

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI AŞINDIRMA PARAMETRELERİ İLE OLUŞTURULAN KAPI
ELEKTRODU'NUN GaN TEMELLİ YÜKSEK ELEKTRON DEYİNGENLİKLİ
TRANSİSTÖR AYGITLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

İrfan Alp GEZGİN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI AŞINDIRMA PARAMETRELERİ İLE OLUŞTURULAN KAPI ELEKTRODU'NUN GaN TEMELLİ YÜKSEK ELEKTRON DEYİNGENLİKLİ TRANSİSTÖR AYGITLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

İrfan Alp GEZGİN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ELMALI

Bu tez çalışmasında, SiC alttaş üzerine Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme yöntemi ile büyütülmüş GaN/AlN/AlGaN epitaksiyel heteroeklem yapıdaki HEMT aygıtının DC elektriksel özellikleri incelenecektir. Öncelikle Adacık (Mesa) litografisi ile desenlenen örnekler İndüktif Eşleşmiş Plazma Reaktif İyon Aşındırma (ICP-RIE) cihazında Cl₂/BCl₃ gaz kimyasalı karışımında aşındırılmıştır. Mesa adımı sonrasında, Omik metal litografisi ile desenlenen örnekler Elektron Demeti ile Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi kullanılarak Ti/Ni/Al/Au metal yapısı desenlenen bölgelere kaplanmıştır. Kapı elektrodu metalizasyon adımı öncesinde yüzeyde bulunan SiN katmanı, Fotolitografi tekniği ile 1µm açıklıkta desenlendikten sonra ayrı ayrı SF₆ ve CF₄ gazları ile aşındırılmıştır. Aşındırılan bölgelere, Elektron Demeti ile Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi kullanılarak Ni/Au metal yapısı kaplanmıştır.

Yapılan DC elektriksel I-V ölçümlerinde, SF₆ gazı ile aşındırılan örneğin ortalama ölçüm sonuçları CF₄ ile aşındırılan örnekten daha yüksek performans göstermiştir.

Haziran 2022, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler : GaN HEMT, SiN_x, Kapı Elektrodu, SF₆, CF₄

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF GATE ELECTRODE ON GaN HEMT DEVICES FABRICATED WITH DIFFERENT ETCHING PARAMETERS

İrfan Alp GEZGİN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Engineering Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ayhan ELMALI

In this thesis, DC electrical performance of GaN/AlN/AlGaIn epitaxial heterostructure on SiC substrate HEMT devices will be investigated. Firstly, the samples patterned with Lithography technique and Mesa mask then Dry Etched with Cl_2/BCl_3 chemical gas mixture in the ICP-RIE system. Secondly, the samples patterned with Lithography technique and Ohmic mask then coated Ti/Ni/Al/Au metals with Electron Beam Evaporator system (E-Beam). Before gate metallization, the surface of samples coated SiN_x passivation material with Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) system then Fotolithography technique used to develop openings with $1\mu\text{m}$ length. The opening areas etched with ICP-RIE technique using SF_6 and CF_4 gases respectively. The openings after etched coated with E-Beam Evaporation technique using Ni/Au metals.

After all these processes, average DC measurements performance results of the device processed with SF_6 gas better than the device processed with CF_4 gas.

June 2022, 80 pages

Key Words: GaN HEMT, SiN_x , Gate, SF_6 , CF_4

TEŐEKKÖR

Çalıőmam süresince, öneri ve fikirleriyle bana yol gösteren, bilimsel çalışma süreçlerini bana öğreten ve desteğini her zaman sunan değerli danıőmanım Sayın Prof. Dr. Ayhan Elmalı' ya (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı);

Fikirleriyle bana yol gösteren, görüş ve deneyimlerini benimle paylaşan Sayın Doğan Yılmaz, Mert Satılmıő ve Fikri Oğuz'a (Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi);

Çalıőmalarım süresince Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nin tüm imkanlarını kullanmama olanak sağlayan Sayın Prof. Dr. Ekmel Özbay (Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi),

Her zaman her koşulda bana destek olan motivasyon kaynağım eőime ve bana destek olan üzerimdeki emekleri sonsuz, beni sevgiyle büyüten aileme,

İrfan Alp GEZGİN
Ankara , Haziran 2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1 Transistör Çeşitleri	2
2.1.1 Alan etkili transistörler (FET) ve iki kutuplu eklem transistörler (BJT).....	2
2.2 GaN Temelli Yüksek Elektron Devingenlikli Transistörler (HEMT).....	8
2.2.1 GaN malzemesi özellikleri	8
2.3 GaN Epitaksiyel Yapısı.....	13
2.3.1 Alttaşlar.....	13
2.3.2 GaN çekirdeklenme tabakası	15
2.3.3 GaN tampon tabakası	17
2.3.4 GaN kanal tabakası.....	18
2.3.5 AlN ara plaka tabakası (Spacer).....	19
2.3.6 AlGaN bariyer tabakası.....	21
2.3.7 GaN kep tabakası	22
2.4 Fiziksel Çalışma Mekanizması.....	25
2.4.1 İki boyutlu elektron gazı (2DEG)	25
2.4.2 Elektron devingenliği.....	28
2.4.3 Isıl iletkenlik	28
2.4.4 Elektriksel kırılma dayanımı	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1 Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi	35
3.2 Optik Litografi	38
3.2.1 Yüzeve fotorezist kaplanması	38

3.2.2 Maske hizalama ve doza maruz bırakma	40
3.3 Elektron Demet Metalizasyonu.....	43
3.4 Kuru Aşındırma	45
3.5 GaN Transistör Üretim Süreçleri	48
3.6 Omik Kontak Litografisi	49
3.7 Omik Metal Kaplaması ve Fotorezist Kaldırma İşlemi	52
3.8 Adacık (Mesa)Yapılarının Oluşturulması	55
3.9 Omik Metallerin Tavlanması	57
3.10 SiN Pasivasyon Kaplanması.....	58
3.11Kapı Elektrodu Oluşturulması	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	63
4.1 Kontak Direnci Ölçüm Sonuçları	63
4.2 Akım – Gerilim (I-V) Ölçüm Sonuçları	65
4.3 Aygıt Karakteristiği ve Kanal İletkenliği.....	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	72
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGELER DİZİNİ

a	Örgü parametresi (x-ekseni)
c	Örgü Parametresi (y-ekseni)
u	Örgü Parametresi (z-ekseni)
V	Hacim
GPa	Gigapascal
E_G	Bant Aralığı
E_C	İletkenlik Bandı Minimumu
E_V	Değerlik Bandı Maksimumu
E_f	Fermi Seviyesi
λ	Dalgaboyu
eV	Elektron Volt
a_A^0	Doğal örgü parametresi (x-ekseni)
a_B^0	Doğal Örgü Parametresi (y-ekseni)
Å	Angström
nm	Nanometre
cm	Santimetre
um	Mikrometre
m	metre
W	Watt
K	Kelvin
P	Basınç
ΔE	Seviyeler Arası Enerji Farkı
ρ	Özdirenç
A	Akım
s	Saniye
V	Gerilim
dB	Desibel
g_m	Kanal İletkenliği
S	Siemens
GHz	Gigahertz

f_t	Frekans
F	Farad
C	Kapasitans
I_d	Doyum Akımı
σ	Stres
P_{SP}	Kendiliğinden Kutuplanma Vektörü
P_{PZ}	Piezoelektrik Kutuplanma Vektörü
N_D	Donör Atom Yoğunluğu
n_C	İletkenlik Bandı Yoğunluğu
d	Uzaklık
e	Elektron Yükü
q	Elektron'un Yükü
g	Gram
Z	Atom Numarası
N_s	Safsızlık Atomu Yoğunluğu
E	Elektrik Alan
k	Toplam Isısal İletkenlik
k_e	Elektronların Isısal İletkenliği
k_l	Örgünün Isısal İletkenliği
T	Sıcaklık
R	Boltzmann Sabiti
v	Elektronların Ortalama Hızı
τ	Elektronların Durulma Zamanı
C_v	Isı sığası
Λ	Ortalama Serbest Yol
ε	Kritik Elektrik Alan
γ	Katsayı
R_{on}	Kanal Direnci
V_{BD}	Kırılma Gerilimi
t	Zaman

Kısaltmalar

DC	Doğru Akım
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
RF	Radyo Frekansı
XRD	X-ışını kırınımı
XPS	X-ışını fotoelektron spektrometresi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Transistör Çeşitleri.....	2
Şekil 2.2 İki kutuplu eklem transistör üretim adımları	3
Şekil 2.3 Paketlenmiş halde iki kutuplu eklem transistörü	4
Şekil 2.4 N-kanallı eklem alan etkili transistör	4
Şekil 2.5 a) artış modu mosfet, b) tüketim modu mosfet.....	5
Şekil 2.6 Mosfet üretim adımları	6
Şekil 2.7 FET ve BJT karşılaştırmalı görseli	7
Şekil 2.8 GaN kristal yapısı	8
Şekil 2.9 a) GaN Zinc-Blende Kristal Yapısı, b) GaN Rock-Salt Kristal Yapısı	9
Şekil 2.10 GaN malzemesinin basınca karşı hacim değişimi grafiği.....	10
Şekil 2.11 III-V Grubu yarıiletkenlerin örgü parametrelerine karşılık bant aralığı grafiği	11
Şekil 2.12 a) Wurtzite yapıda AlN, b) Wurtzite yapıda GaN, c) Wurtzite yapıda InN malzemelerinin bant diagramları.....	11
Şekil 2.13 a) $In_xGa_{1-x}N$ malzemesinin In kompozisyonuna, b) $Al_xGa_{1-x}N$ malzemesinin Al kompozisyonuna, c) $Al_xIn_{1-x}N$ Al kompozisyonuna bağlı olarak bant aralıkları verilmiştir	12
Şekil 2.14 a) Si alttaş üzerine büyütülmüş GaN, b) SiC alttaş üzerine büyütülmüş GaN, c) GaN alttaş üzerine büyütülmüş GaN	14
Şekil 2.15 Kristal kusurunun enerji bant diyagramındaki etkisi	14
Şekil 2.16 Büyütme öncesi prosesin büyütmeye kristalografik olarak etkisi	16
Şekil 2.17 a) Tampon tabakası olmayan GaN epitaksiyel yapısı, b) Tampon tabakası olan GaN epitaksiyel yapısı.....	17
Şekil 2.18 a) AlGaN bariyer tabakası çeşitli olan yapı, b) GaN kanal üzerine AlN ara katman olan yapı, c) GaN tampon tabakası üzerinde InGaN kanal tabakası olan yapı	18
Şekil 2.19 a) Çıkış gücü ve güç çıktısı verimi grafiği, b) I-V Grafiği (Sample A: 50nm, Sample B: 150nm)	19
Şekil 2.20 AlN ara plaka tabakasının farklı kalınlıklarda etkisi	20
Şekil 2.21 HEMT aygıtının AlGaN bariyer tabakasının doyum akımı ve kanal iletkenliğine karşı grafiği.....	21
Şekil 2.22 Farklı AlGaN kompozisyonlarına bağlı akaç akımının değişim grafiği.....	22
Şekil 2.23 2DEG yoğunluğu ve Hall devingenliği'nin GaN kep tabakası kalınlığına karşı grafiği.....	23

Şekil 2.24 a) GaN kep tabakası olmadan GaN/AlGaN enerji bant diyagramı, b) ince GaN kep tabakası olan GaN/AlGaN/GaN enerji bant diyagramı, c) kalın GaN kep tabakası olan GaN/AlGaN/GaN enerji bant diyagramı.....	24
Şekil 2.25 Bir araya getirilmemiş GaN ve AlGaN kristal yapıları	25
Şekil 2.26 a) Bir araya getirilmiş GaN ve AlGaN kristal yapıları, b) Gerinime uğramış yapıların temsili ve bant yapısı, c) 2DEG'in elektron konsantrasyonu	26
Şekil 2.27 AlGaN/GaN – InGaN/GaN sistemlerinin atomik kompozisyonuna bağlı kutuplanma eğrileri.....	27
Şekil 2.28 III-V Grubu doğrudan bant yapılı yarıiletkenlerin Elektriksel Kritik Alan kıyaslama grafiği	29
Şekil 2.29 Şekil 2. III-V Grubu doğrudan olmayan bant yapılı yarıiletkenlerin Elektriksel Kritik Alan kıyaslama grafiği.....	30
Şekil 2.30 Doğrusal ve doğrusal olmayan yarıiletkenlerin Kritik Elektrik Alanının Bant Aralığına bağlı grafiği	31
Şekil 2.31 Zincirleme iyonizasyon etkisinin temsili gösterimi	33
Şekil 2.32 GaN malzemesinin iyonizasyon oranları	34
Şekil 3.1 MOCVD cihazının şematik gösterimi	35
Şekil 3.2 MOCVD sistemlerinde kullanılan Reflektometre'nin şematik gösterimi	36
Şekil 3.3 Reflektometrenin çalışma prensibi şematik gösterimi	37
Şekil 3.4 6H-SiC üzerine AlN tampon tabakası ve GaN epitaksiyel tabakası büyütmesi Fabry-Perot salınımları	38
Şekil 3.5 Döndürme ile kaplanma işlemi	39
Şekil 3.6 Fotorezist pişirme işlemi.....	39
Şekil 3.7 Vernier ölçeği ve fotolitografi belirteçleri temsili görseli	40
Şekil 3.8 Pozitif (Sol) ve negatif (Sağ) fotorezist'in ışık ile verdiği reaksiyonun temsili görseli	41
Şekil 3.9 Fotolitografi proses adımları.....	42
Şekil 3.10 Elektron Demet Metalizasyon yöntemi ve Saçtırma Metalizasyon yöntemi ile kaplama profili karşılaştırmalı görseli.....	43
Şekil 3.11 Elektron Demet Metalizasyon yöntemi ve Saçtırma Metalizasyon yöntemi ile çalışma prensibi karşılaştırmalı görseli	43
Şekil 3.12 Metallerin erime sıcaklıklarının buhar basınçlarına karşı grafiği	44
Şekil 3.13 a) Plazma hal, b) plazmanın elektrik alanda davranışı	46
Şekil 3.14 Plazma'nın elektrik alan altında sahip olduğu potansiyel.....	46
Şekil 3.15 Kimyasal ve fiziksel aşındırma arasında karşılaştırma görseli	47
Şekil 3.16 Aşındırma profilleri karşılaştırması. a) kuru aşındırma profili, b) ıslak aşındırma profili	48

Şekil 3.17 Brewer Science marka Spinner ve Stuart marka Hot Plate.....	50
Şekil 3.18 Süss marka MA6 Cihazı	51
Şekil 3.19 a) A1, b) A2 örneğinin omik kontak litografisi mikroskop görüntüsü	52
Şekil 3.20 Oerlikon marka E-Beam Cihazı.....	53
Şekil 3.21 a) A1, b) A2 örneğinin omik kontak metalizasyon sonrası	54
Şekil 3.22 İEA-RİA cihazı	56
Şekil 3.23 RTP Cihazı.....	58
Şekil 3.24 Sentech Marka ICPECVD Cihazı.....	59
Şekil 3.25 Samco marka ICP-RIE Cihazı	61
Şekil 3.26 a) A1, b) A2 örneği kapı elektrodu kuru aşındırma sonrası mikroskop görüntüsü	61
Şekil 3.27 Kapı elektrodu metalizasyon sonrası mikroskop görüntüsü	62
Şekil 4.1 TLM metodu şematik gösterimi	63
Şekil 4.2 TLM ölçüm sonucu ve veri analizi	63
Şekil 4.3 a) A1, b) A2 örneğinin TLM ölçüm sonuçları.....	64
Şekil 4.4 TLM ölçüm düzeneği.....	65
Şekil 4.5 A1 örneği Id-Vd ölçüm sonucu.....	66
Şekil 4.6 A2 örneği Id-Vd ölçüm sonucu.....	67
Şekil 4.7 Aygıtların Id-Vd ölçüm gösterimi	68
Şekil 4.8 A1 örneğinin Id-Vg ölçüm sonucu	68
Şekil 4.9 A2 örneğinin Id-Vg ölçüm sonucu	69
Şekil 4.10 a) A1, b) A2 örneğinin kanal iletkenliği grafikleri	70
Şekil 5.1 A1 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü	73
Şekil 5.2 A2 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü	73
Şekil 5.3 A1 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü	74
Şekil 5.4 A2 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 BJT ve FET karşılaştırma tablosu.....	7
Çizelge 2.2 GaN malzemesinin kristal yapılarının örgü parametreleri ve birim hücre hacimleri.....	9
Çizelge 2.3 Si, 6H-SiC ve Al ₂ O ₃ alttaş malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırmalı tablosu	13
Çizelge 2.4 Fiziksel Özellikler Karşılaştırma Tablosu	27
Çizelge 2.5 Doğrusal ve Doğrusal olmayan yarıiletkenlerin regresyon katsayıları.....	31
Çizelge 3.1 Omik kontak rezist döndürme parametreleri	50
Çizelge 3.2 Omik kontak fotolitografi parametreleri.....	51
Çizelge 3.3 Omik kontak fotolitografi geliştirme parametreleri.....	52
Çizelge 3.4 Omik metal kaplama parametreleri.....	53
Çizelge 3.5 Omik metal kaplama parametreleri.....	55
Çizelge 3.6 Adacık fotolitografi parametreleri	55
Çizelge 3.7 Adacık kuru aşındırma parametreleri.....	56
Çizelge 3.8 Omik metal tavlama parametreleri.....	57
Çizelge 3.9 SiN pasivasyon parametreleri	59
Çizelge 3.10 SiN pasivasyon aşındırma parametreleri	60
Çizelge 3.11 Kapı elektrodu metalizasyon parametreleri	62
Çizelge 5.1 A1 ve A2 örnekleri elektriksel karakterizasyon parametreleri	72

1. GİRİŞ

1948 yılında Bell laboratuvarlarında Germanyum elementi tabanlı ilk transistör geliştirilmiştir. Bu gelişmenin ardından elektronik çağı başlamıştır.

Zaman içinde gelişmelerle birlikte Germanyum'un elektriksel kırılma dayanımı daha düşük olduğu için ve Silisyum malzemesi hem daha ucuz hem de Germanyum'a göre daha üstün özellikleri olmasından dolayı elektronik aygıtların oluşturulmasında Silisyum malzemesi kullanılmaya başlamıştır. Silisyum malzemesi elektronik pazarını çok uzun bir süre domine etmesine rağmen teknolojinin gereklilikleri ve isterlerin yüksek değerlere çıkmasından dolayı daha üstün özellikli malzemelerin kullanımına ihtiyaç oluşmuştur. III-V grubu yarıiletkenler Silisyum'a kıyasla gösterdikleri üstün özelliklerinden dolayı bir tercih nedeni haline gelmeye başlamışlardır.

GaN malzemesi III-V Grubu malzeme sistemleri ailesinin bir üyesidir. III-V Grubu bileşik yarıiletkenler (özellikle Grup III: Al, Ga, In ve Grup V: N, P, As, Sb) olası 12 farklı kombinasyon ile karşımıza çıkar. Optoelektronik ve yarıiletken endüstrisinde oldukça fazla üretim halinde olan bileşikler GaAs, InP, GaP, GaSb, ve GaN malzemeleridir. Bu malzemeler, oldukça uzun süredir üzerlerinde süren akademik çalışmaların neticesinde ticari ürün olabilme potansiyeline ulaşmış ve yarıiletken endüstrisinde yerini almıştır.

III-V Grubu yarıiletkenler Geniş Bant Aralıklı (WBG) yapılarından dolayı da bir tercih sebebi olmaktadır. WBG yarıiletkenler Si vb. malzemelere oranla küçük birim hücre uzaklıkları ve güçlü atomik bağ yapıları sebebiyle yüksek termal iletkenlik ve Elektriksel kırılma dayanımına sahiptirler.

2. KURAMSAL TEMELLER

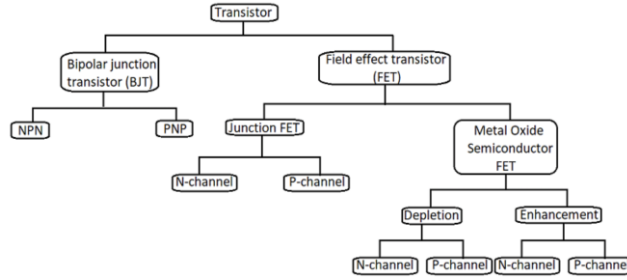
Bu bölümde, kronolojik akışa bağlı kalınarak geçmişten günümüze transistörlerin tarihçesinden, üretim yöntemlerinden, kullanım alanları farklılıklarından ve tercih edilebilirlik durumlarından bahsedilecektir.

GaN malzemesi özellikleri, GaN malzemesinin muadilleri ile arasındaki fark ve HEMT aygıtının üretimindeki önemli faktörlerden bahsedilecektir.

2.1 Transistör Çeşitleri

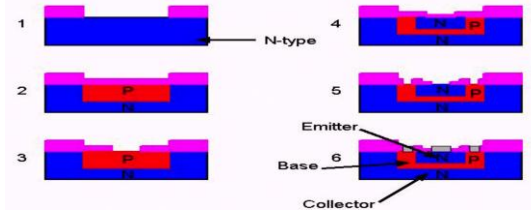
2.1.1 Alan etkili transistörler (FET) ve iki kutuplu eklem transistörler (BJT)

Yarıiletken teknolojisi p-n eklemine oluşturulması ile bir çok devre elemanının oluşturulmasına da öncülük etmiştir. Bu aygıtların başında transistörler gelmektedir. Aşağıdaki şekilde transistör çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Transistör Çeşitleri (Bhimsen 2002)

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere iki çeşit transistör tipi bulunmaktadır. Bu iki tip öncelikle birbirlerinden iki kutuplu eklem transistörler ve alan etkili transistörler olarak ayrılırlar. Burada gösterilmemiş fakat geçtiğimiz son 20 yıl içerisinde endüstride yaygın olarak kullanılan GaAs, GaN vb. gibi III-V grubu yarıiletkenlerin de kullanıldığı GaAs FET, GaN FET ve FinFET gibi yapılar da bulunmaktadır. Aşağıda iki kutuplu eklem transistörünün üretimine dair şematik bir görsel bulunmaktadır.



Şekil 2.2 İki kutuplu eklem transistör üretim adımları (Colin 2022)

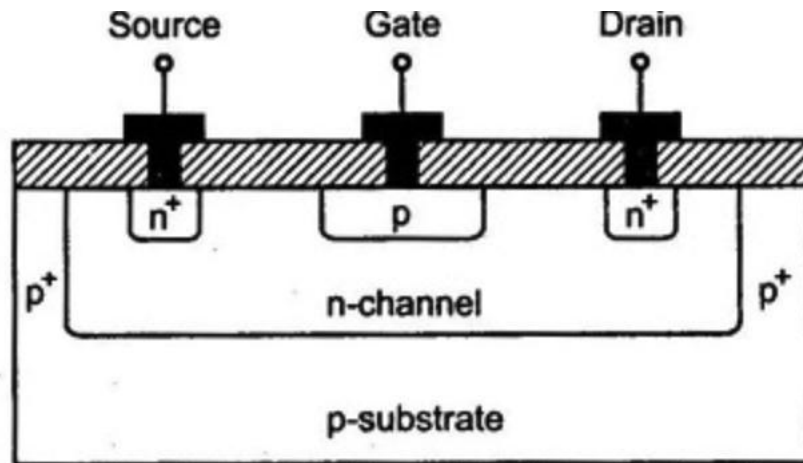
Şekil 2’de ilk adımda pembe katman SiO_2 ve mavi katman Si’dir.

1. Öncelikle alttaş olan Si ısıtılarak doğal yüzeyinde SiO_2 büyütülür. Sonrasında Fotolitografi yardımıyla istenilen bölge desenlenir. Desenlenen bölge kuru ya da ıslak olarak aşındırılır.
2. SiO_2 maske olarak kullanılarak Si alttaş B atomları ile difüzyon prosesi yardımıyla p-tipi katkılanır. Difüzyon prosesi bittikten sonra tekrar yüzey SiO_2 ile kaplanır.
3. Fotolitografi ile desenlenen SiO_2 yüzeyi kuru ya da ıslak aşındırma ile aşındırılır.
4. Aşındırılmış olan bölge P atomları ile difüzyon prosesi yardımıyla n-tipi katkılanır. Difüzyon prosesi bittikten sonra tekrar yüzey SiO_2 ile kaplanır.
5. Omik kontak bölgelerinin oluşturulması ile fotolitografi ile desenlenen bölgeler kuru ya da ıslak aşındırma ile aşındırılır.
6. Aşındırılmış bölgelere metal kaplanır.



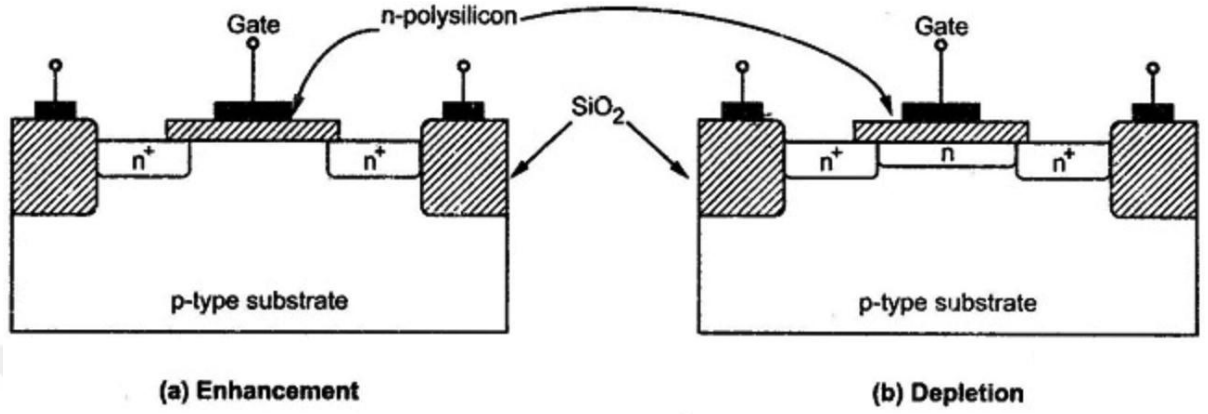
Şekil 2.3 Paketlenmiş halde iki kutuplu eklem transistörü (Colin 2022)

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi Baz (Base) ve Yayıcı (Emitter) kontakları çipin ön yüzünde fakat Toplayıcı (Collector) kontağı çipin arka tarafında olduğu için fotoğrafta görünmemektedir.



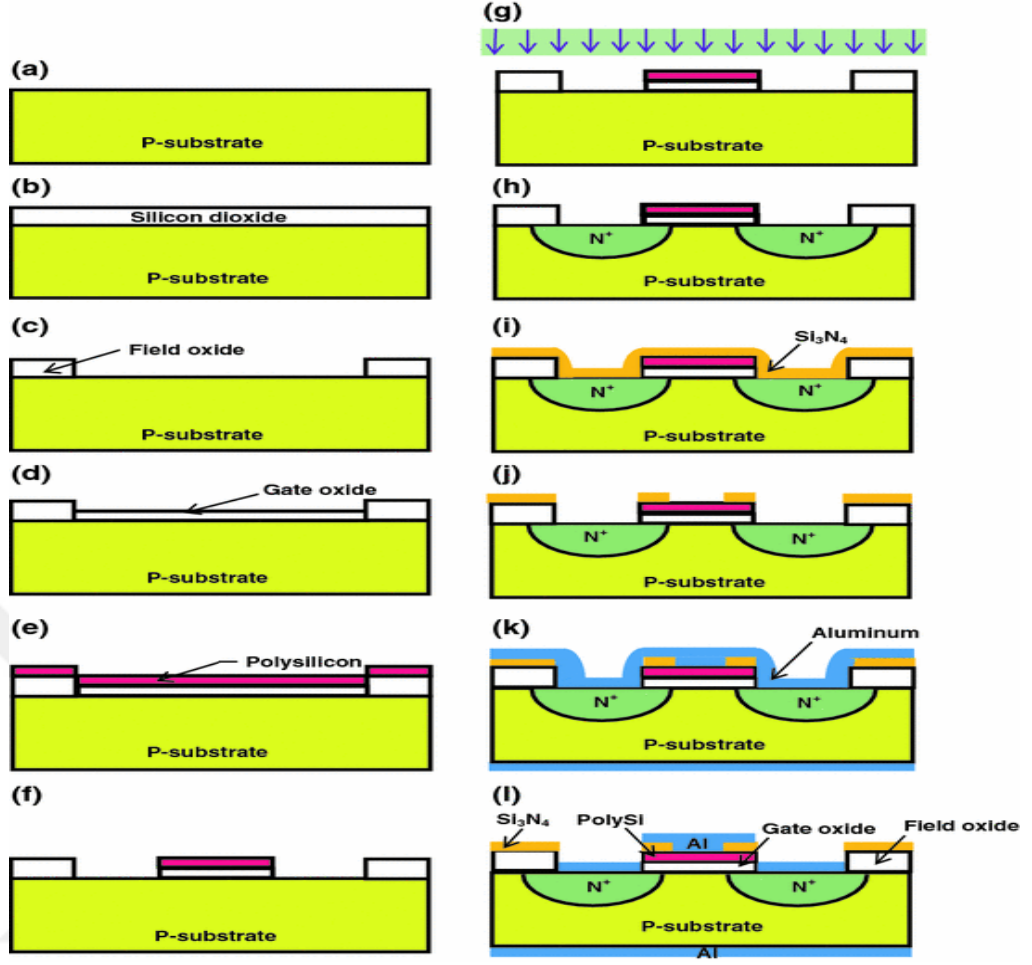
Şekil 2.4 N-kanallı eklem alan etkili transistör (WatElectronics 2013)

Şekil 2.4’de görünen JFET yapısı n-kanallı yapıya bir örnektir. Aynı şekilde Akçe (Drain) ve Kaynak (Source) elektrotlarının altı p^+ katkılanarak ve Kapı (Gate) elektrodunun altı n^+ katkılanarak p-kanallı JFET de üretmek mümkün.



Şekil 2.5 a) artış modu mosfet, b) tüketim modu mosfet (WatElectronics 2013)

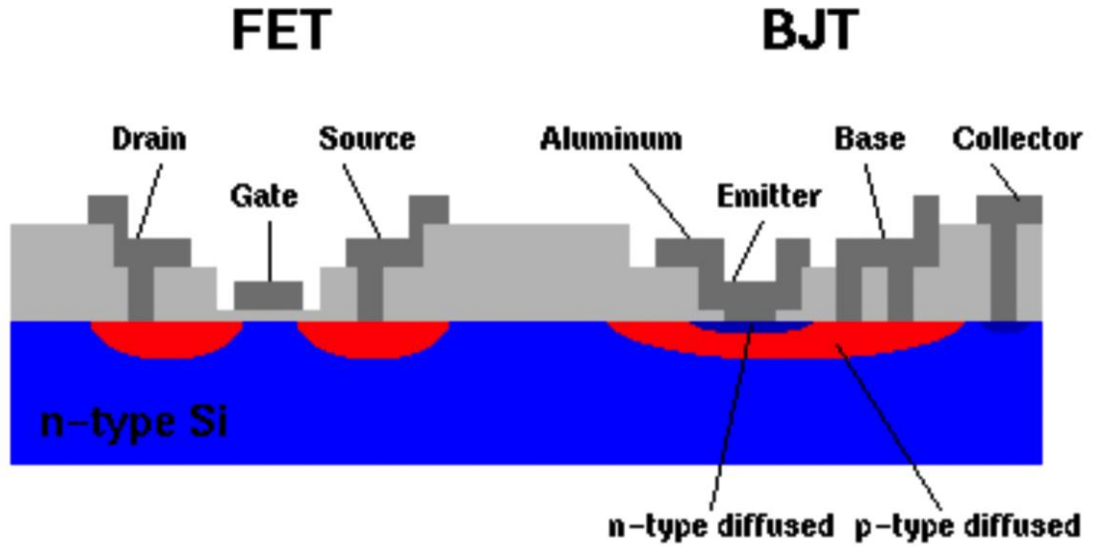
Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’den görüldüğü üzere JFET ve MOSFET arasındaki en büyük fark JFET’lerde Kapı elektrodu epitaksiyel yüzeye temas eder ve Kapı’nın altında katkılanmış bölge vardır. Mosfet’lerde ise Kapı elektrodunun alt kısmında bir oksit katmanı bulunmaktadır. Mosfet’lerde Kapı elektrodu schottky kontakttır. Schottky bariyerin büyüklüğü oksit katmanının dielektrik özelliklerinin değiştirilmesiyle artırılabilir veya azaltılabilir. Bu sayede aygıtların eşik gerilimleri dielektrik katmanın özellikleri değiştirilerek istenilen değerlere getirilebilir.



Şekil 2.6 Mosfet üretim adımları (Khanna 2016)

- a) Si alttaşın temizlenmesi ve fabrikasyona hazır hale getirilmesi.
- b) Si alttaşın üzerine SiO_2 dielektrik malzemesinin kaplanması.
- c) SiO_2 'nin kuru ya da ıslak aşındırma ile aşındırılması.
- d) Kapı elektrodunun altına gelecek oksit tabakasının kaplanması.
- e) Polisilikon kaplanması.
- f) Polisilikon ve oksit tabakasının kuru ya da ıslak aşındırma ile aşındırılması.
- g) Katkılama aşaması.
- h) Si alttaşa açıklıklardan safsızlık atomlarının katkılanması.
- i) Pasivasyon için Si_3N_4 malzemesinin kaplanması.
- j) Si_3N_4 malzemesinin fotolitografi ile desenleme sonrası kuru ya da ıslak aşındırma ile aşındırılması.
- k) Elektriksel kontakların oluşturulması için Alüminyum kaplanması.

1) Alüminyum'un resist kaldırma işlemi ile yüzeydeki belli yerlerden kaldırılması.



Şekil 2.7 FET ve BJT karşılaştırmalı görseli (Anonim 2022)

Çizelge 2.1 BJT ve FET karşılaştırma tablosu (Kubar 2016)

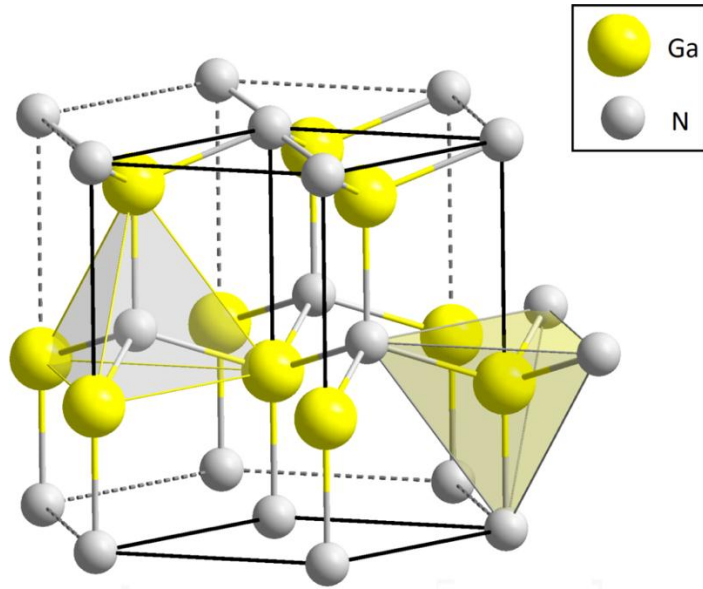
Özellikler	BJT	FET
Yük Taşıyıcıları	Azınlık ve Çoğunluk	Çoğunluk
Kontrol Biçimi	Akım	Gerilim
Gürültü	Aygıt gürültüsü yüksek	Aygıt gürültüsü düşük
Frekansa'a karşı Performans tepkisi	Kötü	İyi
Sıcaklık'a karşı Performans tepkisi	Kötü	İyi
Üretim Maliyeti	Düşük	Yüksek
Aygıt Boyutu	Büyük	Küçük
Güç Tüketimi	Yüksek	Düşük
Kazanç	Yüksek	Düşük
Çıkış Empedansı	Yüksek	Düşük
Gerilim Kazancı	Yüksek	Düşük
Akım Kazancı	Düşük	Yüksek

Tablo 1’den görüldüğü üzere ikisi farklı kullanım alanlarına sahip olan aygıtlar olsalar dahi FET’ler düşük güç tüketimi, yüksek akım kazançları ve küçük aygıt boyutları dolayısıyla daha entegre devrelerde kullanılmaları amacıyla çok daha yaygın kullanılan aygıtlardır.

2.2 GaN Temelli Yüksek Elektron Devingenlikli Transistörler (HEMT)

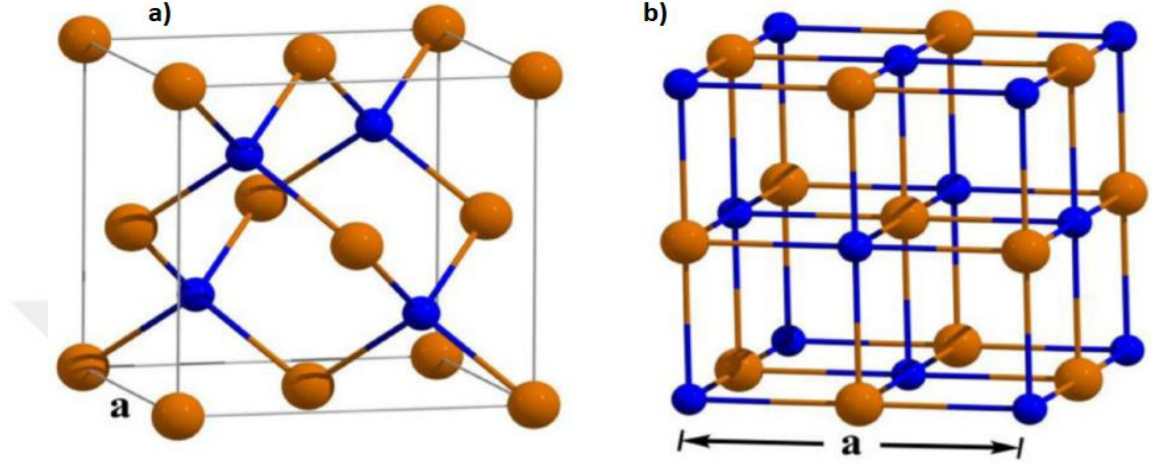
Genellikle ilk transistörün keşfinden bu zamana kadar Si tabanlı yarıiletkenler oldukça sık bir şekilde kullanılmıştır ve kullanılmaya da devam etmektedir. Fakat zaman içinde endüstriyel araçların aygıtlardan duyduğu performans beklentileri yükseldiği için Si tabanlı aygıtların özellikleri yetersiz gelmeye başlamıştır. Bu sebeple III-V grubu yarıiletkenler ticari açıdan yükselişe geçmiştir. Bu yarıiletkenler, Si tabanlı aygıtlara göre çok üstün özellikleri maliyetine rağmen özellikle yüksek teknoloji gereken alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır.

2.2.1 GaN malzemesi özellikleri



Şekil 2.8 GaN kristal yapısı (Sani vd. 2021)

Şekil 2.8’de GaN malzemesinin hexagonal (Wurtzite) yapıda kristallendiği görülmektedir. GaN malzemesi III-N Nitrür grubu malzeme ailesine üye olmakla birlikte kristal yapı olarak sadece Wurtzite yapıda değil harici olarak iki farklı şekilde daha kristallenebilmektedir.

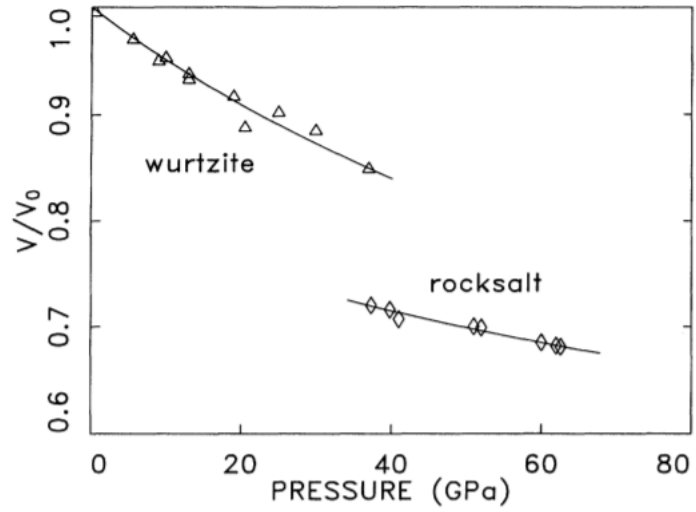


Şekil 2.9 a) GaN Zinc-Blende Kristal Yapısı, b) GaN Rock-Salt Kristal Yapısı (Wonglakhon vd. 2020)

Aşağıdaki tabloda GaN malzemesinin tüm kristal yapılarının örgü parametreleri ve birim hücre hacimleri verilmiştir.

Çizelge 2.2 GaN malzemesinin kristal yapılarının örgü parametreleri ve birim hücre hacimleri (Xia vd. 1993)

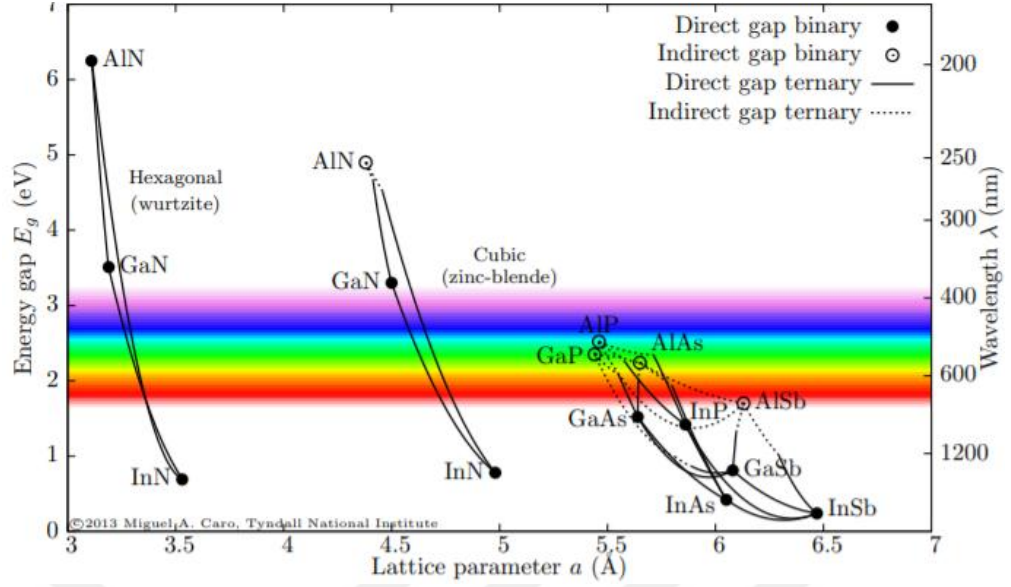
	Wurtzite	Zinc-Blende	Rock-Salt
a (Å)	3.19 [10]	4.49 [10]	4.23 [10]
c (Å)	5.19 [10]	-	-
u (Å)	0.377 [11]	-	-
V (Å ³)	22.87	22.63	18.85



Şekil 2.10 GaN malzemesinin basınca karşı hacim değişimi grafiği (Xia vd. 1993)

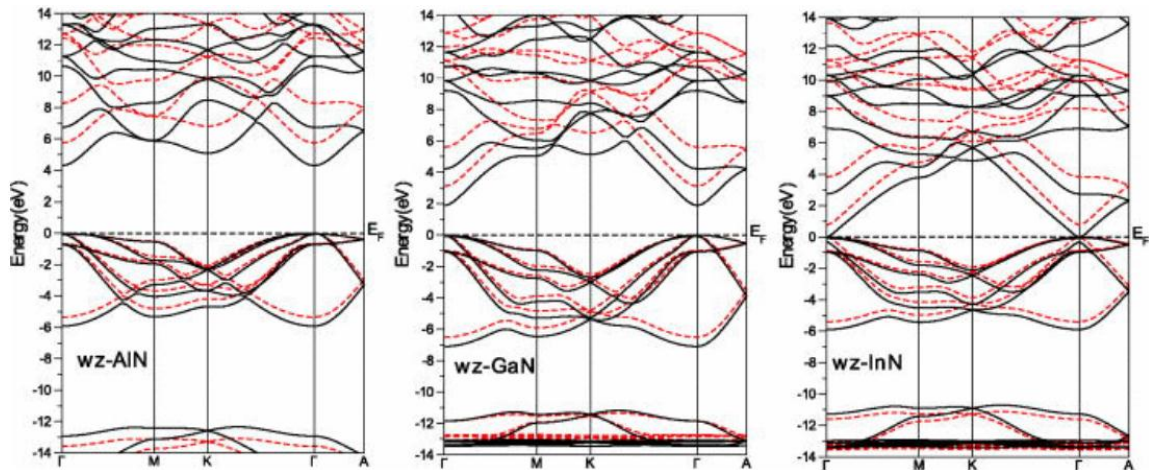
Şekil 2.9’da GaN Zinc-Blende ve Rock-Salt kristal yapılarında da kristallendiği gözlenmektedir. Şekil 2.10’dan görüldüğü üzere, Rock-Salt yapısı 37 GPa basınç civarlarında bir faz değişimi ile Wurtzite yapıdan geçiş yapıyor. Bu geçiş ile Rock-Salt yapısına geçen GaN malzemesinin bağ uzunluğu wurtzite yapıya göre artıyor. Bu durum da hem mekanik hem de kimyasal açıdan Rock-Salt ve Zinc-Blende yapılarının Wurtzite yapısına göre daha dayanaksız olduğu anlamına gelmektedir [10], [11]. Bu tez çalışmasında Wurtzite yapıdaki GaN malzemesi ile oluşturulacak HEMT yapısı incelenecektir.

III-N Nitrür grubu özellikle GaN, AlN ve InN malzemeleri direkt bant yapısına sahip oldukları ve birbirleri arasında üçlü bileşiklerinin kompozisyonları ile bant aralıkları rahatlıkla ayarlanabildiği için elektronik ve optoelektronik uygulamalarda oldukça kullanışlı malzemelerdir.



Şekil 2.11 III-V Grubu yarıiletkenlerin örgü parametrelerine karşılık bant aralığı grafiği (Bayo 2013)

Şekil 2.11’de görüldüğü üzere III-N grubu malzemeler AlN, GaN ve InN direkt bant yapısına ve Wurtzite kristal yapısına sahipler. Ayrıca bu malzemelerin aralarındaki örgü uyumsuzluğu (Lattice Mismatch) miktarı çok az olduğu için birbirleri üzerine yapılan büyütmelerde de örgü uyumsuzluğundan kaynaklanan örgü kusurlarının miktarı az olacak ve bu da tuzak seviyelerinin (Trap Levels) miktarını düşürecektir. Elektronik ve Optoelektronik uygulamalarda tuzak seviyelerinin oluşturulan aygıtlarda istenmeyen sonuçlara kaynak olduğu bilinmektedir.



Şekil 2.12 a) Wurtzite yapıda AlN, b) Wurtzite yapıda GaN, c) Wurtzite yapıda InN malzemelerinin bant diagramları (Araujo vd. 2013)

Şekil 2.12'den görüldüğü üzere III-N grubu malzemeleri AlN, GaN ve InN direkt bant yapısına sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı, bir elektron – boşluk çiftinin oluşumunda ya da tekrar bir araya gelme mekanizmalarında örgü titreşimlerinin (fonon) enerji ve verim kaybına sebebiyet vermemesi sağlanır.

Üçlü yapıda oluşturmak istenen III-N yarıiletken malzemelerinin bant aralıklarını ayarlamak için oluşturulmuş ampirik formül aşağıdaki gibidir.

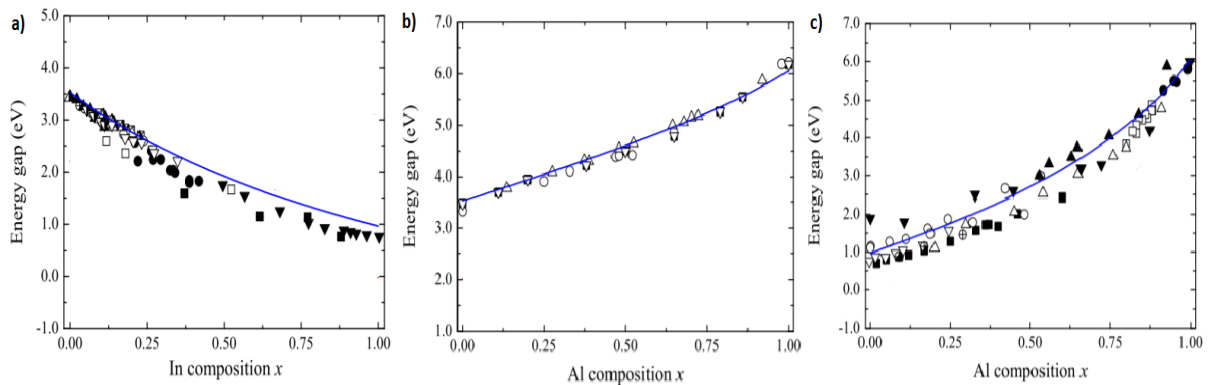
$$E(A_xB_{1-x}N) = xE(AN) + (1 - x)E(BN) - bx(1 - x) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de üçlü (Ternary) III-N grubu malzeme bileşiklerinin katkı oranına göre kompozisyonel olarak bant aralığının formülü verilmiştir. Denklemdeki b parametresi parabolik katsayıyı (Bowling Parameter) simgelemektedir.

Oluşturulan formül en temelinde Vegard Yasası'na dayanmaktadır.

$$a = a_A^0(1 - X) + a_B^0(X) \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 Vegarda Yasasıdır. İkili bir bileşik aralarındaki kompozisyonel katkılamaya göre oluşacak kristalin örgü parametresine dair bir ampirik formüldür. A ve B oluşacak ikili alaşımın elementleridir. X ise katkılama kompozisyonudur. a_A^0 ve a_B^0 elementlerin doğal örgü parametreleridir.



Şekil 2.13 a) $In_xGa_{1-x}N$ malzemesinin In kompozisyonuna, b) $Al_xGa_{1-x}N$ malzemesinin Al kompozisyonuna, c) $Al_xIn_{1-x}N$ Al kompozisyonuna bağlı olarak bant aralıkları verilmiştir (Pela vd. 2011)

Şekil 2.13’de verilmiş olan grafik InGaN, AlGaN ve AlInN malzemelerinin katkılama kompozisyonuna bağlı olarak bant enerjilerini vermektedir. Referans alınmış çalışmada Deneysel bir şekilde yapılan çalışmaların sonuçları baz alınarak Vegard Yasası ile uyumlu olacak şekilde LDA – ½ yaklaşımı yapılarak denklem 2.1’e ulaşılmıştır [13].

2.3 GaN Epitaksiyel Yapısı

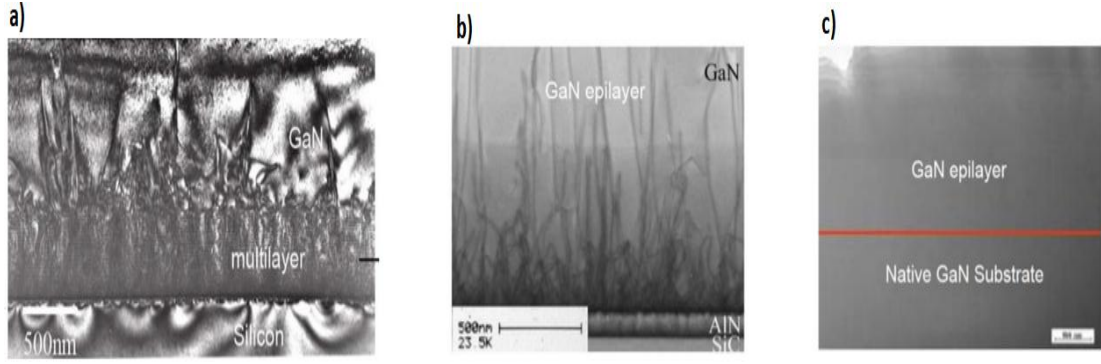
2.3.1 Alttaşlar

Epitaksiyel yapı oluşturulmasında seçilecek alttaş için en önemli olan 3 parametre vardır. Bu parametreler, örgü parametresi, örgü uyumsuzluğu ve ısıl iletkenliktir. Aşağıdaki tabloda sıklıkla GaN malzemesinin epitaksiyel yapı büyütmesinde kullanılan alttaşların karşılaştırılmalı tablosu verilmiştir.

Çizelge 2.3 Si, 6H-SiC ve Al₂O₃ alttaş malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırmalı tablosu

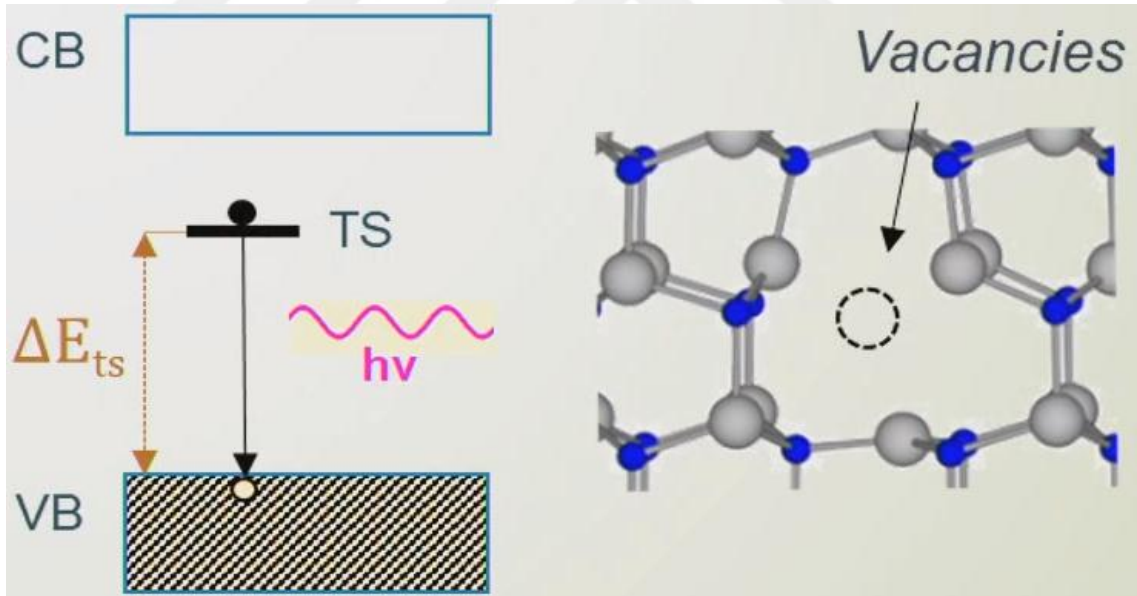
	Si	6H-SiC	Al ₂ O ₃
Örgü Parametresi (Å)	3.84	3.08	4.7589
Örgü uyumsuzluğu (%)	17	3.5	16
Isıl İletkenlik (W/cm.K)	1.3	4.9	1.3

Epitaksiyel olarak büyütülecek malzemenin alttaş ile örgü parametrelerinin oldukça yakın olması gerekmektedir. Bu duruma örgü uyumsuzluğu denir. Örgü uyumsuzluğu, epitaksiyel yapının kalitesini ve malzemenin özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu durum büyütmelemlerin sonrasında “Kristal Kusuru (defect)” olarak tanımlanır.



Şekil 2.14 a) Si alttaş üzerine büyütülmüş GaN, b) SiC alttaş üzerine büyütülmüş GaN, c) GaN alttaş üzerine büyütülmüş GaN

Kristal kusuru genellikle Kusur sayısı / cm^2 olarak tanımlanır. Büyütme esnasında örgü uyumsuzluğu dolayısıyla oluşan kristal kusurları en temelde malzemenin atomik bağ yapılarında bir değişiklik oluşturur. Atomların yaptığı bağ çeşidi değişmez fakat bağ uzunlukları uzalıp kısalabilir. Bu sebeple de malzemede tuzak seviyeleri oluşur.



Şekil 2.15 Kristal kusurunun enerji bant diyagramındaki etkisi (Comelli vd. 2019)

Epitaksiyel yapı alttaş'ın üzerine büyütülüp aygıt haline getirildikten sonra farklı performans kriterleri de ortaya çıkar. Bu performans kriterlerinden alttaş ile ilgili olan ve aygıt performansını oldukça etkileyen bir parametre ise ısısal iletkenliktir. Isısal iletkenlik, oluşturulan aygıtın çalışırken oluşturduğu Joule ısınmasını kendi üzerinden

birim zamanda ne kadar hızlı uzaklaştırabildiğinin bir ifadesidir. Yarıiletken aygıtlar çalışmaları esnasında maruz kaldıkları ısı ile performans düşüşü yaşamaktadırlar. Bu sebeple, olabildiğince hızlı bir ısı kaybı mekanizmasına sahip olmalıdırlar. GaN epitaksiyel yapısının büyütüleceği alttaş'ın ısısal iletkenliği ne kadar yüksek olursa o kadar performansının daha stabil olacağı ve verimin korunacağı söylenebilir.

GaN epitaksiyel yapısı için örgü uyumsuzluğu ve ısısal iletkenlik göz önünde bulundurulduğunda SiC alttaşlar oldukça kullanışlı görünmektedir. Fakat Si alttaşlar ise SiC ve safir alttaşlara göre oldukça ucuzdurlar. Bu noktada kullanılacak alana göre üretilecek aygıtın alttaşı seçilir. Yüksek RF frekansı isteyen radar uygulamalarında genellikle SiC alttaşlar tercih edilir.

2.3.2 GaN çekirdeklenme tabakası

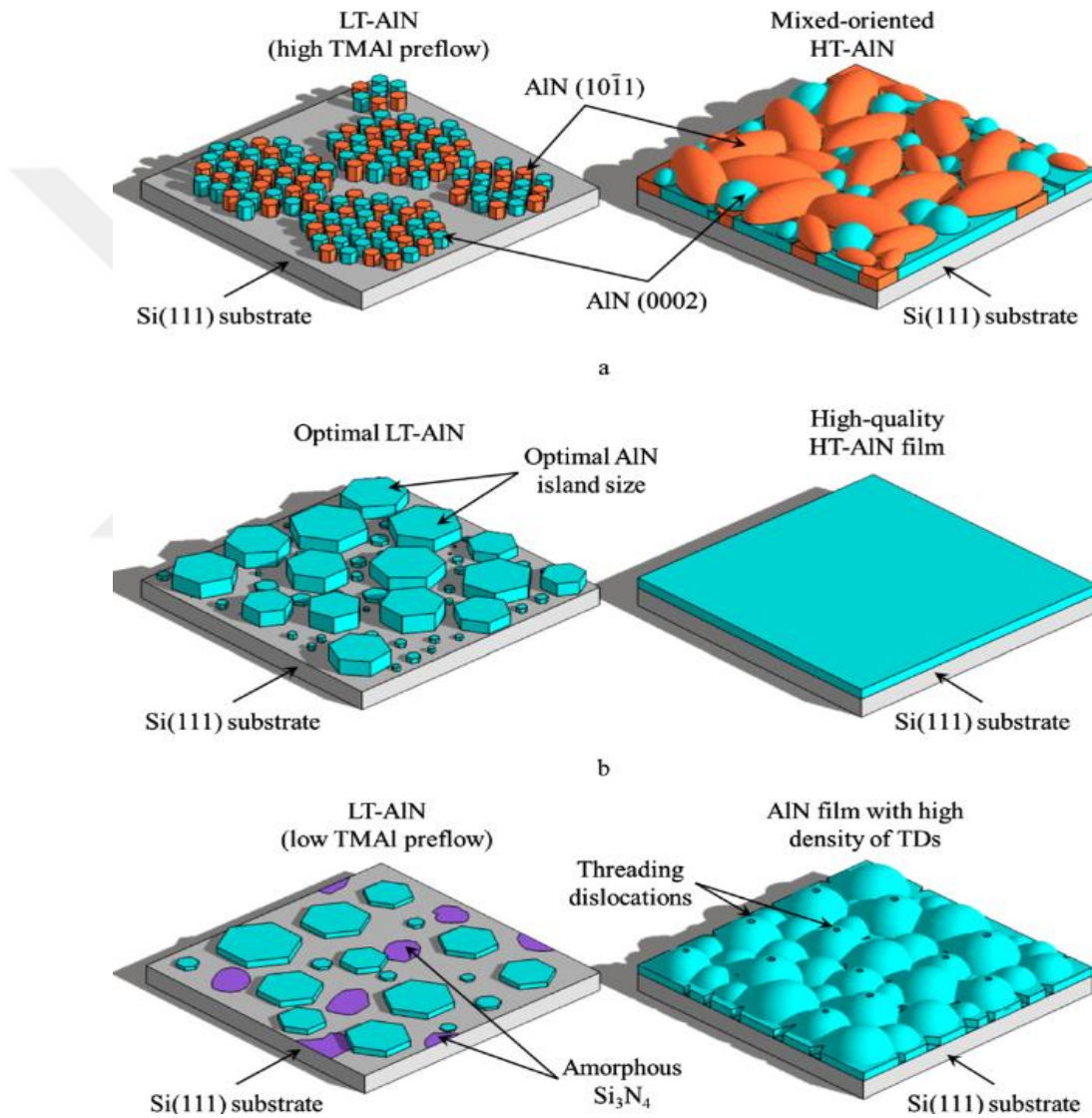
Bu tez çalışmasında çekirdeklenme tabakası olarak AlN malzemesi büyütülmüştür. AlN malzemesinin örgü parametresi uyumsuzluğu 6H-SiC malzemesine göre çok daha iyi olduğu için genel olarak literatürde AlN malzemesi çekirdeklenme tabakası olarak kullanılır.

AlN epitaksiyel katmanı örgü uyumsuzluğunun yanısıra yüksek kusur yoğunluğuna $\approx 10^{10}$ cm⁻² (Thread Dislocation Density) sahiptir. Bu yüksek kusur yoğunluğu Al atomlarının düşük yüzey devingenliği sebebiyle oluşmaktadır. Al atomlarının düşük yüzey devingenliği çok sayıda 3 boyutlu çekirdeklenme adacıklarını oluşturmakta ve çok sayıda kristal kusuru yaratmaktadır. Çok sayıda oluşmuş kristal kusuru ise epitaksiyel katmanının üzerinde stres yaratır ve katmanın kalitesini düşürür (Keller vd. 1999).

Fakat buna rağmen AlN malzemesi AlGaN/GaN yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında sıklıkla kullanılır. Isı dağılımı III-N nitrür grubu HEMT aygıtlarında oldukça önemlidir. Çünkü ısı dağılımı, aygıtın çalışma süresini, dayanıklılığını ve sabit performans gösterme özelliklerini doğrudan etkiler. GaN epitaksiyel katmanının temas halinde bulunacağı ve bu malzeme ile arayüzey etkileşimleri önemli olacağı için AlN

düşük arayüzey ısı direnci sebebiyle çekirdeklenme katmanı için oldukça kullanışlı bir malzemedir (Onojima vd. 2003).

AlN çekirdeklenme tabakasının üretim safhası da oldukça zor bir aşamadır. Büyütülecek AlN malzemesinin kalınlığı, üretim anındaki sıcaklığı ve üretim öncesi üretim odacığı (Chamber) koşullandırması gibi parametreler oldukça önemlidir.



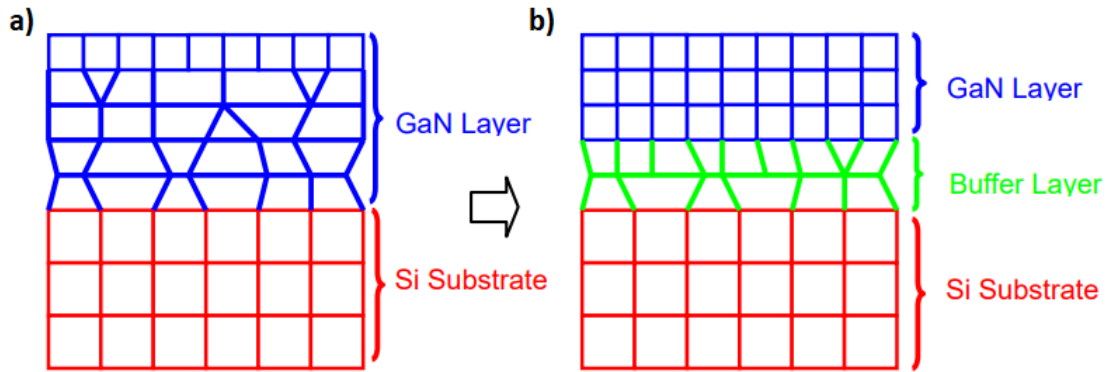
Şekil 2.16 Büyütme öncesi prosesin büyümeye kristalografik olarak etkisi

a) Büyütme öncesi düşük seviyede Al akışı, b) büyütme öncesi orta seviyede Al akışı, c) büyütme öncesi yüksek seviyede Al akışı (Chernykh vd. 2019)

Şekil 2.15'ten de görüldüğü üzere, GaN tabakasının daha az kusurla büyüebilmesi için büyütülen çekirdeklenme tabakasının da üretim esnasında çok önemli incelikleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmada AlN çekirdeklenme tabakasının büyütülmesinden önce yapılan bir prosesin çekirdeklenme tabakası üzerindeki kusur oluşumlarını ya da epitaksiyel yapısındaki sorunların üzerindeki etkileri gösteriliyor. Şekil 2.15. b görselinde yüksek sıcaklıkta (High Temperature) büyütülen AlN tabakası oldukça düşük kusur yoğunluğuna sahiptir fakat düşük sıcaklıkta (Low Temperature) büyütülen AlN tabakasında bu denli düşük kusur yoğunluğu gözlenememiştir (Chernykh vd. 2019). Bu sebeple yapılan farklı çalışmalarda düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık AlN katmanı üzerine araştırmalar devam etmektedir.

2.3.3 GaN tampon tabakası

Genellikle GaN tampon tabakası, AlN ile GaN kanal tabakaları arasına büyütülmesi tercih edilir. AlN ile GaN kanal tabakası arasındaki örgü uyumsuzluğunu oldukça azaltabilmek için epitaksiyel tasarımda en kalın olan tabakadır. Bu kalınlığın sebebi, örgüyü oldukça uzatarak AlN çekirdeklenme tabakası ile GaN tampon tabakası arayüzündeki kusurların azaltılmak istenmesidir.

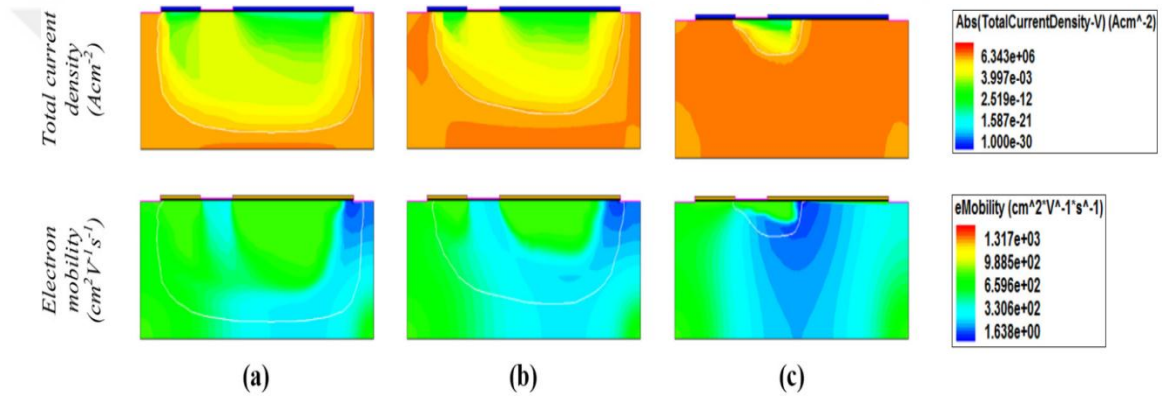


Şekil 2.17 a) Tampon tabakası olmayan GaN epitaksiyel yapısı, b) Tampon tabakası olan GaN epitaksiyel yapısı (Mitsubishi 2012)

Temsili olarak Şekil 2.16.da gösterilmiş epitaksiyel yapılarda GaN kanal tabakasının kusurlarının olabildiğince az oluşması için tampon tabakasının etkisi gösterilmiştir.

Tampon tabakasının belirli bir kalınlığında üstüne gelecek kanal tabakası ile örgülerin eşleştiğini ve bu sebeple kristal yapı düzgün bir şekilde büyüyebilmektedir.

Tampon katmanının epitaksiyel yapıdaki etkisinin haricinde elektriksel olarak oldukça yalıtkan olması gerekmektedir. Üstüne inşa edilecek aygıt elektriksel olarak beslendiğinde beklenmeyen kaçaklar sebebiyle aygıtta performans düşmesi oluşabilir. Aygıt için istenmeyen bu durumdan kaçınmak amaçlı C veya Fe elementleri ile katkılanarak bu katman saf halinden daha yalıtkan haline getirilir. Bu sayede tampon tabakası kaçakları engellenmiş olur.



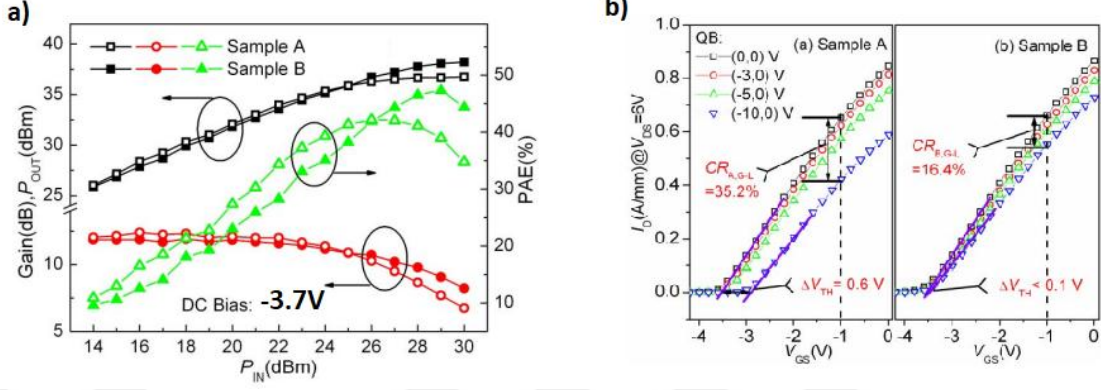
Şekil 2.18 a) AlGaN bariyer tabakası çeşitli olan yapı, b) GaN kanal üzerine AlN ara katman olan yapı, c) GaN tampon tabakası üzerinde InGaN kanal tabakası olan yapı (Othman vd. 2019)

Şekil 2.17'de gösterilen simülasyon sonuçları genel olarak yalıtkanlığı artırılmış alt tabakaların aygıt performansı üzerindeki etkileri göstermektedir. Toplam akım yoğunluğu tüm epitaksiyel yapıya dağılmış bir aygıtta çok fazla kaçak akımlar oluşmaktadır ve bu durum istenilen performansın yakalanmasına engel olmaktadır.

2.3.4 GaN kanal tabakası

GaN kanal tabakası, epitaksiyel yapıdaki iki boyutlu elektron gazı'nın olduğu bölgedeki katmandır. Bu katmanın kalınlığı oldukça önemlidir. İnce yapıdaki olan kanal tabakası DC ve RF özellikleri olarak kalın yapıda büyütülmüş bir tabakaya göre düşük özellikler göstermesine rağmen, tuzak seviyelerinde önemli miktarda azalma ve

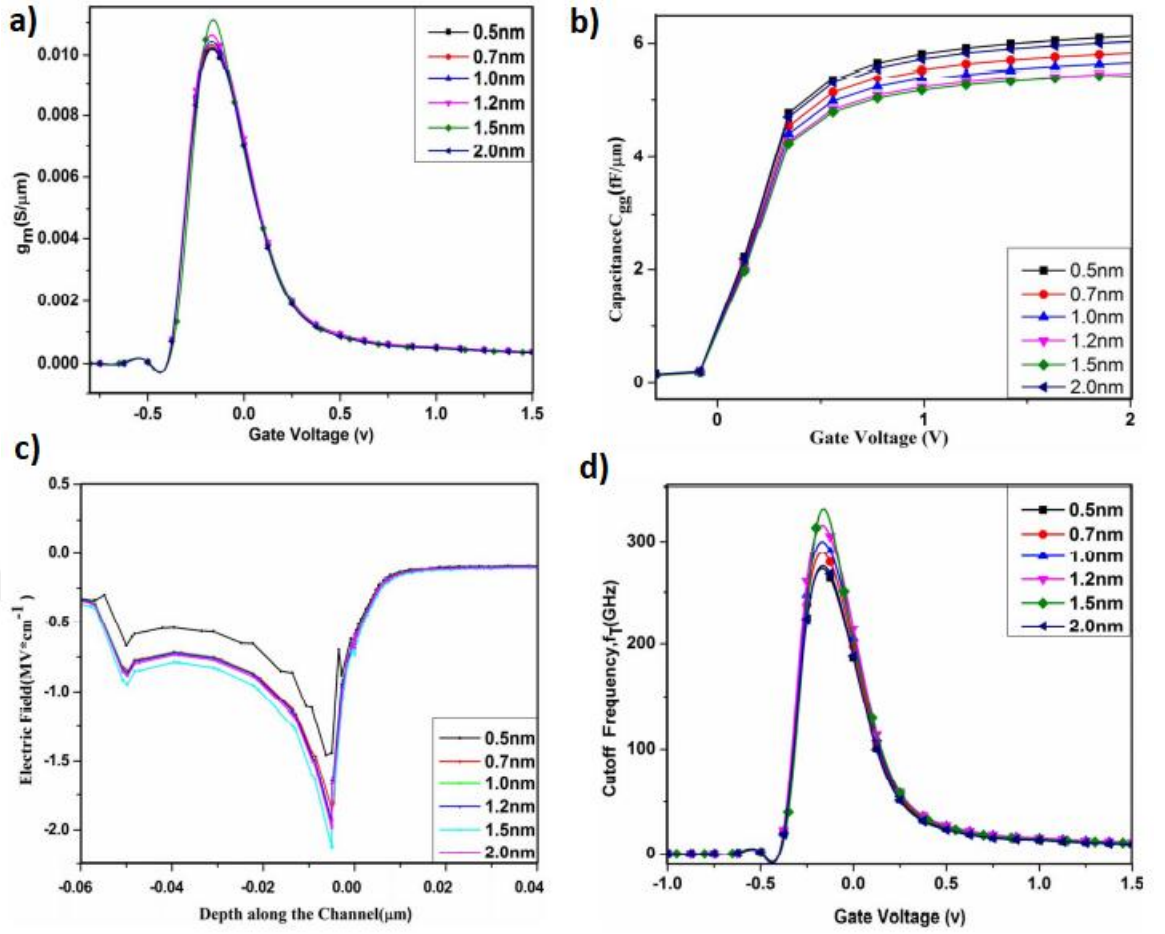
elektriksel kırılma gerilimindeki artış sebebiyle tercih nedeni olabilir. Tasarlanacak epitaksiyel yapı buna göre optimize edilmelidir.



Şekil 2.19 a) Çıkış gücü ve güç çıktısı verimi grafiği, b) I-V Grafiği (Sample A: 50nm, Sample B: 150nm) (Wang vd. 2014)

2.3.5 AlN ara plaka tabakası (Spacer)

AlN ara plaka tabakası, GaN kanal tabakası ile birlikte iki boyutlu elektron gazı'ni oluşturan ikinci katmandır. Bu katmanın özelliği GaN ile bir araya geldiklerinde aralarında oluşan kendiliğinden ve Piezoelektrik kutuplanmalar dolayısıyla AlN ve GaN ara katmanına elektron iterler ve bu şekilde iki boyutlu elektron gazı'ni oluştururlar. AlN tabakası da epitaksiyel yapıda oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu katman diğer katmanlara göre oldukça incedir.



Şekil 2.20 AlN ara plaka tabakasının farklı kalınlıklarda etkisi

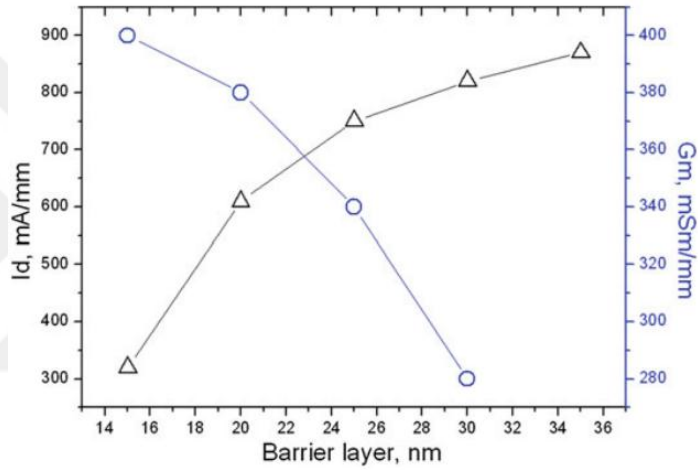
a) kanal iletkenliği grafiği, b) Kapasitans grafiği, c) Elektrik alan grafiği, d) Kesilim frekansı grafiği (Adak vd. 2015)

Şekil 2.19’da verilen grafikler Sentaurus TCAD programında modellenmiş simülasyon verileridir. AlN ara plaka tabakasının kalınlığının aygıt performansında oldukça önemli etkileri olduğu gözlenmektedir.

AlN ara plaka tabakası değişen kalınlığa bağlı olarak iki boyutlu elektron gazı’nın elektron yoğunluğunu arttırdığı için aygıt performansında yüksek etkili değişimlere sebebiyet vermektedir.

2.3.6 AlGaN bariyer tabakası

AlGaN bariyer tabakası, HEMT aygıtlarda çok kritik bir öneme sahip tabakayı oluşturmaktadır. Tampon tabakasının bant genişliğinden daha yüksek bir bant genişliğine sahip olacak şekilde tercih edilen bu tabaka, iki boyutlu elektron gazı'na elektron sağlamaktadır. AlGaN bariyer tabakasında kalınlık ve Al konsantrasyonu oldukça önem taşımaktadır. Bariyer tabakasının belli bir kritik kalınlığına kadar iki boyutlu elektron gazı oluşmaz. Ayrıca AlGaN bariyer tabakası kalınlığı kanal iletkenliği ve doyum akımını da etkilemektedir.

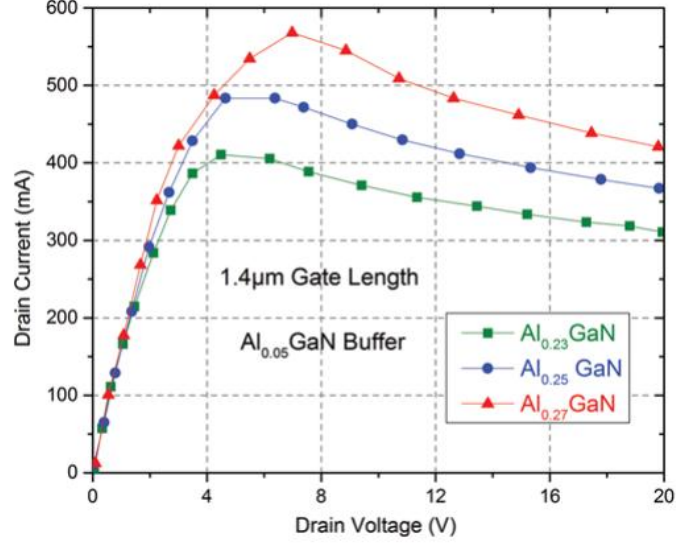


Şekil 2.21 HEMT aygıtının AlGaN bariyer tabakasının doyum akımı ve kanal iletkenliğine karşı grafiği (Gudkov vd. 2017)

Al konsantrasyonuna bağlı olarak iki boyutlu elektron gazı'nın elektron yoğunluğu artmaktadır. Al konsantrasyonu AlGaN kompozisyonunda kritik bir değeri aştıktan sonra GaN ile bir araya gelme durumunda örgü uyumsuzlukları oluşturarak kusurlara, gerilmelere ve iki boyutlu elektron gazı elektronlarının arayüzey pürüzlülüğü ve alaşım saçılmalarına daha fazla maruz kalmalarına neden olmaktadır (Turhan 2011).

AlGaN malzemesinin bant genişliği 3.4eV ile 6.2eV arasında Al kompozisyonuna göre değişmektedir. AlGaN bariyer tabakasının yüksek bant genişliğine sahip olduğu kompozisyonlar, iki boyutlu elektron gazı'nın olduğu bölgede elektronların sadece o bölgede hareket edebilmesi adına önemli bir etkisi vardır. Yüksek bant genişliği o

bölgede iletkenlik bandı süreksizliğini arttırdığı için elektronların sadece kanal boyunca hareket edebilmeleri sağlanır (Anwar vd. 2021).

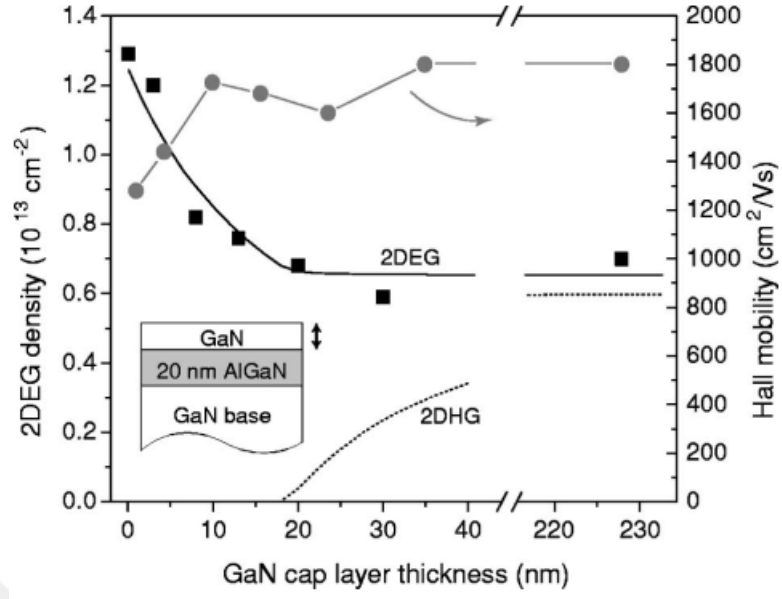


Şekil 2.22 Farklı AlGaN kompozisyonlarına bağlı akaç akımının değişim grafiği (Anwar vd. 2021)

Şekil 2.21’de görülen grafikte doyum akımının, sabit kapı voltajı ve sabit kapı uzunluğunda AlGaN kompozisyonunda Al konsantrasyonundaki artışına göre arttığı gözleniyor.

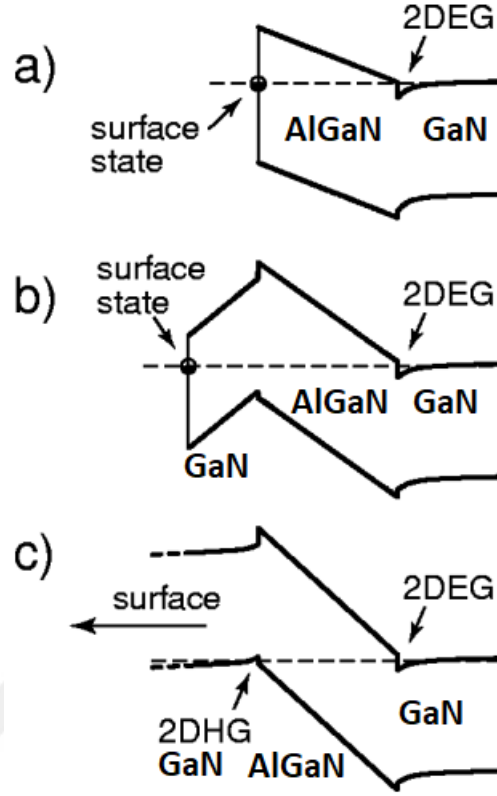
2.3.7 GaN kep tabakası

GaN kep tabakası, epi katmanının oksitlenmesini engellemek ve yüzey kaçaklarını düşürmek adına kullanılan bir yapıdır.



Şekil 2.23 2DEG yoğunluğu ve Hall devingenliği'nin GaN kep tabakası kalınlığına karşı grafiği (Heikman vd. 2003)

Yüzeyin oksitlenmesi ve yüzey kaçaklarının engellenmesinin yanı sıra Şekil 2.22'de görüldüğü üzere, GaN kep tabakasının kalınlığını değiştirilerek 2DEG yoğunluğu ve Hall devingenliği de kontrol edilebilir. GaN kep tabakasının kalınlığı arttıkça 2DEG yoğunluğu eksponansiyel bir şekilde düşüş gösterir ve kritik bir kalınlık değerinden sonra artık doyuma ulaşır. Hall devingenliği ise genel olarak bir artış trendi gösterir fakat kritik bir değerden sonra doyuma ulaşır [27].



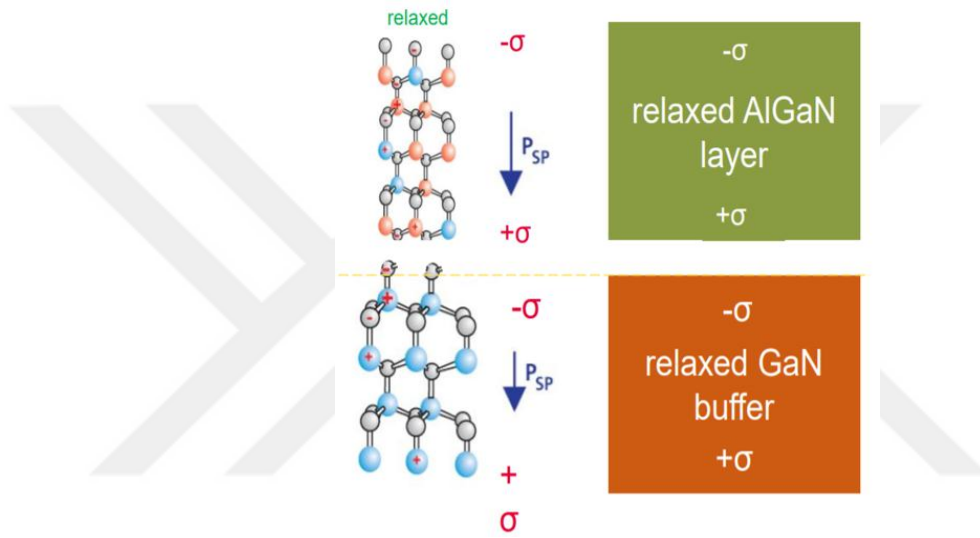
Şekil 2.24 a) GaN kelep tabakası olmadan GaN/AlGaN enerji bant diyagramı, b) ince GaN kelep tabakası olan GaN/AlGaN/GaN enerji bant diyagramı, c) kalın GaN kelep tabakası olan GaN/AlGaN/GaN enerji bant diyagramı

Şekil 2.23'de GaN kelep tabakasının AlGaN/GaN heteroekleminin enerji bant diyagramına etkileri şematik olarak gösterilmiştir. GaN kelep tabakası AlGaN/GaN heteroeklemine eklendiği zaman değerlik bandının maksimumunun fermi seviyesine doğru yaklaştığı Şekil 2.23'den görülmektedir. GaN kelep tabakasının kalınlığı arttırıldığında ise değerlik bandının maksimumu artık fermi seviyesini aşarak bir kuantum kuyusu oluşturur. Bu oluşan kuyunun ismi iki boyutlu boşluk gazı'dır (2DHG). Ayrıca GaN kelep tabakasının heteroekleme eklenmesi ve kalınlığının arttırılması Şekil 23'den görüldüğü üzere 2DEG derinliğini azaltan bir durum oluşturmaktadır.

2.4 Fiziksel Çalışma Mekanizması

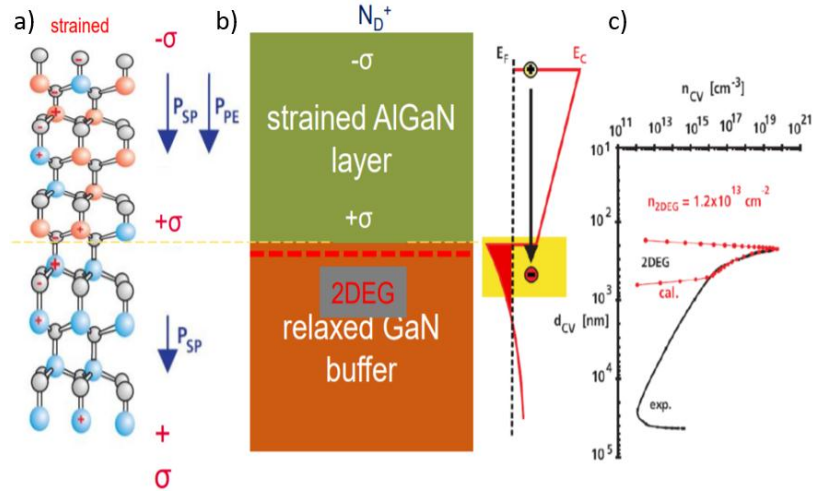
2.4.1 İki boyutlu elektron gazı (2DEG)

AlGaAs/GaAs heteroeklem yapısı, ilk HEMT yapısı olarak 1979'da keşfedilmiştir. HEMT yapısı iki ince epitaksiyel katmanın birbirlerinin üzerinde oluşturduğu gerilme ve yük polarizasyonu dolayısıyla arayüzeyde 2DEG oluşturması ile ortaya çıkar.



Şekil 2.25 Bir araya getirilmemiş GaN ve AlGaN kristal yapıları

Şekil 2.25'de görüldüğü gibi bağ uzunlukları fakat kristal yapıları aynı olan GaN ve AlGaN kristalleri kendiliğinden aynı yönlü bir yüksel kutuplanmaya (Spontaneous Polarization) sahip.



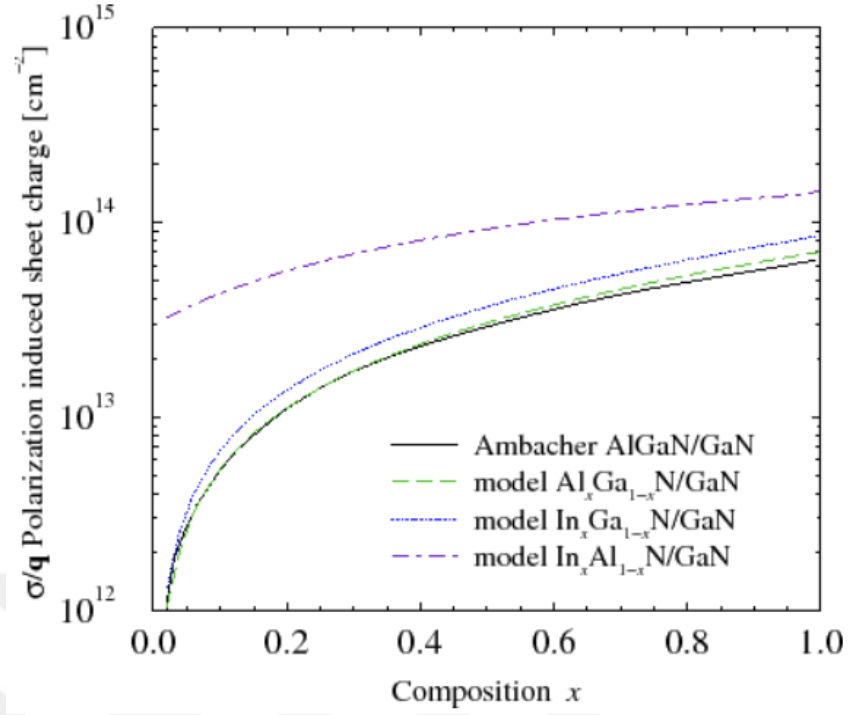
Şekil 2.26 a) Bir araya getirilmiş GaN ve AlGaN kristal yapıları, b) Gerinime uğramış yapıların temsili ve bant yapısı, c) 2DEG'in elektron konsantrasyonu

GaN ve AlGaN epitaksiyel yapıları biraraya getirildiğinde AlGaN katmanı, GaN katmanının üstüne büyütüldüğü için AlGaN katmanının bağ uzunluğu GaN katmanının bağ uzunluğu ile eşitlenir. Bu sayede, AlGaN katmanının üzerinde bir gerinim oluşur. Bu gerinim ise kendiliğinden polarizasyona harici olarak bir Piezoelektrik Kutuplanma katkısı getirir.

$$P_{TOTAL} = P_{SP} + P_{PZ} \quad (2.3)$$

$$P_{PZ} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (2.4)$$

Denklem 2.1'den görüldüğü üzere oluşacak toplam kutuplanma katkısı, kendiliğinden kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanmadır.



Şekil 2.27 AlGaIn/GaN – InGaIn/GaN sistemlerinin atomik kompozisyonuna bağlı kutuplanma eğrileri (Ambacher vd. 2002)

GaN malzemesi sahip olduğu Geniş Bant Aralığı, yüksek termal iletkenlik, yüksek ısı kapasitesi kimyasal stabillığı ve mekanik dayanıklılığı, yüksek elektriksel kırılma dayanımı vb. özelliklerinden dolayı oldukça gelecek vadede bir malzemedir.

Çizelge 2.4 Fiziksel Özellikler Karşılaştırma Tablosu (Kang vd. 2019)

	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	GaN
Bant Genişliği (eV)	1.1	3.3	3.0	1.4	3.4
Elektron Devingenliği (cm ² /V.s)	1350	650	370	8500	900
Isıl İletkenlik (W/cm.K)	1.5	4.5	4.5	0.5	1.3
Elektriksel Kırılma Dayanımı (MV/cm)	0.3	2	2.4	0.4	3.3
Elektron Sürüklenme Hızı (10 ⁷ cm/s)	1	2	2	2	2.5
Erime Sıcaklığı (K)	1415	3103	3103	1238	2791
Yoğunluk (g/cm ³)	2.33	3.21	3.21	5.32	6.15
Dielektrik Geçirgenlik	12	10	9.7	13	9

2.4.2 Elektron devingenliği

$$I_{DS} = qZ\mu N_s E \quad (2.5)$$

Formülünde görüldüğü üzere transistör aygıtının kaynak ve akaç elektrotları arasından geçecek akımın miktarında doğrudan etkiye sahip bir mekanizmaya sahip olduğu için önemli bir parametredir.

2.4.3 Isıl iletkenlik

$$k = k_e + k_l \quad (2.6)$$

$$k_e \approx \frac{1}{\text{Resistivity } (\rho_e)} \quad (2.7)$$

Isıl iletkenliğe elektron katkısının serbest elektronların öz dirençleri ile orantılı olduğu görülmektedir. Bir malzemede serbest elektronların elektriksel iletkenliği ne kadar yüksekse ısıl iletkenliğinde o denli yüksek olacağı anlamına gelmektedir.

$$\sigma = \frac{A}{T^{3/2}} e^{-\frac{E_g}{2RT}} \quad (2.8)$$

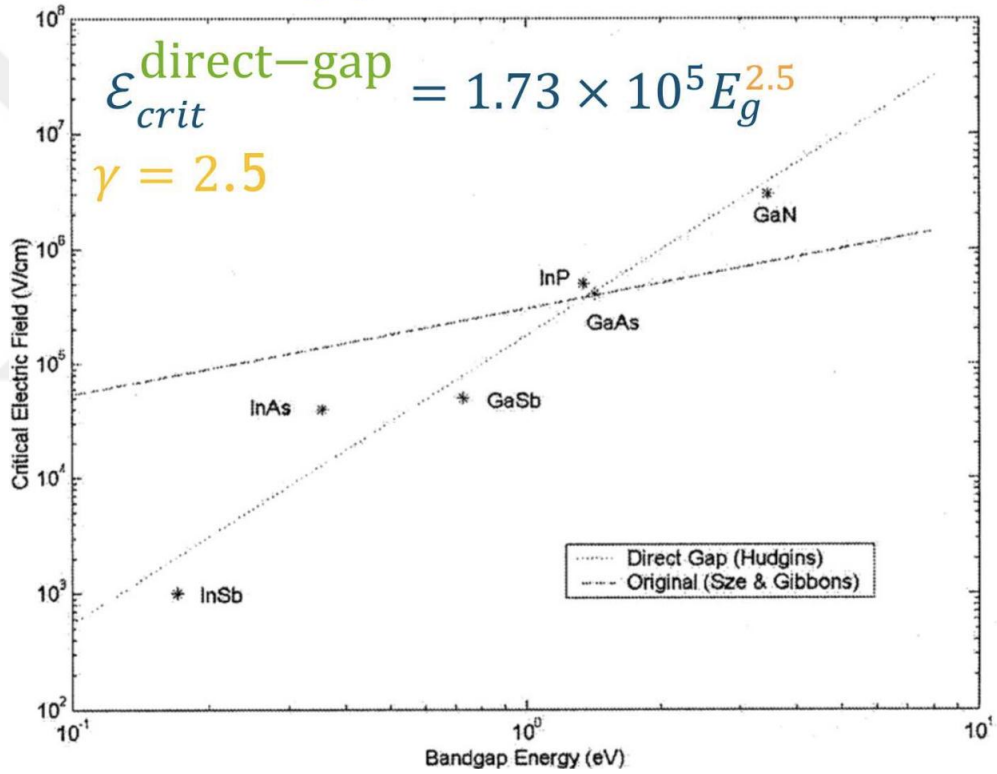
Denkleminde ilk kesirin olduğu kısım eksponansiyel terimin olduğu bölgeye göre sıcaklık arttıkça daha baskın hale gelmektedir. Dolayısıyla sıcaklık 0 Kelvinden itibaren arttığında elektriksel iletkenlik belli bir sıcaklık aralığında artar fakat sonra ilk kesirin olduğu kısım baskın hale gelerek elektriksel iletkenliğin düşmesini sağlar. Bunun sebebi ise eksponansiyel terimin olduğu bölge taşıyıcı yoğunluğunu ifade ettiği için yarıiletkenler taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak artış gösterir. Fakat eksponansiyel ifade belli bir değerden sonra doyuma ulaştığından dolayı artık bu terim etkisini yitirir ve malzemenin ısı kapasitesini anlatan terim baskın hale gelerek elektriksel iletkenliğin düşmesini sağlar.

$$k_l = \frac{1}{3} C_v \langle v^2 \tau \rangle \quad (2.9)$$

$$k_l = \frac{1}{3} C_v \langle \Lambda \tau \rangle; \Lambda = v\tau \quad (2.10)$$

2.4.4 Elektriksel kırılma dayanımı

Elektriksel Kırılma Dayanımı, bir transistor aygıtının I-V grafiğinde artık transistör özelliğini sergileyememesinin bir ölçütüdür. Özellikle güç elektroniğinde çok önemli bir parametredir. Aygıtın Elektriksel Kırılma Dayanımı ne kadar yüksekse o kadar fazla güç çıktısı sergileyebileceği anlamına gelmektedir.

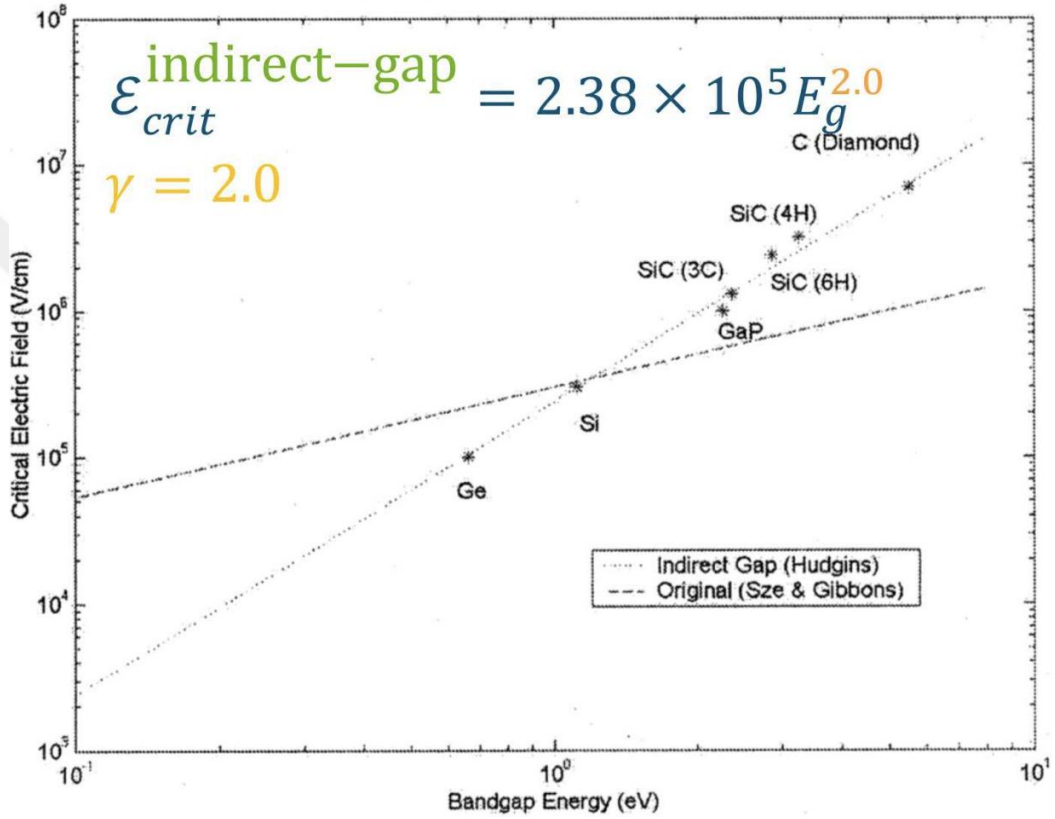


Şekil 2.28 III-V Grubu doğrudan bant yapılı yarıiletkenlerin Elektriksel Kritik Alan kıyaslama grafiği (Hudgins vd. 2003)

Şekil 2.28'deki grafikten görüldüğü üzere III-V grubu direkt bant yapılı yarıiletkenlerin Elektriksel Kırılma Dayanımlarının o malzemelerin bant aralıkları γ ile ilişkilidir.

Denkleminde Elektriksel Kritik Alanı'nın Elektriksel Kırılma Gerilimi ile doğru orantılı olmadığı görülüyor.

Bu durum doğrudan ve doğrudan olmayan bant yapısına sahip yarıiletkenler içinde farklı bir katsayıya sahiptir.



Şekil 2.29 Şekil 2. III-V Grubu doğrudan olmayan bant yapılı yarıiletkenlerin Elektriksel Kritik Alan kıyaslama grafiği (Hudgins vd. 2003)

Şekil 2.29'da görüldüğü üzere Elektriksel Kritik Alanın doğrudan olmayan bant yapısına sahip malzemeler için γ katsayısı farklı bir değer alıyor. Grafikte noktalı olan gösterim çalışmada farklı malzemeler üzerinde yapılmış olan ölçümlerin sonunda elde edilmiş verilerin doğrusal regresyonu göstermektedir.

$$\epsilon_C = 1.02 \times 10^7 \sqrt{\frac{q}{\epsilon}} N_B^{1/8} E_G^{3/4} \quad (2.12)$$

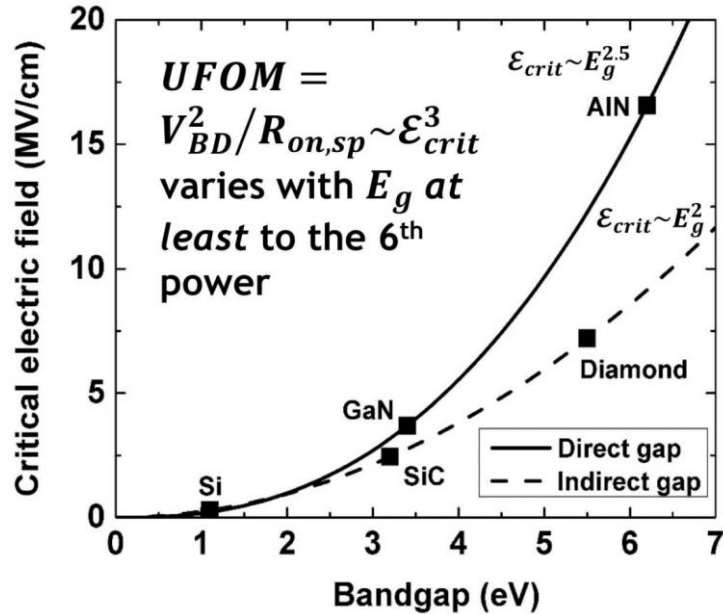
Yukarıdaki ifadenin farklı formları III-V grubu yarıiletkenlerin Elektriksel Kritik Alanı ve bant aralıkları arasında ampirik bir bağlantı oluşturulmaya çalışılmıştır[1], [2]. Sonraki dönemlerde ise bu bağlantı R_{ON} ve R_{ONsp} ifadeleri ile de oluşturulmaya çalışılmıştır[3], [4]

$$\varepsilon_c = a (E_G)^n \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklemde a ve n ifadeleri III-V grubu yarıiletkenlerin Elektriksel Kırılma Alanı ve Bant Aralıkları arasında bir bağlantı oluşturabilmek için kullanılan regresyon katsayılarıdır. Bu katsayılar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Doğrusal ve Doğrusal olmayan yarıiletkenlerin regresyon katsayıları (Hudgins vd. 2003)

	a	n
Tüm Yarıiletkenler	1.7485×10^5	2.359
Doğrusal Olmayanlar	2.3818×10^5	1.995
Doğrusal Olanlar	1.7348×10^5	2.506



Şekil 2.30 Doğrusal ve doğrusal olmayan yarıiletkenlerin Kritik Elektrik Alanının Bant Aralığına bağlı grafiği (Hudgins vd. 2003)

Si tabanlı oluşturulan pn eklemının ve benzerlerinin genellikle az katkılanma yapılmış bölümlerinde tüketim bölgesinde genellikle $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ seviyelerinde safsızlık katkı atomu bulunmaktadır. Denklem 2.5 ve 2.6'ya bakıldığında aralarında oldukça büyük bir benzerlik görülmektedir. Bu noktada aralarındaki bağlantı tam oluşturulabilmesi için $N_B^{1/8}$ teriminin denklem 2.6'daki a ile eşleştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada oluşturulan bağlantı dolayısıyla elde edilen veriler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Direkt Bant Yapısı'na sahip malzemeler için;

$$\varepsilon_C = 1.73 \times 10^5 (E_G)^{2.5} \quad (2.14)$$

Direkt Olmayan Bant Yapısı'na sahip malzemeler için;

$$\varepsilon_C = 2.38 \times 10^5 (E_G)^2 \quad (2.15)$$

Olarak elde edilmiştir.

Denklem 2.6'dan yola çıkılarak Elektriksel Kırılma Gerilimi;

$$V_B = 5.2 \times 10^{13} N_B^{-3/4} E_G^{3/2} \quad (2.16)$$

Olarak elde edilmiştir. Fakat denklem 2.6 ile bir yaklaşım sergilendiğinde;

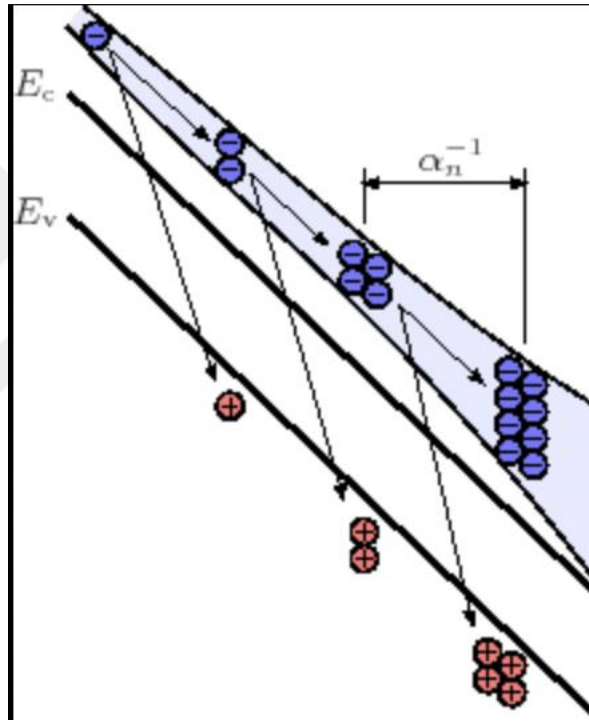
$$V_B = 2.76 \times 10^5 \varepsilon_r a^2 N_B^{-1} E_G^{2n} \quad (2.17)$$

İfadesi elde edilir.

Bu noktada elde edilen denklem üzerinden malzemenin eğer bant aralığı artarsa ve dielektrik katsayısı artarsa Elektriksel Kırılma Gerilimi'nin artacağı anlaşılmaktadır. Bu sebeple son yıllarda Geniş Bant Aralıklı Yarıiletkenlerin üzerine çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. Özellikle güç elektroniği noktasında Geniş Bant Aralıklı Yarıiletkenlerin endüstrileşmesi üzerine hızla çalışmalar devam etmektedir.

Zincirleme İyonizasyon Etkisi;

Bir yarıiletkende dışarıdan elektrik alan ile yüksek miktarda malzeme üzerinde zorlama yaratılırsa artık fazla enerjiyle hale gelmiş serbest elektronlar değerlik bandından iletkenlik bandına geçmemiş elektronları bağlı oldukları atomdan kopararak bir iyonizasyon durumuna sebebiyet verirler. Bu sayede zincirleme olarak enerjisi yüksek olan serbest elektronlar malzemede zincirleme olarak bir iyonizasyon oluştururlar. Bu durum meydana geldiğinde artık aygıt kontrol edilemez hale gelir.



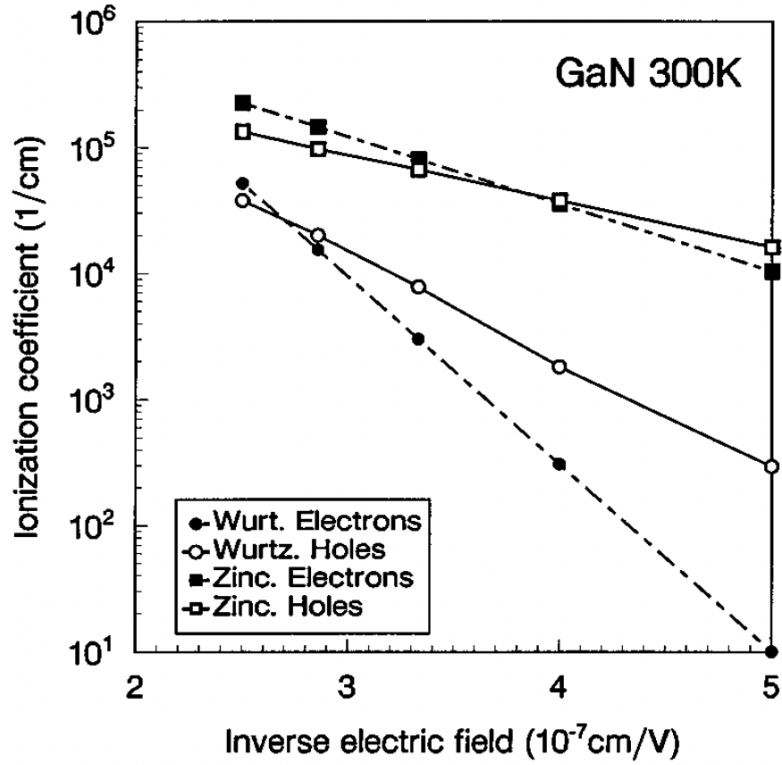
Şekil 2.31 Zincirleme iyonizasyon etkisinin temsili gösterimi (Triebel 1995)

$$\alpha_n = \frac{1}{n} \frac{dn}{d(tv_n)} = \frac{1}{nv_n} \frac{dn}{dt} \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklem alt indislerin n ile belirtilmesinin nedeni elektronların iyonizasyon oranını anlatmaktadır. İyonizasyon oranı Δt sürede değişen (artan) elektron-delik çiftini tanımlamaktadır. Şekil 2.31'de α_n^{-1} ifadesi bir elektronun yüksek enerjisi ile başka bir atomu iyonize etmeden önce aldığı ortalama yolu tanımlamaktadır.

$$\alpha_v \propto \exp\left(-\frac{E_v^{crit}}{E}\right) \quad (2.19)$$

Yukarıdaki denklemde elektronların sahip oldukları enerjiye göre iyonizasyon etkisinin eksponansiyel bir şekilde azalarak arttığı anlaşılıyor. Aşağıdaki şekilde iki farklı kristal yapıda kristallenmiş GaN malzemesi için iyonizasyon oranları gösterilmiştir.

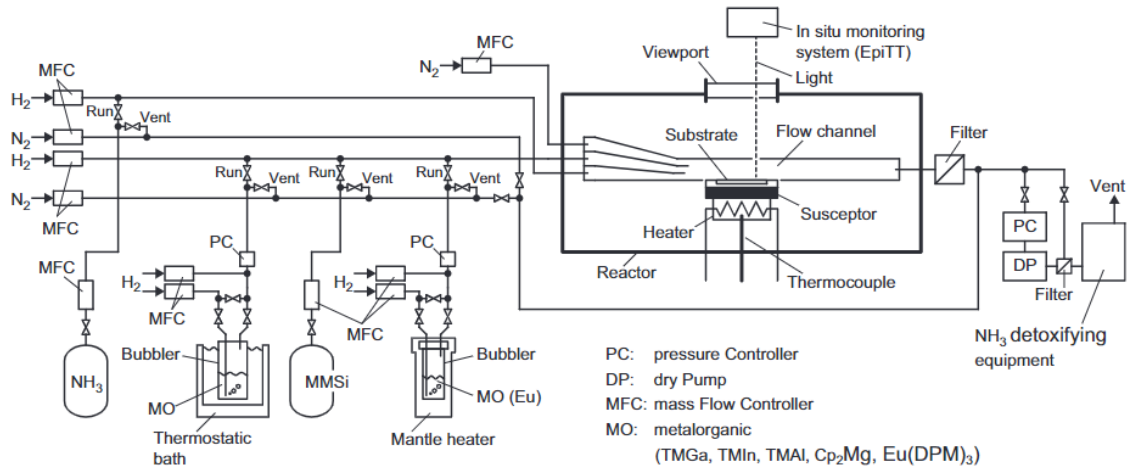


Şekil 2.32 GaN malzemesinin iyonizasyon oranları (Oğuzman vd. 1997)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

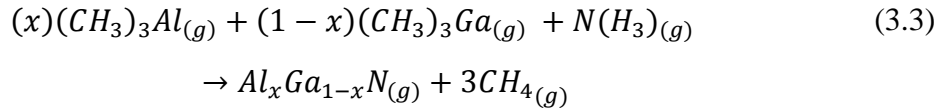
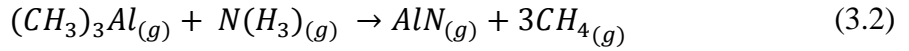
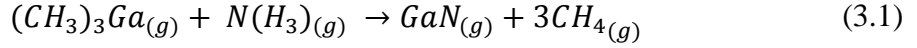
3.1 Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

Son yıllarda grup III-V tabanlı aygıtların üretimi için metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) sistemlerinin gelişimi oldukça etkileyicidir. Günümüzün büyük ölçekli üretim MOCVD sistemleri, büyüme hızı ve katkılama (doping) seviyelerinde ve keskin katman arayüzleri sağlamak için büyüme parametrelerinin mükemmel kontrol edilebilirliğini sağlar. Bu özelliklerin tümü, yüksek verimlerde iyi aygıt özelliklerinin elde edilmesinde önemlidir. Rakip bir teknolojinin Moleküler Demet Epitaksi (MBE)'nin MOCVD'ye kıyasla daha iyi tekdüzelik ve kontrol edilebilirlik sağladığı argümanı artık geçerli değil. MOCVD, ışık yayan diyotlar (LED'ler), lazer diyotlar, hetero-bipolar bağlantı transistörleri (HBT'ler), yüksek elektron hareketlilik transistörleri (HEMT'ler), güneş enerjisi gibi GaN ve GaAs tabanlı optoelektronik cihazların üretimi için en çok tercih edilen sistem haline gelmiştir. Ancak, gelecekte genel aydınlatma için, bir LED ampulün dolar başına lümen maliyeti, tüketici pazarı için hala çok yüksektir. Bir LED ampulün toplam maliyetini düşürmek için MOCVD sistemlerinin üretim maliyetlerinde daha fazla azalma hala gereklidir. Bu, kapasiteyi artırarak, çalışma başına daha fazla alttaş içeren daha büyük reaktörler kullanarak, aygıt üretimi tekrarlanabilirliği ve verimini artırarak, sistemden sisteme yeniden üretilebilirliği geliştirerek, insan faktörlerinin etkisini azaltmak için alttaş yükleme ve boşaltmayı otomatikleştirerek vb. gerçekleştirilebilir.

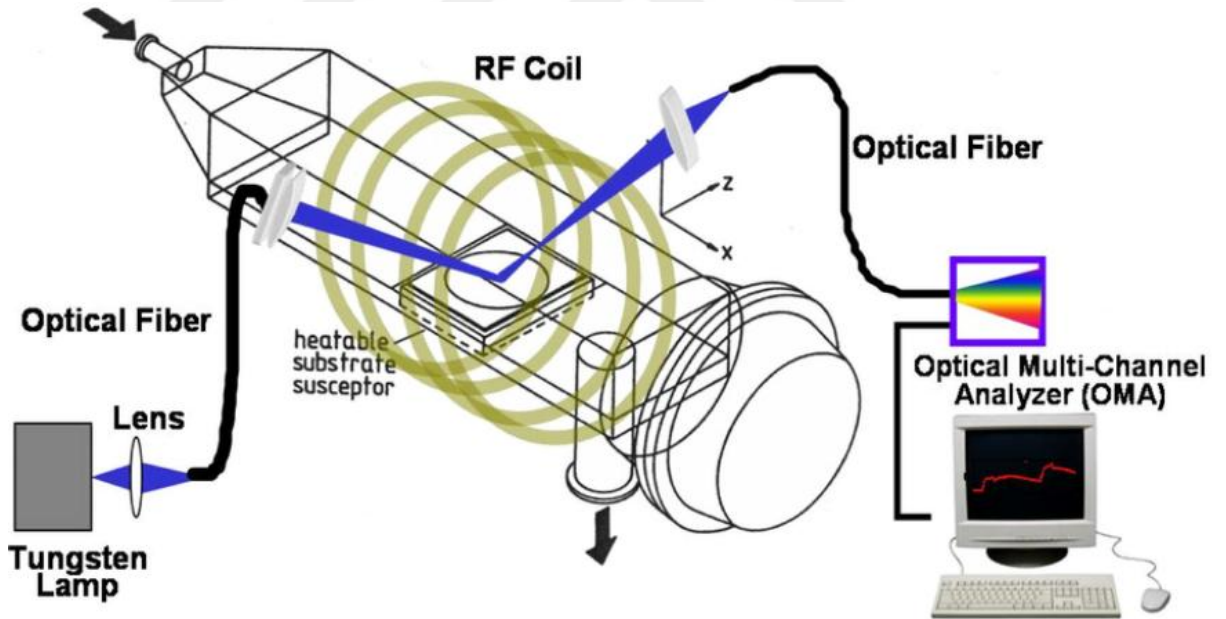


Şekil 3.1 MOCVD cihazının şematik gösterimi (Koizumi vd. 2016)

GaN, AlGaIn, InGaIn ve AlN büyütmeleri için kullanılan yüksek saflıktaki taşıyıcı gazlar NH₃ (Amonyak), N (Azot) ya da H (Hidrojen) öncül gazlar TMGa (Trimetil Galyum), TMAI (Trimetil Aluminyum) ya da TMIIn (Trimetil İndiyum) kaynakları içerisinde reaksiyona girer. Bu reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:

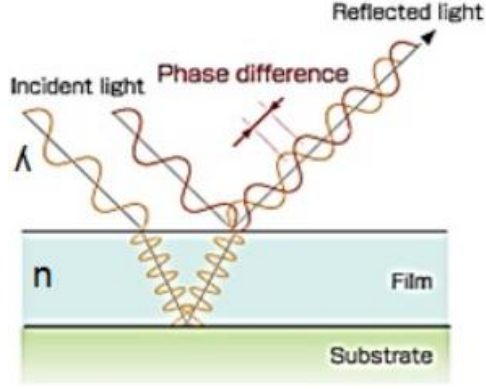


Bir kristalin MOCVD tekniği ile büyütülmesi esnasında büyütme hızı, kalınlık ve yüzey özelliklerinin anlık olarak (in-situ) ölçülüp gözlemlenebilmesi oldukça önemlidir. Çünkü büyütülecek olan malzemelerin yukarıda verilen özelliklere dayalı bant aralığı, taşıyıcı yoğunluğu, mekanik ve termal özellikleri vb. özellikleri değişebilmektedir.



Şekil 3.2 MOCVD sistemlerinde kullanılan Reflektometre'nin şematik gösterimi (Byun vd. 2008)

Şekil 3.2'de görüldüğü üzere bir kaynak lambadan optik fiber yoluyla ışık örneğin üzerine düşülerek tekrar optik fiber ve bazı optik komponentler yardımıyla çok kanallı optik analiz ara birimine aktarılır.



Şekil 3.3 Reflektometrenin çalışma prensibi şematik gösterimi (Anonim 2022)

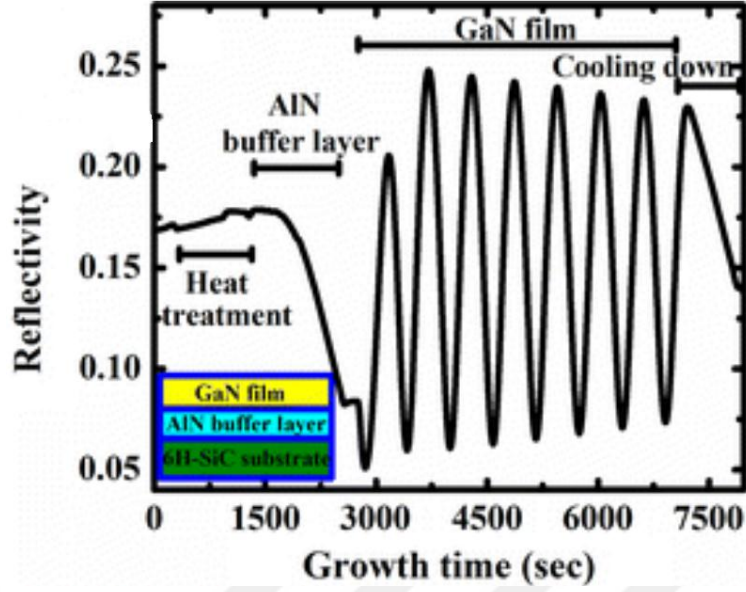
Şekil 3.3’de olay düzlemine (büyütülecek kristal yüzeyine) gelen iki ışının ve yansıyan iki ışının şematik gösterimi görülmektedir. Olay düzlemine gelen ışının farklı kırılma indisli bir ortama giriş yaptığı zaman frekansının değiştiği görülmektedir. Sonrasında alttaş’tan yansıyan ışın tekrar film içinden de çıkarak eski ortamında eski frekansı ile davranışına devam eder. Fakat ışın, film içinde bir miktar yol aldığı için kendisiyle özdeş olan bir ışının ilk yüzeyden yansıması ile arasında yol farkından kaynaklı bir faz farkı oluşmuştur. Bu faz farkı yol farkının değişmesi ile iki özdeş ışının arasında yapıcı ve yıkıcı girişimler oluşturur. Bu sayede MOCVD ile büyütülen kristallerin, büyütme ile eş zamanlı kalınlık ve büyüme hızı bilgilerine ulaşılabilmesini mümkün kılar.

$$nd = \frac{\lambda}{2} \quad (3.4)$$

$$\mu = \frac{\lambda}{2n\Delta t} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde Denk. 2.5 ve Denk 2.6’da n: kırılma indisi, d: kalınlık, λ : dalga boyu, Δt : salınım periyodu ve μ : büyüme hızını ifade etmektedir.

Denklem 2.5’ten görüldüğü üzere, salınım periyodu’nun düşük olduğu durumlarda yüksek büyüme hızı, salınım periyodunun düşük olduğu durumlarda ise yüksek büyüme hızı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4 6H-SiC üzerine AlN tampon tabakası ve GaN epitaksiyel tabakası büyütmesi Fabry-Perot salınımları (Huang vd. 2015)

Şekil 3.4’de 6H-SiC alttaş üzerine AlN tampon tabakasının ve GaN epitaksiyel tabakanın büyüme esnasında reflektometre ile alınan ölçümü görülmektedir. Reflektometre ile herhangi bir malzemenin büyütmesi yapıldığı esnada alınan ölçümlerde periyodik olarak kendini tekrar eden salınımlar GaN malzemesinin büyütüldüğü zaman aralığını gösterir.

3.2 Optik Litografi

Optik litografi ya da fotolitografi genel olarak, belli dalga boyundaki ışığa duyarlı bir akışkanın (Fotorezist) bir fotomaske ile alttaşın desenlenmesi işlemidir. Bu işlem oldukça önemlidir, çünkü aygıt performansında çok önemli rol oynayan istenilen desenlerin büyüklüğü, aralığı vb. gibi parametrelerin maske tasarımıyla oldukça aynı boyutlarda desenlenmesi gereklidir.

3.2.1 Yüzeyle fotorezist kaplanması

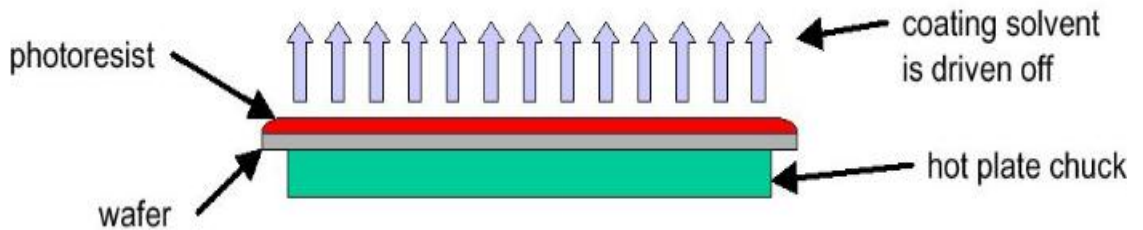
Fotolitografide ilk adım olarak, kullanılacak fotorezistin örnek yüzeyine belirli bir kalınlıkta ve homojen bir şekilde kaplanmasıdır. Bu işlem öncesi fotorezist kaplanacak

örneğin ön ve arkayüz temizliği son derece önemlidir. Bu temizlik prosedürü gerekli şekilde yapılmadığı zaman örneğin yüzeyinde kalan kirlilikler öncelikle fotorezistin yüzeye homojen kaplanmamasına daha sonrasında ise örneğin ışık ile etkileşime gireceği esnada hizalama vb. durumlarda mekanik olarak istenen stabilizasyonun sağlanamamasına sebebiyet verecektir.



Şekıl 3.5 Döndürme ile kaplanma ışlemi (Spin Coating)

Şekıl 3.5'te bir fotorezıstın örnek yzeyıne homojen bir şekilde kaplanması adımları görülmektedir. Temız olduğundan emın olunan bir pipet ya da vb. bir aygıt ile fotorezıst sürekli olacak (kabarık oluşturmayacak şekilde) şekilde örnek zerıne damlatılır. Fotorezıst belirli bir süre içinde örnek yzeyınde her yere yayılır. Bu aşamada bir süre beklenılır. Bir çok fotorezıst'ın kalınlıkları ve özelliklerinden dolayı akmazlığı (Viskozıte) farklı olduğu için bu süre fotorezıst'ın özelliklerine göre değişmektedir. Döndürme ile kaplama ışlemıne özel olarak oluşturulmuş uygulama reçetesinde kaplama ışlemının toplam sresının bir kısmını ıvnelı bir döndürme oluşurmaktadır. Bunun sebebi fotorezıst'ın fazlalığının yüzeyden uzaklaştırmaktır. Ardından sabıt bir hıza döndürülen örnek zerındeki fotorezıst homojen bir şekilde yüzeye dağılır.

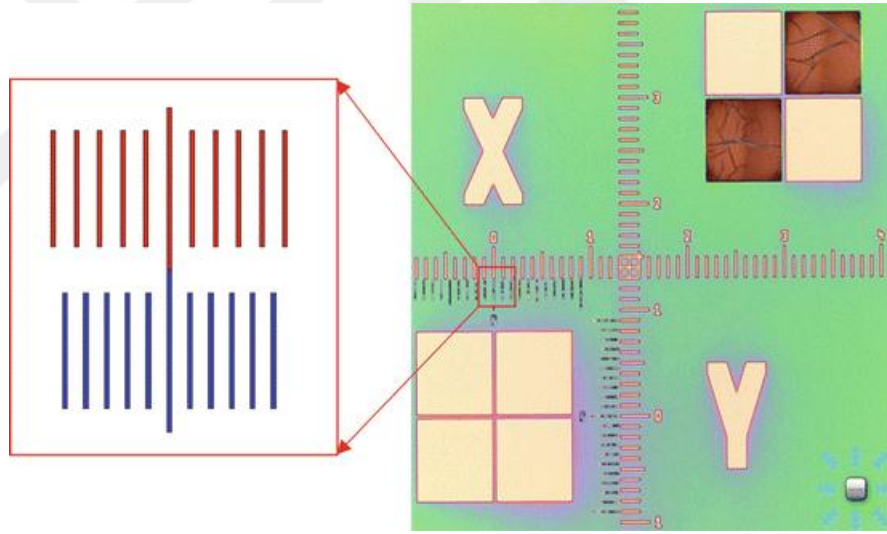


Şekıl 3.6 Fotorezıst pişirme ışlemi

Döndürme ile kaplama işleminden sonra yüzeye homojen bir şekilde kaplanan fotorezist'i katı bir forma dönüştürmek için pişirme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem esnasında fotorezist içinde bulunan bazı kimyasallar buharlaşarak fotorezist kurur ve katı forma yakın bir hal alır. Bu işlemde genellikle 1µm kalınlık başına yaklaşık 1 dakikalık süre uygulanır. Genellikle çoğu fotorezist standart olarak 90°C - 110°C arasında pişirilir fakat yapılan çalışmaya ve fotoreziste bağlı olarak bu süre ve sıcaklık değişkenlik gösterebilir.

3.2.2 Maske hizalama ve doza maruz bırakma

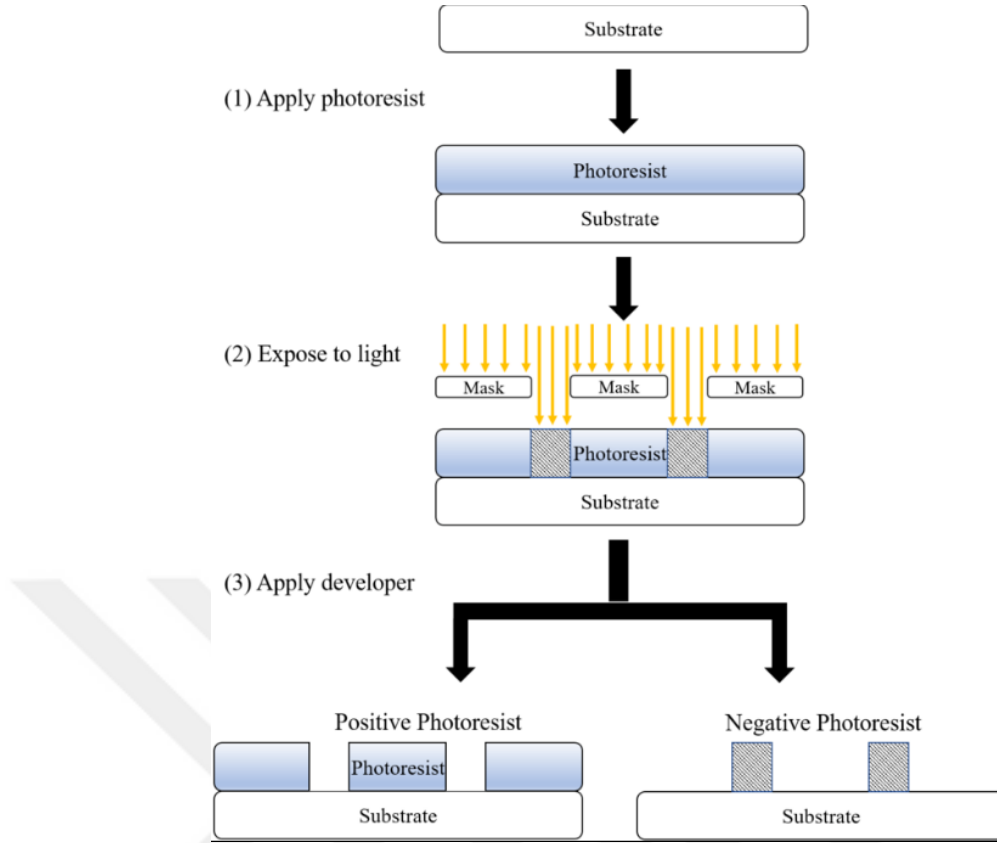
Döndürme ile kaplama işleminden sonra örnek litografi edilecek desenlenmiş maske ile temas haline getirilir. Bu işlemler manuel, otomatik ya da yarı otomatik litografi cihazları ile gerçekleştirilir.



Şekil 3.7 Vernier ölçeği ve fotolitografi belirteçleri temsili görseli (Zhang vd. 2018)

Maske hizalamada örnek ve maskenin üzerindeki belirteçler Vernier ölçeğine göre hizalanır. Şekil 3.7'de görülen Vernier ölçeğindeki her bir çizgi 0.5µm ile hizalamadaki hatayı anlatmaktadır.

Her fotorezistin sağlayıcıları tarafından optimize edilmiş ışık dozu bulunmaktadır. Oluşturulacak desen için belirlenmiş kontak tipi ve doz miktarı ayarlandıktan sonra örnek doz'a maruz bırakılır. Fotorezistler kendi içinde Pozitif ve Negatif olarak ikiye



Şekil 3.9 Fotolitografi proses adımları (Anonim 2005)

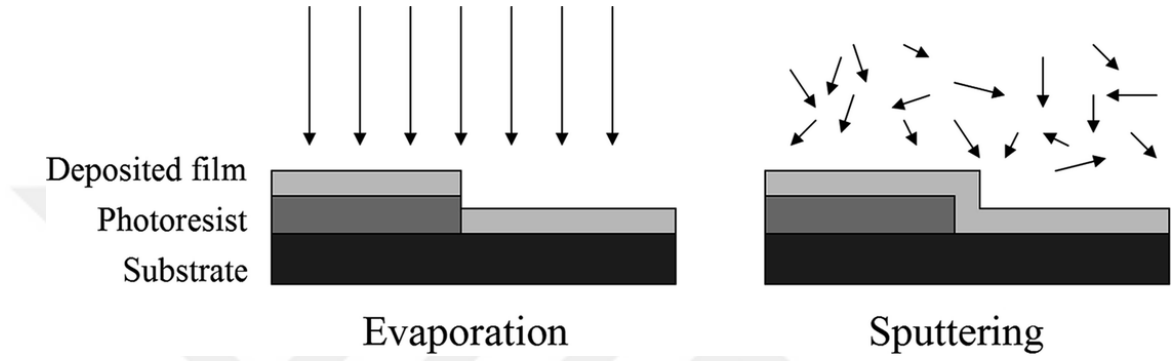
Fotolitografi’de bir diğer önemli kriter ise çözünürlük anlamında desenlenebilecek minimum çizgi genişliğidir. Bu durum Kritik Boyut olarak (l_m) olarak tanımlanır. Litografi yapılacak sistemin kullanılacak rezistin ve örnek ile maske arasındaki kontak tipinin kritik boyutu değiştirdiği bilinmektedir.

$$l_m = k \frac{\lambda}{NA} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki formülde görülen k sabiti 0.25 ve 1 arasında değişen bir değerdir. Bu sabiti değiştiren parametreler proses genişliği, litografi sisteminin optik parametreleri ve fotorezist’in özellikleridir.

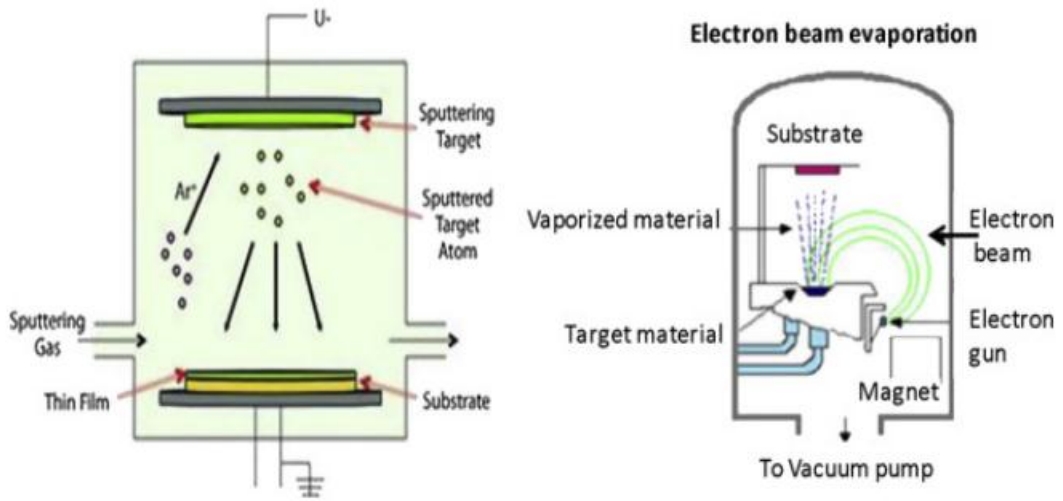
3.3 Elektron Demet Metalizasyonu

Yarıiletken aygıt üretimindeki metalizasyon oldukça önemlidir. Fotolitografi ile desenlenmiş bölgeler sonrasında Omik metalizasyon vb. gibi adımlarda metal kaplanır. Bu noktada hangi yöntem ile belirlenen metalin kaplanacağı önemlidir.



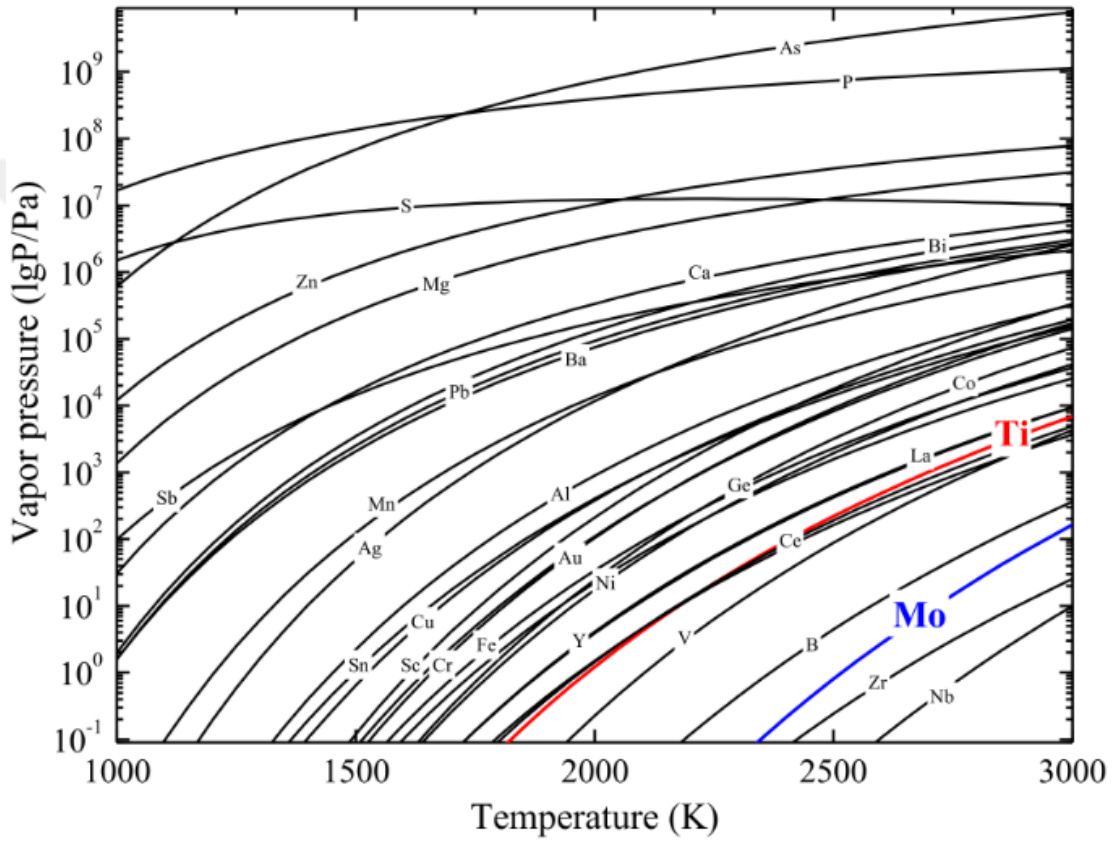
Şekil 3.10 Elektron Demet Metalizasyon yöntemi ve Saçırma Metalizasyon yöntemi ile kaplama profili karşılaştırmalı görseli (Lei vd. 2014)

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere Saçırma Metalizasyon yöntemi Elektron Demet Metalizasyon yöntemine göre daha konformal bir kaplama sağlamaktadır. Bunun sebebi ise yöntemlerin çalışma prensiplerinin farklılığından oluşmaktadır.



Şekil 3.11 Elektron Demet Metalizasyon yöntemi ve Saçırma Metalizasyon yöntemi ile çalışma prensibi karşılaştırmalı görseli (Kafle 2020)

Elektron Demet Metalizasyon yöntemi'nde bir filament ısıtılarak etrafında elektron kaynağı gibi davranır. Filamentten kopan elektron bir manyetik alan yardımıyla radyal bir yörünge izleyerek kaplanmak istenen hacimsel (bulk) malzemenin üstüne düşürülür. Elektronlar enerjik bir şekilde üstüne düştüğü malzemeyi lokal olarak ısıtmaya başlar. Lokal olarak ısınma belli bir mertebeden sonra malzemenin buharlaşma sıcaklığına ulaşır ve malzemenin buharı ile örnek kaplanması sağlanmış olur. Bu noktada farklı bir kaç parametre daha önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3.12 Metallerin erime sıcaklıklarının buhar basınçlarına karşı grafiği

Metallerin buharlaşma sıcaklıkları ortam basıncıyla orantılı olduğu için kaplama yapılacak vakum odasının basıncı oldukça önemlidir. Vakum odasının basıncı ne kadar düşük bir seviyeye getirilebilirse malzeme o seviyede daha düşük sıcaklıkta buharlaşmaya başlayacaktır. Bu durumda kaplama esnasında elektronlara daha düşük enerji kazandırarak güvenli bir kaplama sağlayacaktır.

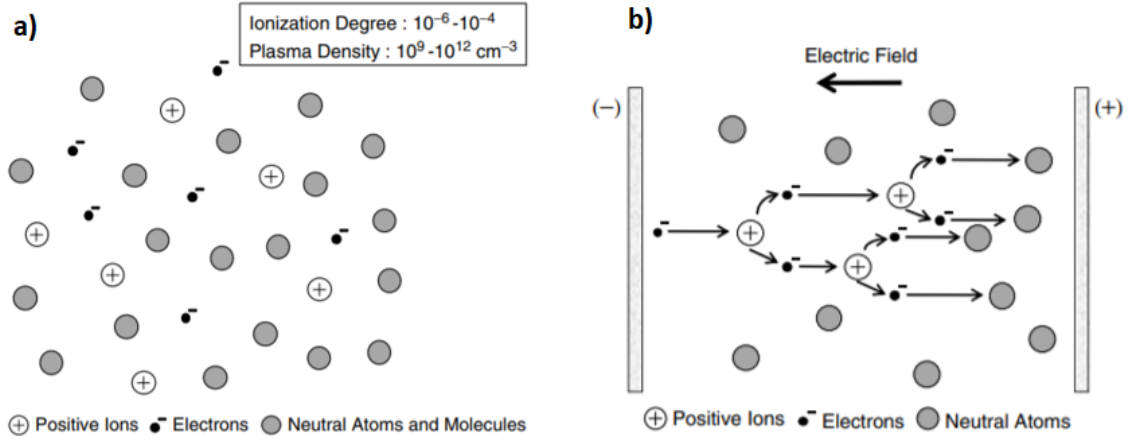
$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \quad (3.7)$$

Bir diğerk önemli parametre ise parçacıkların Ortalama Serbest Yol'udur. Ortalama serbest yol parçacıkların vakum odasındaki koşullar içerisinde enerjilerinin yettiğı kadarıyla ulaşabilecekleri maksimum uzunluğu tanımlar. Denklem 3.2'de görüldüğü üzere ortam basıncı ortalama serbest yol ile ters orantılıdır. Kaplama yapılacak ortam basıncı ne kadar düşerse o seviyede ortalama serbest yolun o kadar artacağı anlaşılmaktadır.

Harici olarak, kaplama esnasında kaplama hızının ve örnek'in sıcaklığı da oldukça önemlidir. Kaplama hızı (Å/s) arttıkça kaplanan malzemenin tanecik boyutu da artmaktadır. Bunun sebebi birim saniyede birim alana biriktirilen malzeme miktarının fazla olmasıdır. Bu duruma ek olarak örnek'in kaplama anındaki sıcaklığı da tanecik boyutunu etkilemektedir. Kaplanan örnek'in sıcaklığı her ne kadar düşük olursa kaplanan malzeme örnek yüzeyindeki ekstra enerjisini çok daha hızlı bir şekilde atabileceğı için yüzeyde gezinme süresini düşürerek daha hızlı kristallenecektir. Fakat örnek sıcaklığının kaplama esnasında bir dezavantajı da bulunmaktadır. Örnek'in sıcaklığı vakum odasındaki komponentlerden daha düşük olduğu takdirde entropi sebebiyle ortamdaki kirlilikleri üstüne çekecektir ve bu durum kaplama sonrası olumsuz sonuçlar yaratacaktır. Bu yüzden örnek sıcaklığı her prosese uygun bir şekilde optimize edilmelidir.

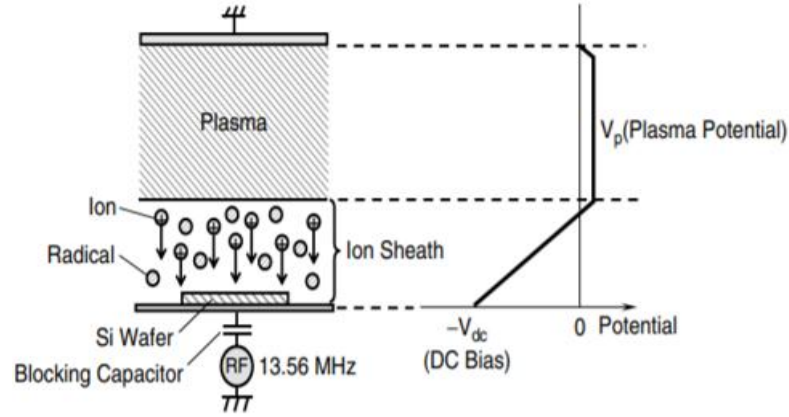
3.4 Kuru Aşındırma

Kuru aşındırma işlemi, mikrofabrikasyonda oldukça sık kullanılan bir çok farklı teknolojik aygıtın üretilmesinde kullanılan bir tekniktir. Genellikle fotolitografi ile desenlenmiş örneklerde kullanılır. Islak aşındırmanın bir alternatifi olarak geliştirilmiştir. Eş zamanlı olarak hem fiziksel hem de kimyasal aşındırmaya olanak sağlayan bu teknik geleneksel kimyasal aşındırmanın imkan sağlayamadığı bir çok duruma olanak sağlar.



Şekil 3.13 a) Plazma hal, b) plazmanın elektrik alanda davranışı (Chung 2005)

Maddenin kararlı hali farklı yöntemlerle plazma haline getirildiği zaman ortaya pozitif iyonlar, negatif iyonlar, elektronlar, nötral molekül ve atomlar ortaya çıkar. Eğer bu plazma bir elektrik alan içine hapsedildiği zaman pozitif yüklü parçacıklar katot'a, negatif yüklü parçacıklar ise anot'a doğru ivmeli bir hareket sergiler. Yüklerin bu kutuplanması olayı esnasında elektronlar pozitif iyonlarla ve nötral atomlarla esnek çarpışmalar gerçekleştirerek kendilerini çoklarlar. Şekil 3.13'de bu durumun temsili olarak görselleştirilmiş hali bulunmaktadır.



Şekil 3.14 Plazma'nın elektrik alan altında sahip olduğu potansiyel (Chung 2005)

Şekil 3.14'de elektrik alan içinde plazma ve iyon kılıfı (Debye sheath) gösterilmiştir. Standart olarak yüklü parçacıkların serbestçe hareket ettiği plazma içerisinde oluşan çarpışmalardan dolayı salınan fotonlar plazma bölgesinin görünür olmasına olanak sağlar. Fakat iyon kılıfı bölgesinin özelliği pozitif yük yoğunluğu standart plazma

bölgesine göre çok daha fazla olduğu için bu bölgede foton salımı oluşmadığı için bu bölge karanlık kılıf (dark sheath) olarak da isimlendirilir.

Aşınma işlemi en temel haliyle pozitif iyonlar ve radikaller tarafından gerçekleşir. Elektrik alan tarafından aşındırılacak olan örneğin temas ettiği blok'a doğru hareket eden pozitif iyonlar ve radikaller örnek ile tepkimeye girer. Aşağıda bir plazma içerisinde oluşabilmesi olası bütün tepkimeler gösterilmiştir.

Ayrışma:



Atomik İyonizasyon:



Moleküler İyonizasyon:



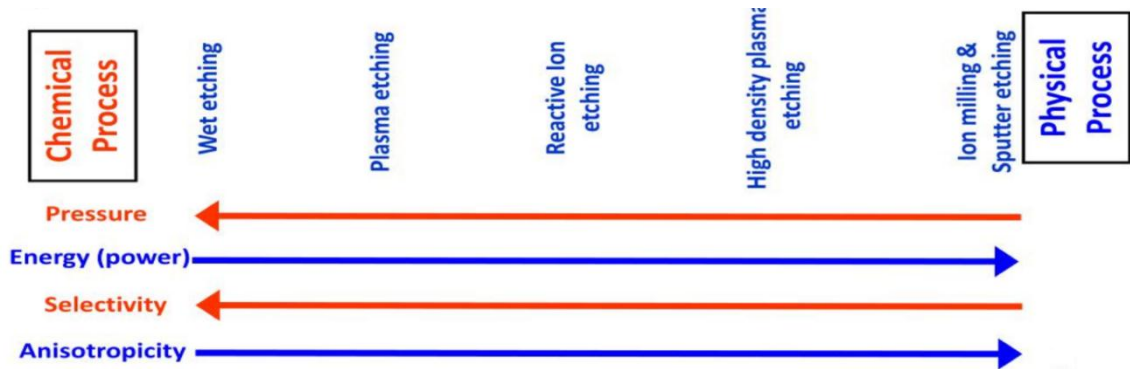
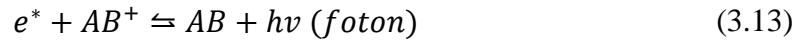
Atomik Uyarma:



Moleküler Uyarma:



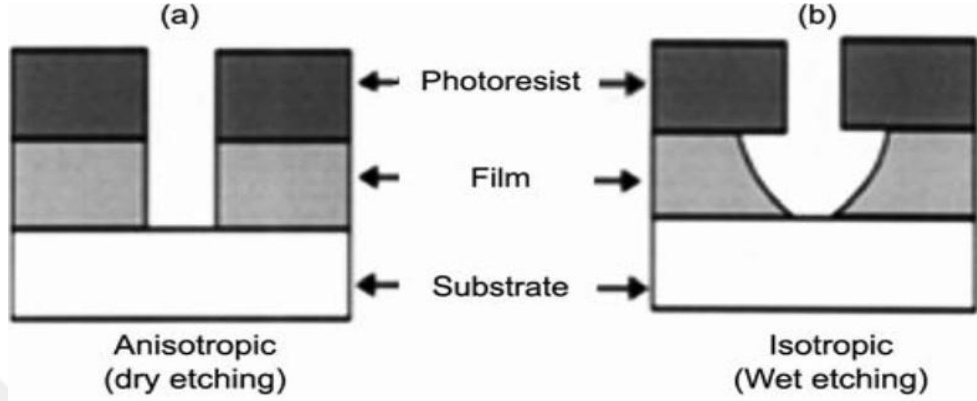
Bir Araya Gelme:



Şekil 3.15 Kimyasal ve fiziksel aşındırma arasında karşılaştırma görseli (Chung 2005)

Şekil 3.15'te görüldüğü üzere tamamen kimyasal ya da tamamen fiziksel aşındırmanın yapılması planlanan prosese göre seçilmesi gerekmektedir. Kimyasal aşındırma esnasında, aşındırması yapılacak örneğin tepkimeye gireceği kimyasal sıvıya örnek

daldırılır ve belirlenen süre bekletildikten sonra tekrar çıkartılır. Bu şekilde yürütülen bir proseste fiziksel aşındırmaya göre anizotropi vb. gibi dezavantajları bulunmaktadır. Aynı şekilde fiziksel aşındırma ile aşındırılan bir örnekte ise örnekte yüksek miktarda ısınma vb. gibi dezavantajları vardır.



Şekil 3.16 Aşındırma profilleri karşılaştırması. a) kuru aşındırma profili, b) ıslak aşındırma profili (Chung 2005)

Kuru aşındırmada aşındırma yüklü parçacıkların elektrik alan altında örnek yüzeyine çekilmesi ile gerçekleştiği için aşındırmayı gerçekleştirecek iyonların izlediği yol düzdür. Bu sebeple aşındırma, desenleme yapılmış fotorezist profili ne şekilde o profilde gerçekleşir. Fakat ıslak aşındırmada aşındırmayı gerçekleştiren kimyasal aşındıracağı malzemeye her yerden tepkimeye girdiği için daha küresel ya da yarı küresel bir geometriye sahip olacak şekilde aşındırır. Bu sebeple keskin hatlara sahip çukurlar oluşturulmak istendiğinde kimyasal aşındırmadan çok kuru aşındırma tercih edilir.

3.5 GaN Transistör Üretim Süreçleri

GaN Transistör üretim süreci genel olarak 3 adımdan meydana gelmektedir.

- Foto-Litografi
- Metalizasyon
- Dielektrik Malzeme Kaplama
- Kuru Aşındırma

Bu ana adımların etrafında şekillenen aygıtların işlemleri detaylıca aşağıda açıklanacaktır.

1. Omik Kontak Litografisi
2. Omik Metal Kaplanması
3. Omik Metal Fotorezist Kaldırma İşlemi
4. Adacık (Mesa) Litografisi
5. Adacık Kuru Aşındırması
6. Fotorezist Temizleme İşlemi
7. Omik Tavlama
8. Dielektrik Malzeme Kaplanması
9. Kapı Elektrodu Litografisi
10. Kapı Elektrodu Kuru Aşındırması
11. Kapı Elektrodu Metal Kaplanması
12. Fotorezist Temizleme İşlemi
13. Dielektrik Açma Litografisi
14. Dielektrik Kuru Aşındırması
15. Fotorezist Temizleme İşlemi

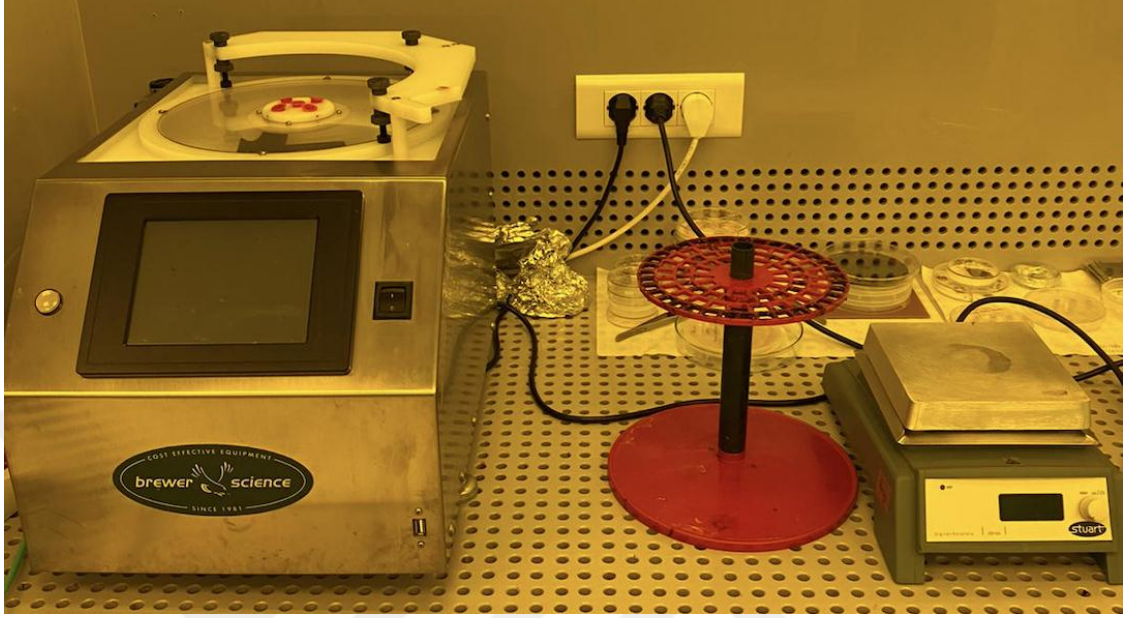
GaN Transistör üretimi toplam 14 adımda tamamlanmıştır.

3.6 Omik Kontak Litografisi

Bu adım GaN Transistör üretiminin ilk adımı olmakla birlikte oldukça önemlidir. Desenleme yapılacak maskenin örneği oldukça iyi ortalama olması kontrol edilmelidir. Maskede bulunan Belirteçlerin (Marker) maskedeki noktaları örnekte oldukça belirgin noktalarına denk gelmesi gerekmektedir. Bunun sebebi aygıtın Omik kontak litografisi sonrası üzerine inşa edilecek desenlerin doğru ortalanması ile ilgilidir.

Bu aşamada A1 ve A2 örnekleri aynı litografi işlemlerine tabi tutulmuştur. Süreç öncelikle örneklerin Aseton ve İzopropil kimyasalları yardımıyla temizlenmesi ile başlamaktadır. Örneklerin yüzeyinde organik ya da inorganik bir kirliliğin

olmadığından emin olunana kadar temizlik işlemine devam edilmiştir. Örnekler Azot yardımıyla kurutulduktan sonra Fotolitografi işlemine başlanılmıştır.

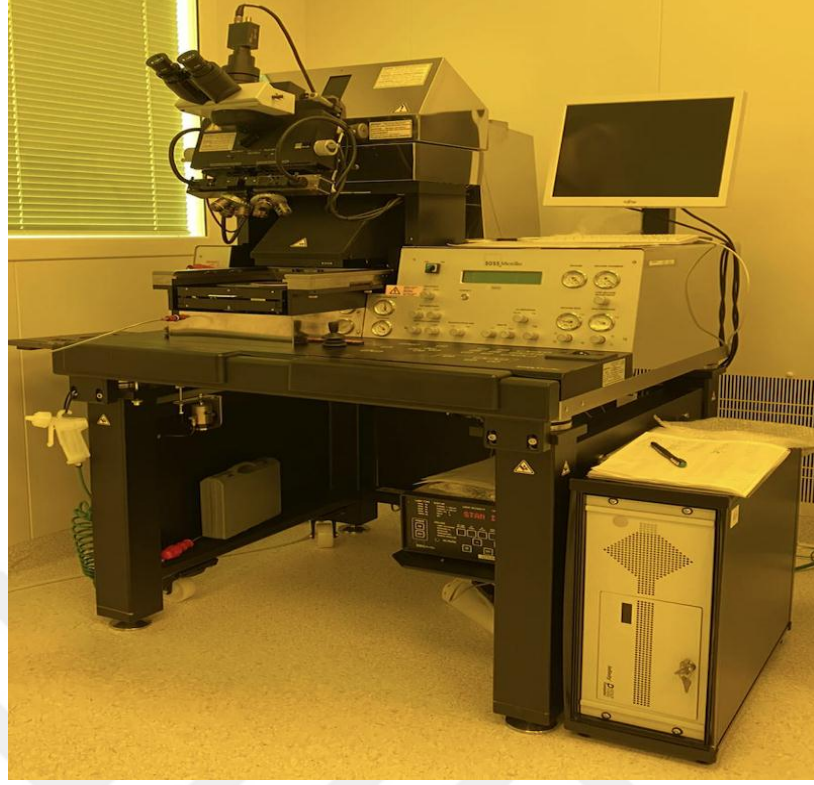


Şekil 3.17 Brewer Science marka Spinner ve Stuart marka Hot Plate

Çizelge 3.1 Omik kontak rezist döndürme parametreleri

Örnek	Fotorezist	Dönme Hızı	İvmelenme	Dönme Süresi	Pişirme Sıcaklığı
A1	AZ5214	4000	1000rpm/s	60 s	100°C
A2	AZ5214	4000	1000rpm/s	60 s	100°C

Örnekler yukarıda belirtilen parametreler ile ışığa maruz bırakılma işlemine hazır hale getirilmiştir. Bu adımda metalizasyon işlemi için desenleme işlemi yapıldığı için rezist'in profili metalizasyon sonrasında çözücü sıvının fotorezist ile temasa geçebileceği şekilde olmalıdır.



Şekil 3.18 Süss marka MA6 Cihazı

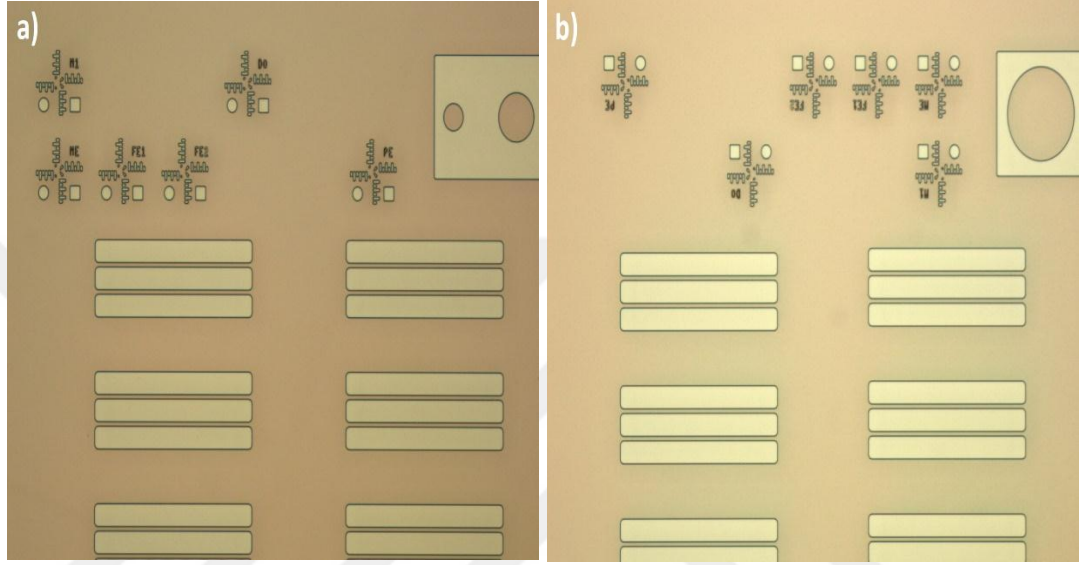
Çizelge 3.2 Omik kontak fotolitografi parametreleri

Örnek	1. Işık Süresi	2. Işık Süresi	Piştirme Sıcaklığı
A1	30 s	60 s	100°C
A2	30 s	60 s	100°C

Örnekler yeterli ışığa maruz bırakıldıktan sonra çok fazla bekletilmeden Geliştirici (Developer) kimyasalına daldırılır. Bu nokta oldukça önemlidir. Işığın gördüğü bölgelerdeki fotorezist'in kimyasal yapısı ışık görmeyen bölgelere göre daha dayanıklıdır ve kimyasalda çözünmeye daha geç tepki vermektedir. Fakat örnek kimyasalda gerektiğinden daha fazla süre bekletildiği takdirde oluşturulan desenlerde genişleme ve daha sonrasında yok olma meydana gelmektedir. Bu yüzden örneği çok dikkatli bir şekilde sıvıyla temas süresinin ayarlanması gerekmektedir.

Çizelge 3.3 Omik kontak fotolitografisi geliştirme parametreleri

Örnek	Geliştirme Süresi
A1	25 s
A2	25 s



Şekil 3.19 a) A1, b) A2 örneğinin omik kontak litografisi mikroskop görüntüsü

Örnekler geliştirici kimyasal ile yeterli süre işleme tabi tutulduktan sonra DI su ile durulanmıştır. Azot yardımıyla kurutulan örnekler hızlı bir şekilde mikroskopta incelenmiş ve desenlerin açıklıkları kontrol edilmiştir. Bu noktada mikroskop ile örnekler oldukça hızlı incelenmiştir çünkü mikroskop'un ışığı fotorezist'i ışığa maruz bıraktığı için desenlerde bozulma meydana gelebilmektedir.

3.7 Omik Metal Kaplaması ve Fotorezist Kaldırma İşlemi

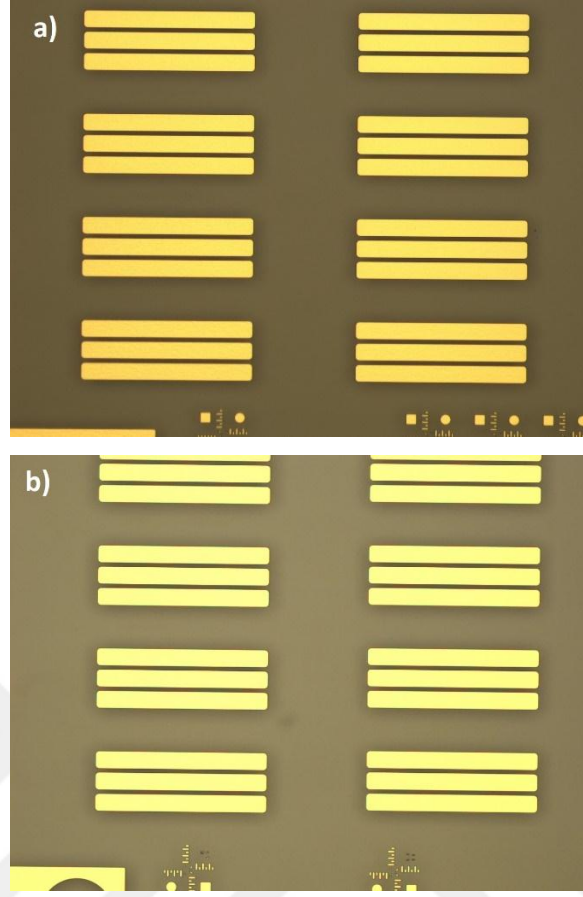
Omik kontak litografisi tamamlanmış örnekler sırasıyla Titanyum, Alüminyum, Nikel ve Altın malzemeleri ile kaplanacaktır. Örnekler, Elektron Demeti ile Buharlaştırma cihazına yerleştirilip yeterli vakum seviyesine ulaşıldığında kaplanmaya başlanmıştır.

Çizelge 3.4 Omik metal kaplama parametreleri

Örnek	Kalınlık/Hız (Ti)	Kalınlık/Hız (Al)	Kalınlık/Hız (Ni)	Kalınlık/Hız (Au)
A1	15nm / 3Å/s	90nm / 4Å/s	50nm / 4.5Å/s	50nm / 4.5Å/s
A2	15nm / 3Å/s	90nm / 4Å/s	50nm / 4.5Å/s	50nm / 4.5Å/s



Şekil 3.20 Oerlikon marka E-Beam Cihazı



Şekil 3.21 a) A1, b) A2 örneğinin omik kontak metalizasyon sonrası

Her metalin ayrı ayrı kaplamasından sonra içinde buldukları potaların soğuması için yaklaşık 5 dakikalık sürelerle beklenilmiştir. Kaplama esnasında alttaş'ın temas ettiği metal blok devir daim su hattı ile soğutulmuştur. Örneğin kaplama esnasında soğutulması kristal yapıdaki taneciklerin (Grain) durulma süresini düşürdüğü için bu durum oldukça önemlidir. Kaplama esnasında örneğin soğutulması kaplanan metalin kalitesini etkilemektedir.

Örnekler kaplama sonrası sistemden çıkartılarak yaklaşık 24 saat boyunca Aseton dolu bir petri kabında bekletilmiştir. Bu süreden sonra örneklerin üzerine şırınga yardımıyla basınçlı olacak şekilde aseton püskürtülmüştür. Bu püskürtme işlemi, aseton'un giremediği bazı noktalardaki fotorezist'in kaldırılıp kaplanan metallerin bazı olmaması gereken desenlerden temizlenmesi için gerçekleştirildi.

3.8 Adacık (Mesa)Yapılarının Oluşturulması

Adacık yapılarının oluşturulması adımımda fotolitografide kullanılan fotorezist AZ 5214'tür. Bu adımdaki fotorezist aynı olmasına rağmen desenler sadece aşındırma için kullanılacağı için pozitif fotolitografi yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 3.5 Omik metal kaplama parametreleri

Örnek	Fotorezist	Dönme Hızı	İvmelenme	Dönme Süresi	Pişirme Sıcaklığı
A1	AZ5214	4000	1000rpm/s	60 s	100°C
A2	AZ5214	4000	1000rpm/s	60 s	100°C

Çizelge 4.5'te verilen parametrelerle örnek ışığa maruz bırakma işlemine hazır hale getirilmiştir. Örnek sonrasında sisteme yüklenerek Vakum Kontak modunda maske ile hizalama işlemi yapılmıştır. Bu aşamadaki hizalama işlemi hassas yapılmalıdır. Omik maske ve Adacık maskesindeki belirteçlerin Vernier ölçeğine göre en az kayma ile hizalanması gerekmektedir. Genellikle 0.5um kayma toleransı kabul edilmekte ve buna göre hizalama yapılmaktadır. Eğer tolerans'ın üzerinde bir kayma hatası ile hizalama gerçekleştirilirse Adacık bölgesi Omik metallerinin desenleri ile iç içe geçmekte bu sebeple aygıtta düzgün çalışmama, performans düşmesi ya da aygıt'ın oluşturulamaması gibi sonuçlar oluşturmaktadır.

Çizelge 3.6 Adacık fotolitografi parametreleri

Örnek	Işık Süresi	Geliştirme Süresi
A1	45 s	20 s
A2	45 s	20 s

Adacık oluşturmasında gerekli fotolitografi parametreleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Fotorezist'in geliştirme adımından sonra kuru aşındırma adımına geçilmiştir. Mesa yapılarının yan duvarlarının olabildiğince dik ve düz olabilmesi için kuru aşındırma

tercih edilmiştir. Kuru aşındırmanın anizotropik özelliği bu adımda oldukça kullanışlıdır.

Aşındırmanın gerçekleştirileceği İndüktif Eşleşmiş Plazma Reaktif İyon Aşındırma (İEA-RIA) cihaz belirlenen reçete ile 15 dakika boyunca koşullandırılmıştır. Koşullandırma adımı özellikle aşındırma işlemlerinde büyük öneme sahiptir. Aşındırma öncesi reaksiyon odasının yan duvarlarının aşındırmanın gerçekleştirileceği gazlar ile tepkimeye girmesini ve gerçek aşındırma esnasında istenilmeyen yan ürünlerin oluşmamasını sağlar. Ayrıca sıcaklığın da gerçek işlem sıcaklığına getirilmesini sağlar.



Şekil 3.22 İEA-RIA cihazı

Çizelge 3.7 Adacık kuru aşındırma parametreleri

Örnek	BCl_3 (Akış)	Cl_2 (Akış)	RF	ICP	Basınç
A1	40 sccm	4 sccm	40 W	120 W	0.7 Pa
A2	40 sccm	4 sccm	40 W	120 W	0.7 Pa

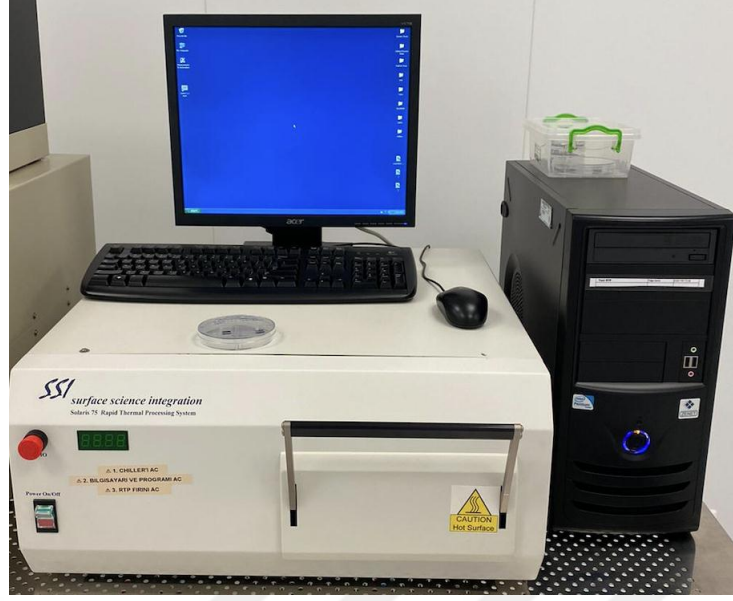
Çizelge 3.7’de verilen parametrelerle Adacık kuru aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. BCl_3 akışı Cl_2 akışına göre daha fazla olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi ise, BCl_3/Cl_2 akış oranında Cl_2 akış miktarının düşürülmesi aşındırma hızını düşüren ve yüzeye verilen zararın azatılmasını sağlamaktadır. İki örnek içinde aşındırma süresi 90 saniye olarak uygulanmıştır. Aşındırma sonrası profilometre’de alınan ölçüm sonucu yaklaşık $\approx 40nm$ olarak gözlenmiştir. Bu kalınlığın yeterli olması sebebiyle ikinci bir ek aşındırma gerçekleştirilmemiştir. Yeterli görülmesinin sebebi ise, Adacık adımının örnek üzerinde birbirlerinden farklı lokasyonlarda bulunan aygıtlar arası oluşabilecek kaçak akımların engellenmesidir. AlGaN yüzetine inşa edilen aygıtların birbirlerinden yalıtılabilmesi için AlGaN katmanından daha yalıtkan bir katmana inilmelidir. Bu katman da GaN tabakasıdır. GaN tabakasının üstüne gelen katmanların toplamı yaklaşık olarak 25nm olması sebebiyle 30nm aşındırma yeterlidir. Daha fazla bir derinliğe inilmesi aygıtlar arasındaki yalıtımın daha fazla olmasını sağlayabilmektedir fakat bu sefer de aşındırma süresi arttığı için epitaksiyel yüzeye verilen zararın daha fazla artırılması sağlanacaktır bu da aygıtların performansında negatif bir etkiye yol açacaktır.

3.9 Omik Metallerin Tavlanması

Ti/Al/Ni/Au (15nm/90nm/50nm/50nm) olarak kaplanan metallerin omik bir kontak haline gelebilmesi için tavlansız epitaksiyel yapıya dolayısıyla 2DEG bölgesine temas edecek şekilde difüzyon ettirilmesi gerekmektedir. GaN yapısının bant aralığı 3.4eV olduğu ve bu bant aralığının çok yüksek olması sebebiyle tavlansız ya da düşük sıcaklıklarda tavlama ile Omik kontak elde edilmesi olası değildir. Bu sebeple örnekler yüksek sıcaklıkta tavlansızdır.

Çizelge 3.8 Omik metal tavlama parametreleri

Örnek	Sıcaklık	Süre
A1	850°C	30 s
A2	850°C	30 s



Şekil 3.23 RTP Cihazı

Tavlama işleminden sonra metallerin yüzeyinde morfolojik bir değişim gözlenmiştir. Bu değişimin sebebi ise metaller arasında yeni bağlar oluşması ve tanecik bölgelerinin büyümesinden dolayıdır. Kaplanan metallerinin sıralamasının ve kalınlıklarının da oldukça büyük önemi vardır. Bu önem direkt olarak omik metallerin dirençlerini belirlemektedir. Ti metali AlGaN yüzeyine ilk temas eden malzemedir. Ti metalinin difüzyon parametreleri ve GaN yapısındaki N atomlarının Ti ile kolay bağ yapabilmelerindedir. Ti metalinin GaN yapısına difüzyonu sonrası oluşan TiN yapısının bant aralığı GaN malzemesi ile neredeyse aynı olmasına rağmen iyi bir iletkenidir. Yapıdaki Au metali kontak anında iyi iletkenlik sağlaması Ni metali ise Au atomlarının difüzyonunu engellemek amacıyla belirlenmiştir.

Tavlama sonrası örneklerdeki TLM (Transmission Line Measurement) desenleri Omik kontak dirençlerinin belirlenebilmesi için ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları “Sonuç ve Yorum” bölümünde incelenecektir.

3.10 SiN Pasivasyon Kaplanması

SiN malzemesi ICPECVD (İndüktif Eşleşmiş Geliştirilmiş Plazma ile Kimyasal Buhar Biriktirme) cihazında kaplanmıştır. Bu adımdaki reçetenin parametreleri oldukça

önemlidir. SiN malzemesi kaplama sonrası Kaynak, Akaç ve Kapı elektrotları arasındaki yalıtımı sağlaması ile kullanılır. Kaplanan dielektrik malzemelerin stresleri o yüzden çok önemlidir. Eğer stres çok fazla olursa öncelikle metallerin stabilizasyonu sonrasında da örnek üzerinde bir stres dolayısıyla kuvvet oluşturur. Bu durum hem aygıt'ın performansını sonrasında total örneğin mekanik dayanımını düşürür.



Şekil 3.24 Sentech Marka ICPECVD Cihazı

Çizelge 3.9 SiN pasivasyon parametreleri

Örnek	Kalınlık
A1	200 nm
A2	200 nm

SiN malzemesinin kalınlığı aygıt performansında elektriksel özelliklerde direkt gözlemlenebilir etkileri vardır. Ayrıca mekanik özellikleri de üstüne gelecek kapı elektrodu'nun mikron mertebesinde kalın olacağı için mekanik stabilizasyonu

önemlidir. Bu sebeple kaplanacak SiN pasivasyon malzemesi 200nm olarak kaplanmıştır.

3.11Kapı Elektrodu Oluşturulması

Bu adımdaki aşındırma ve metalizasyon litografisi adımları Omik metal litografisi adımları ile aynıdır. Litografi sonrası tez'in ana konusu olan farklı Flor tabanlı kimyasallar ile kuru aşındırma işlemine hazır hale getirilmiştir.

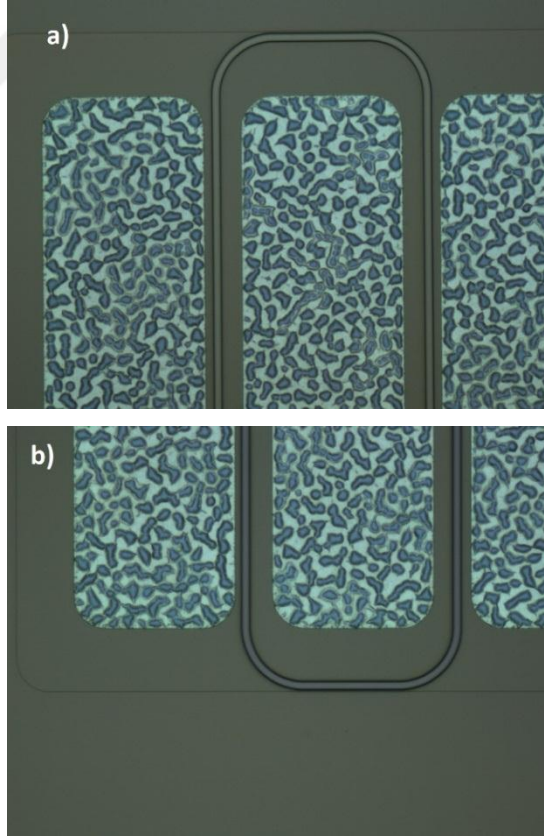
Gerçek örnekleri aşındırmadan önce Si üzerine SiN pasivasyon kaplanmış test örnekleri ile aşındırma hızları kontrol edilmiştir. Fakat test örneklerinden elde edilen aşındırma hızları ile gerçek işlem aynı sürede gerçekleştirilmemiştir. Bunun sebebi ise, test örneklerindeki desenler ile gerçek örneklerde desenlerin boyutları birbirleri ile aynı olmamasıdır. Kuru aşındırma işleminde desenlerin boyutları değiştikçe RIE Lag etkisi sebebiyle farklı aşındırma hızları oluşmaktadır. Test örneklerindeki desen boyutları gerçek örneklerdeki desen boyutlarından daha büyük oldukları için daha fazla aşındırma hızına sahiptirler. O yüzden %15'lik bir ek süre ile gerçek örneklerin tamamen aşındığından emin olunmuştur.

Çizelge 3.10 SiN pasivasyon aşındırma parametreleri

Örnek	SF ₆ (Akış)	CF ₄ (Akış)	Ar (Akış)	RF	ICP	Basınç	Süre
A1	5 sccm	-	20 sccm	40 W	60 W	0.5 Pa	170 s
A2	-	8 sccm	5 sccm	60 W	120 W	0.6 Pa	105 s



Şekil 3.25 Samco marka ICP-RIE Cihazı



Şekil 3.26 a) A1, b) A2 örneği kapı elektrodu kuru aşındırma sonrası mikroskop görüntüsü

Bu aşamaya kadar birebir aynı süreçlerden geçen örnekler bu adımda farklı kimyasal gazlar ile aşındırılmıştır.

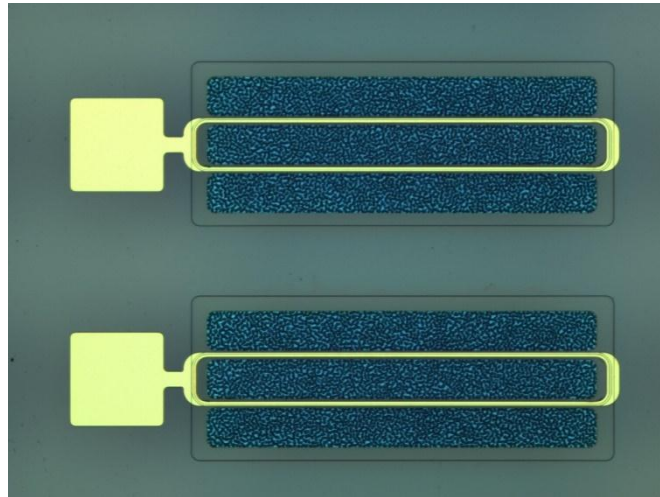
Aşındırma sonrası mikroskop altında kontrol edilen örneklerin açıklıkların bulunduğu bölgelerdeki SiN tabakasının aşındırıldığı gözlemlenmiştir. Aşındırmanın ardından Kapı elektrodu litografisi Omik litografi parametreleri ile yapılmıştır.

Litografi sonrası örnekler E-Beam cihazı ile Ni/Au metalleri ile kaplanmıştır.

Çizelge 3.11 Kapı elektrodu metalizasyon parametreleri

Örnek	Kalınlık/Hız (Ni)	Kalınlık/Hız (Au)
A1	50nm / 4.5Å/s	600nm / 5.5Å/s
A2	50nm / 4.5Å/s	600nm / 5.5Å/s

Örnekler kaplama sonrasında Aseton ile 24 saat boyunca bir petri kabında bekletilmiştir. Sonrasında şırınga ile metallere arındırılan örnek ICP-RIE cihazında O₂ plazma temizliğine 120 saniye boyunca maruz bırakılmıştır. Fotorezist kaldırma işleminden sonra yüzeye tutunmuş fotorezist kalıntıları plazma temizliği ile yok edilmiştir.

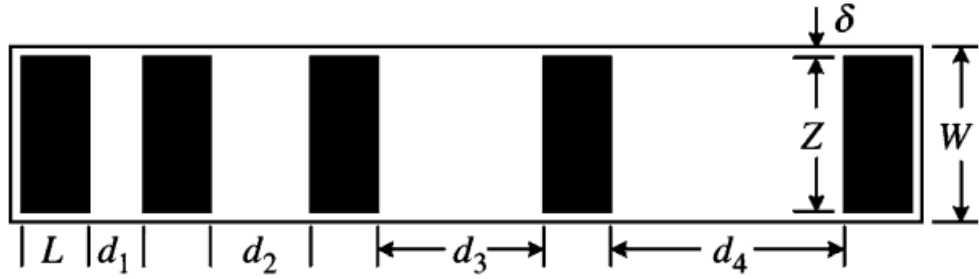


Şekil 3.27 Kapı elektrodu metalizasyonu sonrası mikroskop görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

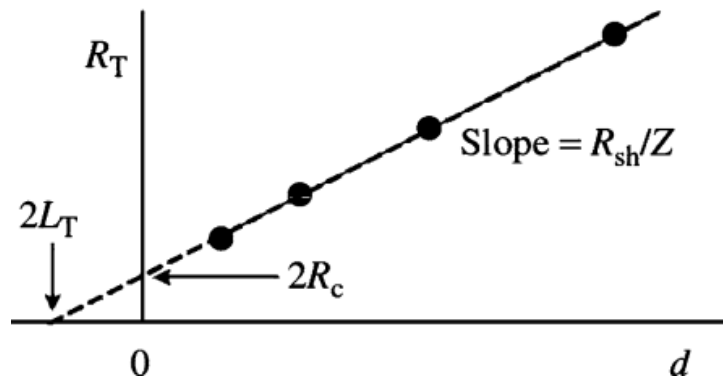
4.1 Kontak Direnci Ölçüm Sonuçları

Yarıiletken aygıt üretiminde metalizasyon adımından sonra oluşturulan omik kontak direncinin aygıt'ın performansında önemli bir rolü vardır. Omik kontak dirençlerini ölçmek için Transmission Line Measurement (TLM) metodu kullanılır.



Şekil 4.1 TLM metodu şematik gösterimi

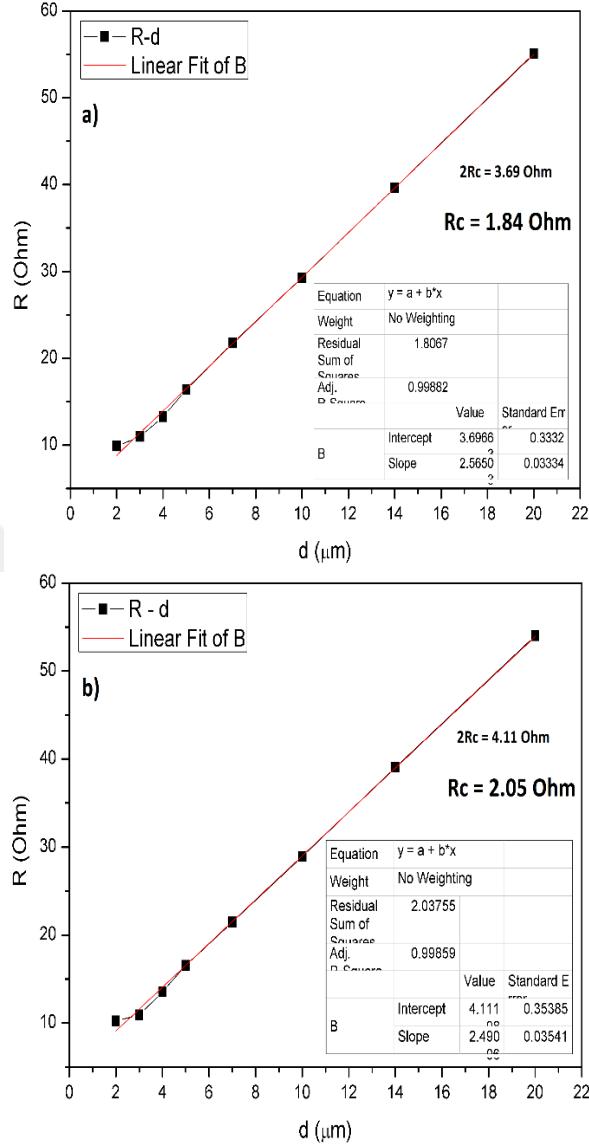
Şekil 4.1'de gösterildiği gibi birbirlerinden farklı uzaklıkta desenlenmiş kontaklar oluşturulduktan sonra dört kontak yöntemi ile bu desenlerden ardışık bir şekilde uzaklığa bağlı olarak direnç ölçümü gerçekleştirilir. Dört kontak yöntemi'nin kullanılmasının amacı, ölçümün gerçekleştirildiği uç'ların dirençlerinin etkisini sıfıra indirip sadece omik metallerin dirençlerini ölçebilmektir.



Şekil 4.2 TLM ölçüm sonucu ve veri analizi

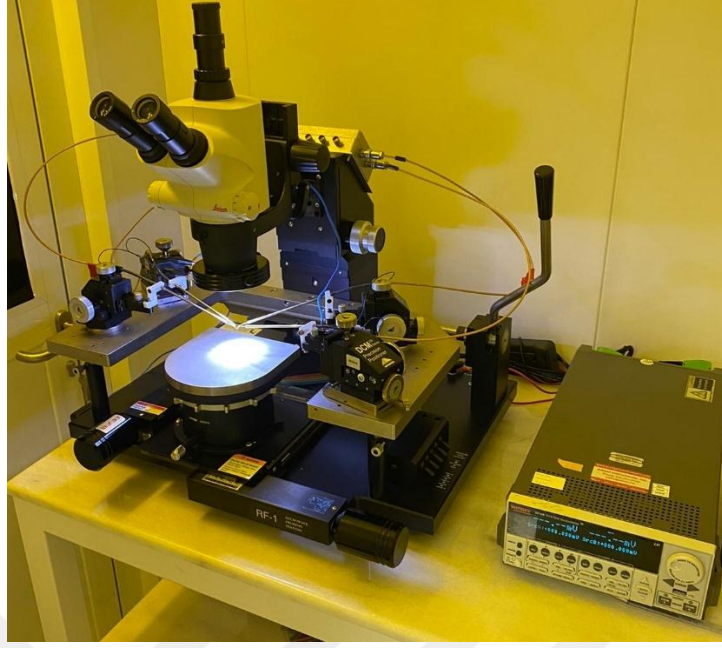
TLM ölçümü tamamlandıktan sonra her bir uzaklığa denk gelen direnç değeri kaydedilerek uzaklığa karşı direnç grafiği çizdirilir. Çizdirilen grafiğin Y eksenini

kestiği nokta kontak direncinin iki katına eşittir. Grafiğin Y eksenini kestiği noktayı ikiye bölerek omik kontak direnç değeri elde edilir.



Şekil 4.3 a) A1, b) A2 örneğinin TLM ölçüm sonuçları

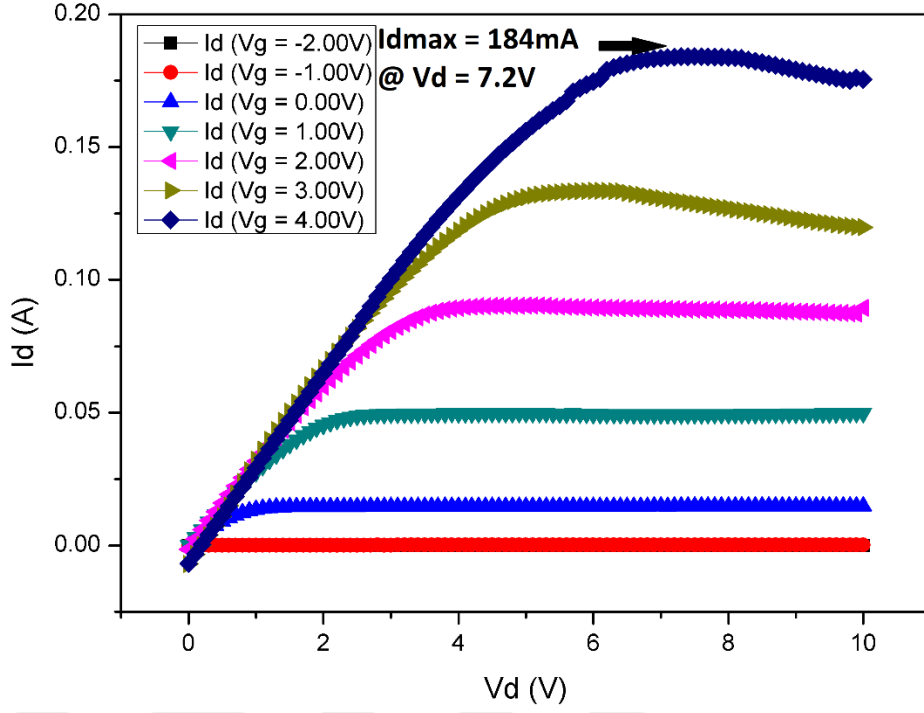
Yukarıdaki şekilde A1 ve A2 örneğinin TLM ölçüm sonuçları gösterilmektedir. 8 adımda gerçekleştirilen ölçümlerin sonucunda omik kontak dirençlerine ulaşılmıştır. Literatürde genellikle GaN transistörlerin omik kontak dirençleri 0.5 Ohm – 1 Ohm arasında olarak görülmektedir. Fakat bu durum epitaksiyel yapıdaki katmanların kalınlıkları, katkılanma oranları, büyütme kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü ile değişebilmektedir.



Şekil 4.4 TLM ölçüm düzeneği

4.2 Akım – Gerilim (I-V) Ölçüm Sonuçları

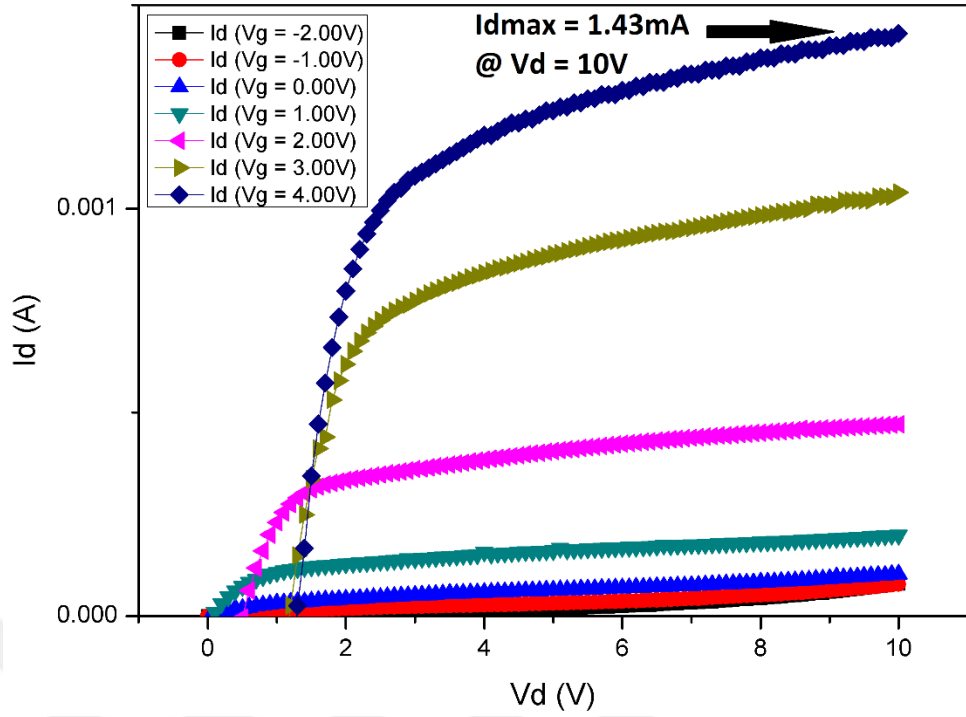
Transistörlerde DC olarak en önemli performans ölçütlerinden birisi olarak I_d-V_d ölçümü aygıt'ın ne kadar güç çıktısına sahip olacağına bir ölçütüdür. Ayrıca farklı Kapı elektrodu gerilim değerlerinde aygıtın farklı Akış akımı değerlerine de ulaşabilmesi gerekmektedir. Bu durum bir transistör'ün doğal davranışdır.



Şekil 4.5 A1 örneği I_d - V_d ölçüm sonucu

A1 örneğinin I_d - V_d ölçümü 7 farklı Kapı elektrodu geriliminde alınmıştır. Şekil 4.5’den görüldüğü üzere Kapı elektrodu’na uygulanan gerilim 0V ve sonrasındaki gerilim değerlerinde aygıt’ın üzerinden akım geçtiği yani Kapı elektrodu’nun açıldığı gözlemlenmektedir.

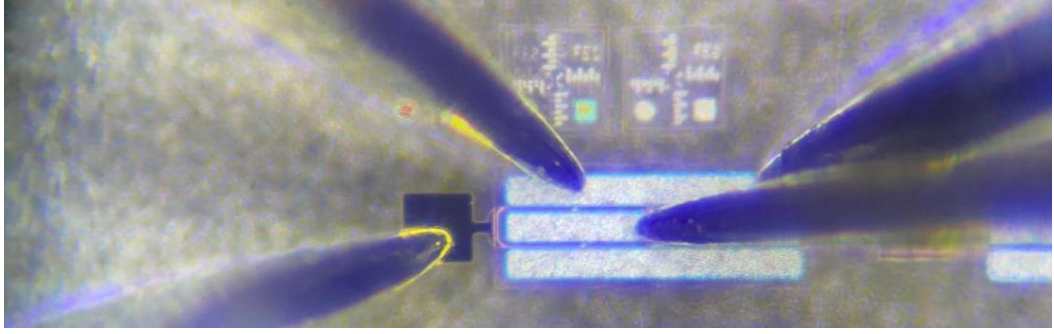
Aygıt’ın 4V kapı elektrodu ve 7.2V Kaynak-Akaç arası gerilimlerinde 184mA maksimum akım değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca farklı olan tüm Kapı elektrodu gerilimlerinde aygıt’ın göstermiş olduğu “Doğrusal Bölge” Ron değerleri’nin birbirleri ile aynı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum Kapı elektrodu’nun oluşturulması adımının başarılı gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 4.6 A2 örneği I_d - V_d ölçüm sonucu

Şekil 4.6'da görülen CF_4 gazı ile oluşturulan A2 örneğinin Kapı elektrodu beklenen performansı sergilememiştir. Birbirleri ile özdeş olan sadece Kapı elektrodu oluşturulması adımıyla farklı kimyasal gazlara maruz kalan örnekler arasında belirgin elektriksel karakteristik farklılıkları gözlenmektedir.

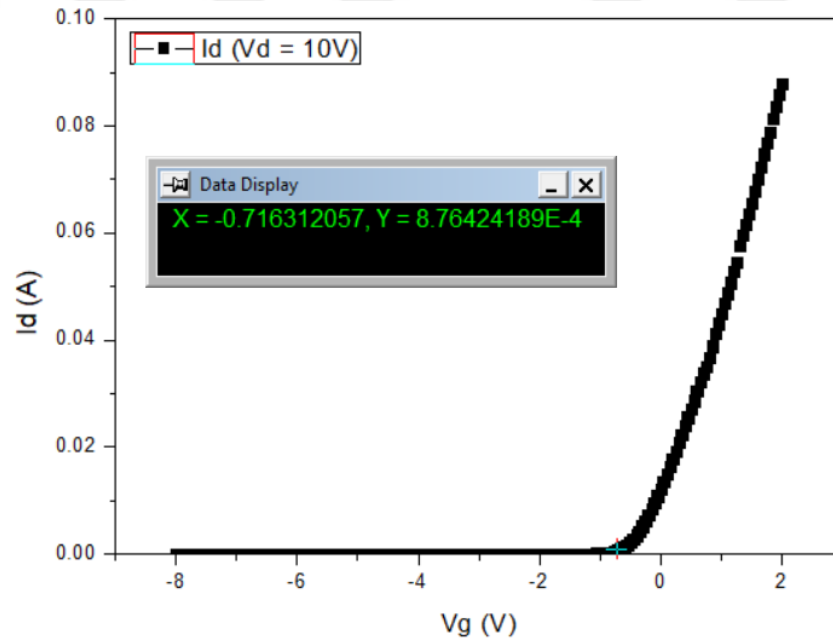
A2 örneğinin I_d - V_d grafiğinde her farklı Kapı elektrodu geriliminde farklı akım değerleri geçirmesine rağmen belirli bir Kaynak-Akaç geriliminde doyuma ulaşmaması ve omik bir davranış sergileyerek artan gerilime göre artan bir akım karakteristiği sergilemesi CF_4 gazı ile oluşturulmuş aygıt'ın tam anlamıyla düzgün çalışmadığını göstermektedir. Ayrıca, her farklı Kaynak-Akaç geriliminde I_d - V_d grafiğinde görülen eğrilerin R_{on} değerlerinin birbirinden farklı olması da aygıt'ın stabil çalışmadığını göstermektedir.



Şekil 4.7 Aygıtların Id-Vd ölçüm gösterimi

4.3 Aygıt Karakteristiği ve Kanal İletkenliği

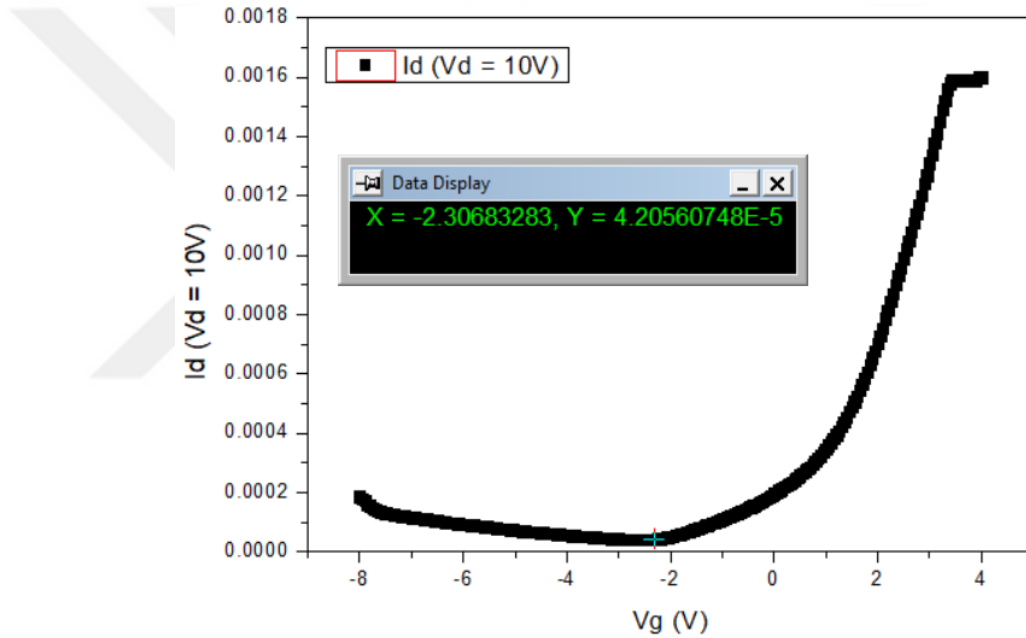
Genel olarak GaN transistörler çalışma karakteristiklerine göre ikiye ayrılmaktadır. Normal olarak kapalı (Normally-Off) ve normal olarak açık (Normally-On) aygıtlardır. Yaygın kullanım olarak güç çıktısı yüksek istenilen GaN transistörler normal olarak kapalı, hız (frekans) çıktısı yüksek istenilen aygıtlar ise normal olarak açık aygıtlardır. Bu tez çalışmasında üretilen aygıtlar normal olarak açık olan aygıtlardır.



Şekil 4.8 A1 örneğinin Id-Vg ölçüm sonucu

Şekil 4.8’de görülen A1 örneğinin Id-Vg grafiğinde aygıt’ın -0.71V değerinde tepki vermeye başladığını ve sonrasında üzerinden akım geçirmeye başladığı görülmektedir ve değişen Kapı elektrodu gerilimine bağlı olarak yüksek bir şekilde Kaynak-Akaç arası akımın arttığı gözlemlenmektedir. Bu durumda A1 örneğinin Kapı elektrodu’nun -0.71V değerinde açıldığı anlaşılmaktadır.

Aynı davranış A1 ve A2 örneklerinin Id-Vd grafiklerinde de gözlemlenmektedir. Kapı elektrodu’na uygulanan gerilim 0V ve üzeri gerilimlerde Kaynak ve Akaç üzerinden akım geçmekte 0V ve altı değerlerde aygıt’ın herhangi bir tepki vermediği gözlemlenmektedir.

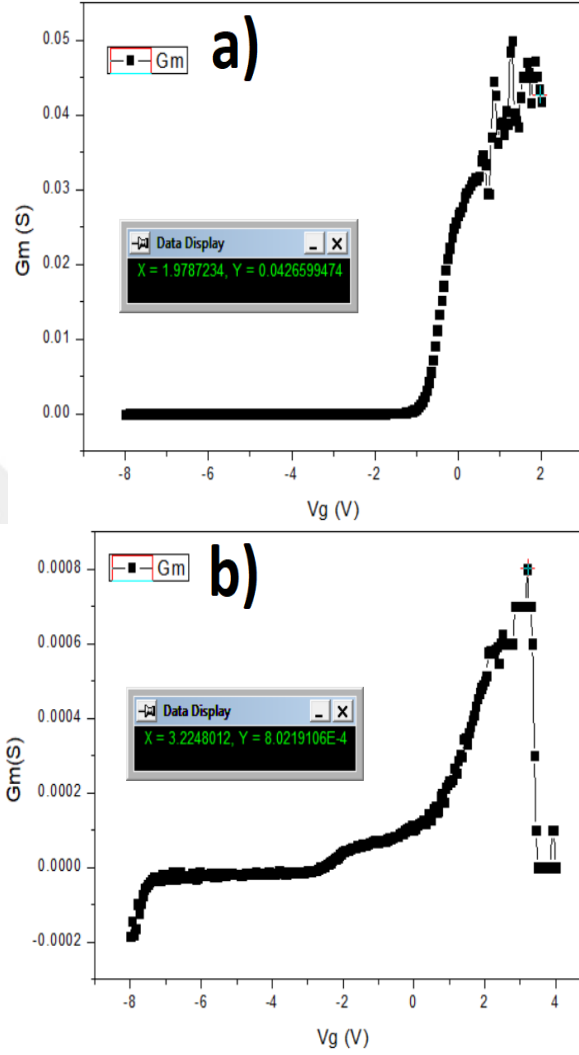


Şekil 4.9 A2 örneğinin Id-Vg ölçüm sonucu

Şekil 4.9’da A2 örneğinin Id-Vg grafiğinde aygıt’ın -2.3V değerinde tepki vermeye başladığı görülmüştür. CF₄ gazı ile Kapı elektrodu oluşturulan A2 örneğinin Id-Vd grafiğinde olduğu gibi Id-Vg grafiğinde de beklenen karakteristiği sergilemediği gözlemlenmiştir.

A2 örneğinin Id-Vg ölçümü A1 örneğinden farklı olarak Kapı elektrodu gerilimi daha yükseğe çıkılarak ölçülmüştür. Bunun sebebi ise aygıt’ın akım doyumuna ulaşacağı noktaya kadar ne kadar fazla akım çekebildiğini gözlemlemektir. İki farklı aygıt’ın Id-

V_g grafiğinde maksimum çektikleri akım arasında çok büyük bir fark gözlemlenmiştir. Ayrıca A2 örneğinin I_d-V_g grafiği eğrinin şeklinin normal bir transistor aygıtı gibi davranmadığını da göstermiştir.



Şekil 4.10 a) A1, b) A2 örneğinin kanal iletkenliği grafikleri

GaN transistörlerde kanal iletkenliği de oldukça önemli bir performans parametresidir. Kaynak ve Akaç arasındaki akımın iletimini sağlayan 2DEG bölgesinin ne kadar iletken olduğuna dair bilgi vermektedir. Ayrıca RF uygulamalarda çıkış frekansını doğrudan belirlemektedir. Hız uygulamalarında kanal iletkenliğinin oldukça yüksek olması beklenmektedir.

Kanal iletkenliğini doğrudan ölçmenin bir yolu olmadığından dolayı Id-Vg grafiğinin birinci dereceden türevi alınarak oluşan eğrinin tepe yaptığı noktadaki değer bulunur. Literatürde aygıtların performans parametreleri mm başına olarak belirlendiği için Id-Vg grafiğinin türevindeki tepe noktası aygıt boyutuna bölünerek kanal iletkenliği değerine ulaşılır. Üretilen aygıtların boyutları 500 μm 'dir.

Şekil 4.10'da A1 ve A2 örneklerinin kanal iletkenliği grafikleri görülmektedir. A2 örneğinin kanal iletkenliği A1 örneğine göre oldukça düşüktür.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kapı elektrodu oluşturma adımına kadar özdeş olarak üretilmiş A1 ve A2 örnekleri ayrı ayrı Kapı elektrodu oluşturma adımında SF₆ ve CF₄ kimyasal gazları ile aşındırılmıştır. “Araştırma Bulguları” bölümünde aygıtların sergiledikleri elektriksel özellikler birbirlerinden oldukça farklı gözlemlenmiştir. Bu bölümde farklılıkların sebepleri tartışılacaktır.

Çizelge 5.1 A1 ve A2 örnekleri elektriksel karakterizasyon parametreleri

Örnek	Rc	Idmax	Vg	Gm
A1	1.84 Ohm	184 mA	-0.71 V	90 mS/mm
A2	2.05 Ohm	1.43 mA	-2.3 V	1.6 mS/mm

Çizelge 5.1’de görülen parametrelerde sadece omik kontak dirençlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. A1 ve A2 örneklerinin Kapı elektrodu oluşturma adımında farklı kimyasallar ile aşındırılmasında yanal kesitten aygıtların Kapı elektrodu SEM görüntüleri incelenmiştir.



Şekil 5.1 A1 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü



Şekil 5.2 A2 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü



Şekil 5.3 A1 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü



Şekil 5.4 A2 örneği Kapı elektrodu SEM görüntüsü

A1 ve A2 aygıtlarında elektriksel karakteristik olarak büyük bir fark gözlenmiştir. A2 örneğinde doyum akımı'nın çok düşük olması Kapı elektrodu'nun iletim kanalını yeterince iyi kontrol edememesinden ya da CF₄ gazı ile yapılan aşındırma esnasında aşındırma yapılan desenlerin yan duvarlarında aşındırmadan kaynaklanan yan ürünlerin yan duvarları ve aşındırma yapılan bölgelere de kaplandığından oluşabilmektedir. C atomu içeren CF₄ gazından kaynaklanan yan ürünlerin dielektrik malzeme olarak davranmasından dolayı Kapı elektrodu ile epitaksiyel yapı arasındaki Schottky kontağın bariyer büyüklüğünü arttırdığından dolayı elektriksel karakteristiği beklenen seviyelerde çıkmasını engelleyebilmektedir.

Literatürde genellikle kendiliğinden açık olarak çalışan GaN Transistör aygıtları, yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip pasivasyon malzemelerinin Kapı elektrodu ve epitaksiyel katman arasına kaplanarak oluşturulmaktadır. Çizelge 5.1'de görülen açılma gerilimleri arasındaki fark'a bakıldığında özellikle A2 örneğinin açılma gerilimi kendiliğinden açık aygıtların açılma gerilimlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple CF₄ gazı ile yapılan aşındırmada yan duvarların ve hatta aşındırmanın yapıldığı taban bölgesinin ince bir tabaka olarak aşındırma yan ürünü ile kaplandığı fikri üzerinde durulmaktadır.

SF₆ ve CF₄ gazları ile ayrı ayrı oluşturulmuş reçeteler arasında gaz akışları ve plazma güç parametrelerinin farklı olduğu Çizelge 4.10'da görülmektedir. Aşındırma parametrelerinin farklılığını tam anlamıyla gözlemek için reçetelerin birebir aynı oluşturulması için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar esnasında SF₆ ve CF₄ gazları ile aynı reçete parametrelerinde stabil bir plazma prosesi sağlanamamıştır.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görülen Taramalı Elektron Mikroskobu görüntülerine göre SiN_x dielektrik malzemesi ile yalıtılan örnek yüzeyi morfolojik olarak iyi görünmektedir. Genellikle örnek yüzeyinde morfolojik olarak proses esnasında oluşan sorunlardan dolayı aygıt performansında değişiklikler gözlenebilmektedir fakat bu durum A1 ve A2 örneklerinde gözlenmemiştir.

KAYNAKLAR

- Adak, S., Swain, S. K., Pardeshi, H., Rahman, H., & Sarkar, C. K, "Effect of AlN Spacer Layer Thickness on Device Performance of AlInN/AlN/GaN MOSHEMT" 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation (2015)
- A. Kubar, B.Kaur, M. Arora, "Evolution of Transistor Technology from BJT to FinFET – A Study" International Journal of Computer Applications, Oct. 2016
- Anonymous, 2022. Web Sitesi: <https://www.elprocus.com/difference-between-bjt-and-fet/> Erişim Tarihi: 2022
- Anonymous, 2002. Web Sitesi: https://www.inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Spectroscopic_reflectometry Erişim Tarihi: 2022
- Anonymous, 2005. Web Sitesi: https://www.vlsiguru.com/layout-ppt-cmos_fabracion Erişim Tarihi : 2022
- Anonymous, 2010. Web Sitesi: <https://www.stringfixer.com/tr/Photoresist> Erişim Tarihi: 2022
- Bhim Prasad Kafle, Chemical Analysis and Material Characterization by Spectrophotometry "Chapter 6 - Introduction to nanomaterials and application of UV–Visible spectroscopy for their characterization" (2020) pp. 147-198
- Bhimsen, 2022. Web Sitesi: <https://www.electronics-fun.com/bipolar-junction-transistor/> Erişim Tarihi: 2022
- B. J. Baliga, "Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications," IEEE Electron Device Lett., vol. 10, pp. 455–457, Oct. 1989.
- B. J. Baliga, "Semiconductors for high-voltage, vertical channel field effect transistors," J. Appl. Phys., vol. 53, no. 3, pp. 1759–1764, Mar. 1982.
- Caro Bayo, M. Á. 2013. Theory of elasticity and electric polarization effects in the group-III nitrides. PhD Thesis, University College Cork.
- Chernykh, M. Y., Ezubchenko, I. S., Mayboroda, I. O., & Zhanaveskin, M. L., "Influence of the growth conditions of LT-AlN on quality of HT-AlN growth on Si (111) by metalorganic chemical vapor deposition" Journal of Crystal Growth 507, (2019), pp. 200-204
- Colin, 2022. Web Sitesi: <https://www.colinjs.com/elec/basicfab/fab.htm> Erişim Tarihi: 2022
- D. Comelli et al., "The Study of the Degradation of Cadmium Yellow Paints Through Their Photoluminescence Emission from Trap States" Proceedigs Volume 11058, Optics for Arts, Architecture and Archaeology VII; 1105806 (2019)
- Gudkov, A. G., Shashurin, V. D., Vyuginov, V. N., Tikhomirov, V. G., Vidyakin, S. I., Agasieva, S. V., ... Chizhikov, S. V. (2017). "The Influence of AlGaN Barrier-Layer Thickness on the GaN HEMT Parameters for Space Applications" Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016", 273–280.

- G. T. Dang, A. P. Zhang, F. Ren, X. A. Cao, S. J. Pearton, H. Cho, J. Han, J. Chyi, C. M. Lee, C. C. Chuo, S. N. Chu, and R. G. Wilson, "High voltage GaN Schottky rectifiers," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, pp. 692–695, Apr. 2000.
- Heikman, S., Keller, S., Wu, Y., Speck, J. S., DenBaars, S. P., & Mishra, U. K. (2003). Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 93(12), pp. 10114–10118.
- Huang, Z., Zhang, Y., Zhao, B., Yang, F., Jiang, J., Deng, G. Song, J. (2015). "Effects of AlN buffer on the physical properties of GaN films grown on 6H-SiC substrates" *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(2), 1738–1744.
- J.L. Hudgins, G.S. Simin, E.Santi, M.A. Khan, "An assesment of wide bandgap semiconductors for power devices" *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, pp. 907-914, May 2003.
- J. S. Byun, J. J. Yoon, Y. D. Kim, E. Ahn, E. Yoon, S. J. An and G.-C. Yi, "Multilayer Calculation on SR Signal during Growth of ZnO Nanorod" *J. Korean Phys. Soc.* 53(1), 388 - 391 (2008)
- Kin Fong Lei, Chapter 1: Materials and Fabrication Techniques for Nano- and Microfluidic Devices , in *Microfluidics in Detection Science: Lab-on-a-chip Technologies*, 2014, pp. 1-28
- Koizumi, A., Mitchell, B., Dierolf, V., & Fujiwara, Y. (2016) "Growth of Eu-doped GaN and its magneto-optical properties" *Rare Earth and Transition Metal Doping of Semiconductor Materials*, 259–280.
- Mitsubishi Electric Corporation, "Mitsubishi Electric Develops High-output, High-efficiency GaN Power Amplifier on Si Substrate for Mobile Communications Base Stations" Tokyo, June 20, 2012
- Mojtaba Hosseinzadeh Sani, Saeed Khosroabadi, "Improving Thermal Effects and Reduction of Self-heating Phenomenon in AlGaIn/GaN/Si Based HEMT" *Journal of Electronic Materials* (50), 2295-2304 (2021)
- N. Onojima, J. Suda, H. Matsunami High-quality AlN by initial layer-by-layer growth on surface-controlled 4H-SiC(0001) substrate *Japanese J. Appl. Phys.*, 42 (Part 2, No. 5A) (2003), pp. L445-L447
- O. Ambacher, J. Majewski, C. Miskys, A. Link, M. Hermann, M. Eickhoff, M. Stutzmann, F. Bernardini, V. Fiorentini, V. Tilak, B. Schaff, and L. Eastman, "Pyroelectric Properties of Al(In)GaIn/GaN Hetero- and Quantum Well Structures," *J.Phys.:Condensed Matter*, vol. 14, no. 13, pp. 3399-3434, 2002.
- Oğuzman, I. H., Bellotti, E., Brennan, K. F., Kolník, J., Wang, R., & Ruden, P. P. (1997). Theory of hole initiated impact ionization in bulk zincblende and wurtzite GaN. *Journal of Applied Physics*, 81(12), 7827–7834.
- Othman, N. A. F., Rahman, S., Wan Muhamad Hatta, S. F., Soin, N., Benbakhti, B., & Duffy, S., "Design optimization of the graded AlGaIn/GaN HEMT device performance based on material and physical dimensions" *Microelectronics International*, 36(2), (2019), pp. 73–82

- R.B.N. Araujo, J. Almeida, A.F. Silva, “ Electronic Properties of III-Nitride Semiconductors: A First Principles Investigation Using the Tran-Baha Modified Becke-Johnson Potential” *Journal of Applied Physics*, 114(18):183702-183702-6 (2013)
- R.R. Pela, C. Caetano, M. Marques, L.G. Ferreira, J. Furthmüller, L.K. Teles, “Accurate Band Gaps of AlGa_N, InGa_N, AlIn_N alloys calculations based on LDA – ½ Approach” *Appl. Phys. Lett.* 98, 151907 (2011)
- S. Keller, G. Parish, P.T. Fini, S. Heikman, C.H. Chen, N. Zhang, S.P. DenBaars, U.K. Mishra, Y.-F. Wu, “Metalorganic chemical vapor deposition of high mobility AlGa_N/Ga_N heterostructures” *J. Appl. Phys.*, 86 (10) (1999), pp. 5850-5857
- Shahzaib Anwar, Sardar Muhammad Gulfam, Bilal Muhammad, Syed Junaid Nawaz, Khursheed Aurangzeb and Mohammad Kaleem, “Analysis and Characterization of Normally-Off Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors” *Computers, Materials and Continua* 69(1), (2021), pp. 1021-1037
- Sun, Kang, Zheng, Lu, Tian, Wei, ... Zhang. (2019). Review of the Recent Progress on GaN-Based Vertical Power Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Electronics*, 8(5), 575.
- S. Turhan, AlGa(In)N/AlN/GaN Heteroeklem Yapıların Enerji Bant Profillerinin ve Taşıyıcı Yoğunluklarının Nextnano 3 Simülasyon programı Kullanarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2011.
- Triebel, 1995. Web Sitesi: <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/triebl/node20.html> Erişim Tarihi: 2022
- T. P. Chow and R. Tyagi, “Wide bandgap compound semiconductors for superior high voltage unipolar power devices,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 41, pp. 1481–1483, Aug. 1994.
- T. Wonglakhon, D. Zahn, “Interaction potentials for modelling GaN precipitation and solid state polymorphism” *J. Phys: Condens. Matter* 32, 2020
- Ueno M, Yoshida M, Onodera A, Shimomura O and Takemura K 1994 Stability of the wurtzite-type structure under high pressure: GaN and InN *Phys. Rev. B* 49 14–21
- Vinod Kumar Khanna, “Integrated Electronics” (2016), pp. 48
- Yao, K., Min, X., Shi, S., & Tan, Y. (2018). Volatilization Behavior of β-Type Ti-Mo Alloy Manufactured by Electron Beam Melting. *Metals*, 8(4), 206.
- Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto, “Threading dislocations in heteroepitaxial AlN layer grown by MOVPE on SiC (0 0 0 1) substrate” *J. Cryst. Growth.*, 298 (2007), pp. 310-315
- WatElectronics, 2022. Web Sitesi: <https://www.watelectronics.com/basics-of-n-channel-mosfet-working-and-characteristics/> Erişim Tarihi: 2022
- W.T. Franke, Comparison of switching and conducting performance of SiC-JFET and SiC-BJT with a state of the art IGBT, Conference: Power Electronics and Applications, Oct. 201

- Xia H, Xia Q and Ruoff A L 1993 High-pressure structure of gallium nitride: Wurtzite-to-rocksalt phase transition Phys. Rev. B 47 12925–8
- Xinhua Wang, Sen Huang, Yingkui Zheng, Ke Wei, Xiaojuan Chen, Haoxiang Zhang, & Xinyu Liu, “Effect of GaN Channel Layer Thickness on DC and RF Performance of GaN HEMTs With Composite AlGaIn/GaN Buffer” IEEE Transactions on Electron Devices, 61(5), (2014), pp. 1341–1346
- Zhiyu Zhang, Ruoqiu Wang, “Donglin Xue Microfabrication by Laser Lithography Combined with Ion Etching” Micro and Nano Fabrication Technology (2018), pp. 1-28.

