

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**NEXTNANO³ SİMÜLASYON PROGRAMI İLE (IN)N
KANALLI İKİ BOYUTLU YAPILARIN BÜYÜTME
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN AKÇAKAYA

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**NEXTNANO³ SİMÜLASYON PROGRAMI İLE (IN)N
KANALLI İKİ BOYUTLU YAPILARIN BÜYÜTME
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN AKÇAKAYA

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sibel GÖKDEN (Tez Danışmanı)

Doç. Dr. Ali KARPUZ

Yrd. Doç. Dr. Remziye TÜLEK

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

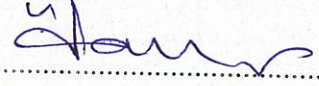
KABUL VE ONAY SAYFASI

HÜSEYİN AKÇAKAY tarafından hazırlanan "NEXTNANO³ SİMÜLASYON PROGRAMI İLE (IN)N KANALLI İKİ BOYUTLU YAPILARIN BÜYÜTME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 13.06.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

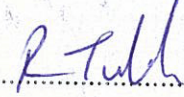
Danışman
Prof. Dr. Sibel GÖKDEN



Üye
Doç. Dr. Ali KARPUZ



Üye
Yrd. Doç. Dr. Remziye TÜLEK



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**NEXTNANO³ SİMÜLASYON PROGRAMI İLE IN(N) KANALLI İKİ
BOYUTLU YAPILARIN BÜYÜTME PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HÜSEYİN AKÇAKAYA
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SİBEL GÖKDEN)**

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

Bu çalışmada InN kanallı yüksek elektron mobiliteli transistör yapıların Nextnano³ simülasyon programı kullanılarak iki boyutlu elektron yoğunluğunu artırmaya yönelik optimum büyütme parametrelerinin belirlenmesi araştırılmıştır. 1-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemleri, In_{1-x}Al_xN/InN/In_{1-y}Al_yN ve In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN tekli kuantum kuyulu yapılar için çözüldü. Bu yapılarda, InN kuyu ve GaN ara tabaka kalınlıklarının, bariyer tabakadaki Al mol yüzdesinin ve InAlN bariyer katkılanmasının, iletim enerji bant yapılarına, olasılık ve elektron yoğunluklarına etkisi araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER:InNHEMT, InAlN, Schrodinger- Poisson, Nextnano.

ABSTRACT

DETERMINATION OF GROWTH PARAMETERS OF TWO DIMENSIONAL STRUCTURES WITH (IN)N CHANNEL BY NEXTNANO3 SIMULATION PROGRAM

MSC THESIS

HÜSEYİN AKÇAKAYA

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

PHYSICS

(SUPERVISOR:PROF. DR. SİBEL GÖKDEN)

BALIKESİR, JUNE 2016

In this study, to improve the device performance of InN-based high electron mobility transistor structures, the optimization of growth parameters is investigated by using Nextnano³ simulation program. For the $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{GaN}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ single quantum wells, the self-consistent 1-band, 1-dimension Schrödinger-Poisson equations including polarization induced carriers have been solved and simulated. The effects of GaN interlayer and InN quantum well layer thicknesses and Al mole fraction in barrier layer and doping of InAlN barrier layer on conduction band structures, carrier densities, two dimensional electron gas wave functions have also been examined

KEYWORDS:InNHEMT, InAlN, Schrodinger Poisson Equation, Nextnano.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| TABLO LİSTESİ | v |
| SEMBOL LİSTESİ | vi |
| ÖNSÖZ..... | vii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. III-NİTRÜRLERİN TEMEL FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ | 4 |
| 2.1 III-Nitrürlerin Kristal Yapısı | 4 |
| 2.2 III-Nitrürler için Kullanılan Alt Taşlar | 6 |
| 2.3 Epitaksi | 8 |
| 2.4 GaN, AlN, InN Materyallere Ait Temel Parametreler | 8 |
| 2.4.1 GaN Materyali | 9 |
| 2.4.2 AlN Materyali | 11 |
| 2.4.3 InN Materyali | 13 |
| 3. HEMT YAPILARIN ÖZELLİKLERİ VE III-NİTRÜR YAPILARDA KUTUPLANMA | 15 |
| 3.1 III-Nitrür Yapılarda Kutuplama | 16 |
| 3.2 Doğal Kutuplanma ve Piezoelektrik Kutuplanma | 18 |
| 3.3 İki Boyutlu Elektron Gazı (2BEG)..... | 23 |
| 4. NEXTNANO ³ SİMÜLASYON PROGRAMI | 24 |
| 5. In _{1-x} Al _x N/InN/In _{1-y} Al _y N YAPISINDA InN KANAL KALINLIĞININ ETKİSİ | 28 |
| 6. In _{1-x} Al _x N/GaN/InN/In _{1-y} Al _y N YAPISINDA ARA TABAKA KALINLIĞININ, BARIYER TABAKADAKİ Al MOL KESRİNİN VE BARIYERDEKİ KATKILAMANIN ETKİSİ..... | 34 |
| 6.1 GaN Ara Tabaka Kalınlığının Etkisi | 34 |
| 6.2 Bariyer Tabakanın Katkılanmasının Etkisi | 38 |
| 6.3 Bariyer Tabakadaki Al-Mol Kesrinin Etkisi | 40 |
| 6.4 Bariyer Tabakanın Katkılı ve Katkısız Hallerinin Karşılaştırılması | 44 |
| 7. SONUÇ VE TARTIŞMA | 47 |
| 8. KAYNAKLAR..... | 49 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: (a) Hegzagonal, (b) çinko sülfür ve (c) NaCl kaya tuzunun şematik gösterimi..... | 5 |
| Şekil 2.2: a ve c örgü sabitli hegzagonal karistal yapı. Bu yapı iç içe geçmiş iki altörgüden oluşmuştur. | 5 |
| Şekil 2.3: Heteroepitaksde büyüme modları | 8 |
| Şekil 2.4: AlN, GaN ve InN materyallerine ait kristal yapısı..... | 11 |
| Şekil 3.1: GaN (InN, AlN) tabakaların şematik gösterimi ve birim alandaki dipol momentler..... | 16 |
| Şekil 3.2: Ga-yüzlü ve N-yüzlü GaN'ın hegzagonal kristal yapısının şematik gösterimi..... | 17 |
| Şekil 3.3: Kutuplanmadan kaynaklı tabaka yük yoğunluğu ve zorlanma varken ve yokken Ga(In,Al) ve N yüzlü AlGa(In)N/Ga(In)N çoklu yapılarda kendiliğinden ve piezoelektrik kutuplanmanın yönelimin gösterimi. | 22 |
| Şekil 3.4: Al _x In _{1-x} N/GaN heteroyapıda elektronlar, (a) yerlerinde iken sistem yüksüzdür; (b) termal enerjileri nedeniyle hareket ederek GaN tarafına geçtiğinde üçgene benzeyen potansiyel bir kuyuda tuzaklanır | 23 |
| Şekil 4.1: In _{1-x} Al _x N/InN/In _{1-y} Al _y N yapısının geometrisi..... | 27 |
| Şekil 4.2: In _{1-x} Al _x N/GaN/InN/In _{1-y} Al _y N yapısının geometrisi. | 27 |
| Şekil 5.1: Farklı InN kalınlıklarına göre enerji bant profilinin uzaysal değişimi...28 | 28 |
| Şekil 5.2: Farklı InN kalınlığına göre olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi ...30 | 30 |
| Şekil 5.3: Farklı InN kalınlığına göre olasılık yoğunluğunun normalize olmuş uzaklığa göre değişimi..... | 31 |
| Şekil 5.4: Farklı InN kalınlığına göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal dağılımı..... | 32 |
| Şekil 5.5: 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun farklı InN kalınlığına göre değişimi. 33 | 33 |
| Şekil 6.1: Farklı GaN kalınlığına göre enerji bant profilinin uzaysal değişimi35 | 35 |
| Şekil 6.2: Farklı GaN ara tabaka kalınlığına göre olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi. | 36 |
| Şekil 6.3: Farklı GaN ara tabaka kalınlığına göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal değişimi | 37 |
| Şekil 6.4: 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun GaN ara tabaka kalınlığına göre değişimi | 38 |
| Şekil 6.5: Farklı katkılama oranına göre enerji bant profilininuzaysal değişimi..39 | 39 |
| Şekil 6.6: Farklı Al-mol kesirlerine göre enerji bant profilinin uzaysal değişimi.40 | 40 |
| Şekil 6.7: Farklı Al-mol kesrine göre olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi. ..41 | 41 |
| Şekil 6.8: Farklı Al-mol kesirlerine göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal değişimi. | 42 |
| Şekil 6.9: 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun Al mol kesrine göre değişimi. | 43 |
| Şekil 6.10: Enerji bant profili | 44 |
| Şekil 6.11: Olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi | 45 |
| Şekil 6.12: 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğu..... | 46 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler | 6 |
| Tablo 2.2: Safir, Si, SiC ve ZnO için örgü parametreleri, ısıl genleşme katsayıları ve ısıl iletkenlik katsayısı | 7 |
| Tablo 2.3: Nitrat tabanlı üst tabakada yaygın olarak kullanılan alttaşların avantaj ve dezavantajları..... | 7 |
| Tablo 2.4: GaN materyaline ait oda sıcaklığındaki temel parametreler..... | 9 |
| Tablo 2.5: AlN'a ait 300K'de ki temel parametreler. | 12 |
| Tablo 3.1: GaN, InN ve AlN yarıiletkenlerinin kendiliğinden kutuplanma büyüklükleri piezoelektrik ve dielektrik sabitleri..... | 20 |
| Tablo 4.1: İnter dosyası girdileri. | 26 |
| Tablo 5.1: InN kalınlığı ile değişen parametreler | 33 |
| Tablo 6.1: GaN ara tabaka kalınlığı ile değişen parametreler..... | 38 |
| Tablo 6.2: Katkılama ile değişen parametreler | 39 |
| Tablo 6.3: Al-mol kesri ile değişen parametreler..... | 43 |
| Tablo 6.4: Katkılama ve mol kesri ile değişen parametreler..... | 46 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|-----------------------|---|
| P | : Kutuplanma |
| P_{PE} | : Piezoelektrik kutuplanma |
| ρ_p | : Kutuplanma yük yoğunluğu |
| P_{KK} | : Kendiliğinden kutuplanma |
| ϵ | : Dielektrik sabit |
| C | : Elastik sabit |
| A | : Örgü sabiti |
| μ | : Mobilite |
| \hbar | : İndirgenmiş Planck sabiti |
| Φ | : Elektrik potansiyeli |
| n_{2B} | : 2 boyutlu electron taşıyıcı yoğunluğu |
| 2BEG | : 2-boyutlu elektron gazı |
| HEMT | : Yüksek elektron mobiliteli transistor |

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmasının her aşamasında her türlü konuda bilgi, tecrübe ve deneyimlerini benimle paylaşan en mutlu ve en acı günümde yanımda olan değerli büyüğüm, kıymetli danışmanım Prof. Dr. Sibel GÖKDEN hocama ve tüm Fizik Bölümündeki hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi her konuda yanımda olan en büyük destekçim, çok sevdiğim eşim Nermin AKÇAKAYA'ya, Anneme ve Şubat 2015 itibariyle artık aramızda olmayan hiçbir zaman unutmayacağım canım Babama ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

III-V yarıiletkenler uzun yıllardır hem elektronik hem de opto-elektronik cihaz uygulamaları için ilgi çekmektedir. Özellikle III-V grubu bileşiklerden olan N-tabanlı yüksek elektron mobiliteli transistörlerde (HEMT) güç performansı üzerine sürekli gelişmeler devam etmektedir [1]. Özellikle de günlük teknolojide yaygın bir şekilde kullanılan GaN kanallı yarıiletkenler bunların başını çekmektedir. Ancak bu yapıların geniş yasak enerji aralığına, yüksek etkinelektron kütlelerine sahip olması, GaN kanallı yapılarda etkin taşıyıcı sürüklenme hızını (v_e) sınırlamaktadır. Bu durum, III-Nitrür yüksek elektron mobiliteli transistörlerin ultra yüksek frekanslı aralıklardaki uygulamalarına doğru gelişmesine engel teşkil etmektedir.

AlGaIn/GaN HEMT yapılarda cutoff (kesim) frekansının değeri 190 GHz iken gate uzunluğu $L=60\text{nm}$ dir [2]. HEMT yapıların hız performansı τ , taşıyıcıların gate boyunca geçiş zamanı olmak üzere $f_T=1/(2\pi\tau)$ ile ilişkilidir. Saf (intrinsic) taşıyıcı geçiş zamanı ise $\tau_i=L/v_e$ ifadesi ile verilir. Bu değer toplam τ 'nun sadece bir kesridir. Eğer v_e artarsa τ_i ve τ_D süreleri azalabilir ki bu durumda da f_T 'nin artması beklenir. Böylece mümkün HEMT yapıların hız performansının artması için düşük gate uzunluklu sistemlerin sağlanması halinde taşıyıcıların hızının artması sağlanabilir bu da gate boyunca geçiş zamanını azaltarak cut-off frekansını artıracaktır [3].

III-N materyaller arasında InN, en düşük elektron kütlelerine $m_e=0.04-0.11 m_o$ (GaN için bu değer $0.2m_o$ 'dır) ve de en yüksek maksimum kararlı durum sürüklenme hızına yani $v_{max} 5 \times 10^5$ m/s 'ye sahiptir. (GaN'ın ise bu hız değeri 3×10^5 m/s dir) [4,5]. Sonuç olarak $v_e \sim v_{max}$ kabul edilirse, InN hetero-yapıların büyütülmesi [6,7] hala olgunlaşmamış safhada olmasına rağmen, InN tabanlı HEMT yapılar, III-N transistörler arasında hızlı bir rekora imza atabilir. Optimal durumda ($f_T \sim v_e$), GaN kanal yerine InN kanal seçerek f_T 'nin %50' ye kadar iyileştirileceğine dair bir beklenti içine girilebilir. Teorik analizler ideal bir transistör için GaN kanal yerine InN kanallı transistörlerde $L=0,1\mu\text{m}$ olduğunda f_T 'nin 480 GHz'den 680 GHz'e çıkabileceğini göstermiştir [8]. Üstelik InN kanalındaki düşük elektron kütleleri, m_e ,

elektronun durağan olmayan dinamiği için bir umut vermekte ve $L=0,1\mu\text{m}$ gate uzunluğu için f_T 'yi 1THz' in üzerine çıkarılabileceğini göstermektedir [8]. Böylece hız performansı yardımıyla, yeni InN kanallı HEMT yapılar, InP tabanlı [9], GaAs tabanlı [9] ve GaN tabanlı HEMT' lerle [10] kıyaslanabilir olacaktır.

Metal organik kimyasal buhar biriktirme [11,12] ve moleküler demet epitaksi [13,14] gibi büyütme teknikleri 50nm-10 μm kalınlıklı InN filmleri hazırlamak için kullanılmaktadır. InN filmlerde yüksek background (arka plan) katkılmasının bare (çıplak) yüzeyde [13,15] ve GaN buffer (tampon) tabaka ara yüzeyinde [15] elektron birikmesine dayalı olduğu gözlenmiştir. İlk bahsedilen etki, iletim band minimumu üzerinde lokalize olmuş native (doğal) yüzey seviyeleri üzerindeki Fermi seviyesi pinning (iğneleme) ile açıklanabilir [15]. Halbuki 2.bahsedilen etki InN ve GaN arasındaki yüksek örgü uyumsuzluğu yüzünden kaynaklanan dislokasyonlara bağlanır [13]. Bunlara ilave olarak, ince InN filmler (~10nm-20nm), Ga- kutuplu GaN üzerine InN/GaN veya N- kutuplu InAlN üzerine InN/GaN ve InN/InAlN kuantum kuyuları şeklinde büyütülür. Bundan başka, InAlN/InN kuantum kuyuları elde etmek için InAlN, relax InN üzerine büyütülür [16]. Ancak hazırlanmış kuantum kuyularının elektriksel özellikleri üzerine pratikte hiç data yoktur ve sadece InN-kanallı HEMT'ler üzerine teorik hesaplamalar vardır. Modeller ise InGaN/InN/InGaN çiftli kuantum kuyularında [17] veya InGaN/InN kuantum kuyularının [18] transport özelliklerini hesaplamak için kullanılmıştır. Her iki yaklaşımda transistör kanalı, 0.5-1 μm kalınlıklı relax InN tampon tabakanın üst bölgesinde oluşur. InN kanalın arka tarafındaki daha yüksek enerji band aralıklı materyali elde etmek için alternatif çözümler içinde hiçbir tartışma mevcut değildir. Aynı şekilde, 0.5-1 μm kalınlıkta (10^{17} cm^{-3} den daha fazla) elektron background konsantrasyon seviyeli [11-14,16] InN kanal/buffer'a ait hiçbir analiz, cihaz pinchoff operasyonu için gerçekçi olmayacaktır. Aynısı AlInN/InN HEMT lerin hesaplamalarında uygulanır [19]. Bu yapıda AlInN bariyer 22nm kalınlıkta, 1- μm kalınlıkta InN üzerine büyütülür. Bununla birlikte, AlInN/InN HEMT yapılarında kabul edilen mükemmel transport özellikler yüzünden model $L=0,25\mu\text{m}$ için $f_T=160$ GHz tahmin etmiştir [19].

Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen literatür çalışmalarının ışığında ideal bir transistör için önerilen düşük elektron etkin kütesine sahip InN kanallı HEMT

yapıların, III-Nitrit yapılar arasında InN'ı büyütmekdeki zorluklara [4,5] rağmen, InN kanallı HEMT yapılar üzerine teorik hesaplamaların yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Modeller önerilen InN kanallı yapıların transport özelliklerini hesaplamak için kullanılmıştır [7-8,11-14,17-20]. 1THz frekans aralığına [8] ulaştırabilecek yapıların tasarımı yapılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda InN kanallı InAlN buffer (tampon) tabakalı HEMT yapılar üzerine çalışılmış teorik çalışmalar ışığında [20,21], InAlN/GaN/InN/InAlN yapılar için 1-bant, 1-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin kendi içinde tutarlı çözümleri nextnano³ simülasyon programı yardımıyla yapılmış ve büyütmeye parametreleri değiştirilerek iki boyutlu taşıyıcı yoğunluğu için uygun optimum cihaz performans değerleri araştırılmıştır [20,22-23].

Tasarımını yaptığımız In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN HEMT yapıların mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu gibi temel iletim özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak, InN kanalın ve GaN ara tabaka kalınlıklarının, InAlN bariyer ve buffer (tampon) tabakasındaki Al yüzde mol kesirlerinin, bariyer tabakasının katkılanmasının, elektronun enerji band profilleri, olasılık yoğunlukları ve taşıyıcı yoğunlukları üzerine etkileri Nextnano³ simülasyon programı kullanarak araştırıldı.

Bu tez çalışmasına aşağıdaki şekilde devam edilmiştir.

2.Bölüm:III- Nitrürlerin temel fiziksel özellikleri

3. Bölüm: HEMT yapıların özellikleri ve III-nitrür yapılarda kutuplanma

4. Bölüm: Nextnano³simülasyon programı

5.Bölüm: In_{1-x}Al_xN/InN/In_{1-y}Al_yN yapısında InN kanal kalınlığının etkisi

6.Bölüm: In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN yapısında,GaN ara tabaka kalınlığının, bariyer tabakadaki Al mol kesirinin ve bariyerdeki katkılanmanın etkisi

7.Bölüm: Sonuç ve Tartışma

2. III-NİTRÜRLERİN TEMEL FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

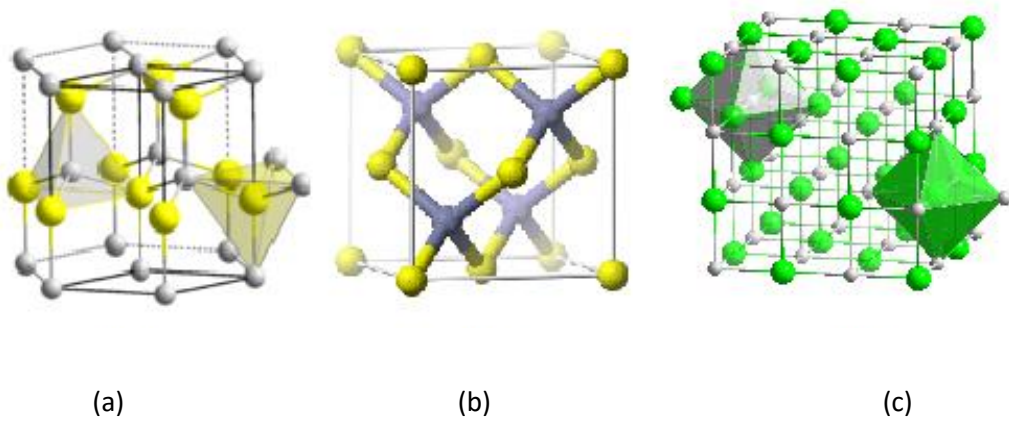
Nitrür temelli aygıtların performanslarının geliştirilmesinde ve buna göre tasarım parametrelerinin optimizasyonu için bu yapılara ait temel bazı fiziksel özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Bu bölümde, GaN, AlN ve InN yarıiletkenlerin kristal yapılarından, AlGa(In)N/GaN yapıların büyütüldüğü alt taşlardan, kutuplanma ile kutuplanmanın ortaya çıkardığı yüksek taşıyıcı yoğunluğu gibi fiziksel özelliklerinden bahsedilecektir.

2.1 III-Nitrürlerin Kristal Yapısı

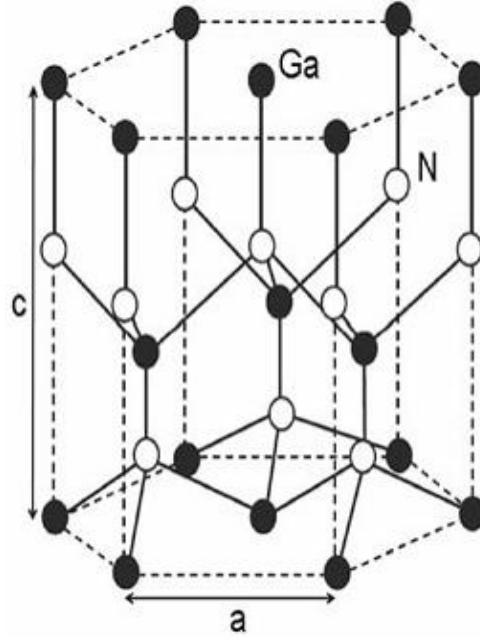
III-nitrür yarıiletkenler ZnS (çinko sülfür), NaCl (kaya tuzu) hegzagonal yapıda kristalleşirler (Şekil 2.1). GaN, AlN, InN yapıların NaCl yapıda kristalleşebilmesi için çok fazla dış basınç gerekmektedir. GaN, AlN, InN bulk yapılar için termodinamik olarak en kararlı yapı hegzagonal (wurtzite) yapıdır. GaN ve InN gibi yapılar ise sadece Si, SiC, MgO, GaAs gibi kübik alt tabakalar üzerinde büyütme ile kararlı olabilir.

Hegzagonal yapıda bağ başına bağlanma enerjisi AlN için 2.88 eV (63.5 kcal/mol), GaN için 2.20 eV(48.5 kcal/mol) ve InN için 1.93 eV (42.5 kcal/mol)'dur [24].

Hegzagonal yapı Şekil 2.2'de görüldüğü gibi iki altıgen yapının (hcp) iç içe girmesiyle oluşur. Her birim hücrede 4 tane atom vardır. Atomlar arası açı 109° dir. Tetrahedral bağ yapısına sahip olup hegzagonal yapıda en yakın komşusunun sayısı 4 ve ikinci en yakın komşusunun sayısı ise 12 dir.



Şekil 2.1: (a) Hegzagonal, (b) çinko sülfür ve (c) NaCl kaya tuzunun şematik gösterimi.



Şekil 2.2: a ve c örgü sabitli hegzagonal karistal yapı. Bu yapı iç içe geçmiş iki altörgüden oluşmuştur.

Hegzagonal yapının örgü parametresi a ve c olup ideal bir hegzagonal yapı için $c/a = 1.633$ değeri hesaplanır. Bu yapı için bir diğer parametre ise katyon ve anyon arasındaki bağ uzunluğu b 'nin (veya en yakın komşular arası bağuzunluğu) c 'ye oranı "u" parametresi olup ideal bir wurtzite yapı için $u = 0.375$ değerini alır.

Tablo 2.1’de hegzagonal yapıda kristalleşen III-Nitrürlere ait deneysel gözlenen yapısal parametreler verilmiştir.

Tablo 2.1: AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler [21].

| Örgü parametreleri | AlN | GaN | InN |
|--------------------|-------|-------|-------|
| a (Å) | 3.110 | 3.199 | 3.585 |
| c (Å) | 4.982 | 5.185 | 5.760 |
| c/a | 1.606 | 1.634 | 1.618 |
| u | 0.382 | 0.377 | 0.379 |
| b (Å) | 1.907 | 1.971 | 2.200 |

2.2 III-Nitrürler İçin Kullanılan Alt Taşlar

Geniş bant aralıklı yarıiletken alttaşlar, epitaksiyel büyütmelemede oldukça kullanışlı görülmektedir. Alttaş seçimi konusunda bazı önemli şartlar mevcuttur. Bunlar termal iletkenlik (κ_L) ve termal genişleme katsayısı (CTE), kullanılan tabaka ve alttaş arasında örgü uyumu, farklı sıcaklıklarda maksimum elektriksel izolasyon, 2-8 inç çaplarında bulunabilme, kusur yoğunluğu, kristal kalitesi, yüzey özellikleri, tabaka eğriliği, mekanik ve kimyasal özelliklerdir. Nitrürlü bileşimlerinin GaN alttaş materyali olarak çok uygundur. Bununla birlikte, şimdiye kadar ne de yarıyalıtkan GaN alttaşlar uygun çapta ve kalitede elde edilememiştir [25,26]. Bu bileşimler için sık olarak kullanılan alttaşlar Al_2O_3 (safir) ve SiC yapılarıdır. Bunlara ilaveten III-nitrürler Si, NaCl, GaP, InP, ZnO, $MgAl_2O_4$, TiO_2 ve MgO üzerine de büyütülürler. Tablo 2.2’de en çok kullanılan alt taş materyallerine ait bazı parametrelerin sayısal değerleri verilmektedir [27].

Tablo 2.2: Safir, Si, SiC ve ZnO için örgü parametreleri, ısıl genleşme katsayıları ve ısıl iletkenlik katsayısı [27].

| Alt taş | a (Å) | c (Å) | $\Delta a/a$ $\times 10^{-6}(1/K)$ | $\Delta c /c$ $\times 10^{-6}(1/K)$ | κ (W/cmK) |
|---|--------|---------|---------------------------------------|--|---------------------|
| Safir (Al ₂ O ₃) | 4.765 | 10.298 | 7.5 | 8.5 | 0.3-0.5 |
| Si | 5.4301 | | 3.99 | | 1.56 |
| 6H-SiC | 3.0806 | 15.1173 | 4.46 | 4.16 | 3.8 |
| ZnO (hegzagonal) | 3.2426 | 5.194 | 4.8 | 2.9 | 0.3–0.4 |

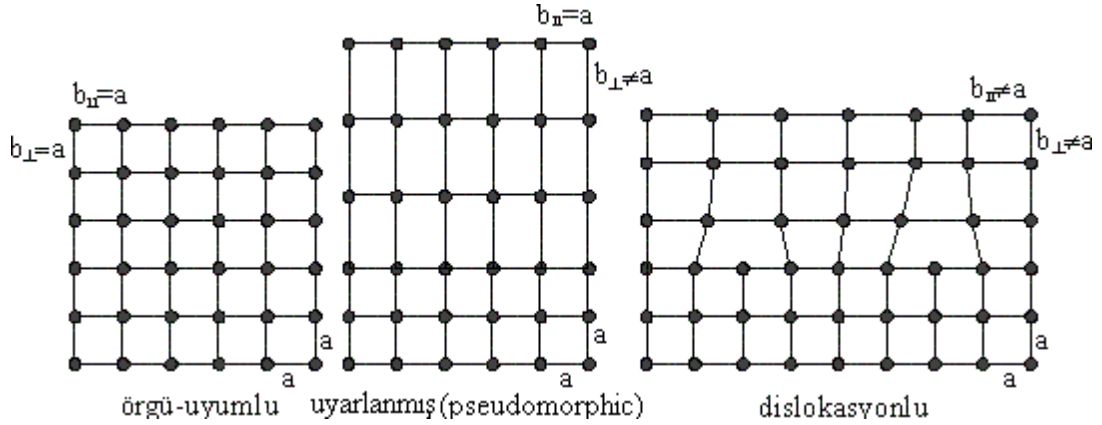
Tablo 2.3’de de bu altaşlardan bazılarının avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 2.3: Nitrat tabanlı üst tabakada yaygın olarak kullanılan altaşların avantaj ve dezavantajları.

| Altaş | Avantajları | Dezavantajları |
|--|--|---|
| Si | -Düşük maliyet -Yaygın olarak bulunur -Si elektroniklerle entegrasyon | -GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu -GaN ile yüksek termal uyumsuzluk -Zayıf termal iletkenlik |
| SiC | -Yüksek termal iletkenlik -GaN ile düşük örgü uyumsuzluğu | -Yüksek maliyet -Yüksek kusur yoğunluğu (mikroborular ve vida türü bozukluk) |
| Al ₂ O ₃ (safir) | -Çok düşük maliyet -Yaygın biçimde bulunuyor -Yüksek sıcaklıkta kararlılık -Kolay temizleme | -Çok zayıf termal iletkenlik -GaN ile yüksek örgü Uyumsuzluğu |

2.3 Epitaksi

Tek kristal alttaş üzerinde kristal büyütme işlemine “epitaksi” denir. Büyütme işlemi; film ve alttaşın aynı türden malzeme olması durumunda homoepitaksi, farklı türden malzeme olması durumunda ise hetero epitaksi olarak adlandırılır. Homo epitaksizde; basamaklı, tabaka-tabaka ve çoklu-tabaka olmak üzere üç büyüme çeşidi vardır. Hetero epitaksizde, film ve alttaş farklı türden malzemeler olduğundan ideal örgü-uyumlu büyümeler çok az görülen bir durumdur. Birçok film ve alttaş malzemenin kristal yapısı farklıdır. Düşük uyumsuzluklar filmde elastik gerilme oluşturabilir. Bu durumda film ara düzlemde alttaşın periyodisine uyar; fakat birim hücre hacmini korumak için dik yönde bozulabilir. Bu, uyarlanmış büyüme olarak isimlendirilir. Daha yüksek uyumsuzluklarda ortaya çıkan gerilme, film/alttaş ara yüzeyinde uyumsuzluk kaynaklı dislokasyon oluşumuyla gevşermiş olur (Şekil 2.3). MBE ve MOCVD, yüksek kristal kaliteye sahip olan heteroyapıların oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan iki kristal büyütme tekniğidir.



Şekil 2.3: Heteroepitaksizde büyüme modları [28].

2.4 GaN, AlN, InN Materyallere Ait Temel Parametreler

Hegzagonal yapıda kristalleşen GaN, AlN, ve InN ‘a ait temel parametreler tablo halinde aşağıda sırasıyla verilmiştir.

2.4.1 GaN Materyali

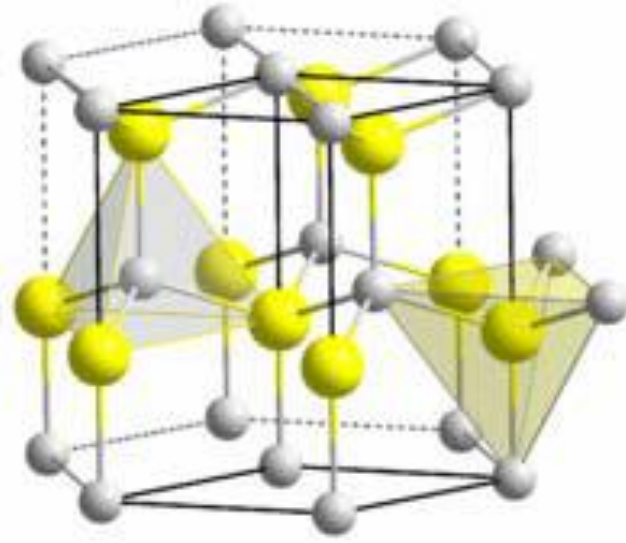
GaN; ikili III/Vdirekt bant aralıklı bir yarıiletkenidir. Şekil 2.4' te görüldüğü gibi bileşimleri hegzagonal kristal yapısına sahip çok sert materyallerdir. Geniş bant aralığına (3.4 eV) sahip GaN, optoelektronik, yüksek güç ve frekans cihazlarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır. GaN ve alüminyum oksit arasındaki örgü sabitlerindeki uyumsuzluklarına rağmen SiC ve Si materyaller üzerine ince film olarak büyütülebilirler [29]. GaN materyali O ve Si ile katkılama işlemi yapılırsa n-tipi [30], Mg ile katkılama işlemi yapılırsa p-tipi olur [31]; bununla beraber, Mg ve Si atomları yer değiştirerek oluşan GaN kristal büyümesi sonucu tensile gerilme oluşur ve yapıyı daha kırılğan hale dönüştürebilir [32]. GaN bileşikleri cm^2 başına 100 milyon kadar çok büyük kusurlara sahiptir [33]. GaN'a ait oda sıcaklığındaki temel parametreler Tablo 2.4' de verilmiştir.

