

**GATE UZUNLUĞUNUN GaN HEMT AYGITLARDA GÜÇ
PERFORMANSINA ETKİSİ**

**EFFECT OF GATE LENGTH ON POWER PERFORMANCE
OF GaN HEMT DEVICES**

AHMET TOPRAK

PROF. DR. M. RECAİ ELLİALTIOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
NANOTEKNOLOJİ ve NANOTIP Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

AHMET TOPRAK' in hazırlamış olduğu “**Gate Uzunluğunun GaN HEMT Aygıtlarda Güç Performansına Etkisi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ VE NANOTIP ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ekmel Özbay

Başkan :.....

Prof. Dr. M. Recai Ellialtıođlu

Danışman :.....

Prof. Dr. řadan Özcan

Üye :.....

Yrd. Doc. Dr. Özlem Duyar Çořkun

Üye :.....

Yrd. Doc. Dr. Memed Duman

Üye :.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof.Dr. Fatma Sevin Düz
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Güven ve desteğini hiç esirgemeyen eşim **Tuđba**'ya ve gülücükleri ile ruhumu ısıtan kızım **Karen**'e

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02/06/2014

AHMET TOPRAK

ÖZET

GATE UZUNLUĞUNUN GaN HEMT AYGITLARDA GÜÇ PERFORMANSINA ETKİSİ

Ahmet TOPRAK

Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilimdalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Recai Ellialtıoğlu

Eş Danışman: Dr. Özlem Şen

Haziran 2014, 68 sayfa

Bu çalışma, GaN temelli yüksek hareketli elektron taşıyıcı transistörlerin (HEMT) geliştirilmesi amacıyla yapılan epitaksiyel büyütme, fabrikasyon ve karakterizasyon işlemlerini kapsamaktadır. GaN HEMT epitaksiyel örnekler, metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemiyle büyütülmüştür. Büyütülen bu örneklerin yapısal incelemeleri için Fotolüminesans (PL) Ölçüm Sistemi, Optik Geçirgenlik Ölçüm Sistemi, Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Hall Etkisi Ölçüm Sistemi kullanılmıştır. Kapı (gate) uzunluğunun (L_g) HEMT aygıtlarda güç performansına etkisini görmek için 12×12 mm² boyutundaki 4 ayrı epitaksiyel örnek için kapı (gate) uzunluğu (L_g); 300 nm, 600 nm, 800 nm ve 1000 nm olacak şekilde değiştirilerek HEMT aygıt fabrikasyonu yapılmıştır. Fabrike edilen örneklerin karakterizasyonu için iletim hattı modeli (Transmission Line Model, TLM) ölçümü, DC ölçümü, RF Ölçümü ve RF güç ölçümü alınmıştır. L_g değişiminin HEMT aygıtlarda güç performansını etkilediği ve L_g arttıkça aygıtların güç performansını arttırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: GaN, gate, HEMT, transistör, MOCVD, PL, HR-XRD, AFM, RF ölçümü.

ABSTRACT

EFFECT OF GATE LENGTH ON POWER PERFORMANCE OF GaN HEMT DEVICES

Ahmet TOPRAK

Master of Science, Department of Nanotechnology and Nanomedicine

Supervisor: Prof. Dr. M. Recai Ellialtıođlu

Co-supervisor: Dr. Özlem Şen

June 2014, 68 pages

This work has combined epitaxial growth, fabrication and characterization efforts to develop a GaN based high electron mobility transistors (HEMT). GaN HEMT epitaxial samples have been grown by using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique. Photoluminescence (PL), optical transmission, high resolution XRD (HR-XRD), Atomic Force Microscopy (AFM) and Hall Effect measurement systems were used for structural analysis of the grown epitaxial samples. In order to see the effect of the gate length (L_g) on RF power performance of HEMT devices with four different gate lengths (L_g) were fabricated on four different samples that have the dimension of $12 \times 12 \text{ mm}^2$. The gate length (L_g) of HEMT devices on four different samples is chosen as 300 nm, 600 nm, 800 nm and 1000 nm respectively. Transmission Line Model (TLM), DC, RF and Power measurements were carried out for DC and RF characterization of the fabricated samples. It was observed that changing of L_g affect the power performance of the HEMT devices, as L_g increases, the RF output power performance of the HEMT devices also increases with acceptable decrease in small signal gain.

Keywords: GaN, gate, HEMT, transistor, MOCVD, PL, HR-XRD, AFM, RF measurement.

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşmasında hiçbir konuda desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanlarım sayın Prof. Dr. M. Recai Ellialtıoğlu'na ve sayın Dr. Özlem Şen'e,

Bu çalışma kapsamında kullanılan örneklerin büyütülmesinin ve karakterizasyonunun yapılmasına olanak sağlayan Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nin tüm olanaklarını cömertçe sunduğu, destek ve yardımları için sayın Prof. Dr. Ekmel Özbay'a,

HEMT aygıt karakterizasyonu kapsamında engin bilgileri ile bütün sorularımı içtenlikle cevaplayan ve yardımlarını asla esirgemeyen Dr. Özlem Şen'e, Ömer Cengiz'e, Sinan Osmanođlu'na ve Galip Orkun Arıcan'a,

Aygıt fabrikasyonu konusunda bana bildiklerini öğretmekten asla çekinmeyen Dođan Yılmaz'a, Gökhan Kurt'a, M. Cihan Çakır'a, Yıldırım Durmuş'a ve Burak Turhan'a,

HEMT epitaksiyel yapılarının üretilmesi ve karakterizasyonu kapsamında bilgilerini benimle paylaşmaktan asla sakınmayan Hüseyin Çakmak'a, Ayça Emen'e ve Pakize Demirel'e,

Sıcak gülüşlerini esirgemeyen ve her türlü yardıma her zaman hazır olan Nanotam çalışanlarına,

Her an içtenliği ve sıcak konuşmaları ile bana destek veren eşim Tuđba'ya,

Ağlamalarıyla ve gülmeleriyle hayatıma anlam katan kızım Karen'e,

en içten teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. GaN YÜKSEK HAREKETLİ ELEKTRON TAŞIYICI TRANSİSTÖRLER (HEMT)3	3
2.1. GaN Malzeme Özellikleri	3
2.1.1. Kristal Yapı	5
2.2. GaN HEMT Epitaksiyel Yapı	6
2.2.1. Alttaş	7
2.2.2. AlN Çekirdeklenme Tabakası	8
2.2.3. AlGaN Geçiş Tabakası	8
2.2.4. GaN Tampon Tabakası	8
2.2.5. AlN Ara Plaka (Spacer) Tabakası.....	8
2.2.6. AlGaN Bariyer Tabakası.....	9
2.2.7. GaN Kep Tabakası	9
2.3. GaN HEMT Yapılarda Kutuplanma	9
2.3.1. Doğal Kutuplanma	9
2.3.2. Piezoelektrik Kutuplanma	10
2.4. GaN HEMT Yapılarda 2DEG Oluşumu.....	10
2.5. GaN HEMT Aygıtların Çalışma Prensibi.....	13
3. DENEYSEL TEKNİKLER	17
3.1. Epitaksiyel Yapının Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri.....	17
3.1.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) Büyütme Yöntemi.....	17
3.1.2. Fotolüminesans (PL) Ölçüm Sistemi	20
3.1.3. Optik Geçirgenlik Ölçüm Sistemi	21
3.1.4. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD)	22
3.1.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	23
3.1.6. Hall Etkisi Ölçüm Sistemi.....	24

3.2. GaN HEMT Aygıt Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri.....	26
3.2.1. Optik Litografi	26
3.2.2. Elektron Demeti Litografisi.....	29
3.2.3. Kuru Aşındırma Sistemi.....	29
3.2.4. Metal Kaplama Sistemi.....	30
3.2.5. Pasivasyon Kaplama Sistemi	31
3.2.6. Hızlı Tavlama Sistemi (RTP)	32
3.2.7. İletim Hattı Modeli (Transmission Line Model).....	33
3.2.8. DC Ölçüm Sistemi	34
3.2.9. RF Ölçüm Sistemi	36
3.2.10. Güç Ölçüm Sistemi.....	37
4. DENEYSEL AYRINTILAR	38
4.1. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısının Büyütülmesi	38
4.2. GaN HEMT Aygıt Fabrikasyonu	39
4.2.1. Örnek Temizliği	39
4.2.2. Aygıt Adacığ Aşındırması	39
4.2.3. Omik Kontak Adımı	40
4.2.4. Kapı (Gate) Kontak Adımı	41
4.2.5. Birinci Bağlantı Metali Adımı.....	43
4.2.6. Pasivasyon Adımı.....	44
4.2.7. Kontak Ped Açma Adımı	44
4.2.8. Hava Köprüsü Destek Adımı	45
4.2.9. İç Bağlantı (Interconnect) Adımı	46
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	47
5.1. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısının Karakterizasyonu	47
5.2. GaN HEMT Aygıt Karakterizasyonu	53
5.2.1. Omik Kontak Direnç Ölçümü	53
5.2.2. DC Ölçüm Sonuçları.....	54
5.2.3. RF Ölçüm Sonuçları	57
5.2.4. Güç Ölçüm Sonuçları	60
6. SONUÇ	64
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_g	Bant genişliği
E_{br}	Kırılma Elektrik Alanı
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
κ	Isıl İletkenlik
μ_n	Elektron Hareketliliği
μ_p	Hole Hareketliliği
σ_P	Tabaka Yük Yoğunluğu
u_d	Doymuş Elektron Sürüklenme Hızı
e_{ij}	Yönelime Bağlı Piezoelektrik Katsayılar
ϵ_j	Gerginlik
C_{13}, C_{33}	Elastik Sabitler
d_{cr}	Kritik Kalınlık
λ	Dalga Boyu
P_{SP}	Doğal Kutuplanma
P_{PZ}	Piezoelektrik Kutuplanma
P	Makroskobik Kutuplanma
L_g	Kapı (Gate) Uzunluğu
W_g	Kapı Genişliği
I_{DS}	Akaç (Drain)-Kaynak (Source) Akımı
g_m	Geçiş İletkenliği
f_T	Akım Kazancı Kesilim Frekansı
f_{max}	Güç Kazancı Kesilim Frekansı
P_{max}	Maksimum Güç
ϵ_s	Yarıiletkenin Dielektrik Sabiti
ϵ_0	Vakumun Dielektrik Sabiti
V_g	Kapı (Gate) Voltajı
C_g	Kapı (Gate) Kapasitansı
V_{knee}	Bükülme Voltajı
V_{br}	Kırılma Gerilimi
I_{DSS}	Doym (Satürasyon) Akımı

Kısaltmalar

HEMT	High Electron Mobility Transistor
2DEG	2-Boyutlu Elektron Gazı
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
SiC	Silisyum Karbür
GaN	Galyum Nitrat
XRD	X-Işını Kırınımı
HR-XRD	Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
RTP	Hızlı Tavlama Sistemi
TLM	İletim Hattı Modeli
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
PL	Fotoluminesans

1. GİRİŞ

İlk katı hal transistörün, 1947 yılında Bell laboratuvarlarında William Shockley başkanlığında John Bardeen ve Walter Brattain'den oluşan bir ekip tarafından bulunmasından sonra transistörler, 20. yüzyılın en önemli keşiflerinden biri olarak modern elektroniğin temel bileşeni haline gelmiştir. Bu tarihten sonra var olan transistörlerin seri üretimini sağlamak ve kapasitesitelerini arttırmak amacıyla yarıiletken aygıt teknolojisinde çok hızlı gelişmeler olmuştur. Özellikle mevcut transistör teknolojisinin, sahip olduğu limitleri nedeniyle kablosuz veri iletişim teknolojisi uygulamalarında gerekli olan yüksek güç ve yüksek frekans gereksinimlerini karşılayamaması yeni tip bir malzeme sisteminin ve teknolojisinin doğmasını sağlamıştır.

1979 yılında Takashi Mimura [1] tarafından yüksek hareketli elektron taşıyıcı transistör (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor) aygıt teknolojisinin bulunması yarıiletken aygıt teknolojisinde bir devrim yaratmış ve geleneksel transistör mantığının bir kenara bırakılmasını sağlamıştır. Geleneksel transistör teknolojisi, n-tipi ve p-tipi katkılamaya bağlı olarak serbest elektronların bir yarıiletken boyunca hareketi üzerine kuruludur. Bu ise; elektronların kendi hareketleri sırasında katkı atomlarıyla çarpışarak saçılmaları ve dolayısıyla da hızlarının ve enerjilerinin azalarak aygıt performansının düşmesine yol açmaktadır. HEMT aygıt teknolojisinde ise bant aralıkları farklı iki malzeme üst üste büyütülerek bu iki tip malzemenin birleştiği sınır bölgede bir kuantum kuyusunun ve buna bağlı olarak da 2-boyutlu bir elektron gazının (2DEG) oluşması sağlanmaktadır. Bu durum ise katkı atomlarıyla herhangi bir çarpışma ve saçılmaya mahal vermeksizin elektronların bir yüzey boyunca daha hızlı ve daha enerjik hareket etmesini sağlamaktadır.

1979 yılında geliştirilen ilk AlGaAs/GaAs HEMT aygıtların kısa zaman içerisinde kendi performanslarının sınırına ulaşması, yeni tip bir malzeme sisteminin gün ışığına çıkmasını sağlamıştır. GaN malzemesi, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında sahip olduğu yüksek bant aralığı genişliği, yüksek kırılma gerilimi alanı, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek elektron satürasyon hızı ve yüksek erime sıcaklığı gibi özellikleri nedeniyle HEMT aygıt çalışmalarında vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Özellikle 1986 yılında Amano ve arkadaşları [2]

tarafından Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemiyle GaN malzemesinin ince film halinde çok kaliteli bir şekilde büyütülmesi ve 1991 yılında Khan ve arkadaşları [3] tarafından AlGaIn/GaN yapılarında 2DEG oluşumunun gösterilmesi ve ardından da yine Khan ve arkadaşları tarafından [4,5] sırasıyla 1993 ve 1994 yıllarında GaN temelli ilk metal yarıiletken alan etkili transistörlerin (MESFET) ve ilk hetero yapılı alan etkili transistörlerin (HFET) üretilmesi GaN temelli HEMT aygıtlara ilgiyi hızla arttırmıştır.

GaN HEMT aygıt teknolojisi, sahip olduğu yüksek çalışma gerilimi, yüksek çıkış gücü ve yüksek giriş empedansı gibi özellikleri nedeni ile yüksek güçlü ve yüksek hızlı Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) yükselteç gerektiren, uydu haberleşme sistemleri, yüksek performanslı radarlar, yüksek kapasiteli kablosuz veri iletişimin sistemleri, baz istasyonları, WiMAX sistemleri gibi gelişmiş haberleşme sistemlerinde hızla yaygınlaşmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında; ileri düzey telekomünikasyon ve MMIC yükselteç uygulamalarında kullanılacak GaN HEMT epitaksiyel yapısının büyütülmesi, fabrikasyonu ve karakterizasyonu amaçlanmıştır. Bu çalışmada üretilen GaN HEMT aygıtlarda, gate uzunluk değişimlerinin aygıt RF güç performansı üzerindeki etkileri incelenecektir. Epitaksiyel yapının büyütülmesinde metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOVCD) sistemi kullanılacaktır. Aygıt fabrikasyonunda ise kuru aşındırma, pasivasyon kaplaması, elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile metal kaplama, fotolitografi ve e-line litografi yöntemleri kullanılacaktır. Büyütülen epitaksiyel yapının ve üretilen aygıtların elektriksel karakterizasyonu, özel olarak hazırlanmış düzeneklerde gerçekleştirilecektir. Büyütülen epitaksiyel yapının ve üretilen aygıtların fiziksel ve optik karakterizasyonları ise optik mikroskop, profilometre, elipsometre, TEM, XRD ve fotoluminesans cihazları kullanılarak yapılacaktır.

Önerilen tezin çıktısı, nanoteknolojinin sivil ve askeri uygulamalarında özellikle yüksek performanslı radarlarda ve yüksek kapasiteli kablosuz veri iletişimde kullanılacak GaN HEMT aygıtlar olacaktır. Günümüz yarıiletken aygıt teknolojisinin yetersizliği göz önünde bulundurulduğunda yüksek frekanslı güç elektroniği alanında gerçekleştirilecek bu çalışma, bu tip aygıtların anlaşılması ve geliştirilmesi konusunda bir referans kaynağı olacaktır.

2. GaN YÜKSEK HAREKETLİ ELEKTRON TAŞIYICI TRANSİSTÖRLER (HEMT)

2.1. GaN Malzeme Özellikleri

GaN, yüksek güç ve yüksek frekans uygulamaları için bilinen en uygun yarıiletken malzemedir. Çizelge 2.1'de yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler ile GaN malzemesinin bazı elektriksel ve mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler için bazı elektriksel ve mekanik özellikler [6–11].

Özellik	Si	GaAs	4H-SiC	6H-SiC	GaN
Bant genişliği, E_g (eV)	1,12	1,43	3,26	2,86	3,39
Kırılma Elektrik Alanı, E_{br} (MV/cm)	0,25	0,40	3,5	3,8	4,0
Bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r	11,9	12,5	10,1	9,66	9,50
Isıl İletkenlik, κ (W/cm.K)	1,5	0,54	3,7	4,9	1,3
Elektron Hareketliliği, μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1350	8500	720	370	2000
Hole Hareketliliği, μ_p ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	600	400	115	101	850
Doymuş Elektron Sürüklenme Hızı, u_d ($\times 10^7$ cm/s)	1	2	2	2	2,5
Erime Noktası, (K)	1415	1238	3103	3103	2791
Yoğunluk (g/cm^3)	2,33	5,32	3,21	3,21	6,15

GaN malzemesi sahip olduğu yüksek bant genişliği, yüksek kırılma elektrik alanı, yüksek yoğunluk ve yüksek erime noktası gibi özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj uygulamaları için oldukça idealdir. GaN sahip olduğu bu özellikleri nedeniyle uzay uygulamaları dahil olmak üzere her türlü yüksek güç uygulaması için vazgeçilmez bir malzemedir. Bununla birlikte GaN malzemesinin sahip olduğu yüksek doymuş elektron sürüklenme hızı, onu diğer malzemelere göre yüksek doyum akımı ve yüksek frekans uygulamaları için de vazgeçilmez kılmaktadır.

Yarıiletken aygıt teknolojisinde malzemelerin aygıt performansına etkilerini incelemek ve malzemelerin belli uygulama alanlarında kendi performans sınırlarını belirlemek amacıyla çeşitli değer katsayıları (figures of merit) tanımlanmıştır. Silisyuma (Si) göre normalize edilen bu değerler Johnson, Keyes, Baliga ve Baliga HF değer katsayıları olarak bilinmektedirler. Johnson değer katsayısı, bir malzemenin yüksek güç ve yüksek frekanslarda çalışma kapasitesini tanımlamaktadır. Keyes değer katsayısı, bütünleşik devrelerde kullanılan yüksek hızlı transistörlerin anahtarlama davranışının termal sınır kapasitesini tanımlamaktadır. Baliga değer katsayısı, güç transistörlerinde iletim kayıplarını minimuma indirmek için gerekli olan kritik malzeme parametrelerini tanımlamaktadır. Baliga yüksek frekans (Baliga HF) değer katsayısı, bir malzemenin yüksek frekans değerlerinde anahtarlama güç kayıplarını tanımlamaktadır [12,13]. Bir yarıiletken aygıtta maksimum verim için bu değer katsayılarının olabildiğince büyük olması gerekmektedir. Çizelge 2.2'de çeşitli yarıiletken malzemeler için değer katsayıları gösterilmektedir.

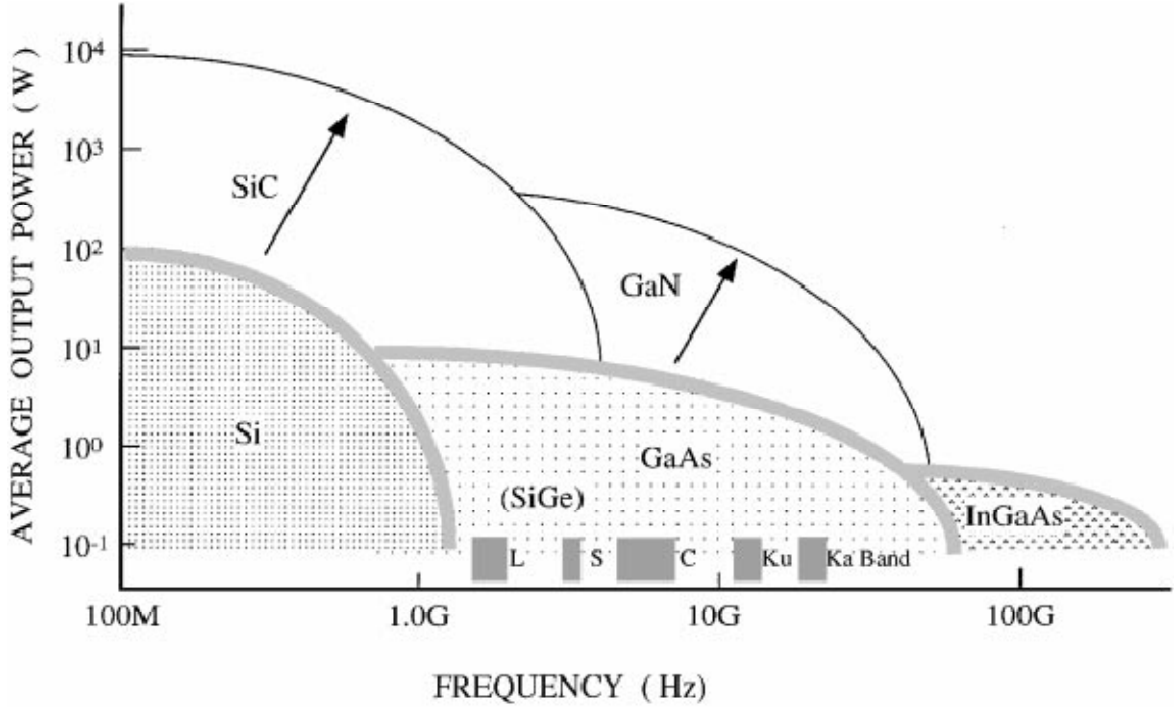
Çizelge 2.2. Yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler için değer katsayıları (figures of merit) [6].

Malzeme	Johnson [[$E_{br} \cdot u_d / \pi$] ²]	Keyes [$\kappa \cdot (u_d / \epsilon_r)^{1/2}$]	Baliga [$\epsilon_r \cdot \mu_n \cdot E_{br}^3$]	Baliga HF [$\mu_n \cdot E_{br}^2$]
Si	1	1	1	1
GaAs	7,1	0,45	15,6	10,8
4H-SiC	180	4,61	130	22,9
6H-SiC	260	4,68	110	16,9
GaN	760	1,6	650	77,8

Çizelge 2.2'den görüldüğü üzere GaN malzemesi geleneksel yarıiletkenlere göre hem yüksek frekans hem de yüksek güç uygulamalarında önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Şekil 2.1'de yer alan çeşitli yarıiletken aygıtlar için çalışma frekansına bağlı ortalama çıkış gücü grafiği incelendiğinde GaN temelli aygıtların yüksek frekans değerlerinde de yüksek güçlere çıkabildiği görülmektedir. Bu da GaN temelli

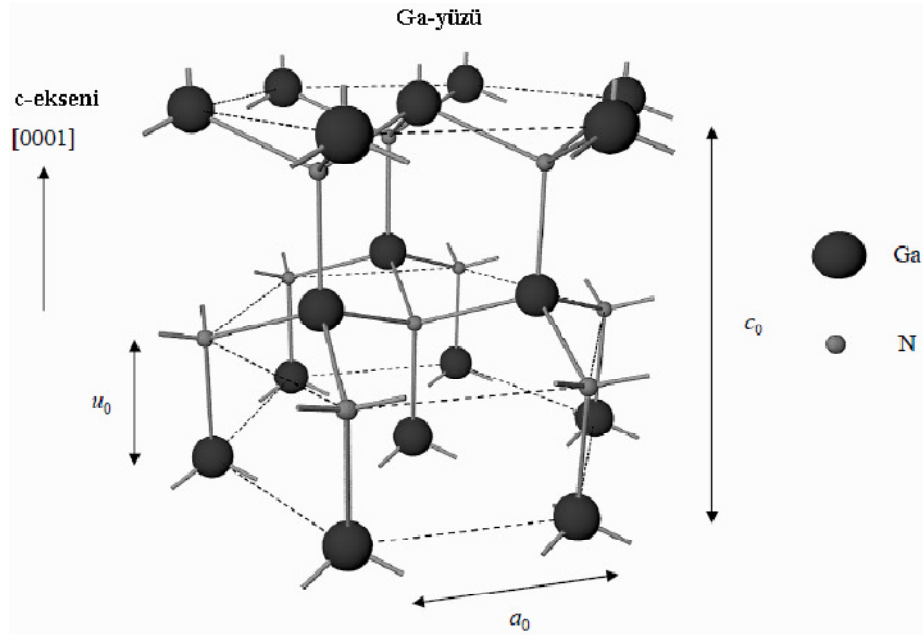
aygıtları, hem yüksek güç hem yüksek frekans hem de yüksek frekanslı yüksek güç elektroniği alanında vazgeçilmez kılmaktadır.



Şekil 2.1. Çeşitli yarıiletken aygıtlar için çalışma frekansına bağlı ortalama çıkış gücü grafiği [14].

2.1.1. Kristal Yapı

GaN, III-Nitrür yarıiletken malzeme grubuna dahil olup III-Nitrür grubu wurtzite, zinc-blende ve kaya tuzu olmak üzere 3 farklı yapıda kristalleşebilmektedir. Ancak bu tez kapsamında büyütülen örnekler uygun olması nedeniyle termodinamik açıdan daha kararlı ve daha güçlü kutuplanma özelliğine sahip wurtzite kristal yapısı ele alınacaktır [15]. Wurtzite kristal yapısı, birim hücresi iç içe geçmiş iki hekzagonal sıkı paket yapıdan oluşmakta olup a ve c olmak üzere iki örgü sabitine sahiptir [16]. Wurtzite kristal yapısına sahip GaN, atomik düzenlenmeye bağlı olarak c-ekseni ([0001] yönelimi) boyunca Ga-yüzlü [0001] ve N-yüzlü [000 $\bar{1}$] olmak üzere iki farklı şekilde büyüebilmektedir [17]. Şekil 2.2'de wurtzite kristal yapısına sahip Ga-yüzlü GaN tabakasının atomik düzenlenimi ve Çizelge 2.3'te de GaN ve bazı III-Nitrürler için 300 K'deki örgü parametreleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Wurtzite kristal yapısına sahip Ga-yüzlü GaN tabakasının atomik düzenlenimi [18].

Çizelge 2.3. Wurtzite kristal yapısında GaN ve bazı III-Nitrürler için 300 K'deki örgü parametreleri [19].

Parametre (Å)	İdeal durum	GaN	AlN	InN
a_0	—	0,318	0,311	0,353
c_0	—	0,517	0,498	0,569
c_0/a_0	1,63	1,63	1,60	1,61
u_0	0,375	0,375	0,385	0,375

2.2. GaN HEMT Epitaksiyel Yapı

Epitaksi ifadesi temel olarak, tek kristal bir alttaş üzerine bu alttaşın kristal yapısına uygun olan başka bir kristalin büyütülmesi anlamına gelmektedir. Epitaksiyel büyütmelelerde üst üste büyütülen malzemelerin kristal parametreleri arasında bir uyum olması gerekmektedir, aksi halde epitaksiyel yapıda çeşitli kusurlar ve gerilmeler kaçınılmaz olarak var olur. Şekil 2.3'te Bilkent Üniversitesi NANOTAM'da silisyum karbür (SiC) alttaş üzerine büyütülmüş bir AlGaIn/GaN HEMT epitaksiyel yapısı görülmektedir.

Tabaka		Kalınlık (nm)
GaN	(Kep tabakası)	~ 2
AlGaN	(Bariyer tabakası)	~ 30
AlN	(Ara plaka tabakası)	~ 1-2
GaN	(Tampon tabakası)	~ 2000
AlGaN	(Geçiş tabakası)	~ 290
AlN	(Çekirdeklenme tabakası)	~ 16
SiC	(Alttaş)	330.000

Şekil 2.3. AlGaN/GaN HEMT epitaksiyel yapısı.

