



«Διατάξεις
υψηλής ισχύος
AlN/GaN HEMT »

Κλεοπάτρα Ε. Αρετούλη

Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Κρήτης

2010

Μεταπτυχιακή διατριβή

«Διατάξεις υψηλής ισχύος *AlN/GaN HEMT*»

Κλεοπάτρα Ε. Αρετούλη

Τριμελής επιτροπή:

Αλέξανδρος Γεωργακίλας (επιβλέπων καθηγητής)

Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Κρήτης

Ηλιόπουλος Ελευθέριος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Κρήτης

Χατζόπουλος Ζαχαρίας

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Κρήτης

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης

Ηράκλειο, Οκτώβριος 2010

Στους γονείς μου..

Δημοσιεύσεις:

“High electron mobility transistors based on the AlN/GaN heterojunction”

A. Adikimenakis, K.E. Aretouli, E. Iliopoulos, A. Kostopoulos, K. Tsagaraki, G. Konstantinidis and A. Georgakilas

Microelectronic engineering, 86, pp. 1071-1073, (2009)

Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια:

“High electron mobility transistors based on the AlN/GaN heterojunction”

K. E. Aretouli, A. Adikimenakis, A. Kostopoulos, E. Iliopoulos, K. Tsagaraki, G. Konstantinidis and A. Georgakilas,

in *Micro and Nano engineering (MNE)*, 15-18 September 2008, Athens, Greece

“Study of capabilities and limitations of the AlN/GaN HEMT material system”

A. Adikimenakis, M. Alomari, E. Kohn, K.E. Aretouli, A. Kostopoulos, E. Iliopoulos, K. Tsagaraki, G. Konstantinidis and A. Georgakilas, in

International Workshop on Nitride semiconductors (IWN), 6-10 October 2008, Montreux, Switzerland

“Current instabilities in AlN/GaN HEMT”

K.E. Aretouli, J. Kuzmik, D. Pogany, A. Adikimenakis, T. Kostopoulos, G. Konstantinidis and A. Georgakilas, in

Heterostructure Technology (HETECH), 18-20 October 2010, Crete, Greece

“Epitaxial growth of (0001) GaN films on polycrystalline diamond substrates, by plasma-assisted MBE”

A. Adikimenakis, K. Tsagaraki, G. Tsiakatouras, K.E. Aretouli and A. Georgakilas, in *Heterostructure Technology (HETECH)*, 18-20 October 2010, Crete, Greece

Παρακολούθηση διεθνών σεμιναρίων:

MORGAN training workshop P9, 24-26 May 2010, Bratislava

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις δομές και διατάξεις HEMT.....	3
Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET).....	5
Ετεροδομές III –Νιτριδίων: Σχηματισμός 2DEG	6
Πεδία πόλωσης.....	8
Τρανζίστορ υψηλής ευκινησίας ηλεκτρονίων, HEMT	9
Πλαστική χαλάρωση-Δομές $Al_xGa_{1-x}N/GaN$, $In_xAl_{1-x}N/GaN$	15
Διατάξεις HEMT AlN/GaN	16
Η διεθνής έρευνα στα AlN/GaN HEMT.....	18
Αστάθεια ρεύματος	19
Θερμικά φαινόμενα	21
Σκοπός της παρούσας διατριβής	22
Κεφάλαιο 2: Πειραματικές τεχνικές και μεθοδολογία	
Κεφάλαιο 2.1: Επιταξιακή ανάπτυξη και κατασκευή των διατάξεων AlN/GaN HEMT.....	28
Κεφάλαιο 2.2: Τεχνικές χαρακτηρισμού.....	36
Μετρήσεις ρεύματος- τάσης (I-V).....	36
Μετρήσεις ρεύματος τάσης (I-V),σε ανορθωτικές επαφές Schottky.....	39
Μετρήσεις χωρητικότητας- τάσης (C-V).....	40
Μετρήσεις διαγωγιμότητας (g_m).....	42
Εξαγωγή της τάσης κατωφλίου του τρανζίστορ.....	43
Μοντέλο γραμμών μεταφοράς (TLM).....	44
Εξαγωγή σειριακών αντιστάσεων	45
Διαφορική αντίσταση	48
Τάση κατάρρευσης Off –state	49
Κεφάλαιο 3: Μελέτη επιταξιακής δομής AlN/GaN HEMT	

Κεφάλαιο 3.1: Βέλτιστο πάχος ανάπτυξης AlN.....	52
Προσδιορισμός του κρίσιμου πάχους AlN πάνω σε GaN.....	54
Προσδιορισμός της χωρικής κατανομής ηλεκτρονίων με μετρήσεις C-V.....	57
Μετρήσεις μέγιστου ρεύματος και διαγωγιμότητας στα τρανζίστορ HEMT.....	59
Μετρήσεις αντίστασης φύλλου σε ωμικές επαφές.....	60
Κεφάλαιο 3.2: Επίδραση της επιφάνειας στην απόδοση των διατάξεων AlN/GaN HEMTs.....	63
Απόδοση των HEMT σε μετρήσεις ρεύματος-τάσης.....	65
Συμπεριφορά των HEMT σε παλμικές μετρήσεις.....	67
<i>Κεφάλαιο 4: Απόδοση των AlN/GaN HEMT σε DC μετρήσεις</i>	
Κεφάλαιο 4.1: Χαρακτηρισμός της λειτουργίας των διατάξεων.....	71
Μετρήσεις ρεύματος τάσης σε ανορθωτικές επαφές Schottky	71
Μετρήσεις χωρητικότητας- τάσης	73
I-V χαρακτηριστικές των τρανζίστορ HEMT AlN/GaN	73
Διαγωγιμότητα των AlN/GaN HEMT	75
Τάση κατωφλίου των AlN/GaN HEMT	77
Ρεύμα διαρροής απαγωγού.....	77
Ρεύμα διαρροής πύλης	79
Τάση κατάρρευσης σε συνθήκη κλειστού καναλιού (Off -state).....	80
Κεφάλαιο 4.2: Μελέτη χαρακτηριστικών αντιστάσεων	85
Μέθοδος γραμμών μεταφοράς (TLM)	85
Σειριακές αντιστάσεις	86
Διαφορική αντίσταση πηγής DRS (dynamic access resistance).....	89
Κεφάλαιο 5: Απόδοση των AlN/GaN HEMT σε παλμικές μετρήσεις	
Κεφάλαιο 5.1: Θερμικά φαινόμενα	93
Κεφάλαιο 5.2: Αστάθεια ρεύματος	98
Συμπεράσματα	102

Περίληψη

Οι ημιαγωγικές ετεροδομές με βάση το GaN, αποτελούν τη σημαντικότερη περιοχή έρευνας τα τελευταία χρόνια, στην κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων υψηλών συχνοτήτων. Οι βασικότεροι εκπρόσωποι της κατηγορίας είναι τα τρανζίστορ τύπου HEMT από ετεροδομές AlGaIn/GaN και InAlN/GaN, που χαρακτηρίζονται από προηγμένες δυνατότητες σε σχέση με τα συμβατικά πλέον MODFET των III-V ημιαγωγών (πχ. AlGaAs/GaAs HEMT).

Στην παρούσα διατριβή έγινε μια συστηματική μελέτη για την απόδοση διατάξεων HEMT, κατασκευασμένων από την νέα ημιαγωγική ετεροδομή AlN/GaN, η οποία αναπτύσσεται με MBE πηγής RF πλάσματος αζώτου και αποτελεί ακραία περίπτωση των δύο προαναφερθέντων ετεροδομών. Τα πειράματα μας περιλαμβάνουν τρία στάδια:

Στο πρώτο στάδιο, καθορίστηκε το βέλτιστο πάχος ανάπτυξης του φράγματος AlN της ετεροδομής AlN/GaN HEMT, όπου με την απουσία πλεγματικής χαλάρωσης επετεύχθη η μέγιστη δυνατή συγκέντρωση και ευκινησία των ηλεκτρονίων του δισδιάστατου ηλεκτρονιακού αερίου (2DEG). Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν ετεροδομές AlN/GaN, με διαφορετικά πάχη στρώματος AlN, στις οποίες κατασκευάστηκαν διατάξεις HEMT, με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας. Μετά από εκτενή χαρακτηρισμό του υλικού και των διατάξεων AlN/GaN HEMT επιλέχθηκε πάχος AlN ίσο με 4.5 nm για τη συνέχεια της μελέτης.

Στο δεύτερο στάδιο, διερευνήθηκε πειραματικά ο ρόλος ενός στρώματος επικάλυψης με νανομετρικό πάχος της επιφάνειας του AlN και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με θεωρητικούς υπολογισμούς για το ενεργειακό διάγραμμα της διάταξης, τον σχηματισμό και την πυκνότητα (N_s) του 2DEG. Η πυκνότητα του 2DEG έχει ιδιαίτερη εξάρτηση από το δυναμικό της επιφάνειας ($E_c - E_F$)_s. Οι διατάξεις από δομές με στρώμα επικάλυψης 1nm GaN παρουσίασαν επιδόσεις ρεκόρ συγκριτικά με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, με πυκνότητα ρεύματος 2A/mm και διαγωγιμότητα 425 mS/mm.

Αφού προσδιορίστηκε ο ιδανικός σχεδιασμός της ετεροδομής HEMT AlN/GaN (βέλτιστο πάχος και επικάλυψη της επιφάνειας AlN), μελετήθηκε αναλυτικά η απόδοση τους με μετρήσεις συνεχούς και παλμικού ρεύματος. Από τις μετρήσεις DC, εξήχθησαν όλες οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα HEMT: μέγιστο ρεύμα, διαγωγιμότητα, τάση κατωφλιού, ρεύμα διαρροής από το υπόστρωμα και από την πύλη, τάση κατάρρευσης, αντίσταση φύλλου και ωμικών επαφών και σειριακές αντιστάσεις. Στην εργασία παρουσιάζεται ανάλυση των τεχνικών των μετρήσεων και η εξήγηση των αποτελεσμάτων. Οι παλμικές

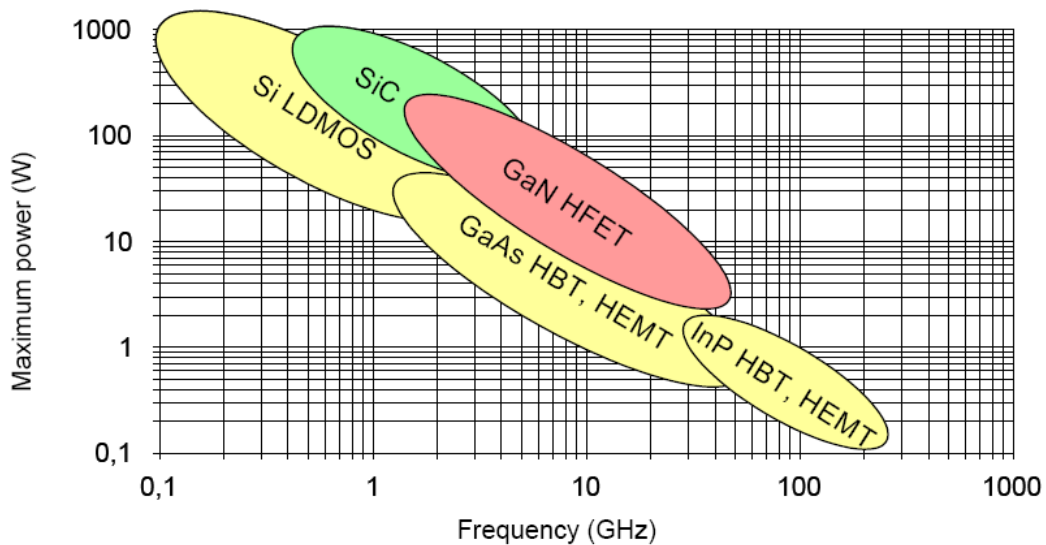
μετρήσεις αφορούν την μελέτη θερμικών φαινομένων (επιρροή της θερμικής αγωγιμότητας των υποστρωμάτων στην αύξηση της θερμοκρασίας του καναλιού) και της παγίδευσης ηλεκτρονίων από επιφανειακές καταστάσεις που προκαλεί αστάθεια ρεύματος. Τέτοιου είδους μετρήσεις δεν έχουν αναφερθεί έως σήμερα στις δομές AlN/GaN HEMT.

Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή οδήγησε στην επίτευξη προηγμένων διατάξεων GaN HEMT με στρώμα φραγμού AlN αντί των $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ή $In_xAl_{1-x}N/GaN$. Η κατανόηση των παραγόντων που περιορίζουν τις δυνατότητες απόδοσης αυτών των διατάξεων, θα επιτρέψει τη βελτιστοποίηση της κατασκευής τους και τη μετέπειτα χρήση τους σε ηλεκτρονικά ισχύος με λειτουργία σε υψηλές συχνότητες και ειδικά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται εξαιρετικά υψηλές τιμές ρεύματος. Οι ετεροδομές AlN/GaN HEMT επιτρέπουν το σχηματισμό του 2DEG σε αποστάσεις 1nm από την επιφάνεια, συνθήκη που επιτρέπει τη μέγιστη σμίκρυνση του μήκους πύλης για υψίσυχνα (THz) νανοηλεκτρονικά τρανζίστορ.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις δομές και διατάξεις HEMT

Οι ημιαγωγικές διατάξεις υψηλής ταχύτητας και συχνοτήτων, συγκεντρώνουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια στο πεδίο των ηλεκτρονικών. Στις τηλεπικοινωνίες, στη δορυφορική επικοινωνία και στο στρατό, υπάρχει μια ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για μικροκυματικές συσκευές ικανές να διαχειρίζονται υψηλή ισχύ σε συχνότητες άνω των 20 GHz. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται ως ενισχυτές, ως μικροκυματικοί σταθμοί βάσης αναμετάδοσης και ως ραντάρ για στρατιωτικές εφαρμογές, καθώς μπορούν να διαχειριστούν αναλογικά και εικονικά σήματα σε υψηλές συχνότητες.

Στη γκάμα ενδιαφέροντος, υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων, οι κυριότερες από τις οποίες είναι Si-LDMOS (Lateral Double Diffuse MOS), τα διπολικά τρανζίστορ GaAs, τα MESFET σε SiC ή GaAs και τα GaN HEMTs. Η απόδοση συστημάτων, βασισμένων στην τεχνολογία Si, περιορίζεται από τα ενδογενή χαρακτηριστικά του ίδιου του υλικού, όπως η ευκινησία φορέων του στρώματος αναστροφής και η ταχύτητα κόρου. Το ίδιο ισχύει και για τις εξαιρετικές ετεροδομές SiC /SiGe MESFETs, όπου αν και η απόδοση τους παρομοιάζεται με αυτή των III-V MODFETs¹, υστερούν σε λειτουργία υψηλών συχνοτήτων όπως φαίνεται στο γράφημα της Εικ.1.1.



Εικόνα 1.1: Κατηγορίες διατάξεων με τις αντίστοιχες συχνότητες λειτουργίας, συναρτήσει της μέγιστης δυνατής ισχύος λειτουργίας².

Οι μελέτες βελτιστοποίησης της ταχύτητας των διατάξεων αυτών, πλέον αφορούν την ανάπτυξη νέων τεχνικών φωτολιθογραφίας, μειώνοντας το μήκος πύλης (L_g) στην κλίμακα των nm.

Η ικανότητα να πραγματοποιηθούν γρηγορότερες διατάξεις μεγάλης ισχύος, εκμεταλλευόμενοι τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών III-N, ήταν το αίτιο για την ανάπτυξη διατάξεων από αυτούς. Οι ημιαγωγοί III-Νιτρίδια είναι σύνθετοι ημιαγωγοί ενώσεων III-V που αποτελούνται από στοιχεία της ομάδας III (Ga, Al, In) στοιχειομετρικά αναμιγμένα με άζωτο N, που ανήκει στην ομάδα V. Τα III-Νιτρίδια αποτελούν τους σημαντικότερους εκπρόσωπους της κατηγορίας III-V, σύνθετων ημιαγωγών, στην εποχή μας. Περιλαμβάνουν το InN, το GaN και το AlN καθώς και όλα τα κράματα που προκύπτουν απ τους συνδυασμούς τους ($Al_xGa_{1-x}N$, $In_xGa_{1-x}N$ κλπ.). Βασικά χαρακτηριστικά της οικογένειας αυτής, είναι η κάλυψη τιμών άμεσου ενεργειακού χάσματος από 0.65³ έως 6.15 eV (0.65, 3.42, 6.15 eV αντίστοιχα), οι υψηλές ταχύτητες κόρου (InN και GaN), το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο κατάρρευσης και θερμοκρασία λειτουργίας (λόγω του μεγάλου E_g στο AlN και GaN), η δυνατότητα εμπλουτισμού σε υψηλές συγκεντρώσεις, η υψηλή χημική σταθερότητα και θερμική αγωγιμότητα και η ύπαρξη αυθόρμητης και πιεζοηλεκτρικής πόλωσης κατά τον άξονα-c, που οδηγούν σε εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία και φορτίο στις ετεροδομές τους^{4 5 6 7}. Οι ετεροδομές αναπτύσσονται επιταξιακά και είναι πολυστρωματικά υλικά όπου συνδυάζονται διαφορετικού είδους ημιαγωγοί, παρουσιάζοντας νέες ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες σε σχέση με τους ημιαγωγούς που τις αποτελούν^{8 9}. Στα III-N εμφανίζονται πολύ μεγαλύτερες τιμές πόλωσης, σε σχέση με τους συμβατικούς πλέον, σύνθετους ημιαγωγούς III-V¹⁰, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους σε συνδυασμό με τις ιδανικές ιδιότητες για υψηλής ισχύος ηλεκτρικά υλικά, αποτελούν τη σημαντικότερη περιοχή έρευνας νέων ημιαγωγικών υλικών τα τελευταία χρόνια, αντικαθιστώντας ουσιαστικά τους III-V, στην κατασκευή ηλεκτρικών διατάξεων υψηλής ισχύος και συχνοτήτων.

Τα GaN HFETs (Field Effect Transistors κατασκευασμένο από ετεροδομή GaN), χαρακτηρίζονται από μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τα III-V MODFETs και τα III-V διπολικά και μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας από τις υπάρχουσες τεχνολογίες πυριτίου Si². Εκτός αυτού, τα GaN HFETs λειτουργούν σε υψηλές τάσεις, χωρίς τη χρήση ψυκτικών συστημάτων για την αποφυγή υπερθέρμανσης τους. Η εξαιρετική αποδοτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, αποτελεί βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρονικών, καθώς

το κόστος των ψυκτικών συστημάτων είναι συγκρίσιμο του κόστους της μικροκυματικής διάταξης.

Η τεχνολογία νιτριδίων εφαρμόζεται και στην οπτοηλεκτρονική λόγω της εκπομπής φωτός σε μικρά μήκη κύματος (μπλε-πράσινο-υπεριώδες)¹¹ και στην παράγωγή διόδων εκπομπής φωτός(LED)¹² και λειζερ¹³. Σήμερα, οι δίοδοι λείζερ (LD) στο ιώδες-μπλε για τη νέα γενιά DVD (blue ray disk), κατασκευάζονται από ημιαγωγικό υλικό που είναι ετεροδομές ημιαγωγών III-V. Επιπρόσθετα, τρανζίστορ GaN HEMT έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή χημικών αισθητήρων με απόδοση καλύτερη σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία των Si ISFET.

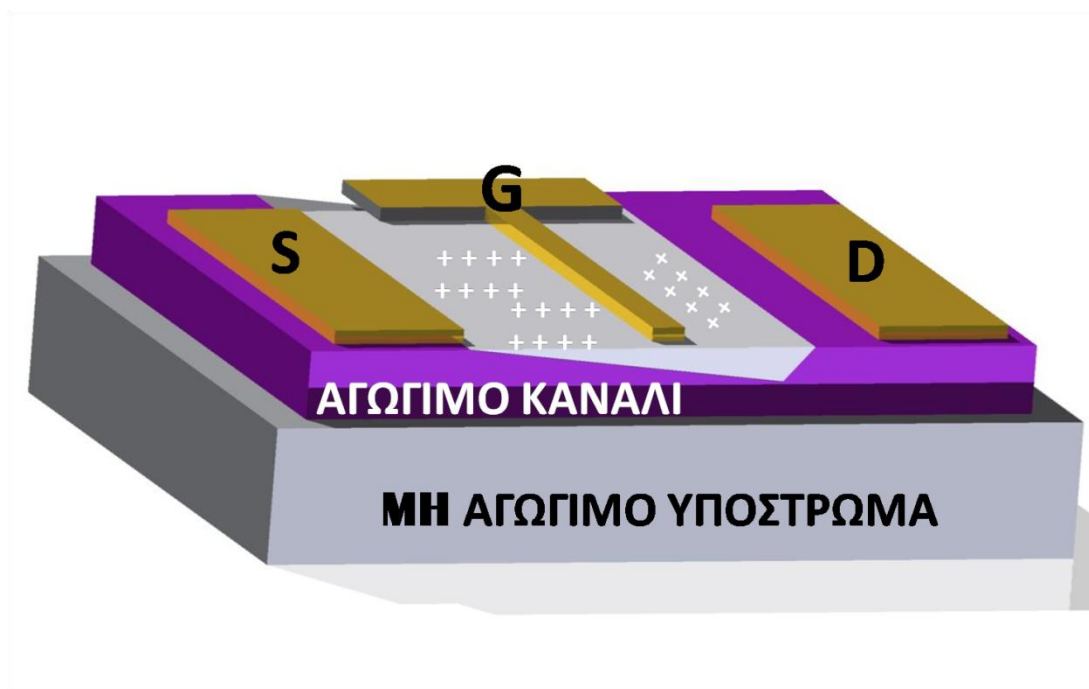
Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)

Η δημοφιλέστερη ημιαγωγική διάταξη υψηλής ταχύτητας είναι το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET). Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι ηλεκτρονικά στοιχεία στα οποία οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ενός είδους (οι φορείς πλειονότητας ενός αγώγιμου καναλιού που σχηματίζεται), σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ, όπου συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα τόσο οι φορείς πλειονότητας όσο και οι φορείς μειονότητας. Στα FET, οι φορείς είναι ελεύθεροι να κινούνται σε μια περιοχή (κανάλι), που οριοθετείται από δύο διεπιφάνειες, με την πύλη (πάνω) και το υπόστρωμα (κάτω).

Το FET, είναι μια διάταξη τριών ακροδεκτών (πηγή-πύλη-απαγωγός), που αποτελείται από αγώγιμο κανάλι, πάνω σε μη αγώγιμο υπόστρωμα¹⁴. Στις δύο άκρες του καναλιού υπάρχουν τα ηλεκτρόδια πηγής (source,S) και απαγωγού (drain,D). Ο απαγωγός συνδέεται σε υψηλότερο δυναμικό από την πηγή. Ενδιάμεσα στις δύο αυτές περιοχές βρίσκεται ο ακροδέκτης που μεταβάλλει την αγωγιμότητα του καναλιού και ονομάζεται πύλη (gate-G). Η λειτουργία του έγκειται στο ότι η διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής μεταβάλλει τη σχέση ρεύματος – τάσης, μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αυτό οφείλεται στο εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται, από την πύλη στο κανάλι. Το ηλεκτρικό πεδίο κάθετα στην πύλη ή με άλλα λόγια η τάση στον πυκνωτή μεταξύ πύλης και καναλιού V_{GS} , καθορίζει την συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο κανάλι κι επομένως την αγωγιμότητα του (αντίσταση και μέγιστο ρεύμα).

Ο συνήθης τύπος τρανζίστορ FET που κατασκευάζεται από ημιαγωγούς III-V είναι τα MESFET (Metal-semiconductor FET), στα οποία η επαφή της πύλης είναι ανορθωτική επαφή Schottky μετάλλου-ημιαγωγού. Στα απλά MESFET το

κανάλι αποτελείται από ένα ομοιογενές στρώμα με εμπλουτισμό δοτών στην περιοχή 10^{17} cm^{-3} . Η εξέλιξη προηγμένων τεχνικών επιταξιακής ανάπτυξης, όπως η «Επίταξη με Μοριακές Δέσμες» (MBE) που επιτρέπει την ελεγχόμενη εναπόθεση κλάσματος ενός ατομικού επιπέδου, κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη ετεροδομών για τρανζίστορ FET (HFET, heterostructure FET). Κατάληξη αυτού, είναι το δημοφιλέστερο σήμερα μέλος των HFET, το τρανζίστορ υψηλής ευκινησίας (HEMT) ή τρανζίστορ διαμόρφωσης εμπλουτισμού (MODFET), με ίδιες αρχές λειτουργίας και απόδοση βασισμένη στις ιδιότητες της ετεροδομής απ την οποία αποτελείται.

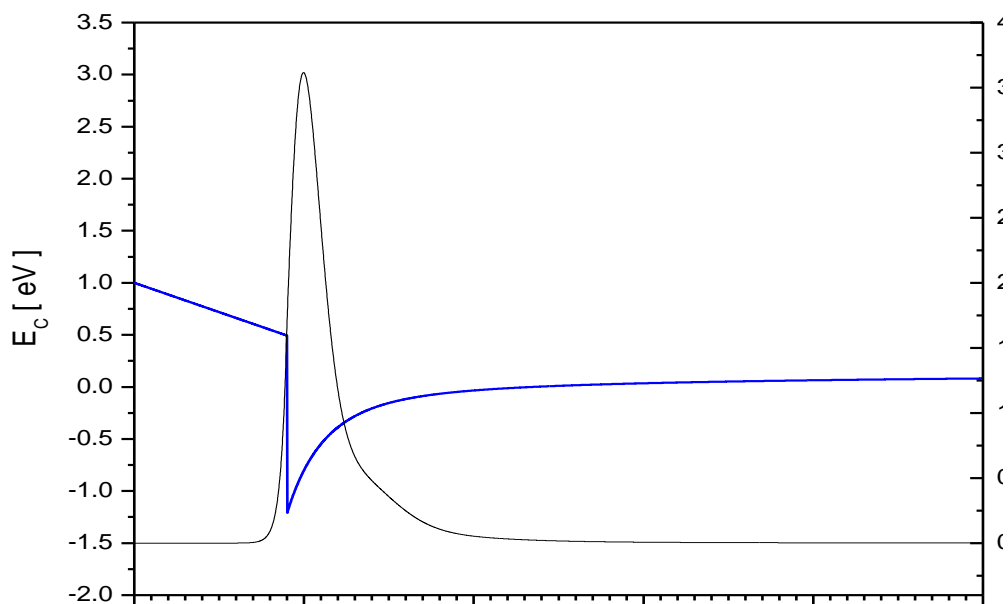


Εικόνα 1.2: Βασικά χαρακτηριστικά μιας διάταξης επίδρασης πεδίου (FET).

Ετεροδομές III-Νιτρίδιων: Σχηματισμός 2DEG

Στην ετεροεπαφή μεταξύ ενός λεπτού στρώματος ημιαγωγού με ευρύ χάσμα ενεργειακών ζωνών (στρώμα φραγμού) και ενός ημιαγωγού μικρότερου χάσματος, εμφανίζεται μια ασυνέχεια στη ζώνη σθένους (ΔE_v) και στη ζώνη αγωγιμότητας (ΔE_c). Το στατικό ηλεκτρικό φορτίο που σχηματίζεται από τη διαφορά πόλωσης στα νιτρίδια, όπως θα δούμε παρακάτω, δημιουργεί σταθερό ηλεκτρικό πεδίο κι επομένως ένα γραμμικό δυναμικό μέσα στο υπόστρωμα GaN. Αυτό, σε συνδυασμό με την ασυνέχεια στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργεί ένα τριγωνικό κβαντικό πηγάδι όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 μέσα στο οποίο

εντοπίζεται δισδιάστατο αέριο ηλεκτρονίων (2DEG) υψηλής ευκινησίας^{15 16}. Η υψηλή ευκινησία οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν προσμίξεις δοτών στην περιοχή σχηματισμού 2DEG (τα ηλεκτρόνια κινούνται σε καθαρό ημιαγωγό). Το 2DEG αποτελεί το αγώγιμο κανάλι των διατάξεων HFET που κατασκευάζονται σε τέτοιες ετεροδομές, γι' αυτό και είναι γνωστές ως τρανζίστορ υψηλής ευκινησίας (HEMT) ή τρανζίστορ FET με διαμόρφωση εμπλουτισμού (MODFET), ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού του 2DEG.



Εικόνα 1.3: Ενεργειακό διάγραμμα που δείχνει την χωρική μεταβολή της κατώτερης στάθμης της ζώνης αγωγιμότητας (E_c) συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια, για ετεροδομή HEMT III-Νιτριδίων, αποτελούμενη από 4,5nm AlN/500 nm GaN. Στην επιφάνεια έχει γίνει η υπόθεση ότι $(E_c - E_F)=1\text{eV}$.

Σε αντίθεση με τους συμβατικούς ημιαγωγούς III-V, όπου είναι απαραίτητη η διαδικασία εμπλουτισμού του στρώματος φραγμού με δότες για να δημιουργηθεί 2DEG (MODFET), στα III-N HEMT το κανάλι αυτό δημιουργείται από την παρουσία των φορτίων πόλωσης και όχι από προσμίξεις δοτών στον ημιαγωγό μεγάλου E_g . Τα βασικά πλεονεκτήματα των διατάξεων αυτών πηγάζουν από το ότι οι φορείς (τα ηλεκτρόνια του 2DEG) περιορίζονται σε αυτό το τριγωνικό πηγάδι, απλά αναπτύσσοντας ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού μεγάλου ενεργειακού χάσματος (στρώμα φραγμού), στο πάνω τμήμα της επιταξιακής δομής. Η μεγάλη αυθόρμητη και πιεζοηλεκτρική πόλωση στα

νιτρίδια δημιουργεί ισχυρά πεδία που επηρεάζουν την κατανομή των επαγόμενων ηλεκτρικών φορτίων¹⁷, γι' αυτό ονομάζονται και πιεζοηλεκτρικά. Η ασυνέχεια της πόλωσης μεταξύ των δύο διαφορετικών ημιαγωγικών στρωμάτων, έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μεγάλης τιμής στατικού θετικού φορτίου στην διεπιφάνεια τους. Ελεύθερα ηλεκτρόνια τείνουν να το αντισταθμίσουν με αποτέλεσμα τον χωρικό εντοπισμό τους στο τριγωνικό πηγάδι. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τα δυο είδη πολώσεων που εμφανίζονται στα III-Νιτρίδια:

Πεδία πόλωσης

Η κρυσταλλική δομή βουρτζίτη των III-Νιτρίδιων, χαρακτηρίζεται από απόκλιση των κρυσταλλικών σταθερών από τις τιμές του ιδανικού εξαγωνικού πλέγματος¹⁶. Αυτό και η έλλειψη κέντρων συμμετρίας έχουν ως αποτέλεσμα την παρουσία **αυθόρμητης πόλωσης**¹⁸ κατά την οποία αναπτύσσεται στατικό επιφανειακό ηλεκτρικό φορτίο (σ) στις κάθετες επιφάνειες προς την [0001] διεύθυνση του κρυστάλλου. Το αυθόρμητο πεδίο πόλωσης εκφράζεται ως:

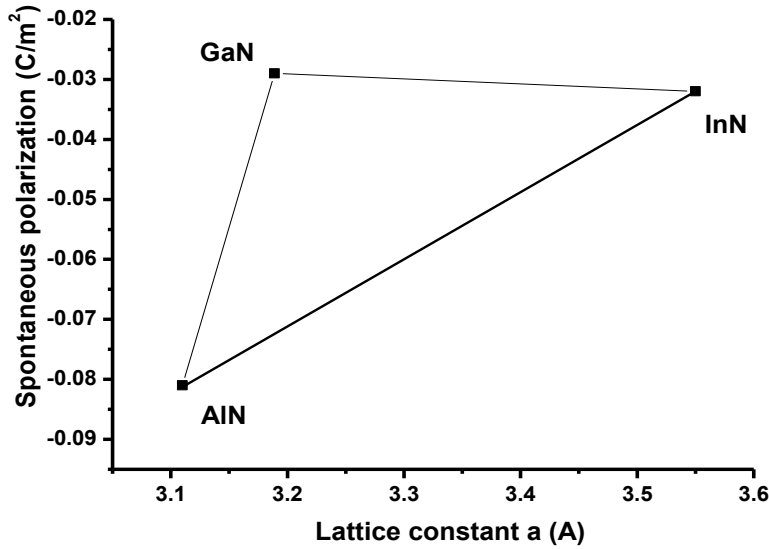
$$\vec{P}_{sp} = P_{sp} * \vec{c}$$

Όπου P_{sp} το μέγεθος της πόλωσης αριθμητικά και \vec{c} το μοναδιαίο παράλληλο διάνυσμα στην [0001].

Η εξαγωνική κρυσταλλική δομή καθορίζεται από το μήκος a της βάσης του εξαγώνου, το ύψος c του εξαγωνικού πρίσματος και από μια εσωτερική παράμετρο u , που χαρακτηρίζει τον δεσμό ανιόντος-κατιόντος (αζώτου-μετάλλου). Η αυθόρμητη πόλωση στα νιτρίδια έχει υπολογιστεί θεωρητικά¹⁶ και η τιμή της αυξάνεται (Εικ. 1.4) καθώς πάμε από τα GaN και InN στο AlN, διότι αυξάνεται το u με αποτέλεσμα την αύξηση της διαφοράς του λόγου c/a ως προς το λόγο των πλεγματικών σταθερών του ιδανικού εξαγωνικού πλέγματος ($c_0/a_0 = 1.633$). Το πρόσημο της, για την ομάδα III-Νιτρίδιων είναι αρνητικό, δηλαδή η κατεύθυνση της είναι από το άτομο του αζώτου (ανιόν), προς το άτομο του μετάλλου (κατιόν), κατά τον κρυσταλλογραφικό άξονα c [0001].

Στην περίπτωση μιας δομής που αποτελείται από διαδοχικά επιταξιακά στρώματα ημιαγωγών (ετεροδομή), η ασυνέχεια της αυθόρμητης πόλωσης κατά

τη μετάβαση από το ένα ημιαγωγικό στρώμα στο επόμενο, θα προκαλεί την εμφάνιση καθαρού στατικού φορτίου στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο διαφορετικών ημιαγωγικών στρωμάτων.



Εικόνα 1.4: Θεωρητικός υπολογισμός αυθόρμητης πόλωσης σε συστήματα III-Νιτρίδιων^{16,18}.

Στους εξαγωνικούς ημιαγωγούς III-N παρατηρείται κι ένα άλλο είδος πόλωσης, η **πιεζοηλεκτρική**^{19 20 21}, με φορά κατά τον άξονα c ή -c, ανάλογα με το πρόσημο της ελαστικής παραμόρφωσης (συμπιεστική ή εκτατική). Όταν ένα στρώμα ημιαγωγού εναποτίθεται πάνω σε κάποιο άλλο, με διαφορετική κρυσταλλική σταθερά, δημιουργείται ελαστική τάση που παραμορφώνει το επιταξιακό στρώμα. Η πιεζοηλεκτρική πόλωση οφείλεται στην ελαστική παραμόρφωση (strain, ϵ) του υλικού και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\vec{P}_{PE} = \vec{e} \times \vec{\epsilon}$$

όπου \mathbf{e} ο πιεζοηλεκτρικός τανυστής και $\mathbf{\epsilon}$ ο τανυστής παραμόρφωσης. Ο πιεζοηλεκτρικός τανυστής \mathbf{e} έχει τρία ανεξάρτητα στοιχεία, τα δύο εκ των οποίων δημιουργούν πιεζοηλεκτρική πόλωση στον άξονα c¹⁶. Έτσι η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή :

$$P_{PE} = e_{33}\epsilon_3 + e_{31}(\epsilon_1 + \epsilon_2)$$

όπου ε_3 η παραμόρφωση κατά το c άξονα και $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ η παραμόρφωση στο επίπεδο της βάσης όπως δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\varepsilon_3 = \frac{c - c_0}{c} \quad \text{και} \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_0}$$

με α_0 και c_0 οι πλεγματικές σταθερές για το μη παραμορφωμένο υλικό και α, c οι σταθερές για το υλικό υπό παραμόρφωση. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές, (e_{ij}) για τα AlN, GaN και InN¹⁶.

Πίνακας 1: Πιεζοηλεκτρικές σταθερές στον άξονα c , για τα AlN, GaN και InN^{16,18}. Οι τιμές των πιεζοηλεκτρικών σταθερών πόλωσης των νιτριδίων είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερες από αυτές των συμβατικών III-V ημιαγωγών¹⁶.

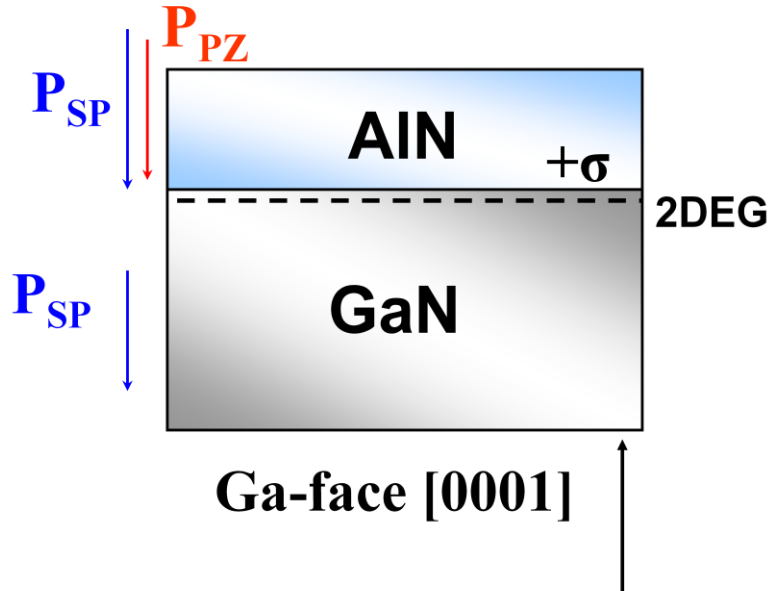
	$e_{33}(C/m^2)$	$e_{31}(C/m^2)$
AlN	1.46	-0.60
GaN	0.73	-0.49
InN	0.97	-0.57

Η συνολική πόλωση, λοιπόν, σε ένα σύστημα III- Νιτριδίων, μπορεί να εκφραστεί ως το διανυσματικό άθροισμα των δύο παραπάνω πολώσεων ^{22 23} :

$$\vec{P} = \vec{P}_{sp} + \vec{P}_{PE}$$

Η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου λόγω πόλωσης στην ετεροεπαφή, ισούται με τη διαφορά (ΔP) της συνολικής πόλωσης στα υλικά εκατέρωθεν της επαφής, δηλαδή $\sigma = -\Delta P$. Όταν το πάνω στρώμα είναι αρκετά λεπτό, τα επιφανειακά φορτία πόλωσης δεν εξουδετερώνονται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κρυστάλλου που ανακατανέμονται χωρικά προκειμένου να τα αντισταθμίσουν. Έτσι θα σχηματιστεί στατικό θετικό φορτίο πόλωσης στην διεπιφάνεια. Ταυτόχρονα, επάγεται ισοδύναμο στατικό ηλεκτρικό φορτίο με αντίθετο πρόσημο στην πάνω πλευρά του υποκείμενου στρώματος. Τα ηλεκτρόνια παγιδεύονται στις δέσμιες καταστάσεις του τριγωνικού πηγαδιού με

αποτέλεσμα τον σχηματισμό του δισδιάστατου νέφους ηλεκτρονίων (2DEG), στην ετεροεπιφάνεια όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5.



Εικόνα 1.5: Πεδία πόλωσης και σχηματισμός 2DEG σε ετεροδομή III-Νιτρίδιων.

Εκμεταλλεόμενοι την ιδιότητα πόλωσης στους ημιαγωγούς III-Νιτρίδια, αναπτύσσουμε διατάξεις υψηλής ευκινησίας και συχνότητας, τα HEMTs. Οι υψηλές τιμές ενεργειακού χάσματος και ηλεκτρικού πεδίου κατάρρευσης στους ημιαγωγούς αυτούς, επιτρέπουν την λειτουργία σε υψηλές τιμές τάσης και ρεύματος ώστε καθίσταται δυνατή η υλοποίηση τρανζίστορ HEMT υψηλών συχνοτήτων και ισχύος. Στα GaN HEMT, η συγκέντρωση του επαγόμενου 2DEG, που οφείλεται στη διαφορά πολώσεων όπως περιγράψαμε, κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή $1-3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, δηλαδή δυο τάξεις μεγέθους υψηλότερη συγκριτικά με τις συμβατικές ετεροεπαφές ημιαγωγών III-V, όπως η περίπτωση AlGaAs/GaAs.

Τρανζίστορ υψηλής ευκινησίας ηλεκτρονίων, HEMT

Τα HEMT, κατασκευάζονται από ημιαγωγικές ετεροδομές, που στην επιφάνεια έχουν ένα λεπτό στρώμα (5-30nm) ημιαγωγού με μεγάλο E_g . Όπως προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού αυτού, ολισθαίνουν προς την διεπιφάνεια σχηματίζοντας ένα δισδιάστατο αέριο ηλεκτρονίων (2DEG), υψηλής ευκινησίας και ταχύτητας, μέσα σε τριγωνικό κβαντικό πηγάδι στην

πλευρά του ημιαγωγού με μικρό E_g , που είναι το κανάλι του FET. Η πυκνότητα και η ευκινησία του 2DEG παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες της τελικής διάταξης. Η ποιότητα του καναλιού εξαρτάται από το υπόστρωμα, τον τρόπο επιταξιακής ανάπτυξης και την καθαρότητα από προσμίξεις. Τα ηλεκτρόνια στο κανάλι, παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση προκαλώντας πολύ χαμηλή αντίσταση και μεγάλη ευκινησία.

