Ultra-ince bariyerli GaN-temelli yarıiletken çokluyapıların elektriksel ve yapısal özelliklerinin incelenmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 114F508

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Beyza SARIKAVAK LİŞESİVDİN

Bursiyer(ler):
Mehmet ÖZTÜRK

MART 2017
ANKARA

ÖNSÖZ

Bu çalışmada farklı ultra-ince bariyer konfigurasyonlu HEMT tasarımları yapılarak, polarizasyon, gerilim ve sıcaklık değişkenlerinin de dahil olduğu yüksek başarımlı 1 ve 2-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin eş-uyumlu çözümleri kullanılarak band yapısı, taşıyıcı yoğunluğu, gerilim ve sıcaklık dağılımları ve bunlara bağlı olarak akım-gerilim karakteristikleri hesaplanmıştır.

Tasarım ve hesaplama sonrası en başarılı olduğu düşünülen yapılar Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemi ile büyütülerek, elektriksel özellikleri (Hall, sıcak elektron,

I-V) ve yapısal özellikleri (Atomik Kuvvet Mikroskobisi, X-ışınları) ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, yapısal olarak gözlemlenen dislokasyon yoğunlukları ve yüzeysel dislokasyon ve pürüzlülüğün, elektriksel özelliklere etkisini görmemizi sağladı.

Bu hesaplamalı çalışmanın ve sonrasında önerilen deneysel yöntemlerin, aşırı-ince bariyerli HEMT yapıları daha iyi anlamamıza ışık tutarak daha küçük transistörleri kısa-kanal etkileri görmeden üretmemize olanak sağladı. Bu proje TUBİTAK tarafından desteklenmekte olan bir 3001 Başlangıç AR-GE projesidir. Burada şunu belirtmek isterim ki projenin bütçesi 37.995 TL olup, oldukça kısıtlanmıştır, bütçenin bu kadar kısılması, bu projeyi üniversitelerin kendi BAP projelerine verdiği bütçe miktarının altına çekmiştir. Bütün bu maddi yetersizliklere rağmen hedeflenen çalışmalar yapılmıştır.114F508 numaralı projemiz için sağladığı bütün imkanlardan dolayı TÜBİTAK a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER **Sayfa**

Önsöz……i

İçindekiler……ii

Tabloların Listesi……iv

Şekillerin Listesi……v

Resimlerin Listesi……vii

Özet……viii

Abstract……ix

1. Giriş……1

2. Literatür Özeti……2
3. Gereç ve Yöntem……7
4. Bulgular……16
4.1. 1.İP: Ultra-ince Bariyer HEMT Tasarım ve Benzetimi……16
4.1.1. İncelenen Ultraince Bariyerli Çokluyapıların Bir Boyutlu Taşıyıcı Yoğunluğu ve Bulunma Olasılığı Hesaplamaları ……17
4.1.1.a. GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu ……17
4.1.1.b- n-GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu……21
4.1.1.c. GaN/n-AlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu ……22
4.1.1.d. n-GaN/AlN/InAlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu ……22
4.1.1.e. n-GaN/InAlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu ……22
4.1.1.f. n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu ……22
4.1.1.g n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu ……22
4.1.2. Çokluyapı grupları hesaplamaları sonuçları……22
4.1.3.- Gerilime Bağlı Gerginlik ve Sıcaklık İncelemeleri ……25
4.1.3.a.Yapı1'e ait gerginlik incelemesi ……26
4.1.3.b.Yapı2'e ait gerginlik incelemesi ……27
4.1.3.c.Yapı3'e ait gerginlik incelemesi ……28
4.1.3.d.Yapı4'e ait gerginlik incelemesi ……29
4.1.3.e.Yapı6'e ait gerginlik incelemesi ……30
4.1.3.f. İlgili yapıların kanal sıcaklığının hesaplanması ……31

4.2. 2. İP: Ultra-ince Bariyer HEMT Büyütme ve Temel Yapısal Karakterizasyonu ……36
4.2.1. B-3018 Gazi Yapı-1 büyütmesi ……37
4.2.2. B-3019 Gazi Yapı-6 büyütmesi ……39
4.2.3. B-3022 Gazi Yapı-4 büyütmesi…… 40
4.2.4.B-2131 Gazi Ostermaier büyütmesi…… 42
4.2.5. Numunelerin XRD incelemeleri …… 43
4.2.6. Numunelerin AFM incelemeleri ……48
4.3. 3. İP: HEMT Yapılarının Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu ……51

5. Tartışma / Sonuç…… 61
6. Kaynaklar……62

Tablo Listesi **Sayfa**

Tablo 1. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen optimize çokluyapıların taşıyıcı yoğunluğu…....24
Tablo 2. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre önerilen beş yapı ……..…….25
Tablo 3. Gerçekleştirilen gerilime bağlı gerginlik hesaplamalarına göre incelenen çokluyapılar için gerginlik patlama sınır değerine karşılık gelen kritik voltaj değerleri……31
Tablo 4. Her bir incelenen ultrainces bariyerli çokluyapı için kritik voltaj değerlerinde hesaplanan kanal sıcaklığı ve toplam tüketilen güç değerlerinin

kıyaslanması ……36
Tablo 5. Bir boyutlu ve iki boyutlu olarak gerçekleştirilen analizler sonucu deneysel olarak büyütülmek üzere önerilen üç yapı ……36
Tablo.6. B 3018 Yapısının büyütme Koşulları……37
Tablo 7.B-3019 Yapısının büyütme koşulları……39
Tablo 8. B 3022 yapısının büyütme koşulları……41
Tablo 9. B2131 yapısının büyütme koşulları……42
Tablo 10. 3018, 3019, 3022, 2131 numunelerinin simetrik (002) ve asimetrik (102) taramaları için FWHM değerleri……44
Tablo 11. 3018, 3019, 3022, 2131 numunelerinin simetrik (002) ve asimetrik (102) taramaları için kenar, vida ve toplam dislokasyon yoğunlukları…… 45
Tablo 12. Numunelerin AFM ölçümlerinden elde edilen Ra, RMS, ortalama yükseklik ve maksimum ölçüm menzili değerleri……49
Tablo 13. Toplam elektron mobilitesinin saçılma analizinde kullanılan GaN için malzeme parametreleri [6, 7]. ……56
Tablo 14. Saçılma analizi sonucunda hesaplanan bazı parametreler ve yorumlanan saçılma mekanizmalarına ait mobilite sınırlama değerleri ……60

Şekil Listesi **Sayfa**

Şekil 1. Farklı malzeme sistemleri ile üretilen transistörlerin Güç/Frekans becerileri (Lisesivdin, 2008a)……3
Şekil 2. (a) Örnek bir AlGaN/GaN yapısının katman bilgisi ve (b) uzaysal elektronik band yapısı (Lisesivdin, 2007)……4
Şekil 3. Bir GaN HEMT yapıda AlN aratabakası (a) 0.6 nm ve (b)1.7 nm

olduğunda yüzeyin durumu (Gonschorek, 2006)……..…..6
Şekil 4. Yüzeydeki AlN tabakasının kalınlığının yüzey morfolojisine etkisi (Cao ve Jena, 2007)…….6
Şekil 5. İş paketlerinin işleyiş sırası…… 7
Şekil 6. Schrödinger-Poisson denklemlerinin kendini-eşleyebilen çözümünün iterasyonu (Harrison, 2005) ……..9
Şekil 7. Hall bar ve basit barlar için maske tasarımları …… 13
Şekil 8 (a) Hall bar biçimli numunede manyetik alan yönü ve akım ve gerilim yönleri. (b) Hall ölçüm sistemine ait diagram. ……..14
Şekil 9. (a) Sıcak elektron ölçüm sistemi düzeneği ve (b) basit bar biçimli numunenin kryostat içinde yerleştirilmiş hali……..……... 15
Şekil 10. Katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda taşıyıcı yoğunluğunun GaN koruma katman kalınlığına bağlı değişimi……... 18
Şekil 11. Katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda AlN bariyer katman kalınlığındaki değişime göre iletkenlik band grafiği…… ……..19
Şekil 12. Katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda AlN bariyer katman kalınlığına bağlı olarak a) taşıyıcı yoğunluğundaki değişim ve b) AlN/GaN arayüzeyindeki üçgenimsi kuyu içindeki iki boyutlu elektron gazı taşıyıcılarının bulunma olasılığındaki değişim. …… …20
Şekil 13. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen en iyileştirilmiş çokluyapılar için bulunma olasılığı. Kalın çizgiler gerginliğe bağlı gerginlik incelemeleri için seçilen çokluyapıları işaret etmektedir. ……..……...23
Şekil 14. GaN (1 nm)/AlN (4 nm)/GaN çokluyapısı (Yapı1) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi. ……..26
Şekil 15. n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)/GaN (Nd= 1x1019 cm-3) çokluyapısı (Yapı 2) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi……..… 27
Şekil 16. GaN (2 nm)/n-AlN (4 nm)/GaN (Nd= 1x1019 cm-3) çokluyapısı (Yapı3) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi. ……28
Şekil 17. GaN (2 nm)/n-AlN (3 nm)/GaN (Nd= 1x1019 cm-3) çokluyapısı (Yapı4) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi…… 29
Şekil 18. n-GaN (2 nm)/In0.17Al0.83N (3 nm)/GaN (Nd= 1x1020 cm-3) çokluyapısı (Yapı6) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi…… 30

Şekil 19. İki boyutlu analizde termal direnç yöntemi kullanılırken göz önünde bulundurulan aygıt yapısının şematiği…….. 33
Şekil 20. Seçilen beş ultraince bariyerli çokluyapı için savak-kaynak gerilimine bağlı kanal sıcaklığındaki değişimi…… 34
Şekil 21. Seçilen beş ultraince bariyerli çokluyapı için savak-kaynak gerilimine bağlı olarak toplam tüketilen güçteki değişim…… 35
Şekil 22. Simülasyon sonucunda belirlenen 1 no'lu yapı olan deneysel olarak büyütülmüş B-3018 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri... 38
Şekil 23. Simülasyon sonucunda belirlenen 6 no'lu yapı olan deneysel olarak büyütülmüş B-3019 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri…… 39
Şekil 24. Simülasyon sonucunda belirlenen 4 no'lu yapı olan deneysel olarak büyütülmüş B-3022 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri.. 40
Şekil 25**.** Simülasyon sonucu belirlenen yapılarla karşılaştırmak amacıyla literatürden seçilen Ostermaier ve arkadaşlarının yapısının deneysel olarak büyütülmüş hali olan B-2131 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri…….…… 41
Şekil 26. 3018, 3019, 3022 ve 2131 numunelerinin w-2θ taraması……..…… 42
Şekil 27. 3018, 3019, 3022 ve 2131 numunelerinin GaN katmanın (002) simetrik taraması. 43
Şekil 28. 3018, 3019, 3022 ve 2131 numunelerinin asimetrik GaN katmanın (102) taraması. ……..…..44
Şekil 29 . B3018 no'lu numunenin AFM görüntüsü…… 46
Şekil 30 . B3019 no'lu numunenin AFM görüntüsü. ……46
Şekil 31 . B3022 no'lu numunenin AFM görüntüsü…… 47
Şekil 32 . B2131 no'lu numunenin AFM görüntüsü ……..48
Şekil 33. (a) B3019, (b), B3022 ve (c) B2131 no'lu numunelerin katman yapıları……53
Şekil 34. (a) B2131, (b) B3019, ve (c) B3022 no'lu numunelerin sıcaklığa bağlı Hall mobilitesi ve Hall taşıyıcı yoğunluğu değerleri……..54
Şekil 35. B2131 numunesine ait saçılma mekanizmaları analizi……57
Şekil 36. B3019 numunesine ait saçılma analizi…….. 57
Şekil 37. B3022 numunesine ait saçılma analizi…… 59

Resim Listesi **Sayfa**

Resim 1. Mart 2017' deki durum……..…51

Resim 2. Bilkent Üniversitesi NANOTAM'da sıcaklığa bağlı Hall ölçümleri yapılırken kullanılan sistem…… 52

ÖZET

Günümüzde artan yüksek frekans / yüksek güç transistörlerinin daha küçük ölçekli uygulamalarda yaygın olarak kullanılması ile birlikte HEMT yapılarda mikrometre ölçeğinden

nanometer ölçeğine bir geçiş söz konusudur. Bu transistörlerde 100 nm altı kanal uygulamaları genel olarak sorunludur ve bu sorunlar kısa-kanal etkileri olarak adlandırılırlar. Kısa-kanal etkilerine son yıllarda yapılan en önemli çözüm önerisi aşırı-ince bariyer uygulamasıdır. Aşırı-ince bariyer uygulaması, kontrol edilebilirliği zor, birkaç nanometre kalınlığındaki katmanlarıyla, bunlar arasında oluşan gerginlikler, polarizasyonlar ve uygulanan elektrik alanlarla tüm bu değişkenlerin etkilenmesiyle çok değişkenli bir problem olarak görülmektedir. Öyle ki birkaç nanometrelik hata ile büyütülen bir transistor, çalışma esnasında uygulanan normal bir elektrik alan büyüklüğü ile dislokasyon oluşumuna ve buna bağlı olarak da elektriksel özelliklerinde katastrofik sonuçlara sahip olabilir.

Çalışmada farklı ultra-ince bariyer konfigurasyonlu HEMT tasarımları yapıldı, polarizasyon, gerilim ve sıcaklık değişkenlerinin de dahil olduğu yüksek başarımlı 1 ve 2-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin eş-uyumlu çözümleri kullanılarak band yapısı, taşıyıcı yoğunluğu, gerilim ve sıcaklık dağılımları ve bunlara bağlı olarak akım-gerilim karakteristikleri hesaplandı.

Tasarım ve hesaplama sonrası en başarılı olduğu düşünülen yapılar Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemi ile büyütüldü, elektriksel özellikleri (Hall, sıcak elektron, I-V) ve yapısal özellikleri (Atomik Kuvvet Mikroskobisi, X-ışınları) ölçüldü. Ölçüm sonuçları, yapısal olarak gözlemlenen dislokasyon yoğunlukları ve yüzeysel dislokasyon ve pürüzlülüğün, elektriksel özelliklere etkisini görmemizi sağladı.

Hesaplamalı çalışmanın ve sonrasında önerilen deneysel yöntemlerin, aşırı-ince bariyerli HEMT yapıları daha iyi anlamamızı sağlayarak daha küçük transistörleri kısa-kanal etkileri görmeden üretmemize olanak sağladı.

Anahtar Kelimeler:

Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör, 2 Boyutlu elektron gazı, Schrödinger-Poisson, Metal Organik Kimyasal Biriktirme, Hall Etkisi, Atomik Kuvvet Mikroskobisi

ABSTRACT

Today, with the increasing usage of the high frequency / high-power transistors in small scale applications, there is a transition in HEMT structures from micrometer to nanometer scale. The gate lengths under 100 nm are known to be problematic are generally referred to as the short-channel effects in these systems. The most important solution proposal to short-channel effects in recent years is the implementation of ultrathin barrier to the system. Application of ultrathin barrier, with a difficult controllability of the layers of a few nanometers thick, with tensions, polarizations, and applied electric fields be affected by all these variables are seen as a multivariate problem. So that, a transistor grown by a few-nanometer error during operation can lead formation of dislocations. Therefore, electrical properties of these systems may change with an electric field and may lead catastrophic consequences.

In this study, ultra-thin barrier HEMTs had been designed for different configurations including polarization, voltage and temperature variations, with solving the high-performance self-consistent 2-dimensional Schrödinger-Poisson equations. Band structure, carrier density, depending on the voltage and temperature distributions and their current-voltage characteristics were calculated.

After design and modelling, the best structures were grown with Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) method. After, the electrical properties (Hall, hot-electron, I-V), and structural properties (Atomic force microscopy, X-Ray Diffraction) of these grown structures were measured.

This computational study and the proposed experimental methods, may enlight us to better understand ultra-thin barrier HEMT structures and result to look forward for producing transistors without the short-channel effects.

Keywords:

High Electron Mobility Transistor, 2 Dimensional Electron Gas, Schrödinger-Poisson, Metal Organic Chemical Vapor Deposition, Hall Effect, Atomic Force Microscopy

1. GİRİŞ

Bu proje ile kısa kanal etkilerinin görülmeyeceği daha başarılı GaN-temelli HEMT türü transistör yapılarının geliştirilmesini sağlamaktır. Galyum nitrür (GaN), son 15 yıl içinde daha yaygın olarak araştırılmaya başlanan, III-V grubu önemli bir yarıiletken materyaldir. Doğası gereği GaN; yüksek bant aralığına, yüksek ısıl iletkenliğe, yüksek erime sıcaklığına, düşük dielektrik sabitine ve yüksek kırılma gerilimine sahiptir. Benzer olarak AlN, InN ve bu üç materyalin alaşımları olan AlGaN, InGaN, AlInN gibi üçlü ve AlInGaN gibi dörtlü alaşımları da benzer özellikler gösterir. Bu özellikleri, yüksek güçte, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek frekanslarda çalışabilen güç transistörleri üretiminde kullanılabilmelerini sağlar. Bu güç transistörleri günümüzde, kablosuz ağ uygulamaları, mobil iletişim, mikrodalga haberleşme ve radar uygulamaları gibi bir çok uygulamada yaygın olarak kullanılırlar. Hızlı Elektron Mobiliteli Transistör'ler (HEMT) birer güç transistörüdür ve elektriksel özellikleri bu cihazların bünyelerinde oluşan 2-boyutlu elektron gazı (2DEG) tarafından belirlenir. GaN-temelli HEMT yapıların, GaN-temelli alttaş eksikliği sebebiyle farklı alttaşlar üzerine büyütülmesi yapıda gerginliklerin ve buna bağlı dislokasyonların bulunmasına yol açar. Bu polar yapıların elektriksel özelliklerinin direkt olarak indüklenen gerginliklerle ilgili olması daha başarılı transistörlerin oluşturulmasının süregelen bir çalışma konusu olmasını sağlar.

Daha yüksek mobilite ve daha yüksek taşıyıcı yoğunluğu gibi daha iyi elektriksel parametrelere sahip olması amaçlanan bu yapılar, daha küçük boyutlarda, çevre dostu, daha verimli transistörlerin üretilmesine olanak sağlayacaktır. Bu bağlamda, hesaplamalı çalışmanın ve sonrasında önerilen deneysel yöntemler kullanılarak Sıcaklık, elektrik alan ve katmanlar arası gerilimlerin hesaba katıldığı yüksek başarımlı 1-2 boyutlu eş-uyumlu Schrödinger-Poisson çözümleri yapıldı, tasarlanan aygıtların doğru yöntemle ve doğru büyütme parametreleriyle üretilmesini sağlandı. Üretilen numunelerin doğru fabrikasyon yöntemleri ile ölçüm yapılacak numuneler biçimine getirmek ve doğru değişkenler ışığında elektriksel ve yapısal özelliklerini inceledik, dislokasyon çeşitlerinin düşük ve yüksek elektrik alanlarda (sıcak elektron) elektriksel özelliklere etkilerini incelendi, daha başarılı ve küçük HEMT'lerin üretilebilmesine olanak sağlandı.

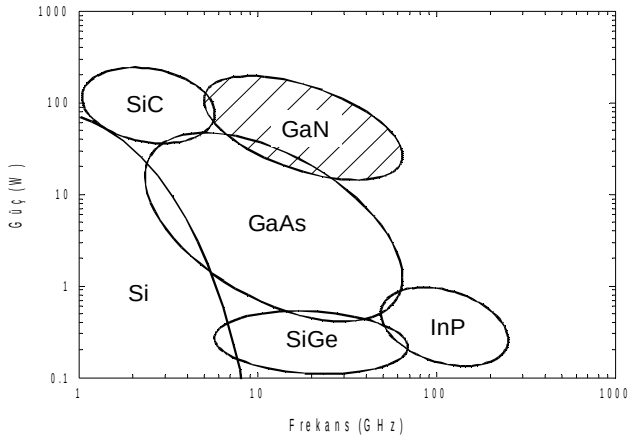
2. LİTERATÜR ÖZETİ

GaN-temelli Hızlı Elektron Hareketliliğe Sahip Transistör (HEMT) yapıları 1992 yılında Khan ve arkadaşları tarafından önerildiğinden beri artarak çalışılagelen bir konu olmuştur (Khan, 1993). Bu transistörler mükemmele yakın radyo-frekans güç anahtarlama, başarılı yüksek-frekans performansları ile birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Şekil 1. de GaN- temelli transistör yapıların diğer malzeme grupları ile birlikte Güç/Frekans çalışma bölgeleri gösterilmiştir (Lisesivdin, 2008a). Şekilden de görüldüğü gibi GaN-temelli transistörler, hem yüksek güç hem de görece yüksek frekans becerileriyle günümüzün askeri ve sivil uydu, kablosuz ağ, hücresel ağ uygulamalarında başlıca tercih edilen transistörler arasına yerleşmiştir.

GaN-temelli transistörlerin GaAs-temelli transistörlere göre en büyük farklılıkları:

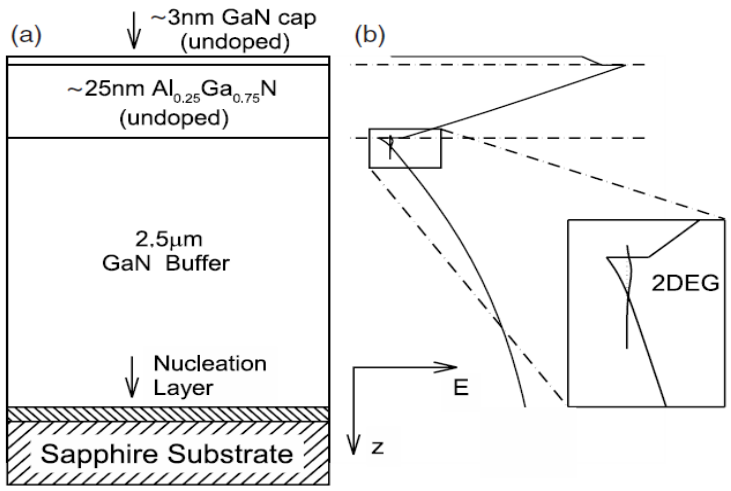
1. *GaN-temelli yapılar genelde kendi temelinden farklı alttaşlara büyütülür:* GaAs-temelli yapılar GaAs alttaşlara büyütüldüğünden kaliteli yapılar üretilebilirken, GaN-temelli yapılarda GaN-alttaş eksikliği vardır. Bu sebeple bu yapılar safir, SiC yada Si gibi alttaşlar üzerine büyütülür (Arslan, 2008). Bu sebeple oluşan yapılarda atomlar arası gerginlikler ve hatta bu gerginliklerin sonucunda ciddi miktarda dislokasyonlar oluşur.

2. *GaN-temelli yapılar genelde hekzagonal kristal yapıdadır*: Cihaz yapımında kullanılan GaN-temelli sistemler kubik olan GaAs-temelli sistemlerin aksine hekzagonal yapıdadır. Bu sebeple yapıda izotropik olmayan polarizasyon görülür. Yapının kendisinde olan polarizasyon kadar ayrıca farklı katmanlar arası örgü parametreleri farkından doğan birde piezoelektrik polarizasyon bulunmaktadır (Ambacher, 1999). Bu sebeple bu yapılar polar yapılardır.



Şekil 1. Farklı malzeme sistemleri ile üretilen transistörlerin Güç/Frekans becerileri (Lisesivdin, 2008a).

3. *GaN-temelli düşük-boyutlu iletim sağlayan kuvantum kuyuları kendiliğinden oluşur*: GaAs-temelli polar olmayan kubik yapılarla bir kuvantum kuyu yapılmak istendiğinde bu kuyuya girecek yük ayrıca kuyu dışına katkı konularak (modülasyon katkı) sağlanır (Balkan, 1997). GaN-temelli yapılarda bulunan güçlü kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyonlar elektrik alanda bir değişime yol açarlar. Elektrik alandaki uzaysal değişim elektronik band yapısında bir bükülmeye yol açarak polar yapının doğasından gelen arayüzeylerde bulunan yüklerin belli bölgelerde birikmesini sağlar. İlave hiçbir katkı yapmadan bu şekilde bir kuvantum kuyusu ve içinde yük birikimi sağlanır. Şekil 2'de örnek bir AlGaN/GaN temelli sistem ve uzaysal elektronik band yapısındaki değişim görülmektedir (Lisesivdin, 2007). Şekil 2(b)'de kuvantum kuyusu ve içinde oluşan 2-boyutlu elektron gazı (2DEG) yerleşimi de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Örnek bir AlGaN/GaN yapısının katman bilgisi ve (b) uzaysal elektronik band yapısı (Lisesivdin, 2007).

Yukarıdaki 3 madde ile gösterilen farklılıklardan da anlaşılacağı üzere, GaN-temelli bir sistemde üstüste büyütülen tabakalarda kullanılan malzeme ve alaşımlar, farklı polarizasyon ve farklı örgü parametrelerine sahip olacaklarından, değişen tabaka kalınlıkları, alaşım oranları, alttaş gibi öğelerdeki farklılıklar direkt olarak 2DEG'deki elektronların mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları üzerinde etkilidir. Bu sebeple, bu yapılarda daha iyi elektriksel parametreler elde etmek için yapılacak tüm bu etkileşimleri içeren eniyileştirme çalışmalarında sayısal band mühendisliği çalışmaları önemli bir yere sahiptir (Sacconi, 2001). Bu konuda, çok sayıda yüklerin yapı içinde dağılımını veren Poisson denklemi ile bir kuvantum kuyusunda ki bir yükün dağılımını veren Schrödinger denklemlerini eşuyumlu olarak çözen Schrödinger-Poisson denklem çözümleri yaygın olarak kullanılır (Birner, 2006).

Genel olarak çoğu uygulama AlGaN/GaN temelli olmakla birlikte, son zamanlarda InAlN/GaN temelli uygulamalarda InAlN malzemesinin belli alaşım oranında GaN ile örgü uyumlu olması ve AlGaN/GaN temelli yapılara göre daha yüksek polarizasyon alanlarının oluşması (ve dolayısıyla daha fazla yük indüklenmesi) sebebiyle tercih sebebi haline gelmiştir (Kuzmik, 2002).

