

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**HEMETS YAPILARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE  
KANAL MODÜLASYONU AÇISINDAN MODELLENMESİ**

**YASİN DOĞAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOÇ. DR. OSMAN ÇİÇEK**

**AĞUSTOS - 2022**

**KASTAMONU**

## TEZ ONAYI

**Yasin DOĞAN** tarafından hazırlanan “**Hemts Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Kanal Modülasyonu Açısından Modellenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **12.08.2022** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

<b>Danışman</b>	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK Kastamonu Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	Dr. Öğr. Üyesi Faruk ERKEN Kastamonu Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK Karabük Üniversitesi	.....

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

Enstitü Müdürü V. Doç. Dr. Osman ÇİÇEK .....

## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*

**Yasin DOĞAN**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### HEMTS YAPILARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KANAL MODÜLASYONU AÇISINDAN MODELLENMESİ

YASİN DOĞAN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI  
DANIŞMAN: DOÇ. DR. OSMAN ÇİÇEK

Yüksek elektron hareketli transistör (HEMT) temelli mikroelektronik teknolojilerdeki gelişmeler; yüksek güç yoğunluklu uygulamalar ve güç amplifikatörlerinin yanı sıra mikrodalga ve radyo frekansı (RF) elektroniğinde büyük ilerlemelere yol açmıştır. Elektronik yapılarda tercih edilen geniş bant aralıklı (WBG) yarı iletken malzemelerin özellikleri ve iki boyutlu elektron gazı (2-DEG) kanallarının avantajı nedeniyle, HEMT aygıtlarını diğer yarı iletken cihazlara göre daha verimli kılmıştır. Galyum arsenit (GaAs) veya indiyum fosfat (InP) gibi WBG malzemeleri, yüksek kazançlı ve yüksek frekanslı uygulamalar için HEMT yapıları üretmek için kullanılırken, galyum nitrid (GaN) temelli HEMT aygıtlar, üstün özellikleri nedeniyle yüksek güç uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamak için büyük bir değere sahiptir. Diğer yandan, geleceğin güç elektroniği uygulamalarının temel yarı iletken aygıtı olarak görülen GaN tabanlı HEMT aygıtlar üzerinde kırılma gerilimi ( $V_{br}$ ) ve çalışma karakteristiklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar önemlidir. HEMT yapıların farklı tasarımda ve kanal modülasyonunda tasarlanması elektronik özellikleri açısından önemlidir. Bu nedenle, bu tez çalışmada güç cihazları için kapı (gate)- akaç (drain) arası mesafe ( $L_{gd}$ )'nin belirlenen yapı üzerinde elektronik özelliklerine etkisi ve farklı kapı aralıklarında  $V_{br}$ , akım voltaj ( $I_{ds}-V_{gs}$ ), çalışma direnci ( $R_{on}$ ) gibi karakteristikleri belirlendi. Belirlenen yapı için akaç ve kapı arası mesafe,  $0.8\mu m$  ile  $30\mu m$  arasında değiştirilerek sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kanal modülasyonu açısından elektronik özellikleri analiz edildi.

**ANAHTAR KELİMELER:**Kanal Modülasyonu, HEMTs, Sonlu Elemanlar Yöntemi, SimuApsys, Crosslight, Mikroelektronik Aygıtlar

Ağustos 2022, 93 Sayfa

## ABSTRACT

### MSC THESIS

#### MODELING OF HEMTS STRUCTURES WITH FINITE ELEMENT METHOD IN TERMS OF CHANNEL MODULATION

YASİN DOĞAN

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. OSMAN ÇİÇEK

Advances in microelectronic technologies based on high electron-moving transistors (HEMT) have led to major advances in microwave and radio frequency (RF) electronics, as well as in high-power density applications and power amplifiers. Thanks to the properties of wide band gap (WBG) semiconductor materials preferred in electronic structures and the advantage of two-dimensional electron gas (2-DEG) channels, HEMT devices have become more efficient compared to other semiconductor devices. WBG materials such as gallium arsenide (GaAs) or indium phosphate (InP) are used to produce HEMT structures for high gain and high frequency applications, whereas HEMT devices based on gallium nitride (GaN), due to their superior properties, are of great value in meeting the needs of high power applications. On the other hand, studies on improving the breakdown voltage ( $V_{br}$ ) and operating characteristics of GaN-based HEMT devices, which are regarded as the basic semiconductor devices of future power electronics applications, are important. Designing HEMT structures in different design and channel modulation is important in terms of their electronic properties. Therefore, in this thesis, the effect of gate-drain distance ( $L_{gd}$ ) on the electronic properties of the determined structure in power devices and its characteristics such as  $V_{br}$ , current voltage ( $I_{ds}-V_{gs}$ ) and operating resistance ( $R_{on}$ ) at different gate intervals were determined. For the determined structure, the distance between the drain and the gate was changed between  $0.8\mu\text{m}$  and  $30\mu\text{m}$ , and the electronic properties were analyzed in terms of channel modulation using the finite element method.

**KEYWORDS:** Channel Modulation, Refraction Voltage, HEMTs, Finite Element Method, 3D APSYS, SimuApsys, Crosslight, Microelectronic Devices

August 2022, 93 Page

## TEŐEKKÖR

Tezimin bilim dűnyasına hizmet yolunda hazırlanmasında ve tűm yűksek lisansım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemededen her an yanımda olan deęerli danıőmanım Sayın Doę. Dr. Osman IEK hocama, deęerli eőim Hatice Kűbra DOęAN'a, prenseslerim Zeynep ve Beyza'ya teőekkűrű bir borę bilirim.

Yasin DOğAN

Kastamonu, 2022

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>ii</b>
<b>TAAHHÜTNAME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>13</b>
<b>2. KURAMSAL BİLGİLER</b> .....	<b>16</b>
2.1 Yarı İletkenler .....	16
2.2 GaN Malzeme Özellikleri .....	18
2.3 GaN Temelli Yarı İletken Cihaz Uygulamaları .....	20
2.3.1 Radyo Frekanslı Güç Amplifikatörü Uygulaması .....	22
2.3.2 Güç Elektroniği Anahtarlama Uygulaması.....	24
<b>3. HEMT YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ</b> .....	<b>26</b>
3.1 Kendiliğinden Kutuplanma .....	26
3.2 Piezoelektrik Kutuplanma .....	27
3.3 Heteroyapılar ve 2-DEG Oluşumu .....	27
3.4 HEMT Aygıt Çalışma Prensibi .....	35
3.5 GaN HEMT .....	36
3.6 HEMT Tabanlı Yarı İletken GaN'lerin Kırılma Voltajı İyileştirmesi .....	37
3.6.1 Kırılma Voltajına Parametrelerin Etkisi.....	37
3.6.2 Farklı Yarı İletken Malzemelerle HEMT'lere Genel Bakış .....	39
<b>4. YÖNTEM VE SİMULASYON</b> .....	<b>42</b>
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	42
4.1.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları .....	43
4.1.3.1 Sınır koşullarının belirlenmesi .....	43
4.1.3.2 Sonlu eleman ağının seçilmesi .....	44
4.2 Elektrik Alan Problemleri için Maxwell Denklemleri .....	45
4.3 Elektrik Alan Problemleri için Sonlu Elemanlar Denklemlerinin Yazılması .....	47
4.2 Modelleme ve Benzetim .....	48
4.4 Crosslight APSYS 2021 Yazılımı ve Çalışma Alanları .....	50
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>55</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİ</b> .....	<b>83</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>93</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Yasak enerji bant aralıkları .....	17
Şekil 2.2 $n$ ve $p$ katkılama sonrasında $E_G$ gösterimi .....	17
Şekil 2.3 Ga yüzü ve N yüzü GaN kristal yapısı .....	20
Şekil 2.4 Yarı iletken cihazı, eşleşen ağları ve yükü gösteren genel güç amplifikatörü şeması .....	22
Şekil 2.5 Tipik bir güç amplifikatörü uygulamasında akım-gerilim düzlemi ve yük hattı salınımı .....	23
Şekil 2.6 Akım-gerilim ilişkisi ve cihazın açık direnci .....	24
Şekil 3.1 Kendiliğinden polarizasyon durumu .....	26
Şekil 3.2 Piezoelektrik polarizasyon durumu .....	27
Şekil 3.3 Farklı bant aralığı enerjilerine sahip iki yarı iletkenlerden oluşan bir heteroeklem yapısı .....	28
Şekil 3.4 Ga- ve N-yüz gerilmiş ve gevşemiş AlGaN/GaN heteroyapıları için kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyonun yönlerini ve karşılık gelen polarizasyon kaynaklı tabaka yük yoğunlukları .....	31
Şekil 3.5 AlGaN/GaN heteroyapısının iletim bandını gösteren şema .....	33
Şekil 3.6 AlGaN/GaN iki boyutlu elektron gazının iletkenlik bandı gösterimi .....	34
Şekil 3.7 Fiziksel büyüklüklerin gösterilmesi; $L_{sd}$ : Kaynak-Akaç Uzunluğu, $L_{gs}$ : Kapı-Kaynak Uzunluğu, $L_{gd}$ : Kapı-Akaç Uzunluğu .....	38
Şekil 3.8 Si/SiGe kanallı MOSFET için farklı kanal uzunluklarında NBTI bozulmasının yüksek sıcaklık ve negatif sapma üzerindeki etkileri a) I-V karakteristiklerinin bozulması ve b) $g-V_g$ özellikler .....	39
Şekil 4.1 İki boyutlu sonlu eleman örnekleri .....	44
Şekil 4.2 Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri .....	45
Şekil 4.3 Yapının Mesh Halinin Görünümü .....	51
Şekil 5.1 GanHemt Yapısı Görünümü .....	57
Şekil 5.2 $R_{on}$ Eğrisi Grafikleri .....	58
Şekil 5.3 Eşik Gerilim Değer Grafikleri .....	61
Şekil 5.4 Akım Voltaj Grafikleri .....	65
Şekil 5.5 Kırılma Voltaj Grafikleri .....	69
Şekil 5.6 Enerji Bant Grafikleri .....	76
Şekil 5.7 Diferansiyel Potansiyel Grafikleri .....	76
Şekil 5.8 Elektriksel Alan Grafikleri .....	80

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa

Tablo 2.1 RF ve güç uygulamaları için farklı cihaz teknolojilerinin ilgili parametrelerinin malzeme parametrelerinin karşılaştırılması .....	19
Tablo 3.1 HEMT yarı iletken malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması .....	39
Tablo 4.1 Maxwell denklemlerinde kullanılan semboller.....	46

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

<b>Al</b>	: Aliminyum
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Oksit
<b>AlGaN</b>	: Alüminyum Galyum Nitrür
<b>AlN</b>	: Aliminyum Nitrür
<b>As</b>	: Arsenik
<b>B</b>	: Manyetik Akı Yoğunluğu
<b>B<sub>r</sub></b>	: Artık Manyetik Akı Yoğunluğu
<b>C<sub>out</sub></b>	: Toplam Çıkış Kapasitansı
<b>D</b>	: Elektriksel Akı Yoğunluğu
<b>D<sub>r</sub></b>	: Artık Elektriksel Akı Yoğunluğu
<b>E</b>	: Elektrik Alan Şiddeti
<b>E<sub>F</sub></b>	: Fermi Seviyesi
<b>E<sub>c</sub></b>	: Elektrik Alan
<b>E<sub>g</sub></b>	: Bant Aralığı
<b>eφ<sub>b</sub></b>	: Kapı Temasının Schottky Bariyer Yüksekliği
<b>f<sub>max</sub></b>	: Maksimum Frekans
<b>f<sub>sw</sub></b>	: Frekans Değiştirme
<b>Ga</b>	: Galyum
<b>GaAs</b>	: Galyum Arsenit
<b>GaN</b>	: Galyum Nitrür
<b>Ge</b>	: Germenyum
<b>HfO<sub>2</sub></b>	: Hafnium Oxide
<b>I<sub>ds</sub></b>	: Akım
<b>I<sub>max</sub></b>	: Maksimum Akım
<b>I<sub>min</sub></b>	: Minimum Akım
<b>In</b>	: İndiyum
<b>InAlN</b>	: İndiyum Aliminyum Nitrür
<b>InGaN</b>	: İndiyum Galyum Nitrür
<b>InN</b>	: İndiyum Nitrür
<b>InP</b>	: İndiyum Fosfat
<b>J</b>	: Akım Yoğunluğu
<b>L</b>	: Kapı Uzunluğu
<b>L<sub>g</sub></b>	: Kapı Uzunluğu
<b>L<sub>gd</sub></b>	: Kapı-Akaç Arası Mesafe
<b>L<sub>gs</sub></b>	: Kapı-Kaynak Arası Mesafe
<b>L<sub>sd</sub></b>	: Kaynak-Akaç Arası Mesafe
<b>m</b>	: Etkin Elektron Kütlesi
<b>μρ</b>	: Malzemenin Bağlı Manyetik Geçirgenliği
<b>N</b>	: Nitrür
<b>P</b>	: Polarizasyon Alan Vektörü

<b>P<sub>dynamic</sub></b>	: Dinamik Güç
<b>P<sub>out</sub></b>	: Çıkış Gücü
<b>P<sub>pe</sub></b>	: Piezoelektrik Polorizasyon
<b>P<sub>static</sub></b>	: Statik Güç
<b>Q</b>	: Kapı Konağı Altındaki Birim Alan Başına Yük Yoğunluğu
<b>Q<sub>ch</sub></b>	: Transistör Kanalındaki Yük
<b>RC</b>	: Düşük Temas Direnci
<b>R<sub>on</sub></b>	: Çalışma Direnci
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	: Silisyum Nitrür
<b>SiC</b>	: Silisyum Karbür
<b>SiGe</b>	: Silisyum Germenyum
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Dioksit
<b>V<sub>br</sub></b>	: Kırılma Gerilimi
<b>V<sub>ds</sub></b>	: Anartarlama Gerilimi
<b>V<sub>gs</sub></b>	: Gerilim
<b>V<sub>knee</sub></b>	: Knee Gerilimi
<b>V<sub>max</sub></b>	: Maksimum Gerilim
<b>V<sub>sat</sub></b>	: Doyma Hızı
<b>V<sub>th</sub></b>	: Eşik Gerilimi
<b>ε<sub>r</sub></b>	: Malzemenin Bağlı Dielektrik Katsayısını

## Kısaltmalar

<b>2DEG</b>	: İki Boyutlu Elektron Gazı
<b>SiC</b>	: Kübik Silikon Karbit
<b>WBG</b>	: Geniş Bant Aralığı
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>APSYS</b>	: Benzetim Yazılımı
<b>NBTI</b>	: Sıcaklık Kararsızlığı
<b>ALD</b>	: Atomik Katman Biriktirme
<b>URL</b>	: İnternet Sayfa Adresi
<b>LED</b>	: Işık Yayan Diyot
<b>CMOSFET</b>	: Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
<b>FP</b>	: Alan Plakası
<b>GUI</b>	: Grafik Kullanıcı Arayüzü
<b>HEMT</b>	: Yüksek Elektron Hareketli Transistörler
<b>MESFET</b>	: Metal-Yarı İletken Alan Etkili Transistör
<b>FET</b>	: Alan Etkili Transistör
<b>mHEMT</b>	: Metamorfik Yüksek Elektron Hareketli Transistörler
<b>MOSFET</b>	: Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
<b>PA</b>	: Güç Amplifikatörleri
<b>PECVD</b>	: Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>MOCVD</b>	: Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme

<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>SD</b>	: Sentauros Cihazı
<b>SDE</b>	: Sentauros Cihaz Editor
<b>SEY</b>	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>TCAD</b>	: Teknoloji Bilgisayar Destekli Tasarım

## 1. GİRİŞ

Yüksek elektron hareketlilikli transistör (HEMT) temelli mikroelektronik teknolojilerdeki gelişmeler, yüksek güç yoğunluklu uygulamalar ve güç amplifikatörlerinin yanı sıra mikrodalga ve radyo frekansı (RF) elektroniği için büyük ilerlemelere yol açmıştır. Birçok bilim insanı, üzerinde sayısız çalışma yaparak bu malzemeyi o kadar mükemmel bir şekilde tasarlamıştır ki, milyarlarca transistor tek bir arıza olmadan üretilebilir ve binlerce saat çalışabilmektedir (Gargini, 2015).

HEMT'ler; omik kontak olan, akaç (drain), kaynak (source) ve kanaldaki elektron yoğunluğunun kontrol eden Schottky kontak olan kapı (gate) kontağından oluşur. Kapı geriliminin kapı eşik gerilim değerinin üzerinde olması durumunda akaç ile kaynak arasındaki elektron akışının devam eder. Akaç geriliminin artırılmasıyla öncelikli olarak akaç akımı belli bir değere kadar doğrusal bir artış gösterir (Gülseren, 2019).

Araştırma ve teknolojik cihazlarda yaygın olarak kullanılan yarı iletken Galyum Nitrür (GaN)'dür. Optik uygulamalara ek olarak, GaN yarı iletkenleri yüksek kırılma voltajına, olağanüstü elektron taşıma özelliklerine ve yüksek termal iletkenliğe sahiptirler. Bu özelliklerinden yararlanmak, nitelikli aygıtlar elde etmek için araştırmalar halen devam etmektedir. Aynı zamanda, iletişim sistemlerinde GaAs veya InP cihazlarının ana teknoloji olduğu mikrodalga frekanslarında güç sağlama kapasitesini artırmaya yönelik GaN yapılarının kullanımı hedeflenmektedir. Ayrıca, son derece küçük boyutlarda yüksek kazanç ile yüksek çıkış gücü gösteren GaN tabanlı mikrodalga güç cihazlarının gelişimini desteklemektedir. (Chow vd., 2000; Coltrin ve Kaplar, 2017).

Geniş bant aralıklı (WBG) yarı iletken malzemelerin özellikleri ve iki boyutlu elektron gazı (2-DEG) kanallarının avantajı, HEMT'leri diğer yarı iletken cihazlara göre daha verimli kılmaktadır. Diğer taraftan, WBG yarı iletken malzemeler içerisindeki GaN'nin istisnai özelliklerine ek olarak, kanalda uyarıcı olmadan iki boyutlu elektron gazının (2-DEG) oluşumu ve 2-DEG'nin de kontrol edilme olasılığı, GaN'yi diğer WBG yarı iletkenlerden farklı kılmaktadır. Galyum arsenit (GaAs) veya indiyum fosfat (InP) gibi WBG malzemeleri, yüksek kazançlı ve yüksek frekanslı uygulamalar

için HEMT yapıları üretmek için kullanılırken, GaN temelli HEMT'ler, üstün özellikleri nedeniyle yüksek güç uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamak için büyük bir değere sahip olduğu bilinmektedir. Diğer yandan, GaN tabanlı HEMT'ler geleceğin güç elektroniği uygulamalarının ana yarı iletken cihazı olarak görülebilir ve GaN HEMT yapıları üzerinde kırılma gerilimi ( $V_{br}$ ), kesme frekansı ve çalışma sıcaklığının iyileştirilmesine yönelik umut vadetmektedir (Odabaşı, 2021).

Birçok çalışma, GaN tabanlı HEMT aygıtlarının üstün performans ve mükemmel özellikte aygıtlar sunsa da GaN HEMT'lerin transistör teknolojisinde liderliği ele geçirmesini engelleyen ciddi sorunları halen mevcuttur. Bu sorunlardan bazıları, uzun ömürlü kararlılık gibi kristal büyütme ve üretim yöntemlerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Diğer yandan, alana bağlı hareketlilik ve cihaz tasarımı gibi malzeme özelliklerinin doğrusallık sorunlarına yol açmaktadır. Agresif olarak ölçümlenen bölgelerde yüksek güçlerin üretilmesi, ısı dağılımı ve sıcaklık tahmininde de sorunlara neden olur (Taking, 2012). Yinede, metalürji teknolojisindeki gelişmelerle birlikte GaN HEMT'lerin performansı yükselmiş ve bu da farklı substratlar (GaN, 4H-SiC, vb.) üzerinde yüksek kalitede büyümeyi mümkün kılmıştır (Brady vd., 2000; Sheppard vd., 2000). Elektronik özellikleri açısından,  $V_{br}$  geliştirme çabaları 2000'lerin başında maksimum 700V ile sınırlı olmuştur. 2000'li yılların başlarından bir çalışma, örtüşen kapı yapısı ile 0,5  $\mu\text{m}$  kapı uzunluğu kullanan 13  $\mu\text{m}$  kaynak-akaç aralığına sahip 570V  $V_{br}$  ile bir AlGaIn/GaN HEMT önerilmiştir (Zhang vd., 2000). Bununla birlikte, çalışmalar ilerledikçe son on yılda  $V_{br}$  seviyesinin 3kV'a kadar iyileştirilmesine imkan sağlandı (Toprak, 2020). Nanjo vd., (2013) çalışmalarında arka bariyer tekniği ile 3000V  $V_{br}$  elde edilmiştir (Nanjo vd., 2013). Yapım sürecinde,  $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{GaN}$  heteroyapı, yarı yalıtkan bir 4H-SiC altlık üzerinde metal-organik kimyasal biriktirme kullanılarak büyütüldü. Daha sonra, Lee vd. (2012), bir AlN çekirdeklenme katmanı, 0,85 $\mu\text{m}$  %4 AlGaIn arka bariyeri ve 20 nm kalınlığında bir GaN kanalı belirtildiği gibi biriktirilmiştir. 13,5 nm kalınlığında  $\text{SiO}_2$  dielektrik ALD yöntemi kullanılarak biriktirildi. Kapı-akaç aralığı  $L_{gd}$  30  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiş ve 4,25  $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$   $R_{on}$  değeri elde edildi.  $V_{br}$ 'yi iyileştirme yöntemlerinden biri de AlGaIn bariyerleri yerine InAlN bariyer yapılarının kullanılması olarak düşünülebilir. InAlN yapıları, artan parazitik kapasitansların ve kayıpların olumsuz etkileri olmadan  $L_{gd}$  aralığını uzatmamıza izin veren üstün polarizasyon özellikleri nedeniyle daha düşük direnç

spesifik değerleriyle çok daha büyük salınım frekanslarında çalışmamıza izin verir. Sonuç olarak, InAlN bariyer yapıları,  $5 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 'nin altındaki  $R_{\text{on}}$  değerleriyle  $V_{\text{br}}$ 'yi 3kV'a kadar iyileştirme fırsatı verir. Başka bir yol olarak,  $V_{\text{br}}$  iyileştirme yöntemi, yüksek k dielektrik pasivasyon katmanı kullanmaktır.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  veya  $\text{SiO}_2$  gibi pasifleştirme malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak kullanıldıklarında daha yüksek  $V_{\text{br}}$  değerleri sağlayan  $\text{HfO}_2$  gibi çok daha yüksek dielektrik sabitlerine sahip bazı pasivasyon malzemeleri de vardır. Diğer yandan, dielektrik sabiti büyüdükçe kontaklar arasındaki parazitik kapasitanslar artar ve cihazın kesme frekansı azalır (Asif Khan vd., 1994).

Bu tezde belirlenen HEMT yapının kapı (gate)- akaç (drain) arası mesafesi ( $L_{\text{gd}}$ ) farklı kapı aralıklarında belirlendi. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kanal modülasyonu açısından  $V_{\text{br}}$ , akım voltaj ( $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ ), çalışma direnci ( $R_{\text{on}}$ ) gibi değerler Crosslight SimuApsys modelleme programı kullanılarak hesaplandı. Süreç teknolojisinden kaynaklanan kayıpların azaltılması amacıyla, farklı açılardan tasarlanan yapının elektronik özelliklerin analizi, pahalı cihaz teminatı gibi masrafları en aza indirecek benzetim modeli kullanılarak etkili araştırma ıktıları elde edilmeye çalışıldı.

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

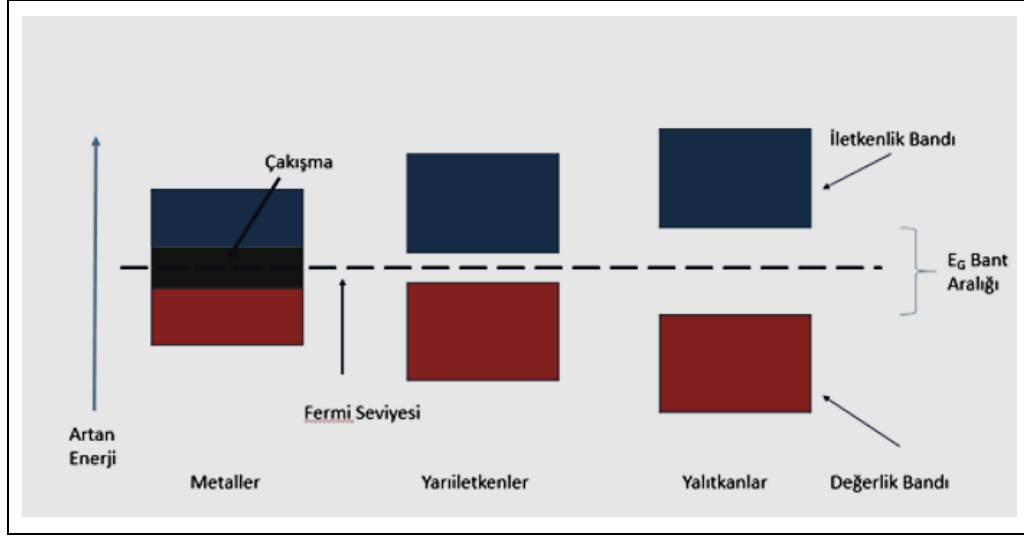
### 2.1 Yarı İletkenler

1940'lı yılların sonlarından günümüze kadar, yarı iletken malzemeler ile yapılan çalışmalarda büyük gelişmeler sağlanmıştır. Yarı iletkenler kullanılarak üretilen elektronik devre elemanlarına foto dedektörler, diyotlar, fotovoltaiik piller ve transistörler örnek verilebilir (Mutlu, 2010).

Yarı iletken maddeleri elektriksel iletkenlikleri bakımından konumlandırmak gerekirse, iletken ile yalıtkan maddelerin arasında olacaktır (Wilson ve Hawkes, 2000). Normal şartlar altında yalıtkan olan yarıiletken malzemeler; ısı, ışık, manyetik etki, elektriksel gerilim vb. uyarılma durumlarında değerlik elektronlarını serbest bırakarak iletken duruma geçerler. Bu uyarılmayı sağlayan dış etkiler ortadan kaldırıldığında ise tekrar yalıtkan duruma geçerler (Neamen, 2003).

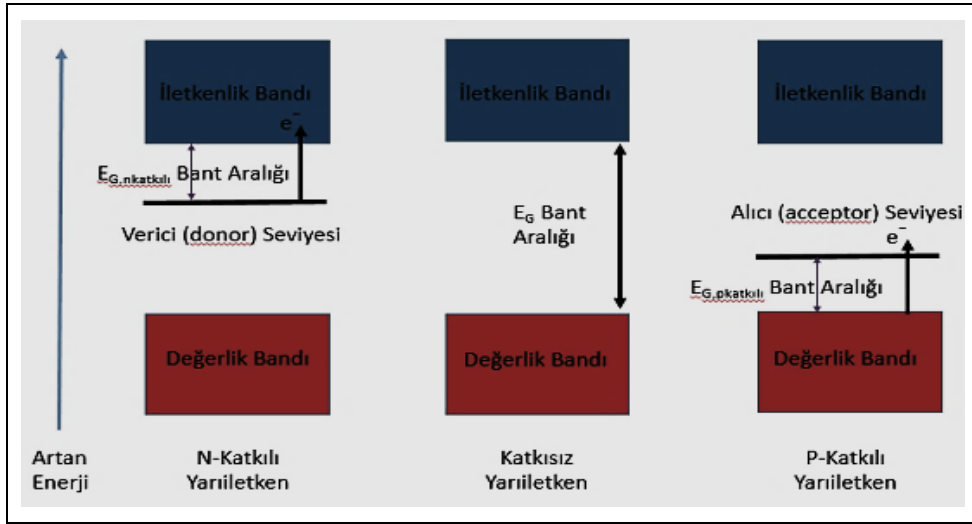
Germanyum (Ge) ve silisyum (Si) en yaygın kullanılan yarı iletkenler olup değerlik elektron yörüngelerinde dört elektron bulunur. İletken malzemeler, yarı iletken malzemelere göre 10 defa fazla iletkenidir. Yalıtkan malzemeler ise yarı iletken malzemelerden 10 -14 defa daha az iletkenlerdir (Yu ve Cardona, 2010).

Yarı iletkenlerin iletken duruma geçebilmeleri için Şekil 2.1' de gösterilen yasak enerji aralığı kadar ek enerjiye ihtiyaçları vardır. Metallerde, değerlik (valans) bandından iletkenlik bandına geçiş, bantta çakışma söz konusu olduğu için, verilen en düşük enerjiyle sağlanmış olur. Ancak yalıtkanlarda bant aralığı oldukça yüksek olduğu için verilmesi gereken enerji de oldukça yüksektir.



Şekil 2.1 Yasak enerji bant aralıkları (Asan, 2018)

Elektronik devre elemanlarının üretiminde yarı iletkenlerin katkılanmış halleri de kullanılmaktadır. Katkılama tipine bağlı olarak  $n$ -tipi ya da  $p$ -tipi katkılama olarak adlandırılmaktadır. Elektron ya da deşik (hole) katkısının artırılması iletkenliği artırır, aynı şekilde azalması da direnci artırmaktadır (Xiao, 2001). Katkılama sonrasında  $E_g$  değişimi Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2  $n$  ve  $p$  katkılama sonrasında  $E_G$  gösterimi (Asan, 2018)

$n$ -tipi katkılanmış yarı iletkenlerde taşıyıcılar elektronlar iken  $p$  tipi katkılama yapılmış olan yarı iletkenlerde ise deşikler (holler) meydana gelecektir. Böylece yeterli enerjiye sahip olan elektron deliğe hareket edecektir.  $n$  tipi yarı iletkenlere örnek olarak arsenik ya da fosfor katkılanmış Si ya da Ge örnek verilebilir. Kısaca son yörüngesinde 5

elektron bulunan arsenik ya da fosfor ile son yörüngesinde 4 elektron bulunan Ge ya da Si elektronları arasında kovalent bağ oluşmaktadır. Elektronlardan birisi ise serbest kalacaktır. Dolayısıyla yapı elektron yönünden zengin hale gelmiş olacaktır (URL 1, 2022).

*p*-tipi yarı iletkene örnek olarak indiyum (In) ya da galyum (Ga) katkılanmış Si ya da Ge örnek verilebilir. Son yörüngesinde 3 elektron bulunan In ya da galyum ile son yörüngesinde 4 elektron bulunan Si ya da Ge ile kovalent bağ yapacaktır. Böylece silisyum ya da Ge bağ yapabilecek In ya da Ga elektronu bulamayacak, elektron kapma eğiliminde olacaktır. Eksik elektron boşluk (hole) olarak ifade edilecektir (URL 1, 2022). Yarı iletkenlerde *p* ve *n* tipi katkılama yapılarak *p-n* eklemleri oluşturulmaktadır. Bu eklemlerle *n*-tipi ve *p*-tipi malzemeler arasındaki sınır özelliklerinden faydalanılmaktadır. Mesela bir *p-n* eklemlili diyot için katkısız bir silikon önce *n*-tipi katkılama ve ardından *p*-tipi katkılama ile üretilebilir. Bu şekilde yarıiletkenler güneş pillerinin üretiminde, transistörlerde ve birçok mikroelektronik aygıtın üretiminde kullanılmaktadır. Yarı iletken transistörlerde *n-p-n* ve *p-n-p* şeklinde eklemler yapılabilmektedir (URL 1, 2022).

## 2.2 GaN Malzeme Özellikleri

Güç amplifikatörü ve güç elektroniği uygulamasında cihaz performansını yöneten temel malzeme özellikleri, cihazın açık devre direncini, kırılma gerilimini ve maksimum akımını etkileyen özelliklerdir. Tüm bu parametreler ortam sıcaklığına bağlı olduğundan malzemenin termal performansı da kritik öneme sahiptir. Cihaz sıcaklığı, cihaz çalışırken ortam sıcaklığının çok üzerine çıkabileceğinden, bu özellikle güç uygulamalarında önemlidir. Anahtar malzeme parametreleri Tablo 2.3'te GaN, Silisyum Karbür (SiC), Si ve GaAs arasında karşılaştırılmıştır (Khandelwal, 2022).

Tablo 2.1 RF ve güç uygulamaları için farklı cihaz teknolojilerinin ilgili parametrelerinin malzeme parametrelerinin karşılaştırılması

Yarı iletkenler	Hareketlilik (cm <sup>2</sup> /V.s)	Doymunlukhızı (cm/s)	Breakdown elektrik alanı (MV/cm)	Termal iletkenlik (W/cm/K)
GaN	1500	2,7.10 <sup>7</sup>	3,0	1,5
Silikon	1300	1,0.10 <sup>7</sup>	0,3	1,5
SiC	950	2,0.10 <sup>7</sup>	2,4	3,0
GaAs	6000	1,3.10 <sup>7</sup>	0,4	0,5

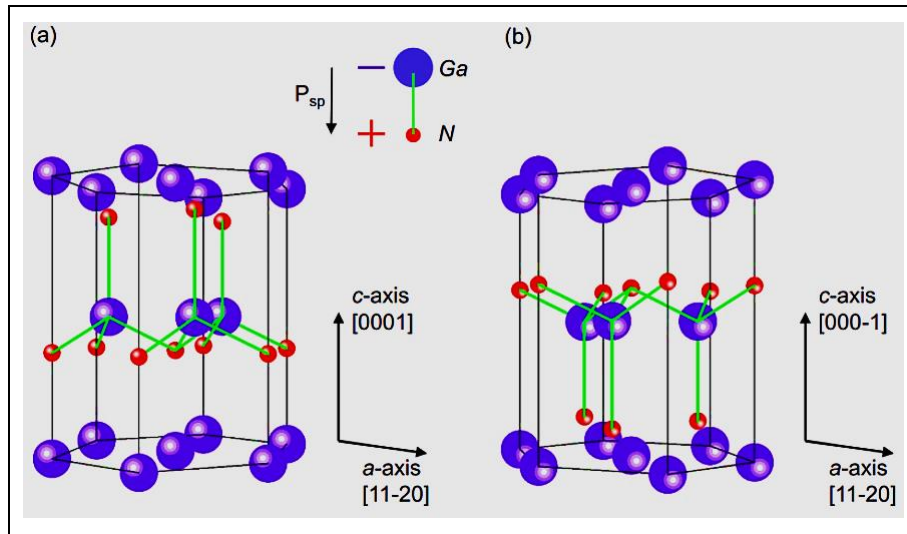
*Bant Boşluğu ve Kırılma Elektrik Alanı:* Bant aralığı ( $E_g$ ), yarı iletken malzemedeki kimyasal bağların gücü ile ilgilidir. Daha büyük bir  $E_g$ , elektronu atomdan koparır, ona daha büyük enerji sağlamak için ihtiyaç duyduğunu gösterir. Daha yüksek bir bant aralığı, yarı iletkenin daha yüksek kırılma elektrik alanı ( $E_c$ ) anlamına gelir. 3,39 eV bant aralığına sahip GaN yarı iletkeni, Si, SiC ve GaAs arasında en yüksek olanıdır. Daha yüksek kırılma elektrik alanı, yarı iletken malzemenin belirli bir uzunluğu için GaN'nin bu malzemeler arasında bozulma olmadan en yüksek voltajı sürdürebileceği anlamına gelmektedir (Khandelwal, 2022).

*Elektron Hareketliliği:* Elektron hareketliliği ( $\mu$ ), güç elektroniği ve güç amplifikatörü uygulamasındaki direnç ve knee gerilimi ile ilgilidir. Yüksek hareketlilik, direnci ve Knee gerilimini ( $V_{knee}$ ) düşürmektedir. Bu, güç elektroniği anahtarlama kayıplarını azaltır. Daha yüksek bir hareketlilik, maksimum voltaj salınımını ve dolayısıyla güç amplifikatörü uygulaması için çıkış gücünü artırmaktadır. 1500 cm<sup>2</sup>/V<sub>sec</sub>'lik 2-DEG'de iyi bir hareketliliğe sahip GaN yarı iletkeni, silikon ve SiC ile karşılaştırıldığında daha avantajlıdır (Khandelwal, 2022).

*Doyma Hızı:* Yüksek bir doyma hızına sahip GaN, bu parametrede de daha avantajlı olduğu açıktır. GaN tarafından sunulan yüksek elektron hareketliliği, doyma hızı ve kırılma elektrik alanı birleşimi, onu hem güç amplifikatörü hem de güç elektroniği anahtarlama uygulamaları için uygun bir aday haline getirir (Khandelwal, 2022).

GaN ve alüminyum (Al) ve indiyum (In) ile üçlü ve dörtlü birleşimleri, Si'den sonra en önemli yarı iletkenlerden bazılarıdır. Üstün optik ve elektriksel özellikleri sayesinde

aydınlatma ve ekranlarda, lazerlerde, dedektörlerde ve yüksek güçlü RF cihazlarında çok çeşitli uygulamalar görülmektedir. Öte yandan GaN, Wurtzite ve Zincblend yapısında olabilir. Wurtzite yapısı, toplu GaN, AlN ve InN için oda sıcaklığında termodinamik olarak kararludur. Bu kristal yapı, kristal uyumuna bağı olarak malzemedeki polarizasyon alanı ile ters çevirme simetrisinden yoksundur. Wurtzite yapısı, Ga ve N çiftlerinin dönüşümlü biatomik sıkı paketlenmiş [0001] düzlemleri tarafından oluşturulmuştur. (0001) yönündeki istifleme sırası AaBbAa'dır. Wurtzite grup III, N c eksenine dik bir inversiyon düzleminden yoksundur; bu nedenle, N yüzeyleri ya bir grup 3 element (Al, Ga veya In) polaritesine veya bir N polaritesine sahip olduğu bilinmektedir. Bu iki oluşum arasındaki temel fark, polarite ve polarizasyon yüklerindedir. Kristal [0001] yönünde yönlendirildiği zaman, yüzeyde Ga atomları ile sonlandırılır ve Ga-polar veya Ga-yüz olarak bilinen negatif net polarizasyona sahiptir. Diğer yandan, [000-1] yönelimi N atom ile sonlandırılır ve N polar olarak adlandırılan pozitif net polarizasyona sahiptir (Khandelwal, 2022).



Şekil 2.3 Ga yüzü ve N yüzü GaN kristal yapısı

### 2.3 GaN Temelli Yarı İletken Cihaz Uygulamaları

Transistörler, mikroişlemcilerden güç elektroniğine kadar çeşitli elektronik devre uygulamalarında kullanılırlar. Bu uygulamalar, transistörleri bir anahtar, ayrıca sinyal yükseltici olarak kullanmaktadır. Elektronik bir anahtar olarak transistör, ideal olarak açıldığında hiçbir direnç, kapatıldığında sonsuz bir direnç sağlamalıdır. Gerçekte, yarı iletken bir malzemedan yapılmış herhangi bir transistör her zaman sonlu bir dirence

sahip olacaktır. Bunun nedeni kanaldaki sınırlı yük miktarı ve kanalda akan taşıyıcıların sonlu hızıdır. Benzer şekilde, kapalı durumda cihazdaki farklı sızıntı mekanizmaları nedeniyle gerçekçi bir cihazın direnci sonlu bir değer olacaktır. Yükseltici bir cihaz olarak, transistörlerin çıkış özelliklerinin doğası, küçük bir sinyalin yükseltilmesini sağlamak için kullanılır. Giriş sinyalini yükseltmek için büyük bir girişten çıkışa transfer veya geçiş iletkenliği olan transistörler kullanılır. Sinyalleri tekrar yükseltme yeteneği, yarı iletken malzeme özelliklerine bağlıdır.(Palacios vd., 2006).

Si tabanlı transistörler, elektronik aygıtlarda devrim niteliği taşıyan özelliklere sahiptirler. Moore yasasına göre, Si temelli transistör performansındaki ilerleme, Si transistör teknolojisindeki ilerleme olmadan önemli gelişme katetmiştir. Yüksek güç, yüksek frekans ve yüksek voltaj işleme yetenekleriyle ilgili uygulamalar için Si'nin malzeme sınırlamaları vardır. GaN ve SiC gibi geniş bant aralıklı yarı iletkenler ise bu uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır (Martín-Guerrero vd., 2020).

GaN yarı iletken teknolojisinin gelişimi 1990'larda başlamıştır. Shuji Nakamura daha sonra Nichia Chemical Industries'de bu malzemeyi mavi, mor ve beyaz ışık yayan diyotlar (LED) üretmek için kullanmıştır (Nakamura, 1991; Nakamura vd., 1993). LED'lerdeki bu başarı ve malzeme özellikleri, dikkatleri ve finansmanı yüksek frekanslı ve yüksek güçlü GaN transistör teknolojisinin geliştirilmesine yöneltmiştir (Nakamura vd., 1991). Khan vd. (1991) AlGaIn/GaN heteroekleminde iki boyutlu elektron gazı (2-DEG) oluşumu bildirilmiştir. İlk GaN tabanlı metal yarı iletken FET (MESFET) ve yüksek elektron hareketli transistör (HEMT) 1991'de rapor edilmiştir (Khan vd., 1991).

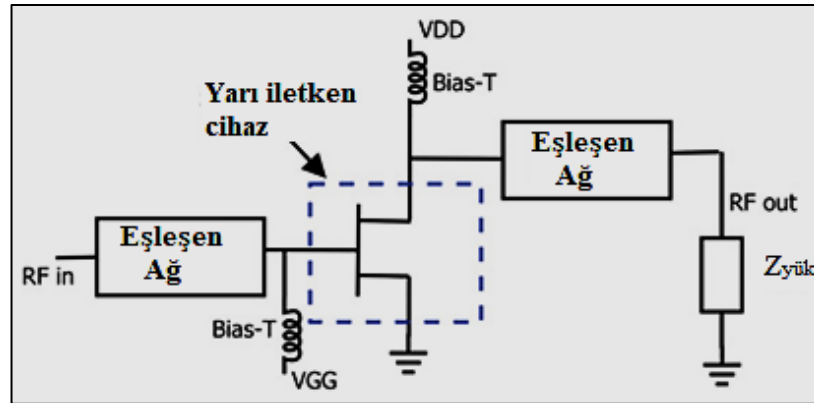
GaN tabanlı elektronik aygıtlar için önemli bir teknolojik hedef, yabancı substratlar üzerinde düşük kusurlu GaN yarı iletken malzemesini büyütmenin yolları bulunmaktır. Araştırmacılar, SiC, Si ve safir substrat üzerinde GaN büyütmenin yollarını geliştirmişlerdir. Günümüzde, GaN cihazları için bir substrat olarak elmas da birkaç grup tarafından takip edilmektedir. Yabancı substrat üzerinde GaN büyümesine yönelik kilometre taşlarından biri, Amano vd. (1986) tarafından elde edilmiştir. Amano vd. (1986), AlN çekirdeklenme katmanı kullanılarak metal organik kimyasal

buhar biriktirme (MOCVD) kullanarak düşük sıcaklıkta (600°C) GaN filmlerinin büyümesini göstermiştir (Hiramatsu vd., 1991).

Cihaz performans iyileştirmeleri, bir dizi önemli yenilik sayesinde mümkün olmuştur. GaN cihazındaki yüksek güç yoğunluğu nedeniyle, termal dağılım önemli bir konudur. Bu amaçla altın kaplamalı kalın hava köprüsü teknolojisi geliştirilmiştir. Kalın hava köprüsü, kolay dağılmaya izin verir ve ayrıca zemine doğru düşük bir endüktans yolu sağlar. Radyo frekanslarında çalışan GaN cihazının kapı direncini azaltmak için T-gate veya mantar kapı yapısı benimsenmiştir (Palacios vd., 2006). T-gate, kapı uzunluğunun kısa olmasına izin verir ve düşük kapı direncine sahiptir (Micovic vd., 2016).

### 2.3.1 Radyo Frekanslı Güç Amplifikatörü Uygulaması

Bu bölümde, radyo frekansı (RF) güç amplifikatörü uygulamaları için uygun olan bir yarı iletken cihazın istenen özellikleri gözden geçirilmiştir. Genel bir güç amplifikatörü yapısı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

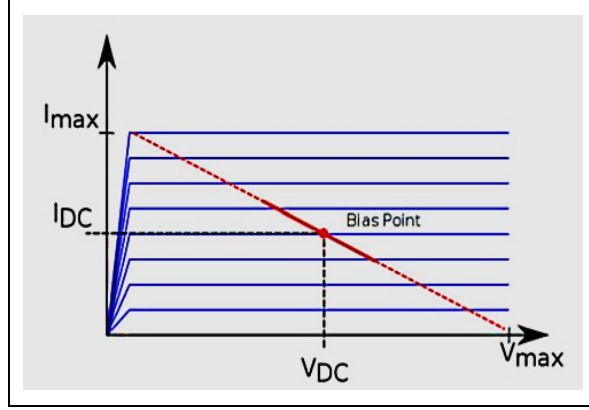


Şekil 2.4 Yarı iletken cihazı, eşleşen ağları ve yükü gösteren genel güç amplifikatörü şeması (Gülseren, 2019).

Giriş gücü, aktif yarı iletken cihaz tarafından yükseltilir. Giriş ve çıkışta eşleşen ağlar, istenmeyen yansımaları en aza indirilir. Giriş sinyali sallandıkça, transistörün çıkış terminalindeki akım ve voltaj, transistörün çıkış özelliklerinin çeşitli bölgelerini kapsar. Denklem 2.7'de gösterildiği gibi, akımdaki ( $\Delta I$ ) ve gerilimdeki ( $\Delta V$ ) salınım

ne kadar büyükse, maksimum çıkış gücü ( $P_{out}$ ) o kadar büyüktür.  $\Delta I$  ve  $\Delta V$  deki bu sinyal salınımı Şekil 2.5'de gösterilmiştir (Khandelwal, 2022).

$$P_{out} = \Delta I \cdot \Delta V \quad (2.7)$$



Şekil 2.5 Tipik bir güç amplifikatörü uygulamasında akım-gerilim düzlemi ve yük hattı salınımı

Akım ve gerilim dalgalanmaları ise;

$$\Delta I = I_{max} - I_{min} \quad (2.8)$$

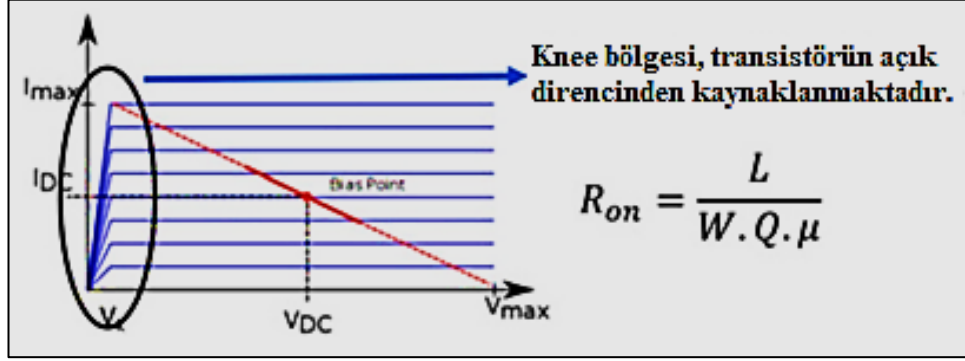
$$\Delta V = V_{max} - V_{knee} \quad (2.9)$$

Denklem 2.7-2.9' dan,  $P_{out}$ 'u maksimize etmek için hem I hem de V'nin maksimize edilmesi gerektiği görülebilir. Cihazın belirli genişliği için  $I_{max}$  (cihazın birim genişliği başına maksimum akımı), doyma hızı ( $v_{sat}$ ) ve transistörün kanalındaki yük ( $Q_{ch}$ ) ile ilgilidir (Khandelwal, 2022).

$$I_{max} = Q_{ch} \cdot v_{sat} \quad (2.10)$$

Denklem 2.9'da  $V_{max}$  ve  $V_{knee}$  temel cihaz özellikleriyle ilgilidir.  $V_{max}$ , cihazın kırılma gerilimi ile sınırlıdır. Bu bölümde, HEMT'lerin  $V_{br}$ 'sini etkileyen fiziksel faktörler incelenmiştir. İlk faktör yarı iletken malzemelerin özellikleridir.. Güvenilir çalışma için  $V_{max}$ , kırılma geriliminin altında tutulmalıdır. Kırılma gerilimi ( $V_{br}$ ) kritik elektrik alanı ( $E_c$ ) ile ilgilidir.  $E_c$ , cihazın yarı iletken malzemesinin bant aralığı ( $E_g$ ) ile ilgilidir. Yüksek bir  $E_g$ , yüksek  $E_c$  ile sonuçlanır ve bu da yüksek bir  $V_{br}$ 'a ve dolayısıyla yüksek

bir  $V_{max}$ 'a yol açar. Denklem 2.9'daki  $V_{knee}$ , yarı iletken cihazın seri temas direncine ve hareketliliğine bağlıdır.  $V_{knee}$ , seri dirençle artarken, hareketlilikle azalır. Bu, Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Akım-gerilim ilişkisi ve cihazın açık direnci

Böylece  $P_{out}$ 'ın aktif cihazın yarı iletken malzemesinin temel özellikleriyle nasıl ilişkili olduğu görülmüştür. Cihaz özellikleri, hareketlilik, doyma hızı, kırılma gerilimi ve seri direnç, cihazdan büyük güç çıkarmak için kritik öneme sahiptir.

### 2.3.2 Güç Elektroniği Anahtarlama Uygulaması

Güç elektroniği uygulamalarında, anahtarlama işleminde transistör kapalı durumdan açık duruma geçer. Anahtarlama etkinliği sırasında iki tür kayıp vardır: statik ve dinamik kayıplar. Statik kayıp, transistörün sonlu direncinden kaynaklanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{static} = I_{on}^2 \cdot R_{on} \quad (2.11)$$

$$R_{on} = \frac{L}{(W \cdot \mu \cdot Q)} \quad (2.12)$$

Burada  $I_{on}$  cihazdaki akım,  $R_{on}$  cihazın direnci,  $L$  kapı uzunluğu,  $\mu$  şarj taşıyıcılarının hareketliliği ve  $Q$  kapı kontağı altında birim alan başına yük yoğunluğu olarak bilinir. Düşük statik kayba sahip olmak için daha düşük bir  $R_{on}$ 'un olması gerektiği görülebilir.  $R_{on}$ , cihazın toplam genişliği veya boyutu artırılarak azaltılabilir. Ancak, dinamik kayıp nedeniyle genişlik rastgele artırılmamalıdır. Artan genişlik ayrıca, güç amplifikatörü durumu için transistörün anahtarlama hızını da sınırladığı bilinir.

Cihazın  $R_{on}$ 'u ayrıca kanal malzemesinin hareketliliğine ve yarı iletken kanala yapılan kontağın temas direncine de bağlı olmaktadır.

Açık direnç, güç anahtarının statik kaybına ve ayrıca güç amplifikatörü uygulaması için  $V_{knee}$  gerilimine neden olur. Düşük  $V_{knee}$  gerilimine sahip transistörün yapılabildiği yarı iletken malzeme, güç elektroniği anahtarı için de uygun olmaktadır (Chuang ve Chuang, 1995).

Statik kayıplara ek olarak, bir anahtarlama cihazında dinamik kayıplar da meydana gelir. Dinamik kayıplar aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$P_{dynamic} = V_{ds}^2 \cdot C_{out} \cdot f_{sw} \quad (2.13)$$

Burada  $C_{out}$  toplam çıkış kapasitansı,  $f_{sw}$  frekans değiştirme ve  $V_{ds}$  anahtarlama gerilimidir.  $C_{out}$  cihazın toplam genişliğiyle orantılıdır. Bu nedenle, cihazın boyutu artırılırsa, cihaz hala aynı hızda anahtarlanabiliyorsa, dinamik kayıplar artar (Chuang ve Chuang, 1995).

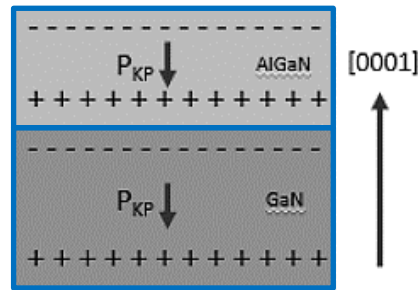
Güç transistörlerinin anma maksimum akımı vardır ve akımı elde etmek için gereken transistörün genişliğine bağlıdır. Bu, büyük genişlikli transistörün daha büyük terminal kapasitansına sahip olacağından, anahtarlama frekansına bir sınır koyar. Sonuç olarak, birim genişlik başına en yüksek akımı elde edebilen bir yarı iletken teknoloji tercih edilmiştir. Bu gereksinim, güç amplifikatörü uygulaması için de benzerdir.

### 3. HEMT YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

#### 3.1 Kendiliğinden Kutuplanma

Ga ve N atomlarının elektronegatifliklerindeki farklılıktan dolayı Ga atomları anyonik (+) ve N atomları katyonik (-) özelliklere sahiptir. Elektronegatiflikteki bu fark, elektrik polarizasyonuna neden olur. Bu polarizasyon malzeme içinde ihmal edilir, ancak kesim yüzeyindeki asimetri nedeniyle c eksenine boyunca belirli bir polarizasyon oluşur. Oluşan GaN atomlarının elektro negatifliklerindeki farktan ve kristal simetrisinin ani ihlalinden kaynaklanan bu polarizasyona kendiliğinden polarizasyon (kutuplaşma) denilmektedir (Gökrem, 2009).

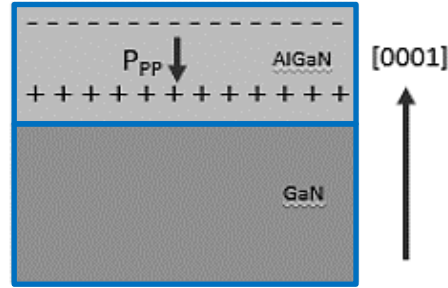
Bu kutuplanma yapı içerisinde, yapısal parametrelere bağlı olarak ortaya çıkan durumdur. AlGaN, GaN ve AlN yapılarında N kısmı elektronegatif olan kısımdır. Dolayısıyla oluşan elektron bulutu, N tarafına kaymaktadır. Güçlü bir iyonik etkileşimin olduğu yapıda, kristalin bir kısmı pozitif diğer kısmı negatif olarak kutuplaşmaktadır. Aynı zamanda hegzagonal kristal yapıda düzlemsel olarak simetri eksikliğinden dolayı birim hücredeki dipollerin toplamı hegzagonal doğrultuda kutuplanma oluşturmaktadır. AlGaN/GaN epitaksiyel yapısının kendiliğinden kutuplanma durumu Şekil 3.1’ de gösterilmiştir (Dahmani 2011; Godesberg, 2013; Hamady, 2014; Fletcher ve Nirmal, 2017).



Şekil 3.1 Kendiliğinden polarizasyon durumu

### 3.2 Piezoelektrik Kutuplanma

Büyütülen epitaksiyel yapıda her bir katman değişikliğinde, yapılar arası gerilmeler oluşmaktadır. Mekanik gerilmenin neden olduğu c eksenine dik doğrultudaki gerilme, diyagonal olmayan gerinim tensörü nedeniyle c ekseninde de gerilmeye neden olur. Bu gerilmeler örgü parametrelerindeki değişimlerden, termal genleşme katsayılarındaki farklılıklardan meydana gelmektedir.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  ara yüzeyinde oluşan, örgü uyumsuzluğundan kaynaklı bu polarizasyon 2-DEG kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir. Farklı katmanların arasındaki gerginlikten doğan kaksidedeki Ga ve N atomları arasındaki mesafelerin değişmesi ile bu kutuplanmaya piezoelektrik kutuplanma denir ve Şekil 3.2' de gösterilmiştir (Bernardini vd., 1997).



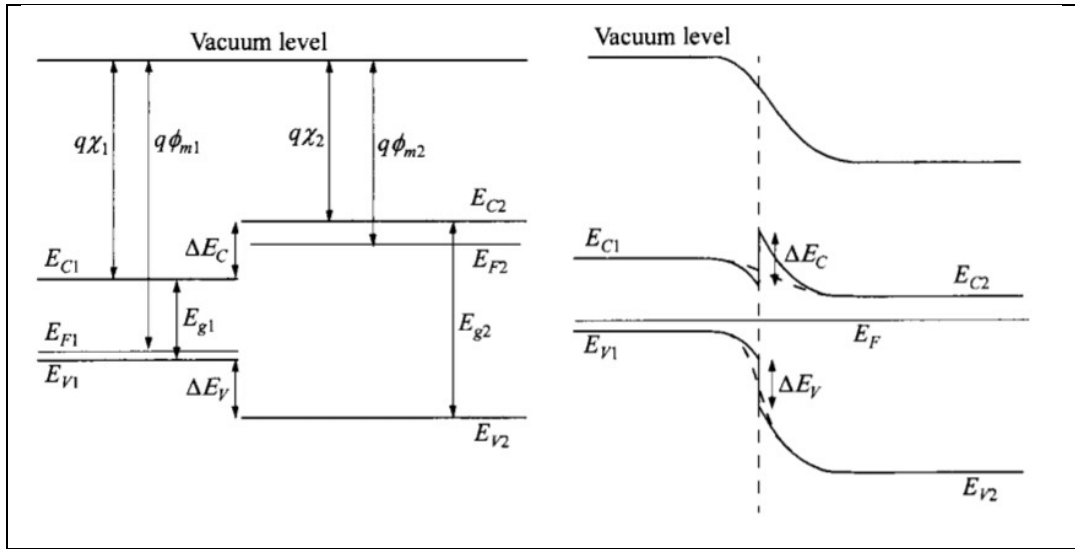
Şekil 3.2 Piezoelektrik polarizasyon durumu

Piezoelektrik kutuplanma sayesinde yapıya herhangi bir katkılama yapılmadan, tabaka ara yüzeylerinde elektron birikebilir. Kutuplanmadan doğan elektrik alanla indüklenen elektronlar iki boyutta serbestçe hareket edebilir.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  kalınlığı, yapı içerisindeki Al miktarı bağlı polarizasyonu etkileyen parametrelerdir. Sistemin toplam kutuplanması ise kendiliğinden kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanmanın toplamına eşittir (Ambacher, 1998).

### 3.3 Heteroyapılar ve 2-DEG Oluşumu

Bir heteroeklem, farklı katkı bölgelerine sahip yalnızca bir tür yarı iletken arasındaki bağlantıyı ifade eden bir homo-bağlantının aksine, eşit olmayan bant aralıklarına sahip iki farklı kristal yarı iletken arasında meydana gelen arayüz olarak tanımlanır. Bir heteroeklem kullanan bir yapıya heteroyapı denir. Bir yarı iletkenin elektriksel davranışı için belirleyici bir faktör, bant aralığı enerjisidir; bir heteroyapıda her iki

malzemenin de farklı bant aralığı enerjileri vardır ve sonuç olarak elde edilen bant yapısı heteroyapı cihazını belirler. Ek olarak, iki malzeme arasındaki polarizasyon farkı ve bu farktan dolayı bağlı yük III-N'deki bant diyagramını etkiler. Kullanılan metal-yarı iletken temasının türü, bant yapısının bir başka belirleyici faktörüdür. Ohmik kontaklar, doğrultucu olmayan metal-yarı iletken kontaklar, metal ve yarı iletken arasında neredeyse hiçbir engele sahip değildir, bu nedenle cihaz, transistörün kaynak ve akçe terminallerini oluşturmak için kullanılan düşük dirençli bir bağlantı kullanan taşıyıcılarla birlikte verilir. Öte yandan, kapı (gate) kontağı, Schottky kontağı olarak adlandırılan bir doğrultucu metal yarı iletken kontağından oluşur. Yarı iletkenin iletkenlik bandı ile metal arasında, metalin iş fonksiyonunun farkı ve yarı iletkenin afinitesi ile tanımlanan bir bariyer bulunur ve bu, cihazın sonuçtaki bant diyagramını etkiler (Gülseren, 2019).



Şekil 3.3 Farklı bant aralığı enerjilerine sahip iki yarı iletkenden oluşan bir heteroeklem yapısı

İki yarı iletkenden oluşan heteroyapıda Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bir yarıiletkenin bant aralığı enerjisi diğerinden daha geniş olması beklenir.  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  heteroyapısı için GaN daha küçük bant aralığı enerjisine,  $Al_xGa_{1-x}N$  ise daha geniş bant aralığına sahiptir. Bu iki yarı iletkenin arayüzünde  $\Delta E_g$  ile temsil edilen bir bant aralığı süreksizliği oluşacaktır. Bant aralığı süreksizliği, iki yarı iletkenin bant aralığı enerjisindeki fark ile verilir ve iletim bant kayması ve değerlik bant kayması ile  $\Delta E_g = \Delta E_c + \Delta E_v$  olarak tanımlanır. Genel yarı iletkenler durumunda, yarı iletkenlerden biri katkı içerdiğinde bantlar bükülür. III-N için, yüksek polarizasyon alanları nedeniyle,

herhangi bir ilave katkı olmaksızın arayüzde yüksek bir elektron yoğunluğu ortaya çıktığı görülür. Yarı iletkenlerin polarizasyon farkı, arayüzde bağlı bir yük vardır. Örneğin, (0001) yönünde büyüme gösteren bir AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heteroyapısı için arayüzde bir pozitif yük ve heteroyapı yüzeyinde bir negatif yük üretilir (Lişesivdin, 2008).

N temelli cihazları oluşturan heteroyapılar genellikle toplu Ga<sub>N</sub> üzerinde büyütülmüş üçlü bir N alaşımından oluşur. Bir heteroyapıdaki polarizasyonun değerlendirilmesi için, genellik kaybı olmaksızın bir Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Ga<sub>N</sub> heteroyapısı varsayılabilir.

III-N bileşikleri, yani Ga<sub>N</sub>, AlN ve InN, farklı gerilmemiş kafes sabitlerine sahiptirler. Üçlü bir alaşım ikili bir alaşım üzerinde büyütüldüğünde, örgüsü ikili alaşımın kafes sabitine uyması için gerilmelidir. Kristalin c eksenine z eksen ve kristalin (0001) düzlemi xy düzlemi olarak adlandırılırsa, III-N yarı iletkeninin büyüme yönü, kristale paralel veya antiparalel olacaktır. c eksen (0001) taban düzlemine diktir, bu nedenle altıgen taban a'nın yanı, eşleşmesi gereken kafes sabitine karşılık gelir. Wurtzite yapısının c eksen yönünde altı katlı dönme simetrisi, gerilme x ve y yönlerinde aynı olmasını gerektirir. Bazal düzlemde gerilme aşağıdaki gibidir (Chuang ve Chuang, 1995).

$$\varepsilon_1 = \frac{a-a_0}{a_0} \quad (3.1)$$

Burada  $a_0$  ve  $a$  sırasıyla, gerdirilmemiş/gevşemiş ve gerilmiş kafes sabitlerini ifade eder. AlGa<sub>N</sub> katman kalınlığı HEMT cihazlarında nanometre mertebesinde; Ga<sub>N</sub> katman kalınlığı genellikle birkaç büyüklük sırası daha büyüktür, bu nedenle AlGa<sub>N</sub> katmanının gergin olduğu, Ga<sub>N</sub> katmanının ise tamamen gevşediği varsayılabilir. Böylece, gerinim denkleminde  $a$ , gerilmemiş Ga<sub>N</sub> katmanının kafes sabitine atıfta bulunacak ve  $a_0$ , kafes sabitine uyması gereken gerilmemiş AlGa<sub>N</sub> katmanının kafes sabitine atıfta bulunur. O zaman  $\varepsilon_1$  şu şekilde yazılabilir (Chuang ve Chuang, 1995).

$$\varepsilon_1 = \frac{a(0)-a(x)}{a(x)} \quad (3.2)$$

Burada  $a(x)$  gerilmemiş Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 'nin kafes sabitini ifade eder ve  $x$ , Al yoğunluğuna işaret eder.

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  katmanı büyütüldüğünde, kuvvetler yalnızca  $xy$  düzleminde en üstteki katmana etki eder; kayma gerilmeleri veya gerinimler veya  $z$ -doğrultusunda hareket eden kuvvetler mevcut değildir. Polarizasyon vektörünün  $z$ -bileşeni, aşağıdaki formda, kesme gerilmelerinin yokluğunda kaybolmayan tek bileşen haline gelmesi beklenir (Bernardini ve Fiorentini, 1999).

$$P_{PE} = 2e_{31}\varepsilon_1 + e_{33}\varepsilon_3 \quad (3.3)$$

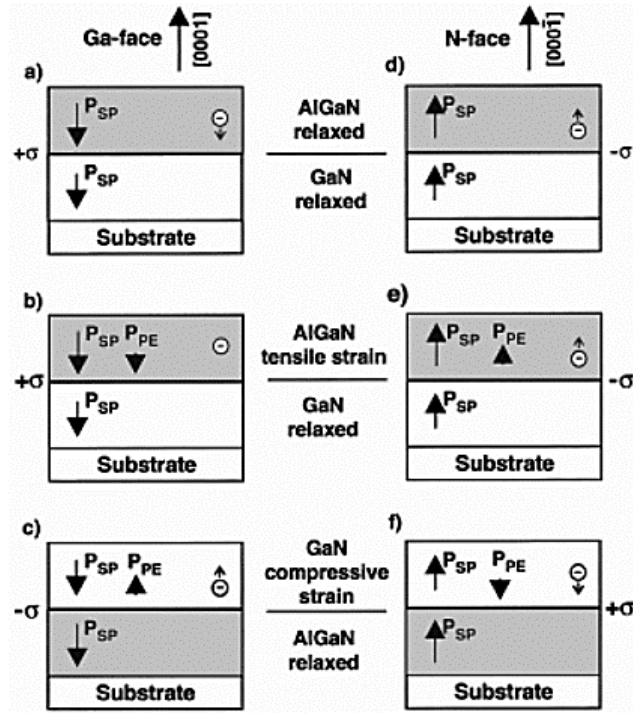
Büyüme yönünde, gerinim, gerilim ve elastik rijitlik arasındaki ilişkiler kullanılarak, polar eksen boyunca ( $\varepsilon_3$ ) ve bazal düzlemde ( $\varepsilon_1$ ) gerinimin ifadesi şu şekilde elde edilebilir:

$$\varepsilon_3 = -2 \frac{c_{13}}{c_{33}} \varepsilon_1 \quad (3.4)$$

Burada gerilmiş  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  katmanında piezoelektrik polarizasyonu elde etmek için piezoelektrik polarizasyon ifadesi ile aşağıdaki gibi birleştirilebilir.

$$P_{PE} = 2 \left( e_{31} - e_{33} \frac{c_{13}}{c_{33}} \right) \varepsilon_1 = 2d_{31} \left( c_{11} + c_{12} - 2 \frac{c_{13}^2}{c_{33}} \right) \varepsilon_1 \quad (3.5)$$

Elektronik cihazlarda kullanılan üç III, N'de piezoelektrik polarizasyon, tüm  $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  için gerilime negatif olarak bağlıdır ( $0 \leq x \leq 1$  ve  $0 \leq y \leq 1 - x$ ). Bu nedenle, negatif (pozitif) piezoelektrik polarizasyon, çekme (basınç) geriniminden kaynaklanır, yani  $\varepsilon_1 > 0$  ( $\varepsilon_1 < 0$ ). Bu, piezoelektrik polarizasyon vektörünün kendiliğinden polarizasyona paralel (antiparalel) olduğu, N-yüzüne (grup III-yüz) işaret ettiği ve böylece polarizasyonun arttığı (azaldığı) anlamına gelir. Farklı gerilim senaryoları ve elde edilen polarizasyon vektörleri Şekil 3.4'te gösterilmektedir. AlN'nin (InN) kafes sabitleri, GaN'nin kafes sabitlerinden daha küçüktür (daha büyüktür). Bu nedenle, GaN'nin üzerindeki AlGaIn, çekme gerilimine sahipken, GaN üzerindeki InGaIn, baskı gerilimine sahiptir. GaN üzerinde InAlN için, gerinim türü bileşime bağlıdır (Bernardini ve Fiorentini, 1999).



Şekil 3.4 Ga- ve N-yüz gerilmiş ve gevşemiş AlGaIn/GaN heteroyapıları için kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyonun yönlerini ve karşılık gelen polarizasyon kaynaklı tabaka yük yoğunlukları (Ambacher vd., 1999)

Piezoelektrik polarizasyonun gerilim üzerindeki lineer bağımlılığı sadece küçük gerilimler için geçerlidir. İkili alaşımlar için piezoelektrik polarizasyonun doğrusal olmaması, ikinci dereceden bir polinom ile modellenilebilir (Bernardini ve Fiorentini, 2002).

$$\varepsilon_1 < 0 \text{ için } P_{PE}^{AlN} = -1,808\varepsilon_1 + 5,624\varepsilon_1^2 \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_1 > 0 \text{ için } P_{PE}^{AlN} = -1,808\varepsilon_1 - 7,8884\varepsilon_1^2 \quad (3.7)$$

$$P_{PE}^{GaN} = -0,918\varepsilon_1 + 9,541\varepsilon_1^2 \quad (3.8)$$

$$P_{PE}^{InN} = -1,373\varepsilon_1 + 7,559\varepsilon_1^2 \quad (3.9)$$

Burada  $\varepsilon_1$  alaşım bileşimi açısından bazal düzlemdeki ikili alaşımın gerilimidir. Üçlü bir alaşım için piezoelektrik polarizasyon şu şekilde modellenilebilir:

$$P_{PE}^{Al_xGa_{1-x}N} = -xP_{PE}^{AlN}(\varepsilon(x)) + (1-x)P_{PE}^{BN}(\varepsilon(x)) \quad (3.10)$$

Bir heterointerface'de polarizasyonda bir süreksizlik olacaktır. Bir bağlı yük yoğunluğu ( $\rho_b$ ), uzayda polarizasyon alanındaki ( $\mathbf{P}$ ) değişikliklerle ilişkilendirilir ve aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Zanato vd., 2004).

$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad (3.11)$$

Polarizasyon yönü, wurtzite III nitrürler için her zaman c eksenini boyuncadır ve heteroyapı arayüzüne diktir. Bu nedenle, ani ve düzlemsel olduğu varsayılan heteroeklemede bir bağlı levha yükü ( $\rho_b$ ) aşağıdaki gibi oluştuğu görülür (Tekeli, 2009).

$$\rho_b = P_{tot,layer1} - P_{tot,layer2} = (P_{SP} + P_{PE})_{layer1} - (P_{SP} + P_{PE})_{layer2} \quad (3.12)$$

Ga'ya bakan bir AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> arayüzü için bağlı yük şu şekilde bulunur (Tekeli, 2009).

$$\rho_b = P_{GaN} - P_{AlGaN} = P_{SP}^{GaN} + P_{PE}^{GaN} - P_{SP}^{AlGaN} - P_{PZ}^{AlGaN} \quad (3.13)$$

$$\rho_b = P_{SP}(0) + P_{PE}(0) - P_{SP}(x) - P_{PE}(x) \quad (3.14)$$

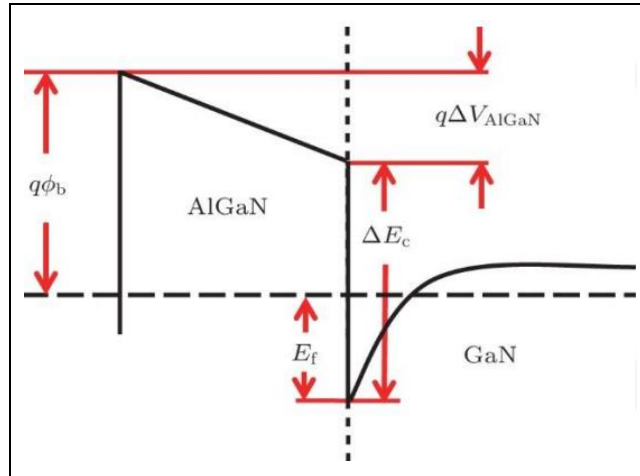
Burada  $x$ , Al<sub>x</sub>In<sub>y</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>N 'nin alaşım bileşimidir. Ga<sub>N</sub> katmanının gevşediği varsayıldığından piezoelektrik polarizasyon sıfır olacaktır, yani  $P_{PE}(0) = 0$ . Sıfır olmayan tüm terimler negatif olacaktır ve AlGa<sub>N</sub>'nin kendiliğinden polarizasyonu Ga<sub>N</sub>'ninkinden daha büyüktür, bu nedenle AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> arayüzünde pozitif bir bağlı yük olacaktır. Tipik olarak cihaz uygulamalarında, AlGa<sub>N</sub> yüzeyinde, hava veya pasivasyon tabakası gibi polarizasyona sahip olmayan ve cihaz yüzeyinde negatif bağlı yüke yol açan bir malzeme vardır. N-yüzlü heteroyapı için durum, arayüzde negatif bir yük ve yüzeyde bir pozitif yük ile tersine çevrilir (Zanato vd., 2004).

Teorik olarak, alt Ga<sub>N</sub> arayüzünde de polarizasyon yükü beklenir, ancak Ga<sub>N</sub> katmanındaki safsızlıklar, kusurlar ve tuzaklar tarafından perdeleme etkileri nedeniyle, indüklenen elektrik alanının ihmal edilebilir olduğu varsayılır. Bağlı levha yükü, Al<sub>N</sub> ve Ga<sub>N</sub> parametrelerinin değerlerinin interpolasyonu ile herhangi bir Al alaşım bileşimi için hesaplanabilir (Palacios ve Mishra, 2007).

Polarizasyon farkından üretilen bağlı yük, yüksek bir elektron tabakası yoğunluğuna ( $n_s$ ) yol açar. Serbest elektronlar, yüksek pozitif polarizasyon kaynaklı levha yükünü telafi eder. Bu elektronlar, üçgen şekilli bir potansiyel kuyusunda GaN katmanındaki arayüze yakın bir yerde birikerek, 2-DEG oluşturur, burada hapsedilmiş elektronlar arayüze paralel hareket etmekte serbesttir. Kapalı elektronlar, yığın halindeki elektronlara kıyasla artan bir hareketliliğe sahiptir. Maksimum tabaka taşıyıcı konsantrasyonu aşağıdaki gibi verilir (Ambacher vd., 1999).

$$n_s(x) = \frac{\sigma(x)}{e} - \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon(x)}{de^2} \right) [e\phi_b(x) + E_F(x) - \Delta E_c(x)] \quad (3.15)$$

Burada  $d$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  bariyerinin kalınlığını,  $e\phi_b$  kapı temasının Schottky bariyer yüksekliğini,  $E_F$  GaN'nin iletim bandına göre Fermi seviyesini verir (Ambacher vd., 1999).



Şekil 3.5 AlGaN/GaN heteroyapısının iletim bandını gösteren şema (He vd., 2015)

Şekil 3.5’de AlGaN/GaN arayüzünün, polarizasyon kaynaklı yük yoğunluğunun hesaplanmasında aşağıdaki değerler kullanılır (Midilli, 2020):

$$\epsilon(x) = -0,5x + 9,5 \quad (\text{Dielektrik sabiti}) \quad (3.16)$$

$$e\phi_b = (1,3x + 0,84) \text{ eV} \quad (\text{Schottky bariyer yüksekliği}) \quad (3.17)$$

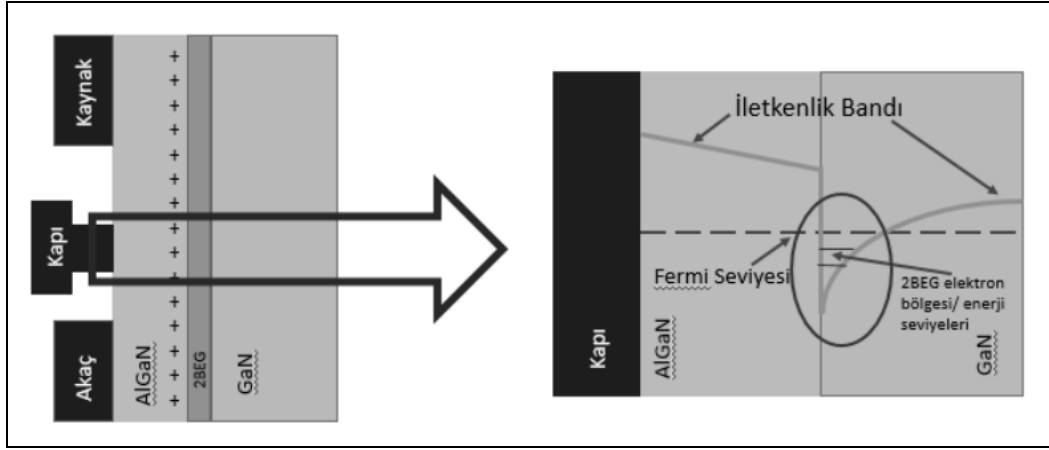
$$E_F(x) = E_0(x) + \frac{\pi \hbar^2}{m^*(x)} n_s(x) \quad (\text{Fermi enerjisi}) \quad (3.18)$$

Burada  $E_0(x)$ , aşağıdaki denklem tarafından verilen 2-DEG'nin zemin alt bant seviyesidir (etkin elektron kütlesi  $m^*(x) \approx 0,22 \cdot 10^6$ ).

$$E_0(x) = \left\{ \frac{9\pi h e^2}{8\epsilon_0 \sqrt{8m^*(x)}} \frac{n_s(x)}{\epsilon(x)} \right\}^{2/3} \quad (3.19)$$

$$\Delta E_C = 0,7[E_g(x) - E_g(0)] \text{ (bant offset)} \quad (3.20)$$

Kendiliğinden kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanma sayesinde oluşan 2-DEG enerji bant diyagramı Şekil 3.6' da gösterilmiştir (Öztürk, 2018).



Şekil 3.6 AlGaN/GaN iki boyutlu elektron gazının iletkenlik bandı gösterimi

Şekil 3.6' da gösterildiği gibi 2-DEG'in olduğu bölgede bir boyutlu kuantum kuyusu gibi davranmaktadır ve iletkenlik bandı Fermi enerjisi düzeyinin altında kalmıştır. Yapıda herhangi bir katkılama olmaksızın kutuplanma sayesinde 2-DEG oluşmaktadır. AlGaN/GaN eklem yapısını  $n$  ya da  $p$  tipi yarı iletkenlerden ayıran temel özelliklerden birisi de budur (Dahmani 2011; Godesberg, 2013; Hamady, 2014; Fletcher ve Nirmal, 2017).

GaN'nin yüksek elektron yoğunluk hızının 2-DEG'lik yüksek elektron yoğunluklu kombinasyonu ile, büyük akımlar elde edilebilir. 2-DEG'deki elektronlar, çok yüksek hareketlilikle büyümeye dik düzlemde serbestçe hareket edebilir. Yüksek mobilite, 5G sistemlerinde olmazsa olmaz olan yüksek frekanslı çalışmayı mümkün kılar. GaN HEMT'ler Si transistörlerini geride bırakır. GaAs HEMT'ler elektron hareketliliğinde üstün olmasına rağmen, diğer kıstaslarda başarısız olurlar. Aynı zamanda WBG bir

yarı iletken olan SiC, arıza voltajında, Johnson FM'de ve benzerlerinde GaN HEMT'ler ile biraz daha iyi veya eşit performansa sahiptir. Bununla birlikte, GaN HEMT'ler, çalışma frekansı ve kanal direncinde SiC teknolojisinden çok daha iyidir. Genel olarak, GaN HEMT'ler diğer teknolojilere göre üstün performans sağlar (Çörekci, 2008).

### 3.4 HEMT Aygıt Çalışma Prensibi

Felbinger vd. (2007), Hu vd. (2009) ve Lee vd. (2011) HEMT teknolojisinin daha yüksek kesme frekansı, daha iyi hareketlilik ve daha fazla  $V_{br}$  elde etmek için farklı alt tabaka türleri, alan plakası veya arka bariyer iyileştirmeleri ile özelliklerini geliştirmek için büyük bir potansiyele sahip olduğu belirtmişlerdir. HEMT'ler, geleneksel MESFET'lere göre üstün çalışma özellikleri nedeniyle RF uygulamalarında, güç yükselteçlerinde ve hatta mikrodalga elektroniğinde en çok kullanılan cihaz haline gelmiştir (Liu, 2016).

Günümüzde yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında GaN HEMT'ler kullanılmaktadır. Temel olarak, iki farklı bant yapısına sahip olan malzemenin epitaksiyel olarak büyütülmesi sonucu, ara yüzeyde oluşan 2-DEG'in kontrol edilmesiyle çalışmaktadır. Oluşturulan 2-DEG sayesinde, elektronların hareketi sırasında yapıyla olan etkileşimleri azalmakta, yapı ve yapı kusurlarıyla elektronların daha az etkileşmesi saçılma olayını en düşük seviyeye indirgenmekte ve böylece elektronlar yüksek hareketliliğe (mobilité) sahip olmaktadır. İki adet omik kontakten oluşan akaç ve kaynak arasına Schottky bir kapı kontağı yerleştirilerek elektronların akışı kontrol edilmektedir. Kapıya uygulanan gerilim düştükçe, kapı elektrodunun altındaki taşıyıcı yoğunluğu azalacaktır. Kapıya uygulanan gerilim ( $V_g$ ); akaç ve kaynak arasındaki akımın kontrolünü sağlamaktadır. Kapı gerilimi değeri belli bir eşik gerilimi değerine ulaştığında ( $V_{th}$ - pinch off) ve bu değerin üzerine çıktığında artık akaç ve kaynak arasında bir akım söz konusu olmayacaktır (Malik, 2003). Bu özellikleri nedeniyle öncelikle tercih edilen HEMT transistörleri, yüksek frekans gereksinimi olan; iletişim, uydu ve radar uygulamalarında etkin olarak kullanılmaktadır (Pengelly vd., 2012).

### 3.5 GaN HEMT

GaN tabanlı HEMT'ler, daha büyük kırılma voltajı ve kararlı yüksek sıcaklıkta çalışma özellikleri nedeniyle mikrodalga elektroniği ve PA uygulamalarının mevcut ihtiyaçlarını karşılayabilecek kapasitede düşünülmüştür (Ghosh vd., 2017). Geniş bant boşluklu (WBG) yarı iletkenlerin malzeme özellikleri, daha yüksek voltaj ve akım kabiliyetine sahip Si tabanlı bir cihazdan daha düşük direnç ve daha az anahtarlama kaybı olan bir cihazla sonuçlanmıştır (Jones vd., 2016).

GaN HEMT'ler için modelleme, birçok nedenden dolayı zordur. GaN cihaz çalışmasının karmaşıklığı ve içindeki doğrusal olmayan etkilerin bolluğu, GaN model geliştirmede çeşitli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, GaN HEMT'deki yük oluşumu için yoğun olarak kullanılan Boltzmann yaklaşımı, HEMT'lerdeki 2-DEG'in kuantum doğası nedeniyle uygulanamaz. Erişim bölgeleri yüksek oranda lineer olmayan şekilde davranır ve cihaz özelliklerinde önemli bir rol oynar. Ek olarak, bir GaN cihazında farklı yapılarda birden fazla alan plakası olabilir. Alan plakaları da cihaz özelliklerini etkiler ve modellenmesi gerekir. Giriş voltajları ve sıcaklıkları için uyarma aralıkları da GaN cihazı için çok daha büyüktür. Bu, modellerdeki matematiksel denklemlerin, herhangi bir sayısal problemde kaçınmak için dikkatli bir şekilde formüle edilmesi ve uygulanması gerektiği anlamına gelir. Bu karmaşık sorunlar, GaN HEMT'ler için yüksek kaliteli bir model geliştirilmesini zor bir hale getirmiştir.

GaN HEMT'leri modellemek için araştırmacılar tarafından geliştirilmiş birçok yaklaşım vardır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir.

- *Ölçüme dayalı modeller:* GaN HEMT'ler için küçük ve doğrusal olmayan büyük sinyal modelleri için çeşitli ölçüm tabanlı modeller önerilmiştir. Root vd. (2010), GaN HEMT'ler için X parametresine dayalı bir model önermiştir. Bu model, GaN cihazının doğrusal olmayan davranışını modellemek için çoklu sapma noktalarında ölçülen X parametrelerini kullanmıştır. Raffo vd. (2013) tarafından yük hattı tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Bu model, dirençli çekirdeği veya modelin akım üreticini karakterize etmek için düşük frekanslı büyük sinyal

ölçümü kullanmıştır. Kapasitif etkiler, cihazın yüksek frekans davranışını modellemek için dirençli çekirdeğin üstünde modellenmiştir.

- *Ampirik GaN modelleri:* Araştırmacılar tarafından birkaç deneysel GaN modeli geliştirilmiştir. Angelov modeli oldukça popüler olan modellerden biridir. Bu model çeşitli ticari araçlarda uygulanmıştır. Bu model, akaç akımı, kapı akımı ve terminal kapasitanslarını modellemek için deneysel fonksiyonları kullanır. Model ayrıca bindirme efektlerini içerecek şekilde genişletilmiştir. Ölçeklendirme, frekans alanı iyileştirmeleri ve modelin diğer yönleriyle ilgili ihtiyaçları ele almak için Angelov modelinin birçok varyantı da önerilmiştir.
- *Fizik tabanlı GaN modeller:* Fizik tabanlı modeller, GaN cihazları için ortaya çıkan yeni bir eğilim olmuştur. Birçok araştırmacı bu tür modeller üzerine yayınlar yapmıştır. Yin vd. (2007) bölge tabanlı bir model geliştirmiştir. Bu modelde GaN HEMT farklı bölgelere ayrılmıştır. Bölgesel fizik, eksiksiz bir model geliştirmek için modellenmiştir. Martin ve Lucci (2013) yüzey potansiyeli tabanlı bir model geliştirmişlerdir.

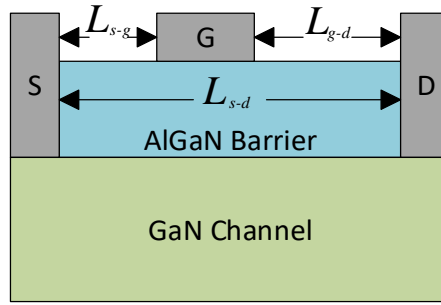
### **3.6 HEMT Tabanlı Yarı İletken GaN'lerin Kırılma Voltajı İyileştirmesi**

#### **3.6.1 Kırılma Voltajına Parametrelerin Etkisi**

Bu bölümde, HEMT'lerin  $V_{br}$ 'sini etkileyen fiziksel faktörler incelenmiştir. İlk faktör yarı iletken malzemelerin özellikleridir. GaN yarı iletken malzemenin kırılma alanı yaklaşık 2MV/cm iken Si yarı iletken malzemenin kırılma alanı yaklaşık 0,3MV/cm'dir (Burk vd.,1999). Bu durum, GaN tabanlı HEMT'lerin Si tabanlı HEMT'lerden beş kat daha fazla  $V_{br}$ 'ye sahip olmasını sağlamıştır. Geleneksel Si tabanlı yarı iletken cihazlarla karşılaştırıldığında, GaN tabanlı HEMT cihazları, aynı  $V_{br}$ 'yi diğerlerinden daha küçük ölçekte boyut sağlar. Ayrıca bu durum parazitik kapasitans ve dirençleri azaltarak geçiş ve anahtarlama kayıplarını azaltır (Öztürk, 2018).

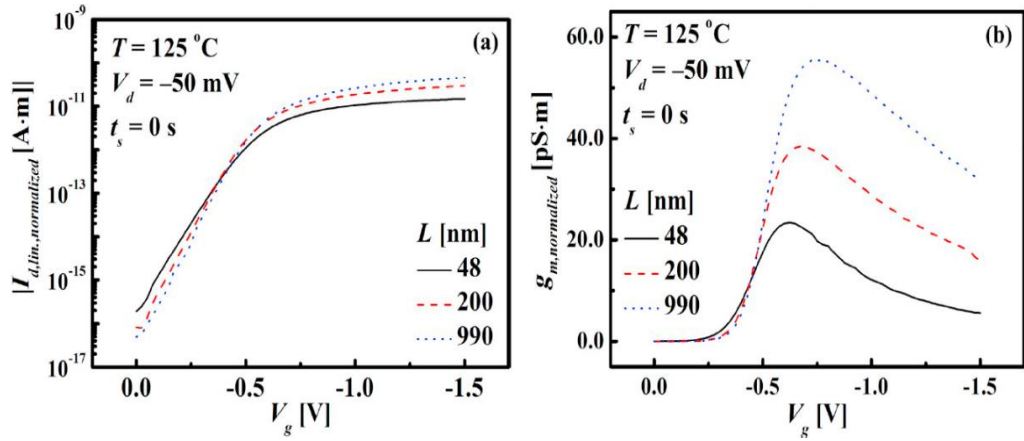
Diğer yandan, kaynak-akaç ( $L_{sd}$ ), kapı-akaç ( $L_{gd}$ ) ve kapı-kaynak ( $L_{gs}$ ) aralığı gibi bir HEMT'nin  $V_{br}$ 'sini etkileyen bazı fiziksel faktörlerde vardır. Bu faktörler Şekil 3.7'de

gösterilmiştir.  $L_{sd}$  veya  $L_{gd}$  uzunluk parametrelerinin etkisi HEMT cihazlarının  $V_{br}$ 'sini doğrusal olarak etkiler. Diğer yandan,  $L_{sd}$  ve  $L_{gd}$  parametrelerini herhangi bir olumsuz etki olmadan artıramayız, çünkü  $L_{sd}$  parametresini arttırmak daha spesifik açık dirence neden olur ve bu da daha büyük geçiş kayıplarına neden olur. Ayrıca, olası minimum  $L_{sd}$  uzunluğu ile daha büyük  $V_{br}$  değerlerine ulaşmayı sağlar. Parazitik bileşenlerin daha yüksek değeri ve artan anahtarlama ve iletim kayıpları gibi yüksek çalışma sıcaklıklarından ve yüksek voltaj streslerinden kaynaklanan diğer problemler,  $L_{sd}$  uzadıkça iki katına çıkarılabilir.



Şekil 3.7 Fiziksel büyüklüklerin gösterilmesi;  $L_{sd}$ : Kaynak-Akçe Uzunluğu,  $L_{gs}$ : Kapı-Kaynak Uzunluğu,  $L_{gd}$ : Kapı-Akçe Uzunluğu

Ek olarak, daha kısa  $L_{sd}$ , bazı kararsızlık sorunlarına neden olabilir. Örneğin, Şekil 3.8, farklı kanal uzunluklarının I-V üzerindeki kararsızlık etkilerini ve Si/SiGe kanallı bir MOSFET'in kazanç özelliklerini göstermek için verilmiştir. Farklı kanal uzunluklarına sahip MOSFET'ler için negatif sapma sıcaklık kararsızlığının (NBTI) etkileri literatürde incelenmektedir (Kim vd., 2019). NBTI bozulması, özellikle p-tipi MOSFET'lerde cihazın eşik voltajını yükseltir. Bu durum yaşlanma sorunu olarak adlandırılabilir. Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b, kanal uzunluğunu azaltırken sırasıyla drenaj akımında ve MOSFET kazancında bir düşüş olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, kanal uzunluğu azaldıkça NBTI bozulmasının azaldığı ve elektriksel özelliklerin bozulduğu, yani kısa kanalların hızla aşınabildiği görülmektedir (Kim vd., 2019). Sonuç olarak, belirli açık direnci azaltmak veya  $V_{br}$ 'yi arttırmak için bazı sınırlamalar vardır. Bu nedenlerle istenilen uygulama dikkate alınarak uygun değeri kanal uzunluğu hesaplanmalıdır.



Şekil 3.8 Si/SiGe kanallı MOSFET için farklı kanal uzunluklarında NBTI bozulmasının yüksek sıcaklık ve negatif sapma üzerindeki etkileri a) I-V karakteristiklerinin bozulması ve b)  $g_m$ - $V_g$  özellikleri (Kim vd., 2019)

### 3.6.2 Farklı Yarı İletken Malzemelerle HEMT'lere Genel Bakış

Bu bölümde; InP, GaAs ve GaN temelli HEMT'leri içeren yayınlanmış üç çalışma incelenmiştir. Hangi tip malzemelerin yüksek güçlü uygulamalarla uyumlu olduğu ve HEMT cihazları için hangi tip çalışmalara daha fazla geliştirme yapılması gerektiği araştırılmıştır. HEMT teknolojisinde kullanılan malzemeler üzerine yapılan çalışmalar genel olarak üç temel malzeme üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu malzemeler GaN, GaAs ve InP olarak sıralanabilir. HEMT'lerin malzemesi olarak yarı iletken özelliklerini göstermek için Tablo 3.1 verilmiştir. 4H-SiC gibi diğer gelişmiş yarı iletken malzemeler genellikle Cordier vd. (2008) ve Nakamura vd. (2007)'de olduğu gibi kanal yapısı oluşturmaktan ziyade altlık gibi yardımcı malzemeler olarak kullanılır.

Tablo 3.1 HEMT yarı iletken malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması (Golio, 2003)

Material	$E_g$ (eV)	$\epsilon_r$	$\kappa$ (W/K·cm) @300K	$E_c$ (V/cm)	$\tau_{minority}$ (sec)
GaAs	1,42	12,5	0,54	$4 \cdot 10^5$	$\sim 10^{-8}$
InP	1,34	12,4	0,67	$4,5 \cdot 10^5$	$\sim 10^{-8}$
4H-SiC	3,20	10,0	4,90	$3,5 \cdot 10^6$	$\sim (10-100) \cdot 10^{-9}$
GaN	3,40	9,50	1,30	$2 \cdot 10^6$	$\sim (1-100) \cdot 10^{-9}$

GaAs, elektronların taşıma özelliklerinden dolayı düşük güç, yüksek frekans, yüksek kazanç ve düşük gürültü gerektiren HEMT uygulamaları için daha uyumlu kabul

edilebilir. Ayrıca, şu anda yeni nesil terahertz uygulamalarına uygun olduğu kabul edilmektedir (Li vd., 2011).

Sum vd. (2017), GaAs substratları üzerinde InAlAs/InGaAs metamorfik yüksek elektron hareketli transistörleri (mHEMT) ifade etmişlerdir. Si katkılı InP/In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As Schottky katmanlarına sahip mHEMT'lerin epitaksiyel yapısı, bir atomik katman biriktirme (ALD) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasivasyon işlemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GaAs mHEMT'leri plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD) SiN pasivasyonu ile karşılaştırırken, ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasivasyonuna sahip cihazlar, birden fazla büyüklük sırası daha düşük kapı kaçak akımı ( $J_g$ ) ve çok daha düşük temas direnci ( $R_C$ ) ve spesifik kontak direnci ( $\rho_C$ ) ile karşılaştırılır. 100 nm kapı uzunluğu ( $L_g$ ) In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As/In<sub>0,7</sub>Ga<sub>0,3</sub>As Si-katkılı InP/In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As Schottky katmanları ve ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasivasyonu ile mHEMT'ler, maksimum salınım frekansı gibi önemli DC ve RF özellikleri sergiler ( $f_{max} = 388,2$  GHz).

Aynı zamanda InP tabanlı HEMT'lerin yüksek frekans ve düşük gürültülü uygulamalar için uygun olduğu düşünülmüş ve çalışmalar 2010'dan önce 610 GHz maksimum salınım frekansına ulaşmıştır (Yeon vd., 2007). Ancak son on yılda yapılan çalışmalar 1 THz değerlerine ulaşmaya başlamıştır. 1 THz'den fazla maksimum salınım frekansı, Ajayan ve Nirmal, (2016)'de olduğu gibi, yoğun katkılı kaynak boşaltma bölgelerine (HSDR) sahip InP substrat üzerinde InGaAs kanallı HEMT ile elde edilmiştir.

Ajayan ve Nirmal (2016) salınım frekansı için, s-d bölgesini yoğun bir şekilde katlayarak gelecekteki uygulamalar için 1 THz'den 1,2 THz'e yükseltilmiştir. Diğer yandan,  $V_{ds} = 1V$ 'de  $I_{DS\_max} = 1475A/m$ 'nin bir sonucu elde edilmiştir. Sonuç, yüksek frekanslı ve yüksek kazançlı uygulamalarla mükemmel bir uyumluluk göstermiş, ancak yüksek güçlü uygulamalarla uyumlu olmamıştır.

GaN temelli HEMT'ler, InP ve GaAs temelli HEMT'ler kadar yüksek frekanslı uygulamalar için uygun değildir. Ancak tam tersine, yüksek güç yoğunluklu uygulamalar için büyük potansiyele sahiptirler. GaN tabanlı HEMT'ler, yüksek  $V_{br}$ , yüksek doyumluk elektron hızı ve yüksek akım yoğunluğu gibi üstün malzeme özelliklerinden dolayı güç uygulamaları için umut verici bir cihaz olarak kabul edilir

(Huang vd., 2020). Diğer yandan, HEMT'lere dayalı GaN, uzay teknolojisi gibi aşırı koşullar için gerekli kabul edilebilecek 1000°C'ye kadar aşırı sıcaklıklarda çalışma kabiliyetine sahiptir (Maier vd., 2010). Pasivasyon tekniği kullanılarak AlGaIn/GaN kanallı HEMT'nin  $V_{br}$  geliştirilmesi hakkında yeni bir çalışma önerilmiştir (Chander vd., 2018). Bu çalışmada, 30nm kanal ve 5µm tampon kalınlığı,  $L_{gs} = 0,8\mu\text{m}$  ve  $L_{gd} = 2,7\mu\text{m}$  -15V geçit voltajı ve  $f_T = 3\text{GHz}$  ile 412V'a kadar  $V_{br}$ , SiC substrat üzerinde büyütülerek ve SiO<sub>2</sub> pasifleştirme ile elde edilmiştir.

Daha küçük parazitik kapasitanslara yol açan daha küçük kalıp boyutları, HEMT'ye dayalı InP ve GaAs'ın 100 GHz üzerindeki frekanslarda çalışmasına izin verirken, HEMT'ye dayalı GaN, 3 GHz'de çalışır. Diğer yandan, GaN tabanlı HEMT, yüksek güçlü uygulamalar için büyük  $V_{ds}$  değerlerinde çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Chander vd., 2018). Bu özellikleri nedeniyle GaN tabanlı HEMT'ler, güç elektroniği uygulamaları için büyük bir potansiyel vaat etmiştir. MOSFET'lerle karşılaştırıldığında, gelişmiş anahtarlama performansı, geçiş kayıpları ve ayrıca iyileştirilmiş verimlilik ile sonuçlanan HEMT'leri kullanarak daha yüksek  $V_{br}$  seviyeleri ile yüksek çalışma frekansı elde edebiliriz. HEMT teknolojisi, verimliliği artırmak için kullanıldıklarında daha düşük güç yoğunluğuna ve kontrol karmaşıklığına neden olan aktif veya pasif kenetleme hücreleri olmadan güç uygulamaları tasarlama fırsatı verir. GaN tabanlı bir HEMT ile tasarlanmış ve sert anahtarlama ile %95'in üzerinde verime ulaşan birkaç DC-DC güç dönüştürücü çalışması bulunmaktadır (Saito vd., 2008; Wu vd., 2008; Gamand vd., 2012; Wu vd., 2019; Qian vd., 2019). Bu nedenle, basit ve daha verimli uygulamalar üretmek için HEMT teknolojisi, daha düşük kayıp ve daha yüksek  $V_{br}$  değerleri talep eden güç elektroniği uygulamalarının ihtiyaçları ile bu amaca daha iyi hizmet etmelidir.

## 4. YÖNTEM VE SİMULASYON

### 4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), fiziğin ve mühendisliğin hemen hemen her alanında kullanılabilen, gerçeğe yakın çözümleri en az hatayla bulmamıza yardımcı olan, işlevsel bir yöntemdir. SEY, karmaşık ve zorlu görünen problemlerin küçük parçalara ayrılarak kontrol edilebilir düzeye indirilebilmesini sağlar. SEY'in temelinde çözüme ulaştırılmak istenen geometrik bir cismin çok sayıda, küçük, basit ve birbirine bağlı sonlu elemana ayrılarak incelenmesi vardır. Fakat burada şöyle bir problem meydana çıkmaktadır: sonlu elemanlar yönteminde geometrik cisimler daha basite indirgenerek incelendiğinden dolayı elde edilen sonuçlar gerçek değerler değil yaklaşık değerler olabilmektedir. Bu durumun ilk bakışta sorun teşkil edeceği düşünülse de aslında doğru sonuçların elde edilmesi tasarımcıya bağlıdır. Şayet tasarımcı problem ayrıştırılmasını ve tanımlamasını detaylı yaparsa sonuç olarak gerçek değerleri de elde edebilir (de Weck ve Kim, 2004).

Sonlu elemanlar yönteminin temelleri 1950'li yıllarda atılmıştır. SEY'in temelini oluşturan deneme fonksiyonları ile diferansiyel denklemlerin çözülmesi ise haliyle daha eski yıllardan itibaren kullanılmaktadır. Lord Rayleigh ve Ritz diferansiyel denklemlerin yaklaşık olarak çözümlerini elde edebilmek adına deneme fonksiyonlarını kullanmışlardır. Bu tür eski yöntemler, günümüzde kullanılan SEY ile karşılaştırıldığında ortaya önemli bir eksiklik çıkmaktadır. Bu eksiklik deneme fonksiyonlarının çözülmek istenen problemin belirli bir alanına uygulanamamasıdır. Deneme fonksiyonlarıyla çözüm yapılmak istenirse problemin tüm alanına uygulanmak zorundadır. 1940'lı yıllarda Courant'ın alt alanlarda parçalı sürekli fonksiyon kavramını oluşturmasına kadar, Galerkin yöntemi SEY için bir temel oluşturmaktaydı. Courant'ın bu kavramı ortaya atması SEY'in asıl başlangıcı olarak kabul edilebilir. Sonlu eleman bir terim olarak ilk kez 1960 yılında Clough tarafından bir uçak zorlanma analizi çalışmasında kullanılmıştır. 1960 ve 1970'li yıllarda SEY yeryüzü levha ve kabuklarının bükülmesinin analizinde, basınç kaplarının analizinde, üç boyutlu yapıların analizinde kullanılmaya başlanmıştır (Hutton, 2004).

SEY'in elektrik mühendisliğinde ilk defa kullanımı da yine 1960'lı yıllara denk gelmektedir. Bu alanda önemli sayılabilecek ilk uygulama Winslow tarafından gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmada üçgen sonlu farklar adı altında ivmelendirme mknatısları incelenmiştir. Helmholtz denkleminin SEY ile analizi Alta Frekuensi Konferansı'nda P. Silvester tarafından sunulmuştur. Elektrik makineleri için iki boyutlu doğrusal olmayan teknikler ilk olarak 1970'li yıllarda çalışılmıştır (Chari vd., 1993). Günümüzde elektromanyetik ve elektrostatik problemlerin çözümünde SEY aktif olarak kullanılmaktadır. SEY o kadar önemli bir hal almıştır ki IEC tarafından Elektrik Kabloları – Akım Değerlerinin Hesaplanması – Sonlu Elemanlar Yöntemi adıyla bir standart yayımlanmıştır (IEC Technical Report, 2003).

#### **4.1.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları**

Sonlu elemanlar yöntemi uygulanırken aşağıdaki adımlar sırasıyla takip edilmelidir.

1. Problem geometrisi belirlenmelidir,
2. Analizi yapılacak olan cisim kapalı bir hacim ile sınırlandırılmalıdır,
3. Sınır koşulları hem cisim için ve hem de kapalı hacim için oluşturulmalıdır,
4. Çözüm bölgesi sonlu elemanlara ayrılmalıdır (ayrıklaştırılmalıdır),
5. Her bir sonlu eleman için temel denklemler yazılmalıdır,
6. Çözüm bölgesindeki sonlu elemanlar birleştirilmelidir,
7. Sonlu elemanların birleştirilmesinin ardından elde edilen lineer cebirsel denklem takımını çözülmelidir,
8. Sonuçlar elde edilmeli ve gösterilmelidir (Semen, 2019).

##### **4.1.3.1 Sınır koşullarının belirlenmesi**

Sınır koşulları, bölgenin sınırlarında verilen değerlere denir. Üç farklı tipte sınır koşulu bulunmaktadır. Bunlar:

- Birinci Tür: Dirichlet türü sınır koşulu: Sınırlarda fonksiyonun değerinin belli olma koşuludur.

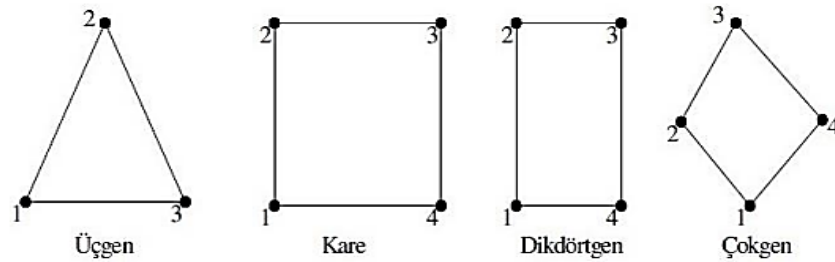
• İkinci Tür: Neuman türü sını koşulu: Sınırlarda fonksiyonun türevinin tanımlı ve belli olma koşuludur.

• Üçüncü Tür: Robbins türü sınır koşulu: Sınırlarda fonksiyonun kendisinin ve türevinin belli olma koşuludur (Semen, 2019).

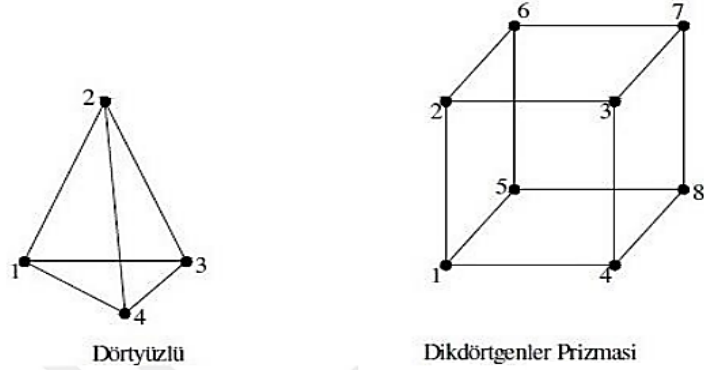
#### 4.1.3.2 Sonlu eleman ağının seçilmesi

Sonlu elemanlar yönteminin temel seçim kuralına göre, seçim ilgili problemin geometrisine bağlıdır. Sonlu eleman belirlenirken geometrinin oluşturduğu boyut önemlidir. Bu sebepten ötürü SEY’de bir, iki, üç ve çok boyutlu elemanlar tanımlanarak analizler yapılabilmektedir.

Bir boyutlu sonlu elemandan kasıt iki düğüm noktası arasındaki bir çizgiden oluşan şekildir. İki boyutlu sonlu eleman ilgili problemin yapısına uygun olacak şekilde seçilebilir. Üçgen, kare, çokgen veya herhangi bir tanımlamaya uymayan kapalı bir yüzey de iki boyutlu sonlu eleman olarak seçilebilir. Problem geometrisinin simetrik olduğu durumlarda iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılır. Problem geometrisinin karmaşık ve asimetric olduğu durumlarda ise üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılır. Şekil 3.1’de iki boyutlu sonlu elemanlara, Şekil 3.2’de ise üç boyutlu sonlu elemanlara örnekler verilmiştir (Kutucu, 2009; Semen, 2019).



Şekil 4.1 İki boyutlu sonlu eleman örnekleri



Şekil 4.2 Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri

SEY ile elektrik alan analizi yapılırken genellikle iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılmaktadır (Kutucu, 2019).

#### 4.2 Elektrik Alan Problemleri için Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemlerinin bazı özel halleriyle elektrik alanlar ifade edilebilirler. Bu denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.4)$$

$$\nabla \times J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen terimlerin anlamları ve birimleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1 Maxwell denklemlerinde kullanılan semboller (Yazıcı, 2022)

Terim	Anlamı	Birimi
E	Elektrik alan şiddeti	(V/m)
D	Elektriksel akı yoğunluğu	(C/m <sup>2</sup> )
H	Manyetik alan şiddeti	(A/m)
B	Manyetik akı yoğunluğu	(T)
J	Akım yoğunluğu	(A/m <sup>2</sup> )
$\rho$	Elektriksel yük yoğunluğu	(C/m <sup>3</sup> )

Maxwell-Ampere yasası denklem (4.1)'de, Maxwell-Faraday yasası denklem (4.2)'de, elektrik alan için Gauss yasası denklem (4.3)'te, manyetizma için Gauss yasası denklem (4.4)'te ve sürekliliği ifade eden denklem (4.5)'te verilmiştir. Yukarıdaki denklemlere ek olarak bazı yardımcı denklemlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yardımcı denklemler aşağıda verilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (4.6)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (4.7)$$

$$J = \sigma E \quad (4.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\varepsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti (F/m),  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m)'dir. SI birim sisteminde;  $\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}$  F/m ve  $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$  H/m olarak tanımlanmıştır.

P, polarizasyon alan vektörüdür. Polarizasyon alan vektörü genellikle elektrik alanın işlevidir. P, yalıtkan malzemeler için kritik bir değerdir. Ortamda elektrik alan olmadığında dahi elektriksel polarizasyona sahip malzemeler olabilir. Elektrik polarizasyonu, yalıtkan malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikimine sebep olur (Semen, 2019).

M, mıknatıslanma vektörüdür. Mıknatıslanma vektörü manyetik alanın varlığında malzemenin mıknatıslanmasını tanımlayan vektördür. Herhangi bir ferromanyetik malzemenin ayırt edici özelliklerinden birisi uygulanan manyetik alana karşı verdiği tersinmez ve doğrusal olmayan manyetizasyon tepkisidir. Ferromanyetik malzemelerin bu davranışları histerezis döngüsü ile açıklanır. Malzeme elektrik alana

değil, manyetik alana tepki verir. Sürekli miktansızlar, ortamda manyetik alan olmasa dahi mıknatıslanmaya sahiptir. Her malzeme çeşidinin histerezis döngüsü farklıdır (Semen, 2019).

Doğrusal malzemelerde, elektrik alan ve manyetik alan için kullanılan denklemler (4.9) ve (4.10)'de verilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon E \quad (4.9)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (4.10)$$

Doğrusal olmayan malzemelerde, elektrik alan ve manyetik alan için kullanılan denklemler (4.11) ve (4.12)'te verilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E + D_r \quad (4.11)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\mu_r$  malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğini,  $\varepsilon_r$  malzemenin bağıl dielektrik katsayısını ifade etmektedir. Denklem (4.11)'de verilen  $D_r$  ifadesi malzemenin artık elektriksel akı yoğunluğunu temsil eder. Çünkü elektriksel akı yoğunluğu, doğrusal olmayan malzemelerde ortamda elektrik alan var olmasa dahi bulunabilir. Denklem (4.12)'te verilen  $B_r$  ifadesi malzemenin artık manyetik akı yoğunluğunu temsil eder. Çünkü manyetik akı yoğunluğu doğrusal olmayan malzemelerde ortamda manyetik alan var olmasa dahi bulunabilir. Manyetik akı yoğunluğu (B) ve manyetik alan şiddeti (H) arasında denklem (4.13)'te verilen denklemdeki gibi bir ilişki vardır (Semen, 2019).

### **4.3 Elektrik Alan Problemleri için Sonlu Elemanlar Denklemlerinin Yazılması**

Statik elektrik alan ifadesi zamanla değişmeyen elektrik alanı ifade eder. Duran ya da sabit hızla hareket eden yükler, statik elektrik alan kaynağıdır. Şebeke frekanslı

gerilimlerin (50/60 Hz) oluşturduğu elektrik alanlar, statik elektrik alan gibi incelenirler

Sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak elektrik alan problemleri çözümlenirken ilk olarak hesaplanması istenilen potansiyel düğümü için sınırlayıcı koşullar belirlenir. Bunun için bilinen malzeme özelliklerinden ve bilinen potansiyellerden yararlanılır. Daha sonra çözüm bölgesi ayrıklaştırılarak, problem çok basit bir fonksiyonla yaklaştırılır. Matris oluştuktan sonra, yaklaşık fonksiyonlar doğrusal bir denklem sistemi oluşturmak için her bir ayık bölgeye yazılır. Bu doğrusal sistem iteratif bir sayısal yöntemle çözülür. Her bir ayık bölge düğümlerindeki potansiyeller hesaplanır. Ardından potansiyel yaklaşım fonksiyonları oluşturulur. Böylece her bir ayık bölgenin köşelerindeki potansiyel büyüklüklere göre istenilen bir noktanın elektrik potansiyelini ve elektrik alan şiddetini belirlemek mümkün olur.

Fiziksel olayların yarattığı enerjiyi minimize etmek sonlu elemanlar yönteminin temel ilkesidir. Bu ilke, problemin tanımını yapan diferansiyel denklemin (örneğin; Poisson ya da Laplace denklemlerinin) çözümü ile aynı sonucu verir (Semen, 2019).

## **4.2 Modelleme ve Benzetim**

Günümüz teknolojisi ile tarihte ya da günümüzde fiziksel olayların daha kolay ve anlaşılır hale getirilmesi için modelleme tekniği kullanılmıştır. Modellemede 2 çeşit olgu vardır. İlki bilinmeyen ve anlaşılmayan olgu olan hedef, ikinci olgu ise bilinen ve anlaşılabilir kaynak olgusudur. Mevcut kaynaklarla bilinmeyen ve anlaşılmayan bir hedefi daha anlaşılabilir hale getirmek için yapılan bütün işlemlere modelleme, çıkan sonuca ise model denmektedir. Çeşitli modelleme türlerine; matematiksel modelleme, fiziksel modelleme, tümeşik modelleme gibi vb. örnek verilebilir.

Modellemenin avantajları:

1. Ele alınan problemin çözümünün bilimsel temellere oturmasının sağlanması
2. Gerçek ölçekteki olası hataları önceden tahmin edilmesi
3. Konuların ve araştırılan bulguların daha basit hale indirgenmesiyle kavranabilirliğinin artırılması

#### 4. Hızlı veri aktarımlarının ve hızlı sonuçların alınarak zamandan tasarruf sağlanması

Benzetim ise, gerçek bir sistemin modelini tasarlama süreci ve sistemin davranışını anlamak için geliştirilen bir model üzerinde denemeler yapmaktır. Teorik ya da gerçek fiziksel bir sisteme ait neden-sonuç ilişkilerinin bir bilgisayar modeline yansıtılmasıyla, farklı şartlar altında gerçek sisteme ait davranışların bilgisayar modelinde izlenmesini sağlayan bir modelleme tekniğidir.

Benzetim, genelde gerçekte olmayan veya maliyetli ve zor gerçekleştirilebilecek sistemlerin denenmesine imkân sağlar. Bilgisayar ortamında sistem gerçekleştirilir ve tasarım sırasında gözden kaçan teorik hatalar, uygulama sırasında meydana gelebilecek ve uygulama çalışmadan görülemeyecek hataların birçoğu benzetim sayesinde gözlemlenip düzeltilebilir.

Yarı iletken cihazların elektriksel tepkisinin benzetimi, fiziksel modeller ve sayısal yöntemlerle mümkün olmaktadır. Cihaz benzetimleri, cihaz yapıları içinde meydana gelen fiziksel süreçleri tanımlamayı ve altta yatan fiziğin anlaşılmasını sağlamayı amaçlar. Yarı iletken cihaz benzetimi iki kısım olarak sınıflandırılır: süreç benzetimi ve cihaz benzetimidir. Yarı iletken cihazların, örneğin transistörlerin üretim süreci, yarı iletken süreç benzetimlerinde modellenmiştir. Katkı ve gerilim davranışlarını elde etmek için bir süreç akışındaki adımları kullanarak modellemek, yarı iletken süreç benzetiminin temel amacıdır. Cihaz benzetimi, cihazın elektriksel özelliklerinin modellenmesinden oluşur.

Cihaz benzetimlerinde, fiziksel tabanlı modellemenin kullanılması yoluyla, belirli öngerilim koşulları altında belirli fiziksel yapılar için elektriksel özellikler tahmin edilir. Fiziksel temelli modelleme, mevcut verilerin analitik formüllerle, minimum karmaşıklık ve iyi doğrulukla yaklaşık olarak uydurulmasının amaçlandığı deneysel modellemeden farklıdır. Fiziksel tabanlı modellemede, bir cihazın DC, AC veya geçici çalışma modları, cihazın çalışmasının bir ızgaraya (iki veya üç boyutlu mesh) yaklaştırılması ve Maxwell denklemlerinden türetilen bir grup diferansiyel denklem uygulaması ile modellenir. Cihaz benzetimini gerçekleştirmek için fiziksel yapı tanımlanır, fiziksel modeller seçilir ve simüle edilecek ön koşulları belirlenir. Fiziksel

tabanlı benzetimler, içgörü sağlamaları, tahmine dayalı olmaları ve teorik bilgileri yakalayıp görselleştirebilmeleri açısından avantajlıdır. Dezavantajları, ilgili fizik ve sayısal işlemleri benzetime dâhil edilmesi gerektiğidir.

#### **4.4 Crosslight APSYS 2021 Yazılımı ve Çalışma Alanları**

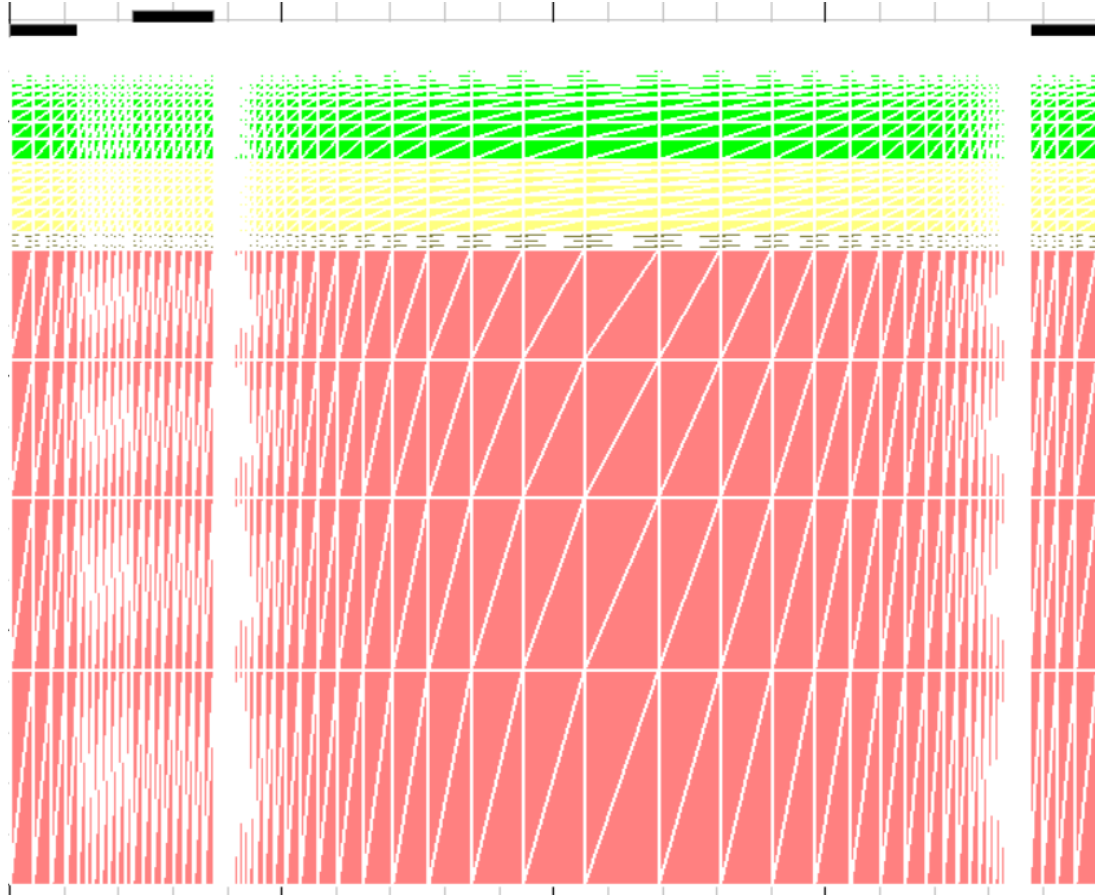
Teknoloji bilgisayar destekli tasarım (TCAD), yarı iletken işleme teknolojilerini ve cihazlarını geliştirmek ve optimize etmek için bilgisayar benzetimlerinin kullanımını ifade eder. Crosslight APSYS benzetimi, yarı iletken cihazların elektriksel, optik, termal özelliklerini ve üretim sürecini simüle etmek için gelişmiş çok boyutlu bir hesaplama aracıdır. Crosslight APSYS (URL-3), endüstri lideri süreç ve cihaz benzetim araçlarını içeren kapsamlı bir ürün paketinin yanı sıra benzetim görevlerini yönetmek ve benzetim sonuçlarını analiz etmek için grafik kullanıcı arayüzü (GUI) odaklı güçlü bir benzetim ortamı sunar. Crosslight APSYS süreç ve cihaz benzetim araçları, tamamlayıcı metal oksit-yarı iletken alan etkili transistör (CMOSFET), Fin temelli alan etkili transistör (FinFET), güç cihazları, bellek cihazları, görüntü sensörü, güneş pilleri ve analog/RF cihazları gibi çok çeşitli uygulamaları destekler. Crosslight APSYS, ara bağlantı modelleme ve çıkarma için araçlar sağlayarak çip performansını optimize etmek için kritik parazit bilgileri sağlar.

Crosslight APSYS, elektriksel özellikler, fiziksel özellikler ve işleme teknolojisi benzetiminde yarı iletken cihazların geliştirilmesi ve uygun şekilde yarı iletken cihazların analizi için baskın bir benzetim yazılımıdır. Bu TCAD araçları, zaman alıcı ve pahalı yarı iletken cihazın erken araştırma ve geliştirmesinin yerini alabilir veya kısmen değiştirebilir. Crosslight APSYS, benzetim sonucunun analizi için güçlü bir GUI görsel benzetim arayüzüne sahiptir. Crosslight APSYS, yarı iletken şirket araştırma ve geliştirme kuruluşları ve akademik kuruluşlar için bir çözüm getiren yarı iletken cihaz performansının önemli parametre bilgileriyle birlikte, etkileşim modu ve cihazların fiziksel ve elektriksel özelliklerini çıkarma araçlarını da sağlar.

*Crosslight APSYS 'in Özellikleri:*

1. Benzetim öğelerinin yüksek verimlilik ve aerodinamik yönetimi
2. Minimum kullanıcı etkileşimi ile büyük ölçekli benzetimin otomatik işlenmesi ve basitleştirilmesi
3. Teknik benzetimin uygun hiyerarşik klasör gösterimi
4. Tamamen parametrik benzetim
5. Uygulanması kolay en uygun şekle sokma ve hassasiyet analizi
6. TCAD yapılarının ve benzetim sonuçlarının hassas 1D, 2D ve 3D görsel görüntü verebilme özelliği (Şekil 4.1).

Cihaz benzetiminde gerilimler, akımlar ve yükler, iletim mekanizmalarını ve taşıyıcı dağılımını açıklayan denklemler kullanılarak hesaplanır. Cihazın fiziksel özellikleri, tek tip bir ayırık ızgara (ağ) olarak simüle edilir.



Şekil 4.3 Yapının Mesh Halinin Görünümü

Crosslight APSYS, birçok parça ve benzetim aracından oluşur. Çalışmada kullanılan uygulamaları ise;

- LayerBuilder
- SimuApsys
- CrosslightView

**LayerBuilder:** Cihaz editörü, TCAD benzetiminin geometrik yapısını oluşturmak için kullandığımız bir araçtır. Cihaz editörü, 2D ve 3D cihaz geometrik şekillerini birleştiren bir düzenleyici ve 3D olarak geliştirilebilen bir benzetim teknolojisi aracıdır. Bu editöre bütünleşmiş tümü aynı veri üzerinde kullanabileceğimiz farklı işletim modları vardır. Geometrik yapının çizimi ve kod ile oluşturulan 3D cihaz geometrik yapısı serbestçe revize edilebilir ve herhangi bir 3D yapıyı büyük bir esneklikle oluşturmak için uyumludur. Ek olarak, cihaz editörü en gelişmiş görselleştirme teknolojisine sahiptir. Bu güçlü görselleştirme özelliği ile kullanıcıların diğer alanlardan çıkarken görüntülenecek şeffaf veya seçilen belirli bir alanının gösterilmesine olanak tanır, böylece geliştiricilerin tasarım verimliliğini etkili bir şekilde artırır. Kullanıcı bilgisayarları metaryaller ile yapıyı istediği boyutta ve özellikte oluşturarak kullanıma hazır hale getirebilir.

**SimuApsys:** SimuApsys uygulaması, bir devredeki tek bir yarı iletkenin veya birkaç kombine cihazın elektriksel, termal ve optik davranışını sayısal olarak simüle eder. Terminal akımları, voltajlar ve yükler, iletim mekanizmalarını ve taşıyıcı dağılımını gösteren bir dizi cihaz denklemi kullanılarak hesaplanır. Denklemler, mesh'deki (ağ) her bir ayrık nokta için çözülür. SD modülü kullanılarak doğru akım (DC), alternatif akım (AC) ve geçiş benzetimleri yapılabilir. Ek olarak, benzetim sırasında çeşitli zaman noktalarında cihaz içindeki enerji seviyeleri, alanlar, potansiyeller, taşıyıcı yoğunlukları ve sıcaklıklar hakkında bilgi içeren çıktı dosyaları üretir. Bu aracın özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Gelişmiş FinFET ve FDSOI gibi teknolojileri, sıcak taşıyıcı etkileri ve birçok diğer gelişmiş taşıyıcı olaylarını logic olarak simüle eder. Gerilim mühendisliği de dâhil olmak üzere birçok konuda kullanılabilir. Sentaurus cihazı Sige, Sism, InGaAs, InSb

ve diğerk yüksek hareketlilik kanallarının modellenmesi atomik yapılar ve atomik modelleme adımlarını yüksek verimli yöntemler ile uygular ve simüle eder.

- Bileşik Yarı İletken Teknolojileri ile gelişmiş niceleme modelleri ve hetero yapıda taşıyıcıların taşınması için karmaşık tünel açma mekanizmaları HEMT ve HBT gibi cihazlar GaAs, InP'den yapılır. Ancak bunlarla sınırlı olmayıp GaN, SiGe, SiC, AlGaAs, InGaAs, AlGaN ve InGaN gibi yapıları da simüle edebilir.
- Optoelektronik Cihazlar olan CMOS görüntüsü gibi yarı iletken cihazların Optoelektronik özellikleri sensörler ve güneş pilleri simüle etme yeteneğine sahiptir.
- Güç Elektronik Cihazlar gibi en esnek ve gelişmiş geniş bir güç aralığında elektrik ve termal etkileri IGBT, MOS, LDMOS, tristörler ve yüksek frekanslı cihazlar GaN ve SiC gibi geniş bantlı malzemedan yapılmış yüksek güçlü cihazları simüle etmede etkilidir.
- Flash bellek gibi yalıtkan cihazlar ile herhangi bir yüzen kapıyı simüle edebilir. Yüksek- $k$  özellikli cihazlar da dahil olmak üzere geniş bir alanda kullanımı mevcuttur.
- Yeni yarı iletken teknolojileri kullanıcı tanımlı modeller ile yeni malzemedan yapılmış yapıların ileri fizik ve ekleme yeteneği ile araştırılmasına izin verir.

**CrosslightView:** Yarı iletken cihazın aşağıda belirtilen akım ve voltaj değerlerini çıkarmak için kullanılmaktadır.

1. Kırılma voltajı ( $V_{br}$ )
2. Eşik voltajı ( $V_{th}$ )
3. Akım Voltaj Grafikleri ( $I_d-V_d$ )
4. Enerji Bant Genişlikleri
5. Potansiyel Enerji Yoğunlukları Grafikleri
6. Diferansiyel Potansiyel Enerji Grafikleri
7. Elektriksel Alan Grafikleri

## 8. R<sub>on</sub> Eğrisi Grafikleri

Crosslight APSYS ile sağlam benzetim sonuçları elde etmek için cihazın fiziğini anlamak ve buna göre uygun meshlemeyi ayarlamak çok önemlidir. Ayrıca, cihaz fiziğini anlayarak, Crosslight APSYS' in geniş model kitaplığından daha gerçekçi modeller seçmek mümkündür, böylece daha gerçekçi modeller ile benzetimin daha iyi yapılmasını sağlar. Ayrıca cihazda kullanılacak malzemelerin parametre dosyaları iyi tanımlanmış olmalıdır. Ancak, çizgi/ızgara boyutları, fiziksel modeller ve malzeme parametreleri ile ilgili her şey iyi ayarlanmış olsa bile, bazı yakınsama sorunları ortaya çıkabilir. Bu genellikle, çok küçük ve çok büyük sayılarla kayan noktalı işlemlerin performansı sırasındaki sayısal zorluklardan kaynaklanan sorunlarla ilgilidir.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Alttaş, HEMT epitaksiyel yapısının üzerinde büyütüleceği alttaş, aygıt performansını etkileyen önemli parametrelerden birisidir ve aygıtın uygulama alanı göz önünde bulundurularak seçilir. Maddelerin özellikleri incelendiğinde Si'nin, oldukça düşük örgü uyumsuzluğu nedeniyle alttaş için en uygun malzeme olduğu görülmektedir.

Çekirdeklenme tabakası, alttaş ile bunun üzerinde büyütülecek tampon/kanal tabakası arasındaki stres ve örgü uyumsuzluklarını azaltmak amacıyla büyütülür. Çekirdeklenme tabakasının tercihi, alttaş malzemesine ve epitaksiyel büyütme tekniğine bağlı olarak değişir (Dikme, 2006). Genelde çok ince AlN, AlGaN ya da GaN tabakası tercih edilir. Çalışmada kullanılan çekirdeklenme tabakası AlGaN'dır.

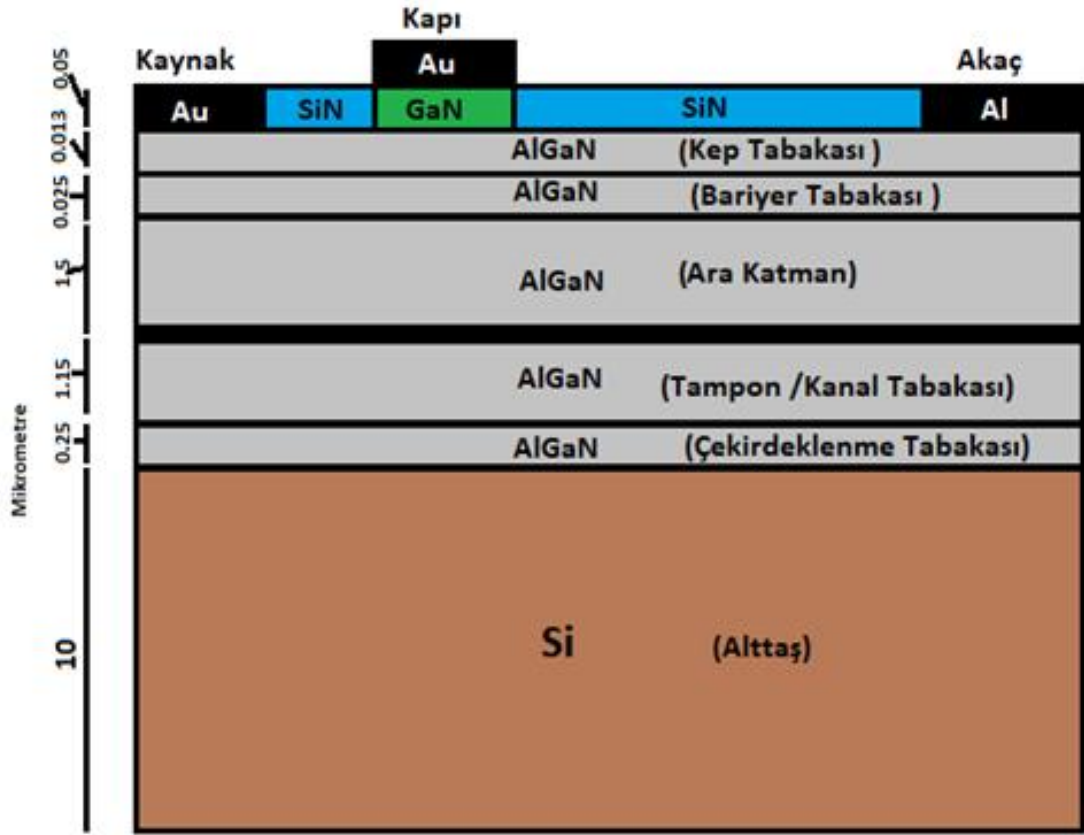
Tampon/Kanal Tabakası Bariyer tabakasından daha düşük bir bant aralığına sahip olan tampon/kanal tabakası, 2-DEG oluşturmak amacıyla yüksek dirençli (yarı yalıtkan), düşük kusur yoğunluklu ve düzgün bir yüzey yapısına sahip olacak şekilde oldukça yüksek kalitede büyütülür. Aksi halde tampon tabakasının hemen altında oluşan 2-DEG elektronları tuzaklanarak tampon akım kaçaklarına ve akaç akım çökmelerine yol açarak kanalın kontrol edilmesini zorlaştırıp HEMT aygıttan yüksek çıkış gücü ve yüksek kırılma gerilimleri elde edilmesini engeller. Tampon tabakası, iyi bir 2-DEG hareketliliği ve tabaka taşıyıcı konsantrasyonu elde etmek amacıyla genelde 1-2  $\mu\text{m}$  kalınlıkta olacak şekilde büyütülür (Wu vd., 1998; Eastman vd., 2001).

Ara katman, tampon tabakası ile bariyer tabakası arasında yer alan oldukça hassas kalınlığa sahip bir tabakadır. Genelde 1.5  $\mu\text{m}$  kalınlığa sahip AlGaN malzemesi olacak şekilde büyütülen bu tabaka, arayüzey pürüzlülük saçılmalarını azaltarak ve alayım bozukluğu saçılmalarını de engelleyerek tabaka taşıyıcı yoğunlaşmasının artmasını sağlar. Bununla birlikte 2-DEG elektronları ile bunların bariyer tabakasından yer alan iyonize halindeki ana atomları arasındaki Coulomb saçılmalarını azaltarak yüksek taşıyıcı hareketliliğinin elde edilmesine de olanak sağlar (Shen vd., 2001; Guo vd., 2008).

Bariyer tabakası, tampon tabakasından daha büyük bir bant genişliğine sahip olacak şekilde büyütülen AlGaN bariyer tabakası, sahip olduğu yüksek piezoelektrik kutuplanma özelliği nedeniyle 2-DEG'in oluşmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. AlGaN bariyer tabakasının kalınlığı ve Al yoğunlaşmasını 2-DEG için kritik bir rol oynamakta olup bariyer tabakasının belli bir kritik kalınlığına kadar 2-DEG oluşmaz. AlGaN bariyer tabakasındaki Al konsantrasyonun az olması 2-DEG'teki taşıyıcı yoğunluğunun az olmasına, belli bir kritik değerin üstünde olması ise ara yüzeyde kusur ve gerilmelerin artmasına ve 2-DEG elektronlarının arayüzey pürüzlülük ve alaşım saçılmalarına daha fazla maruz kalmasına neden olur (Koide vd., 1987).

Kep tabakası, kapı kaçaklarını azaltmak, Schottky bariyer yüksekliğini arttırmak, yüzeyin oksitlenmesini engellemek, pürüzsüz bir yüzey morfolojisi ve düşük tabaka direnci elde etmek amacıyla çok ince (1-5 nm) bir tabaka olacak şekilde büyütülür (Acar, 2009; Taking, 2012).

Kaynak-akaç ( $L_{sd}$ ), kapı-akaç ( $L_{gd}$ ) ve kapı-kaynak ( $L_{gs}$ ) aralıkları kanal modülasyonu açısından bir HEMT'in elektronik parametrelerini etkileyen bazı fiziksel faktörlerdendir.  $L_{gd}$  uzunluk parametre etkisinin incelenmesi amacıyla aşağıda verilen HEMT yapısı kullanılmıştır. Bu doğrultuda gerekli metaryal tanımlamaları gerçekleştirildi. Si, SiN, AlGaN, GaN gibi metaryalleri kullanıldı. Şekil 5.1 de verilen HEMT yapısı için kapı ve akaç arasındaki mesafeyi artırarak her bir yapı için ayrı ayrı grafikleri oluşturuldu.



Şekil 5.1 GanHemt Yapısı Görünümü

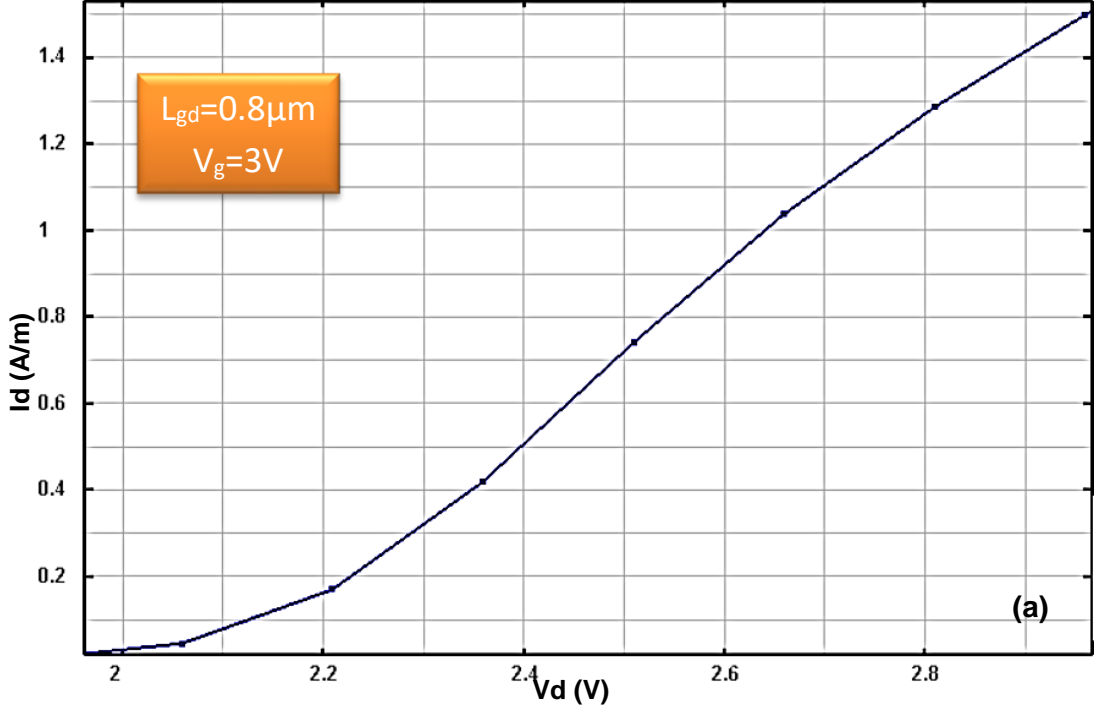
Yapı için elde edilen grafikler ise aşağıdaki gibidir.

- $R_{on}$  Eğrisi Grafikleri
- Eşik Gerilim Grafikleri
- Akım Voltaj Grafikleri
- Kırılma Voltaj Grafikleri
- Enerji Bant Grafikleri
- Diferansiyel Potansiyel Grafikleri
- Elektriksel Alan Grafikleri

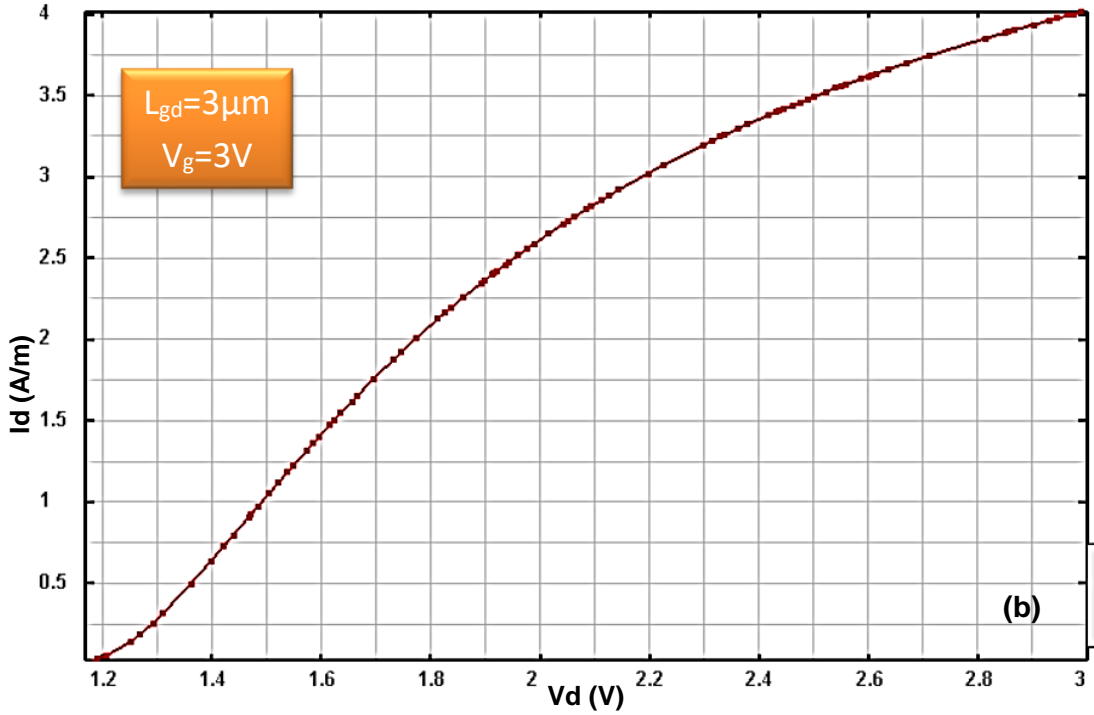
$R_{on}$  veya çalışma direnci, güç cihazları için çok önemli bir parametredir. Güç cihazlarının yüksek voltaj ve büyük akım kabiliyeti gerektiğinden, güç cihazında harcanan güç aşağıdaki şekilde ifade edilir (Simon Li ve Yue Fu, 2012).

$$P = I_D V_D = I_D^2 R_{on} \quad (5.1)$$

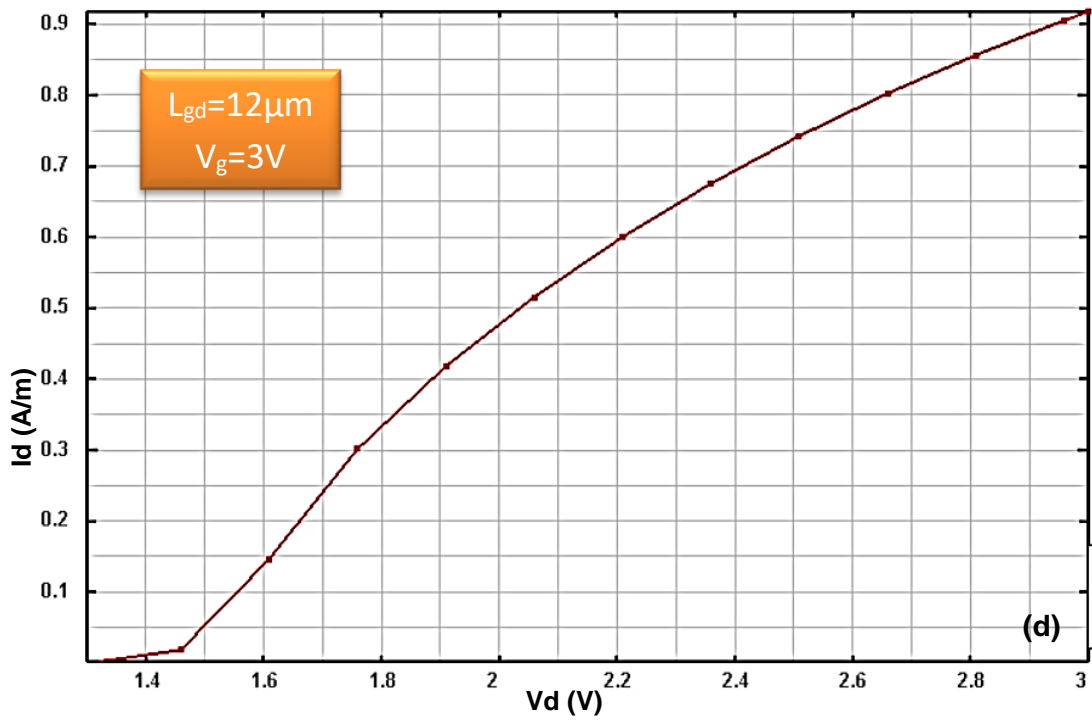
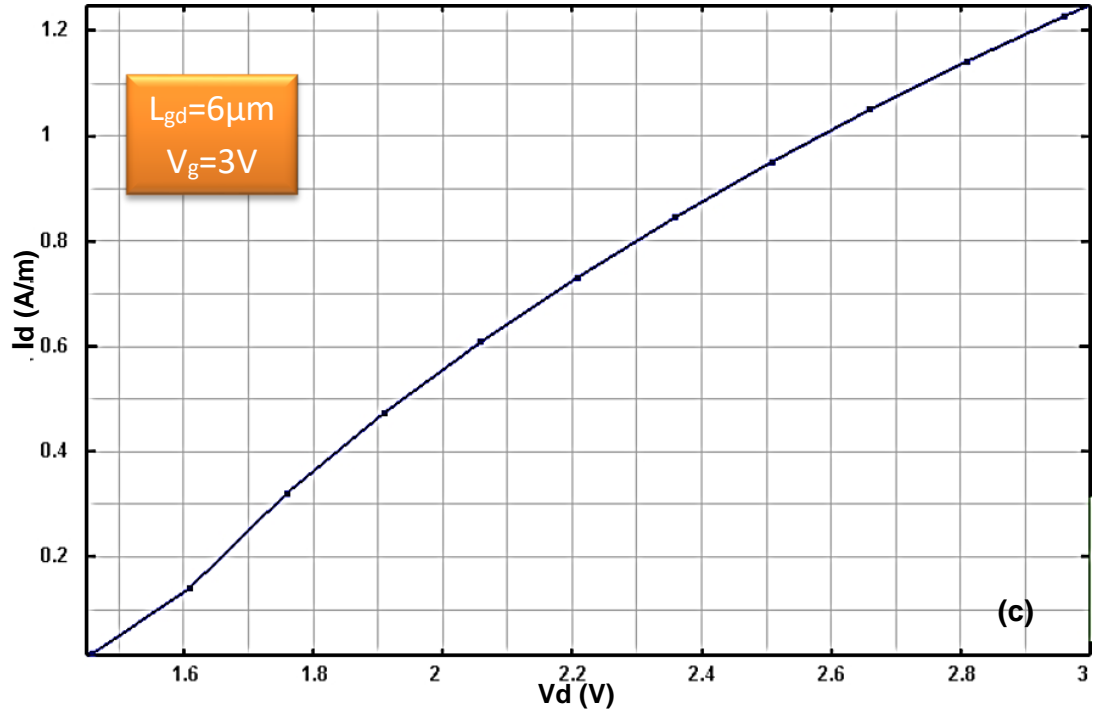
Güç, akım ve voltaj çarpımı olarak, voltajı da akım ve direnç çarpımı olarak düşünürsek  $R_{on}$  ifadesini ise gücün, geçen akımın karesinin oranına eşittir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı kapı-akaç aralıklarında elde edilen  $R_{on}$  çıktıları Şekil 5.2’de verilmiştir.



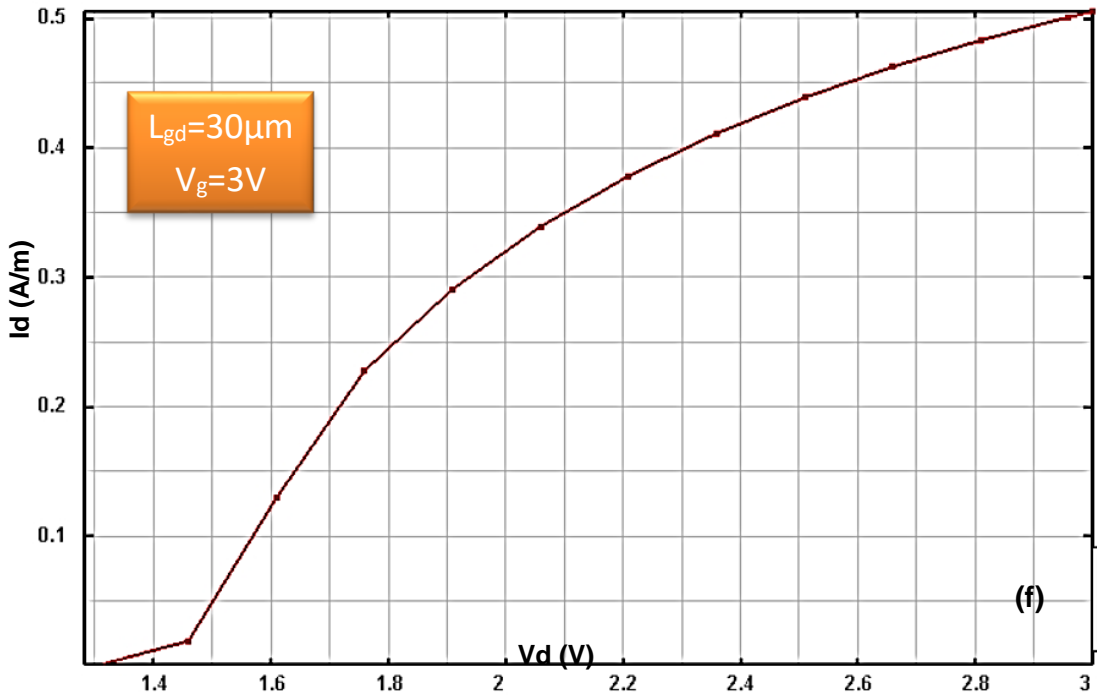
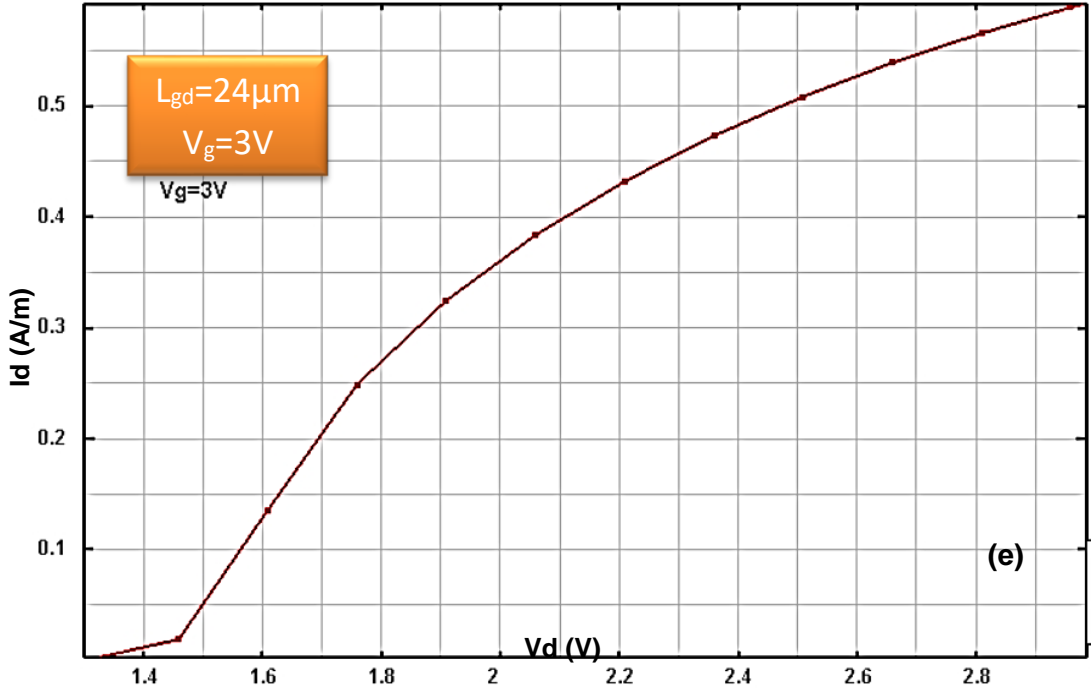
Şekil 5.2  $R_{on}$  Eğrisi Grafikleri



Şekil 5.2'nin devamı...



Şekil 5.2'nin devamı...

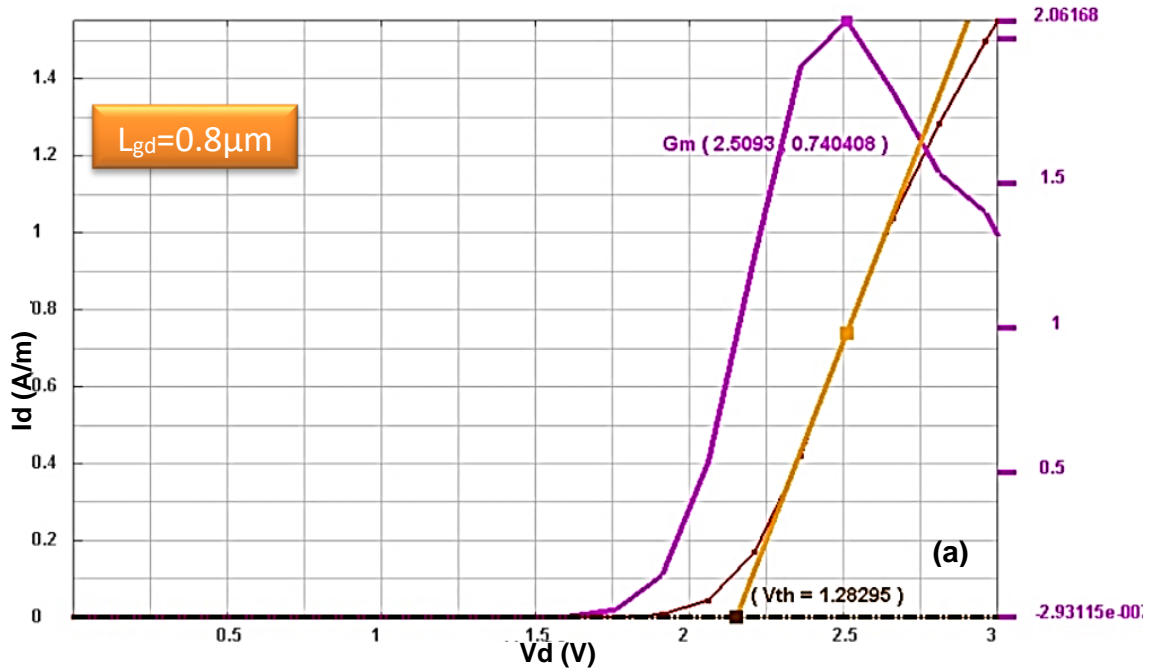


Şekil 5.2.a' ye  $R_{on}$  eğrisi için baktığımızda  $L_{gd} = 0,8 \mu\text{m}$   $V_g = 3\text{V}$  için  $0,5\text{ A/m}$  akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık  $2,4\text{ V}$  olarak ölçülmüştür. Şekil 5.2b' ye  $R_{on}$  eğrisi için baktığımızda  $L_{gd} = 3 \mu\text{m}$   $V_g = 3\text{V}$  için  $0,5\text{ A/m}$  akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık  $1,36\text{ V}$  olarak ölçülmüştür. Şekil 5.2c' ye  $R_{on}$  eğrisi için baktığımızda  $L_{gd} = 6 \mu\text{m}$   $V_g = 3\text{V}$  için  $0,5\text{ A/m}$  akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz

yaklaşık 1,95 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.2d' ye  $R_{on}$  eğrisi için baktığımızda  $L_{gd} = 12 \mu m$   $V_g = 3 V$  için 0,5 A/m akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık 2,15 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.2e' ye  $R_{on}$  eğrisi için baktığımızda  $L_{gd} = 24 \mu m$   $V_g = 3 V$  için 0,5 A/m akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık 2,5 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.2f' ye  $R_{on}$  eğrisi için baktığımızda  $L_{gd} = 30 \mu m$   $V_g = 3 V$  için 0,5 A/m akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık 3 V olarak ölçülmüştür.

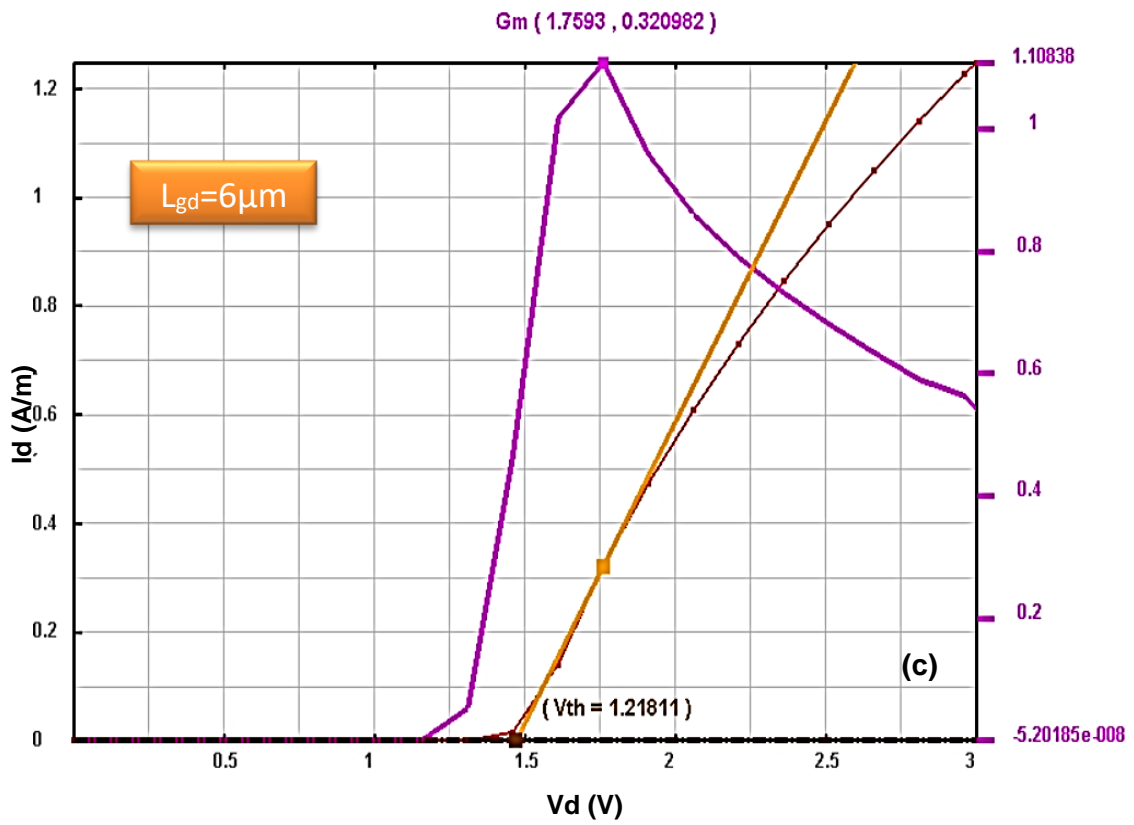
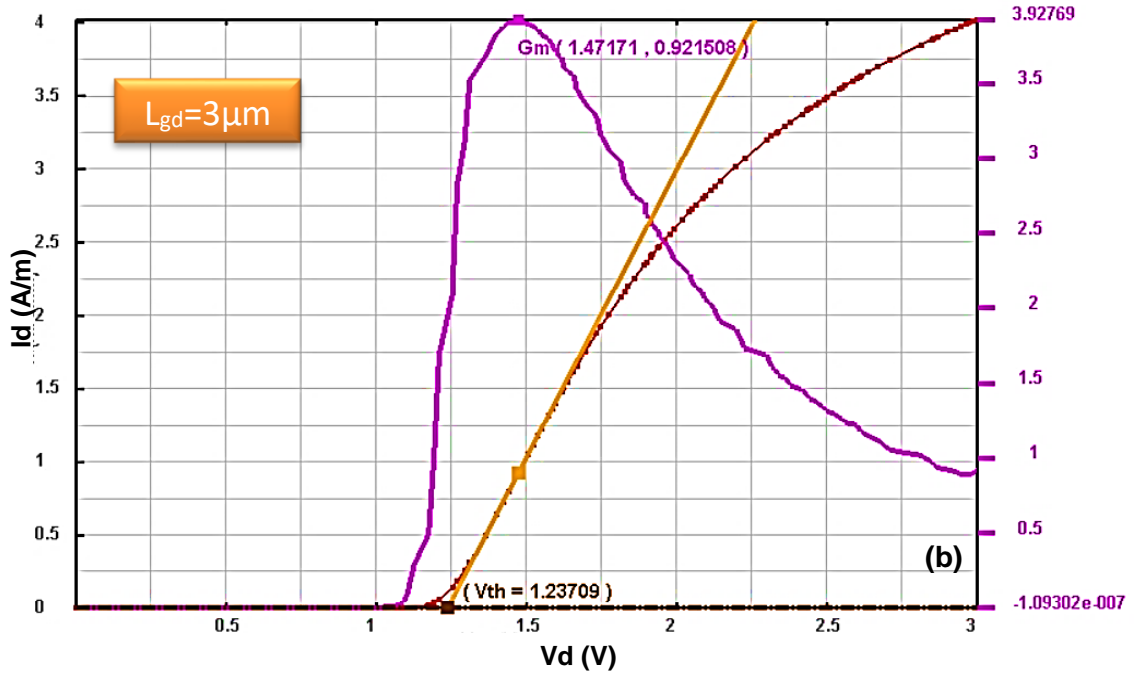
$V_{GS}$  değerini negatif yönde arttırmak, kapı altındaki kanalı tüketerek (depleted) kaynak ile akaç arasındaki  $I_{DS}$  akımının azalmasına neden olur. Kapı altındaki kanalda, tabaka yük yoğunluğunu sıfır yaparak akaç-kaynak arasındaki akımı kısar (pinch off) minimum gerilim değeri, eşik gerilimi (threshold voltage) olarak isimlendirilir ve  $V_{th}$  olarak gösterilir (Toprak, 2020).

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kanal modülasyonu açısından farklı  $L_{gd}$  değerleri için eşik gerilim ( $V_{th}$ ) ve  $G_m$  değerleri elde edilmiş ve Şekil 5.3'de verilmiştir.

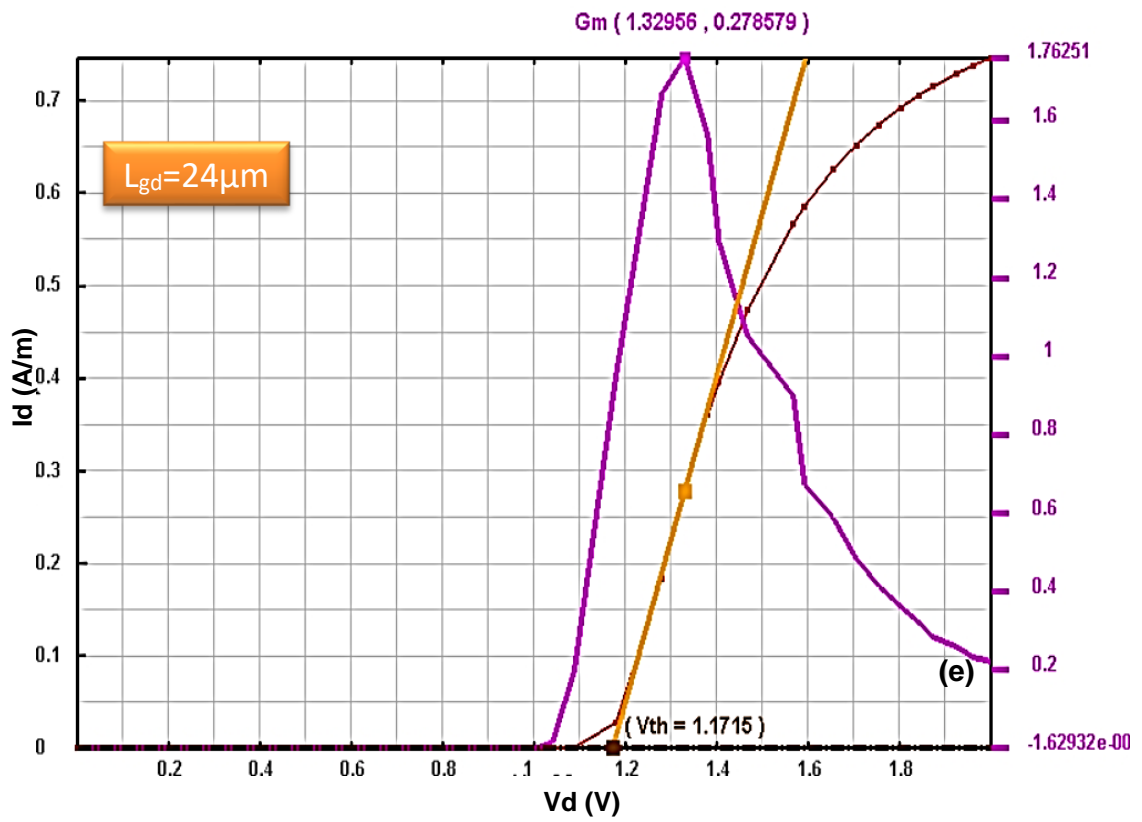
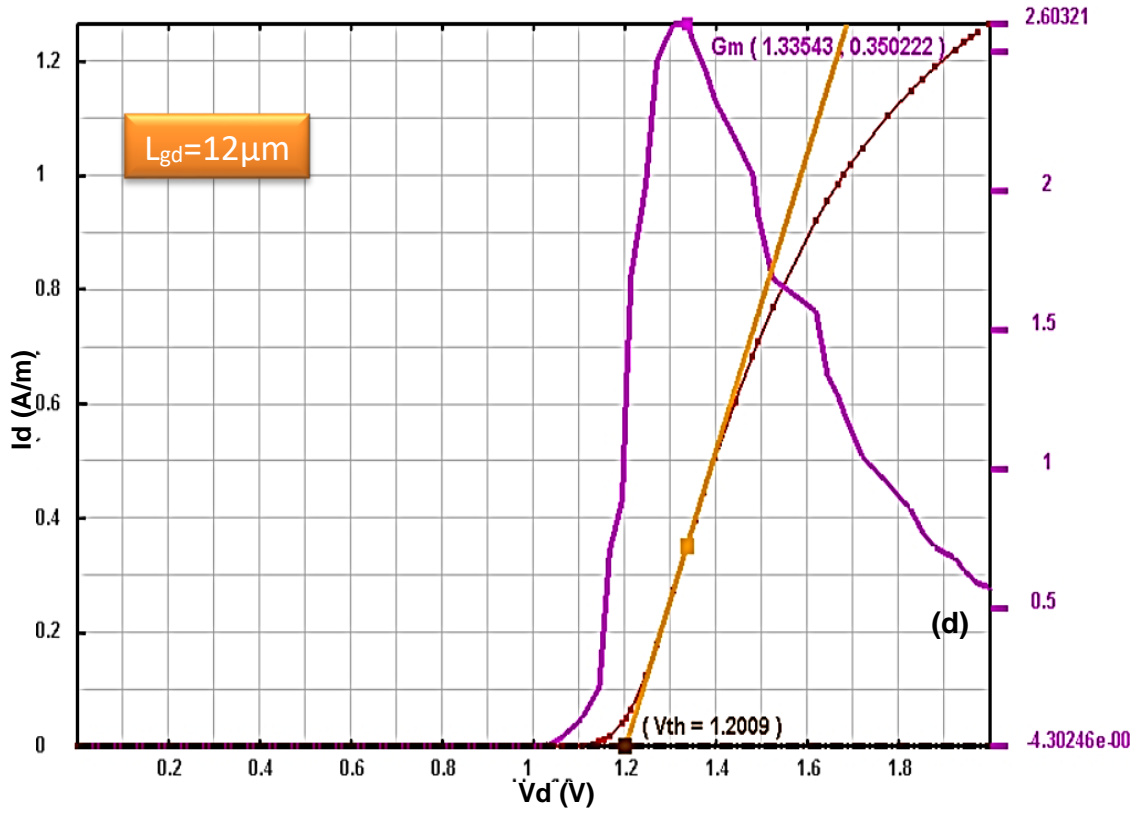


Şekil 5.3 Eşik Gerilim Değer Grafikleri

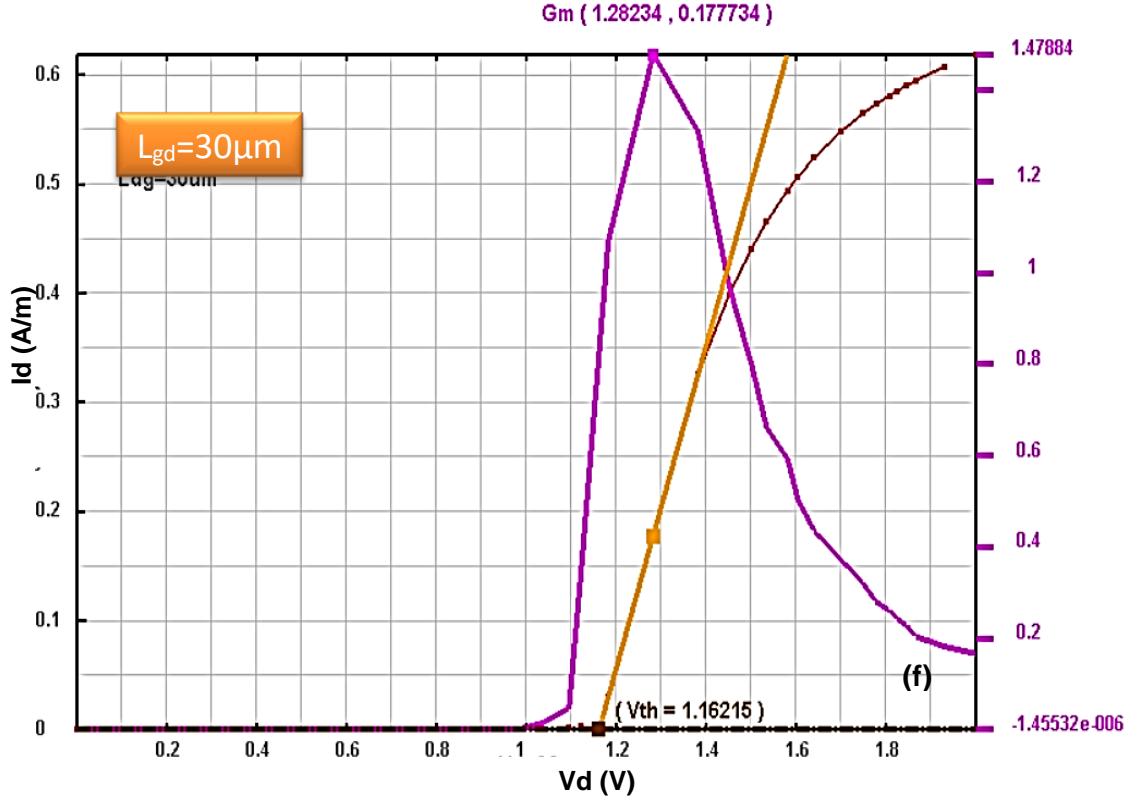
Şekil 5.3'ün devamı...



Şekil 5.3'ün devamı...

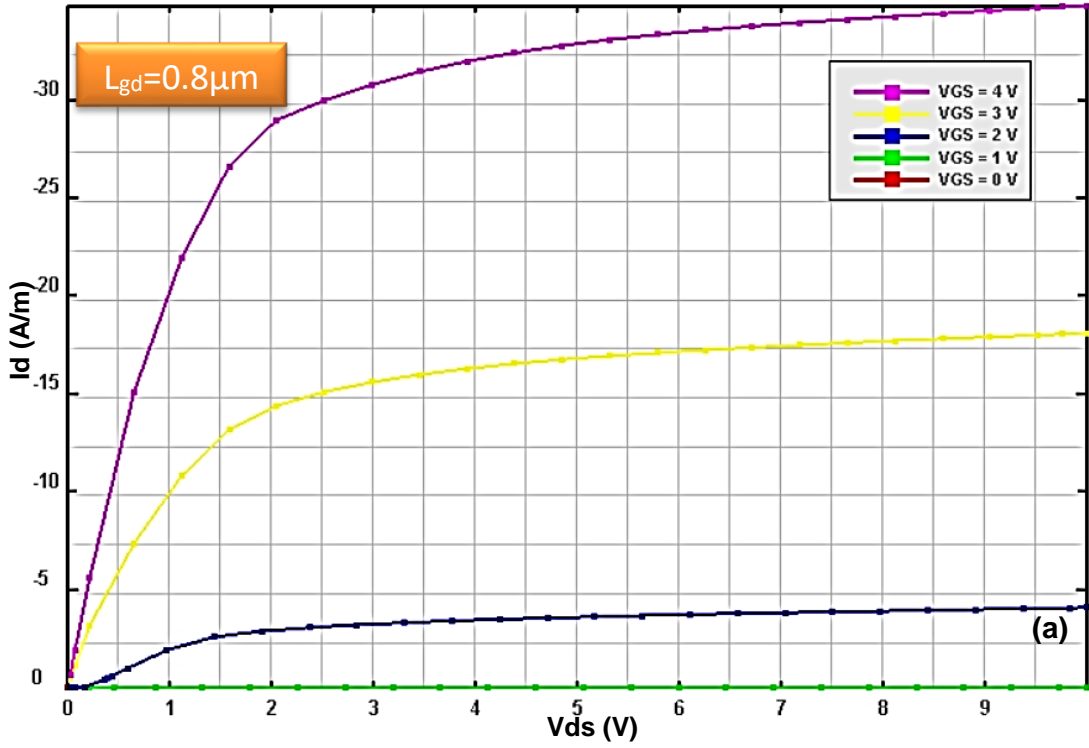


Şekil 5.3'ün devamı...

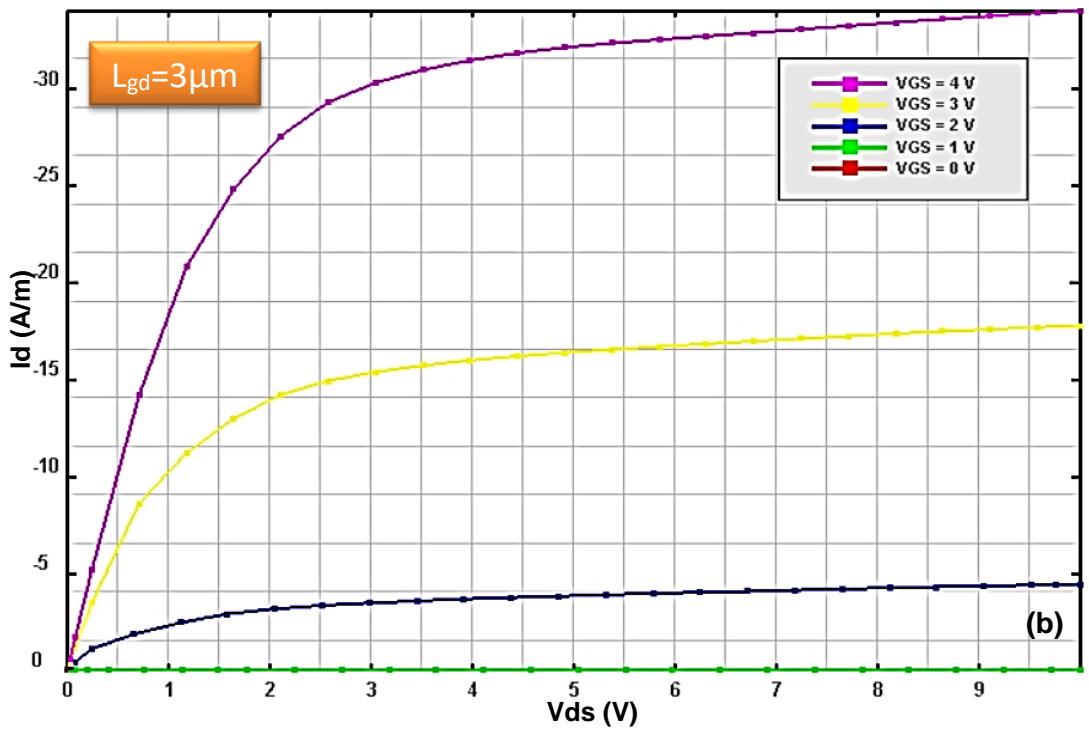


Şekil 5.3a'da verilen eşik Gerilim grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 0,8 \mu m$  için  $V_{th}$  değerimiz yaklaşık 1,28 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3b' ye Eşik Gerilim grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 3 \mu m$  için  $V_{th}$  değerimiz yaklaşık 1,23 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3c' ye Eşik Gerilim grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 6 \mu m$  için  $V_{th}$  değerimiz yaklaşık 1,21 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3d' ye Eşik Gerilim grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 12 \mu m$  için  $V_{th}$  değerimiz yaklaşık 1,20 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3e' ye Eşik Gerilim grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 24 \mu m$  için  $V_{th}$  değerimiz yaklaşık 1,17 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3f' ye Eşik Gerilim grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 30 \mu m$  için  $V_{th}$  değerimiz yaklaşık 1,16 V olarak ölçülmüştür.

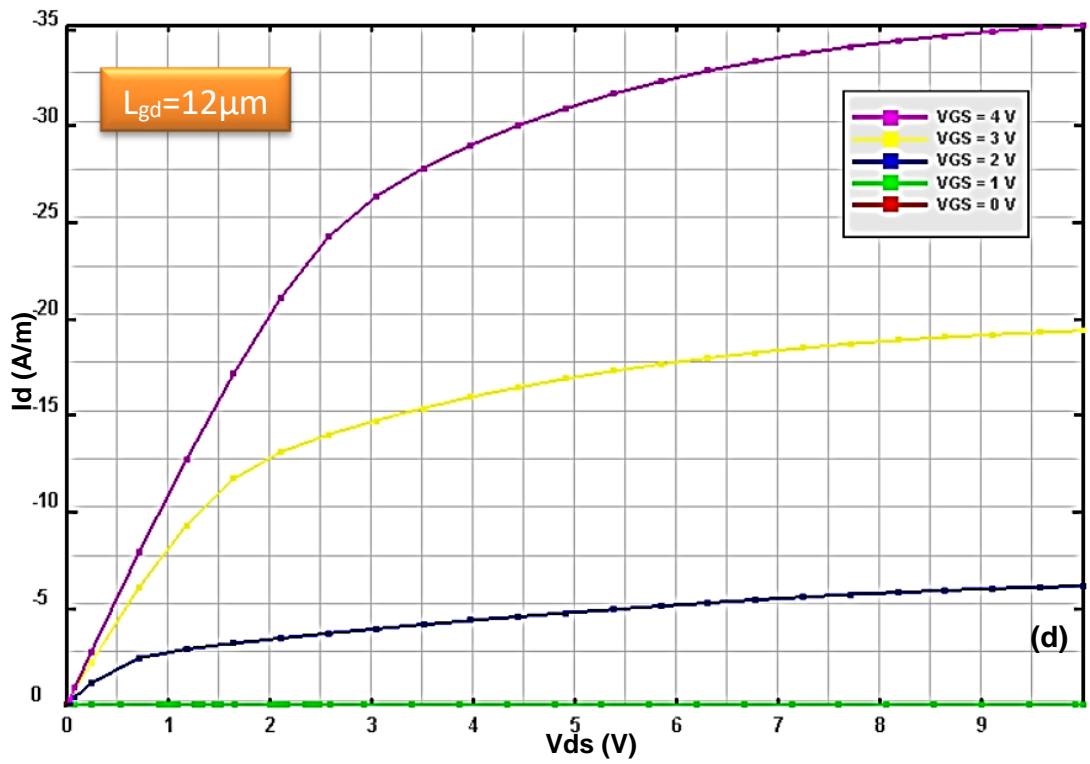
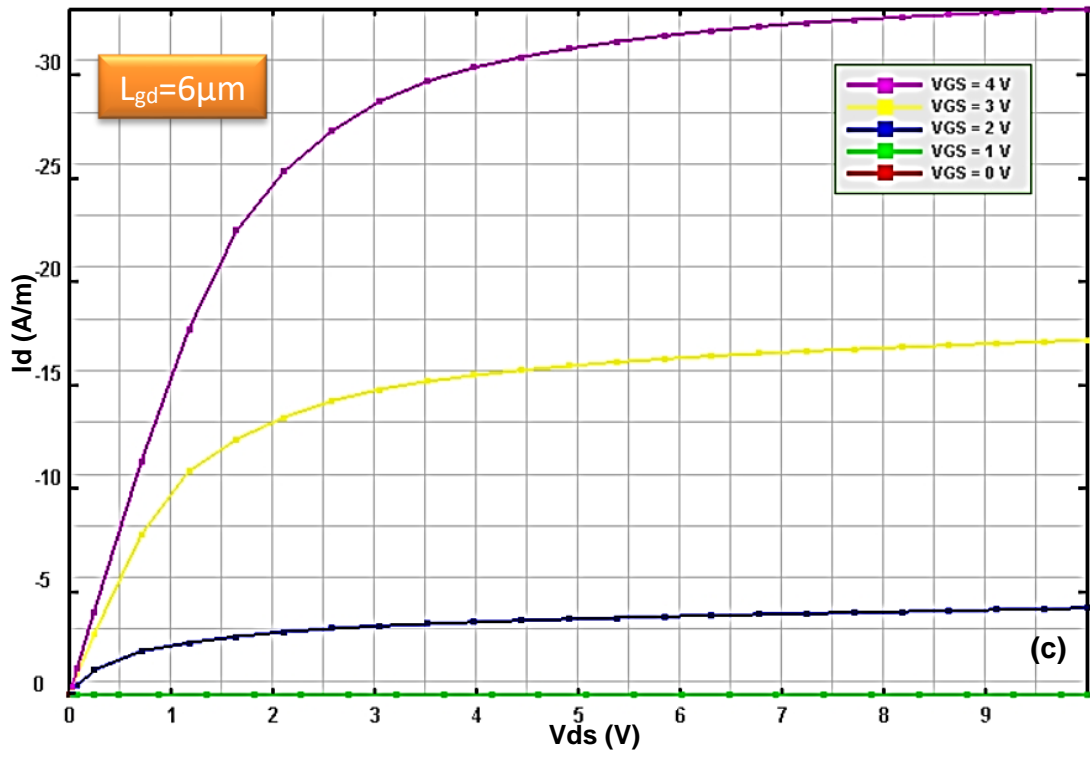
Cihaz benzetiminde bir sonraki adımda, HEMT aygıtın  $I_d$ - $V_d$  elektronik karakteristikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 5.4'de verilmiştir.



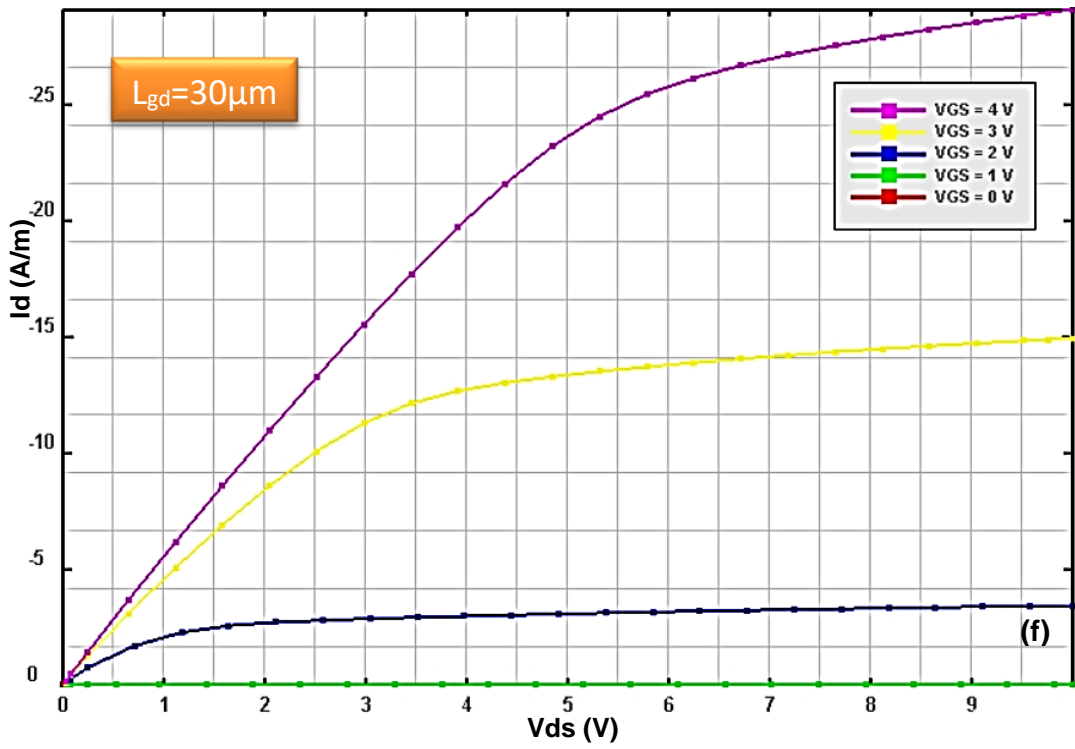
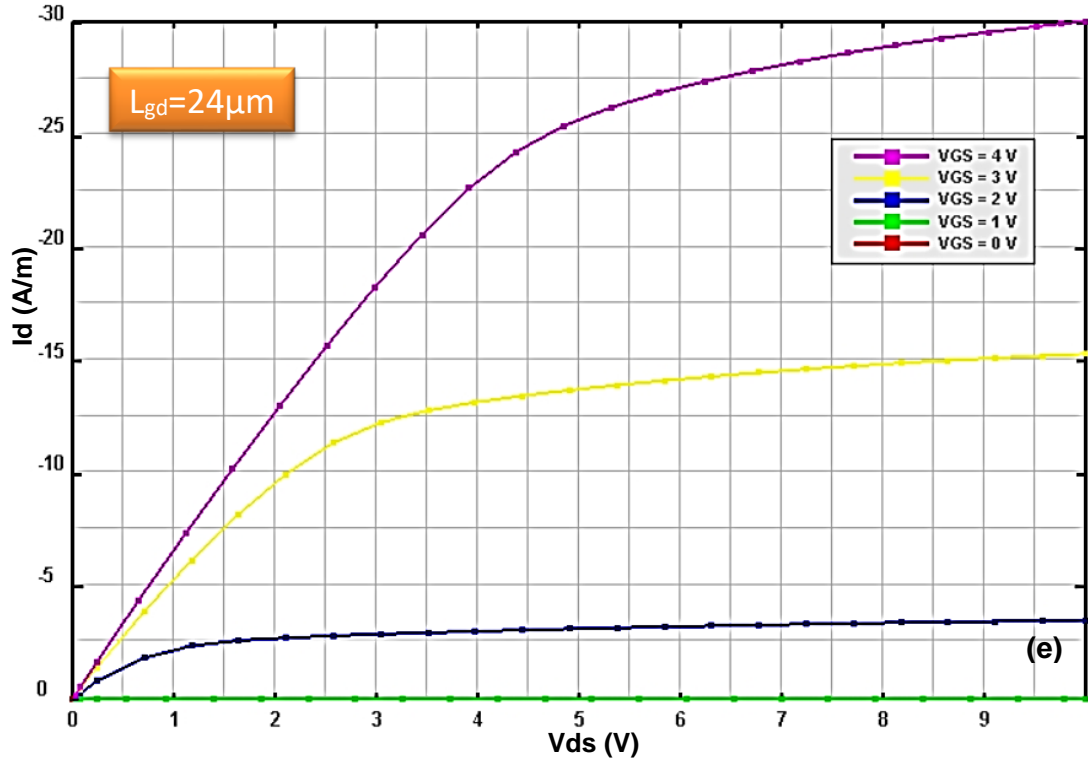
Şekil 5.4 Akım Voltaj Grafikleri



Şekil 5.4'ün devamı...



Şekil 5.4'ün devamı...



Her  $I_d$ - $V_d$  eğrisi için geçit voltajını kontrol etmek için bir tarama ifadesi yayınlanır.  $V_g = 1V, 2V, 3V$  ve  $4V$  değerleri için çizdirerek grafiklerimize bakacak olursak; Şekil 5.4a' ya akım voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 0,8 \mu m$   $V_{ds} = 2V$  için değerlerimiz olan  $V_{gs} = 4V$  değerini  $I_d = 26A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 3V$  değerini ise  $I_d = 14A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerini ise  $I_d = 3A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

Şekil 5.4b' ye akım voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 3 \mu m$   $V_{ds} = 2V$  için değerlerimiz olan  $V_{gs} = 4V$  değerini  $I_d = 25,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 3V$  değerini ise  $I_d = 13,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerini ise  $I_d = 3,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

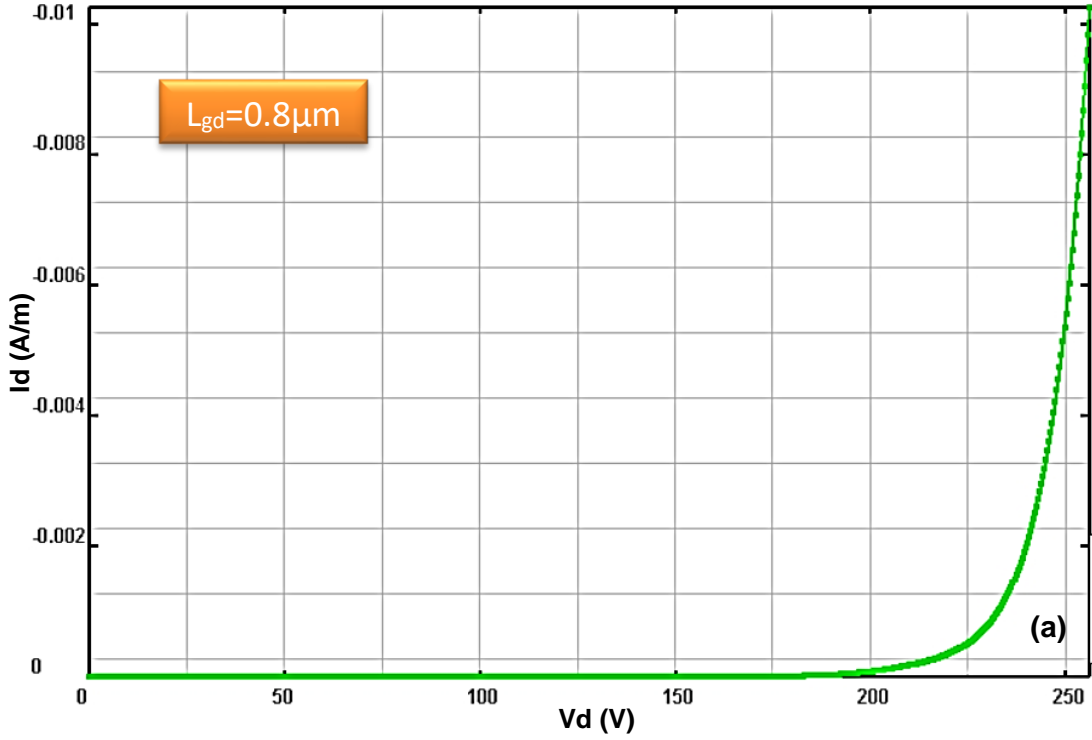
Şekil 5.4c' ye akım voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 6 \mu m$   $V_{ds} = 2V$  için değerlerimiz olan  $V_{gs} = 4V$  değerini  $I_d = 24A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 3V$  değerini ise  $I_d = 12,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerini ise  $I_d = 2,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

Şekil 5.4d' ye akım voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 12 \mu m$   $V_{ds} = 2V$  için değerlerimiz olan  $V_{gs} = 4V$  değerini  $I_d = 20A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 3V$  değerini ise  $I_d = 12,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerini ise  $I_d = 3,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

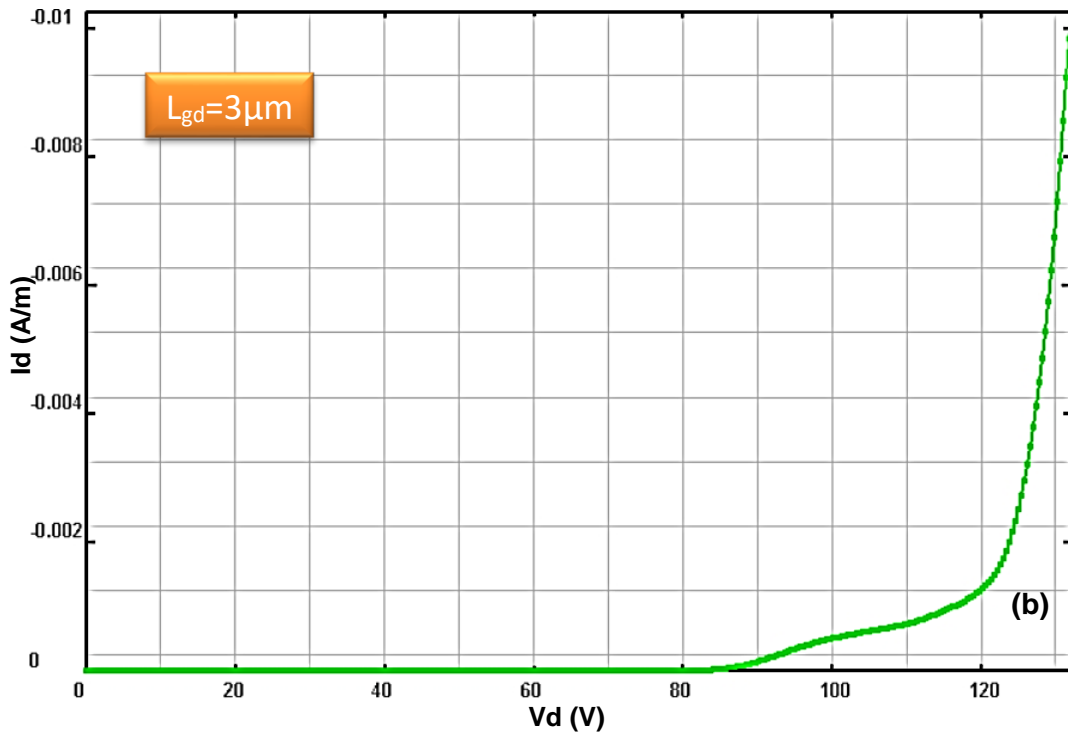
Şekil 5.4e' ye akım voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 24 \mu m$   $V_{ds} = 2V$  için değerlerimiz olan  $V_{gs} = 4V$  değerini  $I_d = 12,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 3V$  değerini ise  $I_d = 9A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerini ise  $I_d = 2,5A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

Şekil 5.4f' ye akım voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd} = 30 \mu m$   $V_{ds} = 2V$  için değerlerimiz olan  $V_{gs} = 4V$  değerini  $I_d = 11A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 3V$  değerini ise  $I_d = 8A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerini ise  $I_d = 3A/m$  de görmüştür.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

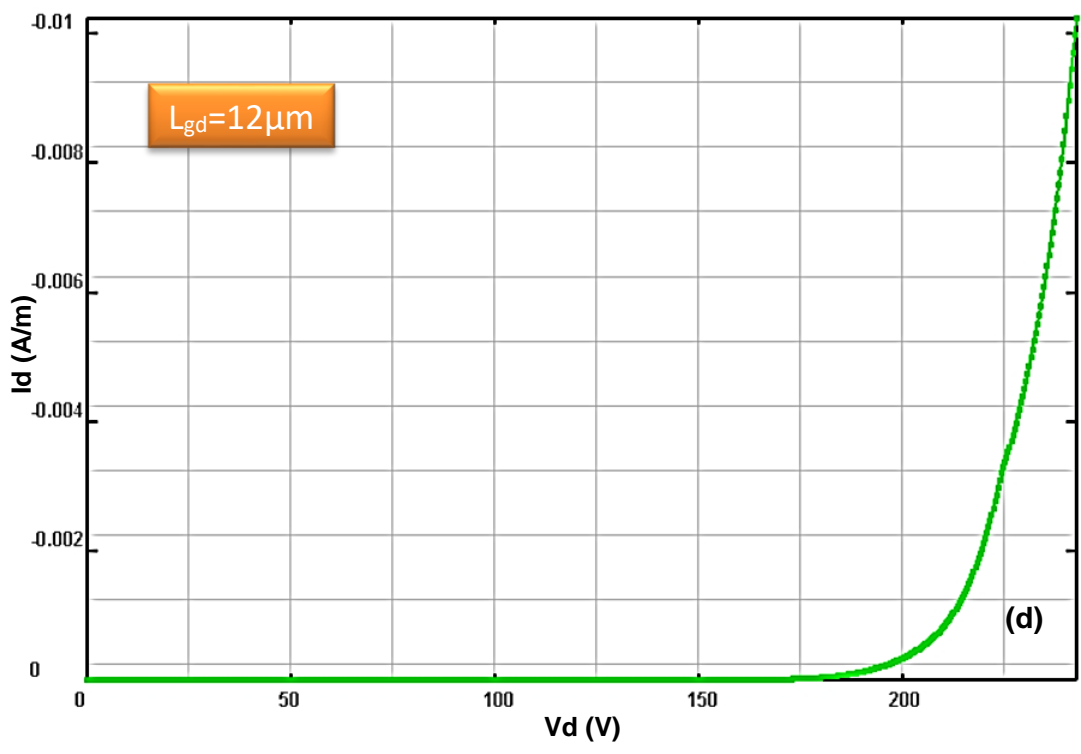
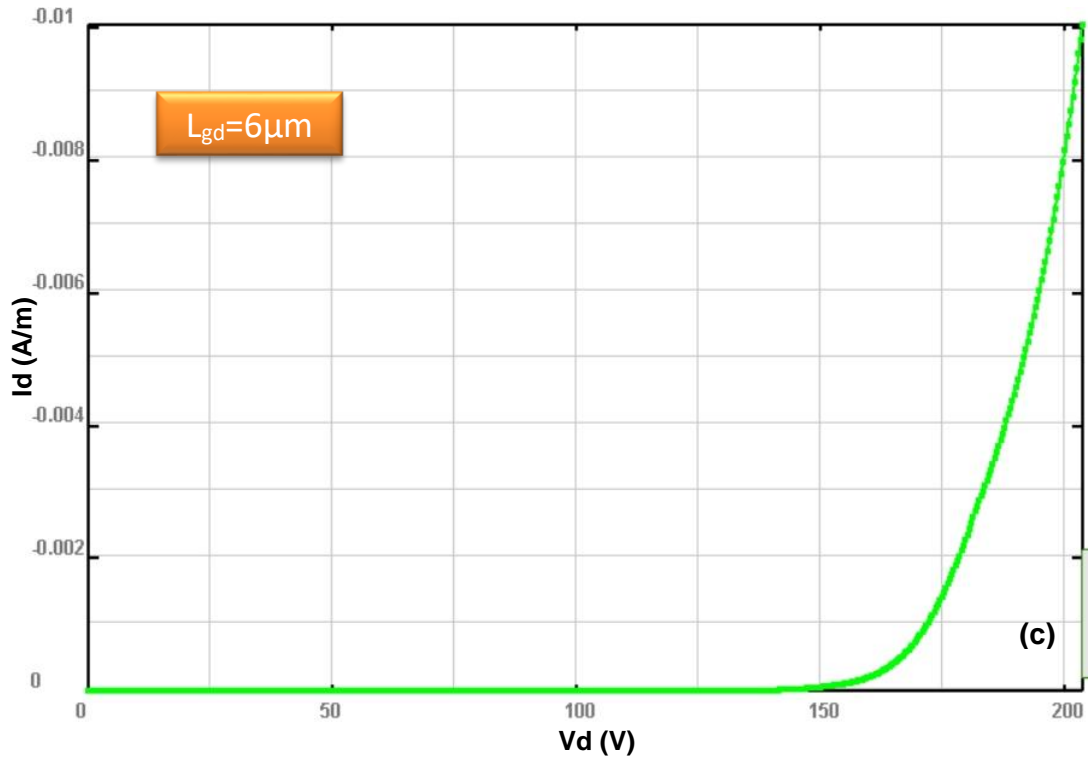
HEMT'lerin  $V_{br}$ 'sini etkileyen fiziksel faktörler incelenmiştir. İlk faktör yarı iletken malzemelerin özellikleridir. Kullanılan maddeler ve özellikleri temel alınarak yapının  $L_{gd}$  mesafesi artırıldığında elde edilen kırılma gerilimleri ise Şekil 5.5 de verilmiştir.



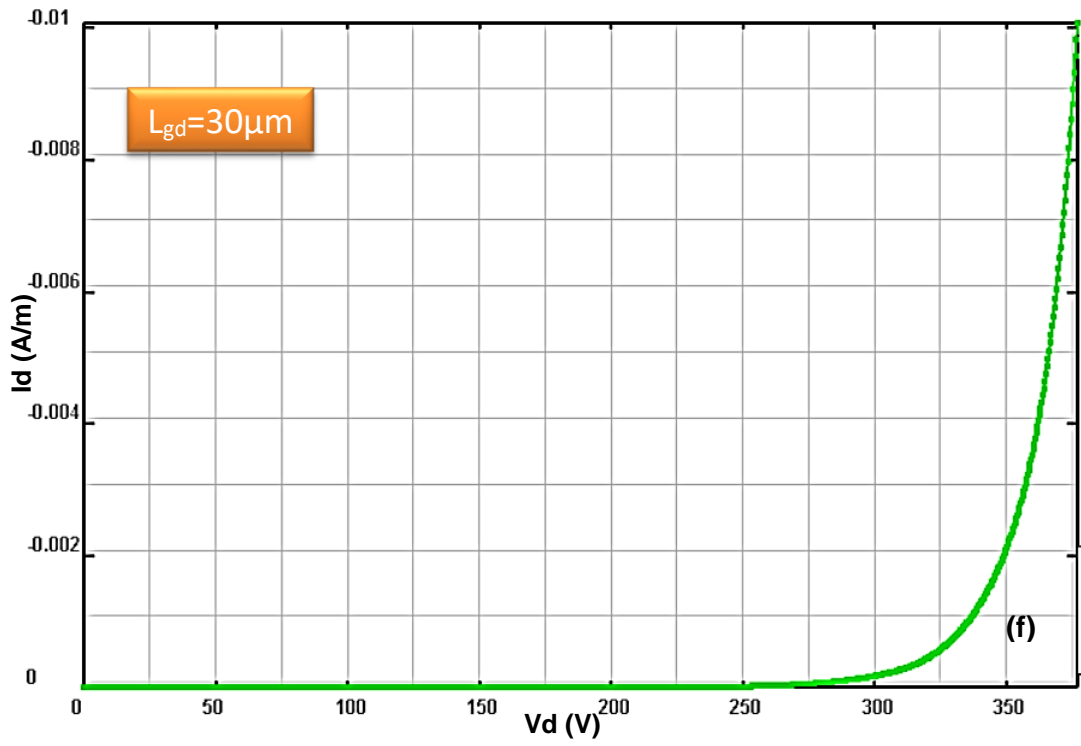
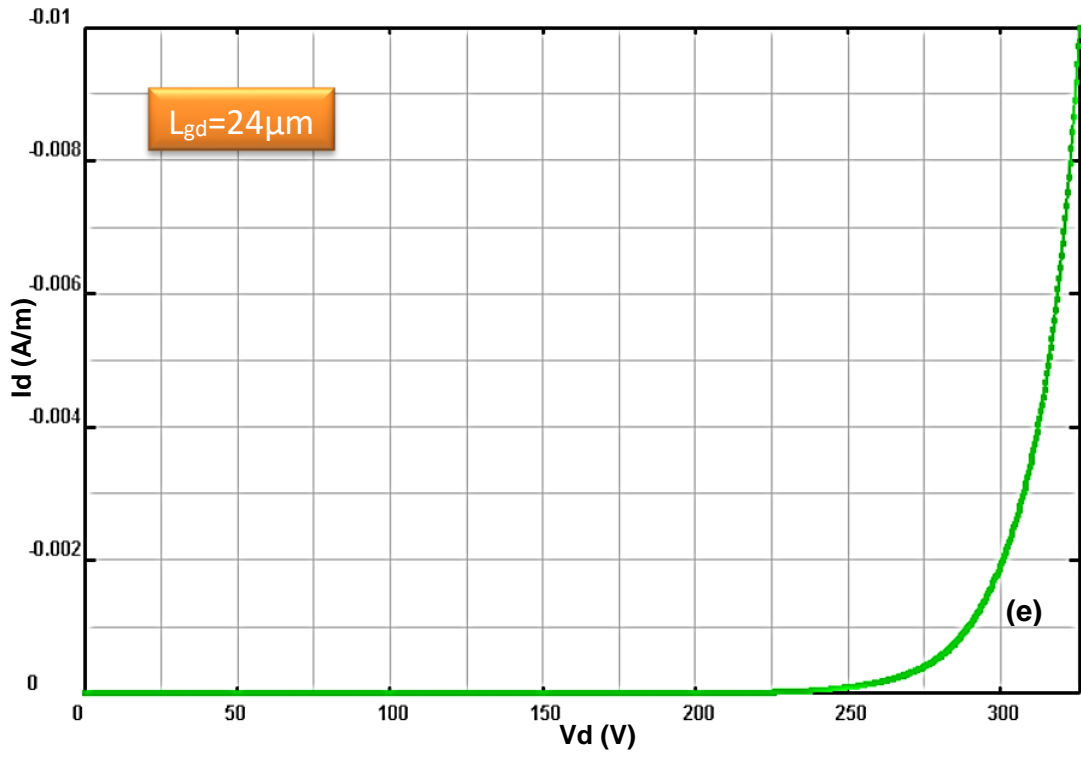
Şekil 5.5 Kırılma Voltaj Grafikleri



Şekil 5.5'in devamı...

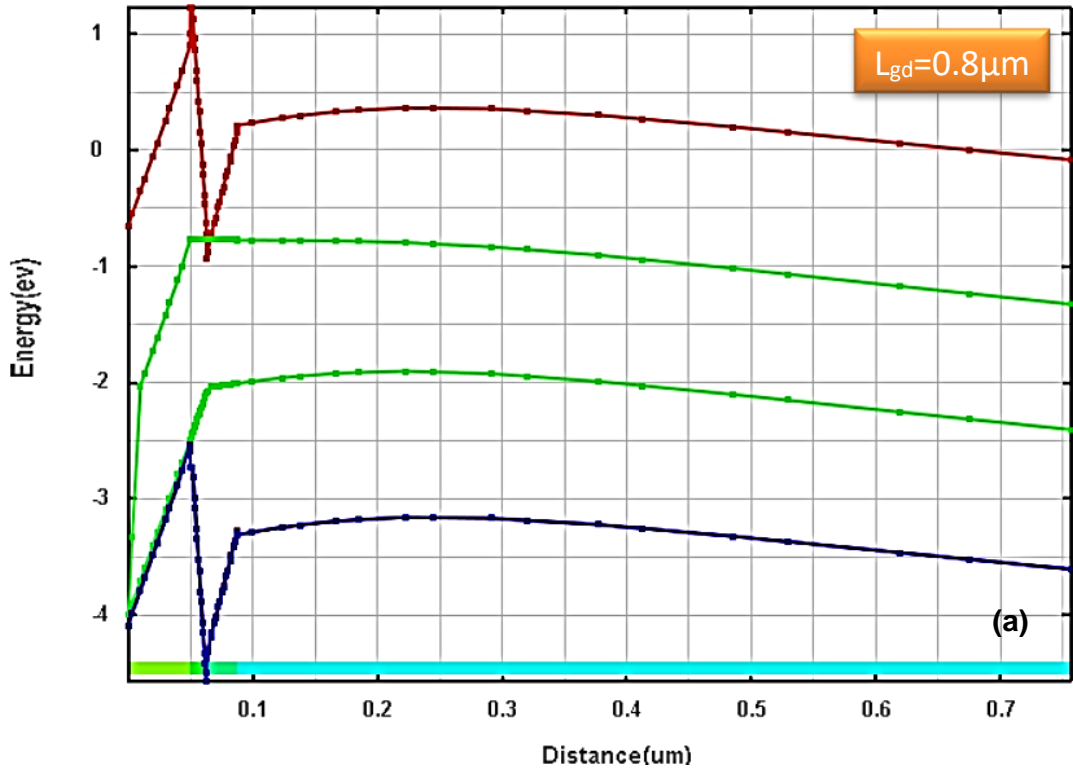


Şekil 5.5'in devamı...



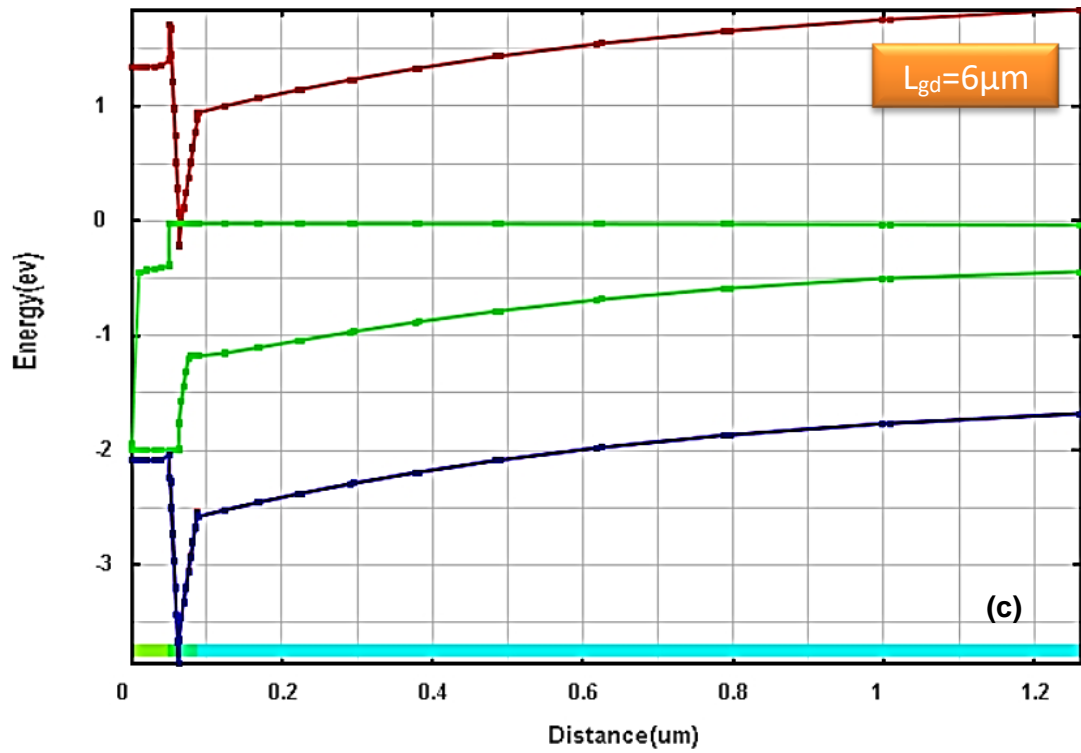
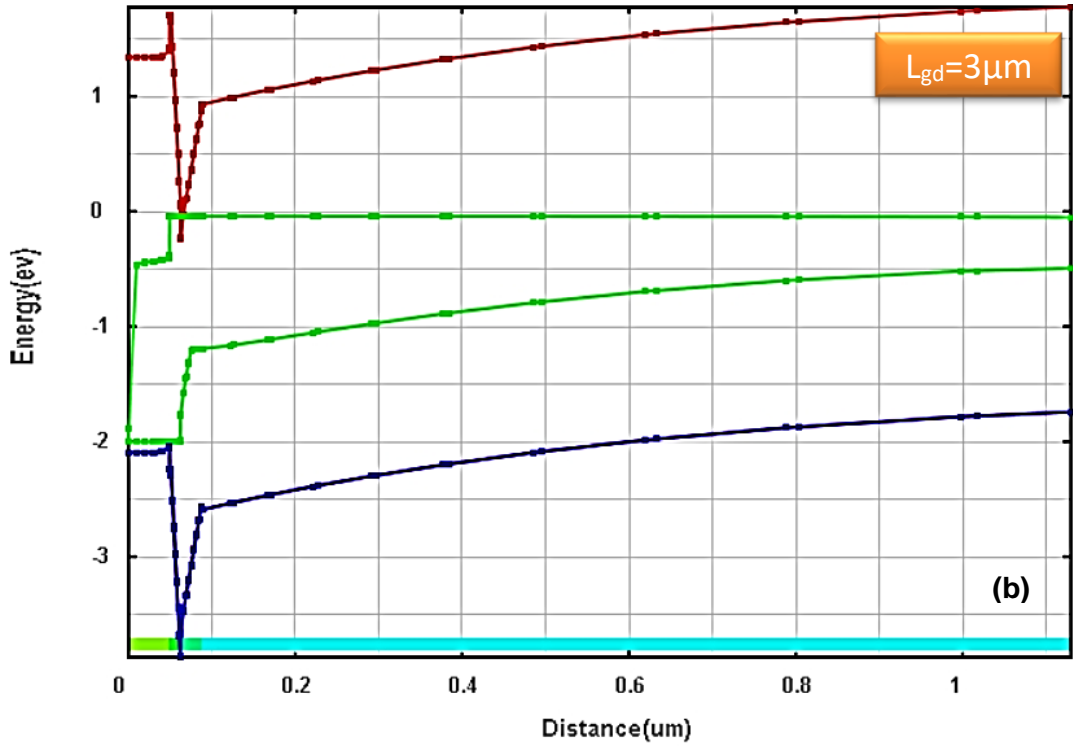
Şekil 5.5a' ya kırılma voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd}=0,8 \mu\text{m}$  için kırılma voltaj değerimiz yaklaşık 180 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.5b' ye kırılma voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd}=3 \mu\text{m}$  için kırılma voltaj değerimiz yaklaşık 85 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.5c' ye kırılma voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd}=6 \mu\text{m}$  için kırılma voltaj değerimiz yaklaşık 140 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.5d' ye kırılma voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd}=12 \mu\text{m}$  için kırılma voltaj değerimiz yaklaşık 170 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.5e' ye kırılma voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd}=24 \mu\text{m}$  için kırılma voltaj değerimiz yaklaşık 225 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.5f' ye kırılma voltaj grafiği için baktığımızda  $L_{gd}=30 \mu\text{m}$  için kırılma voltaj değerimiz yaklaşık 255 V olarak ölçülmüştür.

Enerji bant grafikleri elektrik alan yönünde büküleceğinden, yarıiletkenin içinde bandın büküldüğü belli bir bölge oluşur. Şekil 5.6'da denge durumunda enerji bant grafikleri görülmektedir.

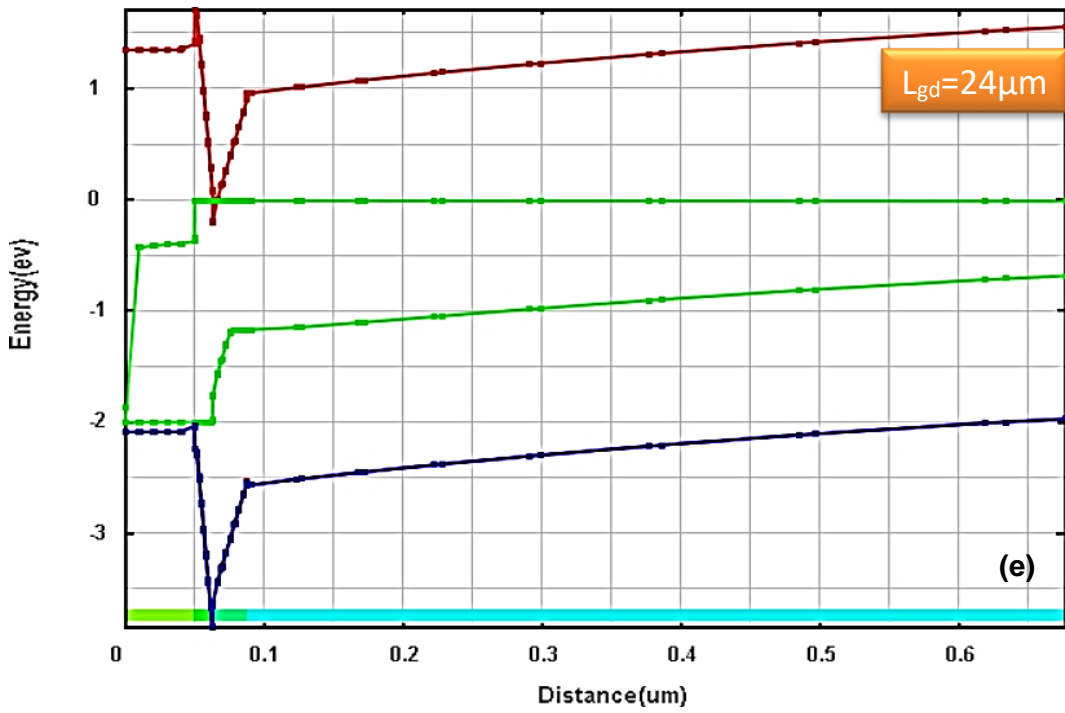
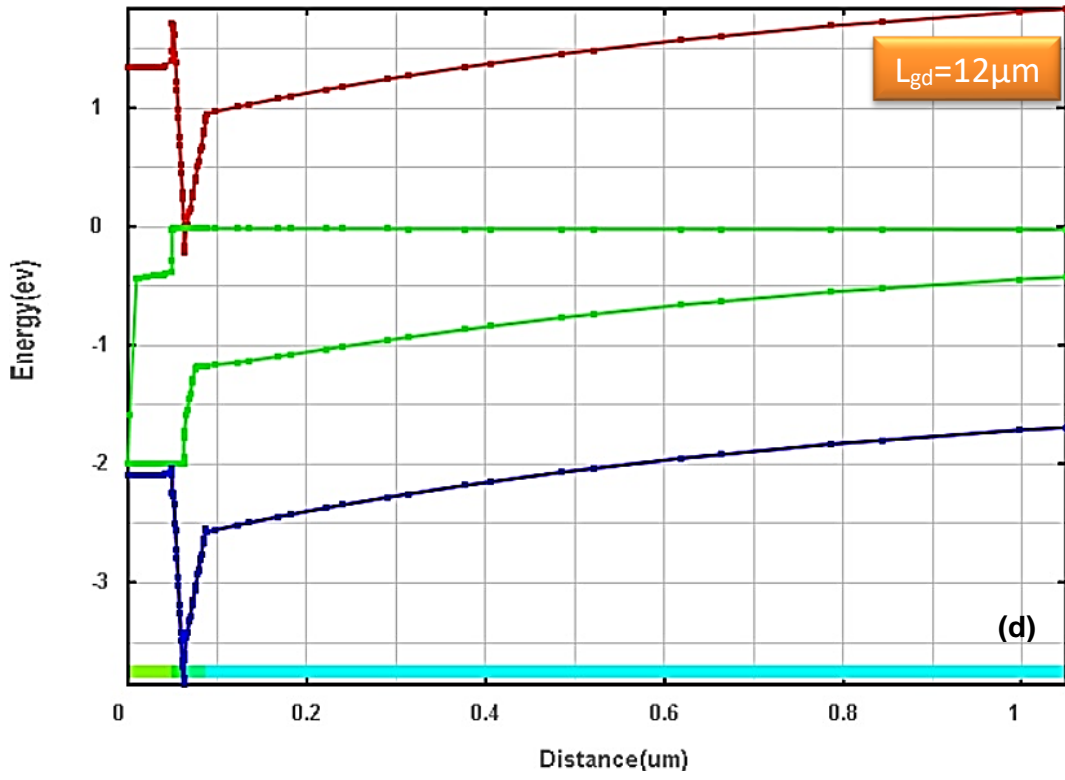


Şekil 5.6 Enerji Bant Grafikleri

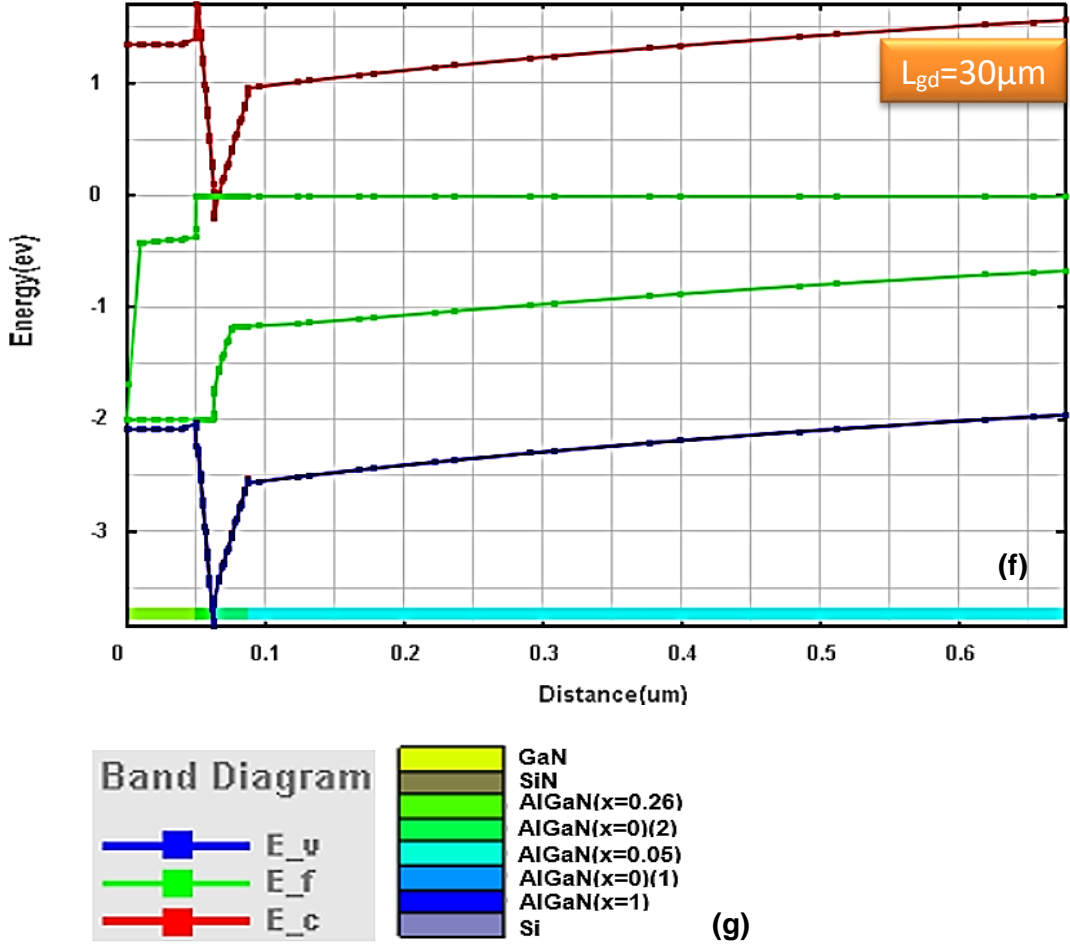
Şekil 5.6' nın devamı...



Şekil 5.6' nın devamı...



Şekil 5.6' nın devamı...

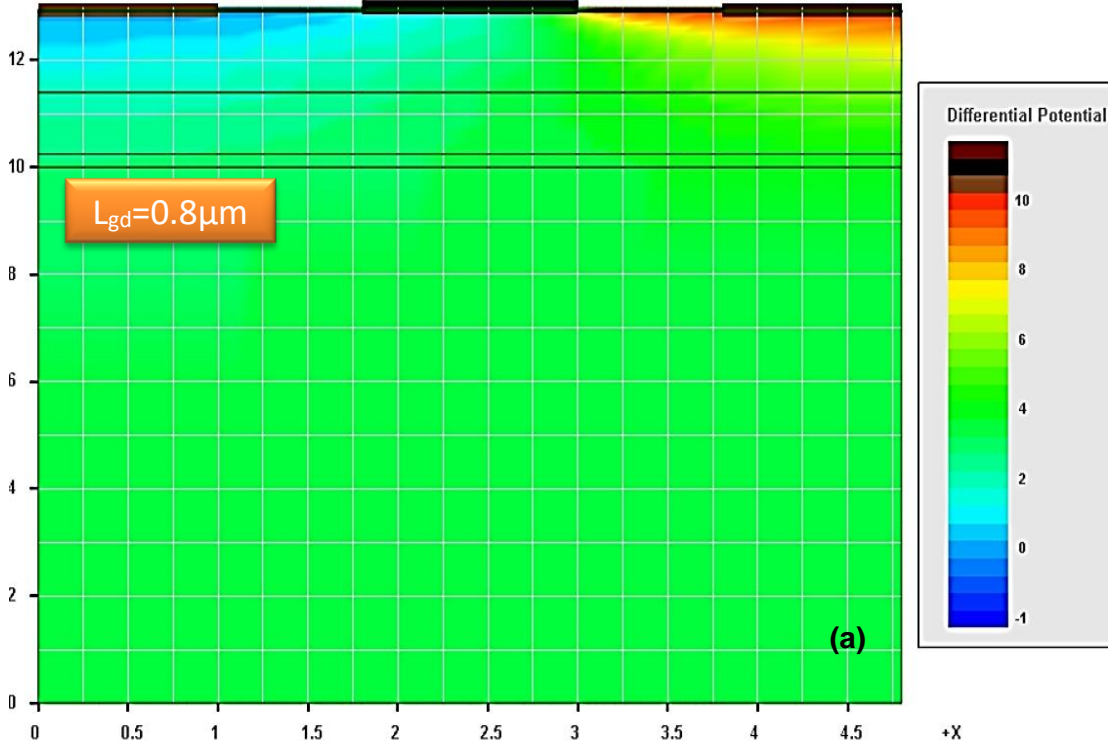


Enrji bant grafikleri için oluşan yapılar hakkında Şekil 5.6g'de görülen band diagramları ve meteryalleri dikkate alındığında elde edilen sonuçlar;

Şekil 5.6a' ya baktığımızda mesafeyi 0,1 µm olarak aldığımızda L<sub>gd</sub> =0,8 µm için yaklaşık E<sub>v</sub> =-3,3eV, E<sub>f</sub>=(-2eV,-08eV), E<sub>c</sub> =0,3eV olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6b' ye baktığımızda mesafeyi 0,1 µm olarak aldığımızda L<sub>gd</sub>=3 µm için yaklaşık E<sub>v</sub> =-2,6eV, E<sub>f</sub> =(-1,1eV,0eV), E<sub>c</sub> =1eV olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6c' ye baktığımızda mesafeyi 0,1 µm olarak aldığımızda L<sub>gd</sub>=6 µm için yaklaşık E<sub>v</sub> =-2,6eV, E<sub>f</sub> =(-1,1eV,0eV), E<sub>c</sub> =1eV olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6d' ye baktığımızda mesafeyi 0,1 µm olarak aldığımızda L<sub>gd</sub>=12 µm için yaklaşık E<sub>v</sub> =-2.6eV, E<sub>f</sub>=(-1,1eV,0eV), E<sub>c</sub> =1eV olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6e' ye baktığımızda mesafeyi 0,1 µm olarak aldığımızda L<sub>gd</sub>=24 µm için yaklaşık E<sub>v</sub> =-2,6eV, E<sub>f</sub> =(-1,1eV,0eV), E<sub>c</sub> =1eV olarak ölçülmüştür. Şekil

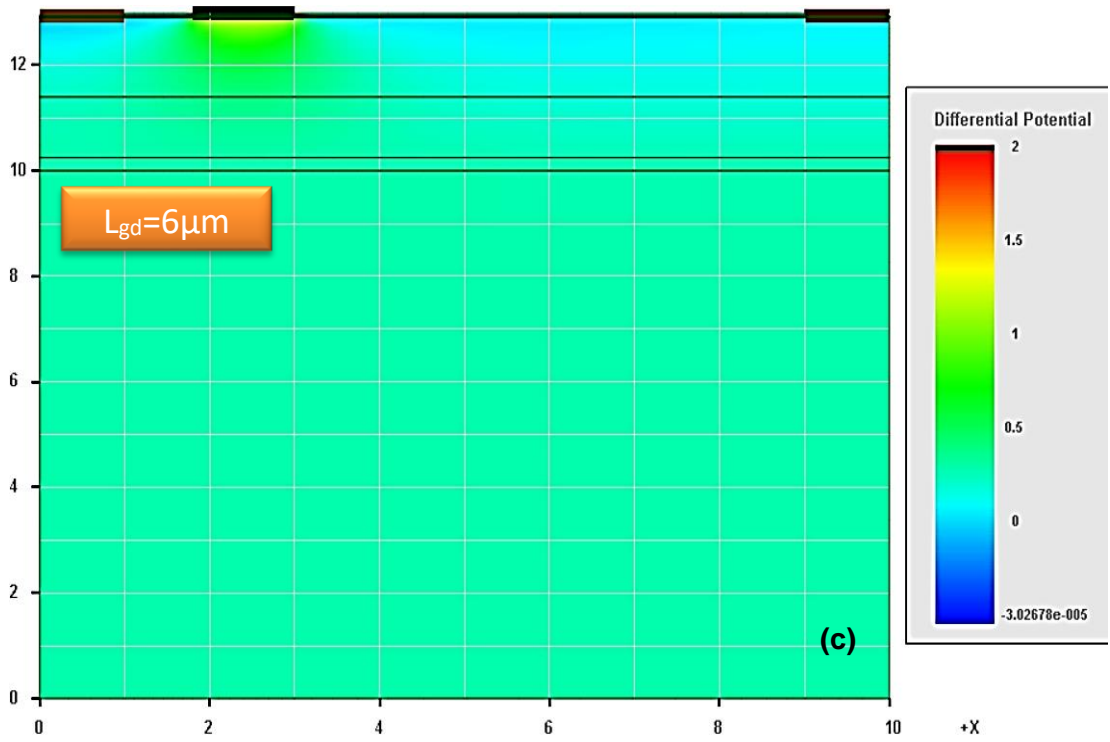
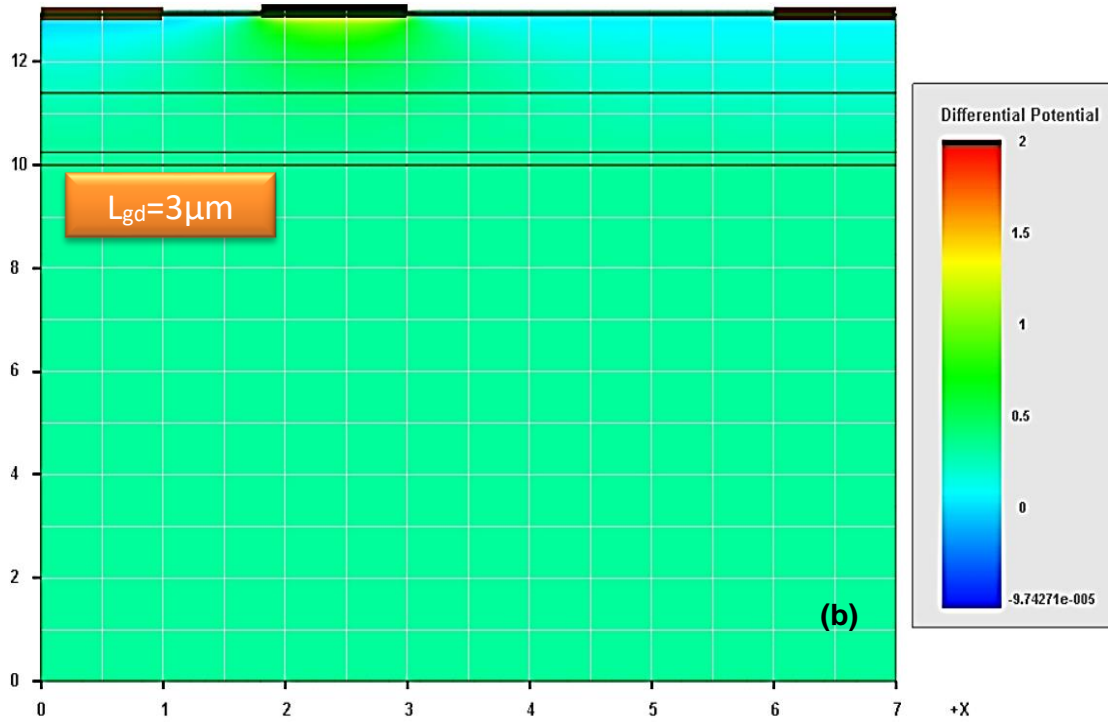
5.6f' ye baktığımızda mesafeyi  $0,1 \mu\text{m}$  olarak aldığımızda  $L_{gd}=30 \mu\text{m}$  için yaklaşık  $E_v = -2,6\text{eV}$ ,  $E_f = (-1,1\text{eV}, 0\text{eV})$ ,  $E_c = 1\text{eV}$  olarak ölçülmüştür.

Oluşan enerji bant grafiklerinin yanı sıra Şekil 5.7 ise incelendiğinde HEMT'lerin hem yüksek güç hem de yüksek frekans uygulamalarında ise oldukça büyük bir potansiyele sahip oldukları görülmektedir.

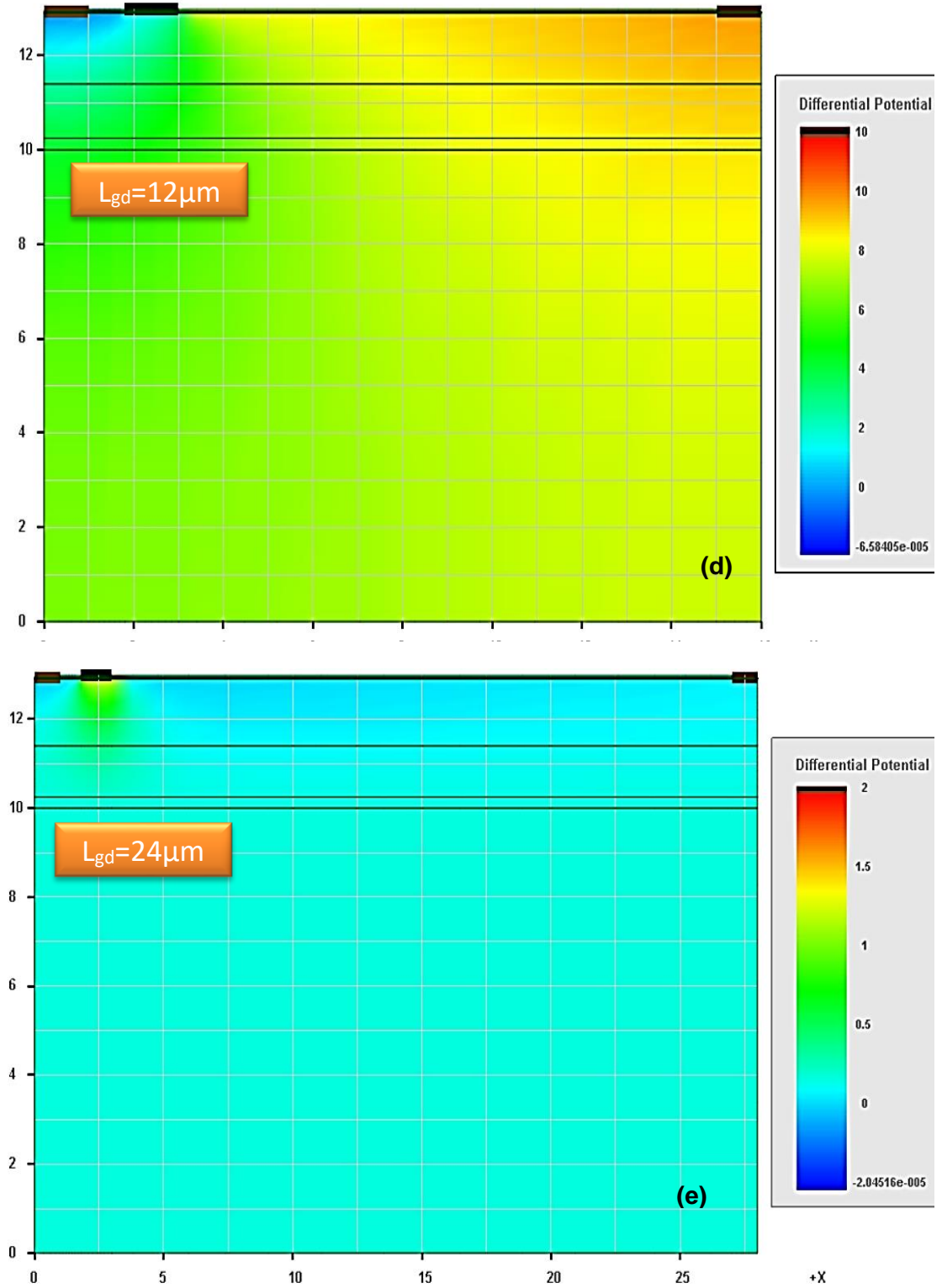


Şekil 5.6 Diferansiyel Potansiyel Grafikleri

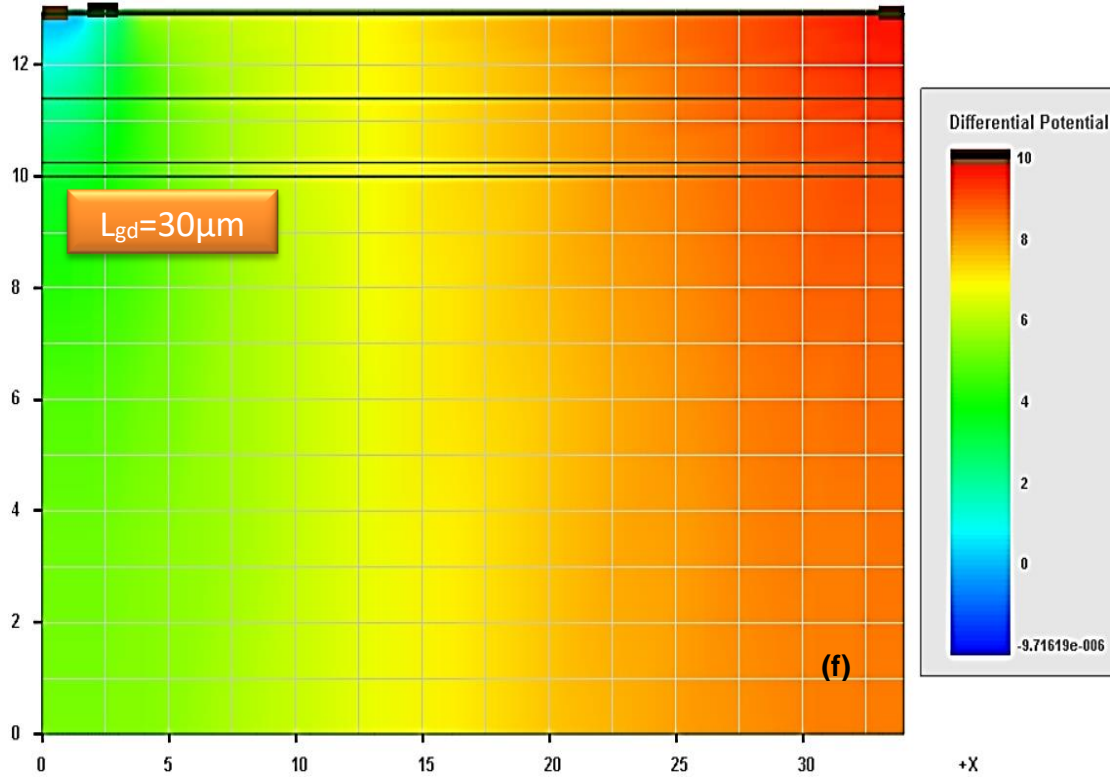
Şekil 5.7' nin devamı...



Şekil 5.7' nin devamı...

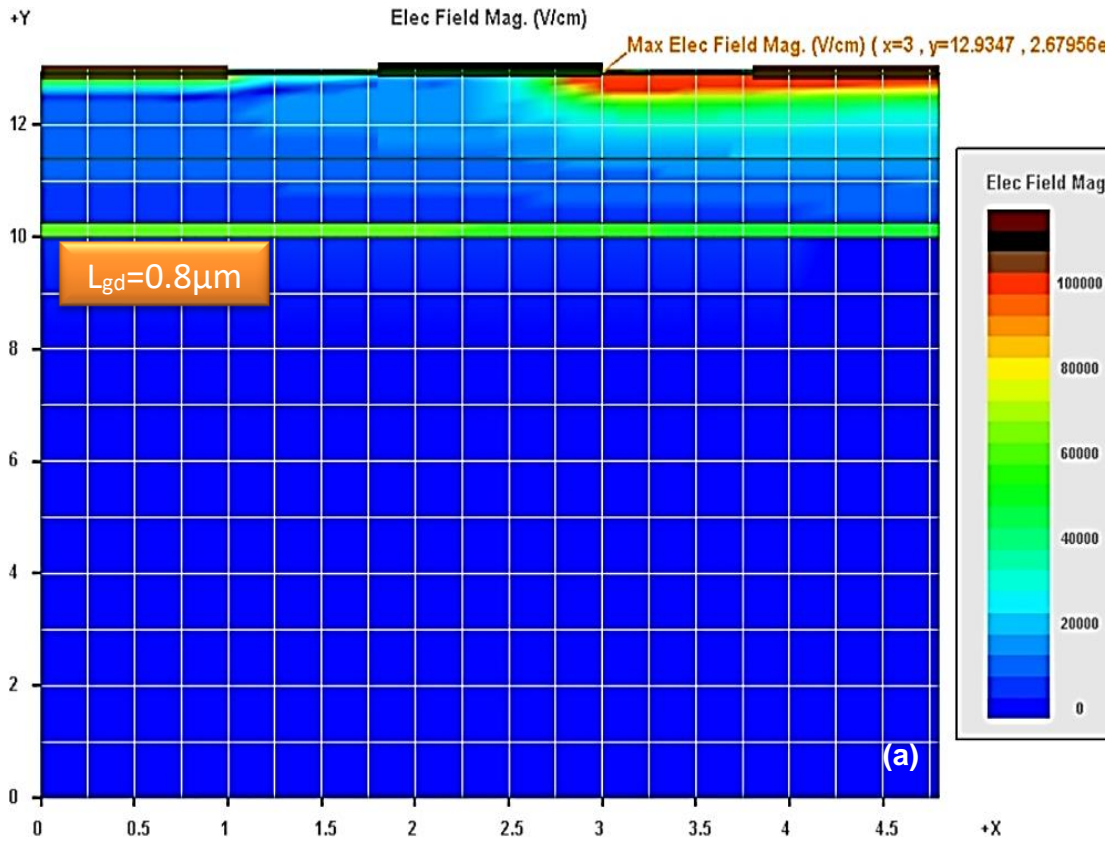


Şekil 5.7' nin devamı...

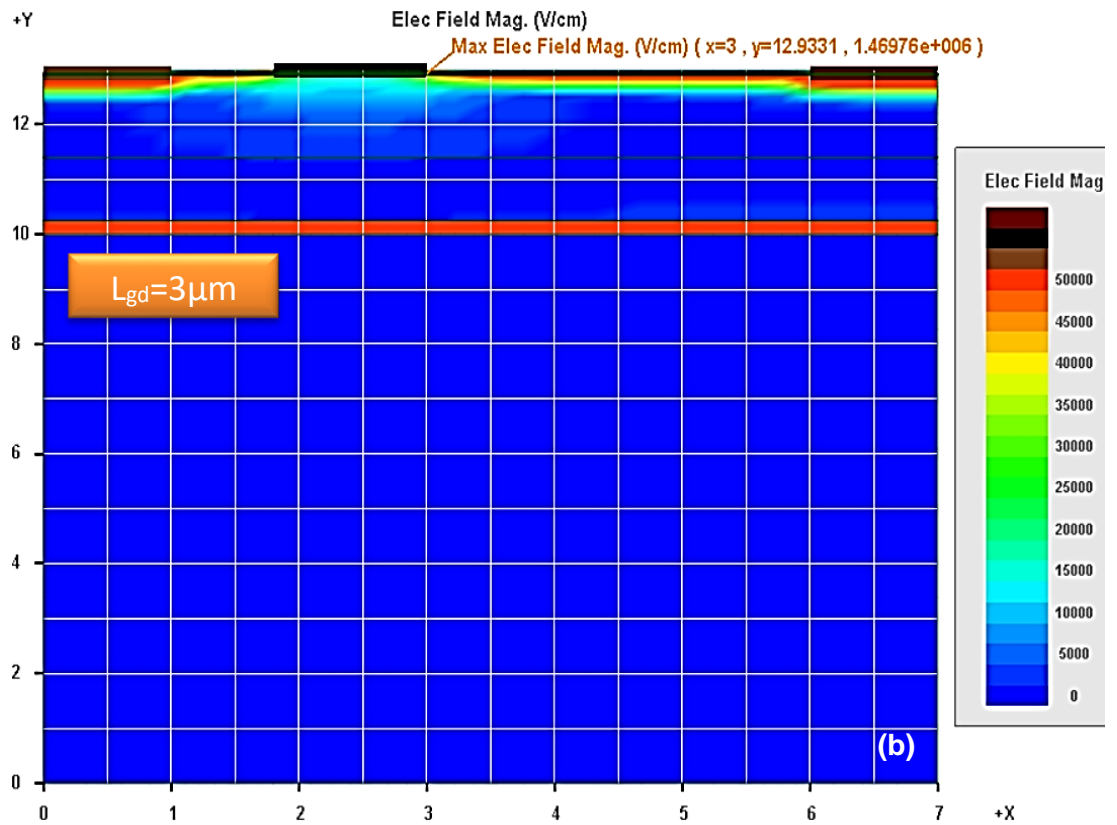


0,8 µm -30 µm kapı-akaç arası mesafe için diferansiyel potansiyel grafikleri Şekil 5.7.a.b.c.d.e.f'deki gibi ölçülmüştür. Bu grafiklerde ise çeşitli aralıklarda ölçülen kapı-akaç-kaynak için diferansiyel potansiyel enerjiler gösterilmiştir.

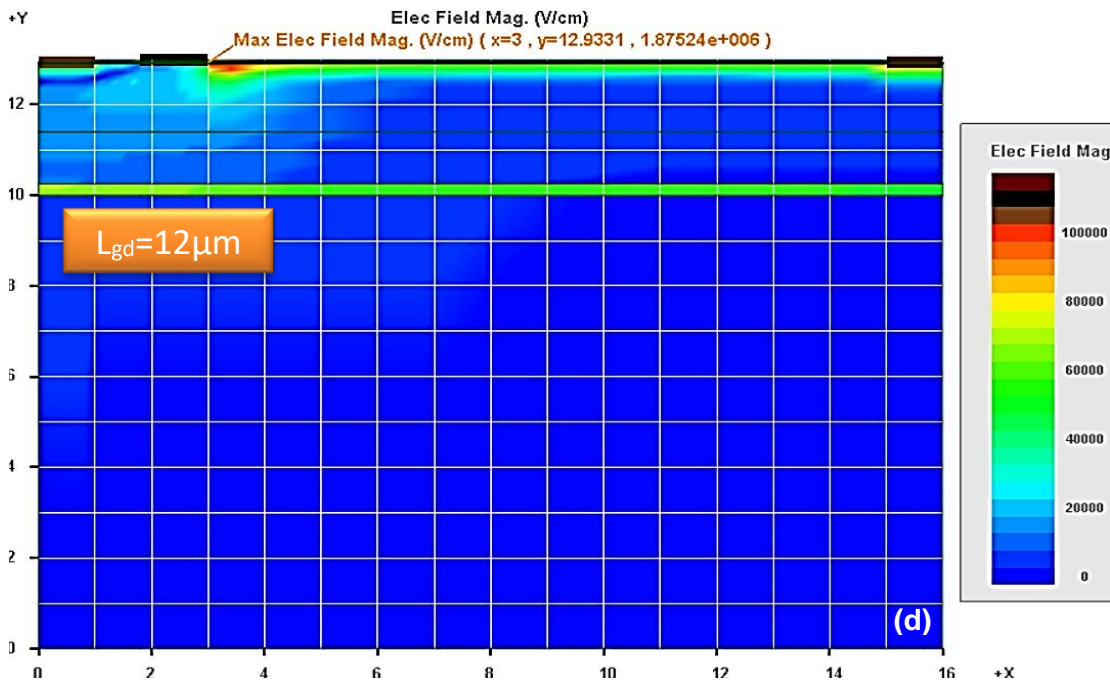
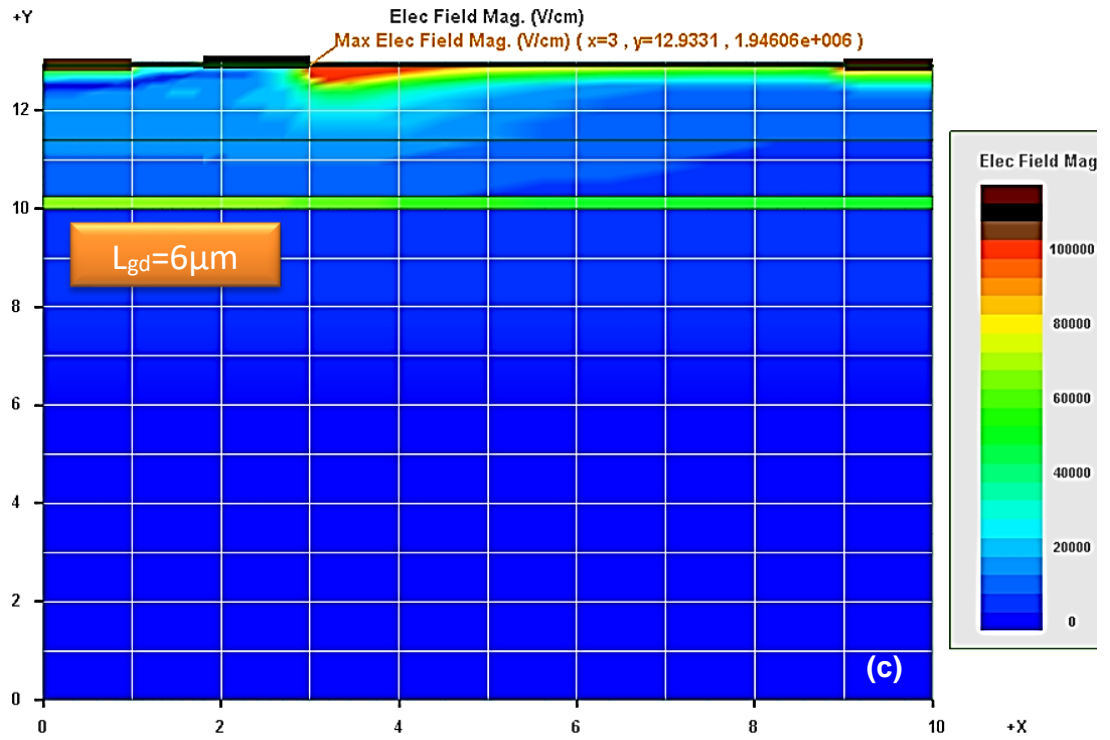
Kapı-akaç arası mesafe arttıkça kapı altındaki elektrik alanın artmasına bağlı olarak elektronların hızları artmakta ve bunlara bağlı olarak da maksimum doyum akımı ve geçiş iletkenliği de artmaktadır. Geçiş iletkenliğinin artması frekans değerlerini arttırarak çalışılmak istenen frekans aralığında aygıtlardan daha yüksek kazanç alınmasını sağlamaktadır. Kapı-akaç arası mesafe düzenli olarak artırılarak elde edilen elektriksel alan grafikleri ise Şekil 5.8'de verilmiştir.



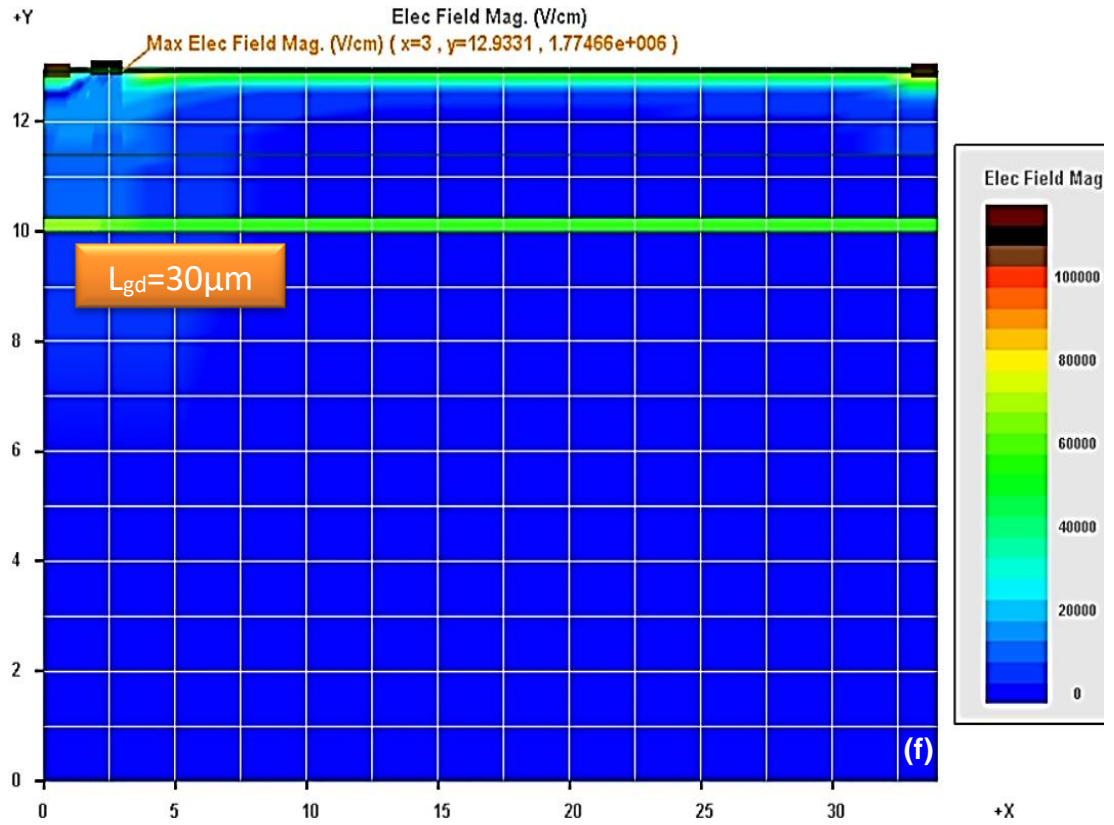
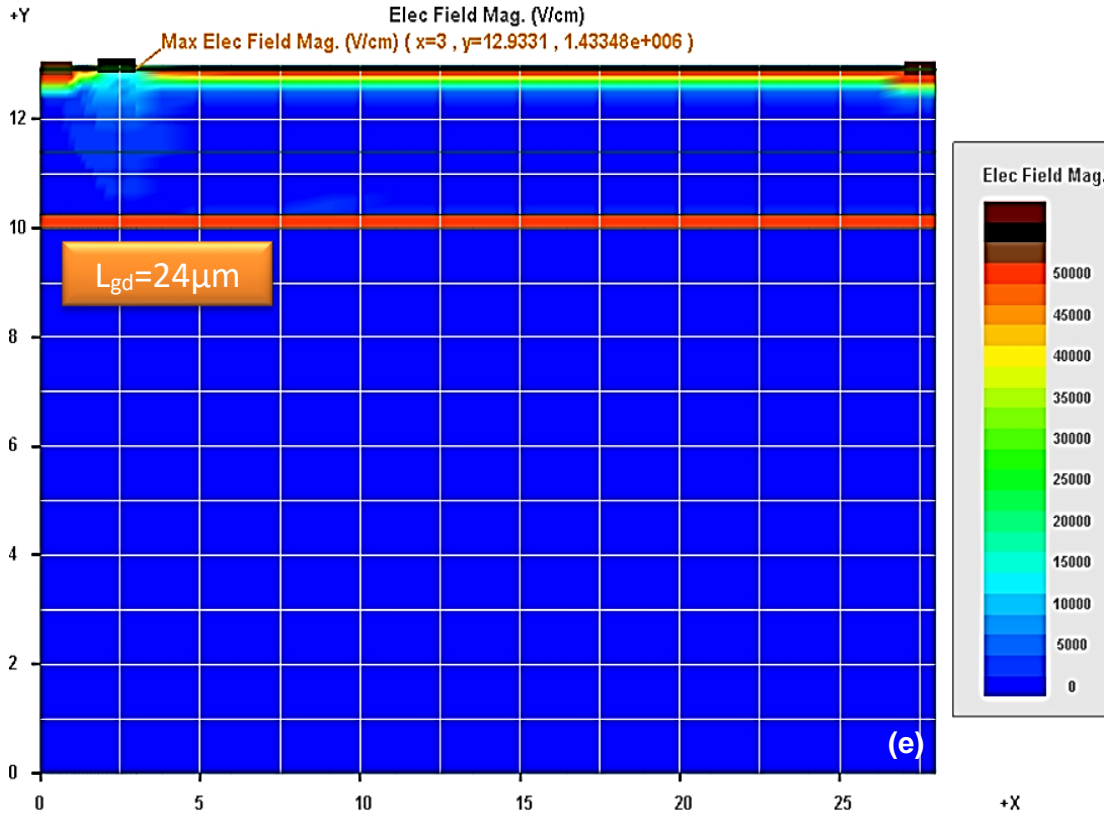
Şekil 5.7 Elektriksel Alan Grafikleri



Şekil 5.8' in devamı...



Şekil 5.8' in devamı...



Elektrik alan büyüklüğü grafikleri (Şekil 5.8.a.b.c.d.e.f)'de gösterilmektedir. Elektrik alan büyüklüğünden bölgelerinde ilginç bir enerji akım koridoru şekli görülmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİ

AlGaIn ekli olarak üretilen HEMT yapılar günümüz elektronik teknolojisine kolayca eklenmektedir. Bununla birlikte bu tür yapılarda yüksek kapı-akaç akımları görülebilmektedir. Ayrıca daha yüksek güç uygulamaları için kullanılacak aygıt tasarımı olarak HEMT yapılar tercih edilebilir. Ölçüm sonuçları, daha iyi elektriksel özelliklere sahip HEMTs'lerin geliştirilmesinde kullanılabilir.

Yapımızda elde ettiğimiz  $V_{br}$  grafiklerimize baktığımızda  $L_{dg}=0,8 \mu m$  için kırılma gerilimi değerimiz yaklaşık 180 V olarak ölçülmüştür.  $L_{dg}=3 \mu m$  için kırılma gerilimi değerimiz yaklaşık 85 V olarak ölçülmüştür. Mesafe 0,8  $\mu m$ 'den, 3  $\mu m$ 'ye çıkarıldığında kırılma geriliminin düştüğü, kapı-akaç arası mesafe 3  $\mu m$ 'den daha da arttırıldıkça kırılma geriliminin düzenli olarak arttığı görülmüştür.

$R_{on}$  grafikleri için elde edilen sonuçlar;  $L_{dg}=0,8 \mu m$ ,  $V_g=3 V$  ve 0,5 A/m akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık 2,4 V olarak ölçülmüştür. İkinci olarak ise  $L_{dg}=3 \mu m$ ,  $V_g=3 V$  ve 0,5 A/m akım için baktığımızda  $V_d$  değerimiz yaklaşık 1,36 V olarak ölçülmüştür. Mesafe 0,8  $\mu m$  den 3  $\mu m$  ye çıkarıldığında  $V_d$  değeri düşse de kapı-akaç arası mesafe arttırıldıkça  $V_d$  değerimizin düzenli olarak arttığı görülmüştür.

HEMT tabanlı GaN üzerindeki  $V_{th}$  değerleri incelenmiş, kapı-akaç arası mesafenin 0.8  $\mu m$  değerinden sırasıyla; 3  $\mu m$ , 6  $\mu m$ , 12  $\mu m$ , 24  $\mu m$  ve 30  $\mu m$  değerlerine artırılması ile oluşan grafikte  $V_{th}$  değerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalma ile de kapı-akaç arası mesafeyle  $V_{th}$  değerimizin ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır.

Yapımız üzerinde elde edilen enerji bant grafikleri incelenmiş olup kapı-akaç arası mesafe 0.8  $\mu m$  için alındığında  $E_v=-3.3eV$ ,  $E_f=(-2eV,-08eV)$  ve  $E_c=0,3eV$  değerleri ölçülmüştür. 3  $\mu m$ , 6  $\mu m$ , 12  $\mu m$ , 24  $\mu m$  ve 30  $\mu m$  değerleri için ise  $E_v=-2,6eV$ ,  $E_f=(-1,1eV,0eV)$  ve  $E_c=1eV$  değerlerinde sabit kaldığı görülmüştür.

$I_d V_d$  grafiklerinden elde edilen sonuçlar için bakıldığında 0,8  $\mu m$ , 3  $\mu m$ , 6  $\mu m$ , 12  $\mu m$ , 24  $\mu m$  ve 30  $\mu m$  mesafelerde  $V_{ds}=2 V$  ve  $V_{gs}=4 V$  değerlerinde mesafe 0,8  $\mu m$  iken  $I_d=26 A/m$ 'de görülmüştür. Kapı-akaç arası mesafe arttıkça  $I_d$  değerimizin azaldığı

görülmüştür. Aynı sonuç  $V_{gs} = 3V$  değerinde mesafe  $0,8 \mu m$  iken  $I_d = 14 A/m$  de görülürken kapı-akaç arası mesafe arttıkça  $I_d$  değerimizin azaldığı görülmüştür.  $V_{gs} = 2V$  değerinde ise düzenli bir azalma görülmemiştir.  $V_{gs} = 1V$  ve daha küçük voltlar için kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen cihazın/aygıtın önemli parametreler yönünden kıyaslamalı olarak analizinin gerçekleştirilmesi hem bu cihazın optimizasyonu hem de benzer cihazların tasarımı açısından önemli olmaktadır. Elektron hareketine dayalı çalışma prensibine sahip olan aygıtlarda elektrik alan, diferansiyel potansiyel ve enerji bant genişliği vb. gibi parametreler önem arz etmektedir. Bu bağlamda, tasarım esnasında ön planda olan kanal genişliğinin/kalınlığının değişimi, parametre temelli incelenirse en verimli çalışma noktasının tespiti kolaylaşır. Bu çalışmada elektron hareketinin doğrudan etkili olduğu elektrik alan parametresinin  $0$  ila  $100000 V/cm$  aralığında değişimi incelendiğinde kanal genişliğinin  $12 \mu m$  ile  $24 \mu m$  değerleri arasında olması gerektiği öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Acar, M. A. (2009). Fabrication, modeling and characterization of GaN HEMTs, and design of high power MMIC amplifiers (Doctoral dissertation, Bilkent Üniversitesi (Turkey)).
- Ajayan, J., & Nirmal, D. (2016). 20 nm high performance enhancement mode InP HEMT with heavily doped S/D regions for future THz applications. *Superlattices and Microstructures*, 100, 526-534.
- Ambacher, O. (1998). Growth and applications of group III-nitrides. *Journal of physics D: Applied physics*, 31(20), 2653.
- Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weimann, N. G., Chu, K., Murphy, M., ... & Hilsenbeck, J. (1999). Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N-and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of applied physics*, 85(6), 3222-3233.
- Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y.: *Appl. Phys. Lett.* 48(5), 353 (1986)
- Anand, M. J., Ng, G. I., Arulkumaran, S., Ranjan, K., Vicknesh, S., & Ang, K. S. (2015). Low k-dielectric benzocyclobutane encapsulated AlGaIn/GaN HEMTs with Improved off-state breakdown voltage. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(3), 036504.
- Asan, K. E. (2018). Sin Pasivasyonu Öncesi Ön İşlemlerin Gan HEMT' lerin Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Asif Khan, M., Kuznia, J. N., Olson, D. T., Schaff, W. J., Burm, J. W., & Shur, M. S. (1994). Microwave performance of a 0.25  $\mu\text{m}$  gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1121-1123.
- Babić, D. I. (2014). Optimal AlGaIn/GaN HEMT buffer layer thickness in the presence of an embedded thermal boundary. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(4), 1047-1053.
- Bahat-Treidel, E., Brunner, F., Hilt, O., Cho, E., Wurfl, J., & Trankle, G. (2010). AlGaIn/GaN/GaN: C Back-Barrier HFETs With Breakdown Voltage of Over 1 kV and Low  $R_{\text{on}} \times A$ . *IEEE Transactions on Electron Devices*, 57(11), 3050-3058.
- Bernardini, F., Fiorentini, V., & Vanderbilt, D. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56(16), R10024.
- Bernardini, F., & Fiorentini, V. (1999). Spontaneous versus piezoelectric polarization in III-V nitrides: conceptual aspects and practical consequences. *physica status solidi (b)*, 216(1), 391-398.

- Bernardini, F., & Fiorentini, V. (2002). Nonlinear behavior of spontaneous and piezoelectric polarization in III–V nitride alloys. *physica status solidi (a)*, 190(1), 65-73.
- Burk Jr, A. A., O'Loughlin, M. J., Siergiej, R. R., Agarwal, A. K., Sriram, S., Clarke, R. C., ... & Brandt, C. D. (1999). SiC and GaN wide bandgap semiconductor materials and devices. *Solid-State Electronics*, 43(8), 1459-1464.
- Brady, M. F., Brixius, W. H., Fechko, G., Glass, R. C., Henshall, D., Jenny, J. R., ... & Carter Jr, C. H. (2000). Status of large diameter SiC crystal growth for electronic and optical applications. In *Materials Science Forum* (Vol. 338, pp. 3-8). Trans Tech Publications Ltd.
- Chander, S., Gupta, S., & Gupta, M. (2018). Enhancement of breakdown voltage in AlGaN/GaN HEMT using passivation technique for microwave application. *Superlattices and Microstructures*, 120, 217-222.
- Chari, K. V. M., Bedrosian, G., D'Angelo, & J., Konrad, A., (1993). Finite Element Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 2, pp. 1306-1314.
- Chow, T. P., Khemka, V., Fedison, J., Ramungul, N., Matocha, K., Tang, Y., & Gutmann, R. J. (2000). SiC and GaN bipolar power devices. *Solid-State Electronics*, 44(2), 277-301.
- Chuang, S. L., & Chuang, S. L. (1995). *Physics of optoelectronic devices*.
- Coltrin, M. E., & Kaplar, R. J. (2017). Transport and breakdown analysis for improved figure-of-merit for AlGaN power devices. *Journal of Applied Physics*, 121(5), 055706.
- Cordier, Y., Portail, M., Chenot, S., Tottereau, O., Zielinski, M., & Chassagne, T. (2008). AlGaN/GaN high electron mobility transistors grown on 3C-SiC/Si (1 1 1). *Journal of crystal growth*, 310(20), 4417-4423.
- Çörekçi, S. (2008). Grup III-V bileşik yarı iletkenlerde AFM yüzey karakterizasyonu.
- de Weck, O., & Kim, I.Y. (2004). Finite Element Method. *Eng. Des. Rapid Prototyp*, 810.
- Desmaris, V., Rudzinski, M., Rorsman, N., Hageman, P. R., Larsen, P. K., Zirath, H., ... & Jos, H. F. F. (2006). Comparison of the DC and microwave performance of AlGaN/GaN HEMTs grown on SiC by MOCVD with Fe-doped or unintentionally doped GaN buffer layers. *IEEE Transactions on electron devices*, 53(9), 2413-2417.
- Dikme, Y. (2006). MOVPE and characterization of GaN-based structures on alternative substrates.
- Eastman, L. F., Tilak, V., Smart, J., Green, B. M., Chumbes, E. M., Dimitrov, R., ... & Shealy, J. R. (2001). Undoped AlGaN/GaN HEMTs for microwave power amplification. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(3), 479-485.

- Felbinger, J. G., Chandra, M. V. S., Sun, Y., Eastman, L. F., Wasserbauer, J., Faily, F., ... & Ejeckam, F. (2007). Comparison of GaN HEMTs on diamond and SiC substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 28(11), 948-950.
- Gamand, F., Li, M. D., & Gaquiere, C. (2012). A 10-MHz GaN HEMT DC/DC boost converter for power amplifier applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 59(11), 776-779.
- Gargini, P. (2015, May). Itrs past, present and future. In ITRSRC Workshop, Feb, pp. 26-27.
- Ghosh, S., Ahsan, S. A., Dasgupta, A., Khandelwal, S., & Chauhan, Y. S. (2016, December). GaN HEMT modeling for power and RF applications using ASM-HEMT. In 2016 3rd International Conference on Emerging Electronics (ICEE) (pp. 1-4). IEEE.
- Golio, M., *RF and Microwave Semiconductor Device Handbook*. 2003.
- Gökrem, L. (2009). Yüksek Elektron Hareketli Transistör (High Electron Mobility Transistor, HEMT) Distorsiyon Analizi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Guo, L., Wang, X., Wang, C., Xiao, H., Ran, J., Luo, W., ... & Hu, G. (2008). The influence of 1 nm AlN interlayer on properties of the Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N/AlN/GaN HEMT structure. *Microelectronics Journal*, 39(5), 777-781.
- Gülseren, M. E. (2019). Design, fabrication, and characterization of normally-off GaN HEMTs (Doctoral dissertation, Bilkent University).
- He, X. G., Zhao, D. G., & Jiang, D. S. (2015). Formation of two-dimensional electron gas at AlGaN/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression. *Chinese physics B*, 24(6), 067301.
- Hiramatsu, K., Itoh, S., Amano, H., Akasaki, I., Kuwano, N., Shiraishi, T., Oki, K.: *J. Cryst. Growth* 115(1-4), 628 (1991)
- Horn, J., Root, D.E., Simpson, G.: In: *Proceedings of the 2010 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, pp. 1-4. IEEE, New York (2010)
- Hu, W., Ma, B., Li, D., Narukawa, M., Miyake, H., & Hiramatsu, K. (2009). Mobility enhancement of 2DEG in MOVPE-grown AlGa<sub>0.3</sub>N/AlN/GaN HEMT structure using vicinal (0 0 0 1) sapphire. *Superlattices and Microstructures*, 46(6), 812-816.
- Huang, K. N., Lin, Y. C., Lee, J. H., Hsu, C. C., Yao, J. N., Wu, C. Y., ... & Chang, E. Y. (2020). Study of tri-gate AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN MOS-HEMTs for power application. *Micro and Nano Engineering*, 9, 100073.
- Hutton, V. D., (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*, Mc Graw Hill, Boston, pp. 45-114.

- IEC Technical Report, (2003). Electric Cables – Calculations for Current Ratings – Finite Element Method, IEC TR 62095-2003.
- Janakiraman, V., Baskaran, S., & Kumutha, D. (2021). Silicon Nitride Back Barrier in AlGaIn/GaN HEMT to Enhance Breakdown Voltage for Satellite Applications. *Silicon*, 13(10), 3531-3536.
- Jones, E. A., Wang, F. F., & Costinett, D. (2016). Review of commercial GaN power devices and GaN-based converter design challenges. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(3), 707-719.
- Khan, M.A., Hu, X., Sumin, G., Lunev, A., Yang, J., Gaska, R., Shur, M.: *IEEE Electron Device Lett.* 21(2), 63 (2000)
- Khan, M.A., Van Hove, J., Kuznia, J., Olson, D.: *Appl. Phys. Lett.* 58(21), 2408 (1991)
- Khandelwal, S. (2022). *Advanced SPICE Model for GaN HEMTs (ASM-HEMT): A New Industry-Standard Compact Model for GaN-based Power and RF Circuit Design.* Springer Nature.
- Khandelwal, S., Stecklein, G., & Herman, T. (2022). Modeling Substrate Voltage Effects on GaN IV Characteristics with ASM-HEMT model. In *2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1731-1734). IEEE.
- Kim, H., Roh, G., Kwon, Y. K., & Kang, B. (2019). Channel-length dependence of mechanical stress effect by hybrid shallow trench isolation on NBTI degradation of HfSiON/SiO<sub>2</sub> p-channel MOSFETs with strained Si/SiGe channel. *Microelectronics Reliability*, 100, 113424.
- Koide, Y., Itoh, H., Khan, M. R. H., Hiramatu, K., Sawaki, N., & Akasaki, I. (1987). Energy band-gap bowing parameter in an Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alloy. *Journal of applied physics*, 61(9), 4540-4543.
- Kutucu, K. (2009). *Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Elektrik Alan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Lakkas, G. (2016). MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency. *Analog Appl*, 10(2016), 22-26.
- Lee, D. S., Gao, X., Guo, S., Kopp, D., Fay, P., & Palacios, T. (2011). 300-ghz InAlN/gan hemts with InGaN back barrier. *IEEE Electron Device Letters*, 32(11), 1525-1527.
- Lee, H. S., Piedra, D., Sun, M., Gao, X., Guo, S., & Palacios, T. (2012). 3000-V 4.3 mΩ · cm<sup>2</sup> InAlN/GaN MOSHEMTs With AlGaIn Back Barrier. *IEEE electron device letters*, 33(7), 982-984.
- Li, H. O., Huang, W., Tang, C. W., Deng, X. F., & Lau, K. M. (2011). Fabrication of 160-nm T-gate metamorphic AlInAs/GaInAs HEMTs on GaAs substrates by metal organic chemical vapour deposition. *Chinese Physics B*, 20(6), 068502.

- Lişesivdin, S. B. (2008). AlGaN/GaN temelli yüksek elektron hareketlilikli transistörlerin (hemt) elektron ve manyeto iletim özellikleri (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- Liu, Z., Huang, T., Li, Q., Lu, X., & Zou, X. (2016). Compound semiconductor materials and devices. *Synthesis Lectures on Emerging Engineering Technologies*, 2(3), 1-73.
- Maier, D., Alomari, M., Grandjean, N., Carlin, J. F., Diforte-Poisson, M. A., Dua, C., ... & Kohn, E. (2010). Testing the temperature limits of GaN-based HEMT devices. *IEEE Transactions on device and materials reliability*, 10(4), 427-436.
- Martin, P., Lucci, L.: In: *Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems-MIXDES 2013*, pp. 92–95. IEEE, New York (2013).
- Martín-Guerrero, T.M., Santarelli, A., Gibiino, G.P., Traverso, P.A., Camacho-Peñalosa, C., Filicori, F.: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 68(5), 1627 (2020).
- Micovic, M., Brown, D., Regan, D., Wong, J., Tang, Y., Herrault, F., Santos, D., Burnham, S., Tai, J., Prophet, E. et al.: In: *Proceedings of the 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, pp. 3–3. IEEE, New York (2016).
- Midilli, T. (2020). Kurşun içermeyen BNBT6 piezoelektrik seramiklerin elektriksel özellikleri üzerine Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ilavelerinin etkisinin araştırılması (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- Nakamura, N., Furuta, K., Shen, X. Q., Kitamura, T., Nakamura, K., & Okumura, H. (2007). Electrical properties of MBE-grown AlGaIn/GaN HEMT structures by using 4H-SiC (0 0 0 1) vicinal substrates. *Journal of crystal growth*, 301, 452-456.
- Nakamura, S., *Jpn. J. Appl. Phys.* 30(10A), L1705 (1991)
- Nakamura, S., Senoh, M., Mukai, T.: *Jpn. J. Appl. Phys.* 32(1A), L8 (1993)
- Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M.: *Jpn. J. Appl. Phys.* 30(12A), L1998 (1991)
- Nanjo, T., Imai, A., Suzuki, Y., Abe, Y., Oishi, T., Suita, M., ... & Tokuda, Y. (2013). AlGaIn channel HEMT with extremely high breakdown voltage. *IEEE transactions on electron devices*, 60(3), 1046-1053.
- Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor physics and devices: basic principles*. McGraw-hill.
- Odabaşı, O. (2021). Improved Robustness, Stability and Linearity in GaN Based High Electron Mobility Transistors for 5G Applications (Doctoral dissertation, Bilkent Üniversitesi (Turkey)).

- Qian, W., Lu, J., Bai, H., & Averitt, S. (2018). Hard-switching 650-V GaN HEMTs in an 800-V DC-grid system with no-diode-clamping active-balancing three-level topology. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(2), 1060-1070.
- Öztürk, M. (2018). Ultraince Bariyerli Gan-Temelli Yüksek Elektron Hareketliliğine Sahip Transistörlerin Elektriksel Özellikleri ve Saçılma Analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Palacios, T., Dora, Y., Chakraborty, A., Sanabria, C., Keller, S., DenBaars, S., Mishra, U.: Optimization of AlGaIn/GaN HEMTs for High Frequency Operation (2006)
- Palacios, T., & Mishra, U. K. (2007). AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation*.
- Pinto, M. R., Rafferty, C. S. & Dutton, R. W. PISCES II: Poisson and continuity equation solver, 1984.
- Raffo, A., Bosi, G., Vadalà, V., Vannini, G.: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 62(1), 73 (2013)
- Saito, W., Nitta, T., Kakiuchi, Y., Saito, Y., Tsuda, K., Omura, I., & Yamaguchi, M. (2007). A 120-W boost converter operation using a high-voltage GaN-HEMT. *IEEE Electron Device Letters*, 29(1), 8-10.
- Salcines, C., Khandelwal, S., & Kalfass, I. (2021). A Compact Model for SiC Power MOSFETs for Large Current and High Voltage Operation. arXiv preprint arXiv:2104.14733.
- Sentaurus, "Sentaurus sDevice 2015," Simulation, no. June, p. 2015, 2009.
- Selvaraj, S. L., Suzue, T., & Egawa, T. (2009). Breakdown enhancement of AlGaIn/GaN HEMTs on 4-in silicon by improving the GaN quality on thick buffer layers. *IEEE electron device letters*, 30(6), 587-589.
- Semen, M. (2019). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yıldırımın Uçaklara Olan Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Shen, L., Heikman, S., Moran, B., Coffie, R., Zhang, N. Q., Buttari, D., ... & Mishra, U. K. (2001). AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT. *IEEE Electron Device Letters*, 22(10), 457-459.
- Sheppard, S. T., Pribble, W. L., Emerson, D. T., Ring, Z., Smith, R. P., Allen, S. T., ... & Palmour, J. W. (2000, August). Technology development for GaN/AlGaIn HEMT hybrid and MMIC amplifiers on semi-insulating SiC substrates. In *Proceedings 2000 IEEE/Cornell Conference on High Performance Devices (Cat. No. 00CH37122)* (pp. 232-236). IEEE.
- Simon Li, Yue Fu (auth.) - 3D TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics-Springer-Verlag New York (2012).

- Sun, B., Chang, H., Wang, S., Niu, J., & Liu, H. (2017). ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation of L<sub>g</sub>= 100 nm metamorphic InAlAs/InGaAs HEMTs with Si-doped Schottky layers on GaAs substrates. *Solid-State Electronics*, 138, 40-44.
- Taking, S. (2012). AlN/GaN MOS-HEMTs Technology (Doctoral dissertation, University of Glasgow).
- Tekeli, Z. (2009). Nitrit Temelli (III-V) Yarıiletken Heteroyapıların Morfolojik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Toprak, A. (2020). Yüksek Güç Uygulamaları İçin Galyum Nitrür Temelli Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistör Tasarımı, Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu.
- Turhan, S. (2011). AlGa (In) N/AlN/GaN heteroeklem yapıların enerji bant profillerinin ve taşıyıcı yoğunluklarının Nextnano3 benzetim programı kullanarak incelenmesi (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Uzgun, F. (2020). Barrier Engineering For High-Performance Nbn Infrared Photodetectors (Doctoral Dissertation, Middle East Technical University).
- URL 1. İnternet: Transistör nedir? Transistör Tarihçesi. Robotik Sistem. Robotiksistem.com.tr,[http://www.robotiksistem.com/transistor\\_nedir\\_transistor\\_cesitleri.html](http://www.robotiksistem.com/transistor_nedir_transistor_cesitleri.html) &date=2022-05-30
- Wu, Y., Jacob-Mitos, M., Moore, M. L., & Heikman, S. (2008). A 97.8% efficient GaN HEMT boost converter with 300-W output power at 1 MHz. *IEEE Electron Device Letters*, 29(8), 824-826.
- Wu, Y. F., Gritters, J., Shen, L., Smith, R. P., & Swenson, B. (2013). kV-class GaN-on-Si HEMTs enabling 99% efficiency converter at 800 V and 100 kHz. *IEEE transactions on power electronics*, 29(6), 2634-2637.
- Wu, X. H., Fini, P., Tarsa, E. J., Heying, B., Keller, S., Mishra, U. K., ... & Speck, J. S. (1998). Dislocation generation in GaN heteroepitaxy. *Journal of crystal growth*, 189, 231-243.
- Yang, L., Zhang, M., Hou, B., Mi, M., Wu, M., Zhu, Q., ... & Hao, Y. (2019). High Channel Conductivity, Breakdown Field Strength, and Low Current Collapse in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Si  $\delta$ -Doped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>: C HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(3), 1202-1207.
- Yazıcı, M. (2022). Yüksek Gerilim Ayırıcılarının Karma Gerilimlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektrik Alan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yeon, S. J., Park, M., Choi, J., & Seo, K. (2007, December). 610 GHz InAlAs/In 0.75 GaAs metamorphic HEMTs with an ultra-short 15-nm-gate. In 2007 IEEE International Electron Devices Meeting (pp. 613-616). IEEE.

- Yin, H., Bilbro, G., Trew, R.: In: Proceedings of the 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, pp. 787–790. IEEE, New York (2007).
- Yu, P. Y., & Cardona, M. (2010). Optical properties I. In *Fundamentals of Semiconductors* (pp. 243-344). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Zanato, D., Gokden, S., Balkan, N., Ridley, B. K., & Schaff, W. J. (2004). The effect of interface-roughness and dislocation scattering on low temperature mobility of 2D electron gas in GaN/AlGaN. *Semiconductor science and technology*, 19(3), 427.
- Zhang, N. Q., Keller, S., Parish, G., Heikman, S., DenBaars, S. P., & Mishra, U. K. (2000). High breakdown GaN HEMT with overlapping gate structure. *IEEE Electron Device Letters*, 21(9), 421-423.
- Zhang, M., Guo, Z., Huang, Y., Li, Y., Ma, J., Xia, X., ... & Sun, H. (2021). Study of AlGaIn/GaN vertical superjunction HEMT for improvement of breakdown voltage and specific on-resistance. *IEEE Access*, 9, 9895-9902.
- Zhang, W., Zhang, J., Xiao, M., Zhang, L., & Hao, Y. (2018). High breakdown-voltage (> 2200 V) AlGaIn-channel HEMTs with ohmic/Schottky hybrid drains. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 6, 931-935.