Όπως σε όλα τα FET, το δυναμικό της πύλης (V_{GS}) ελέγχει την αγωγιμότητα του καναλιού. Η εξάρτηση αυτή δίνεται από την ακόλουθη σχέση²⁴:

$$n_s = \frac{\epsilon_s}{q d} [V_{GS} - V_T - V(x)]$$

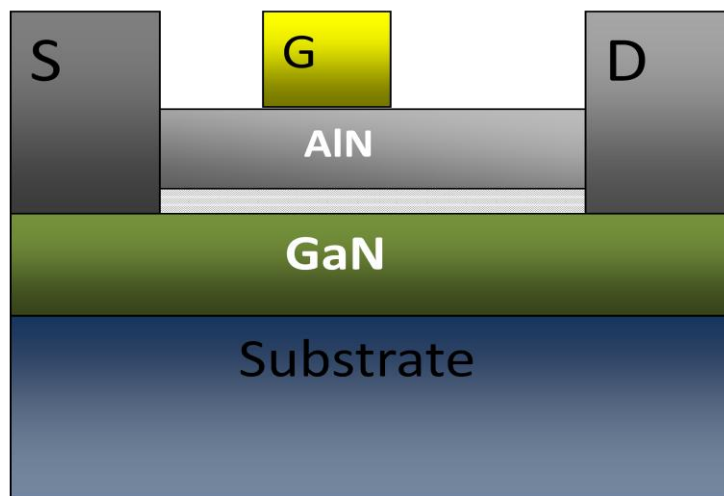
Όπου n_s : Πυκνότητα των ηλεκτρονίων 2DEG

ϵ_s : Διηλεκτρική σταθερά ημιαγωγού,

d : Απόσταση ανάμεσα στην πύλη και το κανάλι,

$V(x)$: Δυναμικό στο σημείο x , σε σχέση με την πηγή,

V_T : Τάση κατωφλίου.

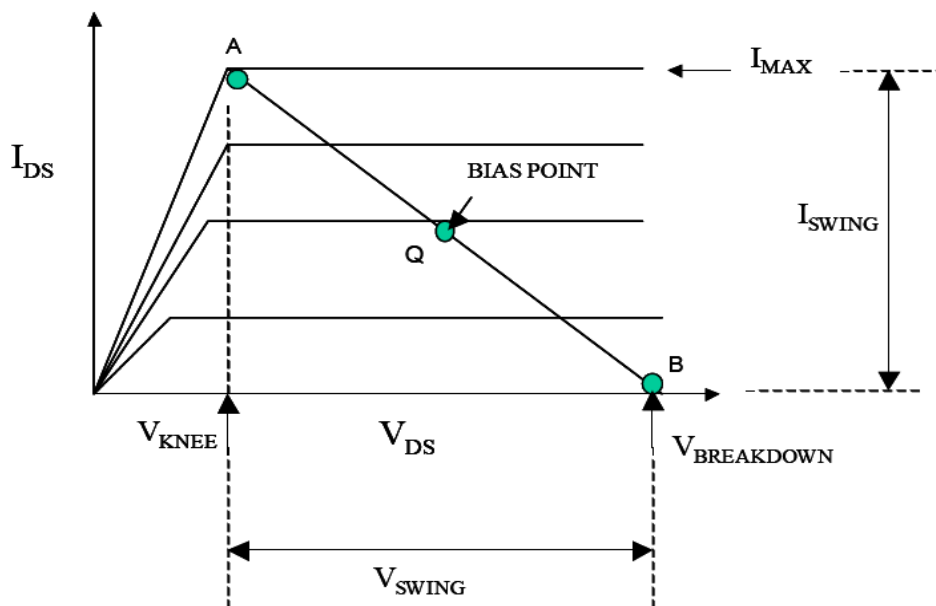


Εικόνα 1.5 : Σχηματική απεικόνιση διάταξης AlN/GaN HEMT

Αλλάζοντας την τάση μεταξύ πηγής και απαγωγού V_{DS} , έχω ροή ρεύματος μέσα από το κανάλι 2DEG και για μηδενική τάση πύλης –πηγής V_{GS} , (στην περίπτωση αυτή το τρανζίστορ είναι τύπου normally-on). Εφαρμόζοντας θετική V_{GS} περισσότερα ηλεκτρόνια προσελκύονται στο κανάλι και η αγωγιμότητα του αυξάνεται. Τότε λέμε ότι το κανάλι ανοίγει. Εφαρμόζοντας αρνητική V_{GS} , τα

ηλεκτρόνια απωθούνται απ' το κανάλι και συνεπώς η αγωγιμότητα του μειώνεται. Κάποια στιγμή το κανάλι είναι πλήρως απογυμνωμένο από φορείς και το ρεύμα είναι μηδενικό παρά το γεγονός ότι εφαρμόζεται τάση V_{DS} . Η V_{GS} στην οποία συμβαίνει αυτό ονομάζεται τάση κατωφλίου του HEMT, $V_{GS}=V_T$.

Για τάση $V_{GS} > V_T$, όταν η V_{DS} παίρνει μικρές τιμές, το ρεύμα διαμέσου του καναλιού είναι μικρό και αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της V_{DS} (Εικ. 1, 6). Όμως η αύξηση της V_{DS} , αυξάνει την αρνητική πόλωση μεταξύ πύλης (G) και καναλιού στην πλευρά του απαγωγού (D), που προσεγγίζει την τιμή V_G-V_D . Επομένως το κανάλι εκεί σταδιακά απογυμνώνεται. Κάποια στιγμή το κανάλι κλείνει προς τη μεριά του απαγωγού και το ρεύμα λαμβάνει την τιμή κόρου για την συγκεκριμένη V_{GS} παραμένοντας σταθερό, ανεξαρτήτως της V_{DS} . Η τάση V_{DS} στην οποία συμβαίνει αυτό, ονομάζεται τάση κόρου (pinch-off, V_{knee}).



Εικόνα 1.6: Οικογένεια I-V χαρακτηριστικών τρανζίστορ HEMT, όπου φαίνονται οι σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις δυνατότητες λειτουργίας του²⁵.

Το ρεύμα δίνεται από τη σχέση²²

$$I_{DS} = q n_s(x) u(E)W$$

όπου W το πλάτος του καναλιού και u η ταχύτητα των ηλεκτρονίων. Για μικρή V_{DS} και θεωρώντας ότι η ταχύτητα είναι ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου $u = \mu \cdot E$ όπου $E = -dV(x)/dx$ έχουμε:

$$I_{DS} = -\mu W q n_s(x) \frac{dV(x)}{dx}$$

Ολοκληρώνοντας σε όλη την έκταση του καναλιού και αντικαθιστώντας το n_s καταλήγουμε στην τελική μορφή της σχέσης για την ένταση του ρεύματος:

$$I_{DS} = \frac{W \mu \epsilon_s}{L d} [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}]$$

Οι βασικότεροι παράμετροι στην απόδοση ενός τρανζίστορ HEMT, είναι η συχνότητα και η ισχύς λειτουργίας του. Η δυνατή συχνότητα λειτουργίας εκτιμάται από τον λόγο της ταχύτητας κόρου προς το μήκος της πύλης (L_g):

$$1/T_R = u/L_g$$

ενώ η ισχύς δίνεται από τη σχέση

$$P = 1/8 * I_{DSmax}(V_{BREAK} - V_{KNEE})$$

Επομένως, για να υλοποιήσουμε ένα HEMT ισχύος, πρέπει να μεγιστοποιήσουμε το ρεύμα που μπορεί να δώσει το τρανζίστορ, μεγιστοποιώντας την πυκνότητα n_s , την ταχύτητα u των ηλεκτρονίων του 2DEG και το V_{swing} (Εικ. 1.6). Στο GaN λόγω των μεγάλων (access) αντιστάσεων, το μέγιστο ρεύμα I_{DS} δεν περιορίζεται από την ταχύτητα αλλά από το πεδίο, δηλαδή η τιμή του $n_s \cdot \mu$, όπου μ η ευκινησία, είναι σημαντικότερη από το $n_s \cdot u_{max}$. Όπως είδαμε η μεγάλη πυκνότητα n_s του 2DEG είναι συνέπεια των ισχυρών πεδίων πόλωσης που παρουσιάζονται στα συστήματα III-Νιτριδίων, ενώ υψηλές τιμές ευκινησίας μπορούν να επιτευχθούν ελαχιστοποιώντας τις κρυσταλλικές ατέλειες και επιτυγχάνοντας λείες επιφάνειες και απότομες διεπιφάνειες. Προκειμένου να πετύχουμε υψηλές συχνότητες λειτουργίας των διατάξεων HEMT, πρέπει να περιορίσουμε τις διαστάσεις της πύλης και κυρίως το μήκος της πύλης.

Το V_{swing} είναι η διαφορά μεταξύ της τάσης κατάρρευσης $V_{BREAKDOWN}$ του HEMT και της τάσης κόρου V_{KNEE} . Μικρή τιμή V_{KNEE} του HEMT επιτυγχάνεται όταν οι access αντιστάσεις και οι αντιστάσεις μεταξύ των ωμικών επαφών ελαχιστοποιηθούν. Οι αντιστάσεις ελαχιστοποιούνται με την ίδια στρατηγική που μεγιστοποιεί το ρεύμα, ενώ αυτές των ωμικών επαφών έχουν να κάνουν με την επιμετάλλωση. Τέλος, μεγάλη τιμή της τάσης κατάρρευσης $V_{BREAKDOWN}$ προκύπτει αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ πύλης και απαγωγού.

Πλαστική χαλάρωση - Δομές $Al_xGa_{1-x}N/GaN$, $In_xAl_{1-x}N/GaN$

Τα HEMTs που βασίζονται στους ημιαγωγούς ΙΙΙ-Νιτρίδια και ερευνήθηκαν έως σήμερα ήταν κυρίως $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ετεροδομές με 30% ποσοστό Al ($x=0.30$) και 20-30nm πάχος φράγματος AlGaN^{26 27 28}. Τα AlGaN/GaN HEMT, λόγω των δυνατοτήτων τους σε συνδυασμό με τις εξελιγμένες συνθήκες κατασκευής και ανάπτυξης, επικέντρωσαν την προσοχή όλων για μικροκυματικές διατάξεις υψηλής θερμοκρασίας και ισχύος^{29 30}. Το σχηματιζόμενο 2DEG είχε συγκέντρωση $1-1,5 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-2}$ και ευκινησία 1000-1600 $\text{cm}^2/\text{V s}$, ενώ η αντίσταση φύλλου ήταν μεγαλύτερη από 300 Ohm/sq . Η χαμηλότερη τιμή που αναφέρθηκε στη βιβλιογραφία είναι 238 Ohm/sq .³¹ Το μέγιστο μετρούμενο ρεύμα σε τρανζίστορ HEMT αντιστοιχούσε σε 1,4 A/mm^{18, 32}.

Προκειμένου να επιτύχουμε υψηλότερες συγκεντρώσεις 2DEG, οι δομές HEMT GaN, απαιτούν στρώματα φραγμού από κράματα με υψηλότερο ποσοστό Al, στα οποία αυξάνεται η αυθόρμητη και η πιεζοηλεκτρική πόλωση. Όμως υπάρχει ένα μέγιστο όριο τιμών πάχους για κάθε σύσταση του κράματος, πάνω από το οποίο παρουσιάζεται πλαστική χαλάρωση του κρυσταλλικού στρώματος AlGaN (strain relaxation) μέσω εισαγωγής εξαρμώσεων πλεγματικής διαφοράς (misfit dislocations). Η πλεγματική χαλάρωση όχι μόνο προκαλεί απώλεια της πιεζοηλεκτρικής συνιστώσας του πεδίου πόλωσης, αλλά ελαττώνει πολύ και την ευκινησία των φορέων στο 2DEG, λόγω σκεδάσεων των φορέων από τις πλεγματικές ατέλειες που δημιουργούνται. Οι αναγραφόμενες τιμές χαρακτηρισμού των AlGaN/GaN HEMT αντιστοιχούν στο μέγιστο δυνατό πάχος όπου δεν παρατηρείται χαλάρωση (critical thickness).

Η εξάλειψη του προβλήματος της πλεγματικής παραμόρφωσης, προϋποθέτει το υπερκείμενο στρώμα ημιαγωγού να μπορεί να αποκτήσει την

πλεγματική σταθερά του GaN . Έτσι, ο ερευνητής Jan Kuzmik πρότεινε την ανάπτυξη δομών HEMT με στρώμα φραγμού κράμα $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$, που μπορεί να έχει παρόμοια ή και ίδια σταθερά πλέγματος (ανάλογα με το ποσοστό In), με αυτή του GaN^{33,34, 35, 36}. Το $\text{In}_{0,18}\text{Al}_{0,82}\text{N}$ δεν βρίσκεται υπό εκτατική τάση κι έτσι δεν υπάρχει ο κίνδυνος της απώλειας του 2DEG λόγω πλεγματικής χαλάρωσης. Η έλλειψη πιεζοηλεκτρικής πόλωσης στο στρώμα $\text{In}_{0,18}\text{Al}_{0,82}\text{N}$, δεν περιορίζει το n_s του σχηματιζόμενου 2DEG, γιατί το μεγάλο ποσοστό AlN (82%) αυξάνει σημαντικά την αυθόρμητη πόλωση. Μάλιστα το θεωρητικά υπολογιζόμενο 2DEG, είναι σημαντικά υψηλότερο (τρεις φορές), από αυτό των ετεροδομών AlGaN/GaN, σαν αποτέλεσμα της αυθόρμητης πόλωσης. Στην πράξη, οι ετεροδομές InAlN/GaN, ανεπτυγμένες με MOCVD, επέδειξαν συγκέντρωση φορέων ίση με $N_s = 2,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, ευκινησία $1170 \text{ cm}^2 / \text{V s}$ και αντίσταση φύλλου 210 Ohm/sq ³⁷. Στην περίπτωση ετεροδομών InAlN/GaN, που αναπτύχθηκαν με MBE, τα χαρακτηριστικά του 2DEG (N_s και ευκινησία) ήταν χειρότερα, λόγω ανομοιογένειας στη σύσταση του κράματος InAlN.³⁸

Διατάξεις HEMT AlN/GaN

Το AlN ως ακραία περίπτωση των InAlN και AlGaIn, ανεπτυγμένο σε GaN, παρουσιάζει υψηλότερα πιεζοηλεκτρικά πεδία από κάθε άλλο ημιαγωγό νιτριδίων, λόγω της μεγάλης διαφοράς μεταξύ των πλεγματικών σταθερών AlN και GaN, η οποία ανέρχεται στο $\Delta a/a = 2,47\%$. Αποτέλεσμα τούτου είναι το AlN να βρίσκεται υπό έντονη εκτατική τάση παραμόρφωσης (η πλεγματική σταθερά του AlN, είναι μικρότερη από του GaN). Έτσι σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάφορα αυθόρμητης πόλωσης, η διαφορά της συνολικής πόλωσης μεταξύ του στρώματος φραγμού και του καναλιού GaN, γίνεται μεγίστη. Οι ετεροδομές AlN/GaN προσφέρουν ακόμα υψηλότερη συγκέντρωση 2DEG έως $6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ³⁹⁴⁰⁴¹ όπως αναμενόταν βάσει θεωρητικών υπολογισμών. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης ασυνέχειας της ζώνης αγωγιμότητας μεταξύ AlN και GaN, οι χαρακτηριστικές των τρανζίστορ HEMT, βελτιώνονται και αυξάνεται το ρεύμα λόγω περιορισμού της μεταφοράς ηλεκτρονίων από το κανάλι στο στρώμα φραγμού.

Από τους κυριότερους περιοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη και κατασκευή τρανζίστορ GaN HEMT, με φράγμα δυναμικού AlN, αποτελεί η πλεγματική χαλάρωση του AlN, που υπεισέρχεται έπειτα από ένα κρίσιμο πάχος. Οι Binary et al., δημοσίευσαν μια μελέτη τρανζίστορ, ανεπτυγμένα με MOCVD,

στα οποία η πυκνότητα του 2DEG περιοριζόταν στο $N_s = 4,8 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Η αντίστοιχη ευκινησία είχε επίσης την πολύ χαμηλή τιμή των $720 \text{ cm}^2/\text{V sec}^{42}$. Πιο πρόσφατα, οι Alekseen et al., παρουσίασαν δομές AlN/GaN ανεπτυγμένες με MOCVD⁴³ με τιμές συγκέντρωσης και ευκινησίας 2DEG ίσες με $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ και $320 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$, αντίστοιχα. Η χαλάρωση της ελαστικής τάσης παραμόρφωσης του AlN, με το σχηματισμό τρισδιάστατων νησίδων, καθιστά αδύνατη την ανάπτυξη επίπεδου στρώματος AlN, άνω των 2nm με μεθόδους υψηλών θερμοκρασιών όπως είναι η MOCVD. Γι' αυτό τα πειραματικά εξαγόμενα των παραπάνω HEMT, απέκλιναν τόσο πολύ από τα αναμενόμενα. Όμως το MBE αποτελεί διεργασία ανάπτυξης χαμηλών θερμοκρασιών και διευκολύνει την ανάπτυξη δομών σε καταστάσεις μη ισορροπίας (μετασταθείς δομές). Έτσι επιτυγχάνεται η ανάπτυξη ατομικά επίπεδων στρωμάτων AlN με τον δισδιάστατο τρόπο ανάπτυξης της ροής βαθμίδων. Στην περίπτωση του MBE δεν εξαλείφεται η ελαστική τάση παραμόρφωσης, αλλά ο τρισδιάστατος τρόπος (3D) ανάπτυξης, που εμφανίζεται σε επιταξιακά στρώματα όταν υπόκεινται σε υψηλές τάσεις ελαστικής παραμόρφωσης.

Το μεγάλο ενεργειακό χάσμα του AlN (6,2 eV), ευνοεί το σχηματισμό 2DEG υψηλής συγκέντρωσης, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να δυσχεράνει το σχηματισμό των ωμικών επαφών πηγής και απαγωγού. Η διέλευση του ρεύματος μέσω του υψηλού φράγματος δυναμικού του AlN προς το κανάλι GaN, σε συνδυασμό με την υψηλή αντίσταση που χαρακτηρίζει το AlN σαν υλικό, δυσκολεύουν την κατασκευή ωμικών επαφών. Τέλος, τα υλικά που περιέχουν Al, είναι ευαίσθητα στην οξείδωση, και αυτό θα οδηγήσει στο σχηματισμό ενός στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του AlN και συνεπώς στη μεταβολή των επιφανειακών καταστάσεων. Η οξείδωση επομένως, θα επηρεάζει τις ιδιότητες της ετεροδομής HEMT, αφού θα μεταβάλλεται το δυναμικό της επιφανείας, δηλαδή το $(E_c - E_F)/q$.

Μελετώντας και εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές επίλυσης των παραπάνω θεμάτων, καταλήγουμε σε διατάξεις ρηχών καναλιών, από ετεροδομές AlN/GaN, με εξαιρετική απόδοση. Εκτός από τις προφανείς εφαρμογές που βρίσκουν σε υψηλής διαγωγιμότητας και χαμηλής τάσης κατωφλίου HEMTs^{44 45}, τα άκρως ρηχά κανάλια των ετεροδομών AlN/GaN, τις καθιστούν ιδανικές για τη σμίκρυνση του μήκους πύλης στην κλίμακα των nm, για την επίτευξη διατάξεων με απόδοση στην περιοχή πλησίον των THz. Το υψηλής πυκνότητας και ευκινησίας 2DEG μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες διατάξεις, όπου είναι επιθυμητό το αγωγίμο κανάλι να βρίσκεται μερικά nm κάτω από την επιφάνεια όπως ηλεκτροχημικοί

αισθητήρες τύπου ISFET, όπου ταυτόχρονα προσφέρουν και την οπτική διαπερατότητα του υλικού, επιτρέποντας νέου είδους εφαρμογές βιοαισθητήρων, που συνδυάζουν ηλεκτρική και οπτική απόκριση. Υπερπλέγματα AlN/GaN, χρησιμοποιούνται σαν υλικό για ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας, με απορρόφηση μεταξύ υποζωνών (intersubband) και αν η περίοδος είναι αρκετά μικρή ώστε να σχηματίζονται υποζώνες (minibands), μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως εικονικά κράματα για να επαυξήσουν την κάθετη μεταφορά φορέων ηλεκτρονίων και οπών σε διατάξεις εκπομπής ή ανίχνευσης, υπεριώδους ακτινοβολίας.⁴⁶

Η διεθνής έρευνα στα AlN/GaN HEMT

Η πρώτη μελέτη σε AlN/GaN HEMT ανεπτυγμένα με MBE, δημοσιεύτηκε από την ερευνητική ομάδα των Smorchkova et al.⁴⁷, οι οποίοι μέτρησαν πυκνότητα 2DEG ίση με $N_s=3,6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ για πάχος φράγματος AlN $x=5\text{nm}$. Ωστόσο, οι τιμές της ευκινησίας του 2DEG και της αντίστασης υποστρώματος, δεν ήταν ικανοποιητικές. Η μειωμένη ευκινησία ($\mu=330\text{cm}^2/\text{V s}$), που συνοδεύει την μεγάλη συγκέντρωση 2DEG, αποδόθηκε στη χαλάρωση της εκτατικής ελαστικής παραμόρφωσης του στρώματος AlN που αυξάνει τις σκεδάσεις, καθώς για φράγματα 3,5-4,5nm, όπου το φαινόμενο θεωρείται λιγότερο έντονο, οι τιμές βελτιώνονται αρκετά: 1460 και 1230 $\text{cm}^2/\text{V sec}$ αντιστοίχως, $R_{sh}=200 \text{ Ohm/sq}$, με $N_s=2,2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Αργότερα επέτυχαν αντίσταση φύλλου ίση με 180 Ohm/sq σε τέτοιες δομές⁴⁸. Η υποβάθμιση των ιδιοτήτων μεταφοράς που προκαλείται από πλεγματική χαλάρωση έχει επίσης αναφερθεί από τους K. Jeganathan et al⁴⁹.

Η πρώτη συστηματική μελέτη για την εξάρτηση της πυκνότητας και της ευκινησίας του 2DEG, από το πάχος του AlN, δημοσιεύτηκε από τους Cao et al.³² οι οποίοι αναφέρουν τιμές N_s από $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ μέχρι $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, για πάχη AlN από 2 έως 7 nm, αντιστοίχως. Μέχρι τα 6 nm δεν παρατηρήθηκε πλαστική χαλάρωση, ενώ δομές με 3,5-4 nm AlN οδήγησαν σε ευκινησία 1200 $\text{cm}^2/\text{V sec}$ και στην ελάχιστη αντίσταση φύλλου 170 Ohm/sq με $N_s=1-3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Πιο πρόσφατες μελέτες βελτιστοποίησαν τις ιδιότητες του 2DEG^{37, 38, 39}, μειώνοντας την αντίσταση του υποστρώματος στην τιμή $R_{sh}=140 \text{ Ohm/sq}$ ³⁹. Οι Higashiwaki et al. ανέφεραν το πρώτο AlN/GaN HEMT τρανζίστορ⁵⁰, με μεγίστη πυκνότητα ρεύματος ίση με $I_{DS}=0,95\text{A/mm}$ και διαγωγιμότητα 211 mS/mm , για μήκος πύλης $L_g=250 \text{ nm}$. Οι Zimmermann et al. δημοσίευσαν^{51, 52} μια σειρά

από μελέτες για την κατασκευή και απόδοση τέτοιων τρανζίστορ. Το καλύτερο τους τρανζίστορ δημοσιεύτηκε πρόσφατα⁵⁰ με πυκνότητες ρεύματος (I_{DS}) που πλησίαζαν τα 2,3 A / mm και διαγωγιμότητα $g_m=480\text{mS/mm}$, για μήκος πύλης $L_g=250\text{ nm}$.

Αστάθεια ρεύματος

Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται στην ανάπτυξη αξιόπιστων/σταθερών, διατάξεων GaN HEMT υψηλής ισχύος, αποτελεί η αστάθεια του ρεύματος πηγής -απαγωγού (current collapse)^{53 54 55}. Current collapse ουσιαστικά ονομάζεται η μείωση του ρεύματος I_{DS} , που παρατηρείται σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής πόλωσης (τάσης) του τρανζίστορ, όταν αυτό μετράται παλμικά, σε σχέση με τις I-V χαρακτηριστικές του από στατικές DC μετρήσεις και οφείλεται στην ύπαρξη βαθιών ενεργειακών σταθμών στα κρυσταλλικά στρώματα (deep levels) της διάταξης ή επιφανειακών καταστάσεων στο στρώμα φραγμού.

Βαθείες στάθμες υπάρχουν πάντα στην ελεύθερη επιφάνεια ενός ημιαγωγού είτε λόγω της ασυνέχειας του κρυστάλλου (ακόρεστοι δεσμοί) ή λόγω επιμόλυνσης με ξένα στοιχεία (πχ. οξειδωση). Ακόμα κατά την ετεροεπιταξιακή ανάπτυξη, κάποια άτομα προσμίξεων (impurities) ενσωματώνονται στον όγκο του κρυστάλλου και μπορεί να εισάγουν βαθιές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό χάσμα. Βαθείες ενεργειακές στάθμες μπορεί επίσης να προκύψουν από κρυσταλλικές ατέλειες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη παγίδων στην ελεύθερη επιφάνεια του στρώματος φραγμού, στην ετεροεπιφάνεια ανάμεσα στο υπόστρωμα και στο υπερκείμενο στρώμα ή ακόμα και μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του υποστρώματος²⁵.

Οι βαθιές καταστάσεις καλούνται παγίδες διότι δεν βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία με το σύστημα των ηλεκτρονίων στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους. Το σύστημα ηλεκτρονίων των βαθιών καταστάσεων, αλληλεπιδρά με αυτό των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους, μέσω των διεργασιών γένεσης-επανασύνδεσης. Ο ρυθμός των διεργασιών αυτών εξαρτάται από την ενέργεια που διατίθεται για να ξεπεραστεί το ενεργειακό φράγμα ανάμεσα σε μια βαθιά στάθμη και στις δύο ζώνες. Έτσι, η απόκριση του ηλεκτρονιακού πληθυσμού στα βαθιά επίπεδα συναρτήσει του χρόνου, διαφέρει από την χρονική

απόκριση των ηλεκτρονίων στις ζώνες. Αυτό, προκαλεί την εμφάνιση ποικίλων ανωμαλιών στην ηλεκτρική συμπεριφορά των III-V FETs²⁵.

Στα συστήματα III-Νιτρίδιων, αν και χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση ατελειών (10^8 - 10^{10} cm⁻²), λίγες μελέτες αποδίδουν την εμφάνιση κέντρων παγίδων αποκλειστικά στις κρυσταλλικές ατέλειες⁵⁶ ⁵⁷. Στην ετεροδομή AlGaIn/GaN για παράδειγμα, έχει επικρατήσει η πρόταση ότι η παρουσία παγίδων οφείλεται κυρίως σε επιφανειακές καταστάσεις καθώς παρατηρήθηκε μείωση της αστάθειας ρεύματος με χρήση υλικού αδρανοποίησης (passivation, πχ. SiN) πάνω στην επιφάνεια⁵⁸. Θεωρείται ότι η ύπαρξη επιφανειακών καταστάσεων, συνδέεται με τα ισχυρά πεδία πόλωσης που εμφανίζονται στα νιτρίδια και έγγειται στο ότι αυτές παρέχουν την ηλεκτρική ουδετερότητα στην επιφάνεια της διάταξης και περιορίζουν το ηλεκτρικό πεδίο στα AlGaIn⁵⁹. Η κατάληψη των καταστάσεων αυτών, ανάμεσα στην πύλη και τον απαγωγό από ηλεκτρόνια που εγχέονται από την πύλη όταν είναι ανάστροφα πολωμένη, μπορεί να απογυμνώσει την συγκέντρωση του 2DEG στο κβαντικό πηγάδι των δομών AlGaIn/GaN⁶⁰. Πρακτικά αυτό δημιουργεί ένα επιπλέον φράγμα δυναμικού στην κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στο κανάλι. Η παγίδευση των ηλεκτρονίων παρομοιάζεται με την εμφάνιση μιας δεύτερης εικονικής πύλης (virtual gate, V_{VG}), συνδεδεμένης εν σειρά με την κανονική πύλη (V_G), στην επιφάνεια μεταξύ πύλης και απαγωγού²⁵.

Επειδή ο χρόνος απο-παγίδευσης είναι μεγάλος, τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να αποκριθούν σε σήματα ac, κι έτσι δεν συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του καναλιού. Το αποτέλεσμα είναι μια σημαντική μείωση του ρεύματος απαγωγού με παράλληλη αύξηση της τάσης κόρου (V_{KNEE}), κατά την εφαρμογή θετικών παλμών στην πύλη.

Τέτοιου είδους μελέτη έχει γίνει και για δομές InAlIn /GaN HEMT⁶¹ όπου διαπιστώθηκε ότι η παγίδευση των ηλεκτρονίων στις επιφανειακές καταστάσεις, συμβαίνει όταν το κανάλι είναι σε αποκοπή (στην κατάσταση off του τρανζίστορ). Η μέτρηση των χαρακτηριστικών I-V του τρανζίστορ, εφαρμόζοντας παλμούς στην πύλη, χρησιμοποιείται για τη μελέτη της ύπαρξης παγίδων στην πλευρά πύλης-απαγωγού (Gate Lag effect), ενώ εφαρμόζοντας παλμούς στον απαγωγό μελετάται η παγίδευση των ηλεκτρονίων στην πλευρά πύλης-πηγής (drain-lag effect).

Καμία εργασία έως της παρούσας, δεν έχει αναφερθεί για την μελέτη αστάθειας ρεύματος σε δομές AlN/GaN. Στο κεφάλαιο 5.2 αναλύονται οι παλμικές μετρήσεις διατάξεων AlN/GaN HEMT, για τη μελέτη της παγίδευσης

των ηλεκτρονίων, τόσο στην πλευρά πύλης-πηγής (Gate Lag effect), όσο στην πλευρά πύλης-απαγωγού (Drain Lag effect). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις αντίστοιχα δομών AlN/GaN HEMT επικαλυμμένων με 1nm GaN.

Θερμικά φαινόμενα

Η υψηλή κατανάλωση ισχύος κατά τη λειτουργία των AlN/GaN HEMTs σε μεγάλες τάσεις, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες στην ημιαγωγική δομή και να ενισχύσει τη σκέδαση φωνονίων προκαλώντας πτώση της ευκινησίας και της ταχύτητας κόρου των φορέων. Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου φαινομένου που καλείται self-heating, είναι η μείωση του ρεύματος I_{DS} συναρτήσει της τάσης V_{DS} σε μετρήσεις DC.

Το self-heating είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση και την αξιοπιστία των διατάξεων σε εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλών θερμοκρασιών. Η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται απ' το self-heating, όχι μόνο υποβιβάζει την απόδοση των τρανζίστορ αλλά επιταχύνει τη φθορά τους (degradation): έχουν αναφερθεί φθορές στο ηλεκτρόδιο (επιμετάλλωση) της πύλης, καταστροφή των μεταλλικών καλωδίων εάν η διάταξη είναι εγκιβωτισμένη σε περίβλημα συναρμολόγησης (package) και προβλήματα αξιοπιστίας (reliability problems)^{62 63}. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο όταν οι διαστάσεις των διατάξεων είναι ιδιαίτερα μικρές και η πυκνότητα ρεύματος πολύ υψηλή. Η θερμοκρασία του καναλιού σε GaN HEMT είναι περίπου 200 C στα 26W/mm και αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση της ισχύος⁴⁵.

Ο σάπφειρος αποτελεί το πιο συνηθισμένο υπόστρωμα στην ανάπτυξη III-Νιτρίδιων, συνδυάζοντας καλή κρυσταλλική ποιότητα με λεία επιφάνεια σε ατομικό επίπεδο. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των υποστρωμάτων SiC έναντι του σαπφείρου, είναι η 10 φορές μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα ($\sigma=350$ W/mK) που επιτρέπει την κατασκευή τρανζίστορ FET, υψηλότερης ισχύος. Η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καταλήγοντας σε μια μη γραμμική σχέση της τελευταίας με την εγχεόμενη ισχύ. Είναι σημαντικό, λοιπόν, για να εξάγουμε αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά όσο αφορά την απόδοση των τρανζίστορ, να λάβουμε υπ' όψιν και την επιρροή των υποστρωμάτων στη λειτουργία τους. Πάμπολλες μελέτες τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές έχουν γίνει για το φαινόμενο αυτό,^{64 65 66 67 68} ιδιαίτερα

στα AlGaIn/GaN HEMTs, ενώ καμία μελέτη δεν έχει αναφερθεί έως σήμερα για τα AlN/GaN HEMTs.

Σκοπός της παρούσας διατριβής

Στην παρούσα διατριβή έγινε μια συστηματική μελέτη για την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των διατάξεων AlN/GaN HEMTs. Αρχικά μελετήθηκε από το εργαστήριο μας η ανάπτυξη των ετεροδομών AlN/GaN, με τη μέθοδο της Επίταξης με Μοριακές Δέσμες, με πηγή πλάσματος αζώτου (RF-MBE)⁶⁹. Αφού καθορίστηκε το κρίσιμο πάχος για την ανάπτυξη ατομικά επίπεδου στρώματος AlN, βάσει ηλεκτρικών μετρήσεων χαρακτηρισμού του ημιαγωγικού υλικού αλλά και των διατάξεων τρανζίστορ HEMT που κατασκευάστηκαν με φωτολιθογραφία, μελετήθηκε ο ρόλος του δυναμικού της επιφάνειας στην απόδοση των τρανζίστορ HEMT. Τα συμπεράσματα οδήγησαν σε βελτιστοποιημένες δομές AlN/GaN HEMT, για τις οποίες εξήχθησαν όλες οι χαρακτηριστικές παράμετροι των διατάξεων. Εν συνεχεία, με παλμικές μετρήσεις, μελετήθηκε η επιρροή της θερμικής αγωγιμότητας του υποστρώματος στις I-V χαρακτηριστικές των τρανζίστορ καθώς και η ύπαρξη κέντρων παγίδευσης στην επιφάνεια.

Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός του ημιαγωγικού υλικού περιλαμβάνει την εξαγωγή της συγκέντρωσης και ευκινησίας του 2DEG (μετρήσεις φαινομένου Hall), μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης σε διόδους Schottky (C-V) για την κατανομή της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια, καθώς και μετρήσεις I-V για τη μελέτη των επαφών μετάλλου-AlN/GaN HEMT ημιαγωγού. Τα τρανζίστορ HEMT με μήκος πύλης $L_g=1 \mu\text{m}$, χαρακτηρίστηκαν με μετρήσεις I-V, απ' όπου εξήχθησαν το μέγιστο ρεύμα I_{DS} , η διαγωγιμότητα g_m , οι τάσεις κατωφλίου (V_T) και κόρου (V_{KNEE}), η τάση κατάρρευσης (V_{BREAK}) και τα ρεύματα διαρροής τόσο της πύλης (I_{GS}), όσο και του απαγωγού (I_{DS}). Οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις του ημιαγωγικού καναλιού (αντίσταση φύλλου R_{sh}) και των ωμικών επαφών (ρ_c), εξήχθησαν με χρήση του μοντέλου γραμμών μεταφοράς στην αντίστοιχη γραμμική γεωμετρία, ενώ μελετήθηκαν και όλες οι σειριακές αντιστάσεις (R_T) του καναλιού καθώς και η διαφορική αντίσταση της πηγής από μετρήσεις I-V στα τρανζίστορ.

Τετραγωνικοί θετικοί παλμοί, μικρής χρονοδιάρκειας χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη θερμικών φαινομένων και αστάθειας ρεύματος στις διατάξεις

AlN/GaN HEMT. Σχετικές εργασίες με τις δυο τελευταίες μελέτες δεν έχουν αναφερθεί έως σήμερα από κανένα εργαστήριο, ενώ κάποια από τα αποτελέσματα μας που αφορούν την απόδοση των τρανζίστορ, αντιστοιχούν σε τιμές ρεκόρ, συγκριτικά με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

- ¹ T.E Whall, E.H.C Parker, J.Appl.Phys. 31 (1998), 1397
- ² The 3rd Strategic Exchange, No E “Target”, Joachim Wurfl, Ferdinand-Braun-Institute
- ³ Διδακτορική διατριβή Ε. Δημάκη, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φυσικής (2007)
- ⁴ Bernardini F. Fiorentini V., Vanderbilt D., Physical Review B:Condensed matter 56(16), 1997 pp. R10024-7
- ⁵ “Nitride Semiconductors”, handbook on Materials and Devices, WILEY-VCH.
- ⁶ “Introduction to nitride semiconductors”, S. Nakamura and S.f. Chichibu, CRC Press.
- ⁷ “Gallium Nitride I,II”, J.I. Pankove, T.D. Moustakas, Academic Press
- ⁸ M.A. Khan et al., Applied Physics Lett., 60, 3027, (1992)
- ⁹ L. Esaki, R. Tsu, IBM Journal of Research and Development, 14, 61, (1970)
- ¹⁰ Bernardini F., Fiorentini V., Polarization fields in nitride nanostructures: 10 points to think about, Applied surface science 166, 2000, pp.23-9.
- ¹¹ “Optoelectronic devices dominate wide-bandgap materials market”, market report in Opto & laser Europe, Issue 73, 49, (2000).
- ¹² O. Ambacher J. Phys. D: Appl. Phys. **31** (1998) 2653
- ¹³ R. Dixon, Compound semiconductors, 5, 15, (1999)
- ¹⁴ Device electronics for intergrated circuits, R.S.Muller, T.I Kamins
- ¹⁵ M.J. Murphy, B.E. Foutz et al., MRS Internet J. Nitride Semicond. Res., 4S1, G8.4, (1999)
- ¹⁶ Y. Zhang, J. Singh, J. Appl. J. Appl. Phys., 85, 587, (1999)
- ¹⁷ A. Georgakilas, H.-M. Ng and Ph. Comninou, Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy of III- nitrides, chapter 3 (pp. 107-191), Handbook on Materials and Devices (Wiley-vch, Weinheim Germany, 2003)
- ¹⁸ F. Bernardini et al., Phys. Rev., B56, R10024.,(1997)
- ¹⁹ V. Fiorentini, F. Bernardini, F.D. Sala, A.D. Carlo and Paolo Lygni, Phys. Rev. B **60** (1999), p. 8849
- ²⁰ R.Gaska et.al., Appl. Phys. Lett, 71, 3673,(1997)
- ²¹ E.T. Yu et al., Appl. Phys. Lett., 73,1880, (1998)
- ²² T. Takeuchi et al., Appl. Phys. Lett., 73, 1691, (1998)
- ²³ R. Langer et al., Appl. Phys. Lett., 74, 3827, (1999)
- ²⁴ S.M. Sze, “Semiconductor Device – Physics and Technology”, John Wiley & Sons Inc., (2002)
- ²⁵ R. Vetry, ‘Polarization induced 2DEG in AlGaIn/GaN HEMTs’, Univercity of California Santa Barbara, December 2000
- ²⁶ E. Iliopoulos, M.Zerros, A. Adikimenakhs, Superlattices and microstructures 40 (2006) 313
- ²⁷ M. Asif Khan et al Appl Phys Lett., 76 (2000) 3807
- ²⁸ M J Manfra et al, J. Appl. Phys.92 (2002) 338

- ²⁹ Y.-F. Wu, D.Kapolnek, J. Ibbetson, N.-Q. Zhang, B.Keller and U.K.Mishra, Tesh. Dig. Int. Electron Devices Meet. 1999, 925
- ³⁰ H. Morkoc, Handbook of nitride semiconductors and Devices(Wiley –VCH, New York), Vols. I-III
- ³¹ R.Gaska et al., Appl.Phys.Lett.72, 707, (1998)
- ³² R.Gaska, M.S. Shur, A.D.Bykhovski, A.O.Orlov and G.L. Snider, Appl.Phys.Lett.74, 287(1999)
- ³³ J. Kuzmik Semicond. Sci. Technl. 17, 540 (2002)
- ³⁴ J. Kuzmik et al J.Appl.Phys. 92 (2002) 338
- ³⁵ J. Kuzmik IEEE Electron device Lett.22(2001) 510
- ³⁶ J. Kuzmik A.Kostopoulos, G. Konstandinidhs, J-F Carlin and A. Georgakilas, IEEE Trans. Electron Devices 53, 422 (2006)
- ³⁷ M. Gonschorek,a_ J.-F. Carlin, E. Feltin, M. A. Py, and N. Grandjean Appl.Phys. Lett 89, 062106 (2006)
- ³⁸ S.-L. Sahonta, G. P. Dimitrakopulos, Th. Kehagias, J. Kioseoglou, A. Adikimenakis, E. Iliopoulos, A. Georgakilas, H. Kirmse, W. Neumann, and Ph. Komninou Appl. Phys. Lett. 95, (2009) 021913
- ³⁹ Yu Cao, Debdeep Jena, Appl. Phys.Lett. 90(2007) 182112
- ⁴⁰ Yu Cao, Kejia Wang, Alexei Orlov, Huili Xing, Debdeep Jena, Appl. Phys. Lett.92 (2008) 152112
- ⁴¹ AM. Dabirau, AM. Wowchak, A.Osinsky, J.Xie, B.Hertog, B Cui, PP Chow, Appl.Phys. Lett. 93 (2008) 082111
- ⁴² S.C. Binary , K. Doverspike, G. Kelner, and A.E. Wickenden, Solid-State Electron. 41, 177 (1997)
- ⁴³ E. Alekseev. A. Eisenbach, and D.Pavlidis, Electron. Lett. 35, 2145 (1999)
- ⁴⁴ H. Kawai, M. Hara, F.Nakamura and S.Imanaga, Electron. Lett. 34, 592 (1998)
- ⁴⁵ E. Alekseev, A. Eisenbach and D. pavlidis, Electron. Lett. 35, 2145 (1999)
- ⁴⁶ D. Hofstetter, E. Baumann, F.R. Giorgetta, M. Graf, M. Maier, Bellet-Amarlic and E. Monroy, Appl. Phys. Lett. 88, 121112 (2006)
- ⁴⁷ I.P. Smorchkova et al.,Appl. Phys. Lett. 77 (2000) 3998
- ⁴⁸ I.P. Smorchkova et al., J. Appl. Phys., Lett. 90, 5196 (2001)
- ⁴⁹ K. Jeganathan et al., Appl. Phys. Lett. 93, 2047 (2006)
- ⁵⁰ M. Higashiwaki et al., IEEE Electron Dev. Lett. 27 (2006) 719.
- ⁵¹ T. Zimmermann et al., Phys. Status Solidi C 5 (2008) 2030
- ⁵² T. Zimmermann et al., IEEE Electron Dev. Lett.29 (2008) 661
- ⁵³ S. C. Binari *et al.*, "Fabrication and characterization of GaN FETs," *Solid-State Electron.*, vol. 41, pp. 1549–1554, 1997.

