



**GaN-TEMELLİ ULTRAİNCE BARIYERLİ YÜKSEK ELEKTRON  
DEVİNGENLİKLİ TRANSİSTÖRLERİN BENZETİMİ VE  
OPTİMİZASYONU**

**Jangeez Mostafa M. Jameel AL ABBAS**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2016**

Jangeez Mostafa M. Jameel AL ABBAS tarafından hazırlanan “GaN-TEMELLİ ULTRAİNCE BARIYERLİ YÜKSEK ELEKTRON DEVİNGENLİKLİ TRANSİSTÖRLERİN BENZETİMİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman :** Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

**Başkan :** Prof. Dr. Selim ACAR

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

**Üye :** Doç. Dr. Abdullah YILDIZ

Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 23/ 08 / 2016

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

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

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

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

Jangeez Mostafa M. Jameel AL ABBAS

23 / 08 / 2016



# GaN-TEMELLİ ULTRAİNCE BARIYERLİ YÜKSEK ELEKTRON DEVİNGENLİKLİ TRANSİSTÖRLERİN BENZETİMİ VE OPTİMİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Jangeez AL ABBAS

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2016

## ÖZET

Bu çalışmada AlN, AlGaN ve AlInN ultraince bariyerli GaN temelli yüksek elektron devingenlikli transistör (HEMT) çoklu yapılarının 2-Boyutlu Elektron Gazı (2DEG) özellikleri bir boyutlu kendini-eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri kullanılarak incelendi. AlN, AlGaN ve AlInN ultraince bariyerli toplam 10 farklı yapı için farklı GaN kapak katman ve farklı bariyer katman kalınlıklarının ve katkı yoğunluklarının iletkenlik bant profili, elektron bulunma olasılığı ve taşıyıcı yoğunluğu üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca bazı çoklu yapılar farklı InGaN kanal kalınlıklarına ve katkı tipine göre de incelenmiştir. Elde edilen verileri kullanarak en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olan ve elektron bulunma olasılığı cinsinden saçılma mekanizmalarından en az etkilenebilecek özelliklere sahip en iyileştirilmiş ultraince bariyerli GaN temelli HEMT çoklu yapıları gelecek aygıt araştırmaları için öne sürülmüştür.

Bilim Kodu : 20226

Anahtar Kelimeler : HEMT, 2DEG, InAlN/AlN, AlGaN/GaN

Sayfa Adedi : 93

Danışman : Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVİDİN

# SIMULATION AND OPTIMATION OF GaN-BASED ULTRATHIN BARRIER HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS

(M. Sc. Thesis)

Jangeez AL ABBAS

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2016

## ABSTRACT

In this study, 2-Dimensional Electron Gas (2DEG) properties of GaN-based high electron mobility transistor (HEMT) heterostructures with ultrathin AlN, AlGa<sub>N</sub> and AlInN barriers were investigated by using the solutions of one-dimensional self-consistent Schrödinger-Poisson equations. For each heterostructures with ultrathin AlN, AlGa<sub>N</sub> and AlInN barriers, the effects of different GaN cap layer and barrier layer thicknesses and doping concentrations on the conduction band profile, electron probability densities and sheet carrier densities were examined. In addition, some of these heterostructures were evaluated according to different InGa<sub>N</sub> channel thicknesses and doping concentrations. Using the obtained results, optimized GaN-based HEMT heterostructures with ultrathin barrier, which have the highest sheet carrier density and 2DEG carriers less affected from scattering mechanisms, were suggested for future device investigations.

Science Code : 20226

Key Words : HEMT, 2DEG, InAlN/AlN, AlGa<sub>N</sub>/GaN

Page Number : 93

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, karşılaştığım tüm zorlukların çözümlenmesinde yakın ilgisini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Görüş ve bilgilerini bana aktaran, hiçbir zaman yardımını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Beyza SARIKAVAK LİŞESİVDİN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Çalışmalarım sırasında yardımlarını benden esirgemeyen ve çalışmalarımı daha verimli bir şekilde tamamlamamı sağlayan arkadaşlarıma Ece KUTLU, Polat NARİN ve Gökhan ATMACA'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında manevi desteğini esirgemeyen annem Asya EFENDİOĞLU, babam Mustafa EFENDİOĞLU ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım. Bu tez, çalışmalarım boyunca bana sabır gösteren ve destekleyen eşim Neval EFENDİOĞLU ve hayatıma anlam katan kızım İnci EFENDİOĞLU'na adanmıştır.

Bu çalışma aynı zamanda TÜBİTAK tarafından "Ultra-ince bariyerli GaN-temelli yarıiletken çokluyapıların elektriksel ve yapısal özelliklerinin incelenmesi" isimli ve 114F508 nolu proje ile desteklenmiştir. Teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                  | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                       | iv    |
| ABSTRACT.....                                                    | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                    | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                        | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                          | xii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                     | xvii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                    | 1     |
| 2. III- NİTRÜR YARIİLETKEN ÖZELLİKLERİ.....                      | 7     |
| 2.1. Kristal Yapı.....                                           | 7     |
| 2.2. Elektriksel Özellikler .....                                | 8     |
| 2.3. III- Nitrür Yarıiletkenlerde Kutuplanma.....                | 8     |
| 2.3.1. Doğal kutuplanma.....                                     | 8     |
| 2.3.2. Piezoelektrik kutuplanma.....                             | 9     |
| 2.4. Gerginlik .....                                             | 10    |
| 2.5. 2DEG Oluşumu Ve Bant Yapısı .....                           | 11    |
| 2.6. Malzeme Parametreleri.....                                  | 12    |
| 3. GaN ÇOKLUYAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ .....              | 15    |
| 3.1. Alan Etkili Transistör.....                                 | 15    |
| 3.2. Yüksek Elektron Hareketliliğe Sahip Transistör (HEMT) ..... | 16    |
| 3.2.1. AlGaIn/GaN çoklu yapılar .....                            | 18    |
| 3.2.2. AlInN/AlN/GaN çokluyapılar .....                          | 19    |

|                                                                                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.2.3. GaN tabanlı HEMT çokluyapılarının katmanları.....                                                                                            | 19           |
| <b>4. NUMERİK VE ANALATİK HESAPLAMALAR.....</b>                                                                                                     | <b>21</b>    |
| 4.1. Numerik Model.....                                                                                                                             | 21           |
| 4.2. Yarıiletken Denklemleri.....                                                                                                                   | 22           |
| 4.2.1. Poisson denklemi.....                                                                                                                        | 22           |
| 4.2.2. Schrödinger denklemi.....                                                                                                                    | 23           |
| 4.3. Kod Akışı.....                                                                                                                                 | 24           |
| <b>5. NUMERİK HESAPLAMA SONUÇLARI.....</b>                                                                                                          | <b>25</b>    |
| 5.1. n-GaN/InAlN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarda InAlN Bariyer ve GaN Kapak Katmanın Etkisinin İncelenmesi.....                                    | 25           |
| 5.2. n-GaN/AlGaIn/GaN Ultraince Çokluyapılarda AlGaIn Bariyer ve GaN Kapak Katman Kalınlığının Etkisi.....                                          | 30           |
| 5.3. n-GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarında AlN Bariyer ve n-GaN Kapak Katmanı Kalınlığının Etkisi .....                                          | 35           |
| 5.4. GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarında AlN Bariyer ve Katkısız GaN Kapak Katman Kalınlığının Etkisi .....                                      | 41           |
| 5.5. GaN/n-AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarında Katkılı AlN Bariyer ve Katkısız GaN Kapak Katman Kalınlıklarının Etkisi .....                         | 47           |
| 5.6. n-GaN/AlInN/InGaIn/GaN Ultraince Çokluyapılarında InGaIn Kanal Katman Kalınlığının Etkisi .....                                                | 53           |
| 5.7. n-GaN/AlN/AlInN/GaN Ultraince Çokluyapılarında AlInN Bariyer Katmanının Etkisi.....                                                            | 60           |
| 5.8. n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaIn/GaN Ultraince Çokluyapılarda Alıcı Katkılı InGaIn Arkabariyer ve AlInN Bariyer Katman Kalınlıklarının Etkisi .....    | 64           |
| 5.9. n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaIn/GaN Ultraince Çokluyapılarında Verici Katkılı InGaIn Arkabariyer ve AlInN Bariyer Katman Kalınlıklarının Etkisi ..... | 71           |
| 5.10. GaN/AlN/GaN/AlN Ultraince Çokluyapılarında AlN Bariyer ve GaN Kapak Katman Kalınlığının Etkisi .....                                          | 79           |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                                                                   | <b>85</b>    |

**Sayfa**

|                 |    |
|-----------------|----|
| KAYNAKLAR ..... | 89 |
| ÖZGEÇMİŞ.....   | 93 |



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                                                  | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge1.1. Yarıiletken teknolojisinde kullanılan farklı malzemeler için özetle bazı özellikleri.....                                                                                    | 2     |
| Çizelge 1.2. GaN tabanlı HEMT tarihsel gelişimi.....                                                                                                                                     | 4     |
| Çizelge 2.1. InN, AlN ve GaN için doğal kutuplanma değerleri.....                                                                                                                        | 9     |
| Çizelge 2.2. III-N yarıiletkenler piezoelektrik sabitleri.....                                                                                                                           | 10    |
| Çizelge 2.3. GaN, AlN ve InN nitrür yarıiletken malzemelerinin oda sıcaklığında esas parametre.....                                                                                      | 13    |
| Çizelge 5.1 Bu tez dahilinde incelenen GaN temelli ultraince bariyerli çokluyapı gruplarının listesi .....                                                                               | 25    |
| Çizelge 6.1. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen optimize çokluyapıların taşıyıcı yoğunluğu..... | 86    |
| Çizelge 6.2. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre önerilen dört tane ultraince bariyerli çokluyapı.....           | 87    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                          | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrumuna göre bazı yarıiletken malzemelerin bant aralıkları.. .....                                                                              | 2     |
| Şekil 1.2. GaN tabanlı çokluyapılarına veya GaN HEMT'ler hakkında yapılan yıllara göre yayın sayısı. Elde edilen veriler Web of Science (ISI) veri tabanından alınmıştır. .... | 5     |
| Şekil 2.1. a) Hekzagonal şematik gösterimi ve b) III-nitrür atomların tetrahedral düzlenmesi.....                                                                              | 7     |
| Şekil 2.2. Çokluyapılarda oluşabilecek gerginlik durumları a) Gerilme gerginliği, b) Sıkışma gerginliği ve c) Gerginlik yok.....                                               | 11    |
| Şekil 2.3. AlGaIn/GaN enerji bant profili ve kutuplanma alanına bağlı olarak 2DEG oluşumu.....                                                                                 | 12    |
| Şekil 3.1. Kaynak, akaç ve geçidin p-kanallı bir MOSFET yapı.....                                                                                                              | 15    |
| Şekil 3.2. AlGaIn/GaN HEMT şematik yapısı ve 2DEG GaN tabakasında oluşumu [43,44] .....                                                                                        | 17    |
| Şekil 3.3. AlGaIn/GaN çokluyapısının iletkenlik bant profili .....                                                                                                             | 18    |
| Şekil 4.1. Schrödinger-Poisson eş uyumlu olarak çözümünün iterasyonu .....                                                                                                     | 21    |
| Şekil 5.1. n-GaN/InAlN/AlN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı I) şematik gösterimi .....                                                                                 | 26    |
| Şekil 5.2. 1 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                                    | 26    |
| Şekil 5.3. 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                                    | 27    |
| Şekil 5.4. 3 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b)elektron bulunma olasılığı. ....                                                     | 27    |
| Şekil 5.5. 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                                    | 28    |
| Şekil 5.6. 5 nm ve 6 nm kapak tabakası kalınlığı için 2DEG elektron bulunma, olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi. ....                                      | 28    |
| Şekil 5.7. 1-5 nm kapak tabakası kalınlıklarında 2DEG elektron bulunma olasılığı ve bariyer kalınlıklarına göre en optimize olanlar seçilmiştir. ....                          | 29    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                                           | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.8. 1-5 nm kapak tabakası kalınlıklarında taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına değişimi.....                                                               | 29           |
| Şekil 5.9. n-GaN/AlGaIn/GaN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı2) şematik gösterimi .....                                                                         | 30           |
| Şekil 5.10. 1 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                           | 30           |
| Şekil 5.11. 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                           | 31           |
| Şekil 5.12. 3 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                           | 31           |
| Şekil 5.13. 4 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                           | 32           |
| Şekil 5.14. 5 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                                           | 33           |
| Şekil 5.15. 1-6 nm GaN kapak tabakası kalınlıklarında bariyerdeki % 30 Al alaşım oranı için 2DEG elektron bulunma olasılığı görülmektedir. ....                        | 33           |
| Şekil 5.16. 2 nm GaN kapak tabakası kalınlığı ve 4 nm $Al_xGa_{1-x}N$ bariyer kalınlığı için farklı alaşım oranları için değişen taşıyıcı yoğunluğu. ....              | 34           |
| Şekil 5.17. 2 nm GaN kapak tabakası kalınlığı ve 4nm $Al_xGa_{1-x}N$ bariyer kalınlığı için farklı alaşım oranları için değişen 2DEG bulunma olasılığı.....            | 34           |
| Şekil 5.18. a) n-GaN/AlN/GaN (Yapı3), b) katkısız GaN/AlN/GaN (Yapı4) ve c) GaN/n-AlN/GaN (Yapı5) ultraince bariyerli çokluyapıların şematik gösterimleri.....         | 35           |
| Şekil 5.19. 1 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 36           |
| Şekil 5.20. 2 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 37           |
| Şekil 5.21. 3 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 38           |

| Şekil                                                                                                                                                                        | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.22. 4 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 39    |
| Şekil 5.23. 1-4 nm kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına<br>bağlı olarak değişimi.....                                                           | 40    |
| Şekil 5.24. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer<br>kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                   | 41    |
| Şekil 5.25. 1 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....     | 42    |
| Şekil 5.26. 2 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....     | 43    |
| Şekil 5.27. 3 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....     | 44    |
| Şekil 5.28. 4 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....     | 45    |
| Şekil 5.29. 1-4 nm GaN kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun farklı bariyer<br>kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                | 46    |
| Şekil 5.30. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer<br>kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                   | 47    |
| Şekil 5.31. 1 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....   | 48    |
| Şekil 5.32. 2 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....   | 49    |
| Şekil 5.33. 3 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....   | 50    |
| Şekil 5.34. 4 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....          | 51    |

| Şekil                                                                                                                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.35. 1-4 nm kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                                    | 52    |
| Şekil 5.36. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                            | 53    |
| Şekil 5.37. n-GaN/AlInN/InGaN/GaN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı6) şematik gösterimi. ....                                                                               | 53    |
| Şekil 5.38. 2 nm kapak kalınlığı ve 1 nm bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı iletkenlik bant profili. ....                                                        | 54    |
| Şekil 5.39. 2 nm kapak ve 2 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu ..... | 55    |
| Şekil 5.40. 2 nm kapak ve 3 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu ..... | 56    |
| Şekil 5.41. 2 nm kapak ve 4 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu ..... | 57    |
| Şekil 5.42. 2 nm kapak ve 5 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu.....  | 58    |
| Şekil 5.43. 2 nm kapak kalınlığı için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi.....                                                                      | 59    |
| Şekil 5.44. 2 nm kapak kalınlığı için elektron bulunma olasılığının AlInN bariyer kalınlığına bağlı değişimi.....                                                                  | 60    |
| Şekil 5.45. n-GaN/AlN/AlInN/GaN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı7) şematik gösterimi .....                                                                                 | 60    |
| Şekil 5.46. 2 nm kapak kalınlığı ve 1 nm AlN bariyer için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı.....                    | 61    |
| Şekil 5.47. 2 nm kapak kalınlığı ve 2 nm AlN bariyer için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                   | 62    |
| Şekil 5.48. 2 nm kapak kalınlığı ve 3 nm AlN bariyer için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı. ....                   | 62    |

| Şekil                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.49. 2 nm kapak kalınlığı ve 4 nm AlN bariyer kalınlığı için elektron bulunma olasılığının AlInN bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi. ....                 | 63    |
| Şekil 5.50. 2 nm kapak tabakası kalınlığı ve 1-4 nm AlN bariyer için taşıyıcı yoğunluğunun InAlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi. ....                     | 63    |
| Şekil 5.51. 2 nm kapak tabakası kalınlığı ve 1-4 nm AlN bariyer için elektron bulunma olasılığının InAlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi. ...              | 64    |
| Şekil 5.52. a) n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN (Yapı8) ve<br>b) n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN (Yapı9)<br>ultrathin bariyerli çokluyapılarının şematik gösterimi. ....         | 64    |
| Şekil 5.53. 1 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 65    |
| Şekil 5.54. 2 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....  | 66    |
| Şekil 5.55. 3 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....  | 67    |
| Şekil 5.56. 4 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....  | 68    |
| Şekil 5.57. 5 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>bant profili.....                                                                          | 69    |
| Şekil 5.58. 1-4 nm GaN kapak kalınlıkları için bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı<br>yoğunlukları .....                                                                 | 70    |
| Şekil 5.59. 1-4 nm GaN kapak kalınlıkları için AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı<br>olarak 2DEG bulunma olasılığı .....                                                | 70    |
| Şekil 5.60. 1 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 72    |
| Şekil 5.61. 2 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu..... | 73    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.62. 3 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....                                                                                                                                 | 75    |
| Şekil 5.63. 4 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....                                                                                                                                 | 76    |
| Şekil 5.64. 5 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı iletkenlik<br>bant profili.....                                                                                                                                                                                               | 77    |
| Şekil 5.65. 1-4 nm kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer<br>kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                                                                                                                                                      | 78    |
| Şekil 5. 66. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının<br>bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi .....                                                                                                                                                                            | 78    |
| Şekil 5.67. GaN/AlN/GaN/AlN ultrince bariyerli çokluyapısının (Yapı10) şematığı..                                                                                                                                                                                                                       | 79    |
| Şekil 5.68. 1 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) 2DEG bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....                                                                                                                                       | 80    |
| Şekil 5.69. 2 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) 2DEG bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunluğu.....                                                                                                                                       | 81    |
| Şekil 5.70. 3 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı<br>a) iletkenlik bant profili, b) 2DEG bulunma olasılığı ve<br>c) taşıyıcı yoğunlukları .....                                                                                                                                   | 82    |
| Şekil 5.71. 4 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı<br>iletkenlik bant profili.....                                                                                                                                                                                                 | 82    |
| Şekil 5.72. 5 ve 6 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı<br>iletkenlik bant profili.....                                                                                                                                                                                            | 83    |
| Şekil 5.73. 1 ve 2 nm kapak tabakası kalınlıklarında taşıyıcı yoğunluğunun bariyer<br>kalınlığına bağlı olarak değişimi.....                                                                                                                                                                            | 83    |
| Şekil 5.74. 1-3 nm kapak tabakası kalınlıklarında 2DEG elektron bulunma olasılığı<br>ve bariyer kalınlıklarına göre en optimize olanlar seçilmiştir. ....                                                                                                                                               | 84    |
| Şekil 6.1. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin<br>çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen en iyileştirilmiş<br>çokluyapılar için bulunma olasılığı. Kalın çizgiler deneysel çalışmalar için<br>önerilebilecek en iyi çokluyapıları göstermektedir. .... | 85    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler                   | Açıklamalar                                    |
|----------------------------|------------------------------------------------|
| $\vec{D}$                  | Elektrik displasman alanı                      |
| $\vec{E}$                  | Elektrik alanı                                 |
| $E_n$                      | Enerji özdeğeri                                |
| $J_n$                      | Elektron akım yoğunluğu                        |
| $V_G$                      | Geçit voltajı                                  |
| $e_{ij}$                   | Piezoelektrik sabiti (ij indisli)              |
| $m^*$                      | Etkin kütle                                    |
| $\vec{p}$                  | Kutuplanma yoğunluğudur                        |
| $\varepsilon_j$            | Gerginlik $j$ yönünde                          |
| $\sigma_b$                 | Taşıyıcı yoğunluğu                             |
| $\psi_m$                   | Enerji özdeğerine karşı gelen dalga fonksiyonu |
| $\mu_n$                    | Elektron devingenliği                          |
| $\mu_p$                    | Deşik devingenliği                             |
| $a, a_0, a_{\bar{u}}, a_a$ | Hekzagonal birim hücre örgü sabiti             |
| $b_0$                      | Hekzagonal birim hücre örgü sabiti             |
| $c$                        | Altıgen örgü hücrenin yüksekliği               |
| $c, c_0$                   | Hekzagonal birim hücre örgü sabiti             |
| $d_k$                      | Kritik kalınlık                                |
| $E_B$                      | Kırılma elektrik alanı                         |
| $E_c$                      | İletkenlik bandı                               |
| $E_F$                      | Fermi seviyesi                                 |
| $E_{Fn}$                   | Kuasi Fermi seviyesi                           |
| $E_g$                      | Yasak bant aralığı                             |
| $\hbar$                    | Plank sabiti                                   |
| $k_{x,y}$                  | Büyütme yönüne dik momentum düzlemi            |
| $k_z$                      | Büyütme yönüne paralel momentum yönelimi       |

**Simgeler****Açıklamalar**

|                 |                                             |
|-----------------|---------------------------------------------|
| $n, ns$         | Elektron yoğunluğu                          |
| $N_A^-$         | İyonize alıcıların yoğunluğu                |
| $N_D^-$         | İyonize vericilerin yoğunluğu               |
| $P_{DK}$        | Doğal kutuplanma                            |
| $P_{PZ}$        | Piezoelektrik kutuplanma                    |
| $T$             | Lokal örgü sıcaklığı                        |
| $V$             | Potansiyel fonksiyonu                       |
| $V(z)$          | Enerji potansiyeli                          |
| $V_c(z)$        | İletim bandında elektron yoğunluğu          |
| $V_s$           | Elektron doyum hızı                         |
| $V_v(z)$        | Değerlilik bandında elektron yoğunluğu      |
| $X$             | Alaşım oranı                                |
| $\Delta$        | Cihazın Fermi düzeyine iletim bandın nüfuzu |
| $\epsilon_s$    | Dielektrik sabiti                           |
| $\psi$          | Dalga fonksiyonu                            |
| $\Theta_K$      | Isıl İletkenlik                             |
| $\epsilon$      | Bariyer tabakanın Dielektrik sabiti         |
| $\phi_b$        | Geçit kontağın yüksekliği                   |
| $\phi, \varphi$ | Elektrostatik potansiyeli                   |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|             |                                                 |
|-------------|-------------------------------------------------|
| <b>2DEG</b> | İki boyutlu elektron gazı                       |
| <b>AlN</b>  | Alüminyum indiyum nitrür                        |
| <b>FET</b>  | Alan etkili transistör                          |
| <b>GaAs</b> | Galyum arsenik                                  |
| <b>GaN</b>  | Galyum nitrür                                   |
| <b>GaP</b>  | Galyum fosfat                                   |
| <b>Ge</b>   | Germanyum                                       |
| <b>HEMT</b> | Yüksek elektron devingenliğine sahip transistör |
| <b>HVPE</b> | Hidrür buhar faz epitaksi                       |

**Kısaltmalar****Açıklamalar****InN**

İndiyum nitrür

**InP**

İndiyum fosfat

**LD**

Lazer diyot

**LED**

Işık yayan diyot

**MOCVD**

Metal organik kimyasal buhar faz epitaksi

**MODFET**

Modülasyon katkılı alan etkili transistör

**MOSFET**

Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör

**RF**

Radyo frekans

**Si**

Silikon

**SiC**

Silikon karbür

## 1. GİRİŞ

Elektronik radyo-frekans (RF) iletişim ve algılama sistemleri 1947 yılında ilk elektronik transistörün icadından beri günlük hayatımızı önemli oranda değiştirdi [1]. Yarıiletken tabanlı aygıtlar mikroelettronik, optoelettronik ve kimyasal sensörlerde, ana elementler ve bileşikler (Ge-Si),( GaAs, GaP, InP, SiC, ...) farklı uygulamalarda teknoloji hayatımıza büyük katkıda bulunmuştur, ancak günümüzde (Si) ve (Ge) malzemelerin bazı özellikleri gittikçe sınırlanmaktadır ve dolayısıyla bazı özel uygulamalarda oldukça uygulaması zordur. P ve As tabanlı III-V yarıiletkenler lazer diyotlar (LD) ve ışık yayan diyotlar (LED) yüksek frekansa sahip olan aygıtlarda büyük başarılar sağlamıştır. Ancak bu tür yarıiletken malzemeler dar bant aralığına sahip olmalarından dolayı yüksek güç ve yüksek sıcaklık uygulamalarda kullanımı kısıtlıdır.

Son zamanlarda teknoloji ilerledikçe III–V nitrid yarıiletkenler (GaN, AlN ve InN ) yoğun bir araştırmaya konusu haline gelmiştir. Benzersiz fiziksel özellikler sağlamaktadır. Yüksek erime sıcaklığı, yüksek bant aralığı gibi özelliklere sahip olması nedeniyle yüksek güç ve yüksek frekanslı cihazlar AlGaN/GaN ya da InAlN/GaN gibi GaN tabanlı yüksek elektron devingenlikli transistörler (HEMT) imalatında büyük katkı sağlamaktadır [1]. Bu malzemelerin yaygın özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek elektron doyum hızı,
- Güçlü kimyasal bağları,
- Yüksek erime sıcaklığı,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Yüksek kırılma elektrik alanı.

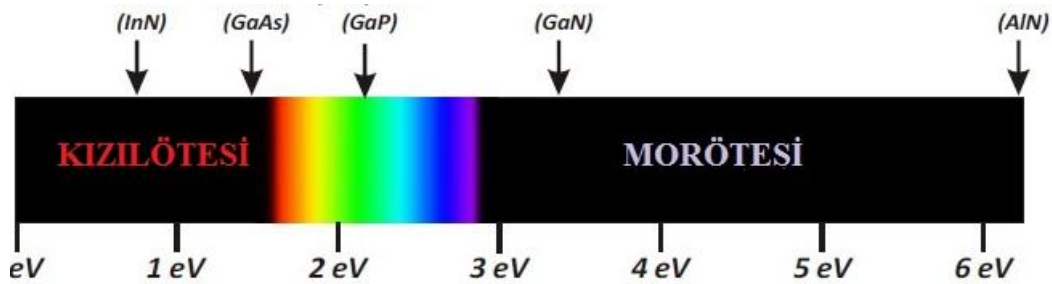
Askeri radar sistemlerinde kullanılan mikrodalga güç yükseltici, iletişim amaçlı baz istasyonlarında kullanılan verici güç yükselteçleri ve otomotiv ve uçak sanayilerinde yüksek gelirim konvektörleri gibi uygulamalar yüksek güç, frekanslı ve yüksek performanslı aygıtlar gerekmektedir. Dolayısıyla yukarıdaki belirtilen nitrid yarıiletken malzemeler bu tipik özellikleri sağlamasından ötürü bahsi geçen uygulamalar için diğer yarıiletken malzemelerden daha uygundur [2,3].

Çizelge 1.1. Yarıiletken teknolojisinde kullanılan farklı malzemeler için özetle bazı özellikleri [4-6]

| Özellikler                     | Si    | 4 H-SiC    | GaAs        | GaN        |
|--------------------------------|-------|------------|-------------|------------|
| Kristal yapı                   | Elmas | Hekzagonal | Zincoblende | Hekzagonal |
| $E_g$ (eV)                     | 1,12  | 3,26       | 1,43        | 3,4        |
| $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /Vs)  | 1400  | 900        | 8500        | 1200       |
| $\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /Vs)  | 600   | 100        | 400         | 200        |
| $E_B$ (v/cm) x 10 <sup>6</sup> | 0,3   | 3,0        | 0,4         | 3,0        |
| $\Theta_K$ (W/cmK)             | 1,5   | 4,9        | 0,5         | 1,3        |
| $V_s$ (cm/s) x 10 <sup>7</sup> | 1,0   | 2,7        | 2,0         | 2,7        |
| $\epsilon_s$                   | 11,8  | 9,7        | 12,8        | 9,0        |

Çizelge 1.1’de listelenen Si, GaAs, SiC ve GaN malzemeler için kristal yapısı, enerji bant aralığı ( $E_g$ ), elektron ve deşik devingenliği ( $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ), kırılma elektrik alanı ( $E_B$ ), Isıl iletkenlik ( $\Theta_K$ ), doyum hızı ( $V_s$ ) ve dielektrik sabitidir ( $\epsilon_s$ ).

Yarıiletken aygıt imalatında kullanılan bazı yarıiletken malzemelerin önemli özellikleri Çizelge1.1’de yer almaktadır. Yüksek bant aralığı, düşük dielektrik sabiti, yüksek ısı iletkenliği, yüksek kırılma elektrik alanı arzu edilen malzeme özellikleridir. SiC ve GaN geleneksel yarıiletkenlere göre iki üç kat daha yüksek bant aralığına sahiptirler. Yüksek bant aralıklı malzemelerin  $\epsilon_s$  değeri geleneksel yarıiletken malzemelerine göre %20 düşüktür [7].



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrumuna göre bazı yarıiletken malzemelerin bant aralıkları [8]

Şekil 1.1’de bazı yarıiletken malzemelerin AlN, GaN ve InN gibi yarıiletkenlerin oda sıcaklığında yasak bant aralıklarının enerji değerlerinin elektromanyetik spektrumunda ki yerler görülmektedir. Görüldüğü üzere, nitrür-tabanlı yarıiletkenler kızılötesinden görünür bölgesine morötesine bölgesine kadar geniş bir bölgeyi kapsamaktadır.

Yüksek frekans ve yüksek güç transistörlerinin daha küçük ölçekli uygulamalarda yaygın olarak kullanılması ile birlikte yüksek elektron devingenlikli transistör (HEMT) yapılarında mikrometre ölçeğinden nanometre 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 ultra-ince bariyer uygulamasıdır. Ultra-ince bariyer uygulaması, kontrol edilmesi zor, birkaç nanometre kalınlığında ki 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 ta elektriksel özelliklerinde katastrofik bozulmalara sahip olabilir [9].

#### GaN'ın Tarihçesi

Galyum Nitrür, Al ve In alaşımlarıyla Si'dan bu yana günümüzde en kararlı yarıiletken malzemelerden bir olarak görülmektedir. GaN bileşiği ilk kez 1932'de Jhonson ve arkadaşları tarafından hazırlanmıştır [10]. Isıya bağlı olarak asitler ve bazlar karşı kararlı olduğu ise kırk yıl sonra Marsuk, Pankove ve arkadaşları tarafından gözlenmiştir [11]. Sonra ise optik özellikleri incelenmiş ve oda sıcaklığında bant aralığı 3,39 eV olarak tespit edilmiştir [12]. Bir kaç yıl sonra Bloom ve arkadaşları tarafından GaN enerji bant aralığı ampirik potansiyelimsi yöntemiyle hesaplanmıştır [13]. GaN, yüksek bant aralığına sahip olması nedeniyle Ilegems ve arkadaşları tarafından optoelektronik cihazlar ve lazer uygulamaları için umut verici bir malzeme olarak öngörülmüştür [14]. 90 'lı yılların başında bir Japonya grubu tarafından GaN tabanlı P-N eklem LED fabrikasyonu gerçekleştirildiği bildirildi [15]. 1992 'de Khan ve arkadaşları GaN/AlGaIn tabakası arayüzeyinde 2DEG gözlediklerini bildirdiler [16].

Günümüzde HEMT teknolojilerinin gelişmesi önemli ölçüde artmıştır. 1990 yılının başında, gelişmiş metal organik kimyasal buhar biriktirme(MOCVD) tekniği ile yüksek kaliteli III-nitrür epitaksiyel film büyütmesinde, AlGaIn/GaN çokluyapı ilk kez gösterilmiştir [17]. GaN tabanlı HEMT büyük bant aralığı, yüksek elektrik alanı ve elektron taşıması özellikleriyle yüksek güç ve yüksek frekans kullanılmaktadır. GaAs tabanlı HEMT gibi, GaN tabanlı HEMT'de farklı bant aralığına sahip iki tür malzemeden

oluşmaktadır. Bir üçlü olan AlGaIn ve GaIn bileşiği en çok kullanılan bileşiklerdir. GaIn tabanlı bileşiklerin hekzagonal örgü yapısında olmaları sebebiyle bu iki bileşik ince film olarak üst üste büyütüldüklerinde aralarında örgü uyumsuzluğu nedeni ile piezoelektrik kutuplanma alanı oluşur. Bu malzemeler doğaları gereği birde doğal kutuplanma alanına sahiptirler [18]. Sonuç olarak, ince film olarak, örgü uyumlu olarak büyütülen bir AlGaIn/GaIn yapısında bulunan bu kutuplanma alanları iletkenlik bandın bükülmesine ve AlGaIn/GaIn arayüzeyinde kuvantum kuyusu oluşmasına yol açar. Bu kuyuda elektronlar hapsolür ve 2 boyutlu elektron gazı (2DEG) olarak adlandırılır. Elektronun iki boyutta taşınması elektron devingenliği büyük oranda yükseltebilir. 2DEG'in kökeni, AlGaIn/GaIn çokluyapılarda AlGaAs/GaAs'den oldukça farklıdır. Benzer kuvantum kuyu ve 2DEG popülasyonu AlGaAs/GaAs yapılarda AlGaAs tabakasının n-tipi modülasyon katkısı ile sağlanabilmektedir. AlGaIn/GaIn çokluyapılar ise katkısız halde yaklaşık  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  taşıyıcı yoğunluğu elde edebilir[19].