Bu yüksek polarizasyon, yapılan transistörlerin genellikle boşalım tipi (D-mode) olmalarına yol açar. Fabrikasyonu daha kolay olan gelişim tipi (E-mode) transistör yapabilmek için geçmişte bazı mühendislik önerileri olmuştur. Bunlara örnek olarak geçit olarak GaN tabakasını p-tipi katkılama (Fujii, 2007), InGaN aratabaka kullanma (Mizutani, 2007), ion katkılama (Cai, 2007) sayılabilir. Fakat bunlar genelde cihaz performansını düşüren ve/veya geçitten yapıya akım sızmasına yol açacak önerilerdir. Bunlar dışında yüksek performanslı E-mode yapılar, bariyer kalınlığının düşürülmesiyle elde edilebilir (Palacios, 2006 ; Maroldt,

2009). Burada da geçite uygulanan gerilimin yakın tabakalarda gerilime yol açması, deneysel olarak yapıların tekrarlanabilirliğinin zor olması gibi problemler bulunmaktadır.

Yinede bariyer kalınlığının azaltılması, E-mode yüksek performanslı cihaz yapımında bilinen en iyi öneri olarak görülmektedir. Ultra-ince bariyer adını alan, kuyu ile cihazın yüzeyi arasının yaklaşım 5 nm olduğu cihazlarda bu konudaki ilk en iyileştirme çalışması Taşlı ve ark. tarafından yapılmıştır (Tasli, 2010). Bu çalışmada 1-boyutlu, homojen gerilim dağılımlı görece basit Schrödinger-Poisson denklemleri çözümleri ile yüksek elektriksel gerilim ve düşük elektriksel gerilim altında çalışabilecek yapılar önerilmiştir (Tasli, 2010).

Bu makale ışığında üretilen yapıların elektriksel ölçümleri yapıldığında (Günes, 2012), kendi içinde tutarlı oldukları ama literatürdeki değerlerden düşük oldukları görülmüştür. Bu konuda bazı önemli eksikliklerin bulunduğu anlaşılmaktadır.

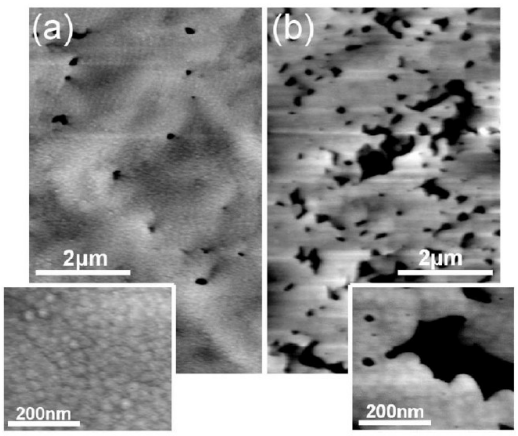
1. 1-boyutlu modellemede kullanılan gerilim modelleri “katmanlara homojen dağılım" yaklaşımı kullanılır. İnce ve gerilimli katmanlarda bu yaklaşım geçerliliğini yitirmeye başlayabilir.

2. Yüksek-gerilim ve yüksek taşıyıcı yoğunluğu durumunda katmanlar ısınacaktır. Buna bağlı olarak katmanların örgü parametreleri, polarizasyonlar ve dolayısıyla taşıyıcı yoğunlukları değişecektir. Taşıyıcı yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı olarak devingenlik değerleri de değişecektir. Bu sebeple modellemede sıcaklık bağımlı çözümleme yapmakgerekmektedir.

3. Nano-ölçekli bir transistörde geçit-kaynak, geçit-savak arası elektriksel gerilim ve buna bağlı geçit kıyısında oluşan mekanik gerilimler 1-boyutlu çözümlerle elde edilemez. Ya analitik formüllerle zenginleştirilen 1-boyutlumsu yada 2-boyutlu çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

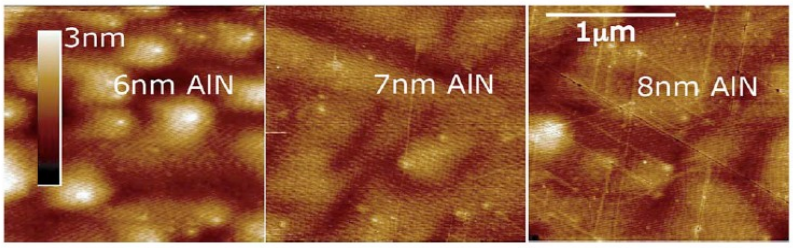
Bu çalışmada, GaN-temelli HEMT yapılarında ultra-ince bariyer tabakaların literatürde yeterli miktarda incelenmemiş yahut hiç incelenmemiş olan farklı biçimlerinin kullanımının elektriksel parametrelere (mobilite, taşıyıcı yoğunluğu, iletkenlik, elektrik alana bağlı sürüklenme hızı ve elektron sıcaklığı, elektronların güç kaybı) ve yapısal parametrelere (kenar ve vida tipi dislokasyon sayıları, yüzey pürüzlülüğü ve ona bağlı olarak 2DEG’in oluştuğu arayüzeyi pürüzlülüğü) olan etkileri geniş bir ölçekte incelenmiştir. Kenar ve vida tipi dislokasyon sayıları X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri ile hesaplanabilmektedir (Sarikavak-Lisesivdin, 2013).

Bu konularda literatürde yukarıda belirtilen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bilgimize göre, ultra-ince bariyerli GaN-temelli HEMT yapılarda sıcak-elektron dinamiği konusu incelenmemiştir. Ayrıca, küçük boyutlu transistörlerde, uygulanan küçük voltajlar dahi büyük elektrik alanlarına yol açabilmekte, kontak kenarlarında buna bağlı oluşabilecek ilave polarlanmaya bağlı gerilimlerin sebep olduğu bozulmalar, aygıtın ömrünü kısaltmaktadır (Joh ve Del Alamo, 2008; Rao, 2013). Ters-piezoelektrik etki adı verilen etki ile oluşan bu bozulmalar, büyütme harici oluşan yeni dislokasyonlar sebebi ile olmaktadır ve yüzeye yakın bir bölgede gerçekleştiğinden bu dislokasyonlar yüzeye çıkabilmektedir. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile bir GaN-temelli transistör yapıda oluşan arayüzey bozulmalarının yüzeye olan etkisinin ölçülebildiği bilinmektedir (Gonschorek, 2006). Şekil 3'de bariyerlerinde sadece 1.1 nm kalınlık farkı bulunan iki GaN-temelli HEMT yapıda yüzey pürüzlülüğü ve dislokasyon farkları görülmektedir.



Şekil 3. Bir GaN HEMT yapıda AlN aratabakası (a) 0.6 nm ve (b)1.7 nm olduğunda yüzeyin durumu (Gonschorek, 2006).

Ultra-ince bariyerlerin yüzey morfolojisine olan etkisi bilgimiz dahilinde sadece Cao ve Jena tarafından incelenmiş bu çalışmadada ters-piezoelektrik etkinin kontak yakınlarındaki yüzey morfolojisine etkisi incelenmemiştir (Cao ve Jena, 2007). Şekil 4'de Cao ve Jena tarafından AlN incefilmin GaN üzerinde büyütülmesinden oluşan çokluyapıdaki yüzey morfolojisi sonuçları gösterilmektedir.



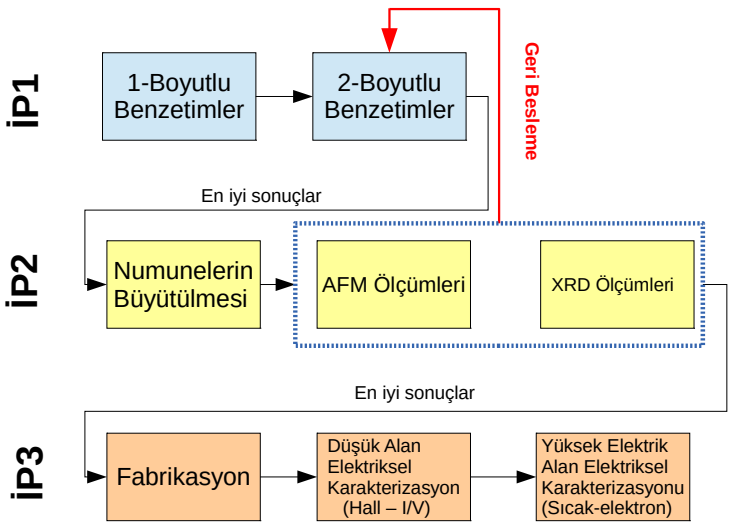
Şekil 4. Yüzeydeki AlN tabakasının kalınlığının yüzey morfolojisine etkisi (Cao ve Jena, 2007).

Görece yüksek elektrik alana maruz bırakılan kontakların yakınlarında yapıdaki gerilimlerin olası boşalmasının, yapıda katastrofik bozulmaya yol açıp açmadığı bilgimiz kadarıyla literatürde incelenmemiştir.

3.GEREÇ ve YÖNTEM

Bu proje, 3 işpaketli olarak planlanmıştır ve genel olarak bu 3 paket, bir mantık sırası ile birbirlerine bağlıdır. Bu iş paketleri sırasıyla:

1. İP1- Ultra-ince Bariyerli HEMT Tasarım ve Benzetimi.
2. İP2- Ultra-ince Bariyer HEMT Büyütme ve Temel Yapısal Karakterizasyonu.
3. IP3- Transistör Yapılarının Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu.



Şekil 5. İş paketlerinin işleyiş sırası

Şekil 5'de iş paketlerinin işleyiş sıraları basitçe belirtilmiştir.

İş paketi 1 - Ultra-ince Bariyer HEMT Tasarım ve Benzetimi: Birinci iş paketi GaN-temelli HEMT yapıların Schrödinger-Poisson denklemlerinin 1-boyutlu ve 2-boyutlu benzetim yöntemleriyle incelenmesini içerir. Burada, literatürden bilinen, iletkenlik ve değerlik bandı enerjileri parabolik davranıştan şaşma, iletkenlik ve değerlik band enerjileri (Vurgaftman, 2001), Varnishi parametreleri ve deformasyon potansiyeller, iletkenlik ve değerlik bandı

kütleri (Kim, 1997), dielektrik sabitler (Komirenko, 1999) ve piezoelektrik ve piroelektrik katsayıları (Ambacher, 2000) gibi parametreler kullanılarak Schrödinger ve Poisson denklem çözümleri eş-uyumlu olarak TiberCAD yazılımı kullanılarak yapıldı. (der Maur, 2008).

Bu numerik model, Schrödinger-Poisson denklemleri GaN-temelli yapıda oluşan üçgenimsi kuvantum kuyudaki 2DEG'in elektriksel potansiyeli ve dalga fonksiyonu iteratif olarak hesaplama üzerine kuruludur. Şekil 6'da da gösterilen bu iterasyonun işleyişi:

1. Schrödinger denkleminden Ψ dalga fonksiyonu hesaplanır,
2. Hesaplanan Ψ dalga fonksiyonu Poisson denkleminde yerine yazılarak elektriksel potansiyel bulunur,
3. Elektriksel potansiyelin bulunmasıyla elektron potansiyel enerjisi tekrar hesaplanır
4. Son olarak da Poisson denkleminden iyonize verici konsantrasyonu hesaplanır.

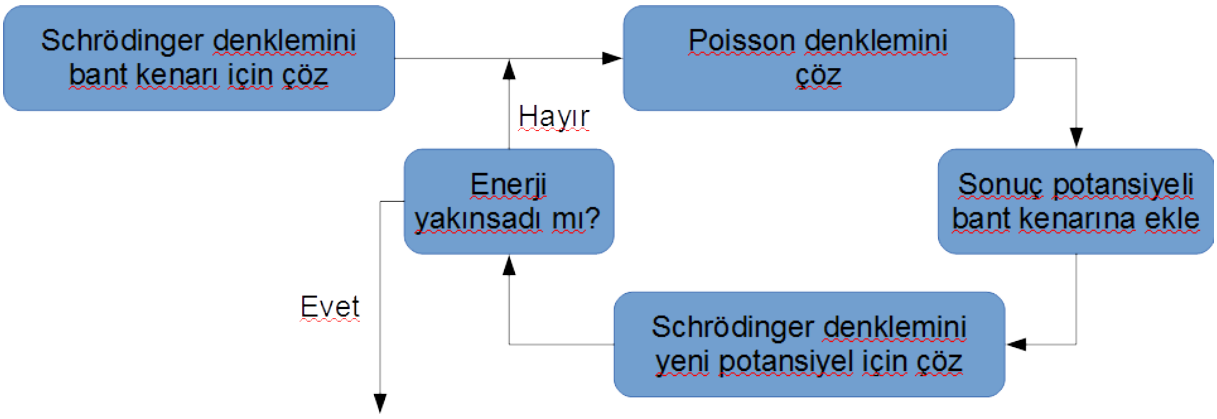
Dalga fonksiyonu hesaplanırken elektriksel potansiyelin ilk beklenen değerinden yararlanılır ve sonra elde edilen dalga fonksiyonu ile tekrar elektriksel potansiyel elde edilir.

Aşağıdaki çözümler 1-boyutlu durumlar için verilmiştir. İki-boyutlu durumlarda benzer çözümlere sahiptir. Sistemin çözümü için 1-boyutlu uzaya yani burada z'ye bağlı bir kuasi-Fermi seviyesi alınır:

$$-\vec{\nabla}\left[\varepsilon(z)\nabla\Phi(z)\right]=4\pi\left[-n+N_D^+\right]. \qquad (1)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2}\nabla\left[\frac{1}{m^*(z)}\nabla\right]\psi_n(z)+V(z)\psi(z)=E_n\psi_n(z). \qquad (2)$$

İlk eşitlik Poisson denklemidir ve n elektron yoğunluğudur ve N_D^+ iyonize vericilerin yoğunluğudur. İkinci eşitlik ise, 1-bant Schrödinger denklemi olarak $V(z) = E_{c0}(z) - e\,\Phi(z)$ bant sınır fonksiyonu vasıtasıyla $\Psi_n(z)$ dalga fonksiyonları ve karşılık gelen E_n özdeğerlerine sahip kuantize durumlar için durumların yoğunluğunu verir. Elektron yoğunluğu n(z), kuasi-Fermi seviyesi $E_{Fn}(z)$ kullanılarak işgal edilen $\Psi_n(z)$ kuantize durumları sayesinde veya Thomas-Fermi yaklaşımı ile Poisson denkleminden elde edilir.



Şekil 6. Schrödinger-Poisson denklemlerinin kendini-eşleyebilen çözümünün iterasyonu (Harrison, 2005)

İyonize vericilerin yoğunluğu ve akım yoğunluğu ise;

$$N_D^+(z)=\frac{N_D(z)}{1+g_D e^{(E_{Fn}(z)-E_D)/k_B T}}. \quad (3)$$

$$j(z)=\mu_n(z)n(z)\nabla_z E_{Fn}(z). \quad (4)$$

ile verilirler. Burada, $N_D(z)$ verici yoğunluğu, E_D iyonlaşma enerjisi, g_D enerji seviyeleri için dejenere faktörü ve $\mu_n(z)$ elektron hareketliliğidir. Elektron hareketliliği, sürüklenme hızından yola çıkılarak hesaplanır. Projede kullanılan Simba hareketlilik modeline göre elektrik alana bağlılığı (Kumar, 2006),

$$v(E)=\frac{\mu E}{\left[1+\left(\frac{\mu E}{v_d}\right)^{\kappa}\right]^{1/\kappa}}. \quad (5)$$

μ , kanal içindeki elektron hareketliliği ve κ ise sıcaklığa bağlılığı belirten bir üstür. v_d , elektron doyum hızıdır ve değerleri sırasıyla 0,82 ve 1,40x10^7 cm/s dir (Caughey ve Thomas, 1967). Schrödinger denklemi için, aşağıda sırasıyla verilen Dirichlet ve Neumann sınır koşulları kullanılır.

$$\Psi(z)|_{snr}=0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Psi(z)}{\partial z}\Big|_{snr} = 0 \qquad (7)$$

Schrödinger denklemi çözümünde bu sınır koşulları kullanılarak çözüm normalize edilir (birlenir).

$$\int |\Psi(z)|^2 dz = 1 \qquad (8)$$

Bunun anlamı tamamen işgal edilen bir durumun tam olarak bir elektrona eşdeğer olmasıdır. Çözümlerimizde Dirichlet ve Neumann koşulları birlikte kullanılmaktadır.

Yukarıda belirtilen Poisson çözümlerinde taşıyıcı yoğunluğuna da ihtiyaç duyulmaktadır. Duruma göre, aygıtın belirli bölgelerinde sadece kuvantum mekaniksel diğer kısımlarında klasik hesaplama yapılması istenilebilir. Bunun için, aygıt klasik bölgeler ve kuvantum bölgeler olarak ayrılır. Klasik bölgelerde, yoğunluk Thomas-Fermi yaklaşımı aracılığıyla hesaplanır. Kuvantum bölgelerinde, ilk olarak, Schrödinger denklemi Dirichlet sınır koşulları kullanılmasıyla çözülür, sonra ayırma enerjisi (E_{ayr}) kuvantum mekaniksel durumlar düşünülerek belirlenir. Bağlı (yerelleşmiş) durumların yoğunluğu n_b olarak adlandırılır.

$$n_b(z) = \sum_{E_n < E_{ayr}} g_{vadi} \frac{m*(z)\,kT}{\pi \hbar^2} |\Psi_n(z)|^2 \ln\left[\frac{1+e^{\left(-E_n + E_{Fn}(z)\right)/k_B T}}{1+e^{\left(-E_{ayr} + E_{Fn}(z)\right)/k_B T}}\right]. \qquad (9)$$

Ayırma enerjisinden yüksek enerjiler için yoğunluk (n_{kat}), Thomas-Fermi yaklaşımı aracılığıyla hesaplanır

$$n_{kat}(z) = g_{vadi} \frac{1}{4\pi^{3/2}} \left(\frac{2\,m*(z)}{\hbar^2}\right)^{3/2} (k_B T)^{3/2}. \qquad (10)$$

Kuvantum bölgesindeki toplam yoğunluk (n_{kb}) ise şöyle verilir:

$$n_{kb}(z) = n_b(z) + n_{kat}(z). \qquad (11)$$

Schrödinger-Poisson denklemlerinin kendini-eşleyebilen çözümü için bir öngörme-düzeltme (predictor-corrector) yöntemi kullanılır. Kendini-eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözüm işlemi şu şekilde izlenir:

İlk olarak, izinli potansiyel için kuvantum mekaniksel durumlar belirlenir. Böyle bir öngörme yoğunluğundan çıkarsama yapılabilir. Esas itibariyle, ilk sırada bir pertürbasyon ansatz kullanılır, yani potansiyel değişimlerine göre değişen özdeğerler ve potansiyel varyasyonlarında dalga fonksiyonların değişmeden kaldığı varsayılır. Bu öngörme yoğunluğu ile doğrusal olmayan Poisson denklemi çözülecektir ve böylece yeni bir düzeltme potansiyeli elde edilir. Bu potansiyelden, hemen yeni özdeğerler belirlenebilir. Bu süreç yakınsanana kadar tekrarlanır.

Bu süreler ve ilgili hesaplar TiberCAD yazılımı tarafından yapılmaktadır. Hesapların yapılması için giriş dosyası hazırlanmalıdır. Giriş dosyasının TiberCAD'de çalıştırılması sonucu hesaplamalar yapılır ve çıkış dosyalarında sonuçlar verilir.

Giriş dosyasında:

- Çalışılan numunenin boyutu (1B, 2B veya 3B), çokluyapının malzemeleri ve biçimi, varsa uygulanan öngerilim, varsa katkılama, klasik hesaplanması gereken yerlerin ve kuvantum bölgelerinin nerede olduğu bilgisi, ve istenen çıktı özellikleri bilgisi bulunur.

Böyle hazırlanan bir giriş dosyasının işlenmesi sonucu hesaplanabilen çıktılar şu şekildedir:

- Bant yapısı, gerginlik, piezo- ve piroelektrik yükler, elektron/deşik yoğunlukları (uzay yük), elektrostatik potansiyel, akım, dalga fonksiyonları (Sarikavak-Lisesivdin, 2013).

Bu projede kullanılan kodda yukarıda anlatılan numerik modele uygun şekilde Schrödinger-Poisson denklemlerinin kendini-eşleyebilen çözümlerinin akışı şu biçimde gerçekleşir,

1. Veritabanından malzeme verilerini okuyan ve aygıt geometrisini içinde bulunan giriş dosyası işlenir.
2. Giriş dosyasındaki malzemelere ve geometriye uygun bir şekilde gerginlik hesaplanır.
3. Gerginlik ve van-de-Walle modeli hesaba katılmasıyla bant kenarları hesaplanır. Bu muhtemelen dejenere enerji durumlarının ayrılmasına yol açabilir.
4. Piezoelektrik ve piroelektrik kutuplanma yükleri belirlenir.
5. Program kuvantum bölgelerini düzenler ve kuvantum durumları ile fiziksel çözümleri içeren diğer tüm ilgili değişkenleri ayırır.
6. Ana program başlar ve potansiyel için bir başlangıç değeri belirlenir.

7. Isısal dengedeki doğrusal olmayan Poisson denklemi yapı içi potansiyeli belirlemek amacıyla çözülür.

8. Sonra sonuç yakınsayana kadar iterasyon gerçekleşir.

9. Sonuçlar özel dosyalara yazdırılır.

Yukarıdaki hesaplamalı yöntem kullanılarak yapılan 1-boyutlu çözümler kullanarak kabaca bazı taşıyıcı yoğunluğu ve kuyu içinde elektron bulunma olasılıkları gibi değerleri verecektir. En yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve kuyu içindeki elektron bulunma olasılığı dağılımları kuyu duvarlarına ve alttaşa doğru yaklaşmayıp düzgün dağılan yapılar 2-boyutlu analiz için seçilirler.

2-boyutlu analizde benzer girdiler kullanılır. Artık 2-boyutlu analizde bir transistör gibi savak-geçit-kaynak kontaklarıda hesaba katılır. Katmanlar arası gerilimlerin homojen dağıtılmaması ve sıcaklıkta hesaba katılır. Yukarıda bahsedilen çoğu parametrenin sıcaklık bağımlısı olanları ile kontaklar arası uygulanan gerilimlerin literatürde bilinen elektrik alan bağımlı devingenliğe etkisi kullanılarak devingenlikte modellenir ve sonuçta farklı geçit uzunlukları ve geçit potansiyeline bağlı I_{DS}/V_{DS} verileri elde edilir. Bu çıktı ve analitik yaklaşımlar ile geçiş iletkenliği ve maksimum çalışma frekanslarıda tahmin edilebilir.

<u>İş paketi 2 - Ultra-ince Bariyer HEMT Büyütme ve Temel Yapısal Karakterizasyonu</u>: İkinci iş paketinde, benzetimden elde edilen elektron yada deşiklerin kuyu içinde dağılımları yoğunlukları ve devingenlikleri hakkında ki bilgiler ışığında MOCVD yöntemi ile numuneler büyütülmesi planlanarak, numuneler Bilkent Nanotamda büyütüldü.

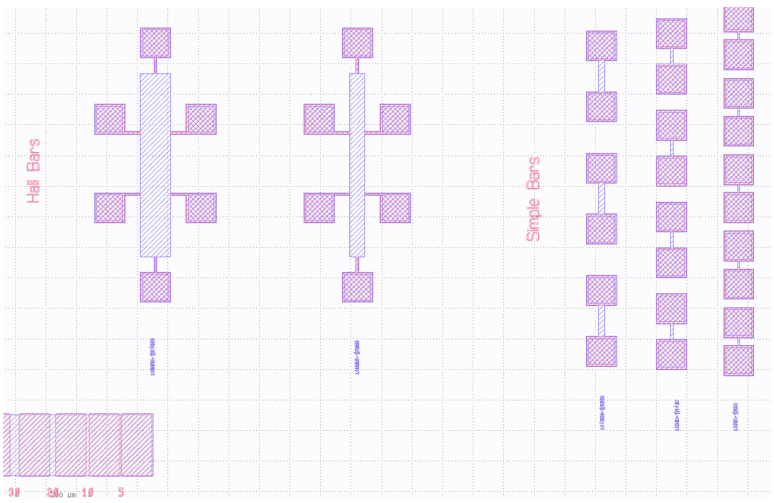
Ayrıca numunelerde kuyu yüzeye çok yakın olduğundan (~5nm) yüzey bozukluğunun AFM ile ölçümünün, kuyudaki arayüzey bozukluğunu yaklaşık olarak verdiği kabul edilmiştir (Gonschorek, 2006). AFM ölçümleri, projeden alınacak olan sistemle gerçekleştirilecektir. AFM ölçümünün yanı sıra, (0002) simetrik, (10-12) ve (10-15) antisimetrik düzlemlerinden alınacak x-ışını kırınımı ölçümleri (XRD) ile kenar ve vida tip dislokasyonların ilgili arayüzeylerde oluşumuna ve miktarlarına dair hesaplar yapılabilmiştir (Sarikavak-Lisesivdin, 2013). XRD ölçümleri Bilkent Nanotamda gerçekleştirilmiştir. Birinci ve ikinci iş paketi boyunca elde edilen bu verilerden 3. iş paketinde, optik fonon saçılması, akustik fonon saçılması, arayüzey saçılması, alaşım saçılması, safsızlık saçılması gibi saçılma mekanizmalarında kullanılmak üzere arayüzey bozukluğu, dislokasyon sayısı, kuyu genişliği gibi parametrelere sahip olunmuştur (Lisesivdin, 2007). Ayrıca en iyi yapısal özelliklere sahip olan numuneler 3. iş paketinde kullanılmak üzere seçildi.

<u>İş paketi 3 - HEMT Yapılarının Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu</u>: 2. İş paketinde önerilen yapısal özellikleri en iyi olan (düşük yüzey pürüzlülüğü, düşük dislokasyon sayısı) numuneler fabrikasyon işlemine sokulacaktır. Fabrikasyonda yaklaşık 1x1 cm^2 boyutlarında kesilen numunelere Hall bar, Basit bar ve van der Pauw tipi ohmik kontaklı yapılar basıldı.

Van der Pauw numuneler kare biçimli numunelerin köşelerine kontak basılması ile yapılırken, Hall bar ve basit bar numuneleri bu iş için tasarlanmış hazır maskeler kullanılarak fabrike edildi (Şekil 7).

Kontakların yapımında Ti/Al/Ni/Au alaşımı (sırasıyla 200/20/100/20 nm) kullanıldı (Lisesivdin, 2007). Tüm kontak işlemlerinde termal buharlaştırma işlemi ile metaller sıra ile buharlaştırıldı, daha sonrasında alaşımlaştırma ve Ohmikleştirme işlemi hızlı ısıl fırın kullanılarak 2 dk süre ile 850 ^oC'de tutularak yapıldı.