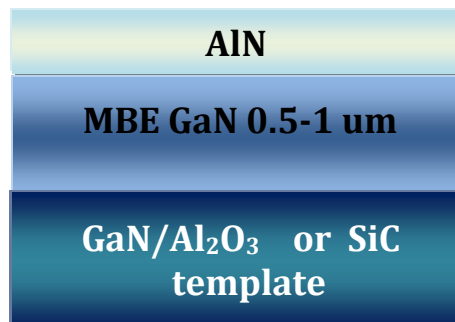
- ⁵⁴ S. C. Binari, J. M. Redwing, G. Kelner, and W. Kruppa, "AlGaIn/GaN HEMT's grown on SiC substrates," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 242–243, 1997.
- ⁵⁵ S. C. Binari *et al.*, "GaN-based electronic devices for high-power, high-speed, and high-temperature applications," in *Proc. Int. Conf. Nitride Semiconductors*, 1997, pp. 476–478.
- ⁵⁶ P. J. Hansen *et al.*, "Scanning capacitance microscopy imaging of threading dislocations in GaN films grown on (0001) sapphire by metalorganic chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 18, pp. 2247, 1998.
- ⁵⁷ A. F. Wright and U. Grossner, "The effect of doping and growth stoichiometry on the core structure of a threading edge dislocation in GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 19, pp. 2751, 1998.
- ⁵⁸ Fakir *et al.*, "Mechanisms of RF Current Collapse in AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE Transactions*, Vol.8, pp. 240 (2008)
- ⁵⁹ J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, *Appl. Phys. Lett.* 77, 250 (2000).
- ⁶⁰ R. Vetry, N. Q. Zhang, S. Keller, and U. K. Mishra, *IEEE Trans. Electron Devices* 48, 560 (2001).
- ⁶¹ J. Kuzmik *et al.*, *phys. stat. sol. (a)* 204, No. 6, 2019–2022 (2007) / DOI 10.1002/pssa.200674707
- ⁶² T. Sadi *et al.*, Electrothermal Monte Carlo simulation of submicrometer Si/SiGe MODFETs, *IEEE Trans. Electron Devices* 54 (2007) 332–339
- ⁶³ J. Kuzmik *et al.* in EDMO 2001 : International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, IEEE, New Jersey, 2001, pp.21–26
- ⁶⁴ R. Gaska, A. Osinsky, J.W. Yang, M.S. Shur, Self heating in highpower AlGaIn–GaN HFET's, *IEEE Electron Device Lett.* 19 (1998) 89–91.
- ⁶⁵ S. Nuttinck, B.K. Wagner, B. Banerjee, S. Venkataraman, E. Gebara, J. Laskar, H.M. Harris, Thermal analysis of AlGaIn–GaN power HFETs, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 51 (2003) 2445–2452.
- ⁶⁶ Y.F. Wu, B.P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, P. Kozodoy, S.P. Denbaars, U.K. Mishra, High power AlGaIn/GaN HEMTs for microwave applications, *Solid-State Electron.* 41 (1997) 1569–1574.
- ⁶⁷ J.D. Albrecht, P.P. Ruden, S.C. Binari, M.G. Ancona, AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor model including thermal effects, *IEEE Trans. Electron Devices* 47 (2000) 2031–2036.
- ⁶⁸ J. Kuzmik, P. Javorka, A. Alam, M. Marso, M. Heuken, P. Kordos, Determination of channel temperature in AlGaIn/GaN HEMTs grown on sapphire and silicon substrates using dc characterization method, *IEEE Trans. Electron Devices* 49 (2002) 1496–1498.
- ⁶⁹ A. Georgakilas, Ph. Komninou, H.M. Ng in: P. Ruterana, M. Albrecht, J. Neugebauer (Eds.), *Nitride Semiconductors*, Berlin, 2003.

Κεφάλαιο 2.1: Επιταξιακή ανάπτυξη και κατασκευή των διατάξεων AlN/GaN HEMT

Η ετεροεπιταξιακή ανάπτυξη των δομών AlN/GaN HEMT πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της επίταξης με μοριακές δέσμες με πηγή πλάσματος αζώτου (RF-MBE), πάνω σε εμπορικά διαθέσιμα υποστρώματα GaN/Al₂O₃ (0001), αλλά και σε υποστρώματα GaN / SiC (0001)^{1 2}. Ο σάπφειρος αποτελεί το πιο συνηθισμένο υπόστρωμα στην ανάπτυξη III-νιτριδίων, συνδυάζοντας καλή κρυσταλλική ποιότητα με λεία επιφάνεια σε ατομικό επίπεδο. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των υποστρωμάτων SiC έναντι του σαπφείρου, είναι η 10 φορές μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα ($\sigma=350$ W/mK) που επιτρέπει την κατασκευή τρανζίστορ FET, υψηλότερης ισχύος.

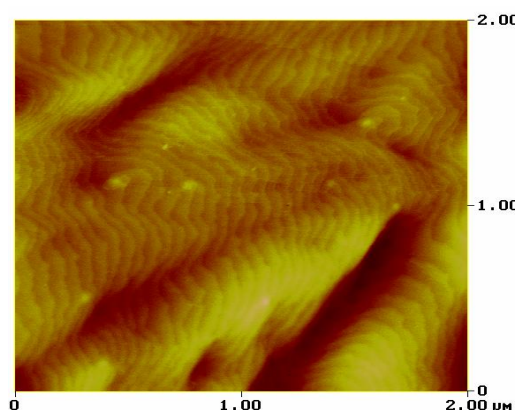
Αρχικά πραγματοποιείται η προετοιμασία των υποστρωμάτων εκτός του συστήματος MBE (ex-situ), που έγκειται στον καθαρισμό τους από τυχόν οργανικά μόρια και λίπη. Στη συνέχεια, το δείγμα εισάγεται στον θάλαμο απαέρωσης του MBE και τοποθετείται πάνω σε θερμαντικό σταθμό προκειμένου να γίνει εξαέρωση των προσροφημένων αερίων (σε $T=650$ °C). Έπειτα, αφού ενεργοποιηθεί η πηγή πλάσματος αζώτου, αναπτύσσεται ένα στρώμα προσαρμογής GaN (buffer layer), πάχους 0.5-1 μm , που ως σκοπό έχει τη βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας και της καθαρότητας του κρυστάλλου. Η εναπόθεση του GaN πραγματοποιείται σε συνθήκες Ga-rich, σε $T=710$ °C³. Έπειτα πραγματοποιείται η επιταξιακή ανάπτυξη του AlN διατηρώντας σταθερή τη ροή Ga. Η επιλογή ανάπτυξης των στρωμάτων AlN παρουσία προσατόμων Ga πάνω στην επιφάνεια, ευνοεί την ανάπτυξη με τρόπο στρώμα- με -στρώμα, αφού μειώνει την επιφανειακή ενέργεια και το φράγμα δυναμικού διάχυσης των ατόμων. Το AlN αναπτύσσεται με λόγο ροών Al/N= 1/1, δηλαδή η ροή Al, F_{Al} έχει ρυθμιστεί ώστε να είναι ακριβώς ίση με τη ροή N, F_{N} (δηλαδή $F_{\text{Al}}=F_{\text{N}}$). Όλα τα προσπίπτοντα άτομα Al ενσωματώνονται στον κρύσταλλο AlN, δεσμεύοντας ίση ποσότητα ατόμων αζώτου, ενώ τα άτομα Ga επανεξαχνώνονται με ρυθμό ίσο με την προσπίπτουσα ροή τους (ρυθμίζεται από την θερμοκρασία ανάπτυξης) ώστε να διατηρείται ένα σταθερό στρώμα προσατόμων Ga πάνω στην επιφάνεια. Η χρονική διάρκεια της εναπόθεσης καθορίζει το πάχος AlN. Στα πρώτα πειράματα μελέτης των ετεροδομών AlN/GaN, κατασκευάστηκαν δείγματα με πάχη AlN από 3,5 έως 15 nm. Στη συνέχεια της μελέτης, το πάχος σταθεροποιήθηκε στα 4,5 nm (αποτελεί το βέλτιστο πάχος της ετεροδομής AlN/GaN HEMT, όπως θα αποδειχτεί στο κεφάλαιο 3.1). Στην Εικ. 2.1.1, βλέπουμε την σχηματική αναπαράσταση μιας

προτομής της ετεροδομής AlN/GaN, πάνω στο υψηλής αντίστασης υπόστρωμα GaN/Al₂O₃.



Εικόνα 2.1.1: Σχηματική αναπαράσταση των ετεροδομών AlN/GaN.

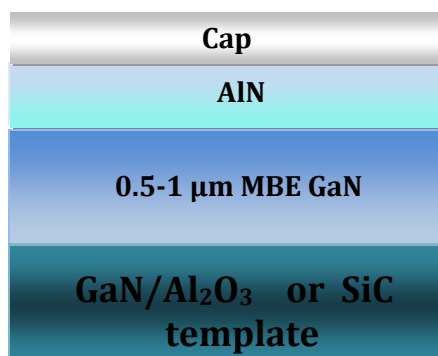
Η μορφολογία της επιφάνειας, σε ατομική κλίμακα, μελετήθηκε με μικροσκοπία AFM. Για όλες τις ετεροδομές AlN/GaN παρατηρήθηκαν ατομικά ομαλές επιφάνειες. Η RMS τιμή της επιφανειακής τραχύτητας ήταν 0.4 nm, σε επιφάνειες AlN στις οποίες δεν είχαν σχηματιστεί μικρορωγμές (micro-cracks). Μια τυπική σάρωση της επιφάνειας των δειγμάτων φαίνεται στην εικόνα 2.1.2, για επιφάνεια 2x2 μm². Παρατηρείται η ύπαρξη βαθμίδων μονομοριακού (1 ML) ύψους στην επιφάνεια, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάπτυξη στρώμα-με-στρώμα, δηλαδή μέσω της ροής βαθμίδων. Η μελέτη της επιφάνειας ετεροδομών AlN/GaN που εμφάνιζαν μικρορωγμές έδειξε την ύπαρξη βαθμίδων ύψους 1 ML, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάπτυξη με ροή βαθμίδων και στην περίπτωση αυτή.



Εικόνα 2.1.2: Μικρογράφημα AFM που δείχνει την επιφάνεια μιας ετεροδομής AlN/GaN με πάχος AlN ίσο με 4.5 nm. Η RMS τιμή της επιφανειακής τραχύτητας είναι 0.4 nm.

Στις ετεροδομές με πάχος AlN 4.5nm, μετά το τέλος της ανάπτυξης ακολούθησε η εναπόθεση ενός στρώματος επικάλυψης μικρού πάχους (0,5-2 nm) GaN ή Al (εικόνα 2.1.3), προκειμένου να συγκρίνουμε το κατά πόσο

εξαρτάται η συγκέντρωση και η ευκινησία του 2DEG και η απόδοση των τρανζίστορ HEMT, από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της ημιαγωγικής δομής.



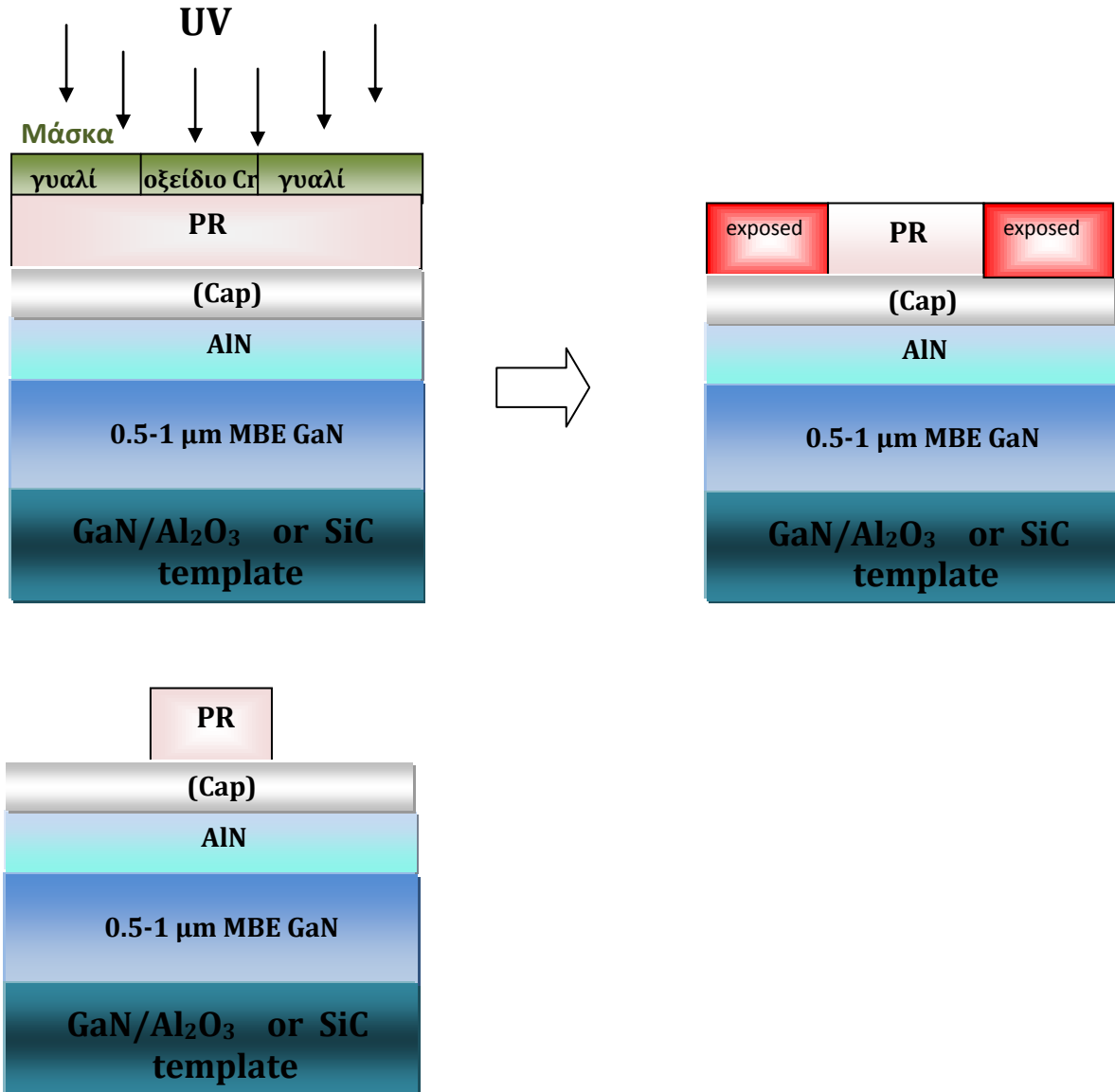
Εικόνα 2.1.3: Σχηματική αναπαράσταση των ετεροδομών AlN/GaN HEMT, με στρώμα επικάλυψης.

Από τις ετεροδομές AlN/GaN, κατασκευάστηκαν τρανζίστορ FET, με κανάλι 2DEG (HEMT), χρησιμοποιώντας διαδικασίες οπτικής λιθογραφίας. Επειδή κατά την ανάπτυξη των δομών με MBE ένα μέρος από τα άτομα γαλλίου μπορεί να συσσωρεύεται στην επιφάνεια του δείγματος, προηγείται της φωτολιθογραφίας, εμβάπτιση των δειγμάτων σε HCl για την απομάκρυνση τους. Για την περαιτέρω απομάκρυνση οργανικών ουσιών, ακολουθούν διαδοχικές εμβάπτισεις σε διαφορετικές οργανικές χημικές ενώσεις (διαλύτες).

Αφού καθαριστεί η επιφάνεια, λοιπόν, εναποθέτουμε φωτορητίνη AZ 5214 (photoresist, PR) και τοποθετούμε το δείγμα σε φυγοκεντριστές. Ο χρόνος περιστροφής των δειγμάτων στον φυγοκεντριστή είναι 20 sec, ενώ η ταχύτητα περιστροφής είναι 4000 στροφές/sec. Υπό αυτές τις συνθήκες, επιτυγχάνουμε ομοιόμορφο πάχος της φωτορητίνης σε ολόκληρη την επιφάνεια, ίσο με 1,2 μm. Μετά την επίστρωση, ακολουθεί η σκλήρυνση της φωτορητίνης με θέρμανση για 20 λεπτά σε ειδικό φούρνο, σε T=80 °C. Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετείται στον ευθυγραμμιστή μασκών όπου εκτίθεται σε ακτινοβολία UV, στα 300nm. Οι μάσκες φωτολιθογραφίας έχουν πάνω τους γεωμετρικά σχήματα κατασκευασμένα συνήθως από οξείδιο του χρωμίου (CrO₂).

Η φωτορητίνη έχει την ιδιότητα να αλλάζει χημική σύσταση κατά τον φωτισμό της σε υπεριώδη ακτινοβολία. Επειδή όμως το UV δεν διαπερνά το οξείδιο, κάποια τμήματα της ρητίνης αλλάζουν χημική σύσταση, ενώ άλλα όχι. Με την εμβάπτιση του δείγματος σε διάλυμα εμφανιστή AZ 400, σε αναλογία 1:4

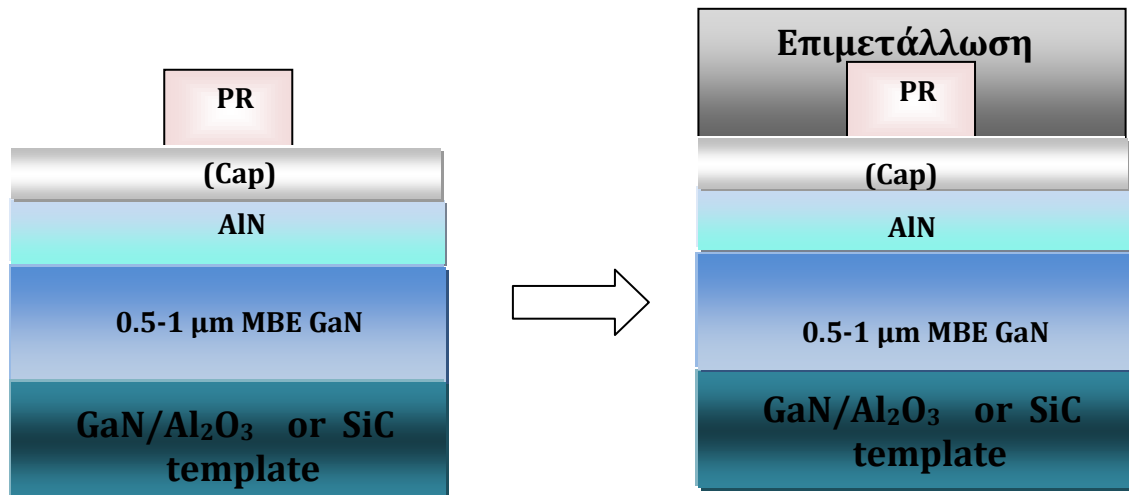
ως προς απιονισμένο νερό, για 20-30 sec, στο υμένιο της φωτορητίνης εμφανίζεται γεωμετρία όμοια της μάσκας που χρησιμοποιήσαμε, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1.4.



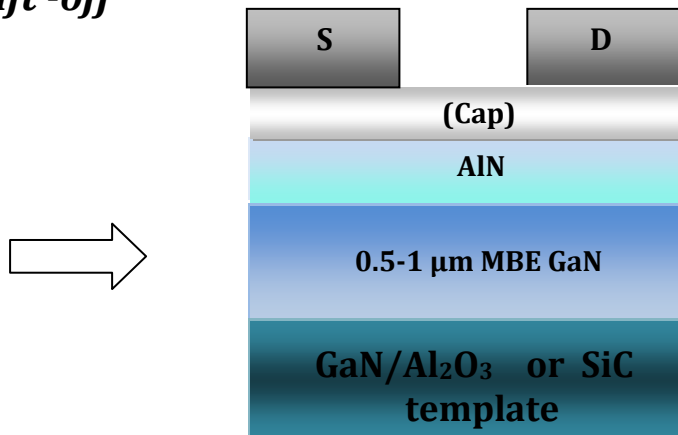
Εικόνα 2.1.4: Η διαδικασία φωτολιθογραφίας.

Για την ηλεκτρική απομόνωση των διατάξεων που αποτυπώθηκαν πάνω στο δείγμα, ακολουθεί ξηρή χημική χάραξη. Η διεργασία αυτή δεν είναι τίποτε άλλο από την μετατροπή των γεωμετρικών σχημάτων της φωτορητίνης σε τρισδιάστατα, αφαιρώντας επιλεκτικά υλικό απ τον ημιαγωγό. Στους ημιαγωγούς III- Νιτρίδια χρησιμοποιείται τεχνική ξηρής χάραξης σε περιβάλλον

πλάσματος (RIE: reactive ion etching). Τα ιόντα του πλάσματος προκαλούν διάβρωση του υλικού εκεί που η φωτορητίνη έχει αλλάξει χημική σύσταση. Στις υπόλοιπες περιοχές, δρα σαν προστατευτική μάσκα με αποτέλεσμα τον σχηματισμό βουνών (mesa) στον ημιαγωγό. Μετά τη χάραξη, τα δείγματα ξεπλένονται με ακετόνη κι έπειτα με απιονισμένο νερό ώστε να απομακρυνθούν όλα τα υπολείμματα φωτορητίνης.



Lift-off

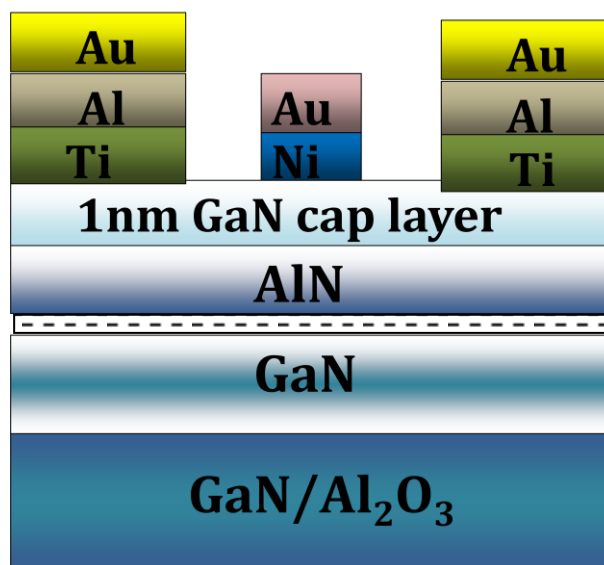


Εικόνα 2.1.5: Επιμετάλλωση και διαδικασία ανύψωσης του μετάλλου (lift-off) για την κατασκευή των ωμικών επαφών. Παρόμοια σχηματίζονται και οι επιμεταλώσεις των διόδων Schottky.

Για να περάσουμε στο επόμενο στάδιο της κατασκευαστικής διαδικασίας ξανατοποθετούμε φωτορητίνη και αποτυπώνουμε στον ευθυγραμμιστή μασκών τη μάσκα των ωμικών επαφών. Οι επιμεταλώσεις πραγματοποιούνται σε θάλαμο κενού ($P=10^{-7}$ Torr), με εξάχνωση μετάλλων με δέσμη ηλεκτρονίων. Οι

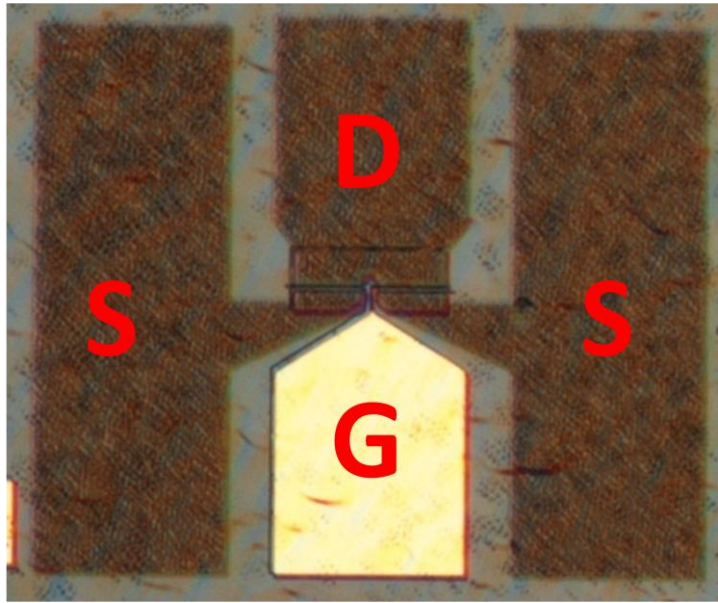
ωμικές επαφές έγιναν με την εναπόθεση μιας πολυχρωματικής δομής μετάλλων, αποτελούμενης από Ti/Al/Ni/Au (300/1700/400/500 Å, αντίστοιχα), όπου το Ti είναι το μέταλλο σε επαφή με τον ημιαγωγό.

Για τον σχηματισμό των ανορθωτικών επαφών Schottky, επαναλαμβάνονται τα τελευταία βήματα (επανατοποθέτηση φωτορητίνης, εμφάνιση σχημάτων με χρήση μάσκας των ανορθωτικών επαφών και επιμετάλλωση). Η επιμετάλλωση για τις επαφές Schottky αποτελείται από Ni/Au, όπου το Ni είναι σε επαφή με τον ημιαγωγό και σχηματίζει το φράγμα Schottky. Η κατακόρυφη τομή ενός τέτοιου τρανζίστορ HEMT που κατασκευάζεται τελικά δίνεται στην εικόνα 2.1.6. Στα δείγματα δεν χρησιμοποιήθηκε καμία τεχνική αδρανοποίησης της επιφάνειας (passivation).



Εικόνα 2.1.6: Σχηματική αναπαράσταση κατακόρυφης τομής ενός τρανζίστορ HEMT AlN/GaN, κατασκευασμένου με τεχνική φωτολιθογραφίας.

Η ομάδα μασκών που χρησιμοποιήθηκε για τα AlN/GaN HEMT της παρούσας διατριβής κατασκευάστηκε από τους συνεργάτες μας στο University of ULM, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ULTRAGAN. Κάθε περίοδος, περιλαμβάνει διόδους διαμέτρων από 30 έως 200 nm, επαφές για μετρήσεις φαινομένου Hall σε γεωμετρία Van der Pauw και κατάλληλες δομές για μετρήσεις αγωγιμότητας του υποστρώματος με το μοντέλο γραμμών μεταφοράς (TLM: transmission line model). Τα τρανζίστορ είναι διπλής πύλης, πλάτους $W_g=2 \times 50 \mu\text{m}$ και μήκους $L_g=1 \mu\text{m}$, ενώ η απόσταση πύλης απαγωγού είναι 4 μm (εικόνα 2.1.7). Οι ωμικές επαφές στα TLM patterns, είναι $90 \times 100 \mu\text{m}$ με αποστάσεις μεταξύ τους 80, 40, 20, 10 και 5 μm .



Εικόνα 2.1.7: Φωτογραφία από SEM: τρανζίστορ διπλής πύλης με μήκος και πλάτος 1 μm και 50 μm αντίστοιχα, κατασκευασμένο με τεχνικές φωτολιθογραφίας.

Το ύψος των mesa είναι 300 nm, που σημαίνει ότι δεν έχει αφαιρεθεί ολόκληρο το επιταξιακό στρώμα GaN (0.5-1 μm) που αναπτύχθηκε με MBE και επομένως η επιφάνεια σύνδεσης των ηλεκτροδίων της πύλης (pad) δεν βρίσκεται πάνω στο υψηλής αντίστασης υπόστρωμα σαπφείρου. Αυτό το επιταξιακό στρώμα είναι επιθυμητό να έχει συγκέντρωση δοτών μικρότερη από 10^{15} cm^{-3} , αν και συνήθως βρίσκεται να είναι της τάξης των 10^{16} cm^{-3} .

]

¹ Διδακτορική διατριβή Αδάμ Αδικιμενάκη, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φυσικής (2009)

² A. Adikimenakis, K.E. Aretouli et al., Microelectronic engineering, 86, “High electron mobility transistors based on the AlN/GaN heterojunction”, pp. 1071-1073, (2009)

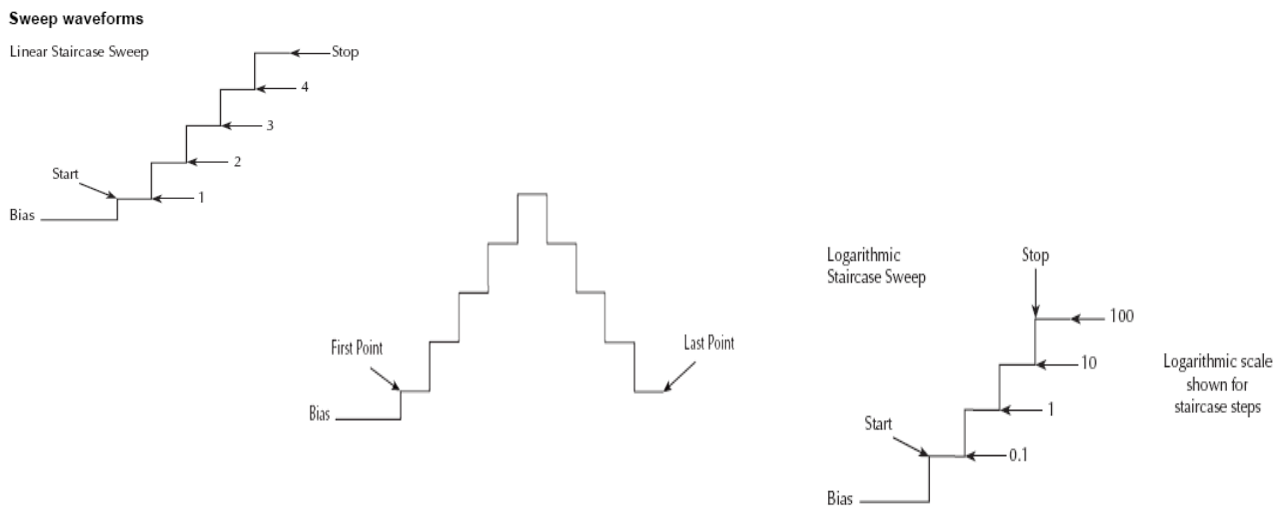
³ A.Georgakilas, Ph. Komninou, H.M. Ng, in: P.Ruterana, M.Albrecht, J. Neugebauer (Eds.), Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and Devices, Wiley-VCH Verlag GmbH, Berlin, 2003.

Κεφάλαιο 2.2: Τεχνικές χαρακτηρισμού

Στο κεφάλαιο των πειραματικών τεχνικών, περιγράφεται το πως εξάγουμε τις χαρακτηριστικές παραμέτρους των διατάξεων HEMT, βάσει ηλεκτρικού χαρακτηρισμού. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει μετρήσεις I-V και C-V σε διόδους Schottky, διαγωγιμότητας, τάσης κατωφλιού, τάσης κατάρρευσης στα τρανζίστορ, καθώς και τις τεχνικές εξαγωγής των χαρακτηριστικών αντιστάσεων. Αρχικά παρατίθενται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του Keithley Parameter Analyser Model 4200-SCS, που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις ρεύματος –τάσης (DC και παλμικές).

Μετρήσεις ρεύματος- τάσης (I-V)

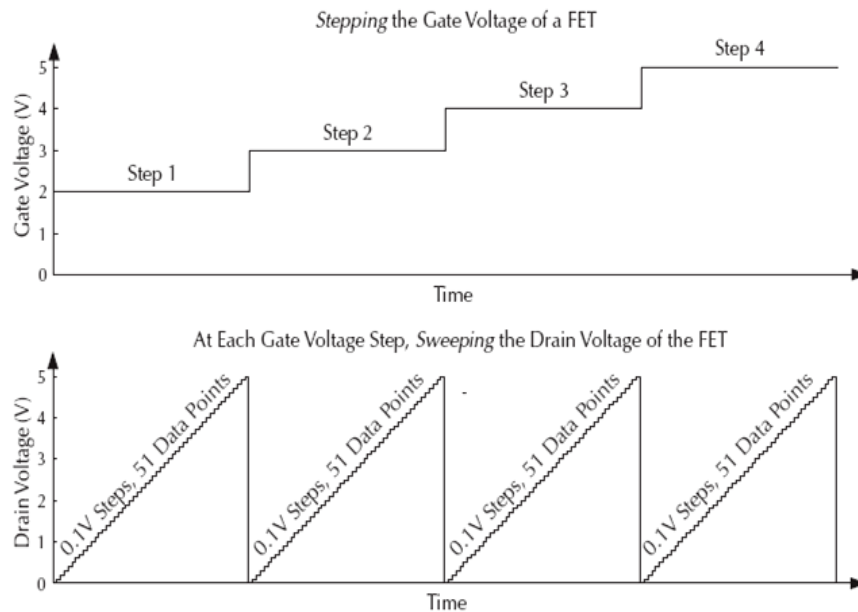
Στις μετρήσεις ρεύματος-τάσης (I-V) χρησιμοποιήθηκε ο Keithley Parameter Analyser, Model 4200-SCS . Σε συνεχή τρόπο λειτουργίας (DC), υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της κυματομορφής της τάσης σάρωσης μεταξύ απαγωγού και πηγής : γραμμικής σειράς βαθμίδων (linear staircase), λογαριθμικής σειράς βαθμίδων (logarithmic staircase) ή προσαρμοσμένης (custom)¹.



Εικόνα 2.2.1 : Μορφές σάρωσης τάσεων σε τρόπο λειτουργίας DC του Parameter Analyser Model 4200-SCS της Keithley.

Η γραμμική σειρά βαθμίδων σαρώνει από την αρχική τάση που έχουμε ορίσει μέχρι την τελική, αυξάνοντας την τάση κατά σταθερό ποσό σε κάθε βήμα (βαθμίδα), όπως φαίνεται στην Εικ. 2.2.1. Η σάρωση με λογαριθμική σειρά βαθμίδων είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι έχουμε σταθερή αύξηση της τάσης σε κάθε βήμα του λογάριθμου. Η προσαρμοσμένη σάρωση επιτρέπει το σχηματισμό κυματομορφής της προτίμησής μας, καθορίζοντας τον αριθμό των σημείων μέτρησης και την τιμή της τάσης για κάθε σημείο.

Για τη μελέτη των διατάξεων HEMT, χρησιμοποιήθηκε σάρωση με γραμμική σειρά βαθμίδων, ενώ ο χρόνος παραμονής και μέτρησης ρεύματος σε κάθε βήμα τάσης, καθορίζεται από το φιλτράρισμα και τον χρόνο ολοκλήρωσης A/D^2 . Από τους παράγοντες αυτούς, για ρεύμα συχνότητας 60Hz και συνήθη φίλτρα, προκύπτει χρόνος ίσος με 16,67 ms. Η μορφή σάρωσης της τάσης μεταξύ απαγωγού και πηγής σαν συνάρτηση του χρόνου, δίνεται στην Εικ. 2.2.2.



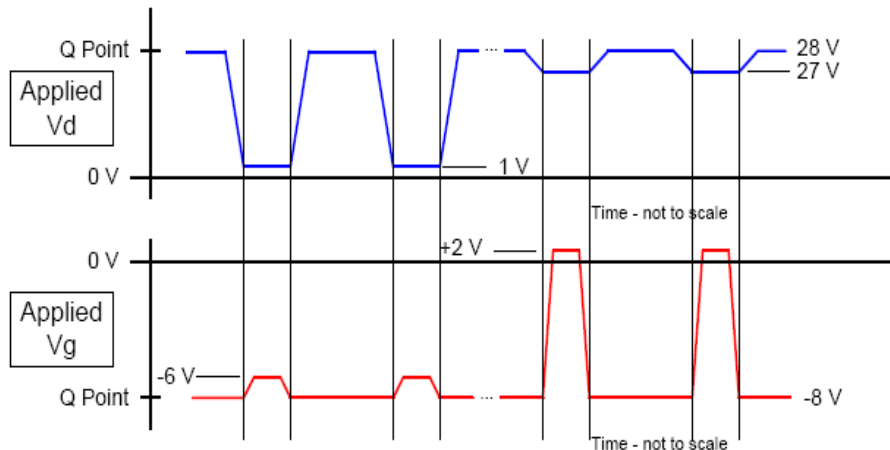
Εικόνα 2.2.2 : Χρονική αντιστοιχία της σάρωσης της τάσης απαγωγού-πηγής (κάτω σχήμα), με τη μεταβολή της τάσης πύλης-πηγής (πάνω σχήμα) στις μετρήσεις των χαρακτηριστικών I-V των τρανζίστορ FET.

Οι παλμικές μετρήσεις I-V παρέχουν στον χειριστή την δυνατότητα να προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά μιας διάταξης, χρησιμοποιώντας παλμικό, αντί για DC, τρόπο μεταβολής της τάσης. Στις παλμικές μετρήσεις I-V, χρησιμοποιείται μια πηγή παλμών τάσης για τη μεταβολή της πόλωσης των

διατάξεων και ένας παλμογράφος για την αντίστοιχη μέτρηση παλμών ρεύματος. Γενικά, χρησιμοποιούνται στη μελέτη των διατάξεων με δυο διαφορετικούς τρόπους:

Ο πρώτος τρόπος, αφορά παραμετρικά τεστ, παρόμοια με τα DC, όπου η μέτρηση του I γίνεται όταν σταθεροποιείται η παλμική τάση, δηλαδή στο επίπεδο μέρος του εφαρμοζόμενου τετραγωνικού παλμού. Ο δεύτερος τρόπος, αφορά την μελέτη των χαρακτηριστικών I - V συναρτήσεως του χρόνου πχ. για μελέτη της υποβάθμισης (degradation) με το πέρασμα του χρόνου καθώς εφαρμόζουμε ένα παλμό τάσης.

Στα AlN/GaN HEMT που παρουσιάζουμε, πραγματοποιήθηκαν παλμικές μετρήσεις με τον πρώτο τρόπο, για τη μελέτη είτε θερμικών φαινομένων ή αστάθειας ρεύματος. Η ελάχιστη χρονοδιάρκεια παλμού που μπορεί να οριστεί στο Pulsed I-V Q (PIV-Q), του Model 4200-SCS της Keithley, είναι $PW=500$ ns. Το ρεύμα του απαγωγού υπολογίζεται, από τη μεταβολή της τάσης στα άκρα μιας αντίστασης 50 Ohm στον παλμογράφο. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του PIV-Q, είναι η δυνατότητα επιλογής μη μηδενικών τάσεων πύλης και απαγωγού, σαν αρχικές συνθήκες των μετρήσεων. Αυτό παρέχεται απ' το ότι εφαρμόζονται ταυτόχρονα με τους παλμούς στην πύλη και παλμοί στον απαγωγό (αντί η τάση V_{DS} να σαρώνεται με τρόπο DC) όπως βλέπουμε στην Εικ. 2.2.3. Η τάση εκκίνησης και η τελική στάθμη ενός παλμού, καθορίζονται σύμφωνα με τις επιθυμητές μετρήσεις.



Εικόνα 2.2.3: Ταυτόχρονη εφαρμογή παλμών στον απαγωγό και στην πύλη.