Çizelge 1.2. GaIn tabanlı HEMT tarihsel gelişimi

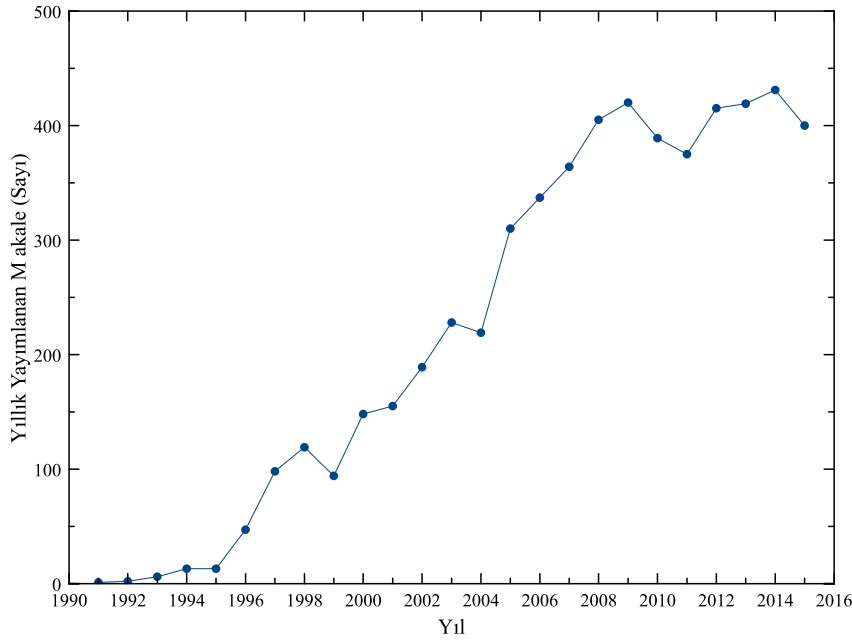
| YIL  | OLAY                                     | YAZARLAR           | Kaynak |
|------|------------------------------------------|--------------------|--------|
| 1969 | HVPE tekniği ile GaIn büyütmesi          | Marsuka ve Tietjen | 11     |
| 1971 | MOCVD yöntemi GaIn için uygulanmıştır    | Masnevit ve ark.   | 20     |
| 1979 | GaAs tabanlı HEMT                        | Tashaki Mimura     | 21     |
| 1992 | AlGaIn/GaIn 2DEG gözlemi                 | Khan ve ark.       | 16     |
| 1993 | AlGaIn/GaIn tabanlı HEMT                 | Khan ve ark.       | 22     |
| 1994 | AlGaIn/GaIn HFET mikrodalga kullanımı    | Khan ve ark.       | 23     |
| 1996 | Mikro güç AlGaIn/GaIn MODFET             | Wu ve ark.         | 24     |
| 1999 | GaIn MODFET'te akım sıkıştırma           | Kohn ve ark.       | 25     |
| 1999 | 6.9W/mm@ 10 GHz GaIn HEMT SiC üzerine    | Sheppard ve ark.   | 26     |
| 2000 | AlGaIn/GaIn HEMT yüzey pasifize          | Green ve ark.      | 27     |
| 2005 | Yüksek performanslı geliştirme modu HEMT | Cai ve ark.        | 28     |

Çizelge 1.2'de GaIn tabanlı HEMT'nin tarihsel gelişimi göstermektedir. Ayrıca o zamandan bu yana en uygun, performanslı ve düşük boyutlu uygulamalar elde etmek için AlGaIn/GaIn tabanlı HEMT için çok sayıda araştırmacı yoğun bir çalışmaya devam etmektedirler.

Radyo frekans amaçlı GaIn tabanlı HEMT aygıtı Japonya'da Eudyna şirketi tarafından yapılması 2004'te gerçekleşmiştir. 2005'te Nitronex şirketi tarafından Si alttaş üzerine GaIn büyütmesini SIGANTIC teknolojisini kullanarak ilk RF HEMT üretilmiştir. 2009 Haziran ayında, Efficient Power Conversion şirketi (EPC) tarafından Si üzerine GaIn

büyütmesi ile iyileştirme modunda çalışan MOSFET'e üretilmiştir [29]. Şekil 1.2'de zamana bağlı olarak GaN HEMT'ler hakkında literatürde yayımlanan makalelerin sayısı görülmektedir. GaN HEMT'ler günümüzde de yaygın bir araştırma konusu olarak ilgi görmektedir.

Bu çalışmada farklı ultra-ince bariyer konfigürasyonlu HEMT tasarımları yapılacak, polarizasyon, gerilim ve sıcaklık değişkenlerinin de dahil olduğu yüksek başarımlı 1 boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin eş-uyumlu çözümleri kullanılarak bant yapısı, taşıyıcı yoğunlukları ve bu taşıyıcıların uzaysal dağılımları incelenecektir.



Şekil 1.2. GaN tabanlı çokluyapılarına veya GaN HEMT'ler hakkında yapılan yıllara göre yayın sayısı. Elde edilen veriler Web of Science (ISI) veritabanından alınmıştır

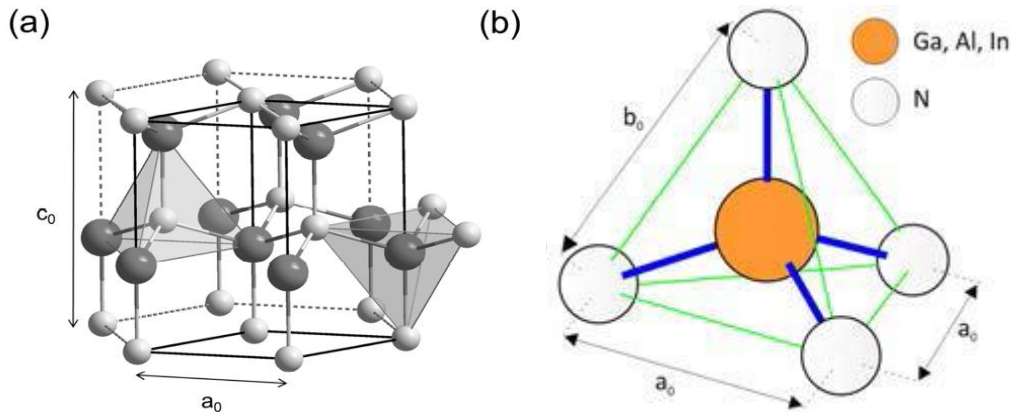


## 2. III- NİTRÜR YARIİLETKEN ÖZELLİKLERİ

### 2.1. Kristal Yapı

III-nitrür grubunda üç çeşit kristal yapı bulunmaktadır. Bunlar hekzagonal (wurtzite), çinko sülfür (zincblende) ve kaya tuzu (NaCl) kristal yapılarıdır. Çinko sülfür yapı düşük sıcaklıklarda yapılan büyütmelede elde edilir. Hekzagonal yapı, normal şartlarda en kararlı ve nitrür gurupta en yaygın olan yapıdır. Aynı zamanda kutuplu yapı sebebiyle arayüzeyde 2DEG oluşumuna yol açması bakımından önemlidir [29]. Bu tez çalışmasında, AlN, GaN ve InN malzemeler hekzagonal yapıya sahip olmaları nedeni ile kendileri ve üçlü bileşikleri kullanılmıştır.

Hekzagonal yapı, iki sıkı paketli yüz merkezli yapının iç içe geçmesinden oluşur. Şekil 2.1.a)'da gösterdiği gibi hekzagonal birim hücresi “a” ve “c” örgü parametresi ile tanımlanır: a kenar tarafının uzunluğudur, c ise altıgen örgü hücrenin yüksekliğidir. İdeal bir wurtzite yapısının doluluk faktörü  $3/8 = 1,633$ 'tir. Hekzagonal birim hücresi dört atomdan oluşmaktadır, tetrahedral yapı Şekil 2.1b'de göstermektedir yani her nitrür grubu üç azota bağlanır ve aksine de azot için üç nitrür grubu bağlanır, azot veya nitrür üç atom bağın boyu ( $a_0$ ) eşkenardır fakat dördüncü bağın boyu ( $b_0$ ) kısadır. GaN ve benzeri hekzagonal yapı c-eksenine göre inversiyon simetri eksikliği vardır ve dolayısıyla iki kutuplaşmaya yol açar; Ga, Al veya In-yüz kutuplanma (0001) yönünde ve N-yüz kutuplanma (000 $\bar{1}$ ) yönündedir.



Şekil 2.1. a) Hekzagonal şematik gösterimi ve b) III-nitrür atomların tetrahedral düzlenmesi [8]

## 2.2. Elektriksel Özellikler

Yarıiletkenler, genellikle iki çeşitli bant aralığından karakterize edilir, bunlar direkt ya da indirekt bant aralığıdır. Galyum nitrürün yasak enerji bant aralığı ise direkttir. Elektronlar değerlilik bandından iletim bandına geçmek için malzemenin safsızlığı veya sıcaklığı değiştirerek sağlanmaktadır. Saf III- nitrür grubu bileşiklerinin bant aralıkları InN, GaN ve AlN 0,7, 3,5 ve 6,2 eV olarak sıralanmıştır. İletim bandı, parabolik yaklaşıma uygun olduğundan izotropik elektron etkin kütleye sahiptir, yalnız deşiklerin etkin kütlesi  $k_z$  ve  $k_{x,y}$  düzlemleri birbirleri ile yüksek anizotropiye sahip olduğundan hesabı zordur[30, 31]. GaN yüksek ısı iletkenliği, yüksek kırılma elektrik alanı yüksek frekanslı ve yüksek güç uygulamalarda kullanıldığını önceki bölümde belirtilmişti. GaN'ın elastik özellikleri ise eşsiz avantaj sağlamaktadır. Elastik özellikleri doğası gereği gelişmiştir ve onun kutuplanmasının hesaplamasında ciddi öneme sahiptir.

## 2.3. III- Nitrür Yarıiletkenlerde Kutuplanma

Hekzagonal yapıya sahip olan III-nitrür yarıiletkenler iki çeşit kutuplanma alanına sahiptir, doğal kutuplanma ( $P_{DK}$ ) her malzemenin kendi kendiliğinden kutuplanma özelliğine sahiptir farklı tabakaları gerginlik farkından doğan piezoelektrik kutuplanma ( $P_{PZ}$ ). Bu kutuplanma alanlarından dolayı, çok katmanlı nitrür çokluyapıların tabaka arayüzeylerinde her hangi bir katkılama yapmadan büyük miktarda elektron birikebilir. Kutuplanmadan doğan yüksek elektrik alan ile indüklenen elektronlar uzaysal olarak bir boyutta sınırlanır ve iki boyutta serbestçe hareket eder ve bu elektronlar iki boyutlu elektron gazı (2DEG) olarak adlandırılır. III-N yarıiletkenlerde toplam kutuplanma, Eş. 2.1'de gibi hesaplanır.

$$P_{\text{toplam}} = P_{DK} + P_{PE} \quad (2.1)$$

### 2.3.1. Doğal kutuplanma

Doğal kutuplanma, hekzagonal kristal yapıdaki GaN 'ün inversiyon simetri olmaması ve Ga ile N arasındaki iyonik bağlar özellikleri neden ile oluşur. III-N kristal ile N bağı iyonlaşma doğası neden ile negatif (bulutlu elektron) ve pozitif yük (çekirdek) aralarında ters yönde hafif yer değişimi olur ki elektrik dipolu oluşur.

III-N yarıiletkenlerde c-ekseni boyunca doğal kutuplanma 3MV/cm mertebesinde elektrik alan dipolun oluşmasına sebep olur [32]. Al(Ga)N, GaN 'den daha yüksek kutuplanmaya sahiptir. Temel nitrürlü bileşiklere ait doğal kutuplanma değerleri Çizelge 2.1'de listelenmiştir.

Çizelge 2.1. InN, AlN ve GaN için doğal kutuplanma değerleri [32]

| Parametre       | InN   | GaN   | AlN   |
|-----------------|-------|-------|-------|
| $P_{Dk}(C/m^2)$ | 0,032 | 0,029 | 0,081 |

### 2.3.2. Piezoelektrik kutuplanma

Hekzagonal malzemeler gibi simetri eksikliğine sahip bir malzeme üzerine başka bir benzer malzeme morfik olarak büyütüldüğünde, iki malzeme arasındaki örgü uyumsuzluğundan dolayı gerginlik olur ki buradan piezoelektrik kutuplanma ortaya çıkar. Nitrür yarıiletkenler, güçlü piezoelektrik kutuplanmaya sahiptir [33]. Piezoelektrik kutuplanma aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{PZ} = \sum_j e_{ij} \varepsilon_j \quad (2.2)$$

$\varepsilon_j$  gerginlik tensörü,  $e_{ij}$  piezoelektrik sabitidir ve III- nitrür yarıiletkenler için c ekseninde boyunda Eş. 2.3'te verilmektedir,

$$P_{PE} = e_{33}\varepsilon_3 + e_{31}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2), \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{(c - c_0)}{c_0}, \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{(a - a_0)}{a_0} \quad (2.5)$$

Eş. 2.4'te  $\varepsilon_3$ , c-ekseni yönünde ki gerilim,  $\varepsilon_1$  ve  $\varepsilon_2$  düzlemsel gerilim,  $a_0$  ve  $c_0$  ise örgü sabitidir. Piezoelektrik kutuplanma wurtzite yapılar için bu aşağıdaki gibi tanımlanabilir [34, 35].

$$P_{PE} = e: \varepsilon = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ e & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Hekzagonal kristal yapısı, yüksek simetriye sahiptir ve sadece üç bağımsız elemana sahiptir. Bu elemanlar, Eş. 2.6'da piezoelektrik sabitleri  $e_{31}$ ,  $e_{33}$  ve  $e_{15}$  olarak gösterilmiştir ve III-N yarıiletken piezoelektrik sabitleri Çizelge 2.2'de Bernardini ve arkadaşları tarafından bulunan değerler olarak listelenmiştir [36]. Bulunan piezoelektrik sabitlerinin bazı önemli farklar vardır. III-N  $e_{31}$  ve  $e_{33}$  mutlak değerleri geleneksel yarıiletkenlerden daha büyüktür ve  $e_{31}$  ve  $e_{33}$  sabitlerin II-VI yarıiletkenlerde işaretleri aynıdır fakat III-N'de işaretleri terstir. [0001] büyütme yönünde bulunan  $e_{15}$  piezoelektrik sabiti ise ihmal edilebilir.

Çizelge 2.2. III-N yarıiletkenler piezoelektrik sabitleri [34, 36]

| Malzeme | $e_{33}(\text{C/m}^2)$ | $e_{31}(\text{C/m}^2)$ | $e_{15}(\text{C/m}^2)$ |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|
| GaN     | 0,73                   | -0,49                  | -0,30                  |
| AlN     | 1,46                   | -0,60                  | -0,48                  |
| InN     | 0,97                   | -0,57                  | -3,14                  |

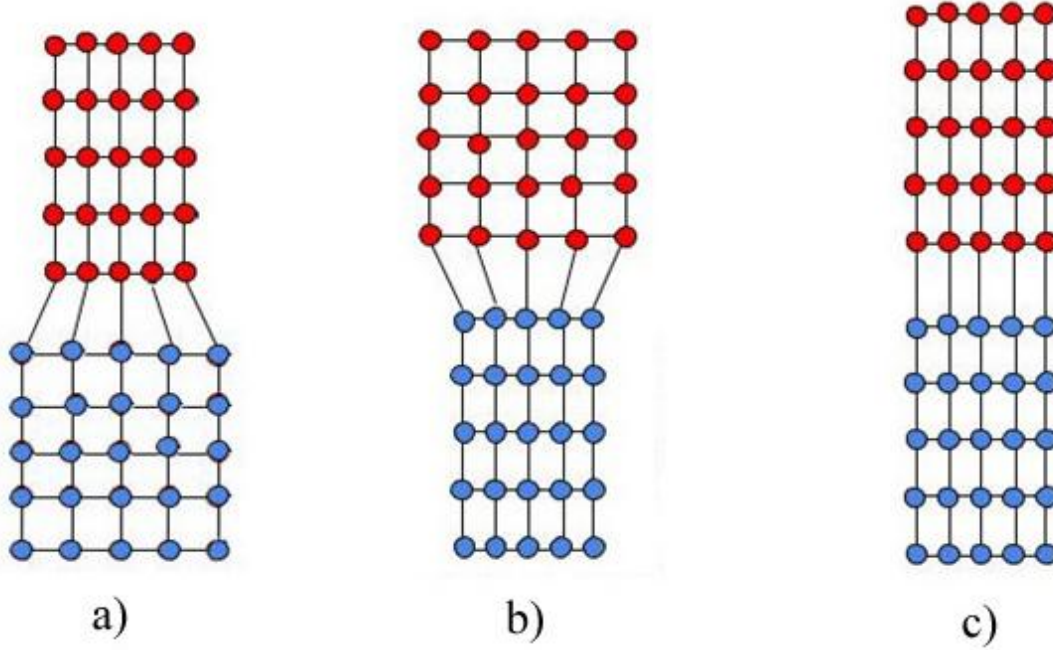
## 2.4. Gerginlik

Hekzagonal yapılı III-N yarıiletkenlerde kristal kalitesi optik ve elektriksel özellikleri etkileyen bir mekanizmadır. Kristal kalitesi ise tabakalar arası gerginlikle oldukça bağlantılıdır. Kristal tabakası büyütmesinde örgü sabitleri uyumsuzluğundan iki çeşit gerginlik mekanizması oluşur, birisi alttaki tabakadan örgü sabiti küçük olan bir tabaka büyütüldüğünde gerilme gerginliği Şekil 2.2.a'da ve ikinci ise alttaki tabakanın örgü sabitinden büyük olan bir tabaka büyütüldüğünde sıkışma gerginliğidir Şekil 2.2.b'de görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.2.c'de görüldüğü gibi örgü sabitleri aynı ve ya birbirine çok yakın ise gerginlik oluşmaz. Büyütme esnasında oluşan gerginlikler katman kalınlığına 'da bağlıdır. Dolayısıyla oluşan gerginlikler kritik bir kalınlıktan sonra bazı bölgelerde rahatlayacaklardır. Rahatlama durumu, arayüzeyde dislokasyon oluşmasına neden olur. Bu durumun 2DEG iletimi ve aygıtların performansına büyük etkisi olabilir. Dislokasyon oluşması için gereken üstteki katmanın kritik kalınlıkta büyümesi aşağıdaki biçimde ifade edilir [37].

$$d_k = \frac{a}{2|\varepsilon|} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \frac{(a_a - a_{ii})}{a_{ii}} \quad (2.8)$$

Burada  $a_a$  alt tabaka örgü sabiti,  $a_{ii}$  üst tabaka örgü sabitinden büyükse gerilme gerginliği olur, ve ters duruma ise sıkışma gerginliği gerçekleşir.



Şekil 2.2. Çokluyapılarda oluşabilecek gerginlik durumları a) Gerilme gerginliği, b) Sıkışma gerginliği ve c) Gerginlik yok

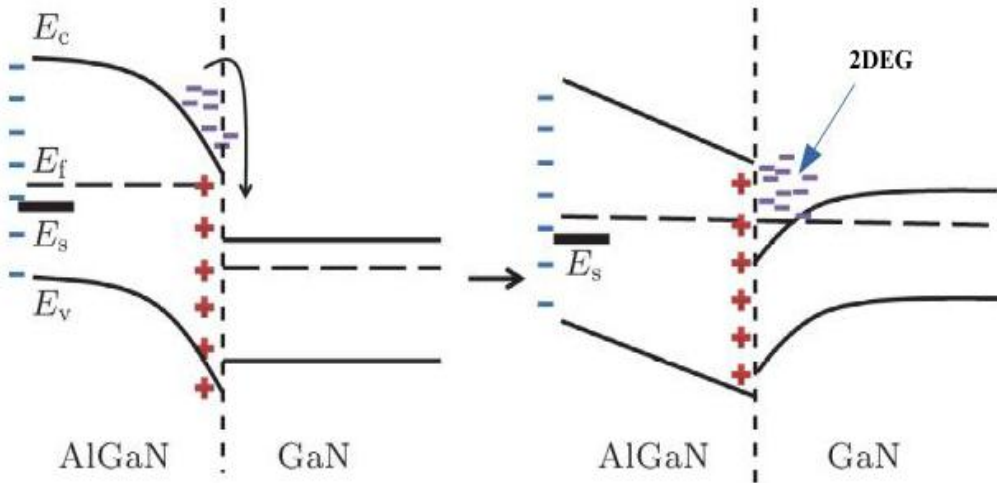
## 2.5. 2DEG Oluşumu Ve Bant Yapısı

2DEG'in oluşum sebebi önceki bölümlerde özet olarak belirtilmişti. AlGaIn/GaN veya InAlN/GaN gibi çokluyapıların arayüzeyinde oluşan 2DEG, doğal ve piezoelektrik kutuplanmadan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla çokluyapılarda GaN üzerine AlGaIn c-yönünde büyütüldüğünde her tabakanın sahip olduğu doğal ve piezoelektrik kutuplamadan dolayı GaN ve AlGaIn arayüzeylerinde yük birikir ve biriken bu yüklere 2DEG denir.

Yarıiletkenlerde ve metallerde elektronlar üç boyutta hareket edebilir. Ancak hareketin belirli bir kuvantum kuyusu içinde sınırlandığını düşünelim. Hareket tek bir yönde sınırlandırılması durumunda elektronlar, sadece bir düzlem boyunca hareket edebilir, fakat elektronlar düzleme dik yönde hareket edemezler ve iki boyutta serbest hareket edebilmeleri bakımından 2DEG olarak adlandırılırlar.

GaN veya GaAs'li yapılarda 2DEG'in bulunduğu tabakanın iletkenlik bandı ( $E_c$ ), 2DEG bölgesinde Fermi enerjisi ( $E_F$ ) altındadır. Bu bölgede bir boyutlu kuvantum kuyusu oluşmaktadır [38]. Şekil2.3 'de görüldüğü gibi AlGaN/GaN çokluyapının arayüzeyinde 2DEG'in oluşumu ve enerji bant diyagramı görülmektedir. Ayrıca Şekil2.2'de incelenen AlGaN/GaN çokluyapı katkılama bulunmayan kutuplanma bölgesinden sağlanarak 2DEG oluşumu gerçekleşmektedir.

Bu tezin dâhilindeki çalışmalarda 1 boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerini kullanarak çokluyapıların bant yapıları ve buna bağlı olarak iletim özellikleri hesaplanmıştır. GaN tabanlı ultraince yapılar için Bölüm 5'te çok sayıda yapı incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar ve analizler sonucunda GaN tabanlı ultraince bariyerli çokluyapılarda iki boyutlu deşik gaz beklenmediğini görülmektedir. Dolayısıyla tüm yapılar için taşıyıcılar, elektron gazı olarak düşünülmektedir.



Şekil 2.3. AlGaN/GaN enerji bant profili ve kutuplanma alanına bağlı olarak 2DEG oluşumu

## 2.6. Malzeme Parametreleri

GaN, AlN ve InN gibi nitrür yarıiletken malzemelere ait temel parametreleri Çizelge 2.3'de verilmiştir [34, 39-40]. Günümüzde nitrür yarıiletken malzemeler yüksek frekanslı aygıtlarda imalatında büyük rol oynamaktadır. Ayrıca teknoloji ilerledikçe bu tür malzemeler umut verici özelliklere sahiptirler ve dolayısıyla bu tez dahilinde bazı bant yapı, iletim bandı, elektrik, optik, ısı ve mekanik özelliklere ait bazı parametreleri Çizelge 2.3 ile verilmektedir. Üçlü bileşiklere ait parametreler Vegard yasası ile hesaplanmıştır.

Çizelge 2.3. GaN, AlN ve InN nitridür yarıiletken malzemelerin oda sıcaklığında esas parametreler

| Parametreler                                           | GaN                                  | AlN                                  | InN                                 |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Kristal Yapısı                                         | Hekzagonal                           | Hekzagonal                           | Hekzagonal                          |
| Yasak bant aralığı (eV)                                | 3,4                                  | 6,2                                  | 0,7-1,0                             |
| Elektron Yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )          | 6,15                                 | 3,25                                 | 6,81                                |
| Elektron Devingenliği ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )     | $\leq 1000$                          | $\leq 200$                           | $\leq 3200$                         |
| Deşik Devingenliği ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )        | $\leq 200$                           | $\leq 15$                            | $\leq 50$                           |
| Elektron Etkin kütlesi                                 | $0,2m_0$                             | $0,4m_0$                             | $0,11m_0$                           |
| Yüksek Deşik etkin kütlesi                             | $0,8m_0$                             | $3,53m_0$                            | $1,63m_0$                           |
| Hafif Deşik etkin kütlesi                              | $0,3m_0$                             | $0,24m_0$                            | $0,27m_0$                           |
| Elektron ısı hızı ( $\text{cm/s}$ )                    | $2,6 \times 10^7$                    | $1,85 \times 10^7$                   | $3,4 \times 10^7$                   |
| Deşik ısı hızı ( $\text{cm/s}$ )                       | $9,4 \times 10^6$                    | $4,1 \times 10^6$                    | $9,4 \times 10^6$                   |
| Kırılma Alanı ( $\text{V/cm}$ )                        | $\sim 5 \times 10^6$                 | $\sim 1,8 \times 10^6$               |                                     |
| Statik Dielektrik sabiti                               | 8,9                                  | 8,5                                  | 15,3                                |
| Yüksek frekanslı Dielektrik sabiti                     | 5,35                                 | 4,77                                 | 8,4                                 |
| Polar optik fonon Enerjisi (meV)                       | 91,2                                 | 99,2                                 | 89,0                                |
| Örgü sabiti, a (Å)                                     | 3,189                                | 3,11                                 | 3,54                                |
| Örgü sabiti, c (Å)                                     | 5,185                                | 4,98                                 | 5,70                                |
| Simetri grubu                                          | $P63mc(C_{6V}^4)$                    | $P63mc(C_{6V}^4)$                    | $P63mc(C_{6V}^4)$                   |
| Elektron Difüzyon Katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) | $\leq 25$                            | $\leq 7$                             | $\leq 80$                           |
| Deşik Difüzyon Katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )    | $\leq 5$                             | $\leq 0,3$                           |                                     |
| $\text{Cm}^3$ 'deki atom sayısı                        | $8,9 \times 10^{22}$                 | $9,58 \times 10^{22}$                | $6,4 \times 10^{22}$                |
| Debye sıcaklığı (K)                                    | 600                                  | 1150                                 | 660                                 |
| Isıl iletkenlik sayısı (a)                             | $5,59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | $4,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  | $3,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| Isıl iletkenlik sayısı (c)                             | $3,17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | $5,27 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | $2,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| Doğal Kutuplanma ( $\text{C}/\text{m}^2$ )             | -0,029                               | -0,081                               | -0,032                              |
| Elastik sabit $C_{11}$ (GPa)                           | 390                                  | 410                                  | 190                                 |
| Elastik sabit $C_{12}$ (GPa)                           | 145                                  | 149                                  | 104                                 |
| Elastik sabit $C_{13}$ (GPa)                           | 106                                  | 99                                   | 121                                 |
| Elastik sabit $C_{33}$ (GPa)                           | 398                                  | 389                                  | 182                                 |
| Elastik sabit $C_{44}$ (GPa)                           | 105                                  | 124                                  | 10                                  |



### 3. GaN ÇOKLUYAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

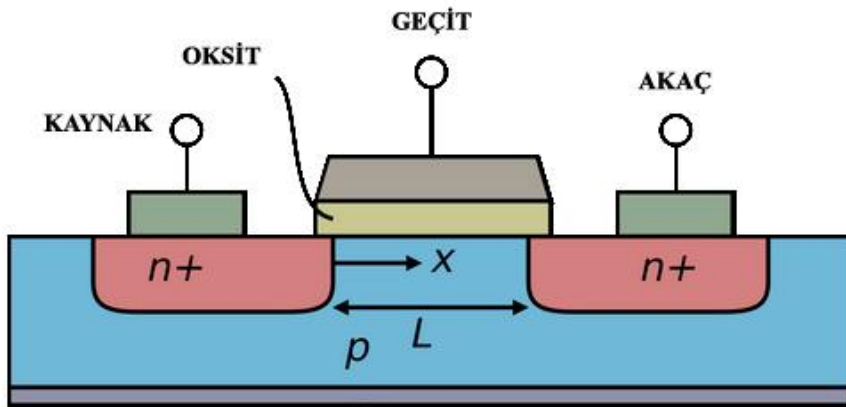
#### 3.1. Alan Etkili Transistör

Transistör, girişine uygulanan sinyali yükselterek gerilim ve akım kazancı sağlayan, gerektiğinde anahtarlama elemanı olarak kullanılan yarı iletken bir elektronik devre elemanıdır. FET (Alan etkili transistör), çalışma prensibi ve teknolojisi bakımından çift kutuplu eklemli transistörlerden farklılık gösterir. FET'te Şekil3.1'de gösterdiği gibi kaynak, geçit ve akaç diye adlandırılan üç kontak bulunmaktadır.

FET'in birçok tipi vardır, fakat bunlardan en genel olanı MOSFET'tir. Burada MOS metal-oksit-yarıiletken kelimelerin ilk harfleridir. Bu isim geçit bölgesi üzerinde metal kontaklar yarıiletken altılıktan elektriksel yalıtkan olarak çalışan bir oksit tabakasının silisyum ile ayrılmış olmasından dolayı verilmiştir. Oksit tabakasının yeri Şekil3.1'de gösterilmiştir.

Alan etkili transistörler çift kutuplu eklemli transistör'e göre yüksek giriş empedansına sahip, tek kutuplu, gerilim kontrollü elemandır. Alan etkili transistörün çift kutuplu eklemli transistör'e göre avantajları şunlardır;

- Giriş empedansları daha yüksektir.
- Radyasyon (yayınım) etkisi yoktur.
- Çift kutuplu eklemli transistör'e göre daha küçüktür.
- Isısal değişimlerden etkilenmezler.



Şekil 3.1. Kaynak, akaç ve geçidin p-kanallı bir MOSFET yapı

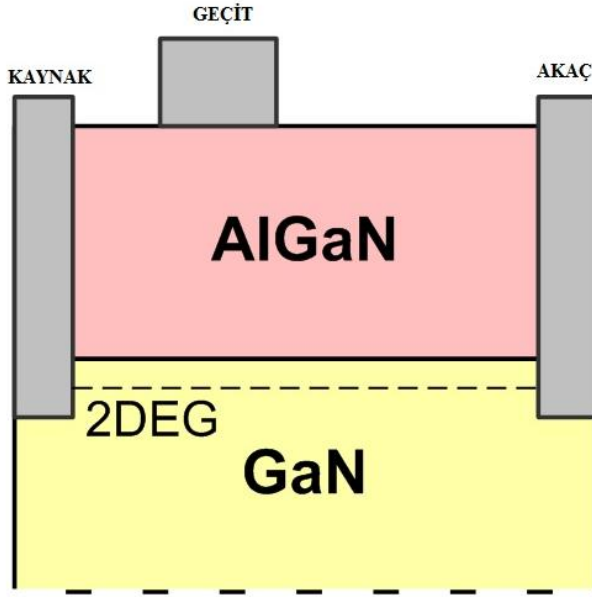
Burada Şekil 3.1'i göz önüne bulundursak geçit üzerindeki metal kontağa bir voltaj uygulandığı zaman ne olacağını göz önüne alarak şu biçimde açıklayabiliriz. Eğer geçit voltajı pozitif ise, o zaman p-tipi yarıiletkende geçidin tam altındaki boşluklar yüzeyden itilirler ve aynı zamanda p-tipi malzemedeki azınlık taşıyıcıları iletkenlik elektronları yüzeye doğru çekilir. Geçit potansiyeli belli bir seviyeye ulaştığında, bu eşik potansiyeli diye adlandırılır, iletkenlik elektronlarının konsantrasyonunun boşlukların konsantrasyonundan fazla olduğu yüzeye yakın bir bölgeyle karşılaşırız. Diğer bir deyişle, her ne kadar malzeme alıcı katkılanmışsa da bir n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu bölge ters çevirici olarak bilinir [41].

### 3.2. Yüksek Elektron Devingenliğine Sahip Transistör (HEMT)

Yıllardır, mikrodalga uygulamalarında aktif aygıt olarak MESFET teknolojisi kullanılmıştır. Ancak zamanla MESFET teknolojisinin performansı sınırına gelinmiştir. HEMT'ler elektron taşıma özelliğinden dolayı yüksek güç, frekans ve yüksek kapasiteli uygulamalar için umut verici bir teknoloji olarak çıkmıştır.

HEMT, bir alan etkili transistörü türündedir ki ve bir kanalda akım akışını sağlamak için farklı bant aralığına sahip olan en az iki malzemenin kavşak birleşmesinden oluşur [42]. Nitrür tabanlı bileşikler geniş bant aralığına ve yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğundan dolayı HEMT için uygun bir malzemelerdir.

HEMT çalışma prensibi olarak FET'e benzer şekilde çalışır. Daha açık ifade ile elektronlar kaynak ile akış arasında akar ve bu akım, geçit'e elektrik alanı uygulamasıyla kontrol edilebilir. Burada geçit Schottky bariyer kontak yapısındadır ve GaN temelli yapılarda genellikle Ni/Au veya Pt/Au metallerin birleşiminden oluşturulur. Şekil3.2'de görüldüğü gibi AlGaIn/GaN tabanlı HEMT'e voltaj dikey Şekilde uygulanmaktadır dolayısıyla geçit kanal arasındaki akıma mani olur veya izin verir. Geçit burada elektronların akışının kontrolünü sağlar. GaN tabanlı aygıtlarda doğal kutuplamadan dolayı kuvantum kuyusundaki 2DEG'in nasıl oluştuğu önceki bölümde daha ayrıntılı Şekilde belirtilmişti.



Şekil 3.2. AlGaN/GaN HEMT şematik yapısı ve 2DEG GaN tabakasında oluşumu [43,44]

Kanalda bulunan taşıyıcı yoğunluğu geçit'e uygulanan gerilime bağlıdır ve Eş. 3.1'deki gibi açıklanır.