2.2.1. Alttaş

Alttaş tercihi, HEMT fabrikasyon maliyetini ve RF performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. AlGaN/GaN HEMT epitaksiyel büyütmelerinde alttaş olarak genelde safir (Al_2O_3) [20–22], silisyum (Si) [23,24] ve silisyum karbür (SiC) [10] kullanılmaktadır. Çizelge 2.4'te AlGaN/GaN HEMT epitaksiyel büyütmelerde kullanılan alttaşlar için bazı mekanik özellikler görülmektedir.

Çizelge 2.4. AlGaN/GaN HEMT epitaksiyel büyütmelerde kullanılan alttaşlar için bazı mekaniksel özellikler [25].

Özellik	Al_2O_3	Si	6H-SiC
Örgü parametresi, a (Å)	4,7589	3,84	3,0806
GaN ile örgü uyumsuzluğu yüzdesi (%)	16	17	3,5
Termal genişleme katsayısı ($10^{-6} K^{-1}$)	7,3	2,6	4,46
Termal iletkenlik ($Wcm^{-1}K^{-1}$)	0,41	1,3	4,9
Erime Sıcaklığı (K)	2303	1412	3102

Bu alttaşlar içerisinde özellikle AlGaN/GaN HEMT yüksek güç uygulamaları için diğer alttaşlara göre çok yüksek erime sıcaklığına, çok yüksek termal iletkenliğe ve çok düşük örgü uyumsuzluğuna sahip olması nedeniyle silisyum karbür (SiC) tercih edilmektedir. Ayrıca SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapıların diğer

alttaşlar üzerinde büyütülenlere göre çok daha yüksek performanslara çıkması SiC alttaşı, diğer alttaşlara göre daha pahalı olmasına rağmen daha cazip kılmaktadır [10].

2.2.2. AlN Çekirdeklenme Tabakası

Çekirdeklenme (nucleation) tabakası, alttaş ile bu alttaş üzerinde büyütülecek tampon tabaka arasındaki stres ve örgü uyumsuzluklarını azaltmak amacıyla bir ara tabaka olarak büyütülür. Çekirdeklenme tabakasının tercihi, alttaş malzemesine ve epitaksiyel büyütme tekniğine bağlı olarak değişir. Ancak genellikle çok ince AlN, AlGaN ya da GaN tabakası tercih edilir. Bu tez kapsamında büyütülen HEMT yapısında SiC ile oldukça düşük bir örgü uyumsuzluğu yüzdesine (%1) sahip olduğu için çekirdeklenme tabakası olarak AlN tercih edilmiştir [25].

2.2.3. AlGaN Geçiş Tabakası

Geçiş tabakası, çekirdeklenme tabakası ile tampon tabaka arasındaki stres, örgü uyumsuzlukları ve tuzak oluşumlarını engellemek amacıyla çok yüksek konsantrasyona sahip olacak şekilde büyütülür. Bu tez kapsamında geçiş tabakası olarak, %70 Al konsantrasyona sahip AlGaN tercih edilmiştir.

2.2.4. GaN Tampon Tabakası

Diğer tabakalara görece daha kalın olan yarı yalıtkan (yüksek dirençli) GaN tabakası üst arayüzde 2-boyutlu bir elektron (2DEG) gazı oluşturmak amacıyla büyütülmektedir. GaN tabakası aynı zamanda alt arka plan (geçiş tabakası) taşıyıcı konsantrasyonuna da yalıtkan görevi görerek 2DEG elektronlarının tuzaklanmasını engelleyerek akaç (drain) akım çökmelerini azaltmaktadır.

2.2.5. AlN Ara Plaka (Spacer) Tabakası

Ara plaka tabakası, GaN tampon tabaka ile AlGaN bariyer tabakası arasında büyütülen oldukça hassas bir kalınlığa sahip bir tabakadır. Bu tabaka, 2DEG elektronları ile bunların bariyer tabakasında yer alan iyonize halindeki ana atomları arasındaki Coulomb saçılmalarını azaltarak yüksek taşıyıcı yoğunluğunun ve hareketliliğinin elde edilmesini sağlamaktadır. Ara plaka tabakasının kalınlığı 2DEG özelliği ve tabaka direnci ile direkt ilintili olduğundan oldukça hassas bir şekilde büyütülmelidir [12].

2.2.6. AlGaN Bariyer Tabakası

AlGaN bariyer tabakası HEMT yapısında en kritik tabakayı oluşturmaktadır. Tampon tabakasının bant genişliğinden daha büyük bir bant genişliğine sahip olacak şekilde tercih edilen bu tabaka, 2DEG'e elektron kaynağı sağlamaktadır. AlGaN bariyer tabakasında kalınlık ve Al konsantrasyonu oldukça önem taşımaktadır. Bariyer tabakasının belli bir kritik kalınlığına kadar 2DEG oluşmaz. Al konsantrasyonuna bağlı olarak 2DEG yoğunluğu artmaktadır, ancak Al konsantrasyonu belli bir kritik değeri geçtikten sonra GaN üzerinde örgü uyuşumsuzlukları oluşturarak kusurlara, gerilmelere ve 2DEG elektronlarının arayüzey pürüzlülüğü ve alaşım saçılmalarına daha fazla maruz kalmalarına neden olmaktadır [26].

2.2.7. GaN Kep Tabakası

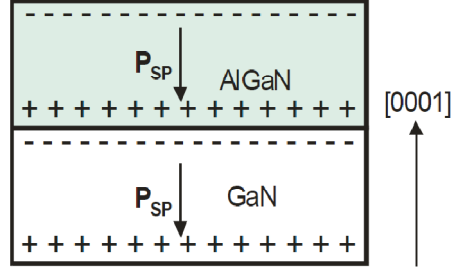
GaN kep tabakası, düşük omik kontak direnci elde etmek, yüzeyin oksitlenmesini engellemek ve yüzey kaçak akımlarını azaltmak amacıyla büyütülmektedir.

2.3. GaN HEMT Yapılarda Kutuplanma

III-Nitrür yarıiletken malzemeler, doğal kutuplanma (P_{SP}) ve piezoelektrik kutuplanma (P_{PZ}) olmak üzere iki çeşit kutuplanma alanına sahiptirler.

2.3.1. Doğal Kutuplanma

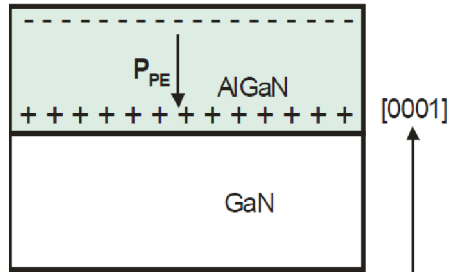
Doğal kutuplanma alanı, wurtzite kristal yapısına sahip III-Nitrürlerin ters simetriye sahip olmamaları ve metal-azot atomları arasındaki bağın tam olarak kovalent olmamasından kaynaklanmaktadır. Azot (N), oldukça elektronegatif bir özelliğe sahip olduğundan Al-N ve Ga-N bağ yapılarında elektron bulutu N tarafına kayarak güçlü bir iyonik etkileşmenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum kristal yapının bir yüzünde net bir negatif yükün ve diğer yüzünde de net bir pozitif yükün oluşmasını sağlayarak kendiliğinden güçlü bir dipol (doğal kutuplanma) alanı oluşturmaktadır. III-Nitrürlerde meydana gelen bu doğal kutuplanma alanı, III-V yarıiletkenlere göre 5 kat daha güçlüdür [27]. Şekil 2.4'te Ga-yüzlü GaN ve AlGaN için doğal kutuplanma alanı ve yüzey yükü oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.4. Ga-yüzlü GaN ve AlGaN için doğal kutuplanma alanı ve yüzey yükü oluşumu [28].

2.3.2. Piezoelektrik Kutuplanma

Piezoelektrik kutuplanma, üst üste büyütülen iki malzemenin örgü parametreleri ve termal genişleme katsayıları arasındaki farklılıkların yapıda oluşturmuş oldukları sıkışma veya gerilme gerginlikleri nedeniyle oluşur. III-Nitrürlerde meydana gelen sıkışma gerginlikleri ve buna bağlı olarak meydana gelen piezoelektrik kutuplanma alanı geleneksel III-V ve II-VI yarıiletkenlere göre 10 kat daha büyüktür. Şekil 2.5'te GaN üzerinde büyütülen AlGaN için piezoelektrik kutuplanma alanı ve yüzey yükü görülmektedir.



Şekil 2.5. Ga-yüzlü GaN üzerinde büyütülen AlGaN'da oluşan sıkışma gerginliği nedeniyle oluşan piezoelektrik alan ve yüzey yükü [28].

2.4. GaN HEMT Yapılarda 2DEG Oluşumu

GaN HEMT yapılarında 2DEG oluşumunu daha rahat anlamak amacıyla AlGaN/GaN heteroeklemini ele alalım. Üst üste büyütülen AlGaN/GaN heteroekleminde kutuplanma, her tabakanın sahip olduğu doğal (P_{SP}) ve piezoelektrik (P_{PZ}) kutuplanmanın toplamı olup makroskobik kutuplanma (P) olarak adlandırılmaktadır. AlGaN ve GaN tabakalarının ayrı ayrı oluşturdukları toplam kutuplanmalar birbirinden farklı olduğundan bu iki tabakanın birleştiği sınır bölgesinde

bir gradyent oluşmakta ve Gauss yasasına göre kutuplanmanın süreksizliği sınırlı bir tabaka yük yoğunluğunun (σ_P) oluşmasını sağlamaktadır. Tabaka yük yoğunluğu şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\sigma_P = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad (2.1)$$

$$\sigma_P = \mathbf{P}_{PE,AlGaN} + \mathbf{P}_{SP,AlGaN} - \mathbf{P}_{SP,GaN} \quad (2.2)$$

Bütün polarizasyon vektörleri aynı yönlü (z-ekseni boyunca) olduklarından bundan sonraki gösterimlerde vektör notasyonu kullanılmayacaktır.

Piezoelektrik kutuplanma e_{ij} , yönelime bağlı piezoelektrik katsayılar ve ε_j ise, gerginlik olmak üzere

$$P_{PE} = \sum_j e_{ij} \varepsilon_j \quad (2.3)$$

olarak tanımlanmaktadır. e_{33} , z-ekseni ve e_{31} , x ve y-ekseni yönündeki piezoelektrik katsayılar olmak üzere III-Nitrürler için Eş. 2.3,

$$P_{PE} = e_{33} \varepsilon_z + e_{31} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (2.4)$$

ifadesine indirgenebilir. Eş. 2.4'te a_0 ve c_0 örgü sabitleri olmak üzere $\varepsilon_z = (c - c_0)/c_0$ ifadesi z-ekseni doğrultusundaki gerginliği ve $\varepsilon_x = \varepsilon_y = (a - a_0)/a_0$ ifadeleri de düzlemsel eksende meydana gelen gerginlikleri ifade etmektedir.

Wurtzite kristal yapısında, C_{13} ve C_{33} elastik sabitler olmak üzere z-ekseni yönündeki ε_z gerginliği için şu bağıntı yazılabilir,

$$\varepsilon_z = -2\varepsilon_{x,y} \frac{C_{13}}{C_{33}} \quad (2.5)$$

Eş. 2.4 ve Eş. 2.5 kullanılarak Eş. 2.2 ifadesi sonuç olarak şu şekilde yazılabilir,

$$\sigma_P = 2 \frac{a-a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) + P_{SP,AlGaN} - P_{SP,GaN} \quad (2.6)$$

Eş. 2.6 incelendiğinde tabaka yük yoğunluğunun (σ_P), AlGaN'in alaşım kompozisyonuna ve arayüzey gerginliklerine sıkı bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. Tabaka yük yoğunluğu tarafından oluşturulan kutuplanmanın pozitif olması durumunda serbest elektronlar, iç elektrik alanın etkisiyle kutuplanmanın oluşturduğu yükü dengelemek için AlGaN/GaN ara yüzüne doğru harekete geçerler. AlGaN/GaN bant offset değerinin yeterince büyük olması ve ara yüzey pürüzlülüğünün düşük olması durumunda bu elektronlar arayüzde birikerek n_s tabaka taşıyıcı yoğunluklu 2DEG kanalının oluşmasına yol açarlar.

2DEG kanalının oluşmasında AlGaN tabakasının kalınlığı kritik bir rol oynamaktadır. Yüzey verici enerji seviyesi (surface donor energy) E_D , AlGaN/GaN bant offseti ΔE_C , AlGaN tabakasının dielektrik sabiti ϵ_{AlGaN} olmak üzere bu kalınlık şu denklem ile belirlenmektedir,

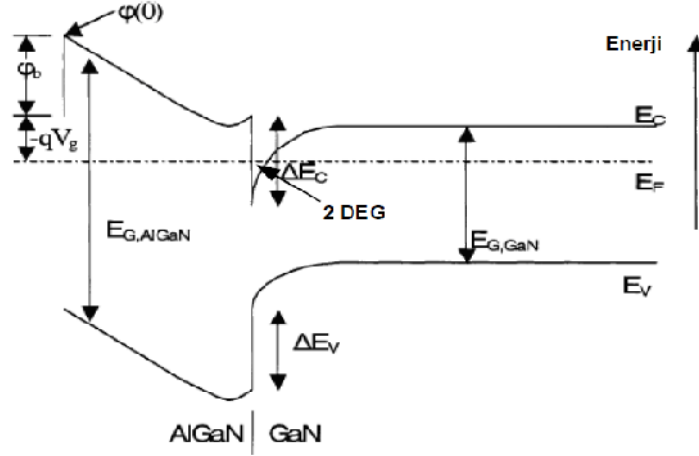
$$d_{cr} = (E_D - \Delta E_C) \cdot (\epsilon_{AlGaN} / e\sigma_P) \quad (2.7)$$

2DEG kanalının oluşturan tabaka taşıyıcı yoğunluğu n_s ise,

$$n_s = \frac{\sigma_P}{e} \left(1 - d_{cr}/d \right) \quad (2.8)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Eş. 2.8 incelendiğinde AlGaN tabakasının belirli bir kritik kalınlığına kadar 2DEG'in oluşmadığı görülmektedir. AlGaN tabakasının kalınlığı d_{cr} kritik kalınlığını geçtiği anda 2DEG oluşmaya başlar. Deneysel çalışmalarda AlGaN tabakası için 35 Å kritik kalınlık değeri rapor edilmiştir [29].

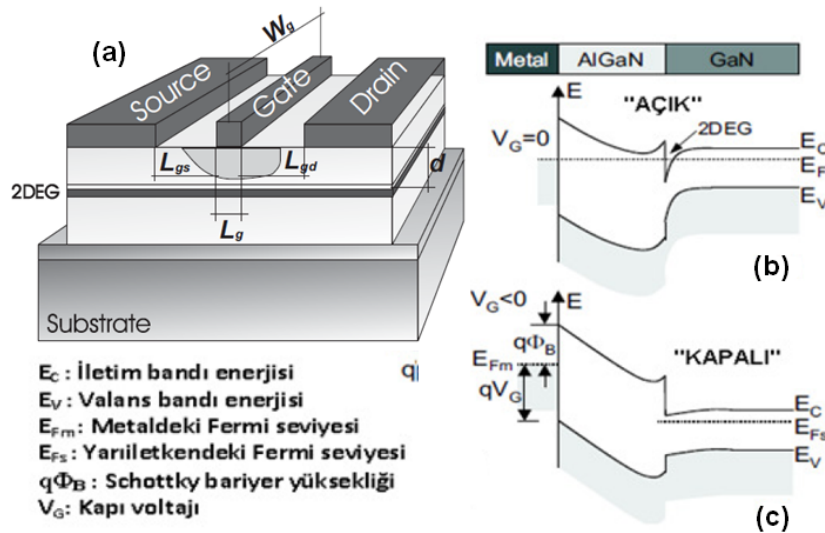
Şekil 2.6'da AlGaN/GaN heteroeklemi için enerji-bant yapısı ve 2DEG oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.6. AlGaN/GaN heteroeklemi için enerji-bant yapısı ve 2DEG oluşumu [30].

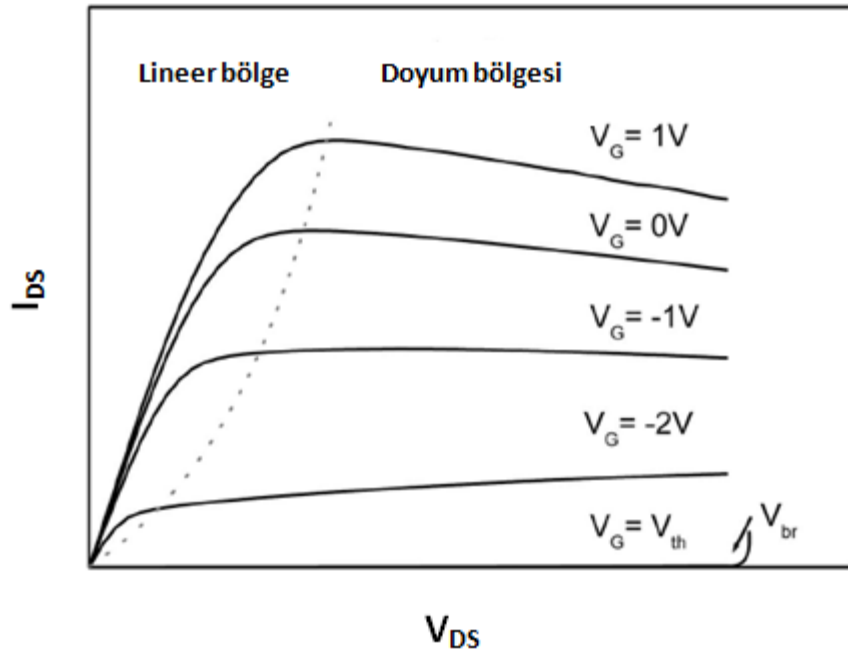
2.5. GaN HEMT Aygıtların Çalışma Prensibi

HEMT aygıtlarda elektronlar belli bir bölgeye sınırlandırıldıklarından sadece bir düzlem boyunca hareket edebilirler. HEMT aygıtlarda kendiliğinden oluşan 2DEG elektronları, yüzeydeki potansiyelin kapı (gate) voltajı ile değiştirilmesi ile kontrol edilebilmektedir. Kapı voltajı ile harekete geçirilen bu elektronlar, kaynak (source) ile akış (drain) arasında bir akımın akmasını sağlamaktadır. Şekil 2.7'de AlGaN/GaN HEMT aygıtının şematik çizimi ve gate voltaj değişimine bağlı olarak bant yapısı görülmektedir.



Şekil 2.7. AlGaN/GaN HEMT aygıtının (a) şematik çizimi [31], (b) termal denge durumunda sıfır kapı voltajı için bant yapısı ve (c) negatif kapı voltajı uygulanmış iken bant yapısı.

Akaç'a pozitif bir gerilim (V_{DS}) uygulanması durumunda kaynak ile akaç arasındaki potansiyel düşecek ve 2DEG boyunca elektronlar harekete geçmeye başlayacaktır. Kaynak ile akaç arasındaki akımın miktarı, kapı voltajı (V_G) ile kontrol edilmektedir. Kapı voltajını negatif yönde arttırmak, kapı altındaki yüklerin 2DEG kanalına doğru yayılmasını sağlayacaktır. Kapı voltajı yeterince büyük olduğunda tüketim tabakası (AlGaN tabakasındaki yükler), 2DEG bölgesine kadar genişler ve 2DEG yoğunluğu artık ihmal edilebilir bir düzeye düşer. Bu kısılmayı (pinch off) sağlayan en düşük kapı voltaj değeri eşik voltaj (V_{th}) olarak adlandırılır. Kapı voltajının eşik değeri üstünde olması durumunda kaynak ile akaç arasında elektron akışı olur. Akaç gerilimin artırılması durumunda akaç-kaynak akımı belli bir değere kadar doğrusal olarak artar. Bu değerden sonra ise kanaldan akan akım doyuma ulaşmaya (satüre) başlar. Maksimum doyum (satürasyon) akımı değeri I_{DSS} , 2DEG konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. 2DEG konsantrasyonu arttıkça I_{DSS} değeri de artar. Şekil 2.8'de belirli kapı voltajlarında (V_G yada V_g) uygulanan akaç voltajına (V_{DS}) bağlı akaç-kaynak akımı (I_{DS}) değişimi görülmektedir.



Şekil 2.8. AlGaN/GaN HEMT aygıtlar için tipik DC-IV karakteristiği [31].

HEMT aygıtların temel geometrik parametreleri kapı uzunluğu (L_g) ve kapı genişliğidir (W_g). Aygıtın maksimum frekans limitlerinin belirlenmesinde L_g oldukça

kritik bir öneme sahiptir. Yüksek frekans değerleri için L_g 'nin olabildiğince küçük olması istenirken yüksek güç uygulamaları için L_g 'nin büyük olması istenir. Aygıttan akan akaç akımı ise doğrudan W_d ile orantılıdır. HEMT'in elektriksel karakterizasyonu şu niceliklerle yapılmaktadır: akaç-kaynak akımı (I_{DS}), geçiş iletkenliği (g_m), akım kazancı kesilim frekansı (f_T), güç kazancı kesilim frekansı ya da maksimum salınım frekansı (f_{max}), maksimum güç (P_{max}).

ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 vakumun dielektrik sabiti ve d_{AlGaN} kapı elektrodu altındaki AlGaN tabakasının kalınlığı olmak üzere kapı kapasitansı için basit olarak şu eşitlik yazılabilir:

$$C_g = \epsilon_s \epsilon_0 \frac{L_g W_g}{d_{AlGaN}} \quad (2.9)$$

V_{BI} dışarıdan uygulanan kapı voltajı sıfır iken yapıda var olan dahili voltajı, V_g kapı voltajı ve v_d doymuş elektron sürüklenme hızı olmak üzere I_{DS} ,

$$I_{DS} \approx \frac{1}{L_g} C_g v_d (V_g - V_{BI}) \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir.

Geçiş iletkenliği (g_m), sabit bir akaç-kaynak voltajında kapı voltajındaki değişime karşılık akaç-kaynak akımındaki (I_{DS}) değişimi belirlemektedir. g_m şu şekilde ifade edilmektedir:

$$g_m \approx \frac{1}{L_g} C_g v_s \quad (2.11)$$

Bir elektronun kapı altından geçiş zamanı (τ), geçiş iletkenliği ve kapı kapasitansına şu şekilde bağlıdır,

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{v_s}{2\pi L_g} = \frac{g_m}{2\pi C_g} \quad (2.12)$$

R_L aygıtın çıkışındaki yük direnci ve R_{in} aygıtın girişindeki direnç olmak üzere f_{max} , f_T cinsinden şu şekilde ifade edilir,

$$f_{max} = \frac{f_T}{2} \times \sqrt{\left(\frac{R_L}{4R_{in}}\right)} \quad (2.13)$$

Aygıtın doyuma girdiği minimum voltaj değeri ya da bükülme voltajı V_{knee} olmak üzere P_{max} ifadesi ise şu eşitlik ile verilir,

$$P_{max} = \frac{I_{DSS}(V_{br} - V_{knee})}{8} \quad (2.14)$$

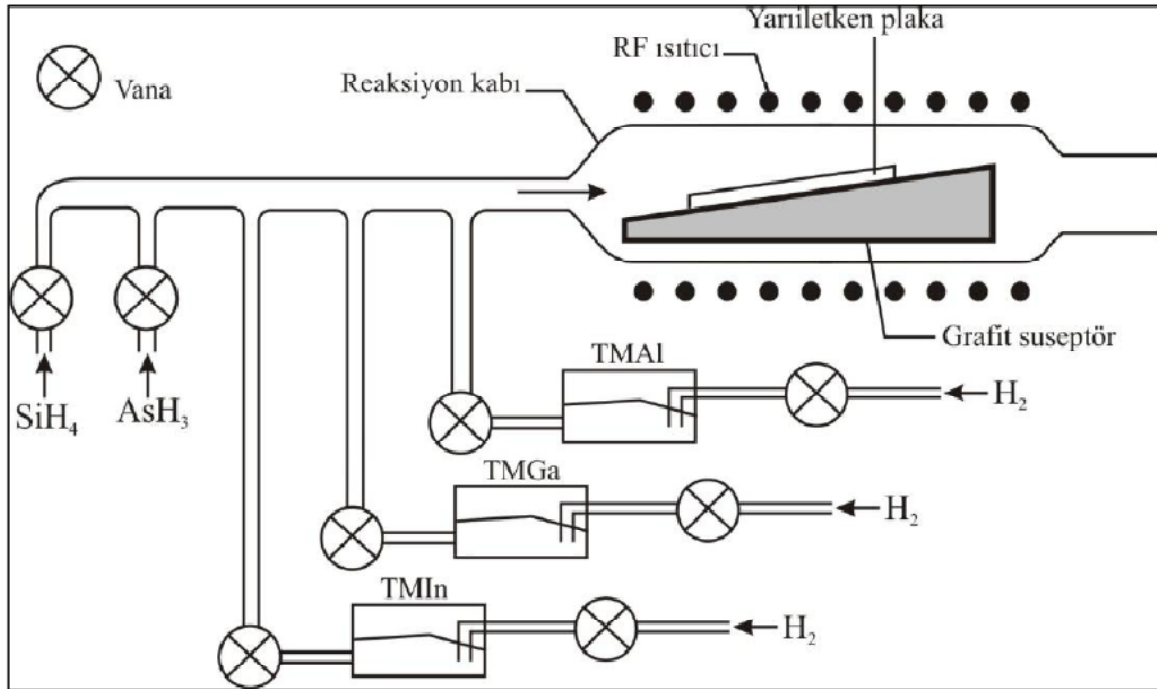
Eş. 2.14'ten görüldüğü üzere aygıtlar için DC çıkış gücü değeri, doyum (satürasyon) akımı (I_{DSS}) ve kırılma gerilimi değeri (V_{br}) ile orantılıdır. I_{DSS} ve V_{br} arttıkça P_{max} 'da artmaktadır.

3. DENEYSEL TEKNİKLER

3.1. Epitaksiyel Yapının Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri

3.1.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) Büyütme Yöntemi

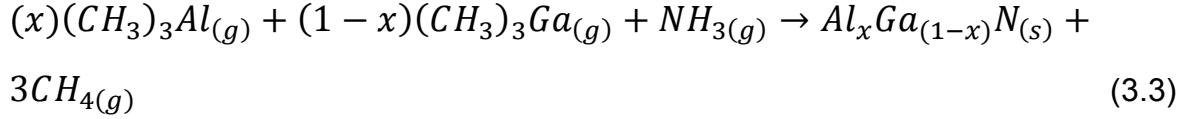
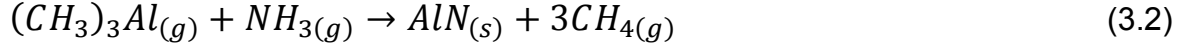
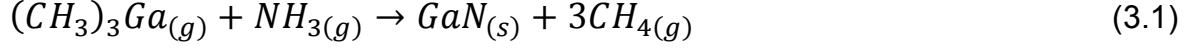
MOCVD, bir alttaş üzerine çoklu epitaksiyel katmanların nanometre hassasiyetinde büyütülmesi amacıyla kullanılan bir kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. MOCVD yöntemi özellikle çok yüksek kalitede ve çok yüksek saflıkta nitrür malzemelerinin büyütülmesinde kullanılmaktadır. MOCVD temel olarak ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilen organik gaz moleküllerine bağlı metal atomlarının bu alttaş yüzeyinde reaksiyon oluşturması esasına dayanmaktadır. Sıcak ortamda organik moleküller ile metal atomları arasındaki bağlar kırılarak alttaş yüzeyinde metal atomlarının tabakalar halinde kristalleşmesi sağlanmaktadır. Şekil 3.1'de yatay reaktörlü bir MOCVD sisteminin genel şematik gösterimi görülmektedir.



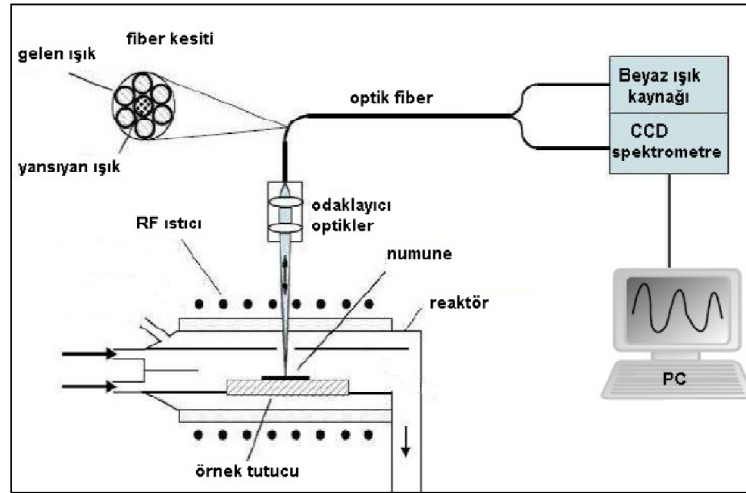
Şekil 3.1. Yatay reaktörlü bir MOCVD sisteminin genel şematik gösterimi [13].

