



**GaN HEMT AYGITLARDA ÇİFT KATMANLI Si_3N_4 DİELEKTRİK
TABAKASININ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ**

Yıldırım DURMUŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Yıldırım DURMUŞ

19/01/2023

GaN HEMT AYGITLARDA ÇİFT KATMANLI Si_3N_4 DİELEKTRİK TABAKASININ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Yıldırım DURMUŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

GaN HEMT teknolojisi; yüksek elektron hareketliliği, yüksek kırılma gerilimi gibi özellikleri nedeni ile günümüzde yeni nesil yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında en önde yer almaktadır. Yüksek kırılma gerilimi ve yüksek elektron hareketliliği, AlGaIn/GaN malzeme yapısı ve kullanılan pasivasyon tabakası ile sağlanmaktadır. GaN HEMT aygıtlarda epitaksiyel malzeme kaynaklı kusur etkilerini azaltmak ve yüksek elektron hareketliliğini korumak için pasivasyon tabakası çok önemlidir. Yüksek çıkış gücü sağlayabilmek için de iyi bir pasivasyon tabakası gereklidir. Bu tez çalışmasında AlGaIn/GaN malzeme yapısına sahip epitaksiyel yapılar büyütülmüş ve bu yapıların karakterizasyonları yapılmıştır. Bu yapılar üzerine fotolitografi, elektron demeti litografisi, metal kaplama, kuru aşındırma ve pasivasyon kaplaması gibi yöntemlerle GaN HEMT aygıtların üretimi yapılmıştır. Üretimde pasivasyon kaplaması için farklı büyüme sıcaklığına ve farklı kalınlığa sahip çift Si_3N_4 dielektrik tabakası kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların GaN HEMT aygıtların elektriksel performansını nasıl etkilediğine bakılmış ve en iyi sonucu veren sıcaklık ve kalınlık değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda; uygun tasarlanan çift Si_3N_4 dielektrik tabakasının, GaN HEMT aygıtın güç performansını tek Si_3N_4 dielektrik tabakasına göre oldukça arttırdığı ortaya çıkmıştır.

Bilim Kodu : 20226
Anahtar Kelimeler : GaN, AlGaIn, HEMT, Si_3N_4 , MOCVD, pasivasyon
Sayfa Adedi : 91
Danışman : Doç. Dr. Ceren TAYRAN

ELECTRICAL PROPERTIES OF DOUBLE-LAYER Si_3N_4 DIELECTRIC LAYER IN
GaN HEMT DEVICES

(M. Sc. Thesis)

Yıldırım DURMUŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

GaN HEMT technology; Due to its features such as high electron mobility and high breaking voltage, it is at the forefront of new generation high power and high-frequency applications today. High breakdown voltage and high electron mobility are provided by the AlGaIn/GaN material structure and the passivation layer used. The passivation layer is very important in order to reduce the effects of defects caused by epitaxial materials in GaN HEMT devices and to protect high electron mobility. A good passivation layer is also required to provide high output power. In this thesis study, epitaxial structures with AlGaIn/GaN material structure are grown and characterizations of these structures are made. GaN HEMT devices were fabricated on these structures by methods such as photolithography, electron beam lithography, metal plating, dry etching and passivation coating. Studies have been carried out using double Si_3N_4 dielectric layers with different growth temperatures and different thicknesses for passivation coating in production. It has been examined how these studies affect the electrical performance of GaN HEMT devices and it has been tried to determine the temperature and thickness values that give the best result. As a result of the study, it was revealed that the properly designed double Si_3N_4 dielectric layer significantly increased the power performance of the GaN HEMT device compared to the single Si_3N_4 dielectric layer.

Science Code : 202226

Key Words : GaN, AlGaIn, HEMT, Si_3N_4 , MOCVD, passivation

Page Number : 91

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ceren TAYRAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca her konuda yardımlarını, desteklerini, bilgilerini ve tecrübelerini aktaran tez danışmanın sayın Doç. Dr. Ceren TAYRAN'a, bu tez çalışması için GaN HEMT örneklerin büyütülmesi, üretilmesi ve karakterizasyonları için tüm altyapı olanaklarını sağlayan sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a, aygıtların üretiminde her konuda destek olan sevgili arkadaşlarım Gökhan KURT, Doğan YILMAZ ve Hüseyin ÇAKMAK'a, HEMT yapısı büyütmesinde tüm bilgi ve desteklerini sağlayan Mustafa ÖZTÜRK'e, özellikle elektriksel karakterizasyon konusunda hiçbir yardımı esirgemeyen Gurur SALKIM'a, aygıtların güç ölçümlerinde tüm destekleri için Sinan OSMANOĞLU'na, tez çalışması boyunca yardımcı olan NANOTAM/ABMN çalışanlarına, yaramazlıkları, tatlılıkları, bitmeyen hastalıkları ile hayatıma renk katan kızım İlkim Mila ve oğlum Yusuf Ali'ye, daima bana yardımcı olan ve güç veren sevgili eşim Songül'e, sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GaN HEMT AYGITI.....	3
2.1. GaN Malzeme Özellikleri	3
2.2. GaN Malzeme Yapısı.....	5
2.3. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısı.....	7
2.3.1. SiC alttaş	8
2.3.2. AlN çekirdeklenme katmanı	9
2.3.3. GaN tampon katmanı	9
2.3.4. AlN ara geçiş katmanı.....	9
2.3.5. AlGaIn katmanı	9
2.3.6. GaN kapak katmanı.....	10
2.4. AlGaIn/GaN Yapıda Polarizasyon.....	10
2.5. AlGaIn/GaN Yapıda 2DEG Oluşum Mekanizması	11
2.6. GaN HEMT Çalışma İlkesi.....	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15

	Sayfa
3.1. Epitaksiyel Malzemenin Büyütme ve Karakterizasyon Yöntemleri	15
3.1.1. Metal organik kimyasal buhar kaplama (MOCVD) ile büyütme yöntemi	15
3.1.2. Epitaksiyel yapıların karakterizasyon yöntemleri	19
3.2. GaN HEMT Fabrikasyon ve Karakterizasyon Yöntemleri.....	24
3.2.1. Fotolitografi.....	24
3.2.2. Elektron demeti litografisi.....	26
3.2.3. Kuru aşındırma yöntemi.....	29
3.2.4. Silisyum nitrür (Si_3N_4) dielektrik kaplaması.....	31
3.2.5. Elektron demeti buharlaştırma ile metal kaplaması	33
3.2.6. Hızlı Isıl İşlem (RTP) Yöntemi	36
3.2.7. İletim hattı modeli yöntemi (TLM)	37
3.2.8. Profilometre ile kalınlık ve stress ölçümü.....	39
3.2.9. Elipsometre ile kalınlık ve kırıcılık indisi ölçümü	41
3.3. GaN HEMT Yapısının Büyütülmesi ve Karakterizasyonları.....	42
3.3.1. MOCVD ile GaN HEMT yapıların büyütülmesi	42
3.3.2. GaN HEMT epitaksiyel yapıların karakterizasyonları.....	44
3.4. GaN HEMT Aygıtların Fabrikasyonu.....	51
3.4.1. Örnek yüzeyi hazırlama	52
3.4.2. Mesa adımı	52
3.4.3. Omik kontak adımı.....	55
3.4.4. Silisyum nitrür (Si_3N_4) dielektrik kaplaması adımı	57
3.4.5. Kapı (gate) kontak adımı.....	61
3.4.6. Si_3N_4 dielektrik açıklığı adımı	65
3.4.7. Hava köprüsü destek adımı	66

	Sayfa
3.4.8. Ara bağlantı metali adımı.....	68
4. ÖLÇÜMLER.....	71
4.1. Optik Ölçümler.....	71
4.2. Elektriksel Ölçümler	72
4.2.1. Omik kontak ölçümleri	72
4.2.2. GaN HEMT aygıtların DC ölçümleri.....	75
4.2.3. GaN HEMT aygıtların RF güç ölçümleri.....	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. GaN ve diğer yarıiletken malzemeler için bazı elektriksel ve mekanik özellikler	3
Çizelge 2.2. Wurtzite kristal yapısındaki GaN ve diğer yarıiletkenlerin 300 K'daki örgü parametreleri	6
Çizelge 2.3. MBE ve MOCVD yöntemlerinin karşılaştırılması	7
Çizelge 2.4. AlGaIn/GaN HEMT malzeme yapısı	8
Çizelge 2.5. GaN epitaksiyel yapılarındaki alttaşların mekanik ve termal özellikleri....	8
Çizelge 3.1. 1.Çift katmanlı Si ₃ N ₄ dielektrik kaplaması çalışması detayları	58
Çizelge 3.2. 2.Çift katmanlı Si ₃ N ₄ dielektrik kaplaması çalışması detayları	60
Çizelge 4.1. İlk dört örneğin TLM ölçümleri	74
Çizelge 4.2. İkinci dört örneğin TLM ölçümleri	75
Çizelge 4.3. Tüm örneklerin DC sonuçları	79
Çizelge 4.3. RF ölçüm sonuçları	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. GaN, GaAs ve Si malzemelerinin kıyaslanması.....	4
Şekil 2.2. GaN HEMT ve diğer yarıiletken aygıtlarda frekansa göre çıkış gücünü gösteren grafik	5
Şekil 2.3. Ga-yüzlü GaN wurtzite yapısının atomik düzeni	6
Şekil 2.4. a) AlGaN ve GaN'daki doğal polarizasyon b) AlGaN'daki piezoelektrik polarizasyon	10
Şekil 2.5. AlGaN/GaN yapısındaki tüm polarizasyonlar ve oluşan net yük.....	11
Şekil 2.6. GaN ile aynı çekme gerilmesine sahip AlGaN katmanındaki enerji bantları.	11
Şekil 2.7. AlGaN/GaN arayüzeyde 2 DEG oluşumu ve enerji bantları.....	12
Şekil 2.8. En yüksek akaç akımı ve doyum durumu.....	13
Şekil 2.9. GaN HEMT aygıtının temel çizimi	13
Şekil.3.1. MOCVD sisteminin basit çizimsel gösterimi	15
Şekil 3.2. Alttaş ve epitaksiyel katmana gelen ve yansıyan ışın.....	17
Şekil 3.3. Fabry-Perot Salınımları	17
Şekil 3.4. Fabry-Perot Salınımlarında yüzey özellikleri	18
Şekil 3.5 Bragg yasasının görsel gösterimi.....	22
Şekil 3.6. SEM şematik çizimi.....	24
Şekil 3.7. Fotodirenç malzemenin örnek yüzeyine kaplanması ve ısıtılması	25
Şekil 3.8. Negatif ve pozitif fotolitografi.....	26
Şekil 3.9. Elektron demeti litografisi sistemi.....	28
Şekil 3.10. Reaktif iyon aşındırma.....	29
Şekil 3.11. PECVD Temel Çizimi	32
Şekil 3.12. Elektron demeti buharlaştırma sistemi	34
Şekil 3.13. Hızlı ısıtma işlemi sistemi	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.14. TLM yönteminde ölçüm grafiği	38
Şekil 3.15. TLM ölçüm desenleri	38
Şekil 3.16. Profilometrede örnek bir kalınlık ölçüm gösterimi	40
Şekil 3.17. Profilometrede stress ölçümü	40
Şekil 3.18. Elipsometre ve bileşenleri.....	41
Şekil 3.19. GaN HEMT büyütmesinde Fabry-Perot salınımları.....	44
Şekil 3.20. 2DEG taşıyıcı yoğunluğu ölçüm haritası.....	45
Şekil 3.21. 2DEG elektron hareketliliği ölçüm haritası.....	45
Şekil 3.22. 2DEG öz direnç ölçüm haritası.....	46
Şekil 3.23. Al konsantrasyonu ölçüm haritası	47
Şekil 3.24. Toplam film kalınlığı ölçüm haritası	47
Şekil 3.25. GaN HEMT waferında XRD ölçüm deseni.....	48
Şekil 3.26. GaN002 FWHM ölçüm grafiği.....	49
Şekil 3.27. GaN102 FWHM ölçüm grafiği.....	49
Şekil 3.29. AlN002 FWHM ölçüm grafiği	50
Şekil 3.30. Mesa aşındırması için fotolitografi sonrası kesit görünümü.....	53
Şekil 3.31. Mesa aşındırması sonrası kesit görünümü	54
Şekil 3.32. Negatif fotolitografi sonrası kesit görünüm.....	55
Şekil 3.33. Metal kaldırma sonrası kaynak ve akaç metallerinin oluşumu.....	56
Şekil 3.34. Tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası kaplaması sonrası kesit görünüm ...	58
Şekil 3.35. Tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası ve kapı kontağı sonrası kesit görünüm	61
Şekil 3.36. Çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası ve kapı kontağının kesit görünüm..	61
Şekil 3.37. Kapı kontağın ayak oluşturma işlemi sonrası kesit görünüm.....	63
Şekil 3.38. Si_3N_4 dielektrik açıklığı adımı sonrası kesit görünüm.....	66

Şekil	Sayfa
Şekil 3.39. Bağlantı metali sonrası kesit görünüm	68
Şekil 4.1. 100 nm Si ₃ N ₄ tabakası için film kalınlığı ve kırıcılık indisi.....	71
Şekil 4.2. TLM desenlerinde alınan I-V ölçümleri	73
Şekil 4.3. Kontak mesafelerine karşı direnç ölçüm grafiği.....	74
Şekil 4.4. Örnek 2 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	76
Şekil 4.5. Örnek 4 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	76
Şekil 4.6. Örnek 5 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	77
Şekil 4.7. Örnek 6 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	77
Şekil 4.8. Örnek 7 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	78
Şekil 4.9. Örnek 8 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	78
Şekil 4.10. Örnek 9 için I _d , g _m ve V _{br} ölçümleri	79
Şekil 4.11 a) 1 GHz b) 1.5 GHz’de örnek 6 için çıkış gücü ve verimlilik ölçümleri	80
Şekil 4.12 a) 1 GHz b) 1.5 GHz’de örnek 9 için çıkış gücü ve verimlilik ölçümleri	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. AIXTRON MOCVD Sistemi.....	16
Resim 3.2. Temassız hall ölçüm sistemi	20
Resim 3.3. Fotolüminesans sistemi.....	21
Resim 3.4. Rigaku XRD Sistemi	23
Resim 3.5. SUSS Maske hizalayıcı sistemi	27
Resim 3.6. Raith elektron demeti litografisi sistemi.....	28
Resim 3.7. SAMCO ICP-RIE 140 ICP sistemi.....	30
Resim 3.8. Sentech SI 500 PPD PECVD Sistemi.....	33
Resim 3.9. Univex 350 elektron demeti buharlaştırma sistemi	35
Resim 3.10. SSI SOLARIS 75 Hızlı ısıt işleme sistemi	37
Resim 3.11. Bruker DektakXT profilometre sistemi	39
Resim 3.12. Sentech elipsometre sistemi.....	42
Resim 3.13. SiC waferlar	43
Resim 3.14. GaN HEMT kesiti SEM incelemesi	51
Resim 3.15. Ultrasonik titreştirici	52
Resim 3.16. Mesa aşındırması sonrası mikroskop görünümü	54
Resim 3.17. Tavlama yapılmış akaç ve kaynak metallerinin görünüşleri	56
Resim 3.18. Ayak aşındırması sonrası SEM görünümü	63
Resim 3.19. Kapı kontağının SEM görüntüsü	64
Resim 3.20. Kapı kontağının optik mikroskop görüntüsü	65
Resim 3.21. Hava köprüsü destekleri	67
Resim 3.22. Hava köprülerinin SEM görünüşleri.....	67
Resim 3.23. a) ve b) Üretimleri tamamlanmış farklı tasarımlara sahip GaN HEMT aygıtları.....	69

Resim	Sayfa
Resim 4.1. TLM desenleri	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A^0	Angstrom
d	Kontaklar arası mesafe
E_g	Yasak enerji aralığı
E_s	Döner durum seviyesi
g_m	Geçiş iletkenliği
I_d	Akaç-kaynak akımı
I_{dss}	En yüksek akaç-kaynak akımı
L_g	Kapı ayak genişliği
L_h	Kapı kafa genişliği
P	Toplam polarizasyon
P_{PE}	Piezoelektrik polarizasyon
P_{SP}	Kendiliğinde polarizasyon
R_c	Kontak direnci
R_{SH}	Kanal direnci
V_{br}	Kırılma gerilimi
V_g	Kapı gerilimi
V_{TH}	Eşik gerilimi

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AlGaN	Alüminyum galyum nitrür
AlN	Alüminyum nitrür
Al₂O₃	Safir
CVD	Kimyasal buhar kaplama
FWHM	Yarı maksimum tam genişlik
HEMT	Yüksek elektron mobiliteli transistör
HFET	Hetero yapıli alan etkili transistör
GaAs	Galyum arsenit
GaN	Galyum nitrür
ICP-RIE	Endüktif eşleşmiş plazma etkin iyon aşındırma
MBE	Moleküler demet epitaksi
MESFET	Metal yarıiletken alan etkili transistör
MMIC	Monolitik mikrodalga entegre devre
MOCVD	Metal organik kimyasal buhar kaplama
PECVD	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
PL	Fotolüminesans
PVD	Fiziksel buharlaştırma kaplama
RTP	Hızlı ısıli işlem
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Si₃N₄	Silisyum nitrür
TLM	İletim hat modeli
VPE	Buhar faz epitaksi
UV	Ultraviyole
XRD	X ışını kırınımı
2DEG	İki boyutlu elektron gazı

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ilk yarısında kuantum ve katı hal fiziğindeki gelişmeler bugünkü teknolojik ilerlemelerin temeli olmuştur. Özellikle ilk transistörlerin icat edilmesi modern elektroniğin doğmasında ve ilerlemesinde çok önemli rol oynamıştır. 1947 yılında, Bell laboratuvarlarında germanyum (Ge) tabakalı ilk transistör William Shockley öncülüğünde John Bardeen ve Walter Brattain tarafından yapılmıştır [1]. İlk transistörün yapılmasından sonra Bell laboratuvarlarında geliştirme çalışmaları devam etmiştir. 1952 yılına gelindiğinde ise Shockley'in ekibi transistörlerin boyutlarını düşürmeyi başardılar ve daha çok üretmeye başladılar. Böylece transistörlerin güçlerinin artırılmasını sağladılar. Devam eden çalışmalarda germanyum yerine silisyum (Si) kullanarak daha yüksek sıcaklıkta çalışan transistörler geliştirildi [1-2].

Germanyum ve silisyum gibi malzemelerde serbest elektronların olmaması, transistör performanslarını sınırlamıştır. Bu yüzden yapılan geliştirme çalışmaları sonucunda n-tipi ve p-tipi katkılama yapılarak kullanılan malzemelerde serbest elektronlar oluşturularak bugün de kullanılmakta olunan transistör teknolojisinin temelleri atılmıştır [2-3]. Bu teknolojiye serbest elektronların yarıiletken malzeme boyunca iletimi esas alınmıştır. Ancak iletim esnasında elektronların katkı atomları ile çarpışmaları, hızlarının ve enerjilerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu da transistör performansını düşürmektedir. Galyum arsenit (GaAs) tabanlı yüksek elektron hareketlilikli transistörün (HEMT) Fujitsu laboratuvarlarında Takashi Mimura tarafından keşfedilmesi ile [4], katkılanmaya ihtiyaç duymadan yeni bir transistör teknolojisi ortaya çıkmıştır. HEMT teknolojisinde, birbirinden farklı bant aralıklarına sahip iki malzemenin üst üste büyütülmesiyle malzemelerin birleştiği bölgede bir kuantum kuyusu oluşturulur. Bant aralıkları farklı olan malzemeler bu kuantum kuyusunda 2-boyutlu bir elektron gazının (2DEG) oluşumunu sağlar. 2DEG bölgesinde bir katkılama olmaması bir yüzey boyunca elektronların yüksek hızlı ve enerjili hareket etmesini sağlar. Bu da aygıt performansını önemli oranda arttırmaktadır.

GaAs tabanlı ilk HEMT aygıtın belli bir zaman sonra kendi performanslarını aşamaması üzerine yeni tip bir malzeme araştırmaları başlamıştır. Galyum nitrür (GaN) malzemesi Si ve GaAs gibi malzemeler ile karşılaştırıldığında yasak enerji aralık değerinin (E_g) yüksek olması, yüksek kırılma gerilimi, yüksek ısıl iletkenlik özellikleri sayesinde öne çıkmaktadır [5-6].

Amano ve ekibinin [7] Metal organik kimyasal buhar kaplama (MOCVD) tekniği ilk kez GaN malzemesini ince film olarak büyütmesi GaN malzemesi büyütükten sonra, 1991’de ise Khan ve ekibi [8] AlGaIn/GaN yapılarında ilk defa 2DEG oluşumunu gösterilmiştir. Bu gelişmeler GaN HEMT aygıtlar için önemli dönüm noktaları olmuştur. İlk GaN metal yarıiletken alan etkili transistör (MESFET) [9] ve ilk GaN temelli ilk hetero yapılı alan etkili transistörlerin (HFET) yapıları [10] yine Khan ve arkadaşları tarafından üretilmiştir. Bu ilk GaN MESFET ve GaN HFET üretimleri HEMT aygıt teknolojisinde GaN malzeme kullanımı ile ilgili araştırmaları arttırmıştır.

Günümüzde HEMT aygıtlar yüksek kırılma gerilimleri ve yüksek çıkış güçleri nedeni ile elektrikli araçlarda, solar elektrik sistemlerinde, askeri radar uygulamalarında, elektrikli trenlerde, baz istasyonlarında ve uydu sistemlerinde monolitik mikrodalga entegre devre (MMIC) yükselteç devreleri olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca HEMT aygıtlarının yüksek frekanslarda milimetre dalga boylarında çalışabilmesi [11] özellikle askeri radar uygulamaları ile haberleşme uydularınının gelişmesine yardımcı olmuştur.

Bu tez çalışmasında; uydu sistemlerinde, yüksek güç ve yükselteç uygulamaları için kullanılmaya aday yüksek çıkış güçlü GaN HEMT malzeme yapısının büyütülmesi, fabrikasyonu ve karakterizasyonu yapılmıştır. GaN HEMT aygıtlarda, tek ve çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakanın aygıt DC ve RF güç performansı üzerindeki etkilerine bakılmıştır. GaN HEMT malzemenin büyütmesinde MOVCD sistemi kullanılmıştır. Epitaksiyel yapının karakterizasyonları için 2DEG ölçüm, fotoluminesans (PL) ve x-ışınları kırınım (XRD) sistemleri kullanılmıştır. GaN HEMT fabrikasyonunda ise fotolitografi ve e-beam litografi yöntemleri, metal kaplama, plazma ile kuru aşındırma ve pasivasyon kaplaması yöntemleri kullanılmıştır. Üretilen GaN HEMT’lerin mekaniksel ve optik karakterizasyonları mikroskop, profilometre, elipsometre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. En son olarak GaN HEMT’lerin elektriksel karakterizasyonları için DC ve RF ölçümler yapılmıştır.

2. GaN HEMT AYGITI

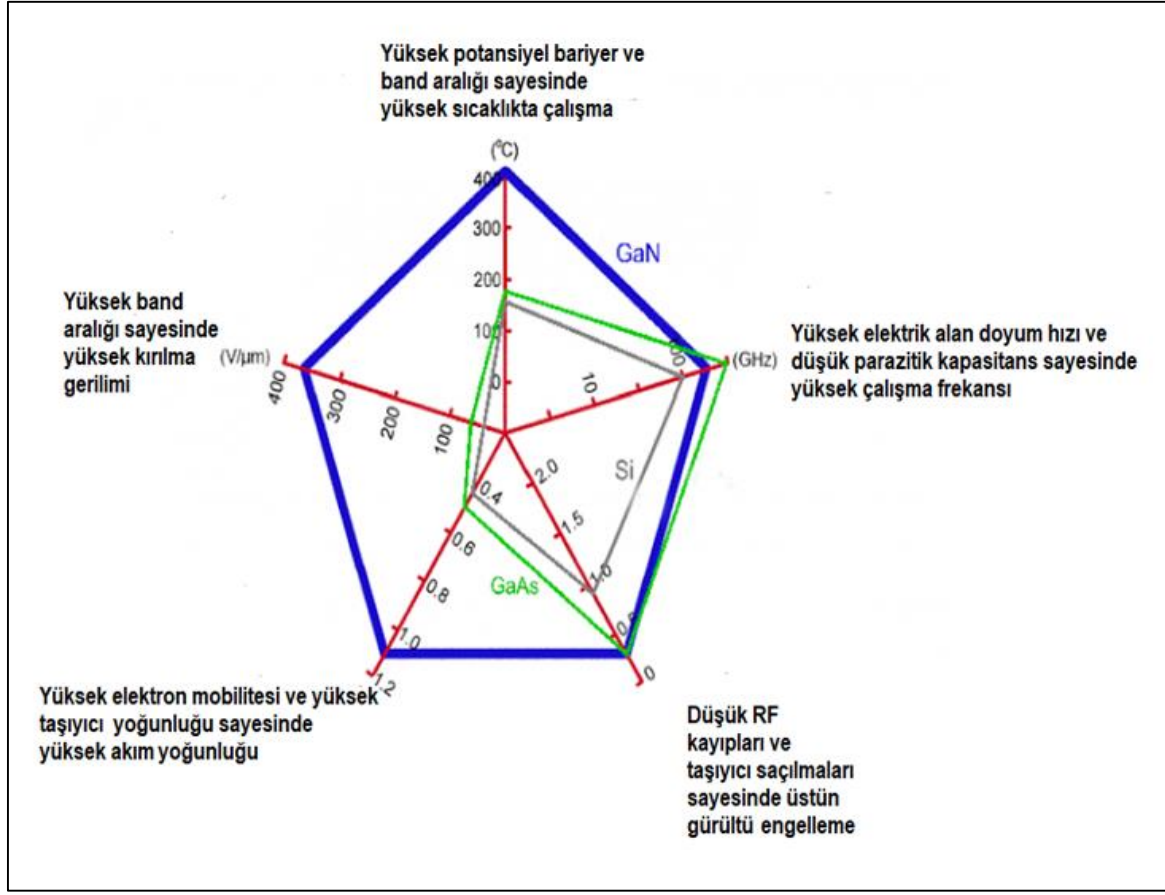
2.1. GaN Malzeme Özellikleri

GaN, en çok çalışma yapılan yarıiletken ailesi ile karşılaştırıldığında, yüksek E_g , doymuş elektron sürüklenme hızı ve ısı iletkenlik gibi özellikleri açısından daha öne çıkmaktadır. Çizelge 2.1’de GaN malzemesi ile diğer yarıiletkenlerin kıyaslaması görülmektedir.

Çizelge 2.1. GaN ve diğer yarıiletken malzemeler için bazı elektriksel ve mekanik özellikler [12-14]

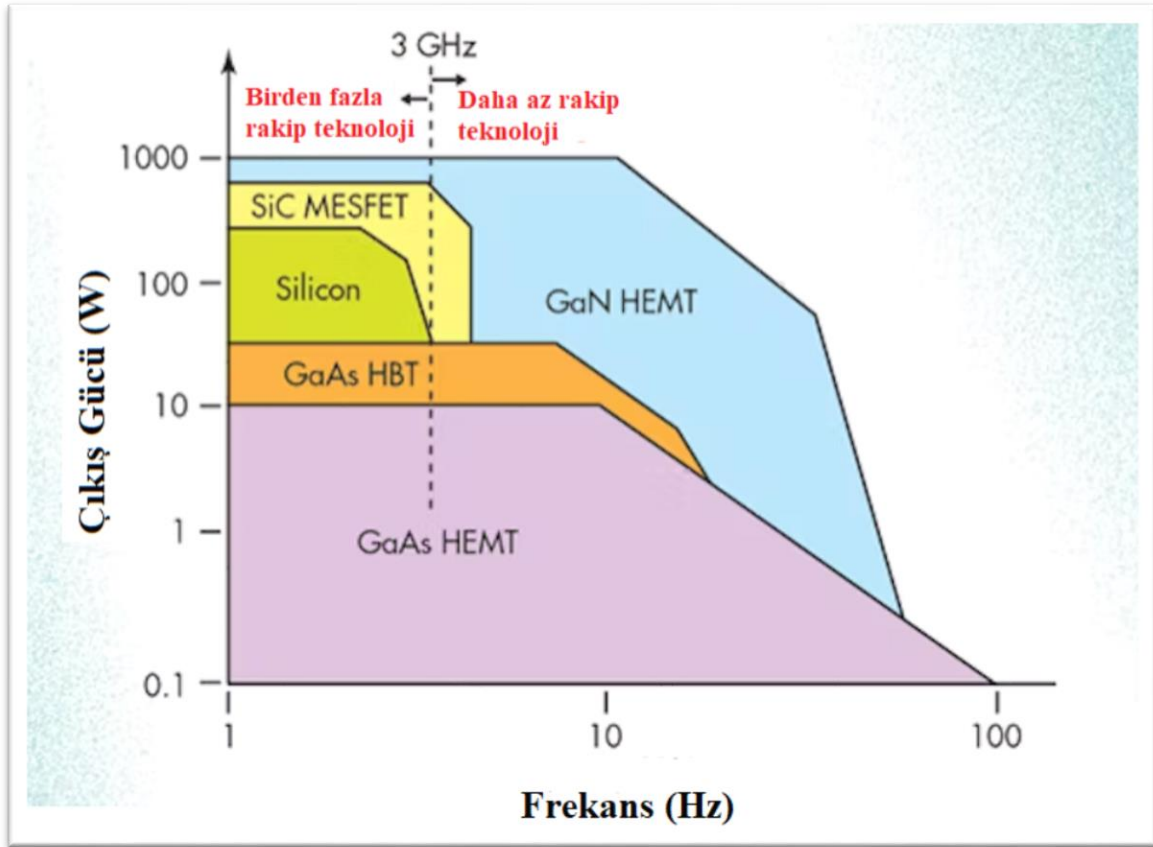
Özellikler	Si	GaAs	SiC	GaN
Bant Aralığı (eV)	1,11	1,43	3,26	3,40
Görelî Dielektrik Sabiti	11,8	12,8	10	9,0
Kırılma Elektrik Alanı (MV/cm)	0,25	0,35	3,5	4,0
Doymuş Elektron Sürüklenme Hızı ($\times 10^7$ cm/s)	1	2	2	2,5
Elektron Hareketliliği ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1350	8500	650	2000
Hole Hareketliliği ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	600	400	115	850
Isıl İletkenlik, (W/cm.K)	1,5	0,46	4,9	4,0
Erime Noktası, K	1415	1238	3103	2791

Çizelge 2.1’den görüleceği üzere GaN malzemesinin sahip olduğu yüksek kırılma elektrik alanı ve yüksek bant aralığı aygıtın yüksek voltajlarda çalışmasına imkân sağlar. Yüksek voltajlarda çalışma ise aygıtın çıkış gücünü arttırmaktadır. Bunun dışında GaN malzemesinin sahip olduğu doymuş elektron hızının yüksek olması aygıtın daha yüksek akımda ve frekansta çalışmasını sağlamaktadır. Ayrıca erime noktasının ve ısı iletkenliğinin yüksek olması yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda GaN kullanımına imkân verir. Şekil 2.1’de ise GaN malzemesinin Si ve GaAs malzemeleri ile kıyaslamaları görülmektedir. Şekil 2.1’de verilen diyagramda GaN malzemesinin birçok özelliğinin Si ve GaAs’a kıyasla daha üstün olduğu görülmüştür.



Şekil 2.1. GaN, GaAs ve Si malzemelerinin kıyaslanması [15]

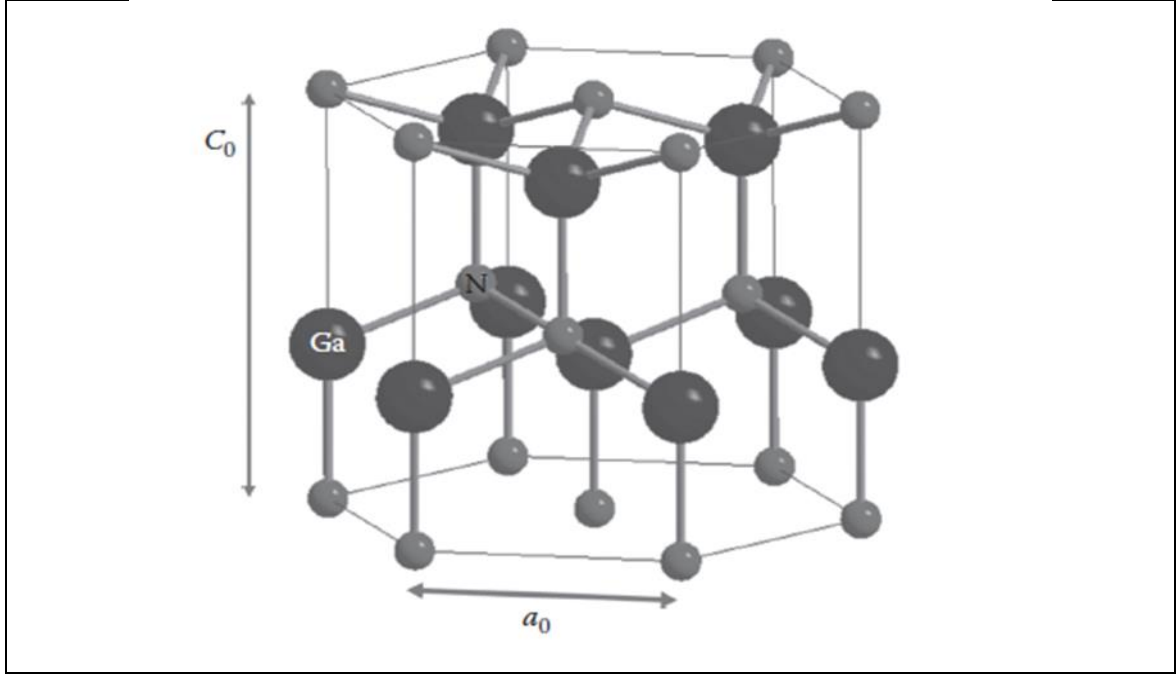
Şekil 2.2’de ise GaN ve yarıiletken teknolojisinde yaygın kullanılan diğer aygıtlar için frekansa göre çıkış gücü grafiği görülmektedir. Şekil 2.2 incelendiğinde GaN’ın yüksek frekans ve güç gerektiren uygulamalarda neredeyse rakipsiz olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2. GaN HEMT ve diğer yarıiletken aygıtlar için frekansa göre çıkış gücünü gösteren grafik [16]

2.2. GaN Malzeme Yapısı

GaN'ında içinde bulunduğu III-Nitrür ailesi (AlN, InN, ZnO, GaN) kristal yapı olarak wurtzite, zinc blende ve kaya tuzu yapısında bulunabilirler [17]. Wurtzite yapısı, oda sıcaklığında ve atmosferde GaN için termal olarak kararlı fazdır. Ayrıca wurtzite GaN yapısı zinc blende GaN yapısına göre daha yüksek band aralığına sahiptir [18]. Wurtzite GaN kristal yapısı, c_0 'ın bir altıgen hücrenin yüksekliği olduğu c_0 ve a_0 olmak üzere iç içe geçen iki altıgen sıkı paket (HCP) örgüden oluşur. Wurtzite GaN için bir birim hücrenin temeli, Şekil 2.3 'te gösterildiği gibi, iki nitrojen ve iki galyum atomu olmak üzere dört atoma aittir. İki örgü sabiti, a_0 (3,18 Å) ve c_0 (5,18 Å) [19] ile karakterize edilir.