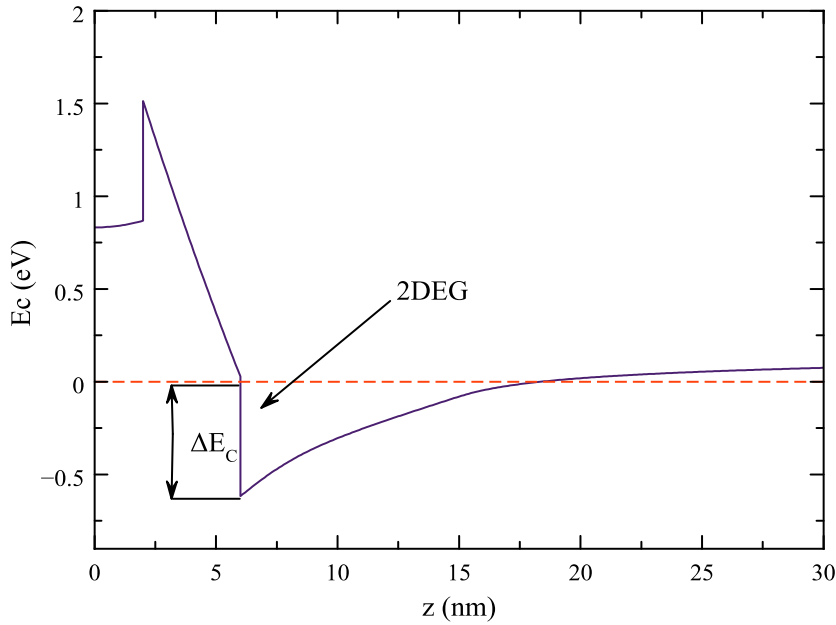
$$n_s(x, d) = \frac{\sigma_b(x)}{e} - \frac{\epsilon_0 \epsilon(x)}{e^2 d} (e(\phi_b(x) - V_G) + \Delta(x) - \Delta E_c(x)) \quad (3.1)$$

Burada  $n_s$ , elektron yoğunluğunu temsil eder,  $\sigma_b$  alttaş taşıyıcı yoğunluğu,  $\epsilon$  bariyer tabakasında dielektrik sabitidir,  $\phi_b$  geçit kontağın Schottky bariyerin yüksekliği,  $V_G$  geçit voltajı iken  $\Delta$  aygıtın iletim bantın Fermi seviyesine nüfuzudur. Geçit'e gerilim arttıkça elektron yoğunluğu azalışa sonuçlanır çünkü  $E_C$ ,  $E_F$ 'nin altına iner.

GaN tabanlı HEMT GaAs'e göre hiçbir katkı olmadan taşıyıcı yoğunluğunda 10 kat daha yüksek değerler yani yaklaşık  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  değerleri elde edilebilir. Bununla birlikte elektron devingenliği ise oda sıcaklığında  $1000\text{-}1700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  mertebesindedir. 2DEG'in iki boyutta hareket etmesi sayesinde elektronlar yapı ile daha az etkileşim halinde olur ve bu durumda saçılma azalır. Saçılmanın azalması ise elektron devingenliğinin artması anlamına gelir. Bu özellikleri taşımasından dolayı günümüzde iletişim, uydu ve radar gibi yüksek frekanslı uygulamalarda oldukça kullanılmaktadır [45].

### 3.2.1. AlGaIn/GaN çoklu yapılar

AlInN veya AlGaIn gibi materyaller hekzagonal yapılara sahip oldukları için GaN üzerine büyütebilir. Diğer taraftan bu bileşikler farklı bant aralıklarına sahiptirler. Burada bir kuvantum kuyusu oluşturabilmek için gerekli bant devamsızlığına sahiptirler ki 2DEG meydana gelmesi için büyük katkıda bulunmaktadır. Dolayısıyla bu iki malzeme birbirine birleştirdiğinde farklı Fermi enerji seviyeleri aynı seviyeye gelir. Böylece AlGaIn ve GaN tabakalarının iletkenlik ve değerlik bantlarında Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelene kadar bükülürler. Bu durumda GaN 'ün iletkenlik bandı, AlGaIn ile olan arayüzey civarında Fermi enerji seviyesinin altına iner ve bu bölge elektronlar tarafından doldurularak iletim sağlanmış olur. Bu sırada, elektronlar biriktikçe elektrik alan oluşacak ve bu bölgedeki değerlik bandı ile iletkenlik bandı bükülecektir. Bükülen bölgede birkaç nanometre genişliğinde üçgenimsi bir kuvantum kuyusu oluşması Şekil3.3'te görülmektedir. Buradaki enerji seviyelerinin ciddi farkından dolayı sadece birinci enerji seviyesi, Fermi seviyesinin altında kalır. Enerji seviyesini elektronlar tarafından doldurulmuş olduğundan iletim gerçekleşmektedir.



Şekil 3.3. AlGaIn/GaN çoklu yapının iletkenlik bant yapısı

### 3.2.2. AlInN/AlN/GaN çokluyapılar

InAlN/GaN çokluyapılar, AlGaN/GaN çokluyapılarına göre çok yüksek doğal kutuplanma sahip olduklarından dolayı daha yüksek taşıyıcı yoğunluğu elde edilmektedir. InAlN bariyer In oranı yaklaşık 0,17-0,18 civarında olduğunda GaN tabakası ile aralarında oluşan örgü uyumu ile gerginlik ortadan kalkar. Bu tür çokluyapılarda elektron devingenliği ise taşıyıcılar kuyu içinde daha çok sınırlandırılmış durumda olduğundan nispeten yüksektir. Böylece InAlN/GaN özellikleri belirtilmiş olduğundan AlGaN/GaN yapılara göre daha avantajlı olduğunu görülmektedir [46].

### 3.2.3. GaN tabanlı HEMT çokluyapılarının katmanları

#### GaN kapak tabakası

GaN kapak, AlGaN bariyer tabakası üzerinde çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. İlk olarak piezoelektrik kutuplanma etkisinden dolayı Schottky bariyer yüksekliğini azaltmak amacıyla tipik bir AlGaN bariyer tabakasının üzerinde olan bir GaN kapak tabakası kullanılır [47]. Ohmik kontak direncini geliştirmek için GaN Kapak tabakası genellikle silisyum ile katkılanır. Son olarak, Al aktif bir element olduğu için yüzeyin oksitlenmesini engellemek için kullanılır.

#### AlGaN bariyer tabakası

Bu tez dahilinde bariyer kalınlığına ilişkin numerik hesaplamalarda kritik değerler gözlenmiştir. Tez dahilinde AlGaN bariyer dışında AlN ve InAlN gibi bariyer çeşitleri ve katkıda incelenmiştir. Genelde bariyer tabakası, GaN tampon tabakasının yasak aralığından daha büyük bir bant aralığına sahip olacak şekilde tercih edilir. Bu seçimle üçgenimsi kuyu oluşur. Genellikle AlGaN bariyer kalınlığı arttıkça alaşım oranına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğu artmaktadır fakat Al mol oranı belli bir kritik değeri geçtikten sonra GaN örgü uyumsuzlukları oluşturarak gerginlik rahatlaması gerçekleşir. Gerginlik rahatlaması ise 2DEG'in oluştuğu arayüzeyde dislokasyonların oluşmasına yol açarak kuvantum kuyusu içindeki 2DEG taşıyıcıların oldukça saçılmaya uğramasına sebep olur. Sonuç olarak elektron devingenliği oldukça düşer [48].



## 4. NUMERİK VE ANALATİK HESAPLAMALAR

### 4.1. Numerik Model

Bu tez dahilindeki hesaplamalarda Schrödinger-Poisson denklemlerinin eş uyumlu olarak çözülmüştür. İşleme ait diyagram Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu modellemede Schrödinger-Poisson denklemleri AlGa<sub>N</sub>, AlN ve AlInN bariyer ile GaN kanaldaki üçgenimsi kuantum kuyunun 2DEG’in dalga fonksiyonu ve elektriksel potansiyeli yenilemeli olarak hesaplandı. Bu hesaplama aşağıdaki biçimde gerçekleşmiştir;

- Giriş dosyaları hazırlanır,
- Schrödinger denklemi, ilk potansiyel bant kenarı ve  $\Psi$  dalga fonksiyonu için çözülür,
- Burada çözülen  $\Psi$  dalga fonksiyonu bir yük (taşıyıcı) içindir, ancak yarıiletkenlerde çok sayıda yük bulunmaktadır ve bunların etkisinin hesaplaması toplu olarak Poisson denklemi ile elde edilir ve burada elektriksel potansiyel bulunur,
- Elektron potansiyel değeri ile Schrödinger denklemi ile tekrar hesaplanır,
- Poisson ve Schrödinger denklemlerinin yukarıda belirten çözümleri sonuç yakınsayana kadar tekrar edilir.



Şekil 4.1. Schrödinger-Poisson eş uyumlu olarak çözümünün iterasyonu

Burada dalga fonksiyonu hesaplanırken aynı zamanda taşıyıcı dağılımı da elde edilir çünkü dalga fonksiyonun mutlak değeri ile ilişkilidir. Ancak yük dağılımı Schrödinger denklemi ile çözülen potansiyeli değiştirebilir. Poisson denklemi ile yeni potansiyel değeri elde edilir. Dolayısıyla bu aşamalar yakınsamayan bir sonuç elde edinceye kadarı tekrar ve tekrar hesaplanmalıdır.

#### 4.2. Yarıiletken Denklemleri

HEMT’lerde 2DEG elektron dağılımını incelemek için hesaplamalarda kuvantum etkilerini göz önüne alarak, Eş. 4.1 ve Eş. 4.2 kendini eşleyebilen Schrödinger–Poisson denklemini çözümlerini kullanılması gerekmektedir. Ayrıca Eş. 4.3 süreklilik denklemi dengeli olmayan durumlarda çözülmesi gerekmektedir.

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{m^*(z)} \frac{d}{dz} \right) \psi_n(z) + V(z) \psi_n(z) = E_n \psi_n(z) \quad (4.1)$$

$$\nabla^2 V_p = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (4.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_z = (\mu_n(z) n(z) \nabla_z E_{Fn}(z)) = 0 \quad (4.3)$$

Buradaki semboller  $\hbar$  Planck sabiti,  $m^*$  etkin kütle iken,  $(V)$  potansiyel fonksiyonu, dalga fonksiyonu ise  $\psi'$  dir ve son olarak  $\mu_n$  elektron devingenliği iken  $E_{Fn}$  elektronların Kuasi Fermi seviyesidir.

##### 4.2.1. Poisson denklemi

Eş. 4.2’de Poisson denklemi malzemedeki elektrostatik potansiyel ile uzaysal olarak elektron dağılımını ifade eder.  $\epsilon$ , geçirgenlik elektrik alan şiddeti aracılığıyla çözüm elde edilir. Ayrıca III-nitrürlerdeki önemli doğal kutuplanma etkilerinden dolayı elektrik deplasman alanı için Poisson denkleminin çözülmesi gerekir. Dolayısıyla elektrik deplasman alanı ifadesi şu Şekilde,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P} \quad (4.4)$$

yazılabilir.  $\epsilon, \vec{E}$  ve  $\vec{P}$  sırayla dielektrik sabiti, elektrik alan etkisi ve kutuplanma yoğunluğudur. Bir zamanla değişen manyetik alanın bulunmaması durumunda, elektrik alanı Eş 4.5'teki gibi ifade edilir,

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi \quad (4.5)$$

Yarı iletken yük dağılımı potansiyeli doğrusal olmayan bir fonksiyonudur

$$\rho(\phi) = [p(\phi) - n(\phi) + N_D^+(\phi) - N_A^-(\phi)] \quad (4.6)$$

$n$  ve  $p$  yükler için  $N_D^+$  ile  $N_A^-$  iyonize vericilerin yoğunluğu ile iyonize alıcıların yoğunluğudur.

#### 4.2.2. Schrödinger denklemi

Bir çokluyapılarının ara yüzeyindeki kuvantum kuyusunu tanımlamak için Schrödinger denkleminin kullanılması gerekir. İletim bandında devamsızlıktan dolayı bir kuyu potansiyeli oluşur ki enerji seviyelerinin oluşmasına yol açar. Kuyudaki bulunan elektronlar 2 boyutta hareket etmeye başlar. Belli bir enerji seviyesinde elektron bulunma olasılığını belirler. Eş 4.2 bir boyutlu Schrödinger denklemi olarak  $V(z) = -q\phi(z) + \Delta E_c(z)$  bant sınır fonksiyonu vasıtasıyla  $\psi_n$  dalga fonksiyonları ve karşılık gelen  $E_n$  özdeğerlerine sahip kuantize durumlar için durumların yoğunluğunu verir. Eş. 4.2'deki  $m^*(z)$  yönünde etkin kütle,  $E_n$  enerji özdeğeri,  $\psi_n$  enerji özdeğerine karşı gelen dalga fonksiyonudur.  $V(z)$  ise potansiyel değeridir.

Bu potansiyel elektrostatik potansiyeline  $\phi$  (Poisson denkleminde bulunmuştur) ve iletim bantı devamsızlığına  $\Delta E_c$  bağlıdır. Nitrür yarıiletkenlerde değerlik ve iletim bantlarında bant devamsızlığı meydana gelir.

Farklı hamiltonyenler Schrödinger denklemini çözmek için kullanılır. Bunlar etkin kütle,  $\vec{k}, \vec{p}$ , sıkıbağ yöntemi gibi yaklaşımlardır. Nitrür tabanlı HEMT'lerde ise değerlilik bandının gerilimlerle yapısının bozulması ama iletkenlik bandına benzer bir durum

olmaması sebebiyle etkin kütle yaklaşımı sadece iletim bandı ile ilgili hesaplar yapılacağı zaman doğru ve yeterlidir [49].

#### 4.3. Kod Akışı

Hesaplamaların yapıldığını yazılımın girdi dosyasında neler bulunmalı;

- Hangi numune hesaplanması belirlenmesi (ör: HEMT, LED, InGaAs QW ve ...)
- Çalışılan numunenin hangi boyutta hesaplanması (1D, 2D veya 3D)
- Çalışılan numunenin hangi yöntem ile hesaplanması (ör: Schrödinger-Poisson)
- Çalışılan numunenin bölgeleri belirtilmesi ve boyutu (ör: kapak, bariyer ve tampon)
- Çokluyapının malzemeleri (ör: GaN, AlGaAs, AlN, AlGaAs ve...)
- Katkılama varsa
- Ön gerilim varsa (Schottky bariyer)
- İstenen çıktı yerleri ve özellikleri

Hazırlanan bir giriş dosyasının işlenmesi sonucu hesaplanabilen çıktılar şu Şekilde dir;

- $E_c$  ve  $E_v$  (bant yapısı),
- Elektrostatik potansiyel,
- Elektron ve deşik yoğunlukları,
- Elektron bulunma olasılığı,
- Elektron ve deşik devingenliği,
- Elektron ve deşik iletkenliği,
- Piezo ve piroelektrik yükleri,
- Enerji özdeğeri,
- Gerginlik (strain ve stress), kutuplanma

## 5. NUMERİK HESAPLAMA SONUÇLARI

Bu tez kapsamında farklı ultra-ince bariyer konfigürasyonlu HEMT tasarımları yapılmış, polarizasyon, gerilim ve sıcaklık değişkenlerinin de dâhil olduğu yüksek başarımlı 1 boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerinin eş-uyumlu çözümleri kullanılarak bant yapısı, taşıyıcı yoğunluğu, gerilim ve sıcaklık dağılımları karakteristikleri hesaplanmıştır. Bu tez dâhilinde incelenen GaN temelli ultraince bariyerli çokluyapıların bir listesi Çizelge 5.1’de yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Bu tez dahilinde incelenen GaN temelli ultraince bariyerli çokluyapı gruplarının listesi

| Yapı No | Yapı                         |
|---------|------------------------------|
| Yapı 1  | n-GaN/InAlN/AlN/GaN          |
| Yapı 2  | n-GaN/AlGaIn/GaN             |
| Yapı 3  | n-GaN/AlN/GaN                |
| Yapı 4  | GaN/AlN/GaN                  |
| Yapı 5  | GaN/n-AlN/GaN                |
| Yapı 6  | n-GaN/AlInN/InGaIn/GaN       |
| Yapı 7  | n-GaN/AlN/AlInN/GaN          |
| Yapı 8  | n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaIn/GaN |
| Yapı 9  | n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaIn/GaN |
| Yapı 10 | GaN/AlN/GaN/AlN              |

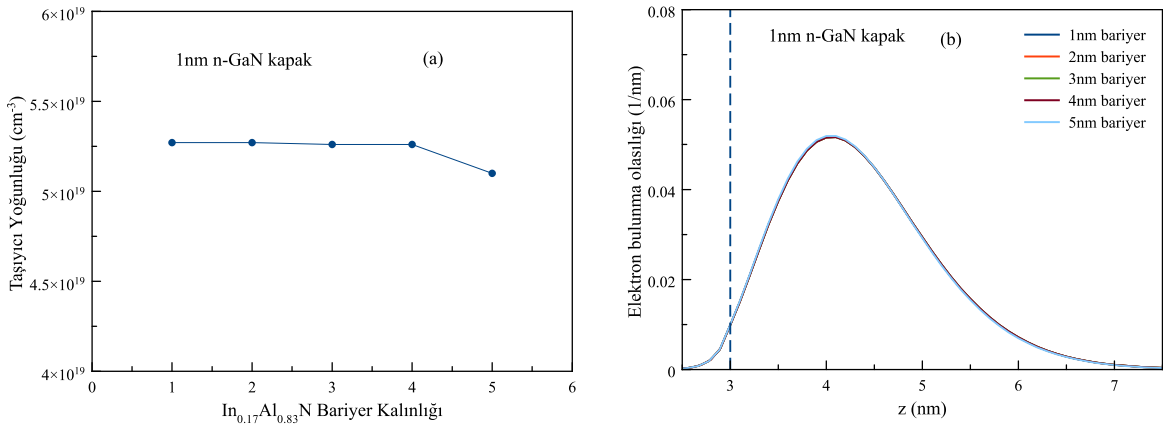
### 5.1. n-GaN/InAlN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarda InAlN Bariyer ve GaN Kapak Katmanının Etkisinin İncelenmesi

Şekil 5.1’de n-tipi katkılı GaN kapak katmanının farklı AlInN bariyerli GaN tampona büyütülen şematik gösterimi görülmektedir. n-GaN/AlInN/AlN/GaN ultraince bariyerli çokluyapının elektron buluma olasılığı, taşıyıcı yoğunluğu ve bant yapısına göre incelenmiştir ve bunlara göre en uygun durumlar seçilmiştir. Dolayısıyla farklı GaN kapak kalınlıkları ve farklı AlInN bariyer kalınlıklarına göre hesaplama yapılmıştır.



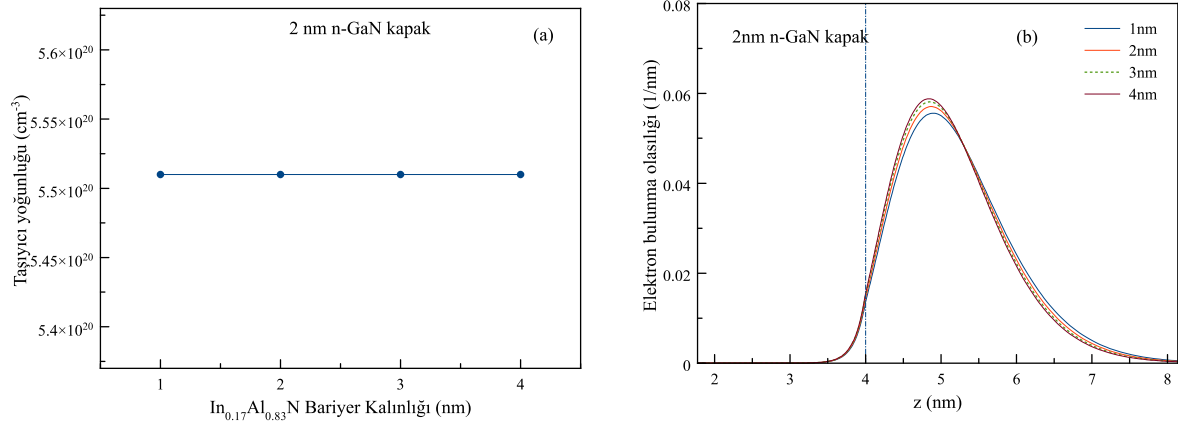
Şekil 5.1. n-GaN/InAlN/AlN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı1) şematik gösterimi

Şekil 5.2’de ince GaN cap (kapak) tabakası kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluklarında ve bulunma olasılıklarında bir değişim görülmemektedir.



Şekil 5.2. 1 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

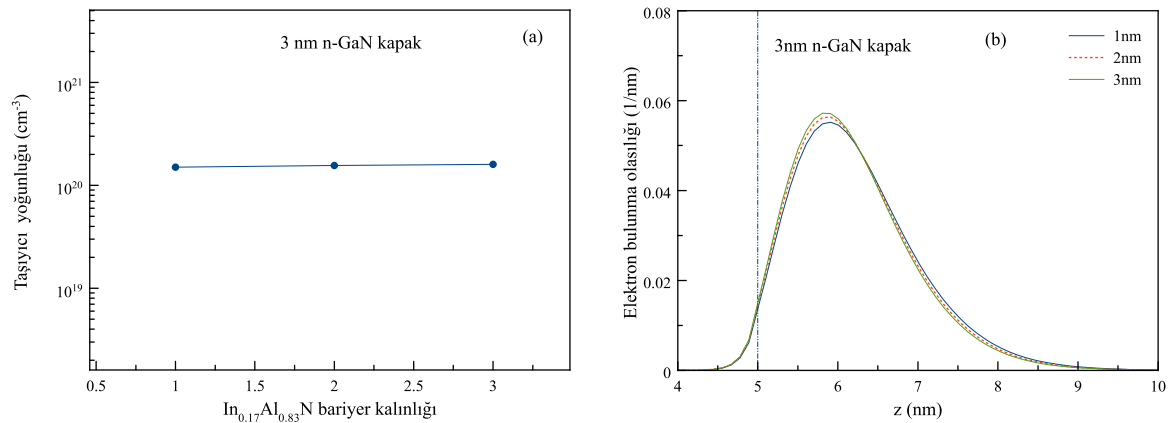
2 nm kapak katmanı için bariyer kalınlığının değişimine bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğunda değişim görülmemektedir ama bulunma olasılığı hesaplamalarında az da olsa bir değişim Şekil 5.3’te görülmektedir. Farklı bariyer kalınlıkları arasında 4 nm bariyer kalınlığına ait elektron bulunma olasılığı arayüzeye daha yakın ve dolayısıyla arayüzey bozukluğu saçılmasından daha çok etkilenebilir.



Şekil 5.3. 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

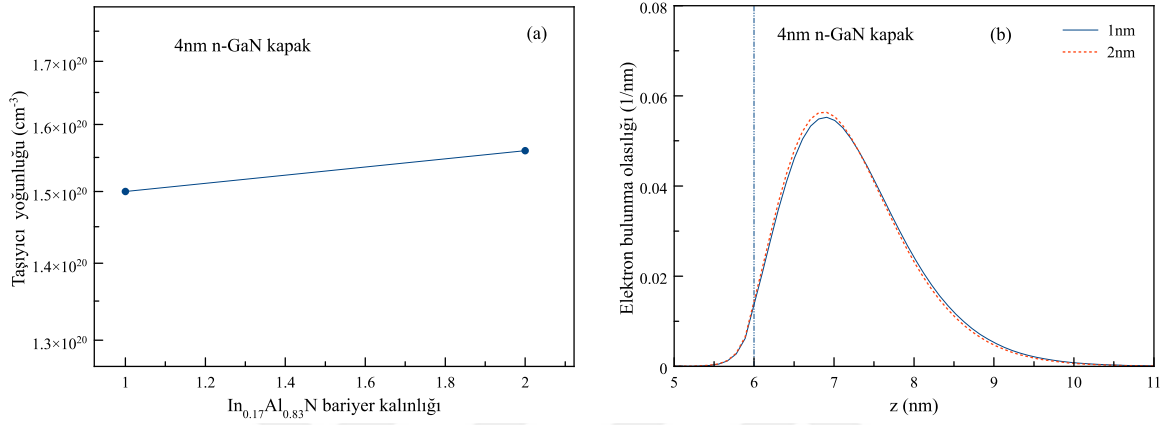
1 ile 2 nm bariyer kalınlıkları için elektron bulunma olasılığı GaN tabakası içine doğru daha çok sızmış durumda ki bu da arkaplan safsızlık saçılmasında daha çok etkilenebileceği anlamına gelmektedir [50]. Bu durumda en uygun durumun, bu iki saçılma mekanizmasından en az etkilenebilecek 3 nm bariyer kalınlıkları durum olduğunu söylenebilir.

Şekil 5.4 a)'da 3 nm kapak katmanı için bariyer kalınlığının değişimine bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğunda hiçbir değişim görülmemektedir fakat 2DEG elektron bulunma olasılıkları için hesaplamalara göre değişim olduğu görülmektedir.



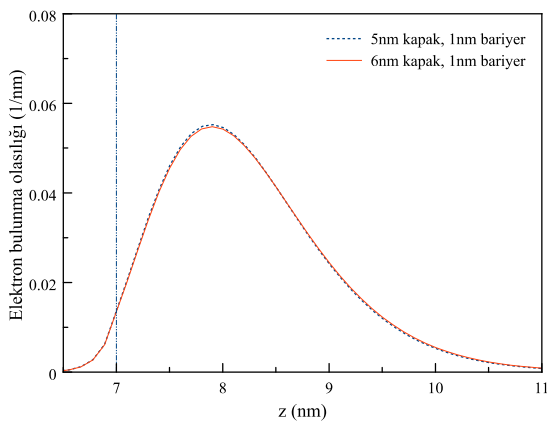
Şekil 5.4. 3 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

Şekil 5.5 a)'da 4 nm kapak katman için bariyer kalınlığı değişimine bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğunda az bir değişim görülmektedir. Şekil 5.5 b)'de görüldüğü gibi, 2DEG elektron bulunma olasılığında değişimin az olduğu göz önüne alındığında taşıyıcı yoğunluğunun yüksek olduğu 2 nm bariyer kalınlığı en optimize durum olarak kabul edilebilir.



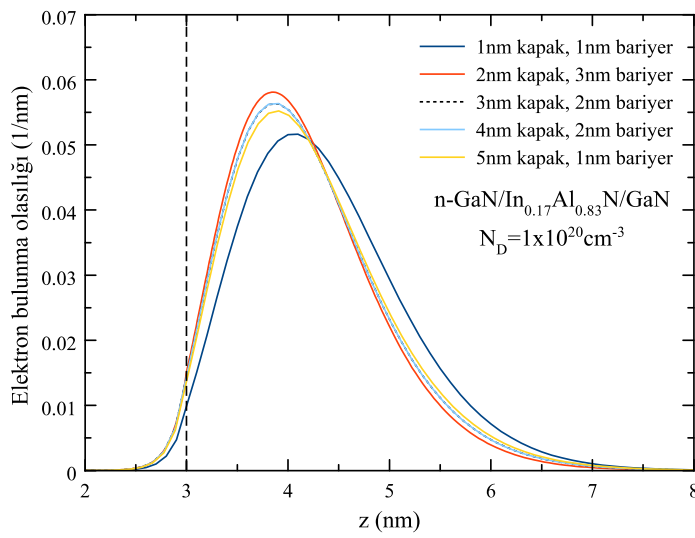
Şekil 5.5. 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

Şekil 5.6'ya göre 5 nm ve 6 nm kapak katmanı kalınlığında 1 nm bariyer kalınlığı için elde edilen 2DEG elektron bulunma olasılıklarında ciddi bir değişim görülmemektedir. Bu sebeple 5 nm kapak katmanı kalınlıklı 6 nm durumuna göre optimize durum olarak kabul edilmiştir.

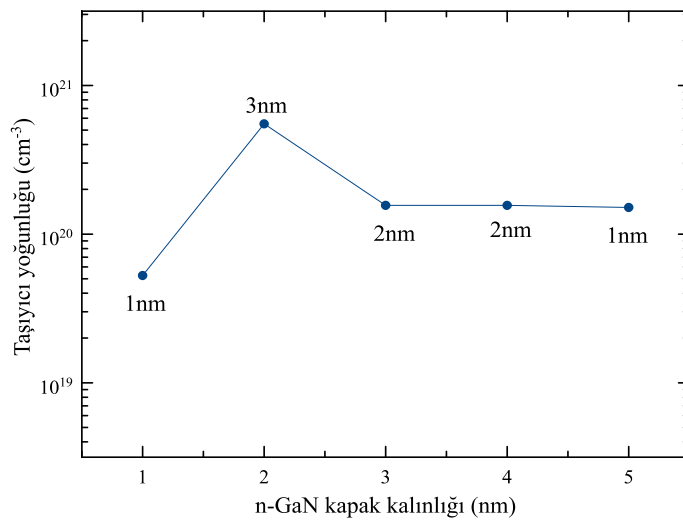


Şekil 5.6. 5 nm ve 6 nm kapak tabakası kalınlığı için 2DEG elektron bulunma olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

Farklı kapak katmanlıklarında yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katman kalınlığı için uygun durumlar elde edilmiştir. Bu elde edilen durumların birbirleri ile elektron bulunma yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğu cinsinden ilişkileri ise sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 5.7’de 2 nm kapak kalınlığı için en uygun durum olan 3 nm bariyer kalınlığının arayüzeye en yakın durum olduğu görülmesine rağmen, diğer tüm farklı kapak kalınlıklarının uygun durumlarına göre en yüksek taşıyıcı yoğunluğunu sağlaması sebebiyle, en uygun durum olduğu düşünülmektedir.



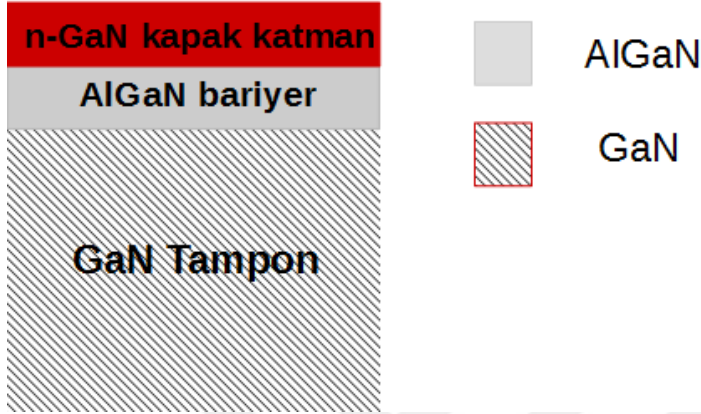
Şekil 5.7. 1-5 nm kapak tabakası kalınlıklarında 2DEG elektron bulunma olasılığı ve bariyer kalınlıklarına göre en optimize olanlar seçilmiştir



Şekil 5.8. 1-5 nm kapak tabakası kalınlıklarında taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına değişimi

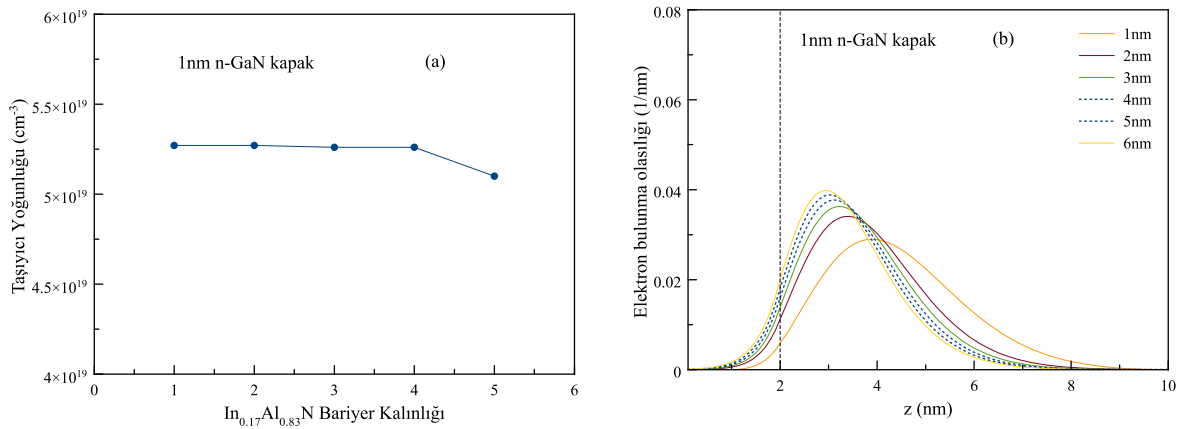
## 5.2. n-GaN/AlGa<sub>0.17</sub>In<sub>0.83</sub>N/GaN Ultraince Çokluyapılarda AlGa<sub>0.17</sub>In<sub>0.83</sub>N Bariyer ve GaN Kapak Katman Kalınlığının Etkisi

GaN tamponlu AlGa<sub>0.17</sub>In<sub>0.83</sub>N bariyer ile n-GaN kapak ultraince çokluyapısının şematik gösterimi Şekil 5.9’da görülmektedir.



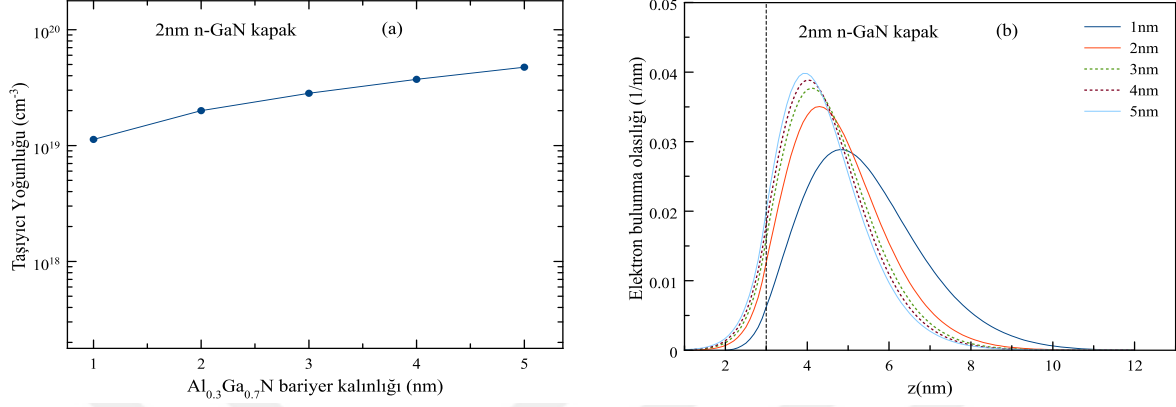
Şekil 5.9. n-GaN/AlGa<sub>0.17</sub>In<sub>0.83</sub>N/GaN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı2) şematik gösterimi

Şekil 5.10 a)’da 1 nm kapak kalınlığı durumu için taşıyıcı yoğunluğu üzerinde bariyer kalınlığının etkisi göz önüne alındığında bir değişim olduğu görülmektedir ve Şekil 5.10 b)’de ise 2DEG elektron bulunma olasılıklarında her bir bariyer kalınlığı için önemli bir değişim olduğu açıkça fark edilmektedir. Dolayısıyla 4 ve 5 nm bariyer kalınlıkları en uygun durum oldukları söylenebilir.