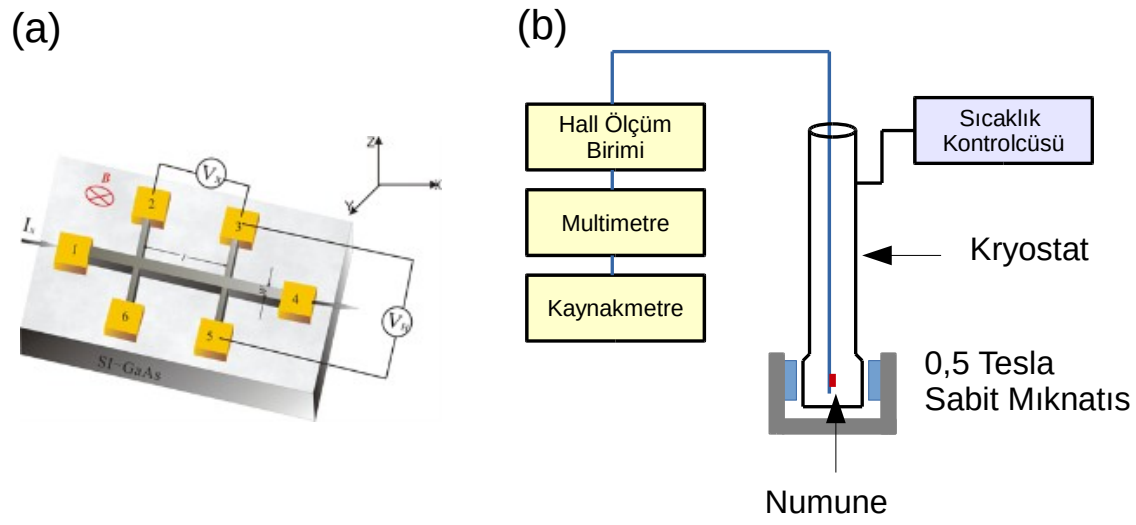
Fabrike edilen numunelerin sahip oldukları kare biçimli kontaklar 100x100 µm boyutludur. Bu sebeple numuneler, üzerinde büyük (2x2mm) kontak padlerinin bulunduğu PCB'lere ısıl iletken epoksi ile tutturulacak, Hall bar ve basit barların kontaklarından PCB'deki kontaklara bağlantılar Au tellerle tel bağlama aygıtı ile yapılmıştır. Elde edilen numuneler ölçümlere hazırdırlar. Numuneler kryostata, bakır teller ile kontak padlarinde indiyum eriterek bağlanırlar.



Şekil 7. Hall bar ve basit barlar için maske tasarımları

Fabrikasyon sonrasında Hall ölçümleri ve Sıcak-elektron ölçümleri yapılarak yapıların temel elektriksel özellikleri incelendi. Hall ölçümleri (Lisesivdin, 2007) Bilkent Nanotam bünyesinde

bulunan 10-300K sıcaklık aralığında çalışan Hall ölçüm sisteminde Hall bar ve van der Pauw numuneler kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 8). Sıcak elektron ölçümleri Patane, 2012) ise 77K sıcaklığında çalışan kriyostat, yüksek voltaj puls jeneratörü (200V) ve yüksek hızlı osiloskop ekipmanları kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 8).

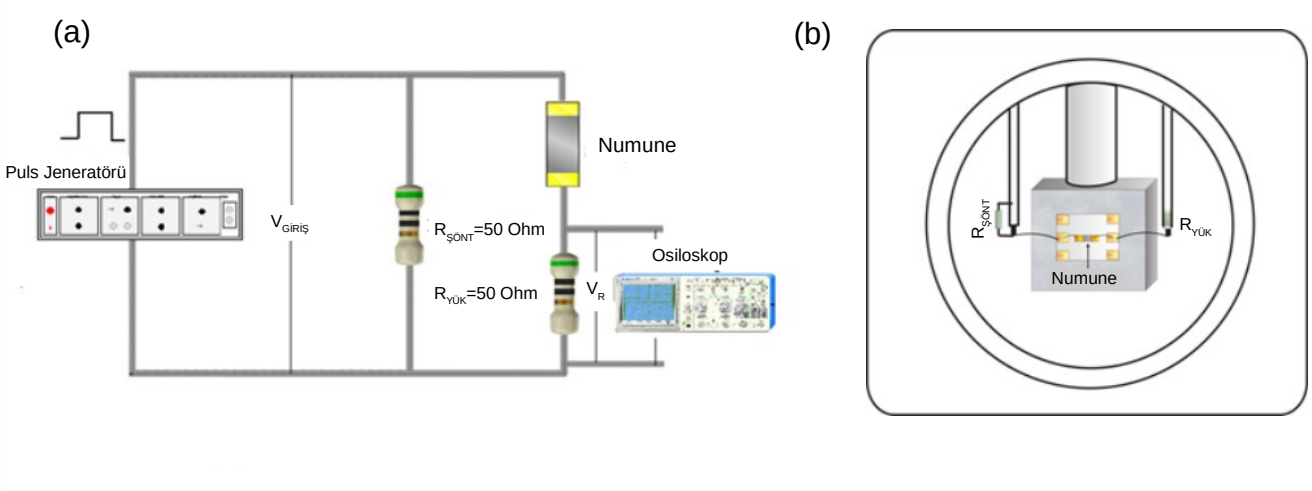


Şekil 8 (a) Hall bar biçimli numunede manyetik alan yönü ve akım ve gerilim yönleri. (b) Hall ölçüm sistemine ait diagram.

Ayrıca ultra-ince bariyerli transistörlerde görüldüğü raporlanan ters-piezoelektrik etkinin kontak kenarlarında gösterdiği katastrofik deformasyonu AFM ile gösterebilmek amacı ile Gate kontaklı numuneler fabrike edildi ve yüksek elektrik alan altında kontak kenarlarında olası katastrofik bozunumların varlığı incelendi. Bunun için Hall bar fabrikasyonunda ilaveten bir de gate kontağı eklendi. Gerekli maske elimizde mevcuttur. Bu ölçüm esnasında kaynak-savak arası biaslama ve akımlarının ölçülme işlemi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, sırasıyla projeden alınması önerilen kaynakmetre aygıtı ile atomik kuvvet mikroskobu aygıtları kullanarak gerçekleştirildi. Alınması istenen GBIP-USB adaptörü, alınması istenen kaynakmetre aygıtını laboratuvarımızdaki USB portu olan herhangi bir bilgisayara bağlamaya yarayacaktır.

Bu iş paketinde elde edilecek elektriksel karakterizasyon ile deformasyon potansiyeller, etkin kuyu genişlikleri, arayüzey bozukluğunun seçilen büyütme parametrelerine bağlı değişimleri gibi bir çok büyütme temelli değişkenlere cevap bulduk. Ayrıca transistör karakteristiklerine kötü yönde etkiyen 2DEG dışı parazitik kanalların varlığı incelemeleride Basit Paralel İletim Ayıklama Yöntemi (ing. SPCEM) (Lisesivdin, 2009) yöntemi kullanarak saf kuyu iletimine ait verilerin hesaplandı. Bu iş paketinde, elde edilen en iyi deneysel devingenlik ve taşıyıcı

sayısına sahip yapılarla projeden ayrı olarak transistörler üretilerek çıkış gücü, kazanç, I_{DS}/V_{DS}, S-parametreleri, geçiş iletkenliği, maksimum çalışma frekansı gibi parametreleri proje sonrasında incelenmek üzere kullanıldı (Mizuno, 2012).



Şekil 9. (a) Sıcak elektron ölçüm sistemi düzeneği ve (b) basit bar biçimli numunenin kryostat içinde yerleştirilmiş hali.

4.BULGULAR

Proje üç iş paketinden (İP) oluşmaktadır:
1. İP: Ultra-ince Bariyer HEMT Tasarım ve Benzetimi
2. İP: Ultra-ince Bariyer HEMT Büyütme ve Temel Yapısal Karakterizasyonu
3. İP: HEMT Yapılarının Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu

Proje süresince iş paketlerinde hedeflenen hesaplamalar yapılmış, sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

4.1. 1. İP: Ultra-ince Bariyer HEMT Tasarım ve Benzetimi

GaN temelli ultrainces bariyerli çokluyapıların en iyi özelliklere sahip bir şekilde tasarlanması araştırmasında bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri kullanılarak toplam 7 farklı çokluyapı grubu incelendi. Bu çokluyapılar, grubumuzun yıllar boyunca bu konularda yaptığı çalışmalar göz önüne alınarak yapılan bir “fikir fırtınası” tartışmasında ortaya çıkarılmışlardır.
1- GaN/AlN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu
2- n-GaN/AlN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu
3- GaN/n-AlN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu
4- n-GaN/AlN/InAlN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu
5- n-GaN/InAlN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu
6- n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu
7- n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN Ultrainces Çokluyapı Grubu

Bu çokluyapı grupları kendi içlerinde her bir katman kalınlığı ve eğer varsa katkılı katmanın katkısı değiştirilerek hesaplandı. Burada “ultrainces” bariyer diyerek kuvantum kuyu ile yüzey arasında maksimum 6 nm’lik bir bariyer kalınlığı olmasını kabul ettik. Hesaplanan iletkenlik band yapısı, taşıyıcı yoğunluğu ve bulunma olasılıkları sonuçlarına göre birbirleri ile karşılaştırılmak üzere toplam 8 ultrainces bariyerli çokluyapı en iyileştirilmiş sonuç olarak önerildi. Bu 8 çokluyapı kendi aralarında taşıyıcı yoğunluğu ve bulunma olasılığı özelliklerine göre kıyaslanarak 5 çokluyapıya indirgendi.

Bu optimize edilmiş 5 çokluyapının 2-boyutlu simülasyonları yapıldı. Buna göre yüzeyden uygulanan potansiyel fark (transistördeki geçit gerilimi gibi) bağlı olarak kristaldeki gerginlik özelliklerindeki değişimler hesaplandı. Hesaplanan bu değişimlerin ışığında deneysel olarak büyütülmek üzere 3 ultraince bariyerli çokluyapı öne sürülmüştür.

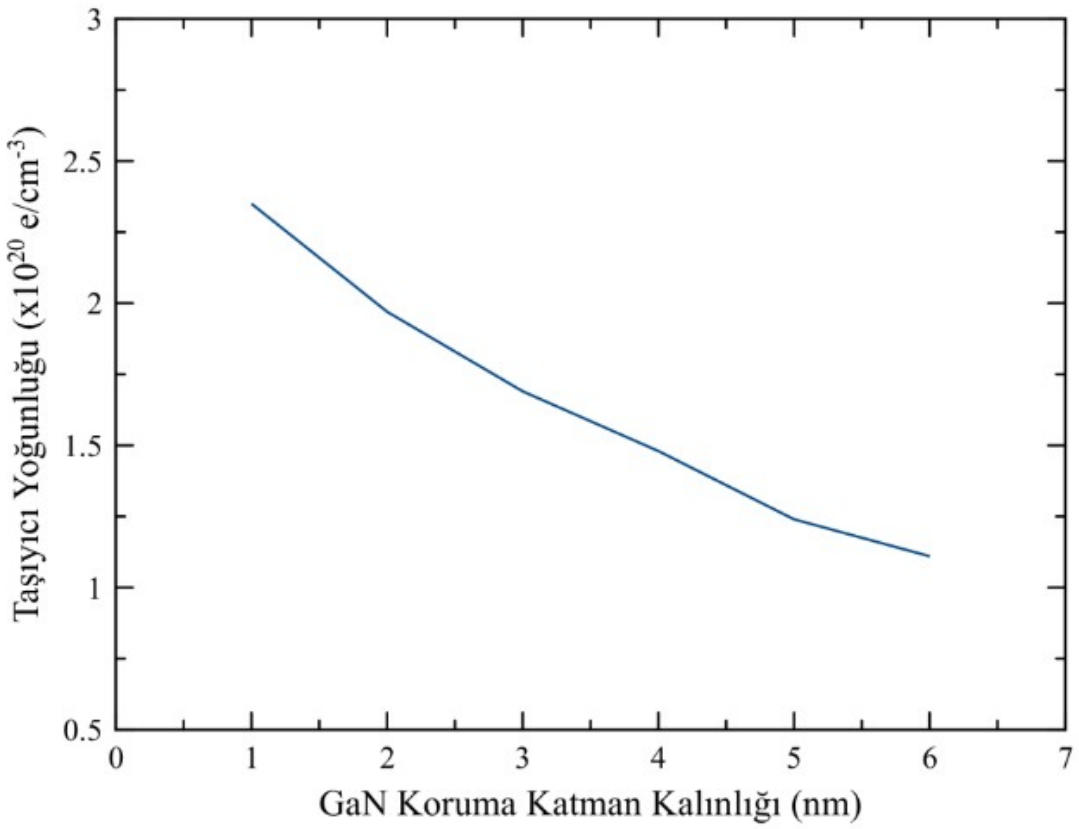
4.1.1. İncelenen Ultraince Bariyerli Çokluyapıların Bir Boyutlu Taşıyıcı Yoğunluğu ve Bulunma Olasılığı Hesaplamaları

Toplam 7 ultraince bariyerli çokluyapı grubu katman kalınlıkları ve katkı oranlarının çokluyapı arayüzeyinde biriken iki boyutlu elektron gazı (2BEG) üzerindeki etkileri incelenerek kendi içinde en az bir en iyileştirilmiş bir çokluyapı öne sürülmüştür. Bu en iyileştirme aşamaları ilk çokluyapı grubu için detaylı olarak verilmiştir. Diğer çokluyapı gruplarında aynı aşamalar gerçekleştirilmiş olup, bu gerçekleştirilen aşamaların sonucunda elde edilen en iyileştirilmiş çokluyapıların katman kalınlıkları, katkı oranları gibi yapısal özellikleri verilmiştir.

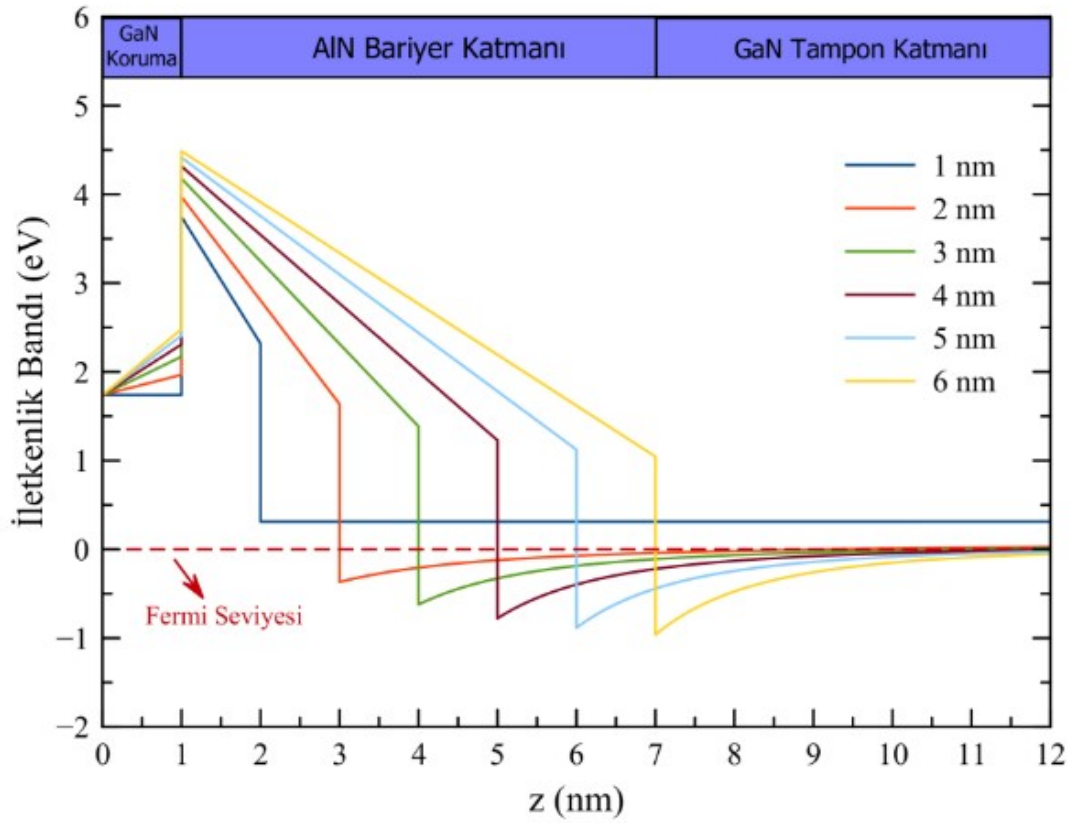
4.1.1.a. GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

Başlangıç olarak 1 nm GaN koruma katmanı ve 3 nm AlN bariyer katmanı kalınlıkları için GaN koruma katmanı kalınlığına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğundaki değişim bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri kullanılarak incelenmiştir.

Şekil10, 3 nm AlN bariyer katman kalınlığına sahip katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda taşıyıcı yoğunluğunun GaN koruma katman kalınlığına bağlı değişimini göstermektedir. GaN koruma katman kalınlığı arttıkça taşıyıcı yoğunluğunda bir azalma görülmektedir. Bu değişim GaN ve AlN katmanlarının her ikisinin mevcut olan güçlü piezoelektrik polarizasyonlar ile açıklanabilir. GaN koruma katmanının kalınlığının artması GaN koruma katmanı ve AlN bariyer katmanı arasındaki piezoelektrik polarizasyonda bir artışa neden olur ve bu artıştan dolayı iki katman arasındaki iletkenlik bandında bükülmesi de artar. Bunun sonucunda AlN/GaN arayüzeyindeki 2BEG birikiminde bir düşüş olur. Şekil1'de görülen değişim Smorchkova ve çalışma arkadaşları tarafından daha önce gerçekleştirilen bir çalışma ile uyumludur (Smorchkova, 2001). Dolayısıyla GaN koruma katmanının 1 nm olduğu durum en yüksek taşıyıcı yoğunluğunun elde edildiği durumdur.

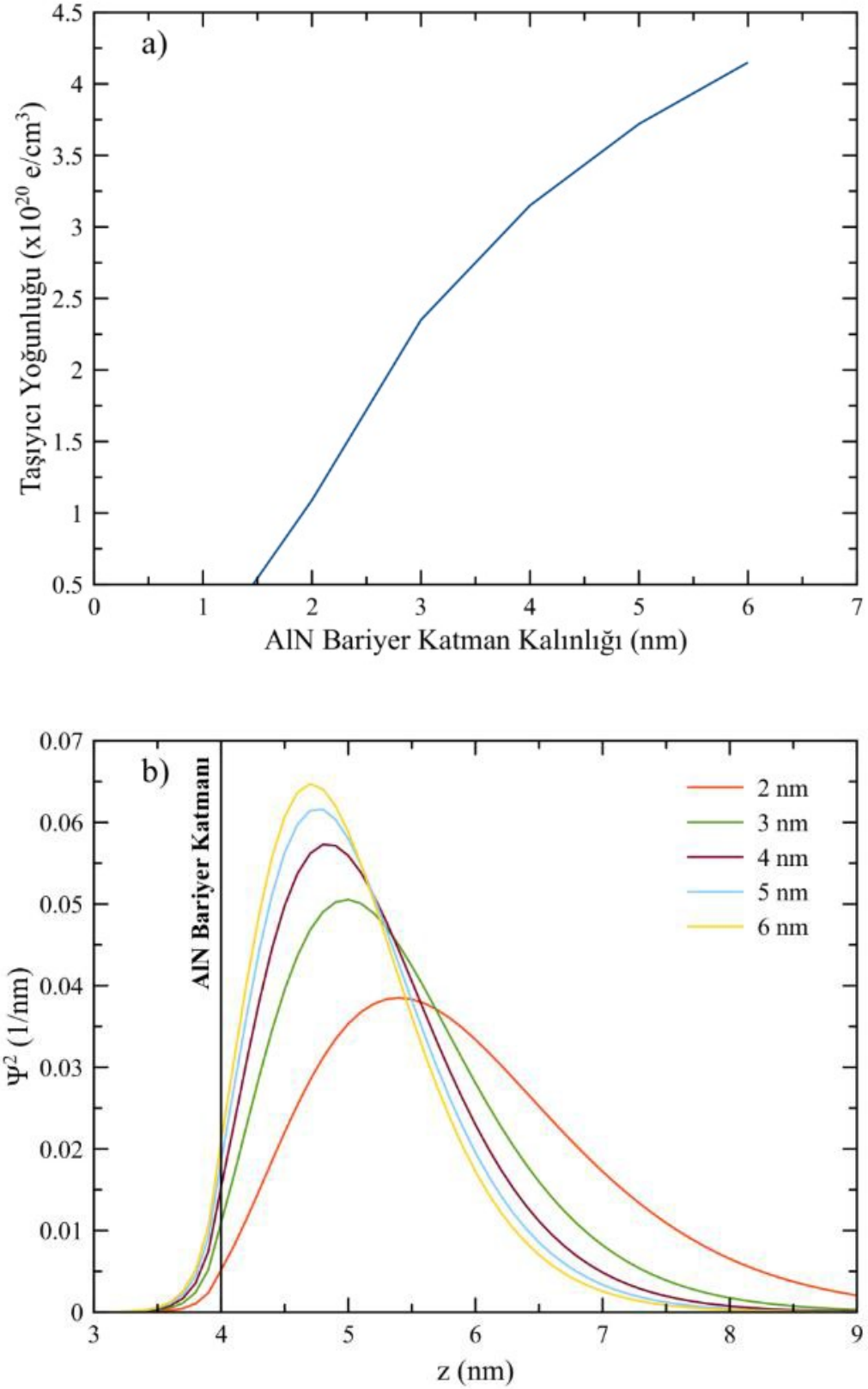


Şekil10. Katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda taşıyıcı yoğunluğunun GaN koruma katman kalınlığına bağlı değişimi.



Şekil 11. Katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda AlN bariyer katman kalınlığındaki değişime göre iletkenlik band grafiği.

1 nm GaN koruma katmanına sahip katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılar için yapılan optimizasyonun ikinci aşamasında AlN bariyer kalınlığının iki boyutlu elektron gazı üzerindeki etkileri göz önüne alındı. Şekil11'de bu çokluyapılarda AlN bariyer katman kalınlığının değişiminin iletkenlik band üzerindeki etkisi gösterilmektedir. 1 nm AlN bariyer katmanı durumunda iletkenlik bandında üçgenimsi bir kuvantum kuyusu oluşturacak şekilde bükülmediği görülüyor. 2 nm ve üzeri durumlarda kalınlık arttıkça oluşan üçgenimsi kuvantum kuyusunun derinliği artmaktadır.



Şekil 12. Katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda AlN bariyer katman kalınlığına bağlı olarak a) taşıyıcı yoğunluğundaki değişim ve b) AlN/GaN arayüzeyindeki üçgenimsi kuyu içindeki iki boyutlu elektron gazı taşıyıcılarının bulunma olasılığındaki değişim.

Şekil12 a) katkısız GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapılarda AlN bariyer katman kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluğundaki değişimi vermektedir. Buna göre AlN bariyer katman kalınlığı arttıkça taşıyıcı yoğunluğunda belirgin bir artış vardır. Ancak 5 ve 6 nm durumları için bu artış bir miktar azalmaktadır. Diğer taraftan, GaN tampon katmanı üzerine büyütülen AlN bariyer katmanının kalınlığı örgü uyumsuzluğu nedeniyle sınırlıdır. Teorik hesaplamalara göre yaklaşık 6,3 nm kalınlığına kadar GaN tampon katmanı üzerine AlN bariyer katmanı büyütülebilir (Cao, 2007 ve Singh, 1992). Ancak daha önce yapılan deneysel çalışmalarda, 5 ve 6 nm AlN bariyer katman kalınlığına sahip çokluyapılarda bu örgü uyumsuzluğuna bağlı olarak elektron hareketliliği oldukça düşüktür [Cao, 2007] . Bu nedenle daha yüksek taşıyıcı yoğunluklarına rağmen bu bariyer katman kalınlıkları için elektriksel olarak iyi özelliklere sahip çokluyapıların büyütülmesi önerilmemektedir. Şekil12 b) ise AlN bariyer katman kalınlığının değişimine göre AlN/GaN arayüzeyindeki üçgenimsi kuyudaki taşıyıcıların hesaplanan bulunma olasılıklarını göstermektedir. Böyle bir kuyudaki taşıyıcının bulunma olasılığının tepe noktasının bariyerin olduğu arayüzeye daha yakın olması arayüzey bozukluğu saçılmasının taşıyıcı hareketliliğinde oldukça baskın olduğuna işaret etmektedir. Aynı şekilde, bu tepe noktası bariyer ile olan arayüzeyden uzak olması kuyu içindeki taşıyıcıların GaN tampon katmanındaki safsızlıklar tarafından saçılmaya uğrayacakları anlamına gelir. Bu nedenle daha yüksek taşıyıcı hareketliliği istenilen optimize çokluyapılar için bulunma olasılığı dağılımı ne arayüzeye çok yakın olmalı ne de çok uzak olmalıdır. Bu durumda, 4 nm AlN bariyer katman kalınlığına sahip çokluyapı diğer çokluyapılara göre daha yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahip olabilir.

GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen en iyileştirilmiş bir çokluyapı için GaN koruma katmanının kalınlığı 1 nm ve AlN bariyer katmanının kalınlığı 4 nm olarak belirlenmiştir.

4.1.1.b- n-GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

n-GaN/AlN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen optimize bir çokluyapı için $1x10^{19}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu ile Si katkılı GaN koruma katmanının kalınlığı 2 nm ve AlN bariyer katmanının kalınlığı 4 nm olarak belirlenmiştir.

4.1.1.c. GaN/n-AlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

GaN/n-AlN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen optimize bir çokluyapı için GaN koruma katmanının kalınlığı 2 nm ve $1x10^{19}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu

ile Si katkılı AlN bariyer katmanının kalınlığı 4 nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca AlN bariyer katman kalınlığı 3 nm olan ikinci bir çokluyapı da önerilmiştir.

4.1.1.d. n-GaN/AlN/InAlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

n-GaN/AlN/InAlN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen optimize bir çokluyapı için $1x10^{18}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu ile Si katkılı GaN koruma katmanının kalınlığı 2 nm, AlN bariyer katmanının kalınlığı 3 nm ve $In_{0.17}Al_{0.83}N$ bariyer katmanının kalınlığı 2 nm olarak belirlenmiştir.

