



**İnGaN VE GaN KUANTUM KUYULU İnAlN/GaN YÜKSEK ELEKTRON
HAREKETLİLİĞİNE SAHİP TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRON İLETİM
ÖZELLİKLERİ**

Polat NARİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2014

Polat NARİN tarafından hazırlanan “InGaN VE GaN KUANTUM KUYULU InAlN/GaN YÜKSEK ELEKTRON HAREKETLİLİĞİNE SAHİP TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRON İLETİM ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi FİZİK Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KASAP

Fizik Anabilim Dalı, Gazi ÜNİVERSİTESİ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Aytunç ATEŞ

Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt ÜNİVERSİTESİ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Anabilim Dalı, Gazi ÜNİVERSİTESİ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/11/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Polat NARİN

21/11/2014

InGaN ve GaN KUANTUM KUYULU InAlN/GaN YÜKSEK ELEKTRON
HAREKETLİLİĞİNE SAHİP TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRON İLETİM

ÖZELLİKLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Polat NARİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2014

ÖZET

Bu çalışmada, farklı kalınlıklarda InGaN ve GaN kanal tabakaya sahip $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ ve $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ yüksek elektron hareketlilikli transistör (HEMT) yapılarının elektron iletim özellikleri araştırıldı. Bu amaçla her bir numune için öz direnç ve Hall etkisi ölçümleri 30-300 K sıcaklık aralığında yapıldı. Ölçümler sonucunda göz önüne alınan yapıların mükemmel bir 2-boyutlu elektron gazı (2DEG) davranışı sergilediği tespit edildi. Bu nedenle iki boyutlu saçılma analizleri yapılarak iletimin gerçekleştiği kuantum kuyu genişliği ve arayüzey bozukluğu parametreleri belirlendi. Ayrıca numunelerin, kanal tabakalarına bağlı olarak 2DEG hareketliliğinin nasıl değiştiği ve uygun InGaN kanal tabaka kalınlığı belirlendi. Belirlenen bu parametreler ile daha sonra olası çalışmalar için iyileştirmeler önerildi.

BilimKodu : 202.1.147
AnahtarKelimeler : InAlN/GaN, HEMT, 2DEG, saçılma
SayfaAdedi : 70
Danışman : Prof. Dr. Mehmet KASAP

ELECTRON TRANSPORT PROPERTIES OF InGaN and GaN QUANTUM WELL
InAlN/GaN HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR

(M.Sc. Thesis)

Polat NARİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2014

ABSTRACT

In this study, electron transport properties of $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ and $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ high electron mobility transistor (HEMT) structures that have InGaN and GaN channel layer in different thickness were investigated. In direction of this purpose, resistivity and Hall effect measurement for each sample were taken at 30-300 K temperature range. In result of measurements, a perfect 2-dimensional electron gas (2DEG) that exhibit behaviour of inspected structures were determined. For this reason, quantum well width and interface roughness parameters that two dimensional conduction occurred were determined by making two dimensional scattering analysis. Also, how changed of 2DEG mobility of samples as dependent on channel layer and proper InGaN channel layer thickness were determined. Improvements for then possible work with these determined parameters were suggested.

ScienceCode : 202.1.147
KeyWords : InAlN/GaN, HEMT, 2DEG, scattering
PageNumbers : 70
Supervisor : Prof. Dr. Mehmet KASAP

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca gerekli vizyonumun oluşmasını sağlayan ve hiçbir zaman yardımını esirgmeden sahip olduğum bilgileri bana aktaran değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet KASAP'a, görüş ve bilgilerini bana aktaran, hiçbir zaman yardımını esirgemeyen değerli hocalarım Doç.Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN'e ve Öğret. Gör. Dr. Beyza SARIKAVAK LİŞESİVDİN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Gazi Üniversitesi FOTONİK Uygulama ve Araştırma Merkezinin gerekli imkanlarını bana sağladığı için değerli hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e ve ölçümünü yaptığım numunelerin büyütüldüğü Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinin yöneticisi Sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda bana sürekli destek olan, fikirleri ile bana her zaman yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Gökhan ATMACA ve Ece KUTLU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Doğumumdan bugüne kadar beni büyüten ve bana her daim güvenen değerli aileme, bu çalışmanın onların maddi ve manevi desteklerinin karşılığı olmayacağını belirterek, annem Satı NARİN, babam Bilal NARİN ve abim Onur NARİN'e bu çalışmayı ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. III-NİTRÜRLERİN ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Kristal Yapı.....	5
2.2. Elektriksel Özellikler.....	6
2.3. III-Nitrür Yapılar İçin Alttaş Seçimi	6
2.4. İstenmeden Katkılanma ve Kusurlar	7
2.5. Bazı III-Nitrürler İçin Materyal Parametreleri	7
2.5.1. AlN, InN ve GaN.....	7
2.5.2. Safir (Al ₂ O ₃)	10
2.5.3. In _{0.17} Al _{0.83} N ve In _{0.1} Ga _{0.9} N Alaşımları	10
3. InAlN/GaN ÇOKLU YAPISI VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ	13
3.1. Çoklu Yapılar	13
3.2. Çoklu Eklem Alan Etkili Transistörler.....	13
3.3. InAlN/GaN Yapısı.....	14
3.3.1. InAlN/InGaN/GaN Yapısı	15
3.3.2. AlN Kullanımı	15

	Sayfa
3.4. Çoklu Yapılarda Polarizasyon ve Gerginlikler	17
3.4.1. Çoklu yapılarda polarizasyon (kutuplanma)	17
3.4.2. Doğal polarizasyon	17
3.4.3. Piezoelektrik polarizasyon	18
3.4.4. Gerginlik	20
3.4.5. Çoklu yapılarda 2 boyutlu elektron gazı (2DEG) oluşumu	21
4. YARIİLETKENLERDE TAŞIYICI İLETİMİ	23
4.1. Elektron Hareketliliği ve Elektriksel İletkenlik	24
4.2. İki Boyutlu İletimde Saçılma Mekanizmaları	27
4.2.1. Akustik fonon saçılması	28
4.2.2. Polar optik fonon saçılması	30
4.2.3. Arayüzey bozukluğu saçılması	30
4.2.4. Safsızlık saçılması	31
4.2.5. Alaşım saçılması	32
5. DENEYSEL TEKNİKLER	35
5.1. Giriş	35
5.2. Numune Hazırlama	36
5.3. Akım Voltaj Ölçümleri	37
5.4. Hall Etkisi	38
5.5. Hall Etkisi Ölçümleri ve Özdirenç Ölçümleri	41
5.5.1. Hall etkisi ölçümleri	41
5.5.2. Özdirenç ölçümleri	43
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
6.1. Giriş	45

	Sayfa
6.2. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ ve $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapıları.....	45
6.3. Kristal Büyütme Detayları.....	45
6.4. Özdirenç Ölçümleri	46
6.5. Hall Etkisi Sonuçlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	47
6.6. Saçılma Analizi	50
6.7. İletkenlik Bandı ve Arayüzeyde Elektron Bulunma Olasılığı.....	55
7. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. GaN-temelli yarıiletkenlerde kullanılan alttaş yapılar için ısıl genişleme katsayı farkı ve örgü uyumsuzluğu	7
Çizelge 2.2. AlN, InN ve GaN için verilen materyal parametreleri	8
Çizelge 2.3. Al ₂ O ₃ için verilen materyal parametreleri	10
Çizelge 2.4. In _{0,17} Al _{0,83} N ve In _{0,1} Ga _{0,9} N için 300 K’de materyal parametreleri	11
Çizelge 3.1. GaN, InN ve AlN için piezoelektrik polarizasyon, doğal polarizasyon ve örgü sabitleri.....	20
Çizelge 6.1. İncelenen numunelerin kalınlıklarına ve yapılarına ait bilgiler	46
Çizelge 6.2. B-2705, B-2706, B-2707 kodlu numuneler için 30K ve 300K sıcaklıklarında sırasıyla 2DEG hareketliliği, yüzey taşıyıcı yoğunluğu ve yüzey özdirenci	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sıkı paketlenmiş hekzagonal yapıları	5
Şekil 3.1. Temel çoklu alan etkili transistör yapısı	14
Şekil 3.2. $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu yapısı iletkenlik ve değerlik bant yapıları ...	15
Şekil 3.3. InAlN/GaN çoklu yapıda AlN ara tabaka kullanımı	16
Şekil 5.1. Cam tavlama fırını düzeneği.....	37
Şekil 5.2. Hall etkisi ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....	39
Şekil 5.3. Hall ölçümleri için, a)Hall bar 6 kontak, b)Hall bar 8 kontak, c) Van der Pauw 4 kontak yonca yaprağı biçiminde, d) Van der Pauw 4 kontak yöntemleri	41
Şekil 5.4. Öz direnç ve Hall hareketliliği ölçümleri için şematik gösterim	42
Şekil 6.1. B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu HEMT yapılarında öz direncin sıcaklığa bağlı değişimi.....	47
Şekil 6.2. B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu HEMT yapıları için taşıyıcı yoğunluklarının sıcaklığa bağlı değişimi	48
Şekil 6.3. B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu HEMT yapıları için 2DEG hareketliliğinin sıcaklığa bağlı değişimi	49
Şekil 6.4. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(3\text{nm})/\text{GaN}$ HEMT yapısı için saçılma analizi.	51
Şekil 6.5. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(8\text{nm})/\text{GaN}$ HEMT yapısı için saçılma analizi.	53
Şekil 6.6. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısı için saçılma analizi.	53
Şekil 6.7. İncelenen numuneler için 300 K sıcaklıkta $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kalınlığına bağlı olarak elektron hareketliliğinin ve öz direncin değişimi.....	54
Şekil 6.8. İncelenen numuneler için iletkenlik bandının yapısı $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/(\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N})/\text{GaN}$ HEMT yapısı ve büyütme doğrultusu..	56
Şekil 6.9. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/(\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N})/\text{GaN}$ HEMT yapıları için elektron bulunma olasılıkları	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu olan AIXTRON RF200/4 RF-S GaN/AlGaIn MOVPE sistemi	35
Resim 5.2. Lakeshore 7700 Yüksek Empedanslı Hall Etkisi ölçüm sistemi 1) Bilgisayar, 2) Sıcaklık Kontrol Ünitesi, 3) Elektromıknatıs Güç Kaynağı, 4) Kapalı devre Helyum soğutma sistemi, 5) Elektromıknatıs, 6) Kryostat, 7)Mekanik pompa destekli turbo moleküler vakum sistemi, 8) Helyum Tüpü	36
Resim 5.3. Numunenin köşesinden indiyum eritilerek tutturulmuş Ti/Al/Ni/Au kontak yapısı.	38

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$a, a_0, a_1, a_2, a_3, a_a, a_{ii}$	Hekzagonal birim hücrenin sabitleri
$\vec{a}$	Elektron ivmesi
α_a	Isıl genleşme katsayısı
b	Frang-Howard ifadesi
$\vec{B}$	Manyetik alan
c, c_0	Hekzagonal birim hücrenin örgü sabiti
c_{TA}, c_{LA}	Enine ve Boyuna ortalama elastik sabitler
C_{ij}	Elastik sabit (ij indis)
d	Numune kalınlığı
d_k	Kritik kalınlık
$\frac{d}{dt}$	Zamana bağlı türev
Δ	Arayüzey bozukluğunun yanal boyutu
e	Elektron yükü
e_{ij}	Piezoelektrik sabit(ij indis)
e_j	Gerginlik tensörü(j yönünde)
ϵ	Dielektrik sabit
ϵ_s	Statik(düşük frekans) dielektrik sabiti
ϵ_∞	Yüksek frekans dielektrik sabiti
$\vec{E}$	Elektrik alan
E_F	Fermi seviyesi

Simgeler

$\vec{F}$

$f(0)$

$F_{11}(q)$

$f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right)$

η

ηw_{PO}

$I_B(\beta)$

J

$J_{ab}(k)$

$J_{PE}(k)$

$J_{DP}(k)$

K, k_F

k_B

K

κ

Λ

m_e^*

m_h^*

m_0

μ, μ_e

μ_{dp}

μ_{pe}

μ_{ak}

Açıklamalar

Lorentz kuvveti

Alt köşe bant

Fang-Howard dalga fonksiyonu form faktörü

Düzeltilme faktörü

Planck sabiti

Polar optik fonon enerjisi

Arka plan safsızlık integrali

Akım yoğunluğu

Arayüzey bükülme saçılması integrali

Piezoelektrik saçılma integrali

Deformasyon potansiyeli integrali

Dalga vektörü

Boltzman sabiti

Elektromekaniksel çiftlenim katsayısı

Isıl iletkenlik

Korelasyon uzunluğu

Elektron etkin kütlesi

Deşik etkin kütlesi

Serbest elektron kütlesi

Taşıyıcı hareketliliği

Deformasyon potansiyel saçılmanın hareketlilik sınırı

Piezoelektrik saçılmasına ait hareketlilik sınırı

Akustik fonon saçılmasına ait hareketlilik sınırı

Simgeler**Açıklamalar** μ_{po}

Polar optik fonon saçılmasına ait hareketlilik sınırı

 μ_{ab}

Arayüzey bozukluğu saçılmasına ait hareketlilik sınırı

 μ_{as}

Safsızlık saçılmasına ait hareketlilik sınırı

 μ_{al}

Alaşım saçılmasına ait hareketlilik sınırı

 n

Elektron yük yoğunluğu

 n_s

2-boyutlu elektron yük yoğunluğu

 n_H

Hall taşıyıcı yoğunluğu

 N_{AS}

2-boyutlu arka plan safsızlık yoğunluğu

 N_d

3-boyutlu arka plan safsızlık yoğunluğu

 Ξ

Deformasyon potansiyeli

 P_{DP}

Doğal polarizasyon

 P_{PE}

Piezoelektrik polarizasyon

 p

Deşik yük yoğunluğu

 $R_{ab,cd}$

4 kontaklı direnç değeri

 R_H

Hall katsayısı

 q_s

Perdeleme sabiti

 ρ

Kristal Yoğunluğu

 σ

Elektriksel iletkenlik

 τ_c

Gevşeme zamanı

 u_l

Boyuna akustik fonon saçılma hızı

 S_0

Perdeleme sabiti

 U_{AL}

Alaşım potansiyeli

 V_H

Hall voltajı

 V_p

Deşik hızı

Simgeler Ω_0 **Açıklamalar**

Bir atom başına düşen hacim

 Z_0

Kuantum kuyu genişliği

 X

Alaşım oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar****2DEG**

2-boyutlu elektron gazı

2DHG

2-boyutlu deşik hazı

AlN

Alüminyum Nitrit

CVD

Kimyasal buhar biriktirme

DP

Doğal polarizasyon

GaN

Galyum nitrit

GaP

Galyum fosfat

GaAs

Galyum arsenik

HFET

Çoklu eklem alan etkili transistör

HEMT

Yüksek elektron hareketliliğine sahip transistör

InN

İndiyum nitrit

LED

Işık yayan diyot

MBE

Moleküler demet epitaksi

MOCVD

Metal organik kimyasal buhar biriktirme

PE

Piezoelektrik polarizasyon

Si

Silikon

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, ayarlanabilir yasak bant enerjileri nedeni ile günümüz teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Yarıiletken kristaller, doğası gereği yarıiletken durumda olan atomlar ve sonradan bileşik veya alaşım yapılarak elde edilen yarıiletken kristal olarak doğada bulunmaktadır. Silikon (Si) ve Germanyum (Ge) doğal yarıiletkenlere örnektir. Silikon teknolojisi 20 yıl öncesine kadar ve günümüzde eskisi kadar olmasa da elektronik devre yapımında alttaş olarak kullanılan yarıiletken bir malzemeydi. Si ve Ge kısa dalga boyuna sahip yarıiletkenler olduğundan gelişen elektronik ve optoelektronik teknolojiye çok uygun olmamaya başladı. Bu yüzden araştırmacılar daha hızlı veri iletişimi ve buna rağmen daha küçük aygıtlar elde etmek istedi. Yeni üretim teknikleri ve yeni üretim boyutları gerekiyordu. Bu gereklilikler araştırmacıları farklı bir yarıiletken malzemeye yöneltti ve saf olarak Silikon ve Germanyum yerine bileşikler olarak GaN (Galyum Nitrür), GaAs (Galyum Arsenik), SiC (Silikon Karbür) gibi yapılara yönelinmiştir. III-V grubu yarıiletkenler GaAs, GaN, InN (İndiyum Nitrür), AlN (Alimünyum Nitrür) oldukça ilgi çekmiş ve her biri ayrı ayrı incelenmiştir. Katkılı yarıiletkenler ikili, üçlü ve günümüzde dörtlü bileşikler oluşturabilir.

Bir yarıiletken malzemenin çalıştığı frekans aralığı bilinirse o yarıiletken malzemenin hangi alanda daha verimli olduğu bilinir ve o alanda çalışma yapılır. III-V gurubu yarıiletkenler, geniş bant aralığına sahiptir. GaN yarıiletkeninin 3,4 eV gibi bant aralığına sahip olması onun 1-50 GHz frekans aralığında çalışabilen bir yarıiletken malzeme olduğunu gösterir. Bu frekans aralığında RF uygulamaları, askeri alanda radar ve füze uygulamaları, mikrodalga, kablosuz ağ uygulamaları bulunmaktadır. Bu alanda yüksek sıcaklıklarda ve yüksek güç uygulamalarında kullanılabilirliği olması ayrıca ilgi çekmiştir.

Doğası gereği GaN güçlü polarizasyona sahiptir, yüksek taşıyıcı yoğunluğu, yüksek ısı iletkenliği, düşük dielektrik sabitine sahiptir. Yüksek güç uygulamalarında ve yüksek sıcaklıklarda çalışılabilmektedir. GaN yarıiletkeni ilk olarak Johnson ve arkadaşları tarafından Galyum üzerinden sıcak amonyak geçirmesiyle sentezlenmiştir [1].

Üretilen bu yapı amorf kristal olduğundan elektriksel özellikleri incelenememiştir. Ancak günümüzde GaN, Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemlerinden olan Metal Organik

Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemi ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) ile yüksek kristal kalitesine sahip ince film olarak büyütülebilmektedir. İlk olarak 1971 yılında Manasevit ve arkadaşları metal organik Al ve Ga kaynaklar kullanarak GaN ve AlN bileşik yapılar üretilmiştir [2]. Bu yeni üretim teknikleri GaN malzemesini incelemek için yeni bir fırsat olmuştur. Günümüzde GaN yapılar Safir (Al_2O_3), SiC ve Si gibi alttaşlar üzerine büyütülebilmektedir. Safir oldukça ucuz ve bol olduğu için daha çok tercih edilmektedir.

GaN malzemesi Transistör uygulamalarında oldukça önemlidir. Özellikle Yüksek Elektron Hareketliliğine Sahip Transistör (HEMT) ile GaN adeta özleşmiştir ancak ilk HEMT yapı GaAs tabanlı bir yapı olmuştur. İlk olarak 1979 yılında Nimura, AlGaAs/GaAs HEMT çoklu yapısını üretmiştir [3]. Yüksek elektron hareketliliği sağlamak için düşünülen bir fikir sonucunda AlGaAs bariyer tabakasının katkılama ile bant yapısının bükülmesi meydana gelmiştir. Dolayısıyla AlGaAs bariyer tabakası ile GaAs kanal tabakası arasında enerji uzayında 2 boyutlu bir kuantum kuyu oluşturarak elektronların serbestçe hareket etmesi sağlanır. AlGaAs/GaN çoklu eklem yapı için ilk olarak 2-boyutlu electron gazı (2DEG) oluşumu Khan ve arkadaşları tarafından 1992 yılında gösterilmiştir [4]. Bu çalışmadan sonra GaN üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan InAlN/AlN/GaN/AlN ve InAlN/AlN/(InGaN)GaN/AlN çoklu yapıları Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi(NANOTAM) Laboratuvarlarında MOVCD yöntemiyle büyütüldü. Büyütülen bu çoklu yapılar Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde Hall Etkisi Laboratuvarında 30-300 K sıcaklık aralığında 0,4 T sabit manyetik alan altında sıcaklığa bağlı ölçümler alındı.

Hall Etkisi ölçümleri sonucunda elde edilen veriler sayesinde InAlN/AlN/GaN/AlN ve InAlN/AlN/(InGaN)GaN/AlN çoklu yapıların, 2 boyutlu kuantum kuyu iletimi ve bu yapıların 2DEG taşıyıcı yoğunlukları ile hareketlilikleri incelendi. Ölçümleri yapılan tüm çoklu yapılar için 2DEG saçılma mekanizmaları incelenerek arayüzey bozukluğu parametreleri araştırması yapıldı. Bu sayede büyütülen yapılar arasında yapısal farklılıklara bağlı olarak parametrelerin kıyaslaması yapıldı.