Tablo 2.4:GaN materyaline ait oda sıcaklığındaki temel parametreler [34-38].

| Parametre | GaN |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Kristal yapısı | Hekzagonal |
| Simetri grubu | $P6_3mc(C_{6v}^4)$ |
| Koordinasyon Geometrisi | Tetrahedral |
| Yasak enerji aralığı | 3,5 eV |
| Cm^3 'deki atom sayısı | $8,9 \times 10^{22}$ |
| Debye sıcaklığı | 600K |
| Yoğunluğu | $6,15 \text{g/cm}^3$ |
| Elektron mobilitesi | $\leq 1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ |
| Deşik mobilitesi | $\leq 200 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ |
| Kırılma alanı | $5 \times 10^6 \text{ V/cm}$ |
| Elektron diffüzyon katsayısı | $\leq 25 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| Deşik diffüzyon katsayısı | $\leq 5 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| Elektron ısı hızı | $2,6 \times 10^5 \text{ m/s}$ |
| Deşik ısı hızı | $9,4 \times 10^4 \text{ m/s}$ |
| Statik dielektrik sabiti | 8,9 |
| Yüksek frekans dielektrik sabiti | 5,35 |

Tablo 2.4(devam): GaN materyaline ait oda sıcaklığındaki temel parametreler [34-38].

| | |
|-------------------------------------|--|
| Elektron etkin kütlesi | 0,2m ₀ |
| Deşik etkin kütlesi | 1.25m ₀ |
| Ağır deşik etkin kütlesi | 1,4m ₀ |
| Hafif deşik etkin kütlesi | 0,3m ₀ |
| Elektron ilgisi | 4,1m ₀ |
| Örgü sabiti(a) | 0,3189 |
| Örgü sabiti(c) | 0,519 |
| Optik fonon enerjisi | 91,2 meV |
| a için Isıl iletkenlik katsayısı | 5,59x10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| c için Isıl iletkenlik katsayısı | 3,17x10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| LA-fonon hızı | 6,56x10 ³ ms ⁻¹ |
| Elektron dalga vektörü | 7,3x10 ⁸ m ⁻¹ |
| Elektromanyetik çiftlenim katsayısı | 0,039 |
| LA-elestik sabiti | 2,65x10 ¹¹ Nm ⁻² |
| TA-elestik sabiti | 0,44x10 ¹¹ Nm ⁻² |
| Doğal polarizasyon | -0,29C/m ² |
| e ₃₃ | 0,73 C/m ² |
| e ₃₁ | -0,49 C/m ² |
| Bir atomun hacmi | 3,48487x10 ⁻²⁹ m ³ |
| Elastik sabiti C ₁₁ | 390 GPa |
| Elastik sabiti C ₁₂ | 145 GPa |
| Elastik sabiti C ₁₃ | 106 GPa |
| Elastik sabiti C ₃₃ | 398 GPa |



Şekil 2.4: AlN, GaN ve InN materyallerine ait kristal yapısı.

2.4.2 AlN Materyali

AlN ağır atmosferde ve yüksek sıcaklıklarda kararlıdır. AlN 2800⁰C' de erir. Vakumda ~1800⁰C' de ayrışır. Havada, yüzey oksidasyonu 700⁰C üstünde gerçekleşir ve oda sıcaklığında bile 5-10 nm yüzey oksit tabakaları belirlenebilir. Bu oksit tabaka 1370⁰C' ye kadar materyalleri korur. AlN 980⁰C' ye kadar H ve CO₂ atmosferlerinde kararlıdır [36]. AlN' a ait oda sıcaklığındaki temel parametreler Tablo 2.5' de verildi [35,39-42]. AlN uygulamaları arasında; opto-elektronik, yüksek ısı iletkenlik esaslı çip taşıyıcılar, optik depolamada dielektrik katmanlar, elektronik alttaşlar, askeri uygulamalar, GaAs' ın kristal büyütmesinde pota olarak, çelik ve yarıiletken imalatında kullanılır.

Tablo 2.5: AlN'a ait 300K'de ki temel parametreler[34,35,39,41-43].

| Parametre | AlN |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Kristal Yapısı | Hegzagonal |
| Simetri Grubu | $P6_3mc(C_{6v}^4)$ |
| Koordinasyon Geometrisi | Tetrahedral |
| Yasak Enerji Aralığı | 6,2 eV |
| Cm^{-3} 'deki Atom Sayısı | $9,58 \times 10^{22}$ |
| Debye Sıcaklığı | 1150K |
| Yoğunluğu | $3,23 \text{ gr cm}^{-3}$ |
| Elektron Mobilitesi | $\leq 300 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ |
| Deşik Mobilitesi | $\leq 14 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ |
| Kırılma Alanı | $1,2-1,8 \times 10^6$ |
| Elektron Difüzyon Katsayısı | $\leq 7 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| Deşik Difüzyon Katsayısı | $\leq 0,3 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| Elektron Isıl Hızı | $1,85 \times 10^5 \text{ m/s}$ |
| Deşik Isıl Hızı | $4,1 \times 10^4 \text{ m/s}$ |
| Statik Dielektrik Sabiti | 8,5 |
| Yüksek Frekans Dielektrik Sabiti | 4,77 |
| Elektron Etkin Kütlesi | $0,4 m_0$ |
| Deşik Etkin Kütlesi | $3,53 m_0$ |
| Ağır Deşik Etkin Kütlesi | $10,42 m_0$ |
| Hafif Deşik Etkin Kütlesi | $0,24 m_0$ |
| Elektron İlgisi | 0,6 eV |
| Örgü Sabiti(a) | 0,311 nm |
| Örgü Sabiti(c) | 0,498 nm |
| Optik Fonon Enerjisi | 99,2 meV |
| a İçin Isıl İletkenlik Katsayısı | $4,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| c İçin Isıl İletkenlik Katsayısı | $5,27 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| Doğal Polarizasyon | $-0,081 \text{ C/m}^2$ |
| e_{33} | $1,46 \text{ C/m}^2$ |
| e_{31} | $0,6 \text{ C/m}^2$ |

Tablo 2.5(devam): AlN'a ait 300K'de ki temel parametreler[34, 35, 39, 41-43].

| | |
|-------------------------|---------|
| Elastik Sabiti C_{11} | 410 GPa |
| Elastik Sabiti C_{12} | 149 GPa |
| Elastik Sabiti C_{13} | 99 GPa |
| Elastik Sabiti C_{33} | 398 GPa |

2.4.3 InN Materyali

InN güneş hücrelerinde ve yüksek hızdaki elektroniklerde potansiyel olarak kullanılan küçük bant aralıklı yapılı yarıiletkenlerdir [44]. InN' in bant aralığı sıcaklığa bağımlı olarak ~0,7 eV' dur [45]. Etkin elektron kütlesi 0,04 ve 0,07 m_0 arasındadır. InN materyaline ait parametreler Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6: InN materyaline ait oda sıcaklığındaki temel parametreler [45-46].

| Parametre | InN |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Kristal yapısı | Hekzagonal |
| Simetri grubu | $P6_3mcC_{6v}^4$ |
| Koordinasyon Geometrisi | Tetrahedral |
| Yasak Enerji Aralığı | 0,7 eV |
| Cm^3 'deki Atom Sayısı | $6,4 \times 10^{22}$ |
| Debye Sıcaklığı | 660K |
| Yoğunluğu | $6,81 \text{ gcm}^{-3}$ |
| Elektron Mobilitesi | $\leq 3200 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ |
| Deşik Mobilitesi | - |
| Kırılma Alanı | - |
| Elektron Diffüzyon Katsayısı | $\leq 80 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| Deşik Difüzyon Katsayısı | - |
| Elektron Isıl Hızı(300K) | $3,4 \times 10^5 \text{ m/s}$ |
| Deşik Isıl Hızı(300K) | $9 \times 10^4 \text{ m/s}$ |
| Statik Dielektrik Sabiti | 15 |
| Yüksek Frekans Dielektrik Sabiti | 8,4 |

Tablo 2. 6(devam): InN materyaline ait oda sıcaklığındaki temel parametreler[45-46].

| | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Elektron Etkin Kütlesi | 0,07-0,26 m_0 |
| Deşik Etkin Kütlesi | 0,65 m_0 |
| Ağır Deşik Etkin Kütlesi | 1,63 m_0 |
| Hafif Deşik Etkin Kütlesi | 0,27 m_0 |
| Elektron İlgisi | 5,8 eV |
| Örgü Sabiti(a) | 0,354 nm |
| Örgü Sabiti(c) | 0,57 nm |
| a İçin Isıl İletkenlik Katsayısı | 3,8x10 ⁻⁶ C ⁻¹ |
| Optik Fonon Enerjisi | 73 meV |
| c İçin Isıl İletkenlik Katsayısı | 2,9 x10 ⁻⁶ C ⁻¹ |
| Doğal Polarizasyon | -0,32 C/m ² |
| e_{33} | 0,81-1,09 C/m ² |
| e_{31} | 0,45 C/m ² |
| Elastik Sabiti C_{11} | 190 GPa |
| Elastik Sabiti C_{12} | 104 GPa |
| Elastik Sabiti C_{13} | 121 GPa |
| Elastik Sabiti C_{33} | 182 GPa |

Bu bölüm [47] numaralı kaynakçadan faydalanılarak yazılmıştır.

3. HEMT YAPILARIN ÖZELLİKLERİ VE III-NİTRÜR YAPILARDA KUTUPLANMA

HEMT yapılar karma eklemli alan-etkili transistör (HFET) veya değişen katkılı alan-etkili transistör (MODFET) olarak adlandırılabilir. Mikrodalga güçlü transistörler, günümüzde çok yaygın olarak kullanılan kablosuz iletişimde ve radar teknolojilerinde çok önemli bir yere sahiptirler. GaAs tabanlı HEMT' ler geçmiş 20 yıl içerisinde büyük ilgi görmüştür. Fakat düşük kırılma voltajları ve daha az güç yoğunlukları sebebiyle diğer materyallere doğru araştırmalar başlamıştır. Bunun üzerine, geniş bant aralığı ve var olan elektriksel polarizasyon sebebiyle III-V HEMT'ler yüksek güç ve kırılma voltajlı mikrodalga aygıtlar için tercih edilmektedir.

HEMT yapısı 1979 yılında Mimura tarafından ilk olarak ortaya konulmuş ve ilk makale de 1980 yılında yayımlanmıştır. GaAs tabanlı HEMT' ler oldukça geniş bir şekilde araştırılmış ve oldukça iyi anlaşılan heteroeklemli sistemlerdir [48]. HEMT'in temel yapısı, yüksek enerjili iletim bantlı bariyer tabakası ve düşük enerji iletim bantlı kanal tabakası arasında heteroeklemlerdir. Kanal ve bariyer tabakası arasındaki arayüzeyde iki-boyutlu elektron gazı (2DEG) oluşur. Yüksek güç ve frekansta aygıtlar yapılabilmesi için yüksek yoğunluk ve mobiliteye sahip 2DEG HEMT'leri gerekmektedir.

Son yıllarda, InAlN bariyer tabakalar Kuzmik' in önersinden sonra HEMT performansını geliştirmek için AlGaN'ların yerine geçmiştir [44]. InAlN kullanmanın avantajları örgü veya polarizasyon uyumlu heteroyapılar elde etmek içinve alaşımların oranının ayarlanabilmesidir. In oranı ~%18 olarak ayarlandığı zaman, GaN ve alaşım örgü uyumlu olur. Gerilmelerin serbest olduğu yapılar için polarizasyon yükü tümüyle kendiliğinden polarizasyonla belirlenir. Bu sistemlerin kendiliğinden polarizasyonları çok olduğu için InAlN/GaN HEMT yapılar AlGaN/GaN HEMT yapılardan daha yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahiptirler ve bu yüzden AlGaN/GaN HEMT'lere göre tercih edilirler. Ancak InAlN/GaN yapıların büyütme koşulları oldukça zordur, yüksek sıcaklıklarda büyütülen bu yapılarda In

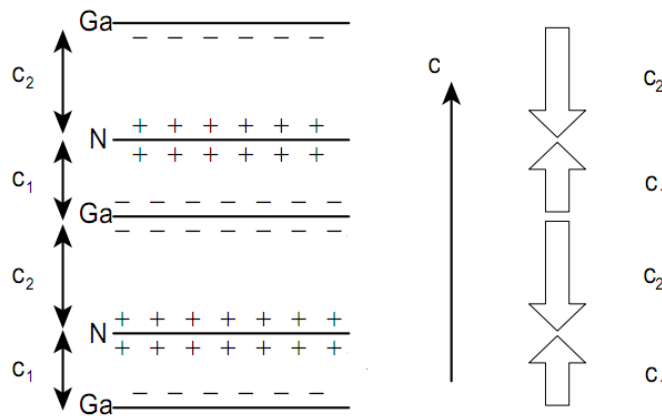
yüksek sıcaklıklarda buharlaştığı için In oranını ayarlamak oldukça zor gerçekleşmektedir.

InN hetero-yapıların büyütülmesi [6],[7] hala olgunlaşmamış safhada olmasına rağmen, GaN tabanlı HEMT yapılar yerine, InN tabanlı HEMT yapılar, III-Nitrür transistörler arasında hızlı bir rekora imza atabilir. Bu tezde de teorik olarak InN kanallı HEMT yapılar üzerine teorik bir çalışma sunulacaktır. InN materyaline ait parametrelere Tablo 2.6 da verilmiştir.

3.1 III-Nitrür Yapılarda Kutuplama

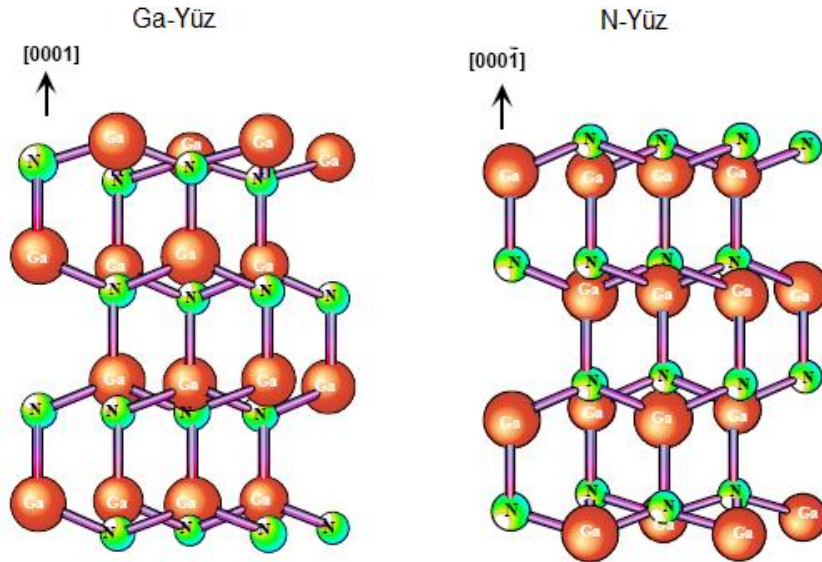
Katılarda atomik seviyede üç çeşit kutuplanma söz konusudur. Birincisi, polar moleküllerin elektrik alan ile kısmi ya da tamamen kutuplanması sonucu oluşan kutuplanma; ikincisi tamamen veya kısmi iyonik kristallerde pozitif ve negatif iyonların elektrik alan altında göreceli hareketleri sonucu oluşan dipolün indüklediği iyonik kutuplanma; üçüncüsü ise tüm dielektrik de mevcut olan elektronik kutuplanmadır [49,50]. III- Nitrür çoklu yapılar, materyallerin sahip olduğu yüksek kutuplanma sebebiyle oldukça önemli fiziksel özelliklere sahiptirler.

Şekil 3.1’ de GaN (InN, AlN) tabakalarının şematik gösterimi ve her birim alandaki dipol moment gösterilmektedir.



Şekil 3.1: GaN (InN, AlN) tabakaların şematik gösterimi ve birim alandaki dipol momentler.

Merkez simetrisi olmayan bileşiklerin kristal yapılarında, belli kristaliografik eksenlere paralel iki zıt doğrultuda olan atomik tabakaların iki farklı düzenlenişini içerirler [51]. Sonuç olarak bu eksenler boyunca kristalografik kutuplanma gözlemlenebilir. Hegzagonal yapıları A-B bileşikleri için atomik tabakaların dizilmesi ya A yüzü olarak adlandırılan $[0001]$ doğrultusu boyunca ABAB....şeklinde ya da B yüzü olarak bilinen $[000\bar{1}]$ doğrultusu boyunca BABA.... şeklinde olup birbirinin tersidir. Merkez simetrisi olmayan ince filmlerin çoklu yapıların büyütülmesi durumunda, materyalin kutuplanması doğrudan hesaplanmasa da deneysel olarak tesbit edilir. Bu durum, GaN epitaksiyel tabakalar için ve $\{0001\}$ taban düzlemine dik olacak şekilde, büyütme doğrultusuna sahip GaN-tabanlı çoklu yapılar için geçerlidir. $\{0001\}$ düzleminde atomlar ikili tabakalar şeklinde düzenlenirler. Bu ikili tabakalar, birbirine yakın duran hegzagonal tabakalardır. Bunlardan ilk olarak katyonlar (Ga atomu) tarafından oluşurken ikinci olarak ise anyonlar (azot atomu) tarafından oluşur. Bu durum kutuplanmaya neden olur. GaN durumunda temel yüzey ya Ga (In, Al) ya da N yüzeyli olmalıdır. Şekil 3.2’de de görüleceği üzere Ga (In, Al) yüzeyli tabiri, $\{0001\}$ ikili tabakanın en üst konumunda $[0001]$ doğrultusunda kutuplanmaya sebep olan Ga atomunun olduğunu ifade eder.



Şekil 3.2: Ga-yüzlü ve N-yüzlü GaN'ın hegzagonal kristal yapısının şematik gösterimi.