4.1.1.e. n-GaN/InAlN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

n-GaN/InAlN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen optimize bir çokluyapı için $1x10^{20}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu ile Si katkılı GaN koruma katmanının kalınlığı 2 nm ve $In_{0.17}Al_{0.83}N$ bariyer katmanının kalınlığı 3 nm olarak belirlenmiştir.

4.1.1.f. n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen optimize bir çokluyapı için $1x10^{18}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu ile Si katkılı GaN koruma katmanının kalınlığı 1 nm, $In_{0.17}Al_{0.83}N$ bariyer katmanının kalınlığı 4 nm, GaN kanal katman kalınlığı 8 nm ve $1x10^{18}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu ile Mg katkılı $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ arka-bariyer katman kalınlığı 4 nm olarak belirlenmiştir.

4.1.1.g. n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN Ultraince Çokluyapı Grubu

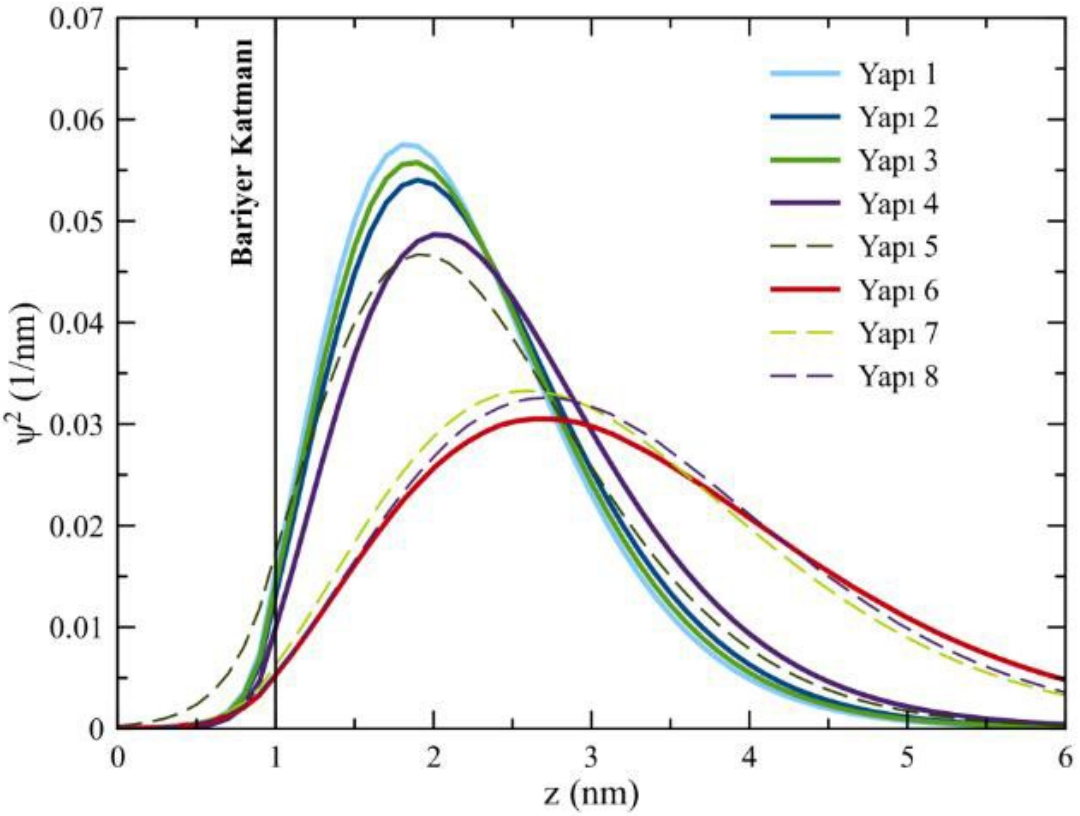
n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN ultraince çokluyapı grubu için gerçekleştirilen bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ile elde edilen optimize bir çokluyapı için n-tipi katkılı GaN koruma katmanının kalınlığı 1 nm, $In_{0.17}Al_{0.83}N$ bariyer katmanının kalınlığı 4 nm, GaN kanal katman kalınlığı 8 nm ve $1x10^{18}$ cm^{-3} katkı konsantrasyonu ile Mg katkılı $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ arka-bariyer katman kalınlığı 4 nm olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Çokluyapı grupları hesaplamaları sonuçları:

Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri kullanılarak elde edilen toplam 8 en iyileştirilmiş çokluyapı için hesaplanan taşıyıcı yoğunlukları Tablo1'de verilmiştir. Ayrıca bu en iyileştirilmiş çokluyapıları için üçgenimsi kuvantum kuyu içerisindeki bulunma olasılıklarının dağılımının kıyaslanması Şekil13'te gösterilmiştir. Şekil

13’de kalın çizgiler gerginliğe bağlı gerginlik incelemeleri için seçilen çokluyapıları işaret etmektedir.

Bu verilerin ışığında gerilime bağlı gerginlik incelemeleri için 5 ultraince bariyerli çokluyapı öne sürülmüştür.



Şekil 13. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen en iyileştirilmiş çokluyapılar için bulunma olasılığı.

Tablo1. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen optimize çokluyapıların taşıyıcı yoğunluğu.

Yapı No	Yapı	Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-3})
Yapı 1	GaN (1 nm)/AlN (4 nm)/GaN	$3{,}15x10^{20}$
Yapı 2	n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)/GaN	$2{,}75x10^{20}$
Yapı 3	GaN (2 nm)/n-AlN (4 nm)/GaN	$2{,}96x10^{20}$
Yapı 4	GaN (2 nm)/n-AlN (3 nm)/GaN	$2{,}15x10^{20}$
Yapı 5	n-GaN (2nm)/AlN (3nm)/InAlN (2nm)/GaN	$3{,}90x10^{19}$
Yapı 6	n-GaN (2 nm)/InAlN (3 nm)/GaN	$3{,}25x10^{19}$
Yapı 7	n-GaN(1nm)/InAlN(4nm)/GaN/n-InGaN/GaN	$2{,}80x10^{19}$
Yapı 8	n-GaN(1nm)/InAlN(4nm)/GaN/p-InGaN/GaN	$2{,}89x10^{19}$

Tablo1'deki verilere göre en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olan Yapı1 Şekil13'e göre aynı zamanda bulunma olasılığı en dar ve kuyu içinde elektron sınırlamasının en iyi olduğu yapı olarak görülüyor. Yapı2 ve Yapı3 taşıyıcı yoğunlukları yüksek olan ve bulunma olasılığı grafiğine göre üçgenimsi kuvantum kuyu içindeki elektron sınırlamaları iyi olan diğer yapılardır. Bu üç yapı için uygulanan gerilime bağlı gerginlik değişimleri benzer katman yapılarından dolayı birbirlerine yakın olacaktır. Yapı4 ise bu üç yapıdan sonraki en iyi taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. Ancak AlN bariyer katmanı 3 nm kalınlığa sahip olduğu için gerginlik patlama değerinden oldukça uzaktır ve gerilime bağlı gerginlik değişimleri üç yapıya göre daha düşük olacaktır. Yapı5 için taşıyıcı yoğunluğu Yapı4'e göre daha azdır ve Şekil4'e göre üçgenimsi kuvantum kuyu içindeki elektronların bulunma olasılığı arayüzeye diğer yapılardan daha yakındır ve bu arayüzey saçılmasını artıracaktır. Yapı6 için taşıyıcı yoğunluğu ayrıca Yapı7 ve Yapı8'e göre daha yüksektir ve Yapı4 ile de görece kıyaslanabilir bir değerdir. Her üç yapı da örgü uyumlu birer çokluyapı oldukları için gerginlik patlamasının görülmesi beklenmez ama taşıyıcı yoğunluğunun daha yüksek olduğu Yapı6 aralarından gerilime bağlı gerginlik incelemeleri için önerilebilir. Bu durumda 1 boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre gerilime bağlı gerginlik incelemeleri için beş yapı önerilebilir: Yapı 1, Yapı 2, Yapı 3, Yapı 4 ve Yapı 6.

Tablo2. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre önerilen beş yapı

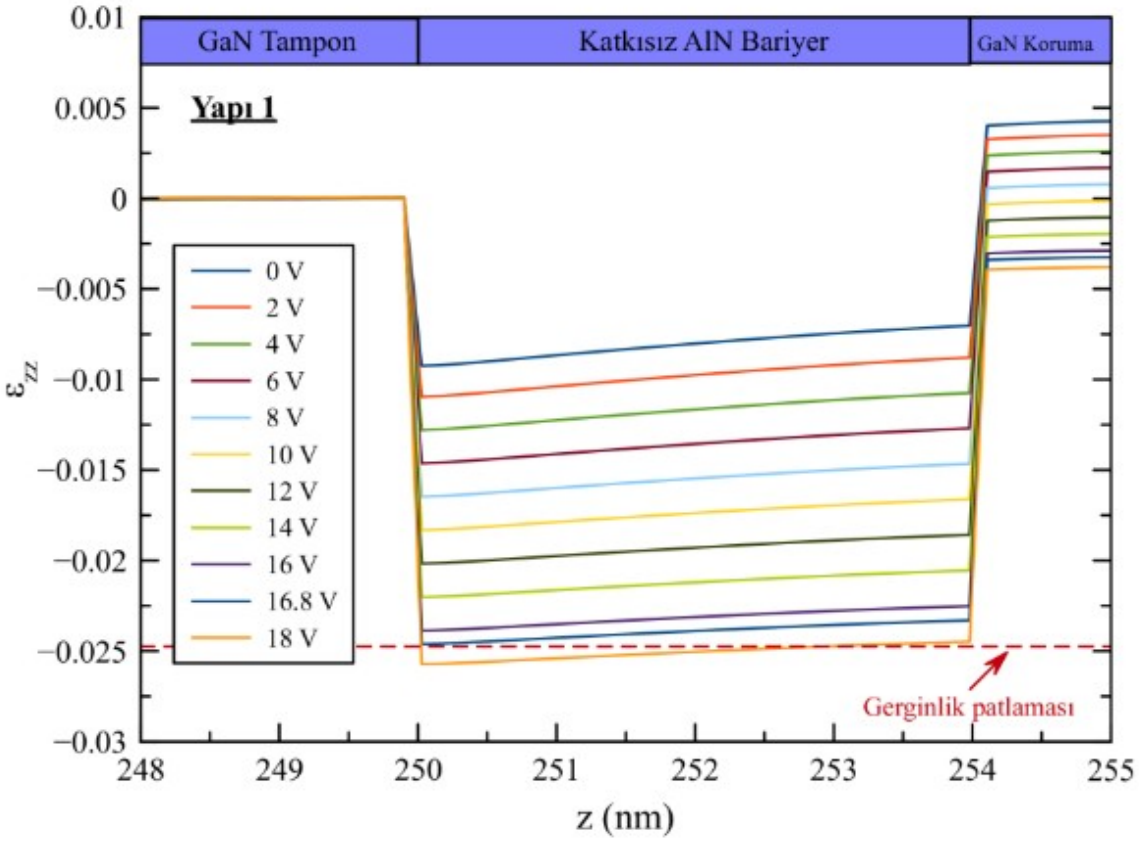
Yapı No	Koruma Katmanı	Bariyer Katmanı	Tampon Katmanı	Katkı Yoğunluğu (cm^{-3})	Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-3})
1	GaN (1 nm)	AlN (4 nm)	GaN	-	$3{,}15\times10^{20}$
2	n-GaN (2 nm)	AlN (4 nm)	GaN	1×10^{19}	$2{,}75\times10^{20}$
3	GaN (2 nm)	n-AlN (4 nm)	GaN	1×10^{19}	$2{,}96\times10^{20}$
4	GaN (2 nm)	n-AlN (3 nm)	GaN	1×10^{19}	$2{,}15\times10^{20}$
6	n-GaN (2 nm)	$In_{0.17}Al_{0.83}N$ (3 nm)	GaN	1×10^{20}	$3{,}25\times10^{19}$

4.1.3. Gerilime Bağlı Gerginlik ve Sıcaklık İncelemeleri

Başlangıç olarak yüzeyden uygulanan gerilimle seçilen ultraince bariyerli çokluyapıların arayüzeylerindeki gerginliklerinin değişimi incelendi.

Gerginlik incelemesi işleminde yüzeyden bir transistörün geçit kontağına uygulanana benzer biçimde bir elektriksel potansiyel uygulandı. Buradan yapıların dayanabileceği maksimum geçit voltajları elde edildi. Ardından gerginlik patlama sınır değerlerine karşılık gelen gerilimler için kanal sıcaklıkları değerlendirildi.

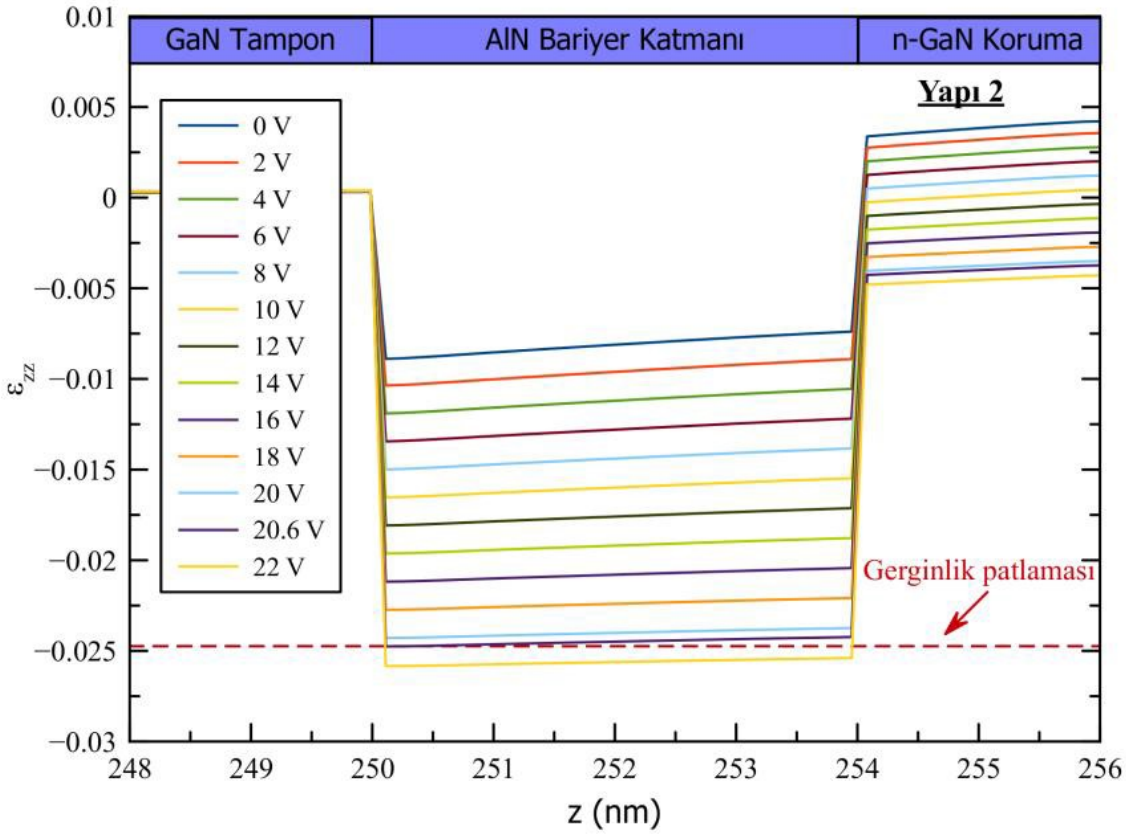
4.1.3.a. Yapı1'e ait gerginlik incelemesi



Şekil 14. GaN (1 nm)/AlN (4 nm)/GaN çokluyapısı (Yapı1) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi.

Burger vektörü yöntemi ile gerginlik patlaması sınır değeri hesaplamasına göre AlN'ün kritik katman kalınlığı 6,28 nm'dir ve bu kalınlık değerine karşılık gelen gerginlik değeri (ε_{zz}) 0,0247'dir. Şekil14'e göre GaN(1nm)/AlN(4nm)/GaN çokluyapısında (Yapı1) gerginlik patlaması için gerginlik sınır değerine 16.8 V'ta ulaşıldığı hesaplanmıştır.

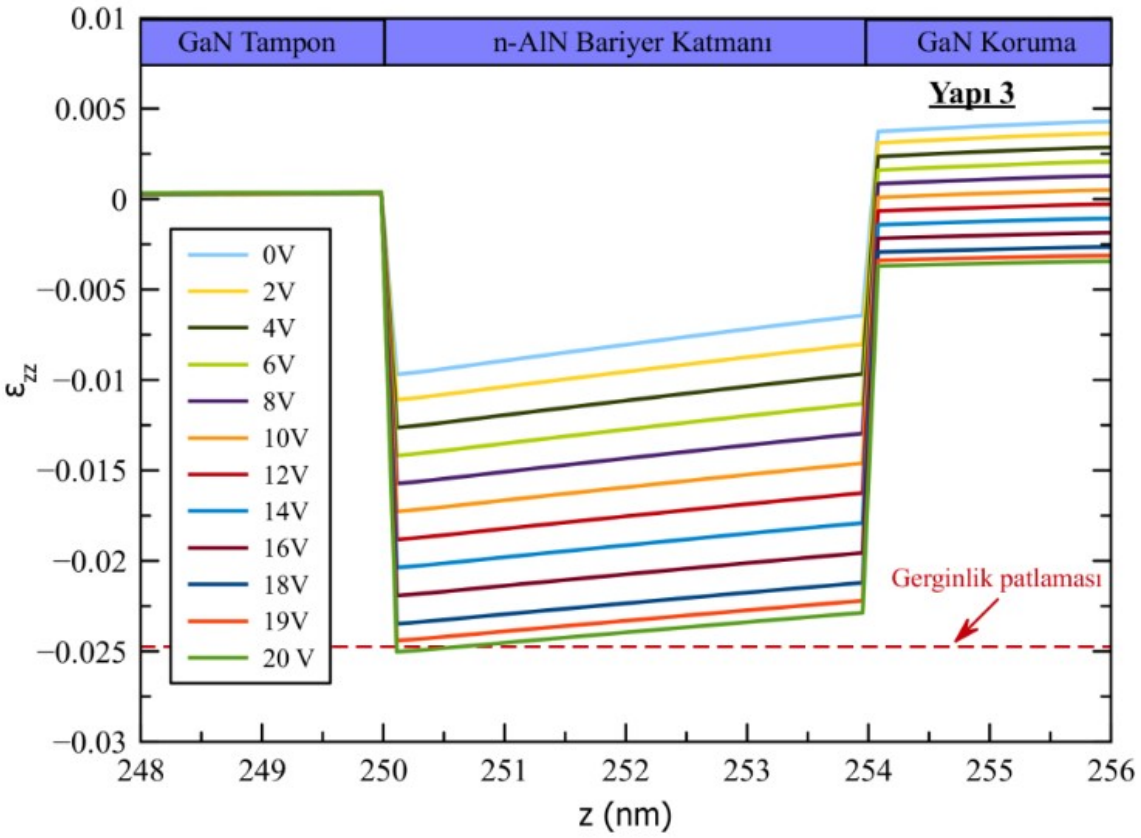
4.1.3.b.Yapı2'ye ait gerginlik incelemesi



Şekil 15. n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)/GaN (N_d= 1x10^{19} cm^{-3}) çokluyapısı (Yapı 2) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi.

Şekil15'e göre n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)/GaN (N_d= 1x10^{19} cm^{-3}) çokluyapısına (Yapı 2) yüzey üzerinde 20.6 V uygulandığında AlN/GaN arayüzeyinde oluşan gerginlik değeri gerginlik patlama sınır değerini geçmektedir.

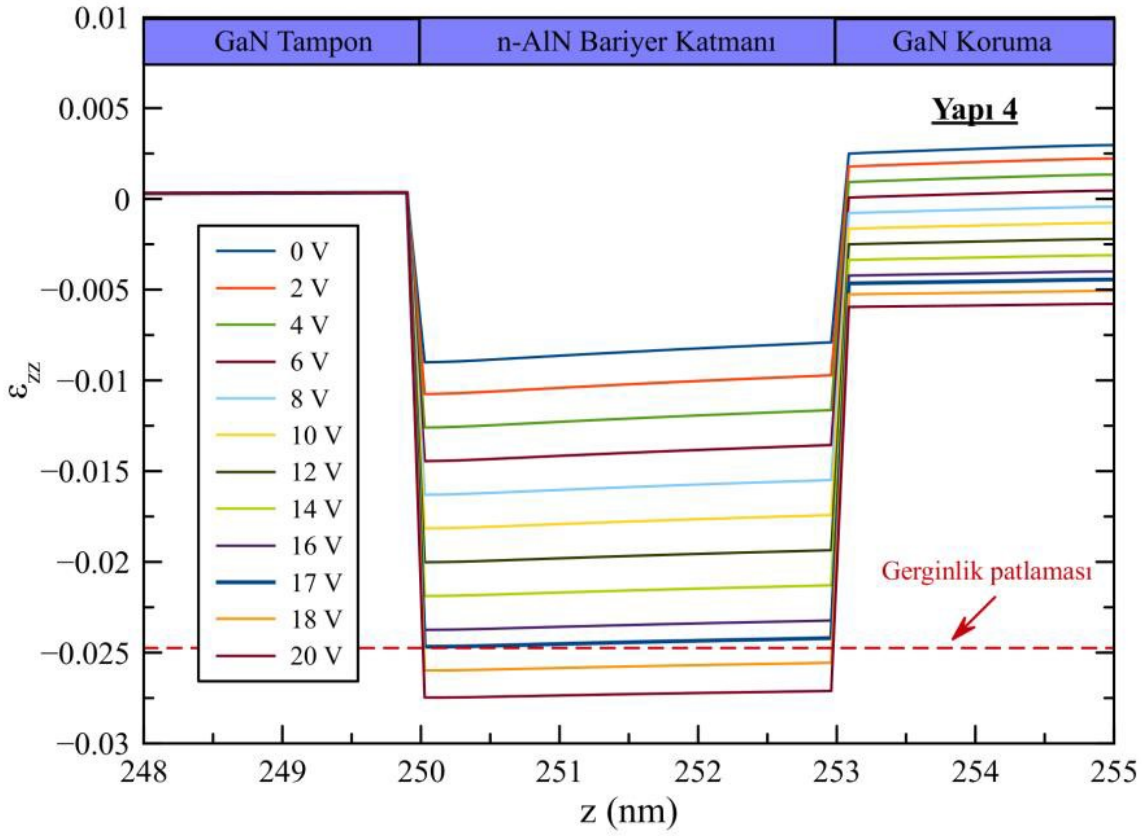
4.1.3.c.Yapı3'e ait gerginlik incelemesi



Şekil 16. GaN (2 nm)/n-AlN (4 nm)/GaN (N_d= 1x10^{19} cm^{-3}) çokluyapısı (Yapı3) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi.

Şekil16'ya göre, bu çokluyapıda yaklaşık 20 V uygulandığında AlN/GaN arayüzeyinde oluşan gerginlik değeri gerginlik patlama sınır değerini geçmektedir.

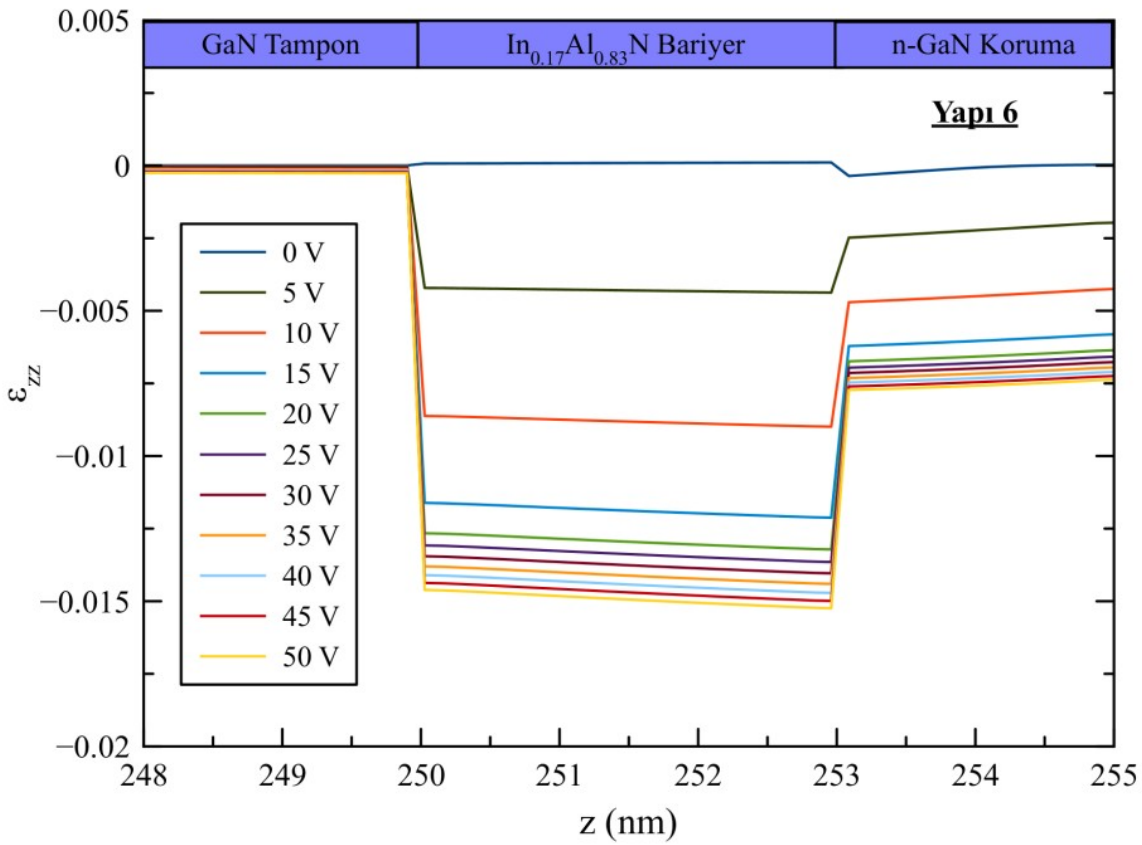
4.1.3.d. *Yapı4'e ait gerginlik incelemesi*



Şekil 17. GaN (2 nm)/n-AlN (3 nm)/GaN (Nd= $1x10^{19}$ cm^{-3}) çokluyapısı (Yapı4) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi.

Şekil17'e göre GaN/n-AlN/GaN çokluyapısında (Yapı4) gerginlik patlaması için gerginlik sınır değerine 17 V'ta ulaşılmaktadır.

4.1.3.e.Yapı6'ya ait gerginlik incelemesi



Şekil 18**.** n-GaN (2 nm)/In $_{0.17}$ Al $_{0.83}$ N (3 nm)/GaN (Nd= 1x10^{20} cm^{-3}) çokluyapısı (Yapı6) için gerilime bağlı olarak büyütme yönünde gerginliğin değişimi.

Şekil18'e göre n-GaN (2 nm)/ In $_{0.17}$ Al $_{0.83}$ N (3 nm)/GaN çokluyapısı (Yapı6) örgü uyumlu olduğu için uygulanan gerilim aralığında gerginlik patlama noktasına ulaşılmadı. 15 V'a kadar olan gerginlik değişimlerinde büyük bir değişim olurken, sonrasında gerilime bağlılık giderek azalmaktadır.

GaN temelli çokluyapılar genellikle yüksek güç uygulamalarında kullanılırlar. Dolayısıyla bu durum aygıtlarda self-heating (kendi kendine ısınma) olgusuna yol açar ve bu nedenle aygıtların kanal sıcaklığının hassas bir şekilde öngörülmesi önemlidir. Çünkü sıcaklık hem taşıyıcı hareketliliği hem de aygıt dayanıklılığı üzerinde etkisi olan etkin bir parametredir. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri yardımıyla seçilen 5 ultrainces bariyerli çokluyapının iki boyutlu aygıt modellemeleri termal direnç yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Bu çokluyapılarda kanal sıcaklığının hesaplanmasında sıcaklık ile termal iletkenlikteki değişimleri içeren basit analitik ifadeler kullanıldı.

Tablo 3. Gerçekleştirilen gerilime bağlı gerginlik hesaplamalarına göre incelenen çokluyapılar için gerginlik patlama sınır değerine karşılık gelen kritik voltaj değerleri.

Yapı No	Yapı	Kritik Voltaj
1	GaN (1 nm)/AlN (4 nm)	16.8 V
2	n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)	20.6 V
3	GaN (2 nm)/n-AlN (4 nm)	~20 V
4	GaN (2 nm)/n-AlN (3 nm)	17 V
6	n-GaN (2 nm)/InAlN (3 nm)	- (örgü uyumlu)

4.1.3.f. İlgili yapıların kanal sıcaklığının hesaplanması

Kanal sıcaklığının hesaplanması için iki boyutlu çözümlerden savak-kaynak akımı elde edilir.

$$I_{SK} = \frac{n_s q \mu_n W t V_{SK}}{L_{SK}}. \tag{12}$$

Burada n_s taşıyıcı yoğunluğu, q elektron yükü, W geçit genişliği, t kuantum kuyu genişliği ve LSK savak-kaynak arası uzunluktur. μn ise elektron hareketliliğidir ve Elektron hareketliliği, sürüklenme hızından yola çıkılarak hesaplanır. Projede kullanılan yapılarda hesaplamalar Simba hareketlilik modeline göre elektrik alana bağlılığı (Kumar, 2006),

$$v(E) = \frac{\mu E}{\left[1 + \left(\frac{\mu E}{v_d}\right)^{\kappa}\right]^{1/\kappa}}. \tag{13}$$

Burada κsıcaklığa bağlılığı belirten bir üstür. v_d ise elektron doyum hızıdır ve değerleri sırasıyla 0,82 ve 1,40x10^7 cm/s'dir (Caughey ve Thomas, 1967).

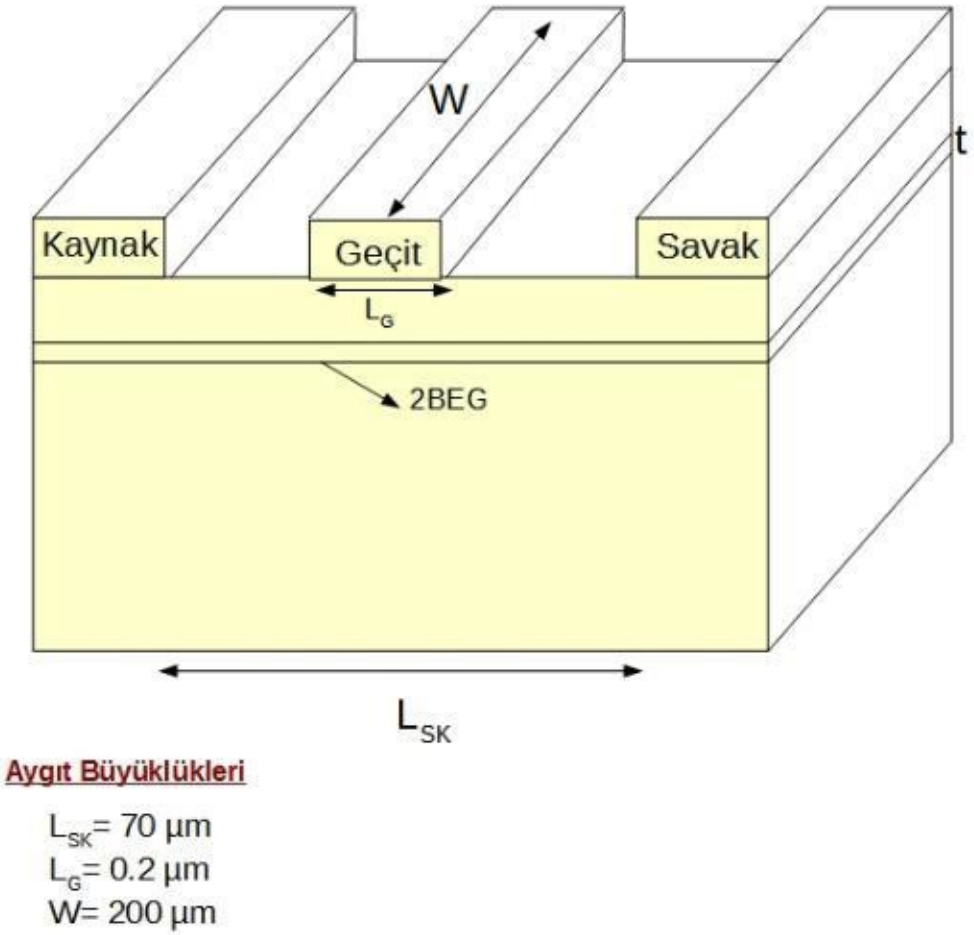
Her bir savak-kaynak gerilimi (VSK) için hesaplanan savak-kaynak akımı ve aygıt gücü (P=IskVsk) Eş.3'te olduğu gibi kanal sıcaklığının hesaplanmasında kullanılır (Asgari, 2005),

$$T_{kanal}=T_o+PR_{termal} \quad (14)$$

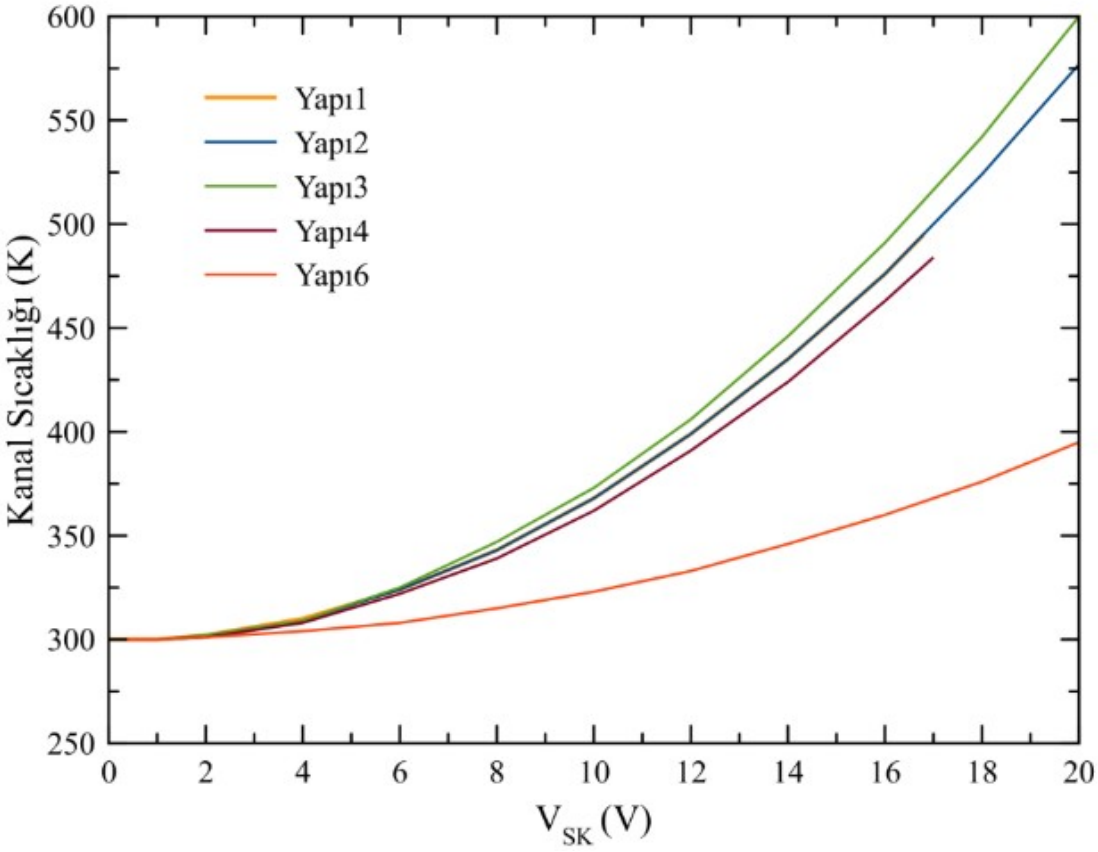
Burada T_0 ortam sıcaklığıdır ve R termal parametresi termal direnç olup malzemenin sıcaklığa bağlı termal iletkenliğine

$$\left(\kappa_{GaN} = 1.6\left(\frac{300}{T}\right)^{1.4}\right) \quad (15)$$

aygıtın savaç-kaynak arası uzaklığına (LSK) ve geçit genişliğine (W) bağlı bir parametredir. 2004 yılında Freeman Şekil19'da verilen aygıt büyüklüklerini kullanarak bir GaN temelli kanal katmanı için R_{termal} parametresinin değerini 18,35 K/W olarak hesaplamıştır (Freeman, 2004). Bu proje çerçevesinde hesaplamalarımızda bu değer göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 19. İki boyutlu analizde termal direnç yöntemi kullanılırken göz önünde bulundurulan aygıt yapısının şematiği.



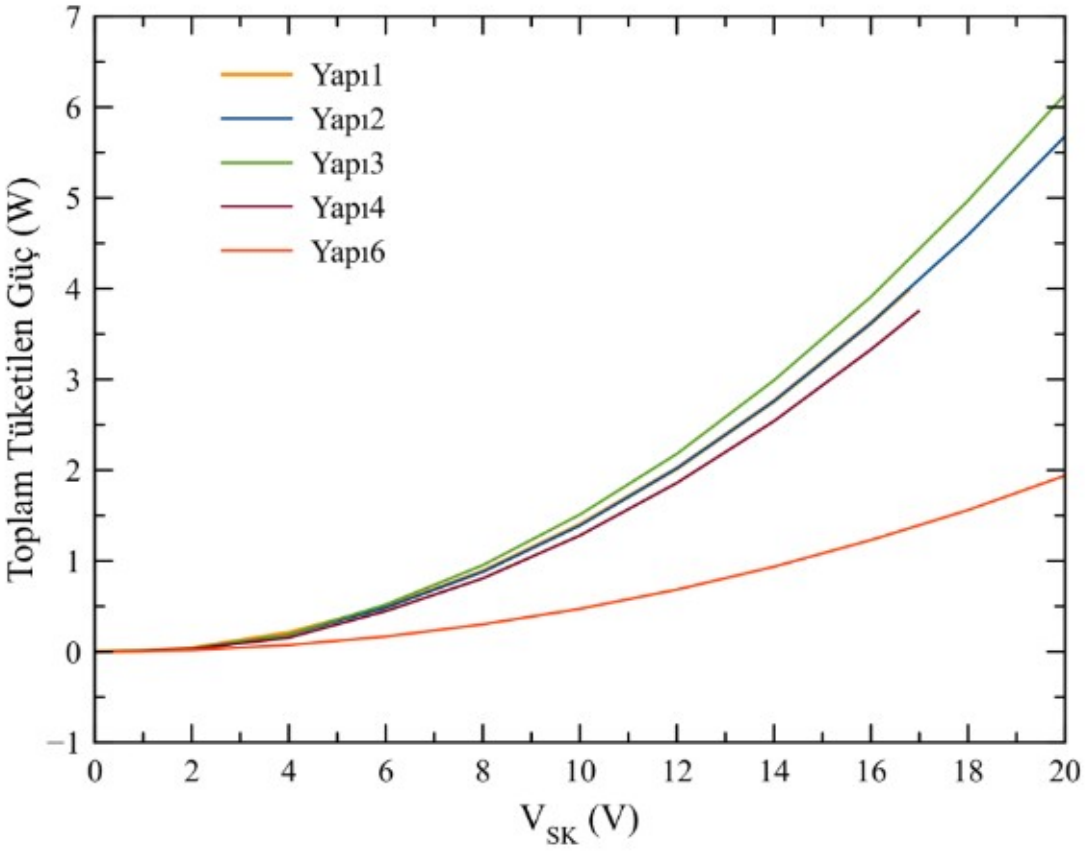
Şekil 20. Seçilen beş ultraince bariyerli çokluyapı için savak-kaynak gerilimine bağlı kanal sıcaklığındaki değişimi.

Şekil 20 her bir ultraince bariyerli çokluyapı için kanal sıcaklığının savak-kaynak gerilimine olan bağımlılığını göstermektedir. Şekil 20'e göre örgü uyumlu çokluyapı olan Yapı6 için kanal sıcaklığı diğer çokluyapılara göre oldukça düşüktür. En yüksek kanal sıcaklığı Yapı3 için hesaplanmıştır.

Toplam tüketilen güç için kullanılan bağıntı Eş. 16 ile verilmiştir (Darwish, 2015),

$$P_{tük} = \frac{(T_{kanal} - T_0) W \pi \kappa_{GaN}}{ln\left(\frac{4t}{\pi L_G}\right)}. \quad (16)$$

Burada *LG* geçit uzunluğudur.



Şekil 21. Seçilen beş ultraince bariyerli çokluyapı için savak-kaynak gerilimine bağlı olarak toplam tüketilen güçteki değişim.

Şekil 21 ise Eş. 16 kullanılarak hesaplanan toplam tüketilen güç miktarını seçilen beş ultraince bariyerli çokluyapı için savak-kaynak gerilimine bağlı olarak göstermektedir. Şekil20 ve Şekil21'deki veriler göz önünde bulundurularak her bir çokluyapı için gerginlik patlaması sınır değerlerine karşılık gelen kritik voltajlar için kanal sıcaklığı ve toplam tüketilen güç değerleri Tablo 4'te yansıtılmıştır.

Tablo 4. Her bir incelenen ultraince bariyerli çokluyapı için kritik voltaj değerlerinde hesaplanan kanal sıcaklığı ve toplam tüketilen güç değerlerinin kıyaslanması.

Yapı No	Yapı	Kritik Voltaj (V)	Kanal Sıcaklığı (K)	Toplam Tüketilen Güç (W)
1	GaN (1 nm)/AlN (4 nm)	16.8	495	4.00
2	n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)	20.6	594	6.03
3	GaN (2 nm)/n-AlN (4 nm)	~20	600	6.14
4	GaN (2 nm)/n-AlN (3 nm)	17	484	3.76
6	n-GaN (2 nm)/InAlN (3 nm)	20 (örgü uyumlu)	395	1.94

Sonuç olarak bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri ve iki boyutlu analiz sonuçları kullanılarak elde edilen verilerin ışığında Tablo4'te görüldüğü gibi kendi kendine ısınma etkilerinin en az görüldüğü üç ultraince bariyerli çokluyapı deneysel olarak büyütülmek için seçilebilir. Bu seçilen çokluyapılar Tablo5'te ayrıca listelenmiştir.

Tablo 5. Bir boyutlu ve iki boyutlu olarak gerçekleştirilen analizler sonucu deneysel olarak büyütülmek üzere önerilen üç yapı

Yapı No	Koruma Katmanı	Bariyer Katmanı	Tampon Katmanı	Katkı Yoğunluğu (cm^{-3})	Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-3})
1	GaN (1 nm)	u-AlN (4 nm)	GaN	-	$3{,}15\times10^{20}$
4	GaN (2 nm)	n-AlN (3 nm)	GaN	1×10^{19}	$2{,}15\times10^{20}$
6	n-GaN (2 nm)	$In_{0.17}Al_{0.83}N$ (3 nm)	GaN	1×10^{20}	$3{,}25\times10^{19}$

4.2. 2. İP: Ultra-ince Bariyer HEMT Büyütme ve Temel Yapısal Karakterizasyonu

Birinci iş paketindeki hesapların beklenenden uzun sürmesi sebebiyle büyütülecek numunelerin Bilkent Nanotam'a siparişleri Kasım 2015'i bulmuştur. Bilkent Nanotam'ın kendi çalışmalarının yoğunluğu ve büyütme sisteminde yaşanan sıkıntılar sebebiyle numunelerin büyütmeleri Ocak 2016'da bitmiştir.

Toplamda 1. İP'de önerilen 3 yapı ve bir de literatürden Ostermaier ve arkadaşlarının (Ostermaier, 2009) çalışmasına ait bir yapı büyütüldü. Her bir yapının büyütme işlemi tüm ön hazırlık ve büyütme işlemsi sonrası adımlarıyla birlikte birer gün sürmüştür. Numuneler

Bilkent Nanotamın isimlendirmesi ile B3018, B3019, B3022 ve B2131 olarak isimlendirilmiştir.

Aşağıda her bir numunenin büyütme reçeteleri ve ilgili in situ reflectans ölçümleri bulunmaktadır. Her numunenin Bilkent Nanotam isimlendirmesi ve simülasyondaki karşılığı da aşağıda belirtilmiştir.

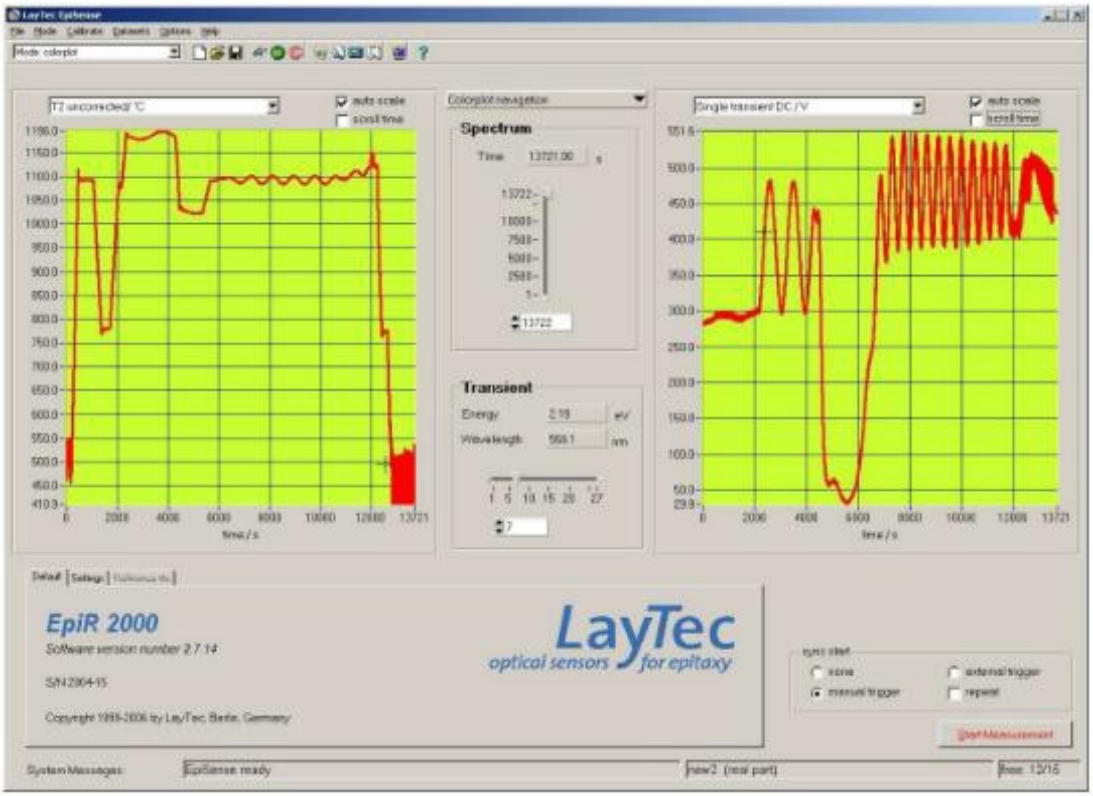
4.2.1. B-3018 Gazi Yapı-1 büyütmesi

i-GaN Kapak Tabakası (t =30 sn, hedef kalınlık 1nm) **i-AlN Bariyer Tabakası** (t=28 sn, hedef kalınlık 4nm) **GaN Tampon Tabakası** (kalınlık 1310 nm) **HT AlN Tampon Tabakası** (kalınlık 306 nm) **AlN Çekirdeklenme Tabakası** (4.00 min)

Büyütme Koşulları:

Tablo.6. B 3018 Yapısının büyütme Koşulları.

Yüzeyden Kaldırma	10 dakika 1050ºC
LT AlN NL	T(yüzey): 770 ºC - Basınç: 50 mbar, V/III = 10239
HT AlN Tampon	T(yüzey): 1180 ºC – Basınç: 35 mbar, V/III = 85
GaN Tampon Tabakası (1)	T(yüzey): 1025 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 842
GaN Tampon Tabakası (2)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1263
GaN Tampon Tabakası (3)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1070
GaN Tampon Tabakası (4)	T(yüzey): 1120 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1070
i-AlN Bariyer Tabakası	T(yüzey): 1120 ºC – Basınç: 35 mbar, NH3: 50 sccm, TMAl= 30 sccm , V/III = 85
i-GaN Kapak Tabakası :	T(yüzey): 830 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 1500sccm, TEGa=60 sccm , V/III = 4412



Şekil 22. Simülasyon sonucunda belirlenen 1 no'lu yapı olan deneysel olarak büyütülmüş B-3018 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri.

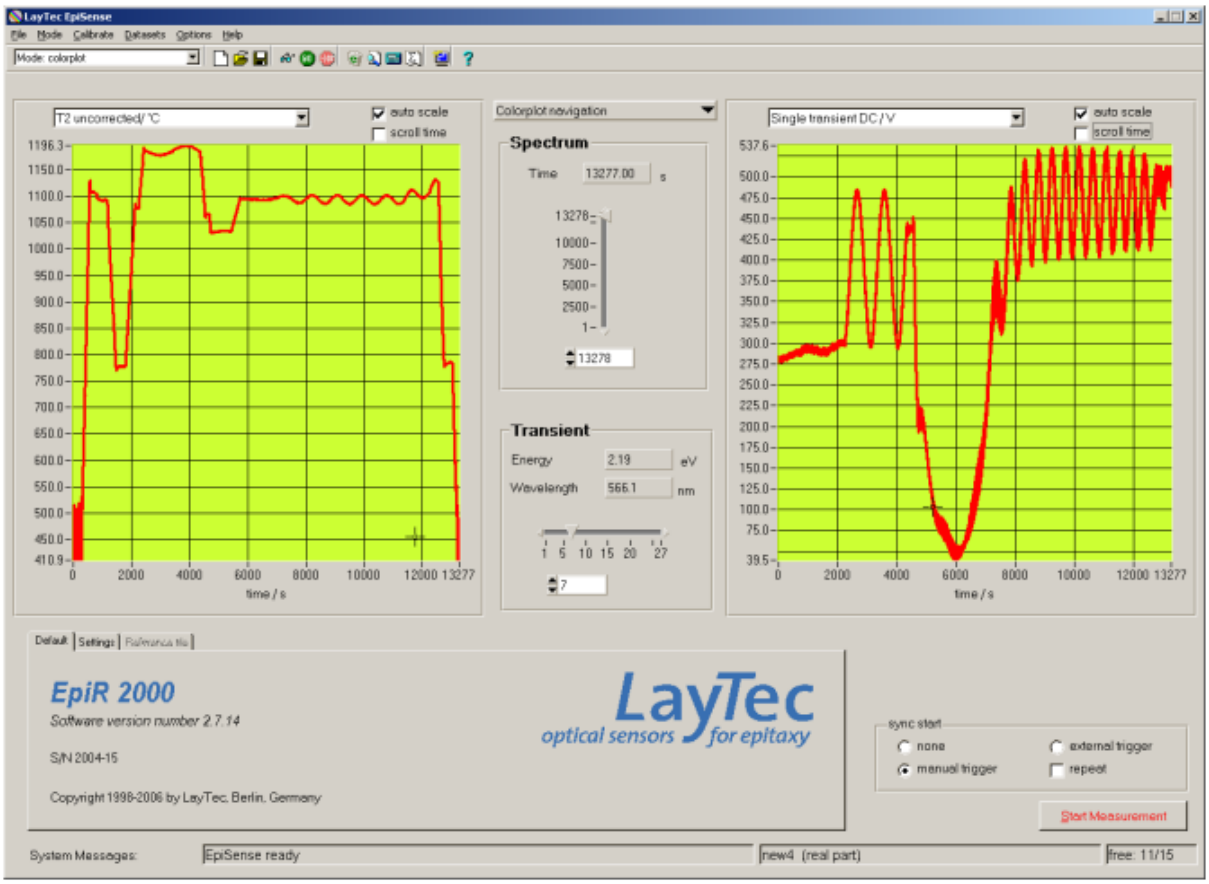
4.2.2. B-3019 Gazi Yapı-6 büyütmesi

n-GaN Kapak Tabakası (Si Doped 1e^{20} cm^{-3}) (t =60 sn, hedef kalınlık 2 nm) **i-In(x)Al(1-x)N Bariyer Tabakası (x=0.17-0.18)** (t=45 sn, hedef kalınlık 3 nm) **GaN Tampon Tabakası** (kalınlık 1300 nm) **HT AlN Tampon Tabakası** (kalınlık 305 nm) **AlN Çekirdeklenme Tabakası** (4.00 min)

Büyütme Koşulları:

Tablo 7.B-3019 Yapısının büyütme koşulları

Yüzeyden Kaldırma	10 dakika 1050ºC
LT AlN NL	T(yüzey): 770 ºC - Basınç: 50 mbar, V/III = 10239
HT AlN Tampon	T(yüzey): 1180 ºC – Basınç: 35 mbar, V/III = 85
GaN Tampon Tabakası (1)	T(yüzey): 1025 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 842
GaN Tampon Tabakası (2)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1263
GaN Tampon Tabakası (3)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1070
GaN Tampon Tabakası (4)	T(yüzey): 1120 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1070
i-In(x)Al(1-x)N Bariyer Tabakası (x=0.17-0.18)	T(yüzey): 830 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 1500 sccm, TMAl= 30 sccm, TMIn=40 sccm, V/III = 2281
n-GaN Kapak Tabakası (Si Doped 1e20 cm^{-3}):	T(yüzey): 830 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 1500sccm, TEGa=60 sccm, SiH4=15 sccm, V/III = 4412



Şekil 23**.** Simülasyon sonucunda belirlenen 6 no'lu yapı olan deneysel olarak büyütülmüş B-3019 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri.

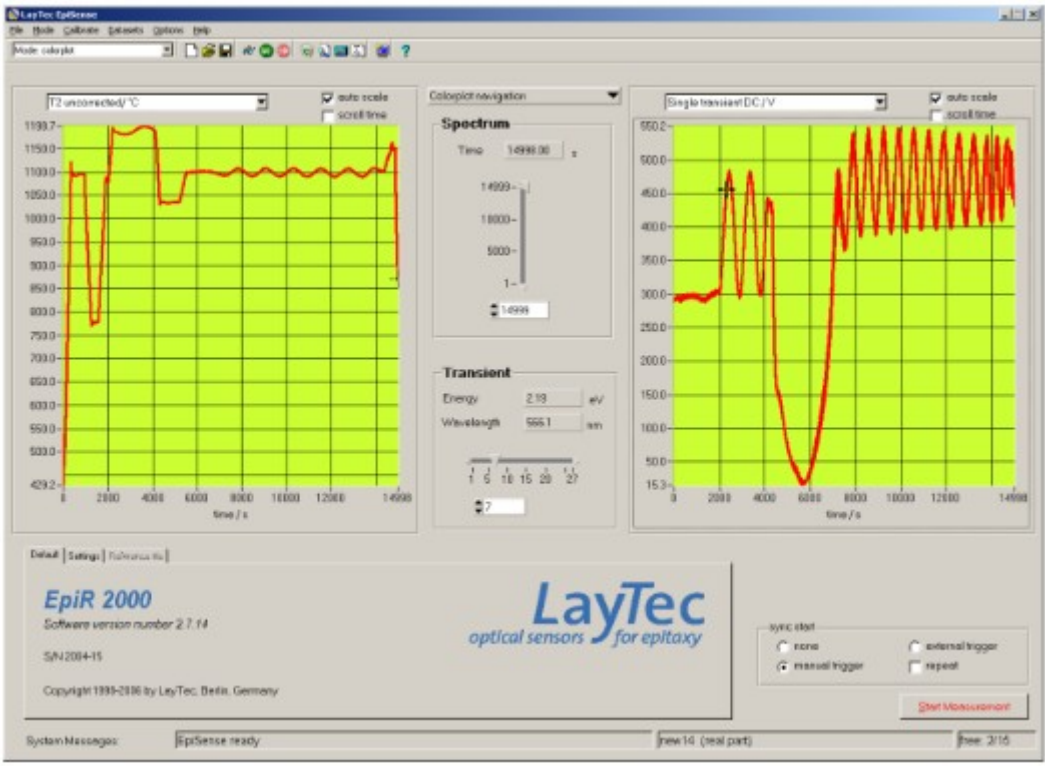
4.2.3. B-3022 Gazi Yapı-4 büyütmesi

i-GaN Kapak Tabakası (t =60 sn, hedef kalınlık 2 nm) **n-AlN Bariyer Tabakası (Si Doped 1e^{19} cm^{-3})** (t=48 sn, hedef kalınlık 3 nm) **GaN Tampon Tabakası** (kalınlık 1380 nm) **HT AlN Tampon Tabakası** (kalınlık 315 nm) **AlN Çekirdeklenme Tabakası** (4.00 min)

Büyütme Koşulları:

Tablo 8. B 3022 yapısının büyütme koşulları

Yüzeyden Kaldırma	10 dakika 1050ºC
LT AlN NL	T(yüzey): 770 ºC - Basınç: 50 mbar, V/III = 10239
HT AlN Tampon	T(yüzey): 1180 ºC – Basınç: 35 mbar, V/III = 85
GaN Tampon Tabakası (1)	T(yüzey): 1025 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 842
GaN Tampon Tabakası (2)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1263
GaN Tampon Tabakası (3)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1070
GaN Tampon Tabakası (4)	T(yüzey): 1120 ºC – Basınç: 250 mbar, V/III = 1070
n-AlN Bariyer Tabakası (Si Doped 1e19 cm^{-3})	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 250 sccm, TMAl= 15 sccm, SiH4=45 sccm, V/III = 853
i-GaN Kapak Tabakası	T(yüzey): 830 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 1500sccm, TEGa=60 sccm



Şekil 24. Simülasyon sonucunda belirlenen 4 no'lu yapı olan deneysel olarak büyütülmüş B-3022 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri.

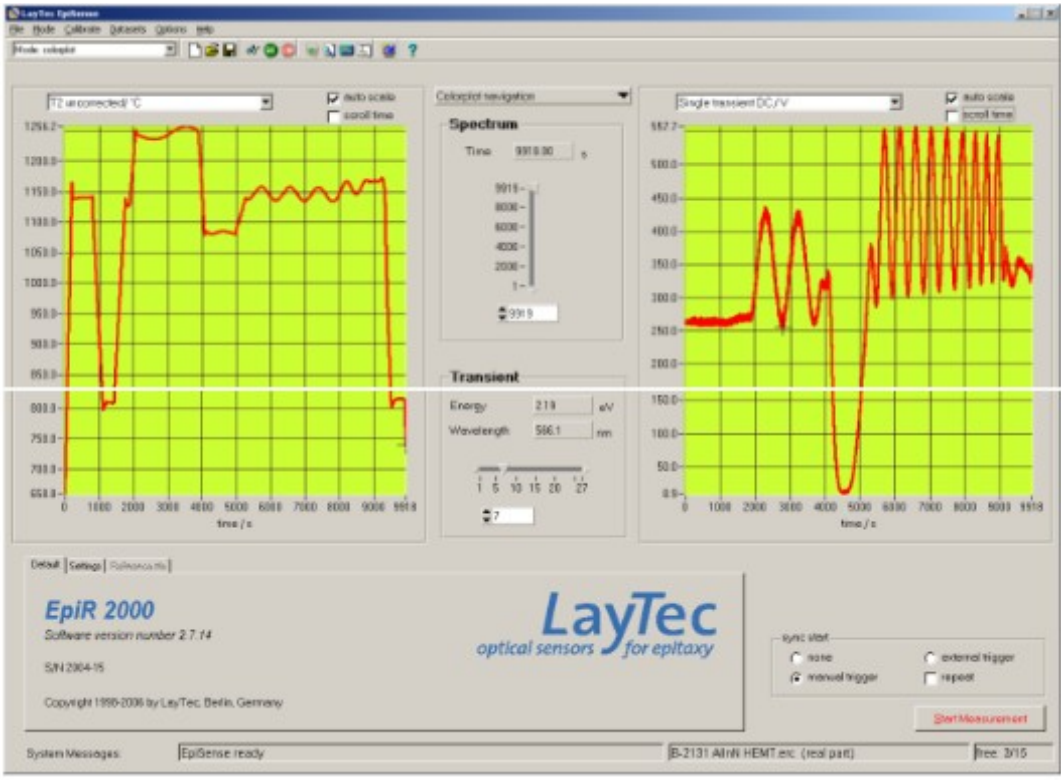
4.2.4.B-2131 Gazi Ostermaier büyütmesi

n-GaN Kapak Tabakası (t =180 sn, hedef kalınlık 6 nm) **i-In(x)Al(1-x)N Bariyer Tabakası (x=0.17-0.18)** (t=15 sn, hedef kalınlık 1 nm) **i-AlN Ara tabaka** (t=12 sn, target kalınlık=1 nm) **GaN Tampon Tabakası** (kalınlık 1050 nm) **HT AlN Tampon Tabakası** (kalınlık 280 nm) **AlN Çekirdeklenme Tabakası** (4.00 min)

Büyütme Koşulları:

Tablo 9. B2131 yapısının büyütme koşulları.

Yüzeyden Kaldırma	10 dakika 1050ºC
LT AlN NL	T(yüzey): 770 ºC - Basınç: 50 mbar, V/III = 10239
HT AlN Tampon	T(yüzey): 1180 ºC – Basınç: 35 mbar, V/III = 85
GaN Tampon Tabakası (1)	T(yüzey): 1025 ºC – Basınç: 200 mbar, V/III = 842
GaN Tampon Tabakası (2)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 200 mbar, V/III = 1263
GaN Tampon Tabakası (3)	T(yüzey): 1100 ºC – Basınç: 200 mbar, V/III = 1070
GaN Tampon Tabakası (4)	T(yüzey): 1120 ºC – Basınç: 200 mbar, V/III = 1070
AlN Ara tabaka:	T(yüzey):1130 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 200 sccm, TMAl= 10 sccm, V/III= 1024
i-In(x)Al(1-x)N Bariyer Tabakası (x=0.17-0.18)	T(yüzey): 890 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 1500 sccm, TMAl= 15 sccm, TMIn=100, V/III = 3180
n-GaN Kapak Tabakası	T(yüzey): 890 ºC – Basınç: 50 mbar, NH3: 1500sccm, TEGa=60 sccm, SiH4: (s/d/i) = 15/100/20 sccm , V/III = 4412



Şekil 25. Simülasyon sonucu belirlenen yapılarla karşılaştırmak amacıyla literatürden seçilen Ostermaier ve arkadaşlarının yapısının deneysel olarak büyütülmüş hali olan B-2131 numunesinin zamana bağlı sıcaklık (sol)ve reflectans (sağ) grafikleri.

4.2.5. Numunelerin XRD incelemeleri

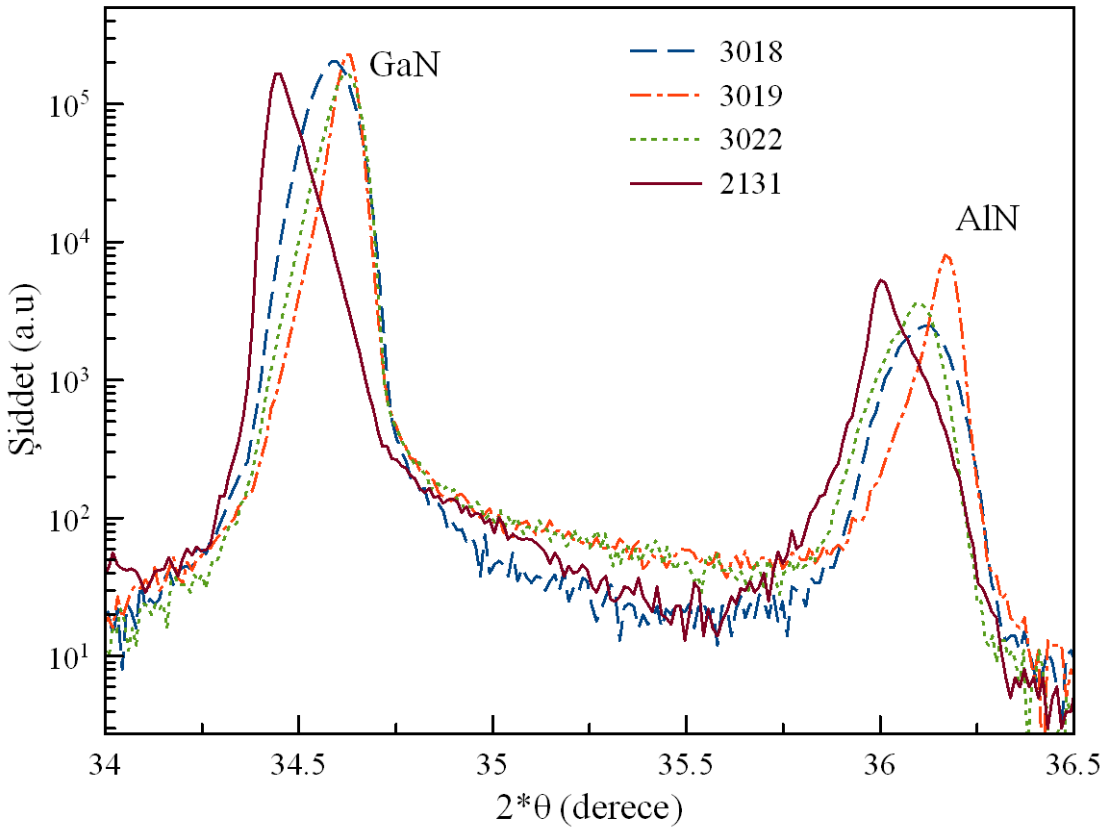
3018 ve 3022 kodlu numuneler aynı yapılara sahip olup sadece GaN kapak katmanları sırasıyla; 1nm ve 2nm, AlN bariyer katmanları ise sırasıyla 4nm, 3nm kalınlıklara sahiptir. 3019 ve 2131 kodlu numunelerinin birbirinden ayıran özellik ise hem katman kalınlıkları hemde 2131 numunesinin bariyer katman ve GaN tampon katman arasına büyütülmüş ~1nm kalınlığında AlN ara tabakaya sahip olmasıdır. 3019 ve 2131 numuneleri için GaN kapak katman kalınlıkları sırasıyla; 2nm ve 6nm, $In_{0.17}Al_{0.83}N$ bariyer katman kalınlıkları ise sırasıyla 3nm ve 1nm'dir. Numuneler içerisinde 3019 kodlu numune örgü uyumlu olarak büyütülmüştür. Bu sebeple Şekil 26'da görülen X-ışını 2-theta grafiğinde gerginliğe sahip olmayan tek pikler (diğer numunelerin piklerine göre daha sağda) bu numuneye aittir.

Gerginlik genel olarak GaN üzerine ince AlN büyümesinden kaynaklanacaktır. Bu sebeple GaN tampon tabakasının üstüne kadar olan bölgede gerginlik olmadığını kabul edebiliriz. Gergin olarak ise GaN üzerine AlN ancak belli miktarda büyütülebiliri. GaN tampon tabaka

üzerine büyütmeler için Eş. 17 ile verilen kritik kalınlık hesabı yapılarak AlN ve InAlN bariyerlerinin kritik kalınlıkları hesaplanmıştır.

$$t_c \cong \frac{b_e}{2\varepsilon_x} \tag{17}$$

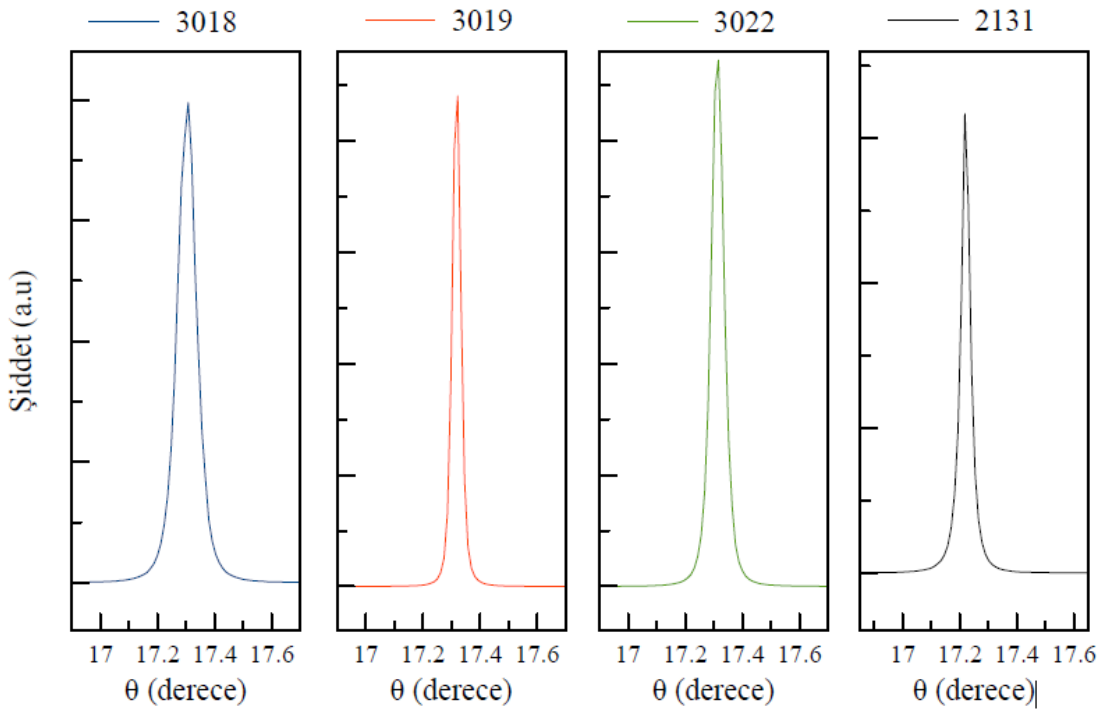
Burada *be* burger vektörü, ε_x iki eksenli gerilimdir. GaN üzerine AlN katman büyütmelerinde teorik olarak AlN kritik kalınlığı ~6.5 nm'dir. GaN üzerine $In_{0.17}Al_{0.83}$ N katman büyütmelerinde x=0.17-0.18 In mol oranında örgü uyumu olduğu için bir sınırlandırma yoktur.



Şekil 26. 3018, 3019, 3022 ve 2131 numunelerinin w-2θ taraması.

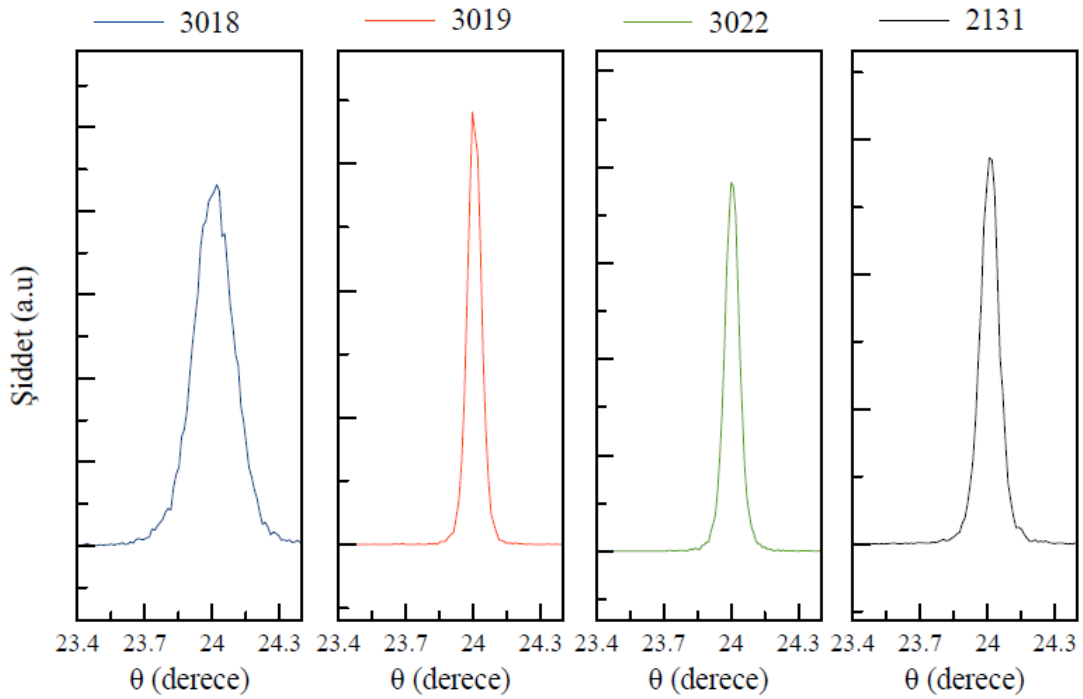
Farklı bariyer ve kalınlıklarda ultra ince bariyerli GaN HEMT yapılarının w-2θ taramasının (0002) yansımaları görülmektedir. Görülen pikler kalın GaN tampon ve AlN tampon katmanlara aittir. InAlN bariyer katman ultra ince kalınlıkta olduğu için herhangi bir pik

görülmemektedir (Sarikavak- Lisesivdin, 2013). Piklerdeki kaymalar ve genişliklerin sebepleri yapı içerisinde oluşan gerilmeler ile alakalıdır (Çörekci, 2011; Ming-Gang, 2015).



Şekil 27. 3018, 3019, 3022 ve 2131 numunelerinin GaN katmanın (002) simetrik taraması

Büyütülen kristal yapıların kalitesini daha iyi anlayabilmek için (002) ve (102) taramaları yapılmıştır. Bu tarama sonuçları şekil 26 ve şekil 27'de verilmiştir. Beklenildiği gibi (002) simetrik taramaları daha dar ve simetrik görülmektedir. Kristal kalitesinin tayini tam genişlik ve maksimum yüksekliğin yarısı (FWHM) değerleri ile belirlenebilir (Yu, 2006).



Şekil 28. 3018, 3019, 3022 ve 2131 numunelerinin asimetrik GaN katmanın (102) taraması. Asimetrik taramalar, simetrik taramalara göre daha geniş piklere ve piklerin başlangıç yerlerinde saçaklara sahiptir.

Tablo 10. 3018, 3019, 3022, 2131 numunelerinin simetrik (002) ve asimetrik (102) taramaları için FWHM değerleri.

Numuneler	3018	3019	3022	2131
FWHM				
(002)	0.084	0.0356	0.053	0.0776
(102)	0.209	0.0719	0.0724	0.0944

Şekil 27 ve şekil 28'de verilen simetrik ve asimetrik taramalar için FWHM değerleri Tablo 10 ile verilmiştir. İncelenen numuneler içinde en kaliteli yapının en düşük FWHM değerine sahip olması nedeniyle 3019 numunesi olduğu görülmektedir.

Tablo11. 3018, 3019, 3022, 2131 numunelerinin simetrik (002) ve asimetrik (102) taramaları için kenar, vida ve toplam dislokasyon yoğunlukları.

Numuneler	$N_{kenar}(cm^{-2})$	$N_{vida}(cm^{-2})$	$N_{toplam}(cm^{-2})$
3018	$4.77x10^{12}$	$2.92x10^{11}$	$5.06x10^{12}$
3019	$5.65x10^{11}$	$5.24X10^{10}$	$6.17x10^{11}$
3022	$5.73x10^{11}$	$1.16x10^{11}$	$6.89x10^{11}$
2131	$9.74x10^{11}$	$2.49x10^{11}$	$1.22x10^{12}$

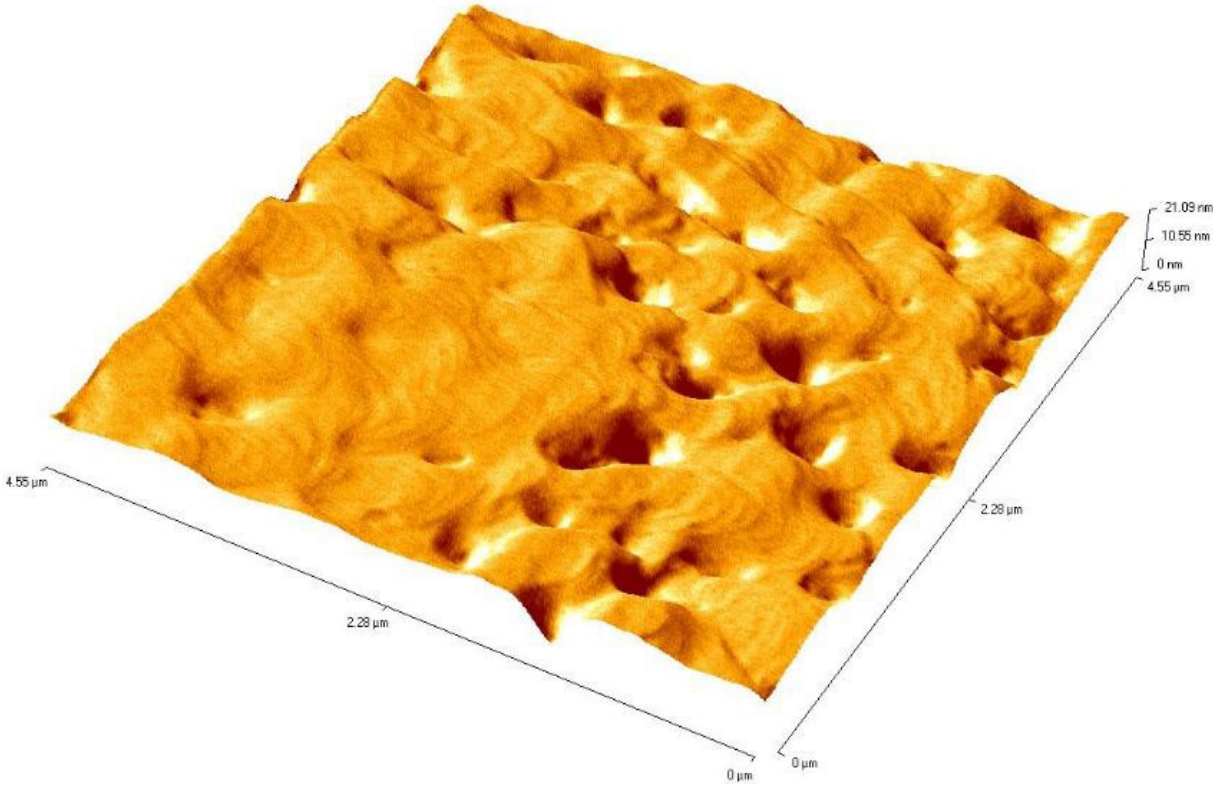
$$N_{vida} = \frac{FWHM^{2}_{(002)}}{9 b_{vida}} \quad (18)$$

$$N_{kenar} = \frac{FWHM^{2}_{(102)}}{9 b_{kenar}} \quad (19)$$

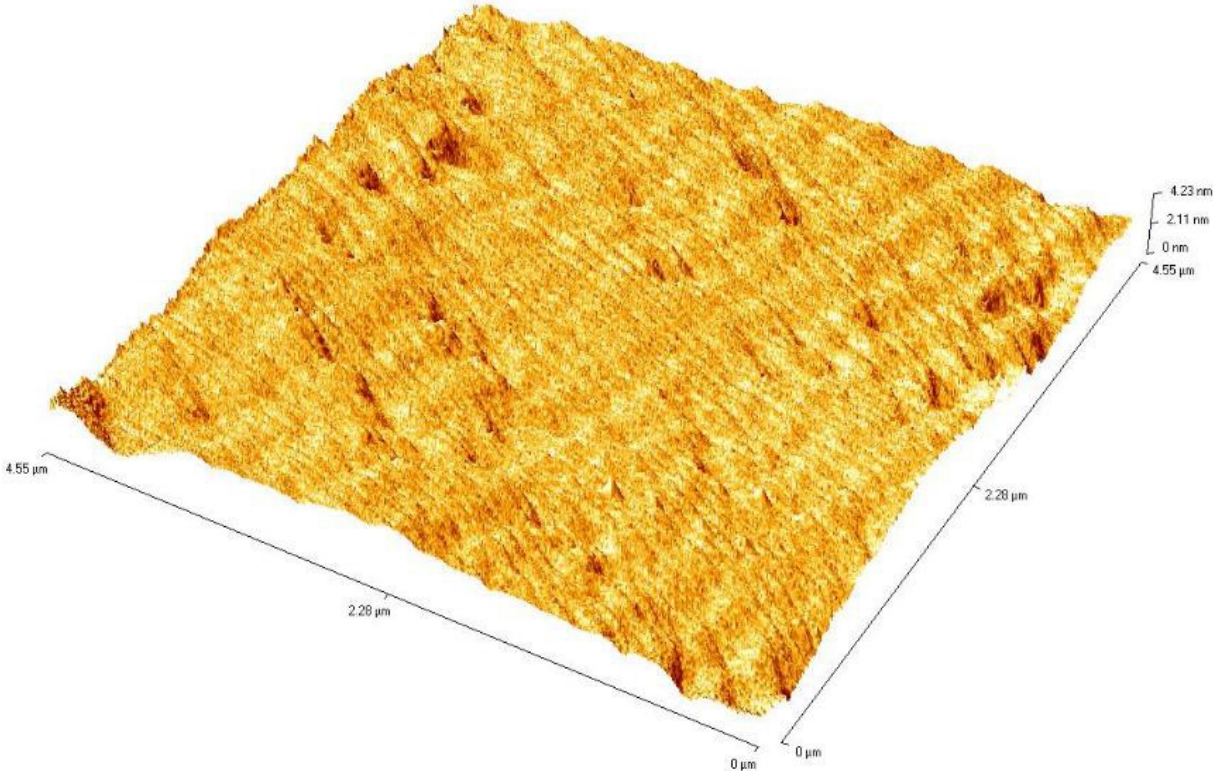
$$N_{toplam} = N_{kenar} + N_{vida} \quad (20)$$

Eşitlik 18 ve 19 kullanılarak her bir numune için kenar, vida ve toplam dislokasyon yoğunluk değerleri verilmiştir. Burada, b_{kenar}, b_{vida} burger vektörleridir. Dislokasyon bir kristal içerisinde istenmeyen durumlardan biridir. Bundan dolayı en düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip numune en kaliteli numunedir. Tablo 11'de görüldüğü gibi tüm yapılar için en baskın dislokasyon yoğunluğu kenar dislokasyonudur. Toplam dislokasyon yoğunluğu ise Eş. 20 ile basitçe belirlenmektedir. Bu hesaplamalar sonucunda örgü uyumlu 3019 numunesinin en düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir.

