.

² CVD: Χημική εναπόθεση ατμών (Chemical vapor deposition), είναι μια χημική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή στερεών υλικών υψηλής καθαρότητας και υψηλής απόδοσης.

1.2 Δομή και ιδιότητες

Το καρβίδιο του πυριτίου υπάρχει σε περίπου 250 διαφορετικές δομές κρυστάλλου (polytypes) ([77]). Ο πολυμορφισμός του SiC χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη οικογένεια παρόμοιων δομών κρυστάλλου που ονομάζονται polytypes. Είναι παραλλαγές της ίδιας χημικής ένωσης τα οποία είναι πανομοιότυπα σε δύο διαστάσεις και διαφέρουν ως προς την τρίτη. Έτσι, μπορούν να θεωρηθούν ως στρώματα τα οποία στοιβάζονται σε μια ορισμένη ακολουθία ([78]).

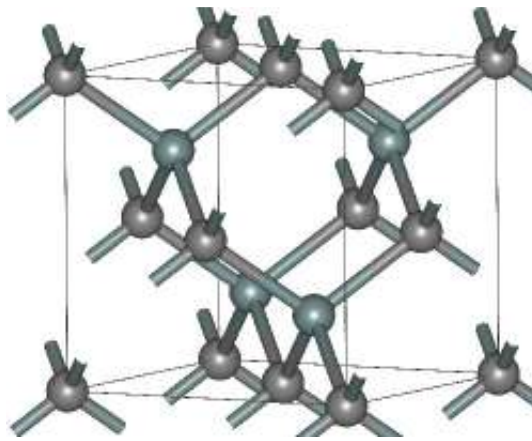
Το καρβίδιο του πυριτίου α (α -SiC) είναι η πιο συχνή πολυμορφία. Σχηματίζεται σε θερμοκρασίες άνω των 1700°C και έχει μια εξαγωνική δομή κρυστάλλου. Η τροποποίηση βήτα (β -SiC), με την zinc blende³ (zinc blende crystal) δομή κρυστάλλου (παρόμοια με διαμάντι), σχηματίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 1700°C ([79]). Μέχρι πρόσφατα, η μορφή βήτα είχε σχετικά λίγες εμπορικές χρήσεις. Τώρα έχει τραβήξει το ενδιαφέρον η χρήση του ως υποστήριξη για ετερογενείς καταλύτες, λόγω της υψηλότερης επιφάνειας του σε σύγκριση με τη μορφή άλφα.

Το καθαρό SiC είναι άχρωμο. Το καφέ προς μαύρο χρώμα του βιομηχανικού προϊόντος είναι αποτέλεσμα των προσμίξεων σιδήρου. Το φάσμα λαμπρότητας των κρυστάλλων προκαλείται από ένα παθητικό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, που σχηματίζεται στην επιφάνεια. Η υψηλή θερμοκρασία εξάχνωσης του υλικού SiC (περίπου 2700°C), το καθιστά χρήσιμο για ρουλεμάν και εξαρτήματα κλιβάνων. Το καρβίδιο του πυριτίου δεν λιώνει σε οποιαδήποτε πίεση και χημικά είναι εξαιρετικά αδρανή. Επί του παρόντος υπάρχει πολύ ενδιαφέρον στην χρήση τους ως υλικό ημιαγωγών στον τομέα των ηλεκτρονικών, όπου η υψηλή τους θερμική αγωγιμότητα, η υψηλή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος τα καθιστούν πιο ελπιδοφόρα από το πυρίτιο για εξαρτήματα υψηλής ισχύος ([80]). Το υλικό SiC επίσης έχει πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής ($4,0 \times 10^{-6} / \text{K}$) και αντιμετωπίζει τις μεταβολές φάσης που θα προκαλέσουν ασυνέχειες στη θερμική διαστολή ([75]).

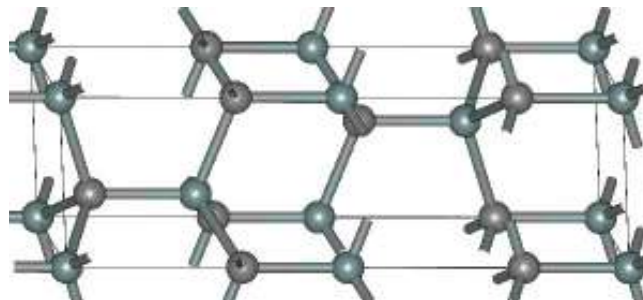
³ zinc blende crystal: Μια άλλη κοινή δομή είναι η δομή "zincblende" (σφαλερίτης). Όπως και στο χλωριούχο νάτριο (Rock salt), οι δύο τύποι του ατόμου αποτελούν δύο κυβικά πλέγματα αλληλοδιαπέρασης. Ωστόσο, διαφέρει από τη δομή του ορυκτού άλατος στο πώς τα δύο πλέγματα τοποθετούνται σε σχέση με ένα άλλο.

Πίνακας 1.1 Ιδιότητες των σημαντικότερων SiC polytypes ([74],[76])

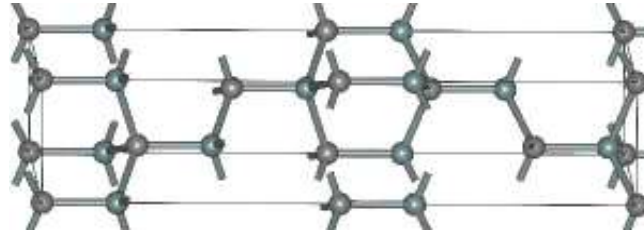
Polytype	3C (β)	4H	6H (α)
Δομή κρυστάλλου	Zinc blende (κυβικό)	εξαγωνικό	εξαγωνικό
Space group	T^2_d-F43m	$C^4_{6v}-P6_3mc$	$C^4_{6v}-P6_3mc$
Σύμβολο Pearson	cF8	hP8	hP12
Σταθερές πλέγματος (Å)	43.596	3.0730; 10.053	3.0730; 15.11
Πυκνότητα (g/cm ³)	3.21	3.21	3.21
Χάσμα Ζωνών (Bandgap) (eV)	2.36	3.23	3.05
Συντελεστής μάζας (Bulk modulus) (GPa)	250	220	220
Θερμική αγωγιμότητα (W cm-1K-1) @ 300K (see [28] for temp. dependence)	3.6	3.7	4.9



Σχήμα 1.1 Δομή του β-3C-SiC polytype



Σχήμα 1.2 Δομή του 4H-SiC polytype



Σχήμα 1.3 Δομή του α -6H-SiC polytype

1.2.1 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Το καρβίδιο του πυριτίου είναι ένας ημιαγωγός, ο οποίος μπορεί να ενισχυθεί με n-τύπου από το άζωτο ή το φώσφορο και με p-τύπου από το αλουμίνιο, το βόριο, το γάλλιο ή το βηρύλλιο ([74]). Η μεταλλική αγωγιμότητα έχει επιτευχθεί από ισχυρές προσμίξεις με βόριο, αλουμίνιο ή άζωτο. Η υπεραγωγιμότητα έχει ανιχνευθεί σε υλικό 3C-SiC: Al, 3C-SiC: B και 6H-SiC: B στην θερμοκρασία των 1,5 K ([79], [81]). Μια κρίσιμη διαφορά, ωστόσο, παρατηρείται στη συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου ανάμεσα στο αλουμίνιο και στην πρόσμιξη με βόριο: SiC: Al είναι τύπου II, ίδιο με το Si: B. Αντίθετα, το SiC: B είναι τύπου I. Στην προσπάθεια να εξηγηθεί αυτή η διαφορά, διαπιστώθηκε ότι οι περιοχές του SI είναι πιο σημαντικές από τις περιοχές του άνθρακα για την υπεραγωγιμότητα σε υλικό SiC.

1.3 Χρήσεις

1.3.1 Λειαντικά και εργαλεία κοπής

Στις τέχνες, το καρβίδιο του πυριτίου είναι ένα δημοφιλές λειαντικό στο σύγχρονο λιθοχαράκτη λόγω της αντοχής του και του χαμηλού κόστους. Στον τομέα της παραγωγής, χρησιμοποιείται για τη σκληρότητά του σε μηχανουργικές κατεργασίες λείανσης ή που προκαλούν εκδορές (abrasive), όπως η λείανση, στίλβωση, κοπή με εκτόξευση νερού και αμμοβολή. Σωματίδια από καρβίδιο του πυριτίου πλαστικοποιούνται σε χαρτί για να δημιουργηθούν γυαλόχαρτα και ταινίες πρόσφυσης για skateboards ([82]). Το 1982 ανακαλύφθηκε μία εξαιρετικά ισχυρή σύνθεση από οξείδιο του αλουμινίου και κρυσταλλικών νημάτων καρβιδίου του πυριτίου. Το 1985, τα πρώτα εμπορικά εργαλεία κοπής τα οποία κατασκευάστηκαν με σύνθεση αλουμίνιας και κρυσταλλικών νημάτων καρβιδίου του πυριτίου εισήχθησαν στην αγορά από τις εταιρείες APMC και Greenleaf ([83]).

1.3.2 Δομικά υλικά

Στη δεκαετία του 1980 και του 1990, το καρβίδιο του πυριτίου μελετήθηκε σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα στην Ευρώπη, την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες για τουρμπίνες αερίου υψηλής θερμοκρασίας. Τα εξαρτήματα προορίζονταν για αντικατάσταση των περυγίων (λεπίδων τουρμπίνας) υπερκράματος νικελίου. Ωστόσο, κανένα από τα έργα αυτά δεν οδήγησαν σε παραγωγή των εξαρτημάτων, κυρίως λόγω της χαμηλής του αντίστασης και της χαμηλής αντοχής του σε θραύση ([84]). Όπως και άλλα σκληρά κεραμικά (δηλαδή αλουμίνα και καρβίδιο του βορίου), το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται για θωράκιση (π.χ. Chobham θωράκιση), και για κεραμικές πλάκες σε αλεξίσφαιρα γιλέκα. Το dragon skin (θωράκιση σώματος το οποίο προστατεύει από τουφέκι), το οποίο παράγεται από την Pinnacle Armor, χρησιμοποιεί δίσκους καρβιδίου του πυριτίου ([85]). Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται για υποστήριξη συστημάτων ραφιών σε κλιβάνους υψηλής θερμοκρασίας, όπως για το ψήσιμο κεραμικών, για σύντηξη γυαλιού ή για χύτευση γυαλιού. Τα ράφια στους κλιβάνους από υλικό SiC είναι σημαντικά ελαφρύτερα και πιο ανθεκτικά από τα παραδοσιακά ράφια αλουμίνας ([86]).

1.3.3 Ανταλλακτικά αυτοκινήτων

Χρησιμοποιούνται για υψηλής απόδοσης "κεραμικά" δισκόφρενα, τα οποία είναι σε θέση να αντέχουν σε ακραίες θερμοκρασίες. Το πυρίτιο αντιδρά με το γραφίτη στη σύνθεση άνθρακα-άνθρακα για να γίνει ανθρακονήματα με ενίσχυση καρβιδίου του πυριτίου (C / SiC). Οι δίσκοι αυτοί χρησιμοποιούνται σε ορισμένα σπορ αυτοκίνητα δρόμου, συμπεριλαμβανομένης της Porsche Carrera GT, την Bugatti Veyron, το Chevrolet Corvette ZR1, Bentley, Ferrari, Lamborghini, και ορισμένα Audi ([87]). Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται επίσης σε συντετηγμένη μορφή για φίλτρα σωματιδίων ντίζελ ([88]).

1.3.4 Ηλεκτρικά συστήματα

Η πρώτη ηλεκτρική εφαρμογή του υλικού SiC ήταν σε αλεξικέραυνα στα ηλεκτρικά συστήματα ισχύος. Οι συσκευές αυτές πρέπει να εμφανίζουν υψηλή αντίσταση, μέχρι η τάση στα άκρα τους φθάσει σε μία ορισμένη τάση κατωφλίου VT, στο οποίο σημείο η αντίσταση τους πρέπει να πέσει σε χαμηλότερο επίπεδο και να διατηρηθεί αυτό το επίπεδο μέχρι η εφαρμοζόμενη τάση πέσει κάτω από την VT ([89]).

1.3.5 Ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος

Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται για υπερταχείες, υψηλής τάσης διόδους Schottky , MOSFETs και υψηλής θερμοκρασίας θυρίστορ για εφαρμογές ημιαγωγικών διακοπών ([80]).

1.3.6 LEDs

Η ιστορία του LED από υλικό SiC είναι αρκετά αξιόλογη: η πρώτη προσπάθεια για την κατασκευή LED πραγματοποιήθηκε το 1907 χρησιμοποιώντας το SiC. Τα κίτρινα LEDs φτιαγμένα από 3C-SiC κατασκευάστηκαν στη Σοβιετική Ένωση τη δεκαετία του 1970 ([90]), και τα μπλε (6H-SiC), σε όλο τον κόσμο τη δεκαετία του 1980 ([91]). Η παραγωγή σύντομα σταμάτησε επειδή το νιτρίδιο του γαλλίου έδειξε 10-100 φορές πιο φωτεινή εκπομπή. Ωστόσο, το υλικό SiC εξακολουθεί να είναι ένα από τα σημαντικά συστατικά των LED.

1.3.7 Αστρονομία

Ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής, η υψηλή σκληρότητα, η ακαμψία και η θερμική αγωγιμότητα κάνουν το καρβίδιο του πυριτίου ένα επιθυμητό υλικό (κάτοπτρο) για τηλεσκοπία (π.χ. διαστημικό τηλεσκόπιο Herschel).

1.3.8 Πυρομετρία λεπτού νήματος

Οι ίνες από καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αερίου μέσα από μια οπτική τεχνική που ονομάζεται πυρομετρία λεπτού νήματος. Πρόκειται για την τοποθέτηση ενός λεπτού νήματος πυρακτώσεως σε μια θερμή ροή του αερίου το οποίο μπορεί να μετρήσει θερμοκρασίες από 800 K έως 2500 K. Οι ίνες SiC έχουν διάμετρο 15 μικρόμετρα, δηλαδή περίπου το ένα πέμπτο από μια ανθρώπινη τρίχα.

1.3.9 Θερμαντικά στοιχεία

Αναφορές για θερμαντικά στοιχεία καρβιδίου του πυριτίου υπάρχουν από τις αρχές του 20ου αιώνα, όταν είχαν παραχθεί από την εταιρεία Acheson's Carborundum Co. στις ΗΠΑ και από την εταιρεία EKL στο Βερολίνο. Το καρβίδιο του πυριτίου προσφέρει αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας σε σύγκριση με τους μεταλλικούς θερμαντήρες. Τα θερμαντικά στοιχεία από καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται σήμερα στο λιώσιμο των μη σιδηρούχων μετάλλων και γυαλιών, για θερμική επεξεργασία των μετάλλων, για την παραγωγή υαλοπινάκων επίπλευσης, την παραγωγή των κεραμικών και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, των αναφλεκτήρων σε ενδεικτικές λυχνίες για θερμάστρες αερίου, κλπ ([92]).

1.3.10 Κοσμήματα

Ως πολύτιμος λίθος που χρησιμοποιείται στα κοσμήματα , το καρβίδιο του πυριτίου ονομάζεται "συνθετικό moissanite" ή απλά "moissanite"

1.3.11 Παραγωγή χάλυβα

Το καρβίδιο του πυριτίου, λειτουργεί ως καύσιμο διαλυμένο σε ένα φούρνο οξυγόνου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή χάλυβα .

1.3.12 Χαρακτική (printmaking) με ανθρακοπυρίτιο

Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται σε χαρακτική με ανθρακοπυρίτιο . Το αμμοχάλικο ανθρακοπυριτίου εφαρμόζεται σε μια κόλλα στην επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου. Όταν η πάστα είναι σε ξηρή κατάσταση, το μελάνι εφαρμόζεται και παγιδεύεται στην κοκκώδη επιφάνεια του. Στην συνέχεια αφαιρείται με σκούπισμα από τις γυμνές περιοχές της πλάκας. Η πλάκα με το μελάνι τυπώνεται σε χαρτί με την βοήθεια πρέσσας που χρησιμοποιείται για την χαρακτική βαθυτυπία. Το αποτέλεσμα είναι μία εκτύπωση των βαμμένων σημάτων ανάγλυφα στο χαρτί ([93]).

1.3.13 Παραγωγή γραφένιου

Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται για την παραγωγή γραφένιου με γραφίτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό θεωρείται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες μεθόδους για την σύνθεση γραφένιου σε μεγάλη κλίμακα για τις πρακτικές εφαρμογές ([94], [95]).

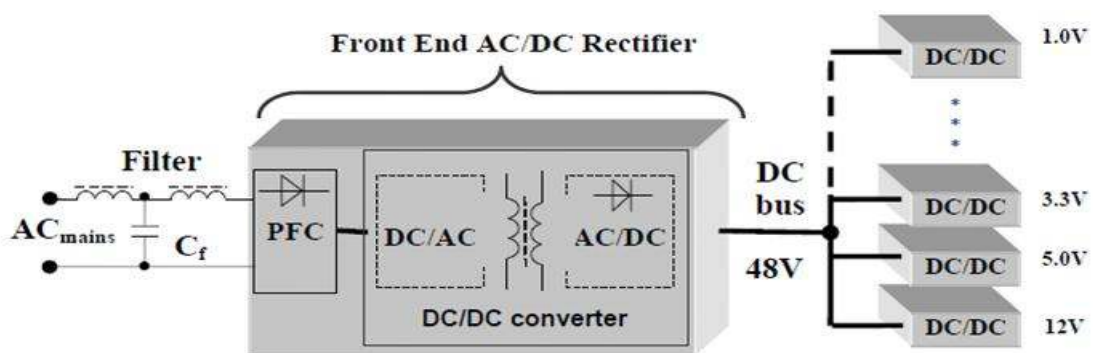
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ”

Η υψηλή απόδοση και η πυκνότητα ισχύος, είναι μεταξύ άλλων οι πιο κύριες απαιτήσεις σε κάθε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική εφαρμογή. Απευθυνόμενοι σε γενικές τροφοδοτικές διατάξεις διακοπτόμενου τρόπου, στα ακόλουθα θα αναθεωρηθούν μερικοί τομείς εφαρμογής όπως οι τηλεπικοινωνίες, οι αυτοκινητοβιομηχανίες, οι ενεργειακές εφαρμογές και επισημαίνεται κατά πόσο και με ποιον τρόπο οι ημιαγωγοί SiC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της απόδοσής τους.

2.1 Απαιτήσεις τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών

Στους περισσότερους διακομιστές (server), το λεγόμενο Καταναμημένο Σύστημα Ισχύος (Distributed Power System) έχει ευρέως υιοθετηθεί. Σε τέτοια συστήματα, η ισχύς υποβάλλεται σε επεξεργασία δύο σταδίων. Πρώτον, το δίκτυο εισόδου AC ανορθώνεται, το οποίο ανυψώνεται έως το επίπεδο των 400V DC και στην συνέχεια μετατρέπεται ξανά και ρυθμίζεται στα 48V DC από τον μετατροπέα ενδιάμεσου διαύλου. Στο δεύτερο στάδιο αυτή η DC τάση διανέμεται στα φορτία από τους μη-απομονωμένους DC/DC μετατροπείς. Το απλοποιημένο διάγραμμα του DPS που συνήθως χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.

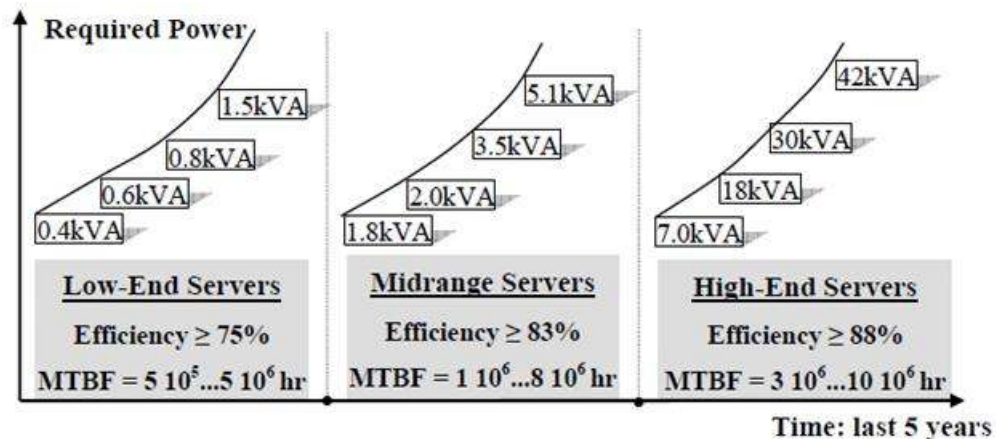


Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική Καταναμημένου Συστήματος Ισχύος με ανορθωτή απομόνωσης AC/DC που παρέχει διάυλο 48 V DC, ο οποίος τροφοδοτεί μη απομονωμένους DC/DC μετατροπείς POL⁴

Οι κύριες προκλήσεις σε αυτήν την εφαρμογή είναι οι ακόλουθες:

⁴ POL: Ο μετατροπέας POL (Point of load) είναι ένας μετατροπέας υποβιβασμού DC/DC τοποθετημένος κοντά σε ένα επεξεργαστή που καταναλώνει ισχύ.

Με την αύξηση του βαθμού ολοκλήρωσης στα ψηφιακά ηλεκτρονικά, όλο και περισσότερα τρανζίστορ είναι ενταγμένα στο σύστημα με την ταχύτερη συχνότητα μεταγωγής (Very Large Scale Integration circuit, VLSI). Η ζήτηση ισχύος του ψηφιακού συστήματος αυξάνεται δραματικά. Το τροφοδοτικό, ως υποσύστημα υποστήριξης, αναμένεται επίσης να είναι λιγότερο ακριβό και να παρέχει περισσότερη ισχύ σε μικρότερο όγκο – η αύξηση της πυκνότητας ισχύος είναι μια σημαντική παράμετρος που συνοδεύει κάθε νέα εξέλιξη του μετατροπέα ισχύος σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 2.2 Τάσεις της τεχνολογίας για AC/DC ανορθωτές: Κατά τα τελευταία 5 χρόνια οι απαιτήσεις ισχύος σε κάθε κατηγορία διακομιστών (server) έχουν αυξηθεί 4-6 φορές συνοδευόμενοι από 5% αυξημένη απόδοση.

Με την ολοκλήρωση (integration) της ψηφιακής τεχνολογίας, τα προφίλ των συστημάτων που πρόκειται να εγκατασταθούν σε βάσεις στήριξης (Racks) γίνονται ένα επιπλέον κίνητρο στη βιομηχανία. Όλο και περισσότερα ψηφιακά συστήματα παρουσιάζουν υψηλό βαθμό ολοκλήρωσης και, ως εκ τούτου, μπορούν να κατασκευαστούν με πολύ χαμηλό προφίλ. Κατά συνέπεια, και τα τροφοδοτικά του συστήματος θα πρέπει να έχουν χαμηλό προφίλ ώστε να είναι μηχανικά συμβατά με τα ψηφιακά εξαρτήματα και συστήματα. Σήμερα τα συστήματα έχουν συνήθως ένα προφίλ του 1.5U (1U ~ 4cm), και η τεχνολογία οδηγείται προς την κατεύθυνση των συστημάτων ισχύος 1U ([49]). Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι τάσεις της τεχνολογίας για την πυκνότητα ισχύος εξόδου, την απόδοση και την διάρκεια ζωής (Mean Time between Failures, MTBF) κατά τη διάρκεια των τελευταίων 5 ετών. Για κάθε κατηγορία διακομιστών (servers) η ζήτηση ισχύος έχει αυξηθεί σχεδόν κατά 4 φορές ή και κατά 6 φορές για διακομιστές υψηλών απαιτήσεων (high-end). Η απόδοση πρέπει να αυξηθεί περισσότερο από 5%. Για την επίτευξη αυτής της βελτίωσης κατά 30% έως 50% είναι απαραίτητη η μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος ([49]). Από την παραπάνω συζήτηση μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα, ότι η εξέλιξη των τροφοδοτικών εξαρτάται από τις εξελίξεις των

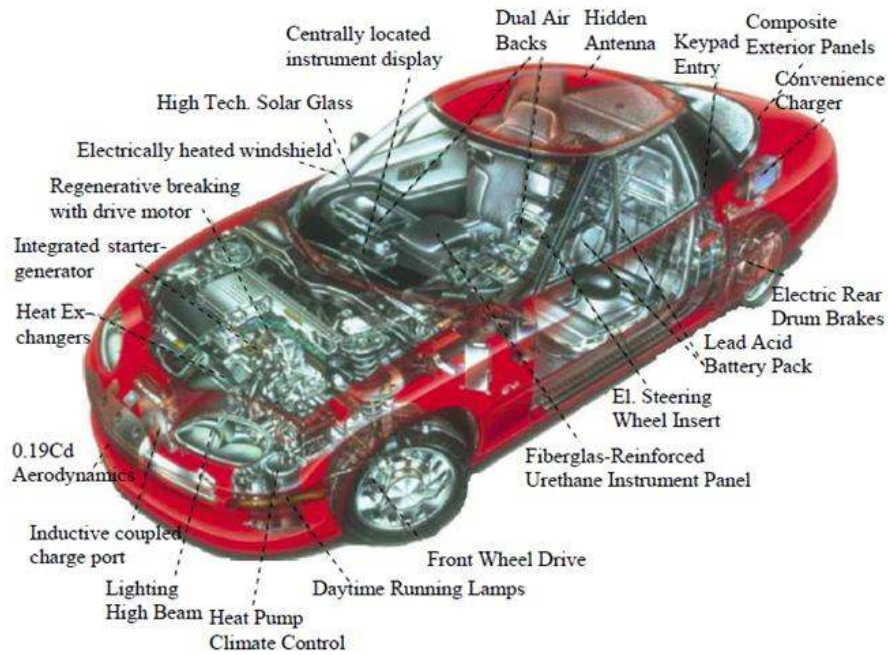
ψηφιακών συστημάτων. Τα τελευταία χρόνια, τα ψηφιακά συστήματα έχουν σμικρυνθεί περισσότερο από δέκα φορές. Ωστόσο η σμίκρυνση και η ολοκλήρωση των τροφοδοτικών για εφαρμογές διακομιστών / τηλεπικοινωνίας με τις διαθέσιμες σήμερα τεχνολογίες είναι σχεδόν αδύνατο. Η συρρίκνωση του όγκου και του χώρου θα προκαλέσει αύξηση των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος και της λειτουργίας των εξαρτημάτων. Είναι προφανής η ανάγκη μιας νέας τεχνολογίας ημιαγωγών, η οποία είναι εγγενώς κατάλληλη για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντίστοιχα, τα νέα συστήματα ψύξης ή διαχείρισης θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το περίβλημα υψηλής θερμοκρασίας καθίστανται υποχρεωτικά. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι στους σημερινούς σύνθετους μετατροπείς είναι δύσκολο να επιτευχθεί συμπαγής και περιορισμένων διαστάσεων περίβλημα/συσκευασία.

Τα ζητήματα με τα παθητικά εξαρτήματα υψηλής θερμοκρασίας και το περίβλημα θα επανεξεταστούν εν συντομία στο κεφάλαιο 4.

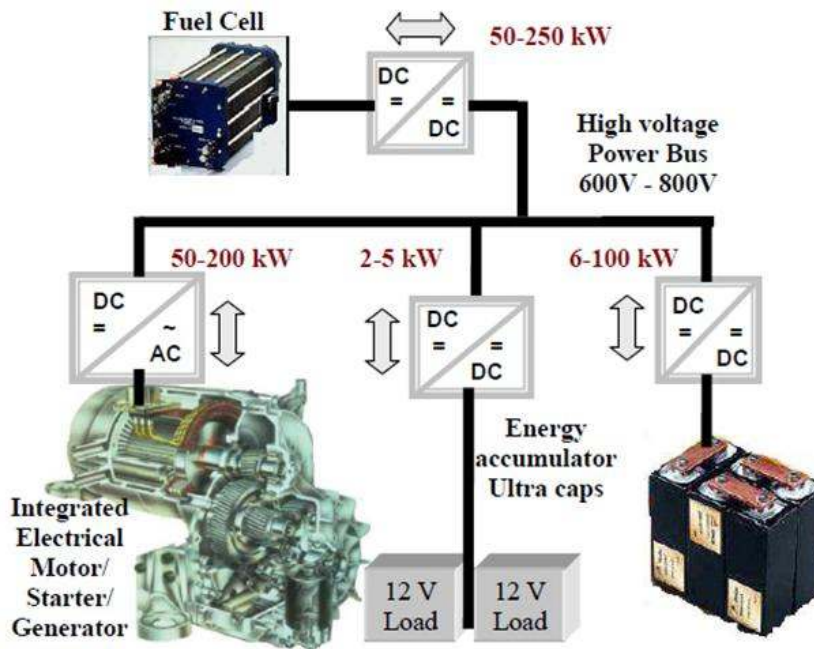
2.2 Απαιτήσεις εφαρμογών αυτοκινητοβιομηχανίας

Κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων, οι απαιτήσεις των ηλεκτρονικών στα μέσα μεταφοράς έχουν αλλάξει ριζικά, προσελκύοντας την αυτοκινητοβιομηχανία για μηχανική (ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών και μηχανικών συστημάτων, π.χ. ηλεκτρονικά στη μετάδοση). Το σχήμα 2.3 [πηγή General Motors] απεικονίζει την εμφάνιση των ηλεκτρονικών στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου οι DC / DC και DC / AC μετατροπείς ισχύος γίνονται αναπόφευκτο μέρος των σημερινών και των μελλοντικών οχημάτων. Από την άλλη πλευρά, θεωρούνται επίσης ως ένα από τα κρίσιμα μέρη, τα οποία συμβάλλουν στη μάζα και στον όγκο του οχήματος, και, αντίστοιχα, έχουν άμεση επίδραση στην επιτάχυνση και τη συνολική απόδοση του οχήματος.

Το σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζεται στο σχήμα 2.4 δείχνει την θέση του μετατροπέα ηλεκτρικής ισχύος στο σχήμα, καθώς επίσης τον τύπο και την ισχύ των εγκατεστημένων μετατροπέων. Μετατροπείς ισχύος κατάλληλοι σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 125°C θα εξαλείψουν τους προηγούμενους περιορισμούς.



Σχήμα 2.3 GM EV1 – Τα ηλεκτρονικά ισχύος στα υβριδικά αυτοκίνητα



Σχήμα 2.4 Σχηματικό διάγραμμα της γραμμής ισχύος υψηλής τάσης και εγκατάσταση μετατροπέων DC-DC και DC-AC για διαφορετικά επίπεδα ισχύος σε υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.

Αυτό θα μειώσει τον αριθμό των καλωδίων και των συνδέσμων στον κινητήρα, τα οποία μπορεί να βελτιώσουν τη μακροπρόθεσμη αξιοπιστία του. Συστήματα X-by-wire⁵ είναι υπό ανάπτυξη, και θα κυριαρχήσουν στα μελλοντικά οχήματα ([45]). Επίσης, η ανύψωση της θερμοκρασίας λειτουργίας των συσκευών ισχύος μέχρι 150°C, θα απλουστεύσει τη διαχείριση της θερμοκρασίας με τη χρήση κοινών συστημάτων ψύξης, τόσο για τα ηλεκτρονικά ισχύος (PE) όσο και για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE). Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε τμήματα ενός αυτοκινήτου ([19], [48]). Η σημαντικότερη πηγή θερμότητας που έχει επιπτώσεις στα ηλεκτρονικά των οχημάτων είναι η θερμότητα που παράγεται από τις ενεργές συσκευές, ειδικά από τους ίδιους τους ημιαγωγούς ισχύος.

Πίνακας 2.1 Μέγιστες θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην αυτοκινητοβιομηχανία

Κάτω από το καπό (Under-hood)	100-125 °C	Στους τροχούς (On Wheel)	150-250°C
Στην μηχανή (On-Engine) (ICE)	150-200°C	Κύλινδροι (Cylinder)	200-300°C
Στο σύστημα μετάδοσης (In-Transmission)	150-175°C	Εξάτμιση (Exhaust)	850°C, ambi. 300°C

Λόγω των υψηλών ρευμάτων και των υψηλών συχνοτήτων τόσο οι απώλειες αγωγής όσο και οι απώλειες μεταγωγής συμβάλλουν στη γενική αύξηση της θερμοκρασίας. Το ποσό των απωλειών εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των ημιαγωγών ισχύος που χρησιμοποιούνται. Σήμερα λόγω της περιορισμένης δυνατότητας ισχύος, χρησιμοποιούνται τα τρανζίστορ IGBT (μονωμένη πύλη διπολικού τρανζίστορ, Insulated Gate Bipolar Transistor) και οι διόδοι PiN (δίοδοι εγγενής ζώνης PN) σε μονάδες έλξης (traction drives) αντί των μονοπολικών MOSFETs.

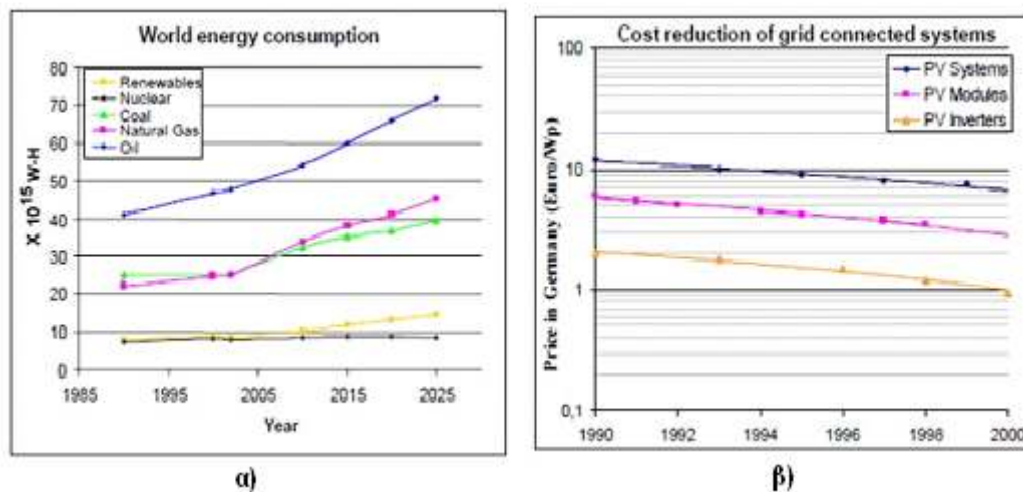
Ωστόσο, οι διπολικοί ημιαγωγοί έχουν περιορισμένη διακοπτική συχνότητα και γενικά μεγαλύτερες διακοπτικές απώλειες σε σύγκριση με τα MOSFETs και τις διόδους Schottky. Έχοντας υψηλή τάση διάσπασης (πάνω από 1200V) και υψηλές διακοπτικές συχνότητες, η διατήρηση της αντίστασης αγωγής πολύ χαμηλά στο Si MOSFET είναι σχεδόν αδύνατη. Φαίνεται ότι απαιτείται ένα υλικό με υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης. Το υλικό SiC θα μπορούσε να είναι ο καταλληλότερος ημιαγωγός. Η ικανότητα λειτουργίας του σε υψηλή

⁵ X-by-wire: Είναι η τεχνολογία στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας που αντικαθιστά τα παραδοσιακά μηχανικά συστήματα ελέγχου με ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου.

θερμοκρασία σε συνδυασμό με την υψηλή τάση διάσπασης και την διακοπτική συχνότητα του μπορεί να αξιοποιηθεί επωφελώς.

2.3 Απαιτήσεις στην ενέργεια και σε εφαρμογές δύσκολων εγκαταστάσεων

Η ενέργεια είναι η σημαντικότερη πτυχή για την οικονομική και εθνική ασφάλεια. Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται. Σύμφωνα με τις προβλέψεις του Τμήματος Ενέργειας της Αμερικής (DoE) ([29]), τα επόμενα είκοσι χρόνια το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο θα είναι ακόμα η κυρίαρχη πηγή ενέργειας, παρά τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας: Σχήμα 2.5. Ωστόσο, το πετρέλαιο και φυσικό αέριο θα πρέπει να μειώνεται σε προμήθεια, και η ανάκτηση τους θα είναι από τα βαθιά πηγάδια. Στα πηγάδια με εκατοντάδες χιλιόμετρα βάθος, η θερμοκρασία κυμαίνεται από 180 °C έως 450 °C και περισσότερο (180 °C θεωρείται ελάχιστο για την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας).



Σχήμα 2.5 α) Στα επόμενα χρόνια το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο θα παραμείνουν ως η κυρίαρχη πηγή ενέργειας ([28]). β) Η μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών μετατροπέων δείχνει τις ίδιες τάσεις όπως για φωτοβολταϊκές μονάδες, καθιστώντας τους κατασκευαστές μετατροπέων ισχύος να βρουν εύκολες και οικονομικά ανταγωνιστικές λύσεις ([52]).

Επί του παρόντος, δεν υπάρχει οποιοδήποτε ηλεκτρονικό σύστημα ή μονάδα που μπορεί να επιβιώσει σε ένα τέτοιο σκληρό περιβάλλον, υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης και οι διατρητές (drillers) έχουν να ερευνήσουν αυτά τα βάθη, χωρίς τα κατάλληλα όργανα. Η διάτρηση με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ δαπανηρή, αργή και ανακριβή. Αυτήν την περίοδο η γεωθερμική βιομηχανία χρησιμοποιεί ένα περίβλημα εκκένωσης διπλού τοιχώματος (Dewar-flask) που προστατεύει τα εσωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα και τους αισθητήρες για

περίπου 10 ώρες εντός 300 °C. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τάσεις αναφοράς (voltage references) είναι περιορισμένες σήμερα μέχρι 150 °C και οι περισσότερες παθητικές συσκευές μέχρι 180 °C, τροφοδοτικές διατάξεις με τα λιγότερα εξαρτήματα και την απλούστερη τοπολογία σε συνδυασμό με ημιαγωγούς υψηλής θερμοκρασίας μπορούν σταδιακά να βελτιώσουν την κατάσταση.