GaN, AlN ve AlGaIn büyütmelerinde yüksek saflığa sahip hidrojen ya da azot taşıyıcı gaz kullanılarak amonyak (NH₃), trimetil galyum (TMGa) ve trimetil

aluminyum (TMAI) içeren bir metal-organik gaz karışımı reaktör içerisine gönderilmektedir. GaN, AlN ve AlGaN için reaktör içinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

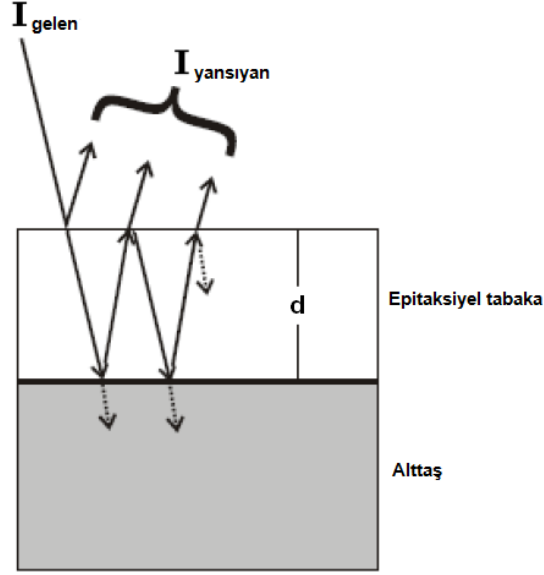


MOCVD büyütme hızı, tabaka kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi epitaksiyel tabaka parametrelerinin gerçek zamanlı olarak net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir reflektometre, epitaksiyel büyütme hızı esnasında anlık olarak yapı hakkında bilgi almak için kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'nde kurulu olan AIXTRON 200/4 RF S MOCVD sisteminde kullanılan reflektometrenin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.2. AIXTRON AIX 200/4 RF S MOCVD sisteminde kullanılan reflektometre düzeneğinin şematik gösterimi [13].

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere reflektometreden çıkan ışınlar yüzey üzerinden yansıyarak tekrardan reflektometre tarafından yakalanmaktadır. Şekil 3.3’te reflektometre ölçümlerinde kullanılan bir yüzey üzerine gönderilen ve yansıyan ışınlar görülmektedir.



Şekil 3.3. Bir alttaş-tabaka sistemine gelen ve yansıyan ışığın şematik gösterimi.

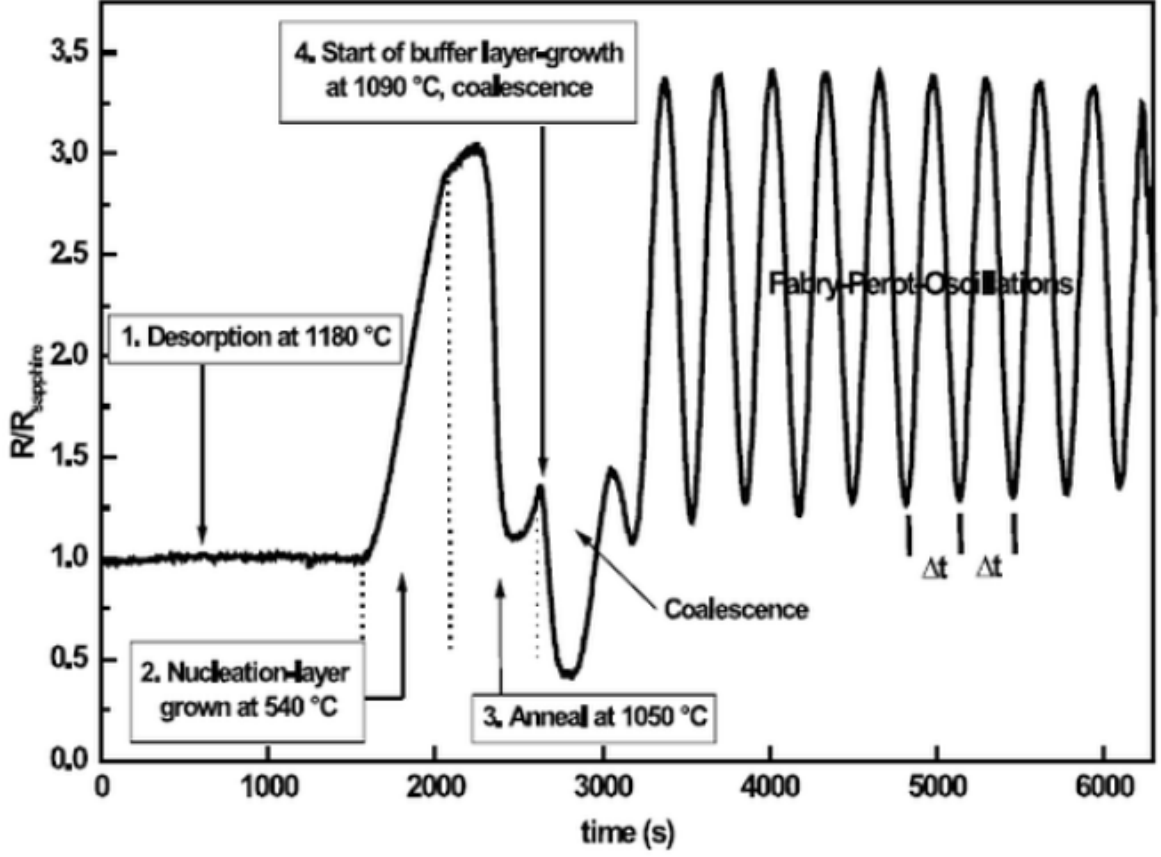
Tabakalar arasındaki kırıcılık indisi (n) farklılığından dolayı gelen ve yansıyan ışın arasında bir faz farkı oluşacaktır. Bu faz farkı da toplam yansıma yoğunluğunda modülasyonlara neden olacaktır. Bu durum Fabry-Perot salınımları olarak bilinmektedir. Bu salınımlar kullanılarak tabaka kalınlığı (d) ve büyüme hızları (μ_{gr}) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$nd = \frac{\lambda_m}{2} \quad (3.4)$$

$$\mu_{gr} = \frac{\lambda_m}{2n\Delta t} \quad (3.5)$$

Eş. 3.5’e göre düşük salınım periyoduna (Δt) sahip yoğunluk modülasyonları büyük büyüme hızları ve büyük salınım periyoduna (Δt) sahip yoğunluk modülasyonları ise düşük büyüme hızları anlamına gelmektedir. Şekil 3.4’te

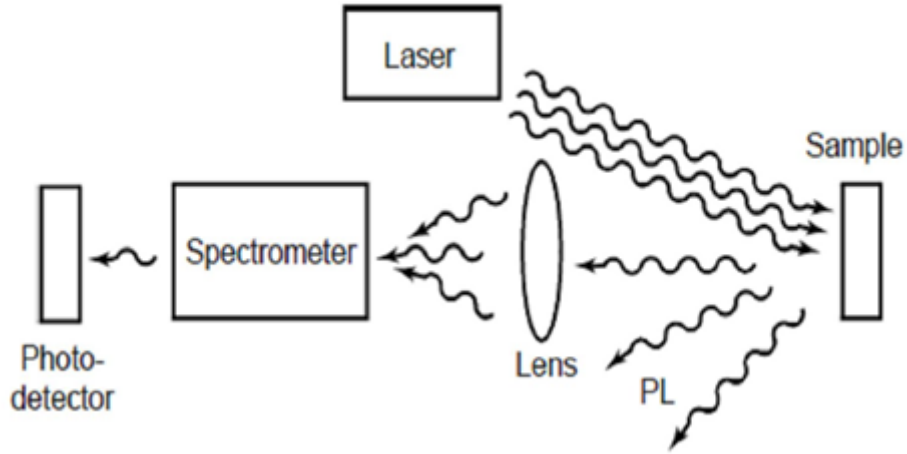
MOCVD sisteminde büyüme esnasında 600 nm dalga boyunda ölçülen tipik bir Fabry-Perot yansıma salınımları görülmektedir.



Şekil 3.4. 600 nm dalga boyunda ölçümlenen tipik bir Fabry-Perot yansıma salınımları [32].

3.1.2. Fotolüminesans (PL) Ölçüm Sistemi

Fotolüminesans ölçüm sistemi, bir malzeme üzerine o malzemenin yasak enerji bandından daha yüksek enerjili bir UV lazer göndererek malzemenin uyarılması esasına dayanır. Uyarılan malzemenin elektronları iletim bandından tekrardan valans bandına geçerken karakteristik bir foton salarlar. Salınan bu fotonun enerjisi malzemenin bant genişliği enerjisi (E_g) kadardır. Şekil 3.5'te Fotolüminesans (PL) ölçüm sisteminin çalışma prensibi görülmektedir.



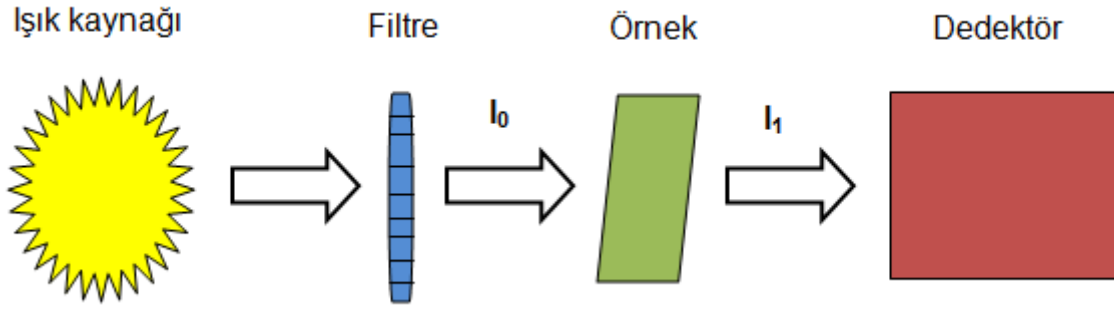
Şekil 3.5. Fotolüminesans (PL) ölçüm sistemi çalışma prensibi [33].

GaN'ın fotolüminesans özellikleri incelenmek istendiğinde GaN'a enerjisi GaN'ın yasak enerji aralığı (E_g) olan 3,39 eV'dan daha yüksek olan bir lazer gönderilmektedir. Bu durumda salınan enerjinin GaN'ın yasak enerji aralığı olan 3,39 eV olması beklenmektedir. Ancak bazı durumlarda GaN malzemesinde harici katkılamadan (n-tipi veya p-tipi) veya malzeme içindeki safsızlıklardan dolayı oluşan donör ve akseptör enerji seviyelerinin uyarılması nedeniyle farklı dalga boylarında da salınım gözlenmektedir.

3.1.3. Optik Geçirgenlik Ölçüm Sistemi

Bir çok malzemenin özelliği elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşmesi sayesinde ortaya çıkarılabilmektedir. Optik geçirgenlik ölçümlerinde de malzeme üzerine düşen ışığın şiddetindeki değişimden yararlanarak malzemenin yasak enerji aralığı (E_g) hakkında bilgi alınabilmektedir. Malzeme ile etkileşen ışığın şiddetindeki değişim Beer-Lambert yasasına göre açıklanabilmektedir. Bu yasaya göre (Eş. 3.6) d kalınlıklı ve α soğurma katsayısına sahip bir malzeme içinden geçen ışığın şiddeti (I_0), exponansiyel olarak azalacaktır. Şekil 3.6'da optik geçirgenlik ölçüm sistemi çalışma prensibi görülmektedir.

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (3.6)$$

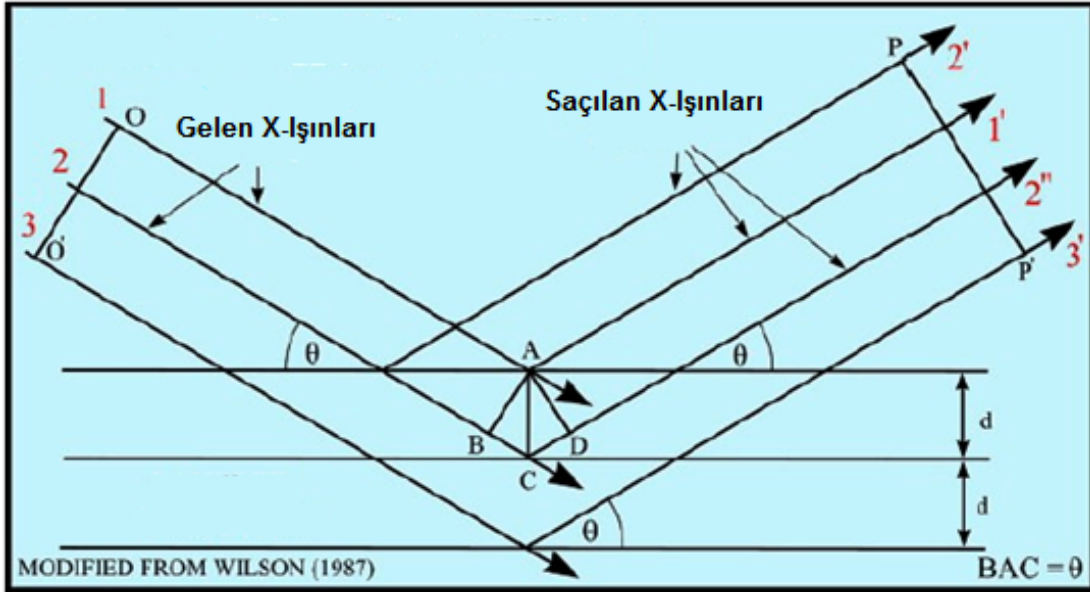


Şekil 3.6. Optik geçirgenlik ölçüm sistemi çalışma prensibi.

Bir malzemenin uyarılabilmesi için o malzemeye gönderilen ışığın enerjisinin o malzemenin yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük olması gerekmektedir. Örneğin $h\nu < E_g$ (3,39 eV) enerjili olan fotonlar GaN içinde electron-hole çiftleri yaratamazlar. Bu durumda GaN bu dalgalıboylarına karşı geçirgen davranacaktır. $h\nu \geq E_g$ (doğrudan geçiş) olması durumunda GaN gelen ışığın ~3,39 eV'dan daha büyük enerjili olanları soğurup daha düşük enerjili olan fotonları ise geçirecektir. Kesim dalga boyu (cut off) denilen bu sınır nokta ise GaN'ın yasak bant aralığı enerjisine karşılık gelecektir. Optik geçirgenlik spektrumunda soğurulmanın başladığı dalgalıboyu her malzeme için karakteristiktir ve doğrudan malzemenin yasak enerji aralığı ile ilintilidir.

3.1.4. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD)

X-Işını Kırınımı (XRD) kristal yapıların incelenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Her malzemenin kendine özgü bir XRD deseni olduğundan bu yöntem kullanılarak malzemelerin tayini, alaşım oranları, malzeme kalınlıkları, kristal yapıları, kristal kusurları ve yapıda oluşan gerginlikler hakkında bilgi alınabilmektedir. XRD'nin temel çalışma prensibi kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalgalıboyuна sahip X-ışınlarının kristal ile etkileşerek kırınımına uğraması esasına dayanır. Şekil 3.7'de bir kristale gönderilen ve kırınımına uğrayan ışınların şematik gösterimi görülmektedir.



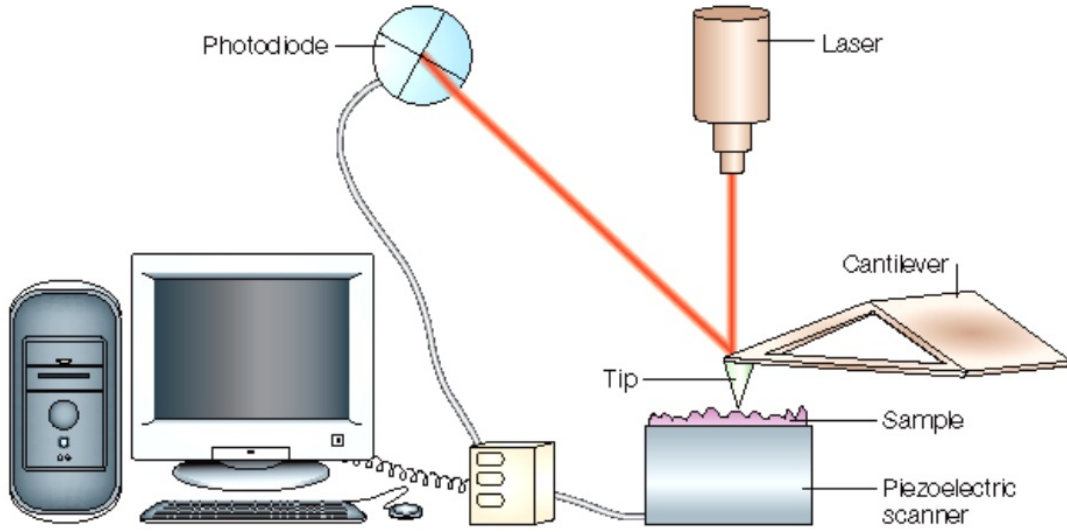
Şekil 3.7. Bir kristal yapının atomik tabakalarına gelen ve saçılan X-ışınları [34].

Bir kristal örgü üzerine gönderilen X-ışınları eşit aralıklarla sıralanmış bu örgü düzlemlerinden saçılmaya uğrayacaktır. Bu iki düzlem arasındaki mesafe d ve X-ışınının dalga boyu λ olmak üzere bu iki düzlemden yansıyan ışınlar arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ olacaktır. Bu düzlemlerden yansıyan ışınların yapıcı girişim oluşturması için bu yol farklarının gönderilen ışının dalga boylarının tam katları olması gerekmektedir. Bragg yasası olarak bilinen bu yapıcı girişimin denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$2d\sin\theta = n\lambda, n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3.7)$$

3.1.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), epitaksiyel büyütmelelerde oldukça hassas bir öneme sahip olan yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topografisi hakkında atomik çözünürlükte ölçüm yapılmasını sağlayan bir tekniktir. HEMT aygıtlarda elektron hareketliliğinin ve de 2DEG özelliğinin doğrudan yüzey kalitesi ile ilintili olduğu düşünüldüğünde AFM ölçümlerinin çok büyük bir öneme sahip olduğu görülür. Şekil 3.8'de AFM çalışma prensibi görülmektedir.

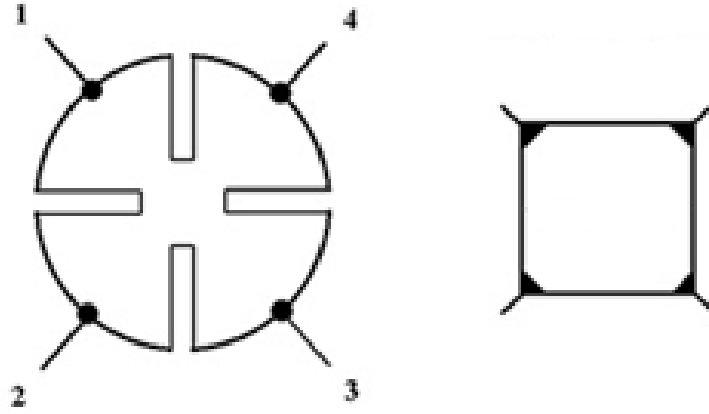


Şekil 3.8. AFM çalışma prensibi [35].

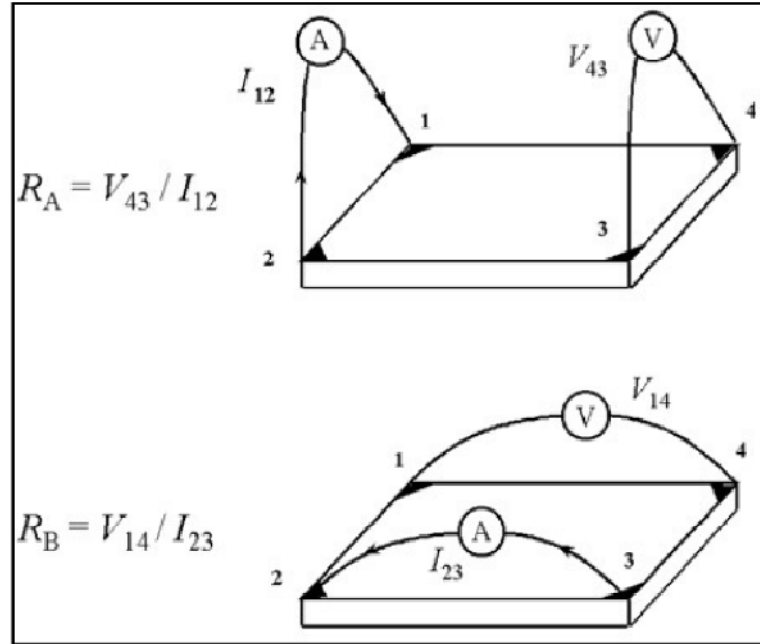
Şekil 3.8’de görüldüğü üzere atomik sivrilikte bir uç (tip) ile yüzey taranmaktadır. Tarama esnasında uç ile yüzey arasında oluşan kuvvetler ($10^{-11} - 10^{-6}$ Newton) kantileverın sapmasına neden olmaktadır. Bu sapmalar gönderilen lazer ışında da sapmalara neden olmakta ve fotodedektör sayesinde çok hassas bir şekilde ölçülmektedir. Uç ile yüzey arasındaki kuvvetin sabit tutulması durumunda ucun yüzey üzerindeki hareketi yüzeyin topografisi hakkında bilgi verecektir.

3.1.6. Hall Etkisi Ölçüm Sistemi

Hall etkisi, bir yarıiletkenin elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan çok basit bir analiz yöntemidir. Hall etkisi ölçümleri yarıiletkenin taşıyıcı yoğunluğu elektron hareketliliği ve öz direnci hakkında bilgi vermektedir. Hall etkisi ölçümlerinde Van der Pauw ölçüm tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte örneğin dört köşesine kontaklar konularak uygulanan gerilime karşılık akımlar okunmaktadır. Şekil 3.9’da örnek köşelerine konulabilecek olası kontaklar görülmektedir. Şekil 3.10’da Van der Pauw ölçüm tekniği görülmektedir.



Şekil 3.9. Hall etkisi ölçümlerinde kullanılacak olası dört kontak şekilleri [36].



Şekil 3.10. Van der Pauw ölçüm tekniği [37].

Yarıiletkenin tabaka direnci (R_s), karşılıklı yatay ve düşey dirençler ölçülerek hesaplanabilir. Bu amaçla Van der Pauw eşitliği kullanılabilir:

$$e^{-\frac{\pi R_A}{R_s}} + e^{-\frac{\pi R_B}{R_s}} = 1 \quad (3.8)$$

Eş. 3.8 nümerik olarak çözümlenerek R_s bulunabilmektedir.

n-tipi malzeme için $\mu_n n \gg \mu_p p$ olacağından tabaka direnci ile elektron hareketliliği arasındaki ilişki,

$$R_s = \frac{1}{qn_s \mu_n} \quad (3.9)$$

$$\mu_n = \frac{1}{qn_s R_s} \quad (3.10)$$

şeklinde verilmektedir. Eşitlikte n_s tabaka yoğunluğu olup, n hacimsel yoğunluk olmak üzere, $n = n_s d$ şeklinde ifade edilmektedir.

Hall etkisi ölçümlerinden yola çıkarak yüzey taşıyıcı yoğunluğu n_s 'yi bulmak amacıyla örneğe dik olacak şekilde sabit bir manyetik alan altında (B) sabit bir I akımı sürülmektedir. Bu ölçümlerden yola çıkarak Hall voltajı ölçülmekte ve nümerik olarak n_s yüzey taşıyıcı yoğunluğu hesaplanmaktadır. Hall voltajı ile yüzey taşıyıcı yoğunluğu arasındaki ilişki şu şekilde verilmektedir:

$$V = \frac{IB}{qn_s} \quad (3.11)$$

3.2. GaN HEMT Aygıt Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri

3.2.1. Optik Litografi

Litografi işlemi, istenen geometrik şekillerin örnek üzerine işlenmesi anlamına gelmektedir. Optik litografide, örnek yüzeyi UV ışığa karşı duyarlı organik bir fotorezist malzemesi ile kaplanmakta ve ardından da örnek üzerine maske hizalayıcı yardımıyla bir maske yerleştirilerek UV ışığın bu maske içerisinden geçmesi ve örnek üzerinde desenler oluşturması sağlanmaktadır. Optik litografi temel olarak şu adımlardan oluşmaktadır: Fotorezistin örnek yüzeyine kaplanması, maske hizalayıcı yardımıyla oluşturulmak istenen desenler için UV pozlama ve fotorezist çözme.

Fotorezist örnek yüzeyine kaplanmadan önce örnek yüzeyinin temiz olduğundan emin olunması gerekmektedir. Bu amaçla optik mikroskop kullanılmaktadır. Yüzeyi kirli olan örnekler aseton ve alkol banyosuna tabi tutulup ardından azot ile kurutulmaktadırlar. Fotorezist malzemesi örnek yüzeyine “spiner” adı verilen döndürücü cihaz vasıtasıyla kaplanmaktadır. Şekil 3.11’de örnek yüzeyine fotorezist kaplanması adımı görülmektedir.



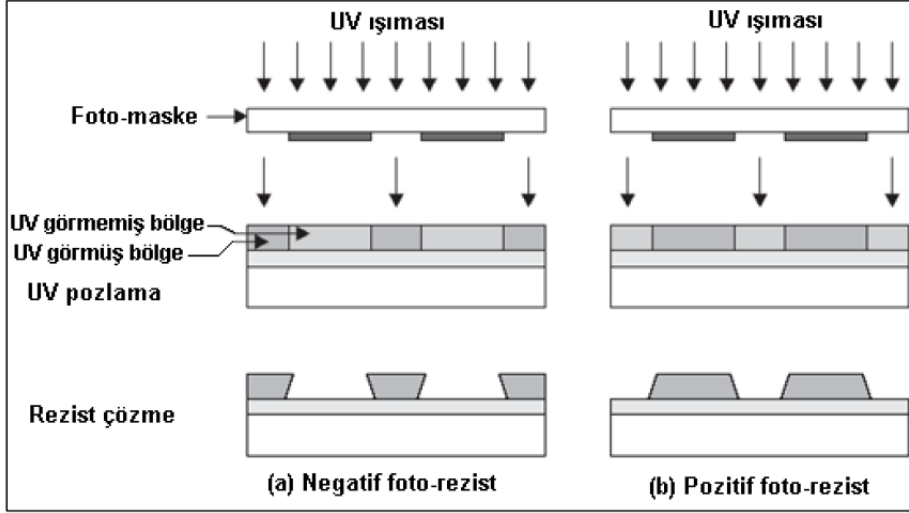
Şekil 3.11. Örnek yüzeyine fotorezist kaplanması adımı.

Kaplama adımından sonra fotorezist malzemesi içerisindeki uçucuların buharlaştırılması, fotodirencin daha katı ve daha dirençli olmasını sağlamak amacıyla “hot plate” adı verilen ısıtıcılar yardımıyla örnek ve dolayısıyla da fotorezist ısıtılmaktadır. Isıtma derecesi kullanılan fotodirencin tipine göre değişmektedir.

Fotorezist kaplaması tamamlanan örnekler üzerine istenen desenlerin oluşturulması amacıyla önceden tasarlanan foto maske ve maske hizalayıcı cihaz kullanılmaktadır. Fotomaske, kuarz tabanlı krom kaplı olup örnek yüzeyine işlenecek desenleri içermektedir. Maske hizalama cihazı kullanılarak bu fotomaske ile örnek, mikron hassasiyetle hizalanmakta ve fotorezist kaplı yüzey üzerine UV ışın gönderilmektedir. Gönderilen UV ışın, fotomaskenin krom kaplı bölgelerinden geçememekte sadece krom kaplı olmayan bölgelerinden geçebilmekte ve öylece fotorezist kaplı yüzey üzerine ulaşabilmektedir.