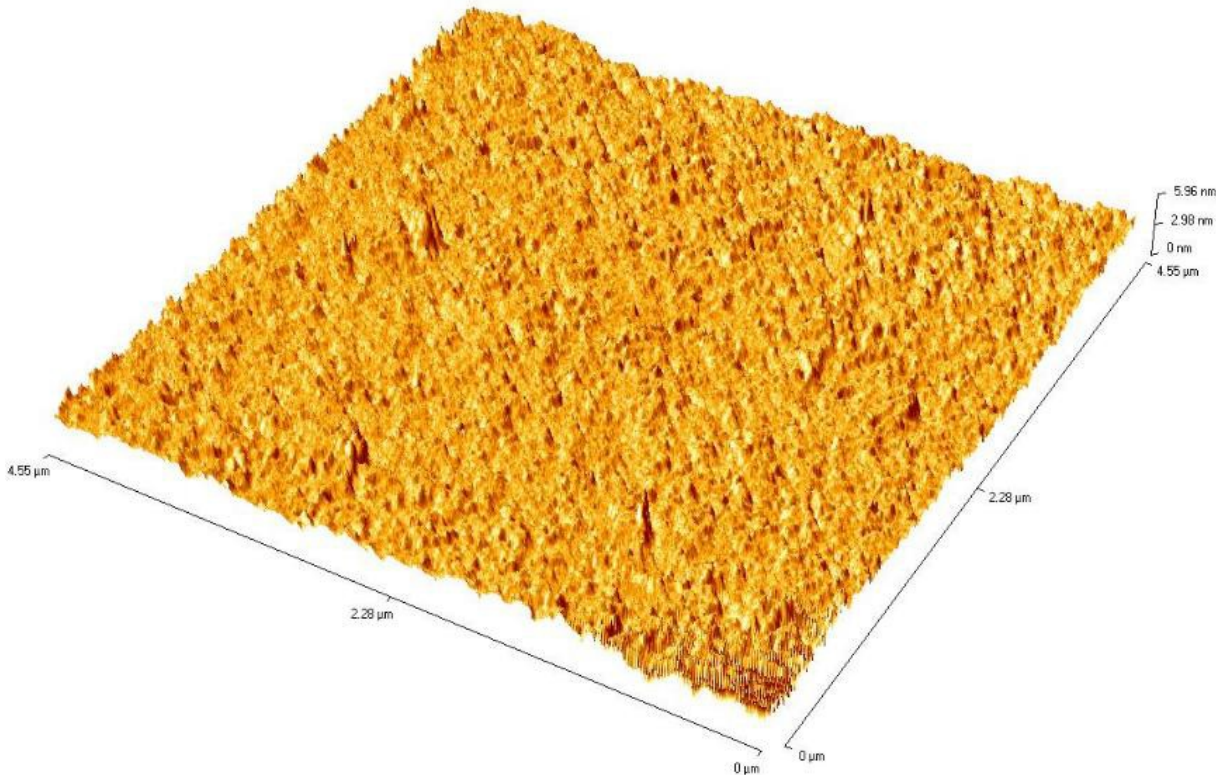
4.2.6. Numunelerin AFM incelemeleri



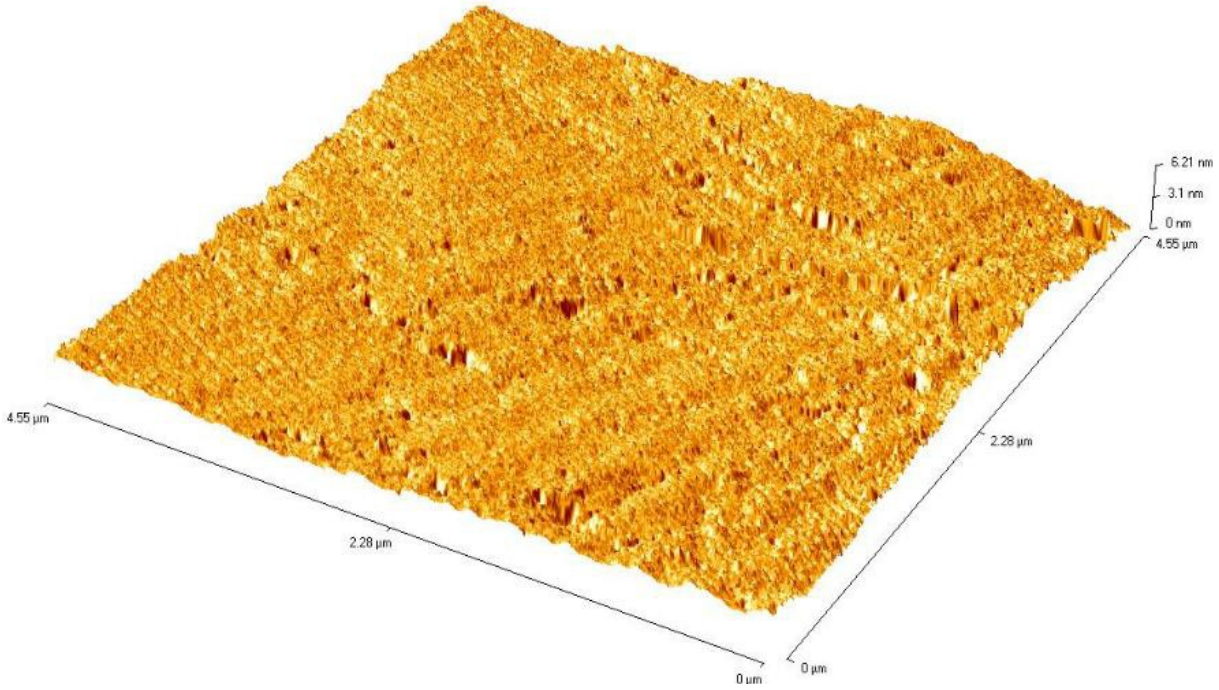
Şekil 29 . B3018 no’lu numunenin AFM görüntüsü.



Şekil 30 . B3019 no’lu numunenin AFM görüntüsü.



Şe kil 31 . B3022 no'lu numunenin AFM görüntüsü.



Şekil 32 . B2131 no'lu numunenin AFM görüntüsü.

AFM çalışmalarında yüzey pürüzlülüğü hakkında iki fonksiyondan yararlanılır. Bunlar Eş. 9 ve Eş. 10'da verilen Ra ve RMS fonksiyonlarıdır.

$$Ra = \frac{1}{L}\int_0^L \left|Z(x)\right| dx \tag{21}$$

$$RMS = \left[\frac{1}{L}\int_0^L Z(x)^2\, dx\right]^{1/2} \tag{22}$$

Burada *L* ve *Z(x)* sırasıyla, değerlendirme uzunluğu ve profil yüksekliği fonksiyonudur. Numunelerimizden alınan AFM ölçümleri ve bunlara bağlı başka değerler Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12**.** Numunelerin AFM ölçümlerinden elde edilen Ra, RMS, ortalama yükseklik ve maksimum ölçüm menzili değerleri

Numuneler	Ra(nm)	RMS (nm)	Ort. Yüks. (nm)	Maks. Menz. (nm)
3018	1,63	2,28	14,81	21,09
3019	0,45	0,57	2,28	4,23
3022	4,54	5,56	7,86	24,80
2131	4,78	5,60	8,72	24,61

Şekil 20-23 arasında incelenen numunelerin AFM sonuçları gösterilmiştir. Aynı numunelere ait Ra, RMS, ortalama yükseklik ve maksimum ölçüm menzili değerleri ise Tablo 12'de verilmiştir.

En dikkat çeken sonuç 3018 numunesinin ciddi bozukluğa sahip yüzeyidir. Buna göre, bu numune büyütme esnasında katmanlar arası gerginliklik patlayarak numunenin bozulmasına sebebiyet vermiştir. Aynı numunenin Şekil 26'da da kristal yapının bozukluğunu gösteren geniş piklere sahip olması bu görüşü desteklemektedir. Yüzeyde pürüzlülüğün az olmasının sebebi, büyük gerginlik patlama noktalarının olmasıdır. Bu noktalar dışındaki bölgeler yaklaşık morfik (pseudomorphic) büyüme göstererek pürüzlülüğü düşük tutmuştur.

Buna zıt olarak 3019 numunesi ise örgü uyumlu büyümesi sayesinde Şekil 26'da en sağa yatık piklere sahip, AFM'de ise en düşük pürüzlülüğe sahip olmuştur.

3022 ve 2131 no'lu numuneler ise pürüzlülüğe sahiptir. Ostermaier'ın çalışmasına rakip olabilecek en olası "gergin" numunemiz 3022 olarak görülmektedir.

Bu numunelere ait XRD ve AFM içeren yayın çalışmamız SCI bir dergiye gönderilmiştir.

4.3. 3. İP: HEMT Yapılarının Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu

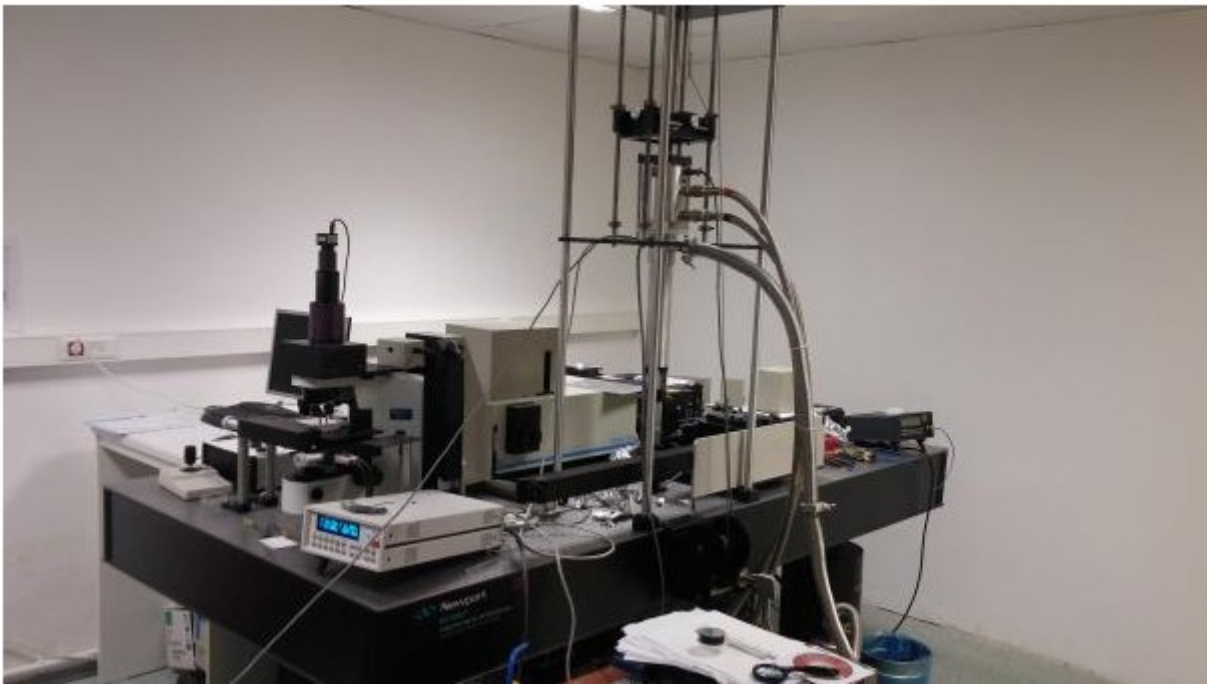
Daha önce belirtilen gelişme raporunda, dört numunenin aygıt fabrikasyonları yapılacağı ve transistör karakteristiklerinin ölçülmesi amacıyla python dilinde bir program yazılacağı belirtilmişti. Laboratuvarımızda kurulacak deneysel düzenek ve python dilinde yazılacak bu yazılım aracılığıyla elektriksel ölçümlere başlanılacaktı. Ancak önceden de belirtildiği gibi son gelişme raporunun sunulmasından sonra planlanan bu çalışmanın değişmesine yol açan bazı durumlar gerçekleşmiştir. Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi laboratuvar binasında Haziran 2016 itibariyle yenilenme amaçlı inşaata başlanmıştır. Bu sebeple Mayıs 2016 sonu itibariyle laboratuvarımızı Resim 1(a)'da görüldüğü gibi topladık ve boşalttık. Tüm elektrik ve su tesisatı, yerler tamamı ile değiştirilmek üzere bina ve laboratuvarımız Resim 1 (b)'de görüldüğü gibi uzun süreli şantiye haline gelmiştir. İnşaatın, Eylül 2016'da biteceği söylenmiş

olmasına rağmen, 15 Temmuz süreci ile birlikte görevden alınan eski rektörlük ve dekanlık çalışanları nedeniyle bu inşaatlar yavaşlamaya başlamıştır. Bu proje raporunun yazıldığı Mart 2017 döneminde laboratuvarımız Resim 1'de görüldüğü üzere çok bir değişikliğe uğramamıştır. Duvarlar yapılmamış, asma tavana ve havalandırma sistemine başlanılmamıştır. Çalışma alanımızın şantiyeye dönmesi sebebiyle çalışmalarımızı sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'ın izinleriyle Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (NANOTAM) gerçekleştirme kararı verdik. Bu sebeple, önceki gelişme raporunda belirtilen kendi ölçüm sistemimizi oluşturma ve ilgili python kodunu yazma işimizi iptal ettik.



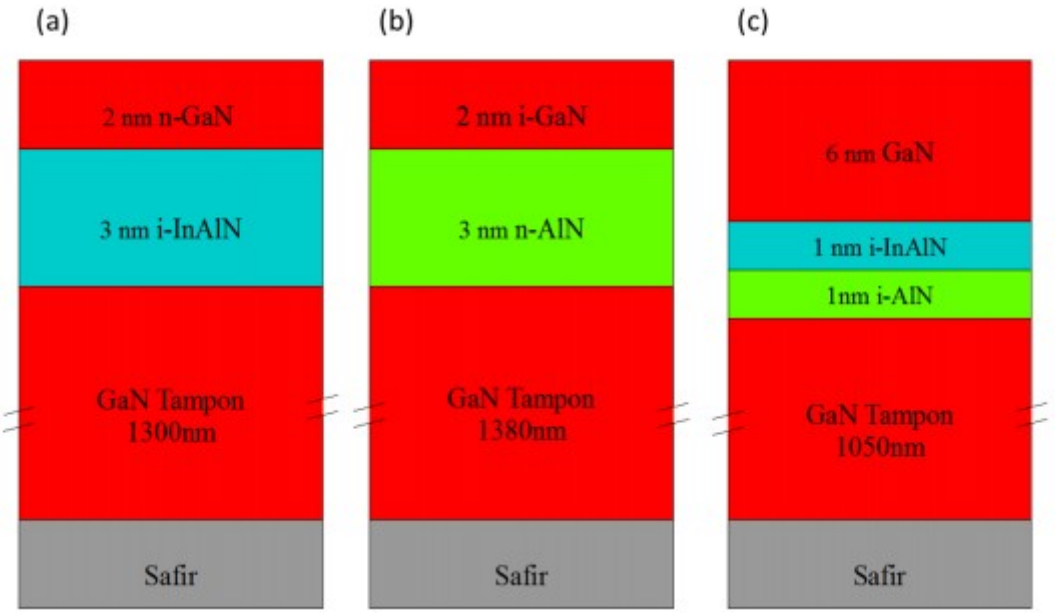
Resim 1. Mart 2017' deki durum.

Projenin ilerleyen kısımlarında da transistör ölçümlerinde yine kendi sistemlerimizi ve kendi bilgisayar kodumuzu kullanmak yerine NANOTAM'ın sistemlerini kullanmaya devam ettik.



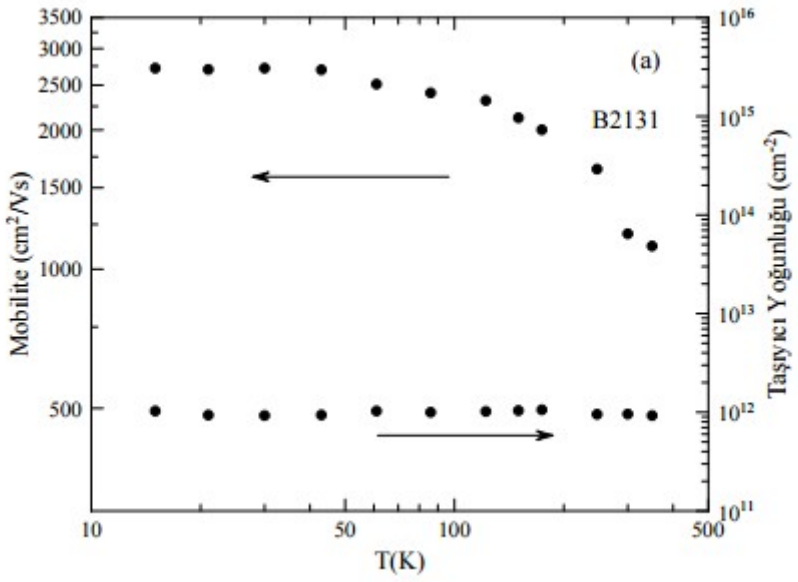
Resim 2. Bilkent Üniversitesi NANOTAM'da sıcaklığa bağlı Hall ölçümleri yapılırken kullanılan sistem.

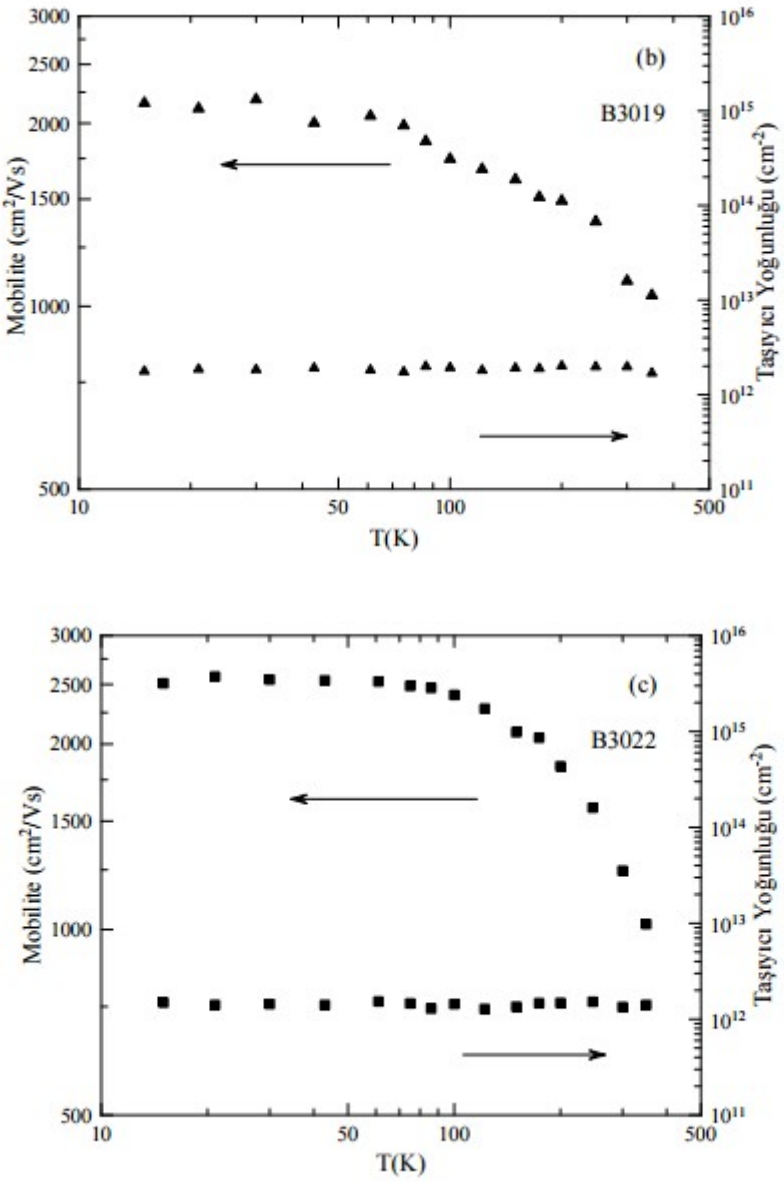
Ölçümler, Temmuz ve Ağustos 2016 döneminde NANOTAM'da bulunan Resim 2'de gösterilen, kapalı devre He soğutuculu bir kryostata bağlanan, sabit 0.5 Tesla magnetli, bir Ecopia 5000 HMS sistemi ile ölçülmüştür. Nunumeler, 5x5 mm^2 boyutlarında kesilmiş ve köşelerine üçgen biçimli Ti/Au/Ni/Au (20/200/30/65 nm) Ohmik kontaklar elektron akı buharlaştırma yöntemi ile kaplanmıştır. Kontakların 1-500 µA aralığında Ohmik oldukları alınan I-V'lerle gözlemlenmiş, buna göre Hall ölçümleri 100 µA akım değerinde alınmıştır. Bir önceki proje raporunda belirtilen 4 numuneden sadece B3018 yapılan I-V ölçümlerinde Ohmik değerler göstermemiştir. Önceki raporda gösterilen AFM yüzey pürüzlülüklerinde de bu numune çok pürüzlü olarak görülmekte idi. Numunenin, büyütme esnasında gerginliklerin patlayarak dislokasyonlu olarak büyüdüğü ve ilgili kuvantum kuyunun da oluşmadığı düşünülmektedir. Bu sebeple bundan sonraki elektriksel incelemelerde bu numuneyi işleme almadık. Şekil 33'de ise başarılı elektriksel ölçümleri yapılan ve analize alınan diğer numunenin katman yapıları görülmektedir.



Şekil 33. (a) B3019, (b), B3022 ve (c) B2131 no'lu numunelerin katman yapıları.

Bu üç numunenin Hall etkisi ölçümleri 15-350 K sıcaklık aralığında 0,5 Tesla sabit magnetik alan altında alınmıştır. Ölçümler sonucunda bu sıcaklık aralığında Hall mobilitesi ve Taşıyıcı yoğunluğu (2-boyutlu, şilte) değerleri hesaplanmıştır. Şekil 34'de tüm üç numunenin sıcaklığa bağlı Hall mobilitesi ve taşıyıcı yoğunluğu değişimleri görülmektedir. B2131 numunesi için mobilite 2700 cm^2/Vs civarlarındayken düşük sıcaklıklarda, sıcaklık arttıkça 500 K' e çıkıldıkça mobilite 1300 cm^2/Vs değerine gelmiştir, taşıyıcı yoğunluğu ise 10^{12} cm^{-2} mertebesindedir.





Şekil 34. (a) B2131, (b) B3019, ve (c) B3022 no'lu numunelerin sıcaklığa bağlı Hall mobilitesi ve Hall taşıyıcı yoğunluğu değerleri.

B3019 numunesinde mobilite düşük sıcaklıklarda 2100 cm^2/Vs mertebesindeyken yüksek sıcaklıklarda 1000 cm^2/Vs mertebesinde çıkmıştır. Taşıyıcı yoğunluğu ise 10^{12} cm^{-2} mertebesinden biraz yüksek çıkmıştır. B3022 numunesinde ise mobilite düşük sıcaklıklarda 2500 cm^2/Vs mertebesindeyken, yüksek sıcaklıklarda 1000 cm^2/Vs mertebesinde olup, taşıyıcı yoğunluğu 10^{12} cm^{-2} mertebesinin çok az üzerinde çıkmıştır.