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος είναι ήδη ένα αναπόσπαστο μέρος του όλου συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αύξηση της ενεργειακής ανάπτυξης από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θέτει αυξημένη τη ζήτηση για υψηλή απόδοση, αξιοπιστία και μετατροπείς ισχύος υψηλής πυκνότητας. Η καμπύλη μείωσης του κόστους του μετατροπέα στο σχήμα 2.5 β) ([52]), παρουσιάζει την ίδια κλίση όπως και στην περίπτωση φωτοβολταϊκών μονάδων. Η καμπύλη αυτών ενθαρρύνει τους σχεδιαστές να μάθουν καινοτόμες, απλές και οικονομικά αποτελεσματικές λύσεις τροφοδοσίας. Στις αγροτικές και απρόσιτες περιοχές η λύση για τροφοδοσία 1kW είναι ο αυτόνομος φωτοβολταϊκός σταθμός ([47]). Σε αυτές τις περιοχές, τα συστήματα αυτά εγκαθίστανται συνήθως για το δημόσιο εφοδιασμό και την ιατρική φροντίδα, επομένως μόνο αξιόπιστα και χωρίς συντήρηση ηλεκτρικά συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν.



α)



β)

Σχήμα 2.6 Φωτοβολταϊκές εφαρμογές ενέργειας, όπου το κόστος συντήρησης οποιουδήποτε εξαρτήματος μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλό. α) Σταθμός παροχής νερού στην Αυστραλία και β) Alpine cot Ponti στην Ιταλία ([47]).

Στο σχήμα 2.6α) παρουσιάζεται σταθμός παροχής νερού (μέρος ενός υβριδικού συστήματος 4kWp) για μία μικρή κοινότητα στην κεντρική Αυστραλία που βρίσκεται περίπου εκατό χιλιόμετρα από την επόμενη πόλη Alice Springs. Μερικές περιοχές είναι τόσο δύσβατες, ώστε κάθε επίσκεψη για τη συντήρηση των σταθμών είναι εξαιρετικά δαπανηρή. Στο σχήμα 2.6β) παρουσιάζεται ο ανεφοδιασμός στο φωτοβολταϊκό σταθμό Alpine cot Ponti

στην Ιταλία, ο οποίος είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο με ελικόπτερο. Σε τέτοια συστήματα πρόσθετες επενδύσεις σε μικρό μέγεθος, αυτόνομων τροφοδοτικών με υψηλό βαθμό ενσωμάτωσης, τα οποία είναι απαλλαγμένα από την τακτική συντήρηση, είναι ωφέλιμα. Στο μέλλον οι μετατροπείς ισχύος που κατασκευάζονται με SiC και οι οποίοι μπορούν να ενσωματωθούν σε ισχυρές μονάδες υψηλής θερμοκρασίας, θα επιτρέψουν την εξάλειψη των κινούμενων μηχανικών μερών όπως ανεμιστήρες για αποτελεσματική ψύξη. Ο μετατροπέας που προκύπτει δεν χρειάζεται συντήρηση. Επίσης παρουσιάζει αυξημένη αξιοπιστία και ταιριάζει καλύτερα στις αναφερθείσες εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

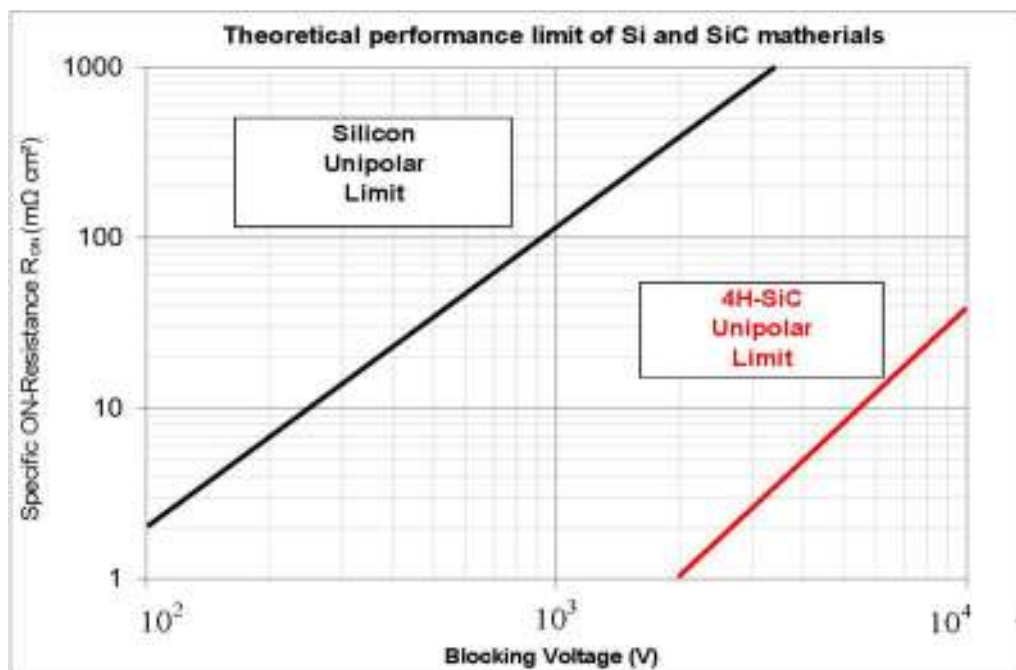
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΙΧΜΗΣ”

3.1 Χάρτης πορείας των ημιαγωγικών εξαρτημάτων ισχύος

3.1.1 Ημιαγωγοί υψηλού ενεργειακού διακένου (wide band-gap)

Λόγω του χαμηλού πεδίου διάσπασης του πυριτίου, οι συσκευές μετατροπής ισχύος έχουν φθάσει τα θεμελιώδη όριά τους: σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Η περιοχή της ειδικής αντίστασης αγωγής ενός μονοπολικού εξαρτήματος SiC, δείχνει θεωρητικά 400 φορές μεγαλύτερη ικανότητα τάσης διάσπασης από το αντίστοιχο Si ([7]).

Σημαντικές βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν μόνο με τη χρήση ημιαγωγών με υψηλότερα πεδία διάσπασης. Η πρόοδος σε μια τεχνολογική συσκευή ισχύος WBG (wide band-gap) βιομηχανικής χρήσης δείχνει ότι μέσα στα επόμενα δύο χρόνια δύο οικογένειες υλικών μπορούν να είναι διαθέσιμες: καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και νιτρίδιο του γαλλίου (GaN), λαμβάνοντας υπόψη ότι το υλικό SiC είναι το πιο ώριμο και πλησιέστερο στην αγορά. Τα GaN και AlGaN (Aluminium gallium nitride) έχουν επίσης υψηλό πεδίο διάσπασης και υψηλή κινητικότητα φορέων, και θα μπορούσαν να είναι ιδανικά για την υλοποίηση ημιαγωγών ισχύος. Ωστόσο, οι ενώσεις νιτρίδιου των ομάδων II-V του περιοδικού

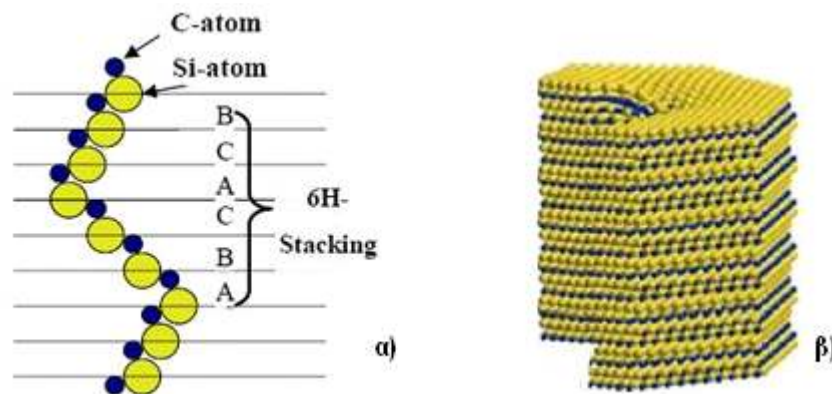
πίνακα στοιχείων δεν προσφέρουν ένα εγγενές οξείδιο παρόμοιο με SiO_2 , επομένως οι αληθινές συσκευές MOS δεν θα είναι εφικτές στο εγγύς μέλλον ([5]). Μια καλή επισκόπηση των υλικών υψηλού ενεργειακού διακένου (WBG) και των τελευταίων ημιαγωγικών διακοπών που βασίζονται σε αυτούς, συμπεριλαμβανομένων των τρανζίστορ SiC , μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [7]. Πολυάριθμες μελέτες πραγματοποιούνται από ερευνητική ομάδα της NASA Glenn SiC όπως αυτές αναφέρονται στις αναφορές [4], [55].

3.1.2 Τεχνολογία και ιδιότητες του SiC

Οι κρύσταλλοι SiC αποτελούνται χημικά από 50% άτομα άνθρακα που συνδέονται ομοιοπολικά με 50% άτομα πυριτίου. Υπάρχουν πάνω από 100 διαφορετικές δομές κρυστάλλου (polytypes), κάθε SiC polytype έχει τη δική του διακριτή δέσμη ημιαγωγικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Ωστόσο, μόνο λίγα "polytypes" χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ημιαγωγών όπως:

- α) το κυβικό 3C- SiC ,
- β) το εξαγωνικό 4H- SiC και
- γ) το 6H- SiC .

Στο σχήμα 3.2α) παρουσιάζεται η γεωμετρική μορφή της δομής του κρυστάλλου και ο αριθμός παρουσιάζει την ακολουθία των ατόμων C και SiC που δημιουργούν τον κρύσταλλο. Για παράδειγμα το 15R- SiC είναι το πιο κοινό από τα πολλά δυνατά είδη SiC με ρομβοεδρική δομή κρυστάλλου.



Σχήμα 3.2 α) Σχηματική διατομή του "polytype" SiC και β) η 3D εικόνα του ([4])

Οι σημαντικότερες ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού SiC μαζί με άλλα κοινά υλικά ημιαγωγών, που συνοψίζονται στις αναφορές [5], [15] και [27] δίνονται στον πίνακα σύγκρισης 3.1. Οι πολύ καλές ιδιότητες του SiC ήταν γνωστές για δεκαετίες εντούτοις μόνο τα αναπαραγωγικά υποστρώματα ημιαγωγικού υλικού με λογική ποιότητα και τιμή είναι

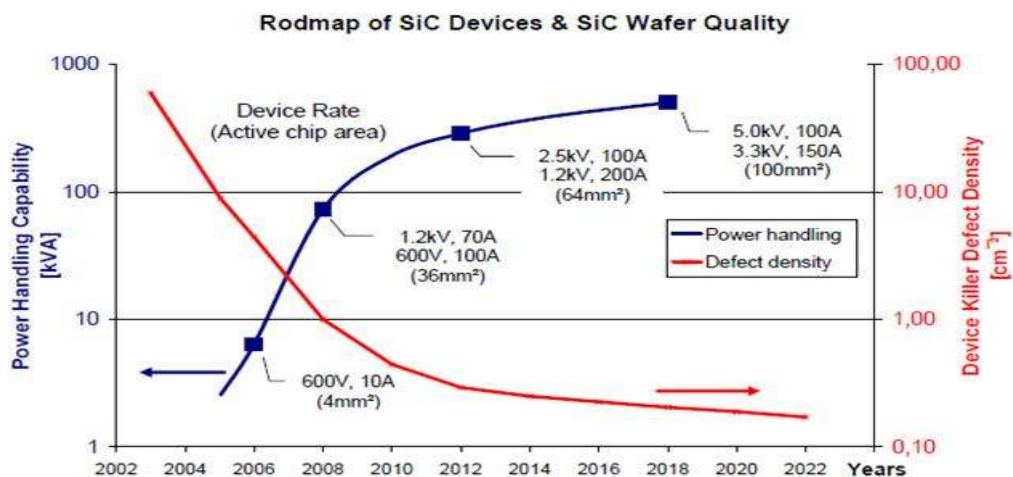
σημαντικά για τη μαζική παραγωγή ημιαγωγών. Το υλικό Si μπορεί να τηχθεί εύκολα και να επανακρυσταλλωθεί *πάλι*, π.χ. με τη μέθοδο Czochralski⁶, λαμβάνοντας υπόψη ότι το SiC εξαχνώνεται αντί να τήκεται. Αυτό ήταν σημαντικό εμπόδιο για τη μαζική παραγωγή. Η πρώτη σημαντική τεχνολογία για αναπαραγωγική ανάπτυξη του κρυστάλλου 6H-SiC καθιερώθηκε από τους Tairon και Tzvetkon στη δεκαετία του '70, αποκαλούμενη "modified seeded sublimation growth" ([11]). Αν και το πρώτο υπόστρωμα ημιαγωγίμου υλικού 1-ίντσας 6H-SiC έγινε εμπορικά διαθέσιμο ήδη από το 1989, το 4H-SiC είναι η ευνοϊκή επιλογή για τις σημερινές συσκευές λόγω της υψηλότερης κινητικότητας του φορέα του. Επιπλέον, το 6H-SiC δείχνει μια εγγενή ανισοτροπία στην κινητικότητα των ηλεκτρονίων, η οποία μειώνει την αγωγή παράλληλα του κρυσταλλογραφικού γ-άξονα, συνεπώς για τις κάθετες συσκευές ισχύος το 4H-SiC είναι η καλύτερη επιλογή. Το 1993 πρώτη η Cree Research LTD (D. J. Larkin, και J. A. Powell στο πλαίσιο χρηματοδότησης της NASA) παρέχει στην αγορά υποστρώματα ημιαγωγίμου υλικού 4H-SiC με διάμετρο 2,5cm. Παράλληλα η T. Urushidani et. Al. έχει παρουσιάσει στην αναφορά [39] μια δίοδο Schottky υψηλής τάσης στα 1100V. Αυτό ήταν το πρώτο κύριο σημείο που αύξησε το ρυθμό της βιομηχανικής χρησιμοποίησης του SiC.

Πίνακας 3.1 Σύγκριση του πυριτίου (Si) με ημιαγωγούς ισχύος υψηλού ενεργειακού διακένου: Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs), Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC), Νιτρίδιο του Γαλλίου (GaN) και Διαμάντι.

Electrical Property	Si	GaAs	SiC (4H)	SiC (6H)	GaN (2H)	Diamond
Band-gap E_g [eV]	1.12	1.42	3.28	2.96	3.4	5.5
Critical electrical field E_{Cr} [MV/cm]	0.29	0.3	2.5	3.2	3.3	20
Relative dielectric constant [E]	11.9	13.1	9.7	9.7	8.9	5.7
Electron mobility μ_n [cm ² /Vs]	1200	8500	800	370	1000	2200
Hole mobility μ_p [cm ² /Vs]	490	320	115	90	30	1800
Thermal conductivity λ [W/cmK]	1.5	0.5	3.8	3.8	1.3	20
T_{max} [K]	400	460	873	873	900	2200
Commercial wafer diameter [cm]	30	15.4	7.62	x	5.0	1.2

⁶ Η διαδικασία Czochralski είναι μια μέθοδος ανάπτυξης κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μονοκρυστάλλων ημιαγωγών (π.χ. πυρίτιο, γερμάνιο και αρσενικούχο γάλλιο), μέταλλα (π.χ. το παλλάδιο, πλατίνα, ασήμι, χρυσό), άλατα, και συνθετικών πολύτιμων λίθων

Δυστυχώς, ως ένα πολύ "σκληρό" ημιαγωγικό υλικό, το υλικό SiC περιέχει συχνά αρκετές ατέλειες κρυστάλλου, με ποιο σημαντική την ατέλεια τύπου "microripre"⁷. Αυτή η ατέλεια εμποδίζει την αύξηση της διαμέτρου του υποστρώματος του ημιαγωγικού υλικού χωρίς ελάττωμα, η οποία επηρεάζει άμεσα την ικανότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που στηρίζονται στο SiC. Μια ατέλεια τύπου "microripre" είναι μια σπειροειδής μετατόπιση με έναν κοίλο πυρήνα (εσοχή με διάμετρο της τάξεως των μικρομέτρων) στο υπόστρωμα του ημιαγωγικού υλικού SiC που επεκτείνεται σχεδόν παράλληλα με τον κρυσταλλογραφικό γ-άξονα ([3]). Τα υποστρώματα ημιαγωγικού υλικού SiC περιέχουν επίσης υψηλή πυκνότητα ατελειών του κλειστού πυρήνα, τα οποία σαν τα microripes, προκαλούν μια τοπική καταπόνηση του κρυσταλλικού πλέγματος του SiC ([3], [9]). Εκτός από τις ατέλειες του "microripre", υπάρχουν επίσης ατέλειες σπειροειδής μετατόπισης μη-κοίλων πυρήνων (στοιχειώδεις) στις φέτες ημιαγωγικών υλικών και στις επιστρώσεις SiC. Ενώ αυτές οι ατέλειες δεν θεωρούνται τόσο σημαντικές όπως του τύπου "microripre", πρόσφατα πειράματα έχουν δείξει ότι υποβαθμίζουν τη διαρροή και τις χαρακτηριστικές διάσπασης των επαφών P-N: ([6], [38] και [50]). Λαμβάνοντας υπόψη την μόνιμη μείωση των ατελειών της πυκνότητας, την συνολική βελτίωση της ποιότητας της φέτας ημιαγωγικού υλικού και την επακόλουθη αύξηση της περιοχής του ολοκληρωμένου κυκλώματος της συσκευής, η ικανότητα χειρισμού ενέργειας θα αυξηθεί εκθετικά μέχρι το 2010 σύμφωνα με τον Ohashi στην αναφορά [51], και μπορεί να φθάσει 500kVA το 2018 (βλ.σχήμα 3.3).



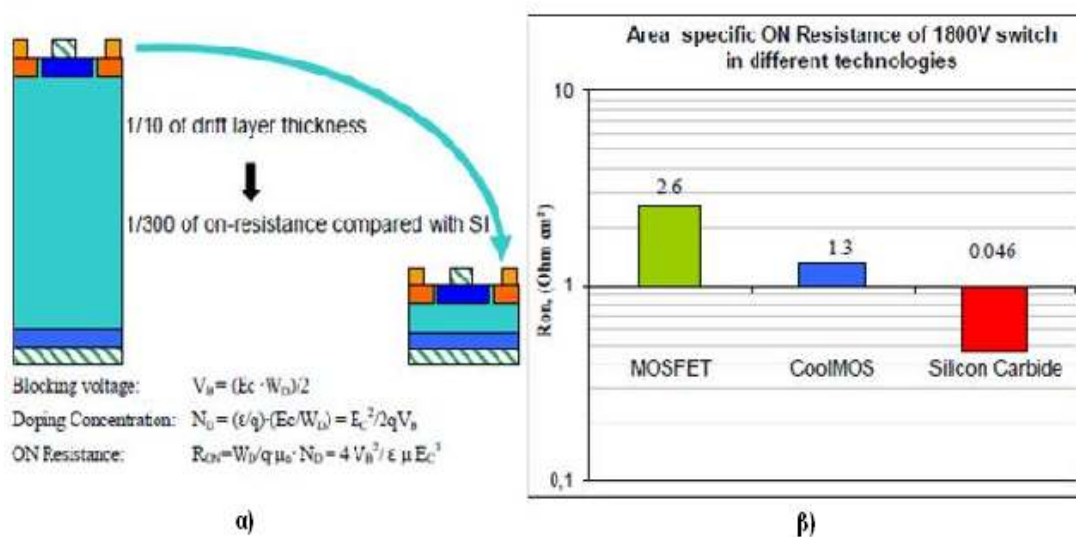
Σχήμα 3.3 Πρόοδος στα εξαρτήματα SiC που συνδέονται με την πρόοδο του υλικού SiC ως τεχνολογία ευρείας διάδοσης ([51])

⁷ "microripre": κρυσταλλική ανωμαλία στο υπόστρωμα ενός μονοκρυσταλλικού υλικού

3.1.3 Συσκευές μετατροπής ισχύος βασισμένες στον ημιαγωγό SiC

Ημιαγωγοί MOS

Το υλικό SiC είναι ο ελκυστικότερος σύνθετος ημιαγωγός, λόγω του εγγενούς οξειδίου του (SiO_2) το οποίο είναι συγκρίσιμο με τα οξείδια που χρησιμοποιούνται σε Si MOSFETs ([2]). Αυτό σημαίνει ότι οι κύριοι ημιαγωγοί ισχύος που κατασκευάστηκαν από πυρίτιο, δηλ. το MOSFET ισχύος, το τρανζίστορ IGBT, και το ελεγχόμενο θυρίστορ MOS (MOS Controlled Thyristors, MCT), μπορούν να κατασκευαστούν σε υλικό SiC επίσης. Εντούτοις, λόγω των τεχνολογικών διαφορών, οι ημιαγωγοί ισχύος σε SiC θα είναι πολύ διαφορετικοί από τους αντίστοιχους πυριτίου, και μια αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών των ημιαγωγών Si σε ημιαγωγούς SiC δεν είναι πάντα δυνατή. Όπως μπορεί να φανεί από τον πίνακα 3.1 το SiC έχει ένα πεδίο διάσπασης περίπου 10 φορές υψηλότερο από το πυρίτιο, με αποτέλεσμα στους ημιαγωγούς ισχύος SiC το πολύ μικρό πλάτος εξάντλησης W_D (σχήμα 3.4α) και πρακτικά 50 φορές χαμηλότερη αντίσταση αγωγής (σχήμα 3.4 β) από τους παρόμοιους ημιαγωγούς πυριτίου.



Σχήμα 3.4 α) Πολύ μικρότερο πάχος του στρώματος ολίσθησης στους ημιαγωγούς SiC οδηγεί σε εξαιρετικά χαμηλή αντίσταση αγωγής (θεωρητικά 300 φορές). β) Περιοχή ειδικής αντίστασης του διακόπτη SiC σε σύγκριση με το φορτίο αντιστάθμισης Si MOSFETs δείχνει 50 φορές βελτίωση.

Ένα μειονέκτημα των υλικών SiC είναι ότι η τάση της επαφής P-N είναι υψηλότερη λόγω υψηλότερου ενεργειακού χάσματος. Αυτό σημαίνει ότι οι δίοδοι SiC θα έχουν γενικά υψηλότερες τάσεις αγωγής. Η κινητικότητα φορέων είναι επίσης χαμηλότερη από το Si, συνεπώς η αντίστροφη κινητικότητα καναλιού στα SiC MOSFET είναι πολύ χαμηλότερη ($<90 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ για τα ηλεκτρόνια αντιστροφής), το οποίο σημαίνει ότι στο χαμηλότερο εύρος τάσης οι συσκευές MOSFET θα έχουν χαμηλότερο κέρδος και χαμηλότερη ικανότητα

μεταφοράς ρεύματος. Δεδομένου ότι οι λεπτές περιοχές ολίσθησης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω του περιορισμένου ελάχιστου εφικτού πάχους του καναλιού, αναμένεται υψηλότερη αντίσταση αγωγής.

Το κύριο πλεονέκτημα του SiC MOSFET θα είναι προφανές μόνο σε μέτριες προς υψηλές τάσης (3...5 kV). Για υψηλότερες τάσεις το SiC IGBT θα μπορούσε να είναι η καλύτερη επιλογή. Επιπλέον, τα οξειδία του υλικού SiC δεν παρουσιάζουν την ίδια αξιοπιστία όπως στα Si MOSFETs. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν υψηλότερη μετατόπιση της τάσης κατωφλίου, διαρροή πύλης, και αποτυχίες οξειδίου από τα συγκρίσιμα πολωμένα MOSFETs πυριτίου, ([35]). Στην αναφορά [8] αναλύονται οι διαφορές μεταξύ των βασικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων του τύπου n και p ημιαγωγών MOS από SiC. Μια από τις προφανείς διαφορές μεταξύ των θερμικών οξειδώσεων του υλικού Si και SiC για να σχηματίσουν SiO₂ είναι η παρουσία άνθρακα (C) στο υλικό SiC. Ενώ το μεγαλύτερο μέρος του άνθρακα C σε υλικό SiC, μετατρέπεται σε αέρια CO και CO₂ και εξατμίζεται από το στρώμα οξειδίου κατά τη διάρκεια της θερμικής οξείδωσης, το υπόλοιπο C βρίσκεται κοντά στην διεπαφή SiC-SiO₂. Αυτό έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ηλεκτρική ποιότητα του SiO₂ ([1]). Κατά συνέπεια, η υψηλότερη θερμοκρασία συντήρησης (προσκόλληση) είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ποιότητας του οξειδίου του υλικού SiC.

Ημιαγωγοί JFET

Οι Alok και Baliga ([14]) παρουσίασαν ένα υψηλής τάσης 6H-SiC JFET για 450V. Ένα τρανζίστορ JFET "θαμμένης πύλης" (buried gate) αναφέρεται στην αναφορά [22]. Στην αναφορά [26] ο Konstantinov et. al. έχει παρουσιάσει ένα JFET "θαμμένης πύλης" με τάση αποκοπής μέχρι 600-700V. Αν και υπάρχουν πολλές αναφορές σχετικά με τις διαφορετικές δυνατότητες για την υλοποίηση του SiC JFET, ένας από τους ημιαγωγούς που είναι διαθέσιμος σήμερα και μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά στα κυκλώματα μετατροπής ισχύος είναι το SiC VJFET από την εταιρεία SiCED GmbH (διαθέσιμο ως δείγματα μηχανικής) ([10]).

Άλλοι ημιαγωγοί

Υπάρχουν επίσης αναφορές για άλλους επερχόμενους ημιαγωγίμους διακόπτες και οι πιθανές εφαρμογές τους όπως:

- α) SiC Metal Semiconductor Field Effect Transistor – MOSFET: ([33], [37])
- β) Gate Turn OFF Switches – GTO: ([13], [17]) και
- γ) SiC Thyristors – ([12], [36]).

Πρόσφατα ιαπωνικές έρευνες έχουν αναφερθεί για τα εργαστηριακά δείγματα των διπολικών τρανζίστορ SiC και IGBTs [Ohashi 2005]. Υπάρχουν επίσης πρόσφατες εκθέσεις

για τα διπολικά τρανζίστορ ([18]) με αποδεκτό κέρδος ρεύματος ([28]). Ο Friedrichs ([21]) έχει υποστηρίξει πρόσφατα ότι το όφελος υψηλού ρεύματος είναι εφικτό με διπολικό τρανζίστορ SiC με ετεροένωση - διπολικό τρανζίστορ FET (BIFET). Εντούτοις μερικές πτυχές πρέπει να μελετηθούν, προτού τα διπολικά τρανζίστορ (BJT) μπορούν να κατασκευαστούν αξιόπιστα όπως:

- 1) Προσδιορισμός αιτιών των περιορισμών στη διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας,
- 2) Τρόπος δημιουργίας εξαιρετικά αγώγιμων και υψηλής ποιότητας υποστρωμάτων ημιαγωγικού υλικού τύπου p,
- 3) Τρόπος διαχείρισης δυσκολιών για τον παραλληλισμό στρωμάτων ή μπλόκ ημιαγωγού (dies) για την ανάπτυξη υψηλότερου ρεύματος ([54]).

Πίνακας 3.2 Περίληψη των μέχρι σήμερα γνωστών τεχνολογιών για τρανζίστορ υψηλής θερμοκρασίας

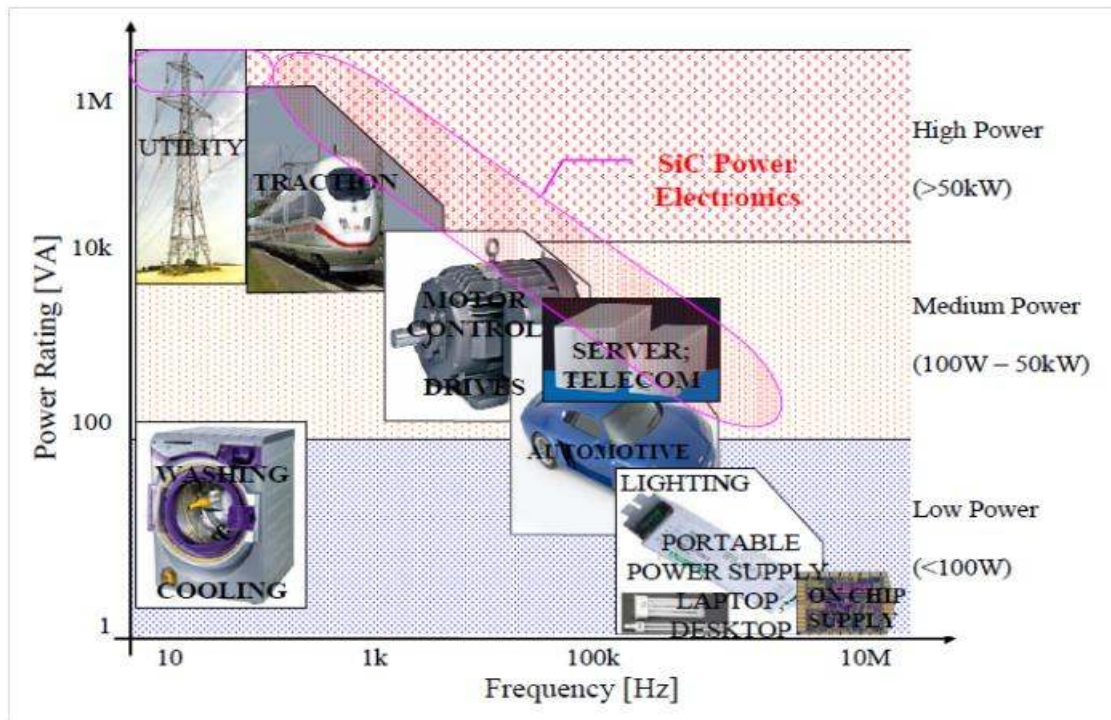
Technology	Transistor Type	Operating Voltage [V]	Frequency Limit [MHz]	Possible Temperature [°C]	Integration Scale
SiC	Normally ON	> 1200	200	500	Discrete
GaN	Normally ON	> 15	100	300	Small
Vacuum Trans	Normally ON	> 500	2000	500	Discrete
SOI CMOS	Normally OFF	5V	20	300	Medium

Συνοψίζοντας τη δεδομένη εικόνα των ημιαγωγών SiC τεχνολογίας αιχμής και των επερχόμενων ημιαγωγικών διακοπών ισχύος που βασίζονται σε αυτούς, μπορούμε να σημειώσουμε, ότι μέσω του υλικού SiC, τα πεδία εφαρμογής των γνωστών έως σήμερα ημιαγωγών ισχύος μπορούν να επεκταθούν σε σημαντικό βαθμό. Από τα πολλά πλεονεκτήματα των ημιαγωγικών διακοπών, το βασικό ενός ημιαγωγικού διακόπτη από την προοπτική αυτής της μελέτης είναι η δυνατότητα της εκπλήρωσης των όρων του συστήματος με ένα ημιαγωγικό διακόπτη, όταν η τεχνολογία πυριτίου απαιτεί αρκετούς. Για παράδειγμα, η υψηλή τάση και η αλλαγή της ταχύτητας των SiC διόδων και τρανζίστορ επιτρέπουν τη μείωση των δυναμικών απωλειών όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των διόδων Si Schottky, όμως, μόνο για τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Με βάση τα παραπάνω, θα επικεντρωθούμε στις πτυχές εκείνες του συστήματος, που μειώνουν σημαντικά το μέγεθος ή την πολυπλοκότητα του κυκλώματος στο οποίο είναι τοποθετημένος ημιαγωγικός διακόπτης SiC. Για παράδειγμα, κρατώντας όλα τα άλλα όρια παραμέτρων σταθερά και με την αύξηση

της διακοπτικής συχνότητας του τρανζίστορ FET υψηλής τάσης από 80 kHz έως και 300-400 kHz, ο όγκος και το βάρος μπορούν να μειωθούν δραστικά.

Το σχήμα 3.5 παρουσιάζει βήμα βήμα την εμφάνιση των ημιαγωγικών διακοπών SiC σε διαφορετικές εφαρμογές:

- Παλμοτροφοδοτικά ισχύος
- Βιομηχανικές Μονάδες και έλεγχος κινητήρων
- Έλξη
- Χρησιμότητα και εφαρμογές Μεγαβάτ

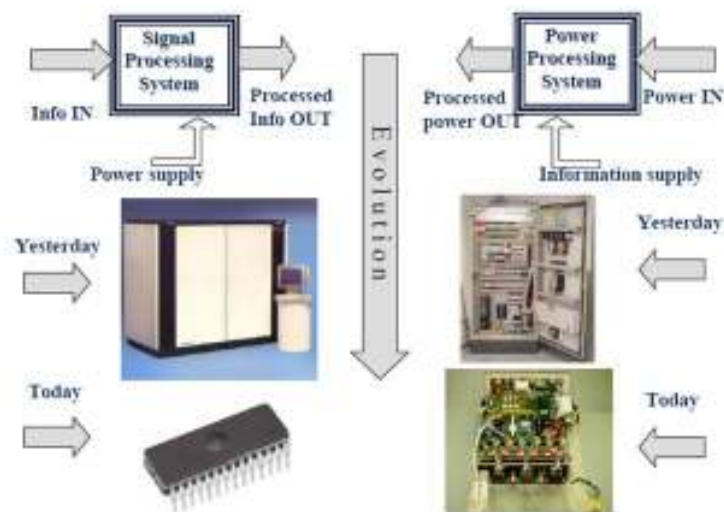


Σχήμα 3.5 Σχετικές περιοχές τάσης, ρεύματος και συχνότητας για διαφορετικούς ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος και η επέκταση των περιοχών εφαρμογής τους μέσω του ημιαγωγού SiC

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

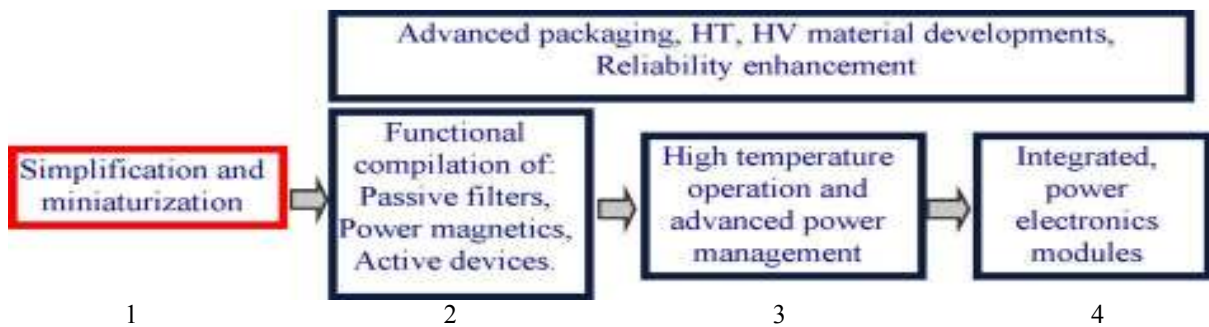
“ΣΜΙΚΡΥΝΣΗ ΚΑΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ”

Στο προηγούμενο κεφάλαιο φάνηκε ότι οι σύγχρονες απαιτήσεις ηλεκτρονικών ισχύος είναι περισσότερες από αυτές που μπορούν να προσφέρουν σήμερα τα υλικά πυριτίου (Si) με βάση τις τεχνολογίες ημιαγωγών. Οι απαιτήσεις στα αυτοκίνητα, στις τηλεπικοινωνίες, στην ενέργεια και σε άλλες εφαρμογές δείχνουν ότι απαιτείται υψηλή θερμοκρασία, υψηλή πυκνότητα ισχύος και αποδοτικά τροφοδοτικά. Ένας τρόπος για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι να ακολουθηθεί η ψηφιακή εξέλιξη των συστημάτων (νόμος του Moore) και να γίνει ολοκλήρωση (integration) στα ηλεκτρονικά ισχύος. Από τη σύγκριση των ψηφιακών και αναλογικών συστημάτων (τροφοδοτικό), είναι δυνατό να αναγνωρίσουμε κάποιες ομοιότητες μεταξύ των συστημάτων πληροφοριών και επεξεργασίας ενέργειας (σχήμα 4.1). Στο σύστημα επεξεργασίας σήματος το αναλογικό σήμα εισόδου κβαντοποιείται με A/D (Analog to digital) μετατροπείς και, μετά την επεξεργασία του, μετατρέπεται πάλι σε αναλογικό σήμα με D/A (Digital to analog) μετατροπείς. Τα συστήματα ισχύος κβαντοποιούν επίσης την αναλογική ισχύ με PWM μετατροπείς ή ψαλιδιστές και μετά το φιλτράρισμα παραδίδουν την αναλογική ισχύ εξόδου στο φορτίο. Ενώ τα ψηφιακά συστήματα χρειάζονται ενέργεια από την παροχή ισχύος για την επεξεργασία πληροφοριών, τα συστήματα ισχύος πρέπει να ελέγχουν τα σήματα και τις πληροφορίες για την επεξεργαστική ισχύ.



Σχήμα 4.1 Ένα σύστημα επεξεργασίας σήματος σε αντίθεση με ένα σύστημα επεξεργασίας ισχύος

Ωστόσο, η πρόοδος προς την ολοκλήρωση (integration) των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος δεν ήταν τόση όση στα ψηφιακά σήματα. Οι τελευταίες τεχνολογίας μετατροπείς εξακολουθούν να απαιτούν πολύ χώρο για το κύκλωμα οδήγησης, για την ψύξη και τα παθητικά εξαρτήματα. Ειδικότερα, ο όγκος που καταλαμβάνουν τα φίλτρα των πυκνωτών και των πηνίων είναι πολύ δύσκολο να ελαχιστοποιηθεί. Για τη διευκόλυνση της ολοκλήρωσης των μονάδων ηλεκτρικής ισχύος, η τυποποίηση και ο σχεδιασμός σε μπλοκ μορφή παίζει σημαντικό ρόλο. Ο στόχος είναι να αποκτήσουν τα ηλεκτρονικά ισχύος μπλοκ μορφή ώστε να μπορούν να συνδυαστούν κατάλληλα για οποιεσδήποτε απαιτήσεις ισχύος. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μειώσει δραστικά την χειρωνακτική εργασία και το κόστος παραγωγής των τροφοδοτικών. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η παραπάνω διαδικασία με την μορφή τεσσάρων βημάτων:



Σχήμα 4.2 Ένα όραμα για ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά ισχύος- 4 βήματα για την ανάπτυξη υψηλής πυκνότητας ισχύος ολοκληρωμένων μονάδων ηλεκτρονικών ισχύος

Πάνω από όλα: η ανάπτυξη υλικών υψηλής τάσης, υψηλής θερμοκρασίας και η αυξημένη αξιοπιστία θα πρέπει να ενσωματωθούν κατά την έναρξη της διαδικασίας ολοκλήρωσης - δείτε το σχήμα 4.2

1. Προκειμένου να είναι σε θέση να ολοκληρωθούν οι μετατροπείς ισχύος, κάθε τοπολογία πρέπει να είναι εξαιρετικά απλή και εύκολη για τον έλεγχο. Θα αποδειχθεί ότι το υλικό SiC επιτρέπει την απλοποίηση των μετατροπέων ισχύος.

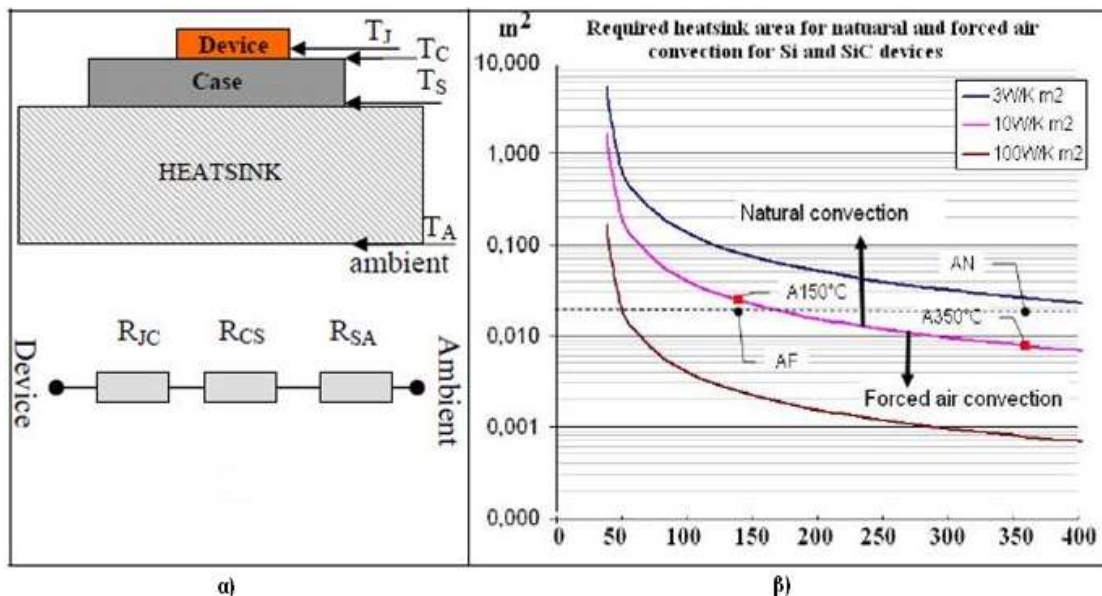
2. Η ίδια η διαδικασία ολοκλήρωσης πρέπει να ενσωματώσει τα παθητικά εξαρτήματα και το συνδυασμό διαφορετικών λειτουργικών εξαρτημάτων όπως πυκνωτών και πηνίων σε ένα εξάρτημα ([42]).

3. Εάν όλα τα εξαρτήματα συσκευάζονται καλά σε μια μονάδα, η αύξηση θερμοκρασίας θα είναι αναπόφευκτη. Οπότε θα πρέπει να πραγματοποιηθεί προηγμένη διαχείριση ισχύος και ψύξη του εξαρτήματος.

Στα επόμενα θα γίνει φανερό πώς η τεχνολογία SiC μπορεί να βοηθήσει να πραγματοποιήσουμε την προηγμένη διαχείριση ισχύος.

4.1 Βελτιωμένη θερμική διαχείριση στους μετατροπείς ισχύος SiC

Όπως έχει ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 3.1, το υλικό SiC λόγω της ανθεκτικής φύσης του δίνει την εγγενή δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι στην περίπτωση του πυριτίου (Si) για την ίδια περίπου απόδοση. Στο σχήμα 4.3 α) το ημιαγωγικό εξάρτημα βρίσκεται εντός περιβλήματος και αυτό βρίσκεται σε επαφή με κατάλληλη ψήκτρα.



Σχήμα 4.3 α) Το απλουστευμένο θερμικό μοντέλο του ολοκληρωμένου κυκλώματος ισχύος συσκευάζεται και επικολλάται σε ψήκτρα β) Η αυξημένη θερμοκρασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος του υλικού SiC (350 $^{\circ}C$) έναντι του Si (150 $^{\circ}C$) επιτρέπει την αλλαγή της ψύξης του από συναγωγή μέσω εξαναγκασμένου αέρα σε φυσική συναγωγή χρησιμοποιώντας το ίδιο εμβαδό ψήκτρας.

Επιπλέον, θεωρείται ότι η ψήκτρα μπορεί να μεταφέρει θερμότητα στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον είτε από αγωγή ή συναγωγή. Ορίζονται τέσσερις θερμοκρασίες αναφοράς:

- T_J – θερμοκρασία επαφής ημιαγωγού,
- T_C – θερμοκρασία του περιβλήματος,
- T_S – θερμοκρασία στην επιφάνεια επαφής του περιβλήματος με την ψήκτρα,
- T_A – θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Λαμβάνοντας το σύνολο της ισχύος που πρέπει να διαχέεται ίση P_0 , για το μοντέλο αυτό η θερμοκρασία επαφής συνδέεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, με την παρακάτω εξίσωση:

$$R_{JA} = \frac{T_J - T_A}{P_0} = R_{JC} + R_{CS} + R_{SA} \quad (4.1)$$

όπου:

- R_{JA} –θερμική αντίσταση επαφής - περιβάλλοντος
- R_{JC} – θερμική αντίσταση από την επαφή στο περίβλημα
- R_{CS} – θερμική αντίσταση από το περίβλημα στην ψήκτρα
- R_{SA} – θερμική αντίσταση από την ψήκτρα στο περιβάλλον

Ως παράδειγμα επιλέγεται το ευρέως χρησιμοποιημένο 5A, 600V Si MOSFET συσκευασμένο σε περίβλημα TO-220. Υποθέτοντας ότι η συχνότητα λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλή, αυτό καταναλώνει (dissipates) ισχύ ίση με 25W. Η μέγιστη θερμοκρασία επαφής της συσκευής περιορίζεται στους 150°C σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή. Αυτό θα πρέπει να συγκριθεί με μια συσκευή SiC που έχει τα ίδια χαρακτηριστικά ισχύος, αλλά μέγιστη θερμοκρασία επαφής ίση με 350°C. Και οι δύο συσκευές υποτίθεται ότι έχουν μια ενεργή περιοχή 0,15 cm², σύμφωνα με τη μέτρια πυκνότητα εντάσεως των 100 A/cm². Η θερμική αντίσταση από την επαφή στο περίβλημα TO220 (σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή) είναι $T_{JC} \sim 1.4^\circ\text{K/W}$ και από το περίβλημα στην ψήκτρα $T_{CS} \sim 0,1\text{K/W}$. Η θερμική αντίσταση, από την ψήκτρα στο περιβάλλον, T_{SA} εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την περιοχή της ψήκτρας και την στρατηγική αφαίρεσης θερμότητας. Για τη φυσική συναγωγή η ροή θερμότητας είναι στο εύρος των 3-10 K/Wm² και για τον εξαναγκασμένο αέρα αυξάνεται στα 10-100 K/Wm². Βάζοντας αυτές τις ποσότητες στην παραπάνω εξίσωση, μπορούμε να υπολογίσουμε την απαραίτητη περιοχή ψήκτρας σε σχέση με την άνοδο της θερμοκρασίας επαφής ΔT , η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3 β) για τις τρεις διαφορετικές τιμές θερμικής αντίστασης της ψήκτρας. Η άνω καμπύλη αφορά στη φυσική συναγωγή, ενώ η κάτω καμπύλη αφορά στην περίπτωση του εξαναγκασμένου αέρα συναγωγής. Αυτές οι καμπύλες απεικονίζουν δύο σημαντικά γεγονότα για την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας:

- Το πρώτο είναι ότι η υψηλότερη θερμοκρασία θα επιτρέψει μικρότερη περιοχή ψήκτρας για την ίδια τεχνολογία συσκευασίας. Αυτό απεικονίζεται μέσα από τα δύο σημεία λειτουργίας (A150) και (A350) για τη συσκευή Si και SiC, που βρίσκεται στους 150°C και 350°C, αντίστοιχα. Κάθε σημείο βρίσκεται στην καμπύλη ορίου, πέραν του οποίου μια ελεύθερη και εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας πρέπει να

διατηρηθεί. Οι προκύπτουσες περιοχές της ψήκτρας είναι 240 cm^2 και 76 cm^2 για τις συσκευές Si και SiC, αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση ψήκτρας με περίπου 50% μικρότερο εμβαδό για την περίπτωση υλικού SiC από ότι για υλικό Si.

- Ένα δεύτερο σημαντικό γεγονός είναι ότι μέσω της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας ενός υλικού SiC, μία πλήρης αλλαγή στην προσέγγιση της θερμικής διαχείρισης για μια δεδομένη περιοχή συσκευασίας είναι δυνατή: - Αυτό μπορεί να απεικονίζεται μέσα από τα δύο σημεία λειτουργίας (AF) και (AN) στην εικόνα 4.3 β) στους 150°C και 350°C , αντίστοιχα, και τα δύο στην περιοχή που καθορίζονται σε $0,02 \text{ m}^2$. Είναι φανερό ότι το σημείο (AF) βρίσκεται εντός του φάσματος του εξαναγκασμένου αέρα συναγωγής, ενώ το σημείο (AN) είναι σαφώς εντός των ορίων της φυσικής συναγωγής. Αυτό σημαίνει ότι η συσκευή Si θα απαιτούσε ένα ανεμιστήρα αλλά η συσκευή SiC θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς αυτόν. Αυτό θα επιτρέψει να εξαλειφθούν τα μηχανικά μέρη τα οποία συνοδεύονται συνήθως από μηχανικές δονήσεις, ακουστικό θόρυβο, και περιβαλλοντικά-εξαρτώμενους μηχανισμούς αποτυχίας που μπορούν να περιορίσουν την αξιοπιστία του συνολικού συστήματος ισχύος. Ως εκ τούτου, η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του SiC θα παρέχει μια ανώτερη λύση θερμικής διαχείρισης για τις περιπτώσεις εφαρμογής που αναφέρονται στην παράγραφο 2.3, όπου η αρχιτεκτονική του συστήματος δεν επιτρέπει τον εξαναγκασμένο αέρα συναγωγής ή όπου το περιβάλλον του συστήματος (π.χ., υγρές συνθήκες, σκόνη ή επίπεδο της ρύπανσης κ.λπ.) επηρεάζει την αξιοπιστία ενός ανεμιστήρα.

4.2 Παθητικά εξαρτήματα σε λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας

Οι σημερινές εμπορικά διαθέσιμες ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος έχουν μέγιστη ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 100°C (125°C της επαφής) – πολύ χαμηλότερη από εκείνες που απαιτούνται σε δύσκολες εφαρμογές και σε μονάδες υψηλής πυκνότητας ισχύος (παράγραφος 2.2). Τα ρεύματα διαρροής και τα προβλήματα μανδάλωσης για ηλεκτρονικά σήματα χαμηλής ισχύος σε θερμοκρασίες από 250°C έως 300°C μπορούν να λυθούν με την τεχνολογία του πυριτίου με χρήση των κυκλωμάτων απομόνωσης (Silicon On Isolator, SOI), ενώ για την περίπτωση ηλεκτρονικών ισχύος σε θερμοκρασίες άνω των 300°C η λύση μπορεί να βρεθεί μόνο στην χρήση ημιαγωγών υψηλού ενεργειακού διακένου, όπως υλικά SiC ή GaN ([29]). Τα θεωρητικά όρια θερμοκρασίας των διάφορων ημιαγωγών

στερεάς κατάστασης, που προέρχονται από τις κενές ζώνες τους και την κινητικότητα των φορέων ηλεκτρισμού, δίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά τεχνολογίας ημιαγωγών υψηλής θερμοκρασίας: Το θεωρητικό όριο της θερμοκρασίας που προέρχεται από το ενεργειακό διάκενο και την κινητικότητα του φορέα των ημιαγωγών, και το πρακτικό όριο επιτεύχθηκαν σε πειράματα πάνω σε μη συσκευασμένα εργαστηριακά δείγματα ([29], [37], [55])

Τεχνολογία	Θεωρητικό όριο [°C]	Πρακτικό όριο [°C]
Si	400	225
SOI (signal level only)	400	300
GaN	900	600
SiC	900	600
Θερμιονικές συσκευές κενού	1000	600

Από τον παραπάνω πίνακα μπορεί να φανεί, ότι τα θεωρητικά όρια θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλότερα από ότι οι επιτεύξιμες θερμοκρασίες συσκευών στην πράξη. Αυτό οφείλεται κυρίως λόγω:

- Μεταλλουργικών επαφών των εξαρτημάτων
- Electromigration⁸ μέσα στα ίχνη μετάλλων
- Χρονικώς εξαρτώμενη κατάρρευση των διηλεκτρικών πυλών
- Ατέλειες στον ημιαγωγό, οι οποίες γίνονται μοιραίες σε υψηλές θερμοκρασίες

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι τα αποτελέσματα των πρακτικών ορίων που παρουσιάστηκαν ισχύουν για εργαστηριακά δείγματα μόνο. Στην πραγματικότητα η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα των συσκευών αυτών είναι πολύ μικρότερη και περιορίζεται από την συσκευασία και από τις εσωτερικές συνδέσεις των ημιαγωγικών στρωμάτων. Από την άλλη πλευρά, για τις πλήρεις ολοκληρωμένες μονάδες ηλεκτρονικών ισχύος, οι παθητικές συσκευές υψηλής θερμοκρασίας πρέπει να είναι επίσης διαθέσιμες. Η ανάπτυξη των HT (High Temperature) παθητικών εξαρτημάτων είχε μικτή επιτυχία. Αυτήν την περίοδο, οι παχιές αντιστάσεις με επικάλυψη οξειδίων του Ρουθηνίου (Ru) είναι ικανές να λειτουργήσουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία 500°C ([34], [31]). Αντίθετα, οι κεραμικοί πυκνωτές γενικής χρήσης έχουν δείξει μεγάλη διακύμανση σε χωρητικότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, το ρεύμα διαρροής του πυκνωτή αυξάνει τόσο πολύ, που ο πυκνωτής δεν μπορεί να κρατήσει άλλο το φορτίο. Σήμερα είναι γνωστό ότι ο πιο ελπιδοφόρος και σταθερός πυκνωτής για τη λειτουργία 500°C θα μπορούσε να είναι ο NP0 κεραμικός πυκνωτής. Δυστυχώς το ρεύμα

⁸ Electromigration: Μεταφορά υλικού προερχόμενη από σταδιακή κίνηση των ιόντων μέσα στον αγωγό λόγω της μετακίνησης μεταξύ των ηλεκτρονίων αγωγής και της διάχυσης των ατόμων του μετάλλου

διαρροής του σε 300°C γίνεται πολύ υψηλό. Οι πιεζοηλεκτρικοί πυκνωτές μπορούν να σχεδιαστούν για συγκεκριμένες θερμοκρασίες και έχουν δείξει σταθερότητα απαγωγής, αλλά η διακύμανση της χωρητικότητας λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι πολύ μεγάλη. Διάφορα εναλλακτικά διηλεκτρικά υλικά όπως το διαμάντι, κ.λπ. είναι υπό έρευνα. Ωστόσο μεγάλες τιμές χωρητικότητας (άνω των 1uF) και τάσεις (άνω των 100V) για λειτουργία σε 300°C δεν είναι εφικτές στο εγγύς μέλλον. Η διάρκεια ζωής των παθητικών εξαρτημάτων σε κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος υψηλής θερμοκρασίας δεν εξαρτάται μόνο από την ικανότητα επιβίωσης των ωμικών στοιχείων, των διηλεκτρικών ή των μαγνητικών πυρήνων, αλλά επίσης από την χρησιμοποιούμενη συσκευασία, την ωμική επαφή και την τεχνολογία συγκόλλησης. Αυτές είναι οι πιο κοινές πηγές αποτυχίας στις ηλεκτρονικές συσκευές που δεν έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας.

Η συσκευασία υψηλής θερμοκρασίας έχει τις ακόλουθες ριζικές διαφορές:

1. Αποσύνθεση ή τήξη των υλικών
2. Κακός συνδυασμός του συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE)
3. Ενδοδιάχυση των διαφορετικών μεταλλικών στρωμάτων ή διασυνδέσεων
4. Electromigration

Στον πίνακα 4.2 δίνονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες και οι ιδιότητες για την επιλογή των συνδυασμών πίστας στρώματος ημιαγωγού και συνδετικού αγωγού σύμφωνα με τις αναφορές [19] και [20]

Πίνακας 4.2 Μέγιστες θερμοκρασίες και περιοριστικοί παράγοντες των επιλεγμένων μεταλλουργικών συνδυασμών των συνδετικών αγωγών ([19], [20]).

Metals: Pad-Wire	Max Temperature	Properties / Comments
Al-Au	175 °C	Forms brittle intermetallic phases which reduced bond strength and conductivity
Ni-Al	260 °C	Interdiffusion creates excessive voids that decrease bond area strength
Au-Au	500 °C	1 mil Au wire bond 5000hr in oxidizing air with 50mA DC; 500 thermal cycles

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι σε ορισμένες εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική κ.λπ. εκτός από τη έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία είναι εκτεθειμένες σε άλλες ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως: έντονοι θερμικοί κύκλοι, κρούσεις, δονήσεις, ρευστά και διαβρωτικά αέρια.

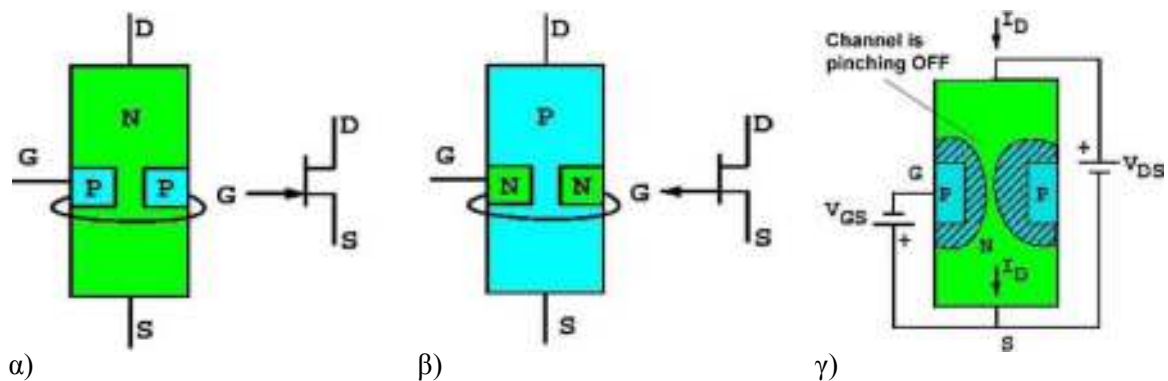
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“SIC JFET ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΙΣΧΥΟΣ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΙΧΜΗΣ”

5.1 Επισκόπηση

5.1.1 Αρχή λειτουργίας

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι τρανζίστορ εγκάρσιων πεδίων επαφής (JFETs): τύπου N και τύπου P (σχήμα 5.1), τα οποία αναφέρονται στην πολικότητα της πλειοψηφίας των φορέων φορτίων στο κανάλι του ημιαγωγού που συνδέει τον ακροδέκτη του απαγωγού (D) με τον ακροδέκτη της πηγής (S). Η αντίστασή του καναλιού που σχηματίζεται από υλικό μόνης πολικότητας είναι συνάρτηση της γεωμετρίας (conducting volume) της ποσότητας του όγκου και της αγωγιμότητας του υλικού αυτού.



Σχήμα 5.1 α) JFET N-καναλιού β) JFET P-καναλιού και γ) η αρχή λειτουργία του

Το JFET έχει δύο τρόπους λειτουργίας:

- α) την λειτουργία "μεταβλητής-αντίστασης"
- β) την λειτουργία περιορισμού τάσης.

Στη λειτουργία "μεταβλητής-αντίστασης" το JFET συμπεριφέρεται σαν μία αντίσταση της οποίας η τιμή ελέγχεται από την τάση μεταξύ πύλης και πηγής (V_{GS}). Στη λειτουργία περιορισμού τάσης, το κανάλι περιορίζεται σημαντικά. Το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης τάσης του απαγωγού-πηγής (V_{DS}) εμφανίζεται κατά μήκος του λεπτού καναλιού υψηλής-αντίστασης κοντά στις περιοχές απογύμνωσης. Αν η τάση V_{GS} από αρνητική γίνει θετική το JFET συμπεριφέρεται σαν μία δίοδος η οποία προοδευτικά πολώνεται ορθά.

5.1.2 Μοντελοποίηση SPICE των SiC JFETs

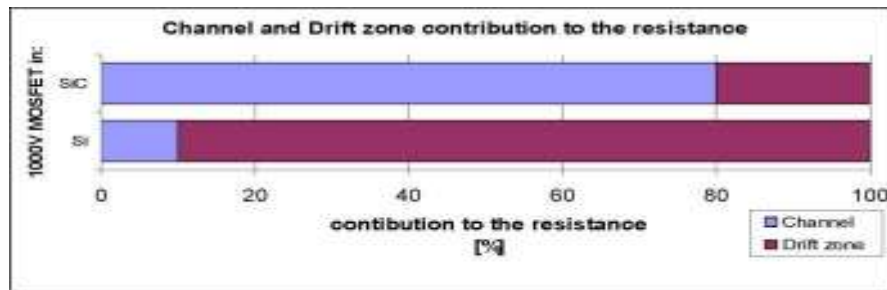
Τα μοντέλα SPICE των SiC JFETs, αρχικά προήλθαν από το Zappe et. al. στις αναφορές [40] και [41], και μπορούν να προβλέψουν το JFET καλά, εάν είναι γνωστές οι παράμετροι του μοντέλου. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για SiC "θαμμένης πύλης" JFETs χαμηλής τάσης και ισχύει μόνο εν μέρει για τις υψηλής τάσης κάθετες συσκευές JFET. Ένα παρόμοιο σχέδιο "θαμμένης πύλης" SiC εξετάστηκε στην αναφορά [26] από τον Konstantinon. Ο Allebrand ([15]), στη διατριβή του έχει συγκρίνει το μοντέλο SPICE με τις προσομοιώσεις της συσκευής του Kaminski ([25]) και έχει βρεί μια καλή αντιστοίχιση του μοντέλου. Ένα κάθετο JFET, που παρέχεται από την SICED ([10]) διαμορφώθηκε επίσης από τους Griepentrog και Maier ([23]) και έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ηλεκτρικής και θερμικής συμπεριφοράς στις εφαρμογές περιορισμού ρεύματος χρησιμοποιώντας την ιδιότητα του κορεσμού της 1ης γενιάς των SiC JFETs.

5.1.3 Λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας

Ο Casady et. al. ([16]) βρήκε τα χαρακτηριστικά ενός SiC JFET για χρήση σε θερμοκρασίες από 293K έως 773K. Οι επιδόσεις των ραδιοφωνικών συχνοτήτων (Radio Frequences, RF) του 4H SiC JFET σε υψηλές συχνότητες στους 500°C προβλέπονται από τον Hatfeld et. al. στην αναφορά [24]. Η λειτουργία του SiC JFET σε υψηλή θερμοκρασία για τη χρήση στον κλάδο μιας φάσης του αναστροφέα δημοσιεύεται από τον Morell στην αναφορά [30]. Ο McLean et al. έχει κατασκευάσει 6H-SiC θαμμένης πύλης JFET μέσα σε ένα επιταξιακό στρώμα που αναπτύσσονται υποστρώματα ημιαγωγικού υλικού. Ο τρόπος που λειτουργεί έχει αξιολογηθεί για θερμοκρασίες από 218K έως 773K. Μια μελέτη θερμικών κύκλων έχει παρασχεθεί από το Rozario et. al.([32]). Έχουν επίσης εφαρμοστεί και δοκιμαστεί SiC "θαμμένης πύλης" JFETs στους αναστροφείς για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής ισχύος. Ο καθηγητής Shenai περιγράφει την απόδοση, τον χαρακτηρισμό, τη μοντελοποίηση και την αξιοπιστία των συσκευών SiC στην αναφορά [53]. Η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία (500hr ζωή σε 500°C) του normally off κάθετου διαύλου JFET που κατασκευάζεται σε υλικό 4H-SiC παρουσιάζεται από τον Mazolla et. al. ([46]).

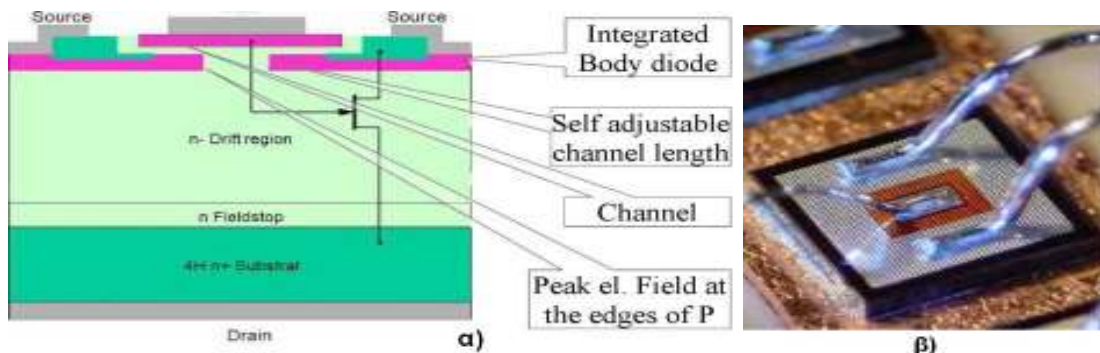
5.2 Το SiC VJFET τρανζίστορ

Σχεδόν όλοι οι ημιαγώγιμοι διακόπτες SiC που περιγράφονται στις σημερινές δημοσιεύσεις χρησιμοποιούν την κάθετη δομή της συσκευής. Ο λόγος που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι η χρησιμοποίηση της περιοχής μετατόπισης που έχει την κύρια συμβολή στην αντίσταση αγωγής. Εντός του υλικού υψηλότερες ταχύτητες ηλεκτρονίων μπορούν να επιτευχθούν, οι οποίες είναι μόλις 20% μικρότερες από τις αντίστοιχες σε υλικό Si. Ωστόσο κάτω από την επιφάνεια, η κινητικότητα των ηλεκτρονίων του n-καναλιού MOSFET έχει μειωθεί δραστικά, λόγω των ακατέργαστων στρωμάτων (των καναλιών) και των φτωχών θερμικών οξειδίων, για να αυξηθούν σε τύπου p SiC τα οποία παρουσιάζουν υψηλότερο σταθερό φορτίο και πυκνότητες κατάστασης διεπαφής.



Σχήμα 5.2 Η συμβολή της αντίστασης αγωγής των συσκευών MOS σε υλικό Si και SiC

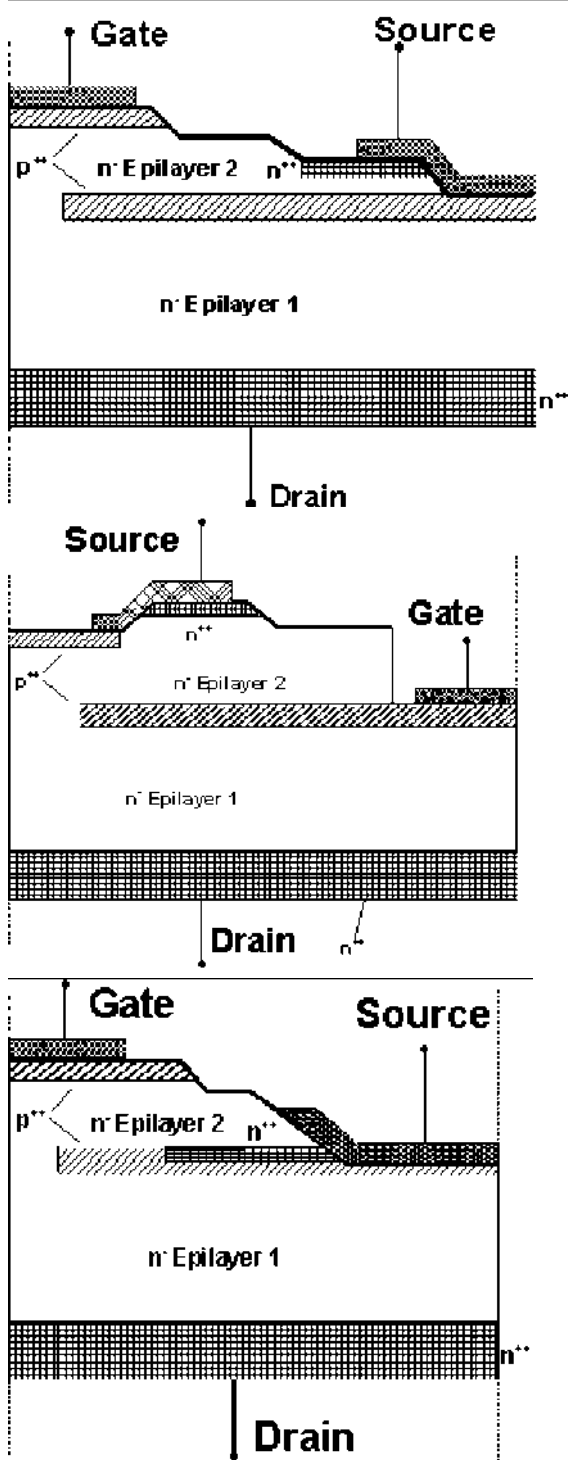
Συνεπώς, το κανάλι του SiC MOSFET έχει περισσότερη επιρροή στη συνολική αντίσταση από το αντίστοιχο Si (σχήμα 5.2). Επομένως όσον αφορά στις αντιστάσεις αγωγής και την σταθερότητα των οξειδίων της πύλης, οι συσκευές JFET με πλευρικό κανάλι από υλικό SiC είναι ευνοϊκότερες. Η βασική δομή του κατακόρυφου τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (VJFET) απεικονίζεται στο σχήμα 5.3α. Η συσκευή ελέγχεται με "θαμμένες πύλες". Η εικόνα παρέχεται στην αναφορά [10].



Σχήμα 5.3 α) Η βασική δομή του SiC JFET. Από κάτω προς τα πάνω: Απαγωγός επιμετάλλωσης, υψηλή πρόσμιξη n+ στρώματος επαφής, n πεδίο διακοπής και n- στρωμάτων διολίσθησης, υψηλή πρόσμιξη p πυλών (Κόκκινο), n κανάλι, p+ στρώμα πηγής επαφής, επιμετάλλωση κορυφής β) Η εικόνα του JFET ([10])

Υπήρχαν τρεις γενιές SiC-JFETs από την εταιρεία SiCED GmbH, οι οποίες μελετώνται σε αυτή την παράγραφο. Οι κύριες διαφορές τους και τα στάδια βελτίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 5.1. Η τελευταία έκδοση, η τέταρτη γενιά έχει μία

Πίνακας 5.1 Οι τρεις γενιές των τρανζίστορ SiC VJFET και οι βασικές τους ιδιότητες



1st First Generation of SiC VJFETs

- +Fast
- +Low Miller capacitance
- +Body-Diode under Source contact
- Prechannel
- R_{on} (app. $22m\Omega cm^2 @ 1500V$)
- Low Source contact area
- Low W/L ratio
- Low I_{SAT} (app. $200A/cm$)

2nd Second Generation of SiC VJFETs

- + Low R_{ON} (app. $18m\Omega cm^2 @ 1500V$)
- + High cell density
- + Large Source contact area
- + High saturation current ($\sim 320A/cm$)
- Higher internal gate series resistance
- Higher Miller capacitance
- Body diode through Gate-contact

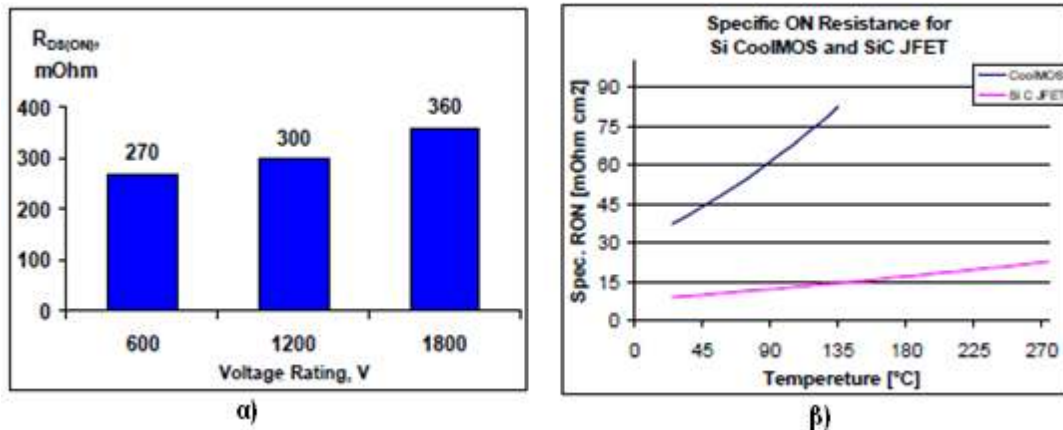
3rd Generation of SiC VJFETs

- + Self adjustable channel length
- + Low internal gate series resistance
- + Low R_{on} ($< 12m\Omega cm^2 @ 1500V$)
- + Low Miller capacitance
- Cell density utilisation is not optimal
- Smaller Source contacting area

ενισχυμένη ικανότητα ρεύματος και λόγω της τροποποιημένης δομής (αυξανόμενη n -πρόσμιξη αμέσως κάτω από το θαμμένο p -στρώμα) επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση των καναλιών και της πυκνότητας των κελιών.

5.2.1 Στατικά χαρακτηριστικά

Από την τρίτη γενιά δομής JFET μπορεί να δει κανείς, ότι μέσω της άμεσης σύνδεσης της πύλης από την επάνω πλευρά του ολοκληρωμένου κυκλώματος, οι μεγάλες αντιστάσεις της πύλης μπορούν να εξαλειφθούν. Μια τέτοια δομή επιτρέπει την επίτευξη αντιστάσεων αγωγής μικρότερων από $14\text{m}\Omega\text{cm}^2$ για ανάστροφη τάση 1500V . Το σχήμα 5.4 α) απεικονίζει τις έως σήμερα εφικτές αντιστάσεις αγωγής για διαφορετικά JFETs με ενεργό περιοχή του στρώματος ημιαγωγού ίση με $4,1\text{mm}^2$.



Σχήμα 5.4 α) Η αντίσταση αγωγής του SiC VJFET για διαφορετικές τάσεις αποκοπής β) ειδική αντίσταση του SiC JFET και του Si CoolMOS συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η ανάλυση του μηχανισμού σκέδασης σε υλικό SiC έχει παρουσιάσει τις εξής εξαρτήσεις μεταξύ της πρόσμιξης πυκνότητας μ και του συντελεστή θερμοκρασίας α ([21]):

$$\mu \sim T^{-\gamma} \rightarrow R_{ON} \sim T^{\alpha}$$

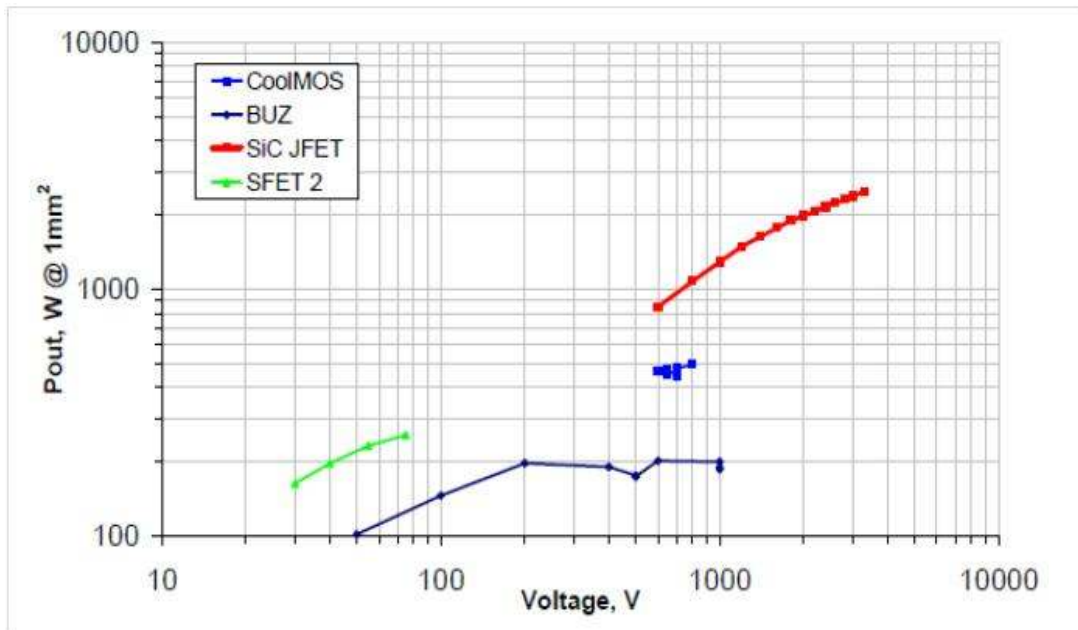
Χαμηλή πρόσμιξη $\rightarrow \gamma$ αυξάνεται

Υψηλή πρόσμιξη $\rightarrow \gamma$ μειώνεται

Με όσο το δυνατόν πιο υψηλή πρόσμιξη στην περιοχή καναλιού, η εξάρτηση της θερμοκρασίας του SiC JFET μπορεί να μειωθεί μέχρι $(T(\text{K})/298)^{1,6}$, ενώ για το Si CoolMOS είναι ίσο με $(T(\text{K})/298)^{2,7}$. Αυτές οι καμπύλες απεικονίζονται στον σχήμα 5.4β).

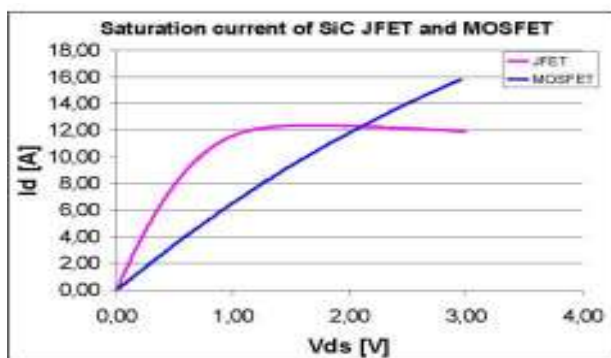
Με βάση τη μέγιστη διαθέσιμη τάση και την ικανότητα ημιαγωγίου διακόπτη (π.χ. για TO220 $\approx 2\text{W}$), είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το RMS ρεύμα μέσω του ημιαγωγού και της μέγιστης ισχύος εξόδου. Οι ισχύς εξόδου σε σχέση με τις ανάστροφες τάσεις για το CoolMOS (Διαφορετικές τεχνολογίες 600V - 800V), BUZ (50 - 1000V), SFET (30 - 75V) καθώς επίσης και για το SiC JFET απεικονίζονται στο σχήμα 5.5. Οι συγκεκριμένες

αντιστάσεις αγωγής είναι κανονικοποιημένες για την μοναδιαία περιοχή του ολοκληρωμένου κυκλώματος $\Omega/1\text{mm}^2$.

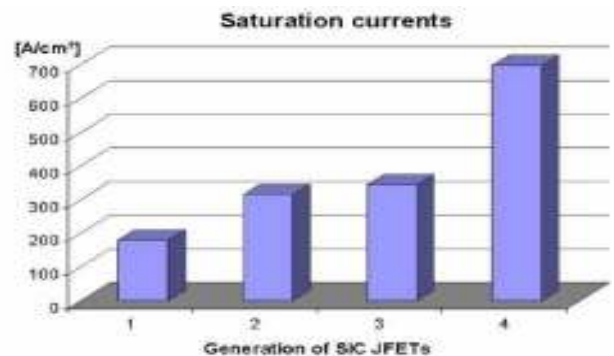


Σχήμα 5.5 Η ισχύς εξόδου έναντι της τάσης αποκοπής για διαφορετικές τεχνολογίες ισχύος FET

Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί, ότι η πρώτη γενιά των SiC JFETs έχει παρουσιάσει ιδιαίτερα χαμηλό ρεύμα κορεσμού, το οποίο μπορεί να φανεί από το σχήμα 5.6 α), όπου τα αποτελέσματα των μετρήσεων των χαρακτηριστικών εξόδου του JFET συγκρίνονται με το Si MOSFET. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει βελτιωθεί σταδιακά στις επόμενες γενιές. Το ρεύμα κορεσμού στα JFET τρίτης γενιάς έχει διπλασιαστεί φθάνοντας σχεδόν τα $350\text{A}/\text{cm}^2$. Η τέταρτη γενιά δείχνει την δυνατότητα εξαιρετικού ρεύματος κορεσμού στα $700\text{A}/\text{cm}^2$, σχήμα 5.6 β)



α)



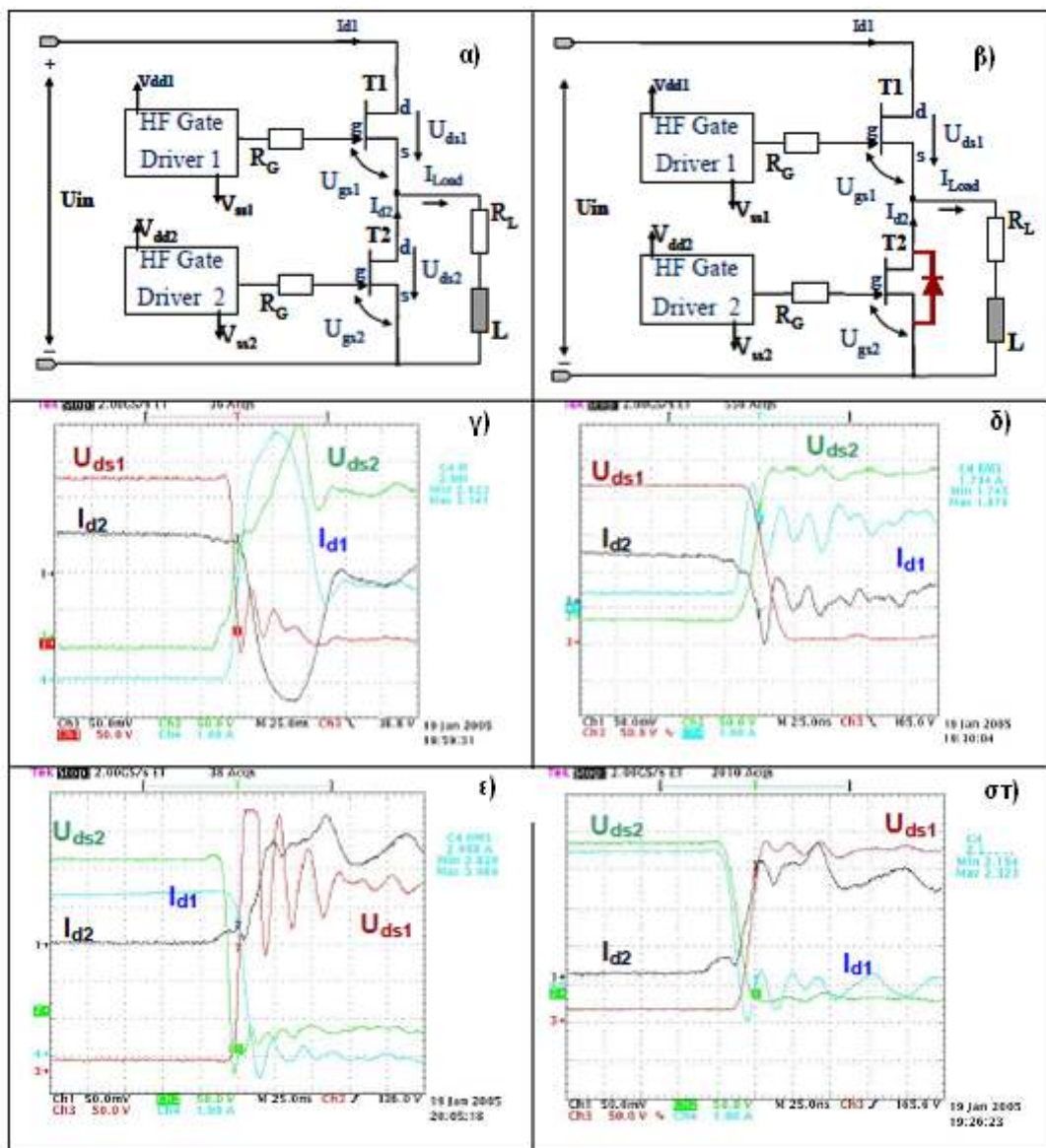
β)

Σχήμα 5.6 Οι χαρακτηριστικές εξόδου των Si MOSFET και SiC JFET. α) Η πρώτη γενιά SiC JFET παρουσιάζει σχετικά χαμηλό ρεύμα κορεσμού. β) η τέταρτη γενιά έχει φτάσει τα $700\text{A}/\text{cm}^2$

5.2.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστικές ανάστροφης αποκατάστασης του SiC JFET στη διαμόρφωση του κλάδου μιας φάσης (phase leg)

Αν και η διακοπτική ταχύτητα του SiC JFET είναι πολύ υψηλή, κατά την λειτουργία στον κλάδο μιας φάσης οι διακοπτικές ιδιότητες της ενσωματωμένης διόδου (body diode) είναι καθοριστικές. Από την δομή του SiC JFET μπορεί να θεωρηθεί, ότι η ενσωματωμένη διάδος (body diode) είναι μια επαφή PN που αναπτύσσεται κάτω από την περιοχή πηγής. Για τον χαρακτηρισμό του ημιαγωγού μια δοκιμή έχει αναπτυχθεί και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7 α), β).



Σχήμα 5.7 Κλάδος μιας φάσης (phase leg) της διάταξης με SiC JFETs μόνο α), γ), ε) και με εξωτερική ανάστροφη διάοδο SiC β), δ), στ). Κατά την μετάβαση αγωγής γ), δ) και κατά την μετάβαση αποκοπής ε), στ) κυματομορφές στον κλάδο μιας φάσης του SiC JFET.

Δύο περιπτώσεις εξετάστηκαν:

- α) ο κλάδος μιας φάσης του αναστροφέα με την εξωτερική ανάστροφη δίοδο SiC και
- β) χωρίς αυτή, όπου η εσωτερική ενσωματωμένη δίοδος (body diode) χρησιμοποιείται για ελεύθερη ροή.

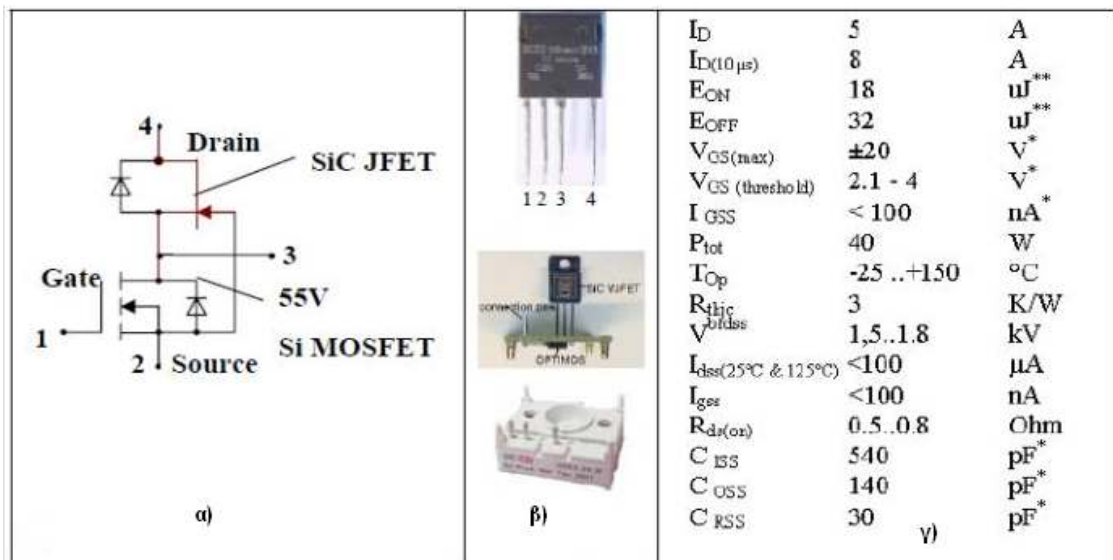
Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι τα διακοπτικά χαρακτηριστικά της ενσωματωμένης διόδου του SiC VJFET είναι συγκρίσιμα με τη συνηθισμένη δίοδο Si. Αυτό είναι ορατό από τη σύγκριση των υπερτάσεων κατά την μετάβαση αγωγής που δίνονται στο σχήμα 5.7 γ) και δ). Η διαρροή ρεύματος I_{d2} του T_2 έχει συγκριτικά μεγάλη αρνητική κλίση "ανάστροφης αποκατάστασης". Συνεπώς εάν η πολύ γρήγορη μεταγωγή είναι απαραίτητη μια πρόσθετη δίοδος SiC πρέπει να συνδεθεί παράλληλα στους ακροδέκτες απαγωγού-πηγής (D-S) του SiC VJFET, σχήμα 5.7 β).

5.2.3 Πρόβλημα με Normally On και το κύκλωμα Cascode JFET-MOSFET

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ημιαγωγών MOSFET έναντι των JFETs είναι ότι είναι συσκευές normally OFF, ενώ τα JFETs συνήθως είναι ημιαγωγοί normally ON. Αυτό σημαίνει ότι, το JFET άγει εάν δεν εφαρμόζεται τάση στην πύλη και αυτό αποτελεί μειονέκτημα σε πολλές εφαρμογές, καθώς η ξαφνική απώλεια του ελέγχου μπορεί να προκαλέσει την αγωγή των διακοπών και κατά συνέπεια μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα. Επίσης, κατά τη διάρκεια εκκίνησης του συστήματος, όταν το κύκλωμα ελέγχου δεν έχει ακόμα ενεργοποιηθεί πλήρως, μπορεί να πραγματοποιηθούν μεταβατικά ρεύματα. Λόγω αυτού του προβλήματος (normally ON ημιαγωγοί) το Si JFET θεωρείται σε πολλές εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος ως ανεπιθύμητο εξάρτημα. Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.1.1 προκειμένου να τεθεί η συσκευή JFET σε κατάσταση αποκοπής, θα απαιτηθεί μια αρνητική τάση να εφαρμοστεί στην πύλη του JFET. Αυτή η τάση, αποκαλούμενη ως "τάση συσφίξεως"⁹ (pinch-off voltage) πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για την μετάβαση του JFET σε κατάσταση αποκοπής, αλλά επίσης πρέπει να περιοριστεί προκειμένου να αποτραπεί η ανάστροφη πόλωση επαφής της διόδου πύλης-πηγής από δευτερογενή διάσπαση. Σήμερα λόγω των διαφορετικών διαθέσιμων ημιαγωγικών διακοπών JFET η "τάση συσφίξεως" ποικίλλει από -20V έως -40V. Είναι σημαντικό να σχεδιαστεί το κατάλληλο κύκλωμα οδήγησης της πύλης και να ρυθμιστεί ακριβώς το αρνητικό επίπεδο της τάσης εξόδου του κυκλώματος αυτού.

⁹ "τάση συσφίξεως" (pinch-off voltage): Η τάση κατά την οποία η ροή ρεύματος από τον απαγωγό (drain) προς την πηγή (source) σε ένα JFET έχει μηδενιστεί επειδή το κανάλι μεταξύ των δύο αυτών ακροδεκτών έχει καταστεί μη αγωγίμο

Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα δεν είναι η αρνητική τάση για την οδήγηση του JFET, ούτε το σχετικό υψηλό επίπεδο του, αλλά μόνο η αγωγή του JFET όταν η τάση πύλης είναι μηδέν. Το κύκλωμα "cascode" ή "Ζευγάρι Baliga" είναι μια διάταξη για να γίνει το JFET normally OFF. Το "ζευγάρι Baliga" αποτελείται από ημιαγωγό χαμηλής τάσης normally OFF, π.χ. ένα χαμηλής τάσης υψηλού ρεύματος MOSFET, που συνδέεται σε σειρά με το υψηλής τάσης JFET σχήμα 5.8. Ο έλεγχος του JFET πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας MOSFET. Όταν το MOSFET είναι σε κατάσταση αποκοπής η τάση μεταξύ απαγωγού-πηγής του αυξάνεται και εφαρμόζεται ως αρνητική πόλωση στην πύλη του JFET. Τώρα το JFET μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής και εμποδίζει ολόκληρη την εφαρμοσμένη τάση.



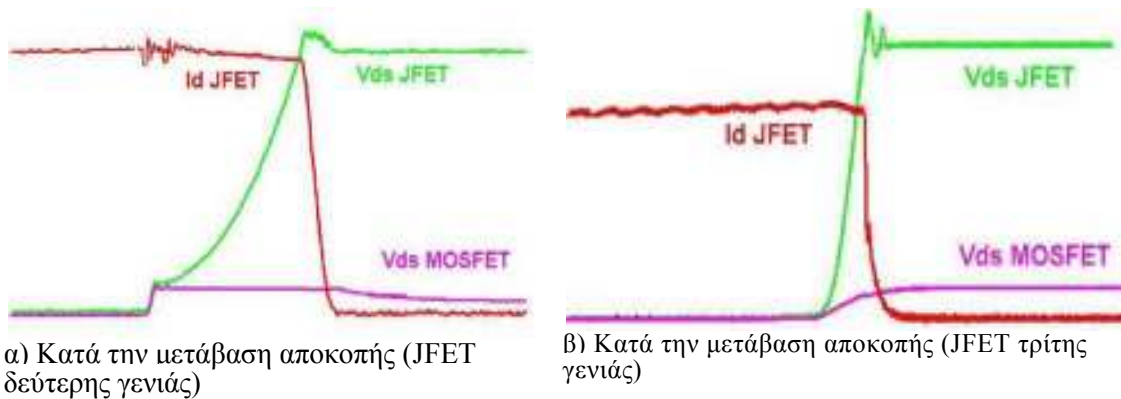
Σχήμα 5.8 α) Το SiC JFET στο κύκλωμα Cascode, β) διαφορετικές προσεγγίσεις περιβλήματος για υψηλή τάση και υψηλή θερμοκρασία και γ) κύρια χαρακτηριστικά. *Οι τιμές καθορίζονται από το LV(Low Voltage) MOSFET

Αν και το MOSFET είναι πάντα στην διαδρομή ρεύματος, η συμβολή του στην πραγματική αντίσταση αγωγής είναι αμελητέα. Τα MOSFETs των 30V έχουν συνήθως 1.2-3.0m Ω αντίσταση απαγωγού-πηγής ($R_{DS,ON}$).

Δυναμική συμπεριφορά του SiC VJFET στο κύκλωμα Cascode

Όπως κάθε συμβατικό JFET, οι διακόπτες SiC JFET είναι παρόμοιοι με τα MOSFETs όσον αφορά τα χαρακτηριστικά μεταγωγής τους. Γενικά, όλοι οι θεωρητικοί υπολογισμοί που γίνονται για τα MOSFET μπορούν να εφαρμοστούν και για τα JFETs. Παρά τις ομοιότητες τους, η δυναμική συμπεριφορά στο κύκλωμα Cascode είναι κάπως πιο περίπλοκη από ότι σε ένα συνηθισμένο MOSFET. Από την κυματομορφή αποκοπής του κυκλώματος Cascode (σχήμα 5.9α) μπορεί να παρατηρηθεί ένα σημαντικό μειονέκτημα στη δυναμική συμπεριφορά. Μόλις η τάση απαγωγού του MOSFET αυξηθεί, η τάση απαγωγού του JFET

αυξάνεται επίσης. Αν η διακοπτική ταχύτητα του JFET είναι περιορισμένη (αυτό συνέβαινε εξ ολοκλήρου στην περίπτωση των JFET δεύτερης γενιάς) χρειάζεται αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρι η τάση εφαρμογής να μπορεί να εμποδιστεί πλήρως από το JFET. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, το MOSFET πρέπει να λειτουργήσει κατά το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, λόγω του ότι έχει μεταβεί σε κατάσταση αποκοπής, η τάση απαγωγού είναι στη μέγιστη τιμή και το ρεύμα εξακολουθεί να ρέει μέσω του καναλιού του. Για επαναλαμβανόμενη λειτουργία, αυτό θα μπορούσε να βλάψει το MOSFET. Επίσης χωρίς καμία αντίσταση πύλης στη διαδρομή πύλης του JFET, η συσκευή έδειξε μια εσωτερική αντίσταση πύλης, που αποτελείται από την ωμική επαφή του ηλεκτροδίου πύλης και την αντίσταση p-στρωμάτων της περιοχής της πύλης. Στην επόμενη γενιά η διακοπτική ταχύτητα βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό, η οποία μπορεί να φανεί από το σχήμα 5.9β).



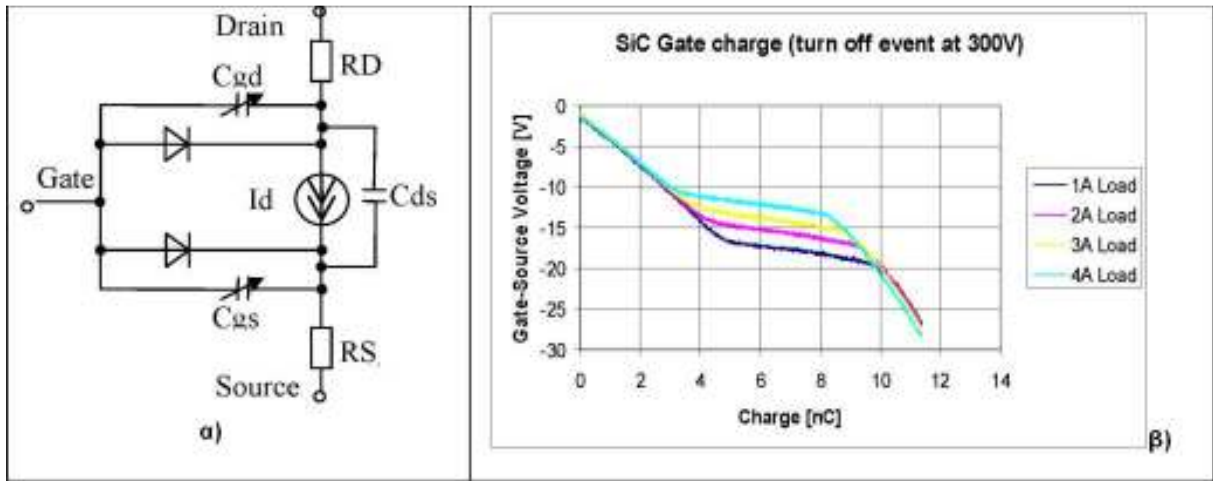
Σχήμα 5.9 Οι κυματομορφές μεταγωγής των SiC JFET - Si MOSFET στην διαμόρφωση του κυκλώματος Cascode ([44])

Ολόκληρη η διαδικασία είναι πολύ γρήγορη και ολοκληρώνεται σε 30ns. Το MOSFET δεν οδηγείται ποτέ σε χιονοστιβάδα, καθώς η τάση απαγωγού ανέρχεται στη στατική τιμή της μετά από τη διακοπτική διαδικασία του SiC VJFET. Εάν παρόλα αυτά η διακοπτική ταχύτητα του VJFET πρέπει να περιοριστεί, παρά τη διαμόρφωση Cascode, πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε να είναι άμεσα ελεγχόμενη από την πύλη του VJFET. Αυτό έχει ως συνέπεια την διατήρηση της κατάστασης normally OFF.

5.3 Μοντέλο SiC VJFET

Για την προσομοίωση του κυκλώματος μετατροπέα ισχύος χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης της saber TM ([56]). Σε αυτό το λογισμικό παρέχεται η προαιρετική βιβλιοθήκη εξαρτημάτων και πρότυπα, με τα προκαθορισμένα μοντέλα των διαφόρων

εξαρτημάτων. Η δομή του μοντέλου JFET από τη βιβλιοθήκη της Saber™ παρουσιάζεται στο σχήμα 5.10 α).



Σχήμα 5.10 α) Το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου SiC VJFET και β) τα χαρακτηριστικά φόρτισης της πύλης

Το μοντέλο VJFET περιγράφεται με βάση το μοντέλο JFET του Berkeley που ενσωματώθηκε στο γενικό πρότυπο JFET και περιλαμβάνει τις επόμενες απαραίτητες και προαιρετικές παραμέτρους:

- | | |
|--|---|
| β Συντελεστής διαγωγιμότητας | V_{GS} τάση μεταξύ πύλης-πηγής |
| λ Διαμόρφωση μήκους καναλιού | V_{GD} τάση μεταξύ πύλης-απαγωγού |
| r_d, r_s αντιστάσεις απαγωγού και πηγής | v_{ds} τάση μεταξύ απαγωγού-πηγής |
| r_{gs}, r_{gd} αντιστάσεις μεταξύ πύλης-πηγής και πύλης-απαγωγού | I_{drain} ρεύμα απαγωγού |
| r_{ds} αντίσταση μεταξύ απαγωγού-πηγής | I_{gate} ρεύμα πύλης |
| c_{gs} χωρητικότητα πύλης-πηγής με μηδενική πόλωση | I_{srce} ρεύμα πηγής |
| c_{gd} χωρητικότητα πύλης-απαγωγού με μηδενική πόλωση | V_{GF} Δυναμικό ορθής πόλωσης πύλης |
| v_{po} τάση συσφίξεως (pinch OFF voltage) | M Gate p-n grading potential |
| K_{CF} Συντελεστής χωρητικότητας ορθής πόλωσης | |

Δυστυχώς δεν μπορούν να βρεθούν αμέσως όλες οι παράμετροι. Ακόμη και για τα πρώτα δείγματα ημιαγωγών (engineering samples), δεν υπήρξε κανένα δελτίο στοιχείων που παρέχετε από τον προμηθευτή του εξαρτήματος. Ορισμένοι απαραίτητοι παράμετροι λαμβάνονται από την Διδακτορική-Διατριβή του Nando Kaminski ([25]) και των προσομοιώσεων των ημιαγωγών του. Πολύ λίγες παράμετροι μπορούν να ληφθούν από πρακτικά συνεδρίων (conference proceeding), ενώ τα περισσότερα από τα στοιχεία αφορούν συνήθως διαφορετικού τύπου JFETs. Ακόμα, διαφορετικές γενεές του ίδιου εξαρτήματος

έχουν μάλλον διαφορετικές παραμέτρους όπως: μέγιστα ρεύματα κορεσμού, τάση κατωφλίου απογύμνωσης (pinch-off threshold voltage), κατάσταση punch-through¹⁰ και επίπεδα τάσης διάσπασης κ.λπ.

Επομένως, η πλειοψηφία των παραμέτρων είχαν εξαχθεί από τις πειραματικές μετρήσεις. Αρχικά λαμβάνονται οι στατικοί παράμετροι. Μετά το φορτίο πύλης, και οι χωρητικότητες εξήχθησαν από τις μετρήσεις, σχήμα 5.10β) ([43]). Αυτά είναι εξαρτώμενα από την τάση και μπορούν να περιγραφούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$C_{GS} = cgs \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GF}}\right)^{-M}, \text{ αν } V_{GS} \leq K_{CF} * V_{GF}$$

$$C_{GS} = cgs \left(1 - K_{CF}\right)^{-(1+M)} \left[1 - K_{CF} (1+M) + M \frac{V_{GS}}{V_{GF}}\right], \text{ αν } V_{GS} > K_{CF} * V_{GF} \quad (5.1)$$

$$C_{GD} = cgd \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GF}}\right)^{-M}, \text{ αν } V_{GD} \leq K_{CF} * V_{GF}$$

$$C_{GD} = cgd \left(1 - K_{CF}\right)^{-(1+M)} \left[1 - K_{CF} (1+M) + M \frac{V_{GD}}{V_{GF}}\right], \text{ αν } V_{GD} > K_{CF} * V_{GF} \quad (5.2)$$

Η τάση απογύμνωσης (pinch off voltage) V_{PO} είναι μεταξύ -20 και -40V και ποικίλλει από δείγμα σε δείγμα. Μία μέση τιμή -30V επιλέγεται. Η διαμόρφωση μήκους καναλιού (channel length modulation¹¹) είναι ίση με $\lambda = 10^{-6}$ ([15]).

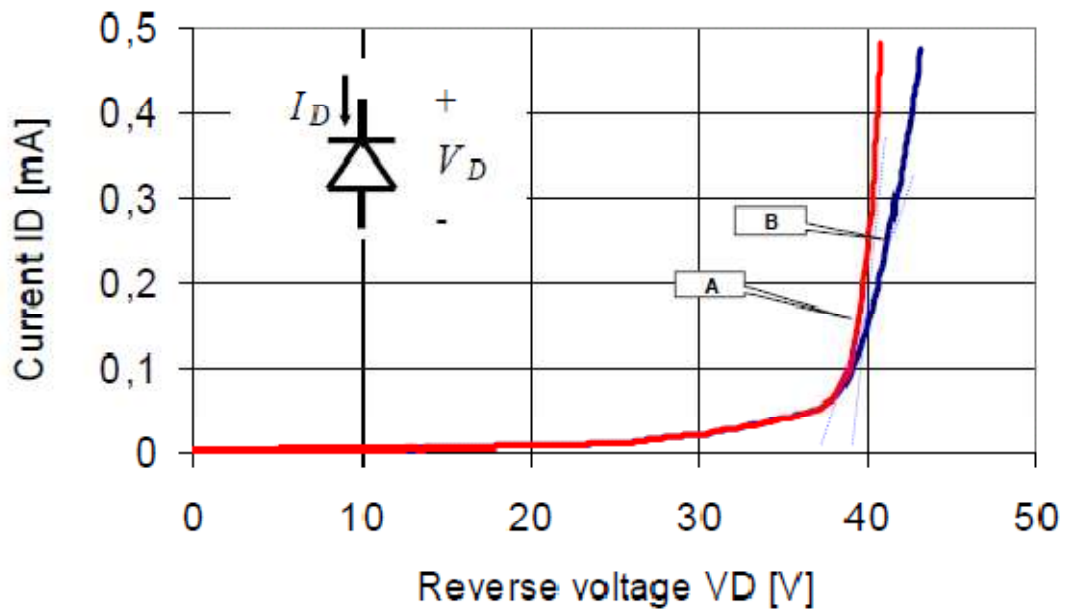
5.4 Παραλληλισμός των VJFET τρανζίστορ

Λόγω του θετικού συντελεστή θερμοκρασίας της ειδικής αντίστασης του καναλιού, τα SiC VJFETs μπορούν να παραλληλιστούν όπως οποιαδήποτε άλλο τρανζίστορ MOSFET Si. Ωστόσο για την οδήγηση του εν παραλλήλω συνδυασμού των JFET, θα πρέπει να γίνουν πιο λεπτομερείς έρευνες. Όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, η πύλη του τρανζίστορ JFET φαίνεται να είναι μια p-n επαφή και σε κατάσταση αποκοπής μπορεί να θεωρηθεί ως μια ανάστροφα πολωμένη δίοδος. Κατά τη διάρκεια της ανάστροφης πόλωσης, η περιοχή απογύμνωσης της διόδου αυξάνεται και στην τάση διάσπασης μπορεί να φθάσει κατευθείαν

¹⁰ punch-through: είναι εκείνη η ακραία κατάσταση κατά την οποία οι περιοχές "απογύμνωσης" γύρω από τους ακροδέκτες του απαγωγού και της πηγής ενώνονται σε μία ενιαία περιοχή.

¹¹ channel length modulation: ονομάζεται το φαινόμενο της μείωσης της περιοχής του καναλιού καθώς η τάση απαγωγού αυξάνεται.

την μικρή και ελαφριάς πρόσμιξης περιοχή ολίσθησης. Όταν αυτό εμφανίζεται (όπως και στις κοινώς ονομαζόμενες διόδους κατάστασης "punch-through") η περαιτέρω αύξηση της ανάστροφης τάσης δεν θα αναγκάσει την περιοχή μείωσης να διευρυνθεί περαιτέρω και το προφίλ του πεδίου (field profile) αρχίζει να γίνεται επίπεδο (flatten out). Μακροσκοπικά αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από την σημαντική αύξηση του ανάστροφου ρεύματος της πύλης στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11 Ρεύμα διαρροής ανάστροφης πόλωσης της πύλης και "punch-through" ρεύματα των δύο δειγμάτων JFET

Το σχήμα 5.11 επίσης δείχνει ότι τα διαφορετικά δείγματα JFET μπορούν να έχουν διαφορετικά "punch-through" ρεύματα για το ίδιο επίπεδο ανάστροφης τάσης (καμπύλες A και B). Το γεγονός αυτό θέτει ένα όριο πέρα από τις απαιτήσεις ρευμάτων και τάσης των παράλληλων συνδεδεμένων πυλών. Τα μέγιστα επιτρεπόμενα ρεύματα πυλών πρέπει να ληφθούν υπόψη για το σχεδιασμό των κυκλωμάτων οδήγησης της πύλης SiC JFET.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ DIMOS”

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο ενός κάθετου ημιαγωγού διπλής εμφύτευσης DIMOS (doubly-implanted MOS) (δομής τρανζίστορ) σε 4H-Silicon Carbide (SiC). Η προσομοίωση για τις χαρακτηριστικές μεταφοράς του SiC MOSFET γίνεται με την εμπορική συσκευή προσομοίωσης Medici. Μια ακριβής αυστηρά πειραματική δοκιμή και χαρακτηρισμός γίνεται σε μια συσκευή ελέγχου με τρανζίστορ 4H-SiC DIMOS. Οι παράμετροι SPICE που εξάγονται από τις μετρήσεις, και ένα μοντέλο SPICE για το τρανζίστορ DIMOS έχουν αναπτυχθεί. Το παρών κεφάλαιο αποτελεί ένα μέρος των προσπαθειών της ομάδας ερευνητών για υλικά, συσκευές, και ηλεκτρονικά ισχύος στο Πανεπιστήμιο του Τένεσι και στην Εθνική βιβλιοθήκη του Oak Ridge.

6.1 Εισαγωγή

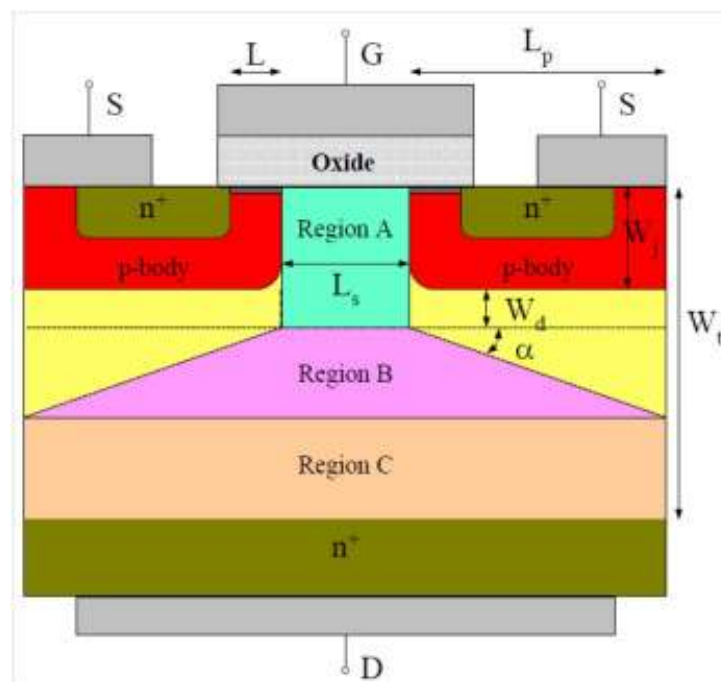
Το Καρβίδιο του πυριτίου (SiC), ένα υλικό υψηλού ενεργειακού διακένου (wide bandgap), παρουσιάζει τεράστιες δυνατότητες για ηλεκτρονικές εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές ημιαγωγίων διακοπών. Έχει ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης (3.5×10^6 V/cm), μια υψηλή ταχύτητα ολίσθησης κορεσμένων ηλεκτρονίων (2×10^7 cm/sec), ένα υψηλό σημείο τήξης (2830°C), και μια υψηλή θερμική αγωγιμότητα ($4,9$ W/cm- $^\circ\text{K}$) που του δίνουν σημαντικά πλεονεκτήματα για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής ισχύος ([57], [58], [59], [60]). Μεταξύ των πολλών υλικών υψηλού ενεργειακού διακένου, το SiC είναι το πιο προηγμένο υλικό, χωρίς να σχηματίζεται διηλεκτρικό, χωρίς την ανάγκη εμφύτευσης και χωρίς επαφές μέσω επιμετάλλωσης.

Οι DC-DC μετατροπείς και οι μονάδες AC χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, συστήματα ισχύος, μονάδες έλξης, και στο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (HEV), όπου οι δίοδοι και τα MOSFETs χρησιμοποιούνται ως διακόπτες.

Αν και δεν υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο MOSFETs ισχύος σε SiC υλικό, η εταιρεία CREE έχει επιδείξει διάφορες εφαρμογές ημιαγωγίων διακοπών σε υλικό SiC ([61]). Μια

ομάδα από το Πανεπιστήμιο Purdue πρότεινε ένα τρανζίστορ DIMOS σε 6H-SiC με τάση διάσπασης 760V ([62]).

Ένα καλό αξιόπιστο μοντέλο του εξαρτήματος είναι απαραίτητο για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του και των χαρακτηριστικών του. Ένα ακριβές μοντέλο μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά του εξαρτήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια και ως εκ τούτου, οι απαιτήσεις σχεδιασμού μπορούν να εφαρμοστούν με αυστηρά όρια ανοχής. Το παρόν κεφάλαιο παρέχει μια σύντομη επισκόπηση της έρευνας, στον τομέα για την μοντελοποίηση του εξαρτήματος καρβιδίου του πυριτίου. Επίσης παρουσιάζεται μια εμπειριστατωμένη και λεπτομερή ανάλυση ενός MOSFET ισχύος SiC, το οποίο μοντελοποιείται, προσομοιώνεται, ελέγχεται, και εξάγονται οι παράμετροι για ένα μοντέλο SPICE.



Σχήμα 6.1 Δομή του DIMOS για τη μοντελοποίηση. Οι ετικέτες περιγράφουν τις διάφορες περιοχές και διαστάσεις της κάθετης δομής

Ένα βελτιωμένο MOSFET ισχύος SiC είναι υπό ανάπτυξη για εφαρμογές σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα ([7]). Τα πλεονεκτήματα σε επίπεδο συστήματος των ηλεκτρονικών ισχύος με SiC για εφαρμογές σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV) μελετώνται επίσης στην αναφορά [8]. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς στην επεξεργασία του υλικού SiC και την αξιολόγηση από την ομάδα των μηχανικών που ασχολούνται με την εφαρμογή σε επίπεδο συστήματος, μια εφαρμογή SiC δομής MOSFET έχει προταθεί από την εταιρεία CREE.

6.2 Μοντελοποίηση του κάθετου εξαρτήματος DIMOS

6.2.1 Μοντέλο

Ένα αναλυτικό μοντέλο για ένα τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου (Field Effect Transistor) DIMOS αναπτύχθηκε από την εταιρεία CREE χρησιμοποιώντας υλικό SiC. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί με βάση τη μεθοδολογία για ένα κάθετο μοντέλο διπλής διάχυσης MOS ([65], [66], [67], [68]). Το προτεινόμενο μοντέλο DIMOS ενσωματώνει την επίδραση της συμπεριφοράς του εξαρτήματος SiC. Το σχήμα 6.1 δείχνει τις λεπτομέρειες της δομής του εξαρτήματος προσδιορίζοντας τις διάφορες περιοχές λειτουργίας. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί από την ανάλυση της περιφερειακής μετακίνησης φορέων στο κανάλι και στις περιοχές ολίσθησης. Το ενεργό κανάλι υπάρχει κάτω από το στρώμα οξειδίου και εντός των p-φορέων.

Η χαρακτηριστική ρεύματος / τάσης στην ωμική περιοχή δίνεται από την Εξ. 6.1,

$$I_{ch} = \frac{W\mu_n}{2L \left[1 + \left(\frac{\mu_n}{2v_{sat}L}\right)V_{ch}\right]} V_{ch} [2C_{ox}(V_{ch} - V_T) - (C_{ox} + C_{do})V_{ch}] \quad (6.1)$$

όπου W είναι το πλάτος του καναλιού,

L είναι το μήκος του καναλιού,

V_{ch} είναι η τάση του καναλιού,

V_T είναι η τάση κατωφλίου¹²,

V_{GS} είναι η τάση της πύλης,

C_{ox} είναι η χωρητικότητα του οξειδίου,

C_{do} είναι η χωρητικότητα απογύμνωσης (depletion) του υποστρώματος,

μ_n είναι η κινητικότητα ηλεκτρονίων, και

v_{sat} είναι η ταχύτητα κορεσμού ηλεκτρονίων.

Η περιοχή ολίσθησης χωρίζεται σε τρία μέρη: A-περιοχή συσσώρευσης, B-περιοχή ολίσθησης με διαφορετική διατομή, και C-περιοχή ολίσθησης με σταθερή διατομή. Οι αντίστοιχες τάσεις στις περιοχές αυτές είναι V_A , V_B , και V_C για την περιοχή A, B, και C, αντίστοιχα, και δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$V_A = \int_0^{W_j+W_d} E_y dy = \frac{I_D(W_j+W_d)}{W(L_s q N_d \mu_n) - I_D/E_C} \quad (6.2)$$

¹² Τάση κατωφλίου : Η τάση κατωφλίου (V_{th}) ορίζεται ως η τάση πύλης στην οποία αρχίζει να άγει το στοιχείο MOS. Για τάσεις μικρότερες από V_{th} το κανάλι βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής

$$V_B = \frac{I_D}{WqN_d\mu_n \cot \alpha} \log \left[\frac{WqN_d\mu_n(L_s+2L_p)-I_D/E_C}{WqN_dL_s\mu_n-I_D/E_C} \right] \quad (6.3)$$

$$V_C = \frac{I_D(W_t-W_j-W_d-L_p \tan \alpha)}{WqN_d\mu_n(L_s+2L_p)-I_D/E_C} \quad (6.4)$$

όπου W_j είναι το βάθος του n^+ της περιοχής επαφής,

W_d είναι το βάθος της περιοχής απογύμνωσης,

W_t είναι το συνολικό πάχος της επίστρωσης,

L_s είναι το μήκος της περιοχής συσσώρευσης, και

L_p είναι το μήκος του p-υποστρώματος.

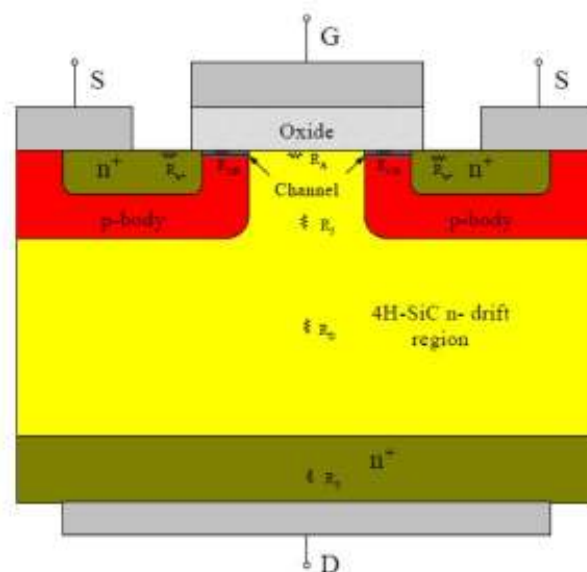
Η συνολική τάση της περιοχής ολίσθησης είναι

$$V_{\text{μετατόπισης}} = V_A + V_B + V_C,$$

και η τάση σε όλο τον απαγωγό και την πηγή

$$V_{DS} = V_{\text{μετατόπισης}} + V_{ch}.$$

Οι τάσεις και τα ρεύματα των παραπάνω δύο εξισώσεων για την περιοχή ολίσθησης και της περιοχής καναλιού είναι έμμεσα συνδεδεμένες. Το ρεύμα απαγωγού, I_D είναι ίσο με το συνολικό ρεύμα καναλιού I_{ch} , το οποίο καθορίζει μια σχέση μεταξύ των δύο εξισώσεων. Η εταιρεία CREE ανέπτυξε ένα επαναληπτικό επιλύτη (iterative solver) για να αξιολογήσει τις τάσεις και τα ρεύματα. Οι παράμετροι του υλικού 4H-SiC χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου.



Σχήμα 6.2 Σχηματική εγκάρσια τομή της κάθετης δομής DIMOS που χρησιμοποιείται σε συσκευή προσομοίωσης Medici

6.2.2 Δομή του εξαρτήματος

Μια κάθετη διπλή εμφύτευση MOSFET (DIMOS) σε 4H-SiC χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του αναλυτικού μοντέλου που αναφέρθηκε νωρίτερα. Η επιφάνεια διατομής του προτεινόμενου DIMOS φαίνεται στο Σχήμα 6.2.

Μια περίληψη της δομής του εξαρτήματος και των επιπέδων πρόσμιξης φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Η προτεινόμενη δομή του εξαρτήματος και οι διαστάσεις του εξαρτήματος είναι επιλεγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε το πρακτικό εξάρτημα να μπορεί να κατασκευαστεί με βάση την τρέχουσα διαθέσιμη τεχνολογία SiC. Δεδομένου ότι η διαδικασία διάχυσης σε υλικό SiC είναι αμελητέα, η εμφύτευση ιόντων είναι ο μόνος τρόπος για να σχηματίσουν τους p- φορείς και τη n^+ περιοχή για την κάθετη δομή. Η διπλή διάχυση δεν είναι κατάλληλη για την κατασκευή του ημιαγωγού SiC.

Πίνακας 6.1 Διαστάσεις ημιαγωγού για το προτεινόμενο 4H-SiC DIMOS

Διαστάσεις ημιαγωγού		Πρόσμιξη (Doping)		
		Περιοχή	Επίπεδο πρόσμιξης	Άτομα πρόσμιξης
Πλάτος καναλιού (Channel width)	400 μm	n-ολίσθησης (n-drift)	$4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	Άζωτο (Nitrogen)
Μήκος καναλιού (Channel length)	1 μm	p-φορείς (p-bodies)	$4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	Αλουμίνιο (Aluminum)
Πάχος οξειδίου (Oxide thickness)	500 Å	n+ περιοχή (n+ region)	$1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	Άζωτο (Nitrogen)
Διαχωρισμός p-φορέων (p-bodies separation)	20 μm			
Πάχος επίστρωσης (Epilayer thickness)	25 μm			

Το πάχος και το επίπεδο πρόσμιξης της περιοχής ολίσθησης (drift region) καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τάση διάσπασης της συσκευής. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της περιοχής ολίσθησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση αποκοπής. Ωστόσο, η σημερινή τεχνολογία SiC έχει τον περιορισμό του πάχους της επίστρωσης που μπορεί να επιτευχθεί. Σε αυτό το σχέδιο, θεωρείται η περίπτωση ενός MOSFET 2,5 kV, με πάχος επίστρωσης ίσο με 25 μm . Με βάση την πρόσφατη τεχνολογία κατασκευής SiC, αυτό το πάχος της επίστρωσης είναι σίγουρα εφικτό. Πρόσφατα, οι Agarwal et al. ([69]) πέτυχαν επίστρωση πάχους περίπου 115 μm , η οποία επιτρέπει την επίτευξη τάσης αποκοπής (blocking voltage) ίση με 10 kV. Η n- περιοχή ολίσθησης συνήθως ενισχύεται ελαφρά ($4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ για αυτή τη συσκευή) για να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση αποκοπής της λειτουργίας του MOSFET. Οι n^+ περιοχές ενισχύονται με ($1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) άζωτο, και οι p-φορείς σχηματίζονται με ($4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

εμφυτεύσεις αλουμινίου. Το μήκος του καναλιού και το πλάτος λαμβάνονται ως 1 μm και 400 μm , αντίστοιχα. Το πάχος του οξειδίου είναι 500Å, και οι p-φορείς χωρίζονται από 20 μm .

6.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

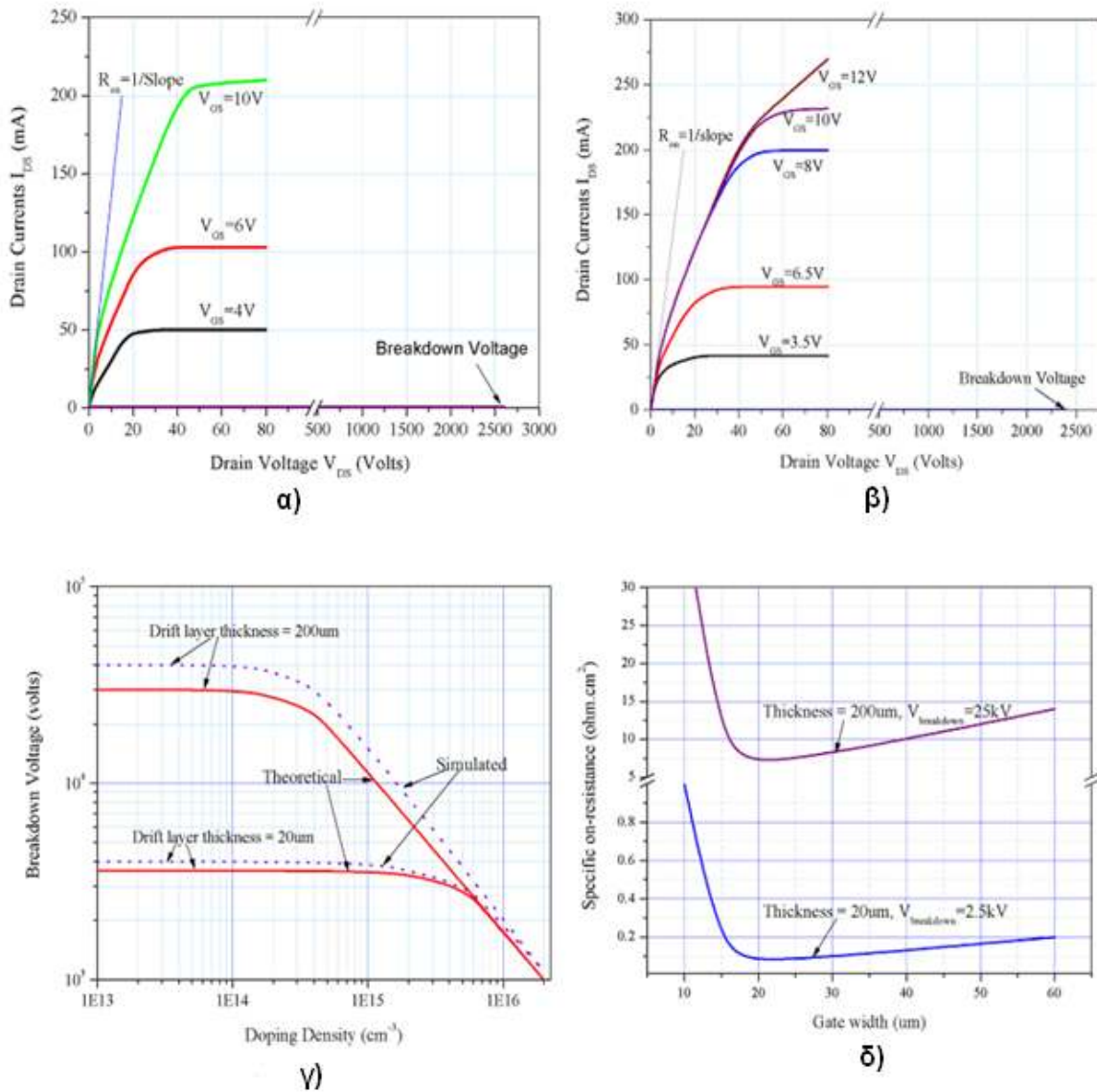
Οι χαρακτηριστικές εξόδου στην κατάσταση αγωγής καθώς και στην κατάσταση αποκοπής της κάθετης δομής DIMOS, είναι υπό εξέταση με την βοήθεια αναλυτικού μοντέλου και αριθμητικής προσομοίωσης. Επίσης συγκρίνονται οι συγκεκριμένες αντιστάσεις αγωγής και οι τάσεις διάσπασης. Μια περίληψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από το αναλυτικό μοντέλο και την αριθμητική προσομοίωση φαίνονται στο σχήμα 6.3. Τα ρεύματα εξόδου του κάθετου MOSFET που λαμβάνονται από το αναλυτικό μοντέλο παραμένουν στην περιοχή κορεσμού για τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ένα σαφές φαινόμενο ημι-κορεσμού στο κάθετο MOSFET. Η τάση της πύλης έχει τον έλεγχο των ρευμάτων απαγωγού, όσο το ρεύμα απαγωγού εισέρχεται στην περιοχή κορεσμού πριν εμφανιστεί η ταχύτητα κορεσμού (velocity saturation). Ωστόσο, η πύλη χάνει τον έλεγχο της κατά τη διάρκεια των ρευμάτων απαγωγού, όταν η ταχύτητα κορεσμού του φορέα εμφανιστεί νωρίτερα από το ρεύμα απαγωγού. Παρατηρείται επίσης ότι το φαινόμενο του ημι-κορεσμού εμφανίζεται σε υψηλότερες τάσεις πύλης για μεγαλύτερους διαχωρισμούς p-φορέων και για υψηλότερες πυκνότητες προσμίξεων. Από το αναλυτικό μοντέλο ένα ρεύμα απαγωγού των 220 mA επιτυγχάνεται για μια τάση πύλης 10 V, λαμβάνοντας υπόψη ότι το προσομοιωμένο εξάρτημα απέδωσε ένα ρεύμα απαγωγού των 232 mA για μία τάση πύλης 10V.

Η μέγιστη εφικτή τάση λειτουργίας αποκοπής (blocking) προσομοιώνεται με την προϋπόθεση ότι η τιμή του πλάτους W_d της περιοχής απογύμνωσης πρέπει να είναι μικρότερη από το πάχος της περιοχής ολίσθησης.

Πίνακας 6.2 Περίληψη του Αναλυτικού Μοντέλου και αποτελέσματα του προσομοιωμένου εξαρτήματος

	Analytical model	MEDICI simulations
<i>Drain currents</i>	220 mA at $V_{GS} = 10V$	232 mA at $V_{GS} = 10V$
<i>Specific on-resistance</i>	54 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$	60 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$
<i>Breakdown voltage</i>	2.6 kV	2.3 kV

Η πύλη είναι γειωμένη για τις εφαρμογές της λειτουργίας αποκοπής. Το αναλυτικό μοντέλο δείχνει ότι η τάση διάσπασης είναι 2,6 kV ενώ στη προσομοίωση MEDICI η τάση αυτή είναι 2,3 kV. Η πρόσμιξη της πυκνότητας και το πάχος της περιοχής ολίσθησης υπολογίζονται για μια τάση διάσπασης των 2,5 kV.



Σχήμα 6.3 Χαρακτηριστικές εξόδου του (α) Αναλυτικό μοντέλο, (β) προσομοίωση Medici, (γ) Μεταβολή της τάσης διάσπασης με προσμίξεις πυκνότητας, (δ) Μεταβολή της ειδικής αντίστασης αγωγής με το πλάτος της πύλης

Η απαιτούμενη πρόσμιξη πυκνότητας είναι $4.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ και το αντίστοιχο πάχος της περιοχής ολίσθησης είναι 25 μm . Το Σχήμα 6.3 (γ) δείχνει τη σύγκριση των θεωρητικών και των προσομοιωμένων τιμών των τάσεων διάσπασης με το πάχος του στρώματος ολίσθησης ως παράμετρο. Οι προσομοιωμένες τιμές βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες θεωρητικές.

Η επίδραση της αύξησης πλάτους της πύλης στην συγκεκριμένη αντίσταση αγωγής εμφανίζεται στην Σχήμα 6.3 (δ). Το κανάλι και οι αντιστάσεις των στρωμάτων συσσώρευσης αυξάνουν το πλάτος της πύλης. Από την άλλη πλευρά, η αντίσταση της περιοχής ολίσθησης (drift region) μειώνεται λόγω της αύξησης της επιφάνειας διατομής μέσω της οποίας ρέει το ρεύμα. Το βέλτιστο πλάτος πύλης που λαμβάνεται από την σχεδίαση είναι 20μm. Οι αντιστάσεις αγωγής και για τις δύο περιπτώσεις, υπολογίζονται από την κλίση της εφαπτομένης στις χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου και η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων (Σχήμα 6.3 (α) και στο Σχήμα 6.3 (β)). Οι αντιστάσεις αγωγής πολλαπλασιάζονται από το εμβαδόν διατομής των $8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ της περιοχής ολίσθησης μεταξύ των p-φορέων για να αποκτήσουν τις συγκεκριμένες τιμές. Η υπολογιζόμενη τιμή των συγκεκριμένων αντιστάσεων αγωγής για το αναλυτικό μοντέλο είναι $54 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, και για την αριθμητική προσομοίωση είναι $60 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$. Ωστόσο, η θεωρητική τιμή της συγκεκριμένης αντίστασης αγωγής είναι $45 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$.

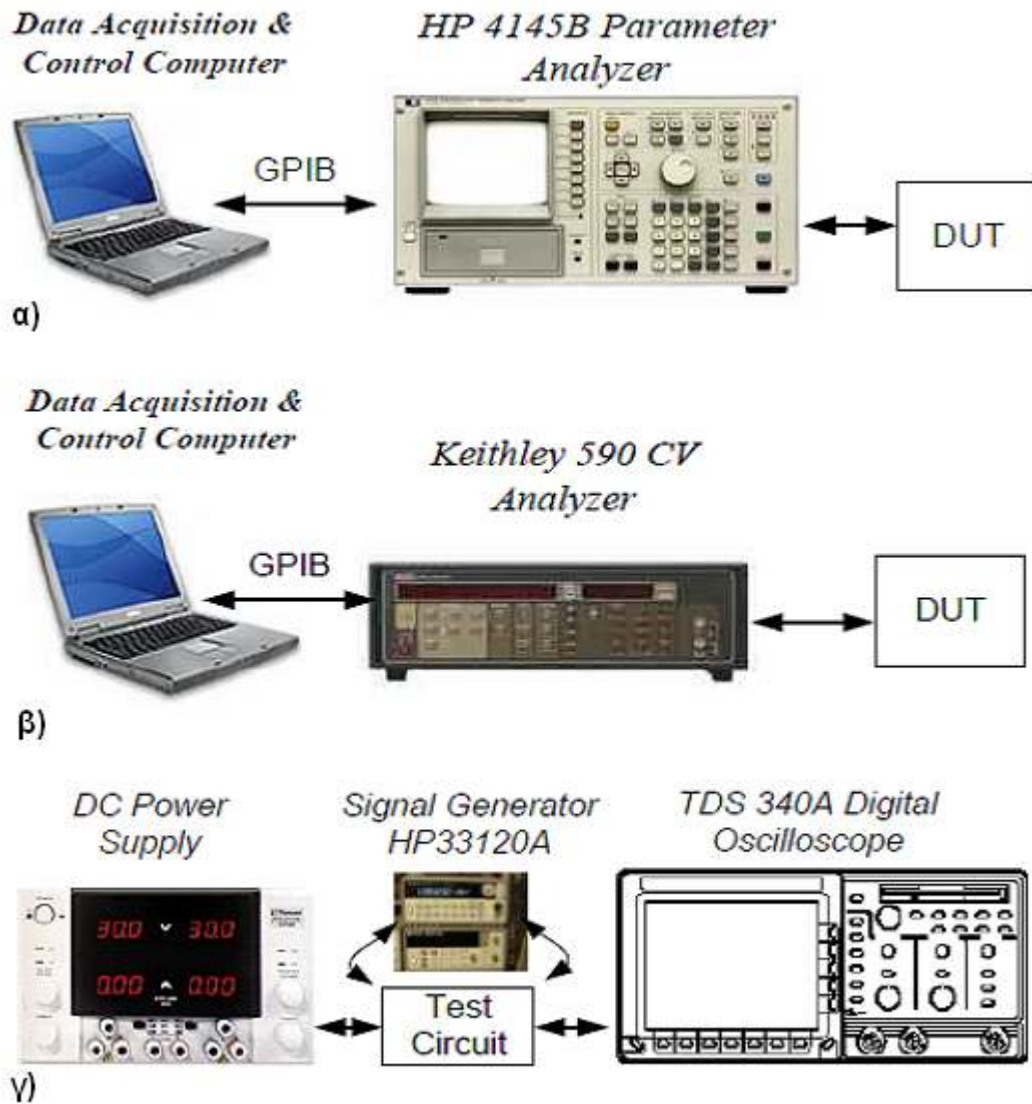
Πίνακας 6.3 Προδιαγραφές δοκιμαστικού ημιαγωγού 4H-SiC DIMOSFET

<i>Μέγιστη εκτίμηση ρεύματος</i> (Maximum current rating)	2A
<i>Τάση αποκοπής</i> (Blocking voltage)	1.2kV
<i>Τάση κατωφλίου</i> (Threshold voltage)	3.2V
<i>Αντίσταση αγωγής</i> (On-resistance)	1Ω at $V_{GS}=20V$
<i>Μήκος καναλιού</i> (Channel length)	1.5μm

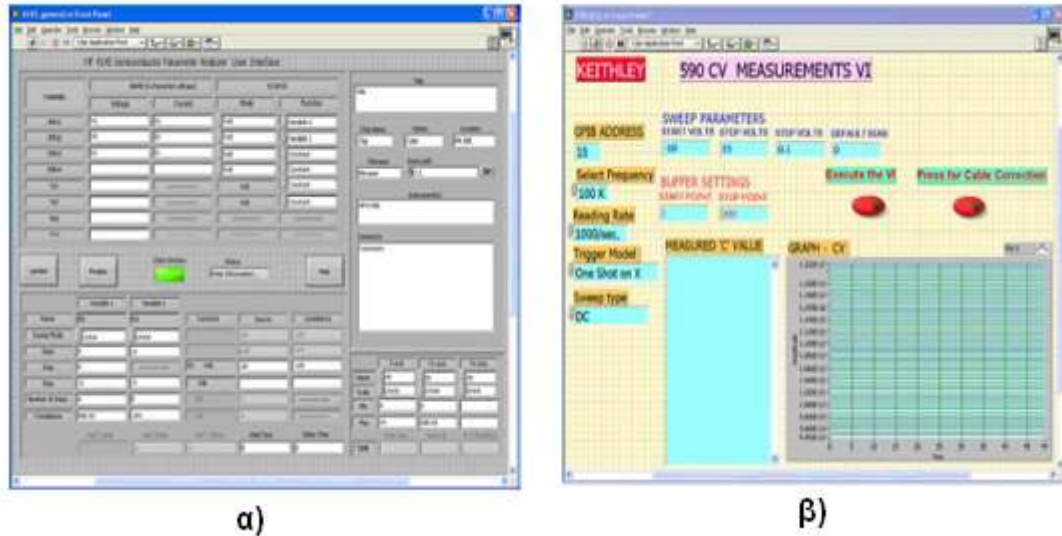
6.3 Έλεγχος, χαρακτηρισμός και εξαγωγή παραμέτρων

Ένα DIMOSFET κατασκευασμένο σε 4H-SiC έχει δοκιμαστεί και έχει χαρακτηριστεί σε θερμοκρασία δωματίου και σε υψηλή θερμοκρασία. Το εξάρτημα της δοκιμής επιτυγχάνεται από την Cree Research Inc, στην Raleigh της Βόρειας Καρολίνας. Οι προδιαγραφές του ημιαγωγού δίνονται στον πίνακα 6.3. Λόγω των περιορισμών στις εγκαταστάσεις δοκιμής και

ελέγχου, μόνο τα DC χαρακτηριστικά και τα διακοπτικά χαρακτηριστικά ενός κυκλώματος μετατροπέα έχουν εξεταστεί. Η δοκιμή της τάσης διάσπασης δεν πραγματοποιήθηκε λόγω της περιορισμένης παροχής των συσκευών ελέγχου.



Σχήμα 6.4 Διάταξη δοκιμής ελέγχου για (α) DC χαρακτηριστικά, (β) μέτρηση χωρητικότητας, (γ) διακοπτικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 6.5 Στιγμιότυπο καταγραφής του προγράμματος LabVIEW: (α) χαρακτηριστικά DC, (β) μέτρηση χωρητικότητας

6.3.1 Διάταξη Δοκιμής-Ελέγχου

Ένα συνηθισμένο σύστημα μέτρησης DC χρησιμοποιήθηκε για να διευκολύνει τον χαρακτηρισμό DC του υπό δοκιμή SiC-DIMOSFET (Σχήμα 6.4 (α)). Ο χαρακτηρισμός DC περιλαμβάνει τη μέτρηση:

- των χαρακτηριστικών εξόδου του ημιαγωγού (I_D συναρτήσει V_{DS}),
- τις χαρακτηριστικές μεταφοράς (I_D συναρτήσει V_{GS}),
- τις παραμέτρους του σήματος όπως η διαγωγιμότητα (g_m), αγωγιμότητα εξόδου (g_d), αντίσταση εξόδου (r_o), κινητικότητα (μ), κλπ.

Ένας Αναλυτής Παραμέτρων HP4145B της Hewlett Packard χρησιμοποιήθηκε για δύο βασικές μετρήσεις: μέτρηση των χαρακτηριστικών εξόδου και των χαρακτηριστικών μεταφοράς του υπό έλεγχου ημιαγωγού.

Το συνολικό σύστημα μέτρησης ελέγχεται με χρήση προσωπικού υπολογιστή (PC) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα LabVIEW και χρησιμοποιείται θύρα GPIB για να επικοινωνεί με το HP4145B. Το πρόγραμμα αυτοματοποιεί πολλές λειτουργίες, επιτρέποντας στο χρήστη να ρυθμίσει το πείραμα, να ξεκινήσει το πρόγραμμα, και στη συνέχεια να τερματίσει την διαδικασία για τη συλλογή, απεικόνιση και αποθήκευση των δεδομένων μέτρησης. Ο χρήστης επιλέγει τις διαφορετικές συνθήκες πόλωσης και ρυθμίζει το όργανο για την ορθή εκτέλεση του χαρακτηρισμού DC. Τα δεδομένα εξόδου αποθηκεύονται σε μια μορφή υπολογιστικού φύλλου που επιτρέπει την απευθείας εισαγωγή στο Excel ή άλλο κατάλληλο λογισμικό γραφικών παραστάσεων. Μια οθόνη καταγραφής του συγκεκριμένου προγράμματος ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 6.5 (α). Η ίδια ρύθμιση του συστήματος

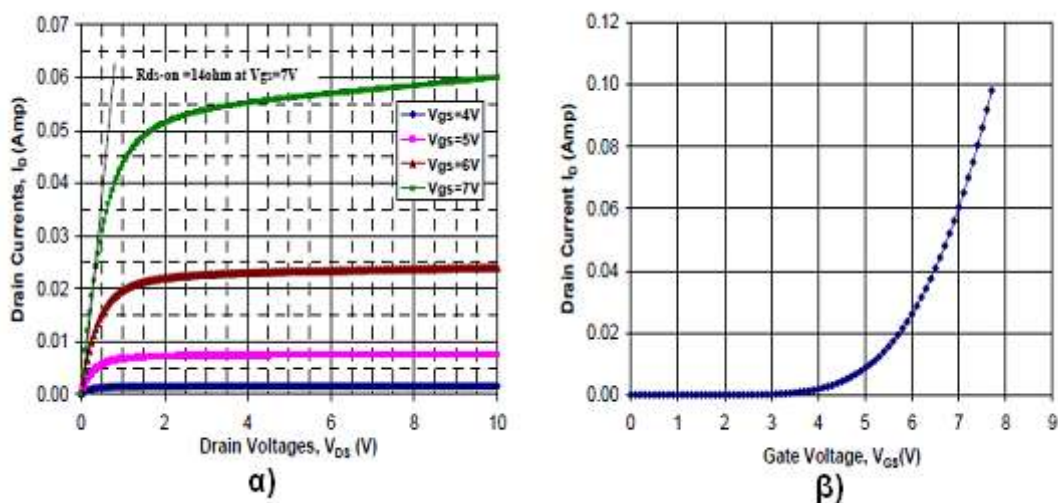
χρησιμοποιείται για υψηλής θερμοκρασίας χαρακτηρισμό, εκτός από το ότι η συσκευή δοκιμής τοποθετείται μέσα σε ένα κατάλληλο θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας. Τα δεδομένα των δοκιμών καταγράφονται για το εύρος της θερμοκρασίας των 25° C έως 200°C με βήμα τους 25°C.

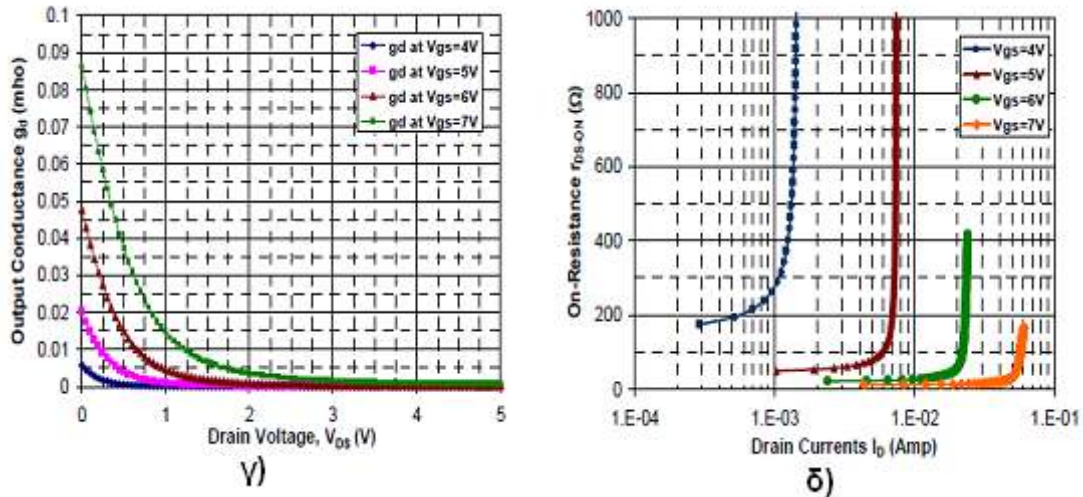
Μια συγκεκριμένη διάταξη μέτρησης της χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4(β), χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της χωρητικότητας του ημιαγωγού ελέγχου. Αυτή η μέτρηση περιλαμβάνει τις χωρητικότητες μεταξύ των ακροδεκτών ελέγχου του ημιαγωγού, όπως:

- η χωρητικότητα πύλης-πηγής (C_{GS}),
- η χωρητικότητα πύλης-απαγωγού (C_{GD}), και
- η χωρητικότητα απαγωγού-πηγής (C_{DS}) καθώς και
- η υψηλή-χαμηλή ή μέγιστη-ελάχιστη μέτρηση του πυκνωτή MOS-πυκνωτή.

Ένας αναλυτής Keithley 590 C-V χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας για το DC ή για χαμηλές συχνότητες και υψηλές συχνότητες.

Ένα παρόμοιο σύστημα μέτρησης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας με χρήση υπολογιστή χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα LabVIEW και θύρα GPIB για την επικοινωνία με τον αναλυτή Keithley 590 C-V. Το πρόγραμμα αυτοματοποιεί πολλές λειτουργίες, επιτρέποντας στο χρήστη να ρυθμίσει το πείραμα, να εκκινήσει το πρόγραμμα, και να τερματίσει τη διαδικασία για τη συλλογή, απεικόνιση και αποθήκευση των δεδομένων μέτρησης. Το Σχήμα 6.5 (β) δείχνει μια οθόνη καταγραφής του συγκεκριμένου προγράμματος ελέγχου.



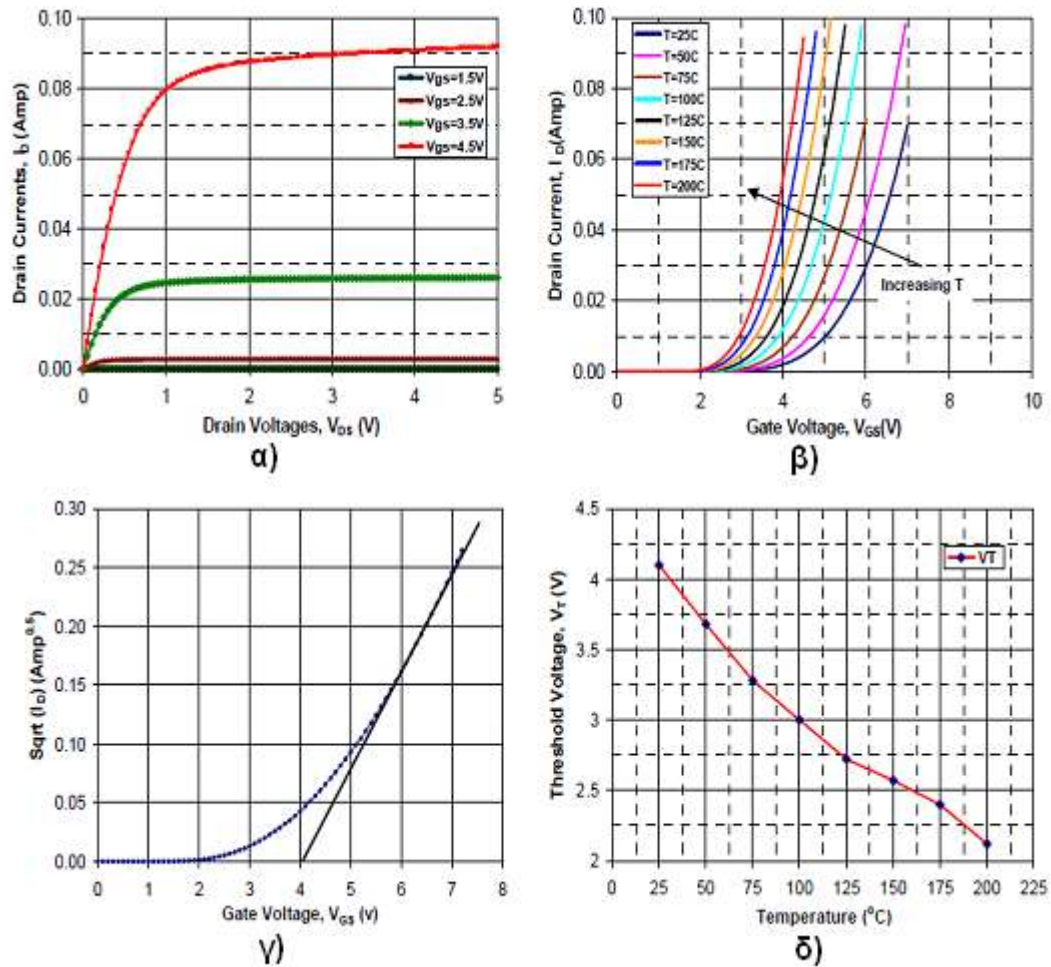


Σχήμα 6.6(α) χαρακτηριστικές εξόδου, (β) χαρακτηριστικές μεταφοράς, (γ) αγωγιμότητα εξόδου, (δ) Αντίσταση αγωγής της δοκιμαστικής συσκευής DIMOS

6.3.2 Δεδομένα και αποτελέσματα δοκιμών

Οι μετρούμενες χαρακτηριστικές εξόδου και οι χαρακτηριστικές μεταφοράς του δοκιμαστικού ημιαγωγού 4H-SiC DIMOS σε θερμοκρασία δωματίου φαίνεται στο Σχήμα 6.6 α), και το σχήμα 6.6 β), αντίστοιχα. Το ρεύμα απαγωγού (I_D) αρχίζει να αυξάνεται για τάση πύλης, λίγο κάτω από 4V. Τα ρεύματα απαγωγού στην περιοχή κορεσμού αυξάνονται σε μια τιμή περίπου 55 mA σε $V_{GS}=7V$ και $V_{DS}=4V$. Ο υπολογισμός της αντίστασης αγωγής R_{DS-ON} γίνεται χαράζοντας την εφαπτομένη στην γραμμική περιοχή της καμπύλης I_D-V_{DS} . Από την κλίση της εφαπτομένης, η υπολογιζόμενη αντίσταση αγωγής R_{DS-ON} είναι ίση με 14 Ω για τάση πύλης 7V. Η τιμή της αντίστασης αγωγής μειώνεται καθώς η τάση πύλης αυξάνεται.

Η αγωγιμότητα εξόδου (Σχήμα 6.6 γ) και η μεταβολή της αντίστασης αγωγής (Σχήμα 6.6 δ) συναρτήσει της τάσης απαγωγού δημιουργούν τις χαρακτηριστικές εξόδου του δοκιμαστικού ημιαγωγού DIMOS. Έχει παρατηρηθεί ότι η αγωγιμότητα εξόδου μειώνεται καθώς το ρεύμα απαγωγού αυξάνεται στην γραμμική περιοχή και μειώνεται στο μηδέν στην αρχή της εμφάνισης του ρεύματος κορεσμού. Υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας παρατηρούνται σε υψηλότερες τάσεις πύλης λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας του καναλιού και του ρεύματος απαγωγού. Χαμηλότερες αντιστάσεις αγωγής παρατηρούνται σε υψηλότερες τάσεις πύλης. Η αντίσταση αγωγής αυξάνεται έως το άπειρο, καθώς το ρεύμα απαγωγού φτάνει την τιμή κορεσμού.

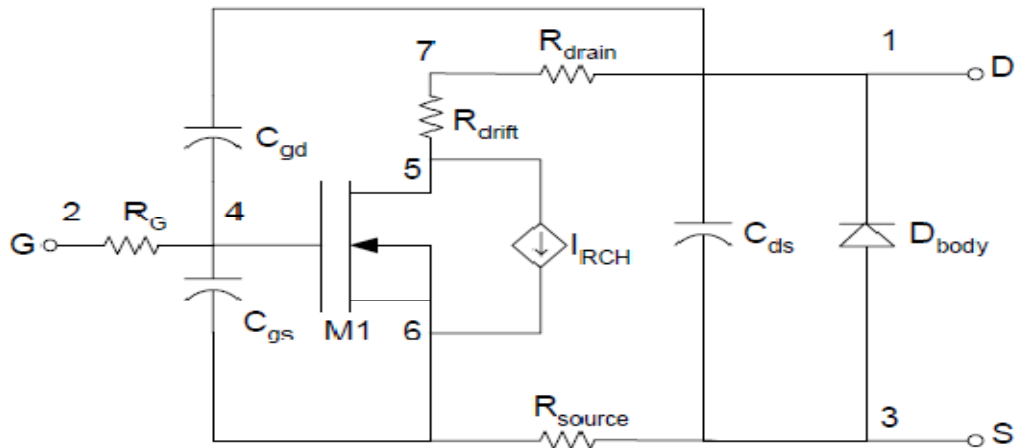


Σχήμα 6.7(α) Χαρακτηριστικές εξόδου στα 200°C , (β) Χαρακτηριστικές Μεταφοράς σε διαφορετικές θερμοκρασίες, (γ) Υπολογισμός της τάσης κατωφλίου, (δ) Μεταβολή της τάσης κατωφλίου με τις θερμοκρασίες του δοκιμαστικού ημιαγωγού DIMOS

Η χαρακτηριστική εξόδου του δοκιμαστικού ημιαγωγού DIMOS στους 200°C φαίνεται στο Σχήμα 6.7α). Μια αξιοσημείωτη αλλαγή του ρεύματος απαγωγού σε υψηλότερη θερμοκρασία παρατηρείται. Στους 25°C , το ρεύμα απαγωγού στην περιοχή κορεσμού είναι περίπου 7 mA με τάση πύλης 5V, και αυξάνεται σε μια τιμή των 40 mA με την ίδια τάση πύλης, αλλά στους 100°C . Η τιμή του ρεύματος ανέρχεται σε 90 mA με μια τάση πύλης 4,5V στους 200°C . Ο κυριότερος λόγος για την αλλαγή του ρεύματος είναι η μείωση της τάσης κατωφλίου και ως εκ τούτου δίνεται ώθηση στο ρεύμα απαγωγού με την ίδια τάση πύλης.

Η χαρακτηριστική μεταφοράς σε διαφορετικές θερμοκρασίες φαίνεται στο σχήμα 6.7 β). Οι καμπύλες μεταφοράς δείχνουν μια ενδιαφέρουσα συμπεριφορά, η οποία είναι διαφορετική από εκείνη των MOSFETs ισχύος από πυρίτιο. Στους ημιαγωγούς ισχύος πυριτίου, οι χαρακτηριστικές μεταφοράς δείχνουν το σημείο μετάβασης με την αύξηση της θερμοκρασίας, το οποίο οφείλεται στην αρνητική εξάρτηση της θερμοκρασίας της τάσης κατωφλίου. Ωστόσο, σε ένα ημιαγωγό SiC, οι χαρακτηριστικές μεταφοράς μετατοπίζονται

παράλληλα (δηλαδή χωρίς σημείο μετάβασης) λόγω της θετικής εξάρτησης της τάσης κατωφλίου με την θερμοκρασία. Οι τάσεις κατωφλίου υπολογίζονται από το σημείο τομής της εφαπτομένης, σχεδιασμένη στην καμπύλη $\sqrt{I_D}$ συναρτήσει της καμπύλης V_{GS} , στον άξονα της τάσης (Σχήμα 6.7 γ). Η διακύμανση της τάσης κατωφλίου $(V_{th})^*$ με την θερμοκρασία φαίνεται στο σχήμα 6.7 δ). Η τάση κατωφλίου αλλάζει από 4,1V (σε 25°C) σε 2,2V (σε 200°C).



Σχήμα 6.8 Μοντέλο SPICE για 4H-SiC DIMOS τρανζίστορ

6.4 Ανάπτυξη μοντέλου SPICE

6.4.1 Μοντέλο SPICE

Ένα απλό μοντέλο συμπεριφοράς SPICE για το SiC DIMOSFET προτείνεται με βάση την κατανόηση της συμπεριφοράς του MOSFET ισχύος (Σχήμα 6.8). Ο στόχος της ανάπτυξης του μοντέλου είναι η επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων ενσωματωμένων μοντέλων FET των τακτικών διατάξεων για πλευρικές συσκευές MOS του εμπορικού προγράμματος προσομοίωσης SPICE. Το πλεονέκτημα του μοντέλου είναι ο περιορισμένος αριθμός των απαιτούμενων παραμέτρων, τα οποία μπορούν εύκολα να εξαχθούν από απλές μετρήσεις του στους ακροδέκτες του ημιαγωγού (terminal measurements) ή από τα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών, χρησιμοποιώντας την αλγοριθμική και εμπειρική προσέγγιση, όπως περιγράφεται παρακάτω. Όταν εισαχθούν οι παράμετροι, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση είτε p-καναλιού ή n-καναλιού MOSFET ισχύος από SiC σε ένα ευρύ φάσμα ρευμάτων και τάσεων.

Πίνακας 6.4 Λίστα εισόδου του Υπο-κυκλώματος Μοντέλου

```

* This the power DIMOS sub-circuit
* Node 1 is the power mos drain
* Node 2 is the power mos gate
* Node 3 is the power mos source

.SUBCKT POWMOS 1 2 3
CGS 2 6 634P
CGD 2 1 344P
CDS 1 3 207P
RDRIFT 5 7 14.33
RDRAIN 1 7 0.1
RSOURCE 3 6 0.1
RG 2 4 1MEG

M1 5 4 6 6 DIMOS
DBODY 3 1 DMOD1

GIRCH 5 6 2 3 0.001

.MODEL DIMOS NMOS VTO=3.9 KP=9.8E-3 TOX=0.07U L=1.5 W=185
.MODEL DMOD1 D IS=1E-16 RS=70 CJO=407P
.ENDS

```

Το μοντέλο θεωρεί το υλικό καρβίδιο του πυριτίου και τη διαδικασία παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του ημιαγωγού. Το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί ως ένα υπο-κύκλωμα που υπάγεται στον ίδιο κωδικό SPICE και μπορεί να εκτελεστεί σε οποιαδήποτε εμπορικό λογισμικό προσομοίωσης SPICE. Αφού το DIMOS είναι ένα εξάρτημα ισχύος, το μήκος του καναλιού, το πλάτος και οι υπόλοιπες διαστάσεις του εξαρτήματος είναι αρκετά μεγάλες έτσι ώστε να αμεληθούν τα φαινόμενα δεύτερης τάξης στις εξισώσεις του μοντέλου, και η προσομοίωση διεξάγεται ως SPICE level 1 ή level 2¹³.

Λόγω της μεγαλύτερης περιοχής της πύλης, τα MOSFETs ισχύος παρουσιάζουν μεγάλη χωρητικότητα πύλης. Οι κυριότερες τρεις χωρητικότητες που εμπεριέχονται στο μοντέλο είναι οι εξής:

1. Χωρητικότητα πύλης-πηγής (C_{GS}),
2. Χωρητικότητα πύλης-απαγωγού (C_{GD}),
3. Χωρητικότητα απαγωγού-πηγής (C_{DS}).

Αυτές οι χωρητικότητες επηρεάζουν σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά του ημιαγωγού.

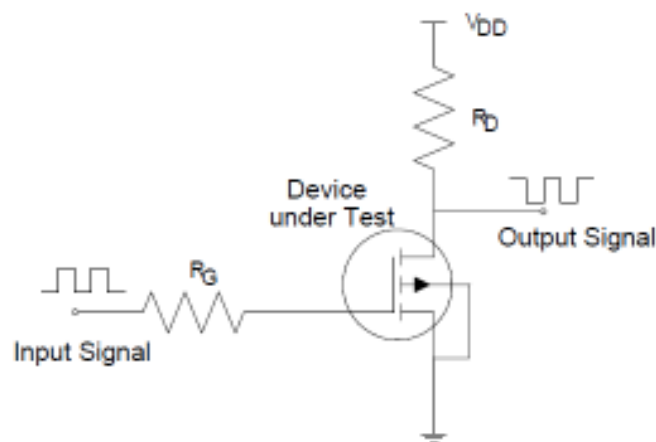
Τα MOSFETs ισχύος μπορούν να μπλοκάρουν τάσεις όταν πολώνονται ανάστροφα. Αυτή η ικανότητα αποκοπής (blocking) συνήθως πραγματοποιείται από την ανάστροφη πόλωση του σώματος της διόδου, η οποία διαμορφώνεται μεταξύ των p-φορέων ηλεκτρισμού και της

¹³ SPICE Levels: αφορά στο μοντέλο που περιγράφει την I-V χαρακτηριστική ενός εξαρτήματος. Αυξανόμενου του Level αυξάνεται η πολυπλοκότητα αλλά και η ακρίβεια του μοντέλου.

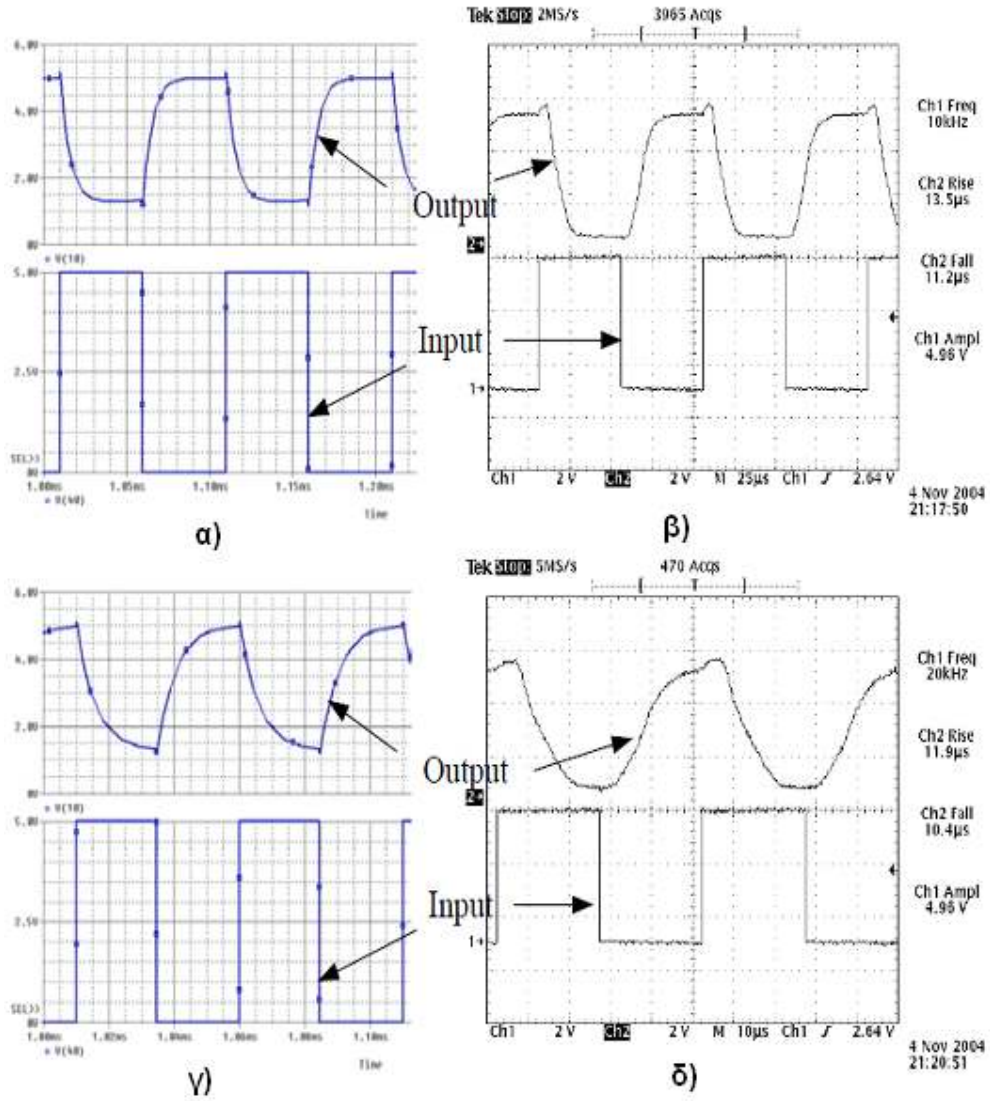
n- περιοχής ολίσθησης της κάθετης δομής. Η επίδραση της μεταβολής της αντίστασης καναλιού με πόλωση της πύλης προσομοιώνεται από την εξαρτημένη πηγή ρεύματος I_{RCH} . Το ρεύμα από την εξαρτημένη πηγή ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση της τάσης της πύλης. Η σταθερά αναλογίας του εξαρτώμενου ρεύματος καθορίζεται από την εμπειρική προσαρμογή των δεδομένων μέτρησης.

6.4.2 Επαλήθευση Μοντέλου

Οι παράμετροι του επιμέρους κυκλώματος του μοντέλου εξάγονται από τις μετρήσεις της χαρακτηριστικής του υπό εξέταση ημιαγωγού. Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζεται λίστα των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται το μοντέλο. Ένα απλό κύκλωμα ψαλιδιστή (DC Chopper) είναι κατασκευασμένο σε μια δοκιμαστική πλακέτα για τη μέτρηση των διακοπτικών χαρακτηριστικών του υπό έλεγχο ημιαγωγού, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.9. Μια παλμοσειρά εισόδου ενός τετραγωνικού σήματος (0-5V από κορυφή σε κορυφή) για την περιοχή συχνοτήτων του (από 1 kHz έως 50 kHz) εφαρμόζεται στην είσοδο, και η αντίστοιχη έξοδος παρατηρείται. Στη συνέχεια το κύκλωμα του μετατροπέα προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το αναπτυγμένο επιμέρους κύκλωμα του μοντέλου. Η σύγκριση των προσομοιωμένων κυματομορφών με τις μετρούμενες κυματομορφές φαίνεται στο σχήμα 6.10 α, β) και το σχήμα 6.10 γ, δ) στα 10 kHz και 20 kHz αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ταιριάζουν πολύ καλά με αυτά της μέτρησης. Έχει παρατηρηθεί από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών ότι ο ημιαγωγός μπορεί να λειτουργήσει για μια περιοχή συχνοτήτων (0-20 kHz). Το μοντέλο SPICE μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία στο κύκλωμα προσομοίωσης, τουλάχιστον για την περίπτωση χαμηλής τάσης και ισχύος.



Σχήμα 6.9 Κύκλωμα αναστροφέα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των διακοπτικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 6.10(α) Προσομοίωση και (β) μετρούμενα διακοπτικά χαρακτηριστικά στα 10kHz, (γ) προσομοίωση και (δ) μετρούμενα διακοπτικά χαρακτηριστικά στα 20kHz

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΟΙ ΔΙΟΔΟΙ SCHOTTKY ΑΠΟ SiC ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ”

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διόδοι SiC Schottky Barrier (SBD) και οι εφαρμογές τους και πραγματοποιείται διερεύνηση του τρόπου αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων της νέας τεχνολογίας σε εφαρμογές εμπορικών λειτουργικών μονάδων. Η έρευνα γίνεται με βάση το παράδειγμα ενός πρότυπου κυκλώματος ανύψωσης που χρησιμοποιείται για την ενεργό διόρθωση του συντελεστή ισχύος ή στους DC-DC μετατροπείς ανύψωσης (step up) ([71], [72], [73]).

7.1 Περίληψη

Η διάδος SiC Schottky Barrier (SBD) είναι εμπορικά διαθέσιμη σε εύρος 600-1200 V /10-100A. Το κύριο πλεονέκτημα της SiC SBD εντοπίζεται στην ανώτερη δυναμική συμπεριφορά της. Το φορτίο ανάστροφης αποκατάστασης της SiC SBD είναι εξαιρετικά χαμηλό (<20 nC) και είναι το αποτέλεσμα της χωρητικότητας ένωσης και όχι της συσσώρευσης φορτίων. Επιπλέον, σε αντίθεση με τη διάοδο Si PiN¹⁴, η χωρητικότητα αυτή είναι ανεξάρτητη από το ρυθμό di/dt, το ρεύμα ορθής πόλωσης και τη θερμοκρασία. Η μέγιστη θερμοκρασία επαφής (junction temperature) των 175°C στη SiC SBD αντιπροσωπεύει την πραγματική αξιοποιήσιμη θερμοκρασία. Το εξαιρετικά χαμηλό Qrr¹⁵ του SiC SBDs είναι αποτελεσματικό στην μείωση των διακοπτικών απωλειών σε ένα τυπικό κύκλωμα ανύψωσης τάσης για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος με λειτουργία συνεχούς αγωγής (Boost Power Factor Correction circuit, Continuous Conduction Mode, Boost PFC CCM). Αυτό μειώνει τη θερμοκρασία περιβλήματος (case temperature) του MOSFET βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα του συστήματος και επιτρέποντας την μείωση του μεγέθους του MOSFET σε σχέση με το αντίστοιχο από πυρίτιο. Για να μετρηθεί το όφελος αυτών των ανορθωτών υψηλής απόδοσης, ένα 250 Watt κύκλωμα δοκιμής PFC από την Infineon Technologies ([70]) συγκρίνεται με μια υπερταχεία διάοδο πυριτίου καθώς επίσης και με μία

¹⁴ PiN : Μία διάδος με ελαφριά πρόσμιξη της περιοχής μεταξύ ενός ημιαγωγού τύπου p και ενός ημιαγωγού τύπου n

¹⁵ Qrr : Το φορτίο ανάστροφης αποκατάστασης

SiC. Όταν το κύκλωμα χρησιμοποιεί μία δίοδο SiC παρατηρείτε μια συνολική μείωση των διακοπτικών απωλειών της τάξεως του 27% σε σύγκριση με την χρήση διόδου Si. Σε κατάσταση πλήρους φορτίου, η απόδοση του κυκλώματος φθάνει το 93% για την δίοδο SiC σε αντίθεση με το 90% του κυκλώματος που χρησιμοποιεί δίοδο Si.

Καρβίδιο του πυριτίου

Αν και υπάρχουν περίπου 170 γνωστές κρυσταλλικές δομές (polytypes) του SiC, μόνο δύο (4H-SiC και 6H-SiC) είναι διαθέσιμες εμπορικά. Η κρυσταλλική δομή 4H-SiC είναι προτιμότερη από την 6H-SiC για τις περισσότερες εφαρμογές ηλεκτρονικών επειδή έχει υψηλότερη και πιο ισοτροπική κινητικότητα ηλεκτρονίων από ότι η δομή 6H-SiC.

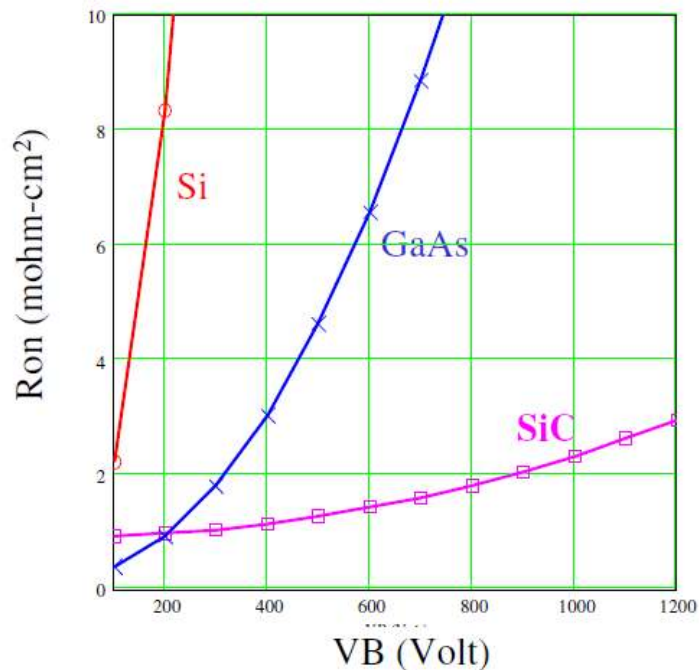
Πίνακας 7.1 Βασικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του Si, GaAs, και 4H-SiC

Ιδιότητα	Πυρίτιο	GaAs	4H-SiC
Δυναμικό Χάσματος, E_g (eV)	1.12	1.5	3.26
Κινητικότητα ηλεκτρονίων, μ_n (cm^2/Vs)	1400	9200	800
Κινητικότητα των οπών, μ_p (cm^2/Vs)	450	400	140
Εγγενής συγκέντρωση φορέα, n_i (cm^{-3}) σε 300 K	1.5×10^{10}	2.1×10^6	5×10^{-9}
Ταχύτητα κορεσμένων ηλεκτρονίων, v_{nsat} ($\times 10^7 \text{ cm/s}$)	1.0	1.0	2.0
Κρίσιμη διάσπαση του ηλεκτρικού πεδίου, E_{crit} (MV/cm)	0.25	0.3	2.2
Θερμική αγωγιμότητα, Θ (W/cm·K)	1.5	0.5	3.0 – 3.8

Ο Πίνακας 7.1 συγκρίνει τις βασικές ηλεκτρονικές ιδιότητες των 4H-SiC με το Si και GaAs. Η υψηλότερη τιμή διάσπασης του ηλεκτρικού πεδίου του υλικού SiC δίνει την δυνατότητα χρήσης του SiC SBDs σε εύρος 600-2000V. Πιο συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του SiC είναι τα εξής:

- Η 10 φορές υψηλότερη τιμή διάσπασης του ηλεκτρικού πεδίου του SiC μειώνει την ειδική αντίσταση αγωγής σε σχέση με το Si και GaAs SBDs. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 7.1. Στα 600V, ένα SiC SBD προσφέρει μια R_{on} της τάξεως του $1,4 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$, η οποία είναι σημαντικά, μικρότερη από $6.5 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$ για GaAs SBD και $73 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$ για ένα Si SBD. Αυτό σημαίνει ότι το SiC SBD θα έχει πολύ μικρότερο αποτύπωμα.
- Τα αποτελέσματα υψηλότερων ενεργειακών διακένων σε μεγαλύτερο φράγμα δυναμικού μέταλλο-ημιαγωγού Schottky σε σύγκριση με το GaAs και το Si, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλά ρεύματα διαρροής σε υψηλότερες θερμοκρασίες διεπαφής λόγω της μειωμένης εκπομπής θερμοϊονικών ηλεκτρονίων πάνω από το πεδίο φραγμού.

- Η πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα του υλικού SiC μειώνει τη θερμική αντίσταση του στρώματος του ημιαγώγιμου υλικού (die).



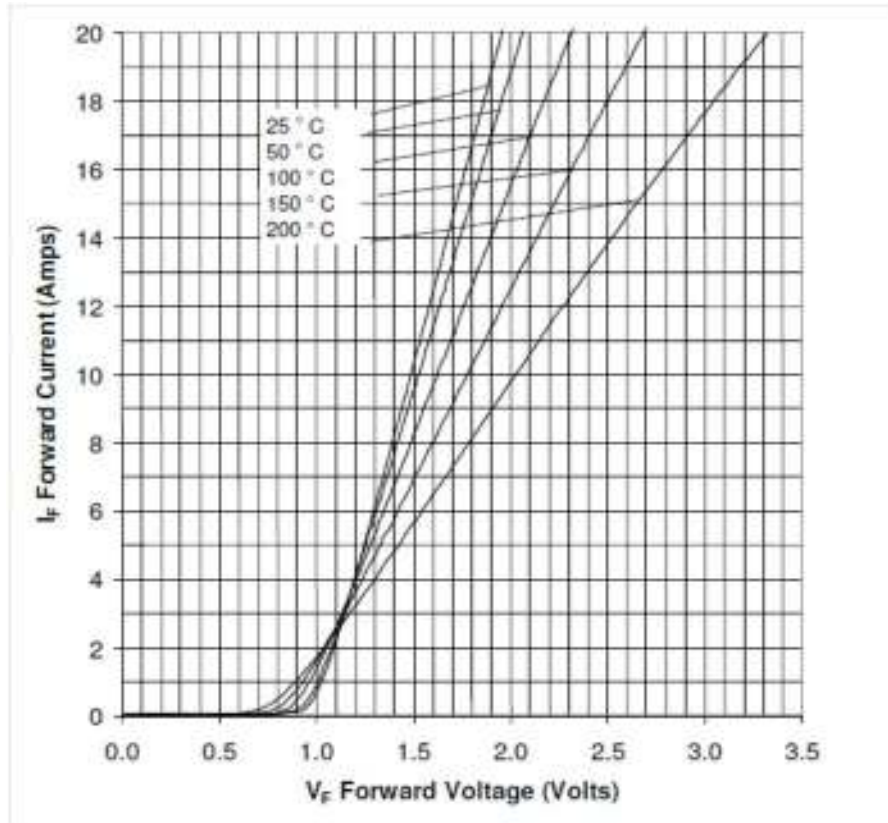
Σχήμα 7.1 Ειδική αντίσταση αγωγής του Si, GaAs και 4H-SiC SBDs ως συνάρτηση της τάσης διάσπασης.

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος που λειτουργούν στην περιοχή τάσης των 600-1200V χρησιμοποιούν σήμερα διόδους πυριτίου PiN, οι οποίες τείνουν να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες φορέων φορτίων μειονότητας όταν βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής. Το αποθηκευμένο φορτίο πρέπει να αφαιρεθεί από τον ανασυνδυασμό των φορέων πλειονότητας πριν η διάοδος μεταβεί σε κατάσταση αποκοπής. Αυτό προκαλεί μεγάλους χρόνους αποθήκευσης και σβέσης. Τα κύρια οφέλη της SiC SBD οφείλονται στην ικανότητά της να μεταβεί από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής (switch) γρήγορα (<50 ns), με σχεδόν μηδενικό φορτίο ανάστροφης αποκατάστασης και σε λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας επαφής. Η 600V SBDs GaAs μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά η χρήση της μειώνεται λόγω των περιορισμών όσο αφορά στην λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας επαφής και με 5 φορές μεγαλύτερο αποτύπωμα για το ίδιο εκτιμώμενο ρεύμα. Οι συγκρίσιμοι διόδοι πυριτίου PiN έχουν ένα φορτίο ανάστροφης αποκατάστασης της τάξης των 100 - 500 nC και χρειάζονται τουλάχιστον 100 ns για να μεταβούν σε κατάσταση αποκοπής. Αυτό επιβαρύνει άλλα διακοπτικά στοιχεία του συστήματος όσον αφορά στην απαιτούμενη ασφαλή αγωγή της περιοχής λειτουργίας και τις διακοπτικές απώλειες που αναπτύσσονται.

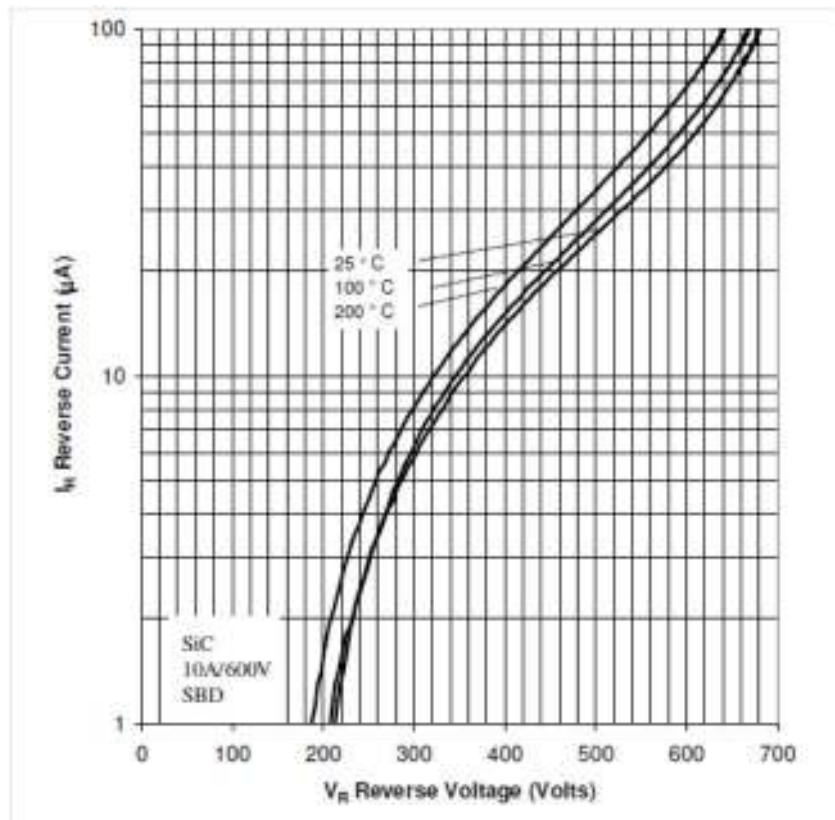
7.2 Χαρακτηριστικές της διόδου Schottky από SiC

Το σχήμα 7.2 δείχνει μια τυπική χαρακτηριστική μίας 10A/600V 4H-SiC SBD με παράμετρο την θερμοκρασία. Η αντίσταση αγωγής αυξάνεται με τη θερμοκρασία, λόγω της μείωσης της κινητικότητας των ηλεκτρονίων σε υψηλές θερμοκρασίες. Η διάδος διαρρέεται από ρεύμα 10A για V_F της τάξης του 1,5V στους 25°C. Το ρεύμα μειώνεται σε περίπου 5.7A με την ίδια V_F στους 200°C. Αυτός ο αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος αγωγής, κάνει δυνατή την παράλληλη ύπαρξη περισσότερων του ενός στρώματος ημιαγωγού σε ένα πακέτο χωρίς να δημιουργηθεί θέμα άνισης κατανομής του ρεύματος. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει από τις διόδους υψηλής τάσης Si PIN. Το σχήμα 7.3 δείχνει τις χαρακτηριστικές κατά την ανάστροφη πόλωση της διόδου Schottky για 10A / 600V. Το τυπικό ρεύμα διαρροής είναι λιγότερο από 50 μ A στα 600V στους 25°C, το οποίο αυξάνεται σε 70 μ A στους 200°C - μια μεγάλη αύξηση για ένα τέτοιο ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Οι ημιαγωγοί αυτοί έχουν συσκευαστεί σε πλαστικά πακέτα TO-220 με θερμική αντίσταση 1,1°C/W. Η καμπύλη μείωσης του ρεύματος αγωγής συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβλήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 7.4. Αυτή η καμπύλη έχει χαραχθεί στη μέγιστη θερμοκρασία επαφής ίση με 175°C. Για την περίπτωση θερμοκρασίας μέχρι 150°C, η θερμοκρασία επαφής παραμένει κάτω από 175°C. Όταν η θερμοκρασία περιβλήματος είναι πάνω από 150°C, το ρεύμα θα πρέπει να υποστεί μείωση για να διατηρηθεί η θερμοκρασία επαφής κάτω από 175°C.

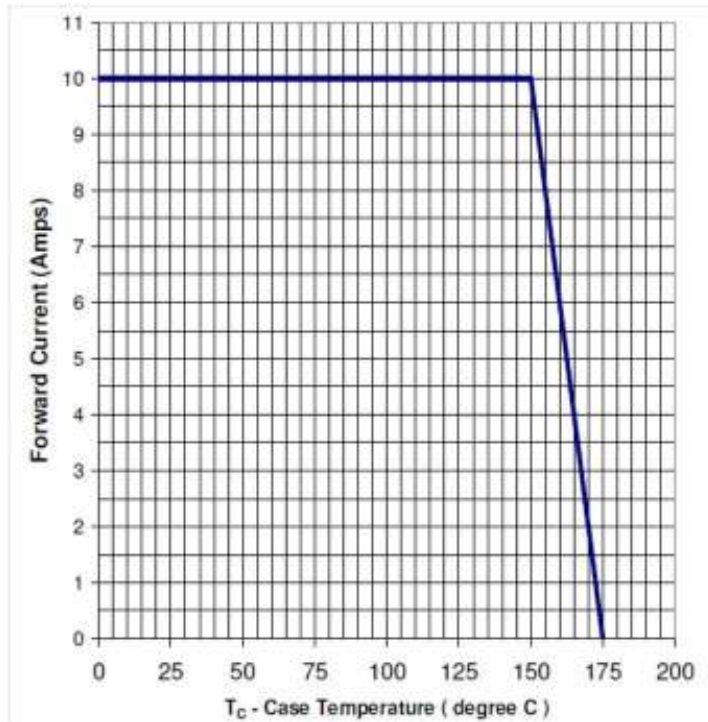


Σχήμα 7.2 Τοπικές χαρακτηριστικές μιας 10A/600V 4H-SiC SBD της εταιρείας CREE με παράμετρο την θερμοκρασία.

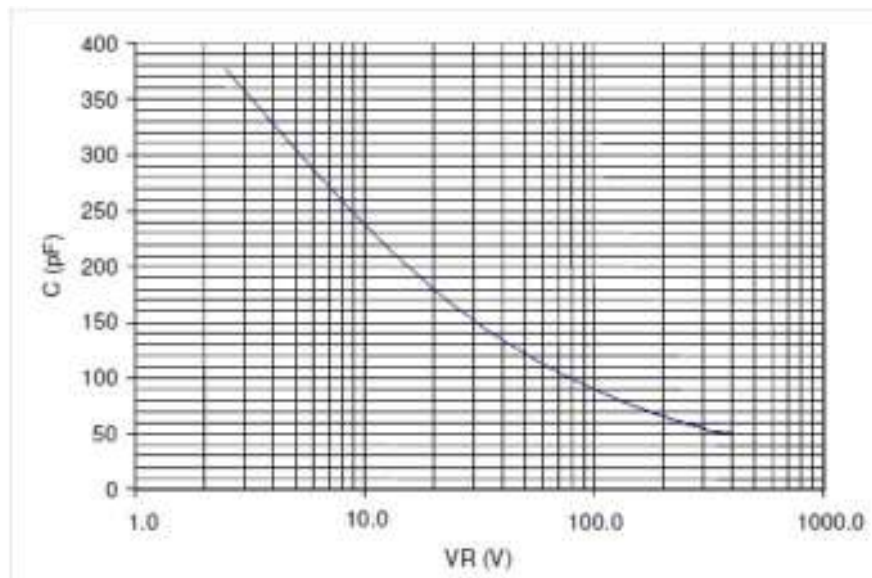


Σχήμα 7.3 Οι χαρακτηριστικές ανάστροφης πόλωσης μιας 10A/600V 4H-SiC SBD της εταιρείας CREE.

Η καμπύλη χωρητικότητας συναρτήσει της ανάστροφης τάσης φαίνεται στο σχήμα 7.5. Στα 10V ανάστροφης πόλωσης, η χωρητικότητα εισόδου είναι περίπου 240 pF, η οποία πέφτει στα 90 pF σε 100V και φθάνει σε κορεσμό στα 50 pF πάνω από 300V. Αυτή η χωρητικότητα μπορεί να συγκριθεί με δίοδο Si Schottky χαμηλής τάσης.

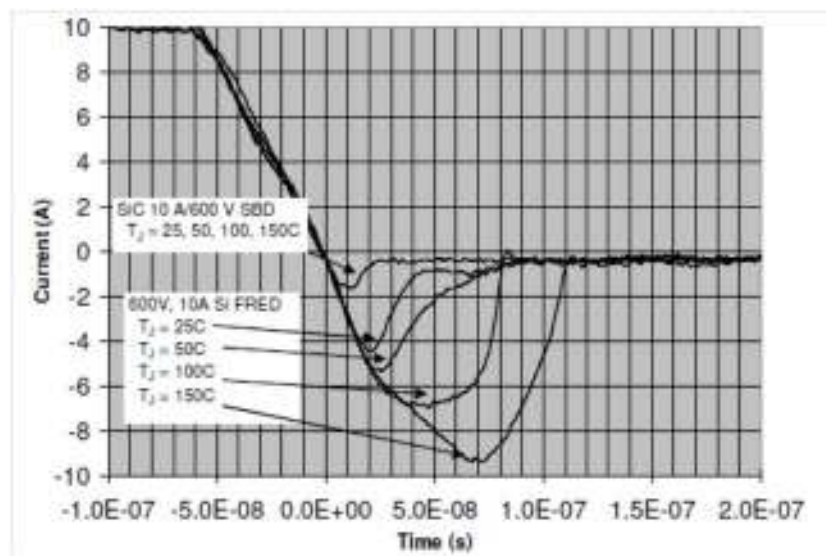


Σχήμα 7.4 Μείωση του ρεύματος αγωγής συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβλήματος για 10A/600V SiC SBD. της εταιρείας CREE



Σχήμα 7.5 Η καμπύλη χωρητικότητας συναρτήσει της ανάστροφης τάσης για το 10 A/600 V SiC SBD της εταιρείας CREE.

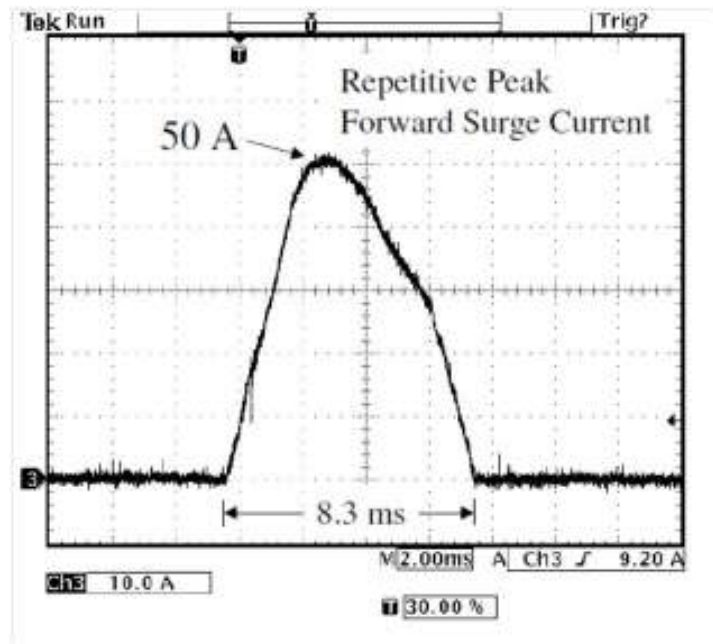
Στο σχήμα 7.6 συγκρίνονται οι χαρακτηριστικές αποκοπής-σβέσης μεταξύ της 10A/600V 4H-SiC SBD της εταιρείας CREE και της Si FRED¹⁶ της εταιρείας IXYS σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η δίοδος SiC, ως ημιαγωγός φορέων πλειονότητας, δεν έχει κανένα αποθηκευμένο φορέα μειονότητας. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης που συνδέεται με την παροδική αποκοπή της διόδου Schottky. Ωστόσο, υπάρχει μια μικρή ποσότητα ρεύματος μετατόπισης που απαιτείται για την φόρτιση της χωρητικότητας επαφής Schottky (<2 A), η οποία είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία, το επίπεδο ρεύματος και το ρυθμό di/dt. Σε αντίθεση με τη SiC SBD, η Si FRED παρουσιάζει ένα μεγάλο ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης, το οποίο αυξάνει δραματικά με τη θερμοκρασία, το ρεύμα αγωγής και τον ανάστροφο (reverse) ρυθμό di / dt. Για παράδειγμα, το Qrr του Si FRED είναι περίπου 160 nC σε θερμοκρασία δωματίου και αυξάνεται σε περίπου 450 nC στους 150°C. Η υπερβολικά μεγάλη τιμή του Qrr αυξάνει τις διακοπτικές απώλειες και επιβαρύνει σημαντικά τον διακόπτη και την δίοδο στο τυπικό κύκλωμα διόρθωσης συντελεστού ισχύος PFC ή στις εφαρμογές ελέγχου κινητήρων.



Σχήμα 7.6 Κυματομορφή μεταγωγής σε κατάσταση αποκοπής της 10A/600V SiC SBD σε σύγκριση με την Si FRED (IXYS DSEI 12-06A).

Σε μια διακοπτική εφαρμογή, η δίοδος θα υποβληθεί σε ρεύματα κορυφής που είναι μεγαλύτερα από το μέσο ονομαστικό ρεύμα της συσκευής. Το σχήμα 7.7 παρουσιάζει ένα επαναλαμβανόμενο απότομο ρεύμα κορυφής των 50A κατά την αγωγή στους 25°C για την 10A/600 V SiC SBD. Αυτό το ημιτονοειδές μισό κύμα της μέτρησης των 60 Hz δείχνει ένα επαναληπτικό ρεύμα κορυφής 5 φορές μεγαλύτερο του μέσου όρου.

¹⁶ FRED : Μία επιταξιακή δίοδος γρήγορης αποκατάστασης



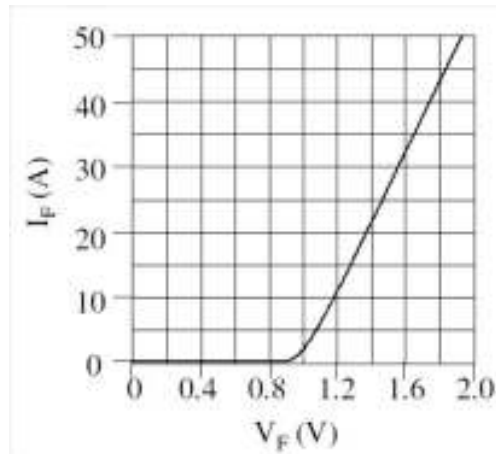
Σχήμα 7.7 Επαναλαμβανόμενο απότομο ρεύμα κορυφής στους 25 °C χρησιμοποιώντας μισό ημιτονοειδές κύμα (CREE)

Τα τελευταία πέντε χρόνια η ποιότητα των υποστρωμάτων του ημιαγωγικού υλικού SiC έχει παρουσιάσει συνεχή βελτίωση. Τώρα είναι δυνατόν να κατασκευαστούν μεγαλύτερες περιοχές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (chips). Το σχήμα 7.8 δείχνει ένα παράδειγμα ενός ενιαίου SiC SBD ολοκληρωμένου κυκλώματος, ισχύος 600V/30A. Ο ημιαγωγός έδειξε ένα ρεύμα διαρροής των 70 μA σε μια ανάστροφη πόλωση 600V. Όπως αναφέρθηκε πριν, ο αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος καθιστά δυνατό τον παραλληλισμό διάφορων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε ένα ενιαίο πακέτο χωρίς την αντιμετώπιση προβλημάτων στην κατανομή του ρεύματος. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 7.9, όπου τρία ολοκληρωμένα κυκλώματα του τύπου που φαίνονται στο σχήμα 7.8 έχουν συσκευαστεί μαζί για να προσφέρουν ένα μέρος των 80A/600V. Αυτό το πακέτο είχε ένα ρεύμα διαρροής των 125 μA σε 600V και 25 °C. Αυτό αποδεικνύει ότι η τεχνολογία SiC SBD είναι επεκτάσιμη σε υψηλότερα ρεύματα. Ενώ το υλικό συνεχώς βελτιώνεται, εξαρτήματα με σχετικά υψηλό ρεύμα διατίθενται παραλληλίζοντας αρκετά chips σε μια συσκευασία.

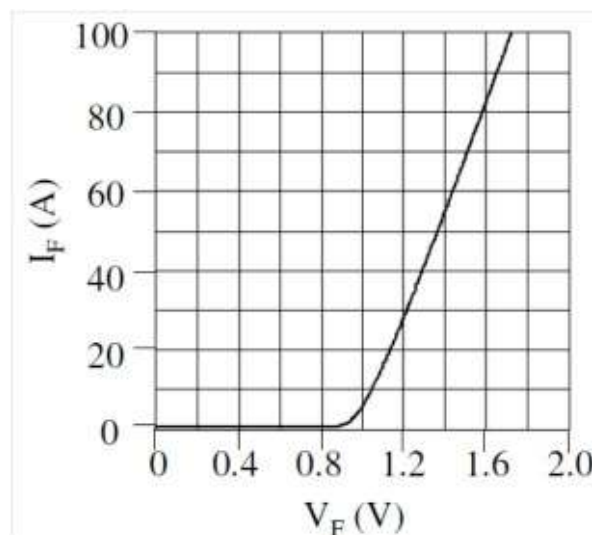
7.3 Μελέτες αξιοπιστίας της διόδου Schottky από SiC

Το SiC είναι εγγενώς ένα πολύ ισχυρό και αξιόπιστο υλικό. Τα 600V SBDs έχουν υποστεί εκτεταμένες δοκιμές αξιοπιστίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παράδειγμα για την αξιοπιστία του εξαρτήματος SiC. Μέχρι σήμερα οι διόδοι έχουν συμπληρώσει ένα σύνολο

145.000 ωρών λειτουργίας σε δοκιμές υψηλής θερμοκρασίας ανάστροφης πόλωσης (High Temperature Reverse Bias, HTRB), 11.000 ώρες λειτουργίας σε δοκιμές συνεχούς ρεύματος τύπου "burn in"¹⁷, και 35.000 ώρες λειτουργίας σε δοκιμές "κύκλου ισχύος" χωρίς αποτυχίες.



Σχήμα 7.8 Ολοκληρωμένο κύκλωμα (single chip) SiC 600 V / 30 A Schottky Diode Barrier.



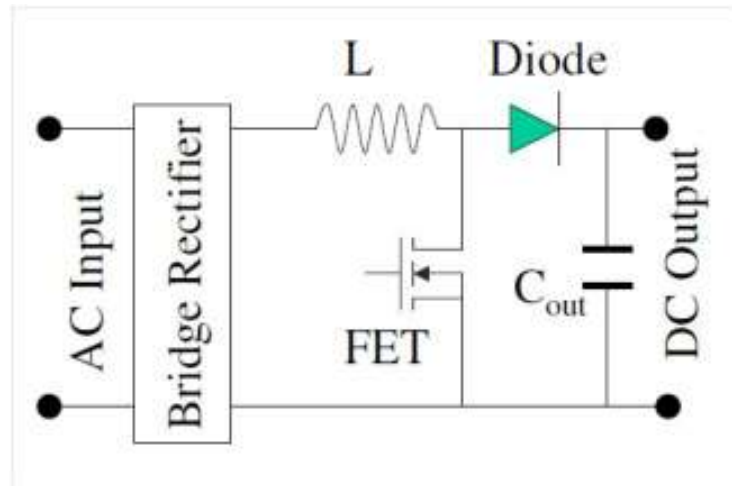
Σχήμα 7.9 Δίοδοι SiC 80 A / 600 V αποτελούμενοι από τρία ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Στην δοκιμή HTRB εμπλέκονται επτά ξεχωριστές παρτίδες με τις συνθήκες δοκιμής των 600V DC σε θερμοκρασία 200°C. Η δοκιμή τύπου "burn in" πραγματοποιήθηκε στο ονομαστικό ρεύμα της συσκευής, με τη θερμοκρασία επαφής του εξαρτήματος στους 200°C. Η δοκιμή κυκλικής λειτουργίας αποτελείται από on/off κύκλους των 7 λεπτών (3,5 λεπτά on / 3,5 λεπτά off) με το ρεύμα αγωγής να καθορίζεται από το ονομαστικό ρεύμα του ημιαγωγού, με μέγιστη θερμοκρασία επαφής ίση με 175°C και με μεταβολή της θερμοκρασίας επαφής μεγαλύτερη των 100°C κατά τη διάρκεια του κύκλου.

¹⁷ "burn in" : είναι η διαδικασία με την οποία τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα ενός συστήματος δοκιμάζονται σε υψηλή θερμοκρασία και αυξημένη τάση πριν τεθούν σε λειτουργία

7.4 Διόρθωση συντελεστή ισχύος (PFC)

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές για ανορθωτές SiC Schottky στο εγγύς μέλλον είναι το κύκλωμα διόρθωσης συντελεστή ισχύος (PFC) στη λειτουργία συνεχούς αγωγής (CCM). Στις συνηθισμένες off-line εφαρμογές, τα τροφοδοτικά AC-DC χρησιμοποιούνται σε υπολογιστικές και τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, η είσοδος AC βλέπει ένα μεγάλο επαγωγικό φορτίο (μετασχηματιστής) το οποίο οδηγεί σε συντελεστή ισχύος σημαντικά χαμηλότερο από 1. Ένα κύκλωμα PFC επιτρέπει στη γραμμή εισόδου AC να δει τον σχεδόν μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, όπως απαιτείται από τις νέες νομικές απαιτήσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10, τεμαχίζοντας το πλήρες κύμα της ανορθωμένης εισόδου με ένα γρήγορο διακόπτη (MOSFET), και στη συνέχεια σταθεροποιώντας την προκύπτουσα κυματομορφή DC χρησιμοποιώντας ένα πυκνωτή ολοκληρώνει αυτή τη λειτουργία. Όταν το MOSFET είναι σε κατάσταση αγωγής, είναι αναγκαίο να αποτραπεί η ροή ρεύματος από τον πυκνωτή εξόδου ή το φορτίο μέσω του MOSFET. Ως εκ τούτου, όταν το FET είναι σε κατάσταση αγωγής, η δίοδος είναι σε αποκοπή, και το αντίστροφο. Κατά τη διάρκεια της παροδικής μεταγωγής όταν η δίοδος μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής και το MOSFET άγει, το ανάστροφο ρεύμα αποκατάστασης από τη δίοδο εκβάλλει στο MOSFET, πέραν του ανορθωμένου ρεύματος εισόδου. Αυτό οδηγεί σε ένα μεγάλο ρεύμα εκκίνησης (inrush current) στο MOSFET, απαιτώντας ένα MOSFET σημαντικά μεγάλου μεγέθους, από ότι απαιτείται, εάν η δίοδος δεν είχε ανάστροφο ρεύμα αποκατάστασης. Αυτό το μεγάλο MOSFET αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό κόστος σε αυτό το κύκλωμα. Αυτές οι διακοπτικές απώλειες περιορίζουν τη συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος, και ως εκ τούτου το κόστος, το μέγεθος, το βάρος και τον όγκο του. Η χρήση υψηλότερης συχνότητας θα επέτρεπε το μέγεθος των παθητικών εξαρτημάτων να είναι αντίστοιχα μικρότερο. Πολλοί γρήγοροι ανορθωτές πυριτίου, δείχνουν επίσης, "νευρώδης" ("snappy") ανάστροφη αποκατάσταση, που έχει ως αποτελέσματα την εμφάνιση σημαντικής Ηλεκτρομαγνητικής Παρενόχλησης (Electromagnetic Interference), κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές. Ένας γρήγορος ανορθωτής με ομαλά διακοπτικά χαρακτηριστικά (ημιαγωγοί ως διακόπτες) θα επιτρέψει την κατασκευή κυκλωμάτων PFC υψηλής απόδοσης, που επίσης συμμορφώνονται με τις νέες νομικές απαιτήσεις.

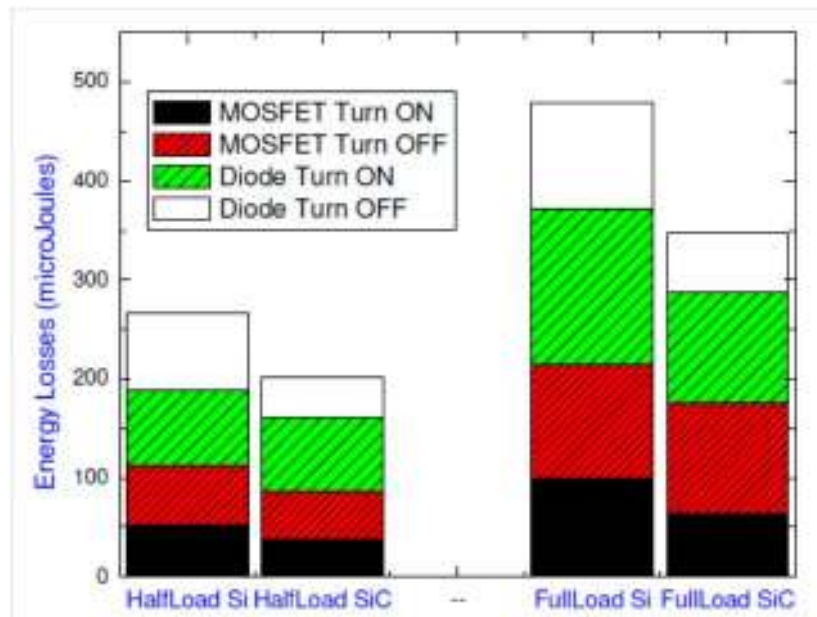


Σχήμα 7.10 Απλοποιημένο κύκλωμα διόρθωσης συντελεστή ισχύος.

Μια δίοδος 4H-SiC είναι σαν ανορθωτής. Η σχεδόν μηδενική ανάστροφη αποκατάσταση του ανορθωτή SiC Schottky προσφέρει χαμηλές απώλειες μεταγωγής, ενώ εξακολουθεί να εμφανίζεται συγκρίσιμος σε απόδοση στην κατάσταση αγωγής με τους συμβατικούς ανορθωτές πυριτίου. Λόγω των ιδιοτήτων κίνησης των φορέων πλειονότητας αυτών των ανορθωτών, παρουσιάζουν μόνο χωρητικό ρεύμα κατά τη διάρκεια της μεταβατικής αποκοπής τους, το οποίο ρέει μέσα από το MOSFET ισχύος. Για να μετρηθεί το όφελος αυτών των ανορθωτών υψηλής απόδοσης, χρησιμοποιήθηκε ένα 250Watt κύκλωμα δοκιμών PFC από την Infineon Technologies για να συγκριθεί μια υπερταχεία δίοδος πυριτίου με μία δίοδο SiC Schottky.

Αυτό το κύκλωμα δοκιμής χρησιμοποίησε ένα 14A, 500V IR MOSFET (IRFP450), και μια 6A, 600V υπερταχεία δίοδο IR PiN Si (HFA08TB60). Η τάση εισόδου διατηρήθηκε σταθερή στα 120V RMS, και η τάση εξόδου ήταν 370V DC. Η συχνότητα λειτουργίας ήταν 90 kHz, και η αντίσταση της πύλης στο MOSFET ήταν 50Ω. Το ονομαστικό ρεύμα (current rating) του MOSFET ήταν υψηλότερο από το μέσο ρεύμα (average rating) για να δώσει το ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης της δίοδου, και να διατηρήσει μια υψηλή απόδοση του κυκλώματος. Υπό συνθήκες πλήρους φορτίου, μια αντίσταση 600Ω χρησιμοποιήθηκε, ενώ υπό συνθήκες μισού φορτίου, χρησιμοποιήθηκε μια αντίσταση των 1200Ω. Οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος έγιναν τόσο για το MOSFET καθώς και για την δίοδο, προκειμένου να υπολογιστούν οι απώλειες ισχύος σε αυτά τα εξαρτήματα. Η ισχύς εισόδου και εξόδου μετρήθηκε για τον υπολογισμό της απόδοσης του κυκλώματος. Υπό συνθήκες πλήρους φορτίου, η θερμοκρασία στο περίβλημα του MOSFET μετρήθηκε με και χωρίς εξωτερικό ανεμιστήρα στη συσκευή. Μετά από όλες αυτές τις μετρήσεις που έγιναν χρησιμοποιώντας

υπερταχεία Si δίοδο, επαναλήφθηκαν χρησιμοποιώντας 4A, 600V SiC SBD (CSD04060) της Cree.

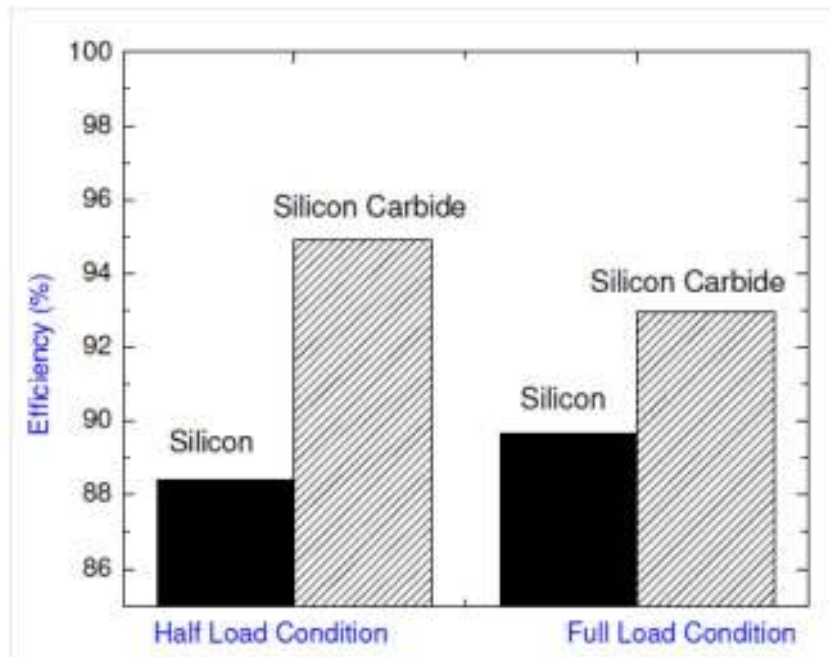


Σχήμα 7.11 Σύγκριση των διακοπτικών απωλειών στα κυκλώματα PFC με Si και SiC δίοδους.

Το σχήμα 7.11 δείχνει τη σύγκριση των διακοπτικών απωλειών ενέργειας ανά διακοπτικό κύκλο στο MOSFET και στην δίοδο υπό συνθήκες μισού φορτίου και πλήρους φορτίου. Επιπλέον, οι απώλειες κατά την αγωγή και την αποκοπή σε κάθε εξάρτημα διαχωρίζονται. Υπό συνθήκες μισού φορτίου, οι συνολικές απώλειες μεταγωγής μειώνονται κατά περίπου 25% από 266 mJ σε 200mJ όταν η δίοδος Si αντικαθίσταται από την SiC SBD. Η μείωση κατά 50% των απωλειών κατά την μετάβαση σε αποκοπή της δίοδου και η μείωση κατά 27% των απωλειών κατά την μετάβαση σε αγωγή του MOSFET είναι κυρίως υπεύθυνες για την συνολική μείωση των απωλειών όταν μία SiC Schottky δίοδος χρησιμοποιείται στο κύκλωμα, σε σύγκριση με την περίπτωση όπου μια Si δίοδος χρησιμοποιείται. Οι απώλειες κατά την αποκοπή του MOSFET και οι απώλειες αγωγής της δίοδου είναι παρόμοιες όταν οι δίοδοι Si και SiC χρησιμοποιούνται σε αυτό το κύκλωμα.

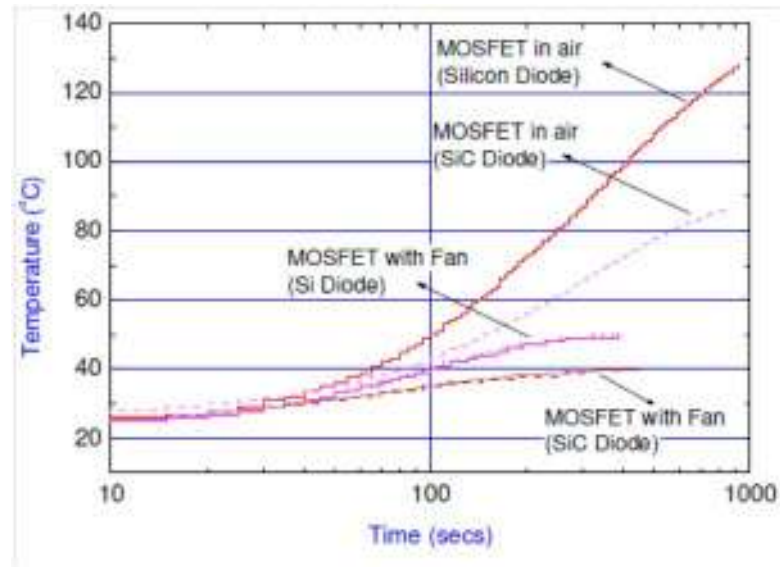
Υπό συνθήκες πλήρους φορτίου, οι απώλειες κατά την αποκοπή της δίοδου μειώνονται κατά 44%, οι απώλειες αγωγής του MOSFET μειώνονται κατά 39%, και οι απώλειες αγωγής της δίοδου μειώνονται κατά 29%, όταν μια δίοδος SiC χρησιμοποιείται σε αυτό το κύκλωμα, σε σύγκριση με την περίπτωση όπου μια δίοδος Si χρησιμοποιείται. Οι απώλειες κατά την αποκοπή του MOSFET παραμένουν παρόμοιες και στις δύο περιπτώσεις. Η συνολική μείωση του 27% σε διακοπτικές απώλειες μετριέται όταν το κύκλωμα χρησιμοποιεί μια δίοδο SiC σε σύγκριση με μια δίοδο Si. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι απώλειες κατά την αγωγή της δίοδου

είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με διόδους Si PiN κάτω από συνθήκες πλήρους φορτίου εξαιτίας της βραδύτερης διαδικασίας αγωγής σε μια δίοδο PiN σε σύγκριση με μία δίοδο SiC Schottky όταν διαρρέονται από υψηλότερο ρεύμα λειτουργίας. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι η κυρίαρχη μείωση των απωλειών μεταγωγής εμφανίζεται λόγω των μικρών απωλειών αναστροφής αποκατάστασης στη δίοδο SiC σε σύγκριση με την περίπτωση που έχουμε διόδους Si.



Σχήμα 7.12 Σύγκριση της συνολικής απόδοσης του PFC με Si και SiC διόδους.

Το σχήμα 7.12 παρουσιάζει τη σύγκριση της μετρούμενης απόδοσης ολόκληρου του κυκλώματος PFC όταν χρησιμοποιούνται διόδους Si και SiC. Σε συνθήκες μισού φορτίου, η απόδοση του κυκλώματος αυξάνεται από 88,4% με δίοδο Si σε 95% με δίοδο SiC. Σε κατάσταση πλήρους φορτίου, η απόδοση του κυκλώματος αυξάνεται από 90% με δίοδο Si σε 93% με δίοδο SiC. Φαινομενικά, οι ελαφρώς υψηλότερες απώλειες στην κατάσταση αγωγής του SiC SBD έχουν ως αποτέλεσμα τη σχετικά μικρότερη αύξηση στη συνολική απόδοση του κυκλώματος σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους φορτίου.



Σχήμα 7.13 Η θερμοκρασία περιβλήματος του MOSFET σε ένα κύκλωμα PFC με διόδους Si και SiC

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζεται η μετρούμενη θερμοκρασία περιβλήματος του MOSFET ως συνάρτηση του χρόνου μετά την αρχική ενεργοποίηση. Αρχικά, τα εξαρτήματα ήταν σε θερμική ισορροπία σε θερμοκρασία δωματίου. Η μέτρηση αυτή διεξήχθη σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Δύο συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις αυτές:

- α) η πρώτη ήταν χωρίς σταθερή θέση και χωρίς ανεμιστήρα, για την ψύξη του περιβλήματος (κατάσταση "στον αέρα") και
- β) η δεύτερη ήταν με ένα τέτοιο ανεμιστήρα.

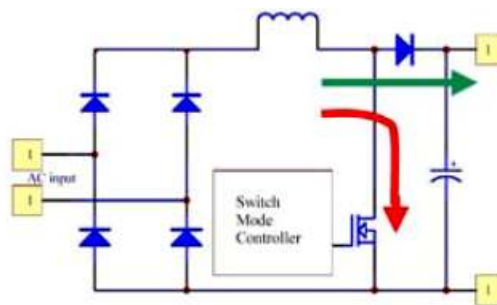
Χωρίς ανεμιστήρα, η θερμοκρασία δεν σταθεροποιείται ακόμα και μετά από 15 λεπτά παροχής ισχύος του κυκλώματος. Ωστόσο, η θερμοκρασία στο MOSFET ήταν 41°C χαμηλότερη (86°C έναντι 127°C) όταν ένα SiC SBD χρησιμοποιήθηκε σε σύγκριση με την περίπτωση όπου μία διάδος Si χρησιμοποιήθηκε. Όταν ο ανεμιστήρας είχε χρησιμοποιηθεί για την κατάλληλη θερμική απαγωγή, η θερμοκρασία περιβλήματος του MOSFET ήταν μόνο 40°C όταν ένα SiC SBD χρησιμοποιήθηκε σε σύγκριση με 50°C, όταν μια διάδος PiN Si χρησιμοποιήθηκε. Αυτό αυξάνει το θερμικό περιθώριο ασφαλείας ("headroom") το οποίο είναι απαραίτητο για πιο αξιόπιστη λειτουργία του κυκλώματος.

Με βάση τις μετρήσεις που παρουσιάζονται παραπάνω, τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος που προσφέρονται από τα SiC SBDs έναντι των διόδων Si PiN σε ένα κύκλωμα PFC είναι:

- α) η υψηλότερη απόδοση του κυκλώματος και
- β) η χαμηλότερη θερμοκρασία περιβλήματος του FET

Τα πλεονεκτήματα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν πολύ αποτελεσματικά για τη μείωση του κόστους του κυκλώματος. Για μια συγκεκριμένη απόδοση, μια υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερα (και ως εκ τούτου φθηνότερα) πηνία και MOSFETs, τα οποία είναι συνήθως τα πιο ακριβά εξαρτήματα στο κύκλωμα PFC. Για την ίδια θερμοκρασία περιβλήματος, ένα μικρότερο και φθηνότερο MOSFET και απαγωγείς θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο κύκλωμα. Ένα άλλο απλό τροποποιημένο κύκλωμα για την μείωση των συνολικών απωλειών του κυκλώματος προϋποθέτει την μείωση της αντίστασης της πύλης του MOSFET. Μια υψηλότερη αντίσταση πύλης χρησιμοποιείται στο τυπικό PFC κύκλωμα, προκειμένου να περιοριστεί ο ρυθμός di/dt στην δίοδο Si PIN, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικό ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης, και εκπομπές EMI. Από τότε που τα SiC SBDs μπορούν να λειτουργούν με υψηλό ρυθμό di / dt , μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη αντίσταση πύλης MOSFET. Μια τέτοια τροποποίηση θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών κατά την αποκοπή του MOSFET, η οποία έδειξε μικρή αλλαγή με την άμεση αντικατάσταση της SiC SBD με δίοδο PiN Si στο κύκλωμα PFC που περιγράφεται παραπάνω.

Παρακάτω γίνεται σύγκριση της απόδοσης μίας διόδου SiC με εναλλακτικές διόδους Si σε μία βαθμίδα ανύψωσης από την εταιρεία Vincotech. Στη σύγκριση τα ενεργά μέρη της βαθμίδας ανύψωσης του PFC συγκρίνονται με 230VAC εισόδου και 400VDC εξόδου σε 2kW ισχύς εισόδου. Η είσοδος του ανορθωτή και του τσοκ δεν περιλαμβάνονται στη σύγκριση.



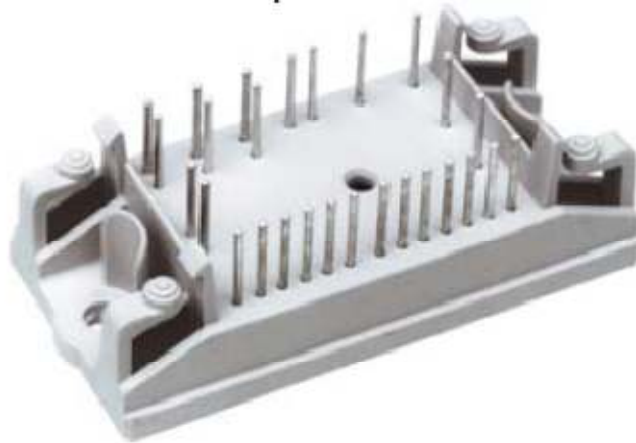
Σχήμα 7.14 Στάδιο ανύψωσης του PFC

Τα ακόλουθα εξαρτήματα συγκρίνονται:

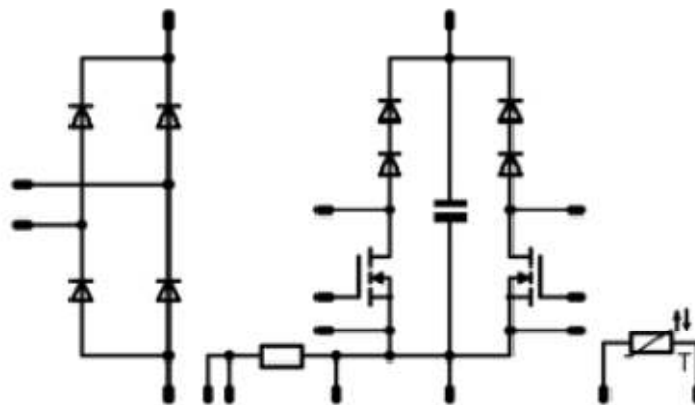
Σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις δοκιμών, ένα CoolMOS™ MOSFET χρησιμοποιείται ως τρανζίστορ μεταγωγής μαζί με διαφορετικές διόδους του μετατροπέα ανύψωσης:

- γρήγορο FRED 600V σε τεχνολογία Si
- 2 γρήγορα FRED 300V σε τεχνολογία Si συνδεδεμένα σε σειρά
- δίοδος SiC

Τα εξαρτήματα για την συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης συναρμολογούνται, σαν γυμνά στρώματα ημιαγωγού σε μια μονάδα ροής ισχύος Vincotechs PFC0.



Σχήμα 7.15 Tyco Electronics module: V23990-P800-D30



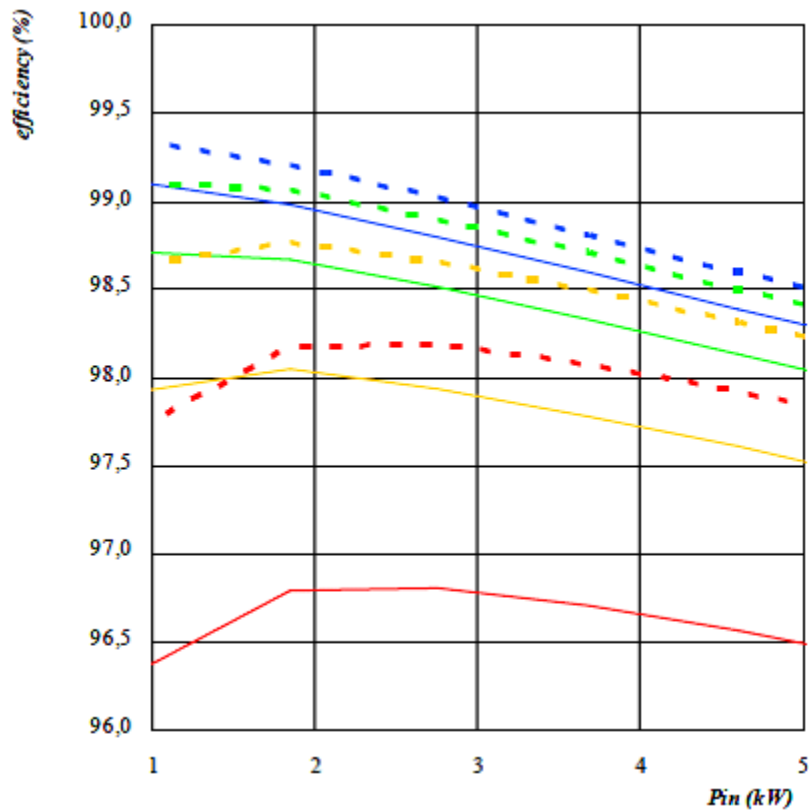
Σχήμα 7.16 Διάγραμμα του flowPFC0. Στο σημείο αναφοράς μόνο 1 φάση ανύψωσης χρησιμοποιείται

Ενιαία Hyperfast FRED

Η ακόλουθη σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ:

- μονάδα ελέγχου Vincotechs: MOS-FET: SIPC44N50C3 Ανορθωτής: ενιαία Si-FRED FD120N60 (συμπαγής γραμμή)
- Βασική λειτουργική μονάδα Vincotechs: V23990-P800-D30 (μόνο 1 φάση ανύψωσης χρησιμοποιείται) MOS-FET: SIPC44N50C3 Ανορθωτής: 2 παράλληλοι ανορθωτές SiC SIDC02D06SiC02 (διακεκομμένη γραμμή)

Το παρακάτω σχήμα 7.17 παρουσιάζει τη σύγκριση της απόδοσης σε μια PFC- εφαρμογή ανύψωσης ανάλογα με την τεχνολογία διόδων.



Σχήμα 7.17 Σύγκριση Απόδοσης: ενιαία υπερταχεία FRED έναντι διόδου SiC

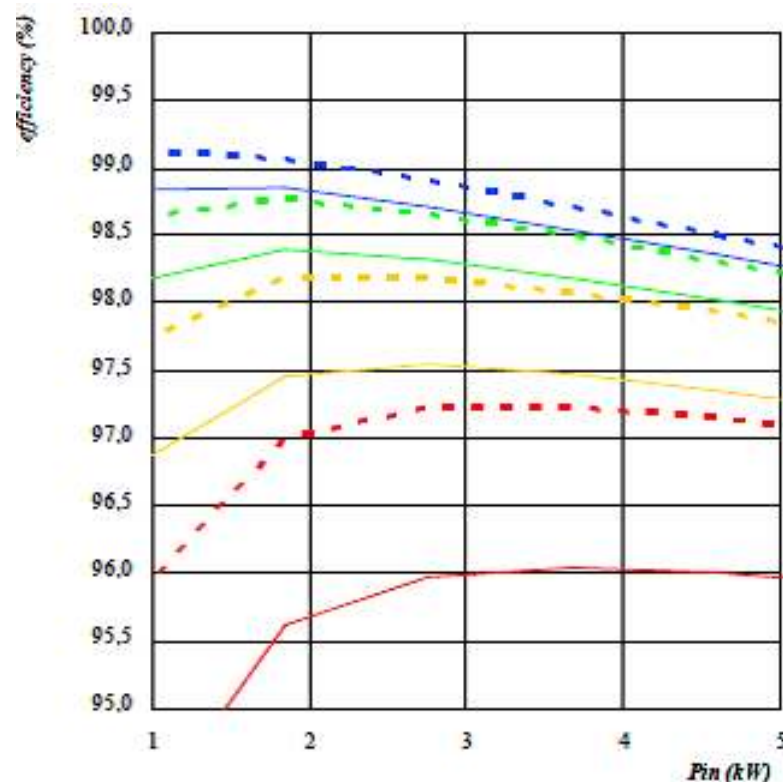
- 25kHz δίοδος SiC
- 50kHz δίοδος SiC
- 100kHz δίοδος SiC
- 200kHz δίοδος SiC
- _____ 25kHz δίοδος FRED
- _____ 50kHz δίοδος FRED
- _____ 100kHz δίοδος FRED
- _____ 200kHz δίοδος FRED

Στα 50kHz, οι απώλειες του βασικού κυκλώματος είναι ήδη 32% υψηλότερες. Στα 100kHz, η απόδοση του κυκλώματος με δίοδο SiC είναι 98,7% σε σύγκριση με το κύκλωμα με τις διόδους Si που είναι μόνο 98%. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στο κύκλωμα με την βασική τεχνολογία είναι περίπου 59% υψηλότερες. Στα 200kHz οι απώλειες της βασικής τεχνολογίας είναι 76% υψηλότερες. Αυτό πρακτικά αποκλείει την βασική τεχνολογία Si για συχνότητες πάνω από 100kHz.

Δύο γρήγορα 300V Fred's

Η ακόλουθη σύγκριση γίνεται μεταξύ:

- Βασική λειτουργική μονάδα Vincotechs: V23990-P803-D30 (μόνο 1 φάση ανύψωσης χρησιμοποιείται) MOS-FET: SIPC44N50C3 (CoolMOS) Ανορθωτής: 2 x γρήγορα Si-FRED (συμπαγής γραμμή)
- Vincotechs μονάδα: V23990-P800-D30 (μόνο 1 φάση ανύψωσης χρησιμοποιείται) MOS-FET: SIPC44N50C3 (CoolMOS) Ανορθωτής: 2 παράλληλοι ανορθωτές SiC SIDC02D06SiC02 (διακεκομμένη γραμμή)



Σχήμα 7.18 Σύγκριση Απόδοσης: 2 εν σειρά γρήγορες FRED 300V έναντι διόδου SiC

----- 50kHz δίοδος SiC	----- 50kHz δίοδος FRED
----- 100kHz δίοδος SiC	----- 100kHz δίοδος FRED
----- 200kHz δίοδος SiC	----- 200kHz δίοδος FRED
----- 400kHz δίοδος SiC	----- 400kHz δίοδος FRED

Η σύνδεση των 2 γρήγορων διόδων 300V σε σειρά είναι η 1η εναλλακτική λύση. Αυτή η λύση παρουσιάζει πολύ μικρότερες απώλειες από το κύκλωμα με μία ενιαία δίοδο Si (Σχήμα 7.18). Ωστόσο, σε 100kHz, οι απώλειες είναι ήδη και πάλι κατά 31% υψηλότερες από ότι με μια SiC δίοδο. Στα 200kHz, οι απώλειες χρησιμοποιώντας μια SiC δίοδο είναι 39% χαμηλότερες και σε 400kHz 46% χαμηλότερες.

EMC / EMI

Ο ηλεκτρικός θόρυβος και η αντιστάθμιση του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη εν λόγω εφαρμογή. Η προσπάθεια για το φιλτράρισμα ηλεκτρομαγνητικού θορύβου σε εφαρμογές που συνδέονται με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος εκτιμάται σε περίπου 20% έως 30% του συνολικού κόστους. Το ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης σε εφαρμογές "hard-switching" είναι μια από τις κύριες πηγές του EMC / EMI. Χρησιμοποιώντας SiC Schottky διόδους, είναι δυνατό να διευκολυνθεί σημαντικά το φιλτράρισμα του θορύβου. Η επίλυση του προβλήματος του EMI αποτελεί ξεχωριστό στάδιο ανάπτυξης μετά την επιλογή των ημιαγωγών. Αυτό καθιστά δύσκολη την σύγκριση της αναλογίας κόστους-οφέλους. Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές με γρήγορες μεταγωγές, η διάδος SiC αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή της, αν το φιλτράρισμα της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης ληφθεί υπόψη.

7.5 Συμπεράσματα

Τα θεωρητικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας SiC είναι προφανή. Η νέα τεχνολογία υπόσχεται νέα προϊόντα ημιαγωγών με μια συμπεριφορά πολύ κοντά σε αυτή των ιδανικών εξαρτημάτων:

- Η πτώση τάσης ορθής πόλωσης μειώνεται: Οι στατικές απώλειες είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με ημιαγωγούς Si με το ίδιο μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος (chip). Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση όσον αφορά τις στατικές απώλειες.
- Υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας: Η θερμοκρασία λειτουργίας των συσκευών SiC ήδη εκτείνεται σε θερμοκρασίες > 225 °C. Αλλά στη θεωρία, πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες είναι επίσης δυνατές.
- Εξαιρετικά χαμηλό Q_{rr} : Δεν υπάρχει σχεδόν κανένα φορτίο ανάστροφης αποκατάστασης (Q_{rr}) αποθηκευμένο σε μια διάοδο SiC. Το Q_{rr} μιας διακοπτικής διόδου, ελεύθερης ροής, προκαλεί επιπλέον απώλειες στο διακόπτη και είναι μια βασική αιτία για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης (EMC/EMI).
- Χαμηλό ρεύμα διαρροής: Το ρεύμα διαρροής ενός ημιαγωγού SiC είναι πολύ χαμηλό και δεν αυξάνεται σημαντικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Αυτή τη στιγμή δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση όλων των δυνατοτήτων της τεχνολογίας SiC σε πραγματικά νέα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος.

Οι λόγοι είναι οι εξής.

- Μέσα σε ένα περιβάλλον εξοικονόμησης κόστους, η υψηλή τιμή αγοράς είναι πάντα το 1ο εμπόδιο για κάθε νέα τεχνολογία. Το κόστος ανά όγκο των εξαρτημάτων του SiC είναι 2 ψηφία υψηλότερο από εκείνο των εξαρτημάτων του Si με την ίδια περιοχή chip (chip area).
- Συνήθως, οι δυνατότητες υψηλής θερμοκρασίας της τεχνολογίας SiC θα μπορούσαν να οδηγήσουν επίσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες απαγωγών θερμότητας. Ωστόσο, άλλα στοιχεία που είναι τοποθετημένα στον ίδιο απαγωγέα θερμότητας είναι διαθέσιμα μόνο σε τεχνολογία Si με στάνταρ διαβάθμιση θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
- Επίσης, η υψηλή T_j -max δεν προσφέρει μεγάλα πλεονεκτήματα σε πραγματικές εφαρμογές. Μια υψηλότερη θερμοκρασία επαφής θα επιτρέψει θεωρητικά υψηλότερη διαβάθμιση ισχύος, η οποία με τη σειρά της αυξάνει την διακύμανση της θερμοκρασίας (temperature swing) του εξαρτήματος. Η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων με συγκόλληση και με συνδετικό καλώδιο (soldered and wire bonded components) εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Στα περισσότερα πακέτα, είτε το ολοκληρωμένο κύκλωμα συγκολλημένο ή το συνδεδεμένο σύρμα, είναι που περιορίζει τη διάρκεια ζωής και όχι το ίδιο το ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- Περιορισμένη ισχύς: Σήμερα, ο αριθμός των αποτυχιών ανά mm^2 σε ένα υπόστρωμα ημιαγωγίμου υλικού SiC είναι πολύ υψηλότερος από ότι για την τεχνολογία Si. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται το μέγεθος του ολοκληρωμένου κυκλώματος για να επιτευχθεί μια αποδεκτή απόδοση.
- Τα χαρακτηριστικά για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα των διόδων είναι περίπου 20A/600V. Για εφαρμογές που υπερβαίνουν την τιμή αυτή, θα πρέπει να παραλληλιστούν diodes.

Επίσης οι ημιαγωγοί SiC παρουσιάζουν ιδανική δυναμική συμπεριφορά. Σε εφαρμογές "hard-switching"¹⁸, οι απώλειες αγωγής του τρανζίστορ εξαρτώνται κυρίως από την αντίστοιχη diode. Και εδώ είναι όπου η diode SiC είναι σε θέση να μειώσει τις απώλειες μεταγωγής στο τρανζίστορ, αφού το ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης της diode θα πρέπει να προστεθεί στο ονομαστικό διακοπτικό ρεύμα. Αυτό το ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης όχι μόνο αυξάνει τις απώλειες, αλλά είναι επίσης η κύρια πηγή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης στην εφαρμογή.

¹⁸ "hard-switching": γρήγορες διακοπτικές μεταβολές (fast on/off times) με επαγωγικό φορτίο. Οι μεταβολές αυτές δημιουργούν αιχμές τάσεις.

8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”

Η βιομηχανία των ημιαγωγών ισχύος κινείται προς την τεχνολογία ημιαγωγών υψηλού ενεργειακού διακένου που παρέχει εγγενώς ικανές συσκευές υψηλής θερμοκρασίας, υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας. Μετατροπείς ισχύος, που επιβάλλονται από την υψηλή απόδοση, πυκνότητα υψηλής ισχύος καθώς και από απαιτήσεις της αγοράς κινούνται προς ολοκληρωμένα, και τυποποιημένα συστήματα.

Οι κύριες πτυχές που καλύπτονται σε αυτήν την πτυχιακή μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Οι ιδιότητες του ημιαγωγού SiC παρουσιάζονται και η συσκευή ισχύος VJFET βασισμένη σε SiC βρίσκεται υπό έρευνα προς τη βέλτιστη εφαρμογή της στους μετατροπείς ισχύος. Ειδικότερα:
 - Το SiC έχει μεγαλύτερη τάση διάσπασης ηλεκτρικού πεδίου (οκτώ φορές περισσότερο από το Si). Αυτό επιτρέπει πολύ μικρότερες δομές ημιαγωγών ισχύος (περιοχές ολίσθησης). Μικρές περιοχές ολίσθησης επιτρέπουν την κατασκευή εξαρτημάτων SiC με πολύ χαμηλή αντίσταση R_{DS} (ON) απαγωγού-πηγής σε σύγκριση με τις ημιαγωγούς Si. Η εφαρμογή του πρόσφατου SiC υψηλής τάσης JFET με λιγότερο από 400mΩ R_{ON} και 1500V_{DS} ($\leq 12 \text{ m}\Omega\text{cm}^2 @ 1500\text{V}$) οδηγεί στη μείωση των απωλειών της κατάστασης αγωγής του DC/DC μετατροπέα (κάτω από 35W @ 1kW). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διακοπτικές απώλειες ισχύος είναι μόνο 15W.
 - Η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα (τρεις φορές περισσότερη από το Si) επιτρέπει την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας και επιτρέπει την καλύτερη ψύξη και τη διαχείριση της θερμοκρασίας. Με τη βέλτιστη χρήση διαβάθμισης της υψηλής θερμοκρασίας από την μονάδα στο περιβάλλον, ο όγκος του μετατροπέα ισχύος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και οι μηχανικοί ανεμιστήρες μπορούν να εξαλειφθούν.
 - Το υψηλότερο ενεργειακό διάκενο (τρεις φορές μεγαλύτερο απ' ότι του Si) επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες επαφής και επιτρέπει την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος μέσω του εξαρτήματος SiC. Ο μετατροπέας συντονισμού επαναφοράς (resonant reset converter) έδειξε την ικανότητα λειτουργίας υψηλής θερμοκρασίας επαφής της συσκευής (πάνω από 260°C), και τη δυνατότητα να αντικατασταθούν διάφοροι διακόπτες Si από

τον ενιαίο διακόπτη SiC. Η προτεινόμενη προσέγγιση απλοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως πρώτο βήμα προς τις ενσωματωμένες μονάδες ηλεκτρονικών ισχύος.

- Η υψηλά κορεσμένη ταχύτητα ολίσθησης ηλεκτρονίων (High saturated electron drift velocity) (δύο φορές μεγαλύτερη από το Si) σε συνδυασμό με το πολύ μικρό μέγεθος του στρώματος του ημιαγωγού (20 φορές μικρότερο από τις αντίστοιχα ονομαστικές συσκευές βασισμένες στο πυρίτιο) επιτρέπει την κατασκευή των υπερταχύτατων συσκευών μετατροπής. Τα SiC JFETs παρουσιάζουν περιορισμένη δυνατότητα οδήγησης της πύλης (λιγότερο από 300pF @ 0-20V) και πολύ υψηλούς ρυθμούς μεταβολής (slew rates) της τάσης κατά την μετάβαση αγωγής και αποκοπής (μπορεί να φθάσει σε 60kV/us). Η εφαρμογή του SiC JFET στο μετατροπέα ισχύος μειώνει τις απώλειες μεταγωγής ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες μεταγωγής. Συνολικά οι διακοπτικές απώλειες είναι περίπου 30W σε πλήρες φορτίο και η συχνότητα μεταγωγής 200 kHz.
2. Μια ιδέα για να αξιοποιηθούν τα ειδικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων SiC έχει βρεθεί. Συγκεκριμένα:
 - Αποδείχθηκε ότι η πλήρης αξιοποίηση των ανώτερων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των εξαρτημάτων SiC είναι δυνατή εάν ο μετατροπέας σχεδιάζεται ρητά για αυτό. Η απλή αντικατάσταση των διακοπών ισχύος Si από το αντίστοιχο SiC δεν θα φέρει τα αναμενόμενα πλεονεκτήματα. Μόνο βελτιστοποίηση σε επίπεδο συστήματος και η σύγκριση είναι εφικτή.
 3. Δύο νέες προσεγγίσεις για την οδήγηση των SiC JFETs: - η "σταθερή πόλωση DC " και " η επέκταση του Cascode "προτείνονται για τη μελλοντική ένταξη τους στις μονάδες ισχύος και για λειτουργίες υψηλών θερμοκρασιών και υψηλών συχνοτήτων.
 4. Ένας πρωτότυπος πίνακας μετατροπέα συντονισμού επαναφοράς (Realized resonant reset converter) με εφαρμογή ανορθωτών SiC VJFET και SiC σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για την πειραματική επαλήθευση. Όλοι οι μετατροπείς DC/DC με υλικό SiC παρουσιάζουν τις ακόλουθες βελτιώσεις σε σχέση με των αντίστοιχων μετατροπέων με υλικό Si.
 - Αύξηση της ικανότητας ισχύος από 50-100W έως 1kW (δέκα φορές).
 - Εξάλειψη των περιοριστών ρεύματος ή τάσης, απομαγνήτιση των κυκλωμάτων και επέκταση του ενεργού κύκλου (80% λιγότερα εξαρτήματα και πολυπλοκότητα).
 - Αύξηση της διακοπτικής συχνότητας και απόκτηση μηδενικής τάσης λειτουργίας (Zero Voltage Switching, ZVS).

5. Το SiC είναι ένα ελκυστικό υλικό για υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας εφαρμογές. Ένα αναλυτικό μοντέλο DIMOS (doubly-implanted MOS) έχει αναπτυχθεί. Η δομή της συσκευής προτείνεται για τον έλεγχο του μοντέλου σε υλικό 4H-SiC. Κοντά στην περιοχή κορεσμού παρατηρείται η επίδραση στο DIMOS. Τα αποτελέσματα κοντά στην περιοχή κορεσμού επιβάλλονται στην απόσταση του p-φορέα και στην πρόσμιξη της περιοχής ολίσθησης βοηθώντας στην επίτευξη της δομής της συσκευής για το επιθυμητό επίπεδο ρεύματος και την τάση διάσπασης. Μια αξιοσημείωτη αλλαγή παρατηρείται από τις μετρούμενες χαρακτηριστικές της εξόδου και της μεταφοράς σε υψηλή θερμοκρασία. Μια μεγάλη αλλαγή της τάσης κατωφλίου λαμβάνεται κατά τη μέτρηση. Οι παράμετροι SPICE προέρχονται από τα μετρήσιμα δεδομένα, και αναπτύσσεται ένα μοντέλο συμπεριφοράς SPICE για το 4H-SiC DIMOS. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ταιριάζουν πολύ καλά με τα αντίστοιχα των μετρήσεων.
6. Τα SiC SBDs προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με διόδους πυριτίου PiN στις εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως τα κυκλώματα PFC. Τα SiC SBDs είναι εμπορικά διαθέσιμα στα 600-1200V, 1-10A και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σήμερα για την βελτίωση των επιδόσεων του κυκλώματος PFC βελτιώνοντας την απόδοση, μειώνοντας τις απώλειες μεταγωγής στη δίοδο και το MOSFET, μειώνοντας την θερμοκρασία περιβλήματος του MOSFET και τη μείωση του αριθμού των MOSFETs. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην απλούστευση ή ακόμη και να εξαλείψουν τα κυκλώματα προστασίας, μειώνοντας το μέγεθος του απαγωγέα θερμότητας (ψήκτρα), ή αυξάνοντας την συχνότητα και μειώνοντας το μέγεθος των μαγνητικών εξαρτημάτων. Σε ένα τυπικό 250W PFC κύκλωμα, μια συνολική μείωση της τάξεως του 27% σε διακοπτικές απώλειες μετριέται όταν το κύκλωμα χρησιμοποιεί μια δίοδο SiC σε σύγκριση με μια δίοδο Si. Σε κατάσταση πλήρους φορτίου, η απόδοση του κυκλώματος αυξάνεται από 90% με τη δίοδο Si σε σύγκριση με το 93% με τη δίοδο SiC.
7. Για εφαρμογές PFC με χρήση μετατροπέα ανύψωσης με διακοπτικές συχνότητες μεγαλύτερες από τα 150kHz, οι διόδους SiC είναι μια καλή και οικονομικά αποδοτική λύση. Για συχνότητες από 20kHz και 150kHz, δύο διόδους Si σε σειρά είναι η καλύτερη επιλογή μεταξύ απόδοσης και κόστους. Η βασική δίοδος Si έχει ήδη ξεπεραστεί σε συχνότητες >25kHz. Σε ειδικές εφαρμογές, όπως οι αποδοτικοί αντιστροφείς για φωτοβολταϊκές εφαρμογές, οι διόδους SiC είναι ήδη καλύτερη επιλογή σε χαμηλότερες συχνότητες. Πολλά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας SiC δεν

μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ισχύος του σήμερα. Ωστόσο, σημαντικά πλεονεκτήματα μπορούν να υλοποιηθούν σε γρήγορες εφαρμογές ισχύος μεταγωγής:

- Η τεχνολογία SiC θα βελτιώσει την απόδοση και θα μειώσει την EMC / EMI.
- Η υψηλότερη απόδοση θα μειώσει το μέγεθος του απαγωγέα θερμότητας.
- Η μειωμένη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση και ο μειωμένος θόρυβος θα μειώσει τα εξαρτήματα του φίλτρου.
- Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω χαρακτηριστικών θα μειώσει το κόστος των μηχανικών και παθητικών εξαρτημάτων και το μέγεθος της ηλεκτρονικής συσκευής.
- Το μειωμένο μέγεθος και η αυξημένη απόδοση θα προσθέσει αξία για την εφαρμογή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Afanasev V., Bassler M., Pensl G. and Schulz M., “Intrinsic SiC/SiO₂ Interface States”, *Physica Status Solidi* 1997
- [2] Brown, D. M., Ghezzi M, Kretchmer J, Downey E, Pimbley J and Palmour, IEEE *Trans. Electron Devices*, 1994 pages: 618-620.
- [3] Heindl J., Strunk H., Heydemann P and Pensl G., “Micropipes: Hollow Tubes in Silicon Carbide”, *Physica Status Solidi* ,1997, pages: 162-251.
- [4] Neudeck P.G., Okojie R. S., and Chen L.-Y., "High-Temperature Electronics - A Role for Wide Band-gap Semiconductors?" *Proceedings of the IEEE*, 2002 vol. 90, no. 6, pages: 1065-1076.
- [5] Neudeck P.G., “SiC Technology”, NASA Lewis Research Center”, 1998
- [6] Neudeck P., Huang W., Dudley M., and Fazi C., “Non-Micropipe Dislocations in 4H SiC Devices: Electrical Properties and Device Technology Implications”, *Wide-Band-gap Semiconductors for High Power, High Frequency and High Temperature*, Materials Research Society, 1998, Warrendale, USA
- [7] Purdue Wide Band Gap Research, Purdue University, www.ecn.purdue.edu/WBG/
- [8] Shenai K. R.S. Scott and J. Baliga, “Optimum semiconductor for high power electronics”, *IEEE Transactions in Electron Devices*, 1989, vol.36, pages: 1811-1823
- [9] Si W., and Dudley M., “Study of Hollow-Core Screw Dislocations in 6H-SiC and 4H-SiC Single Crystals”, *Silicon Carbide, III-Nitrides, and Related Materials*, Materials Science Forum 1998, pages: 264-268, Switzerland.
- [10] SiCED Electronics Development GmbH & Co. KG, Gunther-Scharowsky-Str.19, 1058 Erlangen, Germany - www.siced.de
- [11] Tairov, Y. M. and Tsvetkov V. F., “Investigation of Growth Processes of Ingots of Silicon Carbide Single Crystals”, *Journal of Crystal Growth* 1978 vol. 43 page 209.
- [12] Agarwal, A.K., Damsky, B., Richmond, J., Krishnaswami, S., Capell, C., Sei-Hyung Ryu., Palmour, J.W., “The first demonstration of the 1 x 1 cm SiC thyristor chip”, *Power Semiconductor Devices and ICs, ISPSD*, 2005, pages:195 - 198.
- [13] Agarwal A K et al., “Turn-off performance of 2.6 kV 4H-SiC asymmetrical GTO Thyristor”, *Semiconductor Science Technology*, 2004 vol. 16. pages:260-262

- [14] Alok D. and Baliga J., "High voltage (450V) 6H-SiC substrate gate JFET (SG-JFET)", International Physics Conference, 1995, pages: 749-752, Japan
- [15] Allerbrand B., "Gate control and system aspects of silicon carbide JFETs", PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002
- [16] Casady J. B., Agarwal A.K., "Silicon carbide power MOSFET technology", International Symposium on Compound Semiconductor 1997, pages:359 - 362
- [17] Chinthavali M., Tolbert L., "4H-SiC GTO Thyristor and p-n Diode Loss Models for HVDC Converter" Oak Ridge National Laboratory IEEE 2004
- [18] Chow T. P.: "SiC Bipolar Power Devices in MRS Bulletin" 2005
- [19] Fairchild R., Snyder R.B., Berlin C.W. and Sarma D.H.R., "Emerging Substrate Technologies for Harsh Environment Automotive Electronics Applications", SAE Technical Paper Series, 2002
- [20] NASA Glenn Research Report 2002, Glenn Research Centre. Lewis Field, Cleveland Ohio 2002
- [21] Friedrichs P., "SiC Transistors - Characteristics, Technology, Developments Status and Outlook", SiC Forum 2006, European Centre for Power Electronics, ECPE2006, Nurnberg
- [22] Fujikawa K., Shibata K., Masuda T., Shikata S., Hayashi H., "800 V 4H-SiC RESURF-type lateral JFETs" Electron Device Letters, Vol25, 2004 pages:790 - 791
- [23] Griepentrog G, Maier R., "Modelling of Silicon Carbide (SiC) Power Devices for Electronic Switching in Low Voltage Applications" IEEE Power Electronics Specialists Conference APEC 2004, Aachen
- [24] Hatfeld C., Bilbro G., Allen S. and Palmour J., "DC I-V Characteristics and RF Performance of 4H-SiC JFET at 773K", IEEE Electron Devices, 1998, vol. 45, pages:2072-2074
- [25] Kaminski N., "Unipolare Leistungsbaulemente in Siliziumkarbid", PhD Thesis, Universitat Bremen, 2001
- [26] Konstantinov A., Ivanov P., "High voltage operation of field effect transistors in SiC" IEEE Electron Devices Letters, 1997, vol. 18, pages:521-522
- [27] Koo S.M., "Design and process issues of junction and ferroelectric field effect transistors in Silicon Carbide", 2004
- [28] Schoner A., Ostling M., "SiC power bipolar junction transistors - Modeling and improvement of the current gain" EPE05, 2005, Dresden
- [29] Mantooth H.A., Mojarradi M., Johnson R.W., "Emerging Capabilities in Electronics

- Technologies for Extreme Environments, Part I- High Temperature Electronics”, IEEE Power Electronics Society Newsletter , 2006, Vol. 18, pages:9-14
- [30] D. Bergogne, P. Bevilacqua, S. M'Rad, D. Planson, H. Morel, B. Allard, O. Brevet, “300°C operating junction temperature inverter leg investigations”, EPE 2005
- [31] Naefe J.E, Johnson R.W, Grzybowski R.R., “High Temperature Storage and Thermal Cycling Studies of Heraeus-Cermalloy thick Film and Dale Power Wirewound Resistors”, IEEE Components and Packaging Technology, 2002, pages:45-52.
- [32] Rozario L., Sadwick L., Hwu R. and King D., “Thermal Cycling Study of SiC BGJFETs”, International High Temp. Electronics Conference, 1998, pages: 324-330
- [33] Rodle T., “Can SiC MESFET replace Si LDMOS in High Power High Frequency Applications for Base-station Power Amplifiers”, SiC Forum 2006, European Centre for Power Electronics, ECPE 2006, Nurnberg
- [34] Salom J.S., Johnson R.W. and Palmer M., “Thick Film Hybrid Packaging Techniques for 500 °C Operation”, High Temp Electronics Conference, 1998, pages:103-108.
- [35] Schorner, R. Friedrichs P., Peters D., Mitlehner H., Weis B, Stephani D., "Rugged Power MOSFETs in 6H-SiC with blocking capability up to 1800V", ICSCRM,1999
- [36] Seshardri S., Hall W.B., Kotlas L.C. and Sanger, P.A., “100 kHz Operation of SiC Junction Controlled Thyristor (JCT) Switches used in All-SiC PWM Inverter”, Material Science Forum, 2002 Vols. 338-342, pages: 103-106.
- [37] Spry D., Neudeck P., et. All. "Electrical Operation of 6H-SiC MESFET at 500 C for 500 Hours in Air Ambient," IMAPS International High Temperature Electronics Conference, Santa Fe, 2004. USA
- [38] Sugawara Y., “Recent progress in SiC power device developments and application”, Power Semiconductor Devices and ICs ISPSD, 2003, pages:10 - 18.
- [39] Urushidani T., Kimoto T., Kobajashi S., „High Voltage (>1kV) SiC Schottky barrier diodes with low ON resistance” IEEE Electron device letters Nr 12 1993, pages: 548-550
- [40] Zappe S., Leone M., Yang F.and Obermeier E., “Charackterisation of silicon carbide JFETs with respect to Microsystems for high temperature applications”, Microsystems Technologies, 1997, vol.3, pages 134-138
- [41] Zappe S., Obermeier E., “Advanced SPICE-modeling of 6H-SiC JFETs including substrate effects”, High Temp. Electronics Conference, 1998, pages:261-264

- [42] Chen R., Van Wyk J. D., Wang, S., Lee F.C., „Improved Passive Filter Configurations for High-Frequency Conducted EMI in Power Electronics, EPE05, Keynote Paper, 2005, Dresden
- [43] Hofsajer I.W., Melkonyan A.N., Mantel M., Round S., Kolar J.W, “A simple, low cost gate drive method for practical use of SiC JFETs in SMPS”, Power Electronics Conference EPE’05, 2005, Dresden
- [44] Kappels H., Rupp R., Lorenz L., Zverev I., "SiC Schottky diodes: A Milestone in a hard switching applications", PCIM 2002 Nuremberg
- [45] Leen G. and Heffernan D., “Expanding Automotive Electronic Systems” IEEE Transactions on Computer Engineering, 2002, pages 88-93
- [46] Mazolla M, Casady J, Kelley R., “SiC Devices for Converter and Motor Drive Applications at Extreme Temperatures”, Aerospace Conference IEEE, 2006, pages: 1-6
- [47] Melkonyan A., Stadler I., “High Efficiency Power Converter using new SiC Devices for Harsh Environmental and Operating Conditions”, VDE Congress, Schlüsseltechnologie für nachhaltiger Energietechnik, 2004.
- [48] Myers B.A., Burns J.H. and Ratell J.M., “Embedded Electronics in Electro Mechanical Systems for Automotive Applications”, SAE Technical Paper Series, 2001
- [49] Ngo T. Q., IBM Power Technology Symposium 2002, IBM
- [50] Ohashi H., “Possibility of Power Electronics Paradigm Shift with Wide Band Gap Semiconductors”, Tokyo Institute of Technology, Material Science Forum, 2004 Vols. 457-460, pages: 21-26.
- [51] Ohashi H, “The progress in SiC Technology in Japan”, AIST Power Electronics Research Centre”, EPE05 SiC Workshop, 2005, Dresden
- [52] Schmid J., Buchholz B., Bende Ch., Engler A., Hardt Ch., Straub, Ph., „Review or advances on PV Systems technology”, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich 2001
- [53] Shenai K., “Silicon Carbide Power Converters for Next Generation Aerospace Electronics Applications”, National Aerospace Electronics Conference, 2000, pages: 516-523
- [54] Stefani D., “The Industrial Utilization of SiC Power Devices Aspects and Prospects”, European Power Electronics Conference, Presentation, EPE 2003, Toulouse.

- [55] NASA John H. Glenn Research Center, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC>, Lewis Field 21000 Brookpark Road
- [56] Synopsis Inc. Saber™, 700 East Middlefield Road, Mountain View, USA
- [57] A. Powell and L. Rowland, “SiC Materials-Progress, Status, and Potential Roadblocks,” Proc. IEEE, 2002: 90(6):942-55.
- [58] A. Elasser and T.P. Chow, “Silicon Carbide Benefits and Advantages for Power Electronics Circuits and Systems,” Proc. IEEE, 2002: 90(6): 969-86.
- [59] M. Bhatnagar and B. J. Baliga, “Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for Power Devices,” IEEE Trans. on Electron Devices, 40(3), pp. 645-655, March 1993.
- [60] C. Weitzel, J. Palmour, C. Carter, K. Moore, K. Nordquist, S. Allen, C. Thero, and Bhatnagar, “Silicon Carbide High-Power Devices”, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 43 no. 10, pp. 1732-1741, October 1996.
- [61] D. B. Slater, “Development of a high temperature SiC CMOS Technology”, SBIR abstract, Cree Research, Inc. Durham, NC, 1997.
- [62] J. N. Shenoy, J. A. Cooper, and M.. R. Melloch, “High-Voltage Double-Implanted Power MOSFET’s in 6H-SiC,” IEEE Electron Devices Letters, vol. 18, no. 3, pp. 93-95, 1997.
- [63] M. Hasanuzzaman and S. K. Islam, “Analytical Modeling of Vertical Double-Implanted Power MOSFET (DIMOS) in 4H-SiC,” Proceedings of Connecticut Symposium on Microelectronics & Optoelectronics, Connecticut, March 2002.
- [64] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, S. K. Islam, T. J. Theiss, “A Parametric Device Study for SiC Diodes in Vehicular Applications,” Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC02), Vancouver, Canada, September 24-29, 2002, pp. 1495-1499.
- [65] Y. S. Kim, and J. G. Fossum, “Physical DMOST Modeling for High-Voltage IC CAD,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 37, no. 3, pp.797-803, March 1990.
- [66] M. Andersson and P. Kuivalainen, “Physical Modelling of Vertical DMOS Power Transistors for Circuit Simulation,” Physica Scripta. vol. T54, pp. 157-158, 1994.
- [67] K. Shenai, “Effect of P-Base Sheet and Contact Resistances on Static Current-Voltage Characteristics of Scaled Low-Voltage Vertical Power DMOSFETs,” IEEE Electron Devices Letters, vol. 12, no. 6, pp. 270-272, June 1991.
- [68] M. Darwish, “Study of the Quasi-Saturation Effect in VDMOS Transistors,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 33, no.11, pp. 1710-1716, November 1986.
- [69] A. Agarwal et al, “The impact of 75mm plus SiC high quality substrates and epitaxial layers on high power semiconductor device rating,” Proc. the European

- Power Electronics and Applications Conference (EPE), Toulouse, France, September 2-4, 2003.
- [70] C. Miesner, R. Rupp, H. Kapels, M. Krach, and L. Zverev, "thinQ!_ Silicon Carbide Schottky Diodes: An SMPS Circuit Designer's Dream Comes True!," at http://www.infineon.com/cmc_upload/documents/027/313/WhitePaper_SiC.pdf.
- [71] Stuart Hodge Jr., Senior Member IEEE, Cree Inc. 2004
- [72] thinQ![™] Silicon Carbide Schottky Diodes: An SMPS Circuit Designer's Dream Comes True! Dr. Christian Miesner, Product Marketing Manager Silicon Carbide, Dr. Roland Rupp, Project Manager Development Silicon Carbide, Holger Kapels, Discrete Development Manager, Michael Krach, Project Manager Silicon Carbide, Dr. Ilia Zverev, Concept Engineering Manager
- [73] New Power Module Structure for Efficiency Improvement in Fast Switching - Power Applications (>50kHz, >1kW) Temesi, Zsady, Frisch Mar. 2005, Vincotechs
- [74] "Properties of Silicon Carbide (SiC)". Ioffe Institute. Retrieved 2009-06-06.
- [75] Harris, Gary Lynn (1995). *Properties of silicon carbide*. IET. p. 19; 170–180. ISBN 0-85296-870-1.
- [76] Bakin, Andrey S. (2006). *SiC materials and devices, vol. 1, edited by M. Shur, S. Rumyantsev, M. Levinshtein - Chap.: "SiC Homoepitaxy and Heteroepitaxy"*. World Scientific. pp. 43–76. ISBN 981-256-835-2.
- [77] Cheung, Rebecca (2006). *Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments*. Imperial College Press. p. 3. ISBN 1-86094-624-0.
- [78] Morkoç, H.; Strite, S.; Gao, G. B.; Lin, M. E.; Sverdlov, B.; Burns, M. (1994). "Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies". *Journal of Applied Physics* **76** (3): 1363. Bibcode 1994JAP....76.1363M. doi:10.1063/1.358463.
- [79] Muranaka, T. et al. (2008). "Superconductivity in carrier-doped silicon carbide" (free download). *Sci. Technol. Adv. Mater.* **9** (4): 044204. Bibcode 2008STAdM...9d4204M. doi:10.1088/1468-6996/9/4/044204.
- [80] Bhatnagar, M.; Baliga, B.J. (March 1993). "Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices". *IEEE Transactions on Electron Devices* **40** (3): 645–655. Bibcode 1993ITED...40..645B. doi:10.1109/16.199372.

- [81] Kriener, M. et al. (2008). "Superconductivity in heavily boron-doped silicon carbide" (free download). *Sci. Technol. Adv. Mater.* **9** (4): 044205. Bibcode 2008STAdM...9d4205K. doi:10.1088/1468-6996/9/4/044205.
- [82] Fuster, Marco A. (1997) "Skateboard grip tape", U.S. Patent 5,622,759
- [83] Bansal, Narottam P. (2005). *Handbook of ceramic composites*. Springer. p. 312. ISBN 1-4020-8133-2.
- [84] "Ceramics for turbine engines". Retrieved 2009-06-06.
- [85] "Dragon Skin – Most Protective Body Armor – Lightweight". Future Firepower. Retrieved 2009-06-06.
- [86] "Silicon Carbide". Ceramic Arts Daily.
- [87] "Top 10 Fast Cars". Retrieved 2009-06-06.
- [88] O'Sullivan, D.; Pomeroy, M.J.; Hampshire, S.; Murtagh, M.J. (2004). "Degradation resistance of silicon carbide diesel particulate filters to diesel fuel ash deposits". *MRS proceedings* **19** (10): 2913–2921. Bibcode 2004JMatR..19.2913O. doi:10.1557/JMR.2004.0373.
- [89] Whitaker, Jerry C. (2005). *The electronics handbook*. CRC Press. p. 1108. ISBN 0-8493-1889-0.
- [90] "Yellow SiC LED". Retrieved 2009-06-06.
- [91] Stringfellow, Gerald B. (1997). *High brightness light emitting diodes*. Academic Press. pp. 48, 57, 425. ISBN 0-12-752156-9.
- [92] Yeshvant V. Deshmukh (2005). *Industrial heating: principles, techniques, materials, applications, and design*. CRC Press. pp. 383–393. ISBN 0-8493-3405-5.
- [93] "Printmaking". Retrieved 2009-07-31.
- [94] de Heer, Walt A. (2010). "Epitaxial graphene". In Sattler, Klaus D. (free download). *Handbook of Nanophysics*. Taylor and Francis. ISBN 1-4200-7538-1. Retrieved 2009-07-31.
- [95] de Heer, Walt A. et al. (2007). "Epitaxial graphene" (free download). *Solid State Communications* **143** (1–2): 92. Bibcode 2007SSCom.143...92D. doi:10.1016/j.ssc.2007.04.023. Retrieved 2009-07-31.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για τη ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Αθήνα
Σεπτέμβριος – 2012