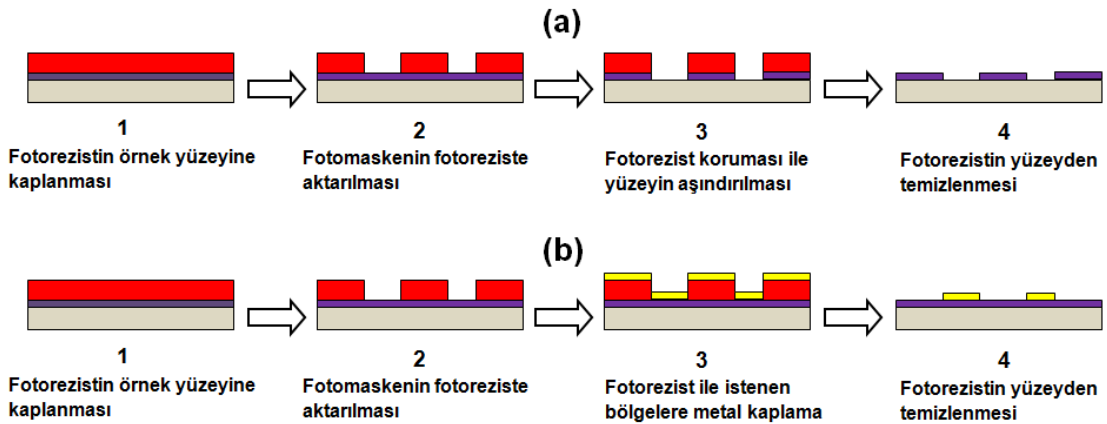
UV pozlama işlemi tamamlanan örnekler üzerindeki fotorezist uygun bir çözücü yardımıyla banyo edilmektedir. Kullanılan fotodirencin türüne (negatif fotorezist ya da pozitif fotorezist) bağlı olarak UV ışına maruz kalan yerlerin çözücü içinde

çözünmesi ya da çözünmemesi durumuna bağlı olarak fotorezist kaplı örnek yüzeyinde fotomaske üzerindeki desenler banyo sonrasında oluşturulmaktadır. Şekil 3.12'de kullanılan fotorezistin türene bağlı optik litografi işlemleri görülmektedir.



Şekil 3.12. Kullanılan fotorezistin türüne bağlı olarak optik litografi adımları.

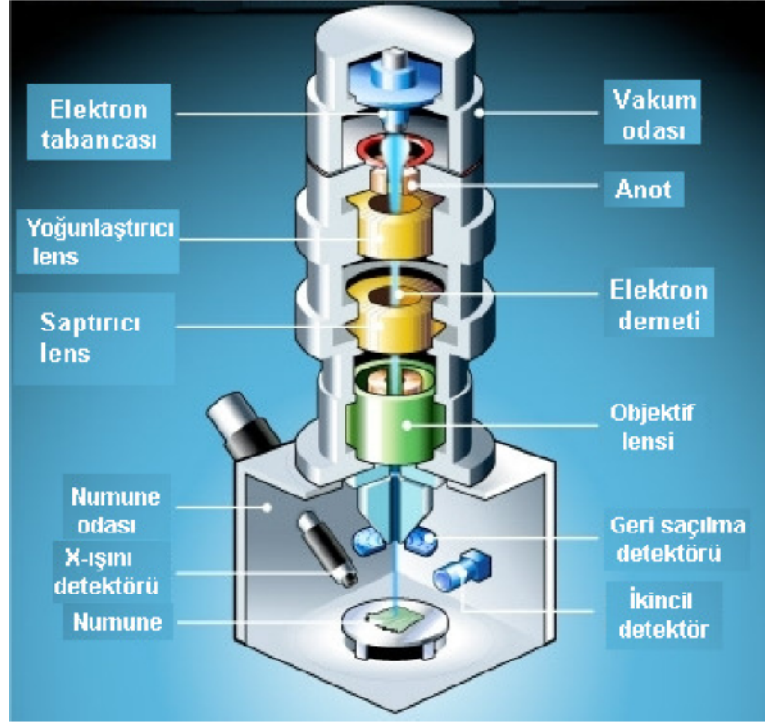
Optik litografi yardımıyla fotomaske üzerindeki desenlerin fotodirenç kaplı yüzey üzerine desenlenmesinden sonra desenlenen bölgelere aşındırma ya da metal kaplama işlemleri yapılabilmektedir. Desenlenen bölgelere aşındırma veya metal kaplama yapıldıktan sonra istenmeyen bölgelerdeki fotorezist, uygun bir çözücü yardımıyla çözülmektedir. Şekil 3.13'te desenlenmiş örnekler için aşındırma ve metal kaplama adımları görülmektedir.



Şekil 3.13. Desenlenmiş örnekler için (a) aşındırma ve (b) metal kaplama adımı.

3.2.2. Elektron Demeti Litografisi

Optik litografide elde edilebilecek minimum boyut (çözünürlük) gönderilen UV ışığın dalga boyu ile sınırlıdır ve bu çözünürlük değeri optik litografi için mikron düzeylerdedir. Mikron altı desenleme yapmak amacıyla ise elektron demeti litografisi kullanılmaktadır. Elektron demeti litografisinde çok hızlı elektronlar kullanıldığından de-Broglie dalga boyları oldukça küçük olmakta (20 nm'den daha kısa) ve dolayısıyla da nanometre mertebelerinde desenlemeler yapılabilmektedir. Elektron demeti litografisini optik litografiden ayıran en önemli özelliklerden biri de optik litografide olduğu gibi maske kullanılmamasıdır. Şekil 3.14'te elektron demeti litografisi sisteminin temel bileşenleri görülmektedir.

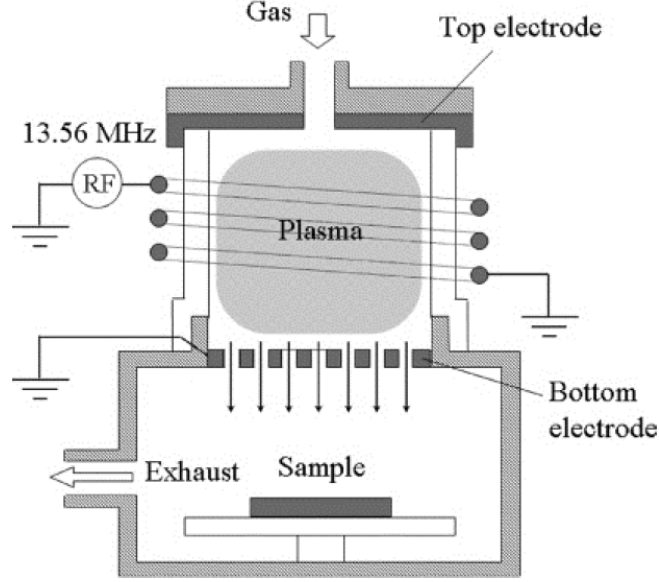


Şekil 3.14. Elektron demeti litografisi sisteminin temel bileşenleri [13].

3.2.3. Kuru Aşındırma Sistemi

Kuru aşındırma işlemi, GaN HEMT aygıt üretiminde izolasyon ve pasivasyon açıklıklarının oluşturulması amacıyla kullanılmaktadır. İzolasyon aşındırma işlemi, aygıtların birbirinden elektriksel olarak izole edilmesini ve bu şekilde de aygıtların birbirinden bağımsız olarak çalışmasını ve ölçümlenmesini sağlamaktadır.

Pasivasyon açıklıklarının oluşturulması işlemi ise tüm yüzeyi dielektrik kaplı aygıtlardan kontak alınması ve böylece aygıt karakteristiklerinin ölçülebilmesi için gereklidir. Şekil 3.15'te kuru aşındırma sisteminin şematik çizimi görülmektedir.



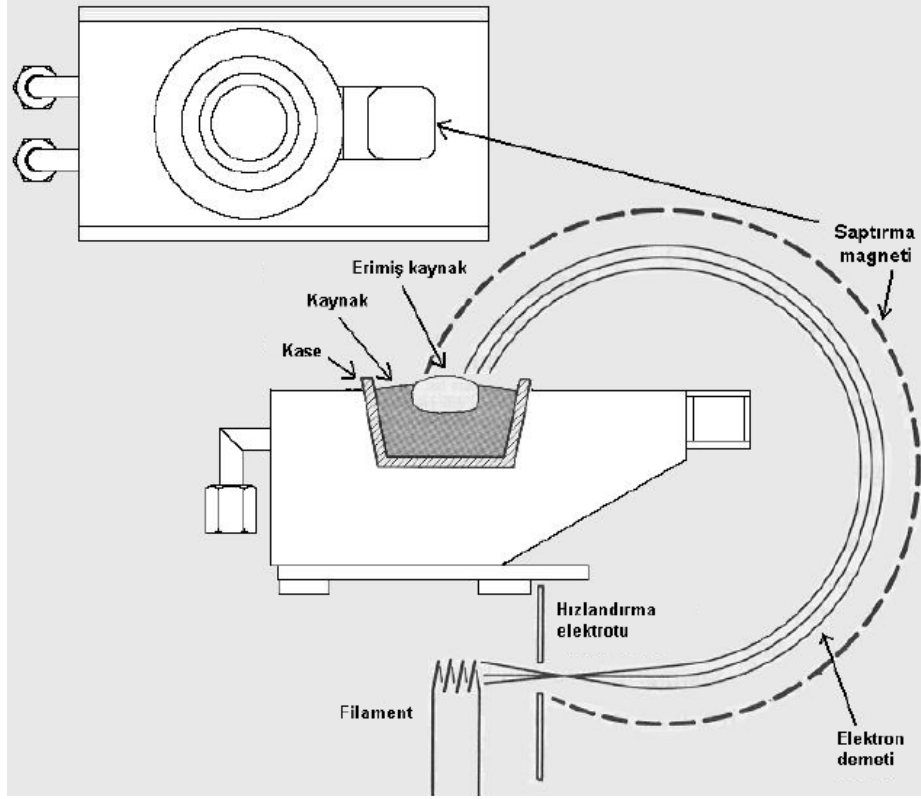
Şekil 3.15. Kuru aşındırma sisteminin şematik çizimi [38].

Kuru aşındırma işleminde aşındırılmak istenen örnekler, aşındırma işlemine uygun gazların gönderileceği vakum ortamına konulmaktadır. Örnekler vakum ortamına konulduktan sonra, ortama aşındırma işlemine uygun gazlar uygun basınç değerlerinde yollanmaktadır. Aşındırma işlemine uygun atmosfer oluşuktan sonra, ortama RF sinyali uygulanarak gazların reaktif iyonlara dönüşmesi sağlanmaktadır. Reaktif iyonlar, elektrotlar vasıtasıyla örnek yüzeyine doğru harekete geçirilerek örnek yüzeyindeki atomların mekanik ve kimyasal olarak koparılması sağlanmaktadır. Bu şekilde örnek yüzeyiyle etkileşen gaz iyonlarının aşındırma işlemi yapması sağlanmaktadır.

3.2.4. Metal Kaplama Sistemi

Yarıiletken aygıtların omik, Schottky ve kontak bağlantılarının oluşturulmasında metal kaplama işlemi oldukça büyük bir öneme sahiptir. GaN HEMT aygıt üretiminde omik, Schottky ve kontak bağlantılarının çok yüksek kalitede kaplanması gerektiğinden kaplama işlemleri elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde

yapılmaktadır. Şekil 3.16'da elektron demeti ile kaplama sisteminin çalışma prensibi gösterilmektedir.

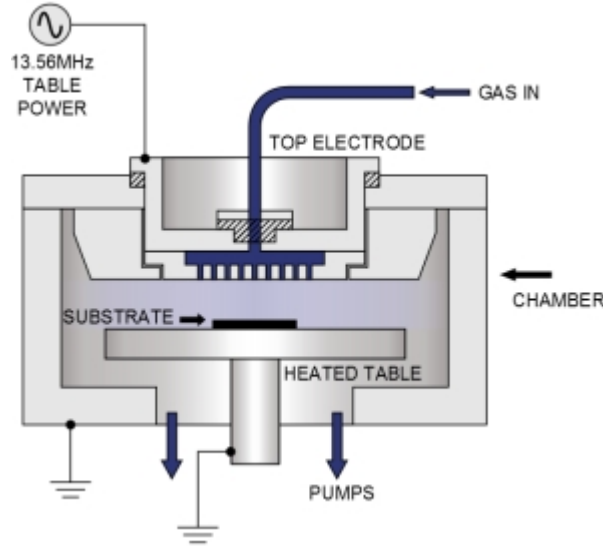


Şekil 3.16. Elektron demeti ile buharlaştırma sisteminin çalışma prensibi [39].

Elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde yüksek vakum altında bir filamentin ısıtılması ile üretilen elektronlar, belli bir potansiyel gerilimi altında hızlandırılmakta ve bir manyetik alan vasıtasıyla yönlendirilerek buharlaştırılmak istenen malzeme üzerine düşürülmektedirler. Bu şekilde yüksek enerjili elektronlarla etkileşen malzeme, eriyerek buharlaşmakta ve kaplanmak istenen örnek üzerinde ince film şeklinde birikmektedir.

3.2.5. Pasivasyon Kaplama Sistemi

Pasivasyon kaplaması, aygıtın çevreden izole edilmesi ve yüzey kaçak akımları engellemek amacıyla aygıtın aktif alanı üzerine yalıtkan bir tabaka olarak kaplanmaktadır. Yalıtım tabakası olarak, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi ile silisyum nitrür (Si_3N_4) kaplanmaktadır. Şekil 3.17'de PECVD sisteminin şematik çizimi görülmektedir.

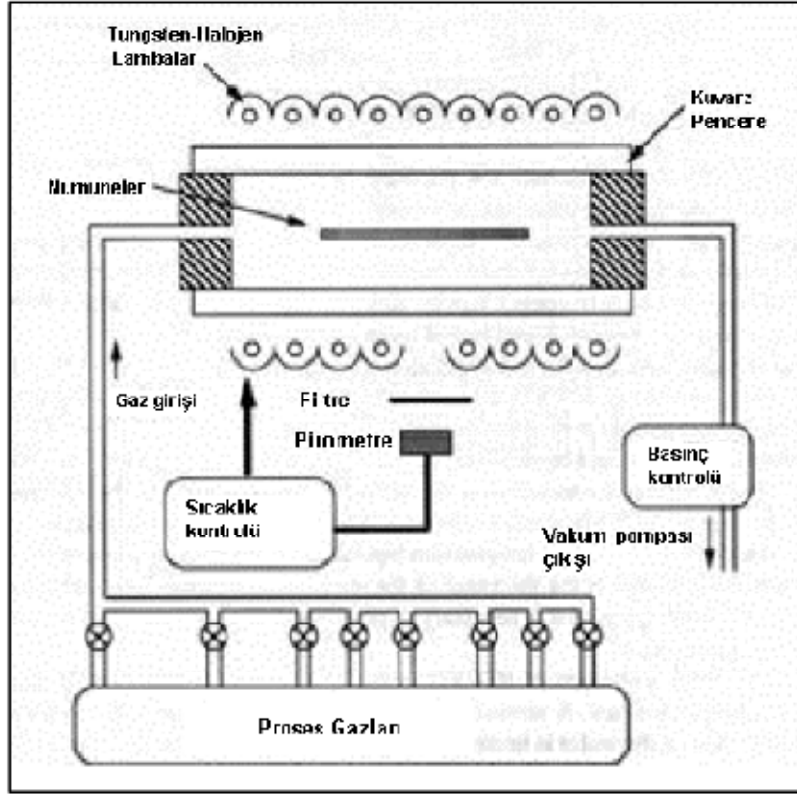


Şekil 3.17. PECVD sisteminin şematik çizimi [40].

PECVD sisteminde pasivasyon kaplaması yapılmak istenen örnekler, kaplama işleminin yapılacağı vakum ortamına konulmaktadır. Örnekler vakum ortamına konulduktan ve alttaş kaplamanın yapılacağı uygun sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra ortama kaplama işleminin yapılacağı gazlar (SiH_4 , NH_3 , Ar) uygun basınç değerlerinde yollanmaktadır. Kaplama işlemine uygun atmosfer ortamı oluşturduktan sonra ortama RF sinyali uygulanarak gazların reaktif iyonlara dönüşmesi sağlanmaktadır. Reaktif iyonlar, elektrotlar vasıtasıyla örnek yüzeyine doğru harekete geçirilerek örnek yüzeyinde birikmeleri ve Si_3N_4 yalıtım tabakasını oluşturmaları sağlanmaktadır.

3.2.6. Hızlı Tavlama Sistemi (RTP)

Kaplanan metallerin omik özellik kazanmaları ve düşük kontak dirençlerine sahip olmaları için tavlama sistemleri gerekmektedir. Özellikle HEMT aygıt performansı açısından omik kontak olarak kaplanan metallerin omik özellik kazanmaları ve kaplanan omik metallerin birbirleriyle alaşım oluşturarak 2DEG bölgesine difüz etmeleri için hızlı tavlama sistemi çok büyük bir öneme sahiptir. Şekil 3.18’de hızlı tavlama sisteminin şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 3.18. Hızlı tavlama sisteminin şematik çizimi [13].

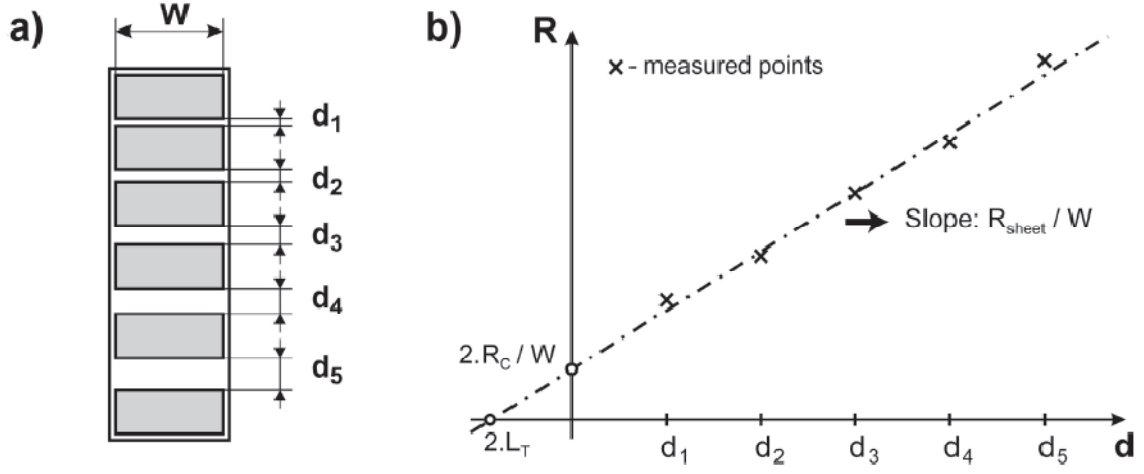
Hızlı tavlama sisteminde tavlamanın istenen örnekler cihaz içerisine atmosfer ortamında sürülmektedir. Tavlama işlemi, halojen lambalar yardımı ile 200 °C/s'lik bir sıcaklık artışı ile %5 H₂ ve %95 N₂ içeren bir gaz atmosferinde yapılmaktadır.

3.2.7. İletim Hattı Modeli (Transmission Line Model)

İletim hattı modeli, omik kontakların kalitesini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu model kullanılarak aygıtlar için tabaka direnci (R_s), kontak direnci (R_c) ve özgül kontak direnci (özdirenç) (ρ_c) belirlenebilmektedir. Bu model, aralarında farklı mesafeler (d) bulunan dikdörtgenel metal kontak pedler arasından direnç (R) ölçülmesi esasına dayanmaktadır. d mesafesine bağlı R direnç değişimi grafiği çizildiğinde bu grafiğin denklemi şu şekilde verilecektir:

$$R = 2 \frac{R_c}{W} + d \frac{R_{sheet}}{W} \quad (3.12)$$

Eş. 3.12’de W kontak pedlerin genişliğini ifade etmektedir. Şekil 3.19’da TLM kontak pedlerinin şekilleri ve TLM grafiği görülmektedir.



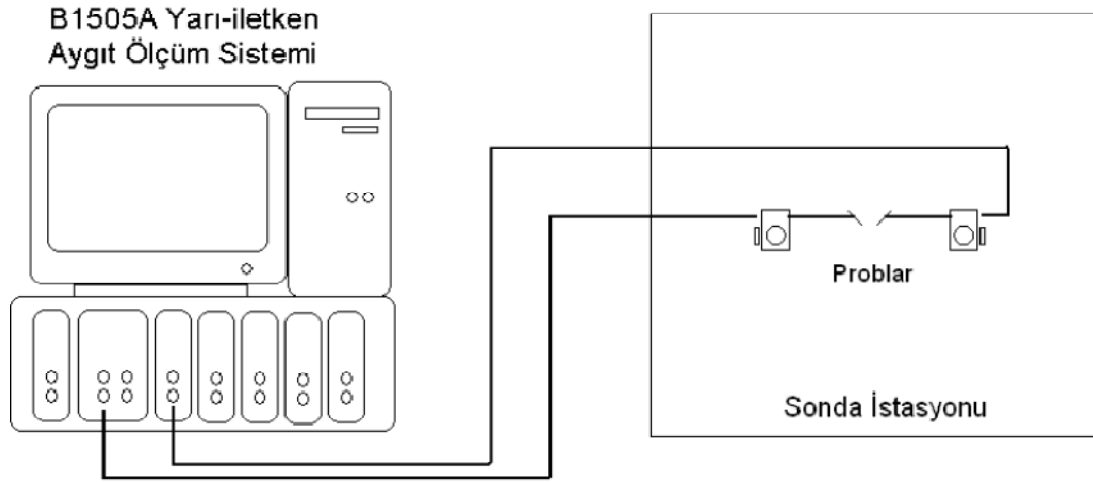
Şekil 3.19. (a) TLM kontak pedleri ve **(b)** TLM grafiği [41].

Eş. 3.12 kullanılarak Şekil 3.19-b grafiği yardımıyla R_s ve R_c kolaylıkla hesaplanabilir. Öz direnç ise şu eşitlik ile bulunabilir:

$$\rho_c = \frac{R_c^2}{R_{sheet}} \quad (3.13)$$

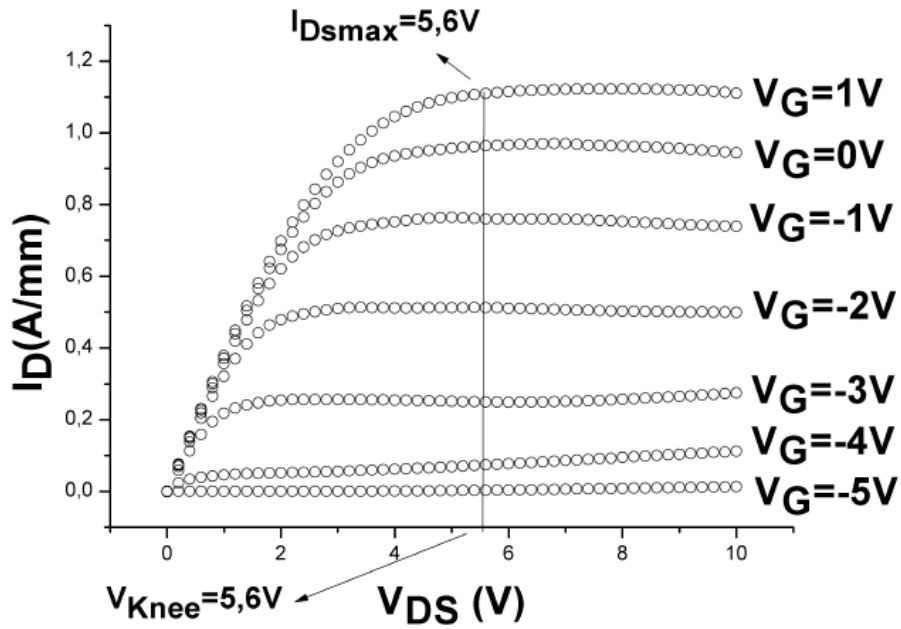
3.2.8. DC Ölçüm Sistemi

GaN HEMT aygıt karakterizasyonunda DC I-V ölçümler oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bu ölçümler ile aygıtın kısılma voltajı ($V_{pinch\ off}$), bükülme voltajı (V_{knee}), maksimum akaç akımı (I_{DSS}), kırılma voltajı (V_{br}), DC geçiş iletkenliği (g_m) ve maksimum çıkış gücü (P_{max}) gibi önemli parametreler elde edilmektedir. DC ölçüm sisteminde Cascade M150 sonda istasyonu ve B1505A yarıiletken aygıt ölçüm sistemi (Semiconductor Device Analyzer) kullanılmaktadır. Şekil 3.20’de GaN HEMT aygıtlar için kullanılan DC I-V ölçüm sistemi şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 3.20. GaN HEMT aygıtlar için kullanılan DC I-V ölçüm sistemi şematik çizimi.

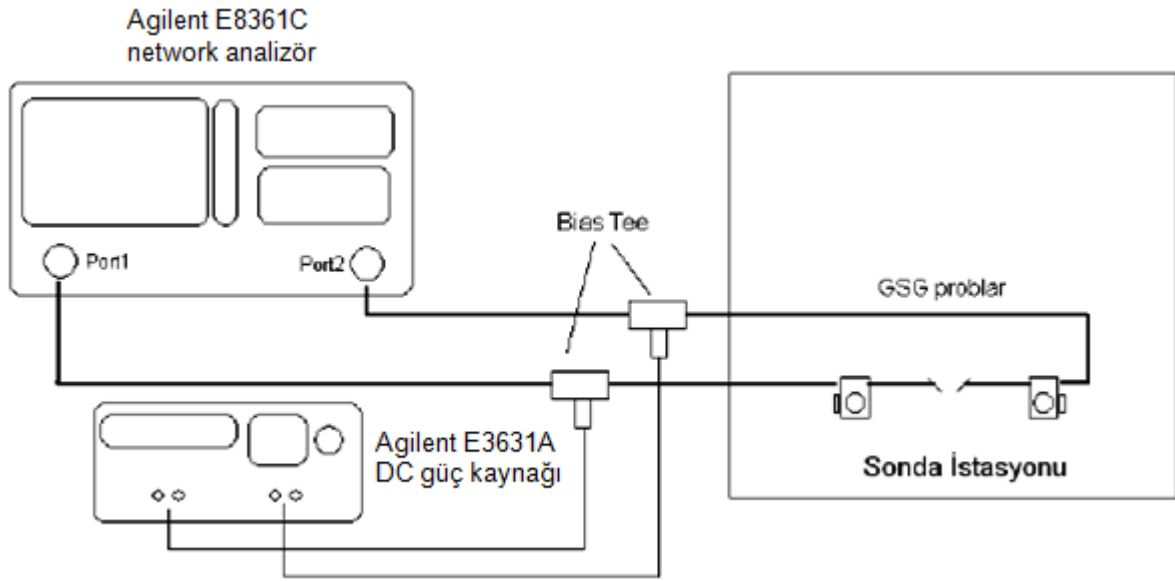
DC I-V ölçümlerinde belirli kapı voltajı (V_G) değerlerinde akış voltajına (V_{DS}) bağlı akış-kaynak akımı (I_{DS}) değişimi ölçümlenmektedir. Şekil 3.21’de GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik bir DC I-V grafiği görülmektedir.



Şekil 3.21. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik bir DC I-V grafiği.

3.2.9. RF Ölçüm Sistemi

GaN HEMT aygıt karakterizasyonunda RF ölçümleri de büyük bir öneme sahiptir. RF ölçümleri ile aygıtların küçük sinyal kazancı (S_{21}), akım kazancı (H_{21}), güç kazancı (G_u), akım kazancı kesim frekansı (f_T) ve güç kazancı kesim frekansı (f_{max}) gibi parametreler belirlenebilmektedir. S_{21} parametresi; aygıtın girişine uygulanan RF sinyalinin ne kadar yükseltilebileceğini, H_{21} parametresi; aygıtın oluşturabileceği akım kazancını ve G_u parametresi ise aygıtın oluşturabileceği güç kazancını ifade etmektedir. Akım kazancının (H_{21}) frekans eksenini kestiği nokta, akım kazancı kesim frekansı (f_T) ve güç kazancının (G_u) frekans eksenini kestiği nokta ise güç kazancı kesim frekansı (f_{max}) olarak ifade edilmektedir. RF ölçüm sisteminde Cascade M150 sonda istasyonu, Agilent E8361C network analizör, Agilent E3631A DC güç kaynağı ve mikrodalga problar kullanılmaktadır. Şekil 3.22'de GaN HEMT aygıtlar için kullanılan RF ölçüm sistemi şematik çizimi görülmektedir.