Το σημείο $Q[V_{GS}, V_{DS}]$, αναφέρεται ως σημείο ηρεμίας, όταν $Q[0, 0]$, ή ως η κατάσταση λειτουργίας (operating point) του τρανζίστορ, κατά την έναρξη των μετρήσεων, αφού οι τιμές των V_{GS} και V_{DS} , αποτελούν τις στάθμες εκκίνησης των παλμών τάσης. Η επιλογή του σημείου Q , γίνεται ανάλογα με το επιθυμητό

θέμα μελέτης (θερμικά φαινόμενα ή παγίδες). Περισσότερες πληροφορίες παρατίθενται στα σχετικά κεφάλαια.

Μετρήσεις ρεύματος τάσης (I-V), σε ανορθωτικές επαφές Schottky

Το ρεύμα I σε μια δίοδο Schottky, σαν συνάρτηση της τάσης V ορθής πόλωσης ($V>0$) που εφαρμόζουμε στα άκρα της, δίνεται από την εξίσωση³:

$$I(V) = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

όπου n είναι ο παράγοντας ιδανικότητας ($n \geq 1$), T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin, k η σταθερά Boltzman και I_0 το ρεύμα κόρου που ισούται με

$$I_0 = A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{kT}\right)$$

Η σταθερά του Richardson (A^{**}), εξάγεται από μετρήσεις του ρεύματος I_0 συναρτήσει της θερμοκρασίας ($I_0=f(T)$) και είναι χαρακτηριστική για τον κάθε ημιαγωγό ($A_{GaN} = 29.2 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2 \text{ K}^2$).

Η σχέση (2.1) χρησιμοποιείται για όλη την περιοχή των τιμών με $V>0$ και ανάλογα με τον μηχανισμό αγωγιμότητας που επικρατεί στις επιμέρους περιοχές του ρεύματος, αλλάζει ο παράγοντας ιδανικότητας n . Το n ισούται με τη μονάδα όταν η δίοδος έχει σχεδόν ιδανική συμπεριφορά, ενώ πλησιάζει την τιμή 2 όταν το ρεύμα οφείλεται σε επανασύνδεση των φορέων στην περιοχή απογύμνωσης⁴. Λογαριθμίζοντας την παραπάνω σχέση και σχεδιάζοντας το γραφημα του $\ln I$ συναρτήσει της V , μπορούμε να υπολογίσουμε το n από την κλίση της ευθείας που προκύπτει, ενώ από τη διατομή υπολογίζεται το εσωτερικό δυναμικό της επαφής V_{bi} .

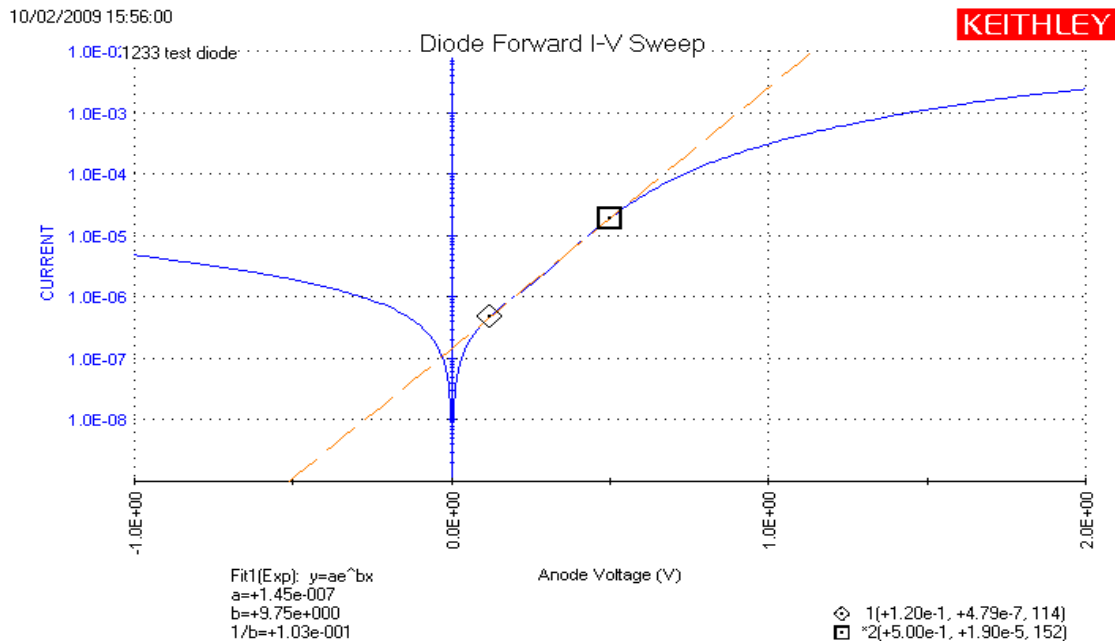
$$\ln I = \ln(I_0) + \frac{qV}{nkT}$$

Επομένως

$$V_{bi} = kT \ln(I_0 / T^2 S A^{**}) \quad \text{και} \quad n = 16,96 / \text{κλίση}$$

όπου S είναι η επιφάνεια της ανορθωτικής επαφής.

Ένα παράδειγμα μετρήσεων I-V σε δίοδο Schottky, με το χρησιμοποιούμενο όργανο της Keithley, καθώς και το αποτέλεσμα της επεξεργασίας για το τμήμα $V>0$, δίνονται στην Εικ. 2.2.4.



Εικόνα 2.2.4: Αποτέλεσμα μέτρησης I-V για δίοδο Schottky διαμέτρου 200μm, πάνω σε δομή AlN/GaN. Κάτω αριστερά αναγράφονται οι τιμές της κλίσης (b) και της διατομής (a), όπως υπολογίζονται απ τη κεντρική γραμμική περιοχή του διαγράμματος lnI-V.

Μετρήσεις χωρητικότητας- τάσης (C-V) σε ανορθωτικές επαφές

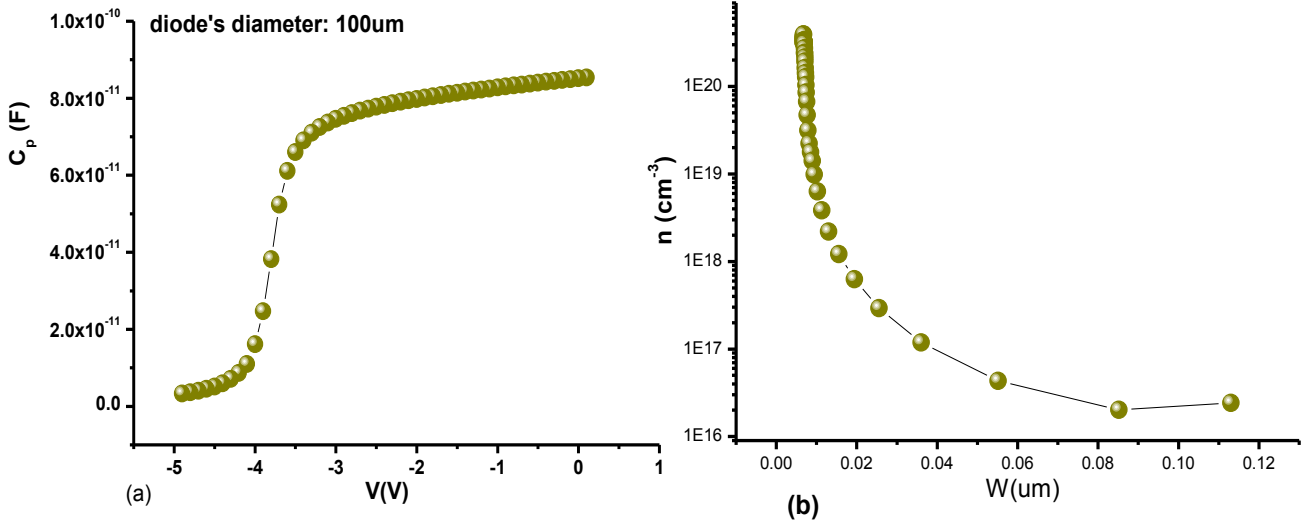
Σε μια δίοδο Schottky, η περιοχή απογύμνωσης αντιστοιχεί σε πυκνωτή με απόσταση οπλισμών όσο είναι το μήκος της W. Επομένως, η χωρητικότητα της επαφής αντιστοιχεί στην χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή, με μόνη διαφορά την εξάρτηση της από την περιοχή απογύμνωσης και κατ' επέκταση από την εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση. Το μήκος W, της περιοχής απογύμνωσης είναι:

$$W = \varepsilon_0 \varepsilon A/C$$

όπου $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}$ F/cm, $\varepsilon = 10.5$ είναι η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού για το GaN, A η επιφάνεια της δίοδου και C η μετρούμενη χωρητικότητα.

Οι μετρήσεις C-V βασίζονται στην εφαρμογή σταθερής τάσης (DC) πόλωσης στη δίοδο (που καθορίζει το W) ενώ η αντίστοιχη χωρητικότητα (C) μετράται με την εφαρμογή μικρής εναλλασσόμενης (ac) τάσης. Το μικρό πλάτος του σήματος ac, απαιτείται για να αποφύγουμε μεταβολές στην τιμή της C λόγω μεταβολής του W. Το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιήσαμε είναι το Agilent 4284A Precision LCR Meter. Το πλάτος του ac σήματος ήταν $V_{ac} = 10$ mV με

συχνότητα $f=1\text{MHz}$, ενώ η DC τάση πόλωσης μεταβάλλεται από $V_{DC} = 0.7\text{ V}$ έως -5 V .



Εικόνα 2.2.5: (α) Χωρητικότητα διόδου Schottky σε δομή AlN/GaN HEMT, συναρτήσεως της τάσης και (β) συγκέντρωση φορέων συναρτήσεως της απόστασης από την επιφάνεια.

Η τεχνική των μετρήσεων χωρητικότητας παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της χωρικής κατανομής των φορέων σε κάθετη διεύθυνση ως προς την επιφάνεια του δείγματος. Η κατανομή των ηλεκτρονίων 2DEG δίνεται από την εξίσωση

$$n = (q \epsilon_0 \epsilon A^2) \left(\frac{C^3}{dV} \right)$$

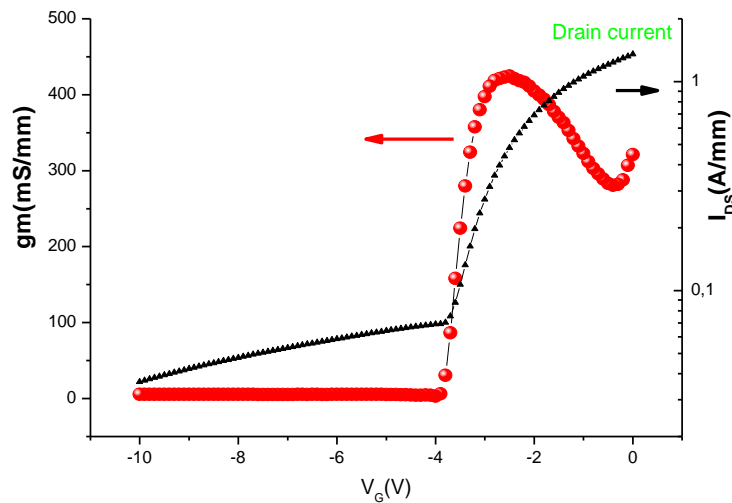
όπου $q=1.6 \cdot 10^{-19}\text{ V}$

Η μέτρηση χωρητικότητας συναρτήσεως της τάσης σε μια δομή HEMT, δίνεται στην Εικ. 2.2.5 (α). Το πλατώ της καμπύλης αντιστοιχεί στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο 2DEG δεδομένου ότι είναι εντοπισμένο σε περίπου σταθερή απόσταση W , από την επιφάνεια. Στην Εικ. 2.2.5 (β) δίνεται το διάγραμμα $n-W$ όπου οι τιμές των n και W , έχουν προσδιοριστεί από τις εξισώσεις που προαναφέρθηκαν χρησιμοποιώντας τις πειραματικές τιμές $C-V$ της Εικ. 2.2.5 (α). Ολοκληρώνοντας την καμπύλη $n \sim W$, εξάγουμε την συγκέντρωση του 2DEG (N_s σε cm^{-2}).

Μετρήσεις διαγωγιμότητας (g_m)

Από τις βασικότερες παραμέτρους για τη απόδοση ενός τρανζίστορ είναι η διαγωγιμότητα (g_m , transconductance) καθώς εκφράζει την αποδοτικότητα έλεγχου του ρεύματος απαγωγού από την τάση της πύλης. Η διαγωγιμότητα ισούται με

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}, V_{DS} = \text{σταθερό}$$

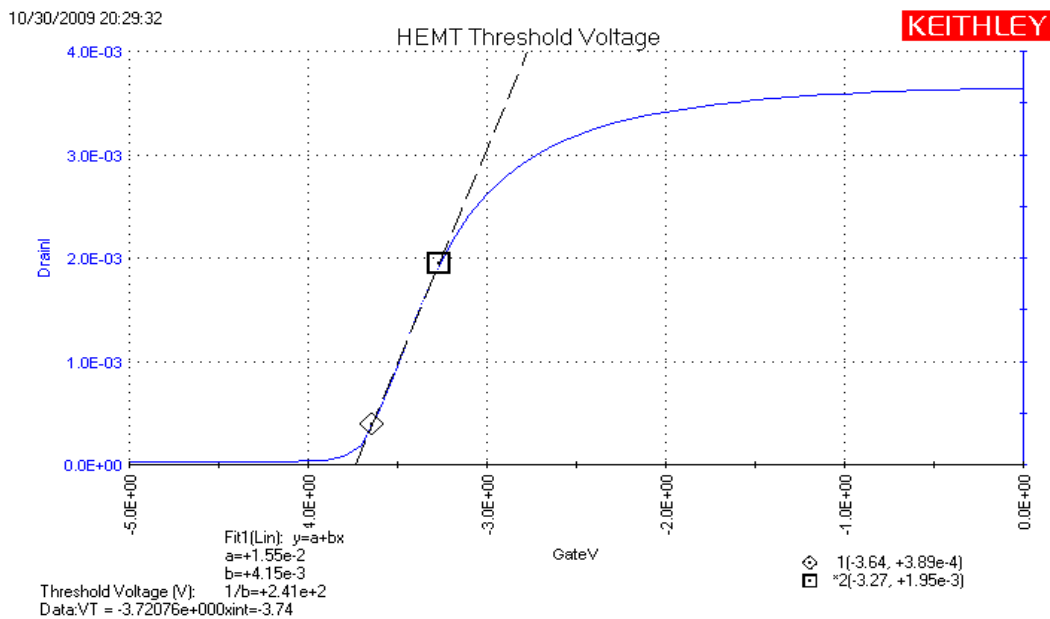


Εικόνα 2.2.6: Διάγραμμα της διαγωγιμότητας g_m συναρτήσει της τάσης V_{GS} , σε τρανζίστορ HEMT με $L_g=1\mu\text{m}$. Στον λογαριθμικό άξονα δεξιά, βλέπουμε την αντίστοιχη πυκνότητα ρεύματος I_{DS} .

Η διαγωγιμότητα ορίζεται για οποιαδήποτε περιοχή των χαρακτηριστικών I-V ενός FET, ωστόσο το ενδιαφέρον εστιάζεται στην τιμή που έχει στην περιοχή κόρου. Πειραματικά μπορούμε να τη μετρήσουμε ως εξής: για σταθερή τάση κόρου απαγωγού-πηγής, V_{DS} στην περιοχή των 7-8 V, μετράμε το ρεύμα απαγωγού-πηγής (I_{DS}), συναρτήσει της τάσης πύλης-πηγής V_{GS} , καθώς απογυμνώνεται το κανάλι. Στις δομές AlN/GaN HEMT που μελετήθηκαν, η V_{GS} κυμαίνεται από +1V έως -6V. Εν συνεχεία υπολογίζουμε την g_m και κάνουμε το αντίστοιχο γράφημα συναρτήσει της τάσης V_{GS} . Από το γράφημα αυτό μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε τη μέγιστη τιμή της διαγωγιμότητας του τρανζίστορ.

Εξαγωγή της τάσης κατωφλίου του τρανζίστορ

Η αρνητική τιμή της V_{GS} πέρα από την οποία το κανάλι κλείνει (απογυμνώνεται από φορείς) και το ρεύμα I_{DS} μηδενίζεται, ονομάζεται τάση κατωφλίου του τρανζίστορ V_T (threshold voltage).



Εικόνα 2.2.7: Γράφημα I_{DS} ως προς V_{GS} για σταθερή τιμή $V_{DS}=0.3V$, για τον προσδιορισμό της τάσης κατωφλίου του HEMT.

Στην γραμμική περιοχή των I-V χαρακτηριστικών, δηλαδή για μικρές τιμές V_{DS} (περίπου $< 0.5V$), το ρεύμα I_{DS} είναι ανάλογο της τάσης V_{GS} . Για σταθερή τάση $V_{DS} < 0.5V$, μετράμε το ρεύμα I_{DS} σαν συνάρτηση της $V_{GS} < 0V$ όπως φαίνεται στο γράφημα της Εικ.2.2.7. Στην μεγαλύτερη κλίση του γραφήματος προσαρμόζουμε ευθεία, το σημείο τομής της οποίας με τον άξονα των y, αποτελεί την τιμή της V_T .

Μοντέλο γραμμών μεταφοράς (TLM)

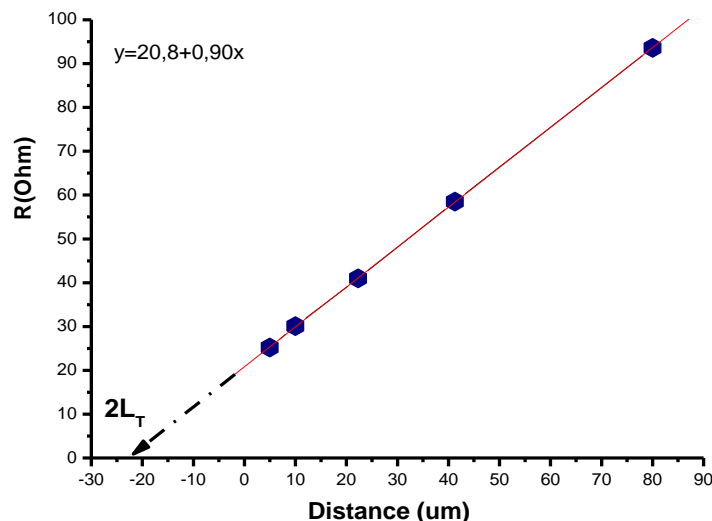
Το μοντέλο γραμμών μεταφοράς (Transmission Line Model-TLM), βασίζεται σε μετρήσεις ρεύματος τάσης μεταξύ διαδοχικών ωμικών επαφών με ολόένα αυξανόμενη απόσταση, για την εξαγωγή της αντίστασης του υποστρώματος (R_{sh}), καθώς και της αντίστασης των μεταλλουργικών επαφών (ρ_c). Οι πιο

συνηθισμένες γεωμετρίες για τις μετρήσεις αυτές, είναι τα γραμμικά TLM και τα κυκλικά TLM . Στα δείγματα μας, εφαρμόζουμε τη μέθοδο γραμμών μεταφοράς σε γραμμική διάταξη, που κατασκευάζεται με την τεχνική της φωτολιθογραφίας. Η διάταξη αυτή, αποτελείται από επτά διαδοχικές ωμικές επαφές διαστάσεων 90*100 μm η καθεμία, με μεταβλητές αποστάσεις μεταξύ τους ίσες με 80, 40 20, 10, 5 και 2,5 μm, αντίστοιχα.

Αφού εξάγουμε τις τιμές αντίστασης R(Ohm), από μετρήσεις I-V μεταξύ όλων των ζευγαριών από διαδοχικές επαφές, κατασκευάζουμε το γράφημα της R σαν συνάρτηση της μεταξύ τους απόστασης, όπως φαίνεται στην Εικ.2.2.8 . Έπειτα προσαρμόζουμε ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, από την εξίσωση της οποίας προσδιορίζουμε τις τιμές της κλίσης και της διατομής, τις οποίες χρησιμοποιούμε για την περαιτέρω ανάλυση. Η αντίσταση που μετρήσαμε ισούται με το διπλάσιο της αντίστασης της ωμικής επαφής ρ_c , συν την αντίσταση του αγώγιμου στρώματος του ημιαγωγού (του υποστρώματος). Θα θεωρήσουμε την αντίσταση κατά την επαφή των ακίδων του μετρητικού συστήματος με το δείγμα αμελητέα. Έτσι έχουμε:

$$R(\text{Ohm}) = 2\rho_c (\text{Ohm}) + R_{sh}(\text{Ohm}) \frac{L(\mu\text{m})}{W(\mu\text{m})}$$

Όπου L η απόσταση μεταξύ των επαφών διαδοχικά και W η μεγάλη διάσταση των ωμικών επαφών.



Εικόνα 2.2.8: Αντίσταση σε Ohm, μεταξύ των διαδοχικών ωμικών επαφών γραμμικού TLM, συναρτήσε της μεταξύ τους απόστασης σε μm.

Επομένως προκύπτει:

$$R_{sh} = \text{Κλίση} \left(\frac{\text{Ohm}}{\mu\text{m}} \right) * 100 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$\rho_c = \text{Διατομή} / 20 \text{ (Ohm mm)}$$

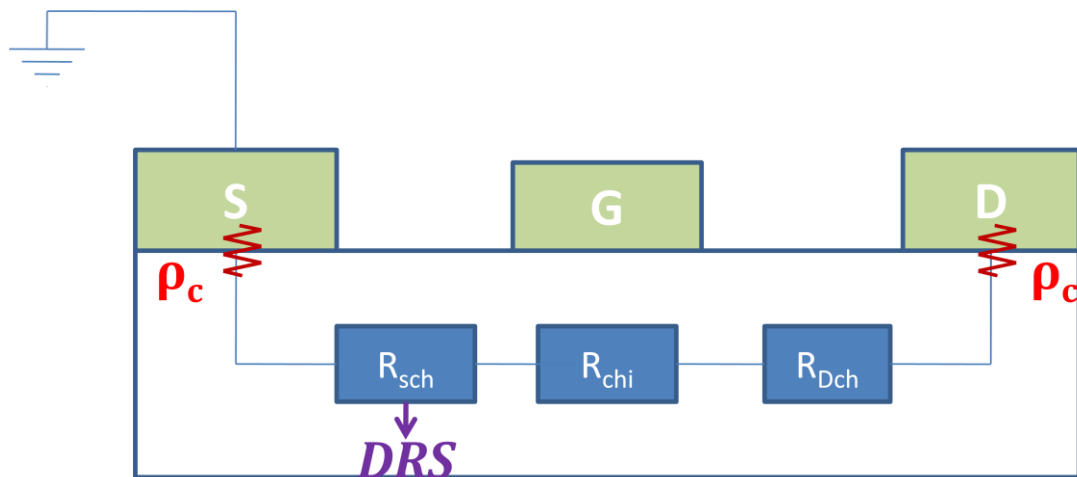
Τέλος, εάν θέλουμε να εξάγουμε και την ειδική αντίσταση (R_c), προκειμένου να έχουμε εικόνα της ποιότητας των επαφών, χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$R_c = L_\tau^2 * R_{sh} \text{ (Ohm cm}^2 \text{)}$$

Όπου $L_\tau = (\text{Διατομή} \times 100) / 2 R_{sh} \text{ (}\mu\text{m)}$ και αποτελεί το τμήμα της ωμικής επαφής που λαμβάνει μέρος στην αγωγιμότητα.

Εξαγωγή σειριακών αντιστάσεων

Με τον όρο σειριακή αντίσταση εννοούμε όλες τις παρασιτικές αντιστάσεις που είναι σε σειρά με την εσωτερική αντίσταση του καναλιού (R_{chi}). Το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό μπορεί να παραστεί σαν μια συνδεσμολογία αντιστάσεων εν σειρά, με την R_{chi} όπως φαίνεται στην Εικ. 2.2.9. Με R_s και R_D συμβολίζονται οι σειριακές αντιστάσεις της πηγής και του απαγωγού αντιστοίχως.



Εικόνα 2.2.9: Σχηματική αναπαράσταση αντιστάσεων συνδεδεμένες σε σειρά με την R_{chi} .

Η συνολική αντίσταση R_T επομένως μεταξύ πηγής και απαγωγού θα είναι:

$$R_T = \rho_c + R_{Sch} + R_{Dch} + \rho_c + R_{chi} = R_S + R_D + R_{chi}$$

Και
$$V_{DS} = I_{DS}(R_S + R_D + R_{chi})$$

Προκειμένου να προσδιορίσουμε τις σειριακές αντιστάσεις πηγής και απαγωγού χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Hower-Bechtel ⁵⁶, η οποία έγκειται σε μετρήσεις της συνολικής αντίστασης R_T , συναρτήσει της V_{GS} . Στην τεχνική που χρησιμοποιούμε, η τάση V_{DS} είναι πολύ χαμηλή προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο Shockley. Θεωρούμε την περίπτωση όπου $V_{DS} \ll V_{bi} - V_{GS}$, όπου V_{bi} είναι το εσωτερικό δυναμικό και V_{GS} η εφαρμοζόμενη τάση ανάμεσα στη πύλη και την πηγή. Επομένως, τα όρια της περιοχής απογύμνωσης είναι σχεδόν παράλληλα στη διεπιφάνεια μεταξύ ενεργού καναλιού και του υποστρώματος. Ως αποτέλεσμα, ένα τρανζίστορ μικρού καναλιού υπό αυτές τις συνθήκες συμπεριφέρεται σαν ένα μεγάλο FET (fat FET). Η σειριακή αντίσταση μετράται από την πλευρά της πηγής διότι από την μεριά του απαγωγού συμπεριλαμβάνεται και η διαρροή της πύλης. Έτσι ορίζουμε:

$$R_T = \frac{V_{DS}}{I_{DS} + I_{GS}}$$

Από την γραφική παράσταση του R_T σαν συνάρτηση της ποσότητας $V_x = (1 - \sqrt{\eta})^{-1}$ όπου $\eta = (V_{bi} - V_{GS}) / (V_{bi} - V_T)$ αδιάστατο, προκύπτει ευθεία (Εικ.2.2.10) με εξίσωση:

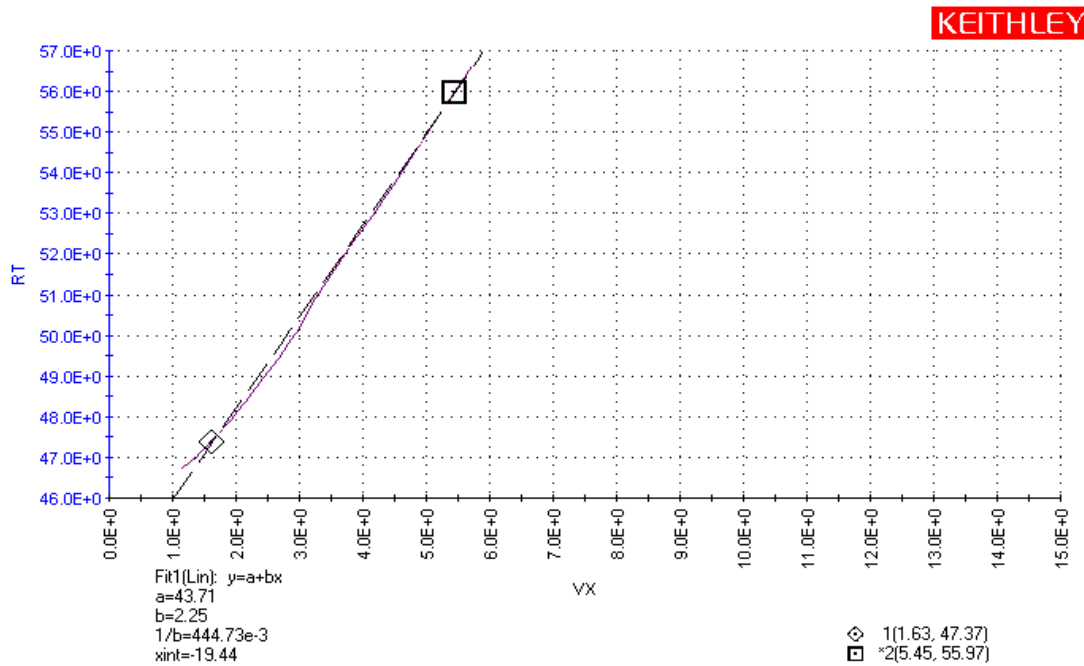
$$R_T = R_S + R_D + \frac{1}{G_o(1 - \sqrt{\eta})}$$

Τα V_{bi} και V_T , έχουν προσδιοριστεί όπως περιγράφηκε στις αντίστοιχες παραγράφους. Το V_{DS} ορίζεται λιγότερο από 0,5V ενώ η V_{GS} κυμαίνεται από +2 έως -2V. Η διατομή της ευθείας ισούται με το άθροισμα των σειριακών αντιστάσεων R_S και R_D :

$$\text{Διατομή} = \frac{R_S + R_D}{20} \text{ Ohm mm (έχοντας συμπεριλάβει ότι } W_g = 50 \mu\text{m)}$$

Η κλίση της ευθείας ισούται με την εσωτερική αντίσταση του καναλιού ($R_{chi} = f(V_{GS})$), ακριβώς κάτω από την πύλη, δηλαδή κάτω από την επαφή Schottky. Το αντίστροφο της κλίσης δίνει την αγωγιμότητα του καναλιού:

$$\text{Κλίση} = 1/G_o = R_{chi} \text{ (Ohm)}$$



Εικόνα 2.2.10: Γραφική παράσταση μέτρησης της συνολικής σειριακής αντίστασης R_T , σαν συνάρτηση της ποσότητας $V_x = (1 - \sqrt{\eta})^{-1}$ για τρανζίστορ AlN/GaN HEMT. Κάτω αριστερά αναγράφονται οι τιμές της κλίσης (b) και της διατομής (α).

Διαφορική αντίσταση πηγής

Με τον όρο διαφορική αντίσταση πηγής DRS (r_s), εννοούμε την παρασιτική αντίσταση μεταξύ πύλης και πηγής, η οποία είναι εν σειρά συνδεδεμένη με την εσωτερική αντίσταση του καναλιού (R_{chi}), όπως φαίνεται στην Εικ.2.2.9. Θεωρούμε ότι η πτώση τάσης στο φράγμα Schottky της πύλης είναι σταθερή κι επομένως η τάση μεταξύ πύλης και πηγής (που θεωρούμε πάντα γειωμένη) θα ισούται με την τάση του καναλιού απ την μεριά της πηγής $R_s I_{DS}$, συν την τάση που εφαρμόζεται στην πύλη $R_G I_{GS}$ ².

$$V_{GS} = R_G I_{GS} + R_s I_{DS}$$

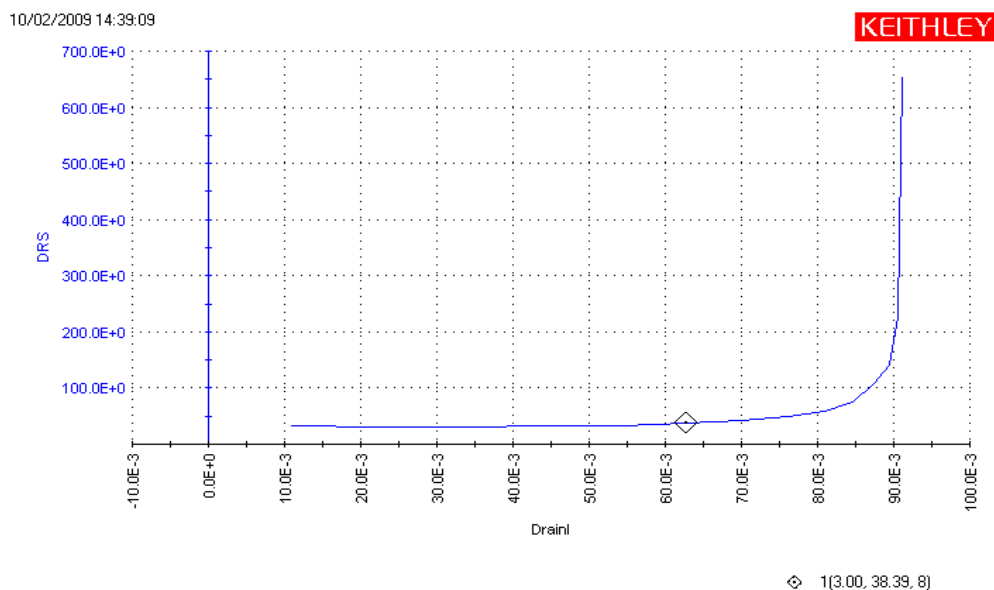
Η παράγωγος της τάσης της πύλης V_{GS} προς το I_{DS} , ισούται με την διαφορική αντίσταση της πηγής :

$$DRS = \frac{\partial V_{GS}}{\partial I_{DS}}$$

Η βασική συνθήκη για να μετρηθεί η r_s , είναι η πύλη να είναι τελείως ανοιχτή, για να έχει το κανάλι την πλήρη αγωγιμότητα του, έτσι ώστε να μην

υπάρχουν περιθώρια για τη δημιουργία φορτισμένων περιοχών⁸. Όταν η ζώνη αγωγιμότητας είναι κατειλημμένη, δεν είναι απογυμνωμένο το κανάλι και η παρουσία ελεύθερων φορτίων χώρου (depletion charge) εκμηδενίζεται. Απαιτείται, λοιπόν, να πολώσω θετικά την πύλη του τρανζίστορ εφαρμόζοντας σε αυτή ρεύμα ίσο με $I_{GS} = 0,5\text{mA}$, ενώ η επαφή της πηγής είναι γειωμένη. Εν συνεχεία, φτιάχνουμε το γράφημα της DRS συναρτήσεως της V_{DS} ή του I_{DS} με την V_{DS} κυμαίνεται από 0V μέχρι 10V προκειμένου να μετρηθεί η r_s για διαφορετικά I_{DS} (γράφημα 2.2.11).

Περαιτέρω αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή μεταξύ πηγής και καναλιού, πάνω από την τιμή που απαιτείται για κορεσμό της ταχύτητας των ηλεκτρονίων, προκαλεί αύξηση της DRS^{9 10}. Γενικά η DRS πρέπει να έχει μια σταθερή τιμή, ανεξαρτήτως της τάσης V_{DS} ή του ρεύματος I_{DS} . Η μεταβολή της DRS που παρατηρείται, συναρτήσεως της V_{DS} που έχουμε ορίσει ή του I_{DS} , πρέπει να υπολογιστεί διότι υποδηλώνει την παρουσία παγίδων.



Εικόνα 2.2.11: Γραφική παράσταση της διαφορικής αντίστασης DRS σε Ω , συναρτήσεως του ρεύματος I_{DS} (A). Το γράφημα αντιστοιχεί σε τρανζίστορ δομής AlN/GaN HEMT.

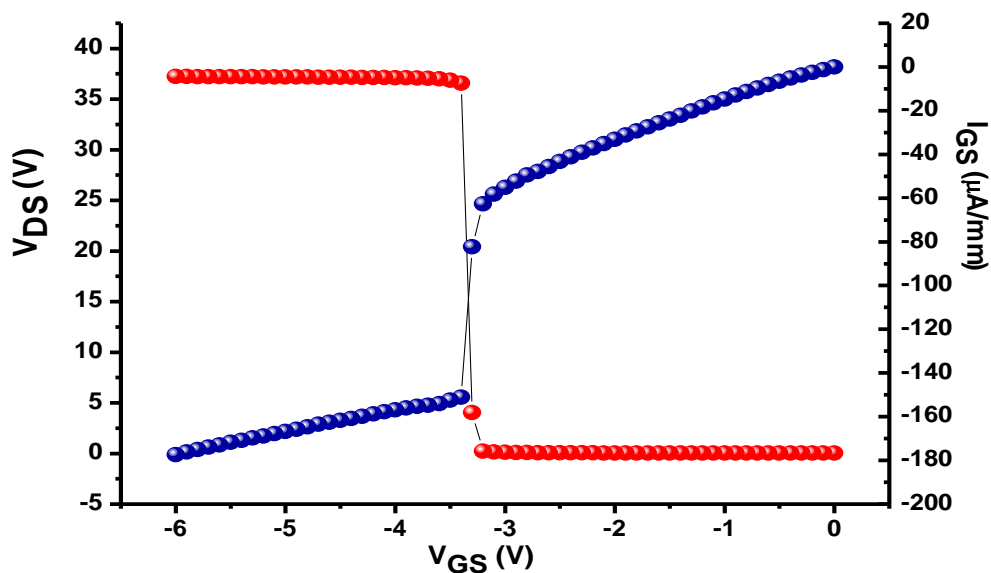
Τάση κατάρρευσης *Off-state*

Τα AlN/GaN HEMTs, λόγω των πολύ υψηλών πυκνοτήτων ρεύματος που παρουσιάζουν, προβλέπεται να έχουν εξαιρετική απόδοση ισχύος. Ωστόσο, η

τιμή της τάσης κατάρρευσης μπορεί να περιορίσει την ισχύ των τρανζίστορ αφού $P_{\max} = I_{\max} \times (V_{BR} - V_{knee})/8$, όπως αναφέραμε στην εισαγωγή.

Η τάση κατάρρευσης ορίζεται ως η απότομη, μη ελεγχόμενη αύξηση του I_{DS} για τάση πόλωσης του HEMT κάτω απ την τάση κατωφλίου. Γι' αυτό το λόγο καλείται και off-state (κλειστού καναλιού), το κανάλι δηλαδή πρέπει να είναι απογυμνωμένο για τον ορισμό της. Η κατάρρευση σαν γεγονός οδηγεί στην καταστροφή του HEMT με θρύμματα μετάλλου πάνω από την περιοχή του καναλιού. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να αποφευχθεί, στις μετρήσεις προσδιορισμού της V_{BR} , χρησιμοποιώντας την τεχνική εγχέομένου ρεύματος απαγωγού (drain current injection)¹¹.

Στην μέτρηση αυτή, το I_{DS} είναι σταθερό στα καθορισμένα επίπεδα κατάρρευσης (συνήθως 1 mA/mm), ενώ η V_{GS} είναι μεταβαλλόμενη και η V_{DS} μετράται. Η τάση κατάρρευσης ισούται με την σταθερή τιμή του V_{DS} που εμφανίζεται καθώς αυξάνεται κατά απόλυτη τιμή η ανάστροφη τάση της πύλης, «κρατώντας» το σταθερό ρεύμα I_{DS} που ορίσαμε, σε συνθήκες κλειστού καναλιού. Η τάση V_{GS} κυμαίνεται από 0V μέχρι -6V (η μέγιστη απόλυτη τιμή της ξεπερνά την τάση κατωφλίου). Ένα τυπικό γράφημα της μέτρησης δίνεται στην εικόνα 2.2.11.



Εικόνα 2.2.11: Γράφημα από μέτρηση τάσης κατάρρευσης: στον άξονα αριστερά βλέπουμε την V_{DS} (V) συναρτήσει της V_{GS} (V), ενώ στον άξονα δεξιά αναγράφεται το αντίστοιχο ρεύμα I_{GS} (A).

Πυκνότητα ρεύματος ίση με 1 mA/mm αντιστοιχεί σε 50 μ A για τρανζίστορ με διαστάσεις πύλης $L_g=1\mu\text{m}$ και $W_g=50\mu\text{m}$. Αν δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε την τάση κατάρρευσης θέτοντας αυτό το ρεύμα, θα πρέπει να αυξήσουμε την τιμή του σταδιακά. Αυτό είναι αναγκαίο στις δομές όπου το υπόστρωμα κάτω από το κανάλι εμφανίζει σημαντικό ρεύμα διαρροής σε συνθήκες off-state. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μέγιστη τιμή ρεύματος που συνήθως χρησιμοποιείται είναι 0.5 mA δηλαδή 10 mA/mm.

Σε κάποια δείγματα μπορεί το υπόστρωμα να έχει τόσο μεγάλη διαρροή ώστε το ρεύμα να διαχέεται παντού και να μην εμφανίζεται η απότομη κατάρρευση, αλλά μια σταδιακή κατάρρευση (soft breakdown) ακόμα και για $I_{DS}=5\text{mA}$. Τότε, δεν είναι εφικτός ο καθορισμός της τάσης κατάρρευσης. Έξαλλου σε τέτοιες περιπτώσεις, δεν έχει και νόημα να μιλάμε για τάση κατάρρευσης.