Şekil 5.10. 1 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

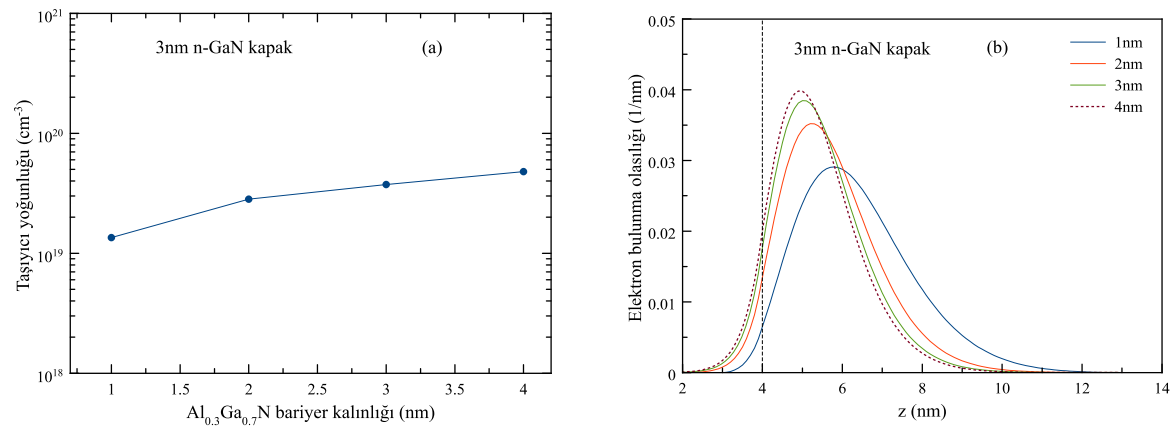
Şekil 5.11’de 2 nm kapak katmanı için taşıyıcı yoğunluğu ve 2DEG elektron bulunma olasılığı üzerinde bariyer kalınlığının etkisini göstermektedir.



Şekil 5.11. 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

Kapak katmanının 1 nm olduğu duruma benzerlik göstermektedir. Kapak katmanının 2 nm olarak seçildiği durumda en optimal durum olarak 3 ve 4 nm bariyer kalınlığı kabul edilmiştir.

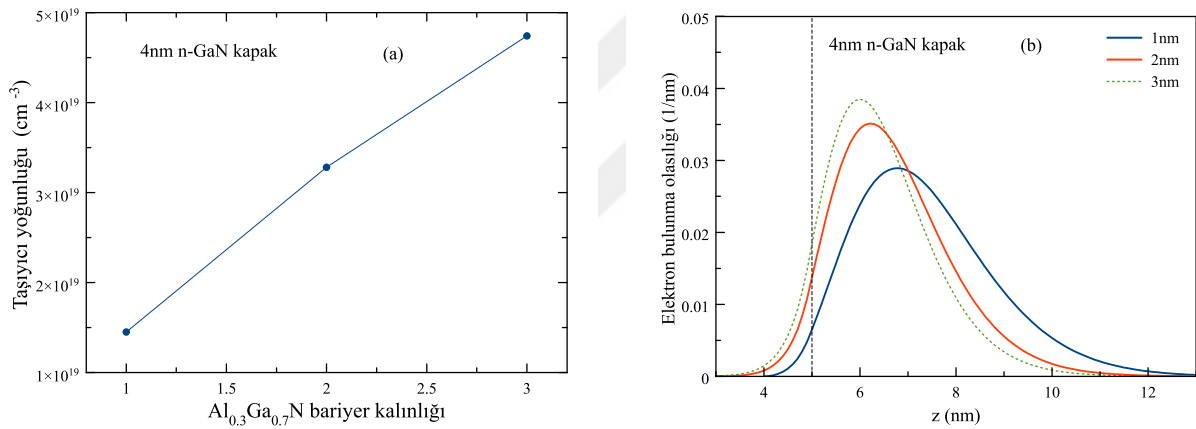
Şekil 5.12 a)’da görüldüğü gibi 3 nm GaN kapak katmanı için taşıyıcı yoğunluklarında AlGaIn bariyer kalınlığına bağlı olarak belirgin bir değişimin olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12. 3 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

Aynı zamanda Şekil 5.12 b)'de 2DEG bulunma olasılığının farklı bariyer kalınlıklarında önemli değişimler gösterdiği görülmektedir. Trendler, kapak katmanı kalınlığının 1 ve 2 nm olduğu durumlarda benzerlik göstermektedir. Buna göre 2DEG bulunma olasılığının 4 nm AlGaIn bariyer kalınlığı için en uygun duruma sahip olduğu söylenebilir.

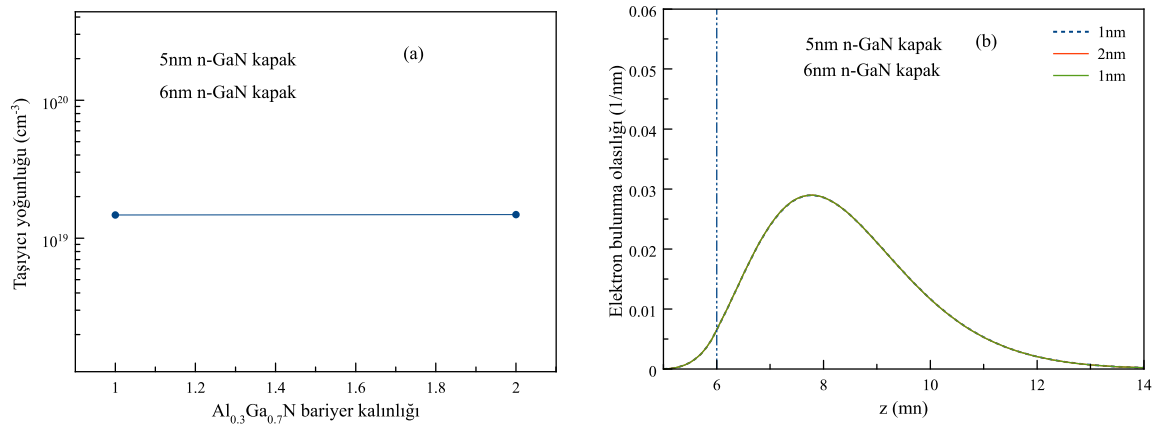
Şekil 5.13 a) 4 nm kapak katmanı için taşıyıcı yoğunluğu üzerinde AlGaIn bariyer kalınlığının önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Şekil 5.13 a)'ya göre en 3 nm AlGaIn bariyer kalınlığı diğer kalınlıklara göre en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olunan durumdur. 2DEG elektron bulunma olasılığı üzerindeki bariyer kalınlığının etkisi ise Şekil 5.13 b)'de görülmektedir. Dolayısıyla, Şekil 5.13 a) ve b) incelendiğinde, bu yapıda yüksek taşıyıcı yoğunluğunun nedeniyle 3 nm bariyer kalınlığı en uygun durum olarak kabul edilmiştir.



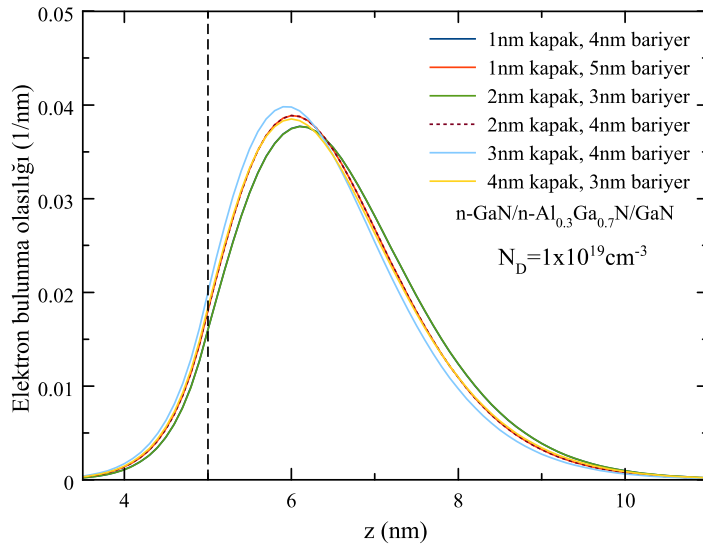
Şekil 5.13. 4 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

5 ve 6 nm GaN kapak tabakası kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluklarında ve 2DEG elektron bulunma olasılıklarında bir değişim görülmemektedir. Bu nedenle en uygun durum olarak bariyer tabakanın en ince yanı 1 nm olduğu durum seçilmiştir.

Şekil 5.15 farklı kapak katmanlıkları için oluşan optimum yapılara ait 2DEG bulunma olasılıklarını vermektedir. Buna göre, Şekil 5.15'te GaN arkaplan safsızlık ve arayüzey bozukluğu saçılmalarından en az etkilenebilecek durum olan 2 nm kapak kalınlığı ve 4 nm bariyer kalınlığı en optimal durum olarak seçilmiştir.



Şekil 5.14. 5 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

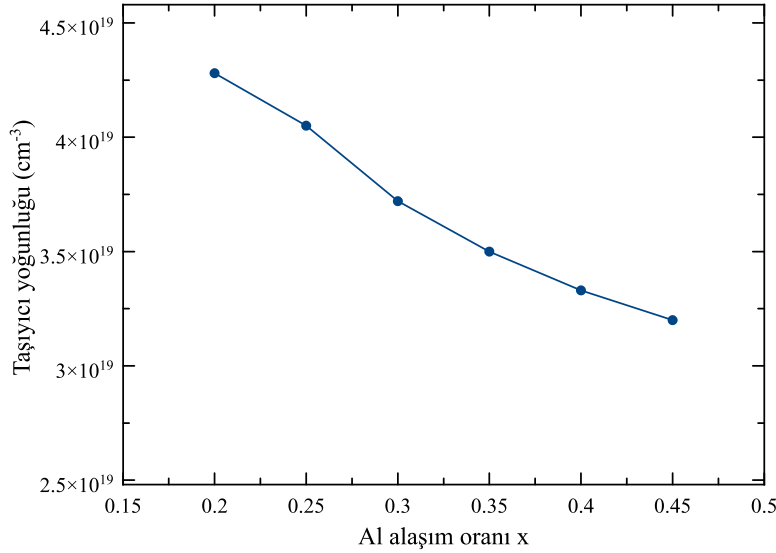


Şekil 5.15. 1-6 nm GaN kapak tabakası kalınlıklarında bariyerdeki % 30 Al alaşım oranı için 2DEG elektron bulunma olasılığı görülmektedir

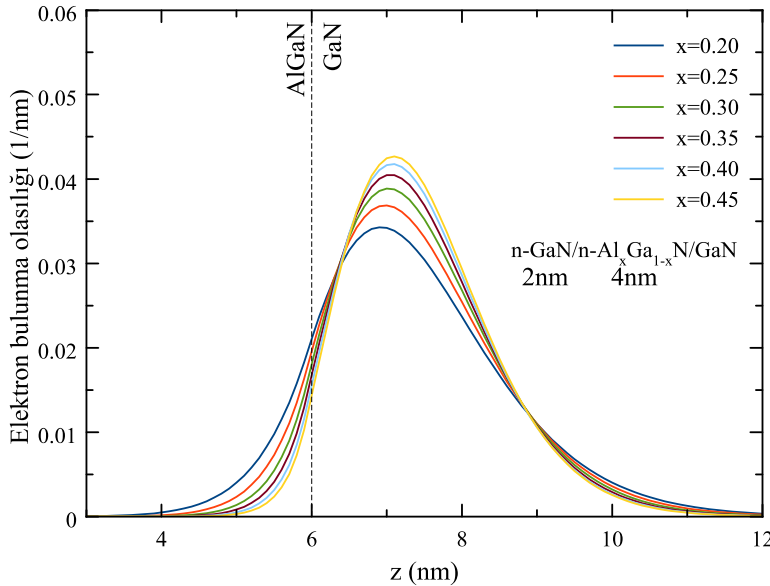
2 nm GaN kapak kalınlığı ve 4 nm AlGaN bariyer kalınlığı için alaşım oranına bağlı olarak elektron bulunma olasılığının değişimi Şekil 5.15'te verilmiştir. 2 nm GaN kapak kalınlığı ve 4 nm AlGaN bariyer kalınlığı için alaşım oranına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğunun değişimi Şekil 5.16'da göstermektedir.

Şekil 5.16'da artan Al alaşım oranı ile taşıyıcı yoğunluğunun beklenmedik şekilde azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla yüksek taşıyıcı yoğunluğu bizim için uygun durum olduğundan  $x = 0,25$  ve  $x = 0,30$  Al oranları olası en iyi durumlar olarak belirlenebilir. Aynı şekilde Al mol oranına bağlı olarak 2DEG bulunma olasılığının değişimi Şekil 5.17'de verilmiştir. Burada arkaplan safsızlık saçılması ve arayüzey bozukluğu saçılmasından en az

etkilenebilecek durumlar alaşım oranının  $x = 0,35-0,40-0,45$  gibi durumlarında görülebilir. Deneysel olarak %30 üzere Al alaşım oranı AlGaIn/GaN yapılarında büyütölmektedir. Dolayısıyla bu kısım hesaplamalarda dikkate alınmalıdır. Bulunma olasılığı grafiklerinde %35'ten küçük alaşım oranındaki kıyaslama yapılmıştır.



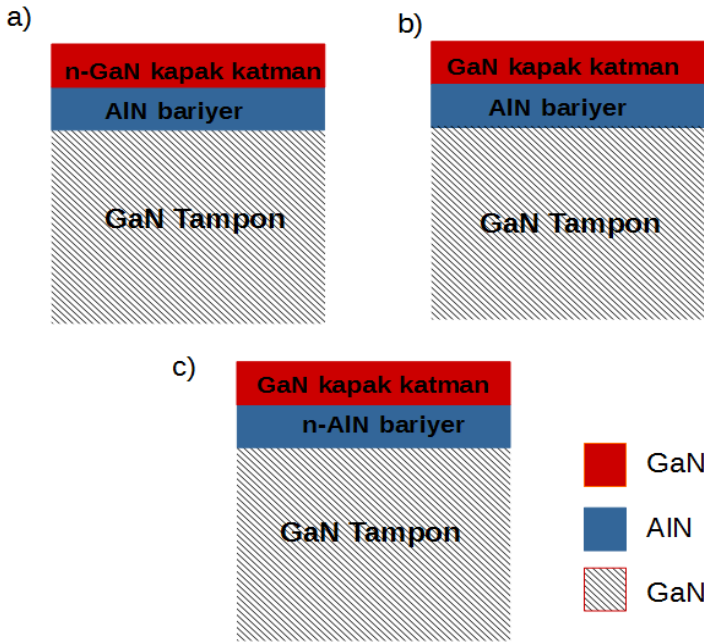
Şekil 5.16. 2 nm GaN kapak tabakası kalınlığı ve 4 nm  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  bariyer kalınlığı için farklı alaşım oranları için değişen taşıyıcı yoğunluğu



Şekil 5.17. 2 nm GaN kapak tabakası kalınlığı ve 4 nm  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  bariyer kalınlığı için farklı alaşım oranları için değişen 2DEG bulunma olasılığı

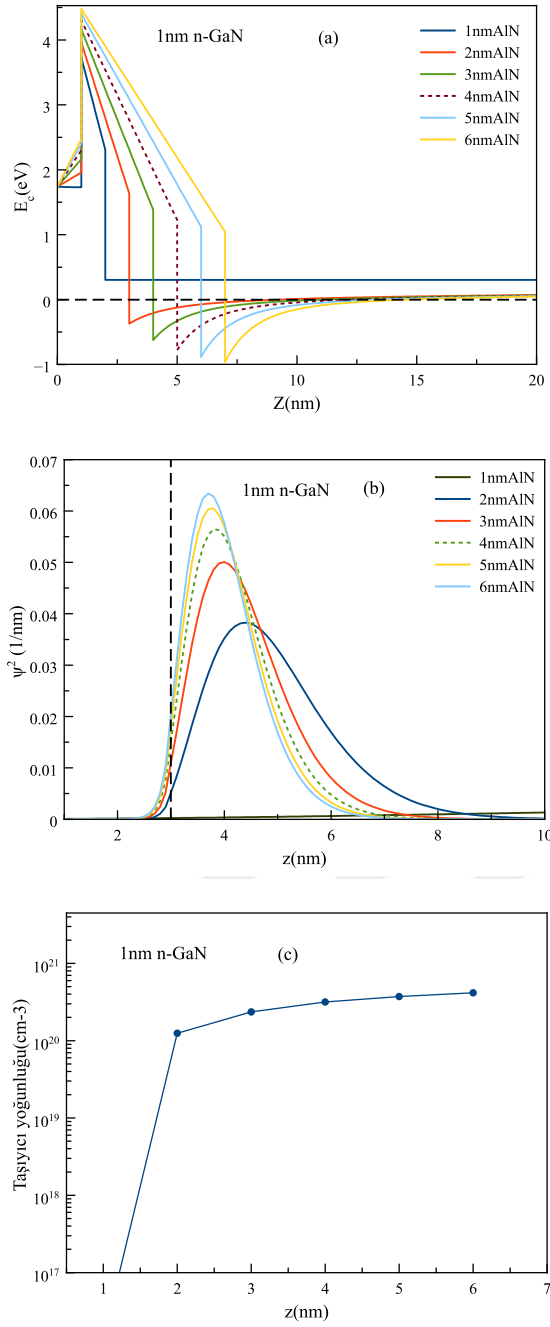
### 5.3. n-GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarında AlN Bariyer ve n-GaN Kapak Katmanı Kalınlığının Etkisi

Şekil 5.18’de GaN tamponlu AlN bariyerli ve GaN kapak sahip ve farklı katkı yerlere sahip olan yapının şematik gösterimi görülmektedir. Şekil 5.18 a)’da silisyum katkılı GaN kapaklı durumdur, Şekil 5.18 b)’de katkısız durumdur ve şekil 5.18 c)’de AlN bariyer katkının durumu gösterilmektedir.



Şekil 5.18. a) n-GaN/AlN/GaN (Yapı3), b) katkısız GaN/AlN/GaN (Yapı4) ve c) GaN/n-AlN/GaN (Yapı5) ultraince bariyerli çokluyapıların şematik gösterimleri

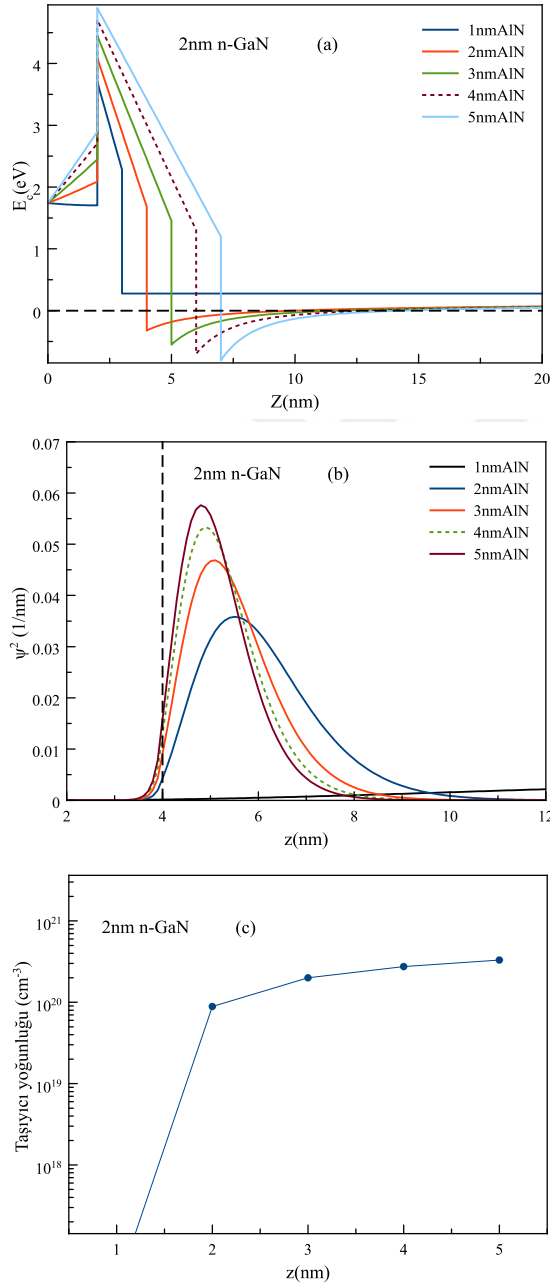
Şekil 5.19 a)’da 1 nm GaN kapak için iletkenlik bandın AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.19 b)’de 2DEG bulunma olasılığı hesaplamalarda elde edilen sonuçlarda değişim görülmektedir. 1 nm AlN bariyer kalığında kuyu oluşmadığından ötürü 2DEG bulunmamaktadır. 2 ve 3 nm bariyer durumları GaN tabakası içine sızmış olduğu görülmektedir dolayısıyla arkaplan safsızlık saçılmasından daha çok etkilenebilir anlamına gelmektedir. 5 ve 6 nm AlN bariyer kalınlıkları ise arayüzey safsızlıktan etkilenebilir. Yukarıdaki belirtilen nedenler ile 4 nm AlN bariyer kalınlığı en optimal durum olarak söyleyebiliriz. Şekil 5.19.c)’de elde edilen taşıyıcı yoğunlukların değişimi görülmektedir.



Şekil 5.19. 1 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

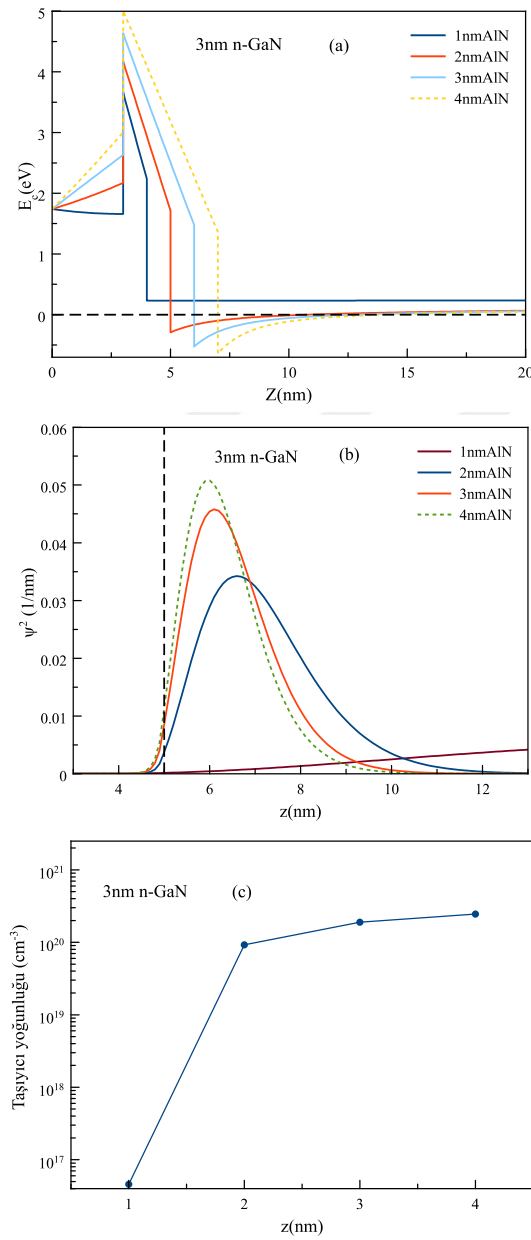
2 nm GaN kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarında iletkenlik bantı profili Şekil 5.20 a)'da görülmektedir. Şekil 5.20 b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında değişim görülmektedir. 1 nm AlN bariyer kalınlığı için kuyu oluşmadığı için elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır. Ayrıca 2 ve 3 nm bariyer durumları GaN tabakası içine doğru daha çok sızmış ki bu da arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlamına gelmektedir.

5 nm durumu en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, arayüzey bozukluğu safsızlıktan etkilenebilir. 4 nm durum ise arkaplan safsızlık mekanizmasından ve arayüzey saçılmasından en az etkilenebilecek durum olduğu sebep ile en uygun durum olarak kabul edebiliriz. 2 nm kapak kalınlığı için taşıyıcı yoğunlukların değişimi ve en yüksek taşıyıcı yoğunluk durumları Şekil 5.20 c)'de görülmektedir.



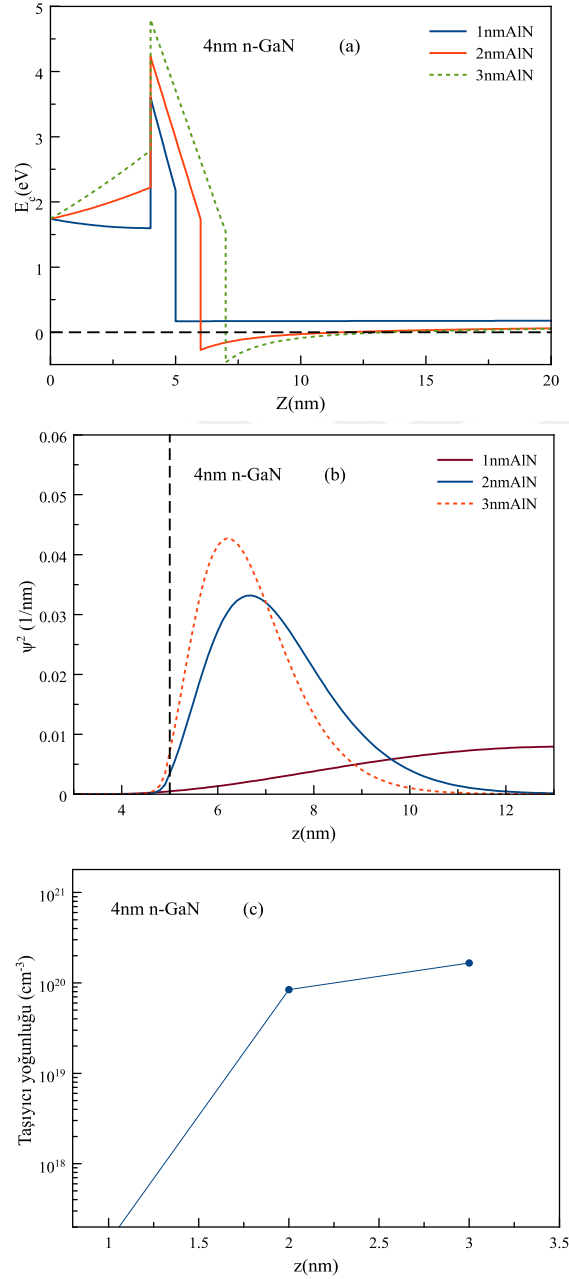
Şekil 5.20. 2 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

2 nm kapak kalınlığında bariyer kalınlıklarına bağılı iletkenlik bant, profili Şekil 5.21 a)'da görülmektedir. Şekil 5.21 b)'de 1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmamasından dolayı elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır. Ayrıca 2 ve 3 nm bariyer kalınlıkları için GaN tabakasına sızmış olduğundan dolayı, arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilecek anlamına gelmektedir. 4 nm durumu ise diğer durumlara göre elektron bulunma olasılığı saçılma mekanizmasından en az etkilenebilir durum olduğunu kabul edebiliriz. Şekil 5.21 c)'de 3 nm GaN kapak kalınlığı için bariyere bağılı taşıyıcı yoğunlukların değişimi görülmektedir.



Şekil 5.21. 3 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağılı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

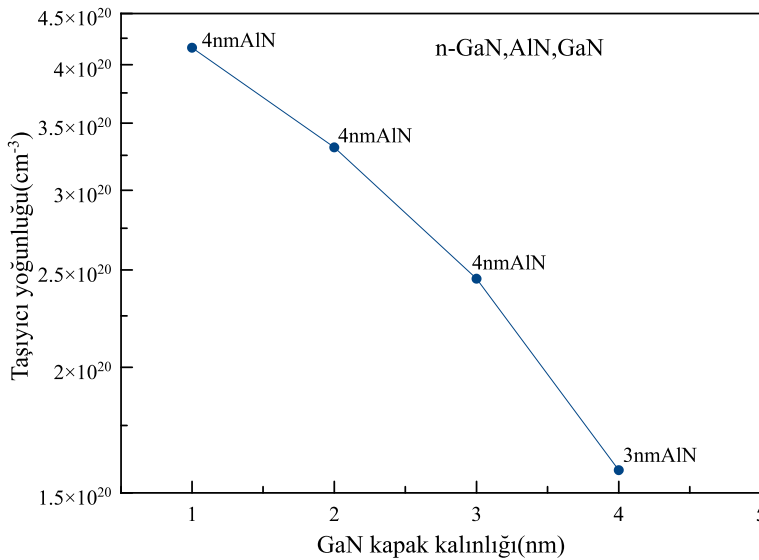
Şekil 5.22 a)'da 4 nm GaN kapak kalınlığı için iletkenlik bandın profili AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak görülmektedir. Şekil 5.22 b)'de bir boyutlu benzetim sonuçlarına göre 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamasında AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



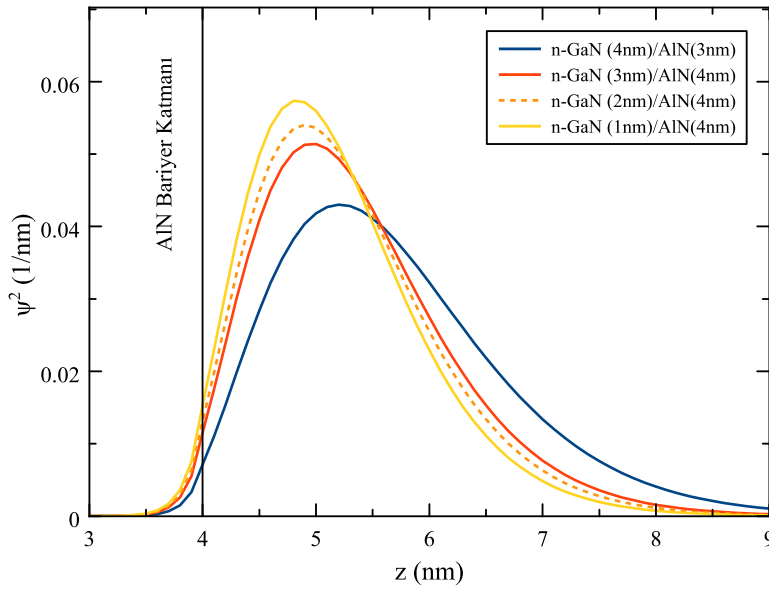
Şekil 5.22. 4 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığı sebep ile bulunma olasılığı çok düşüktür ve 2 nm bariyer kalınlığı için arayüzeyden çok uzak olduğu ve GaN tabakasına sızmış olduğunu görülmektedir ve dolayısıyla arkaplan safsızlık saçılmasından çok etkilenebilir. 3 nm durumu ise iki mekanizmadan en az etkilenebilecek durumdur aynı zamanda diğer durumlara göre elektronlar daha çok sınırlandırılmış durumdadır dolayısıyla en optimal durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.22. c)'de 4 nm kapak kalınlığı için ve 3 nm AlN bariyer kalınlığı durumunda en yüksek taşıyıcı görülmektedir.

Farklı kapak katmanlıklarında yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katman kalınlığı için optimal durumlar elde edilmiştir. Elde edilen durumların birbirleri ile elektron bulunma yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğu cinisinden ilişkilerin ise sırasıyla Şekil 5.23. ve Şekil 5.24)'te gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 5.24)'te 3 ve 4 nm GaN kapak kalınlıkları için GaN göz önüne koyarak GaN tabasına sızmış olduklarını görebiliriz ve bu da arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlama gelmektedir. 1 nm kapak kalınlığı için yüksek taşıyıcı yoğunluğuna rağmen arayüzeye çok yakındır bu sebeple arayüzey saçılmasından etkilemesi sağlamaktadır. 2 nm GaN kapak kalınlığı ise diğer durumlara göre elektronlar sınırlandırılmış durumdadır aynı zamanda iki mekanizma saçılmasından en az etkilenebilecek durum olarak önerilmektedir.