Şekil 2.3. Ga-yüzlü GaN wurtzite yapısının atomik düzeni [17]

GaN'ın kimyasal bağı tetrahedral olarak dört atoma (Ga, N) bağlanır. Bir bağı her iki tarafındaki aynı düzlemdeki tüm atomlar aynıdır. Bu nedenle, wurtzite GaN kristali, yaygın olarak Ga-face ve N-face olarak bilinen ve Miller indeksinin (0001) ve (000 $\bar{1}$) yüzleri olan [0001] ve [000 $\bar{1}$]'e karşılık gelen iki farklı yüzü gösterir [20]. Çizelge 2.2 'de wurtzite yarıiletkenlerin örgü parametrelerinin bir özeti görülmektedir [21]. Çizelge 2.2'ye bakılınca GaN'ın örgü parametreleri olarak wurtzite kristal yapısına daha iyi uyduğu görülmektedir.

Çizelge 2.2. Wurtzite kristal yapısındaki GaN ve diğer yarıiletkenlerin 300 K'daki örgü parametreleri

Parametre	İdeal	AlN	GaN	InN
a_0	—	3,110	3,190	3,540
c_0	—	4,980	5,189	5,706
c_0/a_0 (hesaplanan)	1,633	1,601	1,627	1,619

GaN malzemenin wurtzite kristal yapısının avantajları nedeni ile bu tez çalışmasında GaN malzemesi büyütülürken wurtzite kristal yapısı tercih edilmiştir.

2.3. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısı

Epitaksi, tek kristal alttaş üzerine alttaşa uygun olarak tek kristal ince film büyütme metodudur. Epitaksi kelimesi köken olarak Latince'den gelir ve “epi” üstü, “taksis” ise düzenli biçiminde anlamındadır. Epitaksiyel yapıda büyütülen ince film alttaş ile aynı kristal örgüsü ve yönelimini alır ve tekrar eder. Epitaksi, homoepitaksi ve heteroepitaksi olarak ikiye ayrılır. Homoepitaksiste, ince film kristali aynı kristal yapıya sahip alttaş üzerine büyütülürken, heteroepitaksiste ise ince film farklı kristal yapıya sahip alttaş üzerine büyütülür. Epitaksiyel yapı ile alttaş arasındaki kristal uyum epitaksiyel yapının kalitesi açısından çok önemlidir. Herhangi bir uyumsuzluk büyütülen epitaksiyel yapıda kusurlara neden olacaktır. Bu nedenler dolayı alttaş seçimi epitaksiyel yapının büyütülmesi için çok önemlidir.

Epitaksiyel yapı büyütme için birçok yöntem vardır. Buhar fazı epitaksi (VPE), Moleküler demet epitaksi (MBE) ve Metal organik kimyasal buhar kaplama (MOVCD) bu yöntemlerden en çok bilinenleridir. MBE ve MOCVD, GaN epitaksiyel yapısının büyütülmesinden en çok kullanılan iki yöntemdir. Her iki yöntemde kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Çizelge 2.3'te MBE ve MOCVD yöntemlerinin karşılaştırılması görülmektedir. MOCVD yöntemi; daha hızlı, kontrollü, tekrarlanabilir ve çoklu üretime uygunluk gibi özellikleri nedeni ile özellikle GaN epitaksiyel yapısının büyütülmesinde Dünya'da daha yaygın olarak kullanılır. Bu tez çalışması için Bilkent Üniversitesi içerisindeki Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) altyapısındaki MOCVD sisteminde AlGaIn/GaN epitaksiyel yapıları büyütülmüştür.

Çizelge 2.3. MBE ve MOCVD yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
MBE	Film kalınlık değizmezliği Büyütme takibi Yüksek verim Hassas	Kaynaklar pahalı, zehirli Büyütme hızı çok yavaş Hassaslık kontrolü zor Sistem kullanımı karmaşık Tekli büyütme
MOCVD	Film kalınlık değizmezliği Hassas katkılama işlemi Atık gaz kontrolü Büyütme hızı yüksek Tekrarlanabilir Çoklu büyütme	Atık gaz kontrolü maliyeti Kaynaklar pahalı Bakım onarım maliyeti

Çizelge 2.4'te ise NANOTAM'da bulunan MOCVD sisteminde büyütülen AlGaIn/GaN HEMT malzeme yapısının detayları bulunmaktadır.

Çizelge 2.4. AlGaIn/GaN HEMT malzeme yapısı

Katman	Kalınlık (nm)
GaN kapak katmanı	~2-3
AlGaIn katmanı	~22
AlN ara geçiş katmanı	~1-2
GaN tampon katmanı	~2000
AlN ekirdeklenme katmanı	~100
SiC Alttaş	~350.000

2.3.1. SiC alttaş

Yüksek güçlü ve yüksek frekanslı uygulamalarında kullanılan GaN HEMT yapılarının büyütülmesinde kullanılan alttaşlar için iki kritik parametre vardır: termal iletkenlik ve kristal örgüsü. Alttaşın yüksek termal iletkenliği, GaN HEMT yapılarında, ısınma etkisini hafifletmek için istenen bir özelliktir. Alttaş ile epitaksiyel yapının örgü uyuşması da GaN epitaksiyel yapının kalitesi için istenen diğer bir özelliktir [22]. Bu yüzden GaN HEMT aygıtların epitaksiyel yapısı için alttaş tercihinde bu iki özelliğe dikkat edilir. GaN HEMT aygıtlar için en çok kullanılan alttaşlar SiC (Silisyum karbür) [23], Al₂O₃ (Safir) [24] ve Si [25] malzemeleridir. Çizelge 2.5'te alttaşların mekanik ve termal özelliklerinin karşılaştırılması görülmektedir [26-27]. Mekanik ve termal özellikler incelendiğinde, çok düşük örgü uyuşmazlığına, çok yüksek erime sıcaklığına, termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle SiC GaN HEMT yapılarında alttaş olarak daha çok tercih edilmektedir.

Çizelge 2.5. GaN epitaksiyel yapılarındaki alttaşların mekanik ve termal özellikleri

Özellik	SiC	Al ₂ O ₃	Si
Örgü parametresi, a (Å)	3,08	4,758	5,43
GaN ile örgü uyuşmalığı, (%)	3,5	16,08	16,9
Termal genleşme katsayısı (10^{-6} K)	4,3	7,3	3,59
Termal iletkenlik (W/cm.K)	4,9	0,41	1,3
Termal uyuşmazlık (%)	30	23	55
Erime sıcaklığı (K)	3102	2303	1412

2.3.2. AlN çekirdeklenme katmanı

Çekirdeklenme katmanı, alttaş ile üzerinde büyütülen tampon katman arasındaki örgü uyumsuzluklarını düşürmek azaltmak için büyütülür. Kullanılan alttaşa bağlı olarak GaN HEMT yapıları için bu katman için alüminyum nitrür (AlN) ya GaN katmanı büyütülür. Bu tez çalışmasında büyütülen GaN HEMT yapısındaki çekirdeklenme katmanı için SiC ile düşük örgü uyumsuzluk yüzdesi (%1) bulunan AlN kullanılmıştır [28].

2.3.3. GaN tampon katmanı

Bu katman üst arayüzeyde 2DEG oluşması için büyütülür. GaN tampon katmanı diğer katmanlara göre oldukça kalın büyütülerek daha dirençli olması sağlanır. Bu yüksek dirençli katman yalıtım görevi görerek 2DEG elektronların alt kısımlara geçişini önler. Böylece 2DEG elektronları tuzaklanmamış olur.

2.3.4. AlN ara geçiş katmanı

AlN ara geçiş katmanı, GaN tampon katmanı ile AlGaN katmanı arasında büyütülen çok ince bir katmandır. Görevi ise 2DEG elektronları ile aynı bölgede bulunan iyonize atomlar arasındaki Coulomb saçılmasını azaltmaktır. Böylece 2DEG elektronlarının taşıyıcı yoğunlukları ve hareketlilikleri artmış olur [29].

2.3.5. AlGaN katmanı

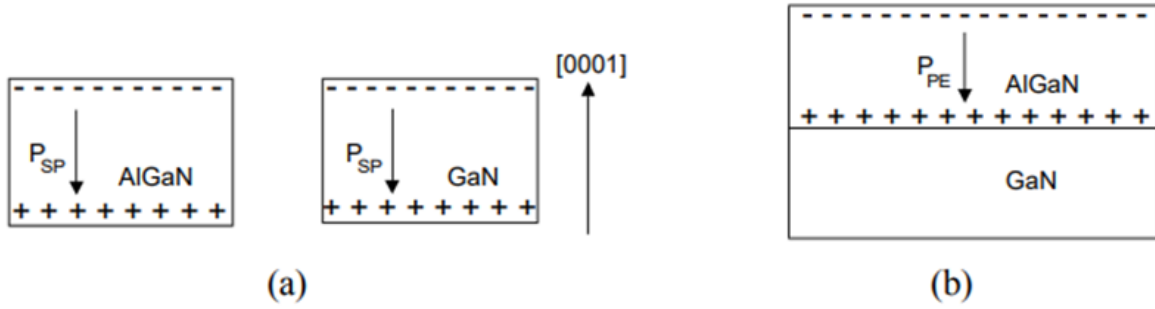
GaN HEMT epitaksiyel yapısı içerisindeki en önemli katmandır. 2DEG'in oluşmasını bu katman sağlar. 2DEG oluşumu, AlGaN katmanın bant genişliği tampon katmanın bant genişliğinden daha büyük olması sebebi meydana gelir. AlGaN katmanındaki Al konsantrasyonu ve katman kalınlığı 2DEG özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Al konsantrasyonu arttıkça 2DEG yoğunluğu artarken, hareketlilik azalır. Al konsantrasyonunun daha da fazla artması ile 2DEG yoğunluğu artar ancak belli bir noktadan sonra örgü uyumsuzlukları ve kusurlar AlGaN katmanda oluşmaya başlar. Bu örgü uyumsuzlukları ve kusurlar 2DEG elektronlarının hem kendi içinde hemde ara yüzeylerde daha fazla saçılmalarına neden olur. Bu durumda 2DEG hareketliliğinin azalmasına yol açar [30].

2.3.6. GaN kapak katmanı

GaN kapak katmanı; yüzeyin oksitlenmesini engellemek, yüzey kaçak akımlarını azaltmak, AlGaIn katmanındaki Al atomların yüzeye çıkmasını engellemek amacıyla büyütülmektedir. Ayrıca bu katmanın kalınlığı 2DEG yoğunluğunu etkilemektedir [31].

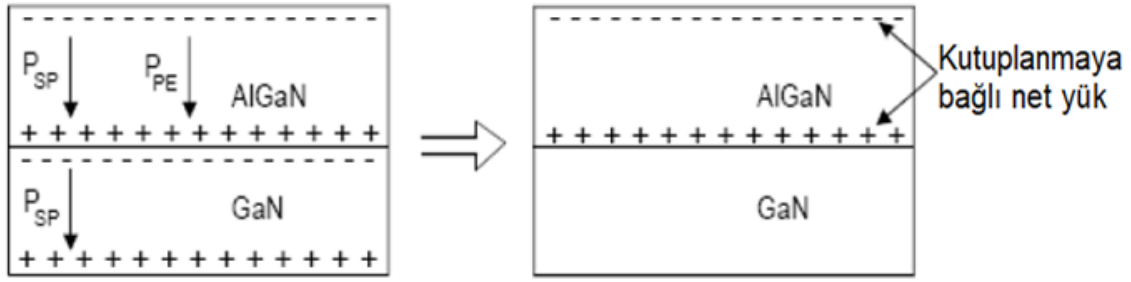
2.4. AlGaIn/GaN Yapıda Polarizasyon

AlGaIn/GaN bileşik yapısındaki toplam polarizasyona katkıda bulunan iki tür polarizasyon vardır. Bunlar kendiliğinden polarizasyon (P_{SP}) ve piezoelektrik polarizasyondur (P_{PE}). Kendiliğinden polarizasyon gerilmemiş bir kristalde bulunan yerleşik polarizasyon alanını ifade eder. Piezoelektrik polarizasyon ise kristal örgünün bozulmalarından kaynaklanan polarizasyon alanıdır. AlGaIn ve GaN malzemeleri arasındaki örgü sabitindeki büyük farktan dolayı, GaN katmanı üzerinde büyüyen AlGaIn katmanı gerilir. Bu malzemelerin piezoelektrik katsayılarının büyük değerinden dolayı bu gerilim, AlGaIn katmanının iki yüzünde katman yükünü oluşturur [32]. Şekil 2.4'te GaN ve AlGaIn katmanlarında doğal polarizasyon ile AlGaIn/GaN heteroyapısındaki piezoelektrik polarizasyon görülmektedir.



Şekil 2.4. a) AlGaIn ve GaN'daki doğal polarizasyon b) AlGaIn'daki piezoelektrik polarizasyon [33]

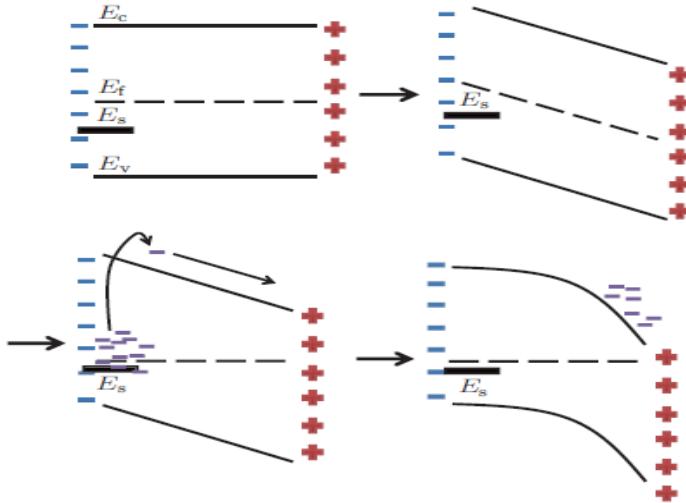
Şekil 2.5'te ise AlGaIn/GaN yapısındaki tüm polarizasyonlar ve oluşan net yük görülmektedir. Toplam polarizasyon yükü $P = P_{SP} + P_{PE}$ olarak, hetero arayüzün hemen yanındaki AlGaIn tarafına aynı miktarda pozitif bir tabaka yük katmanı yerleştirilerek modellenebilir [34].



Şekil 2.5. AlGaIn/GaN yapısındaki tüm polarizasyonlar ve oluşan net yük [33]

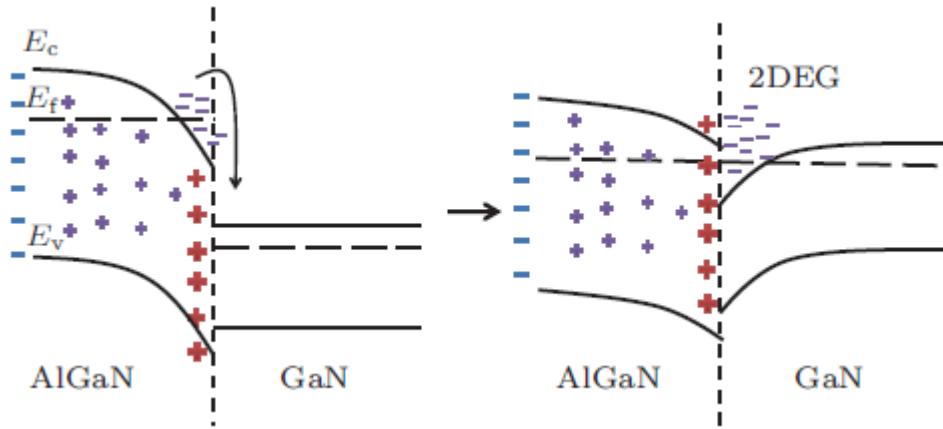
2.5. AlGaIn/GaN Yapıda 2DEG Oluşum Mekanizması

AlGaIn/GaN arayüzünde 2DEG'nin oluşum mekanizması, AlGaIn yüzeyinde donör durumların var olduğu varsayılarak iyi bir şekilde açıklanabilir [35]. Şekil 2.6.'da AlGaIn katmanının sanki GaN üzerinde aynı çekme gerilmesi altında büyütüldüğü varsayımıyla, yüzey donör durumlarına sahip bir AlGaIn malzemesinde enerji bandını gösterilmektedir.



Şekil 2.6. GaN ile aynı çekme gerilmesine sahip AlGaIn katmanındaki enerji bantları [36]

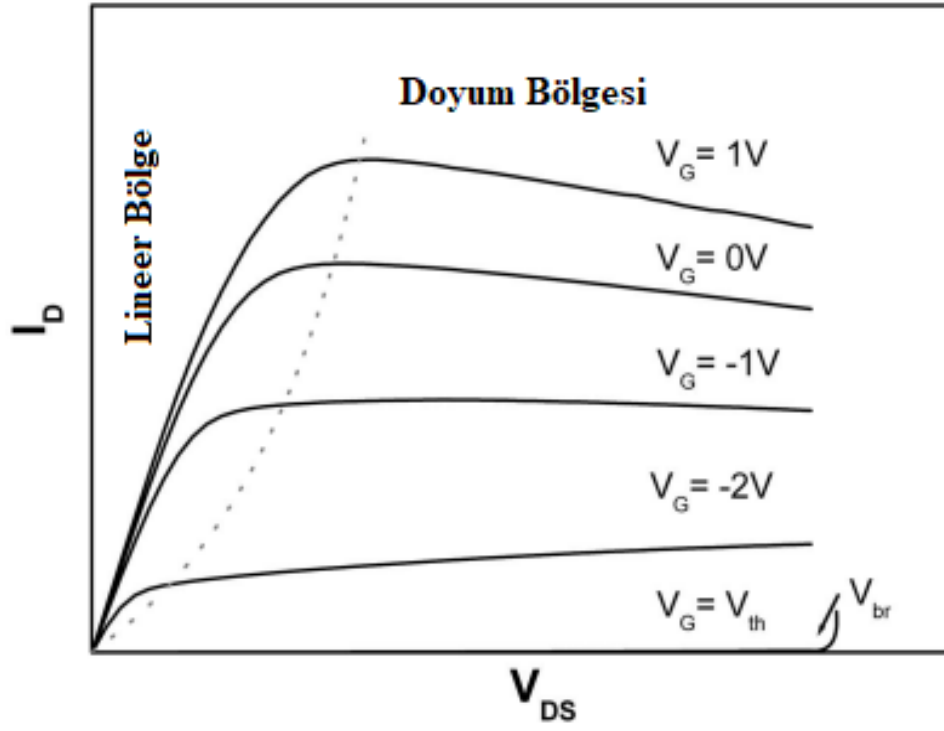
AlGaIn katmanı yeterince kalınsa, Fermi seviyesi donör durum seviyesi E_s 'e ulaşacak ve elektronlar iletken hale gelecek şekilde uyarılacaktır ve toplam polarizasyonun neden olduğu elektrik alanın kuvvetiyle diğer tarafa doğru kaydırılacaktır. GaN katmanı ile temas ettikten sonra, Fermi seviyesinin düşmesi nedeniyle elektronlar GaN tarafına akacaktır. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi elektronlar AlGaIn/GaN arayüzeyinde birikecek ve 2DEG oluşmasını sağlayacaklardır [36].



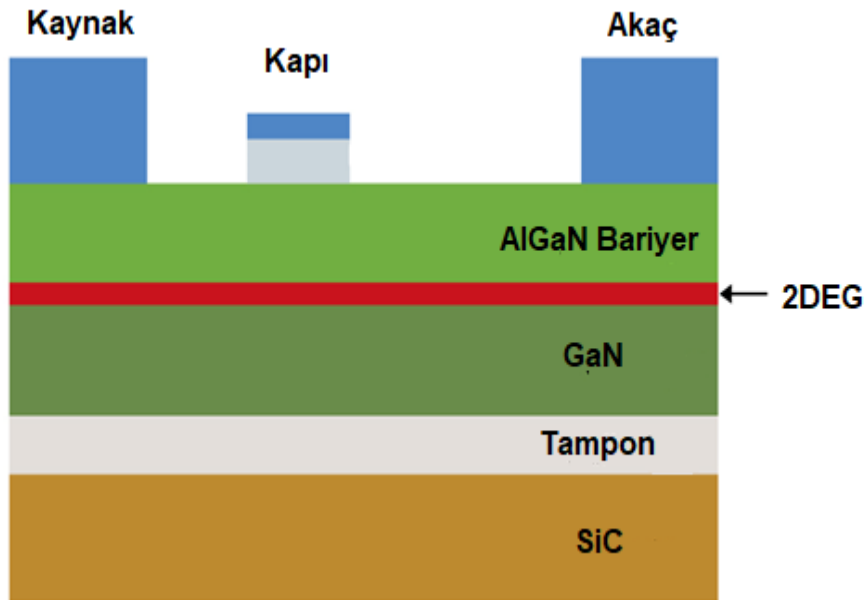
Şekil 2.7. AlGaN/GaN arayüzeyde 2 DEG oluşumu ve enerji bantları[36]

2.6. GaN HEMT Çalışma İlkesi

Temel olarak HEMT, Şekil 2.7’ de gösterilen 2DEG’in kontrolü ile çalışmaktadır. 2DEG yüksek elektron hareketliliğine (mobilité) sahip olması hareketi esnasında yapıyla ve yapı kusurlarıyla olan etkileşimlerinin az olmasına bağlıdır. HEMT yapıda genelde iki adet omik kontaklıdır. Bunlar; akı (drain) ve kayna (source) kontaklarıdır. Bu kontakların arasına schottky bir kapı (gate) kontaklı konumlandırılarak elektronların akışı kontrolü sağlanmaktadır. Başka bir deyişle, kapıya uygulanan gerilim (V_g) sayesinde bu kontaklar arasındaki akımın kontrolü yapılmaktadır. Eğer, kapı gerilimi değeri belirli bir eşik gerilimine vardığında (V_{TH} - pinch off) ve bu gerilimi aştığında akı ve kayna arasında bir akım akışı olmayacaktır [37]. Kapı geriliminin kapı eşik gerilim değeri aştığında, akı ile kayna arasındaki akım akışı tekrar başlayacaktır. Bunu takiben akı akımında belirli bir değere varıncaya dek lineer artışlar görülecektir [38]. En yüksek akım değeri ulaşılması ile artık akı akımı artmayacaktır ve doyum durumuna gelecektir. En yüksek akı akımı ve doyum durumu Şekil 2.8’de gösterildi. En yüksek doyum akımı değeri 2DEG yoğunluğuna bağlı değişecektir. Yani 2DEG yoğunluğunun miktarı arttıkça maksimum akım yoğunluğu da artacaktır [37]. Şekil 2.9’da GaN HEMT aygıtının temel çizimi görülmektedir.



Şekil 2.8. En yüksek akaç akımı ve doyum durumu [39]



Şekil 2.9. GaN HEMT aygıtının temel çizimi

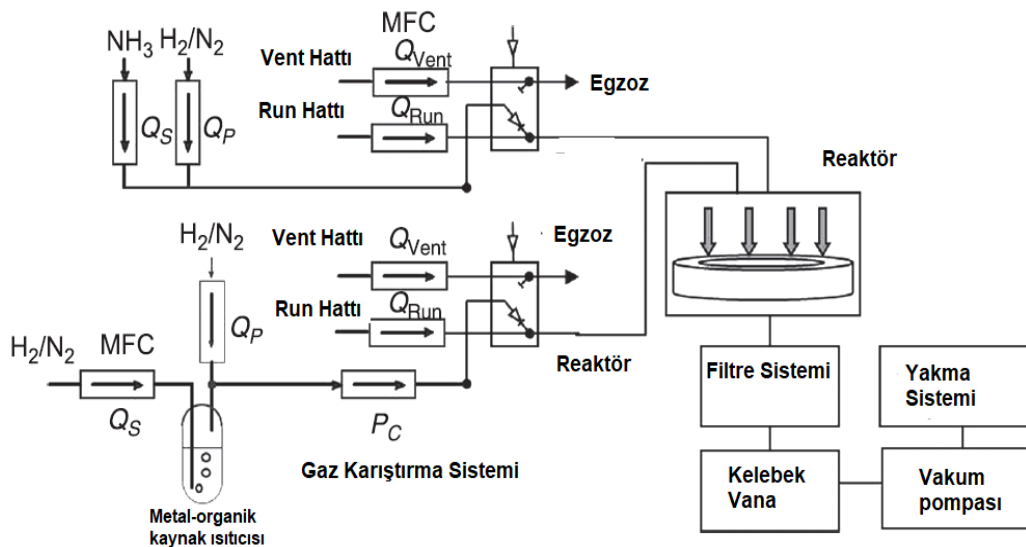
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında Bilkent Üniversitesi NANOTAM laboratuvarları ve temiz oda alt yapısı kullanılarak GaN HEMT aygıtları üretilmiş ve karakterize edilmiştir.

3.1. Epitaksiyel Malzemenin Büyütme ve Karakterizasyon Yöntemleri

3.1.1. Metal organik kimyasal buhar kaplama (MOCVD) ile büyütme yöntemi

III-nitrür yarıiletken ailesinin büyütülmesinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi MOCVD'dir. MOCVD'de çoklu katmanlar nanometre seviyesinde yüksek sıcaklıklarda kaliteli biçimde büyütülürler. Yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılan alttaşların üzerine metal-organik kaynaklardan gaz akışı olur ve bu akış esnasında metal ve organik arasındaki bağ kırılır. Metal atomları alttaş yüzeyi ile çeşitli tepkimelere girerek katmanlar şeklinde yüzeyde büyür. Katmanların kalınlık kontrollü hassas olarak yapılmaktadır. Şekil 3.1'de MOCVD sistemi için temel çizimi gösterilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi MOCVD sistemleri genellikle reaktör, gaz karıştırma sistemi, filtre sistemi ve yakma-temizleme sistemlerinden oluşur. Bunun dışında metal-organik kaynakların konulduğu kaynak ısıtıcıları, kütle akış kontrolcüler (MFC) ve vakum pompası diğer önemli kısımlardır.



Şekil.3.1. MOCVD sistemi için temel çizimsel gösterim [40]

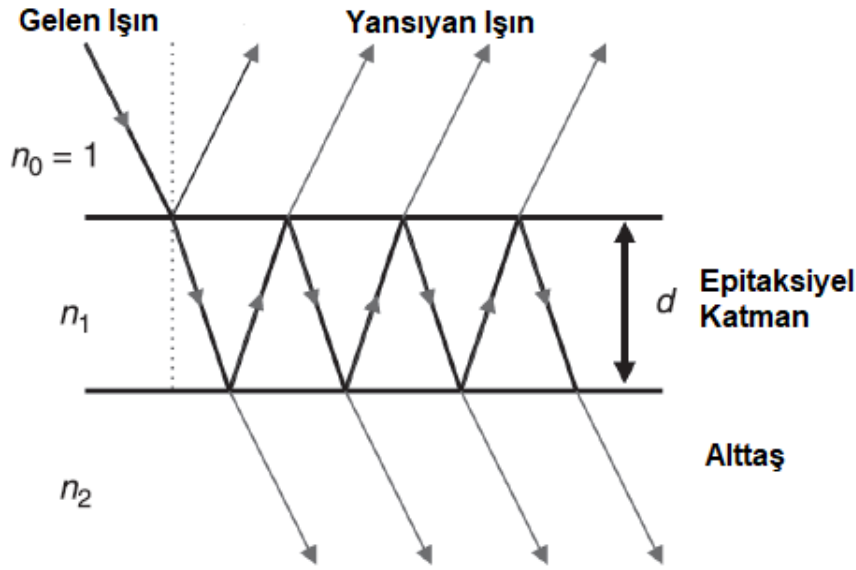
Resim 3.1’de ise NANOTAM’daki MOCVD sistemi ve bölümleri görülmektedir.



Resim 3.1. AIXTRON MOCVD Sistemi.

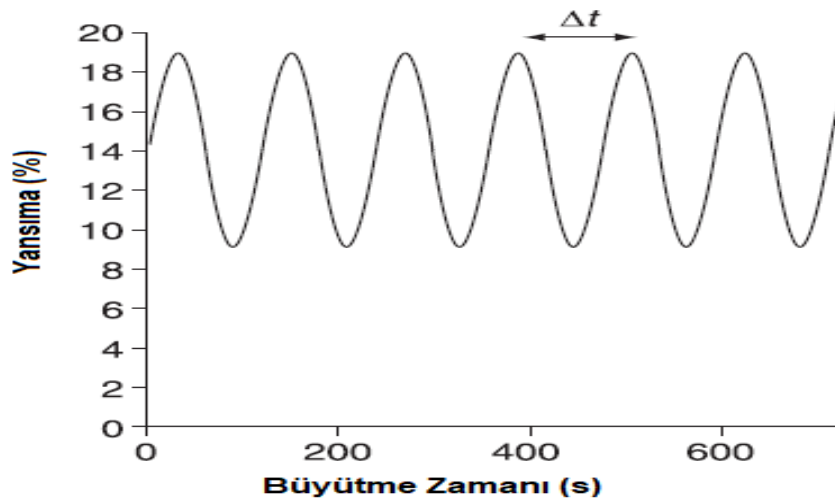
GaN HEMT epitaksiyel yapılarının büyütmelerinde Ga, Al gibi malzemeler trimetil ((CH₃)₃) bileşiği içerisinde metal-organik kaynak olarak bulunurlar. GaN, AlGa_N ve AlN katmanlarının büyütmelerinde yüksek saflığı olan hidrojen (H₂), azot (N₂) taşıyıcı olarak kullanılır. Trimetil galyum (TMGa), trimetil alüminyum (TMAI) ve Amonyak (NH₃) reaktör içerisine metal-organik gaz karışımı olarak girer.

MOCVD’de büyütülen epitaksiyel katmanların kalınlık, büyüme hızı, katman tayin kontrolü, reaktör içerisinde yer alan doğrulukla ölçüm yapan sağlayan optik reflektometre aracılığıyla yapılmaktadır. Reflektometreden gelen ışınlar epitaksiyel yüzeyinde yansarak tekrar reflektometre tarafından toplanır. Şekil 3.2’de reflektometreden epitaksiyel yüzeyine gelen ve yansıyan ışınlar gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Altaş ve epitaksiyel katmana gelen ve yansıyan ışın [40].

Şekil 3.2.'deki n_1 ve n_2 epitaksiyel katman ve altaştaki kırıcılık indisleridir. Katmanlar arasındaki kırıcılık indisi (n) farkından kaynaklı gelen ve yansıyan ışınlar arasında bir faz farkı meydana gelecektir. Bu faz farkı büyütme süresi boyunca salınım olarak görülecektir. Bu salınımlar Fabry-Perot salınımları [41] olarak adlandırılmaktadır. Katman kalınlığı ve katmanların büyüme hızları bu salınımlar sayesinde bulunmaktadır. Şekil 3.3'de Fabry-Perot salınımları gösterilmektedir.



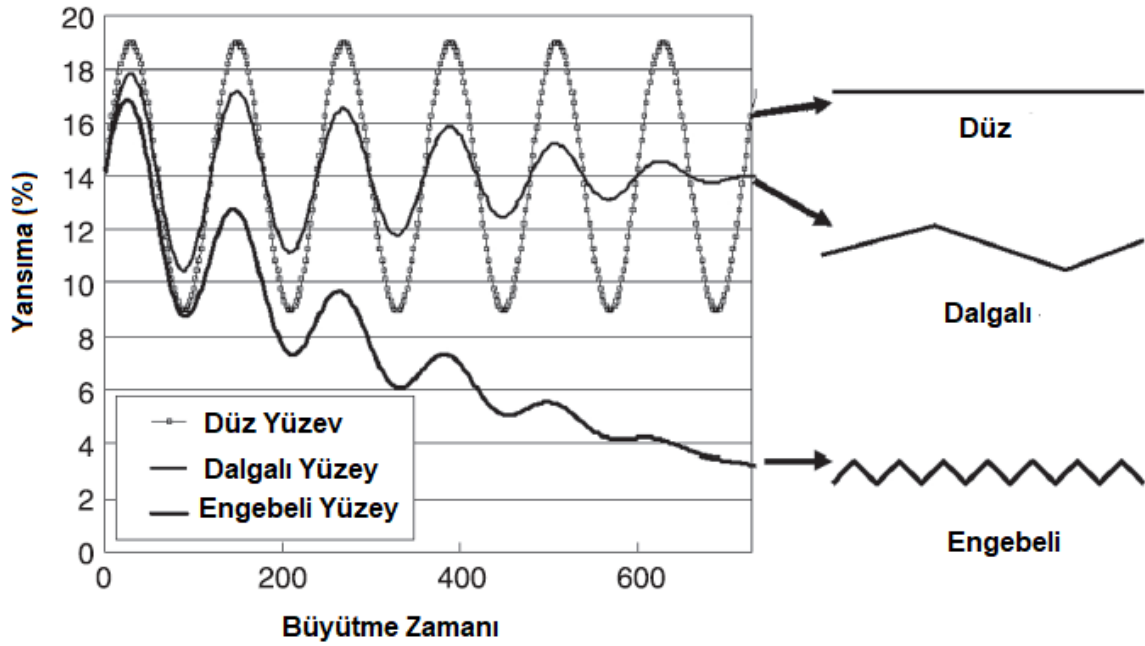
Şekil 3.3. Fabry-Perot Salınımları [40].

Bu salınımlar ile katman kalınlığı, büyütme hızı ve katman yüzey kalitesi hakkında bilgi edinebilir. λ gelen ışının dalga boyu, n katmanın kırıcılık indisi, Δt katman başlangıç ve bitiş süresi arasındaki fark olmak üzere Eş.3.3 ile büyütme hızı, eş.3.4 ile katman kalınlığı hesaplanır.

$$R = \frac{\lambda_m}{2n\Delta t} \quad (3.3)$$

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

Şekil 3.4'te ise fabry-perot salınımlarının epitaksiyel yüzey kalitesi açısından incelenmesi görülmektedir [40]. Daha düz yüzeylerin aynı salınım şiddetlerinde yansıma verdiği, yüzey pürüzlülüğünün artması ile salınım şiddetlerinin de bozulduğu görülmüştür.



Şekil 3.4. Fabry-Perot Salınımlarında yüzey özellikleri [40].

3.1.2. Epitaksiyel yapıların karakterizasyon yöntemleri

MOCVD yöntemi ile büyütülen GaN HEMT epitaksiyel yapıları üretime girmeden önce çeşitli yöntemler ile karakterize edilir ve sonuçlar değerlendirilir. Burdaki amaç büyütülen epitaksiyel yapının istenen kalitede olmasıdır.

Hall ölçümü

Hall ölçümleri ile yarıiletkenin özdirenci, taşıyıcı yoğunluğu ve elektron hareketliliği ölçülür. Bu ölçümde en çok kullanılan yöntem ise Van der Pauw ölçüm tekniğidir. Van der Pauw tekniğinde ölçülecek numunenin köşelerine metaller kaplanarak ölçümler yapılır. Bu tez çalışmasında 2DEG özdirenci, taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliği için temassız hall ölçüm sistemi [42] ile hall ölçümleri yapılmıştır. Temassız hall ölçüm sisteminde mikrodalga kaynağı kullanılarak mikrodalgaın optik modları yardımı taşıyıcı yoğunluğu, elektron hareketliliği ve özdirenç ölçümleri yapılır. Temassız hall ölçüm sisteminde taşıyıcıların yük işaretini veren hall katsayısı ile Eş. 3.5 ile hesaplanır. Özdirenç, taşıyıcı yoğunluğu ve hareketlilik sırası ile Eş. 3.6, Eş. 3.7 ve Eş. 3.8 kullanılarak ölçülür.

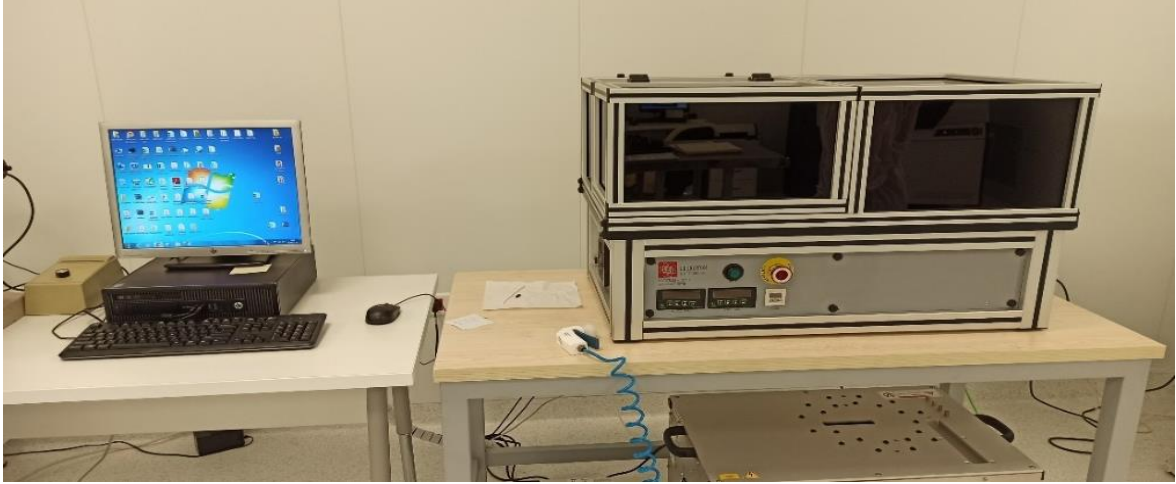
$$R_H = -\frac{1}{H} \left(\frac{\sigma_{xx}(H)}{\sigma_{xx}^2(H) + \sigma_{xy}^2(H)} \right) \quad (3.5)$$

$$\rho(H) = \frac{\sigma_{xx}(H)}{\sigma_{xx}^2(H) + \sigma_{xy}^2(H)} \quad (3.6)$$

$$N_s = -\frac{I}{eR_H} \quad (3.7)$$

$$\mu = -\frac{R_H}{\rho(H)} \quad (3.8)$$

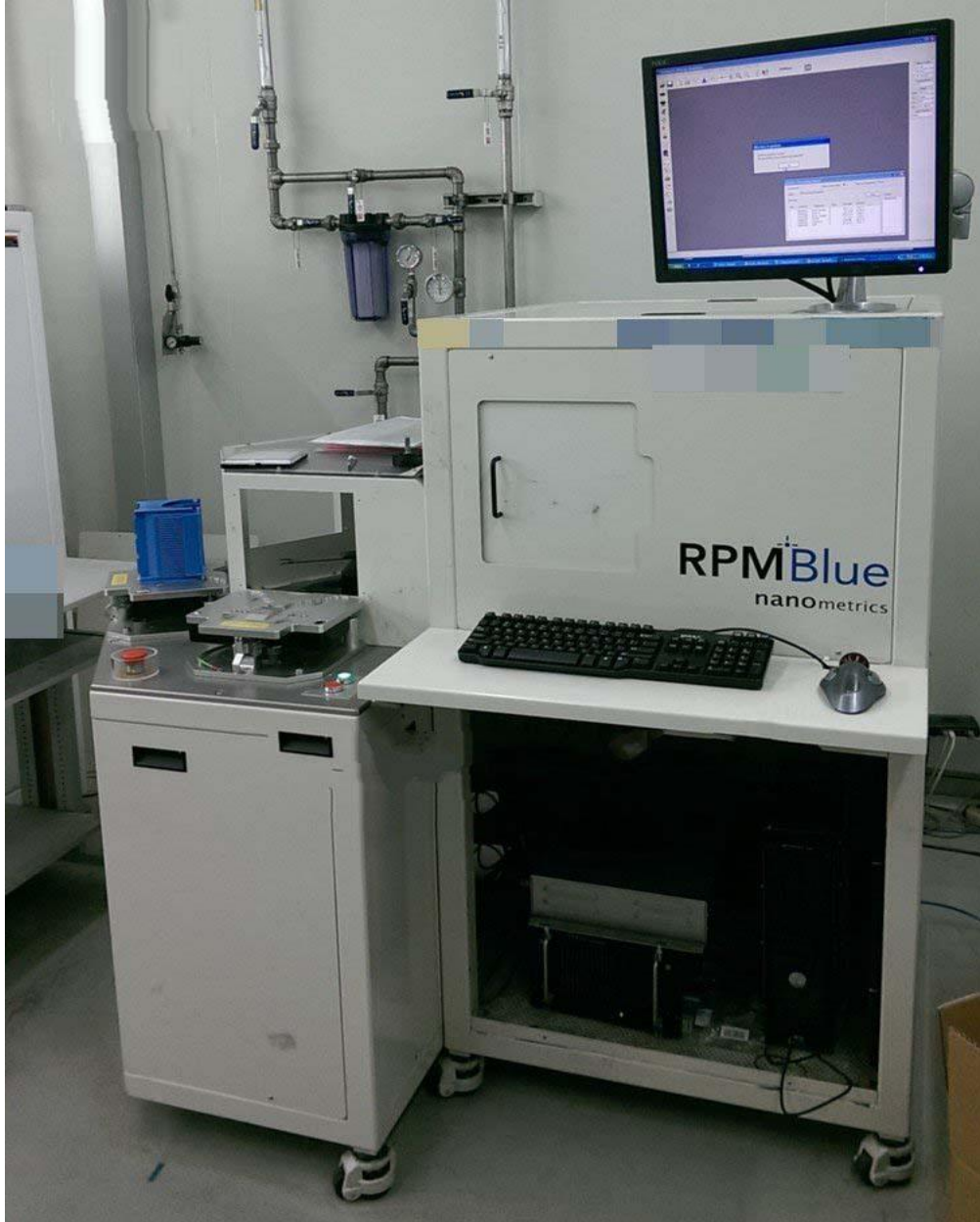
Resim 3.2’de NANOTAM’da bulunan temassız Leighton LEI marka hall ölçüm sistemi görülmektedir.



Resim 3.2. Temassız hall ölçüm sistemi

Fotolüminesans (PL) ölçümü

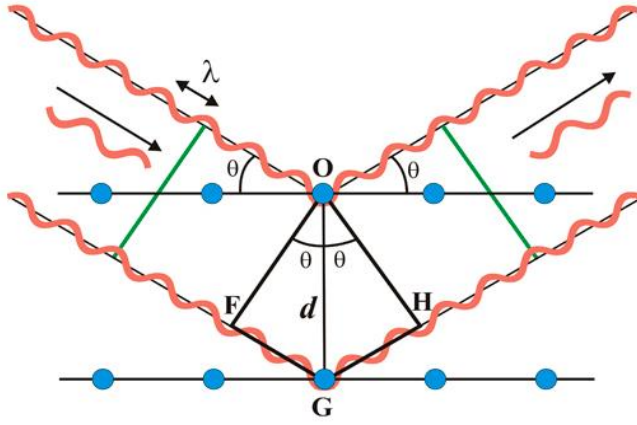
Bir malzemenin kendine özgü yasak enerji band aralığından daha yüksek enerjiye sahip bir ışık ile etkileştiğinde karakteristik bir ışın yaymaktadır. Bu olaya fotolüminesans (PL) denir. PL tekniğinde, gönderilen yüksek enerjisi ışın sayesinde valans bandındaki elektronlar uyarılır ve iletim bandına geçmeleri sağlanır. Ancak elektronlar daima kararlı durumda bulunmak istediklerinden dolayı iletim bandından valans bandında geri dönerler. Bu dönüşte de malzeme kendi E_g değerine denk olacak şekilde karakteristik bir ışın yayarlar. Bu ışının analizleri sonucunda yarıiletkenin bant aralığı, kristal kalitesi, safsızlık, toplam malzeme kalınlığı ve belirli malzemelerin oranı hakkında bilgiler edinilir. Özellikle AlGaN katmanındaki Al oranı 2DEG yoğunluğu için çok önemlidir [5]. PL yöntemi ile Al oranı bulunur. Resim 3.3'te NANOTAM'da bulunan Nanotmetrics RPM Blue marka PL sistemi görülmektedir.



Resim 3.3. Nanotronics RPM Blue marka PL sistemi

X ışını kırınımı (XRD) ölçümü

X ışını kırınımı ile malzemelerin kristal kusurları, alaşım oranları, kristal örgüleri gibi özellikler hakkında bilgiler alınır. Bu yöntemde her malzemenin kendine özgü XRD deseni olması sebebi ile malzeme tayininde kolayca yapılabilir. XRD'nin çalışma ilkesi olarak Eş. 3.9'da yazılan ve Şekil 3.5'te gösterilen Bragg yasasına dayanır.



Şekil 3.5 Bragg yasasının görsel gösterimi [43]

Hekzagonal bir yapıda, düzlemler arasındaki uzaklık d_{hkl} ; a ve c örgü sabitleri ve hkl Miller indisleri (birim hücrede düzlemler) olmak üzere Eş. 3.10'daki gibi ifade edilir.

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (3.9)$$

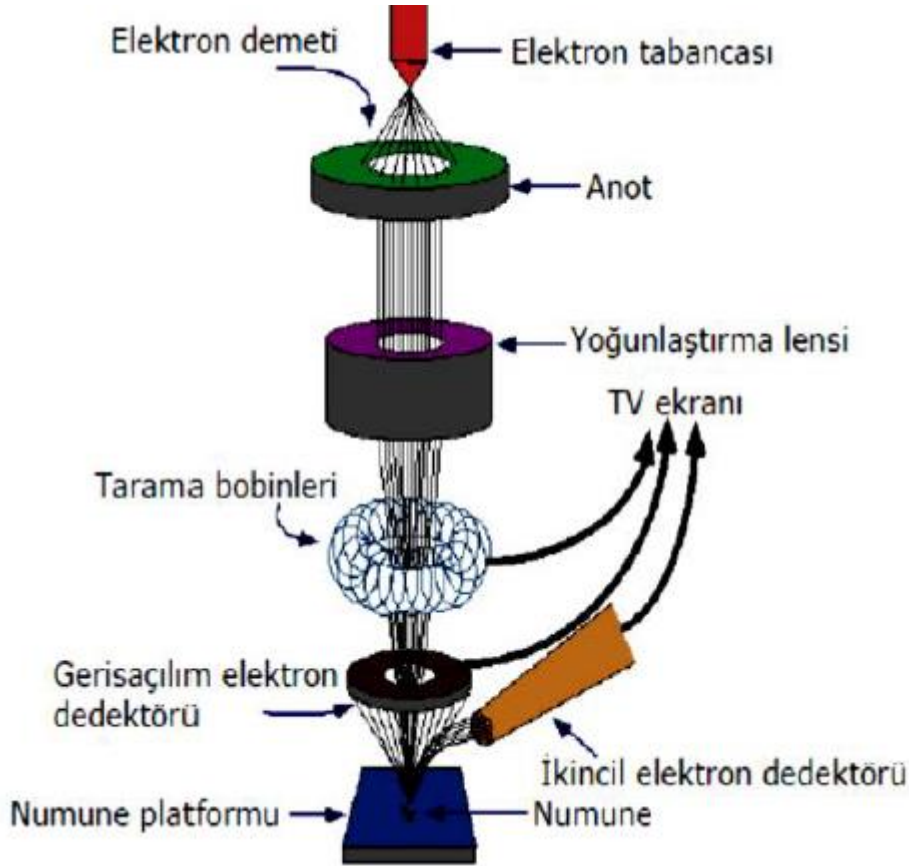
GaN HEMT yapılarında XRD desenleri incelenerek GaN, AlN, SiC malzemelerin tayinleri yapılır. Ayrıca bu desenler özel yazılımlar ile analiz edildiğinde katman kalınlıkları, katman malzeme kalitesi, alaşım oranları gibi önemli özellikler incelenir. Resim 3.4'te NANOTAM'da bulunan XRD sistemi görülmektedir.



Resim 3.4. Rigaku XRD Sistemi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kalınlık ölçümü

Epitaksiyel katman kalınlıklarının nanometre mertebesinde olması taramalı elektron mikroskobu (SEM) kalınlık ölçümlerinde kullanılır. Ancak katman arayüzünün SEM’de zor odaklanması ve SEM’de elektron demetinin katman kesitinde sürekli yük biriktirmesi sebebi ile sürekli tercih edilen bir yöntem değildir. SEM’de, yüksek enerjiye sahip elektronların numune ile etkileşmesi sonucu ikincil elektronlar ve fotonlar oluşur. Oluşan bu ikinci elektronlar belli açılarda saçılarak bir dedektör (algılayıcı) tarafından toplanır. Dedektörde sinyaller elektronik arabirim ve mikroskop yazılımı ile işlenmesi ile görüntüler elde edilir. İkincil elektronlar, malzeme yüzeyi durumu ile ilgili bilgiler verirken, geri saçılan elektronlar ise malzemelerin atomik kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.6’da ise SEM’in şematik çizimi görülmektedir.



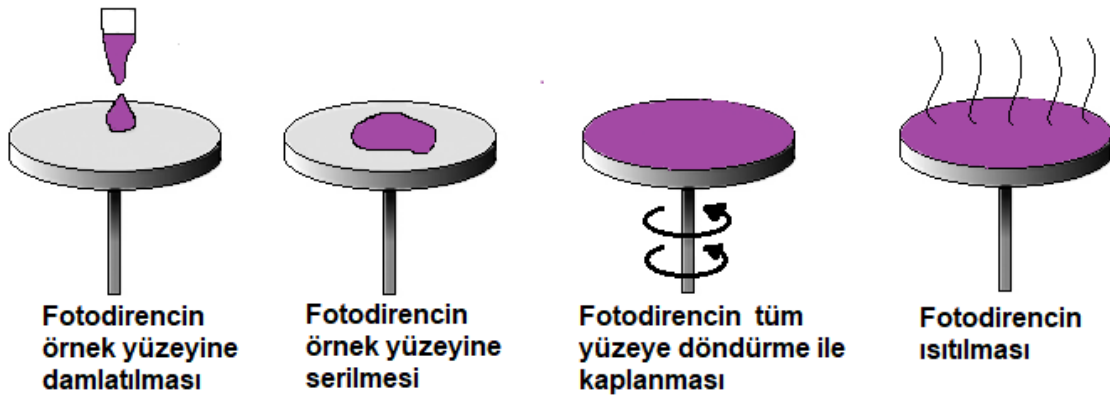
Şekil 3.6. SEM şematik çizimi [44]

3.2. GaN HEMT Fabrikasyon ve Karakterizasyon Yöntemleri

3.2.1. Fotolitografi

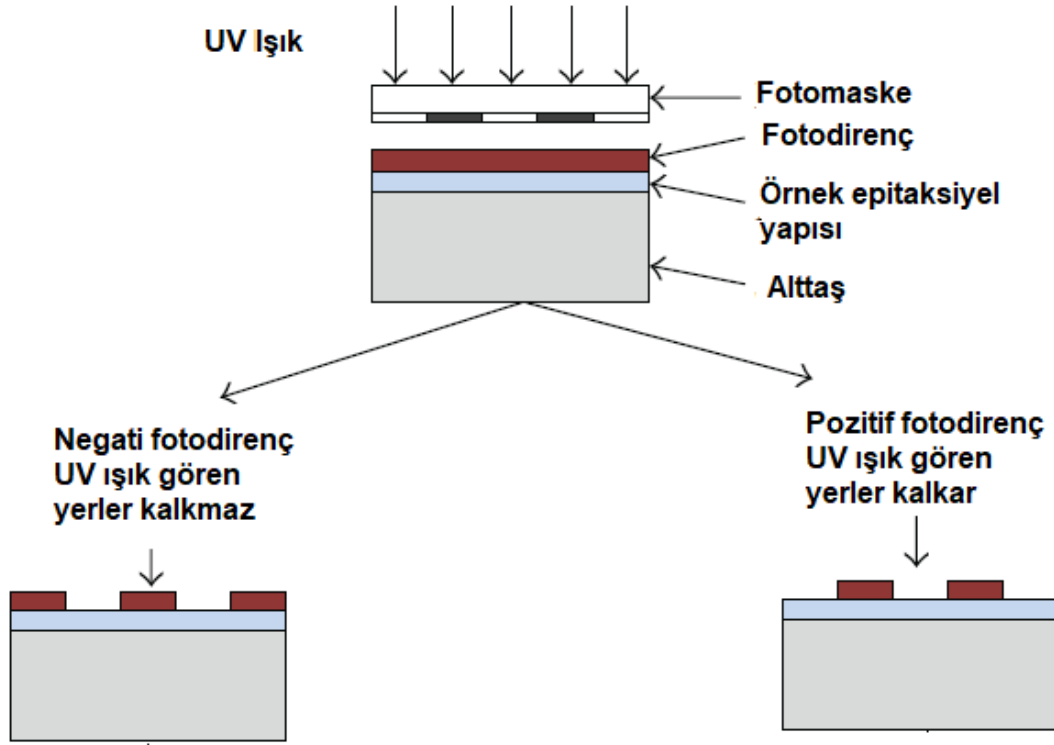
Fotolitografi, ultraviyole (UV) ışık kullanılarak istenilen desenlerin ışığa duyarlı fotodirenç adı verilen malzeme yardımı ile örnek üzerinde oluşturma işlemidir. Fotolitografide ilgili desenler fotomaske adı verilen özel bir cam üzerinde bulunur. Fotomaske UV ışık ile yüzeyine fotodirenç kaplı örnek arasına yerleştirilir. Fotomaskedeki desenlerden geçen UV ışık geçerek örnek yüzeyine düşer ve fotomaskede bulunan desenleri fotodirenç malzeme üzerinde şekillendirir. Daha sonra örnek geliştirici adı verilen özel kimyasal bırakılır ve desenlerin oluşması sağlanır. Fotolitografi işlemi temel olarak, fotodirenç kaplama, UV ışık ile pozlama ve geliştirici sıvı ile banyolama adımlarından oluşur. Fotodirenç ışığa duyarlı özel kimyasal malzemedir. Fotodirenç malzeme temel olarak reçine, çözücü ve fotoaktif bileşikten oluşmaktadır. Reçine; yoğunluğu ve viskozitesi oldukça yüksek, katı ya da yarı sıvı yapıda bulunabilen polimer malzemedir. Çözücü ise reçineyi çözerek sıvı faz olarak

kullanılmasını sağladığı gibi reçineyi de bozulmalara karşı korur. Fotoaktif bileşikse, bir geliştirici solüsyonda reçinenin çözünmesine engel olmak ya da çözünmesini daha da kolaylaştırmak için kullanılan bir malzemedir. Fotodirenç dönel yöntem ile örnek yüzeylerine belli hızlarda ve belli sürelerde kaplanır. Kaplama sonrası fotodirenç içerisinde bulunan çözücünün buharlaşması için ısıtma işlemi yapılır. Bu ısıtma işleminin nedeni çözücüyü buharlaştırarak fotodirenç malzemenin dış etkilere karşı daha sağlam olması içindir. Ayrıca ısıtma işlemi fotodirenç malzemenin örnek yüzeyine daha iyi yapışmasını da sağlar. Şekil 3.7’de fotodirenç malzemenin kaplanması ve ısıtma işlemi görülmektedir.



Şekil 3.7. Fotodirenç malzemenin örnek yüzeyine kaplanması ve ısıtılması

Fotodirenç kaplaması sonrası yüzeyi fotodirenç kaplı örnek fotomaske kullanılarak UV ışıkla etkileşir. Maske hizalayıcı adı verilen sistemde fotomaskedeki desenler örnek yüzeyine hizalanır ve UV ışık kullanılarak örnek yüzeyine aktarılır. Fotomaske genelde krom kaplı kuvars bir camdan oluşmaktadır. fotomaske üzerindeki krom olmayan bölgelerde UV ışın geçerek örnek yüzeyine ulaşırlar. Daha sonra örnek geliştirici sıvı içerisine konulur ve UV ışın gören bölgeler sıvı içerisinde kalkar. Kullanılan fotodirenç türüne göre fotolitografi pozitif ve negatif fotolitografi olarak ikiye ayrılır. Pozitif tonlu fotodirenç ile yapılan pozitif fotolitografide UV ışın gören bölgeler geliştirici sıvıda kalkarken, sadece UV ışın görmeyen bölgelerde fotodirenç malzemesi fotomaskedeki desenler gibi kalır. Negatif tonlu fotodirenç ile yapılan negatif fotolitografide ise durum tam tersidir. UV ışın gören bölgelerde fotodirenç malzemesi fotomaskedeki desenler gibi geliştirici sıvıda kalırken, UV ışın görmeyen bölgeler kalkar. Şekil 3.8’de pozitif ve negatif fotolitografinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.8. Negatif ve pozitif fotolitografi [45]

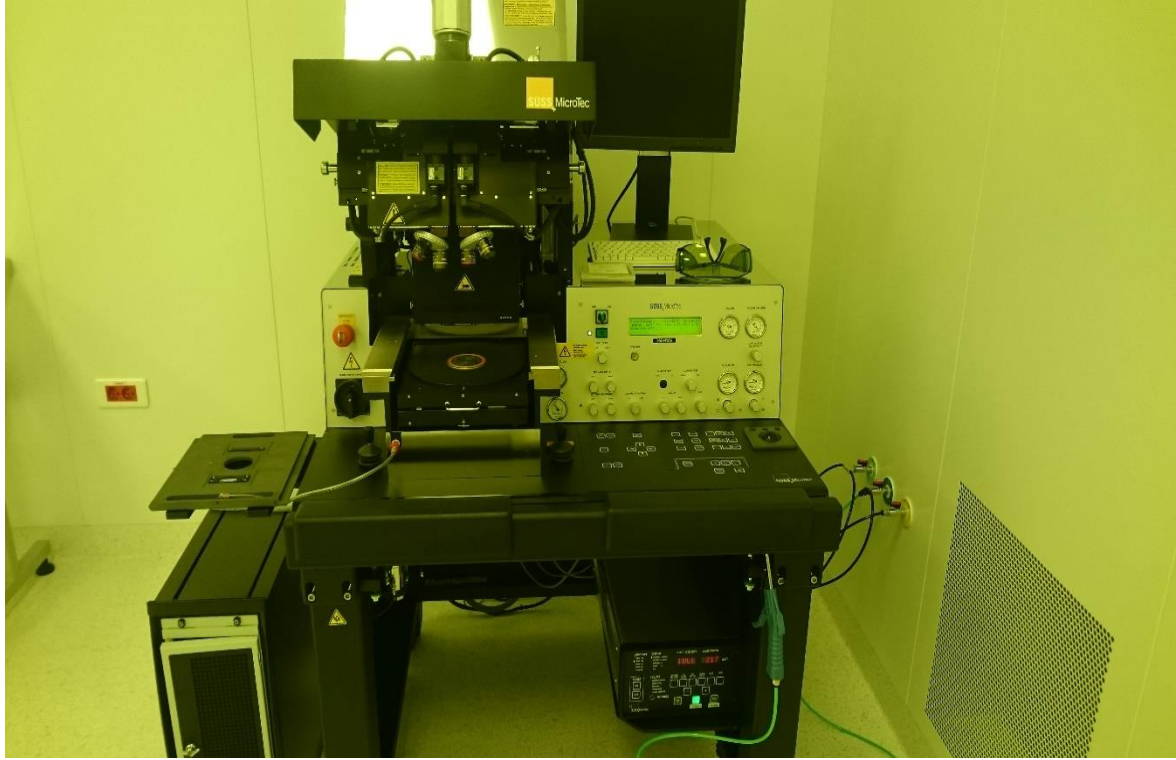
Pozitif fotolitografi örnek yüzeyinin aşındırma işlemleri için kullanılırken, negatif litografi ise metal kaplama işlemlerinde kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında GaN HEMT aygıt üretimi için NANOTAM’da bulunan SUSS maske hizalayıcısı sistemi (Resim 3.5) ile pozitif ve negatif fotolitografiler yapılmıştır.

3.2.2. Elektron demeti litografisi

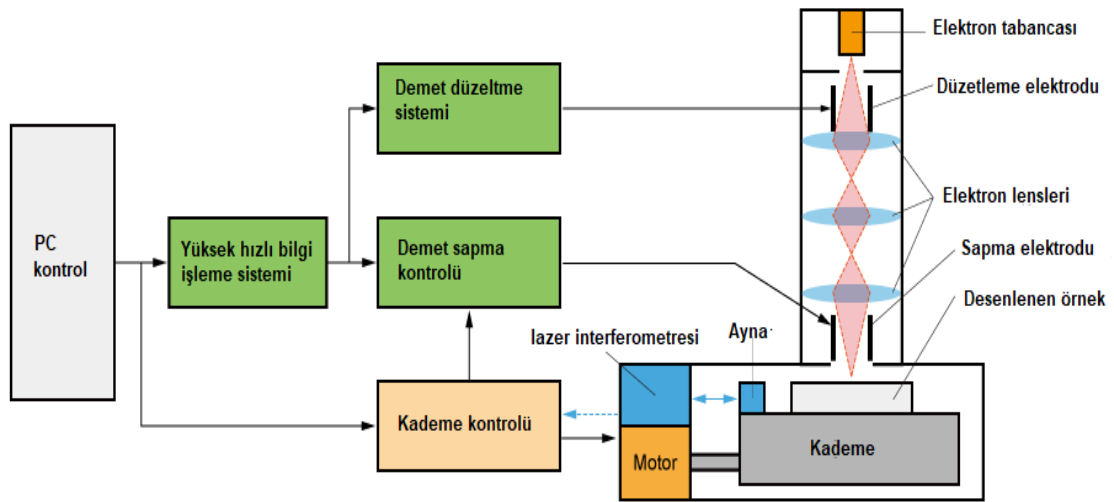
Fotolitografi yönteminde çözünürlüğün mikron mertebelerinde olması sebebi ile GaN HEMT aygıtlarda mikron altı yapılar olan kapı kontağı için elektron demeti litografisi yöntemi kullanılmaktadır [46]. Elektronların UV ışıktan daha küçük dalga boylarına sahip olması (Eş. 3.11 De-Broglie dalga boyu) sayesinde elektronlar ile nanometre mertebelerinde litografiler yapılır.

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{1,23}{\sqrt{E}} \quad (3.11)$$

Elektron demeti litografisinde kullanılan direnç kimyasal malzemesi elektronlara duyarlıdır ve geliştirici sıvılarda fotolitografideki geliştirici sıvılardan farklıdır. Ayrıca elektron demeti litografisinde desenler için maske kullanılmaz. Bunun için sisteme desenler özel yazılım içerisinde maske olarak tanıtılır ve elektronlar ile taranarak örnek yüzeyinde oluşturulur. Ancak bu desen oluşturma işlemi fotolitografi ile kıyaslandığında daha uzun zaman almaktadır. Şekil 3.9’da elektron demeti litografisi sisteminin genel çizimi görülmektedir. Bu tez kapsamında GaN HEMT aygıtların kapı kontağı adımı elektron demeti litografiler NANOTAM’da bulunan Raith elektron demeti litografisi sisteminde (Resim 3.6) yapılmıştır.



Resim 3.5. SUSS Maske hizalayıcı sistemi



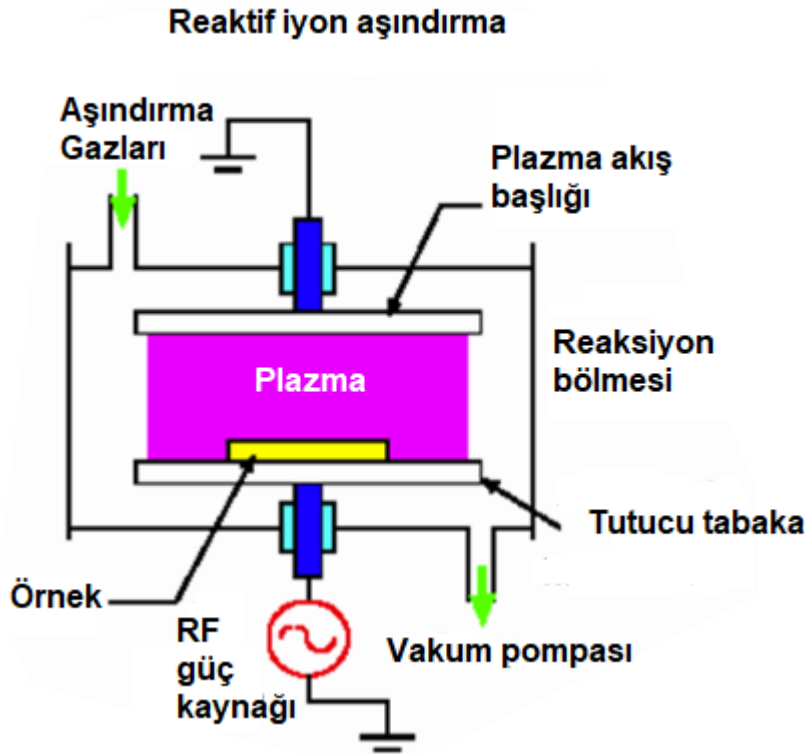
Şekil 3.9. Elektron demeti litografisi sistemi [47]



Resim 3.6. Raith elektron demeti litografisi sistemi

3.2.3. Kuru aşındırma yöntemi

Kuru aşındırma yöntemi yarıiletken, optoelektronik ve mikro-elektronik uygulamalarında aygıt üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Temel olarak örnek yüzeyinde istenmeyen atomların bir plazma yardımı ile uzaklaştırılmasıdır. Örnek yüzeyinde tüm atomlar uzaklaştırılabildiği gibi fotolitografi ile desenleme yapılarak sadece belirli bölgelerdeki atomlarda uzaklaştırılabilir. Kuru aşındırma yöntemi plazma destekli aşındırma yapan özel sistemlerde gerçekleştirilir. Plazma kullanılarak yapılan bu işlemde aşındırma gazlarının iyonlaşması sebebi yapılan işlem etkin iyon aşındırma adını alır. Şekil 3.10'da etkin iyon aşındırmanın temel çizimi görülmektedir.



Şekil 3.10. Etkin iyon aşındırma [48]

Reaktif iyon aşındırmada aşındırılması istenen örnekler reaksiyon bölgesine konulur. Reaksiyon bölgesi içerisine aşındırma gazları belirli akışlarda gönderilir. Reaksiyon bölgesinde belirli bir basınç sağlandıktan sonra RF güç kaynağından RF sinyali oluşturulur. RF sinyali aşındırma gazları ile etkileştiğinde bu gazları iyonlaştırır ve ortamda reaktif iyonlardan oluşan plazma oluşur. Bu plazma, örnek yüzeyi ile etkileşir ve yüzeyde bulunan atomları kopartır. Böylece örneğin yüzeyinde plazma ile etkileşerek aşındırılır. Aşındırma

derinliği örnek yüzeyinin plazma ile etkileşme süresine bağlı olarak değişir. Endüktif eşleşmiş plazma etkin iyon aşındırma (ICP-RIE) yöntemi en çok kullanılan reaktif iyon aşındırma yöntemidir. ICP-RIE’da, yüksek aşındırma oranı, tüm örnek üzerinde homojen aşındırma derinliği ve daha az pürüzlülük elde edilir. Bu tez çalışmasında da GaN HEMT aygıtlarının mesa aşındırma, Si_3N_4 açıklığı gibi adımlar NANOTAM’da bulunan SAMCO ICP-RIE 140 IP sisteminde (Resim 3.7) yapılmıştır.

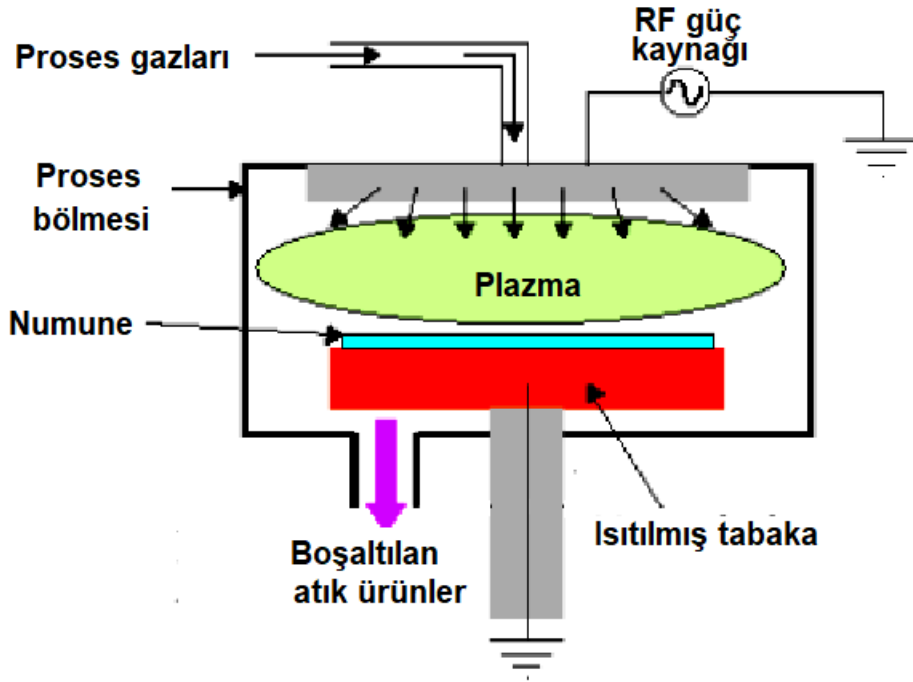


Resim 3.7. SAMCO ICP-RIE 140 ICP sistemi

3.2.4. Silisyum nitrür (Si_3N_4) dielektrik kaplaması

HEMT teknolojisinde yüzey pasivasyonu en önemli konulardan birisi olup, aygıtın elektriksel performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle uzun süreli çalışmalarda HEMT aygıtlarında çalışma kararlılığı ve akım çökmelerinin engellenmesi yüzey pasivasyonuna bağlıdır [49]. Yüzey pasivasyonu, yüzeyde bulunan bağ yapmamış atomları kimyasal olarak kararlı hale getirmek, epitaksiyel yapıdaki kristal kusurların etkinliğini azaltarak 2DEG hareketliliğinin düşmesinin önüne geçmek ve HEMT aygıtları mekaniksel ve kimyasal etkilerden korumak için yapılır. HEMT aygıtlarda yüzey pasivasyonu için Si_3N_4 dielektrik tabakası yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni yüzey pasivasyonu için uygulanan diğer dielektrik tabakaları ile karşılaştırıldığında GaN HEMT aygıtlarda elektriksel performansı daha yüksektir [50]. Bunun yanında Si_3N_4 dielektrik tabakasının mekaniksel olarak dayanıklı olması, örnek yüzeyine kolay ve kontrollü kaplanması, flor tabanlı gazlar hariç diğer atom ve iyonlar ile kolay kolay etkileşmeye girmemeside yaygın kullanılmasında önemli etmenlerdir. Si_3N_4 dielektrik tabakası hem fiziksel buharlaştırma ile kaplama (PVD) hem de kimyasal buharlaştırma ile kaplama (CVD) yöntemleri ile kaplanır. Ancak CVD yöntemi ile Si_3N_4 dielektrik tabakası kaplanması, yüksek sıcaklıklarda daha güçlü kimyasal bağlar kurulması sebebi ile daha çok tercih edilir. CVD yönteminin bir türü olan plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi HEMT aygıt teknolojisinde Si_3N_4 dielektrik tabakası kaplaması için en yaygın kullanılan yöntemdir. Şekil 3.11'de PECVD sisteminin temel çizimi görülmektedir.

PECVD sisteminde Si_3N_4 dielektrik tabakası kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Silan (SiH_4) ve Amonyak (NH_3) gazları 300-350 $^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmış proses bölmesine belirli akışlarda proses gazları olarak girer. Azot (N_2) ve Argon (Ar) gazlarda taşıyıcı gaz olarak proses bölmesine verilir. Tüm gazlar proses bölmesinde belirli bir basıncı sağladıktan sonra RF güç kaynağından RF sinyal oluşur ve sinyal proses bölmesinde proses gazlarını iyonlaştırarak reaktif iyonlara dönüştürür. Bu reaktif iyonlar uygulanan elektriksel gerilimle örnek yüzeyine doğru hareket ederler. Örnek yüzeyinde de çeşitli kimyasal reaksiyonlar gerçekleşerek Si_3N_4 dielektrik tabakası oluşur. Eş. 3.12'de Si_3N_4 dielektrik tabakasının kimyasal reaksiyon denklemi görülmektedir. Bu reaksiyon denkleminde hidrojen gazının (H_2) atık ürün olarak oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.11. PECVD Temel Çizimi [51]

Atık ürünlerin boşaltılması için vakum pompası ile proses bölgesi belirli aralıklarda vakumlanır.



Si_3N_4 dielektrik tabakası örnek yüzeyine kaplandıktan sonra reflektometre veya elipsometre sistemleri optik olarak kalınlığı ve kırıcılık indisi ölçülür.

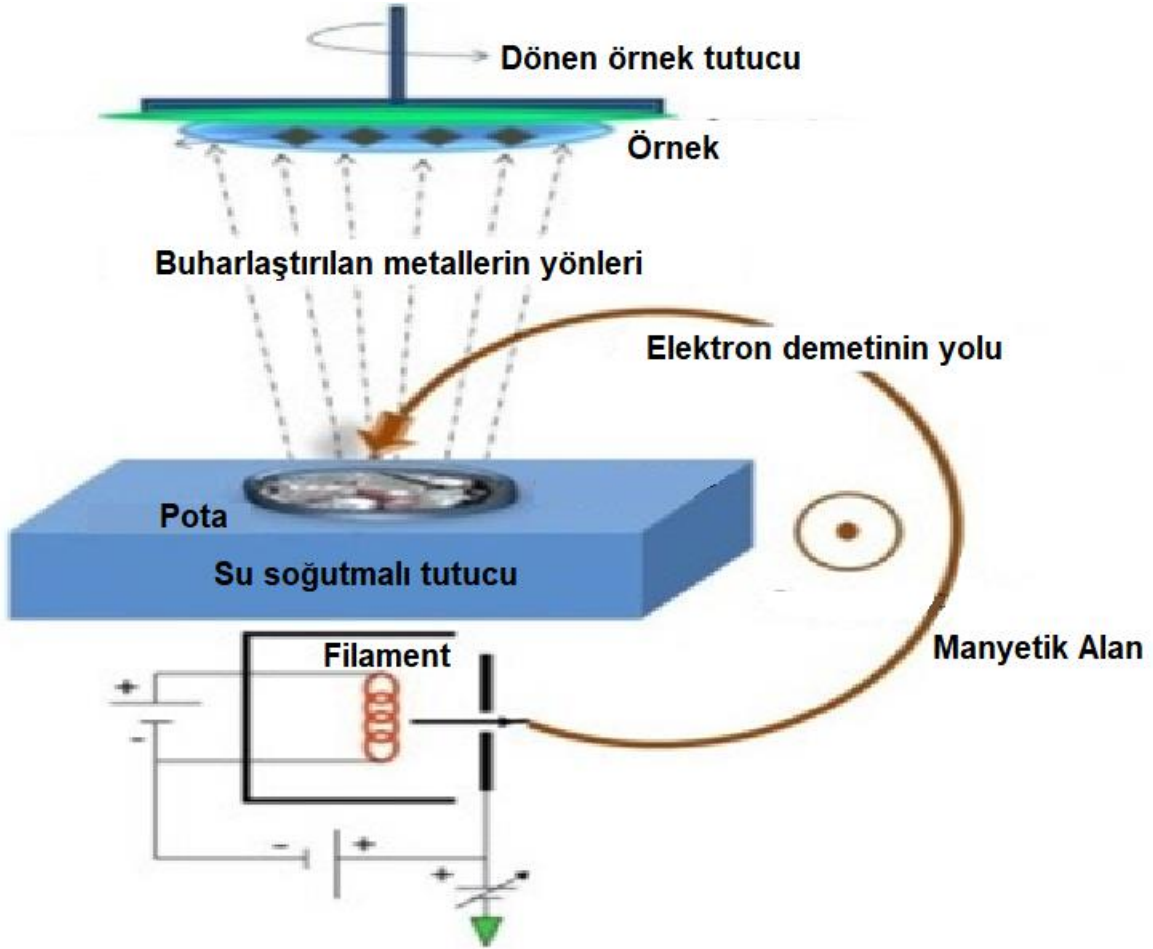
Bu tez çalışmasında tek ve çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakasının GaN HEMT aygıt üzerindeki etkilerinin incelenmesi nedeniyle Si_3N_4 dielektrik tabakası kaplaması bu tez açısından oldukça önemlidir. Farklı sıcaklıklarda ve farklı kalınlıklarda kaplanan Si_3N_4 dielektrik tabakasının kaplama ve ölçüm detayları GaN HEMT aygıt fabrikasyonu kısmında detaylıca anlatılmıştır. Bu tez çalışmasında Si_3N_4 dielektrik tabakası kaplaması için görülen NANOTAM’da bulunan Sentech SI 500 PPD PECVD sistemi (Resim 3.8) kullanılmıştır.



Resim 3.8. Sentech SI 500 PPD PECVD Sistemi

3.2.5. Elektron demeti buharlaştırma ile metal kaplaması

GaN HEMT aygıtlarda kaynak, akaç ve kapı kontağının da metallerin oluşması için fotolitografi ve elektron demeti litografisi ile oluşturulan desenlere ilgili metallerin kaplanması gerekmektedir. Bu metaller elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile vakum ortamında buharlaştırılarak örnek yüzeylerine kaplanır. Elektron demeti buharlaştırma yönteminde titanyum, nikel, alüminyum, altın, platin, krom vb. metaller nanometre hassasiyetinde kontrollü olarak istenilen kalınlıkta kaplanır. Şekil 3.12’de elektron demeti buharlaştırma sisteminin şematik görünümü gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Elektron demeti buharlaştırma sistemi [52]

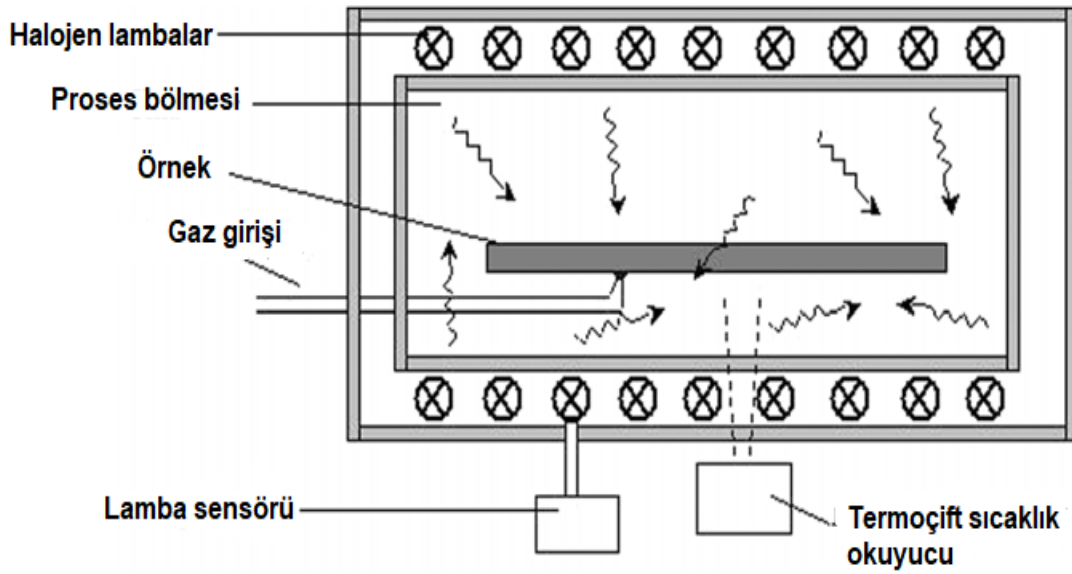
Elektron demeti buharlaştırma sisteminde, yüksek gerilimler (8-10 kV) uygulanan filamentte elektronlar kopartılır ve demet haline getirilir. Bu elektron demeti bir güçlü manyetik alan ile dairesel yol izler ve metallerin olduğu potaya doğru yüksek hızla saptırılır. Potadaki metaller ile yüksek hızlı elektronların etkileşimi sonucu elektronlar enerjilerini metallere aktarır ve metalleri kopartmaya başlarlar. Koparılan metalin miktarı elektronların demet boyutu ile orantılı olduğundan, filamentte koparılan elektron sayısı artırılarak koparılan metalin miktarı artırılabilir. Böylece kaplama hızı artar. Koparılan metaller daha soğuk bölgede bulunan örnek yüzüne doğru termal akış ile yapışarak kaplanırlar. Kaplama boyunca örneğin belirli hızlarda döndürülmesi ile kaplama homojen olacaktır. Kaplama kalınlığı ve kaplama hızı, kaplanan örnek ile aynı bölgede bulunan kristal osilatör sensör ile takip edilir. Bu tez çalışmasında GaN HEMT aygıtların kaynak, kaynak, kapı kontakları ile bağlantı metali adımlarında NANOTAM'da bulunan Univex 350 elektron demeti buharlaştırma sistemi (Resim 3.9) kullanılmıştır.



Resim 3.9. Univex 350 elektron demeti buharlaştırma sistemi

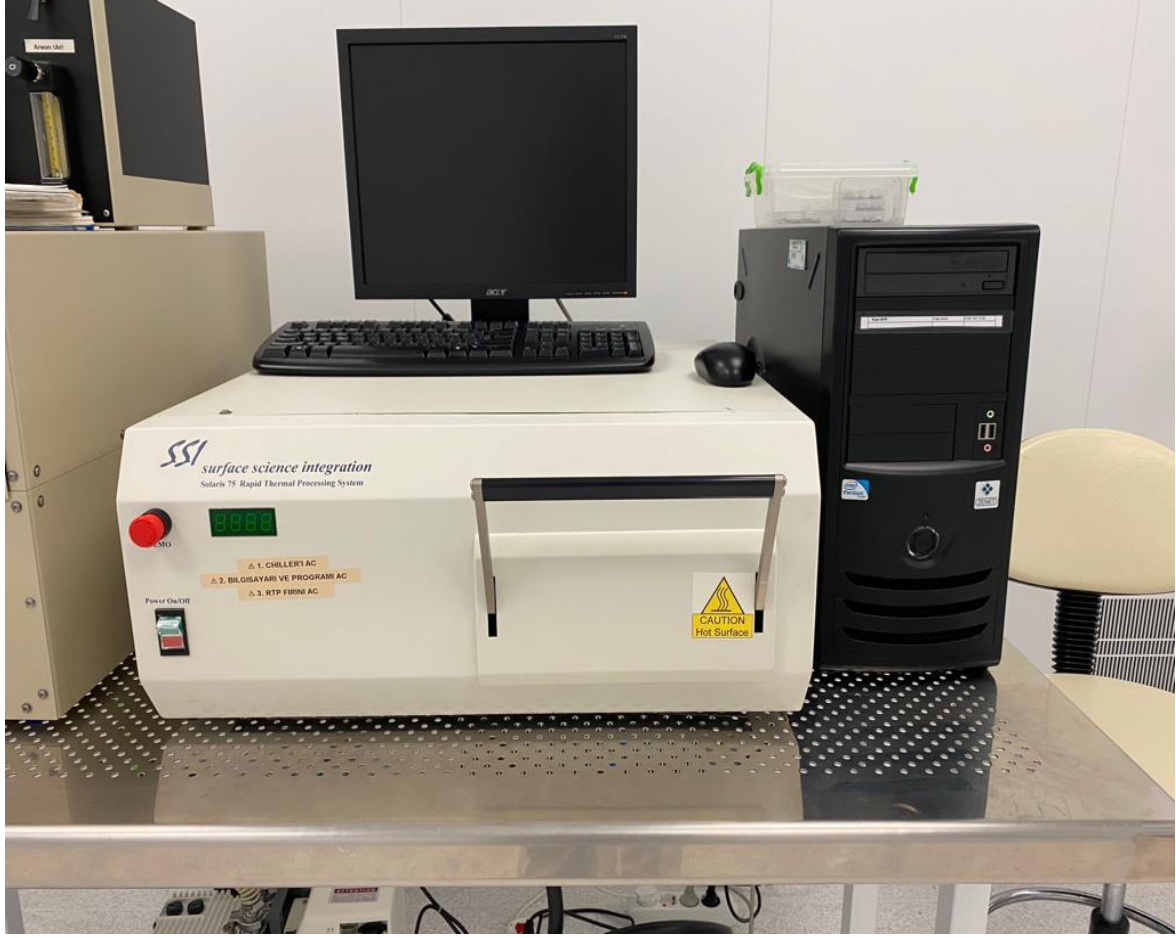
3.2.6. Hızlı ısıt işlem (RTP) yöntemi

GaN HEMT aygıt üretiminde kaynak ve akaç metallerinin omik kontak özelliği kazanabilmesi için yüksek sıcaklarda, belirli bir gaz ortamında, kısa süreli ısıt işlem yapmak gereklidir. Kaynak ve akaç metalleri hızlı ısıt işlemle epitaksiyel yapıda 2DEG bölgesine kadar girecektir. Böylece metallerin elektriksel dirençleri düşecek ve omik kontak özelliği kazanacaklardır. Bu hızlı ısıt işleme tavlama da denir. Hızlı ısıt işlemi N_2 gazlı ortamda halojen lambalar kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 3.13’de Hızlı ısıt işlem sisteminin şematik görünümü görülmektedir.



Şekil 3.13. Hızlı ısıt işlemi sistemi [53]

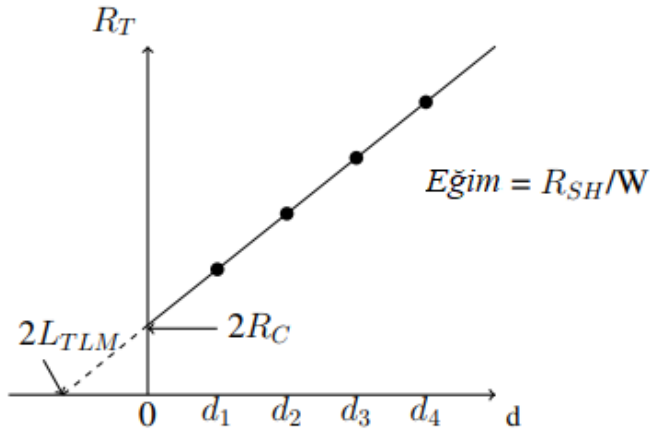
Bu tez çalışmasında, NANOTAM’da bulunan SSI SOLARIS 75 marka hızlı ısıt işlemi sistemi (Resim 3.10) kullanılarak kaynak ve akaç metallerine omik kontak özelliği kazandırılmıştır.



Resim 3.10. SSI SOLARIS 75 Hızlı ısıtma işlemi sistemi

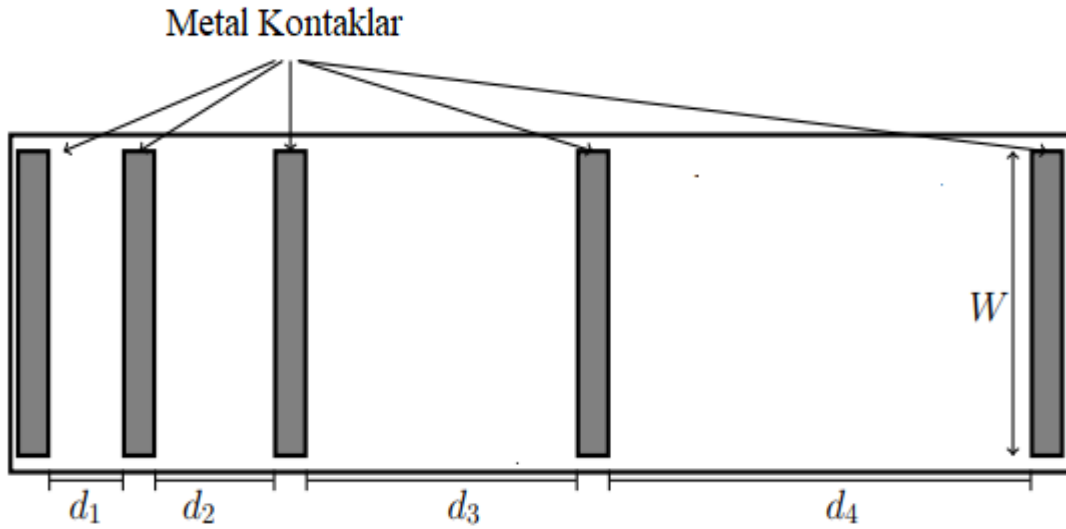
3.2.7. İletim hattı modeli yöntemi (Transmission Line Model)

İletim hattı modeli (TLM), omik kontakları elektriksel olarak ölçmek için en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntem ile metal kontağın kendi direnci (R_c) ve epitaksiyel yapıdan gelen kanal direnci (R_{SH}), belirli geometrik yapıya sahip desenler yardımı ile ölçümler yapılarak hesaplanır. Bu yöntemde temel olarak aralarında farklı aralıklar olan dikdörtgensel metal kontak alanları arasında direnç ölçümü yapılmaktadır. Aralığa (d) bağlı direnç (R) direnç değişiminin grafiği Şekil 3.14'teki gibidir.



Şekil 3.14. TLM yönteminde ölçüm grafiği [54].

Şekil 3.15’de ölçüm alınan metal kontakların çizimleri görülmektedir. Şekil 3.15’den eğim ve kontak genişlikleri kullanılarak R_{SH} , grafikte yatak eksen kesilen nokta bulunarak R_C hesaplanır. Eş.3.13’teki denklem ile toplam direnç hesaplanır. Bu tez çalışması kapsamında da GaN HEMT aygıt üretiminde omik kontaklar oluşturulduktan sonra TLM ölçümleri yapılmıştır.

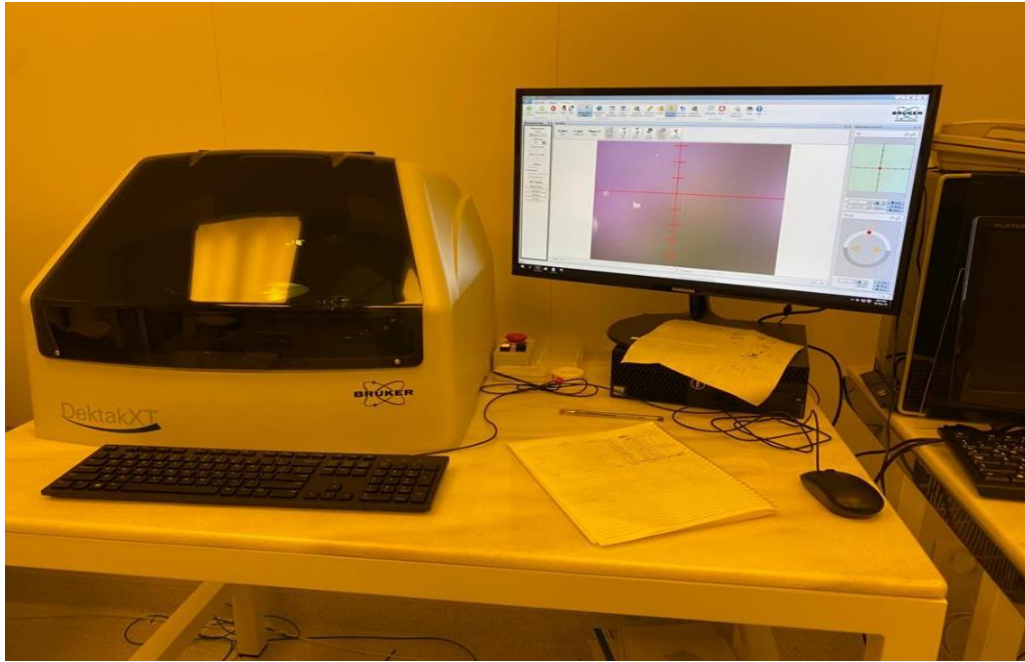


Şekil 3.15. TLM ölçüm desenleri [54]

$$R_T = 2R_c + \left(\frac{R_{SH}}{W}\right)d \quad (3.13)$$

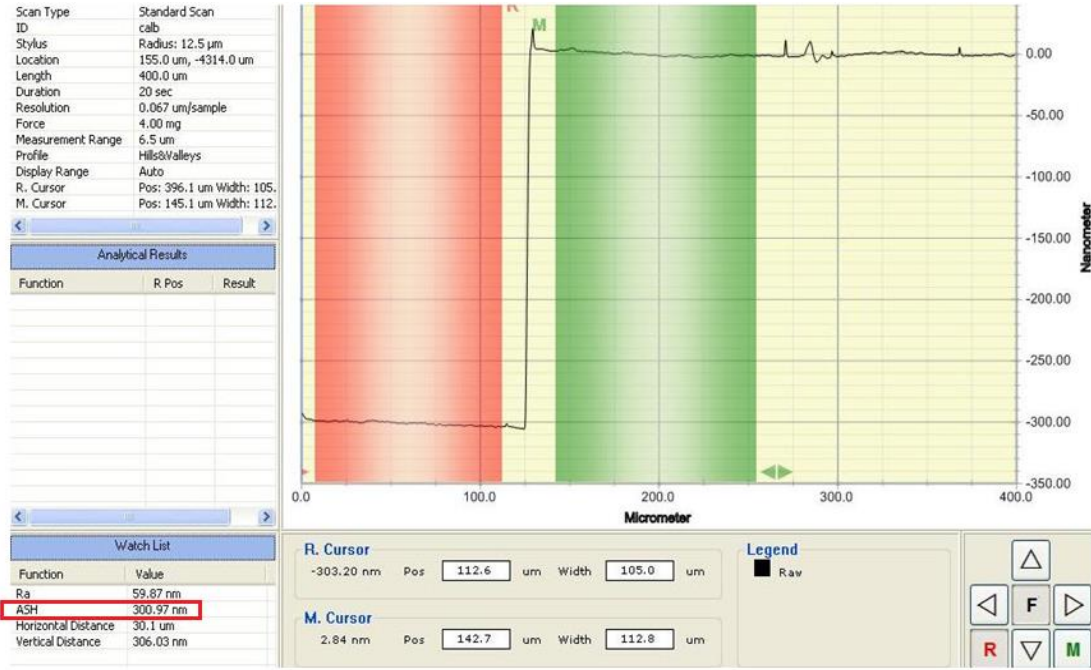
3.2.8. Profilometre ile kalınlık ve stress ölçümü

Profilometre, hareketli dönen bir kol parçasına takılı sivri bir elmas iğne ucun, örnek yüzeyinde taranması ile yüzey profilindeki kalınlık değişimlerinin nanometre mertebesinde incelenmesini sağlayan sistemdir. Kol parçasına takılı uç, örnek yüzeyini tararken yüzeyin morfolojisinden kaynaklı dikey yönde yapacağı hareketler elektro-mekanik dönüştürücüler yardımıyla elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu elektriksel sinyaller özel yazılımlar ile örnek yüzeyindeki yükseklik farklılıkları olarak ölçülür. Profilometre ile örnek yüzeyinde kalınlık değişimleri, belirli aralıkta yüzey pürüzlülüğü ve ince filmdeki stress gibi ölçümler yapılmaktadır. Resim 3.11’de NANOTAM’da bulunan Bruker marka DektakXT model profilometre görülmektedir. Bu tez çalışmasında GaN HEMT aygıtların üretiminde mesa ve dielektrik açıklığı gibi adımlarda aşındırma derinlikleri profilometre ile ölçülmüştür. Ayrıca Si_3N_4 dielektrik kaplamalarında Si_3N_4 ince filmin kaplama oranı hesaplamalarında profilometre kullanılmıştır.



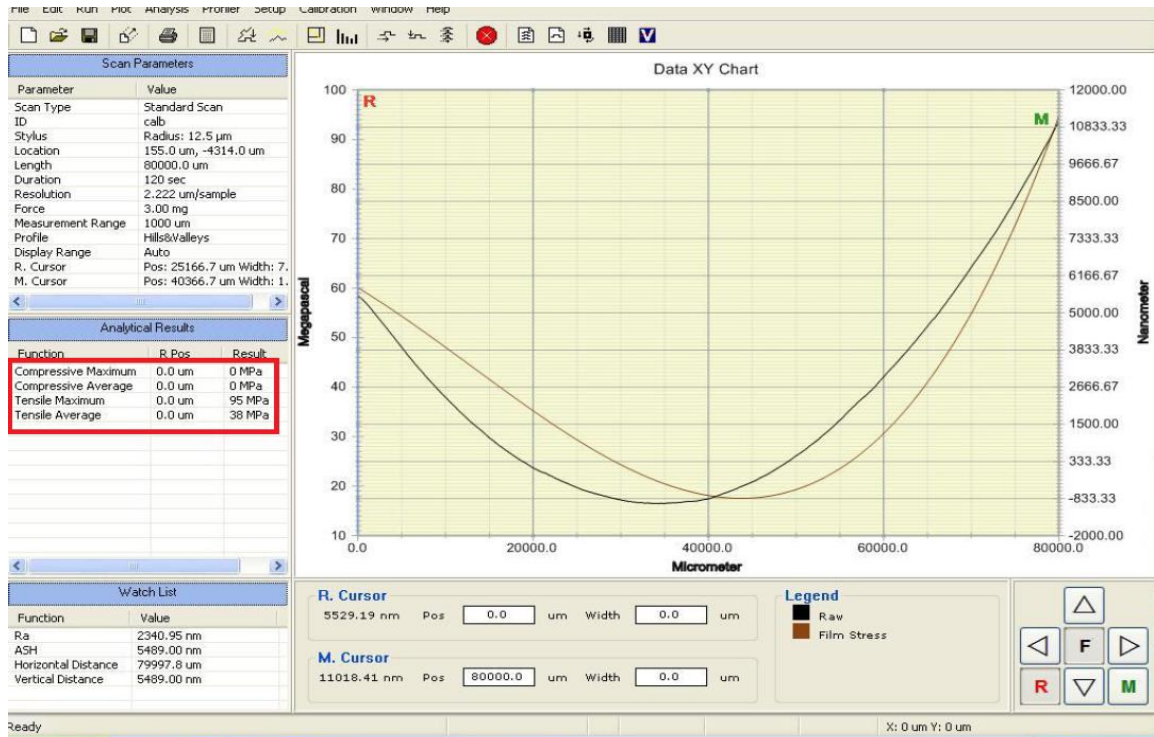
Resim 3.11. Bruker DektakXT profilometre sistemi

Şekil 3.16’da ise profilometrede alınan örnek kalınlık ölçümü görülmektedir. Burada ASH değeri kalınlık ölçüm değerini vermektedir.



Şekil 3.16. Profilometrede örnek bir kalınlık ölçüm gösterimi

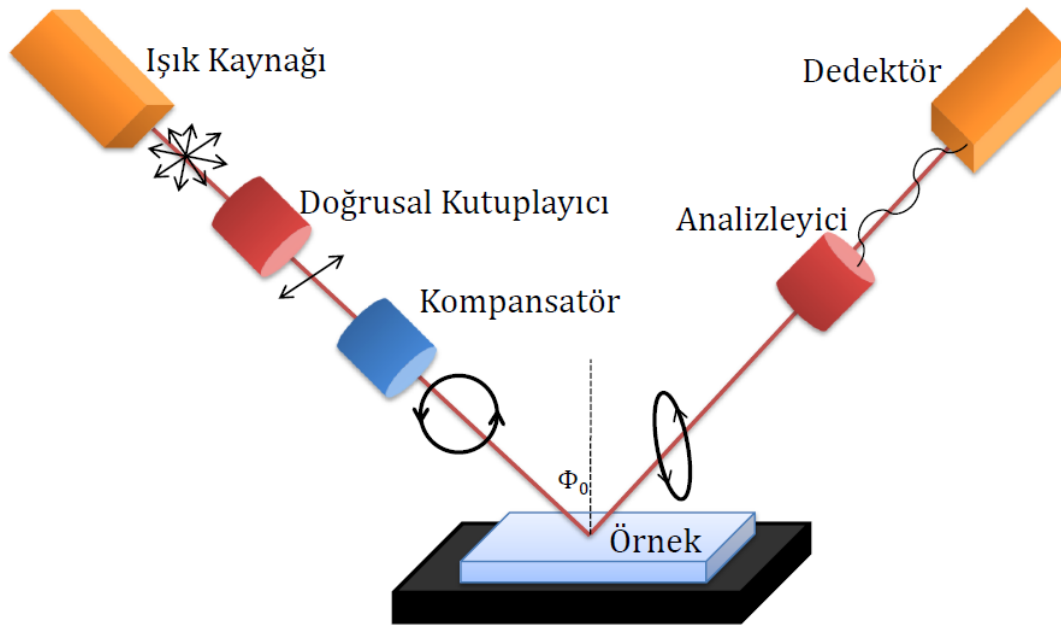
Şekil 3.17’de ise profilometre de stress ölçümü görülmektedir. Burada ince filmin stressine göre dış bükeyli stress (compressive) ve iç bükeyli stress (tensile) değerleri ölçülmektedir.



Şekil 3.17. Profilometrede stress ölçümü

3.2.9. Elipsometre ile kalınlık ve kırıcılık indisi ölçümü

Elipsometre ile ışığın numuneden yansıması ya da kırılması sırasında oluşan polarizasyon kullanılarak malzeme kalınlığı ve kırıcılık indisi ölçülür. Bu tez çalışmasında Si_3N_4 ince filmin kalınlık ve kırıcılık indisi ölçümleri NANOTAM'da bulunan Sentech marka elipsometre sisteminde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18'de elipsometre bileşenlerinin çizimleri görülmektedir. Resim 3.12'de ise Sentech marka elipsometre görülmektedir.



Şekil 3.18. Elipsometre ve bileşenleri [55]



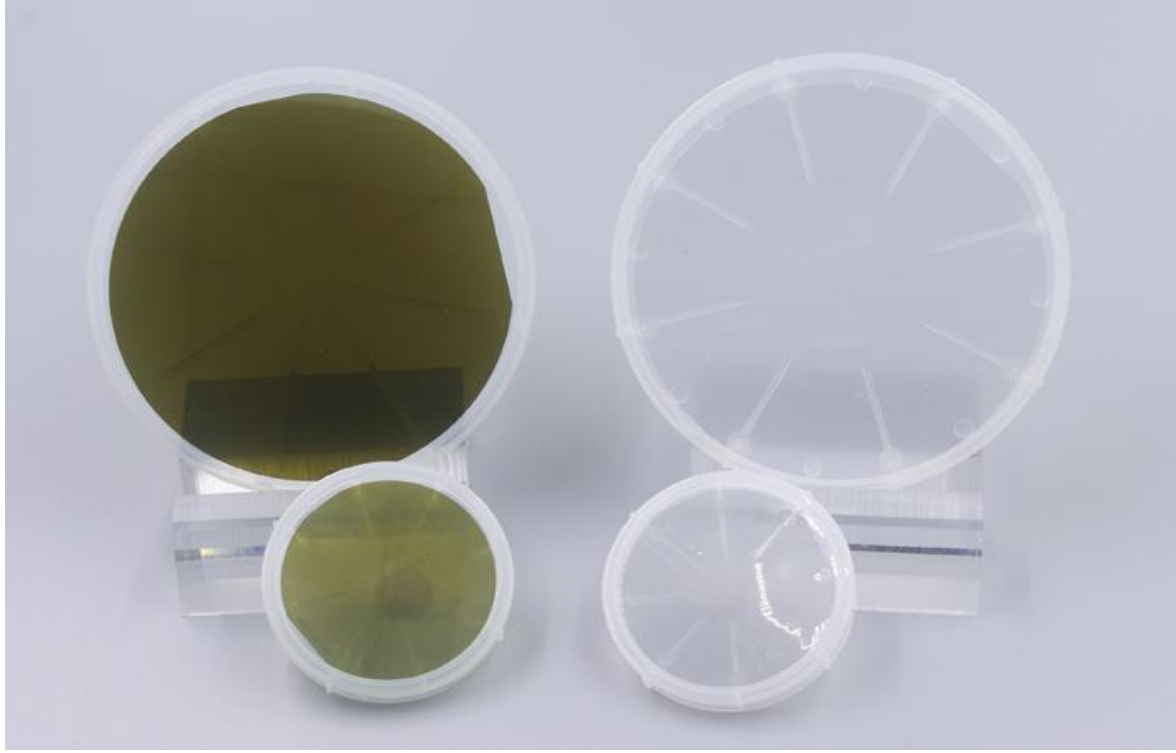
Resim 3.12. Sentech elipsometre sistemi

3.3. GaN HEMT Epitaksiyel Yapısının Büyütülmesi ve Karakterizasyonları

AIXTRON MOCVD sisteminde 3 inçlik SiC wafer üzerine GaN HEMT epitaksiyel yapısı büyütülmüş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Daha sonra bu SiC wafer kullanılarak GaN HEMT aygıtların üretimi ve karakterizasyonları yapılmıştır.

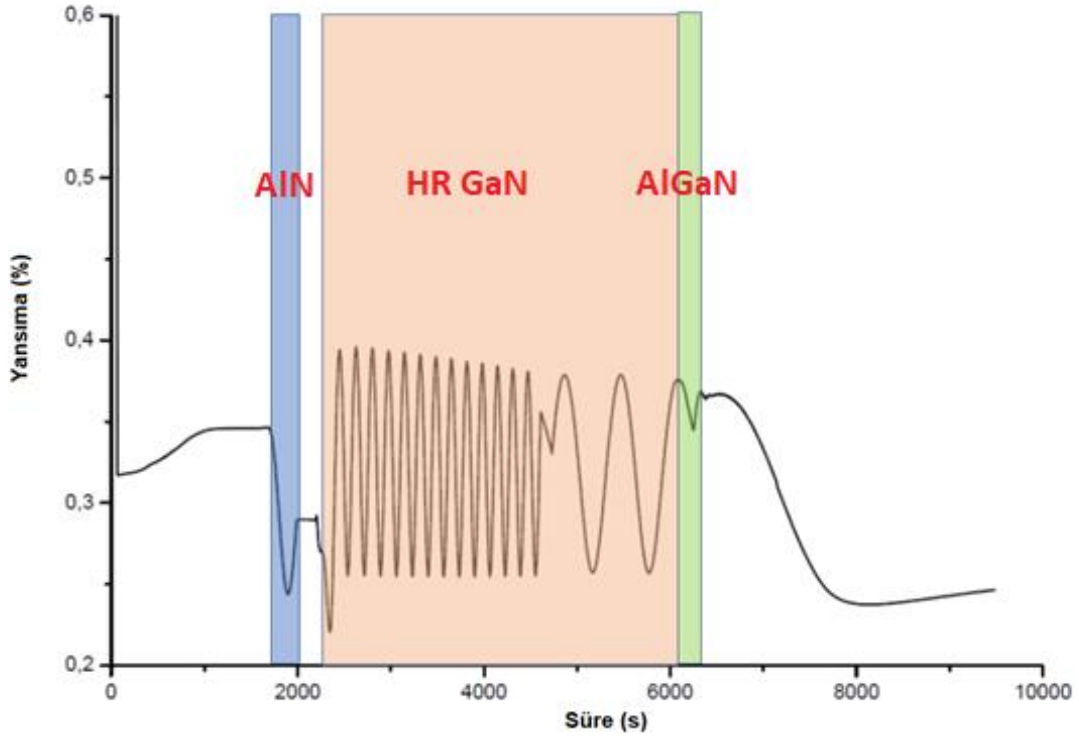
3.3.1. MOCVD ile GaN HEMT epitaksiyel yapıların büyütülmesi

AIXTRON MOCVD sisteminin reaktörüne 3 inç boyutunda tek adet SiC wafer (Resim 3.13) yerleştirildikten sonra GaN HEMT büyütmesine ait reçete kontrol edilerek başlatılmıştır. Reçetede ilk adım olarak reaktör sıcaklığı 1000 °C'ye yükseltilerek H₂ gazı akışı altında 5 dk. boyunca temizlik amacıyla tavlama işlemi yapılmıştır. Temizlik sonrası yüksek sıcaklık AlN katman büyütme amacıyla reaktör sıcaklığı 1130 °C'ye çekilmiştir. NH₃ akışı ve TMAI akışı V/III oranı 100 olacak şekilde ayarlanmış ve reaktör basıncı 50 mbar'da tutulmuştur. Bu koşullarda ~100 nm kalınlıkta büyütülmüştür.



Resim 3.13. SiC waferlar [56]

AlN katmanının ardından TMGa ve TMAI akışları V/III oranı 1300 olacak şekilde ayarlanmıştır. Reaktör sıcaklığı 1070 °C, basınç 200 mbar getirilerek yaklaşık 2000 nm kalınlığında HR GaN (yüksek dirençli) tampon katmanı büyütülmüştür. GaN katman üzerine AlN ara geçiş katmanı büyötmek için reaktör sıcaklığı 1080 °C ve basınç 100 mbar'a ayarlanmıştır. TMAI ve NH₃ akışları V/III oranı 400 olacak biçimde ayarlanarak ~1-2 nm kalınlığa sahip AlN büyütülmüştür. Ardından aynı basınç ve sıcaklık değerlerinde AlGaN katmanı için V/III oranı 1250 ve Al konsantrasyonu %28 olacak şekilde TMGa, TMAI ve NH₃ akışları ayarlanmış ve 22 nm AlGaN büyütülmüştür. AlGaN katmanının bitiminde aynı NH₃ akışı altında sadece TMAI akışı kesilerek GaN kapak katmanı yaklaşık 2 nm olacak şekilde büyütölerek proses bitirilmiştir. Büyütme boyunca taşıyıcı gaz olarak sadece H₂ gazı kullanılmıştır. Büyütmenin bitiminde büyütölen epitaksiyel filmde çatlamlar oluşmaması için reaktör 1200 s'de 500 °C'ye kontrollü bir biçimde NH₃ ve H₂ akışı altında soğutulduktan sonra 500 °C'den 150 °C'ye sadece H₂ akışı altında ve 150 °C'den oda sıcaklığına ise N₂ gazı akışı altında soğutulmuştur. Büyütme boyunca Şekil 3.19'da görölen Fabry-perot salınımları takip edilerek katmanlar hakkında bilgi alınmıştır.



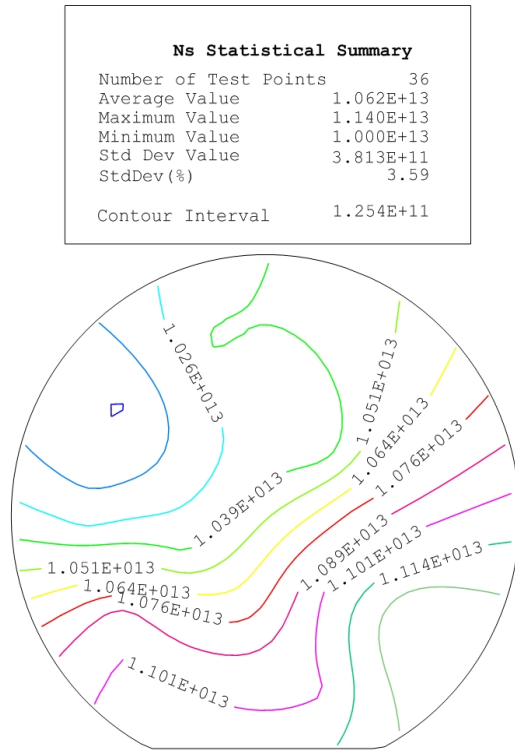
Şekil 3.19. GaN HEMT büyütmesinde Fabry-Perot salınımları

Şekil 3.20’de Fabry-Perot salınımlarında AlN, GaN tampon ve AlGaN bariyer katmanları için salınımlar görülmüştür. Diğer AlN ara geçiş katmanı ve GaN kapak katmanlarında ise salınımlar görülmemiştir. Bunun nedeni belirli bir kalınlığın altındaki katmanlara gelen ışınların yansımaması nedeni ile Fabry-perot salınımların oluşamamasıdır. Büyütmesi tamamlanan GaN HEMT waferın karakterizasyonlarına geçilmiştir.

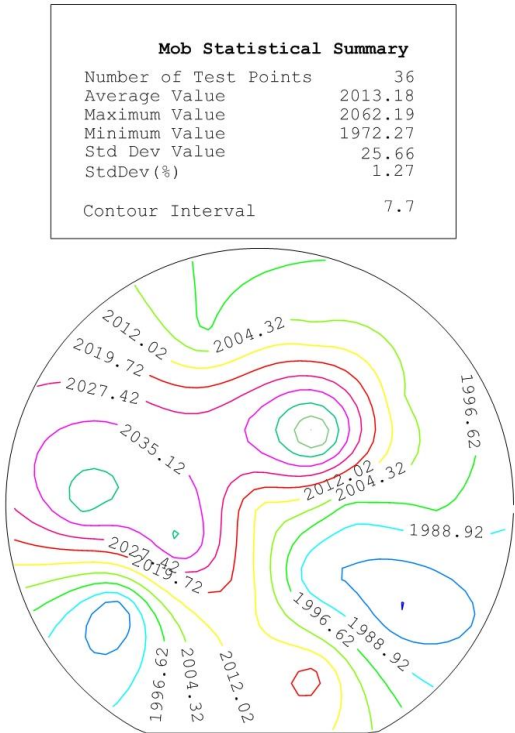
3.3.2. GaN HEMT epitaksiyel yapıların karakterizasyonları

Hall ölçümü ile 2DEG karakterizasyonları

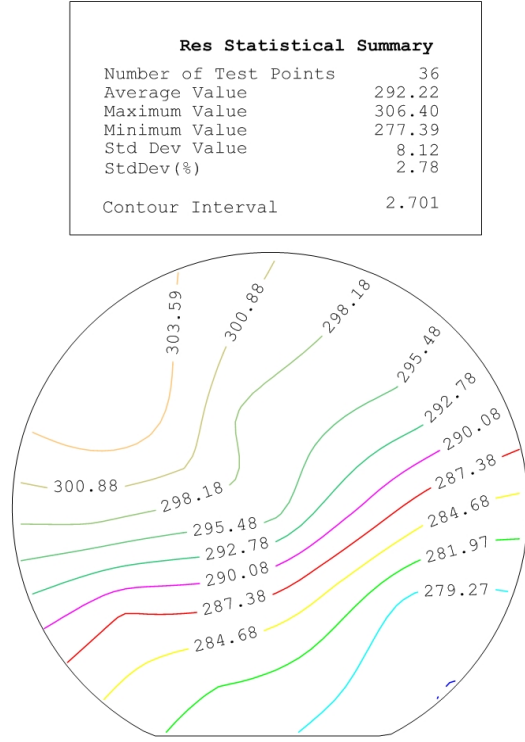
Hall ölçümleri ile GaN HEMT waferında 2DEG’in taşıyıcı yoğunluğu, elektron hareketliliği ve öz direnci ölçülmüştür. GaN HEMT waferı için Şekil 3.20’de taşıyıcı yoğunluğu, Şekil 3.21’de elektron hareketliliği ve Şekil 3.22’de ise öz direnç ölçümlerinin wafer boyunca haritalandırılmış hali görülmektedir.



Şekil 3.20. 2DEG taşıyıcı yoğunluğu ölçüm haritası



Şekil 3.21. 2DEG elektron hareketliliği ölçüm haritası

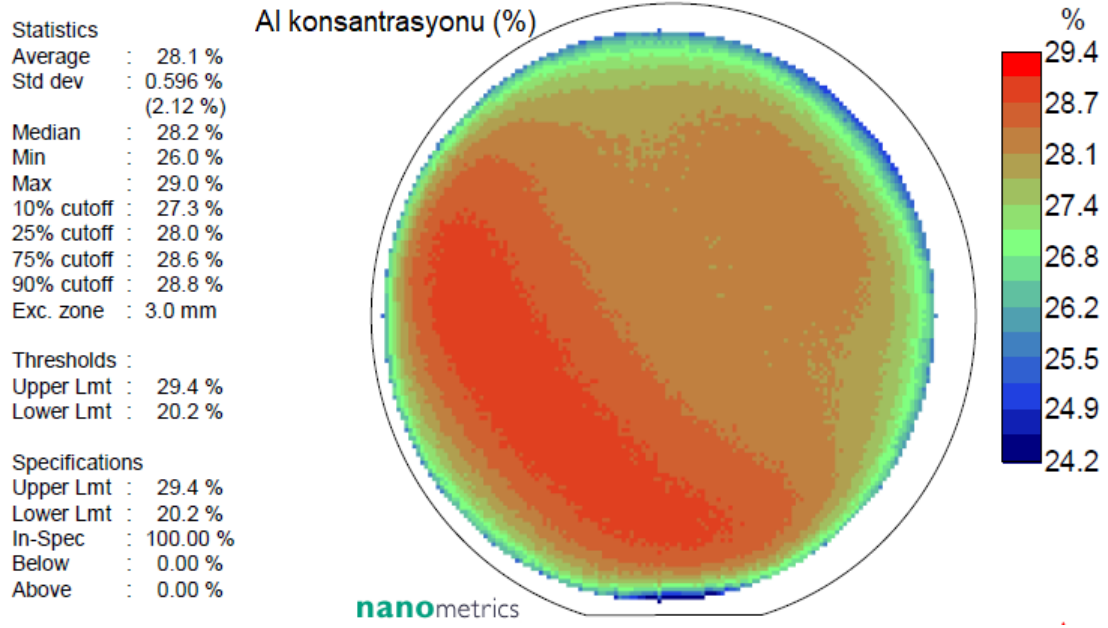


Şekil 3.22. 2DEG öz direnç ölçüm haritası

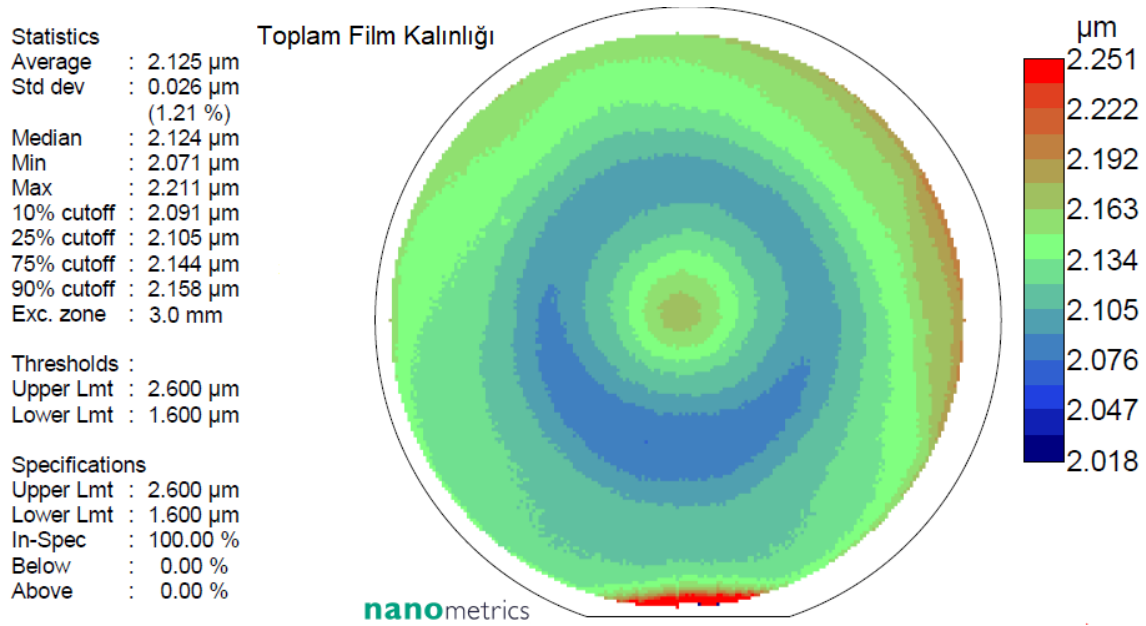
Ölçüm haritalarından büyütülen GaN HEMT yapısında 2DEG taşıyıcı yoğunluğu $1.06 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, elektron hareketliliği $2013 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve öz direnç 292 ohm/sqr. ölçülmüştür. Bu değerlerin literatürdeki değerler ile benzer seviyelerde olduğu görülmüştür [57,59].

PL ölçümleri

PL ölçümlerinde GaN HEMT waferında AlGaIn bariyer katmandaki Al konsantrasyonu ve toplam epitaksiyel film kalınlığı ölçülmüştür. Şekil 3.23’de Al konsantrasyonu ölçümünün, Şekil 3.24’te ise toplam film kalınlığı ölçümünün wafer boyunca haritalandırılması görülmektedir. Şekil 3.23’te Al konsantrasyonunun %28.1, Şekil 3.24’te ise toplam film kalınlığının ise 2125 nm olduğu görülmektedir. Al konsantrasyonu değeri büyütmede tasarlanan değer olan %28 değeri ile aynı oranda ölçülmüştür. Toplam film kalınlığı ise çizelge 2.4’teki katmanların toplam kalınlığı ile aynı oranda ölçülmüştür.



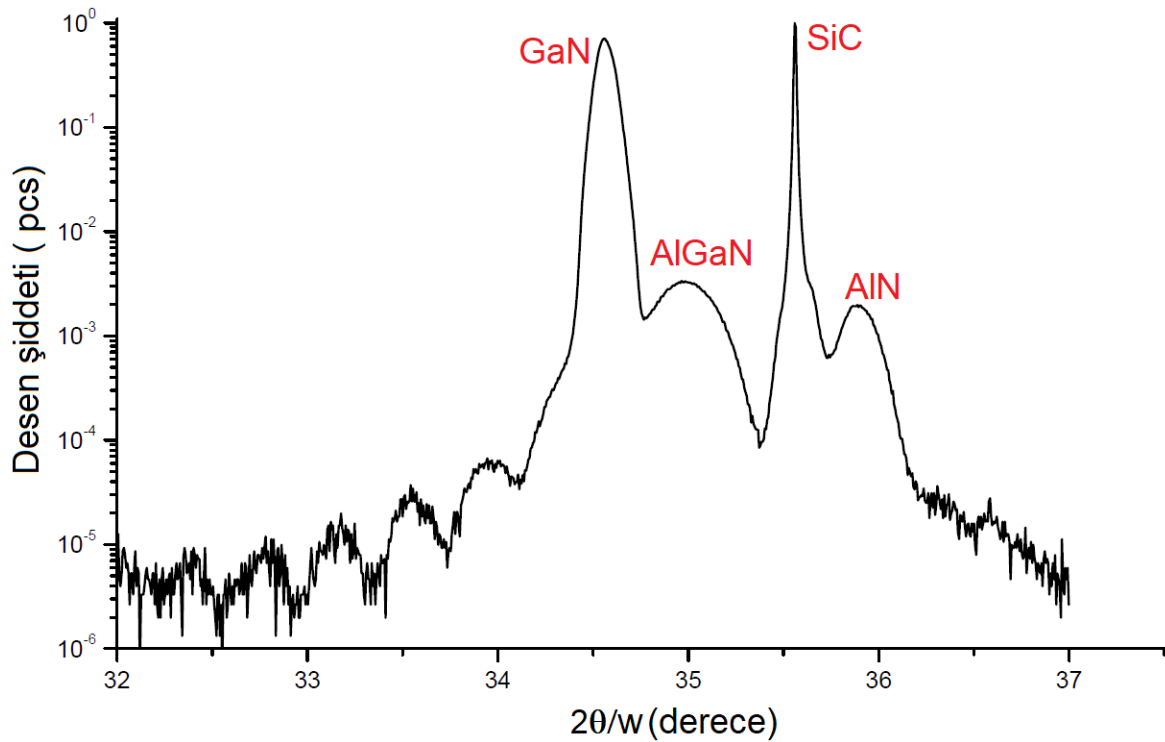
Şekil 3.23. Al konsantrasyonu ölçüm haritası



Şekil 3.24. Toplam film kalınlığı ölçüm haritası

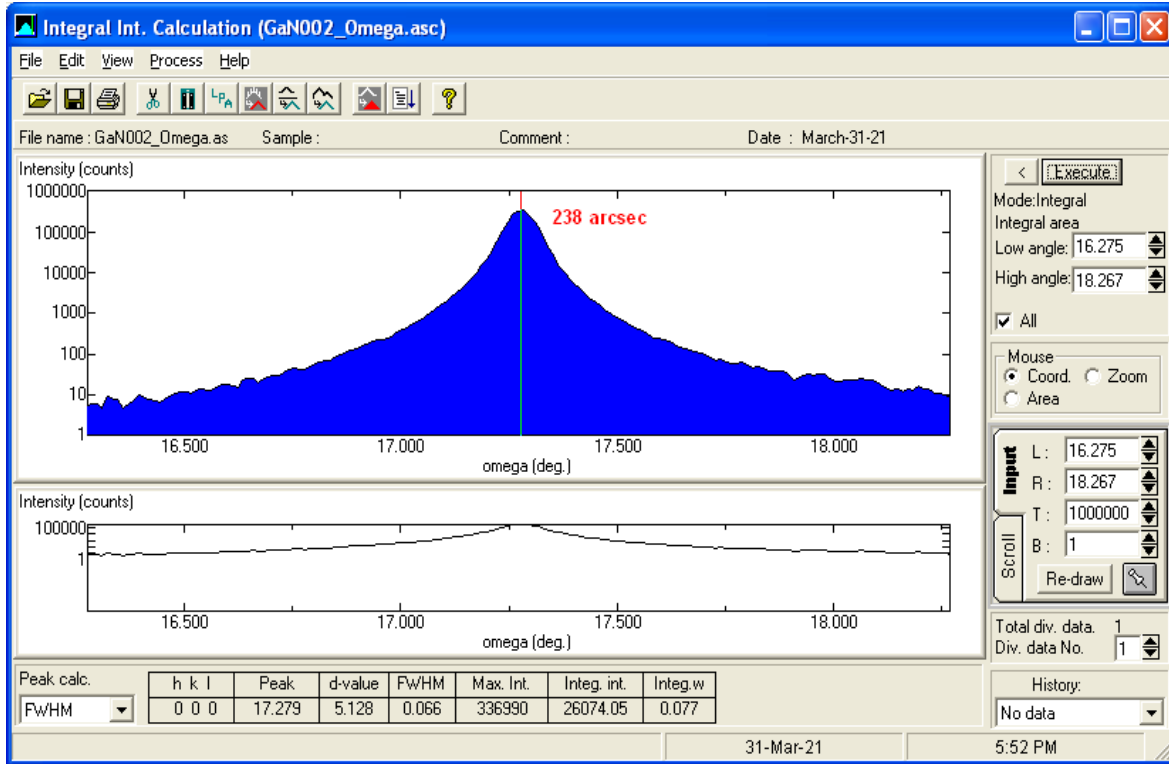
XRD ölçümleri

XRD ölçümü gerçekleştirilerek, GaN HEMT waferi için $32-37^\circ$ açıları arasındaki ölçüm deseni çıkarılmıştır. Şekil 3.25’de bu desen görülmektedir. Bu desende GaN, AlGaN, AlN çekirdeklenme ve SiC alttaşa özel olarak belirli açılarda belirli şiddetlerde eğriler çıkmıştır. Literatür ile karşılaştırıldığında [59] eğrilerin benzer açılarda oluştuğu, böylece büyütmede istenen katmanların oluştuğu sonucu çıkmıştır.

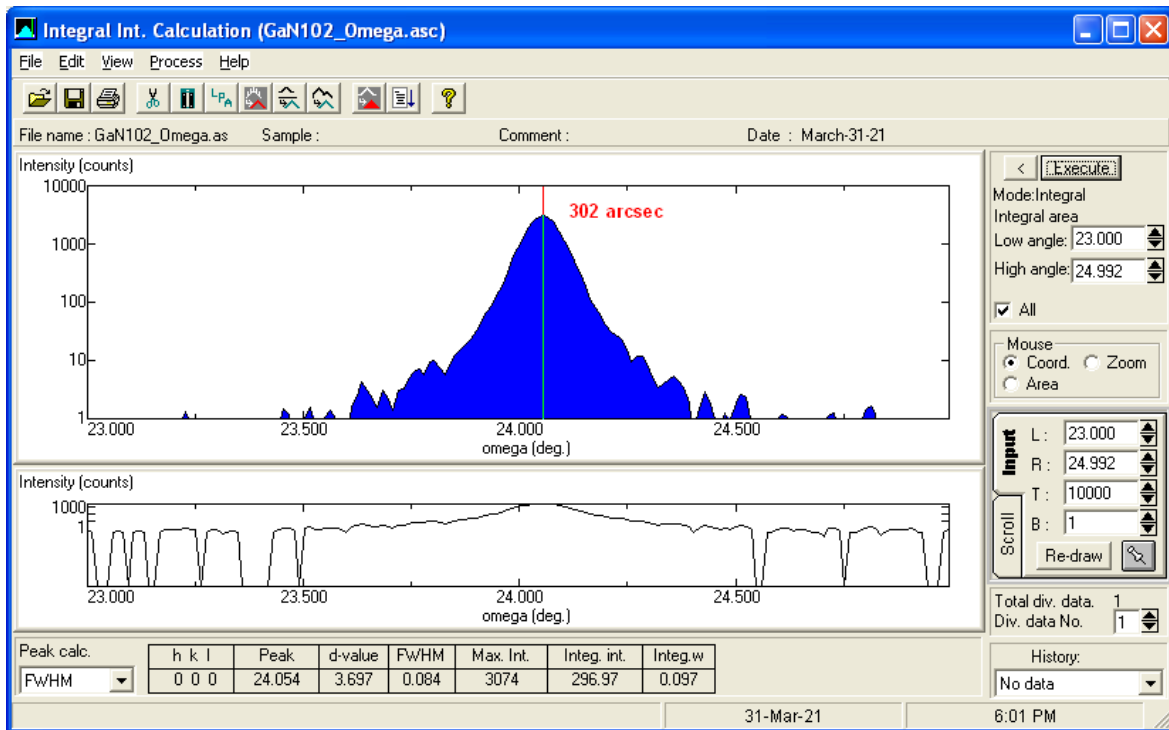


Şekil 3.25. GaN HEMT waferında XRD ölçüm deseni

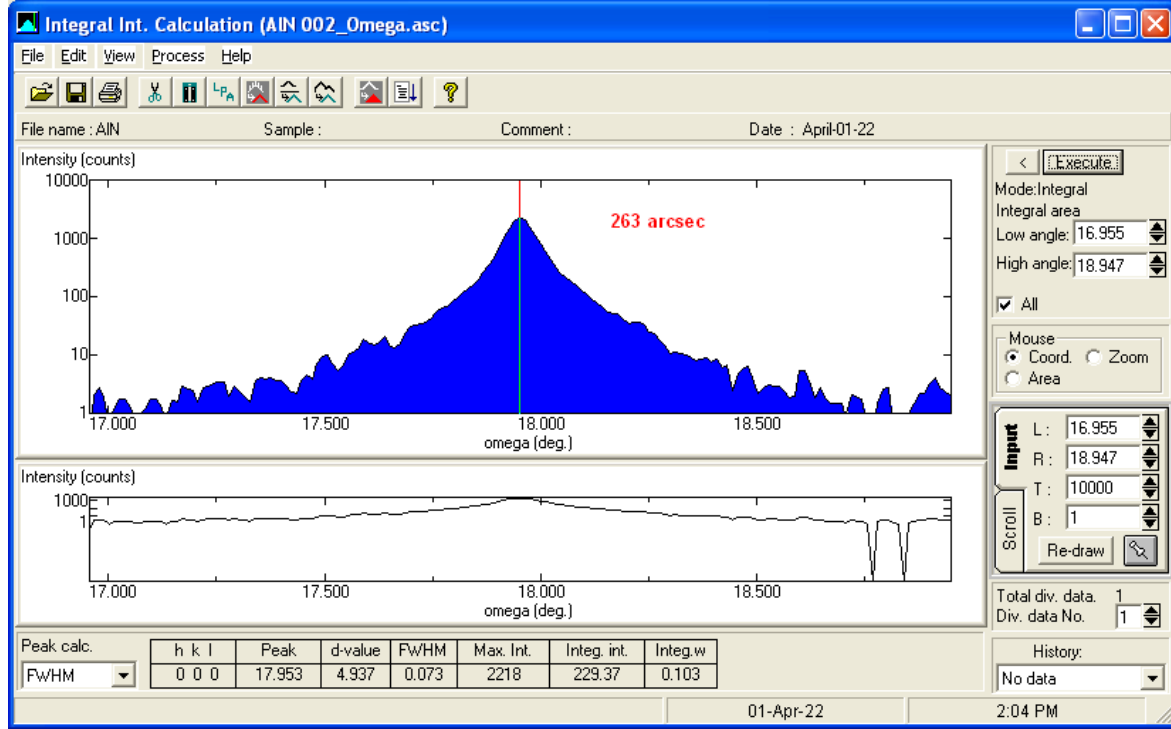
XRD ölçüm deseninde, her bir katmana ait eğrinin belirli bir genişlikte olması o katmanın kristal kalitesi hakkında bilgi verir. Şiddetin yarıya maksimum tam genişlik (FWHM) ölçümleri ile GaN ve AlN katmanlarının kristal kaliteleri hakkında bilgiler alınmıştır. GaN HEMT epitaksiyel yapısı için GaN002, GaN102 ve AlN002 düzlemlerinin kristal kalitesi için Şekil 3.25’deki ölçüm deseni kullanılarak FWHM ölçümleri alınmıştır. Şekil 3.26’da GaN002, Şekil 3.27’de GaN102 ve Şekil 3.28’de AlN002 kristal düzemleri için FWHM grafikleri ve değerleri görülmektedir.



Şekil 3.26. GaN002 FWHM ölçüm grafiği



Şekil 3.27. GaN102 FWHM ölçüm grafiği



Şekil 3.28. AlN002 FWHM ölçüm grafiği

Literatür ile karşılaştırıldığında GaN002, GaN102 ve AlN002 FWHM değerlerinin benzer yapıları için uyumlu hatta daha düşük olduğu görülmüştür [61-62]. Bu değerler bu katmanlar için kristal kalitelerinin iyi olduğunu göstermektedir.

SEM ölçümleri

Büyütülen GaN waferı, üretim için belirli boyutlarda kare örnekler olarak kesilmiştir. Bu kesim sonrası epitaksiyel yapıyı incelemek için kesilen örneklerin kesitinde SEM incelemesi yapılmıştır. Resim 3.14’de bir örnek için kesit SEM incelemesi görülmektedir. Burada 2 µm kalınlığında GaN tampon katmanı ile toplamda 24 nm kalınlıkları olan AlGaIn ve GaN kapak katmanları beraber görülmektedir. Yapılan SEM incelemesi ile AlN ara geçiş ve GaN kapak katmanları hariç, büyütülen katmanların kalınlıkları doğrulanmıştır. SEM incelemesi için NANOTAM’da bulunan Raith elektron demeti litografisi sisteminin (Resim 3.7) SEM modülü kullanılmıştır.



Resim 3.14. GaN HEMT kesiti SEM incelemesi

3.4. GaN HEMT Aygıtların Fabrikasyonu

Epitaksiyel büyütme sonrası tüm karakterizasyonları yapılan 3 inçlik GaN HEMT waferi 12mmx12mm'lik kareler şeklinde kesilerek örneklere ayrılmıştır. Bu örneklerden 9 adet kullanılarak GaN HEMT aygıtların üretimine başlanmıştır. İlk 8 örnek Si_3N_4 dielektrik kaplaması adımıyla deneysel çalışmalar için kullanılmıştır. Son örnekte ise standart tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması yapılmıştır.

3.4.1. Örnek yüzeyi hazırlama

GaN HEMT aygıt üretimi için örnek yüzeylerinin temiz olması gerekmektedir. Bu nedenle örnek yüzeyleri optik mikroskopta incelenmiş ve yüzeyi temiz olmayan örnekler için yüzey temizliği yapılmıştır. Örnek yüzey temizliği için örnekler ilk olarak aseton, daha sonra isopropil alkol içerisinde ultrasonik titreştirici (Resim.3.15) yardımı ile titreştirilmiştir. En son olarak isoproil alkol ile durulama yapılmış ve kuru azot ile kurutma yapılmıştır. Bu işlemler örnek yüzeyi temiz olana dek devam etmiştir.



Resim 3.15. Ultrasonik titreştirici

3.4.2. Mesa adımı

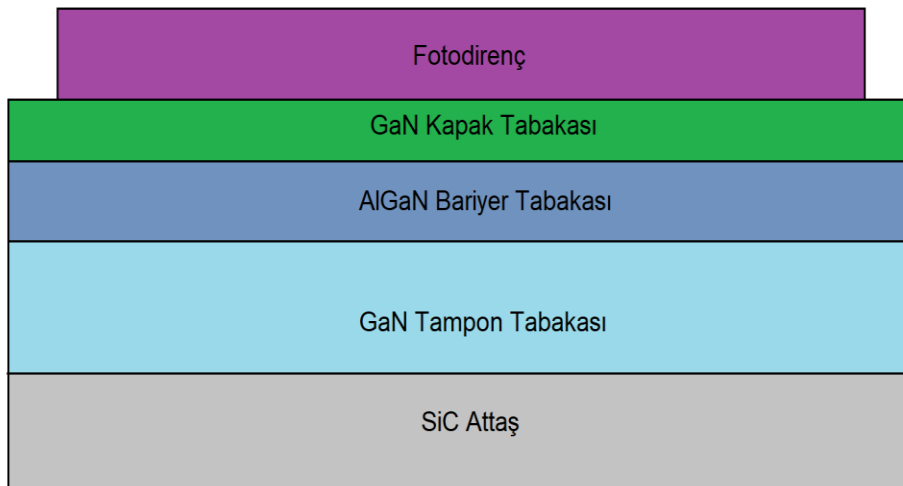
GaN HEMT aygıtların üretim sonunda elektriksel olarak birbirini etkilememesi aygıtların performansı açısından çok önemlidir. Bu yüzden aygıtların dışında bulunan alanların elektriksel olarak yalıtkan olması istenir. Bu yalıtkanlık, aygıtların dışındaki alanların yüksek dirençli GaN tampon katmana kadar aşındırılması ile sağlanır [63-64]. Böylece bu alanların

yüksek dirençli olması sağlanır. Ayrıca 2DEG'den gelecek olan elektriksel etkiler ortadan kaldırılmış olunur.

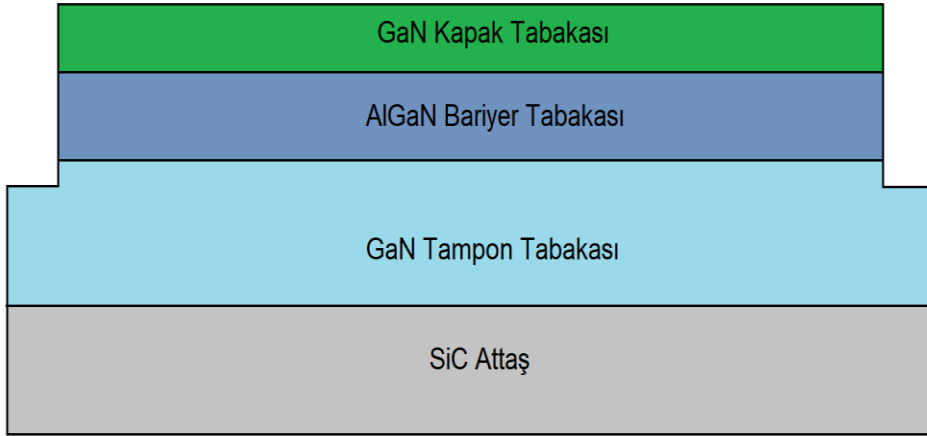
Mesa adı verilen bu adımda ilk olarak örneklerin yüzeyine AZ 5214 E fotodirenç malzemesi serilmiştir. AZ 5214 E fotodirenç malzemesi hem pozitif hem de negatif fotolitografiye imkân veren özel bir fotodirenç malzemedir [65]. Daha sonra SUSS MA6 maske hizalayıcı sistemi ile pozitif fotolitografi yapılmıştır. Pozitif fotolitografi ile GaN HEMT aygıtlarının geleceği bölgeler belirlenmiştir. Bu bölgelerin dışında kalan bölgelere SAMCO ICP-RIE sisteminde kuru aşındırma işlemi yapılmıştır. Bu sayede aygıt adacıkları oluşturulmuştur. Bu kuru aşındırma işleminin detayları şöyledir:

- Basınç:0.6 Pa
- Toplam gaz akışı: 40 sccm (Cl_2 (5sccm)/ BCl_3 (35 sccm))
- RF:50 W
- ICP: 100 W
- Süre: 60 s
- Aşındırma oranı:1.5 nm/s.

Aşındırma sonrası aseton ve isopropil alkol içerisinde örnekler titreştirilerek temizlenmiş ve mesa adımı tamamlanmıştır. Şekil 3.30'da fotolitografi sonrası, Şekil 3.31'de ise mesa aşındırma sonrası kesit çizimi görülmektedir.



Şekil 3.30. Mesa aşındırması için fotolitografi sonrası kesit görünümü



Şekil 3.31. Mesa aşındırması sonrası kesit görünümü

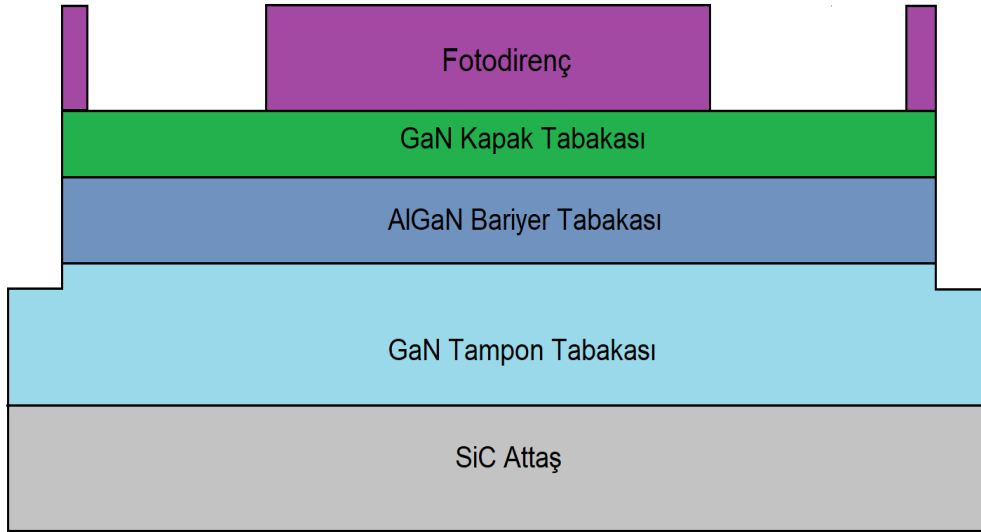
Mesa adımı sonrası aşındırma derinliği Bruker DektakXT profilometreden ~ 90 nm ölçülmüştür. Böylece aşındırma derinliğinin yüksek dirençli GaN tampon katmanına ulaştığı görülmüştür. Resim 3.16’da mesa adımında oluşturulan aygıt adacığının optik mikroskop görüntüsü görülmektedir.



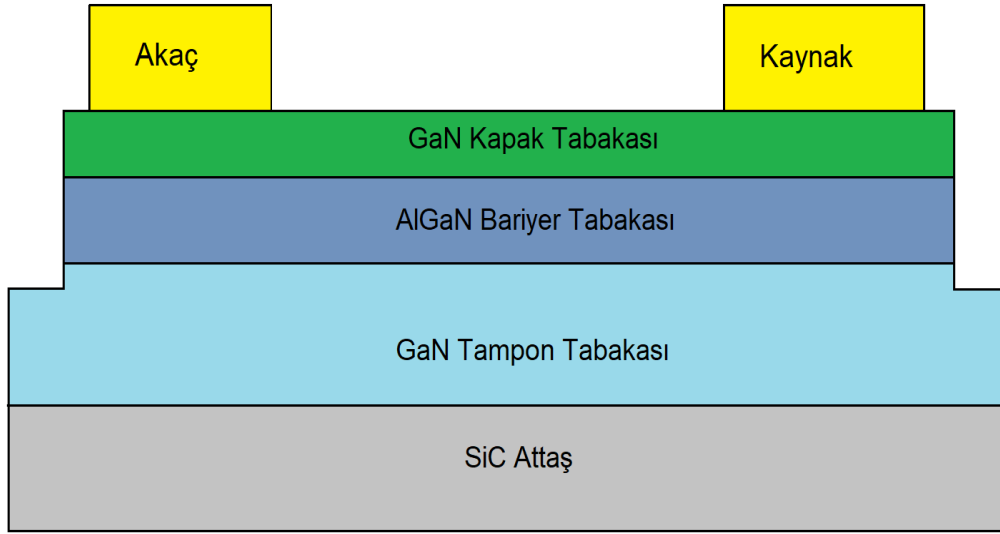
Resim 3.16. Mesa aşındırması sonrası optik mikroskop görünümü

3.4.3. Omik kontak adımı

GaN HEMT aygıtlarda kaynak ve akaç metallerrinin oluştuğu bu adımda ilk olarak yzeye AZ 5214 E fotodirenç malzeme serilmiştir. SUSS maske hizalayıcı sistemi ile negatif fotolitografi yapılarak kaynak ve akaç metallerrinin geleceği bđlgeler belirlenmiştir. Daha sonra rnrnelere Univex 350 elektron demeti ile buharlaştırma sisteminde sırası ile Ti (12 nm)/Al (100 nm) /Ni (35 nm)/Au (65 nm) metalleri kaplanmıştır. Metallerrin kaplaması sonrası metal kalkma (lift-off) adı verilen işlemde, rnrnekler aseton içerisinde bırakılarak metal kaplanmayan bđlgeler kaldırılmış ve sadece kaplanan bđlgelerde metallerrin kalması sağlanmıştır. Bđylece metal kaplı bđlgelerde akaç ve kaynak metallerrinin” oluşması sağlanmıştır. Metal kalkma işleminden sonra rnrnekler aseton ve isopropil alkol içerisinde rnrnekler titreştirilerek temizlenmiştir. şekil 3.32’de negatif fotolitografi sonrası, şekil 3.33’de ise metal kaldırma işlemi sonrası kesit gđrnrnm gđrnlmektredir.

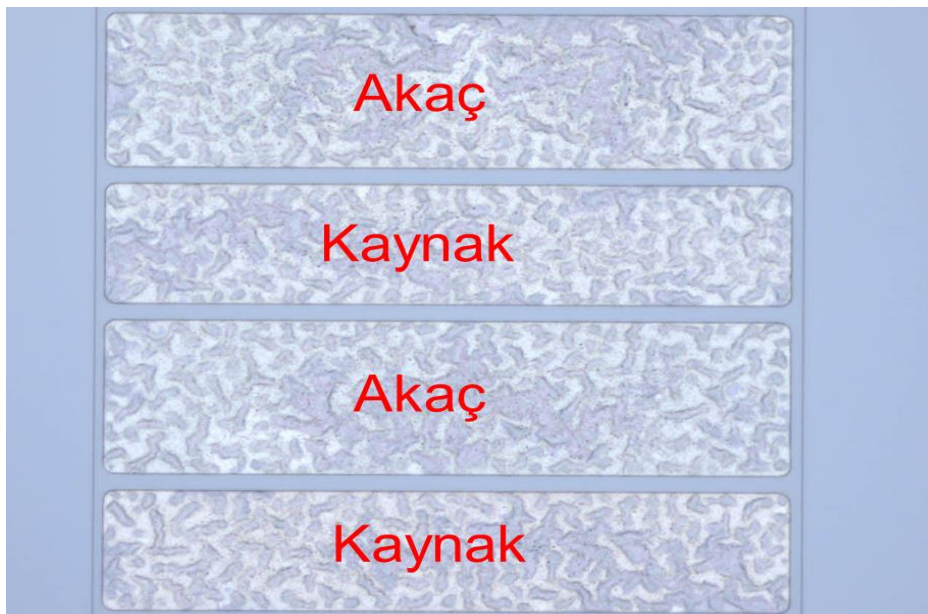


şekil 3.32. Negatif fotolitografi sonrası kesit gđrnrnm.



Şekil 3.33. Metal kaldırma sonrası kaynak ve akaç metallere ait katmanların oluşumu

Akaç ve kaynak metallere ait katmanların oluşturulduktan sonra bu metaller yüksek sıcaklıkta alaşım hale getirilerek omik özelliği kazandırılmıştır. Bunun için örnekler, SSI SOLARIS 75 Hızlı ısıtma işlemi sisteminde 850 °C 'de, %5 H₂ ve %95 N₂ gaz karışımı içerisinde 30 s bekletilmiştir. Bu bekleme işlemi sonrası metaller alaşım oluşturarak yüzey morfolojileri değişmiş ve düşük dirençli omik kontak özelliğini kazanmışlardır. Şekil 3.17'de omik kontaktların optik mikroskop görüntüsü görülmektedir. Burada akaç ve kaynak omik metalleri arasındaki mesafe 5 µm'dir. Ölçümler kısmında omik kontaktların direnç ölçümleri anlatılmıştır.



Resim 3.17. Tavlama yapılmış akaç ve kaynak metallere ait görüntüleri

3.4.4. Silisyum nitrür (Si_3N_4) dielektrik kaplaması adımı

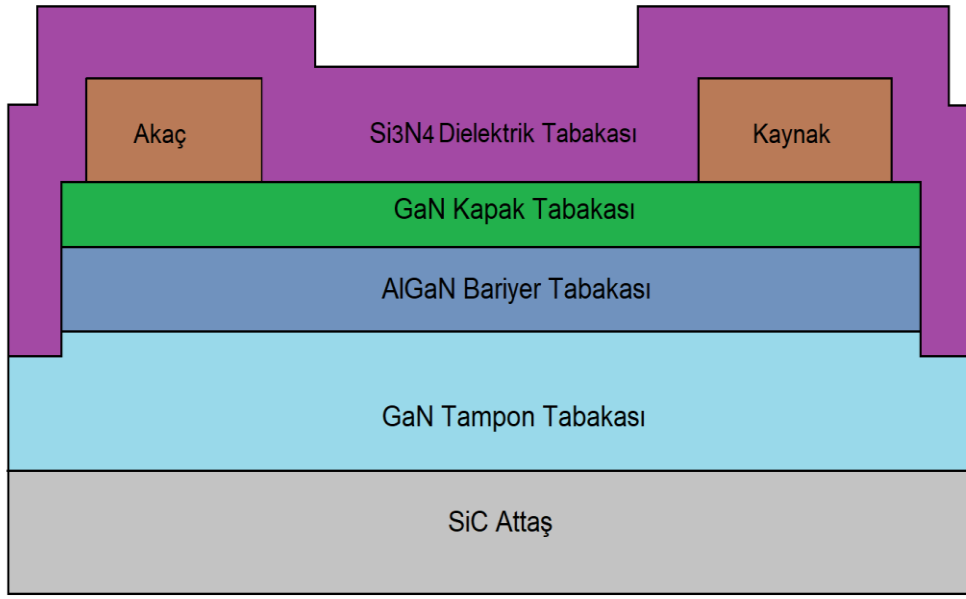
Si_3N_4 dielektrik tabakasının HEMT aygıtlar için önemi GaN HEMT aygıt üretim ve karakterizasyon yöntemleri kısmında detaylıca anlatılmıştı. Si_3N_4 dielektrik tabakasının GaN HEMT aygıtlarda önemi araştırılırken [66] bu tez çalışmasının da ana konusu olan çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakasının GaN HEMT aygıtların elektriksel performanslarını arttırdığı görülmüştür [67-70]. Çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakasının GaN HEMT aygıtlarda etkisini görmek amacı ile deney çalışmaları tasarlanmış ve yapılmıştır. Bu deney çalışmalarında ilk 8 örnek kullanılmış ve daha sonra bu örneklerdeki aygıtların üretimi tamamlanmıştır. 1 örnek içinde standart tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması yapılmıştır ve aygıtların üretimi tamamlanmıştır. Si_3N_4 dielektrik tabakaları Sentech SI 500 PPD PECVD sisteminde kaplanmıştır.

1. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışması

Bu çalışmada mevcut kullanılan tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası iki tabaka haline halinde farklı sıcaklıklarda kaplanmıştır. Sentech SI 500 PPD PECVD sisteminde kullanılan tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası için kaplama parametreleri şunlardır:

- Basınç: 100 Pa
- Toplam gaz akışı: 365 sccm (SiH_4 :300sccm, NH_3 :15 sccm, Ar:50sccm)
- RF gücü: 50 W
- Kaplama sıcaklığı: 320 °C
- Kaplama oranı: 1 nm/dk.
- Film kalınlığı 300 nm

Bu kaplama parametreleri çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplamalarında da kullanılmıştır. Tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası kaplandıktan sonra kesit görünüm şekil 3.34'deki gibidir. Burada tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası kapı (gate) kontağın ayak kısmının oluşumunda da rol alır.



Şekil 3.34. Tek katmanlı Si₃N₄ dielektrik tabakası kaplaması sonrası kesit görünüm

1.çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışmasında, 300 nm kalınlığında olan tek katmanlı Si₃N₄ dielektrik tabakası aynı kalınlıkta iki ayrı katman olarak kapı kontağından önce ve sonra belirli sıcaklıklarda kaplanarak üretim sonrası aygıt performanslarına bakılmıştır. GaN HEMT aygıtların üretimi için hazırlanan 9 adet örnekten ilk 4 örneğe bu denemeler yapılmıştır. Çizelge 3.1’de bu denemelerin detayları gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. 1.Çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışması detayları

Örnek	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3	Örnek 4
1. Si ₃ N ₄ tabakası kaplama sıcaklığı (°C) (150 nm)	200	250	320	320
2. Si ₃ N ₄ tabakası kaplama sıcaklığı (°C) (150 nm)	320	250	320	200
Sonuç	Transistörler çalışmadı.	Transistörler düşük performanslı çalıştı.	Transistörler çalışmadı.	Transistörler İyi performanslı çalıştı.

1.çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışması sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Aynı yüksek sıcaklıkta kaplanan dielektrik tabakalar birbirini bozarak aygıtın çalışmamasına neden olmuştur (Örnek 3).
- Aynı düşük sıcaklıkta kaplanan dielektrik tabakalar birbirini daha az bozarak aygıtın düşük performanslı çalışmasına neden olmuştur (Örnek 2)
- Daha yüksek sıcaklıkta kaplanan ikinci dielektrik tabakanın, alttaki daha düşük sıcaklıkta kaplanan ilk dielektrik tabakayı bozarak aygıtın çalışmamasına neden olmuştur (Örnek 1).
- İlk dielektrik tabakanın yüksek sıcaklıkta, ikinci dielektrik tabakanın düşük sıcaklıkta kaplanması aygıt performansını arttırmıştır. (Örnek 4).

1.çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışması sonucunda örnek 4'e uygulanan yüksek sıcaklıklı birinci dielektrik ve düşük sıcaklıklı ikinci dielektrik kaplamasında iyi sonuç alınmıştır. Ancak örnek 4'teki aygıtların sonuçları ile tek katmanlı katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması yapılan aygıtların sonuçları ile karşılaştırıldığında çok fazla artış görülmemiştir. Bu nedenle örnek 4'e uygulanan sıcaklık değerleri kullanılarak yeni bir çalışma tasarlanmış ve yapılmıştır.

2. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışması

2. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışmasında, dielektrik tabakalarındaki kalınlık değişiminin aygıt performansına olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada 1.çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışmasında en iyi sonucu veren kaplama sıcaklıkları dielektrik tabakaların büyütülmesinde kullanılmıştır. GaN HEMT aygıtların üretimi için hazırlanan 9 örnekten ikinci 4 örnek kullanılmıştır. Bu deneme çalışmasında birinci ve ikinci dielektrik tabaka kalınlık değerleri yer değiştirilerek kaplamalar yapılmıştır. Kalınlık değerleri tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplamasının toplam kalınlığını verecek şekilde ayarlanmıştır. Aygıtların üretimi sonrası elektriksel performanslarına bakılmıştır. Bu deneme çalışmasının detayları çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

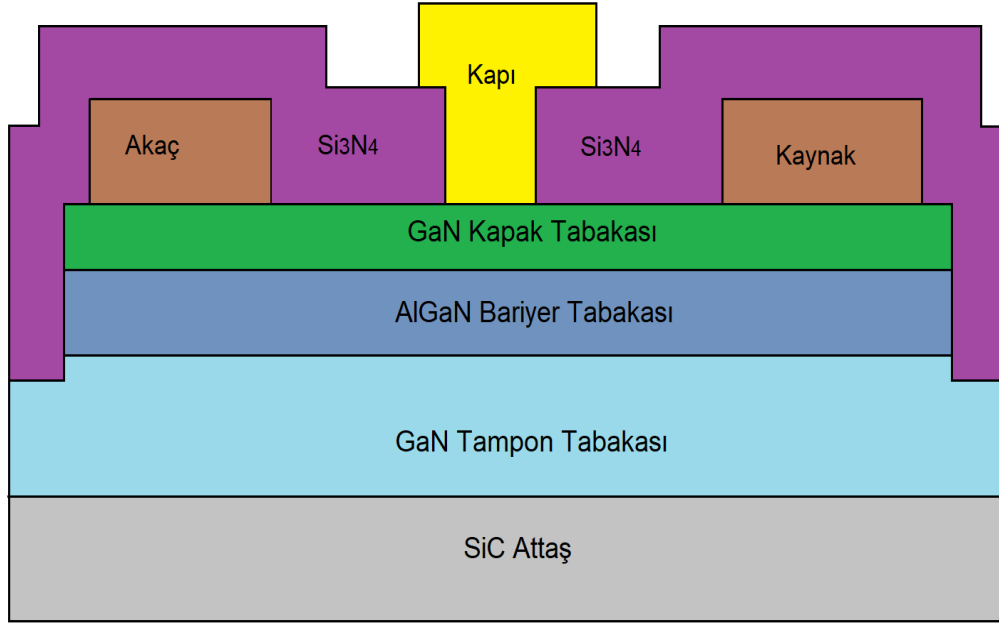
Çizelge 3.2. 2.Çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışması detayları

Örnek	Örnek 5	Örnek 6	Örnek 7	Örnek 8
1. Si ₃ N ₄ tabakası kaplama kalınlığı (nm) (320 °C)	50	100	200	250
2. Si ₃ N ₄ tabakası kaplama kalınlığı (nm) (200 °C)	250	200	100	50
Sonuç	Transistörler düşük perfomanslı çalıştı.	Transistörler en iyi perfomanslı çalıştı.	Transistörler iyi perfomanslı çalıştı.	Transistörler iyi perfomanslı çalıştı.

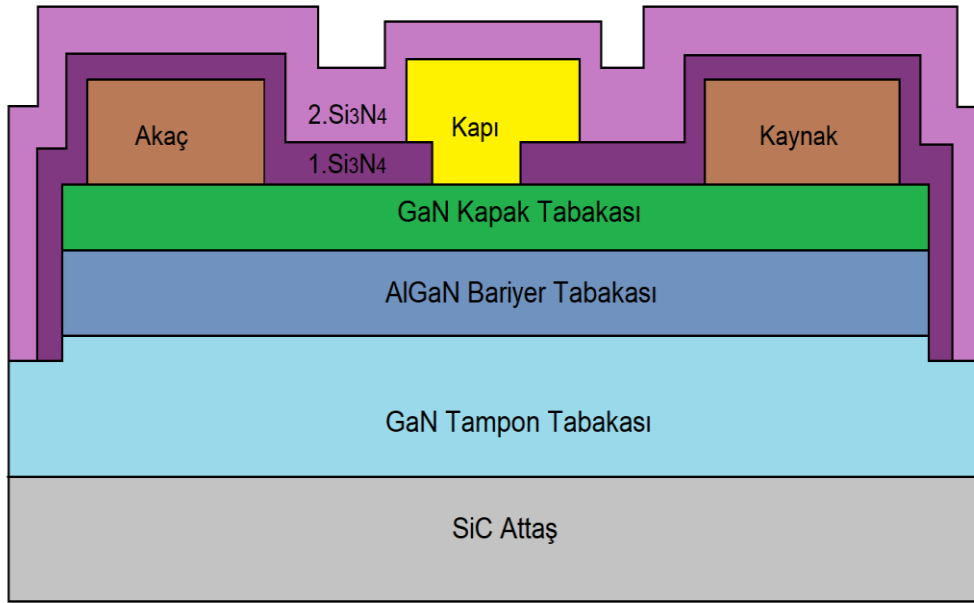
2.çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışması sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir:

- İlk dielektrik tabakanın kalınlığının ikinci dielektrik tabakanın kalınlığından daha az olması aygıt performansını düşürmüştür (Örnek 5).
- İlk dielektrik tabakanın kalınlığının ikinci dielektrik tabakanın kalınlığından daha yüksek olması aygıt performansını iyileştirmiştir (Örnek 7, Örnek 8).
- İlk dielektrik tabakanın kalınlığının ikinci dielektrik tabakanın kalınlığından çok fazla az kalınlıkta olmaması en iyi aygıt performansını vermiştir (Örnek 6).

2.çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışması sonucunda en iyi aygıt performansının, ilk dielektrik tabakanın 320 °C’de 100 nm, ikinci dielektrik tabakanın 200 °C’de 200 nm kaplandığında görülmüştür. Ayrıca bu aygıtların elektriksel sonuçlarının tek katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması yapılan aygıtların sonuçları ile kıyaslandığında net bir artış görülmüştür. Elektriksel sonuçlar detaylı olarak ölçümler kısmında verilmiştir. Şekil 3.35’de tek katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması ve kapı kontağı yapılan GaN HEMT aygıtının kesit çizimi görülmürken, Şekil 3.36’da ise çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması ve kapı kontağı yapılan GaN HEMT aygıtının kesit çizimi görülmektedir.



Şekil 3.35. Tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası ve kapı kontağı sonrası kesit görünüm



Şekil 3.36. Çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası ve kapı kontağının kesit görünüm

3.4.5. Kapı (gate) kontak adımı

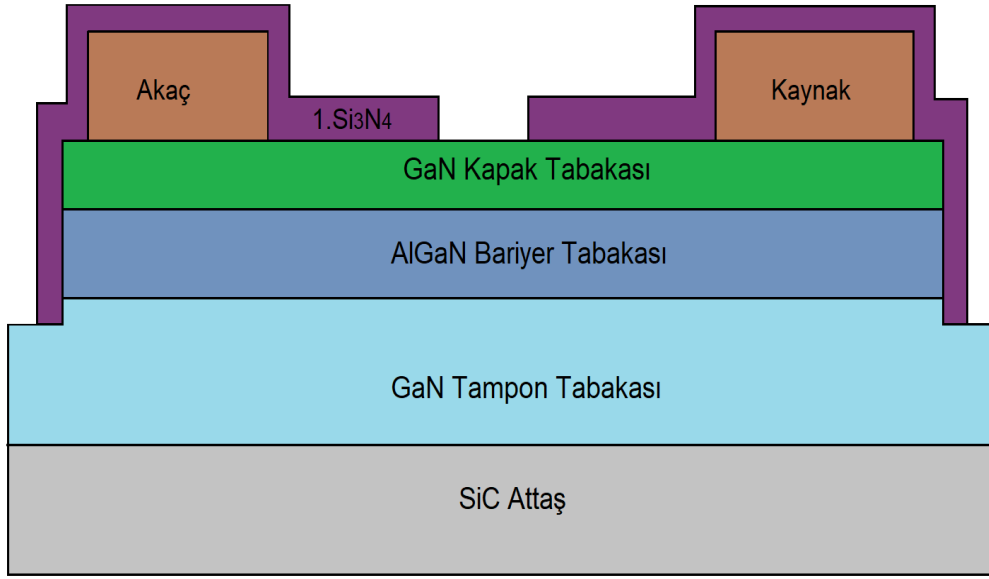
GaN HEMT aygıtlarda kaynaktan akaç metallere doğru kontrollü 2DEG akışı kapı (gate) kontağı ile sağlanır. Kapı kontağının bu kontrolü sağlaması için altındaki bölgenin elektriksel alanını etkileyip, kendisine uygulanan voltaja göre 2DEG akışını kesmesi veya açması gerekmektedir. Kapı kontağının bu şekilde bir nevi anahtar gibi davranması için

schottky kontak yapısında olması lazımdır [71]. GaN HEMT aygıtlarda kaynak ve akaç metalleri arasındaki mesafe birkaç mikrometre olmasından dolayı, kapı kontağının kaynak ve akaç metalleri arasına girerek 2DEG akış kontrolünü sağlayabilmesi için nanometre seviyesinde olması gereklidir. Bu tez çalışmasında GaN HEMT aygıtları için kapı kontak ayak uzunluğu (L_g) 500 nm olacak biçimde kapı kontakların üretimi yapılmıştır.

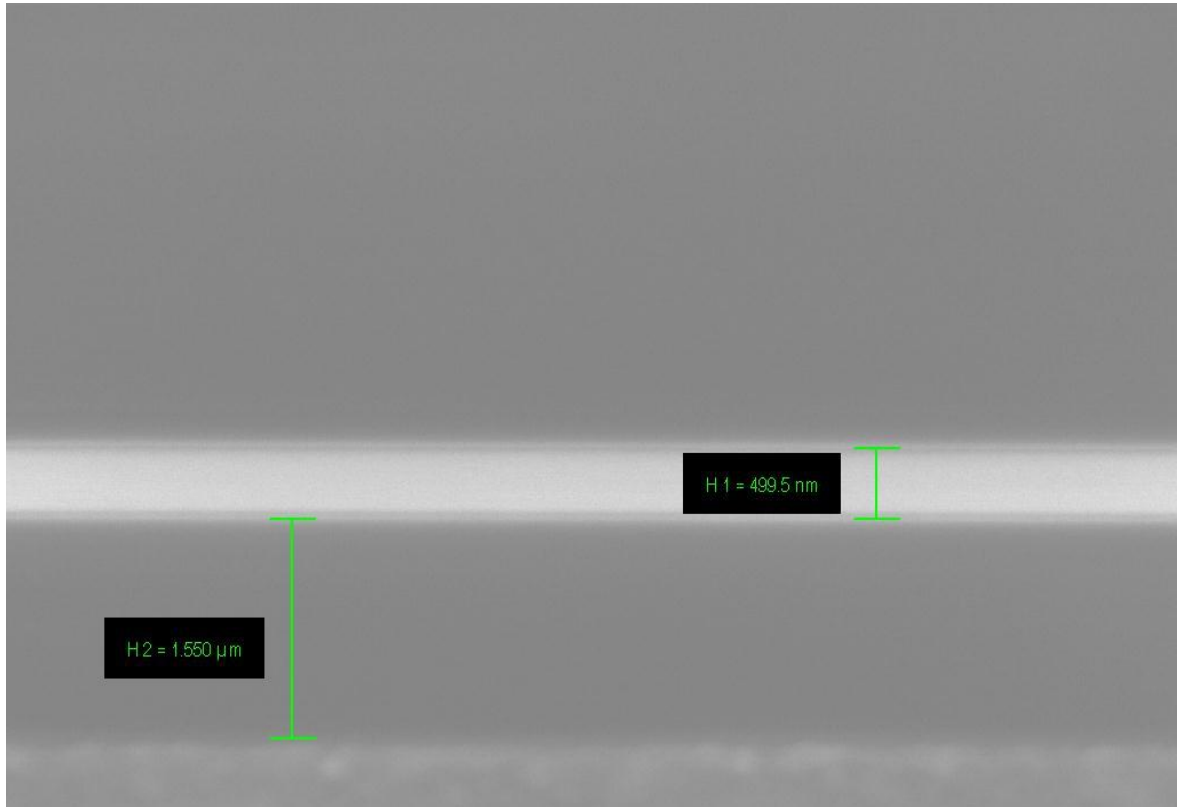
1.Si₃N₄ dielektrik kaplamasından sonra örnek yüzeylerine Raith elektron demeti litografisi sisteminde kapı kontağının L_g 'si 500 nm olacak biçimde litografi yapılmıştır. Bunun için 1.Si₃N₄ dielektrik kaplaması yüzeyine elektron demetine duyarlı olan PMMA A6 adı verilen malzeme kaplanmış ve kapı kontağının ayak litografisi yapılmıştır. Bu işlemde sonra örnek yüzeylerine SAMCO ICP-RIE 140 ICP sisteminde kuru aşındırma yapılarak kapı kontağının ayak kısmı oluşturulmuştur. 8 örnekte farklı kalınlıkta 1.Si₃N₄ dielektrik kaplaması olduğundan farklı sürelerde kuru aşındırmalar yapılmıştır. Kapı kontağının ayak kısmı için şu aşındırma parametreleri yapılmıştır:

- Basınç:0.25 Pa
- Toplam gaz akışı: 6 sccm (SF₆ (5 sccm)/O₂ (5 sccm))
- RF:50 W
- ICP: 100 W
- Süre: 715 s (Örnek 1-4), 240 s (Örnek 5), 475 s (Örnek 6), 950 s (Örnek 7), 1190 s (Örnek 8)
- Aşındırma oranı:0,21 nm/s.

Yapılan kuru aşındırma işleminden sonra örnek yüzeylerinde kalan PMMA A6 temizliği için örnekler önce aseton, sonra da isopropil alkol içerisinde titreştirilerek temizlenmiştir. Bu temizlik sonrası aygıtların kesit görünümü Şekil 3.37'de görülmektedir. Resim 3.18'de ise ayak aşındırma sonrası SEM görüntüsü görülmektedir.

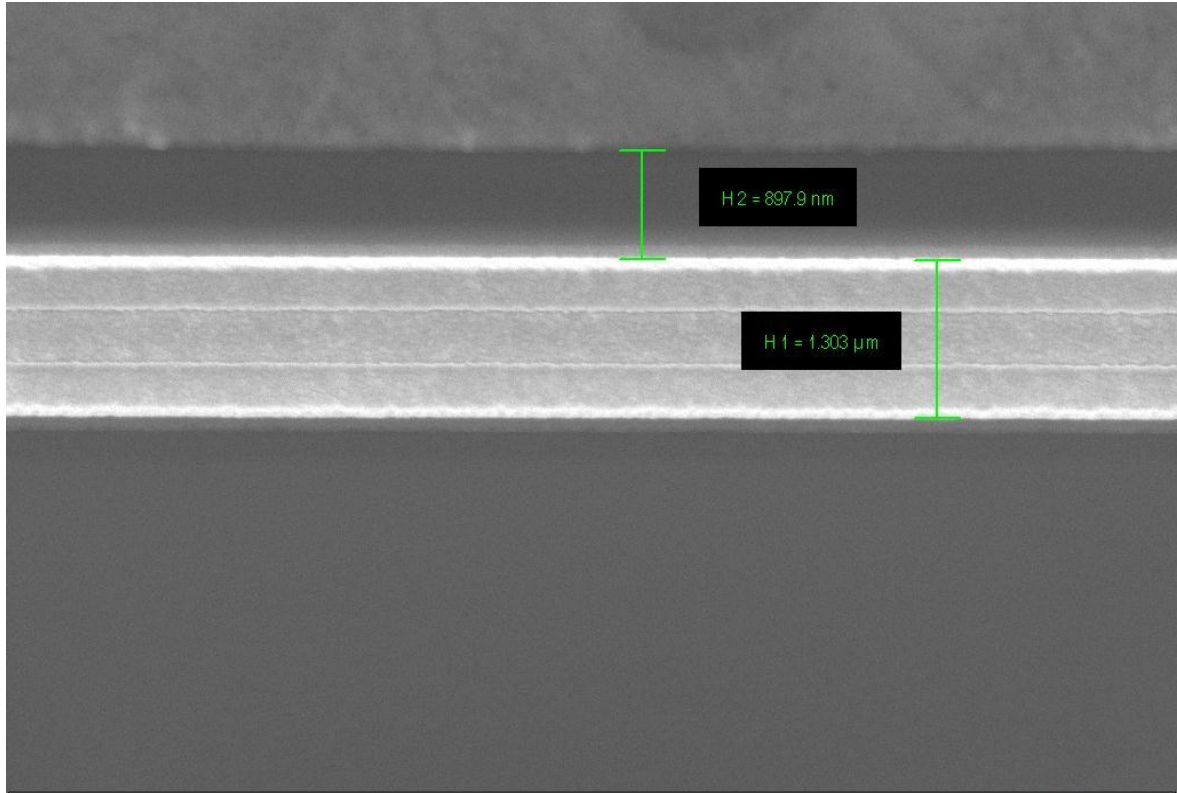


Şekil 3.37. Kapı kontağın ayak oluşturma işlemi sonrası kesit görünüm

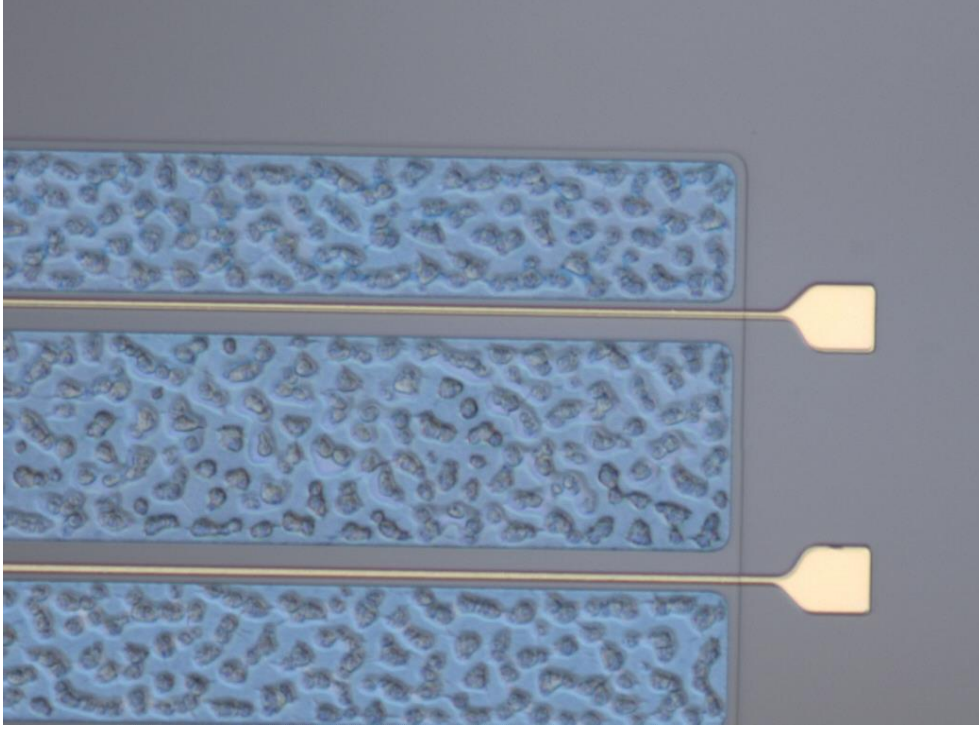


Resim 3.18. Ayak aşındırması sonrası SEM görünümü

Ayak aşındırma tamamlandıktan sonra kapı kontağının kafa kısmının oluşturulmasına geçilmiştir. Bunun için örnek yüzeylerine PMMA A4 malzemesi kaplanarak Raith elektron demeti litografisi sisteminde kafa genişliği (L_h) 1300 nm olacak şekilde litografiler yapılmıştır. Litografi sonrası Univex 350 elektron demeti buharlaştırma sisteminde sırası ile Ni (50 nm) /Au (350 nm) metalleri kaplanmıştır. Metallerin kaplaması sonrası aseton içerisinde metal kalkma işlemi yapılmıştır. En son olarak örneklerin aseton ve isopropil alkol içerisinde titreştirilerek temizlikleri yapılmış ve kapı kontağı adımı tamamlanmıştır. Şekil 3.36'da kapı kontağının aygıtta kesit görünümü görülmektedir. Resim 3.19'da kapı kontağının SEM görüntüsü, Resim 3.20'de ise optik mikroskop görüntüsü görülmektedir.



Resim 3.19. Kapı kontağının SEM görüntüsü



Resim 3.20. Kapı kontağının optik mikroskop görüntüsü

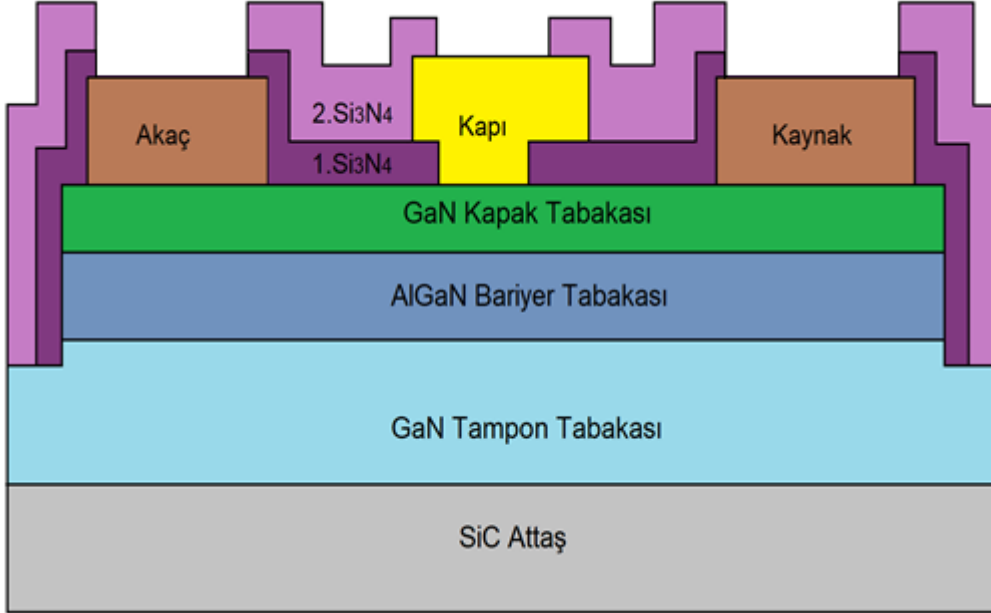
3.4.6. Si₃N₄ dielektrik açıklığı adımı

2.Si₃N₄ dielektrik kaplaması ile örneklerin yüzeyleri yalıtkan hale gelmiştir. Gerekli elektriksel ölçümlerin alınabilmesi için kontaklara ulaşılabilmesi gereklidir. Bu yüzden örneklerde kontak alınacak bölgeler kuru aşındırma yöntemi ile açılmıştır. Si₃N₄ dielektrik açıklığı açıklığı adı verilen bu adımda tüm örnek yüzeyleri AZ 5214 E fotodirenç malzemesi kaplanmıştır. Daha sonra SUSS maske hizalayıcı sisteminde pozitif fotolitografi yapılarak kontak alınacak bölgelere desenlemeler yapılmıştır. SAMCO ICP-RIE 140 ICP sisteminde bu desenlenen bölgeler şu parametreler ile aşındırılmıştır:

- Basınç:5 Pa
- Toplam gaz akışı: 100 sccm (CF₄ (80 sccm)/O₂ (20 sccm))
- RF:100 W
- ICP: 200 W
- Süre: 180 s
- Aşındırma oranı:1,67 nm/s.

Aşındırma işlemi sonrası örneklerin aseton ve isopropil alkol içerisinde titreştirilerek temizlikleri yapılmış ve bu adım tamamlanmıştır. Bruker DektakXT profilometre sisteminde

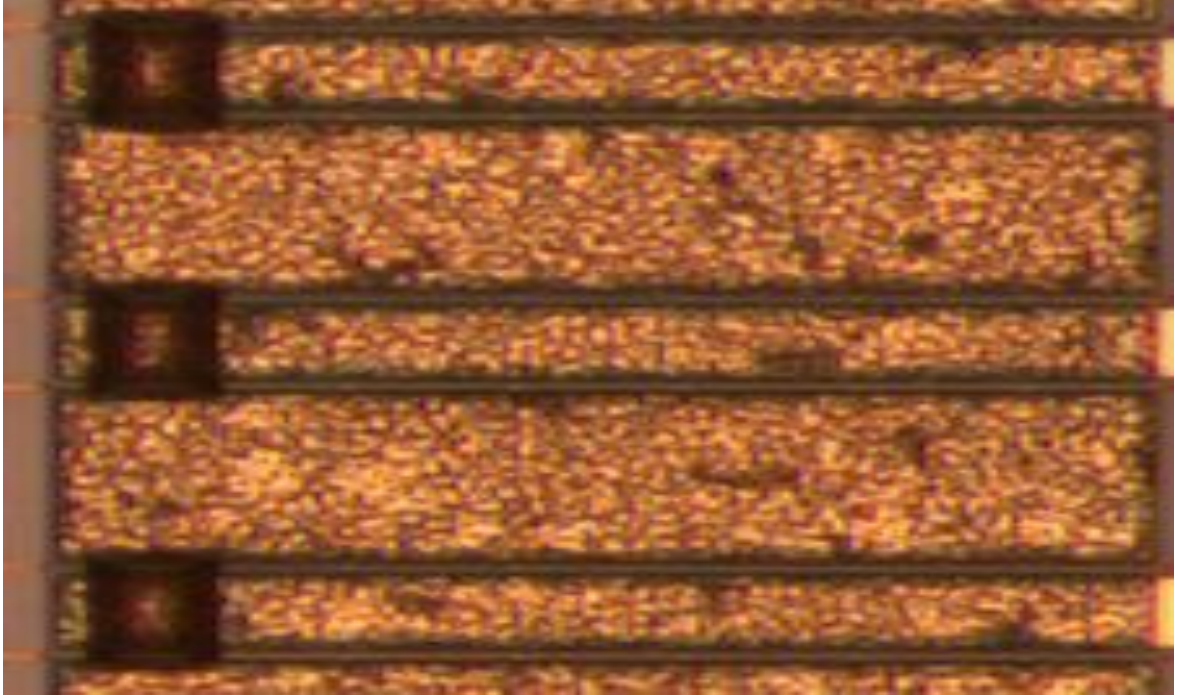
toplam Si_3N_4 kalınlığı da bu adımdan sonra gelen desenlerden ölçülmüştür. Şekil 3.38’de Si_3N_4 dielektrik açıklığı adımı sonrası aygıtın kesit görünümü görülmektedir.



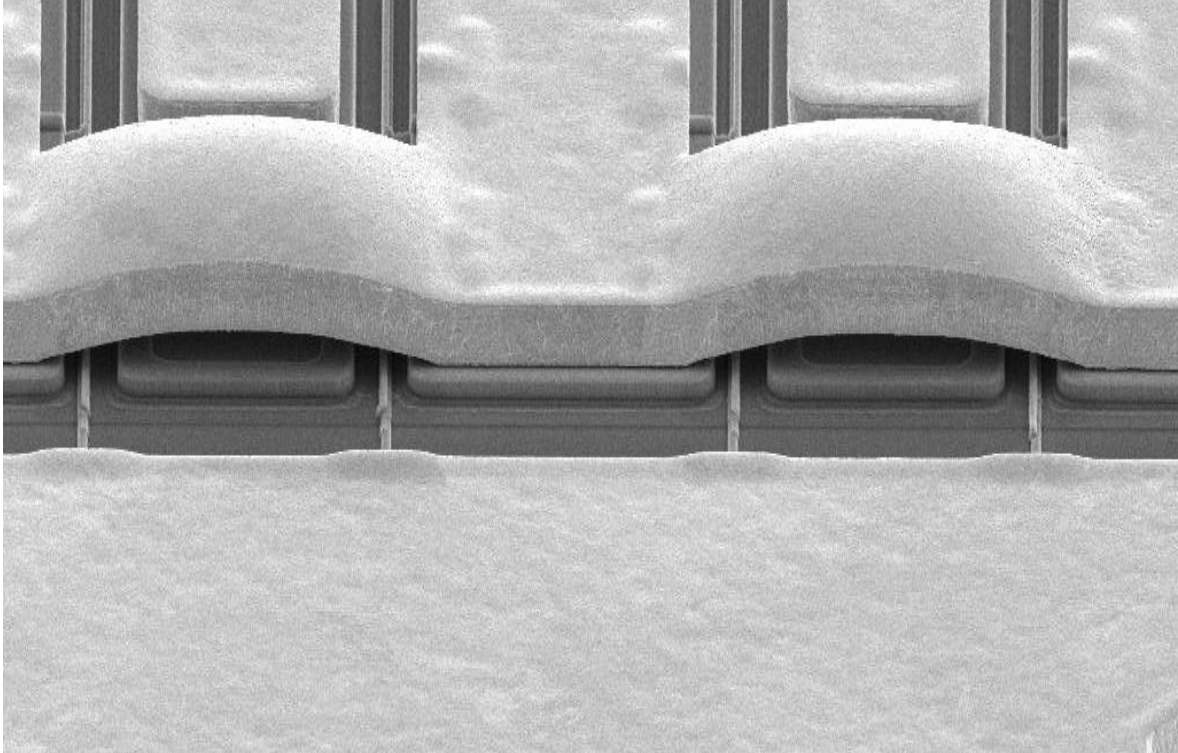
Şekil 3.38. Si_3N_4 dielektrik açıklığı adımı sonrası kesit görünüm

3.4.7. Hava köprüsü destek adımı

GaN HEMT aygıtlardan birden fazla kaynak ve akaç kontaklarını tek noktada bağlayıp ölçüm yapmak için hava köprüsü yapıları gereklidir. Hava köprü yapıları için ilk olarak hava köprüsü desteklerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu yüzden tüm örnek yüzeylerine S1828 adı verilen özel bir fotodirenç kaplandıktan sonra SUSS maske hizalayıcı sisteminde pozitif fotolitografi yapılmıştır. Daha sonra tüm örnekler $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 dk. bekletilerek oluşan desen profillerinin ovalleşmesi sağlanmıştır. Resim 3.21’de örnek yüzeyinde aygıtta oluşan hava köprüsü destekleri görülmektedir. Resim. 3.22’de ise üretim sonunda oluşturulan hava köprü yapılarının SEM görüntüsü görülmektedir.



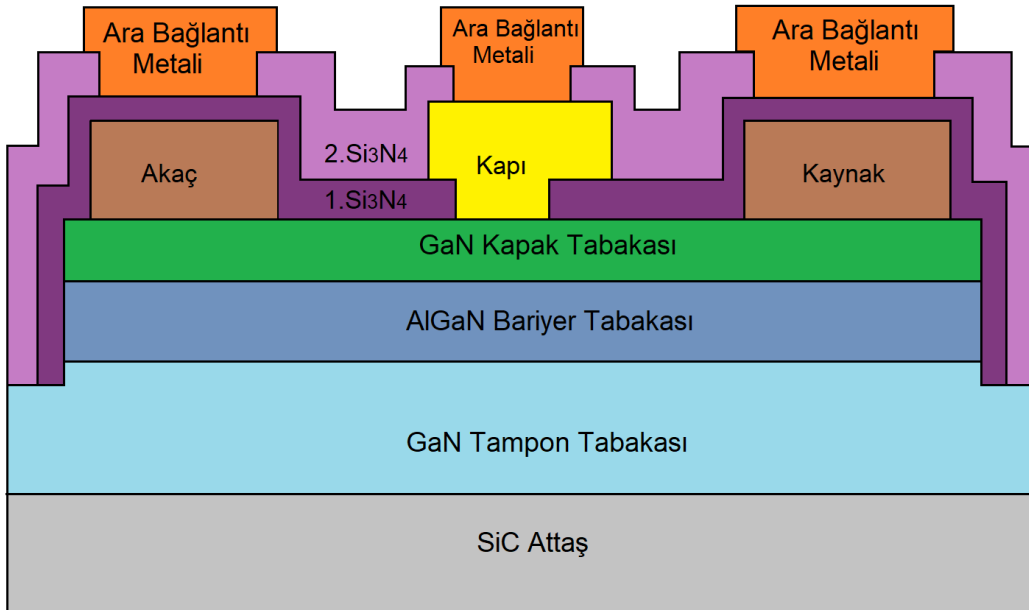
Resim 3.21. Hava köprüsü destekleri



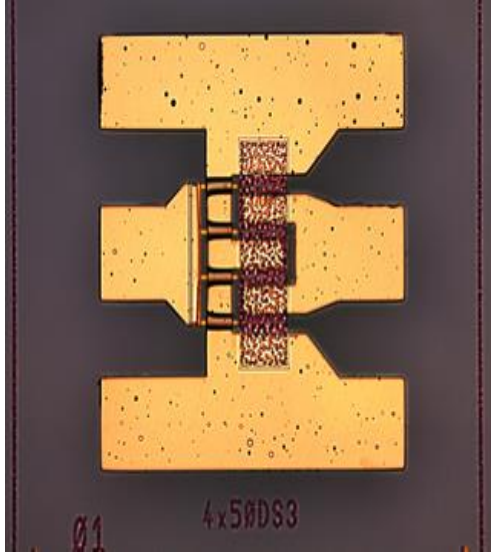
Resim 3.22. Hava köprülerinin SEM görüntüleri

3.4.8. Bağlantı metali adımı

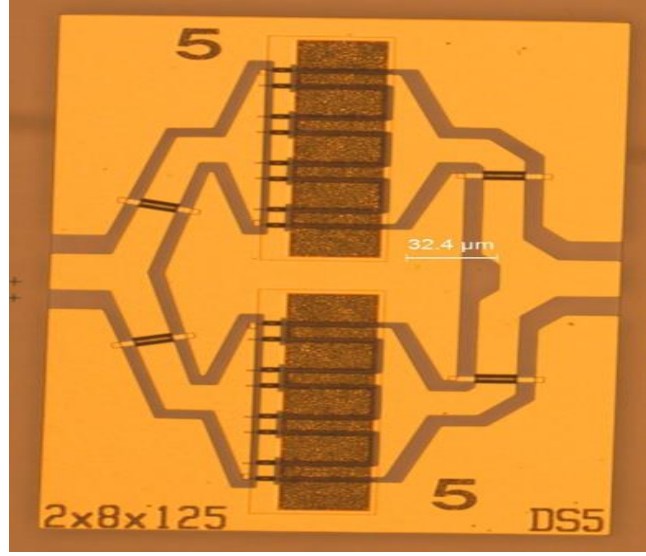
GaN HEMT aygıtlarda elektriksel olarak ölçüm yapılabilmesi için kaynak, akaç ve kapı kontaklarına temas edilmesi gerekmektedir. Bunun için Si_3N_4 dielektrik açıklığı adımı ile açılan bölgelere daha büyük boyutlu desenler oluşturulur ve metaller kaplanır. GaN HEMT aygıt üretiminin son adımı olan ara bağlantı metali adımı ilk olarak AZ2070 fotodirenç malzemesi örnekler yüzeyine serilmiştir. Daha sonra SUSS maske hizalayıcı sisteminde negatif fotolitografi yapılmıştır. Univex 350 elektron demeti buharlaştırma sisteminde sırası ile Ti (100nm)/Au (2000nm) kaplaması yapılmıştır. Kaplama sonrası metallerin kalkma işlemi ve AZ 100 kimyasal sıvısı içerisinde hava köprüsü desteklerinin temizleme işlemi yapılmıştır. En son aseton ve isopropil alkol içerisinde örneklerin temizlenmesi ile GaN HEMT aygıt üretimi tamamlanmıştır. Üretimi tamamlanan GaN HEMT aygıtların elektriksel ölçüm işlemlerine geçilmiştir. Şekil 3.39’da ara bağlantı metali adımı sonrası kesit görünüm görülmektedir. Resim 3.23’de ise üretimi tamamlanmış GaN HEMT aygıtlarının optik mikroskop görüntüleri görülmektedir.



Şekil 3.39. Bağlantı metali sonrası kesit görünüm



(a)



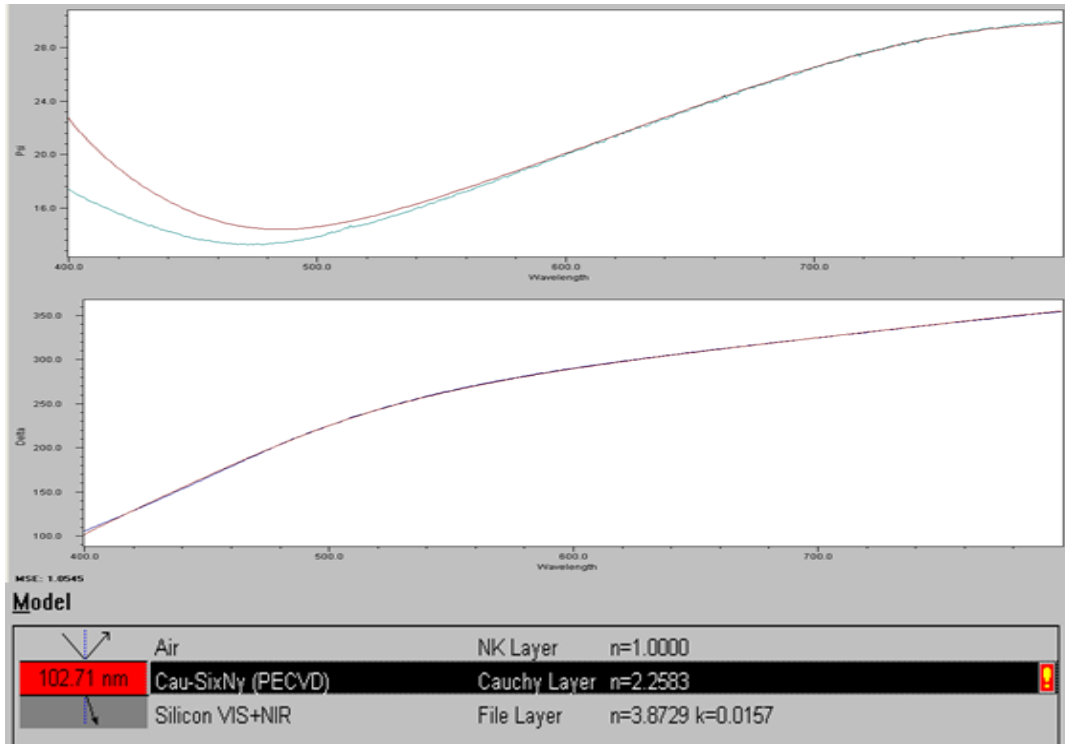
(b)

Resim 3.23. a) ve b) Üretimleri tamamlanmış farklı tasarımlara sahip GaN HEMT aygıtları

4. ÖLÇÜMLER

4.1. Optik Ölçümler

GaN HEMT aygıtlarda birinci ve ikinci Si_3N_4 katmanlarının kalınlıkları ve kırıcılık indisleri Sentech elipsometrede ölçülmüştür. GaN örneklerin şeffaf olması sebebi ile elipsometrede kalınlık ve kırıcılık indisi ölçümü için aynı kaplama süreleri ile silisyum waferlara Si_3N_4 kaplamaları yapılmıştır. Şekil 4.1’de 100 nm büyütülen birinci Si_3N_4 için elipsometre ölçümü görülmektedir. Burada film kalınlığı 102,71 nm ölçülürken, n kırıcılık indisi 2,26 civarında ölçülmüştür. Bu da kaplanan filmlerin Si yoğunluklu olduğunu göstermektedir [72].

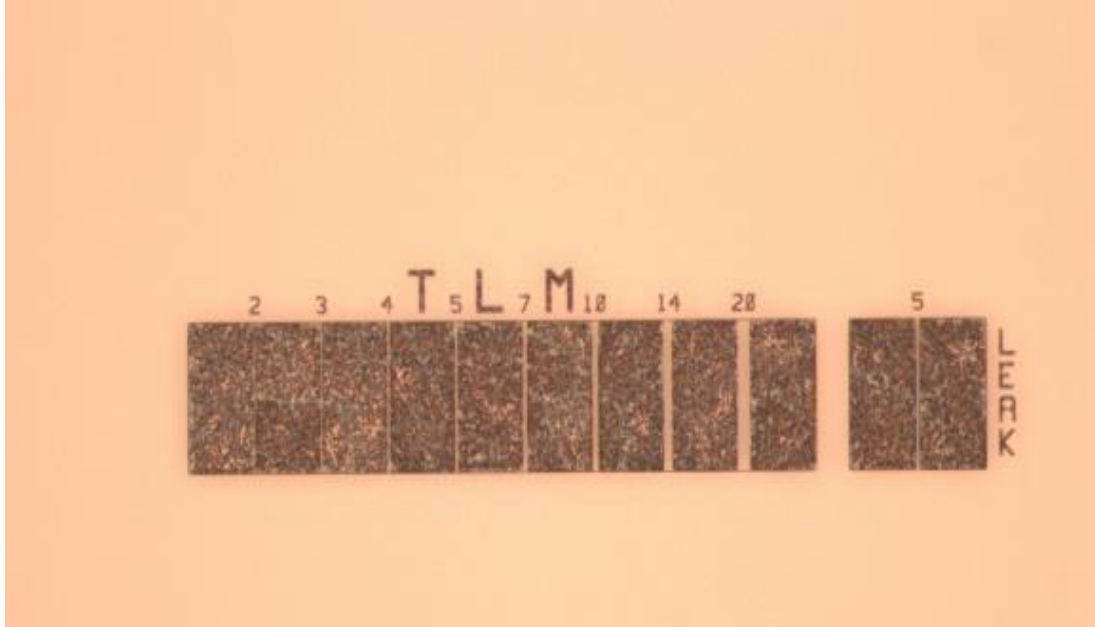


Şekil 4.1. 100 nm Si_3N_4 tabakası için film kalınlığı ve kırıcılık indisi

4.2. Elektriksel Ölçümler

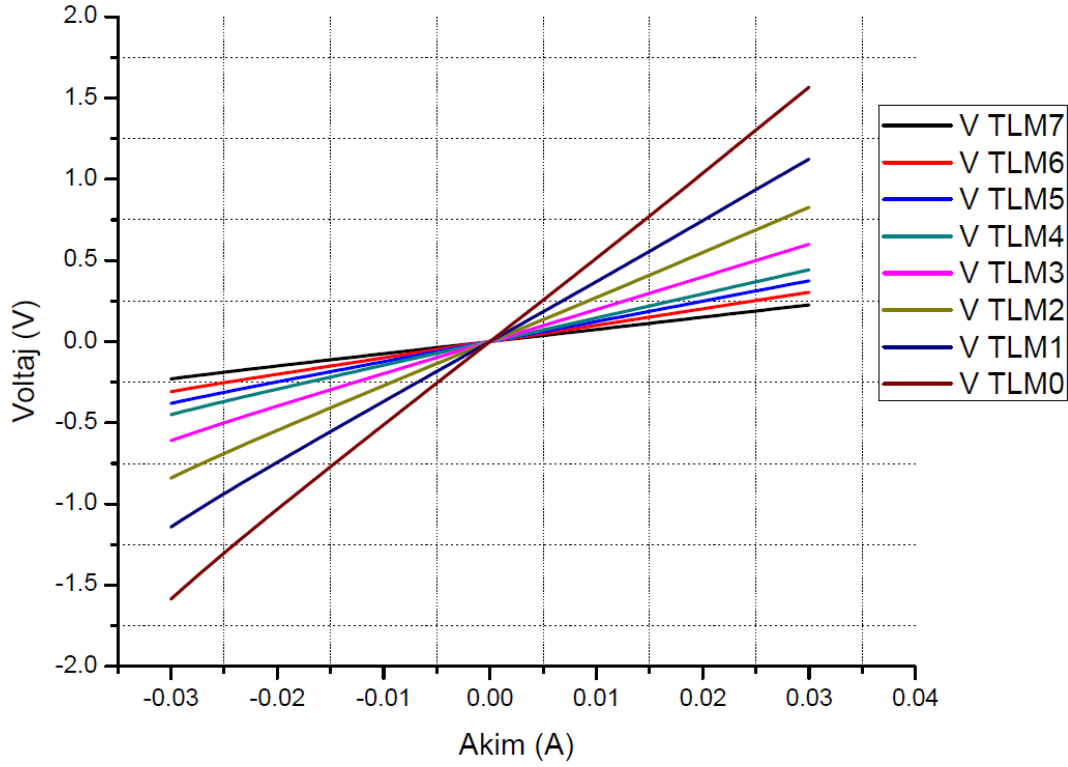
4.2.1. Omik kontak ölçümleri

GaN HEMT aygıtlarda yüksek akım yoğunluğu, iletkenlik ve çıkış gücü gibi özellikler için omik kontakların düşük kontak direncine sahip olması istenir [73-74]. Omik kontaklar oluşturulduktan sonra her bir örnek üzerinde Resim 4.1’de bulunan TLM desenlerinden ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerde R_C ve R_{SH} hesaplanmıştır. Bu ölçümlerde dört kontak ölçüm (four probe) methodu kullanılmıştır.



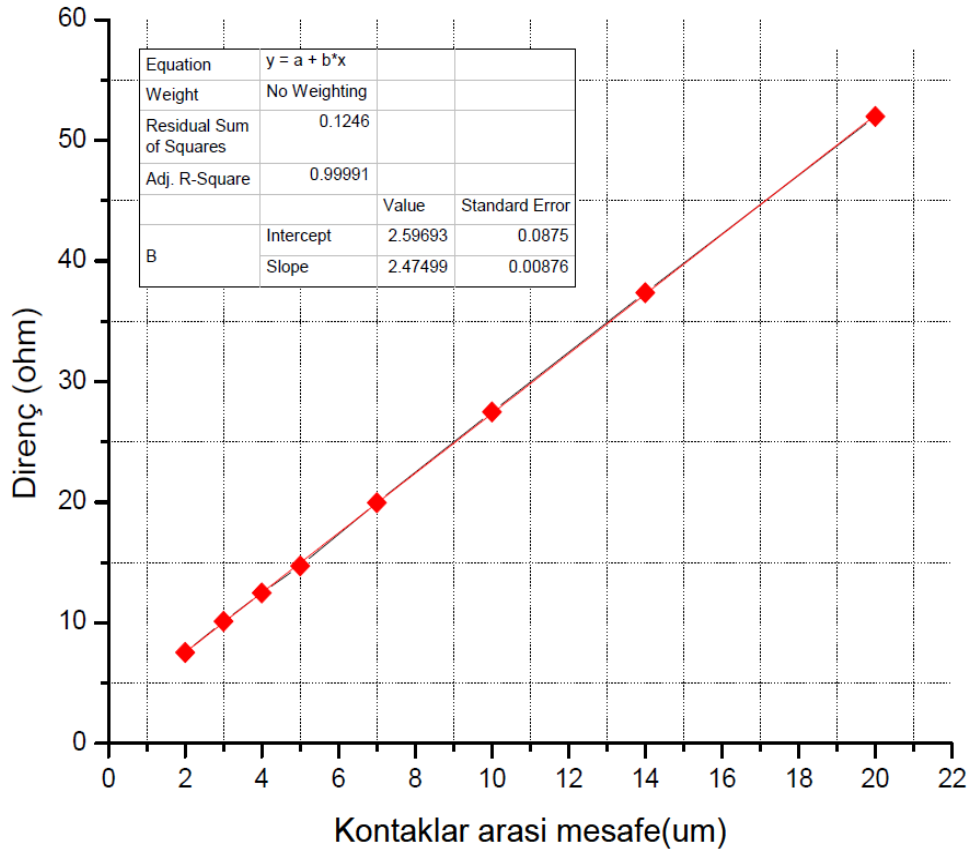
Resim 4.1. TLM desenleri

Şekil 4.2’de örnek 1 için TLM deseninden alınan ölçümlerin I-V grafiği görülmektedir. TLM deseninde bulunan 2, 3, 4, 5, 7, 10, 14 ve 20 μm ’lik desenlerden ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümlerin hepsi omik davranışı göstermektedir.



Şekil 4.2. TLM desenlerinde alınan I-V ölçümleri

TLM desenlerinde alınan I-V ölçümleri sonucunda her bir desen için direnç değeri hesaplanmıştır. TLM desenindeki aralık mesafelerine karşı direnç grafiği çizdirilerek kontak ve kanal dirençleri bulunmuştur. Şekil 4.3’de aralık mesafelerine karşı direnç grafiği görülmektedir.



Şekil 4.3. Kontak mesafelerine karşı direnç ölçüm grafiği

Şekil.4.2'deki grafikten eğim değeri ve y eksenini kesen noktanın değeri kullanılarak R_{SH} ve R_C değerleri hesaplanmıştır. Resim 4.1'de görülen TLM desenlerinden her birinin uzunluğu (W) 200 μm 'dur. Şekil.3.15'teki grafikten ve eşitlik.3.13 kullanılarak örnek 9 (tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakalı) için R_C 0,26 ohm.mm, R_{SH} ise 495 ohm/sq hesaplanmıştır. Tüm örnekler için alınan TLM ölçümleri çizelge 4.1' ve çizelge 4.2'de görülmektedir. Tüm örneklerin kontak dirençleri 0,23-0,35 ohm.mm olarak düşük seviyelerde görülmüştür [73-74].

Çizelge 4.1. İlk dört örneğin TLM ölçümleri

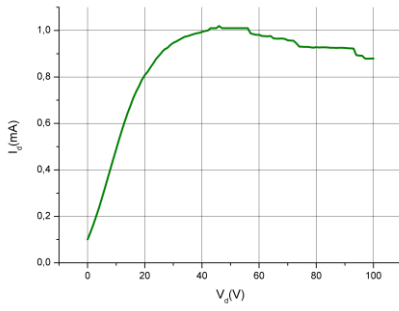
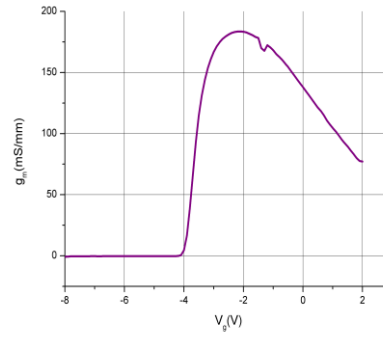
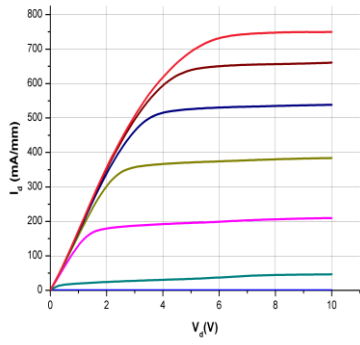
Örnek 1		Örnek 2		Örnek 3		Örnek 4	
R_C (ohm.mm)	R_{SH} (ohm/sqr)	R_C (ohm.mm)	R_{SH} (ohm/sqr)	R_C (ohm.mm)	R_{SH} (ohm/sqr)	R_C (ohm.mm)	R_{SH} (ohm/sqr)
0,31	469	0,28	491	0,35	474	0,34	509

Çizelge 4.2. İkinci dört örneği TLM ölçümleri

Örnek 5		Örnek 6		Örnek 7		Örnek 8	
R _C (ohm.mm)	R _{SH} (ohm/sqr)	R _C (ohm.mm)	R _{SH} (ohm/sqr)	R _C (ohm.mm)	R _{SH} (ohm/sqr)	R _C (ohm.mm)	R _{SH} (ohm/sqr)
0,28	460	0,34	481	0,35	469	0,23	484

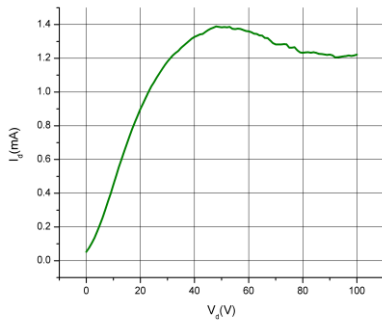
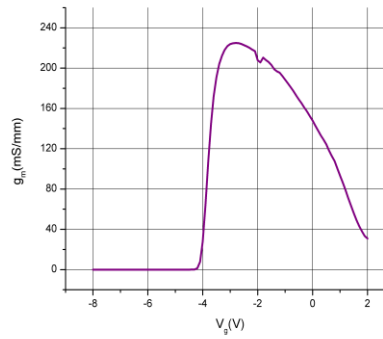
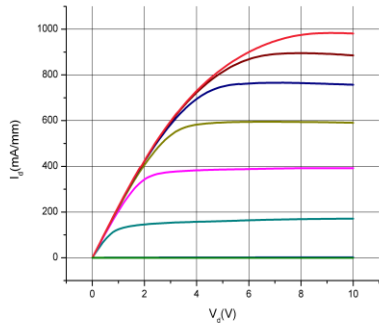
4.2.2. GaN HEMT aygıtların DC ölçümleri

GaN HEMT aygıtların üretimleri tamamlandıktan sonra DC ölçümler alınmıştır. Ölçümler M150 sonda istasyonu ile 1505A yarıiletken aygıt ölçüm sisteminde gerçekleştirilmiştir. Her bir örnekte 1 aygıttan ölçümler alınmıştır. İlk olarak 1.çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışmasında kullanılan ve önden üretimleri tamamlanan örnekler (Örnek 1, 2, 3, 4) ölçülmüştür. Daha sonra bu aygıtların sonucuna göre 2.çift katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması çalışmasında kullanılan ve üretimleri sonra tamamlanan örnekler (örnek 5, 6, 7, 8) ölçülmüştür. En son olarak tek katmanlı Si₃N₄ dielektrik kaplaması yapılan örnek 9 ölçülmüştür. Şekil 4.4'te örnek 2 için, Şekil 4.5'te örnek 4 için, Şekil 4.6'da örnek 5 için, Şekil 4.7'de örnek 6 için, Şekil 4.8'de örnek 7 için, Şekil 4.9'da örnek 8 için ve Şekil 4.10'da örnek 9 için bir GaN HEMT aygıtında ölçülen akım yoğunluğu (I_d), iletkenlik (g_m) ve kırılma gerilimi (V_{br}) ölçüm grafikleri görülmektedir.



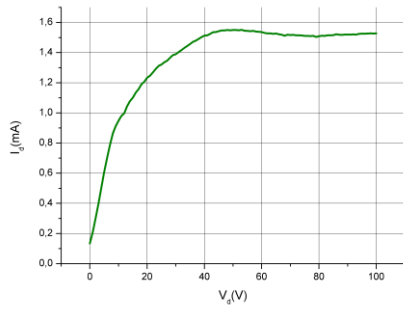
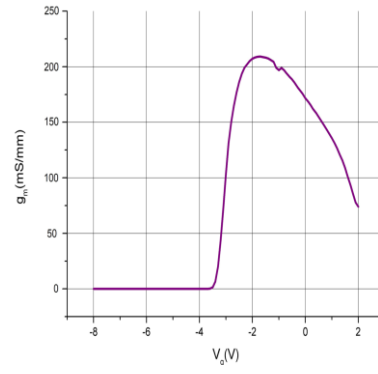
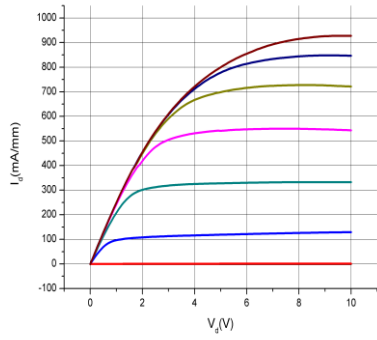
$I_{dss}=750 \text{ mA/mm}$
 $g_m=183 \text{ mS/mm}$
 $V_{br}=45 \text{ V}$

Şekil 4.4. Örnek 2 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri



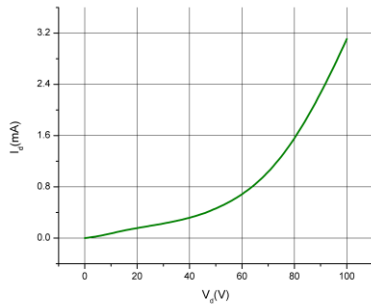
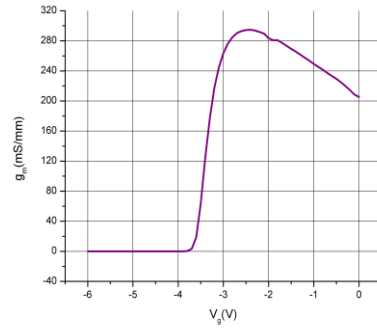
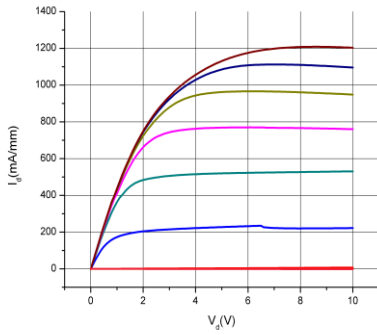
$I_{dss}=980 \text{ mA/mm}$
 $g_m=225 \text{ mS/mm}$
 $V_{br}=52 \text{ V}$

Şekil 4.5. Örnek 4 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri



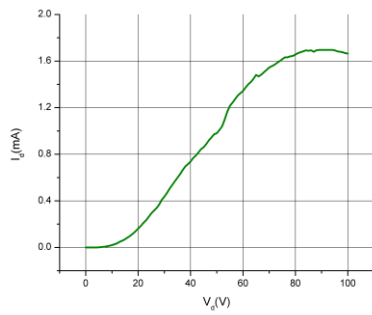
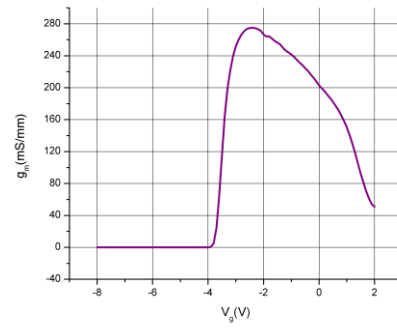
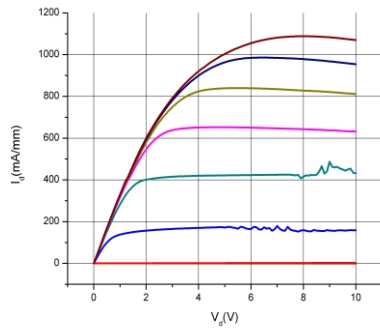
$I_{dss}=930 \text{ mA/mm}$
 $g_m=210 \text{ mS/mm}$
 $V_{br}=49 \text{ V}$

Şekil 4.6. Örnek 5 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri



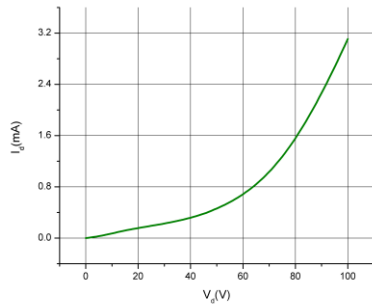
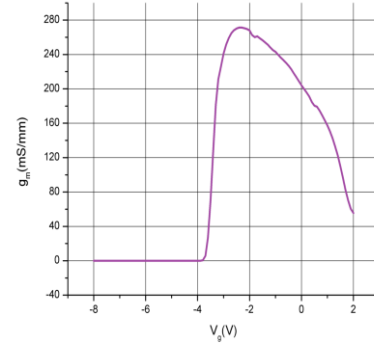
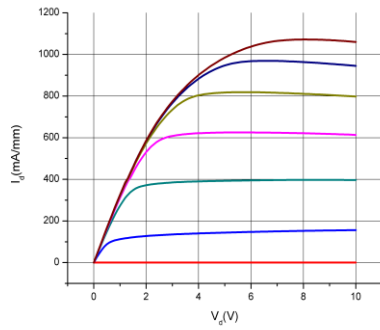
$I_{dss}=1200 \text{ mA/mm}$
 $g_m=294 \text{ mS/mm}$
 $V_{br} > 100 \text{ V}$

Şekil 4.7. Örnek 6 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri



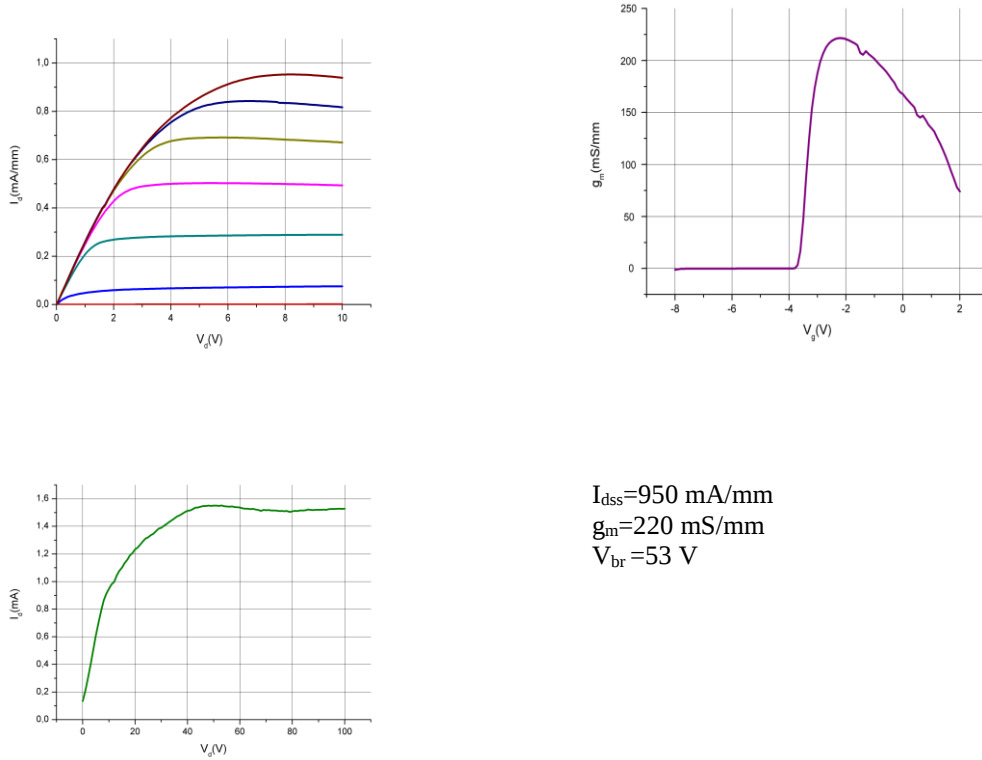
$I_{dss}=1090 \text{ mA/mm}$
 $g_m=275 \text{ mS/mm}$
 $V_{br}=95 \text{ V}$

Şekil 4.8. Örnek 7 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri



$I_{dss}=1090 \text{ mA/mm}$
 $g_m=275 \text{ mS/mm}$
 $V_{br} > 100 \text{ V}$

Şekil 4.9. Örnek 8 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri



Şekil 4.10. Örnek 9 için I_d , g_m ve V_{br} ölçümleri

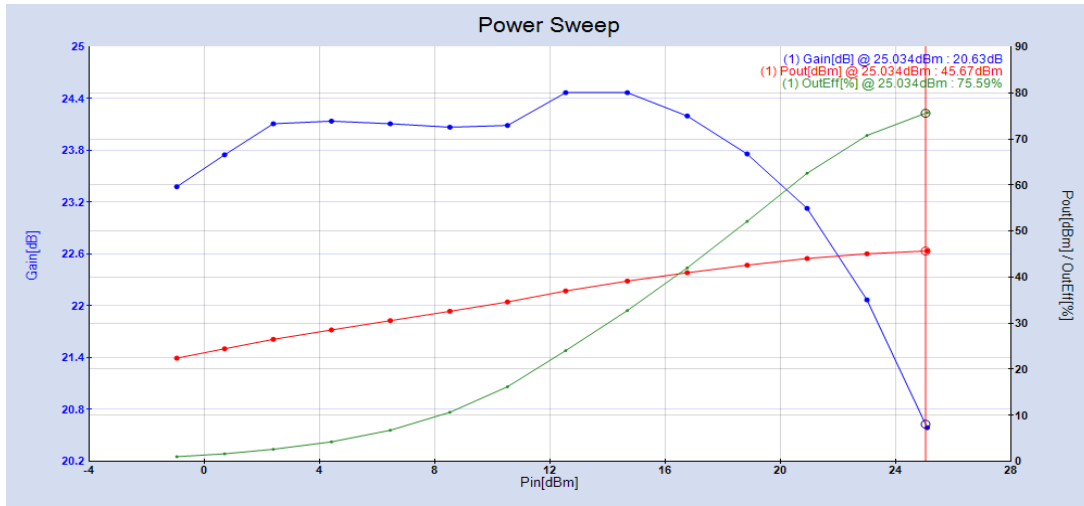
Çizelge 4.3'te tüm DC ölçümlerin detaylı görülmektedir. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, 2. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışmasındaki örneklerin (örnek 5, 6, 7 ve 8) DC sonuçları diğer örneklerle göre daha iyi çıkmıştır. Örnek 6, diğer örneklerden daha iyi iletkenlik, akım yoğunluğu ve kırılma gerilimi sağlamıştır. 1. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışmasındaki örneklerden örnek 1 ve örnek 3'ün çalışmadığı, örnek 2 ve örnek 4'ün düşük performanslı çalıştığı görülmüştür.

Çizelge 4.3. Tüm örneklerin DC sonuçları

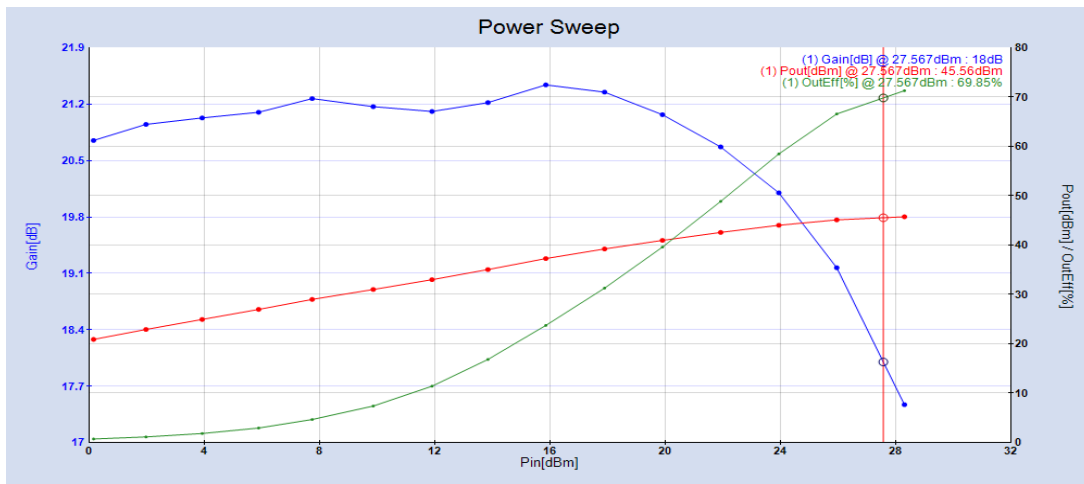
Örnek	$V_{knee}(V)$	$V_p(-V)$	$g_m(mS/mm)$	$I_{dss}(mA/mm)$	$V_{br}(V)$	Si_3N_4 durumu
Örnek 2	5,1	3,55	183	750	45	çift
Örnek 4	5,6	3,38	225	225	52	çift
Örnek 5	5,6	3,70	210	930	49	çift
Örnek 6	4,9	3,64	294	1200	>100	çift
Örnek 7	5,5	3,69	275	1090	95	çift
Örnek 8	5,5	3,21	270	1070	>100	çift
Örnek 9	6,0	3,25	220	950	53	tek

4.2.3. GaN HEMT aygıtların RF güç ölçümleri

DC ölçümlerden sonra aygıtların RF güç ölçümlerine geçilmiştir. DC ölçümlerde en iyi sonuç veren 2. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması çalışmasındaki örnek 6 ile kıyaslama amacı ile tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası olan örnek 9'un RF güç ölçümleri yapılmıştır. RF güç ölçümlerinde M150 sonda istasyonu, Maury load-pull sistemi (0,2-26,5 GHz), Agilent 83620B sinyal üretici, Agilent 3631A DC güç kaynağı, Agilent 83020A sürücü yükselteçten oluşan RF güç ölçüm sistemi kullanılmıştır. Ölçümlerde 1 GHz ve 1.5 GHz frekanslarındaki Çıkış gücü ve verimliliklerine bakılmıştır. Şekil 4.11'de Örnek 6, Şekil 4.12'de Örnek 9 için 1 ve 1.5 GHz'de alınan ölçümler görülmektedir.



a)

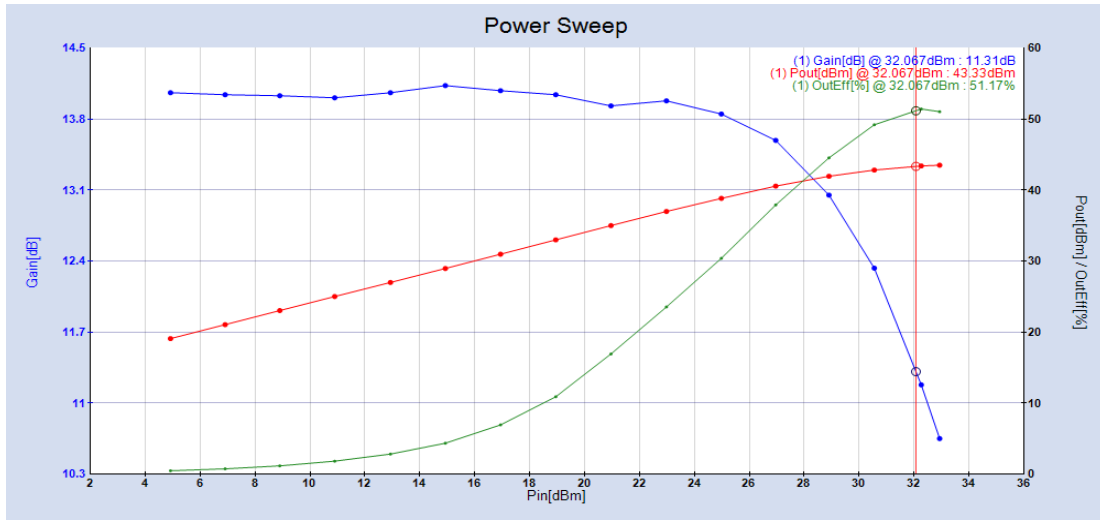


b)

Şekil 4.11 a) 1 GHz b) 1.5 GHz'de örnek 6 için çıkış gücü ve verimlilik ölçümleri



a)



b)

Şekil 4.12 a) 1 GHz b) 1.5 GHz’de örnek 9 için çıkış gücü ve verimlilik ölçümleri

Alınan RF güç ölçüm sonuçları çizelge 4.4’te detaylıca görülmektedir. 2. çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması yapılan örnek 6’nın, tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik kaplaması yapılan örnek 6 ‘ya göre oldukça yüksek çıkış gücü ve verimlilik sağladığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. RF ölçüm sonuçları

Örnek	Frekans	Çıkış gücü (dBm)	Çıkış gücü (W)	Verimlilik
Örnek 6	1 GHz	45,67	36,89	% 75,59
Örnek 6	1,5 GHz	45,56	35,90	% 69,85
Örnek 9	1 GHz	43,20	20,90	% 58,06
Örnek 9	1,5 GHz	43,33	21,53	% 51,17

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında MOCVD’de büyütülen, karakterizasyonları yapılan ve örnekler halinde dilimlenen AlGaIn/GaN wafer yapısı üzerine tek ve çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabası kaplanarak HEMT aygıtlar üretilmiştir. Çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakası için farklı büyütme sıcaklıkları ve farklı kalınlıklar denenerek çalışmalar yapılmış ve aygıtların üretimi tamamlanmıştır. DC ve RF güç ölçümleri alınarak çalışmalar kıyaslanmıştır. Çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakasında; ilk tabakanın yüksek sıcaklıkta daha az kalınlıkta, ikinci tabakanın daha düşük sıcaklıkta daha fazla kalınlıkta olduğu durumda elektriksel ölçümlerde en iyi değerler alınmıştır. Ayrıca bu değerlerin tek katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakalı aygıtın değerlerinden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda yüksek güç gerektiren uygulamalarda, çift katmanlı Si_3N_4 dielektrik tabakanın GaN HEMT aygıtlar için oldukça önemli olduğu görülmüştür.

Si_3N_4 dielektrik tabakada büyütme sıcaklığı ve kalınlık değeri değişiminin, GaN HEMT aygıtlarda çalışma performansını nasıl etkilediği de bu çalışmada görülmüştür. İyi performans veren Si_3N_4 dielektrik tabakası geliştirmek için bu iki parametrenin dikkate alınması gereği ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada epitaksiyel büyütme, epitaksiyel yapı karakterizasyon, yarıiletken aygıt üretim ve karakterizasyon yöntemleri konusunda çok değerli bilgiler ve tecrübeler edinilmiştir. Özellikle Dünya’daki yarıiletken teknolojisinin gelişimi göz önüne alındığında ülkemizde de bu teknolojinin gelişimi için temel bilgilerin öğrenilmesi çok önemli olmuştur.

Daha güçlü GaN HEMT aygıtları için Si_3N_4 dielektrik tabakanın daha da geliştirilmesi gereklidir. Bunun için film kalitesi daha yüksek, çift yada üçlü katman yapıda Si_3N_4 dielektrik tabakanın optimize edilmiş olarak GaN HEMT aygıtlarda kullanılmalıdır. Ayrıca PECVD yöntemine göre daha gelişmiş ve hızlı olan endüktif çiftli plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar kaplama (IC-PECVD) ve düşük basınçlı kimyasal buhar kaplama (LPCVD) yöntemleri ile daha yüksek performans sağlayan Si_3N_4 dielektrik tabakaları geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Hoddeson, L. (2011). John Bardeen: the only person to win two Nobel Prizes in physics. *Physics Education*, 46, 661-668.
2. Brinkman, W.F., Haggan, D.E. and Troutman, W. (1997). A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 32(12), 1858-1865.
3. Shockley, W. (1949). The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *The Bell System Technical Journal*, 28(3), 435-489.
4. Mimura, T. (2002). The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 780-782.
5. Lenka, T.R., Panda, A.K. (2011). Characteristics Study of 2DEG Transport Properties of AlGaIn/GaN and AlGaIn/GaAs based HEMT. *Semiconductors*, 45(5), 650–656.
6. Boles, T. (2018). *GaN-on-Silicon – Present Capabilities and Future Directions*. AIP Conference Proceedings. 1934, Meksika, 020001-0200010.
7. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. and Toyoda, Y. (1986). Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. *Applied Physics Letters*, 48(5), 353-355.
8. Khan, M., Van Hoven, J., Kuznia, J. and Olson, D. (1991). High electron mobility GaN/AlGaIn heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 58(21), 2408–2410.
9. Khan, M., Kuznia, J., Bhattarai, A. and Olson, D. (1993). Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. *Applied Physics Letters*, 62(15), 1786-1787.
10. Khan, M.A., Kuznia, J.N., Olson, D.T., Schaff, W.J., Burm, J.W., Shur, M.S. (1994). Microwave performance of a 0.25 μm gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1121– 1123.
11. Palacios, T., Chakraborty, A., Rajan, S., Poblenz, C., Keller, S., DenBaars, S.P., Speck, J.S., Mishra, U.K. (2005). High-Power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-Band Applications. *IEEE Electron Device Letters*, 26(11), 781-183.
12. Rinke, P., Winkelnkeper, M., Qteish, A., Bimberg, D., Neugebauer, J., Scheffler, M. (2008). Consistent set of band parameters for the group-III nitrides AlN, GaN, and InN. *Physical Review B* 77, 075202, 1-6.
13. Ozpineci, B. and Tolbert, L.M. (2003). Comparison of wide-bandgap semiconductor for power electronics applications. *Technical Report, Oak ridge National Laboratory*, 14, 4-6.

14. Sun, Y., Kang, X., Zheng, Y., Lu, J., Tian, X., Wei, K., Wu, H., Wang, W., Liu, X., Zhang, G. (2019). Review of the Recent Progress on GaN-Based Vertical Power Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Electronics*, 8(575), 1-15.
15. İnternet: Taranovich, S. (March, 2013). Si vs. GaN vs. SiC: Which process and supplier are best for my power design?. *EDN*. Web: <https://www.edn.com/si-vs-gan-vs-sic-which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design/> Erişim Tarihi: 28.11.2022.
16. İnternet: Oliver, S. (September, 2014). Optimize a Power Scheme for these Transient Times. *Electronicdesign*. Web: <https://www.electronicdesign.com/powermanagement/article/21800275/optimize-a-power-scheme-for-these-transient-times> Erişim Tarihi: 28.11.2022.
17. Tzou, A.J., Lee, C.H., Ho, S.Y., Kuo, H.C., Hang, J.J. (2018). *Handbook of GaN Semiconductor Materials and Devices. Chapter: Principles and Properties of Nitride-Based Electronic Devices*. (1. Baskı). Florida: CRC Press, 309-310.
18. Qin, H., Luan, X., Feng, C., Yang, D., Zang, G. (2017). Mechanical, Thermodynamic and Electronic Properties of Wurtzite and Zinc-Blende GaN Crystals. *Materials*, 10(12), 1-15.
19. Trampert, A., Brandt, O., and Ploog, K. (1997). In *Gallium Nitride (GaN), Series: Semiconductors and Semimetals*. (1. Baskı). Amsterdam: Elsevier, 50, 167–192.
20. Ambacher, O., Foutz, B., Smart, J., Shealy, J.R., Weimann, N.G., Chu, K., Murphy, M., Sierakowski, A.J., Schaff, W.J., Eastman, L.F., Dimitrov, R., Mitchell, A., Stutzmann, M. (1999). Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 85(6,) 3222–3233.
21. Bernardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III–V Nitrides. *Physical Review B*, 56, R10024–R10027.
22. Chen, J. (2015). *MOCVD growth of GaN-based high electron mobility transistor structures*. Doktora Tezi, Linköping Üniversitesi, Linköping, 27-28.
23. Kim, H., Tilak, V., Green, B.M., Smart, J.A., Schaff, W.J., Shealy, J.R., Eastman, L.F. (2001). Reliability Evaluation of High Power AlGaIn/GaN HEMTs on SiC Substrate. *Physica Status Solidi*, (a) 188, No. 1, 203 – 206.
24. Chini, A., Buttari, D., Coffie, R., Heikman, S., Keller, S., Mishra, U.K. (2004). 12 W/mm power density AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire substrate. *Electronics Letters*, 40, 1-2.
25. Javorka, P., Alarm, A., Wolter, M., Fox, A., Marso, M., Heuken, M., Luth, H., Kordos, P. (2002). AlGaIn/GaN HEMTs on (111) Silicon Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 23(1), 4-6.
26. Ambacher, O. (1998). Growth and applications of Group III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31, 2653-2665.

27. Liu, A.C., Tu, P.T., Langpoklakpam, C., Huang, Y.W., Chang, Y.T., Tzou, A.J., Hsu, L.H., Lin, C.H., Kuo, H.C., Chang, E.Y. (2021). The Evolution of Manufacturing Technology for GaN Electronic Devices. *Micromachines*, 12(737), 2-6.
28. Ponce, F.A., Krusor, B.S., Major, J.S., Plano, W.E., Welch, D.F. (1995). Microstructure of GaN epitaxy on SiC using AlN buffer layers. *Applied Physics Letters*, 67(3), 410-412.
29. Shrestha, N.M., Wang, Y.Y., Li, Y., Chang, E.Y. (2013). *Effect of AlN Spacer Layer on AlGaIn/GaN HEMTs*. 16th International Workshop on Computational Electronics, Nara, 256-257.
30. Calle, F., Palacios, T., Monroy, E., Grajal, J., Verdu, M., Bougrioua, Z., Moerman, I. (1995). AlGaIn/GaN HEMTs: material, processing, and characterization. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 14(5), 271-277.
31. Asgari, A., Kalafi, M., Faraone, L. (2005). The effects of GaN capping layer thickness on two-dimensional electron mobility in GaN/AlGaIn/GaN heterostructures. *Physica E*, (25), 431–437.
32. Fornetti, F. (2010). *Characterisation and Performance Optimisation of GaN HEMTs and Amplifiers for Radar Applications*. Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Bristol, Doktora tezi, Bristol, 33-34.
33. Jardndal, A.H. (2007). *Large Signal Modelling of GaN Device for High Power Amplifier Design*. Department of Electrical Engineering, University of Kassel, Doktora tezi, Kassel, 14-15.
34. Brennan, K.F., Brown, A. (2002). *Theory of Modern Electronic Semiconductor Devices*. (1. baskı), New-York: John Wiley & Sons, 55-56.
35. Smorchkova, I.P., Elsass, C., Ibbetson, J., Vetury, R., Heying, B., Fini, P., Haus, E., Denbaars, S., Speck, J., Mishra, U.K. (1999). Polarization-induced charge and electron mobility in AlGaIn/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 86, 4520-4526
36. Xiao-Guang, H., De-Gang, Z., and De-Sheng, J. (2005). *Formation of two-dimensional electron gas at AlGaIn/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression*. *Chinese Physics B*, 24 (6- 067301), 1-3.
37. Malik, A. M. (2003). *Technology and Physics of Gate Recessed GaN/AlGaIn FETs*, Yüksek Lisans Tezi, Stuttgart Üniversitesi Microstructures Lab. 4th Physics Institute, Stuttgart, 18-26.
38. Asan, K.E. (2018). *SiN Pasivasyonu Öncesi Ön İşlemlerin GaN Hemtlerin Performansına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği ABD., Ankara, 12-13.
39. Javorka, P. (2004). *Fabrication and Characterization of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors*, Doktora Tezi, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen, 17-18.

40. Yang, F.H. (2014). Modern metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) reactors and growing nitride-based materials. *Materials, Technologies and Application*, 27-28
41. Yariv, A. (1991). *Optical Electronics*, (4. baskı): Orlando, Saunders College, Ch. 4, 112-117
42. Tompkins, R.P. and Nguyen, D. (2015). Contactless Mobility, Carrier Density, and Sheet Resistance Measurements on Si, GaN, and AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor (HEMT) Wafers. *ARL-TR-7209*, 1-2.
43. İnternet: Gurur. (Ağustos 2021). Bragg Yasası Nedir? Ne İşe Yarar? (DNA'nın Yapısı Vb) Açıklaması ve Formülü. *NKFU* Web: <https://www.nkfu.com/bragg-yasasi-nedir-ne-ise-yarar-dnanin-yapisi-vb-aciklamasi-ve-formulu/> Erişim tarihi: 12.12.2022.
44. Singh, N. K. (2014). *Investigation on Transport Properties and Structural Characterization of Some Nanomaterials for Fabrication of Hybrid Supercapacitors*. Chhattisgarh Swami Vivekanand Technical University Applied Physics, Doktora tezi, Bhilai Nagar, 68.
45. Bellah, M. and Christensen, S.M. (2012). Nanostructures for Medical Diagnostics. *Journal of Nanomaterials*, 1-2.
46. Dominianni, D., Giovine, E., Notargiacomo, A., Pantellini, A., Romanini, P., Peroni, M., Nanni. (2011). Dual step EBL Gate fabrication technology for GaN-HEMT wideband applications. *Microelectronic Engineering* 88, 1927–1930.
47. İnternet: EBL. *Matasusada Precision*. Web :https://www.matsusada.com/application/ps/e-beam_lithography Erişim Tarihi: 12.12.2022.
48. İnternet: Joseph Salzman .(August, 2012). Microelectronics Processing Plasma Etching. Web: <https://www.slideserve.com/will/microelectronics-processing-plasma-etching> Erişim Tarihi: 12.12.2022.
49. Green, B.M., Chu, K.K., Chumbes, E.M., Smart, J.A., Shealy, J.R., Eastman, L.F. (2000). The Effect of Surface Passivation on the Microwave Characteristics of Undoped AlGaIn/GaN HEMT's. *IEEE Electron Device Letters*, 21(6), 268-270.
50. Arulkumaran, S., Egawa, T., Ishikawa, H., Jimbo, T. (2004). Surface passivation effects on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors with SiO₂, Si₃N₄, and silicon oxynitride. *Applied Physics Letters*, 84, 613-615.
51. Chena, B., Tay, F.E.H., Iliescu, C. (2014). Development of thick film PECVD Amorphous silicon with low stress for MEMS applications. *Proceedings of SPIE*, 7269, 7269M-2
52. Gedi, S., Reddy, V.R.M., Kang, J.Y., Jeon, C.W. (2017). Impact of high temperature and short period annealing on SnS films deposited by E-beam evaporation, *Applied Surface Science*, 402, 464.

53. İnternet: Mins. (October, 2019). Furnace, RTP. *Blog*. Web: <https://m.blog.naver.com/khm159/221674463303> Erişim Tarihi: 12.12.2022.
54. Grover, S. (2016). *Effect of Transmission Line Measurement (TLM) Geometry on Specific Contact Resistivity Determination*. *Materials Science and Engineering, Rochester Institute of Technology*, Yüksek Lisans Tezi, Rochester, 32-34.
55. İnternet: Birhan Uğuz. Spektroskopik Elipsometre. OMAG. Web: <https://omag.ankara.edu.tr/Elipsometre.pdf> Erişim Tarihi: 12.12.2022.
56. İnternet: Silicon Carbide (SiC). *Helioswafer*. Web: <http://www.helioswafer.com/eng/productshow.asp?ID=26> Erişim Tarihi: 12.12.2022.
57. Wilson, M., Marinskiy, D., Lagowski, J., Almeida, C., Savtchouk, A., Nguyen, D., Benjamin, M. (2022). Method for noncontact measurement of 2DEG mobility and carrier density in AlGa_N/Ga_N on semi-insulating wafers, *Japanese Journal of Applied Physics*, 61(020903), 1-6.
58. Frayssinet, E., Nguyen, L., Lesecq, M., Defrance, N., Barros, M.G., Comyn, R., Ngo, T.H., Zielinski, M., Portail, M., Jaeger, J.C.D., Cordier, Y. (2020). Metalorganic Chemical Vapor Phase Epitaxy Growth of Buffer Layers on 3C-SiC/Si(111) Templates for AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors with Low RF Losses. *Physica Status Solidi A*, (1900760), 1-6
59. Boeykens, S., Leys, M.R., Germain, M., Cheng, K., Derluyn, J., Daele, B.V., Tendeloo, G.V., Belmans, R., Borghs, G. (2006). Investigation of Al_N nucleation layers for AlGa_N/Ga_N heterostructures on 4H-SiC. *Physica Status Solidi (c)*, 3(6), 1579–1582
60. Wong, Y.Y., Huang, S.C., Huang, W.C., Lumbantoruan, F., Chiu, Y.S., Wang, H.C., Yu, H.W., Chang, E.Y. (2014). *Growth Parameters Optimization of GaN High Electron Mobility Transistor Structure on Silicon Carbide Substrate*. IEEE- International Conference on Software Engineering 2014. Kuala Lumpur, 378-381
61. Narang, K., Khan, R., Pandey, A., Singh, V.K., Bag, R.K., Padmavati, M.V.G., Tyagi, R., Singh, R. (2022). Investigation of carrier gas on morphological and structural characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMT. *Materials Research Bulletin*, 153, 1-3.
62. Wang, X., Wang, C., Hu, G., Wang, J., Li, J. (2006). Room temperature mobility above 2100 cm²/Vs in Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_N/Ga_N heterostructures grown on sapphire substrates by MOCVD. *Physica status solidi (c)*, 3(3), 607–610.
63. Keller, S., Wu, Y.F., Parish, G., Ziang, N., Xu, J.J., Keller, B.P., Denbaars, S.P. (2001). Gallium Nitride Based High Power Heterojunction Field Effect Transistors: Process Development and Present Status at UCSB. *IEE Transactions On Electronic Devices*, 48 (3), 552-559.
64. Li, L., Zhang, J., Liu, Y., Ao, J.P. (2013). Evaluation of a Gate-First Process for AlGa_N/Ga_N Heterostructure Field-Effect Transistors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52 (11NH01), 1-5.

65. İnternet: AZ5214 E Photoresist. *Microchemicals*. Web: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_5214e_photoresist.pdf Erişim Tarihi: 16.12.2022
66. Zhang, S., Wei, K., Xiao, Y., Ma, X.H., Zhang, Y.C., Liu, G.G., Lei, T.M., Zheng, Y.K., Huang, S., Wang, N., Asif, M. (2018). Effect of SiN: Hx passivation layer on the reverse gate leakage current in GaN HEMTs. *Chinese Physics B*, 27(9), 097309, 1-5.
67. İnternet: Fujitsu Develops GaN Power Amplifier with World's Highest Output Performance for W-Band Wireless Transmissions. *Fujitsu*. Web: <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2016/0125-01.html> Erişim Tarihi: 16.12.2022
68. Makiyama, K., Ozaki, S., Ohki, T., Okamoto, N. (2015). *Collapse-Free High Power InAlGaN/GaN-HEMT with 3 W/mm at 96 GHz*. 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington, 231-216.
69. Liu, J., Mi, M., Zhu, J., Liu, S., Wang, P., Zhou, Y., Zhu, Q., Wu, M., Lu, H., Hou, B., Wang, H., Cai, X., Zhang, Y., Duan, X., Yang, L., Ma, X., Hao, Y. (2022). Improved Power Performance and the Mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs Using Si-Rich SiN/Si₃N₄ Bilayer Passivation. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 69(2), 631-636.
70. Cho, S.J., Wang, C., Kim, N.Y. (2012). Effects of double passivation for optimize DC properties in gamma-gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistor by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Thin Film Solids*, 520 (13), 4455-4458.
71. Visvkarma, A.J., Sharma, C., Laishram, R., Kapoor, S., Rawal, D.S., Viyanak, S., Saxena, M. (2019). Comparative study of Au and Ni/Au gated AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *AIP Advances*, 9 (125231),1-5
72. Ting, D.K., Wang, Q., Wang, T., Ng, S.K., Toh, Y.T., Lim, K.P., Yang, Y., Tan, D.T.H. (2015). Exploring High Refractive Index Silicon-Rich Nitride Films by Low Temperature Inductively Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition and Applications for Integrated Waveguides. *ACS Applied Material&Interfaces*, 7, 21884–21889.
73. Lu, Y., Ma, X., Yang, L., Hou, B., Mi, M., Zheng, J., Zhang, H., Hao, Y. (2018). High RF Performance AlGaIn/GaN HEMT Fabricated by Recess-Arrayed Ohmic Contact Technology. *IEEE Electron Devices Letters*, 39 (6), 811-814.
74. Wang, C., He, Y., Zheng, X., Zhao, M., Mi, M., Li, X., Mao, W., Ma, X., Hao, Y. (2015). Low ohmic-contact resistance in AlGaIn/ GaN high electron mobility transistors with holes etching in ohmic region. *Electronics Letters*, 51(25), 2145–2147.



Gazili olmak ayrıcalıktır