3.2 Doğal Kutuplanma ve Piezoelektrik Kutuplanma

Hegzagonal ve düşük simetrideli kristal yapılar iki tür kutuplanmaya sahip olabilirler. Çoklu yapıların kendi özelliklerinden dolayı oluşan doğal kutuplanma (DP) ve kristalde belirli sebeplerle oluşabilecek gerilmeden kaynaklanan piezoelektrik kutuplanmaya (PE) sahip olabilirler. III-V grubu yarıiletkenlerden sadece III-N grubu yarıiletkenler arasında gerilme olmadan da kutuplanmaya sahip olabilirler. Bu olay doğal kutuplanma sayesinde gerçekleşmektedir. Doğal kutuplanmaya sahip olan çoklu yapılarda bu sebepten dolayı bir elektrik alan meydana gelir. Bu elektrik alan III-N grubu yarıiletken kristallerde c-yönündedir [0001].

III-N yarıiletkenlerdeki kutuplanma III-V grubu yarıiletkenlerdeki kutuplanmaya göre bir derece daha büyük kutuplanmaya sahiptirler ve işaretleri terstir. Şekil 3.2’de görülebileceği gibi Ga-yüzlü tüm GaN kristallerinde kutuplanma alttaşa doğru ([0001] doğrultusu) olurken N-yüzlülerde alttaştan zıt yönde ([000 $\bar{1}$] doğrultusunda) yönelmiştir. AlN’ın doğal kutuplanması GaN malzemesinin doğal kutuplanma parametresinden hemen hemen 2,5 kat kadar daha fazladır ve AlN ile GaN arasındaki örgü uyumsuzluğu %2 civarında düşük bir değer olduğu için iki kristalin örgü uyumsuzluğundan doğan piezoelektrik kutuplanmanın etkisi doğal polarizasyona göre oldukça düşüktür.

Dış elektrik alan yokken, AlGa(In)N ve GaN tabakanın toplam makroskopik kutuplanması, \mathbf{P} örgü denge durumunda iken kendiliğinden kutuplanma \mathbf{P}_{KK} ile gerilmenin indüklediği piezoelektrik kutuplanmaların, \mathbf{P}_{PK} toplamına eşittir. Doğal (Kendiliğinden) kutuplanmanın yapısal parametrelere hassas şekilde bağlı olmasından dolayı, GaN ve AlN için doğal kutuplanmada da sayısal farklılıklar mevcut olacaktır. GaN’dan AlN’a doğru giderken kristal yapının ideal olmayana doğru artması, doğal kutuplanmada da bir artışa sebep olacaktır. Bunun sebebi (0001) eksen boyunca katyon ve anyon bağ uzunluklarının farklı olmasıdır. Aşağıda, epitaksiyel filmler ve AlGa(In)N/Ga(In)N çoklu yapıların büyütüldüğü doğrultu olan [0001] eksenini boyunca, kutuplanmalar incelenmiştir.

Hegzagonal kristalin c eksenini boyunca doğal kutuplanma $\mathbf{P}_{KK}=\mathbf{P}_{KKZ}$ iken piezoelektrik kutuplanma, e_{13} ve e_{33} piezoelektrik katsayılar olmak üzere (Tablo 3.1),

$$P_{PE} = e_{33}\varepsilon_z + e_{31}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (3.1)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. $\varepsilon_z = (c - c_0)/c_0$, c eksen boyunca gerilmedir. $\varepsilon_x = \varepsilon_y = (a - a_0)/a_0$ ise düzlemdeki izotropik gerilmeyi verir. Burada a_0 ve c_0 örgü sabitlerinin dengedeki değerleridir. Hegzagonal GaN'ın örgü sabitleri arasındaki ilişki

$$\frac{c - c_0}{c_0} = -2 \frac{C_{13}}{C_{33}} \frac{a - a_0}{a_0} \quad (3.2)$$

ile verilir. Burada C_{13} ve C_{33} elastik sabitlerdir.(Tablo3.2). Denklem (3.1) ve (3.2) yardımıyla c -ekseni boyunca piezoelektrik kutuplanmanın miktar

$$P_{PE} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (3.3)$$

eşitliği ile belirlenebilir. $\text{Al}_x\text{Ga}(\text{In})_{1-x}\text{N}$ bariyerin tüm alaşım kompozisyonları için $[e_{31} - e_{33}(C_{13}/C_{33})] < 0$ olduğu için $\text{AlGa}(\text{In})\text{N}$ bariyer gevşeme zorlanması etkisindeyse piezoelektrik kutuplanma negatif, sıkıştırıcı zorlanma etkisinde ise kutuplanma pozitifdir. Böylece piezoelektrik kutuplanmanın yönü ve büyüklüğü zorlanmanın çeşidine göre (3.3) eşitliği ile bulunurken, yapısal parametrelere bağlı olan doğal kutuplanma ise $\text{Ga}(\text{In})\text{N}$ ve AlN için negatif olarak bulunmuştur [34]. Bunun gösterdiği sonuç Ga-yüzlü çoklu yapılar için kendiliğinden kutuplanmanın Şekil 3.3'de de görüldüğü üzere alt taşa doğru olduğuna işaret eder. Sonuç olarak piezoelektrik ve doğal kutuplanmanın yönleri gevşeme zorlanması durumunda birbirine paralel olup, üst tabakalar sıkıştırıcı zorlanma altında iken birbirlerine zıt yönelim gösterirler. Kutuplanma Ga-yüzlü materyalden N-yüzlü materyale dönerse, doğal kutuplanmanın ve piezoelektrik kutuplanmaların yönleri işaretler değiştirir. Şekil 3.3'de piezoelektrik ve doğal kutuplanmanın doğrultuları, Ga(In)yüzlü, N-yüzlü, gerilme varken ve yokken $\text{AlGa}(\text{In})\text{N}/\text{Ga}(\text{In})\text{N}$ ve $\text{Ga}(\text{In})\text{N}/\text{AlGa}(\text{In})\text{N}$ çoklu yapıları için gösterilmiştir.

Tablo 3.1: GaN, InN ve AlN yarıiletkenlerinin kendiliğinden kutuplanma büyüklükleri piezoelektrik ve dielektrik sabitleri [52].

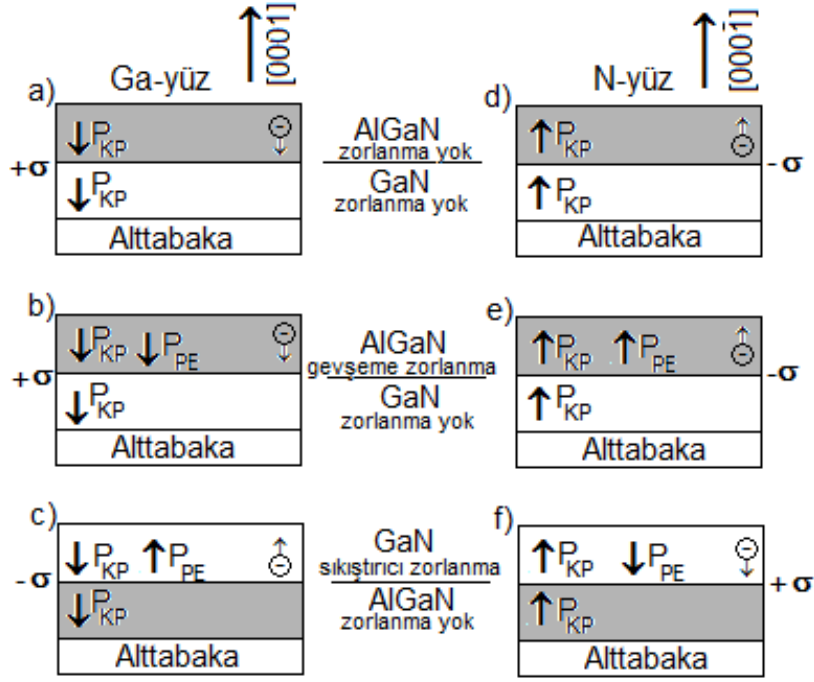
| Wurtzite | AlN | GaN | InN |
|-----------------|--------|--------|--------|
| $e_{33}(C/m^2)$ | 1.46 | 0.73 | 0.97 |
| $e_{31}(C/m^2)$ | -0.60 | -0.49 | -0.57 |
| ϵ_{11} | 9.0 | 9.5 | - |
| ϵ_{33} | 10.7 | 10.4 | 14.6 |
| C_{13} | 108 | 103 | 92 |
| C_{33} | 373 | 405 | 224 |
| $P_{KK}(C/m^2)$ | -0.081 | -0.029 | -0.032 |

Uzayda kutuplanmanın gradyenti ile verilen $\rho_p = \vec{\nabla} \cdot \vec{P}$ olacak şekilde kutuplanmanın indüklediği bir yük yoğunluğu vardır. Benzer şekilde, üst/alt olarak tanımlanabilecek AlGaN(üst)/GaN(alt) veya GaN/AlGaN heteroeklemlili yapıların yüzeyinde kutuplanma, ikili tabakanın içinde azalabilir veya artabilir. Böylece kutuplanmanın indüklediği iki boyutlu tabaka taşıyıcı yoğunluğu;

$$\sigma(P_{KK} + P_{PE}) = P(\text{alt}) - P(\text{üst}) = P_{KK}(\text{alt}) - \{P_{KK}(\text{üst}) + P_{PE}(\text{üst})\} \quad (3.4)$$

denklemleri ile verilir. Alaşım kompozisyonundaki değişimler, gerilmenin dağılımı veya yüzey bozuklukları, tabaka yük yoğunluğunun indüklediği kutuplanmanın lokal dağılımını değiştirecektir. Ancak ara yüzey bölgesi boyunca kutuplanmanın değişimi ile ilişkili olan toplam tabaka yükü ara yüzeyde mevcut olanla yaklaşık olarak aynı olacaktır. Tabaka yük yoğunluğunun indüklediği kutuplanma eğer pozitifse ($+\sigma$), büyütmeden sonraki soğuma aşaması boyunca, serbest elektronlar kutuplanmanın indüklediği yükü dengeleme eğilimi içinde olacaktır. AlGa(In)N/Ga(In)N bant ofset

değerinin yeterince büyük olduğu ve ara yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğu kabulü yapılırsa, bu elektronlar n_s tabaka taşıyıcı yoğunluklu 2BEG oluşumuna sebep olacaktır. Negatif bir tabaka taşıyıcı yük yoğunluğuda ara yüzeyde hollerin birikmesine neden olacaktır. Ga(In)N heteroyapının üzerinde AlGa(In)N yapının bulunduğu Ga-yüzlü durum için kutuplanmanın indüklediği tabaka taşıyıcısı pozitif olup Şekil 3.3a' da gösterilmiştir. Eğer heteroyapı zorlama altında değilse yani AlGa(In)N kalınlığı $\gg 65\text{nm}$ ise AlGa(In)N ve Ga(In)N kutuplanmaları farklı olduğundan elektronlar ara yüzeyde hapsolacaktır. Eğer bu yapı Şekil 3.3.b'de görüldüğü gibi pseudomorfik (uyarlanmış) büyütülmüşse, gevşeme zorlaması altında olan AlGa(In)N bariyerinin piezoelektrik kutuplanması $P(\text{AlGa(In)N}) - P(\text{Ga(In)N})$ kutuplanma farkını artıracaktır. Benzer şekilde tabaka yükü $+\sigma$ ve tabaka taşıyıcı yoğunluğu n_s de artacaktır. Bu durumda 2BEG AlGaN/GaN heteroyapının ara yüzeyinde AlGa(In)N bariyerinin hemen altında oluşacaktır. Kutuplanmanın indüklediği tabaka taşıyıcı yoğunluğu negatif ise bu durumda da Şekil 3.3.c'de görüldüğü gibi ara yüzeyde boşluklar birikecektir. Şekil 3.3.b'deki durum için kendiliğinden kutuplanmanın yönü ile piezoelektrik kutuplanmanın yönü birbirine paralel iken, Şekil 3.3.c'deki durum için de zıt yönde olacaktır. Benzer yorumlar N-yüzlü AlGa(In)N/Ga(In)N heteroyapılar için de geçerlidir (Şekil 3.3.d, Şekil 3.3.e, Şekil 3.3.f).



Şekil 3.3: Kutuplanmadan kaynaklı tabaka yük yoğunluğu ve zorlanma varken ve yokken Ga(In,Al) ve N yüzü AlGa(In)N/Ga(In)N çoklu yapılarında kendiliğinden ve piezoelektrik kutuplanmanın yönelimin gösterimi.

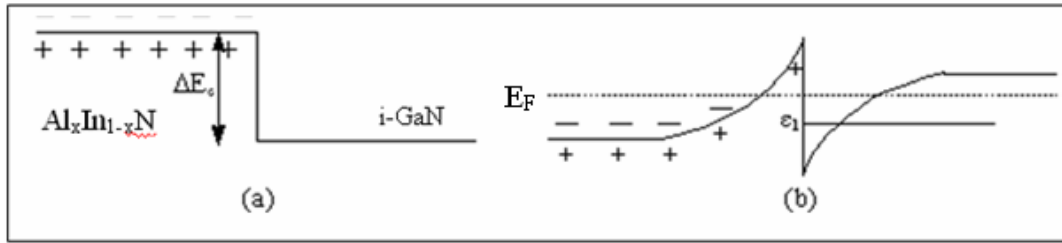
Elektronik cihazların modellenmesi ve optimize edilmesi için, kutuplanmanın indüklediği 2BEG'nin tabaka taşıyıcı yoğunluğunun kontrol edilmesi ve kesin bir tahmini gereklidir. Böylece yukarıdaki bilgiler doğrultusunda Ga-yüzlü AlGa(In)N/GaN ara yüzeyde yüksek oranda pozitif kutuplanmanın indüklediği yük miktarı serbest elektronlar tarafında dengelenmeye çalışılır ve sonuçta 2BEG'na ait tabaka taşıyıcı yoğunluğu, x alaşım oranına, GaN kalınlığına, bariyer kalınlığına, kapak tabaka kalınlığına, AlGa(In)N/GaN ara yüzeydeki iletkenlik bant offset değerine ve Fermi enerjisine bağlı olarak hesaplanır [22]. Kendiliğinden ve piezoelektrik kutuplanmanın ortaya çıkardığı polarizasyon yükleri Nextnano³ simülatörü tarafından en başta hesaplanmaktadır. Gerekli sabitler de simülatörün veri bankasından çekilmektedir.

Bu bölüm [50] numaralı kaynaktan faydalanılarak düzenlenmiştir.

3.3 İki Boyutlu Elektron Gazı (2BEG)

Metallerde ve yarıiletkenlerde elektronlar veya deşikler üç boyutta hareket edebilir. Ancak hareket belirli yönde sınırlandırılması durumunda elektronlar, sadece bir düzlem boyunca hareket edebilir; düzleme dik yönde hareket edemez. Bir yarıiletken malzemenin yüzeyindeki potansiyel metal kapı ile değiştirilerek 2-boyutlu sistem elde edilebilir. Bu şekilde taşıyıcılar üçgene benzer bir potansiyel kuyusunda tuzaklanır ve malzemedeki katkıya, voltaja bağlı olarak üçgen kuantum kuyusunda 2BEG veya 2BHG oluşur. MOSFET, HEMT vb. birçok uygulama 2BEG iletimini esas alır [53].

Nitrit heteroyapılarda polarizasyon 2BEG oluşumunda önemli rol oynar. Şekil 3.4’de $Al_xIn_{1-x}N$ bariyer tabaka ve katkısız GaN tabakadan oluşan $Al_xIn_{1-x}N/GaN$ heteroyapı görülmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi GaN polar bir moleküldür ve kendiliğinden polarizasyona sahiptir. Ayrıca GaN üzerine uyarlanmış (*pseudomorphic*) olarak büyütülen $Al_xIn_{1-x}N$ ise hem doğal hem de piezoelektrik polarizasyona sahiptir [54]. $Al_xGa_{1-x}N$ ve GaN, $Al_xIn_{1-x}N$ ve GaN tabakaları arasındaki polarizasyon farkı, $Al_xGa_{1-x}N$ ve $Al_xIn_{1-x}N$ yüzeyleri üzerindeki negatif yüke uygun olarak ara yüzeyde sabit bir pozitif yük meydana getirir. Pozitif yük ara yüzeyde elektronların birikmesine yani 2BEG oluşumuna yol açar.



Şekil 3.4: $Al_xIn_{1-x}N/GaN$ heteroyapıda elektronlar, (a) yerlerinde iken sistem yüksüzdür. (b) termal enerjileri nedeniyle hareket ederek GaN tarafına geçtiğinde üçgene benzeyen potansiyel bir kuyuda tuzaklanır [55].

4. NEXTNANO³ SİMÜLASYON PROGRAMI

Yüksek performanslı cihazların üretimi ve dizaynında başarılı elektriksel ve optiksel optimizasyonları elde etmek için, daha hızlı ve doğru simülasyon analizleri gerekmektedir. Teknolojinin hızla gelişmesinde dolayı bilgisayarın iç ve dış donanımının fiyatlarındaki hızlıca düşüş, bilgisayarın çalışma gücünün ve performansının her geçen gün gittikçe artmasından dolayı bilgisayar destekli fizik, yarıiletken cihazların optimizasyonu için daha uygun ve pratik bir araç olmaya başlamıştır. Cihaz tasarımını mümkün kılarak cihazın performansını artırmaya yönelik büyütme parametrelerini hızlı ve doğru bir şekilde optimize eden Nextnano³ simülasyon programı III-Nitrür bileşik hetero yapılar için uygun bir yazılımdır [23]. Bu tez çalışmasındaIn kanallı tekli kuantum kuyulu yapılar modellenerek, iletim parametrelerini en iyi verecek olan bazı büyütme parametrelerin optimizasyonu Nextnano³ simülasyon programı kullanılarak araştırılmıştır.