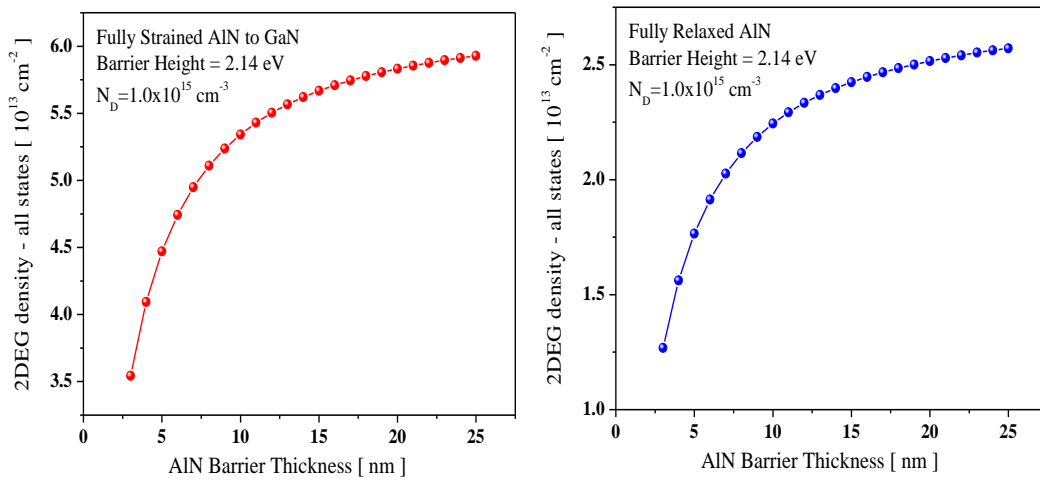
- ¹ Keithley Parameter Analyser, Model SCS 4200, Reference manual, Section 5, pp 14.
- ² Keithley Parameter Analyser, Model SCS 4200, Reference manual, Section 6, pp 119.
- ³ R.S. Muller & T.I Kamins, "Physics of semiconductors devices"
- ⁴ G.W. Neudeck "The PN Junction Diode"
- ⁵ M. Shur, "GaAs devices and circuits", Springer
- ⁶ IEEE Trans. Electron Devices, ED-20 (3), 213 (1973)
- ⁷ Y. Zhu et al., Electronics Letters, vol.31, No.4, (1995)
- ⁸ R. Anholt, Electrical and thermal Characterization of MESFETs, HEMTs and HBTs. Boston, MA : Artech House 1994g
- ⁹ Tomas Palacios et al., IEEE Transactions on Electron Devices , Vol 52, 10, (2005)
- ¹⁰ M. Singh and J Singh, 'Design of high electron mobility devices with composite nitride channels', J.Appl. Phys., vol. 94, pp.2498-2506, 2003
- ¹¹ S. R. Bahl and J. A. del Alamo, IEEE Trans. Electron Devices 40, 1558 (1993)

Κεφάλαιο 3.1: Βέλτιστο πάχος ανάπτυξης AlN

Οι δομές AlN/ GaN HEMT είναι επιθυμητό να έχουν στρώμα φραγμού με αρκετό πάχος, αφού τότε επιτυγχάνεται μεγάλη συγκέντρωση 2DEG περιορίζοντας την απογύμνωση του, από το δυναμικό της επιφάνειας. Όμως η εκτατική τάση παραμόρφωσης του AlN, που ακολουθείται από τη δημιουργία εξαρμόσεων και μικρορωγμών, ορίζει ένα κρίσιμο πάχος πέρα απ' το οποίο υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του 2DEG¹⁻⁷.

Έτσι ξεκίνησε μια συστηματική μελέτη, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, προκειμένου να καθορίσουμε τις ιδιότητες του καναλιού 2DEG (πυκνότητα ηλεκτρονίων, ευκινησία και αντίσταση φύλλου R_{sh}) της ετεροδομής AlN/GaN, συναρτήσει του πάχους του AlN και να προσδιορίσουμε το μέγιστο δυνατό πάχος, όπου με την απουσία εξαρμώσεων και μικρορωγμών θα εμφανίζονται οι δυνατότητες της ετεροδομής AlN/GaN. Προκειμένου να προσδιορίσουμε πειραματικά το κρίσιμο πάχος για πλεγματική χαλάρωση του AlN, αναπτύχθηκε μια σειρά από δομές AlN/GaN πάνω σε υποστρώματα GaN/Al₂O₃ με ολοένα και αυξανόμενο πάχος AlN. Οι επιφάνειες των δειγμάτων εξετάστηκαν με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης με πηγή Εκπομπής Πεδίου, FE-SEM και ακολούθησαν μετρήσεις αγωγιμότητας και φαινομένου Hall. Επίσης, κατασκευάστηκαν δίοδοι Schottky, τρανζίστορ HEMT και διατάξεις TLM που χαρακτηρίστηκαν με μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης (C-V) και ρεύματος-τάσης (I-V) και εξήχθησαν χαρακτηριστικές παράμετροι των δομών όπως αντίσταση φύλλου (R_{sh}), η χωρική κατανομή φορέων και η διαγωγιμότητα. Ας αναλύσουμε αρχικά τις θεωρητικές προσομοιώσεις:

Λύνοντας αυτοσυνεπώς τις εξισώσεις Poisson-Schrodinger, υπολογίστηκε η πυκνότητα του 2DEG συναρτήσει του πάχους AlN, για μια ετεροδομή AlN/GaN που βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία στους 300 K. Οι υπολογισμοί αυτοί, πραγματοποιήθηκαν για τις δύο ακραίες περιπτώσεις όπου το AlN είναι είτε υπό πλήρη ελαστική τάση παραμόρφωσης ή πλήρως χαλαρωμένο. Υποθέσαμε πάχος στρώματος GaN ίσο με 500nm, με συγκέντρωση δοτών $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Η συγκέντρωση φορέων στο στρώμα AlN θεωρήθηκε ίση με $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Το ύψος του φράγματος δυναμικού ($E_c - E_F$) στην επιφάνεια του τελευταίου, τέθηκε ίσο με 2,14 eV.



Εικόνα 3.1.1: Θεωρητικοί υπολογισμοί πυκνότητας φορέων στο 2DEG για την ετεροδομή AlN/GaN με μεταβλητό πάχος AlN: το AlN υποτίθεται ότι βρίσκεται υπό πλήρη ελαστική τάση παραμόρφωσης (αριστερά), ενώ είναι πλήρως χαλαρωμένο (δεξιά).

Όπως παρατηρούμε στα γραφήματα της Εικ. 3.1.1, η πυκνότητα του 2DEG αυξάνεται με το πάχος εξαιτίας της μείωσης της επιφανειακής απογύμνωσης, λόγω του υψηλού επιφανειακού δυναμικού ($E_c - E_F$). Ο κόρος που επέρχεται σε μεγάλα πάχη οφείλεται ακριβώς στην εξάλειψη της απογύμνωσης από το δυναμικό της επιφάνειας. Η μέγιστη διαφορά πόλωσης στις δυο πλευρές της ετεροεπαφής, παρουσιάζεται όταν το AlN βρίσκεται υπό πλήρη ελαστική παραμόρφωση. Στην περίπτωση αυτή το πιεζοηλεκτρικό πεδίο, είναι πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ υψηλές τιμές N_s , που φτάνουν το $5.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ακόμα και για πολύ λεπτά πάχη. Η τιμή αυτή βέβαια δεν είναι εφικτή, αφού για πάχη AlN μεγαλύτερα από 5.0 nm, όπως θα αποδείξουμε, υπεισέρχεται χαλάρωση των κρυσταλλικών σταθερών μέσω σχηματισμού μικρορωγμών. Επομένως, για μεγάλα πάχη AlN περιμένουμε κάτι ενδιάμεσο μεταξύ των περιπτώσεων της Εικ. 3.1.1. Στην περίπτωση της πλήρους χαλάρωσης, η πιεζοηλεκτρική συνιστώσα του πεδίου πόλωσης μηδενίζεται και η μέγιστη συγκέντρωση καθορίζεται αποκλειστικά από τη διαφορά στις αυθόρμητες πολώσεις μεταξύ των δύο ημιαγωγών, περιορίζοντας σημαντικά το επαγόμενο 2DEG στην τιμή $2.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Για ένα στρώμα AlN πάχους 4.5 nm, το οποίο δεν υφίσταται χαλάρωση, αναμένεται μια συγκέντρωση 2DEG περίπου $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (για επιφανειακό δυναμικό 2,14eV), τιμή απόλυτα ικανοποιητική για επίτευξη τρανζίστορ HEMT με εξαιρετικά υψηλά ρεύματα. Εδώ, θα πρέπει να σημειωθεί, στους

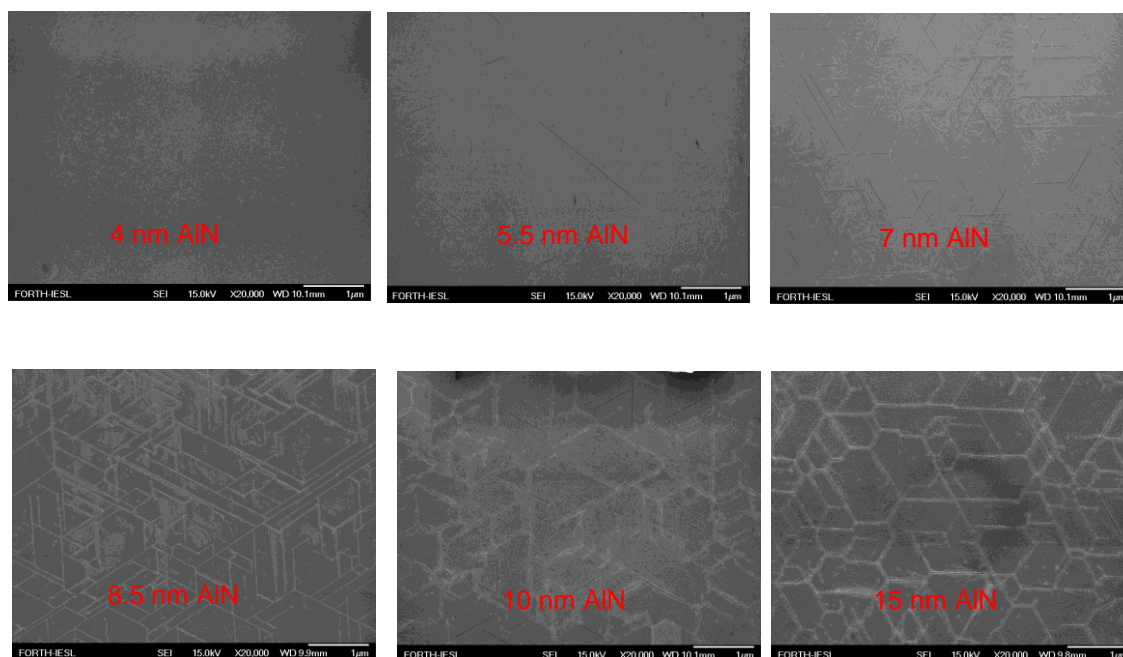
υπολογισμούς δεν έχουν συμπεριληφθεί οι αρνητικά φορτισμένες κρυσταλλικές ατέλειες μέσα στο AlN, που αναμένονται ειδικά όταν υπάρχει χαλάρωση. Επίσης το επιφανειακό δυναμικό μπορεί να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από την τιμή 2,14 eV που υποθέσαμε στους υπολογισμούς, ανάλογα με τη χημική σύσταση της επιφάνειας (οξειδωση, αδρανοποίηση κλπ) που σε κάποιο βαθμό θα μπορούμε να επηρεάσουμε. Τέλος η οξειδωση ενός επιφανειακού στρώματος AlN, θα ελαττώνει το πραγματικό επιταξιακό πάχος του.

Προσδιορισμός του κρίσιμου πάχους AlN πάνω σε GaN

Ο μηχανισμός χαλάρωσης της ελαστικής τάσης παραμόρφωσης στο AlN, λοιπόν, είναι ένας συνδυασμός εισαγωγής εξαρμώσεων λόγω πλεγματικής διαφοράς και δημιουργίας μικρορωγμών.

Προηγούμενη δουλειά μας, βασισμένη σε μετρήσεις με HR-TEM σε συνεργασία με το ΑΠΘ, έδειξε ότι έχουμε εισαγωγή εξαρμώσεων με ανύσματα Burger $1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$, για πάχη AlN μεγαλύτερα των 7nm⁵. Η ετεροδομή που μελετήθηκε, αποτελείτο από διαδοχικά στρώματα AlN/GaN, με πάχος AlN που κυμάνθηκε από 3nm μέχρι 100nm, πάνω σε υπόστρωμα GaN/Al₂O₃. Στα μικρότερα πάχη παρατηρήθηκε μερική χαλάρωση, ενώ το στρώμα πάχους 3nm βρισκόταν υπό πλήρη τάση ελαστικής παραμόρφωσης πάνω στο GaN. Οι ημιαγωγοί ΙΙΙ-νιτρίδια που αναπτύσσονται στη (0001) διεύθυνση στερούνται ενός κατάλληλου συστήματος ολίσθησης των εξαρμώσεων για την εισαγωγή εξαρμώσεων πλεγματικής διαφοράς στις (0001) επιφάνειες. Αποτέλεσμα τούτου, είναι μόνο οι προβαλλόμενες συνιστώσες των εξαρμώσεων που είδαμε πειραματικά στα επίπεδα (0001), να συνεισφέρουν μερικώς στη χαλάρωση της ελαστικής τάσης παραμόρφωσης. Οι μικρορωγμές δημιουργούνται καθώς αυξάνεται η συνολική ελαστική ενέργεια λόγω αύξησης του πάχους του υμενίου και είναι αποτέλεσμα της δυσκολίας εισαγωγής εξαρμώσεων πλεγματικής διαφοράς στις (0001) διεπιφάνειες των ΙΙΙ-νιτρίδιων. Συνεπώς, δεν θα έχουμε εισαγωγή εξαρμώσεων πλεγματικής διαφοράς πριν από την εμφάνιση μικρορωγμών.

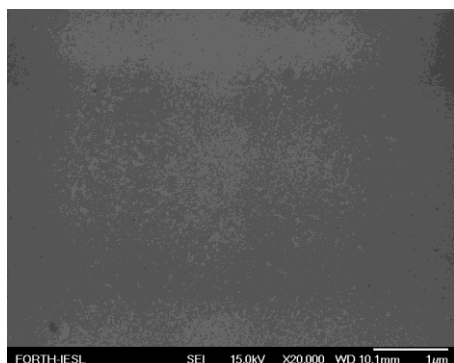
Η ύπαρξη μικρορωγμών στα στρώματα AlN πάνω σε GaN, ερευνήθηκε με παρατηρήσεις της επιφάνειας των δειγμάτων με FE-SEM. Εξετάστηκαν δομές με αυξανόμενα πάχη AlN από 4 μέχρι 15 nm, πάνω σε GaN/Al₂O₃(0001) υψηλής αντίστασης υποστρώματα.



Εικόνα 3.1.2: Μικρογραφήματα FE-SEM που δείχνουν τις επιφάνειες δομών AlN/GaN, με διαφορετικά πάχη AlN. Μικρορωγμές με διαφορετική πυκνότητα και πλάτος εμφανίζονται σε όλα τα δείγματα, εκτός του δείγματος με 4 nm AlN.

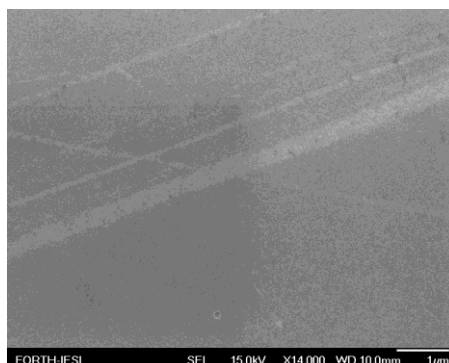
Σύμφωνα με τα μικρογραφήματα των επιφανειών από το υψηλής διακριτικής ικανότητας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο FE-SEM (Εικ. 3.1.2), η εισαγωγή μικρορωγμών ξεκινά στα 5nm, με συγκέντρωση ~ 1 crack/ μm . Η περίπτωση των 5 nm κρίνεται οριακή, καθώς οι μικρορωγμές καλύπτουν μέρος της επιφάνειας του δείγματος ενώ η υπόλοιπη παραμένει καθαρή. Στα 5,5 nm παρατηρούνται χαμηλής πυκνότητας μικρορωγμές σε ολόκληρο το δείγμα, ενώ η επιφάνεια των 4 nm είναι απολύτως καθαρή. Η πυκνότητα των μικρορωγμών αυξάνεται συναρτήσει του πάχους AlN μέχρι τα 8,5nm. Για ακόμη μεγαλύτερα πάχη AlN παρατηρείται σταθεροποίηση της πυκνότητας, αλλά συνεχόμενη αύξηση του πλάτους τους.

Οι μικρορωγμές επηρεάζουν μόνο την ευκινησία του 2DEG και όχι τη συγκέντρωση όπως συμβαίνει στην περίπτωση που έχουμε εξαρμώσεις. Το μέγεθος της επίδρασης των μικρορωγμών στις ιδιότητες του 2DEG, γίνεται εμφανές συγκρίνοντας τις μετρήσεις αγωγιμότητας και φαινομένου Hall, στην κρίσιμη περίπτωση των 5nm, σε περιοχές με και χωρίς μικρορωγμές (εικόνα 3.1.3). Στην πρώτη περίπτωση τα αποτελέσματα ήταν $R_{sh}=656 \Omega/\text{sq}$ με $\mu=423 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ και $N_s=2.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, ενώ στη δεύτερη οι μετρήσεις έδωσαν $R_{sh}=280 \Omega/\text{sq}$ με $\mu=1068 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ και πρακτικά ίδια συγκέντρωση ($N_s= 2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).



περιοχή χωρίς μικρορωγμές

$$N_s = 2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}, \mu = 1068 \text{ cm}^2/\text{vs}$$



περιοχή με μικρορωγμές

$$N_s = 2.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}, \mu = 423 \text{ cm}^2/\text{vs}$$

Εικόνα 3.1.3: Μικρογραφήματα FE-SEM δύο διαφορετικών περιοχών ετεροδομής AlN/GaN με πάχος AlN ίσο με 5 nm, που χαρακτηρίζονται από σημαντική διαφορά στην ευκινησία ηλεκτρονίων.

Από αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι μια κατάλληλη ετεροδομή HEMT, πρέπει να έχει πάχος AlN έως περίπου 4,5nm⁷. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από μετρήσεις αγωγιμότητας και φαινομένου Hall⁷ που έγιναν σε δομές AlN/GaN HEMT με μεταβλητό πάχος AlN από 3.5 έως 7.5 nm, για την εξαγωγή της αντίστασης φύλλου της συγκέντρωσης και της ευκινησίας του 2DEG. Η ετεροδομή με 4.5 nm AlN, παρουσίασε τον καλύτερο συνδυασμό των τριών αυτών παραμέτρων : χαμηλότερη αντίσταση φύλλου, υψηλότερη ευκινησία και εξαιρετική συγκέντρωση για δομές HEMT. Ένα τυπικό αποτέλεσμα για ετεροδομή 4.5 nm AlN/GaN, δίνεται στον Πίνακα 3.1.1.

Πίνακας 3.1.1: Χαρακτηριστικά 2DEG και αντίστασης φύλλου ετεροδομής 4.5 nm AlN/GaN HEMT.

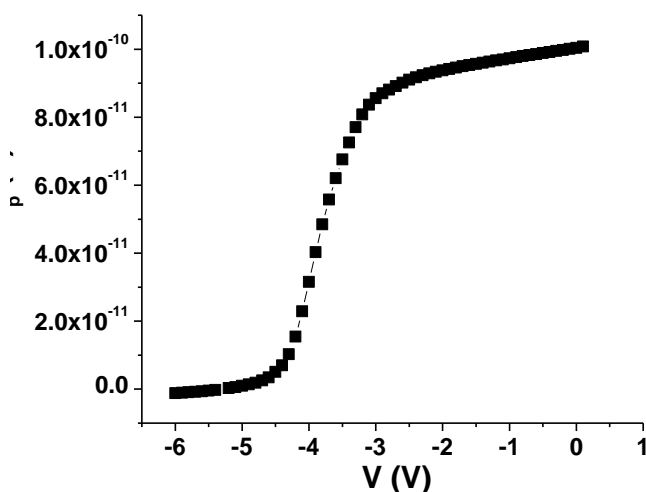
Δομή	Προσομοιώσεις	Hall	(300K)	
	$N_s(\text{cm}^{-2})$	$N_s(\text{cm}^{-2})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{V sec})$	$R_{sh}(\text{Ohm/sq})$
4,5nm AlN/GaN	4×10^{13}	$2,5 \times 10^{13}$	1398	183

Για παχύτερα στρώματα AlN, όπου η πυκνότητα των μικρορωγμών θα είναι μεγαλύτερη, παρατηρείται περαιτέρω μείωση της ευκινησίας του 2DEG η οποία

συνεπάγεται δραστική αύξηση της αντίστασης φύλλου, όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

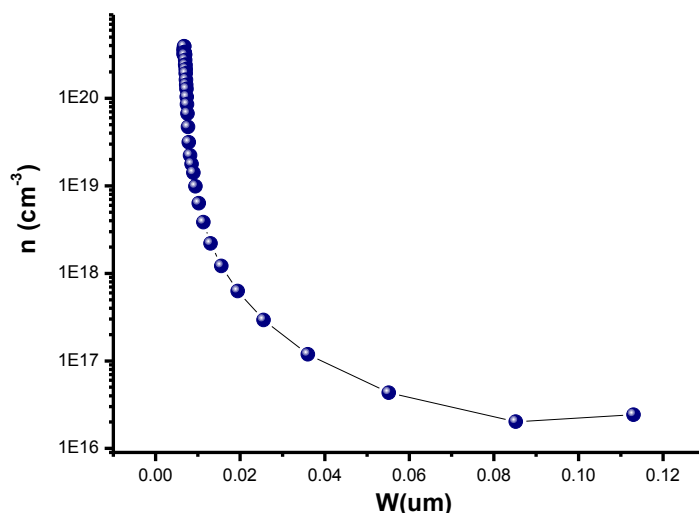
Προσδιορισμός της χωρικής κατανομής ηλεκτρονίων με μετρήσεις C-V

Η κατανομή της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων του 2DEG, συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια, εξήχθη από μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης σε διόδους Schottky διαμέτρου 100μm . Στο γράφημα της Εικ.3.1.5, είναι εμφανές το χαρακτηριστικό πλατώ το οποίο επιβεβαιώνει την ύπαρξη του 2DEG, όπως επίσης και η πλήρης απογύμνωση του καναλιού από φορείς, στη τάση κατωφλίου.



Εικόνα 3.1.5: Καμπύλη χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης, όπως μετρήθηκε σε δίοδο Schottky ετεροδομής 4.5 nm AlN/GaN HEMT.

Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2.2, εξάγουμε τη χωρική κατανομή της συγκέντρωσης φορέων (Εικ. 3.1.6). Σύμφωνα με το γράφημα αυτό, η υψηλή συγκέντρωση φορέων του 2DEG, εντοπίζεται σε απόσταση περίπου 6nm, δηλαδή μέσα στο GaN. Σε ακόμα μεγαλύτερη απόσταση από την επιφάνεια παρατηρείται χαμηλή συγκέντρωση ηλεκτρονίων της τάξης των 10^{15} cm^{-3} , ενώ μέσα στο υψηλής αντίστασης υπόστρωμα GaN οι φορείς είναι της τάξης 10^{13} cm^{-3} .



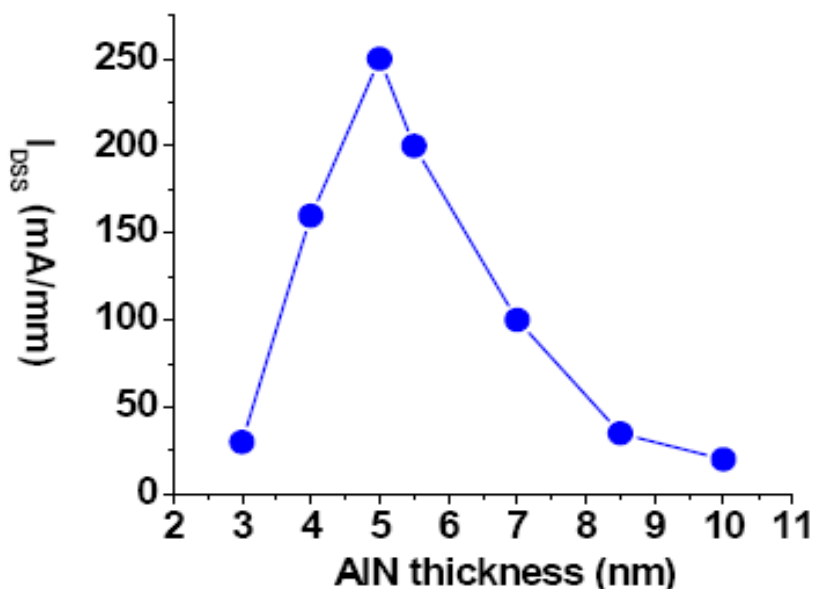
Εικόνα 3.1.6: Χωρική κατανομή συγκέντρωσης φορέων, υπολογισμένη από μετρήσεις C-V που πραγματοποιήθηκαν σε διόδους διαμέτρου 100 μm, δομής 4,5 nm AlN/GaN HEMT, κατασκευασμένων με φωτολιθογραφία.

Η συγκέντρωση του 2DEG αντιστοιχεί σε $2.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, για πάχος φράγματος AlN 4.5nm, όπως υπολογίσαμε ολοκληρώνοντας την καμπύλη n-x. Η απόκλιση που προκύπτει από την τιμή που εξήχθει μέσω φαινομένου Hall, αποδίδεται στο ότι για τη μια μέτρηση χρησιμοποιήθηκε κομμάτι δείγματος με επαφές ινδίου ενώ για την άλλη δίοδος κατασκευασμένη με φωτολιθογραφία: αφενός οι κατασκευασμένες με φωτολιθογραφία ωμικές επαφές είναι βελτιστοποιημένες επαφές και αφετέρου μπορεί να υπάρχει μια διαμόρφωση του επιφανειακού δυναμικού της δομής AlN/GaN, κατά το σχηματισμό των ωμικών επαφών. Όπως θα αναλύσουμε παρακάτω, η συγκέντρωση του 2DEG είναι άμεση συνάρτηση του δυναμικού της επιφάνειας. Για παράδειγμα, η θερμική ανόπτηση μπορεί να επηρεάσει τις ετεροδομές λόγω της υψηλής τάσης ελαστικής παραμόρφωσης υπό την οποία βρίσκεται το AlN και μπορεί να προκαλέσει ακόμη και οξείδωση της επιφάνειας. Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε ότι τα παραπάνω αποτελούν πιθανά αίτια, επαναλάβουμε τις μετρήσεις Hall σε γεωμετρία Van der Pauw κατασκευασμένη με φωτολιθογραφία. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρήθηκε πολύ καλή συμφωνία με τις μετρήσεις C-V, καθώς μετρήθηκε συγκέντρωση ίση με $2.68 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Μετρήσεις μέγιστου ρεύματος και διαγωγιμότητας στα τρανζίστορ HEMT

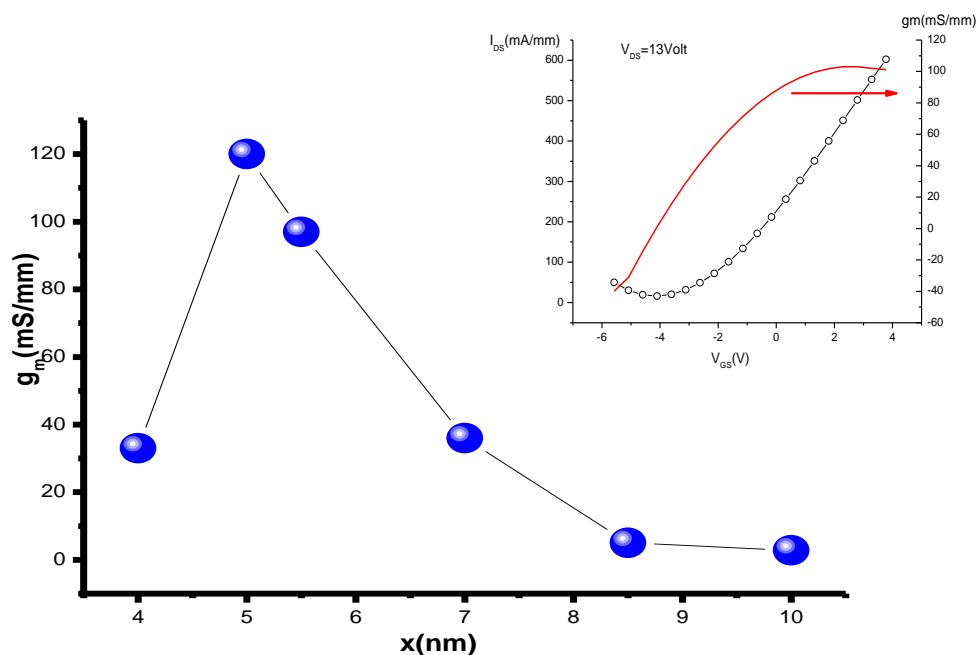
Στα τρανζίστορ των ετεροδομών AlN/GaN HEMT, με πάχη AlN από 3 έως 10 nm, έγιναν μετρήσεις ρεύματος-τάσης (I-V) χρησιμοποιώντας μια απλή διάταξη

curve tracer. Θέτοντας την τάση πύλης-πηγής ίση με $V_{GS}=0V$ (σταθερή) και την τάση απαγωγού-πηγής (V_{DS}) να σαρώνει από 0 έως 10V, μετρήθηκε το ρεύμα κόρου απαγωγού-πηγής (I_{DS}), που διαρρέει το κανάλι. Στην Εικ. 3.1.8 δίνεται το γράφημα του I_{DS} συναρτήσεως του πάχους του AlN της ετεροδομής HEMT. Όπως βλέπουμε η δομή HEMT με 5 nm AlN, παρουσιάζει το μεγαλύτερο ρεύμα.



Εικόνα 3.1.8: Ρεύμα κόρου I_{DS} για $V_{GS}=0$, σε τρανζίστορ AlN/GaN HEMT με διαφορετικό πάχος AlN.

Μια παρόμοια κορυφή εμφανίστηκε και στην καμπύλη της μέγιστης τιμής της διαγωγιμότητας g_m , των τρανζίστορ HEMT συναρτήσεως του πάχους του AlN. Η διαγωγιμότητα αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο για την ποιότητα του τρανζίστορ καθώς δείχνει την αποδοτικότητα ελέγχου του ρεύματος απαγωγού από την τάση της πύλης. Οι μετρήσεις ρεύματος I_{DS} και g_m , έγιναν για τάση $V_{DS}=8V$, που αντιστοιχεί στην περιοχή κόρου (saturation mode). Όπως φαίνεται στην Εικ. 3.1.9, στα τρανζίστορ με πάχος AlN ίσο με 5nm, η διαγωγιμότητα είναι 125 mS/mm. Τα τρανζίστορ των υπόλοιπων δειγμάτων παρουσίασαν αρκετά χαμηλότερες τιμές g_m , επιβεβαιώνοντας ότι το οριακό πάχος του AlN είναι τα 5nm.

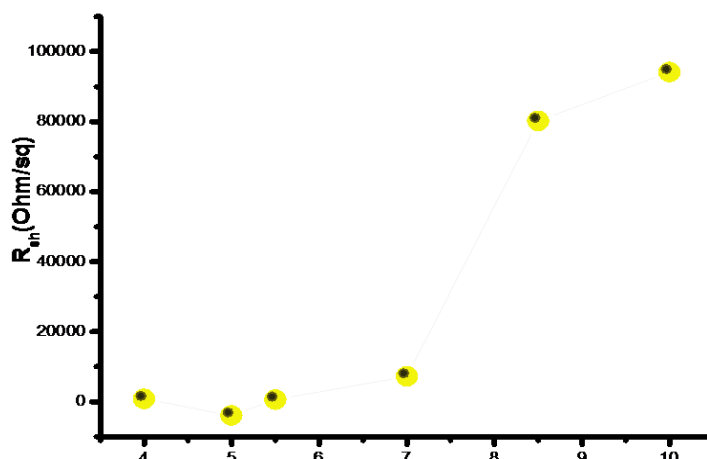


Εικόνα 3.1.9: Διαγωγιμότητα (g_m) συναρτήσεως του πάχους (x) του AlN σε τρανζίστορ AlN/GaN HEMT. Στο ένθετο γράφημα φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη για την μέτρηση της g_m , το I_{DS} συναρτήσεως του V_{GS} , για τάση $V_{DS}=8V$.

Μετρήσεις αντίστασης φύλλου σε ωμικές επαφές

Η αντίσταση φύλλου (R_{sh}) εξήχθη και από μετρήσεις ρεύματος- τάσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο TLM στις αντίστοιχες ωμικές επαφές όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο των πειραματικών τεχνικών.

Όπως παρατηρούμε στο γράφημα της Εικ.3.1.10, το δείγμα με 5nm AlN παρουσιάζει την μικρότερη $R_{sh} = 200 \text{ Ohm/sq}$. Στα υπόλοιπα δείγματα η R_{sh} αυξάνεται λόγω μείωσης της συγκέντρωσης ή/και της ευκινησίας ηλεκτρονίων του 2DEG. Η μείωση της συγκέντρωσης είναι αποτέλεσμα της απογύμνωσης από το επιφανειακό δυναμικό στα δείγματα μικρού πάχους AlN, ή λόγω της χαλάρωσης της ελαστικής παραμόρφωσης, στα δείγματα μεγάλου πάχους AlN. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε και μείωση της ευκινησίας του 2DEG λόγω της εισαγωγής κρυσταλλικών ατελειών, με αποτέλεσμα την δραματική αύξηση της R_{sh} για πάχη AlN άνω των 7 nm.



Εικόνα 3.1.10: Αντίσταση φύλλου όπως εξήχθη από μετρήσεις TLM, συναρτήσει του πάχους του AlN, σε ετεροδομές AlN/GaN HEMT.

Σε τρανζίστορ HEMT κατασκευασμένο από ετεροδομή AlN/GaN με πάχος AlN 4.5 nm και με βελτιωμένες συνθήκες ανάπτυξης του υλικού (AlN) επιτύχαμε μέγιστο ρεύμα 2 A/mm διαγωγιμότητα 425mS/mm για 2DEG με συγκέντρωση $N_s=3.6 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-2}$, ευκινησία 1300 ($\text{cm}^2 / \text{V sec}$) και αντίσταση φύλλου 92 Ohm/sq, όπως θα παρουσιάσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

¹ A. M. Dabiran, A. M. Wowchak, A. Osinsky, J. Xie, B. Hertog, B. Cui, D. C. Look, and P. P. Chow, Appl. Phys. Lett. **93**, 082111 (2008)

²J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, J. Cryst. Growth **27**, 118 (1974) **29**, 273 (1975), **32**, 265 (1976)

³ R. People and J. C. Bean, Appl. Phys. Lett. **47**, 322 (1985)

⁴ Alain Bourret, Christoph Adelman, Bruno Daudin, Jean-Luc Rouviere, Guy Feuillet, and Guido Mula, Physical review B, **63**, 245307 (2001)

⁵ G. P. Dimitrakopoulos et Al, phys. stat. sol. (a) **205**, No. 11, 2569–2572 (2008)

⁶I. P. Smorchkova et Al, Journal of Appl. Phys. **90**, N. 10, p. 5196 (2001)

⁷ Διδακτορική διατριβή Αδάμ Αδικημενάκη, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φυσικής (2009)

Κεφάλαιο 3.2: Επίδραση της επιφάνειας στην απόδοση των διατάξεων AlN/GaN HEMTs

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συγκέντρωση των φορέων του δισδιάστατου ηλεκτρονικού αερίου που σχηματίζεται, έχει άμεση εξάρτηση, ιδιαίτερα ευαίσθητη, από το δυναμικό της επιφάνειας. Με τον όρο δυναμικό της επιφάνειας, αναφερόμαστε στην ποσότητα $(E_c - E_F)_s/q$ που προκαλεί απογύμνωση του 2DEG, αναλόγως της τιμής του. Η τιμή του $E_c - E_F$ στην επιφάνεια, εξαρτάται από την ύπαρξη επιφανειακών καταστάσεων ή τον σχηματισμό φραγμού Schottky με εναπόθεση ενός μετάλλου. Ένα σημαντικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, αφορά την μελέτη διατάξεων HEMT AlN/GaN με διαφορετικά στρώματα επικάλυψης.

Έχοντας ήδη καταλήξει στο βέλτιστο πάχος για την ετεροδομή AlN/GaN, εξετάστηκε η συμπεριφορά των HEMT συναρτήσει του δυναμικού της επιφάνειας, συγκρίνοντας δομές AlN/GaN HEMT με διαφορετικά στρώματα επικάλυψης, νανομετρικού πάχους. Τα στρώματα αυτά αναπτύχθηκαν μέσα στο MBE και μεταβάλλουν το δυναμικό της επιφάνειας αφενός και αφετέρου να αποτρέψουν την οξείδωση του AlN διατηρώντας σταθερό το πάχος του και σταθεροποιώντας τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

Πίνακας 3.2.1: Αποτελέσματα μετρήσεων αγωγιμότητας και φαινομένου Hall για τις ετεροδομές AlN/GaN με διαφορετικά στρώματα επικάλυψης¹.

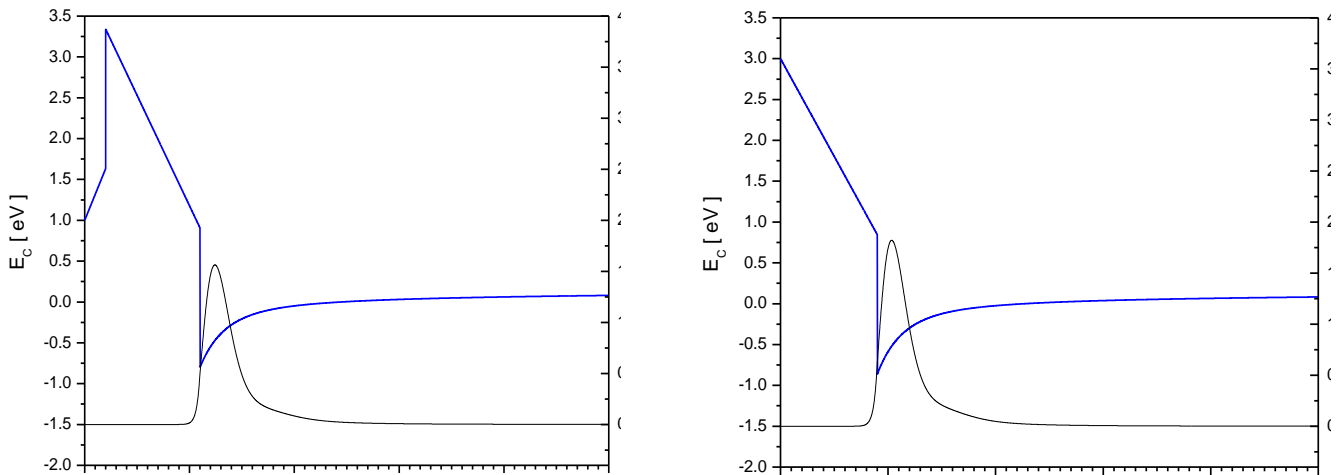
Cap layer	Nitridation (Reference)	0.5 nm GaN	1 nm GaN	2 nm GaN	0.5 nm Al	1 nm Al	2 nm Al
R_s (Ω/sq)	183	169	144	179	241	152	129
N_s (cm^{-2})	2.5×10^{13}	3.1×10^{13}	3.6×10^{13}	3.2×10^{13}	3.9×10^{13}	3.8×10^{13}	6.1×10^{13}
μ_H (cm^2/Vs)	1380	1170	1298	1077	664	1080	793

Προκειμένου να διερευνήσουμε, λοιπόν, την επίδραση της επιφάνειας στις ιδιότητες του 2DEG, αναπτύχθηκε μια σειρά από ετεροδομές AlN/GaN HEMT με

στρώματα επικάλυψης GaN πάχους 0.5 , 1 και 2nm, μια σειρά με στρώματα επικάλυψης Al με τα ίδια πάχη, καθώς και ένα δείγμα αναφοράς χωρίς καμία επικάλυψη. Τα αποτελέσματα για τις ηλεκτρικές ιδιότητες του 2DEG βάσει μετρήσεων αγωγιμότητας και φαινομένου Hall συνοψίζονται στον πίνακα 3.2.1¹.

Όλες οι δομές HEMT με κάποιο νανομετρικό στρώμα επικάλυψης παρουσίασαν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τη δομή χωρίς στρώμα επικάλυψης και ξεχωρίζουμε τον συνδυασμό των χαρακτηριστικών της περίπτωσης επικάλυψης με 1nm GaN. Βάσει των θεωρητικών υπολογισμών SCSP, υποθέτοντας $(E_c - E_F)_s = 1$ eV για μια δομή 1 nm GaN/4,5nm AlN/GaN , στην επαφή πύλης καναλιού εμφανίζεται ένα ενεργό φράγμα δυναμικού περίπου 3,4 eV από τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου λόγω της επαφής του GaN με το AlN (Εικ. 3.2.1 (α)), που μπορεί να περιορίζει το ρεύμα διαρροής της πύλης παρά την υψηλή τιμή συγκέντρωσης 2DEG. Η αντίστοιχη πυκνότητα 2DEG στο τριγωνικό κβαντικό πηγάδι είναι $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Για την επιταξιακή δομή 4,5nm AlN/GaN και υποθέτοντας $(E_c - E_F)_s = 3$ eV (ρεαλιστική περίπτωση), το κβαντικό πηγάδι γίνεται πιο βαθύ αυξάνοντας το αντίστοιχο 2DEG στο $3,3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (Εικ. 3.2.1 (β)). Αν και οι διαφορές δεν φαίνονται μεγάλες, το στρώμα επικάλυψης GaN σταθεροποιεί τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας αναστέλλοντας της οξείδωση του AlN που περιορίζει το πάχος του και εισάγει επιφανειακές καταστάσεις, δίνοντας υψηλές τιμές $(E_c - E_F)_s$. Συγκεκριμένα τα πειραματικά αποτελέσματα σε γυμνές δομές AlN/GaN, έδωσαν μικρότερο N_s που συγκρίνοντας με τη θεωρία μπορεί να αποδοθεί σε επιφανειακό δυναμικό ίσο με 4.0 eV.

