



**RF MAGNETRON SPUTTER SİSTEMİ İLE PASİF DEVRE
ELEMANI REZİSTÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Kemal Berk SÖNMEZ

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Kemal Berk SÖNMEZ tarafından hazırlanan “RF MAGNETRON SPUTTER SİSTEMİ İLE PASİF DEVRE ELEMANI REZİSTÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY

Fizik Ana Bilim Dalı, Bilkent Üniversitesi

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

.....

Üye: Prof. Dr. Abdullah YILDIZ

Fizik Ana Bilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 12/06/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Kemal Berk SÖNMEZ

12/06/2019

RF MAGNETRON SAÇTIRMA SİSTEMİ İLE PASİF DEVRE ELEMANI REZİSTOR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Kemal Berk SÖNMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Monolitik mikrodalga tümleşik devreler (MMIC), radar ve elektronik harp uygulamalarının temel yapıtaşını oluşturan mikrodalga parçaların hemen hepsinde kullanımı mevcut olan, günümüzün kritik teknolojileri arasında görülmektedir. Teknik açıdan donanımlı bir altyapı desteği ile geliştirilen GaN tabanlı MMIC yongalar, mikrodalga parçaların içerisinde yüksek voltaj ve yüksek sıcaklıkta performans göstermesinden ötürü güç yükselteç ve faz kaydırıcı olarak yüksek sınır frekanslarda çalışabilmesi özelliklerinden dolayı son yıllarda gelişen teknoloji ile farklı çalışma konuları için tercih edilir bir hale gelmiştir. MMIC teknolojisi, tek kristal alttaş üzerine aktif ve pasif devrelerin özel olarak tasarlanmış yapıların imal edilmesinde kullanılan bir teknolojidir. MMIC yapılarında pasif devre elemanı olarak görev alan rezistör yapıların RF magnetron saçtırmasistemi ile üretimi ve karakterizasyonu, geliştirme çalışmalarına paralel olarak 4 nokta prob düzeneği ile yapılan elektriksel ölçüm sonuçlarına göre 30 ohm/sq değerine sahip tabaka direnci ile tasarıma uygun şekilde elde edildi.

Bilim Kodu : 20226

Anahtar Kelimeler : MMIC, GaN, RF magnetron saçtırma, ince film rezistör, öz direnç, dört nokta prob düzeneği

Sayfa Adedi : 79

Danışman : Prof.Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

RF MAGNETRON SPUTTER SYSTEM AND PASSIVE CIRCUIT ELEMENT
RESISTOR PRODUCTION AND CHARACTERIZATION

(M. Sc. Thesis)

Kemal Berk SÖNMEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

MMIC chips, which are used in almost all of the microwave components that constitute the basic building blocks of monolithic microwave integrated circuits (MMIC), radar and electronic warfare applications, are among today's critical technologies. Developed with technically equipped infrastructure support, GaN-based MMIC chips have become the preferred choice for different working subjects due to the technology developed in recent years due to their high voltage and high temperature performance due to their high voltage and high frequency frequencies. MMIC technology is a technology used in the manufacture of specially designed structures for active and passive circuits on a single crystal bottomstone. The production and characterization of resistive structures, which serve as passive circuit elements in MMIC structures, with RF magnetron sputter system, were obtained according to the design with a resistivity of 30 ohm / sq.

Science Code : 20226

Key Words : MMIC, GaN, RF magnetron sputter, thin film resistor, resistivity, four point probe station

Page Number : 79

Supervisor : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

TEŞEKKÜR

Tezin tamamlanmasında, pasif devre elemanı olan rezistör yapıların üretildiği RF magnetron saçtırma ince film büyütme sistemi ve üretim sonrasında boyutsal ve elektriksel karakterizasyonlarının yapıldığı deneylerde, Aselsan Bilkent Mikro Nano (ABMN) A.Ş. bünyesindeki teknik olanakları kullanılmamı sağladığı için değerli hocam Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a, tez çalışmam boyunca bilgilerini ve deneyimlerini benimle paylaşan ve beni yönlendiren danışmanım sayın Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN'e, aygıt üretiminin başından sonuna planlanmasında ve uygulanmasında yanımda olan arkadaşlarım Sertaç URAL, Ömer Ahmet KAYAL ve Utku ER'e, çalışmalar süresince desteklerini eksik etmeyen arkadaşlarım Sinem Ön AKTAN, Takiyettin Oytun KILINÇ, İhsan Ahmet YÜKSEL, Taha Kutay VEZİROĞLU, Tuğrul TORUN'a, bana sağladıkları imkânlar ve destekleriyle sahip olduğum her şeyde en büyük pay sahibi olan canım annem Figen DEMİR AĞ ve her zaman en büyük destekçim olan şu an cennetten beni izleyen canım babam Yusuf Bahri SÖNMEZ'e, iyi kötü her gün destekleriyle yanımda olan canım abim Ziya Çağın SÖNMEZ'e ve sevgisiyle her an yanımda olan desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, ilham kaynağım müstakbel eşim Ebru ÇAVUŞOĞLU'na yürekten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER.....	5
2.1.Yarıiletkenler.....	5
2.2. GaN Özellikleri.....	7
2.3. GaN Tabanlı HEMT'in Çalışma Prensibi Ve 2DEG Oluşumu	9
2.4. MMIC Yapısı Ve Bileşenleri	12
2.5. PVD Tekniği	13
2.6. RF Magnetron Saçtırma Sistemi	14
2.7. TFR İçin TaN Hedef Malzeme Özellikleri	21
3. GaN TABANLI HEMT MMIC ÜRETİM AKIŞI	23
3.1. Örnek Temizleme Adımı.....	23
3.2. Omik Kontak Adımı.....	24
3.3. Aygıt Adacığın Oluşturma Adımı	28
3.4. İletim Hattı Modeli Ölçüm Adımı.....	30
3.5. Pasivasyon Adımı.....	33

	Sayfa
3.6. Kapı Oluşturma Adımı	34
3.7. İkinci Elektriksel Ara Ölçüm Adımı	35
3.8. Via1 Oluşturma Adımı	37
3.9. TFR Adımı	38
3.10. Birinci Metal Adımı	39
3.11. Via2 Oluşturma Adımı	41
3.12. Üçüncü Elektriksel Ara Ölçüm Köprüsü Oluşturma Adımı	42
3.13. Hava Köprüsü Oluşturma Adımı	44
3.14. Ara Bağlantı Metal Adımı	45
3.15. Hava Desteği Köprüsü Kaldırma Adımı	47
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR.....	49
4.1. Örnek Hazırlığı Ve Temizliği Adımı	50
4.2. TFR Deseni Oluşturma	51
4.3. Tooling Faktör Hesaplama	59
4.4. Homojen Kalınlıkta Film Üretme Çalışması.....	62
4.5. Kaplama Basıncının Değiştirilmesinin Kaplama Hızına Etkisi	65
4.6. Kaplama RF Gücünün Değiştirilmesinin Kaplama Hızına Etkisi.....	68
4.7. Kaplama Kalınlığının Değiştirilmesinin Tabaka Direncine Etkisi	70
4.8. Karakterizasyon Adımı	71
4.8.1. TFR kaplama işlemi sonrası boyutsal ölçümler	71
4.8.2. TFR kaplama işlemi sonrası elektronik ölçümler.....	73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler için bazı elektriksel ve mekanik özellikler.....	8
Çizelge 4.1. AZ5214E fotodirenç kalınlık çalışması parametreleri.....	56
Çizelge 4.2. Tooling faktör hesabı birinci çalışma değerleri	61
Çizelge 4.3. Tooling faktör hesabı ikinci çalışma değerleri	61
Çizelge 4.4. Tooling faktör hesabı üçüncü çalışma değerleri.....	61
Çizelge 4.5. Tooling faktör hesabı dördüncü çalışma değerleri	62
Çizelge 4.6. RF güç değişkenlerine göre kaplama parametreleri	69
Çizelge 4.7. RF magnetron saçtırma sistemi ile TFR kaplama reçetesi	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. SiC, GaN, Si, SiGe, GaAs, InGaAs temel malzemeli aygıtlar için çalışma frekansına bağlı ortalama çıkış gücü	2
Şekil 1.2. GaN tabanlı malzemenin uygulama alanları.....	3
Şekil 2.1. Yasak enerji bant aralıklarına göre iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar...	6
Şekil 2.2. N tipi ve P tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması	6
Şekil 2.3. 2DEG şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.4. 2DEG oluşumu ve AlGaIn/GaN yapısı.....	11
Şekil 2.5. Maksimum akış akımı ve doyum durumu	12
Şekil 2.6. Magnetron saçtırma yönteminin şematik gösterimi	16
Şekil 3.1. Aygıt adacığı izolasyonu yapılmadan önceki ve sonraki akım akışları.....	30
Şekil 3.2. Omik kontak direnci karakterizasyon grafiği	32
Şekil 3.3. Rezistör devre elemanının HEMT üzerindeki gösterimi	38
Şekil 3.4. Birinci metal devre elemanının HEMT üzerindeki gösterimi	40
Şekil 3.5. Pasivasyon ve aşındırma adımı sonrası HEMT üzerindeki gösterim	41
Şekil 3.6. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik öz direnç ölçümü	43
Şekil 3.7. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik akım yoğunluğu	43
Şekil 3.8. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik kırılma gerilimi grafiği	44
Şekil 3.9. Ara bağlantı metali sonrası MMIC üzerindeki gösterim	47
Şekil 4.1. Kullanılan fotodirencin türüne bağlı olarak optik litografi adımları	51
Şekil 4.2. Dönel kaplayıcı akışı	53
Şekil 4.3. Birikinti bölgesi	56
Şekil 4.4. Alttas tutucu çap boyunca homojen film üretme birinci çalışma grafiği.....	64
Şekil 4.5. Alttas tutucu çap boyunca homojen film üretme birinci çalışma grafiği.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Kaplama basıncının – kaplama hızına etkisi	68
Şekil 4.7. RF gücün – kaplama hızına etkisi.....	69
Şekil 4.8. Kalınlık – tabaka direnci değişimi	70
Şekil 4.9. TFR litografisi sonrası bölgelere göre fotodirenç kalınlık grafiği.....	72
Şekil 4.10. TFR kaplaması sonrası bölgelere göre ince film kalınlık grafiği	72
Şekil 4.11. TFR kaplaması sonrası yonganın ince film kalınlık dağılımı.....	73
Şekil 4.12. TFR kaplaması sonrası tabaka direnci grafiği	74
Şekil 4.13. TFR kaplaması sonrası tabaka direnci dağılımı.....	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. RF magnetron saçtırma kaplama izleme ekranı.....	21
Resim 3.1. Ultrasonik titreştirici.....	24
Resim 3.2. Kirli örnek yüzeyi ve temiz örnek yüzeyi	24
Resim 3.3. Omik kontak litografi işlemi sonrası kritik boyut ve çözünürlük desenlerinin mikroskop görüntüleri	25
Resim 3.4. Fotodirenç kalınlık dağılımı	25
Resim 3.5. Omik metalizasyon işlemi sonrası kritik boyut ve çözünürlük desenlerinin mikroskop görüntüleri.....	26
Resim 3.6. Omik metalizasyon sonrası metal kalınlık dağılımı	26
Resim 3.7. Tavlama sonrası kritik boyut kontrolü	27
Resim 3.8. Tavlama öncesi ve sonrası omik metallerin mikroskop görüntüleri.....	27
Resim 3.9. Tavlama sonrası omik metalleri kaynak-akaç taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	28
Resim 3.10. Aygıt adacığı aşındırma işlemi gösterimi ve örnek üzerindeki kesit alanı mikroskop görüntüsü.....	28
Resim 3.11. Aygıt adacığı litografisi sonrası hizalama ve çözünürlük deseni kontrolü	29
Resim 3.12. Aygıt adacığı aşındırma sonrası transistör optik mikroskop görüntüsü.....	29
Resim 3.13. TLM ölçümünün yapıldığı örnek üzerindeki omik kontak deseni optik mikroskop görüntüsü	31
Resim 3.14. TLM ölçüm deseni üzerinden alınan TLM görüntüsü.....	32
Resim 3.15. SixNy yüzey stres ölçümü.....	33
Resim 3.16. Via0 litografisi sonrası aygıt üzerinden hizalama kontrolü	33
Resim 3.17. Via0 aşındırması sonrası transistör yüzey görüntüsü	34
Resim 3.18. Kapı ayak oluşturma TEM görüntüleri.....	34
Resim 3.19. Kapı adımı tamamlanan transistör TEM görüntüleri	35

Resim	Sayfa
Resim 3.20. Kapı metalizasyon adımı sonrası transistörlerden alınan optik mikroskop görüntüleri.....	35
Resim 3.21. 1-9 arası numaralandırılmış kontrol HEMT aygıtları	36
Resim 3.22. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik bir DC I-V grafiği	37
Resim 3.23. CDS dosyası Via1 maskesinin Mesa maskesine hizalanmasının gösterimi örnek üzerindeki optik mikroskop görüntüsü	37
Resim 3.24. Aygıtın üzerinden hizalama kontrolü ve via1 etch sonrası transistör görüntüsü	38
Resim 3.25. TFR litografi işlemi sonrası rezistör ve çözünürlük desenlerinin mikroskop görüntüsü	39
Resim 3.26. TFR kaplama sonrası rezistör desenleri ve ölçüm deseninin görünümü....	39
Resim 3.27. Birinci metal litografisi sonrası hizalama ve çözünürlük desenlerinin optik mikroskop görüntüsü.....	40
Resim 3.28. Metalizasyonu tamamlanmış örnek üzerinden optik mikroskop görüntüleri	41
Resim 3.29. Via2 litografisi sonrası transistör optik mikroskop görüntüleri.....	42
Resim 3.30. Via2 aşındırması sonrası transistör optik mikroskop görüntüleri.....	42
Resim 3.31. Transistör üzerinden alınan hava köprüsü litografisi ve pişirme işlemleri sonrası hava köprüsü optik mikroskop görüntüsü.....	44
Resim 3.32. Transistör üzerinden alınan hava köprüsü litografisi ve pişirme işlemleri sonrası hava köprüsü TEM görüntüleri	45
Resim 3.33. İkinci metal litografisi işlemi sonrası hizalama kontrolü optik mikroskop görüntüleri.....	45
Resim 3.34. AMMT elektroplating sistemi	46
Resim 3.35. Metalizasyon için kullanılan örnek tutucu.....	46
Resim 3.36. Fabrikasyon sonrası örnek yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü	47
Resim 4.1. Temizlik adımı kullanılarak aseton-alkol ve ultrasonik titreştirici	50
Resim 4.2. Dönel kaplayıcı ve fotodirenç transfer işlemi.....	54
Resim 4.3. Dönel kaplayıcı ile örnek yüzeyine fotodirenç dökme işlemi	54

Resim	Sayfa
Resim 4.4. Sıcak tabla cihazı	55
Resim 4.5. Maske hizalayıcı sistemi.....	57
Resim 4.6. Optik mikroskop	58
Resim 4.7. TFR hizalama desenleri optik mikroskop görüntüleri	59
Resim 4.8. Tooling faktör deneme hesabı için hazırlanan ve kaplanan yonga.....	60
Resim 4.9. Tencor yüzey profilometresi kalınlık ölçümü.....	62
Resim 4.10. Vakum haznesi iç kısım örnek tutucular	63
Resim 4.11. Örneklerin örnek tutucuya yerleştirilmiş hali	64
Resim 4.12. MMIC devresindeki TFR desenleri	71
Resim 4.13. KLA tencor yüzey profilometresi düzeneği	72
Resim 4.14. Dört nokta prob sistemi	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Å	Angström
AlN	Alüminyum nitrat
AlGaN	Alüminyum galyum nitrat
cm ²	Santimetrekare
GaN	Galyum nitrat
GaAs	Galyum arsenür
Ge	Germanyum
Hg	Civa
mW	Miliwatt
nm	Nanometre
NiCr	Nikrom
Si	Silisyum
SiC	Silikon karbür
SiGe	Silisyum germanyum
sn	Saniye
TaN	Tantalyum nitrat
um	Mikrometre
UV	Ultraviyole
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABMN	Aselsan bilkent mikro nano a.ş.
DC	Doğrusal akım
HFET	Çokluyapılı alan etkili transistör
ICP-RIE	İndüktif eşleşmiş plazma reaktif iyon aşındırma

Kısaltmalar**Açıklamalar****MESFET**

Metal yarıiletken alan etkili transistor

MIM

Metal yalıtkan metal geçişi

MMIC

Monolitik mikrodalga entegre devre

MOCVD

Metal organik kimyasal buharlaştırma biriktirme

PECVD

Plazma destekli kimyasal buharlaştırma biriktirme

PCM

İşlem kontrol ekranı

PVD

Fiziksel buhar biriktirme

rpm

Dakika başına tur sayısı

sccm

Dakikada kübik santimetredeki akış

TCR

Rezistör sıcaklık katsayısı

TFR

Thin film rezistor

TEM

Taramalı elektron mikroskobu

TLM

İletim hattı modeli

2DEG

İki boyutlu elektron gazı

1. GİRİŞ

Günümüzde cihazlarda kullanılan elektronik devrelere bakıldığında zaman karşımıza çıkacak olan temel eleman transistörlerdir. Tarihsel gelişimine bakıldığında ise, katıhal transistörleri ilk olarak 1947 yılında, dünyanın o zamanlardaki en büyük şirketleri arasında yer alan Bell kuruluşlarının araştırma laboratuvarlarında çalışan 3 bilim adamı tarafından üretilerek modern elektroniğin en temel bileşeni olarak nitelendirilmiştir [1]. Bu önemli buluşun ardından, transistörlerin hem seri üretimini sağlamak hem de çeşitliliği arttırmak ve daha geniş kapasiteli özelliklere sahip yapılara ulaşılması için çalışmalara devam edilmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, transistör teknolojisinin gelişmesi daha ayrıntılı bir hal almıştır.

Yarıiletken aygıt araştırma ve geliştirme çalışmaları, Germanyum (Ge), Silisyum (Si), Silisyum Germanyum (SiGe) ve Galyum Arsenür (GaAs) yarıiletken malzemelerinin seçilmesiyle hızlı şekilde gelişme sürecine devam etmiştir. Başka bir çağ atlatan gelişme ise 1979 yılında Takashi Mimura [2] tarafından, yarıiletken teknolojisinin can damarı olan ve klasik transistör mantığından farklı şekilde, yüksek hareketli elektron taşıyıcı transistör (HEMT) aygıt teknolojisi ile elektron iletimine dayalı çalışan yarıiletken aygıt araştırmalarında yerini almıştır.

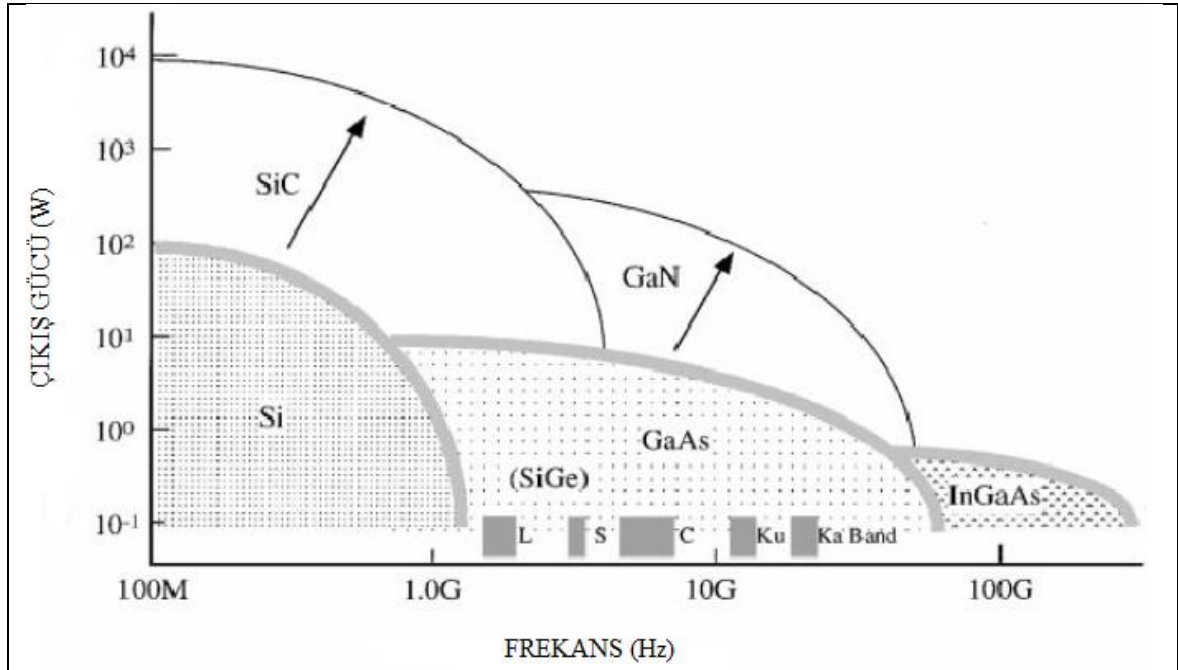
Geleneksel transistör teknolojisinde, n-tipi ve p-tipi katkılamaya bağlı olarak serbest elektronların bir yarıiletken boyunca hareketi temel prensip olarak kabul edilmiştir. Bunun sonucunda ise, elektronların kendi hareketleri sırasında katkı atomlarıyla çarpışarak saçılmaları ve bu çarpışmalara paralel olarak da hızlarının dolayısıyla enerjilerinin azalarak aygıt performansında istenmeyen düşmelere yol açmaktaydı. Yeni düşünce olarak ortaya atılan HEMT aygıt teknolojisinde önceki çalışmalardan farklı olarak, 2-boyutlu bir elektron gazının (2DEG) kullanılması fikri ortaya çıkmıştır. 2DEG oluşması için, çoklu eklem yapısının özelliklerinden faydalanılarak, bant aralıkları farklı iki malzemenin üst üste büyütülmesi ve bu iki tip malzemenin birleştiği sınır bölgede bir kuantum kuyusunun oluşmasına dayalıdır. Bu fiziksel olaylar sonucunda ise katkı atomlarıyla herhangi bir çarpışma ve saçılma olmaksızın elektronların bir yüzey boyunca daha hızlı ve daha enerjik hareket etmesini dolayısıyla aygıt performansında üst sınırlara çıkılması sağlanmaktadır. Gereksinimler ve teknolojinin hızla gelişmesi burada da önemli bir rol almıştır ve aygıt

teknolojisinde kullanılan malzemelerde de doygunluğa ulaşılmıştır. Yeni malzeme arayışları sonucunda farklı yarıiletken malzemelerin bulunduğu ve diğer III-V grubu yarıiletken malzemelerle kıyaslandığında sahip olduğu özellikler bakımından Galyum Nitrür (GaN) malzemesi ön plana çıktı.

GaN malzemesi;

- Yüksek bant aralığı enerjisi,
- Yüksek ısıl iletkenlik,
- Yüksek erime sıcaklığı,
- Yüksek elektron doymahızı,
- Yüksek kırılma gerilimi

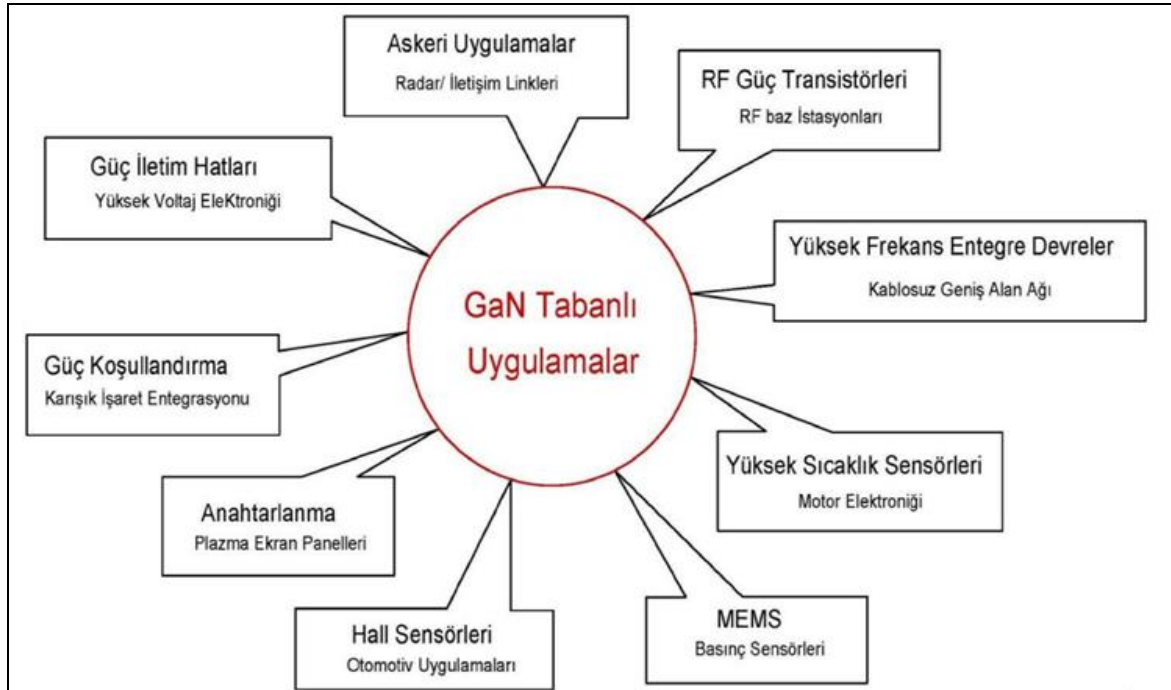
gibi üstün malzeme özellikleri nedeniyle yeni çalışmalarda ön planda tutulmuştur [3]. Bu özellikleri neticesinde daha yüksek güç ve yüksek hız performansları vaat ederek, bugünkü teknolojik cihazların neredeyse hepsinde bulunan bütünleşmiş devrelerin en önemli yapıtaşları yarı iletken araştırmalarında öncü olmuştur. GaN tabanlı aygıtların yüksek frekans değerlerinde yüksek güçlere çıkabildiği grafik şekilde 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. SiC, GaN, Si, SiGe, GaAs, InGaAs temel malzemeli aygıtlar için çalışma frekansına bağlı ortalama çıkış gücü[3]

İlginin GaN malzemesine kayması ve teknolojinin ilerlemesi ile kısa sürede aygıt teknolojisinde gelişmeler yaşanmıştır. 1986 yılında ilk kez Amano ve ekip arkadaşları tarafından MOCVD sistemi ile GaN tabakalarını AlN tampon tabakası üzerine büyütürken, hem optik ve elektriksel özellikler bakımından hem de yüzey morfolojisi kalitesi olan filmler elde edilmiştir[4]. Bu gelişmeler ardından, Khan ve çalışma grubu tarafından 1991 yılında AlGaIn/GaN epitaksiyel tabakasının meydana getirilmesi ile iki boyutlu elektron gazının oluştuğu gösterilmiştir. Aynı çalışma grubu 1993 ve 1994 yıllarında öncelikle GaN tabanlı metal yarıiletken alan etkili transistörü (MESFET), sonrasında da çokluyapılı alan etkili transistörü (HFET) üretmiştir [5].

GaN aygıt teknolojisinde bu çığır açan gelişmelerden sonra GaN HEMT (yüksek elektron mobiliteli transistör) teknolojisini yüksek güçlü ve yüksek hızlı MMIC yükselteçler için uygun bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Sahip olduğu özellikler ile uydu haberleşme sistemleri, yüksek performanslı radarlar, yüksek kapasiteli kablosuz veri iletişimin sistemleri, baz istasyonları gibi yüksek performans gerektiren haberleşme sistemlerinin malzeme seçimi konusunda bir numaralı tercih haline gelmiştir. GaN tabanlı malzemelerin farklı uygulama alanları şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. GaN tabanlı malzemenin uygulama alanları [5]

MMIC teknolojisi, bir tek kristalalttaş üzerine tasarlanan aktif ve pasif devre elemanlarının üretilerek işlenmesine dayalı bir teknolojidir. Yüksek performanslarda sonuç veren MMIC yapıların oluşması için iyi karakterize edilmiş cihazlara ve modellerine sahip olmak gerekmektedir. 1970'lerin ortalarından itibaren güvenilir ve yüksek frekanslı devrelere yönelik askeri ve ticari talebin artması, esas olarak MMIC süreçlerini geliştirmeyi amaçlayan çalışmalara yol açmıştır. Üretilen bu mmic yapılar, yüksek frekanslı uygulamalarının çoğu için tercih edilen bileşenlerdir. MMIC teknolojisi, boyut, maliyet ve yüksek tekrarlanabilirlik performansı gibi çeşitli avantajlar sunarlar[6].

20. yüzyılın mihenk taşı olarak kabul edilen transistörler, günümüzde de geniş alanda çalışma konularına sahiptir. Daha güvenilir, daha hızlı ve daha güçlü transistör üretme trendi gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmalar, son teknolojik cihazlara ve gereksinime cevap veren malzemelere paralel olarakyoğun şekilde devam etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, ilk olarak giriş kısmında bahsedilen gelişen teknoloji ile bütünleşmiş devrede kullanılan alttaş üretiminden başlanıp üzerine inşa edilen devre elemanlarının fabrikasyon adımları da verilmiştir. Diğer bölümde ise tipik MMIC yapıların temel yapısında bulunan ve bütünleşik devrede pasif devre elemanı olarak görev alan ince film rezistör yapıların RF magnetron saçtırma sistemi ile geliştirme çalışmaları sonucundaki üretimi ve üretilen ince filmin hem boyutsal hem de elektriksel sonuçlar tartışılmıştır. Maske hizalayıcısı ile litografi işlemleri ile PVD tekniklerinden türdeş ince film kalınlık ve yüksek kalitede ince film kaplama yöntemlerinden biri olan RF magnetron saçtırma sistemi yetenekleri birleştğinde aygıt teknolojisinde rezistör üretimi anlamında önemli bir yere sahiptirler ve bu rezistör filmlerin sıcaklıkla değişimi ise ilerdeki çalışmalara ışık tutmaktadır.

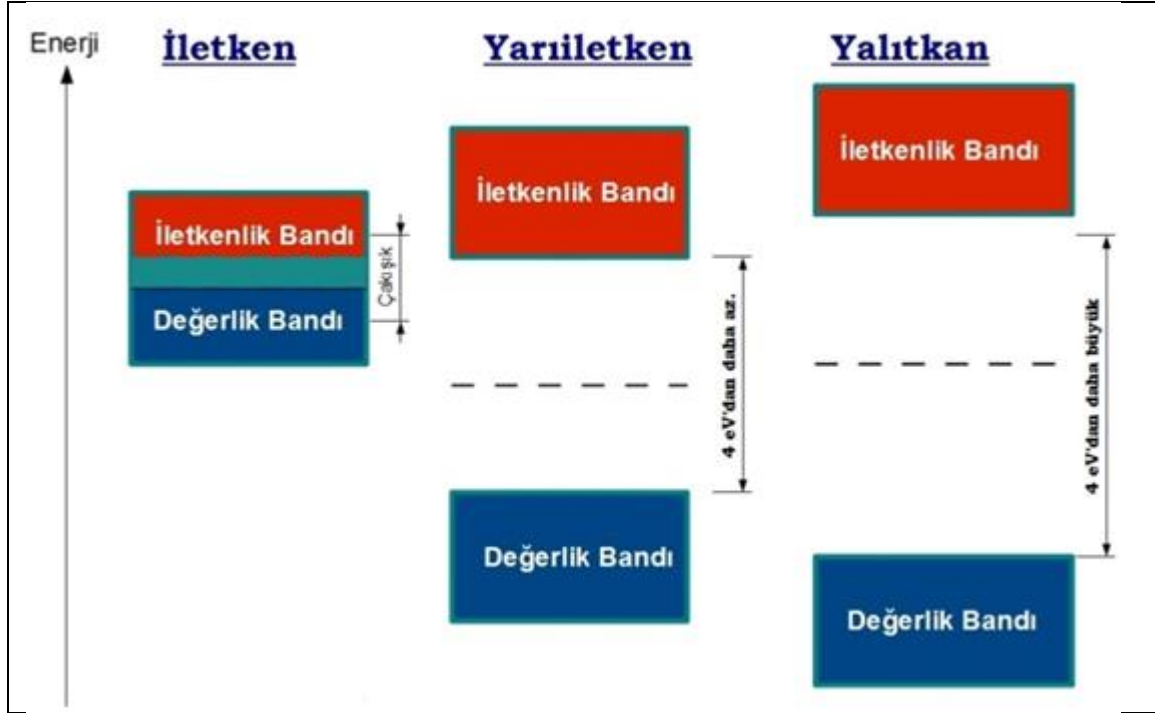
2. KURAMSAL BİLGİLER

Bu bölümde yarıiletkenler, GaN, HEMT çalışma prensibi, 2DEG oluşumu, MMIC yapısı ve bileşenleri, PVD tekniği ile RF magnetron saçtırma ve TaN hedef gibi hem malzeme bilgisi hem de literatür araştırmaları sonucu teorik bilgilere yer verilecektir.

2.1. Yarıiletkenler

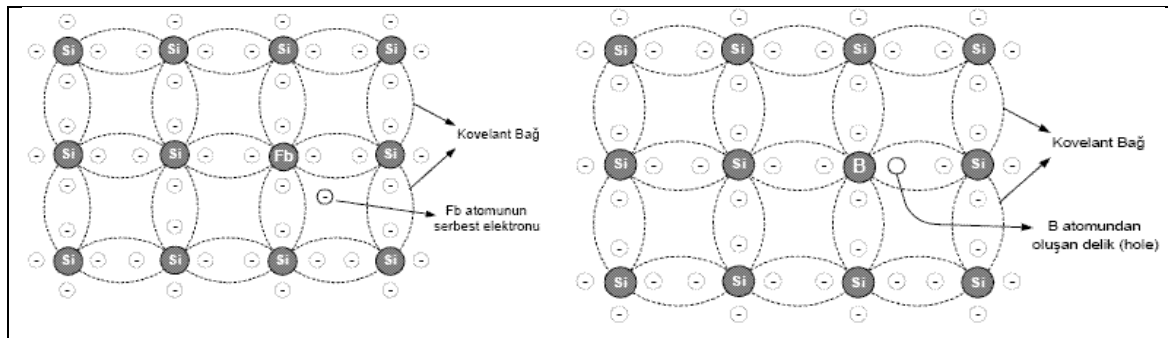
1940'lardan günümüze kadar gelen yarıiletken malzemeler ile yapılan çalışmalar sonucunda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Yarıiletken malzemeler kullanılarak üretilen elektronik devre elemanlarına örnek vermek gerekirse foto dedektörler, diyotlar, fotovoltaiik piller ve transistörler gibi çeşitli yapılarla karşılaşırız [8].

Yarıiletken malzemelerin elektriksel özelliklerine bakıldığında, üzerine yapılan mekaniksel kuvvet, ısı, ışık, manyetik ve elektriksel etkiyle iletken özelliğe geçebilen, normal şartlar altında yalıtkan hal özellikleri sergileyen maddelerdir. Temel olarak elektriksel anlamda yarı iletkenler, iletkenlerle yalıtkanlar arasında kendisine yer edinmiştir [9]. Şekil 2.1'de bu üç farklı elektriksel özelliklere sahip maddelerin bant aralıklarının grafikleri verilmiştir. Yarıiletken malzemeler, iletkenlerden 10^{-10} kere daha az iletken, yalıtkanlara göre 10^{-14} kere daha fazla iletkenlerdir [10]. Yarıiletkenlerin elektriksel olarak iletken hale geçebilmeleri için yasak enerji aralığı kadar ek enerjiye ihtiyaçları vardır. Değerlik bandından iletkenlik bandına geçiş, iletkenlerde çakışıklık söz konusu olmasından kaynaklı daha düşük enerji ile yalıtkanlarda ise bant aralığı oldukça geniş olduğu için gerekli enerji de oldukça yüksek şekilde verilerek sağlanmış olur.



Şekil 2.1. Yasak enerji bant aralıklarına göre iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar [9]

Katkılama tiplerine göre, n tipi ve p tipi yarıiletkenler, elektronik devre elemanlarının üretiminde tercih edilebilirler. Bu katkılama, değerlik bandının yukarı çekildiği yarıiletkenlere p tipi yarı iletken denir [11]. Örneğin Silikon gibi 4 değerlik elektronu bulunan bir yarıiletkende p-tipi yarıiletken oluşturmak için yapıya Bor (B), Alüminyum (Al) ve Galyum (Ga) gibi 3 değerlik elektronlu katkılama atomları katılır. N-tipi yarıiletken oluşturmak için ise aynı Silikon yapıya Arsenik (As), Bizmut (Bi), Fosfor (P) ve Antimon (Sb) gibi 5 değerlik elektronlu katkılama atomları katılır. Şekil 2.2’de n tipi ve p tipi maddelerin oluşumu sırasında örnek silikon ile yaptığı bağ yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2. N tipi ve P tipi yarıiletken malzemenin oluşturulması [11]

Yarıiletkenlerde, ikiden fazla elementin bir araya gelmesi ile bileşik yarıiletken oluşur ve iki element bulunan yarıiletkenlerin kimyasal formülü AB grubu yarıiletkenleri diye gösterilir. A elementine üç değerlik elektronu ve B elementine de beş değerlik elektronu bağlı olacak şekilde ise bu ikili bileşik yarıiletken grubuna girer. Bu grup III-V grubu yarıiletkenler olarak söylenir. Örnek olarak, III-V yarıiletkenler, III. Grup elementler (Galyum, İndiyum, Alüminyum) ile V. Grup atomlardan (Arsenik, Fosfor, Antimon) oluşan GaAs, InN ve GaN yarıiletkenleri verilebilir [12].

2.2. GaN Özellikleri

GaN, bütünleşmiş devrelerde yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında kullanılmak için en bilinen ve farklı malzemelere göre sahip olduğu yüksek bant genişliği, yüksek kırılma elektrik alanı, yüksek yoğunluk ve yüksek erime noktası gibi özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj uygulamaları için en fazla avantaj sağlayan yarıiletken malzemelerdendir. Alttas seçimi gibi önemli parametreler epitaksiyel yapının karakterinde değişikliklere neden olmaktadır. GaN'ın örgü uyumu en iyi silikon karbür (SiC) ile sağlanır ve genelde ekonomik açıdan da düşünüldüğünde maliyeti sebebiyle safir alttas tercihi de seçilebilmektedir.

Çizelge 2.1'de yarıiletken aygıt teknolojisinde alternatif GaN'ın malzeme özelliklerinin rakibi olan malzemelerle kıyaslanan bazı elektriksel ve mekanik özellikleri gösterilmektedir. Bu çizelgede Johnson değer katsayısı ile Baliga değer katsayısı gibi malzemelerin yarıiletken aygıt performansına etkisini incelemek için iki tane önemli değer verilmiştir. Bu katsayılardan ilki Johnson değer katsayısı aygıtın güç-frekans çarpımı için verilmiştir. İkincisi Baliga değer katsayısı ise aygıttaki iletim kayıplarını minimize etmek için kritik olan malzeme parametrelerini işaret etmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi GaN malzemesinin sahip olduğu, hem elektriksel hem de Johnson ve Baliga gibi değer katsayıları açısından geleneksel yarıiletkenler malzemeleri arasında önemli bir üstünlük sağlamaktadır[13].

Çizelge 2.1. Yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler için bazı elektriksel ve mekanik özellikler [13]

	Si	InP	GaAs	4H-SiC	GaN
Bant Genişliği E_g (eV)	1,12	1,34	1,43	3,25	3,44
Elektron Hareketliliği μ_n (cm ² /V.s)	1350	5000	8500	1000	1500
Hole Hareketliliği μ_p (cm ² /V.s)	600	100	400	115	200
Elektron Sürüklenme Hızı v_d (10 ⁷ cm/s)	1,0	1,5	1,0	2,0	2,5
Kırılma Elektrik Alanı Ebr (MV/cm)	0,3	0,45	0,4	2,2	2,0
Isıl iletkenlik (W/cm.K)	1,5	0,7	0,5	4,9	1,5
Johnson Değer Katsayısı [(Ebr·vsat/ π) ²]	1,0	3,0	1,8	215,1	215,1
Baliga Değer Katsayısı [$\epsilon r \cdot \mu n \cdot Ecr^3$]	1,0	5,7	14,8	223,1	186,7
Yoğunluk (g/cm ³)	2,33	4,79	5,32	3,21	6,15
Erime Noktası, (K)	1415	1070	1238	3103	2791

Epitaksi terimi, tek kristal üzerine örgü uyumlu olarak kristal büyütme anlatmak için kullanılır. Büyütme işlemi malzeme seçimlerine göre 2 farklı şekilde adlandırılır. Bu yöntem, film ve alttaşın özellikleri göz önünde tutularak benzer tür malzemeden seçilirse homo ya da tekli epitaksi, farklı tür malzemeden seçilirse hetero ya da çoklu epitaksi olarak belirtilir. GaN tabanlı malzemeler için kolay elde edilebilir, yüksek kaliteli ve büyük miktarlarda tek kristal GaN alttaşları büyütülmesindeki güçlüklerden dolayı, GaN ve diğer nitrür alaşımlarının ince film büyütme işlemleri çoklu epitaksiyel yöntemiyle üretilmektedir. Yüksek kristal kalitesine çıkılmasında ve çoklu yapıların oluşturulmasında en sık karşılaşılan kristal büyütme teknikleri MBE ve MOCVD teknikleridir. Bu tez çalışmasında kullanılan numuneler için GaN-tabanlı ince filmler MOCVD tekniği ile büyütülmüştür [14].

2.3. GaN Tabanlı HEMT'in Çalışma Prensibi ve 2DEG Oluşumu

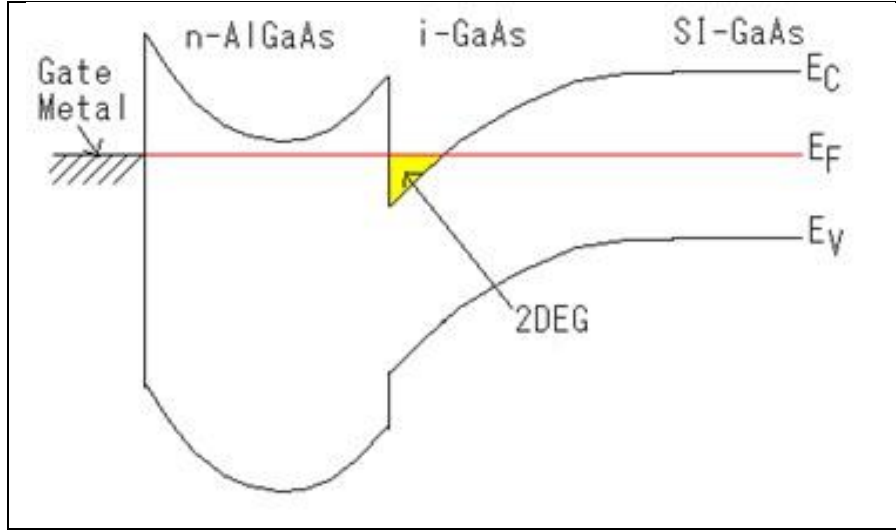
HEMT, farklı bant aralıkları olan iki malzemenin oluşturduğu çokluyapıyı kullanan alan etkili bir transistördür. HEMT'ler, yüksek oranda katkılanmış geniş bantlı n-tipi donör bir tabaka ile katkılanmamış dar bantlı bir tabakanın oluşturduğu çoklu eklem yapıdaki yüksek hareketliliğe sahip elektronlar olan 2 boyutlu elektron gazını kullanarak çalışırlar. İnce n-tipi donör tabakadaki elektronların hepsi, katkılanmamış tabakaya düşerek, tüketilmiş bir n-tipi donör tabaka oluştururlar. Farklı bant aralıklarına sahip malzemelerden oluşturulmuş bu iki tabakanın yarattığı çokluekleme, elektronların hızlıca, herhangi bir safsızlıkla çarpışmadan hareket edebildiği, katkılanmamış tabaka tarafında bulunan iletim bandı üzerinde bir kuantum kuyusu oluşturur. Buradaki temel amaç, yüksek yoğunluklu, yüksek hareketliliğe sahip elektronların var olduğu çok ince bir katman yaratmaktır. Bu katman 2DEG adı verilen katmanı oluşturmaktadır.

HEMT'ler;

- Yüksek elektron hareketliliği,
- Yüksek taşıyıcı yoğunluğu,
- Yüksek ısı dayanımı,
- RF operasyonda yüksek kazanç,
- Güvenilir DC operasyon,
- Düşük gürültü oranı.

gibi bir çok elektriksel ve dayanıklılık anlamında avantajı vardır.

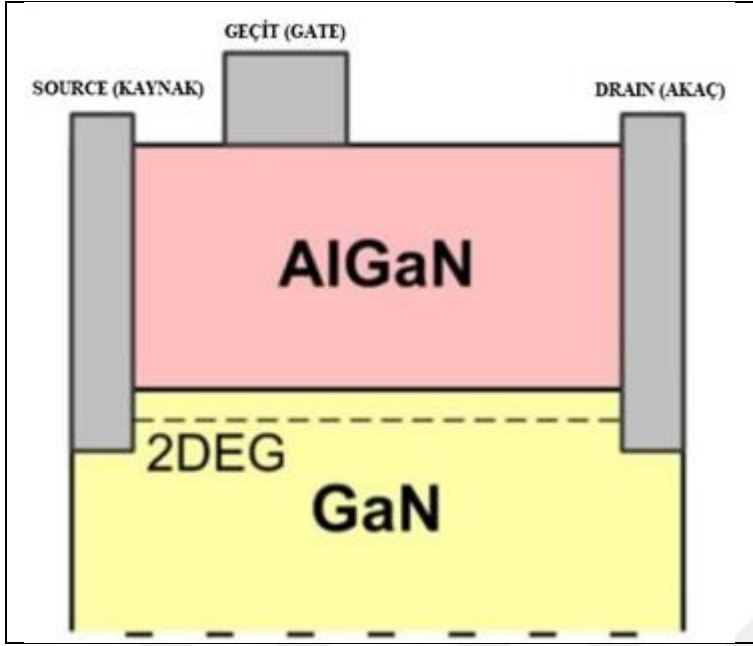
Şekil 2.3'de görüldüğü gibi 2DEG, iletme katkısında bulunan elektronların iki boyutta serbestçe hareket edebildiği ama üçüncü boyutta hapsedildikleri bir elektron gazı yapısıdır. Bu sıkı hapsedilmişlik, bu doğrultuda, hareket için kuantize olmuş enerji seviyeleri yaratır. Böylelikle aygıtın çalışması esnasında karşımıza çıkması mümkün olan birçok sorun bertaraf edilebilir.



Şekil 2.3. 2DEG şematik gösterimi [15]

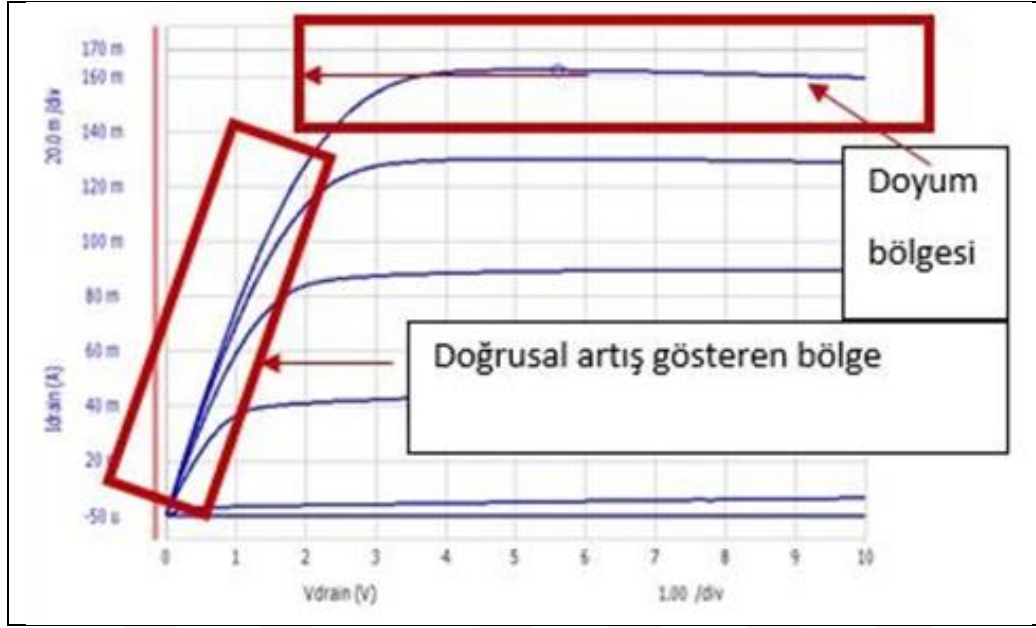
Geleneksel transistör anlayışının dışında GaN malzemesinin kutuplu yapısının kullanılması ile yapıya herhangi bir katkı katmadan 2DEG oluşturulabileceği düşüncesi ortaya çıkmıştır. 2DEG, bant yapıları birbirinden farklı AlGaAs/GaN gibi iki malzeme epitaksiyel olarak büyütülmesi ve bu malzemelerin ara yüzeyinde oluşması şeklindedir [15]. Bu ara yüzeyde oluşan iki boyutlu elektron gazı ile bu bölgenin kontrolü, drain (akaç) ve source (kaynak) omik kontaktları arasında bir kanaldan akan akım ile schottky bariyer kontak yapısı sayesinde uygulanan gate (kapı) voltajı tarafından kontrol edilerek HEMT aygıtının çalışması sağlanır.

Şekil 2.4'de AlGaAs/GaN yapıdaki 2DEG şematik oluşumu gösterilmiştir. 2 boyutlu elektron gazının ortaya çıkması ile elektronlar hareket ederken yapıyla olan etkileşimleri ve sapmaları oldukça azalacaktır. GaN HEMT epitaksiyel yapısı elde edildiğinde, 2DEG taşıyıcı yoğunluğu $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ mertebesinde ve elektron hareketliliği ise yaklaşık $2000 \text{ cm}^2/\text{V}$ değerlerinde elde edilir. Yapı ve yapıya ait, istenmeyen hatalarla daha az etkileşime girecek olması nedeniyle daha az saçılma olacak ve elektronlar yüksek hareketliliği ile birlikte iletme devam edecektir. Bu özellikleri sebebiyle de giriş kısmında da belirtildiği gibi, GaN HEMT yapısının iletişim, uydu ve radar uygulamalarında tercih edilir kılınmaktadır.



Şekil 2.4. 2DEG oluşumu ve AlGaIn/GaN yapısı [16]

Akaç'a pozitif bir gerilim uygulandığında kaynak ile akaç arasındaki potansiyel fark düşmektedir. Bunun sonucunda kaynak ile akaç arasında ve ilgili AlGaIn/GaN ara yüzeyinde 2DEG elektronları harekete geçerek akım oluşmaktadır. Bu sayede oluşacak akımın miktarı, kapı gerilimi ile kontrol edilmektedir. Kapı gerilimi negatif yönde artırıldığında, kapı bölgesi altındaki yüklerin 2DEG kanalına doğru kaymasını, aynı gerilim değerini arttırdığımızda ise, yükler 2DEG bölgesine kadar geçerek, 2DEG yoğunluğunun düşmesi ile ihmal edilebilir bir değere ulaşır. Bu kısılma (pinch off) eşik gerilimi olarak bilinen, en düşük kapı gerilim değeri ile sağlanır. Kapı geriliminin eşik değer üstüne çıkması durumunda kaynak ile akaç arasında elektron akışı başlamış olur. Akaç geriliminin artırılması halinde akaç kaynak arasındaki akımı belli bir değere gelene kadar doğrusal şekilde artar. Bu artış belli bir değerden sonra, kanaldan akan akım doyuma ulaşmaya başlar. Maksimum doyum akımı değeri 2DEG yoğunluğuna paralel olarak değişir. 2DEG yoğunluğu arttıkça maksimum akım değerini de arttıracak yönde etkiler. Şekil 2.5'de belirli kapı gerilimlerinde uygulanan akaç gerilimine karşılık gelen akaç kaynak akımı değişimi görülmektedir [16].



Şekil 2.5. Maksimum akaç akımı ve doyum durumu

2.4. MMIC Yapısı ve Bileşenleri

MMIC'ler aktif ve pasif devre elemanları ile ara bağlantı bileşenlerini içeren ve yüksek frekans seviyelerine çıkacak şekilde tasarlanmış aynı yarı iletken alttaş üzerinde çalışılan bütünleşmiş devrelerdir.

Bu devrelerde, aktif bileşenler HEMT, MESFET, HBT (Çoklu eklem çok-kutuplu Transistör) ve Schottky bariyer diyotlarıdır. Aktif devre elemanları, en az iki veya daha fazla elementten oluşan, akım kontrolü yapabilen devre elemanlarıdır. Diyotlar gibi tek başlarına kullanıldığı zaman, verimli ve hesap edilebilir bir bütünleşmiş devre için pasif devre elemanlarına ihtiyaç duyarlar. Bu elemanlar, özel amaçlı şekilde kullanılacak devrenin özelliğine göre, aktif devre elemanlarının özellikleri ve türleri de değişmektedir.

Pasif bileşenler ise, ince film rezistörler, metal kaplamalı iç içe geçmiş kondansatörler ve spiral indüktörlerdir. Pasif devre elemanları aktif devre elemanlarından farklı şekilde, tek elementten üretilirler ve akım kontrolü özelliği yoktur. Bu bileşenler, çoğu elektronik devrede çeşitli amaçlar doğrultusunda belirli değer aralıklarında kullanılırlar. Toplu veya dağıtılmış eleman olarak bütünleşmiş devrelerde yerlerini alırlar.

MMIC'lerde alttaş, gerekli iletim hatlarını ve pasif bileşenleri yerleştirmek için yarı iletken olmalıdır. Aktif bileşenler, yarı iletken malzemenin yalıtılmış iletken bölgelerinde yapılır. Bağlantılar ve pasif bileşenler için alt tabakanın düşük kayıplı bir pasive edilmiş tabakası oluşturması önemlidir.

GaN transistörler, çok daha yüksek sıcaklıklarda ve bir diğer alttaş olara kullanılan GaAs'a nazaran transistör aygıtlarında çok daha yüksek gerilimlerde çalışabileceği için, GaN HEMT yarıiletkeni mikrodalga frekanslarında ideal güç yükselticileri olarak günümüzde bu alanda en yaygın kullanım alanına sahiptirler.

MMIC'lerin diğer bütünleşmiş devrelere göre avantajları vardır. Bunlar;

- Daha küçük boyut,
- Daha yüksek güvenilirlik,
- Büyük üretim sayılarında potansiyel olarak düşük maliyet,
- Daha düşük parazitlik (bağ teli yok),
- Daha iyi tekrarlanabilirlik

özellikleri ile yüksek frekanslardaki uygulama alanlarında yüksek performans gösterirler [17].

2.5. PVD Tekniği

Bir alttaş üzerine istenilen malzemeleri biriktirerek ince film elde etmenin birçok alternatif yolu bulunmaktadır. Bunların en yaygın olanı Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemlerinden olan RF magnetron saçtırma sistemi ile son derece yüksek homojen yapıya sahip ve yüksek kalitede filmler büyütülmektedir.

PVD tekniği, belirli bir vakum altında bulunan malzemelerin buharlaştırma ya da saçtırma işlemleri ile atomların kaplanması istenen malzeme yüzeyinden kopartılması ve kaplanacak olan alttaş malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi temeline dayanır. Bu alandaki araştırmalar sonucunda, vakum teknolojisindeki gelişmeler ışığında endüstriyel olarak PVD yöntemlerine yönelim başlamıştır. PVD yöntemi ile çeşitli iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemeler, vakum altında kararlı halde her tür alttaş

malzemesi üzerine ince film şeklinde kaplama gerçekleştirilebilir. PVD tekniği ile kaplama süreci, özetle aşağıdaki adımlar gibidir,

- Kaplanması istenen malzeme katı halden buhar fazına geçişi, ısıtılarak veya saçtırma işlemi sırasında enerji transferiyle yüzey atomlarının fiziksel olarak yer değiştirmesiyle sağlanır.
- Buhar fazına geçen malzeme, vakum ortamında alttaşa doğru yönlendirilir.
- Alttaş üzerine gelen malzemeler ince film formunda birikir.

2.6. RF Magnetron Saçtırma Sistemi

PVD kaplama ailesinde yer alan sputter yani saçtırma ile kaplama yöntemi, yine PVD grubuna dâhil olan buharlaştırma yönteminden farklı olarak kaplanması istenen hedef malzemeye çarptırılıp enerji transferinden dolayı kopan parçaların alttaşa ulaşması olayı olarak açıklanabilir. Bu olay başka bir ifadeyle, RF sinyali ile ince film kaplama gazı olan argon atomlarının iyonlaştırılarak yüklü hale gelmesiyle başlar. Vakum haznesi içerisine yerleştirilen güçlü mıknatıslar yardımıyla kaplanması istenen hedef malzemeye çarptırılan argon atomları momentumlarını aktarması ile hedef malzemeden parçacıkların kopmasını sağlayarak alttaşa yapışması temeline dayanan bir kaplamadır [18]. Bu yöntemde saf halde kaplama yapılması ve oluşacak ince filmin yüksek kalitede olması için gereken şart vakum ortamının sağlanmasıdır. Ancak kaplama süreci sırasında plazma oluşması için argon akışı verilerek ortam atmosferi gerekli basınca çekilir. RF magnetron saçtırma sistemi ile yapılan kaplamalarda işlem parametreleri kaplanan filmin özelliklerini doğrudan etkiler fakat bu parametreler uygun şekilde seçilip eniyileştirilirse, kaplama esnasında büyük oranda kontrolü elimizde tutmamıza olanak sağlar. RF sinyalinin gücü, ortam basıncı, ortama verilen gaz akışları, hedef tutucu ve örnek tutucu aparatlarının dönme hızı gibi parametreler önemli kontrol parametreleridir.

Bu sistemlerde yaygın olarak Argon (Ar) gazı tercih edilmektedir. Bunun sebeplerinden birisi, atom çapının He atomunun çapına kıyasla çapına göre daha büyük olmasıdır. Argon (Ar) gazının kullanılmasının bir diğer sebebi ise hiçbir şekilde kullanılan malzemelerle tepkimeye girmeyerek ince film kaplama sürecini kontrollü şekilde yürütülmesidir.

RF magnetron saçtırma yönteminin avantajları aşağıdaki gibi listelenebilir;

- Teorik olarak her çeşit seramik kaplamaları elde etmek mümkündür.
- Bu teknoloji ile yapılan kaplamalar mükemmel yapışma özelliği gösterirler.
- Kaplama hız aralığı ince film kaplama parametreleri değiştirilerek yüksek hızda kaplama yapılabilir.
- Kaplama işleminin kontrollü ilerlemesi sebebiyle oluşan filmlerin yüzey pürüzlülüğü bakımından son derece kaliteli filmler meydana gelir.
- Yüksek vakum değerlerine çıkılarak kaplamaya başlanması ve kaplanacak malzeme seçiminde saf malzemelerinin tercih edilmesi, filmlerin yüksek saflıkta oluşmasını sağlar.
- Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemine kıyasla bu yöntem ile büyütme yapılabilen malzeme sayısı daha geniştir.
- Vakum haznesi içinde geometrik olarak karmaşık hedefleri ve alttaşları, dönebilen örnek tutucu aparatlarıyla ile homojen olarak kaplanabilmesine olanak sağlar.
- Kaplama süreci, sistem parametrelerinde kaynaklı daha kontrollü bir büyütme gerçekleşir.
- Çevreye zararlı ve zehirli atıklar üretmeden kaplama işlemini tamamlar.

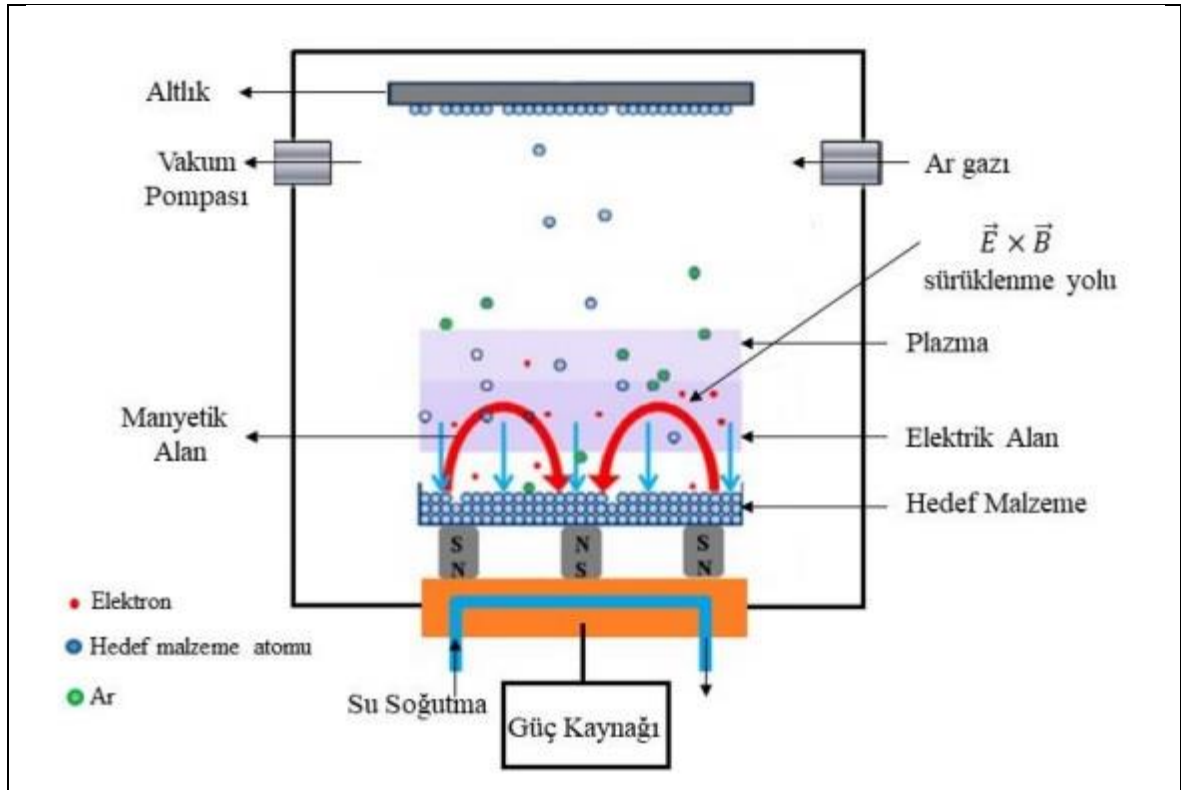
Şekil 2.6'da RF magnetron saçtırma yönteminin şematik gösteriminde görüldüğü gibi, saçtırılan hedef malzemenin alttaşa ulaşmasını sağlayan yönlendirilme hareketi mıknatıslar sayesinde gerçekleşir. RF Magnetron saçtırma tekniğinde hedef malzemenin fazla ısınmasını engelleyensu soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslar üzerine konumlandırılır. Hedef malzeme tutucusu altındaki mıknatısların kutupları birbirinden farklı olacak şekilde, bir kutbu hedef malzemenin kenarlarına, diğer kutbu ise hedef malzemenin merkez eksenine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Mıknatısların bu şekilde konumlandırılmasındaki temel amaç, manyetik alanın hedef malzemenin üzerinde birbirine dik şekilde gelmesini sağlamaktır. Birbirlerine dik olan ortamdaki elektrik ve manyetik alanlar sayesinde iyonlaşmış argon atomları hızlandırılır ve bu sayede hedef malzeme üzerindeki iyon yoğunluğu artırılmış olur. Manyetik alanın etkisi hedeftenkopan elektronların yüzey etrafında dolanmasına sebep olurken, gezinen bu elektronlar yüzey üzerinde yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturarak magnetron saçtırma işlemini başlatır. Plazmadaki elektronların hareketi $\vec{E} \times \vec{B}$ yönünde olacak şekildedirler. Kısaca, elektronların hareketi hem elektrik alana hem de manyetik alana dik yöndedir [19].

Bu yöntem fiziksel olarak aşağıda verilen,

$$\vec{F} = -m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

Lorentz bağıntısıyla açıklanır.

Bu formülde bahsi geçen, $\vec{F}$ kuvveti, $\vec{v}$ hız, e elektronun yükünü, $\vec{v}$ elektronun sürüklenme hızını, $\vec{E}$ elektrik alanı ve $\vec{B}$ manyetik alanı temsil eder. Yoğun plazma ortamında kaplama süreçlerin tamamlanması PVD grubu kaplama teknikleri arasında saçtırma tekniğini avantajlı hale getirmektedir.



Şekil 2.6. Magnetron saçtırma yönteminin şematik gösterimi [28]

RF magnetron saçtırma sisteminde kaplama sürecini ve film kalitesini etkileyen çeşitli unsurlar aşağıdaki gibidir;

- i. Kaplama sonrasında oluşturulan filmin kalitesini belirleyen bir başka parametre iyi bir vakum değeridir. Vakum haznesindeki kirlilikler filmin saflığını da olumsuz etkileri

olur. Bu sebeple, ince film kaplamadan önce kullanılan kaplama sisteminin yeteneklerine paralel şekilde iyi bir vakum değeri elde etmek şarttır. Vakum haznesi mekanik olarak daha önce yerleşen ve geçmeyen kaplama kalıntıları temizlenmelidir ancak mekanik olarak geçmeyen su buharı, atık gazlar gibi istenmeyen kirlilikleri yok etmek için ısıtma işlemi yapılabilir. Böylelikle çok daha yüksek temel vakum değerlerine çıkması sağlanır.

- ii. Farklı firmaların ürettiği saçtırma sistemlerinin vakum haznelerinin tasarımları da çeşitlilik gösterebilir. Ancak, vakum haznesindeki geometri büyütülecek filmin bütünlüğü için de ayrı bir önem taşımaktadır. Bu geometri kaplanması istenen hedef malzeme ile alttaş arasındaki mesafedir. Bu mesafeden kasıt, hem hedef malzeme ile alttaş arasındaki uzaklık hem de açısal olarak mesafeyi ifade eder.
- iii. Saçtırma devam ederken, hedef malzemeden koparak saçılan atomlardan farklı olarak, iyon bombardımanı ile hedeften (katot) yayılan elektronlar iyonize gaz atomları ile iyonlaşarak plazmanın sürdürülmesine yardımcı olurlar ve sırayla ikincil elektronları üreten hedefi bombalayabilirler. Eğer katot (hedef) ve anot (alttaş) mesafesi çok küçükse, ikincil elektronlar alttaşa çarpmadan önce yeterli iyonize çarpışmalara denk gelmezler, hedef ile alttaş arasındaki uzaklık çok büyükse, üretilen iyonlar elastik olmayan çarpışmalarla yavaşlatılır. Böylece hedefe çarptığında, ikincil elektronları oluşturacak kadar yeterli enerjiye sahip olmayacaklardır. Bu sebepten ötürü, hedef malzeme ile alttaş mesafesini vakum haznesini içerisinde optimize etmek kaliteli bir film elde etmek için önemli bir parametredir.
- iv. Kaplanması istenen hedef malzeme atomlarının alttaş üzerine birikmesi, yüzey bağlama enerjisi ile alakalı bir durumdur. İnce film biriktirme oranı ise saçtırma esnasındaki gaz basıncına ve verilen güce bağlı olarak değişir. Düşük basınçlarda ortamda az atom bulunmasından dolayı, çarpışmalar arasındaki ortalama elektron serbest yolu yani bir taneciğin çarpışma yapmadan önce aldığı ortalama yol büyük olacaktır. Tam aksi durumda yüksek basınç altında, elektronun aldığı ortalama serbest yolu azalır, üretilen iyon sayısı artar ve daha fazla akım akışı oluşur. Ancak bu durum aynı zamanda saçtırılan atomlar daha fazla çarpışmalara maruz bırakarak yüzeye doğru yayılırlar ve kaliteli bir şekilde kaplanmazlar. Maksimum verimde kaplama yapılması için kaplama oranı da uygun bir basınç değerine çekmek gerekmektedir.
- v. İnce film kalitesini etkileyen bir diğer faktör ise hedef malzeme-alttaş sıcaklığıdır. Saçtırma işlemi diğer fiziksel buhar biriktirme tekniklerine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Katotta, hedefe çarpan iyonlar tarafından yüksek miktarlarda

enerji transferi olur ve hedef malzemesi oldukça ısınır. Saçtırma koşulları bu sıcaklığın yükselmesini doğrudan etkiler. Saçtırma verimi sıcaklıkla birlikte artsa da, bu sıcaklık değeri gazın dışarı atılmasını engelleyecek kadar olmaması için saçtırma esnasında hedef malzemenin soğutulması gerekmektedir. Hedef malzemenin sıcaklığının ile birlikte alttaş sıcaklığı da filmin yüzeye yapışması, film yüzeyinin pürüzlülüğü gibi kaplanan ince filmin özelliklerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, hem hedef malzeme hem de alttaş sıcaklık değeri soğutucularla kontrollü şekilde yapılarak ince film biriktirmesinde önemli bir parametre olarak yerini alır.

Bu unsurlar dışında sistem için ince film kaplama işlemi öncesi kontrol edilmesi gereken detaylar ise fonksiyonel testlerdir. Bu tez çalışmasında RF magnetron saçtırma sistemi için fonksiyonel kontroller de yapılmıştır. Kaplama işleminin sağlığı açısından cihazın sağlığı da kontrol edilmiştir.

Bu fonksiyonel test kontrolleri;

- **Regülatör kontrolleri:** Vakum haznesine verilen her bir gaz için önceden belirlenen basınç değerleri regülatörlerde gösterilen değerlerle aynı olmalıdır. İnce film kaplaması sırasında ve sistem gereksinimlerinde kullanılacak olan gaz bulunan tüplere ait hatların kontrolleri kaplama işlemi başlamadan önce yapılmalıdır.

- **Hedef açıları ve baca yükseklik kontrolü:** Hedeflerin açısı ve baca yükseklikleri sistem her açıldığında kontrol edilmelidir. Baca yükseklik değeri sapmış ise kullanılan vidalar gevşetilerek belirli açığa kadar çevrilir ve vidalar tekrar sıkılarak açısı ayarlanır. Kaplama için oluşturulan plazma ortamına ve hedeften kopartılan atomların sayısını doğrudan etkileyen bu parametreler kaplama işlemi öncesi kontrol edilmelidir.

- **Örnek tutucu temizlik kontrolü:** Örnek tutucuda bulunan çeşitli metal ve diğer malzemelerin kaplama artıkları hem vakum ortamına hem de kaplamaya olumsuz yönde etkisi olur. Örnek tutucudaki artık metal vb. parçalar alkol ve toz bırakmayan özel bez yardımıyla temizlenir, daha sonra azot ile kurutularak sistem içerisine monte edilmelidir. Kaplama esnasında istenmeyen parçacıkların vakum haznesinde bulunması kaplamayı olumsuz etkilememesi için örnek tutucular ilgili kimyasallarla temizlenmelidir.

• **Gölgeleyici kontrolü:** Vakum haznesi içerisinde kaplanması istenen hedef malzemelerin önlerinde bulunan gölgeleyiciler aç-kapa yapmak suretiyle çalışmaları test edilmelidir. Eğer gölgeleyicilerde takılma veya belirli bir sürenin üzerinde gecikme oluşuyorsa açılma ve/veya kapanma yönündeki basınçlı hava akış kontrolcüsü gölgeleyicinin hareketi bir miktar hızlandırılmalıdır. Tam tersi durumda da bu aparat yavaşlatılmalıdır. Kaplama işlemi süresince oluşabilecek mekaniksel bir hata ile hedefin önü gölgeleyici ile kapanması sonucu bir anda kaplamayı durdurabilmesi ihtimaline karşılık gölgeleyicilerin kontrolleri gerçekleştirilmelidir.

• **Örnek tutucu için dönme kontrolü:** Sistem her açıldığında, örnek yükleme aşamasında kaplama işleminin kalınlık ile kaplama işleminin tamamlanması için örnek dönme fonksiyon testi yapılmalıdır. Örnek tutucunun dönme testi için belli sürede belli turda döneceği değeri girilerek istenilen dönüş hızı değerine ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmelidir.

• **Güç kaynağı:** Plazmanın oluşması için gerekli RF güç değeri ile bu değer sabit şekilde devam etmesi kaplama için oldukça önemli bir parametredir. Güç kaynağı testi sistem açıkken ince film kaplama parametreleri ayarlanarak gerekli koşullar sağlandıktan sonra kullanılacak olan hedef malzemesi için tanımlanan RF güç değeri girilerek plazma oluşumu ve RF kontrolcüsü ekranındaki değer ile karşılaştırılmalıdır.

• **Vakum haznesi kontrolü:** Vakum haznesi içinde çeşitli kaplamalar sonrası metal kalıntıları kalmış olabilir. Vakumun daha iyi seviyelere gelmesi ve o değerde çok fazla kayma yaşanmaması adına vakum haznesi dikkatli şekilde kontrol edilmelidir. Bu işlem bez zımpara yardımıyla çapaklar ve metal kaplamaları kaldırılmalıdır. Metal tozları elektrikli süpürge ile süpürülerek, temiz oda peçetesi ile izopropil alkol kullanılarak pota yuvaları ve çevreleri iz kalmayacak şekilde temizlenmeli ve azot tabancası ile kurutulmalıdır.

• **Plaka değişimi:** Sistemin koruyucu plakaları yılda bir defa değiştirilir. Hazne içinde bulunan her bir plaka dikkatli bir şekilde yerinden alınarak çıkarılır. Daha sonra birbiri üstüne kelebek vidalarla bağlanmış liner parçalarından üstte olandan başlanarak tüm plakalar sökülür. Plakaların sökümü işlemi sırasında kaynaklara ve kristal sensörlere çarpmamasına dikkat edilir. Sökülen plakaların yerine yenileri sökme sırasının tersiyle

takılır. Sökülen kanatlar tutucu üzerindeki yönüne dikkat edilerek yenisiyle değiştirilir. Shutter kolu üzerine aynı hizada ve yükseklikte yeniden montaj yapılır. Hedef gölgeleyiciler ise kaynaklı kollarıyla birlikte sökülerek yenisi aynı hiza ve boyda olacak şekilde montajı yapılır.

• **İç kapak panelleri:** Vakum haznesi içinde oluşacak plazma ortamını ve vakum değerini etkilememesi için belli bir sayıdaki kaplama işlemleri sonrası iç kapak panelleri temizlenmelidir. Panellerin söküm işlemi sırasında hedeflere ve kristal sensörlere çarpmamasına dikkat edilmelidir. Temiz oda peçetesi ile temizlenirken panellerdeki sivri bölgeye gelmemesine dikkat edilmesi gerekir, aksi takdirde kirlilik oranı artacaktır. Temizlik işlemi öncelikle elektrikli süpürge ile yapılmalı, sonrasında ise izopropil alkollü temiz oda peçetesi ile iç paneller temizlenmelidir. İç kapak panellerine yapışan kirlilikler eğer temizlik işlemiyle geçmiyorsa yenileriyle değiştirilmelidir. Aynı hizada ve yükseklikte yeniden montajı yapılmalıdır.

• **Hedef malzemesi yüzey profili kontrolü:** Hedef yüzey profili kaplama işlemi ile oluşan ince filmin kalitesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Hedef malzemenin görsel açıdan üzerinde herhangi bir çatlak olup olmadığı kontrol edilerek kaplama öncesi önlem alınmalıdır.

• **İşlem izleme penceresi:** Kaplama esnasında plazmanın ve örnek tutucunun dönme hareketinin görsel kontrolü için periskop camları belli bir sürede değiştirmelidir. Camlar üzerine kaplanmış metal filmin kavlaması durumunda kontrol zorluğu çekilmemesi için TFR kaplama işlemi öncesi camlar yenisiyle yer değiştirilmelidir. Resim2.7’de kaplama esnasında pencereden izleme görüntüsü verilmiştir.



Resim 2.1. RF magnetron saçtırma kaplama izleme ekranı

2.7. TFR için TaN Hedef Malzeme Özellikleri

Literatür taramasıyla esnasında bütünleşmiş devrelerde pasif devre elemanı olarak tantal nitrür (TaN) ve nikel krom alaşımı olan nikrom (NiCr) olarak iki farklı malzeme göze çarpmıştır. TaN ve NiCr ince film rezistör malzemeleri arasında düşük sıcaklık rezistör katsayısı (TCR) ve gerilim rezistör katsayısı (VCR) sahip olan TaN malzemesi bir adım öndedir [20]. Bununla birlikte, nikel ve krom arasındaki buhar basıncındaki fark, yüksek kapasiteli bir üretim ortamında, tutarlı rezistör değerlerine ulaşılmasını zorlaştırmaktadır.

TaN gibi nitrür esaslı seramik kaplamalar;

- Üstün mekanik özellikleri,
- Isıl kararlılık,
- Kimyasal ortamlara karşı yüksek aşınma ve korozyon dayanımları,
- Yüksek ergime sıcaklıkları,

- Elektriksel özellikleri,

nedeniyle bütünleşmiş devre uygulama alanlarında rezistör yapılarında kullanılmak için TaN malzemesi yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu geçiş metal nitrürlerden olan TaN kendi sınıflarında sahip oldukları iyi derecede mekanik özelliklerden dolayı tribolojik uygulamalarda da sıkça kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, mmic tasarımı sırasında belirlenen TaN hedef kullanılarak istenilen öz direnç (ohm/sq) değerine nasıl ulaşılacağı konusu üzerinde durulmuştur. RF magnetron saçırma sisteminde ince film rezistör üretimi için yine makale taraması yapılmış ve üretim için istenen öz direnç değeri kaplama çalışmaları doğrultusunda başarılı şekilde sağlanmıştır. Kısmi basıncı değiştirerek elde edilebilecek rezistör aralığı çok yüksek olduğu için, bu tez çalışmasında ise N₂ gazı vermeksizin literatürden farklı olarak TaN hedef kullanarak istenilen öz direnç değerine ulaşılmıştır.

Tantal metalinin nitrür bileşiği, elektriksel değerlerini yüksek sıcaklıklarda da kararlı bir şekilde yansıtmaması TaN'ı tam olarak bir tür ince film rezistör haline getirmiştir. Elektriksel rezistör değerinin düşme ya da yükselme gibi değişimleri ancak örgüde ya da tane sınırlarında tutulan azot atomlarının miktarı ile ilgili olduğu belirlenmiştir [21]. Özetle azotça zengin TaN filmlerin elektriksel dirençleri yüksek tam tersi koşullarda ise düşük olduğu Kim ve arkadaşları tarafından belirlenmiştir [23].

TaN ince filmler, fiziksel buhar biriktirme teknikleri ile büyütülürler. TaN malzemesinin ısıya dayanıklı oluşu ve yüksek erime noktası nedeniyle buharlaşma ile kaplama yöntemi yerine, reaktif magnetron saçırma yöntemi tercih edilerek bütünleşmiş devre teknolojisinde kullanılan geleneksel kaplama şemaları ile de uyumluluğu sağlanmıştır [22]. Oluşan filmler son derece kompakt ve pürüzsüz şekilde sonuç vermektedir.

3. GaN TABANLI HEMT MMIC ÜRETİM AKIŞI

Bu bölümde GaN HEMT MMIC üretim akışı ve üretim aşamasında kullanılan cihazlar hakkında bilgiler yer almaktadır.

Bu üretim akışı aşağıdaki gibi sıralanır;

- Örnek temizleme adımı
- Omik kontak adımı (Ti/Al/Ni/Au)
- Aygıt adacığı oluşturma adımı
- Birinci elektriksel ölçüm (Omik kontak kontrol)
- Pasivasyon adımı (Si_3N_4)
- Kapı oluşturma adımı (Ni/Au)
- İkinci elektriksel ölçüm (Transistör I-V, Kapı performans ölçümleri)
- Rezistör adımı (TaN)
- Birinci metal adımı (Ti/Au)
- Üçüncü elektriksel ölçüm (Özdirenç kontrol)
- Pasivasyon adımı (Si_3N_4)
- Hava köprüsü adımı
- Ara bağlantı metali (Ti/Au)
- Hava köprüsü desteğı kaldırma

3.1. Örnek Temizleme Adımı

İşlem öncesi ilk olarak aseton, alkol ve resim 3.1’de gösterilen ultrasonik titreştirici ile örnek yüzeyi temizlenir. Örnekler sırasıyla çeşitli kimyasal işlemlere maruz bırakılır.



Resim 3.1. Ultrasonik titreştirici

Bu temizlik işlemleri sonrasında örnekler optik mikroskop altında incelenir, yüzey temizse bir sonraki işleme geçilir, ancak yüzeyde istenmeyen kirlilik veya parçacıklar gözlemlenirse bu işlemler kirlilik geçene kadar tekrarlanır ve temiz olduğu görülene kadar devam edilir. Resim 3.2’de hem kirli hem de temiz örnek yüzeyi verilmektedir.

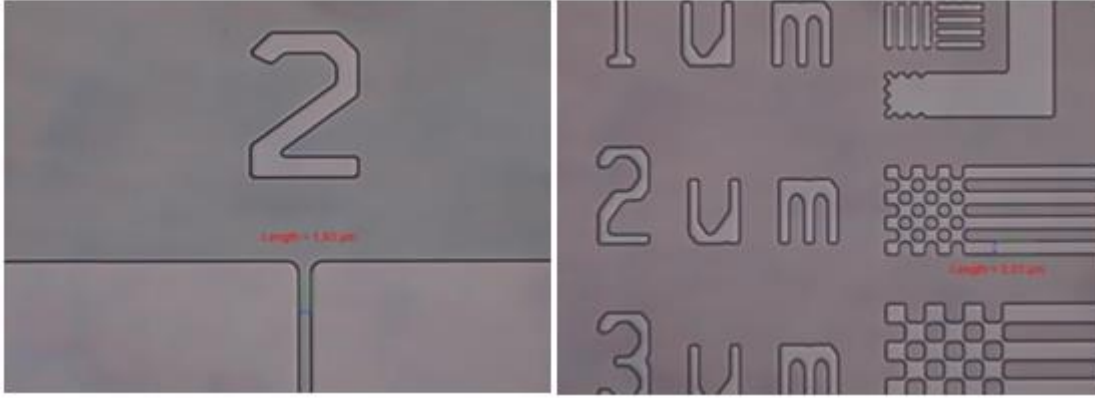


Resim 3.2. Kirli örnek yüzeyi ve temiz örnek yüzeyi

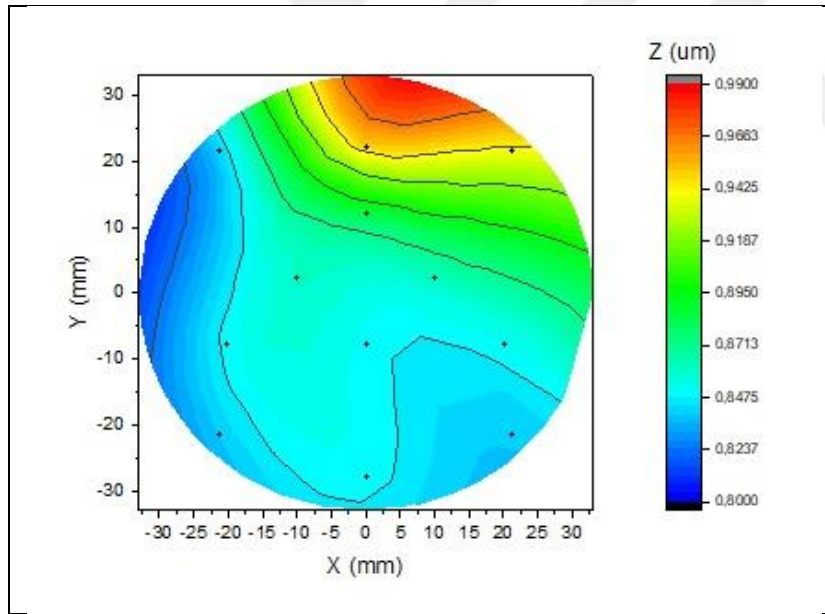
3.2. Omik Kontak Adımı

Örnek temizlik işlemi sonrası omik kontak metallerinin kaplanması için litografi işlemi gerçekleştirilir. Bu adımda örnek AZ5214 fotodirenci ile döndürerek kaplama tekniği kullanarak tüm yüzeye aktarılır. Maske hizalayıcı sistemi ile istenilen desenler örnek üzerine geçer. Çözücü ile desenin son halini vermek için fotodirenç atıldıktan sonra örnek mikroskop ile ayrıntılı şekilde incelenir. Tümleşik devre aygıt üretiminde yapılan işlemlerin optik mikroskop kontrolü oldukça önemlidir. Litografi işlemleri sonrası resim

3.3’de gösterilenkritik boyut, çözünürlük ve yüzey analizleri gibi parametreler incelenir. Bu analizler ek olarak resim 3.4’deki KLA tencor yüzey profilometresi ile fotodirenç kalınlık ölçümü alınır.



Resim 3.3. Omik kontak litografi işlemi sonrası kritik boyut ve çözünürlük desenlerinin mikroskop görüntüleri



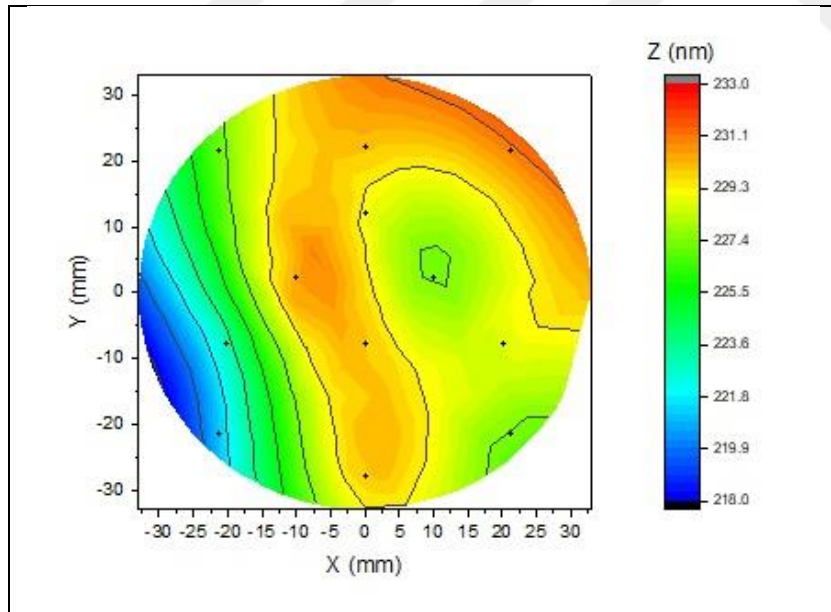
Resim 3.4. Fotodirenç kalınlık dağılımı

Omik kontak kaplama aşamasında Ti/Al/Ni/Au metalleri seçilmiştir. Bu metaller tavlandıklarında GaN-tabanlı sistemlerde omik özellik kazanırlar. Omik kontak yapılarak metalin, ilgili yapı için yüzeyle temasında açığa çıkan elektriksel direnç düşürülür. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi kullanarak sırası ile Ti, Al, Ni ve Au desenlenmiş yüzeye kaplanır. Metalizasyon adımı tamamlandığında kaldırma kimyasal işlemi gerçekleştirilir. Bu kaldırma işlemi, aseton-izopropanol ve ultrasonik titreştirici

kullanılarak fotodirenç artıkları atılarak tamamlanır. Omik litografi işlemi sonrasında yapılan optik mikroskop kontrolü metalizasyon işleminden sonra da tekrarlanır. Resim 3.5'te verilen kritik boyut, çözünürlük ve yüzey kontrolü yapılır ardından KLA Tencor Yüzey Profilometresi ile metal kalınlık kontrolü resim 3.6'daki gibi gerçekleştirilir.



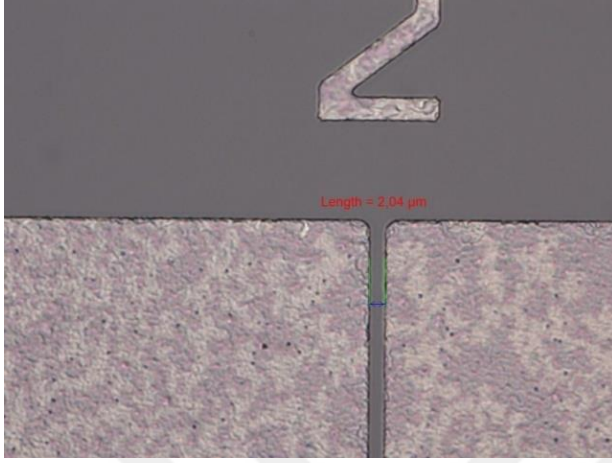
Resim 3.5. Omik metalizasyon işlemi sonrası kritik boyut ve çözünürlük desenlerinin mikroskop görüntüleri



Resim 3.6. Omik metalizasyon sonrası metal kalınlık dağılımı

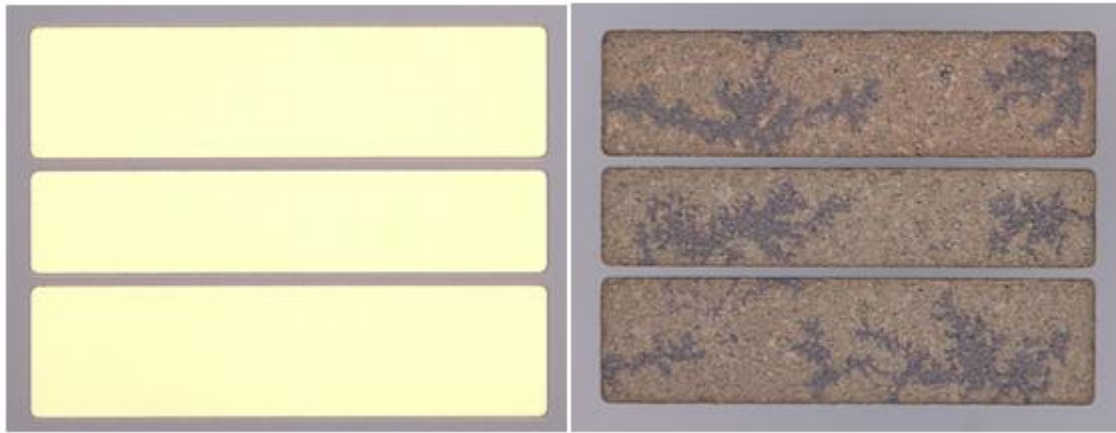
Metalizasyonu tamamlanan örnekler, metallerin bir alaşım oluşturması için ve 2DEG bölgesine difüzyonu için tavlama işlemi uygulanır. Tavlama işlemi AllWin RTP siteminde gerçekleştirilir. Tavlama sonrası omik kontak kontrolü hem de optik mikroskop ile yüzey

kontrolü ve kritik boyut kontrolü gerçekleştirilerek resim 3.7’de verilen bir görüntü meydana gelir.



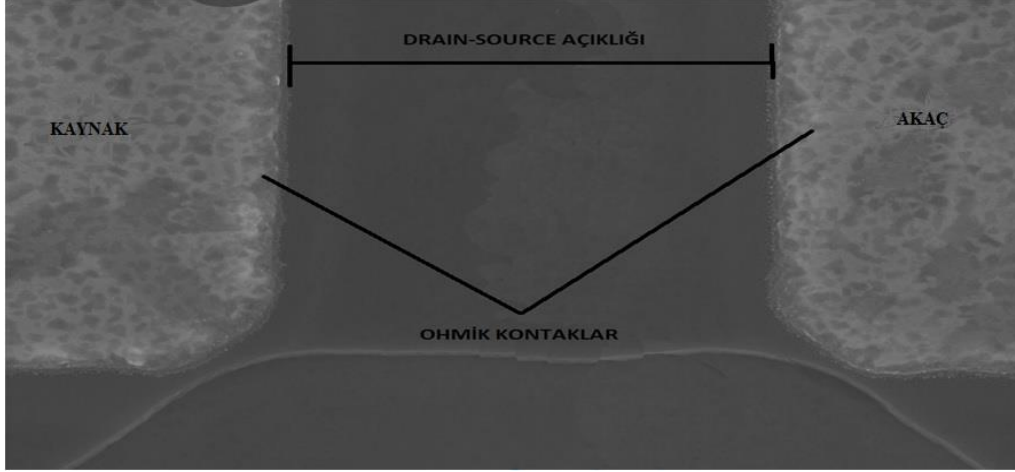
Resim 3.7. Tavlama sonrası kritik boyut kontrolü

Tavlama işlemi sonrası metallerdeki değişimler resim 3.8’de görülmektedir.



Resim 3.8. Tavlama öncesi ve sonrası omik metallerin mikroskop görüntüleri

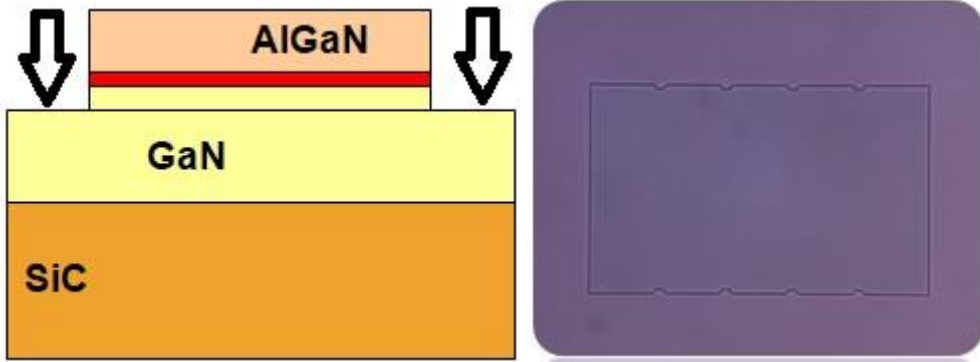
Omik kontak aşaması bitirildikten sonra taramalı elektron mikroskopundan faydalanılarak kaynak - akaç aralığının boyu, akaç ya da kaynak metallerinin tavlama sonrası hat keskinliği ve tavllanmış metalin durumu resim 3.9’daki gibi incelenebilmektedir.



Resim 3.9. Tavlama sonrası omik metalleri kaynak-akaç taramalı elektron mikroskop görüntüsü

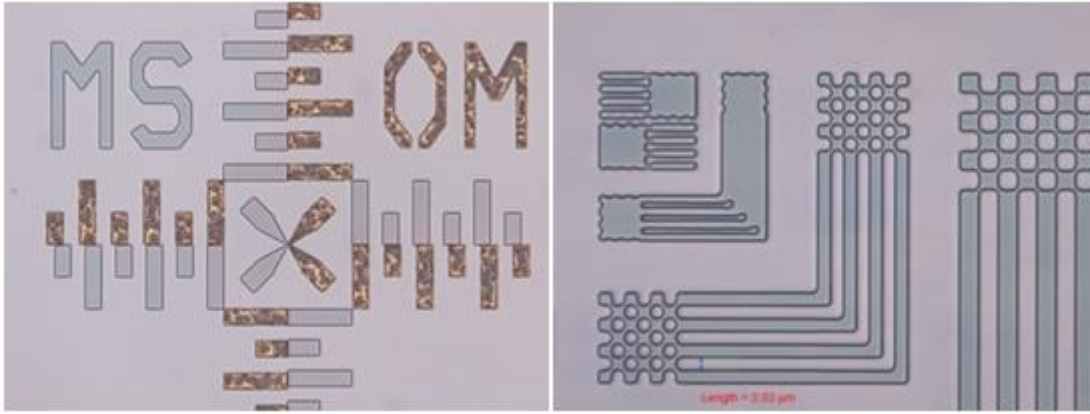
3.3. Aygıt Adacığı Oluşturma Adımı

Her bir transistör kendine ait bir adacığın üzerinde çalışacaktır. Bu sebeple aygıt adacıkları örnek yüzeyi belirli bir derinlikte aşındırılacak şekilde omik metallerinin çerçevesi olacak şekilde belirlenir. Resim 3.10'da aygıt adacığı aşındırma işlemi gösterimi ve kesit alanı mikroskop görüntüsü görülmektedir.



Resim 3.10. Aygıt adacığı aşındırma işlemi gösterimi ve örnek üzerindeki kesit alanı mikroskop görüntüsü

Aygıt adacığı oluşturma adımı da, omik kontak litografi adımı gibi yine AZ5214E fotodirenci ile döndürülerek edilerek örnek kaplanır. Maske hizalayıcı yardımıyla, aygıt adacığı deseni örnek ile denk getirilerek pozlama işlemi tamamlanır ve mikroskop analizleri ile resim 3.11'de görüldüğü gibi devam eder.



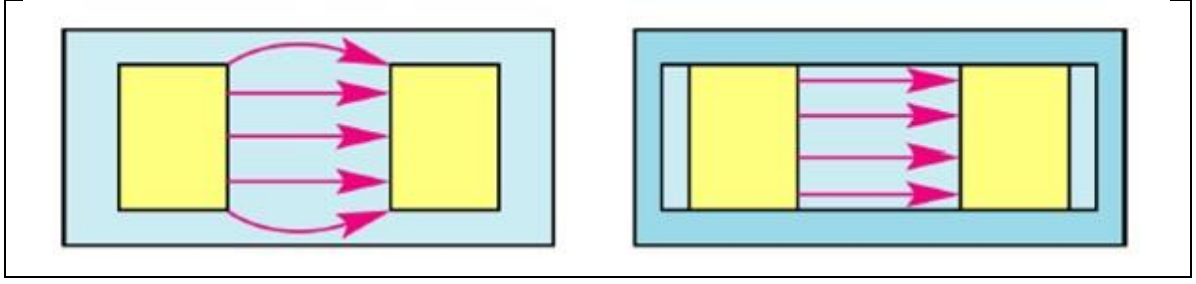
Resim 3.11. Aygıt adacığı litografisi sonrası hizalama ve çözünürlük deseni kontrolü

Sentech ICP RIE cihazı kullanılarak litografi yapılan bölgeler kuru aşındırma işlemi yapılır. Aşındırma sonrasında fotodirenç, aseton ve alkol ile temizlendikten sonra azot tabancasıyla örnek kurutulur. Omik kontak metalizasyon işleminde yer alan metalleri kapsayacak şekilde resim 3.12’de gösterilen desenler oluşturulur.



Resim 3.12. Aygıt adacığı aşındırma sonrası transistör optik mikroskop görüntüsü

Aşındırma sonrası MMIC’e ait aygıt adacıkları aşındırılıp mesa yapıları oluşturulduktan sonra aşındırılan aygıt adacık derinlikleri profilometre cihazı kullanılarak ölçülür. Bu aygıt adacıkları birbirinden izole edildikleri için hiçbir aygıt adacığarasında 2DEG gazının bulunduğu taşıyıcı kanal vasıtası ile iletimin olmaması gereklidir. Bu sebeple 90 nm’lik aşındırma derinliğinin elde edildiğinin onaylanması gereklidir. Şekil 3.13’de ise aygıt adacığı izolasyonu yapılmadan önceki ve sonraki akım akışları verilmiştir.



Şekil 3.1. Aygıt adacığı izolasyonu yapılmadan önceki ve sonraki akım akışları

3.4. İletim hattı modeli (TLM) ölçüm adımı

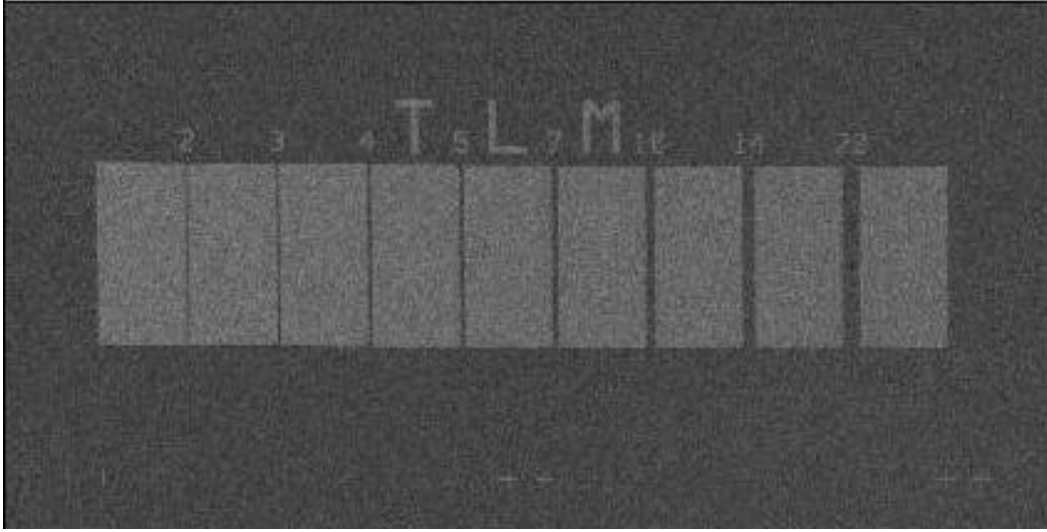
Örneklerin boyut analizleri ve detaylı mikroskop incelemeleri kadar elektriksel ölçümlerde bütünleşmiş devre fabrikasyonunda aygıtların karakterizasyonu hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Birinci elektriksel ara ölçüm ile birlikte;

- TLM ölçümü gerçekleştirilerek omik kontak direnci ölçülerek, omik metalizasyonu sonrası omik kontaklar hakkında bilgi verir.

- Kontak direnci, akımın bir metal yarı iletken ara yüz boyunca akabileceği kolaylığın bir ölçüsüdür; kontak direnci (R_c), iletim hattı yöntemi (TLM) kullanılarak ölçülür. TLM ölçüm desenleri şekil’de görülen, aynı uzunluktaki (L) ve genişlik (W) geometrisinde sahip birbirleri arasında farklı d mesafelerinde (mm) kontaklardan meydana gelir.

Resim 3.13’te omik kontak ölçümlerinin alındığı, örnek yüzeyindeki TLM desenlerinin optik görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.13. TLM ölçümünün yapıldığı örnek üzerindeki omik kontak deseni optik mikroskop görüntüsü

Bu model kullanılarak, aralarında farklı mesafeler (d) bulunan dikdörtgenel metal kontak pedler arasından direnç (R) ölçülerek, aygıtlar için tabaka direnci (R_s), kontak direnci (R_c) ve özgül kontak direnci (özdirenç) (ρ_c) değerleri esasına dayanmaktadır. d mesafesine bağlı R direnç değişimi grafiği çizildiğinde bu grafiğin denklemi,

$$R = 2 \frac{R_{\text{kontak}}}{W} + d \frac{R_{\text{tabaka}}}{W} \quad (3.1)$$

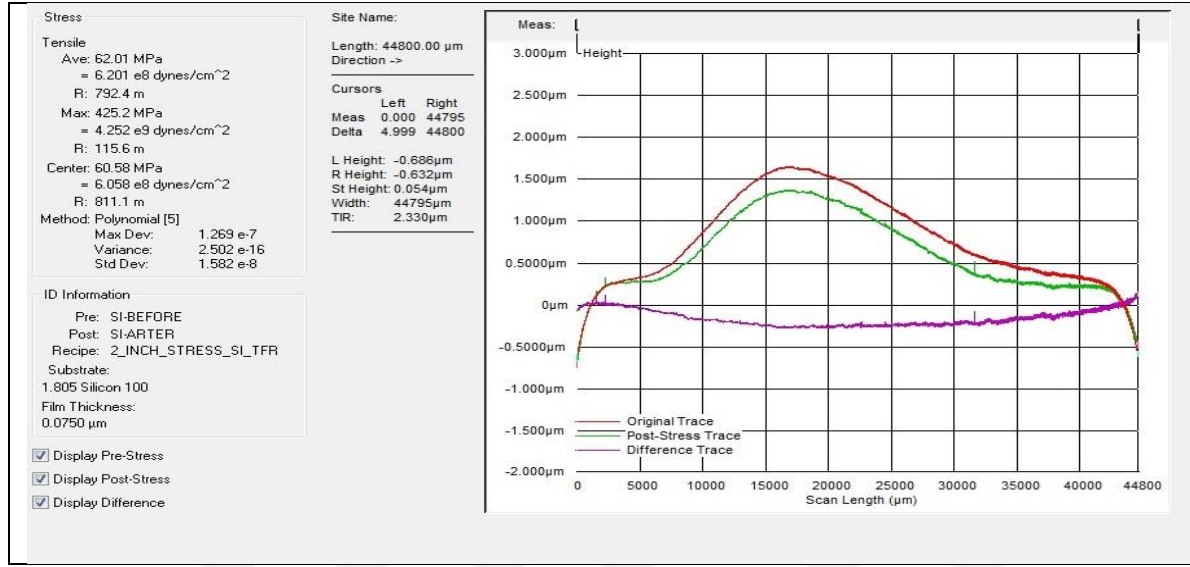
$$\rho = \frac{R_{\text{kontak}}^2}{R_{\text{tabaka}}} \quad (3.2)$$

eşitlikleri ile verilir.

Şekil 3.14'te TLM ölçüm deseni üzerinden alınan TLM grafiği ile şekil 3.2'de omik kontak direnci karakterizasyon grafiği verilmiştir.

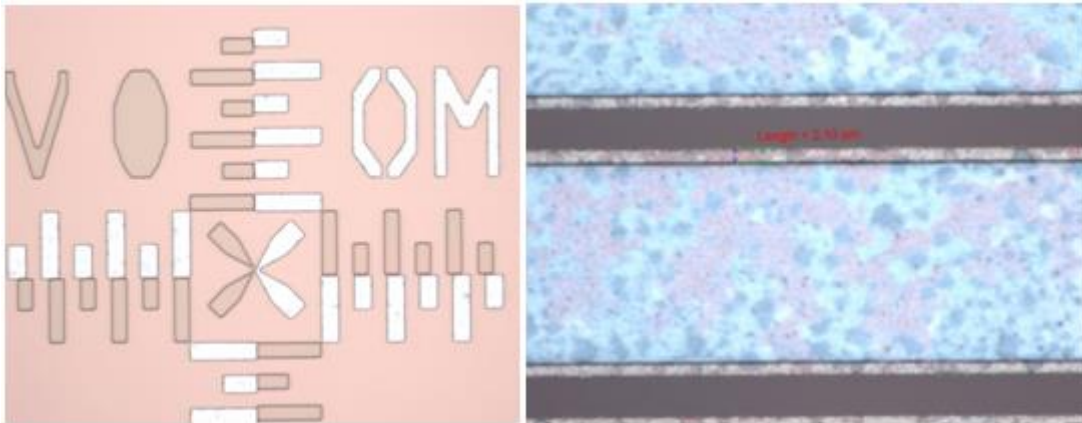
3.5. Pasivasyon Adımı

Si_xN_y kaplaması sentech PECVD cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Bu kaplama işleminde, izolasyonun artırılması amaçlanır. Kaplama sonrası resim 3.15'te gösterilen Si_xN_y yüzey stresi karakterize edilir.



Resim 3.15. Si_xN_y yüzey stres ölçümü

Optik mikroskop kontrolü ile KLA Tencor Yüzey Profilometresi ile fotodirenç kalınlık ölçümü yapılır. Resim 3.16'da litografi işlemi sonrası hizalama kontrolleri paylaşılmıştır.



Resim 3.16. Via0 litografisi sonrası aygıt üzerinden hizalama kontrolü

Sentech ICP RIE cihazı kullanılarak aygıtların kontak bölgeleri bu aşındırma işlemi ile açılır. Bu işlemde yine kuru aşındırma işlemi gerçekleştirilir. Aşındırma sonrasında

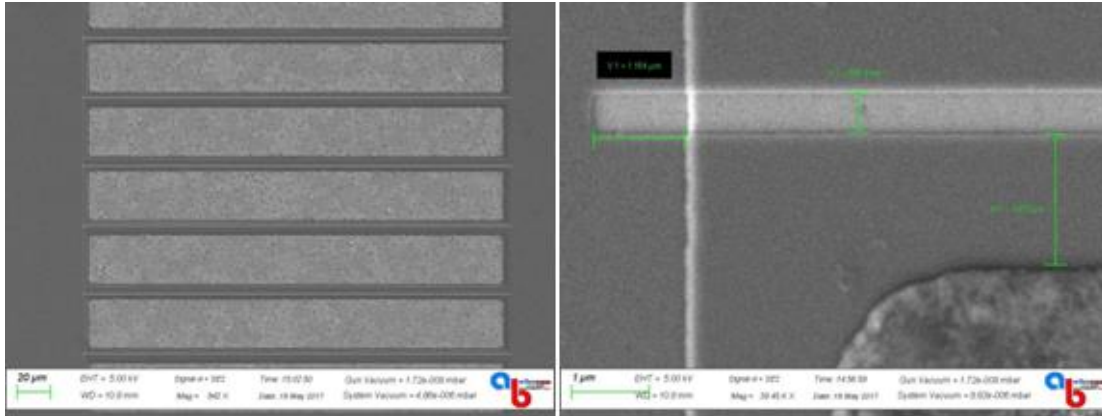
fotodirenç, aseton-izopropanol ve AZ100 kimyasalları ile temizlenir. Aşındırma işlemi sonrası omik kontak desenlerin mikroskop görüntüsü resim 3.17’de verilmiştir.



Resim 3.17. Via0 aşındırması sonrası transistör yüzey görüntüsü

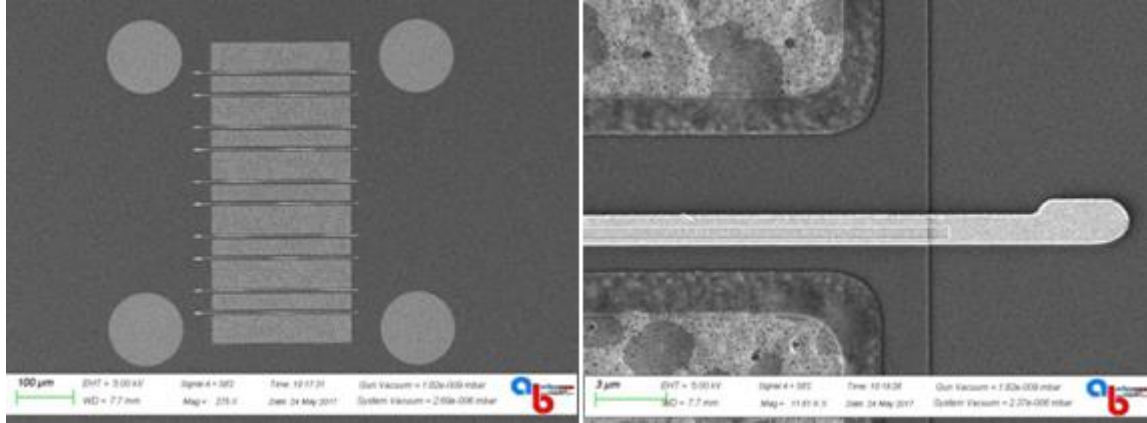
3.6. Kapı Oluşturulması Adımı

HEMT’in kapı Schottky kontağı, Ni/Au metal tabakaları kaplanarak oluşturulur. Kalın bir Altın tabakasının kullanımı iyi bir RF çalışma performansını sağlar. Diğer taraftan kapı kontak litografisindeki çözünürlük, DC ve RF performans için oldukça kritiktir. Kapı ayak ve baş litografisinde, elektron demeti litografi sistemi ile birlikte PMMA ve aquasave gibi özel fotodirenç kullanılarak tamamlanır. Optik mikroskop ve TEM incelemeleri yapılır. Kapı ayak aşındırması, Sentech ICP RIE cihazı kullanılarak kuru aşındırma sistemi ile aygıt adacağı aşındırma adımındaki şekilde işlem tamamlanarak kapı adımı oluşturulur. Şekil 3.18’de kapı ayak TEM analiz görüntüleri görülmektedir.



Resim 3.18. Kapı ayak oluşturma TEM görüntüleri

Kapı metalizasyon adımı Leybold elektron demeti buharlaştırma sistemi ile tamamlanır. Ni/Au metalleri sırası ile kaplanarak gerçekleştirilir. Metalizasyon adımı tamamlandığında kaldırma işlemi, aseton ve izopropanol kullanılarak tamamlanır. Metalizasyon sonrası optik mikroskop kontrolü Resim 3.19'deki görüldüğü gibi, TEM analizi ve KLA Tencor Yüzey Profilometresi ile metal kalınlık kontrolü gerçekleştirilir.



Resim 3.19. Kapı adımı tamamlanan transistör TEM görüntüleri

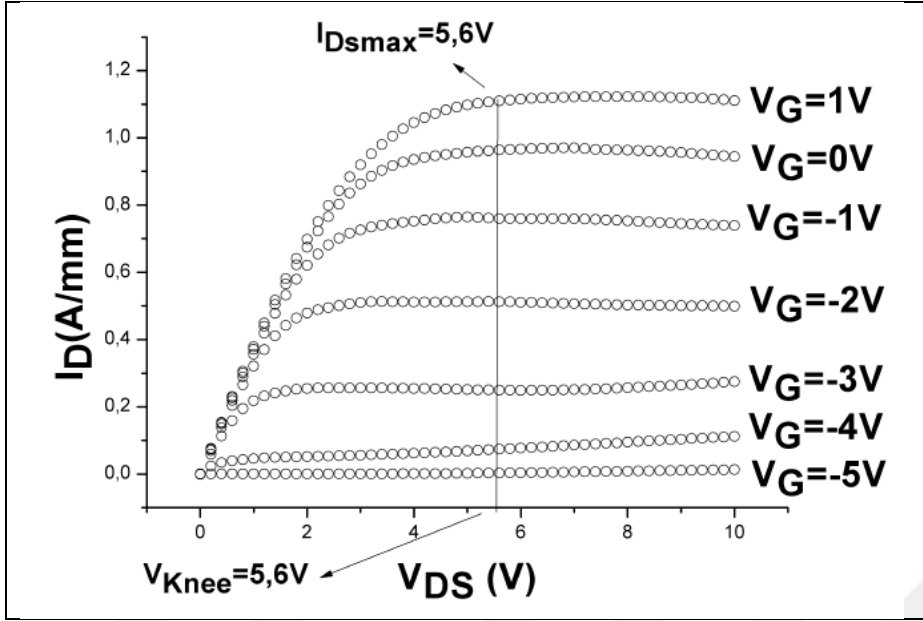
Resim 3.20'de ise kapı metalizasyon adımı sonrası farklı transistörlerin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.20. Kapı metalizasyon adımı sonrası transistörlerden alınan optik mikroskop görüntüleri

3.7. İkinci Elektriksel Ara Ölçüm Adımı

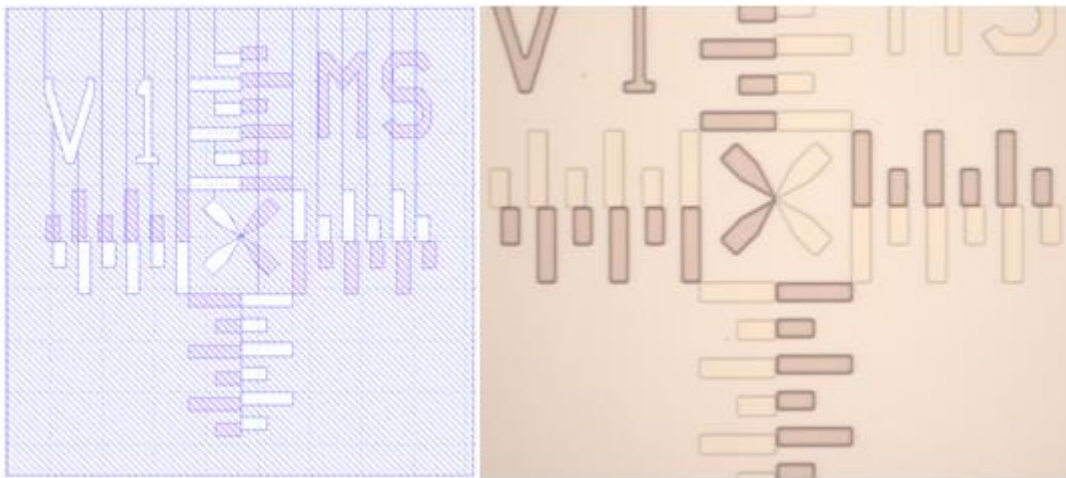
İşlem kontrol gözlemleri (PCM) HEMT aygıtları üzerinden çeşitli elektriksel ölçümlerin alınabilmesi için özel olarak tasarlanmış desenler mevcuttur.



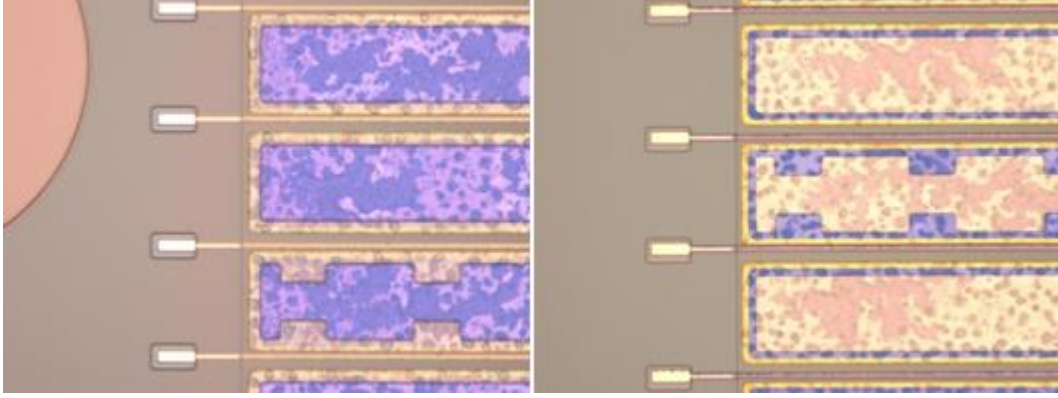
Resim 3.22. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik bir DC I-V grafiği

3.8. Via1 Oluşturma Adımı

Yüzey ve kapı pasivasyonun sağlanması amaçlandığı bu adımda Sentech cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Via0 adımına benzer şekilde sırasıyla litografi, kontrol, Si_xN_y kaplama ve yüzey stresi karakterize edilir. Aygıtların kontak bölgeleri kuru aşındırma işlemi ile açılır. Aşındırma işlemi sonrası şekil 3.23'te gösterilen optik mikroskop ile şekil 3.24'te verilen yüzey taraması ve KLA tencor yüzey profilometresi ile Via1 aşındırma derinliği ölçülür.



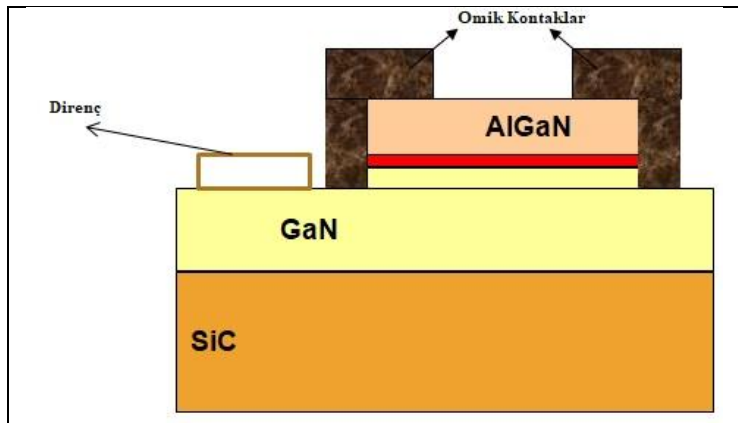
Resim 3.23. CDS dosyası Via1 maskesinin aygıt adacığı maskesine hizalanmasının gösterimi ve örnek üzerindeki optik mikroskop görüntüsü



Resim 3.24. Ayrıştırıcı üzerinden hizalama kontrolü ve via1 etch sonrası transistör görüntüsü

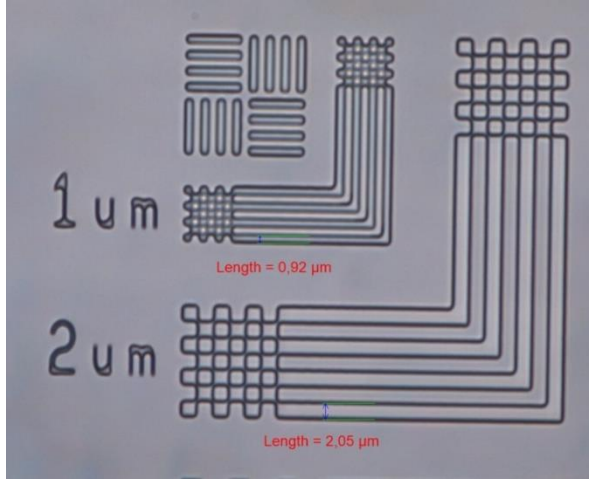
3.9. TFR Adımı

MMIC bütünleşmiş devrelerde pasif devre elemanı olan TFR'ler tasarlanan devrede istenilen öz direnç değerine göre kalınlıkla orantılı şekilde kaplama işlemi yapılır. TFR üretiminde AZ5214 fotodirenci kullanılarak litografi işlemi tamamlanırken boyut analizleri yapılır, elektriksel ölçümler de 4 nokta düzeneği ile kontrolü sağlanır. Şekil 3.3'te HEMT üzerindeki direncin gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.3. Rezistör devre elemanının HEMT üzerindeki gösterimi

Resim 3.25'te gösterilen mikroskop kontrolleri tamamlandıktan sonra örnekler RF Magnetron saçtırmassistemine yüklenir ve kaplama işlemi sonrası TFR üretimi tamamlanmış olur. TFR kaplama sonrası resim 3.26'da verilen optik mikroskop kontrolü ve KLA tencor yüzey profilometresi ile metal kalınlık kontrolü gerçekleştirilir. Elektronik ölçümler ile TFR öz direnç değeri karakterize edilir.



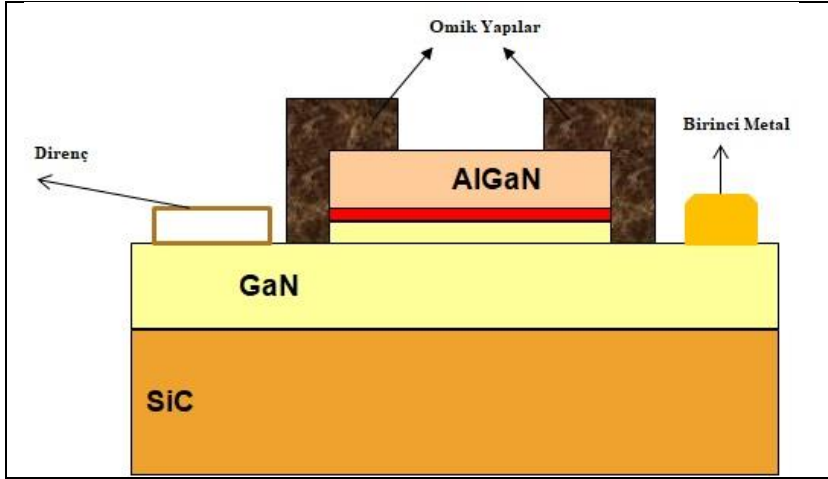
Resim 3.25. TFR litografi işlemi sonrası rezistör ve çözünürlük desenlerinin mikroskop görüntüsü



Resim 3.26. TFR kaplama sonrası rezistör desenleri ve ölçüm deseninin görünümü

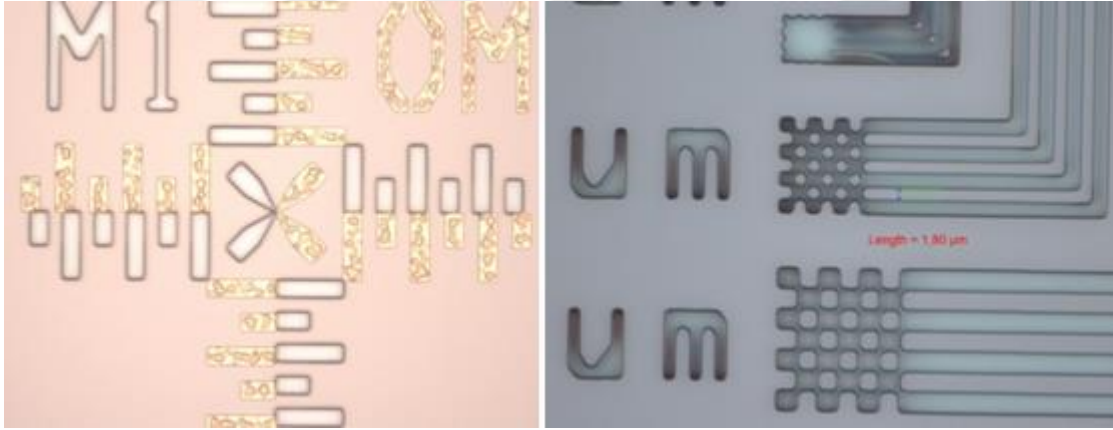
3.10. Birinci Metal Adımı

MMIC'e ait iç bağlantı metalleri, kapasitör ve indüktör gibi pasif ayalara ait ilk metal yapılar bu aşamada üretilir. Kapı parmaklarının toplanarak tek bir kolda birleştirildiği kapasitörlerin birinci metalleriyle bağlantı metallerinin oluşturulması bu adımda gerçekleşir. Şekil 3.4'te birinci metal devre elemanın HEMT üzerindeki gösterimi paylaşılmıştır.



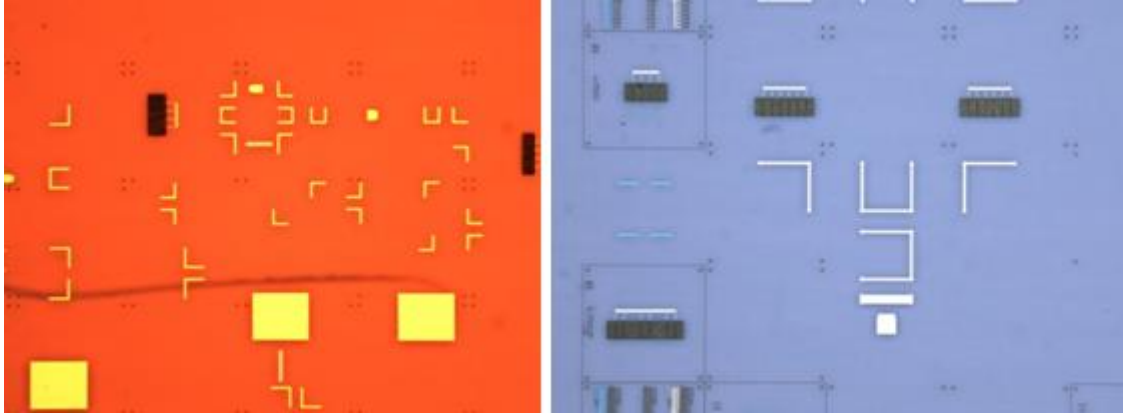
Şekil 3.4. Birinci metal devre elemanının HEMT üzerindeki gösterimi

Bağlantı metallerini oluşturmak için yapılan bu adımda, TI 35ES fotodirencihızlı döndürme işlemi ile örnek yüzeyine kaplanır. Maske hizalayıcı cihazı kullanılarak maskedeki birinci metale karşılık gelen desenler ile hizalama yapılır. Resim 3.27’de gösterilen birinci metal litografisi sonrası hizalama ve çözünürlük desenlerinin optik mikroskop görüntüsü kontrol edilir.



Resim 3.27. Birinci metal litografisi sonrası hizalama ve çözünürlük desenlerinin optik mikroskop görüntüsü

Litografi işlemi sonrası, elektron demeti buharlaştırma yöntemi kullanarak Ti/Au metalleri sırası ile kaplanarak ince filmler örnek üzerinde oluşturulur. Resim 3.28’de örnek üzerindeki birinci metal kaplama adımını sonrası optik mikroskop görüntüleri paylaşılmıştır.

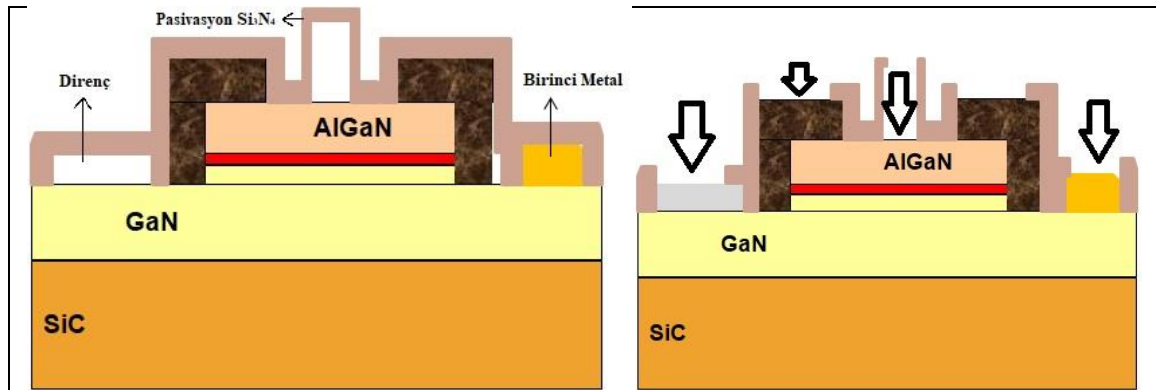


Resim 3.28. Metalizasyonu tamamlanmış örnek üzerinden optik mikroskop görüntüleri

Metalizasyon sonrası optik mikroskop kontrolü ve KLA tencor yüzey profilometresi ile metal kalınlık kontrolü gerçekleştirilir. Elektronik ölçümler ile birinci metal öz direnç değeri karakterize edilir

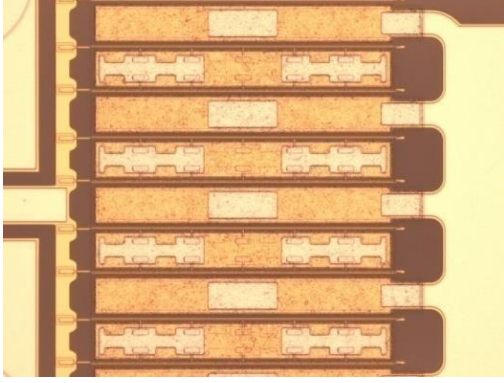
3.11. Via2 Oluşturma Adımı

Transistörün kırılma gerilimini artırmak ve yüzey sızıntı akımını engellemek için dielektrik kaplaması yapılmaktadır. Ayrıca MIM kapasitörlerin dielektrikleri de bu aşamada oluşturulur. Ölçüm alınabilmesi için pasivasyon adımı sonrası devre elemanların yüzey kısımları açılmalıdır. Şekil 3.5'te bu açıklıkların HEMT üzerindeki gösterimine yer verilmiştir.



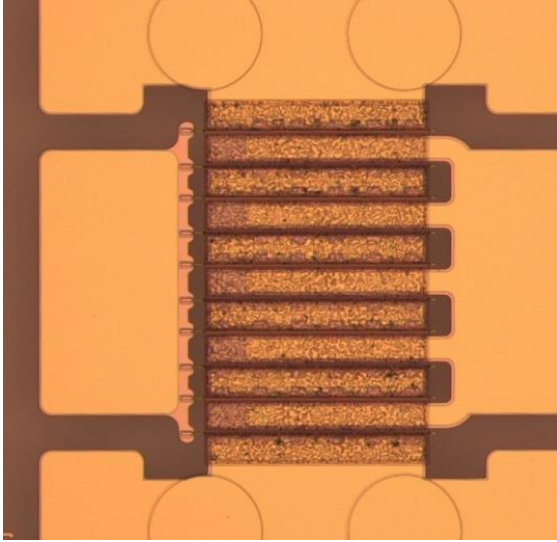
Şekil 3.5. Pasivasyon ve aşındırma adımı sonrası HEMT üzerindeki gösterim

Resim 3.29'da ise Via2 litografi işlemi sonrası transistör optik mikroskop görüntüleri bulunmaktadır.



Resim 3.29. Via2 litografisi sonrası transistör optik mikroskop görüntüleri

Pasif aygıtların pasivasyonunun sağlanması hedeflendiği bu adımda Sentech PECVD cihazı kullanılarak SiN kaplaması gerçekleştirilir. Aygıtların ikinci metal gelecek bölgelerikuru aşındırma işlemi ile resim 3.30’de gösterildiği gibi açılır. Aşındırma işlemi sonrası optik mikroskop ile yüzey taraması ve KLA tencor yüzey profilometresi ile Via2 aşındırma derinliği ölçülür.



Resim 3.30. Via2 aşındırması sonrası transistör optik mikroskop görüntüleri

3.12. Üçüncü Elektriksel Ara Ölçüm Köprüsü Oluşturma Adımı

Si_3N_4 dielektrik açıklığı adımımdan sonra da DC ara ölçümleri yapılmaktadır. Pasivasyon katmanının getirileri ve kaybettirdikleri bu aşamada karakterize edilip tartışılır. Ayrıca profilometre ile dielektrik kalınlığı ölçümleri yapılır ve beklenen değerin elde edilip edilmediği gözlemlenerek, elipsometre ölçümleri ile kıyaslanılır.

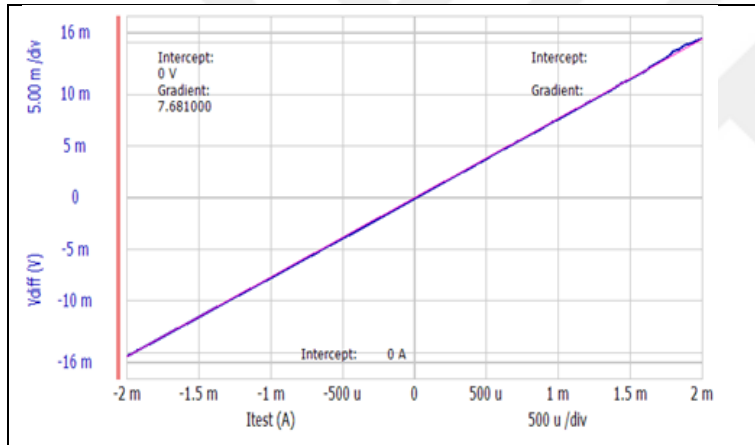
Örneklerin dört kenarı ve ortasında bulunan kontrol transistörlerinden DC ölçümler yapılarak karakterize edilir.

Bu ölçümlerde;

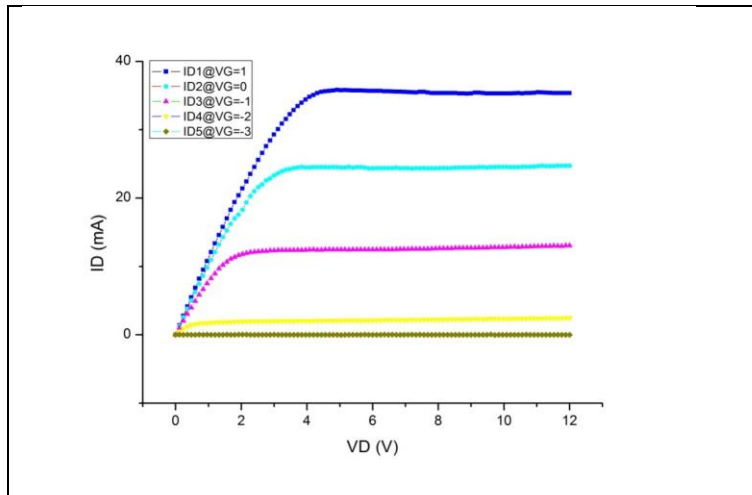
- TFR ve Birinci Metal Özdirenc
- Akım Yoğunluğu (I_{DSS})
- Kırılma Gerilimi (V_{br})

gibi değerlerin bilgisini almak için gerçekleştirilir.

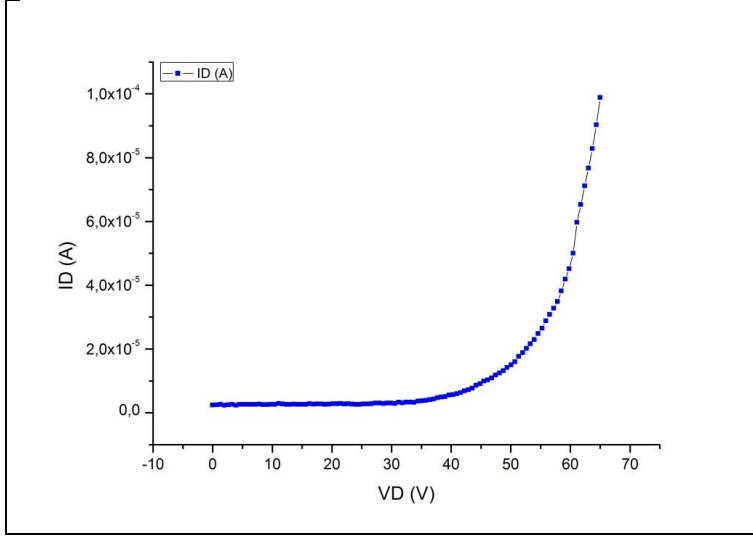
Bu ölçümlerin tipik grafikleri sırasıyla şekil 3.6., şekil 3.7., şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik özdirenc ölçümü



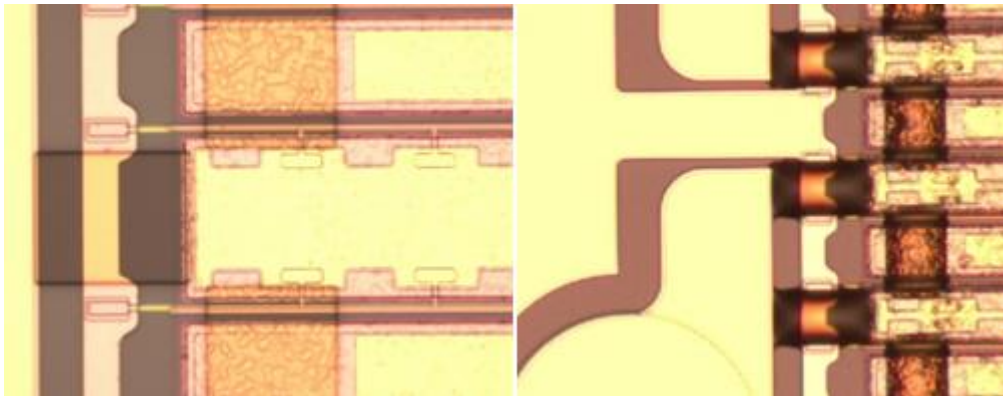
Şekil 3.7. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik akım yoğunluğu grafiği



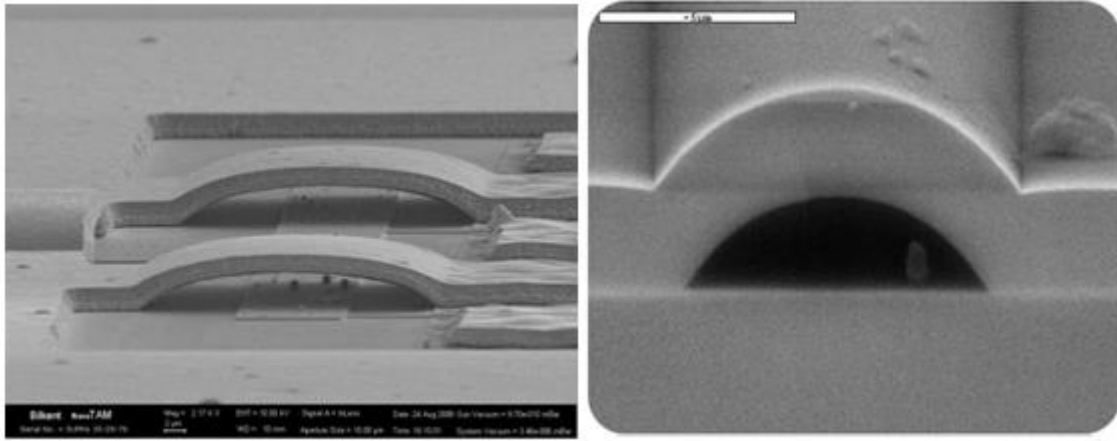
Şekil 3.8. GaN HEMT aygıtlar için ölçümlenen tipik kırılma gerilimi grafiği

3.13. Hava Köprüsü Oluşturma Adımı

Hava köprülerini yapmaktaki maksat, iç bağlantıları bu yapılar vasıtasıyla kısa devre yapmadan birbiriyle ilişkilendirilir. Bu adımda önce hava köprülerinin destek maddeleri yaratılır ve sivri hatlarından arındırılmak için ısıtılır. Litografi ile yüzeyde oluşturulan hava köprüsü desenlerinin yükselmesi ve sertleşmesi sağlanır. Litografi işleminde S1828 fotodirenci ile döndürülerek kaplama ve maske hizalayıcı cihazı kullanılarak hava köprüsü maskesi ile hizalama ve pozlama işlemleri tamamlanır. Litografi sonrası optik mikroskop kontrolü ve KLA tencor yüzey profilometresi ile fotodirenç kalınlık ölçümü ile gerçekleşir. Resim 3.31’de transistör üzerinden hava köprüsü litografisi ve pişirme sonrası hava köprüsü optik mikroskop görüntüsü ile resim 3.32’de TEM görüntüleri gösterilmektedir.



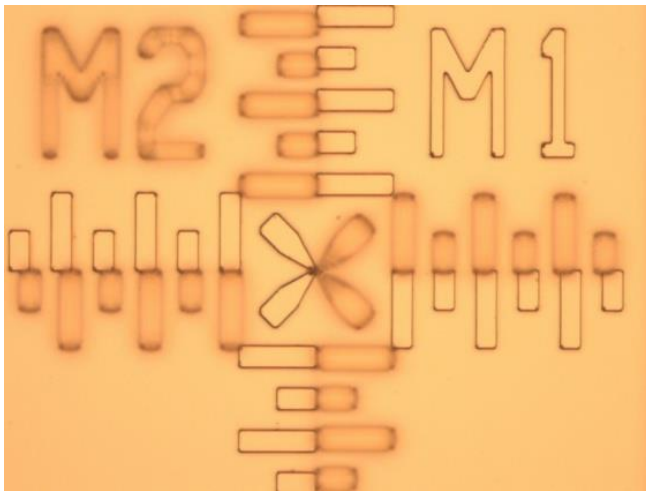
Resim 3.31. Transistör üzerinden alınan hava köprüsü litografisi ve pişirme işlemleri sonrası hava köprüsü optik mikroskop görüntüsü



Resim 3.32. Transistör üzerinden alınan hava köprüsü litografisi ve pişirme işlemleri sonrası hava köprüsü TEM görüntüleri

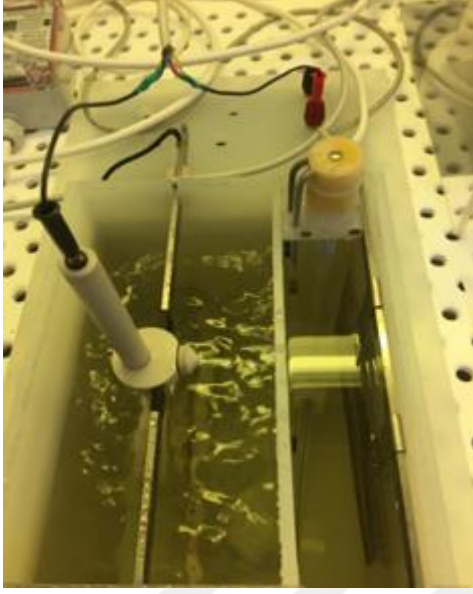
3.14. Ara Bağlantı Metal Adımı

Geniş ara bağlantı kontakları kalın Au metali ile oluşturulur. Böylelikle kolay problama işlemi gerçekleştirilebilirken, iyi RF performansı elde edilir. Ara bağlantı metalizasyon adımı öncesinde iletken çekirdeklenme katmanını oluşturmak için Leybold saçırmasistemi ile Ti/Au metalleri sırası ile kaplanır. Ara bağlantı metalizasyonu öncesi fotodirenç artıklarının yüzeyden uzaklaştırılması için plazma temizliği yapılır. İşlem diener asher cihazı ile gerçekleştirilir. Resim 3.33'te bağlantı metal litografisi sonrası hizalama kontrolü optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir.

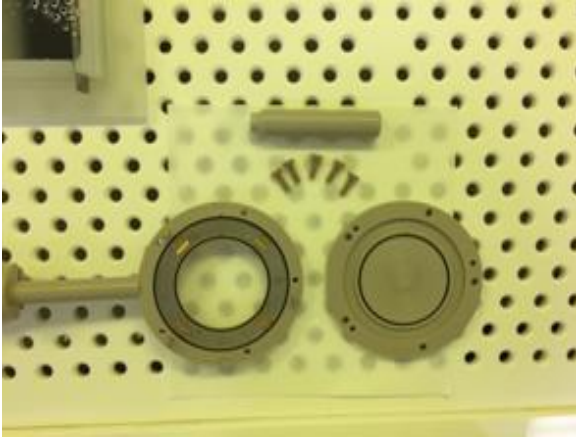


Resim 3.33. İkinci metal litografisi işlemi sonrası hizalama kontrolü optik mikroskop görüntüleri

Ara bağlantı altın metali kaplama işlemi Gold Plating solüsyonu ile resim 3.34'te gösterilen elektroplating sistemi kullanarak gerçekleştirilir. Resim 3.35'teki örnek boyutunda özel olarak hazırlanmış örnek tutucuları kullanılır. Örnek tutucusu ile solüsyon içerisine koyulur ve akım yoğunluğu ayarlanarak ve işlem süresi takip edilerek metalizasyon tamamlanır. Kaplama işlemi sonrası örnek DI su altında durulanır.



Resim 3.34. AMMT elektroplating sistemi



Resim 3.35. Metalizasyon için kullanılan örnek tutucu

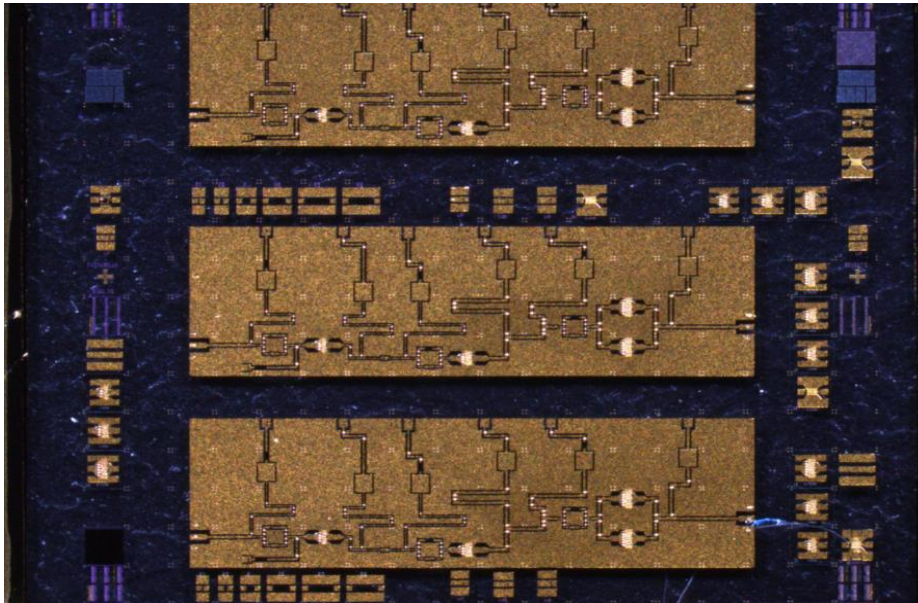
Şekil 3.9'de ise ara bağlantı metali sonrası MMIC üzerindeki gösterim verilmiştir.



Şekil 3.9. Ara bağlantı metali sonrası MMIC üzerindeki gösterim

3.15. Hava Desteği Köprüsü Kaldırma

Örnekten hava desteği köprüsü kaldırma işlemi için, örnek AZ100 çözücü solüsyonu içinde, 120 C sıcaklıkta ısıtılır ve yaklaşık 1 saat bu sıcaklıkta tutulur. Daha sonra mikroskopta hava köprüsü desteği yapılarının bu solüsyon içerisinde çözündüğüne emin olunur. Daha sonra MMIC örnekler aseton içerisinde titreştirilme işlemi sonrası alkol ile durulanıp, azot tabancası ile kurulanır ve örneklerin bu son hali mikroskopta dikkatlice incelenir. Bu haliyle MMIC fabrikasyonu tamamlanmış olur. Şekil 3.36'da fabrikasyon sonu örnek üzerindeki aygıtların optik mikroskop görüntüsü paylaşılmıştır.



Resim 3.36. Fabrikasyon sonrası örnek yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü

Hava Desteği Köprüsü Kaldırma işlemi sonrası transistör ve pasif devre elemanlarında altaş üzerine aktarılıp üretildikten sonra, DC Transistör I-V  l  mleri ile RF güç ölçümleri yapılarak, MMIC hakkında elektriksel karakterizasyon işlemleri tamamlanır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, yapılan mikrofabrikasyon adımları ve analiz çalışmaları için Aselsan Bilkent Mikro Nano A.Ş.'nin alt yapısı kullanılmıştır. Bu bölümde geliştirme çalışmaları ve TFR üretim sürecine ile karakterizasyon ölçümlerinde kullanılan sistemlerle ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Bu çalışma, 4 inç silikon yonga ve parçalarının kullanıldığı örnekler ile tamamlanmıştır. Örneklerin temizliği ile başlanan TFR üretim adımları, TFR deseninin örnek yüzeyine aktarılması, maske hizalayıcı ile desenleme işlemi daha önce tasarlanan MMIC maskesinin rezistör kısmını içeren bölümü kullanılmıştır ve bu uygulamada litografi işlemleri için en uygun fotodirenç kalınlığı seçilerek gerçekleştirilmiştir. Ardından RF magnetron saçtırma sisteminde fonksiyonel testler ve ince film kaplama işlemi parametrelerinden vakum haznesinin basıncının değişimi ile kaplama hızı ilişkisi ile RF güç değerinin arttırılmasının kaplama hızına etkileri incelenmiştir. RF magnetron saçtırıcı sistemi kaplama esnasında gerekli şartlandırma işlemlerine sokulduktan ve sabit şekilde ön koşulları sağladıktan sonra gerçek kaplama adımlarına geçilmiştir. TFR adımı karakterizasyon adımları, litografi işlemi sonrası fotodirenç kalınlığı ve kaplama sonrası üretilen TFR film kalınlığı boyutsal ölçümleri yüzey profilometresi cihazı ve yüzey analizleri için de optik mikroskop kullanarak sağlanmıştır.

MMIC yapısında, TFR aygıt üretimine karakterizasyonunda kullanılan sistemler aşağıdaki sıradaki gibidir;

- ✓ Maske hizalayıcı sistemi
 - ✓ Dönel kaplayıcı ve ısıtılabilir tabla
 - ✓ RF magnetron saçtırma sistemi → TFR üretimi
 - ✓ Yüzey profilometresi
 - ✓ 4 nokta prob düzeneği
- }
Desenleme süreçleri
- }
Karakterizasyon analizleri

4.1. Örnek Hazırlığı ve Temizliği Adımı

ABMN tarafından temin edilen 4 inç boyutundaki silikon yonga örneğin arka kısmı yukarı bakacak şekilde temiz oda tezgâhın üzerinde elmas kalem kullanılarak arka yüzeyini belirleyecek işaretleme gerçekleştirildi.

TFR üretimi fabrikasyonu sırasında örneklerin temizlik işlemlerikaplama esnasında istenilen sonuçlara ulaşmak için gerekmektedir. Temizlik sırasında örnekler oda sıcaklığında 5 dakika aseton bekletilmiş, daha sonra da aseton içerisinde 5 dakika boyunca ultrasonik titreştiricide titreştirilmiştir. Temizlik işleminde kullanılan kimyasal ve cihazlar resim 4.1’de verilmiştir. Daha sonra asetondan çıkartılan örnekler direkt olarak izopropanol alkol içerisine vakit kaybetmeden atılmıştır. 1 dk boyunca izopropanol alkol içerisinde bekletilen örnekler tek tek üzerlerine izopropanol alkol sıkılarak kaptan çıkartılmış ve azot tabancası ile kurutulmuştur. Son olarak örnekler iyonlardan arındırılmış su ile yıkanarak temizlenmiş ve azot (N_2) tabancası ile kurutulmuştur. Bu yöntemle üzerinde yapı olmayan boş örnek teslim alındıktan sonraki ilk adım olan temizlik işlemi tamamlanmıştır. Burada kullanılan kimyasallardan, aseton organik moleküllerin çözünmesini, izopropanol alkol ise asetonun yüzeyden atılması için tercih edilmiştir. Örneklerin yüzeyi tüm temizlik işlemleri bittikten sonra optik mikroskop altında incelenmiştir. Yüzeyde herhangi bir kirlilik ve istenmeyen parçacık görülmesi halinde ise yukarıda belirtilen işlemler tekrarlanarak kontrol edilir.

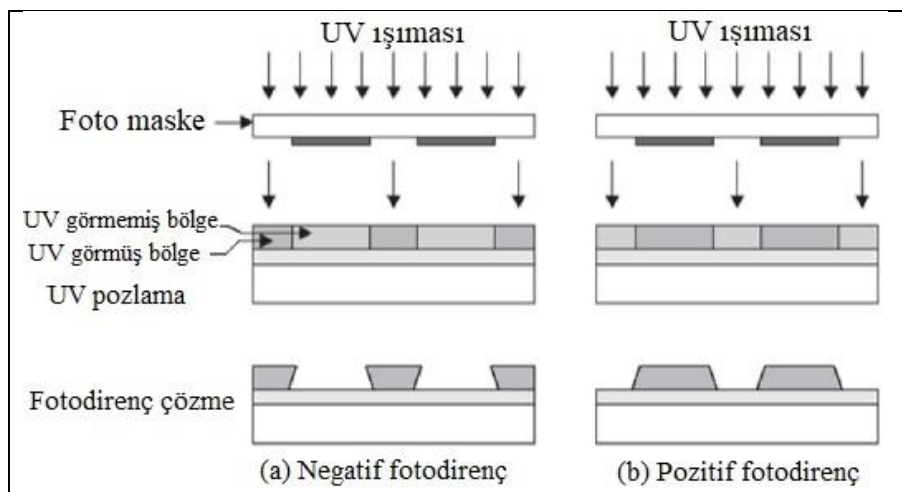


Resim 4.1. Temizlik adımı için kullanılan aseton-alkol ve ultrasonik titreştirici

4.2. TFR Deseni Oluşturma

Litografi, kelime anlamına bakıldığında ışıkla yazma olarak tanımlanabilir. Antik mısırdan günümüze kadar bilinmekte olan bu yöntem, yarıiletken endüstrisindeki çalışmalar ile birlikte litografi süreçlerin kullanım alanları ve yeteneklerinde etkili gelişmeler olmuştur. Litografi ışıkla yapılmasının yanı sıra elektron demetini kullanarak da maskesiz şekilde veya başka yöntemlerle de yapılabilir. Günümüzde bütünleşmiş devre üretiminde mikro-nano yapıların fabrikasyon adımlarında çoğunlukla fotolitografi kullanılır. Bu devrelerde bir aygıt oluşturmak için, ince filmlerin katmanlarının desenlenmesi, aşındırılması ve kaplanması gerekir. Bu işlemler litografi süreci ile birleştirir ve toplu halde alttaş üzerine milyonlarca aygıt yaratabilir [26].

Maske hizalayıcı yardımıyla yapılan fotolitografi de en çok tercih edilen yöntem UV-litografidir. Bu yöntemde, tasarıma uygun maske üzerindeki yapıları, bu dalga boyundaki ışığa duyarlı ve örnek yüzeyine dönel kaplayıcı ile serilen “fotodirenç” adı verilen polimerin gerekli süre boyunca UV ışığa maruz bırakmaktadır. Fotodirençler, pozitif veya negatif olarak UV ışığa maruz kaldığında ve çözme işlemi gerçekleştiğinde iki farklı olay ile sonuç verir. Farklı duyarlılık gösteren fotodirençler, tasarıma uygun, elde edilmesi istenen desen ve sonrasındaki adımın ihtiyaçlarına göre uygun şekilde seçilmektedir. Şekil 4.1’ de pozitif ve negatif fotodirençlerin UV’ ye olan tepkisi açıklanmıştır.



Şekil 4.1. Kullanılan fotodirenç türüne bağlı olarak optik litografi adımları

Bu tez çalışmasında AZ5214E fotodirenci seçilmiş olup, örnek kaplama işlemi pipetler yardımıyla örneklerin ön yüzeyine transferi sağlanmıştır. Bu fotodirenç belirli dalga

boylarındaki ışığı soğurabilmektedir. Bu ışığı sağlamak ve desenleme işleminin hizalanması için önceki bölümde anlatılan Süss Microtec MA6 cihazı tercih edilmiştir. Bu cihaz 365 nm dalga boyunda ışık sağlar ve bunun için sistemde civa (Hg) lambası bulunur.

Optik litografi sürecinde, istenilen desenlerin maske kullanılarak yüzey üzerinde oluşturulmasını sağlayan yöntem;

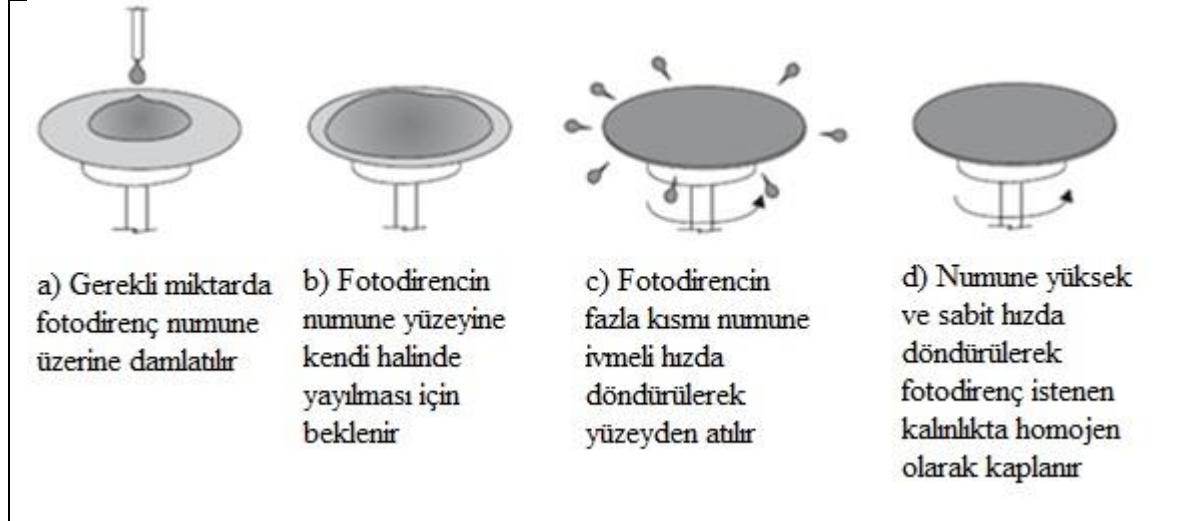
- Dönel kaplayıcı ile fotodirenç kaplama,
- Isıtma plakası ile ısıtma işlemi (yumuşak pişirme),
- Maske hizalayıcı ile ultraviyole (UV) pozlama,
- Foto dirence uygun bir çözücü kullanarak banyo ettirilme (tab etme) olayı

sonrası maskedeki desenin örnek yüzeyine aktarılması sırasıyla ilerler. Litografi işleminin son adımı olan fotodirenç çözme, banyo veya tab etme işlemi, üzerine fotomaske kullanılarak UV pozlama yapılan örneğin, UV'ye maruz kalmış bölgelerinin (ters litografide bu durum tam tersi) uygun bir kimyasal çözeltide çözündürülüp kaldırıldığı bir tür kimyasal aşındırma işlemine verilen addır.

- i. Dönel kaplayıcı ile fotodirenç kaplama; foto direncin örnek yüzeyine homojen bir şekilde istenilen kalınlıkta yayılması optik litografi işleminden iyi bir sonuç elde edebilmek için oldukça önemli bir parametredir. Bu sebeple fotodirenç kaplaması “dönel kaplayıcı” adı verilen cihaz kullanılarak döndürerek kaplama yöntemi ile yapılır. Döndürme işlemi esnasında, ilk aşamada altta örnek üzerine damlatılan fotodirencin yaratılan merkezci ivmeye bağlı olarak altta üzerinde yayılması gerçekleşir. Dönel kaplama işlemi sonrası kenarlara gelen fotodirencin katılarak içe bükülüp birikintiler oluşturması söz konusu olabilir. Bu birikintiler ucu sünger şeklindeki çubuk yardımıyla fotolitografi işlemi başlamadan giderilir. Bu işlemle yüksek çözünürlüğe sahip, maske üzerindeki desenlerin örnek yüzeyine aktarılması sağlanır. Çözünürlük kavramı, maske üzerindeki şablonun fotodirenç üzerine kritik boyut adı verilen bir ölçütte yansıtılabilme yeteneği verir.

Dönel kaplayıcı çeşitli rpm hız aralığında homojen şekilde dağılması için parametreler seçilir. Cihazın hazne tasarımı örnek yüzeyinde istenmeyen sıçramayı engelleyecek şekilde oluşturulur. Fotodirencin örnek yüzeyine kaplanması sağlayan dönel kaplayıcı işlemi

Resim 4.2’de gösterilmiştir. Cihazın kendine ait ekran üzerinde, örneğin dakikada atacağı devir sayısı ve kaç tur atacağı parametrelerinin girildiği bölümler mevcuttur.

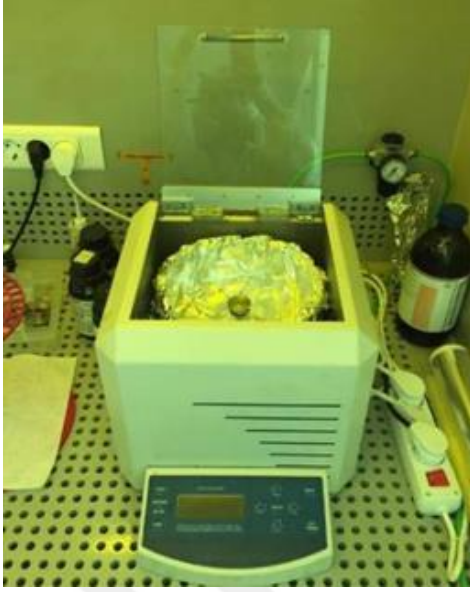


Şekil 4.2. Dönel kaplayıcı akışı

Fotodirenç kaplamak için kullanılan bazı yöntemler;

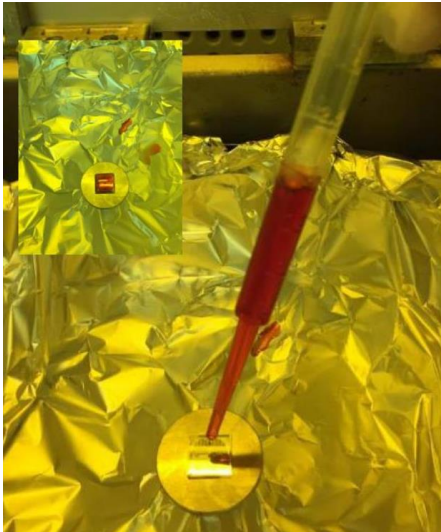
- Döndürme yöntemi ile kaplama,
- Sprey sıkarak kaplama,
- Döküp yaydırarak kaplama,
- Daldırarak kaplama.

Tez çalışmasında fotodirenç örnek yüzeyine resim 4.2’de gösterilen dönel kaplayıcı ile dönme hareketi sağlanarak homojen bir şekilde tamamlanmıştır.



Resim 4.2. Dönel kaplayıcı ve fotodirenç transfer işlemi

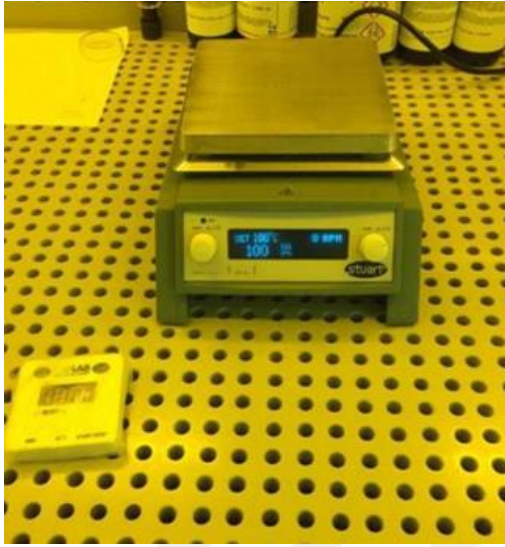
Bu işlem için hazırlanan örnekler dönel kaplayıcı cihazının vakumlu haznesinin ortasına koyulur. Daha sonra fotodirenç bir pipet yardımıyla resim 4.3'te gösterildiği gibi şişeden çekilerek örnek yüzeyinin tümünü kaplayacak şekilde yüzeye yavaşça ve dikkatli şekilde dökülür. Daha sonra istenilen parametrelere ayarlanır ve haznenin kapağı kapatıldıktan sonra döndürme işlemi başlatılmıştır. Fazla fotodirenç yüzeyden atılırken yüzey üzerinde homojen bir ince film oluşturulmuş olunur.



Resim 4.3. Dönel kaplayıcı ile örnek yüzeyine fotodirenç dökme işlemi

ii. Sıcak tabla ile ısıtma işlemi; fotodirencin örnek yüzeyine aktarılmasının hemen ardından sıcak tabla yardımıyla ısıtma işlemi yapılmıştır. Burada ısıtma işlemi, örneğin sıcak

tabla üzerinde belirli bir süre boyunca pişirilerek, fotodirencin içeriğindeki çözücünün buharlaştırılması olarak nitelendirilir. Bu pişirme işlemi sonunda, örnek yüzeyine dökülen polimer yapıdaki fotodirencin içindeki uçucuları yok etmek, örneklerin pozlama sırasında foto maskeye yapışmasını engellemek ve fotodirencin örnek yüzeyine daha sağlam yapışmasını sağlamak için sıcak tabla üzerinde tutularak ısıtıl işlem süreci tamamlanır. Resim 4.4'te sıcak tablanın görseli verilmiştir.



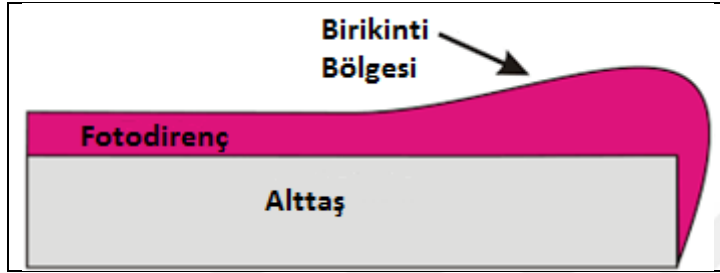
Resim 4.4. Sıcak tabla cihazı

TFR kaplama adımına geçmeden önce istenilen kalınlıkta, en homojen fotodirenç elde etmek için ek olarak bir döndürme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada; 4 farklı deneme örneği sırasıyla 2000, 3000, 4000 ve 5000 rpm döndürme hızları ile döndürülmüş, örnek yüzeylerinden ölçüm alınabilecek düzeyde kazınarak resim 4.5'de yüzey profilometresi ile fotodirenç kalınlık ölçümleri tamamlanmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen kalınlık değerleri çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Yapılan bu döndürme çalışmasından sonra optik litografide en iyi çözünürlük sağlanması ve kaplanacak TFR katmanı kalınlığı göz önüne alınarak 4000 rpm döndürme hızı ile kaplama işleminin yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 4.1. AZ5214E fotodirenç kalınlık çalışması parametreleri

Döndürme hızı (rpm)	2000	3000	4000	5000
AZ5214E kalınlık (um)	1.97	1.62	1.40	1.25

Döndürme ile fotodirenç kaplama işleminde, örneklerin köşelerinde fotodirenç oluşan merkezci ivme sebebiyle yüzeyin geneline göre daha kalın kalır. Buna “edgebead” adı verilen ve şekil 4.3’te gösterilmiş olan, istenmeyen ve örnek üzerindeki eş kalınlık dağılımını bozan bölgeler oluşmuştur. Bu yüzden fotodirenç döndürme işleminden hemen sonra örneklerin dört köşesinden fotodirencin çok ince bir kısmı kaldırılır. Bu edgebead kaldırma işlemi aseton ve q-tip adı verilen bir çubuğun asetona batırılıp foto direncin kenarlardan temizlenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

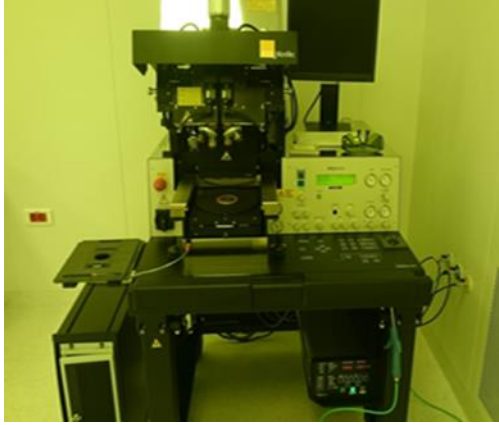


Şekil 4.3. Birikinti bölgesi

iii. Maske hizalayıcı ile ultraviyole (UV) pozlama; eniyileştirme çalışmalarından sonra gerçek örneklerin TFR kaplama adımı için optik litografi adımı gerçekleştirilmiştir. TFR adımı optik litografi aşamaları şu şekildedir:

- Fotodirenç döndürme hızı: 4000 rpm/4 sn/40 sn (döndürme hızı/bu hıza gelme süresi/döndürme süresi)
- Yumuşak pişirme: 110 °C/55 sn
- Edgebead kaldırma
- İlk pozlama: 1,4 sn/6 mW/cm² (UV ışığa maruz bırakma süresi/Lamba gücü)
- Pozlama sonrası pişirme: 110 °C/120 sn
- Fotodirenç kaldırma: AZ 400 K 35-40 sn
- Deiyonize su ile durulama

Bu tez çalışmasında ABMN bünyesinde bulunan resim 4.5’te verilmiş Süss Microtec MA6 marka maske hizalayıcı sistemi TFR litografi işlemlerinde kullanılmıştır.



Resim 4.5. Maske hizalayıcı sistemi

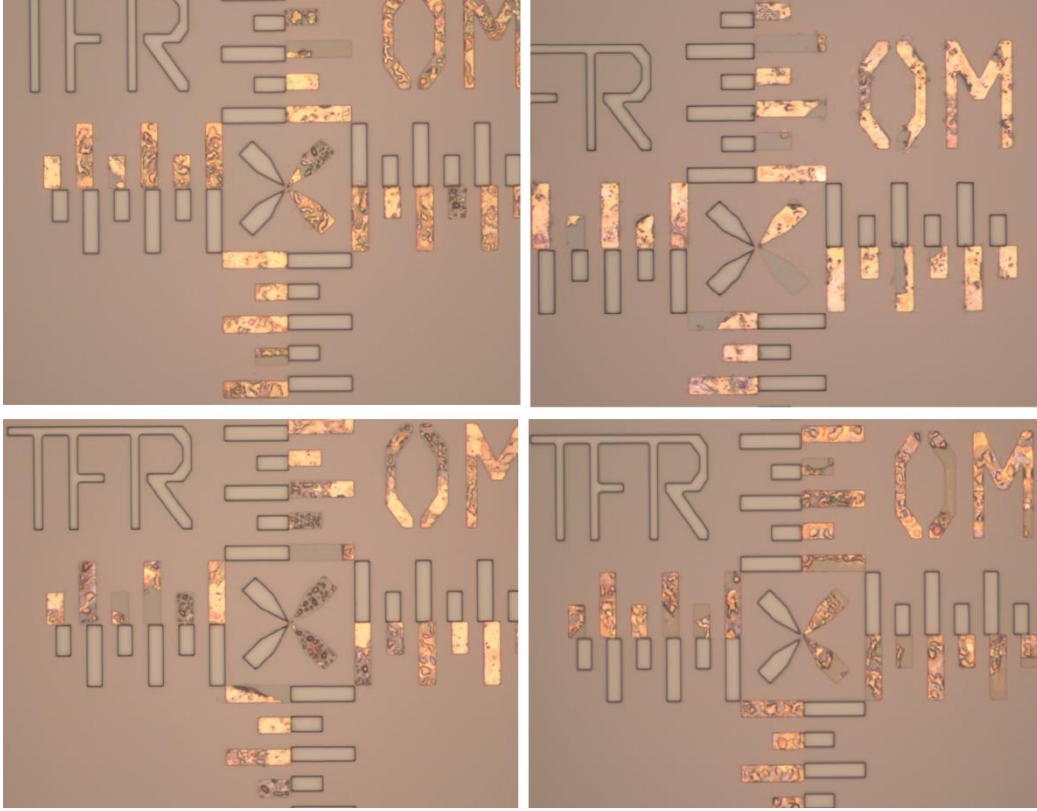
iv. Çözücü ile banyo ettirilme olayı; UV pozlama işlemi tamamlanan örnekler üzerindeki fotodirenç uygun bir çözücü yardımıyla banyo edilmektedir. Kullanılan fotodirencin türüne (negatif fotodirenç ya da pozitif fotodirenç) bağlı olarak UV ışına maruz kalan yerlerin çözücü içinde çözünmesi ya da çözünmemesi durumuna bağlı olarak fotodirenç kaplıörnek yüzeyinde fotomaske üzerindeki desenler banyo sonrasında oluşturulmaktadır.

Litografi işlemi sonrası kaplama öncesi yüzey analizleri için örnekler optik mikroskop ile kontrol edilmiştir. Mikroskoplar, aydınlatma kaynağına göre ışık mikroskobu ve elektron mikroskobu olmaküzereiki tiptir. Mikroskop, çeşitli merceklerin kullanılması ve bu merceklerin düzenlenmesi ile objelerin görüntülerinin büyütülmesine olanak vererek inceleme işlemlerinde sıklıkla kullanılan resim 4.6'da gösterilen cihazdır. Özellikle litografi işlemi sonrası olmakla birlikte kaplama işlemi sonrasında da yapılan tez çalışmasında sıkça kullanılmıştır.



Resim 4.6. Optik mikroskop

TFR litografi geliştirme çalışmaları sonucunda, resim 4.7’de gösterilen örnek yüzeyi üzerindeki hizalama işleminde kullanılan desenlerin görüntüleri verilmiştir. Bu kontrolde litografi işleminin ne kadar hassas şekilde yapıldığı ve desenlerin ne kadar kaydığı hakkında bilgiler vermektedir.



Resim 4.7. TFR hizalama desenleri optik mikroskop görüntüleri

4.3. Tooling Faktör Hesaplama

Bu optimizasyon çalışmalarında öncelikle, kullanılmış olan TaN hedef malzemesi için RF magnetron saçtırma sistemi ekranında kaplama kalınlığının doğru kalınlıkta okumasını gösteren “tooling faktör” hesabı için deneme kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Tooling faktör hesaplamada kullanılmak üzere kaplama işlemlerinde silikon örnekler kullanılmıştır.

Tooling faktör sistem geometrisi ile ilgili bir parametredir ve gerçek kaplama hızının izlenebilmesi için kullanılan bir çeşit ölçüleme sabitidir. Tooling faktör değeri gerçek kalınlık değeri ile monitörden okunan kalınlık değerinin oranı çarpılarak hesaplanır. Kaplama kalınlığının monitördeki okunan değeri ile profilometre cihazında okunan değer aynı olduğu anda kaplama parametreleri değiştirilmeden kaplama sağlama amaçlı

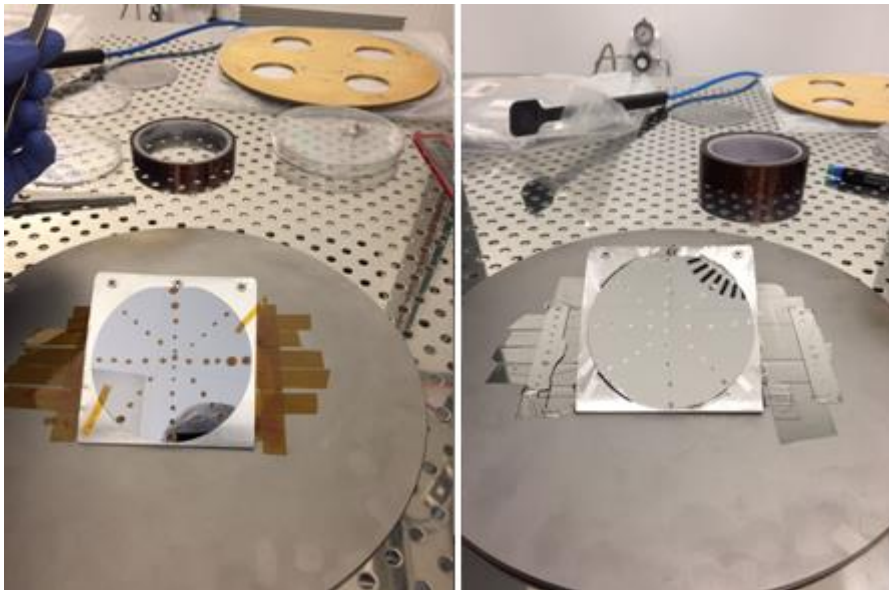
tekrarlanmıştır ve yeniden ölçüm alınarak son hesaplanan tooling faktör hesabının sağlaması yapılmış olup, sisteme teorik olarak hesaplanan değer girilip kaydedilmiştir. Çizelge 4.2’de tooling faktör hesabı için kullanılan formül gösterilmiştir.

Aşağıda gösterilen formül ile tooling faktör hesabı,

$$Tooling_{gerçek} = Tooling_{yaklaşık} \times \frac{Kalınlık_{gerçek}}{Kalınlık_{monitör}} \quad (4.1)$$

ifadesi ile verilir.

Her malzeme için ayrı bir tooling faktör hesabının yapıp sisteme doğru şekilde girilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında, tooling faktör hesabı yapılırken kullanılmış olan TaN hedef malzemesi seçilmiştir. TaN hedef kullanılarak yapılan tooling faktör hesabı çalışması için 4 inç ebatlarında silikon şahit örnekler tercih edilmiştir. Maskeleme işlemi, foto direncin pipet yardımıyla şahit örnek yüzeyine damlatılarak tamamlanmıştır. 110 °C’de 55 sn. pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üzerine fotodirenç serilen şahit örnekler kapton bant yardımıyla örnek tutucuya yapıştırılarak sisteme yüklenmiştir. Resim 4.8’de görüldüğü üzere sol taraftaki 4 inç’lik si yonga üzerine maskeleme yapılmış ve sisteme yüklemeye önceki hali, sağ taraftaki ise kaplama sonrası yonganın görselini verilmiştir.



Resim 4.8. Tooling faktör deneme hesabı için hazırlanan ve kaplanan yonga

Sisteme girilen tooling faktör değeri ilk olarak 100 seçilmiştir ve monitor kalınlık 6328 Å değerinde iken alınan yüzey profilometresi kalınlık ölçümleri çizelge 4.2'deki gibidir.

Çizelge 4.2. Tooling faktör hesabı birinci çalışma

1.Nokta	918 Å
2.Nokta	967 Å
3.Nokta	848 Å
4.Nokta	934Å

gibi çıkmıştır. Bu değerlerin ortalaması 916,7Å alınıp yeni bir tooling faktör hesabı yapılmıştır. Bulunan yeni tooling faktör değeri 14,1 ile yeni bir kaplama işlemine geçilmiştir. Tooling faktör değeri 14,1ve sistem monitöründe okunan değer 400 Å iken alınan yüzey profilometresi kalınlık ölçümleri çizelge 4.3'teki gibidir.

Çizelge 4.3. Tooling faktör hesabı ikinci çalışma

1.Nokta	248 Å
2.Nokta	242 Å
3.Nokta	243 Å
4.Nokta	253Å

gibi okunmuştur. Bu değerlerinortalaması 246,5 Å alınıp yeni bir tooling faktör hesabı yapılmıştır. Bulunan yeni tooling faktör değeri 86,8 ile kaplama işlemine geçilmiştir. Tooling faktör değeri 86,8 ve monitörde okunan değer 1000 Å iken alınan yüzey profilometresi kalınlık ölçümleri çizelge 4.4'teki gibidir.

Çizelge 4.4. Tooling faktör hesabı üçüncü çalışma

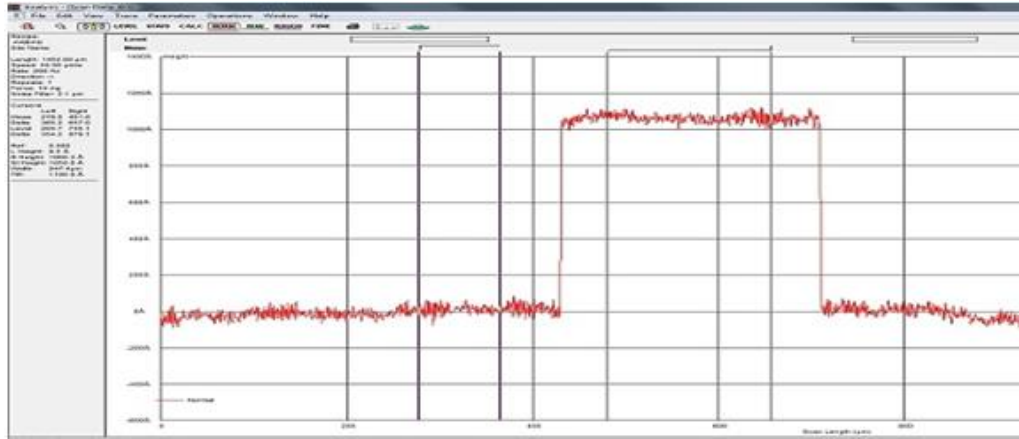
1.Nokta	1008 Å
2.Nokta	1013 Å
3.Nokta	976 Å
4.Nokta	963 Å

gibi çıkmıştır. Bu değerlerin ortalaması 990,5 Å alınmıştır. Sistem ekranı ile yüzey profilometresi kalınlık ölçümleri arasındayaklaşık 8 Å'lık bir fark gözlemlenmiş olup tooling faktör değeri sabit kalmak koşuluyla farklı bir kalınlık olan 1500 Å değeri ile sağlama kaplaması yapılmıştır. Tooling faktör 86,8 ve monitör kalınlık 1500 Å değerinde iken alınan yüzey profilometresi kalınlık ölçümleri çizelge 4.5'teki gibidir.

Çizelge 4.5. Tooling faktör hesabı dördüncü çalışma

1.Nokta	1479 Å
2.Nokta	1491 Å
3.Nokta	1515 Å
4.Nokta	1486 Å

Bu değerlerin ortalaması 1492,7 Å olarak hesaplanmıştır. Monitör ile Tencor kalınlık ölçümleri arasında yaklaşık 7 Å'lık bir fark gözlemlenmiş olup tooling faktör değeri sağlama da başarıyla tamamlanmıştır. Sisteme TaN hedef malzemesi için 86.8'lik tooling faktör değeri girilerek kaydedilmiştir. TFR tooling faktör hesaplama için yapılan kaplamaların kalınlık ölçümlerinin tipik gösterimi resim 4.9'daki gibidir.



Resim 4.9. Tencor yüzey profilometresi kalınlık ölçümü

4.4. Homojen Kalınlıkta Film Üretme Çalışması

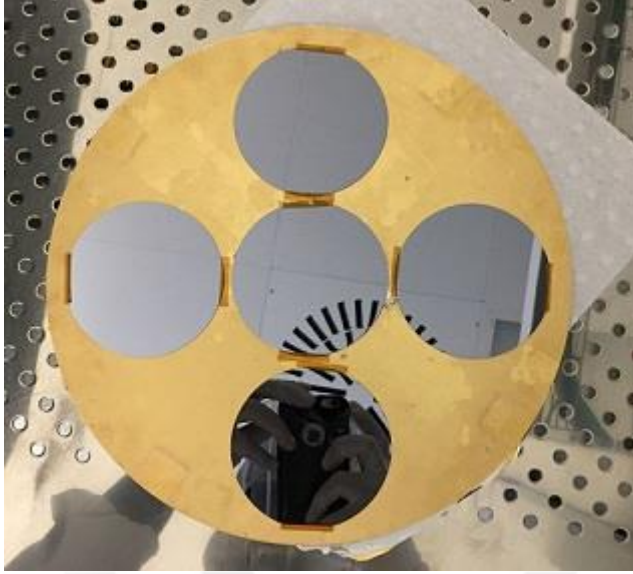
TaN hedef ile ilgili homojen filmler üretme çalışması yapılmıştır. Homojen konusu ince film kaplama işlemlerinde oldukça önemli bir parametredir. Çünkü hem örnek tutucu boyunca, hem de yonga boyunca filmin türdeş kalınlıkta olması alttaşın yüzeyindeki

tasarlanan rezistör yapılarının değerlerini değiştirebilir. Bütünleşmiş devreyi etkilememesi için örnek üzerinde istenen kaplama kalınlığı ile öz direnç değerlerini sağlaması amacıyla bu konuda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. RF magnetron saçtırma ince film kaplama sisteminin kaplama şartlandırmasının sağlanarak sabit hale gelmesi ve örnek tutucunun 8 rpm dönme hızı ile belli turu atacağı bilgisinin sistem ekranında girilmesi sonucu homojen bir kaplama sonucuna ulaşılmıştır. Resim 4.10'da rf magnetron saçtırma sistemi vakum haznesinin iç tasarımı görülmektedir. Burada örnek tutucu döndürülerek homojen filmler meydana getirmek mümkündür.



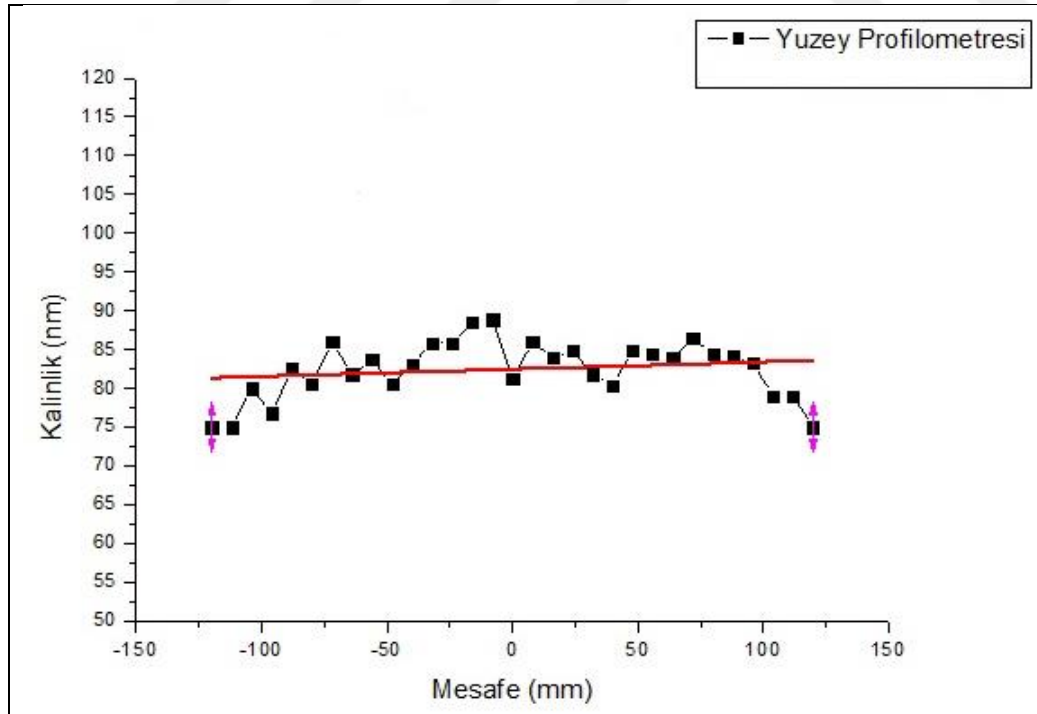
Resim 4.10. Vakum haznesi iç kısım örnek tutucular

Homojen film üretme çalışması kapsamında, resim 4.11'de gösterilen 4 adet 4 inç'lik Si şahit örnekler kullanılarak tamamlanmıştır. Tencor yüzey profilometresi cihazında ölçüm alınabilmesi için örnek yüzeylerine fotodirenç ile her bir damla arasında 5 mm boşluk bırakarak Q-tip yardımıyla maskeleme işlemi ve ardından ısıtım işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.11. Örneklerin örnek tutucuya yerleştirilmiş hali

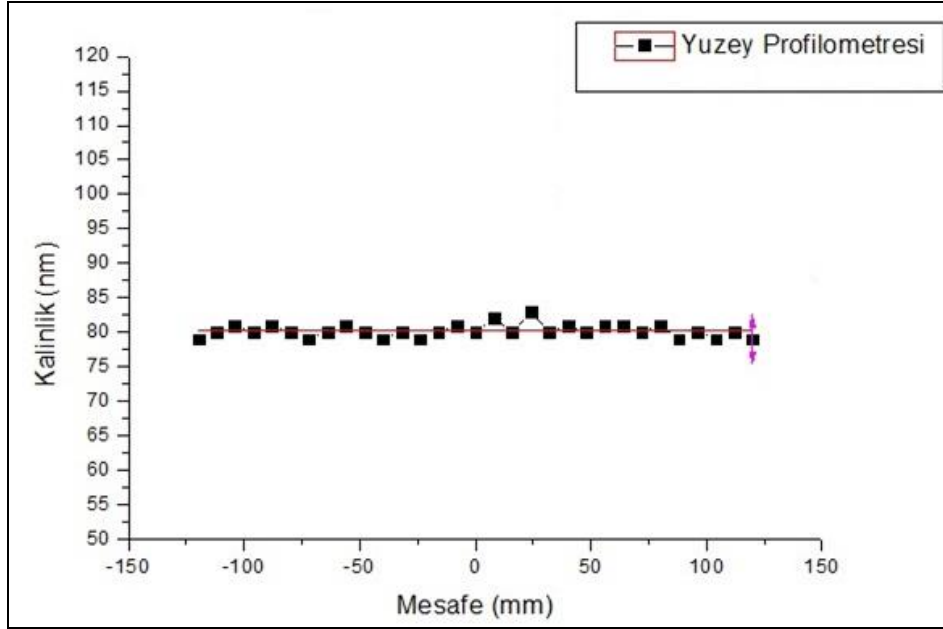
Hazırlanan örnekler sistem içerisine yerleştirildikten sonra örnek tutucu 4 rpm’de çevrilerek kaplama işlemi yapılmıştır. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi dairesel alttaş tutucu üzerinde kalınlık değişimleri minimum ve maksimum arası yaklaşık 15 nm çıkmıştır.



Şekil 4.4. Alttaş tutucu çap boyunca homojen film üretme birinci çalışma grafiği

Şekil 4.4’de origin programı tarafından çizdirilen kalınlık (nm) ile mesafe (mm) arasındaki grafikten de anlaşıldığı gibi örnek tutucu dönme hızından kaynaklı çap boyunca homojen

olmayan bir film büyütülmüştür. Bu kaplama ve kalınlık ölçümü işlemlerinden sonra örnek tutucu dönme hızı 8 rpm'e çıkarılarak şekil 4.15'deki yaklaşık 5 nm farklılıkla çıkan sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 4.5. Alttaş tutucu çap boyunca homojen film üretme ikinci çalışma grafiği

RF magnetron saçtırma sisteminin önem taşıyan parametrelerinden tooling faktör hesabı ve homojen filmler üretme çalışmaları tamamlandıktan sonra, TaN hedef için kaplama işlemi basıncı (mbar cinsinden) ve RF güç (Watt cinsinden) parametrelerinin değiştirilmesinin kaplama hızına ($\text{\AA}/\text{sn}$) etkisi çalışmaları ile devam edilmiştir. Kaplama hızı parametresi, kaplama süresini doğrudan etkileyen bir nicelik. Bu çalışma ile en uygun basınç olan 2×10^{-3} mbar ve 200 Watt güç değerleri seçilerek tez çalışması gerçekleştirilmiştir.

4.5. Kaplama Basıncının Değiştirilmesinin Kaplama Hızına Etkisi

Bu çalışmada, TFR film kaplama parametrelerinden yalnızca işlembasınç değeri değiştirilerek kaplama hızına olan etkisi gözlemlenmiştir. Sadece kaplama basıncının etkisini görmek için RF güç, örnek tutucu dönme hızı ve kaplamada kullanılan gaz basıncı değerleri değiştirilmeden deneyler tamamlanmıştır. Kaplama basıncındaki her bir değişikliğe karşılık değişen rate değeri kontrollü şekilde monitörden not edilerek kaplama basıncı'na karşılık kaplama hızı grafiği çizdirilmiştir.

Kaplama hızı ile ilgili kaplama parametreleri arasındaki bağlantıyı incelediğimiz zaman,

$$D = F \times E \quad (4.2)$$

eşitliğiyle karşılaşıyoruz.

Eşitlik 4.2’de;

D: Birikme hızı

E: Hedeften kopartılan parçaların oranı

F: Hedef ile alttaş arasındaki mesafeyle saptanan bir sabittir.

Formülde görüldüğü gibi F sabit kabul edildiğinde birikme hızı hedeften kopartılan parçaların oranı ile doğru orantılıdır. Hedeften kopartılan parçaların oranı, aynı zamanda iyon akım yoğunluğu, hedef yüzeyindeki değişkenler ile orantılı olduğu da aşağıdaki gibi açıklanır.

$$E = 62,3 \frac{Sj+M}{q} \quad (4.3)$$

eşitliğini görüyoruz.

Eşitlik 4.3’de S ve J; kaplama gazı, basınç, güç, hedef malzemesinin türü, hedef-alttaş mesafesi, alttaş sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösteren karakteristik değerlerdir.

Denklemdaki diğer bilinmeyenler;

M: Hedefin atom kütlesi.

q: Yoğunluk

S: Püskürtme verimi

J: İyon akım yoğunluğu

olarak verilir.

İyon akım yoğunluğunu hedeften kopartılan parçaların oranı ile doğru orantılı bir şekilde değişeceği eşitlik 4.4’de belirtilmiştir. İyon akım yoğunluğu arttıkça hedeften kopartılan parçacık sayısı dolayısıyla birikme artacaktır.

Ortalama Serbest Yol ile Basınç arasındaki şu bağlantıyı incelediğimiz zaman,

$$\Lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi P d^2} \quad (4.4)$$

formülünü görüyoruz.

Burada;

P: Basınç,

k: Boltzman sabiti,

T: Sıcaklık,

Λ : Ortalama serbest yol,

d: Gaz moleküllerinin çapı

olarak verilir. Eşitlik 4.4’de, d ve T’yi sabit kabul ettiğimizde, basınçtaki artış ortalama serbest yolun yani bir molekülün diğer molekül ile çarpışmadan önce kat ettiği mesafenin azalmasına neden olacaktır.

Basınç ve kaplama hızı arasındaki ilişki için, düşük basınç seviyelerinde iyon akım yoğunluğu artacağı için birikme hızında da bir artış beklenmektedir. Ancak yüksek basınç seviyelerinde gaz moleküllerinin miktarı daha fazladır vesayice çok olması saçılan atomlar ile gaz moleküllerinin çarpışmasına aynı oranda katkıda bulunacaktır. Çarpışmalar sonucunda enerjisi azalan atomların daha az sayıda alttaşa birikeceği ve düşük birikme hızına sebep olacaktır.

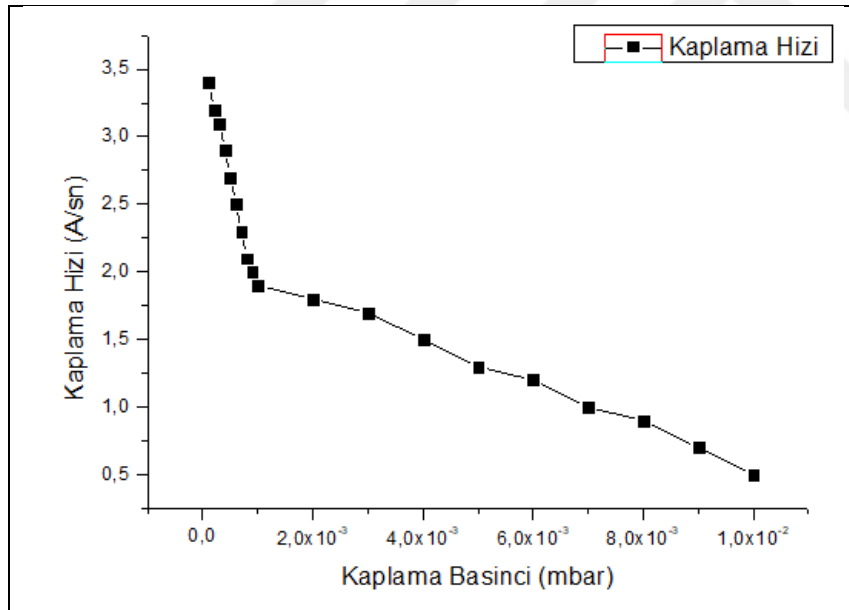
Çalışmanın yapılışı, TaN hedef kullanılarak, örnek konulmadan örnek tutucuda bulunan deliklerin vakum haznesini kaplamaması için boşluklar alüminyum folyo ile kapatılarak kaplama işlemi için sistem hazır hale getirilmiştir. Cihaz vakuma alındıktan sonra işlem basınç değeri 1×10^{-2} mbar’dan $1,2 \times 10^{-3}$ mbar değerine gelinceye kadar 0,2 mbar değiştirilerek kaplama işlemleri diğer işlem parametreleri olan, RF güçve kullanılan Ar gaz

akışı değiştirilmeden tekrarlanır. Monitörden okunan büyüme hızı değerleri kaydedilir ve veriler doğrultusunda İşlem Basıncı – Büyüme hızı grafiği çizilmiştir.

Sabit İşlem Parametreleri;

- Hedef malzemesi : TaN
- RF güç : 200 Watt
- Ar akış hızı : 20 sccm
- Dönme hızı : 8 rpm
- Tooling faktör : 86,8
- Kalınlık : 1000 Å

Yapılan bu çalışmada işlembasıncının artırılması ile birikme hızındaki azalma şekil 4.6'da gösterildiği gibi literatüre uygun şekildedir.



Şekil 4.6. Kaplama basıncının – kaplama hızına etkisi

4.6. Kaplama RF Gücünün Değiştirilmesinin Kaplama Hızına Etkisi

Çalışma için yine TaN hedef kullanılarak ve alüminyum folyo ile örnek tutucudaki boşluklar kapatılarak, kaplama işlemi için sistem hazır hale gelmiştir. Yalnızca RF güç

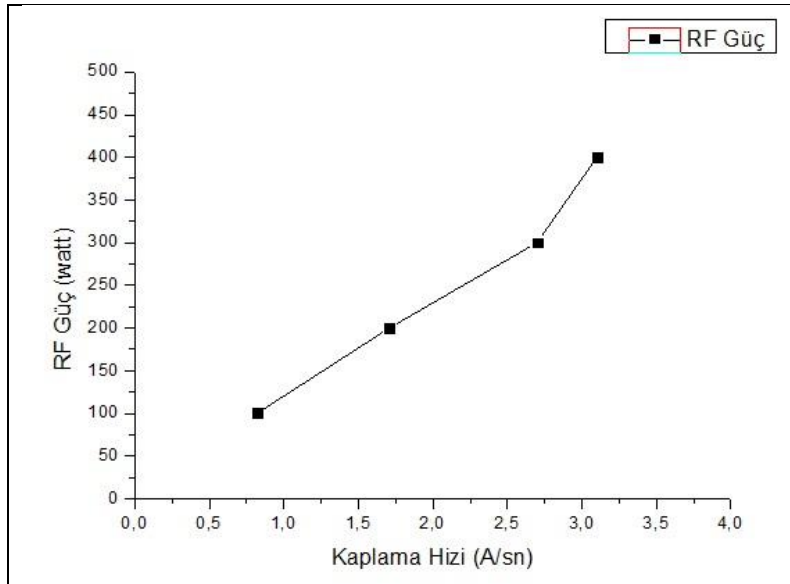
değerleri sırasıyla 100W/200W/300W/400W olacak şekilde değiştirilerek ince film kaplama geliştirme çalışmaları tamamlanmıştır.

RF güç değerlerine göre parametreler;

Çizelge 4.6. RF güç değişkenlerine göre kaplama parametreleri

Parametreler	100 Watt	200 Watt	300 Watt	400 Watt
Kaplama Hızı (Å/sn)	0,82	1,71	2,7	3,1
Kaplama Basıncı (mbar)	$2e^{-3}$	$2e^{-3}$	$2e^{-3}$	$2e^{-3}$
Argon Akış Hızı (sccm)	20	20	20	20
Örnek Dönme Hızı (rpm)	8	8	8	8
Film Kalınlığı (Å)	1000	1000	1000	1000
Tooling Faktör	84,8	84,8	84,8	84,8
Gerilim (V)	123	225	312	416

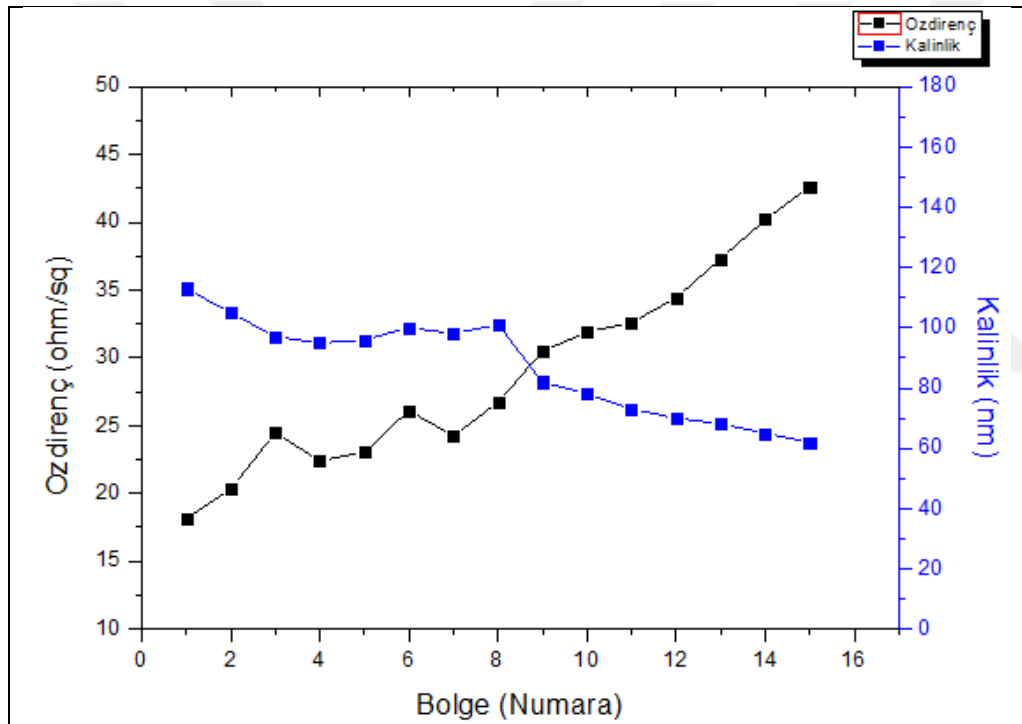
Bu işlem TaN hedef kullanılarak 4 farklı kaplama ile 100W-400W aralığında tekrarlanarak değişimi gözlemlemeye yönelik yapılmıştır. Elde edilen grafik, teorik bilgi ile paralel sonuçlanarak RF güç değerindeki artış kaplama hızını artırıcı yönde etkilediği şekil 4.7’de görülmüştür.



Şekil 4.7. RF gücün – kaplama hızına etkisi

4.7. Kaplama Kalınlığının Değiştirilmesinin Tabaka Direncine Etkisi

Özdirenç birim uzunluk ve kesit alana sahip bir iletkenin, elektrik akımına karşı ne ölçüde direnç gösterdiğini sembolize eder. Özdirenç, iletkenin geometrik ölçülerinden bağımsız bir büyüklük olup, sadece iletkenin yapıldığı maddenin özellikleriyle ilgilidir. Malzeme kalınlığı, tabaka direnci değeri olan özdirençin kalınlığa bölünmesiyle elde edilen değeri etkilediği için, tasarımda istenen değeri yakalamak için kalınlık değerini değiştirmek gerekir. Başka bir deyişle şekil 4.8’de de gösterilen film kalınlığı arttığında tabaka direnci azalması bilgisi, yapılan çalışmayla verilmiştir.



Şekil 4.8. Kalınlık – Tabaka direnci değişimi

Yapılan deneme kaplama çalışmaları sonucunda isterleri sağlaması koşuluyla en uygun kaplama parametreleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.8. RF magnetron saçtırma sistemi ile TFR kaplama reçetesi

RF güç (Watt)	Argon akışı (sccm)	TFR kalınlık (Å)	Dönme hızı (rpm)	Kaplama basıncı (mbar)	Ön kaplama Süresi (dk)	Gücün artış süresi (W/dk)
200	30	750	8	2xe-3	30	20

Çizelge 4.8'deki gibi parametreler ile kaplama işlemi yapıldıktan sonra örneklerin görünüşleri resim 4.12'de gösterilmektedir.



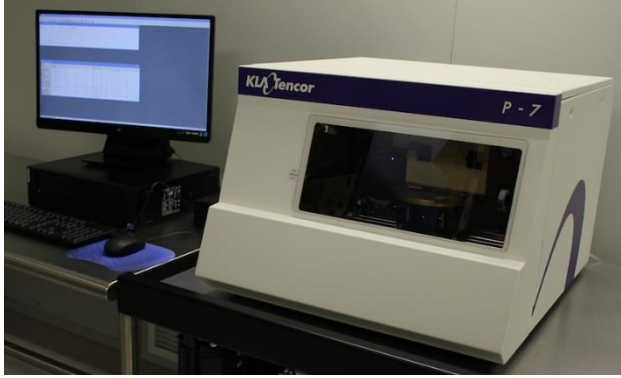
Resim 4.12. MMIC devresindeki TFR desenleri

4.8. Karakterizasyon Adımı

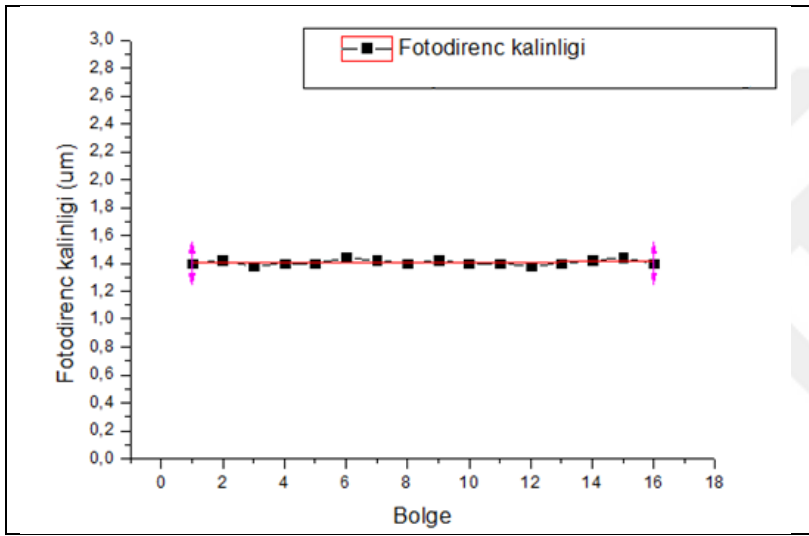
TFR kaplama sonrası boyutsal ve elektriksel ölçümler ile aygıtların karakterizasyon işlemleri tamamlanır.

4.8.1. TFR kaplama işlemi sonrası boyutsal ölçümler

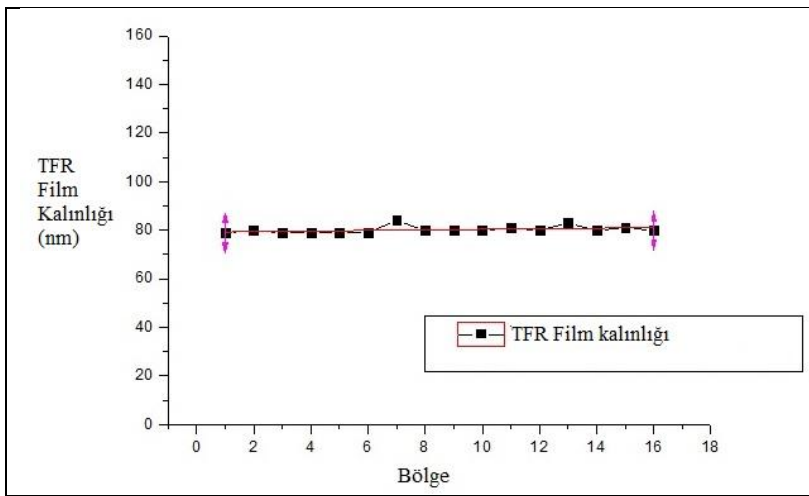
TFR litografi adımı resim 4.20'de görülen KLA Tencor P-7 marka yüzey profilometre cihazı ile rezistör yapıların örnek yüzeyine desenleme işlemi sonrasında fotodirenç ve RF magnetron saçırma sistemi ile TFR kaplama işlemi sonrası ince film kalınlığı ile filmin türdeş kalınlık kontrolleri yapılmıştır. Hem fotodirenç kalınlığı hem de ince film kalınlığı yonga boyunca türdeş ve istenilen kalınlıklarda sonuç vermiştir. Bu değerler resim 4.13'deki yüzey profilometresi cihazıyla ölçüldükten sonra, şekil 4.9 ve şekil 4.10'deki grafikler ile şekil 4.11'deki dağılım grafiğinde açıkça görülmektedir.



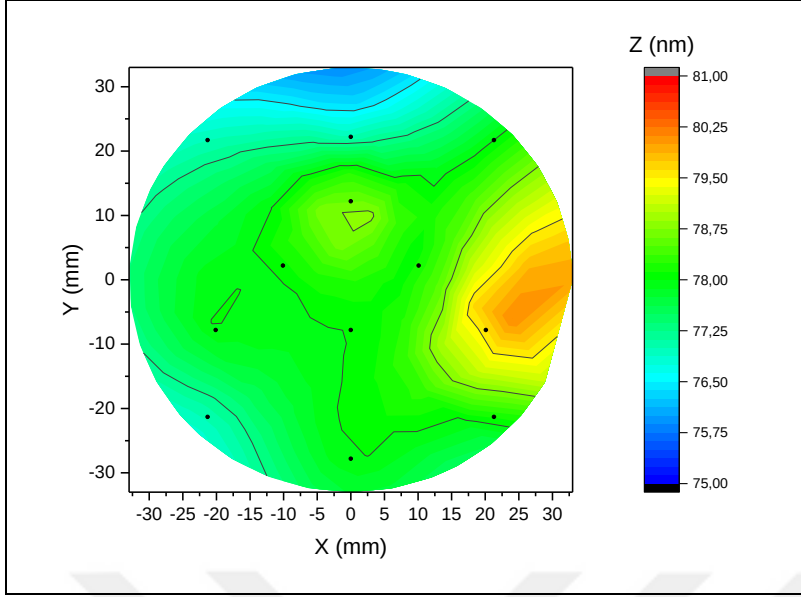
Resim 4.13. KLA tencor yüzey profilometresi düzeneği



Şekil 4.9. TFR litografisi sonrası bölgelere göre fotodirenç kalınlık grafiği



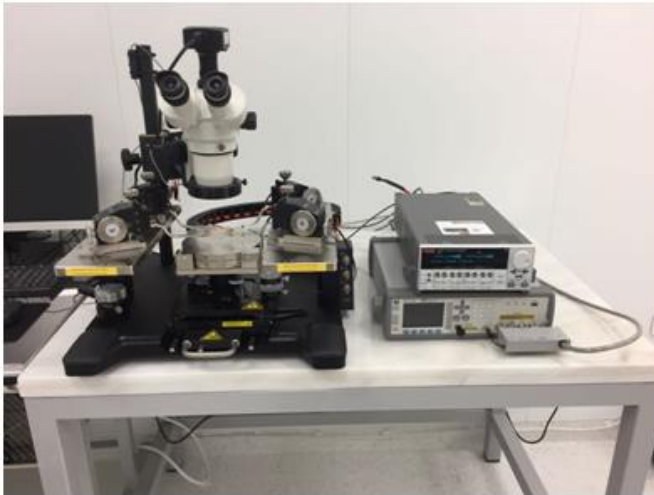
Şekil 4.10. TFR kaplaması sonrası bölgelere göre ince film kalınlık grafiği



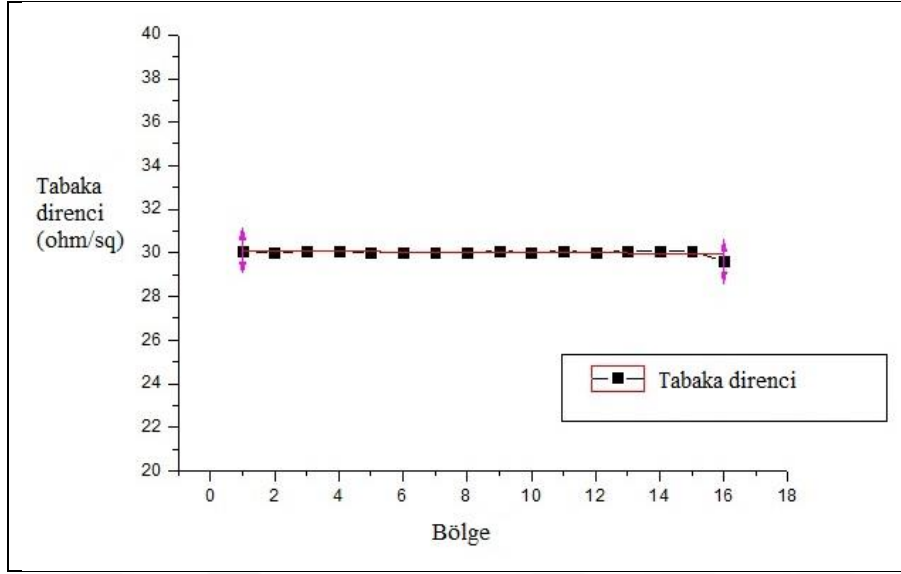
Şekil 4.11. TFR kaplaması sonrası yonganın ince film kalınlık dağılımı

4.8.2. TFR kaplama işlemi sonrası elektronik ölçümler

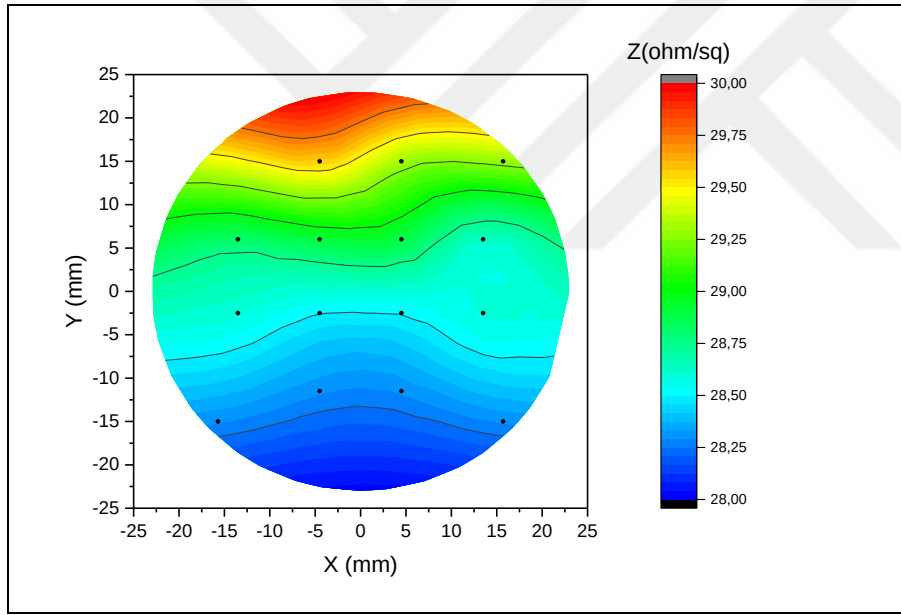
Kaplama adımı sonrası ölçüm desenlerinden, resim 4.14’de görülen 4 nokta prob düzeneği kullanılarak örnek yüzeyindeki tabaka direnci (ohm/sq) ölçümleri alınmıştır. Dört nokta methodu kullanılarak yapılan bu ölçüm belirli akım değeri arasında kaydedilen ölçüm sonuçları 30 ohm/sq’lik değerler yapılan kaplama işlemleri ile birlikte sağlanmıştır ve tekrarlanabilirliği kontrol edilmiştir. Şekil 4.12 veşeki 4.13’deki ölçüm sonuçları aynı işlem parametreleri ile tamamlanan kaplamaların istenilen tabaka direnci değerine ulaştığını ve tekrarlanabilirlik testlerinden de başarıyla geçtiğini göstermiştir.



Resim 4.14. Dört nokta prob sistemi



Şekil 4.12. TFR kaplaması sonrası tabaka direnci grafiği



Şekil 4.13. TFR kaplaması sonrası tabaka direnci dağılımı



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

MMIC yapılarında pasif devre elemanı olarak görev alan rezistör yapısı için öncelikle malzeme araştırması yapılmıştır. Bu araştırmada TaN malzemesi, mekanik ve elektriksel özelliklerinin avantajlarından dolayı tercih edilmiştir. Optik litografi işlemi sonrası TaN malzemesi kullanarak homojen bir film büyütmek için RF magnetron saçtırma sistemi PVD grubu kaplama yöntemlerinde istelere en yakın cevabı veren teknik olarak seçilmiştir. Büyütülen ince filmlerin hem boyutsal anlamda yüzey profilometresi cihazıyla film kalınlığı hem de elektriksel anlamda 4 nokta prob tekniği ile tabaka direnci ölçümleri tamamlanmıştır. Kaplama işlemlerinin geliştirme çalışmalarına paralel şekilde en uygun reçete seçilerek TFR'lar üretilmiştir.

TFR üretimi ve karakterizasyonu konusu ileride rezistör sıcaklık katsayısı (TCR) ve ömür testlerini yapılması planlanmıştır. TCR, bir direnci karakterize etmek için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. TCR, rezistördeki değişikliği ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tanımlar. TCR'yi ifade etmenin yaygın yolu ppm / K cinsindendir ve bu, Kelvin başına milyon başına parça demektir. Herhangi bir sıcaklıktaki bir iletkenin direnci, sıcaklığın, rezistör sıcaklık katsayısının, standart bir sıcaklığa direncinin ve çalışma sıcaklığının bir bilgisinden hesaplanabilir.



KAYNAKLAR

1. Bardeen, J. and Walter H. B. (1948). The transistor, a semi-conductor triode. *Physical Review*, 74(2) 230.
2. Mimura, T. (2009). *Development of High Electron Mobility Transistor*, Fujitsu Laboratories Limited, Kanagawa, Japan 243-0197.
3. Morkoç, H. (2009). *Handbook of nitride semiconductors and devices*, Materials Properties, Physics and Growth. New York, John Wiley & Sons, 31-43.
4. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. and Toyoda, Y. (1986). *Metal Organic Vapor Phase Epitaxial Growth of a High Quality GaN Film Using an AlN Buffer Layer*, *Applied Physics Letters*, 48 (5), 353-355.
5. Khan, J., Hoven, J., Kuznia, and D. Olson, *High electron mobility GaN/AlGaIn heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition*, *Applied Physics Letters*, 58 (21), 2408–2410, 1991.
6. Clive P. and Izzat D. (2016) *Microwave Active Circuit Analysis and Design*, Pages 395-437.
7. Artech house microwave library, (1989). *Monolithic microwave integrated circuits* Chapter 11 pg 314
8. Mutlu, T. (2010). *Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs Yapılı P-N Eklem Diyodun Tavlama Sıcaklığına göre Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir.
9. Wilson, J. and Hawkes, J. F. B. (2000). *Optoelektronik*, (çev. Okur, İ.). Adapazarı: Değişim Yayınları, 20-45.
10. Cardona, M. and Yu, P.Y. (2010). *Fundamentals of Semiconductors Physics and Materials Properties*. (Dördüncü Baskı). Berlin: Springer-Verlag, 230-270.
11. Xiao, H. (2001). *Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology*. Bellingham WA: SPIE Press, 78-130.
12. Askeland, D. R. (1998). *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri* (Çev. M. Erdoğan). İstanbul: Nobel Yayın Dağıtım. (Eserin orijinali 1994'de yayımlandı), 55-59
13. Johnson, C., Parsons, B., And, Crew, C. (1932) *Nitrogen Compounds of Gallium*, *J.Phys. Chem.*, 36 (10): 2561.
14. Davies, J. H. (1998). *The Physics of low-dimensional semiconductors*, Cambridge University Press, Cambridge, 80-84.
15. Ibbetson, J.P. (2000). *Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors*. *Applied Physics Letters*, 77, 250-252.

16. Malik, A. M. (2003). *Technology and Physics of Gate Recessed GaN/AlGaIn FETs*, Yüksek Lisans Tezi, Stuttgart Üniversitesi Microstructures Lab. 4th Physics Institute: Germany. 18-26.
17. Edward C. and Pucel A. (2002). *Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits* Niehenke, Fellow, IEEE.
18. The Foundations of Vacuum Coating Technology, (2018). *Physical Sputtering and Sputter Deposition*, Chapter 4, Pages 87-149
19. Sarkar, J. (2013). *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*, William Andrew, New York 608.
20. Lee Y. and Suh D. (1998). *Thin Solid Film*, 320, 141
21. Riekkinen, T. and Suni, J.K. Kivilahti. (2002) *Microelectron, Eng.* 64 (2002) 289.
22. Tsai, M. and Sun, J. (1996). *Applied Physics*, 79, 6932.
23. Kim, K. and Cha, B. (2004). *Deposition of tantalum nitride thin films by D.C. magnetron sputtering*, *Thin Solid Films*, 475, 202-207.
24. Forsberg, U. and Ivanov, G. (2007). *Growth*, 300.
25. Wang, X. and Wang, C. (2005). *Information Sciences*, Science in China, Ser.F 48 (6), 808.
26. Darling, R. (2017). *Microfabrication*, Photolithography Source, lecture notes on photolithography.
27. Yao N. and Lin Z. (2005). *Electron Beam Lithography*, Handbook of Microscopy for Nanotechnology, (pp.287-321).
28. Cansever, N. (2011). *Manyetik Alanda Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
29. Abbas, T. and Slewa L. (2014). *Transmission line method (TLM) measurement of (metal/ZnS) contact resistance*, Department of physics, College of Science, Salahaddin University.
30. Rowe, M. (2012). *Resistivity is the key to measuring electrical resistance*, EDN, May 21.
31. Ford, M. and Christman, A. (2019). *Electrical Conductivity and Resistivity*, National Science Foundation, Chemistry Libretext.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SÖNMEZ, Kemal Berk
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 13.12.1989, Gaziantep
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0(555) 849 59 19
 e-mail : kemalberksonmez@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ İleri Teknolojiler	Devam ediyor
Lisans	Ankara Üniversitesi/ Fizik Mühendisliği	2015
Lise	Aliğa Alp Oğuz Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	Aselsan Bilkent Mikro Nano A.Ş.	Üretim Mühendisi
2015-2017	Nanoteknoloji Arşaktırma Merkezi	Arge Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Almanca

Yayınlar

Sönmez K.B., Çalışkan M.D., Lişesivdin S.B., Özbay E. (2017, 29 Eylül). “RF Magnetron Sputter Sisteminde TaN Hedef Kullanarak Resistor Yapıların Üretilmesi”, 19. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Koç Üniversitesi, İstanbul Türkiye

Hobiler

Şiir, Basketbol, Ebru



GAZİ GELECEKTİR..