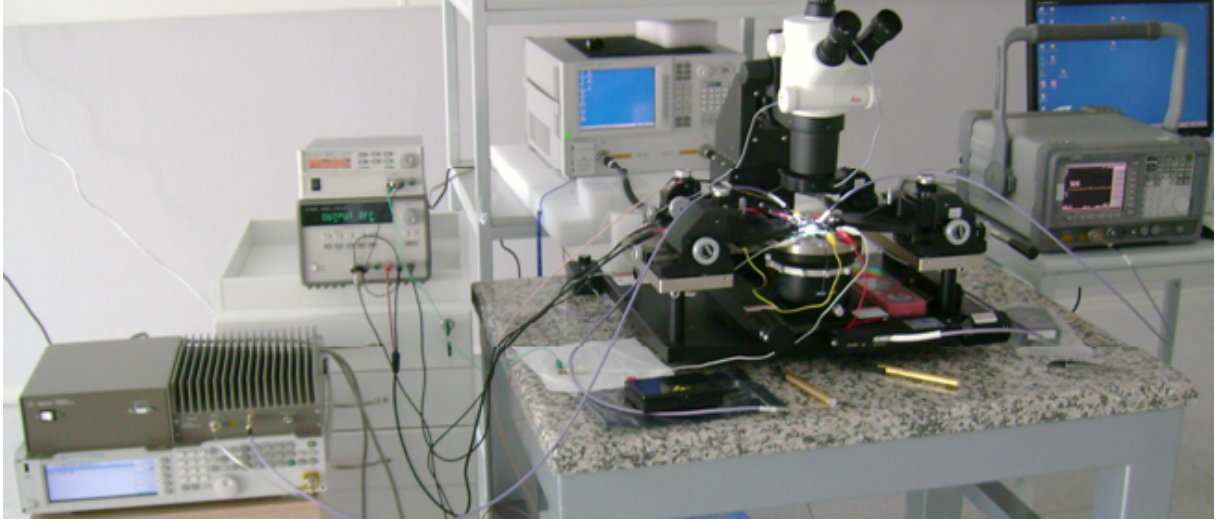


Şekil 3.22. GaN HEMT aygıtlar için kullanılan RF ölçüm sistemi şematik çizimi.

RF ölçümlerinde network analizör cihazına tarama yaptırılacak frekans aralığı ve RF gücü değerleri girilmektedir. İlgili RF gücü değerinde her bir frekans değeri için birinci ve ikinci portlara sırasıyla RF sinyali gönderilerek her bir port için ayrı ayrı yansıyan ve geçen sinyallerin faz ve genlikleri ölçümlenmekte ve frekansa bağlı aygıt parametreleri elde edilmektedir.

3.2.10. Güç Ölçüm Sistemi

GaN HEMT aygıtların performanslarının belirlenmesinde kullanılan diğer bir ölçüm çeşidi de güç ölçümleridir. Güç ölçümlerinde belli bir frekans değerinde HEMT aygıtların girişine uygulanan bir sinyalin çıkışta ne kadar yükseltildiğine bakılmaktadır. Güç ölçümleri, herhangi bir frekans ve çıkış gücü değerinde çalışacak yükselticilerin tasarımında oldukça büyük bir öneme sahiptir. Güç ölçüm sisteminde Cascade M150 sonda istasyonu, Maury load-pull sistemi (4-26,5 GHz), Agilent 83620B ve Agilent 5183A sinyal üretici, Agilent 3631A üçlü çıkış DC güç kaynağı, Agilent 83020A sürücü yükselteç, Agilent 9300 güç sensörü ve Agilent 4419B güç metre kullanılmaktadır. Şekil 3.23'te GaN HEMT aygıtlar için kullanılan güç ölçüm sisteminin genel görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.23. GaN HEMT aygıtlar için kullanılan RF ölçüm sistemi genel görüntüsü.

4. DENEYSEL AYRINTILAR

4.1. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısının Büyütülmesi

GaN HEMT epitaksiyel yapısının büyütülmesi işlemi, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'nde kurulu olan AIXTRON 200/4 RF S MOCVD sisteminde yapılmıştır. Büyütülen GaN HEMT epitaksiyel yapısı Şekil 4.1'de görülmektedir.

Tabaka		Kalınlık (nm)
GaN	(Kep tabakası)	~ 2
AlGaN	(Bariyer tabakası)	~ 30
AlN	(Ara plaka tabakası)	~ 1-2
GaN (3)	(Tampon tabakası)	~ 1400
GaN (2)	(Tampon tabakası)	~ 400
GaN (1)	(Tampon tabakası)	~ 200
AlGaN	(Geçiş tabakası)	~ 290
AlN	(Çekirdeklenme tabakası)	~ 16
SiC	(Alttaş)	~ 330.000

Şekil 4.1. AIXTRON 200/4 RF S MOCVD sisteminde büyütülmüş AlGaN/GaN HEMT epitaksiyel yapısı.

AlGaN/GaN HEMT epitaksiyel büyütmesi 2 inç boyutunda 6H-SiC alttaş üzerinde yapılmıştır. Epitaksiyel tabakaların büyütülmesi öncesinde alttaşın temiz olduğundan emin olunması gerekmektedir. Bu amaçla optik mikroskop kullanılmaktadır. Temiz olmayan alttaşlar, aseton ve isopropanol alkol içinde ultrasonik titreştirici yardımıyla temizlenmekte ve azot gazı (N₂) ile kurutulmaktadır. Alttaşın mekanik temizlik prosedürü yerine getirildikten sonra alttaş, reaktöre sürülerek 1100°C'de 15 dakika 100 mbar basınçlı hidrojen gazı (H₂) akışı altında ısıtılarak temizlendi. Bu ön ısıtma işleminden sonra alttaş yüzeyinin pürüzsüz olması ve kirliliklerden arındırılması amacıyla reaktör sıcaklığı 750°C'ye çekildi ve yüzey 20 saniye boyunca 500 sccm NH₃ akışına tabi tutuldu. Nitridasyon işleminden sonra sıcaklık 750°C'de sabit tutularak 50 mbar basınç altında 500 sccm NH₃ ve 15 sccm TMAI akışında 16 nm boyutunda AlN tabakası büyütüldü. AlN çekirdeklenme tabakası ardından 1120°C'de 50 mbar basınç altında 500 sccm NH₃, 42 sccm TMAI ve 1 sccm TMGa akışlarında 290 nm boyutunda AlGaN geçiş

tabakası büyütüldü. Sonra sırasıyla 1020°C'de 200 mbar basınç altında 1000 sccm NH₃ ve 12 sccm TMGa akışlarında 200 nm GaN (1); 1050°C'de 200 mbar basınç altında 1250 sccm NH₃ ve 17 sccm TMGa akışlarında 400 nm GaN (2) ve 1075°C'de 200 mbar basınç altında 1800 sccm NH₃ ve 17 sccm TMGa akışlarında 1400 nm GaN (3) tampon tabakaları büyütüldü. GaN tampon tabakaları ardından sırasıyla 1090°C'de 50 mbar basınç altında 300 sccm NH₃ ve 13 sccm TMAI akışlarında 1-2 nm AlN ara plaka tabakası; 1090°C'de 50 mbar basınç altında 300 sccm NH₃, 13 sccm TMAI ve 5 sccm TMGa akışlarında 30 nm AlGaN bariyer tabakası ve 1090°C'de 50 mbar basınç altında 300 sccm NH₃ ve 5 sccm TMGa akışlarında 2 nm GaN kep tabakası büyütülerek GaN HEMT epitaksiyel yapısı tamamlandı.

4.2. GaN HEMT Aygıt Fabrikasyonu

Fabrikasyon işlemleri, 12x12 mm² boyutunda 4 adet GaN HEMT epitaksiyel örnek kullanılarak yapılmıştır.

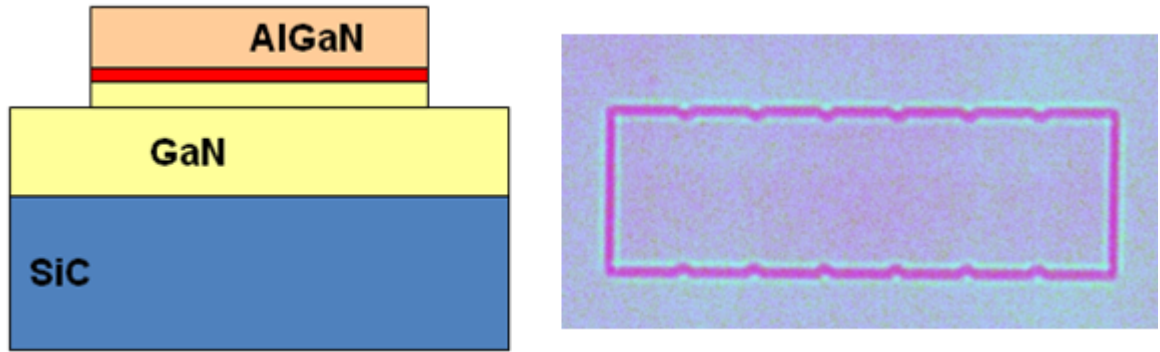
4.2.1. Örnek Temizliği

Fabrikasyon öncesinde örneklerin temiz olduğundan emin olunması gerekmektedir. Bu amaçla optik mikroskop kullanılmaktadır. Temiz olmayan örnekler, aseton ve isopropanol alkol içinde ultrasonik titreştirici yardımıyla temizlenmekte ve azot gazı (N₂) ile kurutulmaktadır.

4.2.2. Aygıt Adacığın Aşındırması

Bu tez kapsamında yapılacak fabrikasyon işlemleri ile 12x12 mm² boyutundaki 4 tane epitaksiyel yapı üzerinde akaç-kaynak arası mesafe 4 µm olacak şekilde 6 tane kapı kontağına sahip, kapı kontak genişliği (W_g) 125 µm ve kapı kontak uzunluğu (L_g); her bir örnek için sırasıyla 300, 600, 800 ve 1000 nm aralığında değişmek üzere her bir örnek üzerinde 0,16 mm² boyutunda 256 transistör üretilmesi amaçlanmaktadır. Ancak bu transistörlerin ölçüm esnasında birbirlerini etkilememeleri için elektriksel açıdan izole edilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla epitaksiyel yüzey üzerinde her aygıtın çalışabileceği aktif alanlar belirlenmekte ve geri kalan yerler GaN tampon tabakasına kadar aşındırılmaktadır. Bu şekilde 2DEG tabakası üzerinden parazitik iletim engellenerek aygıtların elektriksel olarak izolasyonu sağlanmaktadır.

Aşındırma işlemi yapılmadan önce aygıt adacıklarının yüzey üzerine desenlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla örnek yüzeyleri, MicroChemicals GmbH AZ5214 E fotorezisti kullanılarak kaplanmıştır. AZ5214 E fotorezisti özel bir rezist olup hem pozitif hem de negatif litografi yapılmasına olanak vermektedir. Aygıt adacıklarının oluşturulması için pozitif ton tercih edilmiştir. Optik litografi işlemi için Karl Suss MA6 maske hizalayıcı kullanılmıştır. Aygıt adacığın aşındırma işlemi SENTECH Plasma SI 500 ICP RIE sisteminde 0,40 Pa basınçta, BCl_3 (20sccm)/ Cl_2 (25sccm)/Ar (10sccm) gaz karışımında, 100 W RF ve 800 W ICP gücü kullanılarak yapılmıştır. Aşındırma işleminden sonra fotorezist temizliği, aseton ve isopropanol alkol kullanılarak ultrasonik titreştirici yardımıyla yapılmış ve örnek yüzeyleri N_2 gazı ile kurutulmuştur. Şekil 4.2'de aygıt adacığın aşındırması sonrası adacıkların kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü görülmektedir.

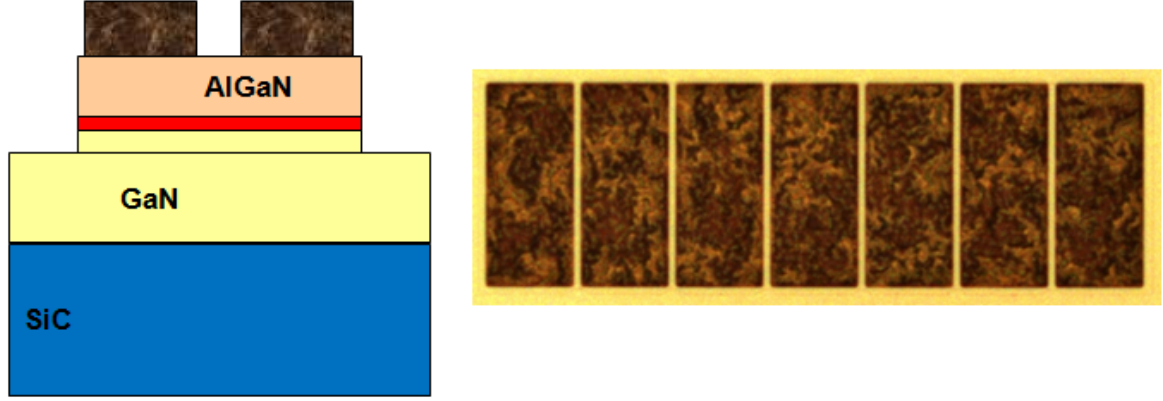


Şekil 4.2. Aygıt adacığın aşındırması sonrası adacıkların kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü.

4.2.3. Omik Kontak Adımı

Aygıt adacığın oluşturma adımından sonra aygıtların kaynak ve akaç kontak metalleri oluşturulmaktadır. Bu adım aygıtlara voltaj uygulanabilmesi ve akım çekilebilmesi için gereklidir. Kaynak ve akaç kontak desenleri, AZ5214 E fotorezisti kullanılarak ters litografi yöntemiyle maske hizalama sisteminde yapılmıştır. Omik metalizasyon işlemi, Oerlikon Leybold Vacuum Univex 350 model elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde Ti/Al/Ni/Au (12/120/35/65 nm) metalleri buharlaştırılarak yapılmıştır. Kaplama sonrasında istenmeyen bölgelerdeki metallerin yüzeyden kaldırılması amacıyla (lift-off) örnekler aseton içerisinde 1 gün boyunca bekletilmişlerdir. Metal kaplama işlemleri tamamlanan örneklerin kontak

dirençlerini düşürmek ve kaplanan metallerin alaşım oluşturarak omik özellik kazanmalarını sağlamak için örnekler, SSI Solaris-75 model hızlı tavlama sisteminde %5 H₂ ve %95 N₂ gaz karışımı kullanarak 850 °C'de 30 saniye tavllanmışlardır. Şekil 4.3'te omik kontak sonrası aygıtların kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü görülmektedir.



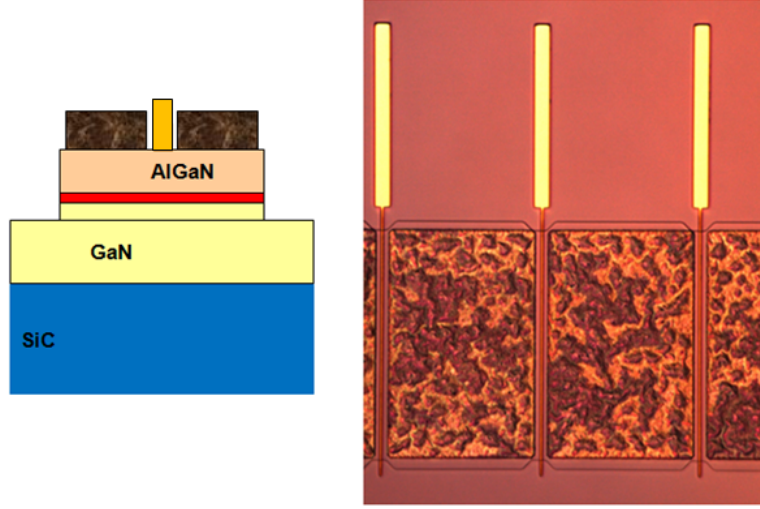
Şekil 4.3. Omik kontak sonrası aygıtların kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü.

4.2.4. Kapı (Gate) Kontak Adımı

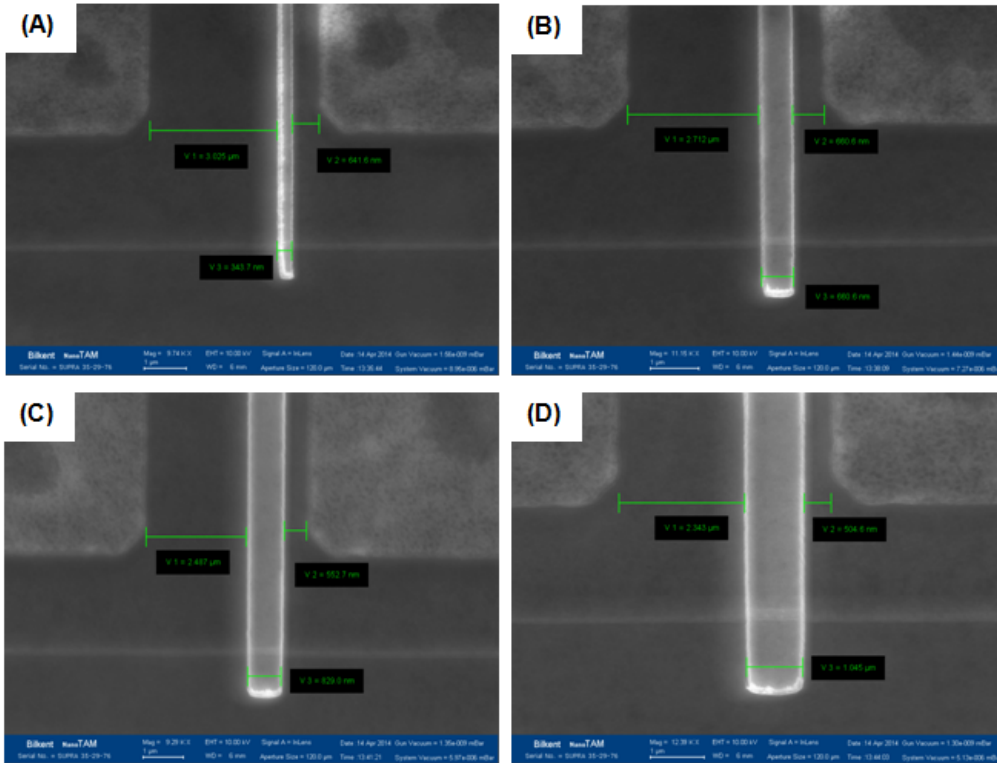
2DEG kanalındaki elektronların kontrol edilerek I_{DS} akımlarının ayarlanabilmesi için kapı kontak metallerinin (Schottky kontak) oluşturulması gerekmektedir. Kapı kontak uzunluğu (L_g) aygıt performansı açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Yüksek frekans çalışmaları için L_g 'nin minimum olması istenirken yüksek güç çalışmalarında L_g 'nin maksimum olması istenir [42–44]. Bu tez kapsamında L_g ; 300, 600, 800 ve 1000 nm olacak şekilde değiştirilerek L_g 'nin GaN HEMT aygıtlarda güç performansını nasıl etkilediği incelenmiştir.

Kapı kontak desenlerinin boyutları oldukça küçük olduğundan ve bu desenleme işinin oldukça hassas olması nedeniyle örneklerin kapı kontak litografi işlemleri RAITH e-line elektron demeti litografisi sistemi kullanılarak yapılmıştır. Litografi öncesinde örnek yüzeyleri e-line litografiye özel 950 PMMA (polymethyl methacrylate) A6 rezisti ve ardından da Aquasave polimer bileşiği ile kaplanmıştır. Kapı kontak metalizasyon işlemi (Schottky kontak), elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde Ni/Au (50/300 nm) metalleri buharlaştırılarak elde edilmiştir. Şekil 4.4'te kapı kontak metalizasyon sonrası aygıtların kesit çizimi ve

mikroskop görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.5'te örneklerin kapı uzunluğu (L_g) değişimine bağlı aygıtların kapı metalleri Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.4. Kapı kontakt metalizasyonu sonrası aygıtların kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.5. L_g değişimine bağlı örneklerin kapı metalleri TEM görüntüleri.

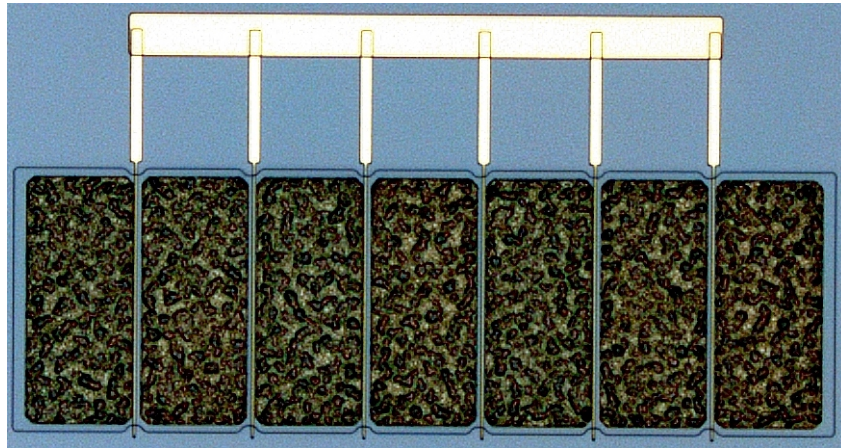
Örneklerin TEM görüntülerinden yararlanılarak aygıtlar için elde edilen kapı uzunlukları (L_g), kapı-akaç arası (L_{gd}) ve kapı-kaynak arası (L_{gs}) mesafe bilgileri Çizelge 4.1'deki gibi olmuştur.

Çizelge 4.1. Örnekler için TEM görüntülerinden elde edilen L_g , L_{gd} ve L_{gs} bilgileri.

Örnek	A	B	C	D
Kapı uzunluğu, L_g (nm)	344	661	829	1045
Kapı-akaç arası mesafe, L_{gd} (nm)	3014	2678	2618	2450
Kapı-kaynak arası mesafe, L_{gs} (nm)	642	661	553	505

4.2.5. Birinci Bağlantı Metali Adımı

Bu adımda bir adacıkta bir önceki adımda oluşturulan tüm kapılar, metalizasyon işlemi ile birleştirilirler. Kapıların birleştirilme noktası kapı parmaklarının uç noktalarıdır. Birinci bağlantı metali desenleme işlemi, AZ5214 E fotorezisti kullanılarak ters litografi yöntemiyle maske hizalama sisteminde yapılmıştır. Metalizasyon işlemi, elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde Ti/Au (50/350 nm) metalleri buharlaştırılarak yapılmıştır. Şekil 4.6'da birinci bağlantı metali sonrası örneklerin mikroskop görüntüsü görülmektedir.



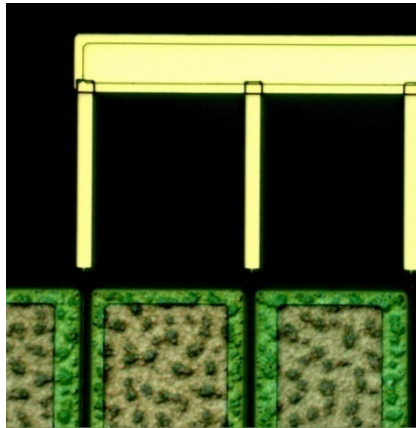
Şekil 4.6. Birinci bağlantı metali sonrası örneklerin mikroskop görüntüsü.

4.2.6. Pasivasyon Adımı

Pasivasyon adımı, yüzey sızıntı akımlarını en aza indirerek aygıtların kırılma gerilimlerini ve akım yoğunluklarını arttırmak amacıyla yapılmaktadır. Örneklerin silisyum nitrür (Si_3N_4) pasivasyon kaplamaları; SENTECH SI 500 PPD PECVD sisteminde, 300°C 'de 80 Pa basınç altında, SiH_4 (300 sccm)/ NH_3 (15 sccm)/Ar (50 sccm) gaz karışımı kullanılarak, 50 W RF gücünde yapılmıştır. Pasivasyon işlemi ile örneklerin tüm yüzeyi Si_3N_4 kaplanmıştır. Kaplama sonrasında kaplama kalınlığı ölçümleri FILMETRICS F20 reflektometre sistemi kullanılarak yapılmıştır. Si_3N_4 pasivasyon kaplaması için 300 nm kalınlık ve 1,97 kırıcılık indisi ölçülmüştür.

4.2.7. Kontak Ped Açma Adımı

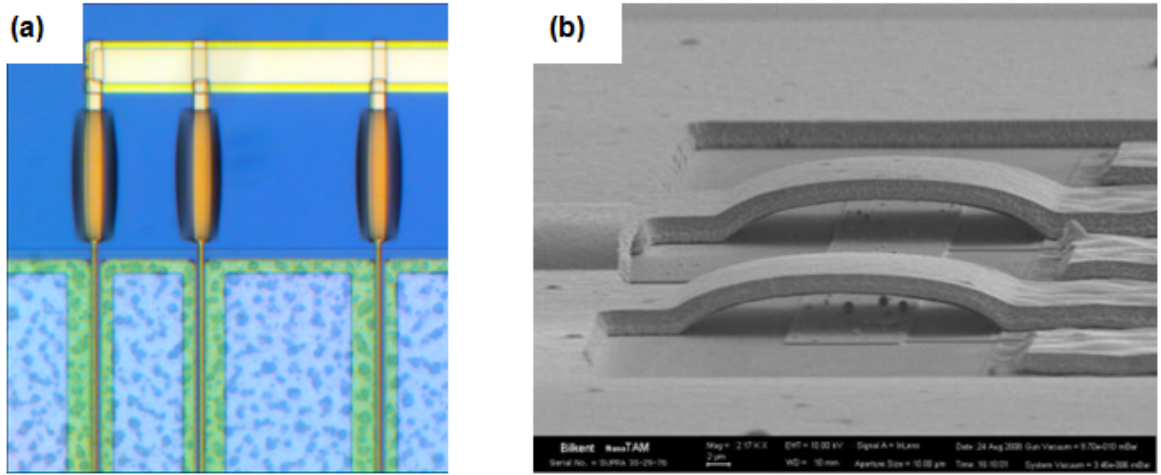
Pasivasyon adımında tüm yüzey Si_3N_4 kaplandığından aygıtlardan ölçüm alınabilmesi için omik ve birinci bağlantı metali üzerindeki Si_3N_4 tabakasının kaldırılması gerekmektedir. Bu amaçla kontak ped açma desenleme işlemi, AZ5214 E fotorezisti kullanılarak ters litografi yöntemiyle maske hizalama sisteminde yapılmıştır. Desenleme işlemi tamamlanan örnekler, SENTECH Plasma SI 500 ICP RIE sisteminde 0,40 Pa basınçta CHF_3 (60 sccm) gazı kullanılarak 100 W RF ve 200 W ICP gücünde aşındırılmıştır. Aşındırma işleminden sonra fotorezist temizliği, aseton ve isopropanol alkol kullanılarak ultrasonik titreştirici yardımıyla yapılmış ve örnek yüzeyleri N_2 gazı ile kurutulmuştur. Aşındırılan Si_3N_4 kalınlığı, Veeco marka Dektak 150 model profilometre kullanılarak 300 nm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.7'de kontak ped açma adımı sonrası örneklerin mikroskop görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.7. Kontak ped açma adımı sonrası örneklerin mikroskop görüntüsü.

4.2.8. Hava Köprüsü Destek Adımı

HEMT aygıtlarda çok fazla kapı kontağı (Schottky kontak) ve omik kontak olması nedeniyle aynı metal kontak gruplarının birbirlerine dokunabilmeleri ve farklı olan metal gruplarının da birbirlerinden yalıtılabilmesi amacıyla birinci bağlantı metallerin ve kapı kontak metallerin üstünden geçen hava köprüleri oluşturulmaktadır. Bu amaçla hava köprüsü desteği desenleme işlemi, S1828 G2 fotorezisti kullanılarak düz litografi yöntemiyle maske hizalama sisteminde yapılmıştır. Desenleme işlemi tamamlanan örnekler, 200°C'de 5 dakika tavlansak desenlerin köşelerden arındırılarak yuvarlak hatlara sahip (reflow) olması sağlanmıştır. Şekil 4.8'de hava köprüsü destek adımı sonrası aygıtların mikroskop görüntüsü ve iç bağlantı (interconnect) adımı sonrası TEM görüntüleri görülmektedir.