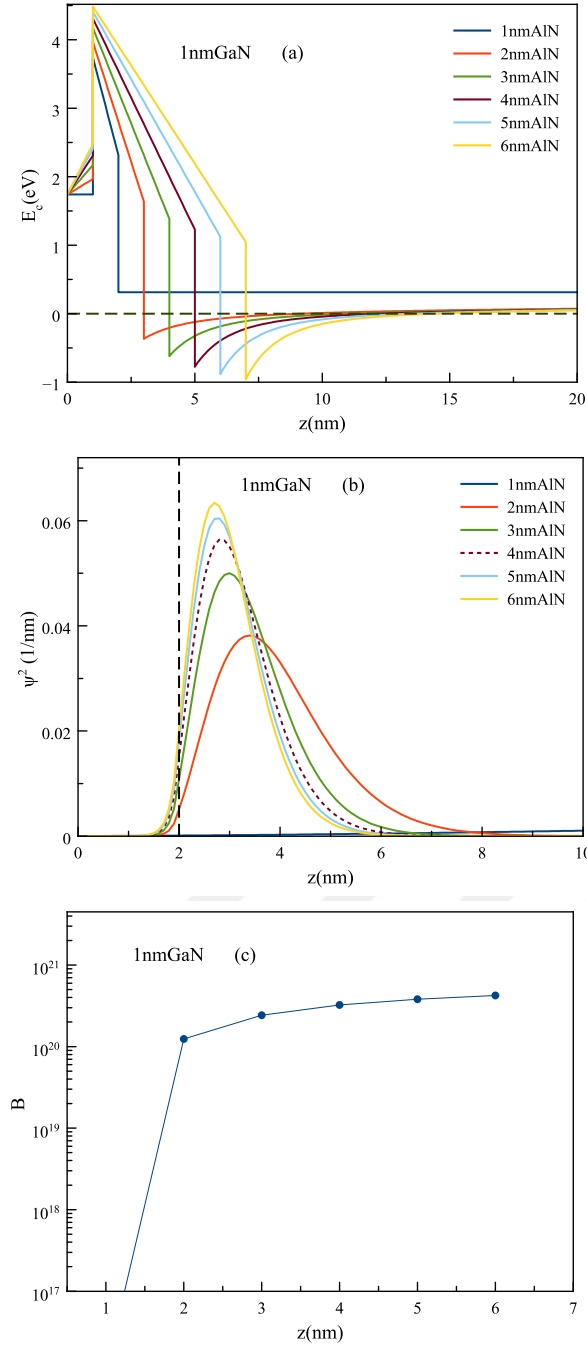
Şekil 5.23. 1-4 nm kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.24. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

#### 5.4. GaN/AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarında AlN Bariyer ve Katkısız GaN Kapak Katman Kalınlığının Etkisi

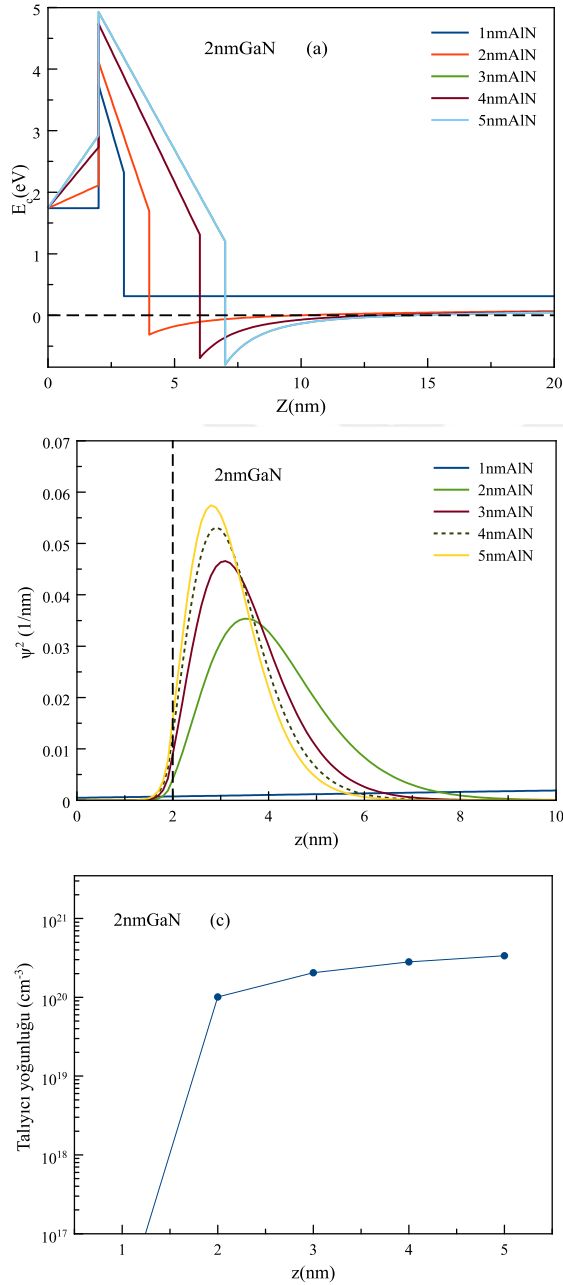
Şekil 5.25 a)'da 1 nm GaN kapak kalınlığı için iletkenlik bandın bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.25 b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığındaki bariyer kalınlığına bağlı değişimi görülmektedir. 1 nm AlN bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığı için elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır. 2 ve 3 nm bariyer durumları için GaN tabakası sızmış durumda ki bu da arkaplan safsızlık saçılmasından daha çok etkilenebilir anlamına gelmektedir. 5 ve 6 nm durumları ise arayüzey safsızlık saçılmasından etkilenir. Dolayısıyla 4 nm bariyer durumu diğer durumlara göre saçılma mekanizmalarından etkilenebilecek olmaması çok mümkündür bu nedenle en uygun durum olarak söyleyebiliriz. Şekil 5.25 c)'de taşıyıcı yoğunlukların değişimi görülmektedir.



Şekil 5.25. 1 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

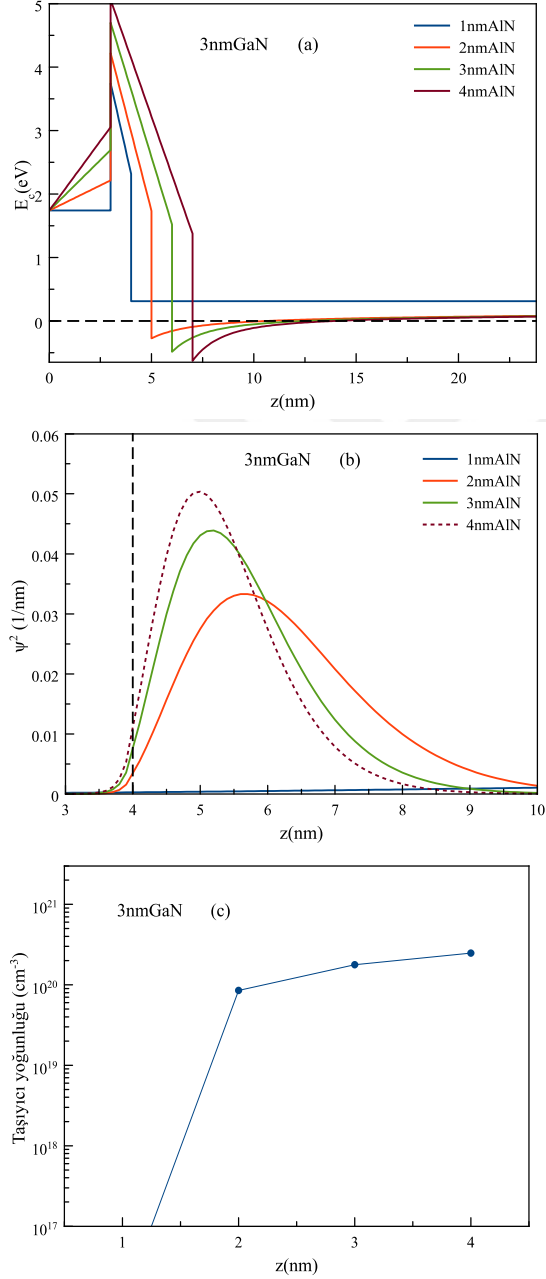
2 nm GaN kapak kalınlığı için farklı bariyer AlN kalınlıklarında iletkenlik bandın profili Şekil 5.26. a)'da görülmektedir. Şekil 5.26. b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında değişim görülmektedir. 1 nm AlN bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığı için elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır. Ayrıca 2 ve 3 nm bariyer durumları GaN tabakası içine doğru daha çok sızmış ki bu da arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlamına gelmektedir. 5 nm durumu için en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, arayüzey safsızlık saçılmasından etkilenebilir. Dolayısıyla en optimal durum

olarak kabul edilmez anlamına gelmektedir. 4 nm durum ise arkaplan safsızlık mekanizmalarından en az etkilenebilecek durum olduğu sebep ile en optimal durum olarak kabul edebiliriz. 2 nm GaN kapak kalınlığı için taşıyıcı yoğunlukların değişimi Şekil 5.26 c)'de görülmektedir.



Şekil 5.26. 2 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

3 nm kapak kalınlığında bariyer kalınlıklarına bağılı iletkenlik bandı profili Şekil 5.27. a)'da görülmektedir. Şekil 5.27.b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığının hesaplamasında değişim görülmektedir ve farklı bariyer kalınlıklarında 1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmaması neden ile elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır.

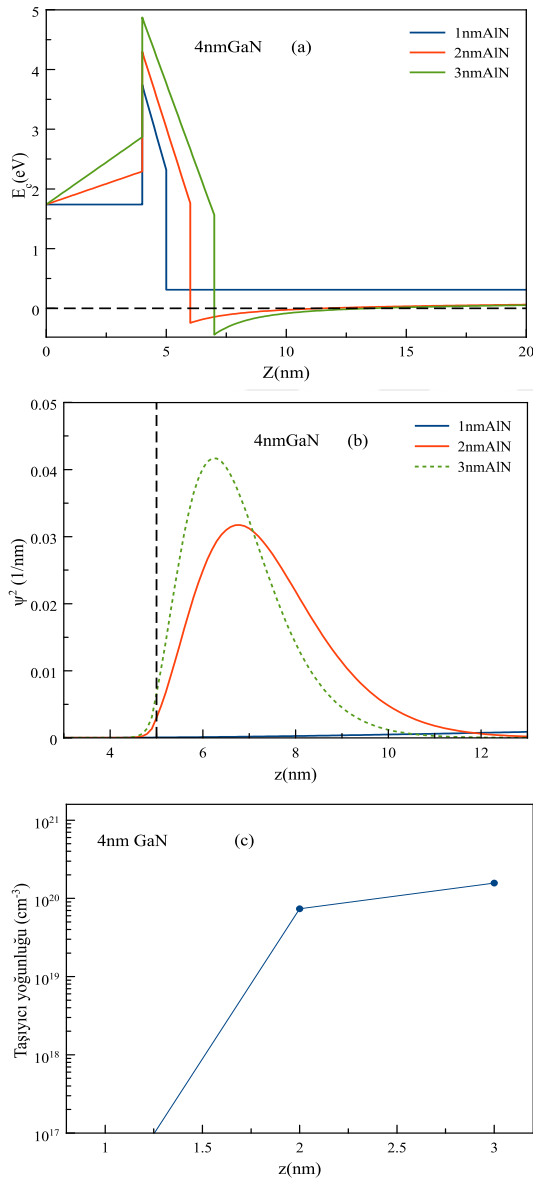


Şekil 5.27. 3 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağılı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

Ayrıca 2 ve 3 nm bariyer kalınlıkları için GaN tabakasına sızmış olduğundan dolayı, arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir. 4 nm durumu ise diğer durumlara göre elektronlar daha çok sınırlandırılmış ve saçılma mekanizmasından en az etkilenebilir

durum olduğunu kabul edebiliriz. Şekil 5.27. c)'de 3 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlıklarına bağlı taşıyıcı yoğunluğu değişimi görülmektedir.

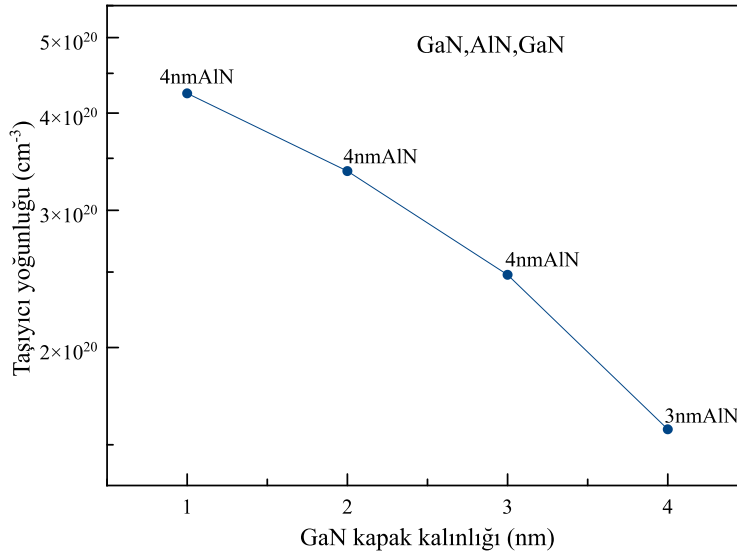
Şekil 5.28. a)'da 4 nm GaN kapak kalınlığı için iletkenlik bandı profili AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak görülmektedir. Şekil 5.28. b)'de bir boyutlu hesaplamada 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamasında AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



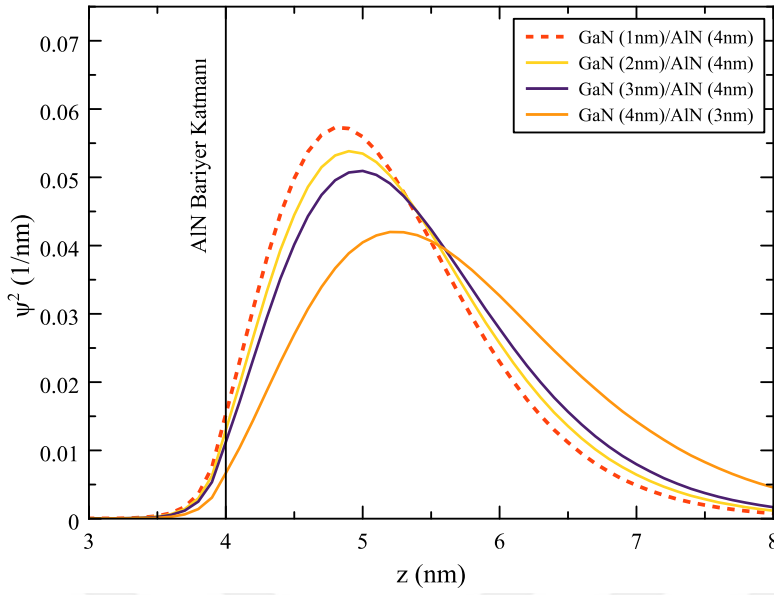
Şekil 5.28. 4 nm kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığı için bulunma olasılığı çok düşüktür ve 2 nm bariyer kalınlığı için arayüzeyden çok uzak olduğu ve GaN tabakasına sızmış olduğunu görülmektedir ve dolayısıyla arkaplan safsızlık saçılmasından çok etkilenebilir. 3 nm durumu ise iki mekanizmadan en az etkilenebilecek anlama gelmektedir aynı zamanda diğer durumlara göre elektronlar daha çok sınırlandırılmış durumdadır dolayısıyla en optimal durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.28c)'de 4 nm GaN kapak kalınlığında taşıyıcı yoğunlukları AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak yükselmesi görülmektedir.

Farklı kapak katmanlıkların kalınlıkları için yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katman kalınlığı için optimal durumlar elde edilmiştir. Bu elde edilen durumların birbirleri ile elektron bulunma yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğu cinisinden ilişkilerin ise sırasıyla Şekil 5.29 ve Şekil 5.30.'de gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 5.30'da 2-4 nm GaN kapak kalınlıkları için GaN göz önüne koyarak GaN tabakasına sızmış olduklarını görebiliriz bu da arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlamına gelmektedir. 1 nm kapak kalınlığı ise diğer durumlara göre yüksek taşıyıcı yoğunluğu sağladığından ve safsızlık saçılmasından en az etkilenebileceğini görebiliriz ve dolayısıyla en optimal durum olduğunu kabul edebiliriz.



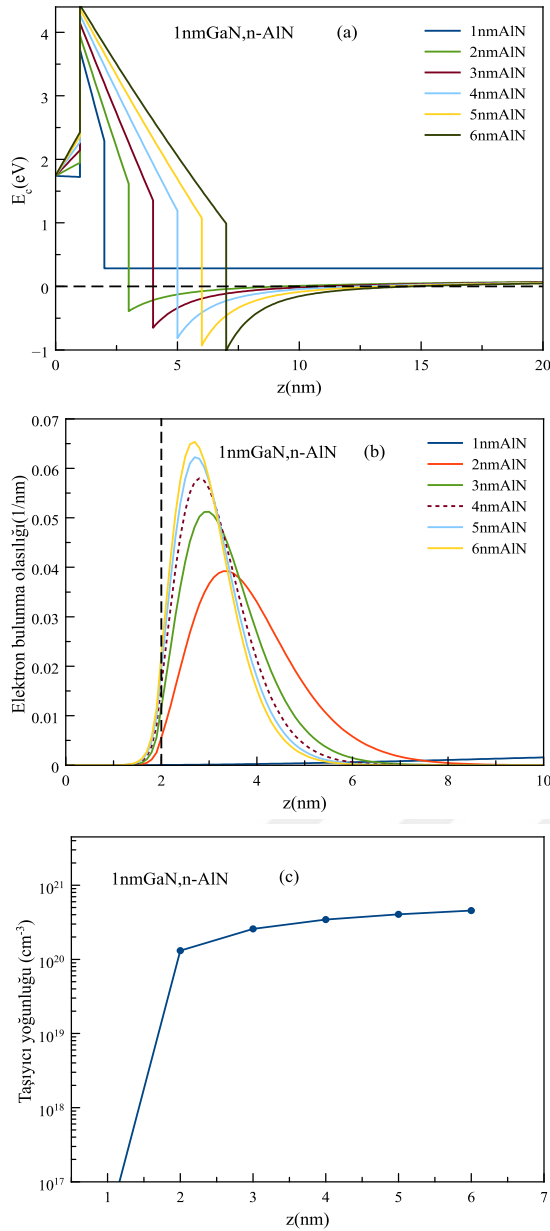
Şekil 5.29. 1-4 nm GaN kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun farklı bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi



Şekil 5.30. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

##### 5.5. GaN/n-AlN/GaN Ultraince Çokluyapılarında Katkılı AlN Bariyer ve Katkısız GaN Kapak Katman Kalınlıklarının Etkisi

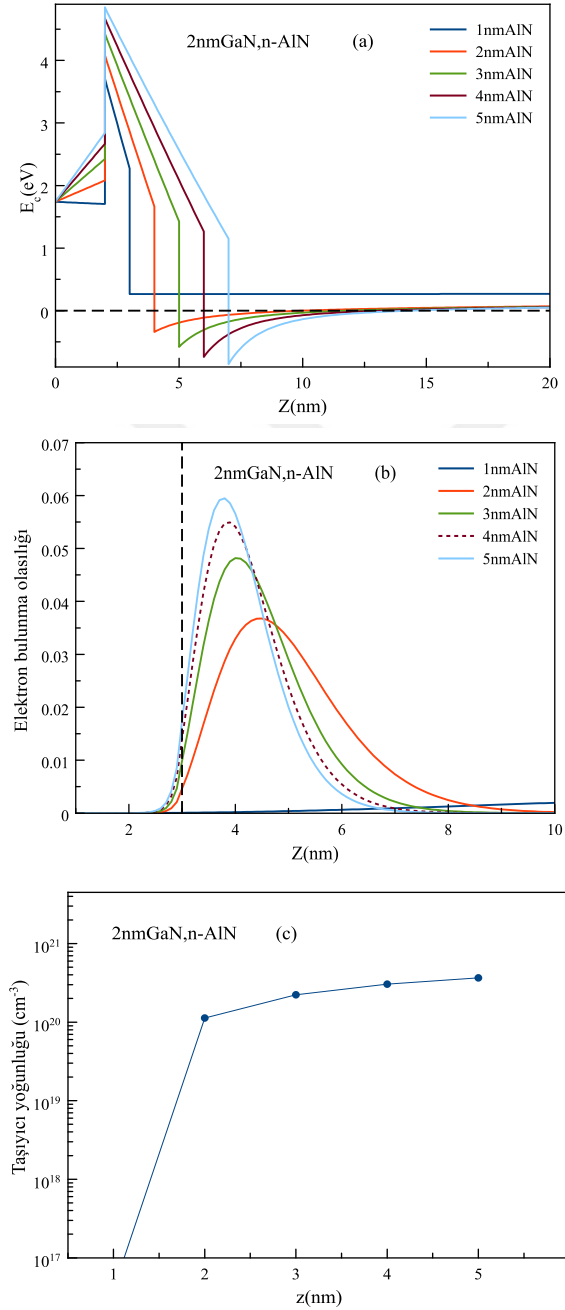
Şekil 5.31 a)'da 1 nm GaN kapak kalınlığı için iletkenlik bantın profili bariyer kalınlığına bağlı olarak görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.31 b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında değişim görülmektedir. 1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığı için ile elektron bulunma olasılığı ve taşıyıcı yoğunluğu bulunmamaktadır. 2 ve 3 nm bariyer durumları GaN tabakası içine sızmış durumda ki ve arkaplan safsızlık saçılmasından daha çok etkilenebilir anlamına gelmektedir. 5 ve 6 nm durumları ise arayüzey safsızlık saçılmasından etkilenirler. Dolayısıyla 4 nm bariyer durumu diğer durumlara göre saçılma mekanizmalarından etkilenebilecek olmaması çok mümkündür bu nedenle en optimal durum olarak söyleyebiliriz. Şekil 5. 31 c)'de AlN bariyer kalınlık durumları için taşıyıcı yoğunluğu durumları göstermektedir.



Şekil 5.31. 1 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

2 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarında iletkenlik bantın profili Şekil 5.32 a)'da görülmektedir ve 1 nm AlN bariyer kalınlığında kuyu oluşmamaktadır. Şekil 5.32 b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında değişim var. 2 ve 3 nm AlN bariyer kalınlıkları durumu için GaN tabakası içine sızmış olduğu görülmektedir dolayısıyla arkaplan safsızlıktan etkilenmiş olduğunu görebiliriz. 5 nm AlN bariyer durumu ise yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir fakat arayüzeye daha yakındır ve burada safsızlık saçılmasından etkilenir anlamına gelmektedir. 4 nm AlN bariyer ise saçılma mekanizmalarından en az etkilenebilecek durumdur dolayısıyla en optimal durum

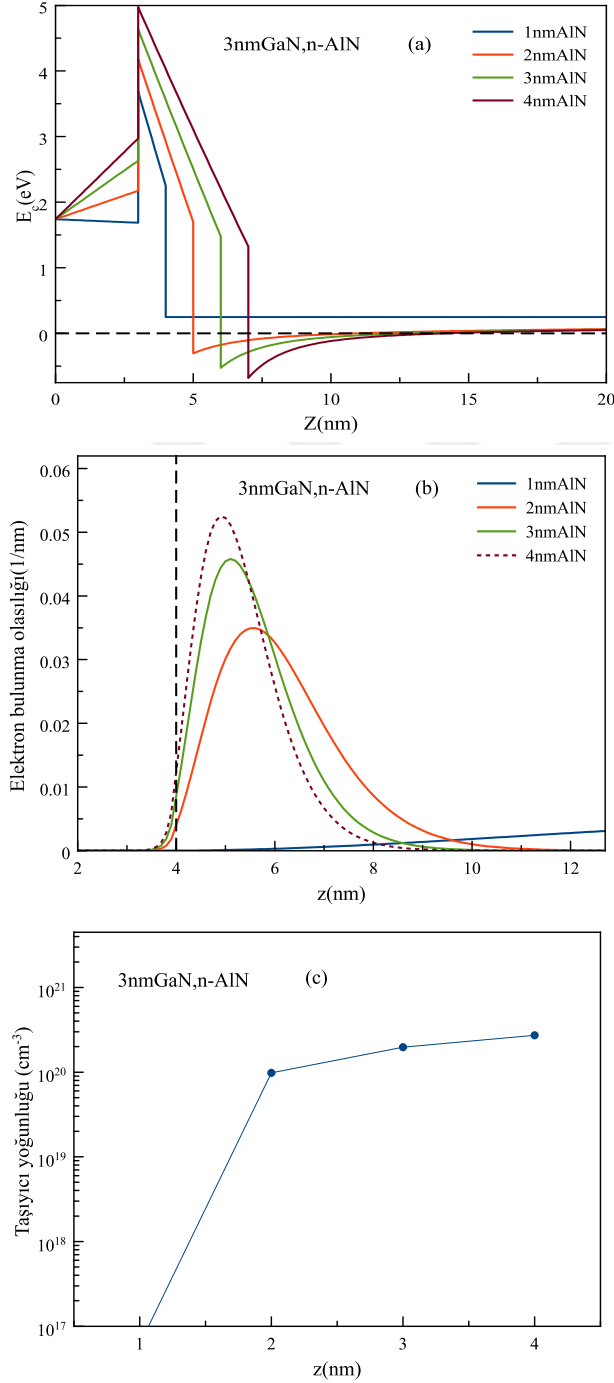
olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5. 32 c)'de GaN kapak katmanı için n-AlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğu görülmektedir.



Şekil 5.32. 2 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

3 nm kapak kalınlığında bariyer kalınlıklarına bağlı iletkenlik bantı profili Şekil 5.33. a)'da görülmektedir. Şekil 5.33. b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığının hesaplamasında

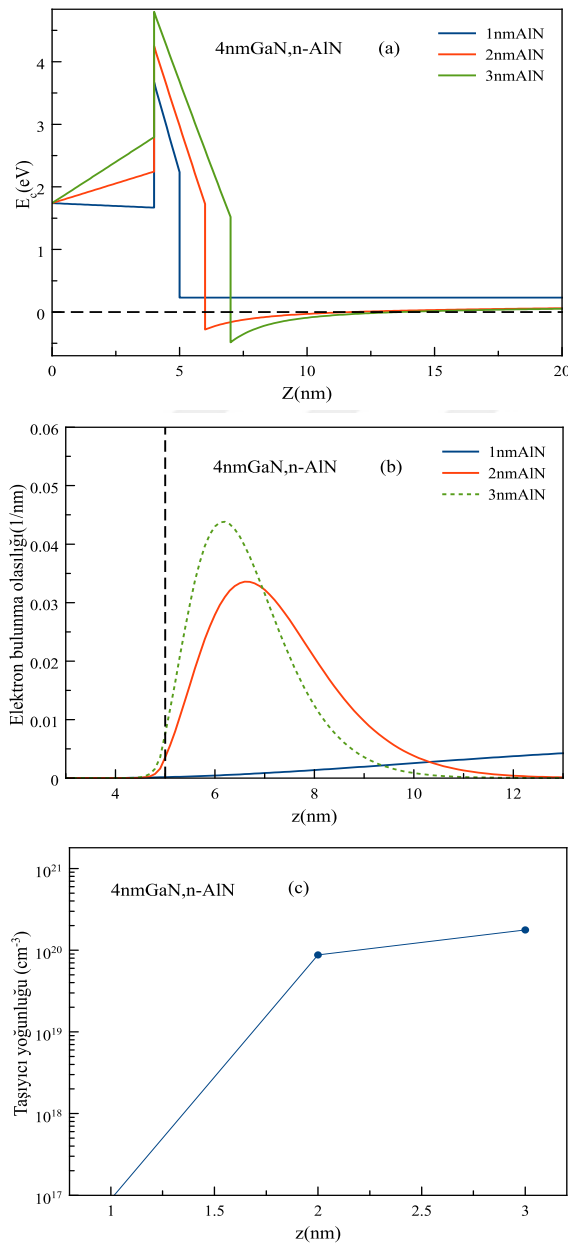
değişim görülmektedir. Farklı bariyer kalınlıklarında 1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığı için elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır.



Şekil 5.33. 3 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

Ayrıca 2 ve 3 nm bariyer kalınlıkları için GaN tabakasına sızmış olduğundan dolayı, arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilecek anlamına gelmektedir. 4 nm durumu ise diğer durumlara göre elektronlar daha çok sınırlandırılmış durumdadır ve saçılma mekanizmalarından en az etkilenebilir durum olduğunu kabul edebilir. Şekil 5.33.c)'de GaN kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğu değişimi görülmektedir.

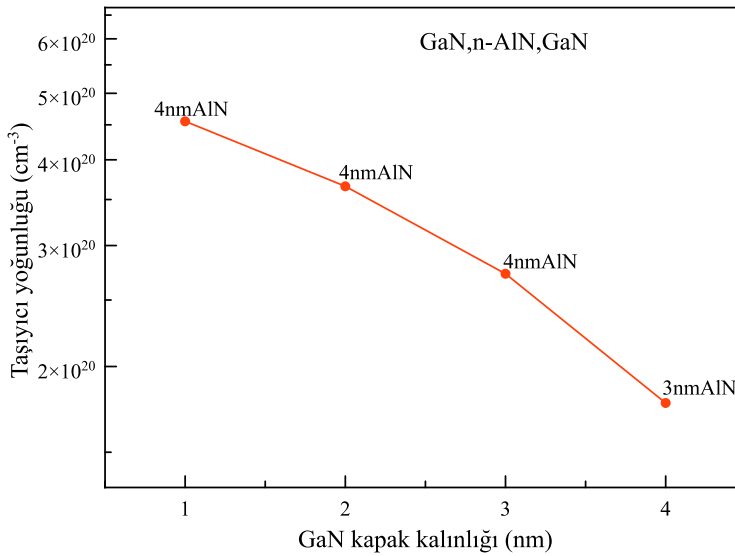
Şekil 5.34 a)'da 4 nm kapak kalınlığı için iletkenlik bandın profili bariyer kalınlıklarına bağlı olarak görülmektedir.



Şekil 5.34. 4 nm kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

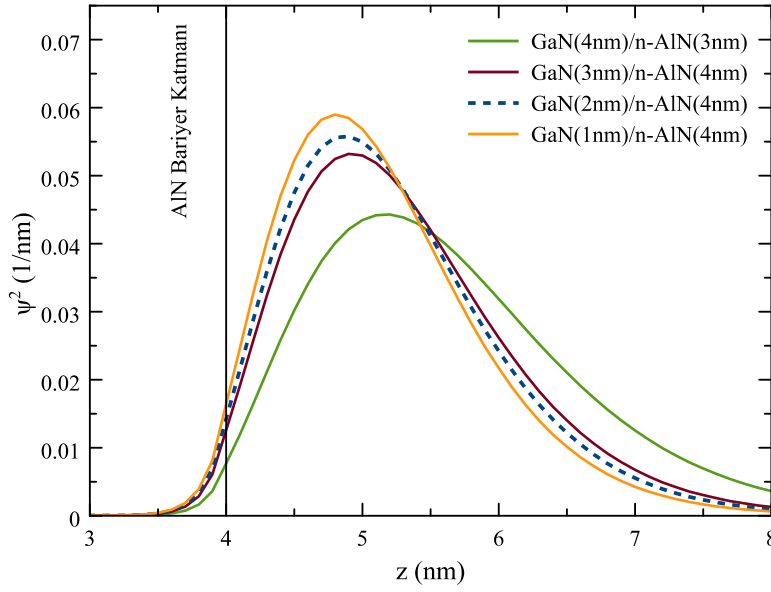
Şekil 5.34 b)'de elde edilen bir boyutlu hesaplama sonuçlarında 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamasında bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimleri görülmektedir. 1 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmadığından dolayı elektron bulunma olasılığı çok düşüktür ve 2 nm bariyer kalınlığı için arayüzeyden çok uzak olduğu ve GaN tabakasına sızmış olduğunu görülmektedir ve dolayısıyla arkaplan safsızlık saçılmasından çok etkilenebilir. 3 nm durumu ise iki mekanizmadan en az etkilenebilecek anlama gelmektedir aynı zamanda diğer durumlara göre elektronlar daha çok sınırlandırılmış durumdadır dolayısıyla en optimal durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.34 c)'de 4 nm GaN kapak kalınlığı için n-AlN bariyer kalınlığına bağlı olarak taşıyıcı görülmektedir.

Katkılı AlN bariyerin farklı katman kalınlıkları ve farklı GaN kapak katmanı kalınlıkları için 2DEG bulunma olasılığı ve taşıyıcı yoğunluğu cinsinden herbiri tek tek incelendi dolayısıyla Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.35. 1-4 nm kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

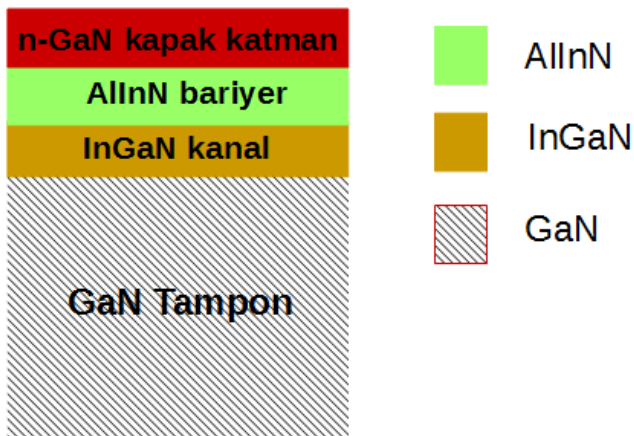
Şekil 5. 35)'te 1 nm kapak ve 6 nm bariyer kalınlıklarında en yüksek taşıyıcı yoğunluğu elde edildi fakat bu sonuç elektron bulunma olasılığı cinsinden optimal durum değil çünkü burada safsızlık ve arayüzey bozukluğu saçılmalarından etkilenmeler dolayısıyla Şekil 5. 36'da 2 nm GaN tabakası ve 4 nm AlN bariyer optimal durum olarak seçilmiştir.



Şekil 5.36. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

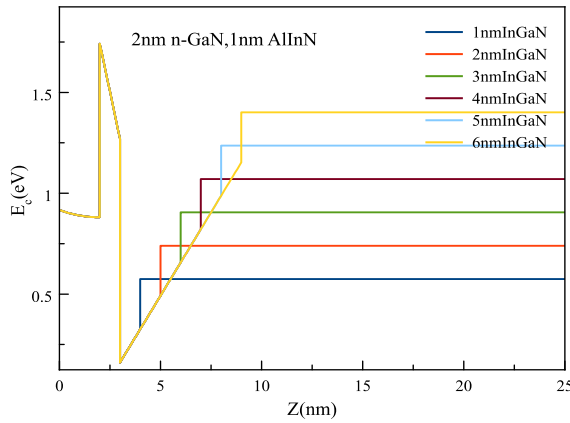
### 5.6. n-GaN/AlInN/InGaN/GaN Ultraince Çokluyapılarında InGaN Kanal Katman Kalınlığının Etkisi

InGaN kanallı ve AlInN bariyerli GaN tamponuna sahip olan yapının şematik gösterimi Şekil 5.37’de görülmektedir. Bu yapıda InGaN kanalın ve AlInN bariyerin etkisini incelenmiştir.