Nextnano³ yazılım programı Ge, Si, SiGe gibi IV. grup materyalleri, çinko sülfür ve hegzagonal kristal yapısına sahip tüm III-V ve II-VI grup materyalleri ve bunların 3'lü bileşiklerinin bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) çoklu kuantum cihazların optiksel ve elektriksel özelliklerini inceleyen simülasyon programıdır. Simülasyon, homojen gerilim altında simülasyonun yapılacağı bölge üzerindeki piezoelektrik kutuplanmanın doğurduğu piezoelektrik yükleri ve de yapının iyonik olmasının ortaya çıkardığı doğal (spontaneous-pyroelektrik) polarizasyon yüklerini de hesaplar. Kuyu içindeki yüklerin neredeyse önemli bir kısmı piezoelektrik yüklerden kaynaklanır. Piezoelektrik ve pyroelektrik yükler Poisson denkleminin hesaplanması için kullanılır. Simülasyon son adımda da Schrödinger ve Poisson denklemlerini kendi içinde tutarlı çözümleri ile dalga fonksiyonu, enerji özdeğerlerini ve taşıyıcı yoğunluğu gibi istenilen sonuçları bize verir. Simülasyon 1 boyutlu ve 1 bant çözümleri için çalıştırılmıştır. Simülatör III-V materyal parametrelerini veri bankasından çekmektedir.

Poisson eşitliği;

$$-div(\epsilon(\vec{r})grad\Phi(\vec{r}))=\rho(\vec{r}) \quad (4.1)$$

denklemi ile verilir. Burada ϵ , dielektrik sabitini, Φ , elektrik potansiyeli ve de ρ , elektronların, boşlukların, iyonize verici ve alıcıların ve de piezoelektrik ve pyroelektrik yüklerin tümünü içeren elektrik yük yoğunluğunu ifade eder. Bir $V(x)$ potansiyeli altında bir parçacığın 1-boyutlu Schrödinger denklemi,

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x) \Psi(x, t) \quad (4.2)$$

eşitliği ile verilir.

Dirichlet veya Neumann sınır şartları kullanılarak potansiyel belirlenir bu da Poisson denkleminin çözümü için tektir ve sabittir.

$$\Phi(z)|_{SINIR} = sabit \quad (4.3)$$

Neumann sınır şartları ile Poisson denkleminin çözümü,

$$\frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \Big|_{SINIR} = sabit \quad (4.4)$$

dir. Bu sınır şartları Schrödinger denklemi için de geçerlidir. Schrödinger denklemi, programın input dosyasında bizim seçtiğimiz sınır şartlarına göre çözülür ve normalize edilir. Bu da o enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edildiğini gösterir.

Bu işlemler yapılırken diğer temel yarıiletken denklemler olan elektron ve boşluklar için akımın sürekliliği denklemi;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n - q \cdot \frac{\partial n}{\partial t} = q \cdot R \quad (4.5)$$

Elektron ve boşluklar için akım yoğunluğu denklemleri;

$$\vec{J}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}_n + q \cdot D_n \cdot \vec{\nabla} n \quad (4.6)$$

$$\vec{J}_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E}_p - q \cdot D_p \cdot \vec{\nabla} p \quad (4.7)$$

çözülür. Böylece Schrödinger ve Poisson denklemleri yük nötralitesini sağlamak için sabit bir Fermi seviyeli termodinamik denge durumu için uygun sınır şartlarında kendi içlerinde tutarlı olarak çözülerek cihaz için uygun durum yoğunluklarını ve yük taşıyıcı yoğunluklarını hesaplar.

Nextnano³ simülasyon programı ile;

- Piezoelektrik ve pyroelektrik yükleri
- İletim ve valans bantlarına ait enerji bant profilleri
- Gerilme (strain)
- Akım
- Dalga fonksiyonları ve özdeğerleri
- Elektron ve boşluk (deşik) yoğunlukları

çıktıları elde edilir. Bu çıktılar elde etmek için incelenecek yapının input dosyası hazırlanır ve program çalıştırılır. Elde edilen sonuçlar çizim programı yardımıyla grafiğe dökülür. Tablo 4.1’de input dosya girdileri verilmiştir.

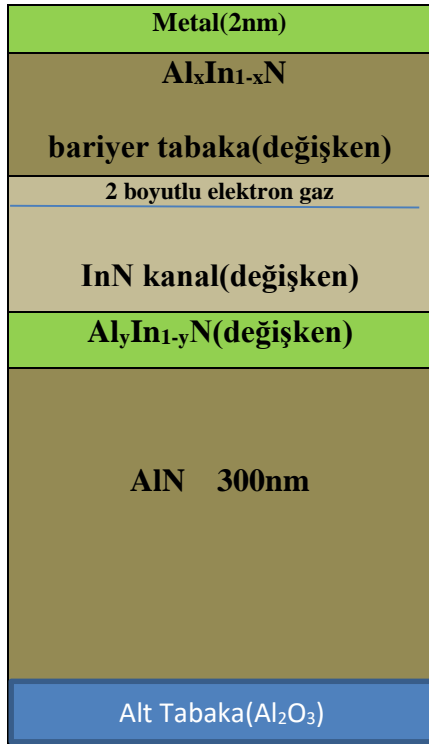
Tablo 4.1: Input dosyası girdileri.

| | |
|-----------------------------|--|
| Sıcaklık | 300K |
| Simülasyon boyutu | 1 |
| Simülasyon yönü | 001 |
| Gerilme hesabı | Homojen gerilme |
| Büyütme koordinatı | 001 |
| Psödomorfik büyütme | AIN-üzerine |
| Çıkış bant yapısı | İletkenlik ve değerlik bandı |
| Çıkış taşıyıcı yoğunlukları | Elektron ve boşluk yük yoğunluğu, piezoelektrik ve pyroelektrik yük ve yüzey yük yoğunluğu |
| Katkı | p-tipi veya n-tipi (varsa) |
| Potansiyel | Varsa |

Bu bölüm [56] numaralı kaynaktan faydalanılarak düzenlenmiştir.

Bu tezde InAlN/InN/InAlN ile InAlN/GaN/InN/InAlN tekli kuantum kuyulu yapılara ait cihaz tasarımı yapılmış ve farklı değişkenler altında yapıların çıktıları elde edilerek yorumlar yapılmıştır.

Tasarımı yapılan yapılar aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1: $In_{1-x}Al_xN/InN/In_{1-y}Al_yN$ yapısının geometrisi



Şekil 4.2: $In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN$ yapısının geometrisi.

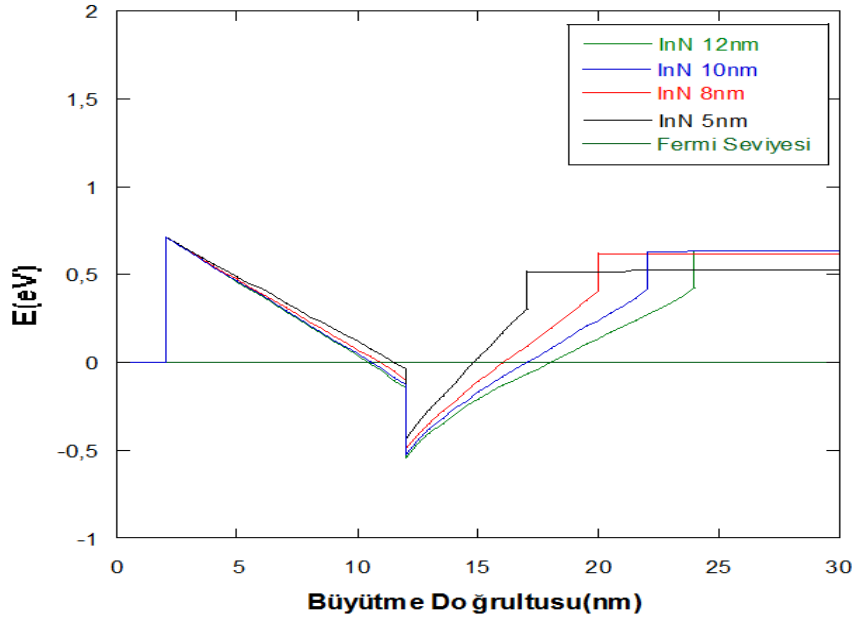
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' de büyütülecek ve optimizasyonu yapılacak her bir yapının tabaka sıralaması gösterilmiştir. Tabakaların tümü AlN üzerine psödomorfik (uyarlanmış) olarak büyütülecek şekilde tasarlanmıştır. Dengede polarizasyon yüklerinin oluşturduğu üçgen kuantum kuyusu olarak da bilinen iki boyutlu elektron gazı (2BEG) her iki durum için de Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Bu yapılar için, InN kuyu ve GaN aratabaka kalınlıklarının, bariyer tabakadaki Al mol yüzdesinin, InAlN bariyer katkılanmasının, iletim enerji bant yapılarına, olasılık ve elektron yoğunluklarına etkisi bir sonraki bölümde araştırılmıştır.

5. $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ YAPISINDA InN KANAL KALINLIĞININ ETKİSİ

İlk dört bölümde nitrürlerin temel özellikleri, InN kanallı HEMT'lerin materyal özellikleri, kutuplanma ve Nextnano³ simülasyon programının çalışması hakkında temel bilgiler verilmiştir. Bu bölümde de tezin ana konusu doğrultusunda yapı tasarımları yapılarak $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ yapısında ilk olarak InN kalınlığının enerji bant profili, dalga fonksiyonu ve taşıyıcı yoğunluğu üzerine etkisi araştırılmıştır.

Şekil 5.1'de $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ yapısının farklı InN kalınlıklarına göre iletkenlik bandına ait enerji bant profilleri görülmektedir. Bu değişim eğrileri elde edilirken simülatörün input dosyasında $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ bariyerdeki Al yüzde mol kesri 0.17, $\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ tampon tabakadaki Al yüzde mol kesride 0.1 alınmıştır. Bariyer kalınlığı 10nm, tampon tabaka kalınlığı ise 300 nm dir.

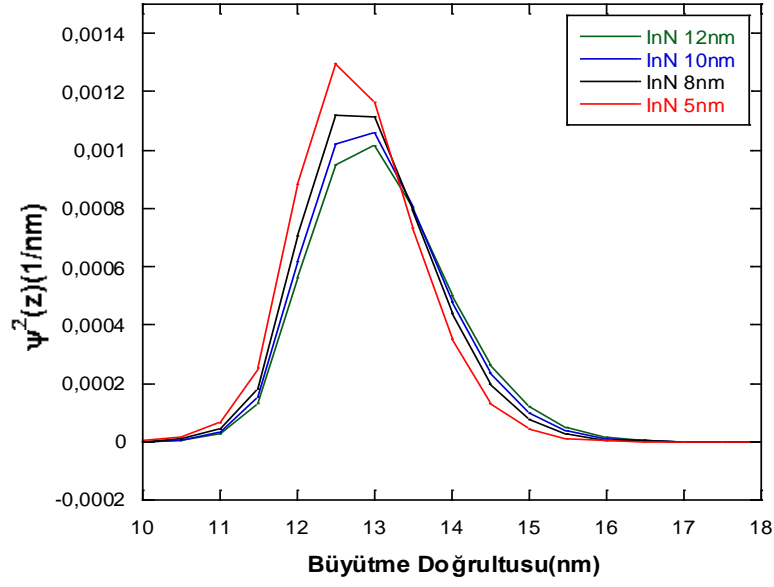


Şekil 5.1: Farklı InN kalınlıklarına göre enerji bant profiline uzaysal değişimi.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, bariyer ile InN ara yüzeyinde 2BEG meydana gelmektedir. GaN ara tabaka yokken serbest elektronlar InAlN bariyerine daha yakın lokalize olmuştur ve iletim bant minimumu, E_c , InAlN bariyerdeki Fermi enerjisini E_F ’yi kesmektedir. Bu durum elektron mobilitelerini azaltabilir ve bariyer içine paralel iletim oluşturabilir. Bant diyagramının en uygun yapısı GaN ara tabakanın konulmasıyla ara yüzeyde oluşacak piezoelektrik katkı ile açıklanabilir. Bu durumda InAlN/GaN heteroeklemdaki negatif polarizasyon yükü InAlN bariyer bant diyagramını yukarı doğru bükür. Bu nedenle bariyere taşıyıcıların geçmesini engellemek için ince bir GaN ara tabakaya ihtiyaç vardır.

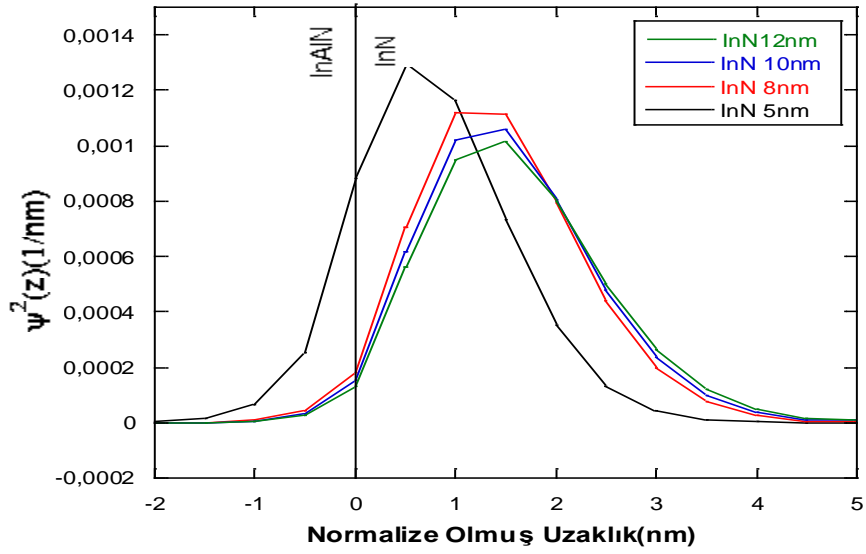
GaN ara tabaka konularak yüksek potansiyelli bariyerler elde edilebilir. Böylece GaN’ın varlığında elektronların kuyu içinde hapsolmesi kaçınılmazdır. Bu tabaka aynı zamanda elektronların bariyerdeki mevcut alaşım düzensizlik saçılmasını perdeleyeceğinden mobilitiyi de artırabilir. Benzer bir durum AlInN/AlN/GaN HEMT yapılarında AlN ara tabakanın mobilitiyi artırdığına yönelik çalışmalarla da ispatlanmıştır [56]. GaN ara tabakalı $In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN$ yapılar aşağıda verilmiştir.

Şekil 5.1’den InN kalınlığı arttıkça kuantum kuyu derinliğinin arttığı söylenebilir. Ancak kuantum kuyu genişliği ise FWHM’dan tam doğru olarak bulunabilir.



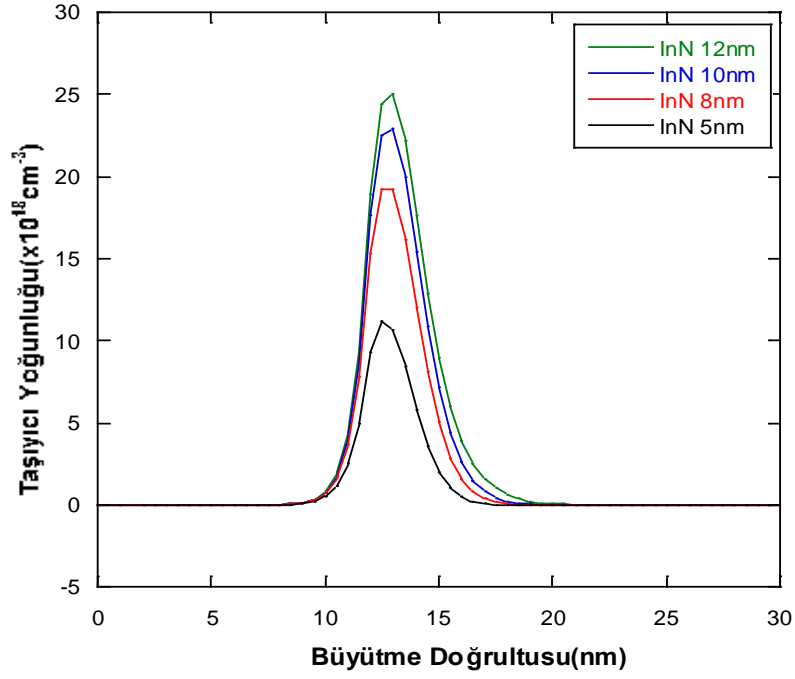
Şekil 5.2: Farklı InN kalınlığına göre olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi.

Şekil 5.2’de farklı InN kalınlıklarına göre elektronların kuyu içinde bulunma olasılıklarının büyütme doğrultusuna göre değişimi verilmiştir. Kalınlık arttıkça toplam olasılık yoğunluğu azalmaktadır. Bu durumda elektronların sağ taraftaki In_{1-y}Al_yN tampon tabakadaki alaşım saçılması tarafından saçıldığı ve mobilitelerinin azaldığı söylenebilir. O nedenle de yapılar büyütülürken kuyu için optimum bir kalınlık seçilmelidir.



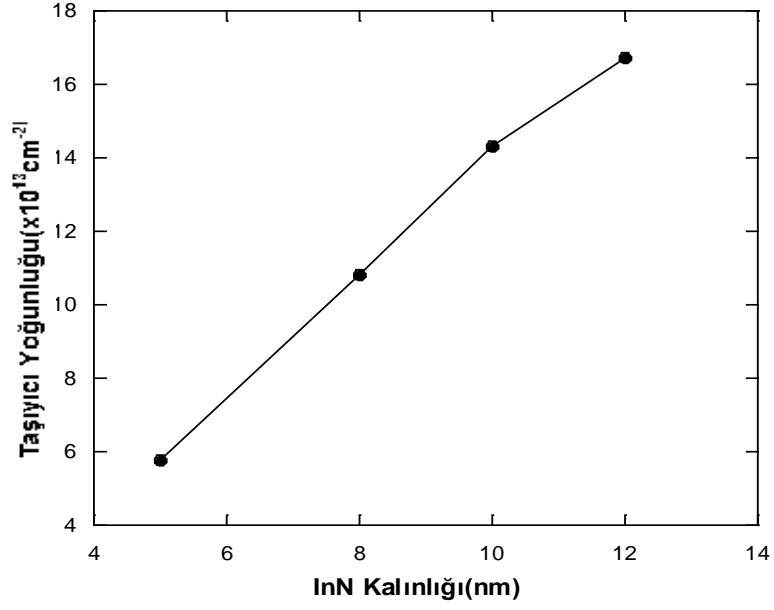
Şekil 5.3: Farklı InN kalınlığına göre olasılık yoğunluğunun normalize olmuş uzaklığa göre değişimi.

Şekil 5.3’de elektronların olasılık yoğunluklarının farklı InN kalınlıklarında normalize olmuş uzaklığa göre değişimi çizilmiştir. Normalizasyon yapılmasının sebebi elektronların bariyer içine ne kadar girdiklerini kıyaslayabilmek içindir. Şekilden de görüleceği üzere InN kalınlığı 5nm iken elektronların bariyerin içine daha çok sızdığı ve bu durumda da bariyerdeki alaşım saçılmasına uğrayacağını yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Kalınlık arttıkça elektronların daha çok ara yüzeye yaklaştığını sızan elektron sayısının azaldığını dolayısı ile alaşım saçılmasının daha az olduğunu elektronların kuyu içinde bulunma olasılığının arttığını söylemek mümkündür. Bu da elektronların kuyu içinde daha iyi hapsedildiğini göstereceğinden 2BEG’daki taşıyıcı yoğunluğunu artıracakını desteklemektedir.



Şekil 5.4: Farklı InN kalınlığına göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal dağılımı.

Şekil 5.4’ de görüldüğü gibi InN kalınlığı arttıkça 3 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu da artmaktadır. 3 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu ile kuyu genişliğinden yararlanarak bulunan 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu da Şekil 5.5’ de çizilmiştir. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi InN kalınlığı arttıkça 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu da artmaktadır. Kuyu genişliği, 3 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu ve 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun sayısal değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu tablodaki kuyu genişlikleri Şekil 5.2’deki her bir InN kalınlığına karşılık gelen olasılık yoğunluğu eğrilerinin FWHM’ları (Full-Width Half Maximum) hesaplanır. Sonra Şekil 5.4’deki toplam 3 boyutlu taşıyıcı yoğunlukları bulunur. Bu taşıyıcı yoğunlukları ile üçgen kuantum kuyusunun genişliği ile çarpılarak 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu elde edilir.



Şekil 5.5: 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun farklı InN kalınlığına göre değişimi.

Özet olarak Tablo 5.1’de, GaN yokken, kuyu genişliğinin, 3-boyutlu ve 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun InN kalınlığına göre değişimi verilmiştir

Tablo 5.1: InN kalınlığı ile değişen parametreler.

| InN Kalınlığı (nm) | Kuyu Genişliği (cm) | $n_{3B}(\text{cm}^{-3})$ | $n_{2B}(\text{cm}^{-2})$ |
|--------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 5 | 1.88×10^{-7} | 0.71×10^{20} | 1.34×10^{13} |
| 8 | 1.81×10^{-7} | 1.30×10^{20} | 2.36×10^{13} |
| 10 | 2.11×10^{-7} | 1.60×10^{20} | 3.38×10^{13} |
| 12 | 2.09×10^{-7} | 1.82×10^{20} | 3.82×10^{13} |

6. $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{GaN}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ YAPISINDA ARA TABAKA KALINLIĞININ, BARIYER TABAKADAKİ Al MOL KESRİNİN VE BARIYERDEKİ KATKILAMANIN ETKİSİ

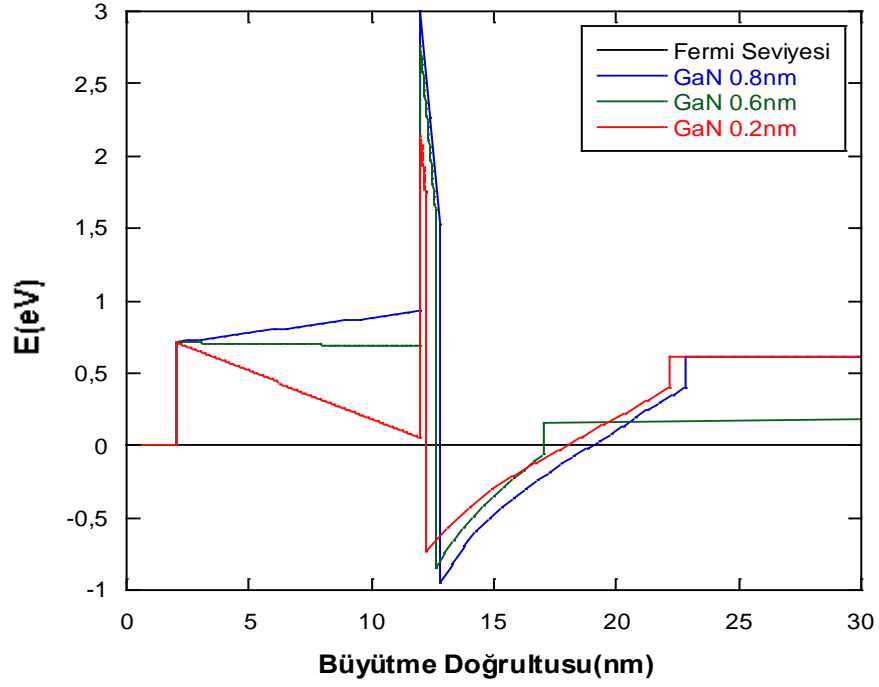
Son yıllarda, HEMT yapıların performansını iyileştirmek için AlGaN bariyeri yerine AlInN bariyer tabakası kullanılmaktadır. AlInN bariyer tabakası kullanılmasının avantajı, örgü uyumlu veya kutuplanma uyumlu çoklu yapı elde etmek için alaşım oranının ayarlanabilir olmasıdır [57]. InN'in etkin kütlelerinin düşük olmasından ve de kararlı durum sürüklenme hızının diğer III-nitrür yapılara oranla büyük olmasından dolayı, III-Nitrür yüksek elektron mobiliteli transistörlerin ultra yüksek frekanslı aralıklardaki uygulamaları için GaN kanal yerine InN kanal tercih edilmiştir [20]. Ara tabaka olarak da GaN seçilerek elektronların AlInN bariyer içine sızması engellenerek hem taşıyıcı yoğunluğunun hem de mobilitenin artmasının sağlanması düşünülmüştür.

Bu sebepler doğrultusunda tasarlanan $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{GaN}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ yapısında HEMT yapıların performansını arttırmak için Nextnano³ simülasyon programını kullanarak, ara tabakanın, mol kesrinin ve katkılamanın etkisi bu bölümde araştırılacaktır.

6.1 GaN Ara Tabaka Kalınlığının Etkisi

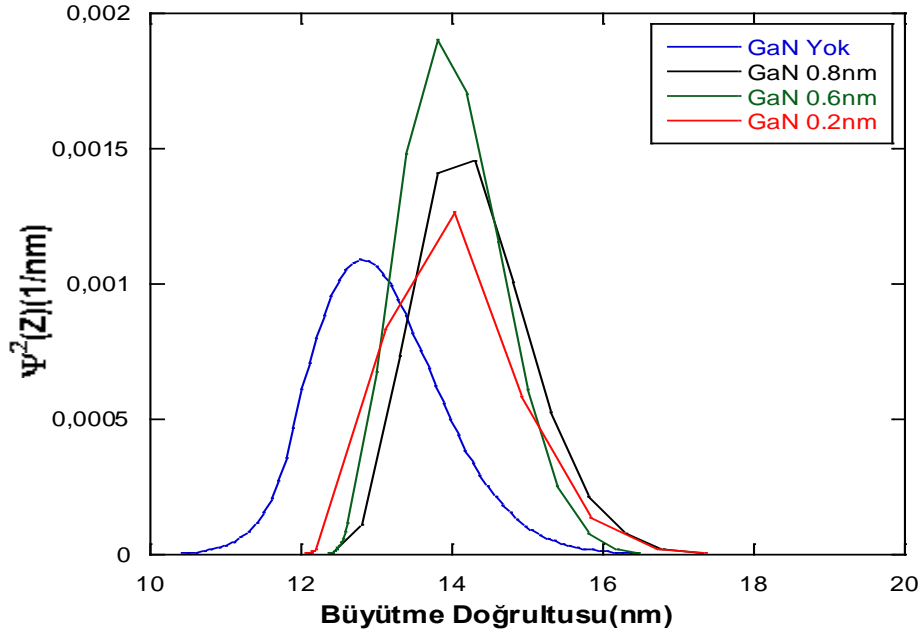
Bu yapıda bariyerdeki x alaşım oranı 0.17 alınırken, tampon tabakadaki y alaşım oranı 0.1 alınmıştır. Bariyer kalınlığı 10nm ve InN kalınlığı da 10nm olarak alınmıştır.

Şekil 6.1'de $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{GaN}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ HEMT yapısının farklı GaN ara tabaka kalınlığına göre iletim bandına ait enerji band profilindeki değişimler gösterilmiştir.



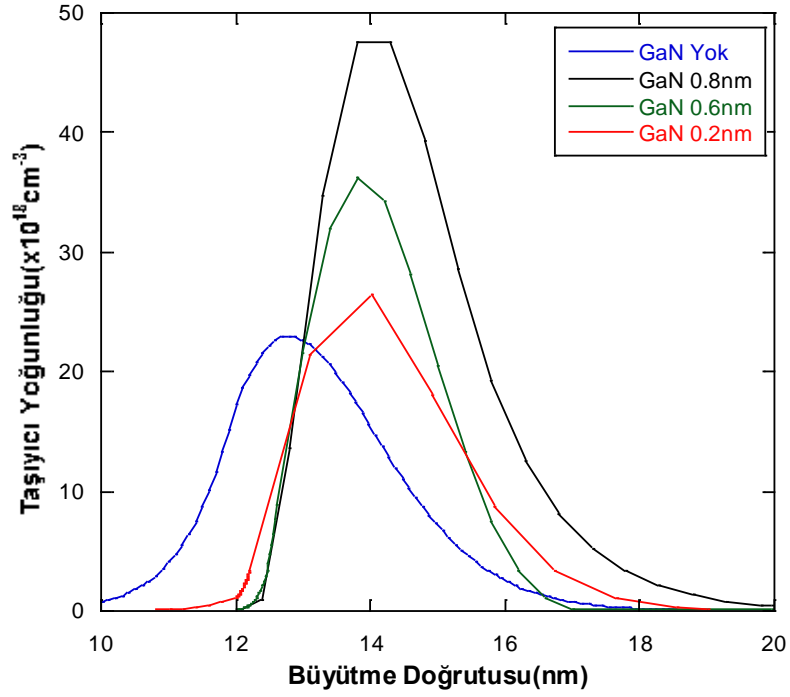
Şekil 6.1:Farklı GaN kalınlığına göre enerji band profilinin uzaysal değişimi.

Şekil 6.1'den GaN ara tabaka kalınlığı arttıkça GaN ara tabakanın eklenmesiyle ara yüzeydeki gerilmenin ortaya çıkardığı negatif piezoelektrik polarizasyon yükleri bariyeri yukarı bükmüş ve bariyer yüksekliğini artırmıştır. Bu durum da elektronların kuyu içinde bulunma olasılıkları artırmaktadır. Çünkü bariyer yüksekliği arttığında, elektronların bariyere geçme olasılığı azalmakta ve kuyu içine daha iyi hapsolmektedir.



Şekil 6.2:Farklı GaN ara tabaka kalınlığına göre olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi.

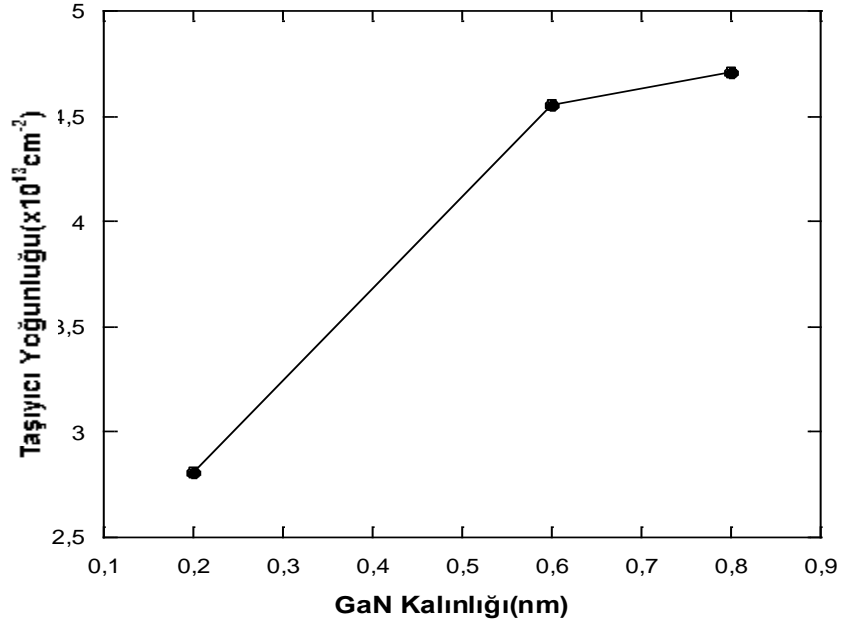
Şekil 6.2’de farklı GaN kalınlıklarına bağlı olarak elektronların olasılık yoğunluğunun uzaysal dağılımı görülmektedir. Bu değişim eğrisinden GaN kalınlığı arttıkça elektronların kuyu içinde bulunma olasılığının da arttığı söylenebilir.



Şekil 6.3: Farklı GaN ara tabaka kalınlığına göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal değişimi.

Şekil 6.3’de farklı GaN kalınlıklarına göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun değişim eğrisi görülmektedir.

Şekil 6.4’de ise Tablo 6.1 yardımıyla hesaplanan 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu görülmektedir. Taşıyıcı yoğunluğunun tabaka kalınlığı arttıkça arttığı görülmektedir.



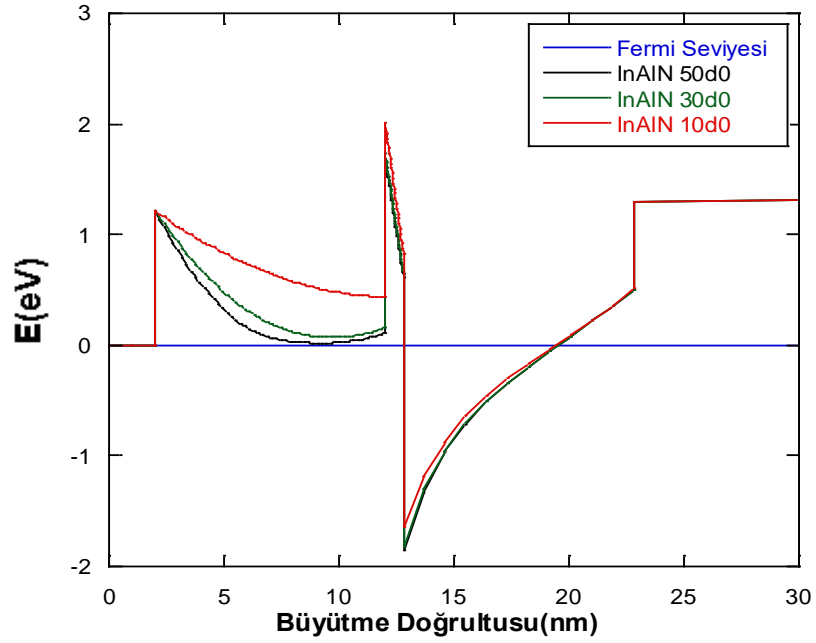
Şekil 6.4: 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun GaN ara tabaka kalınlığına göre değişimi

Tablo 6.1: GaN ara tabaka kalınlığı ile değişen parametreler

| GaN Kalınlığı (nm) | Kuyu Geniştirliği (cm) | $n_{3B}(\text{cm}^{-3})$ | $n_{2B}(\text{cm}^{-2})$ |
|--------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.2 | 2.00×10^{-7} | 1.40×10^{20} | 2.81×10^{13} |
| 0.6 | 1.72×10^{-7} | 2.65×10^{20} | 4.55×10^{13} |
| 0.8 | 1.69×10^{-7} | 2.79×10^{20} | 4.71×10^{13} |

6.2 Bariyer Tabakanın Katkılanmasının Etkisi

Bu bölümde InAlN bariyerinin katkılanmasıyla 2BEG'daki elektron yoğunluğuna etkisini araştıracağız. d_0 , 10^{18} 'i temsil etmektedir. Hesaplamalarda InN kalınlığı 10nm, GaN kalınlığı 0.8nm, InAlN bariyeri 10nm, bariyerdeki Al mol yüzdesi 0.33, tampon kalınlığı 300nm ve tampon tabakadaki Al mol yüzdesi 0.3 olarak alınmıştır.