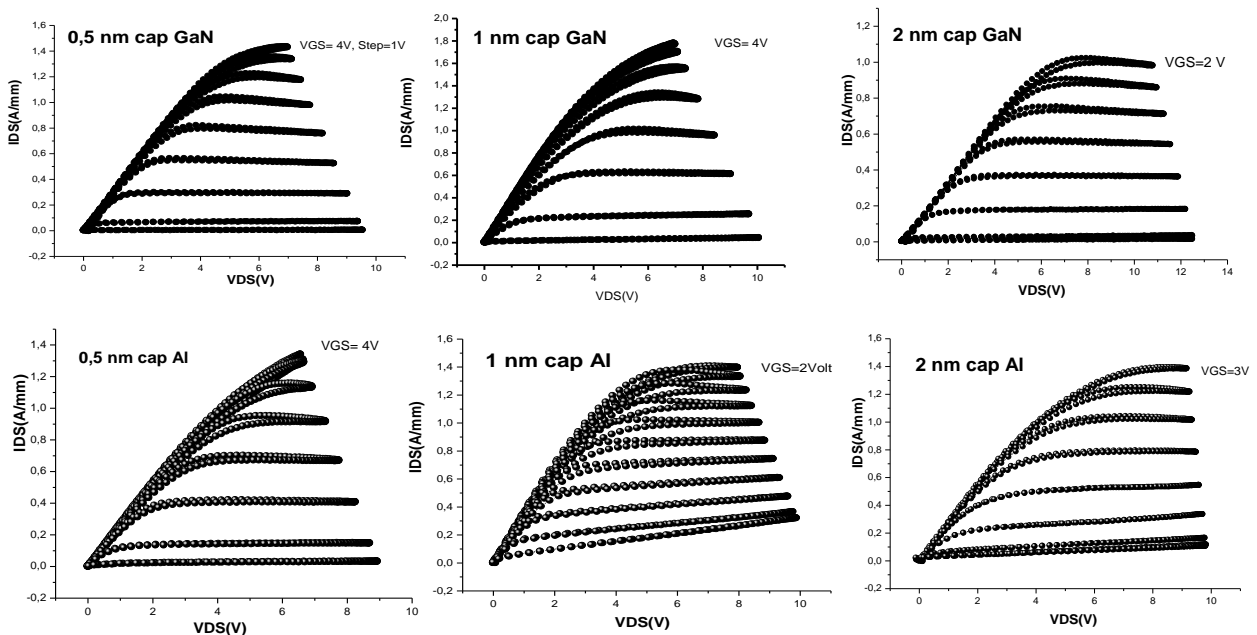
Από μετρήσεις αγωγιμότητας και φαινομένου Hall εξήχθησαν $R_s = 144 \text{ } \Omega/\text{sq}$, $N_s = 3,6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ και $\mu_H = 1298 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ για δομές 1 nm GaN/4,5nm AlN/GaN και $R_s = 183 \text{ } \Omega/\text{sq}$, $N_s = 2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ και $\mu_H = 1380 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ για τις δομές 4.5nm AlN/GaN που δεν είχαν στρώμα επικάλυψης.



Εικόνα 3.2.1: Γραφήματα της μεταβολής της E_c συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια, σε συνθήκες $\Theta.I.$, για ετεροδομές HEMT AlN/GaN με (α) στρώμα επικάλυψης 1nm GaN και (β) χωρίς στρώμα επικάλυψης.

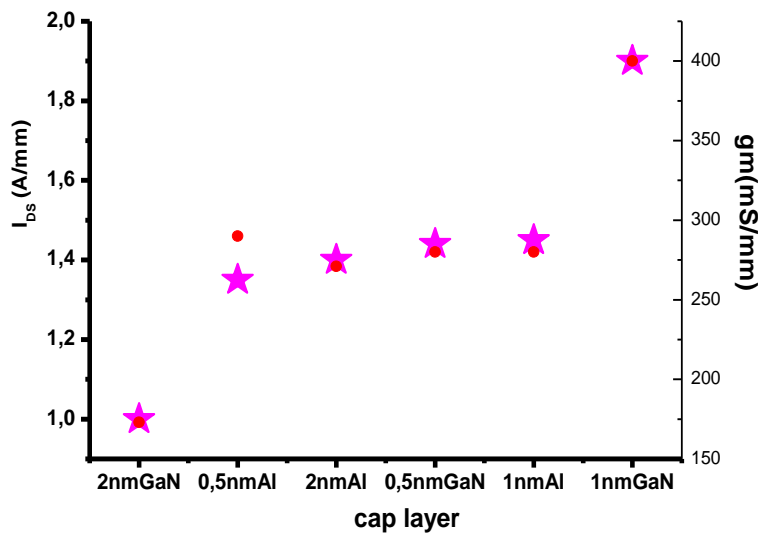
Απόδοση των HEMT σε μετρήσεις ρεύματος-τάσης

Οι χαρακτηριστικές I-V των τρανζίστορ HEMT που κατασκευάστηκαν σε όλα τα δείγματα, με μήκος και πλάτος πύλης 1μm και 50μm αντίστοιχα, μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τον curve tracer.



Εικόνα 3.2.2: Χαρακτηριστικές I-V τρανζίστορ HEMT από ετεροδομές 4.5 nm AlN/GaN, με διαφορετικά στρώματα επικάλυψης.

Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος καθώς και η μέγιστη διαγωγιμότητα για καθεμιά από τις παραπάνω δομές δίνονται στο συγκεντρωτικό γράφημα 3.2.3. Τα ρεύματα απαγωγού-πηγής I_{DS} , είναι ιδιαίτερα ψηλά, μεγαλύτερα από 1 A/mm σε συνθήκες ανοιχτού καναλιού ενώ η δομή 1nm cap GaN/4.5nm AlN/GaN επέδειξε πυκνότητα που πλησιάζει τα 2 A/mm. Αν και τα δείγματα με στρώματα επικάλυψης Al παρουσίασαν υψηλότερες πυκνότητες 2DEG, οι αντίστοιχες πυκνότητες ρεύματος καθώς και μέγιστες τιμές διαγωγιμότητας δεν είναι εξίσου αυξημένες. Το μέγιστο ρεύμα στα δείγματα αναφοράς ήταν 1-1,3 A/mm.

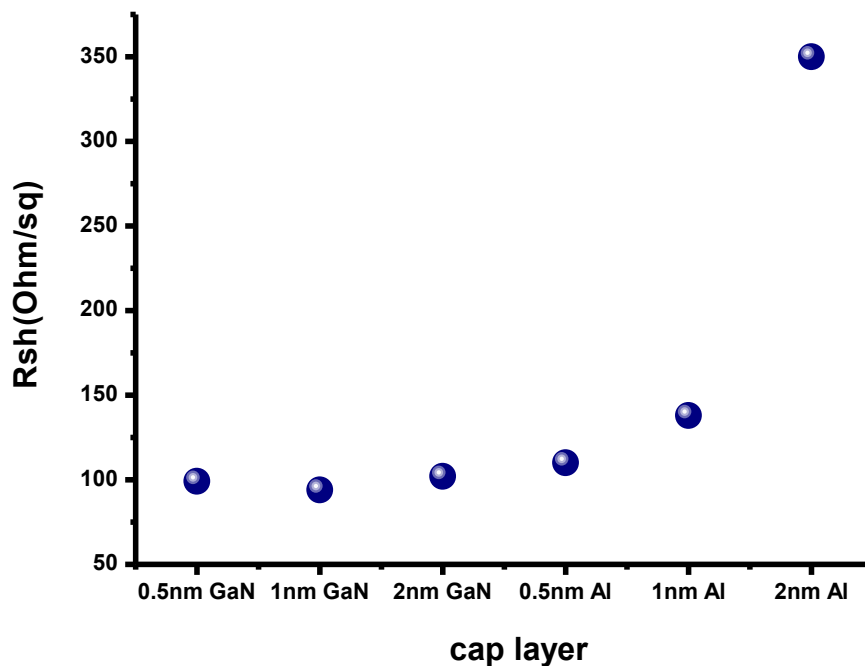


Εικόνα 3.2.3: Μέγιστο ρεύμα κόρου I_{DS} (αριστερά), και μέγιστη διαγωγιμότητα (δεξιά) συναρτήσει του πάχους των δύο διαφορετικών στρωμάτων επικάλυψης Al και GaN. Οι μετρήσεις έγιναν σε τάση $V_{GS}=+4V$ και $V_{DS}=8V$.

Σε κάποια δείγματα με επικάλυψη αλουμινίου, η πύλη δεν μπορούσε να απογυμνώσει το κανάλι. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην παρουσία στρώματος μετάλλου, που αποτελεί το μη οξειδωμένο Al (περιμένουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος του Al θα οξειδώνεται σχηματίζοντας Al_2O_3). Τα μέγιστα μετρούμενα ρεύματα σε $V_{GS}=+4V$ ήταν 1,35-1,45 A/mm, ενώ το ρεύμα διαρροής ήταν 0,1 A/mm στις καλύτερες περιπτώσεις. Πιο συστηματική δουλειά απαιτείται για να καταλάβουμε τα όρια βελτιστοποίησης των διατάξεων cap Al/4.5nm AlN/GaN HEMT.

Στο πλαίσιο των πειραμάτων της παρούσας διατριβής, συμπεραίνουμε ότι το 1nm cap GaN βελτιστοποιεί τη δομή AlN/GaN HEMT, οδηγώντας στην κατασκευή τρανζίστορ με ρεύμα $I_{DS} \sim 2A/mm$, για $L_g=1\mu m$ και εξαιρετικά DC χαρακτηριστικά. Το αποτέλεσμα αυτό, ενισχύουν και οι μετρήσεις ρεύματος-

τάσης με τη μέθοδο γραμμών μεταφοράς (TLM), όπου η εξαγόμενη αντίσταση φύλλου είναι 94 Ohm/sq. Οι αντιστάσεις φύλλου είναι χαμηλότερες από αυτές που εξήχθησαν με μετρήσεις αγωγιμότητας σε δείγματα 0,5x0.5 cm με 4 επαφές In και όπως και στο κεφάλαιο 3.1, θα αποδώσουμε τη διαφορά αυτή στις μη βελτιστοποιημένες επαφές ινδίου και σε ενδεχόμενες αλλαγές του επιφανειακού δυναμικού στα διάφορα στάδια της λιθογραφικής διαδικασίας. Η αντίσταση των ωμικών επαφών που εξήχθη από τη μέθοδο TLM, είναι $\rho_c = 0,93 \text{ Ohm/mm}$.

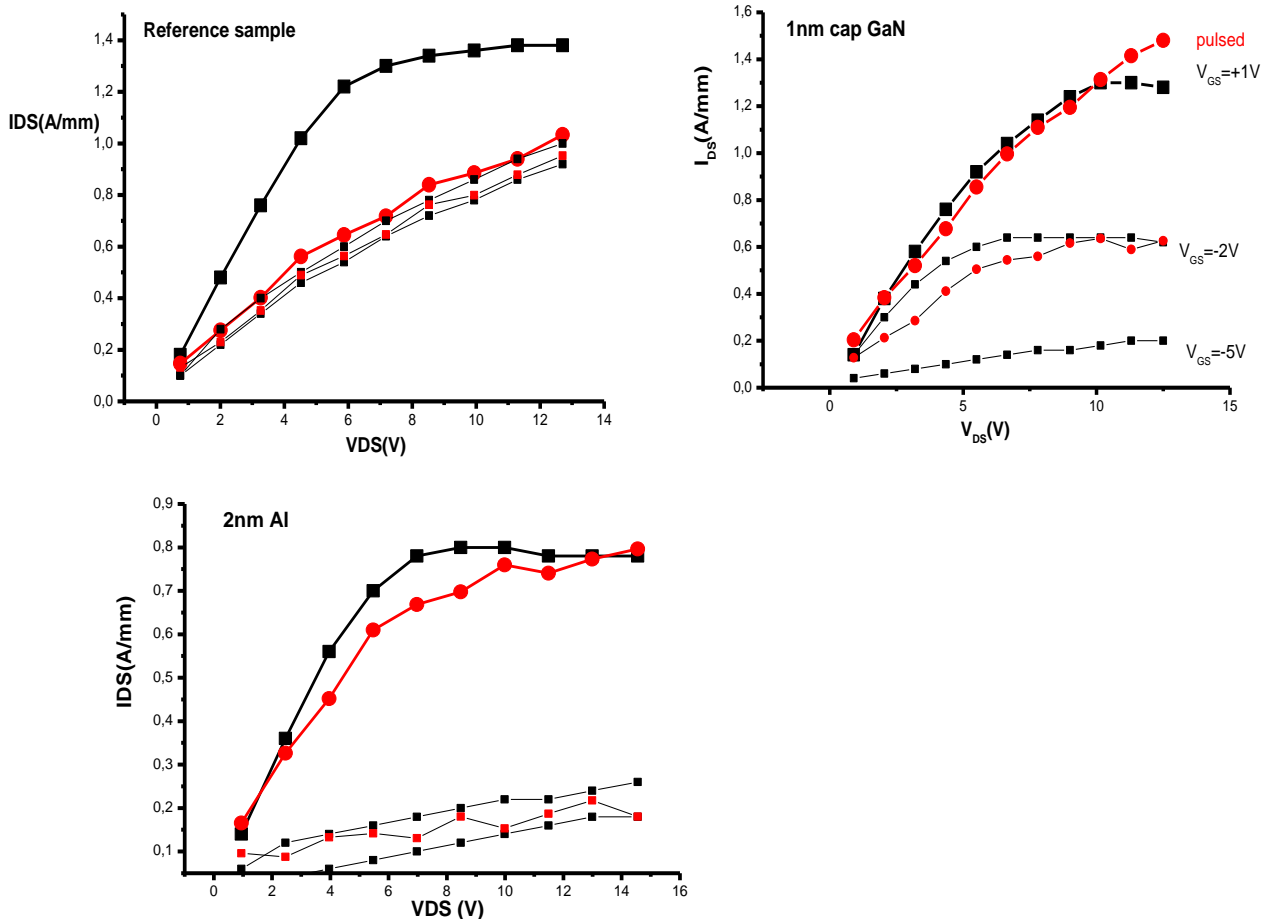


Εικόνα 3.2.5 : Αντίσταση φύλλου συναρτήσει των δυο διαφορετικών στρωμάτων επικάλυψης Al ή GaN, όπως εξήχθη από μετρήσεις με την μέθοδο TLM.

Συμπεριφορά των HEMT σε παλμικές μετρήσεις

Όπως συζητήσαμε στο θεωρητικό μέρος, η απόδοση των HEMT από ημιαγωγούς μεγάλου ενεργειακού χάσματος, υποβαθμίζεται από φορτισμένες καταστάσεις, τις οποίες καλούμε παγίδες. Στα πλαίσια της μελέτης της επίδρασης της επιφάνειας και των διαφορετικών επικαλύψεων στην λειτουργία των HEMT, είναι ουσιαστικό να προσδιορίσουμε σε τι βαθμό τα διάφορα στρώματα επικάλυψης επηρεάζουν τη φόρτιση των παγίδων της επιφάνειας. Μελετήσαμε, λοιπόν, στο Technical University of Vienna στην Αυστρία, με

επιβλέποντα τον Dr. Jan Kuzmik, το πως ανταποκρίνονται τα παροδικά χαρακτηριστικά του ρεύματος απαγωγού, όλων των δειγμάτων, στις τάσεις πύλης V_{GS} και απαγωγού V_{DS} . Το μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας HP parameter analyser Agilent 8114A με πλάτος παλμού 250ns. Η παλμική τάση στην πύλη, ξεκινούσε από τη στάθμη $V_{GS} = -6V$, δηλαδή το τρανζίστορ βρισκόταν σε κατάσταση off κατά την έναρξη της μέτρησης, ενώ η τελική στάθμη των παλμών τάσης αντιστοιχούσε στην επιθυμητή τιμή για την παραγωγή καθεμίας από τις καμπύλες $I_{DS}-V_{DS}$ ($V_{GS} = +1, -2, \text{ και } -5V$). Η τάση σάρωσης του απαγωγού ήταν 13V, ενώ το αντίστοιχο ρεύμα υπολογίστηκε στα 100 και στα 200ns.



Εικόνα 3.2.6: Παλμικά χαρακτηριστικά $I-V$ (κόκκινα) εν συγκρίσει με τα DC (μαύρα), σε τρανζίστορ HEMT από ετεροδομές 4,5 nm AlN/GaN με: (α) χωρίς κανένα στρώμα επικάλυψης (δείγμα αναφοράς) (β) με επικάλυψη 1nm GaN και (γ) με επικάλυψη 2nm Al.

Στο δείγμα αναφοράς (γυμνή επιφάνεια AlN), παρατηρούμε μεγάλη ασυμφωνία μεταξύ των παλμικών και DC χαρακτηριστικών I-V, που αποτελεί την πειραματική απόδειξη της ηλεκτρικής δράσης των επιφανειακών παγίδων στα AlN/GaN HEMTs. Επιπλέον, εφόσον αυτή η απόκλιση της τάξης του 90% μειώνεται με την παρουσία κάποιου στρώματος ανεπτυγμένου πάνω από το AlN, κρίνεται αναγκαία η επικάλυψη της επιφάνειας στις ετεροδομές αυτές. Τα δυο ειδών μετρούμενα ρεύματα I_{DS} στο δείγμα με 1nm cap GaN σχεδόν συμπίπτουν κι επομένως μπορούμε να πούμε ότι περιορίστηκε η παγίδευση των ηλεκτρονίων λόγω του νιτριδίου του γαλλίου στην επιφάνεια. Τα υπόλοιπα δείγματα αυτής της κατηγορίας παρουσίασαν μια ενδιάμεση κατάσταση που πιο πολύ προσεγγίζει την απόκλιση, παρά τη σύγκλιση των DC και παλμικών χαρακτηριστικών I-V. Παρόμοια συμπεριφορά ανέδειξαν και οι δομές με επικάλυψη αλουμινίου, με εξαίρεση του δείγματος των 2nm Al. Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφεται το επίπεδο πτώσης ρεύματος των HEMT, δηλαδή οι σχετικές διαφορές $(1-I_{pulsed}/I_{DC}) \times 100\%$, όπως υπολογίστηκαν για κάθε στρώμα επικάλυψης. Η σύγκριση έγινε για τις τιμές ρευμάτων στις τάσεις $V_{DS}=10V$ και $V_{GS}=+1V$.

Πίνακας 3.2.2: Σχετική διαφορά των τιμών ρεύματος I_{DS} από παλμικές και dc μετρήσεις $(1-I_{pulsed}/I_{DC}) \times 100\%$, για διαφορετικά πάχη στρωμάτων επικάλυψης Al ή GaN.

Cap Layer	Current collapse
0,5 nm GaN	26%
1 nm GaN	3.3%
2 nm GaN	24%
0.5 nm Al	65%
1 nm Al	29%
2 nm Al	11%
Reference	95%

Από τη στιγμή που και οι παλμικές μετρήσεις αυτού του τύπου επέδειξαν θεαματικά καλύτερη συμπεριφορά για τη δομή 1nm GaN/ 4.5 nmAlN/ GaN επιλέξαμε το συνδυασμό αυτό για περαιτέρω διερεύνηση στη συνέχεια της μελέτης των τρανζίστορ HEMT που βασίζονται στην ετεροδομή AlN/GaN.

¹ Διδακτορική διατριβή Αδάμ Αδικημενάκη, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φυσικής (2009)

Κεφάλαιο 4.1: Χαρακτηρισμός της λειτουργίας των διατάξεων

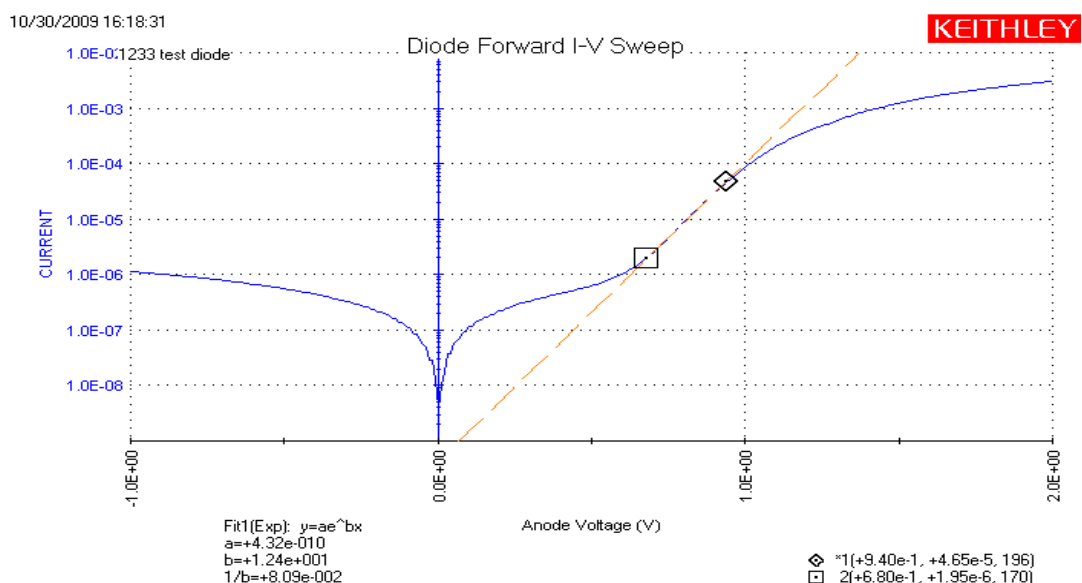
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε την ηλεκτρική συμπεριφορά των βελτιστοποιημένων πλέον ετεροδομών AlN/GaN HEMT. Το πάχος του στρώματος φραγμού AlN στα δείγματα που κατασκευάστηκαν είναι σταθερό και ίσο με 4.5 nm. Η επιφάνεια είναι επικαλυμμένη με 1 nm στρώματος GaN, ενώ σε κάποια δείγματα έγινε νιτρίδωση (έκθεση σε ροή N), στο τέλος της ανάπτυξης του AlN προκειμένου να προβούμε στις ανάλογες συγκρίσεις για μια ολοκληρωμένη μελέτη της ετεροδομής. Έχουν χρησιμοποιηθεί δυο ειδών υποστρώματα (SiC και Al₂O₃).

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις που θα περιγράψουμε εδώ, αφορούν την εικόνα της ανορθωτικής συμπεριφοράς των διόδων Schottky, τη χωρική κατανομή της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων σαν συνάρτηση της απόστασης από την επιφάνεια, τις I-V χαρακτηριστικές των τρανζίστορ καθώς και την εξαγωγή όλων των παραμέτρων τους. Στη συνέχεια μετρήθηκε η διαρροή τόσο από τον απαγωγό (διαρροή υποστρώματος) όσο και από την πύλη και η τάση κατάρρευσης του τρανζίστορ. Για τις μετρήσεις ρεύματος-τάσης χρησιμοποιήθηκε ένας Keithley Parameter Analyzer 4200 SCS ενώ οι μετρήσεις χωρητικότητας τάσης έγιναν με το LCR Meter 4284 A. Παρουσιάζουμε τα καλύτερα αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για δομές AlN/GaN με και χωρίς στρώμα επικάλυψης GaN και σχολιάζουμε.

Μετρήσεις ρεύματος τάσης σε ανορθωτικές επαφές Schottky

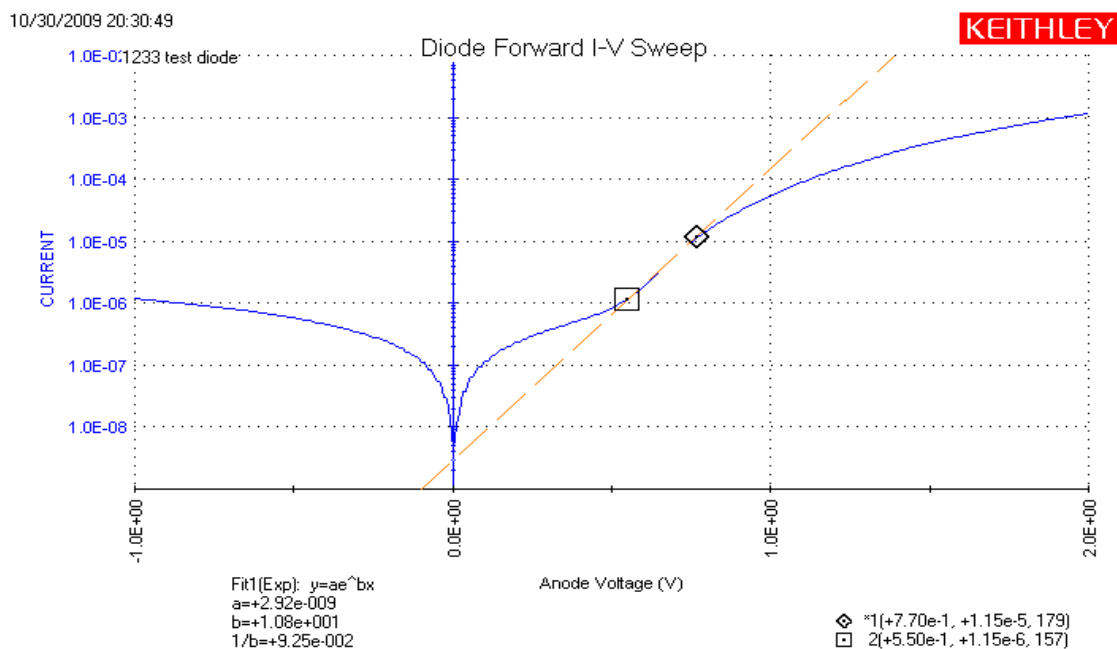
Ξεκινώντας τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρεύματος τάσης σε διόδους Schottky για τη μελέτη της ανορθωτικής συμπεριφοράς τους και την εξαγωγή των χαρακτηριστικών τους παραμέτρων.

Το γράφημα της Εικ. 4.1.1 είναι αντιπροσωπευτικό μιας τέτοιας μέτρησης για δομές AlN/GaN HEMT, με στρώμα επικάλυψης 1nm GaN. Η διάδος άγει μετά τα 0,15V, έχει παράγοντα ιδανικότητας $n=1.3$, ενώ το εσωτερικό δυναμικό της επαφής αντιστοιχεί σε $V_{bi}=0,6$ eV. Σε τάση $V=+2V$ το ρεύμα ορθής πόλωσης έχει ξεπεράσει το 1 mA ενώ το ανάστροφο ρεύμα διαρροής της διόδου είναι αρκετά μικρό, 1 μA , σε $V=-1V$.



Εικόνα 4.1.1: Ρεύμα (A) σαν συνάρτηση της τάσης (V) σε λογαριθμικό άξονα, για δίοδο Shottky διαμέτρου 100μm, δομής 1 nm GaN/4.5 nm AlN/GaN/Al₂O₃. Κάτω αριστερά αναγράφονται οι τιμές της κλίσης (b) σε V⁻¹ και της διατομής (a) σε A.

Εξίσου καλή ανορθωτική συμπεριφορά επέδειξαν και οι δίοδοι των δειγμάτων αναφοράς με $V_{bi}=0,53$ eV και παράγοντα ιδανικότητας $n=1.3$, όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα.

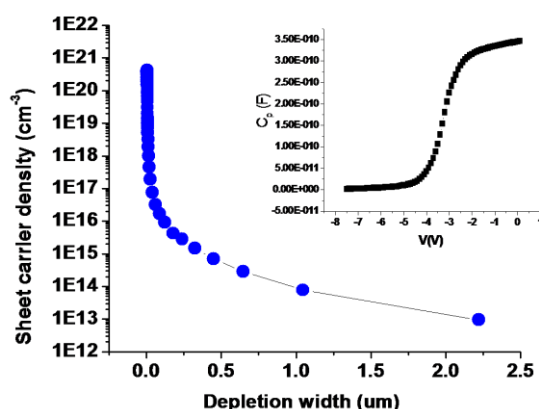


Εικόνα 4.1.2: Ρεύμα (σε A) σαν συνάρτηση της τάσης (σε V), σε λογαριθμικό άξονα, για δίοδο Shottky διαμέτρου 100μm, δομής 4.5 nm AlN/GaN/Al₂O₃.

Μετρήσεις χωρητικότητας- τάσης

Οι επιταξιακές δομές 1 nm GaN / 4.5nm AlN /GaN παρουσίασαν μεγάλη συγκέντρωση φορέων 2DEG, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.2, ίση με $N_s=3,6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ στους 300K και ευκινησία περίπου $1300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, βάσει μετρήσεων φαινομένου Hall.

Η χωρική κατανομή της συγκέντρωσης των φορέων συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια (βάθους), εξάγεται από μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης στις διόδους Schottky. Η καμπύλη C-V, δίνεται στο ένθετο του γραφήματος της Εικ.4.1.3. Η πυκνότητα 2DEG ισούται με $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ και αποδίδουμε την διαφορά από τις μετρήσεις φαινομένου Hall, στις διαφορετικές επαφές που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε μέτρηση. Ο συνδυασμός υψηλής ευκινησίας και συγκέντρωσης είναι πρόσφορος για την ανάπτυξη τρανζίστορ HEMT εξαιρετικής απόδοσης με ιδιαίτερα υψηλά ρεύματα.

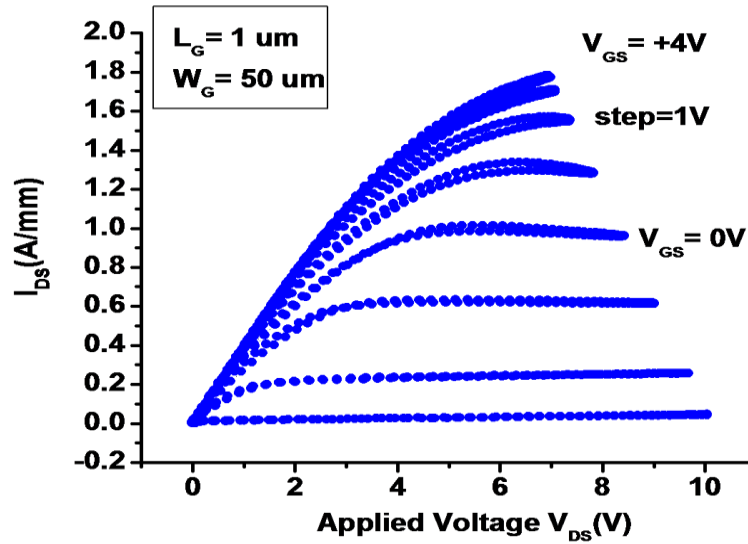


Εικόνα 4.1.3: Χωρική κατανομή συγκέντρωσης ηλεκτρονίων στην ετεροδομή 1 nm GaN/AlN/GaN, όπως εξήχθη από μετρήσεις χωρητικότητας -τάσης σε δίοδο Schottky διαμέτρου 100μm (ένθετο).

I-V χαρακτηριστικές των τρανζίστορ HEMT AlN/GaN

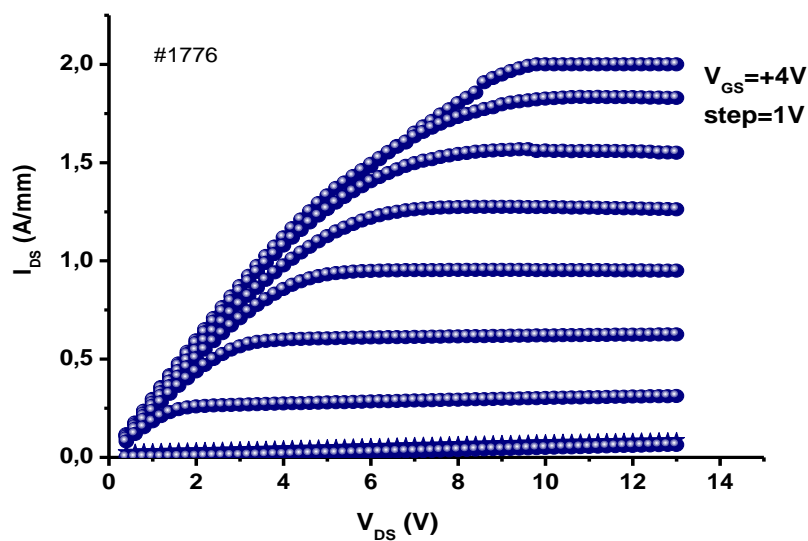
Οι οικογένειες των I-V χαρακτηριστικών, για τα τρανζίστορ των δομών 1 nm GaN/AlN/GaN, παρουσιάζονται στα ακόλουθα γραφήματα. Η τάση πύλης-πηγής κυμαίνεται από $V_{GS} = +4V$ μέχρι $-4V$ με βήμα 1V. Οι μέγιστες μετρούμενες

πυκνότητες ρεύματος αντιστοιχούν σε 1,9A/mm για διαστάσεις πύλης $L_g=1\mu\text{m}$ $W_g=50\mu\text{m}$.



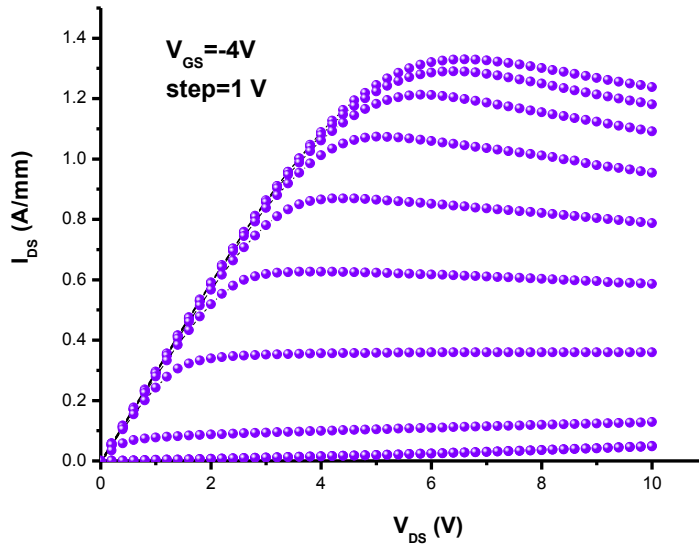
Εικόνα 4.1.4: *I-V* χαρακτηριστικές τρανζίστορ HEMT από επιταξιακή δομή 1nm GaN /4.5nm AlN/500 nm GaN (#G1292).

Σε κάποια τρανζίστορ μετρήθηκε ρεύμα μεγαλύτερο από 2 A/mm, αλλά τα τρανζίστορ αυτά παρουσίασαν και μεγαλύτερη διαρροή σε συνθήκες κλειστού καναλιού όπως αναλύουμε παρακάτω.



Εικόνα 4.1.6: *I-V* χαρακτηριστικές τρανζίστορ HEMT από επιταξιακή δομή 1nm GaN /4.5nm AlN/500 nm GaN (#G1776).

Τα τρανζίστορ HEMT που κατασκευάστηκαν από δείγματα αναφοράς, επιδεικνύουν μέγιστο ρεύμα 70mA σε $V_{GS}=+4V$, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος ίση με 1.4 A/mm.



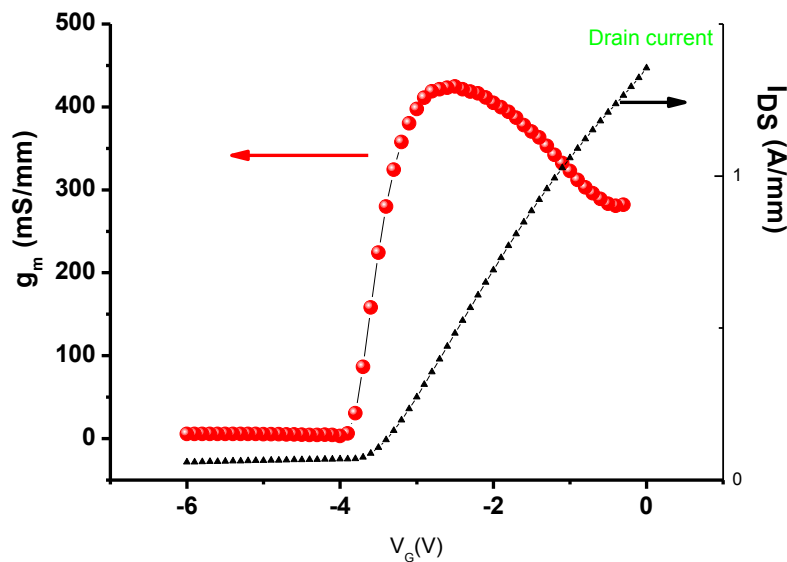
Εικόνα 4.1.7: I-V χαρακτηριστικές τρανζίστορ HEMT από επιταξιακή δομή 4.5nm AlN/500 nm GaN/Al₂O₃ HEMT.

Η σμίκρυνση του μήκους πύλης των τρανζίστορ, που κατασκευάζονται στο εργαστήριο, σε τιμές μικρότερες από το 1 μm , όπως τα 0.25 μm , θα μπορούσε να δώσει πυκνότητες ρεύματος που θα έφταναν σε πολύ υψηλότερες τιμές, κάτι το οποίο επαληθεύθηκε από συνεργάτες μας στο University of Ulm. Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία έως σήμερα είναι 2,3 A/mm, από τους Jena^{1 2} και Zimmerman^{3 4}, για μήκος πύλης $L_g = 250 \text{ nm}$ ενώ στην ίδια αναφορά παρουσίασαν I-V χαρακτηριστικές που πλησίαζαν τα 3A/mm, για διατάξεις με $L_g = 150 \text{ nm}$. Για $L_g = 1,25 \mu\text{m}$ έχει αναφερθεί μέγιστη πυκνότητα ρεύματος 1,3 A/mm⁵. Τα 2 A/mm, λοιπόν, θεωρούνται ένα νέο ρεκόρ για τις διατάξεις AlN/GaN HEMT με μήκος πύλης $L_g = 1 \mu\text{m}$.

Διαγωγιμότητα των AlN/GaN HEMT

Τα τρανζίστορ HEMT από δομή 1nm GaN/4.5 nm AlN/GaN/Al₂O₃, επιδεικνύουν διαγωγιμότητα ίση με 425 mS/mm, που υποδηλώνει εξαιρετική αποδοτικότητα έλεγχου του ρεύματος απαγωγού από την τάση της πύλης. Οι

μετρήσεις ρεύματος κόρου I_{DSsat} και g_m , συναρτήσει της τάσης V_{GS} για $V_{DS}=9V$, δίνονται στην Εικ.4.1.10.

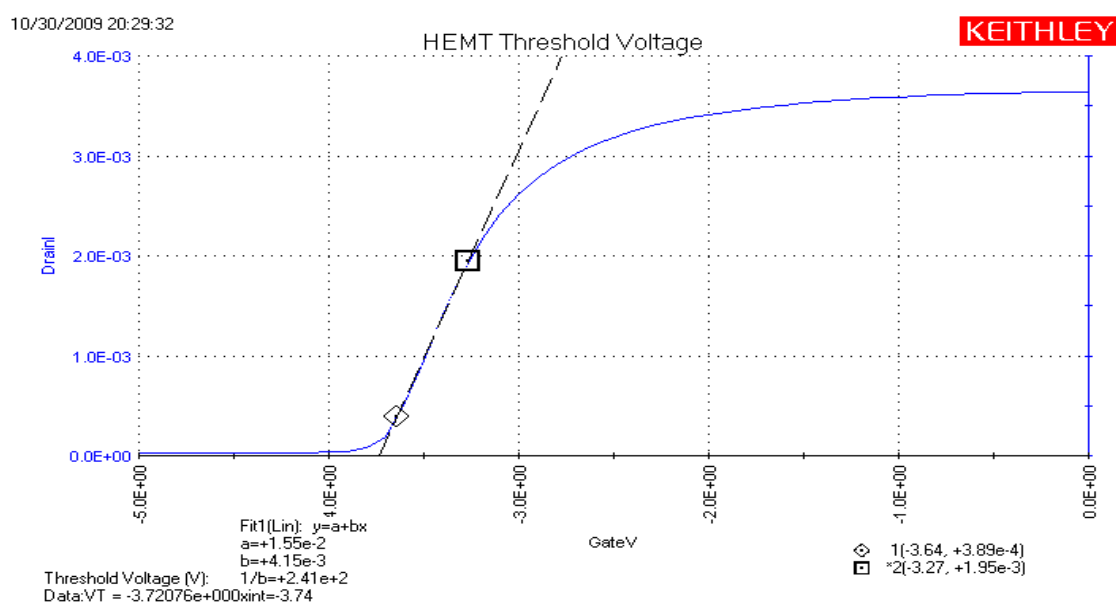


Εικόνα 4.1.10: Διαγωγιμότητα συναρτήσει της τάσης V_{GS} (αριστερά) και ρεύμα I_{DS} συναρτήσει της V_{GS} (δεξιά), μετρημένα στην περιοχή κόρου, με σταθερή $V_{DS}=9V$, για τρανζίστορ από επιταξιακή δομή $1nm\ GaN/4.5\ nm\ AlN/GaN/Al_2O_3$.

