

**GaN TEMELLİ YÜKSEK ELEKTRON MOBİLİTELİ TRANSİSTÖR
(HEMT) TASARIMI, FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU**

Özgür KELEKÇİ

**DOKTORA TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2011
ANKARA**

Özgür KELEKÇİ tarafından hazırlanan “GaN TEMELLİ YÜKSEK ELEKTRON MOBİLİTELİ TRANSİSTÖR (HEMT) TASARIMI, FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY
Fizik Anabilim Dalı, Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KASAP
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet PARLAK
Fizik Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Tarih: 20/10/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özgür KELEKÇİ

**GaN TEMELLİ YÜKSEK ELEKTRON MOBİLİTELİ TRANSİSTÖR
(HEMT) TASARIMI, FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU
(Doktora Tezi)**

Özgür KELEKÇİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ekim 2011

ÖZET

Bu çalışmada, GaN temelli yüksek elektron mobiliteli transistörler (HEMT) için yeni epitaksiyel yapıların tasarımı yapıldı ve MOCVD tekniği ile büyütüldü. Elde edilen yapıların elektriksel ve yapısal özellikleri incelendi. Tasarlanan HEMT yapılarından InGaN arka bariyerli AlGaN/AlN/GaN yapıları, AlGaN tampon tabakalı AlInN/AlN/GaN yapılar ve AlInN/AlGaN çift bariyerli yapılar büyütüldü ve malzeme analizleri yapıldı. Yapısal incelemeler için AFM ve yüksek çözünürlüklü XRD tekniği, elektriksel analizler için sıcaklığa (30-300K) ve manyetik alana (0-1,4 Tesla) bağlı Hall Etkisi sistemi kullanıldı. HEMT yapıları için önemli olan saçılma analizleri yapılarak etkin saçılma mekanizmaları belirlendi. InGaN arka bariyer kullanılmasının kanaldaki elektron sınırlandırmasını ve mobilitiyi artırdığı gözlemlendi. AlInN bariyerli yapılar üzerinde transistör aygıtları üretilerek karakterize edildi. Farklı epitaksiyel yapı tasarımlarının HEMT aygıt performansı üzerindeki etkileri incelendi. AlGaN tampon tabakalı HEMT yapıları üzerinde üretilen aygıtlarda standart yapılara göre düşük sızma akımları ve yüksek kırılma gerilimleri elde edildi.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : AlInN, AlGaN, GaN, HEMT, Hall etkisi, Saçılma
Sayfa Adedi : 163
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**DESIGN, FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF GaN BASED
HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS (HEMT)**

(Ph. D. Thesis)

Özgür KELEKÇİ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2011

ABSTRACT

In this study, novel epitaxial structures for GaN based high electron mobility transistors (HEMT) have been designed and grown by using MOCVD technique. Electrical and structural characterizations of the grown samples have been performed. AlGaN/AlN/GaN HEMTs with InGaN back barriers, AlInN/AlN/GaN HEMTs with AlGaN buffers and AlInN/AlGaN double barrier HEMT structures were grown and material properties were analyzed. AFM and high resolution XRD techniques were used for structural analysis, temperature (30-300K) and magnetic field (0-1,4 Tesla) dependent Hall Effect system was used for electrical analysis. Dominant scattering mechanisms were determined for the samples. Increase in electron confinement and mobility has been observed in the samples with InGaN back barriers. Transistor devices were fabricated on the samples with AlInN barriers and characterized. Effects of epitaxial structure design on the performance of HEMT devices were examined. Lower leakage currents and higher breakdown voltages were obtained in AlInN HEMT structures with AlGaN buffer layers when compared to the structures with standard GaN buffer layers.

Science Code : 202.1.147
Key Words : AlInN, AlGaN, GaN, HEMT, Hall effect, Scattering
Page Number : 163
Adviser : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında beni yönlendiren, bana çok değerli bilgi ve tecrübelerini aktaran değerli danışman hocam Prof. Dr. Süleyman Özçelik'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Hall Etkisi laboratuvarının bütün imkanlarını kullanmamı sağlayan ve birçok aşamada yardımını esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet Kasap'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmada kullandığımız numunelerin büyütüldüğü, HEMT aygıtlarının üretim ve karakterizasyonlarının yapıldığı Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nin tüm imkanlarını her zaman cömertçe sunarak birçok bakımdan çalışmalarımı desteklemiş olan sayın hocam Prof. Dr. Ekmel Özbay' a teşekkürlerimi sunarım.

Epitaksiyel yapı tasarımı ve analizinde yardımları olan Doç. Dr. Sefer Bora Lişesivdin'e, Hall ölçümleri ve analizlerinde önemli katkılar sağlayan Yrd. Doç. Dr. Pınar Tunay Taşlı'ya, XRD ölçüm ve analizlerinde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa Kemal Öztürk ve Dr. Saime Şebnem Çetin'e ayrıca teşekkür ederim. Bu çalışma sırasında bana çeşitli şekillerde yardım eden arkadaşlarım Barış Kınacı, Ömer Cengiz, Galip Orkun Arıcan, Gökhan Kurt, Yıldırım Durmuş, Pakize Demirel ve Mustafa Öztürk'e özellikle teşekkür ederim. Ayrıca Bilkent Üniversitesi-Nanotam ile Gazi Üniversitesi-Starlab'da beraber çalıştığımız bütün öğrenci ve mühendis arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her aşamasında maddi, manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme, çok büyük sabır ve anlayış göstererek bana her konuda yardımcı olan sevgili eşim Nesrin Gökhan Kelekçi'ye en özel teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez 2001K120590 no' lu "İleri Araştırma ve Eğitim Programları" isimli proje ile DPT tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. III-NİTRÜR YARIİLETKEN MALZEMELER.....	8
2.1. Kristal Yapı	8
2.2. Isıl Özellikler.....	10
2.3. Optik Özellikler ve Bant Yapısı.....	10
2.4. Elektriksel Özellikler.....	12
2.5. Malzeme Parametreleri.....	13
2.6. III-Nitrür Epitaksi.....	14
2.6.1 III-Nitrür epitakside kullanılan alttaşlar.....	16
3. GaN TEMELLİ ÇOKLU YAPILARIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ.....	20
3.1. GaN Temelli Çoklu Yapılarda Kutuplanma.....	20
3.1.1 Doğal kutuplanma.....	20
3.1.2 Piezoelektrik kutuplanma.....	22
3.2. GaN Temelli Çoklu Yapılarda 2DEG Oluşumu	24

Sayfa

3.3. GaN Temelli Çoklu Yapılarda Saçılma Mekanizmaları	31
3.3.1. Polar optik fonon saçılması.....	32
3.3.2. Akustik fonon saçılmaları.....	33
3.3.3. Alaşım saçılması.....	35
3.3.4. Dislokasyon saçılması.....	35
3.3.5. Safsızlık saçılması.....	36
3.3.6. Arayüzey bozukluğu saçılması.....	37
3.4. GaN Temelli HEMT Aygıtlarının Temel Çalışma Prensibi.....	39
4. DENEYSEL TEKNİKLER.....	44
4.1. Epitaksiyel Nümuneye Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri.....	44
4.1.1. Metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) büyütme yöntemi.....	44
4.1.2. Atomik kuvvet mikroskobu.....	49
4.1.3. Yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı (HR-XRD).....	50
4.1.4. Hall etkisi ve ölçüm sistemi.....	53
4.2. GaN Temelli HEMT Aygıt Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri.....	59
4.2.1. Optik litografi.....	59
4.2.2. Elektron demeti litografi.....	65
4.2.3. Metal kaplama sistemi.....	67
4.2.4. Kuru aşındırma sistemi.....	69
4.2.5. Hızlı tavlama sistemi.....	71
4.2.6. DC ölçüm sistemi.....	72
4.2.7. RF ölçüm sistemi.....	74

Sayfa

4.3. GaN Temelli HEMT Aygıt Üretim Adımları.....	76
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	82
5.1. Safir, Silisyum ve SiC Alttaşlar Üzerinde GaN HEMT Büyütme Çalışmaları.....	82
5.1.1. Safir alttaş üzerinde GaN HEMT büyütülmesi ve karakterizasyonu.....	82
5.1.2. Silisyum alttaş üzerinde GaN HEMT büyütülmesi ve karakterizasyonu.....	87
5.1.3. SiC alttaş üzerinde GaN HEMT büyütülmesi ve karakterizasyonu.....	93
5.2. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN Epitaksiyel Yapılarının Analizi ve Tasarımı.....	98
5.3. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN Çoklu HEMT Yapıları.....	108
5.3.1. MOCVD büyütme koşulları.....	108
5.3.2. Yüksek çözünürlüklü XRD ölçümleri.....	111
5.3.3. Hall ölçümleri ve saçılma analizleri.....	112
5.4. AlInN Bariyerli Çoklu HEMT Yapıları.....	117
5.4.1. AlInN bariyerli çoklu HEMT yapılarının bant analizleri ve tasarımları.....	118
5.4.2. AlGaIn tampon tabakalı AlInN HEMT numunelerin yapısal özelliklerinin incelenmesi.....	124
5.4.3 Hall ölçümleri ve nicel mobilite spektrum analizi (QMSA).....	128
5.5. AlInN Bariyerli Çoklu HEMT Yapıları Üzerinde Üretilen Transistörlerin DC ve RF Karakterizasyonları.....	133
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	143

Sayfa

KAYNAKLAR.....	147
EKLER.....	158
EK-1 GaN Temelli HEMT Aygıt Proses Parametreleri.....	159
ÖZGEÇMİŞ.....	160

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Çeşitli yarı iletken malzemeler için malzeme parametreleri ve değer katsayıları.....	3
Çizelge 2.1. Wurtzite yapıda III-Nitrürler için 300 K'deki örgü parametreleri.....	9
Çizelge 2.2. GaN, AlN ve InN'e ait 300 K'deki yapısal, elektriksel ve optiksel malzeme parametreleri.....	13
Çizelge 2.3. III-Nitrür epitakside yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri.....	19
Çizelge 2.4. Nitrür epitakside yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin avantajları ve dezavantajları.....	19
Çizelge 5.1. Farklı alttaş malzemeleri üzerinde büyütülen GaN HEMT yapılarına ait ölçüm sonuçları.....	97
Çizelge 5.2. Büyütülen numuneler için elde edilmek istenen In oranları ve GaN kanal kalınlıkları.....	109
Çizelge 5.3. Numunelerden alınan XRD ölçümlerine göre hesaplanan Al ve In oranları ve zorlama değerleri.....	111
Çizelge 5.4. Büyütülen numunelere ait bazı yapısal parametreler ve oda sıcaklığındaki Hall ölçüm sonuçlarının özeti.....	116
Çizelge 5.5. İncelenen numunelere ait bazı yapısal parametreler ve oda sıcaklığındaki Hall ölçüm sonuçlarının özeti.....	130
Çizelge 5.6. Fabrikasyonu yapılan numunelerin DC ve RF ölçüm sonuçlarının özeti.....	142

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. GaN temelli malzemelerin uygulama alanları.....	2
Şekil 1.2. Si, GaAs, InGaAs, SiC ve GaN temelli aygıtlar için çalışma frekansına bağlı ortalama çıkış gücü grafiği.....	5
Şekil 2.1. GaN ve diğer III-Nitrür malzemeler için hekzagonal kristal yapısı.....	9
Şekil 2.2. III-Nitrür yarıiletkenlerin oda sıcaklığında örgü sabitine bağlı olarak bant aralığı enerjisinin değişimi.....	11
Şekil 2.3. Wurtzite yapıdaki GaN'ün bant yapısı.....	12
Şekil 2.4. GaN'ün safir (Al_2O_3) üzerindeki büyütme mekanizmasının adımları.....	16
Şekil 3.1. Ga- yüzlü wurtzite GaN'da doğal kutuplanma vektörü.....	21
Şekil 3.2. Ga-yüzlü GaN ve AlGaN'da sadece doğal kutuplanmadan kaynaklı olan elektrik alan ve tabaka yükü.....	21
Şekil 3.3. III-Nitrür malzeme sisteminde doğal kutuplanma katsayıları.....	22
Şekil 3.4. III-Nitrür yapılarda oluşabilecek gerginlik durumları.....	23
Şekil 3.5. III-Nitrür yapılara ve diğer III-V malzemelere ait piezoelektrik kutuplanma katsayıları.....	23
Şekil 3.6. AlGaN/GaN çoklu yapısında (a) sadece piezoelektrik kutuplanmadan kaynaklı kutuplanma alanı ve tabaka yükü, (b) piezoelektrik ve doğal kutuplanmadan kaynaklı kutuplanma alanları ve tabaka yükleri.....	24
Şekil 3.7. Kutuplanma kaynaklı tabaka yük yoğunluğunun AlGaN/GaN hetero yapısındaki Al mol oranının değişimine bağlı değişimi.....	26
Şekil 3.8. AlGaN/GaN çoklu yapısında enerji bant diyagramı ve oluşan tabaka yükleri.....	27
Şekil 3.9. Yüzey verici modeline göre 2DEG oluşumunun şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.10. Normalize 2DEG yoğunluğunun normalize AlGaN bariyer kalınlığına bağlı değişim grafiği.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapısı için hesaplanan mobilitenin sıcaklığa bağlı grafiği. Kesikli çizgiler her bir saçılma mekanizması için hesaplanan mobiliteleri göstermektedir. 2DEG yoğunluğu $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, iyonize safsızlık yoğunluğu $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve dislokasyon yoğunluğu 10^9 cm^{-2} olarak alınmıştır.....	39
Şekil 3.12. $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT aygıtının (a) şematik gösterilimi ve (b,c) kapı elektrodu altından yüzeye dik yöndeki elektronik bant yapısı. Bant yapıları (b)'de sıfır kapı voltajı varken ve termal denge durumu için (c)'de negatif kapı voltajı uygulanmış durum için gösterilmiştir.....	40
Şekil 4.1. MOCVD ile ince film büyütülmesi esnasında meydana gelen temel fiziksel olaylar ve büyütme mekanizmasının temsili gösterilimi.....	45
Şekil 4.2. Yatay reaktörlü bir MOCVD sisteminin genel şematik gösterimi.....	45
Şekil 4.3. AIX 200/4 RF-S sisteminde kullanılan in-situ optik reflektans ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....	47
Şekil 4.4. Optik reflektans ölçümlerindeki gelen ve yansıyan demetlerin gösterilimi.....	48
Şekil 4.5. MOCVD sisteminde GaN büyütme esnasında oluşan Fabry-Perot reflektans salınımları.....	48
Şekil 4.6. AFM'nin çalışma prensibi.....	49
Şekil 4.7. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması.....	50
Şekil 4.8. X-ışını kırınım düzeneği.....	51
Şekil 4.9. X-ışını kırınımı ölçüm cihazına ait blok şeması.....	52
Şekil 4.10. Manyetik alan altında elektronların hareketi.....	54
Şekil 4.11. Van der Pauw ölçüm tekniği.....	55
Şekil 4.12. Karakteristik dirençlerin belirlenmesi için kontaklara uygulanan akım ve voltaj bağlantıları.....	56
Şekil 4.13. Hall ölçümünde çeşitli numune geometrileri.....	57
Şekil 4.14. Hall ölçüm sisteminin blok diyagramı.....	58

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Döndürücü cihazda foto-rezist kaplama adımları.....	60
Şekil 4.16. (a) Pozitif litografi (b) Negatif litografi işlemlerinin şematik gösterimi.....	63
Şekil 4.17. Epitaksiyel tabaka aşındırma prosesinin adımları.....	64
Şekil 4.18. Metalizasyon prosesinin adımları.....	64
Şekil 4.19. Elektron demeti litografisi sisteminin temel bileşenleri.....	66
Şekil 4.20. Elektron demeti buharlaştırıcı sisteminin temel çalışma prensibi.....	68
Şekil 4.21. Kuru aşındırma sisteminin şematik çizimi.....	70
Şekil 4.22. Hızlı tavlama sisteminin şematik çizimi.....	71
Şekil 4.23. HEMT aygıtları için kullanılan DC ölçüm sisteminin blok şeması.....	73
Şekil 4.24. HEMT aygıtlarından alınan tipik bir DC I-V grafiği.....	74
Şekil 4.25. HEMT aygıtları için kullanılan RF ölçüm sisteminin blok şeması.....	75
Şekil 4.26. HEMT aygıtları üretiminde kullanılan foto- maske çizimleri.....	77
Şekil 4.27. Aygıt adacığı aşındırması sonrası örneğin kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü.....	78
Şekil 4.28. Ohmik kontak adımı sonrası örneğin kesit görünümü ve mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 4.29. Kapı metali kaplanması sonrasında kesit çizimi, optik mikroskop görüntüsü ve SEM görüntüsü.....	80
Şekil 4.30. Dış bağlantı metali sonrası fabrikasyonu tamamlanmış bir transistöre ait mikroskop görüntüsü ve örneğin üzerindeki genel görüntü.....	81
Şekil 5.1. Safir üzerinde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel tabakaları.....	83
Şekil 5.2 Safir alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısı için optik reflektans ölçüm grafiği.....	85
Şekil 5.3. Safir alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısının 5µm x 5 µm'lik yüzey taraması.....	86

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. Safir alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT numunesinden alınan Hall etkisi ölçüm sonucu (@ 300 K).....	87
Şekil 5.5. Silisyum üzerinde büyütülen GaN HEMT epitakseyel tabakaları.....	88
Şekil 5.6. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısı için optik reflektans ölçüm grafiği.....	91
Şekil 5.7. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısının 5µm x 5 µm'lik yüzey taraması.....	92
Şekil 5.8. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT numunesinden alınan Hall etkisi ölçüm sonucu (@ 300 K).....	93
Şekil 5.9. SiC üzerinde büyütülen GaN HEMT epitakseyel tabakaları.....	94
Şekil 5.10. SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısı için optik reflektans ölçüm grafiği.....	95
Şekil 5.11 SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısının 5µm x 5 µm'lik yüzey taraması.....	96
Şekil 5.12. SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT numunesinden alınan Hall etkisi ölçüm sonucu (@ 300 K).....	97
Şekil 5.13. (a) GaN-InGaN arayüzünde oluşan ΔE_p enerji bant süreksizliği ve yükler (b) Yapıya ait enerji bant diyagramı	98
Şekil 5.14. Hesaplamalarda kullanılmak üzere temel alınan epitakseyel yapının şematik çizimi.....	99
Şekil 5.15. nextnano ³ programında izlenen hesaplama akışı.....	100
Şekil 5.16. Optimize edilecek yapı ve ilgili kalınlık, alaşım oranları değerleri.....	101
Şekil 5.17. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN HEMT yapısına ait farklı GaN kanal kalınlıkları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı. Küçük grafik: GaN/InGaIn bölgesinin yakın gösterilimi. ($t_{InGaIn}=1$ nm, $x_{InGaIn}=0.1$).....	102
Şekil 5.18. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN HEMT yapısı için GaN kanal kalınlığının değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği.....	103

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.19. AlGa _N /AlN/GaN/InGa _N /Ga _N HEMT yapısı için InGa _N arka bariyer kalınlığının değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği.....	104
Şekil 5.20. AlGa _N /AlN/GaN/InGa _N /Ga _N HEMT yapısı için InGa _N arka bariyerdeki In-oranı değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği.....	105
Şekil 5.21. (a) 3 nm ve (b) 1 nm InGa _N arka bariyerli yapılar için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramları.....	105
Şekil 5.22. 3 nm In _{0,09} Ga _{0,91} N ve 1 nm In _{0,18} Ga _{0,82} N arka bariyerli yapılar için elde edilen taşıyıcı yoğunluğu dağılımı grafikleri.....	106
Şekil 5.23. Standart AlGa _N /AlN/GaN yapısı ve optimize edilmiş 1 nm In _{0,18} Ga _{0,82} N arka bariyerli yapı için hesaplanan (a) iletim bandı enerji diyagramları (b) taşıyıcı yoğunluğu dağılımları.....	107
Şekil 5.24. (a) Kontrol numunesi olarak büyütülen standart yapı (b) InGa _N arka bariyerli yapılardan bir örnek.....	108
Şekil 5.25. Büyütülen numunelerin yüksek çözünürlüklü XRD ölçüm sonucu.....	112
Şekil 5.26. Büyütülen numunelerde ölçülen sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerlerinin grafiksel gösterilimi.....	113
Şekil 5.27. AlGa _N /AlN/GaN/InGa _N /Ga _N yapılarında 5 nm (düz çizgi) ve 10 nm (kesikli çizgi) Ga _N kanal kalınlığı için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı ve taşıyıcı yoğunluğu dağılımı. Küçük grafikte taşıyıcı yoğunluğunun Ga _N kanal kalınlığına göre değişimi deneysel ve hesaplamalarla gösterilmiştir.....	114
Şekil 5.28. Ölçülen mobilite değerlerinin InGa _N arka bariyer tabakasındaki indiyum oranına bağlı değişimi.....	115
Şekil 5.29. D numunesine ait saçılma mekanizması analizinin grafiksel gösterilimi.....	116
Şekil 5.30. Nextnano hesaplamalarında kullanılan standart AlIn _N çoklu yapısı ile AlGa _N tampon tabakasına sahip AlIn _N çoklu yapısının şematik gösterimi.....	118
Şekil 5.31. Ga _N tampon tabakası ile AlGa _N tampon tabakasına sahip AlIn _N çoklu yapıları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı ve taşıyıcı yoğunluğu dağılımı.....	119

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. Farklı GaN kanal kalınlıkları ve AlGaIn tampon tabakasındaki Al mol oranları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramları.....	119
Şekil 5.33. GaN kanal kalınlığı ve AlGaIn tampon tabakasındaki Al mol oranının parametrik olarak değiştirilerek hesaplanan taşıyıcı yoğunlukları.....	120
Şekil 5.34. AlGaIn tampon tabakasındaki Al mol oranının farklı değerleri için hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu dağılımları.....	120
Şekil 5.35. AlInN/AlGaIn çift bariyerli yapı ve standart AlInN bariyerli yapı için hesaplanan enerji bandı diyagramları.....	121
Şekil 5.36. AlInN/AlGaIn çift bariyerli yapılar ve standart AlInN bariyerli yapı için hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu dağılımları.....	122
Şekil 5.37. MOCVD sisteminde büyütülen AlInN çoklu yapılarının ayrıntılı yapısı.....	122
Şekil 5.38. AlInN çoklu yapılarından alınan optik geçirgenlik ölçümleri.....	124
Şekil 5.39. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler üzerinden alınan $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 'luk AFM ölçümü.....	126
Şekil 5.40. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler için yapılan HR-XRD ölçümleri ve simülasyonları.....	128
Şekil 5.41. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler için sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerlerinin grafiksel gösterilimi.....	129
Şekil 5.42. (a) 50 ve 297 K sıcaklığında manyetik alana karşı iletkenlik tensörleri. Semboller ve çizgiler sırasıyla deneysel ve QMSA fitleri göstermektedir. (b) 50K' de ve 297K' de QMSA kullanılarak elde edilen mobilite spektrumu.....	132
Şekil 5.43. B2294 numunesinin QMSA saçılmalarından elde edilen taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.....	133
Şekil 5.44. B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerine ait DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri.....	134
Şekil 5.45. B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerinden alınan RF ölçüm sonuçları.....	139

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde bulunan AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi.....	46
Resim 4.2 Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde bulunan AFM sistemi.....	50
Resim 4.3. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü.....	53
Resim 4.4. Lakeshore 7700 serisi Yüksek Empedans Hall etkisi ölçüm sistemi.....	59
Resim 4.5. Specialty Coating Systems marka döndürücü cihazının genel görüntüsü.....	61
Resim 4.6. Karl Suss MA6 model UV litografi sisteminin genel görüntüsü.....	62
Resim 4.7. Raith E-line model elektron demet litografi sisteminin genel görüntüsü.....	67
Resim 4.8. Oerlikon Leybold Vacuum Univex 350 model metal kaplama sisteminin genel görüntüsü.....	69
Resim 4.9. SI-500 ICP-RIE plazma kuru aşındırma sisteminin genel görüntüsü.....	70
Resim 4.10. SSI Solaris-75 model hızlı tavlama sisteminin genel görüntüsü.....	72
Resim 4.11. DC ölçüm sisteminin genel görüntüsü.....	74
Resim 4.12. RF ölçüm sisteminin genel görüntüsü.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
μ_{as}	Arka plan safsızlıklarına ait mobilite limiti
μ_{dp}	Deformasyon potansiyeline ait mobilite limiti
μ_{min}	Materyaldeki en küçük taşıyıcı mobilitesi
μ_{pe}	Piezoelektrik saçılmaya ait mobilite limiti
μ_{po}	Polar optik fonon saçılmasına ait mobilite limiti
μ_H	Hall mobilitesi
E_{br}	Kritik elektrik alan
f_t	Akım kazancı kesim frekansı
f_{max}	Güç kazancı kesim frekansı
k.b.	Keyfi birim
m^*	Etkin kütle
n	Elektron yük yoğunluğu
n_i	Has yarıiletken taşıyıcı yoğunluğu
n_s	2-boyutlu elektron yük yoğunluğu
n_H	Hall taşıyıcı yoğunluğu
N_{AS}	2-boyutlu arka plan safsızlık yoğunluğu
Ξ	Deformasyon potansiyeli
p	Deşik yük yoğunluğu
P_{SP}	Doğal polarizasyon
P_{PE}	Piezoelektrik polarizasyon
q_s	2-boyutlu ters perdeleme uzunluğu, perdeleme sabiti
ρ	Kristal yoğunluğu
ρ_0	Manyetik alan yokluğunda öz direnç
ρ_{ij}	Özdirenç tensörü (ij indisli)
ρ_p	Polarizasyondan indüklenmiş yük yoğunluğu
$R_{ab,cd}$	4 kontaklı direnç değeri

Simgeler	Açıklama
R_H	Hall katsayısı
σ, σ_n	Elektriksel iletkenlik
σ_0	Manyetik alan yokluğunda iletkenlik
σ_{ij}	İletkenlik tensörü (ij indisli)
$\sigma_{ij}^{exp}(B)$	Deneysel iletkenlik tensörü (ij indisli)
S_0	Perdeleme sabiti
τ	İki saçılma arasındaki ortalama zaman
u_1	Boyuna akustik fonon hızı
U_{AL}	Alaşım potansiyeli
V_{br}	Kırılma voltajı
v_{sat}	satürasyon hızı
V_H	Hall voltajı
Ω_0	Bir atom başına düşen hacim
x	Alaşım oranı
Z_0	Kuantum kuyu genişliği

Kısaltmalar	Açıklama
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
2DEG	2-Boyutlu Elektron Gazı
2DHG	2-Boyutlu Deşik Gazı
AlGaN	Alüminyum Galyum Nitrür
AlInN	Alüminyum İndiyum Nitrür
AlN	Alüminyum Nitrür
SP	Doğal Polarizasyon
FET	Alan Etkili Transistör
GaN	Galyum Nitrür

Kısaltmalar	Açıklama
HEMT	Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör
HFET	Çokluyapı Alan Etkili Transistör
I-V	Akım- Voltaj
InN	İndiyum Nitrür
InGaN	İndiyum Galyum Nitrür
LED	Işık Yayan Diyot
MBE	Moleküler Akı Epitaksisi
MESFET	Metal Yarıiletken Alan Etkili Transistör
MOSFET	Metal Oksit Alan Etkili Transistör
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
CVD	Kimyasal Buhar Faz Epitaksisi
VPE	Buhar Faz Epitaksi
HRXRD	Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
FWHM	Pik Uzunluğun Yarısındaki Genişliği
PE	Piezoelektrik Polarizasyon
QMSA	Nicel Mobilite Spektrumu Analizi
RF	Radyo Frekans
RIE	Reaktif İyon Aşındırma
RTP	Hızlı Tavlama İşlemi
SiC	Silisyum karbür

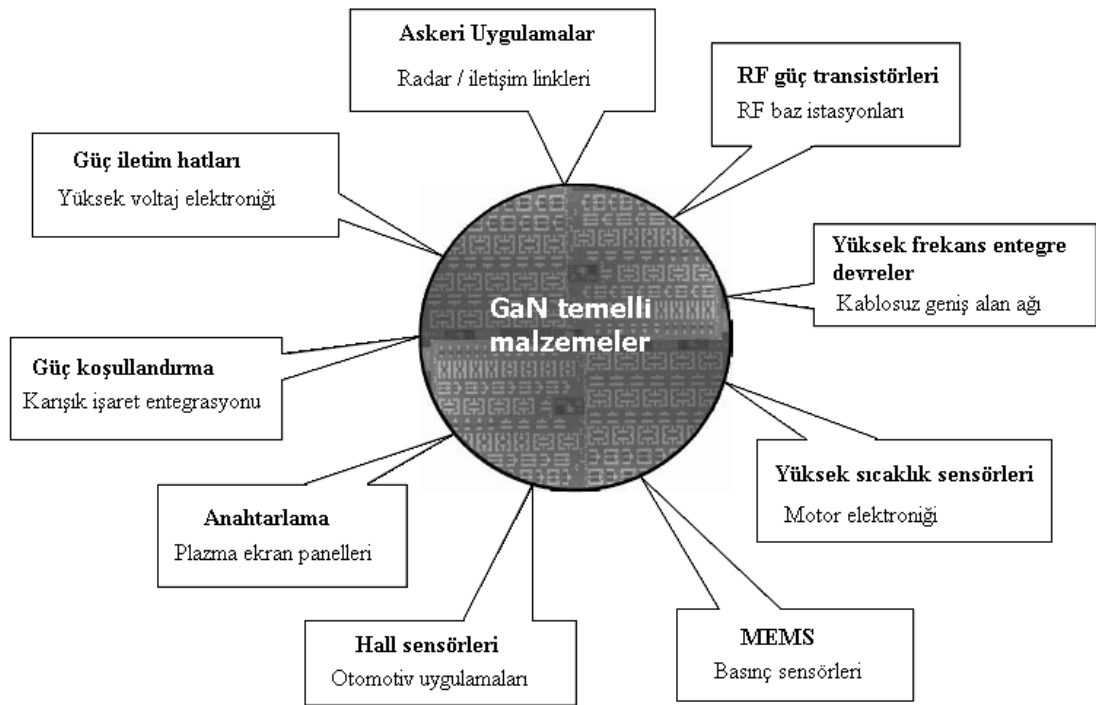
1. GİRİŞ

İlk katı hal transistörün Shockley, Brattain ve Bardeen tarafından Bell laboratuvarlarında 1947’de icat edilmesi, modern elektroniğin gelişiminde çok önemli bir kilometre taşı oldu [1]. Transistör günümüzdeki nerdeyse bütün elektronik devrelerde temel eleman olarak yer almaktadır. İlk çalışmanın ardından daha iyi özelliklere sahip transistörleri büyük miktarlarda üretmek için yarıiletken teknolojisinde çok büyük ilerlemeler kaydedildi. Günümüzde daha hızlı, daha güçlü ve daha güvenilir transistör geliştirme trendi büyük bir hızla devam etmektedir. Bu geliştirmeleri yapabilmek için olgunlaşmış, geleneksel teknoloji ve malzemeler yerine yeni malzeme sistemleri üzerinde çok yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Yarıiletken aygıt araştırmaları sırasıyla Germanyum (Ge), Silisyum (Si), Silisyum Germanyum (SiGe) ve Galyum Arsenid (GaAs) yarıiletken malzemelerinin kullanımıyla evrimine başladı. 1979’da Takashi Mimura’nın Fujitsu laboratuvarlarında GaAs yüksek elektron mobiliteli transistörü (High Electron Mobility Transistor) icat etmesi elektron iletimine dayalı çalışan yarıiletken aygıt araştırmalarında yeni bir çığır açmıştır [2]. Bu çalışma sayesinde oldukça yüksek taşıyıcı yoğunlukları ve mobilite değerleri elde etmek mümkün oldu.

O yıllarda, elektronları bir yarıiletken boyunca hareket ettirebilmenin tek yolunun serbest elektronlar oluşturmak üzere yapıya n-tipi katkılar eklenmesi geleneksel düşüncesi hakimdi. Elektronların, yapıda serbest elektronlar oluşturmak için kullanılan katkılarla çarpışması sonucu yavaşlamasına neden olan bu geleneksel yaklaşım halen birçok yarıiletken aygıtta uygulanmaktadır. HEMT aygıtlarında ise durum bundan farklıdır: Bir AlGaAs/GaAs hetero-ekleminin özelliklerinden faydalanılarak iki malzeme arasındaki bant aralığı farkı tek boyutlu üçgensel bir kuantum kuyusu oluşturur. Bu kuantum kuyusu sınırın bir tarafında 2-boyutlu bir elektron gazı (2DEG) birikmesini sağlar ve elektronların maruz kaldığı saçılma etkileri burada çok daha az olur.

AlGaAs/GaAs hetero-eklemi kullanılarak yapılan HEMT aygıtları, malzemenin performans özelliklerinin üst sınırına hızla yaklaştı. Sahip olduğu yüksek bant aralığı enerjisi, yüksek ısı iletkenlik, yüksek erime sıcaklığı, yüksek elektron saturasyon hızı ve yüksek kırılma gerilimi gibi üstün malzeme özellikleri nedeniyle GaN temelli aygıtlar araştırma grupları tarafından çok büyük bir ilgi gördü ve birçok yarı iletken aygıt araştırmacısı GaN temelli HEMT yapıları geliştirmeye başladı. GaN malzeme sisteminin çeşitli uygulama alanları Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. GaN temelli malzemelerin uygulama alanları

Malzemelerin yarı-iletken aygıt performansına etkisini incelemek için genelde iki tane önemli değer katsayısı (figure of merit) kullanılmaktadır [3-6]. Bunlardan ilki Johnson değer katsayısı aygıtın güç-frekans çarpımı için tanımlanmıştır. İkincisi Baliga değer katsayısı ise aygıttaki iletim kayıplarını en aza indirmek için kritik olan malzeme parametrelerini tanımlamaktadır. GaN’ün malzeme özelliklerinin rakibi olan malzemelerle karşılaştırılması Çizelge 1.1’de verildi. Çizelgeden görüldüğü üzere GaN Johnson ve Baliga değer katsayıları açısından geleneksel yarı-iletkenlere önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Çizelge 1.1 Çeşitli yarı iletken malzemeler için malzeme parametreleri ve değer katsayıları [3-6].

Malzeme Parametre	Si	InP	GaAs	4H-SiC	GaN
E _g (eV)	1,12	1,34	1,43	3,26	3,45
μ _n (cm ² /V.s)	1350	5000	8500	1000	1500
v _{sat} (10 ⁷ cm/s)	1	1,5	1	2	2,5
E _{br} (MV/cm)	0,3	0,45	0,4	2,2	2,0
Isıl iletkenlik (W/cm.K)	1,5	0,7	0,5	4,9	1,5
Johnson değer katsayısı [(E _{br} ·v _{sat} /π) ²]	1	3	1,8	215,1	215,1
Baliga değer katsayısı [ε _r ·μ _n ·E _{cr} ³]	1	5,7	14,8	223,1	186,7

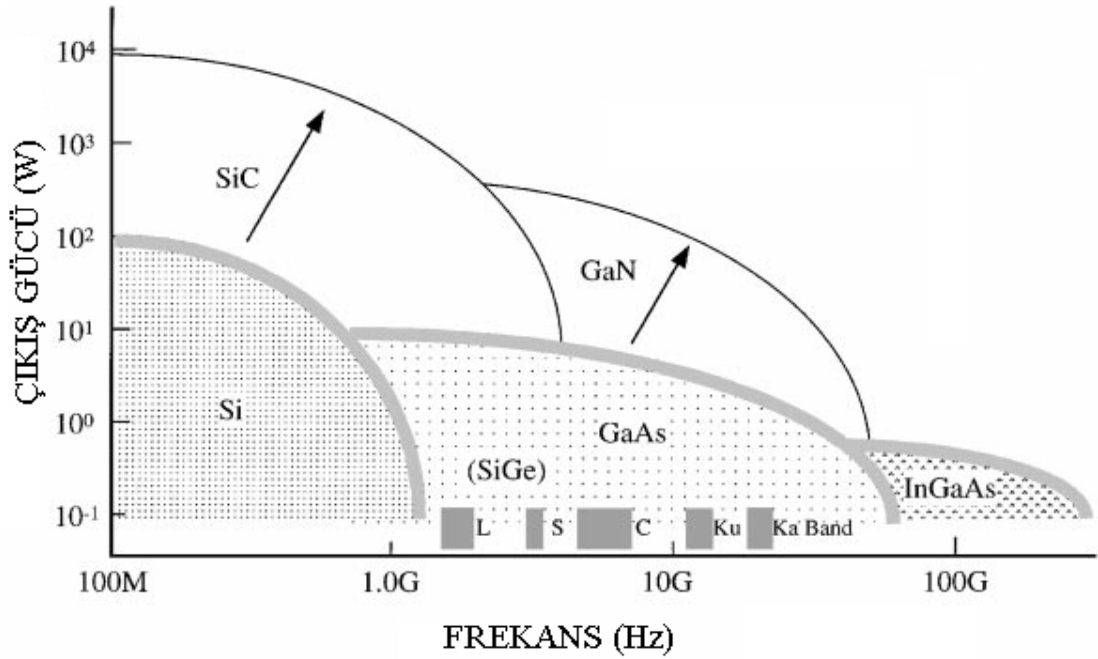
*Değer katsayıları Silisyuma göre normalize edilmiştir.

GaN'ün geleneksel yarı-iletkenlere kıyasla önemli üstünlükleri olmasına rağmen GaN temelli malzeme ve aygıtların hayata geçirilmesini geciktiren bazı sorunlarla karşılaşıldı. Bunlardan en önemlisi GaN'ün uzun bir süre büyük miktarlarda tek kristal şeklinde büyütülemediği olmasıdır. GaN ilk olarak sıvı Galyum üzerinden yüksek sıcaklıklarda amonyak (NH₃) geçirerek Johnson ve arkadaşları tarafından 1930'da sentezlendi [7]. Sonuçta toz şeklinde GaN elde edebildiler. Amaçları GaN'ün kristal yapısını ve örgü sabitini araştırmaktı. GaN yüksek erime sıcaklığı ve yüksek denge buhar basıncına sahip olması nedeniyle Czochralski ya da Bridgeman temelli yöntemlerle büyük tek kristaller halinde büyütülememektedir [8,9]. GaN alttaş olarak büyütülemediği için farklı alttaşlar üzerindeki büyütmelemlere yoğunlaşıldı. GaN'ün toz formundan tek kristal yapısına geçişi, 1960'lı yılların sonunda Maruska ve Tietjen'in HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) tekniği ile GaN tabakalarını safir alttaş üzerinde büyütmelemleri ile ilk defa sağlandı [10]. Elde edilen tabakaların kalitesi önemli yarıiletken özelliklerini incelemek için uygundu. Fakat isteyerek katkılama yapılmamasına rağmen bu ince filmlerde büyütme esnasında oluşan kusur ve safsızlıklardan kaynaklı olarak yüksek miktarda n-tipi katkıları gözlenmiştir. Bu çalışmaları müteakip 1971 yılında Manasevit ve arkadaşları Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) yöntemini ilk olarak GaN için uyguladı [11] ve bu

yöntem günümüzde de epitaksiyel ince film üretmek için en yaygın tekniklerden biridir.

1970'lerden sonra aygıt geliştirmeleri için gerekli yüksek kalitede GaN ince filmlerin büyütülmesinde karşılaşılan sorunların uzun bir süre aşılammaması nedeniyle bu malzeme üzerindeki araştırmalar durma noktasına geldi. 1986'da Amano ve arkadaşlarının oldukça iyi yüzey morfolojisi, optik ve elektriksel özelliklere sahip GaN tabakalarını MOCVD kullanarak safir alttaş üzerinde büyütmeleri, GaN temelli araştırmalarda önemli bir dönüm noktası oldu [9]. Bu çalışmada safir üzerine AlN tampon tabaka büyütülerek safir ve GaN tabakaları arasındaki örgü uyumsuzluğu azaltıldı. Dolayısıyla elde edilen filmlerde çatlak ve kusurlar da önceki çalışmalara göre önemli ölçüde azaldı. Bu büyütme reçetesi "iki adımlı büyütme yöntemi" olarak bilinmekte ve günümüzde de kullanılmaktadır. Ardından yine Amano'nun Mg katkılıyarak p-tipi GaN elde ettiklerini duyurması GaN malzeme araştırmalarına azalan ilginin çok hızlı bir şekilde artmasını sağladı [12,13]. Bu çalışmalarda p-tipi GaN:Mg'den n-tipi tabakaya deşik pompalanma etkinliği gösterildi. 1991'de Nakamura ve arkadaşları GaN:Mg'u N₂ veya vakum ortamında 750 °C üzerinde tavlayarak düşük dirençli p-tipi GaN elde edilebileceğini gösterdiler [14,15]. Yapılan bu çalışmaların ışığında 1993'te Nakamura ve arkadaşları tarafından ilk yüksek parlaklığa sahip mavi GaN LED üretildi [16]. Ardından 1996'da yine aynı grup ilk sürekli dalga (CW) mavi GaN lazer diyotu elde ettiklerini duyurdular [17]. Optoelektronik uygulamalarına yönelik araştırmalar bir yandan ilerlerken transistör araştırmaları da bu dönemde hız kazandı. 1991'de Khan ve arkadaşları safir alttaş üzerinde büyütülen Al_xGa_{1-x}N/GaN çoklu yapısında ilk olarak 2DEG oluşumunu gösterdiler [18]. Safir alttaş üzerinde MOCVD ile büyütülen ilk GaN metal yarıiletken alan etkili transistör (MESFET) ve hetero yapılı alan etkili transistör (HFET) yine Khan grubu tarafından sırasıyla 1993 ve 1994'te rapor edildi [19,20]. Bu çalışmalardan ilkinde $1,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ taşıyıcı yoğunluğu ve 563 cm²/Vs elektron mobilitesi elde edildi. İlk AlGaIn/GaN HEMT'in gösterilmesinden bu yana GaN temelli HEMT'lerin mikrodalga frekanslarında sağladığı çıkış gücü yoğunlukları GaAs ve diğer III-V grubu yarıiletkenlerle elde edilenlerin 10 katına ulaştı. Fujitsu, Toshiba, NASA gibi dev kuruluşların da bu çalışmalara dahil olmasıyla yüksek güçlü

mikrodalga uygulamaları ve optoelektronik uygulamalarında GaN temelli teknolojiler için geniş bir araştırma alanı doğdu.



Şekil 1.2. Si, GaAs, InGaAs, SiC ve GaN temelli aygıtlar için çalışma frekansına bağlı ortalama çıkış gücü grafiği [21]

Şekil 1.2’de yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzemeler ve GaN için çalışma frekansına bağlı olarak ortalama çıkış gücü değerleri grafik olarak gösterilmektedir [21]. Buradan görüleceği üzere GaN diğer malzeme sistemlerine göre özellikle yüksek frekanslarda yüksek güç sağlayabilmekte ve ileride de yeri doldurulmayacak bir malzeme olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, GaN temelli HEMT epitaksiyel yapılarının tasarımının yapılması, tasarlanan yapıların büyütülmesi, elde edilen yapıların elektriksel ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi, bu yapılar üzerinde miko-nano fabrikasyon teknikleri kullanılarak transistör üretilmesi ve elde edilen transistörlerin karakterize edilmesi amaçlandı. Ayrıca, bu tez çalışmasının yeni epitaksiyel yapı tasarımlarının daha iyi anlaşılmasına, bu tasarımların 2DEG özellikleri ve aygıt performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi konusuna katkı sağlaması da amaç edinildi. Öncelikle literatürdeki epitaksiyel yapılar araştırıldı, farklı alttaşlar üzerinde yapılan

büyütmelerin numunelerdeki 2DEG özelliklerine etkisi incelendi. Yeni epitaksiyel yapı tasarımları yapabilmek amacıyla nextnano³ yazılımı kullanılarak 1-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin öz uyumlu çözümleri yapıldı. Bu çözümler sonucunda taşıyıcı yoğunlukları, dalga fonksiyonları ve enerji bant yapıları elde edildi. Tasarlanan epitaksiyel yapılardan uygun olanları Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) yöntemiyle büyüldü. Büyütülen numunelerin 0,4 Tesla sabit manyetik alan altında 30 K – 300 K sıcaklık aralığında, sıcaklığa bağlı ve 0 – 1,4 Tesla manyetik alan aralığında her bir sıcaklık adımında manyetik alana bağlı olarak öz direnç ve Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Elde edilen 2DEG parametreleri kullanılarak farklı epitaksiyel yapı tasarımlarına sahip numunelerde oluşan kuantum kuyularının özellikleri karşılaştırmalı olarak incelendi. Numunelerin yapısal ve yüzey özellikleri, X ışını kırınımı (XRD) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sistemleri kullanılarak değerlendirildi. Büyütülen numunelerden uygun olanları üzerinde mikro-nano fabrikasyon teknikleri kullanılarak transistör üretimi gerçekleştirildi; üretilen transistörlerin DC ve RF ölçümleri yapılarak sonuçlar irdelendi.

Tez çalışmasının genel düzeni şu şekilde tasarlandı: Birinci bölümde, GaN, temelli malzemeler ve HEMT'ler hakkında özet bilgiler ile literatürdeki tarihsel gelişimine yer verilmiş, öne çıkan uygulama alanları ve gelecekteki önemine değinildi. İkinci bölümde, III-Nitrür yarıiletkenlerin kristal yapıları, elektriksel ve bazı fiziksel özellikleri, epitaksiyel büyütmeye kullanılan alttaşlar ve büyüme tekniği hakkında genel bilgiler verildi. Üçüncü bölümde, GaN temelli çoklu yapılarda polarizasyon etkileri, elektron iletim mekanizmaları gibi HEMT aygıtlarının çalışması için çok önemli olan konular üzerinde duruldu. Dördüncü bölümde, kullanılan üretim, ölçüm ve analiz teknikleri hakkında bilgiler verildi. Beşinci bölümde, elde edilen deneysel sonuçlar analiz edilerek yorumlandı. Altıncı bölümde yapılan çalışmalar özetlenerek ileriye yönelik çalışmalar için öneriler sunuldu.

Tez çalışmasında kullanılan numuneler Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'ndeki (NANOTAM) MOCVD sistemi ile büyüldü. Numunelerin X ışını kırınımı (XRD) ve Hall etkisi ölçümleri Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı'ndaki

(STARLAB) XRD cihazı ve Hall Etkisi ölçüm sistemi ile gerçekleştirildi. Numuneler üzerinde mikro-nano fabrikasyon teknikleri ile transistör üretimi ve üretilen transistörlerin karakterizasyonları Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'ndeki Class-100 temiz odalarında gerçekleştirildi.

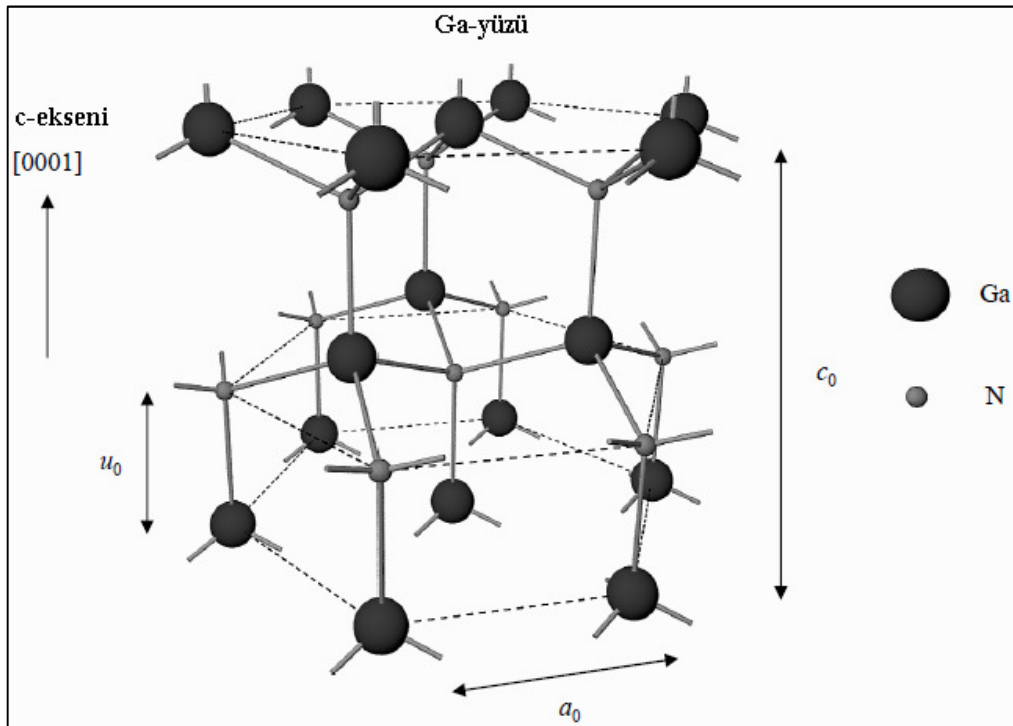
2. III-NİTRÜR YARIİLETKEN MALZEMELER

Bu bölümde III-Nitrür yarıiletken malzemelerin önemli malzeme parametreleri verilmiş, temel fiziksel özellikleri ve büyütülmesi anlatıldı.

2.1. Kristal Yapı

III-Nitrür yarıiletken malzemeler wurtzite, zinc-blende ve kaya tuzu olmak üzere üç farklı yapıda kristalleşebilir. Fakat çoğunlukla wurtzite yapısı termodinamik olarak en kararlı olan yapıdır. Wurtzite yapısı birbirlerinden $\frac{3}{8} \cdot c_0$ kadar kaymış komşu 2 hekzagonal sıkı paket örgüsünden oluşur [22]. Burada c_0 Şekil 2.1’de gösterilen hekzagonal hücrenin yüksekliğidir. III-Nitrür bileşiklerinin kimyasal bağları baskın olarak kovalenttir. Bunun anlamı her bir atom diğer tipteki dört atoma tetrahedral olarak bağlanmışlardır. Ga ve N atomlarının elektro-negativite farkının büyük olması nedeniyle yapılan bağa, ilgili yapısal fazın kararlılığını belirleyen önemli bir iyonik katkı gelmektedir. Wurtzite örgünün birim hücresi her tipten ikişer tane olmak üzere dört atomlu baza sahip hekzagonal hücredir. Bu örgüde [0001] yönelimi veya c-ekseni (genellikle bir Ga atomundan en yakın komşu N atomuna doğru çizilen vektör yönü) boyunca ters simetri bulunmamaktadır. Ters simetrinin olmaması, sıkı paket düzleminde (x,y,z) koordinatlarıyla bir atomun konumu tanımlanırsa bu konum (-x,-y,-z) konumu ile aynı yere denk gelmeyeceği anlamındadır. Çünkü işaret değişmesi, grup III atomları ile N atomlarının yer değiştirmesi ile sonuçlanır. Ters simetrinin olmaması sonucunda bir bağın her bir yanında aynı düzlemdeki atomlar aynı tür olur. Böylece wurtzite GaN kristallerinin Ga-yüzü (0001) ve N-yüzü ($000\bar{1}$) olmak üzere iki farklı yüzü bulunur. Şekil 2.1’de GaN kristalinin Ga-yüzü atomik düzenlenimi gösterilmektedir. Ga-yüzlü malzeme için N atomlarının Ga atomları üzerinde direk olarak sıralandıklarına dikkat edilmelidir. Wurtzite yapıdaki III-Nitrürler C_{6v}^4 (P6₃mc) uzay grup simetrisi ve C_{6v} (6mm) nokta grup simetrisine sahiptirler [22]. Şekil 2.1’ de aynı zamanda wurtzite örgüyü tanımlayan üç parametre gösterilmektedir. Bunlar temel altıgenin kenar uzunluğu (a_0), hekzagonal örgü hücresinin yüksekliği (c_0) ve [0001] yönelimi boyunca katyon-anyon bağ uzunluğu

oranı (u_0)'dır. "0" alt indisi bu değerlerin denge durumundaki örgü parametreleri olduğunu belirtmektedir. İdeal bir wurtzite kristalde c_0/a_0 oranı $\sqrt{\frac{8}{3}} = 1,633$ ve u_0 değeri 0,375'dir [22]. Farklı metal katyonlarından dolayı AlN, GaN ve InN'deki bağ uzunlukları ve c_0/a_0 oranları farklıdır. Çizelge 2.1'de 300 K'de wurtzite aypındaki III-Nitrürler için bu parametreler gösterilmektedir [23]. Çizelge 2.1'den açıkça görüleceği üzere GaN ideal wurtzite yapısına en yakın malzeme olup onu sırasıyla InN ve AlN takip etmektedir. Bağ uzunluk oranlarının ideal yapıya uygunluğu önem taşır; çünkü ideallikten sapma derecesi III-Nitrürlerdeki polarizasyonun etkinliğini belirlemede oldukça önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.1. GaN ve diğer III-Nitrür malzemeler için hekzagonal kristal yapısı [22].

Çizelge 2.1 Wurtzite yapıda III-Nitrürler için 300 K'deki örgü parametreleri [23].

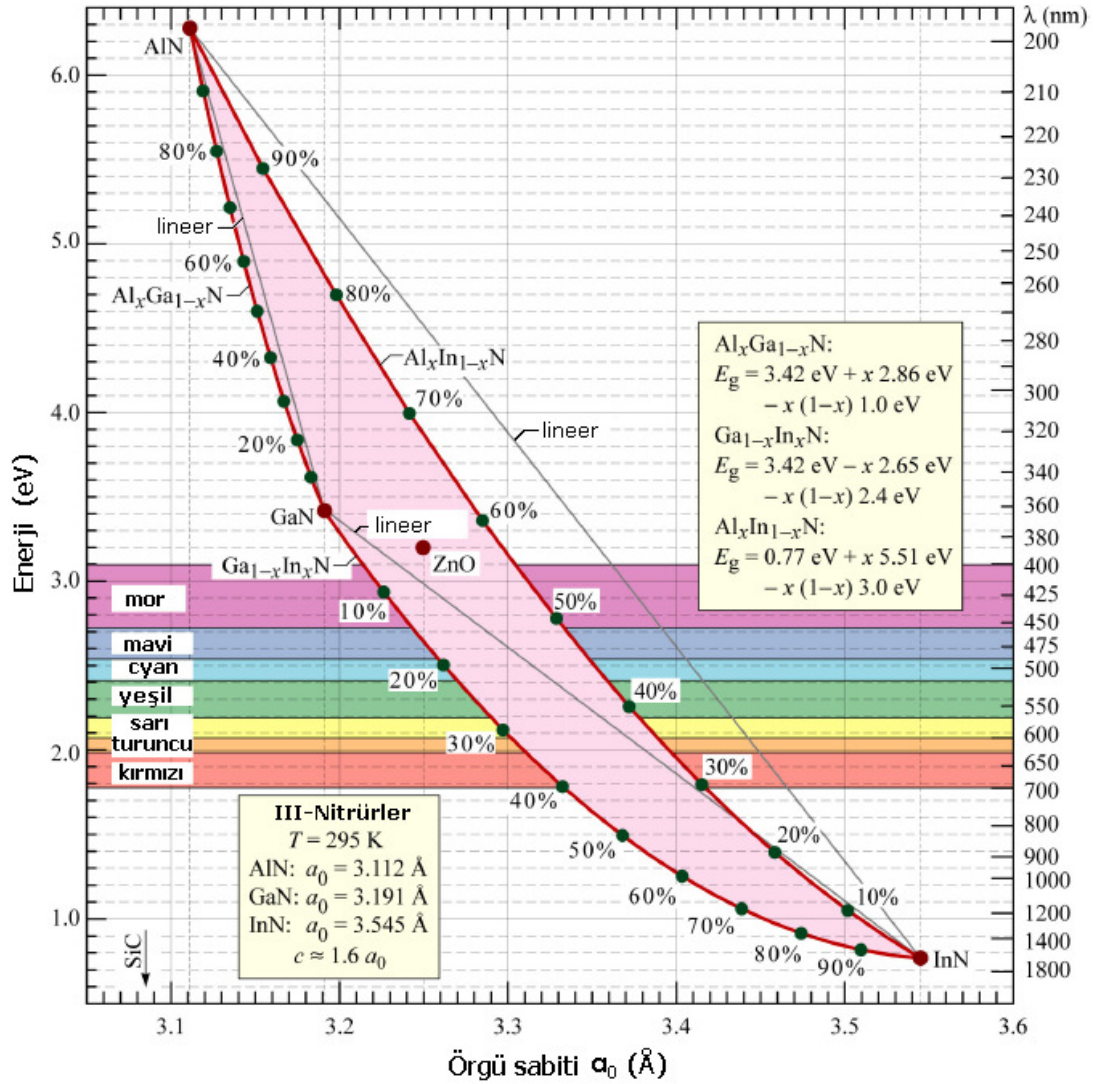
Parametre	İdeal durum	AlN	GaN	InN
a_0 (Å)	-	3,112	3,189	3,54
c_0/a_0 (hesap)	1,633	1,6190	1,6336	1,6270
u_0	0,375	0,380	0,376	0,377

2.2. Isıl Özellikler

GaN çok iyi termal kararlılığa sahip olmasıyla oldukça sağlam ve güvenilir bir malzeme olduğunu kanıtlamıştır. 2500 °C erime sıcaklığı, 1,5 W/cm.K ısı iletkenlik ve 600 K Debye sıcaklığına sahiptir. Maruska ve Tietjen wurtzite GaN'ün örgü parametrelerini 300-900 K aralığında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak inceledi [10]. Bu çalışmada a-ekseni için ısı genleşme katsayısını bütün sıcaklık aralığında $\Delta a/a = 5,59 \times 10^{-6} / K$, c-ekseni için 300 – 700 K sıcaklık aralığında $\Delta c/c = 3,17 \times 10^{-6} / K$ ve 700 – 900 K sıcaklık aralığında ise $7,75 \times 10^{-6} / K$ olarak bulundu. Bu değerler safir alttaşın ($\Delta a/a = 7,5 \times 10^{-6} / K$, $\Delta c/c = 8,85 \times 10^{-6} / K$) değerlerinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu fark büyütme sonrasındaki soğumada GaN film ile alttaş arasında bir gerginlik oluşmasına neden olur. Gerginliğin rahatlaması ise yapıda çatlaklar oluşmasına, ince filmin elektriksel ve optik özelliklerini olumsuz etkileyen kusurlar oluşmasına yol açabilir.