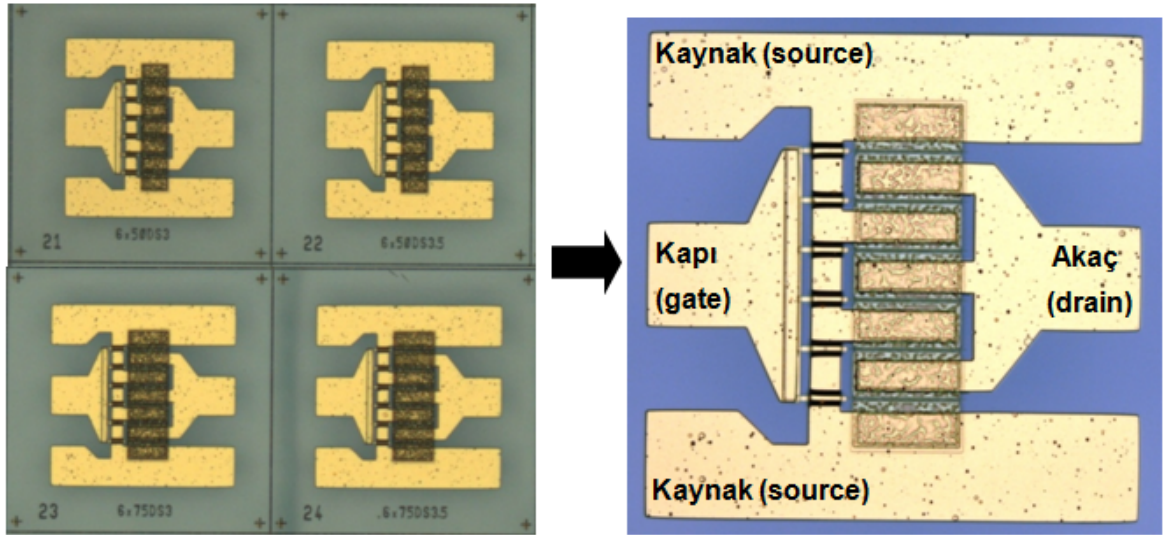


Şekil 4.8. Hava köprüsü destek adımı sonrası aygıtların (a) mikroskop görüntüsü ve (b) iç bağlantı (interconnect) adımı sonrası TEM görüntüsü.

4.2.9. İç Bağlantı (Interconnect) Adımı

Transistörlerin ölçüm cihazları ile bağlantılarının yapılabilmesi ve bu şekilde de aygıtlardan ölçüm alınabilmesi için daha büyük kontak alanlarının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla omik kontaklar ile kapı kontakları birbirlerinden izole olacak şekilde hava köprüsü desteklerinin üzerinden iç bağlantı metalizasyonu yoluyla birleştirilmektedir. Düşük seri direnç oluşturmaları ve ölçüm esnasında çizilmelere ve kopmalara karşı dayanıklı olmaları amacıyla iç bağlantı metalleri kalın metal kaplanmaktadır. Metalizasyon öncesi 6-7 µm boyutundaki iç bağlantı

desenleri, AZ nLOF 2070 fotorezisti kullanılarak ters litografi yöntemiyle maske hizalama sisteminde yapılmıştır. Metalizasyon işlemi, elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde Ti/Au (200/2000 nm) metalleri buharlaştırılarak yapılmıştır. Metalizasyon sonrasında istenmeyen bölgelerdeki metallerin yüzeyden kaldırılması amacıyla (lift-off) örnekler, NMP (n-metil pyrolidon) adı verilen solüsyon içinde 1 gün boyunca bekletilmişlerdir. Daha sonra önceden hava köprüsü desteği olarak oluşturulan fotorezistin temizlenmesi amacıyla örnekler, 100 °C sıcaklığındaki AZ 100 Remover adı verilen solüsyon içinde 1 saat boyunca bekletilmişlerdir. Bu işlem ardından örnekler deiyonize su ile durulanmış, aseton ve isopropanol alkol kullanılarak ultrasonik titreştirici yardımıyla temizlenmiş ve N₂ gazı ile kurutulmuşlardır. Şekil 4.9'da iç bağlantı metalinin sonrası GaN HEMT aygıtlarının mikroskop görüntüsü görülmektedir.



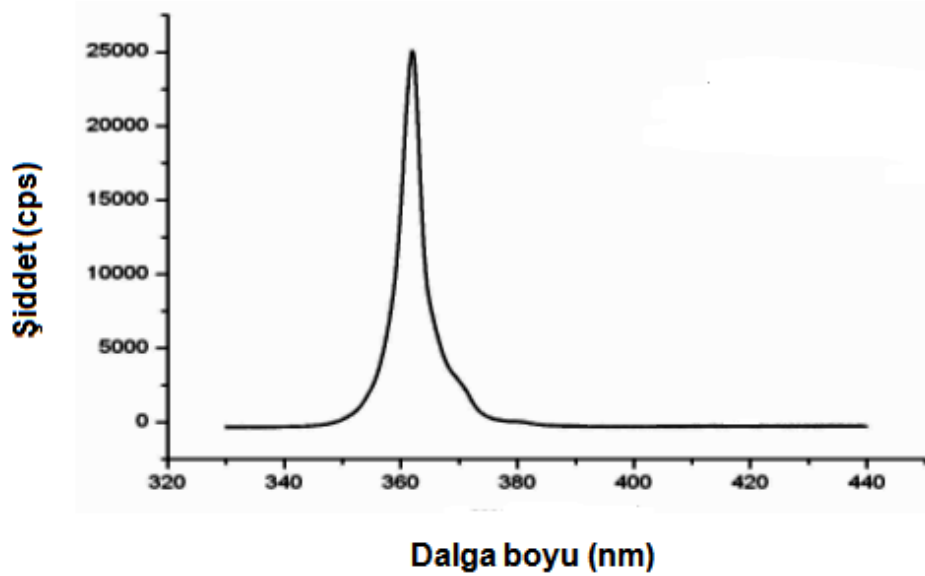
Şekil 4.9. İç bağlantı metalinin sonrası GaN HEMT aygıtlarının mikroskop görüntüsü.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısının Karakterizasyonu

HEMT yapılarında 2DEG oluşumu büyük oranda yüksek dirençli GaN tampon tabakası ile ilgili olduğundan bu tabakanın olabildiğince saf ve pürüzsüz büyütülmesi gerekmektedir. Aksi halde safsızlıklar ve pürüzlülük elektron saçılmalarına yol açarak aygıt performansının azalmasına neden olacaktır. GaN tabakasını karakterize etmek amacıyla silisyum karbür (SiC) alttaş üzerinde sırasıyla 16 nm AlN çekirdeklenme tabakası, 290 nm AlGaN geçiş tabakası, 200 nm GaN (1) tampon tabakası, 400 nm GaN (2) tampon tabakası ve son olarak da 1400 nm GaN (3) tampon tabakası büyütülmüştür.

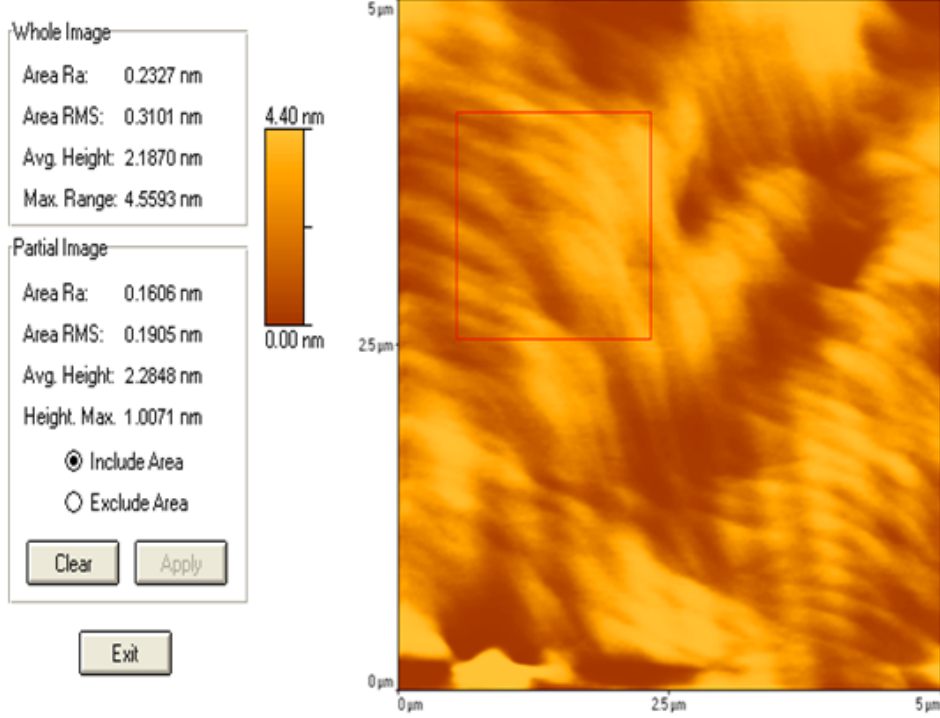
GaN malzemesinin fotoluminesans (PL) ölçümü, Jobin Yvon Triax 550 CCD fotoluminesans sisteminde yapılmıştır. Şekil 5.1'de GaN malzemesine ait PL ölçüm grafiği görülmektedir.



Şekil 5.1. GaN malzemesine ait PL ölçüm grafiği. Pik pozisyonu: 361,5 nm.

GaN malzemesi ortalama 3,8 eV enerjili 325 nm dalga boyunda HeCd lazeri ile uyarılmış ve Şekil 5.1'deki PL grafiği elde edilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere GaN malzemesi için pik pozisyonu 361,5 nm olarak ölçülmüştür. Bu değer, Planck eşitliğine ($E=h\nu$) göre 3,42 eV'luk bir enerjiye karşılık gelir ki bu da GaN'ın yasak enerji aralığı (E_g) için beklenen teorik değerle uyumludur.

Yüksek dirençli GaN tampon tabakasının yüzey morfolojisi VEECO CPlI Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. Şekil 5.2'de 5x5 μm^2 'lik GaN yüzey üzerinden alınmış AFM ölçüm sonucu görülmektedir.



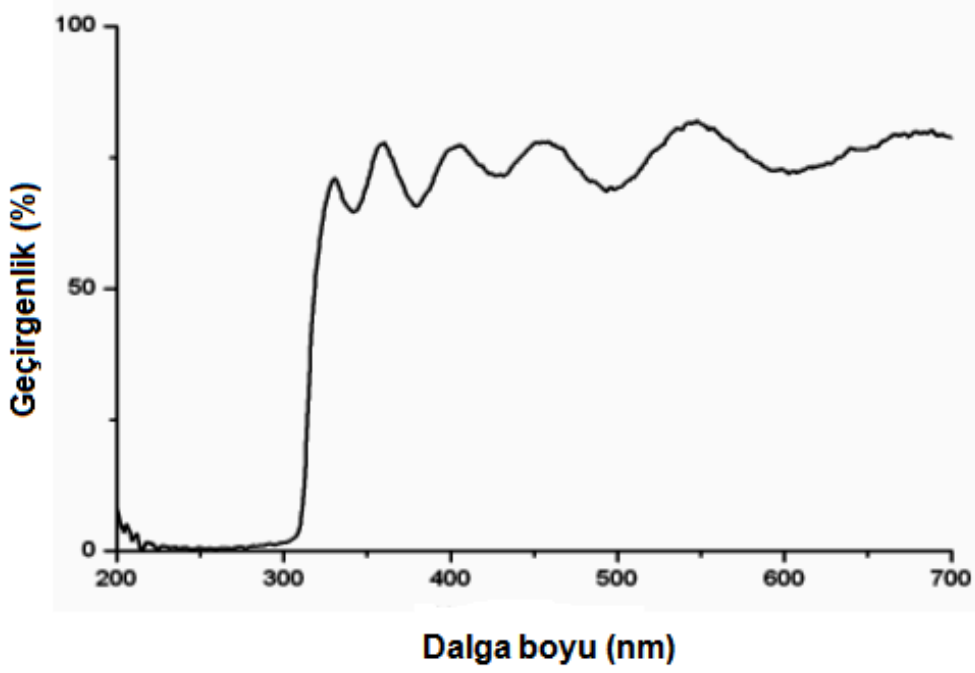
Şekil 5.2. 5x5 μm^2 'lik GaN yüzey üzerinden alınmış AFM ölçüm sonucu.

Şekil 5.2 incelendiğinde GaN yüzey için RMS yüzey pürüzlülüğü değerinin 0,31 nm olduğu görülmektedir. Bu değer, literatürde geçen 0,2-0,6 nm'lik [45] değerlerle kıyaslandığında oldukça iyi bir değer olup yüzey kalitesinin çok iyi olduğunu göstermektedir.

GaN tampon tabakasının direnci Hall etkisi ölçümlerinde $5 \times 10^9 \Omega/\text{sq}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer, literatürdeki değerlere oldukça yakın olup büyütülen GaN tampon tabakasının oldukça yüksek dirence sahip olduğunu göstermektedir [46].

2DEG oluşumunda diğer bir önemli tabaka da AlGaN bariyer tabakasıdır. Bu tabakayı karakterize etmek amacıyla SiC alttaş üzerine AlN ve onun üzerine AlGaN tabakası büyütülerek Ocean Optics USB 4000 UV-VIS spektrometre sistemi ile optik geçirgenlik ölçümleri alınmıştır. Şekil 5.3'te Ocean Optics USB

4000 UV-VIS spektrometre sistemi ile alınmış AlGaN malzemesine ait optik geçirgenlik grafiği görülmektedir.



Şekil 5.3. Ocean Optics USB 4000 UV-VIS spektrometre sistemi ile alınmış AlGaN malzemesine ait optik geçirgenlik grafiği.

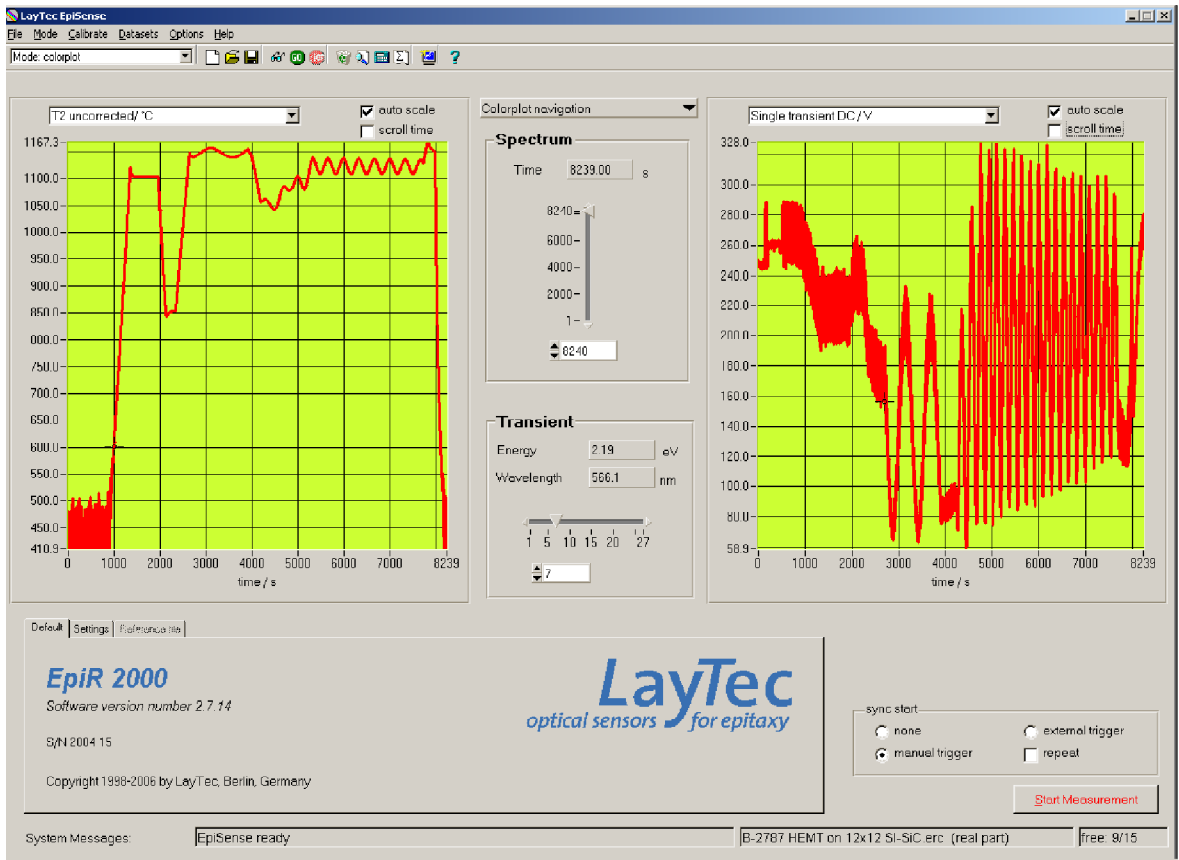
Şekil 5.3 incelendiğinde optik geçirgenliğin 320 nm dalga boyunda başladığı görülmektedir. Bu değer, Planck eşitliğine göre 3,88 eV'luk bir enerjiye karşılık gelmekte ve büyütülen AlGaN tabakasının yasak enerji aralığını vermektedir. AlGaN tabakasının yasak enerji aralığı Alüminyum (Al) konsantrasyonuna bağlı olarak şu şekilde verilmektedir.

$$E_g^{(Al_xGa_{1-x}N)} = E_g^{(GaN)} \cdot (1 - x) + E_g^{(AlN)} \cdot x - b \cdot (1 - x) \quad (5.1)$$

Eş. 5.1 Vegard yasası olarak ta bilinmekte olup eşitlikte b, bir sabit olup 1,0 eV değerine karşılık gelmektedir. $E_g^{(GaN)}$ değeri PL ölçümlerinden 3,42 eV ve $E_g^{(Al_xGa_{1-x}N)}$ değeri optik geçirgenlik ölçümlerinden 3,88 eV olarak ölçülmüştür. $E_g^{(AlN)}$ değeri 6,13 eV olmak üzere Eş. 5.1'den Al konsantrasyonu %23 ($x=0,23$) olarak hesaplanmıştır. Bu değer aynı zamanda büyütülen GaN HEMT epitaksiyel

yapısındaki AlGaN bariyer tabakasındaki Al konsantrasyon miktarını da ifade etmektedir.

GaN tampon tabakası ve AlGaN bariyer tabakası karakterize edildikten sonra MOCVD sisteminde GaN HEMT epitaksiyel yapısı büyütülmüştür. Silisyum karbür (SiC) alttaş üzerinde büyütülmüş GaN HEMT epitaksiyel yapısının MOCVD sistemi tarafından alınmış optik yansıma (Fabry-Perot yansıma salınımları) grafiği Şekil 5.4'te görülmektedir. Grafikte salınım genliklerinin birbirlerine yakın olması büyütülen kristal tabakasının homojen olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel yapısı için MOCVD sistemi tarafından alınmış optik yansıma (Fabry-Perot yansıma salınımları) grafiği.

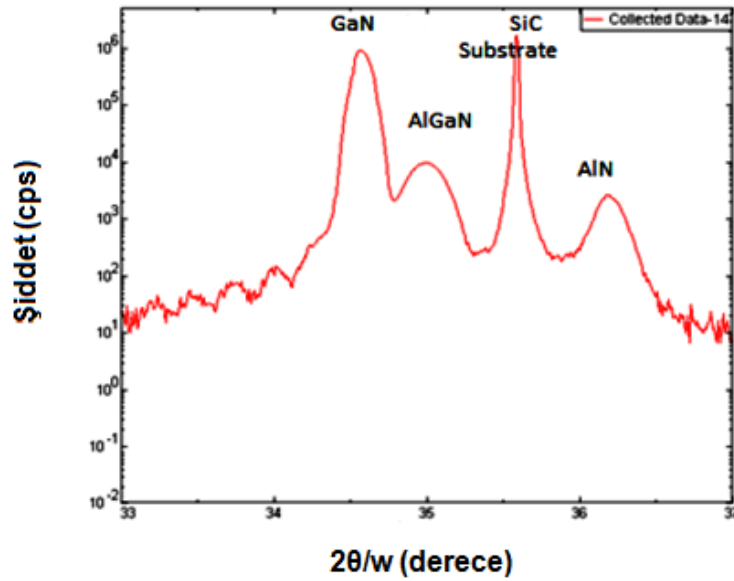
Fabry-Perot yansıma salınımlarından yararlanarak Eş. 3.5'ten AlN çekirdeklenme tabakasının büyüme hızı $0,77 \mu\text{m/s}$, AlGaN geçiş tabakasının büyüme hızı $0,87 \mu\text{m/s}$, GaN (1) tampon tabakasının büyüme hızı $1,5 \mu\text{m/s}$, GaN (2) tampon tabakasının büyüme hızı $1,85 \mu\text{m/s}$, GaN (3) tampon tabakasının büyüme hızı $2,07 \mu\text{m/s}$, AlN ara plaka tabakasının büyüme hızı $0,27 \mu\text{m/s}$, AlGaN bariyer

tabakasının büyüme hızı 0,97 $\mu\text{m}/\text{sa}$ ve GaN kep tabakasının büyüme hızı 1,39 $\mu\text{m}/\text{sa}$ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.1’de GaN HEMT epitaksiyel tabakalarının MOCVD sistemindeki büyütme hızları, büyütme süreleri ve katman kalınlıkları görülmektedir.

Çizelge 5.1. GaN HEMT epitaksiyel tabakalarının MOCVD sistemindeki büyütme hızları, büyütme süreleri ve katman kalınlıkları.

Tabaka	Büyütme hızı ($\mu\text{m}/\text{sa}$)	Büyütme süreleri (s)	Katman kalınlıkları (nm)
GaN (Kep tabakası)	1,39	5	~ 2
AlGaN (Bariyer tabakası)	0,97	115	~ 30
AlN (Ara plaka tabakası)	0,27	15	~ 1-2
GaN (3) (Tampon tabakası)	2,07	2430	~ 1400
GaN (2) (Tampon tabakası)	1,85	770	~ 400
GaN (1) (Tampon tabakası)	1,50	480	~ 200
AlGaN (Geçiş tabakası)	0,87	1200	~ 290
AlN (Çekirdeklenme tabakası)	0,77	75	~ 16
SiC (Alttaş)	-	-	-

MOCVD sisteminde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel yapısının RIGAKU-Smartlab X-ışını difraktometresinde alınan XRD ölçümü grafiği Şekil 5.5’te görülmektedir.



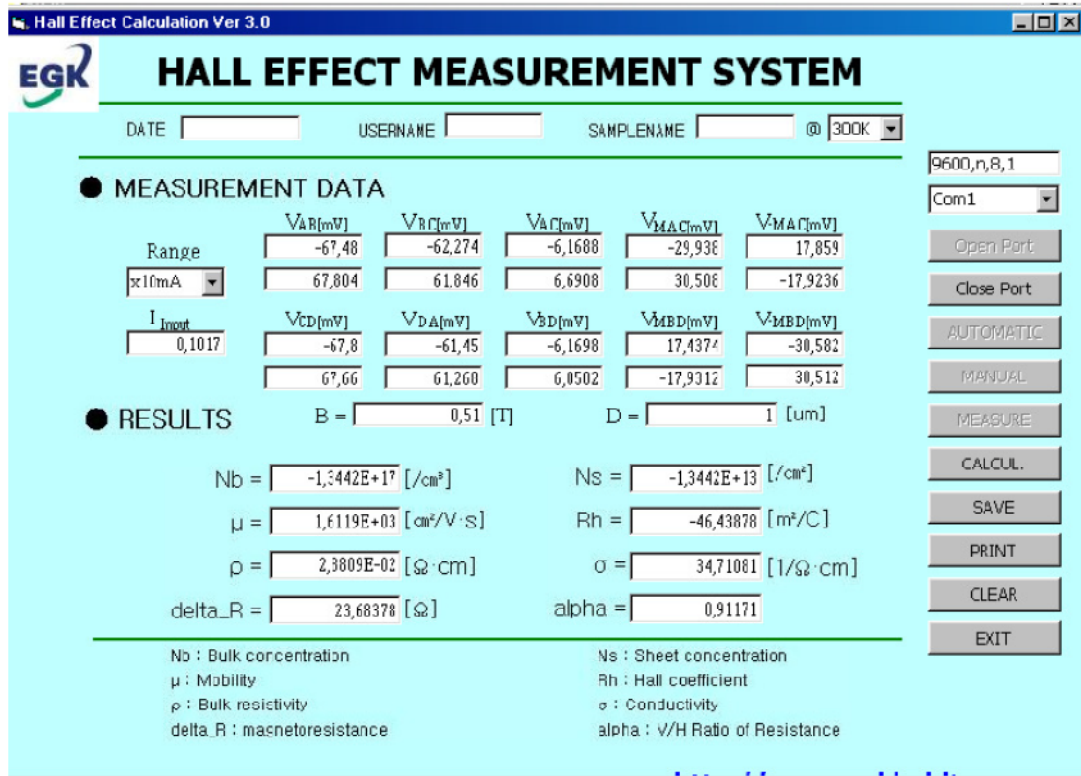
Şekil 5.5. GaN HEMT epitaksiyel yapısının XRD ölçümü grafiği.

Şekil 5.5'ten GaN, AlGaN ve AlN için pik yarı genişlikleri (FWHM) Çizelge 5.2'deki gibi bulunmuştur. Bu değerler literatürdeki değerlere yakın olup büyütülen kristal tabakalarının kalitesini göstermektedir.

Çizelge 5.2. GaN, AlGaN ve AlN tabakaları için XRD deseninden ölçülen ve literatürdeki FWHM değerleri.

Tabaka Simetrik eksen (002)	Ölçülen FWHM (arc sec)	Literatürdeki FWHM (arc sec) [47-50]
GaN	173	100-400
AlGaN	302	300-500
AlN	320	200-600

GaN HEMT epitaksiyel yapısının tabaka taşıyıcı yoğunluğunu, taşıyıcı hareketliliğini ve öz direncini ölçmek amacıyla EGK HEM-2000 Hall ölçümü sisteminde Hall ölçümü alınmıştır. Şekil 5.6'da GaN HEMT epitaksiyel yapısına ait Hall ölçüm sonuçları grafiği görülmektedir.



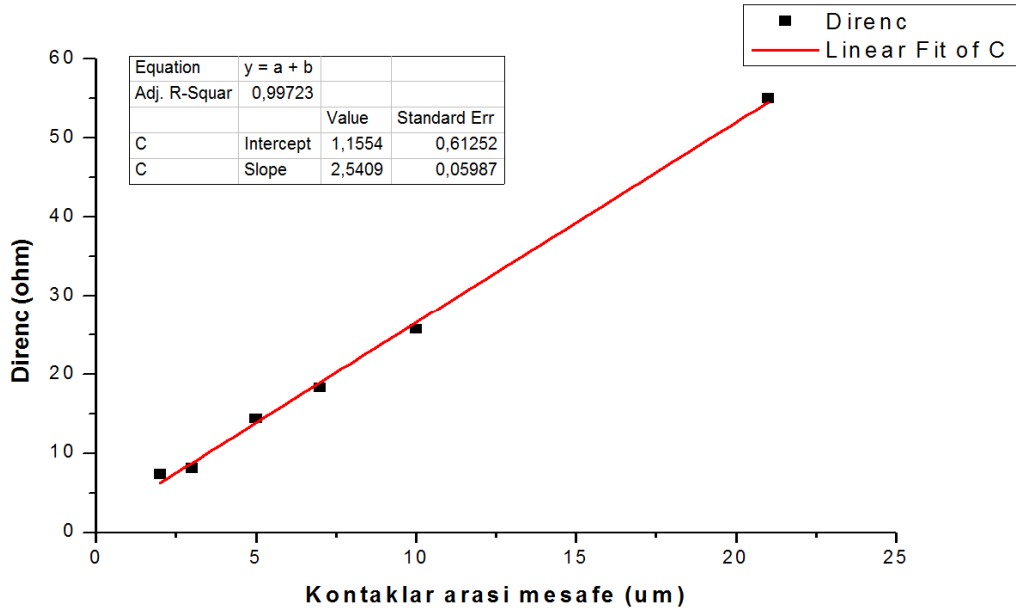
Şekil 5.6. GaN HEMT epitaksiyel yapısına ait 300K'daki Hall ölçüm sonuçları grafiği.

GaN HEMT epitaksiyel yapısı için $1.34 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ tabaka taşıyıcı yoğunluğu, $1,61 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ taşıyıcı hareketliliği, $2,88 \times 10^{-2} \Omega.\text{cm}$ öz direnç ve $34,7 \Omega^{-1}.\text{cm}^{-1}$ elektriksel iletkenlik ölçümlenmiştir. Bu değerler literatürdeki [51] değerlere oldukça yakın değerler olup büyütülen GaN HEMT epitaksiyel yapısının aygıt üretimi için oldukça ideal olduğunu göstermektedir.

5.2. GaN HEMT Aygıt Karakterizasyonu

5.2.1. Omik Kontak Direnç Ölçümü

Tabaka direnci doğrudan elektron hareketliliği, taşıyıcı yoğunluğu ve geçiş iletkenliği ile ilintili olduğundan GaN HEMT aygıtlarda aygıt performansı açısından omik kontak dirençlerinin olabildiğince düşük olması istenmektedir. GaN HEMT aygıtlar için omik kontak direnci ölçümü dört kontak iletim hattı modeli (TLM) ile yapılmıştır. Şekil 5.7'de GaN HEMT aygıtlara ait tipik bir dört kontak TLM ölçümü grafiği görülmektedir.



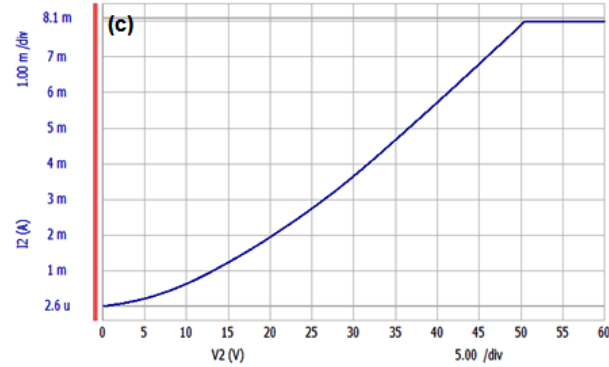
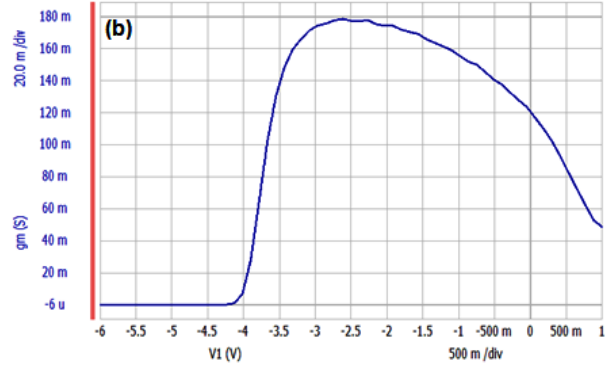
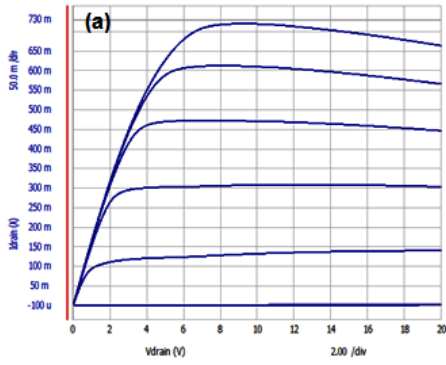
Şekil 5.7. GaN HEMT aygıtlara ait tipik bir dört kontak TLM ölçümü grafiği.

Kontak pedlerin genişliği (W), $200 \mu\text{m}$ olmak üzere Eş. 3.12'den yararlanarak kontak direnç (R_c) için $0,12 \Omega.\text{mm}$ ve tabaka direnci (R_s) için $508 \Omega/\text{sq}$ değerleri hesaplanmıştır. Literatürde R_c için $0,2-0,9 \Omega.\text{mm}$ ve R_s için $300-600 \Omega/\text{sq}$

aralığında değerler rapor edildiği düşünüldüğünde bu değerlerin oldukça iyi değerler olduğu görülmektedir [52–54].

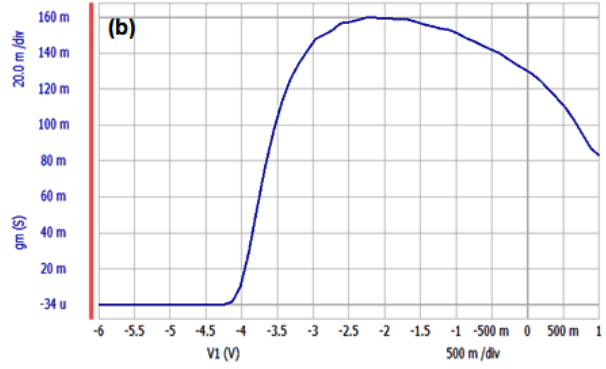
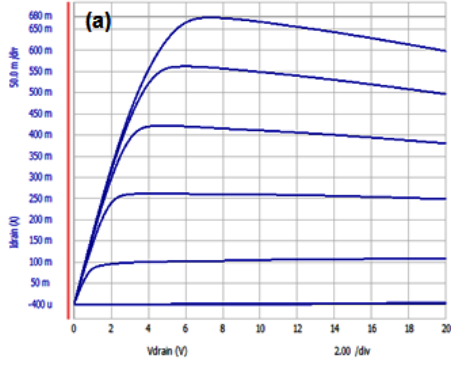
5.2.2. DC Ölçüm Sonuçları

6x125 μm (6 kapılı ve 125 μm kapı genişliğine sahip) lik aygıtlar için L_g değişimine bağlı DC karakterizasyon sonuçları Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de görülmektedir. Şekillerde (a) grafiği; I-V ölçüm sonucunu, (b) grafiği; geçiş iletkenliği (g_m) ölçüm sonucunu ve (c) grafiği kırılma gerilimi (V_{br}) ölçüm sonucunu göstermektedir. Kırılma gerilimi ölçümlerinde aygıtlardan geçen akım değeri 8,0 mA değerinde sınırlandırılarak aygıtlardan 51 V (bu voltaj değeri, $L_g = 300$ nm olan örneğin kırılma gerilimidir) değerinde geçen maksimum akım $I_{DS,51V}$ değerleri incelenmiştir. Aygıtlar için 51 V değerinde ölçümlenen akım değerinin düşük olması, aygıtların kırılma geriliminin büyük olması anlamına gelmektedir.

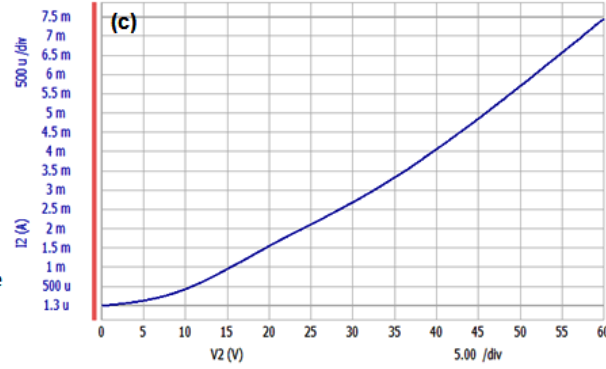


$$\begin{aligned}
 I_{DSS} &= 960 \text{ mA/mm} \\
 V_{\text{pinch off}} &= -5,2 \text{ V} \\
 V_{\text{knee}} &= 8,8 \text{ V} \\
 g_m &= 236 \text{ mS/mm} \\
 I_{DS,51V} &= 8,0 \text{ mA (8mA sınırlandırma geriliminde} \\
 &\quad \text{51V'ta aygıttan geçen akım} \\
 &\quad \text{değeri)}
 \end{aligned}$$

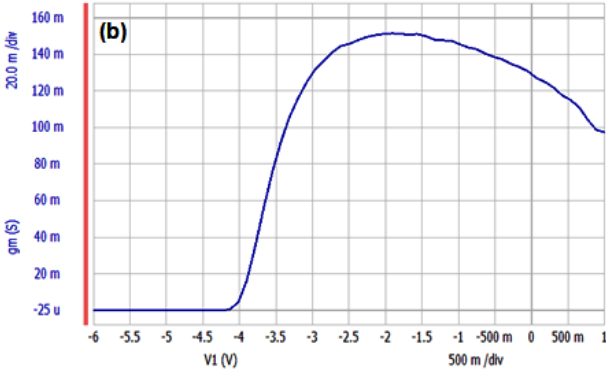
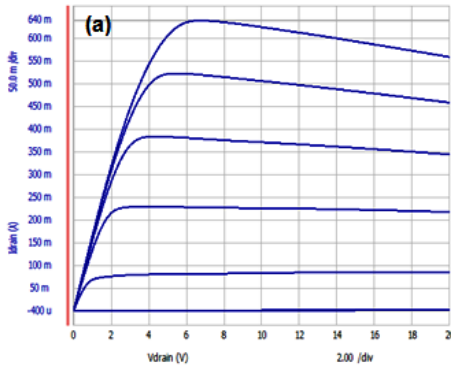
Şekil 5.8. L_g 'si 300 nm olan A örneği için alınmış DC ölçüm sonuçları.



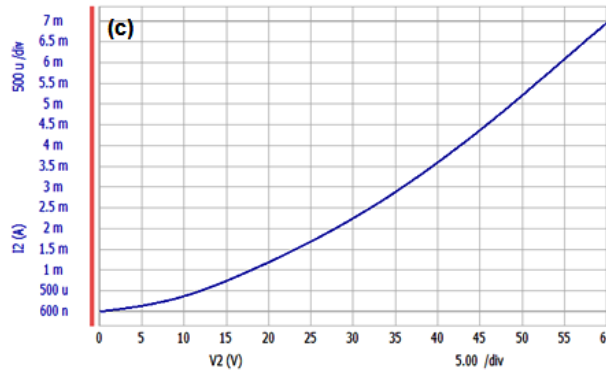
$I_{DSS} = 903 \text{ mA/mm}$
 $V_{\text{pinch off}} = -4,4 \text{ V}$
 $V_{\text{knee}} = 7,2 \text{ V}$
 $g_m = 213 \text{ mS/mm}$
 $I_{DSS,51V} = 5,9 \text{ mA}$ (8mA sınırlandırma geriliminde 51V'ta ağıttan geçen akım değeri)



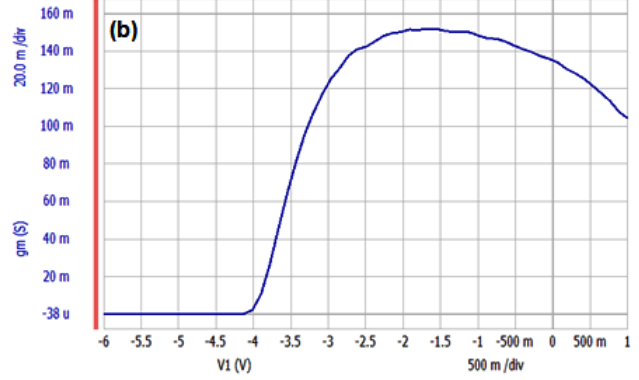
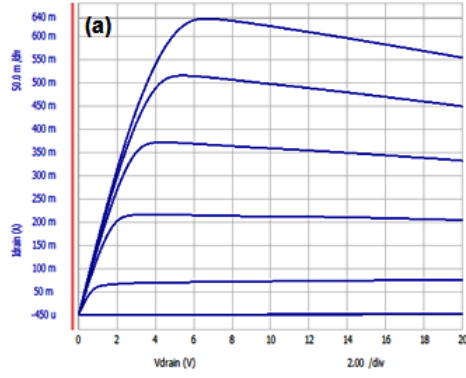
Şekil 5.9. L_g 'si 600 nm olan B örneği için alınmış DC ölçüm sonuçları.



$I_{DSS} = 852 \text{ mA/mm}$
 $V_{\text{pinch off}} = -4,4 \text{ V}$
 $V_{\text{knee}} = 6,6 \text{ V}$
 $g_m = 203 \text{ mS/mm}$
 $I_{DSS,51V} = 5,4 \text{ mA}$ (8mA sınırlandırma geriliminde 51V'ta ağıttan geçen akım değeri)



Şekil 5.10. L_g 'si 800 nm olan C örneği için alınmış DC ölçüm sonuçları.



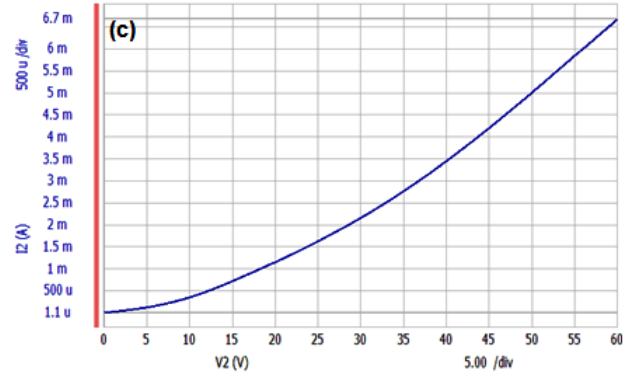
$$I_{DSS} = 851 \text{ mA/mm}$$

$$V_{\text{pinch off}} = -4,3 \text{ V}$$

$$V_{\text{knee}} = 6,6 \text{ V}$$

$$g_m = 203 \text{ mS/mm}$$

$$I_{D,51V} = 5,2 \text{ mA (8mA sınırlandırma geriliminde 51V'ta aygıttan geçen akım değeri)}$$



Şekil 5.11. L_g 'si 1000 nm olan D örneği için alınmış DC ölçüm sonuçları.

DC ölçümleri sonucunda L_g değişimine bağlı olarak aygıtlar için elde edilen karşılaştırmalı veriler Çizelge 5.3'te görülmektedir.

Çizelge 5.3. L_g değişimine bağlı DC ölçüm sonuçları.

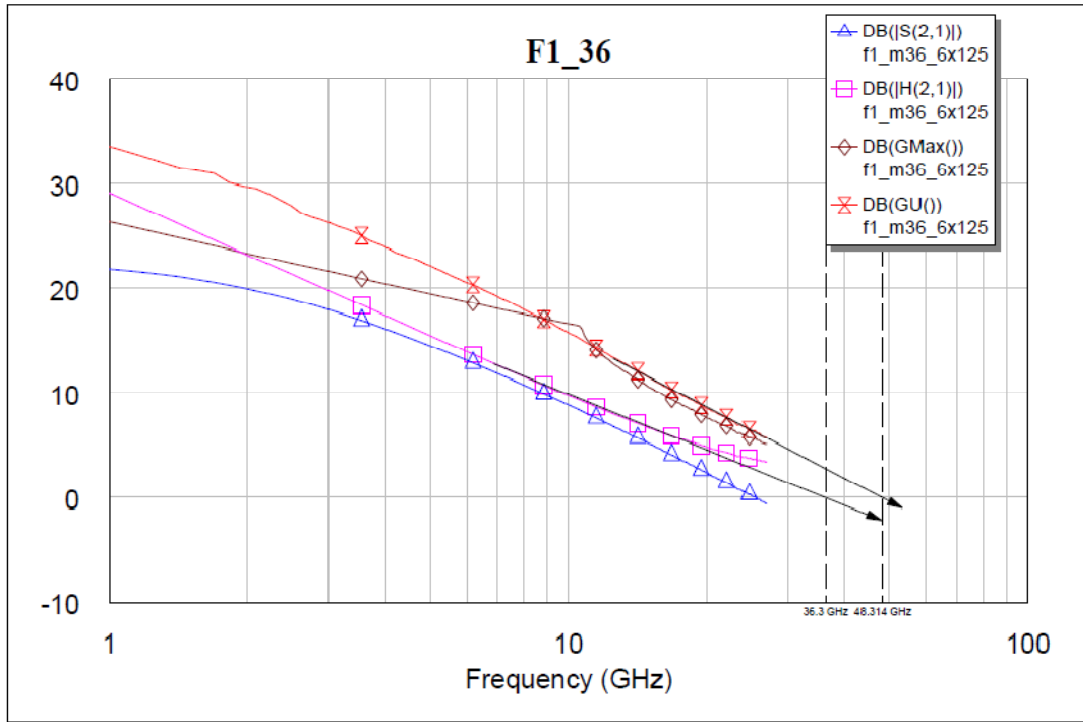
Örnekler	L_g (nm)	I_{DSS} (mA/mm)	$V_{\text{pinch off}}$ (-V)	V_{knee} (V)	g_m (mS/mm)	$I_{D,51V}$ (mA)
A	300	960	5,2	8,8	236	8,0
B	600	903	4,4	7,2	213	5,9
C	800	852	4,4	6,6	203	5,4
D	1000	851	4,3	6,6	203	5,2

Çizelge 5.3 incelendiğinde L_g 'nin 300-800 nm aralığındaki değişimlerinde L_g 'nin arttıkça Eş. 2.10'a uygun olarak I_{DSS} ve Eş. 2.11'e uygun olarak da g_m değerlerinin düştüğü, kırılma gerilimi değerlerinin ise arttığı görülmektedir. L_g arttıkça kapı kontağının akaç kontağı tarafında oluşturmuş olduğu elektrik alan daha düzgün olmakta ve kapı kontağı, kanalı daha iyi kontrol edebilmektedir. Bu da doyum

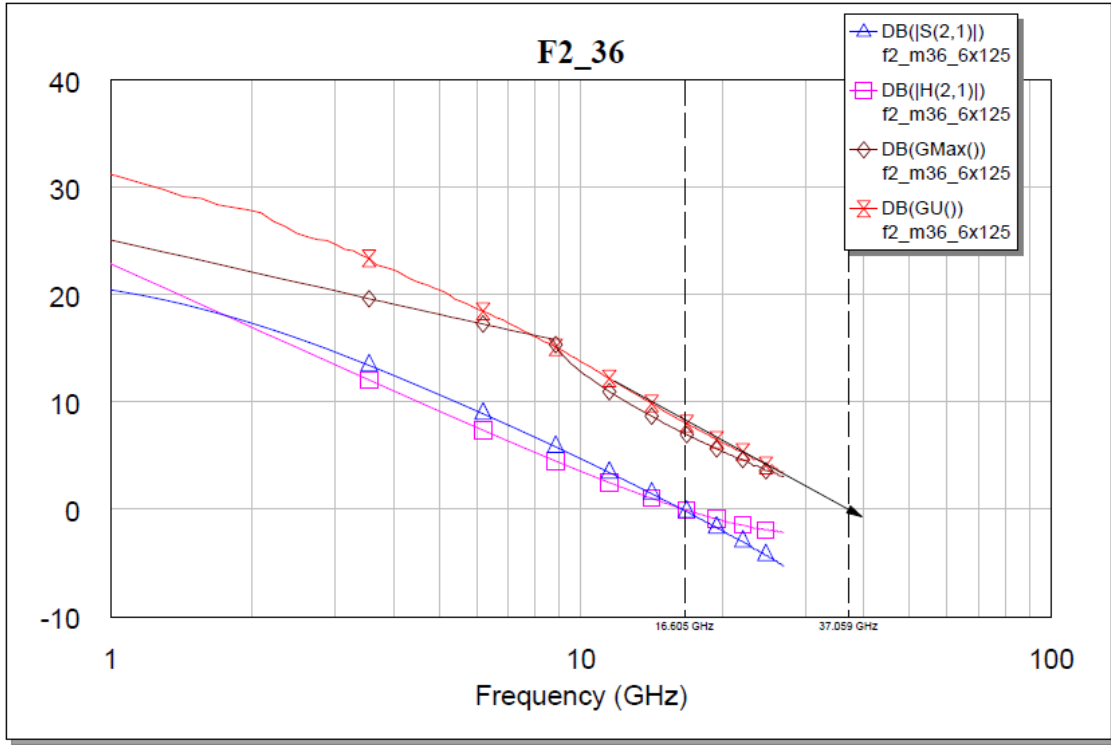
akımının (I_{DSS}) ve geçiş iletkenliğinin (g_m) azalması ve kırılma geriliminin de artması anlamına gelmektedir. L_g 'nin 1000 nm olduğu aygıtlarda ise g_m 'in değişmediği I_{DSS} ve kırılma geriliminin ise çok az değiştiği görülmektedir. Bunun temel nedeni ise; L_g 'nin belli bir değerine kadar kapı kontağının akaç kontağı tarafında oluşturmuş olduğu elektrik alanın, ani piklerden kurtularak daha düzgün bir forma girmesi [55], ancak L_g 'nin belli bir optimum değerinden sonra L_g değişiminin artık elektrik alan dağılımını etkilememesidir. Çünkü L_g 'nin bu optimum noktasından sonra elektrik alan en düzgün formuna girmekte ve L_g 'den bağımsız hale gelmektedir. L_g 'nin bu optimum değerinden sonra L_g 'yi arttırmak, elektrik alan dağılımını iyileştirmemekte aksine ek kapı kapasitansı yaratarak aygıt performansının azalmasına neden olmaktadır. Akaç-kaynak arası mesafenin 4 μm olduğu bizim aygıtlar için L_g 'nin optimum değeri 800 nm olarak bulunmuştur.

5.2.3. RF Ölçüm Sonuçları

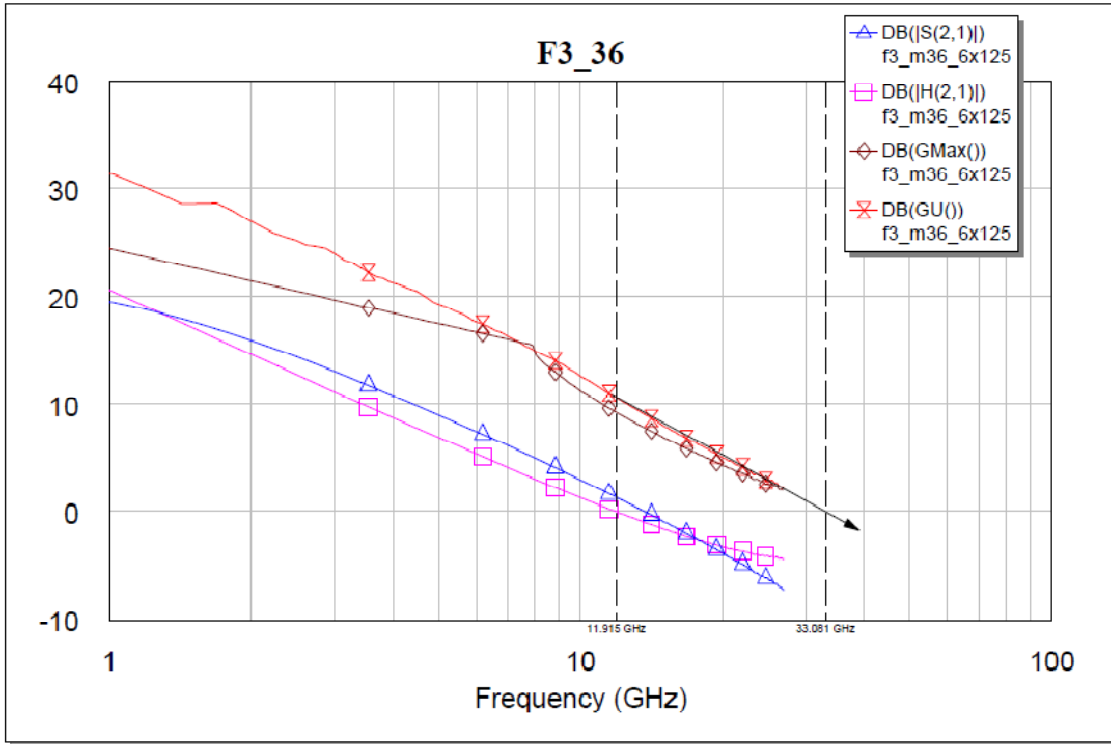
RF ölçümleri sonucunda aygıtlar için elde edilen f_T ve f_{max} değerleri Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 gibi olmuştur.



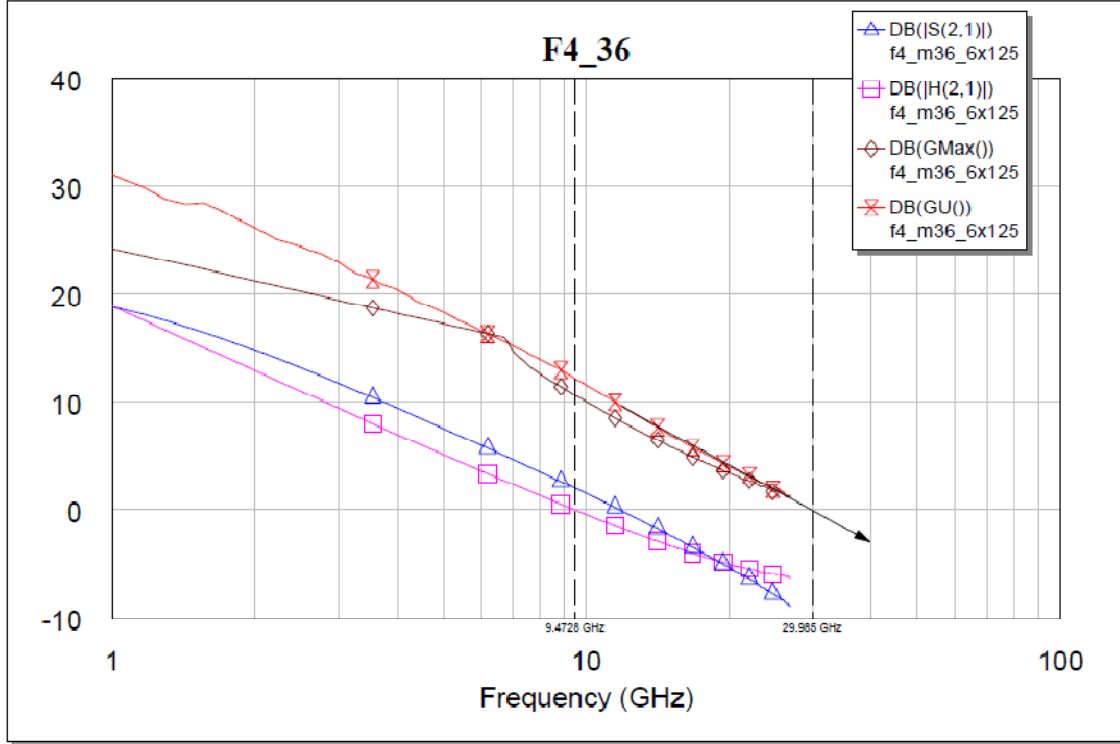
Şekil 5.12. RF ölçümleri sonucunda L_g 'si 300 nm olan A örneği için alınmış f_T ve f_{max} değerleri. A örneği için $f_T = 36$ GHz ve $f_{max} = 48$ GHz olarak bulunmuştur.



Şekil 5.13. RF ölçümleri sonucunda L_g 'si 600 nm olan B örneği için alınmış f_T ve f_{max} değerleri. A örneği için $f_T = 17$ GHz ve $f_{max} = 37$ GHz olarak bulunmuştur.



Şekil 5.14. RF ölçümleri sonucunda L_g 'si 800 nm olan C örneği için alınmış f_T ve f_{max} değerleri. A örneği için $f_T = 12$ GHz ve $f_{max} = 33$ GHz olarak bulunmuştur.



Şekil 5.15. RF ölçümleri sonucunda L_g 'si 800 nm olan D örneği için alınmış f_T ve f_{max} değerleri. A örneği için $f_T = 9,5$ GHz ve $f_{max} = 30$ GHz olarak bulunmuştur.

RF ölçümleri sonucunda aygıtlar için elde edilen L_g değişimine bağlı karşılaştırmalı f_T ve f_{max} değerleri Çizelge 5.4'te görülmektedir.