Να αναφέρουμε στο σημείο αυτό, ότι η διαγωγιμότητα δεν είναι συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος, αλλά έχει να κάνει με την απόσταση μεταξύ της πύλης και του καναλιού. Το κανάλι στα AlN/GaN HEMT είναι ρηχό, βρίσκεται μόλις 5 nm περίπου κάτω από την μεταλλουργική επαφή της πύλης. Για το λόγο αυτό αναμένουμε υψηλή διαγωγιμότητα στις δομές, όπως αποτελούν οι τιμές πάνω από 400mS/mm, που μετρήσαμε για τρανζίστορ με $L_g=1\mu m$. Η υψηλότερη τιμή διαγωγιμότητας που έχει αναφερθεί, είναι 480 mS/mm^{1,3}, αλλά μετρήθηκε σε τρανζίστορ με υποτετραπλάσιο μήκος πύλης $L_g= 250nm$, συγκριτικά με την παρούσα εργασία.

Τάση κατωφλίου των AlN/GaN HEMT

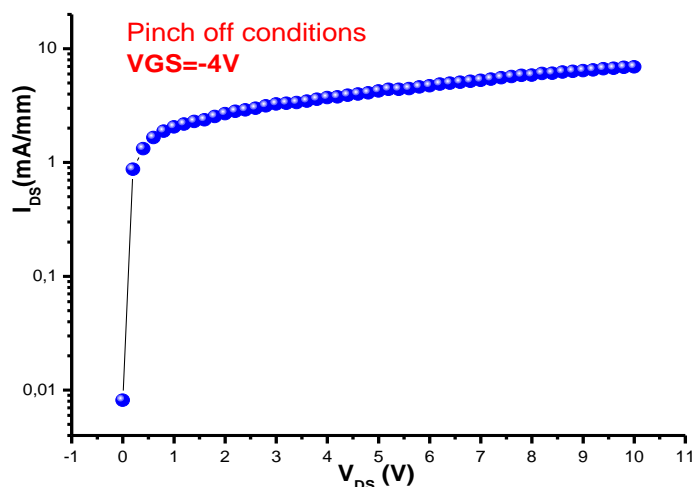
Η τάση κατωφλίου (V_T) των τρανζίστορ AlN/GaN HEMT, που κατασκευάστηκαν από δομές με 4,5 nm AlN, αντιστοιχεί σε -3,7V, με απόκλιση $\pm 0,2V$ από δείγμα σε δείγμα. Οι μετρήσεις της V_T , έγιναν για σταθερή V_{DS} στα 0.3V, προκειμένου να εξάγουμε το I_{DS} , συναρτήσει της V_{GS} στη γραμμική περιοχή, όπου τα δυο μεγέθη είναι ανάλογα. Από τη γραμμική τους σχέση υπολογίζουμε την τάση πέρα από την οποία το τρανζίστορ κλείνει και το ρεύμα απαγωγού σχεδόν μηδενίζεται, όπως φαίνεται στην Εικ.4.1.8.



Εικόνα 4.1.8: Τάση κατωφλίου του HEMT

Ρεύμα διαρροής απαγωγού

Όταν σε συνθήκες κλειστού καναλιού το ρεύμα δεν είναι μηδενικό, υπάρχει διαρροή διαμέσου του υποστρώματος ή/και από την πύλη. Ως ρεύμα διαρροής απαγωγού ορίζουμε το μετρήσιμο I_{DS} στην τάση κατωφλίου, στο οποίο αθροίζονται τα δύο παραπάνω ρεύματα. Στο γράφημα της Εικ.4.1.9 δίνεται το I_{DS} σαν συνάρτηση της τάσης V_{DS} , σε συνθήκες κλειστού καναλιού, δηλαδή για $V_{GS}=-4V$. Στην τάση αυτή μετρήθηκε ρεύμα που πλησιάζει τα 10mA/mm στα καλύτερα μας δείγματα.



Εικόνα 4.1.9: Ρεύμα διαρροής απαγωγού-πηγής (I_{DS}) του HEMT, συναρτήσεως της τάσης V_{DS} , σε συνθήκες κλειστού καναλιού.

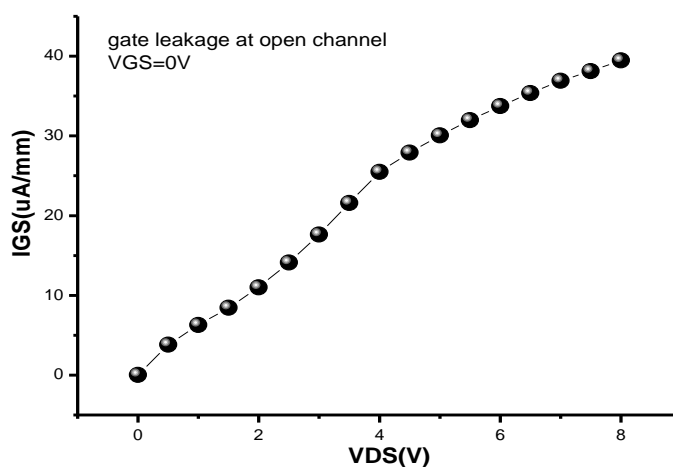
Σε δείγματα τρανζίστορ HEMT όπου μετρήθηκε πυκνότητα ρεύματος μεγαλύτερη από 2A/mm, πρόεκυψαν και μεγαλύτερες τιμές ρεύματος διαρροής απαγωγού που πλησιάζουν τα 40mA/mm. Η διαρροή από το υπόστρωμα οφείλεται στην ύπαρξη ελευθέρων ηλεκτρονίων στο στρώμα προσαρμογής GaN κάτω από το κανάλι, από ακούσιες προσμίξεις δοτών (ή κρυσταλλικές ατέλειες με χαρακτήρα δότη) που εισήλθαν κατά την επιταξιακή ανάπτυξη στο στρώμα GaN. Το ανεπτυγμένο με MBE υπόστρωμα GaN, πρέπει να έχει συγκέντρωση φορέων 10^{13}cm^{-3} για να παρουσιάζει επαρκή αντίσταση (να λειτουργεί σαν μονωτής). Όμως διαπιστώσαμε ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση, της τάξης 10^{16}cm^{-3} , με αποτέλεσμα να προκαλεί το ρεύμα διαρροής που δεν μπορεί να αποκόψει η πύλη. Σε πρόσφατη μελέτη για την αντιμετώπιση της διαρροής μέσα από το υπόστρωμα GaN, μετρήθηκε ρεύμα διαρροής μικρότερο από 100μΑ δηλαδή 2mA/mm, αλλά τα τρανζίστορ δεν παρουσίασαν εξίσου καλά αποτελέσματα στις υπόλοιπες παραμέτρους (μέγιστο I_{DS} , g_m κτλ). Η εξήγηση σχετίζεται με την εισαγωγή κρυσταλλικών ατελειών με χαρακτήρα βαθειού αποδέκτη, που ναι μεν αντισταθμίζουν τους ακούσιους δέκτες και αυξάνουν την αντίσταση του υποστρώματος GaN/ Al_2O_3 αλλά ταυτόχρονα αφαιρούν ένα μέρος από τα ηλεκτρόνια του 2DEG.

Αν και είναι προτιμητέο τα εξαγόμενα ρεύματα διαρροής να είναι της τάξης των μΑ όπου θεωρούνται σχεδόν μηδενικά, ρεύμα διαρροής της τάξης του 1mA

είναι αναμενόμενο στα πλαίσια διατάξεων HEMT με υπόστρωμα GaN και θεωρείται ότι το κανάλι είναι κλειστό.

Ρεύμα διαρροής πύλης

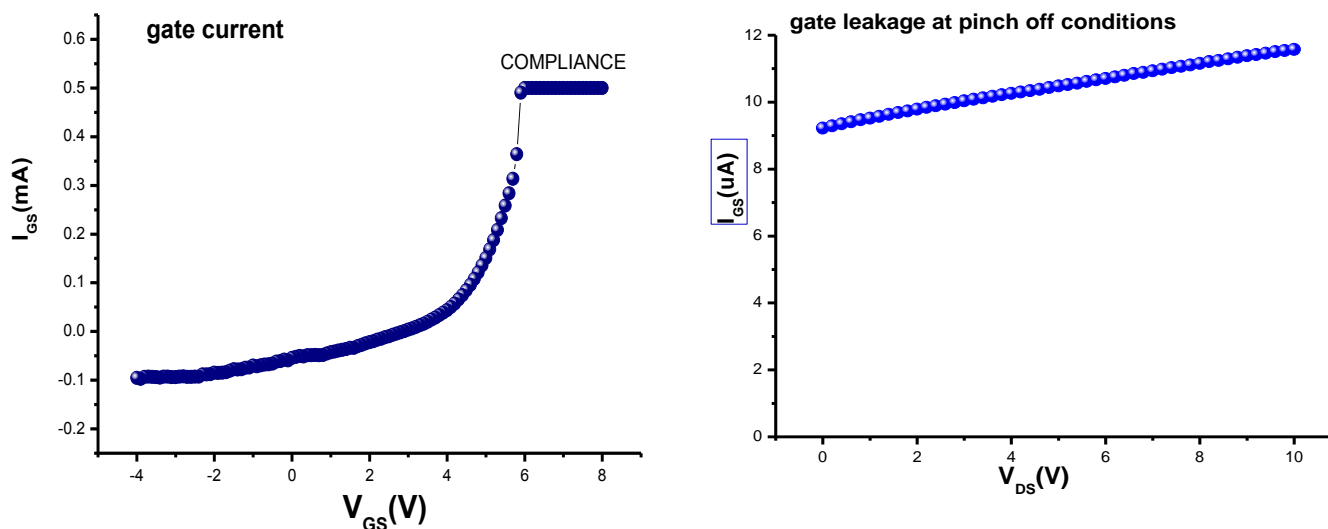
Όταν μετράμε το ρεύμα απαγωγού-πηγής από την μεριά του απαγωγού και όχι από την μεριά της πηγής (έχει να κάνει με το μηχάνημα), συμπεριλαμβάνουμε και το ρεύμα της πύλης. Όταν αυτό είναι πολύ υψηλό (πχ αν έχουμε διαρροή από την πύλη), τότε θα έχουμε και λανθασμένη εικόνα για συνολικό ρεύμα I_{DS} . Είναι απαραίτητο, λοιπόν, σε όλες τις μετρήσεις να μετράται παράλληλα και το ρεύμα I_{GS} . Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται το ρεύμα I_{GS} σε συνθήκες ανοιχτού καναλιού, σε $V_{GS}=0V$ για τρανζίστορ με $L_g=1\mu m$, δομών $1nm\ GaN/4.5\ nm\ AlN/0.5\ \mu m\ GaN$. Όπως παρατηρούμε το ρεύμα της πύλης δεν ξεπερνά τα $40\ \mu A/mm$.



Εικόνα 4.1.11 : Ρεύμα I_{GS} συναρτήσει της τάσης V_{DS} , σε συνθήκες ανοιχτού καναλιού ($V_{GS}=0V$) για τρανζίστορ HEMT δομής $1nm\ GaN/4.5\ nm\ AlN/GaN/Al_2O_3$.

Στη συνέχεια το ρεύμα διαρροής της πύλης I_{GS} μετρήθηκε και συναρτήσε της V_{GS} για σταθερή $V_{DS}=9V$ στην περιοχή κόρου (Εικ 4.1.12(α)), όπως επίσης και συναρτήσε της V_{DS} σε συνθήκη κλειστού καναλιού ($V_{GS}=-4V$) (Εικ 4.1.12(b)). Ο προσδιορισμός του ρεύματος διαρροής της πύλης μπορεί τώρα να βοηθήσει στην κατανόηση της φύσης του ρεύματος διαρροής απαγωγού, που αναλύθηκε προηγουμένως.

Κατά τη λειτουργία του τρανζίστορ μέχρι την $V_{GS}=+4V$, παρατηρούμε $I_{GSmax}=0,04\text{ mA}$ δηλαδή $0,4\text{mA/mm}$, όπου βεβαίως στη μετατροπή συμπεριλαμβάνουμε όλη τη πύλη ($2*50\mu\text{m}$). Δεδομένου ότι το ρεύμα I_{GS} , δεν ξεπερνάει δυο δεκάδες μA (Εικ. 4.1.12 β) σε όλα τα δείγματα, δηλαδή τα $200\mu\text{A/mm}$, σε συνθήκες κλειστού καναλιού, συμπεραίνουμε ότι η διαρροή οφείλεται στο υπόστρωμα και όχι σε κατασκευαστικά προβλήματα των επαφών Schottky.

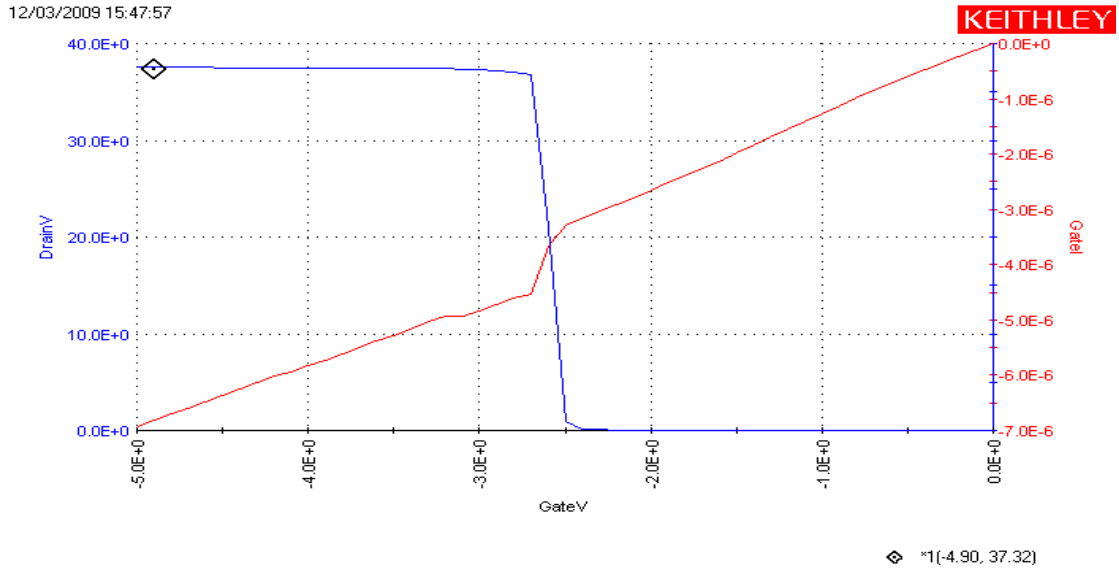


Εικόνα 4.1.12: (α) Ρεύμα I_{GS} συναρτήσει της τάσης V_{GS} σε συνθήκες κόρου ($V_{DS}=9$) και (β) ρεύμα I_{GS} συναρτήσει της V_{DS} σε συνθήκες κλειστού καναλιού ($V_{GS}=-4V$).

Τάση κατάρρευσης σε συνθήκη κλειστού καναλιού (Off-state)

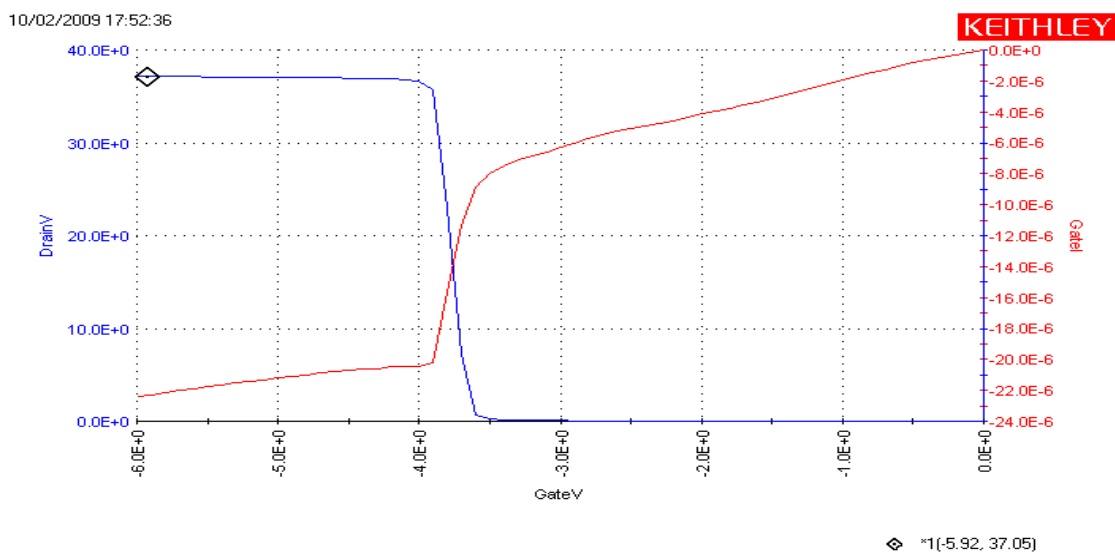
Η τάση κατάρρευσης των τρανζίστορ (V_{BR}) μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μη καταστροφική τεχνική ένεσης ρεύματος απαγωγού (drain current injection)⁶, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο των πειραματικών τεχνικών. Ένα άλλο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι αποφεύγουμε τις θερμικές απώλειες, καθώς εξασφαλίζει τον απόλυτο έλεγχο του ρεύματος. Το ρεύμα απαγωγού είναι σταθερό, η V_{GS} μεταβάλλεται από $0V$ έως $-6V$ και μετράται η τάση V_{DS} . Θέτοντας το ρεύμα ίσο με $I_{DS}=50\text{ }\mu\text{A}$ δηλαδή 1 mA/mm , προκύπτει τάση κατάρρευσης ίση με $37,3V$ όπως φαίνεται στην Εικ. 4.1.13. Στον άξονα που βρίσκεται στα δεξιά, αναγράφεται το ρεύμα της πύλης κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Όπως εξήχθη και από τις μετρήσεις που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη ενότητα, το ρεύμα από την πύλη δεν ξεπερνά δυο δεκάδες μA ,

επιβεβαιώνοντας ότι το ρεύμα διαρροής σε συνθήκες κλειστού καναλιού, διέρχεται είναι διαμέσου του υποστρώματος.



Εικόνα 4.1.13: Μέτρηση προσδιορισμού της τάσης κατάρρευσης σε τρανζίστορ HEMT δομής 1nm GaN/4.5 nm AlN/ 500 nm GaN /Al₂O₃, με $L_g=1 \mu\text{m}$ και $W_g=50 \mu\text{m}$ ($I_{DS}=1\text{mA}/\text{mm}$ και απόσταση G-D, 2 μm . Η τάση κατάρρευσης είναι $V_{BD}=37.3\text{V}$

Σε δείγματα ίδιας επιταξιακής δομής, όπου όμως το ρεύμα διαρροής μέσα από το υπόστρωμα ήταν μεγαλύτερη, χρειάστηκε να θέσουμε υψηλότερη τιμή ρεύματος I_{DS} προκειμένου να ορίσουμε την τάση κατάρρευσης με την μέθοδο που χρησιμοποιούμε. Στο γράφημα της Εικ.4.1.14, βλέπουμε το αποτέλεσμα της μέτρησης, για $I_{DS}= 10\text{mA}/\text{mm}$, που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή που χρησιμοποιείται για υποστρώματα με μεγάλη διαρροή. Η τάση κατάρρευσης ήταν ίδια και αυτό δείχνει ότι η κατάρρευση δεν εξαρτάται από τη διαρροή του υποστρώματος. Η ίδια τιμή $V_{BD}=37\text{V}$ εξήχθη και για τις δομές που δεν ήταν επικαλυμμένες με 1 nm GaN .



Εικόνα 4.1.14: Τάση κατάρρευσης τρανζίστορ HEMT δομής 1nm GaN/4.5 nm AlN/ 500 nm GaN /Al₂O₃, με $L_g=1 \mu\text{m}$ και $W_g=50 \mu\text{m}$ ($I_{DS}=10\text{mA/mm}$). Η απόσταση G-D είναι 2 μm .

Δεν είναι ξεκάθαρος ο μηχανισμός της κατάρρευσης στα τρανζίστορ AlN/GaN HEMT: μπορεί να καθορίζεται από την κατάρρευση του υποστρώματος που επί το πλείστον οφείλεται σε διαδικασίες έγχυσης ηλεκτρονίων και φαινομένου χιονοστιβάδας στο GaN (impact ionization, avalanche breakdown) ή και να επηρεάζεται από το στρώμα φραγμού AlN. Το ρεύμα της πύλης είναι πολύ μικρό κι έτσι σίγουρα δεν μπορεί να αποδοθεί σε κατάρρευση λόγω ρεύματος φαινομένου σήραγγας από την πύλη. Στα AlGaN/GaN HEMTs^{7 8} και σε δομές InAlN/AlN/GaN⁹ αναφέρθηκε ότι η τάση κατάρρευσης εξαρτάται από την απόσταση G-D. Η κατάρρευση επέρχεται σε μεγαλύτερη τάση, όσο αυξάνεται η απόσταση G-D, διότι αυξάνεται η περιοχή απογύμνωσης και αποδόθηκε σε έγχυση ηλεκτρονίων/διαδικασία χιονοστιβάδας στον όγκο του υποκείμενου στρώματος GaN, χωρίς να υπάρχει άμεση εξάρτηση από τα στρώματα φραγμού InAlN ή AlGaN. Η εκδοχή αυτή, αιτιολογεί τις σταθερές τιμές V_{BR} που εξήχθησαν για τα δείγματα μας, παρά τη μεταβολή του επιφανειακού δυναμικού λόγω ύπαρξης ή μη, στρώματος επικάλυψης, ή το μέγεθος του ρεύματος διαρροής.

Στις δομές AlN/GaN HEMT θεωρητικά αναμέναμε μεγαλύτερες τιμές τάσης κατάρρευσης, λόγω της υψηλής τιμής του ηλεκτρικού πεδίου κατάρρευσης στο GaN (\mathcal{E}_{CR}), που οφείλεται στο μεγάλο ενεργειακό χάσμα. Η θεωρητική τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο GaN είναι $\mathcal{E}_{CR}=1-2 \cdot 10^6 \text{ V/cm}^{10}$ και για απόσταση $L_{GD}= 2$

μm στις διατάξεις μας αντιστοιχεί σε $V_{BD} = E_{CR} \times L_{GD} = 200V$. Ωστόσο, για την ίδια απόσταση $L_{GD} = 2 \mu m$, έχει αναφερθεί τάση κατάρρευσης σε διατάξεις InAlN HEMT ίση με $65V^{10}$, ενώ για τρανζίστορ AlGaN HEMT έχει αναφερθεί $V_{BR} = 80V$ για $L_{GD} = 6 \mu m$ που σημαίνει ότι το αντίστοιχο ηλεκτρικό πεδίο είναι της τάξης των $10^5 V/cm$, μια τάξη μεγέθους μικρότερο από τη θεωρητική τιμή. Και σε άλλες βιβλιογραφικές αναφορές, η πειραματική τιμή του ηλεκτρικού πεδίου κατάρρευσης στο GaN (planar structure) αντιστοιχούσε σε $E_{πειρ} = 1 \times 10^5 V/cm$ ^{11,12}. Στην περίπτωση των AlN/GaN HEMT της παρούσας εργασίας, βάση της τιμής $V_{BD} = 37V$, το ηλεκτρικό πεδίο κατάρρευσης αντιστοιχεί σε $E_{πειρ} = 1,8 \times 10^5 V/cm$.

- ¹ Huili (Grace) Xing, T. Zimmermann, D. Deen, K. Wang, C. Yu, T. Kosel, P. Fay, and D. Jena, CS MANTECH Conference, April 14-17, 2008, Chicago, Illinois, USA
- ² David Deen, Tom Zimmermann, Yu Cao, Debdeep Jena, and Huili Grace Xing, *phys. stat. sol. (c)* **5**, No. 6, 2047–2049 049 (2008)
- ³ Tom Zimmerman et al., *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 29, NO 7, (2008)
- ⁴ Yu Cao, Kejia Wang, and Debdeep Jena, *phys. stat. sol. (c)* **5**, No. 6, 1873– 1875 (2008)
- ⁵ A. M. Dabiran, A. M. Wowchak, A. Osinsky, J. Xie, B. Hertog, B. Cui, D. C. Look, and P. P. Chow, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 082111 (2008)
- ⁶ S. R. Bahl and J.A. del Alamo. *IEEE Trans. On Electron Devices* **40**, 1558 (1993)
- ⁷ Y.-F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R. P. Smith, S. Sheppard, P. M. Chavarkar, T. Wisleder, U. K. Mishra, and P. Parikh, *IEEE Electron Device Lett.* **25**, 117 (2004).
- ⁸ J. W. Johnson, E. L. Piner, A. Vescan, R. Therrien, P. Rajagopal, J. C. Roberts, J. D. Brown, S. Singhal, and K. J. Linthicum, *IEEE Electron Device Lett.* **25**, 459 (2004).
- ⁹ J. Kuzmik et al., *Phys. Status Solidi C* **6**, S2, pp.925-927 (2009)
- ¹⁰ M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, and M. S. Shur, *Properties of Advanced Semiconductor Materials* (Wiley, New York, 2001).
- ¹¹ A. Hinoki, S. Kamiya, T. Tsuchia, T. Yamada, J. Kikawa, T. Araki, A. Suzuki, and Y. Nanashi, *Phys. Status Solidi C* **4**, 2728 (2007).
- ¹² H. Hasegawa, T. Kitagawa, T. Sawada, and H. Ohno, *Electron. Lett.* **20**, 561 (1984).

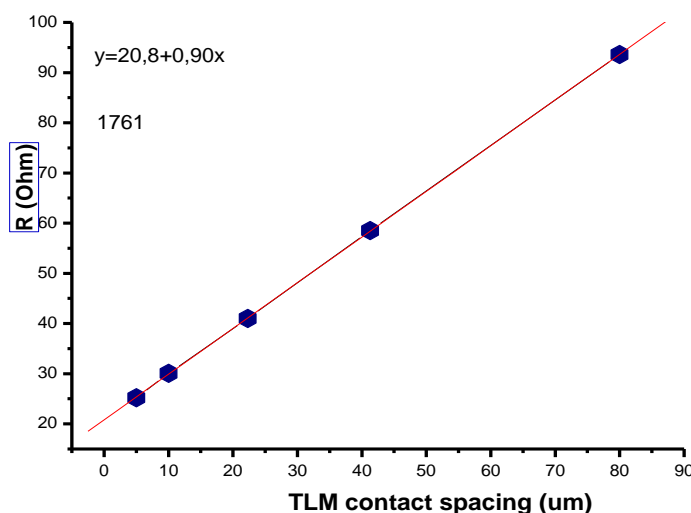
Κεφάλαιο 4.2: Μελέτη χαρακτηριστικών αντιστάσεων

Στο παρών κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις αντιστάσεις που χαρακτηρίζουν τις διατάξεις HEMT AlN/GaN με στρώμα επικάλυψης 1nm GaN. Αυτές αφορούν την αντίσταση φύλλου της ημιαγωγικής ετεροδομής (R_{sh}), την ειδική αντίσταση των ωμικών επαφών μετάλλου ημιαγωγού (r_c) καθώς και όλες τις παρασιτικές αντιστάσεις (R_s , R_D) που είναι σε σειρά με την εσωτερική (ενδογενή) αντίσταση του καναλιού (R_{chi}). Στην τελευταία ενότητα παρατίθενται μετρήσεις για την εξαγωγή της διαφορικής αντίστασης της πηγής (DRS). Παράλληλα γίνονται οι ανάλογες συγκρίσεις με τα δείγματα αναφοράς που είναι τρανζίστορ HEMT AlN/GaN χωρίς στρώμα επικάλυψης της επιφάνειας AlN.

Μέθοδος γραμμών μεταφοράς (TLM)

Η αντίσταση φύλλου του υποστρώματος καθώς και η αντίσταση των ωμικών επαφών μετάλλου-ημιαγωγού, εξήχθησαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο γραμμών μεταφοράς (TLM) όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.2. Η κατάλληλη διάταξη γραμμικού TLM για τις μετρήσεις I-V μεταξύ των ωμικών επαφών, κατασκευάστηκε με διαδικασίες φωτολιθογραφίας.

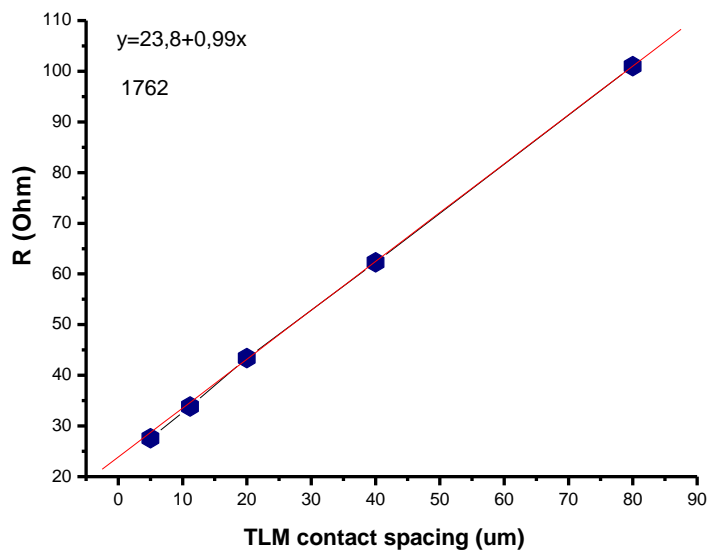
Από τις μετρήσεις I-V που έγιναν χρησιμοποιώντας έναν curve tracer, προκύπτει το ακόλουθο γράφημα της αντίστασης σαν συνάρτηση της απόστασης των ωμικών επαφών της διάταξης TLM, για δείγματα με δομή 1 nm GaN/4,5 nm AlN/GaN/Al₂O₃. Πάνω αριστερά αναγράφεται η κλίση και η διατομή (σε Ohm/μm και Ohm αντίστοιχα) από την εξίσωση της προσαρμοσμένης ευθείας ελαχίστων τετραγώνων.



Εικόνα 4.2.1: Μετρήσεις αντίστασης σε Ohm, μεταξύ των ωμικών επαφών της διάταξης TLM, συναρτήσεως της μεταξύ τους απόστασης σε μm για την επιταξιακή δομή 1 nm GaN/4.5nm AlN/GaN/Al₂O₃ HEMT.

Τα αποτελέσματα, δίνουν αντίσταση φύλλου ίση με $R_{sh} = 90 \text{ Ohm/sq}$. Η τιμή αυτή αποτελεί την καλύτερη τιμή στη βιβλιογραφία για ετεροδομές AlN/GaN HEMT πάνω σε υποστρώματα GaN/Al₂O₃ [1][2][3][4][5][6]. Η ειδική αντίσταση των ωμικών επαφών είναι $\rho_c = 1 \text{ Ohm mm}$, τιμή συνηθισμένη, που αντιστοιχεί σε επιτυχή διεργασία επιμετάλλωσης. Η απόκλιση που παρουσιάζεται στην τιμή της R_{sh} , συγκριτικά με την τιμή που εξάγεται μέσω φαινομένου Hall, αποδίδεται είτε στις καλύτερες ωμικές επαφές που προκύπτουν από τις διαδικασίες κατασκευής με φωτολιθογραφία ή στην μεταβολή του επιφανειακού δυναμικού του ημιαγωγού (ελαττώνεται), που μπορεί να προκύψει από αλλαγές στην χημική σύσταση της δομής κατά τη διάρκεια των διάφορων κατασκευαστικών σταδίων.

Από το αντίστοιχο δείγμα αναφοράς εξήχθη αντίσταση φύλλου ίση με $R_{sh} = 100 \text{ Ohm/sq}$ και ειδική αντίσταση $\rho_c = 1,1 \text{ Ohm mm}$.

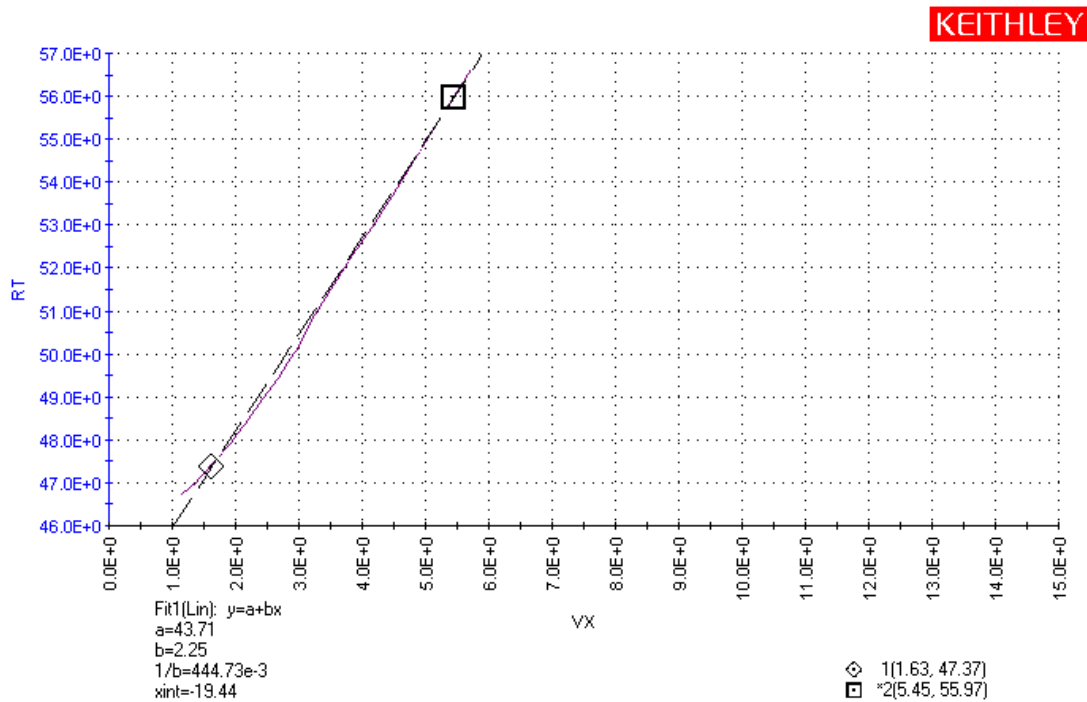


Εικόνα 4.2.2 : Μετρήσεις αντίστασης σε Ohm, μεταξύ των ωμικών επαφών της διάταξης TLM, συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης σε μm για την επιταξιακή δομή αναφοράς 4.5nm AlN/GaN/Al₂O₃ HEMT.

Σειριακές αντιστάσεις

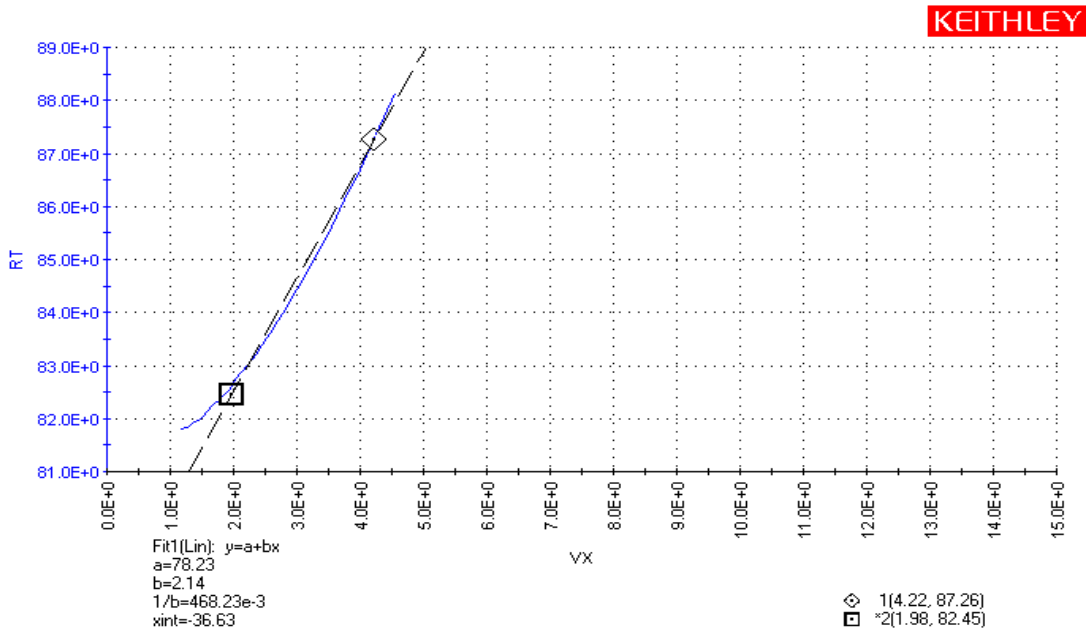
Αν θέλουμε να υπολογίσουμε την εσωτερική αντίσταση μέσα στο κανάλι (R_{chi}), πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις και αναλύσεις στα τρανζίστορ. Ακολουθώντας την τεχνική που περιγράφηκε στο Κεφ. 2.2, κάνουμε τη γραφική παράσταση του R_T συναρτήσει του V_x , όπως φαίνεται

στην Εικ. 4.2.3 για δομές HEMT 1nm GaN/ 4.5nm AlN/ GaN/ Al₂O₃. Το εσωτερικό δυναμικό της επαφής Schottky τέθηκε ίσο με $V_{bi}=0,8$ eV μια συνήθη τιμή για επαφές Schottky πάνω σε GaN (0001), ενώ η τάση κατωφλίου ήταν ίση με $V_T=-3,9$ V. Η V_{DS} ήταν σταθερή στα 0.3 V προκειμένου να βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή, ενώ η V_{GS} μεταβλήθηκε από +2V έως -2V.



Εικόνα 4.2.3: Μέτρηση συνολικής σειριακής αντίστασης R_T (σε Ohm) σαν συνάρτηση του V_x (αδιάστατο), για δομή HEMT 1 nm GaN/4.5nm AlN/GaN/Al₂O₃. Κάτω αριστερά αναγράφονται η κλίση (b) σε Siemens και η διατομή (a) σε Ohm της ευθείας.

Το άθροισμα των σειριακών αντιστάσεων είναι $R_S+R_D=44$ Ohm, όπως προκύπτει από τη διατομή της ευθείας που προσαρμόσαμε στο γράφημα. Η εσωτερική αντίσταση του καναλιού ακριβώς κάτω από την πύλη ισούται με $R_{chi}=2.25$ Ohm. Αξίζει στο σημείο αυτό να γίνει μια σύγκριση με τα εξαγόμενα από δείγματα 4,5nm AlN/GaN HEMT χωρίς το στρώμα επικάλυψης 1 nm GaN .



Εικόνα 4.2.4: Μέτρηση συνολικής σειριακής αντίστασης R_T (σε Ω mm) σαν συνάρτηση του V_X (αδιάστατο), για δομή αναφοράς HEMT 4.5nm AlN/GaN/Al₂O₃. Κάτω αριστερά αναγράφονται η κλίση (b) σε Siemens και η διατομή (a) σε Ω mm, της ευθείας.

Από το γράφημα της Εικ. 4.2.4, για τα δείγματα αναφοράς προκύπτει $R_S+R_D=78 \Omega$ mm και $R_{chi}=2.14 \Omega$ mm. Τα αποτελέσματα δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.2.1.

Πίνακας 4.2.1: Άθροισμα των σειριακών αντιστάσεων $R_S + R_D$ και εσωτερική αντίσταση καναλιού R_{chi} για διατάξεις AlN/GaN HEMT με και χωρίς στρώμα επικάλυψης.

Surface	1 nm GaN Cap	AlN
$R_S + R_D$ (Ω mm)	2,18	3.9
R_{chi} (Ω mm)	2.25	2.14

Οι παρασιτικές αντιστάσεις, λοιπόν, πηγής και απαγωγού στη δομή HEMT με επικάλυψη 1nm GaN είναι 1,09 Ω mm για την κάθε επαφή (υποθέτοντας $R_S=R_D$), ενώ στα δείγματα αναφοράς, με γυμνή νιτριδωμένη επιφάνεια AlN, παρουσιάζονται αυξημένες κατά περίπου 1 Ω mm. Για να έχουμε πλήρη

εικόνα των εξαγόμενων τιμών, μπορούμε να προχωρήσουμε και σε μια άτυπη σύγκριση με τα αποτελέσματα από την μέθοδο γραμμών μεταφοράς (TLM):

Λαμβάνοντας υπ'όψιν τις γνώστες διαστάσεις της πύλης L_g και W_g και την αντίσταση φύλλου R_{sh} της ημιαγωγικής ετεροδομής που υπολογίστηκε με TLM, η εσωτερική αντίσταση του καναλιού κάτω από την πύλη θα είναι $(R_{sh}(L_g/W_g))$, (Πίνακας 4.2.2). Οι εξαγόμενες τιμές R_{chi} με τον τρόπο που παρουσιάστηκε είναι σε συμφωνία με τις τιμές που υπολογίζονται με χρήση των μετρήσεων TLM αν και οι τελευταίες επηρεάζονται από το δυναμικό της επιφάνειας. Μάλιστα για το λόγο αυτό θα έπρεπε η υπολογιζόμενη εσωτερική αντίσταση με χρήση της τιμής R_{sh} να είναι μεγαλύτερη από την R_{chi} . Το αντίθετο αποτέλεσμα που παρατηρούμε μπορεί να αποδοθεί στο ότι $L_g > 1\mu m$.

Πίνακας 4.2.2: Σύγκριση των αντιστάσεων όπως εξάγονται από την force method με αυτές που προκύπτουν από TLM.