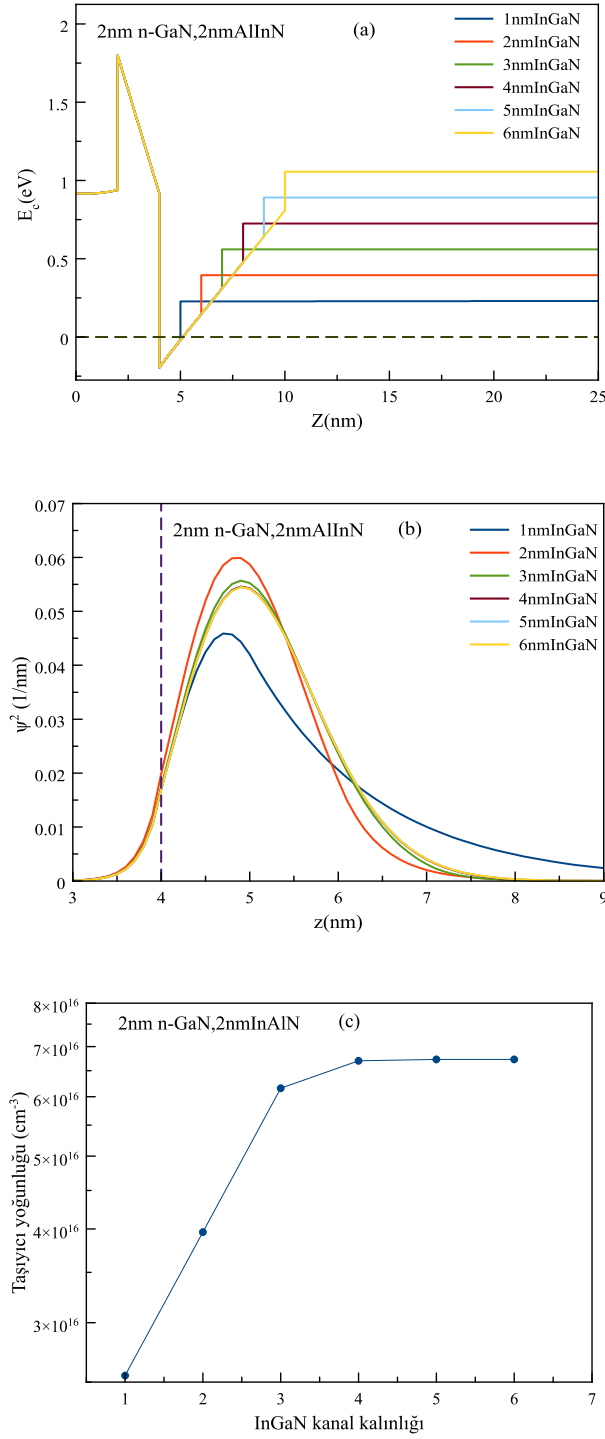
Şekil 5.37. n-GaN/AlInN/InGaN/GaN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı6) şematik gösterimi

n-GaN/AlInN/InGaN/GaN ultraince bariyerli çokluyapısına ait şematik gösterim Şekil 5.37’de verilmiştir. 2 nm kapak kalınlığı ve 1 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı olarak iletkenlik bandın profilindeki değişim Şekil 5.38’de görülmektedir. 1 nm bariyer kalınlığında oluşan potansiyel kuyu Fermi seviyesinin üzerinde kaldığı her bir InGaN kanal katman kalınlığında kuyu üzerinde taşıyıcı birikimi yoktur.



Şekil 5.38. 2 nm kapak kalınlığı ve 1 nm bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı iletkenlik bant profili.

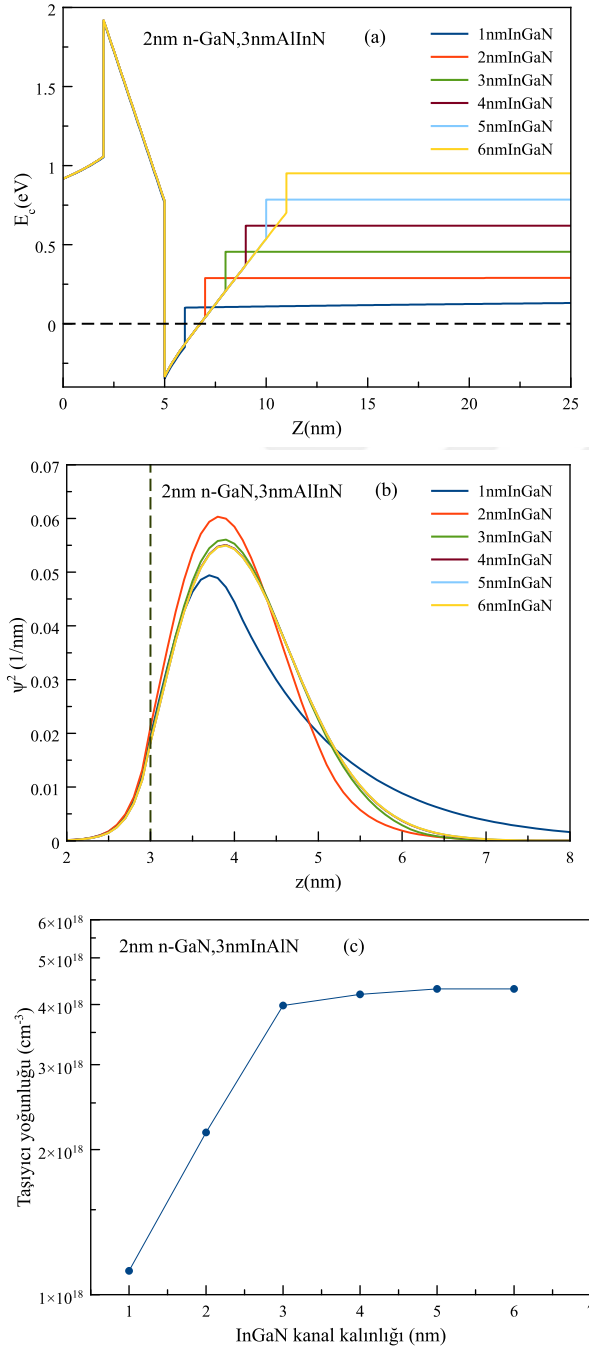
2 nm kapak katmanı ve 2 nm bariyer kapak katmanı kalınlığı için iletkenlik bantın profilinin InGaN kanal katman kalınlıklarına bağlı değişimi Şekil 5.39 a)’da görülmektedir. Şekil 5.39 b)’de 2 nm kapak ve 2 nm bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı olarak 2DEG elektron bulunma olasılığı değişim verilmektedir. 1 ve 2 nm InGaN kanal kalınlığı düşük taşıyıcı yoğunluğuna sahiptirler ve arayüzey safsızlık saçılmasından etkilenebilir. 4-6 nm InGaN durumları için yüksek taşıyıcı yoğunluklarına sahip olmalarına rağmen GaN tabakası içine sızması nedeniyle arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlama gelmektedir. 3 nm durum ise arkaplan ve arayüzey safsızlık saçılmalarından en az etkilenebilir ve dolayısıyla en optimal durum olarak kabul edebiliriz. Şekil 5.39 c)’de 2 nm n-GaN kapak katmanı ve AlInN bariyer kalınlıklarında InGaN kanal kalınlıklarına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluklarında değişim görülmektedir.



Şekil 5.39. 2 nm kapak ve 2 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

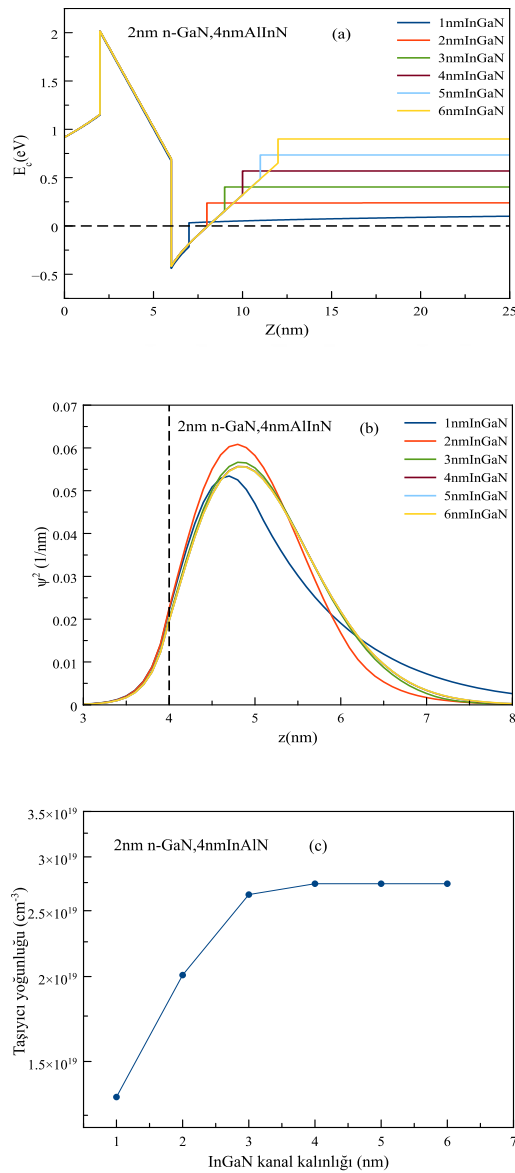
Şekil 5.40 a)'da 2 nm kapak katmanı ve 3 nm bariyer kalınlığı için farklı InGaN kanal kalınlıklarına bağlı iletkenlik bantın profili görülmektedir. Ayrıca 2 nm kapak ve 3 nm AlInN bariyer kalınlığı için 2DEG elektron bulunma olasılığının InGaN kanal kalınlıklarına bağlı olarak değişimi Şekil 5.40 b)'de görülmektedir. 1-2 nm kanal kalınlığı için arayüzey bozukluğu saçılmasından çok etkilenebilir.

4-6 nm InGaN kalınlıkları için GaN tabakası içine doğru sızmış ve dolayısıyla arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlamına gelmektedir. 3 nm kanal kalınlığı ise GaN tabakası safsızlık ve arayüzey safsızlık saçılmasından en az etkilenebilecek olarak görülmektedir, ve dolayısıyla en optimal durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.40 c)'de InGaN kanal kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluğu değişimi gösterilmiştir.



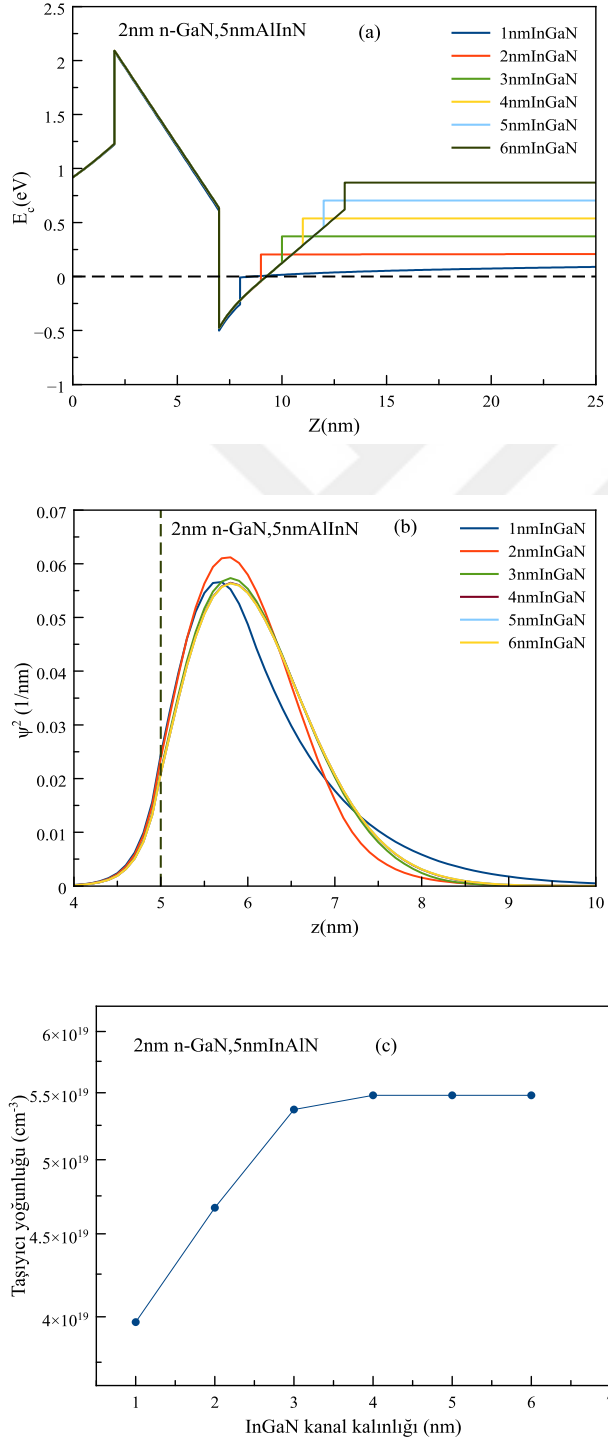
Şekil 5.40. 2 nm kapak ve 3 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

Şekil 5.41 a)'da 2 nm n-GaN kapak kalınlığı ve 4 nm AlInN bariyer kalınlığı için farklı InGaN kanal kalınlıklarında iletkenlik bantı görülmektedir. 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında farklı kanal kalınlıklarında bariyer ile kapak katmanlarını sabit tutarak Şekil 5.41 b)'de değişim görülmektedir. 1 ve 2 nm InGaN durumları düşük taşıyıcı yoğunluğuna sahiptirler ve arayüzey bozukluk saçılmasından etkilenebilirler. Ayrıca 4-6 nm kanal kalınlıkları için yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen GaN tabakası içine sızmış olduğunu görülmektedir ve dolayısıyla GaN tabakası arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlama gelmektedir. 3 nm durum arayüzey ve GaN tabakası saçılmasından en az etkilenebilecek durumdur ve bu sebeple en optimal durum olarak kabul edebiliriz.



Şekil 5.41. 2 nm kapak ve 4 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

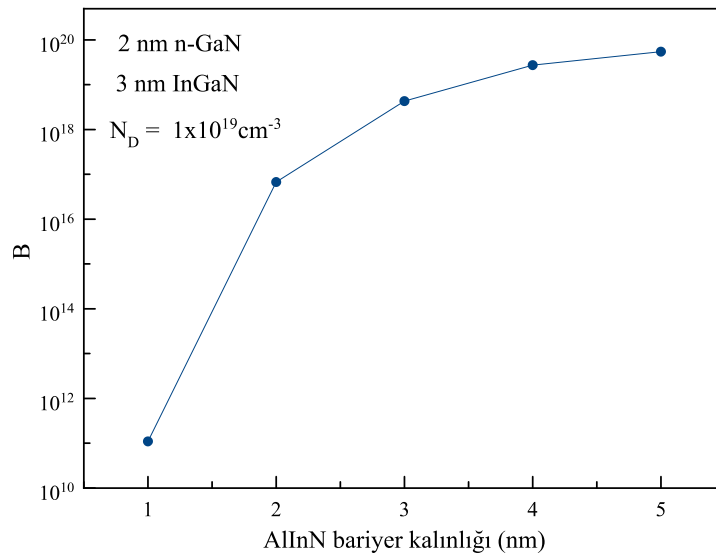
Şekil 5.42 a)'da 2 nm n-GaN kapak kalınlığı ve 5 nm AlInN bariyer kalınlığı için farklı InGaN kanal kalınlıklarına bağlı iletkenlik bantın profili görülmektedir. Farklı InGaN kanal kalınlıklarında 2 nm GaN kapak ve 5 nm AlInN bariyer kalınlığı için 2DEG olasılığı Şekil 5.42 b)'de görülmektedir.



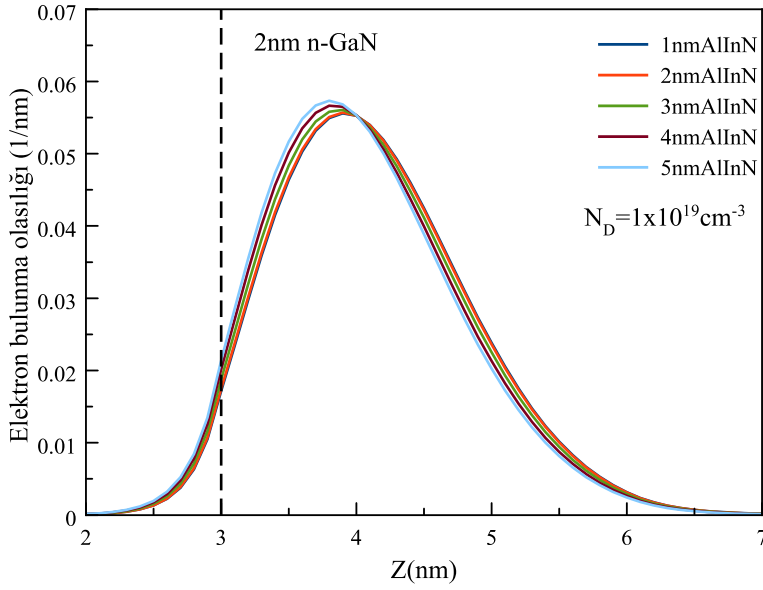
Şekil 5.42. 2 nm kapak ve 5 nm AlInN bariyer kalınlığı için InGaN kanal kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

1 ve 2 nm InGaN kanal durumları arayüzey bozukluğu saçılmasından etkilenebilirler. Ayrıca 4-6 nm kanal kalınlıkları için yüksek taşıyıcı yoğunluğna sahip olmalarına rağmen GaN tabakası içine sızmış olduğunu görülmektedir ve dolayısıyla GaN tabakası arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir. 3 nm durum arayüzey ve GaN tabakası saçılmasından en az etkilenebilecek durumdur, dolayısıyla en optimal durum olarak kabul edebiliriz.

Farklı kapak katmanı kalınlıkları için yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katman kalınlığı için uygun durumlar elde edilmiştir. Elde edilen durumların birbirleri ile taşıyıcı yoğunluğu ve elektron bulunma olasılığı cinsinden verileri Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te gösterilmiştir. Buna göre Şekil 5.43'te 5 nm AlInN bariyer durumuna en yüksek taşıyıcı yoğunluğu sağlanmaktadır. Şekil 5.44'te 2DEG elektron bulunma olasılığı sonuçlarında çok az değişim görülmektedir fakat Şekil 5.39'da taşıyıcı yoğunluklarında farklı sonuçlar elde edilmiştir. 5 nm bariyer kalınlığı en yüksek taşıyıcı yoğunluğu sağlaması sebep ile en uygun durum olarak seçilmiştir.



Şekil 5.43. 2 nm kapak kalınlığı için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi



Şekil 5.44. 2 nm kapak kalınlığı için elektron bulunma olasılığının AlInN bariyer kalınlığına bağlı değişimi

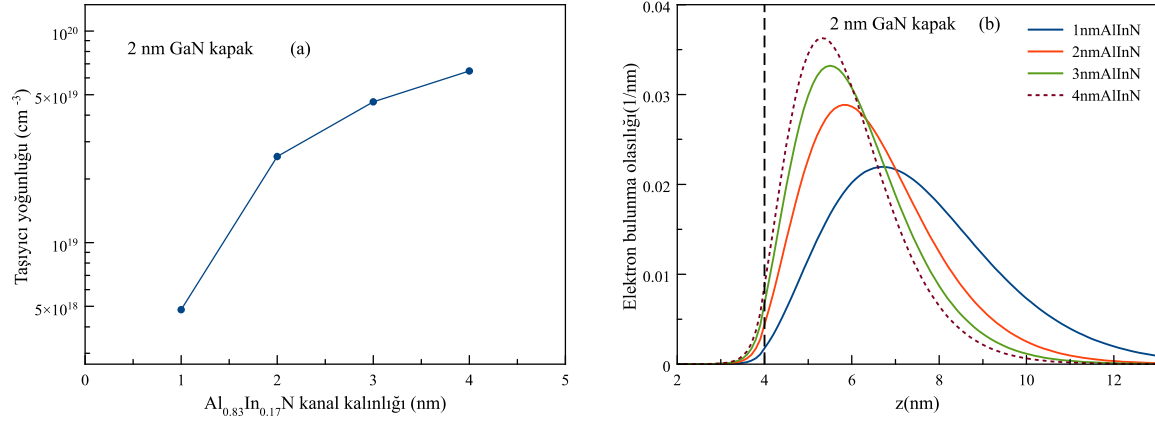
### 5.7. n-GaN/AlN/AlInN/GaN Ultraince Çokluyapılarında AlInN Bariyer Katmanının Etkisi

n-GaN/AlN/AlInN/GaN ultraince bariyerli çokluyapısına ait şematik gösterimi Şekil 5.45'te göstermektedir ve bu yapının AlInN bariyer kalınlıklarını değiştirerek incelenmiştir.



Şekil 5.45. n-GaN/AlN/AlInN/GaN ultraince bariyerli çokluyapısının (Yapı7) şematik gösterimi

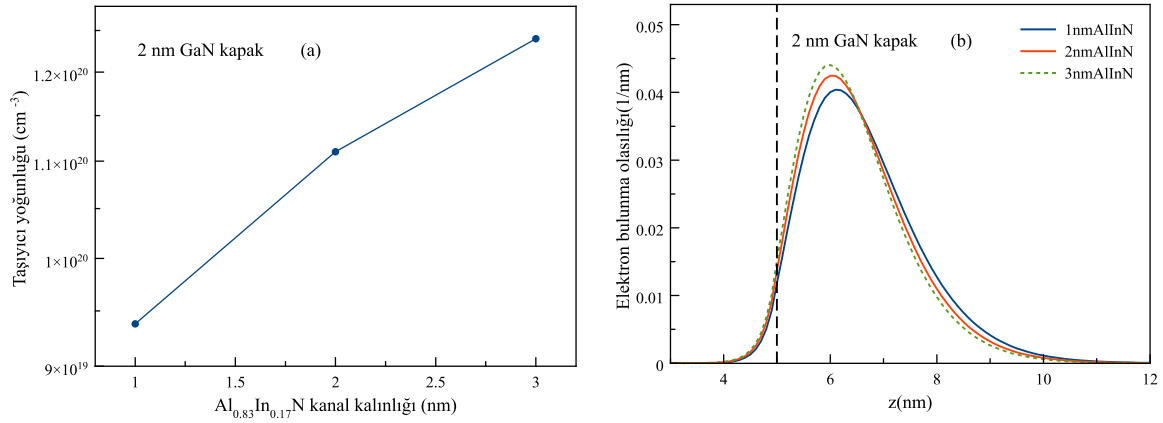
2 nm kapak katmanı kalınlığı ve 1 nm AlN bariyer kalınlığı için taşıyıcı yoğunluklarında ve 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında bir değişim görülmektedir. Şekil 5.46 a)'da 1 nm AlN bariyer kalınlığında InAlN bariyer kalınlığı arttıkça taşıyıcı yoğunluğu artması görülmektedir.



Şekil 5.46. 2 nm kapak kalınlığı ve 1 nm AlN bariyer için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

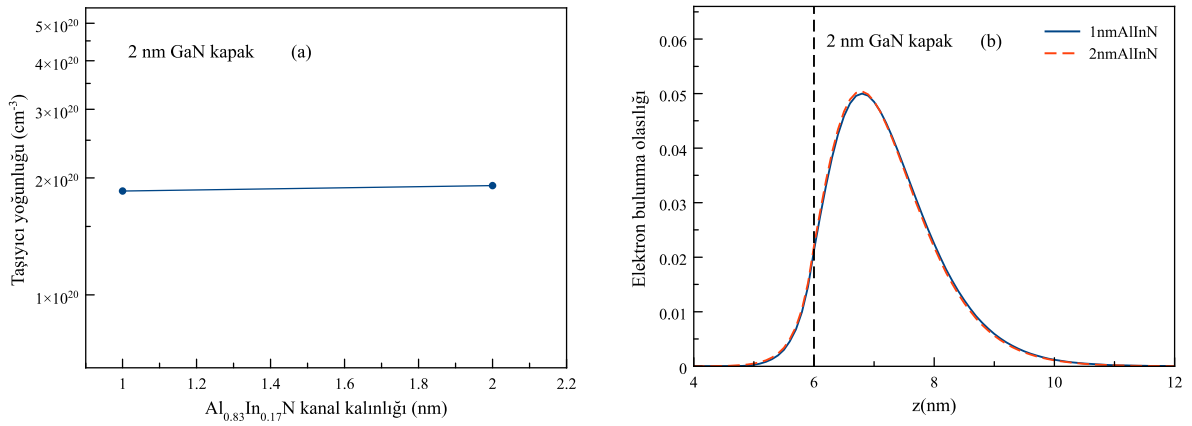
Şekil 5.46 b)'de 2DEG elektron bulunma hesaplamalarında 2 nm kapak kalınlığı ve 1 nm AlN bariyer kalınlığında AlInN bariyer kalınlıklarını değiştirerek sonuçlarda değişim görülmektedir, 1-3 nm AlInN kalınlığı durumları için GaN tabakasının içinde olduklarından dolayı arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir. 4 nm AlInN kalınlığı ise diğer durumlara göre en yüksek taşıyıcı yoğunluğu sağlamaktadır ve elektronlar daha sınırlandırılmış durumdur, ayrıca arkaplan safsızlık ve arayüzey safsızlık saçılmasından az etkilenmesi gözlenmektedir ve dolayısıyla en uygun durum olduğunu söylenebilir.

Şekil 5.47'de 2 nm kapak kalınlığı ve 2 nm AlN bariyer kalınlığında AlInN bariyer kalınlığına bağlı olarak taşıyıcı yoğunluklarında ve 2DEG elektron bulunma olasılığında değişim görülmektedir. 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında AlInN kalınlığına bağlı az değişime rağmen en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olan 3 nm AlInN kalınlığı bu neden ile en optimal durum olarak söyleyebiliriz.



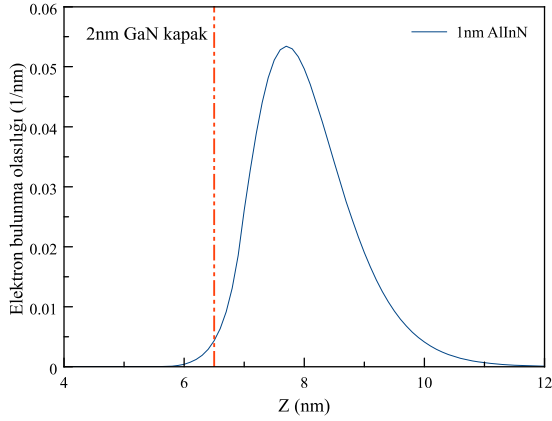
Şekil 5.47. 2 nm kapak kalınlığı ve 2 nm AlN bariyer için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

Şekil 5.48’de 2 nm kapak ve 3 nm AlN bariyer kalınlığı için taşıyıcı yoğunluğunda ve 2DEG elektron bulunma hesaplamalarında bir değişim görülmemektedir. İnce kapak tabakası kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluklarında ve bulunma olasılıklarında bir değişim görülmemektedir. Bu nedenle bariyer tabakanın en ince durumu uygun durum olarak için seçilmiştir.



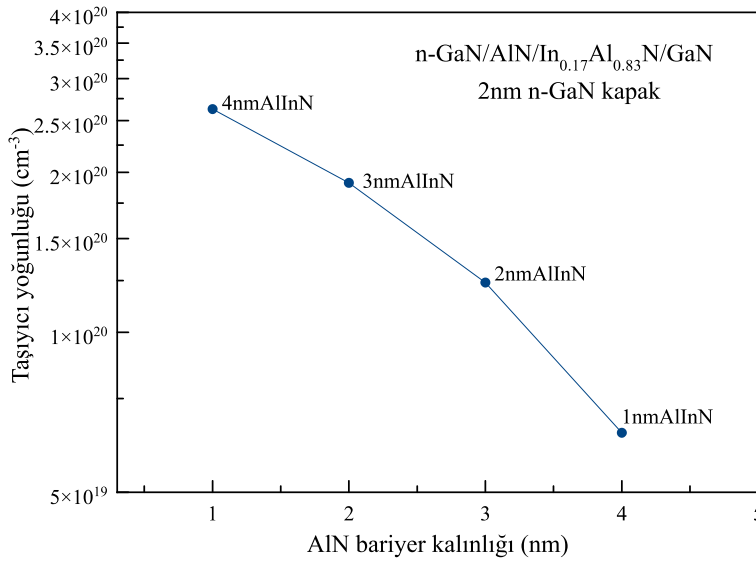
Şekil 5.48. 2 nm kapak kalınlığı ve 3 nm AlN bariyer için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı a) taşıyıcı yoğunluğu ve b) elektron bulunma olasılığı

Şekil 5.49’da 2 nm katkılı GaN kapak katman için 1 nm AlInN bariyer kalınlığına bağlı olarak elektron bulunma olasılığı cinsinden hesaplaması görülmektedir.

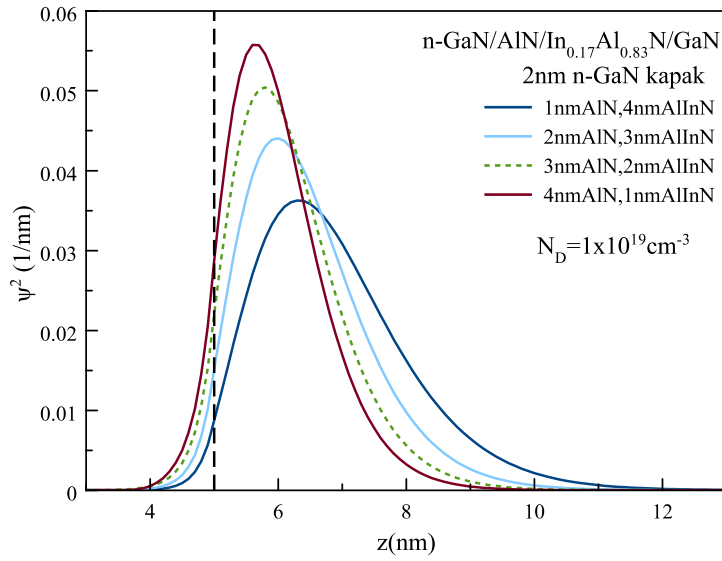


Şekil 5.49. 2 nm kapak kalınlığı ve 4 nm AlN bariyer kalınlığı için elektron bulunma olasılığının AlInN bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

Farklı kapak katmanlıklarında yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katman kalınlığı için uygun durumlar elde edilmiştir. Elde edilen durumların birbirleri ile elektron bulunma yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğu cinsinden ilişkileri sırasıyla Şekil 5.50 ve Şekil 5.51'de gösterilmiştir. Buna göre Şekil 5.51'de GaN arkaplan safsızlık ve arayüzey bozukluğu saçılmasından en az etkilenebilecek 2 nm kapak kalınlığı 3 nm AlN bariyer için 2 nm AlInN bariyer kalınlığı en optimal durum olarak seçilmiştir. Ayrıca Şekil 5.50'de en yüksek taşıyıcı yoğunluğu 2 nm kapak kalınlığı, 1 nm bariyer ve 4 nm InAlN bariyer kalınlığında elde edilmiştir.



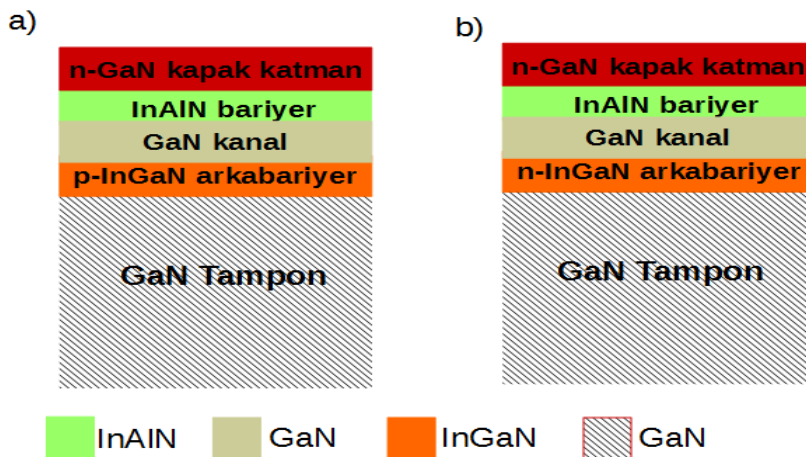
Şekil 5.50. 2 nm kapak tabakası kalınlığı ve 1-4 nm AlN bariyer için taşıyıcı yoğunluğunun InAlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi



Şekil 5.51. 2 nm kapak tabakası kalınlığı ve 1-4 nm AlN bariyer için elektron bulunma olasılığının InAlN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak değişimi

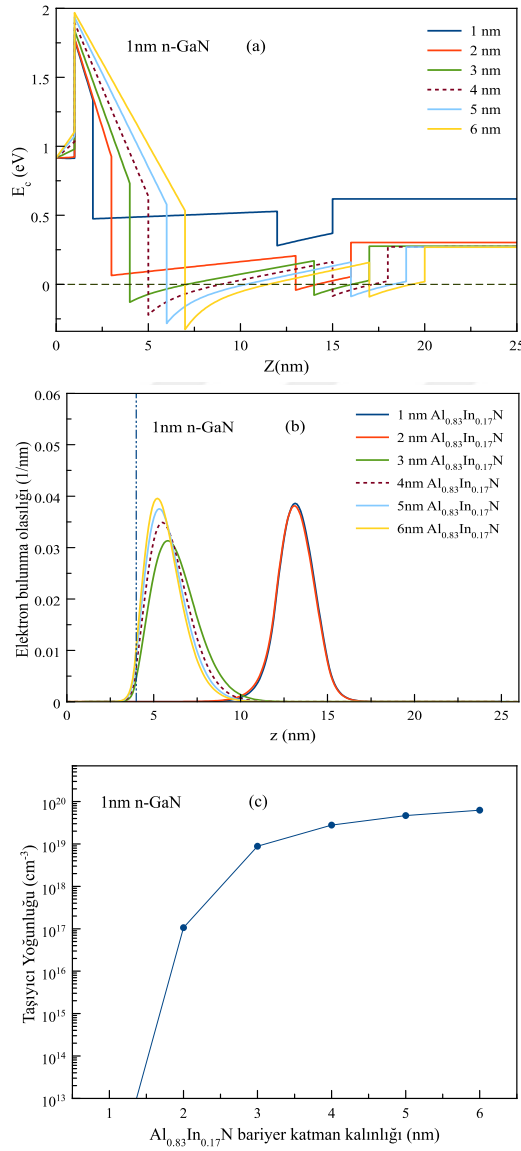
### 5.8. n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN Ultraince Çokluyapılarda Alıcı Katkılı InGaN Arkabariyer ve AlInN Bariyer Katman Kalınlıklarının Etkisi

n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN ultraince bariyerli çoklu yapısına ait şematik gösterim Şekil 5.52 a)'da görülmektedir. Şekil 5.52 b)'de gösterilen şematik yapısına ait n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN ultraince bariyerli çoklu yapısı ile ilgili elde edilen bulgular Bölüm 5.9'da aktarılmıştır.