Şekil 6.5: Farklı katkılama oranına göre enerji band profilininuzaysal değişimi.

Şekil 6.5’de InAlN bariyerinin katkılanmasıyla oluşan enerji band profilleri görülmektedir. Kanal/bariyer arayüzündeki elektrik alanın diverjansı 2BEG’da taşıyıcıların birikmesini sağlar Grafikteki bükülmeler katkılamanın olduğunu göstermektedir. Bu belirgin bükülmeler elektronların kanal içinde daha iyi hapsolmalarını sağlamaktadır.

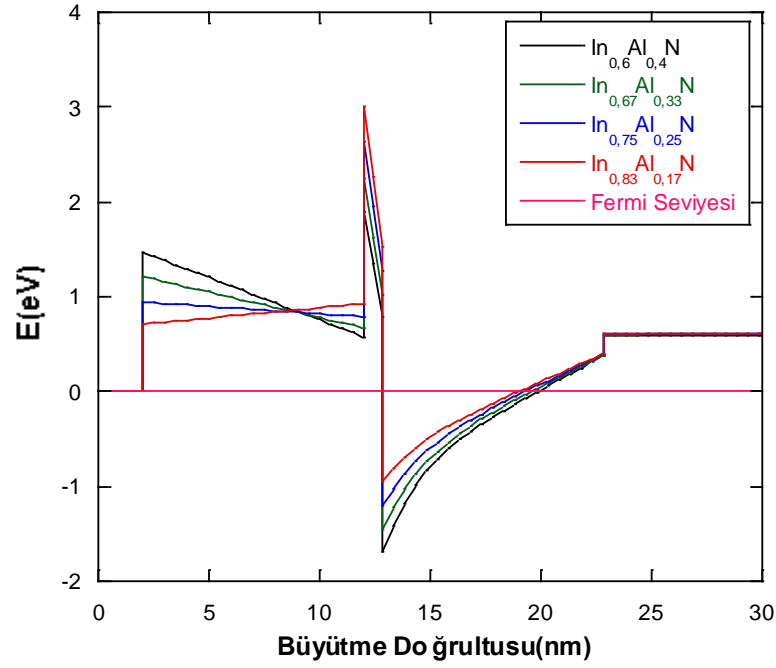
Tablo 6.2: Katkılama ile değişen parametreler

| Katkılama (cm^{-3}) ($d_0=10^{18}$) | Kuyu Genişliği (cm) | $n_{3B}(\text{cm}^{-3})$ | $n_{2B}(\text{cm}^{-2})$ |
|---|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 10d0 | 1.44×10^{-7} | 5.10×10^{20} | 7.34×10^{13} |
| 30d0 | 1.32×10^{-7} | 6.43×10^{20} | 8.48×10^{13} |
| 50d0 | 1.22×10^{-7} | 6.67×10^{20} | 8.13×10^{13} |

Tablo 6.6’da bariyerin katkılanması ile iletim bant ve kuyu derinliğindeki artıştan dolayı 2BEG’ndaki taşıyıcı konsantrasyonun arttığını söyleyebiliriz.

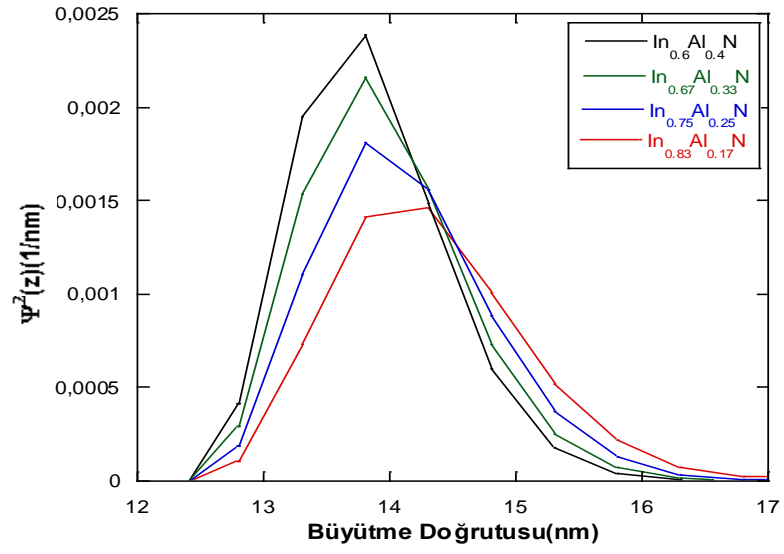
6.3 Bariyer Tabakadaki Al-Mol Kesrinin Etkisi

2BEG'ndakielektron yoğunluğunu arttırmanın yollarından biri de bariyer tabakadaki Al-mol kesrini arttırmaktır. Hesaplamalarda tampon tabakada ki Al-mol yüzdesini 0.1, InN kalınlığını 10nm ve GaN kalınlığını 0.8nm, bariyer kalınlığını 10nm,tampon tabaka kalınlığını ise 300nm aldık. Bariyer tabakada herhangi bir katkılama yoktur.



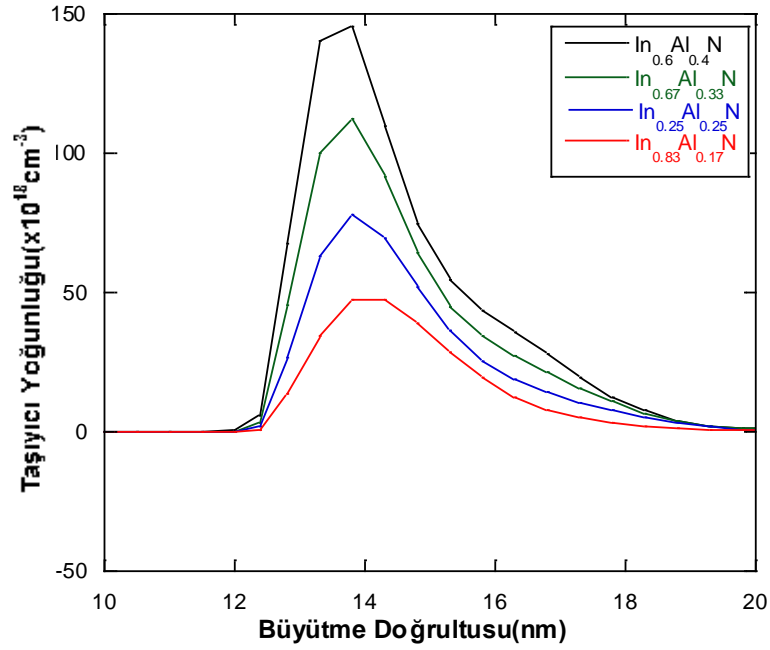
Şekil 6.6: Farklı Al-mol kesirlerine göre enerji band profilinin uzaysal değişimi.

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi, Al mol kesri arttıkça kuantum kuyu derinliğide artmaktadır. Bariyerdeki bant bükülmeleri de gerilmelerin ortaya çıkardığı piezoelektrik polarizasyon yüklerinden dolayı değişmektedir.



Şekil 6.7: Farklı Al-mol kesrine göre olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi.

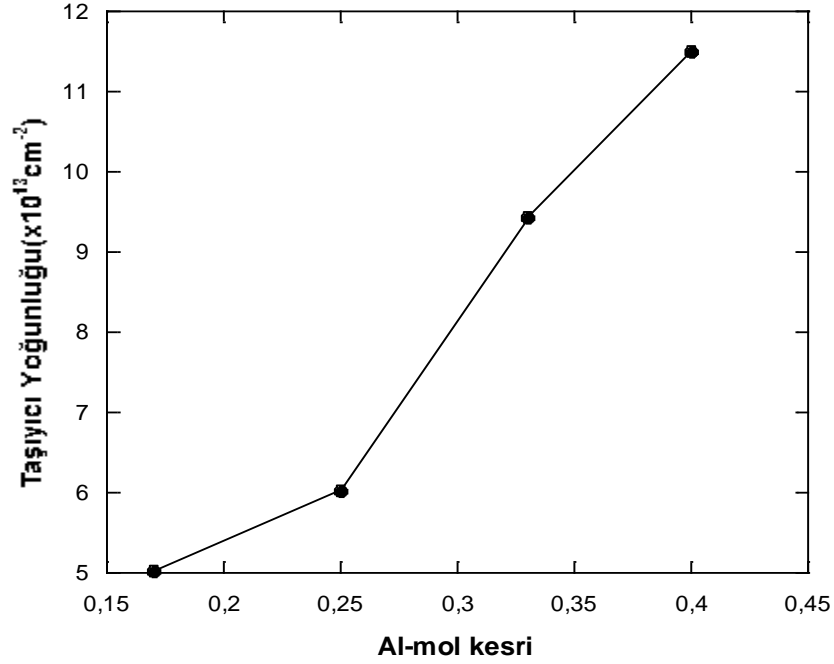
Şekil 6.7’de görüldüğü gibi Al-mol oranı arttıkça elektronların kuyu içinde bulunma olasılıkları da artmaktadır.



Şekil 6.8: Farklı Al-mol kesirlerine göre 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun uzaysal değişimi.

Şekil 6.8’ de her bir kuyu içindeki 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun büyütme doğrultusuna göre değişimi verilmiştir. Bu grafikten, Al mol kesri arttıkça beklenildiği gibi taşıyıcı yoğunluğu da artmaktadır.

Şekil 6.9’da ise 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun Al mol kesrine göre değişimi elde edilmiştir. Şekil 6.9’da görüldüğü gibi Al mol kesri arttıkça 2 boyutlu taşıyıcı yoğunluğuda artmaktadır.



Şekil 6.9: 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun Al mol kesrine göre değişimi.

Al-mol kesrinin değişimine bağlı olarak değişen kuyu genişliği, 3-boyutlu ve 2-boyutlu taşıyıcı yoğunlukları Tablo6.3’de verilmiştir.

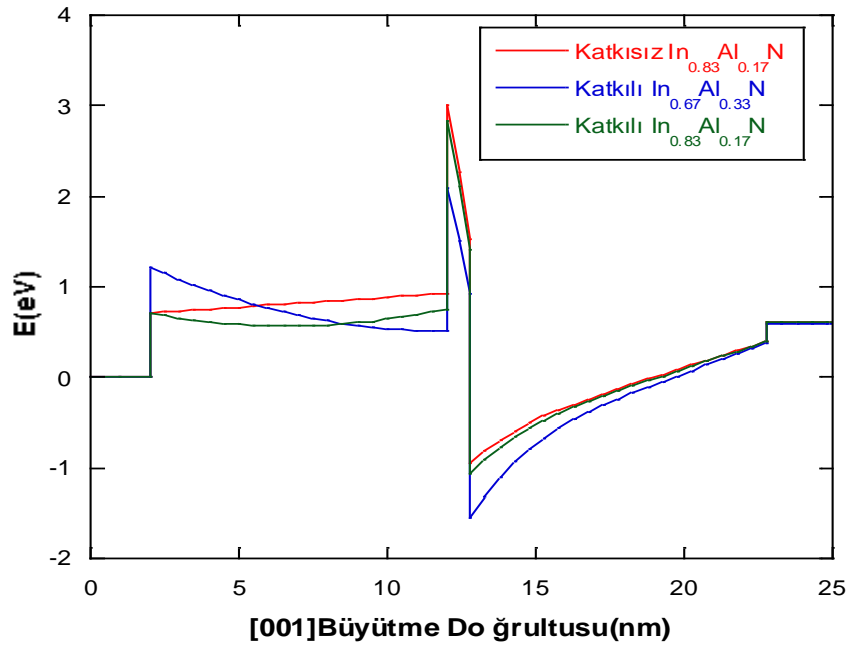
Tablo 6.3: Al-mol kesri ile değişen parametreler.

| Al mol kesri | Kuyu Genişliği (cm) | $n_{3B}(\text{cm}^{-3})$ | $n_{2B}(\text{cm}^{-2})$ |
|--------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0,17 | $1,80 \times 10^{-7}$ | $2,79 \times 10^{20}$ | $5,022 \times 10^{13}$ |
| 0,25 | $1,36 \times 10^{-7}$ | $4,43 \times 10^{20}$ | $6,02 \times 10^{13}$ |
| 0,33 | $1,49 \times 10^{-7}$ | $6,33 \times 10^{20}$ | $9,43 \times 10^{13}$ |
| 0,4 | $1,40 \times 10^{-7}$ | $8,21 \times 10^{20}$ | $11,49 \times 10^{13}$ |

Bariyerdeki Al-mol kesrinin artmasıyla 2-boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun da arttığı görülmektedir.

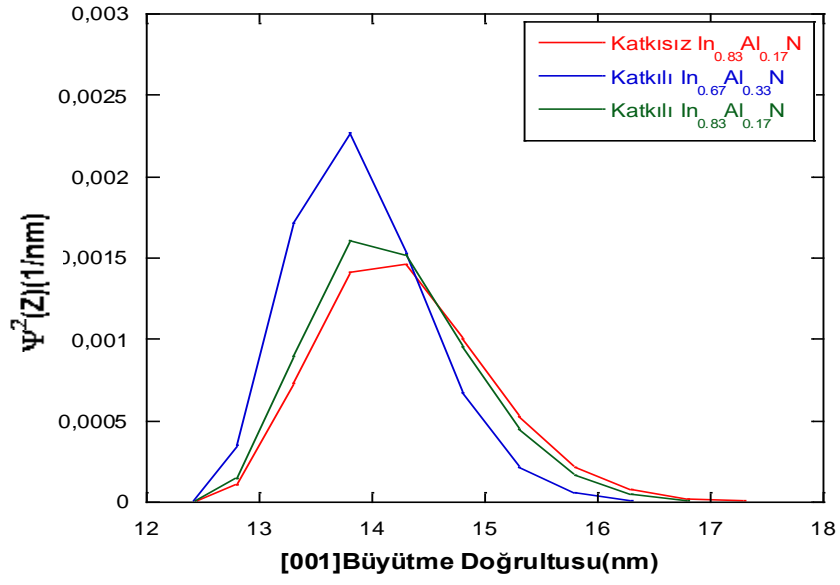
6.4 Bariyer Tabakanın Katkılı ve Katkısız Hallerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde bariyer tabakanın katkılı ve katkısız olduğu durumlar, tampon tabaka kalınlığı 300nm, ara tabaka kalınlığı 0.8nm, bariyerdeki Al mol yüzdesi 0.17 ve 0.33, tampon tabakadaki Al mol yüzdesi 0.1, InN kalınlığı 10nm, ve bariyer kalınlığı 10 nm iken aşağıda toplu bir şekilde yeniden değerlendirilmiştir.



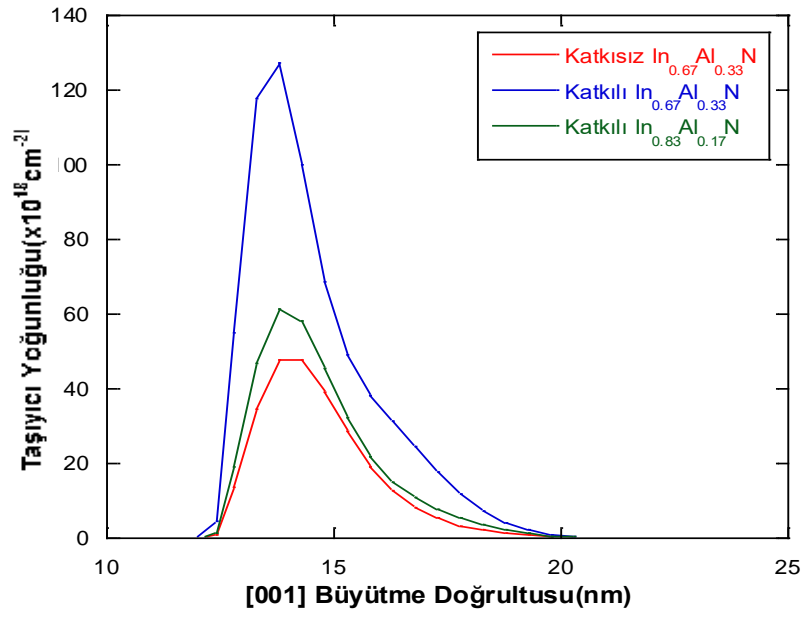
Şekil 6.10: Enerji band profili.

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi bariyeri katkıladığımızda kuantum kuyu derinliğinin arttığı görülmektedir. Yine aynı grafikte katkılı olan iki yapıyı karşılaştırdığımızda Al mol oranı fazla olanın kuantum kuyu derinliği daha fazladır.