Surface	Force method	TLM	Force method	TLM
	R_{chi} (Ohm)	$R_{sh}(L_g/W_g)$ (Ohm)	R_S+R_D (Ohm mm)	$2\rho_c+R_{sh}*4/1000$ (Ohm mm)
capped nitridated	2.25	1.8	2.18	2.36
	2.1	2	3.9	2.8

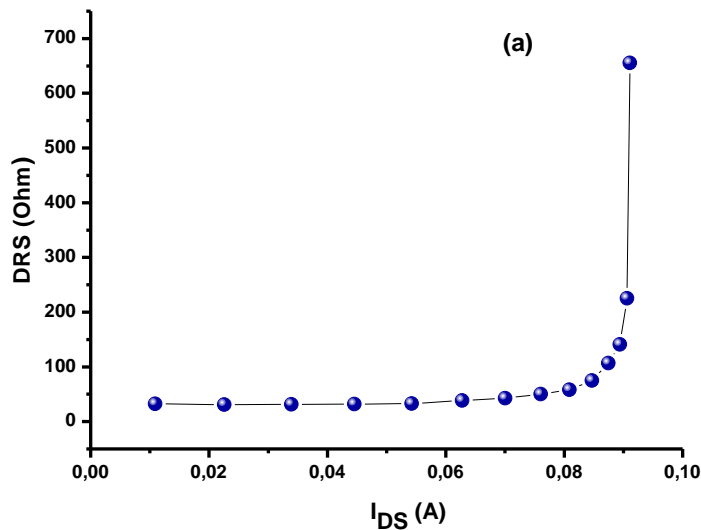
Οι παρασιτικές αντιστάσεις R_S και R_D μπορούν επίσης να εκτιμηθούν από την TLM, προκειμένου να προβούμε στην ανάλογη σύγκριση. Λαμβάνοντας υπ'όψιν ότι η απόσταση πηγής -απαγωγού είναι $4\mu m$, η ποσότητα R_S και R_D είναι $R_{sh} \times 4/1000 + 2\rho_c$. Έτσι προκύπτει $2,36\text{ Ohm mm}$ για τα δείγματα AlN/GaN HEMT με στρώμα επικάλυψης 1 nm GaN και η αυξημένη τιμή $2,8\text{ Ohm mm}$ για τα δείγματα αναφοράς. Η παρατηρούμενη διαφορά που προκύπτει μεταξύ των δυο μεθόδων προσδιορισμού των R_S και R_D , αποδίδεται (όπως και προηγουμένως) στο ότι οι τιμές από την TLM επηρεάζονται από το δυναμικό της επιφάνειας του ημιαγωγού.

Διαφορική αντίσταση πηγής DRS (dynamic access resistance)

Μια άλλη κρίσιμη παράμετρος αντίστασης που πρέπει να εξαχθεί για τον πλήρη χαρακτηρισμό της ενδογενούς απόδοσης των HEMT, είναι η διαφορική αντίσταση της πηγής (**dynamic access resistance, DRS**). Ενώ μια αυξημένη

αντίσταση του απαγωγού κατά ΔR_D επηρεάζει μόνο την κλίση των $I_{DS}-V_{DS}$ χαρακτηριστικών ($I_{satRD1}=I_{satRD2}$) και εξαρτάται από την απόσταση πύλης-απαγωγού⁷, η αύξηση της αντίστασης στην περιοχή από την πηγή έως την πύλη (DRS) συναρτήσε του ρεύματος του απαγωγού (I_{DS}), ή της τάσης (V_{DS}), επηρεάζει την περιοχή κόρου, δίνοντας λιγότερο ρεύμα κόρου ($I_{satRS1} > I_{satRS2}$)⁸.

Η μέτρηση αυτή γίνεται σε συνθήκες ορθής πόλωσης που εξασφαλίζουν ότι περνάει αρκετό ρεύμα από την πύλη, για να αποκλειστεί η ύπαρξη φορτίων απογύμνωσης. Έτσι επιλέγουμε $I_{GS}=0.5\text{mA}$. Η τάση V_{DS} κυμαίνεται από 0 έως 10V προκειμένου να υπολογίσουμε την DRS για διαφορετικά ρεύματα I_{DS} , όπως περιγράφηκε στο Κεφ. 2.2. Το γράφημα που ακολουθεί εξήχθη από δομές HEMT 1nm cap GaN/ 4.5nm AlN/GaN/Al₂O₃ και δείχνει την DRS συναρτήσε του ρεύματος I_{DS} .



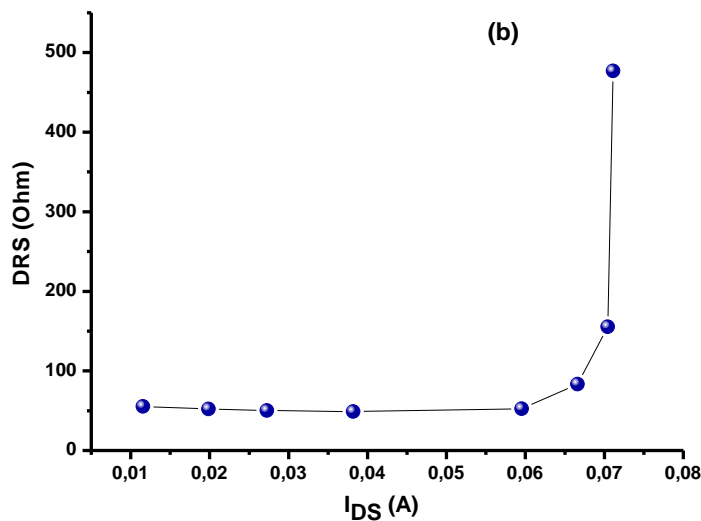
Εικόνα 4.2.5: Διαφορική αντίσταση πηγής DRS (r_s), σαν συνάρτηση του ρεύματος I_{DS} (A), για HEMT δομών 1nm GaN/4.5nmAlN/MBE GaN /Al₂O₃, με διαστάσεις πύλης $L_g=1\mu\text{m}$ και $W_g=50\mu\text{m}$.

Η μη γραμμική συμπεριφορά της DRS, αποδίδεται στην ύπαρξη παρασιτικών στοιχείων-κέντρα παγίδων στην περιοχή μεταξύ πηγής και πύλης. Όπως παρατηρούμε στο γράφημα της Εικ. 4.2.5, η τιμή της DRS είναι σταθερή για ρεύμα $I_{DS}<80\text{mA}$, όπου η αντίστοιχη τάση V_{DS} είναι 6V. Για ακόμη μεγαλύτερα ρεύματα παρατηρούμε ότι αυξάνεται, όμως η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε θέρμανση του καναλιού και επιπλέον το γεγονός ότι βρισκόμαστε σε περιοχή κόρου, περιοχή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου, σημαίνει ότι έχουμε και έγχυση φορέων στο υπόστρωμα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η DRS λόγω της αύξησης της τάσης V_{DS} , χωρίς να υπάρχουν παγίδες στην επιφάνεια. Προκειμένου να αποκλείσουμε την επίδραση των παραπάνω

παραγόντων και δεδομένου ότι στη συνθήκη $V_{DS}=5V$ και $I_{DS}= 70 \text{ mA}$, η αντίστοιχη τιμή της V_{GS} είναι $+4V$ δηλαδή το κανάλι είναι σίγουρα πλήρως ανοιχτό (πληρείται η συνθήκη μέτρησης), δεν λαμβάνουμε υπ όψιν περαιτέρω τιμές για την εξαγωγή της μεταβολής της DRS.

Επομένως στις δομές $1\text{nm GaN}/4.5 \text{ nm AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$, η DRS είναι περίπου 36 Ohm (1.8 Ohm mm) και ανεξάρτητη του ρεύματος ή της τάσης μέχρι τις τιμές $I_{DS}= 70 \text{ mA}$ και $V_{DS}=5V$. Οι τιμές αυτές στις δομές $1\text{nm GaN}/4.5 \text{ nm AlN}/\text{GaN}$ HEMT είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές αφού για τις δομές AlGaIn/GaN HEMT έχουν αναφερθεί τιμές $\text{DRS}=1,5 \text{ Ohm mm}$ με αύξηση μέχρι τα 6 Ohm mm , για $V_{DS}=3V$ ⁷.

Σε τρανζίστορ κατασκευασμένα από την επιταξιακή δομή αναφοράς $4.5 \text{ nm AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (χωρίς επικάλυψη της επιφάνειας) προσδιορίστηκε τιμή $\text{DRS}=50 \text{ Ohm}$ δηλαδή 2.5 Ohm mm και είναι σταθερή μέχρι την $V_{DS}=5V$ ($I_{DS}=60 \text{ mA}$) όπως φαίνεται στην Εικ. 4.2.6.



Εικόνα 4.2.6: Διαφορική αντίσταση πηγής DRS (r_s), σαν συνάρτηση του ρεύματος $I_{DS}(A)$, σε τρανζίστορ HEMT από επιταξιακή δομή αναφοράς $4.5\text{nm AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

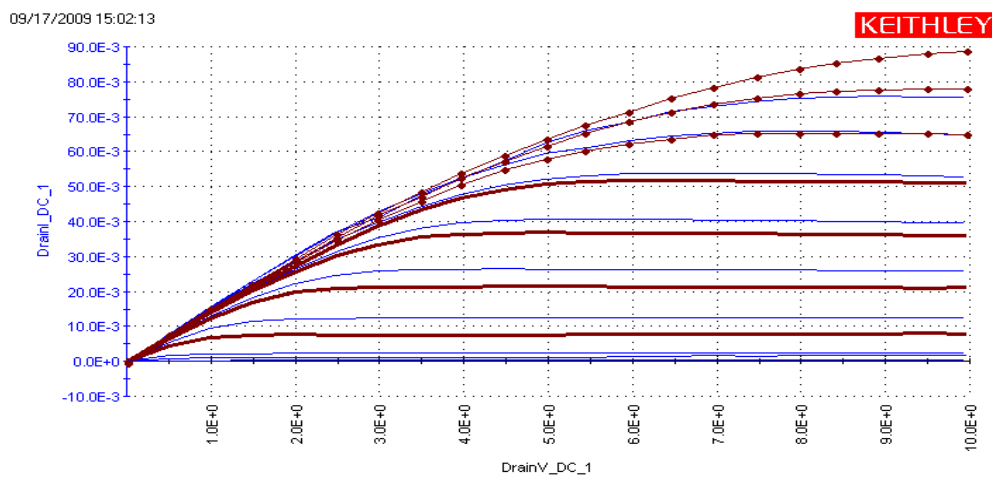
Οι δυναμικές αλλαγές στην R_s καθορίζονται από τα επιφανειακά φορτία⁷. Έτσι οι σταθερές τιμές των DRS με την αύξηση του ρεύματος I_{DS} , υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχουν φορτισμένες καταστάσεις στην περιοχή της πηγής, κι αυτό είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Ωστόσο στα δείγματα αναφοράς οι εξαγόμενες τιμές ήταν υψηλότερες από αυτές που εξήχθησαν από τα επικαλυμμένα δείγματα. Τέλος, οι τιμές των DRS συμβαδίζουν με τις τιμές των R_s που εξήχθησαν από την προηγούμενη μέθοδο (των σειριακών αντιστάσεων, R_T), όπως αναμένεται για σταθερές DRS.

- ¹ I. P. Smorchkova et Al, Journal of Appl. Phys. **90**, N. 10, p. 5196 (2001)
- ² Tom Zimmermann et Al, IEEE Electron device letters **29**, N. 7, p. 661 (2008)
- ³ Yu Cao, Kejia Wang, and Debdeep Jena, phys. stat. sol. (c) **5**, No. 6, 1873– 1875 (2008)
- ⁴ Yu Cao and Debdeep Jena, Appl. Phys. Lett. **90**, 182112 (2007)
- ⁵ Yu Cao, Kejia Wang, Alexei Orlov, Huili Xing, and Debdeep Jena, Appl. Phys Lett. **92**, 152112 (2008)
- ⁶ A. M. Dabiran, A. M. Wowchak, A. Osinsky, J. Xie, B. Hertog, B. Cui, D. C. Look, and P. P. Chow, Appl. Phys. Lett. **93**, 082111 (2008)
- ⁷ J. Kuzmik, IEEE Electron Device Lett. **22**, 510 (2001)
- ⁸ Tomas Palacios et al., IEEE Transactions on Electron Devices , Vol 52, 10, (2005)

Κεφάλαιο 5.1: Θερμικά φαινόμενα

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των υποστρωμάτων σαπφείρου, Al_2O_3 , περιορίζει την απόδοση των AlN/GaN HEMT, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του καναλιού κατά τη λειτουργία σε υψηλή ισχύ (μεγάλες τιμές τάσης και ρεύματος). Η αύξηση της θερμοκρασίας, όχι μόνο υποβαθμίζει την ευκινησία και την ταχύτητα ηλεκτρονίων του 2DEG, αλλά δημιουργεί και προβλήματα σταθερότητας των επαφών και επομένως θέματα αξιοπιστίας των τρανζίστορ¹. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τον βαθμό που επηρεάζει το υπόστρωμα τα χαρακτηριστικά των τρανζίστορ λόγω της υπερθέρμανσης του καναλιού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Χρησιμοποιώντας τον Keithley ParaMeter Analyser σε παλμική λειτουργία εξήχθησαν οι παλμικές χαρακτηριστικές I-V των τρανζίστορ, για δείγματα με υπόστρωμα είτε Al_2O_3 ή SiC . Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών παλμών που χρησιμοποιήθηκαν είναι $\text{PW}=500\text{ns}$ με περίοδο $T=1\mu\text{s}$, ενώ το σημείο εκκίνησης των μετρήσεων είναι $Q[V_{\text{GS}}, V_{\text{DS}}]=[0\text{V}, 0\text{V}]$ (μετρήσεις τύπου ‘cold pulsed’). Η V_{DS} μεταβάλλεται στην περιοχή των 0-10V ενώ η V_{GS} από +3V έως -3V, με βήμα 1V.



Εικόνα 5.1.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών I-V “cold pulsed” (κόκκινες), με τις αντίστοιχες DC, για δομές 1nm GaN/4.5nm AlN/500 nm MBE GaN σε υποστρώματα SiC. Η V_{GS} μεταβάλλεται από +3V μέχρι -3V, με βήμα 1V.

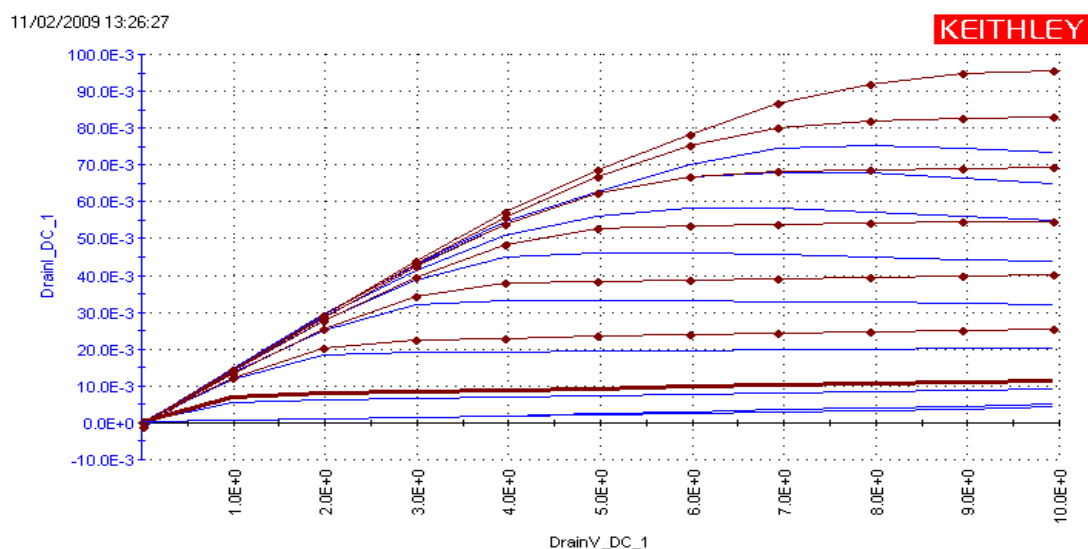
Στην Εικ. 5.1.1 βλέπουμε τις παλμικές χαρακτηριστικές I-V (κόκκινες) , σε σύγκριση με τις αντίστοιχες DC (μπλε), που αντιστοιχούν σε τρανζίστορ HEMT κατασκευασμένα από δομές 1 nm GaN/4.5 nm AlN/500 nm GaN πάνω σε υπόστρωμα SiC. Το μήκος και πλάτος της πύλης των διατάξεων είναι $L_g=1 \mu\text{m}$ και $W_g=50 \mu\text{m}$ αντίστοιχα.

Όπως παρατηρούμε οι χαρακτηριστικές των δυο μετρήσεων (DC και παλμικών), εμφανίζουν σημαντική απόκλιση στην περιοχή του ρεύματος κόρου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην θέρμανση του καναλιού από τις μεγάλες τιμές τάσης V_{DS} και ρεύματος κόρου I_{DS} , στην περίπτωση των μετρήσεων DC. Έτσι μειώνεται η ευκινησία των ηλεκτρονίων του 2DEG ² με αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού ρεύματος κόρου I_{DS} , ενώ η σχετική μεταβολή εκφράζεται με τη σχέση:

$$(1-I_{DC}/I_{pulsed})\%$$

όπου I_{DC} και I_{pulsed} είναι το ρεύμα I_{DS} που προσδιορίστηκε από DC και παλμικές μετρήσεις I-V αντίστοιχα. Στα περισσότερα δείγματα η απόκλιση ήταν 10% για $V_{DS}=9\text{V}$ και $V_{GS}=+3\text{V}$, ενώ γενικότερα δεν ξεπερνά το 12%.

Το φαινόμενο είναι εντονότερο σε τρανζίστορ HEMT κατασκευασμένα πάνω σε υπόστρωμα Al_2O_3 . Στο γράφημα της Εικ.5.1.2 απεικονίζονται οι παλμικές χαρακτηριστικές I-V (και οι αντίστοιχες DC) για δομές 1nm GaN/4.5 nm AlN/500 nm GaN σε υποστρώματα σαπφείρου.



Εικόνα 5.1.3: Σύγκριση χαρακτηριστικών I-V “cold pulsed” (κόκκινες) , με τις αντίστοιχες dc για δομές 1nm GaN/4.5nm AlN/500 nm MBE GaN σε υποστρώματα Al_2O_3 . Η V_{GS} μεταβάλλεται από +3V μέχρι -4V, με βήμα 1V.

Με τον ίδιο τρόπο εξάγουμε απόκλιση των DC από τις παλμικές χαρακτηριστικές ίση με 21% για δομές HEMT 1nm GaN/4.5nm AlN/MBE GaN/Al₂O₃. Η σύγκριση συνοψίζεται στον πίνακα 5.1.1.

Πίνακας 5.1.1: Σύγκριση τιμών ρεύματος κόρου I_{DSsat} για $V_{DS}= 9V$ και $V_{GS}=+3V$, που προσδιορίστηκε με μετρήσεις DC και παλμικές για τρανζίστορ HEMT δομών 1nm GaN/4.5 nm AlN/GaN, ανεπτυγμένων σε υποστρώματα SiC και Al₂O₃.

Υπόστρωμα	I dc(mA)	I cold pulsed(mA)	(1-I dc/I cold pulsed)%
SiC	77	87	12%
Al ₂ O ₃	74	94	21%

Όπως γνωρίζουμε η θερμική αγωγιμότητα του σαπφείρου είναι πολύ μικρότερη από αυτή του SiC (Πίν. 5.1.2). Επίσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καταλήγοντας σε μια μη γραμμική σχέση της τελευταίας με την εγχεόμενη ισχύ. Η θερμότητα δεν επάγεται αποτελεσματικά από το κανάλι, με αποτέλεσμα να παρατηρούμε διπλάσια απόκλιση μεταξύ των DC και των παλμικών χαρακτηριστικών I-V στα υποστρώματα Al₂O₃, συγκριτικά με τα SiC. Είναι σημαντικό, λοιπόν, το πλεονέκτημα της χρήσης υποστρώματος SiC σε σχέση με το Al₂O₃ για τρανζίστορ υψηλής ισχύος AlN/GaN HEMT. Τα αποτελέσματα μας βάσει αυτής της μεθόδου χαρακτηρισμού για τα υποστρώματα έρχονται σε συμφωνία με ανάλογες μετρήσεις σε τρανζίστορ από δομές AlGaN/GaN³.

Πίνακας 5.1.2: Θερμική αγωγιμότητα βασικών υποστρωμάτων⁴.

υπόστρωμα	Θερμική αγωγιμότητα (W/m K)
σάπφειρος	30
GaN	130
Si	150
SiC	350
διαμάντι	900-2320

Από τη στιγμή που η θερμική αγωγιμότητα του SiC είναι μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του σαπφείρου, η θερμοκρασία στην ενεργό περιοχή του HEMT μπορεί να μειωθεί με χρήση υποστρώματος SiC, καθιστώντας το απαραίτητο υπόστρωμα για τρανζίστορ GaN, που χαρακτηρίζονται από λειτουργία υψηλής ισχύος. Κατάλληλο υπόστρωμα αποτελεί και το ίδιο το GaN, που όχι μόνο έχει ίδια πλεγματική σταθερά με το GaN του καναλιού, αλλά επίσης η θερμική του αγωγιμότητα έχει τιμή μεταξύ των δυο παραπάνω υλικών. Ωστόσο η χρήση του, περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα και το κόστος. Ιδανικό υπόστρωμα βέβαια θα ήταν το διαμάντι, αφού παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή θερμικής αγωγιμότητας.

Χωρίς αντικατάσταση του υποστρώματος, η επαγωγή θερμότητας μπορεί να διευκολυνθεί με συνδεσμολογία της ημιαγωγικής ψηφίδας μέσω της πάνω πλευράς, με την τεχνική flip-chip bonding, ή με την επικάλυψη της διάταξης από ένα θερμικά αγωγίμο στρώμα στην επιφάνεια (νανοκρυσταλλικό διαμάντι).

Η χρήση υποστρώματος Al_2O_3 δεν είναι περιοριστικός παράγων εάν ο στόχος της έρευνας μας είναι η μελέτη θεμάτων της επιταξιακής ημιαγωγικής δομής. Αυτό διευκολύνεται από την κατασκευή τρανζίστορ HEMT με μικρό πλάτος πύλης W_g όπως ήταν τα τρανζίστορ που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία ($W_g = 50\mu m$). Η βασική συμπεριφορά των διατάξεων προσδιορίζεται συναρτήσσει του πλάτους W_g (I_{DS} σε mA/mm) και εύκολα συμπεραίνουμε τις δυνατότητες της ημιαγωγικής δομής για τρανζίστορ ισχύος με πολύ μεγάλες τιμές W_g . Ακόμα, όμως, και για τις μικρές τιμές $W_g = 50\mu m$, παρατηρούμε επίδραση της παραγόμενης θερμότητας στις χαρακτηριστικές I-V των διατάξεων για μετρήσεις DC. Η σύγκριση με παλμικές μετρήσεις είναι ο ασφαλής τρόπος να συμπεράνουμε τα ακριβή χαρακτηριστικά απόδοσης της ημιαγωγικής δομής, αποσυσζευγμένα από θερμικά φαινόμενα.

-
- ¹ J.C. Freeman, Channel temperature model for microwave AlGa_N-Ga_N HEMTs on SiC and sapphire MMICs in high power SSPAs, NASA/TM-2004 212900
 - ² M.K. Chattopadhyay et al., ELSEVIER, Microelectronics Journal 39 (2008) p.1181-1188
 - ³ J. Kuzmik, P. Javorka, A. Alam, M. Marso, M. Heuken, P. Kordos, Determination of channel temperature in AlGa_N/Ga_N HEMTs grown on sapphire and silicon substrates using dc characterization method, IEEE Trans. Electron Devices 49 (2002) 1496–1498.
 - ⁴ M. Alomari et al., Electron Lett.46, 299 (20010)

Κεφάλαιο 5.2: Αστάθεια ρεύματος

Όπως προαναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος, όταν το τρανζίστορ είναι σε κατάσταση κλειστού καναλιού (off, $V_{GS}=-5V$), η παγίδευση των εγχεόμενων ηλεκτρονίων από την πύλη σε επιφανειακές καταστάσεις, στην περιοχή πύλης-απαγωγού, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του ρεύματος I_{DS} όταν το τρανζίστορ έρθει σε αγώγιμη κατάσταση (current collapse). Τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια απογυμνώνουν το 2DEG, κι επειδή ο χρόνος απο-παγίδευσης είναι μεγάλος, δεν μπορούν να αποκριθούν σε παλμικά σήματα ac, μικρής χρονικής διάρκειας (500ns). Έτσι, εφαρμόζοντας έναν θετικό παλμό στην πύλη για να ανοίξει το κανάλι, παρατηρούμε μειωμένο ρεύμα I_{DS} .

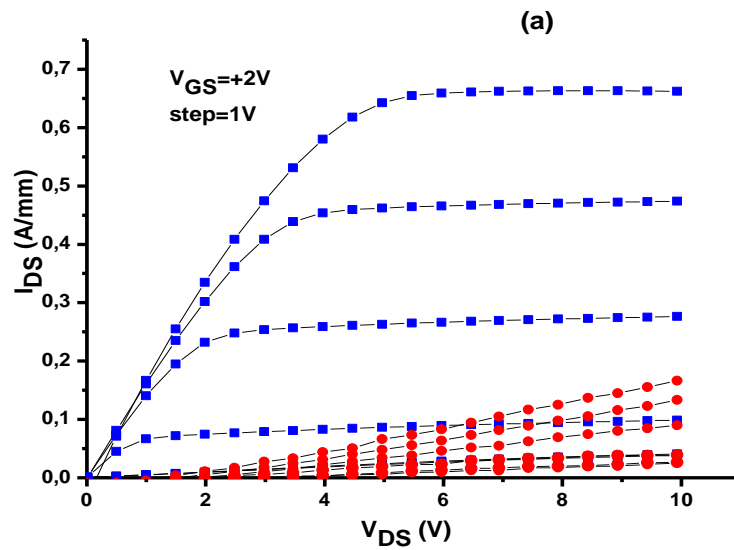
Ο Keithley Parameter Analyser SCS 4200 με το «PIVQ project», παρέχει παλμούς ταυτόχρονα στην πύλη και στον απαγωγό, προσφέροντας την δυνατότητα έναρξης των μετρήσεων από μια μη μηδενική τάση (σημείο Q). Το σημείο Q, αναφέρεται ως σημείο ηρεμίας ή ως εκείνη η τάση που βάζει το τρανζίστορ σε μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας (operating point). Με χρήση του $Q[V_{GS}, V_{DS}]$, καθορίζεται η ολική απόκριση της συσκευής (για τη συγκεκριμένη μέτρηση) καθώς το τρανζίστορ ανταποκρίνεται γρηγορότερα αν είναι ήδη λίγο ανοιχτό η αγώγιμο, από το να είναι τελείως κλειστό.

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η παροδική απόκριση ρεύματος λόγω παγίδων σε δομές AlN/GaN HEMT με παλμικές μετρήσεις (I-V χαρακτηριστικές). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά των δομών AlN/GaN HEMT με στρώμα επικάλυψης 1nm GaN. Σε κανένα από τα δείγματα δεν έχει εναποτεθεί υλικό αδρανοποίησης της επιφανείας.

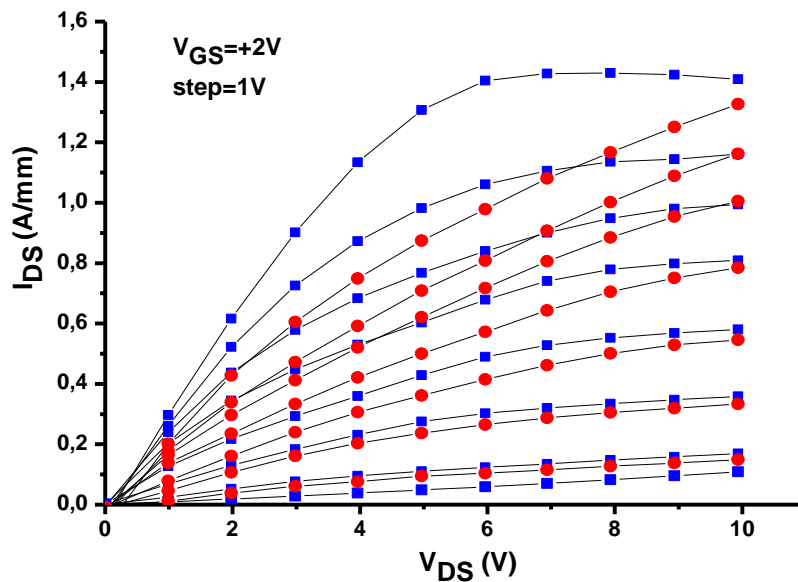
Το σημείο έναρξης των μετρήσεων είναι $Q[V_{GS}, V_{DS}]=[-5V, 10V]$. Έτσι οι παλμοί τάσης στην πύλη ξεκινούν από την τάση αποκοπής ($V_T=-5V$) κι έχουν σαν υψηλή στάθμη την V_{GS} που έχουμε καθορίσει, ενώ στον απαγωγό εφαρμόζονται παλμοί που ξεκινούν από την τάση $V_{DS}=10V$. Οι παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν έχουν χρονοδιάρκεια $PW= 500ns$ και περίοδο $T= 1\mu s$.

Στο γράφημα της Εικ.5.2.1, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V, DC (μπλε) και παλμικές (κόκκινες) για τρανζίστορ από δομές 4,5 nm AlN/GaN/Al₂O₃ HEMT αναφοράς, στις οποίες η επιφάνεια AlN δεν επικαλύπτεται με 1nm GaN. Παρατηρούμε μια σημαντική μείωση του ρεύματος I_{DS} των παλμικών μετρήσεων, συγκριτικά με αυτό των DC, τόσο στη γραμμική περιοχή όσο και στην περιοχή κόρου. Για σταθερή τάση $V_{DS}=9V$, καταγράφουμε τις τιμές ρεύματος κόρου για $V_{GS}=0V$ και με χρήση της σχέσης $(1-I_{pulsed}/I_{DC})$, εξάγουμε το

ποσοστό της πτώσης του ρεύματος.



Εικόνα 5.2.1: Παλμικές χαρακτηριστικές $I_{DS}-V_{DS}$ (κόκκινες) σε σύγκριση με τις DC (μπλε) για τρανζίστορ κατασκευασμένα από δομές 4,5 nm AlN/500 nm GaN/Al₂O₃ HEMT. Τα τρανζίστορ είχαν $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=50\mu\text{m}$ με την τάση V_{GS} να μεταβάλλεται από +2V έως -4V.



Εικόνα 5.2.2: Παλμικές χαρακτηριστικές I_{DS} (σε A)- V_{DS} (σε V) (κόκκινες) σε σύγκριση με τις DC (μπλε) για τρανζίστορ κατασκευασμένα από δομές 1 nm GaN/4,5 nm AlN/500 nm GaN/Al₂O₃ HEMT. Τα τρανζίστορ είχαν $L_g=1\mu\text{m}$ και $W_g=50\mu\text{m}$ με την τάση V_{GS} να μεταβάλλεται από +2V έως -4V.

Η απόκλιση ανέρχεται στο 71% (Εικ.5.2.1). Το φαινόμενο είναι λιγότερο έντονο για δομές 4.5 nm AlN/GaN/Al₂O₃ HEMT επικαλυμμένες με 1nm GaN, καθώς η απόκλιση που εξάγεται ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, περιορίζεται στο 3% (Εικ. 5.2.2). Τα αποτελέσματα δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.2.1.

Πίνακας 5.2.1: Ποσοστό της πτώσης ρεύματος I_{DSSat} , σε τρανζίστορ HEMT από δομές 4,5nm AlN/GaN/Al₂O₃.

	Level of collapse
Με 1 nm GaN cap	3%
Χωρίς 1 nm GaN cap	70%

Αν και οι επικαλυμμένες δομές δεν παρουσιάζουν πτώση του ρεύματος I_{DS} στην περιοχή κόρου (I_{DSSat}), παρατηρούμε μια σημαντική διαφορά (37% για $V_{DS}=4V$ και $V_{GS}=0V$) στα δύο μετρούμενα ρεύματα, στην γραμμική περιοχή των χαρακτηριστικών I-V (Εικ.5.2.2). Η αλλαγή στην κλίση των παλμικών I-V χαρακτηριστικών, σε σχέση με τις DC, οφείλεται στη δυναμική αλλαγή της αντίστασης του απαγωγού (DRD), η οποία καθορίζεται από επιφανειακά φορτία στην περιοχή απαγωγού – πύλης (G-D). Αν υπάρχουν φορτισμένες καταστάσεις στην περιοχή πηγής-πύλης (S-G), η διαφορά στα μετρούμενα ρεύματα εντοπίζεται στην περιοχή κόρου. Στην περίπτωση αυτή έχουμε έγχυση ηλεκτρονίων από την πηγή και όχι από την πύλη και το φαινόμενο ονομάζεται drain lag. Όταν όμως εμφανίζονται παρασιτικά στοιχεία στην περιοχή του απαγωγού, παρατηρούμε αλλαγή στην κλίση των χαρακτηριστικών στη γραμμική περιοχή και όχι στην περιοχή κόρου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται gate lag.

Βάσει των παλμικών μετρήσεων, λοιπόν, θα συμπεράνουμε ότι στις διατάξεις αναφοράς 4.5 nm AlN/GaN HEMT υπάρχουν φορτισμένες επιφανειακές καταστάσεις στην ακάλυπτη επιφάνεια του ημιαγωγού AlN, ανάμεσα στις επιμεταλλώσεις της πηγής, της πύλης και του απαγωγού, ενώ τα ηλεκτρόνια που παγιδεύονται εγχέονται τόσο από την πηγή όσο και από την πύλη. Το αποτέλεσμα αυτό ωστόσο, είναι αντιφατικό με τις μετρήσεις της DRS στα δείγματα αναφοράς, όπου δεν υπέδειξαν φορτισμένες καταστάσεις στην αντίστοιχη περιοχή μελέτης. Στις διατάξεις 1nm GaN/4,5 nm AlN/GaN HEMT, παρατηρούμε την ηλεκτρική επίδραση παγίδων μόνο στην πλευρά του

απαγωγού, αφού η απόκλιση στα ρεύματα I_{DS} παρατηρήθηκε μόνο στη γραμμική περιοχή (gate lag). Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται από τις ανάλογες μετρήσεις της DRS, που παρουσιάσαμε στο Κεφ. 5.1. Επομένως το GaN μειώνει την παγίδευση των ηλεκτρονίων σταθεροποιώντας τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Περαιτέρω μελέτη απαιτείται για να εξακριβώσουμε την αρχή της παγίδευσης των ηλεκτρονίων.

Η πτώση ρεύματος, είναι επιλύσιμο φαινόμενο και εξαρτάται από το τελείωμα της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα για τις δομές 1 nm GaN/AlN/GaN HEMT είναι αρκετά ενθαρρυντικά, διότι εκτός του ότι εκμηδενίζεται η φόρτιση καταστάσεων στην πλευρά πηγής -πύλης, περιορίζεται αρκετά η παγίδευση των ηλεκτρονίων και στην περιοχή του απαγωγού, παρά το γεγονός ότι στα δείγματα δεν έχει εναποτεθεί υλικό αδρανοποίησης.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν οι δυνατότητες και η βελτιστοποίηση των ετεροδομών AlN/GaN ανεπτυγμένων με RF-MBE, για την επίτευξη προηγμένων τρανζίστορ HEMT, ρηχού καναλιού με μεγάλη πυκνότητα ρεύματος. Αφού καθορίστηκε το βέλτιστο πάχος ανάπτυξης του AlN βάσει ηλεκτρικών μετρήσεων χαρακτηρισμού του υλικού και των διατάξεων, μελετήθηκε ο ρόλος του δυναμικού της επιφάνειας. Ένα νανομετρικό στρώμα επικάλυψης πάνω από το AlN, αποτρέπει την οξειδωση του, διατηρώντας σταθερό το πάχος του. Στη βελτιστοποιημένη ετεροδομή 1nm GaN /4,5 nm AlN/2,5 μm GaN/Al₂O₃, επετεύχθη υψηλή συγκέντρωση 2DEG ίση με $3.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, με ευκινησία $\mu = 1298 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Η πυκνότητα ρεύματος των διατάξεων HEMT με $L_g = 1 \mu\text{m}$ and $W_g = 50 \mu\text{m}$ αντιστοιχούσε σε 2A/mm με διαγωγιμότητα 425 mS/mm, ενώ το ρεύμα διαρροής απαγωγού δεν ξεπερνούσε τα 0.5 mA. Οι παραπάνω τιμές αποτελούν έως σήμερα ρεκόρ για αυτές τις διαστάσεις πύλης.

Στη συνέχεια εξήχθησαν όλες οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός τρανζίστορ HEMT, βάσει DC μετρήσεων. Οι αντιστάσεις φύλλου και των ωμικών επαφών ήταν ιδιαίτερα χαμηλές $R_{sh} = 90 \text{ Ohm/sq}$ και $\rho_c = 1,1 \text{ Ohm mm}$. Το ίδιο ισχύει και για τις παρασιτικές αντιστάσεις R_D και R_S που δεν ξεπέρασαν τα 45 Ohm στο άθροισμα τους. Η εσωτερική αντίσταση του καναλιού ήταν $R_{chi} = 2.25 \text{ Ohm}$. Σε όλες τις μετρήσεις έγιναν οι αντίστοιχες συγκρίσεις με δομές 4.5 nm AlN/GaN χωρίς καμία επικάλυψη στην επιφάνεια.

Ο μηχανισμός της κατάρρευσης στα τρανζίστορ HEMT δεν είναι προφανής. Η τάση κατάρρευσης off-state, μελετήθηκε με την τεχνική ένεσης ρεύματος απαγωγού, που επιτρέπει την μέτρηση χωρίς την καταστροφή της διάταξης. Ανεξαρτήτως των λεπτομερειών της επιταξιακής δομής, όλα τα τρανζίστορ HEMT με στρώμα φραγμού 4,5nm AlN εμφάνισαν κατάρρευση σε $V_{DS} = 37\text{V}$. Η σταθερή τιμή των 37 V δεν είναι ικανοποιητική για τρανζίστορ ισχύος αλλά μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της απόστασης των επαφών G-D, που στις διατάξεις μας ήταν μόνο 2 μm.

Με παλμικές μετρήσεις τύπου cold pulsed, μελετήθηκε η επιρροή της θερμικής αγωγιμότητας των υποστρωμάτων Al₂O₃ και SiC στη θέρμανση του καναλιού. Η θερμότητα επάγεται αποτελεσματικότερα από το κανάλι με χρήση υποστρωμάτων SiC, καθιστώντας το καταλληλότερο υπόστρωμα για τρανζίστορ υψηλής ισχύος AlN/GaN HEMT, έναντι του σαπφείρου.

Τέλος, μελετήθηκε η αστάθεια του ρεύματος I_{DS} λόγω παγίδευσης των ηλεκτρονίων από επιφανειακές καταστάσεις, με την εφαρμογή παλμών

ταυτόχρονα στην πύλη και τον απαγωγό, με επιλεγμένες αρχικές συνθήκες πόλωσης του τρανζίστορ, $Q[-5, 10]$. Στα δείγματα αναφοράς (HEMT με γυμνή επιφάνεια AlN), είδαμε έντονα φαινόμενα υστέρησης πύλης και απαγωγού (gate lag, drain lag effects), ενώ στα δείγματα με επικάλυψη 1 nm GaN τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις για την εξαγωγή δυναμικών αλλαγών στην αντίσταση της πηγής (R_s), όπου η σταθερή της τιμή υποδηλώνει ότι δεν υπάρχουν φορτισμένες καταστάσεις στην αντίστοιχη περιοχή. Ωστόσο, ήταν υψηλότερη στα δείγματα αναφοράς, δείχνοντας την θετική επίδραση του στρώματος επικάλυψης GaN. Το πρόβλημα της αστάθειας ρεύματος, δείχνει την κρισιμότητα αδρανοποίησης της επιφάνειας των διατάξεων με κάποια επεξεργασία, όπως την εναπόθεση στρώματος Si_3N_4 .

Η απόδοση των διατάξεων AlN/GaN HEMT ήταν εξαιρετική για $L_g=1\mu m$, αλλά με περαιτέρω μείωση των διαστάσεων της πύλης στην κλίμακα των νανομέτρων χρησιμοποιώντας τεχνικές λιθογραφίας δέσμης ηλεκτρονίων (e-beam lithography), θα επιτευχθεί υψηλότερης πυκνότητας ρεύμα (A/mm) και δυνατότητα λειτουργίας σε συχνότητες μεταξύ 100GHz και THz. Περαιτέρω θέματα προς επίλυση, αποτελούν η εξάλειψη της παράλληλης αγωγιμότητας μέσω του υποκείμενου GaN επιτυγχάνοντας υψηλή αντίσταση-ημιμονωτικά χαρακτηριστικά, καθώς και η αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας από το κανάλι με χρήση υποστρωμάτων μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας, όπως ο αδάμαντας.

Πιστεύουμε πως η επίτευξη των παραπάνω θα μας αποκαλύψει πλήρως το μοναδικό δυναμικό αυτών των ετεροδομών, για διατάξεις υψηλών συχνοτήτων και ισχύος του μέλλοντος.