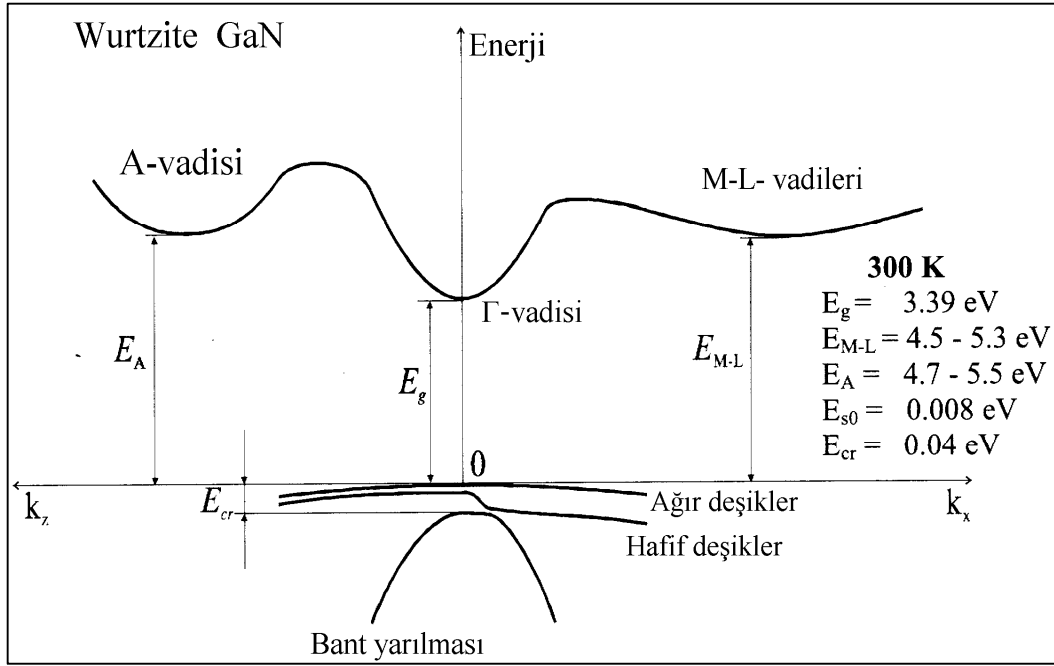
2.3. Optik Özellikler ve Bant Yapısı

III-Nitrür'lerin optoelektronik uygulamalar için çok ilgi çekici olmalarının nedenlerinden biri bu yarıiletkenlerin direkt ve geniş enerji bant aralığına sahip olmalarıdır. III-Nitrürler ve bunların üçlü alaşımlarındaki bant arası elektron-deşik yeniden birleşmesinden (recombination) gelen optik yayınım, elektromanyetik spektrumun kızıl-ötesi bölgesinden görünür bölge ve mor-ötesi bölgesine kadar uzanan önemli ve geniş bir bölümünü kapsamaktadır. Şekil 2.2'de III-Nitrür yarıiletkenlerin oda sıcaklığında örgü sabitine bağlı olarak bant aralığı enerjisinin değişimi grafiksel olarak gösterildi [24]. Verilen enerji eşitliklerindeki bükülme parametreleri çeşitli kaynaklardan alınmıştır [25-27].



Şekil 2.2. III-Nitrür yarıiletkenlerin oda sıcaklığında örgü sabitine bağlı olarak bant aralığı enerjisinin değişimi [24].

Bir yarıiletken malzemenin bant yapısı karakteristiği onun birçok özelliği üzerinde etkilidir. Suzuki ve arkadaşlarının hesapladığı wurtzite GaN'ün bant yapısına ait temel özellikler Şekil 2.3'te gösterildi [28]. Şekilden görüldüğü gibi valans bandının üst tarafı üç duruma bölünmüştür. Bu bölünme spin-yörünge etkileşimi ve kristal simetrisinin sonucunda oluşmaktadır [29]. 3.39 eV'luk enerji bant aralığına sahip GaN'ün ara-bant luminesansı Şekil 2.2'de gösterildiği üzere spektrumun mor-ötesi bölgesinde yer almaktadır.



Şekil 2.3. Wurtzite yapıdaki GaN’ün bant yapısı [28].

2.4. Elektriksel Özellikler

Heteroepitaksiyel olarak büyütülmesi yapılan wurtzite GaN, istenmeden n-tipi katkı olmasına neden olan yüksek bir elektron konsantrasyonuna sahip olmaktadır. 1995’te Boguslawski ve arkadaşları bu sonucu büyütme esnasında oluşan, azot boşlukları gibi yapısal kusurların yüksek yoğunlukta olmasına bağladı [30]. Bu durum sonradan yapılan temel (ab-initio) moleküler dinamik hesaplamalarıyla da doğrulandı. Boguslawski ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bu tip yerel kusurların bant aralığında erişilebilir enerji seviyelerinin oluşmasına neden olduğu sonucuna vardı.

Daha yeni bir çalışmada (2004) Van de Walle ve Neugebauer, GaN’ün istenmeden oluşan n-tipi iletkenliğini incelemek için daha gelişmiş hesaplama yöntemleri kullandı [31]. Yapılan çalışmada, istenmeden katkılamanın nedeni olarak büyütülen GaN’deki azot boşluklarının gösterilemeyeceğini, bunun yerine büyütme sırasında yapıya O ve Si safsızlıklarının girmesinin bu sonuca neden olabileceği belirtildi. Yapısal kusurlarda olduğu gibi bu safsızlıklar da bant aralığında enerji seviyelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu seviyeler serbest yük taşıyıcıları ile etkileşerek

GaN'ün mobilité ve difüzyon katsayıları gibi önemli elektronik özelliklerini çok kuvvetli bir şekilde etkileyebilirler.

2.5. Malzeme Parametreleri

Bu çalışmada alaşımları kullanılmış olan GaN, AlN ve InN yarıiletken malzemelerine ait önemli yapısal, elektriksel ve optiksel malzeme parametreleri 300 K sıcaklığı için Çizelge 2.2'de verildi.

Çizelge 2.2 GaN, AlN ve InN'e ait 300 K'deki yapısal, elektriksel ve optiksel malzeme parametreleri [32-41].

Parametre	GaN	AlN	InN
Kristal yapısı	Hekzagonal	Hekzagonal	Hekzagonal
Simetri grubu	$P6_3mc(C_{6v}^4)$	$P6_3mc(C_{6v}^4)$	$P6_3mc(C_{6v}^4)$
Koordinasyon geometrisi	Tetrahedral	Tetrahedral	Tetrahedral
Yasak enerji aralığı [eV]	3,5	6,2	0,7
cm ³ ' deki atom sayısı	$8,9 \times 10^{22}$	$9,58 \times 10^{22}$	$6,4 \times 10^{22}$
Debye sıcaklığı [K]	600	1150	660
Yoğunluğu [g/cm ³]	6,15	3,23	6,81
Elektron mobilitesi [cm ² /V.s]	≤ 1000	≤ 300	≤ 3200
Deşik mobilitesi [cm ² /V.s]	≤ 200	≤ 14	-
Kırılma alanı [V/cm]	5×10^6	$1,2-1,8 \times 10^6$	-
Elektron difüzyon katsayısı [cm ² /s]	≤ 25	≤ 7	≤ 80
Deşik difüzyon katsayısı [cm ² /s]	≤ 5	$\leq 0,3$	-
Elektron ısı hızı [m/s]	$2,6 \times 10^5$	$1,85 \times 10^5$	$3,4 \times 10^5$
Deşik ısı hızı [m/s]	$9,4 \times 10^4$	$4,1 \times 10^4$	9×10^4
Statik Dielektrik sabiti	8,9	8,5	15
Yüksek frekans dielektrik sabiti	5,35	4,77	8,4

Çizelge 2.2.(Devam) GaN, AlN ve InN'e ait 300 K'deki yapısal, elektriksel ve optiksel malzeme parametreleri [32-41].

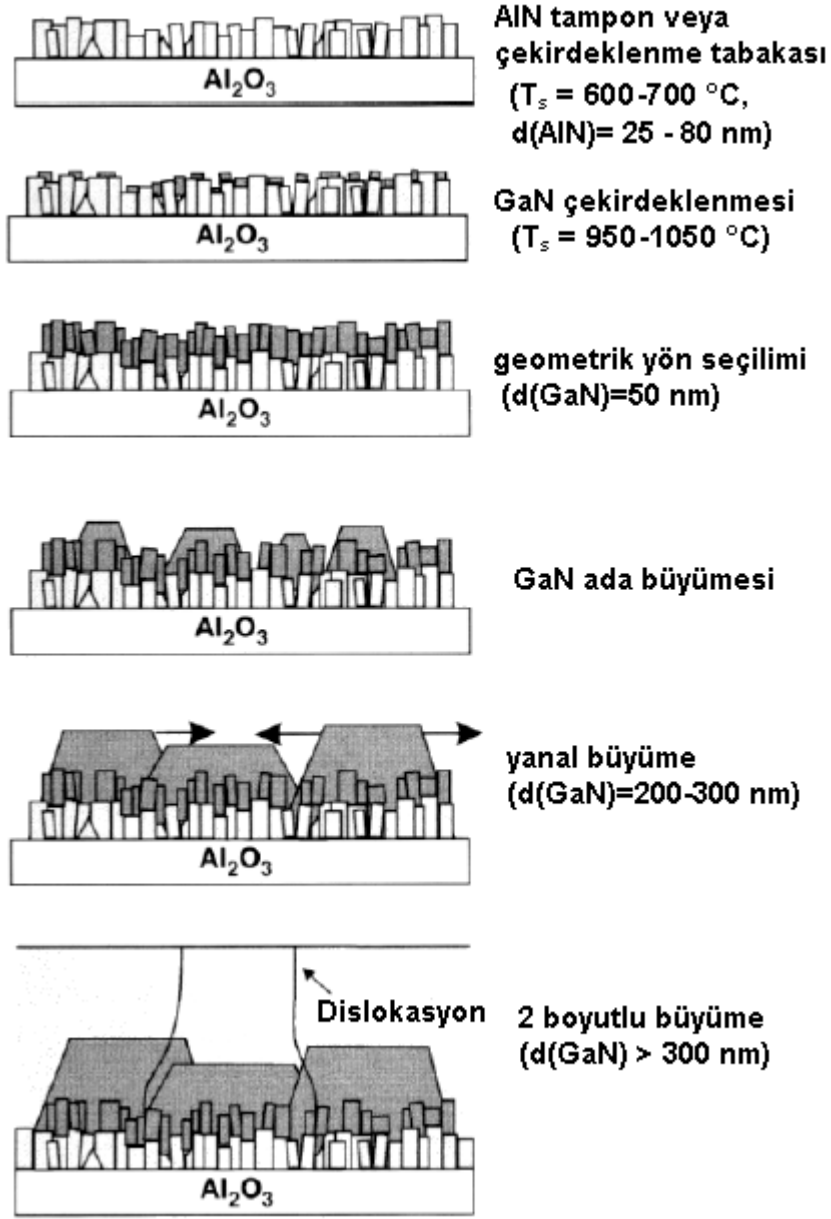
Parametre	GaN	AlN	InN
Elektron etkin kütlesi	0,2m ₀	0,4 m ₀	0,07-0,26 m ₀
Deşik etkin kütlesi	1,25m ₀	3,53 m ₀	0,65 m ₀
Ağır deşik etkin kütlesi	1,4m ₀	10,42 m ₀	1,63 m ₀
Hafif deşik etkin kütlesi	0,3m ₀	0,24 m ₀	0,27 m ₀
Elektron ilgisi [eV]	4,1	0,6	5,8
Örgü sabiti (a) [nm]	0,3189	0,311	0,354
Örgü sabiti (c) [nm]	0,519	0,498	0,57
Optik fonon enerjisi [meV]	91,2	99,2	73
a için Isıl iletkenlik katsayısı [K ⁻¹]	5,59x10 ⁻⁶	4,2x10 ⁻⁶	3,8x10 ⁻⁶
c için Isıl iletkenlik katsayısı [K ⁻¹]	3,17x10 ⁻⁶	5,27x10 ⁻⁶	2,9x10 ⁻⁶
LA-fonon hızı [ms ⁻¹]	6,56x10 ³	-	-
Elektron dalga vektörü [m ⁻¹]	7,3x10 ⁸	-	-
Elektromanyetik çiftlenim katsayısı	0,039	-	-
LA-elastik sabiti [Nm ⁻²]	2,65x10 ¹¹	-	-
TA-elastik sabiti [Nm ⁻²]	0,44x10 ¹¹	-	-
Doğal polarizasyon (P _{sp}) [C/m ²]	-0,029	-0,081	-0,032
e ₃₃ [C/m ²]	0,73	1,46	0,81-1,09
e ₃₁ [C/m ²]	-0,49	-0,6	-0,45
Elastik sabit C ₁₁ [GPa]	390	410	190
Elastik sabit C ₁₂ [GPa]	145	149	104
Elastik sabit C ₁₃ [GPa]	106	99	121
Elastik sabit C ₃₃ [GPa]	398	389	182

2.6. III-Nitrür Epitaksi

Tek kristal alttaş üzerine yönelimli kristal büyütme işlemi “epitaksi” olarak adlandırılır. Büyütme işlemi, film ve alttaşın aynı tür malzeme olması durumunda homoepitaksi, farklı tür malzeme olması durumunda ise heteroepitaksi olarak isimlendirilir. GaN temelli malzemeler için kolay elde edilebilir, yüksek kaliteli ve büyük miktarlarda tek kristal GaN alttaşları üretilmediği için GaN ve diğer nitrür

alaşımlarının ince film büyütme işlemleri hetero-epitaksiyel yöntemle yapılmaktadır. Yüksek kristal kalitesine sahip çoklu yapıların oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan kristal büyütme teknikleri MBE (Moleküler Demet Epitaksi) ve MOCVD (Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi) teknikleridir. Bu tez çalışmasında incelenen numuneler MOCVD tekniği ile büyütüldü. Bu teknik Bölüm 4.1' de detaylı olarak anlatıldı.

Epitaksiyel olarak GaN'ün safir üzerindeki büyütme mekanizmasına ilişkin adımlar Şekil 2.4'te gösterildi. Bu adımlar: 1) Düşük sıcaklıkta ince bir AlN tabakası büyütülerek çekirdeklenme kristallerinin oluşturulması, 2) Kristal sütunlarının kristalografik yöneliminin geometrik olarak belirlenmesi, 3) Yüksek sıcaklıkta GaN büyümesiyle ada oluşumu, 4) Yüksek yanal büyüme hızı sayesinde adaların birleşmesi ve 5) İki boyutlu büyüme ile sonuçlanması şeklinde sıralanabilir [42]. Düşük sıcaklıktaki tampon tabakanın, alttaş ile aynı yönelime sahip çekirdeklenme merkezlerinin oluşturulması ve alttaş ile ince film arasındaki arayüzey serbest enerjisindeki azalma nedeniyle GaN'ün yanal büyümesini kolaylaştırmak şeklinde iki önemli rolü bulunmaktadır.



Şekil 2.4. GaN'ün safir (Al_2O_3) üzerindeki büyütme mekanizmasının adımları [42].

2.6.1. III-Nitrür Epitakside Kullanılan Altaşlar

Önceki bölümde de belirtildiği üzere GaN temelli malzemeler için kolay elde edilebilir, yüksek kaliteli tek kristal GaN altaşlarının büyük miktarlarda henüz üretilmemiş olması araştırmacıları farklı altaş arayışına yöneltmiştir. Öte yandan GaN altaş üretimi üzerinde çalışmalar bulunmakla birlikte bu çalışmalar henüz geliştirme safhasındadır ve üretimler çok pahalı olmaktadır [43]. Bu nedenle GaN

için hetero-epitaksi yöntemi ağırlık kazanmıştır. GaN temelli malzemelerin hetero-epitaksisinde yaygın olarak kullanılan alttaşlar Safir (Al_2O_3), Silisyum karbür (SiC) ve Silisyumdur. Bunların dışında son yıllarda geliştirilmeye başlanan SopSiC (Silicon on poly-crystalline Silicon Carbide: Silisyum karbür üzerinde poli-kristal Silisyum) malzemesinin de alttaş olarak kullanılacağı ön görülmektedir [44].

Safir Alttaş

Safir (Al_2O_3) alttaş GaN temelli hetero-epitaksi büyütmelerinde en yaygın kullanılan alttaş olarak karşımıza çıkmaktadır [45]. Safir yarı-yalıtkan olması, yüksek büyütme sıcaklıklarına dayanabilmesi ve nispeten ucuz olması nedeniyle GaN HEMT malzeme geliştirme safhasında tercih edilmektedir. Diğer yandan termal iletkenliğinin ($0,47 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$) düşük olması, GaN ile olan büyük örgü uyumsuzluğu (16%) ve ısı genleşme katsayısının uyumsuzluğu (34%) yüksek güçlü uygulamalar için Safir alttaşın dezavantajları olarak sayılmaktadır. Fakat yine de Safir üzerine büyütülen GaN HEMT’lerde GaAs HEMT’lerin 10 katı kadar güç yoğunluklarına ulaşabilmektedir.

Silisyum Alttaş

Silisyum yarıiletken malzemeler arasındaki önemini korumaktadır ve halen elektronik uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. GaN’a olan örgü uyumsuzluğu (17%) ve ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğunun (56%) yüksek olmasına rağmen kabul edilebilir ($1,5 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$) düzeyde ısı iletkenliğe sahip olması, düşük maliyetli olması ve halihazırdaki Si tabanlı teknolojiyle bütünleştirilebilme potansiyeli nedeniyle GaN HEMT yapıları için önemli alttaş malzemelerinden biri olmuştur. Literatürde Si üzerinde büyütülen GaN HEMT’lerle ilgili ümit verici sonuçlara rastlanmaya başlanmıştır [46-50].

Silisyum karbür Alttaş

Yüksek ısı iletkenliğe sahip olması (3,7-4,5 W/cm•K @300K), GaN ile olan örgü uyumsuzluğunun (3,4%) ve ısı ıl genleşme katsayısı uyumsuzluğunun (25%) düşük olması SiC malzemesini diğer alttaş alternatifleri içinde ön plana çıkarmaktadır. SiC alttaş üzerine büyütölen GaN epitaksiyel yapıları diğer alttaşlarda büyütölenlere göre daha üstün performans sergilemektedir [51]. Bu nedenle SiC yüksek güçlü GaN HEMT yapılarının büyütölmesinde öncelikli olarak tercih edilmektedir. Öte yandan SiC'ün diğer alttaşlara göre oldukça pahalı (3 inç wafer ~4000\$) olması yaygın olarak kullanımını zorlaştırmaktadır.

Silisyum karbür üzerinde poli-kristal Silisyum (SopSiC) Alttaş

SopSiC, Si ve SiC'ün avantajlarının birleştirildiğı bir alttaş malzemesi olarak geliştirilmeye başlanmıştır [44]. Geleneksel tek kristal SiC ile kıyaslandığında bu yeni yaklaşım daha büyük alttaş boyutu ve daha düşük maliyet çözümü sunmaktadır. SopSiC malzemesinin poli-kristal SiC'in sahip olduğı ısı ıl özelliklere yakın performansta özellikler göstereceğı beklenmektedir. Tek kristal Silisyum ile karşılaştırıldığında bu özel tasarlanmış alttaş özellikle ısı yayılımında önemli bir gelişme sağlamaktadır. SopSiC alttaşlarının birleşik yarıiletken aygıt üretimleriyle tamamen uyumlu olacağı görölmüştür. Bu malzemenin yüksek frekans ve yüksek güç uygulamaları için gerekli olan performansı düşük maliyetle birleştirerek iyi bir alttaş alternatifi olabileceğı beklenmektedir [52-54].

Çizelge 2.3'te ve III-Nitrür epitakside yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. III-Nitrür epitakside yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri [55-58].

Malzeme	Örgü sabiti		Isıl genleşme		Isıl iletkenlik [W cm ⁻¹ K ⁻¹]	Erime noktası [K]
	[Å]	uyuşmazlık GaN/AlN [%]	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	uyuşmazlık GaN/AlN [%]		
GaN	$a = 3,189$ $c = 5,185$	-2,4 -3,9	5,59 3,17	-25,7 -/-66,2	4,1	2791
AlN	$a = 3,112$ $c = 4,982$	-2,5/- -4,1/-	4,15 5,27	-34,7/- 39,9/-	5,9	3487
Safir	$a = 4,7589$ $c = 12,991$	-16,0/-13,3	7,3 8,5	23,4/43,2	0,41	2303
6H-SiC	$a = 3,0806$ $c = 15,117$	-3,5/-1,0	4,46 4,16	-25,3/7,0	4,9	3102
Si(111)	$a_{111} = 3,84$	17,0/19,0	2,6	-115/-60	1,3	1412

Nitrür epitakside yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin avantajları ve dezavantajları özet olarak Çizelge 2.4’te verilmektedir.

Çizelge 2.4. Nitrür epitakside yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin avantajları ve dezavantajları [59].

Alttaş	Avantajları	Dezavantajları
Safir (Al ₂ O ₃)	-Düşük maliyet -Yaygın olarak bulunabilme -Yüksek sıcaklıklarda kararlılık -Kolay temizleme	-Çok zayıf termal iletkenlik -GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu
SiC	-Yüksek termal iletkenlik -GaN ile düşük örgü uyumsuzluğu	-Yüksek maliyet -Yüksek kusur yoğunluğu (mikroborular ve vida türü kusurlar)
Si	-Düşük maliyet -Yaygın olarak bulunabilme -Si temelli mikroelektronik aygıtlarla bütünleşme olanağı -İletken ve yalıtkan formlarda bulunabilme	-GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu -GaN ile yüksek termal uyumsuzluk -Zayıf termal iletkenlik

3. GaN TEMELLİ ÇOKLU YAPILARIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde GaN temelli çoklu yapılarda kutuplanma özellikleri, 2 boyutlu elektron gazının (2DEG) oluşumu ve HEMT aygıtları için önemli olan saçılma mekanizmaları hakkında bilgiler verildi. Ayrıca GaN HEMT aygıtlarının temel çalışma prensibi açıklandı.

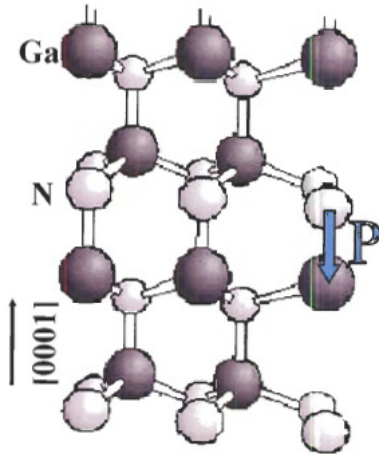
3.1. GaN Temelli Çoklu Yapılarda Kutuplanma

Yarıiletkenlerin çoğunluğunda 2DEG'teki taşıyıcıların tamamı engel katmanındaki n-tipi katkılardan kaynaklanmakta iken III-Nitrür yarıiletkenlerde durum bundan karmaşıktır. AlGa(In)N/GaN malzeme sisteminde bulunan kutuplanma alanları diğer malzemelerden çok farklı bir şekilde 2DEG oluşumunu sağlar. Hatta bu kutuplanma alanları, engelin katılanmasına hiç gerek kalmadan 2DEG oluşumuna imkan sağlayacak kadar kuvvetlidir [60]. Hekzagonal AlGa(In)N malzeme sisteminde iki çeşit kutuplanma alanı bulunur: Doğal kutuplanma (P_{SP}) ve Piezoelektrik kutuplanma (P_{PZ}). Dışarıdan elektrik alanı uygulanmadığında toplam makroskobik kutuplanma bu iki kutuplanmanın toplamından oluşur [60].

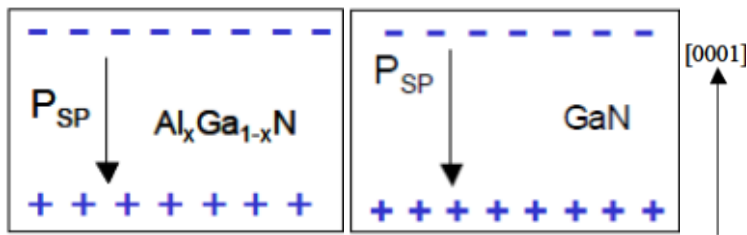
3.1.1. Doğal kutuplanma

Doğal kutuplanma, gerginliği olmayan bir kristalin iç yapısından kaynaklı kutuplanma alanı ile ilgilidir. Bu alan, iki atom arasındaki bağın tamamen kovalent olmamasından ve kristalin ters simetri göstermemesinden kaynaklanır. Al-N ve Ga-N bağları iyonik özelliktedir ve her biri kuvvetli bir dipol taşır. N'un elektronegatifliği Ga'dan daha yüksek olduğundan Ga-N çifti civarındaki elektron dalga fonksiyonu azot tarafına doğru kaymıştır. Diğer bir deyişle, elektron yük bulutu bağlı atomlardan birine doğru yer değiştirmiştir. Kristalin ters simetri göstermediği yönelimde, asimetric elektron bulutu kristalin bir yüzünde net bir pozitif yük oluşmasına ve diğer yüzünde ise net bir negatif yük oluşmasına neden olur. III-Nitrür malzemeleri için bu çok özel bir durumdur ve doğal kutuplanma diğer III-V yarıiletkenlerinkine göre 5 kat daha fazladır [61]. Şekil 3.1'de Ga yüzü doğrultusunda büyütülmüş

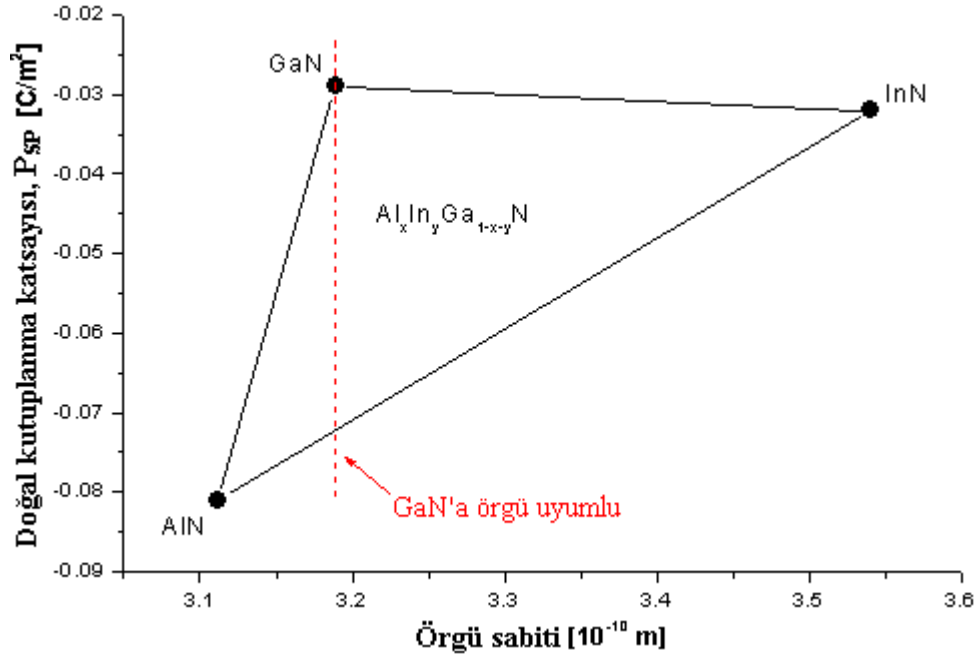
GaN'deki doğal kutuplanma gösterilmektedir. c-eksenine ait kutuplanma vektörü azottan galyuma doğru yöneliktir ve bunun tersi yönünde bir dahili elektrik alan oluşturur. Bu gösterilen alan doğal kutuplanma olarak adlandırılır. Doğal kutuplanma katsayısı, doğal kutuplanma elektrik alanının kuvvetini karakterize eden bir parametredir. c-ekseni üzerine büyütülmüş Ga-yüzlü GaN ve AlGaN'da sadece doğal kutuplanmadan kaynaklı olan elektrik alan ve tabaka yükü Şekil 3.2'de gösterildi. Şekil 3.3'te ise GaN malzeme sistemindeki doğal kutuplanma katsayıları gösterildi [61].



Şekil 3.1. Ga- yüzlü wurtzite GaN'da doğal kutuplanma vektörü [60].



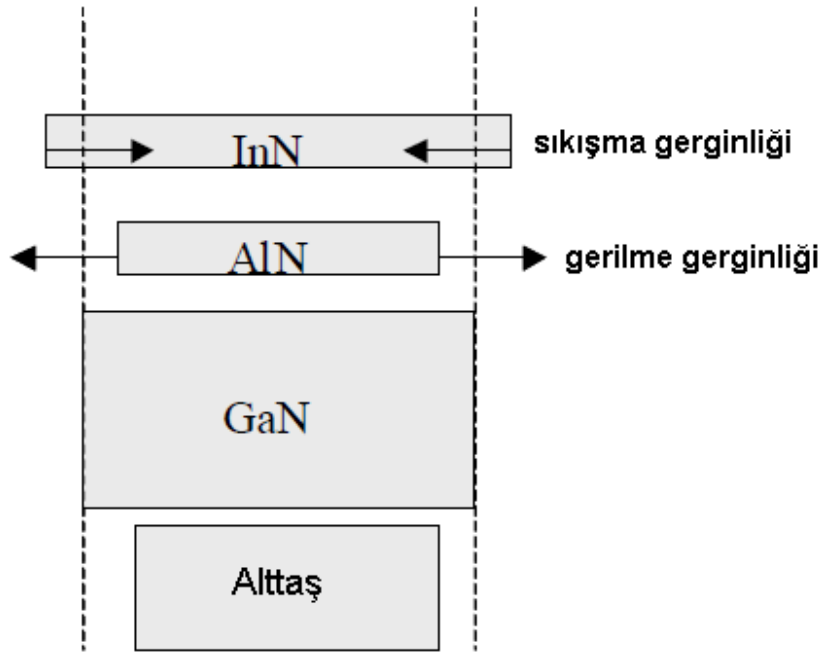
Şekil 3.2. Ga-yüzlü GaN ve AlGaN'da sadece doğal kutuplanmadan kaynaklı olan elektrik alan ve tabaka yükü



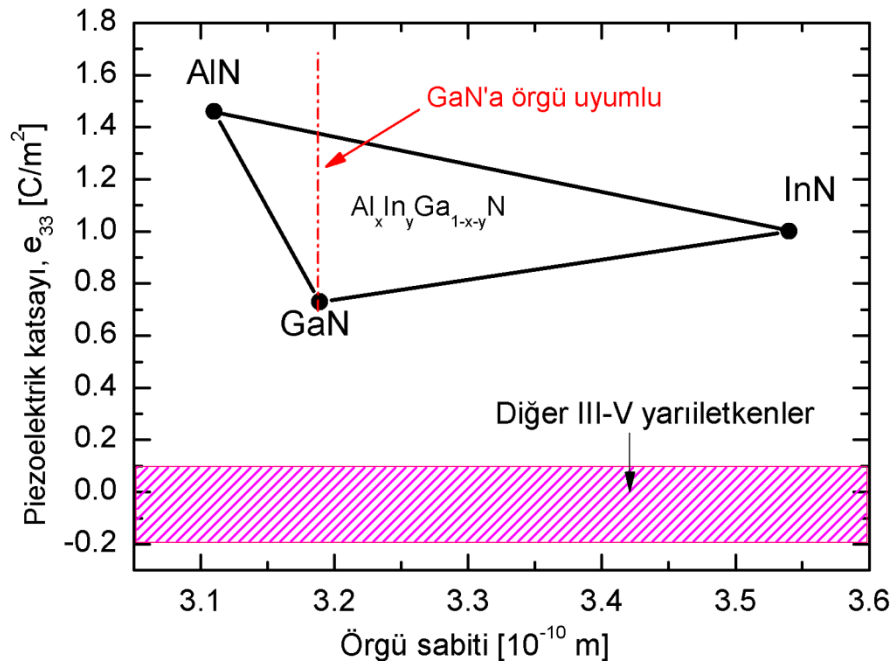
Şekil 3.3. III-Nitrür malzeme sisteminde doğal kutuplanma katsayıları [61]

3.1.2. Piezoelektrik kutuplanma

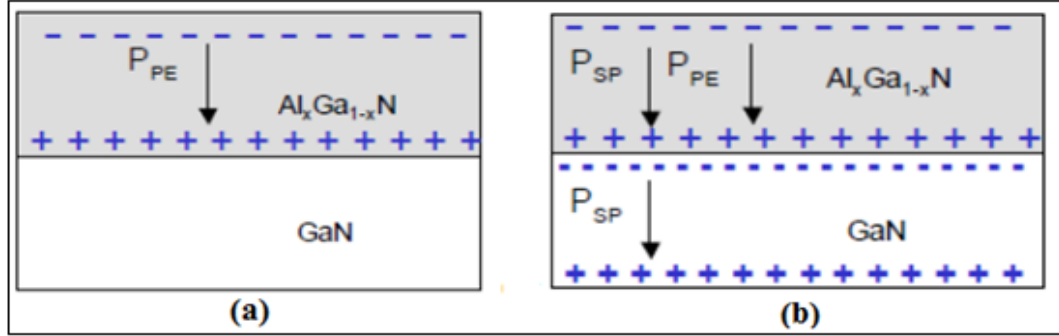
Piezoelektrik kutuplanma, kristal örgüsünün bozulmasından kaynaklanan kutuplanma alanının varlığından oluşur. AlN ve GaN'ün örgü sabitleri arasındaki farktan dolayı GaN tampon tabakaları üzerine uyarlanmış olarak (pseudomorphic) büyütülen AlGaIn tabakaları sıkışma gerginliğine sahip olur. Şekil 3.4'te oluşabilecek gerginlik durumları gösterildi. Oluşan bu gerginlik, piezoelektrik katsayılarının çok büyük olması nedeniyle AlGaIn tabakasının her iki yüzünde tabaka yükü oluşmasını sağlar. Şekil 3.5'te III-Nitrür ve diğer III-V malzemelere ait piezoelektrik katsayıları grafiksel olarak gösterildi. Görüldüğü üzere piezoelektrik katsayılar diğer III-V yarı-iletken malzemelerine kıyasla oldukça büyüktür. c-eksenli safir üzerinde büyütülmüş AlGaIn/GaN çoklu yapısında sadece piezoelektrik kutuplanmadan kaynaklı elektrik alan ve tabaka yükü Şekil 3.6a'da gösterildi. Şekil 3.6b'de ise aynı çoklu yapı içinde oluşan piezoelektrik ve doğal kutuplanma alanları birlikte gösterildi.



Şekil 3.4. III-Nitrür yapılarında oluşabilecek gerginlik durumları



Şekil 3.5. III-Nitrür yapılarına ve diğer III-V malzemelere ait piezoelektrik kutuplanma katsayıları [61]



Şekil 3.6. AlGaIn/GaN çoklu yapısında (a) sadece piezoelektrik kutuplanmadan kaynaklı kutuplanma alanı ve tabaka yükü, (b) piezoelektrik ve doğal kutuplanmadan kaynaklı kutuplanma alanları ve tabaka yükleri

3.2. GaN Temelli Çoklu Yapılarda 2DEG Oluşumu

GaN temelli çoklu yapılarda 2DEG oluşumunu açıklamak için AlGaIn/GaN sistemi göz önüne alındı. AlGaIn/GaN heteroyapısı üzerine herhangi bir dış elektrik alan uygulanmadığını düşünelim. Bu durumda sistemin toplam makroskobik kutuplanması (P), doğal kutuplanma (P_{SP}) ve piezoelektrik kutuplanmanın (P_{PE}) toplamı olarak tanımlanır [60]. Böyle bir sistemde bütün kutuplanma vektörleri z-ekseni yöneliminde olduğu için vektör notasyonunu kullanmaya gerek yoktur. AlGaIn tabakası için toplam makroskobik kutuplanma şu şekilde verilir:

$$P = P_{SP} + P_{PE} \quad (3.1)$$

Önceki bölümde açıklandığı üzere, kalın GaN tabakası sadece doğal kutuplanma içerir. Gauss yasasına göre, ara yüzeydeki kutuplanma süreksizliği sınırlı bir tabaka yük yoğunluğu (σ_P) oluşturmaktadır ve yük yoğunluğu şu şekilde verilir [60]:

$$|\sigma_P| = |P_{PE,AlGaIn} + P_{SP,AlGaIn} - P_{SP,GaN}| \quad (3.2)$$

Bir sonraki adım ise tabaka yük yoğunluğunu hesaplayabilmek için piezoelektrik kutuplanmanın elde edilmesidir. Piezoelektrik kutuplanma

$$P_{PE} = \sum_j e_{ij} \epsilon_j \quad (3.3)$$

olarak tanımlanır. Burada ϵ_j gerginliği, e_{ij} ise piezoelektrik sabitleri ifade etmektedir. III-nitürler için Eş. 3.3,

$$P_{PE} = e_{33} \epsilon_z + e_{31} (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (3.4)$$

ifadesine indirgenebilir [60]. Bu eşitlikte e_{33} (z-yönünde) ve e_{31} (x ve y yönlerinde) piezoelektrik katsayılar olup, $\epsilon_z = (c-c_0)/c_0$ z-ekseni doğrultusundaki gerginlik ve $\epsilon_x = \epsilon_y = (a-a_0)/a_0$ ise düzlemsel izotropik gerginliktir. a_0 ve c_0 değerleri de ilgili örgü sabitleridir. Wurtzite kristal yapısında elastik sabitler olan C_{13} ve C_{33} ile ilgili gerginlik bağıntıları bulunmaktadır. Bu bağıntılar,

$$\epsilon_z = -2 \epsilon_{x,y} \frac{C_{13}}{C_{33}} \quad (3.5)$$

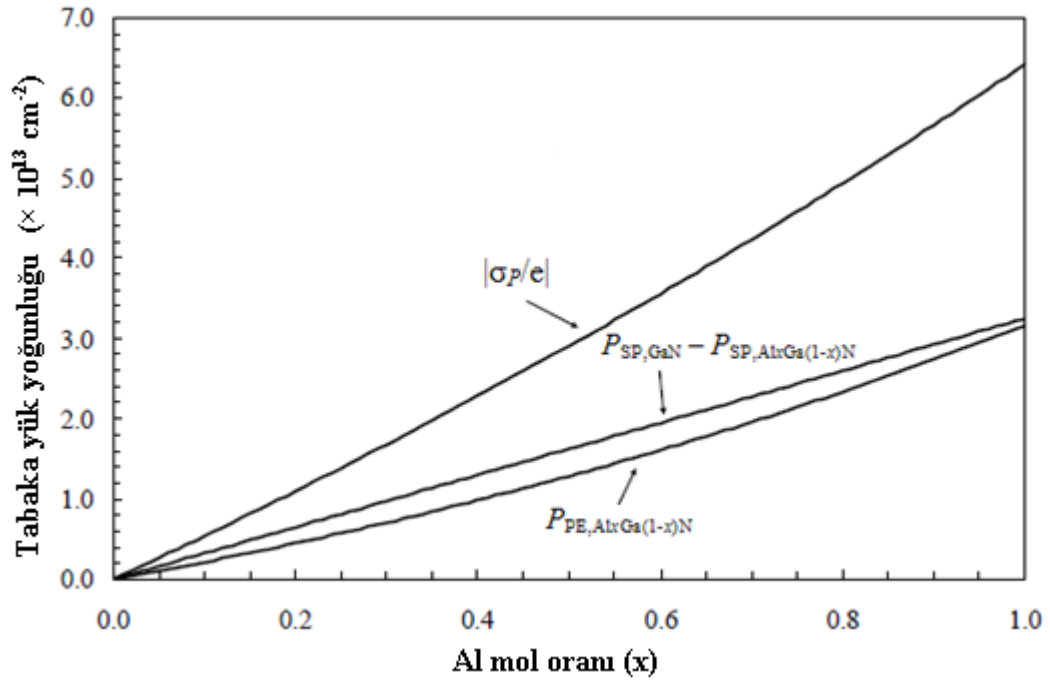
ifadesi ile verilir [61]. Eş.3.4 ve Eş.3.5 kullanılarak AlGaN tabakasındaki piezoelektrik kutuplanma:

$$P_{PE} = 2 \frac{a-a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (3.6)$$

ile ifade edilebilir. Eş.3.2 ve Eş.3.6 birleştirilerek $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ ara yüzündeki kutuplanma kaynaklı tabaka yük yoğunluğu σ_P

$$|\sigma_P| = \left| 2 \frac{a-a_0}{a_0} \left\{ e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right\} + P_{SP,AlGaN} - P_{SP,GaN} \right| \quad (3.7)$$

ile hesaplanabilir. Hesaplamalar $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 'deki Al mol oranının artmasıyla tabaka yük yoğunluğunun artacağını göstermiştir [64]. Şekil 3.7'de bu durum grafiksel olarak gösterildi. Diğer yandan büyütülen malzemenin kalitesi Al mol oranına uygulanabilirlik açısından bir sınırlama getirmektedir [62-63].



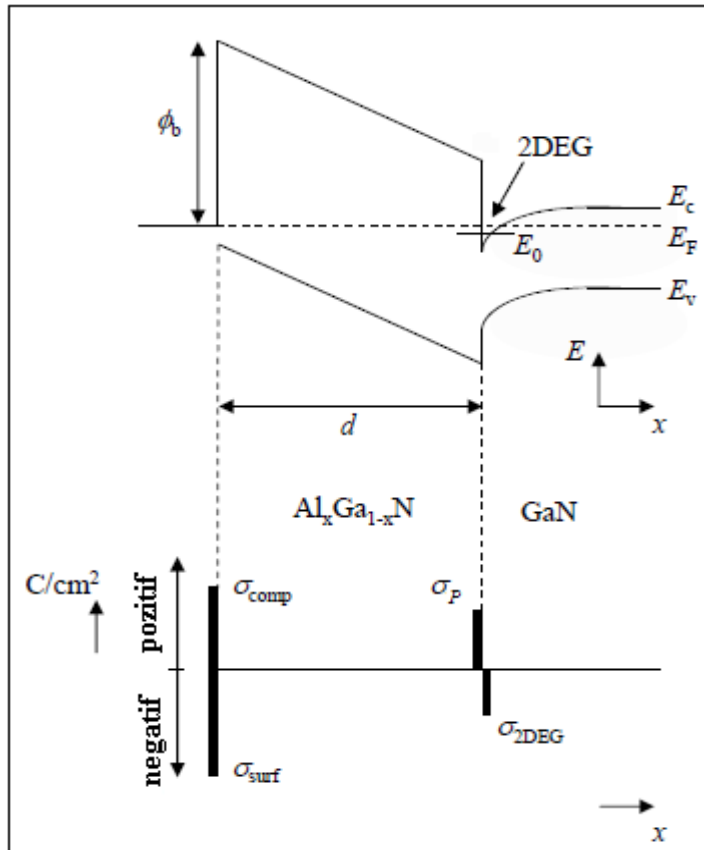
Şekil 3.7. Kutuplanma kaynaklı tabaka yük yoğunluğunun AlGaIn/GaN hetero yapısındaki Al mol oranının değişimine bağlı değişimi [64]

AlGaIn/GaN çoklu yapısı kuantum kuyusunun oluşabilmesi için yeterli bant süreksizliğine sahiptir. Katkılanmamış AlGaIn tabakası kritik bir kalınlığa ulaştıktan sonra söz konusu iletim bandı süreksizliği enerji seviyesinin Fermi seviyesinin altına inmesini sağlar [64]. İletim bandının Fermi enerjisinin altında kalan yeri elektronlar tarafından doldurulacaktır. Elektronlar biriktikçe elektrik alan oluşur ve bant bükülerek yaklaşık üçgen kuantum kuyusu oluşur. Şekil 3.8'de AlGaIn/GaN ara yüzünde üçgensel bir kuantum kuyusunun oluşumu gösterildi.

AlGaIn tabakası için bahsedilen kritik kalınlığı, Fermi dağılımının genişliğini ihmal ederek Poisson denkleminin çözümünden,

$$d_{cr} = (E_D - \Delta E_C) \cdot \left(\frac{\epsilon_{AlGaN}}{e\sigma_P} \right) \quad (3.8)$$

olarak elde etmek mümkündür. Eş.3.8'den görüleceği üzere kritik kalınlık, yüzey verici enerji seviyesi (E_D), AlGaN/GaN birleşme yerindeki enerji bant ofseti (ΔE_C), kutuplanma kaynaklı tabaka yük yoğunluğu (σ_P) ve AlGaN tabakasının dielektrik sabitine (ϵ_{AlGaN}) bağlıdır. Bu eşitlik deneysel çalışmalarla da doğrulanmıştır. İletim bandı kenarından 1.65eV kadar aşağıda yüzey verici enerji seviyesi ve AlGaN tabakası için 35Å kritik kalınlık değerleri rapor edilmiştir [65].



Şekil 3.8. AlGaN/GaN çoklu yapısında enerji bant diyagramı ve oluşan tabaka yükleri [64]

AlGaN tabakasının kalınlığı belirli bir kritik kalınlığın üzerine çıktığında yapıda oluşan kutuplanma alanları, yüzey verici durumlarını iyonize edecek kadar yüksek olmaktadır [65]. Bu iyonize olmuş elektronlar iç elektrik alanın etkisiyle

AlGaIn/GaN ara yüzüne doğru hareket eder ve üçgensel kuvantum kuyusunu doldurur. Ara yüzeyde biriken bu negatif yükler 2 boyutlu elektron gazı (2DEG) olarak adlandırılırlar. Buna karşılık, iyonize olmuş yüzey verici durumları AlGaIn tabakasının yüzeyinde Şekil 3.8’de gösterildiği gibi pozitif bir yük (σ_{comp}) oluşturur [64]. Bu pozitif yük kutuplanma kaynaklı tabaka yükü (σ_P) nedeniyle oluşan negatif (σ_{surf}) yüzey yükünü dengelemek üzere oluşur. AlGaIn tabakası boyunca toplam yükün nötr olmasını sağlamak için yüzeydeki net yük pozitif olması gerektiğinden yüzeydeki dengeleyici yük (σ_{comp}) de pozitif olmaktadır.

Arayüzde ve yüzeydeki tabaka yük yoğunlukları arasında yük korunumunu varsayan basit bir elektrostatik analizle 2DEG tabaka taşıyıcı yoğunluğu (n_s) hesaplanabilir. Bu yaklaşımla tabaka taşıyıcı yoğunluğu (n_s), AlGaIn engel tabakasındaki Al mol oranının (x) bir fonksiyonu olarak

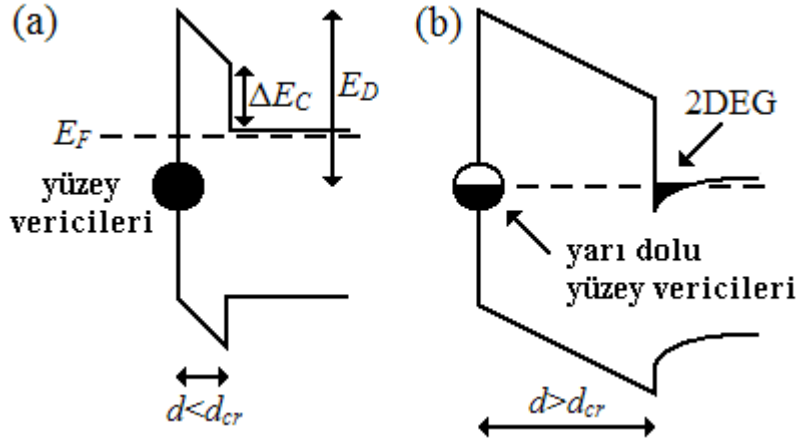
$$n_s(x) = \frac{\sigma_P(x)}{e} - \left(\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}}(x) / de^2 \right) (e\phi_b(x) + E_F - \Delta E_c(x)) \quad (3.9)$$

elde edilir [66]. Burada σ_P AlGaIn/GaN birleşme ara yüzündeki kutuplanma kaynaklı tabaka yük yoğunluğu, e elektron yükü, ϵ_0 boş uzay geçirgenliği, ϵ_{AlGaIn} AlGaIn engel tabakasının geçirgenliği, d AlGaIn engel tabakasının kalınlığı, ϕ_b Schottky engel yüksekliği, E_F GaN iletim bandı kenarına göre eklem yerindeki Fermi seviyesi ve ΔE_c ise AlGaIn/GaN ara yüzündeki iletim bandı ofseti olarak tanımlıdır.

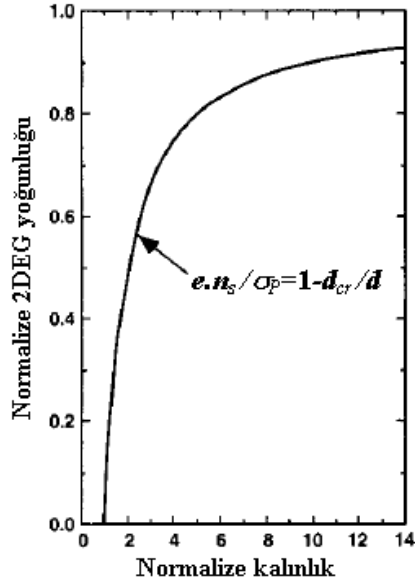
GaN temelli çoklu yapılarıdaki 2DEG oluşumu için en kesin ve doğru model, 2DEG kanalındaki elektronların kaynağının yüzey vericileri olduğunu öne süren yüzey verici modelidir [65]. Yüzey verici modelini temel alan eşitlik (3.8)’deki kritik kalınlık ifadesini kullanarak taşıyıcı yoğunluğunu (n_s) kapalı formda

$$n_s = \frac{\sigma_p}{e} \cdot (1 - d_{cr}/d) \quad (3.10)$$

şeklinde yazılabilir. Yüzey verici modeline göre 2DEG oluşumu ve kritik kalınlık etkisi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Şekil 3.9.a'da gösterildiği gibi AlGaN tabakası belirli bir kritik kalınlığa ulaşana kadar 2DEG oluşmamaktadır. AlGaN tabakasının kalınlığı d_{cr} değerinin üzerine çıktığında ise 2DEG oluşumu gözlenmektedir (Şekil 3.9.b). Bu teoriye dayalı olarak, normalize 2DEG yoğunluğunun normalize AlGaN engel kalınlığına bağlı değişim grafiği Şekil 3.10'da gösterildi.



Şekil 3.9. Yüzey verici modeline göre 2DEG oluşumunun şematik gösterimi



Şekil 3.10. Normalize 2DEG yoğunluğunun normalize AlGaIn engel kalınlığına bağlı değişim grafiği [65]

Kanaldaki elektron mobilitesi ve taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olan 2DEG kanalının iletkenliği HEMT aygıtlarının çalışma performansı bakımından çok önemli bir parametredir. İletkenlik σ :

$$\sigma = e n_s \mu_n \quad (3.11)$$

ile ifade edilmektedir [67]. Burada e elektron yükü μ_n ise kanaldaki elektronların mobilitesidir. Taşıyıcı yoğunluğu ile elektron mobilitesi arasında genellikle dikkatle kontrol edilmesi gereken bir ters orantı vardır. n_s 'i artırmak μ_n 'i kötüleştirecektir; çünkü 2 boyutlu sistemlerde çeşitli saçılma mekanizmaları etkin olacaktır.

2DEG özellikleri yüzey verici durumları ile yakından ilişkili olduğundan HEMT yapılarının yüzey kalitesi de çalışma performansı için çok önemli olmaktadır. Yapının yüzeyi birçok iç ve dış etkenlerden etkilenebilmektedir. Epitaksiyel yapı tasarımının ve büyütülmesinin yüzey kalitesini belirlemede önemli bir rolü bulunmaktadır.

3.3. GaN Temelli Çoklu Yapılarda Saçılma Mekanizmaları

AlGaIn/GaN ara yüzünde oluşan oldukça büyük bir bant süreksizliği (AlN/GaN için 2.4 eV) ve birleşme bölgesindeki yük transferi ile indüklenen bant bükülmesi, GaN tarafında bir kuvantum kuyusunun oluşmasına neden olur. Kuvantum kuyusundaki elektron sınırlanması Fermi seviyesinin konumuna bağlı olarak yüksek bir taşıyıcı yoğunluğunun oluşmasını sağlar. Yüzeye dik doğrultudaki elektronların öz değerleri kuvantum kuyusundaki sınırlanma nedeniyle kuantalanmış olurlar. Yüzeye paralel durum için, Bloch dalgaları ile açıklanan, serbest elektron gazı varsayımı geçerli olmaktadır. Bu nedenle bu durum 2 boyutlu elektron gazı yaklaşımı ile açıklanabilir. 2DEG'deki elektronların öz değerleri ifade edilebilir.

$$E_i^{2D} = \frac{\hbar^2}{2m_x^*} \cdot k_x^2 + \frac{\hbar^2}{2m_y^*} \cdot k_y^2 + E_i \quad (3.12)$$

ile ifade edilebilir. E_i Schrödinger ve Poisson denklemlerinin çözümüyle nümerik olarak hesaplanabilir. Nicel bir değerlendirme için simetrik üçgensel potansiyel yaklaşımı genellikle yeterli olmaktadır [68]. Öz fonksiyonlar, Airy fonksiyonları ile ifade edilir.

Yapıdaki 2DEG varlığının ara yüz boyunca elektron iletimi üzerinde önemli etkileri olmaktadır. 3 boyutlu dejenere olmayan bir yarıiletkende iletim özellikleri, (rahatlama süresinin (τ_m) sıcaklığa bağlı enerji dağılımı boyunca ortalamasının alınması varsayımı ile) elastik saçılma durumu için Boltzmann denkleminin çözümü ile elde edilebilir. 2DEG ise dejenere bir yarıiletken yapısı olarak ele alınabilir. Diğer bir deyişle, sadece Fermi seviyesi kenarındaki elektronlar iletme katkı yapar ve dolayısıyla τ_m sadece $E = E_F$ durumunda hesaplanmalıdır. Bu enerji bağılılığındaki farklılık 3 boyutlu durumda olduğu gibi farklı bir sıcaklık davranışına yol açar. Ayrıca saçılma süreçlerinde erişilen ilk ve son durumların niceliğini belirleyen Fermi yüzeyindeki dalga vektörü

$$k_F = \sqrt{2\pi n_s} \quad (3.13)$$

ifadesi ile taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır [69]. Farklı saçılma mekanizmaları elektron mobilitelerini farklı biçimlerde sınırlarlar. Fakat her birinin etkisi diğerinden bağımsız olarak ele alınabilir. Toplam mobilité ise etkin saçılma mekanizmalarının sınırladığı taşıyıcı mobilitelerinin toplamı olarak elde edilir [70-72]. Aşağıda verilen bu ifade Matthiessen kuralı olarak bilinmektedir.

$$\frac{1}{\mu_{Top}} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} \quad (3.14)$$

Yapıdaki 2DEG oluşumunun varlığını deneysel olarak doğrulamanın yollarından biri sıcaklığa bağı Hall etkisi ölçümleridir. Yapılan analizlerde birçok muhtemel saçılma mekanizmasını ve bunların elektron mobilitesine etkilerini dikkate almak gereklidir [73]. Bu kısımda GaN temelli HEMT yapıları için önemli olan saçılma mekanizmalarına özet olarak değinilecektir.

3.3.1. Polar optik fonon saçılması

Taşıyıcıların, örgü titreşimlerinin optik modlarıyla (optik fononlar) etkileşmesi sonucu oluşan saçılma mekanizmasına optik fonon saçılması adı verilir. Birçok yarıiletken yüksek sıcaklıklarda 2 boyutlu taşıyıcıların mobilitesi ağırlıklı olarak polar optik fonon saçılması tarafından sınırlanır. Polar optik fonon saçılmasına ait analitik ifade

$$\mu_{po} = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_p\hbar^2}{e\omega_{PO}m^{*2}Z_0} [e^{\hbar\omega_{PO}/k_BT} - 1] \quad (3.15)$$

ile verilir [74]. Burada,

$$\frac{1}{\epsilon_p} = \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \quad (3.16)$$

olarak tanımlıdır. Eş.3.15'te, $\hbar\omega_{PO}$ polar optik fonon enerjisi, Z_0 2DEG'in bulunduğu kuvantum kuyusu genişliği, k_B Boltzmann sabiti, m^* elektronun etkin kütlesi, ϵ_∞ ve ϵ_s ise sırasıyla yüksek ve düşük frekans (statik) dielektrik sabitleridir.

3.3.2. Akustik fonon saçılmaları

Örgü saçılma mekanizmalarından biri olan akustik fonon saçılması orta sıcaklık aralığında (100 K – 200K) etkin olan önemli bir saçılma mekanizmasıdır. Bu tez çalışmasında Ridley ve arkadaşlarının önermiş olduğu akustik fonon saçılması modeli kullanıldı [73]. Akustik fonon saçılması iki farklı saçılma mekanizması dikkate alınarak hesaplanır. Bunlar deformasyon potansiyel saçılması ve piezoelektrik saçılmadır. Deformasyon potansiyeline ilişkin mobilite ifadesi

$$\mu_{dp} = \frac{16\rho eu_l^2 \hbar^3}{3\Xi^2 k_B T m^{*2} b} \frac{1}{J_{DP}(k)} \quad (3.17)$$

ile verilir [73]. Burada e elektron yükü, ρ kristal yoğunluğu, k_B Boltzman sabiti, T sıcaklık, m^* etkin kütle, u_l boyuna akustik fonon hızı, Ξ deformasyon potansiyeli ve k elektron dalga vektörüdür. Eş.3.17'deki b faktörü, dalga fonksiyonlarının Hartree yaklaşımı üçgen kuyu çözümlemelerinde [69] kullanılan Fang-Howard ifadesi olarak bilinir,

$$b = \left(\frac{33e^2 m^* n_s}{8\epsilon_0 \epsilon_s \hbar^2} \right)^{1/3} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir [75]. Burada n_s ölçülen iki boyutlu taşıyıcı yoğunluğudur. Eş.3.17'deki $J_{DP}(k)$ ise

$$J_{DP}(k) = \int_0^{2k} \frac{1}{2\pi k^3 (q + q_s)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{q}{2k}\right)^2}} q^4 dq \quad (3.19)$$

integralinden oluşmaktadır. Bu integral ifadesindeki q_s iki boyutlu ters perdeleme uzunluğudur ve

$$q_s = \frac{e^2 m^*}{2\pi \hbar^2 \epsilon_0 \epsilon_s} F_{11}(q) f(0) \quad (3.20)$$

ile tanımlanır. Eş.3.20'deki $f(0)$, altband köşesi olarak adlandırılır ve genelde tüm perdelemenin en düşük altbanttaki elektronlar tarafından yapıldığı kabul edilebilir [73]. Aynı eşitlikteki $F_{11}(q)$, temel durum için Fang-Howard dalga fonksiyonunun form faktörü olarak adlandırılır [75].

III-Nitrür bileşikleri gibi güçlü kutuplanmaya sahip malzemelerde akustik fononlar piezoelektrik etki sebebiyle etkileşmeye girerler. Açısal bağıllığında bir sadeleştirme ile birlikte piezoelektrik saçılma mekanizmasına ait mobilite

$$\mu_{pe} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_s \hbar^3 k}{e K^2 k_B T m^{*2}} \frac{1}{J_{pe}(k)} \quad (3.21)$$

ile verilir [73]. Burada K , elektromekaniksel çiftlenim katsayısıdır ve

$$K^2 = \frac{\epsilon_{LA}^2}{\epsilon_s c_{LA}} - \frac{\epsilon_{TA}^2}{\epsilon_s c_{TA}} \quad (3.22)$$

ile verilir [76]. Eş.3.22'de $\epsilon_{LA}, \epsilon_{TA}, c_{LA}, c_{TA}$ sırasıyla boyuna ve enine etkin piezoelektrik katsayıları, boyuna ve enine ortalama elastik sabitleridir. $J_{pe}(k)$ integrali ise;

$$J_{pe}(k) = \int_0^{2k} \frac{F_{11}(q)}{4k^2 (q + q_s)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{q}{2k}\right)^2}} q^3 dq \quad (3.23)$$

şeklinde verilir. Eşitlik (3.17) ve Eşitlik (3.21)' de verilen deformasyon potansiyeli ve piezoelektrik saçılmalara ait mobilite ifadeleri Matthiessen kuralı ile toplanarak akustik fononlara ait toplam saçılma

$$\frac{1}{\mu_{ak}} = \left(\frac{1}{\mu_{DP}} + \frac{1}{\mu_{PE}} \right) \quad (3.24)$$

olarak bulunur.

3.3.3. Alaşım saçılması

Üçlü alaşımlarda atomların yapı içindeki istatistiksel dağılımı nedeniyle yerel potansiyel dalgalanmaları oluşmaktadır. Potansiyelde oluşan bu yerel dalgalanmalar iletkenlik bandında bir düzensizlik meydana getirir. Kanaldaki 2DEG dalga fonksiyonunun GaN/AlGaN ara yüzünü geçerek AlGaN engeline sızması sonucu engelde bahsi geçen alaşım potansiyeli düzensizliği nedeniyle taşıyıcılar saçılmaya uğrar [77]. Bu saçılma mekanizması alaşım saçılması veya alaşım düzensizliği saçılması olarak adlandırılır. Kearney ve Horrell [78], perdeleme etkisini ihmal ederek bu saçılma mekanizmasının mobilitesini

$$\mu_{al} = \frac{16}{3b} \frac{e\hbar^3}{x(1-x)m^{*2} \Omega_0 U_{AL}^2} \quad (3.25)$$

ifadesi ile hesaplamışlardır. Burada x alaşım oranı, U_{AL} alaşım potansiyeli ve Ω_0 ise bir atom başına düşen hacimdir.

3.3.4. Dislokasyon saçılması

Nitrür yarıiletkenler ve üzerine büyütüldükleri alttaş malzemeler arasında büyük örgü uyumsuzlukları olduğundan büyütülen epitaksiyel tabakalarda dislokasyonlar oluşur. Oluşan bu dislokasyonlar yapıda ışımasız birleşme merkezleri gibi davranırlar; yasak

enerji aralığında enerji seviyelerine sahip olurlar ve yüklü saçılma merkezleri olarak işlev görürler. Dejenere bir 2DEG durumunda dislokasyon saçılması için elde edilen analitik ifade

$$\mu_{dis} = \frac{\hbar^3 \varepsilon^2 c^2}{N_{dis} m^{*2} e} \frac{4\pi k_F^4}{I_t} \quad (3.26)$$

şeklinde verilir [79]. Burada N_{dis} dislokasyon yük yoğunluğu, ε kristalin dielektrik sabiti, c [0001] yönelimindeki örgü sabitidir. I_t integrali ise;

$$I_t = \frac{1}{2} \xi^2 \int_0^1 \frac{du}{(1+\xi^2)\sqrt{1-u^2}} \quad (3.27)$$

ile tanımlıdır. Burada ξ boyutsuz parametre olup $\xi=2 k_f/q_{TF}$ şeklinde tanımlıdır. q_{TF} ise 2 boyutta Thomas-Fermi dalga vektörü olup $q_{TF} = 2/a_B^*$ şeklinde tanımlıdır. a_B^* malzemenin etkin Bohr yarıçapıdır. Dislokasyon saçılmasının mobilite üzerindeki etkisi dislokasyon yoğunluğunun 10^9 cm^{-2} 'nin üstünde olması durumunda önemli hale gelir [80].

3.3.5. Safsızlık saçılması

İki-boyutlu taşıyıcılar için safsızlık saçılmaları iki farklı mekanizma ile incelenir. Bunlar, uzak vericilerden kaynaklanan safsızlık saçılması ve arayüzeydeki yüklerden kaynaklanan iyonize safsızlık saçılmasıdır. Uzak vericilerden kaynaklanan safsızlık saçılması modülasyon katkılı yapılarda etkili olmaktadır. GaN temelli yapılarda çoğunlukla katkılama yapılmadığı için uzak vericilerden kaynaklanan safsızlık saçılması etkili olmamakta, iyonize safsızlık veya diğer adıyla arka plan safsızlık saçılması etkin olmaktadır. Arka plan safsızlık saçılmasına ait mobilite ifadesi

$$\mu_{as} = \frac{8\pi\hbar^3 \varepsilon^2 k_F^2 I_B(\beta)}{e^3 m^{*2} N_{AS}} \quad (3.28)$$

ile verilir [81]. Burada ϵ , GaN' ün dielektrik geçirgenliği, N_{AS} ise 2-boyutta arka plan safsızlık yoğunluğudur. $I_B(\beta)$ integral ifadesi ise

$$I_B(\beta) = \int_0^\pi \frac{\sin^2 \theta}{(\sin \theta + \beta)^2} d\theta \quad (3.29)$$

şeklinde tanımlıdır. Bu integral ifadesinde geçen β ,

$$\beta = \frac{S_0}{2k_F} \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k_F , Fermi yüzeyindeki dalga vektörü ve S_0 perdeleme sabitidir. Perdeleme sabiti, dejenere durumlar için Lee ve arkadaşları tarafından

$$S_0 = \frac{e^2 m^*}{2\pi \epsilon \hbar^2} \quad (3.31)$$

olarak sadeleştirilmiştir [82].

3.3.6. Arayüzey bozukluğu saçılması

Farklı yüzey tutunma katsayılarına sahip materyallerin birbiri üzerine büyütülmesi sonucunda arayüzey bozukluğu meydana gelmektedir. Bu bozukluk, yapılarda elektronların tam bir enerji değerine sahip olmasını engeller ve enerji değerinde küçük dalgalanmalar oluşur [83-84]. $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ çoklu yapılarının dar olan kuvantum kuyuları arayüzey bozukluğuna oldukça hassastır. Bu durum kesikli elektron enerjilerinde büyük dalgalanmalara neden olabilir [85]. Arayüzey bozukluluğu saçılmasına ait mobilite:

$$\mu_{ab} = \left(\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s}{n_s \Delta \Lambda} \right)^2 \frac{\hbar^3}{e^3 m^{*2}} \frac{1}{J_{ab}(k)} \quad (3.32)$$

ile verilir [83]. Burada Δ , bozukluğun yanal boyutu ve Λ ise pürüzlülükler arası korelasyon uzunluğu olarak adlandırılır. $J_{ab}(k)$ integral ifadesi ise

$$J_{ab}(k) = \int_0^{2k} \frac{e^{-q^2 \Lambda^2 / 4}}{2k^3 (q + q_s)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{q}{2k}\right)^2}} q^4 dq \quad (3.33)$$

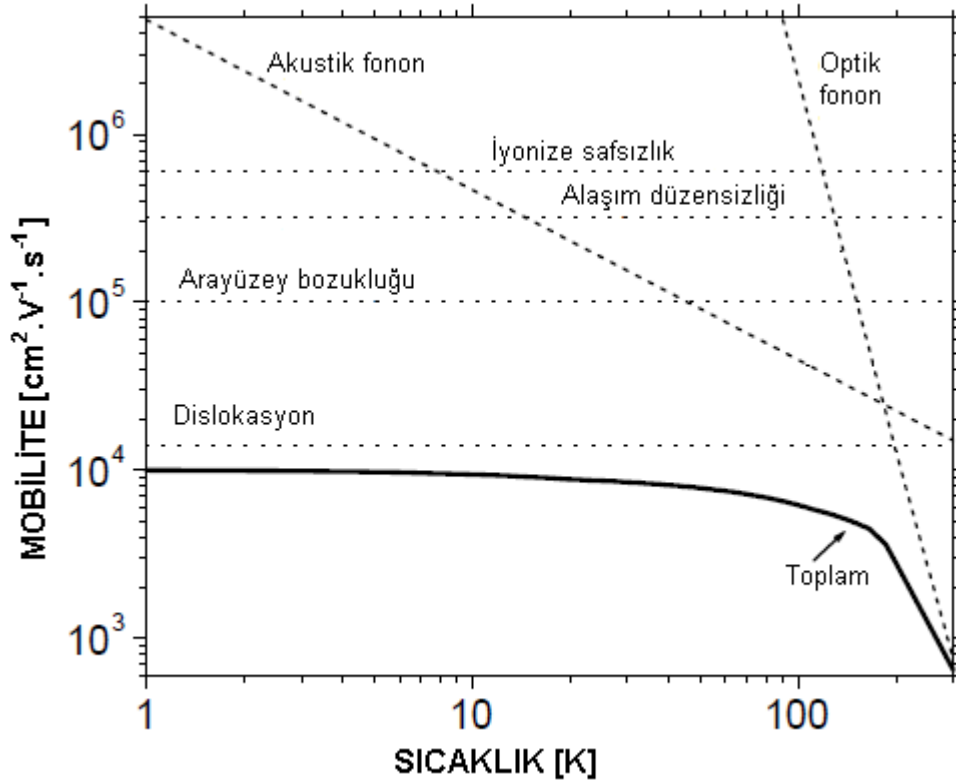
olarak verilir. Burada q_s , perdeleme sabitidir [85] ve

$$q_s = \frac{e^2 m^*}{2\pi \hbar^2 \epsilon_0 \epsilon_s} F(q) \quad (3.34)$$

şeklinde verilir. Hirakawa tarafından form faktörü $F(q)$

$$F(q) = \int_0^\infty dz \int_0^\infty dz' [f(z)]^2 [f(z')]^2 e^{-q|z-z'|} \quad (3.35)$$

olarak tanımlanmıştır [86]. Şekil 3.11'de $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapısı için hesaplanan mobilite bileşenleri ve toplam mobilite sıcaklığa bağlı (1K – 300K) olarak gösterilmektedir. Bu hesaplamada 2DEG yoğunluğu $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, iyonize safsızlık yoğunluğu $N_{\text{GaN}} = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve dislokasyon yoğunluğu 10^9 cm^{-2} olarak alınmıştır [59]. Bütün Coulomb katkıları sıcaklıktan bağımsız bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Böylece her türlü iyonik safsızlıktan mobiliteye gelen katkı düz çizgi olarak gözükmemektedir.



Şekil 3.11. $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapısı için hesaplanan mobilitenin sıcaklığa bağlı grafiği. Kesikli çizgiler her bir saçılma mekanizması için hesaplanan mobiliteleri göstermektedir. 2DEG yoğunluğu $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, iyonize safsızlık yoğunluğu $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve dislokasyon yoğunluğu 10^9 cm^{-2} olarak alınmıştır [59]

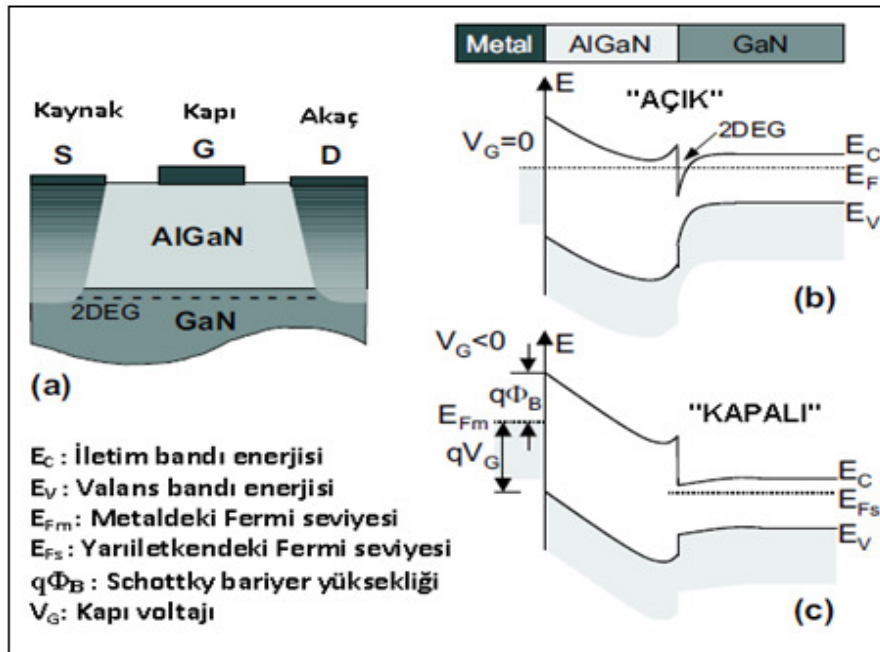
Özetle, GaN temelli çoklu yapılarda oda sıcaklığında ve orta sıcaklıklarda fonon saçılmalarının, düşük sıcaklıklarda ise ara yüzey bozukluğu, alaşım düzensizliği ve dislokasyon saçılmalarının mobilitayı önemli ölçüde sınırladığı gözlenmiştir [87-88]. İyonize safsızlık saçılmasının ise sadece düşük 2DEG yoğunluğuna (10^{12} cm^{-2}) sahip heteroyapılarda mobilitayı sınırlamada etkin olduğu belirlenmiştir [89].

3.4. GaN Temelli HEMT Aygıtlarının Temel Çalışma Prensibi

Yüksek kalitede yarıiletken tabakalarının büyütülmesi için geliştirilen modern epitaksiyel teknikler sayesinde yüksek frekans (20-100 GHz) uygulamaları için oldukça hızlı çalışabilen, düşük gürültülü HEMT aygıtlarını üretmek mümkün olmuştur. HEMT aygıtları özellikle radar ve uydu iletişimde metal yarıiletken alan

etkili transistörlerin (MESFET) yerini almaya aday yeni nesil transistörler olarak ön plana çıkmaktadırlar.

Katkısız ve kısmen kalın bir GaN tampon tabakası üzerine geniş enerji band aralığına sahip AlGaN tabakasının epitaksiyel olarak büyütülmesi, yüksek elektron mobiliteli transistör olarak bilinen heteroyapının oluşmasına neden olur. Bu tip bir AlGaN/GaN HEMT yapısı Şekil 3.12-a'da gösterildi. HEMT aygıtında kontrol MESFET'te olduğu gibi kapı (gate) elektrodunun altındaki Schottky engeli aracılığıyla sağlanır. Fakat n-tipi kanal AlGaN/GaN arayüzündeki 2DEG tarafından oluşturulur ve tipik olarak elektron yoğunluğu $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 'dir. AlGaAs/GaAs yapılarına dayalı geleneksel malzeme sistemlerinde 2DEG yoğunluğu $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ civarındadır. Yüksek elektron yoğunluğu iyonize vericilerden ayrılmış olduğundan yüksek mobilite ve düşük gürültü seviyeleri elde edilebilmektedir. AlGaN/GaN ara yüzündeki 2DEG bölgesine iyi bir ohmik kontak yapılabilmesi için akaç (drain) ve kaynak (source) elektrotları hazırlanmalıdır.



Şekil 3.12. AlGaN/GaN HEMT aygıtının (a) şematik gösterilimi ve (b,c) kapı elektrodu altından yüzeye dik yöndeki elektronik bant yapısı. Bant yapıları (b)'de sıfır kapı voltajı varken ve termal denge durumu için (c)'de negatif kapı voltajı uygulanmış durum için gösterilmiştir

Termal dengede tabakaların büyüme yönüne dik doğrultudaki enerji bant diyagramı Şekil 3.12-b’de gösterilmektedir. Pozitif bir akaç voltajı uygulandığında, kaynak-akaç yolu boyunca potansiyel düşmesi bant diyagramında bir değişime neden olur. Yerel potansiyele bağlı olarak birikim tabakası elektronlardan az veya çok boşaltılır, E_F Fermi seviyesinin konumu bant kenarlarına göre akım kanalı boyunca değişir. Ek olarak uygulanan kapı voltajı, katkısız GaN tabakasındaki değerine göre metaldeki Fermi seviyesinin kaymasına neden olacağından transistör çalışması mümkün olmaktadır. Kapı metal elektrodunun hemen altındaki Schottky tüketim tabakasının varlığından dolayı (AlGaN tabakasındaki vericiler boşaltılır) voltaj düşmesinin büyük kısmı AlGaN tabakasında gerçekleşir ve böylece kapı elektrodu ile 2DEG arasında yalıtkanmış gibi bir engel oluşur. Bu Schottky engeli metal oksit yarıiletken alan etkili transistörlerdeki (MOSFET) SiO_2 katmanıyla benzer bir işleve sahiptir. Uygulanan kapı voltajına bağlı olarak ara yüzdeki üçgensel potansiyel kuyusu enerji olarak daha yükseltilir (birikim tabakası boşalır, Şekil 3.12c) veya daha azaltılır (birikim tabakası dolar, Şekil 3.12b). Bu şekilde 2DEG yoğunluğu kontrollü olarak değiştirilerek akaç-kaynak akımı modüle edilebilir. Kapı voltajı yeterli büyüklükte uygulandığında tüketim tabakası 2DEG bölgesine kadar genişler, 2DEG yoğunluğu artık ihmal edilebilir düzeye düşer ve akım kanalı kısılmış (pinch-off) olur. Bu kısılmayı sağlayan en düşük kapı voltajı eşik voltajı olarak adlandırılır.

Transistörün kuvvetlendirme işlemi temelde daha yüksek akaç-kaynak akımlarını anahtarlayabilen düşük kapı akımlarının kontrolüne dayalıdır. Kapı uzunluğu L , genişliği W olan kısmen basitleştirilmiş bir modeli varsayarak kapı kapasitansı için

$$C_g = \epsilon_s \epsilon_0 \frac{LW}{d_{\text{AlGaN}}} \quad (3.36)$$

ifadesi yazılabilir. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 vakumun dielektrik sabiti ve d_{AlGaN} kapı elektrodu altındaki AlGaN tabakasının kalınlığıdır. 2DEG’in yük yoğunluğu n_s kapı voltajı V_g tarafından indüklenir. Böylece lineer yaklaşımla kapı kapasitansı

$$C_g = \frac{dQ}{dV_g} \approx \frac{e \cdot n_s}{V_g - V_{BI}} \cdot LW \quad (3.37)$$

şeklinde yazılabilir Burada V_{BI} , dışarıdan uygulanan kapı voltajı sıfır iken yapıda var olan dahili voltajdır. Normal çalışmada akaç-kaynak voltajı çok yüksektir ki bu sayede elektronlar kanalda satürasyon hızı v_s (10^7 cm/s) ile hareket etmektedirler. Akaç-kaynak akımı,

$$I_{DS} \approx en_s v_s W \quad (3.38)$$

şeklinde yazılabilir. Eş.3.37'den n_s 'i elde edip Eş.3.38'de yerine koyarsak basitleştirilmiş modelde I_{DS} 'in V_g 'ye lineer bağıllığı

$$I_{DS} \approx \frac{1}{L} C_g v_s (V_g - V_{BI}) \quad (3.39)$$

olarak elde edilir. HEMT performansını tanımlamadaki önemli parametrelerden biri geçiş iletkenliği g_m 'dir. Geçiş iletkenliği sabit bir akaç-kaynak voltajında kapı voltajındaki değişime karşılık akaç-kaynak akımındaki (I_{DS}) değişimi belirlemektedir. Geçiş iletkenliği

$$g_m = \left(\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_g} \right)_{V_{DS}} \approx \frac{1}{L} C_g v_s = e v_s \frac{dn_s}{dV_g} W \quad (3.40)$$

ifadesi ile verilmektedir [90]. Geçiş iletkenliği kapı voltajının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisine bağlı bir parametredir. Geçiş iletkenliği ile kapı kapasitansı arasındaki ilişki bir elektronun kapı altından geçiş zamanı olan τ 'yu aşağıdaki eşitlik uyarınca tanımlamış olur [90].

$$f_t = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{v_s}{2\pi L} = \frac{g_m}{2\pi C_g} = \frac{\mu E_c}{2\pi L} \quad (3.41)$$

Eş.3.41'de f_t maksimum frekans, μ elektron mobilitesi ve E_c kanaldaki elektrik alan olarak tanımlıdır. $1 \mu\text{m}$ kadar kapı uzunlukları ve 10^7 cm/s civarı satürasyon hızları

ile 10 ps mertebesinde iletim zamanlarına ulaşılabilir. Bu durum GaN HEMT'leri özellikle mikrodalga frekanslarındaki uygulamalar için oldukça ilgi çekici hale getirmiştir. HEMT aygıtlarının yüksek frekans özelliklerini geliştirebilmek için kapasitans değerleri mümkün olduğunca düşük tutulmalı geçiş iletkenliği ise olabildiğince yüksek elde edilmeye çalışılmalıdır.

4. DENEYSEL TEKNİKLER

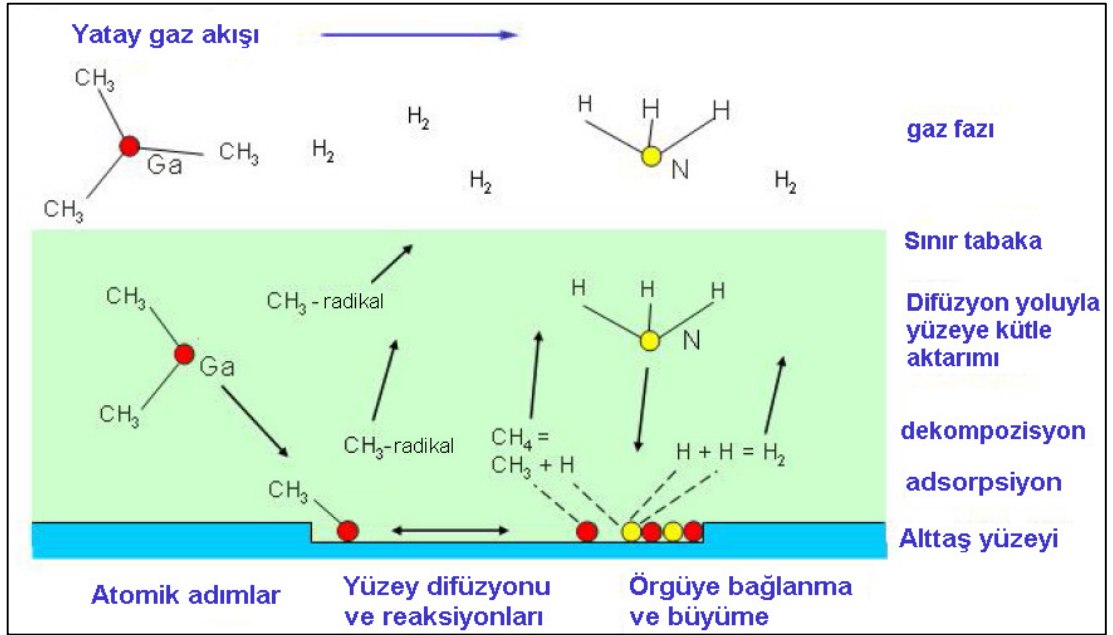
Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan üretim ve karakterizasyon teknikleri hakkında özet bilgiler verildi. Deneysel teknikler epitaksiyel nümune için kullanılanlar ve GaN temelli HEMT aygıtları için kullanılanlar olmak üzere iki bölüme ayrıldı. Son olarak GaN temelli HEMT aygıt üretim adımları hakkında bilgi verildi.

4.1. Epitaksiyel Nümune Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri

Bu alt bölümde epitaksiyel nümune üretimi ve karakterizasyonunda kullanılan Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) Büyütme Sistemi, Atomik Kuvvet Mikroskobu, X-Işını Kırınımı ve Hall Etkisi Ölçüm Sistemi anlatıldı.

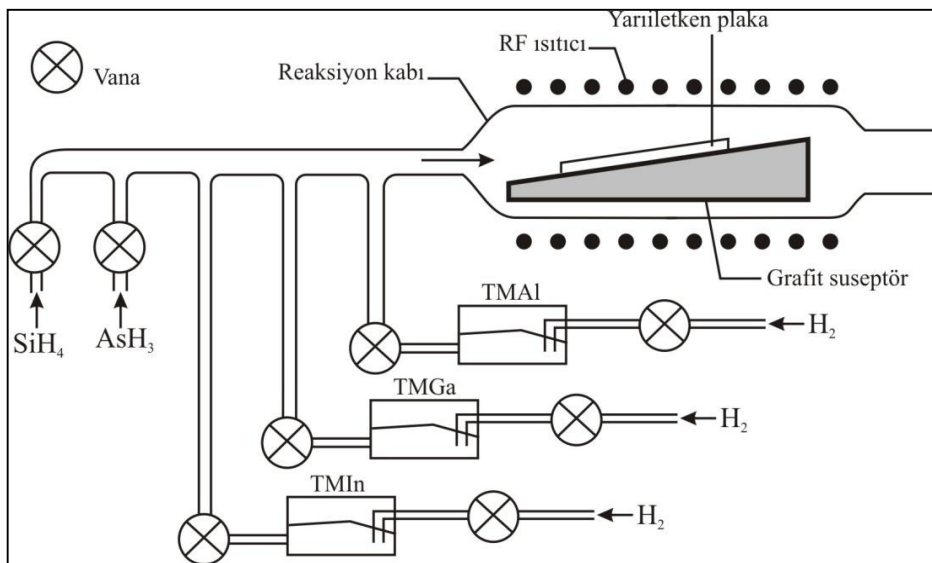
4.1.1. Metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) büyütme yöntemi

Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) yöntemi bir alttaş materyali üzerine atomik biriktirme ile kontrol edilebilir epitaksiyel tabakaların büyütülmesinde en yaygın olarak kullanılan epitaksiyel büyütme tekniğidir. Geniş alanlı yongalar üzerinde yüksek büyütme hızlarının elde edilmesi avantajına sahiptir. Bu sistemde elde edilmek istenen yarı iletken malzemeyi oluşturacak olan ve organik gaz molekülleri ile bağlı olan metal atomları sıcak bir ortamda tutulan alttaş üzerinden taşıyıcı gaz (H_2) ile birlikte geçirilir. Sıcak ortamda organik moleküller ile metal atomları arasındaki bağlar kırılır (piroliz) ve istenen malzemenin alttaş üzerine tabakalar halinde kristallenmesi sağlanır [91]. GaN büyütülürken amonyak (NH_3) ve trimetil galyum (TMGa) içeren bir hidrit karışımı, yüksek oranda seyreltilmiş hidrojen veya nitrojen ile reaktörün içine ayrı ayrı gönderilir. Şekil 4.1’de MOCVD ile ince film büyütülmesi esnasında meydana gelen temel fiziksel olaylar ve büyütme mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 4.1. MOCVD ile ince film büyütülmesi esnasında meydana gelen temel fiziksel olaylar ve büyütme mekanizmasının temsili gösterilimi [92]

Yatay bir reaktöre sahip olan MOCVD sistemine ait genel bir şematik gösterim Şekil 4.2’de verilmektedir. TMGa, TMAI ve TMIn bileşiklerinin hepsi oda sıcaklığında yüksek buhar basıncına sahip sıvılardır. Bu nedenle bu bileşikler reaktöre H_2 aracılığıyla baloncuklaşarak taşınmaktadırlar.



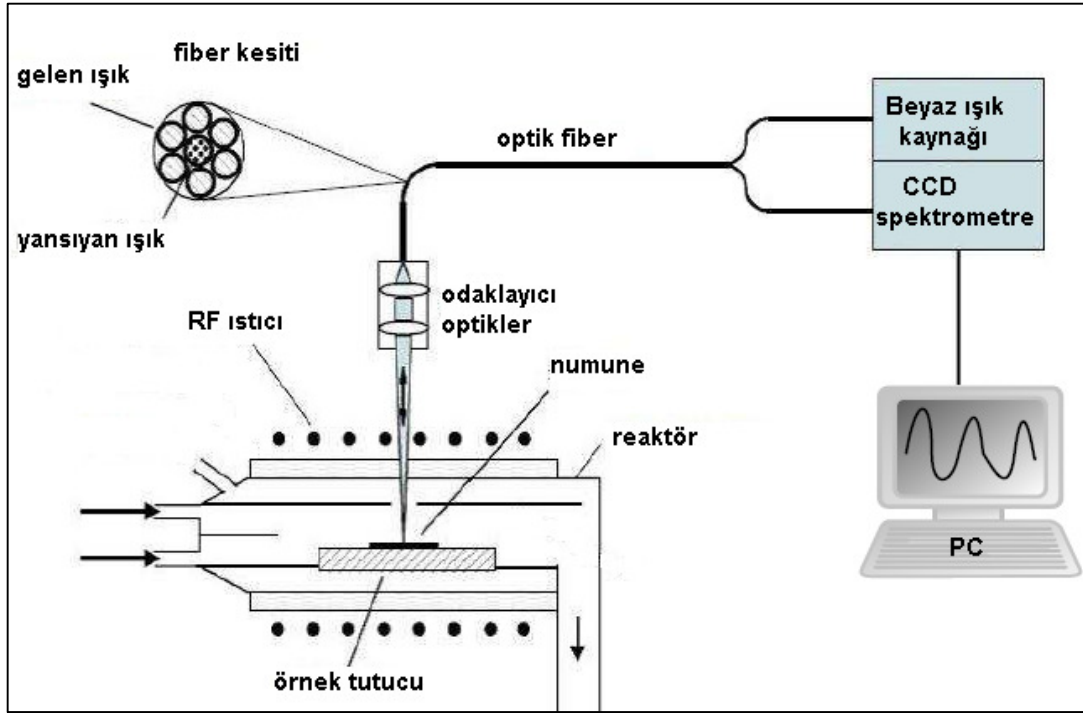
Şekil 4.2. Yatay reaktörlü bir MOCVD sisteminin genel şematik gösterimi

Bu tez çalışması için hazırlanan GaN temelli HEMT yapıları Bilkent Üniversitesi-Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde kurulu olan AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi ile sentezlenmiştir. AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi Resim 4.1' de görülmektedir. MOCVD sistemi dört ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; gaz kontrol sistemi, reaksiyon çemberi, ısıtma/sıcaklık kontrol sistemi ve vakum sistemidir.



Resim 4.1. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde bulunan AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi

MOCVD büyütmeleri esnasında büyüme hızı, tabaka kalınlığı, çoklu yapıların kompozisyonu ve yüzey özellikleri gibi epitaksiyel tabaka parametreleri gerçek zamanlı olarak net bir şekilde belirlenmelidir. Optik reflektans metodu, epitaksiyel tabakalara direk erişim sağladığı ve MOCVD sistemlerine uygun olması nedeniyle büyütme proseslerinin izlenmesi, kalibre edilmesi ve kontrol edilmesi için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu sistemde büyütme yapılan yüzeye doğrultulmuş şekilde, ayarlanabilir bir monokromatik ışık kaynağı mevcuttur. İncelenmekte olan epitaksiyel tabakalar üzerine düşürülen ışık kısmen yansıtılmaktadır. Yansıyan ışık yoğunluğu bir CCD dizin veya foto-diyot tarafından ölçülmektedir. Gönderilen ve yansıyan ışık yoğunluklarının oranına reflektans denmektedir. Kullanılan MOCVD sisteminde bulunan in-situ reflektans ölçümünün şematik gösterilimi Şekil 4.3'te verilmektedir.

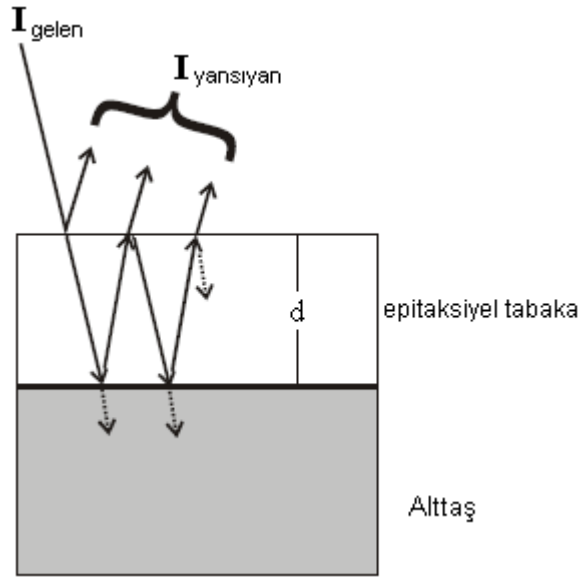


Şekil 4.3. AIX 200/4 RF-S sisteminde kullanılan in-situ optik reflektans ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Şekil 4.4'te gösterildiği üzere çoklu iç yansımalarla kaynaklı girişim etkilerinden yapıya yönelik bilgi edinmek amacıyla reflektans ölçümlerindeki anlık değişimler incelenmektedir. Yansıyan demetlerin girişimleri toplam reflektanstaki yoğunluk modülasyonlarına neden olmaktadır. Bu etki Fabry-Perot salınımı olarak bilinmektedir. Modülasyonun periyodu büyütülen epitaksiyel tabakanın büyüme hızı ve kalınlığı hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca modüle edilmiş reflektansın genliği, çoklu yapıların kompozisyonu ve yüzey pürüzlülüğü gibi bazı malzeme özellikleri hakkında bilgi verebilmektedir. Reflektans eğrisinin bir osilasyonu sırasında büyütülen tabakaya ait kalınlık değeri (d) şu eşitlik ile yaklaşık olarak hesaplanabilir [93]:

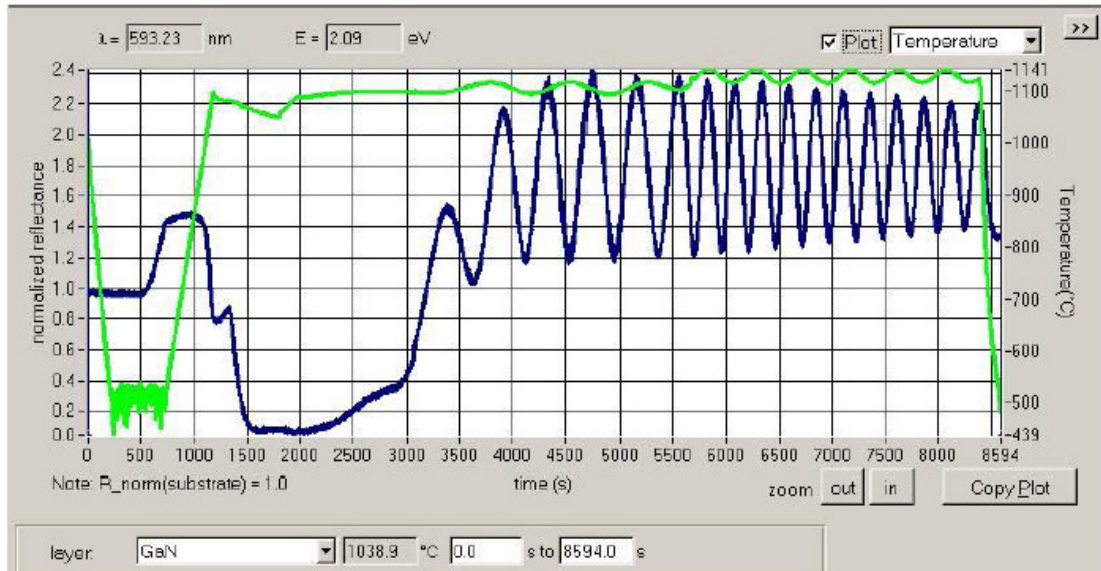
$$d = \lambda_m / 2n \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'de λ_m spektrometrede ölçülen ışığın nm cinsinden dalga boyu, n ise büyütülen ince filmin ölçülen dalga boyundaki kırıcılık indisidir.



Şekil 4.4 Optik reflektans ölçümlerindeki gelen ve yansıyan demetlerin gösterilimi

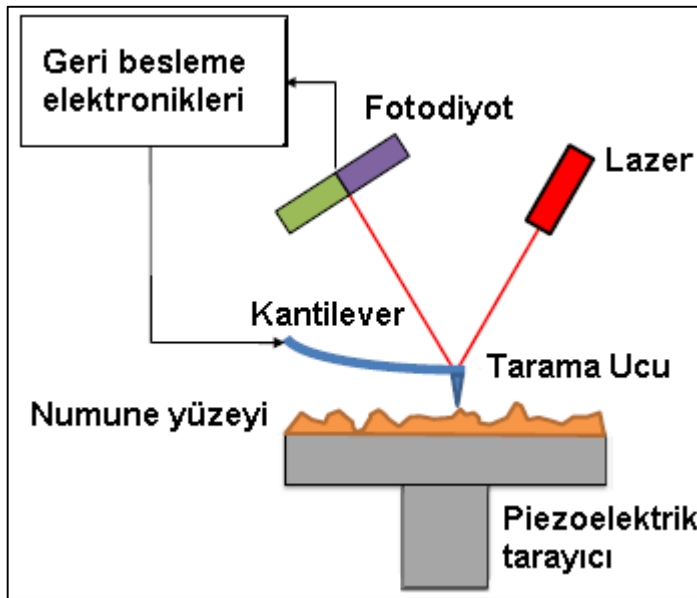
MOCVD sisteminde GaN büyütme esnasında oluşan Fabry-Perot reflektans salınımlarına ait grafik Şekil 4.5'te görülmektedir. Büyütülen yapıya ait anlık (single transient) reflektans değişim grafiği epitaksiyel yapının büyütme kalitesinin ve yüzey özelliklerinin iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5 MOCVD sisteminde GaN büyütme esnasında oluşan Fabry-Perot reflektans salınımları

4.1.2. Atomik kuvvet mikroskobu

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) çeşitli özellikteki katı malzemelerin (iletken, yalıtkan, manyetik) yüzey topografisini angstrom mertebesinde mikron seviyelerine kadar çok hassas bir şekilde ölçmeye yarayan bir tekniktir. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere kantileverin (sundurma kolu) sonuna yerleştirilmiş birkaç mikron uzunluğunda atomik sivrilikte bir uç ile numune yüzeyi taranır. Tarama esnasında uç-yüzey arasındaki atomlar arası kuvvetler ($10^{-11} - 10^{-6}$ Newton) kantileverin sapmasına sebep olur. Bu sapma yayın arkasına odaklanan lazer ışığı yardımı ile bir foto detektör üzerine düşürülür ve çok duyarlı bir şekilde ölçülür. Uç ile yüzey arasındaki kuvvet, bir geri besleme devresiyle sabit tutulur ve uç yüzeyi tararken ölçülen ucun hareketi yüzeyin topografisini verir [94]. AFM ile incelenen numunenin yüzey topografisinden büyüme modu, numunenin yüzey pürüzlülüğü, numune yüzeyindeki kusur tipleri ve kusur yoğunluğu hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 4.6. AFM'nin çalışma prensibi

AFM ölçümleri kontak, non-kontak ve yarı-kontak (semicontact or tapping) olmak üzere üç farklı modda gerçekleştirilir. İşlemin modu uç-numune mesafesine göre belirlenir. Bu çalışmada kullanılan Veeco marka CPII model AFM sistemi Resim

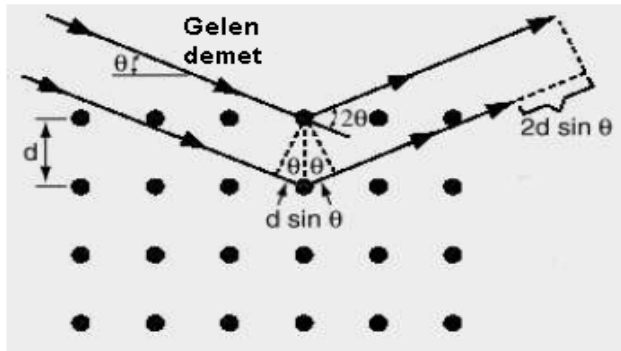
4.2’de gösterilmektedir. HEMT aygıtları için büyütülen numunenin yüzey kalitesi çok önemlidir çünkü yüzey pürüzlülüğünün elektron mobilitesi ve 2DEG özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır.



Resim 4.2. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde bulunan AFM sistemi

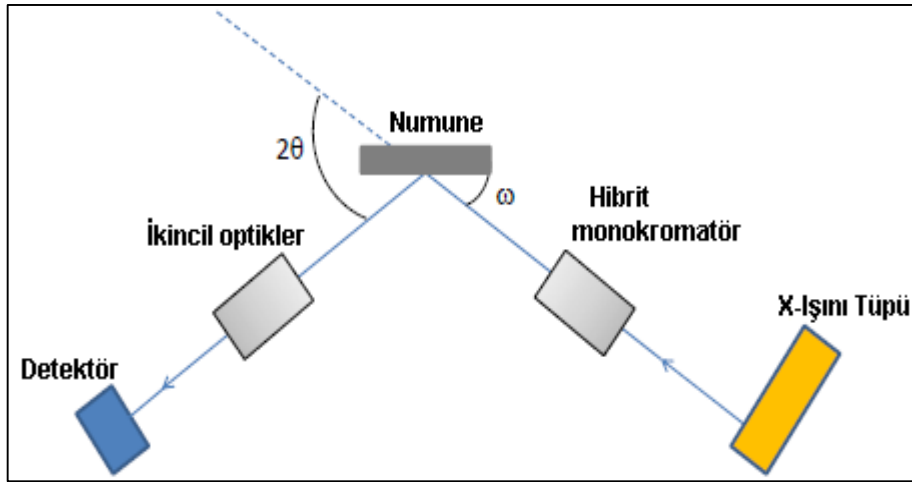
4.1.3. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD)

X-Işını Kırınımı (XRD) büyütülen yonga tabakalarının kalınlığını, çoklu alaşımların mol oranlarını ve ince filmlerde oluşan gerginliği, kusur tiplerini belirlemeye yarayan çok yönlü bir deneysel tekniktir [95]. XRD’nin çalışma prensibi kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalgaboyuna sahip X-ışını dalgalarının kristal ile kırınıma uğraması olayına dayanır.



Şekil 4.7 Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması

X-ışınlarının eşit aralıklarla sıralanmış paralel örgü düzlemleri üzerine θ açısıyla geldiğini varsayalım (Şekil 4.7). Bu durumda ardışık iki düzlemden yansıyan ışınlar arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ olur. Burada “d” düzlemler arası mesafedir. Yapıcı girişim oluşması için, bu yol farkları dalgaboyunun tam katları şeklinde olmalıdır ($2d\sin\theta=n\lambda$, $n=0, 1, 2, 3\dots$). Bu eşitlik Bragg yasası olarak bilinir [96].

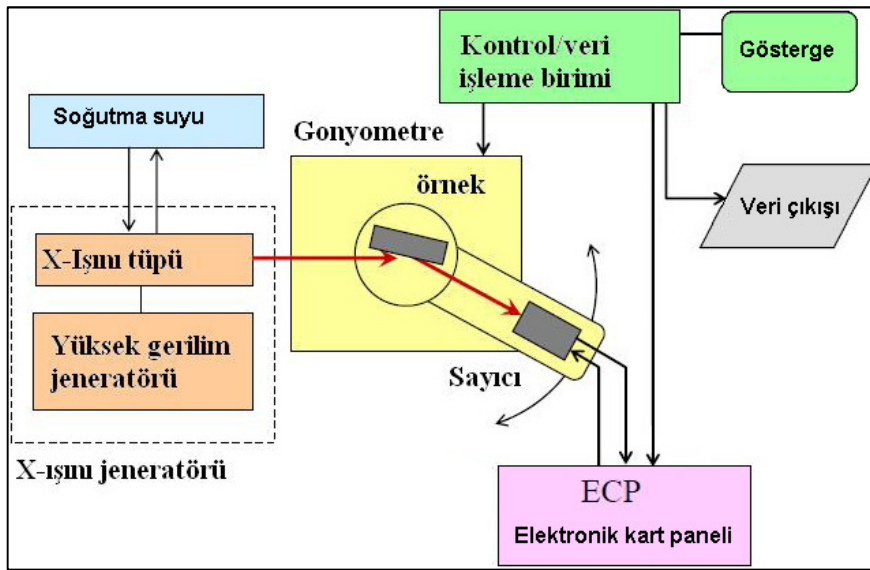


Şekil 4.8. X-ışını kırınım düzeneği

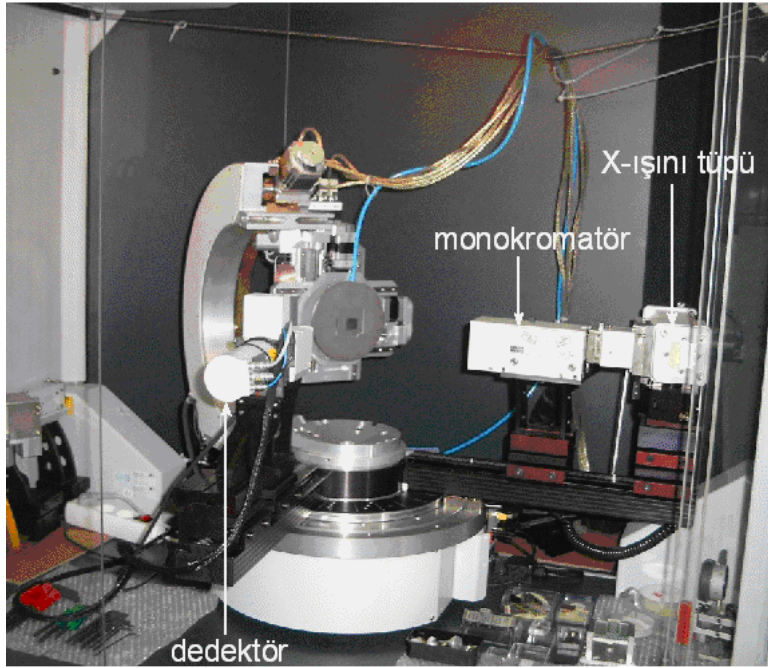
Şekil 4.8’de gösterildiği üzere gelen ışın demeti ile numune arasındaki açı ω ve 2θ ise gelen ışın demeti ile kırınımına uğramış demet arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır. XRD ölçüm çeşitlerinde bu tanımlamalar sıklıkla kullanılmaktadır. X-ışını demeti ilk olarak monokromatördeki yüksek kaliteli bir kristale çarparak kırınımına uğrar. Kırınan demet numune kristal üzerine düşer. Eğer iki kristal için Bragg açıları eşitse oldukça dar bir kırınım deseni gözlenir. Örnek kristalin geniş-aralıkta yapısal dizilimini veren rocking-eğrilerini elde etmek için örnek kristal küçük bir ω açısıyla döndürülür ve kırınan demet şiddeti kaydedilir. Yüksek kaliteli kristaller birkaç arc-saniye genişliğinde piklere sahiptirler. Bu teknik, özellikle kalın alttaşlar üzerine büyütülmüş ince katman filmler için yararlıdır. Genellikle, bu durumlarda birisi alttaştan ve diğeri ise ince film katmanından gelen iki pik gözlenir. Alttaş ve ince katmanın Bragg yansımaları için $\Delta\omega$ farkı $\Delta\theta$ ve $\Delta\phi$ olmak üzere iki bileşen içermektedir. Alttaş ve katman için $\Delta d/d$ örgü düzlemleri

arasındaki fark Bragg açılarındaki $\Delta\theta$ farkına neden olur. $\Delta\omega$ 'nın ikinci bileşeni $\Delta\phi$ ise ince katmanın ve alttaş örgü düzlemlerinin eğiklikleri arasındaki farktır [97].

Bu tez çalışmasında yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı deneyinde ölçüm için Bruker D8 Discover XRD cihazı kullanıldı. Bu cihaz Ge (220) yönelimli dört kristal monokromatöre ve X-ışını kaynağı olarak $\text{CuK}\alpha_1$ 'e ($1.540 \text{ \AA}$) sahiptir. Cihazın genel çalışmasını gösteren blok şeması Şekil 4.9'da ve görüntüsü Resim 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.9. X-ışını kırınımı ölçüm cihazına ait blok şeması

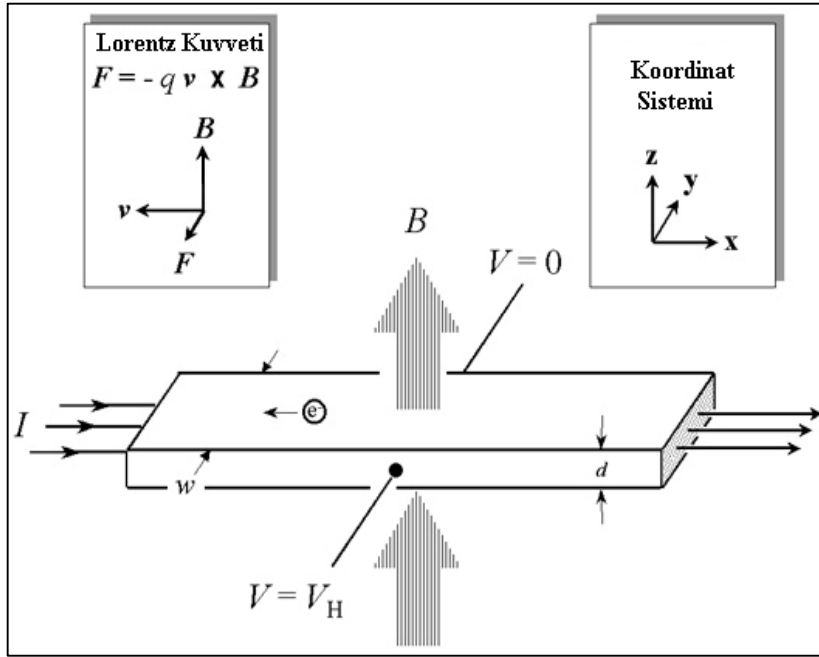


Resim 4.3. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü

4.1.4. Hall etkisi ve ölçüm sistemi

1879 yılında Edwin Hall, akım taşıyan bir metal levhaya akım yönüne dik doğrultuda bir manyetik alan uygulandığında levhanın diğer iki kenarı arasında bir potansiyel farkı meydana geldiğini gözlemlemiştir [98]. Bu olaya Hall Olayı veya Hall Etkisi denmiştir. Hall Etkisi ölçümü günümüzde herhangi bir yarıiletken malzemenin elektriksel karakterizasyonunda standart olarak kullanılan yöntem olmuştur.

Taşıyıcı yoğunluğu n ve mobilite μ parametreleri Hall etkisi ölçümü ile elde edilmektedir. Hall etkisinin fiziksel temeli aslında Lorentz kuvvetidir. Bir elektron uygulanan manyetik alana dik olarak hareket ederse hem hareket hem de manyetik alana dik olacak şekilde bir manyetik kuvvete maruz kalır. Bu kuvvet etkisiyle elektron sapar. Sapan bu elektronlar bir elektrik alan oluşturur. Oluşan bu elektrik alan etkisiyle de bir elektriksel kuvvet oluşur. Bu durum Şekil 4.10'da gösterildi.



Şekil 4.10. Manyetik alan altında elektronların hareketi

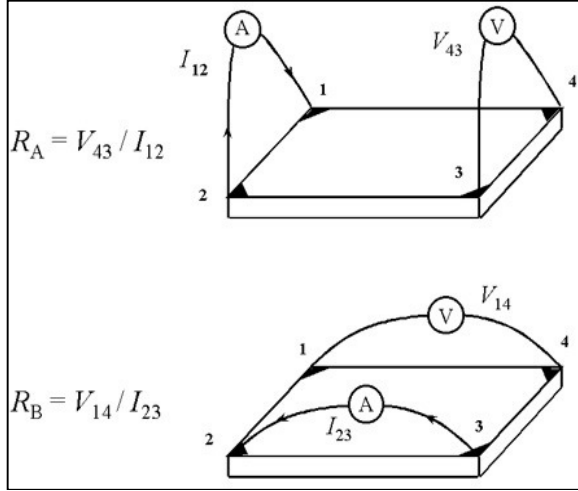
Şekil 4.10'da x eksenini boyunca soldan sağa doğru sabit bir I akımının aktığını ve z-yönünde bir manyetik alan olduğunu kabul ediyoruz. Elektronlar Lorentz kuvvetine maruz kalması nedeniyle başlangıçta akım yönünde giderken daha sonra negatif y-yönünde hareket etmeye ve yarıiletkenin her iki tarafında bir yük birikmesine neden olacaktır. Bu yük birikimi Hall voltajı denilen bir voltaj oluşturur ve yarıiletkenin iki tarafı boyunca bir potansiyel düşmesi meydana getirir. Hall voltajı V_H ile gösterilir ve büyüklüğü IB/nqd' ye eşittir. Burada I akım, B manyetik alan, d örneğin kalınlığı ve q elektronun yüküdür. Bazı durumlarda katman veya yüzey yoğunluğu ($n_s=nd$) hacim yük yoğunluğunun yerine kullanmak daha uygun olabilir. Bu durumda:

$$n_s = \frac{IB}{q|V_H|} \quad (4.2)$$

Eşitliği elde edilir. Hall voltajının ölçülmesiyle ve I , B ve q niceliklerinin bilinmesiyle yarıiletken içindeki n_s katman taşıyıcı yoğunluğunu belirleyebiliriz. Yarıiletkenin katman direnci R_s Van der Pauw öz direnç ölçüm tekniğiyle belirlenebilir [99]. Katman direnci, hem katman yoğunluğu hem de mobilitesi içerdiği için aşağıdaki eşitlikten Hall mobilitesi elde edilebilir.

$$\mu = |V_H| / R_s IB = 1 / q n_s R_s \quad (4.3)$$

Eğer iletken katmanın kalınlığı d bilirse hacim öz direnci ($r=R_s d$) ve hacim yoğunluğu ($n=n_s/d$) elde edilir.



Şekil 4.11. Van der Pauw ölçüm tekniği

Mobilite μ ve katman yoğunluğu n_s ' yi belirleyebilmek için öz direnç ölçümünün ve Hall ölçümünün yapılması gerekmektedir. Bu bölümde tartışılacak olan Van der Pauw tekniği uygun bir teknik olması nedeniyle özellikle homojen numunelerin öz direnç ölçümlerini yapmak için kullanılır. Bu teknik kısaca şöyledir. Numunenin tercihen köşelerine 4 adet küçük boyutlarda ohmik kontak alınır. Bu durum Şekil 4.11'de dikdörtgen biçimli Van der Pauw kontakları için gösterilmiştir.

Öz direnç ölçümünün amacı katman direnci R_s ' yi belirlemektir. Van der Pauw, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi iki terminal ucla ilgili olarak iki karakteristik R_A ve R_B dirençlerini ifade etti. R_A ve R_B katman direnci R_s ile ilgilidir ve Van der Pauw denkleminde yerine yazılarak

$$\exp(-\pi R_A / R_s) + \exp(-\pi R_B / R_s) = 1 \quad (4.4)$$

Eşitlik R_s için nümerik olarak çözülür. Hacim elektriksel öz direnci ρ ,

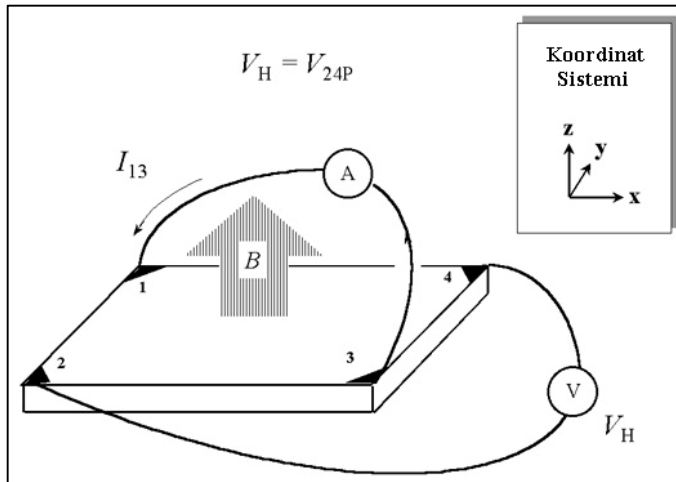
$$\rho = R_s \times d \quad (4.5)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

İki karakteristik direnci hesaplayabilmek için dc I akımı kontak 1 ve kontak 2 boyunca uygulanarak kontak 3 ve kontak 4' ten V_{43} voltajı ölçülür. Bu durum Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

V_{43} voltajı ölçüldükten sonra tekrardan I akımı kontak 2 ve kontak 3' e uygulanıp kontak 1 ve kontak 4' ten V_{14} voltajı ölçülür. Bu ölçümlerden sonra R_A ve R_B dirençleri aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

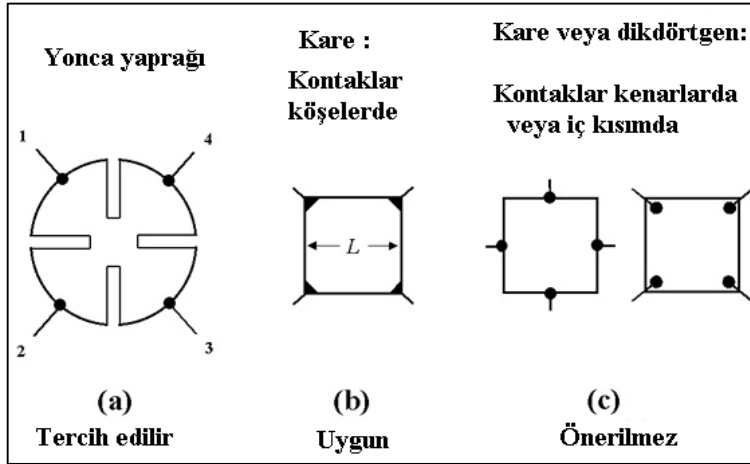
$$\begin{aligned} R_A &= V_{43} / I_{12} \\ R_B &= V_{14} / I_{23} \end{aligned} \quad (4.6)$$



Şekil 4.12. Karakteristik dirençlerin belirlenmesi için kontaklara uygulanan akım ve voltaj bağlantıları

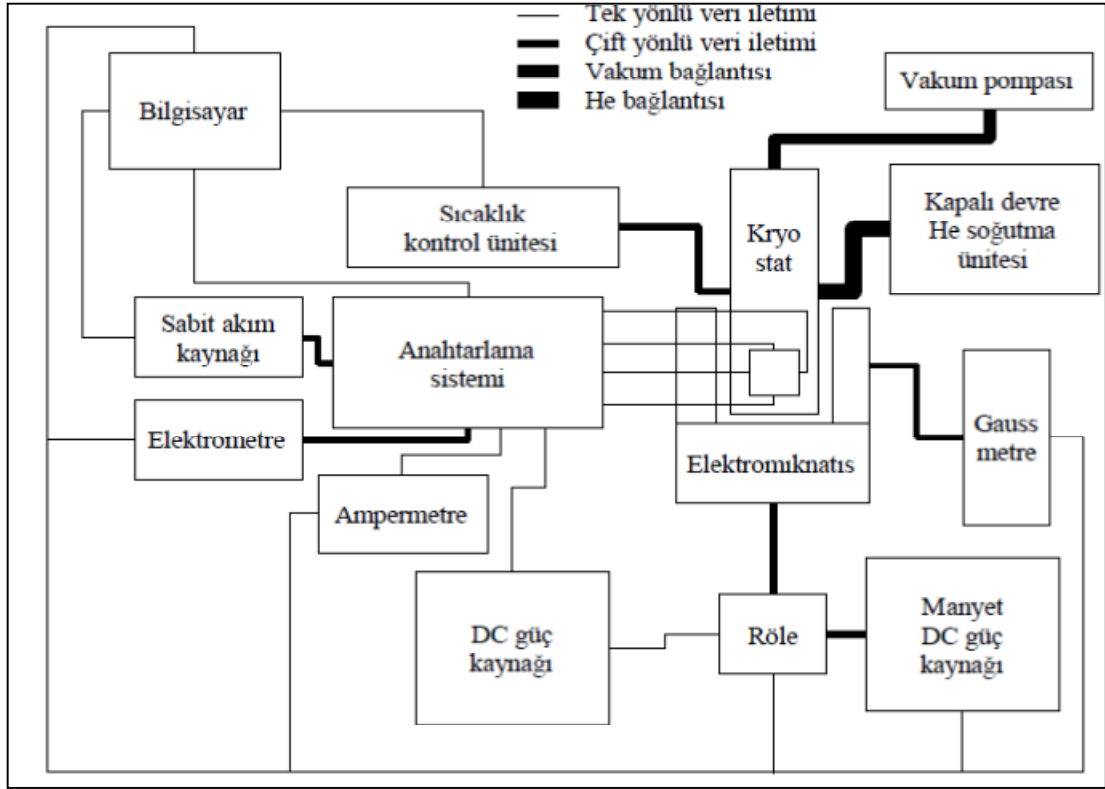
Van der Pauw tekniğinde Hall ölçümünün amacı, V_H Hall voltajının ölçülmesiyle katman taşıyıcı yoğunluğu n_s 'i elde etmektir. Hall voltaj ölçümü, sabit bir I akımı ve örneğe dik olarak uygulanan sabit bir B manyetik alan altında birkaç dizi voltaj ölçümlerinden oluşmaktadır. Şekil 4.12'de gösterilen bağlantılara sahip numune Hall

ölçümleri için kullanılabilir. Hall voltajını V_H ölçmek için, bir I akımı kontak 1 ve kontak 3 boyunca karşılıklı olarak uygulanır ve Hall voltajı kontak 2 ve kontak 4 arasından $V_H (=V_{24})$ ölçülür. Bir kez Hall voltajı belirlendikten sonra katman taşıyıcı yoğunluğu n_s Eşitlik (4.1) ile hesaplanabilir.



Şekil 4.13. Hall ölçümünde çeşitli numune geometrileri

Hall ölçümü alınırken mümkün olduğu kadar sağlanması gerekli bazı koşullar bulunmaktadır. Bunlar kısaca; ohmik kontakların kalitesi ve boyutları [100], örneğin homojenliği ve kalınlığının tam olarak bilinmesi ve fotoiletkenlik be fotovoltajik etkilerin minimize edilmesi için Hall ölçümünün karanlık ortamda alınması. Ayrıca örneğin boyutları kontak boyutlarına ve örneğin kalınlığına kıyasla büyük olmalıdır. Son olarak numune sıcaklığını, manyetik alan şiddetini, elektrik akımını ve voltajını doğru bir şekilde ölçebilecek bir düzeneğin olması gerekmektedir. Hall ölçümünün yapılacağı numunelerin hangi uygun geometrilerde bulunması gerektiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Hall ölçüm sisteminin blok diyagramı

Bu çalışmada büyütülen GaN HEMT numuneleri kare şeklinde yaklaşık $7 \times 7 \text{ mm}^2$ olarak kesilmiş, numunelerin dört köşesine metalizasyon ve tavlama ile Ohmik kontaklar hazırlanmıştır. Hazırlanan kontaklar üzerinden Van der Pauw yöntemi kullanılarak Hall etkisi ölçümleri yapılmıştır. Bu tez çalışmasında yapılan ölçümlerde yüksek empedans girişli Lakeshore 7700 serisi Hall ölçüm sistemi kullanıldı. Sistem sıcaklığı, kapalı devre helyum soğutması ile sağlandı. Sistemin blok diyagramı genel olarak Şekil 4.14’ te verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi sabit akım kaynağı, elektrometre, çift kanallı sıcaklık kontrol ünitesi, gaussmetre ve elektromıknatıs güç kaynağı bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Bu cihaz bilgisayarla kontrol edilerek numuneleri istenilen sıcaklık ve manyetik alana getirir ve öz direnç ve Hall ölçümlerini her manyetik alan ve sıcaklık adımında toplam 16 kere yapar. Bilgisayar, öz direnç (ρ), Hall katsayısı (R_H), Hall mobilitesi (μ_H) ve Hall taşıyıcı yoğunluklarını (n_H) hesaplar ve bir veri dosyası elde edilir. Lakeshore 7700 serisi Hall ölçüm sisteminin genel görüntüsü Resim 4.4’te gösterilmektedir.



Resim 4.4. Lakeshore 7700 serisi Yüksek Empedans Hall etkisi ölçüm sistemi

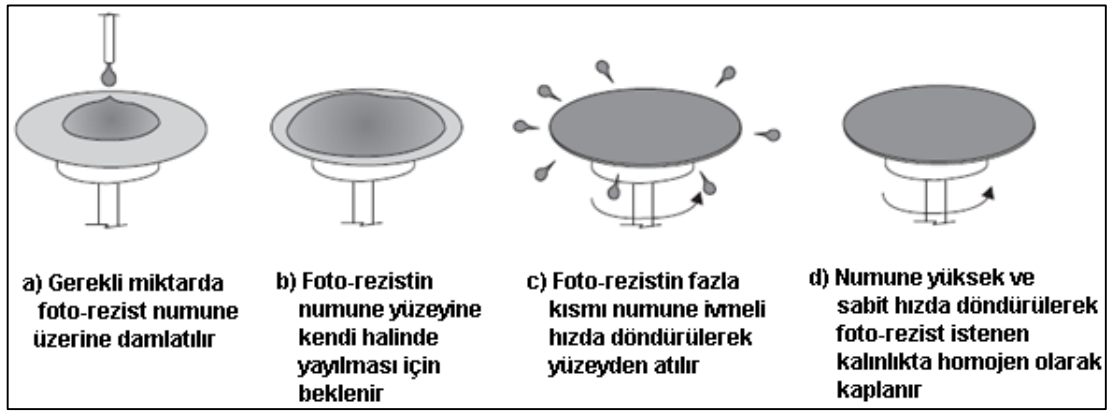
4.2. GaN Temelli HEMT Aygıt Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri

Bu alt bölümde GaN temelli HEMT aygıt üretim ve karakterizasyonunda kullanılan Optik ve Elektron Demeti Litografi Sistemleri, Metal Kaplama Sistemi, Kuru Aşındırma Sistemi, Hızlı Tavlama Sistemi, DC Ölçüm Sistemi ve RF Ölçüm Sistemi anlatılacaktır.

4.2.1. Optik litografi

Litografi işlemi, istenilen geometrik şekillerin yonga üzerinde oluşturulmasını sağlayan yarıiletken aygıt üretimindeki en kritik prosestir. Her litografi işleminde “rezist” denilen ve belli koşullarda ancak bağlarını koparan özel bir kimyasal çözelti kullanımı gerekmektedir. Bu tez çalışmasında optik litografi ve elektron demeti litografisi olmak üzere iki farklı litografi tekniği kullanılmıştır. Bu kısımda optik litografiye yer verilecektir.

Optik litografi tekniğinde, UV (mor ötesi) ışığa karşı dirençli olan ve foto-rezist olarak adlandırılan rezist malzemesi gerekli örüntüleri oluşturmak için kullanılmaktadır. Optik litografi işleminin temel basamakları yüzey temizliği, foto-rezist kaplama, hafif ısıtma işlemi, foto-maske hizalama, UV pozlama, rezist çözme olarak sıralanabilir. Foto-rezist kaplama öncesinde numuneler standart yonga temizlik işlemine tabi tutulurlar. Foto-rezist kaplama işlemi döndürücü (spinner) denilen bir cihaz yardımıyla yapılmaktadır. Bu kaplama işleminin basamakları Şekil 4.15'teki çizimle gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Döndürücü cihazda foto-rezist kaplama adımları

Yeterince uzun döndürme süreleri için kaplanan foto-rezist kalınlığı şu şekilde hesaplanabilir [101]:

$$t = k \cdot \frac{p^2}{w^{1/2}} \quad (4.7)$$

Eşitlik (4.7)'de k değeri 80-100 civarı olan döndürücü sabiti, p foto-rezistteki katı içeriğinin yüzdesi ve w döndürücünün rpm/1000 türünden dönme hızıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan Specialty Coating SystemsTM marka döndürücü cihazı Resim 4.5'te gösterilmektedir.



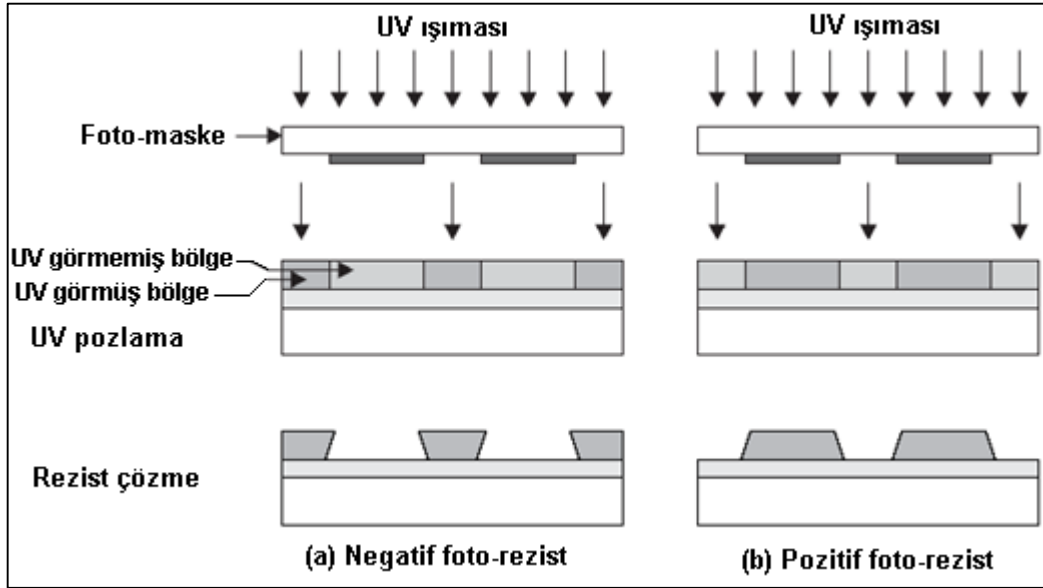
Resim 4.5. Specialty Coating Systems marka döndürücü cihazının genel görüntüsü

Kaplama işleminin ardından foto-rezisti yoğun hale getirmek amacıyla ısıtıcı cihaz üzerinde hafif ısıl işlem (80-100 °C’de 40-60 saniye) uygulanır. Numune üzerine istenen örüntüleri çıkarmak için kuarz tabanlı krom kaplı foto-maske kullanılır. Numune üzerinde önceden tanımlı hizalama işaretleri ile foto-maskedeki hizalama işaretleri uygun şekilde kullanılarak numune üzerinde istenen şekillerin hizalaması yapılır. Hizalamanın doğru ve hassas bir şekilde yapılması üretim sonucunda çalışan aygıt sayısı açısından oldukça önemlidir. Maske hizalama ve UV pozlama işlemi için Resim 4.6’da gösterilen Bilkent Üniversitesi-Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’ndeki Karl Suss marka MA6 model UV litografi sistemi kullanılmıştır. Bu sistemde kontak (soft, hard, vakum) ve proximity olmak üzere iki temel UV pozlama türünü uygulamak mümkündür. Kullanılan optik dalga boyuna da bağlı olarak proximity modu için 2.5 μm ve vakum kontak modu için 1 μm altında desen çözünürlükleri elde edilebilmektedir.



Resim 4.6. Karl Suss MA6 model UV litografi sisteminin genel görüntüsü

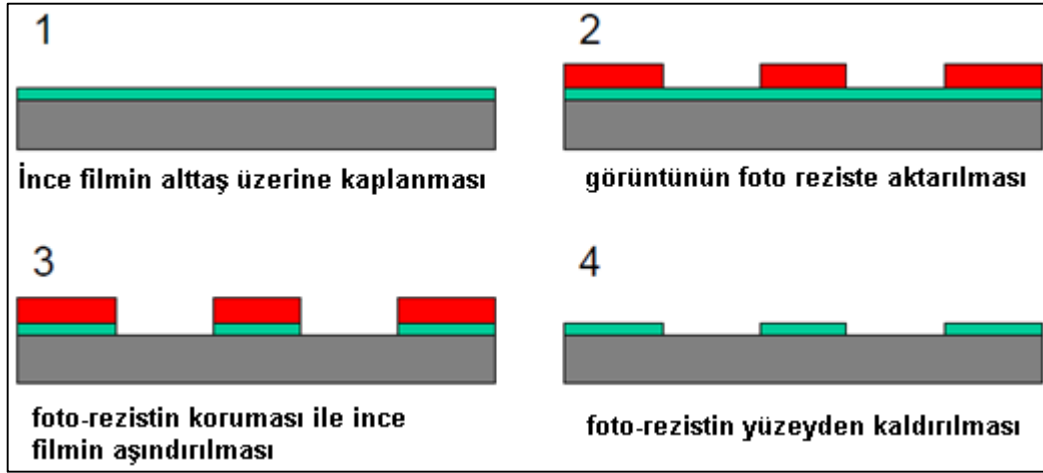
Litografi işlemlerinde kullanılan foto-rezistler pozitif ve negatif olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Pozitif foto-rezistler UV ışıma maruz kaldığında rezist çözücüde (developer) daha kolay çözülebilir hale gelmektedir. Negatif foto-rezistlerde ise UV ışıma maruz kalan bölgeler rezist çözücüye karşı daha dirençli hale gelir ve çözülmez. Pozitif ve negatif litografi için farklı foto-rezist profilleri elde edilmekte ve bunlar farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Örneğin, yüzeyde ada aşındırması yapmak için pozitif foto-rezist kullanmak bağlantı metallerinin sürekliliği açısından daha elverişli olmaktadır. Negatif foto-rezist ise metalizasyon işlemi ardından gereksiz metallerin kaldırılmasında kullanılmaktadır. Şekil 4.16'da pozitif ve negatif fotolitografi adımları özetlenmiş ve oluşturulan foto-rezist profilleri her iki durum için şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.16. (a) Pozitif litografi (b) Negatif litografi işlemlerinin şematik gösterimi

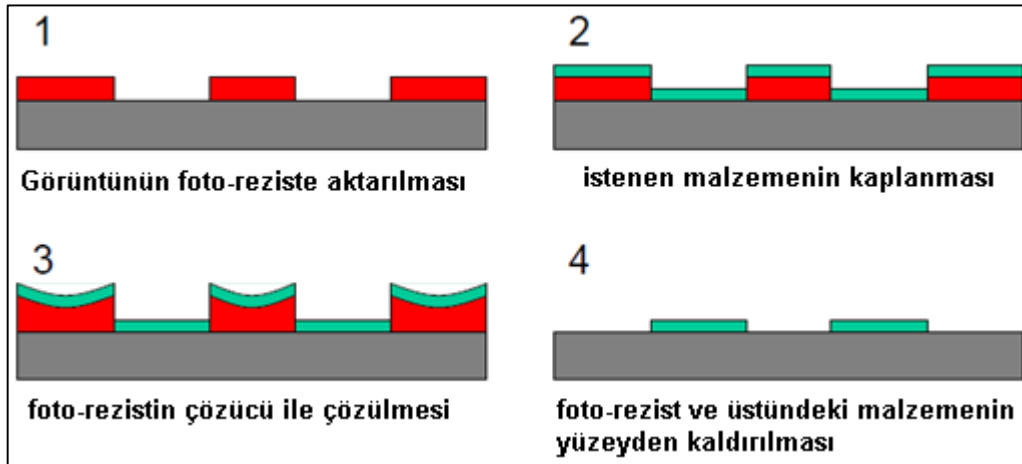
Foto-litografide rezist çözme işlemini müteakiben uzun ısıtma işlemi (hard-bake) uygulanmaktadır. Uzun ısıtma işlemi kullanılan foto-rezist türüne göre değişmekle birlikte genellikle 120 °C civarında yaklaşık 10 dakika uygulanmaktadır. Bu ısıtma işlemi foto-rezistin yapısını daha kararlı hale getirmekte ve vakum ortamındaki işlemlerde istenmeyen kalıntıları yüzeyden buharlaştırmaya yardımcıdır. Diğer yandan yapılan bu ısıtma işlemi foto-rezistin yüzeye gereğinden fazla yapışmasına neden olabilmekte ve rezistin sökülmesi gerektiği durumlar için sorun oluşturabilmektedir.

Uzun ısıtma işlemi olan ihtiyaç prosesi çeşidine bağlıdır. Temelde foto-litografi iki prosesi adımı için kullanılmaktadır. Bunlardan ilki foto-rezistin koruma görevi gördüğü epitaksiyel tabaka aşındırma prosesidir. Bu prosenin önemli adımları Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Tabaka aşındırma prosesinde uzun ısıtma işlemi ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.17. Epitaksiyel tabaka aşındırma prosesinin adımları

Foto-litografinin kullanıldığı diğer proses metalizasyon prosesidir. Metalizasyon prosesinde litografi ile metal kaplanacak yerler tanımlanır, bütün yüzey metal ile kaplanır ve son olarak foto-rezist ile birlikte istenmeyen metal kısımları yüzeyden çözücü yardımıyla kaldırılır. Metalizasyon prosesinin önemli adımları Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Bu proste foto-rezistin nispeten daha gevşek olması gerektiğinden, uzun ısı işlem uygulanmamaktadır.



Şekil 4.18. Metalizasyon prosesinin adımları

Bütün mikro-fabrikasyon proseslerinde foto-rezistlerin proses bitiminde yüzeyden kaldırılmaları gerekmektedir. Çünkü foto-rezist temelde bir feda katmanıdır. Diğer

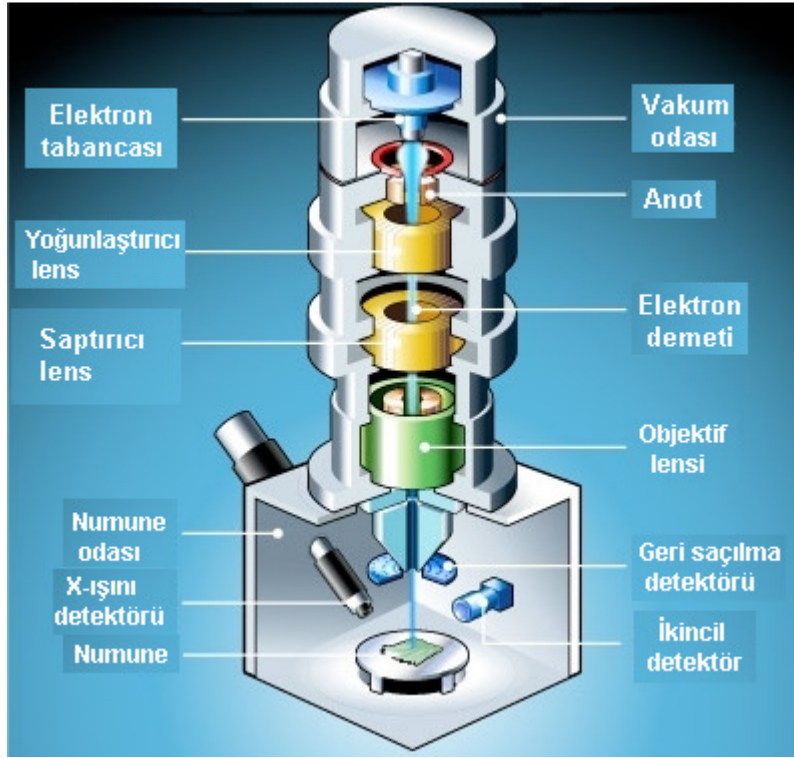
bir deyişle foto-rezist malzemesi epitaksiyel tabakalara şekil vermek veya onların üzerine başka malzemeleri desenli şekilde yerleştirmek için kullanılan ara ürünlerdir ve işleri bitince yüzeyden kaldırılmaları şarttır. Bu tez çalışmasında her türlü foto-rezist malzemesini temizlemek için aseton (CH_3COCH_3) çözeltisi kullanılmıştır. Ayrıca ultrasonik dalgalar üreterek numune yüzeyine çok sıkı yapışmış rezist malzemelerini parçalamaya yarayan ultrasonik titreştirici de kimyasal çözücüye yardımcı olarak kullanılmıştır.

4.2.2. Elektron demeti litografi

Optik litografide elde edilebilecek çözünürlük (r) UV ışımalarının dalga boyu ile şu şekilde sınırlanmıştır:

$$r = k_1 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad (4.8)$$

Eşitlik (4.8) Rayleigh bağıntısı olarak bilinir [102]. Bu eşitlikte k_1 uygulanan prosese özgü bir sabit, λ UV ışımının dalga boyu ve NA sistemin nümerik açıklığıdır. Çözünürlük limitini aşmak ve mikron-altı boyutlarda desen oluşturabilmek için elektron demet litografisi kullanılmaktadır. UV dalga boyları ile kıyaslandığında elektronların de-Broglie dalga boyu çok küçük olduğundan elektron demet litografisi oldukça yüksek çözünürlük (20 nm'den daha iyi) gerektiren uygulamalarda kullanılan etkin bir yöntem olmuştur. Elektron demet litografisi, nanoteknoloji araştırmalarında yaygın olarak kullanılan ve ileri nanolitografi yetenekleri sağlayan bir tekniktir. Optik litografideki durumun aksine maske kullanılmaz, bu da çok yüksek çözünürlüğe olanak sağlar. Bir elektron demeti litografisi sistemi birçok bileşenden oluşur. Bunlardan başlıcaları; elektron kaynağı, elektron optiği, saptırıcı lensler, desen işleyicisi (pattern processor), lazer interferometre kontrollü numune taşıyıcıdır. Şekil 4.19'da elektron demeti litografisi sisteminin temel bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Elektron demeti litografisi sisteminin temel bileşenleri

Desen işleyicisi ve lazer interferometre kontrollü numune taşıyıcısı haricindeki bileşenler taramalı elektron mikroskoplarında da mevcuttur. Bu nedenle bir taramalı elektron mikroskobu bu eklentilerle litografi cihazı haline getirilebilir. Bilgisayar destekli tasarım programları yardımıyla kullanıcı litografisini yapmak istediği desenleri belirler ve desen işleyicisi elektron demetini konumlandırmak için bu tasarımı elektronik sinyallere çevirir. Elektron demeti litografisinde kullanılacak malzemelere (silisyum, diğer yarı-iletken malzemeler, metal ya da cam vb.) ince bir rezist tabakası kaplanır. Bu rezist tabakasının elektron demetine maruz bırakılan kısımları rezistin pozitif ya da negatif özellikte olmasına bağlı olarak çözücüde çözünür ya da çözünmez. Bu şekilde desenler numune üzerinde elde edilir. Daha sonra bu desenler aşındırma ya da kaplanan bir başka malzemeyi yine çözücüler kullanarak kaldırma yöntemleriyle örneğe aktarılır.

Bu tez çalışmasında üretilen HEMT aygıtlarının kapı elektrotlarının uzunluğu 250-300 nm civarında üretilmesi hedeflenmiş ve bu nedenle Bilkent Üniversitesi-

Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde kurulu olan Raith E-Line model elektron demet litografi sistemi kullanılmıştır. Bu sistemin genel görüntüsü Resim 4.7'de gösterilmektedir. Önceki bölümde anlatıldığı üzere HEMT aygıtlarında yüksek frekans karakteristiklerinin iyi olması için kapı elektrotunun olabildiğince dar boyutlu ve düşük dirençli olması gerekmektedir. Bu çalışmada elektron demeti litografi için rezist malzemesi olarak poli-metil metakrilat (PMMA) pozitif rezisti kullanılmıştır. Rezist çözücü olarak ise metil-izobütil keton (MIBK) ve izo-propanol (IPA) karışımı kullanılmıştır.



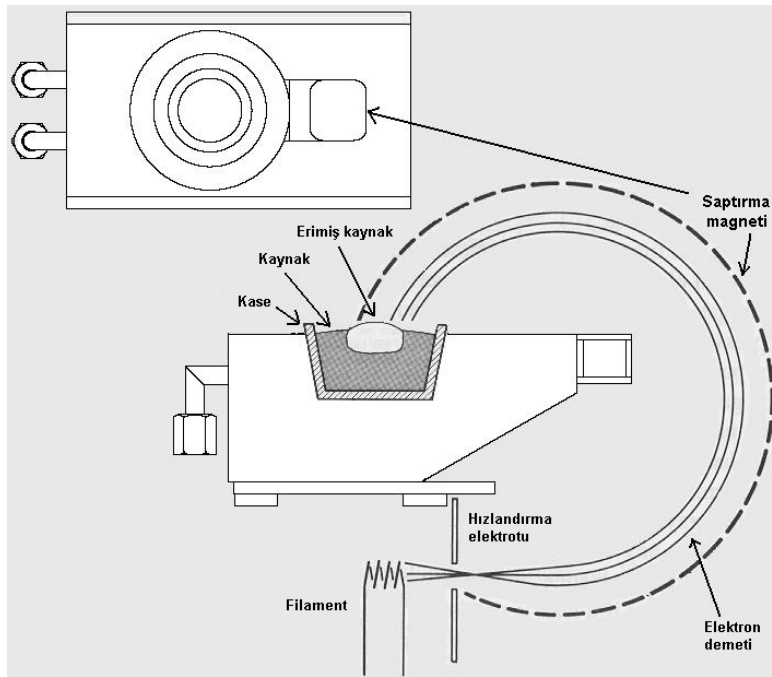
Resim 4.7. Raith E-line model elektron demet litografi sisteminin genel görüntüsü

4.2.3. Metal kaplama sistemi

GaN HEMT aygıt üretiminde gerekli ohmik, Schottky ve bağlantı metallerini büyütülen epitaksiyel yapılar üzerinde oluşturmak için yüksek kalitede metal kaplama işleminin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada elektron demet buharlaştırıcı sistemi kullanılarak metal kaplama adımları yapılmıştır.

Elektron demeti buharlaştırıcısı, Titanyum, Alüminyum, Nikel, Altın, Platin, Molibden vb. metalleri buharlaştırarak, numuneleri çeşitli nanoteknoloji

uygulamaları için istenen kalınlıkta kaplamaya yarayan bir sistemdir. Bu sistem ile kaplama işlemi, temel olarak, belirlenen bir hızlandırma gerilimi altında hızlandırılan elektronların oluşturduğu elektron demetinin, içinde buharlaştırılması istenen metalin bulunduğu kaseye düşürülmesiyle yapılır. Kase içindeki metal üzerine düşürülen elektron demeti enerjisini metale aktararak bu metalin buharlaşmasına neden olmaktadır. Buharlaşan metal, numune taşıyıcıya önceden yüklenmiş olan numunelere vakum ortamında yapışarak kaplamaya başlar. Elektron demeti buharlaştırıcı sisteminin temel çalışma prensibi Şekil 4.20’de gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Elektron demeti buharlaştırıcı sisteminin temel çalışma prensibi

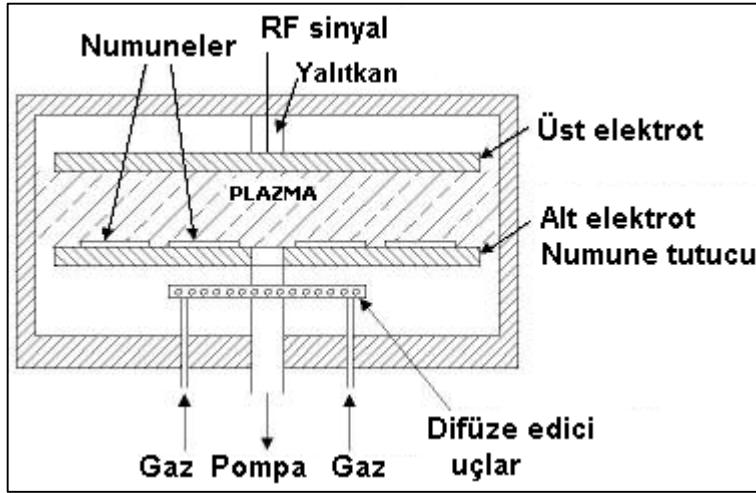
Metal kaplamada kullanılan Oerlikon-Leybold Univex 350 model metal kaplama sisteminin genel görüntüsü Resim 4.8’de gösterilmektedir.



Resim 4.8. Oerlikon Leybold Vacuum Univex 350 model metal kaplama sisteminin genel görüntüsü

4.2.4. Kuru aşındırma sistemi

GaN HEMT aygıt üretiminde aygıt izolasyonu önemli adımlardan biridir. Bu işlem sayesinde aynı yonga üzerindeki aygıtlar bir birinden izole edilmiş olurlar ve böylece her bir aygıtın ölçümü diğerlerinden bağımsız olarak yapılabilir. Bu işlemin yapılması litografi ve ardından aşındırma ile mümkün olmaktadır. Bu çalışmada kuru aşındırma sistemi kullanılmıştır. Kuru aşındırma sisteminin şematik çizimi Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. Kuru aşındırma sisteminin şematik çizimi

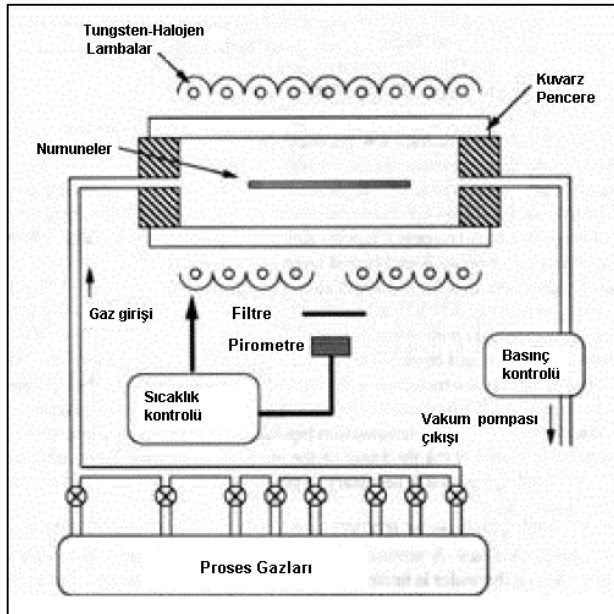
Kuru aşındırma yapılmak istenilen numuneler, içine çeşitli gazların gönderildiği vakum ortamına konulur. Gazların bulunduğu bu ortama RF sinyali uygulandığı zaman, gaz molekülleri gaz iyonlarına dönüşür ve plazma oluşturulur. Bu iyonlar numunelerin bulunduğu yüzeye doğru hızlandırıldıklarında numunenin yüzeyi ile etkileşirler. Bu etkileşim sırasında numune yüzeyindeki atomlar koparılırlar. Böylece numunenin plazma ile etkileşen bölümleri aşındırılmış olur. Bu çalışmada kullanılan SI-500 marka kuru aşındırma sisteminin genel görüntüsü Resim 4.9’da gösterilmektedir.



Resim 4.9. SI-500 ICP-RIE plazma kuru aşındırma sisteminin genel görüntüsü

4.2.5. Hızlı tavlama sistemi

GaN HEMT aygıt proseslerinde düşük kontak direncine sahip ohmik kontaklar üretmek aygıt performansı açısından oldukça önemlidir. Ohmik kontak metallerinin yarıiletken malzemeye düşük dirençli olarak kaplanması ve bu metallerin birbirleriyle alaşım oluşturarak 2DEG bölgesine difüze ettirilmesi gerekmektedir. Bu işlem hızlı tavlama sistemi ile yapılmaktadır. Hızlı tavlama işlemi ile alttaş üzerine büyütülmüş olan ince film yapılarının elektriksel özellikleri kısa sürede yüksek sıcaklıklara (~ 1000 °C) ulaşarak değiştirilebilmektedir. Farklı reçeteler hazırlanarak farklı tipte işlemler gerçekleştirilebilir. Örneğin; ince film ile metal kontaklar arası direncin düşürülmesi, yarıiletken yapı içerisinde bulunan katkıların aktifleştirilmesi, alttaş ile ince film veya ince filmler arası yüzey profilinin değiştirilmesi, iyon implantasyonu sonucu oluşan hasarları gidermek gibi işlemler yapılabilmektedir. Şekil 4.22’de hızlı tavlama sisteminin şematik çizimi gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Hızlı tavlama sisteminin şematik çizimi

Cihaz içerisinde bulunan halojen lambalar yardımı ile 200 °C/sn hız ile istenilen sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Ayrıca farklı gaz işlem hatları ile aynı cihaz için yapılacak işlemlere bağlı olarak farklı işlem gazları kullanılabilmektedir. Sıcaklık

kontrolcüsü ve işlemciler yardımı ile istenilen sıcaklıkta istenilen sürelerde numunelerin hızlı ısıtma işlemleri tamamlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan SSI Solaris-75 model hızlı tavlama sisteminin genel görüntüsü Resim 4.10'da gösterilmektedir.

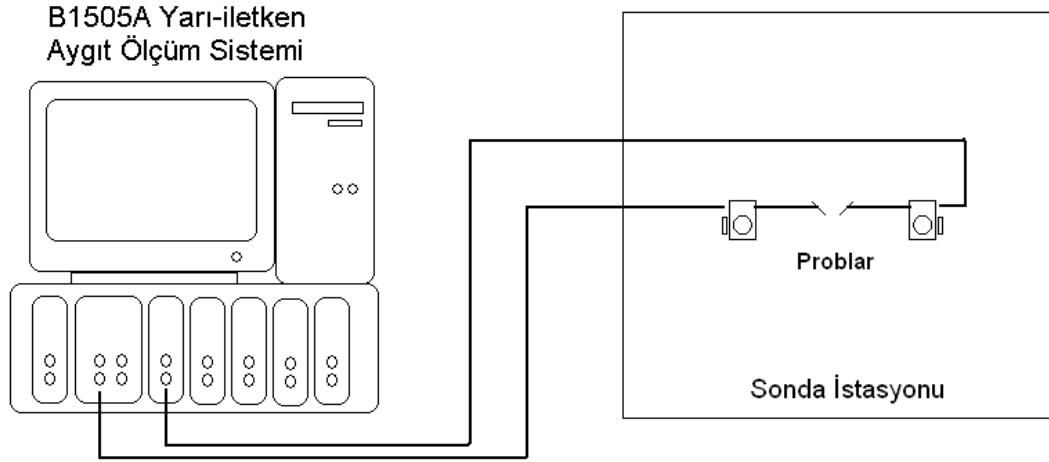


Resim 4.10. SSI Solaris-75 model hızlı tavlama sisteminin genel görüntüsü

4.2.6. DC ölçüm sistemi

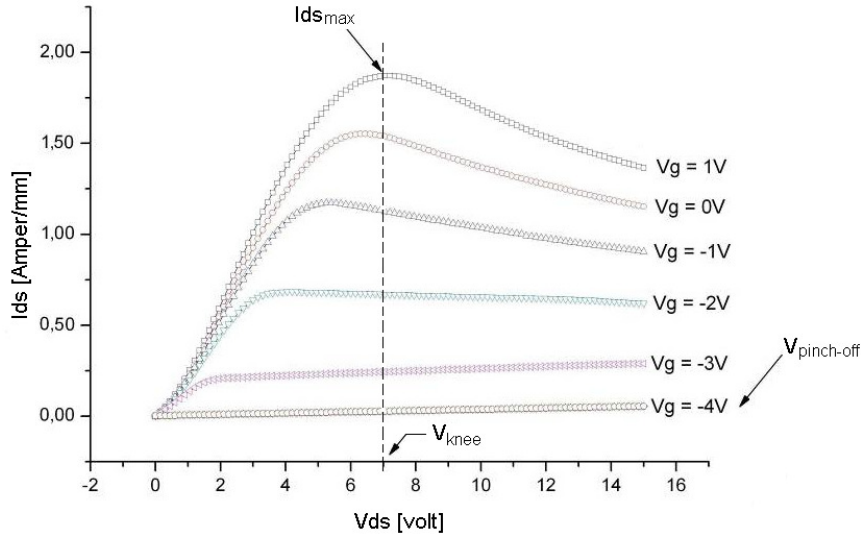
GaN HEMT aygıtlarının karakterizasyonu temelde iki farklı ölçümle gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki DC akım-voltaj (I-V) ölçümleri diğeri ise yüksek frekans parametrelerinin elde edildiği RF (Radyo Frekansı) ölçümlerdir. GaN HEMT aygıtının DC ölçümleri sonucunda kısılma voltajı ($V_{pinch-off}$), bükülme voltajı (V_{knee}), maksimum akaç akımı (I_{dsmax}), kırılma voltajı (V_{br}) ve DC geçiş iletkenliği (g_m) gibi önemli aygıt parametreleri elde edilmektedir. HEMT aygıtlarının DC ölçümü için B1505A Semiconductor Device Analyzer, Cascade M150 sonda istasyonu ve küçük probalar kullanılmaktadır. DC ölçümler için

kullanılan düzeneğin şematik çizimi Şekil 4.23'te, örnek bir I-V ölçüm grafiği ise Şekil 4.24'te gösterilmektedir.

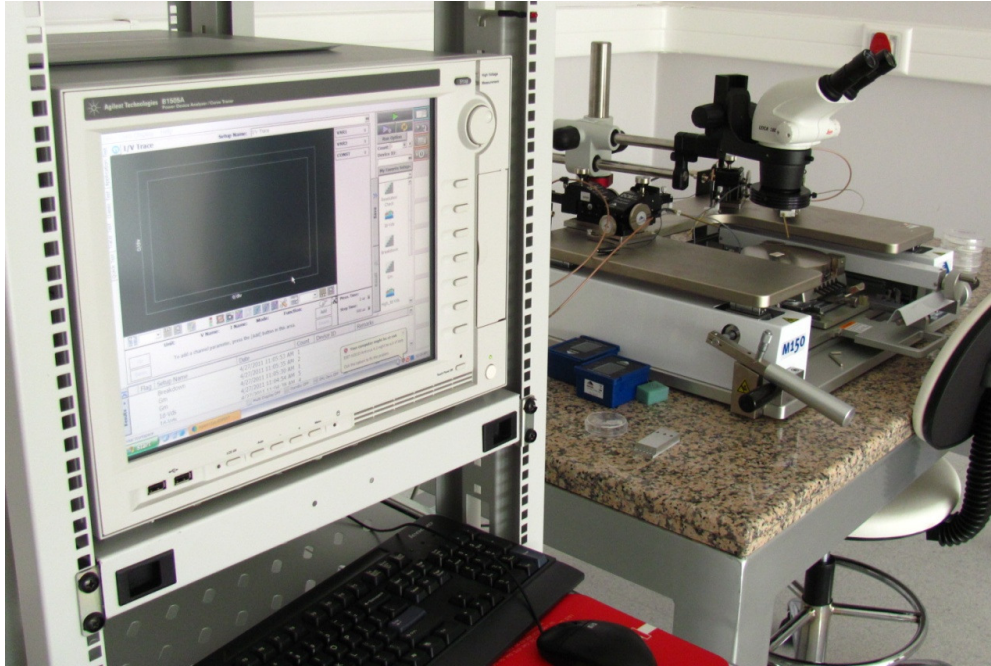


Şekil 4.23. HEMT aygıtları için kullanılan DC ölçüm sisteminin blok şeması

DC ölçümde cihaza Kapı (V_{gs}) ve Akaç (V_{ds}) gerilimlerinin değişim aralığı ve alınması istenen ölçüm nokta sayısı girilir. Ölçüm başlatılınca cihaz kapı geriliminin (V_{gs}) ilk değerini uygular ve akaç gerilimini (V_{ds}) önceden belirlenmiş olan başlangıç değerinden bitiş değerine kadar değiştirerek Akaç-Kaynak (I_{ds}) akımını ölçer. Daha sonra V_{gs} gerilimini değiştirip yeniden V_{ds} gerilimini başlangıç değerinden bitiş değerine kadar değiştirerek I_{ds} akımını ölçer ve ölçüm sonuçlarını bir grafik olarak gösterir. DC ölçüm sisteminin genel görüntüsü Resim 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.24. HEMT aygıtlarından alınan tipik bir DC I-V grafiği

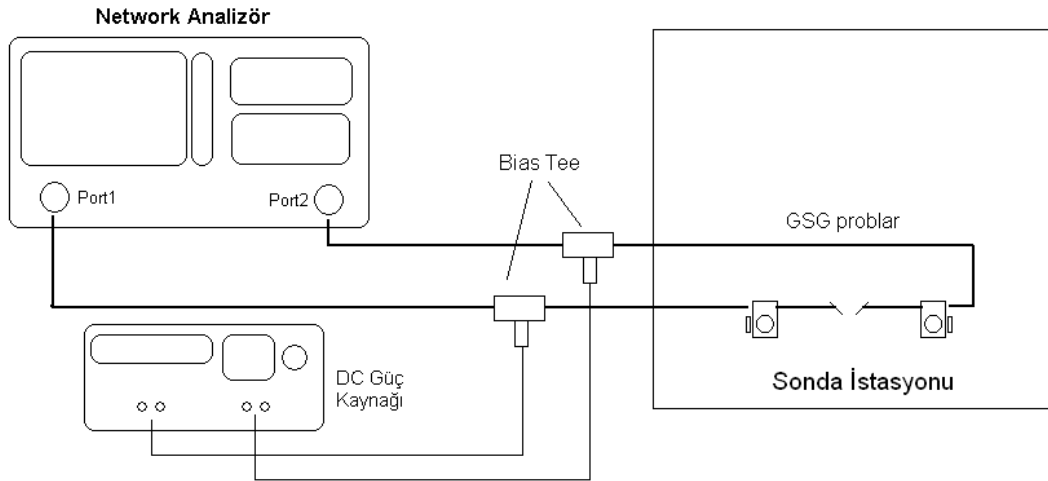


Resim 4.11. DC ölçüm sisteminin genel görüntüsü

4.2.7. RF ölçüm sistemi

GaN HEMT aygıtlarının performansını belirlemede kullanılan diğer bir ölçüm çeşidi RF ölçümüdür. RF ölçüm denildiğinde sadece sınırlı bir frekans bandı

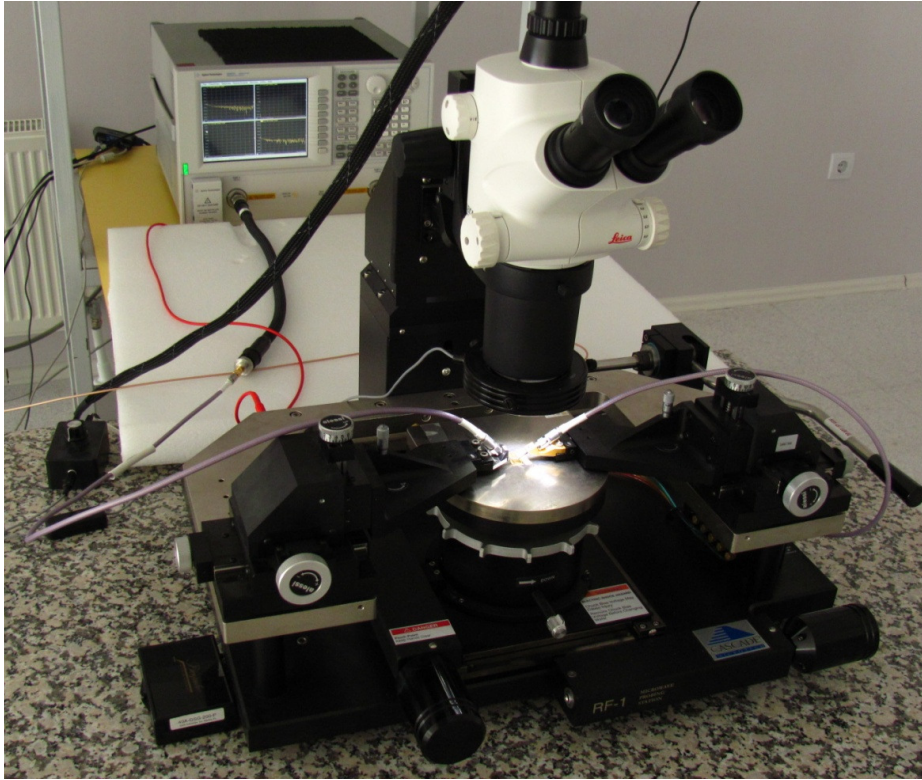
anlaşılmalıdır. Bu çalışmada yüksek frekans ölçümlerin hepsi RF ölçüm olarak adlandırılmıştır. RF ölçümlerde uygulanan sinyalin frekansına bağlı olarak elde edilen önemli aygıt parametreleri küçük sinyal kazancı S_{21} , akım kazancı H_{21} ve güç kazancı G_u 'dur. S_{21} parametresi aygıtın girişine uygulanan RF sinyalini ne kadar yükseltebileceğinin bir göstergesi olan küçük sinyal kazancını, H_{21} parametresi aygıtın sağlayabileceği akım kazancını ve G_u parametresi aygıtın sağlayabileceği güç kazancını belirlemektedir. Akım kazancının frekans eksenini kestiği frekans değerine akım kazancı kesim frekansı (f_t), güç kazancının frekans eksenini kestiği frekans değerine güç kazancı kesim frekansı (f_{max}) denilmektedir ve aygıtın yüksek frekans çalışmasındaki en önemli parametrelerdir. RF ölçümler için kullanılan düzeneğin şematik çizimi Şekil 4.25'te gösterilmektedir.



Şekil 4.25. HEMT aygıtları için kullanılan RF ölçüm sisteminin blok şeması

RF ölçümde Network analizör cihazına tarama yapılacak frekans aralığının başlangıç ve bitiş değerleri, uygulanacak RF gücü gibi bir takım parametreler girilir. Cihaz 1. porttan başlangıç frekansında bir sinyal uygular, yansıyan ve geçen sinyallerin fazını ve genliklerini ölçer. Sonra aynı sinyali 2. porttan uygular, yansıyan ve geçen sinyallerin fazını ve genliklerini ölçer. Daha sonra frekansı arttırarak bu işlemi tekrarlar. Bu şekilde frekansa karşı istenen parametreleri ekranına çizdirir. RF ölçümlerde transistörlere aynı zamanda DC bias gerilimleri de uygulanmalıdır. Bu bias gerilimleri standart bir DC güç kaynağı ve DC ile RF sinyallerin birbirine

karışmasını engelleyen bias-tee elemanları yardımıyla ölçülecek transistörlere uygulanır. RF ölçümler için 67 GHz'e kadar çalışan Agilent E8361C network analizör cihazı, Agilent E3631A DC güç kaynağı ve yüksek frekans ölçümleri için uygun olan mikrodalga probalar kullanılmıştır. RF ölçüm sisteminin genel görüntüsü Resim 4.12'de gösterilmektedir.

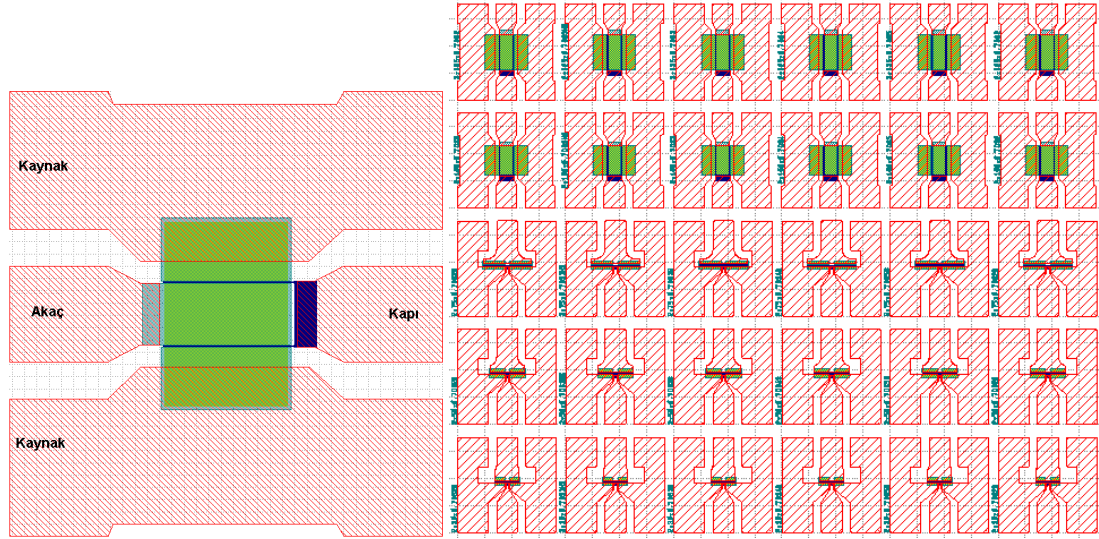


Resim 4.12. RF ölçüm sisteminin genel görüntüsü

4.3. GaN Temelli HEMT Aygıt Üretim Adımları

Bu alt bölümde GaN temelli HEMT aygıt üretim adımları temel olarak ele alınacaktır. Oldukça fazla ayrıntı içeren proses parametreleri Ek-1'de verilmiştir. Litografi kısmında anlatıldığı üzere HEMT aygıt fabrikasyonunun epitaksiyel numuneler üzerinde yapılabilmesi için öncelikle optik litografi adımı kullanılmak üzere aygıtın her adımının çizimlerini içeren bir foto-maskeye ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma prensibinin anlatıldığı bölümden hatırlanacağı üzere HEMT aygıtının çalışması için Akaç, Kaynak ve Kapı olmak üzere üç elektrot gereklidir. Bu düzeni

uygun şekilde bir arada gösteren tipik bir aygıt çizimi ve genel foto-maske görüntüsü Şekil 4-26’da gösterilmektedir.



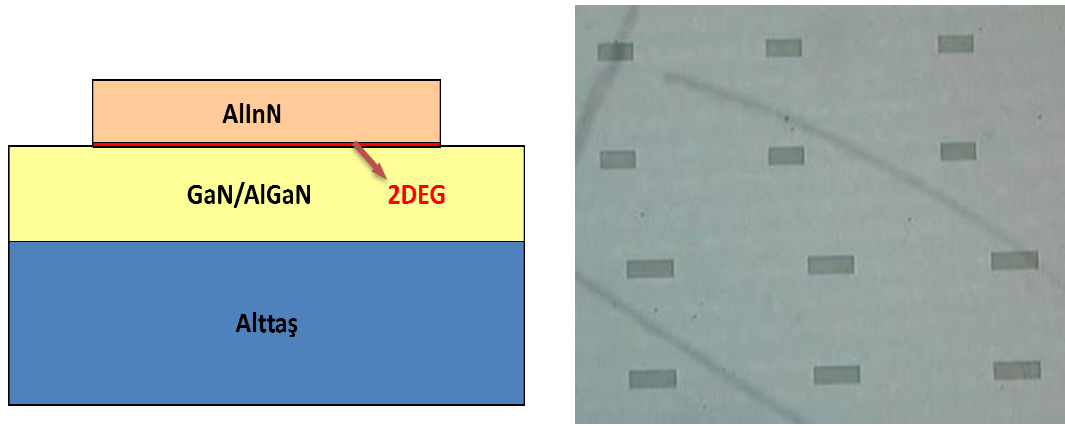
Şekil 4.26. HEMT aygıtları üretiminde kullanılan foto- maske çizimleri

Kapı ve akaç elektrotları paralel şekilde çoğaltılarak toplam akımı artırmak mümkün olmaktadır. Fakat bu durumda oluşan fazla kapasitans nedeniyle küçük sinyal kazancı ve kesim frekansları düşmektedir [103]. Bu çalışmada daha çok epitaksiyel yapıların aygıt performansı üzerindeki etkisi incelendiğinden en standart HEMT tasarımı temel alınmış ve her fabrikasyonda aynı foto-maske kullanılmıştır. Böylece farklı epitaksiyel numuneler üzerinde üretilen aygıtlar için procesten gelen varyasyonlar en aza indirilmiş ve gözlenen değişimlerin epitaksiyel yapıdan kaynaklandığına emin olunmuştur.

Temel olarak HEMT aygıtları 4 adımlı bir prosesin ardından test edilebilir noktaya gelmektedir. Bu adımlar şu şekilde sıralanabilir:

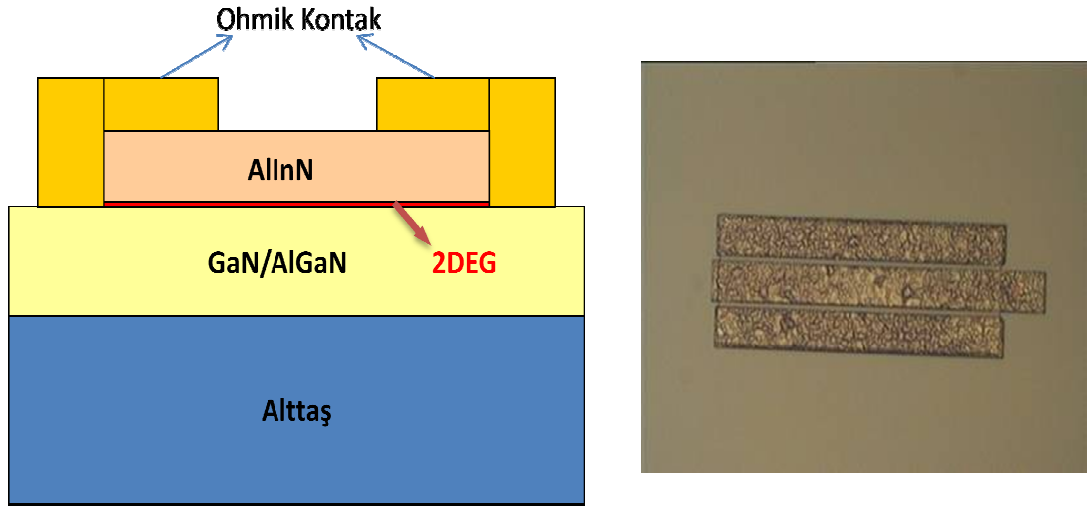
- i. Aygıt adacığı aşındırması
- ii. Ohmik kontak adımı
- iii. Kapı (gate) kontağı adımı
- iv. Dış bağlantı metali adımı

Aygıt adacığı aşındırması her bir aygıtı elektriksel olarak birbirinden ayırmak için, epitaksiyel yüzeyin aşındırılmasından ibaret olan bir işlemdir. Bu aşamada her bir aygıt için aktif bölgeler belirlenir ve geriye kalan bölgeler aygıtlar arasında parazitik iletim olmaması için aşındırılır. Aşındırma derinliğinin 2DEG'in olduğu bölgeyi geçmesi gerekmektedir. Aksi halde aygıtlar arasında 2DEG bağlantısı üzerinden parazitik iletim olur. Şekil 4.27'de aygıt adacığı aşındırması sonrası örneğin kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü gösterilmektedir.



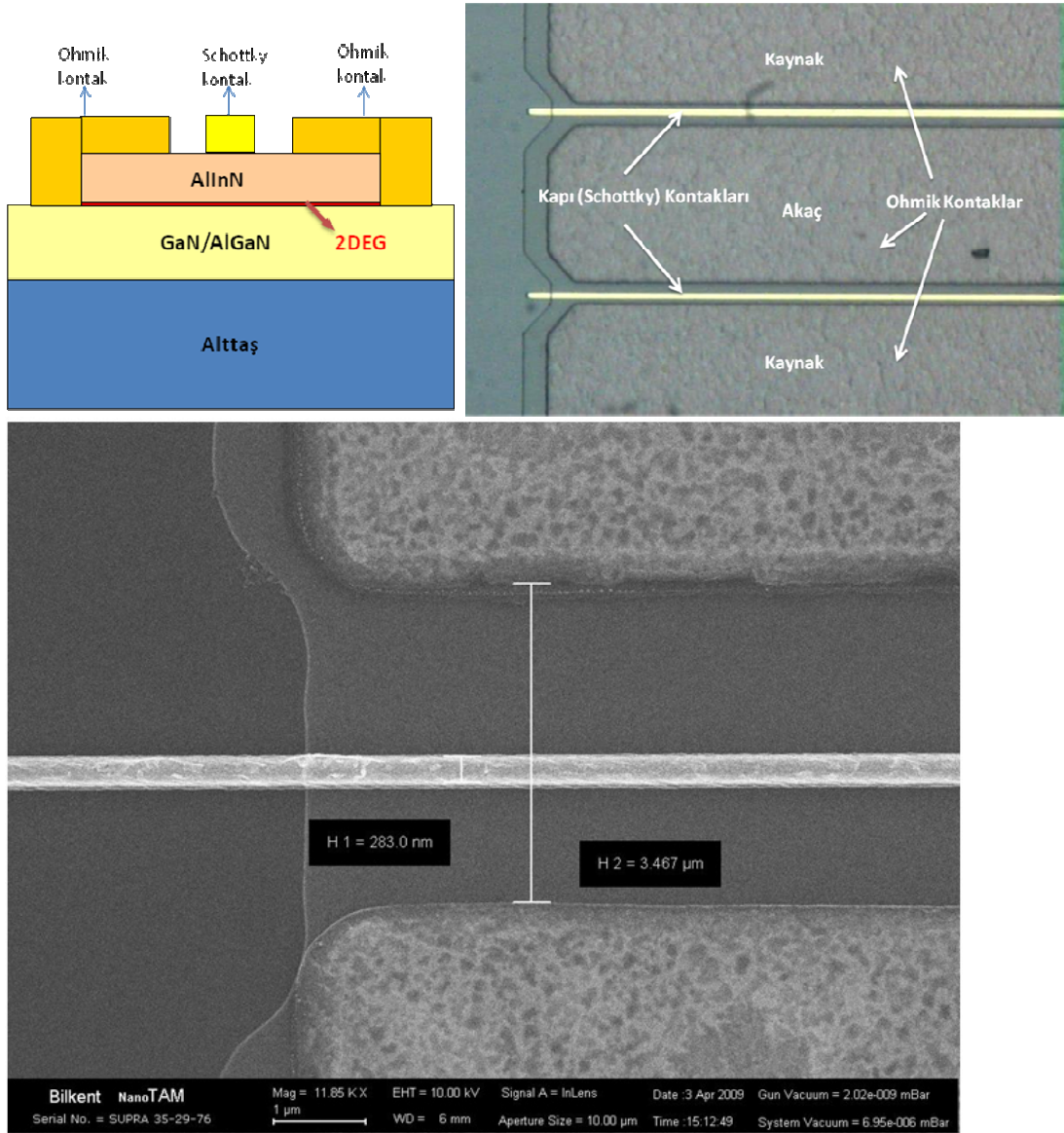
Şekil 4.27. Aygıt adacığı aşındırması sonrası örneğin kesit çizimi ve mikroskop görüntüsü

Ohmik kontak aşamasında aygıtın akaç (drain) ve kaynak (source) metalleri yapılmaktadır. Aygıtta voltaj uygulanabilmesi ve aygıttan yüksek akım akıtılabilmesi için çok düşük dirençli ohmik kontaklar yapılmalıdır. Ohmik metalizasyonunda Ti, Al, Ni ve Au metalleri kullanılmaktadır. Ayrıca uygulanan metallerin kendi arasında alaşım oluşturması ve alaşımın 2DEG bölgesine nüfuz edebilmesi için metal kaplama sonrası tavlama işlemi uygulanmaktadır. Şekil 4.28'de ohmik kontak adımı sonrası örneğin kesit görünümü ve mikroskop görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.28. Ohmik kontak adımı sonrası örneğin kesit görünümü ve mikroskop görüntüsü

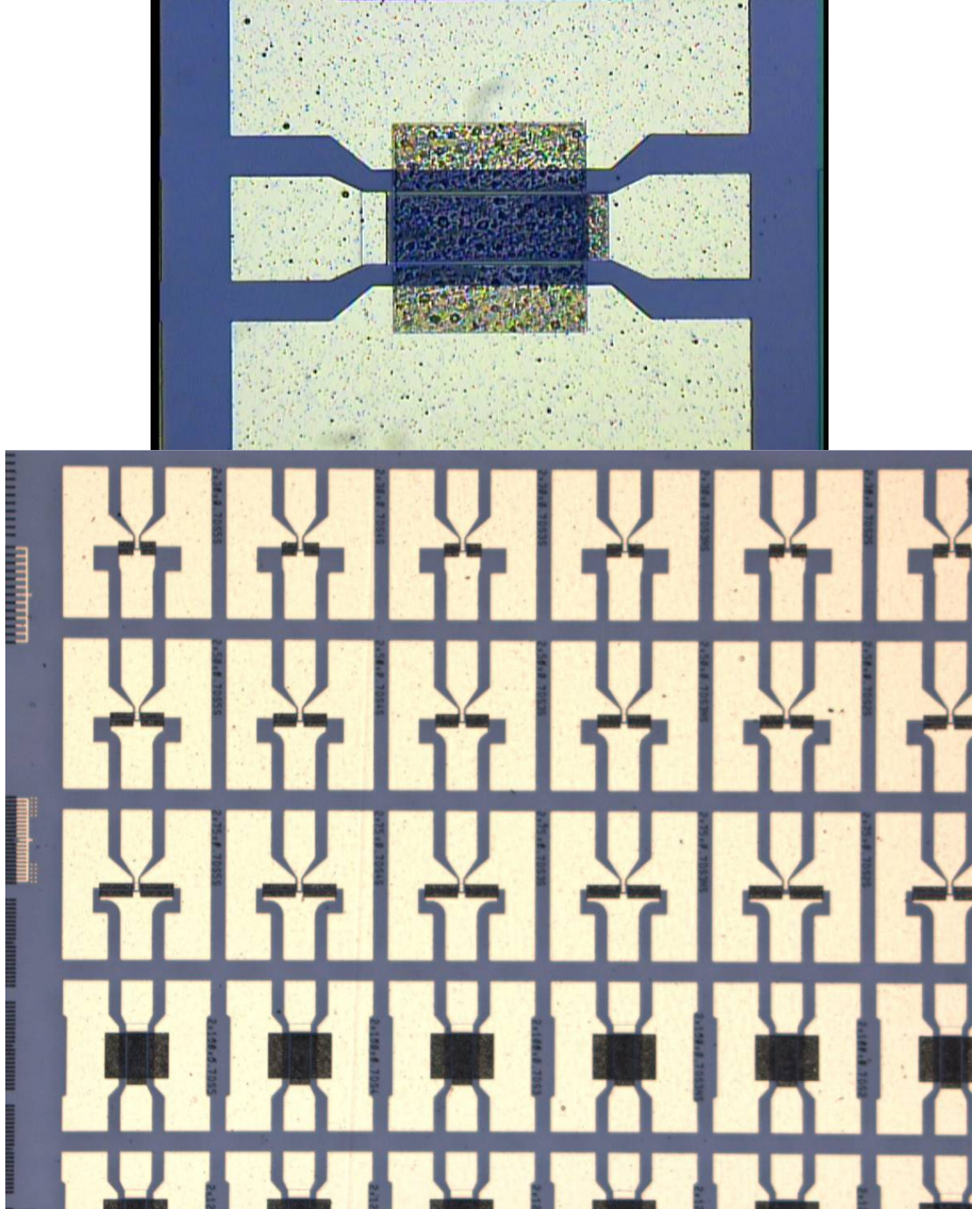
Ohmik kontakların yapılmasının ardından sıra kapı (gate) kontağı aşamasına gelmektedir. Kapı kontakları Schottky özelliğinde kontaklar olup engele belli bir metal-yarıiletken iş fonksiyonu ile bağlantı yaparlar. GaN temelli HEMT aygıtlarında kapı metali olarak Ni/Au metalleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kapı kontağı sayesinde 2DEG kanalındaki elektronlar kontrol edilerek I_{ds} akımı ayarlanabilmektedir. Bu kontakların boyutları aygıtın yüksek frekans çalışması açısından çok önemlidir. Kapı uzunluğu (gate length) kısaldıkça aygıtın kesim frekansları artmaktadır. Fakat çok kısa ($L_g < 100$ nm) kapı kontaklarının getirdiği yüksek seri direnç ve kısa kanal etkileri gibi bazı sorunlarla karşılaşmaktadır [104]. Bu tez çalışmasındaki HEMT proseslerinde genelde 250-300 nm uzunluğunda kapı kontakları elde edilmektedir. Kapı kontaklarının litografi aşaması diğer aşamalardan farklı olarak nanolitografi cihazı ile yapılmaktadır. Kapı metali kaplanması ardından elde edilen kesit çizimi, optik mikroskop ve SEM görüntüsü Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Kapı metali kaplanmasının ardından kesit çizimi, optik mikroskop görüntüsü ve SEM görüntüsü

Kapı metali sonrasında aygıtlar normalde fiziksel olarak transistör özelliğini kazanmışlardır fakat bu aygıtların ölçüm cihazlarına bağlantısını yapabilmek için daha büyük kontak alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dış bağlantı kontakları her bir ohmik ve schottky kontak üzerine denk gelecek şekilde hizalanır. Dış bağlantı metalleri düşük seri direnç oluşturması ve ölçüm aşamasında dayanıklı durması için diğer metallere göre daha kalın kaplanmaktadır. Dış bağlantı metali sonrası fabrikasyonu tamamlanmış bir transistöre ait mikroskop görüntüsü ve örneğin

üzerindeki genel görüntü Şekil 4.30’da gösterilmektedir. Bu adım sonrasında elde edilen transistör aygıtları ölçüme hazır hale gelmektedir.



Şekil 4.30. Dış bağlantı metali sonrası fabrikasyonu tamamlanmış bir transistöre ait mikroskop görüntüsü ve örneğin üzerindeki genel görüntü

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında AlGa_N ve AlIn_N engelli çoklu HEMT yapılarının epitaksiyel yapı tasarımları yapıldı. Tasarlanan yapılardan uygun olanlar MOCVD yöntemi ile büyütüldü. Büyütülen numunelerin yapısal ve elektriksel özellikleri incelendi. Büyütme çalışmaları için öncelikle Safir, SiC ve Silisyum altaşlar kullanıldı ve numunelerin karakterizasyonları gerçekleştirildi. Literatürde yeni çalışılmaya başlanan InGa_N arka engelli yapılar, AlIn_N engelli yapılar ve AlGa_N tampon tabakalı yapılar üretildi ve karakterize edildi. Yapısal incelemeler için AFM ve yüksek çözünürlüklü XRD tekniği, elektriksel analizler için sıcaklığa (30-300K) ve manyetik alana (0-1,4 Tesla) bağlı Hall ölçümleri kullanıldı. HEMT yapıları için önemli olan saçılma analizleri numunelere uygulandı ve etkin saçılma mekanizmaları belirlendi. Son olarak bu çalışmada uygulama açısından önemli olan HEMT aygıtlarının mikro-nano fabrikasyon teknikleri ile üretimi, DC ve RF ölçümler aracılığı ile karakterizasyonları yapıldı. Epitaksiyel yapıların aygıt performansı üzerindeki etkileri tartışıldı.

5.1. Safir, Silisyum ve SiC Altaşlar Üzerinde GaN HEMT Büyütme Çalışmaları

Bu kısımda farklı altaş malzemeleri üzerinde yapılan büyütme çalışmaları anlatılmaktadır. 2. kısımda altaş malzemelerinin özellikleri, avantaj ve dezavantajları ayrıntılı olarak verildi. Bu büyütmelerdeki amaç, farklı altaş malzemeleri üzerinde yapılan büyütmelerin HEMT yapılarına etkisini incelemek, ileriki çalışmalar için uygun altaş malzemesini ve büyütme koşullarını belirlemektir.

5.1.1. Safir altaş üzerinde GaN HEMT büyütülmesi ve karakterizasyonu

Safir hali hazırda GaN HEMT yapıları için en çok kullanılan altaş malzemesi olduğundan büyütmelere öncelikle bu malzeme ile başlandı. Safir üzerindeki büyütmeler için kullanılan epitaksiyel yapı Şekil 5.1’de verildi.

GaN (üst kontak katmanı) ~ 3 nm
AlGaIn (engel katmanı) ~ 30 nm
AlN (ara tabaka) 1-2 nm
GaN (tampon tabaka-4) ~ 140 nm
GaN (tampon tabaka-3) ~ 380 nm
GaN (tampon tabaka-2) ~ 750 nm
GaN (tampon tabaka-1) ~ 340 nm
HT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~ 800 nm
LT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~4 dakika
Safir alttaş

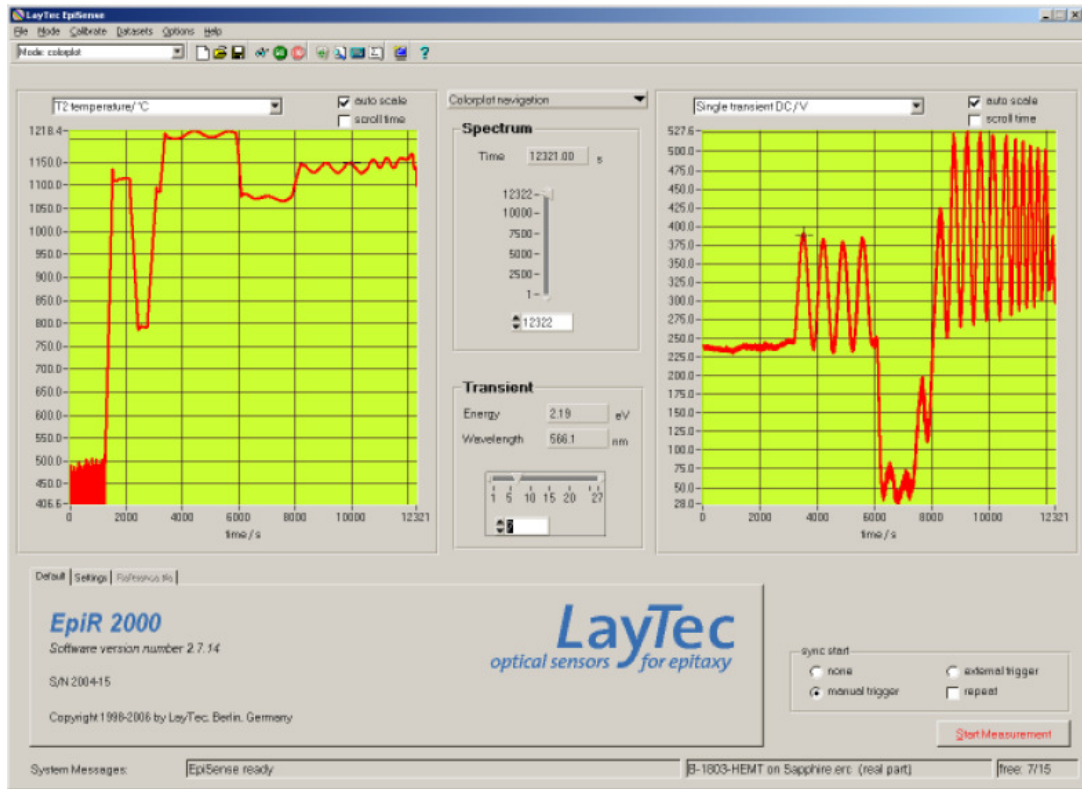
Şekil 5.1. Safir üzerinde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel tabakaları

Alttaş temizliği büyütme öncesi uygulanması gereken önemli bir ön işlemdir. Epitaksiyel büyütme öncesinde safir alttaş reaktöre yerleştirildikten sonra 10 dakika boyunca 1050 °C’de hidrojen akışı altında tutulmuş ve yüzeyinin temizlenmesi sağlandı. Bu temizleme işleminin bitiminde 20s boyunca 200 sccm NH₃ akışı verilerek 770 °C’de nitridasyon işlemi uygulandı. Bu büyütmede safir alttaş ile GaN tampon tabakası arasında düşük sıcaklık (LT) ve yüksek sıcaklık (HT) olmak üzere iki farklı çekirdeklenme tabakası büyütüldü. Çekirdeklenme tabakaları alttaş ile GaN tabakası arasındaki örgü sabiti ve ısıl genleşme katsayısı uyumsuzluklarından kaynaklı büyüme kusurlarını azaltmak ve yüksek dirençli tampon tabakaları elde edebilmek için çok büyük öneme sahiptir. Nitridasyon işleminin ardından sıcaklık 770 °C’de sabit tutularak 1000 sccm NH₃ ve 5 sccm TMAI akışında 4 dakika boyunca düşük sıcaklık AlN tabakası büyütüldü. Bu adım HT-AlN (yüksek sıcaklık) çekirdeklenme tabakası için hazırlık aşamasıdır ve HT-AlN çekirdeklenme tabakasındaki dislokasyon yoğunluğunun az olmasını sağlamaktadır. LT-AlN çekirdeklenme tabakasının büyütülmesini müteakiben sıcaklık 1155 °C’ye çıkartılmış ve reaktör basıncı 25 mbar’a getirildi. Belirtilen sıcaklık ve basınçta 40 sccm TMAI akışı verilmiş, NH₃ akışı ise 60 sn içinde 150 sccm’den 50 sccm’e düşürülerek 800 nm kalınlığında HT-AlN çekirdeklenme tabakası büyütüldü.

Al atomlarının alttaş yüzeyindeki hareketliliği çok düşük olduğundan kristal örgüde uygun yere bağlanamamaktadır. Bu nedenle Al atomlarının yeterli kinetik enerji kazanabilmeleri ve yüzeyde en kararlı noktaya bağ yapabilmelerinin sağlanabilmesi (kristal kalitesinin iyi olması) için yüksek büyütme sıcaklığı gereklidir. Ayrıca, HT-AlN tabakası büyütülürken 50 sccm Trimetil-indiyum (TMIn) akışı verildi. In atomları $T > 900$ °C'deki yüzeylere yüksek buharlaşma oranı nedeniyle tutunamamaktadır. Bu sıcaklıklarda In atomları yüksek kinetik enerjiye sahip olduklarından Al atomlarının yüzeydeki hareket kabiliyetini artırmakta fakat bu sıcaklıkta AlN kristal yapısına girememektedir. HT-AlN çekirdeklenme tabakasının aynı zamanda safir alttaştaki Oksijen atomlarına karşı bir engel olma görevi de vardır. GaN tampon tabakasına sızan Oksijen atomları GaN malzemesinin elektronik özelliklerini değiştirerek bu tabakayı düşük dirençli yapar. HT-AlN tabakası Oksijen atomlarının GaN tabakasına sızmasını engelleyerek GaN tampon tabakasının yüksek dirençli olmasını sağlar.

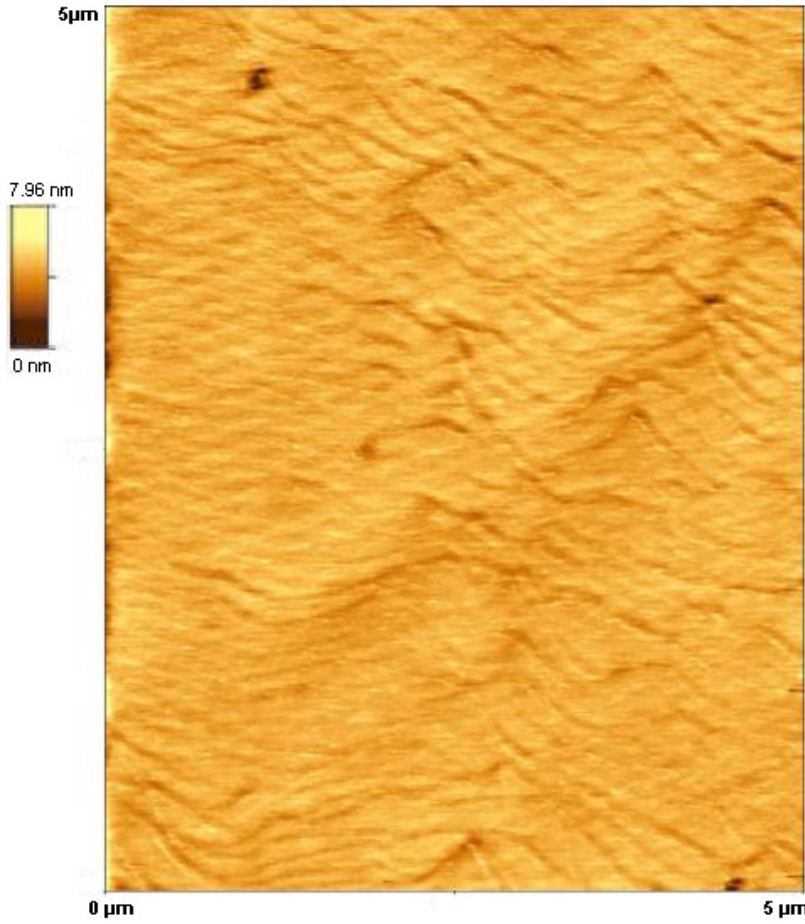
HT-AlN tabakasının ardından 340 nm'lik ilk GaN tabakası, 200 mbar basınç ve 1000 °C'de 1300 sccm NH_3 akışı ve 10 sccm TMGa akışı verilerek büyütüldü. Sonra 5 dakika içinde sıcaklık 1050 °C'ye ve NH_3 akışı 1500 sccm'e çıkartıldı. Bu koşullar altında 750 nm'lik ikinci GaN tabakası büyütüldü. Ardından 380 nm kalınlığındaki üçüncü GaN tabakasının büyütülmesi için sıcaklık 1060 °C'ye, NH_3 akışı 1800 sccm'e ve TMGa akışı 17 sccm'e çekildi. Bu tabakadan sonra sadece sıcaklık 1075 °C'ye artırılarak 140 nm kalınlığında sonunca GaN tampon tabakası büyütüldü. Tampon tabakaların büyütmelerinin bitiminde reaktör koşulları 1-2 nm kalınlığındaki AlN ara tabakası büyütmesi için değiştirildi. Reaktör basıncı 50 mbar'a, NH_3 akışı 100 sccm'e düşürüldü. Sıcaklık 1090 °C'ye çekilmiş ve TMAI akışı 25 sccm olarak verildi. 30 nm'lik AlGaIn engel katmanı büyütmesi için bir önceki adımda belirtilen koşullarda 9 sccm'lik TMGa akışı verilmiş ve NH_3 akışı 1000 sccm'e çıkarıldı. Son olarak diğer koşullar sabit tutularak TMAI akışı kesilmiş ve 15 saniye boyunca GaN üst kontak katmanı büyütülmesi yapılarak safir alttaş üzerindeki GaN HEMT yapısı tamamlandı.

Safir alttaş üzerinde büyütölmesi yapılan epitaksiyel yapıya ait MOCVD sistemi tarafından alınan optik reflektans grafiği şekil 5.2’de görölmemektedir. Büyütölölen yapıya ait anlık (single transient) reflektans değişim grafiğinde salınımların genliklerinin birbirine yakın olması kristal büyütölmesinin homojen olduğuunu göstermektedir.



şekil 5.2. Safir alttaş üzerinde büyütölölen GaN HEMT yapısı için optik reflektans ölçüm grafiği

Büyütölölen numunelerin yüzey morfolojisini belirlemek için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanıldı. Safir alttaş üzerinde büyütölölmüş olan GaN HEMT yapısı üzerinde $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ’lik bir alana ait AFM ölçüm sonucu şekil 5.3’te gösterildi. RMS yüzey pürüzlölölüğü değerinin 0,45 nm civarında elde edilmiş olması yüzey kalitesinin iyi olduğuunu göstermektedir.



Şekil 5.3. Safir alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısının 5 μm x 5 μm’lik yüzey taraması

Yapılan büyüttmeler sonunda elde edilen yapıların 2DEG yoğunluğunu ve mobilite seviyesini anlamak için Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Ölçümler için numuneler 7 mm x 7 mm ölçülerinde kare olarak kesildi ve ohmik kontak uygulanarak Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Ohmik kontak yapmak için uygulanan yöntemde numunenin köşeleri açıkta kalacak şekilde simetrik bir şekilde numune maskelendi. Bu şekilde metal kaplama sistemine yüklendi ve vakumlamanın ardından açıktaki köşelere Ti/Al/Ni/Au metalleri 200/2000/400/500 Å kalınlıklarda kaplandı. Kaplamanın ardından maske yüzeyden alınıp numune RTA fırınında metallerin difüze ettirilmesi için işlendi. Bu difüzyon işlemi ardından numune üzerine yapılan kontaklar çok daha simetrik ve düşük dirençlidir.

Hall Effect Calculation Ver 3.0

EGK HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM

DATE USERNAME SAMPLENAME @ 300K

MEASUREMENT DATA

Range	V _{AB} [mV]	V _{BC} [mV]	V _{AC} [mV]	V _{MAC} [mV]	V _{MAC} [mV]
x10mA	-76,17	-66,052	-9,9802	-31,844	12,1602
I _{Input}	77,246	67,11	10,5336	32,746	-11,9774
0,1017	V _{CD} [mV]	V _{DA} [mV]	V _{BD} [mV]	V _{MBD} [mV]	V _{MBD} [mV]
	-76,538	-66,034	-10,2368	11,4854	-32,764
	76,684	66,87	10,1298	-11,733	32,482

RESULTS

B = 0,51 [T] D = 1 [um]

N_b = -1,4618E+17 [/cm³] N_s = -1,4618E+13 [/cm²]

μ = 1,3409E+03 [cm²/V.s] R_h = -42,70345 [m²/C]

ρ = 3,1846E-02 [Ω ·cm] σ = 31,40132 [1/ Ω ·cm]

delta_R = 21,77876 [Ω] alpha = 0,86769

N_b : Bulk concentration
 μ : Mobility
 ρ : Bulk resistivity
 delta_R : magnetoresistance

N_s : Sheet concentration
 R_h : Hall coefficient
 σ : Conductivity
 alpha : V/H Ratio of Resistance

9600,n,8,1
 Com1
 Open Port
 Close Port
 AUTOMATIC
 MANUAL
 MEASURE
 CALCUL.
 SAVE
 PRINT
 CLEAR
 EXIT

Şekil 5.4. Safir alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT numunesinden alınan Hall etkisi ölçüm sonucu (@ 300 K)

Oda sıcaklığında yapılan Hall etkisi ölçüm sonucu Şekil 5.4'te gösterildi. Hall etkisi ölçümünden görüldüğü üzere mobilite $\mu = 1341 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve taşıyıcı yoğunluğu $n_s = 1,46 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ olarak ölçüldü. Bu değerler literatürdeki safir üzerindeki GaN HEMT'ler için elde edilen değerlerle uyumludur ve HEMT aygıtları üretmek için uygundur [105].

5.1.2. Silisyum alttaş üzerinde GaN HEMT büyütülmesi ve karakterizasyonu

Silisyumun GaN'e olan örgü uyumsuzluğu (17%) ve ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğunun (56%) yüksek olması büyütme işleminin oldukça zorlu olmasına neden olmaktadır. Dislokasyon yoğunluğu düşük ve çatlaksız HEMT yapılarını Silisyum üzerinde büyütmede en önemli kısım tampon tabakası olmuştur. Silisyum üzerine literatürdeki tasarımlar da gözden geçirilerek uygun tampon tabakası belirlenmeye çalışıldı [106]. Bu tampon katmanları yapıda 2DEG oluşabilmesi için

Silisyum alttaş üzerinde gerekli yüzey düzgünlüğünü sağlamaya yönelik en uygun dizilimi ve ayrıca aygıt performansı için önemli olan yarı yalıtkan özelliği gösterecek biçimde ayarlanmaya çalışıldı. Uygun tampon tabakası ve 2DEG oluşturabilmek için seçilen ve üzerinde çalışılmaya başlanan tasarım Şekil 5.5’de gösterildi.

GaN (üst kontak katmanı) ~ 3 nm
AlGaN (engel katmanı) ~ 30 nm
AlN (ara tabaka) 1-2 nm
GaN (tampon tabaka) ~ 1850 nm
$Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ ~ 250 nm
$Al_{0.22}Ga_{0.78}N$ ~ 180 nm
$Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ ~ 120 nm
$Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ ~ 90 nm
$Al_{0.56}Ga_{0.44}N$ ~ 65 nm
$Al_{0.64}Ga_{0.36}N$ ~ 50 nm
HT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~ 430 nm
LT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~30 nm
HT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~ 5 dakika
Silisyum alttaş

Şekil 5.5. Silisyum üzerinde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel tabakaları

Şekil 5.5’deki silisyum alttaş üzerine tasarlanan HEMT yapısında amaç GaN ve AlN tabakalarının ısı genleşme katsayıları ($AlN=5,27 [10^{-6} K^{-1}]$, $GaN=3,17 [10^{-6} K^{-1}]$) farkından yararlanarak gerilme zorlaması ve sıkıştırma zorlamasının birbirini dengeleyerek soğuma esnasında epitaksiyel tabakada oluşabilecek çatlak ve örgü kusurlarını engellemektir. Isıl genleşme katsayıları arasındaki fark AlN ile GaN arasında Al kompozisyonu değişen altı farklı AlGaN tabakası kullanılarak dengeli bir geçiş süreci sağlandı. Böylece her bir tabaka kendisinden önceki tabaka ile çok az bir ısı genleşme katsayısı farkıyla ayrılır. Bu dengeli geçiş modeli GaN’ün maruz kaldığı gerilme zorlamasını azaltmak için idealdir.

MOCVD büyütme adımı Silisyum alttaş gerekli temizlik işlemine tabi tutulup reaktöre yüklendi. Büyütmede öncelikle Silisyum alttaş 1100 °C’de 25 mbar’da 10 dakika boyunca hidrojen altında tutulmuş ve yüzeyinin temizlenmesi sağlandı. 10 dk’lık sürenin bitiminde 90s boyunca 200 sccm NH₃ akışı verilerek nitridasyon işlemi uygulandı. Nitridasyon işleminden sonra sıcaklık 1130°C ye ve NH₃ akışı 70 sccm’e getirilmiş ve bu sıcaklıkta basınç 25 mbar iken 15 sccm TMAI akışı ile 5 dk boyunca yüksek sıcaklıkta AlN çekirdeklenme (nucleation) tabakası büyütüldü. Büyütülen çekirdeklenme tabakasından sonra sıcaklık 700°C’ye çekildi. Reaktör basıncı ise 50 mbar yapıldı. Bu koşullarda 300sccm NH₃ ve 15 sccm TMAI akışında ~30nm düşük sıcaklık AlN tabakası büyütüldü. LT-AlN tabakasından sonra reaktör sıcaklığı tekrar 1130C ye ve basınç 25 mbar’a getirilmiştir. NH₃ akışı ise tekrar 70sccm yapıldı. 25 sccm TMAI akışı da verilerek 345nm/saat büyütme oranıyla 75dk da yaklaşık 430 nm AlN büyütüldü. AlN tampon tabakaları Silisyum alttaş-çekirdeklenme arayüzünde ortaya çıkan örgü kusurlarının (dislokasyon) azaltılması için koyuldu. Bu kusurların büyük çoğunluğu 400 nm’den fazla büyütülen AlN yüzeyine ve ilk birkaç AlGaN tampon tabakası yüzeyine kadar tamamen yok olması ve daha üst tabakalara sızması sağlanmaya çalışıldı. İlk AlN tabakası kusur yoğunluğunun en fazla olduğu tabakadır. Bu nedenle büyütme koşulları bu tabaka için çok dikkatli seçilmelidir. AlGaN tampon tabakaları içinde yüksek Al kompozisyonuna sahip olanlar daha yüksek büyütme sıcaklıklarına ihtiyaç duymaktadır. Al atomlarına yüzeyde yüksek hareketlilik vermek ve kristal yapısına daha çok girmesini sağlamak için yüksek sıcaklık ve düşük basınç gereklidir. Bu durum hem yüksek AlGaN kristal kalitesi hem de homojen Al kompozisyonu için önemlidir.

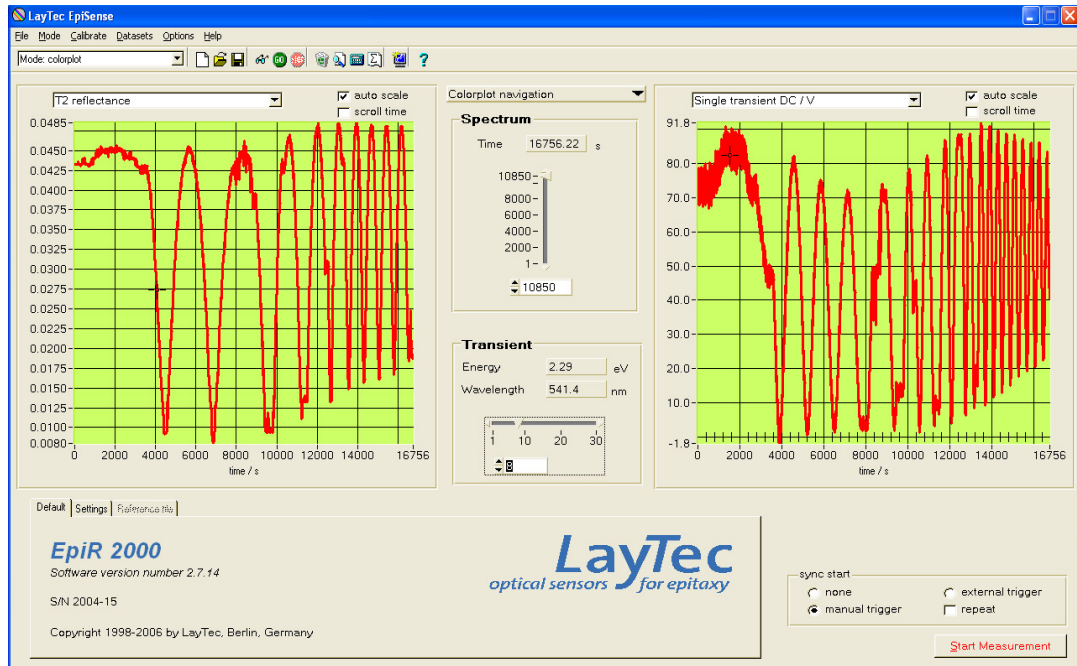
AlGaN tampon tabakalarının ilki olan Al_{0.64}Ga_{0.36}N için reaktör sıcaklığı 1180 °C’ye çıkarılmıştır. Reaktör basıncı yine 25 mbar’da tutuldu. Yüksek Al kompozisyonu için TMAI akışı 30sccm ve TMGa akışı da 3 sccm yapıldı. Sonraki Al_{0.56}Ga_{0.44}N tampon tabakası için sıcaklık ve basınç değerleri aynı tutularak 1,5 dk içinde TMAI akışı 20 sccm’e TMGa akışı 4 sccm’e ve NH₃ akışıda 1100sccm’e çekildi. Bu tabakanın kalınlığı yaklaşık 65 nm’dir. Al_{0.4}Ga_{0.6}N tabakasını büyütme için TMAI ve TMGa akışları sırasıyla 10 sccm ve 9 sccm yapıldı. NH₃ akışı yine 1100 sccm’de tutuldu

ancak bu kez reaktör basıncı yapıya daha fazla Ga girmesi için 50 mbar'a çıkarıldı. Bu koşullarda yaklaşık 90 nm $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ tabakası büyütüldü.

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ tabakası için sıcaklık 1120 °C'ye çekildi. Reaktör basıncı tekrar 25 mbar'a çekilmekle birlikte TMGa ve TMAI akışları bir önceki AlGaN ile aynıdır. Sadece NH_3 akışı 500 sccm 'e düşürüldü. Bu tabakanın kalınlığı yaklaşık 120 nm'dir. Bundan sonra gelen tabaka $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ dir ve daha düşük sıcaklıkta büyütülmektedir. Yüksek Ga kompozisyonuna sahip AlGaN tabakaları depozisyon ve dekompozisyon oranları arasındaki dengeyi korumak için düşük sıcaklık tercih edilir. Eğer ortamda reaktant (Ga, Al) miktarı, depozisyon oranının dekompozisyon oranından daha fazla olmasına yeterli değilse epi tabanın yer yer etch olmasına sebep olabilir. $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ için sıcaklık 1095°C ye düşürüldü. TMGa ve TMAI akışları 10 sccm yapıldı. NH_3 akışı da 1000 sccm 'e yükseltildi. Bu koşullarda yaklaşık 180 nm kalınlık elde edildi. Yarı yalıtkan GaN tampon tabakasından hemen önce son AlGaN tabakası olan $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ de reaktör sıcaklığı 1100°C ve basınç 25 mbar da tutuldu. TMAI akışı 10 sccm ve TMGa akışı 16 sccm'e çıkarıldı. NH_3 akışı tekrar 500 sccm'e çekildi. Bu koşullarda son AlGaN tampon tabakası 250nm olarak büyütüldü. İki boyutlu elektron gazı bölgesinden (2DEG) önceki son tampon tabaka olan GaN tabakası AlGaN tabakalarına göre oldukça düşük sıcaklıkta büyütüldü. GaN için reaktör büyütme sıcaklığı 990C ye getirildi. AlN ve AlGaN dan farklı olarak GaN, 200mbar gibi yüksek basınçlarda büyütülebilmektedir. Büyütme esnasında TMGa ve NH_3 akışları sırasıyla 23sccm ve 1600 sccm olarak verildi. GaN tabaka kalınlığı 1850 nm olmuştur ve 1050 nm/saat 'lik büyütme oranı elde edildi. Yapıda farklı V/III oranına ve yukarı doğru giderek değişen Alüminyum kompozisyonuna sahip tampon tabakaları kristal kalitesinin yüzeye doğru artması amaçlanarak büyütüldü.

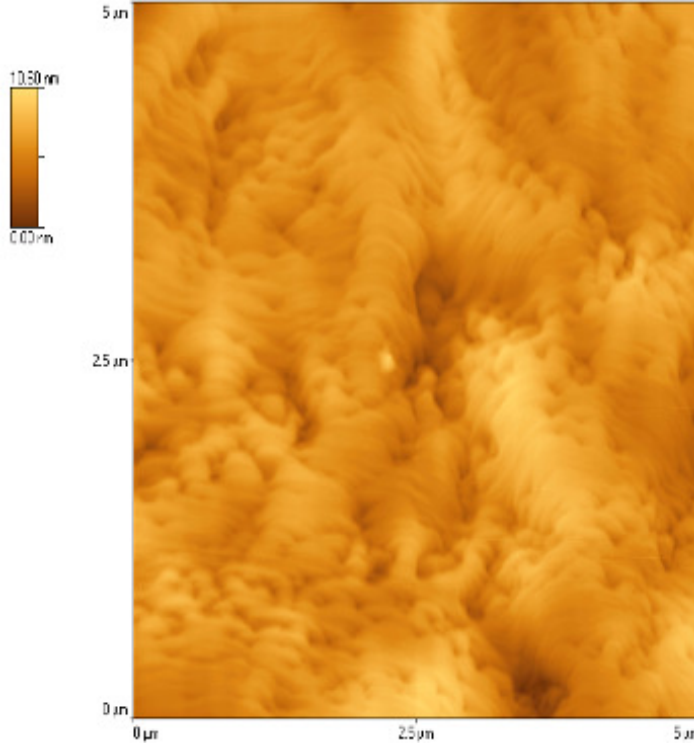
GaN tampon tabaka üzerine AlGaN engel tabakası elde etmek için reaktör koşulları $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ koşullarına tekrar getirildi. NH_3 akışını 1000 sccm'e çekerek ve reaktöre 10 sccm TMAI yanında 10 sccm TMGa verilmesi ile 30 nm'lik $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ engel tabakası büyütüldü. Böylece AlGaN engel tabakası ile GaN tampon tabakası arasında iki boyutlu elektron gazı oluşması sağlandı. AlGaN engel tabakası üzerine tekrar aynı koşullarda GaN büyütülerek aygıt fabrikasyonu sırasında yapılacak metal

kontak dirençlerinin azaltılması sağlandı. Bu tabakanın yaklaşık 3 nm büyütülmesi yeterlidir. Silisyum alttaş üzerinde büyütülmesi yapılan epitaksiyel yapıya ait MOCVD sistemi tarafından alınan optik reflektans grafiği Şekil 5.6'da verildi. Salınımların genlikleri Safir alttaştaki kadar düzenli olmadığından onun kadar kaliteli bir büyütme olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 5.6. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısı için optik reflektans ölçüm grafiği

Silisyum alttaş üzerinde büyütülmüş olan GaN HEMT yapısı üzerinde $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 'lik bir alana ait AFM ölçüm sonucu Şekil 5.7'de gösterildi. RMS yüzey pürüzlülüğü değerinin 1,23 nm civarında elde edilmiş olması yüzey kalitesinin çok iyi olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.7. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısının 5 μm x 5 μm’lik yüzey taraması

Silisyum alttaş üzerinde büyütmesi yapılan numuneden alınan Hall etkisi ölçüm sonuçları Şekil 5.8’de gösterildi. Hall etkisi ölçümünden görüldüğü üzere mobilite $\mu = 287 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve taşıyıcı yoğunluğu da $n_s = 2,98 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ olarak ölçüldü. Bu değerler aygıt üretimi için uygun değerler değildir.

Hall Effect Calculation Ver 3.0

EGK HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM

DATE USERNAME SAMPLENAME @ 300K

MEASUREMENT DATA

Range	V _{AB} [mV]	V _{BC} [mV]	V _{AC} [mV]	V _{MAC} [mV]	V _{MAC} [mV]
x1uA	-13,38	-49,64	-6,747	-5,53	-4,712
	-17,332	-38,944	-23,078	-21,822	-21,198

I_{Inout} 0,9999

V _{CD} [mV]	V _{DA} [mV]	V _{BD} [mV]	V _{MBD} [mV]	V _{MBD} [mV]
-107,046	-19,0856	-26,906	-23,54	-23,568
-109,432	-8,1122	-39,116	-38,424	-37,794

RESULTS

B = 0,51 [T] D = 1 [um]

N_b = -2,9889E+16 [/cm³] N_s = -2,9889E+12 [/cm²]

μ = 287,19008 [cm²/V·s] R_h = -208,84441 [m²/C]

ρ = 0,71592 [Ω ·cm] σ = 1,3968 [1/ Ω ·cm]

delta_R = 1,8884E+03 [Ω] alpha = -0,29346

N_b : Bulk concentration
 μ : Mobility
 ρ : Bulk resistivity
 delta_R : magnetoresistance

N_s : Sheet concentration
 R_h : Hall coefficient
 σ : Conductivity
 alpha : V/H Ratio of Resistance

9600,n,8,1
 Com1
 Open Port
 Close Port
 AUTOMATIC
 MANUAL
 MEASURE
 CALCUL.
 SAVE
 PRINT
 CLEAR
 EXIT

Şekil 5.8. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT numunesinden alınan Hall etkisi ölçüm sonucu (@ 300 K)

5.1.3. SiC alttaş üzerinde GaN HEMT büyütülmesi ve karakterizasyonu

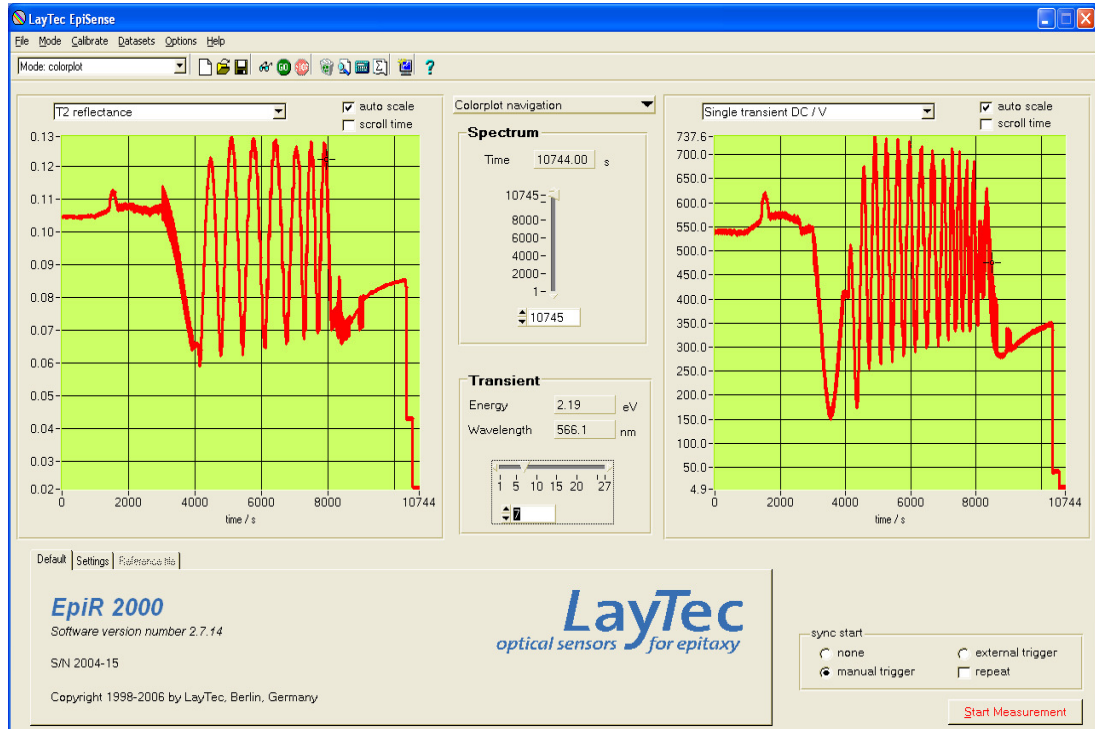
SiC'ün ısı iletkenliğinin yüksek olması (3,7-4,5 W/cm·K), GaN ile olan örgü uyumsuzluğunun (3,4%) ve ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğunun (25%) düşük olması onu diğer alttaş malzemeleri içinde ön plana çıkarmaktadır. Fakat diğer yandan SiC'ün diğer alttaşlara göre oldukça pahalı (3 inç SiC alttaş ~4000\$) olması yaygın kullanım açısından önemli bir dezavantaj olmaktadır. Şekil 5.9'da SiC üzerinde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel tabakaları şematik olarak gösterildi.

GaN (üst kontak katmanı) ~ 3 nm
AlGaIn (engel katmanı) ~ 30 nm
AlN (ara tabaka) 1-2 nm
GaN (tampon tabaka-4) ~ 140 nm
GaN (tampon tabaka-3) ~ 380 nm
GaN (tampon tabaka-2) ~ 700 nm
GaN (tampon tabaka-1) ~ 340 nm
HT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~ 160 nm
LT AlN (çekirdeklenme tabakası) ~2 dakika
6H-SiC alttaş

Şekil 5.9. SiC üzerinde büyütülen GaN HEMT epitaksiyel tabakaları

6H-SiC alttaşlar büyütme öncesi sadece aseton ve izopropil alkol banyosundan geçirilip DI su ile yıkandıktan sonra azot ile kurutuldu. Alttaşın ve reaktörün in-situ temizlenmesi için sıcaklık 1100 °C'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 10 dakika boyunca H₂ akışı altında bekletildi. Desorpsiyon işleminden sonra reaktör koşulları LT-AlN çekirdeklenme tabakası koşullarına getirildi. Sıcaklık 750°C ve reaktör basıncı 50mbar'a getirilerek 300 sccm akışında NH₃ kaynağı 20 s açılarak nitridasyon işlemi yapıldı. Bu işlem temizlik ve SiC alttaş yüzeyini düzgünleştirme amaçlı uygulanmaktadır. Kullanılan SiC alttaş Silisyum yüzeye sahiptir. Bu da nitridasyon sırasında bazı SiN fazlarının oluşabileceğini gösterir. Ancak yüksek sıcaklıkta bu ince SiN mono-tabakası fazla kararlı değildir ve bozunur. Nitridasyon süresinin bitiminde TMAI kaynağı 15 sccm akışla verilerek 90s boyunca LT-AlN çekirdeklenme tabakası büyütüldü. Çekirdeklenme tabakasında kusur yoğunluğu oldukça fazladır. Bu kusurları bloke etmek ve daha yukarıdaki tabakalara ulaşmasını engellemek için yüksek sıcaklıkta kalın HT-AlN büyütülmesi gereklidir. Bu amaçla sıcaklık 1130°C ve basınç 25 mbar'a çekildi. NH₃ kaynağı 150 sccm akışa ayarlanmış ve TMAI akış oranında 20 sccm yapıldı. Bu şekilde yaklaşık 125 nm AlN büyütüldü. Ardından koşullar yarı yalıtkan GaN elde etmek üzere parametreleri adım adım değişen bir dizi GaN tampon tabaka yapısı büyütme üzere değiştirildi. İlk GaN tampon tabakası için sıcaklık 1025°C ye ve basınç 200 mbar'a çekildi. 10 sccm TMGa ve 1300 sccm NH₃

verilerek yaklaşık 340nm GaN büyütüldü. İkinci GaN tampon tabakası için sıcaklık 1050°C'ye ve amonyak akışı da 1500 sccm'e çıkarıldı. Buradaki amaç daha yüksek bir büyütme oranı yakalamaktır. Bu tabaka yaklaşık olarak 700 nm'dir. 3.GaN tampon tabaka bir geçiş tabakasıdır. Burada 5 dk içinde sıcaklık 1070 °C'ye NH₃ akışı 1800 °C'ye ve TMGa kaynak akışı 17 sccm'e çıkarılıp toplamda 380 nm kalınlığında yüksek büyütme oranına sahip GaN tabakası elde edildi. Son GaN tampon katmanında diğer tüm koşullar sabit tutulurken 4,5 dk da sıcaklık 1085 °C'ye çıkarılıp bu sürede yaklaşık 140 nm kalınlığında GaN büyütülerek oldukça düzgün yüzeye sahip yarı yalıtkan GaN elde edildi. 4 adet GaN tampon tabakasının toplam kalınlığı 1.5 µm'ye ulaştı. GaN tampon tabakaları süresince V/III oranı düşürüldü. Buna karşılık büyütme oranı ise 1,25 µm/saat'ten 1,93 µm/saat hıza kadar ulaştı.

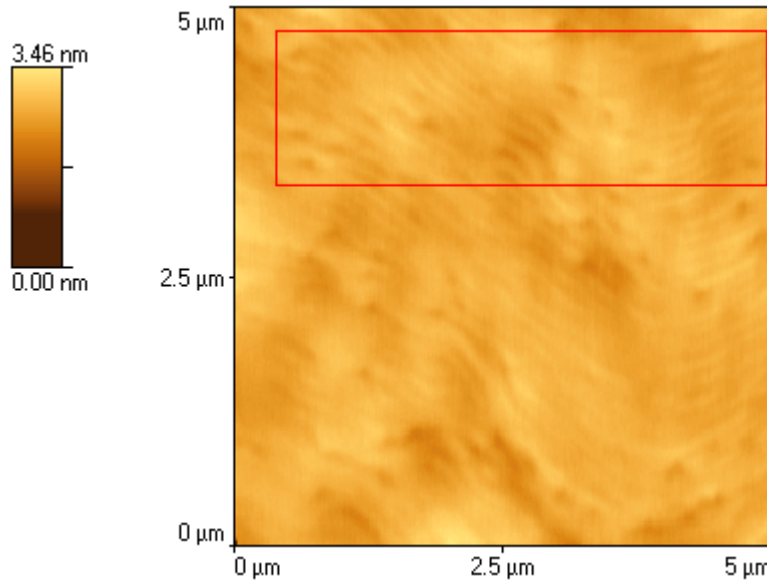


Şekil 5.10. SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısı için optik reflektans ölçüm grafiği

2DEG oluşturabilmek için ise sıcaklık 1120 °C'ye getirilerek 20 sccm TMAI ve 9 sccm TMGa kaynağı akışı altında ve 50 mbar basınçta AlGaIn engel tabakası büyütüldü. 3 nm GaN cap tabakası aynı koşullarda sadece reaktöre TMAI akışını

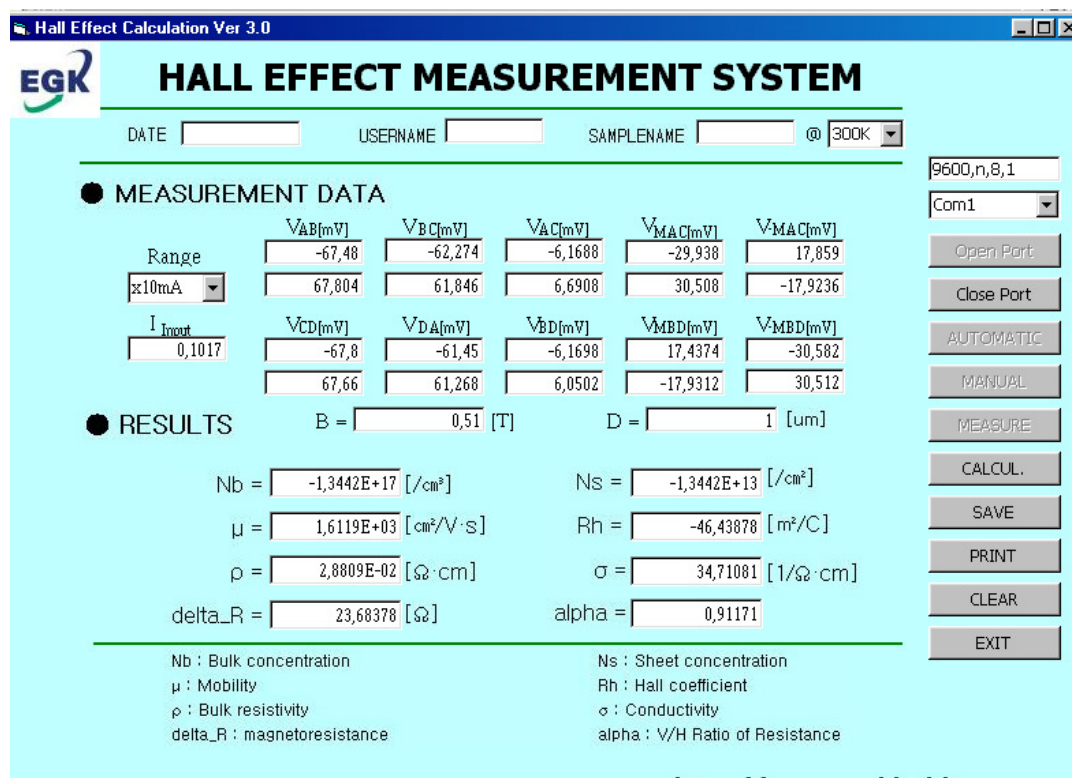
keserek 5 s’de büyütülerek yapı tamamlandı. SiC alttaş üzerinde büyütülmesi yapılan epitaksiyel yapıya ait MOCVD sistemi tarafından alınan optik reflektans grafiği Şekil 5.10’da verildi.

SiC alttaş üzerinde büyütülmüş olan GaN HEMT yapısı üzerinde $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ’lik bir alana ait AFM ölçüm sonucu Şekil 5.11’de gösterildi. RMS yüzey pürüzlülüğü değerinin 0,30 nm civarında elde edilmiş olması yüzey kalitesinin çok iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.11. SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT yapısının $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ ’lik yüzey taraması

SiC alttaş üzerinde büyütmesi yapılan numuneden alınan Hall etkisi ölçüm sonuçları Şekil 5.12’de gösterildi. Hall etkisi ölçümünden görüldüğü üzere mobilite $\mu = 1611 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve taşıyıcı yoğunluğu da $n_s = 1,34 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ olarak ölçüldü. Bu değerler aygıt üretimi için oldukça iyi değerlerdir.



Şekil 5.12. SiC alttaş üzerinde büyütülen GaN HEMT numunesinden alınan Hall etkisi ölçüm sonucu (@ 300 K)

Çizelge 5.1. Farklı alttaş malzemeleri üzerinde büyütülen GaN HEMT yapılarına ait ölçüm sonuçları

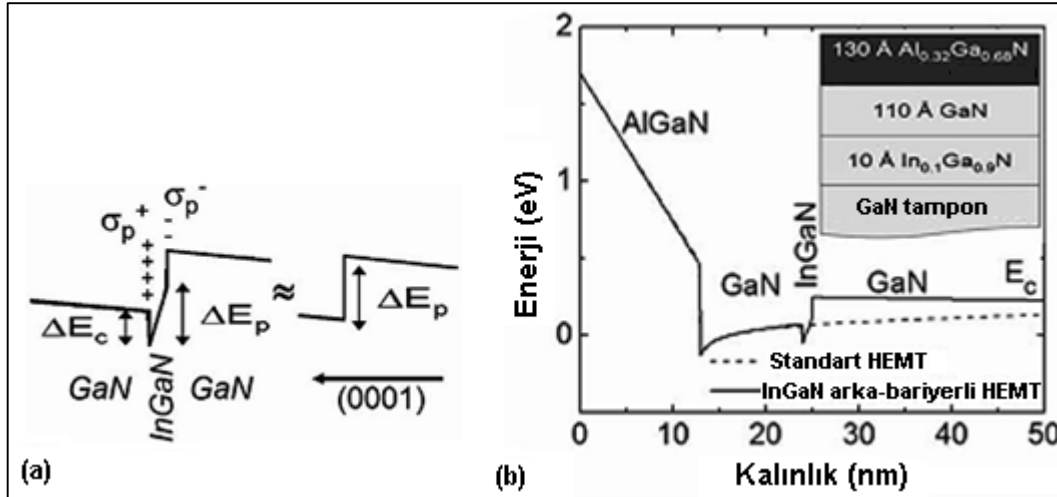
Büyütme yapılan alttaş	Mobilite @300 K (cm ² / V.s)	Taşıyıcı yoğunluğu @300 K (x10 ¹² cm ⁻²)	RMS yüzey pürüzlülüğü (nm)
Safir	1341	14,6	0,45
Si	287	2,98	1,23
SiC	1611	13,4	0,30

Sonuç olarak Safir, Silisyum ve SiC alttaşları üzerinde 2DEG oluşturabilecek standart AlGaN/AlN/GaN HEMT yapıları için büyüme ve karakterizasyon çalışmaları yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 5.1’de verildi. Safir ve SiC üzerinde yapılan büyütme HEMT aygıtları için uygun sonuçlar verirken Silisyum üzerindeki büyütme 2DEG oluşumu gözlenirse de aygıt için yeterli olmayan sonuçlar elde edildi. Bu kısımdaki çalışmalar alttaş seçimi ve standart HEMT

yapıları için temel oluşturmaya yönelik planlandı. Bu nedenle ayrıntılı yapısal ve elektriksel analizlerden çok 2DEG oluşumunun kanıtı olan oda sıcaklığındaki Hall ölçümleri ve yüzey kalitesi hakkında bilgi veren AFM ölçümleri kullanıldı. Bu bölümden sonraki bütün büyütme Safir alttaş üzerinde yapıldı. Safir ve SiC üzerindeki büyütme sonucu elde edilen yapılarda HEMT aygıtları açısından önemli bir fark görülmemesine rağmen aradaki büyük maliyet farkı Safir alttaşı tercih etmemize neden oldu.

5.2. AlGa_xN/AlN/GaN/InGa_xN/GaN Epitaksiyel Yapılarının Analizi ve Tasarımı

Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN tabanlı HEMT yapılarındaki 2DEG'in kanalda daha iyi sınırlandırılması, elektron mobilitésinin ve yoğunluğunun artırılması amacıyla InGa_xN arka engel yapıları kullanılmaya başlanmıştır [107,108]. Şekil 5.13'te gösterildiği gibi ince bir InGa_xN tabakası kanaldan GaN tampon tabakasına geçiş bölgesinde iletim bandını yükselterek kanaldaki elektronlar için bir potansiyel engeli oluşturmakta ve bu da sınırlandırmayı artırmaktadır [108].

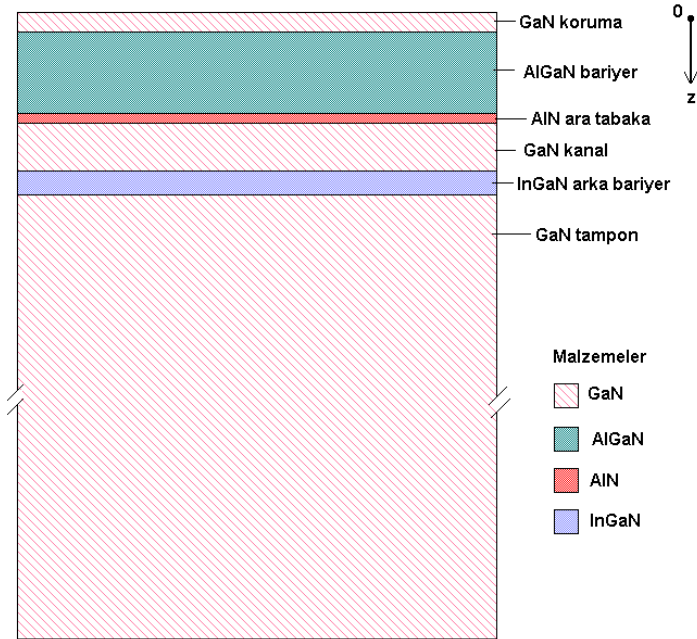


Şekil 5.13. (a) GaN-InGaN arayüzünde oluşan ΔE_p enerji bant süreksizliği ve yükler
(b) Yapıya ait enerji bant diyagramı [108]

GaN temelli HEMT'lerde InGa_xN arka engel tabakasının kullanılması üzerine literatürde bazı çalışmalar olsa da bu yapıdaki In kompozisyonu ve tabaka

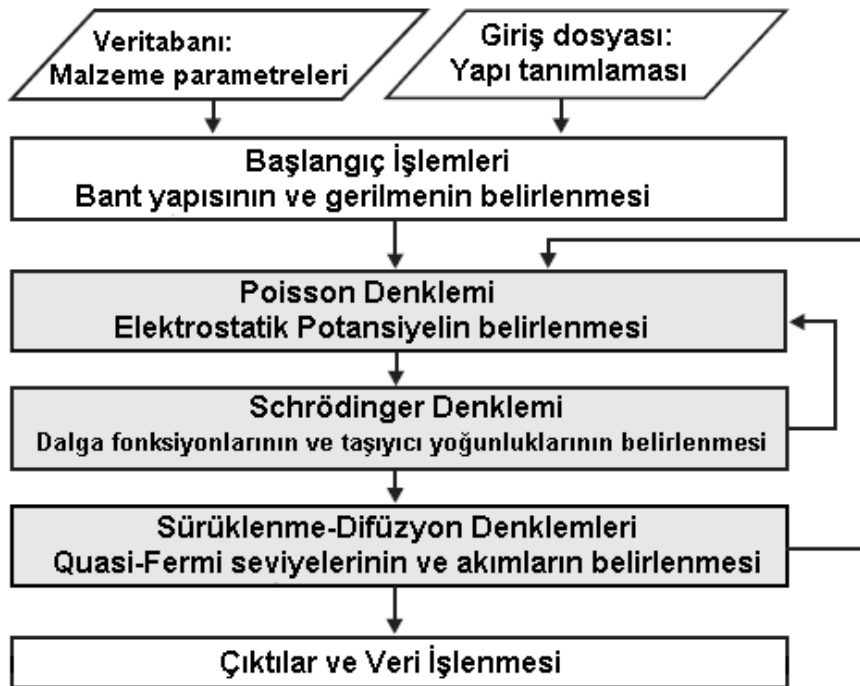
kalınlıklarının bant yapısına ve 2DEG dağılımına etkisi ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Bu tez kapsamında epitaksiyel yapı tasarımlarının yapılması da planlandığından InGaN arka engelli HEMT yapılarının bant yapıları ve 2DEG dağılımları nextnano³ programı ile analiz edildi. Bu program yardımıyla lineer olmayan 1-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin kendi ile uyumlu çözümlerini elde etmek mümkündür. Bu çözümler sonucunda taşıyıcı yoğunlukları, dalga fonksiyonları ve ilgili öz enerjiler elde edilmektedir [109].

Hesaplamalarda kullanılmak üzere temel alınan epitaksiyel yapı Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Standart $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapılarında yüksek mobilitte ve taşıyıcı yoğunluğu elde etmek üzere $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tabakasındaki Al alaşım oranı ve kalınlığı, AlN ara tabakanın kalınlığının optimizasyonu üzerine literatürde çalışmalar yapılmıştır [110-112]. Bu değerler hesaplamalar boyunca bilinen optimum değerlerde sabit tutuldu. Hesaplamalarda InGaN arka engel tabakasının kalınlığı ve In alaşım oranı, GaN kanal tabakasının kalınlığı sistematik olarak değiştirilerek bant yapısına ve taşıyıcı yoğunluğuna olan etkileri incelendi.



Şekil 5.14. Hesaplamalarda kullanılmak üzere temel alınan epitaksiyel yapının şematik çizimi

Simülasyon işlemi, simülasyonu yapılan alan boyunca homojen olarak dağılmış gerilme alanlarının hesaplanması ile başlar. Hesaplanan gerilme ve piroelektrik yükler kullanılarak piezoelektrik yükler hesaplanır. Çoğu simülatörde piezoelektrik yüklerin hesaba katılmaması katkısız GaN temelli simülasyonların genelde başarısız olmasına yol açacak kadar önemli bir problemdir. Bu yüklerin hesaplanmasından sonra, toplam yükler çıkarılır. Bu çalışmada katkı olmadığından, tüm yükler piezoelektrik yükler olarak alınacaktır. Toplam yük kullanılarak Poisson denklemi çözülür. Ardından, bağlaşıp çözüm elde edilene kadar Schrödinger ve Poisson denklemleri sıra ile çözülür. Sonuç olarak taşıyıcı tipleri, dağılımları, dalga fonksiyonları ve özdeğerleri hakkında bilgi edinilir [113]. GaN, AlN ve InN'e ait malzeme parametreleri tezin 2. bölümündeki Çizelge 2.2'den alındı. Hesaplamalarda kullanılan nextnano³ programında izlenen hesaplama akışı Şekil 5.15'te şematik olarak gösterildi.



Şekil 5.15 nextnano³ programında izlenen hesaplama akışı

Sistematik değişimlerin etkilerini kıyaslayabilmek için öncelikle standart bir AlGaN/AlN/GaN HEMT yapısı belirlenmiş ve optimizasyonlar bu yapı üzerinde

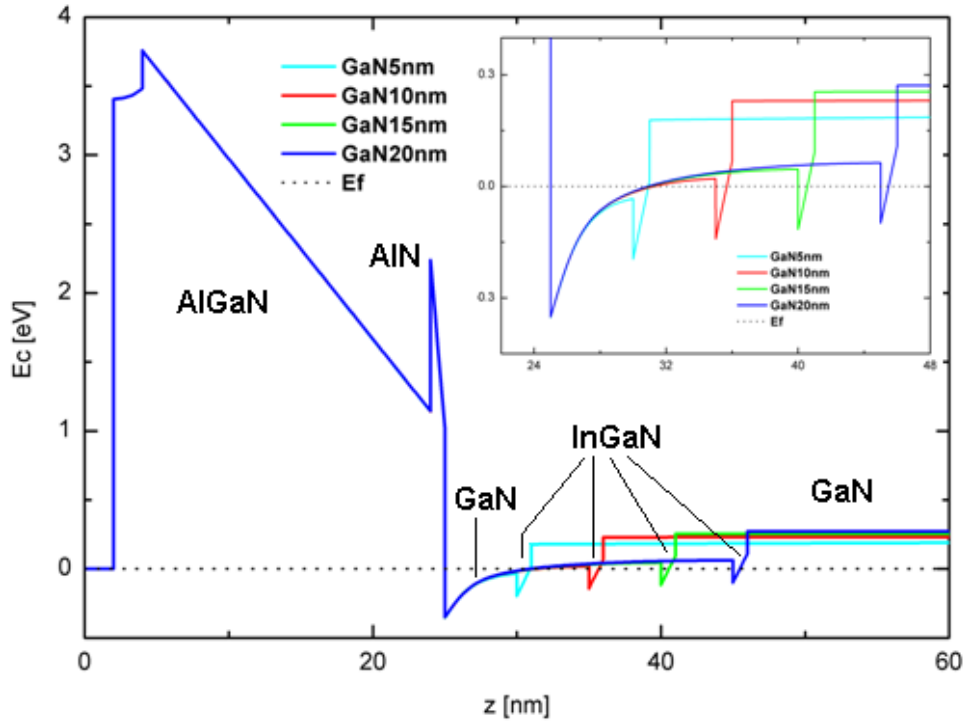
yapılmıştır. Bu yapı ve ilgili kalınlık, alaşımlar oranları değerleri Şekil 5.16'da gösterildi.

GaN koruma, $t=2\text{nm}$
$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ engel, $t=20\text{ nm}$
AlN ara tabaka, $t=1\text{nm}$
GaN kanal, $t_{\text{GaN}}=\text{var1}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ arka engel, $t_{\text{InGa}}=\text{var2}$, $x_{\text{InGa}}=\text{var3}$
GaN tampon, $t=1500\text{ nm}$

Şekil 5.16 Optimize edilecek yapı ve ilgili kalınlık, alaşımlar oranları değerleri

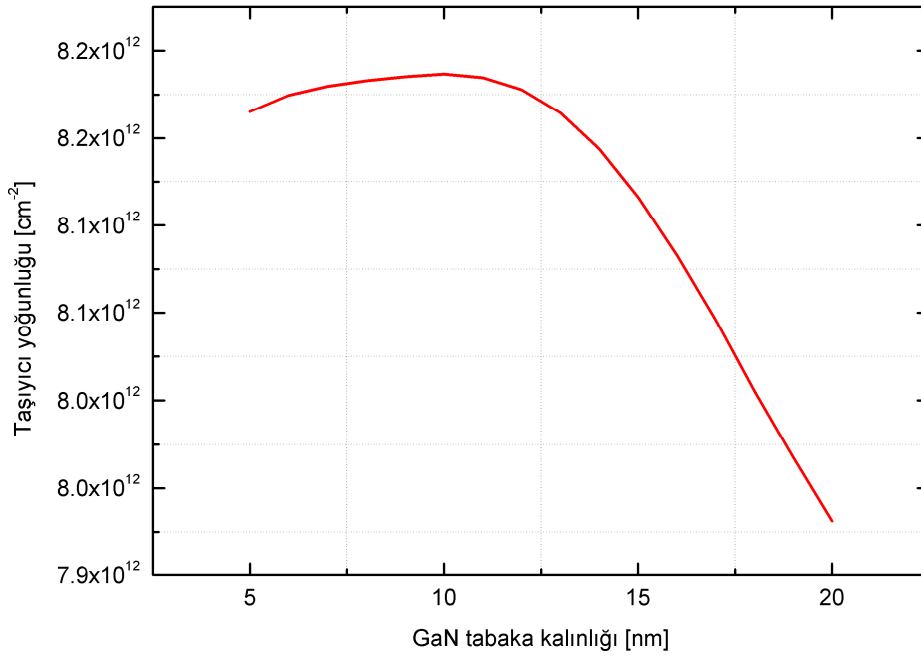
Optimizasyon adımları şu şekilde gerçekleştirildi:

- 1- GaN kanal tabakasının kalınlığı değiştirilerek iletim bandı ve taşıyıcı yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. $t_{\text{GaN}}= 5\text{nm}...20\text{nm}$ arasında değiştirildi.
- 2- InGaN arka engel tabakasının In-oranı sabit bir değerde tutularak kalınlığı değiştirilmiştir. $t_{\text{InGa}}= 1\text{nm}...6\text{nm}$ arasında değiştirildi.
- 3- InGaN arka engel tabakasının In-oranı üç farklı kalınlık değeri için taranmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. $x_{\text{InGa}}= 5\%...20\%$ arasında ($t_{\text{InGa}}= 1, 2$ ve 3 nm için) değiştirildi.



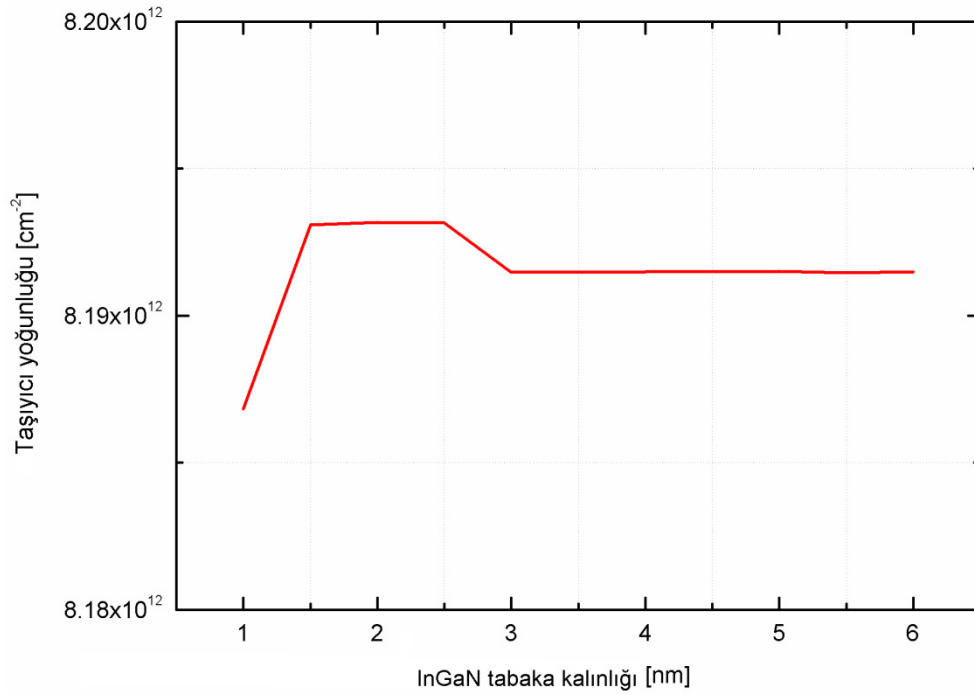
Şekil 5.17. AlGaN/AlN/GaN/InGaN/GaN HEMT yapısına ait farklı GaN kanal kalınlıkları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı. Küçük grafik: GaN/InGaN bölgesinin yakın gösterilimi. ($t_{\text{InGaN}}=1$ nm, $x_{\text{InGaN}}=0.1$)

AlGaN/AlN/GaN/InGaN/GaN HEMT yapısına ait farklı GaN kanal kalınlıkları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı Şekil 5.17’de gösterildi. Bu hesaplamalarda InGaN arka engel tabakasının kalınlığı 1 nm, In alaşım oranı ise $x=0,1$ değerinde tutuldu. Aynı yapı için GaN kanal kalınlığının değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği Şekil 5.18’de gösterildi. Taşıyıcı yoğunluğu, 10 nm GaN kanal kalınlığına kadar çok küçük artışlar göstermekte, bu değerde pik yapmakta ve 12 nm değerinden sonra hızlıca düşmektedir. GaN kanal kalınlığı belli bir değer üstüne çıktığında InGaN tabakasının potansiyel engelinden kaynaklı sınırlama etkisi azalmakta olduğu söylenebilir. Bu sonuçlara bakılarak GaN kanal kalınlığı için optimum değer olarak 10 nm değeri seçildi ve sonraki hesaplama adımlarında kullanıldı.



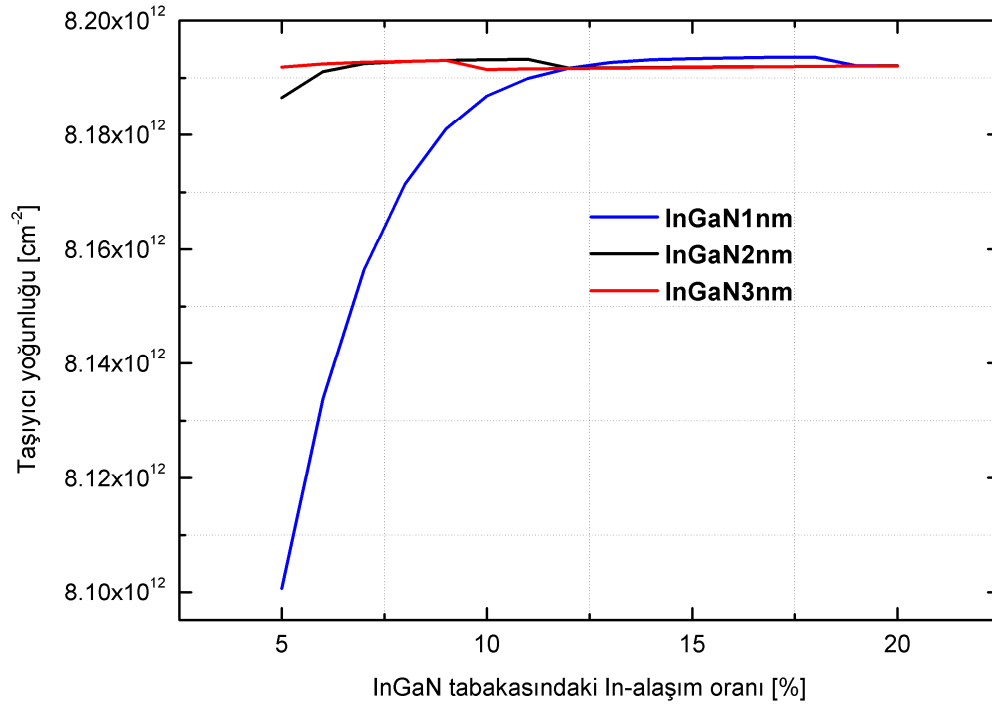
Şekil 5.18. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN HEMT yapısı için GaN kanal kalınlığının değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği

Hesaplamaların sonraki adımında InGaIn arka engel tabakasının kalınlığı değiştirildi. Bu hesaplamalarda InGaIn tabakasındaki In alaşım oranı $x=0,1$ değerinde sabit tutulurken tabaka kalınlığı 1nm'den 6 nm'ye kadar artırıldı. $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ tabakasının GaN üzerindeki kritik kalınlığı 14,4 nm olarak hesaplandı. Böylece kullanılan InGaIn tabakalarının gerginlik durumunda olacağı bilinmektedir. Belirlenen HEMT yapısı için InGaIn tabaka kalınlığının değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği Şekil 5.19'da gösterildi. Görüldüğü üzere 3 nm InGaIn tabaka kalınlığından sonra bir değişim gözlenmedi. InGaIn tabakasının oluşturacağı potansiyel engelinin kalınlıkla artacağı bilinmektedir [114]. Fakat InGaIn tabakasının kalınlığı arttıkça bu tabakanın GaN tampon tabaka ara yüzünde oluşturduğu bant süreksizliği keskinliğini yitirmektedir. Böylece elektronların kanaldaki sınırlanması ve dolayısıyla mobiliteleri azalacaktır. Bir sonraki adımda In alaşım oranı optimize edilirken 1 nm – 3 nm kalınlık aralığı için x değerleri tarandı.



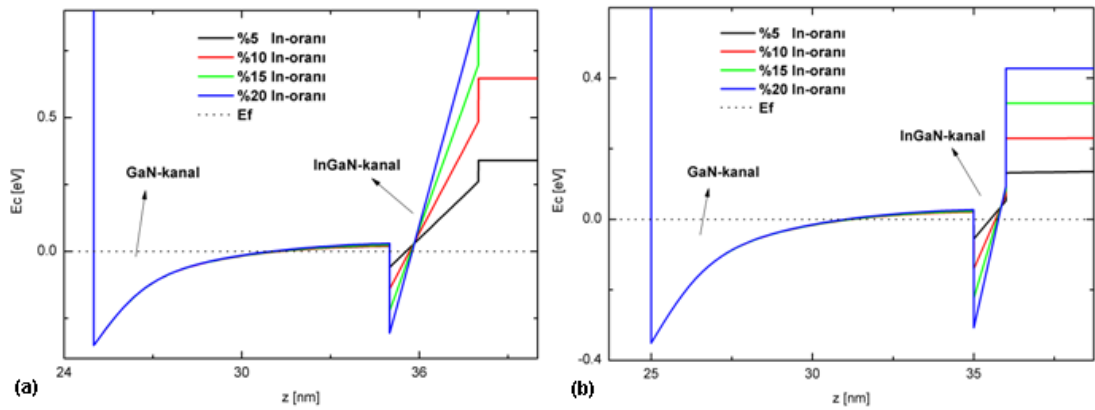
Şekil 5.19. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN HEMT yapısı için InGaIn arka engel kalınlığının değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği

Belirlenen HEMT yapısı için InGaIn arka engeldeki In-oranı değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği Şekil 5.20’de gösterildi. 3 farklı kalınlık için In alaşım oranı 5%’ ten 20%’ ye kadar tarandı. Grafikten görüleceği üzere taşıyıcı yoğunluğunun In alaşım oranına bağlılığı, 1 nm kalınlığındaki InGaIn tabakası için diğer iki kalınlık değerine göre daha fazladır. Taşıyıcı yoğunluğu 1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ tabakası için en yüksek değerine ulaştı. Arka engel için önerilebilecek diğer seçenek 3 nm $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ tabakası olabilir çünkü bu tabaka için elde edilen taşıyıcı yoğunluğu değeri 1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ tabakası ile elde edilene oldukça yakındır. Bu nedenle bu iki seçenek üzerinde daha ayrıntılı analiz gerekmektedir.



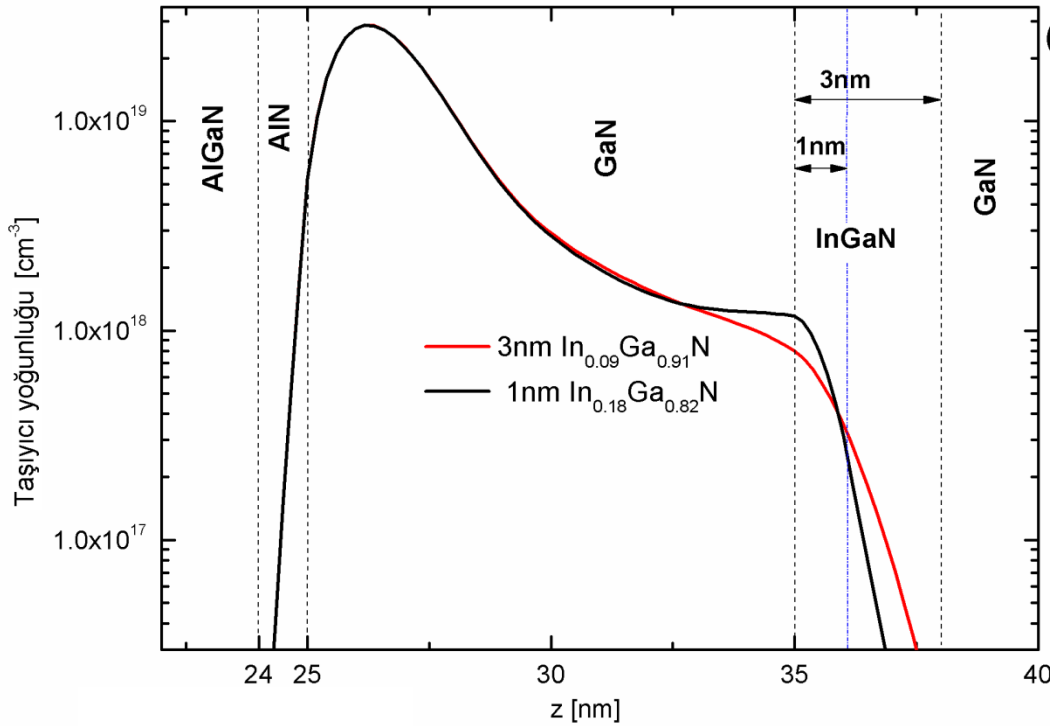
Şekil 5.20. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN HEMT yapısı için InGaIn arka engeldeki In-oranı değişimine bağlı elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiği

3 nm ve 1 nm InGaIn arka engelli HEMT yapıları için In alaşım oranları değiştirilerek hesaplanan iletim bandı enerji diyagramları Şekil 5.21’de gösterildi. Şekil 5.22’de ise 3 nm $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ ve 1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ arka engelli yapılar için elde edilen taşıyıcı yoğunluğu dağılımları karşılaştırıldı.



Şekil 5.21. (a) 3 nm ve (b) 1 nm InGaIn arka engelli yapılar için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramları

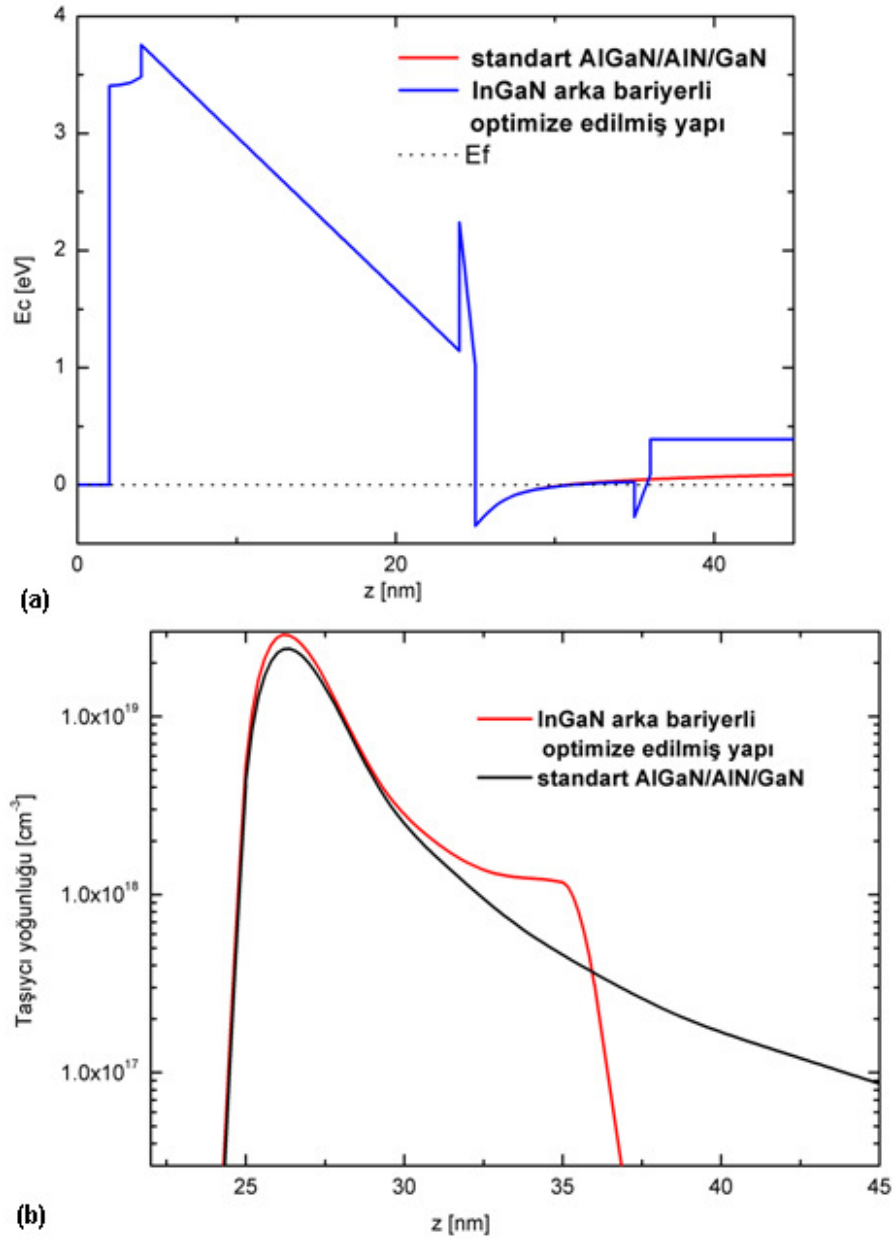
1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ arka engelli yapıdaki InGaN kanalında, 3 nm $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ arka engelli yapıdakine göre daha fazla taşıyıcı biriktiği gözlemlendi. Bu ilk bakışta bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Fakat yapıdaki taşıyıcı yoğunluğunun dağılımı incelendiğinde bu elektronların iyi sınırlanmış olduğu ve GaN tampon tabakasına sızmanın pek olası olmadığı görülmektedir. Bu nedenle $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ (20 nm/1 nm/ 10 nm/1nm/1500nm) HEMT yapısı yüksek mobilitte ve taşıyıcı yoğunluğu için önerildi. Bununla birlikte, 3 nm $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ arka engelli yapının, 1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ arka engelli yapıya göre deneysel açıdan daha avantajlı olabileceği değerlendirilmektedir. Çünkü 1 nm arka engelli yapıda taşıyıcı yoğunluğu In-oranıyla önemli bir değişim göstermektedir. Epitaksiyel büyütme sistemlerinde InGaN malzemesinin In-oranını çok kesin şekilde kontrol etmenin oldukça zor olduğu bilinmektedir [115].



Şekil 5.22. 3 nm $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ ve 1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ arka engelli yapılar için elde edilen taşıyıcı yoğunluğu dağılımı grafikleri

Standart $\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ yapısı ve optimize edilmiş 1 nm $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ arka engelli yapı için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramları ve taşıyıcı yoğunluğu

dağılımları Şekil 5.23'te gösterildi. InGaN arka engel kullanarak ve tabakaları uygun şekilde optimize ederek taşıyıcı yoğunluğunun standart AlGaN/AlN/GaN yapısındaki göre 16,6% daha yüksek elde edilebileceği hesaplandı.



Şekil 5.23. Standart AlGaN/AlN/GaN yapısı ve optimize edilmiş 1 nm In_{0.18}Ga_{0.82}N arka engelli yapı için hesaplanan (a) iletim bandı enerji diyagramları (b) taşıyıcı yoğunluğu dağılımları

5.3. AlGaN/AlN/GaN/InGaN/GaN Çoklu HEMT Yapıları

Bu kısımda $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapıları incelendi. MOCVD sisteminde yapıların büyütmeleri yapılarak yüksek çözünürlüklü XRD ölçümleri ve sıcaklığa bağlı Hall etkisi ölçümleri alındı. Öncelikle InGaN arka engelli yapıların etkisini gözleyebilmek için standart bir AlGaN/AlN/GaN yapısı büyütüldü. Bu numune kontrol numunesi olarak adlandırıldı. Daha sonra Şekil 5.24'te ayrıntıları verilen InGaN arka engelli yapılar büyütüldü.

GaN koruma $t \sim 3$ nm
$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ engel $t \sim 25$ nm
AlN aratabaka $t \sim 1-2$ nm
GaN tampon $t \sim 1400$ nm
HT AlN tampon $t \sim 520$ nm
AlN NL $t \sim 15$ nm
Safir alttaş

(a)

GaN koruma $t \sim 3$ nm
$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ engel $t \sim 25$ nm
AlN aratabaka $t \sim 1-2$ nm
GaN kanal tabaka $t \sim 5$ (10,15) nm
InGaN arka engel $t \sim 1$ nm
GaN tampon $t \sim 1400$ nm
HT AlN tampon $t \sim 520$ nm
AlN NL $t \sim 15$ nm
Safir alttaş

(b)

Şekil 5.24. (a) Kontrol numunesi olarak büyütülen standart yapı (b) InGaN arka engelli yapılardan bir örnek

5.3.1. MOCVD büyütme koşulları

Büyütülen numunelerin listesi ve tabaka özellikleri Çizelge 5.2'de verildi.

Çizelge 5.2. Büyütülen numuneler için elde edilmek istenen In oranları ve GaN kanal kalınlıkları

Numune	InGaN tabakasındaki In oranı	GaN kanal tabakası kalınlığı
A (kontrol)	-	-
B	%10	5 nm
C	%10	10 nm
D	%10	15 nm
E	%5	10 nm
F	%15	10 nm

Numune-B büyütme koşulları

Alttaş temizleme : 15 dakika @ 1050°C

Nitridasyon : 60 s @ 550°C

LT AlN tabakası : T= 550°C - 50 mbar NH₃= 1000 sccm, TMAI =15 sccm

HT AlN tampon : T= 1150°C - 25 mbar NH₃= 150 sccm'den 50 sccm'e, TMAI =40 sccm, TMIn= 40 sccm

GaN tabaka (1) : T= 1035°C - 200 mbar NH₃= 1350 sccm, TMGa= 10 sccm

GaN tabaka (2) : T= 1050°C - 200 mbar NH₃= 1500 sccm, TMGa= 10 sccm

GaN tabaka (3) : T= 1060 °C - 200 mbar NH₃=1500 sccm'den 1800 sccm'e, TMGa= 10 sccm'den 17 sccm'e

GaN tabaka (4): T= 1060°C - 200 mbar NH₃= 1800 sccm, TMGa= 17 sccm

GaN tabaka (5): T= 1075°C - 200 mbar NH₃= 1800 sccm, TMGa= 17 sccm

InGaN arka engel: T= 765°C - 200 mbar, NH₃=5500 sccm, TEGa= 60 sccm, TMIn= 200 sccm

GaN tabaka : T= 765°C - 200 mbar, NH₃=5500 sccm , TEGa =60 sccm

AlN ara tabaka : T= 1075°C - 50 mbar NH₃= 200 sccm, TMAI= 10 sccm

AlGaIn engel: $T = 1075^{\circ}\text{C}$ - 50 mbar $\text{NH}_3 = 500$ sccm, $\text{TMAI} = 10$ sccm, $\text{TMGa} = 5$ sccm

GaN koruma: $T = 1075^{\circ}\text{C}$ - 50 mbar $\text{NH}_3 = 500$ sccm, $\text{TMGa} = 5$ sccm

Numune-A büyüme koşulları

Numune-B ile büyüme koşulları aynen uygulandı. Fakat InGaIn tabakası büyütülmedi.

Numune-C büyüme koşulları

Numune-B ile büyüme koşulları aynen uygulandı. Farklı olarak sadece GaN kanal tabakasının kalınlığı 10 nm olacak şekilde büyüme süresi artırıldı.

Numune-D büyüme koşulları

Numune-B ile büyüme koşulları aynen uygulandı. Farklı olarak sadece GaN kanal tabakasının kalınlığı 15 nm olacak şekilde büyüme süresi artırıldı.

Numune-E büyüme koşulları

Numune-C ile büyüme koşulları aynen uygulandı. Farklı olarak sadece In alaşım oranını azaltmak için InGaIn arka engel tabakasının büyüme sıcaklığı $T = 795^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarıldı.

Numune-F büyüme koşulları

Numune-C ile büyüme koşulları aynen uygulandı. Farklı olarak sadece In alaşım oranını artırmak için InGaIn arka engel tabakasının büyüme sıcaklığı $T = 750^{\circ}\text{C}$ 'ye düşürüldü.

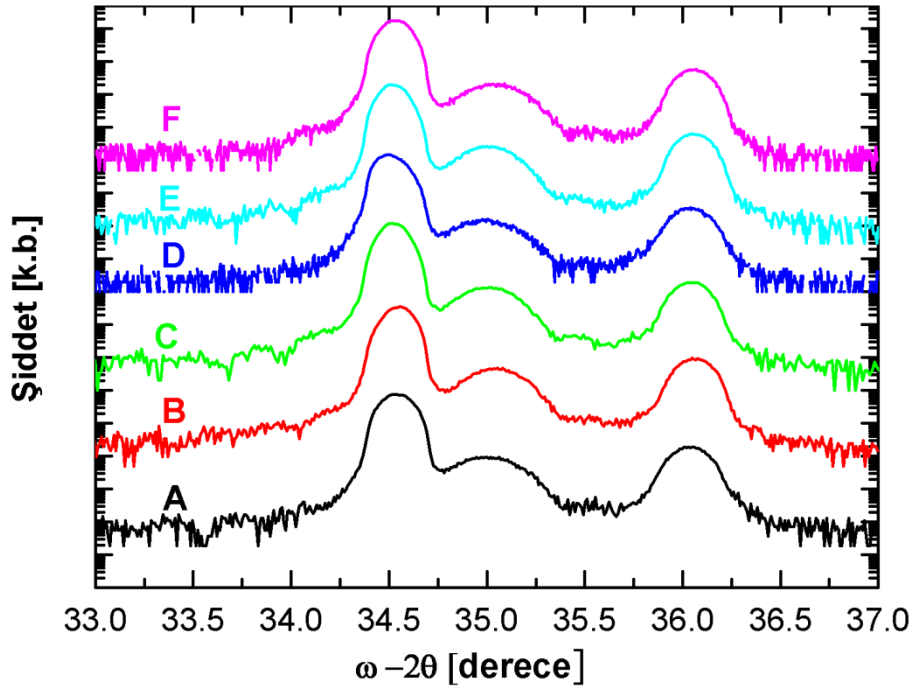
5.3.2. Yüksek çözünürlüklü XRD ölçümleri

Numunelerin yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı ölçümleri Bruker D8 Discover X-ışını kırınım cihazı ile yüksek çözünürlüklü Ge (002) monokromatörü kullanılarak yapıldı. Numunelerdeki AlGaIn ve InGaIn tabakalarının Al ve In oranları Leptos 4.02 programı kullanılarak bulundu. Ayrıca taramaların pik pozisyonlarından Bragg yasası kullanılarak elde edilen düzlemler arası d uzaklık (d - d_0)/ d ifadesinde kullanarak c -yönündeki gerilme (strain) değerleri elde edildi. Bu değerler Çizelge 5.3'te verildi.

Çizelge 5.3. Numunelerden alınan XRD ölçümlerine göre hesaplanan Al ve In oranları ve zorlama değerleri

Numune	Al oranı (%)	In oranı (%)	InGaIn gerilme	AlGaIn gerilme
A (kontrol)	23,6	-	-	$-2,87 \times 10^{-02}$
B	23,6	10,6	$1,08 \times 10^{-02}$	$-2,42 \times 10^{-02}$
C	23,6	10,1	$1,30 \times 10^{-02}$	$-2,49 \times 10^{-02}$
D	23,6	19,8	$2,52 \times 10^{-02}$	$-3,66 \times 10^{-02}$
E	23,6	5,1	$1,12 \times 10^{-02}$	$-3,32 \times 10^{-02}$
F	23,6	15,3	$1,09 \times 10^{-02}$	$-2,29 \times 10^{-02}$

Büyütülen numunelerin yüksek çözünürlüklü XRD ölçümlerinden elde edilen (002) simetrik düzlemlerine ait ω -2 θ X-ışını kırınım deseni Şekil 5.25'te verildi. Simetrik (0002) düzleminde elde edilen üç temel pik; GaIn tampon tabakası ($34,5^\circ$), AlGaIn engel tabakası ($35,0^\circ$) ve AlIn çekirdekleşme tabakasından ($36,1^\circ$) elde edilen Bragg yansımalarıdır. GaIn pikinde herhangi bir yarıma gözlenmemesi tampon tabakanın iyi bir uyum ile alttaş üzerine büyümüş olduğunu göstermektedir. InGaIn tabakasına ait pik çok düşük şiddetli olduğu için pek iyi görülememektedir. InGaIn tabaka kalınlığının 1 nm kadar çok ince olması nedeniyle yansılardan gelen şiddetin yeterli olmamasının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir.



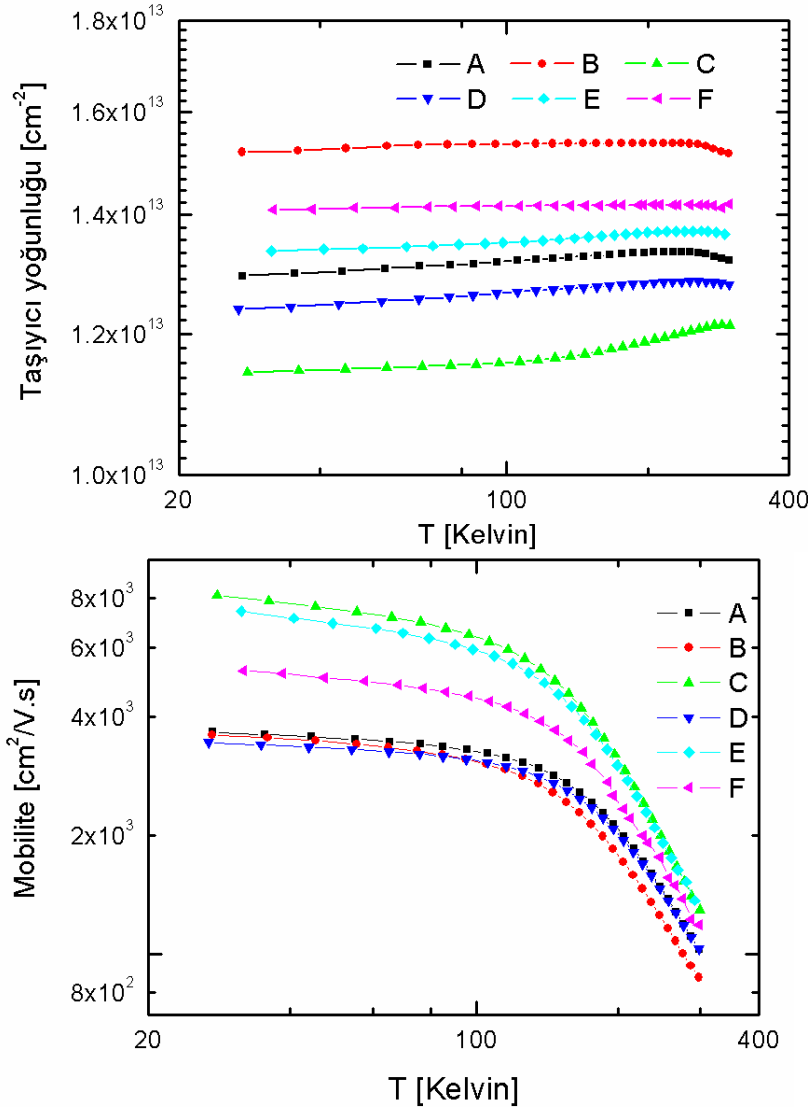
Şekil 5.25. Büyütülen numunelerin yüksek çözünürlüklü XRD ölçüm sonucu

5.3.3. Hall ölçümleri ve saçılma analizleri

Büyütülen numunelerin sıcaklığa bağlı Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Bu amaçla kare şeklinde yaklaşık $7 \times 7 \text{ mm}^2$ olarak kesilmiş numunelerin dört köşesine metalizasyon ve tavlama ile Ohmik kontaklar hazırlandı. Hazırlanan kontaklar üzerinden Van der Pauw yöntemi kullanılarak Hall etkisi ölçümleri alındı. Ölçümler 30K – 300 K sıcaklık aralığında sabit (0.4 Tesla) manyetik alanda yapıldı. Elde edilen ölçüm ve analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.26 ve Şekil 5.29’da gösterilmektedir. Numunelere ait bazı yapısal parametreler ve oda sıcaklığındaki Hall ölçüm sonuçları özeti Çizelge 5.4’te gösterilmektedir.

Şekil 5.26’daki grafikten görüleceği üzere mobilite değerleri sıcaklığın artmasıyla azalmakta fakat düşük sıcaklıklarda mobilite sıcaklık değişiminden çok etkilenmemektedir. Bununla birlikte, taşıyıcı yoğunluğu değerleri ölçülen sıcaklık aralığında nerdeyse sıcaklıktan bağımsızdır. Taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitenin bu şekilde karakteristik göstermesi taşıyıcıların yapıdaki uzaysal dağılımının 2 boyutlu olduğuna işaret etmektedir. Bu durum ise HEMT yapıları için istenen bir durumdur.

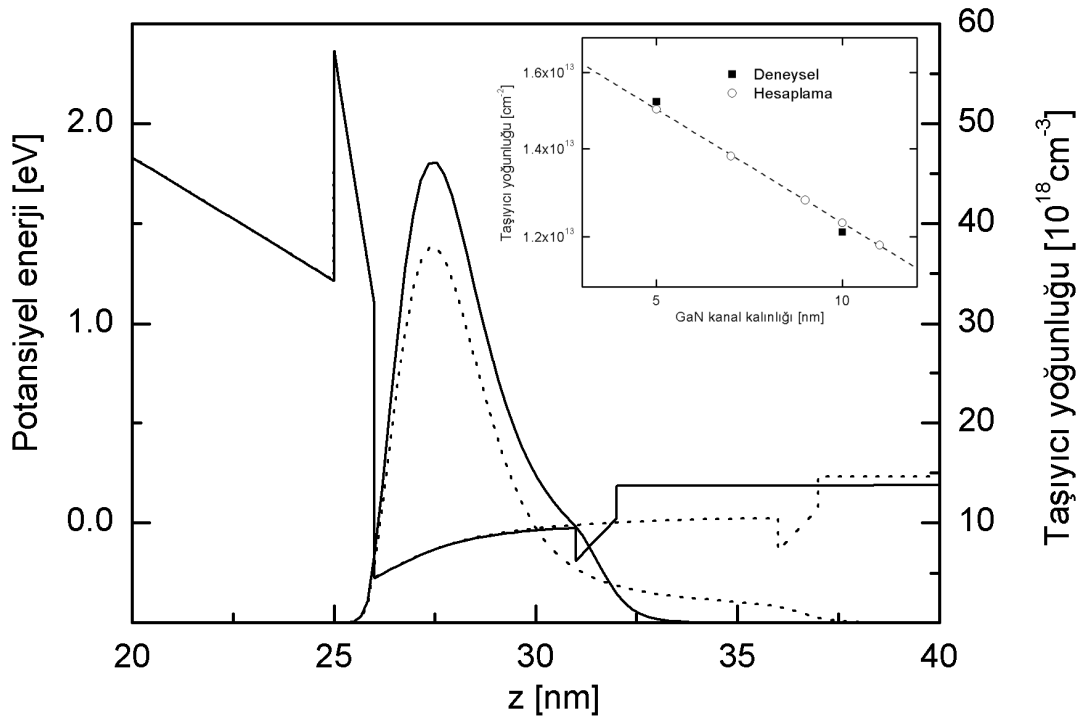
InGaN arka engel kullanılan numunelerin genellikle standart yapıya göre daha yüksek mobilite ve taşıyıcı yoğunluğuna sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle, standart yapıya eklenen InGaN arka engelin yapıdaki 2DEG sınırlandırmasını geliştirmeye ve mobilitesini artırmaya yönelik pozitif bir katkı yaptığı söylenebilir.



Şekil 5.26. Büyütülen numunelerde ölçülen sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerlerinin grafiksel gösterilimi

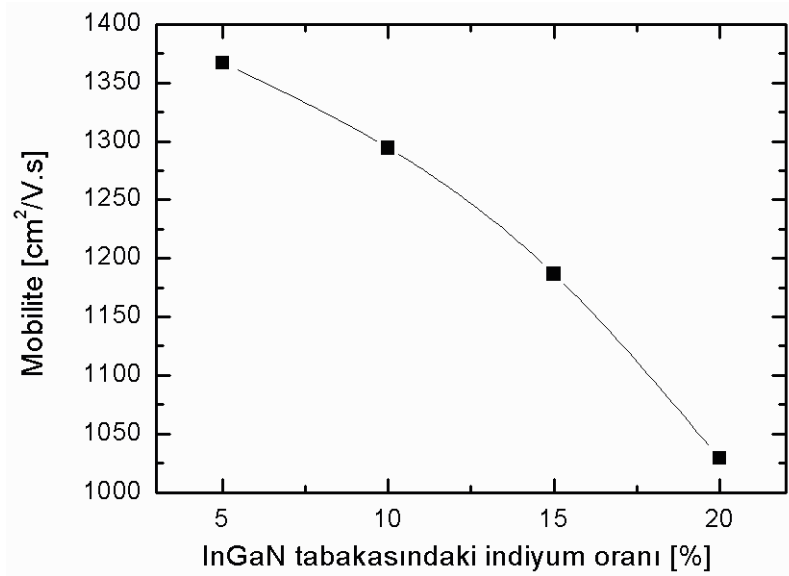
Parametrik değişim uygulanan C, E ve F numunelerinin ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında mobilitesi en yüksek olan C numunesinin beklenildiği gibi taşıyıcı yoğunluğunun en düşük olduğu görülmektedir. Bu numuneler arasında

mobilitesi en düşük olan F numunesinin ise taşıyıcı yoğunluğunun en yüksek olduğu görülmektedir. D numunesinin mobilitesi düşükken taşıyıcı yoğunluğunun da düşük olduğu gözlenmektedir. Mobilitenin düşük olmasının nedeni D numunesinin artan In oranı ve taşıyıcı yoğunluğunun düşük olmasının nedeni ise artan GaN kanal kalınlığı olduğu düşünülmektedir. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN yapılarında farklı GaN kanal kalınlıkları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı ve taşıyıcı yoğunluğu dağılımı Şekil 5.27’de gösterilmektedir. Ayrıca 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun GaN kanal kalınlığına göre değişimi deneysel ve hesaplamalarla gösterilmiştir. Şekil 5.28’de ölçülen mobilitelerinin InGaIn arka engel tabakasındaki indiyum oranına bağlı değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. İndiyum oranının artması kristal kalitesinin azalmasına ve dolayısıyla kanaldaki arayüzey saçılmasının artmasına neden olmuştur.



Şekil 5.27. AlGaIn/AlN/GaN/InGaIn/GaN yapılarında 5 nm (düz çizgi) ve 10 nm (kesikli çizgi) GaN kanal kalınlığı için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı ve taşıyıcı yoğunluğu dağılımı. Küçük grafikte taşıyıcı yoğunluğunun GaN kanal kalınlığına göre değişimi deneysel ve hesaplamalarla gösterilmiştir

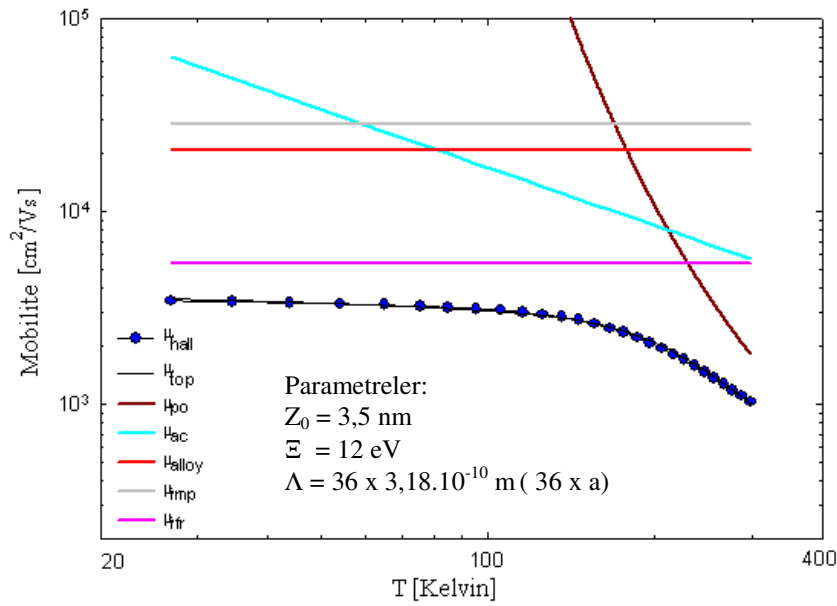
Ayrıca bu numuneler üzerinde saçılma analizleri gerçekleştirildi. Bu analizlerde kullanılan parametreler Çizelge 2.2’ de verildi. Hesaplamalarda arka plan safsızlık miktarı (N_d) olarak 10^{-23} m^{-3} [116] ve arayüzey bozukluğunun yanal boyut değeri (Δ) $2 \times 2,58 \times 10^{-10} \text{ m}$ (iki monotabaka kalınlığı) [88] olarak alındı. Saçılma mekanizmalarındaki diğer parametreler; kuyu genişliği (Z_0), deformasyon potansiyeli (Ξ) ve korelasyon uzunluğu (Λ) ayarlanabilir parametre olarak kullanıldı. Hesaplanan mobilteinin deneysel mobilteye en iyi uyumluluğu sağlayan kuyu genişliği (Z_0), deformasyon potansiyeli (Ξ) ve korelasyon uzunluğu (Λ) parametreleri belirlendi. Yapılan analizlerde, polar optik fonon saçılması (PO), akustik fonon saçılması (AC) (deformasyon potansiyel saçılması ve piezoelektrik saçılmaları içeren), arka plan safsızlık saçılması (IMP), alaşım saçılması (ALLOY) ve arayüzey pürüzlülük saçılması (IFR) mekanizmalarına ait mobiliteler hesaplandı. Her bir saçılma mekanizmasından gelen katkılar Matthiessen kuralı uyarınca toplanarak toplam mobilite elde edildi.



Şekil 5.28. Ölçülen mobilite değerlerinin InGaN arka engel tabakasındaki indiyum oranına bağlı değişimi

Yapılan saçılma analizlerinden D numunesine ait olanı Şekil 5.29’da verilmektedir, diğer numuneler için de benzer saçılma analizleri gerçekleştirildi. D numunesinde diğer numunelere göre ara yüzey pürüzlülük saçılmasının oldukça baskın olduğu

görüldü. Bu da mobilitayı sınırlayan oldukça önemli bir faktördür. AlN ara tabaka kullanılması sayesinde, numunelerde alaşım saçılması baskın olmamıştır. Analiz sonuçlarına göre düşük sıcaklıklarda ($T < 200$ K) toplam mobilitenin sadece ara yüzey pürüzlülük saçılması ile sınırlandığı, yüksek sıcaklıklarda ($T > 200$ K) ise baskın saçılma mekanizmasının polar optik fonon saçılması olduğu görüldü. Akustik fonon saçılmasının etkisinin de ihmal edilebilir düzeyde olduğu görüldü.



Şekil 5.29. D numunesine ait saçılma mekanizması analizinin grafiksel gösterilimi

Çizelge 5.4. Büyütülen numunelere ait bazı yapısal parametreler ve oda sıcaklığındaki Hall ölçüm sonuçlarının özeti

Numune	A	B	C	D	E	F
In oranı (%)	-	10	10	20	5	15
GaN kanal kalınlığı (nm)	-	5	10	15	10	10
Mobilite @300K (cm²/V.s)	1029	872	1294	1029	1367	1186
2DEG yoğunluğu @300 K ($\times 10^{13}$ cm⁻²)	1,32	1,52	1,21	1,27	1,36	1,41
Tabaka direnci @300 K (Ω/sq)	460	471	399	478	336	374

Numunelerde ara yüzey pürüzlülüğü saçılmasının bu kadar fazla etkili olması InGaN tabakasının kristal kalitesine bağlanmaktadır. Indiyum atomları küçük ve akışkanlıkları fazla olduğundan kontrollü büyütülmesi zor olmakta ve topaklı (cluster) InGaN tabakalarının büyümesi kristal kalitesini düşürmektedir [114]. E numunesi ($\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$, $t_{\text{GaN-kanal}}=10$ nm) 2DEG yoğunluğu ve mobilitesi bakımından büyütülen numuneler arasında en iyi optimize edilmiş yapı olarak gözükmektedir. E numunesinde ölçülen mobilite değeri ($1367 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) standart $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısındaki değerden ($1029 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç, GaN tampon tabakası ile GaN kanalı arasına bir InGaN tabakasının eklenmesinin 2DEG sınırlandırmasında etkili olduğunu ve mobilitayı artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, MOCVD büyütme koşullarının ve tabaka parametrelerinin daha iyi kalitede InGaN tabakası verecek şekilde optimize edilmesi durumunda daha yüksek mobilite değerine ve daha düşük tabaka direncine sahip HEMT yapılarının elde edilebileceği ön görülmektedir.

5.4. AlInN Engelli Çoklu HEMT Yapıları

AlGaN/GaN kuantum kuyusundaki taşıyıcı yoğunluğunu artırmanın en etkin yolunun, engel katmanındaki gerilmeyi artırarak AlGaN tabakasındaki Al miktarını artırmak olduğu bilinmektedir. Öte yandan, bu yöntemin en sorunlu yanı engel katmanında muhtemel bir rahatlamayla piezoelektrik kaynaklı yüklerin azalmasına neden olmasıdır. Ayrıca, x arttıkça AlGaN 'ın kristalografik kalitesi oluşabilecek kusurlardan dolayı azalmaktadır. Bu da elektron mobilitasını azaltmakta ve sızma akımlarını artırmaktadır. AlGaN engel katmanı yerine GaN ile örgü uyumlu AlInN katmanı büyütüldüğünde engel katmanındaki gerilme miktarı azaltılabilir. GaN ile örgü uyumlu olarak büyütülen AlInN yapılarında elektron yoğunluğu sadece kendiliğinden polarizasyon ile sağlanır. AlGaN/GaN yapılarındaki gerilme kaynaklı kusurların ve rahatlamamanın getireceği performans ve güvenilirlik sorunları AlInN çoklu yapıları ile elimine edilebilir. Literatürde AlInN çoklu yapıları ile ilgili çalışmalar yapılmış olmasına rağmen yüksek elektron mobilitesi ve düşük kaçak akımlar elde etmek için oldukça önemli olan tampon tabakalar için alternatif epitaksiyel yapılar üzerinde sistematik çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle

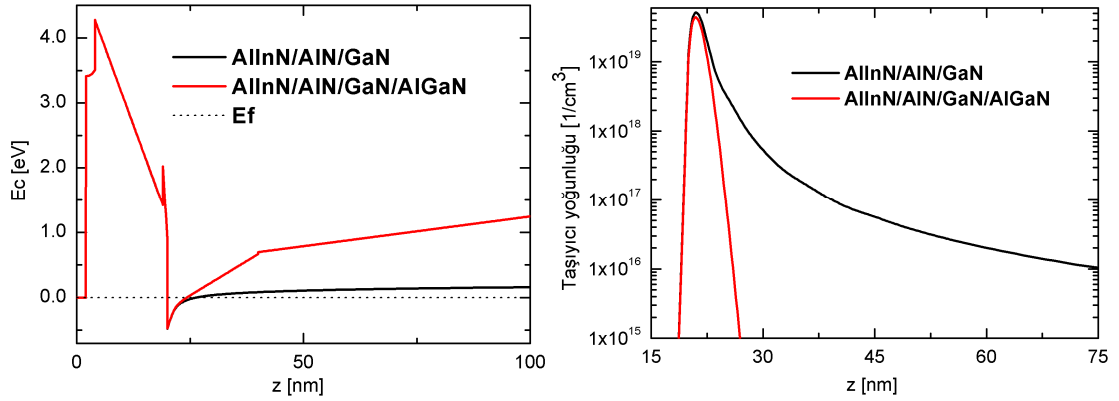
AlGaIn/GaN çoklu yapılarda kanaldaki elektron sınırlandırmasını artırmak için uygulanmış olan AlGaIn tampon tabakaları [117-121] AlInN çoklu yapılarına eklendi ve tabaka parametreleri sistematik olarak değiştirilerek elektriksel ve yapısal özelliklere olan etkiler incelendi. Ayrıca AlInN/AlGaIn çift engelli yapıların da analizleri yapıldı.

5.4.1. AlInN engelli çoklu HEMT yapılarının bant analizleri ve tasarımları

AlInN çoklu yapılarının tabaka tasarımlarında nextnano³ programından faydalanılmıştır. Simülasyon için kullanılan standart yapı ve AlGaIn tampon tabakasına sahip yapının tabakalarının şematik gösterilimi Şekil 5.30'da verilmektedir. Şekil 5.31'den görüleceği üzere elektron kanalına AlGaIn tampon tabakasının sağladığı 1.2 eV'luk arka engel enerjisi elektronların kanalda çok daha iyi sınırlandırmasını sağlamakta ve daha dar bir dağılım elde edilmektedir. Bu da standart yapıya göre hem sızma akımlarının azalması hem de elektron mobilitésinin artması yönünde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

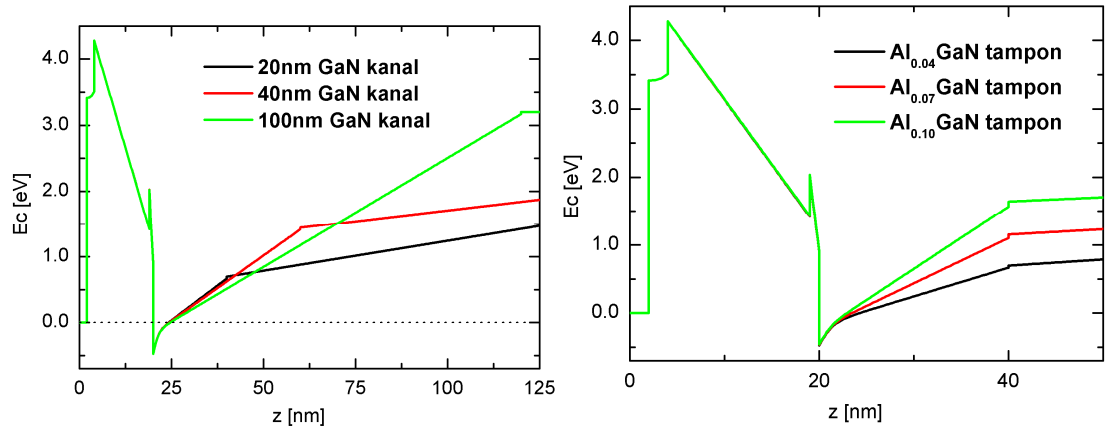
GaN kapak 2 nm	GaN kapak 2 nm
$\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ 8 nm	$\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ 8 nm
AlN 1 nm	AlN 1 nm
GaN tampon 2 μm	GaN kanal 20 nm
Safir alttaş	$\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ tampon 1.1 μm
	Safir alttaş

Şekil 5.30. Nextnano hesaplamalarında kullanılan standart AlInN çoklu yapısı ile AlGaIn tampon tabakasına sahip AlInN çoklu yapısının şematik gösterimi

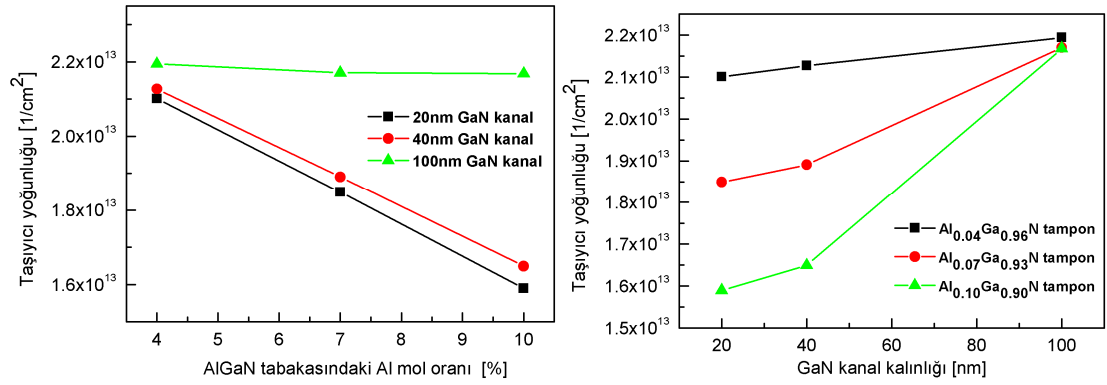


Şekil 5.31. GaN tampon tabakası ile AlGaN tampon tabakasına sahip AlInN çoklu yapıları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramı ve taşıyıcı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.31’de verilen hesaplamalar $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ tampon tabakası ve 20 nm GaN kanal kalınlığı için yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda GaN kanal kalınlığı ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tampon tabakasındaki Al mol oranının taşıyıcı yoğunluğuna ve elektron sınırlandırmasına etkileri olacağı görülmüştür. Bu değişimlerin enerji bandına etkisi Şekil 5.32’de, taşıyıcı yoğunluğuna etkisi ise Şekil 5.33’te gösterilmiştir.

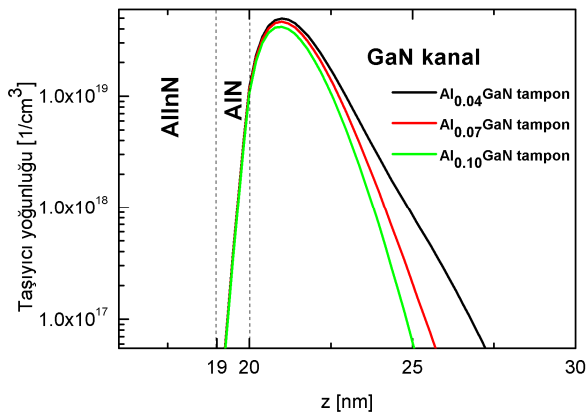


Şekil 5.32. Farklı GaN kanal kalınlıkları ve AlGaN tampon tabakasındaki Al mol oranları için hesaplanan iletim bandı enerji diyagramları



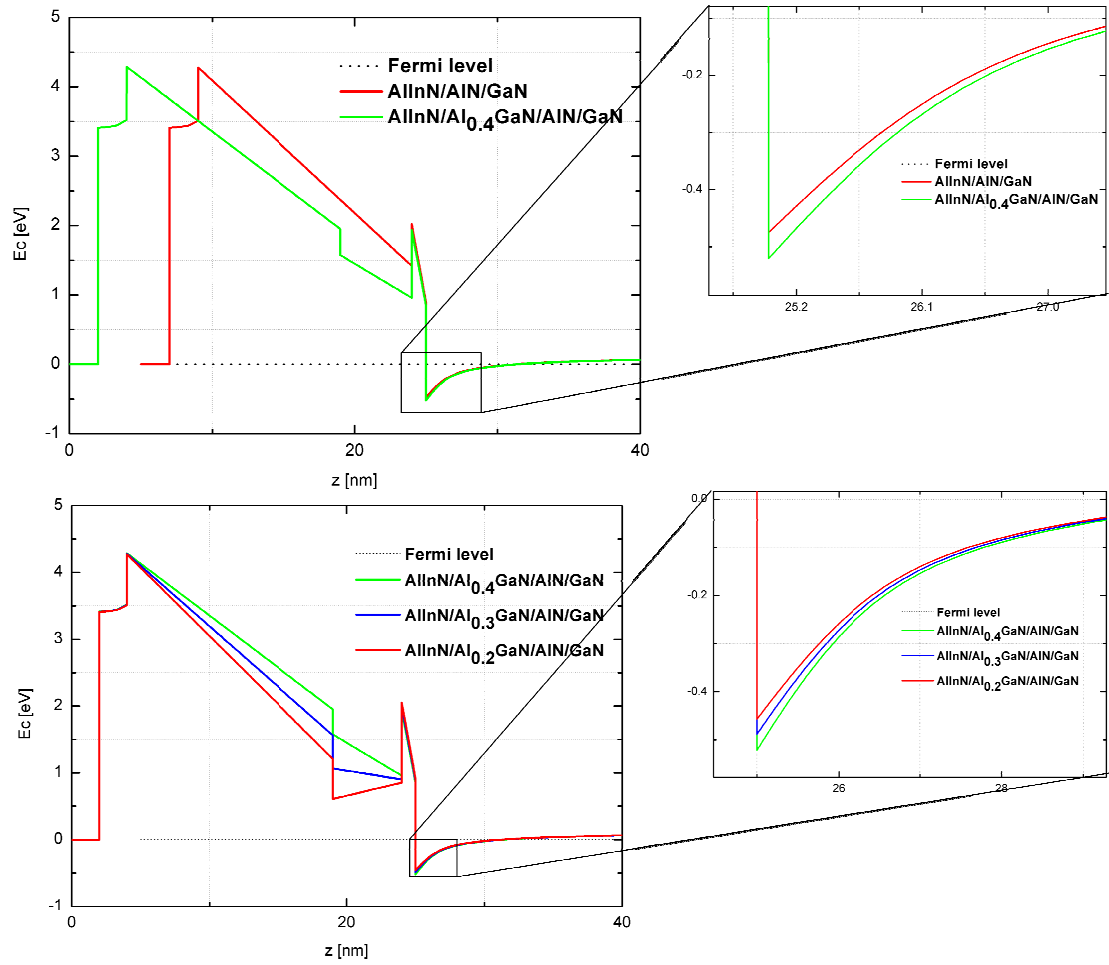
Şekil 5.33. GaN kanal kalınlığı ve AlGaIn tampon tabakasındaki Al mol oranının parametrik olarak değiştirilerek hesaplanan taşıyıcı yoğunlukları

Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'den görüleceği üzere GaN kanal kalınlığı arttıkça taşıyıcı yoğunluğu da artmaktadır. Çünkü AlGaIn tampon tabakasının etkinliği azalmaktadır. GaN kanal kalınlığını daha da artırmak artık sadece GaN tampon tabakası varmış gibi bir etki yapmaktadır. Diğer yandan, GaN kanal kalınlığını sabit tutarak AlGaIn tampon tabakasındaki Al mol oranını artırmak arka engeldeki enerji bandı süreksizliğini (farkını) artırmakta ve dolayısıyla daha iyi elektron sınırlandırması elde edilmektedir. Fakat bunun karşılığında AlGaIn tampon/GaN kanal ara yüzeyindeki negatif piezo-elektrik polarizasyon yüklerinin kanaldaki elektronları azaltmasından kaynaklı olarak taşıyıcı yoğunluğunda bir azalma gözlenir. Şekil 5.34'ten görüldüğü üzere Al mol oranı arttıkça taşıyıcı yoğunluğunda daha dar bir dağılım elde edilmektedir.



Şekil 5.34. AlGaIn tampon tabakasındaki Al mol oranının farklı değerleri için hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu dağılımları

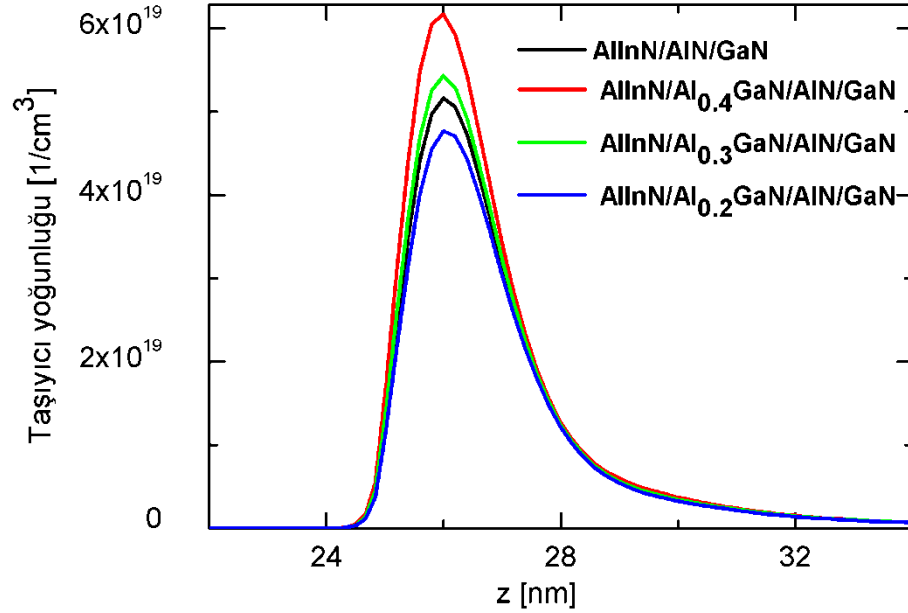
Bu tasarımlara ek olarak AlInN/AlGaN çift engelli yapıların mobilitayı artıracak literatürde gösterilmiş [122] fakat üzerinde yeterince çalışılmamıştır. AlInN engeline eklenecek ince bir AlGaN tabakasının kuantum kuyusundaki elektronları üst engel bölgesinde daha iyi sınırlandıracağı görülmektedir.



Şekil 5.35. AlInN/AlGaN çift engelli yapı ve standart AlInN engelli yapı için hesaplanan enerji bant diyagramları

Çift engelde kullanılan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tabakasının Al mol oranının enerji bant yapısına ve dolayısıyla hem mobiliteye hem de taşıyıcı yoğunluğuna etkisi olacağı görülmektedir. Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'dan görüleceği üzere Al mol oranı arttıkça kuantum kuyusu derinleşmekte ve taşıyıcı yoğunluğu artmaktadır. Ayrıca kuantum kuyu genişlikleri hesaplandığında Al mol oranı 0,4 olan yapının diğerlerine göre

daha dar kuyu genişliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durumda mobilitenin artması beklenmektedir.



Şekil 5.36. AlInN/AlGaN çift engelli yapılar ve standart AlInN engelli yapı için hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu dağılımları

Yukarıda anlatıldığı şekilde epitaksiyel yapı tasarımları yapıldıktan sonra seçilen bazı yapıların MOCVD sisteminde büyütme işlemi yapılmıştır. Büyütülen yapıların tabaka ayrıntıları Şekil 5.37’de verilmektedir.

GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) AlN (1 nm) GaN tampon (2 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2277	GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) AlN (1 nm) GaN kanal (20 nm) $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ tampon (1.1 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2285
--	--

Şekil 5.37. MOCVD sisteminde büyütülen AlInN çoklu yapılarının ayrıntılı yapısı

GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) AlN (1 nm) GaN kanal (40 nm) $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ tampon (1.1 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2286	GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) AlN (1 nm) GaN kanal (20 nm) $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ tampon (1.1 μm) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ $x=1$ 'den 0.04'e lineer (450 nm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2288
GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ (3 nm) AlN (1 nm) GaN tampon (2 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2293	GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ (6 nm) AlN (1 nm) GaN tampon (2 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2294
GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ (4.5 nm) AlN (1 nm) GaN tampon (2 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2296	GaN kapak (2 nm) $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ (8 nm) $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ (4.5 nm) AlN (1 nm) GaN kanal (40 nm) $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ tampon (1.1 μm) HT AlN tabakası (0.4 μm) AlN çekirdekleşme tabakası (15 nm) Safir alttaş B2298

Şekil 5.37. (Devam) MOCVD sisteminde büyütülen AlInN çoklu yapılarının ayrıntılı yapısı

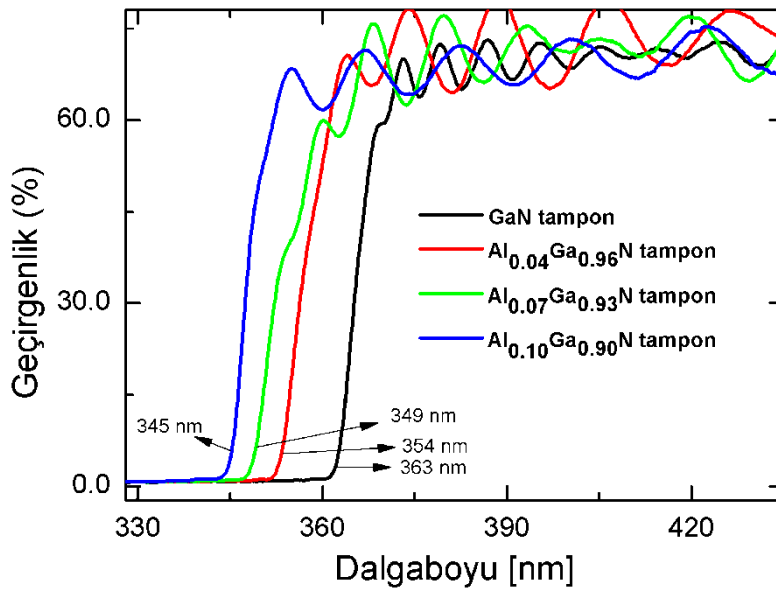
Büyütülen yapılardan B2277 standart AlInN/AlN/GaN HEMT yapısıdır ve kontrol numunesi olarak kullanılacaktır. B2285, B2286 ve B2288 numuneleri AlGaIn tampon tabakaların etkisini görmek amacıyla büyütülen yapılardır. B2293, B2294, B2296 ve B2298 numuneleri ise AlInN/AlGaIn çift engelli yapılardır.

5.4.2. AlGaN tampon tabakalı AlInN HEMT numunelerin yapısal özelliklerinin incelenmesi

Büyütülen yapılardan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tampon tabaka kullanılanlarda Al mol oranının belirlenmesi için optik geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 5.38’de gösterilmektedir. Bu ölçümlerdeki kesim dalga boyları kullanılarak enerji bant aralıkları ve Vegard yasası ile x mol oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan Al mol oranlarının beklenen değerlerde elde edildiği görülmüştür. Hesaplama için kullanılan Vegard yasası şu şekilde verilmektedir:

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x E_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - bx(1-x) \quad (5.1)$$

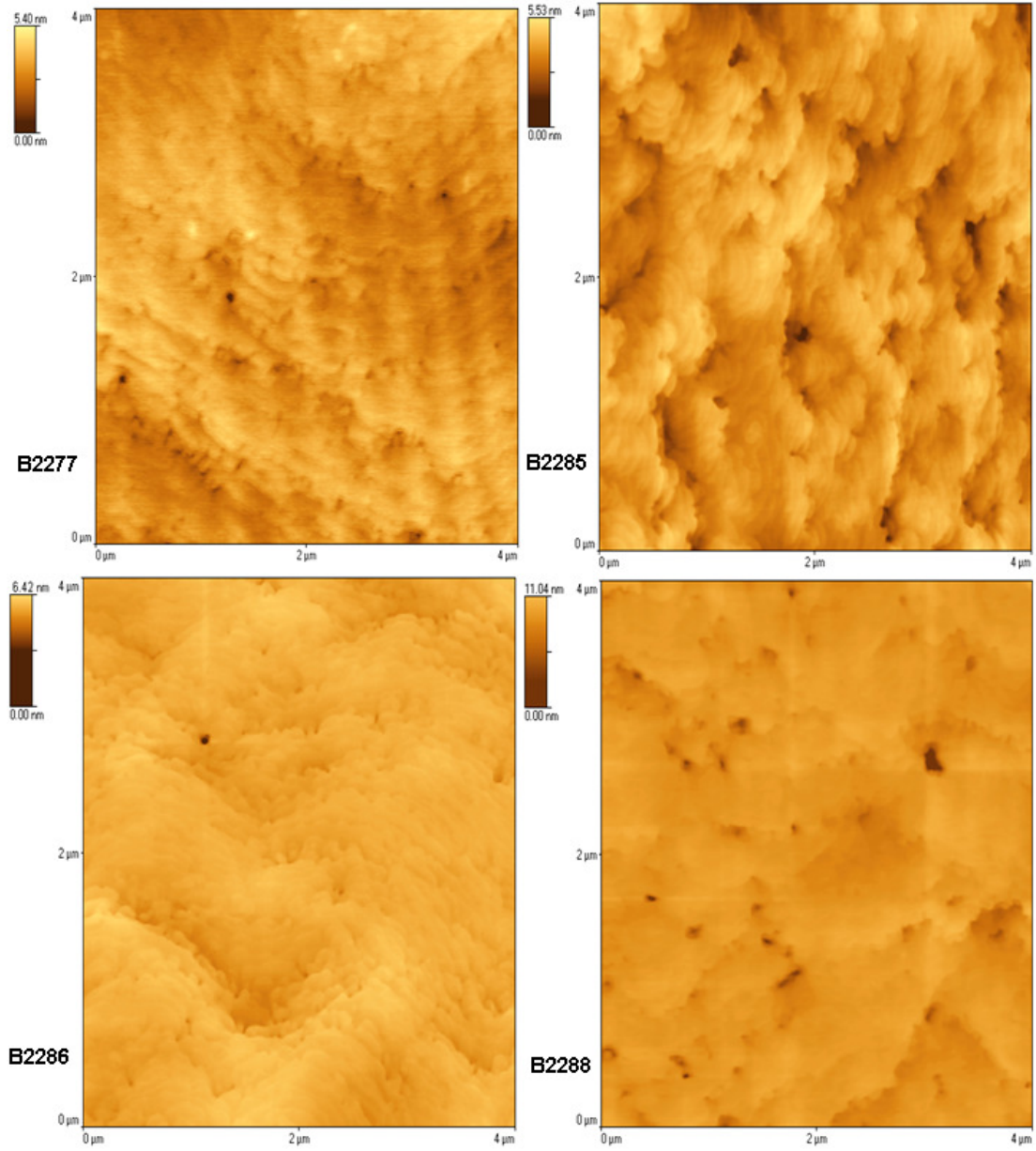
Eş. 5.1’de b , bükülme (bowing) parametresidir ve 1,3 olarak alınmıştır [123].



Şekil 5.38. AlInN çoklu yapılarından alınan optik geçirgenlik ölçümleri

Büyütülen AlInN çoklu yapılarının yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek amacıyla AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ile ölçümler alınmıştır. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numunelerin GaN kapak tabakası yüzeyinden alınan $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ tarama alanlı AFM ölçüm sonuçları Şekil 5.39’da gösterilmektedir. Yüzeylerde

genellikle basamaklar ve rastgele yönelimli teraslar gözlenmektedir. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler için rms yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 0,54 nm, 0,58 nm, 0,51 nm ve 0,70 nm olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler yüzeylerin düzgün olduğunu ve genel olarak GaN yüzeyi üzerindeki değerlerle uyumlu olduğunu göstermektedir. B2288 nolu numunenin diğerlerine göre daha yüksek rms değerine sahip olması üzerindeki siyah noktaların ve dar basamakların fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzey pürüzlülüğü değerleri mobilite ölçümleriyle de uyumludur. Yüzey pürüzlülüğü düşük olan numunelerin mobiliteleri yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeninin ara yüzey saçılma mekanizması olduğu düşünülmektedir.

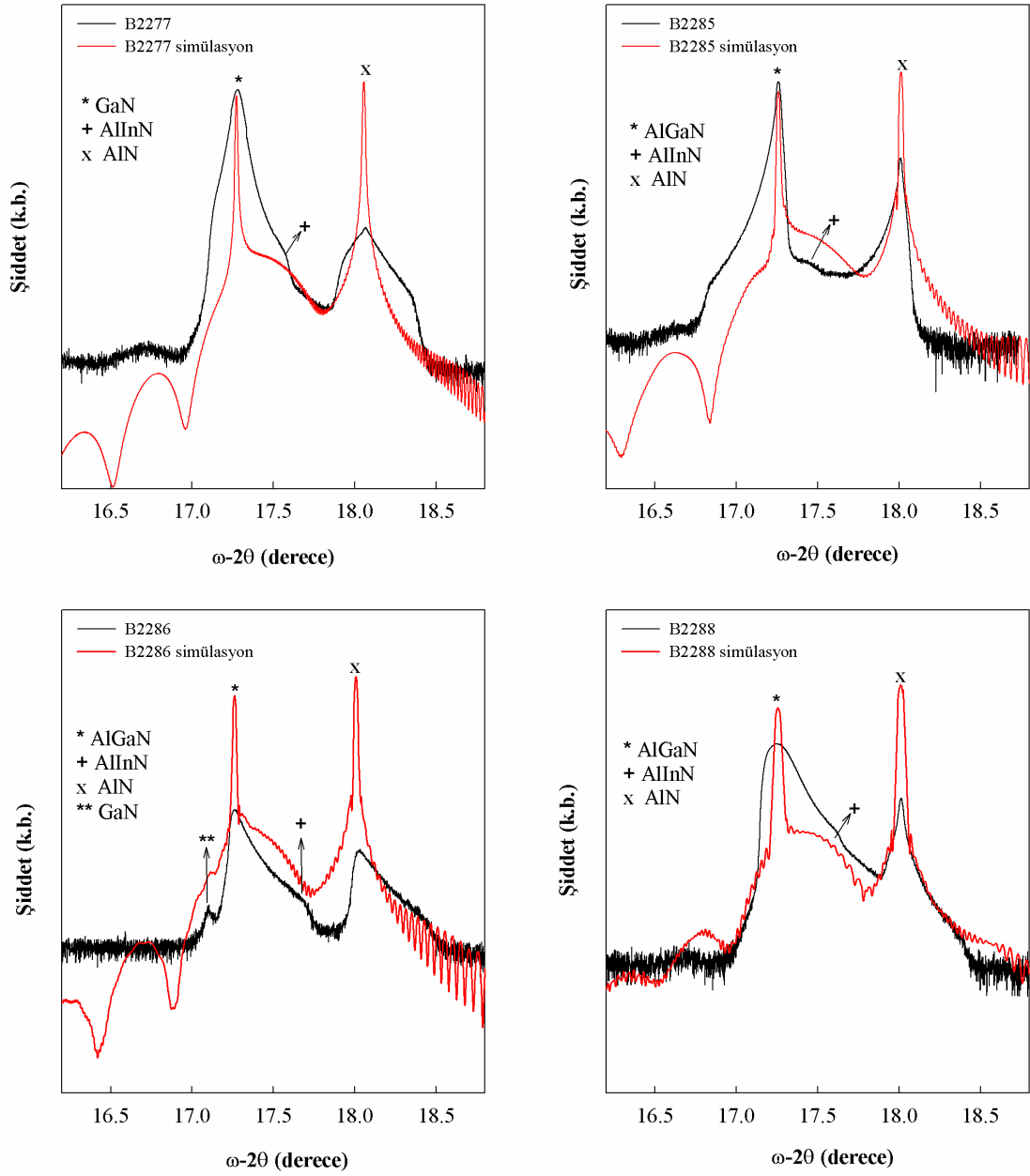


Şekil 5.39. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler üzerinden alınan 4μm x 4μm’luk AFM ölçümü

Numunelerin yapısal kalitesi ve alaşım oranları XRD tekniği ile araştırıldı. Öncelikle numunelerin hedeflenen yapıları θ -2 θ taramaları ile doğrulandı. Daha sonra simetrik (0002) düzlemi civarında ω -2 θ taramalarından malzemelerin yapısı analiz edildi. Şekil 5.40’ta B2277, B2285, B2286 ve B2288 no’lu numunelerin yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) (0002) ω -2 θ taraması ve aynı zamanda simülasyon verileri görülmektedir. Ölçülen HR-XRD verileri üzerinden yapı

simülasyonu LEPTOS 4.02 programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu programda AlInN engel tabaka kalınlığı, indiyum alaşım oranı, AlGa_N tabaka kalınlığı ve Al alaşım oranı fit parametresi olarak seçilmiştir. Grafiklerde görülen iki temel pik, GaN tampon tabakası (B2277)/Al_{0.04}Ga_{0.96}N tampon tabakası (B2285,B2286,B2288) ile AlN tabakasından gelen (0002) düzlemi sıfırıncı-dereceden Bragg yansımalarıdır. B2277, B2285, B2286-B2288 no'lu numuneler için AlInN engel tabakasındaki indiyum oranları sırasıyla 19.5%, %20, ve %21 olarak program yardımıyla hesaplanmıştır. Numunelerdeki indiyum oranı farklılığı tabakalardaki farklı gerginliklerden kaynaklı alaşım oranı çekilme etkisi ile açıklanmaktadır [119].

B2277, B2285, B2286 ve B2288 no'lu numunelerdeki AlGa_N(Ga_N)/AlN tabakalarının simetrik (0002) düzleminden elde edilen pik yüksekliği yarı genişlikleri (FWHM) sırasıyla 256/634, 165/190, 187/183 ve 666/136 arcsec olarak belirlendi. B2285, B2286 ve B2288 numunelerinin FWHM değerleri karşılaştırıldığında, Al oranı lineer değişen AlGa_N tabakasının yapıya eklenmesinin (B2288'de) daha yayvan bir AlGa_N piki elde edilmesine neden olduğu ve buradan da kristal kalitesinin diğer numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, B2286 nolu numunedeki GaN kanal tabakasının piki B2285 nolu numune ile kıyaslandığında AlGa_N tampon tabakasından daha belirgin biçimde ayrıldığı gözlenmiştir. Bu da B2286 nolu numunenin tasarımındaki daha kalın GaN kanal tabakasının varlığını doğrulamaktadır.

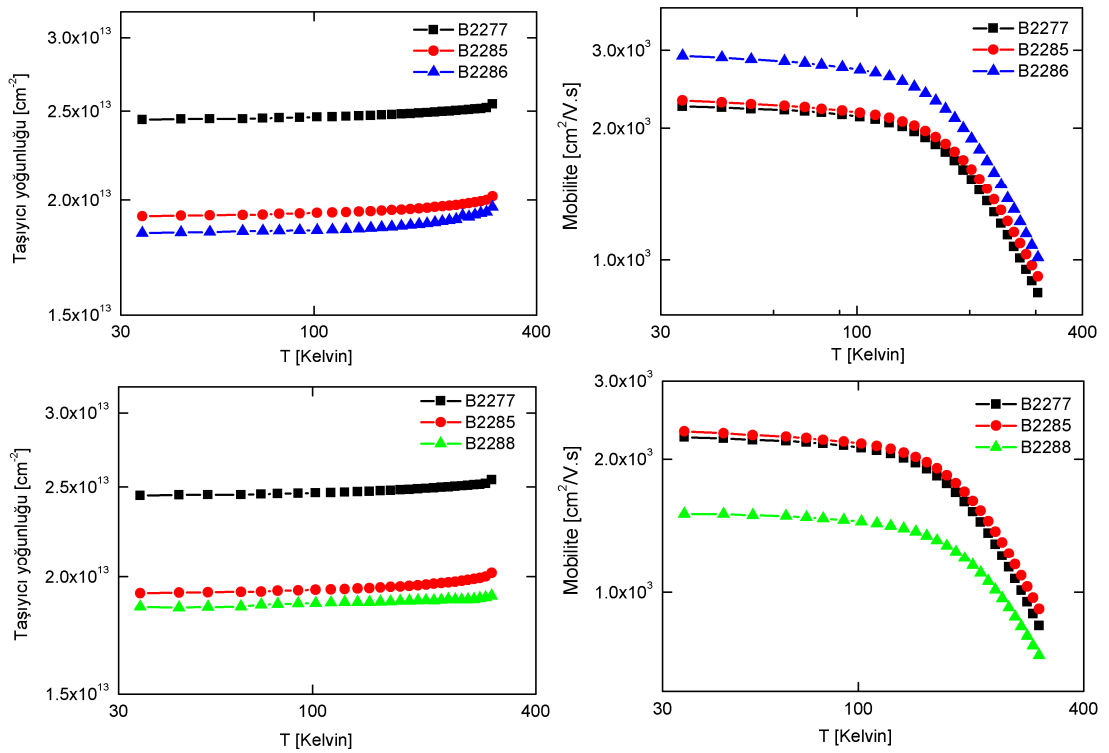


Şekil 5.40. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler için yapılan HR-XRD ölçümleri ve simülasyonları

5.4.3. Hall ölçümleri ve nicel mobilite spektrum analizi (QMSA)

B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler için sıcaklığa bağlı ölçülen taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerleri Şekil 5.41’de grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere taşıyıcı yoğunlukları bütün numuneler için çalışılan sıcaklık aralığı boyunca neredeyse sabit kalmaktadır. Taşıyıcı yoğunluklarının sıcaklığa

bağlı bu davranışı taşıyıcıların tamamıyla AlN/GaN ara yüzündeki dar bölgede 2 boyutlu olarak yer aldığını göstermektedir. B2285 ve B2286 numunelerinde ölçülen mobilite değerleri B2277 kontrol numunesinin mobilitesinden tüm sıcaklık aralığı boyunca yüksek elde edilmekle birlikte, B2288 numunesi numuneler arasında en düşük mobilite değerine sahiptir. Elektron mobilitesinde gözlenen bu artış, piezoelektrik polarizasyon kaynaklı elektron sınırlanması ve $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}/\text{GaN}$ ara yüzünde oluşan yüksek enerji bandı süreksizliğine bağlanmaktadır.



Şekil 5.41. B2277, B2285, B2286 ve B2288 nolu numuneler için sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerlerinin grafiksel gösterimi

Elektron sınırlanması, iyonize safsızlık saçılması ve dislokasyon kaynaklı saçılma etkilerini azaltma ve dolayısıyla mobilitayı artırma yönünde bir etkiye neden olmaktadır [124-125]. Bununla birlikte, B2285 numunesinde (GaN kanalı 20nm) sağlanan mobilite artışı B2286 numunesi (GaN kanalı 40nm) ile sağlanan kadar yüksek değildir. Bunun nedeni, B2285 numunesindeki ince GaN kanalın kristal kalitesini kötüleştirilmesi olarak düşünülmektedir. Alt tabakalardan gelen dislokasyonların ince GaN kanal tabakasını daha kolay geçerek ilerlemiş olabileceği

değerlendirilmektedir. Bu durum AFM ölçümlerinde de daha yüksek rms yüzey pürüzlülüğü şeklinde kendini göstermiştir. B2288 numunesinde düşük mobilite ($723 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) değerlerinin ölçülmüş olması diğer numunelere göre düşük kristal kalitesine sahip olmasından ileri gelmektedir. Buna ek olarak, B2288 numunesinde 2DEG'in bulunduğu kanala paralel olarak Al mol oranı lineer olarak değişen AlGaIn tabakasında düşük mobiliteli 3-boyutlu bir kanal oluşabilmesi olasılığı da söz konusudur [126]. Taşıyıcı yoğunlukları kıyaslandığında B2277 kontrol numunesinin en yüksek ($2,54 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) değere sahip olduğu görülmektedir ki bu önceki bölümlerde yapılan hesaplarla da uyumludur. B2277, B2285, B2286 ve B2288 numaralı numunelere ait bazı yapısal parametreler ve oda sıcaklığındaki Hall ölçüm sonuçlarının özeti Çizelge 5.5'te verilmektedir.

Çizelge 5.5. İncelenen numunelere ait bazı yapısal parametreler ve oda sıcaklığındaki Hall ölçüm sonuçlarının özeti

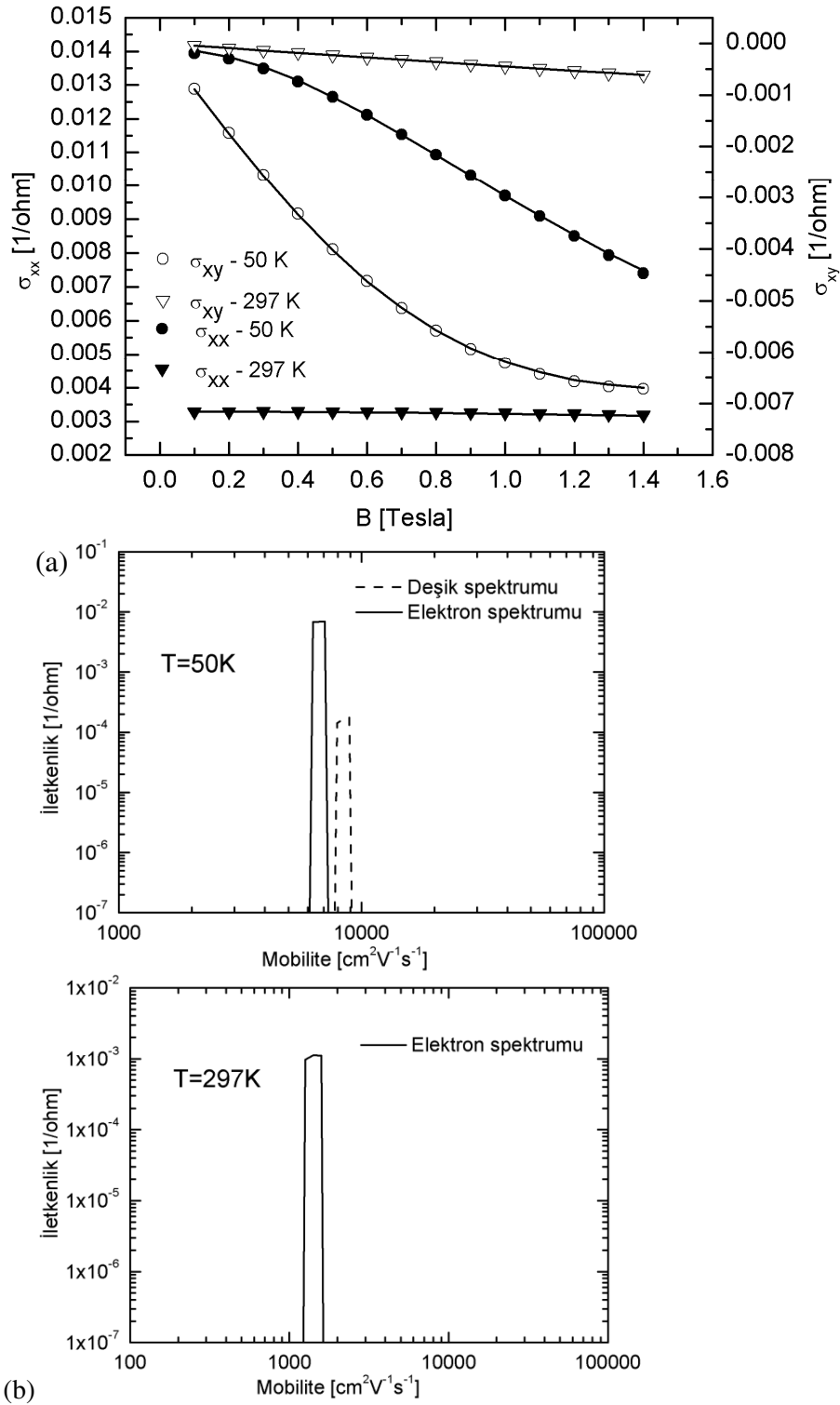
Numune	B2277	B2285	B2286	B2288
Tampon tabaka	GaN	$\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$	$\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$	$\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$ + kademeli $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$
GaN kanal kalınlığı (nm)	-	20	40	20
rms yüzey pürüzlülüğü (nm)	0,54	0,58	0,51	0,70
Mobilite @300K ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	895	918	1013	723
2DEG yoğunluğu @300 K ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)	2,54	2,02	1,97	1,91
Tabaka direnci @300 K (Ω/sq)	292	337	313	453

AlInN/AlN/GaN yapısının AlInN/AlN/GaN/AlGaIn yapısına göre daha yüksek 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmasının nedeni taşıyıcı yoğunluğu dağılımı grafiklerine bakıldığında net olarak görülmektedir. AlInN/AlN/GaN yapısındaki fazla olan taşıyıcılar bariz şekilde GaN tampon tabakaya doğru sızan kısımlardan kaynaklanmaktadır. Bu sızan taşıyıcılar transistör uygulamalarında kanal akımına az bir katkı sağlarken diğer yandan yüksek sızma akımları nedeniyle aygıtlarda düşük kırılma gerilimlerine neden olurlar. Bu nedenle AlGaIn tampon tabakalarına sahip

AlInN HEMT yapılarında tabakalar uygun şekilde optimize edilerek elektronların kanal bölgesinde sınırlanması sağlanabilir ve tampon sızma akımları azaltılabilir.

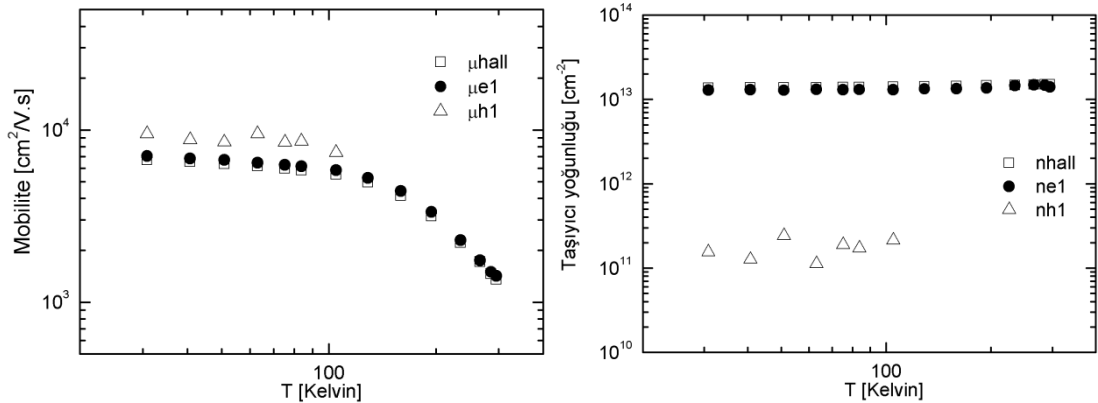
Büyütülen numunelerden Hall ölçümleri manyetik alana bağımlılık gösterenlerde (B2293, B2294, B2296, B2298) Nicel Mobilite Spektrumu Analizi (QMSA) yöntemi uygulanmıştır. Nicel Mobilite Spektrumu Analizi (QMSA), manyetik alan bağımlı Hall ölçümleri ile çoklu-iletme sahip yarıiletkenleri analiz etmek için kullanılan bir metottur [113]. Bu teknik kullanılarak, bir numune içindeki 1-boyutlu, 2-boyutlu ve 3-boyutlu hareket serbestliğine sahip tüm elektron ve deşiklerin taşıyıcı yoğunlukları ve mobiliteleri birbirinden ayrt edilebilir.

Manyetik alanın (0 – 1,4 T) fonksiyonu olarak AlInN HEMT yapılarının öz direnç ve Hall ölçümleri, 30 – 300 K arasında 14 sıcaklık adımında gerçekleştirildi. QMSA tekniği ile, manyetik alan bağımlı öz direnç ve Hall katsayısı verisi kullanılarak öncelikle deneysel iletkenlik tensörleri (σ_{xx} , σ_{xy}) elde edilmektedir. Deneysel iletkenlik tensörlerini (σ_{xx} , σ_{xy}) ve daha sonra da çoklu taşıyıcı spektrumunu elde etmek için, QMSA tekniği her bir sıcaklık adımında manyetik alana bağımlı öz direnç ve Hall verilerine uygulandı. Örnek olarak; B2294 numunesi için 50 K ve 297 K sıcaklıklarında türetilen deneysel iletkenlik tensörleri ve QMSA fit sonuçları Şekil 5.42.a’ da verildi. Şekilde görülen yüksek uyum bütün sıcaklık adımlarında gözlemlendi. Yine aynı sıcaklıklar için; Şekil 5.42.b’ de 50 K ve 297 K’ deki QMSA’ dan elde edilen mobilite spektrumları gösterilmektedir.



Şekil 5.42. (a) 50 ve 297 K sıcaklığında manyetik alana karşı iletkenlik tensörleri. Semboller ve çizgiler sırasıyla deneysel ve QMSA fitleri göstermektedir. (b) 50K' de ve 297K' de QMSA kullanılarak elde edilen mobilite spektrumu

QMSA analizinden yüksek sıcaklıklarda sadece bir elektron piki elde edilirken, 100 K altındaki sıcaklıklarda bir elektron ve bir deşik piki elde edildi. B2294 numunesi için 30 K – 300 K sıcaklık aralığında QMSA analizlerinden elde edilen bireysel taşıyıcı yoğunlukları ve mobiliteleri Şekil 5.43'te verilmiştir. Şekillerde 0,5 Tesla'da ölçülen mobiliteler ve taşıyıcı yoğunlukları ile QMSA analizinden elde edilenler karşılaştırma için verildi. Şekil 5.43'te görüldüğü üzere, B2294 numunesinde 100 K altındaki sıcaklıklarda elektron ve deşik taşıyıcıları iletme katkısı bulunurken 100 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde sadece elektronlar iletimi sağlamaktadır. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklardaki deşik yoğunluğu elektronların yoğunluğuna kıyasla çok düşük kaldığından bu sıcaklıklardaki iletimde de elektronların baskın olduğu söylenebilir. Düşük sıcaklıklarda deşiklerin gözlenmesinin, valans bandının Fermi seviyesi üzerine az da olsa çıkmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



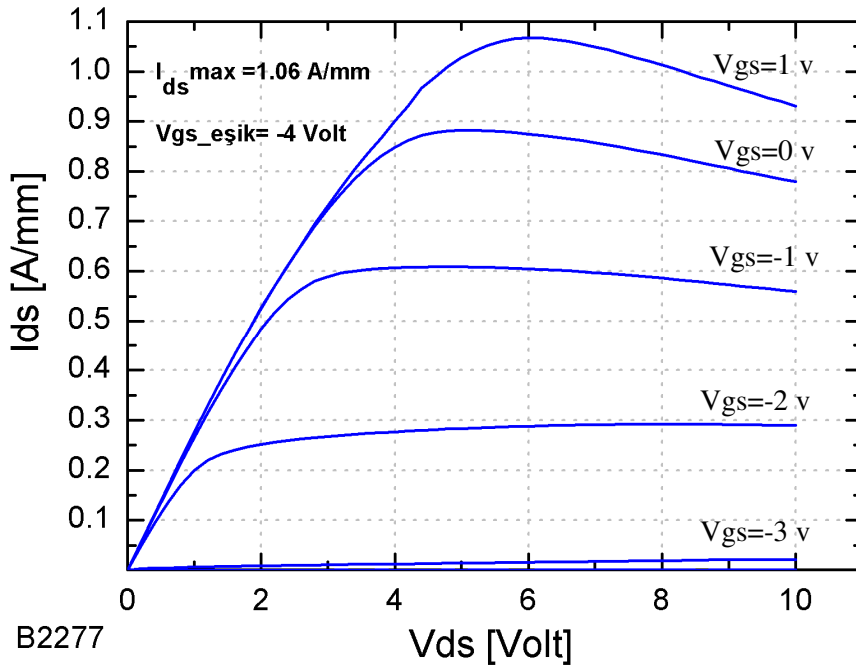
Şekil 5.43. B2294 numunesinin QMSA saçılmalarından elde edilen taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri

5.5. AlInN Engelli Çoklu HEMT Yapıları Üzerinde Üretilen Transistörlerin DC ve RF Karakterizasyonları

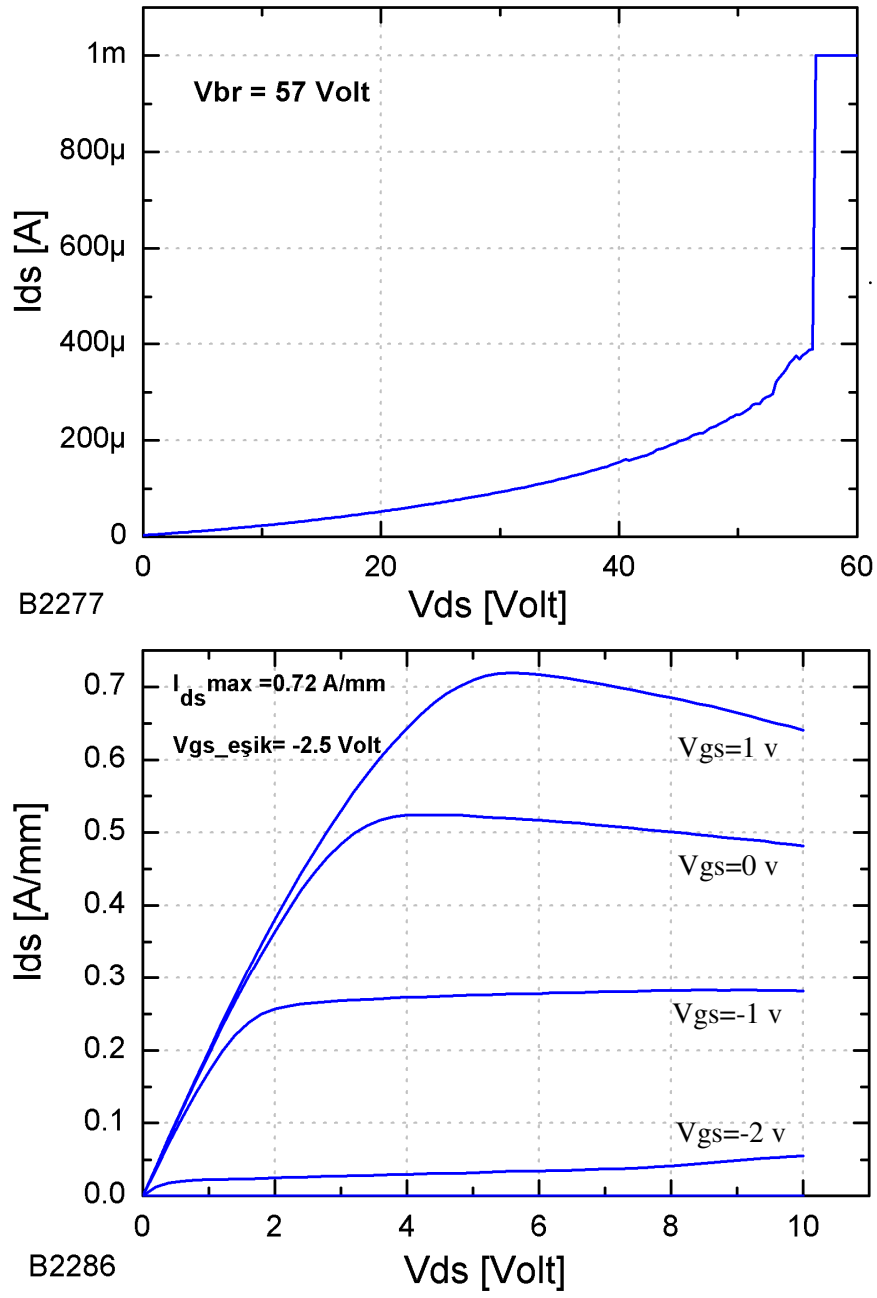
Önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde büyütülüp karakterizasyonu yapılan AlInN HEMT yapılarından bazıları seçilerek mikro-nano fabrikasyon teknikleri ile HEMT aygıtları üretilmiştir. Aygıt üretimi için B2277, B2286, B2296 ve B2298 numuneleri seçilmiştir. Bu çalışmanın amacı farklı epitaksiyel tasarımların aygıt performansına etkisini incelemektir. B2277 numaralı numune kontrol numunesi olduğu için

kullanılmıştır. B2286 numunesinin yapısına bakıldığında AlGaIn tampon tabakalı yapılar içerisinde tabaka direnci açısından en optimize yapı olduğu görülmektedir. Aynı şekilde B2296 yapısı da AlInN/AlGaIn çift engelli yapılar içerisinde ön plana çıkmaktadır. B2298 numunesi ise B2286 yapısındaki AlGaIn tampon tabakasının sınırlama etkisi ile çift engel yapısını (B2296) birleştirerek hem sızma akımı hem mobilite açısından avantajlı olabilmesi amacıyla tasarlanmış bir numunedir.

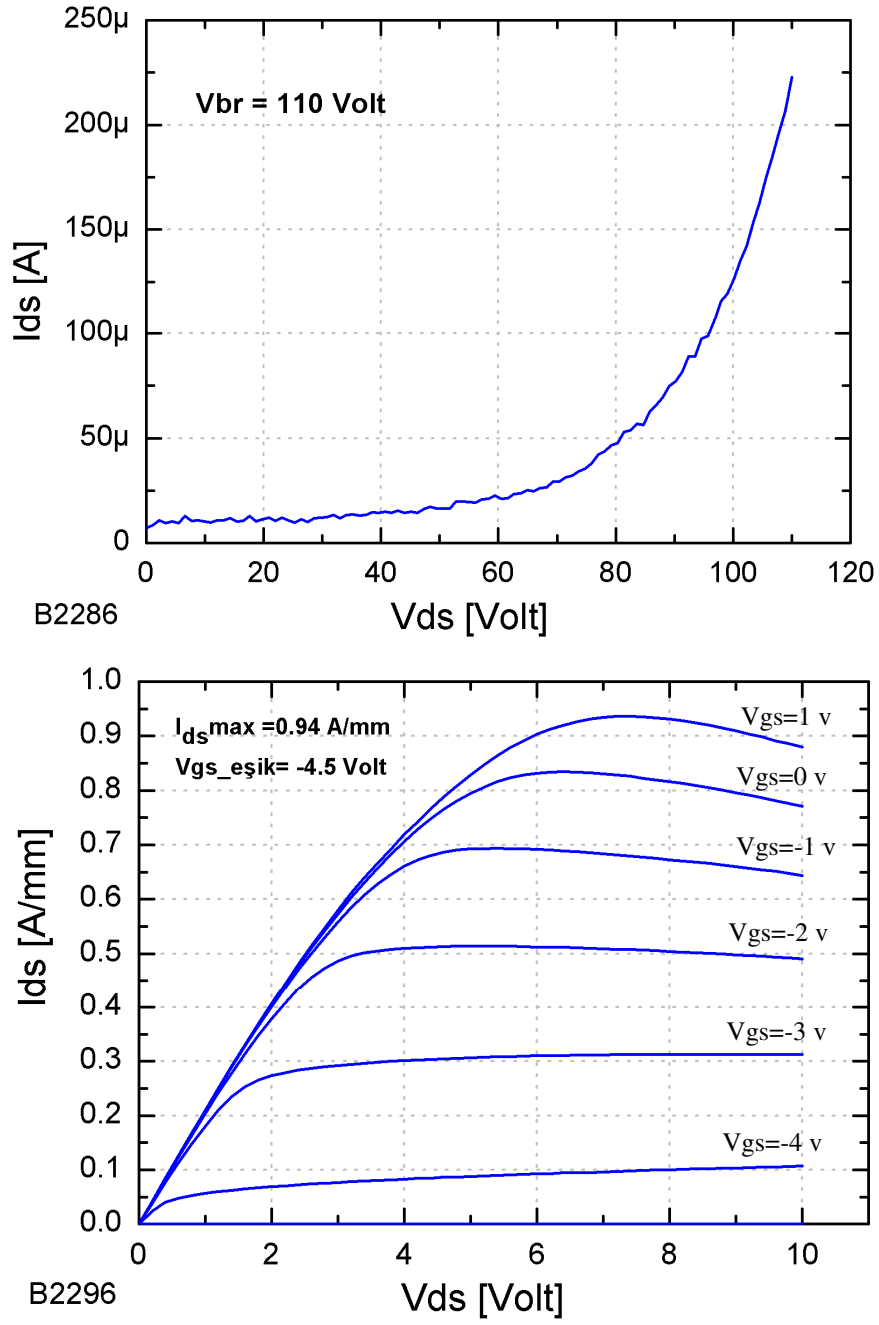
Bölüm 4.3'te anlatılan HEMT aygıt üretim adımları ile yukarıda belirtilen numuneler üzerinde üretimler yapılmış, DC ve RF ölçümler alınmıştır. Numunelerden alınan DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri Şekil 5.44'te gösterilmektedir. Transistör I-V eğrilerinde I_{ds} , ölçülen akım toplam kapı genişliğine bölünerek akım yoğunluğu (A/mm) cinsinden verildi. Kırılma voltajları V_{gs} eşik seviyesinin altında tutularak ölçüldü.



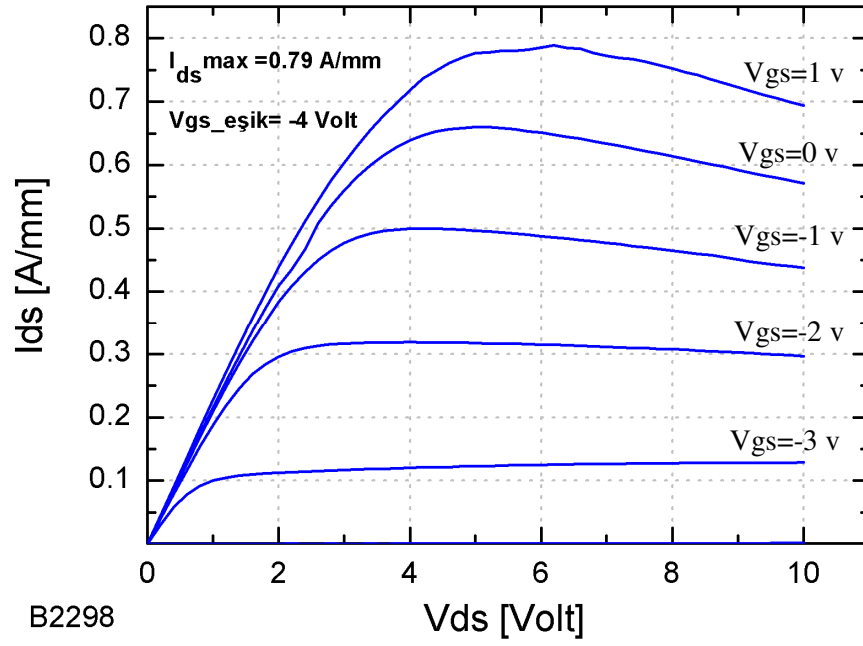
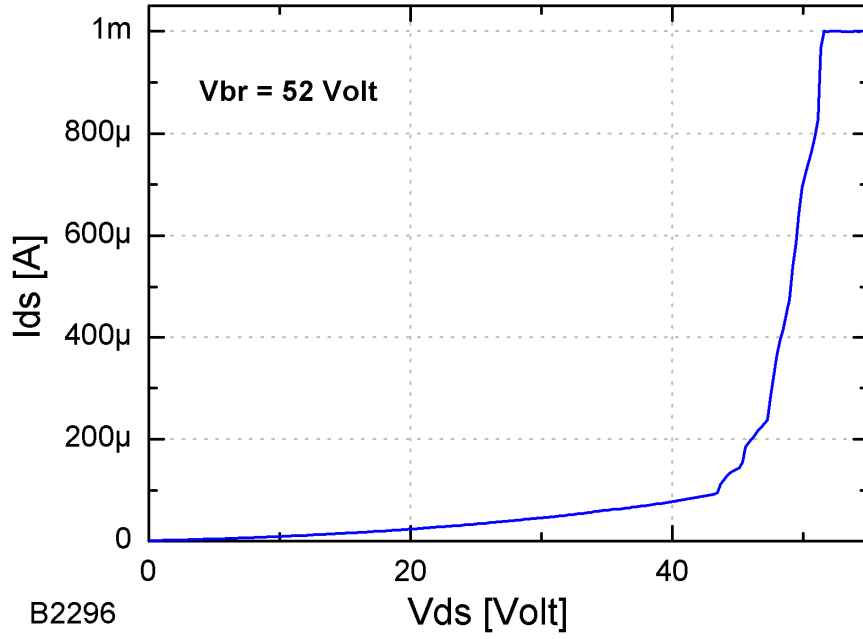
Şekil 5.44. B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerine ait DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri



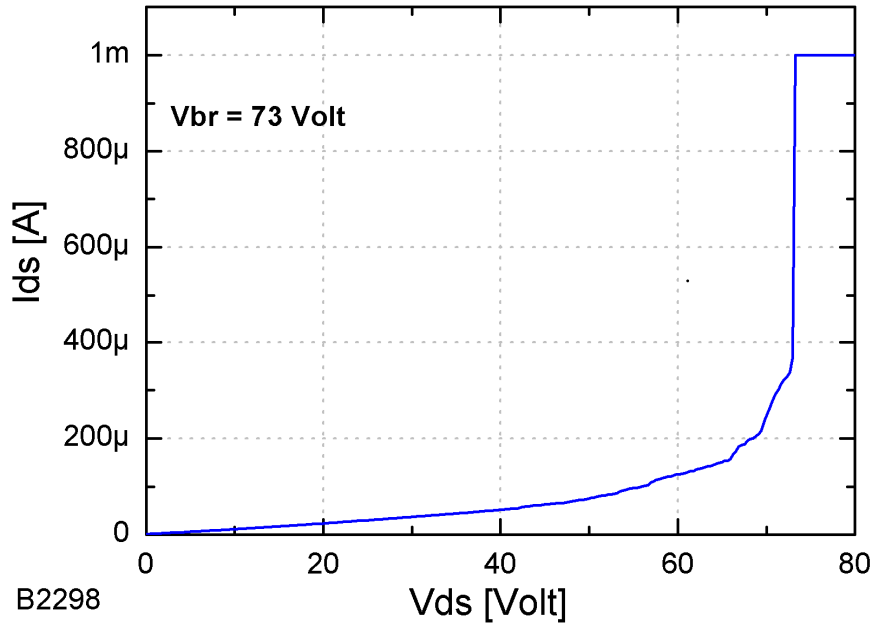
Şekil 5.44. (Devam) B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerine ait DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri



Şekil 5.44. (Devam) B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerine ait DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri

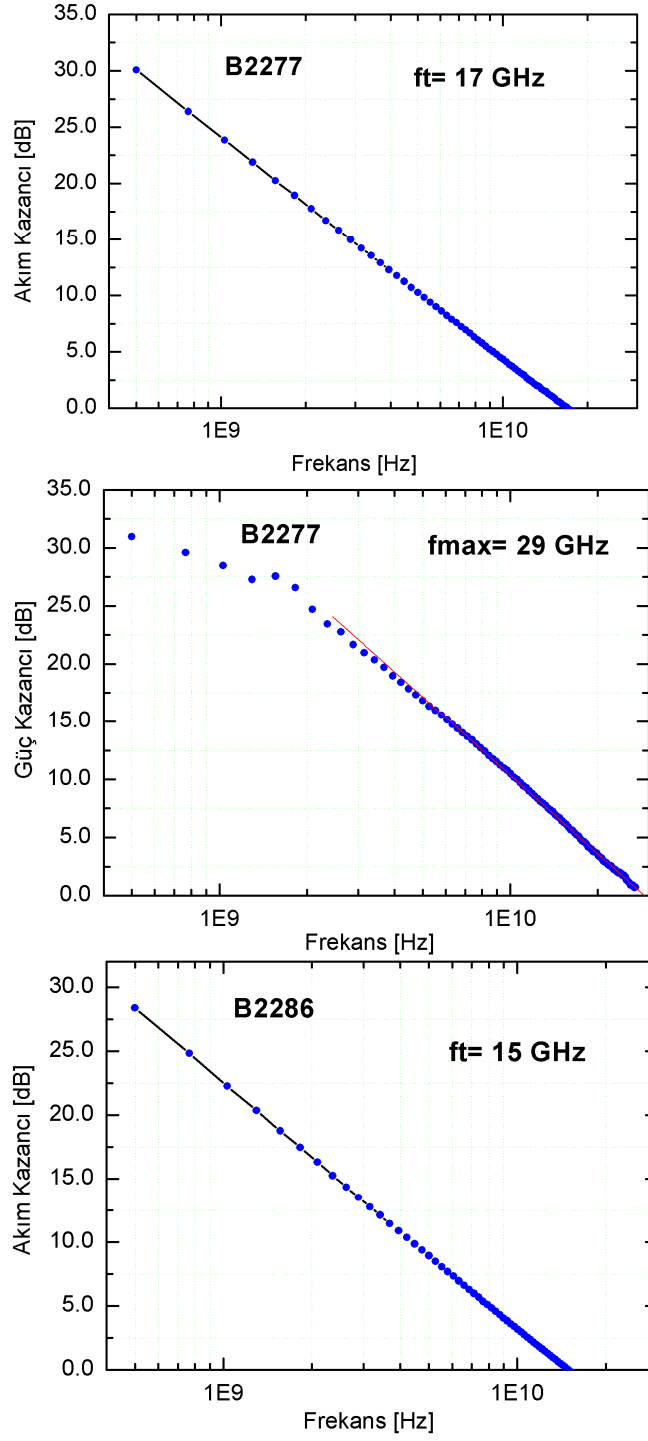


Şekil 5.44. (Devam) B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerine ait DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri

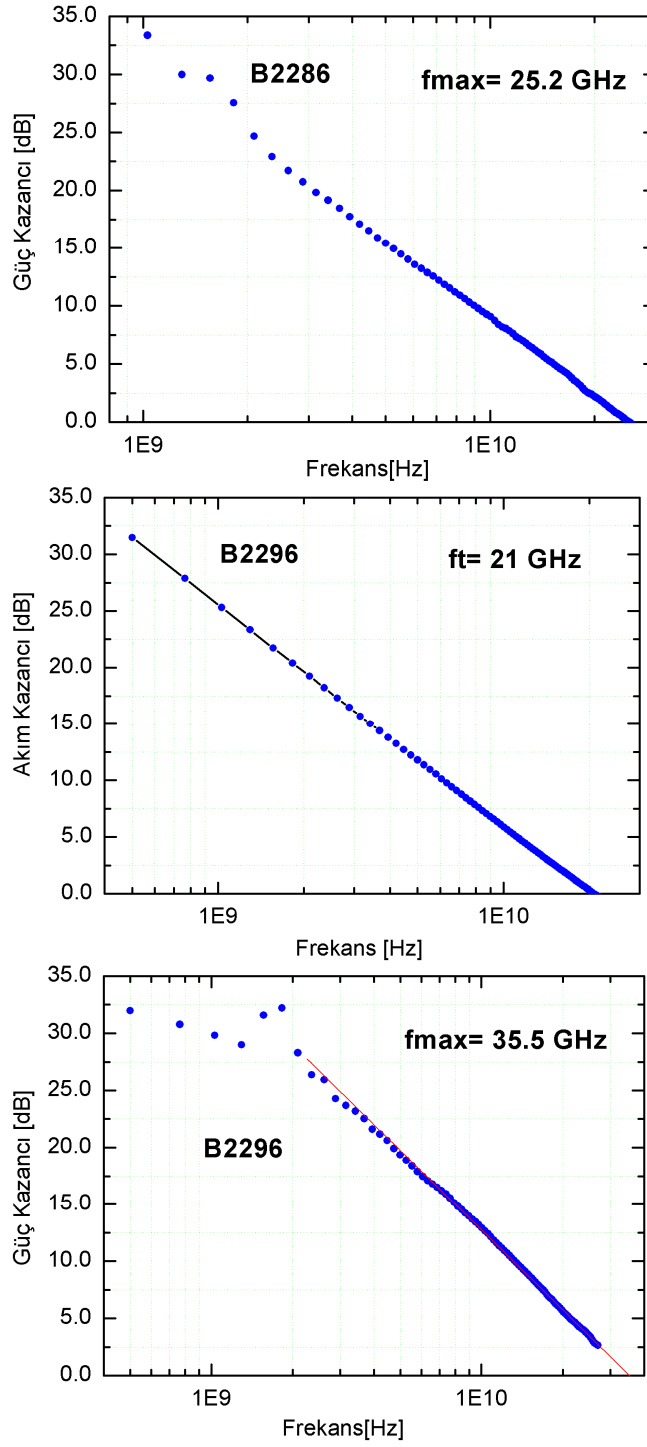


Şekil 5.44. (Devam) B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerine ait DC I-V ve kırılma gerilimi ölçümleri

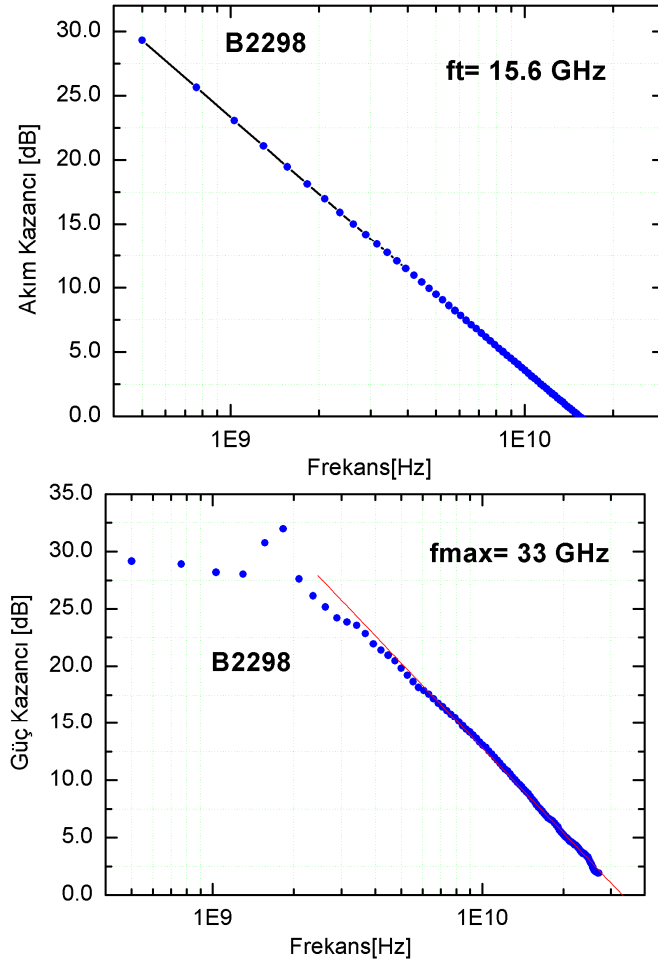
DC ölçüm sonuçları beklentilerle uyum içinde elde edilmiştir. Bu ölçümlerin hepsi karşılaştırma yapılabilmesi için her bir numune üzerindeki aynı tip aygıttan alınmıştır. AlGaIn tampon tabaka kullanılan B2286 ve B2298 numuneleri üzerindeki aygıtların kırılma gerilimleri GaN tampon tabaka kullanılan B2277 ve B2296 numuneleri üzerindeki aygıtların kırılma gerilimlerinden yüksek elde edilmiştir. Ayrıca kırılma gerilimleri grafiklerindeki akım değerlerine bakıldığında yine B2286 ve B2298 numunelerindeki aygıtlarda sızma akımları diğer iki örneğe göre çok önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu sonuçlar, AlInN HEMT yapılarında AlGaIn tampon tabaka kullanımının elektron sınırlandırması ve kırılma gerilimleri açısından aygıtlarda önemli bir üstünlük sağlayacağını göstermektedir. Diğer yandan I_{ds} akımlarının maksimum değerleri GaN tampon tabakalı yapılarda daha yüksek elde edilmiştir ki bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü bu yapılardaki taşıyıcı yoğunluğu AlGaIn tampon tabakalı yapılardakine göre daha yüksek elde edilmiştir ve I_{ds} akımı taşıyıcı yoğunluğu ile doğru orantılıdır.



Şekil 5.45. B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerinden alınan RF ölçüm sonuçları



Şekil 5.45. (Devam) B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerinden alınan RF ölçüm sonuçları



Şekil 5.45. (Devam) B2277, B2286, B2296 ve B2298 numunelerinden alınan RF ölçüm sonuçları

Numunelerdeki aygıtlardan ölçülen akım kazancı ve güç kazancı grafikleri Şekil 5.45'te gösterilmektedir. Elde edilen bu ölçümlerden f_t akım kazancı kesim frekansı ve f_{max} güç kazancı kesim frekansı belirlenmiştir. Bu değerler literatürdeki benzer transistör tasarımları ile uyumludur ve üretilen aygıtların yüksek frekanslarda sinyal genliğini yükseltme işlemi yapabileceğini göstermektedir [105]. Kesim frekanslarına bakıldığında B2296 numunesinin diğer numunelere göre daha yüksek f_t ve f_{max} 'a sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu numunede yüksek elektron mobilitésinin ($1446 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) elde edilmesidir. Çünkü f_t mobilité ile doğru orantılıdır [90].

Fabrikasyonu yapılan numunelerin DC ve RF ölçüm sonuçlarının özeti Çizelge 5.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Fabrikasyonu yapılan numunelerin DC ve RF ölçüm sonuçlarının özeti.

Numune	B2277	B2286	B2296	B2298
Ids akım yoğunluğu (A/mm)	1,06	0,72	0,94	0,79
Eşik voltajı Vth (volt)	-4	-2,5	-4,5	-4
Kırılma voltajı Vbr (volt)	57	110	52	73
Ft (GHz)	17	15	21	15,6
Fmax (GHz)	29	25,2	35,5	33

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, GaN temelli yüksek elektron mobiliteli transistörler (HEMT) için yeni epitaksiyel yapıların tasarımı yapıldı. Epitaksiyel yapılar MOCVD tekniği ile büyütüldü, elektriksel, yapısal özellikleri incelendi ve büyütülen yapılar üzerinde transistör aygıtları üretilerek karakterize edildi. Yapısal özelliklerin incelenmesinde yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) cihazı ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanıldı. Elektriksel özelliklerin incelenmesinde ise sıcaklığa (30-300K) ve manyetik alana (0-1,4 Tesla) bağlı Hall ölçümleri kullanıldı. HEMT yapıları için önemli olan saçılma analizleri numunelere uygulandı ve etkin saçılma mekanizmaları belirlendi.

Büyütme çalışmaları için öncelikle Safir, SiC ve Silisyum alttaşlar üzerinde büyütme yapıldı. Bu alttaşlar üzerinde 2DEG oluşturabilecek standart AlGa_xN/AlN/GaN HEMT yapıları için büyütme ve karakterizasyon çalışmaları yapıldı. Silisyumun GaN'e olan örgü uyumsuzluğu (17%) ve ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğunun (56%) yüksek olması büyütme işleminin oldukça zorlu olmasına neden olmaktadır. Bu zorlukları aşmak için kompozisyonu kademeli olarak değişen Al_xGa_{1-x}N tampon tabakaları kullanılarak çatlaksız HEMT yapıları büyütülebildi ve yapıda 2DEG oluştuğu gözlemlendi. Safir ve SiC üzerinde yapılan büyütme HEMT aygıtları için uygun sonuçlar verirken Silisyum üzerindeki büyütme HEMT aygıtları için yeterli olmayan sonuçlar elde edildi. Yapılan bu çalışmalar alttaş seçimi ve standart HEMT yapıları için temel oluşturmuştur. Safir ve SiC üzerindeki büyütme sonucu elde edilen yapılarda HEMT aygıtları açısından önemli bir fark görülmemesine rağmen aradaki büyük maliyet farkı Safir alttaş tercih etmemize neden oldu.

Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN tabanlı HEMT yapılarındaki 2DEG'in kanalda daha iyi sınırlandırılması, elektron mobilitelerinin ve yoğunluğunun artırılması amacıyla InGa_xN arka engel yapıları araştırıldı, tasarım ve analizleri nextnano³ programı yardımıyla yapıldı. Yapılan analizlerden, GaN kanalı ile tampon tabakası arasına koyulan ince (~1nm) bir InGa_xN tabakasının kanaldan GaN tampon tabakasına geçiş

bölgesinde iletim bandını yükselterek kanaldaki elektronlar için bir potansiyel engeli oluşturduğu ve bunun da sınırlandırmayı artırdığı görüldü. Parametrik çalışma yapmak amacıyla bir adet kontrol numunesi (Numune-A) ve beş adet (B, C, D, E, F numuneleri) InGaN arka engelli yapı büyütülerek incelendi. GaN kanal kalınlığının ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tabakasındaki İndiyum mol oranının mobilite, taşıyıcı yoğunluğu ve baskın saçılma mekanizmalarına etkisi incelendi. İndiyum oranı arttıkça mobilitenin düştüğü gözlemlendi. İndiyum oranının artması kristal kalitesinin azalmasına ve dolayısıyla kanaldaki arayüzey pürüzlülüğü saçılmasının artmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

Genel olarak InGaN arka engelli numunelerde ara yüzey pürüzlülüğü saçılmasının fazla etkili olması InGaN tabakasının kristal kalitesine bağlanmaktadır. İndiyum atomları küçük ve akışkanlıkları fazla olduğundan kontrollü büyütülmesi zor olmakta ve topaklı (cluster) InGaN tabakalarının büyümesi kristal kalitesini düşürmektedir. E numunesi ($\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$, $t_{\text{GaN-kanal}}=10$ nm) 2DEG yoğunluğu ve mobilitesi bakımından büyütülen numuneler arasında en iyi optimize edilmiş yapı olarak gözükmektedir. E numunesinde ölçülen mobilite değeri ($1367 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) standart $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısındaki değerden ($1029 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç, GaN tampon tabakası ile GaN kanalı arasına bir InGaN tabakasının eklenmesinin 2DEG sınırlandırmasında etkili olduğunu ve mobilitayı artırdığını göstermektedir.

AlGaIn/GaN çoklu yapılarda kanaldaki elektron sınırlandırmasını artırmak ve tampon sızma akımlarını azaltmak için literatürde uygulanmış olan AlGaIn tampon tabakaları AlInN çoklu yapılarına eklenmiş ve tabaka parametreleri sistematik olarak değiştirilerek elektriksel ve yapısal özelliklere olan etkiler incelendi. AlGaIn tampon tabakalı yapılara ek olarak AlInN/AlGaIn çift engelli yapılar üzerinde çalışıldı. AlInN engeline eklenecek ince bir AlGaIn tabakasının kuantum kuyusundaki elektronları üst engel bölgesinde daha iyi sınırlandıracağı görüldü.

AlInN engelinin büyütme şartları bütün numunelerde aynı olmasına rağmen AlGaIn tampon tabakalı yapıların XRD analizleri sonucunda AlInN tabakasındaki indiyum

mol oranında küçük farklılıklar gözlemlendi. B2277, B2285, B2286-B2288 no'lu numuneler için AlInN engel tabakasındaki indiyum oranları XRD ölçümlerinden sırasıyla 19,5%, %20, ve %21 olarak elde edildi. Numunelerdeki indiyum oranı farklılığı tabakalardaki farklı gerginliklerden kaynaklı alaşım oranı çekilme etkisi ile açıklanmaktadır. B2285 ve B2286 numunelerinde ölçülen mobilite değerleri B2277 kontrol numunesinin mobilitelerinden tüm sıcaklık aralığı boyunca yüksek elde edildi. Elektron mobilitesinde gözlenen bu artış, piezoelektrik polarizasyon kaynaklı elektron sınırlandırması ve $\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}/\text{GaN}$ ara yüzünde oluşan yüksek enerji bandı süreksizliğine bağlanmaktadır.

Bununla birlikte, B2285 numunesinde (GaN kanalı 20nm) sağlanan mobilite artışı B2286 numunesi (GaN kanalı 40nm) ile sağlanan kadar yüksek değildir. Bunun nedeni, B2285 numunesindeki ince GaN kanalın kristal kalitesini kötüleştirilmesi olarak düşünülmektedir. Alt tabakalardan gelen dislokasyonların ince GaN kanal tabakasını daha kolay geçerek ilerlemiş olabileceği değerlendirilmektedir. Bu durum AFM ölçümlerinde de daha yüksek rms yüzey pürüzlülüğü şeklinde kendini gösterdi. B2288 numunesinde düşük mobilite ($723 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) değerlerinin ölçülmüş olması diğer numunelere göre düşük kristal kalitesine sahip olmasından ileri gelmektedir. Buna ek olarak, B2288 numunesinde 2DEG'in bulunduğu kanala paralel olarak Al mol oranı lineer olarak değişen AlGaN tabakasında düşük mobiliteli 3-boyutlu bir kanal oluşabilmesi olasılığı da söz konusudur. Taşıyıcı yoğunlukları kıyaslandığında B2277 kontrol numunesinin en yüksek ($2,54 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) değere sahip olduğu görüldü ve bu yapılan hesaplarla da uyumludur.

Büyükten numunelerden Hall ölçümleri manyetik alana bağımlılık gösterenlerde (B2293, B2294, B2296, B2298) Nicel Mobilite Spektrumu Analizi (QMSA) yöntemi uygulandı. B2294 numunesi için yapılan QMSA analizinden yüksek sıcaklıklarda sadece bir elektron piki elde edilirken, 100 K altındaki sıcaklıklarda bir elektron ve bir deşik piki elde edildi. 0,5 Tesla'da ölçülen mobilite ve taşıyıcı yoğunlukları ile QMSA analizinden elde edilenler karşılaştırıldı. B2294 numunesinde 100 K altındaki sıcaklıklarda elektron ve deşik taşıyıcıları iletme katkıda bulunurken 100K üzerindeki sıcaklık değerlerinde sadece elektronlar iletimi sağlamaktadır. Bununla

birlikte, düşük sıcaklıklardaki deşik yoğunluğu elektronların yoğunluğuna kıyasla çok düşük kaldığından bu sıcaklıklardaki iletimde de elektronların baskın olduğu söylenebilir. Düşük sıcaklıklarda deşiklerin gözlenmesinin, valans bandının Fermi seviyesi üzerine az da olsa çıkmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Son olarak bu çalışmada uygulama açısından önemli olan HEMT aygıtlarının mikro-nano fabrikasyon teknikleri ile üretimi, DC ve RF ölçümler aracılığı ile karakterizasyonları yapıldı. Epitaksiyel yapı farklılıklarının aygıt performansı üzerindeki etkileri incelendi. AlGa_N tampon tabaka kullanılan B2286 ve B2298 numuneleri üzerindeki aygıtların kırılma gerilimleri Ga_N tampon tabaka kullanılan B2277 ve B2296 numuneleri üzerindeki aygıtların kırılma gerilimlerinden yüksek elde edildi. Ayrıca B2286 ve B2298 numunelerindeki aygıtlarda sızma akımları diğer iki örneğe göre çok önemli ölçüde azaltıldı. Bu sonuçlar, AlIn_N HEMT yapılarında AlGa_N tampon tabaka kullanımının elektron sınırlanması ve kırılma gerilimleri açısından aygıtlarda önemli bir üstünlük sağlayacağını göstermektedir. Böylece literatürde AlIn_N engelli yapılar için önemli olan yüksek eşik gerilimi ve düşük kırılma gerilimi sorunlarına bir çözüm önerildi. AlIn_N HEMT yapılarında 110 Volt'tan yüksek kırılma gerilimleri elde edildi.

Gazi Üniversitesi ve Bilkent Üniversitesi ortaklığında yapılan bu çalışma sayesinde Ga_N temelli HEMT tasarım, büyüme, aygıt üretim ve karakterizasyon işlemleri tamamen ülkemizde yapılarak, bilimsel, teknolojik ve ticari değeri yüksek bir teknoloji ülkemize kazandırılmaya çalışıldı. Bu çalışmadaki veri ve analizlerin daha iyi elektriksel özelliklere sahip HEMT yapılarının geliştirilmesine imkan sağlayacağı düşünülmektedir. InGa_N arka engelli yapılar için yapılan analizler daha iyi büyüme koşullarının tayini için kullanılabilecektir. İleriki çalışmalar için, AlIn_N engelli yapılarda AlGa_N tampon tabaka kullanılması durumu ile InGa_N arka engel kullanılan yapılar kıyaslanarak daha yüksek performanslı ve uzun dönem kararlılığı daha iyi olan aygıtların üretilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. J. Bardeen ,W. H. Brattain, “The Transistor, A Semi-Conductor Triode”, *Phys. Rev.*, 74: 230 (1948).
2. T. Mimura, "The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT)", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3): 780-782 (2002).
3. B. Ozpineci and L. M. Tolbert, “Comparison of wide-bandgap semiconductor for power electronics applications”, *Technical Report, Oak Ridge National Laboratory*, 6-13 (2003).
4. T.S. Moss and S. Mahajan, “Handbook on Semiconductors: Materials, Properties and Preparation”, *Elsevier Science B.V*, Amsterdam, 450-460 (1994).
5. R. J. Trew, "Sic and GaN transistors - is there one winner for microwave power applications?" *Proceedings of the IEEE*, 90: 1032-47 (2002).
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 Elec.*, 44(2): 277-301 (2000).
7. Johnson, W.C., Parsons, J.B., And, Crew, M.C., “Nitrogen Compounds of Gallium”, *J.Phys. Chem.*, 36 (10): 2561 (1932).
8. Porowski, S. and Grzegory, I., “Thermodynamical properties of III–V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure”, *J. Cryst. Growth*, 178 (1-2): 174-188 (1997).
9. 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”, *Appl. Phys. Lett.*, 48 (5): 353-355 (1986).
10. H. P. Maruska and J. J. Tietjen, “The preparation and properties of vapor-deposited single-crystalline GaN”, *Appl. Phys. Lett.*, 15: 327 (1969).
11. Manasevit, H., Erdmann, F. M., And Simpson, W. I., “The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials: IV. The Nitrides of Aluminum and Gallium”, *J. Electrochem. Soc.*, 118 (11): 1864-1868 (1971).
12. Amano, H., Akasaki, I., Kozawa, T., Hiramatsu, K., Sawaki, N., Ikeda, K. and Ishii, Y., “Electron beam effects on blue luminescence of zinc-doped GaN”, *J. Lum.*, 40-41: 121-122 (1988).

13. Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K. And Akasaki, I., "P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28 (12): L2112-L2114 (1989).
14. S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mukai, "Highly P-Typed Mg-Doped GaN Films Grown with GaN Buffer Layers", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30: L1708 (1991).
15. S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, "Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31: L139–L142 (1992).
16. S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mukai, "p-GaN/n-InGaN/n-GaN double-heterostructure blue light-emitting diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32: L8–L11 (1993).
17. S. Nakamura, "Characteristics of room temperature CW operated InGaN multi-quantum-well structure laser diodes", *Proc. Mat. Res. Soc.*, USA, 449 (1996).
18. M. Khan, J. van Hoven, J. Kuznia, and D. Olson, "High electron mobility GaN/AlGaN heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, 58 (21): 2408–2410 (1991).
19. M. Khan, J. Kuznia, A. Bhattarai, and D. Olson, "Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN," *Appl. Phys. Lett.*, 62 (15): 1786–1787 (1993).
20. 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," *Appl. Phys. Lett.*, 65 (9): 1121–1123 (1994).
21. S. Yoshida, "Growth of cubic III-nitride semiconductors for electronics and optoelectronics application", *Physica E*, 7(3-4): 907-914 (2000).
22. J. I. Pankove and T. D. Moustakas, "Gallium Nitride (GaN) I", *Academic Press*, San Diego, 167-178 (1998).
23. F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides", *Phys. Rev. B*, 56 (16): 24–27 (1997).
24. E. F. Schubert, "Light Emitting Diodes, Second edition", *Cambridge University Press*, Cambridge, 222-224 (2006).
25. L. Siozade, J. Leymarie, P. Disseix, A. Vasson, M. Mihailovic, N. Grandjean, M. Leroux, and J. Massies, "Modelling of thermally detected optical

absorption and luminescence of (In,Ga)N/GaN heterostructures”, *Solid State Comm.* , 115: 575 (2000).

26. F. Yun, M. A. Reshchikov, L. He, T. King, H. Morkoç, S. W. Novak, and L. Wei, “Energy band bowing parameter in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys”, *J. Appl. Phys.*, 92: 4837-4839 (2002).
27. J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J. W. Ager III, S. X. Li, E. E. Haller, H. Lu, and W. J. Schaff, “Universal bandgap bowing in group-III nitride alloys” *Solid State Com.* , 127(6): 411-414 (2003).
28. İnternet: Ioffe Physical-Technical Institute “Ioffe data archive”, <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/index.html> (2011).
29. M. Suzuki, T. Uenoyama, A. Yanase, “First-principles calculations of effective-mass parameters of AlN and GaN”, *Phys. Rev. B*, 52: 8132 – 8139 (1995).
30. P. Boguslawski, E. L. Briggs and J. Bernholc, “Native defects in gallium nitride”, *Phys. Rev. B*, 51: 17255-17258 (1995).
31. C.C. Van de Walle and J. Neugebauer, “First-principles calculations for defects and impurities: Applications to III-nitrides”, *J. Appl. Phys.*, 95: 3851-3855 (2004).
32. Levinstein M., Rumyantsev S. And Shur M., “Handbook Series On Semiconductor Parameters Vol 1-2, 2nd edition”, *World Scientific Publishing Company*, Singapore, 77-98 (2000).
33. Madelung, O., “Semiconductors-Basic Data”, *Springer-Verlag*, Heidelberg, 106-110 (1996).
34. Bougrov, V., Levinshtein, M.E., Rumyantsev, S.L. And Zubrilov A., “Properties of Advanced SemiconductorMaterials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe”, Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S. (Eds.), *John Wiley & Sons Inc.*, New York, 1-30 (2001).
35. Santic, B., “On the hole effective mass and the free hole statistics in wurtzite GaN”, *Semicond. Sci. Technol.*, 18 (4): 219-224 (2003).
36. Bernardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D., “Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides”, *Phys. Rev. B*, 56 (16): R10024-R10027 (1997).
37. Goldberg, Y., “Properties of Advanced SemiconductorMaterials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe”, Eds. Levinshtein, M. E., Rumyantsev, S. L. and Shur, M. S., *John Wiley & Sons Inc.*, New York, 31-47 (2001).

38. Xu, Y. N. And Ching W. Y., “Electronic, optical, and structural properties of some wurtzite crystals”, *Phys Rev. B*, 48 (7): 4335-4351 (1993).
39. Christensen, N.E., Gorczyca I., “Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure”, *Phys. Rev. B*, 50 (7): 4397-4415 (1994).
40. Veal, T. D., McConville, C. F. ve Schaff (Eds), W. J., “Indium Nitride and Related Alloys”, *CRC Press*, Boca Raton, 121-139 (2009).
41. Davydov, V., Klochikhin, A. A., Seisyan, R. P., Emtsev, V. V., Ivanov, S. V., Bechstedt, F., Furthmüller, J., Harima, H., Mudryi, A. V., Aderhold, J., Semchinova, O., Graul, J., “Absorption and Emission of Hexagonal InN. Evidence of Narrow Fundamental Band Gap”, *Phys. Stat. Solidi(b)*, 229 (3): 1-3 (2002).
42. Hiramatsu K, Itoh S, Amano H, Akasaki I, Kuwano N, Shiraishi T and Oki K, “Growth mechanism of GaN grown on sapphire with AlN buffer layer by MOVPE”, *J. Crystal Growth*, 115: 628-631 (1991).
43. K. Gurnett and T. Adams, “Native substrates for GaN: the plot thickens”, *III-Vs Review*, 19(9): 39-41 (2006).
44. R. Langer, B. Faure, A. Boussagol, P. Bove, H. Lahreche, A. Wilk, J. Thuret, F. Letertre, “Recent Achievements in SopSiC substrates for High Power and High Frequency Applications,” *CS MANTECH Conference*, Vancouver, 71-72 (2006).
45. U. K. Mishra, P. Parikh, Y.-F. Wu, “AlGaIn/GaN HEMTs-An Overview of Device Operation and Applications”, *Proceedings Of The IEEE*, 90(6): 1022-1031 (2002).
46. H.F. Sun, A.R. Alt, H. Benedickter, and C.R. Bolognesi, “100 nm gate AlGaIn/GaN HEMTs on silicon with $f_T=90$ GHz,” *IET J. Electronics Lett.*, 45(7): 376-377 (2009).
47. D. Ducatteau, A. Minko, V. Hoël, E. Morvan, E. Delos, B. Grimberty, 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”, *IEEE El. Dev. Lett.*, 27(1): 7-9 (2006).
48. 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”, *Phys. Status Solidi C*, 6(2): 1045-1048 (2009).

49. N. Ikeda, S. Kaya, J. Li, Y. Sato, T. Kokawa, and S. Kato, "High power AlGaIn/GaN HFETs on 4 inch Si substrates", *Phys. Status Solidi C*, 6(2): 933-936 (2009).
50. A. Able, W. Wegscheider, K. Engl, J. Zweck, "Growth of crack-free GaN on Si(111) with graded AlGaIn buffer layers", *Journal of Crystal Growth*, 276: 415-418 (2005).
51. U.K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y-F. Wu, "GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers", *Proc. of IEEE*, 96: 287 (2008).
52. T. J. Anderson, F. Ren, L. Voss, M. Hlad, B. P. Gila, S. J. Pearton, J. Kim, J. Lin, P. Bove, H. Lahreche, J. Thuret and R. Langer, "AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors and Diodes Fabricated on Large Area Silicon on poly-SiC (SopSiC) Substrates for Lower Cost and Higher Yield," *CS MANTECH Conference*, Austin, 137-140 (2007).
53. T. J. Anderson, F. Ren, J. Kim, J. Lin, M. Hlad, B. P. Gila, L. Voss, S. J. Pearton, P. Bove, H. Lahreche, and J. Thuret, "Microwave Performance of AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistors on Si/SiO₂/Poly-SiC Substrates", *Journal of Electronic Mat.*, 37(4): 384-387 (2008).
54. V. Hoel, N. Defrance, J.C. De Jaeger, H. Gerard, C. Gaquiere, H. Lahreche, R. Langer, A. Wilk, M. Lijadi and S. Delage, "First microwave power performance of AlGaIn/GaN HEMTs on SopSiC composite substrate", *IEEE Electronics Lett.*, 44(3): 238-239 (2008).
55. O. Ambacher, "Growth and applications of Group III-nitrides", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31: 2653-2710 (1998).
56. A. Witek, "Some aspects of thermal conductivity of isotopically pure diamond - a comparison with nitrides", *Diamond Relat. Mater.*, 7: 962-964 (1998).
57. H. Xing, S. Keller, Y.-F. WU, L. McCarthy, I. P. Smochkova, D. Buttari, R. Coffie, D. S. Green, G. Parish, S. Heikman, L. Shen, N. Zhang, J. J. Xu, B. P. Keller, S. P. DenBaars and U. K. Mishra, "Gallium nitride based transistors", *J. Phys.: Condens. Matter*, 13: 7139-7157 (2001).
58. L. Liu and J. H. Edgar, "Substrates for gallium nitride based epitaxy", *Mat. Sci. Eng.*, R37: 61-127 (2002).
59. Kočan, M., "AlGaIn/GaN MBE 2DEG Heterostructures: interplay between surface- interface- device properties", Doktora tezi, *RWTH Aachen University*, Aachen, 34-35 (2003).

60. O. Ambacher, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W.J.Schaff, L.F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger and J. Hilsenbeck, "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGa_N/Ga_N heterostructures", *J.Appl.Phys.*, 85: 3222-33 (1999).
61. F. Bernardini, V. Fiorentini and D. Vanderbilt, "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides", *Physical Review B*, 56: 10024-10027 (1997).
62. I. P. Smorchkova, L. Chen, T. Mates, L. Shen, S. Heikman, B. Moran, S. Keller, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "Al_N/Ga_N and (Al,Ga)_N/Al_N/Ga_N two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, 90: 5196 (2001).
63. S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa and T. Jimbo, "Characterization of different-Al-content Al_xGa_{1-x}N/Ga_N heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 21: 888 (2003).
64. M.C.J.C.M. Krämer, "Gallium Nitride-based Microwave High-Power Heterostructure Field-Effect Transistors, design, technology, and characterization", Doktora Tezi, *Eindhoven University of Technology*, Eindhoven, 31-32 (2006).
65. J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors", *Appl. Phys. Lett.*, 77: 250 (2000).
66. E. T. Yu, G. J. Sullivan, P. M. Asbeck, C. D. Wang, D. Qiao, and S. S. Lau, "Measurement of piezoelectrically induced charge in Ga_N/AlGa_N heterostructure field-effect transistors", *Appl. Phys. Lett.*, 71(19): 2794–2796 (1997).
67. Sze, S. M., Ng K. K., "Physics of semiconductor devices 3rd edition", *John Wiley & Sons*, New Jersey, 30-31 (2007).
68. J. J. Harris, J. A. Pals and R. Woltjer, "Electronic transport in low-dimensional structures", *Rep. Prog. Phys.*, 52: 1217 (1989).
69. Davies, J.H., "The Physics of low-dimensional semiconductors", *Cambridge University Press*, Cambridge, 290-365 (1998).
70. Rode, D. L., "Low-field electron transport: Semiconductors and Semimetals", *Academic Press*, New York, 26-45 (1975).

71. Anderson, D. A. and Apsley, N., "The Hall Effect in III-V semiconductor assessment", *Semicond. Sci. Technol.*, 1 (3): 187-202 (1986).
72. Nag, B. R., "Electron transport Compound Semiconductors, Vol. 11", *Springer-Verlag*, Berlin, 53-54 (1980).
73. Ridley, B. K., Foutz, B. E. and Eastman, L. F., "Mobility of electrons in bulk GaN and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures", *Phys. Rev. B*, 61(24): 16862-16869 (1999).
74. Ridley, B. K., "The electron-phonon interaction in quasi-two-dimensional semiconductor quantum-well structures", *J. Phys. C*, 15 (28): 5899-5917 (1982).
75. Fang, F. F. And Howard, W. E., "Negative Field-Effect Mobility on (100) Si Surfaces", *Phys. Rev. Lett.*, 16 (18): 797-799 (1966).
76. Ramonas, M., Matulionis, A. And Rota, L., "Monte Carlo simulation of hot phonon and degeneracy effects in the AlGa N/GaN two-dimensional electron gas channel", *Semicond. Sci. Technol.*, 18 (2): 118-123 (2003).
77. Morkoç, H., "Handbook of Nitride Semiconductors and Devices", *WILEY-VCH Verlag GmbH*, Weinheim, 367-368 (2008).
78. Kearney, M. J. and Horrell, A. I., "The effect of alloy scattering on the mobility of holes in a $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ quantum well", *Semicond. Sci. Technol.*, 13 (2):174-180 (1998).
79. Gökden S, Ilgaz A, Balkan N and Mazzucato S., "The effect of scattering mechanisms on the low field mobility in GaN/AlGa N heterostructures", *Physica E*, 25: 86-92 (2004).
80. Weimann, N.G., Eastman, L.F., Doppalapudi, D., Ng, H. M. and Moustakas, T. D., "Scattering of electrons at threading dislocations in GaN", *J. Appl. Phys.*, 83 (7): 3656-3659 (1998).
81. Hess, K., "Impurity and phonon scattering in layered structures", *Appl. Phys. Lett.*, 35 (7): 484-486 (1979).
82. Lee, K., Shur, M. S., Drummond, T. J. And Morkoc, H., "Low field mobility of 2-d electron gas in modulation doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ layers", *J. Appl. Phys.*, 54 (11): 6432-6438 (1983).
83. Zanato, D., Gokden, S., Balkan, N., Ridley, B. K. And Schaff, W. J., "The effect of interface-roughness and dislocation scattering on low temperature mobility of 2D electron gas in GaN/AlGa N ", *Semicond. Sci. Technol.*, 19 (3): 427-432 (2004).

84. Fewster, P. F., "Interface roughness and period variations in MQW structures determined by X-ray diffraction", *J. Appl. Cryst.*, 21 (5): 524-529 (1988).
85. Deveaud, B., Emergy, J. Y., Chomette, A., Lambert, B. And Baudet, M., "Single monolayer well size fluctuations in the luminescence of GaAs-GaAlAs superlattices", *Superlatt. Microstruct.*, 1 (3): 205-208 (1985).
86. Hirakawa, K. And Sakaki, H., "Mobility of the two-dimensional electron gas at selectively doped n-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunctions with controlled electron concentrations", *Phys. Rev. B*, 33 (12): 8291-8303 (1986).
87. Xing, H., Keller, S., Wu, Y. F., McCarthy, L., Smorchkova, I. P., Buttari, D., Coffie, R., Green, D. S., Parish, G., Heikman, S., Shen, L., Zhang, N., Xu, J. J., Keller, B. P., DenBaars S. P. and Mishra U. K., "Gallium nitride based transistors", *J. Phys. Cond. Matt.*, 13: 7139-7157 (2001).
88. Gokden, S., "Mobility of two-dimensional electrons in an AlGaIn/GaN modulation-doped heterostructure", *Phys. Stat. Sol. (a)*, 200: 369-377 (2003).
89. Shen, L., "Advanced polarization-based design of AlGaIn/GaN HEMTs", Doktora tezi, *University of California*, Santa Barbara, 15-37 (2004).
90. Mishra, U., Singh J., "Semiconductor Device Physics and Design", *Springer*, Dordrecht, 411-415 (2008).
91. Oura, K., Lifshitsi V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V., Katayama, M., "Surface science", *Springer*, Berlin, 378-382 (2003).
92. Boyd A.R., Heuken M., "Basics of MOCVD", *Aixtron MOCVD Training Notes*, Aachen, 10-11 (2004).
93. S. Nakamura, and S.F. Chichibu, "Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes", *Taylor and Francis*, London, 15-17 (2000).
94. Meyer, E., Heinzelman, H., "Scanning Tunneling Microscopy II, 28", R. Wiesen- danger, H. -J. Güntherodt, *Springer*, Berlin, 99-149 (1992).
95. Singh, J., "Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures", *Cambridge University Press*, New York, 1-494 (2003).
96. Kittel, C., "Katıhal Fiziğine Giriş", Bekir Karaoğlu, *Güven*, İstanbul, 22-23 (1996).

97. Çetin, Ş., “GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35 (2010).
98. E. H. Hall, "On a New Action of the Magnet on Electrical Current," *Amer. J. Math.*, 2: 287-292 (1879).
99. Van der Pauw, L. J. , "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shapes", *Philips Res. Repts.*, 13: 1-9 (1958).
100. E.H. Putley, “The Hall Effect and Related Phenomena”, *Butterworths*, London, 106-107 (1960).
101. İnternet: Washington University “Courses in Applied Microtechnology, EE527: Microfabrication Techniques”, <http://www.ee.washington.edu/research/microtech/Courses/ee527.html> (2011).
102. Franssila S., “Introduction to Microfabrication”, *John Wiley & Sons*, Chichester, 100-102 (2004).
103. Quay R., “Gallium Nitride Electronics”, *Springer-Verlag*, Berlin, 200-202 (2008).
104. Nidhi, T. Palacios, A. Chakraborty, S. Keller and U. K. Mishra, “Study of Impact of Access Resistance on High-Frequency Performance of AlGaIn/GaN HEMTs by Measurements at Low Temperatures,” *IEEE Elec. Dev. Lett.*, 27 (11): 877-880 (2006).
105. X.L. Wang , C.M. Wang , G.X. Hu, J.X. Wang , T.S. Chen, G. Jiao , J.P. Li , Y.P. Zeng , J.M. Li, “Improved DC and RF performance of AlGaIn/GaN HEMTs grown by MOCVD on sapphire substrates”, *Solid-State Electronics*, 49: 1387–1390 (2005).
106. A. Able, W. Wegscheider, K. Engl, J. Zweck, “Growth of crack-free GaN on Si(111) with graded AlGaIn buffer layers”, *Journal of Crystal Growth*, 276: 415–418 (2005).
107. J. Liu, Y. Zhou, J. Zhu, K. M. Lau, K. J. Chen, “AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN DH-HEMTs With an InGaIn Notch for Enhanced Carrier Confinement”, *IEEE Electron Device Lett.*, 27: 10 (2006).
108. T. Palacios, A. Chakraborty, S. Heikman, S. Keller, S. P. DenBaars, U. K. Mishra, “AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors With InGaIn Back-Barriers”, *IEEE Electron Device Lett.*, 27: 13 (2006).
109. S. Birner, S. Hackenbuchner, M. Sabathil, G. Zandler, J.A. Majewski, T. Andlauer, T. Zibold, R. Morschl, A. Trellakis, P. Vogl, “Modeling of

- Semiconductor Nanostructures with nextnano³”, *Acta Phys. Pol. A*, 110: 111-115 (2006).
110. I. P. Smorchkova, L. Chen, T. Mates, L. Shen, S. Heikman, B. Moran, S. Keller, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, “AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy”, *J. Appl. Phys.*, 90: 5196-5198 (2001).
 111. Z. Bougrioua, J.-L. Farvacque, I. Moerman, and F. Carosella, “2DEG Mobility in AlGa_N-Ga_N Structures Grown by LP-MOVPE”, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 228(2): 625-628 (2001).
 112. S. B. Lisesivdin, A. Yildiz, M. Kasap, “Optimization of alloy composition, interlayer and barrier thicknesses in Al_xGa_{1-x}N/(AlN)/Ga_N high electron mobility transistors”, *Optoelectron. Adv. Mater. - Rapid Comm.*, 1: 467-469 (2007).
 113. Lişesivdin, B., “AlGa_N/Ga_N Temelli Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistörlerin (HEMT) Elektron ve Manyeto İletim Özellikleri”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 114-115 (2008).
 114. J.Tang, X. Wang, H. Xiao, J. Ran, C. Wang, X. Wang, G. Hu, J. Li, “AlGa_N/Ga_N/InGa_N/Ga_N DH-HEMTs structure with an AlN interlayer grown by MOCVD”, *Phys. Stat. Solidi (c)*, 5: 2982-2894 (2008).
 115. J. Liberis, I. Matulionienė, A. Matulionis, E. Šermukšnis, J. Xie, J. H. Leach, H. Morkoç, “InAlN-barrier HFETs with Ga_N and InGa_N channels” *Phys. Stat. Solidi (a)*, 206: 1385-1388 (2009).
 116. Zhang, G. Y., Tong, Y. Z., Yang, Z. J., Jin, S. X., Li, J. And Gan, Z. Z., “Relationship of background carrier concentration and defects in Ga_N grown by metalorganic vapor phase epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.*, 71 (23): 3376-3378 (1997).
 117. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, and N. Kobayashi, “Enhanced Electron Mobility in AlGa_N/InGa_N/AlGa_N Double-Heterostructures by Piezoelectric Effect”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38: L799-L801 (1999).
 118. C. Q. Chen, J. P. Zhang, V. Adivarahan, A. Koudymov, H. Fatima, G. Simin, J. Yang and M. A. Khan, “AlGa_N/Ga_N/AlGa_N double heterostructure for high-power III-N field-effect transistors”, *Appl. Phys. Lett.*, 82: 4593-4594 (2003).
 119. Z. Chen, Y. Pei, S. Newman, D. Brown, R. Chung, S. Keller, S. P. DenBaars, S. Nakamura, and U. K. Mishra, “Growth of AlGa_N/Ga_N/AlGa_N double

heterojunction field-effect transistors and the observation of a compositional pulling effect”, *Appl. Phys. Lett.*, 94: 171117-171119 (2009).

120. H. Yu, S.B. Lisesivdin, B. Bolukbas, O. Kelekci, M.K. Ozturk, S. Ozcelik, D. Caliskan, M. Ozturk, H. Cakmak, P. Demirel and E. Ozbay, “Improvement of breakdown characteristics in AlGaIn/GaN/Al_xGa_{1-x}N HEMT based on a grading Al_xGa_{1-x}N buffer layer”, *Phys. Status Solidi (a)*, 207: 2593-2595 (2010).
121. E. Bahat-Treidel, O. Hilt, F. Brunner, J. Würfl, and G. Tränkle, “Punch-through voltage enhancement scaling of AlGaIn/GaN HEMTs using AlGaIn double heterojunction confinement”, *Phys. Status Solidi (c)*, 6: 1373-1376 (2009).
122. M. Hiroki, N. Maeda, and T. Kobayashi, “Electrical properties and device characteristics of InAlN/AlGaIn/AlN/GaN heterostructure field effect transistors”, *Phys. Status Solidi (c)*, 6 (52): S1056-S1060 (2009).
123. H. Angerer, D. Brunner, F. Freudenberger, O. Ambacher, M. Stutzmann, R. Hopler, T. Metzger, E. Born, G. Dollinger, A. Bergmaier, S. Karsch, and H. Korner, “Determination of the Al mole fraction and the band gap bowing of epitaxial Al_xGa_{1-x}N films”, *Appl. Phys. Lett.*, 71: 1504-1506 (1997).
124. N. G. Weimann, L. F. Eastman, D. Doppalapudi, H. M. Ng, and T. D. Maustakus, “Scattering of electrons at threading dislocations in GaN”, *J. Appl. Phys.*, 83: 3656-3657 (1998).
125. T. Ando, A. B. Fowler, and F. Stern, “Electronic properties of two-dimensional systems”, *Rev. Mod. Phys.* 54: 437-439 (1982).
126. S. Rajan, S. P. DenBaars, U. Mishra, H. Xing, and D. Yena, “Electron mobility in graded AlGaIn alloys”, *Appl. Phys. Lett.* 88: 42103-42105 (2006).

EKLER

EK-1: GaN Temelli HEMT Aygıt Proses Parametreleri

1. Aygıt Adacığın Oluşturulması

Foto-litografi: AZ5214E, 5000 rpm-40 s döndürme, 110 °C-55 s ısıtma işlemi
 10 mW lamba gücü-1 s UV pozlama, AZ-400K: DI su (1:4) foto-rezist çözünürü
 RIE kuru aşındırma: BCl₃: 20sccm – Cl₂: 25sccm – Ar: 10sccm -0.40 Pa
 100WRF – 800W ICP - 30 s.

2. Ohmik Kontaklar (Akaç-Kaynak Elektrotları)

Foto-litografi: AZ5214E, 5000 rpm-40 s döndürme, 110 °C-55 s ısıtma işlemi
 10 mW lamba gücü-1 s UV pozlama, AZ-400K: DI su (1:4) foto-rezist çözünürü
 Metal çeşidi ve kalınlıkları: Ti-Al-Ti-Ni-Au (120Å-1200 Å -10 Å -350 Å -600 Å)
 RTP hızlı tavlama: 850 °C-30 s.

3. Kapı (Schottky) Kontakları

Elektron Demet Litografisi (Nano-litografi): PMMA-950K-A6, 2000 rpm-40 s döndürme, 180 °C-60 s ısıtma işlemi, 200 µC/cm² elektron dozu, EHT 15 kV, MIBK:IPA (1:3) rezist çözünürü
 RIE kuru aşındırma: O₂: 40sccm - 50W RF - 100W ICP - 3 s.
 Metal çeşidi ve kalınlıkları: Ni-Au (500 Å - 3000 Å)

4. Dış bağlantı metaline

Foto-litografi: AZ5214E, 5000 rpm-40 s döndürme, 110 °C-55 s ısıtma işlemi
 10 mW lamba gücü-1 s UV pozlama, AZ-400K: DI su (1:4) foto-rezist çözünürü
 Metal çeşidi ve kalınlıkları: Ti-Au (500 Å - 3500 Å)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KELEKÇİ, Özgür
 Uyuğu : T. C.
 Doğum tarihi ve yeri : 30 Mart 1980, Diyarbakır
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 631 22 98
 Eposta : okelekci@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gebze Y.T.E / Fen Bilimleri	2005
Lisans	İ.T.Ü / Elektrik-Elektronik	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-	Bilkent Üniv.- Nanotam	Araştırma Müh.
2006-2007	Tübitak-Teydeb	Araştırmacı
2004-2006	Tübitak-UME	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI-indexli dergilerdeki makaleler

1. E. Arslan, Y. Şafak, Ş. Altındal, Ö. Kelekçi, E. Özbay, “Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN heterostructures”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 356, Issue 20-22, pp. 1006-1011, (2010).
2. H. Yu, S.B. Lişesivdin, B. Bölükbaş, Ö. Kelekçi, M.K. Öztürk, S. Özçelik, D. Çalışkan, M. Öztürk, H. Çakmak, P. Demirel and E. Özbay, “Improvement of breakdown characteristics in AlGaN/GaN/Al_xGa_{1-x}N HEMT based on a grading Al_xGa_{1-x}N buffer layer”, Physica Status Solidi (A), Vol. 207, Issue 11, pp. 2593-2596, (2010).
3. P. Caban, W. Strupinski, J. Szmidt, M. Wojcik, J. Gaca, Ö. Kelekçi, D. Çalışkan, E. Özbay, “Effect of growth pressure on coalescence thickness and crystal quality of GaN deposited on 4H-SiC”, Journal of Crystal Growth, Vol. 315, pp. 168–173, (2011).
4. Ö. Kelekçi, S. B. Lisesivdin, S. Özçelik, E. Özbay, “Numerical optimization of In-mole fractions and layer thicknesses in Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN high electron mobility transistors with InGaN back barriers”, Physica B, Vol. 406, pp. 1513–1518, (2011).
5. Ö. Kelekçi, P. T. Taşlı, H. Yu, M. Kasap, S. Özçelik, and E. Özbay, “Electron transport properties in AlGaN/AlN/GaN heterostructures with different InGaN back barrier layers and GaN channel thicknesses grown by MOCVD”, Physica Status Solidi-C, kabul edildi, (basım aşamasında).

6. Ö. Kelekçi, P. T. Taşlı, S.S. Çetin, M. Kasap, S. Özçelik, and E. Özbay, “Investigation of AlInN HEMT structures with different AlGaIn buffer layers grown on sapphire substrates by MOCVD”, Applied Physics A’da inceleniyor.
7. Ö. Kelekçi, P. T. Taşlı, S.S. Çetin, M. Kasap, S. Özçelik, and E. Özbay, “Effect of the Al composition in AlGaIn buffer layer on the structural and electrical properties of AlInN HEMTs with AlGaIn buffers”, yayına hazırlanıyor.
8. Ö. Kelekçi, P. T. Taşlı, S.S. Çetin, M. Kasap, S. Özçelik, and E. Özbay, “AlGaIn layer thickness optimization in double barrier AlInN/AlGaIn HEMTs”, yayına hazırlanıyor.
9. Ö. Kelekçi, P. T. Taşlı, S.S. Çetin, M. Kasap, S. Özçelik, and E. Özbay, “Breakdown characteristics improvement in AlInN/AlN/GaN HEMT based on low Al-content $Al_xGa_{1-x}N$ buffer layers”, yayına hazırlanıyor.

Ulusal ve Uluslararası Bildiriler

1. H. Yu, S.B. Lişesivdin, B. Bölükbaş, Ö. Kelekçi, M. Öztürk, H. Çakmak, P. Demirel and E. Özbay, “Double Heterostructure AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT Based on Grading AlGaIn/AlN Buffer Layer”, 2009 MRS Fall Meeting, I: III-Nitride Materials for Sensing, Energy Conversion, and Controlled Light-Matter Interactions, Boston, I4.9 (2009).
2. Ö. Kelekçi, S. B. Lişesivdin, M. Kasap, S. Özçelik ve E. Özbay, “InGaIn arka bariyerli $Al_xGa_{1-x}N$ /AlN/GaN HEMT yapılarındaki ince filmlerin alaşım oranları ve kalınlıklarının nümerik optimizasyonu”, 17. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Ankara, S17 (2010).
3. P.Caban, W.Strupinski, M.Wojcik, J.Gaca, J.Szmidt, D.Çalışkan, Ö. Kelekçi, E.Özbay, “Growth of GaN on SiC by low pressure MOVPE for HEMTs applications”, 5th Wide Bandgap Materials - progress in synthesis and applications

and 7th Diamond and Related Films jointly with 2nd International Workshop on Science and Applications of Nanoscale Diamond Materials, Zakopane, 90 (2010).

4. K. Elibol, Ö. Kelekçi, G. Atmaca, S. B. Lişesivdin, M. Kasap, S. Özçelik ve E. Özbay, “Grafen Flake Üretim Yöntemlerinin Geliştirilmesi”, 17. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Ankara, S2 (2010).

5. Ö. Kelekçi, P. T. Taşlı, H. Yu, M. Kasap, S. Özçelik, and E. Özbay, “Electron transport properties in $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ heterostructures with different InGaN back barrier layers and GaN channel thicknesses grown by MOCVD”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow, PC1.05 (2011).

6. K. Elibol, G. Atmaca, Ö. Kelekçi, P. Taşlı, E. Özbay ve S. B. Lişesivdin, “Self-Consistent Transport Properties Of Graphene Sheets”, Turkish Physical Society 28th International Physics Conference, Bodrum, 710 (2011).