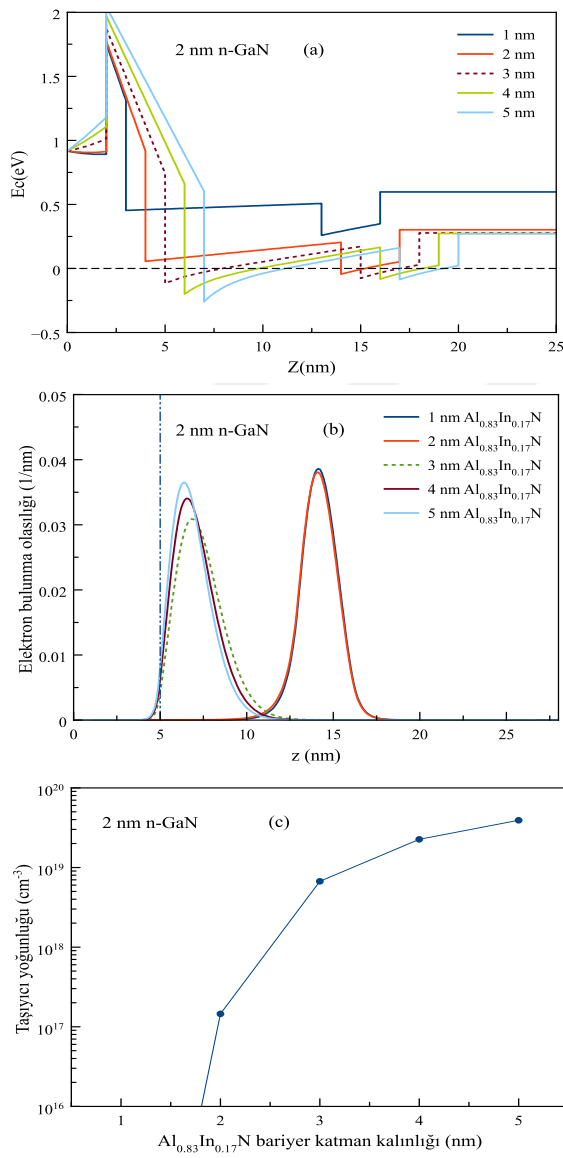
Şekil 5.52. a) n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN (Yapı8) ve b) n-GaN /InAlN/ GaN /n-InGaN/GaN (Yapı9) ultraince bariyerli çokluyapılarının şematik gösterimi

1 ve 2 nm AlN bariyer kalınlıklarında kuyu oluşmamaktadır, 3 nm bariyer kalınlığından itibaren kuyu oluşumu Şekil 5.53 a)'da görülmektedir. Şekil 5.53 b)'de 1 ve 2 nm kuyu oluşmadığından dolayı 2DEG bulunmamaktadır. 3 nm bariyer kalınlığını GaN tabakası içine doğru daha çok sızmış durumdadır ki bu da arkaplan safsızlık saçılmasından daha çok etkilenebilir anlamına gelmektedir. Ayrıca 5 ve 6 nm bariyer durumu için arayüzeye yakın olduğu için arayüzey bozukluğu saçılmasından çok etkilenebilir. Bu durumda en optimal durumun, iki saçılma mekanizmasından en az etkilenebilecek 4 nm bariyer kalınlıkları durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.53 c)'de ise 1 nm kapak kalınlığında taşıyıcı yoğunlukları bariyer kalınlığına bağlı olarak görülmektedir.



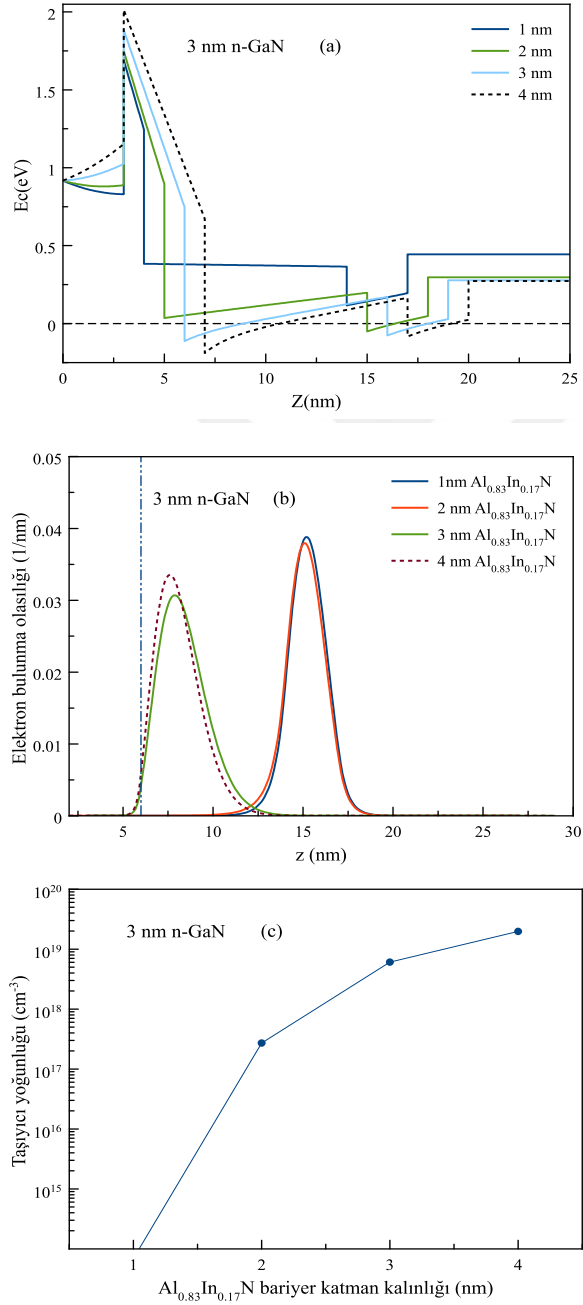
Şekil 5.53. 1 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

2 nm kapak kalınlıklarında iletkenlik bantları bariyer kalınlıklarına bağılı olarak Şekil 5.54 a)'da görülmektedir. Şekil 5.54 b)'de 2DEG elektron bulunma hesaplamalarında 1 ve 2 nm bariyer kalınlıklarında kuyu oluşmadığından dolayı elektron bulunma olasılığı arayüzeyden çok uzak olduğunu görülmektedir, 4 ve 5 nm durumu arayüzeye daha çok yakındır ve dolayısıyla bu durum arayüzey bozukluğu saçılmasından etkilenebilir anlamına gelebilir. 3 nm durumu ise GaN tabakası saçılmasından ve arayüzey bozukluğu saçılmasından en az etkilenebilecek olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.54 c)'de 2 nm kapak kalınlığı için bariyer kalınlığına bağılı taşıyıcı yoğunluklarında değişim görülmektedir.



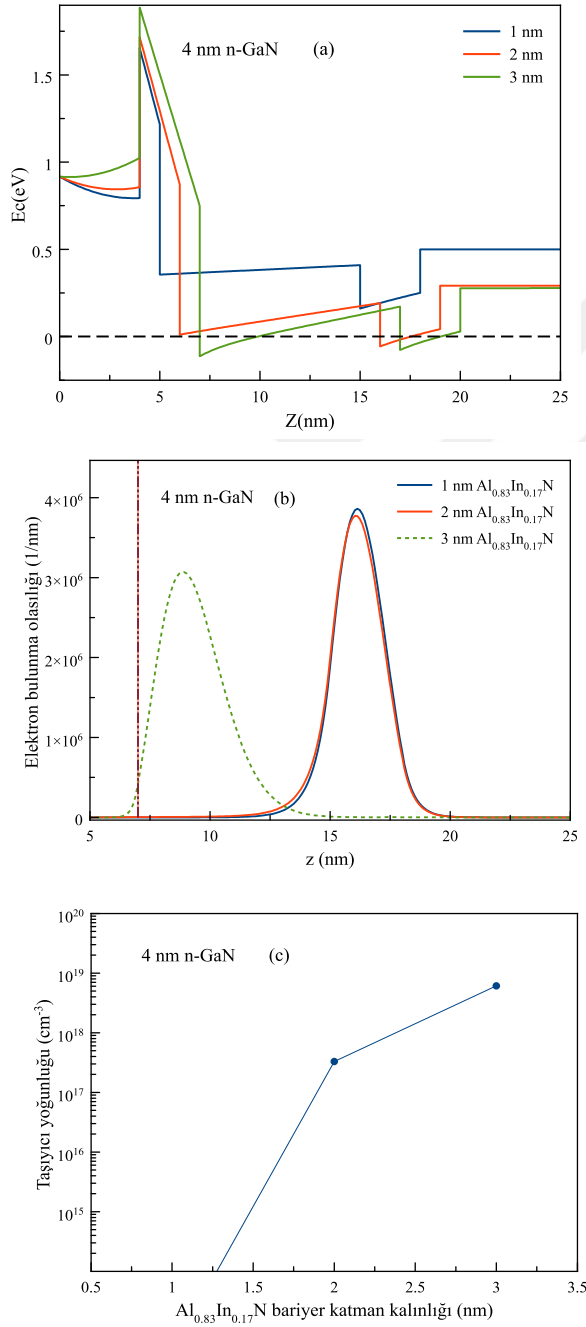
Şekil 5.54. 2 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağılı a) iletkenlik bant profili b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

Şekil 5.55 a)'da 3 nm kapak kalınlığında farklı bariyer kalınlıklarında iletkenlik bantın profili görülmektedir. 1 ve 2 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmamaktadır. Dolayısıyla 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında 1 ve 2 nm bariyer kalınlıklarında arayüzeyden uzak olduğunu



Şekil 5.55. 3 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

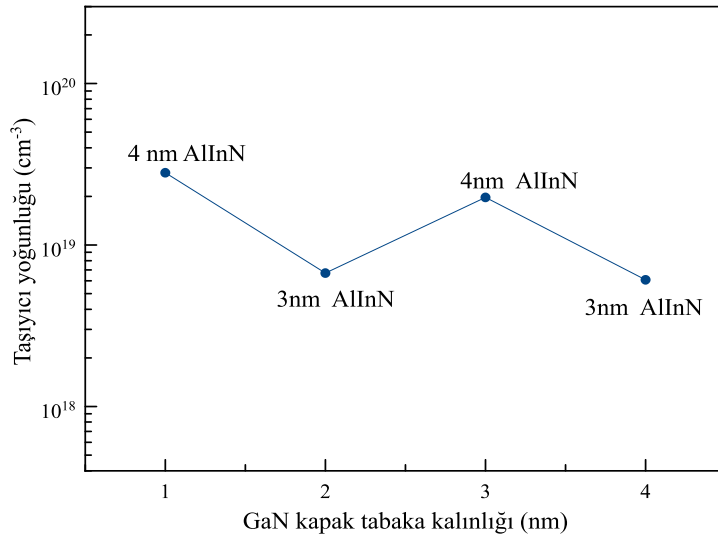
Şekil 5.55 b)'de göstermektedir. Ayrıca 3 nm durumu GaN tabakası içinde bulunması neden ile arkaplan safsızlık saçılmasından etkilenebilir anlamına gelmektedir. Burada en optimal durum 4 nm bariyer durum ve elektronlar diğer durumlara göresınırlandırılmış durum olduğunu söylebiliriz. Şekil 5.55 c)'de en yüksek taşıyıcı yoğunluğu 4 nm bariyer kalınlığında görülmektedir.



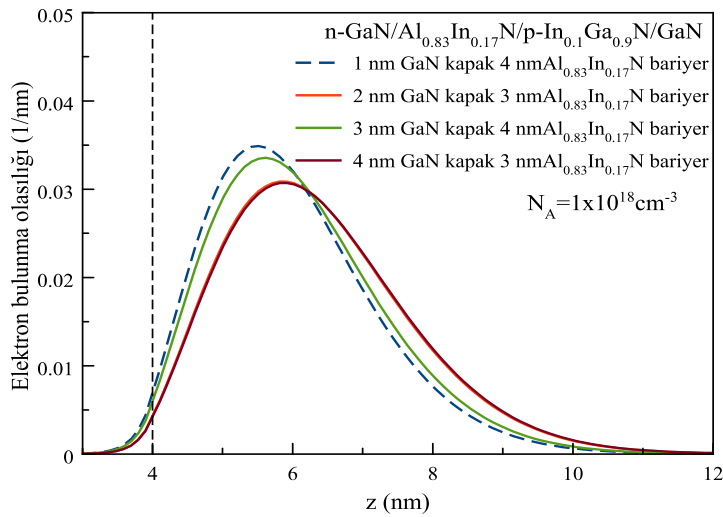
Şekil 5.56. 4 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu



yapılardaki elektronların arayüzey bozukluğu saçılmasından nispeten daha az etkilenebileceklerini söyleyebiliriz ama bulunma olasılıklarının kuyu içerisindeki dağılımının geniş olması GaN içindeki safsızlıkların elektron devingenliğini azaltmada olacağına işaret eder [51]. Bu durumda bu yapı grubu için en iyi çoklu yapı 3 nm GaN kapak katman kalınlığı ve 4 nm AlInN bariyer katman kalınlığına sahip olduğu Şekil 5.58 ve Şekil 5.59'a göre söylenebilir.



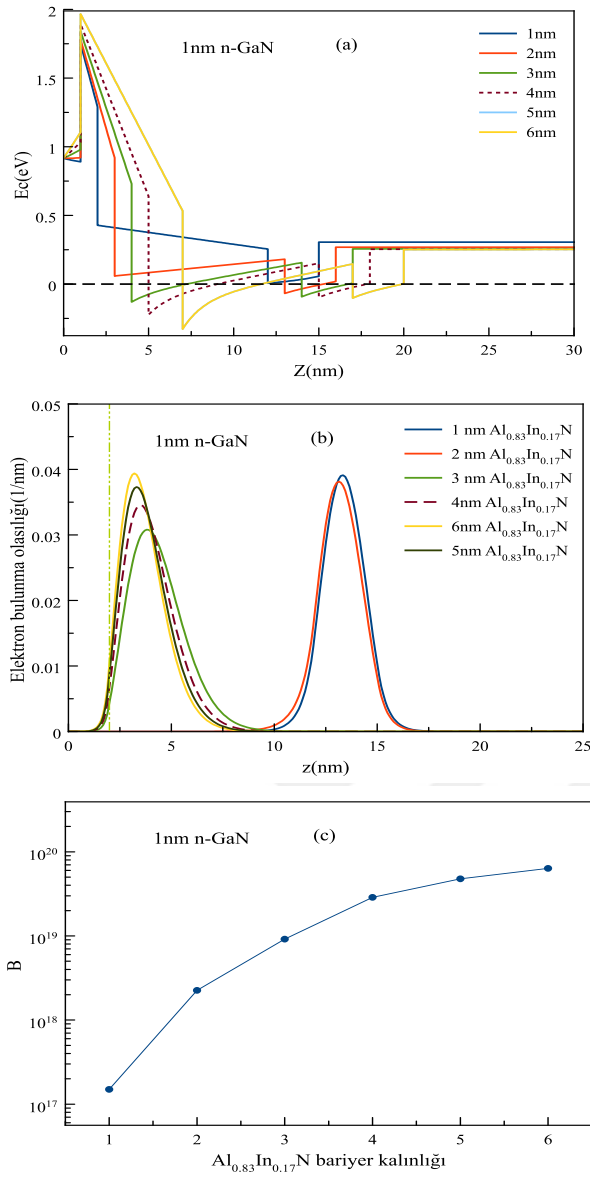
Şekil 5.58. 1-4 nm GaN kapak kalınlıkları için bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunlukları



Şekil 5.59. 1-4 nm GaN kapak kalınlıkları için AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak 2DEG bulunma olasılığı

### 5.9. n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN Ultraince Çokluyapılarında Verici Katkılı InGaN Arkabariyer ve AlInN Bariyer Katman Kalınlıklarının Etkisi

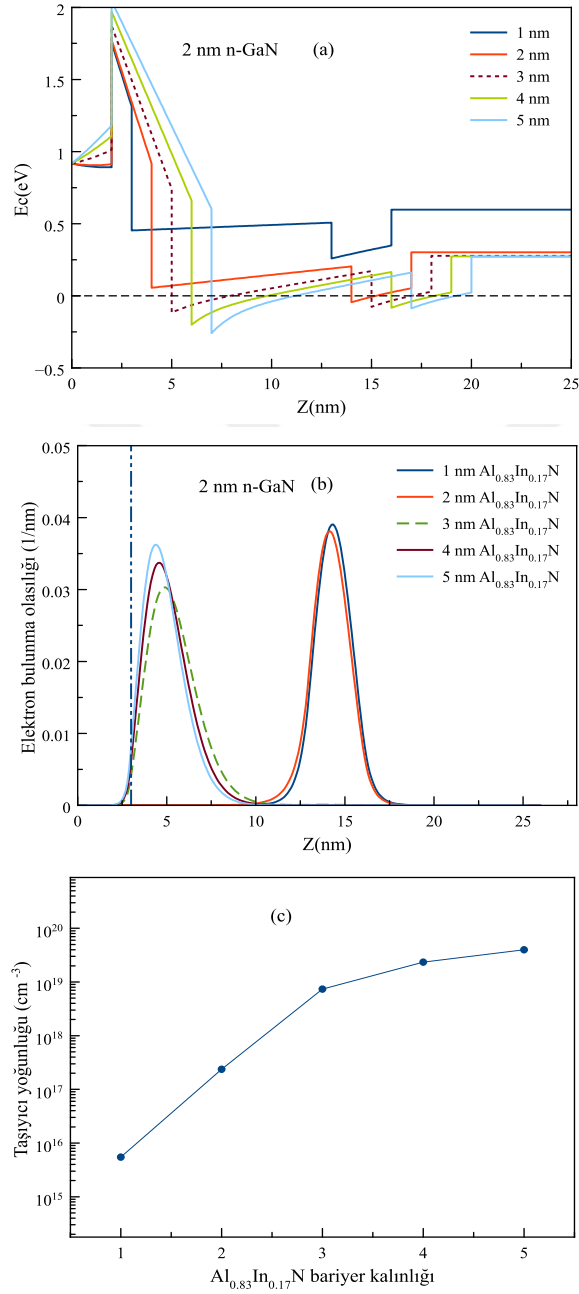
Şekil 5.60 a)'de 1 nm kapak kalınlığında AlInN bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluğunun değişimi görülmektedir. Farklı bariyer kalınlıkları için oluşan 2DEG bulunma olasılığı değişimleri Şekil 5.60 b)'de görülmektedir. Şekil 5.60 b)'ye göre 3 nm bariyer kalınlığını GaN tabakası içine doğru daha çok sızmış durumdadır ve dolayısıyla bu, arkaplan safsızlık saçılmasından daha çok etkilenebilir anlamına gelmektedir. Ayrıca 5 ve 6 nm bariyer durumu için arayüzeye yakın olduğu neden ile arayüzey bozukluğu saçılmasından çok etkilenebilir. Bu durumda en optimal durumun, bu iki saçılma mekanizmasından en az etkilenebilecek 4 nm bariyer kalınlıkları durum olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 5.60. 1 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

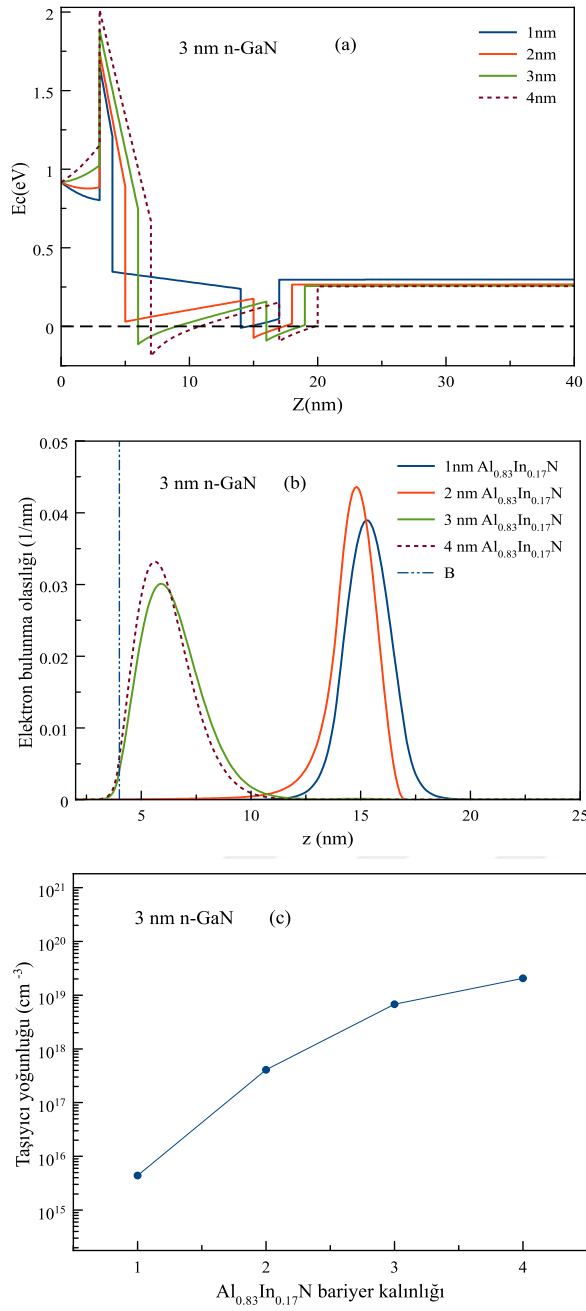
Şekil 5.61 a)'da 2 nm kapak kalınlıklarında iletkenlik bantın profili bariyer kalınlıklarına bağlı olarak görülmektedir. 1 ve 2 nm bariyer kalınlıklarında arayüzeyde oluşan potansiyel kuyu Fermi seviyesinin üzerinde olduğu için bu durumlardaki kuvantum kuyularında taşıyıcı birikimi söz konusu değildir. Farklı bariyer kalınlıkları için oluşan 2DEG bulunma olasılığı değişimleri Şekil 5.61 b)'de görülmektedir. Şekil 5.61 b)'ye göre 3 nm durumu için ise GaN tabakası saçılmasından ve arayüzey bozukluğu saçılmasından en az etkilenebilecek olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.61 c)'de 2 nm kapak kalınlığı için AlInN bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluklarında değişim görülmektedir. Ayrıca 4 ve 5 nm bariyer kalınlıklarında en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduklarına rağmen 2DEG

bulunma olasılığı hesaplamalarında arayüzeye çok yakındılar ve dolayısıyla arayüzey bozukluğu saçılmasında etkilenebilirler.



Şekil 5.61. 2 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

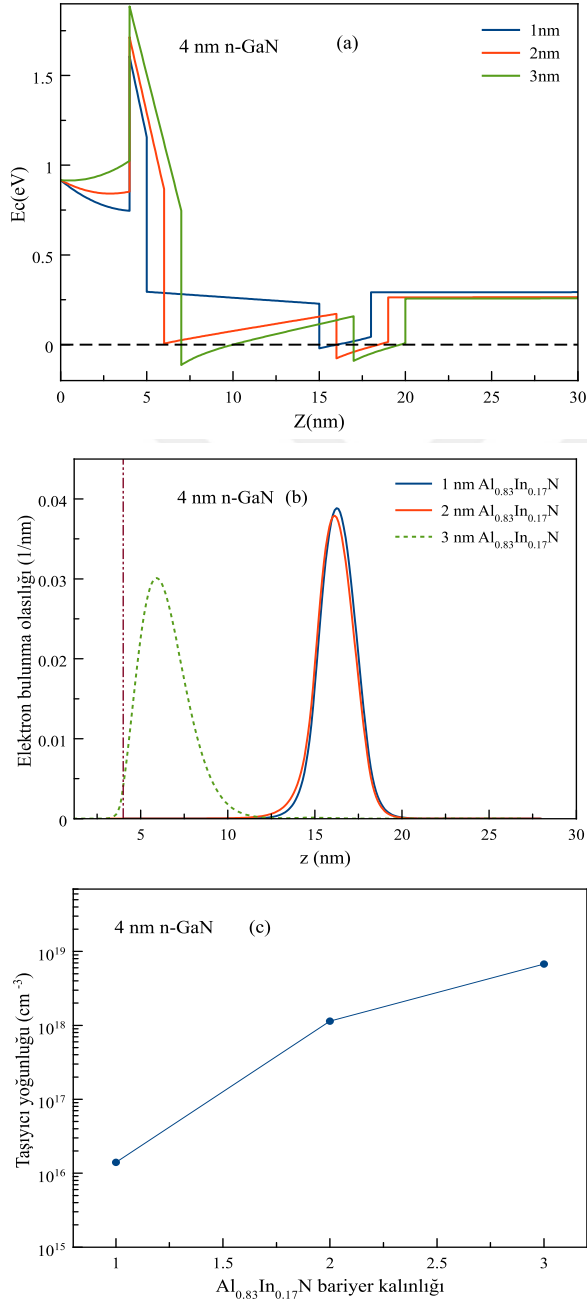
Şekil 5.62 a)'da 3 nm n-GaN kapak kalınlığı için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak iletkenlik bant yapısındaki değişim görülmektedir. 1 ve 2 nm AlInN bariyer kalınlığı durumlarında AlInN/GaN arayüzeyde potansiyel kuyu Fermi seviyesi üzerindedir. Bundan dolayı bu potansiyel kuyu içinde taşıyıcı birikimi meydana gelmez. Ancak InGaN arka bariyer ile GaN katmanı arasındaki arayüzeydeki potansiyel kuyu Fermi seviyesinin altındadır. Burada taşıyıcı birikmesinin olması beklenir. Şekil 5.62 b)'de farklı AlInN bariyer kalınlıkları için 2DEG bulunma olasılığındaki değişimleri göstermektedir. 1 ve 2 nm bariyer kalınlığı durumlarında elektronların dağılımlarının sadece InGaN/GaN arayüzeyinde olduğu görülmektedir. Bu kuyulardaki taşıyıcılar In alaşım kaynaklı alaşım saçılmasına maruz kaldıkları için devingelikleri oldukça düşük olacaktır. 3 nm ve 4 nm bariyer kalınlığındaki durumlar göz önüne alındığında ise elektronların GaN kanal içerisinde biriktikleri görülüyor. AlInN ve GaN arasındaki piezoelektrik kutuplanma daha güçlü olduğu için InGaN/GaN arayüzeyinde taşıyıcı birikimi olmadığı görülmektedir. 3 nm bariyer kalınlığı durumunda bulunma olasılığı tepe noktasının arayüzeyinden 4 nm bariyer kalınlığı durumuna göre daha uzakta olması bu yapıdaki elektronların safsızlık saçılmasından daha fazla etkilenebileceği anlamına gelmektedir [51]. Burada en optimal durum 4 nm bariyer durum, elektronlar diğer durumlara göre sınırlandırılmış durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.62 c)'de GaN kapak katmanı için AlInN bariyer kalınlığına bağlı taşıyıcı yoğunluklarının değişimi görülmektedir.



Şekil 5.62. 3 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

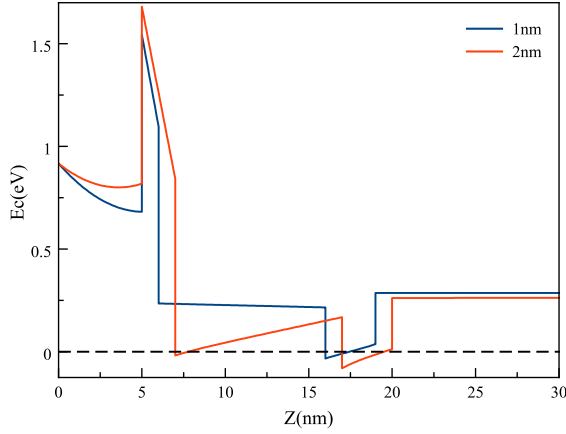
Şekil 5.63 a)'da 4 nm n-GaN kapak kalınlığı için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı olarak iletkenlik bant yapısındaki değişim görülmektedir. 1 ve 2 nm AlInN bariyer kalınlığı durumlarında AlInN/GaN arayüzeyde potansiyel kuyu Fermi seviyesi üzerindedir. Bundan dolayı bu potansiyel kuyu içinde taşıyıcı birikimi meydana gelmez. Ancak InGaN arka bariyer ile GaN katmanı arasındaki arayüzeydeki potansiyel kuyu Fermi seviyesinin altındadır. Burada taşıyıcı birikmesinin olması beklenir. Şekil 5.63 b)'de farklı AlInN bariyer kalınlıkları için 2DEG bulunma olasılığındaki değişimleri göstermektedir. 1 ve 2

nm bariyer kalınlığı durumlarında elektronların dağılımlarının sadece InGaN/GaN arayüzeyinde olduğu görülmektedir. Bu kuyulardaki taşıyıcılar In alaşım kaynaklı alaşım saçılmasına maruz kaldıkları için devingenlikleri oldukça düşük olacaktır.



Şekil 5.63. 4 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) elektron bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

Şekil 5.63 b)'de 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında 3 nm AlInN bariyer kalınlığında potansiyel kuyu oluşmaktadır bundan dolayı bu yapıda ve burum için 3 nm durumu optimal durum olarak söyleyebiliriz. Ayrıca 4 nm GaN kapak katmanı için farklı AlInN bariyer kalınlıklarına bağlı taşıyıcı yoğunluğunun değişimi Şekil 5.57 c)'de görülmektedir.

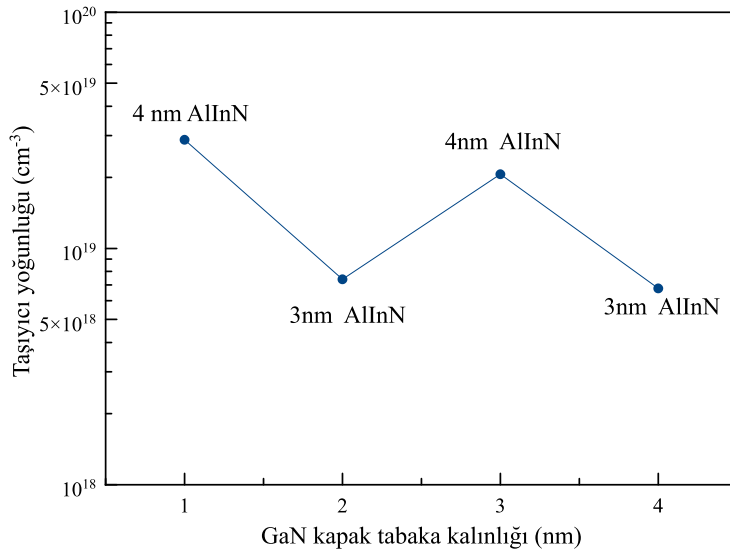


Şekil 5.64. 5 nm kapak kalınlığı için farklı bariyer kalınlıklarına bağlı iletkenlik bant profili

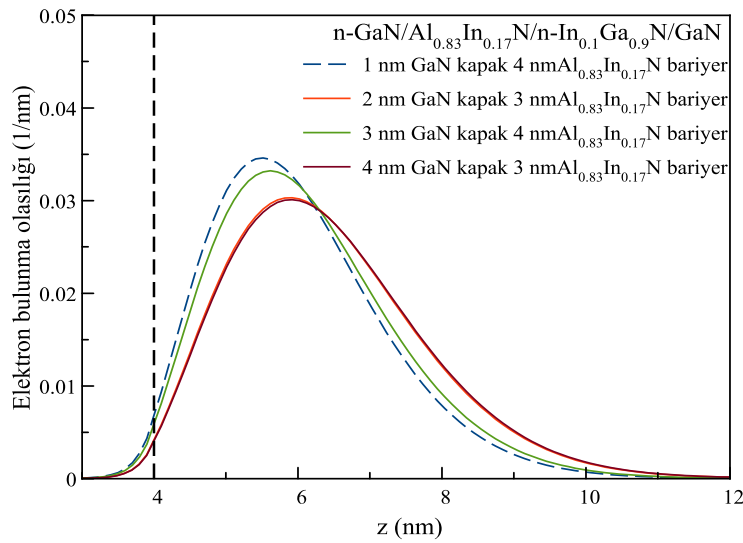
Şekil 5.64'te 5 nm kapak kalınlığında bariyer kalınlığına bağlı iletkenlik bant profili görülmektedir. 2 nm bariyer kalınlığında çok küçük bir potansiyel kuyu oluşumunu görülmektedir dolayısıyla taşıyıcı yoğunluğu çok düşüktür.

Farklı kapak katmanı kalınlıkları için yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katmanı katman kalınlığı için uygun durumlar elde edilmiştir. Elde edilen durumlar ait taşıyıcı yoğunluğu ve 2DEG bulunma olasılığı sırayla Şekil 5.65 ve Şekil 5.66'da gösterilmiştir. Buna göre Şekil 5.65'te taşıyıcı yoğunluğu değişimi görülmektedir ve Şekil 5.66'da göre 1 nm kapak katmanı kalınlığı ve 4 nm bariyer kalınlığı için bulunma olasılığı arayüzeye en yakın durum olduğu için bu durum arayüzey bozukluğu saçılmasından en çok etkilenecek durumdur. Ayrıca taşıyıcı yoğunluğunda Şekil 5.55'e göre diğerleri arasında en yüksek olması da arayüzey bozukluğu saçılmasını artırıcı bir faktördür. Bu nedenle bu yapıya ait elektron devingenliği diğer yapılara göre daha düşük olabilir. Diğer taraftan, 3 nm AlInN bariyer kalınlığı için 2 ve 4 nm GaN kapak katman kalınlığına sahip yapıların 2DEG bulunma olasılık tepe noktaları arayüzeyden oldukça uzaktır.

Bu yapılardaki elektronların arayüzey bozukluğu saçılmasından nispeten daha az etkilenebileceklerini söyleyebiliriz ama bulunma olasılıklarının kuyu içerisindeki dağılımının geniş olması GaN içindeki safsızlıkların elektron devingenliğini azaltmada olacağına işaret eder [51]. Bu durumda bu yapı grubu için en iyi çokluyapı 3 nm GaN kapak katman kalınlığı ve 4 nm AlInN bariyer katman kalınlığına sahip olduğu Şekil 5.65 ve Şekil 5.66'ya göre söylenebilir.