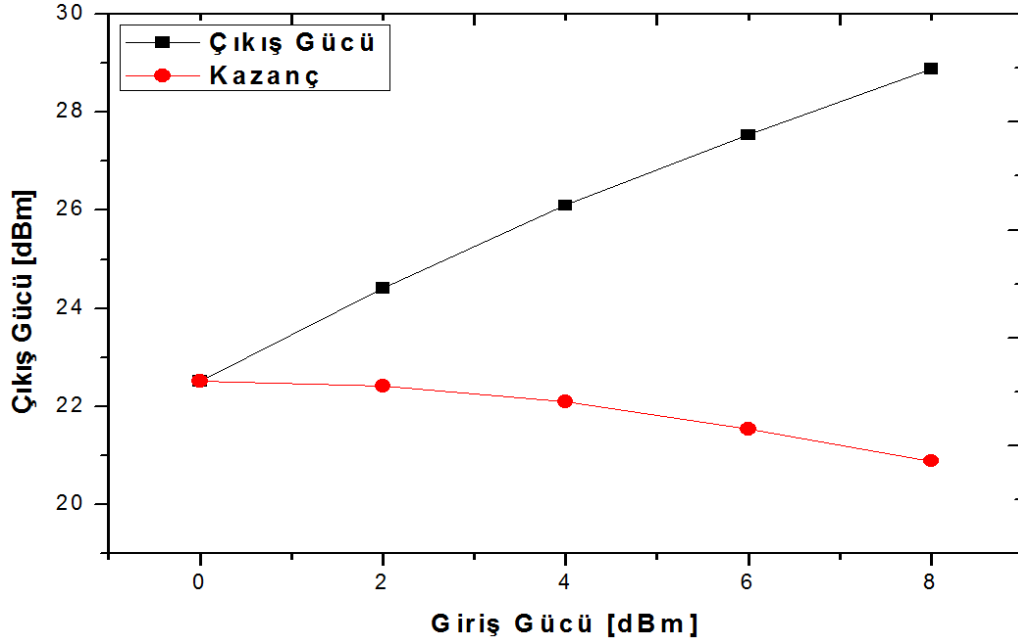
Çizelge 5.4. RF ölçümleri sonucunda L_g değişimine bağlı olarak aygıtlar için elde edilen f_T ve f_{max} değerleri.

Örnekler	L_g (nm)	f_T (GHz)	f_{max} (GHz)
A	300	36	48
B	600	17	37
C	800	12	33
D	1000	9,5	30

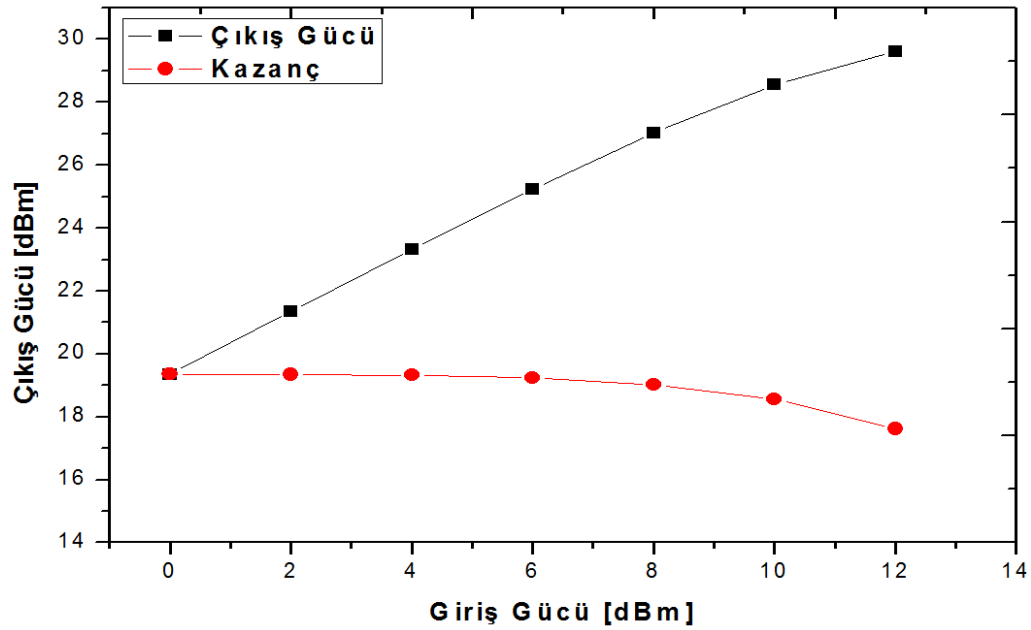
Çizelge 5.4'ten görüldüğü üzere Eş. 2.12 ve Eş. 2.13'e uygun olarak L_g arttıkça kapı kapasitansı (C_g) artmakta ve aygıtlar için f_T ve f_{max} değerleri düşmektedir. C ve D örneklerinde g_m değerleri aynı olmasına rağmen f_T değerleri arasındaki farklılık, L_g 'nin 800 nm'lik optimum değerinden sonra aygıtlar için C_g değerinin daha etkin olduğunu göstermektedir.

5.2.4. Güç Ölçüm Sonuçları

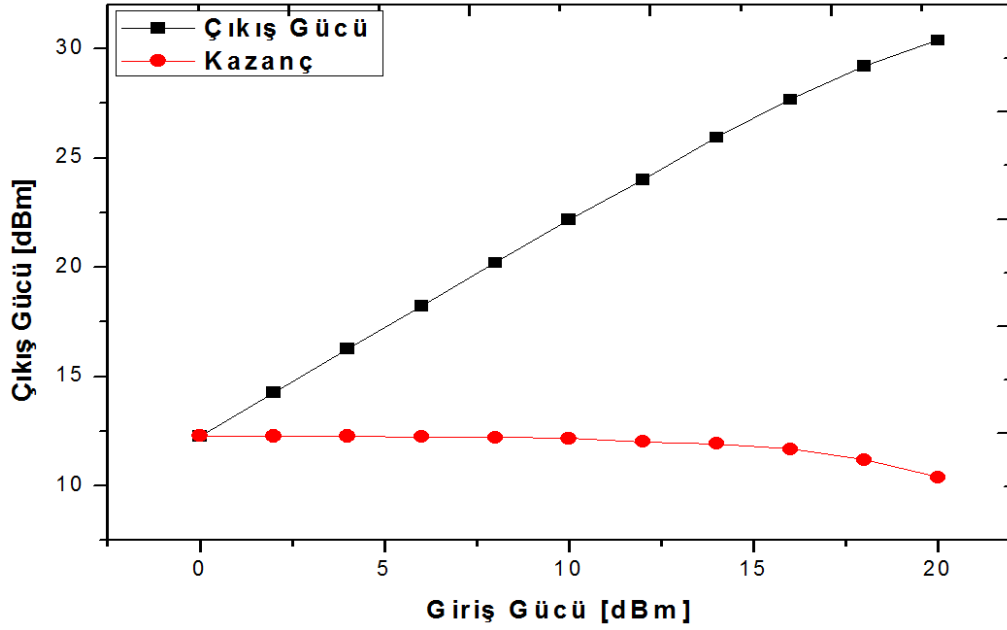
Güç ölçümleri sonucunda aygıtlar için elde edilen 4 GHz'lik giriş gücü sinyallerine karşılık çıkış gücü ve kazanç (çıkış gücü-giriş gücü) grafikleri Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'daki gibi olmuştur.



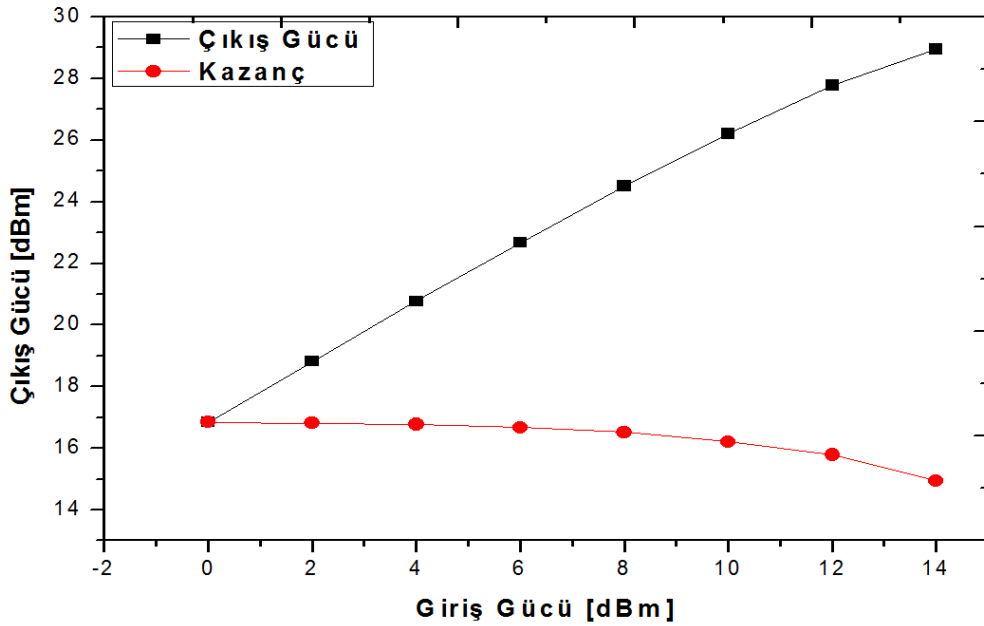
Şekil 5.16. Güç ölçümleri sonucunda L_g 'si 300 nm olan A örneği için alınmış giriş gücüne karşılık çıkış gücü ve kazanç grafiği.



Şekil 5.17. Güç ölçümleri sonucunda L_g 'si 600 nm olan B örneği için alınmış giriş gücüne karşılık çıkış gücü ve kazanç grafiği.



Şekil 5.18. Güç ölçümleri sonucunda L_g 'si 800 nm olan C örneği için alınmış giriş gücüne karşılık çıkış gücü ve kazanç grafiği.



Şekil 5.19. Güç ölçümleri sonucunda L_g 'si 1000 nm olan D örneği için alınmış giriş gücüne karşılık çıkış gücü ve kazanç grafiği.

Aygıtlar için elde edilen 2 dBm kazanç sıkıştırma (gain compression) değerinde L_g değişimine bağlı karşılaştırmalı çıkış gücü değerleri Çizelge 5.5'te görülmektedir.

Çizelge 5.5. Güç ölçümleri sonucunda elde edilen 2 dBm kazanç sıkıştırma (gain compression) değerinde L_g değişimine bağlı çıkış gücü değerleri.

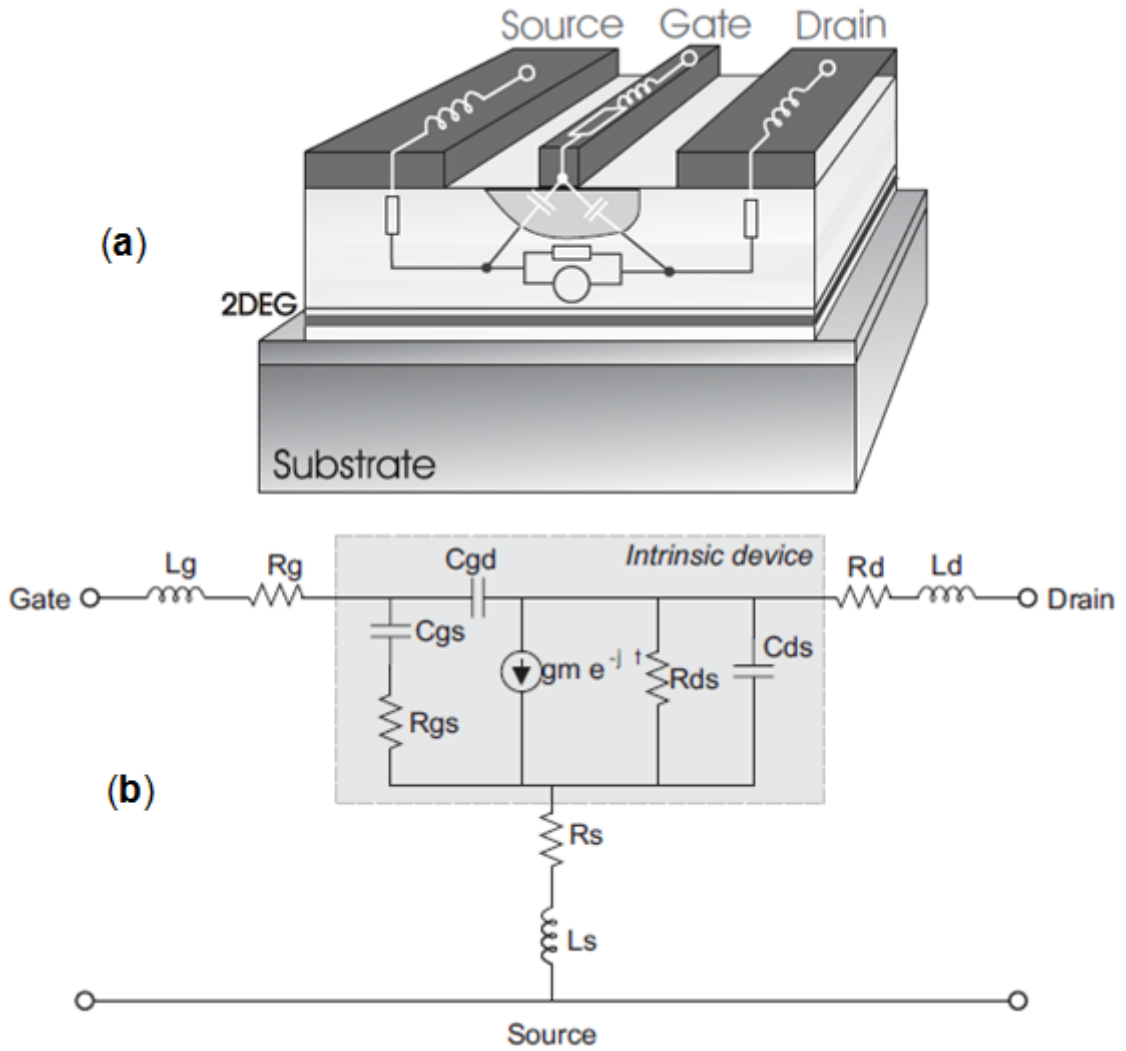
Örnekler	L_g (nm)	Çıkış gücü (dBm)	Çıkış gücü (mW)
A	300	28,8	759
B	600	29,6	912
C	800	30,4	1096
D	1000	28,9	776

Çizelge 5.5'ten görüldüğü üzere L_g 'nin 300-800 nm'lik değişimleri arasında L_g arttıkça çıkış gücünün de arttığı görülmektedir. L_g arttıkça kapı kontağı akaç bölgesine doğru genişlemekte ve kanal üzerinde daha düzgün bir elektrik alanın oluşması sağlanmaktadır. Bu da akaç bölgesine yakın kapı kenarında elektrik alanın ani pikler yapmasını engelleyerek elektronların tuzaklanmasını engellemekte ve HEMT aygıtların kırılma gerilimlerinin ve güç performanslarının artmasını sağlamaktadır.

L_g 'nin 1000 nm olduğu aygıtlar için ise çıkış gücünün azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni daha iyi anlamak için Şekil 4.5 ve Çizelge 4.1'den D örneğinin TEM görüntüleri ve verileri incelendiğinde D örneğinin HEMT aygıtları için kapı kontağının akaç kontağına çok yaklaştığı ve aradaki mesafenin 2450 nm olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarımız, bu mesafenin HEMT aygıtlardan yüksek güç performansı almak için yeterli olmadığını göstermiştir. DC ve RF ölçümleri sonucunda akaç-kaynak arası mesafenin 4 μ m olduğu 6x125 μ m'lik HEMT aygıt tasarımlarımızda L_g için en optimum değer 800 nm olduğu, bundan daha büyük kapı uzunluklarda L_g 'nin elektrik alan profili üzerinde bir etkiye sahip olmadığı, aksine kapı akaç arasındaki mesafenin 2500 μ m'nin altına düşmesine bağlı olarak, kapı- akaç arasındaki kapasitansın arttığı ve aygıt performansının azaldığı görülmüştür.

Kapı-kaynak arasındaki mesafe sabit olmak koşuluyla L_g arttırıldığında kapı kontağının akaç kontağına bakan kenarında elektrik alanın keskin pikleri daha düzgün bir form alacak şekilde değişmektedir [55]. Elektrik alanın düzgün dağılımı, L_g 'nin belli bir değerine kadar devam etmektedir. Bu değer L_g 'nin optimum değeri olup bu değerden sonra L_g 'nin artması elektrik alanın profilini etkilememektedir. HEMT aygıtlar için L_g 'nin optimum değeri, akaç-kaynak arasındaki mesafeye bağlı

olarak değişmektedir. L_g 'nin optimum değerinden sonra L_g 'yi arttırmak, kapı-akaç arasındaki mesafenin giderek azalmasına ve kapasitans formülüne göre ($C = \epsilon A/d$) de kapı-akaç arasındaki kapı kapasitansının (C_{gd}) artmasına neden olmaktadır. Bu ise yüksek frekans ölçümlerinde HEMT aygıtların girişindeki empedans değerini düşürerek RF giriş gücünün bir kısmının C_g değerine bağlı olarak kazanç almadan aygıtın çıkışına aktarılmasına ve sonuç olarak da aygıtın çıkış gücünün azalmasına neden olmaktadır. Şekil 5.20 (a)'da yer alan HEMT aygıtların kesit görünümü için küçük sinyal devre eşleniğini ve (b)'de HEMT aygıtlar için iç (intrinsic) ve dış (extrinsic) elemanlı küçük sinyal devre eşleniğini inceleyiniz.



Şekil 5.20. (a) HEMT aygıtların kesit görünümlü küçük sinyal devre eşleniği, **(b)** HEMT aygıtların iç (intrinsic) ve dış (extrinsic) elemanlı küçük sinyal devre eşleniği [31].

6. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, MOCVD tekniği ile büyütülen HEMT epitaksiyel örnekler üzerinde kapı kontak uzunluğu (L_g) değiştirilerek, HEMT aygıt fabrikasyonu ve karakterizasyonu başarılı bir şekilde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, L_g değişiminin HEMT aygıtların güç performansını değiştirdiğini ve L_g arttıkça HEMT aygıtların güç performansını arttırdığını göstermiştir. Ancak L_g 'nin belli bir değerinden sonra kapı (gate)-akaç (drain) arasındaki mesafenin azalması kapı-akaç kapasitansını (C_{gd}) arttırarak HEMT aygıtların güç performansının azalmasına neden olmaktadır. Bu da bize kapı-akaç arasındaki mesafenin aygıt tasarımına bağlı olarak belli bir değerden asla küçük olmaması gerektiğini ve tasarımların da bu sonuç göz önünde bulundurularak yapılması gerektiğini göstermiştir.

Yukarıdaki deneysel bulgular göz önünde bulundurularak gelecek çalışmaların, kapı (gate)-akaç (drain) arası mesafeler değiştirilerek, çeşitli akaç (drain)-kaynak (source) arası mesafelerde L_g 'nin HEMT aygıtların güç performansını nasıl etkileyeceğini içermesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] T. Mimura, The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT), *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 780-782, **2002**.
- [2] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. and Toyoda, Y., Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, *Applied Physics Letters*, 48 (5), 353-355, **1986**.
- [3] M. Khan, J. van Hoven, J. Kuznia, and D. Olson, High electron mobility GaN/AlGaN heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition, *Applied Physics Letters*, 58 (21), 2408–2410, **1991**.
- [4] M. Khan, J. Kuznia, A. Bhattarai, and D. Olson, Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN, *Applied Physics Letters*, 62 (15), 1786–1787, **1993**.
- [5] M. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, W. Schaff, J. Burm, and M. Shur, Microwave performance of a 0.25 μm gate AlGaN/GaN heterostructure field effect transistor, *Applied Physics Letters*, 65 (9), 1121–1123, **1994**.
- [6] T.P. Chow, V. Khemka, J. Fedison, N. Ramungul, K. Matocha, Y. Tang, R.J. Gutmann, SiC and GaN bipolar power devices, *Solid-State Electronics*, 44, 277–301, **2000**.
- [7] R. J. Trew, SiC and GaN Transistors-Is There One Winner for Microwave Power Applications?, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Vol. 90, No. 6, **2002**.
- [8] Sang Kwon Lee, *Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contacts for High Power and High Temperature Device Applications*, Ph. D Dissertation, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) Royal Institute of Technology Department of Microelectronics and Information Technology, Kista-Stockholm, Sweden, **2002**.
- [9] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, *Comparison of wide-bandgap semiconductor for power electronics applications*, Technical Report, Oak ridge National Laboratory, 14, **2003**.
- [10] U. K. Mishra, P. Parikh, Y. Wu, GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Vol. 96, No. 2, pp. 287–305, February **2008**.
- [11] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/> (Ocak, **2014**).
- [12] M. A. Acar, *Fabrication, Modeling and Characterization of GaN HEMTs, and Design of High Power MMIC Amplifiers*, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2009**.
- [13] Ö, Kelekçi, *GaN Temelli Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) Tasarımı, Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2011**.

- [14] S. Yoshida, Growth of cubic III-nitride semiconductors for electronics and optoelectronics application, *Physica E*, 7(3-4), 907–914, **2000**.
- [15] H. Harima, Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14 R967–R993, **2002**.
- [16] H. Morkoç, *Nitride Semiconductors and Devices*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 8–9, **1999**.
- [17] M. Sumiya, S. Fuke, Review of polarity determination and control of GaN, *Materials Research Society (MRS) Internet Journal Nitride Semiconductor Research*, 9, 1, **2004**.
- [18] J. I. Pankove, T. D. Moustakes, *Gallium Nitride (GaN) I*, Academic Press, San Diego, 167–178, **1998**.
- [19] D. Vogel, P. Kruger, J. Pollmann, Structural and electronic properties of group-III nitrides, *Physical Review B*, 55 (19), 24-27, **1997**.
- [20] L. Liu, J. H. Edgar, Substrates for gallium nitride based epitaxy, *Applied Physics Letters*, 15, 327–329, **1969**.
- [21] J. E. Van Nostrand, J. Solomon, A. Saxler, Q. H. Xie, D. C. Reynolds, D. C. Look, Dissociation of Al₂O₃(0001) substrates and the roles of silicon and oxygen in *n*-type GaN thin solid films grown by gas-source molecular beam epitaxy, *Journal of Applied Physics*, 87 (12), 8766–8772, **2000**.
- [22] U. K. Mishra, P. Parikh, Y. F. Wu, AlGaIn/GaN HEMTs-An Overview of Device Operation and Applications, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 90 (6), 1022–1031, **2002**.
- [23] D. Ducatteau, A. Minko, V. Hoël, E. Morvan, E. Delos, B. Grimbart, H. Lahreche, P. Bove, C. Gaquière, J. C. De Jaeger, and S. Delage, Output Power Density of 5.1 W/mm at 18 GHz With an AlGaIn/GaN HEMT on Si Substrate, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Devices Letters*, 27(1), 7–9, **2006**.
- [24] Adam R. Boyd, Stefan Degroote, Maarten Leys, Frank Schulte, Olaf Rockenfeller, Markus Luenenbuerger, Marianne Germain, Johannes Kaeppler, and Michael Heuken, Growth of GaN/AlGaIn on 200 mm diameter silicon (111) wafers by MOCVD, *Physics Status Solidi*, 6(2), 1045–1048, **2009**.
- [25] Y. Dikme, *MOVPE and characterization of GaN-based structures on alternative substrates*, Doktora Tezi, Von der Fakultät für Electrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 15, **2006**.
- [26] S. Turhan, *AlGa(In)N/AlN/GaN Heteroeklem Yapıların Enerji Bant Profillerinin ve Taşıyıcı Yoğunluklarının Nextnano³ Simülasyon programı Kullanarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, **2011**.
- [27] F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt, Spontaneous polarization and piezo electric constants of III-V nitrides, *Physical Review B*, 56, 10024–10027, **1997**.

- [28] S. Dahmani, *Large-Size AlGaIn/GaN HEMT Large-Signal Electrothermal Characterization and Modeling for Wireless Digital Communications*, Doktora Tezi, Kassel Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Enstitüsü, Almanya, **2011**.
- [29] J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, U. K. Mishra, Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors, *Applied Physics Letters*, 77, 250, **2000**.
- [30] E. W. Faraclas, *Modelling and simulation of GaN-based high electron mobility transistors*, Doktora Tezi, M.S.E.E., University of Connecticut, 20–29, **2006**.
- [31] P. Javorka, *Fabrication and Characterization of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors*, Doktora Tezi, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Almanya, **2004**.
- [32] N. E. Kaluza, *MOVPE Growth and Characterization of AlGaIn/GaN Heterostructures for HEMT Application*, Doktora Tezi, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Almanya, 78, **2003**.
- [33] T. H. Gfroerer, *Photoluminescence in Analysis of Surface and Interfaces in Encyclopedia of Analytical Chemistry*, R.A. Meyers (Ed.), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 9209–9231, **2000**.
- [34] <http://www.spec2000.net/09-xrd.htm> (Ocak, **2014**).
- [35] http://www.geobacter.org/images/jpg/AFM_diagram.jpg (Ocak, **2014**).
- [36] http://www.nist.gov/pml/div683/hall_fig4.cfm (Ocak, **2014**).
- [37] <http://www.rfcafe.com/references/general/hall-effect.htm> (Ocak, **2014**).
- [38] T. Uesugi, T. Okada, A. Wada, K. Kato, A. Yasuda, S. Maeda, S. Samukawa, The effects of polymer side-chain structure on roughness formation of ArF photoresist in plasma etching processes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(7), 075203, February **2012**.
- [39] <http://www.cleanroom.byu.edu/metal.phtml> (Ocak, **2014**).
- [40] <http://www.oxford-instruments.com/> (Ocak, **2014**).
- [41] J. Bernát, *Fabrication and Characterisation of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors for Power Applications*, Doktora Tezi, Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 36, **2005**.
- [42] T. Palacios, A. Chakraborty, S. Keller, U. K. Mishra, Study of Impact of Access Resistance on High-Frequency Performance of AlGaIn/GaN HEMTs by Measurements at Low Temperatures, *Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Devices Letters*, 27(11), 877–880, **2006**.
- [43] T. Ide, M. Shimizu, A. Nakajima, M. Inada, S. Yagi, G. Piao, Y. Yano, N. Akutsu, H. Okumura, K. Arai, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46(4B), 2334–2337, **2007**.

- [44] G. H. Jessen, R. C. Fitch, J. K. Gillespie, G. Via, A. Crespo, D. Langley, D. J. Denninghoff, M. Trejo, E. R. Heller, Short-Channel Effect Limitations on High-Frequency Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for T-gate Devices, *Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Electron Devices*, 2589–2597, **2007**.
- [45] X. Wang, C. Wang, G. Hu, J. Wang, J. Li, Room temperature mobility above 2100 cm²/Vs in Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN heterostructures grown on sapphire substrates by MOCVD, *Physica status solidi (c)* 3, No. 3, 607–610, **2006**.
- [46] S. M. Hubbard, G. Zhao, D. Pavlidis, W. Sutton, E. Cho, High-resistivity GaN buffer templates and their optimization for GaN-based HFETs, *Journal of Crystal Growth* 284, 297–305, **2005**.
- [47] S. Boeykens, et al., Investigation of AlN nucleation layers for AlGaIn/GaN heterostructures on 4H–SiC, *Physica status solidi (c)* 3, No. 6, 1579–1582, **2006**.
- [48] H. Amano, et al., Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, *Applied Physics Letters*, vol. 48, p.353, **1986**.
- [49] S. Çörekçi, et al., Structural, morphological, and optical properties of AlGaIn/GaN heterostructures with AlN buffer and interlayer, *Journal of Applied Physics*, vol. 101, 123502, **2007**.
- [50] A. Grzegorzcyk, et al., Resistivity control of unintentionally doped GaN films, *Physica status solidi (c)*, vol. 2, 2113–2116, **2005**.
- [51] H. Xing, et al., Gallium nitride based transistors, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 13, 7139–7157, **2001**.
- [52] S. T. Sheppard, et al., High-Power Microwave GaN/AlGaIn HEMT's on Semi-Insulating Silicon Carbide Substrates, *Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Electron Device Letters*, Vol. 20, No. 4, **1999**.
- [53] J. G. Felbinger, et al., Comparison of GaN HEMTs on Diamond and SiC Substrates, *Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Electron Device Letters*, Vol. 28, No. 11, **2007**.
- [54] H. K. Lin, et al., DC and RF characterization of AlGaIn/GaN HEMTs with different gate recess depths, *Solid-State Electronics*, 54, 582–585, **2010**.
- [55] S. Karmalkar and U. K. Mishra, Enhancement of breakdown voltage in AlGaIn/GaN high electronmobility transistors using a field plate, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, no. 8, pp.1515–1521, Aug. **2001**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ahmet Toprak
Doğum Yeri : Midyat
Doğum Yılı : 1985
Medeni Hali : Evli
E-pota : atoprak@bilkent.edu.tr
Adresi : Bilkent Üniversitesi NANOTAM

Eğitim

Lise : 1999-2003 İskenderun Süper Lisesi
Lisans : 2003-2008 Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans :
Doktora :

Yabancı Dil ve Düzeyi : İngilizce, İyi

İş Deneyimi : 2010-... Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'nde Araştırma Mühendisi

Deneyim Alanları : Optoelektronik Aygıtlar ve Yarıiletken Aygıt Proses Teknolojisi

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi :

Tezden Üretilmiş Yayınlar :

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar :