

**GaN TABANLI GÜÇ AYGITLARI İÇİN PASİVASYON
TABAKASI GELİŞTİRİLMESİ**

**PASSIVATION LAYER DEVELOPMENT FOR GaN BASED
POWER DEVICES**

GÜLŞAH ÇELİK

Prof. Dr. AKIN BACIOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

GaN TABANLI GÜÇ AYGITLARI İÇİN PASİVASYON TABAKASI GELİŞTİRİLMESİ

GÜLŞAH ÇELİK

YÜKSEK LİSANS, NANOTEKNOLOJİ VE NANOTİP ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. AKIN BACIOĞLU

Haziran 2022, 86 sayfa

Güç elektroniğinde kullanılan galyum nitür (GaN) transistörler için farklı pasivasyon tabakaları üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Yüksek kırılma gerilimine sahip aygıtlarda kullanılan pasivasyon malzemesinin dielektrik özellikleri hem kırılma gerilimini hem de aygıt verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple aygıt mimarisinin yanı sıra kullanılan pasivasyon malzemesinin yüksek gerilimlere dayanımı oldukça önemlidir. Bu kapsamda pasivasyon malzemesi olarak silisyum nitür ve silisyum oksit ince filmler, plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD) tekniği ile farklı hazırlama koşullarında büyütülmüştür. Kaplanan dielektrik ince filmler ile metal-yalıtkan-metal yapısı oluşturularak, kapasitans-gerilim ölçümleri ile dielektrik sabiti, elipsometri ölçümleri ile kırılma indisi ve akım-gerilim ölçümleri ile de kırılma gerilimleri belirlenmiştir. Böylelikle plazma koşulları değiştirilerek büyütülen malzemelerin optik ve elektriksel özelliklerinin ne yönde değiştiği ve bu değişimin kırılma gerilimine etkisinin ne olduğu incelenmiştir. Üretilen ince filmler arasından en iyi dielektrik dayanıma sahip olanlar seçilerek GaN transistör üretiminde pasivasyon malzemesi olarak kullanılmış ve aygıtın elektriksel performansına etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GaN, PECVD, Pasivasyon, Transistör, Dielektrik, Kırılma Gerilimi, p-GaN Kapı.

ABSTRACT

PASSIVATION LAYER DEVELOPMENT FOR GaN BASED POWER DEVICES

GÜLŞAH ÇELİK

Master of Science, Department of Nanotechnology and Nanomedicine

Supervisor: Prof. Dr. AKIN BACIOĞLU

June 2022, 86 pages

In this study, various passivation layers are developed and characterized for gallium nitride (GaN) transistors used in power electronics applications. Dielectric properties of the passivation material on high breakdown voltage devices directly affect both the breakdown voltage and efficiency. That's why, the high voltage strength of the passivation material used has a crucial importance besides the device structure. Silicon nitride and silicon oxide passivation layers were grown with different deposition conditions by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) technique. After forming metal-insulator-metal structure with the deposited dielectric thin films, refractive index, dielectric constant, and breakdown voltages were determined, by using ellipsometry, capacitance-voltage and current-voltage measurements, respectively. Thus, the effect of plasma parameters on the optical and electrical properties of the dielectric materials was investigated. The best dielectric strength materials achieved were applied on GaN transistors as passivation layers. And the effect of the passivation layer on the electrical performance of the device was investigated.

Keywords: GaN, PECVD, Passivation, Transistor, Dielectric, Breakdown Voltage, p-GaN Gate.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının oluşması için ve lisans yıllarımdan bu yana her anlamda bana elinden gelen desteği ve yardımı sunan değerli hocam ve danışmanım sayın Prof. Dr. Akın Bacioğlu'na,

Çalışma kapsamında kullandığım tüm fiziki olanakları sağlayan Bilkent Üniversitesi NANOTAM direktörü sayın Prof. Dr. Ekmel Özbay'a,

Mikrofabrikasyon üretim ve karakterizasyon süreçlerinde desteğini esirgemeyen Orhun Şentürk'e,

Bu süreçte hep yanımda olan başta ekip müdürüm Dr. M. Cihan Çakır ve tüm ekip arkadaşlarım Cem Alibeyoğlu, Levent Özkarayel, Tolga Semizoğlu, Hakan Yakupoğlu'na

Hem bu tez kapsamında, iş hayatımda bana yaptığı tecrübe aktarımlarıyla hem kariyerime hem hayatıma büyük katkıları bulunan Kübra Elif Asan'a,

Bu günlere gelmemi sağlayan sevgili aileme,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ETİK	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1 GaN Özellikleri.....	5
2.2 GaN ile Alttaş Arasındaki Örgü Uyumu	8
2.3 AlGaN/GaN YEMT'ler	10
2.4 Normalde Kapalı AlGaN/GaN YEMT'ler	12
2.4.1 Flor Ekimi.....	13
2.4.2 Kapı Girinti Aşındırma	14
2.4.3 p-GaN Kapı	14
2.5 p-GaN/AlGaN/GaN Aygıtlarında Pasivasyon Tabakasının Önemi	16
2.6 Dielektrik Filmlerin Elektriksel ve Optik Özellikleri.....	21
2.7 Dielektrik Filmlerin İletim Mekanizması	23
2.7.1 Elektrot Limitli İletim Mekanizması	24
2.7.2 Yığın Limitli İletim Mekanizması	26
2.8 p-GaN/AlGaN/GaN YEMT Aygıtların Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri	27
2.8.1 Foto Litografi.....	28
2.8.2 Kuru Aşındırma	30

2.8.3 Dielektrik İnce Film Biriktirme	32
2.8.4 Elektron Demeti ile Buhar Biriktirme	33
2.8.5 Bağlantı İstasyonu	36
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
3.1. Geliştirilen Dielektrik İnce Filmlerin Optik ve Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi	39
3.1.1 Metal-Yalıtkan-Metal Yapıların Üretilmesi	39
3.2. Gaz Akış Hızı Oranları Farklı Reçeteler ile Dielektrik İnce Film Büyütme	42
3.2.1. İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Karakterize Edilmesi	42
3.3.1 İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Karakterize Edilmesi	44
3.4 p-GaN Kapı Yapısına Sahip Normalde Kapalı GaN Transistörlerinin Üretimi	45
3.4.1 Örneklerin Temizlenmesi	46
3.4.2 p-GaN Metalizasyonu	46
3.4.3 p-GaN Aşındırma	48
3.4.4. Omik Kontak Metalizasyonu	50
3.4.5 Mesa Adalarının Oluşturulması	51
3.4.6 Hızlı Tavlama Adımı	52
3.4.7 Dielektrik İnce Film Büyütme	53
3.4.8 Pasivasyon Açıklığı Aşındırması	54
3.4.9 Kapı Alan Levhası Metalizasyonu	54
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	57
4.1 SiN _x ve SiO _x Filmlerin Karakterizasyonu	57
4.1.1 Elipsometre Ölçümleri	57
4.1.2 Dielektrik Sabiti ve Kırılma Gerilimi Hesaplama	58
4.1.3 Gaz Akış Hızı Oranları Farklı Filmlerin Değerlendirilmesi	59
4.1.4 RF Gücü Farklı Filmlerin Değerlendirilmesi	66
4.3 Normalde Kapalı Transistörlerin I-V Ölçümleri	73

4.3.1 Transfer Karakteristiği.....	73
4.3.2 ıkış Karakteristiği.....	75
4.3.3 Kırılma Gerilimi	76
5. SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŐ.....	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	GaN özelliklerinin Si ve SiC ile karşılaştırılması [24]	6
Şekil 2.2	GaN wurtzite birim hücresi [25].....	7
Şekil 2.3	Doğal polarizasyon alanı ve GaN, AlGaN tabaka yüklerinin oluşması [23]...	7
Şekil 2.4	AlGaN/GaN hetero ekleminde doğal (P_{SP}) ve piezoelektrik polarizasyon (P_{PE}) alanları ve yük yoğunlukları [23]	8
Şekil 2.5	GaN ile Si (a), Safir (b) ve SiC (c) örgü uyumu [30]	9
Şekil 2.6	AlGaN ve GaN katmanlarının (a) birleşimi ve elektron transferi sonrası (b) termal denge bant diyagramı şematiği [36]	10
Şekil 2.7	AlGaN/GaN YEMT kesit alan görüntüsü	11
Şekil 2.8	Farklı kapı metalleri bulunan AlGaN/GaN YEMT için V_{th} grafiği [39].....	12
Şekil 2.9	(a) Normalde açık AlGaN/GaN ve (b) flor ekimi yapılmış normalde kapalı AlGaN/GaN yapısı [45].....	13
Şekil 2.10	Kapı girinti aşındırma AlGaN/GaN YEMT	14
Şekil 2.11	p-GaN kapı yapısına sahip AlGaN/GaN YEMT	15
Şekil 2.12	(a) Normalde açık operasyonda AlGaN/GaN ve (b) normalde kapalı operasyonda p-GaN/AlGaN/GaN bant yapısı [44].....	15
Şekil 2.13	Üretilen transistörün normalde açık ta da kapalı olmasının AlGaN tabakasının kalınlığı ve Al konsantrasyonuna bağlılığı [44]	16
Şekil 2.14	AlGaN/GaN YEMT yapısı ve sanal kapı etkisinin gösterimi [20].....	17
Şekil 2.15	Yüzey pasivasyonunun sanal kapı davranışı etkisini azaltması [20].....	18
Şekil 2.16	Pasivasyon tabakasının aygıtın elektrik alan dağılımına etkisi	19
Şekil 2.17	Farklı malzemeler kullanılarak büyütülmüş pasivasyon tabakasına sahip p-GaN kapılı AlGaN/GaN YEMT'lerin kırılma gerilimlerinin simülasyon sonuçları [52].....	20
Şekil 2.18	R_{on} ve Kırılma geriliminin kapı akaç arasındaki mesafe ile değişimi [53] ...	21
Şekil 2.19	Dielektrik filmlerde iletim mekanizmasının sınıflandırılması [54, 62].....	24
Şekil 2.20	Metal-Yalıtkan-Dielektrik bant yapısı ve termiyonik (Schottky) emisyon şematiği [62].....	25

Şekil 2.21	Metal-Yalıtkan-Dielektrik bant yapısı ve F-N tünelleme şematiği [62]	25
Şekil 2.22	MIS yapı için termiyonik, termiyonik-alan ve alan emisyonu şematik gösterimi [62]	26
Şekil 2.23	P-F emisyon mekanizması [62]	27
Şekil 2.24	Fotolitografi ile örnek pozlama [64].....	28
Şekil 2.25	Pozitif ve negatif fotorezistin UV ışığa tepkisi	29
Şekil 2.26	Tez kapsamında kullanılan maske hizalama cihazı.....	30
Şekil 2.27	ICP RIE şematik çizimi [66]	31
Şekil 2.28	PECVD tekniği ile ince film biriktirme şematiği [74]	32
Şekil 2.29	Elektron demeti ile buhar biriktirme tekniği [76].....	33
Şekil 2.30	(a) Tavlama öncesi ve (b) tavlama sonrası metal-yarıiletken bant yapısı [79].....	35
Şekil 2.31	Schottky metal- yarıiletken bant yapısı [82].....	36
Şekil 2.32	Bağlantı istasyonunun bir görüntüsü	36
Şekil 2.33	Bağlantı istasyonunun optik mikroskop görüntüsü	38
Şekil 3.1	(a) MIM yapının ilk fotoligrafi deseni ve (b) metalizasyon sonrası örneğin kesit şekli	40
Şekil 3.2	(a) MIM yapının ikinci fotolitografi deseni ve (b) aşındırma sonrası örneğin kesit şekli	40
Şekil 3.3	(a) MIM yapının üçüncü fotolitografi deseni ve metalizasyon sonrası (b) örneğin kesit şekli.....	41
Şekil 3.4	MIM aygıt optik mikroskop görüntüsü	41
Şekil 3.5	PECVD Tekniği ile SiN _x kaplanmış Silisyum altaşın sistemden çıkartılması.....	43
Şekil 3.6	Temizlenen altaşların durulanma aşaması.....	46
Şekil 3.7	Elektron Demeti ile Fiziksel Buhar Biriktirme Sisteminin bir görüntüsü	47
Şekil 3.8	p-GaN metalizasyonu sonrası örneğin (a) optik mikroskop görüntüsü ve (b) kesit görüntüsü.....	48
Şekil 3.9	p-GaN/AlGaN seçici aşındırma SEM kesit görüntüsü.....	49
Şekil 3.10	Kuru aşındırma işleminin gerçekleştirildiği ICP RIE sisteminin bir görüntüsü.....	49
Şekil 3.11	p-GaN aşındırma sonrası örnek yüzeyinin (a) optik mikroskop ve (b) kesit görüntüsü.....	50

Şekil 3.12	Omik metalizasyonu sonrası örnek yüzeyinin (a) optik mikroskop ve (b) kesit görüntüsü	51
Şekil 3.13	Mesa aşındırma sonrası örnek yüzeyinin optik mikroskop (a) ve kesit görüntüsü (b)	52
Şekil 3.14	Transistörün hızlı tavlama sonrası optik mikroskop görüntüsü.....	52
Şekil 3.15	Dielektrik ince filmlerin büyütüldüğü PECVD sisteminin bir görüntüsü	53
Şekil 3.16	Dielektrik ince film büyütme sonrası örneğin kesit çizimi	54
Şekil 3.17	Pasivasyon açıklığı aşındırması sonrası örneğin kesit çizimi.....	54
Şekil 3.18	Alan Levhası Metalizasyonu sonrası örneğin (a) optik mikroskop ve (b) kesit görüntüsü	55
Şekil 4.1	Elipsometre ile kırma indisi ve ince film ölçme düzeneği	57
Şekil 4.2	Paralel Levhalı Kapasitör	58
Şekil 4.3	(a) SiN _x ve (b) SiO _x ince filmlerin kırma indisinin gaz oranı ile değişimi....	60
Şekil 4.4	(a) SiN _x ve (b) SiO _x gaz oranı ile dielektrik sabitinin değişimi.....	61
Şekil 4.5	(a) SiN _x ve (b) SiO _x ince filmlerin IV grafikleri	63
Şekil 4.6	Gaz oranlarına karşı kırılma gerilimi değerleri	65
Şekil 4.7	PECVD tekniği ile üretilmiş (a) SiN _x ve (b) SiO _x ince filmlerin kırma indisinin RF gücü ile değişimi.....	68
Şekil 4.8	PECVD tekniği ile üretilmiş (a) SiN _x ve (b) SiO _x RF gücü ile dielektrik sabitinin değişimi.....	69
Şekil 4.9	(a) SiN _x ve (b) SiO _x ince filmlerin IV grafikleri	70
Şekil 4.10	PECVD tekniği ile üretilmiş (a) SiN _x ve (b) SiO _x filmlerin RF gücüne karşı kırılma gerilimi değerleri	72
Şekil 4.11	(a) SiN _x , (b) SiO _x ve filmlere sahip ve (c) pasivasyon bulunmayan transistörlerin V _g -I _d grafikleri.....	74
Şekil 4.12	(a) T ₁ , (b) T ₂ ve (c) T ₃ transistörlerinin IV grafikleri	75
Şekil 4.13	(a) T ₁ , (b) T ₂ ve (c) T ₃ için kırılma gerilimi grafikleri.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	GaN, Si ve SiC yapıların kritik kırılma elektrik alanlarının karşılaştırılması [3].....	2
Çizelge 2.1	GaN, Si ve 4H-SiC elektriksel ve fiziksel özellikleri [1]	5
Çizelge 2.2	GaN epitaksi için farklı alttaşların özellikleri [30-32].....	9
Çizelge 2.3	Proses parametrelerinin SiN _x ve SiO _x yapısına etkisi [54]	22
Çizelge 3.1	Büyütülen Filmlerin Hazırlama Parametreleri.....	44
Çizelge 3.2	RF gücü değiştirilerek büyütülen filmlerin hazırlama parametreleri.....	45
Çizelge 3.3	Büyütülen ince filmlerin hazırlama parametreleri	53
Çizelge 4.1	İnce filmlerin kaplama hızı ve kırma indisi değerleri.....	59
Çizelge 4.2	Filmlerin kırılma gerilimleri	64
Çizelge 4.3	İnce filmlerin kaplama hızı ve kırma indisi değerleri.....	67
Çizelge 4.4	Filmlerin kırılma gerilimleri	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

n	Kırma indisi
ϵ_0	Boş uzayın dielektrik sabiti
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
n_s	Taşıyıcı yoğunluğu
E_k	Kritik alan
μ	Mobilite
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_c	İletim bandı enerji seviyesi
E_v	Değerlik bandı enerji seviyesi
P_{SP}	Doğal polarizasyon
P_{PE}	Piezoelektrik polarizasyon
Φ_B	Bariyer yüksekliği
X	Elektron ilgisi
V_{th}	Eşik gerilimi
V_k	Kırılma gerilimi
V_g	Kapı gerilimi
V_{gs}	Kapı kaynak arası gerilim
L_{gd}	Kapı akaç arası mesafe
I_d	Akaç akımı
I_{dss}	Maksimum doyum akaç akımı

Kısaltmalar

C-V	Kapasitans-Gerilim
I-V	Akım-Gerilim
PECVD	Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme
p-GaN	p-tipi Galyum Nitrür
YEMT	Yüksek Elektron Mobilite Transistör
2BEG	2 Boyutlu Elektron Gazı
UV	Mor Ötesi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
RF	Radyo Frekansı

1. GİRİŞ

Dünyada enerjinin %40'ı elektrik enerjisinden sağlanmaktadır. Bu oranın 2040 yılında %60'a çıkması beklenmektedir [1]. Enerji ve elektroniğin birleşimi ile ulaşım araçları, ışık, iletişim araçları gibi birçok somut çıktı oluşmaktadır. Bu gelişmeler için enerji dönüşümü ve bilgiye sahip olmak gerekir. Enerji her insan için kritik bir ihtiyaçtır. Güç elektroniği elektrik enerjisinin akışını kontrol ederek ve güç akışını daha yüksek seviyelere çekerek enerji üretimi ve son kullanıcı arasında kilit rolü üstlenmektedir. Doğrultucu devreler bu tip devrelere en yaygın örnektir. Güç elektroniği, eviriciler (DC-AC dönüştürücü ya da invertör) ve çeviricilerde (DC-DC dönüştürücü ya da konvertör) yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç elektroniği, enerji depolama için kullanılan manyetik aygıt uygulamaları, günümüz enerji sistemleri ve alternatif enerji kaynaklarının merkezi bir bileşenidir. Güç elektroniği uygulamaları hızla artmaktadır. Bilgisayar, telefon, kişisel veri servisleri, elektrikli arabalar, güneş panelleri, rüzgâr jeneratörleri gibi birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Elektrikli araçlar, bilgisayarlar, LED ışıklandırma gibi teknolojik ürünler güç elektroniği olmadan gelişme gösteremez [1, 2]. Güç elektroniğinde devre elemanı olarak yarıiletken teknolojisinden yararlanılmaktadır. Bu teknoloji ilk olarak silisyum ile başlamıştır. Fakat teknolojinin ilerlemesi ile silisyum yetersiz kalmıştır. Bu noktada devreye geniş bant aralıklı yarıiletkenler girmiştir [3, 4].

Geniş bant aralıklı malzemeler yüksek frekans, yüksek güç ve yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun özelliklere sahiptirler. Yarıiletken bant aralığı bloklama gerilimi ve çevrim verimini oldukça etkilemektedir. GaN ve SiC son zamanlarda oldukça sık kullanılan geniş bant aralıklı malzemelerdir [5]. GaN ve AlGaIn malzemeler hetero yapı oluşumu sırasında polarizasyon sebebi ile meydana gelen 2 boyutlu elektron gazı sayesinde yüksek elektron mobilitesine sahiptirler ve herhangi bir katkılama işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır. GaN tabanlı aygıtlar ilk olarak 1990'ların başında mavi LED geliştirilmesinde kullanılmıştır. Birkaç yıl sonra yüksek frekans uygulamaları için, yüksek elektron mobilitesinin ulaşıldığı AlGaIn/GaN heteroeklem yapısındaki transistörler geliştirilmeye başlanmıştır [6]. Yüksek güç ve yüksek sıcaklık uygulamalarında Si tabanlı güç cihazları teorik limitlerine ulaşıncaya geniş bant aralıklı malzemeler bu açığı kapatmaya başlamıştır. AlGaIn/GaN YEMT'ler

yüksek kırılma dayanımı ve yüksek kanal iletimi sebebi ile anahtarlama güç transistörleri için oldukça büyük potansiyele sahiptirler [3, 5, 7].

Çizelge 1.1 GaN, Si ve SiC yapıların kritik kırılma elektrik alanlarının karşılaştırılması [3]

	Si	SiC	GaN
Kritik Elektrik Alan, E_{kritik} (10^6 V/cm)	0,3	2,2	3,3

Çizelge 1.1’de GaN ve Si ve SiC gibi diğer yarıiletkenlerin kritik elektrik alan büyüklükleri karşılaştırılmıştır. GaN’ü diğer malzemelerden ayıran en önemli özelliklerden biri kırılma gerilimi dayanımıdır. Özellikle Si ile kıyaslandığında 10 kat daha fazla gerilime dayandığı görülmektedir. Transistör açık duruma geldiğinde aygıt kayıpları kanal açık durum direnci olan R_{on} ile tanımlanır. GaN aygıtlarda transfer özellikleri sebebi ile R_{on} direnci Si aygıtlara göre 2 kat daha düşüktür. Bu sebeple GaN aygıtlar daha yüksek kırılma gerilimine ve akım seviyelerine, daha küçük boyutlarda çıkabilmektedirler. Si’den GaN gibi geniş bant aralıklı yarıiletkenlere geçilmesiyle elektrik tüketimi %25 azaltılarak tasarruf sağlanabileceği ileri sürülmüştür [2].

Transistörler normalde kapalı ve normalde açık olmak üzere iki farklı şekilde çalışırlar. Kapı terminaline herhangi bir gerilim uygulanmadığı durumda kaynak ve akaç arasında akım akıyorsa bu transistör normalde açık çalışmaktadır. Fakat bu akımın akması için kapı terminaline pozitif bir gerilim uygulamaya ihtiyaç duyuluyorsa bu transistör normalde kapalı çalışmaktadır. RF uygulamalarında normalde açık transistörler tercih edilirken güvenlik sebebi ile güç uygulamaları için normalde kapalı çalışan aygıtlar tercih edilmektedir. Katkılama olmadan standart bir AlGaIn/GaN transistör normalde açık çalışmaktadır. Bu sebep ile normalde kapalı duruma getirmek için Flor ekimi, kapı girinti ve p-GaN kapı gibi farklı teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerin hepsinin temel amacı kapı terminalinin altında bulunan elektron yoğunluğunu azaltarak normalde kapalı hale getirmektir. Bunlardan en sık kullanılan ve en güvenilir olanı p tipi GaN kapı yapısıdır. Kapı metalinin altındaki p-GaN tabakası sayesinde eşik gerilimi pozitif bir değere sahip olmaktadır [8].

Güç uygulamalarında kullanılacak GaN transistörler için maliyet ve verim açısından Si alttaşı sıkça kullanılmaktadır. GaN/Si yapıdaki transistörler 200 V- 600 V kırılma gerilimi aralığında çalışırken daha yüksek kırılma gerilimleri için GaN/SiC ya da SiC yapılar tercih edilmektedir. Orta segment (200 V- 600 V) transistörler, güç kaynaklarında, ses yükselticilerinde, elektrikli araçlarda, rüzgâr ve güç dönüştürücülerinde kullanılmaktadır [1, 8].

Yatay çalışan AlGaIn/GaN aygıtlar için aygıt mimarisi oldukça önemlidir. Aygıtın akım yoğunluğu, kırılma gerilimi gibi önemli parametrelerini aygıt yapısı doğrudan etkilemektedir. Yüzey durumları, kapı ve akaç terminali arasındaki mesafe gibi durumlar akım yoğunluğu ve kırılma gerilimini doğrudan etkiler. Yüzey durumlarının etkisini azaltmak ve yüzey kaçaklarını minimize etmek için en etkili yöntemlerden biri yüzey pasivasyonudur [9-11].

Dielektrik ince filmler birçok farklı teknolojik uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Si, CdTe güneş gözelerinde SiN_x, SiO_x, AlO_x gibi ince filmler yüzey pasivasyonu ve yansıtma yüzey kaplamaları için sıklıkla kullanılmaktadır. Foto diyotlarda ve foto detektörlerde verimi arttırmak için yüzey durum yoğunluğunu azaltmak ve yansıtma yüzey olarak kullanılmaktadır [12-16]. GaN, GaAs gibi transistörlerde yüzey pasivasyonu için kullanılmaktadır [9, 17, 18]. Transistör üretiminde yüzey pasivasyonu ile aygıtın yüzey durum yoğunluğu azalır, elektrik alan dağılımı homojenize edilir. Böylelikle kırılma gerilimi ve akım yoğunluğunda iyileşme sağlanır [19, 20]. GaN aygıtlar için SiN_x ve SiO_x gibi ince filmler pasivasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu filmlerin aygıt iyileşmesine katkı sağlaması için yüksek kalitede olması gerekmektedir. Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) tekniği ile oldukça yüksek kaliteli filmler büyütülebilmektedir. Bunun için plazma parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. SiN_x ve SiO_x yapılar için kırılma indisi, dielektrik sabiti gibi özellikler incelenerek, stokiometrik yapıları Si₃N₄ ve SiO₂ filmler ile karşılaştırılabilir. Kırılma gerilimi ölçülerek kırılma dayanımları hesaplanabilir. Yine de AlGaIn yüzeyine uygulanması sırasında farklı durumlar meydana gelmektedir. İki yüzey arasındaki stres, yüzey durumlarının pasive edilmesi, pasivasyon sırasında meydana gelebilecek yüzey hasarı ve AlGaIn/GaN yapısının elektrik alan dağılımı

gibi durumlar ince filmin kalitesi kadar önemlidir. Bu sebeple pasivasyon tabakasına karar vermek için birçok parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında normalde kapalı çalışan p-GaN kapı yapısına sahip AlGaIn/GaN/Si YEMT'ler için pasivasyon tabakası geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda fotolitografi, ICP-RIE, PECVD, elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme teknikleri kullanılarak aygıt üretimi ve elipsometre, bağlantı istasyonu ile de bu aygıtların optik ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. İlk olarak farklı gaz akış hızı oranlarına ardından farklı RF gücüne sahip reçeteler ile SiN_x ve SiO_x filmler büyütülmüştür. Tüm filmlerin optik ve elektriksel özellikleri incelenerek en iyi ince filmler seçilmiştir. Bu filmler YEMT üretimi için ayrı ayrı pasivasyon tabakası olarak kullanılmıştır. Pasivasyon tabakasının aygıtların elektriksel performansına etkisini görmek için hiçbir pasivasyon tabakası bulunmayan AlGaIn/GaN YEMT aygıt ile kırılma gerilimleri ve akım yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Literatürde AlGaIn/GaN YEMT RF aygıtlar için pasivasyon çalışmaları yer alıyor olsa da p-GaN kapı yapısına sahip AlGaIn/GaN güç transistörleri için yüksek gerilimlere dayanıklı pasivasyon çalışmaları kapsamlı bir şekilde yer almamaktadır. Bu tez çalışması sayesinde p-GaN kapı yapısına sahip güç transistörleri için pasivasyon tabakasının önemi, pasivasyon tabakası ile akım yoğunluğu ve kırılma geriliminin değişimi kapsamlı olarak incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 GaN Özellikleri

Galyum Nitrür (GaN) kararlı kristal yapısı hegzagonal wurtzite olan geniş bant aralığına sahip yarıiletkenlerdir. Çizelge 2.1’de GaN ile Silisyum ve Silisyum Karbür (SiC) yarıiletkenlerin fiziksel ve elektriksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Si 4H-SiC ve GaN, ’ün 300 K’de verilen bazı elektriksel ve fiziksel özellikleri [1]

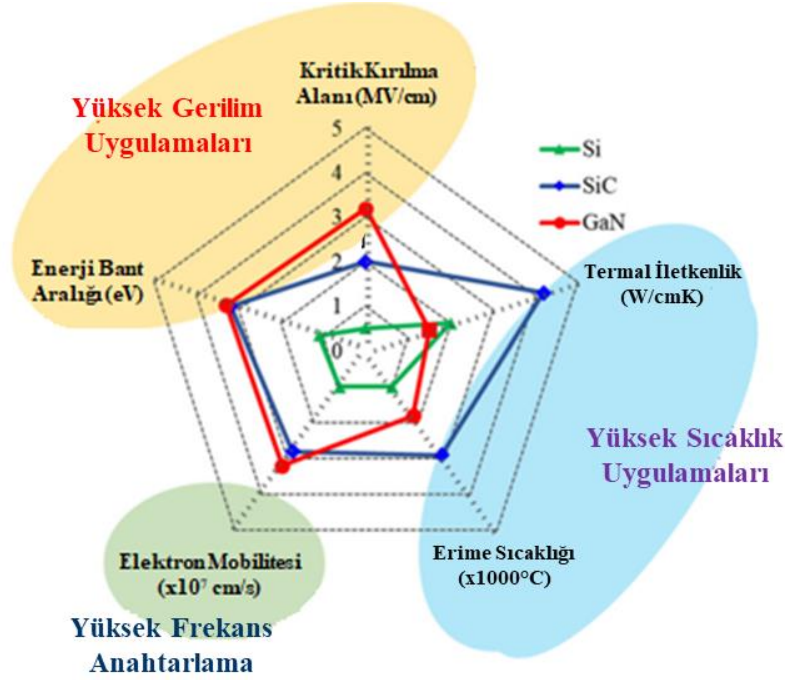
Özellik	Si	4H-SiC	GaN
Bant Aralığı (eV)	1,12	3,2	3,4
Bağıl Dielektrik Sabiti	11,8	9,7	9,5
Elektron Mobilitesi (cm ² /Vs)	1350	800	1300* (*2BEG)
Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻³)	~ 10 ¹⁰	~ 10 ⁻⁷	~ 10 ⁻¹⁰
Termal İletkenlik (W/cm K)	1,5	2,3-4,9	2,1

GaN ’ün bant genişliğinin ve kritik kırılma alanının yüksek olması yüksek güç uygulamalarına uygun olduğunu gösterir. GaN, termal iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılabilir. AlGaIn/GaN gibi hetero yapılarda polarizasyon farkı sebebiyle oluşan 2 boyutlu elektron gazı (2BEG) mobilitiyi artırarak GaN aygıtları yüksek frekans ve yüksek güç uygulamaları için uygun hale getirmektedir [1, 21, 22].

Aktif bir aygıtta iletim kaybını tanımlayan bir parametre olan R_{on} , güç kapasitesi ve verim için önemli bir parametredir ve Eşitlik 2.1’de tanımlanmıştır.

$$R_{on} = 4V_k^2 / \epsilon_r \mu_n E_k^3 \quad (2.1)$$

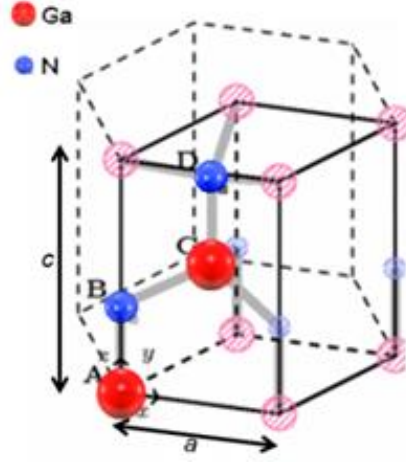
Burada V_k kırılma gerilimi, ϵ_r bağıl dielektrik sabiti, μ elektron mobilitesi, E_k kritik kırılma alanıdır. Bu eşitliğe göre GaN malzemenin R_{on} direnci SiC'e göre 5 kat daha düşük hesaplanmaktadır [23]. GaN'ün özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması Şekil 2.1'de şematize edilmiştir.



Şekil 2.1 GaN özelliklerinin Si ve SiC ile karşılaştırılması [24]

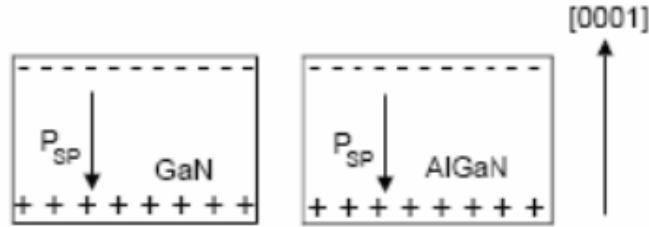
Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi GaN özellikleri bakımından yüksek gerilim ve yüksek frekanslı anahtarlama için uygundur.

GaN kristal yapısı olarak ise genellikle iç içe geçmiş iki hegzagonal sıkı paket alt örgüsü içeren wurtzite yapıda bulunmaktadır. Çünkü GaN oda sıcaklığında atmosfer basıncında termodinamik olarak bu yapıda dengededir. Fakat zinc-blend ve çok yüksek basınçlar altında tuz (NaCl) örgü yapısına sahip olabilmektedir. Wurtzite yapıya sahip GaN örgü yapısı Şekil 2.2'de verilmiştir [22, 25]. GaN wurtzite yapısı Ga-yüz ve N-yüz olmak üzere iki farklı polaritede olabilmektedir. Bu iki yapı farklı polariteye ve kararlılığa sahiptir.



Şekil 2.2 GaN wurtzite birim hücresi [25]

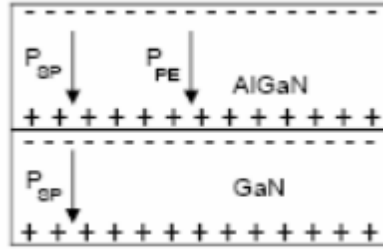
Azot 5A grubunun en küçük ve en elektronegatif elementidir. Yüksek elektronegatif özelliğe sahip azot elementi III-N malzemelerini diğer III-V malzemelerinden özel kılar. Bu güçlü iyoniklik polarizasyona sebep olmaktadır. Bu polarizasyon yönü malzemenin büyüme yönündedir ve doğal polarizasyon alanı olarak adlandırılır [26]. GaN ve AlGaN için doğal polarizasyon (P_{SP}) alanı ve bu alandan kaynaklı tabaka yükleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Doğal polarizasyon alanı ve GaN, AlGaN tabaka yüklerinin oluşması [23]

AlGaN ve GaN gibi iki malzeme ile hetero yapı oluşturulurken örgü uyumsuzluğu sebebiyle iki malzeme arasında stres meydana gelir. Bu stres kristal yapının örgü parametrelerinin değişmesi ile azaltılır. Doğal polarizasyona benzer şekilde bu yeni denge durumu yeni bir polarizasyona sebep olur ve bu polarizasyon piezoelektrik polarizasyon (P_{PE}) olarak isimlendirilir [27, 28].

Oluşan stres GaN tabakası tarafından etkisi azaltıldığı için AlGaN tabakası daha büyük bir polarizasyona sahip olur. Bu hetero yapıda oluşan polarizasyon ve 2BEG yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu elektrik alan sebebiyle ara yüzeyde oldukça yoğun pozitif yük dağılımı meydana gelir. AlGaN tabakasında oluşan donör-tipi tuzaklar sayesinde 2 boyutlu elektron gazı (2BEG) ara yüzeyde GaN bölgesinde oluşur [27-29].



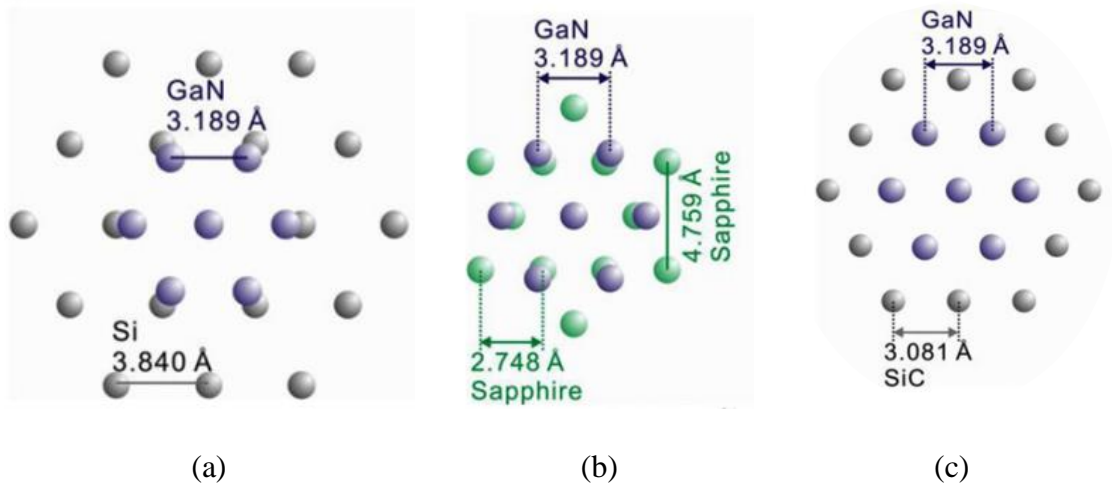
Şekil 2.4 AlGaN/GaN hetero ekleminde doğal (P_{SP}) ve piezoelektrik polarizasyon (P_{PE}) alanları ve yük yoğunlukları [23]

2.2 GaN ile Alttaş Arasındaki Örgü Uyumu

GaN epitaksiyel büyütme sırasında safir, SiC, Si gibi farklı alttaşlar kullanılmaktadır. Alttaş seçimi kullanılacak uygulamaya göre değişebilmektedir. Alttaş seçimi yapılırken en önemli faktörlerden biri GaN ile örgü uyumudur. Örgü uyumsuzluğu iki katman arasında stres ve bükülmeye sebep olarak ara yüzey tuzakları oluşturur. Bu uyumsuzluk aygıt performansını etkilemektedir [30]. GaN ve alttaş olarak kullanılan malzemelerin örgü parametreleri Çizelge 2.2'de örgü uyumu ise Şekil 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.2 GaN epitaksi için farklı alttaşların özellikleri [30-32]

	Safir	SiC	Si	GaN
Örgü Uyuşmazlığı (%)	16	3,1	-17	0
Isıl Genleşme Kat Sayısı (10^{-6} K^{-1})	7,5	4,4	2,6	5,6
Isıl İletkenlik ($\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0,25	4,9	1,6	2,3

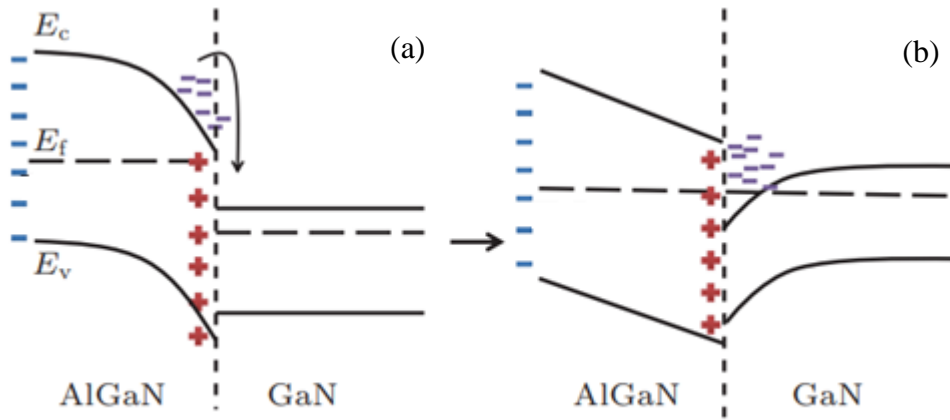


Şekil 2.5 GaN ile Si (a), Safir (b) ve SiC (c) örgü uyumu [30]

SiC iyi örgü uyumu, yüksek ısı iletkenlik gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen alttaşlardan biridir. Fakat yüksek maliyetli oluşu sebebiyle kullanılacak alana göre daha düşük maliyetli alternatifler tercih edilebilmektedir. Safir düşük maliyetli olmasına karşın düşük ısı iletkenliğe ve yüksek örgü uyuşmazlığına sahiptir. Daha çok GaN LED teknolojisinde kullanılmaktadır. Silisyum alttaş diğer malzemelere göre düşük maliyetli ve daha büyük boyutlarda üretilebiliyor olması sebebiyle tercih edilir. Özellikle orta segment (200 V- 600 V) güç aygıtları için oldukça iyi performans göstermektedir [31-35].

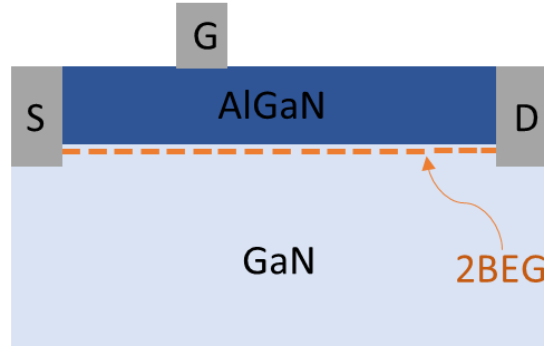
2.3 AlGa_N/Ga_N YEMT'ler

Elektronik sinyallerin anahtarlanması ya da yükseltilmesi transistörlerin ana amacıdır. En yaygın kullanılan alan etkili transistörler akaç, kaynak ve kapı olmak üzere üç terminalden oluşmaktadır. Kaynaktan akaca elektron akan bir kanal bulunur. Bu kanalın akımı kapıya uygulanan gerilim ile kontrol edilmektedir. AlGa_N/Ga_N Yüksek Elektron Mobilité Transistörler (YEMT) hetero yapıdan oluşmaktadır. Bu yapıyı oluşturan katmanlardan AlGa_N, Ga_N'e göre daha yüksek bant aralığına sahiptir. AlGa_N ve Ga_N heteroekleminin bant diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 AlGa_N ve Ga_N katmanlarının (a) birleşimi ve elektron transferi sonrası (b) termal denge bant diyagramı şematığı [36]

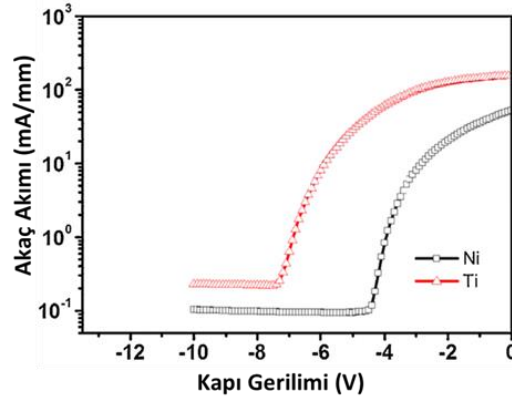
Şekil 2.6'da gösterildiği gibi bu iki katman birleştiğinde ara yüzeyde bant bükülmesi meydana gelir. Bu bant bükülmesiyle 2BEG oluşur. Daha geniş bant aralığına sahip AlGa_N katmanındaki elektronlar hetero yapının ara yüzeyine doğru hareket eder. Ara yüzeyde bant bükülmesi sebebiyle Ga_N potansiyel bariyeri meydana gelir. Ara yüzeyde bulunan 2BEG burada Ga_N potansiyel bariyeri tarafından sınırlandırılır [36, 37]. Elektron transferi, elektron ilgisine, bant genişliğine ve malzemenin iş fonksiyonuna bağlıdır. Elektron transferi Fermi seviyesi eşitlenene kadar devam eder. Fermi seviyesi eşitlendiğinde denge durumu sağlanmış olur. Ara yüzeyde bir kuantum kuyusu oluşur ve burada elektronlar sadece 2 boyutta hareket edebilir. Bu elektronlar oldukça yüksek mobilitéye sahiptirler [38]. AlGa_N/Ga_N YEMT kesit görüntüsü Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 AlGaIn/GaN YEMT kesit alan görüntüsü

Yüksek akaç (D) gerilimlerinde kapı (G) terminalinin akaç tarafındaki sınırında yüksek elektrik alan meydana gelmektedir. Bu sebeple kapı terminali akaç terminalinden oldukça uzağa konumlandırılır. Böylelikle AlGaIn/GaN ara yüzeyindeki elektrik alan dağılımı daha homojen bir hal alır ve kırılma gerilimi arttırılır. Fakat bu mesafenin artması R_{on} direncinin artmasına sebep olur [22].

YEMT aygıtlarda kapı terminali üstünde bulunan Schottky kontağa uygulanan gerilim ile akım kontrol edilmektedir. Normalde açık transistörlerde kapı gerilimi bir negatif gerilimden pozitif gerilime doğru arttırılırken bir yandan akaç akımı ölçülürse bir gerilim değerinden sonra akaç akımı hızla artmaya başlar. Bu gerilim değeri artık transistörün açık konuma geldiğini ve kanalın aktif olduğu anlamına gelir. Bu gerilim eşik gerilimi (V_{th}) olarak isimlendirilir. Normalde açık transistörler V_{th} negatif bir değere sahiptir [39-41]. Şekil 2.8’de standart bir AlGaIn/GaN aygıtın V_{th} grafiği farklı kapı metalleri için verilmiştir.



Şekil 2.8 Farklı kapı metalleri bulunan AlGaIn/GaN YEMT için V_{th} grafiği [39]

Şekil 2.8’de Ni ve Ti kapı metalleri için iki farklı grafik bulunmaktadır. Bu iki grafik arasındaki temel fark metallerin iş fonksiyonlarının farklı olmasındandır. Ni metalinin iş fonksiyonu (5,1 eV) Ti iş fonksiyonundan (4,3 eV) büyüktür. Bu sebeple V_{th} pozitif gerilime kaymaktadır.

2.4 Normalde Kapalı AlGaIn/GaN YEMT’ler

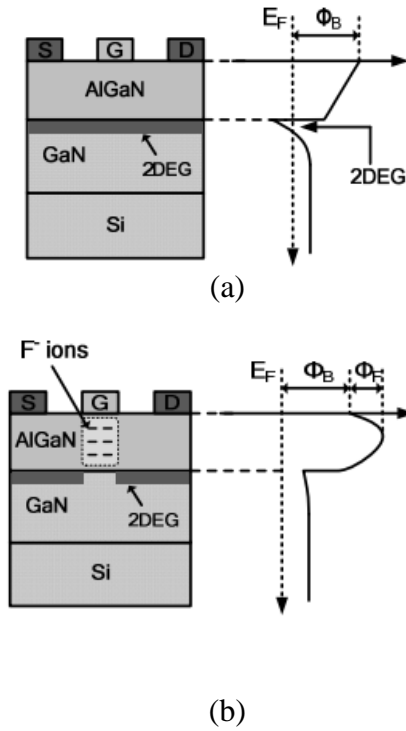
AlGaIn/GaN YEMT’ler herhangi bir katkılama yapılmadığı durumda normalde açık aygıtlardır. Fakat güç elektroniği uygulamalarında sürücü devreyi sadeleştirmek ve devre güvenliği için normalde kapalı aygıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü kapı sürücüsü arızalanıp kapı gerilimi 0 V olduğunda normalde kapalı transistör kapalı duruma geçer ve devrenin yanması engellenir [42]. Burada temel amaç kapı bölgesinin altındaki kanalı tüketmektir. Böylelikle kapı metaline bir gerilim uygulanmadığı durumda akaç ve kaynak arasında bir elektron akışı olmaz ve aygıt normalde kapalı hale gelmiş olur. Kapı gerilimi 0’dan büyük olduğunda ($V_g > 0$) taşıyıcı yoğunluğu tekrar artar ve 2BEG aktif hale gelir. Bu sebeple normalde kapalı transistörlerde $V_{th} > 0$ olması beklenir [43].

Normalde kapalı aygıt üretmek için kapı girinti, flor ekimi ve p-GaN kapı gibi farklı uygulamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Flor ekimi yönteminin düşük kaçak akım ve eşik geriliminin kontrol edilebilmesi gibi avantajları vardır fakat flor ekiminin kararsız olması ve kristal yapıya zarar verebilmesi gibi dezavantajları vardır. Kapı girinti yapısı düşük kaçak akımı ve düşük R_{on} direncine sahip aygıtlar üretilmesini sağlarken aşındırma

kaynaklı yüzey hasarları, aşındırma profilinin homojen olmaması gibi zorluklar sebebi ile güvenilirlik açısından kontrol edilmesi zordur. p-GaN kapı yöntemi ise V_{th} 'ın kontrol edilebildiği ve güvenilirlik açısından en uygun metottur [1, 44]. Fakat eşik gerilimi diğer tekniklere göre daha düşüktür ve kaçak akımları yüksek olabilmektedir. Bunun temel sebeplerinden biri, üretilirken kapı terminalinin altında kalan p-GaN tabakası hariç tüm p-GaN tabakasının aşındırılmasıdır. Bu aşındırma yüzey hasarına sebep olur. Kaçak akımların yüksek olmasının sebebi bu yüzey hasarıdır [1].

2.4.1 Flor Ekimi

Flor ekimi yöntemi normalde kapalı GaN transistörler için oldukça yaygın kullanılmaktadır. Kapı bölgesinin altına flor bazlı plazma ile flor ekimi yapılır. Böylelikle eşik gerilimi artırılmış olur. Bunun temel sebebi III-Nitür kristal yapısı ve flor elementinin yüksek elektronegatifliğidir. Flor iyonları elektronları yakalayıp sabit negatif yük haline alırlar. Bu negatif bölge 2DEG kanalı tüketir [45]. Flor ekimi yapılmış ve yapılmamış AlGaIn/GaN kesit görüntüsü ve bant yapısı Şekil 2.9'da verilmiştir.

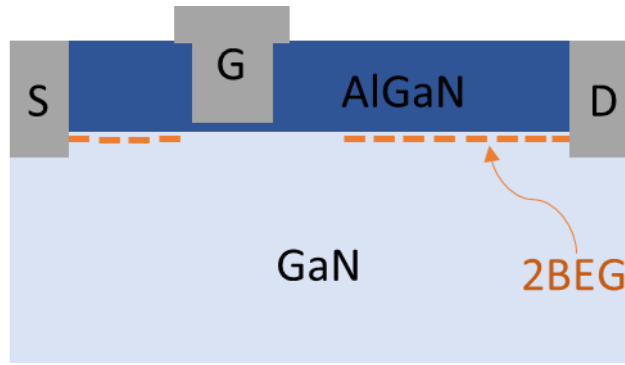


Şekil 2.9 (a) Normalde açık AlGaIn/GaN ve (b) flor ekimi yapılmış normalde kapalı AlGaIn/GaN yapısı [45]

Burada eşik gerilimindeki kayma miktarı RF plazma gücü ve plazma süresi ile kontrol edilebilmektedir. Plazma süresi arttıkça pozitif gerilime kayma da artmaktadır. RF gücü arttıkça F iyonlarının 2BEG bölgesine geçme ihtimali artacağı için kontrollü bir şekilde optimize edilmelidir [45, 46].

2.4.2 Kapı Girinti Aşındırma

Bu yöntemde kapı bölgesinin altı aşındırılarak AlGaN tabakası inceltir. Kapı bölgesinin altındaki AlGaN tabakasının incilmesiyle bu bölgedeki taşıyıcı yoğunluğu azalır ve kanal tüketilmiş olur. Bazı uygulamalarda aşındırma sonrası bu bölge dielektrik film ile kaplanır. Kapı girinti aşındırma tekniği ile üretilmiş AlGaN/GaN YEMT yapının kesit görüntüsü Şekil 2.10'da verilmiştir.



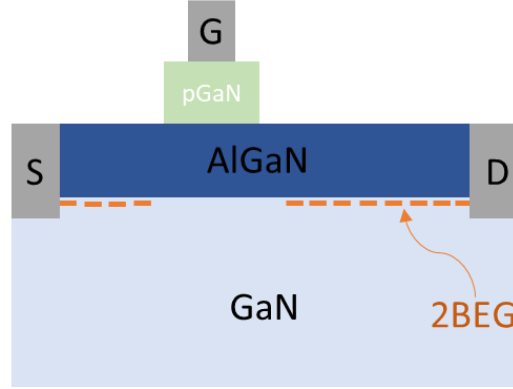
Şekil 2.10 Kapı girinti aşındırma AlGaN/GaN YEMT

Bu yapılarda aşınma derinliği ile V_{th} kontrol edilmektedir. Aşınma derinliği arttıkça V_{th} artmaktadır, fakat R_{on} direnci de artış gösterir. Ayrıca aşınma kaynaklı yüzey hasarı ve büyütülen dielektrik filmin kalitesi de R_{on} direncini etkilemektedir [1, 42].

2.4.3 p-GaN Kapı

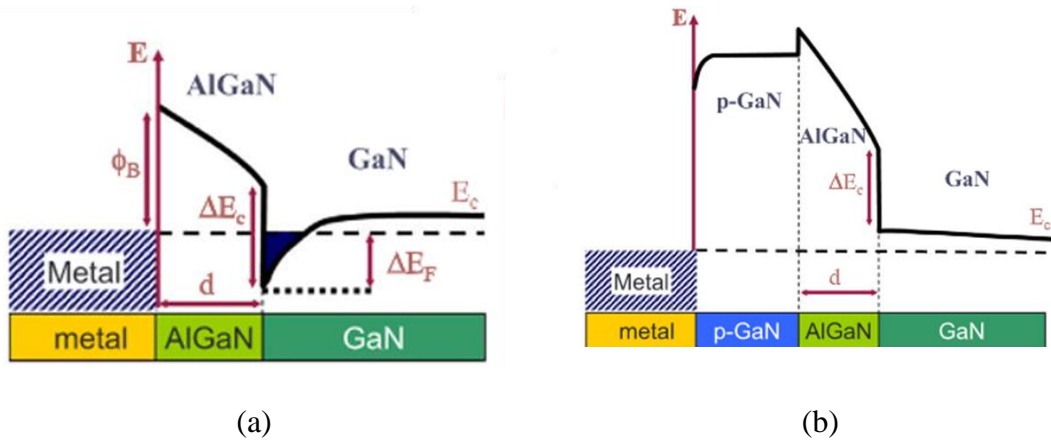
Bu yapıda, AlGaN tabakasının üzerine MOCVD tekniği ile büyütülmüş p-GaN tabakası vardır. Bu p-GaN tabakası MOCVD tekniği ile epitaksi büyütme sırasında büyütülür. Mikrofabrikasyon sırasında sadece kapı bölgesinin alt kısmında kalacak şekilde tüm p-GaN tabakası aşındırılır. p-GaN tabakası bant yapısını yükselterek 2BEG kanalını tüketir. p-GaN

kapı yapısına sahip normalde kapalı AlGaN/GaN YEMT aygıt yapısı Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11 p-GaN kapı yapısına sahip AlGaN/GaN YEMT

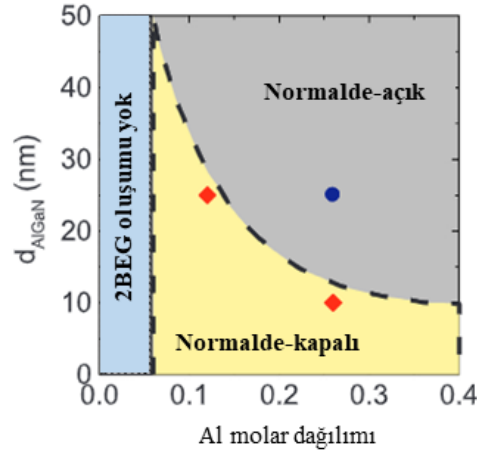
p-GaN tabakası iletim bandını Fermi seviyesinden yukarı çekerek potansiyel bariyerini yükseltir. Böylelikle kapı metaline gerilim uygulanmadığı durumda akım akamaz. p-GaN tabakasının olmadığı normalde açık ve p-GaN tabakası ile üretilen normalde kapalı yapıların enerji bant diyagramları Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 (a) Normalde açık operasyonda AlGaN/GaN ve (b) normalde kapalı operasyonda p-GaN/AlGaN/GaN bant yapısı [44]

Genellikle GaN’ün p tipi katkılanması için Magnezyum kullanılır. Alıcı yoğunluğu genelde $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ civarındadır. Daha yüksek konsantrasyonlar kristal yapısını bozacağı için tercih

edilmemektedir. AlGaN katmanının Al konsantrasyonu ve kalınlığı bariyer yüksekliğini etkilemektedir. AlGaN kalınlığının ve Al molar dağılımının 2BEG yoğunluğuna ve çalışma türüne etkisi Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Üretilen transistörün normalde açık ta da kapalı olmasının AlGaN tabakasının kalınlığı ve Al konsantrasyonuna bağlılığı [44]

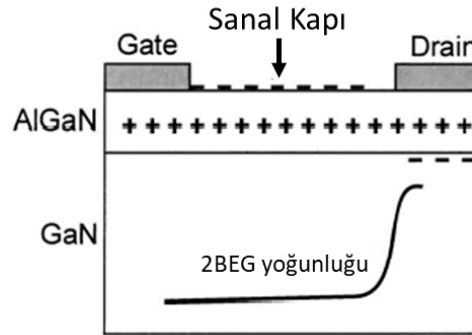
Şekil 2.13'te görüldüğü gibi hem AlGaN kalınlığı hem de Al konsantrasyonu aynı anda aygıt operasyonunu etkilemektedir. Al konsantrasyonu arttıkça bariyer yüksekliği ve eşik gerilimi artmaktadır fakat bu tek başına normalde kapalı çalışma için yeterli değildir. İnce AlGaN kalınlığı iletim bandını Fermi seviyesinin üstüne çıkartarak normalde kapalı hale getirir. Burada AlGaN kalınlığı incelidikçe V_{th} pozitif kaysa da 2BEG yoğunluğu azalmaktadır. Bu sebeple hem akım yoğunluğunu istenilen seviyede tutmak hem de normalde kapalı bölgede kalmak, p-GaN tabakasına sahip aygıtların üretimi için zordur. Bu sebeple diğer normalde kapalı aygıtlara kıyasla V_{th} değerleri düşüktür. Buna rağmen güvenilirlik açısından orta segment (200 V – 600 V) güç aygıtları için en çok tercih edilen yapılar p-GaN kapı transistörlerdir [42-44, 46].

2.5 p-GaN/AlGaN/GaN Aygıtlarında Pasivasyon Tabakasının Önemi

AlGaN/GaN YEMT'ler yüksek frekans, yüksek güç ve yüksek sıcaklık uygulamaları için büyük potansiyele sahip olsalar da tuzaklanma etkisi aygıt performansını sınırlandırmaktadır. Bu tuzaklar ya da yük yoğunluğu daha çok AlGaN yüzeyindedirler. Bu

yük durumları polarizasyon etkisiyle ve AlGa_N tabakasının büyütülmesi sırasında oluşan kusurlardan kaynaklanabilmektedir [10].

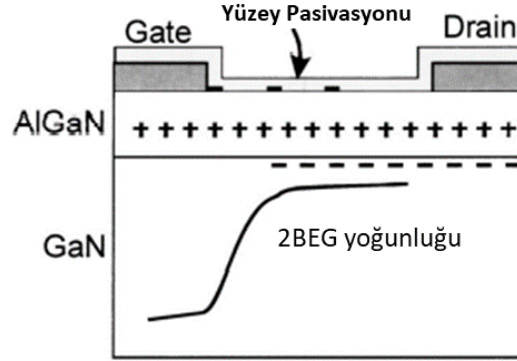
p-GaN kapı yapısına sahip aygıtlarda ise bu etkilere ek olarak p-GaN tabakasının AlGa_N tabakasına kadar aşındırılmasından kaynaklı plazma hasarı meydana gelmektedir. Her ne kadar bu aşındırma işlemi düşük hasarlı yapılmaya çalışılsa da verilen hasar yüzeyde alıcı ya da verici tipi tuzaklar oluşturabilmektedir [20, 47]. AlGa_N/Ga_N yüzey yük yoğunluğu Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 AlGa_N/Ga_N YEMT yapısı ve sanal kapı etkisinin gösterimi [20]

Kapı elektrotuna negatif bir gerilim uygulandığında kapı sınırının akaç tarafında yüksek bir elektrik alan meydana gelir. Bunun sonucu olarak yüzey durumları elektron yakalar ya da hol oluştururlar ve yük dengesi bozulur. Yük dengesinin bozulmasıyla kapı bölgesi ile akaç arasında sanal kapı etkisi görülür. Bu bölge Şekil 2.14'te işaretlenmiştir. Bu sanal kapı 2BEG kanalını tıpkı kapı gibi tüketerek akım yoğunluğunu azaltır. Kapı ve akaç arasında kapı sınırında meydana gelen elektrik alan pikleri olası kırılma bölgeleridir. Bu pikler ne kadar yüksek olursa aygıtın kırılma gerilimi de o kadar düşük olur. Yüzey durumları 2BEG yoğunluğunu azalttığı için aygıtın akaç akımı azalmaktadır. Bu durumu azaltmak için farklı teknikler geliştirilmiştir. Bunlardan biri kapı kontağının üzerine alan levhası metali kaplayarak kapı sınırında meydana gelen elektrik alan piklerini azaltmak fikrine dayanır. Bir diğeri ise yüzeye büyük yasak enerji aralığına sahip dielektrik film kaplamaktır. Bu kaplama yüzey durumlarını pasive edici özellik gösterir. Yapılan çalışmalarda yüzey pasivasyonu ile

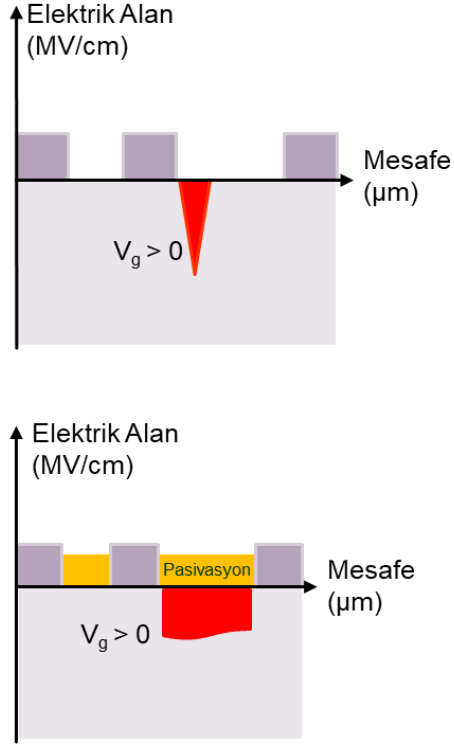
yüzey durumlarının azaldığı gözlenmiştir [48-50]. Pasivasyon sonrası yüzey durumları Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15 Yüzey pasivasyonunun sanal kapı davranışı etkisini azaltması [20]

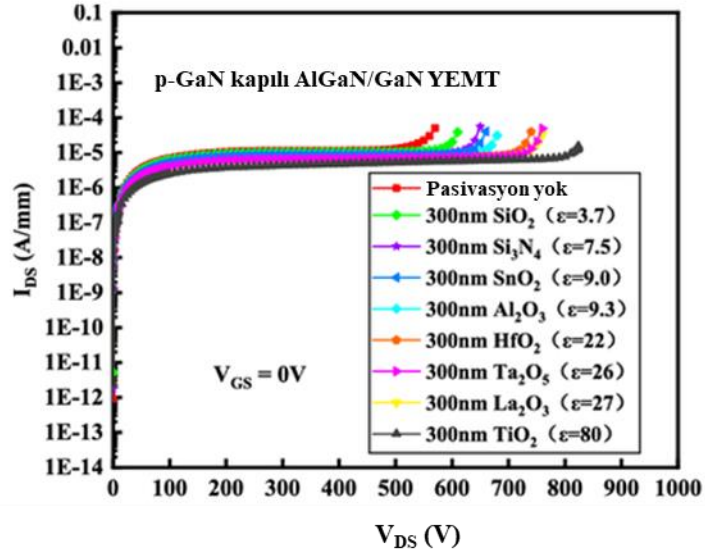
SiN_x ya da SiO_x gibi Si tabanlı pasivasyon yapıldığında Si atomları sığ verici gibi davranır ve pozitif yük yoğunluğunu artırır. Pozitif yük yoğunluğunun artmasıyla yüzey durumları nötralize olur ve 2BEG yoğunluğu artar [11, 47, 50]. Bu durumda pasivasyon tabakası, aygıtın kanal akım yoğunluğunu artırıcı ve kaçak akımlarını azaltıcı etki göstermektedir.

Yüksek dielektrik sabitine sahip pasivasyon malzemeleri kullanıldığında kapı ve akaç arasındaki elektrik alan profili homojenleşir [19, 51]. Özellikle kapı ve akaç arasında elektrik alan pikleri belli bölgelerde elektrik alanın fazla olması ve buralardan akımın daha kolay akmasından kaynaklı olarak kırılma gerilimini azaltır. Yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler alan levhası gibi davranarak bu pikleri azaltır ve elektrik alanın daha homojen yayılmasını sağlar. Bu da aygıtın kırılma gerilimini artırır [10, 19, 51, 52]. Pasivasyon tabakasının elektrik alan dağılımına etkisi Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Pasivasyon tabakasının aygıtın elektrik alan dağılımına etkisi

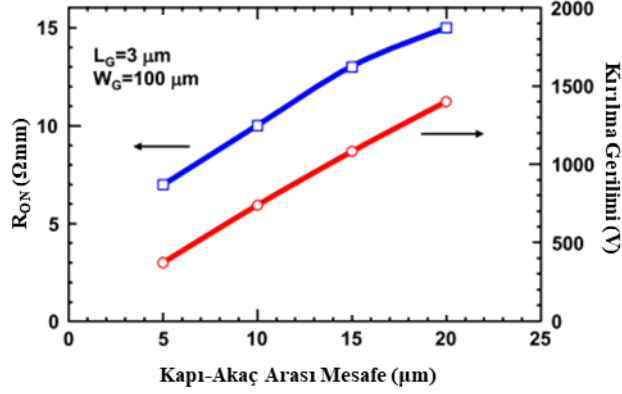
Pasivasyon tabakasının kırılma gerilimine etkisi Şekil 2.17'de verilmiştir. Şekilde simülasyon çalışması ile farklı dielektrik sabitine sahip malzemelerin kırılma gerilimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Farklı malzemeler kullanılarak büyütülmüş pasivasyon tabakasına sahip p-GaN kapılı AlGaIn/GaN YEMT'lerin kırılma gerilimlerinin simülasyon sonuçları [52]

Yapılan simülasyon çalışmasında pasivasyon tabakası olmadığı durumda kırılma geriliminin en düşük olduğu, pasivasyon tabakasının dielektrik sabiti arttıkça da kırılma geriliminin arttığı görülmektedir.

Bunların yanında AlGaIn/GaN YEMT aygıtlarda kırılma gerilimini etkileyen önemli parametrelerden biri de akaç ve kapı arasındaki mesafedir. Akaç ve kapı arasındaki mesafe arttıkça kırılma gerilimi artmaktadır. Fakat kırılma gerilimi artarken R_{on} direnci de artacağı için bu mesafenin iyi optimize edilmesi gerekmektedir [53]. Kırılma gerilimi ve R_{on} 'un kapı akaç arası mesafe (L_{gd}) ile değişimi Şekil 2.18'de verilmiştir.



Şekil 2.18 R_{on} ve Kırılma geriliminin kapı akaç arasındaki mesafe ile değişimi [53]

Görüldüğü gibi kapı akaç arası mesafenin kırılma gerilimine etkisi oldukça fazladır. Bu sebeple yüzey durumları iyileştirilse de L_{gd} kırılma gerilimini sınırlayabilir.

2.6 Dielektrik Filmlerin Elektriksel ve Optik Özellikleri

Mikro fabrikasyon süreçlerinde birçok teknik ile dielektrik film büyütülebilmektedir. Bunlardan en yaygın olanı PECVD tekniğidir. PECVD tekniğinde RF plazma ile düşük sıcaklıklarda alttaş yüzeyine ince film kaplaması yapılmaktadır. AlGaIn/GaN YEMT teknolojisinde pasivasyon tabakası olarak büyütülen dielektrik filmlerden SiN_x ve SiO_x yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu filmler PECVD tekniği ile büyütülürken proses parametreleri filmlerin elektriksel ve optik özelliklerini etkilemektedir. Burada gaz akış hızı oranları, reaktör basıncı, alt taban sıcaklığı ve RF gücü gibi parametreler filmlerin yapısını doğrudan etkilemektedir.

Filmlerin sitokiyometrik yapısına ve optik özelliklerine en büyük etki gaz akış oranlarından ve RF gücünden gelmektedir. Plazma parametrelerinin filmlerin yapısına etkisi Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Proses parametrelerinin SiN_x ve SiO_x yapısına etkisi [54]

Parametre	[Si]/[N]-[Si]/[O] oranı	Kırma İndisi	Kaplama Hızı
SiH ₄ Akış Hızı ↑	↑	↑	
RF gücü ↑	↓	↓	↑
Basınç ↑	↑	↑	↑
Sıcaklık ↑	↑	↑	↓

SiN_x büyütülürken tipik olarak SiH₄/NH₃ gaz karışımı kullanılmaktadır. SiH₄ akışı arttıkça SiN_x film Si bakımından zenginleşmeye başlar. Si₃N₄ filmin kırma indisinin (n=2) artması için [Si], kırma indisinin azalması için [N] konsantrasyonunun artması gerekmektedir.

SiO_x film büyütülürken ise tipik olarak SiH₄/N₂O ya da SiH₄/CO₂ gibi gaz karışımları kullanılmaktadır. SiO₂ filmin kırma indisinin (n=1,45) artması için [Si], kırma indisinin azalması için [O] konsantrasyonunun artması gerekmektedir [55, 56].

Filmlerde [Si] oranı arttıkça bant aralığı daralır. Bant aralığının azalmasıyla kırma indisi ve dielektrik sabiti artmaktadır. Bant aralığının genişliği elektron ve hol iletimini de etkilemektedir. Bant aralığı ne kadar daralır ise bu iletim o kadar kolaylaşır çünkü malzeme iletkenliğe doğru kayar. Bu durumda [Si] oranı arttıkça malzemelerin kırılma gerilimleri azalmaktadır. Fakat [N] oranı artmaya devam ettiğinde yapıda N-H bağlarının sayısı artmaya başlamaktadır ve bu bağ yapısı yığın kusuru gibi davranmaktadır. Bu sebeple [Si]/[N] oranının iyi optimize edilmesi gerekmektedir [57-59].

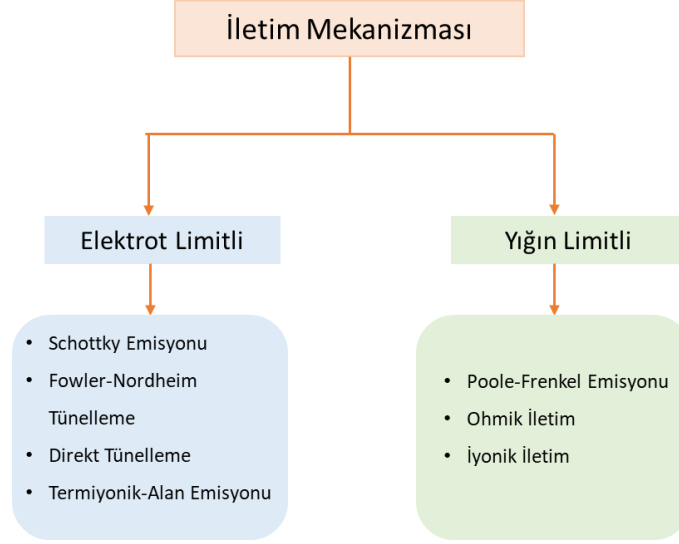
RF gücünün artması ise plazma enerjisi ve aktif bileşenleri artır. Bu hem yüzey hasarını hem de kusur yoğunluğunu arttıracığı için daha kaliteli ince filmler için düşük RF güçleri tercih edilmektedir. RF gücü filmlerin sitokiyometrik yapısını da etkilemektedir. N₂ atomlarının N bağlarına dönüşmesi için gerekli olan enerji RF gücüyle sağlandığı için RF gücü arttıkça

yapıdaki [N] oranı da artmaktadır. Aynı şekilde RF gücünün artması oksijen bağlarının da artmasına sebep olmaktadır. Bu durum ilk başta [Si] oranını azalttığı için kırma indisi ve dielektrik sabitinin azalmasına böylelikle kırılma geriliminin artmasına yardım etse de RF gücü arttıkça kusur yoğunluğu ve iyon hasarının artmasıyla film kalitesi düşmeye ve kırılma gerilimi azalmaya başlamaktadır [56, 60, 61].

2.7 Dielektrik Filmlerin İletim Mekanizması

Dielektrik özelliğe sahip ince filmler elektronların oldukça sıkı bağlı olduğu malzemelerdir. Dielektrik ince filmlerin içindeki elektronlar elektrik alan ile değişen polarizasyona tepki vermektedir. Elektrik iletimi oldukça düşüktür ve neredeyse yalıtkan malzeme gibi davranırlar. Bant aralıkları oldukça geniştir [53].

Tıpkı yarıiletkenlerde olduğu gibi dielektrik özellik gösteren malzemelerde de 0 K'de iletim bandı tamamen boş, değerlik bandı tamamen doludur. Sıcaklık arttıkça değerlik bandından veya verici safsızlık seviyesinden bazı elektronlar termal olarak uyarılırlar. Bu elektronlar akımın taşınmasına katkıda bulunmaktadır. Yalıtkanların iletim akımı oldukça düşüktür. Fakat büyük bir elektrik alan uygulandığında bu akım artmaya başlar. Her yapı için farklı iletim mekanizmaları gözlenebilmektedir. Temel iletim mekanizmaları Şekil 2.19'da şematize edilmiştir. Temelde iki tip iletim mekanizması vardır. Bunlardan biri dielektrik filmle elektrot ara yüzeyinden kaynaklı elektrot limitli, diğeri malzemenin kendi özelliklerinden kaynaklı yığın limitli iletim mekanizmasıdır [54].



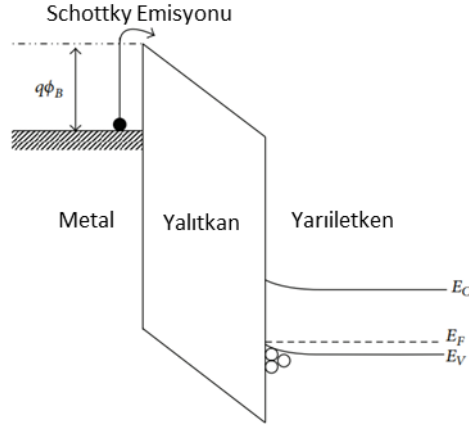
Şekil 2.19 Dielektrik filmlerde iletim mekanizmasının sınıflandırılması [54, 62]

2.7.1 Elektrot Limitli İletim Mekanizması

Elektrot limitli iletim mekanizması elektrot-dielektrik kontakın elektriksel özelliklerine bağlıdır. Buradaki en önemli parametre ara yüzeydeki bariyer yüksekliğidir.

2.7.1.1 Schottky (Termiyonik) Emisyon

Termal aktivasyon ile elektronlara yeterli enerji kazandırıldığında elektronlar enerji bariyerini aşarak dielektrik filme geçebilirler. Metal-Yalıtkan-Dielektrik bant yapısı ve Termiyonik emisyon Şekil 2.20’de gösterilmiştir.

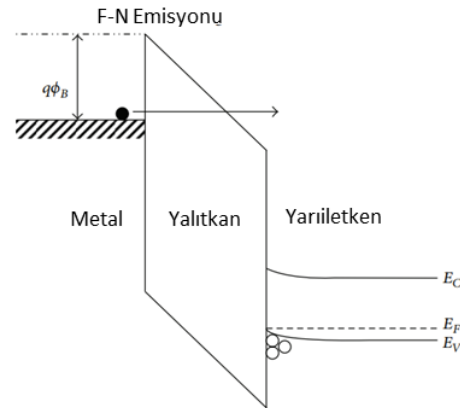


Şekil 2.20 Metal-Yalıtkan-Dielektrik bant yapısı ve termiyonik (Schottky) emisyon şematığı [62]

Enerji bariyeri yüksekliği sanal bir yük ile azalabilir. Bu bariyer azaltıcı etki Schottky etkisi olarak isimlendirilir. Bu iletim mekanizması ise termiyonik ya da Schottky emisyonu olarak adlandırılır. En sık görülen emisyon türüdür [62].

2.7.1.2 Fowler-Nordheim Emisyonu

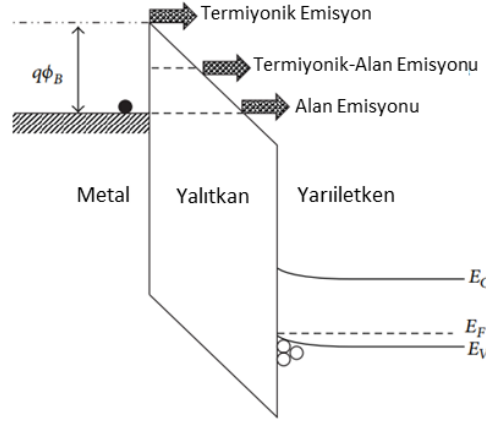
Bu mekanizma çok ince dielektrik filmlerde (<10 nm) geçerlidir. Kuantum teorisine göre bir elektron kendi enerjisinden büyük bir engelle karşılaştığında bu engeli tünelleyerek geçme olasılığı vardır. Bu durum F-N tünellemesi olarak isimlendirilir. F-N tünelleme mekanizması Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



Şekil 2.21 Metal-Yalıtkan-Dielektrik bant yapısı ve F-N tünelleme şematığı [62]

2.7.1.3 Termiyonik Alan Emisyonu

Bu durum için tünelleme elektronları metalin Fermi seviyesi ile dielektrik filmin iletim bandı arasında olmalıdır. Alan emisyonu, termiyonik emisyon ve termiyonik alan emisyonu Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



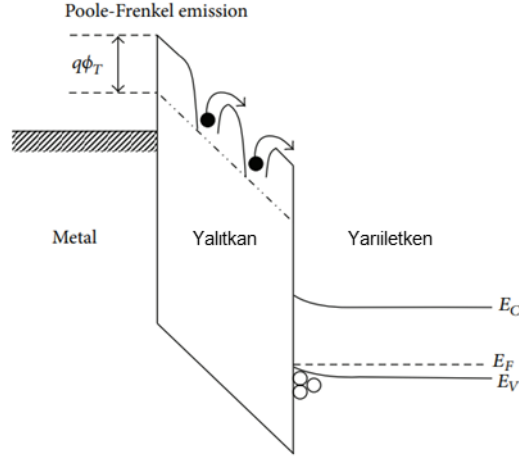
Şekil 2.22 MIS yapısı için termiyonik, termiyonik-alan ve alan emisyonu şematik gösterimi [62]

2.7.2 Yığın Limitli İletim Mekanizması

Bu mekanizma dielektrik filmin kendi özelliklerine ve tuzak enerji seviyelerine bağlıdır.

2.7.2.1 Poole-Frenkel Emisyonu

Termiyonik emisyon modeline oldukça benzemektedir. Dielektrik filmin içinde, enerjice iletim bandı yakınında bulunan tuzaklardan termal olarak elektronların uyarılması ilkesine dayanır. Bir tuzak merkezindeki elektronun enerjisi dielektrik film boyunca uygulanan elektrik alan ile artabilir ve elektronun tuzaktan iletim bandına termal olarak uyarılması gerçekleşir. P-F emisyonu Şekil 2.23’te gösterilmiştir.



Şekil 2.23 P-F emisyon mekanizması [62]

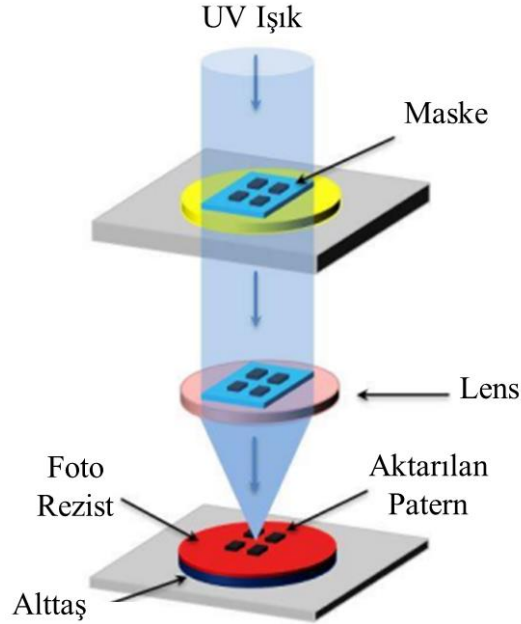
Tüm iletim mekanizmaları incelendiğinde bant yapısı ve buna bağlı olarak dielektrik sabitinin önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. SiN_x ve SiO_x gibi AlGaIn/GaN YEMT teknolojisinde oldukça sık kullanılan dielektrik filmlere bakıldığında bu iki filmi ayıran en büyük özelliklerden birinin bant yapıları olduğu görülmektedir. SiO_x 9 eV gibi yüksek bir bant aralığına sahipken SiN_x 5,1 eV gibi daha dar bir bant aralığına sahiptir. Bu sebeple iki malzemede farklı iletim mekanizmaları daha baskın hale gelebilmektedir [54, 62].

2.8 p-GaN/AlGaIn/GaN YEMT Aygıtların Üretim ve Karakterizasyon Teknikleri

Bu bölümde p-GaN kapı yapısına sahip normalde kapalı AlGaIn/GaN YEMT mikrofabrikasyonu için kullanılan tekniklerden bahsedilmiştir. Bunlar; desenleme için kullanılan foto litografi, p-GaN, AlGaIn, GaN, SiN_x ve SiO_x gibi katmanların aşındırılmasını sağlayan ICP RIE, kapı, akaç ve kaynak elektrotlarının metallerinin kaplanmasını sağlayan elektron demeti ile buhar film biriktirme, kaplanan metallere omik özellik kazandırmak için RTP, SiN_x ve SiO_x gibi pasivasyon tabaklarının kaplanmasını sağlayan PECVD teknikleridir. Aygıtların akım yoğunluğu, eşik gerilimi ve kırılma gerilimi gibi özelliklerinin karakterizasyonu için ise bağlantı istasyonu kullanılmıştır.

2.8.1 Foto Litografi

Foto litografinin temeli dört aşamaya dayanmaktadır. Bunlardan ilki UV ışık kaynağı, ikincisi istenilen deseni örnek üzerine aktarmaya yarayan maske, diğeri UV ışığa duyarlı bir polimer olan fotorezist ve sonuncusu bu ışığa duyarlı fotorezisti istenilen bölgelerden kaldırarak nihai desenin örnek üzerinde kalmasını sağlayan çözücüdür. Foto litografi bir sonraki adımda yapılacak işlem için ön hazırlıktır. Foto litografi sonrası örnek çoğu zaman ince film kaplanır ya da aşındırılır. Foto litografide ilk olarak rezist yüzeye serilir. Ardından uygun bir maske ile UV ışığa maruz bırakılır. Ardından çözücü içerisinde bekletilerek belli yerlerdeki rezist kaldırılarak örnek bir sonraki işlem için hazır hale getirilir [63]. Tipik bir maske ve UV kaynak ile örneğin pozlanması Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Fotolitografi ile örnek pozlama [64]

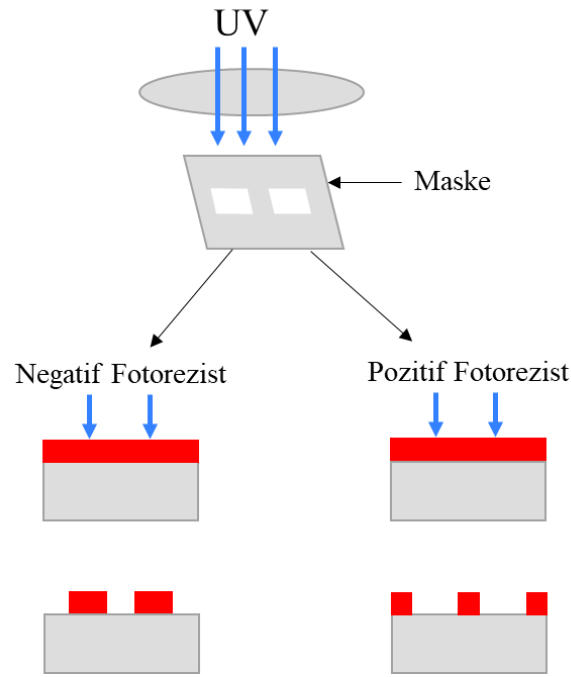
Pozlama işlemi bittikten sonra örnek çözücü içerisinde bekletilerek rezistin türüne göre ışığa maruz kalan ya da kalmayan bölgelerdeki rezist yüzeyden uzaklaştırılır. İki tip rezist kullanılır. Bunlar pozitif ve negatif fotorezistlerdir.

- Pozitif Fotorezist: UV ışığa maruz kalan bölge çözünebilir hale gelir. Çözücü içerisinde UV ışığa maruz kalan bölge çözünür ve UV ışığa maruz kalmayan alan

kalır. Sonuç olarak maskedeki desen direkt olarak pozitif rezist kullanarak alttaş üzerine aktarılır.

- Negatif Fotorezist: UV ışığa maruz kalan alan çözünmez veya sertleşir. Çözücü içerisinde UV ışığa maruz kalan alan çözünür. Sonuç olarak alttaş üzerinde maske deseninin negatif şekli kalır [64, 65].

Negatif ve pozitif fotorezist farkı Şekil 2.25’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.25 Pozitif ve negatif fotorezistin UV ışığa tepkisi

UV ışık kaynağının verilmesi, maske ve örneğin hizalanması, pozlama süresi gibi parametreler maske hizalama cihazı kullanılarak yapılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan SUSS-MicroOptics marka maske hizalama cihazının bir fotoğrafı Şekil 2.26’da gösterilmiştir.

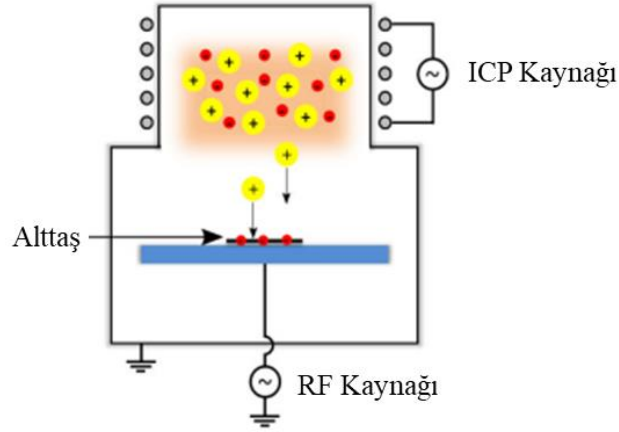


Şekil 2.26 Tez kapsamında kullanılan maske hizalama cihazı

Tez kapsamında fotolitografi adımı tüm metalizasyon ve kuru aşındırma işlemlerinden önce yapılmıştır. RTP ve PECVD gibi yüksek sıcaklık gerektiren mikrofabrikasyon adımları öncesi fotorezist zarar göreceği için fotolitografi yapılmamaktadır.

2.8.2 Kuru Aşındırma

AlGaIn/GaN YEMT üretim aşamasında AlGaIn, GaN, p-GaN ve dielektrik ince film aşındırma yapılmaktadır. Kuru aşındırma işlemi farklı teknikler ile yapılabilmektedir. Bu tez kapsamında Eşlenmiş Plazma-Reaktif İyon Aşındırma (ICP-RIE) tekniği kullanılmıştır. Reaktif İyon Aşındırma (RIE) tekniğinde amaç yüksek enerjili bir plazma oluşturarak bu plazma içerisindeki iyonlar ya da radikaller ile örnek yüzeyini fiziksel ve kimyasal olarak aşındırmaktır. ICP ise manyetik alan ile bu plazmayı güçlendirerek daha az yüzey hasarı ile aşındırma yapma sağlar. ICP RIE tekniği kullanılarak yapılan kuru aşındırma işlemi Şekil 2.27’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.27 ICP RIE şematik çizimi [66]

Burada ICP ve RF olmak üzere iki radyo frekans güç kaynağı bulunmaktadır. RF sinyali gönderilmesiyle elektronlar atomlar ve moleküller ile çarpışarak uyarma, iyonlaşma ve ayrışma gibi süreçleri başlatmak için yeterli enerjiye ulaşırlar. Elektronlar iyonlara göre daha hareketli oldukları için alt elektrota ulaşarak alt elektrotu negatif yüklerler. Böylelikle pozitif yüklü iyonlar hızlanarak alttaş yüzeyine çarpıp aşındırma işlemini gerçekleştirirler. İyonlar fiziksel aşınmaya katkı sağlayarak örneğin sadece dikey doğrultuda aşınmasını sağlarken serbest radikaller kimyasal bileşik oluşturup yüzeyden uzaklaştıkları için yatay doğrultuda da aşındırma gerçekleşir. Bir ICP RIE tekniği ile RF gücü, ICP gücü, basınç, sıcaklık, gaz akış oranları gibi parametreler aşınma hızı, aşınma profili, yüzey pürüzlülüğü, seçicilik gibi kavramları belirler [66]. Gaz akışları aşındırılmak istenilen malzemeye göre seçilmelidir. AlGa_N ve GaN gibi malzemeler için Cl₂ bazlı gazlar kullanırken SiN_x, SiO_x gibi malzemelerin aşındırılması için SF₆ gibi F bazlı gazlar kullanılmaktadır [67-70].

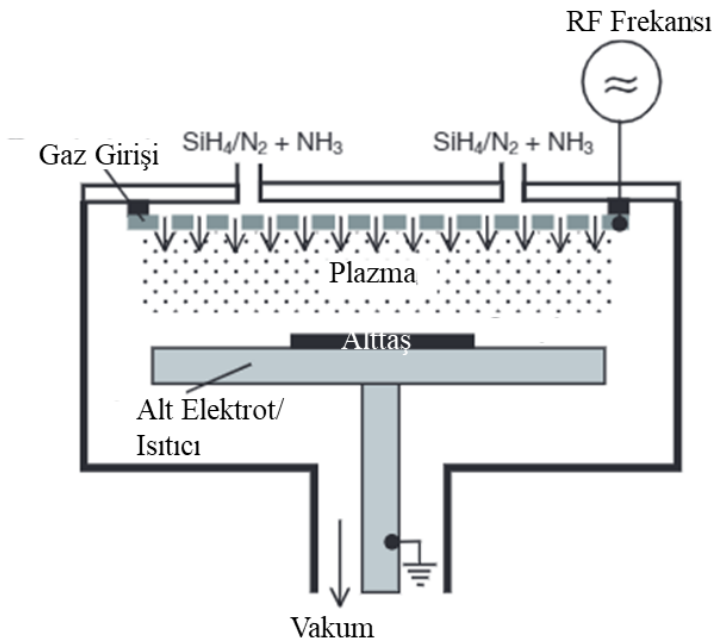
Tez kapsamında p-GaN kapı yapısı kullanıldığı için p-GaN tabakasının sadece kapı bölgesinin altında kalacak şekilde aşındırılması gerekmektedir. Burada önemli olan p-GaN tabakası aşındırılırken p-GaN tabakasının altında bulunan AlGa_N tabakasının aşındırılmaması gerekmektedir. Çünkü AlGa_N tabakasının kalınlığı 2BEG yoğunluğu açısından kritik önem taşımaktadır. Bu sebeple bu aşındırma işleminin yüksek seçiciliğe sahip olması gerekmektedir. Yani uygulanan plazmanın p-GaN aşındırma hızının AlGa_N aşındırma hızına kıyasla oldukça yüksek olması gerekmektedir. Bu tip bir aşındırma için plazma gaz karışımına O₂ gazı eklenerek seçicilik arttırılabilmektedir. Oksijen iyonları

AlGaN tabakasındaki Al ile AlO_x bileşimini oluştururlar. Böylelikle Cl_2 gazı ile oldukça zor aşındırılan bir AlO_x tabakası AlGaN katmanı üzerinde büyür ve bu katman p-GaN/AlGaN arasında yüksek seçici aşındırma sağlar. Bu aşındırmanın yüksek seçicilikte ve düşük hasarlı olması aygıt performansını oldukça etkilemektedir [71-73].

Tez kapsamında p-GaN tabakası Cl_2/O_2 , AlGaN/GaN tabakası Cl_2/BCl_3 , SiN_x ve SiO_x tabakaları SF_6/Ar gazları içeren ICP RIE tekniği ile aşındırılmıştır.

2.8.3 Dielektrik İnce Film Biriktirme

Pasivasyon tabakası olarak kullanılan ince filmler LPCVD, PECVD, ALD gibi farklı teknikler kullanılarak büyütülmektedir. Bu tez kapsamında pasivasyon tabakası olarak SiN_x ve SiO_x filmler, PECVD tekniği kullanılarak büyütülmüştür. PECVD tekniği bir kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemidir. Klasik kimyasal buhar biriktirme tekniğinden farklı olarak bir RF güç kaynağı ile yüksek enerjili plazma oluşturulur. PECVD tekniği Şekil 2.28’de şematize edilmiştir. PECVD tekniği plazma oluşumu bakımından ICP RIE tekniğine benzemektedir. Fakat burada oluşan radikaller yüzeyde kimyasal bileşik oluşturup yüzeye tutunurlar. Her ne kadar bir aşındırma olmasa da plazma iyonlarının yüzeyle buluşmasıyla yüzey hasarı meydana gelebilmektedir. Bu yüzey hasarı RF gücü arttıkça artmaktadır.



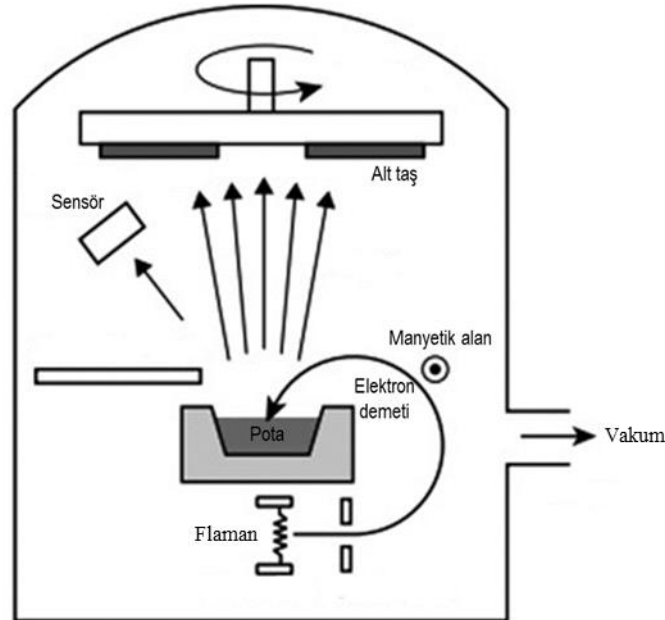
Şekil 2.28 PECVD tekniği ile ince film biriktirme şematığı [74]

CVD tekniğinde 800° C- 1000° C gibi yüksek sıcaklarda film biriktirme yapılırken RF frekansı sayesinde 250° C- 400° C gibi düşük sıcaklıklarda proses yapılabilir. YEMT aygıt üretiminde proses sıcaklığı aygıtın kontakları gibi diğer bileşenlerini etkileyeceği için düşük sıcaklık proseslerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple PECVD tekniği oldukça sık kullanılmaktadır [75].

Bu tez kapsamında SiN_x film büyötmek için SiH₄/N₂/NH₃ gazları, SiO_x film büyötmek için SiH₄/N₂/N₂O gazları kullanılmıştır.

2.8.4 Elektron Demeti ile Buhar Biriktirme

Elektron demeti ile buhar biriktirme fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden biridir. AlGaIn/GaN YEMT mikro fabrikasyon süreçlerinde metalizasyon adımları için kullanılmaktadır. Şekil 2.29’da elektron buhar biriktirme için kullanılan sistemin şematığı verilmiştir.



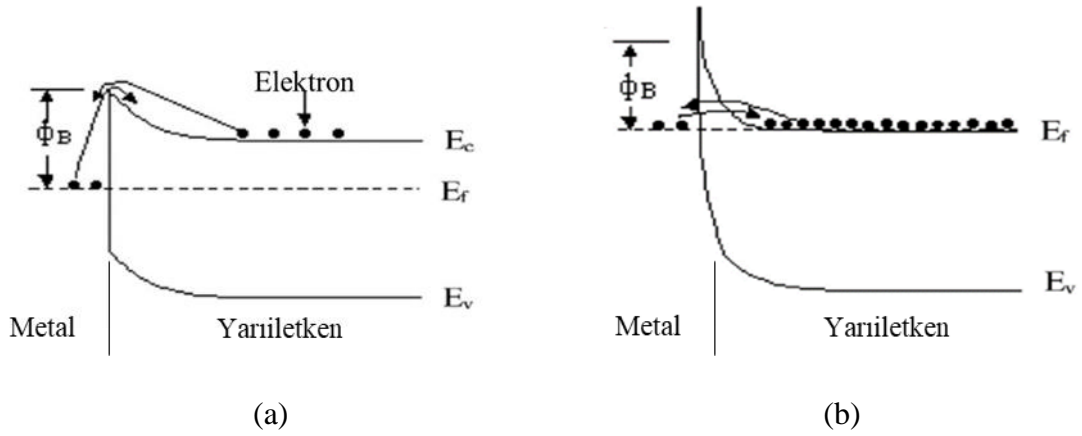
Şekil 2.29 Elektron demeti ile buhar biriktirme tekniği [76]

Bu teknik ile ince film biriktirilmek istenilen alt taş sistemin içerisine potanın üstünde kalacak şekilde yerleştirilir. Kaplanmak istenilen malzeme pota içerisine yerleştirilir. Flaman yardımıyla oluşan elektron demeti yüksek gerilim kaynağı ile hızlandırılırlar ve manyetik alan sayesinde pota içerisinde bulunan metal yüzeyine çarptırılırlar. Kaplanacak metali eritmek için yeterli akım verildikten sonra metal buharlaşmaya ve yukarı çıkmaya başlar. Yukarıda bulunan alt taş yüzeyi kaplanmış olur. Burada metal kalınlığı bir sensor yardımıyla takip edilmektedir.

AlGa_N/Ga_N YEMT yapılarında akaç, kapı ve kaynak terminallerinden kontak alabilmek için metal kaplanması gerekmektedir. Akaç ve kaynak arasında 2BEG kanalı sayesinde akım akması istendiği için, bu akımı toplayacak elektrotların omik özellikte, aygıtın açık ya da kapalı duruma geçmesini sağlayan kapı elektrotunun ise Schottky özellikte olması gerekmektedir. Ga_N yapılarında omik kontak için Ti/Al/Ni/Au metalleri yaygın olarak kullanılırken, Schottky kontak için Ni gibi Ni/Au gibi metaller tercih edilmektedir [77-79].

2.8.4.1 Omik Kontak

AlGa_N/Ga_N YEMT yapılarında omik kontak ve 2BEG kanalı aygıt için kritik önem taşımaktadır. Omik kontak için hem ileri hem geri besleme durumunda akım-gerilim ilişkisi lineer ve simetriktir. Fakat Ga_N gibi geniş bant aralığına sahip yarı iletkenler için omik kontak yapmak zordur. Çünkü yeterince düşük iş fonksiyonuna sahip metal mevcut değildir. Bu sebeple düşük dirençli bir omik kontak yapmanın en iyi yolu metal yarıiletken ara yüzeyindeki katkılama miktarını arttırmaktır. Bu katkılama için genellikle Ti/Al metalleri kullanılmaktadır. Çünkü Ti AlGa_N yüzeyindeki N boşlukları ile TiN bileşiğini oluştururlar. Bu TiN bileşiği AlGa_N katmanını n tipi katkılar ve bu yüksek katkılama bariyerin incelmeye neden olur. Bariyerin inceliyle elektronların tünelleme olasılığı artar. Ayrıca Ti metalinin iş fonksiyonu ($\Phi_{Ti} = 4,3$ eV) Ga_N'ün elektron ilgisinden ($\chi_{GaN} = 4,1$ eV) büyüktür. Bu sebeple metalden yarıiletkene elektron iletimi zordur. TiN'ün iş fonksiyonu ise ($\Phi_{TiN} = 3,7$ eV) Ga_N elektron afinitesinden küçüktür. Böylelikle elektron iletimi kolaylaşmış olur [79-81]. Bu bileşiğin ara yüzeyde oluşması için metal kaplı örnek yüksek sıcaklıkta hızlı tavlama tekniği (RTP (Rapid Thermal Annealing)) ile tavlınır. Şekil 2.30'da tavllanmış ve tavlınmamış metal-yarı iletken bant yapıları gösterilmiştir.

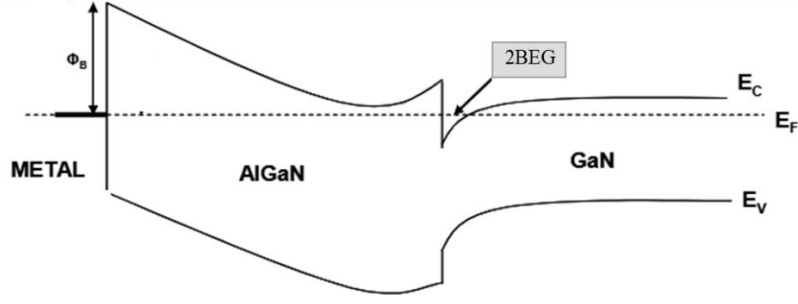


Şekil 2.30 (a) Tavlama öncesi ve (b) tavlama sonrası metal-yarıiletken bant yapısı [79]

Ti metali gibi Al metali de AlN, AlTi₂N gibi bileşikler oluşturarak iletme katkı sağlamaktadır. Tavlama sıcaklığı belirlenirken metallerin erime sıcaklıkları ve iletme katkı sağlayan yapıların oluşumu göz önünde bulundurulur. Ti AlGaN ile TiN yapısını 700° C'nin üzerinde oluşturmaktadır. En üstte bulunan Au metali genellikle kontağı iyileştirmek ve oksitlenmeyi engellemek için kullanılır fakat tavlama sırasında Al ile alaşım oluşturarak kontak yapısının kötüleşmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple araya Ni tabakası konulur. Ni tabakasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bu alaşım oluşabilmektedir. Bu sebeple tavlama sıcaklığı 800° C-850° C arasında ideal sonuç vermektedir [79, 81].

2.8.4.2 Schottky Kontak

Enerji bariyeri Φ_B metal-yarıiletken eklemlerinin en önemli parametresidir. Bariyer yüksekliği yarıiletken iletim bant sınırı ile metalin Fermi seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Schottky kontak oluşturmak için kullanılacak metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin elektron ilgisinden büyük olmalıdır. Böylelikle elektronlar sadece ileri besleme durumunda yarıiletkenden metale doğru akar. Ters besleme de bant bükülmesi artarak enerji bariyeri yükselir ve metalden yarıiletkene çok az elektron akışı olur. Şekil 2.31'de Schottky metal- yarıiletken bant yapısı çizilmiştir.

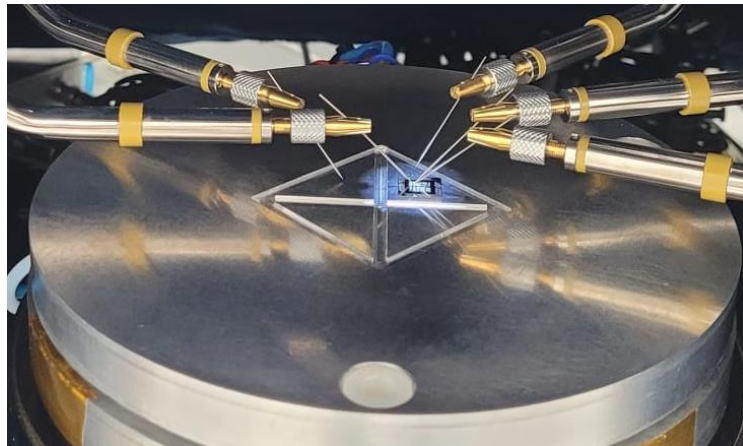


Şekil 2.31 Schottky metal- yarıiletken bant yapısı [82]

AlGaIn/GaN aygıtlarda kapı metali olarak yüksek iş fonksiyonlu metal seçilmelidir. Çünkü kapı terminali ara yüzeyden elektron akışını kontrol eden terminaldir. Bu sebeple bu akımın tek yönlü akmasını sağlayan Schottky kontak tercih edilmektedir. En sık kullanılan metal Ni metalidir. Ni metalinin iş fonksiyonu (5,1 eV) GaN'ün elektron ilgisinden büyüktür. Yine Ni gibi yüksek iş fonksiyonuna sahip Pd, Pt ve Au gibi metaller de kapı terminali için kullanılmaktadır [77, 82].

2.8.5 Bağlantı İstasyonu

Üretilen YEMT aygıtların elektriksel karakterizasyonu için elektriksel ölçüm istasyonu kullanılmaktadır. Bağlantı istasyonu ile transistör I-V karakteristikleri ölçülmektedir. Şekil 2.32'de I-V ölçüm düzeneğinin görseli verilmiştir.

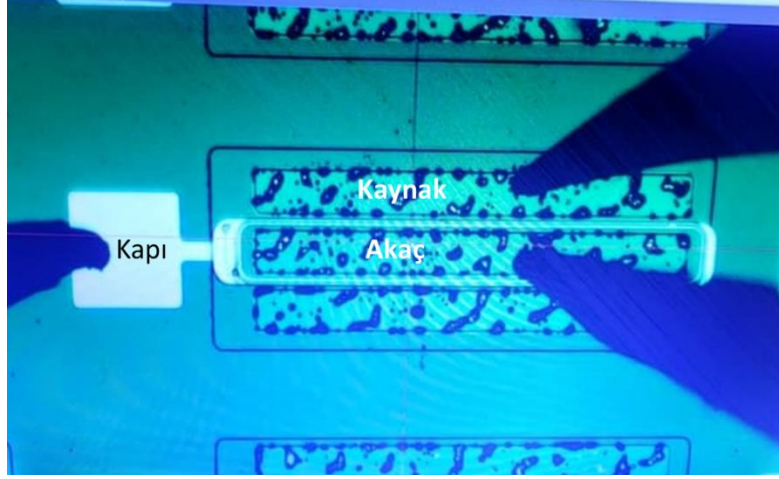


Şekil 2.32 Bağlantı istasyonunun bir görüntüsü

Temelde transfer ve çıkış olmak üzere iki karakteristik vardır. Çıkış gerilimi (akaç ve kaynak arasındaki (V_{ds})) sabitlenerek ve giriş (kapı (V_g)) gerilimini arttırırken giriş gerilimine karşılık çıkış akımı ölçülür. Burada amaç ileri besleme durumunda kanaldan akım akması için gerekli minimum gerilim değerini bulmaktır. Buna transfer karakteristiği denir. Transfer karakteristiği ile eşik gerilimi (V_{th}) elde edilmektedir. Giriş (kapı) gerilimini sabit tutularak akaç akımını (I_d) ölçmek ise çıkış (output) karakteristiğini vermektedir. Burada kapı gerilimi farklı değerlerde sabit tutularak akım ölçülür ve kapı gerilimi arttıkça akımın artması beklenir. Akaç ve kaynak arasına küçük gerilimler uygulandığında direnç gibi davranarak ohm yasasına uygun bir şekilde lineer davranış göstermektedir. Gerilim yeterince büyük olduğunda ideal akım kaynağı gibi davranır ve gerilimden bağımsız olarak aynı akım akar. Bu maksimum kapı gerilimindeki maksimum doyum akımı maksimum akaç doyum akımı (I_{dss}) olarak isimlendirilir.

Kırılma gerilimini ölçmek için ise kapı gerilimi eşik geriliminden büyük bir değerde ($V_g > V_{th}$) sabit tutularak akaç gerilimi (V_d) arttırılarak akaç akımı okunur. Akaç akımının limit değere ulaştığı gerilim değeri kırılma gerilimi (V_k) olarak kabul edilmiştir. Literatürde kullanılan 1 mA limit akım olarak belirlenmiştir.

Tez kapsamında üretilen transistörlerin I_{dss} , V_{th} ve V_k değerleri bağlantı istasyonu yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 2.33'te, ölçüm düzeneği ve transistör terminallerinin optik mikroskop ile alınmış görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.33 Bağlantı istasyonunun optik mikroskop görüntüsü

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

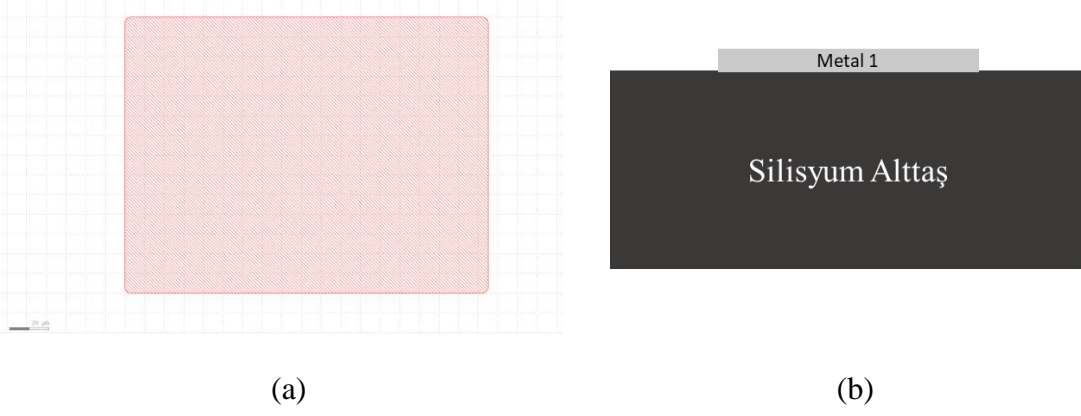
3.1. Geliştirilen Dielektrik İnce Filmlerin Optik ve Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde PECVD tekniği kullanılarak farklı plazma parametrelerine sahip SiN_x ve SiO_x filmlerin büyütülmesi amaçlanmıştır. İlk olarak gaz akış oranları değiştirilerek büyütülen filmler kaplama hızı, kırma indisi, dielektrik sabiti ve kırılma gerilimleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra belirlenen en iyi gaz akış parametreleri sabit tutularak RF gücü değiştirilip büyütülen ince filmler karakterize edilmiştir.

3.1.1 Metal-Yalıtkan-Metal Yapıların Üretilmesi

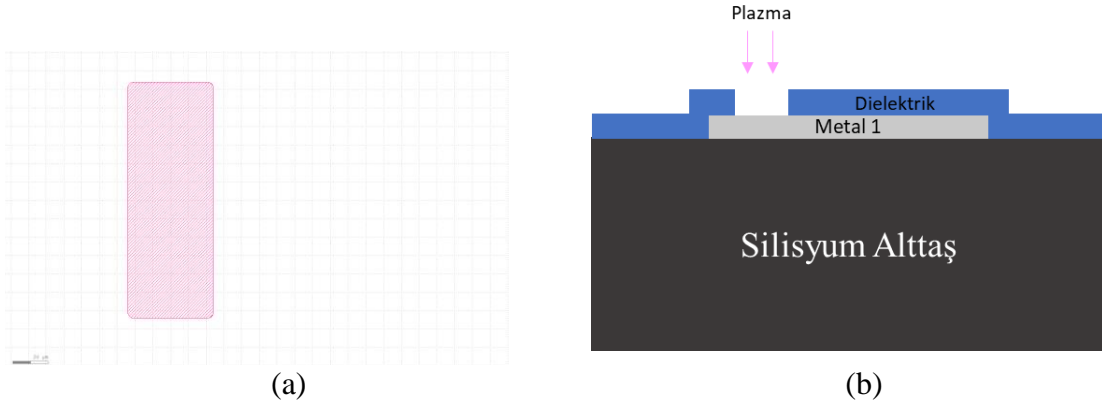
Dielektrik sabitinin ve kırılma geriliminin hesaplanmaları için Metal-Yalıtkan-Metal (Metal-Insulator-Metal MIM) yapıda sahip örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerden alınan C-V ve I-V ölçümleri ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu yapı $20 \times 20 \text{ mm}^2$ boyutlarda Silisyum attaşlar üzerinde oluşturulmuştur.

MIM yapının metal kaplaması yapılmadan önce Şekil 3.1 (a)'da gösterilen fotolitografi deseni kullanılarak maskeleme gerçekleştirilmiştir. Metal kaplama işlemi elektron demeti buhar biriktirme tekniği yapılmıştır ve 100 nm titanyum kaplanmıştır. Metalizasyon sonrası örneğin kesit görüntüsü Şekil 3.1 (b)'de gösterilmiştir.



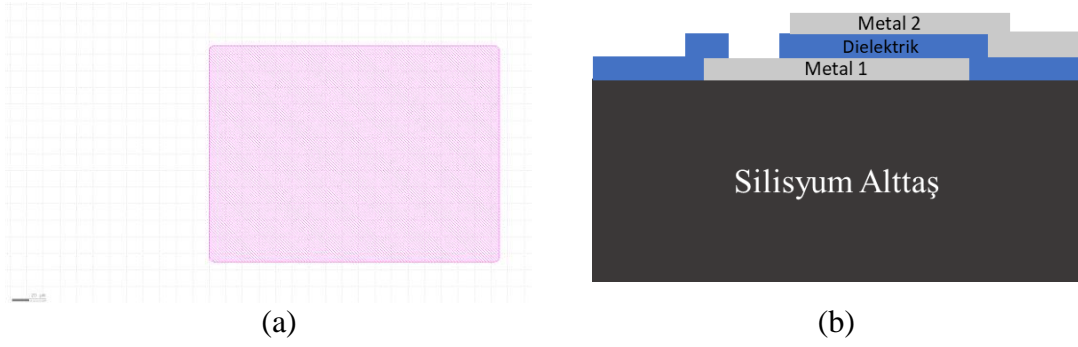
Şekil 3.1 (a) MIM yapının ilk fotolitografi deseni ve (b) metalizasyon sonrası örneğin kesit şekli

Tüm örneklerin üzerine farklı dielektrik ince filmler PECVD tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Bu ince filmlerin altında bulunan ve ilk metal levhayı oluşturan Ti filminden kontak alabilmek için dielektrik ince filmin bir kısmı ICP-RIE tekniği ile SF_6/Ar kimyası kullanılarak aşındırılmıştır. Aşındırılacak bölgeler Şekil 3.2 (a)'da gösterilen fotolitografi yöntemi ile desenlenmiştir. Aşındırma sonrası örneğin kesit görüntüsü Şekil 3.2 (b)'de çizilmiştir.



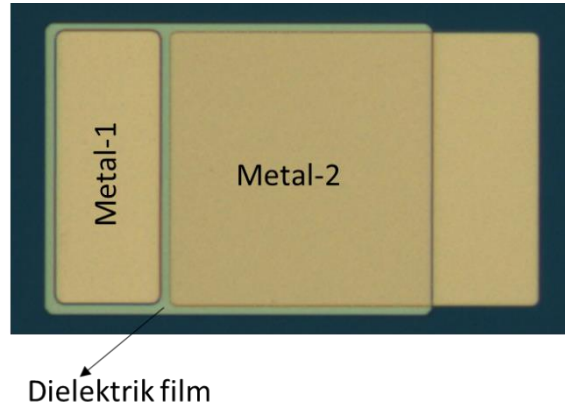
Şekil 3.2 (a) MIM yapının ikinci fotolitografi deseni ve (b) aşındırma sonrası örneğin kesit şekli

İkinci metal levhayı oluşturulacak titanyumun kaplanması için tekrar Şekil 3.3 (a)'da gösterilen desen fotolitografi yöntemi ile yapılmış ve 100 nm Ti kaplanmıştır. İkinci metalizasyon sonrası kesit görüntüsü Şekil 3.3 (b)'de verilmiştir.



Şekil 3.3 (a) MIM yapının üçüncü fotolitografi deseni ve metalizasyon sonrası (b) örneğin kesit şekli

Kapasitans – Gerilim (C-V) ve Akım – Gerilim (I-V) ölçümü almaya hazır hale gelen aygıtın görüntüsü Şekil 3.4’te verilmiştir. Bu aygıttan alınan C-V ölçümleri ile dielektrik sabiti I-V ölçümleri ile de kırılma gerilimleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.4 MIM aygıt optik mikroskop görüntüsü

Alınan C-V ölçümleri her bir dielektrik film için kapasitans değerlerini vermektedir. Kaplanan dielektrik filmin yüzey alanı da optik mikroskop yardımı ile hesaplanmıştır. Tüm dielektrik ince filmlerin kalınlıkları 100 nm olacak şekilde kaplanma yapılmıştır.

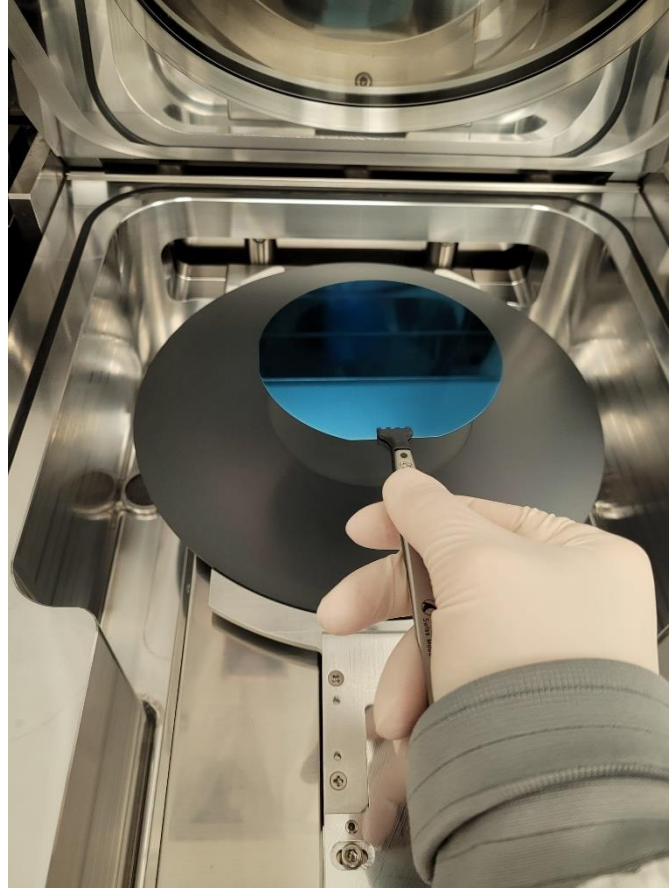
Bağlantı istasyonu yardımıyla aynı aygıtların üzerine 200 V'a kadar gerilim uygulanarak 1 mA akım limitinde kırılma gerilimleri ölçülmüştür. Literatür ile uyumlu olarak akımın 1 mA' e ulaştığı gerilim değeri kırılma gerilimi olarak kabul edilmiştir.

3.2. Gaz Akış Hızı Oranları Farklı Reçeteler ile Dielektrik İnce Film Büyütme

Bu kısımda PECVD tekniği kullanılarak farklı gaz akış oranlarında SiN_x ve SiO_x ince filmlerin büyütülmesi, bu filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

3.2.1. İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Karakterize Edilmesi

İnce film büyütme işlemi 4" boyutunda Silisyum alttaşlar üzerinde Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 3.5 PECVD Tekniği ile SiN_x kaplanmış Silisyum altaşın sistemden çıkartılması

Hem SiN_x hem de SiO_x büyütme işlemleri sırasında N_2 ile seyreltilmiş %5 SiH_4 , NH_3 ve N_2O gazları kullanılmıştır. Bu aşamada sadece SiH_4 akışı değiştirilip diğer parametreler sabit tutularak kaplama yapılmıştır. Çizelge 3.1’de, kullanılan tüm parametreler verilmiştir.

Çizelge 3.1 Büyütülen Filmlerin Hazırlama Parametreleri

Büyütülen Malzeme	Örnek Adı	SiH ₄ /(N ₂ +NH ₃)	SiH ₄ /(N ₂ +N ₂ O)	RF Gücü (W)	Reaktör Basıncı (Pa)	Alttaş Sıcaklığı (°C)
SiN _x	F ₁	2,16		130	75	275
SiN _x	F ₂	1,16		130	75	275
SiN _x	F ₃	0,16		130	75	275
SiO _x	F ₄		0,075	50	80	350
SiO _x	F ₅		0,050	50	80	350
SiO _x	F ₆		0,025	50	80	350

Büyütülen tüm ince filmlerin ilk olarak elipsometre ile kalınlıkları ve kırma indisleri ölçülmüştür. C-V ölçümleri için hazırlanan MIM yapıdaki örneklerden bağlantı istasyonu yardımıyla CV ölçümleri alınmış ve C-V ölçümleri yardımıyla her bir malzeme için dielektrik sabiti hesaplanmıştır. Aynı örneklerden bağlantı istasyonu yardımıyla I-V ölçümleri de alınarak kırılma gerilimleri ölçülmüştür.

3.3 RF Gücü Farklı Reçeteler ile Dielektrik İnce Film Büyütme

Bölüm 3.2’de yapılan çalışma ile hem SiN_x hem de SiO_x için optimal gaz oranları elde edilmiştir. Her iki film için de maksimum kırılma gerilimine sahip akışlar seçilmiştir. Bu bölümde ise gaz akışları, basınç ve sıcaklık değerleri sabit tutulup RF gücü azaltılarak ince filmler karakterize edilmiştir. RF gücünün azalması kaplama hızını düşürerek daha az kusura sahip daha yüksek kaliteli filmler büyütülmesine olanak sağlamaktadır.

3.3.1 İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Karakterize Edilmesi

İnce film büyütme işlemi Bölüm 3.2.1.’de anlatıldığı gibi yapılmıştır. Kullanılan tüm parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 RF gücü değiştirilerek büyütülen filmlerin hazırlama parametreleri

Büyütülen Malzeme	Örnek Adı	SiH ₄ /(N ₂ +NH ₃)	SiH ₄ /(N ₂ +N ₂ O)	RF Gücü (W)	Reaktör Basıncı (Pa)	Alttaş Sıcaklığı (°C)
SiN _x	W ₁	1,16		80	75	275
SiN _x	W ₂	1,16		60	75	275
SiN _x	W ₃	1,16		40	75	275
SiN _x	W ₄	1,16		20	75	275
SiO _x	W ₅		0,050	40	80	350
SiO _x	W ₆		0,050	30	80	350
SiO _x	W ₇		0,050	20	80	350
SiO _x	W ₈		0,050	10	80	350

Büyütülen tüm ince filmlerin ilk olarak elipsometre ile kalınlıkları ve kırma indisleri ölçülmüştür.

C-V ölçümleri için hazırlanan MIM yapıdaki örneklerden bağlantı istasyonu yardımıyla CV ölçümleri alınmış ve bu ölçümler yardımıyla her bir malzeme için dielektrik sabiti hesaplanmıştır. Aynı örnekler üzerinden bağlantı istasyonu yardımıyla I-V ölçümleri de alınarak kırılma gerilimleri ölçülmüştür.

3.4 p-GaN Kapı Yapısına Sahip Normalde Kapalı GaN Transistörlerinin Üretimi

Bu bölümde 3.1, 3.2 ve 3.3 başlıklarında incelenen ince filmlerden en iyi olanlar seçilerek GaN aygıt üzerindeki performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Toplamda 3 adet p-GaN/AlGaN/GaN/Si epitaksi yapısına sahip 10x10 mm² çip kullanılmıştır. Bu çiplerin p-

GaN tabakası kalınlığı 100 nm, AlGaIn tabaka kalınlığı 18 nm'dir. Çipin toplam kalınlığı ise 1 mm'dir.

3.4.1 Örneklerin Temizlenmesi

Çip fabrikasyonun ilk adımı kullanılacak örnek yüzeylerinin temizlenmesidir. Bunun için ilk olarak örnek yüzeyler aseton, ardından izopropil içerisinde 5 dk ultrasonik titreştirici ile temizlenmiştir. Örnek yüzeyindeki organik kalıntıları temizlemek için ise piranha çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Ardından deiyonize (DI) su ile Şekil 3.6 'da görüldüğü gibi durulanmıştır.



Şekil 3.6 Temizlenen alıtışların durulanma aşaması

3.4.2 p-GaN Metalizasyonu

p-GaN kapı yapısına sahip aygıtlarda sadece kapı metalinin altında p-GaN tabakası olması gerekmektedir. Geri kalan tüm yüzeydeki p-GaN tabakası kaldırılır. Bu sebeple kapı bölgesinin maskelenmesi gerekmektedir. Bu maskeleyme işlemi daha sonra kapı metali olarak da kullanılmaktadır.

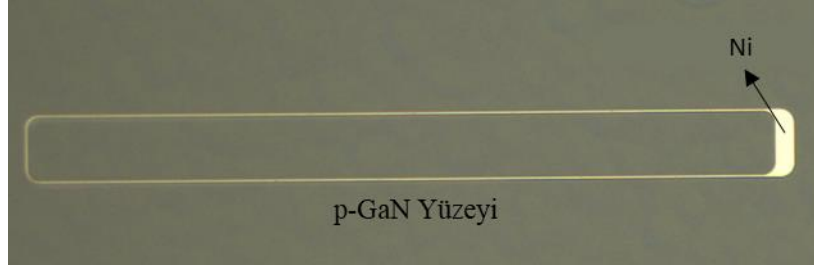
Metalizasyon öncesi istenilen desenin çip üzerine aktarılması için fotolitografi tekniği ile desenleme yapılmıştır. Metalizasyon adımı Şekil 3.7 'de gösterilen fiziksel buhar biriktirme

sisteminde elektron demeti buhar biriktirme tekniği ile Nikel kaplanmıştır. Metalizasyon sonrası fotorezist üzerinde kalan ve desene dahil olmayan metallerin fotorezist ile yüzeyden kalkması için aseton içerisine daldırılmıştır.

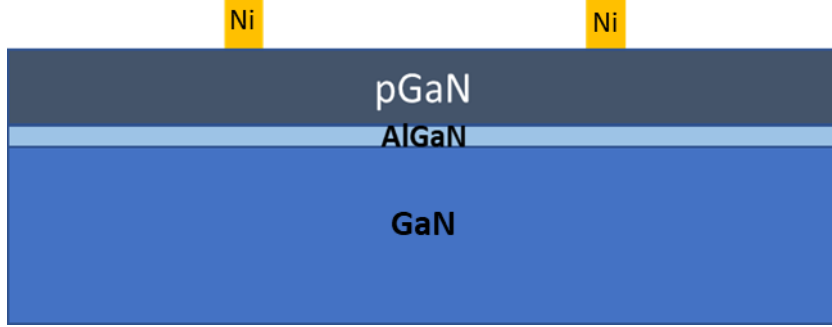


şekil 3.7 Elektron Demeti ile Fiziksel Buhar Biriktirme Sisteminin bir görüntüsü

Metalizasyon ve fotorezist kaldırma işlemi sonrası p-GaN kapı metalinin optik mikroskop görüntüsü ve çipin kesit çizimi hali şekil 3.8 ‘de verilmiştir.



(a)

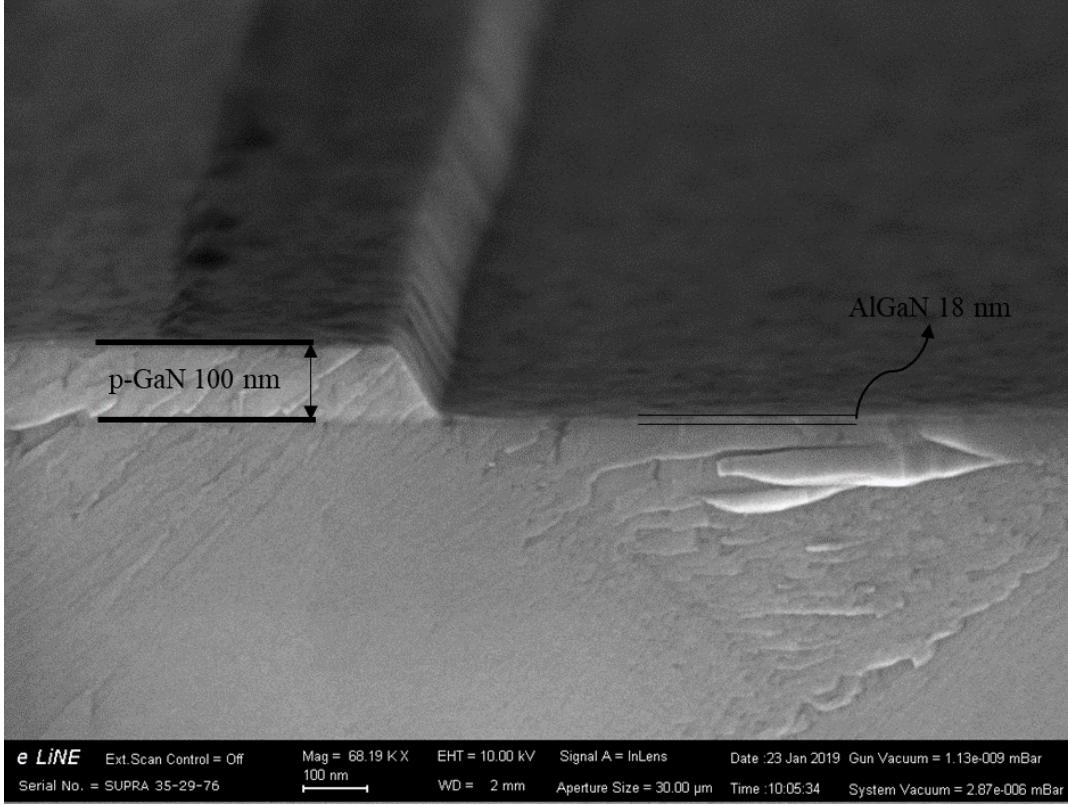


(b)

Şekil 3.8 p-GaN metalizasyonu sonrası örneğin (a) optik mikroskop görüntüsü ve (b) kesit görüntüsü

3.4.3 p-GaN Aşındırma

Sadece kapı metalinin altında p-GaN tabakası kalacak şekilde geri kalan tüm p-GaN tabakasının AlGaN'a kadar aşındırılması gerekmektedir. Burada AlGaN kalınlığı 2BEG için kritik olduğundan bu aşınmanın yüksek seçiciliğe sahip olması gerekmektedir. Tez kapsamında geliştirilen yüksek seçiciliğe sahip p-GaN/AlGaN/GaN kesit yapısının SEM görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir.



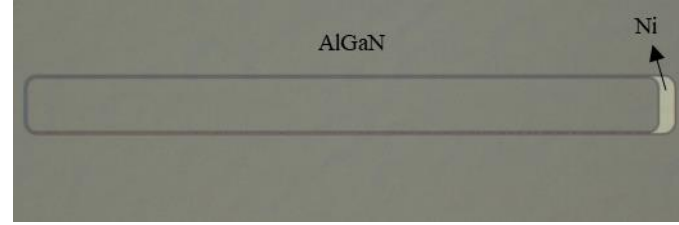
Şekil 3.9 p-GaN/AlGaIn seçici aşındırma SEM kesit görüntüsü

Aşındırma işlemi Şekil 3.10’da gösterilen cihaz ile ICP RIE tekniği kullanılarak yapılmıştır.

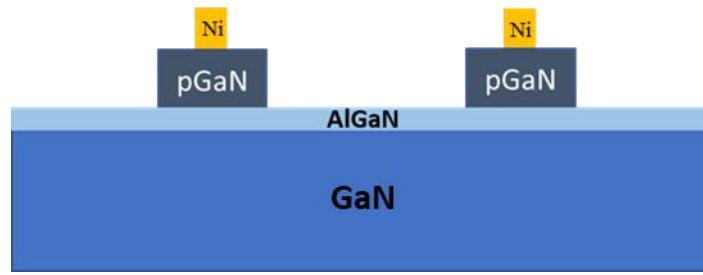


Şekil 3.10 Kuru aşındırma işleminin gerçekleştirildiği ICP RIE sisteminin bir görüntüsü

Aşındırma işlemi için Cl_2/O_2 gazlarını içeren plazma reçetesi kullanılmıştır. Aşındırma sonrası örneğin optik mikroskop görüntüsü ve kesit çizimi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



(a)

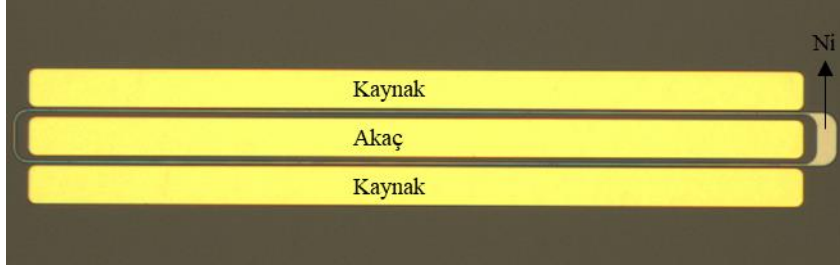


(b)

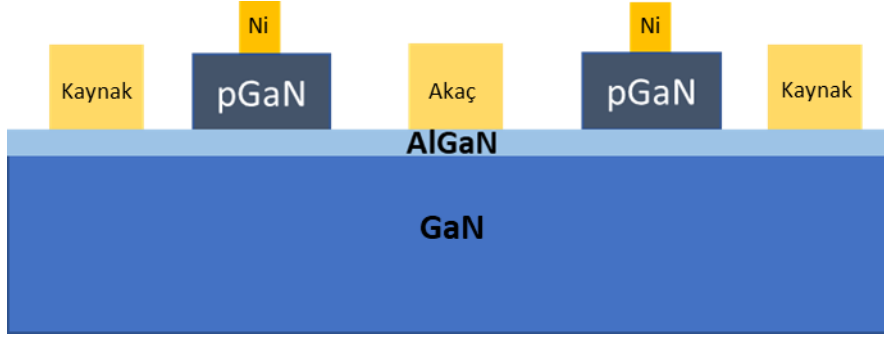
Şekil 3.11 p-GaN aşındırma sonrası örnek yüzeyinin (a) optik mikroskop ve (b) kesit görüntüsü

3.4.4. Omik Kontak Metalizasyonu

Transistörün akaç ve kaynak metallerini oluşturacak metaller fiziksel buhar biriktirme cihazı ile elektron demeti buhar biriktirme tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Metal olarak Ti/Al/Ni/Au kaplanmıştır. Metalizasyon öncesi istenilen desenin çip üzerine aktarılması için fotolitografi tekniği ile desenleme yapılmıştır. Metalizasyon sonrası fotorezist üzerinde kalan ve desene dahil olmayan metallerin fotorezist ile yüzeyden kalkması için aseton içerisinde daldırılmıştır. Metalizasyon ve fotorezist kaldırma işlemi sonrası akaç ve kaynak metallerinin optik mikroskop görüntüsü ve çipin kesit alanın şematize edilmiş hali Şekil 3.12’de verilmiştir.



(a)



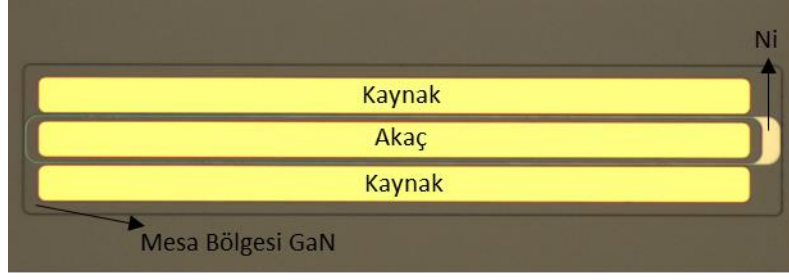
(b)

Şekil 3.12 Omik metalizasyonu sonrası örnek yüzeyinin (a) optik mikroskop ve (b) kesit görüntüsü

3.4.5 Mesa Adalarının Oluşturulması

10x10 mm²'lik bir çip üzerinde birden fazla sayıda aygıt bulunmaktadır. Bu aygıtların elektriksel olarak birbirlerinden izole edilebilmesi için her bir aygıtın çevresi AlGaN tabakasını geçecek şekilde ICP RIE tekniği kullanılarak aşındırılmıştır.

Aşındırma öncesi mesa deseni çipler üzerine fotolitografi tekniği ile desenlenmiştir. Aşındırma için BCl₃/Cl₂ gazları içeren plazma uygulanmıştır. Aşındırma sonrası örneklerin optik mikroskop görüntüsü ve kesit çizimi Şekil 3.13'te verilmiştir.



(a)

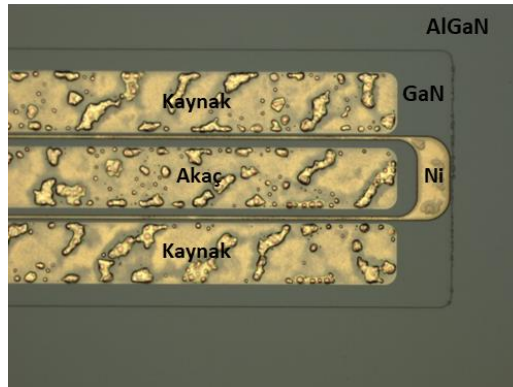


(b)

Şekil 3.13 Mesa aşındırma sonrası örnek yüzeyinin optik mikroskop (a) ve kesit görüntüsü (b)

3.4.6 Hızlı Tavlama Adımı

Akaç ve kaynak metallerine omik kontak özelliği kazandırmak için hızlı termal tavlama tekniği uygulanmaktadır. Bu teknik ile metaller 830°C’de tavlansmaktadır. Tavlama sonrası örneklerin optik mikroskop görüntüsü Şekil 3.14 ‘te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Transistörün hızlı tavlama sonrası optik mikroskop görüntüsü

3.4.7 Dielektrik İnce Film Büyütme

Çiplerden iki tanesinin (T_1 ve T_2) yüzeyi PECVD tekniği ile dielektrik ince film ile pasive edilirken üçüncü çipe (T_3) herhangi bir pasivasyon uygulanmamıştır. Çalışma 3.2’de elde edilen sonuçlardan elde edilen en iyi elektriksel özelliklere sahip ince filmler seçilerek örnek yüzeylerine Şekil 3.15’de gösterilen cihaz ile PECVD tekniği ile kaplanmıştır.



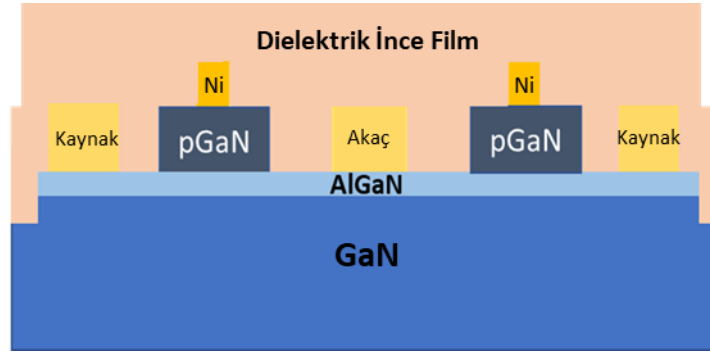
Şekil 3.15 Dielektrik ince filmlerin büyütüldüğü PECVD sisteminin bir görüntüsü

Örneklere uygulanan reçetelerin parametreleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Büyütülen ince filmlerin hazırlama parametreleri

Örnek Adı	Malzeme	$\text{SiH}_4/(\text{N}_2+\text{NH}_3)$	$\text{SiH}_4/(\text{N}_2+\text{N}_2\text{O})$	RF Gücü (W)	Dielektrik Kalınlığı (nm)
T_1	SiN_x	1,16		130	400
T_2	SiO_x		0,050	30	400

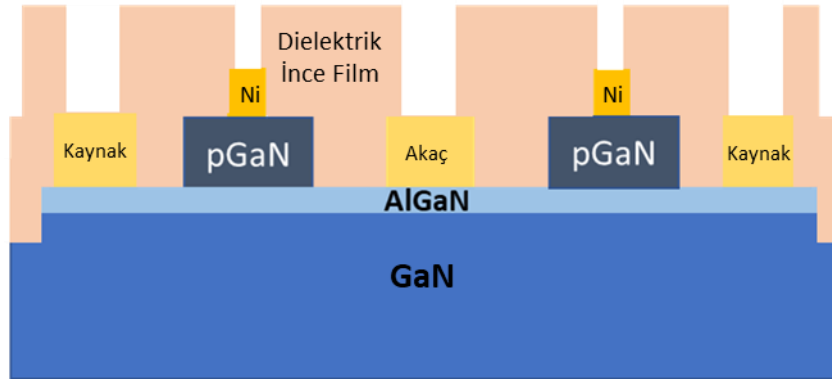
Kaplama sonrası örneklerin kesit çizimi Şekil 3.16’de verilmiştir.



Şekil 3.16 Dielektrik ince film büyütme sonrası örneğin kesit çizimi

3.4.8 Pasivasyon Açıklığı Aşındırması

Kapı, Akaç ve Kaynak üzerinden kontak alabilmek için metallerin üzerindeki pasivasyon tabakasının aşındırılması gerekmektedir. Örnek üzerindeki pasivasyon tabakasının aşınması gereken yerler fotolitografi tekniği ile desenlenmiştir. Aşındırma işlemi ICP RIE tekniği kullanılarak SF_6/Ar gazları içeren plazma ile yapılmıştır. Aşındırma sonrası örneğin kesit çizimi Şekil 3.17’ de verilmiştir.

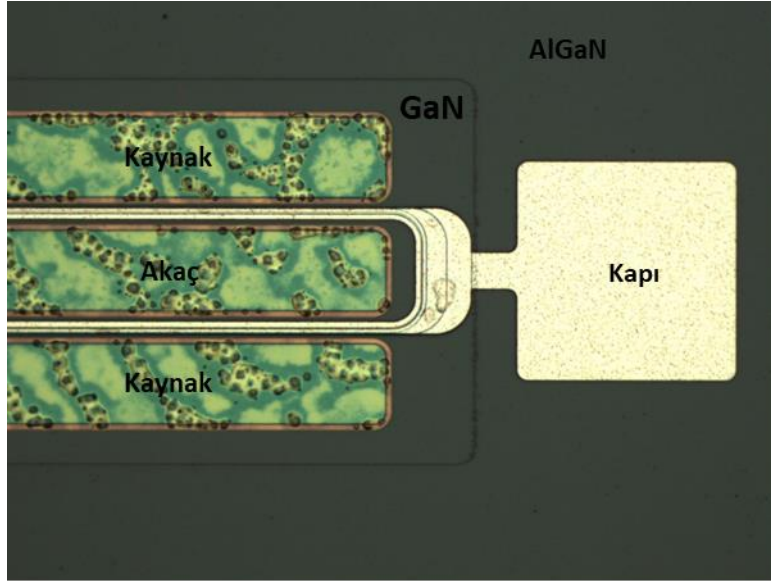


Şekil 3.17 Pasivasyon açıklığı aşındırması sonrası örneğin kesit çizimi

3.4.9 Kapı Alan Levhası Metalizasyonu

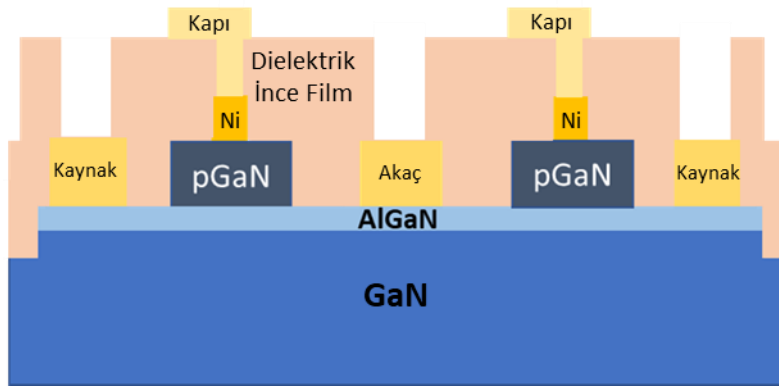
Kapı üzerinde bulunan pasivasyon tabakası aşındırıldıktan sonra bu bölgeye alan levhası metalizasyonu yapılmıştır. Metalizasyon öncesi fotolitografi tekniği ile alan levhası deseni örnek üzerine aktarılmıştır. Metalizasyon elektron demeti buhar biriktirme tekniği ile Ni/Al seçilerek yapılmıştır.

Metalizasyon sonrası fotorezist üzerinde kalan ve desene dahil olmayan metallerin fotorezist ile yüzeyden kalkması için aseton içerisinde daldırılmıştır. Metalizasyon ve fotorezist kaldırma işlemi sonrası akaç ve kaynak metallere optik mikroskop görüntüsü ve çipin kesit çizimi Şekil 3.18 'de verilmiştir.



11

(a)



(b)

Şekil 3.18 Alan Levhası Metalizasyonu sonrası örneğin (a) optik mikroskop ve (b) kesit görüntüsü

Mikrofabrikasyonu tamamlanan transistörlerin elektriksel ölçümleri bağlantı istasyonu yardımıyla yapılmıştır. TLM ölçümleri ile akaç ve kaynak metallerinin omik özellikleri incelenmiştir. Transistör I-V ölçümleri ile de maksimum doyum akımı, eşik gerilim değeri ve kırılma gerilimleri ölçülmüştür.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ilk olarak büyütülen dielektrik filmlerin optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Gaz akış oranı ve RF gücünün ince filmlere etkisi ve farklılıkların sebepleri değerlendirilmiştir.

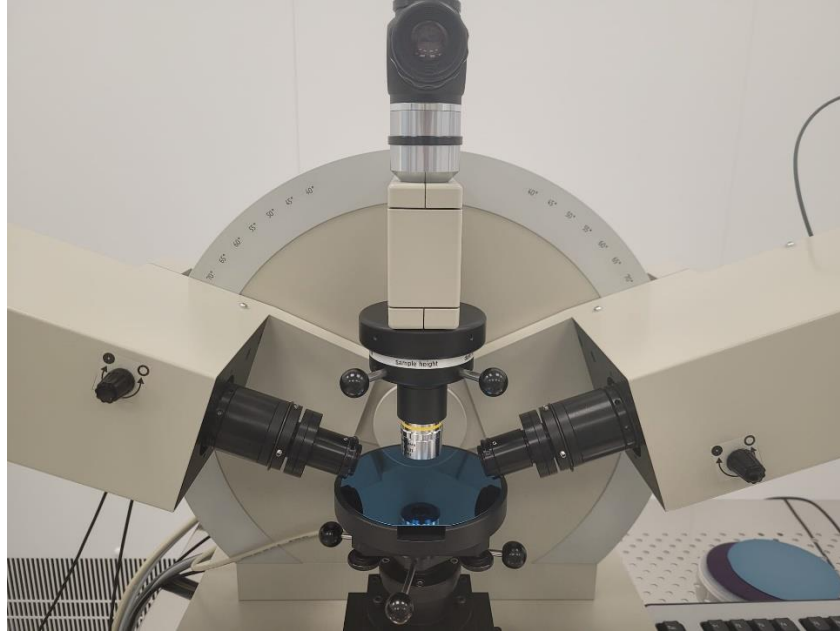
Daha sonra elektriksel olarak en iyi performansa sahip olan film p-GaN kapı yapısına sahip normalde kapalı transistör mikro fabrikasyonunda pasivasyon tabakası olarak kullanılarak aygıtın elektriksel performansı değerlendirilmiştir.

4.1 SiN_x ve SiO_x Filmlerin Karakterizasyonu

İlk olarak farklı gaz oranları ile büyütülen dielektrik filmler incelenerek yorumlanmıştır.

4.1.1 Elipsometre Ölçümleri

Büyütülen tüm dielektrik filmlerin kırma indisleri ve kalınlıklarını ölçmek için elipsometrenin görseli Şekil 4.1’de verilmiştir.

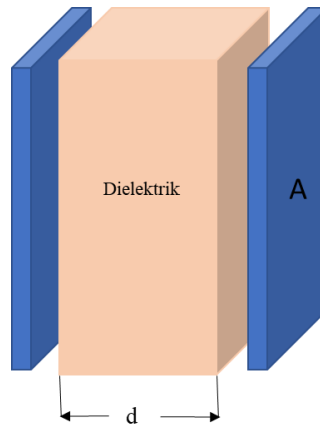


Şekil 4.1 Elipsometre ile kırma indisi ve ince film ölçme düzeneği

Tüm ölçümlerde gönderilen ışığın dalga boyu 632,8 nm olarak belirlenmiştir. Kalınlık ölçümünden yararlanarak kaplama hızı hesaplanmıştır.

4.1.2 Dielektrik Sabiti ve Kırılma Gerilimi Hesaplama

Büyütülen ince filmlerin önemli özelliklerinden biri olan dielektrik sabitinin hesaplanması için kapasitans ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi iki metal levha arasında bulunan dielektrik filmin kapasitans ölçümleri Formül 4-1’de gösterildiği gibi bağlı dielektrik sabiti hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 4.2 Paralel Levhalı Kapasitör

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4-1)$$

Eşitlik 4-1’ de verilen C kapasitans, ϵ_r bağlı dielektrik sabiti, ϵ_0 boş uzayın geçirgenliği, A dielektriğin ince filmin yüzey alanı, d metal levhalar arası mesafeyi vermektedir.

C-V ölçümleri için bağlantı istasyonu kullanılmıştır. Her bir dielektrik ince film için kapasitans ölçülmüştür. Her filmin kalınlığı 100 nm (d) olacak şekilde deney süresi belirlenmiştir. Metaller arasındaki dielektrik filmin alanı da optik mikroskop yardımı ile hesaplanarak her film için bağlı dielektrik sabiti hesaplanmıştır.

4.1.3 Gaz Akış Hızı Oranları Farklı Filmlerin Değerlendirilmesi

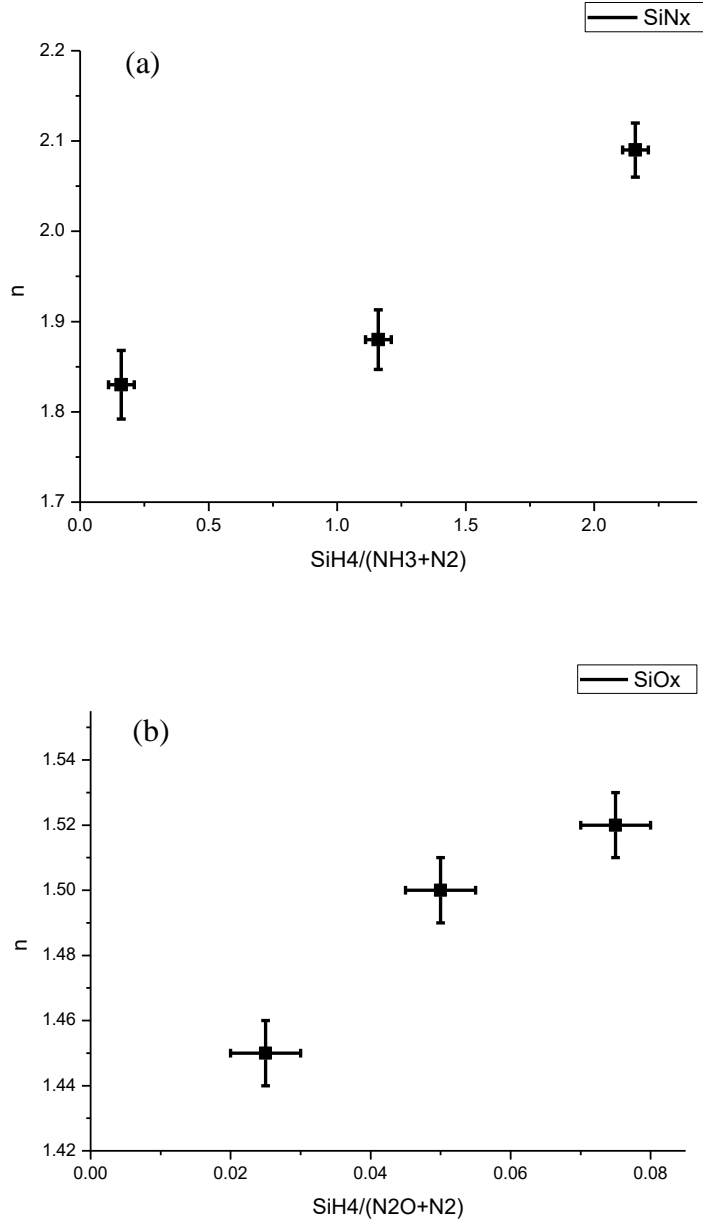
İlk olarak tüm filmlerin kırma indisleri ölçülüp dielektrik sabitleri hesaplanmıştır. Elipsometre ile alınan tüm ölçüm sonuçları Çizelge 4.1’de listelenmiştir.

Çizelge 4.1 İnce filmlerin kaplama hızı ve kırma indisi değerleri

Büyütülen Malzeme	Örnek Adı	SiH ₄ /(N ₂ +NH ₃)	SiH ₄ /N ₂ +N ₂ O	Kaplama Hızı (nm/s)	n (λ=632,8 nm)
SiN _x	F ₁	2,16		0,72	2,09
SiN _x	F ₂	1,16		0,55	1,88
SiN _x	F ₃	0,16		0,13	1,83
SiO _x	F ₄		0,075	1,51	1,52
SiO _x	F ₅		0,050	1,44	1,45
SiO _x	F ₆		0,025	0,28	1,46

Standart bir Si₃N₄ filmin kırma indisi dalga boyu 632,8 nm için yaklaşık olarak 2’dir [83]. Yapılan çalışmada F₁ örneğinin bu değere en yakın örnek olduğu görülmüştür. Fakat sitokiyometrik olarak Si oranı biraz fazla kabul edilebilir. F₂ ve F₃ örnekleri ise N oranı fazla SiN_x örnekler olarak kabul edilebilir. Standart bir SiO₂ filmin kırma indisi dalga boyu 632,8 için yaklaşık olarak 1,45’tir [83].

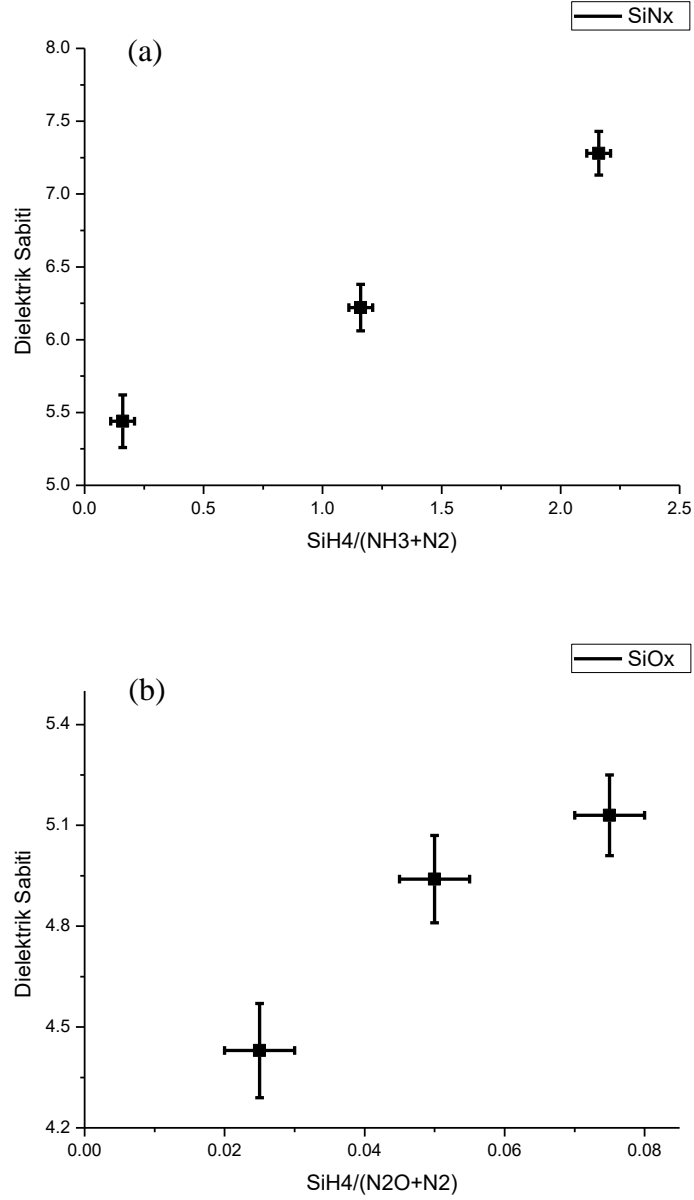
Alınan veriler ile gaz akışlarına karşılık kırma indisi, dielektrik sabiti ve kırılma gerilimi grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.3 (a) SiN_x ve (b) SiO_x ince filmlerin kırma indisinin gaz oranı ile değişimi

Şekil 4.3 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi Si/N oranı arttıkça kırma indisi artmıştır. Silan akış hızının artması hem SiN_x hem de SiO_x filmlerin kırma indisini arttırdığı görülüyor.

C-V ölçümleri için hazırlanan MIM yapıdaki örnekler üzerinde C-V ölçümleri alınmış ve CV ölçümleri yardımıyla her bir malzeme için dielektrik sabiti hesaplanmıştır. Gaz akış hızı oranları ile dielektrik sabitinin değişimi Şekil 4.4 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



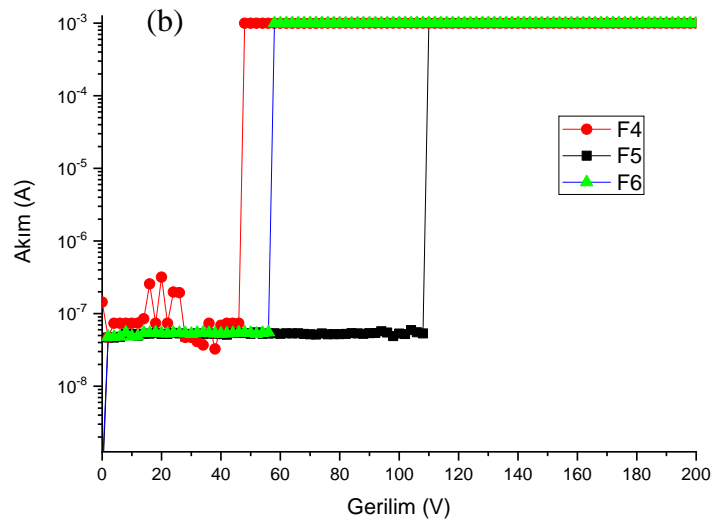
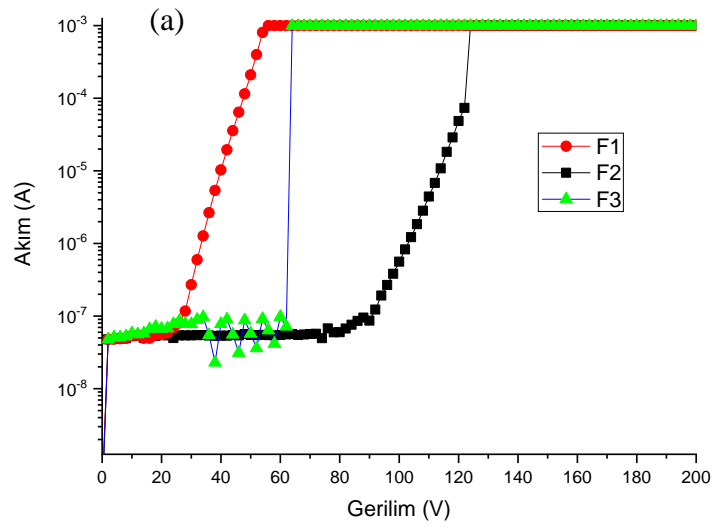
Şekil 4.4 (a) SiN_x ve (b) SiO_x gaz oranı ile dielektrik sabitinin değişimi

Şekil 4.4'teki grafiklerde hem SiN_x hem SiO_x filmlerde silan akış hızı arttıkça dielektrik sabitinin arttığı görülmektedir.

SiN_x ve SiO_x filmler PECVD tekniği ile büyütülürken gaz oranları filmlerin kırma indisi, dielektrik sabiti gibi parametreleri etkilemektedir [55, 57, 60, 61, 84-86]. Bunun temel sebeplerinden biri [Si] ya da [N] oranı ile yapıdaki Si-Si, N-N, N-H ve Si-H gibi bağların

konsantrasyonu değişmektedir. Bu bağlar ve bu bağların yoğunlukları filmlerin optik ve elektriksel özelliklerine etki etmektedir [55, 59, 85]. N-H bağ enerjisi Si-H bağ enerjisine göre daha yüksek olduğu için [N] oranı arttıkça bant aralığı da artar. Tam tersi durumda da [Si] oranı arttıkça bant aralığı azalır. Bant aralığının azalması ile kırma indisi ve dielektrik sabiti artmaktadır [84]. Aynı şekilde N₂O arttıkça O₂ bakımından daha zengin SiO_x filmler oluşur. Silisyumun elektron yoğunluğu oksijenden çok daha büyüktür. Böylece SiO_x filmlerin oksijen içeriğinin artması SiO_x filmin toplam elektron yoğunluğunun azalmasına neden olur ve buna bağlı olarak SiO_x filmindeki oksijen oranının artmasıyla kırma indisi ve dielektrik sabiti azalır [55, 86]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda da [Si] oranı arttıkça kırma indisi ve dielektrik sabitinin arttığı görülmüştür.

Aynı örnekler üzerinden I-V ölçümleri de alınarak kırılma gerilimleri hesaplanmıştır. IV ölçümleri bağlantı istasyonu kullanılarak alınmıştır. Akımın 1 mA' ulaştığı gerilim değeri kırılma gerilimi olarak kabul edilmiştir. Alınan IV ölçümleri Şekil 4.5 (a)'da SiN_x için ve (b)'de SiO_x için verilmiştir.



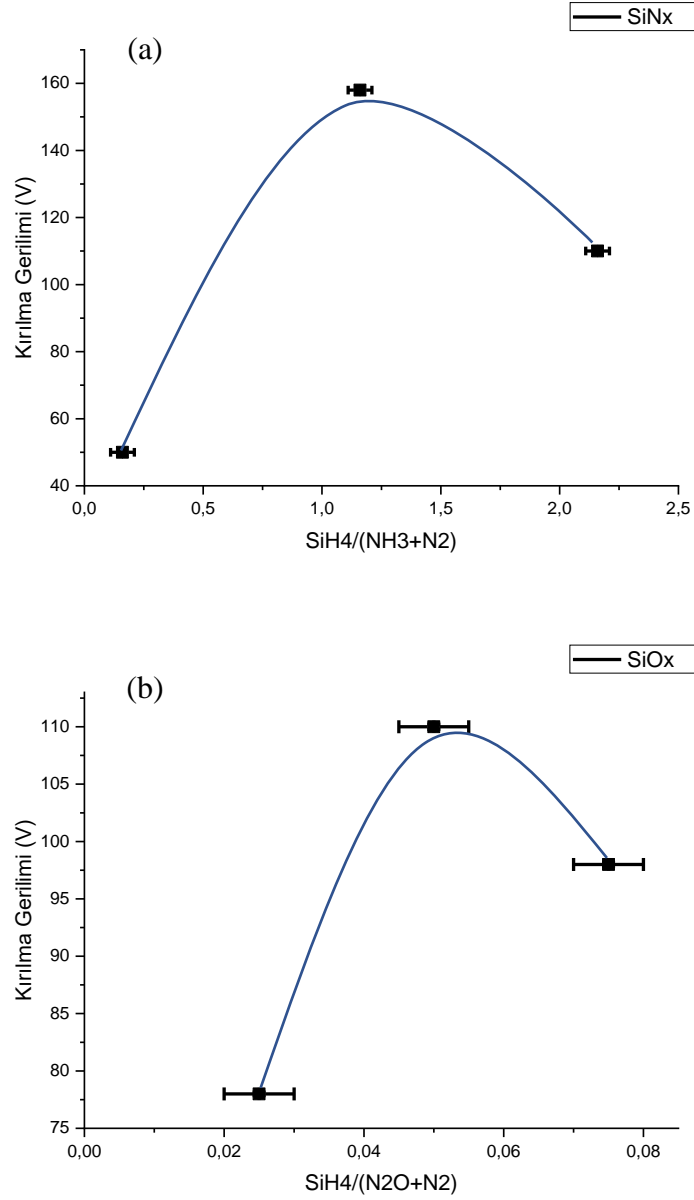
Şekil 4.5 (a) SiN_x ve (b) SiO_x ince filmlerin IV grafikleri

Her bir örneğin kırma gerilimi değeri Çizelge 4.2 'de tablolanmıştır.

Çizelge 4.2 Filmlerin kırılma gerilimleri

Büyütülen Malzeme	Örnek Adı	Kırılma Gerilimi (V)
SiN _x	F ₁	54
SiN _x	F ₂	158
SiN _x	F ₃	100
SiO _x	F ₄	78
SiO _x	F ₅	110
SiO _x	F ₆	96

Gaz oranları ile kırılma gerilimi değişimi Şekil 4.6(a) ve (b) gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Gaz oranlarına karşı kırılma gerilimi değerleri

Kırılma gerilimini etkileyen önemli faktörlerden biri yapıdaki kusurlar iken diğeri de bant aralığı olarak gösterilebilir. Bant aralığının genişliği elektron ve hol iletimini etkilemektedir [57]. Bu durumda [N] ve [O] konsantrasyonu arttıkça bant genişliğinin artması değerlik bandından iletim bandına elektron geçişi için gerekli olan enerjiyi arttıracığından kırılma geriliminin artması beklenir.

NH₃ artışı ile Si kopuk (dangling) bağlarının azaldığı yorumu yapılabilir. Bu bağlar ne kadar az ise kırılma gerilimi o kadar yüksek olacaktır [59, 87]. Aynı şekilde N₂O akış hızı oranı arttıkça kırılma gerilimi artar [88]. Fakat [N] oranı artmaya devam ettiğinde N-H bağları yığın kusur gibi davranacağı için kırılma gerilimi azalmaya başlayacaktır.

Yapılan deneysel çalışmada NH₃ akış hızı arttıkça kırılma gerilimi artış gösterirken bu oran artmaya devam ettiğinde kırılma geriliminin de azaldığı görülmüştür. [N] konsantrasyonu arttıkça bant genişliğinin artması ve Si kopuk bağlarının azalması ile başlangıçta kırılma gerilimi artarken bu oran artmaya devam ettiğinde kırılma geriliminin azalma sebebi N-H bağları olabileceği düşünülmüştür. Aynı şekilde N₂O akış hızı oranı arttıkça [O] oranının artması ile bant genişliği artmış daha sonra N-H bağlarının artmasıyla kırılma gerilimi azalmıştır. Ancak bu yorumu desteklemek için daha fazla veriye ihtiyaç olduğu açıktır.

100 nm kalınlığındaki ince filmler için dielektrik dayanıklılık hesaplandığında SiN_x filmler için en yüksek F₂ örneği yaklaşık olarak 16 MV/cm, SiO_x için 11 MV/cm bulunmuştur. Literatürde hem SiN_x hem SiO_x filmler için tipik kırılma dayanıklılığı 10 MV/cm olarak bulunmuştur [88]. Literatür ile karşılaştırıldığında elektriksel olarak oldukça iyi filmler büyütüldüğü görülmektedir.

4.1.4 RF Gücü Farklı Filmlerin Değerlendirilmesi

RF gücü hariç tüm plazma parametreleri sabit tutularak film büyütme yapılmıştır. Gaz akış oranı olarak 4.2 bölümünde en iyi elektriksel özelliklere sahip F₂ ve F₅ örneklerinin parametreleri seçilmiştir.

Büyütülen tüm ince filmlerin ilk olarak elipsometre ile kalınlıkları ve kırma indisleri ölçülmüştür. Alınan tüm ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'te listelenmiştir.

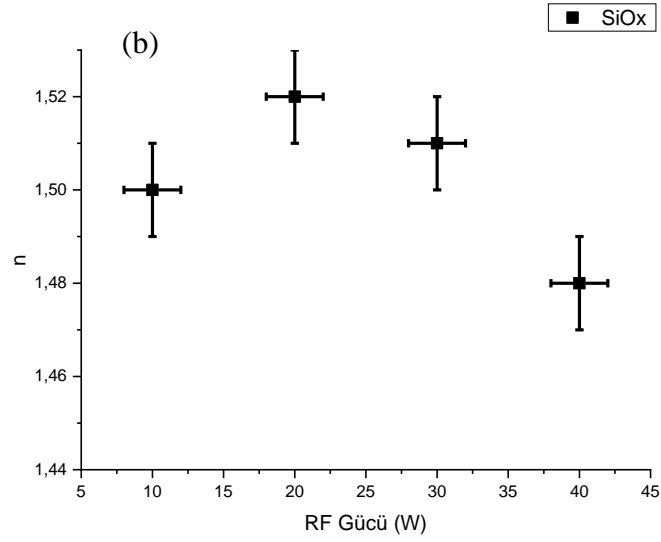
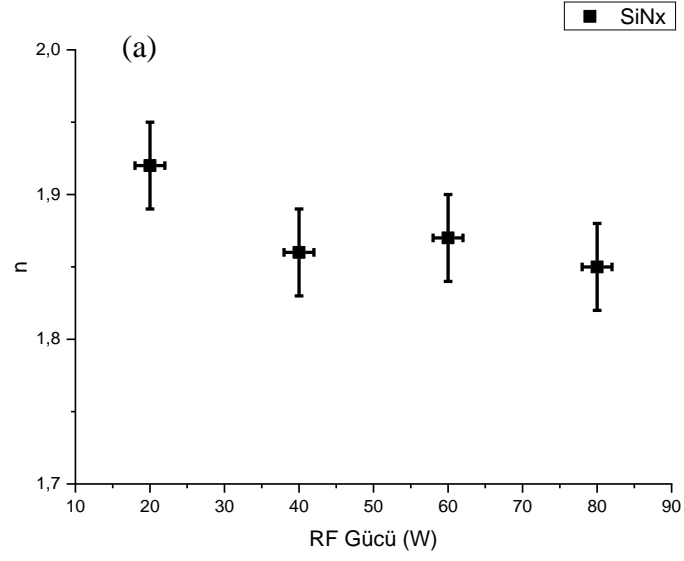
Çizelge 4.3 İnce filmlerin kaplama hızı ve kırma indisi değerleri

Büyütülen Malzeme	Örnek Adı	RF Gücü (W)	SiH ₄ /(N ₂ +NH ₃)	SiH ₄ /(N ₂ +N ₂ O)	Kaplama Hızı (nm/s)	n
SiN _x	W ₁	80	1,16		0,59	1,85
SiN _x	W ₂	60	1,16		0,45	1,86
SiN _x	W ₃	40	1,16		0,36	1,87
SiN _x	W ₄	20	1,16		0,24	1,92
SiO _x	W ₅	40		2,5	1,3	1,48
SiO _x	W ₆	30		2,5	1,1	1,51
SiO _x	W ₇	20		2,5	0,9	1,52
SiO _x	W ₈	10		2,5	0,8	1,5

SiO_x için RF gücü azaldıkça kırma indisinin arttığı ve SiO₂'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. SiN_x için kırma indisi RF gücü ile azalmakta ve Si₃N₄ kırma indisine yaklaşmaktadır.

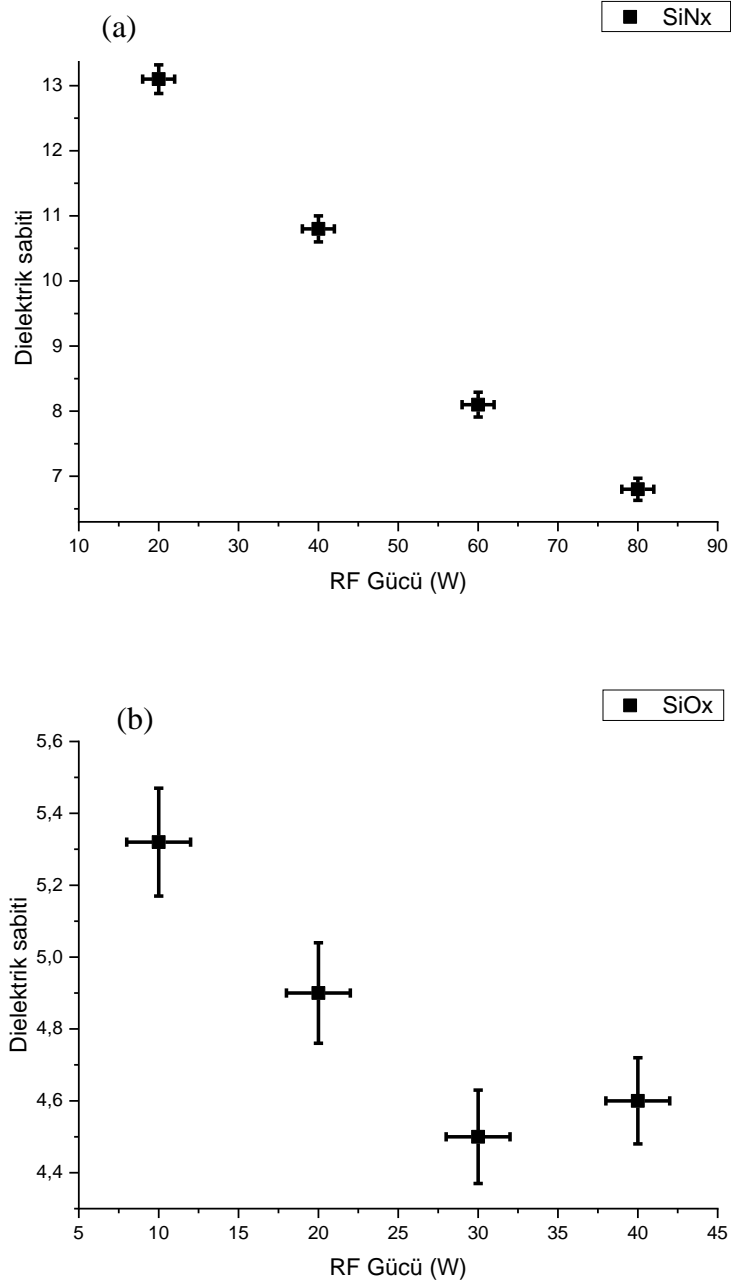
C-V ölçümleri için hazırlanan MIM yapıdaki örneklerden bağlantı istasyonu yardımıyla C-V ölçümleri alınmış ve bu ölçümler yardımıyla her bir malzeme için dielektrik sabiti hesaplanmıştır.

Aynı örnekler üzerinden bağlantı istasyonu yardımıyla I-V ölçümleri de alınarak kırılma gerilimleri hesaplanmıştır. I-V ölçümleri alınırken akım limiti 1 mA olarak belirlenmiştir. Alınan veriler ile gaz akışlarına karşılık kırma indisi, dielektrik sabiti ve kırılma gerilimi grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.7 PECVD tekniği ile üretilmiş (a) SiN_x ve (b) SiO_x ince filmlerin kırma indisinin RF gücü ile değişimi

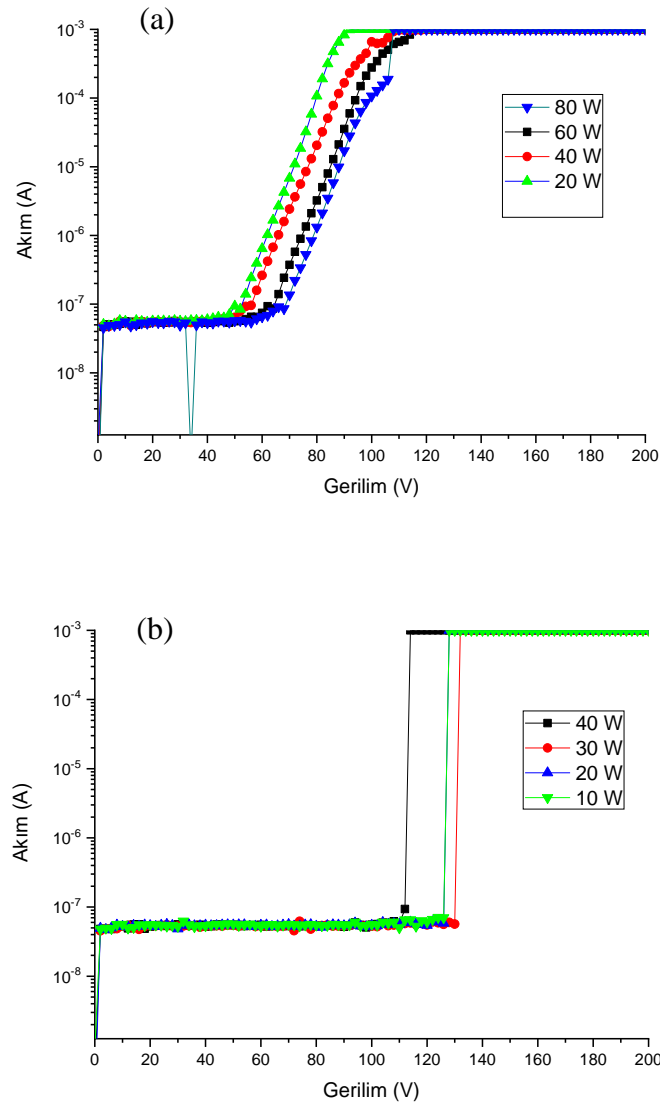
Şekil 4.7 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi RF gücü arttıkça kırma indisi azalmıştır. RF gücü ile dielektrik sabitinin değişimi Şekil 4.8 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 PECVD tekniği ile üretilmiş (a) SiN_x ve (b) SiO_x RF gücü ile dielektrik sabitinin değişimi

Şekil 4.8'teki grafiklerde hem SiN_x hem SiO_x filmlerde RF gücü arttıkça dielektrik sabitinin azaldığı görülmektedir.

PECVD tekniği ile büyütölen filmin yapısı ve kalitesi RF gücü ile değişir. RF gücünün artmasıyla daha yüksek plazma enerjisi oluşur ve daha reaktif radikallerin konsantrasyonu artar. Bu da kusur yoğunluğunun artmasına ve iyon hasarına sebebiyet verir [89, 90]. RF gücü oluşun filmlerin sitokiyometrik yapısını da etkiler. RF gücü arttıkça N/Si oranı da artar. Çünkü N₂ atomlarının N bağlarına dönüşmesi için gerekli enerji sağlanmış olur. N/Si oranı arttıkça kırma indisi ve dielektrik sabiti azalır [56, 61]. SiO_x için ise RF gücü arttıkça oksijen radikallerinin artması ile kırma indisi ve dielektrik sabiti azalır [55]. şekil 4.7 ve şekil 4.8'e bakıldığında RF gücü ile kırma indisi ve dielektrik sabitinin azaldığı bunun da literatür ile uyumlu olduğu görölmektedir.



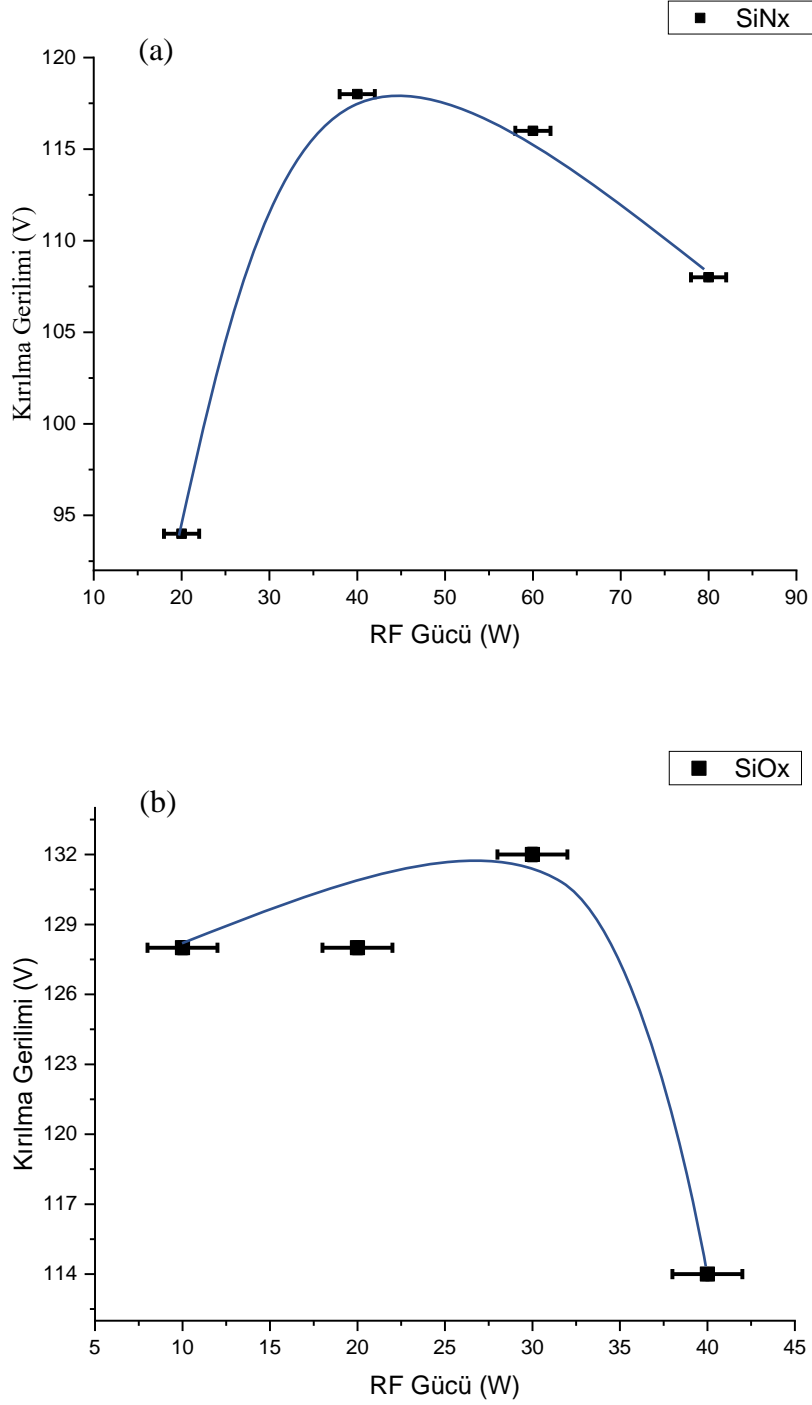
şekil 4.9 (a) SiN_x ve (b) SiO_x ince filmlerin IV grafikleri

Şekil 4.9’da PECVD tekniği ile büyütülen SiN_x ve SiO_x filmler için kırılma gerilimleri I-V grafikleri çizdirilmiştir. Her bir örneğin kırılma gerilimi değeri Çizelge 4.4 ‘te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Filmlerin kırılma gerilimleri

Büyütülen Malzeme	Örnek Adı	RF Gücü (W)	Kırılma Gerilimi (V)
SiN_x	W ₁	80	108
SiN_x	W ₂	60	116
SiN_x	W ₃	40	120
SiN_x	W ₄	20	94
SiO_x	W ₅	40	114
SiO_x	W ₆	30	132
SiO_x	W ₇	20	126
SiO_x	W ₈	10	126

RF gücü ile kırılma gerilimi değişimi Şekil 4.10 (a) ve (b) gösterilmiştir.



Şekil 4.10 PECVD tekniği ile üretilmiş (a) SiN_x ve (b) SiO_x filmlerin RF gücüne karşı kırılma gerilimi değerleri

Hem SiN_x hem de SiO_x filmler için kırılma indisi ve dielektrik sabitinin azalması kırılma geriliminin artmasına neden olmaktadır. [60, 86-88]. Bu sebeple RF gücünün artmasıyla kırılma gerilimi artmaya başlar. Fakat RF gücü artmaya devam ettikçe yüksek RF gücünden

kaynaklı kusur yoğunluğunun ve iyon hasarının artmasıyla kırılma geriliminin azalmaya başladığı yorumu yapılabilir.

4.3 Normalde Kapalı Transistörlerin I-V Ölçümleri

Bölüm 4.1’de incelenen ince filmlerden en iyi elektriksel özelliklere sahip SiN_x ve SiO_x katmanları seçilerek transistör mikro fabrikasyonu tamamlanmıştır. Transistör mikro fabrikasyon sonrası I-V ölçümleri Keithley 3612B SYSTEM Sourcemeter güç kaynağı ve bağlantı istasyonu ile yapılmıştır.

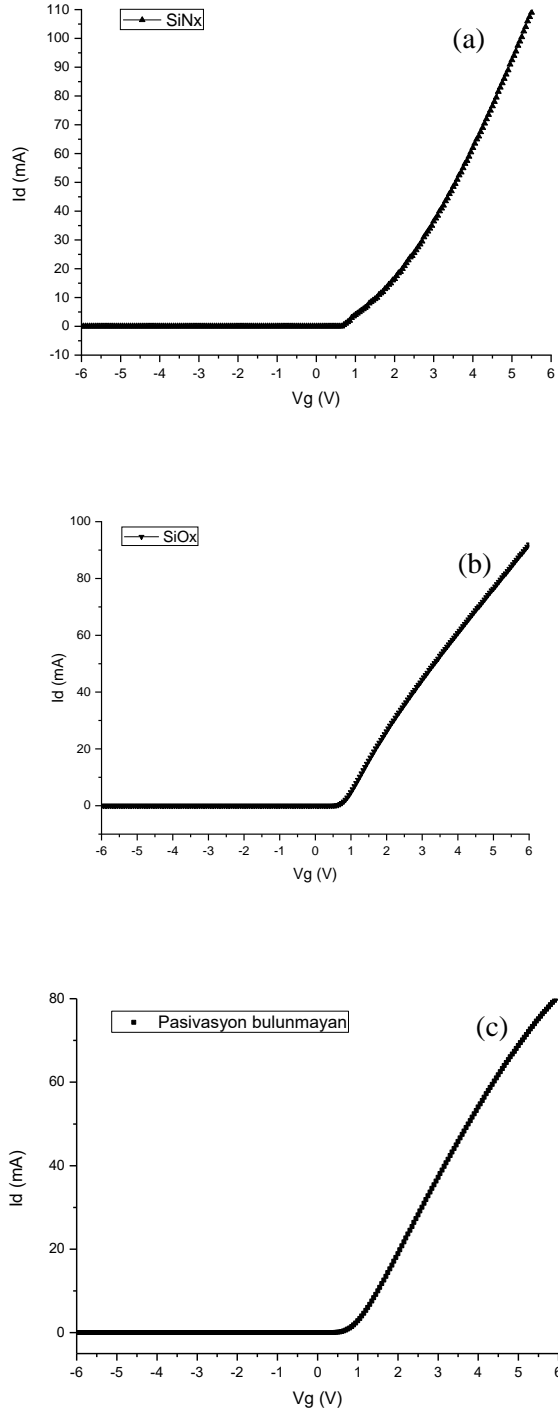
Gerilim karakteristiği elde etmenin iki yolu vardır. İlki çıkış gerilimi (akaç ve kaynak arasındaki (V_{ds})) sabitleyerek giriş (kapı (V_g)) gerilimini arttırmak şeklindedir. Bu şekilde giriş gerilimine karşılık çıkış gerilimi çizdirilir. Buna transfer karakteristiği denir. Transfer karakteristiği ile eşik gerilimi (V_{th}) elde edilmektedir. Diğer bir yol ise giriş (kapı) gerilimi sabit tutularak akaç akımını (I_d) ölçmektir. Buna ise çıkış (output) karakteristiği denmektedir.

Kırılma gerilimini ölçmek için ise kapı gerilimi eşik geriliminden küçük bir gerilim değerinde ($V_g < V_{th}$) sabit tutularak akaç gerilimi (V_d) arttırılarak akaç akımı okunur. Akaç akımının limit akımına ulaştığı gerilim değeri kırılma gerilimi (V_k) olarak kabul edilmiştir. Limit akım değeri 1 mA olarak belirlenmiştir.

4.3.1 Transfer Karakteristiği

Bağlantı istasyonu ile hem SiN_x hem SiO_x kaplı T₁, T₂ ve T₃ örnekleri için IV ölçümü alınmıştır. Ölçüm sonucu V_g - I_d grafiği Şekil 4.11’de çizilmiştir. Normalde kapalı transistörlerde $V_g > 0$ olduğu durumda kaynaktan akaça doğru bir akım akması beklenir. $V_g \leq 0$ olduğu durumda ise transistör kapalı durumdadır ve kanaldan akım akmaz. Kapı gerilimi negatif bir değerden pozitif değere doğru arttırıldığında bir süre akım ölçülmez fakat belli bir gerilim değerinden sonra akım hızla artmaya başlar. Bu gerilim değeri eşik değeridir ve normalde kapalı aygıtlarda bu gerilimin pozitif olması gerekmektedir. Şekil 4.11’de SiN_x pasivasyon tabakasına sahip T₁ transistörünün V_{th} değeri 0,65 V, SiO_x pasivasyon tabakasına sahip T₂ transistörünün V_{th} değeri 0,60 V, pasive edilmemiş T₃ transistörünün V_{th} değeri

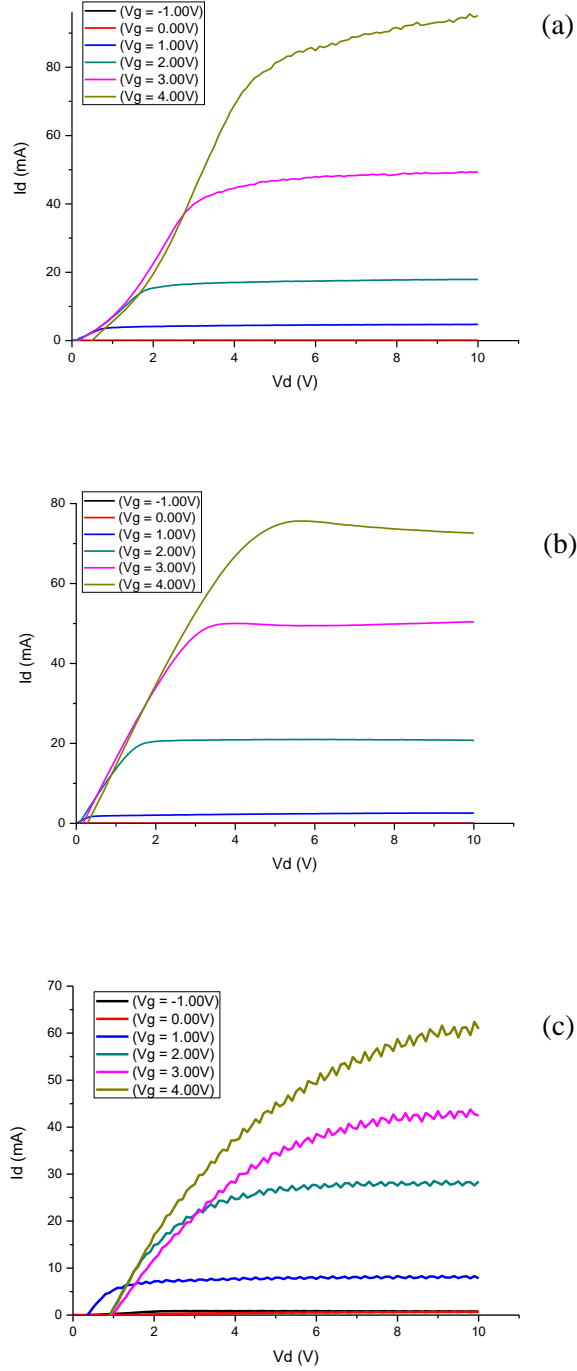
0,55 olarak birbirlerine oldukça yakın ve pozitif olarak ölçülmüştür. Bu da aygıtların normalde kapalı olarak çalıştıklarını göstermektedir.



Şekil 4.11 (a) SiN_x , (b) SiO_x ve filmlere sahip ve (c) pasivasyon bulunmayan transistörlerin V_g - I_d grafikleri

4.3.2 Çıkış Karakteristiği

Bağlantı istasyonu ile transistör IV ölçümü yapılmıştır. V_g -1 V ve +4 V aralığında adım adım artırılarak V_d 0 V'dan 10 V'a taranarak I_d ölçülmüştür. Ölçüm sonucu IV grafikleri Şekil 4.12'de çizilmiştir.

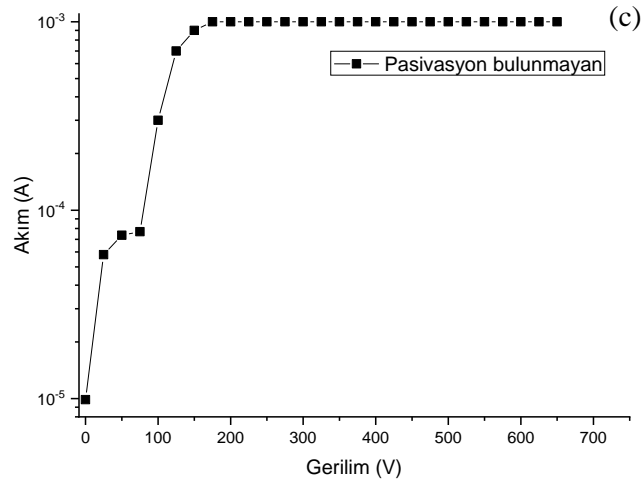
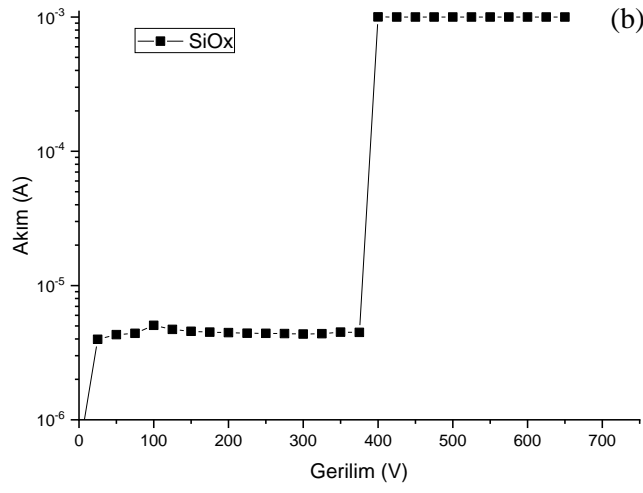
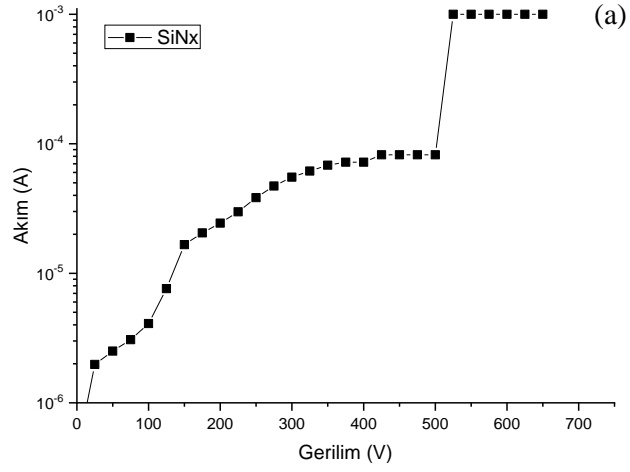


Şekil 4.12 (a) T_1 , (b) T_2 ve (c) T_3 transistörlerinin IV grafikleri

IV grafiklerinden T_1 için $V_g=4$ V iken maksimum akaç doyum akım toplam kapı genişliğine (0,5 mm) bölünerek akım yoğunluğu T_1 180 mA/mm, T_2 için 150 mA/mm T_3 için ise 130 mA/mm olarak ölçülmüştür. p-GaN tabakasına sahip transistörlerde p-GaN tabakası 2BEG yoğunluğunu azalttığı için akım yoğunlukları GaN/AlGaN HEMT yapılarla kıyaslandığında μ A mertebesine kadar düşebilmektedir. p-GaN tabakası haricinde AlGaN yüzeyinde bulunan yüzey tuzakları tarafından oluşturulan negatif yüzey durumları 2BEG yoğunluğunun azalmasına sebebiyet vermektedir. Bu durumda akım yoğunluğu da azalmaktadır. Fakat Si tabanlı bir pasivasyon malzemesi AlGaN tabakası üzerine büyütüldüğünde yüzey durumlarını azaltacaktır. Çünkü Si tabanlı dielektrik malzeme içerisindeki silisyumlar sığ donör gibi davranarak yüzey durumlarını nötralize eder. Böylelikle 2BEG yoğunluğu ve maksimum akaç akımı artar [11, 47-50].

4.3.3 Kırılma Gerilimi

Kırılma gerilimini ölçmek için kapı gerilimi eşik geriliminden büyük bir gerilim değerinde ($V_g = 1$ V) sabit tutularak akaç gerilimi (V_d) 650 V değerine kadar arttırılarak akaç akımı okunmuştur. Akaç akımının limit akımına ulaştığı gerilim değeri kırılma gerilimi (V_k) olarak kabul edilmiştir. Limit akım değeri 1 mA olarak belirlenmiştir. T_1 , T_2 ve T_3 transistörleri için kırılma gerilimi grafikleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 (a) T₁, (b) T₂ ve (c) T₃ için kırılma gerilimi grafikleri

T_1 için kırılma gerilimi 500 V T_2 için 400 V, T_3 için 150 V olarak ölçülmüştür. p-GaN/AlGaIn/GaN/Si normalde kapalı güç aygıtları için tipik kırılma gerilimi 200 V ile 600 V aralığındadır. Yapılan çalışmada pasivasyon tabakası bulunan aygıtların bu değer aralığında sonuç vermiştir. Fakat pasive edilmeyen aygıtın kırılma gerilimi bu aralığın dışında kalmıştır. Pasive edilmiş aygıtlar için elde edilen kırılma gerilimlerinin GaN tabanlı güç aygıtları için uygun değerlere sahip oldukları görülmektedir. Burada pasivasyon tabakasının aygıt yapısı yanında bir etkisi olduğu görülmektedir. Çünkü AlGaIn yüzey durumları sanal kapı gibi davranarak ve kanaldaki taşıyıcı bölgesini tüketir. Yüzey pasivasyonu ise bu durumu iyileştirerek kaçak akımları azaltarak kırılma gerilimini iyileştirir [9, 19].

Pasivasyon malzemesinin dielektrik sabiti arttıkça kapı ve akaç arasındaki elektrik alan profili iyileşiyor, elektrik alan pikleri azalıyor. Bu elektrik alan pikleri potansiyel kırılma bölgeleri olduğu için bu piklerin azalması kırılma gerilimini arttırıyor. Bu sebeple daha yüksek dielektrik sabitine sahip SiNx tabakasının bulunduğu T_1 transistörünün kırılma gerilimi daha yüksek ölçülmüştür [10, 19, 51].

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında yüksek kırılma gerilimi uygulamalarında kullanılmak üzere GaN temelli normalde kapalı transistörler üretilerek aygıt performansını iyileştirmek için pasivasyon tabakası geliştirilmiştir. Pasivasyon tabakası olarak kullanılan SiN_x ve SiO_x filmler PECVD tekniği ile büyütülmüştür. Gaz akış hızı oranları ve RF gücünün, filmlerin optik ve elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslanmış ve optimum parametreler belirlenmiştir. Burada SiH_4 akış hızının kırma indisi, dielektrik sabiti gibi optik özellikleri etkilediği görülmüştür. Filmlerin [Si] oranı arttıkça daha iletken bir hal aldıkları görülmüştür. Bunun sonucu olarak kırma indisleri ve dielektrik sabitleri artmıştır. Bu özelliklerin kırılma gerilimine etkisi incelendiğinde dielektrik sabitinin artması ile iletkenlik artacağından kırılma geriliminin (V_k) azalması beklenmiştir. Fakat kırılma gerilimine sadece filmlerin iletkenliğinin değil, yapı kusurları, Si kırık bağları gibi durumların da etkisinin olduğu yorumlanmıştır.

Gaz akış hızı oranları için kırılma geriliminin (V_k) en optimize değeri belirlendikten sonra aynı işlem RF gücü için de yapılmıştır. RF gücü arttıkça yapı kusurları ve yüzey hasarı azalacağı için uygulanabilen en düşük RF güçleri ile çalışılmıştır. Beklendiği gibi RF gücünün azalması ile kırılma geriliminde iyileşme görülmüştür, fakat RF gücü azalmaya devam ettiğinde kırılma gerilimi azalmıştır. Bunun temel sebeplerinden biri N konsantrasyonunun azalmasıdır. Aynı durum O_2 atomları için de geçerlidir. Bu sebeple hem gaz akışları hem RF gücü için etkin değerler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

SiN_x ve SiO_x filmler AlGaN/GaN YEMT üretiminde pasivasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. DC performans incelendiğinde SiN_x , SiO_x ile pasive edilmiş ve pasivasyon bulunmayan aygıtların kırılma gerilimleri ve akım yoğunlukları sırasıyla 500 V- 180 mA/mm, 400 V- 150 mA/mm, 150 V- 130 mA/mm olarak ölçülmüştür. GaN/Si güç aygıtları incelendiğinde güvenilir çalışma gerilimi olan 200 V- 600 V aralığının üst sınırlarına yaklaşıldığı görülmüştür. İnce filmler karşılaştırıldığında pasivasyon tabakasının akım yoğunluğunu ve kırılma gerilimini iyileştirdiği görülmüştür. SiN_x hem akım yoğunluğu hem kırılma gerilimi açısından daha iyi sonuç vermiştir. Bunun temel sebeplerinden biri SiN_x filmin daha yüksek dielektrik sabitine sahip olmasından kaynaklı aygıtın elektrik alan

homojenitesini daha iyi sağlamış olduğu yorumu yapılmıştır. Her ne kadar dielektrik sabiti küçüldükçe kırılma geriliminin artacağı düşünülse de AlGaN/GaN YEMT yapının iç dinamiklerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği görülmüştür.

Yapılan tüm çalışmalar sonucunda pasivasyon tabakası bulunmayan AlGaN/GaN aygıtın akım yoğunluğu 130 mA/mm'den SiO_x pasivasyonu ile 150 mA/mm'ye, SiN_x pasivasyon ile 180 mA/mm'ye yükselmiştir. Akım yoğunluğundaki bu artış, pasivasyon tabakasının AlGaN yüzeyinde bulunan ve 2BEG yoğunluğunun azalmasına sebep olan durum yoğunluklarını azaltmış olduğu yorumu yapılmıştır. Kırılma gerilimi 150 V değerinden SiO_x ile 400 V, SiN_x ile 500 V değerine yükselmiştir. Pasivasyon tabakasının aygıtın akım yoğunluğu ve kırılma gerilimini arttırarak aygıt performansında iyileştirme sağlanabildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Roccaforte, F., et al., *An Overview of Normally-Off GaN-Based High Electron Mobility Transistors*. Materials (Basel), 2019. **12**(10): p. 1599-1617.
2. Anwar, S., et al., *Analysis and Characterization of Normally-Off Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors*. Cmc -Tech Science Press-, 2021. **69**: p. 1021-1037.
3. Medjdoub, F. and K. Iniewski, *Gallium Nitride (GaN): Physics, Devices, and Technology*. 2017: CRC Press. 2-9.
4. Meneghini, M., G. Meneghesso, and E. Zanoni, *Power GaN Devices: Materials, Applications and Reliability*. 2017: Springer. 1-27.
5. Yogesh Kumar, S., *Disruptive Wide Bandgap Semiconductors, Related Technologies, and Their Applications*. 2018, Rijeka: Intech Open. 20-30.
6. Fan, Z., et al., *AlGaIn/GaN double heterostructure channel modulation doped field effect transistors (MODFETs)*. Electronics Letters, 1997. **33**: p. 814-815.
7. Calle, F., et al., *AlGaIn/GaN HEMTs: material, processing, and characterization*. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2003. **14**: p. 271-277.
8. Meneghini, M., et al., *Technology and Reliability of Normally-Off GaN HEMTs with p-Type Gate*. Energies, 2017. **10**(2): p. 153-169.
9. Arulkumaran, S., et al., *Surface passivation effects on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors with SiO₂, Si₃N₄, and silicon oxynitride*. Applied Physics Letters, 2004. **84**(4): p. 613-615.
10. Gupta, A., et al., *Effect of Surface Passivation on the Electrical Characteristics of Nanoscale AlGaIn/GaN HEMT*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. **225**: p. 012095.
11. Tan, W., et al., *Comparison of different surface passivation dielectrics in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002. **35**(7): p. 595.
12. Jaffrennou, P., et al., *Laser ablation of SiO₂/SiN_x and AlO_x/SiN_x back side passivation stacks for advanced cell architectures*. 2011. 2180-2183.
13. Jeong, M.I. and C.-J. Choi. *Passivation properties of SiN_x and SiO₂ thin films for the application of crystalline Si solar cells*. 2014. Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology.
14. Chen, F.W., T.t.A. Li, and J.E. Cotter. *PECVD Silicon Nitride Surface Passivation for High-Efficiency N-Type Silicon Solar Cells*. in 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference. 2006.
15. Budhraja, V., *Effect of SiO₂ and SiN_x Passivation on CdTe based Solar Cells*.
16. Zhou, Y., et al., *Impact of SiN_x passivation on the surface properties of InGaAs photo-detectors*. Journal of Applied Physics, 2015. **118**: p. 034507.

17. Yue, Y.Z., et al. *Study of Surface Passivation with Different α -SiNB_xB:H Films Effect on AlGa_N/Ga_N HEMTs*. in *2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings*. 2006.
18. Ye, P.D., et al., *Improvement of GaAs metal–semiconductor field-effect transistor drain–source breakdown voltage by oxide surface passivation grown by atomic layer deposition*. *Solid-State Electronics*, 2005. **49**: p. 790-794.
19. Natarajan, R., E. Parthasarathy, and P. Murugapandiyan, *Influence of High-k Passivation Layer on Gate Field Plate AlGa_N/Ga_N/AlGa_N Double Heterojunction HEMT*. *Silicon*, 2022: p. 1-9.
20. Ohno, Y., et al., *Effects of surface passivation on breakdown of AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors*. *Applied Physics Letters*, 2004. **84**(12): p. 2184-2186.
21. Khan, M.A.H. and M.V. Rao, *Gallium Nitride (Ga_N) Nanostructures and Their Gas Sensing Properties: A Review*. *Sensors (Basel)*, 2020. **20**(14): p. 3889-4011.
22. Gülseren, M., *DESIGN, FABRICATION, AND CHARACTERIZATION OF NORMALLY-OFF GAN HEMTS*. 2019, Bilkent Üniversitesi.
23. Acar, M.A., *Fabrication, Modeling and Characterization of Ga_N HEMTs, and Desing f High Power MMIC Amplifier*, in *Electrical and Electronics Engineering*. 2009, Bilkent Univeristy.
24. Kim, N., et al., *Current Trends in the Development of Normally-OFF Ga_N-on-Si Power Transistors and Power Modules: A Review*. *Journal of Electronic Materials*, 2020. **49**(11): p. 6829-6843.
25. Andiwijayakusuma, D., M. Saito, and A. Purqon, *Density functional theory study : Electronic structures of RE:Ga_N in wurtzite G ?15 RE 1 N 16*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016. **739**: p. 012027.
26. Bernardini, F., *Doğalous and Piezoelectric Polarization: Basic Theory vs. Practical Recipes*. 2007, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 49-68.
27. Hellman, E.S., *The Polarity of Ga_N: a Critical Review*. *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*, 2014. **3**.
28. Bernardini, F., V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, *Doğalous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides*. *Physical Review B*, 1997. **56**(16): p. R10024-R10027.
29. Ambacher, O., *Polarization Induced Effects in AlGa_N/Ga_N Heterostructures*. *Acta Physica Polonica A*, 2000. **98**(3): p. 195-201.
30. Zhu, D., D.J. Wallis, and C.J. Humphreys, *Prospects of III-nitride optoelectronics grown on Si*. *Rep Prog Phys*, 2013. **76**(10): p. 106501.
31. MILLESIMO, M., *OFF-STATE RELIABILITY OF pGa_N POWER HEMTs*, in *Electronic*. 2019, Universita di Bologna campus di cesena.
32. BROWN, R., *A NOVEL AlGa_N/Ga_N BASED ENHANCEMENT MODE HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR WITH SUB CRITICAL BARRIER THICKNESS*, in *Engineering*. 2015, University of Glasgow.
33. Lee, J.-H. and K.-S. Im, *Growth of High Quality Ga_N on Si (111) Substrate by Using Two-Step Growth Method for Vertical Power Devices Application*. *Crystals*, 2021. **11**(3).

34. Zhong, Y., et al., *A review on the GaN-on-Si power electronic devices*. Fundamental Research, 2021.
35. Ohno, Y. and M. Kuzuhara, *Application of GaN-based heterojunction FETs for advanced wireless communication*. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001. **48**(3): p. 517-523.
36. He, X., Z. De-Gang, and D.-S. Jiang, *Formation of two-dimensional electron gas at AlGa_N/Ga_N heterostructure and the derivation of its sheet density expression*. Chinese Physics B, 2015. **24**(6): p. 067301.
37. Piner, E., et al., *AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistor Structure Design and Effects on Electrical Properties*. MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, 2000. **5**: p. 349-354.
38. Subramani, N.K., *Physics-based TCAD device simulations and measurements of Ga_N HEMT technology for RF power amplifier applications.*, in *Electronics*. 2017, Université de Limoges.
39. Koo, S.-M. and M.-S. Kang, *Gate metal dependent electrical characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs*. Materials Research Bulletin, 2014. **58**: p. 178-180.
40. Volcheck, V. and V. Stempitsky, *Mobility of a two-dimensional electron gas in the AlGa_N/Ga_N heterostructure: simulation and analysis*. Journal of Physics: Conference Series, 2019. **1410**(1): p. 012200.
41. Xia, X., Z. Guo, and H. Sun, *Study of Normally-Off AlGa_N/Ga_N HEMT with Microfield Plate for Improvement of Breakdown Voltage*. Micromachines (Basel), 2021. **12**(11).
42. Devices, F.R.a.M.L.-P.E.a.O., *Nitride Semiconductor Technology*. 2020: WILEY-VCH. 137-155.
43. He, J., et al., *Recent Advances in Ga_N-Based Power HEMT Devices*. Advanced Electronic Materials, 2021. **7**(4).
44. Greco, G., F. Iucolano, and F. Roccaforte, *Review of technology for normally-off HEMTs with p-Ga_N gate*. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018. **78**: p. 96-106.
45. Chen, K.J., et al. *Physics of fluorine plasma ion implantation for Ga_N normally-off HEMT technology*. in *2011 International Electron Devices Meeting*. 2011, p. 19.4.1-19.4.4
46. Anwar, S., et al., *Analysis and Characterization of Normally-Off Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors*. Computers, Materials & Continua, 2021. **69**(1): p. 1021-1037.
47. Vetry, R., et al., *The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGa_N/Ga_N HFETs*. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2001. **48**: p. 560-566.
48. Fu, C., et al., *The influence of the PCF scattering on the electrical properties of the AlGa_N/Al_N/Ga_N HEMTs after the Si₃N₄ surface passivation*. Applied Physics A, 2018. **124**(4).
49. Sleptsova, A.A., et al., *Optimization of passivation in AlGa_N/Ga_N heterostructure microwave transistor fabrication by ICP CVD*. Modern Electronic Materials, 2020. **6**(2): p. 71-75.

50. Lu, W., et al., *A comparative study of surface passivation on AlGaIn/GaN HEMTs*. Solid-State Electronics, 2002. **46**: p. 1441-1444.
51. Hanawa, H., et al., *Numerical Analysis of Breakdown Voltage Enhancement in AlGaIn/GaN HEMTs With a High- κ Passivation Layer*. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014. **61**(3): p. 769-775.
52. Huang, Y., et al., *High-performance normally off p-GaN gate high-electron-mobility transistor with In_{0.17}Al_{0.83}N barrier layer design*. Optical and Quantum Electronics, 2021. **53**(3).
53. Hasan, M.T., et al., *Current Collapse Suppression by Gate Field-Plate in AlGaIn/GaN HEMTs*. IEEE Electron Device Letters, 2013. **34**(11): p. 1379-1381.
54. Irudayam, A., *Electrical characterization of plasma-enhanced Cvd silicon nitride*, in *Electrical and Computer Engineering*. 2001, University of Nevada: Las Vegas.
55. Hussein, M.G., et al., *Optimization of plasma-enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride layers for integrated optics applications*. Thin Solid Films, 2007. **515**(7-8): p. 3779-3786.
56. Thalía Domínguez Bucio, A.Z.K., Cosimo Lacava, Stevan Stankovic, Goran Z Mashanovich, Periklis Petropoulos and Frederic Y Gardes, *Material and optical properties of lowtemperature NH₃-free PECVD SiN_x layers for photonic applications*. J. Phys. D: Appl. Phys. , 2017. **50**.
57. Tiour, F., et al., *Opto-structural properties of Si-rich SiN_x with different stoichiometry*. Applied Physics A, 2020. **126**(1): p. 2-10.
58. Ravichandran, R., A.X. Wang, and J.F. Wager, *Solid state dielectric screening versus band gap trends and implications*. Optical Materials, 2016. **60**: p. 181-187.
59. Garcia, S., et al., *Deposition of SiN_x:H thin films by the electron cyclotron resonance and its application to Al/SiN_x:H/Si structures*. Journal of Applied Physics, 1998. **83**(1): p. 332-338.
60. Mackenzie, K., et al., *Stress control of Si-based PECVD dielectrics*. Proceedings - Electrochemical Society, 2005: p. 148-159.
61. Khawaja, H.U.R., et al., *Characterisation of dielectric properties of PECVD Silicon Nitride for RF MEMS applications*. IEEE INMIC 2008: 12th IEEE International Multitopic Conference - Conference Proceedings, 2008: p. 91-96.
62. Chiu, F.-C., *A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. **2014**: p. 578168.
63. Betancourt, T. and L. Brannon-Peppas, *Micro- and nanofabrication methods in nanotechnological medical and pharmaceutical devices*. International journal of nanomedicine, 2006. **1**: p. 483-495.
64. Ghosh, P.K., *Study of Plasmonic Properties of the Gold Nanorods in the Visible to Near Infrared Light Regime*, in *Master of Science in Physics*. 2016, University of Dhaka: Bangladesh.
65. Stevenson, J.T.M. and A.M. Gundlach, *The application of photolithography to the fabrication of microcircuits*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1986. **19**(9): p. 654-667.
66. Gili, V.F., *All-dielectric nonlinear nanophotonics*. Material chemistry. Université Sorbonne Paris Cité, 2018.

67. Gryglewicz, J., et al., *Reactive ion etching of GaN and AlGaIn/GaN assisted by Cl₂/BCl₃*. Materials Science-Poland, 2012. **29**(4): p. 260-265.
68. Zhou, S., B. Cao, and S. Liu, *Dry etching characteristics of GaN using Cl₂/BCl₃ inductively coupled plasmas*. Applied Surface Science, 2010. **257**(3): p. 905-910.
69. Pearton, S.J., R.J. Shul, and F. Ren, *A Review of Dry Etching of GaN and Related Materials*. MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, 2014. **5**(1).
70. Pant, B.D. and U.S. Tandon, *Etching of Silicon Nitride in CCl₂F₂, CHF₃, SiF₄, and SF₆ Reactive Plasma: A Comparative Study*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1999. **19**(4): p. 545-563.
71. Han, Y., et al., *Highly Selective Dry Etching of GaN over AlGaIn Using Inductively Coupled Cl₂/N₂/O₂ Plasmas*. Japanese Journal of Applied Physics, 2003. **42**(Part 2, No. 10A): p. L1139-L1141.
72. Schuette, M.L. and W. Lu, *Highly selective zero-bias plasma etching of GaN over AlGaIn*. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2007. **25**(6).
73. Wong, J.C., et al., *Selective anisotropic etching of GaN over AlGaIn for very thin films*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2018. **36**(3).
74. Schmidt, J., M.J. Kerr, and A. Cuevas, *Surface passivation of Si solar cells using plasma-enhanced chemical vapor deposited SiN films and thermal SiO₂/plasma SiN stacks*. Semiconductor Science and Technology, 2001. **16**: p. 164.
75. Martinu, L., O. Zabeida, and J.E. Klemberg-Sapieha, *Chapter 9 - Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Functional Coatings*, in *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)*, P.M. Martin, Editor. 2010, William Andrew Publishing: Boston. p. 392-465.
76. Bashir, A., et al., *Chapter 3 - Interfaces and surfaces*, in *Chemistry of Nanomaterials*, T.I. Awan, A. Bashir, and A. Tehseen, Editors. 2020, Elsevier. p. 51-87.
77. Ofuonye, B., et al., *Electrical and microstructural properties of thermally annealed Ni/Au and Ni/Pt/Au Schottky contacts on AlGaIn/GaN heterostructures*. Semiconductor Science and Technology, 2014. **29**(9).
78. Yan, W., et al., *Analysis of the ohmic contacts of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMTs by the multi-step annealing process*. Journal of Semiconductors, 2012. **33**(6).
79. Mahajan, S.S., et al., *Micro-structural evaluation of Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts with different Ti/Al thicknesses in AlGaIn/GaN HEMTs*. Materials Science and Engineering: B, 2014. **183**: p. 47-53.
80. WEN, K.-H., *Study of ohmic contact formation on AlGaIn/GaN heterostructures*, in *Information and Communication Technology 2019*, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY: Stockholm, Sweden.
81. Shostachenko, S., et al., *Temperature optimization of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact formation to the AlGaIn/GaN heterostructure*. Journal of Physics: Conference Series, 2017. **938**: p. 012072.
82. McClory, J., *The Effect of Radiation on the Electrical Properties of Aluminum Gallium Nitride/Gallium Nitride Heterostructures*. 2008: p. 176.

83. Podlucky, L., et al., *Optimization of Fabrication Process for SiON/SiO_x Films Applicable as Optical Waveguides*. Coatings, 2021. **11**(5).
84. Charifi, H., et al., *Opto-Structural Properties of Silicon Nitride Thin Films Deposited by ECR-PECVD*. World Journal of Condensed Matter Physics, 2016. **06**(01): p. 7-16.
85. Lelièvre, J.F., et al., *Study of the composition of hydrogenated silicon nitride SiN_x:H for efficient surface and bulk passivation of silicon*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009. **93**(8): p. 1281-1289.
86. Miyazaki, H., *Refractive index and dielectric constant of SiO_x films deposited by reactive sputtering*. Physics and Chemistry of Glasses - European Journal of Glass Science and Technology Part B, 2010. **51**.
87. Kyoung-Min Lee, J.-D.H., Youn-Jin Lee, Wan-Shick Hong, *Silicon Nitride Films Prepared at a Low Temperature (≤ 200 °C) for Gate Dielectric of Flexible Display*. IMID 2009 DIGEST, 2009. **P2**: p. 1402-1404.
88. Lee, J.-G., et al., *High quality PECVD SiO₂ process for recessed MOS-gate of AlGa_N/Ga_N-on-Si metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors*. Solid-State Electronics, 2016. **122**: p. 32-36.
89. Thalía Domínguez Bucio, A.Z.K., Cosimo Lacava, Stevan Stankovic, Goran Z Mashanovich, Periklis Petropoulos and Frederic Y Gardes, *Material and optical properties of low temperature NH₃-free PECVD SiN_x layers for photonic applications*. J. Phys. D: Appl. Phys. , 2017. **50**.
90. Kagan, C.R., & Andry, P., *Thin-film Transistors*. 2003, New York: Marcel Dekker.