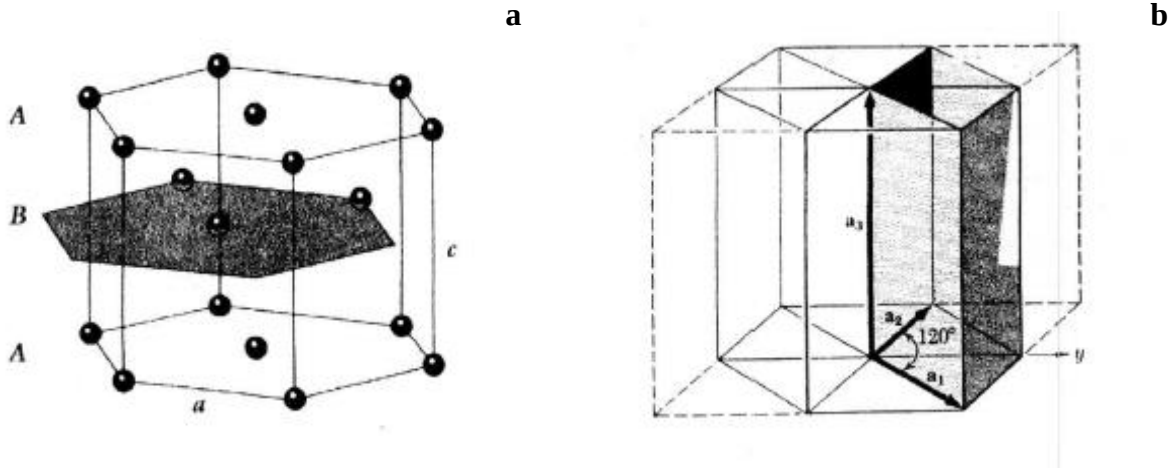
Bu tez çalışması aşağıdaki şekilde düzenlendi. Birinci bölümde GaN bileşik yarıiletkeni ve HEMT yapılar ile ilgili temel bilgiler verildi. İkinci bölümde III-Nitrür yapıların kristal

yapıları ile elektriksel parametreleri verildi. Üçüncü bölümde InAlN/InGaN/GaN ve InAlN/GaN çoklu yapılarında, polarizasyon ve 2DEG oluşumu üzerine bilgiler verildi. Dördüncü bölümde, yarıiletkenlerde iletim ve saçılma mekanizmaları detaylı olarak anlatıldı. Beşinci bölümde deney seti ve ölçüm yöntemleri hakkında bilgiler verildi. Altıncı bölümde ölçüm sonucunda elde edilen sonuçların hesaplanması ve tartışması yapıldı. Yedinci bölümde sonuçlar değerlendirildi.

2. III-NİTRÜRLERİN ÖZELLİKLERİ

2.1. Kristal Yapı

III-Nitrür grubu malzemeler wurtzite (hekzagonal), zinc-blende (çinko-sülfür) ve kaya tuzu yapılarında olabilir. Hekzagonal yapıda AlN, GaN ve InN malzemeleri termodinamik olarak kararlı durumdadır. Aynı zamanda hekzagonal yapıda malzeme içerisinde doğal polarizasyon ve nitrürlerdeki gerilmelerden dolayı piezoelektrik kutuplanma oluşması çoklu yapılarda ara yüzeylerde yük birikmesini meydana getirecektir. Çinko Sülfür yapıda ise kübik krsitaller Si, SiC, MgO [5-7] gibi alttaşlar üzerine büyütüldüklerinde kararlı durumda bulunurlar. Elektriksel ve optik çalışmalar açısından hekzagonal GaN oldukça çok kullanılır. Hekzagonal yapılar sıkı paketlenmiş yapılardır ve dörtlü eksen takımı örnek olarak [0001] veya [1010] gibi verilir. Bu tez dahilinde hekzagonal GaN yapısı incelenecektir.



Şekil 2.1. Sıkı paketlenmiş hekzagonal yapıları

Hekzagonal kristal yapı A ve B düzlemi Şekil 1a)'da gösterilmektedir. Bu kristal yapının örgü vektörleri ile gösterimi ise Şekil 1b)'de görülmektedir. Vektörel gösterimde a₁ ve a₂ soldaki şekilde a kenarını, a₃ vektörü ise c kenarını göstermektedir. Şekil 1b)'de taranmış olan kısım ilkel hücreyi göstermektedir. [0001] ve [1010] gibi eksen takımları basitçe Miller indisleri ile hesaplanabilir. Hekzagonal yapı için bir birim hücredeki atom sayısı 6'dır. Kristal yapılarda belirli bir atoma komşu olan atom sayısı koordinasyon sayısı ile verilmektedir. Koordinasyon sayısı kristal yapının ne kadar sıkı olduğunun bir ölçüsüdür.

GaN için örgü parametreleri $a=3,189 \text{ \AA}$, $c= 5,185 \text{ \AA}$ olarak verilmektedir [8]. İdeal bir Hekzagonal yapıda $c/a=1,633$ olmalıdır.

2.2. Elektriksel Özellikleri

III-Nitrür kristal yapıları enerji uzayında birbirlerine çok yakın olmayan farklı bant aralıklarına sahiptir. Bu nedenle kendilerine geniş yelpazede elektronik uygulama alanları bulmaktadırlar. AlN 6,2 eV, GaN 3,4 eV, InN 1,9 eV gibi yasak bant enerjilerine sahip olmakla birlikte sıcaklığa bağlı olarak $\sim 0,1$ gibi bir değişim gösterebilir [9]. Yasak bant aralıkları örgü sabitine göre ve eğer alaşımlı yapı ise alaşım oranına göre de değişiklik gösterebilir. Bu değişim en önemli olarak dalga boyunda değişim gösterir. Şekil 2’de bu yapılardan GaN yüksek ısı iletkenlik $\kappa=1,3 \text{ W/cmK}$ [10], yüksek bant aralığı ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme olanağıyla hemen her yerde kullanılabilir. GaN yarıiletkeni direk bant aralıklı yarıiletkendir. GaN’ün elektron etkin kütlesi $m_e^*=0,22m_0$ iken deşik kütlesi $m_h^*=1,0m_0$ değerindedir [11]. Deşik etkin kütlesi oldukça yüksektir. GaN temelli yapılar için literatürde yaklaşık olarak elektron hareketlilik değeri oda sıcaklığında $\sim 1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak verilmektedir. Buna ilaveten kristal içerisinde iletme katılan taşıyıcıların sayısı ise $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ olarak verilmektedir.

2.3. III-Nitrür Yapılar için Alttaş Seçimi

İncelenmek istenen herhangi bir GaN-temelli yapının karakteristik özelliklerinin iyi sonuçlar vermesi seçilen alttaş ile ilgilidir. Özellikle seçilen alttaş üzerine büyütülecek olan yarıiletken malzeme ile örgü uyumlu olması gerekmektedir. Bunun aksi durumlarında örgü uyumsuzluğu nedeniyle büyütülen yapılar arasında gerilmeler ve kusurlar oluşacaktır. Temel olarak alttaş seçiminde; örgü uyumu, termal iletkenlik (κ_L) ve termal genleşme katsayısı önemli kriterlerdir. GaN-temelli yapılar için Si, SiC ve Safir gibi alttaşlar kullanılmaktadır. Safir oldukça ucuz ve bol bulunan bir malzemedir. İlk olarak Manasevit ve arkadaşları Safir üzerine GaN ince film olarak büyüttüler [3]. Fakat safir ile GaN kristal yapılarının arasındaki örgü uyumu ve termal genleşme katsayısı birbirlerinden oldukça farklıdır. Bu yüzden GaN ile Safir arasına bir AlN tampon tabaka büyütülmüştür [12]. Yarıiletken bir malzemenin alttaş olarak kullanılması üzerine inşa edilecek yarıiletken için çok fazla kolaylık sağlayabilir. Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi alttaş olarak kullanılabilecek malzemeler verilmiştir.

6H-SiC üzerine büyütülen GaN daha güzel sonuçlar verebilir [4]. Ancak maliyet düşünüldüğünde en uygun alttaş yapısının Safir olacağı düşünülmektedir.

Çizelge 2.1. GaN-temelli yarıiletkenlerde kullanılan alttaş yapılar için ısı genleşme katsayı farkı ve örgü uyumsuzluğu [13,14]

Alttaş	Isıl Genleşme Katsayı Farkı(%) $(\alpha_a^{\text{GaN}} - \alpha_a^{\text{alt}}) / \alpha_a^{\text{GaN}}$	Örgü uyumsuzluğu(%) $(a_a^{\text{GaN}} - a_a^{\text{alt}}) / a_a^{\text{GaN}}$
Safir	34	-14
6H-SiC	25	2,3
Silikon	100	17

2.4. İstenmeden Katkılanma ve Kusurlar

Kristal yapının büyütülmesi esnasında, büyütme tekniğine bağlı olarak ortamda bulunan gazlar nedeniyle kristal içerisine istenmeyen atomlar yerleşir. Bu durum istenmeden katkılama olarak bilinir. İstenmeden katkılama nedeni ile bazı atomlar GaN kristali içerisinde Ga veya N atomlarının yerine geçerek alıcı ve verici sığ seviyeler meydana gelir [17]. Bu seviyeler yarıiletken malzemenin elektriksel ve optik özelliklerini dolayısıyla aygıt karakteristiğinin önemli ölçüde etkilemektedir [15,16].

Yarıiletken kristalde başlıca kusurlar; çizgisel, bölgesel ve noktasal kusurlar olarak bulunmaktadır [18,19]. Dislokasyonlar kristal içerisindeki bir kusurdur. Bu kusur kristal yapı içerisindeki bütün düzeni bozabilir. Kristal yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğu çok fazla olursa kristaldeki iletkenlik değişecektir [20]. Temel olarak kristal içerisindeki bir elektron belirli saçılmalara uğrayacaktır. Saçılmalara maruz kalan elektron yön değiştirdiğinden hareketi kısıtlanacaktır.

2.5. Bazı III-Nitürler İçin Materyal Parametreleri

2.5.1. AlN, InN ve GaN

AlN bazı ilgi çekici özelliklere sahip olan bir yarıiletken malzemedir. Geniş bant aralığı, yüksek ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olması onu cazip hale

getirmektedir [21]. Aynı zamanda AlN iyi bir elektronik ambalajlama malzemesidir. Yarıiletken devrelerde transistörler veya çeşitli devre elemanları plastik kılıflarla korunur veya paketlenir. AlN bu iş için oldukça iyidir. Çünkü aşındırıcı ve yakıcı kimyasallara karşı dirençlidir. GaP ve InP temelli yarıiletkenler için geniş bant aralığına sahip olması LED uygulamalarında onun önemli olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda AlN yarıiletken kristali GaN ve InN gibi kristaller ile alaşım olarak kullanıldığında AlInN/GaN çoklu yapısı olarak transistör uygulamalarında kullanılmaktadır. Öte yandan InN yarıiletkeni düşük yasak bant aralığına sahiptir.

Yüksek bant aralığına, yüksek ısıl iletkenliğe ve yüksek frekanslarda çalışabilme yeteneğine sahip bir yarıiletken olan GaN kristali, bu özellikleri ile çok fazla ilgi odağı olmuştur. Neredeyse HEMT yapılarının birçoğu GaN-temelli yapılardır. Bu tez çalışması dahilinde de GaN temelli InAlN/ GaN HEMT yapısı incelenmiştir. AlN, InN ve GaN için hesaplamalarda kullanılan temel sabitler Çizelge 2.2 ile verilmiştir. AlN ve GaN kadar ilgi çekici olmamıştır. Kullanım alanları AlN ve GaN ile alaşım yapıldığı durumdan öteye gitmemektedir.

Çizelge 2.2. AlN, InN ve GaN için verilen materyal parametreleri [9,22-28]

Parametreler	AlN	InN	GaN
Kristal Yapısı	Hekzagonal	Hekzagonal	Hekzagonal
Yasak bant aralığı (eV)	6,2	1,9	3,4
Elektron Etkin kütlesi	0,4m ₀	0,11m ₀	0,2m ₀
Elektron Hareketliliği (cm ² /V.s)	≤300	≤3200	≤1000
Deşik Hareketliliği (cm ² /V.s)	≤14	≤50	≤200
Örgü sabiti(a) (Å)	3,11	3,54	3,189
Örgü sabiti(c) (Å)	4,98	5,7	5,19
Optik fonon Enerjisi (meV)	99,2	73	91,2
Doğal Polarizasyon (C/m ²)	-0,081	-0,032	-0,029
e ₃₃ (C/m ²)	1,46	0,97	0,73
e ₃₁ (C/m ²)	-0,6	-0,57	-0,49
Kırılma Alanı (V/cm)	1,2-1,8x10 ⁶	-	5x10 ⁶
Elektron ilgisi eV	0,6	0,6	4,1
Statik Dielektrik Sabiti	8,5	15	8,9

Çizelge 2.2. (devam) AlN, InN ve GaN için verilen materyal parametreleri

Elektron Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)	≤7	<80	≤25
Deşik Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)	≤0,3	-	≤5
Deşik Etkin Kütlesi	3,53 m ₀	0,65m ₀	1,25m ₀
Simetri grubu	P6 ₃ mc(C _{6v} ⁴)	P6 ₃ mc(C _{6v} ⁴)	P6 ₃ mc(C _{6v} ⁴)
Koordinasyon geometrisi	Tetrahedral	Tetrahedral	Tetrahedral
cm ³ 'deki atom sayısı	9,58x10 ²²	6,4x10 ²²	8,9x10 ²²
Debye sıcaklığı (K)	1150	660	600
Yoğunluğu (g/cm ³)	3,23	6,81	6,15
Elektron ısı hızı (m/s)	1,85x10 ⁵	3,4x10 ⁵	2,6x10 ⁵
Deşik ısı hızı (m/s)	4,1x10 ⁴	9,4x10 ⁴	9,4x10 ⁴
Yüksek frekans dielektrik sabiti	4,77	8,4	5,35
Ağır deşik etkin kütlesi	10,42m ₀	1,63m ₀	1,4m ₀
Hafif deşik etkin kütlesi	0,24 m ₀	0,27m ₀	0,3m ₀
(a) için ısı iletkenlik katsayısı K ⁻¹	4,2x10 ⁻⁶	3,8x10 ⁻⁶	5,59x10 ⁻⁶
(c için ısı iletkenlik katsayısı K ⁻¹	5,27x10 ⁻⁶	2,9x10 ⁻⁶	3,17x10 ⁻⁶
Elastik sabit C ₁₁ (GPa)	410	190	390
Elastik sabit C ₁₂ (GPa)	149	104	145
Elastik sabit C ₁₃ (GPa)	99	121	106
Elastik sabit C ₃₃ (GPa)	389	182	398

2.5.2. Safir (Al_2O_3)

GaN-temelli yarıiletkenler için neredeyse en çok kullanılan alttaş safirdir. Safir ile GaN arasındaki örgü uyumsuzluğundan daha önce bahsetmiştik. Ancak safir bolca bulunmasından ve ucuz olmasından dolayı araştırmacılar tarafından alttaş olarak tercih edilmektedir. Safir malzemesine ait materyal parametreleri Çizelge 2.3 ile verilmiştir.

Çizelge 2.3. Al_2O_3 için verilen materyal parametreleri [29,30]

Parametreler	Al_2O_3
Kristal Yapısı	Hekzagonal-Rombohedral-Trigonal
Erime sıcaklığı	1,9 eV
Özdirenç	10^{11} - $10^{16} \Omega\text{cm}$
a Örgü sabiti	4,76 Å
c Örgü sabiti	13 Å
Yoğunluğu	$3,98\text{gcm}^{-3}$
Kırılma Alanı	$4 \times 10^5 \text{ V/cm}$
Koordinasyon Geometrisi	Oktahedral
cm^3 'teki atom sayısı	$2 \times 35 \times 10^{22}$

2.5.3. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ ve $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ Alaşımları

$\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ ve $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ alaşımlarının materyal parametreleri; Çizelge 2.2' ile verilen AlN, InN ve GaN bileşik yarıiletken materyal parametrelerinin Vegard yasasında kullanılmasıyla elde edilebilir. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ ve $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ alaşım yarıiletkenlerinin gerekli materyal parametreleri Çizelge 2.4 ile verildi.

Bu parametreler sayesinde özdirenç ve Hall etkisi ölçümü yapılan numuneler için 1 boyutta Schrödinger-Poisson denklem çiftinin çözülmesiyle, ilekenlik bandının şekli ile kanal tabaka ve bariyer tabaka arasında elektronların bulunma olasılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonuçları, bulgular ve tartışma bölümünde detaylı olarak tartışılmıştır.

Çizelge 2.4. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ ve $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ için 300 K’de materyal parametreleri [31-34]

Parametreler	$\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$
(a) örgü sabiti	3,153 Å
(c) örgü sabiti	5,131 Å
Yasak bant aralığı	4,36 eV
Doğal polarizasyon	-0.072 Cm^{-2}
InAlN/GaN arasındaki Piezoelektrik polarizasyon	-0,0052 Cm^{-2}
Bant offset	1,51 eV
Dielektrik sabit	11,04
Parametreler	$\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$
(a) örgü sabiti	3,224 Å
(c) örgü sabiti	5,24 Å
Yasak bant aralığı	3,048 eV
Doğal polarizasyon	-0,0315 Cm^{-2}
InAlN/GaN arasındaki Piezoelektrik polarizasyon	0,011 Cm^{-2}
Bant offset	-0,23 eV
Dielektrik sabit	10,71

3. InAlN/GaN ÇOKLU YAPISI VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

3.1. Çoklu Yapılar

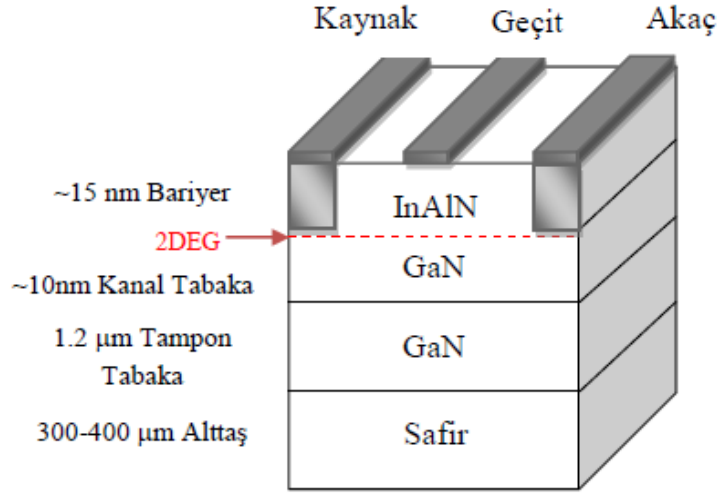
Günümüzde hekzagonal GaN temelli malzemeler üzerine hekzagonal InAlN ve AlGaIn tabakalar büyütülebilmektedir. Örneğin AlGaIn/GaN yapıları basit çoklu yapılar olarak bilinmektedir. Bu tez dahilinde InAlN/GaN çoklu yapısı incelenecektir. Burada GaN tabakasına tampon tabaka denilmektedir. Bu tabakanın kanal bölgesinde iletim gerçekleşmektedir dolayısıyla kullanılan kanal tabakanın alaşım yapıda olmaması veya safsızlık atomlarının olmaması daha iyi iletim için oldukça önemlidir. GaN önceki bölümde de anlatıldığı gibi Safir, Silikon veya SiC üzerine günümüz koşullarında büyütülmektedir. InAlN/GaN çoklu yapısında InAlN tabakası bariyer olarak adlandırılmaktadır. Çünkü GaN ile InAlN yarıiletken malzemelerinin yasak bant enerjileri farklıdır. InAlN yarıiletkeni yüksek bant aralığı nedeniyle bariyer gibi davranarak elektronların hapsedilmesine yardımcı olmaktadır.

GaN temelli yapılar genellikle Yüksek Elektron Hareketliliğine Sahip Transistörler (HEMT) yapımında kullanılmaktadır. GaN temelli HEMT yapılar aslında Çoklu Eklem Alan Etkili Transistör (HFET) yapılardan başka bir şey değildir. Bu yüzden HFET yapıları incelemek çoklu yapılara girişi ve bu yapıların çalışma prensibini daha iyi açıklamaya yardımcı olacaktır.

3.2. Çoklu Eklem Alan Etkili Transistörler

Çoklu eklem alan etkili transistörler ilk olarak AlGaAs yapısı için Nimura tarafından Bell laboratuvarında gözlemlendi [35]. Kullanılan malzemeler veya yapılar üzerindeki değişimlere rağmen 2DEG, yüksek yasak bant aralığına sahip malzemeler ile düşük yasak bant aralığına sahip malzemeler arasındaki ara yüzeyde gözlenmektedir. 2DEG herhangi bir bulk yarıiletken malzemedan daha yüksek yüzey taşıyıcı yoğunluğuna ve yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahiptir. Yüksek taşıyıcı hareketliliği ve yüksek yüzey taşıyıcı yoğunluğu bu yapıların yüksek iletkenliğe sahip olması ve yüksek frekanslarda çalışması olanağını sağlamaktadır. Şekil 3.1’de rastgele seçilmiş kalınlıklara sahip, HFET yapısı görülmektedir. Bu yapı bir Kaynak bir Akaç ve bir Geçit’ten oluşmaktadır.

Burada Kaynak ve Akaç omik kontak, Geçit ise Metal-Yarıiletken Schottky kontak olmaktadır [36].



Şekil 3.1. Temel çoklu eklem alan etkili transistör yapısı

3.3. InAlN/GaN yapısı

GaN temelli eklem yapılar için farklı bariyerler kullanılmaktadır. Burada InAlN bariyer kullanımı ve sonucunda oluşan eklem yapıdan bahsedeceğiz. InAlN ve GaN farklı yasak bant enerjilerine sahip yarıiletken malzemelerdir. GaN üzerine büyütülmüş InAlN eklem yapıda InAlN ile GaN malzemelerinin Fermi seviyeleri dengelenene kadar iletkenlik bantları bükülecektir. Bükülme gerçekleştikten sonra GaN'nin iletkenlik bandı üçgenimsi olarak Fermi seviyesinin altında kalacak ve 2DEG oluşumu gerçekleşecektir [37].

Oluşan 2 boyutlu kuantum kuyu InAlN yüzeye yakın olmaktadır. Bu yüzden bariyer olarak kullanılan InAlN tabakasındaki In oranı, safsızlık oranı ve kusurlar oluşan üçgenimsi kuyu içerisindeki elektronların hareketini doğrudan etkileyecektir. Burada oluşan kuantum kuyu yaklaşık birkaç nanometre civarındadır.

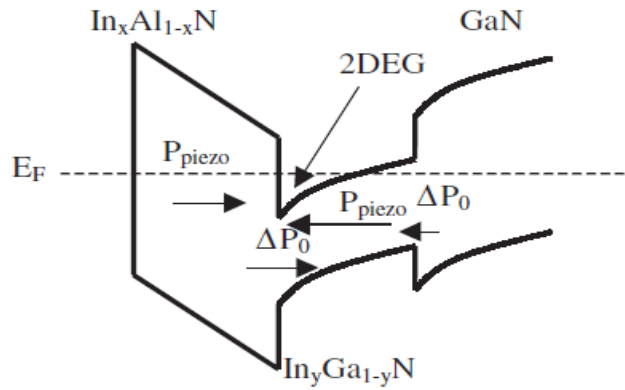
InAlN/GaN için eklem yapısında In oranı %17 olduğunda yüksek kaliteli yapıların büyütüldüğü görülmektedir [38]. Tez dahilinde incelenen yapı için In alaşım oranı %17 olarak alınmıştır. Örgü uyumlu büyütülen bir InAlN/GaN eklem yapı için oluşan 2 boyutlu kuantum kuyuda iletim iyileştirilmiş olmaktadır.

Bu tez dahilinde InGaN kanal ve GaN kanal tabakaya sahip HEMT yapıları incelenecektir.

3.3.1. InAlN/InGaN/GaN yapısı

InGaN alaşımı ilk olarak Osamura tarafından ortaya çıkarılmıştır [39]. InGaN alaşımlı eklem yapılar literatürde genellikle LED çalışmalarında görülmektedir [40]. Bu eklem yapının diğer yapılardan farkı belki de iki farklı alaşım yapının üst üste büyütülmüş olmasıdır. InAlN, InGaN ve GaN farklı yasak bant aralıklarına sahip yapılardır.

Bu tez dahilinde InGaN yarıiletkeni bu eklem yapı için kanal tabaka olarak kullanılmıştır. InGaN yarıiletken kanal tabaka için In alaşım oranı % 10'dur. InGaN en düşük yasak bant aralığına sahip yarıiletken malzemedir. Bu yüzden bant yapısı dikkate alındığında InGaN yarıiletken malzemesinin olduğu kısım ilk olarak fermi seviyesinin altına inecektir ve üçgenimsi kuyu InGaN kanal içerisinde oluşacaktır. 2 boyutlu kuantum kuyu içerisindeki elektronlar, oluşan bu kuantum kuyunun bir alaşım kuyu olmasından sebeple çok fazla saçılmalara uğrayacaktır. Dördüncü bölümde bu kuantum kuyu içerisindeki elektronların uğrayacağı saçılma mekanizmaları detaylı bir biçimde anlatılacaktır.



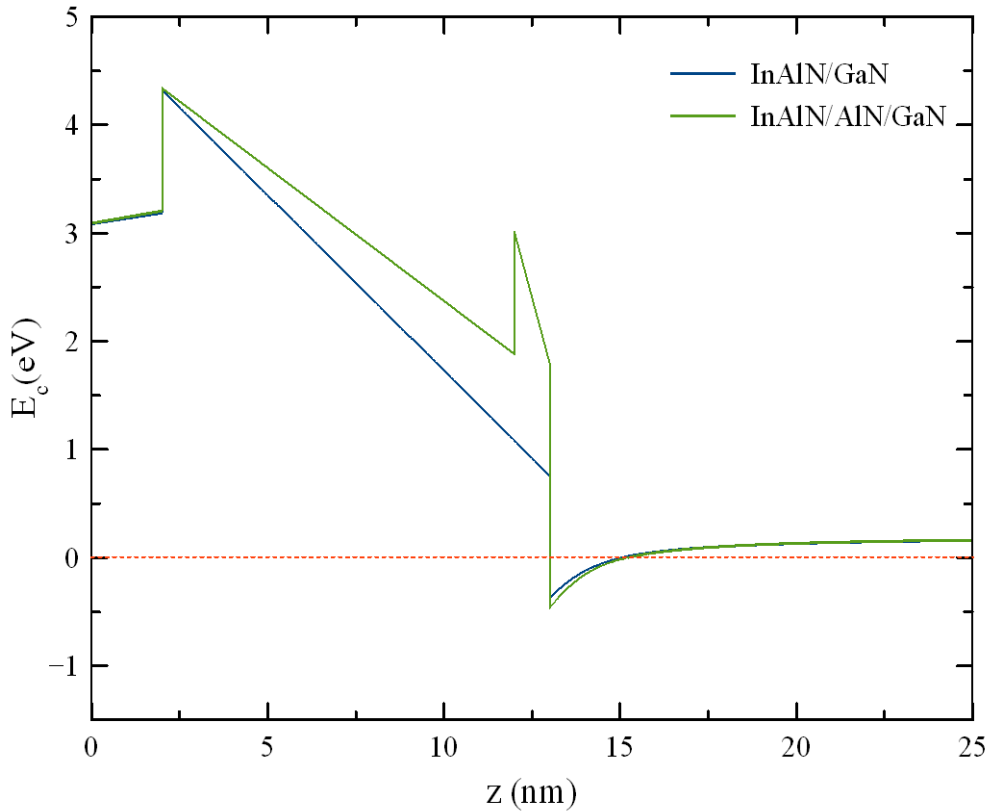
Şekil 3.2. $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu yapısı iletkenlik ve değerlik bant yapıları [41]

3.3.2. AlN kullanımı

Çoklu yapılarda AlN iki türlü kullanılmaktadır. İlk olarak Bariyer ile Kanal tabaka arasına yapılan çok ince büyütülmelerdir. İkinci kullanımı ise Altaş ile GaN tampon tabaka arasına örgü uyumsuzluğunu azaltmak amacıyla yapılan büyütülmelerdir.

InAlN/AlN/GaN/AlN ve InAlN/AlN/InGaN/GaN/AlN

AlN ara tabaka kullanımı bariyer tabakadan gelebilecek alaşım saçılmasını minimize edebilmek için ilk olarak AlGaIn/AlN/GaN yapısı için önerilmiştir [42]. Bizim çalışmamızda InAlN/AlN/GaN yapısı için AlN ara tabaka kullanıldı. Bu ara tabakanın kalınlığı ~ 1 nm olarak seçilmektedir. Bu kalınlıktaki ara tabaka, Lişesivdin ve arkadaşlarının yaptığı teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur [43]. Literatürde farklı AlN kalınlıkları ile yapılmış çalışmalar bulunmaktadır [44,45]. AlN yarıiletkeninin yasak bant aralığı InAlN ve GaN yarıiletkenlerinin yasak bant aralığından büyük olduğundan iletkenlik bandı büküldüğünde AlN ara tabakası bariyerin daha da yüksek bir bariyere sahip olmasına olanak sağlayacaktır [46]. Şekil 3.3 ile ~ 1 nm AlN ara tabaka kullanıldığında 2DEG kuantum kuyusunda ve bariyer yüksekliğindeki değişim görülmektedir.



Şekil 3.3. InAlN/GaN çoklu yapıda AlN ara tabaka kullanımı

Diğer bir yapı olan InAlN/AlN/InGaIn/GaN yapısı için AlN tabaka kullanımıyla InAlN bariyer tabakadan gelen alaşım saçılması minimize edilmektedir. Ancak Şekil 3.2’de bant

yapısında gösterildiği gibi 2DEG InGaN kanal tabaka içerisinde oluştuğundan 2 boyutlu iletim incelenirken alaşım saçılması ayrıca bu çalışma için incelendi.

3.4. Çoklu Yapılarda Polarizasyon ve Gerginlikler

3.4.1. Çoklu yapılarda polarizasyon (kutuplanma)

Klasik bir AlGaIn/GaN HEMT yapının aygıt performansı, elektriksel ve yapısal özelliklerine bağlıdır. Bu yapısal özellikleri, büyütüldükleri yüzeylerle doğrudan ilişkilidir. GaN, c eksenini boyunca ters simetriye(inversiyon simetri) sahip olmadığından safir üzerine Ga veya N yüzeyleri üzerine büyüyebilir [47,48]. Ters simetriye sahip olmaması GaN temelli yapıların piezoelektrik özelliklere sahip olmasını sağlar. GaN, AlN ve InN polarizasyona sahip bazı Nitrid yapılarıdır [49,50].

AlN yarıiletken malzemesi, GaN ve InN yarıiletkenlerinden yaklaşık 4-5 kat daha güçlü doğal ve piezoelektrik polarizasyona sahiptir. III-Nitrid yarıiletken malzemelerde Doğal ve Piezoelektrik olmak üzere iki türlü polarizasyon bulunmaktadır. Doğal polarizasyon kristalin doğasında var olan polarizasyondur. Piezoelektrik polarizasyon ise büyütülen yapılar arasındaki gerilmelerden kaynaklanan polarizasyondur. Yarıiletken kristal içerisinde toplam polarizasyon doğal ve piezoelektrik polarizasyonun toplamı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$P = P_{DP} + P_{PE}$$

3.4.2. Doğal polarizasyon

Doğal polarizasyon III-Nitrid grubu hekzagonal ve düşük simetrikli yarıiletkenlerin doğası gereği yarıiletken malzemenin içyapısından kaynaklıdır. Her malzeme için Doğal polarizasyon katsayısı farklıdır. Yüksek Doğal polarizasyon katsayısına sahip yarıiletken kristaller tabakalar halinde büyütüldüğünde ara yüzeyde oluşan 2DEG yoğunluğu da önemli oranda değişebilmektedir. Doğal polarizasyon sonucunda yarıiletken kristal içerisinde bir elektrik alan meydana gelir. Bu polarizasyon yarıiletken kristalin denge örgülerinde meydana geldiğinden(kendiliğinden gelişen) Doğal polarizasyon olarak isimlendirilir [51]. Oluşan bu elektrik alan c-[0001] eksenini boyunca ve 3MV/cm gibi

yüksek bir değerdir [52]. [0001] yönü Ga-yüzey üzerine büyütme çoklu yapının üstten alttaşa doğru olmasıdır. $[000\bar{1}]$ yönü ise N-yüzey tam tersi alttaştan çoklu yapının üst kısmına doğrudur. GaN temelli büyütme için AlGa_N, InAlN ve InGa_N alaşımları için doğal polarizasyon hesaplama ifadeleri şöyledir [53];

$$\overset{AlGaN(x)}{P_{DP}} = -0.090x - 0.034(1-x) + 0.021x(1-x) \quad (3.1)$$

$$\overset{InGaN(x)}{P_{DP}} = -0.042x - 0.034(1-x) + 0.037x(1-x) \quad (3.2)$$

$$\overset{AlInN(x)}{P_{DP}} = -0.090x - 0.042(1-x) + 0.070x(1-x) \quad (3.3)$$

burada x alaşım oranıdır.

3.4.3. Piezoelektrik polarizasyon

Piezoelektrik polarizasyon GaN temelli yapılarda tabakalı büyütme örgü uyumsuzluğu olduğunda gerilmelerden kaynaklanan oluşan polarizasyondur. GaN üzerine büyütülen yapılarda temel olarak örgü uyumsuzluğu açısından en uygun malzeme AlN yarıiletkenidir. Çoklu yapılardan söz ederken AlN yarıiletkeninin safir ile GaN arasına büyütüldüğünden bahsedildi. Bu noktada GaN ile Safir arasındaki örgü uyumsuzluğunu kaldırmak hedeflenmiştir.

Çizelge 3.1’de verildiği gibi AlN yarıiletken kristalinin doğal polarizasyon katsayısı GaN yarıiletken kristalinden fazladır. Öte yandan GaN ile AlN arasında %2’lik düşük örgü uyumsuzluğu bulunmaktadır. Bu durumda kristal içerisinde zaten var olan Doğal polarizasyon yanında Piezoelektrik polarizasyon oldukça düşük şiddette kalmaktadır. Ancak InN ile GaN kristallerini kıyasladığımızda %10 gibi bir örgü uyumsuzluğu görmekteyiz [54]. Bu durumda InN ile GaN arasındaki büyütme örgü uyumsuzluğunda Piezoelektrik polarizasyon, Doğal polarizasyona göre daha büyük olacaktır. Piezoelektrik polarizasyon ve Doğal polarizasyon sonucunda, tabakalar halinde büyütülen yapıların ara yüzeylerinde yani bariyer tabaka ile kanal tabaka arasında yük birikmesi meydana gelmektedir.

Burada biriken yük direkt olarak Piezoelektrik polarizasyon için büyütülen yarıiletken malzemeler arasındaki örgü uyumsuzluğu ve Doğal polarizasyon için yarıiletken kristaller arasındaki Doğal polarizasyon katsayıları ile orantılıdır.

Ara yüzeyde biriken yük, diğer bir ifadeyle kristal içerisindeki iletimi sağlayan taşıyıcılar yarıiletken aygıt için çok önemlidir. Bu yüzden temelde yapılacak olan ilk inceleme tabakalar halinde büyütülecek kristal yapıları arasındaki farklılıklar ve ortak özelliklerdir. Alaşım yarıiletken kristallerde, alaşım oranına bağlı olarak piezoelektrik polarizasyon farklılık göstermektedir. Artan alaşım oranı ile piezoelektrik polarizasyon artmaktadır [55]. Piezoelektrik polarizasyon bazı hesaplamalar ile şöyle verilmektedir;

$$\vec{P}_{PE} = \sum_j e_{ij} \vec{\epsilon}_j. \quad (3.4)$$

e_j gerginlik tensörü ve e_{ij} piezoelektrik sabitlerdir.

III-Nitrür grubu için ifadeyi sadeleştirmek gerekirse c-[0001] yönü için piezoelektrik polarizasyon;

$$P_{PE} = e_{33}e_3 + e_{31}(e_1 + e_2), \quad (3.5)$$

şeklinde verilir. e_3 , c doğrultusundaki gerginlik, e_1 ve e_2 ise düzlemsel gerginliktir.

$$e_1 = e_2 = \frac{(a - a_0)}{a_0}, \quad (3.6)$$

$$e_3 = \frac{(c - c_0)}{c_0}. \quad (3.7)$$

Eş. 3.6 ve Eş. 3.7’de a_0 ve c_0 örgü sabitleridir. Eş. 3.6’da verilen a ise üstteki gergin tabakanın örgü sabiti, a_0 alttaki rahat durumda olan tabakanın örgü sabitidir.

Çizelge 3.1. GaN, InN ve AlN için piezoelektrik polarizasyon, doğal polarizasyon ve örgü sabitleri [28,56]

Yarıiletken Kristal	GaN	InN	AlN
$e_{33}(\text{Cm}^{-2})$	0,73	0,97	1,46
$e_{31}(\text{Cm}^{-2})$	-0,49	-0,57	-0,60
$a_0(\text{\AA})$	3,12	3,54	3,112
$c_0(\text{\AA})$	5,19	5,705	4,981
$P_{\text{DP}}(\text{Cm}^{-2})$	-0,029	-0,032	-0,081

3.4.4. Gerginlik

III-Nitrür yarıiletken kristalleri için elektronik ve optik birçok uygulama alanı mevcut olmakla birlikte oluşturulan bir aygıtın karakteristik özellikleri seçilen yarıiletken kristallerin temel örgü sabitleri ile ilişkilidir. Buradan hareketle GaN temelli bir aygıt üretiminde üstüne büyütülecek olan kristal yapı, GaN ile örgü sabitleri açısından uyumlu olmalıdır. Altta bulunan GaN ile üstte büyütülecek olan yapının örgü sabitleri Çizelge 3.1 ile verilmektedir.

Büyütülecek olan iki yarıiletken kristal arasında, alttaki yapının örgü sabitinden farklı bir örgü sabitine sahip yarıiletken kristal üste büyütüldüğünde gerginlik meydana gelecektir. Bu gerginlik belirli bir kritik kalınlıktan sonra rahatlayacak ve bu durumda yarıiletken ara yüzeyinde dislokasyonlar meydana gelecektir. Bu dislokasyonlar 2 boyutlu iletimi etkileyecek ve oluşturulmuş olan aygıtın performansını etkileyecektir. Burada üst kısımda büyütülecek olan yapının kritik kalınlığı şöyle ifade edilmektedir [57];

$$d_k = \frac{a_{\bar{u}}}{2|\varepsilon|}, \quad (3.8)$$

$a_{\bar{u}}$, üst tabakanın örgü sabiti ve ε , Eş. 3.6' da belirtilen gerginliktir. Büyütme sürecinde, alttaki GaN için örgü sabiti a_a olarak kabul edersek; $a_a > a_{\bar{u}}$ durumunda gerilme gerginliği, $a_{\bar{u}} > a_a$ durumunda sıkışma gerginliği oluşmaktadır.

3.4.5. Çoklu yapılarda 2 boyutlu elektron gazı oluşumu (2DEG)

Şimdiye kadar III-Nitrür grubu yarıiletkenler için Doğal ve Piezoelektrik polarizasyon etkileri ve gerginliklerden bahsedildi. Özellikle Doğal ve Piezoelektrik polarizasyon sonucunda AlGaIn/GaN veya InAlN/GaN gibi çoklueklem yapıların ara yüzeylerinde yük birikimi olur. Bu polarizasyonlardan kaynaklı biriken yük yoğunluğunu;

$$\sigma = P^{üst} - P^{alt}, \quad (3.9)$$

$$\sigma = [P_{DP}^{üst} + P_{PE}^{üst}] - [P_{DP}^{alt} + P_{PE}^{alt}] \quad (3.10)$$

formülü ile ifade etmek mümkündür [58].

İfade edilen yük yoğunluğu ara yüzeyde meydana gelen taşıyıcıların sayısını ihtiva etmektedir. Ara yüzeyde oluşan yük birikimi farklı yasak bant aralıklarına sahip yarıiletken kristallerin tabakalar şeklinde üst üste büyütülmesi ile oluşmaktadır. Büyütülen bu yapıların iletkenlik bantları enerji uzayında fermi seviyeleri dengelenene kadar bükülme meydana gelir. Bant bükülmesi sonucunda üçgenimsi bir kuantum kuyu fermi seviyesinin altında kalır, işte burası taşıyıcıların serbestçe hareket edebildiği bölgedir yani 2DEG kuyusudur. Şekil 3.2’de polarizasyonlar sonucu oluşan 2DEG kuyusu verilmiştir. Oluşan bu kuantum kuyuda katkıya bağlı olarak veya aygıtın geçidine uygulanan gerileme bağlı olarak tüm iletim için 2DEG kuyusu dikkate alınır [59].

GaN temelli HEMT yapılarda genellikle 2DHG yani 2 boyutlu deşik gazı beklenmez. Bu yüzden incelenen tüm yapılar için taşıyıcıların elektron olduğu düşünülmektedir. Yapılan tüm analizler ve hesaplamalar 2DEG için geçerlidir. GaN temelli HEMT yapılarda 2DEG oluşturmak için herhangi bir katkılamaya gerek yoktur.

4. YARIİLETKENLERDE TAŞIYICI İLETİMİ

Yarıiletkenler malzemeler iletim özellikleri açısından n-tipi ve p-tipi olmak üzere ikiye ayrılırlar. Temel olarak bilindiği üzere n-tipi bir yarıiletkende iletim elektronlar yani negatif yükler tarafından yapılır. p-tipi yarıiletkende ise deşikler yani pozitif yükler aracılığıyla iletim gerçekleşir. Bizim incelediğimiz GaN-temelli HEMT yapılarında iletim elektronlarla gerçekleşir. Yarıiletkenlerde iletim iki yolla gerçekleşir. Birincisi “Taşıyıcı Sürüklenmesi”, ikincisi ise “Taşıyıcı Difüzyonu”. Bu iletim mekanizmaları birbirinden farklı çalışma prensiplerine dayanmaktadır.

Taşıyıcı difüzyonu, taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal değişiminden kaynaklanan iletim şeklidir. Bu değişim sonucunda taşıyıcılar fazla yoğun bölgeden az yoğun bölgelere difüz ederek orada bir akım meydana getirirler bu akım “Difüzyon akımı” olarak bilinir. Bu tez dahilinde Taşıyıcı difüzyonu incelenmeyecektir. Sadece Taşıyıcı sürüklenmesi iletimi incelenecektir.

Kusursuz bir yarıiletken kristalin deneysel olarak üretimi oldukça zordur. Bu yüzden kristal içerisinde sonsuz bir periyodiklikten bahsedilemez. Kristal içerisindeki periyodik potansiyelin bozulması sonucunda, elektronlar çok uzun mesafelerde hareket etmesi zordur. Bu yüzden uygulanan elektrik alan ve bir manyetik alan ile hareketlenen elektronların, kristal örgüdeki atomlara, kristal örgüdeki herhangi bir bozukluğa veya bir başka elektrona çarpması sonucu gerçekleşen iletimdir. Yani uzaktan baktığımızı düşündüğümüzde sanki bir sürüklenme hareketi yapar. Elektronun kendisinin dışındaki bu başka nesnelere çarpması sonucu bulunduğu durumu değiştirmesi olayına “saçılma” denilmektedir.

Çoklu eklem yapının ara yüzeyinde gerçekleşen iki boyutlu iletimde elektronların saçılmalar sonucunda iletimi gerçekleştiriyor olması, incelemelerin elektronların hangi saçılmalara uğradığı ve sonucunda nasıl bir 2 boyutlu iletimin gerçekleşeceği noktasına doğru gittiği aşikârdır. İşte bu bölümde ayrıntılı olarak elektronun 2-boyutlu iletiminde hangi saçılmaların ne kadar baskın ve iletimi ne kadar kısıtlayacağını ayrıntılı olarak inceleyeceğiz.

4.1. Elektron Hareketliliği ve Elektriksel İletkenlik

Kristal örgü içerisindeki elektronu hareketlendirmek için kristale bir $\vec{E}$ elektrik alanı ve bir $\vec{B}$ manyetik alanı uygulandığında elektron Eş 4.1’de gösterildiği gibi Lorentz kuvveti altında hareket eder:

$$m_e^* \frac{d\vec{V}}{dt} = -e\vec{E} - e\vec{V} \times \vec{B}. \quad (4.1)$$

Uygulanan elektrik ve manyetik alan altındaki elektronun etkin kütlesi m_e^* ile gösterilmektedir. Eş 4.1’de Newton’nun 2. yasası olan $\vec{F} = m\vec{a}$ formülü kullanılmıştır. Eş 4.1’de serbest elektron kütlesi yerine, elektronun etkin kütlesi kullanılmıştır.

Serbest elektron için momentum;

$$\vec{P} = m_0 \vec{V}_e \quad (4.2)$$

eşitliği ile verilmektedir. Uygulanan elektrik alan sonucunda elektronlar $\vec{F} = -e\vec{E}$ kuvveti altındadır buna ek olarak kristal içerisinde kristal örgüden kaynaklı örgü kuvveti bulunmaktadır. O halde momentumdaki değişim toplam kuvvete eşit olacağından;

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_{toplam} \quad (4.3)$$

ile verilir. Buradan;

$$m_0 \frac{d\vec{V}_g}{dt} = \vec{F}_{toplam} = \vec{F}_{uygulanan} + \vec{F}_{örgü} \quad (4.4)$$

İle toplam kuvvetin bileşenleri Newton yasası ile verilmiş olur. Burada $\vec{V}_g$ kristal içerisinde grup hızıyla hareket eden elektronun hızıdır. Uygulanan kuvvet sonucunda elektron;

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}_g}{dt} = \frac{\vec{F}_{uygulanan}}{m^*} \quad (4.5)$$

ivmesini kazanır. Burada m^* kristal içerisindeki elektronun etkin kütlesidir. Eş 4.5'in her iki tarafını m_0 serbest elektron kütlesi ile çarptığımızda;

$$m_0 \frac{d\vec{V}_g}{dt} = m_0 \frac{\vec{F}_{uygulanan}}{m^*} \quad (4.6)$$

olarak denklemde matematiksel bir değişim yapmış oluyoruz. Eş 4.4 ile Eş 4.6 ifadeleri birbirleri ile eşitlenirse;

$$m^* = m_0 \frac{\vec{F}_{uygulanan}}{\vec{F}_{uygulanan} + \vec{F}_{örgü}} \quad (4.7)$$

ifadesini elde etmiş oluruz. Buradan küçük bir yer değiştirme ile;

$$\frac{m^*}{m_0} = \frac{\vec{F}_{uygulanan}}{\vec{F}_{uygulanan} + \vec{F}_{örgü}} \quad (4.8)$$

formülü elde edilir ve fiziksel olarak artık yorumlanabilir haldedir. Eş 4.8'den $\vec{F}_{örgü}$ kuvvetinin elektronun etkin kütlesi ile elektronun serbest kütlesinin birbirine eşit olmasını engellediğini görebilmek mümkündür. Ancak biz 2 boyutlu iletimin gerçekleştiği kuantum kuyuda elektronların serbestçe hareket edebildiğini biliyoruz. Burada atlamamamız gereken bir durum vardır. O da kristal içerisindeki örgüden kaynaklanan örgü kuvvetidir. Serbest elektron ile kristal örgü içerisindeki elektronu birbirinden ayıran önemli fark örgü kuvvetidir. Elektronun etkin kütlesinin önemi elektronun uğradığı saçılma mekanizmalarını incelerken daha iyi bir şekilde kavramış olacağız.

Elektronun saçılma mekanizmaları iki grupta incelemek mümkün, örgü ve safsızlık saçılma mekanizmaları. Isısal etkileşim sonucunda örgü, yabancı atomlar ve yarıiletken kristal içerisindeki kusurlar nedeni ile de safsızlık saçılmaları meydana gelir. Saçılan elektronlar, rastgele saçılmalar sonucunda net bir yol alamadığı için çarpışmalar arası

ortalama mesafe sınırlıdır. Çarpışmalar arası ortalama zaman yani saçılma zamanı “gevşeme zamanı” olarak bilinir ve τ_c ile gösterilir. Uygulanan elektrik alan kaynaklı, ters yönde ivmelenmesi sonucunda elektronun ısısal hızına ek olarak elektronun sürüklenme hızı da hesaba katılmalıdır. Sürüklenme hızı çarpışmalar arası alınan serbest yol boyunca uygulanan kuvvetten kaynaklı momentum ile aynı süre içerisinde elektronun kristal içerisinde kazandığı momentuma eşitlenirse;

$$-e\vec{E}\tau_c = m^*\vec{V}_s \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir. Buradan sürüklenme hızını elde etmek istersek;

$$\vec{V}_s = -\left[\frac{e\tau_c}{m^*}\right]\vec{E} \quad (4.10)$$

elde edilir. Burada köşeli parantez içerisindeki ifade etkin kütleye ve serbest zamana bağlıdır. Bu ifade elektron hareketliliğinden başka bir şey değildir. Yani elektron için hareketlilik ifadesini

$$\mu_e = \frac{e\tau_c}{m^*} \quad (4.11)$$

elde etmiş oluruz. Bir yarıiletken için akım yoğunluğu ifadesi;

$$\vec{J} = -en\vec{V}_s \quad (4.12)$$

ile verilir. $\vec{V}_s$ sürüklenme hızı iken n, taşıyıcı yoğunluğudur. Sürüklenme hızını yerine yazarsak;

$$\vec{J} = en\mu_e\vec{E} \quad (4.13)$$

ifadesinin elde etmiş oluruz. Ohm kanunun uygulanması ile öz direnci elde edebiliriz.

$V=I.R$ formülü ile;

$$\vec{E}.L = (\vec{J}.A)(\rho \frac{L}{A}) \quad (4.14)$$

ifadesi elde edilmiş olur. A, elektrik alan uygulanan yarıiletkenin kesit alanı, L ise yarıiletkenin uzunluğudur. Eş 4.3 sadeleştirilirse;

$$\vec{E} = \vec{J}.\rho \quad (4.15)$$

ifadesi elde edilir. Eş 4.13 ifadesi Eş 4.15 ifadesinde yerine yazılırsa;

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (4.16)$$

özdirenç ifadesi elde edilir. $\rho = \frac{1}{\sigma}$ olduğu için Eş 4.16;

$$\sigma = ne\mu_e \quad (4.17)$$

iletkenlik ifadesi elde edilmiş olur. İletkenlik elektron yoğunluğu ve hareketliliğiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Burada GaN-temelli bir aygıt için elektron hareketliliğinin yüksek olması aslında iletimin o derece hızlı olması anlamına gelmektedir. Her bir bireysel saçılmadan kaynaklı özdirençlerin toplamı sonucunda, bireysel saçılma mekanizmalarının sınırlandırdığı toplam hareketlilik ile belirlenir. Bu toplam;

$$\frac{1}{\mu_{toplam}} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} \quad (4.18)$$

Matthiessen kuralı olarak bilinir [60,61].

4.2. İki Boyutlu İletimde Saçılma Mekanizmaları

İki boyutlu ilettime sahip yapılar için elektronların uğrayabileceği saçılmalar safsızlık ve örgü saçılma mekanizmalarıdır. Bu saçılma mekanizmalarından en önemlileri safsızlık saçılması (yükü safsızlıklar), fonon etkileşimleri sonucunda oluşan saçılmalar ve

dislokasyonlar sonucunda oluşan saçılmalarıdır. Fonon saçılmaları, Akustik ve Optik fonon olmak üzere iki grupta toplanmaktadır. GaN polar yarıiletken olduğu için Polar Optik Fonon saçılması burada devreye girmektedir. Aynı zamanda piezoelektrik bir yarıiletken olduğundan piezoelektrik potansiyel saçılması da görülmektedir. İki boyutlu iletimlerde taşıyıcılar ara yüzeyde bariyere doğru yığılmaktadırlar. Bu yüzden ara yüzeydeki bozukluk elektronların hareketi açısından oldukça önemlidir. Ara yüzey bozukluğu saçılması da incelenecek olan saçılma mekanizmaları arasındadır. InGaN kanal tabakaya sahip numunelerde 2 boyutlu kuantum kuyu alaşım kanalda oluşacağından, InGaN kanallı yapılar için alaşım saçılması ayrıca incelenecektir.

4.2.1. Akustik fonon saçılması

Akustik fonon saçılması deformasyon potansiyel (bozulmuş kristal potansiyeli) ve piezoelektrik potansiyel nedeniyle meydana gelen saçılmalarıdır. Etki ettiği sıcaklık 100K-200K arasındadır. Deformasyon potansiyeli için hareketlilik Ridley tarafından [62];

$$\mu_{dp} = \frac{16\rho e u_i^2 \eta^3}{3\Xi^2 k_B T m^* b} \frac{1}{J_{DP}(k)} \quad (4.19)$$

formülü ile verilmektedir. Burada u_i boyuna akustik fonon hızı, ρ kristalin yoğunluğu, k elektron dalga vektörü ve Ξ deformasyon potansiyeli olarak verilmektedir. b dalga fonksiyonlar için ve Hartree yaklaşımı üçgenimsi kuyu çözümlemelerinde kullanılan Fang-Howard ifadesidir [63]. Eş. 4.19'daki b ;

$$b = \left(\frac{33e^2 m^* n_s}{8\epsilon_0 \epsilon_s \hbar^2} \right)^{1/3} \quad (4.20)$$

ile verilir. n_s , iki boyutlu taşıyıcı yoğunluğudur. $J_{DP}(k)$ ifadesi ise;

$$J_{DP}(k) = \int_0^{2k} \frac{1}{2\pi k^3 (q + q_s)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{q}{2k}\right)^2}} q^4 dq \quad (4.21)$$

ile tanımlıdır. q_s , perdeleme uzunluğu olup;

$$q_s = \frac{e^2 m^*}{2\pi \eta^2 \epsilon_0 \epsilon_s} F_{11}(q) f(0) \quad (4.22)$$

ile ifade edilir. $f(0)$ alt bant köşesi iken $F_{11}(q)$, Fang-Howard dalga fonksiyonu form faktörü olarak adlandırılır [63]. Piezoelektrik etkilerden kaynaklı saçılma için hareketlilik ifadesi [62];

$$\mu_{pe} = \frac{\pi \epsilon_s \epsilon_0 \eta^3 k}{e K^2 k_B T m^* 2 J_{PE}(k)} \quad (4.23)$$

olarak verilmektedir. K elektromekaniksel çiftlenim katsayısı olup [64];

$$K^2 = \frac{\epsilon_{LA}^2}{\epsilon_s c_{LA}} - \frac{\epsilon_{TA}^2}{\epsilon_s c_{TA}} \quad (4.24)$$

olarak tanımlıdır. c_{TA} , c_{LA} , ϵ_{TA} , ϵ_{LA} katsayıları sırasıyla enine ve boyuna ortalama elastik sabitler, enine ve boyuna etkin piezoelektrik katsayılarıdır. Eş 4.23'de $J_{PE}(k)$ ifadesi ise;

$$J_{PE}(k) = \int_0^{2k} \frac{F_{11}(q)}{4k^2 (q + q_s)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{q}{2k}\right)^2}} q^3 dq \quad (4.25)$$

ile verilmektedir. Akustik fonon saçılması genel olarak Mattheissen kuralı ile;

$$\mu_{ak} = \left(\frac{1}{\mu_{DP}} + \frac{1}{\mu_{PE}} \right)^{-1} \quad (4.26)$$

verilmektedir.

4.2.2. Polar optik fonon saçılması

Çoğu yarıiletken için 300K civarında yani oda sıcaklığında baskın olan saçılma mekanizmasıdır. Özellikle GaN temelli HEMT yapıların birçoğu oda sıcaklığında çalıştıklarından bu saçılma mekanizması önemlidir. Ridley tarafından polar optik fonon saçılması için hareketlilik ifadesi [65];

$$\mu_{po} = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_p\eta^2}{e\omega_{po}m^{*2}Z_0} \left[e^{\eta\omega_{po}/k_B T} - 1 \right] \quad (4.27)$$

ile verilir. Burada, $\frac{1}{\epsilon_p} = \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s}$ olarak yazılmıştır. ϵ_∞ ve ϵ_s sırasıyla yüksek frekans dielektrik sabiti ve alçak frekans dielektrik sabitidir. Z_0 , 2DEG kuantum kuyu genişliği olup, $\eta\omega_{po}$ polar optik fonon enerjisidir.

4.2.3. Arayüzey bozukluğu saçılması

Araştırmacılar, MBE ve MOCVD gibi yöntemler ile çok düzgün kristaller büyütülmektedir. Ancak kristal yapılar arasındaki örgü uyumsuzlukları veya yüzey tutunma katsayılarının farklı olması ara yüzeyde bozukluğa sebep olmaktadır. 2DEG kuantum kuyusundaki taşıyıcılar ara yüzeye yakın oldukları için ara yüzeydeki bozukluk elektronların hareketini etkilemektedir [66].

Yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip InAlN/GaN gibi çoklu eklem yapılarda ara yüzey bozukluğu daha fazla etkili olmaktadır. Zanato ve arkadaşları Ara Yüzey Bozukluğu için analitik hesaplamayı [66];

$$\mu_{ab} = \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{n_s\Delta\Lambda} \right)^2 \frac{\eta^3}{em^{*2}} \frac{1}{J_{ab}(k)} \quad (4.28)$$

ile verilmiştir. Δ , ara yüzey bozukluğunun yanal boyutu iken Λ ise korelasyon uzunluğudur. $J_{ab}(k)$ ifadesi ise;

$$J_{ab}(k) = \int_0^{2k} \frac{e^{-q2\Lambda/4}}{2\pi k^3 (q + q_s)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{q}{2k}\right)^2}} q^4 dq \quad (4.29)$$

şeklinde tanımlanmıştır. q_s perdeleme sabiti olup [67];

$$q_s = \frac{e^2 m^*}{2\pi \eta^2 \varepsilon_0 \varepsilon_s} F(q) \quad (4.30)$$

ifadesi ile verilmektedir. Form faktörü $F(q)$ Hirakawa tarafından [68];

$$F(q) = \int_0^\infty dz \int_0^\infty dz' [f(z)]^2 [f(z')]^2 e^{-q|z-z'|}. \quad (4.31)$$

ifadesi ile verilmiştir. Ara yüzey bozukluğu saçılmasının sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmektedir.

4.2.4. Safsızlık saçılmaları

Yarıiletken kristaller büyütme aşamasında büyütme koşullarından kaynaklanan safsızlık atomlarının kristal içine istenmeden yerleşmesi sonucunda arka plan safsızlık meydana gelmektedir. İstenilen taşıyıcı sayısını elde etmek veya yarıiletkenin tipini dizayn etmek için katkılama yapılır. Yapılan bu katkılama uzak vericiden kaynaklanan safsızlıktır. Yarıiletken kristal her iki durumda da safsızlık atomu ihtiva etmiş olur. GaN-temelli yapılar için 2DEG oluşumunda katkılamaya gerek olmadığından safsızlık saçılmasında sadece arka plan safsızlık saçılması dikkate alınmalıdır. Arka plan safsızlık saçılması [69];

$$\mu_{as} = \frac{8\pi \eta^3 \varepsilon^2 k_F I_B(\beta)}{e^3 m^{*2} N_{AS}} \quad (4.32)$$

ifadesi ile verilmekle birlikte ε , GaN için dielektrik sabitidir. k_F , 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu için fermi yüzeyinin dalga vektörüdür ve;

$$k_F = \sqrt{2\pi n_s} \quad (4.33)$$

ile tanımlıdır [71]. N_{AS} , arka plan safsızlık yoğunluğudur. 3-boyutlu arka plan safsızlık yoğunluğu kuyu genişliği ile çarpılarak;

$$N_{AS} = Z_0 \cdot N_d \quad (4.35)$$

2-boyutlu arka plan safsızlık yoğunluğuna çevrilebilmektedir. Z_0 , 2 boyutlu kuantum kuyu genişliği iken N_d , 3-boyutlu arka plan safsızlık yoğunluğudur. Eş 4.32’de $I_B(\beta)$ ifadesi;

$$I_B(\beta) = \int_0^\pi \frac{\sin^2 \theta}{\sin(\theta + \beta)} d\theta \quad (4.36)$$

integrali ile verilmektedir. Burada;

$$\beta = \frac{S_0}{2k_F} \quad (4.37)$$

olarak verilmektedir. S_0 perdeleme sabiti olup [70];

$$S_0 = \frac{e^2 m^*}{2\pi \epsilon \eta^2} \quad (4.38)$$

ile verilmektedir. Safsızlık saçılma mekanizmasının sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmektedir.

4.2.5. Alaşım saçılması

Alaşım saçılması bu tez dahilinde önemli bir saçılma mekanizmasıdır. 2 boyutlu kuantum kuyuda bulunan elektronlar bariyer yakınlarında yığılma yapmaktadır. Ancak dikkat etmek gerekirse bariyer ile kanal tabaka arasına ~1 nm AlN ara tabaka büyütülmesi bu saçılmayı ortadan kaldıracaktır. Öte yandan GaN kanal tabakaya sahip çoklu yapı hariç $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

kanal tabakaya sahip alaşım yapılar için önemli bir saçılma mekanizması haline gelmektedir. $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ alaşım bariyer için örneklendirmek gerekirse, alaşım atomları olan In ve Al atomları N atomları arasına rastgele dizilmesi sonucunda iletim bandında düzensizlik meydana gelecek ve sonucunda elektronlar alaşım saçılmasına uğramaktadır. Kearly ve Horell perdeleme sabitini ihmal ederek alaşım saçılması için analitik değer ifadesini[72];

$$\mu_{al} = \frac{16}{3b} \frac{e\eta^3}{x(1-x)m^* 2\Omega_0 U_{AL}^2} \quad (4.39)$$

formülü ile verilir. Eř 4.39’da x , alaşım oranını, Ω_0 birim atom başına düşen hacmi, U_{AL} ise alaşım potansiyelini ifade etmektedir. Alaşım saçılmasının da sıcaklıktan bağımsız olduğu görölmektedir.

5. DENEYSEL TEKNİKLER

5.1. Giriş

Yarıiletken kristaller farklı büyüme yöntemleri ile büyütülerek, araştırılacak özelliklerine göre ölçüm sistemlerinde ölçümleri yapılır. Bizim çalışmamızda MOCVD yöntemi ile büyütülmüş 3 farklı $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapıların Hall Etkisi ölçüm sisteminde ölçümü yapılarak elektriksel karakterizasyonu yapıldı. Bundan sonraki kesimlerde ölçüm ve büyüme esnasında kullanılan deney sistemleri detaylı olarak açıklanacaktır. Yarıiletken kristaller MBE(Moleküler Akı Epitaksi) yöntemi ve genel olarak CVD yöntemleri ile büyütülebilmektedir. CVD yöntemi temel olarak kimyasal gazların uygun sıcaklıklarda alttaş üzerine çöktürme işlemidir. Tabii ki burada büyütülecek olan yapıya göre kullanılan kimyasal gazlar ve ortam sıcaklığı ve süreleri değişmektedir. CVD yöntemi ile genelde homojen yapılar büyütülür aslında olan yapının kalınlığını da artırmak denilebilir. MOCVD ile farklı yapılar büyütülmektedir.



Resim 5.1. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu olan AIXTRON RF200/4 RF-S GaN/AlGaIn MOVPE sistemi

Bu tez çalışmasında Bilkent Üniversitesi bünyesinde Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde(NANOTAM) bulunan MOCVD kristal büyüme sisteminde incelenecek olan B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu çoklu eklem yarıiletken kristalleri büyütüldü.

Resim 5.1’ de NANOTAM’da bulunan MOCVD yöntemi görülmektedir. Büyütülmüş olan yarıiletken numuneler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde Hall Etkisi ölçüm sisteminde elektriksel karakterizasyonu yapılmaya üzere ölçüldü. Lakeshore 7700 yüksek empedans’a sahip bu sistemde Van der Pauw kare kontak yöntemi ile omik kontaklar alınarak ölçüm 30-300K aralığında sabit 0.4 T manyetik alan altında ölçümler alınmıştır. Resim 5.2’ de Hall Etkisi Ölçüm sistemi görülmektedir. Ölçümlere başlanmadan önce numunelerin temizlenmesi ve hazırlık aşamasından bahsetmek yerinde olacaktır.

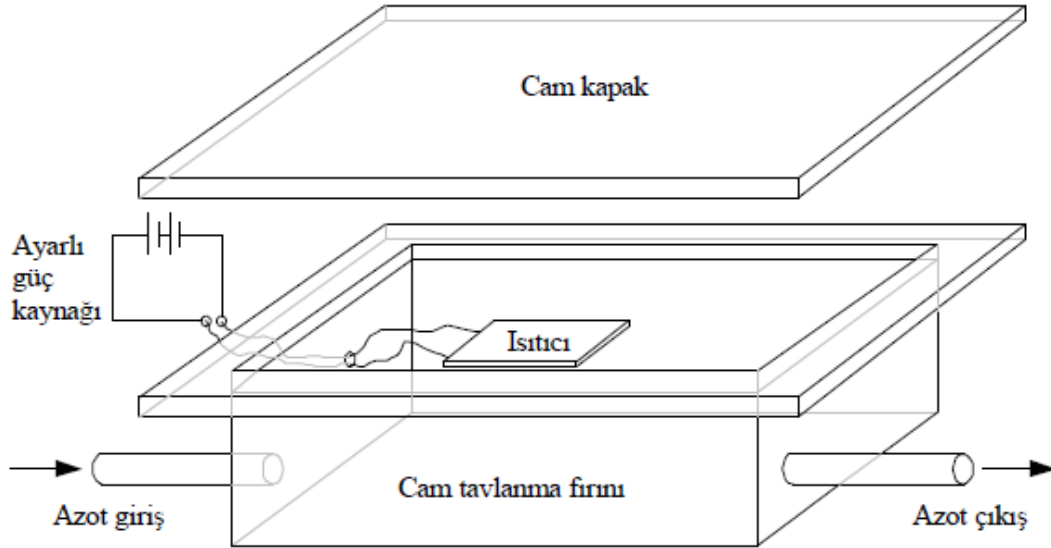


Resim 5.2. Lakeshore 7700 Yüksek Empedanslı Hall Etkisi ölçüm sistemi 1) Bilgisayar, 2) Sıcaklık Kontrol Ünitesi, 3) Elektromıknatıs Güç Kaynağı, 4) Kapalı devre Helyum soğutma sistemi, 5) Elektromıknatıs, 6) Kryostat, 7) Mekanik pompa destekli turbo moleküler vakum sistemi, 8) Helyum Tüpü

5.2. Numune Hazırlama

Ölçülecek olan numunelerin, ölçümlerinin iyi sonuçlar verebilmesi için omik kontaklara sahip olması gerekir. Bu yüzden büyütme şartları önemlidir. MOCVD ile büyütülen yapıların büyütme sıcaklıkları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Kontaklar eklenmeden önce hazırlanan numuneler 5’er dakika ara ile izopropanol, aseton ve ultrasonik temizleyici ile temizlendi. Mekanik kirden temizlenen numunelerin, omik kontak alabilmek için

fotolitografi yöntemi ile kontaklarının yerleri belirlendi ve Ti/Al/Ni/Au metal yapısının kontak bölgelerine tavlانarak difüz edilmesi sağlandı. N-tipi bir yarıiletkenle omik kontak yapabilmek için numune üzerine numunenin iş fonksiyonundan daha düşük bir iş fonksiyonu kullanmak gereklidir [73]. Genellikle yarıiletkenler için kullanılan kontakların direnci 10^{-3} - 10^{-7} $\Omega \cdot \text{cm}^2$ arasında olması beklenir [74].

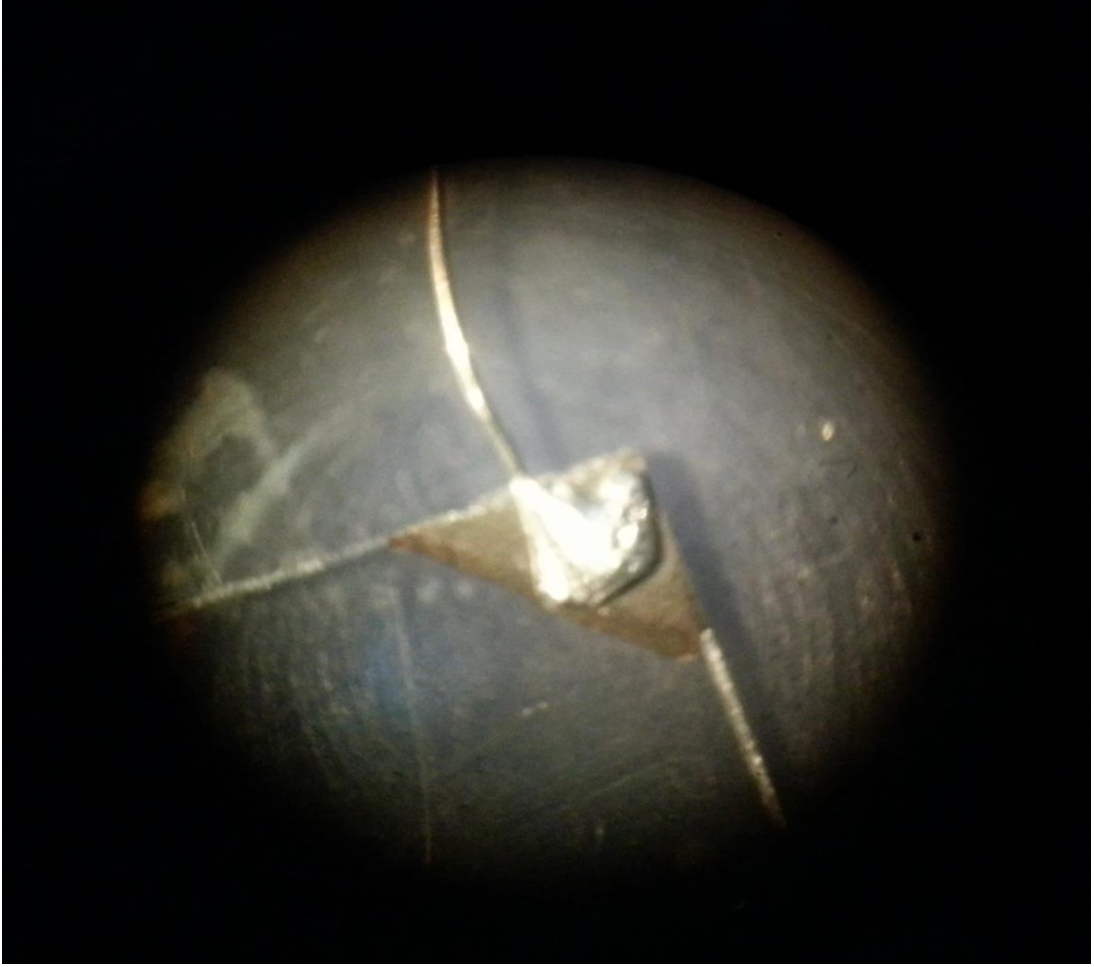


Şekil 5.1. Cam tavlama fırını düzeni

Numunelerin köşelerinde Ti/Al/Ni/Au metal kontakların üzerine indiyum eritilerek köşelerden kontaklar alındı. Resim 5.3’de numune köşesinden alınmış indiyum kontak görülmektedir. Bu işlem sırasında Şekil 5.1’de verilen cam fırın kullanıldı. Fırın içerisinde sıcaklık ile birlikte indiyumların metal kontaklar üzerine yapışması sağlandı. Fırından çıkarılan numune Hall etkisi ölçüm sistemine Van der Pauw kare kontak metoduna göre yerleştirildi ve ölçüm alındı. Ölçümü biten numune tekrar Hall sisteminden dikkatlice çıkarıldı. Bu işlemler her numune için benzer şekilde yapıldı.

5.3. Akım Voltaj Ölçümleri

Omik kontağa sahip numunelerde, yarıiletken numuneye uygulanan gerilim ile numuneden geçen akımın aynı fazda olması gerekir. Yani akım-voltaj grafiğinde eğer eğim 1 veya 1’e yakın ise yarıiletken malzeme için omik davranıştan söz etmek mümkündür. Omik kontak ölçülen numunelerin verilerinin kontakdan bağımsız olduğunu bize belirtir [75].



Resim 5.3. Numunenin köşesinden indiyum eritilerek tutturulmuş Ti/Al/Ni/Au kontak yapısı

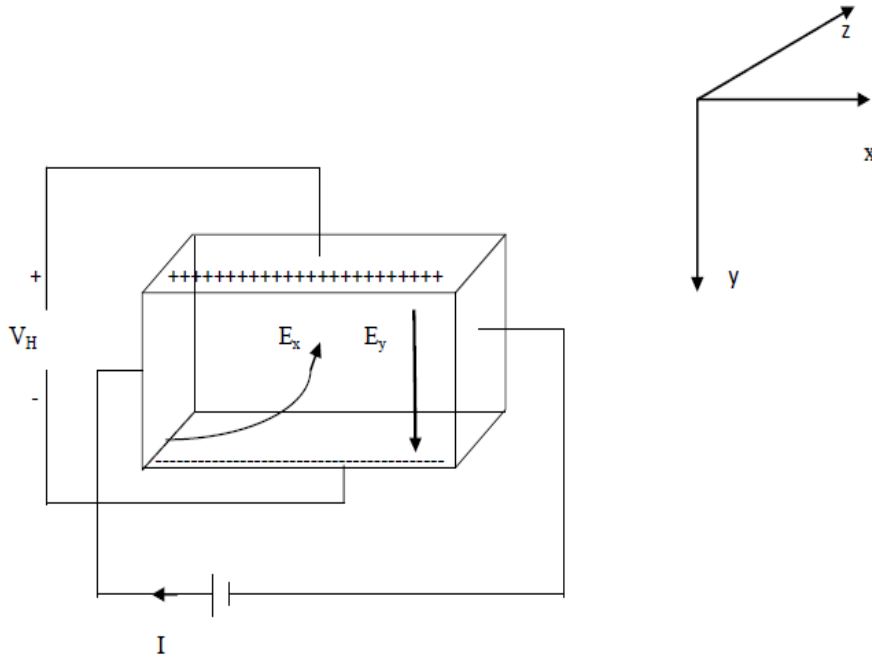
5.4. Hall Etkisi

Hall etkisi, bir yarıiletken numuneye elektrik alan ve manyetik alan uygulanması sonucu taşıyıcıların bu alanlar altında hareketinin izlenmesi olayıdır. İlk olarak Hall etkisi 1879 yılında Edwin Hall tarafından manyetik alan altında olan bir metal şeritten akım geçirdiğinde dikey bir potansiyel alan oluştuğunu gözlemlemesiyle bulunmuştur [76].

Şekil 5.2’de p-tip bir yarıiletken için x-yönünde elektrik alan ve z-yönünde manyetik alan uygulanarak y-yönünde bir elektrik alan elde edilmektedir. Yarıiletken numunenin E_y alanı doğrultusundaki numune kalınlığına d dersek;

$$V_H = E_y \cdot d \quad (5.1)$$

ifadesi ile Hall voltajını elde etmiş oluruz.



Şekil 5.2. Hall etkisi ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Yarıiletken numune içerisindeki taşıyıcının hızı x-doğrultusunda olacağından V_x olacaktır.

Bu hız;

$$J_p = qpV_p \quad (5.2)$$

İle verilir. Deşikler için akım yoğunluğu denkleminde hız ifadesi ile aynı olacaktır. Yarıiletken numune içerisindeki pozitif yüklü taşıyıcıları uygulanan manyetik alan ve elektrik alan nedeniyle Lorentz kuvveti;

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B} = qV\vec{i} \times B\vec{k} = -qVB\vec{j} \quad (5.3)$$

etki edecektir. $\vec{E}_y$ alanından kaynaklı elektrostatik kuvvet ile lorentz kuvveti denge durumunda birbirine eşit olacağından;

$$qV_x B_z \vec{j} = qE_y \vec{j} \quad (5.4)$$

yazılabilir. Buradan da,

$$E_y = V_x B_z \quad (5.5)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 5.2'de hız ifadesi Eş. 5.5'de yerine yazılırsa;

$$E_y = \left(\frac{J_p}{qp} \right) B_z = R_H J_p B_z \quad (5.6)$$

ifadesi elde edilir. Buradan R_H ifadesinin;

$$R_H = \frac{1}{qp} \quad (5.7)$$

olarak elde ederiz. Bu ifade Hall Katsayısı olarak bilinmektedir. Eğer yarıiletken numune n-tipi olursa Hall katsayısı (-) negatif olacaktır. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak Hall hareketliliği, taşıyıcı yoğunluğu ifadeleri de elde edilmektedir. Hall voltajı ve yarıiletken numuneye uygulanan akımın değerlerinin bilinmesiyle ve $J_p = I/A$ akım yoğunluğu ifadesi kullanılarak Eş 5.6 ve Eş 5.7 kullanımıyla;

$$p = \frac{IB_z d}{qV_H A} \quad (5.8)$$

taşıyıcı yoğunluğu ifadesini elde etmiş oluruz. Eş 5.7'yi kullanarak;

$$\sigma = qp\mu \quad (5.9)$$

ifadesi yardımıyla deşik hareketliliğini;

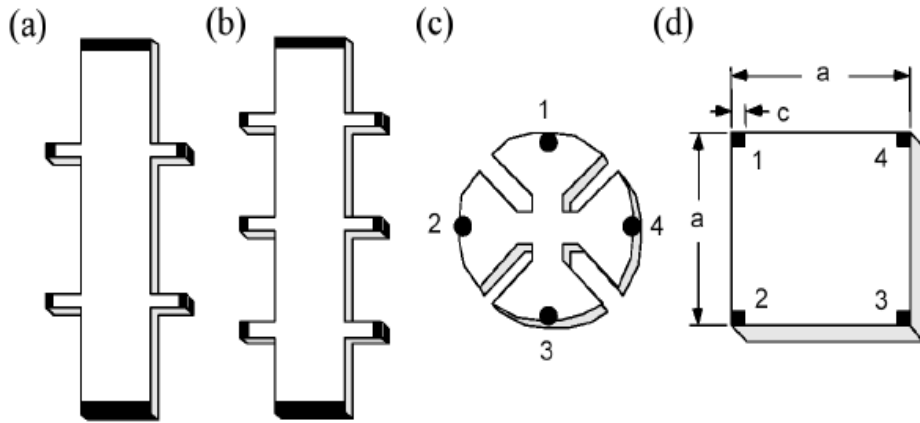
$$\mu_p = |R_H| \sigma \quad (5.10)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada görmekteyiz ki ölçülen Hall katsayısı ve iletkenlik ile deneysel taşıyıcı hareketliliğini elde edebiliriz.

5.5. Hall Etkisi Ölçümleri ve Özdirenç Ölçümleri

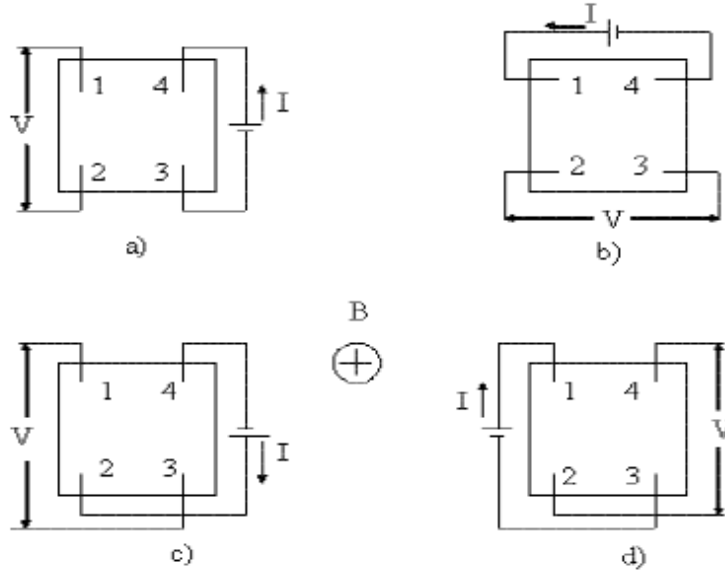
5.5.1. Hall etkisi ölçümleri

Hall etkisi ölçümleri sonucunda herhangi bir yarıiletken numunenin iletim tipini, özdirencini, içindeki taşıyıcı sayısını ve bu taşıyıcıların hareketliliği hakkında bilgi sahibi olunabilir. O açıdan elektriksel karakterizasyon açısından önemli bir ölçümdür. Değişen manyetik alan veya değişen sıcaklıkta yarıiletken malzemelerin taşıyıcılarının değişimini gözlemlemek ve bu değişimler yardımıyla hesaplanabilir parametreleri elde etmek oldukça dikkate değerdir.



Şekil 5.3. Hall ölçümleri için, a) Hall bar 6 kontak, b) Hall bar 8 kontak, c) Van der Pauw 4 kontak yonca yaprağı biçiminde, d) Van der Pauw 4 kontak yöntemleri

Hall Etkisi ölçümleri için geliştirilmiş numune kontak metotları genel olarak Hall bar ve Van der Pauw yöntemleri kullanılmaktadır. Şekil 5.3’de kontak türleri görülmektedir. Hall ölçümlerinde bu tez dahilinde alınan kontak Van der Pauw yöntemi olarak bilinen Şekil 5.3.d ile gösterilen kare kontak metodu kullanılmıştır. Bu kontaklar oldukça küçük ve simetrik olmalıdır.



Şekil 5.4. Özdirenç ve Hall hareketliliği ölçümleri için şematik gösterim

Teorik olarak Hall olayında bahsedilen Hall katsayısı;

$$R_H = 10^8 \left[\frac{d\Delta R_{13,24}}{B} \right] cm^3 C^{-1} \quad (5.11)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikte görülen $\Delta R_{13,24}$ değişimi yarıiletken numuneye dik bir manyetik alan uygulandığında $R_{13,24}$ dirençlerindeki değişimi göstermektedir. Taşıyıcılar için Hall hareketliliği ve Hall taşıyıcı yoğunluğu, özdirenç ve Hall katsayısı kullanılarak;

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} cm^2/V.s \quad (5.12)$$

$$n_H = \frac{1}{eR_H} cm^{-3} \quad (5.13)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Eşitliklerde kalınlığın d olarak ifadeye dahil edilmesi sonucu iletimler 3-boyutlu olarak görülmektedir. Bizim araştırmalarımız 2 boyutlu iletim olduğu için yarıiletken numunelerde d kalınlığı ihmal edilmektedir.

5.5.2. Özdirenç ölçümleri

Bu tez için kullanılan Van der Pauw ölçüm metoduna göre özdirenç [77];

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left[\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \right] f \left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} \right) \Omega.cm \quad (5.14)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada 1 ve 2 numaralı kontaklardan akım uygulandığında, 3 ve 4 numaralı kontaklardan gerilim ölçülmektedir. Şekil 5.3d de gösterilen konfigürasyona göre Eş 5.14 yazılmıştır. Eş 5.14'teki

$$f \left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} \right) = 1 - \left[\frac{R_{12,34} - R_{23,41}}{R_{12,34} + R_{23,41}} \right]^2 \frac{\ln(2)}{2} - \left[\frac{R_{12,34} - R_{23,41}}{R_{12,34} + R_{23,41}} \right]^4 \left[\frac{(\ln(2))^2}{4} - \frac{(\ln(2))^3}{12} \right] \quad (5.15)$$

ifadesi ise düzeltme faktörü olarak bilinmektedir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Giriş

Bu çalışmada incelenen numuneler, Bilkent Üniversitesi NANOTAM laboratuvarlarında MOVCD yöntemi ile büyütüldü. B-2707 kodlu $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısı ile B-2705 ve B-2706 kodlu olan $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT yapıları Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde öz direnç ve Hall etkisi ölçümleri gerçekleştirildi. Ölçümler 30-300K sıcaklık aralığında ve sabit 0.4 T manyetik alan altında yapıldı.

6.2. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ ve $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT Yapıları

B-2705, B2706 ve B-2707 HEMT yapılarının büyütme koşulları, öz direnç ve Hall ölçümü sonucunda elde edilen elektriksel sonuçları bu bölümde incelendi. 2-boyutlu iletimin gerçekleştiği kuantum kuyuda oluşan 2DEG için saçılma analizleri yapıldı. Bu analizler, üç numune için ayrı ayrı yapılarak birbirleriyle kıyaslaması yapıldı.

6.3. Kristal Büyütme Detayları

İncelenen numuneler içerisinde B-2707 kodlu numune GaN kanal tabakaya sahip olmakla birlikte B-2705 ve B-2706 numuneleri InGaN kanala sahiptir. İncelenen üç numune de Safir (Al_2O_3) alttaş üzerine büyütüldü. Daha sonrasında 50 mbar'lık basınçta ilk olarak yaklaşık 12 nm kümelenme AlN tabakası 770 °C sıcaklıkta büyütüldü. Buna ilaveten 400 nm AlN tampon tabaka kümelenme tabakasının üzerine 35 mbar basınç altında 1050 °C sıcaklıkta, 1000 °C sıcaklıkta 400 mbar'lık basınç altında katkısız ~350 nm GaN tabakası ve 1.3 µm katkısız GaN tabaka 1050°C sıcaklık altında büyütüldü. Katkısız GaN tabakası üzerine tampon tabaka olarak sırasıyla 1060 °C ve 1075 °C sıcaklık altında 1,29 µm ve 130 nm kalınlıklarda GaN tampon tabaka 400 mbar basınç altında büyütüldü. B-2705 ve B-2706 numuneleri için 745 °C sıcaklık ve 200 mbar basınç altında sırasıyla 3 nm ve 8 nm $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ tabakaları büyütüldü. Bu tabakalar 2DEG oluşumun gözlemlendiği kanal tabakalar olarak bilinmektedir. B-2707 numunesi için GaN kanal kullanıldı.

Çizelge 6.1. İncelenen numunelerin kalınlıklarına ve yapılarına ait bilgiler

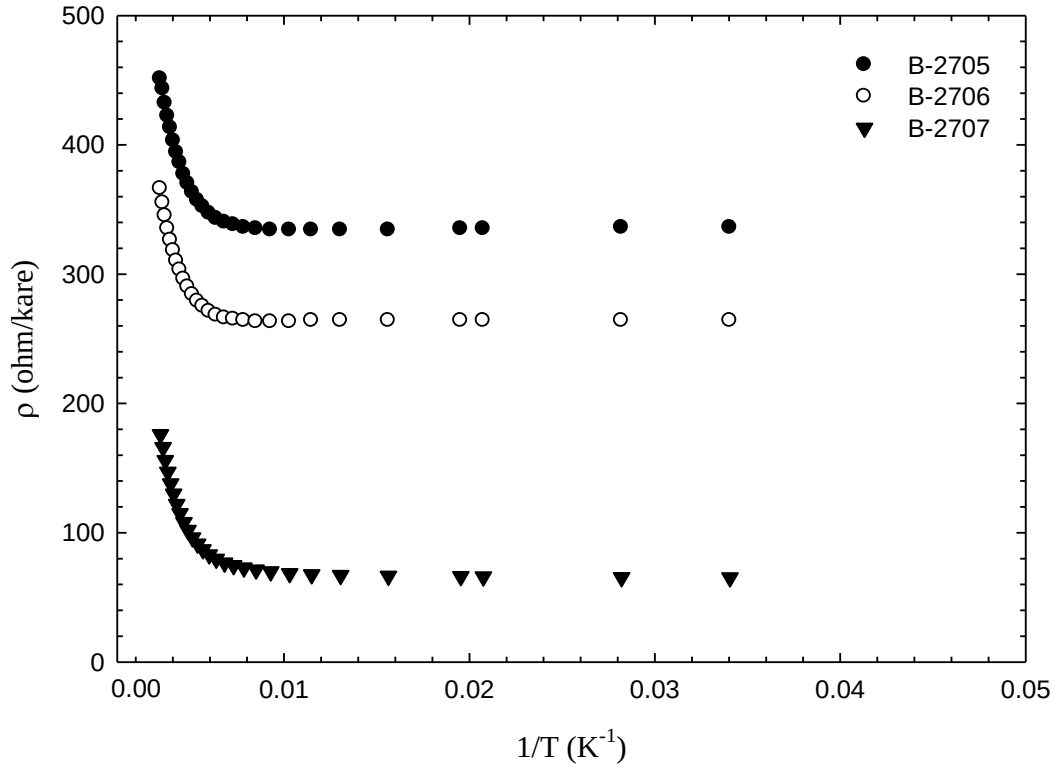
Numune Materyal	B-2705	B-2706	B-2707
GaN Üst Tabaka	~3nm	~3nm	~3nm
InAlN Bariyer	~10nm	~10nm	~10nm
AlN Aratabaka	~1nm	~1nm	~1nm
InGaN Kanal Tabaka	~3nm	~8nm	—
GaN Tampon Tabaka	~3μm	~3μm	~3μm
AlN Tampon Tabaka	~300nm	~300nm	~300nm

Ara tabaka olarak yaklaşık ~1 nm kalınlıkta, 830 °C sıcaklık altında ve 50 mbar basınç altında AlN tabakası büyütüldü. Bariyer tabaka olarak 10 nm kalınlıkta $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ tabaka 50 mbar basınç altında ve 830 °C sıcaklık altında büyütüldü. HEMT yapının en üst kısmı olan kapak GaN tabaka 50 mbar basınç altında ve 830 °C sıcaklık altında büyütüldü.

6.4. Özdirenç Ölçümleri

B-2705, B-2706 ve B-2707 HEMT yapılarının özdirenç ve Hall ölçümleri, Hall Etkisi ölçüm sisteminde 30-300 K sıcaklık aralığında, sabit 0.4 T manyetik alan altında ve düşük sıcaklıklarda, manyetik alana bağlı olarak incelendi.

Özdirenç ölçümleri sonucunda Şekil 6.1’de üç numune için özdirencin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakaya sahip B-2705 ve B-2706 HEMT yapıları nispeten özdirençleri birbirine daha yakındır. Ancak GaN kanala sahip B-2707 HEMT yapısının özdirenci oldukça düşüktür.



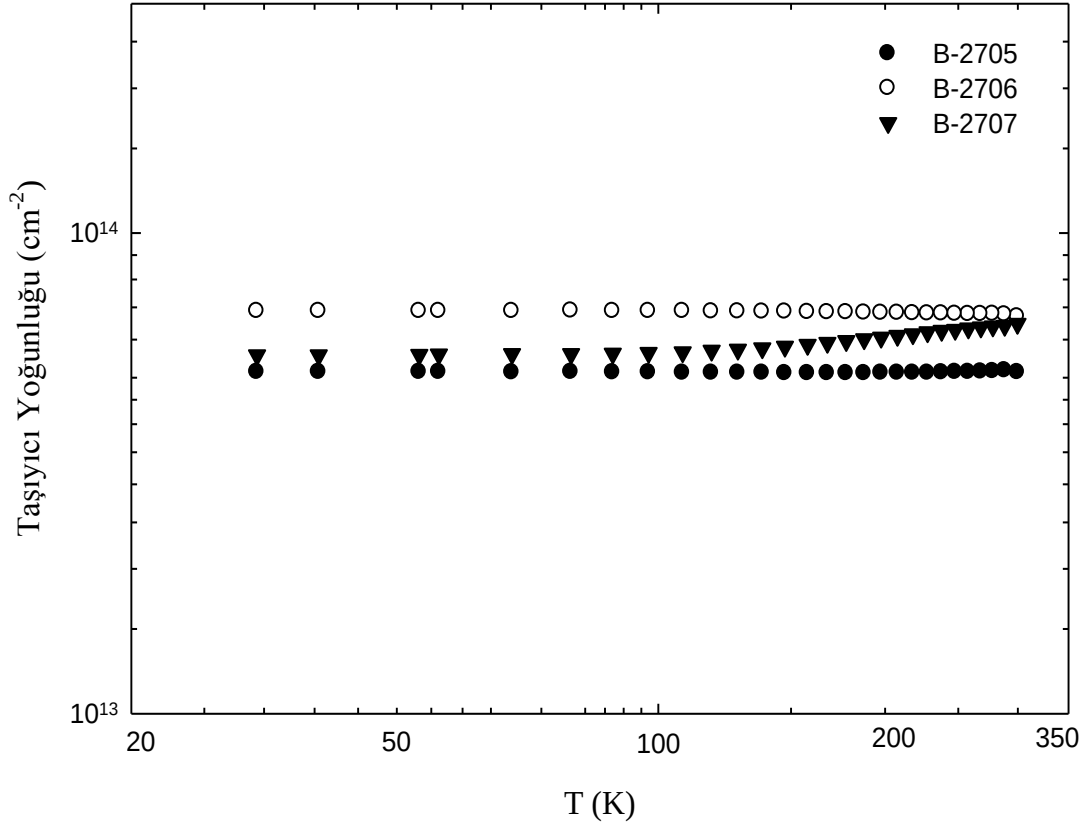
Şekil 6.1. B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu HEMT yapılarında öz direncin sıcaklığa bağlı değişimi

Yüksek sıcaklıklarda öz dirençlerin oldukça yüksek, düşük sıcaklıklarda ise tam tersine düşük olduğu görülmektedir. Bu durum bize iletimin hangi sıcaklıklarda daha yüksek hareketliliğe sahip olacağını göstermektedir. Sıcaklığın artması ile yarıiletken kristal içerisinde bulunan atomların termal enerjileri yükselecektir. Yükselen termal enerji ile atomlar titreşim hareketi yapacaklar ve örgü titreşimi nedeniyle 2 boyutlu iletme katılan elektronlara karşı direnç gösterecek ve onların saçılmalarını sağlayacaktır. Saçılan elektronlarla birlikte iletim azalacaktır. Bu durum saçılma analizleri bölümünde daha detaylı olarak incelenecektir.

6.5. Hall Etkisi Sonuçlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Hall Etkisi ölçümleri 30-300 K sıcaklık aralığında sabit 0.4 T manyetik alan altında alındı. GaN ve In_{0.1}Ga_{0.9}N kanal tabakaya sahip üç numune için Hall Etkisi ölçümü sonuçlarına bağlı olarak 2DEG taşıyıcı yoğunluğu ve 2DEG hareketliliği incelemeleri yapıldı. Bu numuneler 2 boyutlu iletimin gerçekleştiği kuantum kuyuların oluşumunu ispat etmek

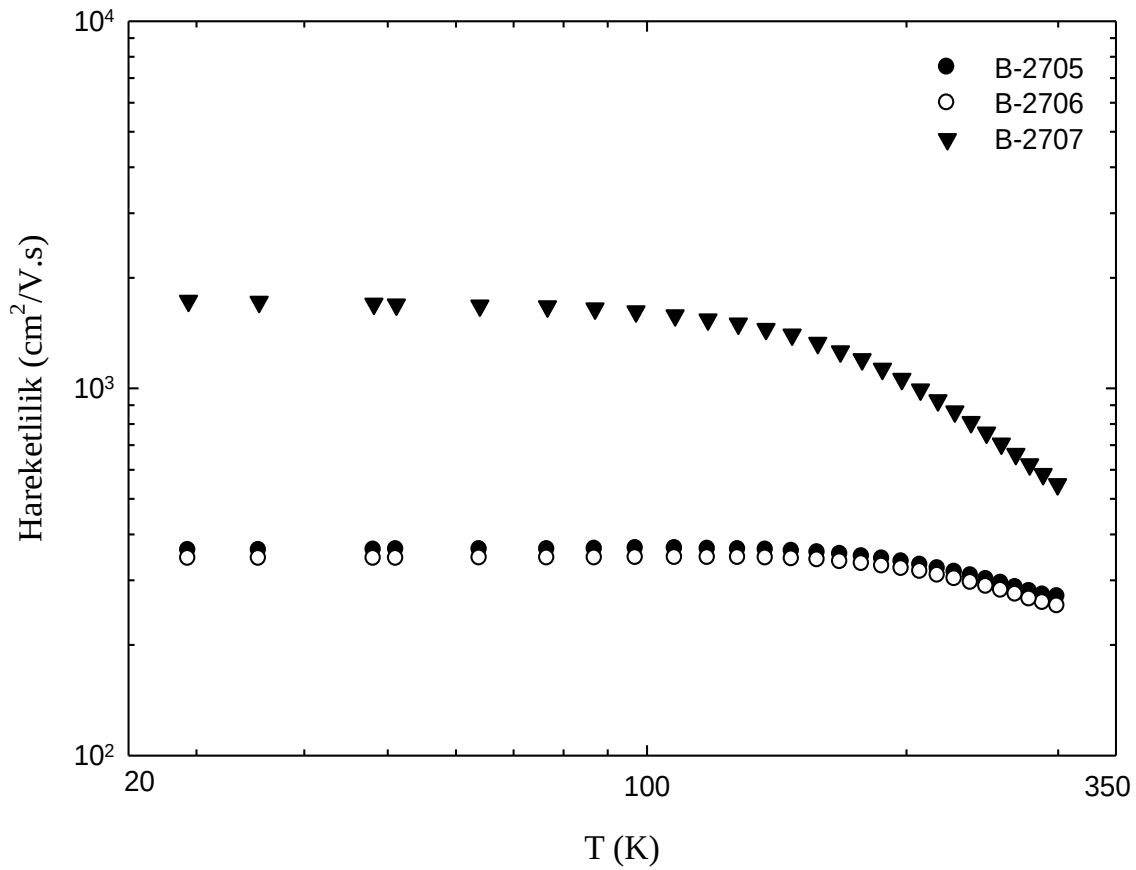
amacıyla büyütülmüştür. Yapılan incelemelerde Şekil 6.2’de taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi grafiğinde, üç numunenin de taşıyıcı yoğunluklarının sıcaklık ile değişmediği gözlemlendi. Bu durum elektronların 2-boyutlu kuantum kuyuda belirli enerji seviyelerinde hapsoldüğü anlamına gelmektedir.



Şekil 6.2. B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu HEMT yapıları için taşıyıcı yoğunluklarının sıcaklığa bağlı değişimi

Bu tez dahilinde incelenen numunelerin, InGaN tabakası için In alaşım oranı %10 iken InAlN bariyer tabakası için In alaşım oranı %17’dir. B-2705 ve B-2706 numuneleri sırasıyla 3 ve 8 nm InGaN kanal tabakaya sahip olduğu için ilk olarak bu iki numune arasında karşılaştırma yapıldığında, daha kalın kanal tabakaya sahip B-2706 HEMT yapısının taşıyıcı yoğunluğunun daha yüksek olduğu görülmektedir. InGaN kanal tabakada %10 In oranında oluşacak gerginlik nedeniyle piezoelektrik polarizasyon yüksek olacaktır. Daha önce In oranının %17-18 civarında olduğunda GaN temelli yapılar için örgü uyumlu olduğu belirtildi. Bu yüzden güçlü Piezoelektrik ve Doğal polarizasyon nedeniyle yüksek taşıyıcı yoğunluğu olduğu görülmektedir.

Genel olarak ara tabaka olmadan AlGaIn/GaN ve InAlN/GaN yapıları için taşıyıcı yoğunluğu $2\text{-}3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ve elektron hareketliliği $6\text{-}7 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak elde edilir [78]. Bu tez dahilinde ara tabaka olarak AlN kullanımı taşıyıcıların InAlN bariyer tabakaya sızmasını engellenmiştir. Buna rağmen taşıyıcı yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle 2DEG hareketliliğinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.3. B-2705, B-2706 ve B-2707 kodlu HEMT yapıları için 2DEG hareketliliğinin sıcaklığa bağlı değişimi

Hall ölçümleri sonucunda 300 K'de 2DEG taşıyıcı yoğunlukları B-2705, B-2706 ve B-2707 HEMT yapıları için sırasıyla, $5.13 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $6.69 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $6.47 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ olarak ölçüldü. Yine sırasıyla 300 K'de 2DEG hareketliliği değerleri $270 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, $255 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve $548 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak ölçüldü. 30 K sıcaklığında ise sırasıyla $361 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, $343 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve $1730 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak ölçüldü. Özdirenç ve Hall Etkisi ölçüm sonuçlarının bu sonuçları tablo halinde Çizelge 6.2 ile verilmektedir. Hall ölçümleri sonucunda elde edilen 2DEG hareketliliği değerleri Şekil 6.3 ile gösterilmektedir.

Bu sonuçlara göre $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakaya sahip numunelerin oldukça düşük elektron hareketliliğine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ancak GaN kanallı numune ise daha yüksek elektron hareketliliğine sahiptir. 2DEG oluşum bölgesi dikkate alındığında kanal tabakanın önemi büyüktür. Yaklaşık 150 K sıcaklığından sonra elektron hareketliliğinin azaldığı görülmektedir.

Bu çalışmada incelediğimiz saçılma mekanizmalarından optik fonon saçılma mekanizmasının sıcaklık ile $T^{-3/2}$ oranı ile değiştiği dördüncü bölümde anlatılmıştı. Yüksek sıcaklıklarda baskın olan bu saçılma mekanizmasına göre elektron hareketlilikleri bu oranla azalmaktadır.

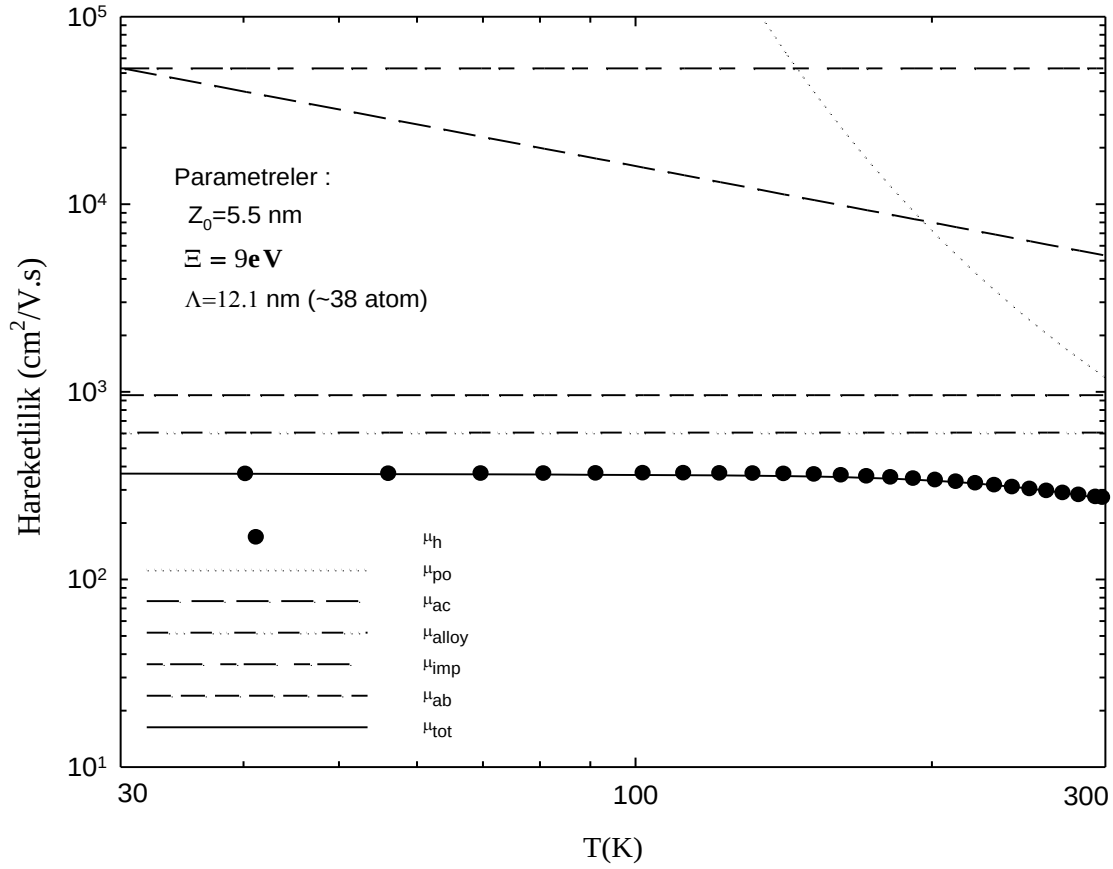
Düşük sıcaklıklarda ise 3 numune içinde sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmektedir. Akustik fonon ve optik fonon saçılmaları dışında düşük sıcaklıklarda saçılma mekanizmaları sıcaklıktan bağımsızdır.

Çizelge 6.2. B-2705, B-2706, B-2707 kodlu numuneler için 30K ve 300K sıcaklıklarında sırasıyla 2DEG hareketliliği, yüzey taşıyıcı yoğunluğu ve yüzey öz direnci

Numune	Elektron Hareketliliği (cm^2/Vs)	Yüzey Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-2})	Yüzey Öz direnci (Ω/kare)
B-2705	270-361	5.13×10^{13}	335-451
B-2706	255-342	6.69×10^{13}	264-366
B-2707	548-1730	6.47×10^{13}	65-176

6.6. Saçılma Analizi

Bölüm 4’de teorik olarak detaylı anlatılan saçılma mekanizmaları, bu kısımda numuneler üzerinde uygulandı hangi saçılma mekanizmasının 2DEG hareketliliğini nasıl etkilediği araştırıldı. Hesaplamalar sırasında kullanılan parametreler Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.4 ile verilmiştir.



Şekil 6.4. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(3\text{nm})/\text{GaN}$ HEMT yapısı için saçılma analizi

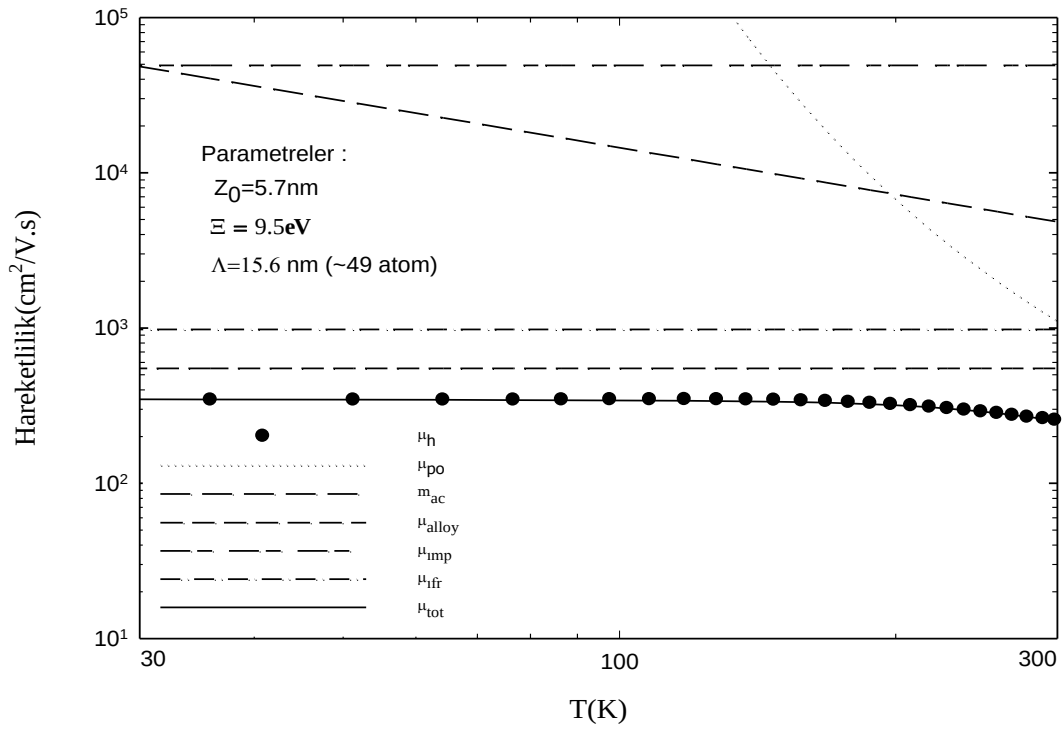
2 Boyutlu iletim için örgü titreşimi olarak Polar Optik Fonon, Akustik Fonon saçılma mekanizmaları ile safsızlıklardan kaynaklanan Arayüzey Bozukluğu, Alaşım Saçılması, Arka Plan Safsızlık saçılma mekanizmaları B-2705, B-2706 ve B-2707 HEMT yapıları için analiz edildi. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısı, GaN kanal tabakaya sahip olduğundan ve ara tabaka olarak AlN kullanımı, bu yapı için bariyer tabakadan gelen alaşım saçılmasını engelleyecektir. Dolayısıyla, Alaşım saçılma mekanizması B-2707 numunesi için incelenmedi. B-2705 ve B-2706 numunelerde de AlN ara tabaka kullanıldı. Ancak 2DEG kuantum kuyusu $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakada olduğu için elektronlar buradaki alaşım saçılmasına uğrayacaktır. Bu yüzden bu numunelerde alaşım saçılması ek olarak incelendi. Bu incelemelerde arka plan safsızlık yoğunluğu $N_d=10^{23} \text{ m}^{-3}$ olarak alındı [79]. Ara yüzey bozukluğu hesaplamalarında ara yüzeyin yanal bozukluk değeri (Δ) $2 \times 2,58 \times 10^{-10} \text{ m}$ (2 monotabaka kalınlığı) olarak alındı [80]. Kuyu genişliği (Z_0), deformasyon potansiyel enerjisi (Ξ) ve korelasyon uzunluğu (Λ) ayarlanabilir parametreler olarak bırakıldı.

Şekil 6.4'te $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(3\text{nm})/\text{GaN}$ HEMT yapısına ait 2DEG saçılma analizi görülmektedir. Elektron hareketliliğinin hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda alaşım saçılması tarafından sınırlandırıldığı buna ek olarak ara yüzey bozukluğunun da etkin olduğu görülmektedir. Oluşan 2DEG kuantum kuyusu bir alaşım kuyusu olduğu için hemen her sıcaklıkta alaşım saçılmasının baskın saçılma mekanizması olduğu görülmektedir [81]. 300 K sıcaklığına yaklaştıkça elektron hareketliliğinin azaldığı görülmektedir. Bu sıcaklıklarda polar optik fonon saçılmasının da az da olsa etkilediği görülmektedir. Akustik fonon saçılmasının pek etkin olmadığı görülmektedir.

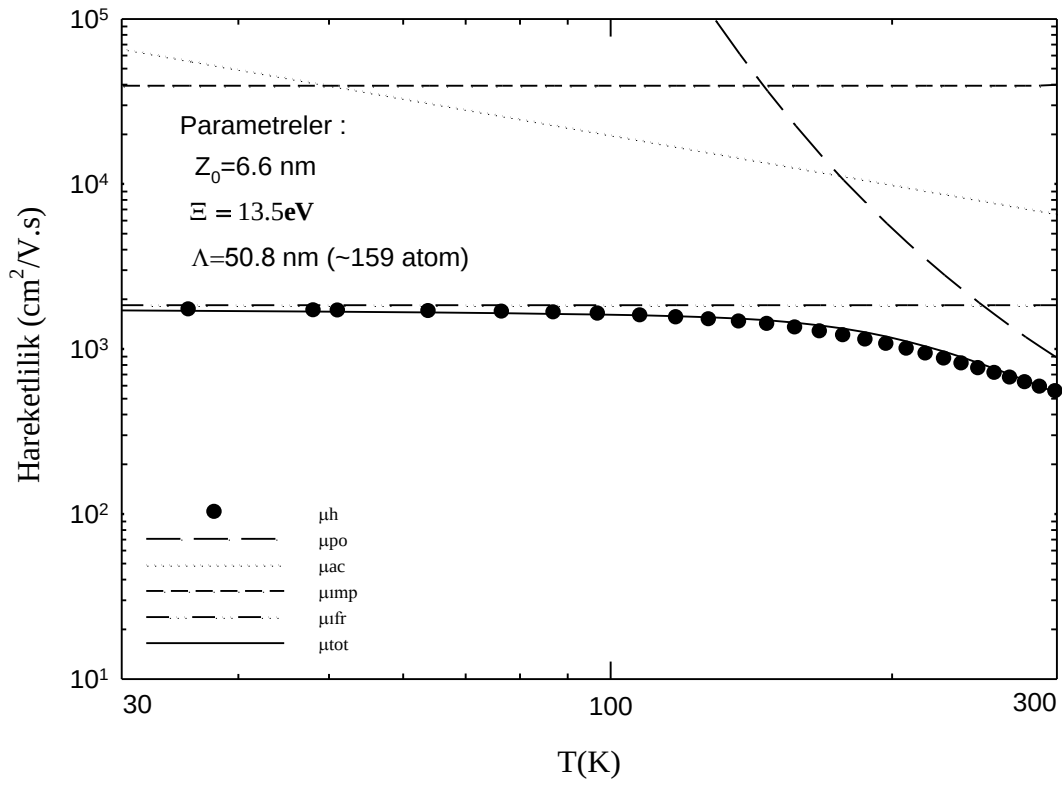
Ara yüzey bozukluğu parametreleri olan kuantum kuyu genişliğinin $\sim 5,5$ nm olduğu ve korelasyon uzunluğunun $\sim 12,1$ nm olduğu bulundu. 3 nm InGaN kanal tabakaya sahip olması kuyunun da $\sim 5,5$ nm olması oluşan kuantum kuyunun GaN tabakaya doğru taşması nedeniyle 8 nm InGaN kanal tabakaya sahip yapıdan daha yüksek elektron hareketliliğine sahip olmasına yol açmaktadır. Kuantum kuyu genişliği değerleri oda sıcaklığında baskın olan polar optik fonon saçılma mekanizması hesabında ayarlanabilir parametre olarak hesaplandı.

Şekil 6.5 ile verilen grafikte düşük ve orta sıcaklıklarda baskın olan saçılma mekanizması Şekil 6.4'da olduğu gibi alaşım saçılması ve ara yüzey bozukluğudur. Yüksek sıcaklıklarda ise elektron hareketliliği azalmakta olduğundan polar optik fonon saçılması etki eden saçılma mekanizması olarak görülmektedir. Akustik fonon saçılma mekanizmasının etki ettiği pek söylenemez. Alaşım saçılmasının her sıcaklıkta baskın saçılma mekanizmasının olduğu görülmektedir. Oluşan kuantum kuyunun genişliği $\sim 5,7$ nm ve korelasyon uzunluğu 15,6 nm olduğu görülmektedir. Bu durumda oluşan kuantum kuyu tamamen InGaN kanal tabaka içerisindedir.

Şekil 6.6'da GaN kanal tabakaya sahip olan $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısına ait elektron hareketliliğine etki eden saçılmalar gösterilmiştir. Düşük sıcaklıklarda baskın olan sadece ara yüzey bozukluğu saçılmasıdır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça 100 K sonrasında akustik fonon saçılmasının az da olsa etki ettiği görülmektedir.



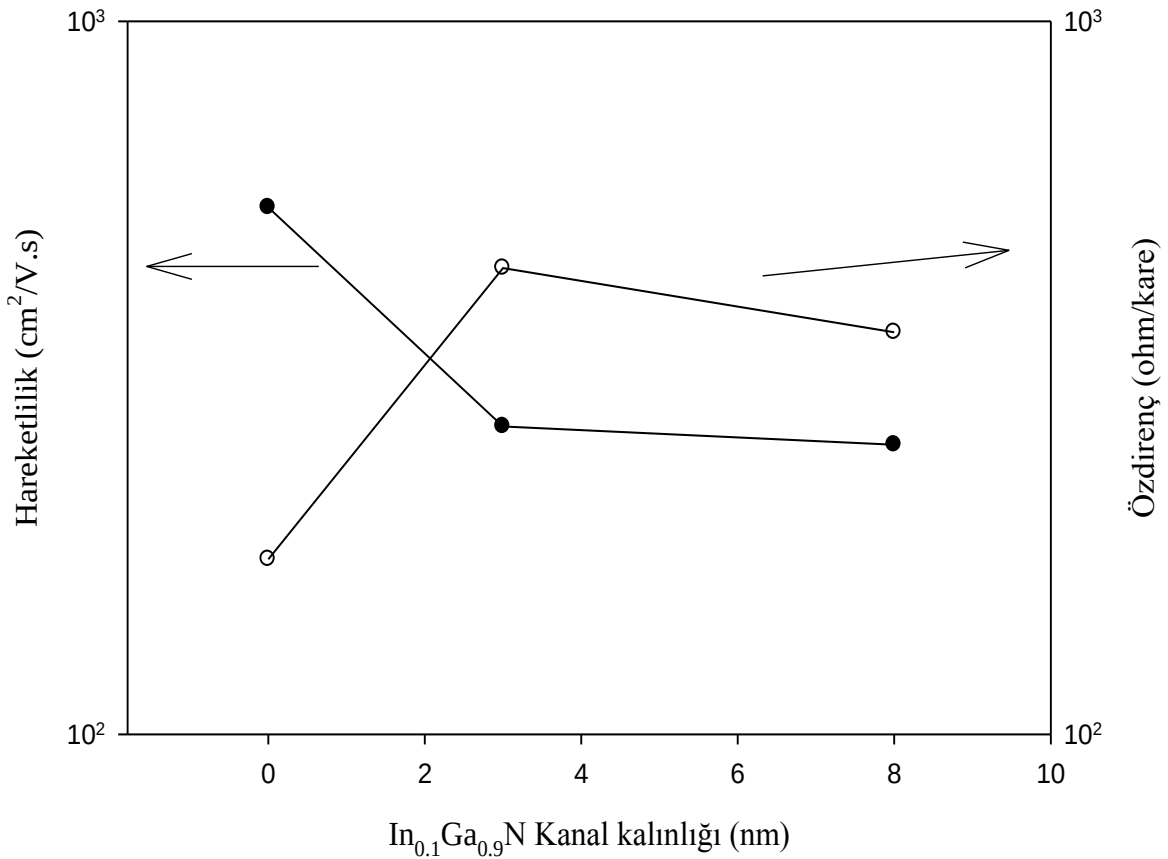
Şekil 6.5. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(8\text{nm})/\text{GaN}$ HEMT yapısı için saçılma analizi



Şekil 6.6. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT yapısı için saçılma analizi

300 K civarında ise polar optik fonon saçılması baskın saçılma mekanizmasıdır. Bu yapı için diğerlerine oranla daha geniş bir kuantum kuyu görülmektedir. Geniş kuantum kuyularda elektronlar arka plan safsızlıkları ve ara yüzey bozukluğu safsızlıkları ile etkileşime girmektedir. Burada da bu durum görülmektedir. Deformasyon potansiyel enerjisi yüksek olan yapılarda akustik fonon saçılması da baskın olur. Diğer numunelere oranla bu yapıda deformasyon potansiyel enerjisi daha büyük olduğundan orta sıcaklıklarda etkin olduğu görülmektedir.

Tez çalışması boyunca saçılma analizleri üzerine yapılan incelemelerin dışında kanal tabaka kullanımı Şekil 6.7 ile verilen grafikte oldukça açık bir biçimde önem arz etmektedir. Bu grafikte kullanılan sonuçlar oda sıcaklığı sonuçlarıdır.



Şekil 6.7. İncelenen numuneler için 300K sıcaklıkta In_{0.1}Ga_{0.9}N kalınlığına bağlı olarak elektron hareketliliği ve öz direncin değişimi

Burada özdirenç ile elektron hareketliliğinin nasıl değiştiği görülmektedir. Özdirenç elektron hareketliliğini kısıtlayan bir etkidir. Oda sıcaklığında örgü titreşimi nedeni ile polar optik fonon saçılmasının baskın olması bilinen bir durumdur. Artan kanal tabaka kalınlığına bağlı olarak özdirenç artmaktadır. Buna ilaveten 2DEG hareketliliğinin kanal tabakanın artmasına bağlı olarak azalması yine Şekil 6.7’de açıkça görülmektedir. Artan kanal tabaka kalınlığına bağlı olarak özdirenç artmaktadır. Buna ilaveten 2DEG hareketliliğinin kanal tabakaya bağlı olarak da azaldığı bu grafikte açık bir biçimde görülmektedir.

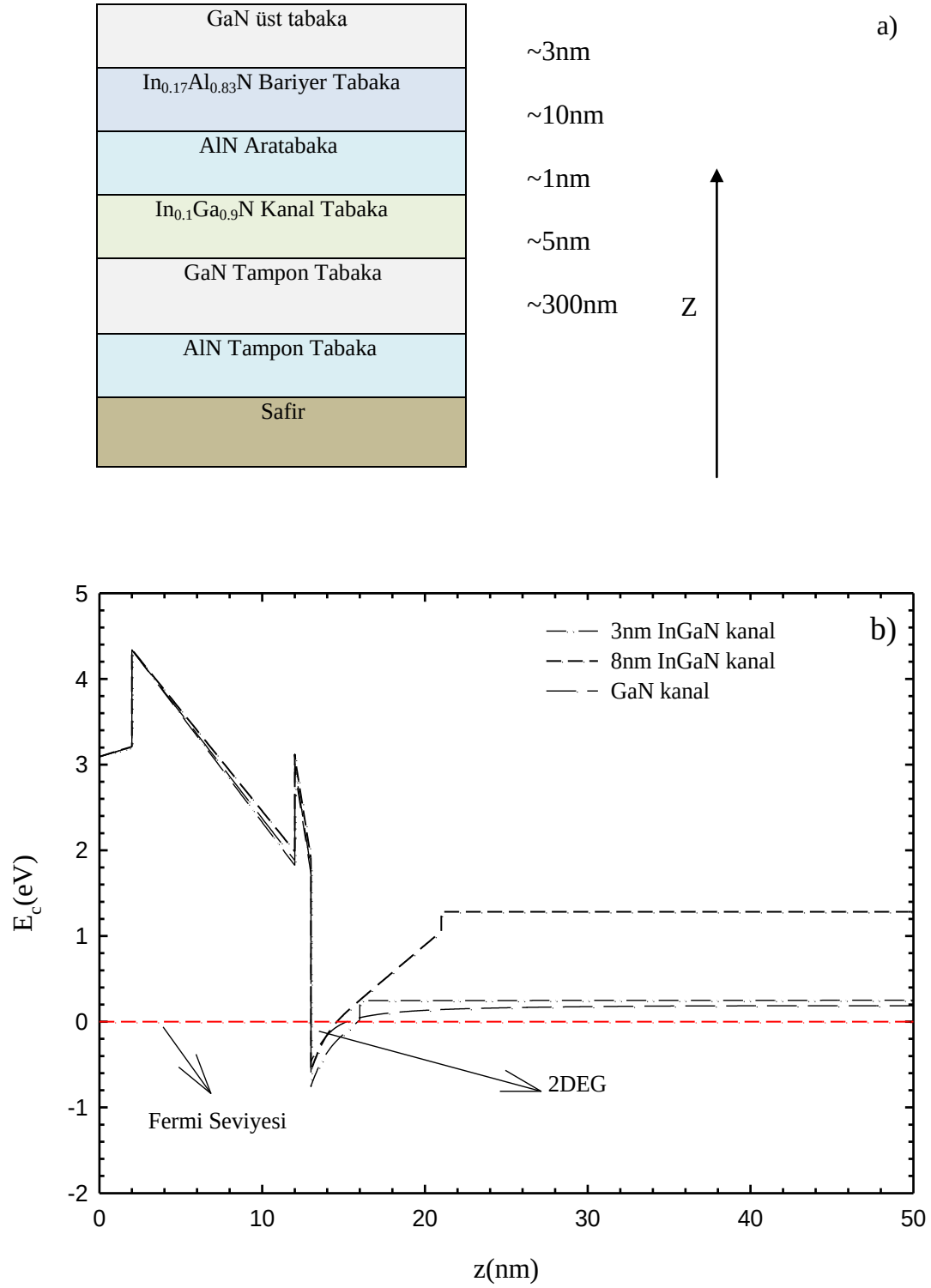
InGaN kanal tabakaya sahip numunelerde kanal tabaka kalınlığının artması oluşan 2DEG kuyunun elektron iletim özelliklerini kötüleştirmektedir. Özellikle kuantum kuyunun kalınlığı InGaN kanal tabakada kalınlığından küçük olduğunda elektronlar oluşan saçılmalara maruz kalacaktır. 3 nm InGaN kanallı yapı kuantum kuyu genişliğinden daha küçük olacağından nispeten daha az etkilenmektedir.

6.7. İletkenlik Bandı ve Arayüzeyde Elektron Bulunma Olasılığı

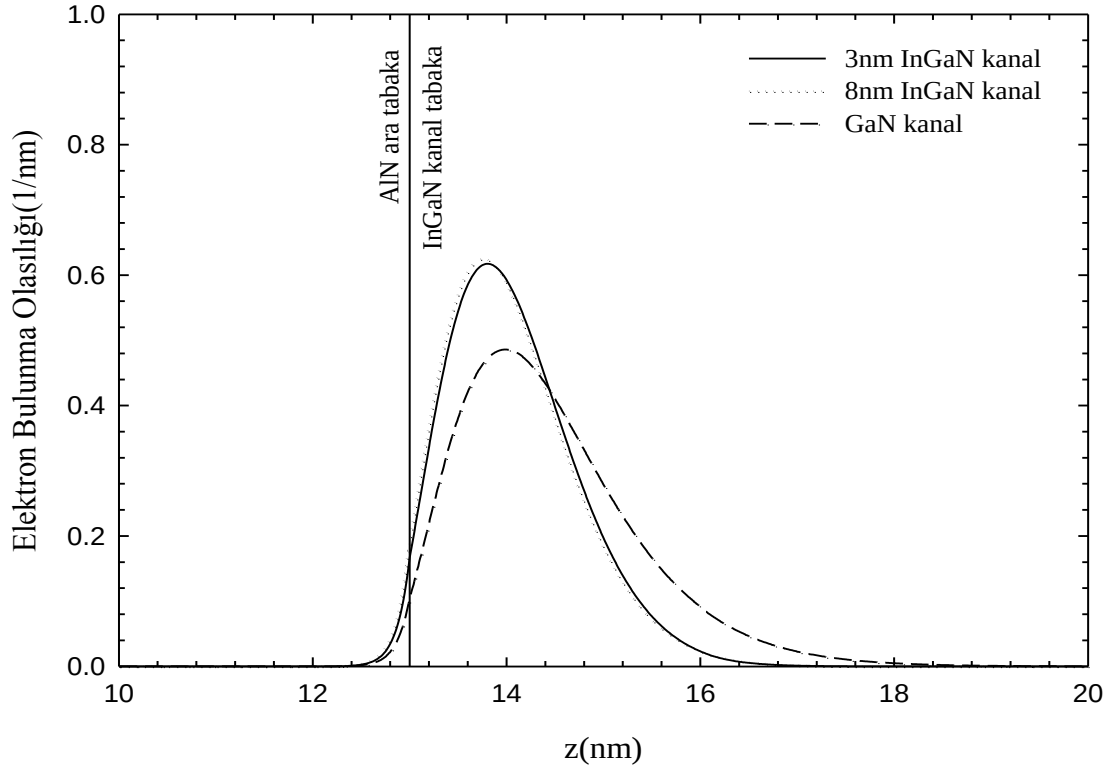
İletkenlik bandın bükülmesi sonucu kanal tabaka ile bariyer tabaka arasında iletkenlik bandının bir kısmı Fermi seviyesinin altına inmektedir. Fermi seviyesinin altında kalan bu üçgenimsi kısım 2DEG içeren kuantum kuyudur.

Şekil 6.8 ile $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$, $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(8\text{nm})/\text{GaN}$ ve $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(3\text{nm})/\text{GaN}$ HEMT yapıları için 1 boyutta kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklem çifti kullanılarak hesaplanmış bant grafiği verilmiştir. Tüm numuneler için bariyer ile kanal tabaka arasındaki arayüzeyde Fermi seviyesinin altına inmiş üçgenimsi bir kuantum kuyu görülmektedir.

Deneysel veriler sonucunda elde edilen taşıyıcı yoğunluğu grafiklerinde görülen 2DEG bu grafik ile de desteklenmektedir. Şekil 6.8 a) ile verilen numune yapısının kalınlıkları Çizelge 6.1 de verildi. Şekil 6.8 a) ile verilen kalınlıklar numune kalınlıkları ile orantılı değildir. Büyütme doğrultusu olan z eksenini, Şekil 6.8 b)’deki iletkenlik bandı grafiğinde z eksenini ile aynıdır.



Şekil 6.8. a) InAlN/AlN/InGaN/GaN/AlN HEMT yapısı ve büyütme doğrultusu, b) incelenen HEMT yapıların iletkenlik bant diyagramı



Şekil 6.9. Farklı $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/(\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N})/\text{GaN}$ HEMT yapıları için elektron bulunma olasılıkları

Tez çalışması boyunca incelenen numunelerin 1 boyutta kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklem çiftinin kullanılması ile hesaplanan $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ arayüzeyinde elektron bulunma olasılığı grafiği Şekil 6.9 ile verilmiştir. Burada InGaN kanal tabakaya sahip yapılarda elektronların arayüzeye daha yakın olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla arayüzeydeki bozukluk bu iki yapının elektron hareketliliğini oldukça etkilemektedir. Arayüzey bozukluğu saçılmasının 2DEG hareketliliğini, InGaN kanal tabakaya sahip yapılar için daha düşük elektron hareketliliğinde sınırlandırdığı görülmektedir. Nispeten GaN kanal tabakaya sahip yapı arayüzey bozukluğu saçılmasından daha az etkilendiğinden elektron hareketliliği daha yüksek olmaktadır. InGaN kanal tabakaya sahip yapıların bulunma olasılığının daha yüksek olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, MOCVD yöntemi ile safir alttaş üzerine c-(0001) yönünde büyütülen GaN-temelli HEMT yapıların elektriksel karakterizasyonu yapıldı. 3 nm ve 8 nm kalınlıklı $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakaya sahip 2 tane, $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapısı ve GaN kanal tabakaya sahip 1 tane $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapısı incelendi.

Büyütülen numuneler için bariyer tabakada In alaşım oranı %17 ve InGaN kanala sahip yapılarda In alaşım oranı %10 olmakla birlikte HEMT yapıların bariyer kalınlıkları 10 nm'dir. Numuneler arasındaki fark sadece InGaN kanal ve GaN kanal kullanımındır. Genel olarak bu çalışmada HEMT yapıların 2 boyutlu iletme sahip olarak, 2DEG oluşumu beklenildi ve Hall Etkisi ölçümleri sonucunda 2DEG oluşumu gözlemlendi. 2DEG kuantum kuyusu içerisindeki elektronların hareketi detaylıca incelendi. Buna bağlı olarak çalışmanın temelini oluşturan saçılma analizi yapıldı. Saçılma analizleri üç numune için ayrı ayrı incelendi. İnceleme sonucunda hangi yapılarda hangi saçılma mekanizmalarının baskın olduğu belirlenerek, arayüzey bozukluğu parametreleri ile kuantum kuyu genişlikleri belirlendi.

Hall Etkisi ölçümlerinin sonuçları olan 2DEG hareketliliği ve taşıyıcı yoğunluğu değerleri ile öz direnç sonuçlarının numuneler için kıyaslaması yapıldı. $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapısının yüksek 2DEG hareketliliğine ve düşük öz dirence sahip olduğu görüldü. Literatürde örgü uyumlu InAlN/AlN/GaN HEMT yapılar için yüksek elektron hareketliliği olduğu bilinmektedir. Bu ölçümlerde ise literatüre göre 2DEG hareketliliğinin düşük olduğu görüldü. Çok iyi büyütülen kristal yapılarda örgü uyumluluğu olduğu takdirde güzel sonuçlar alınabilir. Ancak bu çalışmadaki numuneler örgü uyumlu değildir. Ayrıca alaşım yapıya sahip bariyer kullanılmasından ötürü alaşım saçılmasını engellemek için büyütülen AlN gerilmeleri artırmaktadır.

Bu gerilmeler sonucunda piezoelektrik polarizasyon nedeniyle ara yüzeyde yüksek sayıda taşıyıcı birikmesi meydana gelmiştir. Oluşan gerilmeler sonucunda ara yüzeyde bozukluklar nedeniyle elektronlar ara yüzey bozukluğu saçılmasına maruz kalacağından hemen her numune için ara yüzey bozukluğunun etkin olduğu görüldü.

$\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapılarında AlN ara tabaka kullanımı sonucunda bariyer tabakadan kaynaklanan alaşım saçılması engellendi. Ancak bu numunelerde $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakada 2DEG oluşmaktadır. Bu nedenle iki HEMT yapı için tüm sıcaklıklarda arayüzey bozukluğu saçılması ve beklenildiği gibi alaşım saçılmasının baskın saçılma mekanizmaları olduğu belirlendi. Buna ek olarak polar optik fonon saçılmasının 300 K civarında 2DEG hareketliliğini etkilediği görüldü.

Farklı kalınlıklarda $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakaya sahip bu iki numunenin elektron hareketliliği birbirine yakındır. Yapılan saçılma analizi sonucunda kuyu genişliği daha düşük olan yapının daha yüksek elektron hareketliliğine sahip olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla 3nm kanal tabakaya sahip olan $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapısının daha yüksek elektron hareketliliğine sahip olduğu belirlendi.

Bu çalışmada kullanılan üç numune için elektron hareketliliğinin ve öz direncin $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal kalınlığına bağımlılığı incelendi. Burada $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ kanal tabakaya sahip olmayan HEMT yapının daha yüksek elektron hareketliliğine sahip olduğu açıkça görüldü. Bu yapıların öz dirençlerinin ise elektron hareketliliği ile ters orantılı olarak değiştiği görüldü. Aynı zamanda GaN kanala sahip yapının diğerlerinden daha düşük öz dirence sahip olduğu da görüldü.

Bu tez çalışmasında incelenen numuneler için ara yüzey bozukluğu saçılması oldukça önemli saçılma mekanizmasıdır. Ara yüzey bozukluğu parametreleri incelendiğinde korelasyon uzunluğu arttıkça elektron hareketliliğinin arttığı belirlendi. 8nm kanal tabakaya sahip olan $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapısının daha yüksek korelasyon uzunluğuna sahip olmasına rağmen daha düşük elektron hareketliliği sonucu elde edilmesi InGa_N kanal tabakaya bağlı olarak 2DEG hareketliliğinin değiştiği görüldü.

KAYNAKLAR

1. Warren J. C., Parson, J. B., and Crew, M. C. (1932) "Nitrogen Compounds of Gallium" *The Journal of Physical Chemistry*, 36.10: 2651-2654.
2. Manasevit, H. M., F. M. Erdmann, Simpson, W. I. (1971) "The Use of Metalorganics in the Preparation of Semiconductor Materials IV. The Nitrides of Aluminum and Gallium." *Journal of the Electrochemical Society* 118.11: 1864-1868.
3. Mimura, T., Hiyamizu, S., Fujii, T. And Nanbu, K. (1980). "A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions", *Japan Journal of Applied Physics*, 19(5): L225-L227.
4. Khan, M. A., Kuznia, J. N., Hove, J. M. V., Pan, N., Carter, J. (1992). "Observation of a two-dimensional electron gas in low pressure metalorganic chemical vapor deposited GaN-Al_xGa_{1-x}N heterojunctions", *Applied Physics Letter*, 60 (24): 3027-3092.
5. Lei T., Fanciulli, M., Molnar, R. J. Moustakas, T. D., Graham, R. J. ,Scanlon, J. (1991). "Epitaxial growth of zinc blende and wurtzitic gallium nitride thin films on (001) silicon" *Applied Physics Letter*, 59, 944.
6. Paisley, M. J., Sitar, Z., Posthill, J. B., and Davis, R. F.. (1989). "Growth of cubic phase gallium nitride by modified molecular-beam epitaxy." *Journal of Vacuum Science & Technology* A 7, no. 3: 701-705.
7. Powell, R. C., G. A. Tomasch, Y-W. Kim, J. A. Thornton, and J. E. Greene. (1989). "Growth of high-resistivity wurtzite and zincblende structure single crystal GaN by reactive-ion molecular beam epitaxy." *In MRS Proceedings*, vol. 162, p. 525. Cambridge University Press.
8. Maruska, H. Pi, and J. J. Tietjen. (1969). "The Preparation and Properties of Vapor-Deposited Single-Crystal-Line GaN." *Applied Physics Letters* 15.10: 327-329.
9. Vurgaftman, I., Meyer, J. R. (2004). "Band parameters for nitrogen-containing semiconductors", *Journal of Applied Physics*, 94 (6): 3675-3696.
10. E. K. Sichel and J. I. Pankove. (1977). *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 38,330.
11. Barker Jr, A. S., and M. Ilegems. (1973). "Infrared lattice vibrations and free-electron dispersion in GaN." *Physical Review B* 7,2: 743.
12. Nakamura, S. (1991). "GaN Growth Using GaN Buffer Layer", *Japan Journal of Applied Physics* 30 (10A): L1705-L1707.

13. Suzuki, M. And Uenoyama, T. (1998). "Group III Nitride Semiconductor Compounds: Physics and Applications" Gil. B., (Ed.), Clarendon Press, Oxford, 312-313.
14. Morkoc, H., Strite, S., Gao, G. B., Lin, M. E., Sverdlov, B., Burns, M. (1994). "Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies", *Journal of Applied Physics*, 76 (3): 1363-1398.
15. Wu, Y.F., Keller, B.P., Keller, S., Xu, J.J., Thibault, B.J., Denbaars, S.P., Mishra, U.K. (1999). "GaN-Based FETs for Microwave Power Amplification", *IEEE Transactions on Electron*, E82-C (11): 1895-1905.
16. Hopfield, J. J., (1960). "Fine structure in the optical absorption edge of anisotropic crystals", *Journal of Physics and Chemistry Solids*, 15 (1-2): 97-107.
17. Reshchikov, M. A., Morkoç, H. (2005). "Luminescence properties of defects in GaN", *Journal of Applied Physics*, 97 (6): 061301 (95pp)
18. Neugebauer, J., Van de Wall, C. G. (1994). "Atomic geometry and electronic structure of native defects in GaN", *Phys. Rev. B*, 50 (11): 8067-8070.
19. Lin, M. E., Ma, Z., Huang, F. Y., Fan, Z., Allen, L. H., Morkoç, H. (1994). "Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN", *Applied Physics Letter*, 64 (8):1003-1005.
20. Joshi, R. P., Sridhara, V., Jogai, B., Shah, P., Del Rosario, R. D., (2003). "Analysis of dislocation scattering on electron mobility in GaN high electron mobility transistors." *Journal of Applied Physics* 93, (12): 10046-10052.
21. Dettmer, E. S., Romenesko, B. M., Charles Jr, H. K., Carkhuff, B. G., Merrill, D. J, (1989). "Steady-state thermal conductivity measurements of AlN and SiC substrate materials." *Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions* 2, 4: 543-547.
22. Yim, W. M., Stofko, E. J., Zanzucchi, P. J., Pankove, J. I., Ettenberg, M., Gilbert, S. L. (1973). "Epitaxially grown AlN and its optical band gap." *Journal of Applied Physics* 44, 1: 292-296.
23. Perry, P. B., and Rutz, R. F. (1978). "The optical absorption edge of single-crystal AlN prepared by a close-spaced vapor process." *Applied Physics Letters* 33, 4: 319-321.
24. Yim, W. M., and Paff, R. J. (1974). "Thermal expansion of AlN, sapphire, and silicon." *Journal of Applied Physics* 45, 3: 1456-1457.
25. Tansley, T. L., Foley, C. P. (1986). "Optical band gap of indium nitride." *Journal of Applied Physics* 59, 9: 3241-3244.

26. Wakahara, A., Akira Y. (1989). "Heteroepitaxial growth of InN by microwave-excited metalorganic vapor phase epitaxy." **Applied Physics Letters** 54,8: 709-711.
27. Levinstein, M., Rumyantsev, S., Shur M. (2000). "Handbook Series On Semiconductor Parameters Vol 1&2, 2nd edition", **World Scientific Publishing Company**, Singapore, 77-98
28. Bernardini, F., Fiorentini, V., Vanderbilt, D. (1997). "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides", **Physical Review B**, 56 (16): R10024-R10027.
29. Ching, W. Y., Xu, Y.N. (2005). "First-Principles Calculation of Electronic, Optical, and Structural Properties of α -Al₂O₃", **Journal of American Ceramic Society**, 77 (2):404-411.
30. Thielsch, R., Gatto, A., Heber, J., Kaiser, N. (2002). "A comparative study of the UV optical and structural properties of SiO₂, Al₂O₃, and HfO₂ single layers deposited by reactive evaporation, ion-assisted deposition and plasma ion assisted deposition " **Thin Solid Films**, 410 (1-2): 86-93.
31. Bernardini, F., and Fiorentini, V. (2001). **Physical Review B** 64 85 207.
32. Stepanov, S., Wang, W.N., Yavich, B.S., Bougrov, V., Rebane, Y.T., Shreter, Y. G. (2001). "Influence of Poisson's ratio uncertainty on calculations of the bowing parameter for strained InGaN layers." **MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research** 6, 6: 1-8.
33. Brunner, D., Angerer, H., Bustarret, E., Freudenberg, F., Hopler, R., Dimitrov, R., Ambacher, O., Stutzmann, M. (1997). "Optical constants of epitaxial AlGaIn films and their temperature dependence." **Journal of applied physics** 82, 10: 5090-5096.
34. Martin, G., Strite, S., Botchkaev, A., Agarwal, A., Rockett, A., Morkoc, H., Lambrecht, W. R. L. and Segall, B. (1994). **Applied Physics Letter** 65 610.
35. Mimura, T. (2002). "The early history of the high electron mobility transistor (HEMT)." **IEEE Transactions on microwave theory and techniques** 50, 3: 780-782.
36. Golio, J.M. (1991). "Microwave MESFETs and HEMTs" Boston, **Artech House**.
37. Khan, M. A., Bhattarai, A., Kuznia, J. N. Olson, D. T., (1993). "High electron mobility transistor based on a GaN-Al_xGa_{1-x}N heterojunction", **Applied Physics Letter**, 63 (9): 1214-1215.
38. Kariya, M., Shugo, N., Shigeo, Y., Hiroshi, A., Isamu, A. (1999). "Mosaic Structure of Ternary Al 1-xIn_xN Films on GaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy." **Japanese Journal of Applied Physics** 38, 9A: L984.
39. Osamura, K., Nakajima, K., Murakami, Y., Shingu, P. H., Ohtsuki, A. (1972). "Fundamental absorption edge in GaN, InN and their alloys" **Solid State Communications**, 11(5), 617-621.

40. Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M. (1994). "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes" *Applied Physics Letters*, 64(13), 1687-1689.
41. Kuzmík, J. (2002). "InAlN/(In) GaN high electron mobility transistors: some aspects of the quantum well heterostructure proposal" *Semiconductor Science and Technology*, 17(6), 540.
42. Hsu, L., Walukiewicz, W. (2001). "Effect of polarization fields on transport properties in AlGaIn/GaN heterostructures", *Journal of Applied Physics*, 89 (3): 1783–1789.
43. Lisesivdin, S. B., Yildiz, A., Kasap, M. (2007). "Optimization of alloy composition, interlayer and barrier thicknesses in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/(\text{AlN})/\text{GaN}$ high electron mobility transistors", *Optoelectronics and Advanced Materials: Rapid Communications*, 1 (9): 467.
44. Teke, A, Gökden, S., Tülek, R., Leach, J. H., Fan, Q., Xie, J., Özgür, Ü., Morkoç, H., Lisesivdin, S. B., Özbay, E. (2009). "The effect of AlN interlayer thicknesses on scattering processes in lattice-matched AlInN/GaN two-dimensional electron gas heterostructures", *New Journal of Physics*, 11: 063031.
45. Guo, L., Wang, X., Wang, C., Xiao, H., Ran, J., Luo, W., Wang, X., Wang, B., Fang, C., Hu, G. (2008). "The influence of 1 nm AlN interlayer on properties of the $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT structure", *Microelectronics Journal*, 39: 777–781.
46. Shen, L., Heikman, S., Moran, B., Coffie, R., Zhang, N. Q., Buttari, D., Smorchkova, I.P., Keller, S., DenBaars, S.P., Mishra, U. K. (2001). "AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT", *IEEE. Electron Device Letter*, 22 (10): 457–459.
47. Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weinman, N. G., Chu, K., Murohy, M., Schaff, W. J., Eastman, L. F., Dimitrov, R., Wittmer, L., Stutzman, M., Rieger, W., Hilsenbeck, J. (1999). "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures", *Journal of Applied Physics*, 85 (6): 3222-3233.
48. Hellman, E. S. (1998). "The Polarity of GaN: a Critical Review", *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*, 3: 11.
49. Zoroddu, A., Bernardini, F., Ruggerone, P., Fiorentini, V. (2001). "First-principles prediction of structure, energetics, formation enthalpy, elastic constants, polarization, and piezoelectric constants of AlN, GaN, and InN: Comparison of local and gradient-corrected density-functional theory" *Physical Review B*, 64(4), 045208.
50. Dubois, M. A., Muralt, P. (1999). "Properties of aluminum nitride thin films for piezoelectric transducers and microwave filter applications" *Applied Physics Letters*, 74(20), 3032-3034.
51. Ambacher, O. (1998). "Growth and applications of group III-nitrides" *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(20), 2653.

52. Bernardini, F. (2007). "Spontaneous and Piezoelectric Polarization: Basic Theory vs. Practical Recipes," *in Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation, J. Piprek, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim, Germany, 49-68.
53. Ambacher, O., Majewski, J., Miskys, C., Link, A., Hermann, M., Eickhoff, M., Eastman, L. F. (2002). "Pyroelectric properties of Al (In) GaN/GaN hetero- and quantum well structures" *Journal of physics: Condensed Matter*, 14(13), 3399.
54. Bernardini, F., Fiorentini, V. (1999). "Spontaneous versus Piezoelectric Polarization in III-V Nitrides: Conceptual Aspects and Practical Consequences", *Physica Status Solidi (b)*, 216 (1): 391-398.
55. Yang, B., Xiaoliang, W., Hongling, X., Cuimei, W., Cuibai, Y., Enchao, P., and Lijuan, J. (2011). "Simulation of electrical properties of $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ high electron mobility transistor structure" *Journal of Semiconductors*, 32(8), 083003.
56. Ambacher, O., Foutz, B., Smart, J., Shealy, J., Weimann, N., Chu, K., Murphy, M., Sierakowski, A., Dimitrov, R., Mitchell, A., Stutzmann, M. (2000). "Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures", *Journal of Applied Physics*, 87: 334.
57. Chuang, S. L. (1995). "Physics of Optoelectronic Devices", *Wiley-Interscience, New York*, 438.
58. Tasli, P., Sarikavak, B., Atmaca, G., Elibol, K., Kuloglu, A. F., Lisesivdin, S. B. (2010). "Numerical Simulation of Novel Ultrathin Barrier n-GaN/InAlN/AlN/GaN HEMT Structures: Effect of In Mole Fraction, Doping and Layer Thicknesses", *Physica B*, 405: 4020.
59. Smith, M., Lin, J. Y., Jiang, H. X., Salvador, A., Botchkarev, A., Morkoc, H. (1996). "Optical transitions in GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy", *Applied Physics Letter*, 69 (17): 2453-2455.
60. Rode, D.L. (1975). "Low-field electron transport. *Semiconductors and Semimetals*", *Academic*, New York, 1: 26-45.
61. Nag, B. R. (1980). "Electron transport Compound Semiconductors, *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg*, 11: 53.
62. Ridley, B. K., Foutz, B. E., Eastman, L. F. (1999). "Mobility of electrons in bulk GaN and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures", *Physical Review B*, 61(24): 16862-16869.
63. Fang, F. F., Howard, W. E. (1966). "Negative Field-Effect Mobility on (100) Si Surfaces", *Physical Review Letter*, 16 (18): 797-799.
64. Ramonas, M., Matulionis, A., Rota, L. (2003). "Monte Carlo simulation of hot phonon and degeneracy effects in the AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas channel", *Semicondductor Science Technology*, 18 (2): 118-123.

65. Ridley, B. K. (1982). "The electron-phonon interaction in quasi-two-dimensional semiconductor quantum-well structures", *Journal of Physics C*, 15 (28): 5899-5917.
66. Zanato, D., Gokden, S., Balkan, N., Ridley, B. K., Schaff, W. J. (2004). "The effect of interface-roughness and dislocation scattering on low temperature mobility of 2D electron gas in GaN/AlGaIn", *Semiconductor Science Technology*, 19 (3):427-432.
67. Deveaud, B., Emergy, J. Y., Chomette, A., Lambert, B., Baudet, M. (1985). "Single monolayer well size fluctuations in the luminescence of GaAs-GaAlAs superlattices", *Superlattice Microstructure*, 1 (3): 205-208.
68. Hirakawa, K., Sakaki, H. (1986) "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", *Physical Review B*, 33 (12): 8291-8303.
69. Hess, K. (1979). "Impurity and phonon scattering in layered structures", *Applied Physics Letter*, 35 (7): 484-486.
70. Lee, K., Shur, M. S., Drummond, T. J., Morkoc, H. (1983). "Low field mobility of 2-d electron gas in modulation doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ layers", *Journal of Applied Physics*, 54 (11): 6432-6438.
71. Davies, J. H. (1998). "The Physics of Low-Dimensional Semiconductors" **Cambridge University Press**, Cambridge, 128.
72. Kearney, M. J., Horrell, A. I. (1998). "The effect of alloy scattering on the mobility of holes in a $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ quantum well", *Semiconductor Science Technology*, 13 (2):174-180.
73. Hoderick, A.R., Williams, R.H. (1988). "Metal-Semiconductor Contacts", **Clarendon Press**, Oxford, 79-88.
74. Holloway, P.H., McGuire, G.E. (1995). "Handbook of Compound Semiconductors", **Park Ridge**, New Jersey, 773-812.
75. Baca, A. G., Ren, F., Zolper, J. C., Briggs, R. D., Pearton, S. J. (1997). "A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors", *Thin Solid Films*, 308-309: 599-606.
76. Hall, E. H. (1879). "On a New Action of the Magnet on Electrical Current" *American Journal of Mathematics*, 2: 287-292.
77. Van der Pauw, L. J. (1958). "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape", *Philips Research Reports*, 13 (1): 1-9.
78. Lisesivdin, S.B., Demirezen, S., Caliskan, M.D., Yildiz, A., Kasap, M., Ozcelik, S., Ozbay, E. (2008). "Growth parameters investigation of $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}$ heterostructures with Hall Effect Measurements", *Semiconductor Science Technology*, 23: 95008-95015.

79. Zhang, G. Y., Tong, Y. Z., Yang, Z. J., Jin, S. X., Li, J., Gan, Z. Z. (1997). "Relationship of background carrier concentration and defects in GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy", *Applied Physics Letter*, 71 (23): 3376-3378
80. Gokden, S. (2003). "Mobility of two-dimensional electrons in an AlGaIn/GaN modulation-doped heterostructure", *Physica Status Solidi (a)*, 200: 369-377.
81. Gökden, S., Tülek, R., Teke, A., Leach, J. H., Fan, Q., Xie, J., Özbay, E. (2010). "Mobility limiting scattering mechanisms in nitride-based two-dimensional heterostructures with the InGaIn channel" *Semiconductor Science and Technology*, 25(4), 045024.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : NARİN, Polat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.04.1989, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0(545) 903 05 39
 e-mail : polatnarin@kuark.org



Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik	2011
Lise	Fatih Sultan Mehmet Lisesi	2006

Yabancı Dil

İngilizce

Tez Dışı Yayınlar

SCI-indeksli makaleler

1. Atmaca, G., Narin, P., Lisesivdin, S. B., Kasap, M., Sarikavak-Lisesivdin, B. (2014). Electron Transport Properties of Two-Dimensional Electron Gas in $\text{Be}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ Heterostructures. *Philosophical Magazine*, (ahead-of-print), 1-11.

Bildiriler

1. E. Kutlu, P. Narin, G. Atmaca, B. Sarikavak-Lisesivdin, S. B. Lisesivdin “Ab initio study of oxygen and arsenic impurities on non-linear optical properties of $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ material” *Конференция И Школа Молодых Учёных По Актуальным Проблемам Физики Полупроводниковых Структур, Novosibirsk*, 77, (2014).
2. P. Narin, G. Atmaca, S. B. Lisesivdin, “Effects of ultrathin InGaN channel layer on two dimensional electron gas in hybrid GaN/InGaN/ZnO heterostructures” *Turkish Physical Society 31th International Physics Congress*, p406 (2014).
3. E. Kutlu, P. Narin, G. Atmaca, S. B. Lisesivdin, M. Kasap “Investigation of electrical properties of two dimensional hole gas in hybrid InGaN/ZnO heterostructure” *Turkish Physical Society 31th International Physics Congress*, p401 (2014).

4. S. B. Lisesivdin, E. Kutlu, P. Narin, G. Atmaca, B. Sarikavak-Lisesivdin, “Investigation of the effect of the arsenic impurity on the electronic and optical properties of β -Si₃N₄ dielectric material” *Turkish Physical Society 31th International Physics Congress*, p402 (2014).
5. P. Narin, G. Atmaca, E. Boyalı, S. B. Lisesivdin, M. Kasap, S. Ozcelik, “Scattering Analysis of 2DEG in AlInN/GaN Based Heterostructures with GaN and InGaN Quantum Wells”, *Turkish Physical Society 30th International Physics Congress*, p530 (2013).
6. P. Narin, G. Atmaca, B. Sarikavak-Lisesivdin, S. B. Lisesivdin, M. Kasap, “A Numerical Investigation on Electronic Properties of Two Dimensional Electron Gas in Be_xZn_{1-x}O/ZnO Heterostructures”, *Turkish Physical Society 30th International Physics Congress*, p529 (2013).
7. E. Boyalı, P. Narin, G. Atmaca, S. B. Lisesivdin, M. Kasap and S. Ozcelik, “The Investigation of Temperature Dependent Electrical Transport Properties of In_xGa_{1-x}P/GaAs”, *Turkish Physical Society 30th International Physics Congress*, p482 (2013).



GAZİ GELECEKTİR..