Şekil 5.65. 1-4 nm kapak kalınlıkları için taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi



Şekil 5.66. 1-4 nm kapak kalınlıkları için elektron bulunma olasılığının bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

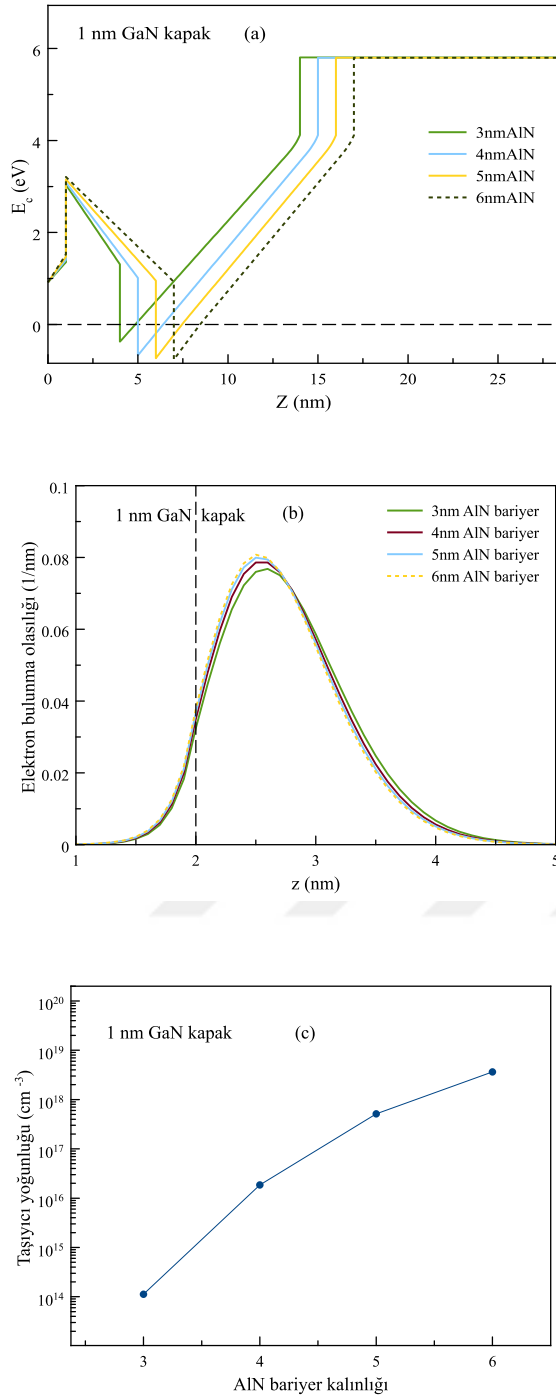
### 5.10. GaN/AlN/GaN/AlN Ultraince Çokluyapılarında AlN Bariyer ve GaN Kapak Katman Kalınlığının Etkisi

Bu tez dahilinde incelenen son yapı grubu olan GaN/AlN/GaN/AlN ultraince bariyerli çokluyapısına ait şematik gösterim Şekil 5.67’de görülmektedir.



Şekil 5.67. GaN/AlN/GaN/AlN ultraince bariyerli çoklu yapısının (Yapı10) şematiği

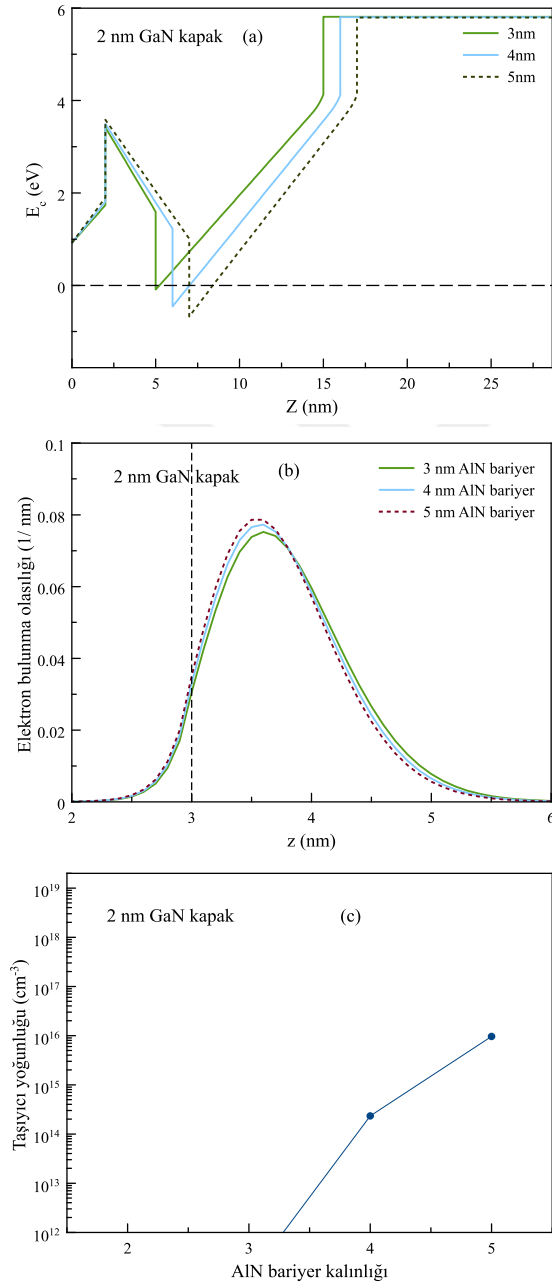
Şekil 5.68 a)’da 1 nm kapak kalınlığında iletkenlik bantın bariyer kalınlığına bağlı kuyu oluşmasını göstermektedir, dolayısıyla 3 nm bariyerden itibaren kuyu oluşması görülmektedir. Şekil 5.68 b)’de 2DEG elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında az bir değişim görülmektedir. İnce kapak tabakası kalınlığı için bariyer kalınlığına bağlı bulunma olasılıklarında bir değişim görülmemektedir. Bu nedenle bariyer tabakanın en ince durumu uygun durum olarak için seçilmiştir. Şekil 5.68 c)’de 1 nm kapak kalınlığında 6 nm bariyer kalınlığında taşıyıcı yoğunluğu elde edilmiştir.



Şekil 5.68. 1 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) 2DEG bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

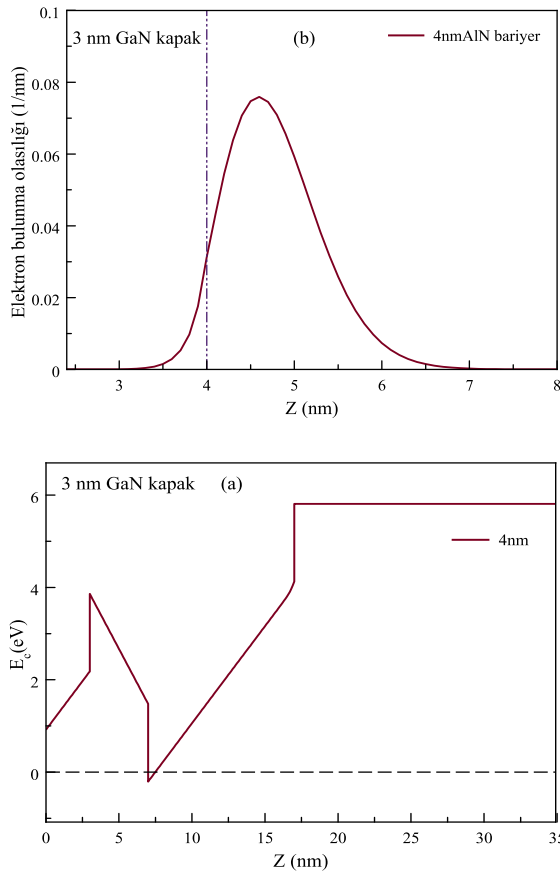
2 nm GaN kapak kalınlığında 3 nm bariyer kalınlığından itibaren kuyu oluşumu Şekil 5.69 a)'da görülmektedir. Şekil 5.69 b)'de ise 2DEG elektron bulunma hesaplamalarında 3 ve 4 nm bariyer kalınlıklarında 5 nm 'ye göre GaN tabakası içine doğru daha çok sızmış durumdadırlar ki bu da arkaplan safsızlık saçılmasından daha çok etkilenebilir anlamına gelmektedir.

Bu durumda en uygun durumun, saçılma mekanizmasından en az etkilenebilecek 5 nm AlN bariyer kalınlıkları durum olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.69 c)'de çok düşük taşıyıcı yoğunlukları görülmektedir.



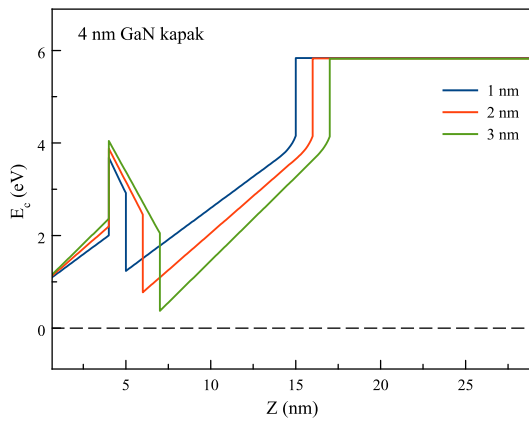
Şekil 5.69. 2 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) 2DEG bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunluğu

Şekil 5.70 a)'da 3 nm kapak kalınlığında bariyer kalınlıklarında iletkenlik bant profili elde edilmiştir. Elde edilen bant yapısında 4 nm bariyer kalınlığında kuyu oluşmaktadır. Elektron bulunma olasılığı hesaplamalarında 4 nm bariyer kalınlığında elde edilmiştir.



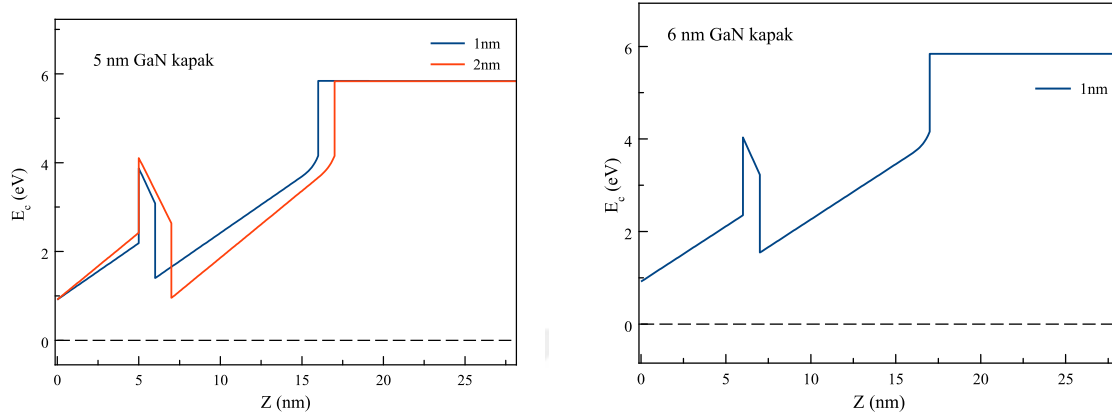
Şekil 5.70. 3 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı a) iletkenlik bant profili, b) 2DEG bulunma olasılığı ve c) taşıyıcı yoğunlukları

4 nm kapak kalınlığında farklı bariyer kalınlıklarında iletkenlik bantı elde edilmiştir fakat elde edilen bant yapısı Fermi seviyesinin altına düşmemektedir. Dolayısıyla kuvantum kuyusu oluşmamaktadır bu nedenle taşıyıcı yoğunluğu ve 2DEG elektron bulunma olasılığı bulunmamaktadır.



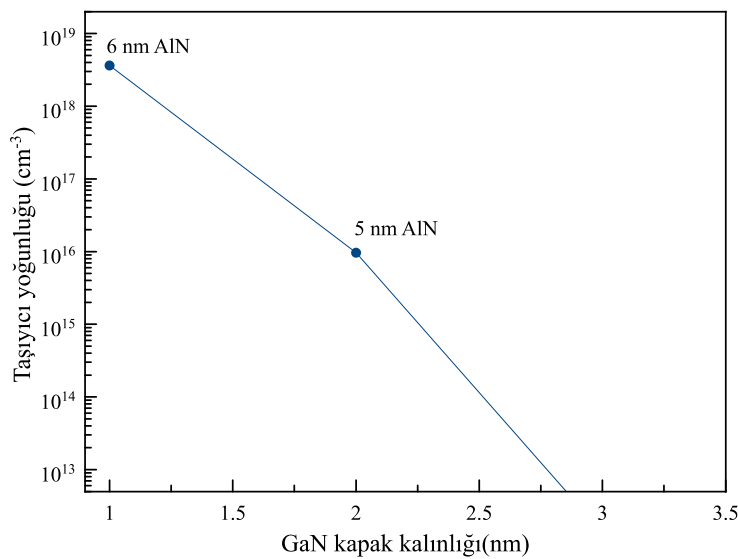
Şekil 5.71. 4 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı iletkenlik bant profili

Şekil 5.72’de elde edilen hesaplamalarda 5 ve 6 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı iletkenlik bant profili görülmektedir ve yapıda potansiyel kuyu oluşmamaktadır.

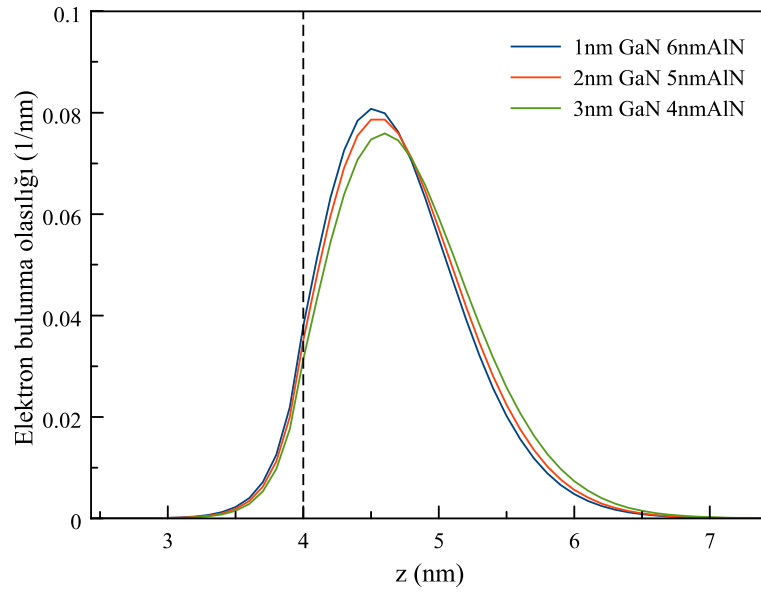


Şekil 5.72. 5 ve 6 nm GaN kapak kalınlığı için AlN bariyer kalınlığına bağlı iletkenlik bant profili

Farklı kapak kanlıklarında yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kapak katman kalınlığı için optimal durumlar elde edilmiştir. Bu elde edilen durumlar ait taşıyıcı yoğunluğu ve 2DEG bulunma olasılığı grafikleri sırasıyla Şekil 5.73 ve Şekil 5.74’te gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 5.73’te 1 nm GaN ve 6 nm AlN bariyer en yüksek taşıyıcı yoğunluğunu sağlamaktadır.



Şekil 5.73. 1 ve 2 nm kapak tabakası kalınlıklarında taşıyıcı yoğunluğunun bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi

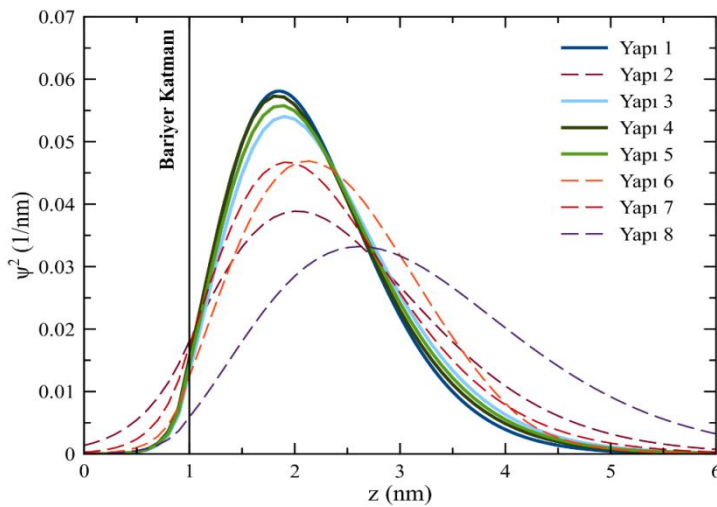


Şekil 5.74. 1-3 nm kapak tabakası kalınlıklarında 2DEG elektron bulunma olasılığı ve bariyer kalınlıklarına göre en optimize olanlar seçilmiştir

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı ultra-ince bariyer HEMT tasarımları yapılarak, polarizasyon gerilim ve sıcaklık değişkenlerinin de dahil olmadığı yüksek başarımlı kendini eşleyebilen doğrusal olmayan 1-boyutlu Schrödinger-Poisson denklemlerini kullanılarak yaklaşık olarak büyütülen n-GaN/InAlN/AlN/GaN, n-GaN/AlGaN/GaN, n-GaN/AlN/GaN, GaN/AlN/GaN, GaN/n-AlN/GaN, n-GaN/AlInN/InGaN/GaN, n-GaN/AlN/AlInN/GaN, n-GaN/InAlN/GaN/p-InGaN/GaN, n-GaN/InAlN/GaN/n-InGaN/GaN ve GaN/AlN/GaNQw/AlN yapıların katman kalınlıklarına bağlı olarak 2DEG ait iletkenlik bant profiline kuyu oluşumu, elektron bulunma olasılıkları ve taşıyıcı yoğunluklar uzaysal dağılımları gibi özellikler incelendi. İncelenen çoklu yapılar farklı kapak, bariyer kalınlıklarına ve farklı katkı miktarına göre hesaplandı.

Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümleri kullanılarak elde edilen toplam 8 en iyileştirilmiş çokluyapı için hesaplanan taşıyıcı yoğunlukları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Ayrıca bu en iyileştirilmiş çokluyapıları için 2DEG bulunma olasılıklarının dağılımının kıyaslanması Şekil6.1’de gösterilmiştir. Bu verilerin ışığında gelecek GaN temelli ultraince çokluyapılara dayanan aygıt incelemeleri için yüksek başarımlı olabilecek 4 ultraince bariyerli çokluyapı öne sürülmüştür.



Şekil 6.1. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen en iyileştirilmiş çokluyapılar için bulunma olasılığı. Kalın çizgiler deneysel çalışmalar için önerilebilecek en iyi çokluyapıları göstermektedir

Çizelge 6.1. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen her bir yapı grubundan seçilen optimize çokluyapıların taşıyıcı yoğunluğu

| Yapı No | Yapı                                      | Taşıyıcı Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ ) |
|---------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Yapı 1  | n-GaN (2 nm)/InAlN (3 nm)/AlN/GaN         | $5,51 \times 10^{20}$                   |
| Yapı 2  | n-GaN (2 nm)/AlGaIn (4 nm)/GaN            | $3,72 \times 10^{19}$                   |
| Yapı 3  | n-GaN (2 nm)/AlN (4 nm)/GaN               | $2,75 \times 10^{20}$                   |
| Yapı 4  | GaN (1 nm)/AlN (4 nm)/GaN                 | $3,15 \times 10^{20}$                   |
| Yapı 5  | GaN (2 nm)/n-AlN (4 nm)/GaN               | $2,96 \times 10^{20}$                   |
| Yapı 6  | GaN (2 nm)/InAlN (5 nm)/InGaIn (3 nm)/GaN | $7,94 \times 10^{19}$                   |
| Yapı 7  | n-GaN (2nm)/AlN (3nm)/InAlN (2nm)/GaN     | $3,90 \times 10^{19}$                   |
| Yapı 8  | n-GaN(3nm)/InAlN(4nm)/GaN/n-InGaIn/GaN    | $2,80 \times 10^{19}$                   |

Çizelge 6.1'deki verilere göre en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olan Yapı1, Şekil 6.1'e göre aynı zamanda bulunma olasılığı en dar ve kuyu içinde elektron sınırlamasının en iyi olduğu yapı olarak görülüyor.

Yapı 4'ün bulunma olasılığı da Yapı 1'e oldukça benzemektedir ancak taşıyıcı yoğunluğu açısından Çizelge 6.1'e göre daha düşük taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. Yapı 3 ve Yapı 5 taşıyıcı yoğunlukları yüksek olan ve bulunma olasılığı grafiğine göre üçgenimsi kuvantum kuyu içindeki elektron sınırlamaları iyi olan diğer yapılardır. Yapı 2, Yapı 7 ve Yapı 8 için taşıyıcı yoğunlukları oldukça düşüktür diğer yapılar göre. Bu üç yapı arasında Yapı 2 ve Yapı 8 için Şekil6.1'de olduğu gibi elektron sınırlamasının oldukça kötü olduğu görülebilir. Yapı 6 ise elektron sınırlaması açısından Yapı 7 ile benzerliklere sahiptir ancak InGaIn kuyu içermesi sonucunda alaşım saçılmasından dolayı elektron hareketliliği daha düşük olacaktır. Bu durumda, bu tez dahilindeki 1 boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre GaN temelli ultraince bariyerli çokluyapılara dair gelecek deneysel çalışmalar için önerilecek çokluyapıların listesi şu şekildedir: Yapı 1, Yapı 3, Yapı 4, Yapı 5. Dolayısıyla elde edilen ultraince bariyerli çokluyapıların 1 boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson çözümlerine dayalı hesaplaması sonuçlarına göre bu tez çalışmasında deneysel çalışmalara

yönelik yapıların katkı tipi, GaN kapak kalınlıkları ve bariyer kalınlıklarına bağılı olarak en optimal durumlar ve önerilen yapılar Çizelge 6.2’de listelenmiştir.

Çizelge 6.2. Bir boyutlu kendini eşleyebilen Schrödinger-Poisson denklemlerinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre önerilen dört tane ultraince bariyerli çokluyapı

| Yapı No | Koruma Katmanı | Bariyer Katmanı                                   | Tampon Katmanı | Katkı Yoğunluğu( $\text{cm}^3$ ) | Taşıyıcı Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ ) |
|---------|----------------|---------------------------------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| 1       | n-GaN (2 nm)   | $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ (3 nm) | GaN            | $1 \times 10^{20}$               | $5,51 \times 10^{20}$                   |
| 3       | n-GaN (2 nm)   | AlN (4 nm)                                        | GaN            | $1 \times 10^{19}$               | $2,75 \times 10^{20}$                   |
| 4       | GaN (1 nm)     | AlN (4 nm)                                        | GaN            | -                                | $3,15 \times 10^{20}$                   |
| 5       | GaN (2 nm)     | n-AlN (4 nm)                                      | GaN            | $1 \times 10^{19}$               | $2,96 \times 10^{20}$                   |



## KAYNAKLAR

1. Ruterana, P., Albercht, M. and Neugebauer, J. (2003). *Nitride Semiconductors, Handbook on Materials and Devices* (first Edition). New York: **Wiley-VCH GmbH&Co. KGaA**, Weinheim, 1-2.
2. Mishra, U. K., Parikh, P. and Wu, Y. F. (2002). AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications. **Proceeding of IEEE**, 90(4), 1022-1031.
3. Wu, Y. F., Kapolnek, D., Ibbetson, J. P., Parikh, P., Keller, B. P., and Mishra, U. K. (2001). Very- High Power Density AlGaIn/GaN HEMTs. **IEEE Transactions on Electronic Devices**, 48(3), 586-590.
4. Millan, J., Godignon, P. and Tomas, A. P. (2012). Wide Bant Gap Semiconductor Devices for Power Electronics. **ATKAF**, 53(2), 107-116.
5. Trew, R. J. (2002). SiC and GaN Transistors- Is Thereone Winner for Microwave Power Applications?. **Procedings of The IEEE**, 90(6), 1032-1047.
6. Chow, T. P., Khemka, V., Fedison, J., Ramungul, K., Matocha, K., Tang, Y., and Gutmann, R. J. (2000). SiC and GaN bipolar power devices. **Solid-State Electronics**, 44(2), 277-301.
7. Kramer, J. C. M. (2006). *Gallium Nitride-based Microwave High- Power Heterostructure Field- Effect Transistors*, Doktora Tezi, Eindhoven University of Technology, Hollanda, 7-9.
8. Lundskog, A. (2012). *Controlled Growth Of Hexagonal GaN Pyramids And InGaIn QDs*, Doktora Tezi, Linköping University, İsveç, 15, 19-20.
9. Yu, E. T., Sullivan, G. J., Asbeck, P. M., Wang, C. D., Qiao, D., and Lau, S. S. (1997). Measurement of Piezoelectrically induced charge in GaIn/AlGaIn heterostructures field-effecttransistors. **Applied Physics Letters**, 71(19), 2794-2796.
10. Warren, J. C., Parson, J. B., and Crew, M. C. (1932). NitrogenCompounds of Gallium. **The Journal of Physical Chemistry**, 36(10), 2651-2654.
11. Maruska, H. P., and Tietjen., J. J. (1969). The Preparation and Properties of Vapor-Deposited Single-Crystal-Line GaIn. **Applied Physics Letters**, 15(10), 327-329.
12. Pankove, J. I., Maruska, H. P., and Berkeyheiser, J. E. (1970). Optical absroption of GaIn. **Applied Physics Letters**, 17(5), 194-198.
13. Bloom, S. (1971). Bant structures of GaIn and AlIn. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 32(9), 2027-2032.
14. Ilegems, M., and Montgomery, H. C. (1973). Electrical properties of n-type vapor-grown gallium nitride. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 34(5), 885-895.

15. Akasai, I., Amano, H., Kito, M., and Hiramatsu, K. (1991). Photo luminescence of Mg-doped p-type GaN and electroluminescence of GaN p-n junction LED. *Journal of Luminescence*, 49(2), 666-670.
16. Khan, A. M., Kuznia, J. N., VanHove, J. M., Pan, N., and Carter, J. (1992). Observation of a two-dimensional electron gas in low pressure metal organic chemical vapor deposited GaN-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterojunctions. *Applied Physics Letters*, 60(24), 3027-3029.
17. Khan, A. M., Vankove, J. M., Kuznia, J. N., and Olson, D. T. (1991). High electron mobility GaN/AlGa<sub>x</sub>N heterostructures grown by low-pressure metal organic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 58(21), 2408-2410.
18. Bernardini, F., Fiorentini, V., Vanderbilt, D. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56(16), R10024-R10027.
19. Ambacher, O., Foutz, B., Smart, J., Shealy, J., Weimann, N., Chu, K., Murphy, M., Sierakowski, A., Dimitrov, R., Mitchell, A., Stutzmann, M. (2000). Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa<sub>x</sub>N/GaN heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 87(334), 334-344.
20. Masnasevit, H. M., Erdmann, F. M., and Simpson W. I. (1971). The use of metal organics in the preparation of semiconductor Materials IV. The nitrides of Aluminum and Gallium. *Journal of The Electrochemical Society*, 118(11), 1864-1868
21. Mimura, T., Hiyamizu, T., Fujii, T., and Nanbu, K. (1980). A New field-Effect Transistor with selectively doped GaAs/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunctions. *Japanese Journal of Applied Physics*, 19(5), L225-L227.
22. Khan, M. A., Bhattarai, A., Kuznia, J. N., and Olson, D. T. (1993). High electron mobility transistor based on a GaN-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterojunction. *Applied Physics Letters*, 63(9), 1214-1215.
23. Khan, M. A., Kuznia, J. N., Olson, D. T., Schaff, W. J., Burm, J. W., and Shur, M. S. (1994). Microwave performance of a 0.25 μm gate AlGa<sub>x</sub>N/GaN heterostructures field effect transistor. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1121-1123.
24. Wu, Y. F., Keller, B. P., Keller, S., Kapolnek, D., Denbaars, S. P., and Mishra, U. K. (1996). Measured microwave power of AlGa<sub>x</sub>N/GaN MODFET. *IEEE Electron Device Letters*, 17(9), 455-457.
25. Kohn, E., Daumiller, I., Schmid, P., Nguyen, N. X., and Nguyen, C. N. (1999). Large signal frequency dispersion of AlGa<sub>x</sub>N/GaN heterostructures field effect transistors. *Electronics Letters*, 35(12), 1022-1024.
26. Sheppard, S. T., Doverspike, K., Pribble W. L., Allen, S. T., Palmour, J. W., Kehias, L. T., and Jenkins, T. J. (1999). High power microwave GaN/AlGa<sub>x</sub>N HEMT's on semi-insulating silicon carbide substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 20(4), 161-163.

27. Green, B. M., Chu, K. K., Chumbes, M., Smart, J. A., Shealy, J. R., and Eastman, L. F. (2000). *IEEE Electron Device Letters*, 21(6), 268-270.
28. Cai, Y., Zhou, Y., Chen, K. J., and Lau, K. M. (2005). High-performance enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMT using fluoride-based plasma treatment. *IEEE Electron Device Letters*, 26(7), 435-437.
29. Lidow, A., Strydom, J., Rooij, M., and Reusch, D. (2015). *GaN transistors for Efficient power conversion* (Second Edition). New York: Wiley, 2.
30. Connie, A. T. (2015). *Characterization of Al(Ga,In)N Nanowire Heterostructures and Applications in Light Emitting Diodes*, Doktora Tezi, McGill University Faculty of Engineering, Montreal, 1-9.
31. Suzuki, M., and Uenoyama, T. (1996). Strain effect on electronic and optical properties of GaN/AlGaIn quantum-well lasers. *Journal of Applied Physics*, 80(12), 6868-6874.
32. Kim, K., Walter, R., Lambrecht, L., and Segal B. (1997). Effective masses and valence-band splittings in GaN and AlN. *Physical Review B*, 56(12), R7363-7375.
33. Bernardini, F., Fiorentini, V., Vanderbilt, D. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56(16), R10024-R10027.
34. Morkoç, H. (2008). *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices vol. 1: Material properties, Physics and Growth* (First Edition). New York: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 30-40, 30-84, 243.
35. Simms, R. J. T., Pomeroy, J. W., Uren, M. J., Martin, T., and Kuball, M. (2008). Current collapse in AlGaIn/GaN transistors studied using time-resolved photoluminescence. *Applied Physics Letters*, 93(203510), 203510-1-203510-3.
36. Zoroddu, A., Bernardini, F., and Ruggerone, P. (2001). First-principles prediction of structure, energetics, formation enthalpy, elastic constants, polarization, and piezoelectric constants of AlN, GaN and InN: Comparison of local and gradient-corrected density-functional theory. *Physical Review B*, 64(4), 045208, 1-045208, 6.
37. Chung, S. L. (1995). *Physics of Optoelectronic Devices* (First Edition). New York: Wiley- Interscience, 438.
38. AYDIN, B. (2013). *GaN Tabanlı Heteroeklem Yapıların Magnetotransport Özellikleri*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22-26.
39. Vurgaftman, I., and Meyer, J. (2004). Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 94(6), 3675-3696.
40. Yim, W. M., Stofko, E. J., Zanzucchi, P. J., Pankove, J. I., Ettenberg, M., and Gilbert, S. L. (1973). Epitaxially grown AlN and its optical band gap. *Journal of Applied Physics*, 44(1), 292-296.

41. Turton, T. (2005). *Katıların Fiziği*. (Çev. Prof. Dr. Yoğurtçu, Y. K.). İstanbul: Aktif Yayınevi. 173.
42. Saura, A., Permeroy, J., Kuball, M., Falk, A., Albright, G., Uren, M. J., and Martin, T. (2008). Raman-IR micro-thermography tool for reliability and failure analysis electronic devices. **IEEE, 2008 15th international symposium on the physical and failure analysis of integrated circuits**, Singapore, 1-5.
43. Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weimann, N. G., Murphy, C. M., Schaff, W. J., and Eastman, L. F. (1999). Two- dimensional electron gases induced by spontaneous polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. **Journal of Applied Physics**, 85(6), 3222-3233.
44. Balaz, D. (2010). *Current Collapse and Device Degradation in AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors*, Doktora Tezi, University of Glasgow, Birleşik Krallık, 30.
45. Eastman, L. F., Tilak, V., Smart, J., Green, B. M., Chumbes, E. M., Dimitrov, R., Kim, H., Ambacher, O. S., Wiemann, N., Prunty, T., Murphy, M., Schaff, W. J., and Shealy, J. R. (2001). Undoped AlGaIn/GaN HEMTs for microwave power amplification. **IEEE Transaction on Electron Devices**, 48(3), 479-485.
46. Liu, H. Q., Zhou, J. J., Dong, X., Chen, T. S., Chen, C. (2010). InAlN/AlN/GaN HEMTs on sapphire substrate. **Microwave and Millimeter Wave Technology, International Conference on**, Çin, 2059-2062.
47. Yu, E. T., Dang, X. Z., Yu, L. S., Qiao, D., Asbeck, P. M., and Lau, S. S. (1998). Schottky barrier engineering in III-V nitrides via the piezoelectric effect. **Applied Physics Letters**, 73(13), 1880-1882.
48. Gökhan, A. (2012). *Çoklu Kuantum Kuyu Arkabariyer Yapısına Sahip AlGaIn/AlN/GaN-Temelli (Q=Ga,In) Transistörlerde 2-Boyutlu Taşıyıcıların Özelliklerinin Hesaplamalı İncelenmesi*, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15.
49. Morkoç, H. (2009). *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices vol.3: GaN-based Optical and Electronic Devices*, (First Edition). New York: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 358.
50. Ashcroft, N. W., and Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*, (First Edition). California: Harcourt College Publishers, 612.
51. Atmaca, G., Narin, P., Lisesivdin, S. B., Kasap, M., and Lisesivdin, B. S. (2014). Electron transport properties of two dimensional electron gas in  $\text{Be}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$  heterostructures. **Philosophical Magazine**, 95(1), 79-89.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı,adı :AL ABBAS, Jangeez  
 Uyuğu :IRAK  
 Doğum tarihi ve yeri :01.11.1986, IRAK  
 Medeni hali :Evli  
 Telefon :0(539)417 11 35  
 e-mail :jangizafandy@gmail.com



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                    | Mezuniyet tarihi |
|---------------|----------------------------------|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi/Fizik          | Devam Ediyor     |
| Lisans        | Musul Üniversitesi /Fizik eğitim | 2008             |
| Lise          | Telafer Erkek Lisesi             | 2004             |

### Yabancı Dil

İngilizce, Arapça, Türkçe

### Bildiriler

- Al abbas, J. M., Narin, P., Atmaca, G., Kutlu, E., Lişesivdin, S. B., and Lişesivdin B. S. (2016, 22 Nisan). The effect of dopping in different layers on 2DEG for ultrathin AlN/GaN heterostructures. *ADIM FİZİK V*, Eskişehir, 164.
- Al abbas, J. M., Narin, P., Atmaca, G., Kutlu, E., Lişesivdin, S. B., and Lişesivdin B. S. (2016). Two dimensional electrongas in ultrathin AlInN/GaN heterostructures with p-type and n-type InGaN back-barriers. *ADIM FİZİK V*, Eskişehir, 163.
- Kutlu E., Narin P., Atmaca G., Al abbas J. M., Lişesivdin B. S., and Lişesivdin S. B. (2016, 22 Nisan). Li katkılı zigazag kenarlı grafen nano şeritlerin elektronik özelliklerinin DFT ile incelenmesi. *ADIM FİZİK V*, Eskişehir, 151.



*GAZİ GELECEKTİR..*