

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΡΒΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ SiC
(Silicon Carbide)



Της φοιτήτριας
ΜΑΛΕΣΚΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ
Αρ. Μητρώου 516080

Επιβλέπων
ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 02/09/23

Τίτλος Δ.Ε Μελέτη στους τύπους ημιαγωγών SiC

Κωδικός Π.Ε 23229

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/των Μαλέσκου Βασιλική

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Δημητριάδης Παναγιώτης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 20/05/22

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 02/09/23

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Δι.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Μαλέσκου Βασιλικής που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας της συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση της συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων τής συγγραφέα/δημιουργού, εκ μέρους του Τμήματος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Παναγιώτη Δημητριάδη 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 διαφόρων 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.

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των νέων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ισχύος, κατασκευασμένων από Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide, SC). Η πρόοδος στη σύγχρονη παραγωγή ενέργειας και στη τεχνολογία του διαστήματος απαιτεί τη δημιουργία ημιαγωγών, ικανών να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και κάτω από υψηλά επίπεδα ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Μία κατηγορία ημιαγωγών με βάση το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) ικανοποιεί και τις ανωτέρω απαιτήσεις. Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν οι τύποι των καρβιδίων (SiC), η χρησιμότητά τους, καθώς και οι πρακτική εφαρμογή τους στα ηλεκτρονικά ισχύος. Βάσει των δεδομένων από μελέτες που διεξήγαγαν ακαδημαϊκοί στο πεδίο των Ηλεκτρονικών Συστημάτων, θα αναλυθούν βασικά χαρακτηριστικά από τα πλεονεκτήματα χρήσης των καρβιδίων έναντι άλλων υλικών των ημιαγωγών.

Πίνακας περιεχομένων

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Κεφάλαιο I	1
1.1 Ιστορική αναδρομή	1
1.2 Κρυσταλλική δομή του Ανθρακοπυριτίου (Silicon Carbide).....	2
1.3 Οι ιδιότητες και εφαρμογές του Ανθρακοπυριτίου (Silicon Carbide)	4
1.3.1 Χημικές ιδιότητες	4
1.3.2 Άλλες Γενικές Ιδιότητες	6
1.3.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες & εφαρμογές	7
Κεφάλαιο II	10
2.1 Ορισμός των ημιαγωγών	10
2.2 Θεωρίες ανάπτυξης ημιαγωγών Silicon Carbide (ανθρακοπυριτίου).....	10
2.3 Θεωρία ανάπτυξης κρυστάλλων	11
2.4 Θεωρία μηχανικής του χάσματος ζώνης	13
2.5 Θεωρία της φυσικής της διάταξης	14
2.6 Σύγκριση θεωρημάτων και διαφορές	16
Κεφάλαιο III	18
3.1 Ημιαγωγοί Silicon Carbide (Ανθρακοπυριτίου)	18
3.1.1 Ημιαγωγοί SiC τύπου N.....	20
3.1.2 Ημιαγωγοί SiC τύπου P	20
3.1.3 Ανορθωτική Δίοδος.....	23
3.1.4 Δίοδοι Schottky SiC	25
3.1.5 Δίοδοι Schottky σε κυκλώματα	30
3.1.6 Χαρακτηριστικά των SiC-SBDs, Si SBDs και Si PNDs.....	31
3.1.7 Τιμές t_{rr} των SiC-SBDs.....	33
3.1.8 Χαρακτηριστικά προώθησης των SiC-SBDs	34
3.1.9 Πλεονεκτήματα των SiC-SBDs	35
3.1.10 Τρανζίστορ BJT	36
3.1.11 FET	39
3.1.12 JFETs.....	42
3.1.13 MOSFET	45
3.1.14 IGBT.....	48
3.1.15 Thyristors	52
3.1.16 Triacs	54

3.2 Άλλοι Ημιαγωγοί.....	57
Κεφάλαιο IV	59
Γενικές εφαρμογές στα ηλεκτρονικά Ισχύος.....	59
Κεφάλαιο V	70
Μελλοντικές εφαρμογές.....	70
Κεφάλαιο VI	72
Γενικά Συμπεράσματα.....	72
Αναφορές	73

Κεφάλαιο I

1.1 Ιστορική αναδρομή

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide), είναι μία σταθερή ένωση του διμερούς συστήματος πυριτίου – άνθρακα. Το υλικό συνήθως μπορεί να βρεθεί σε τεχνητή μορφή, στην φύση δεν υφίσταται παρά μόνο ως ίχνη σε μεγαλύτερα συμπλέγματα υλικών και ανιχνεύονται κυρίως σε δυσμενή περιβάλλοντα όπως οι μετεωρίτες και ηφαιστειογενή γή.[1] Γενικότερα, θεωρείται ως μια ένωση η οποία βρίσκεται κυρίως στην αστρική σκόνη καθώς και σε πλανήτες που έχουν πλούσια κοιτάσματα άνθρακα. [2]



Εικόνα 1: Κρυσταλλική μορφή Ανθρακοπυριτίου.[17]

Η πρώτη προσπάθεια για την τεχνητή παραγωγή του υλικού έγινε το 1824 από τον Σουηδό χημικό Jons Jacob Berzelius, σε μία ατυχή προσπάθεια παραγωγής τεχνητού διαμαντιού. Ωστόσο, η παραγωγή του Ανθρακοπυριτίου ως πολυκρυσταλλικό Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) επιτεύχθηκε μεταγενέστερα, το 1885 από τον Edward Goodrich Acheson ο οποίος προσπάθησε να αναπτύξει διάφορα υλικά που θα είχαν την δυνατότητα να αντικαταστήσουν το διαμάντι σε μηχανήματα κοπής και λείανσης.

Η πρώτη αναφορά σε ακαδημαϊκό άρθρο για τις ιδιότητες και χρησιμότητες του ανθρακοπυριτίου καθώς και για την χρήση του ως ημιαγωγό έγινε από τον G.W. Pierce το

1907. Η δημοσίευση του ακαδημαϊκού άρθρου πυροδότησε καινούργιες ανησυχίες για την διαφοροποίηση των υλικών. Την δεκαετία του 1950 επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός φούρνου που επέτρεψε την παραγωγή δισκίων ανθρακοπυριτίου που έστρεψε το ενδιαφέρον προς την έρευνα ημιαγωγών υλικών. Ο Jan Antony Levy κατάφερε να δημιουργήσει έναν θάλαμο ανάπτυξης κατασκευασμένο από γραφίτη, ο οποίος μπορούσε να παράξει εξαγωγικά δισκία ανθρακοπυριτίου με εξάχνωση σκόνης ανθρακοπυριτίου να ανέρχεται στους 2500 βαθμούς Κελσίου. Μεταγενέστερα αναπτύχθηκε μία καινοτόμα τεχνική στα μέσα της δεκαετίας του 1980 βασιζόμενη στην επιταξία της υγρής φάσης. Παρόλο που η εφαρμογή του ανθρακοπυριτίου σήμερα είναι ως μέσο λείανσης και κοπής, η χρήση του σε ηλεκτρονικές διατάξεις συνεχώς αυξάνεται. Εάν αναλογιστούμε ότι τα πρώτα ευρετρα του ήταν σε αστρική σκόνη μέσα σε μετεωρίτες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής μέχρι και σήμερα που χρησιμοποιείται σε εταιρείες όπως η Siemens στην Ευρώπη διεξαγωγής ερευνών. Η ανθεκτικότητα του υλικού επιτρέπει να χρησιμοποιείται σε αντιδραστήρες σύντηξης και τήξης, όπως και η ανθεκτικότητα του έχει μαγνητίσει το ενδιαφέρον πολλών ακαδημαϊκών.[11]

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένα ημιαγωγικό υλικό που έχει προσελκύσει σημαντική προσοχή λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων του σε σύγκριση με τους συμβατικούς ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο (Si) και το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs). Το SiC είναι ένας ημιαγωγός με ευρύ χάσμα ζώνης που έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου διάσπασης και υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων, καθιστώντας το ελκυστικό υποψήφιο για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας. Στην παρούσα μελέτη, θα συζητήσουμε τους διάφορους τύπους ημιαγωγών SiC.

1.2 Κρυσταλλική δομή του Ανθρακοπυριτίου (Silicon Carbide)

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι μια ένωση που αποτελείται από πυρίτιο και άνθρακα και μπορεί να έχει διάφορες κρυσταλλικές δομές, όπως κυβική (3C ή β -SiC), εξαγωνική (4H-SiC και 6H-SiC), ρομβοεδρική (15R-SiC) και τετραγωνική (β -SiC). Ωστόσο, οι πιο κοινές κρυσταλλικές δομές του SiC είναι οι 4H-SiC και 6H-SiC.

Το 4H-SiC έχει εξαγωνική μοναδιαία κυψελίδα με παραμέτρους πλέγματος $a = 3,073 \text{ \AA}$ και $c = 10,053 \text{ \AA}$, ενώ το 6H-SiC έχει εξαγωνική μοναδιαία κυψελίδα με παραμέτρους πλέγματος a

= 3,073 Å και $c = 15,117$ Å. Και οι δύο δομές αποτελούνται από εναλλασσόμενες στρώσεις ατόμων πυριτίου και άνθρακα, με τα άτομα Si να καταλαμβάνουν τις τετραεδρικές θέσεις και τα άτομα C τις οκταεδρικές θέσεις του πλέγματος.

Η κρυσταλλική δομή του SiC είναι σημαντική για την κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του, καθώς και για το σχεδιασμό και την κατασκευή συσκευών και υλικών με βάση το SiC.

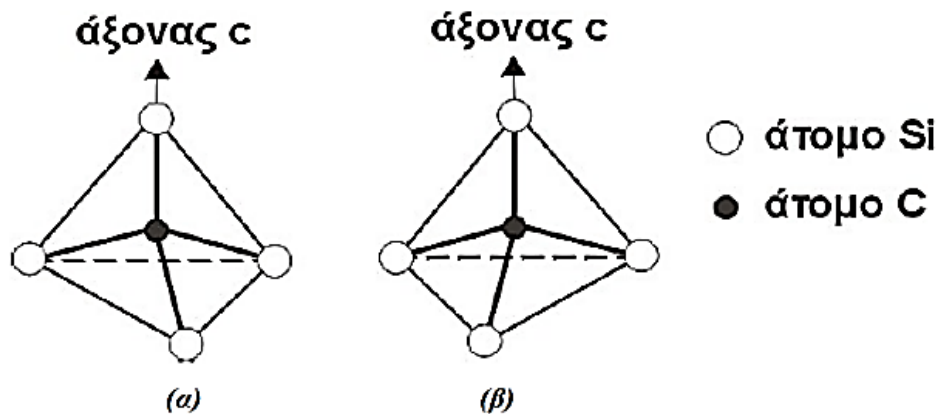
Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι μια ένωση που αποτελείται από άτομα πυριτίου και άνθρακα τοποθετημένα σε δομή πλέγματος. Το SiC είναι γνωστό για το ευρύ χάσμα ζώνης, την υψηλή θερμική αγωγιμότητα και την υψηλή μηχανική αντοχή του, καθιστώντας το δημοφιλές υλικό για ηλεκτρονικά υψηλής ισχύος, οπτοηλεκτρονικά και εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Στην παρούσα μελέτη, θα συζητήσουμε την κρυσταλλική δομή του SiC.

Το SiC μπορεί να υπάρχει σε διάφορες κρυσταλλικές δομές ή πολυτύπους, συμπεριλαμβανομένων των 3C, 4H, 6H και 15R. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι πολυτύποι για ηλεκτρονικές και οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές είναι οι 4H και 6H. Και οι δύο πολυτύποι έχουν εξαγωνική κρυσταλλική δομή, αλλά διαφέρουν ως προς την αλληλουχία στοιβάξης των διπλών στρωμάτων SiC. Στον πολυτύπο 4H, η αλληλουχία στοιβάξης είναι ABAB, ενώ στον πολυτύπο 6H είναι ABCABC.

Η μοναδιαία κυψελίδα του SiC αποτελείται από δύο αλληλοδιεισδυόμενα τετράεδρα: το ένα αποτελείται από άτομα πυριτίου και το άλλο από άτομα άνθρακα. Η κρυσταλλική δομή του SiC μπορεί να απεικονιστεί ως μια τρισδιάστατη διάταξη αυτών των τετραέδρων. Τα άτομα Si και C είναι τοποθετημένα σε εξαγωνικό μοτίβο μέσα σε κάθε τετράεδρο και τα τετράεδρα στοιβάζονται κατά μήκος του άξονα c για να σχηματίσουν μια εξαγωνική δομή στενής συσσώρευσης.

Η κρυσταλλική δομή του SiC έχει πολλά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Πρώτον, έχει υψηλό βαθμό συμμετρίας. Οι πολυτύποι 4H και 6H ανήκουν στην ομάδα χώρου $P63mc$, η οποία έχει εξαγωνική συμμετρία με εξαπλό άξονα περιστροφής. Δεύτερον, η κρυσταλλική δομή του SiC έχει μεγάλο χάσμα ζώνης. Το χάσμα ζώνης του SiC είναι περίπου 2,2 eV για τον πολυτύπο 4H και περίπου 3,0 eV για τον πολυτύπο 6H, καθιστώντας τον ημιαγωγό με ευρύ χάσμα ζώνης.

Τέλος, η κρυσταλλική δομή του SiC έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα λόγω των ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ των ατόμων Si και C.



Σχήμα 1.1: (α) τετράεδρο SiC όπου ο άξονας c συμπίπτει με τον κατακόρυφο δεσμό Si-C. (β) το πανομοιότυπο τετράεδρο SiC που προκύπτει από την περιστροφή του κανονικού γύρω από τον άξονα c κατά 180 μοίρες.[6]

1.3 Οι ιδιότητες και εφαρμογές του Ανθρακοπυριτίου (Silicon Carbide)

1.3.1 Χημικές ιδιότητες

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι μια ένωση πυριτίου και άνθρακα με χημικό τύπο SiC.

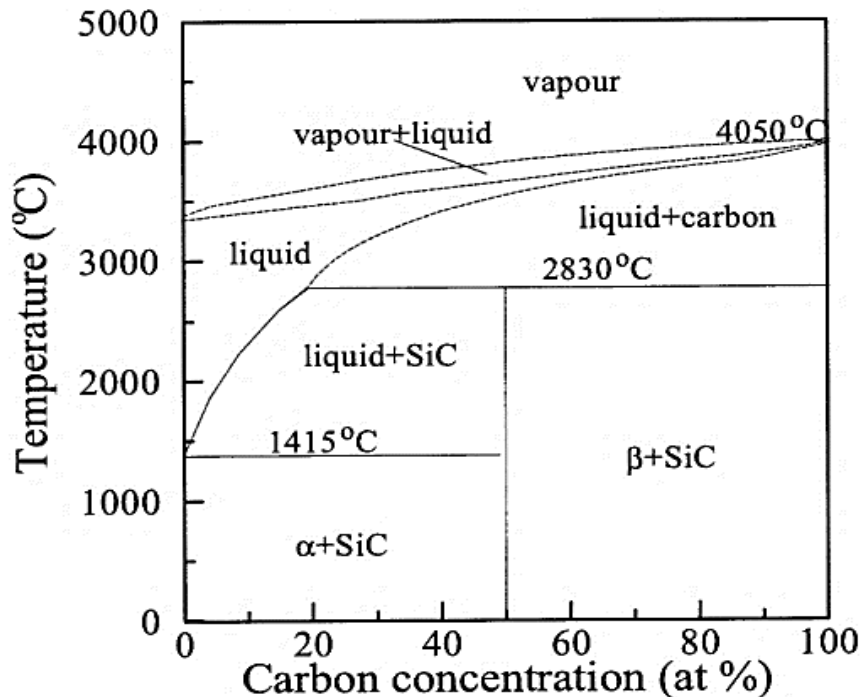
Διαθέτει ένα ευρύ φάσμα φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, όπως:

Υψηλά σημεία τήξης και βρασμού: Το SiC έχει πολύ υψηλό σημείο τήξης 2700°C και σημείο βρασμού 3500°C, καθιστώντας το ιδανικό υλικό για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών.

Σκληρότητα και ανθεκτικότητα: Σκληρότητα Mohs 9,5, η οποία είναι η δεύτερη μετά το διαμάντι. Είναι επίσης ανθεκτικό στη φθορά, τη διάβρωση και τη διάβρωση.

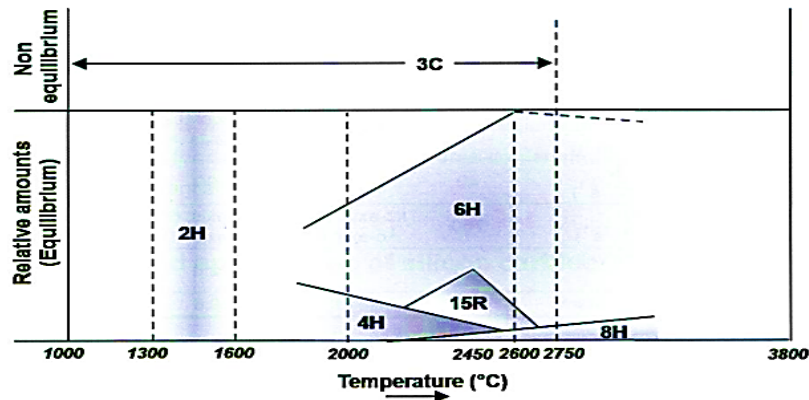
Χημική σταθερότητα: Το SiC είναι εξαιρετικά χημικά σταθερό και είναι ανθεκτικό στα περισσότερα οξέα και αλκάλια. Είναι επίσης ανθεκτικό στην οξείδωση στον αέρα σε θερμοκρασίες έως και 1000°C.

Ημιαγώγιμες ιδιότητες: Το SiC έχει ευρύ χάσμα ζώνης 2,2-3,4 eV, ανάλογα με την κρυσταλλική δομή, γεγονός που το καθιστά καλό υποψήφιο για ηλεκτρονικές συσκευές υψηλής ισχύος και θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.2 : Διάγραμμα φάσης του ανθρακοπυριτίου (Si- C).[8]

Από το άνωθεν διάγραμμα φάσης του SiC μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν υπάρχει κάποια υγρή φάση κάτω των 1800°C. Οι επίμονες προσπάθειες των ερευνητών για την εξερεύνηση το των συνθηκών σταθεροποίησης των πολυτύπων απέδωσαν καρπούς δημιουργώντας το διάγραμμα Kihrrenberg. Τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι ο ρυθμός καθώς και η θερμοκρασία ανάπτυξης είναι θεμελιώδεις παράγοντες στην σταθεροποίηση διαφόρων υλικών. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος πολύτιμος δεν είναι σταθερός λόγω της ανακρυστάλλωσης στην φάση του υπερκορεσμού.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα σταθερότητας Kirkendall, η σταθερότητα συναρτίζεται με την θερμοκρασία. [10]

1.3.2 Άλλες Γενικές Ιδιότητες

Χημική αδράνεια: Το Ανθρακοκυρίτιο (Silicon Carbide) είναι χημικά αδρανές και έχει εξαιρετική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Είναι σταθερό στην παρουσία οξέων, αλκαλίων και πολλών χημικών ουσιών, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο στη χημική επεξεργασία και σε σκληρές βιομηχανικές συνθήκες.

Ηλεκτρικές ιδιότητες: Το SiC είναι ένα ημιαγωγικό υλικό με εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Έχει ευρύ χάσμα ζώνης, που σημαίνει ότι απαιτεί υψηλότερη ενέργεια για την προώθηση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το SiC κατάλληλο για ηλεκτρονικές συσκευές υψηλής ισχύος και θερμοκρασίας, όπως ηλεκτρονικά ισχύος και συσκευές ραδιοσυχνότητας (RF).

Γυαλιστικές ιδιότητες: Το Ανθρακοκυρίτιο (Silicon Carbide) χρησιμοποιείται ευρέως ως λειαντικό υλικό λόγω της σκληρότητας και της ανθεκτικότητάς του. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές λείανσης, κοπής και στίλβωσης, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής κεραμικών, γυαλιού και μεταλλικών εξαρτημάτων.

Θερμική διαστολή: Το Ανθρακοκυρίτιο (Silicon Carbide) έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, πράγμα που σημαίνει ότι διαστέλλεται ή συστέλλεται λιγότερο με τις μεταβολές της θερμοκρασίας σε σύγκριση με πολλά άλλα υλικά. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά χρήσιμο σε εφαρμογές όπου η σταθερότητα των διαστάσεων είναι σημαντική.

Αντοχή στην ακτινοβολία: Το SiC παρουσιάζει καλή αντοχή σε βλάβες από ακτινοβολία, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, επιταχυντές σωματιδίων και εξερεύνηση του διαστήματος, όπου η έκθεση σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας αποτελεί πρόβλημα.

Οπτικές ιδιότητες: Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) έχει ενδιαφέρουσες οπτικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου ενός μεγάλου χάσματος ζώνης που του επιτρέπει να απορροφά και να εκπέμπει φως σε ένα ευρύ φάσμα. Χρησιμοποιείται σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις, όπως οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED), καθώς και σε οπτικά εξαρτήματα όπως κάτοπτρα και φακοί.

1.3.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες & εφαρμογές

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένα υλικό ημιαγωγού με μεγάλο χάσμα ζώνης που παρουσιάζει εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές. Ορισμένες από τις αξιοσημείωτες ηλεκτρικές ιδιότητές του περιλαμβάνουν υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου διάσπασης, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή ταχύτητα μετατόπισης κορεσμένων ηλεκτρονίων. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν το SiC κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας.

Ακολουθούν ορισμένες βασικές ηλεκτρικές ιδιότητες του SiC:

Ευρύ χάσμα ζώνης: Αυτό του επιτρέπει να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες και να διαχειρίζεται υψηλές τάσεις. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στις διατάξεις SiC να έχουν χαμηλότερα ρεύματα διαρροής και υψηλότερες τάσεις διάσπασης σε σύγκριση με τις διατάξεις που βασίζονται στο πυρίτιο.

Υψηλή ισχύς ηλεκτρικού πεδίου: Το SiC έχει υψηλή αντοχή κρίσιμου ηλεκτρικού πεδίου (8-10 MV/cm), γεγονός που του επιτρέπει να αντέχει υψηλά ηλεκτρικά πεδία χωρίς διάσπαση. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική για διατάξεις ισχύος που λειτουργούν σε υψηλές τάσεις.

Υψηλή θερμική αγωγιμότητα: Το SiC έχει θερμική αγωγιμότητα που είναι περίπου τρεις φορές υψηλότερη από το πυρίτιο. Αυτή η υψηλή θερμική αγωγιμότητα βοηθά στην

αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας από τη συσκευή, επιτρέποντας στις συσκευές SiC να διαχειρίζονται υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Υψηλή ταχύτητα μετατόπισης ηλεκτρονίων κορεσμού: Το SiC έχει υψηλή ταχύτητα μετατόπισης ηλεκτρονίων κορεσμού, η οποία είναι η ταχύτητα με την οποία τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα στο υλικό υπό ηλεκτρικό πεδίο. Η υψηλή ταχύτητα μετατόπισης επιτρέπει στις διατάξεις SiC να μεταστρέφονται σε υψηλές συχνότητες και να χειρίζονται εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Το SiC βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών ισχύος, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άλλων. Μερικές από τις συνήθεις εφαρμογές του SiC είναι:

Ηλεκτρονικά ισχύος: (MOSFET) και τρανζίστορ διπολικής σύνδεσης (BJT), χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Οι διατάξεις ισχύος SiC προσφέρουν χαμηλότερες απώλειες αγωγής και μεταγωγής, υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και υψηλότερες δυνατότητες φραγής τάσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διατάξεις πυριτίου.

Ηλεκτρικά οχήματα (EVs): Το SiC χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά ισχύος για τα EVs, καθώς επιτρέπει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, ταχύτερη φόρτιση και μεγαλύτερη εμβέλεια οδήγησης. Οι μονάδες ισχύος με βάση το SiC χρησιμοποιούνται σε μετατροπείς ηλεκτρικών οχημάτων για τη μετατροπή της συνεχούς ισχύος από τη μπαταρία σε εναλλασσόμενη ισχύ για τον κινητήρα.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Οι διατάξεις ισχύος με βάση το SiC χρησιμοποιούνται σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ηλιακοί μετατροπείς και οι μετατροπείς αιολικής ενέργειας. Οι διατάξεις SiC προσφέρουν υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής, μειωμένο μέγεθος και βάρος και καλύτερη θερμική διαχείριση, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής τάσης.

Αεροδιαστημική και άμυνα: Το SiC χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική βιομηχανία για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, συμπεριλαμβανομένων της μετατροπής ισχύος, του ελέγχου κινητήρων και των συστημάτων ραντάρ. Οι διατάξεις SiC μπορούν να αντέξουν σε

ακραίες θερμοκρασίες, ακτινοβολία και σκληρά περιβάλλοντα, καθιστώντας τις κατάλληλες για αεροδιαστημικές και αμυντικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο II

2.1 Ορισμός των ημιαγωγών

Οι ημιαγωγοί είναι υλικά που έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ της αγωγιμότητας ενός αγωγού (όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο) και ενός μονωτή (όπως το καουτσούκ ή το γυαλί). Κατασκευάζονται συνήθως από υλικά όπως το πυρίτιο, το γερμάνιο ή το αρσενικούχο γάλλιο και χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών διατάξεων, συμπεριλαμβανομένων των τρανζίστορ, των διόδων και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μια από τις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών είναι ότι η αγωγιμότητά τους μπορεί να ελεγχθεί με την προσθήκη προσμείξεων, μια διαδικασία γνωστή ως πρόσμιξη. Αυτό επιτρέπει τη σχεδίαση διατάξεων ημιαγωγών με συγκεκριμένες ηλεκτρικές ιδιότητες, καθιστώντας τις εξαιρετικά ευέλικτες και χρήσιμες σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές.

Οι ημιαγωγοί έχουν φέρει επανάσταση στη σύγχρονη τεχνολογία και αποτελούν κρίσιμα στοιχεία σε συσκευές όπως οι υπολογιστές, τα smartphones και οι τηλεοράσεις. Χρησιμοποιούνται επίσης σε ηλιακές κυψέλες, αισθητήρες και πολλές άλλες ηλεκτρονικές συσκευές.

2.2 Θεωρίες ανάπτυξης ημιαγωγών Silicon Carbide (ανθρακοπυριτίου)

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένα υλικό ημιαγωγών που έχει κερδίσει όλο και μεγαλύτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του, όπως η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, η υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων και το ευρύ χάσμα ζώνης. Το SiC μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τάσεις και συχνότητες από τις παραδοσιακές διατάξεις που βασίζονται στο πυρίτιο, καθιστώντας το ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες σχετικά με την ανάπτυξη του SiC ως ημιαγωγικού υλικού, μερικές από τις οποίες περιγράφονται παρακάτω:

Θεωρία ανάπτυξης κρυστάλλων: Η θεωρία της κρυσταλλικής ανάπτυξης εξηγεί τη διαδικασία σύνθεσης κρυστάλλων SiC υψηλής ποιότητας. Οι κρύσταλλοι SiC συνήθως αναπτύσσονται είτε με τη μέθοδο της εξάχνωσης είτε με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης

ατμών (CVD). Η θεωρία κρυσταλλικής ανάπτυξης εξηγεί τις θερμοδυναμικές και κινητικές διεργασίες που εμπλέκονται σε αυτές τις μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς των πρόδρομων αερίων σε φάση ατμών, της πυρηνοποίησης και της κρυσταλλικής ανάπτυξης. Η κατανόηση της θεωρίας κρυσταλλικής ανάπτυξης είναι απαραίτητη για την παραγωγή κρυστάλλων SiC υψηλής ποιότητας.

Θεωρία μηχανικής του χάσματος ζώνης: Η θεωρία της μηχανικής του χάσματος ζώνης εξηγεί πώς οι ιδιότητες του SiC μπορούν να ρυθμιστούν με τον έλεγχο του μεγέθους και της συγκέντρωσης των ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα. Το χάσμα ζώνης του SiC είναι ευρύτερο από αυτό του πυριτίου, γεγονός που επιτρέπει στις διατάξεις SiC να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και τάσεις. Με την εισαγωγή συγκεκριμένων ατελειών στο πλέγμα SiC, το χάσμα ζώνης μπορεί να τροποποιηθεί περαιτέρω για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της διάταξης για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Θεωρία της φυσικής της διάταξης: Η θεωρία της φυσικής των διατάξεων εξηγεί τη συμπεριφορά των διατάξεων SiC, όπως τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (MOSFET) και οι δίοδοι Schottky. Οι διατάξεις SiC λειτουργούν διαφορετικά από τις διατάξεις που βασίζονται στο πυρίτιο λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του υλικού τους. Για παράδειγμα, τα MOSFET SiC έχουν χαμηλότερη χωρητικότητα πύλης από τα MOSFET πυριτίου, γεγονός που τους επιτρέπει να μεταστρέφονται ταχύτερα και να μειώνουν τις απώλειες ισχύος. Η κατανόηση της φυσικής των διατάξεων είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των διατάξεων SiC.

2.3 Θεωρία ανάπτυξης κρυστάλλων

Η θεωρία της κρυσταλλικής ανάπτυξης αποτελεί σημαντική πτυχή της επιστήμης των υλικών, ιδίως στην ανάπτυξη ημιαγωγών όπως το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide). Το SiC είναι ένας ημιαγωγός με ευρύ χάσμα ζώνης με αρκετές επιθυμητές ιδιότητες, όπως υψηλή θερμική αγωγιμότητα, υψηλή αντοχή ηλεκτρικού πεδίου και υψηλή ταχύτητα κορεσμού, που το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση της θεωρίας της κρυσταλλικής ανάπτυξης στους ημιαγωγούς SiC.

Το SiC μπορεί να αναπτυχθεί με διάφορες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της εξάχνωσης, της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) και της επιταξίας υγρής φάσης (LPE). Ωστόσο, η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη κρυστάλλων SiC είναι η τεχνική εξάχνωσης, η οποία περιλαμβάνει τη θέρμανση σκόνης SiC σε υψηλές θερμοκρασίες σε κενό. Κατά την εξάχνωση, η σκόνη SiC εξατμίζεται και ο ατμός συμπυκνώνεται σε μια ψυχρότερη επιφάνεια για να σχηματίσει έναν κρύσταλλο. Η διαδικασία ανάπτυξης κρυστάλλων περιλαμβάνει διάφορα στάδια, όπως η πυρηνοποίηση, η ανάπτυξη και η συνένωση.

Πυρηνοποίηση: Η πυρηνοποίηση είναι το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανάπτυξης του κρυστάλλου, όπου τα άτομα SiC ενώνονται για να σχηματίσουν έναν μικρό κρύσταλλο (πυρήνα). Η διαδικασία πυρηνοποίησης διέπεται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η σύνθεση των ατμών. Σε υψηλές θερμοκρασίες, ο ατμός SiC γίνεται υπερκορεσμένος, οδηγώντας στο σχηματισμό μικρών πυρήνων. Το μέγεθος και ο αριθμός των πυρήνων εξαρτώνται από τον ρυθμό ψύξης και τον βαθμό υπερκορεσμού.

Ανάπτυξη: Μόλις σχηματιστούν οι πυρήνες, αρχίζει η διαδικασία ανάπτυξης των κρυστάλλων. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, οι πυρήνες αυξάνονται σε μέγεθος καθώς περισσότερα άτομα SiC εναποτίθενται στην επιφάνειά τους. Ο ρυθμός ανάπτυξης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σύνθεσης των ατμών. Ο ρυθμός ανάπτυξης μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας ή τη μείωση της πίεσης.

Συγχώνευση: Η συνένωση είναι το τελικό βήμα στη διαδικασία ανάπτυξης κρυστάλλων, όπου οι μεμονωμένοι πυρήνες συγχωνεύονται για να σχηματίσουν έναν ενιαίο κρύσταλλο. Η διαδικασία συνένωσης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η επιφανειακή ενέργεια. Η επιφανειακή ενέργεια είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας και επηρεάζει το σχήμα του κρυστάλλου. Το σχήμα του κρυστάλλου μπορεί να ελεγχθεί με τη ρύθμιση της επιφανειακής ενέργειας, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη προσμείξεων ή την αλλαγή των συνθηκών ανάπτυξης.

Έχουν προταθεί διάφορες θεωρίες για την εξήγηση της διαδικασίας κρυσταλλικής ανάπτυξης στο SiC, όπως η θεωρία της δισδιάστατης πυρηνοποίησης, η θεωρία της τρισδιάστατης πυρηνοποίησης και η θεωρία της συσσωμάτωσης με περιορισμένη διάχυση. Η θεωρία της δισδιάστατης πυρηνοποίησης προτείνει ότι οι πυρήνες σχηματίζονται στην επιφάνεια του

υποστρώματος και στη συνέχεια αναπτύσσονται κάθετα για να σχηματίσουν έναν κρύσταλλο. Η θεωρία της τρισδιάστατης πυρηνοποίησης προτείνει ότι οι πυρήνες σχηματίζονται στον όγκο του υποστρώματος και στη συνέχεια αναπτύσσονται προς όλες τις κατευθύνσεις για να σχηματίσουν έναν κρύσταλλο. Η θεωρία συσσωμάτωσης με περιορισμένη διάχυση προτείνει ότι οι πυρήνες σχηματίζονται τυχαία και η διαδικασία ανάπτυξης του κρυστάλλου ελέγχεται από τη διάχυση των ατόμων στους πυρήνες.

2.4 Θεωρία μηχανικής του χάσματος ζώνης

Η μηχανική του χάσματος ζώνης είναι μια σημαντική έννοια στον τομέα των υλικών και των διατάξεων ημιαγωγών. Αναφέρεται στον σκόπιμο χειρισμό του χάσματος ζώνης ενός υλικού με διάφορα μέσα, όπως η πρόσμιξη, η μηχανική των τάσεων και ο σχεδιασμός ετεροδομών. Στους ημιαγωγούς SiC, η μηχανική του χάσματος ζώνης είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων αυτού του υλικού.

Το SiC είναι ένας ημιαγωγός ευρέως χάσματος ζώνης με ενέργεια χάσματος ζώνης 2,3-3,3 eV, ανάλογα με τον πολυτύπο. Αυτό το ευρύ χάσμα ζώνης καθιστά το SiC ελκυστικό για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία σε υψηλές τάσεις και θερμοκρασίες. Ωστόσο, το ευρύ χάσμα ζώνης παρουσιάζει επίσης προκλήσεις όσον αφορά την απόδοση της διάταξης, όπως η υψηλή αντίσταση επαφής και η χαμηλή κινητικότητα φορέων.

Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές μηχανικής του χάσματος ζώνης για τους ημιαγωγούς SiC. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν την πρόσμιξη με προσμίξεις, όπως άζωτο ή αλουμίνιο, για τη δημιουργία ρηχών επιπέδων δοτών ή αποδεκτών εντός του χάσματος ζώνης. Αυτό μπορεί να αυξήσει τη συγκέντρωση φορέων και να βελτιώσει την απόδοση της διάταξης. Επιπλέον, η μηχανική τάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή της ενέργειας του χάσματος ζώνης με την εφαρμογή τάσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορα μέσα, όπως η επιταξιακή ανάπτυξη ή η εμφύτευση ιόντων.

Ο σχεδιασμός ετεροδομής είναι μια άλλη προσέγγιση για τη μηχανική του χάσματος ζώνης στους ημιαγωγούς SiC. Πρόκειται για την ενσωμάτωση διαφορετικών πολυτύπων SiC ή

άλλων ημιαγωγικών υλικών με διαφορετικές ενέργειες χάσματος ζώνης για τη δημιουργία μιας ετεροεπαφής. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ποικίλων διατάξεων, όπως τρανζίστορ υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων (HEMT) και διόδους Schottky, με βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διατάξεις SiC.

Η μηχανική του χάσματος ζώνης στους ημιαγωγούς SiC είναι ένας ταχέως εξελισσόμενος τομέας, με τη συνεχή έρευνα να επικεντρώνεται στη βελτίωση των επιδόσεων των διατάξεων και στη διερεύνηση νέων εφαρμογών. Ορισμένες πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη χρήση ατελειών και κενών θέσεων στο SiC για τη διαμόρφωση του χάσματος ζώνης και τη βελτίωση της απόδοσης των διατάξεων.

2.5 Θεωρία της φυσικής της διάταξης

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένα ημιαγωγικό υλικό με ευρύ χάσμα ζώνης που προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο (Si) και το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs). Το SiC έχει υψηλότερη τάση διάσπασης, υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και υψηλότερη ταχύτητα κορεσμού ηλεκτρονίων, καθιστώντας το ιδανικό για ηλεκτρονικές συσκευές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Σε αυτή την ανάλυση, θα συζητήσουμε τη θεωρία της φυσικής των διατάξεων των ημιαγωγών SiC.

Δομή ζώνης

Η δομή ζώνης του SiC αποτελεί βασικό παράγοντα για τον καθορισμό των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του. Το SiC έχει ένα ευρύ χάσμα ζώνης 2,3-3,3 eV, ανάλογα με τον πολυτύπο, το οποίο είναι πολύ υψηλότερο από το Si (1,1 eV) και το GaAs (1,4 eV). Το χάσμα ζώνης καθορίζει την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και η ενέργεια αυτή είναι πολύ υψηλότερη για το SiC από ό,τι για το Si και το GaAs. Το ευρύ χάσμα ζώνης σημαίνει επίσης ότι το SiC έχει χαμηλότερη εγγενή συγκέντρωση φορέων από το Si και το GaAs σε θερμοκρασία δωματίου, γεγονός που το καθιστά πιο κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής ισχύος.

Μεταφορέας μεταφοράς

Η μεταφορά φορέων στο SiC επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η κρυσταλλική δομή, οι προσμίξεις και οι ατέλειες. Η κινητικότητα των ηλεκτρονίων και των οπών στο SiC είναι υψηλότερη από ό,τι στο Si και το GaAs, ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό σημαίνει ότι οι διατάξεις SiC μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες και πυκνότητες ισχύος. Ωστόσο, η υψηλή κινητικότητα καθιστά επίσης τις διατάξεις SiC πιο ευάλωτες σε επιφανειακά φαινόμενα και φαινόμενα διεπαφής, όπως επιφανειακές καταστάσεις και παγίδες οξειδίου, τα οποία μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση της διάταξης.

Συνδέσεις

Οι διακλαδώσεις SiC, όπως οι δίοδοι p-n και τα MOSFET, είναι βασικά στοιχεία των διατάξεων SiC. Ο σχηματισμός μιας ένωσης p-n στο SiC είναι παρόμοιος με αυτόν του Si, αλλά με ορισμένες σημαντικές διαφορές. Το ευρύτερο χάσμα ζώνης του SiC σημαίνει ότι η περιοχή εξάντλησης είναι μεγαλύτερη, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη τάση διάσπασης και χαμηλότερο ρεύμα διαρροής. Η υψηλή συγκέντρωση ντοπαρίσματος που απαιτείται για την αποτελεσματική έγχυση φορέων δημιουργεί επίσης μια περιοχή φόρτισης χώρου που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση της διάταξης.

MOSFETs

Τα MOSFET SiC είναι από τις πιο υποσχόμενες διατάξεις SiC για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Η βασική λειτουργία ενός SiC MOSFET είναι παρόμοια με ένα Si MOSFET, αλλά με ορισμένες σημαντικές διαφορές. Η υψηλότερη κινητικότητα ηλεκτρονίων και το ευρύτερο χάσμα ζώνης του SiC επιτρέπουν υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο και υψηλότερη τάση διάσπασης. Τα MOSFET SiC έχουν επίσης χαμηλότερη χωρητικότητα πύλης και ταχύτερη ταχύτητα μεταγωγής από τα MOSFET Si, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Ωστόσο, τα MOSFET SiC υποφέρουν επίσης από ορισμένα μειονεκτήματα, όπως υψηλότερη αντίσταση ενεργοποίησης και προβλήματα αξιοπιστίας του οξειδίου πύλης.

2.6 Σύγκριση θεωρημάτων και διαφορές

Για να παρέχουμε μια λεπτομερή σύγκριση των θεωριών που σχετίζονται με τις διατάξεις SiC, θα συνοψίσουμε τις βασικές πτυχές κάθε θεωρίας και θα επισημάνουμε τις διαφορές μεταξύ τους:

Φυσική των διατάξεων SiC: Η θεωρία της φυσικής των διατάξεων SiC εξηγεί τις θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες των διατάξεων SiC, συμπεριλαμβανομένης της κρυσταλλικής δομής, της ηλεκτρονικής δομής ζώνης και των ιδιοτήτων μεταφοράς φορέων. Η θεωρία αυτή επικεντρώνεται στη σχέση μεταξύ των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του υλικού και της απόδοσης της διάταξης. Οι κύριες διαφορές στη φυσική των διατάξεων μεταξύ του 4H-SiC και του 6H-SiC είναι η κρυσταλλική δομή και η ενέργεια του χάσματος ζώνης. Το 4H-SiC έχει ευρύτερο χάσμα ζώνης και υψηλότερη κινητικότητα ηλεκτρονίων από το 6H-SiC, γεγονός που το καθιστά καταλληλότερο για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας.

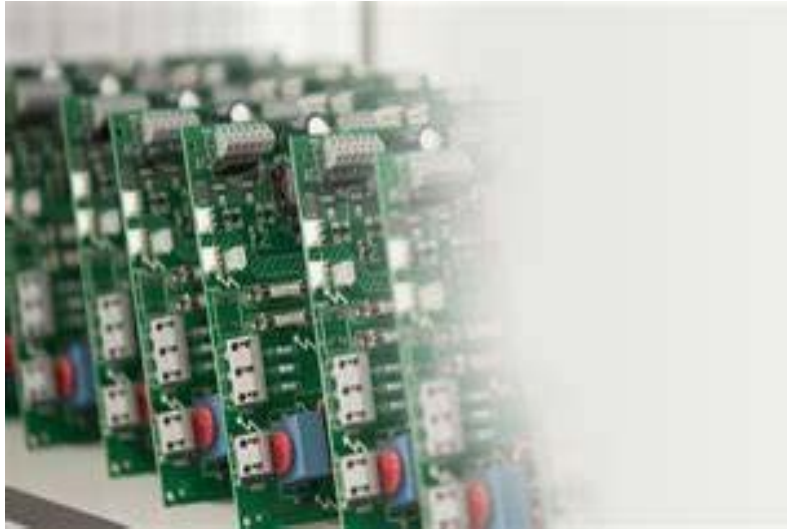
Bandgap Engineering: Η θεωρία της μηχανικής του χάσματος ζώνης εξηγεί πώς οι ηλεκτρονικές ιδιότητες του SiC μπορούν να τροποποιηθούν με την αλλαγή της ενέργειας του χάσματος ζώνης μέσω κραμάτωσης και πρόσμιξης. Η μηχανική του χάσματος ζώνης είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των διατάξεων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των διατάξεων που βασίζονται στο SiC. Η κραματοποίηση περιλαμβάνει την εισαγωγή ενός άλλου υλικού, όπως το αλουμίνιο, στο κρυσταλλικό πλέγμα SiC για την τροποποίηση της ενέργειας του διακένου ζώνης. Η πρόσμιξη περιλαμβάνει την εισαγωγή προσμίξεων, όπως άζωτο ή αλουμίνιο, στο υλικό για την τροποποίηση των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του.

Ανάπτυξη κρυστάλλων: Η θεωρία της κρυσταλλικής ανάπτυξης εξηγεί τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη κρυστάλλων SiC και τον αντίκτυπό τους στην ποιότητα και τις επιδόσεις των διατάξεων SiC. Η μέθοδος εξάχνωσης, η μέθοδος CVD και η μέθοδος LPE χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάπτυξη κρυστάλλων SiC. Η μέθοδος εξάχνωσης είναι μια δημοφιλής τεχνική για την ανάπτυξη κρυστάλλων SiC υψηλής ποιότητας, αλλά έχει περιορισμούς όσον αφορά την επεκτασιμότητα και την αποδοτικότητα. Η μέθοδος CVD είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την ανάπτυξη πλακών SiC μεγάλης επιφάνειας με υψηλή κρυσταλλική ποιότητα. Η μέθοδος LPE είναι μια πιθανή τεχνική για την ανάπτυξη υμενίων SiC με ελεγχόμενο πάχος και ντοπάρισμα.

Συνοπτικά, οι θεωρίες που σχετίζονται με τις διατάξεις SiC εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές του υλικού και της απόδοσης της διάταξης. Η θεωρία της φυσικής των διατάξεων εξηγεί τις θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες των διατάξεων SiC, η θεωρία της μηχανικής του χάσματος ζώνης εξηγεί πώς μπορούν να τροποποιηθούν οι ηλεκτρονικές ιδιότητες του SiC και η θεωρία της ανάπτυξης κρυστάλλων εξηγεί τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη κρυστάλλων SiC και τον αντίκτυπό τους στην απόδοση των διατάξεων. Όλες αυτές οι θεωρίες είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη διατάξεων υψηλής απόδοσης με βάση το SiC.

Κεφάλαιο III

3.1 Ημιαγωγοί Silicon Carbide (Ανθρακοπυριτίου)



Εικόνα 1: Ημιαγωγός SiC.[18]

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένα υλικό ημιαγωγού με μεγάλο χάσμα ζώνης που προσφέρει μοναδικές ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες, καθιστώντας το κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ημιαγωγών SiC με βάση τις κρυσταλλικές δομές και τις τεχνικές πρόσμιξης. Ακολουθούν ορισμένοι συνηθισμένοι τύποι:

4H-SiC: Αυτός είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος πολυτύπος SiC. Έχει εξαγωνική κρυσταλλική δομή και προσφέρει ισορροπία μεταξύ κινητικότητας φορέων και τάσης διάσπασης. Είναι κατάλληλο για διατάξεις ισχύος και εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

6H-SiC: Ένας άλλος κοινός πολυτύπος SiC, το 6H-SiC έχει εξαγωνική κρυσταλλική δομή. Έχει ελαφρώς διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες σε σύγκριση με το 4H-SiC και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διατάξεις ισχύος και ηλεκτρονικά υψηλής θερμοκρασίας.

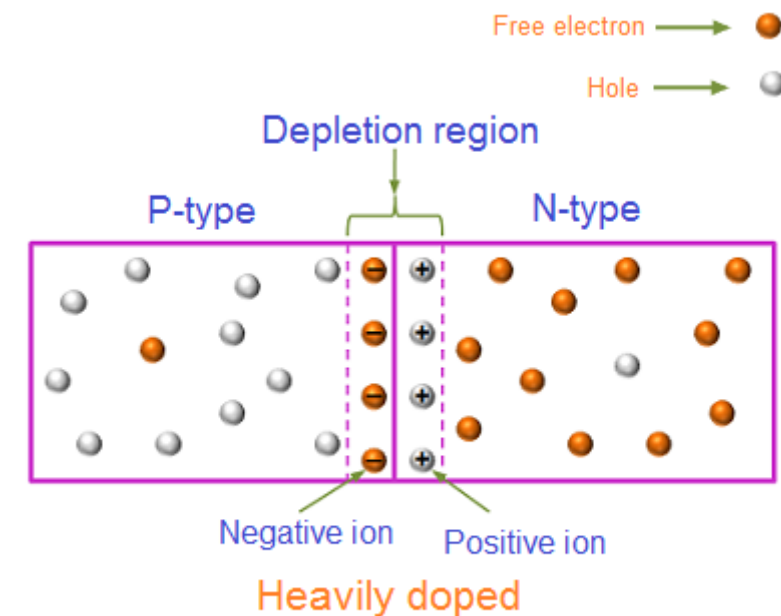
3C-SiC: Επίσης γνωστό ως κυβικό SiC, το 3C-SiC έχει κρυσταλλική δομή ψευδαργύρου μπλέντε. Έχει χαμηλότερη τάση διάσπασης αλλά υψηλότερη κινητικότητα ηλεκτρονίων σε σύγκριση με το 4H-SiC και το 6H-SiC. Χρησιμοποιείται σε ορισμένες εφαρμογές υψηλής συχνότητας και υψηλής ισχύος.

15R-SiC: Αυτός ο πολυτύπος SiC έχει ρομβοεδρική κρυσταλλική δομή. Έχει μοναδικές ηλεκτρικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται σε ορισμένες ηλεκτρονικές συσκευές και εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας.

Εκτός από τις κρυσταλλικές δομές, οι ημιαγωγοί SiC μπορούν επίσης να ταξινομηθούν με βάση τις τεχνικές πρόσμιξης τους:

SiC τύπου n: προσμίξεις όπως άζωτο ή φώσφορος εισάγονται για να δημιουργήσουν περίσσεια ηλεκτρονίων, καθιστώντας το υλικό πλούσιο σε ηλεκτρόνια.

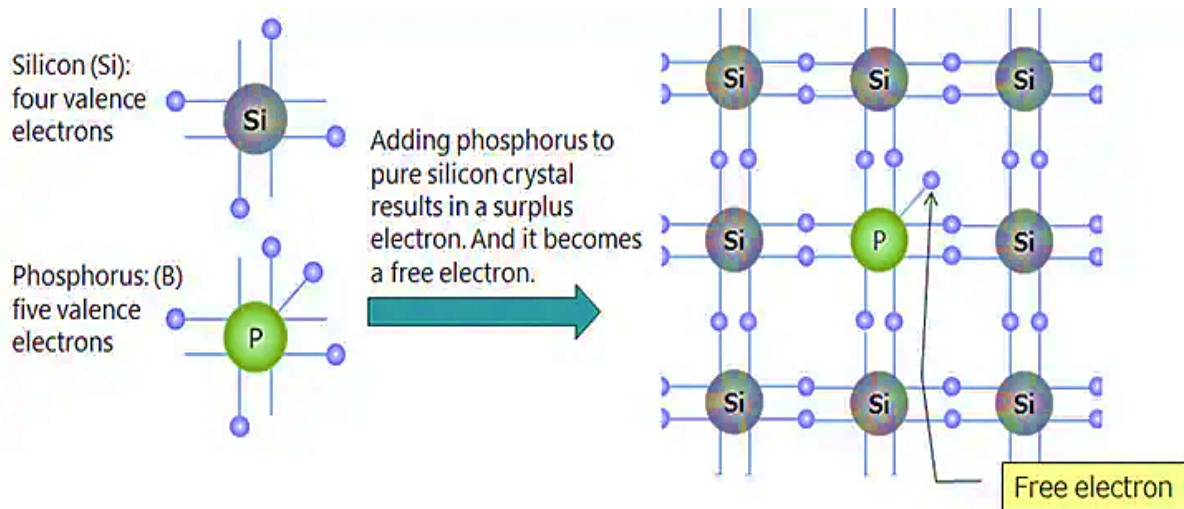
SiC τύπου P: Το SiC τύπου P δημιουργείται με την εισαγωγή προσμίξεων όπως το αλουμίνιο ή το βόριο, οι οποίες δημιουργούν κενά ηλεκτρονίων ή "οπές", καθιστώντας το υλικό πλούσιο σε οπές.



Copyright © Physics and Radio-Electronics, All rights reserved

Εικόνα 2- Συνδυασμός των ημιαγωγών τύπου N & P.[19]

3.1.1 Ημιαγωγοί SiC τύπου N



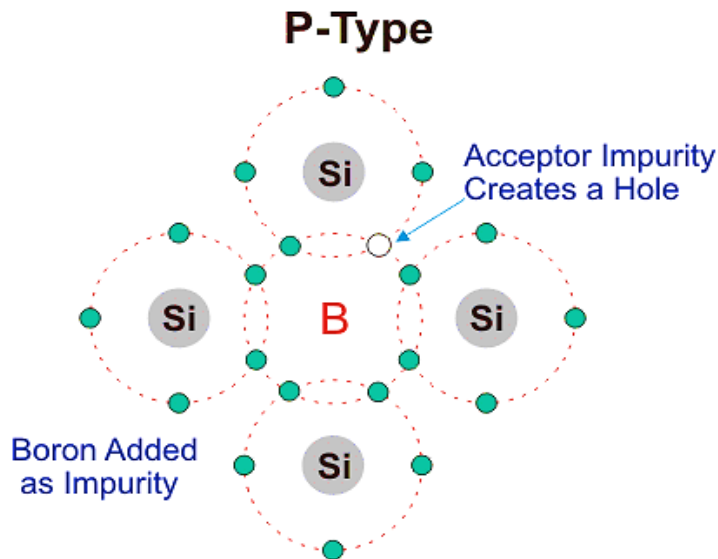
Εικόνα 3- Ημιαγωγός SiC τύπου N.[20]

Οι ημιαγωγοί SiC τύπου N είναι προσμίξεις με στοιχεία που έχουν περίσσεια ηλεκτρονίων, όπως το άζωτο (N) ή ο φώσφορος (P). Αυτά τα στοιχεία πρόσμιξης εισάγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στο κρυσταλλικό πλέγμα, καθιστώντας το υλικό αγώγιμο. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης υπεύθυνα για την υψηλή κινητικότητα των ηλεκτρονίων του SiC, η οποία το καθιστά εξαιρετικό υλικό για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Το SiC τύπου N χρησιμοποιείται συνήθως σε ηλεκτρονικά ισχύος και εφαρμογές RF.

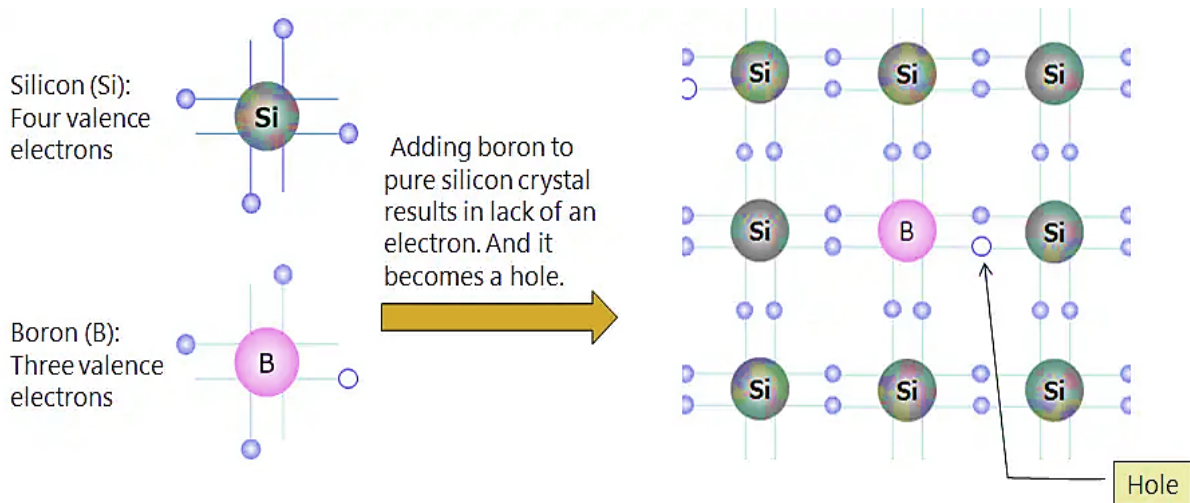
3.1.2 Ημιαγωγοί SiC τύπου P

Οι ημιαγωγοί τύπου P SiC (Ανθρακοκυρίτιο) αναφέρονται σε έναν συγκεκριμένο τύπο υλικού SiC που παρουσιάζει αγωγιμότητα τύπου p. Το Ανθρακοκυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένας ημιαγωγός με ευρύ χάσμα ζώνης με εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας.

Στους ημιαγωγούς SiC τύπου p, το υλικό προστίθεται με προσμίξεις για την εισαγωγή οπών ως φορέων πλειονότητας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται προσμίξεις αλουμινίου (Al) ή βορίου (B) ως προσμίξεις για τη δημιουργία SiC τύπου p. Η προσθήκη αυτών των προσμίξεων δημιουργεί επιπλέον θετικά φορτισμένες οπές στο κρυσταλλικό πλέγμα, οι οποίες συμβάλλουν στην αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 4- Ημιαγωγός SiC τύπου P.[21]



Εικόνα 5- Ημιαγωγός SiC τύπου P.[22]

Οι ημιαγωγοί SiC τύπου p χρησιμοποιούνται συνήθως στα ηλεκτρονικά ισχύος, σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών και σε συσκευές ανθεκτικές στην ακτινοβολία. Προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως υψηλή τάση διάσπασης, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή αντίσταση σε κατάσταση λειτουργίας και βελτιωμένη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς με βάση το πυρίτιο.

Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τους ημιαγωγούς SiC τύπου p κατάλληλους για εφαρμογές όπως μετατροπείς ισχύος, κινητήρες, ηλεκτρικά οχήματα, συστήματα

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αεροδιαστημική και αισθητήρες υψηλής θερμοκρασίας. Επιτρέπουν την αποτελεσματική διαχείριση ισχύος και τη διαχείριση υψηλών τάσεων και ρευμάτων σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Ημιαγωγοί τύπου P σε κυκλώματα

Οι ημιαγωγοί SiC (Ανθρακοπυρίτιο) τύπου P διαθέτουν συγκεκριμένες ιδιότητες που τους καθιστούν επιθυμητούς για διάφορες εφαρμογές κυκλωμάτων. Ακολουθούν ορισμένες βασικές ιδιότητες και οι αντίστοιχες εφαρμογές τους:

Υψηλή τάση διάσπασης: Οι ημιαγωγοί SiC τύπου P έχουν υψηλή τάση διάσπασης, επιτρέποντάς τους να διαχειρίζονται υψηλές τάσεις χωρίς να παρουσιάζουν διάσπαση ή βλάβη. Αυτή η ιδιότητα τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές σε ηλεκτρονικά ισχύος υψηλής τάσης, όπως ανορθωτές υψηλής ισχύος, αντιστροφείς και ρυθμιστές τάσης.

Υψηλή θερμική αγωγιμότητα: Το SiC παρουσιάζει εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας, καθιστώντας τους ημιαγωγούς SiC τύπου P κατάλληλους για εφαρμογές υψηλής ισχύος που παράγουν σημαντική θερμότητα. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε μονάδες ισχύος για ηλεκτρικά οχήματα, βιομηχανικούς κινητήρες και συσκευές μεταγωγής υψηλής ισχύος.

Λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες: Οι ημιαγωγοί SiC τύπου P μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων. Μπορούν να αντέξουν θερμοκρασίες πολύ πάνω από 200 βαθμούς Κελσίου και παρουσιάζουν ανώτερη σταθερότητα σε σύγκριση με τους ημιαγωγούς με βάση το πυρίτιο. Αυτές οι ιδιότητες τους καθιστούν ιδανικούς για εφαρμογές στην αεροδιαστημική, στο πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών.

Χαμηλή αντίσταση σε κατάσταση λειτουργίας: Οι ημιαγωγοί SiC τύπου P έχουν χαμηλή αντίσταση σε κατάσταση λειτουργίας, οδηγώντας σε μειωμένες απώλειες ισχύος και βελτιωμένη απόδοση σε εφαρμογές μετατροπής ισχύος. Χρησιμοποιούνται συχνά σε ηλεκτρονικά ισχύος υψηλής συχνότητας, όπως τα τροφοδοτικά διακοπτικής λειτουργίας, όπου η υψηλή απόδοση και το συμπαγές μέγεθος είναι ζωτικής σημασίας.

Αντίσταση στην ακτινοβολία: Το SiC παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στην ακτινοβολία, καθιστώντας τους ημιαγωγούς SiC τύπου P κατάλληλους για εφαρμογές σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, εξερεύνηση του διαστήματος και επιταχυντές σωματιδίων. Μπορούν να αντέξουν την ιονίζουσα ακτινοβολία και τα σωματίδια υψηλής ενέργειας χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης, προσφέροντας αυξημένη αξιοπιστία και μακροζωία σε περιβάλλοντα πλούσια σε ακτινοβολία.

Συνοπτικά, οι ημιαγωγοί SiC τύπου P με την υψηλή τάση διάσπασης, τη θερμική αγωγιμότητα, τις δυνατότητες λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, τη χαμηλή αντίσταση σε κατάσταση λειτουργίας και την αντίσταση στην ακτινοβολία βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορα κυκλώματα, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών ισχύος υψηλής τάσης, των ανορθωτών και των αντιστροφών υψηλής ισχύος, των κινητήρων, των ηλεκτρικών οχημάτων, των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της αεροδιαστημικής, των αισθητήρων υψηλής θερμοκρασίας και των διατάξεων ανθεκτικών στην ακτινοβολία. Αυτοί οι ημιαγωγοί συμβάλλουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και των επιδόσεων σε απαιτητικές εφαρμογές κυκλωμάτων.

3.1.3 Ανορθωτική Δίοδος

Μια ανορθωτική δίοδος, κοινώς γνωστή ως δίοδος, είναι μια διάταξη ημιαγωγού που επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση, λειτουργώντας ως μονόδρομη βαλβίδα για το ηλεκτρικό ρεύμα. Πρόκειται για ένα ηλεκτρονικό στοιχείο δύο ακροδεκτών με επαφή p-n, που σχηματίζεται από την ένωση ενός ημιαγωγού τύπου p (θετικοί φορείς φορτίου) και ενός ημιαγωγού τύπου n (αρνητικοί φορείς φορτίου). Η μοναδική ιδιότητα της διόδου να διοχετεύει το ρεύμα προς μία κατεύθυνση και να το εμποδίζει προς την αντίθετη κατεύθυνση την καθιστά κρίσιμο στοιχείο σε διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Ιδιότητες ανορθωτικών διόδων:

Εμπρόσθια πόλωση: Όταν εφαρμόζεται θετική τάση στην περιοχή τύπου p και αρνητική τάση στην περιοχή τύπου n (εμπρόσθια πόλωση), η δίοδος γίνεται αγώγιμη, επιτρέποντας

την εύκολη ροή ρεύματος μέσω αυτής. Η τάση που απαιτείται για να ξεπεραστεί το φράγμα της διόδου και να αρχίσει η αγωγιμότητα ονομάζεται πτώση τάσης εμπρόσθιας πόλωσης, τυπικά περίπου 0,6 έως 0,7 βολτ για τις διόδους πυριτίου.

Αντίστροφη πόλωση: Όταν εφαρμόζεται αρνητική τάση στην περιοχή τύπου p και θετική τάση στην περιοχή τύπου n (αντίστροφη πόλωση), η διόδος γίνεται μη αγωγίμη, εμποδίζοντας τη ροή ρεύματος. Σε αυτή την κατάσταση, μπορεί να ρέει μόνο ένα μικρό ρεύμα διαρροής, συνήθως αμελητέο στις περισσότερες εφαρμογές.

Ανόρθωση: Η βασική εφαρμογή των διόδων ανόρθωσης είναι η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC). Τοποθετώντας τη διόδο σε σειρά με μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, μπορούν να περάσουν μόνο οι θετικοί ή οι αρνητικοί ημιπερίοδοι του σήματος εναλλασσόμενου ρεύματος, ανάλογα με τον προσανατολισμό της διόδου.

Γρήγορη ανταπόκριση: Οι διόδοι έχουν χαμηλή χωρητικότητα και μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται γρήγορα, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές υψηλής συχνότητας, όπως η ανόρθωση και η αποδιαμόρφωση σήματος.

Ευαισθησία στη θερμοκρασία: Τα χαρακτηριστικά των διόδων μπορούν να επηρεαστούν από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Η πτώση τάσης προς τα εμπρός μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ το αντίστροφο ρεύμα διαρροής αυξάνεται.

Τάση διάσπασης: Οι διόδοι σχεδιάζονται για να αντέχουν μια μέγιστη ανάστροφη τάση, γνωστή ως τάση διάσπασης ή μέγιστη αντίστροφη τάση (PIV). Εάν η τάση αυτή ξεπεραστεί, η διόδος μπορεί να υποστεί μόνιμη βλάβη.

Εφαρμογές ανορθωτικών διόδων:

Διόρθωση: Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κύρια εφαρμογή των διόδων είναι στα κυκλώματα ανόρθωσης, μετατρέποντας το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές σε τροφοδοτικά, ανορθωτές και φορτιστές μπαταριών.

Τροφοδοτικά: Οι διόδοι χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση και την προστασία των τροφοδοτικών ισχύος μέσω της ανόρθωσης και του ελέγχου της ροής του ρεύματος.

Αποδιαμόρφωση σήματος: Στα συστήματα επικοινωνίας, οι δίοδοι χρησιμοποιούνται για την αποδιαμόρφωση σημάτων, εξάγοντας την αρχική πληροφορία από το φέρον σήμα.

Ρύθμιση τάσης: Οι δίοδοι Zener, ένας εξειδικευμένος τύπος διόδου, χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ρύθμισης τάσης και αναφοράς τάσης.

Κυκλώματα μεταγωγής: Οι δίοδοι χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα μεταγωγής για την προστασία άλλων εξαρτημάτων από αιχμές τάσης και μεταβατικά φαινόμενα.

Κυκλώματα ψαλιδισμού και σύσφιξης: Οι δίοδοι χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ψαλιδισμού και σύσφιξης για τον περιορισμό του επιπέδου τάσης μιας κυματομορφής ή τη μετατόπιση του επιπέδου συνεχούς ρεύματος.

Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED): Ένας ειδικός τύπος διόδου που εκπέμπει φως όταν είναι στραμμένη προς τα εμπρός και χρησιμοποιείται ευρέως στις τεχνολογίες φωτισμού και οθονών.

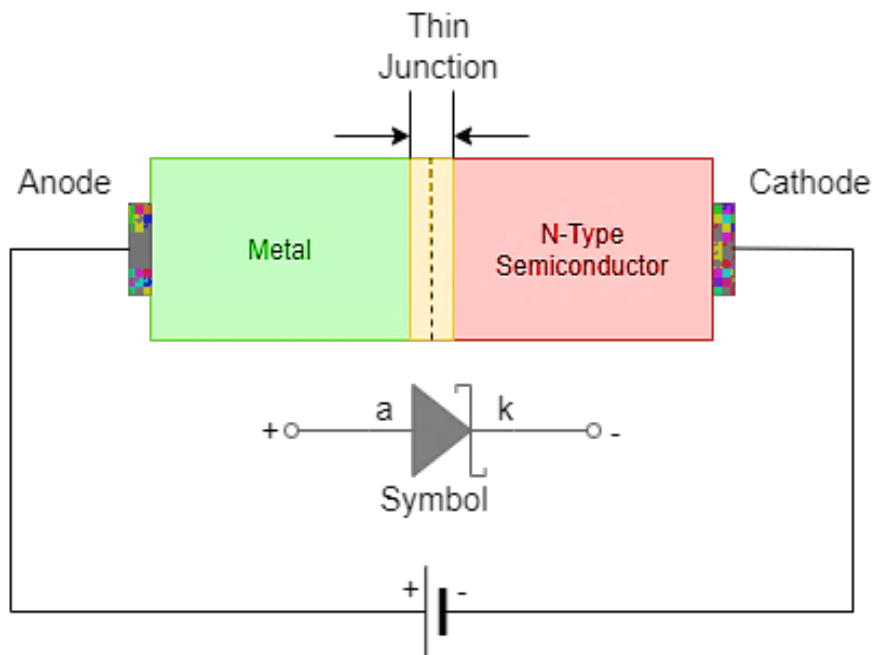
Φωτοδίοδοι και ηλιακά κύτταρα: Πρόκειται για φωτοευαίσθητες δίοδους που χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση του φωτός και στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, αντίστοιχα.

3.1.4 Δίοδοι Schottky SiC

Η διάδος Schottky είναι ένας τύπος διόδου ημιαγωγού που έχει μοναδικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τις συμβατικές δίοδους επαφής p-n. Πήρε το όνομά της από τον Γερμανό φυσικό Walter H. Schottky, ο οποίος περιέγραψε για πρώτη φορά τις αρχές της στις αρχές του 20ού αιώνα. Οι δίοδοι Schottky χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες ηλεκτρονικές εφαρμογές λόγω της χαμηλής πτώσης τάσης εμπρόσθιας τάσης και της γρήγορης ταχύτητας μεταγωγής τους.

Η βασική δομή μιας διόδου Schottky αποτελείται από μια ένωση μετάλλου-ημιαγωγού αντί για μια ένωση p-n που συναντάται στις κανονικές δίοδους. Η μεταλλική πλευρά της ένωσης αποτελείται συνήθως από ένα υλικό χαμηλής λειτουργικότητας έργου, όπως το αλουμίνιο ή η πλατίνα, ενώ η πλευρά του ημιαγωγού είναι συνήθως κατασκευασμένη από υλικό τύπου

n, όπως το πυρίτιο ή το αρσενίδιο του γαλλίου. Το μέταλλο χαμηλής λειτουργίας εργασίας επιτρέπει την αποτελεσματική ροή ηλεκτρονίων κατά μήκος της ένωσης.



Εικόνα 6- Δίοδος Schottky [23]

Το βασικό πλεονέκτημα των διόδων Schottky είναι η χαμηλή πτώση τάσης προς τα εμπρός (συνήθως περίπου 0,2 έως 0,3 βολτ), η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από την πτώση τάσης των συμβατικών διόδων (περίπου 0,6 έως 0,7 βολτ). Αυτή η χαμηλή πτώση τάσης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη απώλεια ισχύος και μειωμένη παραγωγή θερμότητας, καθιστώντας τις διόδους Schottky κατάλληλες για εφαρμογές όπου η απόδοση είναι κρίσιμη.

Οι δίοδοι Schottky έχουν επίσης γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής λόγω της χαμηλής χωρητικότητάς τους και του χαμηλού χρόνου ανάστροφης αποκατάστασης. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής συχνότητας, ανόρθωση σημάτων υψηλής ταχύτητας και διακοπτικά τροφοδοτικά.

Ωστόσο, οι δίοδοι Schottky έχουν επίσης ορισμένους περιορισμούς. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι το σχετικά υψηλό αντίστροφο ρεύμα διαρροής τους σε σύγκριση με τις διόδους σύνδεσης p-n. Αυτό περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές όπου απαιτείται χαμηλό ανάστροφο ρεύμα. Επιπλέον, οι δίοδοι Schottky έχουν χαμηλότερη μέγιστη ονομαστική αντίστροφη τάση σε σύγκριση με τις κανονικές διόδους.

Συνοπτικά, οι διόδους Schottky προσφέρουν χαμηλή πτώση τάσης προς τα εμπρός, γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής και δυνατότητες υψηλής συχνότητας, καθιστώντας τες ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν αποδοτικότητα και επιδόσεις υψηλής ταχύτητας. Βρίσκουν εφαρμογές σε τροφοδοτικά, κυκλώματα σύσφιξης τάσης, κυκλώματα RF και μικροκυμάτων, ανορθωτές και πολλά άλλα ηλεκτρονικά συστήματα.

Η διάδος Schottky διαθέτει αρκετά διακριτά χαρακτηριστικά που την διαφοροποιούν από τις συμβατικές διόδους σύνδεσης p-n. Ακολουθούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των διόδων Schottky:

Χαμηλή προωθητική τάση: Οι διόδους Schottky έχουν σημαντικά χαμηλότερη προωθητική τάση σε σύγκριση με τις διόδους σύνδεσης p-n. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει μειωμένη απώλεια ισχύος και βελτιωμένη απόδοση σε πολλές εφαρμογές.

Γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής: Λόγω της μοναδικής δομής τους και της χαμηλής χωρητικότητάς τους, οι διόδους Schottky παρουσιάζουν γρήγορες ταχύτητες μεταγωγής. Αυτό το χαρακτηριστικό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής συχνότητας και ανόρθωση σημάτων υψηλής ταχύτητας.

Χαμηλός χρόνος ανάστροφης αποκατάστασης: Οι διόδους Schottky έχουν ελάχιστο χρόνο ανάστροφης αποκατάστασης. Αυτή η ιδιότητα τους επιτρέπει να μεταβαίνουν γρήγορα από την αγώγιμη στη μη αγώγιμη κατάσταση όταν αλλάζει η πολικότητα της τάσης. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεταγωγικά τροφοδοτικά και άλλες εφαρμογές που απαιτούν ταχεία μεταγωγή.

Ικανότητα υψηλής συχνότητας: Η χαμηλή χωρητικότητα και η γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής των διόδων Schottky τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπως κυκλώματα RF και μικροκυμάτων. Μπορούν να ανορθώνουν αποτελεσματικά σήματα υψηλής ταχύτητας και να διαχειρίζονται ρεύματα υψηλής συχνότητας.

Μέτρια ονομαστική αντίστροφη τάση: Οι διόδους Schottky έχουν συνήθως χαμηλότερη μέγιστη ονομαστική αντίστροφη τάση σε σύγκριση με τις διόδους σύνδεσης p-n. Ενώ αυτό περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές υψηλής τάσης, εξακολουθούν να είναι κατάλληλες για σενάρια χαμηλότερης τάσης.

Σχεδιασμός Διόδων Schottky

Ο σχεδιασμός μιας διόδου Schottky περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων υλικών και την κατασκευή της ένωσης μετάλλου-ημιαγωγού. Ακολουθεί μια γενική επισκόπηση της διαδικασίας σχεδιασμού:

Επιλογή υλικού ημιαγωγού: Η πλευρά του ημιαγωγού μιας διόδου Schottky κατασκευάζεται συνήθως από ένα υλικό με χαμηλό χάσμα ζώνης, όπως το πυρίτιο (Si) ή το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs). Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της επιθυμητής πτώσης τάσης προς τα εμπρός, του ρεύματος διαρροής προς τα πίσω και της σταθερότητας στη θερμοκρασία.

Επιλογή της μεταλλικής επαφής: Η μεταλλική πλευρά της επαφής της διόδου Schottky είναι συνήθως κατασκευασμένη από υλικό χαμηλής λειτουργικότητας έργου, όπως το αλουμίνιο (Al), η πλατίνα (Pt) ή ο χρυσός (Au). Η μεταλλική επαφή επιλέγεται για τη βελτιστοποίηση του ύψους φραγμού και την ελαχιστοποίηση της πτώσης τάσης εμπρόσθιας κίνησης.

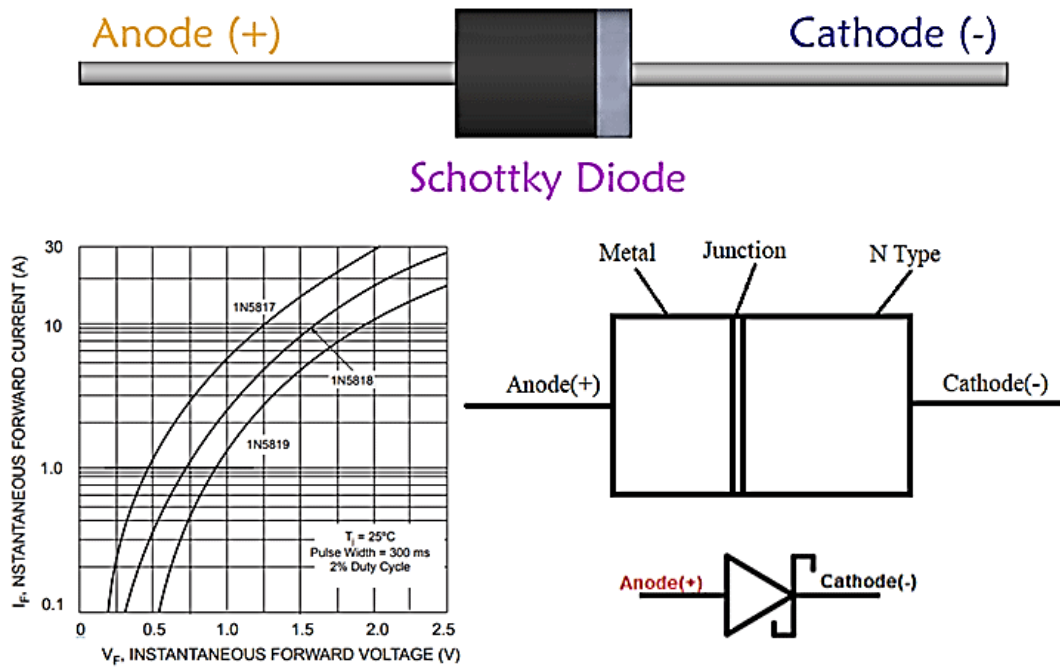
Κατασκευή του κόμβου: Η μεταλλική επαφή εναποτίθεται πάνω στο υλικό ημιαγωγού με τεχνικές όπως η σπατουλαρίσματος, η εξάτμιση ή η ηλεκτρολυτική επίστρωση. Η επαφή σχηματίζεται από τη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του ημιαγωγού. Η μεταλλική επαφή θα πρέπει να ανοπτηθεί ή να υποστεί επεξεργασία για να εξασφαλιστούν καλές ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες.

Παθητικοποίηση: Για την προστασία της σύνδεσης και τη μείωση των επιφανειακών καταστάσεων, μπορεί να εφαρμοστεί ένα στρώμα παθητικοποίησης στη δίοδο Schottky. Τα συνήθη υλικά παθητικοποίησης περιλαμβάνουν νιτρίδιο του πυριτίου (Si₃N₄) ή διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂).

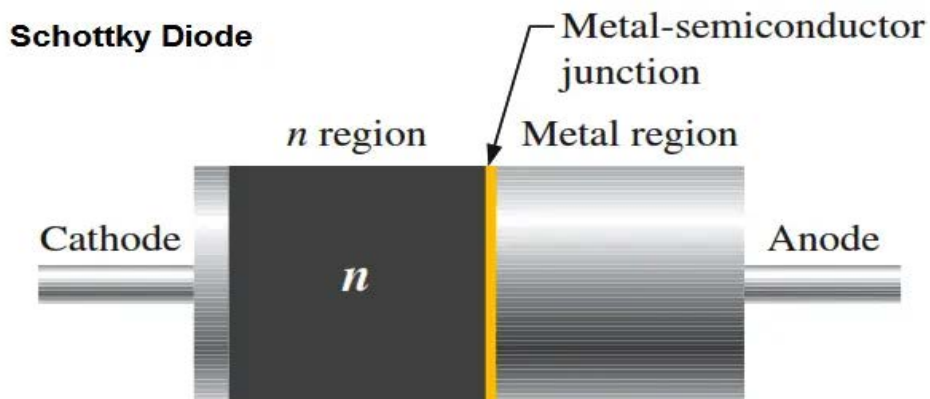
Συσκευασία και διασυνδέσεις: Αφού κατασκευαστεί η δίοδος Schottky, συνήθως τοποθετείται σε συσκευασία για να προστατεύεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και να διευκολύνεται η εύκολη ενσωμάτωση σε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η συσκευασία παρέχει επίσης ηλεκτρικές συνδέσεις μέσω συγκόλλησης καλωδίων ή συγκόλλησης.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες λεπτομέρειες σχεδιασμού και οι διαδικασίες κατασκευής μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το υλικό του ημιαγωγού, τη

μεταλλική επαφή και την τεχνολογία κατασκευής που χρησιμοποιείται. Τα παραπάνω βήματα παρέχουν μια γενική επισκόπηση των αρχών σχεδιασμού.



Εικόνα 7- Επεξήγηση της Διόδου Schottky.[24]



Εικόνα 8- Επεξήγηση της Διόδου Schottky.[25]

3.1.5 Δίοδοι Schottky σε κυκλώματα

Οι δίοδοι Schottky βρίσκουν ευρύ φάσμα εφαρμογών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους. Ακολουθεί μια λεπτομερής ματιά στη χρήση των διόδων Schottky σε διάφορες κυκλωματικές διαμορφώσεις:

Κυκλώματα ανορθωτή: Οι δίοδοι Schottky χρησιμοποιούνται συνήθως ως ανορθωτές σε κυκλώματα τροφοδοσίας. Λόγω της χαμηλής πτώσης τάσης εμπρόσθιας κατεύθυνσης, είναι πιο αποτελεσματικές από τις κανονικές διόδους σύνδεσης p-n στη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση. Η γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής τους και ο χαμηλός χρόνος ανάστροφης αποκατάστασης τις καθιστούν ιδανικές για ανόρθωση υψηλής συχνότητας.

Κυκλώματα σύσφιξης τάσης: Οι δίοδοι Schottky χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα σύσφιξης τάσης για την προστασία ευαίσθητων εξαρτημάτων από αιχμές τάσης. Τοποθετώντας μια δίοδο Schottky παράλληλα με το φορτίο, λειτουργεί ως παράπλευρο στοιχείο που οδηγεί την υπερβολική τάση μακριά από το φορτίο, αποτρέποντας τη ζημία.

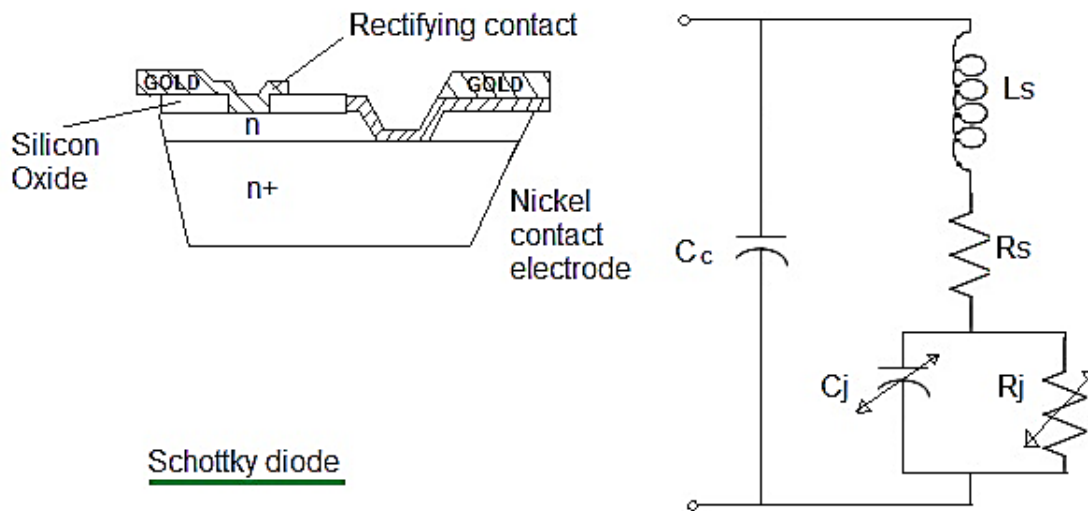
Διακόπτες ισχύος: Οι δίοδοι Schottky χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεταγωγής ισχύος, όπως σε ρυθμιστές μεταγωγής και μετατροπείς DC-DC. Μπορούν να διαχειριστούν υψηλά ρεύματα και παρέχουν δυνατότητες γρήγορης μεταγωγής, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές μεταγωγής υψηλής συχνότητας.

Κυκλώματα RF και μικροκυμάτων: Οι δίοδοι Schottky είναι κατάλληλες για κυκλώματα υψηλής συχνότητας λόγω της χαμηλής χωρητικότητάς τους και της γρήγορης ταχύτητας μεταγωγής τους. Χρησιμοποιούνται σε μίκτες RF, ανιχνευτές, πολλαπλασιαστές συχνότητας και άλλα μικροκυματικά κυκλώματα.

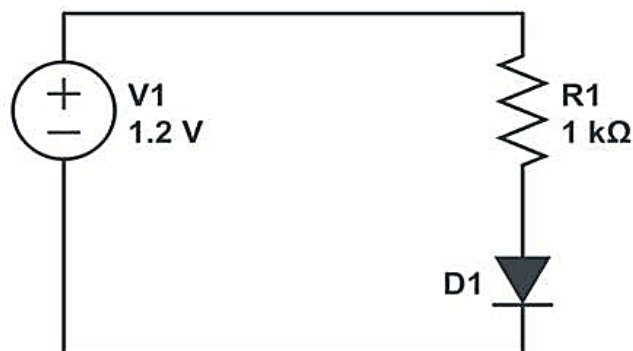
Λογικά κυκλώματα: Οι δίοδοι Schottky μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λογικά κυκλώματα για λειτουργίες όπως οι πύλες OR, AND και NOR. Αξιοποιώντας τη χαμηλή πτώση τάσης εμπρόσθιας τάσης των διόδων, μπορούν να εκτελέσουν αποτελεσματικά λογικές πράξεις.

Προστασία από υπέρταση: Οι δίοδοι Schottky μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διατάξεις προστασίας από υπέρταση για την αποφυγή ζημιών από παροδικές αιχμές τάσης. Μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα σε συνθήκες υψηλής τάσης και να διοχετεύσουν το πλεονάζον ρεύμα μακριά από τα ευαίσθητα εξαρτήματα.

Φωτοβολταϊκά συστήματα: Οι δίοδοι Schottky χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα για να αποτρέψουν την αντίστροφη ροή ρεύματος από την μπαταρία ή το φορτίο πίσω στον ηλιακό συλλέκτη. Προστατεύουν τα ηλιακά κύτταρα από βλάβες και βελτιστοποιούν την απόδοση μετατροπής ενέργειας.



Εικόνα 9- Δίοδος Schottky σε κύκλωμα.[26]

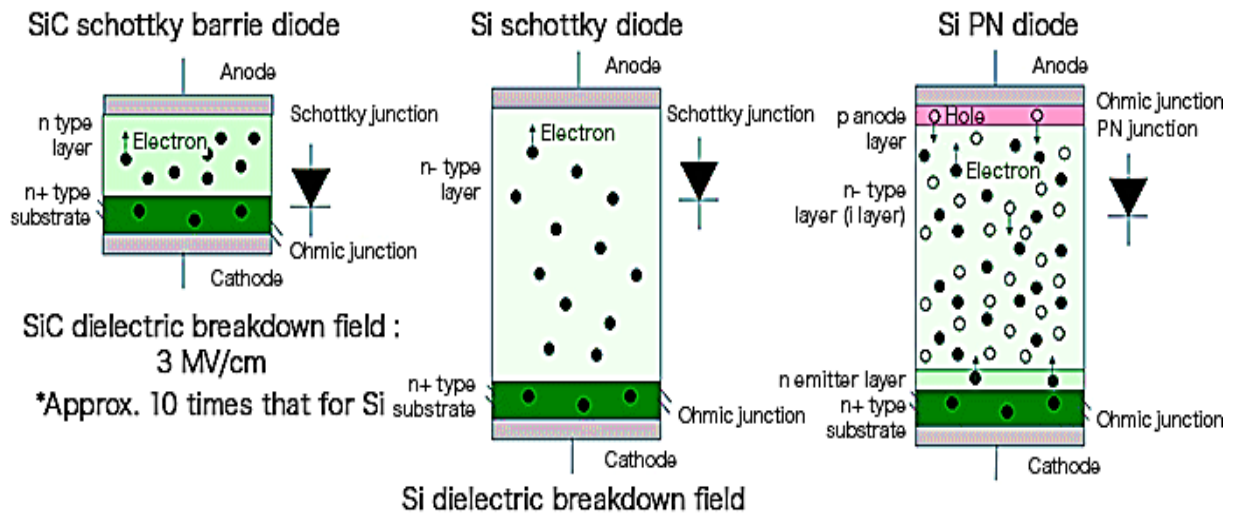


Εικόνα 10- Δίοδος Schottky σε κύκλωμα.[27]

3.1.6 Χαρακτηριστικά των SiC-SBDs, Si SBDs και Si PNDs

Σε ένα SiC-SBD, σχηματίζεται μια μεταλλική ένωση με τον ημιαγωγό SiC (μια ένωση Schottky) για τη δημιουργία ενός φράγματος Schottky. Η δομή είναι ουσιαστικά η ίδια με εκείνη μιας δίοδου φραγμού Schottky Si και μόνο τα ηλεκτρόνια κινούνται για να προκαλέσουν τη ροή

ρεύματος. Αντίθετα, μια Si-PND έχει δομή που βασίζεται σε μια ένωση πυριτίου τύπου P και πυριτίου τύπου N, και το ρεύμα ρέει λόγω τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών.

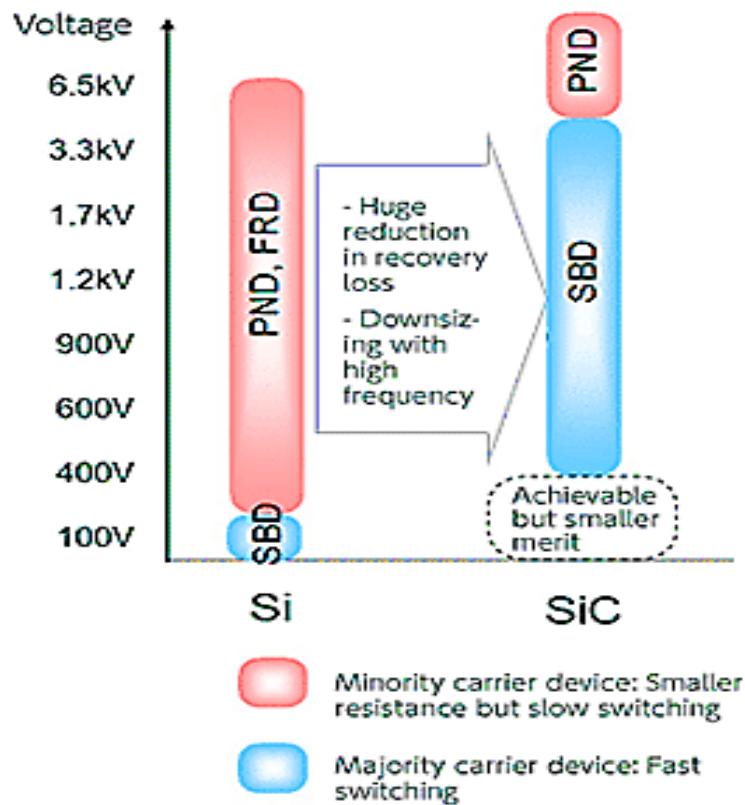


Εικόνα 11- SiC-SBD.[28]

Τόσο τα SiC-SBD όσο και τα Si SBD διαθέτουν γρήγορη λειτουργία, αλλά τα SiC-SBD επιτυγχάνουν υψηλές ονομαστικές τάσεις μαζί με γρήγορη λειτουργία. Τα 200 V είναι το ανώτερο όριο των ονομαστικών τάσεων των Si-SBD, αλλά το SiC έχει πεδίο διηλεκτρικής διάσπασης περίπου δέκα φορές υψηλότερο από εκείνο του πυριτίου, και έτσι παράγονται μαζικά προϊόντα SiC με ονομαστική τάση 1200 V, ενώ προϊόντα με τάση 1700 V βρίσκονται υπό ανάπτυξη.

Τα Si-PNDs έχουν μειωμένη αντίσταση λόγω της συσσώρευσης οπών φορέων μειονότητας στο στρώμα n, και έτσι μπορούν να πραγματοποιήσουν ταυτόχρονα χαμηλή αντίσταση και υψηλές τάσεις πολύ πέρα από εκείνες των Si-SBDs, αλλά οι ταχύτητες απενεργοποίησης είναι αργές.

Μεταξύ των Si-PNDs, οι FRDs διαθέτουν ταχύτερη λειτουργία, αλλά ακόμη και έτσι το χαρακτηριστικό t_{rr} είναι κατώτερο από εκείνο των SBDs.

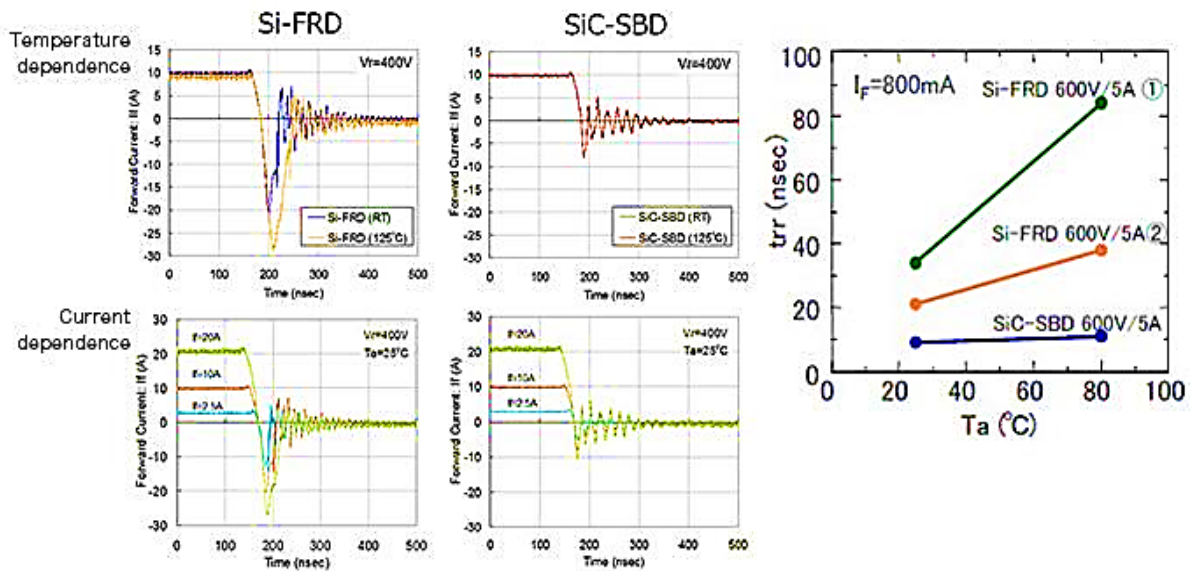


Εικόνα 12-Τάση των SiC-SBD.[29]

Το διάγραμμα στα δεξιά υποδεικνύει τα εύρη ονομαστικής τάσης για τα Si-SBDs, τα Si-PNDs/FRDs και τα SiC-SBDs. Τα SiC-SBDs εκτείνονται σε ένα σημαντικό μέρος του εύρους τάσης των Si- PNDs/FRDs, και έτσι είναι δυνατή η βελτίωση της t_{rr} των Si-PNDs/FRDs σε αυτή την περιοχή.

3.1.7 Τιμές t_{rr} των SiC-SBDs

Σε σύγκριση με τα Si-FRDs, εξηγήθηκε ότι τα Si-SBDs έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά t_{rr} και δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία εξάρτηση από τη θερμοκρασία ή το ρεύμα.

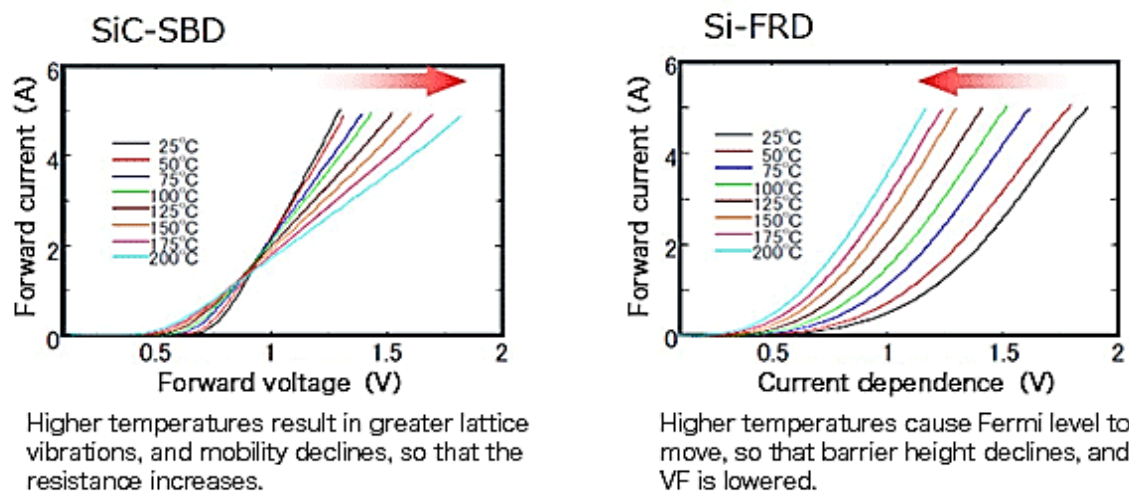


Εικόνα 13- Τιμές t_{rr} των SiC-SBDs.[30]

3.1.8 Χαρακτηριστικά προώθησης των SiC-SBDs

Τα χαρακτηριστικά προώθησης των Si-SBDs διαφέρουν από εκείνα των Si-PNDs. Αυτό είναι συνέπεια των φυσικών ιδιοτήτων και των δομών. Ειδικά όσον αφορά τα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η VF ενός Si-FRD μειώνεται και οι απώλειες αγωγιμότητας μειώνονται, αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνεται η IF και υπάρχει η πιθανότητα μιας κατάστασης θερμικής διαφυγής.

Αντίθετα, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, η VF ενός SiC-SBD αυξάνεται, έτσι ώστε να μην εμφανίζεται θερμική διαφυγή. Ωστόσο, λόγω της υψηλότερης VF, η IFSM είναι χαμηλότερη από ό,τι για ένα Si-FRD.



Εικόνα 14- Χαρακτηριστικά προώθησης των SiC-SBDs.[31]

3.1.9 Πλεονεκτήματα των SiC-SBDs

Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών των SiC-SBDs, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση τους για την αντικατάσταση των Si-PNDs/FRDs οφείλονται στη γρήγορη λειτουργία τους.

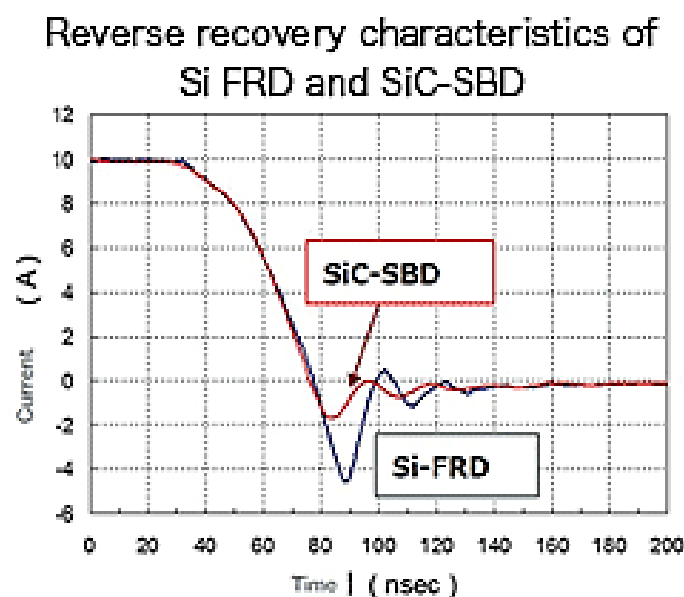
1. Η t_{rr} είναι γρήγορη, έτσι ώστε οι απώλειες ανάκτησης να μπορούν να μειωθούν δραματικά, για υψηλότερη απόδοση.

2. Για παρόμοιο λόγο, το ανάστροφο ρεύμα είναι μικρό, έτσι ώστε ο θόρυβος να είναι χαμηλός και η καταστολή θορύβου/επιφανειακών υπερτάσεων και τα στοιχεία μπορούν να εξαλειφθούν, επιτρέποντας ενισχυμένη σμίκρυνση.

3. Η λειτουργία υψηλής συχνότητας επιτρέπει τη σμίκρυνση των επαγωγών και άλλων περιφερειακών εξαρτημάτων.

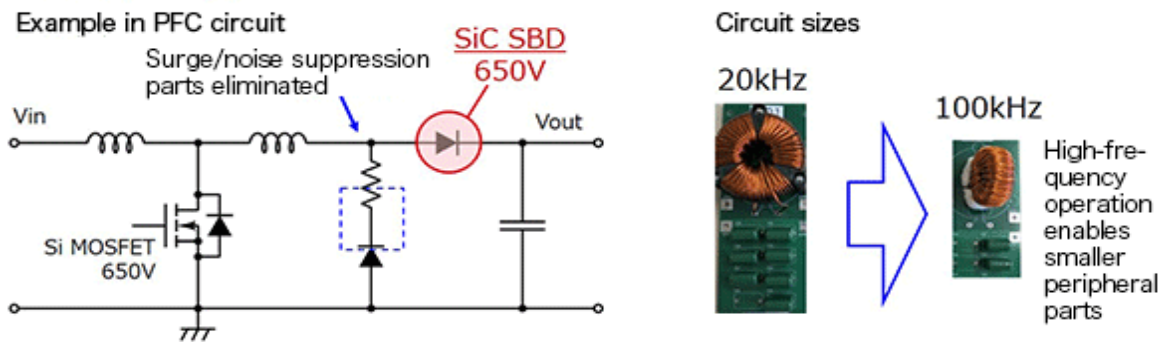
Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα και σχετικές εικόνες.

Επιπλέον, λόγω της πολύ σταθερής λειτουργίας τους σε σχέση με τη θερμοκρασία, οι διατάξεις αυτές είναι συμβατές με εφαρμογές αυτοκινήτων και τα πλεονεκτήματα των SiC-SBDs αξιοποιούνται σε πραγματικά κυκλώματα φόρτισης HV/EV/PHV επί του οχήματος.



Reverse recovery current during t_{rr} results in loss

Εικόνα 15- Πλεονεκτήματα των SiC-SBDs.[32]



Εικόνα 16- Πλεονεκτήματα των SiC-SBDs.[33]

3.1.10 Τρανζίστορ BJT

Το τρανζίστορ διπολικής σύνδεσης (BJT) είναι μια θεμελιώδης διάταξη ημιαγωγών που χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για διάφορες εφαρμογές, όπως ενίσχυση, μεταγωγή και επεξεργασία σήματος. Τα BJT είναι διατάξεις τριών ακροδεκτών που αποτελούνται από τρεις περιοχές ημιαγωγών: τον εκπομπό, τη βάση και τον συλλέκτη. Η λειτουργία ενός BJT βασίζεται στη ροή τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών στις διάφορες περιοχές του τρανζίστορ.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι διατάξεων BJT:

Τρανζίστορ NPN:

Η περιοχή εκπομπού είναι κατασκευασμένη από υλικό ημιαγωγού τύπου N, η περιοχή βάσης είναι κατασκευασμένη από υλικό τύπου P και η περιοχή συλλέκτη είναι υλικό τύπου N.

Οι φορείς πλειονότητας στον εκπομπό είναι ηλεκτρόνια και στη βάση είναι οπές.

Το τρανζίστορ NPN είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος σε πρακτικές εφαρμογές.

Τρανζίστορ PNP:

Σε ένα τρανζίστορ PNP, η περιοχή εκπομπού είναι κατασκευασμένη από υλικό ημιαγωγού τύπου P, η περιοχή βάσης είναι κατασκευασμένη από υλικό τύπου N και η περιοχή συλλέκτη είναι υλικό τύπου P.

Αρχή λειτουργίας ενός BJT:

Η λειτουργία ενός BJT βασίζεται στον έλεγχο της ροής ρεύματος μεταξύ των περιοχών εκπομπού και συλλέκτη με ένα μικρό ρεύμα που διαρρέει την περιοχή βάσης. Όταν εφαρμόζεται ένα μικρό ρεύμα με τάση προς τα εμπρός μεταξύ της βάσης και του εκπομπού, επιτρέπει τη ροή πολύ μεγαλύτερου ρεύματος μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ενίσχυση ρεύματος και ο λόγος του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης είναι γνωστός ως κέρδος ρεύματος (β ή h_{fe}).

Οι φορείς πλειονότητας στον εκπομπού είναι οπές, ενώ στην περιοχή βάσης είναι ηλεκτρόνια.

Τρόποι λειτουργίας BJT:

Τα BJT έχουν τρεις τρόπους λειτουργίας:

Ενεργός τρόπος λειτουργίας: Το ρεύμα συλλέκτη είναι ανάλογο του ρεύματος βάσης. Το BJT πολώνεται ώστε να διασφαλίζεται ότι παραμένει σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας.

Λειτουργία αποκοπής: Στη λειτουργία αποκοπής, το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση απενεργοποίησης και δεν ρέει σχεδόν καθόλου ρεύμα μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού. Αυτό συμβαίνει όταν η ένωση βάσης-εκπομπού είναι αντίστροφα πολωμένη.

Λειτουργία κορεσμού: Στη λειτουργία κορεσμού, το τρανζίστορ είναι πλήρως αγώγιμο και η τάση συλλέκτη-εκπομπού μειώνεται στην ελάχιστη τιμή της. Αυτό συμβαίνει όταν η ένωση βάσης-εκπομπού είναι στραμμένη προς τα εμπρός και το τρανζίστορ λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης.

Τύποι διαμόρφωσης BJT:

BJT μπορούν να διαμορφωθούν με τρεις τρόπους:

Κοινός πομπός (CE): Ο εκπομπός είναι κοινός μεταξύ των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου. Αυτή η διαμόρφωση προσφέρει υψηλό κέρδος τάσης και χρησιμοποιείται συνήθως για σκοπούς ενίσχυσης.

Κοινή βάση (CB): Η βάση είναι κοινή μεταξύ των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου. Αυτή η διαμόρφωση προσφέρει χαμηλή αντίσταση εισόδου και υψηλό κέρδος ρεύματος, κατάλληλο για ορισμένες εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Κοινός συλλέκτης (CC) ή Emitter Follower: Ο συλλέκτης είναι κοινός μεταξύ των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου. Αυτή η διαμόρφωση παρέχει μοναδιαίο κέρδος τάσης αλλά υψηλό κέρδος ρεύματος και λειτουργεί ως ρυθμιστής μεταξύ των κυκλωμάτων.

Τα BJT έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, αν και η χρήση τους έχει συμπληρωθεί και, σε ορισμένες περιπτώσεις, αντικατασταθεί από άλλες διατάξεις ημιαγωγών όπως τα MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors). Παρ' όλα αυτά, τα BJT παραμένουν βασικά εξαρτήματα σε διάφορες ηλεκτρονικές εφαρμογές λόγω των ισχυρών επιδόσεών τους και της ευελιξίας τους.

Να θυμάστε ότι ενώ τα BJT είναι χρήσιμα, η επιλογή της κατάλληλης διάταξης ημιαγωγών για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από παράγοντες όπως οι απαιτήσεις τάσης, η απώλεια ισχύος, η ταχύτητα μεταγωγής και η απόδοση θορύβου. Οι σχεδιαστές πρέπει να εξετάζουν προσεκτικά αυτούς τους παράγοντες για να επιλέξουν την καταλληλότερη διάταξη ημιαγωγών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ιδιότητες των ημιαγωγών BJT:

Ενίσχυση: Τα BJT μπορούν να ενισχύουν ασθενή σήματα, καθιστώντας τα χρήσιμα σε διάφορες ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Έλεγχος ρεύματος: Τα BJT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ροής ρεύματος σε ένα κύκλωμα.

Υψηλό κέρδος: Προσφέρουν υψηλό κέρδος τάσης και ρεύματος.

Χαμηλή απορρόφηση ισχύος: Τα BJT έχουν χαμηλή απώλεια ισχύος σε σύγκριση με ορισμένες άλλες διατάξεις ημιαγωγών, όπως τα FET (τρανζίστορ επίδρασης πεδίου).

Γρήγορες ταχύτητες μεταγωγής: Τα BJT μπορούν να μεταβούν γρήγορα μεταξύ των καταστάσεων ενεργοποίησης και απενεργοποίησης, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Ευαισθησία στη θερμοκρασία: Τα χαρακτηριστικά των BJT μπορούν να επηρεαστούν από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Εφαρμογές των ημιαγωγών BJT:

Ενισχυτές: BJT χρησιμοποιούνται συνήθως σε ενισχυτές ήχου και ραδιοσυχνοτήτων.

Διακόπτες: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος σε διάφορα κυκλώματα.

Ταλαντωτές: Τα BJT χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ταλαντωτών για τη δημιουργία περιοδικών σημάτων.

Ρυθμιστές τάσης: Τα BJT μπορούν να αποτελέσουν μέρος κυκλωμάτων ρυθμιστών τάσης για τη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου.

Λογικά κυκλώματα: Τα BJT χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό ψηφιακών λογικών πυλών.

Έλεγχος ισχύος: Χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ελέγχου ισχύος και διαχείρισης ισχύος.

Επεξεργασία σημάτων: Τα BJT βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορα κυκλώματα επεξεργασίας σήματος.

3.1.11 FET

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) είναι ένας τύπος ημιαγωγικής διάταξης που χρησιμοποιείται ευρέως στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα για ενίσχυση, μεταγωγή και επεξεργασία σήματος. Αποτελούν βασικά στοιχεία στα ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC) και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία των ψηφιακών λογικών κυκλωμάτων, των μικροεπεξεργαστών, των τσιπ μνήμης και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών. Τα FET κυκλοφορούν σε διάφορους τύπους, όπως τα FET μεταλλικών οξειδίων-ημιαγωγών (MOSFET) και τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου διασταύρωσης (JFET), αλλά το πιο κοινό και ευρέως χρησιμοποιούμενο FET είναι το MOSFET.

Ακολουθεί μια λεπτομερής εισαγωγή στα FET, εστιάζοντας κυρίως στα MOSFET:

Βασική δομή: Το MOSFET αποτελείται από τρεις ακροδέκτες: την πύλη (G), την πηγή (S) και την αποστράγγιση (D). Αυτοί οι ακροδέκτες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος μεταξύ της Πηγής και της Απορροής με την εφαρμογή τάσης στον ακροδέκτη της Πύλης. Η ροή του ρεύματος ρυθμίζεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την τάση που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη Gate.

Αρχή λειτουργίας: Το MOSFET λειτουργεί με βάση την αρχή της διαμόρφωσης επίδρασης πεδίου. Όταν εφαρμόζεται τάση στον ακροδέκτη πύλης, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο

υποκείμενο ημιαγωγικό υλικό (συνήθως πυρίτιο). Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο ελέγχει τη ροή φορέων φορτίου (είτε ηλεκτρόνια είτε οπές) μεταξύ των ακροδεκτών Source και Drain. Το MOSFET μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύο βασικές λειτουργίες: λειτουργία ενίσχυσης (κανονικά απενεργοποιημένη) και λειτουργία εξάντλησης (κανονικά ενεργοποιημένη).

Λειτουργία βελτίωσης MOSFET: Σε αυτή τη λειτουργία, το MOSFET είναι συνήθως απενεργοποιημένο όταν δεν εφαρμόζεται τάση στην πύλη. Για να ενεργοποιηθεί η διάταξη και να επιτραπεί η ροή ρεύματος από την Πηγή στην Απορροή, εφαρμόζεται θετική τάση στον ακροδέκτη Πύλης. Αυτή η θετική τάση προσελκύει ηλεκτρόνια (ή οπές, ανάλογα με τον τύπο του MOSFET) στην επιφάνεια του ημιαγωγού, σχηματίζοντας ένα αγώγιμο κανάλι μεταξύ Source και Drain.

Λειτουργία εξάντλησης MOSFET: Σε αυτή τη λειτουργία, το MOSFET είναι συνήθως ενεργοποιημένο ή αγώγιμο όταν δεν εφαρμόζεται τάση στην πύλη. Για να απενεργοποιηθεί η διάταξη και να διακοπεί η ροή ρεύματος, εφαρμόζεται αρνητική τάση στον ακροδέκτη της πύλης. Αυτή η αρνητική τάση εξαντλεί το αγώγιμο κανάλι, μειώνοντας τη ροή ρεύματος μεταξύ Source και Drain.

Τύποι MOSFET:

MOSFET n-καναλιού (NMOS): Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί υλικό ημιαγωγού τύπου n για το κανάλι και ηλεκτρόνια ως φορείς φορτίου. Χρησιμοποιείται συνήθως σε ψηφιακά κυκλώματα.

MOSFET p-καναλιού (PMOS): Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί υλικό ημιαγωγού τύπου p για το κανάλι και οπές ως φορείς φορτίου. Το PMOS χρησιμοποιείται λιγότερο συχνά από το NMOS στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

CMOS (Complementary MOS): Η τεχνολογία CMOS συνδυάζει τόσο τα τρανζίστορ NMOS όσο και τα PMOS σε ένα μόνο τσιπ, επιτρέποντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή ανοχή στο θόρυβο. Χρησιμοποιείται ευρέως στους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές και τα ψηφιακά λογικά κυκλώματα.

Τα FETs, ιδίως τα MOSFETs, έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα της ηλεκτρονικής και έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη σμίκρυνση και την αύξηση των επιδόσεων των ηλεκτρονικών διατάξεων. Η ευελιξία και η αποδοτικότητά τους τα έχουν καταστήσει

απαραίτητο συστατικό σε διάφορες βιομηχανίες, από τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης έως την αεροδιαστημική και όχι μόνο.

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) είναι διατάξεις ημιαγωγών με μοναδικές ιδιότητες που τα καθιστούν απαραίτητα σε διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες βασικές ιδιότητες και εφαρμογές των FET:

Ιδιότητες των FET:

Υψηλή αντίσταση εισόδου: Αυτό σημαίνει ότι αντλούν ελάχιστο ρεύμα από την πηγή σήματος εισόδου. Αυτή η ιδιότητα τους επιτρέπει να λειτουργούν ως εξαιρετικές διατάξεις ελεγχόμενης τάσης, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε κυκλώματα υψηλής εμπέδησης.

Συσκευή ελεγχόμενης τάσης: Τα FET μπορούν να λειτουργούν και να ελέγχονται από την τάση που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη πύλης τους. Αυτός ο έλεγχος τάσης τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές ενίσχυσης και μεταγωγής, όπου το επίπεδο τάσης καθορίζει τη ροή ρεύματος.

Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Τα FET απαιτούν πολύ μικρό ρεύμα για τον έλεγχο της λειτουργίας τους, με αποτέλεσμα τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Η ιδιότητα αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Υψηλή ταχύτητα μεταγωγής: Τα FET μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται γρήγορα, γεγονός που τα καθιστά πολύτιμα σε ψηφιακά λογικά κυκλώματα υψηλής ταχύτητας και σε εφαρμογές μεταγωγής.

Αντοχή σε θόρυβο: Τα FET παρουσιάζουν υψηλή ανοσία στο θόρυβο λόγω της ελεγχόμενης από τάση φύσης τους. Είναι λιγότερο επιρρεπείς σε παρεμβολές θορύβου από ορισμένες άλλες διατάξεις ημιαγωγών.

Λειτουργία υψηλής συχνότητας: Τα FET μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Συμπαγές μέγεθος: Τα FET είναι συμπαγείς διατάξεις ημιαγωγών, επιτρέποντας την ενσωμάτωση σε πολύπλοκα ολοκληρωμένα κυκλώματα με εκατομμύρια τρανζίστορ σε ένα μόνο τσιπ.

Εφαρμογές των FET:

FET: Ψηφιακά λογικά κυκλώματα: (Complementary MOS), αποτελούν τη βάση των σύγχρονων ψηφιακών λογικών κυκλωμάτων και των μικροεπεξεργαστών. Χρησιμοποιούνται σε CPUs, τσιπ μνήμης και άλλα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Ενισχυτές: Τα FET χρησιμοποιούνται ως ενισχυτές τάσης σε κυκλώματα ήχου και ραδιοσυχνοτήτων (RF). Ο χαμηλός τους θόρυβος και η υψηλή αντίσταση εισόδου τους καθιστούν κατάλληλους για ενίσχυση σήματος.

Συσκευές μεταγωγής: Τα FET χρησιμοποιούνται ευρέως ως ηλεκτρονικοί διακόπτες στα ηλεκτρονικά ισχύος, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό έλεγχο της ισχύος σε διάφορα φορτία, όπως κινητήρες, φώτα και μετατροπείς ισχύος.

Επεξεργασία αναλογικών σημάτων: Τα FET διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε κυκλώματα επεξεργασίας αναλογικών σημάτων, όπως φίλτρα και μείκτες.

Αισθητήρες: Τα FET χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα αισθητήρων για ενίσχυση και επεξεργασία σήματος σε εφαρμογές όπως αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες πίεσης και αισθητήρες αερίου.

Συστήματα επικοινωνίας: FETs χρησιμοποιούνται σε ενισχυτές RF, μίκτες και ταλαντωτές για ασύρματα συστήματα επικοινωνίας.

Οθόνες: FETs χρησιμοποιούνται σε οθόνες ενεργού πλέγματος όπως οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) και οι οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός (OLED).

Φωτοβολταϊκές συσκευές: Τα FET χρησιμοποιούνται σε ηλιακές κυψέλες και φωτοανιχνευτές για τη μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρικά σήματα.

3.1.12 JFETs

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου σύνδεσης (JFET) είναι διατάξεις ημιαγωγών τριών ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ως αντιστάσεις ή

ενισχυτές ελεγχόμενης τάσης. Η λειτουργία ενός JFET βασίζεται στον έλεγχο του πλάτους μιας περιοχής εξάντλησης σε ένα υλικό ημιαγωγού.

Ένα JFET αποτελείται από ένα κανάλι από ημιαγωγικό υλικό τύπου n ή p που περιβάλλεται από δύο περιοχές τύπου p ή n, δημιουργώντας μια pn-ένωση σε κάθε πλευρά. Οι δύο περιοχές ονομάζονται πηγή και αποστράγγιση, ενώ το κανάλι είναι η περιοχή μεταξύ τους. Η πύλη είναι μια μεταλλική επαφή που τοποθετείται πάνω από το κανάλι, αλλά δεν το αγγίζει.

Όταν εφαρμόζεται τάση στην πύλη, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που εκτείνεται στο κανάλι. Το ηλεκτρικό πεδίο εξαντλεί το κανάλι από τους φορείς πλειονότητας, δημιουργώντας μια περιοχή χωρίς ελεύθερα ηλεκτρόνια (ή οπές) για ροή ρεύματος. Η περιοχή εξάντλησης λειτουργεί ως αντίσταση και η αντίστασή της εξαρτάται από το πλάτος της περιοχής, το οποίο ελέγχεται από την τάση της πύλης.

Όταν η τάση πύλης είναι μηδενική ή αρνητική, η περιοχή εξάντλησης είναι στενή και η αντίσταση του καναλιού είναι χαμηλή. Αυτό επιτρέπει τη ροή ρεύματος μεταξύ της πηγής και της αποστράγγισης, δημιουργώντας ένα αγώγιμο μονοπάτι. Το JFET λέγεται ότι βρίσκεται στην κατάσταση "on".

Όταν η τάση της πύλης είναι θετική, η περιοχή εξάντλησης διευρύνεται και η αντίσταση του καναλιού αυξάνεται, μειώνοντας τη ροή ρεύματος μεταξύ της πηγής και της αποστράγγισης. Το JFET λέγεται ότι βρίσκεται στην κατάσταση "off". Η τάση πύλης που απενεργοποιεί το JFET ονομάζεται τάση αποσύνδεσης (pinch-off voltage) και καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού της διάταξης.

Τα JFET χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ως αντιστάσεις ή ενισχυτές ελεγχόμενης τάσης. Στη διαμόρφωση αντίστασης ελεγχόμενης από τάση, το JFET χρησιμοποιείται ως μεταβλητή αντίσταση της οποίας η τιμή εξαρτάται από την τάση πύλης. Στη διαμόρφωση ενισχυτή, το JFET χρησιμοποιείται για την ενίσχυση ενός μικρού σήματος τάσης εισόδου ελέγχοντας την ποσότητα του ρεύματος που ρέει μέσω του καναλιού.

Συνοπτικά, τα JFET είναι διατάξεις ημιαγωγών τριών ακροδεκτών που βασίζονται στον έλεγχο μιας περιοχής εξάντλησης σε ένα κανάλι ημιαγωγού για τον έλεγχο της ροής του

ρεύματος μεταξύ της πηγής και της αποστράγγισης. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως αντιστάσεις ή ενισχυτές ελεγχόμενης τάσης σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Ιδιότητες:

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου σύνδεσης (JFET) είναι διατάξεις ημιαγωγών με μοναδικές ιδιότητες που τα καθιστούν χρήσιμα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ακολουθούν ορισμένες από τις σημαντικές ιδιότητες και εφαρμογές των JFET:

Ελεγχόμενη από την τάση αντίσταση: Τα JFET μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντιστάσεις ελεγχόμενες από τάση, όπου η αντίσταση της διάταξης μεταβάλλεται μεταβάλλοντας την τάση που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη πύλης. Αυτό τα καθιστά χρήσιμα σε μια ποικιλία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπως εξασθενητές, ρυθμιστές τάσης και ταλαντωτές ελεγχόμενους από τάση.

Χαμηλή αντίσταση εισόδου: Τα JFET έχουν πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε κυκλώματα όπου απαιτείται χαμηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου, όπως σε προενισχυτές ή ρυθμιστικά στάδια.

Υψηλή γραμμικότητα: Τα JFET έχουν υψηλό επίπεδο γραμμικότητας, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε εφαρμογές όπου πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η παραμόρφωση του σήματος, όπως σε ενισχυτές ήχου.

Χαμηλός θόρυβος: Τα JFET έχουν χαμηλά επίπεδα θορύβου, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε κυκλώματα ενισχυτών υψηλού κέρδους.

Αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας: Η αντίσταση καναλιού ενός JFET μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, με αποτέλεσμα αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας. Αυτό τα καθιστά χρήσιμα σε κυκλώματα με αντιστάθμιση θερμοκρασίας, όπως οι ρυθμιστές τάσης.

Απόκριση υψηλών συχνοτήτων: Τα JFET έχουν απόκριση υψηλής συχνότητας, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπως ενισχυτές και ταλαντωτές ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Απλή κατασκευή: Τα JFET κατασκευάζονται εύκολα και έχουν απλή κατασκευή, γεγονός που τα καθιστά οικονομική επιλογή για πολλά ηλεκτρονικά κυκλώματα

Εφαρμογές:

Ενισχυτές ήχου: Τα JFET χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα ενισχυτών ήχου λόγω της υψηλής γραμμικότητας, του χαμηλού θορύβου και των χαμηλών χαρακτηριστικών παραμόρφωσης.

Ενισχυτές RF: Τα JFET χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ενισχυτών ραδιοσυχνοτήτων (RF) λόγω της απόκρισης υψηλής συχνότητας και των χαρακτηριστικών χαμηλού θορύβου τους.

Ρυθμιστές τάσης: Τα JFET χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ρυθμιστών τάσης όπου απαιτείται σταθερή τάση εξόδου, όπως στα τροφοδοτικά.

Ταλαντωτές: Τα JFET χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ταλαντωτών, όπως ταλαντωτές ήχου και ταλαντωτές RF.

Διακόπτες: Τα JFET μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διακόπτες σε ηλεκτρονικά κυκλώματα όπου μια μικρή τάση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ενός μεγαλύτερου ρεύματος.

Μεταβλητές αντιστάσεις: Τα JFET μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντιστάσεις ελεγχόμενες από τάση, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα όπως ταλαντωτές και εξασθενητές ελεγχόμενοι από τάση.

Συνοπτικά, τα JFET είναι διατάξεις ημιαγωγών με μοναδικές ιδιότητες που τα καθιστούν χρήσιμα σε μια ποικιλία εφαρμογών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντιστάσεις ελεγχόμενης τάσης, έχουν υψηλό επίπεδο γραμμικότητας, χαμηλά επίπεδα θορύβου και απόκριση υψηλής συχνότητας, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε ενισχυτές ήχου, ενισχυτές RF, ρυθμιστές τάσης, ταλαντωτές και διακόπτες.

3.1.13 MOSFET

MOSFET σημαίνει τρανζίστορ πεδίου επίδρασης μεταλλικού οξειδίου-ημιαγωγού. Είναι ένας τύπος τρανζίστορ που χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για την ενίσχυση ή τη μεταγωγή σημάτων. Τα MOSFET είναι γνωστά για την υψηλή αντίσταση εισόδου, τη χαμηλή αντίσταση εξόδου και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Τα MOSFET αποτελούνται από ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο πύλης, ένα μονωτικό στρώμα οξειδίου και ένα κανάλι ημιαγωγού. Το υλικό του ημιαγωγού μπορεί να είναι είτε τύπου n είτε τύπου p. Το MOSFET τύπου n χρησιμοποιείται συχνότερα από το MOSFET τύπου p.

Όταν εφαρμόζεται τάση στο ηλεκτρόδιο πύλης, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο στρώμα μονωτικού οξειδίου. Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο τροποποιεί την αγωγιμότητα του καναλιού του ημιαγωγού. Εάν το κανάλι είναι τύπου n, το ηλεκτρικό πεδίο προσελκύει ηλεκτρόνια από τον ακροδέκτη πηγής προς το κανάλι, δημιουργώντας ένα αγώγιμο μονοπάτι μεταξύ των ακροδεκτών πηγής και αποστράγγισης. Αυτό το μονοπάτι επιτρέπει τη ροή ρεύματος από την πηγή προς την αποστράγγιση.

Υπάρχουν δύο τύποι MOSFET: λειτουργία ενίσχυσης και λειτουργία εξάντλησης.

Τα MOSFET με λειτουργία ενίσχυσης απαιτούν θετική τάση στην πύλη για να ενεργοποιηθούν και να επιτρέψουν τη ροή ρεύματος, ενώ τα MOSFET με λειτουργία εξάντλησης απαιτούν αρνητική τάση στην πύλη για να απενεργοποιηθούν και να αποτρέψουν τη ροή ρεύματος. Τα περισσότερα MOSFET είναι διατάξεις λειτουργίας βελτίωσης.

Τα MOSFET έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τύπων τρανζίστορ, όπως υψηλή αντίσταση εισόδου, χαμηλή αντίσταση εξόδου, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και καλή γραμμικότητα. Είναι επίσης σχετικά εύκολο να κατασκευαστούν και μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλες ποσότητες με χαμηλό κόστος.

Τα MOSFET χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών εφαρμογών, όπως ενισχυτές ισχύος, ρυθμιστές τάσης, ρυθμιστές μεταγωγής, ψηφιακά κυκλώματα και μικροεπεξεργαστές. Χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπως ενισχυτές και ταλαντωτές ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Συνοπτικά, τα MOSFET είναι ένας τύπος τρανζίστορ που χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρικό πεδίο για να ελέγχουν την αγωγιμότητα ενός καναλιού ημιαγωγού. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για ενίσχυση, μεταγωγή και άλλες λειτουργίες λόγω της υψηλής αντίστασης εισόδου, της χαμηλής αντίστασης εξόδου, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και άλλων επιθυμητών χαρακτηριστικών.

Ιδιότητες:

Υψηλή αντίσταση εισόδου: Τα MOSFET έχουν υψηλή αντίσταση εισόδου, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση σε κυκλώματα όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση εισόδου.

Χαμηλή αντίσταση εξόδου: Τα MOSFET έχουν χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση σε κυκλώματα όπου απαιτείται χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου.

Υψηλή ταχύτητα μεταγωγής: Τα MOSFET μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται πολύ γρήγορα, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Τα MOSFET απαιτούν πολύ μικρή ισχύ για να λειτουργήσουν, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες και άλλες εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Υψηλό κέρδος: Τα MOSFET έχουν υψηλό κέρδος, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε κυκλώματα ενισχυτών.

Σταθερότητα στη θερμοκρασία: Τα MOSFET έχουν υψηλή σταθερότητα στη θερμοκρασία, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε κυκλώματα όπου η σταθερότητα της θερμοκρασίας είναι σημαντική.

Εφαρμογές:

Ενισχυτές: Οι MOSFET χρησιμοποιούνται συνήθως σε ενισχυτές ήχου, ενισχυτές βίντεο και άλλους τύπους ενισχυτών λόγω του υψηλού κέρδους τους.

Διακόπτες: Τα MOSFET χρησιμοποιούνται συνήθως ως διακόπτες σε τροφοδοτικά, κυκλώματα ελέγχου κινητήρων και άλλους τύπους κυκλωμάτων λόγω της υψηλής ταχύτητας μεταγωγής τους και της χαμηλής αντίστασης ενεργοποίησης.

Μετατροπείς ισχύος: Τα MOSFET χρησιμοποιούνται συνήθως σε μετατροπείς ισχύος, όπως μετατροπείς DC-DC και μετατροπείς AC-DC, λόγω της χαμηλής τους αντίστασης ενεργοποίησης και της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος.

Ψηφιακά κυκλώματα: Τα MOSFET χρησιμοποιούνται συνήθως σε ψηφιακά κυκλώματα, όπως οι λογικές πύλες και οι μικροεπεξεργαστές, λόγω της υψηλής ταχύτητας μεταγωγής τους και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Κυκλώματα ραδιοσυχνότητας (RF): Τα MOSFET χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα RF, όπως ενισχυτές RF και ταλαντωτές, λόγω της υψηλής ταχύτητας μεταγωγής τους και του χαμηλού θορύβου τους.

Οδηγοί οθονών: Τα MOSFET χρησιμοποιούνται συνήθως σε οδηγούς οθόνης για οθόνες LCD και LED λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της υψηλής ταχύτητας μεταγωγής τους.

Συνοπτικά, τα MOSFET έχουν αρκετές επιθυμητές ιδιότητες, όπως υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου, χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου, υψηλή ταχύτητα μεταγωγής, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλό κέρδος και σταθερότητα στη θερμοκρασία. Αυτές οι ιδιότητες τα καθιστούν ιδανικά για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων ενισχυτών, διακοπών, μετατροπέων ισχύος, ψηφιακών κυκλωμάτων, κυκλωμάτων RF και οδηγών οθόνης.

3.1.14 IGBT

Το IGBT (Διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης) είναι ένας τύπος ημιαγωγικής διάταξης που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά ισχύος και σε εφαρμογές μεταγωγής. Συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τόσο των MOSFET (τρανζίστορ πεδίου επίδρασης μετάλλων-οξειδίων-ημιαγωγών) όσο και των διπολικών τρανζίστορ, καθιστώντας το μια ευέλικτη και αποτελεσματική επιλογή για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Τα IGBTs χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των κινητήρων, των μετατροπέων ισχύος, της επαγωγικής θέρμανσης, των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άλλων.

Ας κάνουμε μια λεπτομερή εισαγωγή στα IGBT:

Βασική δομή:

Τα IGBT αποτελούνται από μια δομή ημιαγωγών που συνδυάζει την πύλη ενός MOSFET και την έξοδο ενός διπολικού τρανζίστορ. Διαθέτει τρεις κύριους ακροδέκτες: την πύλη (G), τον συλλέκτη (C) και τον εκπομπό (E). Ο ακροδέκτης πύλης ελέγχει τη ροή ρεύματος μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού.

Αρχή λειτουργίας:

Το IGBT λειτουργεί με βάση το μηχανισμό διαμόρφωσης της αγωγιμότητας. Όταν εφαρμόζεται θετική τάση στον ακροδέκτη πύλης, δημιουργείται ένα κανάλι ηλεκτρονίων, επιτρέποντας τη ροή ρεύματος μεταξύ των περιοχών συλλέκτη και εκπομπού. Αυτό είναι παρόμοιο με τη λειτουργία ενός MOSFET με τρόπο ενίσχυσης.

Μόλις σχηματιστεί το κανάλι, το IGBT επιτρέπει τη διέλευση μεγάλης ποσότητας ρεύματος, παρόμοια με ένα διπολικό τρανζίστορ. Αυτή η ικανότητα υψηλού ρεύματος καθιστά τα IGBT κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Ταχύτητα μεταγωγής:

Τα IGBT έχουν μέτριες ταχύτητες μεταγωγής σε σύγκριση με άλλες διατάξεις ημιαγωγών, όπως τα MOSFET. Ενώ είναι πιο αργά από τα MOSFET, είναι ταχύτερα από τα παραδοσιακά διπολικά τρανζίστορ. Οι κατασκευαστές εργάζονται για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών μεταγωγής των IGBT με την πάροδο των ετών.

Πλεονεκτήματα:

Υψηλή ικανότητα μεταφοράς ρεύματος: Τα IGBT μπορούν να διαχειριστούν μεγάλα ρεύματα, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Υψηλή αντίσταση εισόδου: Η είσοδος της πύλης απαιτεί πολύ μικρό ρεύμα, γεγονός που απλοποιεί το κύκλωμα οδήγησης και βελτιώνει την απόδοση.

Λειτουργία ελεγχόμενης τάσης: Τα IGBT μπορούν εύκολα να ελεγχθούν με τη χρήση σημάτων τάσης, καθιστώντας τα συμβατά με τα τυπικά ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου.

Χαμηλότερες απώλειες αγωγής: Η πτώση τάσης σε ένα IGBT στην κατάσταση "on" είναι σχετικά χαμηλή, οδηγώντας σε μειωμένη απώλεια ισχύος και αυξημένη απόδοση.

Μειονεκτήματα:

Απώλειες μεταγωγής: Τα IGBT έχουν υψηλότερες απώλειες μεταγωγής σε σύγκριση με τα MOSFET λόγω των ενδιάμεσων ταχυτήτων μεταγωγής τους.

Ευαισθησία στη θερμοκρασία: Η απόδοση των IGBT επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για τη σωστή ψύξη και θερμική διαχείριση.

Συνολικά, τα IGBT είναι βασικά εξαρτήματα στα σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος, επιτρέποντας την αποτελεσματική και ελεγχόμενη μεταγωγή ισχύος σε εφαρμογές υψηλής ισχύος σε διάφορες βιομηχανίες. Παρακάτω θα αναλυθούν οι ιδιότητες και εφαρμογές τους.

Ιδιότητες των ημιαγωγών IGBT:

Χειρισμός υψηλής τάσης: Τα IGBT μπορούν να χειριστούν υψηλά επίπεδα τάσης, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μεταγωγή υψηλής τάσης και έλεγχο ισχύος.

Υψηλή ικανότητα μεταφοράς ρεύματος: Μπορούν να διαχειριστούν μεγάλα ρεύματα, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Συσκευή ελεγχόμενης τάσης: Τα IGBT είναι συσκευές ελεγχόμενες από τάση, που σημαίνει ότι μπορούν εύκολα να ενεργοποιηθούν και να ελεγχθούν από ένα σήμα τάσης, απλοποιώντας το κύκλωμα οδήγησής τους.

Χαμηλή τάση κορεσμού: Η πτώση τάσης σε ένα IGBT στην κατάσταση "on" είναι σχετικά χαμηλή, οδηγώντας σε μειωμένες απώλειες αγωγής και αυξημένη απόδοση.

Ταχύτητα μεταγωγής: Τα IGBT έχουν μέτριες ταχύτητες μεταγωγής, ταχύτερες από τα παραδοσιακά διπολικά τρανζίστορ αλλά πιο αργές από τα MOSFET.

Ευαισθησία στη θερμοκρασία: Η απόδοση των IGBT είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία και η κατάλληλη ψύξη και θερμική διαχείριση είναι ζωτικής σημασίας για την αξιόπιστη λειτουργία τους.

Παράλληλη λειτουργία: Τα IGBT μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να διαχειρίζονται ακόμη υψηλότερα ρεύματα και επίπεδα ισχύος.

Εφαρμογές των ημιαγωγών IGBT:

Ιδιοβιδών: Κινητήρες κινητήρων: IGBT χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές ελέγχου κινητήρων, όπως οι μεταβλητές μονάδες οδήγησης συχνότητας (VFD) που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές μηχανές και ηλεκτρικά οχήματα.

Μετατροπείς ισχύος: Χρησιμοποιούνται σε μετατροπείς ισχύος DC-AC για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των συσκευών UPS (Uninterruptible Power Supply).

Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Τα IGBT διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο σε μετατροπείς ισχύος ηλιακών μετατροπέων συνδεδεμένων στο δίκτυο και σε μετατροπείς ισχύος ανεμογεννητριών, επιτρέποντας την αποτελεσματική μετατροπή ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Επαγωγική θέρμανση: Τα IGBT χρησιμοποιούνται σε εξοπλισμό επαγωγικής θέρμανσης για διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως η θερμική επεξεργασία μετάλλων και η συγκόλληση.

Τροφοδοτικά: Τα IGBT χρησιμοποιούνται σε μεταγωγικά τροφοδοτικά υψηλής ισχύος για εφαρμογές όπως κέντρα δεδομένων, συστήματα τηλεπικοινωνιών και βιομηχανικό εξοπλισμό.

Συστήματα έλξης: Σε εφαρμογές σιδηροδρόμων και μηχανών έλξης, τα IGBT χρησιμοποιούνται σε συστήματα έλξης για τον έλεγχο και την κίνηση ηλεκτρικών κινητήρων.

Έλεγχος συσκευών: Τα IGBT χρησιμοποιούνται σε οικιακές συσκευές, όπως κλιματιστικά και ψυγεία, για τον αποτελεσματικό έλεγχο των κινητήρων και τη διαχείριση ισχύος.

3.1.15 Thyristors

Τα Thyristor είναι ένας τύπος ημιαγωγικής διάταξης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διακόπτης, ανορθωτής ή ρυθμιστής τάσης. Αποτελούνται από τέσσερα στρώματα εναλλασσόμενων ημιαγωγών τύπου P και N και μπορούν να θεωρηθούν ως δύο δίοδοι με πλάτη προς πλάτη με κοινή πύλη.

Όταν μια θετική τάση εφαρμόζεται στον ακροδέκτη πύλης ενός Thyristor, επιτρέπει τη ροή ρεύματος από την άνοδο στην κάθοδο, ενεργοποιώντας τη διάταξη και επιτρέποντάς της να διεξάγει ρεύμα. Μόλις το Thyristor τεθεί σε λειτουργία, θα παραμείνει αγωγίμο ακόμη και αν αφαιρεθεί η τάση πύλης, εφόσον το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη παραμένει πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο κατωφλίου, γνωστό ως "ρεύμα συγκράτησης".

Για να απενεργοποιηθεί το Thyristor, το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη πρέπει να μηδενιστεί είτε με μείωση της εφαρμοζόμενης τάσης είτε με διακοπή του κυκλώματος. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως "μεταγωγή" και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξή της, όπως η φυσική μεταγωγή, η εξαναγκασμένη μεταγωγή και η ενεργοποίηση παλμών.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των Thyristors είναι η ικανότητά τους να διαχειρίζονται υψηλά επίπεδα ρεύματος και τάσης, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρονικά ισχύος, ο έλεγχος κινητήρων και ο έλεγχος φωτισμού. Ωστόσο, μπορεί επίσης να είναι επιρρεπείς σε ορισμένους τύπους ηλεκτρικού θορύβου και μπορεί να είναι δύσκολο να απενεργοποιηθούν όταν έχουν ενεργοποιηθεί, γεγονός που μπορεί να τους καταστήσει ακατάλληλους για ορισμένες εφαρμογές.

Τα Thyristor έχουν αρκετές σημαντικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά που τα καθιστούν χρήσιμα για μια ποικιλία εφαρμογών. Ακολουθούν ορισμένες από τις σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των Thyristor:

Ιδιότητες:

Υψηλή ικανότητα χειρισμού ρεύματος και τάσης: Τα Thyristor μπορούν να χειριστούν υψηλά επίπεδα ρεύματος και τάσης, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές ελέγχου και ρύθμισης ισχύος. Μπορούν να χειριστούν επίπεδα ρεύματος που κυμαίνονται από μερικά αμπέρ έως αρκετές χιλιάδες αμπέρ και επίπεδα τάσης που κυμαίνονται από μερικά βολτ έως αρκετές χιλιάδες βολτ.

Μη γραμμική συμπεριφορά: Τα Thyristor έχουν μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές μεταγωγής και ελέγχου όπου απαιτείται μη γραμμική συμπεριφορά.

Αγωγιμότητα διπλής κατεύθυνσης: Τα Thyristor μπορούν να διεξάγουν ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα για εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος.

Χαμηλή πτώση τάσης στην κατάσταση ON: Τα Thyristor έχουν χαμηλή πτώση τάσης στην κατάσταση ON, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πολύ αποδοτικά όσον αφορά τη διάχυση ισχύος.

Ταχύτητα μεταγωγής: Η ταχύτητα μεταγωγής των Thyristor είναι συνήθως αργή, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Αντοχή σε θόρυβο: Τα Thyristor έχουν ανοσία στον θόρυβο υψηλής συχνότητας, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ανοσία στον θόρυβο.

Εφαρμογές:

Έλεγχος ισχύος AC: Τα Thyristor χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ελέγχου ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως ο έλεγχος φωτισμού, ο έλεγχος κινητήρων και ο έλεγχος θέρμανσης.

Ανορθωτές: Τα Thyristor μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανορθωτές για τη μετατροπή της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος σε τάση συνεχούς ρεύματος.

Ρύθμιση τάσης: Τα Thyristor μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ρυθμιστές τάσης για τη διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου.

Εφαρμογές μεταγωγής: Τα Thyristor μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διακόπτες σε εφαρμογές όπως παλμικά τροφοδοτικά, ηλεκτρονικά συστήματα ανάφλεξης και ελεγκτές ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος.

Αντιστροφείς: Τα Thyristor μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντιστροφείς για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση.

Φορτιστές μπαταριών: Τα Thyristor μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορτιστές μπαταριών για τον έλεγχο του ρεύματος και της τάσης φόρτισης μιας μπαταρίας.

3.1.16 Triacs

Τα triacs είναι διατάξεις ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά κυκλώματα και εφαρμογές ελέγχου ισχύος. Ανήκουν στην οικογένεια των θυρίστορ και έχουν σχεδιαστεί για να διαχειρίζονται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και προς τις δύο κατευθύνσεις, καθιστώντας τα κατάλληλα για τον έλεγχο ισχύος AC.

Δομή:

Ένας Triac είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός δύο ελεγχόμενων ανορθωτών πυριτίου (SCR) συνδεδεμένων αντίστροφα παράλληλα. Αποτελείται από τέσσερα στρώματα ημιαγωγού υλικού εναλλασσόμενου τύπου P και N. Οι τρεις συνδέσεις ακροδεκτών είναι γνωστές ως MT1 (κύριος ακροδέκτης 1), MT2 (κύριος ακροδέκτης 2) και πύλη (G). Ο ακροδέκτης πύλης χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του Triac σε αγωγή.

Λειτουργία:

Το Triac λειτουργεί σε τέσσερα διαφορετικά τεταρτημόρια της κυματομορφής της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος: θετικοί και αρνητικοί ημιπερίοδοι και για τις δύο κατευθύνσεις MT1-MT2. Μπορεί να ενεργοποιηθεί σε αγωγή με την εφαρμογή ρεύματος στον ακροδέκτη πύλης προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, γεγονός που επιτρέπει τη ροή ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών MT1 και MT2.

Τρόποι διεξαγωγής:

Όταν ένα Triac ενεργοποιείται, μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης και οδηγεί ρεύμα μέχρι η τάση εναλλασσόμενου ρεύματος να μηδενιστεί. Σε αυτό το σημείο, απενεργοποιείται φυσικά, αφού το ρεύμα είναι μηδενικό. Το Triac παραμένει απενεργοποιημένο μέχρι το επόμενο συμβάν ενεργοποίησης.

Πλεονεκτήματα:

Αγωγιμότητα διπλής κατεύθυνσης: Τρίακ μπορούν να ελέγχουν τόσο το θετικό όσο και το αρνητικό μισό του κύκλου εναλλασσόμενου ρεύματος.

Συμπαγή και απλά: Triacs είναι σχετικά μικρά και εύκολα ενσωματώσιμα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Οικονομικά αποδοτικά: Είναι γενικά φθηνά σε σύγκριση με άλλες διατάξεις ελέγχου ισχύος.

Μειονεκτήματα:

Περιορισμοί τάσης και ρεύματος: Τα triacs ενδέχεται να έχουν περιορισμένες ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Ταχύτητα μεταγωγής: Τα Triacs μπορεί να έχουν σχετικά αργές ταχύτητες μεταγωγής σε σύγκριση με άλλους διακόπτες στερεάς κατάστασης, όπως τα MOSFET ή τα IGBT.

Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (HMI): Τα χαρακτηριστικά μεταγωγής των Triacs μπορεί να παράγουν θόρυβο HMI σε ορισμένες εφαρμογές.

Συμπερασματικά, τα Triacs είναι βασικά στοιχεία στα κυκλώματα ελέγχου ισχύος AC και βρίσκουν ευρεία χρήση σε διάφορες εφαρμογές λόγω της αμφίδρομης αγωγής και της απλότητάς τους. Ωστόσο, οι σχεδιαστές θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς τους, ιδίως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας, όπου οι ταχύτερες διατάξεις μεταγωγής μπορεί να είναι πιο κατάλληλες.

Τα triacs είναι διατάξεις ημιαγωγών με μοναδικές ιδιότητες που τα καθιστούν κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες από τις βασικές τους ιδιότητες και τις συνήθεις εφαρμογές τους.

Ιδιότητες των Triacs:

Αμφίδρομη αγωγή: Τρίακ μπορούν να διεξάγουν ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις, επιτρέποντάς τους να ελέγχουν αποτελεσματικά την ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος.

Σκανδαλισμός: Τα Triacs μπορούν να ενεργοποιηθούν σε αγωγή με την εφαρμογή ρεύματος ή τάσης στον ακροδέκτη πύλης. Μόλις ενεργοποιηθούν, θα παραμείνουν σε αγωγή έως ότου το ρεύμα πέσει κάτω από ένα ορισμένο όριο.

Συμπεριφορά μανδάλωσης: Τα triacs παρουσιάζουν συμπεριφορά μανδάλωσης, δηλαδή παραμένουν αγώγιμα ακόμη και αν αφαιρεθεί το ρεύμα πύλης, εφόσον το κύριο ρεύμα υπερβαίνει το επίπεδο ρεύματος συγκράτησης.

Ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος: Τα triacs διατίθενται σε διάφορες ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος, επιτρέποντάς τους να διαχειρίζονται διαφορετικά επίπεδα ισχύος ανάλογα με την εφαρμογή.

Μεταγωγή: Τα triacs απενεργοποιούνται με φυσικό τρόπο όταν το ρεύμα που τα διαρρέει πέσει στο μηδέν ή κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο ρεύματος συγκράτησης. Αυτή η ιδιότητα απλοποιεί το κύκλωμα ελέγχου.

Εφαρμογές των Triacs:

Triacs: Έλεγχος φωτισμού: για τον έλεγχο της φωτεινότητας λαμπτήρων πυράκτωσης, αλογόνου ή λαμπτήρων LED με δυνατότητα ρύθμισης.

Έλεγχος ταχύτητας κινητήρα: Triacs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ελέγχου μονοφασικών κινητήρων για τη ρύθμιση της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Έλεγχος θέρμανσης: Τα triacs βρίσκουν εφαρμογή σε ηλεκτρικές θερμάστρες, φούρνους και άλλα συστήματα θέρμανσης για τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου και της θερμοκρασίας.

Έλεγχος ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος: Χρησιμοποιούνται σε διάφορα κυκλώματα ελέγχου ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, συμπεριλαμβανομένων των τροφοδοτικών και των κινητήρων.

Οικιακός αυτοματισμός: Τα triacs χρησιμοποιούνται σε έξυπνα οικιακά συστήματα για τον έλεγχο των συσκευών και του φωτισμού από απόσταση.

3.2 Άλλοι Ημιαγωγοί

Εκτός από το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide), υπάρχουν πολλά άλλα υλικά ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα:

Οργανικοί ημιαγωγοί: Οι οργανικοί ημιαγωγοί αποτελούνται από μόρια ή πολυμερή με βάση τον άνθρακα. Χρησιμοποιούνται σε οργανικές διόδους εκπομπής φωτός (OLED), οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) και οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (OFET). Οι οργανικοί ημιαγωγοί προσφέρουν ευελιξία, χαμηλό κόστος κατασκευής και συμβατότητα με ηλεκτρονικά συστήματα μεγάλης επιφάνειας και εύκαμπτα.

Αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs): Το GaAs είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπως συσκευές μικροκυμάτων, ενισχυτές και ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής ταχύτητας. Έχει ανώτερη κινητικότητα ηλεκτρονίων σε σύγκριση με το πυρίτιο, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και υψηλών συχνοτήτων.

Νιτρίδιο του γαλλίου (GaN): Το GaN είναι ένας ημιαγωγός με ευρύ χάσμα ζώνης που προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος και απόδοση, καθιστώντας το κατάλληλο για ηλεκτρονικά ισχύος, εφαρμογές ραδιοσυχνοτήτων (RF) και διόδους εκπομπής φωτός (LED). Οι διατάξεις με βάση το GaN μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες τάσεις και θερμοκρασίες από τις παραδοσιακές διατάξεις με βάση το πυρίτιο.

Φωσφίδιο του ινδίου (InP): Το InP είναι ένας άλλος σύνθετος ημιαγωγός που χρησιμοποιείται σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις υψηλής ταχύτητας, συμπεριλαμβανομένων φωτοδίοδων, λέιζερ και συστημάτων επικοινωνίας μέσω οπτικών ινών. Έχει εξαιρετική κινητικότητα ηλεκτρονίων και είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής συχνότητας και υψηλής ταχύτητας.

Νιτρίδιο γαλλίου σε πυρίτιο (GaN-on-Si): Η τεχνολογία GaN-on-Si περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός στρώματος νιτρίδιου του γαλλίου σε υπόστρωμα πυριτίου. Συνδυάζει τα

πλεονεκτήματα του μεγάλου χάσματος ζώνης του GaN με την οικονομική αποδοτικότητα και τις δυνατότητες κατασκευής μεγάλης κλίμακας του πυριτίου. Το GaN-on-Si χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικά ισχύος, συσκευές RF και φωτισμό στερεάς κατάστασης.

Οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO): Ο ZnO είναι ένας ημιαγωγός με ευρύ χάσμα ζώνης που χρησιμοποιείται στην οπτοηλεκτρονική, σε πιεζοηλεκτρικές διατάξεις και σε αισθητήρες. Παρουσιάζει εξαιρετική διαφάνεια στην υπεριώδη περιοχή (UV) και έχει εφαρμογές σε ανιχνευτές UV, διαφανή ηλεκτρόδια και συσκευές εκπομπής φωτός.

Κεφάλαιο IV

Γενικές εφαρμογές στα ηλεκτρονικά Ισχύος

- **Αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs)**

Το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs) είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός με μοναδικές ιδιότητες που τον καθιστούν κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες γενικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά του GaAs.

Εφαρμογές:

Ηλεκτρονικά υψηλής ταχύτητας: Το GaAs χρησιμοποιείται ευρέως σε ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής ταχύτητας, όπως σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας (π.χ. κινητά τηλέφωνα) και συσκευές μικροκυμάτων. Η υψηλή κινητικότητα των ηλεκτρονίων του επιτρέπει ταχύτερες ταχύτητες μεταγωγής και καλύτερες επιδόσεις σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Οπτοηλεκτρονική: Το GaAs χρησιμοποιείται σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις, συμπεριλαμβανομένων των διόδων εκπομπής φωτός (LED) και των διόδων λέιζερ. Τα LED με βάση το GaAs χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι ενδεικτικές λυχνίες, οι οθόνες και τα οπτικά συστήματα επικοινωνίας. Οι δίοδοι λέιζερ GaAs βρίσκουν εφαρμογές σε επικοινωνίες οπτικών ινών, συσκευές ανάγνωσης γραμμωτού κώδικα και εκτυπωτές λέιζερ.

Ηλιακά κύτταρα: Το GaAs χρησιμοποιείται σε ηλιακές κυψέλες υψηλής απόδοσης, ιδίως σε διαστημικές και δορυφορικές εφαρμογές. Οι ηλιακές κυψέλες με βάση το GaAs μπορούν να μετατρέψουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος σε ηλεκτρική ενέργεια και παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Συσκευές μικροκυμάτων: Τα μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα μικροκυμάτων (MMIC) με βάση το GaAs χρησιμοποιούνται σε συστήματα ραντάρ, δορυφορικές επικοινωνίες και ενισχυτές μικροκυμάτων. Τα MMICs GaAs προσφέρουν υψηλό κέρδος, χαμηλό θόρυβο και υψηλή ισχύ εξόδου σε μικροκυματικές συχνότητες.

Χαρακτηριστικά:

Υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων: Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν ταχύτερα μέσα στο υλικό. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το GaAs κατάλληλο για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και υψηλών συχνοτήτων.

Άμεσο χάσμα ζώνης: Το GaAs έχει άμεσο χάσμα ζώνης, επιτρέποντας την αποτελεσματική εκπομπή και απορρόφηση φωτός. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πλεονεκτικό για οπτοηλεκτρονικές διατάξεις όπως οι λυχνίες LED και οι δίοδοι λέιζερ.

Ευρύ χάσμα ζώνης: Το GaAs έχει ευρύτερο χάσμα ζώνης σε σύγκριση με το πυρίτιο, καθιστώντας το πιο κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής ισχύος. Μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες τάσεις και θερμοκρασίες χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης.

Υψηλή τάση διάσπασης: Το GaAs παρουσιάζει υψηλή τάση διάσπασης, επιτρέποντάς του να αντέχει λειτουργία και τάσεις υψηλής ισχύος.

- **Νιτρίδιο του γαλλίου (GaN)**

Το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN) είναι ένα ημιαγωγικό υλικό με ευρύ χάσμα ζώνης με μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες γενικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά του GaN.

Εφαρμογές:

Ηλεκτρονικά ισχύος: Οι διατάξεις ισχύος με βάση το GaN είναι γνωστές για την υψηλή πυκνότητα ισχύος, την υψηλή απόδοση και τη λειτουργία υψηλής συχνότητας. Τα τρανζίστορ και οι δίοδοι ισχύος GaN χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τροφοδοτικά, ηλεκτρικά οχήματα, συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ασύρματη φόρτιση.

Εφαρμογές RF και μικροκυμάτων: Τα τρανζίστορ RF με βάση το GaN χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπως συστήματα ασύρματης επικοινωνίας (π.χ. 5G), συστήματα ραντάρ, δορυφορικές επικοινωνίες και στρατιωτικές εφαρμογές. Η υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων του GaN και η υψηλή τάση διάσπασης επιτρέπουν την αποτελεσματική ενίσχυση ισχύος RF.

Φωτισμός: Το GaN χρησιμοποιείται στον φωτισμό στερεάς κατάστασης, ιδίως σε LED υψηλής φωτεινότητας. Τα LED με βάση το GaN προσφέρουν υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που κυμαίνονται από το γενικό φωτισμό έως τις οθόνες και τον οπίσθιο φωτισμό για τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης.

Λέιζερ: Οι δίοδοι λέιζερ με βάση το GaN χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως συστήματα προβολής λέιζερ, οθόνες και συσκευές οπτικής αποθήκευσης. Τα λέιζερ GaN μπορούν να εκπέμπουν φως στο μπλε, το πράσινο και το υπεριώδες (UV) φάσμα.

Χαρακτηριστικά:

Ευρύ χάσμα ζώνης: Το GaN έχει ευρύ χάσμα ζώνης, επιτρέποντάς του να λειτουργεί σε υψηλότερες τάσεις και θερμοκρασίες. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας.

Υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων: Το GaN παρουσιάζει υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων, επιτρέποντας μεταγωγή υψηλής ταχύτητας και άριστες επιδόσεις σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Υψηλή τάση διάσπασης: Το GaN έχει υψηλή τάση διάσπασης, επιτρέποντάς του να διαχειρίζεται υψηλές τάσεις και επίπεδα ισχύος.

Θερμική σταθερότητα: Το GaN έχει καλή θερμική αγωγιμότητα, η οποία βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για τη διατήρηση της απόδοσης της διάταξης σε υψηλά επίπεδα ισχύος.

- **Φωσφίδιο του ινδίου (InP)**

Το φωσφίδιο του ινδίου (InP) είναι ένα σύνθετο ημιαγωγικό υλικό με μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες γενικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά του InP:

Εφαρμογές:

Οπτοηλεκτρονική: Το InP χρησιμοποιείται ευρέως σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις, όπως φωτοδιόδοι, λέιζερ και οπτικοί ενισχυτές. Οι συσκευές με βάση το InP χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα επικοινωνίας μέσω οπτικών ινών, σε εφαρμογές μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας και σε εφαρμογές ανίχνευσης.

Ηλεκτρονικά υψηλής συχνότητας: Τα τρανζίστορ υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων (HEMT) με βάση το InP χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας, όπως δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας, συστήματα ραντάρ και ασύρματες επικοινωνίες. Τα InP HEMTs προσφέρουν υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων και χαμηλά χαρακτηριστικά θορύβου.

Φωτοβολταϊκά: Το InP μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ηλιακές κυψέλες υψηλής απόδοσης, ιδίως σε ηλιακές κυψέλες πολλαπλών διακλαδώσεων που χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές. Οι ηλιακές κυψέλες με βάση το InP μπορούν να μετατρέψουν αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ολοκληρωμένα κυκλώματα: Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με βάση το InP χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και υψηλών συχνοτήτων όπου οι απαιτήσεις επιδόσεων είναι απαιτητικές. Αυτές περιλαμβάνουν εφαρμογές σε συστήματα μικροκυμάτων, ψηφιακές επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας και επεξεργασία σήματος.

Χαρακτηριστικά:

Υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων: Το InP παρουσιάζει υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες και εξαιρετικές επιδόσεις σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Άμεσο χάσμα ζώνης: Το InP έχει άμεσο χάσμα ζώνης, καθιστώντας το κατάλληλο για οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την αποτελεσματική εκπομπή και απορρόφηση φωτός, επιτρέποντας την ανάπτυξη λέιζερ και φωτοανιχνευτών υψηλής απόδοσης.

Χαμηλός θόρυβος: Οι διατάξεις με βάση το InP έχουν γενικά χαρακτηριστικά χαμηλού θορύβου, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν ενίσχυση χαμηλού θορύβου, όπως συστήματα επικοινωνίας και ευαίσθητοι αισθητήρες.

Υψηλή θερμική σταθερότητα: Το InP έχει καλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή θερμική σταθερότητα, επιτρέποντας αξιόπιστη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.

- **Νιτρίδιο γαλλίου σε πυρίτιο (GaN-on-Si)**

Η τεχνολογία του νιτριδίου του γαλλίου στο πυρίτιο (GaN-on-Si) περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός στρώματος νιτριδίου του γαλλίου σε υπόστρωμα πυριτίου. Αυτός ο συνδυασμός προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και έχει ποικίλες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες γενικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά του GaN-on-Si.

Εφαρμογές:

Ηλεκτρονικά ισχύος: Η τεχνολογία GaN-on-Si επιτρέπει την παραγωγή διατάξεων ισχύος υψηλής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένων τρανζίστορ και διόδων. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μετατροπής ισχύος, όπως τροφοδοτικά, μετατροπείς και συστήματα ηλεκτρικών οχημάτων. Οι διατάξεις GaN-on-Si προσφέρουν υψηλότερη απόδοση, ταχύτερες ταχύτητες μεταγωγής και βελτιωμένη πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διατάξεις με βάση το πυρίτιο.

Εφαρμογές RF και μικροκυμάτων: Οι διατάξεις GaN-on-Si βρίσκουν εφαρμογές σε συστήματα υψηλών συχνοτήτων και RF, συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, των συστημάτων ραντάρ και των δορυφορικών επικοινωνιών. Προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό κέρδος και εξαιρετική γραμμικότητα, καθιστώντας τις κατάλληλες για απαιτητικές εφαρμογές RF.

Φωτισμός στερεάς κατάστασης: Τα LED GaN-on-Si χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φωτισμού, συμπεριλαμβανομένου του γενικού φωτισμού, του φωτισμού αυτοκινήτων και του οπίσθιου φωτισμού οθονών. Τα LED με βάση το GaN προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και βελτιωμένη ποιότητα χρώματος σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες φωτισμού.

Χαρακτηριστικά:

Κόστος-αποτελεσματικότητα: Η τεχνολογία GaN-on-Si αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα κόστους των πλακιδίων πυριτίου και την επεκτασιμότητα των διαδικασιών παραγωγής πυριτίου. Αυτό καθιστά το GaN-on-Si μια οικονομικά αποδοτική λύση για παραγωγή μεγάλης κλίμακας και ενσωμάτωση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες που βασίζονται στο πυρίτιο.

Συμβατότητα: Η τεχνολογία GaN-on-Si επιτρέπει την ενσωμάτωση των διατάξεων GaN με υφιστάμενα κυκλώματα και συστήματα που βασίζονται σε πυρίτιο. Αυτή η συμβατότητα διευκολύνει την ανάπτυξη υβριδικών διατάξεων και λύσεων συστήματος-σε-τσιπ (SoC).

Υψηλή πυκνότητα ισχύος: Οι διατάξεις GaN-on-Si προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων του νιτριδίου του γαλλίου. Μπορούν να διαχειριστούν υψηλές τάσεις, να λειτουργήσουν σε υψηλές συχνότητες και να παρουσιάσουν υψηλή τάση διάσπασης, επιτρέποντας συμπαγή και αποδοτικά ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος.

Ευρύ χάσμα ζώνης: Το GaN έχει ευρύ χάσμα ζώνης, επιτρέποντας τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες και τη βελτιωμένη θερμική σταθερότητα. Οι διατάξεις GaN-on-Si μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων.

- **Οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO)**

Το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) είναι ένα ημιαγωγικό υλικό με ευρύ χάσμα ζώνης με μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθούν ορισμένες γενικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά του ZnO.

Εφαρμογές:

Οπτοηλεκτρονική: Το ZnO χρησιμοποιείται σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις όπως δίοδοι εκπομπής φωτός (LED), ανιχνευτές υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας και διαφανείς αγωγίμες επιστρώσεις. Τα LED με βάση το ZnO βρίσκουν εφαρμογές σε οθόνες, φωτισμό και οπτικά συστήματα επικοινωνίας. Οι ανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας ZnO χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η βιοϊατρική ανίχνευση.

Διαφανή ηλεκτρονικά: Τα λεπτά υμένια και οι νανοδομές ZnO χρησιμοποιούνται στα διαφανή ηλεκτρονικά. Αυτές περιλαμβάνουν διαφανείς αγώγιμες επιστρώσεις για οθόνες αφής, ηλιακές κυψέλες και διαφανή τρανζίστορ για οθόνες και αισθητήρες.

Αισθητήρες αερίων: Οι αισθητήρες αερίων με βάση το ZnO χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση διαφόρων αερίων, συμπεριλαμβανομένου του μονοξειδίου του άνθρακα, του υδρογόνου και των πτητικών οργανικών ενώσεων. Η ευαισθησία του ZnO στα διάφορα αέρια το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, τη βιομηχανική ασφάλεια και τα συστήματα αυτοκινήτων.

Πιεζοηλεκτρικές διατάξεις: Το ZnO παρουσιάζει ισχυρές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, καθιστώντας το χρήσιμο για αισθητήρες, ενεργοποιητές και συσκευές συλλογής ενέργειας. Οι πιεζοηλεκτρικές διατάξεις με βάση το ZnO χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως οι αισθητήρες πίεσης, οι ακουστικές διατάξεις και η παραγωγή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας.

Χαρακτηριστικά:

Ευρύ χάσμα ζώνης: επιτρέποντας την αποτελεσματική απορρόφηση και εκπομπή υπεριώδους φωτός. Η ιδιότητα αυτή καθιστά το ZnO κατάλληλο για εφαρμογές όπως ανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας και συσκευές εκπομπής φωτός.

Διαφάνεια: Το ZnO είναι διαφανές στο ορατό φως, καθιστώντας το χρήσιμο για εφαρμογές που απαιτούν διαφάνεια, όπως διαφανή ηλεκτρόδια και επιστρώσεις για οπτοηλεκτρονικές συσκευές.

Πιεζοηλεκτρικότητα: Το ZnO παρουσιάζει ισχυρές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, δημιουργώντας ηλεκτρικό φορτίο όταν υποβάλλεται σε μηχανική καταπόνηση. Η ιδιότητα αυτή είναι πλεονεκτική για εφαρμογές σε αισθητήρες, ενεργοποιητές και συλλογή ενέργειας.

Υψηλή χημική σταθερότητα: Το ZnO έχει υψηλή χημική σταθερότητα, επιτρέποντάς του να αντέχει σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και να διατηρεί τις επιδόσεις του με την πάροδο του χρόνου.

- **Οργανικοί ημιαγωγοί**

Οι οργανικοί ημιαγωγοί είναι μια κατηγορία υλικών που αποτελούνται από μόρια ή πολυμερή με βάση τον άνθρακα και παρουσιάζουν ημιαγωγικές ιδιότητες. Ακολουθούν ορισμένες γενικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά των οργανικών ημιαγωγών.

Εφαρμογές:

Οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός (OLED): OLED: Οι οργανικοί ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται ευρέως στις οθόνες OLED και στις εφαρμογές φωτισμού. Προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως ευέλικτοι παράγοντες μορφής, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή χρωματική καθαρότητα. Οι OLED χρησιμοποιούνται σε smartphones, τηλεοράσεις, επιγραφές και φωτισμό αυτοκινήτων.

Οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV): Οι οργανικοί ημιαγωγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλιακές κυψέλες. Τα OPVs προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως το μικρό βάρος, η ευελιξία και η χαμηλού κόστους παραγωγή. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η προσαρμοστικότητα και η φορητότητα είναι σημαντικές, όπως οι φορητές συσκευές, η παραγωγή ενέργειας σε εξωτερικούς χώρους και οι παροχές ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές.

Οργανικά τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης (OTFT): Οι οργανικοί ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται σε OTFTs για εύκαμπτα ηλεκτρονικά, όπως εύκαμπτες οθόνες, αισθητήρες και έξυπνες συσκευασίες. Τα OTFTs επιτρέπουν την υλοποίηση εύκαμπτων και ελαφρών ηλεκτρονικών συσκευών.

Οργανικοί αισθητήρες: Οι οργανικοί ημιαγωγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές αισθητήρων, όπως αισθητήρες χημικών ουσιών και αερίων, βιοαισθητήρες και αισθητήρες εικόνας. Προσφέρουν το πλεονέκτημα της συμβατότητας με εύκαμπτα υποστρώματα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης με άλλα οργανικά στοιχεία.

Χαρακτηριστικά

Χαμηλό κόστος: Οργανικοί ημιαγωγοί μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνικές χαμηλού κόστους που βασίζονται σε διαλύματα, όπως οι διαδικασίες εκτύπωσης και επικάλυψης.

Αυτό τους καθιστά ελκυστικούς για κατασκευή μεγάλης κλίμακας και πιθανή μείωση του κόστους.

Ευελιξία: Οι οργανικοί ημιαγωγοί είναι εγγενώς εύκαμπτοι και μπορούν να επεξεργαστούν σε εύκαμπτα υποστρώματα. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την ανάπτυξη εύκαμπτων και λυγισμένων ηλεκτρονικών διατάξεων.

Ρυθμιζόμενα ενεργειακά επίπεδα: Τα ενεργειακά επίπεδα των οργανικών ημιαγωγών μπορούν να ρυθμιστούν με την τροποποίηση της χημικής τους δομής. Αυτή η δυνατότητα συντονισμού επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των ηλεκτρονικών και οπτικών ιδιοτήτων ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις συσκευών.

Περιορισμένη κινητικότητα φορέων φορτίου: Σε σύγκριση με τους ανόργανους ημιαγωγούς, οι οργανικοί ημιαγωγοί παρουσιάζουν γενικά χαμηλότερη κινητικότητα φορέων φορτίου. Ωστόσο, οι εξελίξεις στη μηχανική υλικών και διατάξεων έχουν βελτιώσει την κινητικότητα των οργανικών ημιαγωγών, επιτρέποντας τη χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές.

Γενικές παρατηρήσεις

Οι ημιαγωγοί καρβιδίου πυριτίου (SiC) αποτελούν μια συναρπαστική και ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος. Ακολουθούν ορισμένες γενικές σκέψεις σχετικά με τους ημιαγωγούς SiC.

Ευρύ χάσμα ζώνης: Το SiC έχει ευρύ χάσμα ζώνης σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο (Si). Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στις διατάξεις SiC να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τάσεις και συχνότητες διατηρώντας την απόδοσή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και πυκνότητα ισχύος.

Ικανότητα για υψηλές θερμοκρασίες: Οι ημιαγωγοί SiC μπορούν να αντέξουν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις διατάξεις Si. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές όπου απαιτείται λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, η αεροδιαστημική και οι βιομηχανικές εφαρμογές.

Μειωμένες απώλειες μεταγωγής: Οι διατάξεις SiC έχουν ταχύτερες ταχύτητες μεταγωγής και χαμηλότερες απώλειες μεταγωγής σε σύγκριση με τις διατάξεις Si. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει τη λειτουργία υψηλότερων συχνοτήτων και επιτρέπει την αποδοτικότερη μετατροπή ισχύος.

Υψηλότερη πυκνότητα ισχύος: Λόγω του ευρύτερου χάσματος ζώνης και της ανώτερης θερμικής αγωγιμότητας του SiC, οι διατάξεις μπορούν να διαχειριστούν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος. Αυτό οδηγεί σε πιο συμπαγή και ελαφριά ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος, καθιστώντας το SiC ελκυστικό για εφαρμογές όπου οι περιορισμοί χώρου και βάρους είναι κρίσιμοι.

Βελτιωμένη αποδοτικότητα: Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη συνολική απόδοση μετατροπής ισχύος. Αυτό το πλεονέκτημα είναι ιδιαίτερα επωφελές σε εφαρμογές όπως τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα και τα κέντρα δεδομένων.

Προκλήσεις στην κατασκευή: Παρόλο που η τεχνολογία SiC έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όσον αφορά την κατασκευή μεγάλης κλίμακας και τη μείωση του κόστους. Οι διαδικασίες παραγωγής για τις διατάξεις SiC είναι πιο πολύπλοκες και ακριβές σε σύγκριση με τις διατάξεις Si. Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες εξελίξεις αντιμετωπίζουν αυτές τις προκλήσεις.

Αυξανόμενη υιοθέτηση: Η υιοθέτηση των ημιαγωγών SiC αυξάνεται σε διάφορες βιομηχανίες. Τα ηλεκτρικά οχήματα, τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι βιομηχανικοί κινητήρες και τα τροφοδοτικά είναι μερικοί από τους τομείς στους οποίους εφαρμόζεται ευρέως η τεχνολογία SiC. Οι δυνατότητες του SiC να φέρει επανάσταση στα ηλεκτρονικά ισχύος και να συμβάλει σε ένα πιο πράσινο και αποδοτικό μέλλον είναι σημαντικές.

Συνολικά, οι ημιαγωγοί SiC προσφέρουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές διατάξεις Si, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητας υψηλότερης θερμοκρασίας, των ταχύτερων ταχυτήτων μεταγωγής και της βελτιωμένης απόδοσης. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται και οι διαδικασίες κατασκευής ωριμάζουν, το SiC αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των ηλεκτρονικών ισχύος.

Κεφάλαιο V

Μελλοντικές εφαρμογές

Οι ημιαγωγοί SiC έχουν ήδη βρει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, αλλά το δυναμικό τους για μελλοντικές εφαρμογές είναι τεράστιο. Ακολουθούν ορισμένες πιθανές μελλοντικές εφαρμογές των ημιαγωγών SiC:

Ηλεκτρικά οχήματα (EVs): Οι διατάξεις SiC μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση και την εμβέλεια των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ικανότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπει καλύτερη θερμική διαχείριση και ταχύτερη φόρτιση, ενώ η υψηλή πυκνότητα ισχύος τους επιτρέπει μικρότερα και ελαφρύτερα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος. Οι αντιστροφείς και οι μονάδες ισχύος με βάση το SiC αναμένεται να γίνουν όλο και πιο διαδεδομένες στα ηλεκτρικά οχήματα επόμενης γενιάς.

Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Οι ημιαγωγοί SiC μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Η υψηλή τους απόδοση και η ικανότητά τους να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές μετατροπής ισχύος και ενσωμάτωσης στο δίκτυο. Οι διατάξεις SiC μπορούν να επιτρέψουν την αποτελεσματικότερη συλλογή ενέργειας και να μειώσουν τις απώλειες ισχύος στις διαδικασίες μετατροπής.

Αεροδιαστημική και αεροπορία: Η αεροδιαστημική βιομηχανία μπορεί να επωφεληθεί από τους ημιαγωγούς SiC λόγω της ανθεκτικότητάς τους σε υψηλές θερμοκρασίες, των ελαφρών χαρακτηριστικών τους και της υψηλής αξιοπιστίας τους. Οι διατάξεις SiC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρονικά ισχύος για συστήματα αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένων των κινητήρων, των τροφοδοτικών και των ηλεκτρονικών συστημάτων αεροπλοΐας. Η βελτιωμένη αποδοτικότητα και πυκνότητα ισχύος τους μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση καυσίμων και στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Βιομηχανικές εφαρμογές: Ημιαγωγοί SiC έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν τις βιομηχανικές διαδικασίες και τον εξοπλισμό. Η λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες και οι δυνατότητες υψηλής ισχύος τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές όπως η επαγωγική θέρμανση υψηλής συχνότητας, οι κινητήρες, τα τροφοδοτικά και ο εξοπλισμός συγκόλλησης. Οι διατάξεις SiC μπορούν να επιτρέψουν αποτελεσματικότερο και

ακριβέστερο έλεγχο στις βιομηχανικές διαδικασίες, οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγικότητα και εξοικονόμηση ενέργειας.

Κέντρα δεδομένων: Τα κέντρα δεδομένων είναι εγκαταστάσεις υψηλής έντασης ενέργειας που απαιτούν αποτελεσματικές λύσεις διαχείρισης ισχύος και ψύξης. Οι ημιαγωγοί SiC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μονάδες διανομής ισχύος, αδιάλειπτα τροφοδοτικά (UPS) και άλλα συστήματα μετατροπής ισχύος εντός των κέντρων δεδομένων. Οι διατάξεις SiC μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, στη μείωση των απωλειών ισχύος και στην αύξηση της πυκνότητας ισχύος, οδηγώντας σε πιο βιώσιμα και συμπαγή σχέδια κέντρων δεδομένων.

Εφαρμογές υψηλής συχνότητας: Τα ανώτερα χαρακτηριστικά υψηλής συχνότητας του SiC το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορες ταχύτητες μεταγωγής και λειτουργία υψηλής συχνότητας. Αυτές περιλαμβάνουν συστήματα ασύρματης φόρτισης, ενισχυτές ισχύος RF, συστήματα ραντάρ και τροφοδοτικά υψηλής συχνότητας μεταγωγής. Οι διατάξεις SiC μπορούν να επιτρέψουν καλύτερη απόδοση και αποδοτικότητα σε αυτές τις εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Ιατρική και υγειονομική περίθαλψη: Ημιαγωγοί SiC μπορούν να έχουν εφαρμογές σε ιατρικές συσκευές και συστήματα υγειονομικής περίθαλψης. Η ικανότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες, η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η αποδοτικότητά τους μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη προηγμένου εξοπλισμού ιατρικής απεικόνισης, τροφοδοτικών για χειρουργικά εργαλεία και αποτελεσματικότερης διαχείρισης ισχύος σε εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης.

Αυτά είναι μερικά μόνο παραδείγματα πιθανών μελλοντικών εφαρμογών για τους ημιαγωγούς SiC. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, μπορούμε να περιμένουμε να δούμε συσκευές SiC να εφαρμόζονται σε ένα ευρύτερο φάσμα βιομηχανιών και εφαρμογών, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, σε υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και σε πιο αξιόπιστα συστήματα.

Κεφάλαιο VI

Γενικά Συμπεράσματα

Το Ανθρακοπυρίτιο (Silicon Carbide) είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός που κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερη δημοτικότητα λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του υλικού του, οι οποίες περιλαμβάνουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, υψηλό ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης και υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων. Το SiC έχει δυνητικές εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών ισχύος, των τηλεπικοινωνιών και της αεροδιαστημικής.

Οι ημιαγωγοί SiC προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς με βάση το πυρίτιο, συμπεριλαμβανομένης της υψηλότερης απόδοσης ισχύος, των ταχύτερων ταχυτήτων μεταγωγής και των υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τους ημιαγωγούς SiC ιδιαίτερα ελκυστικούς για χρήση σε εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας.

Διατάξεις με βάση το SiC, όπως δίοδοι Schottky, MOSFET και BJT, είναι ήδη διαθέσιμες στο εμπόριο και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως ηλεκτρικά οχήματα, συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τροφοδοτικά. Ωστόσο, οι διατάξεις με βάση το SiC εξακολουθούν να είναι ακριβότερες από τις αντίστοιχες διατάξεις με βάση το πυρίτιο, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την υιοθέτησή τους σε ορισμένες εφαρμογές.

Συμπερασματικά, οι ημιαγωγοί SiC προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς με βάση το πυρίτιο και η υιοθέτησή τους είναι πιθανό να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς η ζήτηση για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας συνεχίζει να αυξάνεται. Ωστόσο, το υψηλότερο κόστος των διατάξεων με βάση το SiC μπορεί να περιορίσει την υιοθέτησή τους σε ορισμένες εφαρμογές και απαιτούνται συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για την περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεών τους και τη μείωση του κόστους τους.

Αναφορές

- [1] Madelung, O. (Ed.). (2004). *Semiconductors: Data Handbook*. Springer-Verlag.
- [2] Sadow, S. E., & Agarwal, A. (Eds.). (2018). *Advances in Silicon Carbide Processing and Applications*. Artech House.
- [3] Kimoto, T., & Cooper, J. A. (Eds.). (2014). *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*. Wiley-VCH.
- [4] Zetterling, C.-M. (2019). *Silicon Carbide in Power Electronics*. Elsevier.
- [5] Shur, M. S. (Ed.). (2016). *Wide Bandgap Semiconductors for High Power, High Frequency and High Temperature Applications*. Academic Press.
- [6] Lupton, D., "The Physical and Chemical Properties of Silicon Carbide," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 27, no. 9, pp. 277-281, 1944.
- [7] Choyke, W. and Patrick, L. "The Chemical Properties of Silicon Carbide," *Journal of Applied Physics*, vol. 37, no. 11, pp. 3824-3831, 1966.
- [8] Sadow, S. and Agarwal, A., "Advances in Silicon Carbide Processing and Applications," Artech House, 2004.
- [9] Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray Diffraction* (3rd ed.). Prentice Hall.
- [10] Neudeck, P. G., & Pierret, R. F. (1988). *Advanced Semiconductor Fundamentals* (1st ed.). Addison-Wesley.
- [11] O'Mahony, D., McCarthy, E., & Knief, R. A. (2016). *Silicon Carbide: Recent Major Advances*. Springer.
- [12] Park, J. S., et al. (2013). Structural defects in silicon carbide crystals: a review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 1624-1631.
- [13] W. F. Knippenberg, (1963). *Philips Research Reports*, 18 ,p. 161-274
- [14] A. O. Konstantinov, (2011). "Silicon Carbide: Structure, Properties, and Processing," *Materials Science Forum*, vol. 679-680, pp. 282-290.

- [15] Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2005). Solid State Electronic Devices (6th ed.). Pearson.
- [16] Baliga, B. J. (2005). Modern Power Devices. CRC Press.
- [17] https://www.mountaintopstonesales.ca/uploads/3/7/7/7/37772721/s230153653302187039_p33_i12_w2560.jpeg
- [18] [OIP.E5V3GZ3FrqHVDT8aeGGZqAHaCx \(474×177\) \(bing.com\)](#)
- [19] [heavilydoped.png \(402×336\) \(physics-and-radio-electronics.com\)](#)
- [20] [chap1-3_en.png \(720×277\) \(semicon-storage.com\)](#)
- [21] [1462856539.png \(498×358\) \(electrical4u.com\)](#)
- [22] [P-Type-Semiconductor.jpg \(800×319\) \(studiousguy.com\)](#)
- [23] [construction-300x225.png \(300×225\) \(electronics-lab.com\)](#)
- [24] [1c72680c66f98a7ece7fc75c199e6ea3.png \(750×492\) \(pinimg.com\)](#)
- [25] [instrumentationtools.com_schottky-diode-working-principle.png \(621×292\)](#)
- [26] [R.383b0d72a4cd5c48d5aa8494cc319a91 \(593×294\) \(bing.com\)](#)
- [27] [OIP.sGg36kwGWNfexZ3p-o_HzwHaFj \(474×355\) \(bing.com\)](#)
- [28] [OIP.Yw1VKIN3aASytlNEKmjlpwHaCq \(474×170\) \(bing.com\)](#)
- [29] [c27c0cf6-8d2a-4d80-b6d3-9aaf8d2d520e \(560×420\) \(rohm.com\)](#)
- [30] [OIP.ogurHS4JyLGrLNVf9xnWTAAAAA \(450×208\) \(bing.com\)](#)
- [31] [OIP.juXKCg6umxNOWPqyWLC6egHaDP \(474×207\) \(bing.com\)](#)
- [32] [OIP.pU6Hdh1_aHmt4yeK9N1zbQAAAA \(300×245\) \(bing.com\)](#)
- [33] [SiC_2-5_pfc.gif \(599×180\) \(rohm.com.cn\)](#)
- [34] Donald A. Neamen(2009)-"Microelectronics: Circuit Analysis and Design"
- [35] Thomas L. Floyd(2017).-"Electronic Devices: Conventional Current Version"
- [36] Lim, S., Ong, H. & Chen, Z. (2018). Device Physics and Applications of Wide Bandgap Semiconductors. World Scientific Publishing.
- [37] Shur, M., (2019). SiC Wide Bandgap Semiconductors: Devices and Applications. CRC Press.
- [38] Zekry, A., (2018). Silicon Carbide Electronics: Fundamentals and Devices. Springer.
- [39] Deboy, G., (2018). SiC Power Devices and Applications. John Wiley & Sons.

- [40]Palmour, J. et al., "Bandgap Engineering in Silicon Carbide," Materials Science Forum, vol. 457-460, pp. 23-30, 2004.
- [41]Rumyantsev, S. et al., "Strain and defect engineering in silicon carbide," Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 41, pp. 107-120, 2016.
- [42]Palmour, J. et al., "High Voltage and High Power SiC Devices," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 52, no. 3, pp. 523-533, 2005.
- [43]Sarro, P. et al., "Defects and Defect Engineering in Silicon Carbide," Materials Science Forum, vol. 924, pp. 3-19, 2018.
- [44]Melloch, M. et al., "Heteroepitaxy of Silicon Carbide," Journal of Electronic Materials, vol. 27, no. 4, pp. 268-272, 1998.
- [45]Ravi, K. & Sharma, A. (2016). "Growth of SiC crystals: A review," Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, vol. 62, pp. 1-32.
- [46]Nakashima, S. & Harima H. (1999). "SiC crystal growth technology," Journal of Crystal Growth, vol. 201, pp. 130-137.
- [47]Saddow, S. & Agarwal, A. (2004). "Advances in Silicon Carbide Processing and Applications," Artech House.
- [48]Razeghi, M. (Ed.). (2009). Gallium Arsenide Electronics. Wiley-Interscience.
- [49]Chang, C. C., & Surya, C. (2019). Gallium Nitride Electronics: Materials, Devices, and Applications (1st ed.). CRC Press.
- [50]Mishra, U. K., Shen, L., & Kazior, T. E. (Eds.). (2013). GaN-Based Materials and Devices (1st ed.). Springer.
- [51]Asbeck, P. M., & Lee, T. H. (Eds.). (2004). Indium Phosphide and Related Materials (1st ed.). Springer.
- [52]Wada, O., & Hayashi, N. (Eds.). (2000). Indium Phosphide and Related Materials: Processing, Technology, and Devices (1st ed.). Springer.
- [53]Keller, S., Mishra, U. K., & DenBaars, S. P. (Eds.). (2013). Gallium Nitride (1st ed.). Springer.

- [54] Ong, C. B. (2010). Zinc Oxide Materials for Electronic and Optoelectronic Device Applications (1st ed.). Elsevier.
- [55] Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2005). Solid State Electronic Devices (6th ed.). Prentice Hall.
- [56] Bhattacharya, P. (2015). Semiconductor Optoelectronic Devices (2nd ed.). Academic Press.
- [57] Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2021). Microelectronic Circuits. Oxford University Press.
- [58] Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2005). Solid State Electronic Devices (6th ed.). Pearson Education.
- [60] Colinge, J.-P. (Ed.). (2012). FinFETs and Other Multi-Gate Transistors. Springer.
- Stillman G. (1990). Schottky Barrier Diodes. Elsevier Science Ltd.
- [61] Sedra A. (1972). Schottky Diodes and Applications. Wiley-Interscience.
- [62] Kenichi I. and Shin-ichi N. (2002). Schottky Barrier Diodes. Springer. Jaeger R. and
- [63] Blalock T. (2018), "Microelectronic Circuit Design," 5th ed., McGraw-Hill.
- [64] Horowitz P. and Hill W. (2015), "The Art of Electronics," 3rd ed., Cambridge University Press.
- [65] Sze S. and Ng K. (2007), "Physics of Semiconductor Devices," 3rd ed., Wiley.
- [66] Van Duzer T. and Turner C. W. (1998), "Principles of Superconductive Devices and Circuits," 2nd ed., Elsevier.
- [67] Ghosh A. and Bhattacharya K. (2015), "Semiconductor Device Physics and Design," 1st ed., Cambridge University Press.
- [68] Neamen D. A. (2011), "Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles," 4th ed., McGraw-Hill.
- [69] Weste N. and Harris D. (2011), "CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective," 4th ed., Pearson.
- [70] Lee, T. H. (2004), "The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits," 2nd ed. Cambridge University Press.

- [71]Rashid M., (2013) "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications," 4th ed., Pearson.
- [72]Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2016). Microelectronic circuits (7th ed.). Oxford University Press.
- [73]Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2015). Solid state electronic devices (7th ed.). Pearson.
- [74]Razavi, B. (2016). Fundamentals of Microelectronics (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [75]Baliga, B. J. (2015). Power Semiconductor Devices. Springer Science & Business Media.
- [76]Umanand, L. (1999). Thyristor Theory and Design Considerations. John Wiley & Sons.
- [77]Mohan, N., Undeland, T. & Robbins, W. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons.
- [78]Mathur, R. & Varma, R. (2002). Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. IEEE Press.
- [79]Vachhani, V. & Fernandes B. (1994). Thyristor Control of AC Power. CRC Press.
- [80]Kwok, H. (1984). Thyristor Physics. John Wiley & Sons.
- [81]Baliga, B, (1988). Thyristor Applications. PWS-KENT Publishing Company.
- [82]Padiyar, K. (2014). Thyristor-Based Voltage Source Converters for HVDC Transmission Systems. Springer.
- [83]Vishal, J. (2014). Introduction to Thyristors and Their Applications. International Journal of Engineering Research & Technology.