Şekil 6.11: Olasılık yoğunluğunun uzaysal değişimi.

Şekil 6.11' de baktığımızda ise elektronların kuyu içinde bulunma olasılıkları verilmiştir. Al mol kesirleri aynı olan iki yapıya baktığımızda katkılı olanın kuyu içinde bulunma olasılığının daha fazla olduğu görülmektedir. Katkılı olan iki yapıyı karşılaştırdığımızda ise Al mol kesri büyük olan yapıda elektronların bulunma olasılığı daha fazladır.



Şekil 6.12: 3-boyutlu taşıyıcı yoğunluğu.

Şekil 6.12’de 3-boyutlu taşıyıcı yoğunlukları gösterilmiştir. Bariyer katkılı olduğunda ve Al mol yüzdesi arttığında 3 boyutlu taşıyıcı yoğunluğu da artmaktadır. Bütün bu bilgilerden yararlanarak Tablo 6.4 oluşturulmuştur. Sonuç olarak bariyeri katkılamanın ve bariyerdeki Al mol oranını arttırmanın 2- boyutlu taşıyıcı yoğunluğunu arttığını söyleyebiliriz

Tablo 6.4: Bariyerdeki katkılama ve mol kesri ile değişen parametreler.

| Katkı Durumu | Al mol oranı | In mol oranı | $n_{2B}(cm^{-2})$ |
|--------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Katkısız | 0.33 | 0.67 | 4.4798×10^{13} |
| Katkılı | 0.33 | 0.67 | 6.6741×10^{13} |
| Katkılı | 0.17 | 0.83 | 10.1713×10^{13} |

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında yüksek performans, yüksek mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu elde edebilmek için InN kanallı $In_{1-x}Al_xN/InN/In_{1-y}Al_yN$ ve $In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN$ 2- boyutlu HEMT yapıların tasarımları yapılmış ve yapıların büyütme parametrelerinin belirlenmesi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda olan GaN ara tabaka ve InN kanal kalınlıklarının, bariyerin katkılanmasının ve bariyerdeki Al mol yüzdesinin değişimleri araştırılmıştır.

Bu değişimlerin bu yapılardaki taşıma özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması Nextnano3 simülasyon programı ile yapılmıştır. Bu simülasyon programı, kendi içerisinde tutarlı çözümlere dayalı olan, lineer olmayan 1-boyutlu 1-bant, Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile çalışmaktadır.

İlk olarak relax InAlN tampon tabaka üzerine 5-10 nm kalınlıklı InN kanallı HEMT yapılar önerdik. InAlN tampon tabakadaki 0.1Al mol kesirli (0001) katyon polariteli yapı için bariyerdeki Al mol kesrini 0.17 kabul ettik. InN kanalda yüksek mobilite ve taşıyıcı yoğunluğunu korumak ve elektronların bariyer içine sızmasının azaltmak için kanal ile bariyer arasına ince bir GaN ara tabakanın kullanılmasının gerekli olduğunu gördük.

Her bir $In_{1-x}Al_xN/InN/In_{1-y}Al_yN$ ve $In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN$ yapılar için elektronların iletim enerji bant profillerinin, olasılık dağılım fonksiyonlarının ve taşıyıcı yoğunluklarının uzaysal dağılımları elde edilmiştir. Bu değişim eğrileri, bariyerdeki Al mol kesrinin, katkılanmanın, GaN ve InN kalınlıklarının değişimleri altında çizilmiştir.

Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre $In_{1-x}Al_xN/InN/In_{1-y}Al_yN$ HEMT yapılarda InN tabaka kalınlığının artmasıyla taşıyıcı yoğunluğunun arttığı bulunmuştur. Diğer yapıımız olan $In_{1-x}Al_xN/GaN/InN/In_{1-y}Al_yN$ 'da ise GaN ara tabaka ilave edilmiştir. Bu yapıda GaN ara tabaka kalınlığı artmasıyla taşıyıcı yoğunlunun arttığı görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarına göre, $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{GaN}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ HEMT yapısında $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ bariyer tabakayı katkılı olduğumuzda taşıyıcı yoğunluğunun arttığı bulunmuştur. InAlN bariyer tabakadaki Al mol yüzdesini arttırdığımızda da taşıyıcı yoğunluğunun arttığı görülmüştür.

$\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{GaN}/\text{InN}/\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ yapısında bariyerin katkılı ve katkısız olarak karşılaştığımızda ise katkılı olan yapıda taşıyıcı yoğunluğunun arttığı hesaplanmıştır. Katkılı olan bariyerin mol yüzdesini arttırdığımızda ise yine taşıyıcı yoğunluğunun arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada önerilen InN-kanallı HEMT yapıların hız performansından dolayı gelecekte InP tabanlı AlGaIn/GaN HEMT yapılar ile yarışabileceğini söylemek mümkündür.

Elde ettiğimiz simülasyon sonuçlarına göre taşıyıcı yoğunluğunu artıran değişken parametreler belirlenmiştir. Hala teorik çalışmaların üzerinde yürütüldüğü bu çalışmamız, InN kanallı HEMT yapılar üzerine gelecekte bir araştırma için tüm araştırmacılara ışık tutacaktır.

8. KAYNAKLAR

- [1] Eastman, L. F. and Mishra, U. K., "The toughest transistors yet", *IEEE Spectr.*, 39(5), 28-33, (2002).
- [2] Higashiwaki, M., Mimura, T. and Matsui, T., "AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors on 4H-SiC substrates with current-gain cutoff frequency of 190 GHz", *Appl. Phys. Express*, 1(2), 021103, (2008).
- [3] Endoh, A., Yamashita, Y., Hirose, N., Hikosaka, K., Matsui, T., Hiyamizu, S. and Mimura, T., "High performance AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistors fabricated using SiN/SiO₂/SiN triple-layer insulators", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45(4B), 3364-3367, (2006).
- [4] Polyakov, V. M. and Schwierz, F., "Low-field electron mobility in wurtzite InN", *Appl. Phys. Lett.*, 88(3), 032101, (2006).
- [5] Levinshtein, M., Rumyantsev, S. L. and Shur, M. S., *Properties of Advanced Semiconductor Materials*, New York: Wiley, (2001).
- [6] Terashima, W., Che, S. B., Ishitani, Y. and Yoshikawa, A., "Growth and characterization of AlInN ternary alloys in whole composition range and fabrication on InN/AlInN multiple quantum wells by RF molecular beam epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45(21), L539 - L542, (2006).
- [7] Dimakis, E., Iliopoulos, E., Kayambaki, M., Tsagaraki, K., Kostopoulos, A., Konstantinidis, G. and Georgakilas, A., "Growth optimization of electron confining InN/GaN quantum well heterostructure," *J. Electron. Mater.*, 36(4), 373-378, (2007).
- [8] Foutz, B. E., O'Leary, S. K., Shur, M. S. and Eastman, L. F., "Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN," *J. Appl. Phys.*, 85(11), 7727-7734, (1999).

- [9] Schwierz, F. and Liou, J. J., "RF transistors: Recent developments and roadmap towards terahertz applications", *Solid State Electron.*, 51(8), 1079-1091, (2007).
- [10] Palacios, T., "Beyond the AlGaIn/GaN HEMT: New concepts for high-speed transistors", *Phys. Stat. Sol.(A)*, 206(6), 1145-1148, (2009).
- [11] Singh, P., Ruterana, P., Morales, M., Goubilleau, F., Wojdak, M., Carlin, J. F., Ilegems, M. and Chateigner, D., "Structural and optical characterization of InN layers grown by MOCVD," *Superlatt.Microstruct.*, 36(4-6), 537 -545, (2004).
- [12] Yamaguchi, T., Muto, D., Araki, T., Maeda, N. and Nanishi, Y., "Novel InN growth method under In-rich condition on GaN/Al₂O₃ (0001) templates", *Phys. Stat. Sol. (C)*, 6(S2), 360-363, (2009).
- [13] Piper, L. F. J., Veal, T. D., McConville, C. F., Lu, H. and Schaff, W. J., "Origin of the n-type conductivity of InN: The role of positively charged dislocations," *Applied Phys.Lett.*, 88 (25), 252109, (2006).
- [14] Dimakis, E., Iliopoulos, E., Tsagaraki, K., Adikimenakis, A. and Georgakilas, A., "Biaxial strain and lattice constants of InN (00010) films grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy," *Appl. Phys.Lett.*, 88(19), 191918, (2006).
- [15] C. G. Van de Walle, J. L. Lyons, and A. Janotti, "Controlling the conductivity of InN," *Phys. Stat. Sol. (A)*, 207(5), 1024-1036, (2010).
- [16] M. Higashiwaki and T. Matsui, "Plasma-assisted MBE growth of InN films and InAlN/InN heterostructures", *J. Cryst. Growth*, 251(1-4), 494-498, (2003).
- [17] Hasan, Md. T., Kaysir, Md. R., Islam, M. S., Bhuiyan, A. B. Islam, Md. R., Hashimoto, A. and Yamamoto, A., "2DEG properties in InGaIn/InN/InGaIn-based double channel HEMTs", *Phys. Stat. Sol. (C)*, 7(7/8), 1997-2000, (2010).
- [18] Kong, Y. C., Zheng, Y. D., Zhou, C. H., Deng, Y. Z., Shen, B., Gu, S. L., Zhang, R., Han, P., Jiang R. L. and Shi, Y., "A novel In_xGa_{1-x}N/InN heterostructure field-effect transistor with extremely high two-dimensional electron-gas sheet density", *Solid State Electron.*, 49(2), 199-203, (2005).

- [19] Islam, Md. S., Muhtadi, S. M., Hasan, Md. T., Bhuiyan, A. G., Islam, Md. R., Hashimoto, A. and Yamamoto, A., "AlInN/InN metal oxide semiconductor heterostructure field effect transistor," *Phys. Stat. Sol. (C)*, 7(7/8), 1983-1987, (2010).
- [20] Kuzmik, J., Georgakilas, A., "Proposal of High-Elektron Mobility Transistors With Strained InN Chanel", *IEEE Electron Device Lett.*, 58, 3, (2011).
- [21] Kuzmik, J., "N polarity InN/GaN/InAlN High Electron Mobility Transistors" *J. Applied physics Express* 5, 2012, 044-101, (2012).
- [22] Lişesivdin, S.B., Yıldız, A. and Kasap, M., "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", *Adv. Mater.-Rapid Comm.*, 1, 467, (2007).
- [23] Birner, S., (2004). Nextnano3-next generation 3D nano device simülator., (27.12.2011), <http://www.nextnano.de/nextnano3/>.
- [24] Haris, W.A., *Electronic Structure and Properties of Solids*, Dover: New York, 174, (1980).
- [25] Whitlock, J.B., Morgan, K., Schujman, S.B., Raghothamachar, B., Dudley, M., Evans, K.R., "Fabrication of native, single-crystal AlN substrates", *Physica Status Solidi C: Conferences and Critical Reviews*, (7): 1997-2000, (2003).
- [26] Newey, J., "Essient photonics brings new thinking to optical modulation technology", *Comp. Semicond.*, 8 (6): 33-37, (2002).
- [27] Liu, L. and Edgar, J.H., "Substrates for gallium nitride epitaxy", *Materials Science & Engineering R, Reports*, 37, 61, (2002).
- [28] Oura, K., Lifshitsi V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V., Katayama, M., "Surface science", *Springer, Berlin*, 166 (229): 378-382, (2003).
- [29] Akasaki, I., Amano, H., "Crystal Growth and Conductivity Control of Group III Nitride Semiconductors and Their Application to Short Wavelength Light Emitters", *Jpn.J.Appl. Phys*, 36: 5393-5408, (1997).

- [30] Yoshida, S., Misawa, S., Gonda, S., “Epitaxial growth of GaN/AlN heterostructures”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1 (2): 250-253, (1983).
- [31] Akasak, I., Amano, H., "Crystal Growth and Conductivity Control of Group III Nitride Semiconductors and Their Application to Short Wavelength Light Emitters", *J. Appl. Phys.*, 36: 5393-5408, (1997).
- [32] Terao, S., Iwaya, M., Nakamura, R., Kamiyama, S., Amano, H. and Akasaki, I., “Fracture of Al_xGa_{1-x}N/GaN Heterostructure-Compositional and Impurity Dependence”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40:L195 L197, (2001).
- [33] Nakamura, S., Fasol, G., Pearton, J.S., "The Blue Laser Diode : The Complete Story", *Springer; 2nd edition*, 95-100, (2000).
- [34] Bernardi, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D., “Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides”, *Phys. Rev. B*, 56, 10024, (1997).
- [35] Madelung, O., “Semiconductors- Basic Data”, *Springer – Verlag Heidelberg New York Berlin*, 106 – 110, (1996).
- [36] Berger, L. I., “*Semiconductor materials*”, *CRC Press*, 3 : 123–124, (1997).
- [37] Bougrov, V., Levinshtein, M.E., Rumyantsev, S.L., Zubrilov, A., “Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe”, Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S. (Eds.), *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1-30, (2001).
- [38] Santic, B., “On the hole effective mass and the free hole statistics in wurtzite GaN”, *Semicond. Sci. Technol.*, 18 (4): 219-224, (2003).
- [39] Levinstein, M., Rumyantsev, S., Shur M., “Handbook series on semiconductor parameters”, *World Scientific Publishing Company, Singapore*, 11 (2): 77- 98, (2000).
- [40] Wood, C., Jena, D., “Polarization effects in semiconductors: From Ab initio theory to device application”, *US Office of Naval Research, Arlington, VA, University of Notre Dame, Notre Dame, USA*, 6 : 515-517, (2008).

- [41] Goldberg, Y., “Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe”, Eds. Levinshtein, M.E., Rumyantsev, S.L. And Shur, M.S., *John Wiley & Sons, Inc., New York*, 57, 31-47, (2001).
- [42] Xu, Y. N., Ching, W. Y., “Electronic, optical, and structural properties of some wurtzite crystals”, *Phys Rev. B*, 48 (7), 4335-4351, (1993).
- [43] Christensen, N.E., Gorczyca I., “Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure”, *Phys. Rev. B*, 50 (7), 4397-4415, (1994).
- [44] Kuzmík, J., “Power electronics on InAlN/(In)GaN: Prospect for a record performance”, *IEEE Electron Device Lett* , 22(11), 510-512, (2001).
- [45] Veal, T.D., McConville, C.F., Schaff, W. J., “Indium Nitride and Related Alloys”, *CRS Pres*, 34, 25-30, (2009).
- [46] Davydov, V.Y., "Absorption and Emission of Hexagonal InN. Evidence of Narrow Fundamental Band Gap", *Phys. Stat. Solidi(b)*, 229, R1 – R3, (2002).
- [47] Tunay Taşlı, P., “InAlN/GaN Temelli Yüksek Elektron Mobiliteli Transistörlerin (HEMT) Elektron ve Magneto İletim Özellikleri”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Ankara, (2010).
- [48] Bean, J. C., “Materials and Technologies in High-speed semiconductor devices”, *S. M. Sze, Editor, John Wiley&Sons New York*, 1200-1225, (1990).
- [49] Can, N., “GaN temelli heteroeklem ve kuantum yapıların optiksel özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2011).
- [50] Tülek, R., “Yüksek performanslı Al(In)GaN/AlN/(In)GaN heteroeklem yapıların iletim özellikleri”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2010).
- [51] Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J.R., Weimann, N.G., Chu, K., Murphy, M., Schaff, W.J., Eastman, L.F., Dimitrov, R., Wittmer, L., Stutzmann, M., Rieger,

- W. and Hilsenbeck, J., “Two dimensional electron gas”, *J. Appl. Phys.*, 85, 3222, (1999).
- [52] Leszczynski, M., Suski, T., Perlin, P., Teisseyre, H., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., Porowski, S., Pakula, K., Baranowski, J.M., Foxon, C.T. and Cheng, T.S., “Lattice Parameters of Gallium Nitride”, *Applied Physics Letters*, 69,73, (1996).
- [53] Smith, M., Lin, J. Y., Jiang, H. X., Salvador, A., Botchkarev, A., Morkoc, H., “Optical transitions in GaN/Al_xGa_{1-x}N multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy”, *Appl. Phys. Lett*, 69 (17): 2453-2455, (1996).
- [54] Xing, H., Keller, S., Wu, Y. F., McCarthy, L., Smorchkova, I. P., Buttari, D., Coffie, R., Green, D. S., Parish, G., Heikman, S., Shen, L., Zhang, N., Xu, J. J., Keller, B. P., DenBaars, S. P. And Mishra, U. K., “Gallium nitride based transistors”, *J. Phys. -Condens. Matter*, 13 (32): 7139-7158, (2001).
- [55] Lisesivdin, S.B., “MBE tekniđi ile büyütölen InGaAs/GaAs ve AlGaAs/GaAs yarıiletkenlerinin iletim özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-18, (2005).
- [56] Turhan, S., “AlGa(In)N/AlN/GaN Heteroeklem Yapıların Enerji Bant Profillerinin ve Taşıyıcı Yoğunluklarının Nextnano³ Simulasyon Programı Kullanılarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2011).
- [57] Teke, A., Gökden, S., Tölek, R., Leach, J.H., Fan, Q., Xie, J., Özgür, Ü., Morkoç, H., Lisesivdin, S.B. and Özbay, E., “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, (2009).