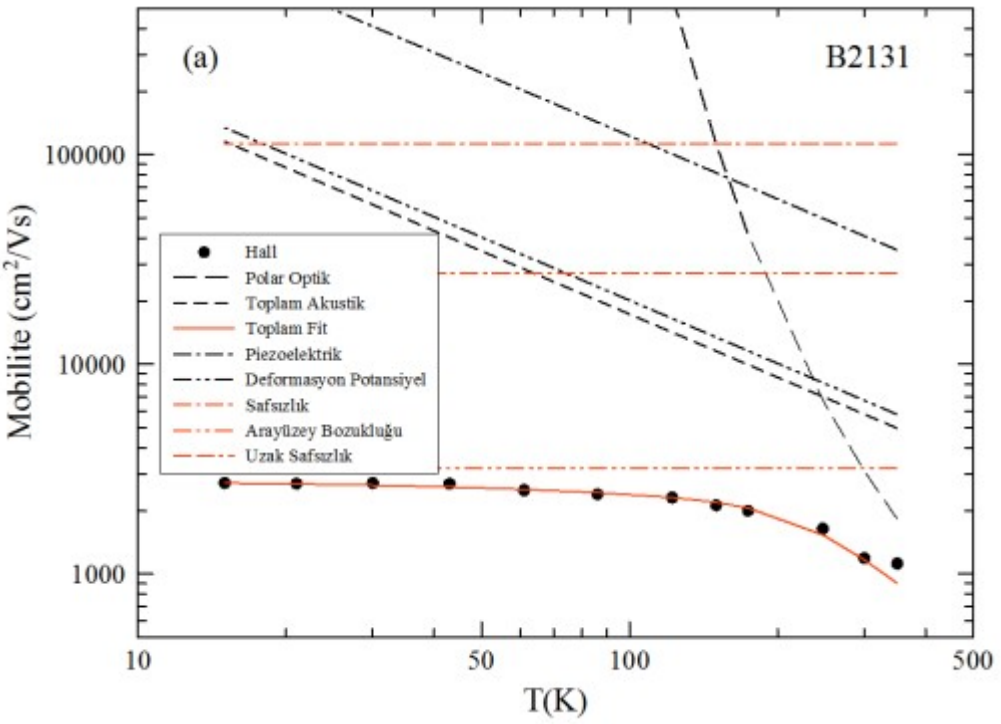
Şekil 34'den de görüleceği gibi tüm 3 numunede de Hall mobilitesi sıcaklık düştükçe artma eğilimi göstermekte ve 100K'den daha düşük sıcaklıklarda sabitlenme eğilimine girmektedir.

Taşıyıcı yoğunluğu ise çalışılan sıcaklık aralığında yaklaşık sabit olarak düşünülebilir. Hall mobilitesinin ve taşıyıcı yoğunluğunun bu davranışı klasik 2 boyutlu elektron gazı davranışı olarak tanımlanır [13]. En yüksek taşıyıcı yoğunluğu B3019 numunesinde görülmektedir. Bu davranış, bariyerde kullanılan kalın InAlN tabakasının getirdiği ilave spontane polarizasyonla açıklanabilir [14]. En yüksek mobilite ise B2131 numunesinde görülmüştür. Ostermaier ve ark. önerdiği bu yapı [15] kullandığı 1 nm AlN aratabakanın alaşım saçılmasını engellemesi sebebiyle daha yüksek mobiliteye sahiptir. Yapılacak transistörlerin başarımı açısından elektriksel olarak incelenmesi gereken önemli bir büyüklük ise iletkenliktir. Mobilite ve taşıyıcı yoğunluğunun çarpımı ile orantılı olan iletkenlik değerine baktığımızda hem mobilitesinin hemde taşıyıcı yoğunluğunun başarılı değerlerde olduğunu gördüğümüz B3022 numunesi öne çıkmaktadır. Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluklarının sıcaklıktan bağımsız davranış göstermesi, hatta yüksek sıcaklıklarda bulk taşıyıcıların aktivasyonu [16] yahut dx-merkezli taşıyıcı azalımı [17] gibi bir mekanizma dahi görülmemesi sebebiyle ölçüm yapılan tüm sıcaklık aralığındaki verilerimizin numunelerin GaN-tampon tabakanın hemen üstünde kendiliğinden oluşan kuvantum kuyusunda bulunan 2 boyutlu elektron gazına (2DEG) ait olduğunu söyleyebiliriz. Elde edilen sıcaklığa bağlı mobilite verilerinden kuantum kuyusundaki 2DEG elektronların düşük alan elektron iletimi özelliklerini incelemek için taşıyıcı mobilitesini sınırlayan saçılma mekanizmalarının incelenmesi gereklidir. Hesaplamalarımızda polar optik fonon saçılma (μPO), deformasyon potansiyel (μDP) ve piezoelektrik (μPZ) saçılma mekanizmalarını içeren akustik fonon saçılma mekanizması (μAC), arkaplan safsızlık saçılması (μBI), uzak vericilerden kaynaklanan safsızlık saçılması (μRI), alaşım saçılması (μAL) ve arayüzey bozukluğu saçılması (μIFR) göz önünde bulunduruldu. Bu saçılma mekanizmalarına ait mobilite bileşenleri 6 ve 7 no'lu referanslarda verilen bağıntılar kullanılarak hesaplandı. μ_{tot} Mattheisen kuralı kullanılarak bu saçılma mekanizmalarına ait mobilite bileşenlerle hesaplanan toplam mobilitedir ve μH ise tek manyetik alanda Hall etkisi ölçümleri ile ölçülen mobilitesini temsil eder. Yapılan analitik hesaplamalarda kullanılan malzeme parametreleri Tablo 13'de listelenmiştir. Alaşım saçılması, AlN aratabaka kullanılmayan tek numune olan B3019'un hesaplarında göz önüne alındı.

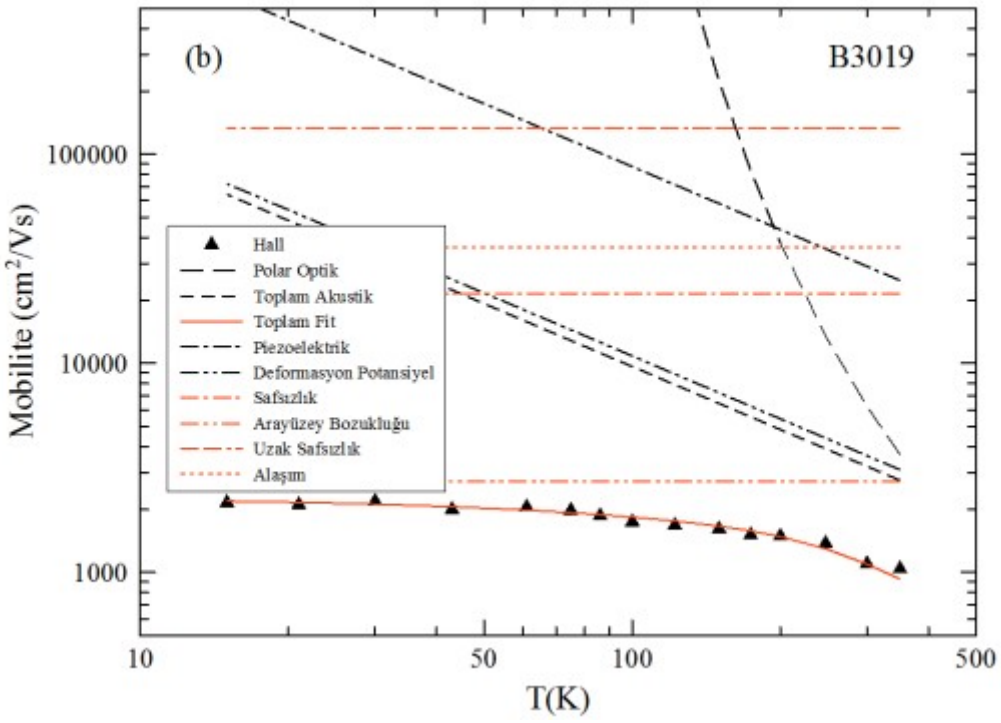
Tablo 13. Toplam elektron mobilitesinin saçılma analizinde kullanılan GaN için malzeme parametreleri [18,19].

Parametreler	*Değer*
Yüksek frekans dielektrik sabiti	$\varepsilon_\infty = 5.35$
Statik dielektrik sabiti	$\varepsilon_s = 8.9$
LO-fonon enerjisi	$\hbar\omega = 0.092$ eV
LA-fonon hızı	$u_l = 6.56 \times 10^3$ ms^{-1}
Kristal yoğunluğu	$\rho = 6.15 \times 10^3$ kgm^{-3}
Elektron dalga vektörü	$k = 7.3 \times 10^8$ m^{-1}
Elektromekanik çiftlenim sabiti	$K^2 = 0.039$
LA elastik sabiti	$c_{LA} = 2.650 \times 10^{11}$ Nm^{-1}
TA elastik sabiti	$c_{TA} = 0.442 \times 10^{11}$ Nm^{-1}

Şekil 35'de B2131 no'lu numunenin saçılma analizi sonucu görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda polar optik fonon saçılmasının baskın olduğu görülmektedir. Orta sıcaklıklarda ki eğime, akustik fonon saçılması bileşenleri olan piezoelektrik saçılma ve deformasyon potansiyeli saçılmalarının etkili olduğu söylenebilir. Düşük sıcaklıklarda etkili olan tüm saçılma mekanizmaları sıcaklıktan bağımsızdır. Bu sebeple, en düşük sıcaklıklarda dahi sıcaklık düştükçe hafif artış davranışı gösteren mobilitenin bu artışının kaynağı en yakın etkili mekanizma olan ve sıcaklığa bağımlılık gösteren akustik fonon saçılmasıdır. Düşük sıcaklıklardaki mobilite sınırlandırmasına bakıldığında, mobiliteyi en baskın olarak arayüzey saçılmasının sınırlandırdığı görülmektedir. Bu sonuç literatür ile uyumludur [20] ve gerginliğin baskın olduğu bu tür numunelerde önem kazanmaktadır. Arayüzey bozukluğu saçılmasından sonra daha az etkin olan safsızlık ve çok ince bir katkılı tabakaya sahip olmasından ötürü uzak safsızlık saçılma mekanizmalarının etkilerini görmekteyiz.



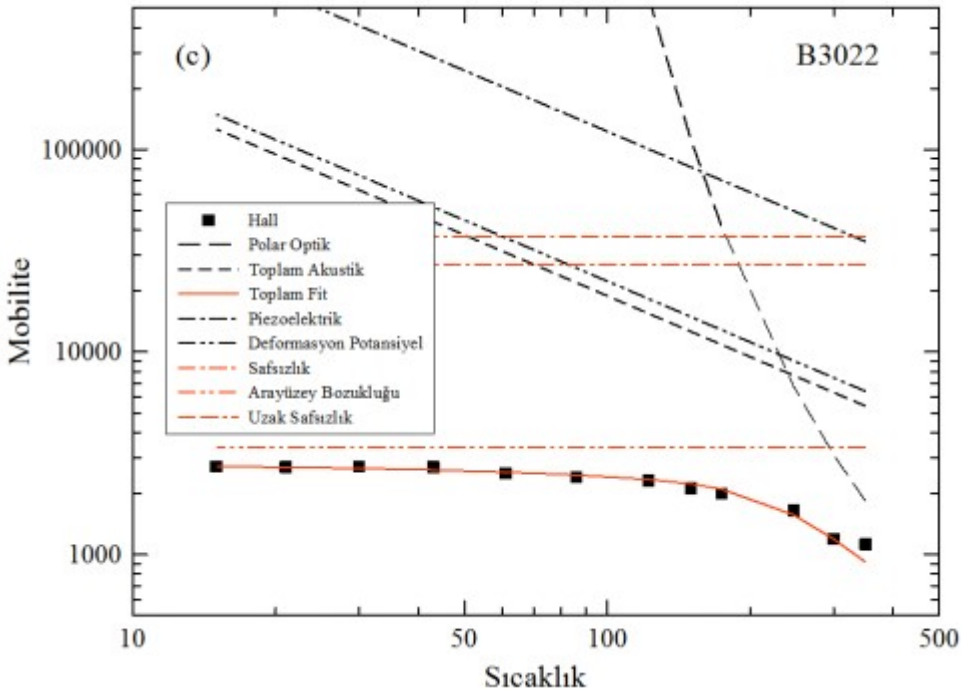
Şekil 35. B2131 numunesine ait saçılma mekanizmaları analizi.



Şekil 36. B3019 numunesine ait saçılma analizi.

Şekil 36’de B3019 no’lu numunenin saçılma analizi sonucu görülmektedir. B2131’e benzer biçimde yüksek sıcaklıklarda polar optik fonon saçılmasının baskın olduğu görülmektedir. Akustik fonon saçılmasının bileşenleri olan piezoelektrik saçılma ve deformasyon potansiyeli saçılmalarının orta sıcaklıklardaki davranışları da B2131 numunesine benzerlik gösterir. Düşük sıcaklıklardaki mobilite sınırlandırmasına bakıldığında, mobiliteyi en baskın olarak yine arayüzey saçılmasının sınırlandırdığı görülmektedir. Arayüzey bozukluğu saçılmasından sonra daha az etkin olan safsızlık, InAlN tabakası kuvantum kuyusunun kıyısında kullanıldığında alaşım saçılması ve görece ince bir katkılı tabakaya sahip olmasından ötürü uzak safsızlık saçılma mekanizmalarının etkilerini görmekteyiz.

Burada B2131’den farklı olarak safsızlık saçılması mobiliteyi daha çok ve uzak safsızlık saçılması ise mobiliteyi daha az sınırlandırmaktadır. En baskın olan arayüzey bozukluğu saçılmasından sonra ikinci baskın mekanizma B2131 ile benzer olarak safsızlık saçılması iken, üçüncü baskın saçılma bu numune alaşım saçılması olarak görülmektedir. Uzak safsızlık saçılmasının daha az olmasının sebebi, hem B2131’den daha ince katkılı bir tabakanın kullanılması hemde kuvantum kuyusu ile katkılı tabakanın arasındaki mesafenin daha çok olmasıdır.



Şekil 37. B3022 numunesine ait saçılma analizi.

Şekil 37’de B3022 no’lu numunenin saçılma analizi sonucu görülmektedir. Diğer iki numuneye benzer biçimde yüksek sıcaklıklarda polar optik fonon saçılmasının baskın olduğu

görülmektedir. Akustik fonon saçılmasının bileşenleri olan piezoelektrik saçılma ve deformasyon potansiyeli saçılmalarının orta sıcaklıklardaki davranışları da yine diğer iki numuneye benzerlik gösterir. Düşük sıcaklıklardaki mobilite sınırlandırmasına bakıldığında, mobiliteyi en baskın olarak yine arayüzey saçılmasının sınırlandırdığı görülmektedir. Arayüzey bozukluğu saçılmasından sonra daha az etkin olan safsızlık ve 3 nm kalınlığında katkılı bir tabakaya sahip olmasından ötürü uzak safsızlık saçılma mekanizmalarının etkilerini görmekteyiz. Burada B3022 numunesini diğer numunelerden ayırt eden en önemli özellik olarak 3 nm kalınlığında ve kuvantum kuyunun kıyısında bulunan katkılı AlN tabakasının kullanımını gösterebiliriz. Kuyunun hemen kıyısında bu tabakanın kullanılmasından ötürü uzak safsızlık saçılması diğer numunelerden çok daha baskındır. Fakat yinede B2131'e benzer şekilde düşük sıcaklıklardaki üçüncü baskın saçılma mekanizmasıdır. İkinci baskın mekanizma B2131 ile benzer olarak safsızlık saçılması iken, en baskın mekanizma diğer numunelerdeki gibi arayüzey bozukluğu saçılmasıdır. Tablo 14'de bu saçılma analizlerinde uygulanan fit sonucunda elde edilen bazı parametreler bulunmaktadır. Ayrıca tabloda yukarıda bahsedilen düşük sıcaklıklarda baskın olan ve her üç numunede de bulunan saçılma mekanizmaları olan arayüzey bozukluk saçılması (μIFR), safsızlık saçılması (μIMP) ve uzak safsızlık saçılmalarının (μREM) ve sadece B3019'da bulunan alaşım saçılmasının (μALLOY) mobilite sınırlama değerleri verilmiştir. Buna göre B3019'da etkin kuvantum kuyu genişliği diğer numunelere göre daha dar bulunmuştur. Bu sonuç arayüzey bozukluğu saçılmasının, bozukluk daha az olmasına rağmen diğer numuneler kadar etkin olmasına sebep olmuştur. Dar kuyuya sahip olması sebebiyle B3019, daha az safsızlık saçılmasının etkisi altındadır. Bu numunede diğer numunelerde olmayan orta derece etkin diyebileceğimiz bir de alaşım saçılması bulunmaktadır.

B3022 ve B2131 numuneleri ise yapısal olarakta birbirlerine benzediklerinden saçılma analizi sonucunda elde edilen parametrelerde benzerlik göstermektedir. Hem kuyu genişlikleri, hem deformasyon potansiyeli, arayüzeyin bozukluğunun bir göstergesi olan Λ değeri, hem de arayüzey bozukluğu ve safsızlık saçılmaları sınırlamaları benzer değerler göstermiştir. İki numune arasındaki en önemli fark katkılı katmanın kalınlığı ve kuvantum kuyuya olan uzaklıklarının farklı olması sebebiyle uzak safsızlık saçılması sınırlamasıdır. B3022 numunesi uzak safsızlık saçılmasından daha çok etkilenmektedir. Gelecekte çalışılabilecek daha başarılı bir numune önerisi olarak B3022 numunesinin 3 nm'lik AlN katmanının GaN-tampon tabakasına yakın kısmında 1 nm'lik kısmının katkısız yapması önerilebilir. Böyle bir tasarımın yukarıdaki sonuçlar ve analizler ışığında B2131'den daha yüksek mobilite değerleri verebileceğini öngörebiliriz.

Tablo 14. Saçılma analizi sonucunda hesaplanan bazı parametreler ve yorumlanan saçılma mekanizmalarına ait mobilite sınırlama değerleri

Numune	Z_0 (nm)	Ξ (eV)	Λ (atom)	μ_{IFR} (cm^2/Vs) ($x10^3$)	μ_{IMP} (cm^2/Vs) ($x10^4$)	μ_{ALLOY} (cm^2/Vs) ($x10^4$)	μ_{REM} (cm^2/Vs) ($x10^5$)
B3019	1.0	50	29	2,73	2,15	3,60	1,33
B3022	2,0	38	15	3,38	2,71	-	0,37
B2131	2,0	40	15	3,19	2,71	-	1,13

5. TARTIŞMA / SONUÇ

Bu proje ile kısa kanal etkilerinin görülmeyeceği daha başarılı GaN-temelli HEMT türü transistör yapılarının geliştirilmesi hedeflenmişti ve bu hedefe ulaşıldı. Daha yüksek mobilite ve daha yüksek taşıyıcı yoğunluğu gibi daha iyi elektriksel parametrelere sahip olan bu yapıların, daha küçük boyutlarda, çevre dostu, daha verimli transistörlerin üretilmesine olanak sağlayacağı bundan sonra yapılan çalışmalarda görülecektir. Bu bağlamda, hesaplamalı çalışmanın ve sonrasında önerilen deneysel yöntemlerin, sıralanan hedeflerin sıcaklık, elektrik alan ve katmanlar arası gerilimlerin hesaba katıldığı yüksek başarımlı 1-2 boyutlu eş-uyumlu Schrödinger-Poisson çözümleri yaparak yeni tasarım yöntemleri geliştirildi, tasarlanan aygıtların doğru yöntemle ve doğru büyütme parametreleriyle üretilmesi sağlandı, üretilen numunelerin doğru fabrikasyon yöntemleri ile ölçüm yapılarak numuneler biçimine getirilerek ve doğru değişkenler ışığında elektriksel ve yapısal özelliklerini incelendi, dislokasyon çeşitlerinin düşük ve yüksek elektrik alanlarda (sıcak elektron) elektriksel özelliklere etkileri incelendi, daha yüksek mobiliteli ve daha yüksek taşıyıcı yoğunluklu transistör yapıları elde edildi, daha başarılı ve küçük HEMT'ler üretilebildi,gelecekte daha başarılı benzetimler yapılabilmesi için gerekli parametrelerin eldesi ve, bu konularda bilim uzmanı olacak öğrenci yetişmesi ve kurumlar arası işbirliğinin gerçekleşmesi sağlanabilecek bu çalışma ile.

6. Kaynaklar

[1] Asgari, A., Kalafi, M., Faraone, L., 2005. "A quasi-two-dimensional charge transport model of AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMTs)", Physica E 28, 491–499.

[2] Cao, Y., Jena, D. 2007. “High-mobility window for two-dimensional electron gases at ultrathin AlN/GaN heterojunctions”, Appl. Phys. Lett. 90, 182112.

[3] Caughey, D., Thomas, R. 1967. “Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field”, Proceedings of IEEE, 55, 2192.

[4] Darwish, A., Bayba, A. J., Hung, H. A., 2015. "Channel Temperature Analysis of GaN HEMTs With Nonlinear Thermal Conductivity", IEEE Transactions on Electron Devices, 62, 3, p. 840.

[5] Freeman, J., 2004. "Channel Temperature Model for Microwave AlGaN/GaN HEMTs on SiC and Sapphire MMICs in High Power, High Efficiency SSPAs", International Microwave Symposium sponsored by the Institute of Electrical and Electronics Engineers Fort Worth, Texas, June 6–11.

[6] Kumar S. P., Agrawal A.,Kabra S., Gupta M., Gupta R.S. 2006. “An analysis for AlGaN/GaN modulation doped field effect transistor using accurate velocity-field dependence for high power microwave frequency applications”, Microelectronics J. 37, 1339.

[7] Ostermaier, C., Pozzovivo, G., Carlin, J.F., Basnar, B., Schrenk, W., Douvry, Y., Gaquiere, C., DeJaeger, J.C., Čičo, K., Froehlich, K. and Gonschorek, M., 2009. Ultrathin InAlN/AlN barrier HEMT with high performance in normally off operation. Electron Device Letters, IEEE, 30(10), pp.1030-1032.

[8] Singh, J., 1992. Physics of Semiconductors and Their Heterostructures, McGraw-Hill, New York, p. 734.

[9] Smorchkova, I. P., Chen, L., Mates, L., Shen, L., Heikman, S., Moran, B., Keller, S., DenBaars, S. P., Speck, J. S., Mishra, U. K., 2001. "AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy", J. Appl. Phys. 90, 5196

[10] Sarikavak-Lisesivdin, B., S. B. Lisesivdin, E. Ozbay, 2013. “The effect of InxGa1−xN back-barriers on the dislocation densities in Al0.31Ga0.69N/AlN/GaN/InxGa1-xN/GaN heterostructures (0.05≤ x≤ 0.14)”, Curr. Appl. Phys., *13*(1), 224-227.

[11] Çörekçi, S., M. K. Öztürk, A. Bengi, M. Çakmak, S. Özçelik, E. Özbay, 2011.“Characterization of an AlN buffer layer and a thick-GaN layer grown on sapphire substrate by MOCVD” *J. Mater. Sci.*, *46*, 1606-1612.

[12] Ming-Gang, L., W.Yun-Qian, Y. Yi-Bin, L. Xiu-Qi, X. Pen, C. Wei-Jie, L. Hui, 2015.“Performance improvement of GaN-based light-emitting diodes transferred from Si (111) substrate onto electroplating Cu submount with embedded wide p-electrodes” *Chin. Phys. B*, *24*(3), 038503.

[13] Yu, H., D. Caliskan, E. Ozbay, 2006. “Growth of high crystalline quality semi-insulating GaN layers for high electron mobility transistor applications” J. Appl Phys 100:033501.

[14] Redwing, J. M., M. A. Tischler, J. S. Flynn, S. Elhamri, M. Ahoujja, R. S. Newrock, and W. C. Mitchel. 1996."Two-dimensional electron gas properties of AlGaN/GaN heterostructures grown on 6H– SiC and sapphire substrates."Applied physics letters 69, no. 7: 963-965.

[15] Gonschorek, M., J-F. Carlin, E. Feltin, M. A. Py, and N. Grandjean, 2006. "High electron mobility lattice-matched AlInN/GaN field-effect transistor heterostructures." Applied physics letters 89, no. 6: 2106.

[16] Ostermaier, Clemens, Gianmauro Pozzovivo, Jean-Francois Carlin, Bernhard Basnar, Werner Schrenk, Yannick Douvry, Christophe Gaquiere et al., 2009."Ultrathin InAlN/AlN barrier HEMT with high performance in normally off operation." IEEE Electron Device Letters 30, no. 10: 1030-1032.

[17] Aktas, Ozgur, Z. F. Fan, S. N. Mohammad, A. E. Botchkarev, and H. Morkoc. 1996. "High temperature characteristics of AlGaN/GaN modulation doped field-effect transistors." Applied physics letters 69, no. 25: 3872-3874.

[18] Lisesivdin, S. B., H. Altuntas, A. Yildiz, M. Kasap, E. Ozbay, and S. Ozcelik. 2009. "DX-center energy calculation with quantitative mobility spectrum analysis in n-AlGaAs/GaAs structures with low Al content." Superlattices and Microstructures 45, no. 6 :604-611.

[19] Gökden, S., R. Baran, N. Balkan, and S. Mazzucato. 2004. "The effect of interface roughness scattering on low field mobility of 2D electron gas in GaN/AlGaN heterostructure." Physica E: Lowdimensional Systems and Nanostructures24, no. 3: 249-256.

[20] Lisesivdin, S. B., S. Acar, M. Kasap, S. Ozcelik, S. Gokden, and E. Ozbay. 2007. "Scattering analysis of 2DEG carrier extracted by QMSA in undoped Al0. 25Ga0. 75N/GaN heterostructures." Semiconductor science and Technology22, no. 5: 543.

[21] Zanato, D., S. Gokden, N. Balkan, B. K. Ridley, and W. J. Schaff. 2004. "The effect of interface-roughness and dislocation scattering on low temperature mobility of 2D electron gas in GaN/AlGaN." Semiconductor science and technology19, no. 3, 427.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. BEYZA LİŞESİVDİN
Proje No:	114F508
Proje Başlığı:	Ultra-İnce Bariyerli Gan-Temelli Yarıiletken Çokluyapıların Elektriksel Ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	GAZİ Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2015 - 15/03/2017
Onaylanan Bütçe:	37995.0
Harcanan Bütçe:	20849.95
Öz:	Ultra-ince bariyerli GaN-temelli yarıiletken çokluyapılar
Anahtar Kelimeler:	Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK