



**GaN TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERDE SiC ARKA YÜZEY
GEÇİŞ DELİĞİ AŞINDIRMA UYGULAMASI**

Mehmet Taha HALİLOĞLU

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2019

Mehmet Taha HALİLOĞLU tarafından hazırlanan “GaN TABANLI TRANSİSTÖRLERDE SiC ARKA-YÜZEY GEÇİŞ DELİĞİ AŞINDIRMA UYGULAMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bilkent Üniversitesi

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

.....

Üye: Prof. Dr. Mehmet KASAP

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 15/05/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Mehmet Taha HALİLOĞLU

15/05/2019

GAN TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERDE SIC ARKA-YÜZEY GEÇİŞ DELİĞİ AŞINDIRMA UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Taha HALİLOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Yarıiletken teknolojisinde transistörler önemli bir yere sahiptir. Transistörler temel olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Bu yapılar kaynak, akçe ve kapı metallerinin bir yarıiletken üzerinde konumlandırılarak elektriksel iletimi sağlamaktadır. Bu yapılar sayesinde yüksek güç, yüksek frekans ve hızlı anahtarlama işlemleri yapılabilmektedir. Günümüzde farklı ihtiyaçlara göre transistör veya monolitik mikrodalga entegre devreleri (ing.MMIC) tasarlanıp üretilmektedir. Farklı amaçlar için üretilen bu aygıtların performansını artırmak adına çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri de geçiş deliği uygulamasıdır. Yarıiletken aygıt üretiminin arka yüz işlemleri olarak adlandırılan bölümünde malzeme aşındırılarak ön yüzdeki aygıt metalleri ile kontak ettirilmesi için kuyu açılması işlemine geçiş deliği denmektedir. Bu yöntem ile alttaşı 100 µm'ye inceltilerek arka yüzeyden, ön yüzde bulunan kaynak metaline kontak sağlanır. Bu kontak sayesinde kaynak metali alttaşı tabanından topraklanmış olur. Elektriksel olarak kaynak metalinin indüktansının azaltılması hedeflenerek bu yöntem geliştirilmiştir. Geçiş deliği işlemi elmaştan sonra en sert malzeme olarak bilinen silikon karbür (SiC) malzemesi üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada indüklenmiş elektron çiftli plazma reaktif iyon aşındırma (ICP RIE) sistemi kullanılarak SiC malzemesinin flor tabanlı kuru aşındırma yöntemi ile geçiş deliği işleminin iyileştirilmesi ve aşındırma mekanizması rapor edilmiştir. Geçiş deliği aşındırma işlemine kadar gelen süreç anlatılarak, arka yüz işlemleri ele alınmıştır. Aşındırma işleminin sonuçlarını analiz etmek için SEM sistemi kullanılmıştır. DC ölçümler ile geçiş deliği yapılarının dirençleri analiz edilmiştir.

Bilim Kodu : 20215

Anahtar Kelimeler : SiC, SiC geçiş deliği aşındırma işlemi, GaN tabanlı transistörler, kuru aşındırma, yan ürünler

Sayfa Adedi : 63

Danışman : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

BACK SIDE VIA HOLE ETCHING APPLICATION OF SiC FOR GaN BASED FIELD EFFECT TRANSISTORS

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Taha HALILOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

Transistors have a significant role in semiconductor technology. Transistors are mainly composed of three components as source, drain and gate metals. These structures provide electrical conduction by placing the source, drain and gate metals on a semiconductor. High power, high frequency and fast switching operations can be made by these structures. Recently, transistors or monolithic microwave integrated circuits (MMIC) are designed and manufactured according to different needs. Various methods have been developed to improve the performance and optimization of these devices produced for different purposes. One of these methods is the via hole application. In the part of so-called back side processes of semiconductor device production, a well opening process for contacting the material with the device metals on the front side is referred to as the via hole. With this method substrates are thinned to 100 μm from back-side, contact is provided to weld metal on the front side. The weld metal is grounded from the bottom of the substrate by this contact. This method has been developed by aiming to reduce the inductance of source metal electrically. The via hole process was performed on the silicon carbide (SiC) material known as the hardest material after diamond. The optimization and dry etching mechanism of the via hole process with fluorine-based dry etching method of SiC material by using reactive ion etching system (ICP RIE) with inductive coupled plasma has been reported on this study. With describing whole via hole dry etching process back-side operations are discussed. The SEM system was used to analyze the results of the etching process. As a result of DC measurement, it has been show that the resistance of SiC via hole structures were analyzed.

Science Code : 20215

Key Words : SiC, GaN on SiC, GaN based transistor applications, byproducts, via hole process, dry etching, back side process,

Page Number : 63

Supervisor : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

TEŞEKKÜR

Tezin tamamlanmasını, Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) bünyesindeki teknik olanakların kullanılmasını sağladığı için, Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a, tezin oluşturulmasında, ilerlemesinde desteğini benden esirgemeyen Lisesivdin Araştırma Laboratuvarı direktörü ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN'e, çalışmanın planlanmasında, uygulanmasında ve sonuca ulaştırılmasında emeği olan Mehmet Deniz ÇALIŞKAN'a manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Kübra Elif ASAN'a, Uğur KÖROĞLUNA'na Deniz GÜLCÜ'ye ve Doğan YILMAZ'a, ayrıca bugün sahip olduğum her şeye ulaşmamda her zaman yanımda olan kardeşim Talha Türker HALİLOĞLU, annem Mihri HALİLOĞLU, babam Veysel HALİLOĞLU'na ve sevgisiyle daima beni motive eden sevgili eşim İrem'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ALTYAPI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	9
2.1. Kuru Aşındırma İşleminin Mekanizması	9
2.1.1. Plazmanın temeli.....	9
2.1.2. Plazma içindeki çarpışma işlemi.....	11
2.1.3. İyon kılıfı (Ion Sheath) ve iyon hareketi	13
2.1.4. Kılıf içindeki iyon saçılması	15
2.1.5. Aşındırma oranı.....	17
2.1.6. Seçicilik.....	18
2.2. SiC Geçiş Deliği Aşındırma Mekanizması ve Genel Bilgiler.....	19
2.3. Sütun Oluşumu.....	21
2.4. Mikro Çukur Yapısı	25
2.5. Özdirenç	26
2.5.1. İki nokta ve dört nokta prob karşılaştırması.....	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1. Deneysel Metodoloji	29

	Sayfa
3.2. İndüklenmiş Elektron Çiftli Reaktif İyon Aşındırma Sistemi.....	29
3.3. Örneğin Hazırlanması ve Arka Yüzey İşlemleri	32
3.3.1. Ön yüzey koruma	33
3.3.2. Mum ile destek örneğine yapıştırma	34
3.3.3. Alttaşın SiC yüzeyini inceltme ve parlatma.....	35
3.3.4. Çekirdek metalizasyonu	36
3.3.5. Geçiş deliklerini desenleme	37
3.3.6. Elektroliz yöntemi kullanılarak Ni sert maske oluşturma.....	37
3.3.7. Geçiş deliğini flor tabanlı plazma ile aşındırma adımı	38
3.4. Geçiş Deliği Direnç Ölçümü	40
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ.....	43
4.1. SiC Geçiş Deliği Aşındırma İşlemi	43
4.2. Geçiş Deliği Profili Karşılaştırması	50
4.3. Geçiş Deliği Direnç Ölçümü	51
4.4. Geçiş Deliği Dirençlerinin Karşılaştırması	55
5. SONUÇ	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Yarıiletken malzemelerin performans katsayıları	1
Çizelge 1.2. Alttaş özellikleri.....	2
Çizelge 1.3. Farklı SiC türlerinin özellikleri.....	5
Çizelge 2.1. Ar gazı ile plazmanın iyon kılıfı kalınlığının hesaplanmış çizelgesi	15
Çizelge 2.2. SiC geçiş deliği aşındırma işleminde parametrelerin prosese etkisinin gösterimi	20
Çizelge 4.1. Test örneklerine uygulanan işlemlerin görünümü	44
Çizelge 4.2. Alttaş üzerinde bulunan geçiş deliği zincir yapısının DC elektriksel ölçümü.....	52
Çizelge 4.3. Literatürde bulunan geçiş deliği yapısının direnç değeri.....	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. GaN malzemesinin elektronik uygulamalardaki yerinin şematik gösterimi.....	2
Şekil 1.2. Tetragonal olarak bağ yapan Si ve C atomlarının şematik gösterimi.....	3
Şekil 1.3. SiC malzemesinin üç ana kristal örgü yapısının şematik gösterimi	4
Şekil 2.1. Elektron ve atomların çarpışması ile iyon oluşumunun şematik gösterimi	9
Şekil 2.2. Gaz deşarjının (discharge) gösteriminin şematik gösterimi	10
Şekil 2.3. Zayıf iyonize plazma işleminin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.4. Elastik çarpışma yapısının şematik gösterimi	11
Şekil 2.5. Elastik olmayan çarpışmanın şematik gösterimi	12
Şekil 2.6. İyon Kılıfı ve DC öngerilimin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.7. Elektrot ve uygulanacak gerilim arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.8. İyonların aşındırma işlemindeki şematik gösterimi (a) yüksek basınçta iyonların yönelimi, (b) düşük basınçta iyonların yönelimi	16
Şekil 2.9. Aşındırma sırasında oluşan yan ürünlerin buhar basıncı.....	17
Şekil 2.10. Zamana bağlı bir tabakanın aşınma miktarının şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.11. İki farklı tabakanın birbirine bağlı seçiciliğinin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.12. Kontrol örneğine uygulanan flor tabanlı işleme He ve Ar gaz karışımları eklendiğinde aşındırma oranındaki değişimin gösterimi.....	21
Şekil 2.13. Mikro boru nedeni ile sütun oluşumunu şematik gösterimi	22
Şekil 2.14. O ₂ gaz akışının en iyi olduğu durumda mikro sütun oluşumunun grafiği....	25
Şekil 2.15. DC ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi a) iki terminal direnç ölçüm düzeneği b) dört terminal direnç ölçüm düzeneği	28
Şekil 3.1. Sentez SI 500 sisteminin 3-boyutlu şematik gösterimi	31
Şekil 3.2. Ön yüz işlemi bitirilen örneğin kesit görünümü.....	33
Şekil 3.3. Örneğin ön yüzü polimer malzeme ile korunmuş halinin şematik gösterimi	34

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Mum ile yapıştırılmış örneğin şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.5. Mekanik olarak inceltilen örneğin şematik gösterimi	36
Şekil 3.6. Çekirdek metali kaplanan örneğin şematik gösterim	36
Şekil 3.7. Fotodirenç malzeme ile desenlenen örneğin şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.8. Ni maske ile aşındırılacak bölgeleri oluşturulan örneğin şematik gösterimi (a) desenleme sonrası elektroliz ile Ni metalinin kaplanmış halinin şematik gösterimi (b) fotodirenç malzemeyi çözerek kaldırıldıktan sonra oluşan geçiş deliği maskesinin şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.9. Flor tabanlı plazma ile GaN epitaksiyel katmana ulaşılan geçiş deliği yapısının şematik gösterimi	39
Şekil 3.10. Arka yüz işlemi tamamlanmış örneğin şematik gösterimi	40
Şekil 4.1. 3 inç boyutunda seri üretim amaçlı tasarlanmış transistörlerin görünümü ve geçiş deliği test aygıtının görünümü	51
Şekil 4.2. Geçiş deliği karakterizasyonu yapılan test aygıtının tasarımı	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen MMIC aygıtının görseli (a) tasarımı yapılmış MMIC aygıtının Klayout programındaki şematik gösterimi (b) GaN epitaksiyel katmana sahip SiC alttaş üzerine üretimi gerçekleştirilmiş MMIC aygıtının optik mikroskop görüntüsü.....	6
Resim 2.1. Farklı çalışmalara ait sütun formasyonunun oluşumunu gösteren SEM görüntüleri	23
Resim 2.2. (a) ICP/RF 500/100 W 2 dakika, (b) ICP/RF 300/250 W 2 dakika, (c) ICP/RF 500/250 W 2 dakika, ICP/RF 750/100 W 5 dakika, ön işlem uygulanmış geçiş deliklerinin mikroskop görünümü	24
Resim 2.3. Flor tabanlı plazma sonrası oluşan geçiş deliğinin SEM ile alınmış kesit görünümü (a) geçiş deliğinin SEM görünümü (b) aşındırma derinliği ve mikro çukur görünümü (c) mikro çukur yapısının yakınlaştırılmış görünümü.....	26
Resim 3.1. ICP RIE sisteminin ICP sarımının görünümü	30
Resim 3.2. Sentez SI 500 sisteminin görünümü	32
Resim 3.3. B1505A güç aygıt analiz sistemi.....	41
Resim 3.4. 4-Prob istasyonun görseli	41
Resim 4.1. (a) CF_4 ve O_2 gaz karışımı ile elde edilen geçiş deliği profilinin SEM görüntüsü (b) SiC malzemesinin kesit alttaş ile birlikte kesit görüntüsü ...	45
Resim 4.2. (a) SF_6 , O_2 ve Ar gaz karışımı ile kuru aşındırma sonrası geçiş deliğinin profilinin kesit görünümü (b) geçiş deliği tabanında oluşan mikro çukur yapısı.....	45
Resim 4.3. (a) SF_6 , O_2 ve He gaz karışımları ile yapılan aşındırma işleminin SEM görünümü (b) geçiş deliği tabanında oluşan sütun formasyonunun oluşumu	46
Resim 4.4. (a) SF_6 ve O_2 gaz karışımı ile yapılan kuru aşındırma sonrası geçiş deliğinin yapısı (b) geçiş deliği duvar profilinin detaylandırılmış hali	47
Resim 4.5. (a) 3 inç alttaş üzerine uygulanan ön işlem ve SF_6 ve O_2 gaz karışımı ile kuru aşındırma yöntemi uygulanan geçiş deliğinin yapısı (b) 3 inç örneğin farklı noktasından alınan SEM görünümü.....	47
Resim 4.6. (a) 3 inç alttaş üzerine uygulanan ön işlem ve SF_6 ve O_2 gaz karışımı ile kuru aşındırma yöntemi uygulanan geçiş deliğinin yapısı (b) 3 inç örneğin farklı noktasından alınan SEM görünümü.....	48

Resim	Sayfa
Resim 4.7. (a) Arka yüz işlemleri bitmiş geçiş deliğinin SEM görünümü (b) ön yüz ile kontak alınmış geçiş deliğinin kesit görünümü (c) geçiş deliğinin farklı açıdan alınmış SEM görünümü (d) desenleme çözünürlüğü için tasarlanmış yapının Au elektroliz sonrası SEM görüntüsü	49
Resim 4.8. (a) Eliptik geçiş deliği ve dairesel geçiş deliği üst yapısının karşılaştırılması (b) eliptik geçiş deliği ve dairesel geçiş deliği taban yapısının karşılaştırılması	50
Resim 4.9. Farklı çalışma gruplarının elde etmiş olduğu SiC geçiş deliği profil karşılaştırması	51
Resim 4.10. Ön yüz metaline ulaşan geçiş deliği zincirinin optik mikroskop görünümü (Arka yüzden görünüm)	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

E_{br}	Elektrik kırılma alanı
E_g	Bant genişliği
κ	Isıl iletkenlik
μ_n	Elektron hareketliliği
μ_p	Hole hareketliliği
v_d	Doymuş elektron sürüklenme hızı
μA	Mikroamper
mA	Mili amper
$m\Omega$	Mili ohm

Kısaltmalar

Açıklamalar

2DEG	İki Boyutlu Elektron Gazı
DC	Doğru Akım
FET	Alan Etkili Transistör
GaN	Galyum Nitrür
HEMT	Yüksek Elektron Hareketli Transistör
ICP-RIE	İndüklenmiş Elektron Çiftli Reaktif İyon Aşındırma
I-V	Akım- Gerilim
MMIC	Monolitik Mikrodalga Entegre Devre
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MOSFET	Metal Oksit Alan Etkili Transistör
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	Silisyum Karbür

1. GİRİŞ

Galyum Nitrür (GaN), elektronik uygulamalarında, araştırma-geliştirme ve ürün olarak geniş kullanım alanları bulunan bir malzemedir. Yüksek güç, yüksek frekansa yönelik birçok uygulamaların temel malzemesi olarak günümüzde GaN'ın yeri giderek sağlamlaşmaktadır. Bu bakış açısıyla, GaN “geleceğin malzemesi” olarak nitelendirilebilir [1].

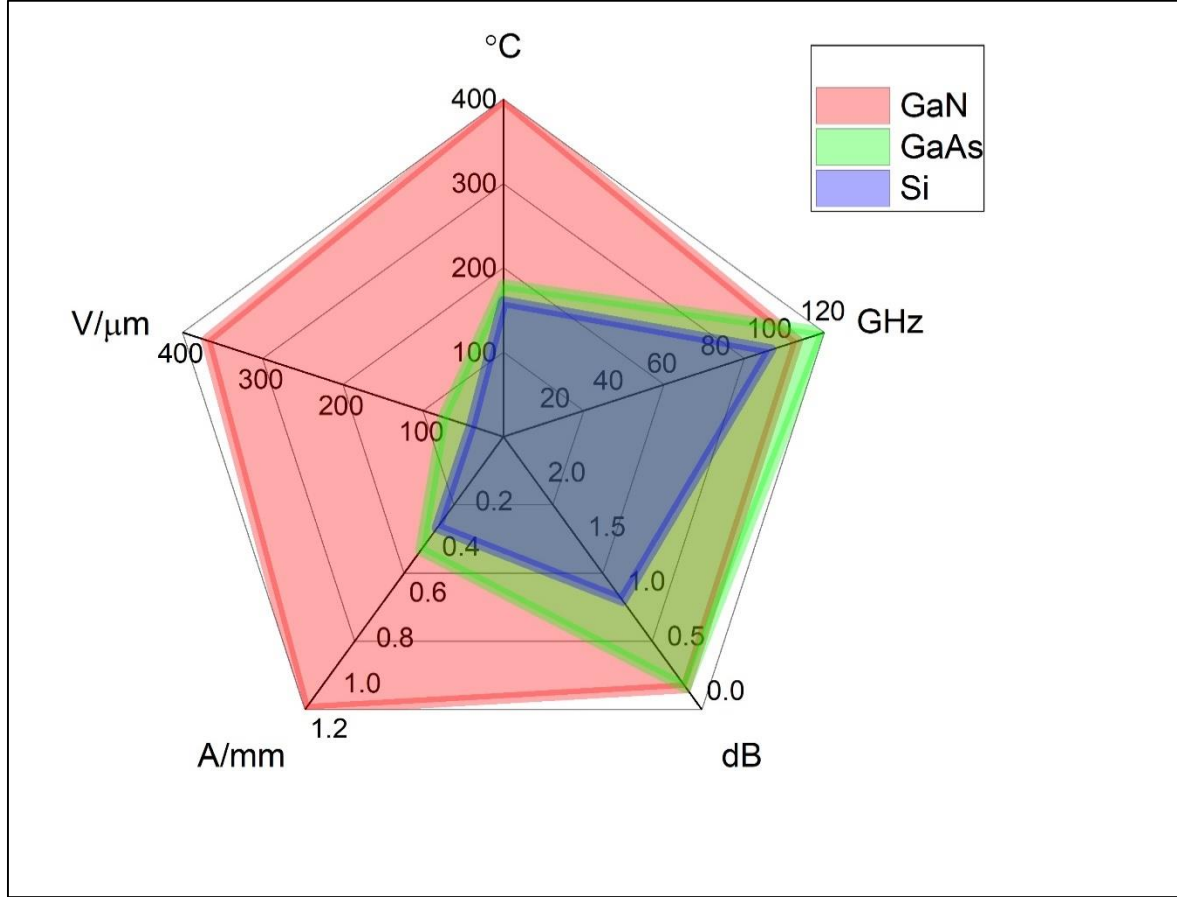
Malzemelerin üzerine inşa edilen aygıtların performansını incelemek için iki parametre ön plana çıkmaktadır. Bu parametreler performans katsayısı (figure of merit) olarak adlandırılır. Bunlar Johnson ve Baliga performans katsayılarıdır. Çizelge 1.1’de görüldüğü üzere Silisyum Karbür (SiC) ve GaN’ın performans katsayıları diğer yarıiletken aygıtlardan ayrılmaktadır. Johnson performans kat sayısı aygıtın güç/frekans çarpımını ifade etmektedir. Baliga performans katsayısı ise malzeme üzerindeki aygıtın iletim kayıplarını minimuma indirmek için kritik olan değeri temsil eder [2,3].

Çizelge 1.1. Yarıiletken malzemelerin performans katsayıları

Parametre / Malzeme	Si	InP	GaAs	4H-SiC	GaN
Bant Genişliği $E_g(\text{eV})$	1,12	1,34	1,43	3,26	3,45
Elektron Hareketliliği $\mu_n (\text{cm}^2/\text{V.s})$	1350	5000	8500	1000	1500
Elektron Sürüklenme Hızı $v_d (10^7 \text{ cm/s})$	1,0	1,5	1,0	2,0	2,5
Kırılma Elektrik Alan $E_{br} (\text{MV/cm})$	0,3	0,45	0,4	2,2	2,0
Johnson performans katsayısı $[(E_{br} \cdot v_{sat}/\pi)^2]$	1,0	3,0	1,8	215,1	215,1
Baliga performans katsayısı $[\epsilon_r \cdot \mu_n \cdot E_{cr}^3]$	1,0	5,7	14,8	223,1	186,7

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi GaN malzemesi geniş bant aralığı, yüksek kırılma elektrik alanı, yüksek erime noktası gibi özellikleri ile yüksek sıcaklıklarda ve yüksek gerilim altında çalışabilmektedir [4,5]. Yüksek elektrik alan doyma hızı ve düşük parazitik kapasitesi özellikleri, yüksek frekans uygulamaları için bu malzemeyi önemli bir konuma getirmiştir. 2-boyutlu elektron gazı (ing.2DEG) içerisindeki elektronların oluşturduğu saçılma

etkilerinin az olması düşük radyo frekansı kaybını minimum hale getirir. Bu yüzden gürültü faktörü diğer malzemelere göre düşüktür. Yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve yüksek elektron hareketliliği sayesinde yüksek güç uygulamalarında kullanılır. Ayrıca yüksek bant genişliğine sahip olması yüksek kırılım kuvvetine dayanımı arttırmaktadır.



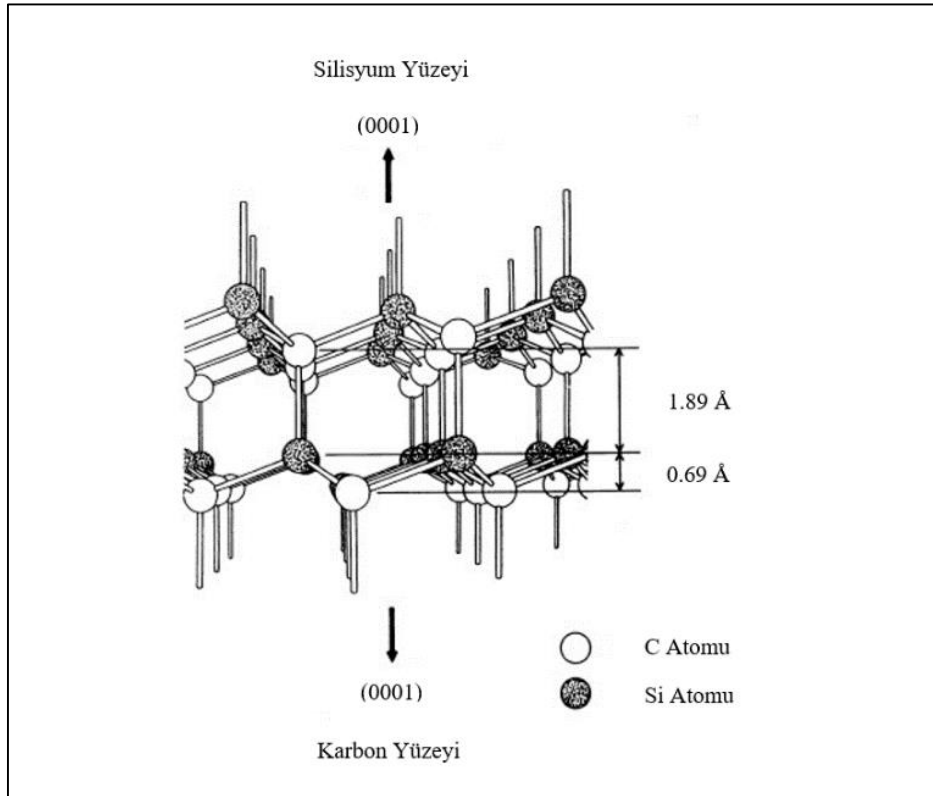
Şekil 1.1. GaN malzemesinin elektronik uygulamalardaki yerinin şematik gösterimi [6]

Çizelge 1.2. Alttaş özellikleri

Özellikler	Al ₂ O ₃	Si	SiC
Örgü Parametresi (Å)	4,76	3,84	3,08
GaN ile örgü uyumsuzluğu (%)	16	17	3,5
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ m/(mK))	7,3	2,6	4,5
Isıl İletkenlik (Wcm ⁻¹ K ⁻¹)	0,4	1,3	4,9
Erime Sıcaklığı (K)	2303	1412	3012

GaN'ın tek kristal olarak büyütülmesinin zorluğu ve alttaş olarak üretim kısıtlamalarının getirmiş olduğu problemleri aşmak için farklı malzemeler ile çalışılmasına neden olmuştur. Silisyum (Si) , safir (Al_2O_3) gibi alttaşlar üzerine Metal Organik Buhar Biriktirme (ing.MOCVD) ve Moleküler Akı Epitaksisi (ing.MBE) yöntemleri kullanılarak yüksek kaliteli GaN epitaksiyel yapılar büyütülmektedir. Şekil 1.2'de ve Şekil 1.3'te görüldüğü gibi alttaş olarak kullanılan yarıiletken malzemelerin özellikleri verilmiştir. GaN ve diğer alttaşların arasındaki örgü uyumsuzluğu ve ısıl genleşme uyumsuzluğunun fazla olması aygıt performansını ve örnek üzerindeki çalışan aygıt oranını etkilemiştir. SiC alttaş üzerine büyütülen GaN epitaksiyel yapısının uyumu diğer alttaşlar ile kıyaslandığında farklı olduğu görülmektedir. GaN ile örgü uyumsuzluğunun ve ısıl genleşme katsayısının düşük olması ayrıca SiC malzemesinin yüksek termal iletkenliğe sahip olması bakımından SiC alttaş çok önemli bir yere sahiptir.

SiC alttaş üzerine MOCVD yöntemi ile büyütülen GaN'ın performansı diğer alttaşlara göre daha üstündür. Bu yüzden SiC yüksek frekans, yüksek güç uygulamalarında GaN Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistör (ing.HEMT) yapıların üretilmesinde öncelikli hale gelmiştir [7-10] .

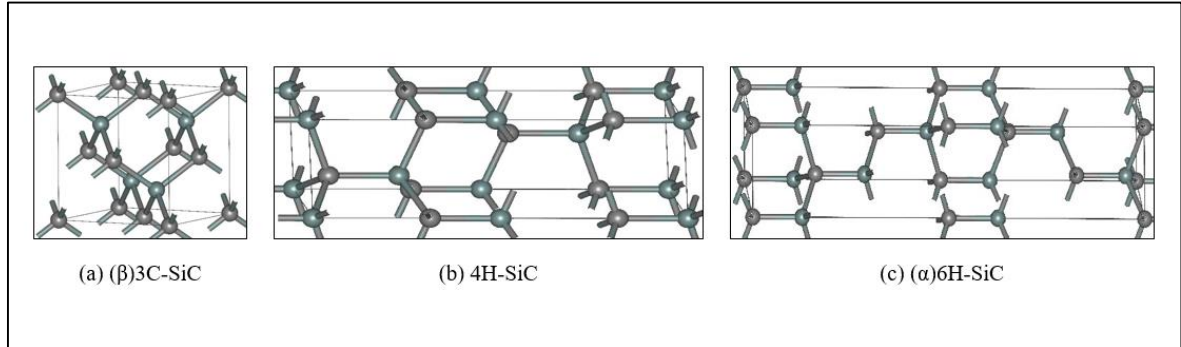


Şekil 1.2. Tetragonal olarak bağ yapan Si ve C atomlarının şematik gösterimi

SiC; Si ve karbon (C) atomlarının eşit sayıda birleşmesi sonucunda oluşur. Bu iki element IV. periyot elementleridir. Bu yüzden kovalent bağ yapmayı tercih ederler. Ayrıca, her bir karbon atomu 4 silisyum atomu ile çevrelenmiştir. Şekil 1.2’de görüldüğü üzere bu bağlar, düzenli ve ardışık tek kristal yapı oluşturmuştur.

Polarize olmuş tek kristal yapı sayesinde atomların dizilişine göre silisyum yüzey ya da karbon yüzey olarak tanımlanabilmektedir. Her yüzey bir atom ile bağ yapacak şekildedir. Si ya da galyum arsenit (GaAs) tek kristal yapısına sahip iken SiC birkaç farklı kristal yapıya sahip olabilmektedir.

Çok kristalli (polimorfizm) yapıda bulunan SiC, benzer kristal ailesinden gelen politipler (polytypes) ile karakterize edilir. SiC yapısında oluşan bu farklılıklar, 3 boyutlu kristal örgünün 2 boyutu bire bir aynı olmasına rağmen 3. boyuttaki farklılıklar ile ortaya konmuştur. Şekil 1.3’te SiC’in 3 ana kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.3. SiC malzemesinin üç ana kristal örgü yapısının şematik gösterimi [11]

Alfa (α) SiC genellikle çok kristalli yapıda bulunmaktadır. Bu yapı 1700 °C sıcaklığın üzerinde hekzagonal kristal yapıda (Wurtzite benzer) oluşmaktadır. Beta modifikasyonuna sahip (β-SiC) 1700 °C altında çinko sülfür kristal yapısına (elmas benzeri) dönüşmektedir. Saf SiC renksizdir. Yaklaşık 2700 °C sıcaklıklarda süblimleşme görülmektedir. SiC bilinen herhangi bir sıcaklıkta eritilemez. Kimyasal olarak inert bir malzemedir. Bu özelliklerinden dolayı elektronik endüstrisinde yarıiletken teknolojisinde kullanımı uygun bir malzemedir. Yüksek ısı iletkenliği, yüksek elektrik alan kırınımına direnci ve yüksek akım yoğunluğuna sahip olmasından dolayı yüksek güç aygıtlarında Si temelli aygıtlara göre daha üstün elektriksel özelliklere sahip aygıtlar üretilebilir.

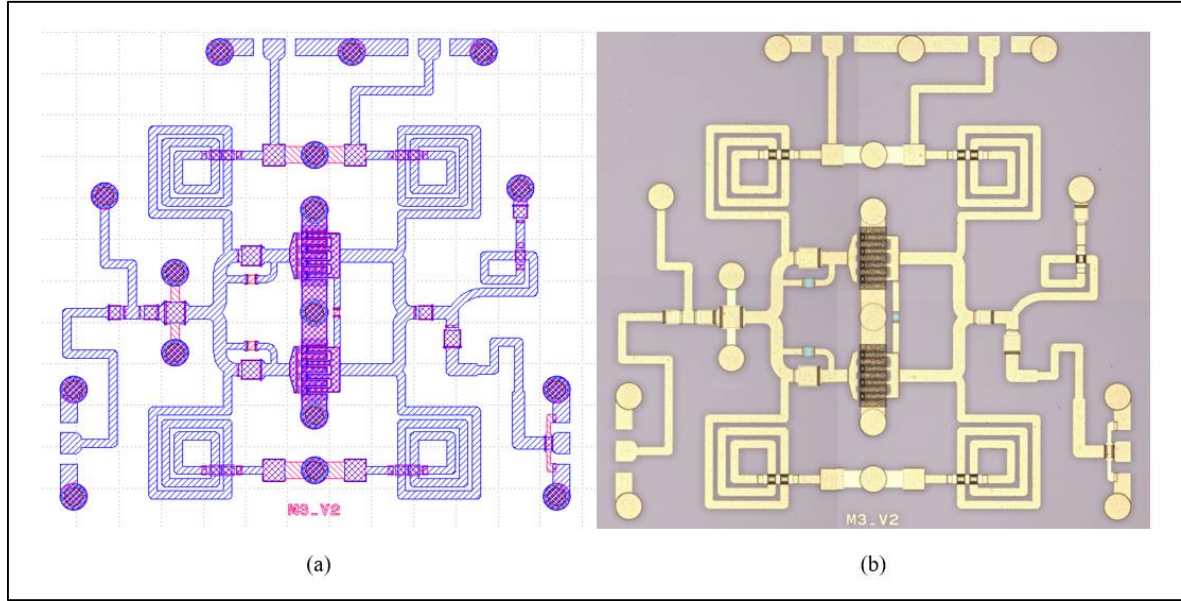
Çizelge 1.3. Farklı SiC türlerinin özellikleri

Politip	3C (β)	4H	6H (α)
Kristal Yapısı	Kübik	Hekzagonal	Hekzagonal
Pearson Sembolü	cF8	hP8	hP12
Örgü Sabiti (Å)	4,3596	3,0730; 10,053	3,0810; 15,1200
Yoğunluk (g/cm ³)	3,21	3,21	3,21
Bant Aralığı (eV)	2,36	3,23	3,05
Hacimsel Basınç Katsayısı (GPa)	250	220	220
Isıl İletkenlik (W/m.K) @300K	360	370	420

GaN temelli transistörler, Metal Yarıiletken Alan Etkili Transistör (MESFET), Farklı Eklemlili Çift Kutuplu Transistör (HBT) ve HEMT uygulamalarında Si ve GaAs temelli transistörlerle aynı fonksiyona sahiptir. Ancak yapısal olarak ya da işlem adımları farklılıklar gösterebilir. SiC üzerine MOCVD yöntemi ile büyütülmüş GaN temelli transistör fabrikasyonunun, silikon temelli transistör fabrikasyonundan ayıran en önemli farklılığı arka yüz işlemidir. Çoğunlukla SiC alttaş üzerine büyütülmüş GaN temelli malzeme üzerine HEMT aygıtlar ve Monolitik Mikrodalga ile Bütünlenmiş Devreler (MMIC) üretilmektedir. Arka yüz geçiş deliği işlemi sayesinde arka yüzdeki metal ile ön yüzdeki toprak pedlerine kontak sağlanır.

MMIC aygıtlarındaki tipik parazitik etki transistörlerin, kaynak (source) metalinin indüktansıdır. Bu yüksek indüktans kaynak ve toprak arasında bulunmaktadır. Geçiş deliği bağlantısı olmayan MMIC aygıtlarında, ara bağlantı yolları ve kaynak pedleri yüksek indüktansa sebep olur. Geçiş deliği, devre tasarımında esneklik sağlamakla birlikte aygıtta oluşan ısıyı dağıtmaya yardımcı olur.

Resim 1.1'deki gösterim, geçiş deliğine sahip bir MMIC aygıtına aittir. Tasarımı tamamlanmış MMIC aygıtında, 2 adet paralellenmiş transistör ve pasif elemanlar bulunmaktadır. Kaynak indüktansını azaltmak için arka yüz geçiş deliği, ohmik özelliğe sahip kaynak metaline bağlanmış ped'in altına dairesel olarak konumlandırılmıştır. Arka yüz metali ile ön yüzde bulunan bağlantı metali kontak oluşturur. Böylelikle, uzun ara bağlantı yolları oluşturulmadan kolaylıkla tabandan toprak pedlerine ulaşım sağlanır.



Resim 1.1. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen MMIC aygıtının görseli (a) tasarımı yapılmış MMIC aygıtının Klayout programındaki şematik gösterimi (b) GaN epitaksiyel katmana sahip SiC alttaşı üzerine üretimi gerçekleştirilmiş MMIC aygıtının optik mikroskop görüntüsü

Bu tez kapsamında, GaN tabanlı SiC alttaşı üzerine oluşturulan aygıtların, arka yüz geçiş deliği plazma ile kuru aşındırma işlemleri için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışmalarda ön yüz işlemleri tamamlanan örneğin, geçiş deliği aşındırma işlemine gelene kadar geçmiş olduğu süreç incelenmiştir.

Geçiş deliği aşındırma işlemi, kuru aşındırma yöntemlerinden biri olan indüklenmiş elektron çiftli plazma reaktif iyon aşındırma (ICP RIE) ile yapılmıştır. Kuru aşındırma işleminin en büyük özelliği geçiş deliği profilinin anizotropik olmasından kaynaklanmaktadır. ICP RIE sistemi yüksek en-boy oranına sahip yapıları aşındırmada ve kabul edilebilir aşındırma oranlarına sahip olduğu için günümüzde en çok tercih edilen sistemlerin başında gelmektedir. Geçiş deliklerini oluştururken, radyo frekansının gücü (RF), indüklenmiş elektron çiftli sarımların gücü (ICP), işlem odasının basıncı, gaz akışları, gazın cinsi gibi parametreler ele alınmıştır. Ancak, reaktif iyon aşındırma sistemini kullanırken aşındırma işlemlerinde istenmeyen sonuçlar meydana gelebilmektedir. En çok bilinen problemlerin başında istenmeyen mikro sütun yapılar (pillar structure) ve mikro çukur yapılar (microtrench) gelmektedir. İstenmeyen bu yapıları azaltmak için plazma ile kuru aşındırma işlemlerinde basınç, gaz akışı ve RF/ICP gücü oranlarının iyileştirilmesi yapılmıştır. Ayrıca flor tabanlı plazma işlemi öncesi sütun yapısını azaltmak için Ar gazı ile ön işlem yapılmıştır.

Aşındırma oranı ve seçicilik gibi parametreler incelenerek, geçiş deliği yapısına etkisi gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada SiC üzerine büyütölmüş GaN temelli transistörlerin arka yüzey geçiş deliği oluşumunu ve ICP RIE sistemi ile yapılan sistematik çalışmalar üzerinde durulacaktır. Örneklerin, mikro ve nano fabrikasyon işlemleri; alttaş üzerine epitaksiyel büyütme işlemleri, aygıtların üretimi ve üretilen aygıtların karakterizasyonları Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'ndeki (NANOTAM) Class-100 temiz odalarında gerçekleştirilmiştir.

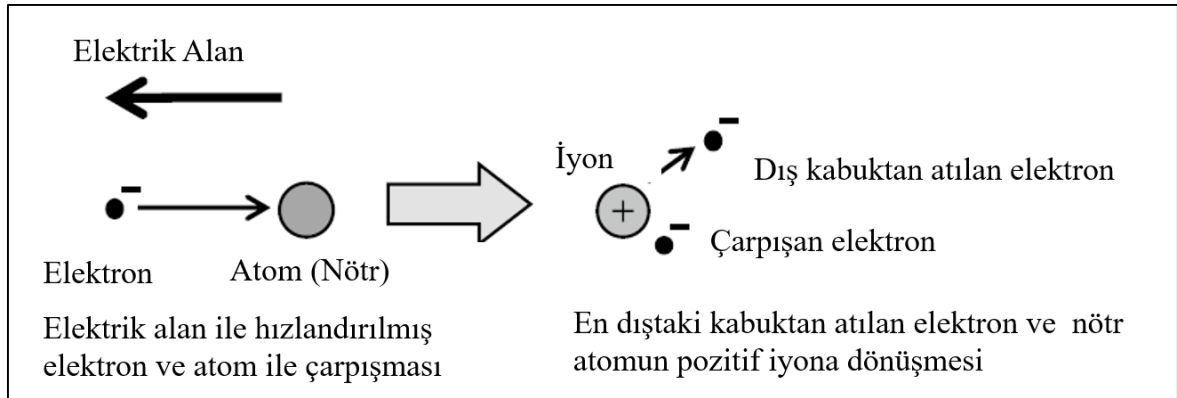
2. ALTYAPI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde plazma ile kuru aşındırmanın mekanizması, SiC malzemesini aşındırma parametreleri ve kuru aşındırma işlemi sırasında karşılaşılan problemler ve çözümleri ele alınacaktır.

2.1. Kuru Aşındırma İşleminin Mekanizması

2.1.1. Plazmanın temeli

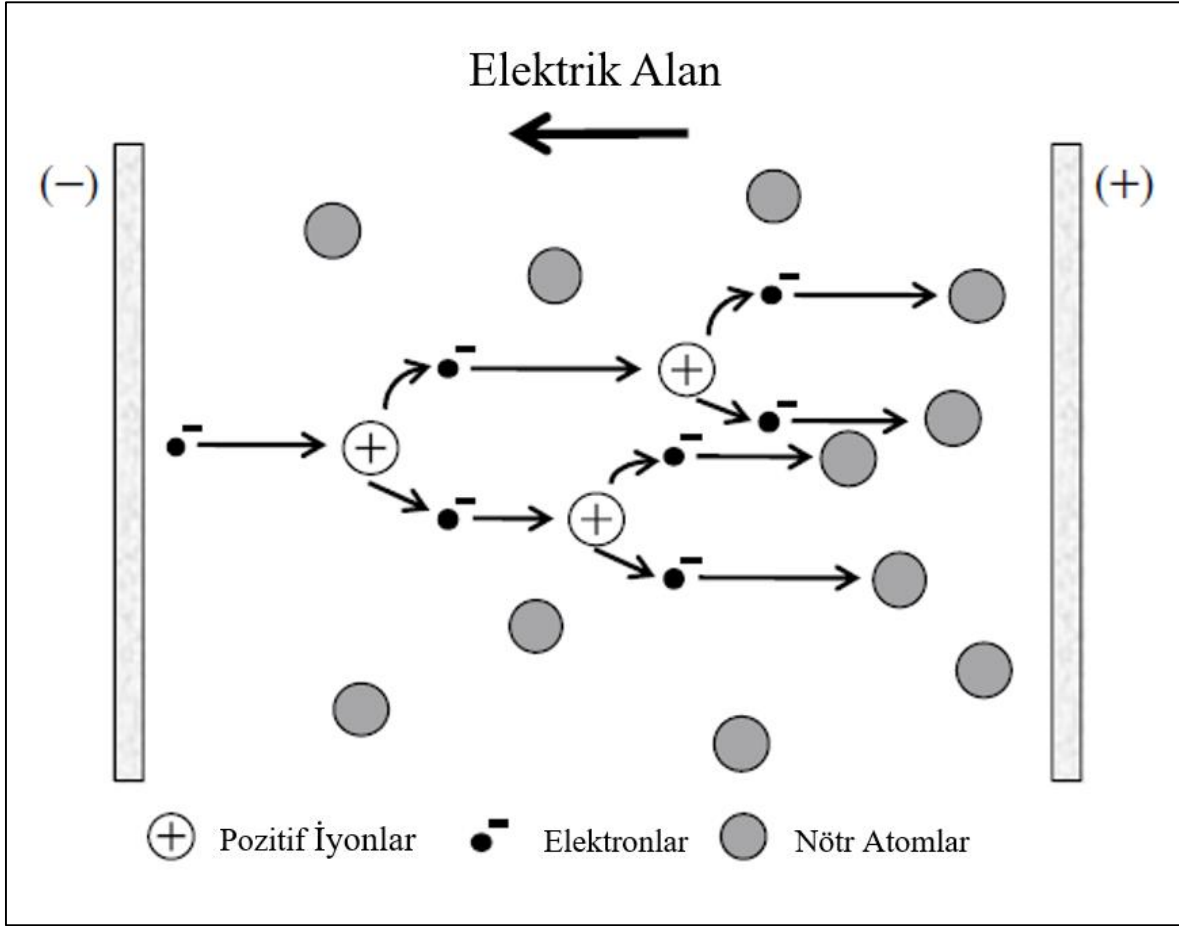
Plazma, neredeyse aynı sayıda elektron ve iyonların bulunduğu “iyonize gaz” olarak bilinir. Makroskopik bir bakış açısıyla elektriksel olarak nötr bir durumdadır. Elektron yoğunluğu (n_e) ve iyon yoğunluğu (n_i) birbirlerine eşittir ve bunlar plazma yoğunluğu olarak adlandırılır. Elektronlar, iletken özelliklerinden dolayı plazma içinde serbestçe hareket edebilirler. İşlem odasında, bir radyo frekans kaynağı (RF), çift elektrot arasına uygulandığında, elektronlar RF kaynağının üretmiş olduğu elektrik alanında kinetik enerji kazanırlar ve bu enerji ile atom ve moleküller ile çarpışırlar.



Şekil 2.1. Elektron ve atomların çarpışması ile iyon oluşumunun şematik gösterimi

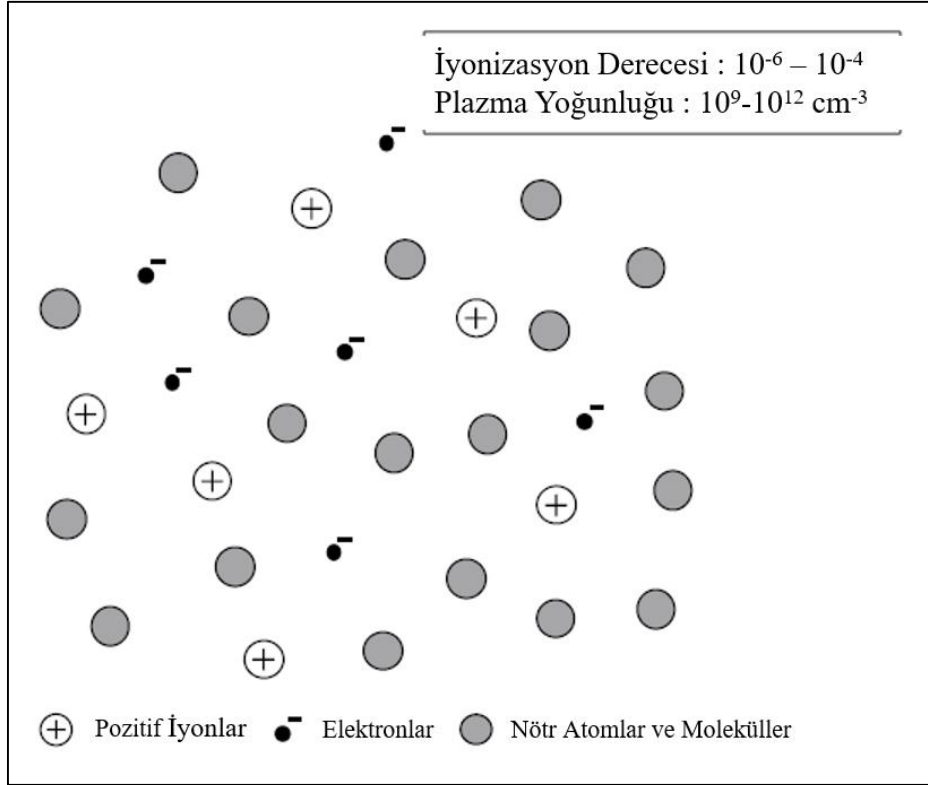
Bir elektronun kinetik enerjisi, iyonlaşma enerjisinden büyükse, atom ya da molekülün en dış kabuğunda bulunan elektron dışarı atılır. Sonuç olarak, nötr atom ya da molekül iyon haline dönüşür. Diğer yandan, dış kabuktan ayrılan elektronla birlikte çarpışan elektronda eklenince toplamda 2 elektron hareket halinde olur. Şekil 2.1’de bu yapı gösterilmiştir. Bu elektronlar bir elektrik alan sayesinde ivmelenirler ve yeni atom ve ya moleküller ile çarpışırlar ve böylelikle yeni iyonlar ve elektronlar elde edilir. Elde edilen elektronlar ve

iyonlar çıkışı etkisi oluşturarak plazmayı başlatan ve oluşturan eşik seviyeyi geçer. Şekil 2.2’te gaz içindeki deşarj yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Gaz deşarjının (discharge) gösteriminin şematik gösterimi

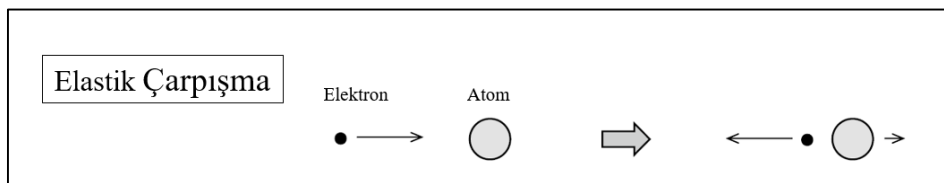
Plazma iki farklı yapıda sınıflandırılır. Diğer bir durum ise zayıf iyonize olmuş yapıdır. Bu durumda elektronlar, iyonlar ve nötr atomlar bir arada bulunur. Atomlar ve moleküller bir arada bulunurlar ve ortamda düşük seviyede iyonize olmuş yapılar vardır. Akkor deşarj (glow discharge) kuru aşındırma için kullanılır. Plazma, akkor deşarj ile oluşturulur ve bu plazma zayıf iyonize olmuş yapıdadır. Eşit sayıda negatif ve pozitif iyonlar bulunmakla birlikte elektriksel olarak nötr atomlar ve moleküllerde bulunmaktadır. Şekil 2.3’te zayıf iyonize plazma şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Zayıf iyonize plazma işleminin şematik gösterimi

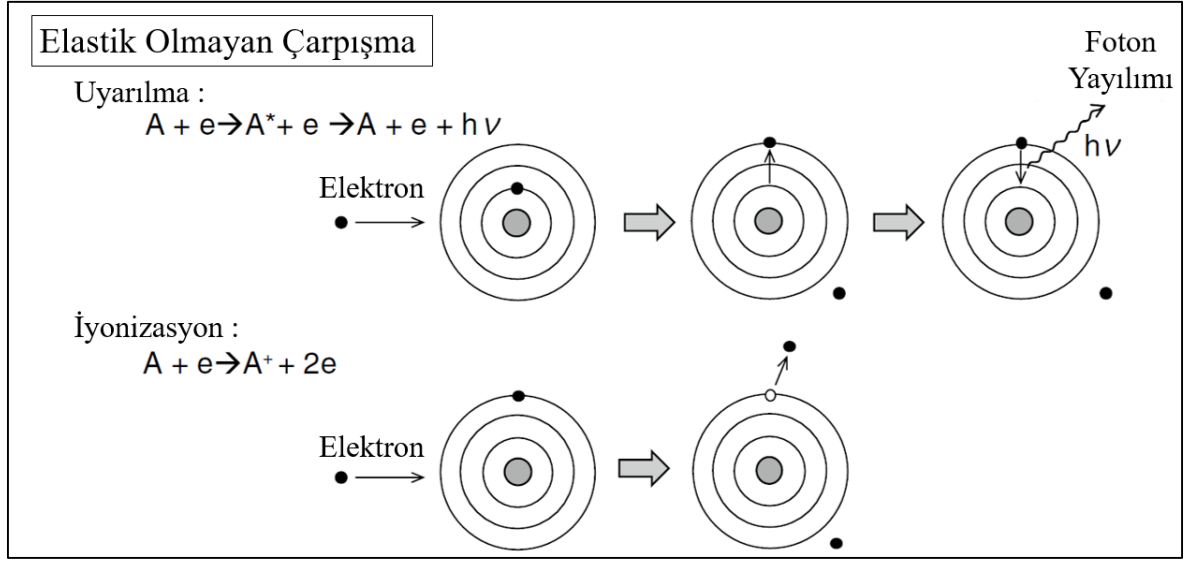
2.1.2. Plazma içindeki çarpışma işlemi

Elektronlar, plazma içindeki enerji ile atom ve moleküller ile çarpışırlar. Bu çarpışmalar elastik çarpışma ve elastik olmayan çarpışma olarak ikiye ayrılır. Elastik çarpışmada sadece kinetik enerji değişimi olur. İç enerji değişmez. Bir atoma çarpan elektron, atomdan farklı yönde sekererek kinetik enerji kaybına uğrar. Çarpışan atom ise kinetik enerji kazanarak hareket eder. Şekil 2.4'te elastik çarpışmanın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Elastik çarpışma yapısının şematik gösterimi

Elastik olmayan çarpışmada iç enerji; uyarılma, iyonizasyon, ayrışma, elektron bağlanması olarak dönüşüme uğrar. Şekil 2.5'te elastik olmayan çarpışmanın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Elastik olmayan çarpışmanın şematik gösterimi

Uyarılma: Atomun dış kabuğunda bulunan elektrona çarpan hareket halindeki elektron sayesinde enerji açığa çıkar. Böylelikle elektron daha yüksek enerji seviyesine geçer. Genellikle, uyarılma seviyesi kararsızdır ve uyarılan elektron bu seviyede sadece 10^{-8} saniye kadar durumunu korur. Bu geçiş ile bir foton salınır. Plazmanın ışık saçması bunun bir sonucudur. Uyarılma reaksiyonu aşağıdaki gibidir.



Bu eşitlikte A nötr atomu, A^* nötr atomun uyarılma durumunu, h Planck sabitini, ν ise ışığın frekansını temsil etmektedir.

İyonizasyon: Çarpışan elektronların enerjisi, iyonizasyon geriliminden fazla ise bir elektron dış kabuktan dışarı atılır ve nötr atom, pozitif iyon dönüşür. Bu reaksiyon aşağıdaki eşitlik ile gösterilmiştir.



Ayrışma: Çarpışan elektronların oluşturduğu enerji, molekülün bağlanma enerjisinden daha büyük ise ayrışma gerçekleşir. Aşağıdaki eşitlik ile bu tanım gösterilmiştir.



Moleküller ayrıldığında, yan ürünler molekülün ilk durumuna göre kimyasal olarak daha aktiflerdir. Böylelikle yüksek reaktif parçacıklara dönüşürler. Bir parçacığın bu durumda aktif olmasına radikal denir. Literatürde CF_4 yapısının kolayca ayrıştığı belirtilmiştir. CF_4 bir kez uyarıldığında ayrılarak, CF_3 radikali ($CF_3\bullet$) ve F radikali ($F\bullet$) oluşur. Bu reaksiyon aşaması aşağıdaki denklem ile belirtilmiştir.

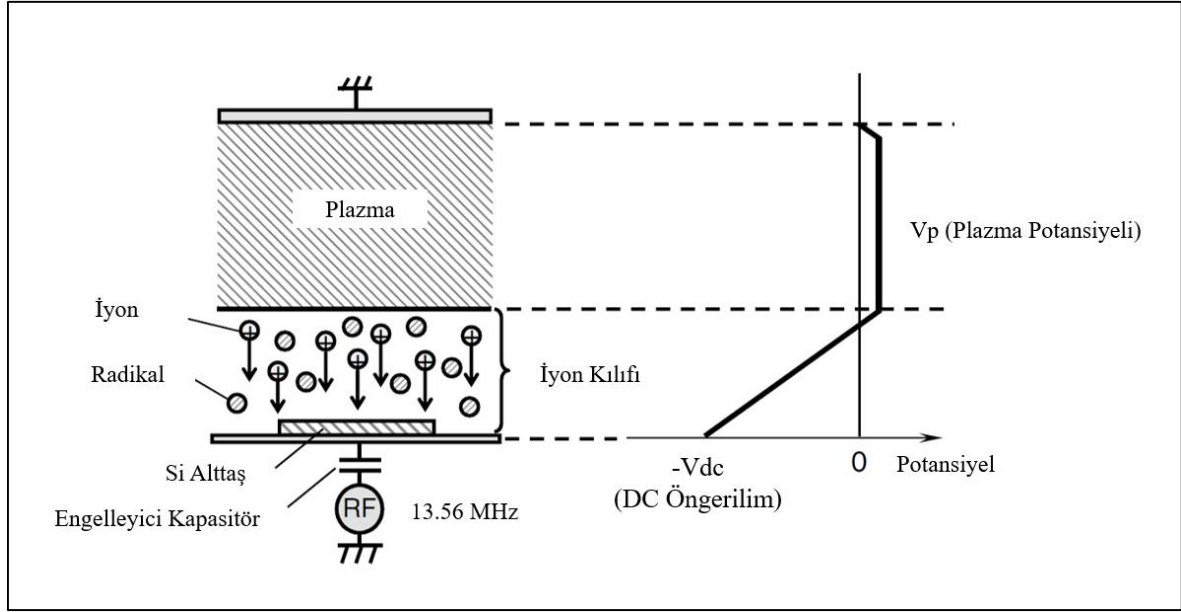


Elektron Bağlanması: Çarpışan elektronlar atomların dış kabuğundaki boş seviyelere eklenirler ve atomlar negatif iyonla dönüşür.



2.1.3. İyon kılıfı (Ion Sheath) ve iyon hareketi

Kuru aşındırma mekanizmasının anlaşılabilmesi için V_{dc} çok önemli bir parametredir. Kuru aşındırma sistemlerinden RIE (reaktif iyon aşındırma) 2 adet paralel plakaya sahiptir. Alt elektrotta alttaş bulunur. Bu elektrotta RF güç kaynağına, engelleyici kapasitör bağlanmıştır. Üst elektrot ise topraklanmıştır. RF kaynağı frekansı sıklıkla 13.56 MHz olarak kullanılmaktadır. Yani, elektrik alanın yönü her saniyede 13.56×10^6 kez değiştirilir. Elektronların kütlelerinin küçük olması yüzünden elektronlar, elektrik alanın salınımını takip ederler. Başka bir ifade ile iyonlar elektronlara göre 10000 kat daha ağırdır. Bu yüzden elektrik alanın salınımından etkilenmezler ve çok fazla hareket etmezler. Sonuç olarak, elektrotlar arasında oluşturulan elektrik alanda sadece elektronlar hareket ederler. Çünkü alt elektrot, engelleyici kapasitöre bağlıdır ve kademeli olarak negatif potansiyelde tutulur. Direk akım (DC) öngerilimi, V_{dc} sayesinde otomatik öngerilim (self-bias) oluşturur. V_{dc} değeri RF gücüne bağlıdır ve onlarca volttan yüzlerce volta çıkabilmektedir.



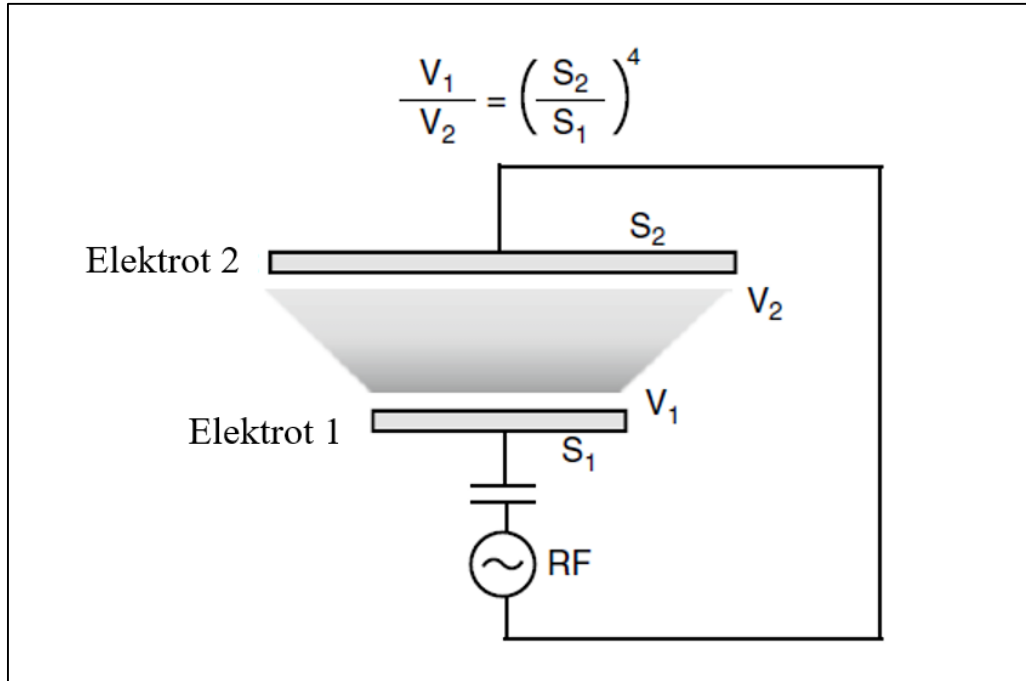
Şekil 2.6. İyon Kılıfı ve DC öngerilimin şematik gösterimi

Elektrota negatif öngerilim uygulanırsa, elektronları iter. Bu yüzden, elektrodun yakınında neredeyse elektron bulunmaz. Bu bölge iyon kılıfı olarak adlandırılır. Bu bölgede elektronlar, çarpışmalarla uyarılma yapamayacağı için foton saçılımı olmaz ve ışık oluşmaz. Bu yüzden iyon kılıfının olduğu bölgeye karanlık boşluk (dark space) denmektedir.

Plazma elektriksel olarak iletkenidir. Makroskopik görüşte eşit potansiyeldedir. Bunun nedeni, plazma içindeki iyonların rasgele hareket etmesidir. Plazmanın elektriksel potansiyeli V_p olarak adlandırılır. Plazma ve iyon kılıfı arasındaki ara yüzeye ulaşan iyonlar $-V_{dc}$ gerilimi ile üst elektrottan alttaşa doğru hızlandırılırlar. Burada iyonlar $V_p + V_{dc}$ enerjisine eşittir. Aşındırma işleminin büyük bir kısmı düzgün bir şekilde hareket ederek, anizotropik bir profile sahip olacak şekilde ilerleyen bu iyonlar sayesinde gerçekleştirilir.

Elektrotlara uygulanacak gerilim değeri, elektrodun yüzey alanına bağlıdır. Yüzey alanlarını sırası ile S_1 ve S_2 , elektrotlara uygulanacak gerilim değerlerini ise sırası ile V_1 ve V_2 olarak tanımlanırsa oluşan eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^4 \quad (2.6)$$



Şekil 2.7. Elektrot ve uygulanacak gerilim arasındaki ilişkinin şematik gösterimi

2.1.4. Kılıf içindeki iyon saçılması

İyon kılıfının kalınlığını (d_{is}) hesaplamak için Child-Langmur eşitliği kullanılır. Kılıf içerisindeki iyonların saçılma mekanizmasını nicel olarak hesaplamak mümkün olur.

$$d_{is} = \frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_0}{i_{io}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2e}{m_i} \right)^{\frac{1}{4}} (V_p - V_{dc})^{\frac{3}{4}} \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte iyon akım yoğunluğu i_{io} , ϵ_0 vakum geçirgenliğini, m_i iyon kütlesini temsil eder.

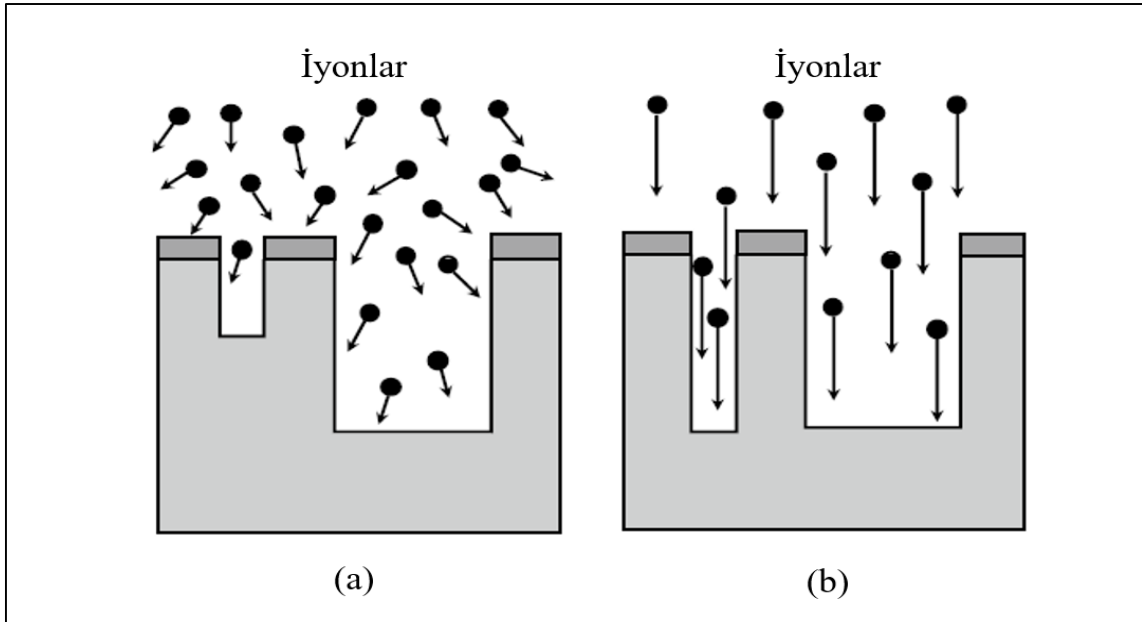
Çizelge 2.1. Ar gazı ile plazmanın iyon kılıfı kalınlığının hesaplanmış çizelgesi

Koşullar	
Gaz	Ar
Gaz Basıncı	1,33 Pa
Ortalama Serbest Yol (λ)	5 mm
Vdc-Vp	-100 V
İyon Akım Yoğunluğu	15 mA/cm ²
Hesaplanan Sonuçlar	
İyon Kılıf Kalınlığı (d_{is})	0,28 mm

Yüksek yoğunluklu plazma oluşturmak için indüktüf çiftlenmiş plazma (ICP) sistemlerine benzer sistemler gerekmektedir. Çizelge 2.1'te görüldüğü üzere 1.33 Pa basınca sahip Ar gazı kullanılarak oluşturulan ortamda iyon kılıf kalınlığı 0.28 mm gibi çok küçük bir değer hesaplanmıştır.

En önemli paramterrelerden biri de iyon kılıfı içerisinde saçılan iyonların ortalama serbest yoludur(λ). Ortalama serbest yol, parçacıkların çarpışmadan sonraki diğer çarpışma arasındaki almış olduğu ortalama mesafeye denir. Düşük gaz basıncında oluşturulan plazmada molekül sayısının daha az olması, parçacıkların çarpışmadan daha fazla mesafe kat edeceği anlamına gelir. Ortalama serbest yol Ar gazı için 1.33 Pa basınçta 5 mm olarak bulunmasına karşın, basıncı 0.133 Pa'a indirilirse ortalama serbest yol 50 mm'ye çıkar.

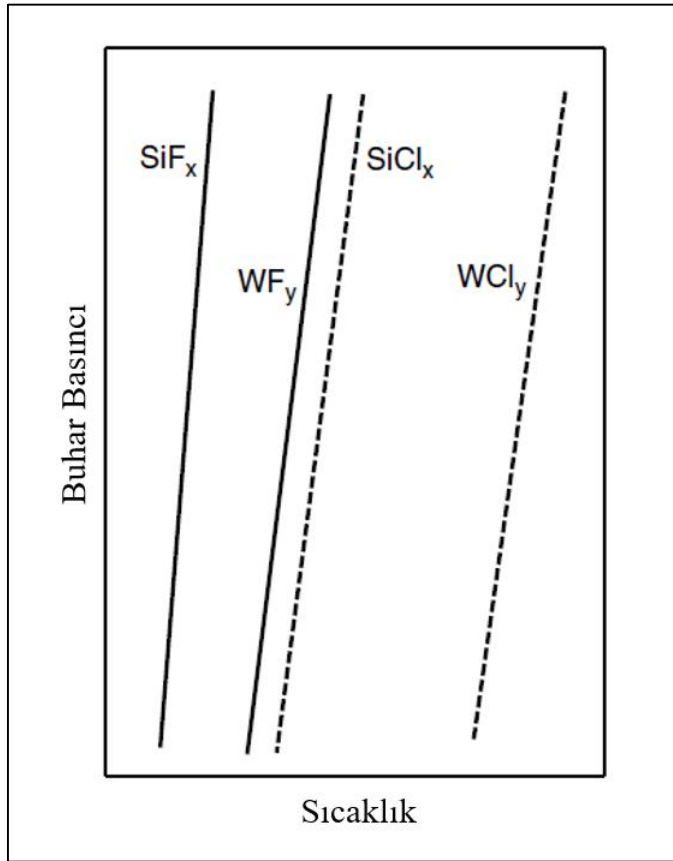
İyon kılıfı içerisinde saçılan iyonlar, iyon kılıfı kalınlığı ve ortalama serbest yol ile karşılaştırılabilir. Ortalama serbest yol, iyon kılıfı kalınlığından yeteri kadar büyük ise iyonlar çarpışmadan doğrudan alttaşa ulaşırlar. Bu durum anizotropik aşındırma için önemli bir parametredir.



Şekil 2.8. İyonların aşındırma işlemindeki şematik gösterimi (a) yüksek basınçta iyonların yönelimi, (b) düşük basınçta iyonların yönelimi

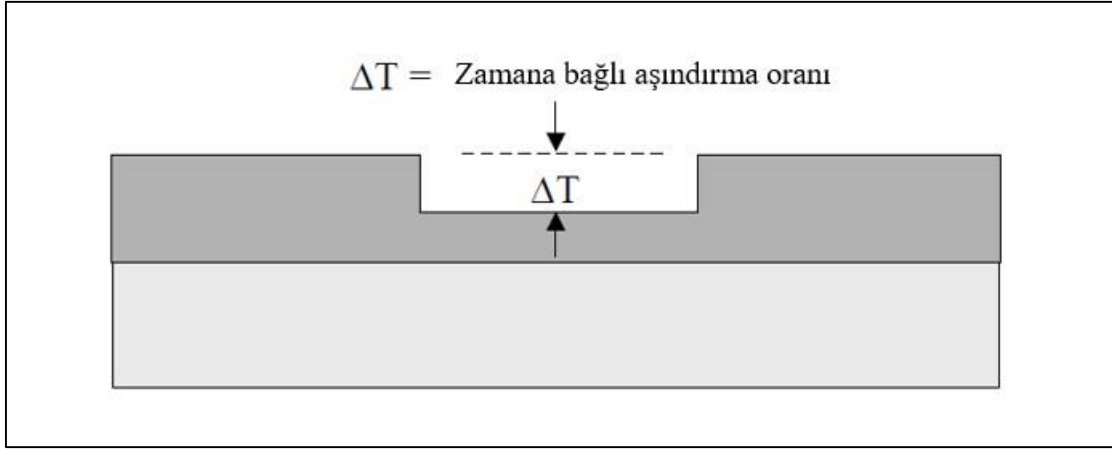
2.1.5. Aşındırma oranı

Aşındırma oranı, Bölüm 2.1.2’de anlatılan 4 farklı reaksiyon adımları ile ilişkilidir. Özellikle, yüzey reaksiyonları ve aşındırma yan ürünlerinin oluşumu, aşındırılacak malzeme için aşındırıcı gaz seçimi etkilidir. Aşındırma sırasında kimyasal saçılma alanı ve oluşan yan ürünlerin buhar basıncı yine önemli rol oynamaktadır. Şekil 2.9’da bazı gazların buhar basıncına karşılık sıcaklık eğrisi verilmiştir. Bu görsele göre flor tabanlı gazlar, klor tabanlı gazlara göre daha uçucu yapıdadır. Bu durumda, flor tabanlı gaz seçildiğinde yüzeyden ayrılan yan ürünler daha fazla ayrılarak, aşındırma oranını daha hızlı hale getirirler.



Şekil 2.9. Aşındırma sırasında oluşan yan ürünlerin buhar basıncı

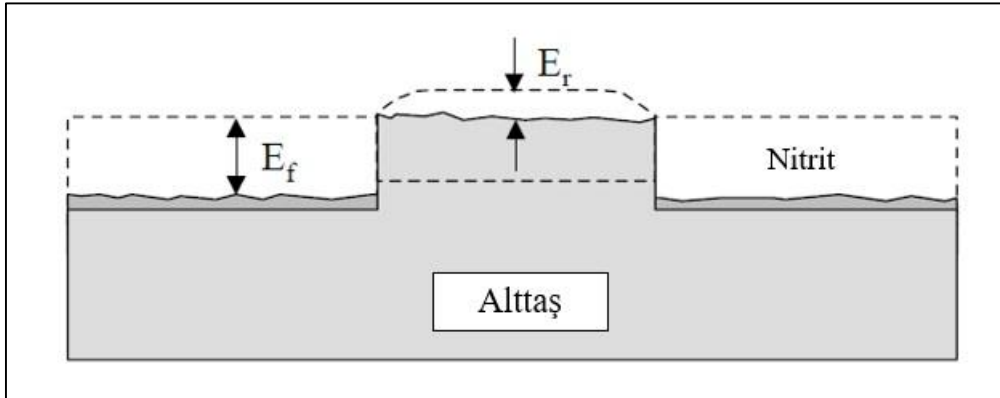
Aşındırma süresi boyunca, aşındırılan bölgenin kalınlığı aşındırma oranını vermektedir. Şekil 2.10’da aşındırma oranının görseli belirtilmiştir.



Şekil 2.10. Zamana bağlı bir tabakanın aşınma miktarının şematik gösterimi

2.1.6. Seçicilik

Seçicilik farklı tabakalar arasındaki aşındırma oranının değişimi olarak tanımlanır. Seçicilik, bir maske ve aşındırılacak yüzeyi tanımlarken diğer bir yandan aşındırma işleminde çok katmanlı bir tabakayı aşındırırken alttaki tabakanın aşınma oranının farklılığı da seçiciliği tanımlar. Aşındırma işlemindeki iyon miktarını ayarlayarak seçicilik artırılabilir ya da azaltılabilir. Şekil 2.11’de tabakalar arasındaki seçiciliğin tanımı gösterilmektedir.



Şekil 2.11. İki farklı tabakanın birbirine bağlı seçiciliğinin şematik gösterimi

$$S = \frac{E_r}{E_f} \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte E_r ilk tabakayı, E_f ikinci tabakayı tanımlar. Birbiri arasındaki oran seçiciliği temsil etmektedir [12].

2.2. SiC Geçiş Deliği Aşındırma Mekanizması ve Genel Bilgiler

SiC, yüksek yasak bant aralığına (2.4-3.0 eV) sahip yarıiletken bir malzemedir. Ayrıca mekanik olarak kararlı, elektriksel ve kimyasal özellikleri bakımından birçok malzemeden üstündür. Yüksek kırılma elektrik alanı ve yüksek elektron hareketliliğine sahip olan GaN malzemesi, yüksek güç üreten aygıt uygulamalarında ön plana çıkmaktadır. GaN epitaksiyel tabakaları genellikle SiC alttaş üzerine büyütülür. Arka yüzeyde oluşturulan geçiş delikleri, SiC malzemesine uygulanan derin aşındırma işlemi sonrasında ön yüzeyde bulunan devrelere entegre olur [13].

Arka yüzey geçiş deliklerini oluşturmak için diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında zorlu bir işlem sürecine sahiptir. Yüksek Si-C bağ enerjileri sayesinde elmas kadar güçlü bir malzeme ortaya çıkmıştır. Kuru aşındırma yöntemi sayesinde yüksek enerjili iyonlar oluşturularak SiC yüzeyi ile etkileşimi sonucunda, SiC malzemesini yüksek aşındırma hızları ile delmek, bu işlem sırasında yüksek sıcaklıklara ulaşmasını engellemek mümkündür [14,15].

Arka yüzey kanallarını oluşturmak için yaklaşık 100 μm kalınlığa sahip SiC aşındırılır, ardından 2-3 μm kalınlığa sahip epitaksiyel katman farklı kimyasal gaz karışımı kullanılarak aşındırılır. Bu işlemlerin ardından ön yüzeyde bulunan metale ulaşılmaktadır. Yüksek en-boy oranına sahip bu geçiş deliklerini aşındırmak ve geri kalan bölgeleri korumak için maske kullanılmaktadır. Bu maske seçimi oluşturulan plazma işleminin seçicilik özelliğine göre belirlenebilir. SiO_2 , Al, Ni gibi flor tabanlı plazma işlemine dayanıklı malzemeler seçilebilmektedir. Sert maske seçimindeki en önemli faktör aşındırma seçiciliğidir. 100 μm SiC için ortalama 2-4 μm arasında belirlenen maske kalınlığının dayanımı kuru aşındırma işleminin sağlıklı yapılabilmesi için gerekli bir parametredir. Genellikle literatürde sert maske olarak nikel metali kullanılmıştır. İşlem parametrelerine göre SiC:Ni seçicilik oranı ortalama 30-40:1 olarak görülmüştür. Böylelikle 100 μm kalınlığa sahip SiC aşındırıldığında yüzeyde hala Ni maske ile koruma gerçekleştirilmiştir [16].

Elektroliz ile Ni metal maske öncesinde çekirdeklenme metali kaplaması elektron demeti kaplama yöntemi ya da püskürtme (sputter) yöntemi ile Ti/Au metali vakum ortamında kaplanır. Bu işlemten sonra geçiş deliği yapıları ön yüz metaline desenlenerek dairesel yapılar elde edilir. Bu dairesel yapıların çaplarının genişliği aşındırma hızına etkisi vardır.

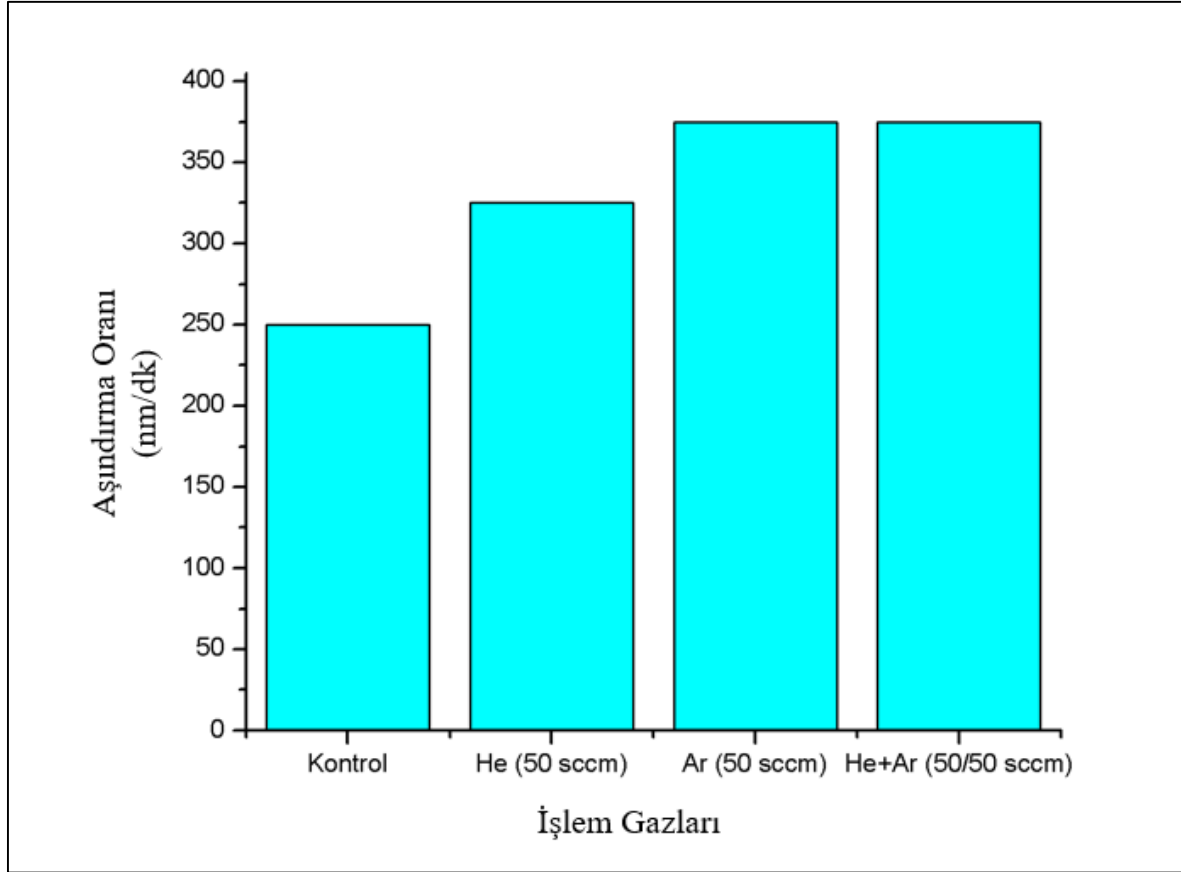
Dairesel çap küçüldükçe iyonize atomların etkileştiği bölge azalacağından aşındırma oranında azalacaktır. Ayrıca Ni metal maskenin kalınlığı arttıkça plazma ortamında bulunan iyonlar daha derin bir maske içerisinde yol aldıklarından dolayı aşındırma mekanizması gereği aşındırma oranında azalma görülecektir.

Bu parametreler göz önünde bulundurularak flor tabanlı kuru aşındırma ile geçiş deliği yapılarını oluşturmak için dört ana parametre incelenmiştir. Basınç, gaz akışları, RF ve ICP güçleri ile işlem optimize edilmiştir.

Çizelge 2.2. SiC geçiş deliği aşındırma işleminde parametrelerin işleme etkisinin gösterimi

İşlem Koşulları	Aşındırma Oranı	Ni Seçiciliği	GaN Seçiciliği	Homojenlik	Duvar Kalitesi
Öngerilim Gücü (RF)	↑↑	↓↓	↓↓	↑	→
He Seyreltme	↓	↓	↓	↑↑	↑
Basınç	↑	↑↑	↑	↑	↑
Ar Ekleme	↑	↓↓	↓↓	→	↓↓

Şekil 2.12’de belirtildiği üzere, SF_6 ve O_2 gaz karışımları ile yapılan işlem sonucunda 250 nm/dk aşındırma oranına ulaşılmıştır. *He* ve *Ar* gazları bu işleme eklendiğinde ise aşındırma işleminde ortalama %30 oranında artış gözlemlenmiştir. *Ar* ve *He* gibi inert gazların eklenmesi aşındırma oranını arttırdığı farklı çalışmalarda da teyit edilmiştir [17].



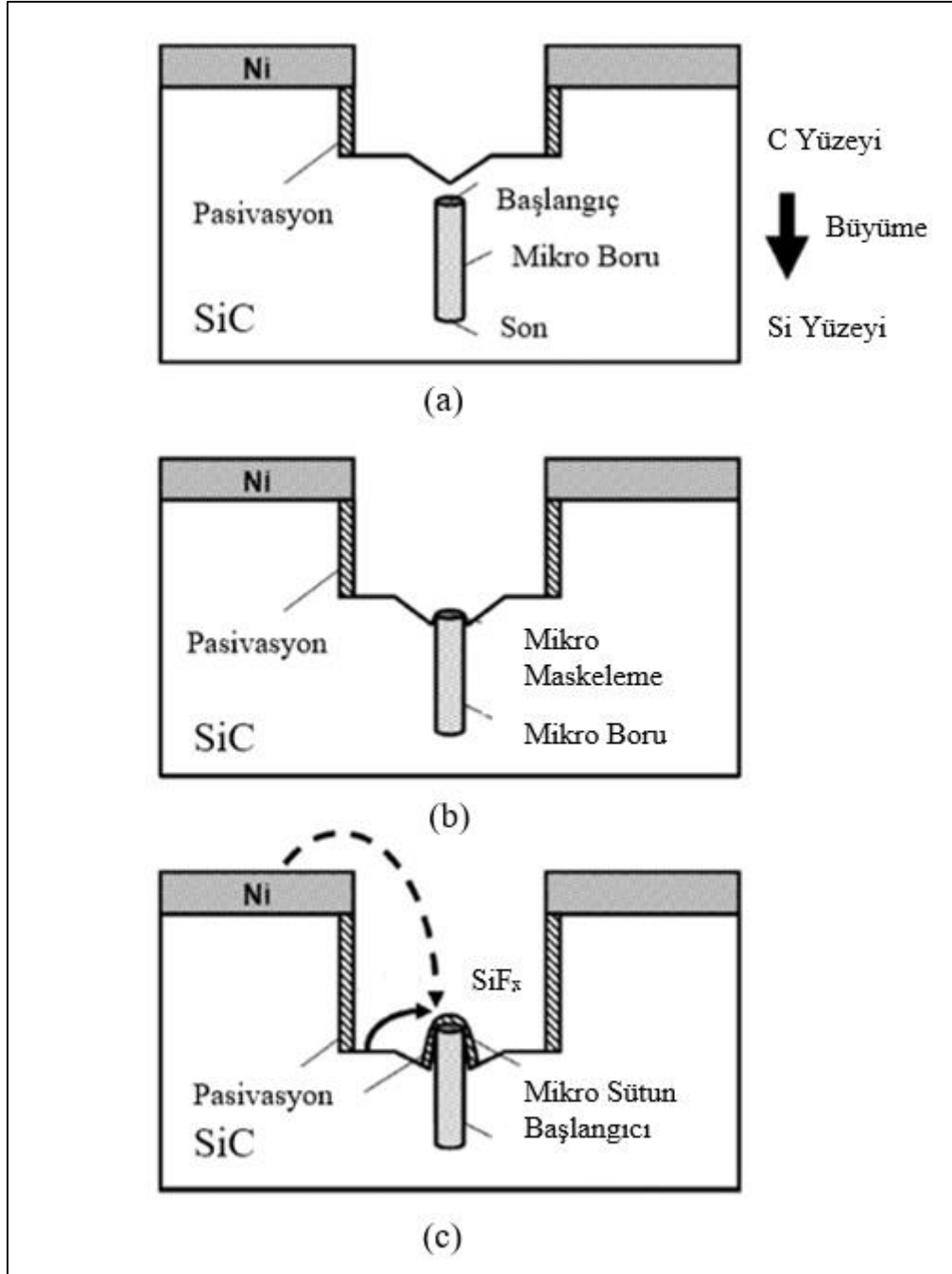
Şekil 2.12. Kontrol örneğine uygulanan flor tabanlı işleme He ve Ar gaz karışımları eklendiğinde aşındırma oranındaki değişimin gösterimi [18]

Çalışmalar sırasında plazma yöntemi ile aşındırılan geçiş deliklerinde bazı anomaliler gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar aşındırma mekanizması ile ortaya çıkan ve geçiş deliği kalitesini etkileyen yapılardır. Bu farklılıklar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Sütun Oluşumu (Pillar Structure)
- Mikro Çukur Yapısı (Microtrench Structure)

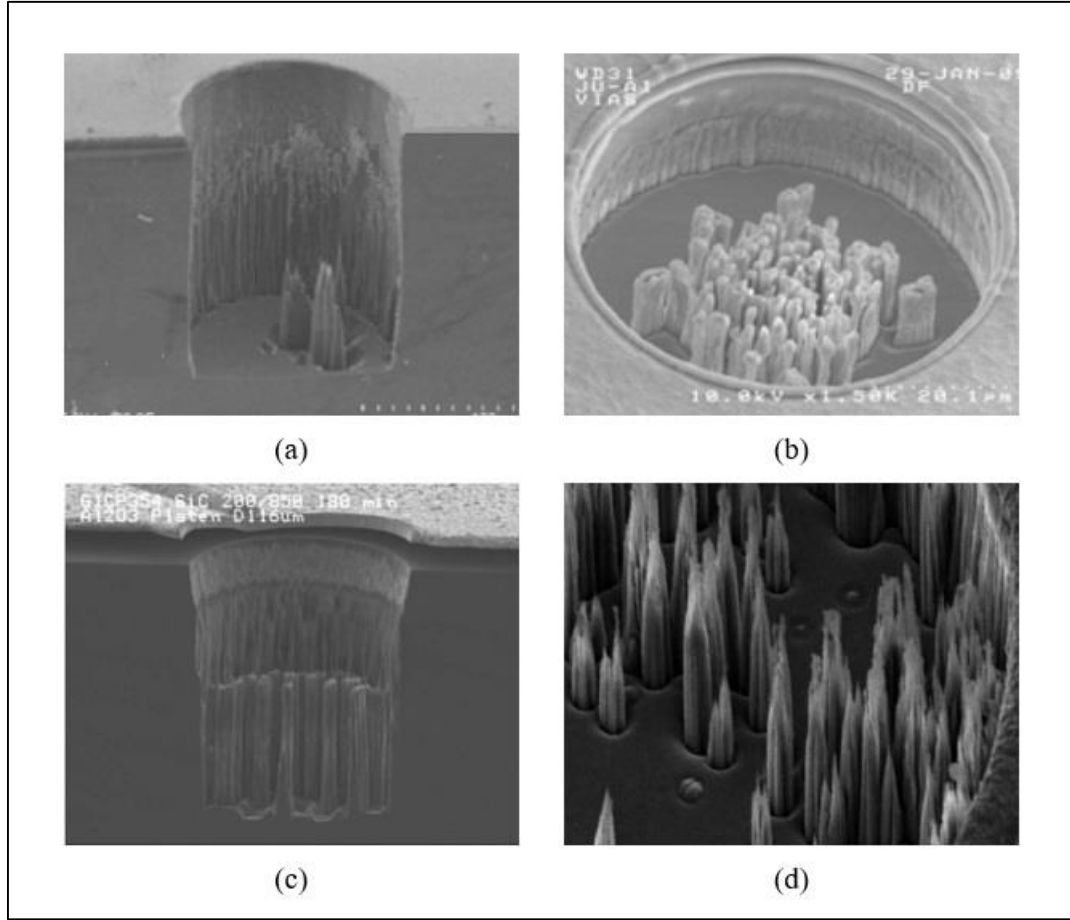
2.3. Sütun Oluşumu

Sütun yapısı, flor tabanlı aşındırma işleminde sık görülen bir oluşumdur. Çalışmalarda sütun yapısını azaltmak ve minimuma indirmek için farklı çalışmalar yapılmıştır. Sütun yapısı SiC alttaşın oluşum sürecinde içerisinde bulunan mikro boru (micro pipe) 'lardan oluşmakla birlikte plazma işlemindeki parametrelerde bu durumu tetiklemektedir. Ayrıca yüzeyde bulunan organik kirlilikler geçiş deliği yüzeyinde maskeleme yaparak sütun oluşumuna sebep olmaktadır.



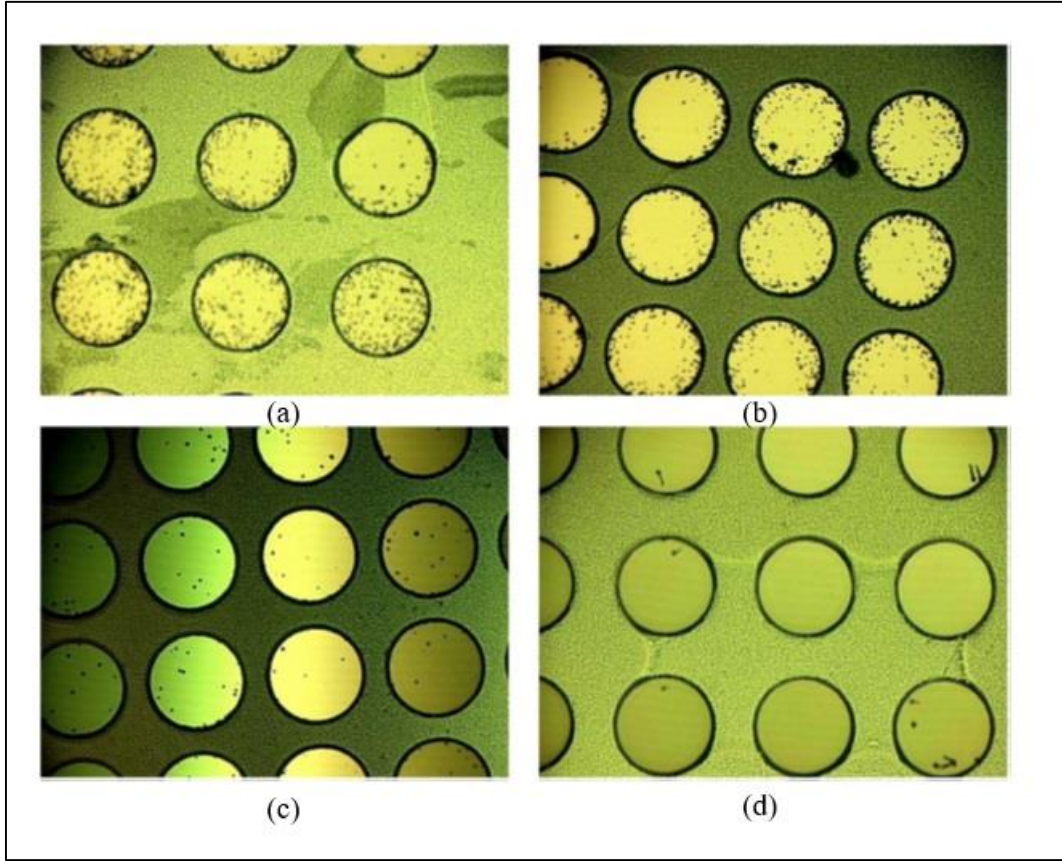
Şekil 2.13. Mikro boru nedeni ile sütun oluşumunu şematik gösterimi

Şekil 2.13’de görüldüğü üzere SiC kristal yapısının içerisinde oluşan istenmeyen mikro boru yapılar aşındırma mekanizmasından dolayı üstü pasive malzeme ile kaplanır. İşlem parametrelerine bağlı olarak Ni metalinin geçiş delikleri içerisine yüzeysel salınım (desorpsiyon) etkisi mikro boru yapılarının oluşmasına destek verir. Aşınma işlemi dikey olarak devam etmekle birlikte mikro boruların bulunduğu bölge ve duvarda aşınma işlemi gözlenmemiş olur. Bu davranışlara mikro maskeleme de denir [19-22].



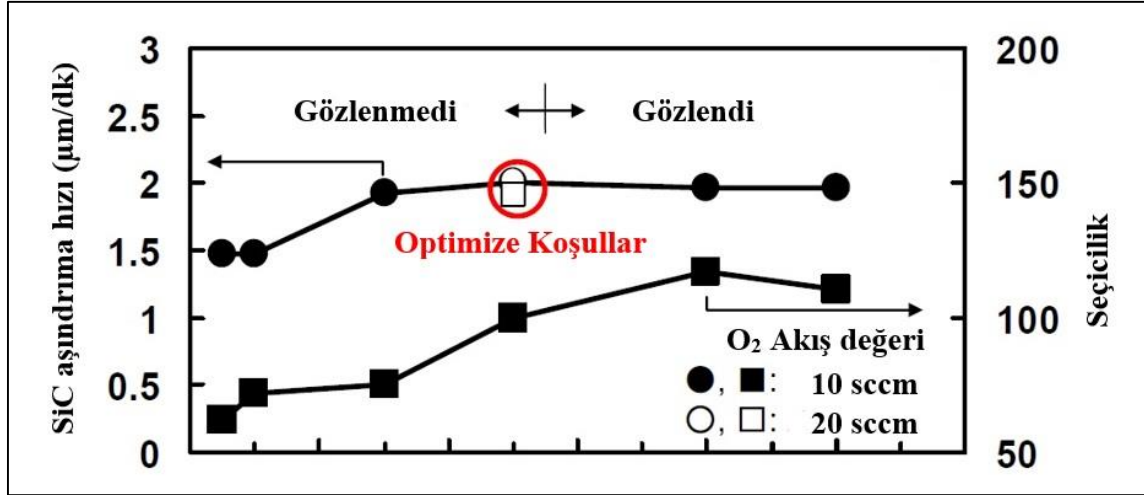
Resim 2.1. Farklı çalışmalara ait sütun formasyonunun oluşumunu gösteren SEM görüntüleri

Sütun formasyonunu azaltmak için farklı çalışmalar yapılmıştır. SiC malzemesi içerisinde bulunan mikro boruları aşındırmak için yapılan çalışmalarda ICP gücünün ve işlem basıncının sütun formasyonunu önlemede önemli rol oynadığı görülmüştür. Mikro boruların oluşumu malzemenin doğası gereğidir. Sadece mikro boru oranının az olduğu malzemeler kullanmak bile sütun formasyonunu azaltmak için yeterlidir. Ancak organik kirlilikler ve optimize olmayan parametreler dolayısı ile oluşan sütun formasyonunu minimize etmek için ön işlem yapılmaktadır. Bu ön işlemi optimize etmek için Ar gazı ile farklı sürelerde plazma işlemi uygulanmıştır. Bu çalışma ile mikro sütunlar, geçiş delikleri içerisindeki oluşumu %1'in altına inmiştir. Resim 2.2'te sütun formasyonunun Ar gazı ortamında süre ve RF/ICP oranlarına göre değişimi gösterilmiştir [23].



Resim 2.2. (a) ICP/RF 500/100 W 2 dakika, (b) ICP/RF 300/250 W 2 dakika, (c) ICP/RF 500/250 W 2 dakika, ICP/RF 750/100 W 5 dakika, ön işlem uygulanmış geçiş deliklerinin mikroskop görünümü

Şekil 2.2’te görüldüğü gibi farklı ICP/RF oranları ile süreler baz alınarak yapılan çalışmada geçiş delikleri içerisindeki sütun yapıları minimize edilmiştir. Ayrıca sütun yapısı, flor tabanlı plazma işleminde işlem parametrelerinin iyileştirilmesi bu yapının gözlenmemesini sağlamıştır. Ayrıca ön işlem sonrasında gerçekleştirilen flor tabanlı plazma sırasında kullanılan O_2 gazı akışında değişiklikler yapılarak en uygun nokta bulunmuştur [24].

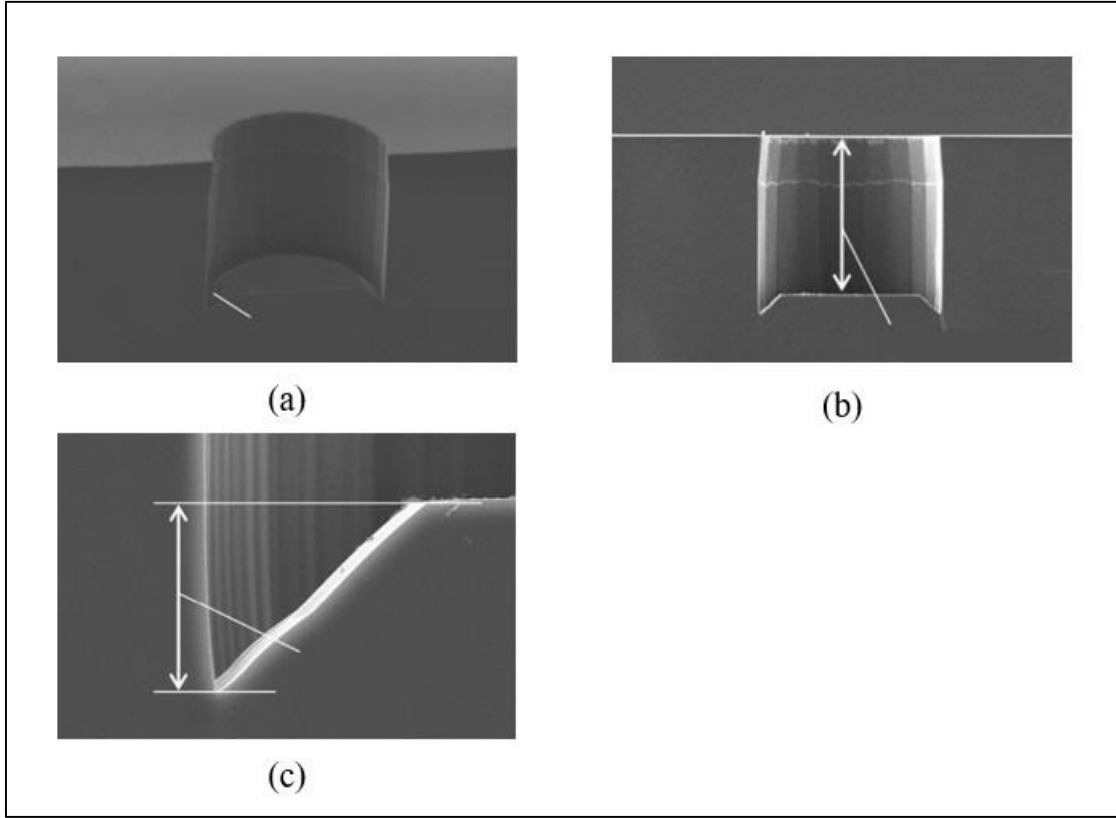


Şekil 2.14. O₂ gaz akışının en iyi olduğu durumda mikro sütun oluşumunun grafiği

Şekil 2.14'te SiC aşındırma işleminde belirli bir basınç altında yapılan işlemin O₂ gazı akışının mikro sütun yapısı oluşumuna etkisi gösterilmiştir [25].

2.4. Mikro Çukur Yapısı

Geçiş deliği plazma işleminde istenmeyen bir durum olan mikro çukur yapısı plazma işleminin doğası gereği oluşabilmektedir. Flor tabanlı plazma sırasında dikey olarak yönlendirilen iyonlar geçiş deliği tabanına çarparak aşındırma işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada geçiş deliği duvarında oluşan pasivasyon yüzeyine çarparak ilerleyen iyonize atomlar aşındırılan yüzeye kontrolsüz şekilde çarparak istenmeyen aşındırma profilleri elde edilmesine neden olur. Bu yüzden plazma işleminin parametreleri iyileştirilmelidir. Yapılan çalışmalarda RF gücü azaltılarak, düşük iyon enerjisi ile aşındırmanın mikro çukur yapısına etki etmediği gözlemlenmiştir. Ardından ICP gücünü değiştirilerek yapılan çalışmalarda plazma yoğunluğu değişimi hedeflenmiş ancak değişim gözlenmemiştir. Mikro çukur yapısına etki eden en büyük değişkenin basınç olduğu ve basıncı artırarak mikro çukur yapısını kontrol altına alındığı görülmüştür. Resim 2.3'de gösterildiği gibi mikro çukur yapısı oluşmuş aşındırma profilleri verilmiştir.



Resim 2.3. Flor tabanlı plazma sonrası oluşan geçiş deliğinin SEM ile alınmış kesit görünümü (a) geçiş deliğinin SEM görünümü (b) aşındırma derinliği ve mikro çukur görünümü (c) mikro çukur yapısının yakınlaştırılmış görünümü [26-28]

2.5. Özdirenç

Yarıiletken aygıtlarda, malzemeyi karakterize etmek için başlangıç olarak malzemenin özdirenci (ρ) ön plana çıkar. Yarıiletken malzeme üretimi için kristal büyütme sırasında kontrollü olursa da gerçekte, katkı maddesinin büyüme ve ayrışma katsayılarından dolayı homojen yapıya sahip malzeme elde edilemez. Epitaksiyel olarak büyütlen malzemelerin direnci genellikle çok homojendir. Öz direnç aygıtlar için çok önemlidir. Çünkü aygıtın seri direnci, kapasitansı, eşik voltajı ve sıcak taşıyıcı bozunması bu parametreyle ilişkilidir. Alttaşın özdirenci genellikle proses esnansında difüzyon ya da iyon ekimi ile amaca uygun şekilde değiştirilir.

Özdirenç, serbest elektron (n) ve çukur (p) yoğunluğuna ayrıca elektron (μ_n) ve çukur (μ_p) hareketliliğine bağlıdır.

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.1)$$

Özdirenç ile taşıyıcı yoğunluğu ve hareketlilik hesaplanabilir. Alternatif ölçüm yöntemleri olarak kontaksız, geçici kontak ve kalıcı kontak teknikleri ile taşıyıcı yoğunluğu ve elektron hareketliliği hakkında bilgi alınabilir. Ayrıca bilinen özdirenç değeri ile aygıtın, direnci aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

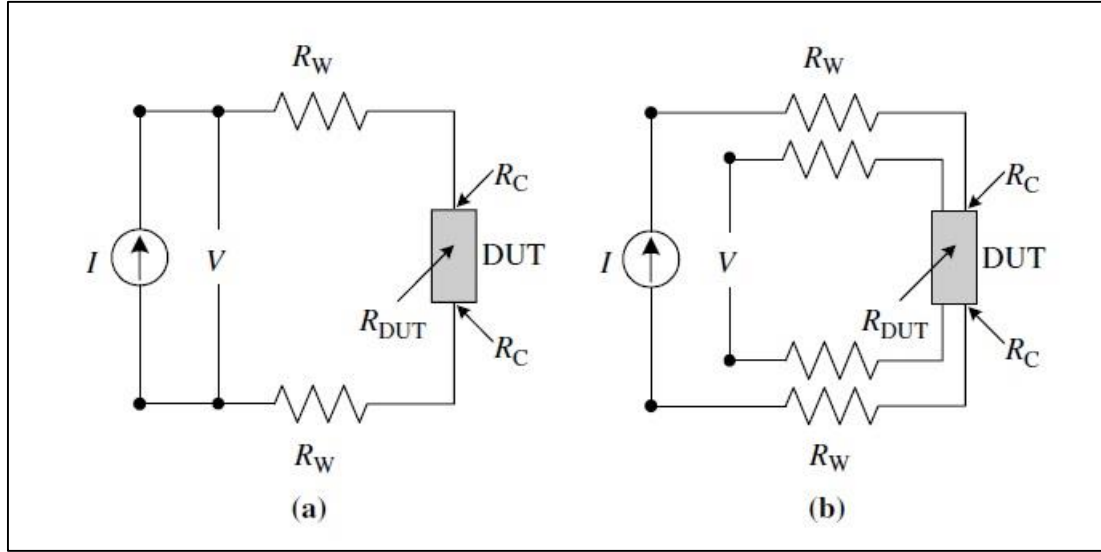
R , kontak malzemesinin direncini, ρ malzemenin özdirenci, l pedin uzunluğunu ve A pedin kesit alanını vermektedir.

2.5.1. İki nokta ve dört nokta prob karşılaştırması

Genellikle dört nokta prob yöntemi, yarıiletken aygıt özdirenci ölçümleri için kullanılmaktadır. Bu ölçüm yöntemi ile yardımcı kaynak kullanılmadan ve kalibrasyon yapılmadan mutlak sonuç alınabilmektedir. 2 nokta prob yöntemi görünüş olarak daha kolay olsa da alınan sonucun doğruluğu kolayca değiştirilebilir. 2 nokta kontak göz önüne alındığında Şekil 2.15a 'da ki gibi her kontak akım ve gerilim sağlar. Böylelikle aygıtın test altındaki (DUT) direnci tespit edilir.

$$R_T = V/I = 2R_W + 2R_C + R_{DUT} \quad (2.3)$$

R_W kablo ve prob direncini, R_C kontak direncini ve R_{DUT} test altındaki aygıtın direncini tanımlamaktadır. Bu denkleme bakıldığında kablo ve prob direnci sağlıklı ölçülemeyeceği için test altındaki aygıtın direncini ölçmek neredeyse imkansızdır. 4 nokta prob yönteminde Şekil 2.15b'daki akım yolu aynı olmasına rağmen gerilim ölçümü için eklenmiş ekstra 2 prob ile mutlak ölçümler alınır. Gerilim yolu, R_W ve R_C yapılarını içermektedir. Voltmetrenin yüksek giriş empedansından (10^{12} ohm ya da daha fazla) dolayı gerilim yolu üzerinden geçen akım çok düşüktür. Bu nedenle, R_W ve R_C üzerinden okunan gerilim düşer, bu düşüş gözle görülebilir seviyelerdedir ve ihmal edilebilir. Ölçülen gerilim aslında R_{DUT} üzerinden okunan gerilim düşüşüdür. Bu duruma göre 2 nokta prob yerine 4 nokta prob ölçümü ile gerilim ölçen problar aynı pede kontak etmesine rağmen parasitik voltaj düşüşleri ihmal edilebilir.



Şekil 2.15. DC ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi a) iki terminal direnç ölçüm düzeneği
b) dört terminal direnç ölçüm düzeneği [29]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Deneyisel Metodoloji

Geçiş deliği uygulaması için örneğin belirli aşamalardan geçmesi ve karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu aşamalar Bölüm 3.3'te ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Karakteristik aşındırma parametreleri, çeşitli plazma işlemi koşullarında incelenmiştir. Aşındırma kimyasalları, işlem basıncı, RF kaynak gücü ve RF öngerilim gücü parametreleri, plazma ile aşındırma için seçilen 4 ana parametreden oluşmuştur. Sistemin gaz akışları kütle akış kontrolcüsü (MFC) ile kontrol edilmiştir. Bu çalışmada plazma ile oluşturulan iyonların yoğunlukları ve enerjilerinin, aşındırma işlemine etkisi gözlemlenmiştir.

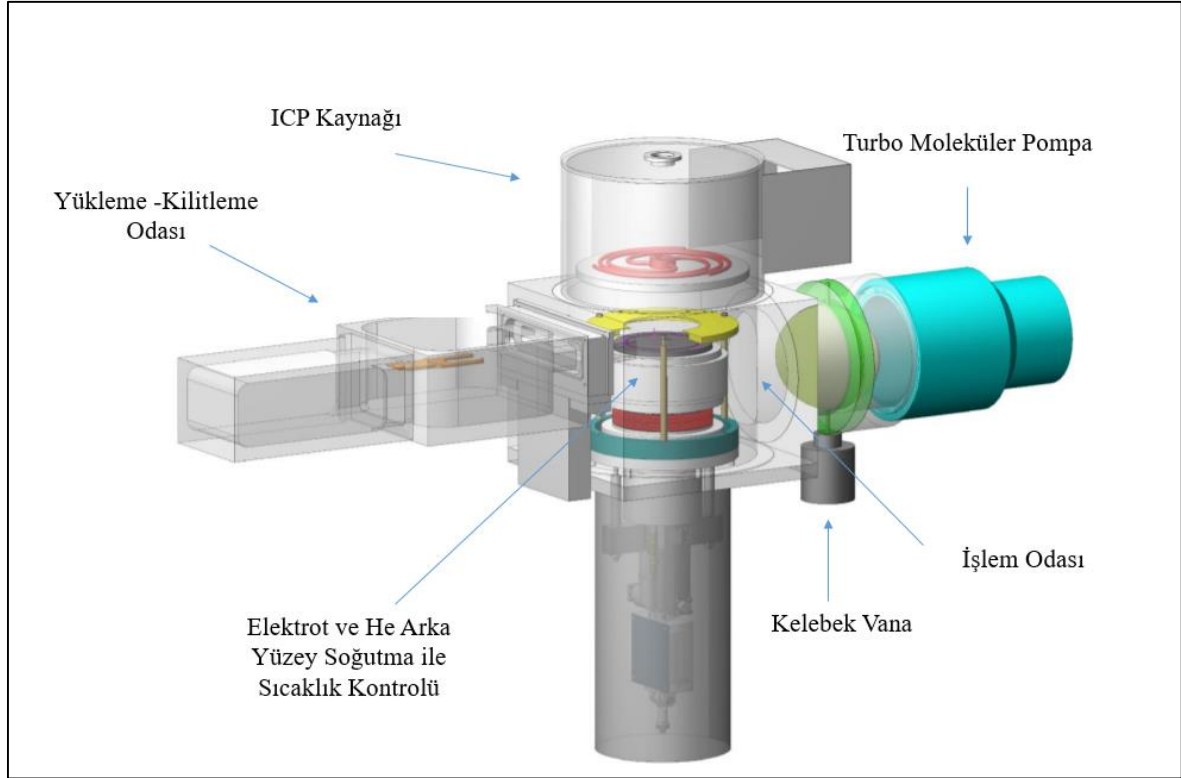
3.2. İndüklenmiş Elektron Çiftli Reaktif İyon Aşındırma Sistemi

Bu çalışmada, geçiş deliklerinin aşındırma işlemleri Sentech SI 500 ICP RIE sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistem işlem odası dışında vakum ile yüklenebilecek geçiş odasına (LLC) sahiptir. ICP tasarımı Resim 3.1'de gösterildiği gibidir. Bu sarımlar sayesinde işlem odasının merkezinde oluşturulan güçlü bir manyetik alan, ICP ile örnek arasında elektrik alanının oluşmasını sağlar. İyon yoğunluğunun direk ölçülmesi zor olduğu için dolaylı olarak iyon yoğunluğunun işlemler sırasındaki eğilimi görmek mümkün olmuştur.



Resim 3.1. ICP RIE sisteminin ICP sarımının görünümü

Örnek, işlem odasından ayrı olan yükleme-kilitleme odasına yerleştirilir. Bu oda işlem odasından mekanik bir kapı ile ayrılır. Örnek bu odada mekanik kaba pompa yardımı ile yaklaşık 2×10^{-3} Torr seviyelerine getirilir. Ardından yükleme-kilitleme odasından pnömatik kol yardımı ile işlem odasına alınır. İşlem odasının vakum seviyesi, turbo moleküler pompa ile yaklaşık 5×10^{-6} Torr basınca getirilir. Örnek işlem odasının merkezinde yukarı-aşağı hareket eden iğneler ile mekanik olarak kenetlenir. Örneğin altında bulunan kanallar yardımı ile He gazı verilerek örnek belirlenen sıcaklıkta sabit tutulur. Belirli bir taban vakum değerine gelen işlem odası, plazma ile aşındırma işlemine hazır hale gelir. MFC ile kontrol edilen gaz akışları işlem odasına gönderilerek kontrollü bir basınç elde edilir. Bu sabit basıncı sağlayan yapı kelebek vanadır. Bu hareketli vana sayesinde belirli bir akışa sahip işlem gazları istenen basınca ulaşması için kendisine pozisyon alır. Şekil 3.2’de Sentech SI 500 model sistemin 3-Boyutlu bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sentech SI 500 sisteminin 3-boyutlu şematik gösterimi

Aşındırma işlemine hazır olan sistem, bilgisayar yardımı ile RF kaynak gücü ve ICP gücünü bağımsız olarak aktive edebilmesine imkan sağlar. RF ve ICP kaynakları 13,56 MHz frekansında çalışmaktadır. RF üretici otomatik eşleme ağı sayesinde bu frekansta plazma empedansı eşleşir. Ortamda bulunan gaz karışımı plazma formuna geçerek, örnek yüzeyi ile etkileşime girer. Plazma işlemi sırasında He gazı ile örneğin alt kısmından sıcaklık kontrolü sağlanır. Zaman kontrollü yapılan bu işlem belirlenen süreci tamamladığında RF ve ICP gücünü keserek işlemi bitirir. İşlem odası vakum ortamında bırakılarak işlem gazlarından arındırılır.

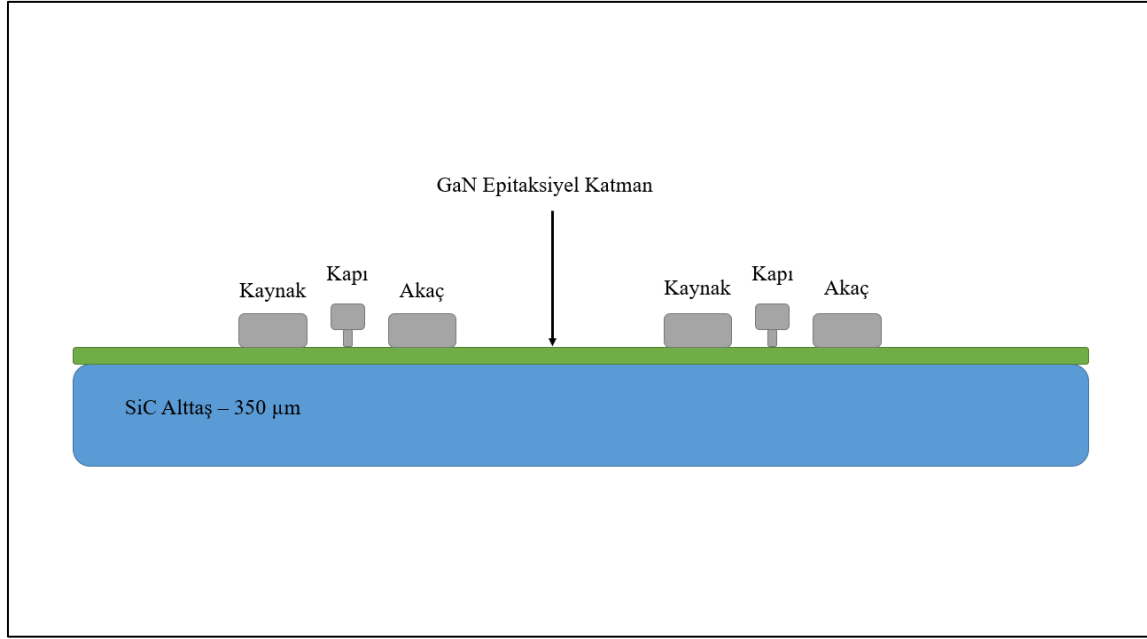
Ardından örnek yükleme-kilitleme odasına alınarak, işlem bitirilir. Aşındırma kimyasalları olarak SF_6 , CF_4 , O_2 , Ar gazları kullanılmıştır. Yapılan işlemler sonrası geçiş deliklerinin kesit görüntüleri alınarak profil yapısı, yüzey morfolojisi ve sütun oluşumları SEM ile incelenmiştir. Aşındırma oranı, geçiş deliklerinin derinlikleri ölçülerek belirlenmiştir.



Resim 3.2. Sentech SI 500 sisteminin görünümü

3.3. Örneğin Hazırlanması ve Arka Yüzey İşlemleri

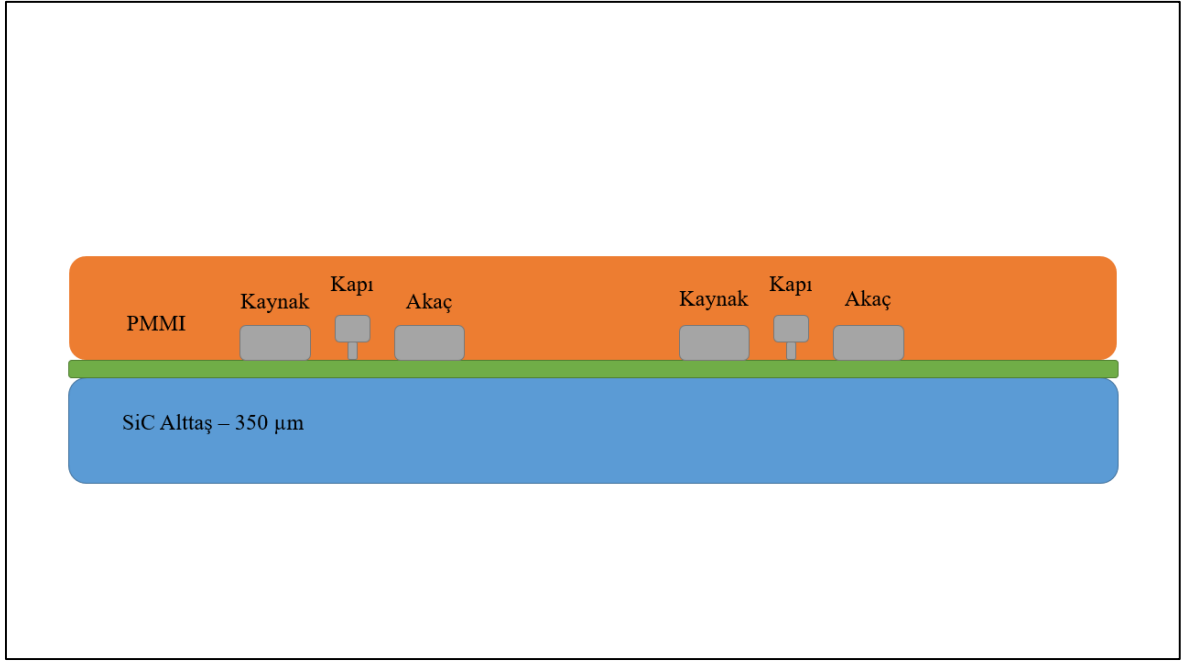
Bu çalışmanın ana konusunu oluşturan plazma işlemi ile geçiş deliğini oluşturmak için örnek bazı aşamalardan geçmektedir. SiC üzerine büyütülen HEMT epitaksiyel yapı üzerine fabrikasyonu yapılan örneğin, arka yüz işlemine hazırlanması aşağıda ayrıntıları ile birlikte anlatılmıştır.



Şekil 3.2. Ön yüz işlemi bitirilen örneğin kesit görünümü

3.3.1. Ön yüzey koruma

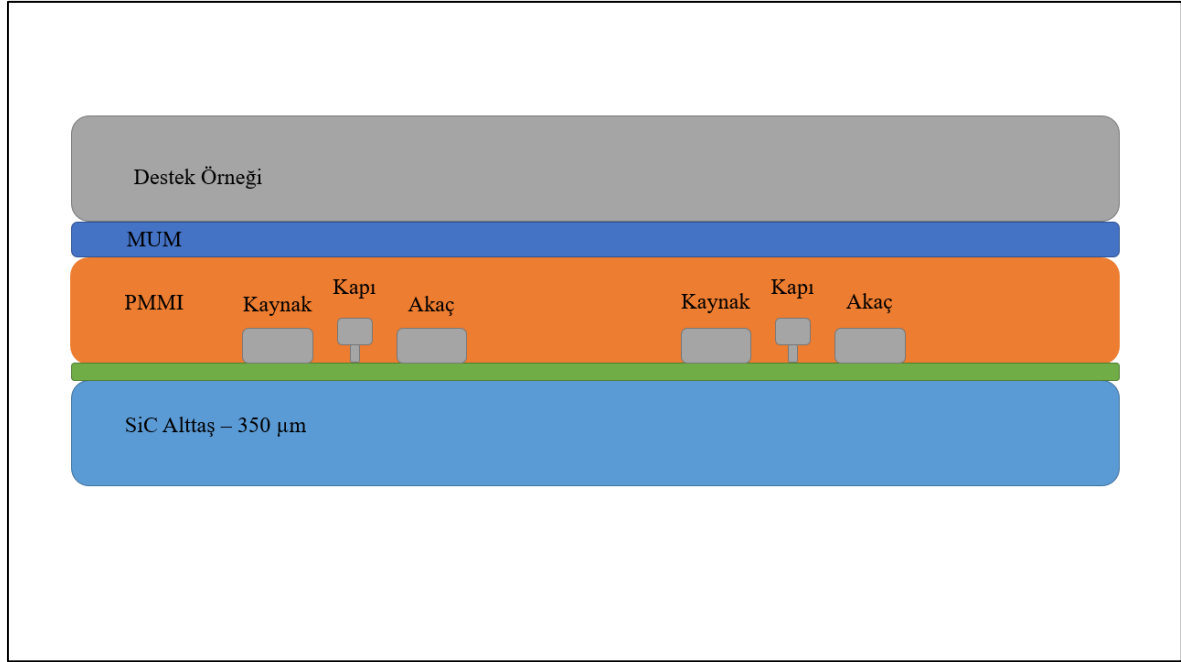
SiC altaş üzerine büyütülmüş epitaksiyel yapının, tanımlanmış bir fabrikasyon işlemi bitirildikten sonra arka yüzeyinin işlenebilmesi için ön yüzey korunmalıdır. Bu koruma işlemini yapabilmek için yüksek sıcaklıklara dayanım gösteren fotodirenç polimer bir yapı altaş yüzeyine homojen bir şekilde serilir. Serme işlemi merkezci kuvvetten yararlanılan dönel kaplayıcı ile serilmiştir. Ön yüzeyi korumak için UV ışıktan etkilenmeyen polimer malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Örneğin ön yüzü polimer malzeme ile korunmuş halinin şematik gösterimi

3.3.2. Mum ile destek örneğine yapıştırma

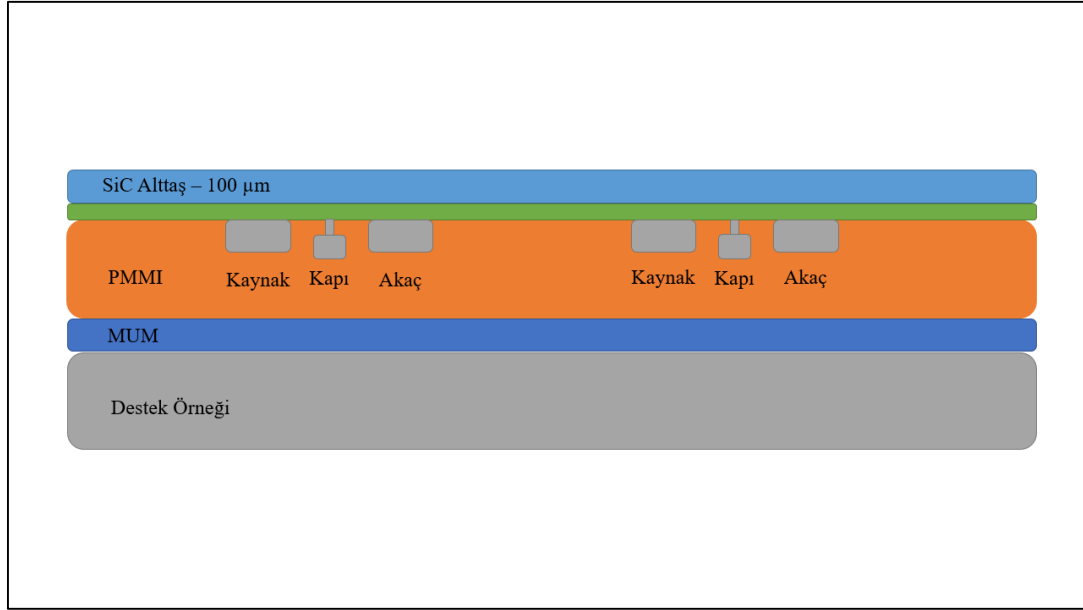
Ön yüzeyi polimer malzeme ile korunan alttaş, yoğun vizikoziteye sahip mumsu bir malzeme kullanılarak aynı boyutlara sahip bir alttaşın ön yüzeyi tutucunun ön yüzeyi ile buluşturulur. Ardından sıcaklık ve basınç kontrollü “Logitech Substrate Bonding” sistemi ile 2 alttaş birbirine yapıştırılmıştır. Bu işlemdeki amacımız SiC alttaşımızın çatlama, kırılma gibi fiziksel hasarların olasılıklarını azaltmaktır [30].



Şekil 3.4. Mum ile yapıştırılmış örneğin şematik gösterimi

3.3.3. Alttaşın SiC yüzeyini inceltme ve parlatma

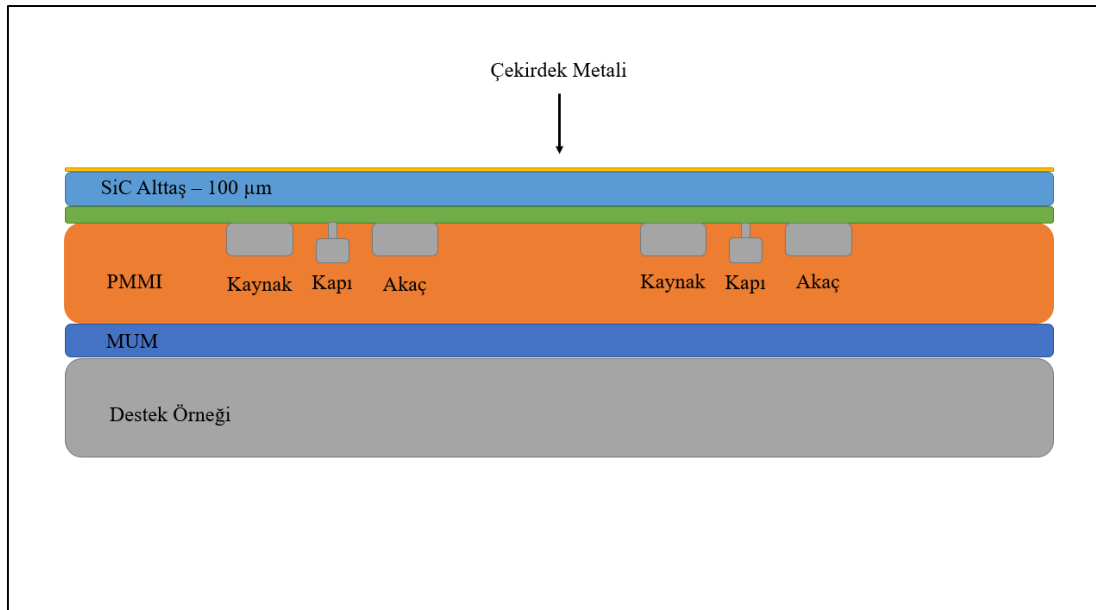
Alttaşın ön yüzeyi SiC alttaş ile yapışmış olup, SiC yüzeyi inceltme ve parlatma için hazırdır. Aşındırma diskinin dişleri sayesinde mekanik traşlama işlemi uygulanmıştır. Ardından, SiC yüzey mekanik olarak aşındırılıp, parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu inceltme işlemi öncesi ve sonrası alttaş kalınlığı ölçülerek kontrollü bir inceltme işlemi sağlanmıştır. Bu inceltme ve parlatma işlemleri Disco firmasına ait “DAG 810” sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Burada hedeflenen kalınlık 100μm’dir. Böylelikle 100 μm’ye kadar incelmiş alttaş örneği fabrikasyona hazır hale getirilmiştir [31].



Şekil 3.5. Mekanik olarak inceltileen örneğin şematik gösterimi

3.3.4. Çekirdek metalizasyonu

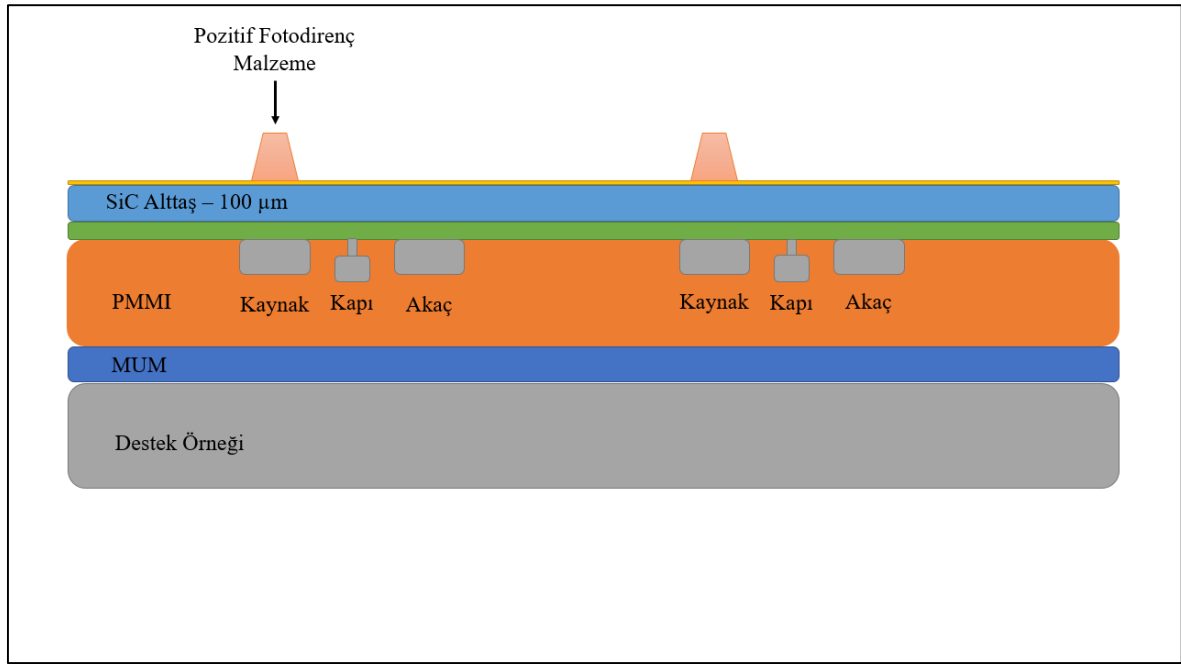
Çekirdek metalizasyonu, örneğin arka yüzeyine elektron demeti buharlaştırma sistemi ile Ti ve Au metali kaplanmıştır. Bu işlemin amacı elektroliz yöntemi ile oluşturulacak sert metal maske olan Ni metalinin yüzeye yapışmasını sağlamaktır.



Şekil 3.6. Çekirdek metali kaplanan örneğin şematik gösterim

3.3.5. Geçiş deliklerini desenleme

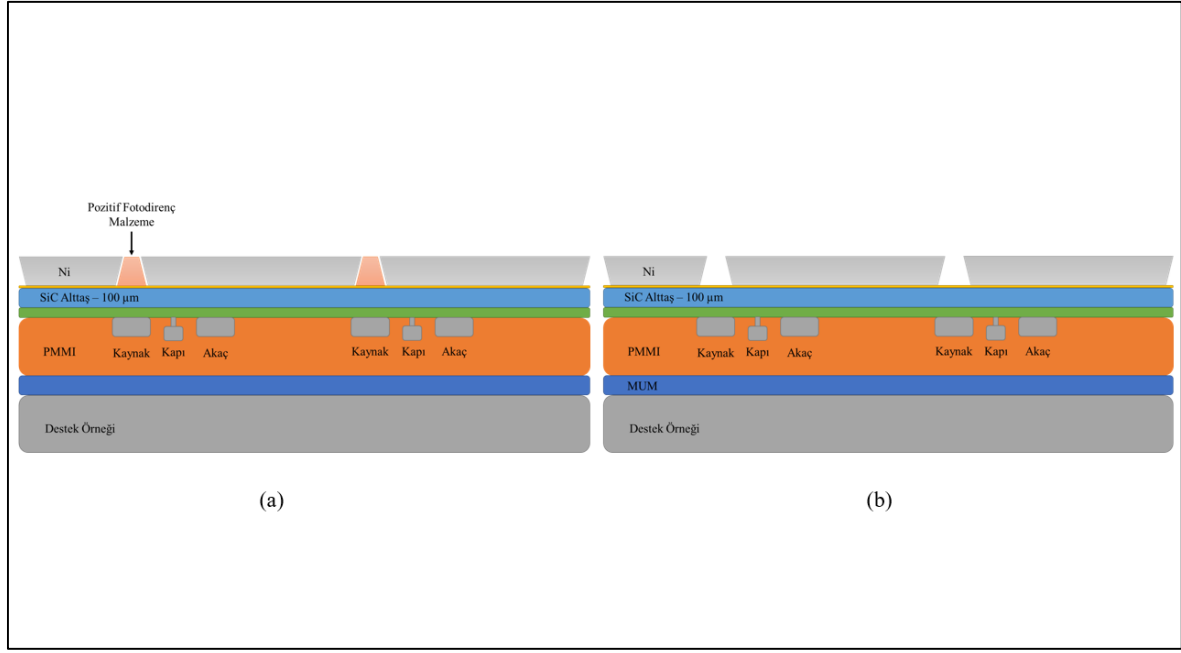
Birkaç mikrometre kalınlığa sahip akışkan fotodirenç dönel kaplama sistemi ile örnek yüzeyine serilir. Fotomaske desenleri ön yüzeyde bulunan şekillere hizalanır ve pozlanır. Pozlama sonrası fotodirenç ile uyumlu geliştirici kullanılarak pozlanan yerler çözünür. Böylelikle elektroliz yöntemi ile istenen yerler Ni metali kaplanacak şekilde maskeleme yapılmış olur.



Şekil 3.7. Fotodirenç malzeme ile desenlenen örneğin şematik gösterimi

3.3.6. Elektroliz yöntemi kullanılarak Ni sert maske oluşturma

Örnek elektroliz yöntemi ile kaplama için Ni sıvı solüsyon içerine batırılmıştır. Bir elektrik alan oluşturularak istenilen kalınlık elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra geçiş deliklerinin plazma ile aşındırılması için hazır hale getirilmiştir. Ni sert maske ile maskelenen yüzey ve aşındırılacak geçiş delikleri fiziksel olarak tamamlanmıştır.



Şekil 3.8. Ni maske ile aşındırılacak bölgeleri oluşturulan örneğin şematik gösterimi (a) desenleme sonrası elektroliz ile Ni metalinin kaplanmış halinin şematik gösterimi (b) fotodirenç malzemeyi çözerek kaldırıldıktan sonra oluşan geçiş deliği maskesinin şematik gösterimi

3.3.7. Geçiş deliğini flor tabanlı plazma ile aşındırma adımı

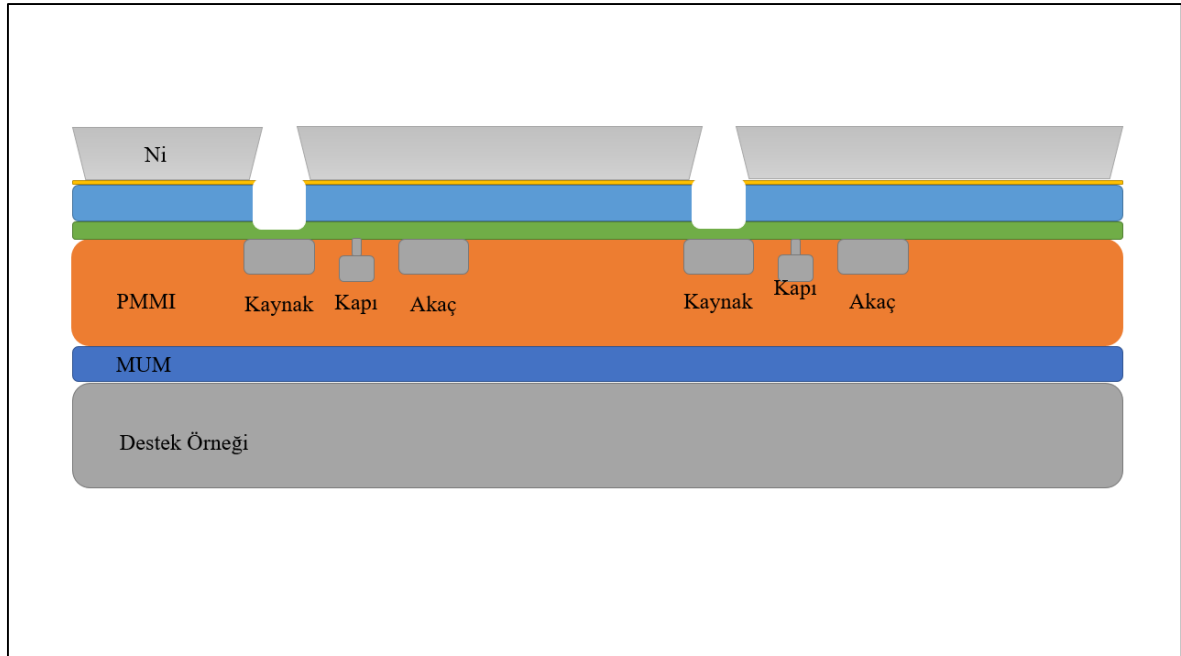
Alttaş plazma ile aşındırma için artık hazırdır. Bu işlem için SENTECH firmasına ait SI 500 ICP RIE sistemi kullanılmıştır. Bu adımda kullanılan başlıca flor tabanlı gazlar ve yardımcı gazlar şöyledir;

- SF₆ (Kükürt Heksaflorür – Aşındırıcı gaz)
- CF₄ (Karbon Tetraflorür – Aşındırıcı gaz)
- Ar (Argon – Yardımcı ön işlem gazı)
- He (Helyum – Yardımcı gaz)
- O₂ (Oksijen – Yardımcı gaz)

SiC geçiş deliği aşındırma işlemi için kullanılan genel kimyasallar flor tabanlı yapıdadır. SF₆, CF₄ gibi gazlar SiC yüzeyi ile tepkimeye girerek flor iyonları hem kimyasal hem de fiziksel olarak aşındırma işleminde bulunurlar. Bu gazlara ilave olarak O₂, He, Ar gibi gazlar destekleyici yapıdadır. O₂ gazı işlem esnasında yüzey aşındırma oranına çok fazla katkı sağlamaz ancak Ni/Al gibi katı maskeleri aşındırma seçiciliğine katkıda bulunur. Ayrıca O₂ gazı ilavesi aşındırılan yüzeyin kontrollü olmasını sağlar. He ve Ar inert gazlar ortam

içindeki kimyasal aşındırma ile birlikte fiziksel aşındırmak için katkı sağlar. İyonize olan flor atomları SiC yüzeyine ICP ile güçlendirilerek çarpar. Si ve C bağlarını zayıflatarak aşındırma işlemini yapar. Bu işlem anizotropik bir aşındırma oluşturur. İşlem sırasında tepkimeye giren yüzeyden saçılan yapılar atık malzeme oluşturur. Bu malzemeler aşınan yüzeyde ve duvar profilinde birikir. Biriken bu atık malzemeler ıslak aşındırma yöntemi ile işlem yapılan yüzeyden bertaraf edilir.

Geçiş deliklerinin çapından, Gaz akış oranlarına, RF/ICP gücünden basınca kadar değişen parametreler işlem yapılan yüzeyin yapısında değişiklikler meydana getirmektedir. Uygun geçiş delikleri oluşturmak için optimum değerler yakalanmalıdır.

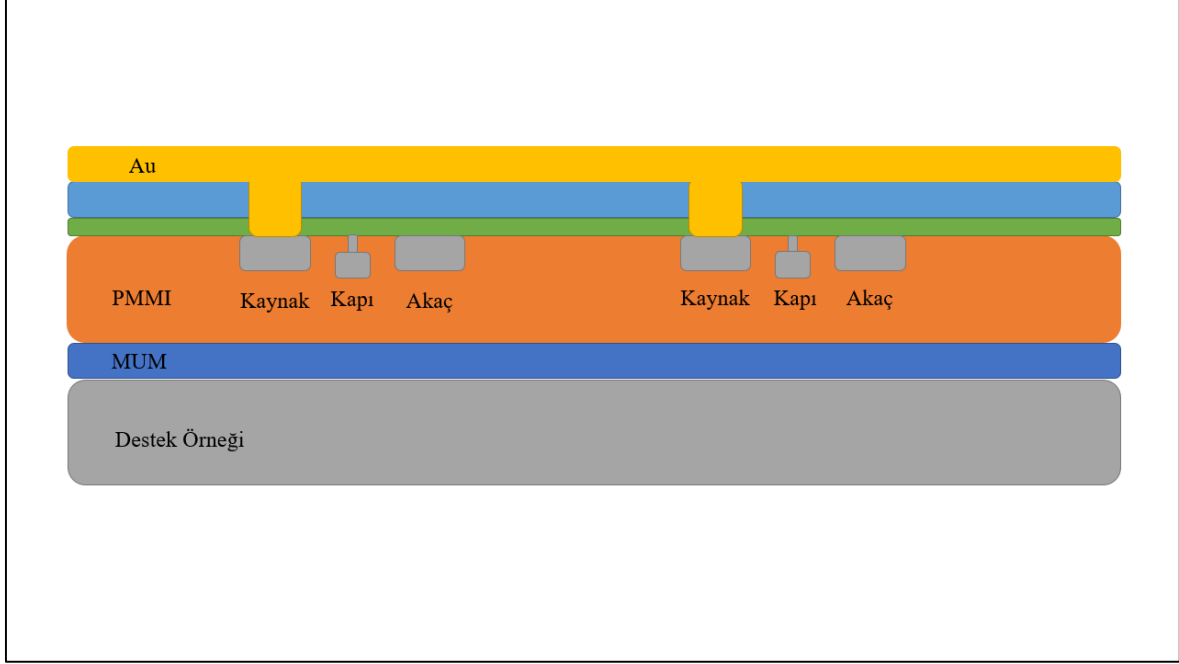


Şekil 3.9. Flor tabanlı plazma ile GaN epitaksiyel katmana ulaşılan geçiş deliği yapısının şematik gösterimi

Bu aşamadan sonra sert maske olarak kullanılan Ni maske, H_2SO_4 (Sülfürik asit) ve H_2O_2 (Hidrojen peroksit) karışımı ile kaldırılır. Aşındırma sırasında geçiş deliklerinin içerisinde biriken yan ürünler derişik HNO_3 (Nitrik asit) çözeltisi ile temizlenmiştir. Klor tabanlı plazma ile epitaksiyel tabaka aşındırılarak ön yüzde bulunan Au metaline ulaşılmıştır.

Geçiş deliklerinin profilini analiz etmek için SEM sistemi kullanılarak bu yapıların kesit görüntüleri alınmıştır. Elde edilen görüntüler ile en iyi geçiş deliği profili seçilerek mikroşerit transistör ve MMIC yapılara entegre edilmiştir. Entegre edilen bu yapıların

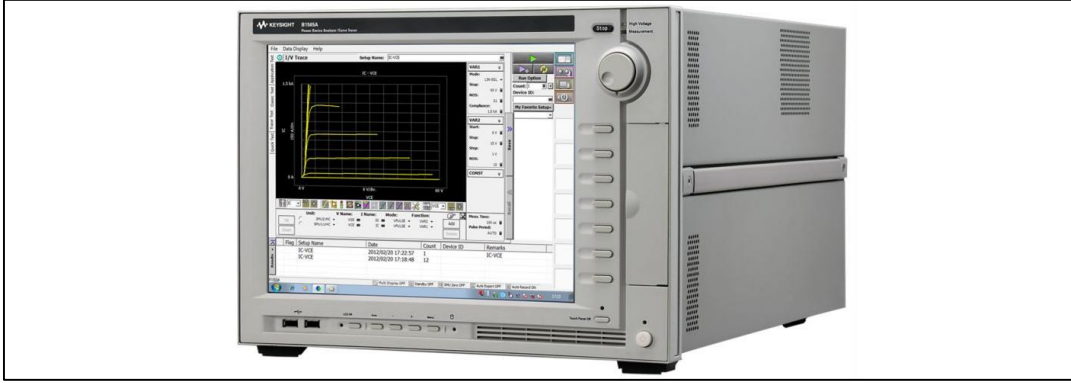
ardından klor tabanlı işlem ile GaN çoklu epitaksiyel yapısı aşındırılmıştır. Ardından elektroliz yöntemi ile Au metali geçiş deliklerinin içerisini ve ön yüzdeki metale dokunacak şekilde doldurulmuştur. Şekil 3.10'da arka yüz işlemi bitirilmiş örneğin şematik gösterimi verilmiştir [32].



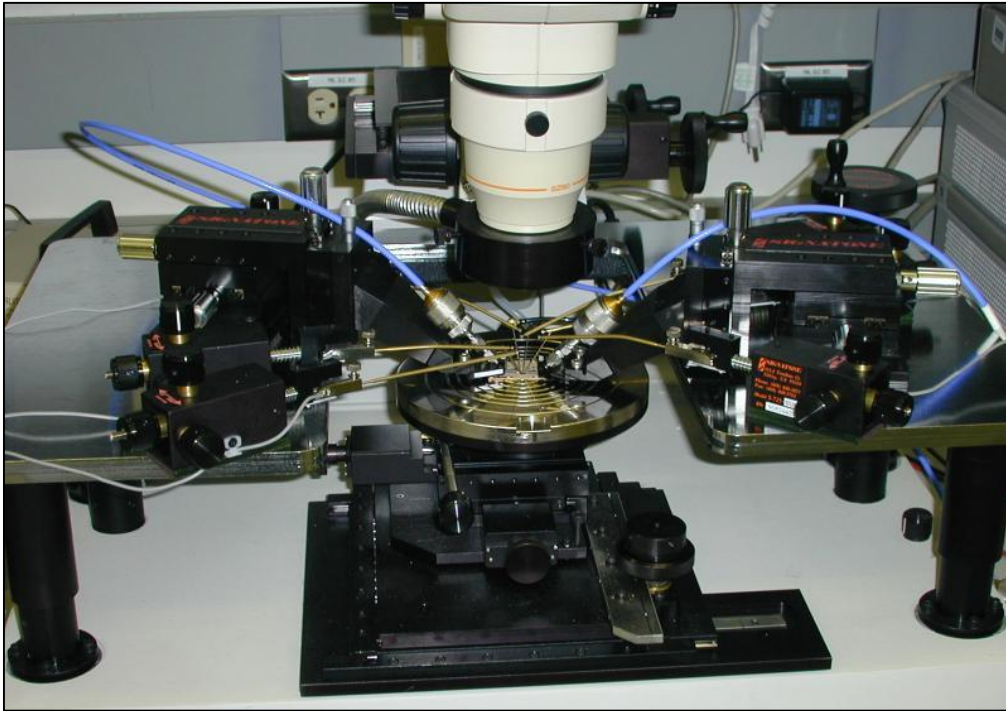
Şekil 3.10. Arka yüz işlemi tamamlanmış örneğin şematik gösterimi

3.4. Geçiş Deliği Direnç Ölçümü

Metalizasyon sonrası geçiş deliğinin direncini ölçmek için 4-prob ölçümü gerçekleştirilir. 2'şer prob, 2 metal pede dokundurulur. 2 prob üzerinden akım geçirilerek diğer 2 probdan voltaj okunur. Bu ölçüm örnek ve iletken yüzey arasındaki kontak direci vermektedir. Bu yöntem ile geçiş deliği metali karakterize edilmiştir. Elektriksel ölçüm için Keysight B1505A Güç Aygıt Analiz sistemi kullanılmıştır. Resim 3.3'te sistemin görseli ve Resim 3.4'te 4 prob istasyonunun görseli bulunmaktadır.



Resim 3.3. B1505A güç aygıt analiz sistemi



Resim 3.4. 4-Prob istasyonunun görseli

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ

Bu çalışma kapsamında toplamda 4 adet $12 \times 12 \text{ mm}^2$ alttaş ve 3 adet 3" boyutlarında alttaş ile çalışılmıştır. 4 adet alttaşta denemeler yapıldıktan sonra 3" örneğe işlemler aktarılmıştır. Son örneğe ise başından sonuna iyileştirme yapılan parametreler uygulanmış olup, geçiş deliklerinin elektriksel ölçümleri alınmıştır. Her bir örnek Bölüm 3.3'te belirtilen arka yüz işlemlerinden geçmiştir. Ardından farklı parametrelere sahip flor tabanlı plazma ile kuru aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde sonra kesit görüntüsü alınması için geçiş deliğinin tam ortasından kırılarak SEM sistemi ile inceleme yapılmıştır.

SEM sistemi ile alınan görüntüler sayesinde kuru aşındırma ile aşındırma hızı, tabakalar arası seçicilik ve geçiş deliği profilinin yapısı tayin edilmiştir.

Ön işlem olarak Ar gazı kullanılarak geçiş deliği bölgesinde bulunabilecek organik yapıların giderilmesi hedeflenmiştir. Bu işlemin süre, güç, gaz akışı gibi iyileştirmeleri başka bir çalışmada ele alınmıştır. Yapılan ön işlem standart hale getirilmiş ve uygulanan örneklerle aynı parametreler uygulanmıştır.

Islak aşındırma işlemleri için flor tabanlı kuru aşındırma sonrası oluşan yan ürünleri temizlemek için 4 farklı aşındırıcı kullanılmıştır. Öncelikle katı maskeleme için kaplanılan Ni metali pirhana olarak bilinen H_2SO_4 ve H_2O_2 karışımı hazırlanarak ıslak aşındırma yöntemi ile aşındırılmıştır. Ni metalini elektroliz yöntemi ile kaplamak için öncesinde yapılan çekirdeklenme işlemi için sırası ile Au ve Ti metalleri aşındırılır. Au metali için Technistrip firmasına ait altın aşındırıcı solüsyonu kullanılır. Ardından Ti metali için %1 oranında hazırlanmış HF (Hidroflorik asit) kullanılmıştır. Flor tabanlı plazma sonrası oluşan SiF_x yan ürünleri kimyasal ve mekaniksel olarak temizlemek için derişik HNO_3 kullanılmıştır. Mekaniksel temizlik için HNO_3 , ultrasonik titreştirici ile desteklenmiştir.

4.1. SiC Geçiş Deliği Aşındırma İşlemi

Sentech ICP RIE SI 500 sisteminde yapılan kuru aşındırma işlemleri için örnek kuartz kelepçe ile safir alttaş sabitlenmiştir. He arka yüzey soğutma işlemi bu alttaşlara standart olarak yapılmıştır. Aşındırma işlemleri sırasında deneme SiC örnekleri ısıl olarak sabit kalması için fomblin yağ, Al_2O_3 alttaş ile SiC ara yüzey arasına konulmuştur. Geçiş delikleri

tasarımı 85 μm dairesel olarak tasarlanmıştır. Aşağıda verilen Çizelge 4.1’de örneklere yapılan işlemler belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Test örneklerine uygulanan işlemlerin görünümü

Örnek	Ön İşlem Uygulanmış	CF_4+O_2	$\text{SF}_6+\text{O}_2+\text{Ar}$	$\text{SF}_6+\text{O}_2+\text{He}$	SF_6+O_2	Islak Aşındırma İşlemleri
A		✓				
B			✓			
C				✓		✓
D					✓	✓
E	✓				✓	✓
F	✓				✓	✓
G	✓				✓	✓

A örneğine, herhangi bir ön işlem yapılmadan CF_4 ve O_2 gazları kullanılmıştır. RF ve ICP güç oranları 1:5’tir. RF bias gerilimi -300 V değerindedir. Aşındırma işlemi 60 dk olarak sabit tutulmuştur. İşlem basıncı 1 Pa olarak belirlenmiştir. İşlemler sonrası ıslak işlemlere girmeden 85 μm çaplı geçiş deliğinin SEM karakterizasyonu için örnek kırılmıştır. Kesit görüntüsü alınan geçiş deliklerinin yapısı Resim 4.1’de verilmiştir.

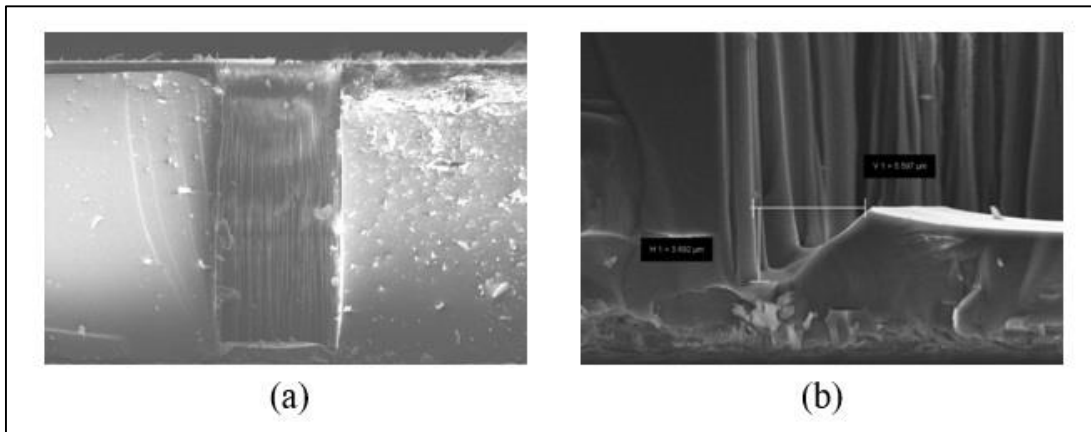
SEM karakterizasyonu sonunda CF_4 ve O_2 gaz karışımı ile yapılan kuru aşındırma işleminin duvar profili bakımından iyi olduğu görülmektedir. Aşındırma sonrası herhangi bir ıslak işlem yapılmadığı için geçiş deliği duvarlarında yan ürünler görülebilmektedir. 60 dk sonunda ortalama 24 μm aşındırılmıştır. Bu duruma göre aşındırma oranı ortalama 400 nm/dk olarak hesaplanmıştır.



Resim 4.1. (a) CF_4 ve O_2 gaz karışımı ile elde edilen geçiş deliği profilinin SEM görüntüsü (b) SiC malzemesinin kesit alttaşı ile birlikte kesit görüntüsü

B örneği daha önce belirlenmiş parametreler ile herhangi bir ön işlem uygulanmadan aşındırma işlemi yapılmıştır. Bu aşındırma işleminde SF_6 , O_2 ve Ar gazları kullanılmıştır. RF ve ICP güç oranları 1:5 olarak tutulmuştur. RF bias gerilimi -273 V değerindedir. Basınç sabit tutulmuştur. Aşındırma işlemi 60 dk olarak sabit tutulmuştur. Resim 4.2’de görüldüğü gibi kuru aşındırma sonrası SEM karakterizasyonu yapılan geçiş deliği profili aşağıdaki görsellerde belirtilmiştir.

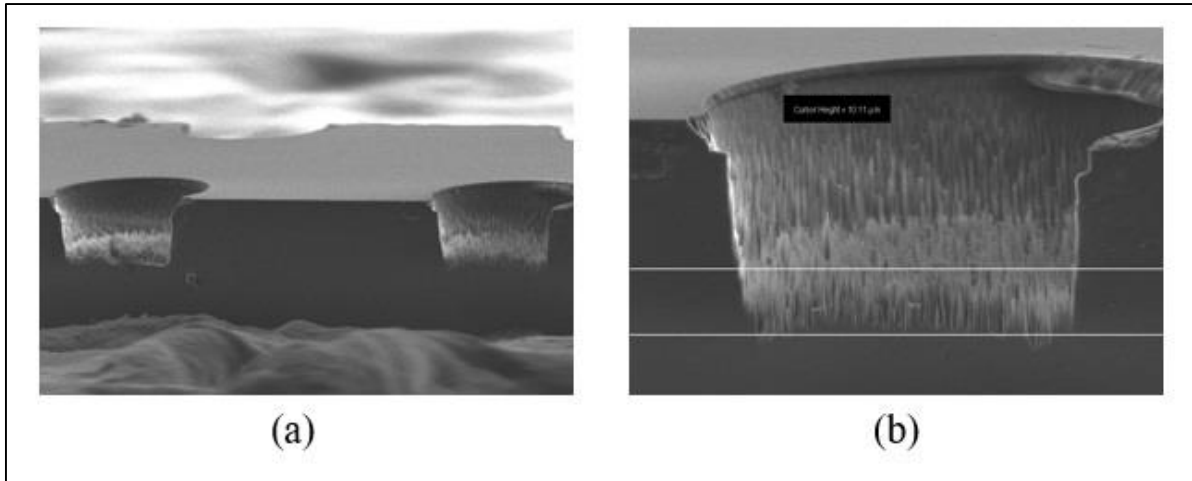
SEM karakterizasyonu sonrası SF_6 , O_2 ve Ar gaz karışımı ile yapılan kuru aşındırma işleminde 60 dk sonunda ortalama 83 μm aşındırılmıştır. Bu duruma göre aşındırma oranı 1300 nm/dk olarak hesaplanmıştır. Geçiş deliği duvarları pürüzlü gözlemlenmiştir. Ayrıca geçiş deliği tabanında yaklaşık 4 μm derinlikli mikro çukur yapısı oluşmuştur. Ni:SiC seçiciliği ortalama 1:25 olarak hesaplanmıştır.



Resim 4.2. (a) SF_6 , O_2 ve Ar gaz karışımı ile kuru aşındırma sonrası geçiş deliğinin profilinin kesit görünümü (b) geçiş deliği tabanında oluşan mikro çukur yapısı

C örneğinde herhangi bir ön işlem yapılmadan SF_6 , O_2 ve He gazları kullanılmıştır. RF ve ICP güç oranları 1:3 oranında belirlenmiştir. O_2 ve He gazları 1:1 olarak belirlenmiştir. RF Bias gerilimi -400 V değerindedir. Basıncın etkisini görmek için 2 katına çıkarılmıştır. Aşındırma işlemi 60 dk olarak sabit tutulmuştur. Resim 4.3'te gösterildiği üzere geçiş deliklerinin kesit görüntüsü verilmiştir.

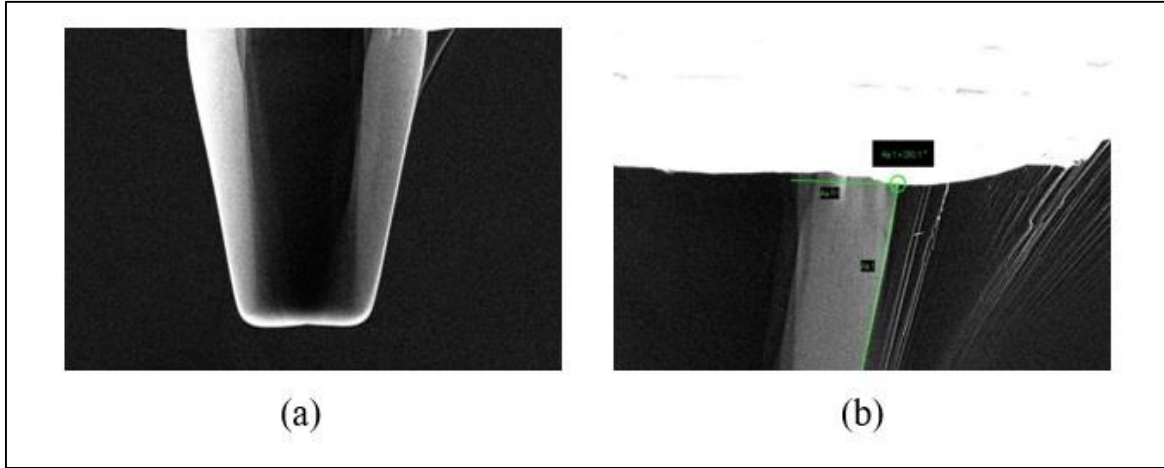
SEM karakterizasyonu sonunda 60 dk kuru aşındırma işleminin ardından 85 μm geçiş deliğinin yapısı aşağıdaki gibidir. İlk dikkat çeken özellik sütun yapısının geçiş deliği tabanındaki oluşumudur. Yaklaşık 11 μm yüksekliğe sahip bu yapılar düzensiz bir şekilde olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 4.3. (a) SF_6 , O_2 ve He gaz karışımları ile yapılan aşındırma işleminin SEM görünümü (b) geçiş deliği tabanında oluşan sütun formasyonunun oluşumu

D örneğinde herhangi bir ön işlem yapılmadan SF_6 ve O_2 gazları kullanılmıştır. RF ve ICP güç oranları 1:5 oranında belirlenmiştir. SF_6 ve O_2 gaz oranı 5:1 olarak belirlenmiştir. RF Bias gerilimi -210 V değerindedir. Basınç 2 Pa olarak belirlenmiştir. Aşındırma işlemi 60 dk olarak sabit tutulmuştur. Resim 4.4'te gösterildiği üzere geçiş deliklerinin kesit görüntüsü verilmiştir.

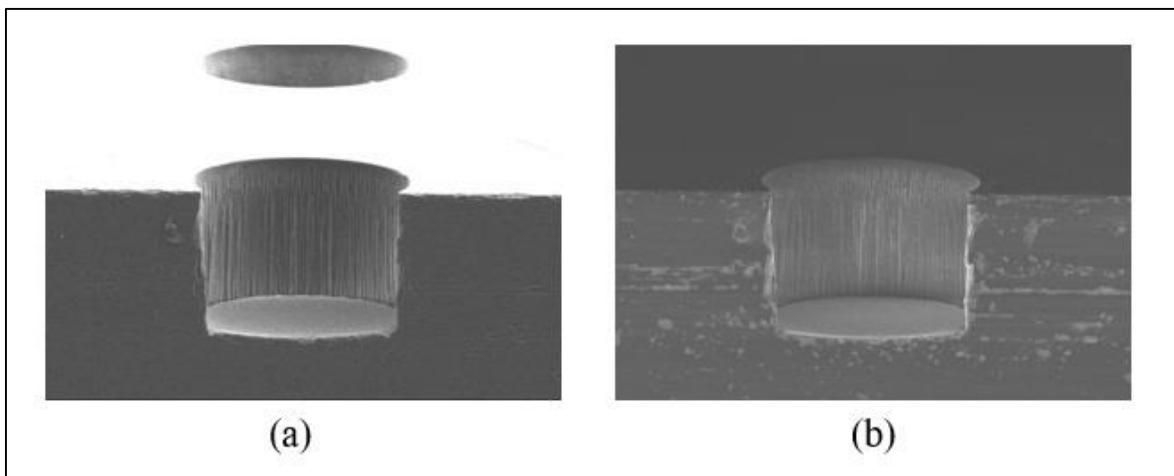
SEM karakterizasyonu sonrasında SF_6 ve O_2 gaz karışımları ile yapılan kuru aşındırma sonrasında aşındırma oranı ortalama 500 nm/dk olarak hesaplanmıştır. Geçiş deliği duvar ve taban yapısı pürüzsüz görünmektedir. Ayrıca mikro çukur ve sütun yapıları gözlemlenmemiştir. SiC:Ni seçicilik oranı yaklaşık 1:40 oranındadır.



Resim 4.4. (a) SF_6 ve O_2 gaz karışımı ile yapılan kuru aşındırma sonrası geçiş deliğinin yapısı (b) geçiş deliği duvar profilinin detaylandırılmış hali

E örneğinde Ar plazma ile ön işlem yapılmıştır. Bunun amacı mikro sütun yapısını 3" örnek boyunca azaltmaktır. Bu örneğe yapılan ön işlem sonrası 120 dk boyunca SF_6 ve O_2 gaz karışımına sahip kuru aşındırma işlemi uygulanmıştır. RF ve ICP oranı 1:5 oranında sabit tutulmuştur. Basınç %25 artırılmıştır. Resim 4.5'te gösterildiği üzere geçiş deliklerinin kesit görüntüsü verilmiştir.

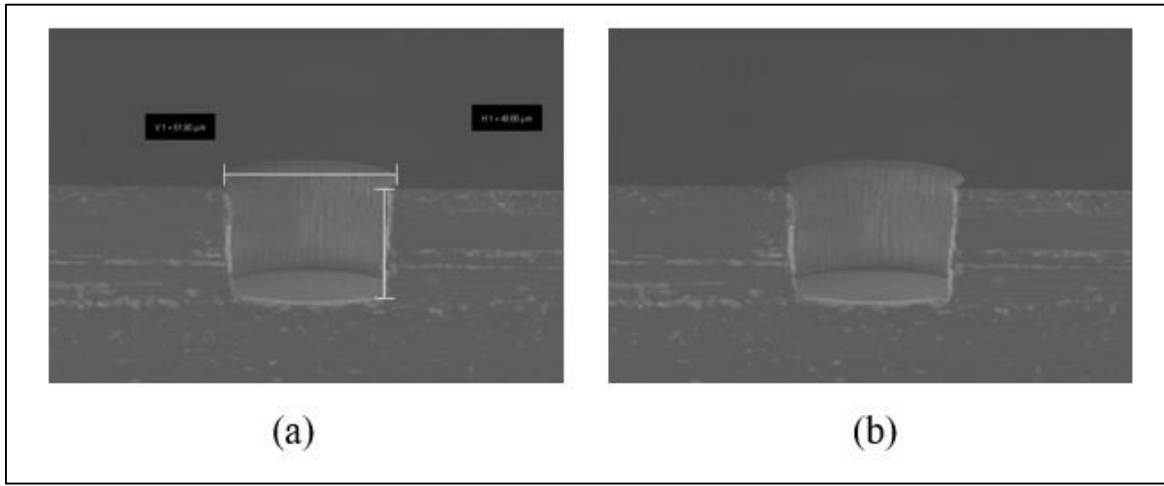
SEM karakterizasyonu sonrasında, 3" örnek boyunca homojenlik %90'ın üzerindedir. Bu işlem sonunda duvar yapısında az da olsa pürüzlülük görülmüştür. Aşındırma oranı yaklaşık 600 nm/dk olarak hesaplanmıştır. Seçicilikte D örneğine kıyasla değişiklik gözlemlenmemiştir. Ni:SiC seçiciliği 1:40 oranındadır.



Resim 4.5. (a) 3 inç alttaş üzerine uygulanan ön işlem ve SF_6 ve O_2 gaz karışımı ile kuru aşındırma yöntemi uygulanan geçiş deliğinin yapısı (b) 3 inç örneğin farklı noktasından alınan SEM görünümü

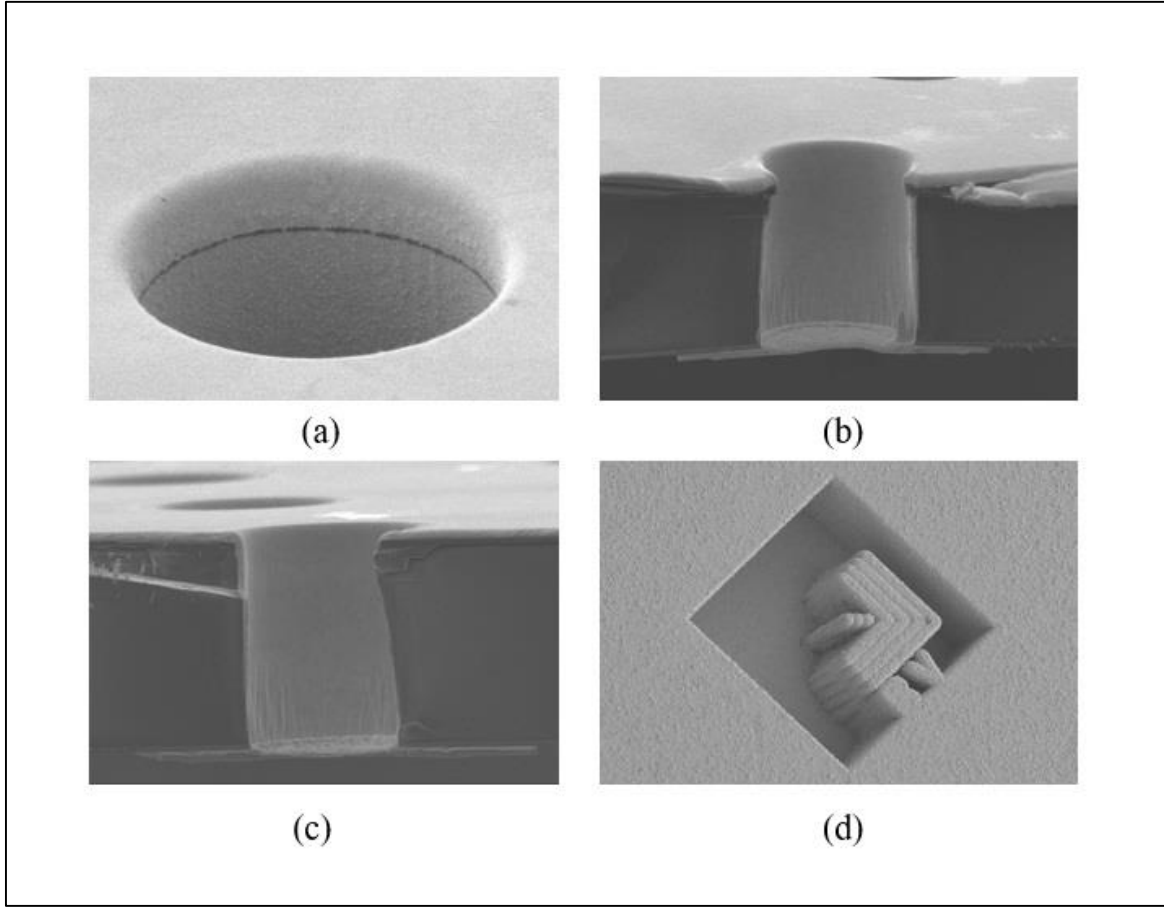
F örneğinde Ar plazma ile ön işlem yapılmıştır. Bu örneğe yapılan ön işlem sonrası 120 dk boyunca SF_6 ve O_2 gaz karışımına sahip kuru aşındırma işlemi uygulanmıştır. RF ve ICP oranı 1:5 oranında sabit tutulmuştur. Basınç azaltılmıştır. Resim 4.6'te gösterildiği üzere geçiş deliklerinin kesit görüntüsü verilmiştir.

SEM karakterizasyonu sonrasında, E örneğinden farkı sadece basınç değişimi olan F örneğinin görünümü aşağıdaki gibidir. Buna göre basınç değerini azaltmak geçiş deliği duvar yapısını E örneğine göre daha pürüzsüz yapmıştır. D ve E örneğinde olduğu gibi Ni:SiC seçicilik oranı yaklaşık 1:40 değerindedir.



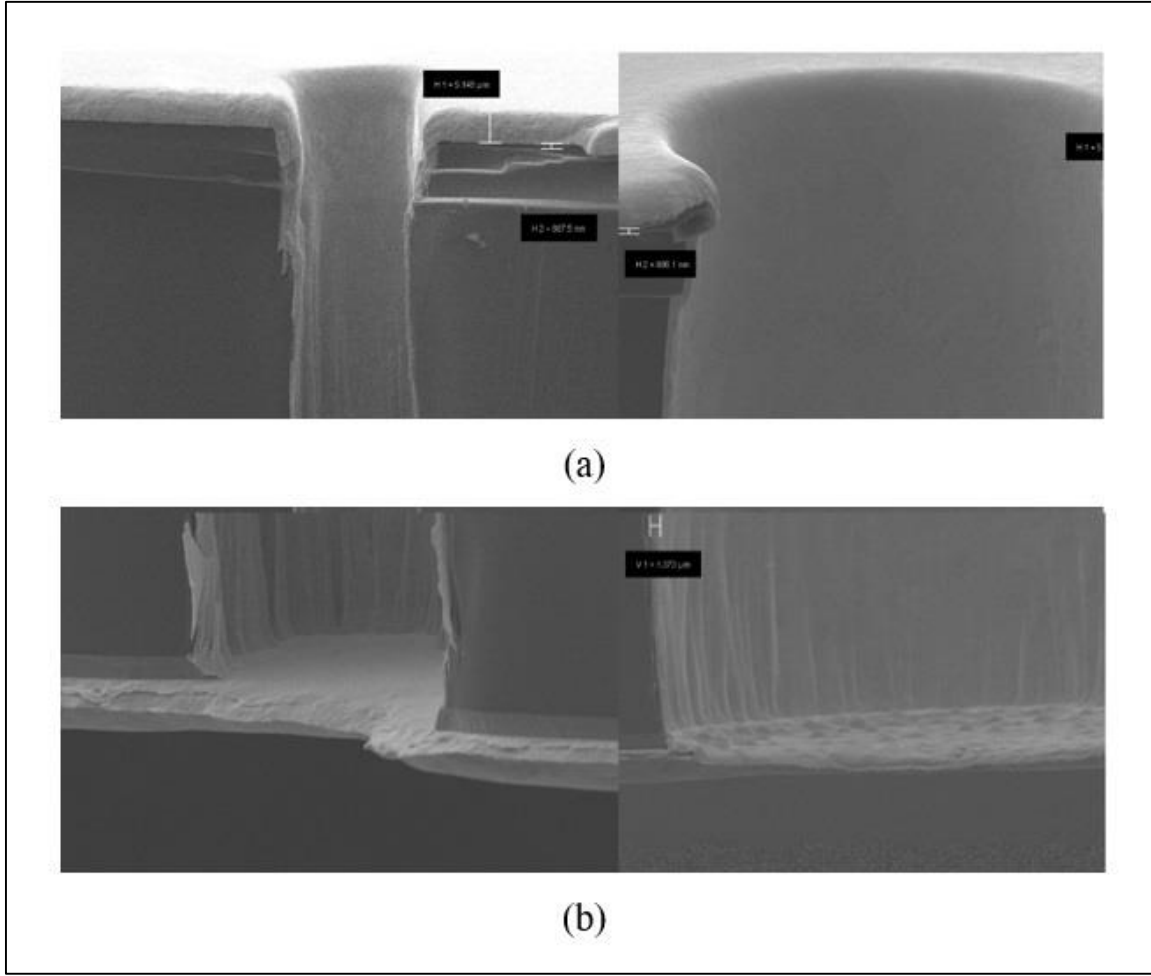
Resim 4.6. (a) 3 inç alttaş üzerine uygulanan ön işlem ve SF_6 ve O_2 gaz karışımı ile kuru aşındırma yöntemi uygulanan geçiş deliğinin yapısı (b) 3 inç örneğin farklı noktasından alınan SEM görünümü

Toplamda 6 örnek sonunda istenilen geçiş deliği profili elde edilmiştir. G örneğinde hesaplanan aşındırma oranı ile SiC tabakası tamamen aşındırılarak GaN tabakasına ulaşılmıştır. Ardından ıslak aşındırma işlemleri yapılarak geçiş deliklerinin içerisinde oluşan yan ürünler temizlenmiştir. Klor tabanlı plazma ile GaN çok katmanlı epitaksiyel yapı, ön yüzde bulunan metallere kadar kuru aşındırma yöntemi ile aşındırılmıştır. Klor tabanlı kuru aşındırma sonrası oluşan yan ürünler ıslak aşındırma işlemleri ile temizlenerek kontak metalini kaplamak için hazır hale getirilmiştir. Çekirdeklenme metali olarak Ti ve Au kullanılmıştır. Ardından elektroliz yöntemi ile 5 μm kalınlığında Au metali kaplanmıştır. Arka yüz işlemleri biten alttaş tutucu örnekten ayrılarak ön ve arka yüzleri organik temizlik işlemleri yapılmıştır. Resim 4.7'de ön ve arka yüz işlemleri bitirilmiş alttaşın geçiş deliği profil yapısı verilmiştir.



Resim 4.7. (a) Arka yüz işlemleri bitmiş geçiş deliğinin SEM görünümü (b) ön yüz ile kontak alınmış geçiş deliğinin kesit görünümü (c) geçiş deliğinin farklı açıdan alınmış SEM görünümü (d) desenleme çözünürlüğü için tasarlanmış yapının Au elektroliz sonrası SEM görüntüsü

G örneğinde $85\text{ }\mu\text{m}$ dairesel geçiş yapıları ile birlikte farklı en boy oranına sahip $30\times 75\text{ }\mu\text{m}^2$ alanlı eliptik yapıda geçiş delikleri de test edilmiştir. Farklı uygulamalar için geliştirilen bu yapılar tasarım olarak kaynak metaline kısa mesafeden kontak alma imkanı verir. Resim 4.8’de eliptik geçiş deliğinin profil yapısı verilmiştir. Bu yapıda dikkat çeken en önemli parametre $85\text{ }\mu\text{m}$ ’lik dairesel geçiş deliklerine göre aşındırma oranı daha yavaştır.



Resim 4.8. (a) Eliptik geçiş deliği ve dairesel geçiş deliği üst yapısının karşılaştırılması
(b) eliptik geçiş deliği ve dairesel geçiş deliği taban yapısının karşılaştırılması

Bu aşamadan sonra alttaş üzerinde bulunan transistör gibi aktif ve kapasitif elemanlar gibi pasif yapılar DC ve RF ölçüm için hazır hale gelmiştir. Geçiş deliklerinin elektriksel karakterizasyonun yapılabilmesi için DC ölçüm yapılmıştır.

4.2. Geçiş Deliği Profili Karşılaştırması

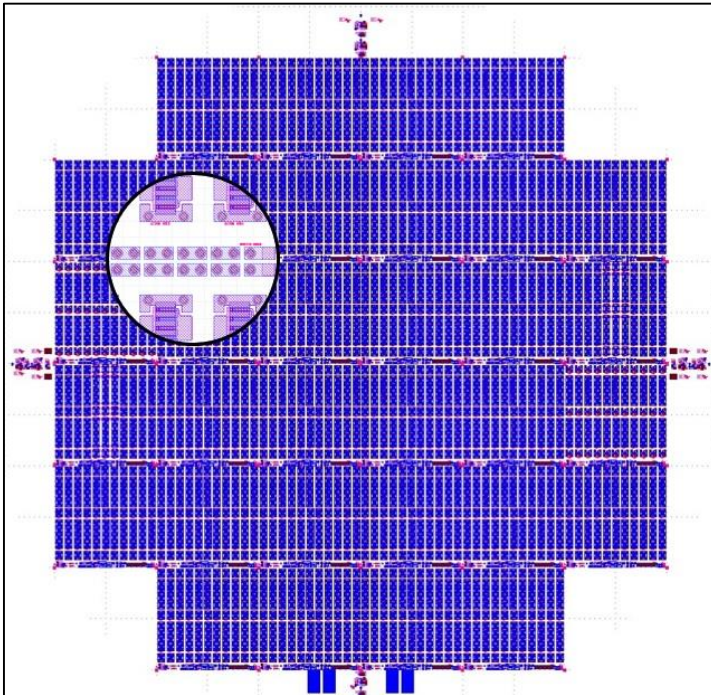
F örneği ile elde edilen geçiş deliği profili literatür ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Farklı çalışma gruplarının SiC geçiş deliği profil yapıları Resim 4.9'da gösterilmiştir.



Resim 4.9. Farklı çalışma gruplarının elde etmiş olduğu SiC geçiş deliği profil karşılaştırması [33-35]

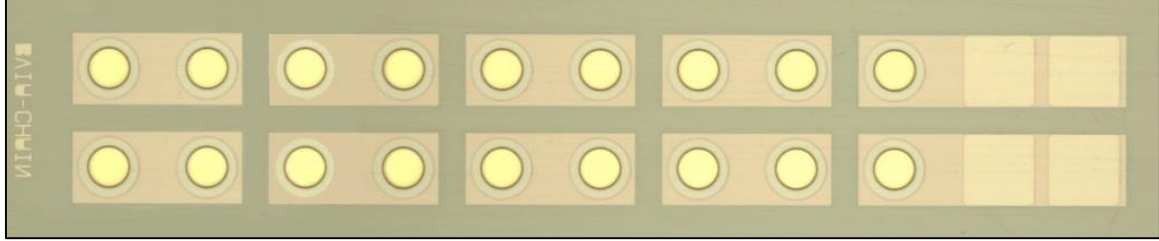
4.3. Geçiş Deliği Direnç Ölçümü

Bir adet geçiş deliği direnç değeri normal şartlar altında düşük olması gerektiği için tek başına ölçümünde cihazların ölçüm çözünürlüğü limitinde kalabilir. Burada amaç cihaz çözünürlüğüne takılmadan en doğru şekilde geçiş deliği direncini hesaplayabilmektir.



Şekil 4.1. 3 inç boyutunda seri üretim amaçlı tasarlanmış transistörlerin görünümü ve geçiş deliği test aygıtının görünümü

Seri üretim için tasarlanmış 3 inç büyüklüğündeki örneğin dijital görünümü ve geçiş deliği metalinin direncini ölçmek için tasarlanmış geçiş deliği zincirinin görseli Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Geçiş deliğinin direnç değerini doğru karakterize edebilmek için 18 adet geçiş deliğine sahip test yapısının üretilmiş hali Resim 4.10’daki gibidir.



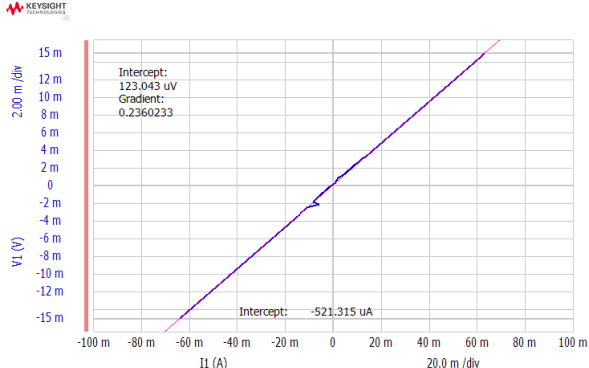
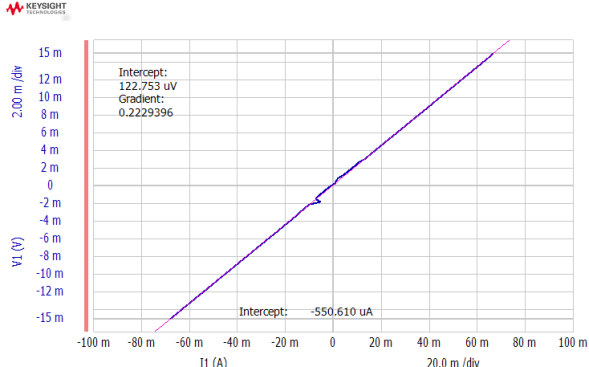
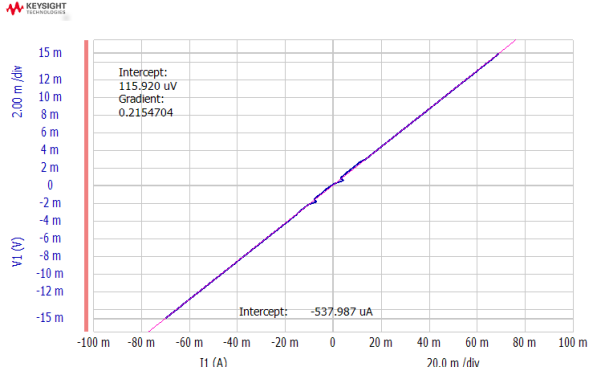
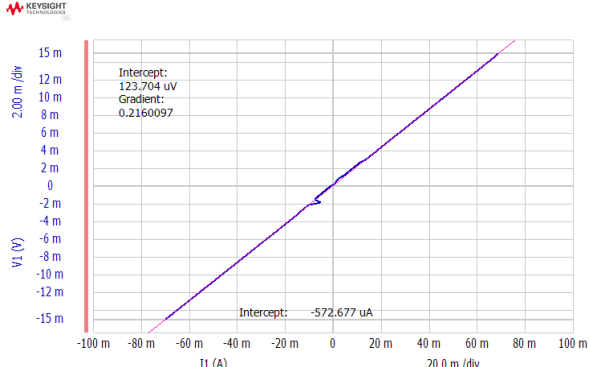
Resim 4.10. Ön yüz metaline ulaşan geçiş deliği zincirinin optik mikroskop görünümü (Arka yüzden görünüm)

Örnek yüzeyinde belirli noktalara yerleştirilen bu test aygıtı, geçiş deliği yapısının fiziksel ve elektriksel olarak homojenliği incelenmiştir. 3 inç boyuta sahip örnek üzerinden toplamda 10 test aygıtından alınan ölçüm sonuçları ve ortalaması aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.2. Alttas üzerinde bulunan geçiş deliği zincir yapısının DC elektriksel ölçümü

Test Bölgesi	R_c (m Ω)	Alınan Ölçüm Görseli
1	232	KEYSIGHT ölçüm ekran görüntüsü. Y-ekseni V1 (V) olarak etiketlenmiştir ve -15 mV'den 15 mV'ye kadar ölçeklenmiştir. X-ekseni I1 (A) olarak etiketlenmiştir ve -100 mV'den 100 mV'ye kadar ölçeklenmiştir. Grafiğin eğimi 0.2315998'dir. Kesim noktası 127.072 uV'dir. Diğer bir kesim noktası -548.673 uA olarak belirtilmiştir.
2	222	KEYSIGHT ölçüm ekran görüntüsü. Y-ekseni V1 (V) olarak etiketlenmiştir ve -15 mV'den 15 mV'ye kadar ölçeklenmiştir. X-ekseni I1 (A) olarak etiketlenmiştir ve -100 mV'den 100 mV'ye kadar ölçeklenmiştir. Grafiğin eğimi 0.2220541'dir. Kesim noktası 129.313 uV'dir. Diğer bir kesim noktası -582.347 uA olarak belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. (devam) Alttaş üzerinde bulunan geçiş deliği zincir yapısının DC elektriksel ölçümü

3	236	 KEYSIGHT TECHNOLOGIES Intercept: 123.043 uV Gradient: 0.2360233 Intercept: -521.315 uA
4	223	 KEYSIGHT TECHNOLOGIES Intercept: 122.753 uV Gradient: 0.2229396 Intercept: -550.610 uA
5	215	 KEYSIGHT TECHNOLOGIES Intercept: 115.920 uV Gradient: 0.2154704 Intercept: -537.987 uA
6	216	 KEYSIGHT TECHNOLOGIES Intercept: 123.704 uV Gradient: 0.2160097 Intercept: -572.677 uA

Çizelge 4.2. (devam) Alttaş üzerinde bulunan geçiş deliği zincir yapısının DC elektriksel ölçümü

7	219	Keysight Technologies Intercept: 124.063 uV Gradient: 0.2182760 Intercept: -568.377 uA
8	214	Keysight Technologies Intercept: 125.845 uV Gradient: 0.2136618 Intercept: -588.992 uA
9	216	Keysight Technologies Intercept: 128.010 uV Gradient: 0.2135733 Intercept: -599.371 uA
10	218	Keysight Technologies Intercept: 120.347 uV Gradient: 0.2176908 Intercept: -552.833 uA
Ortalama R_T	221	Ortalaması alınmış 18 geçiş deliğinin toplam R_c değeri

Çizelge 4.2. (devam) Alttaş üzerinde bulunan geçiş deliği zincir yapısının DC elektriksel ölçümü

Standart Sapma	7,44	Geçiş deliklerinin toplam direncinin standart sapması
Ortalama R_V	12,3	Bir adet geçiş delğinin ortalama R_c değeri

Bir adet geçiş deliğinin direnci bulunurken aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$R_T \cong 18 \times R_V + c \quad (4.1)$$

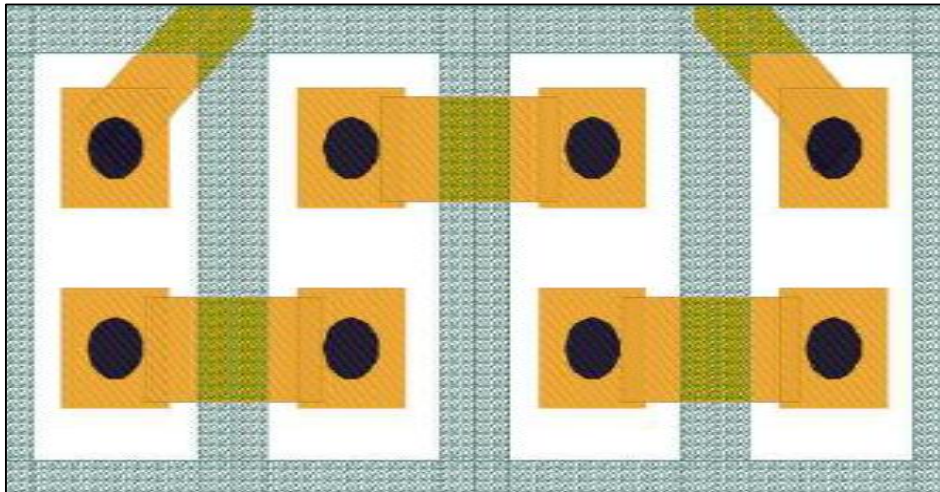
$R_T = 2$ ped üzerinden ölçülen toplam geçiş deliği direnci

$R_V = 1$ adet geçiş deliğinin oluşturduğu direç değeri

$c =$ Geçiş deliklerini birbirine bağlayan metal dirençleri ihmal edilecek kadar düşük olduğu için hesaba katılmamıştır.

4.4. Geçiş Deliği Dirençlerinin Karşılaştırması

Bir adet 85 μm çaplı dairesel geçiş deliğinin ortalama direnç değeri 12,3 m Ω çıkmıştır. Bu değer 18 adet geçiş deliğinin toplam direncinin bölümü şeklinde bulunmuştur. Literatürde 8 adet geçiş deliği yapısının toplam ölçümü yapılmış olup, elde edilen değer aşağıdaki Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Geçiş deliği karakterizasyonu yapılan test aygıtının tasarımı

Literatürde, geçiş deliği yapısının elektriksel karakterizasyonu için kullanılan test aygıtının tasarımını Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Literatürde bulunan geçiş deliği yapısının direnç değeri

	Geçiş Deliği Direnç Değeri (mΩ)	1 adet geçiş deliğinin ortalama direnci (mΩ)
Ön Yüz	42,6	5,3
Arka Yüz	9,7	1,21
Geçiş Deliği	37,3	4,66
Toplam	89,6	11,2

Çalışmalarda elde edilen geçiş deliği direnç değeri ile literatürde elde edilmiş direnç değerleri benzerlik göstermektedir. Geçiş deliği yapısının homojenliği ve kalitesini belirlemek için yapılan bu ölçüm literatürde yapılan çalışmalarla tutarlıdır [36].

5. SONUÇ

Yapılan çalışma kapsamında 4 farklı flor tabanlı gaz karışımı kullanılarak, kuru aşındırma yöntemi ile 85 μm 'lik çapa sahip dairesel yapılar tasarlanmış ve aşındırılmıştır. 4 örneğe uygulanan flor tabanlı aşındırma sonunda SEM karakterizasyonu yapılmıştır. Kesit görüntüleri alınan geçiş deliklerinin duvar profili, aşındırma oranı, katmanlar arası seçiciliği, mikro çukur ve sütun yapıları incelenmiştir. Ayrıca flor tabanlı işlem öncesi uygulanan Ar ön işlemi ve aşındırma sonrası ıslak aşındırma işlemlerinin geçiş deliği yapısına etkisi incelenmiştir. İyileştirme sonucu edilen parametreler ile 3 adet 3 inç boyutlarındaki örneklerle arka yüz işlemleri uygulanmıştır. SiC tabakası sonuna kadar aşındırılmıştır. GaN epitaksiyel tabakası klor tabanlı kuru aşındırma yöntemi ile aşındırılmış, ardından çekirdek metali ve Au elektroliz yöntemi ile kaplanmıştır. Bu işlemlerin ardından geçiş deliği zincir test yapısı üzerinden DC ölçümler alınarak geçiş deliklerinin toplam direnci ölçülmüştür. Bulunan direnç değerleri literatür ile karşılaştırılmıştır.

Kullanılan gaz karışımları, literatürde ön plana çıkmış parametreler dikkate alınarak işleme alınmıştır. Literatürde SF_6 , O_2 ve SF_6 , O_2 , Ar gaz karışımları, işlem sırasında gaz akış oranları ve RF, ICP güçleri parametrik olarak çalışılmıştır. Yapılan işlemlerle, literatürde elde edilen geçiş deliği yapısına ulaşılması hedeflenmiştir. Literatürde üzerinde durulmayan önemli bir özellik olan ısıl denge, yapılan çalışmalar sırasında incelenmiş olup, tutucu malzemenin özelliği ve kuru aşındırma işlemi sırasında soğutma işlevini üstlenen He arka yüz soğutmanın önemi daha iyi anlaşılmıştır.

Flor tabanlı kuru aşındırma işleminde; işlem basıncı, kullanılan gazlar ve akışları, RF ve ICP güçleri gibi parametreler incelenerek geçiş deliğinin profili tayin edilmiştir. Flor tabanlı kuru aşındırma işlemlerinde kullanılan SF_6 ve O_2 gazlarına eklenen inert gazlar (He, Ar vb.) geçiş deliği profiline fiziksel olarak zarar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan inert gazların aşındırma oranını arttırdığıda görülmüştür. Özellikle Ar gazının işleme eklenmesi fiziksel hasarı artırırken kontrolsüz bir profil oluşmasına da neden olmaktadır.

Belirli bir eşik basınç değerini geçen işlemlerde, geçiş deliği duvar yapısının bozulduğu, mikro çukur yapılarının düzensiz halde olduğu gözlemlenmiştir. Ar gazı ile yapılan plazma ön işleminin geçiş deliği yapılarında oluşacak mikro sütun yapılarını %99'a kadar azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca flor tabanlı aşındırma işlemi sonrası yapılan ıslak aşındırma

işlemlerinin, geçiş delikleri duvarlarında biriken yan ürünleri temizleyerek verimi (yield) arttırdığı görülmüştür.

İyileştirilen flor tabanlı işlem sonucunda elde edilen geçiş deliği profil yapısı literatür ile karşılaştırılmıştır. Farklı çalışma gruplarının elde etmiş olduğu SiC geçiş delikleri ile geliştirilmiş olan geçiş deliği profili benzer özelliklere sahiptir.

Tez kapsamında yapılan geçiş deliği zinciri 4 noktadan prob DC ölçümlerinin, geçiş deliklerinin elektriksel karakterizasyonu sonunda 3 inçlik alttaş boyunca homojen dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Ölçümler ile desteklenen karakterizasyon işleminde bulunan değerler, literatür ile benzerlik göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Bardeen, J., Brattain, W. H. (1948). The transistor, a semi-conductor triode. *Physical Review*, 74(2), 230.
2. Ozpineci, B., Tolbert, L. M. (2004). *Comparison of wide-bandgap semiconductors for power electronics applications*. United States Department of Energy Technical Report, Oak Ridge, 1-26.
3. Moss, T.S., Mahajan, S. (1994). *Handbook on semiconductors: Materials, properties and preparation*. Amsterdam: Elsevier Science, 450-460.
4. Trew, R. J. (2002). SiC and GaN transistors-is there one winner for microwave power applications?. *Proceedings of the The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 90(6), 1032-1047.
5. Chow, T. P., Khemka, V., Fedison, J., Ramungul, N., Matocha, K., Tang, Y., Gutmann, R. J. (2000). SiC and GaN bipolar power devices. *Solid-State Electronics*, 44(2), 277-301.
6. İnternet: Silicone Carbide. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FSilicon_carbide&date=2019-04-08, Son Erişim Tarihi: 08.04.2019.
7. Langer, R., Faure, B., Boussagol, A., Bove, P., Lahreche, H., Wilk, A., Thuret, J., Letertre, F. (2006, April). *Recent achievements in SopSiC substrates for high power and high frequency applications*. CS Mantech Conference, Vancouver, 71-72.
8. Ikeda, N., Kaya, S., Li, J., Sato, Y., Kokawa, T., Kato, S. (2009). High power AlGaIn/GaN HFETs on 4 inch Si substrates. *Physica Status Solidi C*, 6(S2 2), 933-936.
9. Able, A., Wegscheider, W., Engl, K., Zweck, J. (2005). Growth of crack-free GaN on Si (1 1 1) with graded AlGaIn buffer layers. *Journal of Crystal Growth*, 276(3-4), 415-418.
10. Mishra, U. K., Shen, L., Kazior, T. E., Wu, Y. F. (2008). GaN-based RF power devices and amplifiers. *Proceedings of the The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 96(2), 287-305.
11. İnternet: Gallium Nitride almost as wear resistant as diamond, URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.nextbigfuture.com%2F2016%2F10%2Fgallium-nitride-almost-as-wear.html&date=2019-04-08>, Son Erişim Tarihi: 08.04.2019
12. Nojiri, K. (2015). *Dry etching technology for semiconductors*. Switzerland: Springer International Publishing, 11-29.
13. Senesky, D. G., Pisano, A. P. (2010, January). *Aluminum nitride as a masking material for the plasma etching of silicon carbide structures*. 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Wanchai, 352-355.

14. Okamoto, N., Ohki, T., Masuda, S., Kanamura, M., Inoue, Y., Makiyama, K., Imanishi, K., Shigematsu, H., Kikkawa, T., JoK.nshin, K., Hara, N. (2009, May). *SiC backside via-hole process for GaN HEMT MMICs using high etch rate ICP etching*. CS MANTECH Conference Tampa, Florida, USA.
15. Reyes-Betanzo, C., Moshkalyov, S. A., Swart, J. W., Ramos, A. C. S. (2003). Silicon nitride etching in high-and low-density plasmas using SF₆/O₂/N₂ mixtures. *Journal of Vacuum Science & Technology a: Vacuum, Surfaces, and Films*, 21(2), 461-469.
16. Tanaka, S., Rajanna, K., Abe, T., Esashi, M. (2001). Deep reactive ion etching of silicon carbide. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 19(6), 2173-2176.
17. Barker, A., Riddell, K., Ashraf, H., Thomas, D., Chen, C. H., Wei, Y. F., Cho, I.T., Wohlmuth, W. (2013, May). *Advances in back-side via etching of SiC for GaN device applications*. CS MANTECH Conference, Louisiana, 13-16.
18. Voss, L. F., Ip, K., Pearton, S. J., Shul, R. J., Overberg, M. E., Baca, A. G., Sanchez, C., Stevens, J., Martinez, Armendariz, M. G. and Wouters, G. A., (2008), SiC via fabrication for wide-band-gap high electron mobility transistor/microwave monolithic integrated circuit devices, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 26(487).19.
19. Voss, L. F., Ip, K., Pearton, S. J., Shul, R. J., Overberg, M. E., Baca, A. G., Sanchez, C., Stevens, J., Martinez, M., Armendariz, M. G., Wouters, G. A. (2008). SiC via fabrication for wide-band-gap high electron mobility transistor/microwave monolithic integrated circuit devices. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 26(2), 487-494.
20. Ruan, J. A., Roadman, S., Lee, C., Sellers, C., Regan, M. (2009 May). *SiC substrate via etch process optimization*. CS MANTECH Conference, Tampa, Florida, 121-123.
21. İnternet: Westerman¹, R., Johnson, D., Clayton, F., (2003), *Eliminating pillars during gaas via etch formation*. CS MANTECH Conference, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.plasma-therm.com%2Fpdfs%2Fpapers%2FEliminating-Pillars-During-GaAs-Via-Etch-Formation.pdf&date=2019-04-18>, Son Erişim Tarihi: 08.04.2019.
22. Min, B. G., Kim, S. I., Lee, J. M., Yoon, H. S., Kim, H., Ahn, H. K., Cho, K. J., Kang, D. M., Lee, S. H., Ju, C. W., Lim, J. W. (2015). Fabrication and electrical properties of an AlGaIn/GaN HEMT on SiC with a taper-shaped backside via hole. *Journal of the Korean Physical Society*, 67(4), 718-722.
23. Chabert, P. (2001). Deep etching of silicon carbide for micromachining applications: Etch rates and etch mechanisms. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 19(4), 1339-1345.
24. Palmour, J. W., Davis, R. F., Wallett, T. M., Bhasin, K. B. (1986). Dry etching of β -SiC in CF₄ and CF₄+ O₂ mixtures. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(3), 590-593.

25. Evans, L. J., Beheim, G. M. (2006). *Deep reactive ion etching (DRIE) of high aspect ratio SiC microstructures using a time-multiplexed etch-passivate process*. *Materials science forum*, 527-529, 1115-1118.
26. Lim, Y. D., Lee, S. H., Yoo, W. J., Jung, O. J., Kim, S. C., Lee, H. C. (2009). Roles of F and O radicals and positive ions in a SF₆/O₂ plasma in forming deep via structures. *Journal of Korean Physical Society*, 54(51), 1774.
27. Ruan, J. A., Roadman, S., Lee, C., Sellers, C., Regan, M. (2009, May). *SiC substrate via etch process optimization*, CS MANTECH Conference, Tampa, Florida, USA.
28. Khan, F. A., Adesida, I. (1999). High rate etching of SiC using inductively coupled plasma reactive ion etching in SF₆-based gas mixtures. *Applied Physics Letters*, 75(15), 2268-2270.
29. Cho, H., Lee, K. P., Leerungrawat, P., Chu, S. N. G., Ren, F., Pearton, S. J., Zetterling, C. M. (2001). High density plasma via hole etching in SiC. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 19(4), 1878-1881.
30. Schroder, D. K. (2006). *Semiconductor material and device characterization*. United States of America: John Wiley & Sons, 1-5.
31. Biscarrat, J., Michaud, J. F., Collard, E., Alquier, D., (2013). ICP etching of 4H-SiC substrates. *Materials Science Forum*, 740-742, 825-828.
32. Okamoto, N. (2009). Elimination of pillar associated with micropipe of SiC in high-rate inductively coupled plasma etching. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 27(2), 295-300.
33. Min, B. G., Kim, S., Lee, J. M., Yoon, H. S., Kim, H., Ahn, H. K., Cho, K. J., Kang, D. M., Lee, S. H., Ju, C. W., Lim, J. W., (2015), Fabrication and electrical properties of an AlGaN/GaN HEMT on SiC with a taper-shaped backside via hole, *Journal of the Korean Physical Society*, 67(4), 718-722.
34. Chen, C.H., Chang, Y-W., Weng, M.H., Chang, R., Huang, S. H., Wang, F., Wei, Y-F., Hsieh, S., Cho, I-T., Wohlmuth, W. (2014, May). Method for Forming Through Wafer Vias in GaN on SiC Devices and Circuits, CS MANTECH Conference, Denver, Colorado, USA.
35. Stieglauer, H., Noesser, J., Bödege, G., Drücke, K., Blanck, H., Behammer, D., (2012, April). *Evaluation of through wafer via holes in SiC substrates for GaN HEMT technology*, CS MANTECH Conference, Boston, Massachusetts, USA.
36. İnternet: Oxford Instruments develops SiC via etch for RF device manufacture, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.oxinst.com%2Fnews%2FFoxford-instruments-develops-sic-via-etch-for-rf-device-manufacture%2F&date=2019-04-09>, Son Erişim Tarihi: 09.04.2019.
37. Fan, F., Chen, M., Hou, D., Wang, D., (18-21 May 2015), *Qualification of Backside Via Etch Process in GaN-on-SiC HEMT Devices*, CS MANTECH Conference, Scottsdale, Arizona, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : HALILOĞLU, Mehmet Taha
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 08.03.1989, Keçiören
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (506) 613 43 07
 e-mail : haliloglu.taha@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı	Devam ediyor
Lisans	Hacettepe Üniversitesi / Fizik Mühendisliği	2013
Lise	19 Mayıs Lisesi (Y.D.A.)	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-2016	Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi(NANOTAM)	Araştırma Mühendisi
2016- Halen	Aselsan Bilkent MikroNano A.Ş.	Kıdemli Araştırma Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Haliloğlu, M.T., Lişesivdin, S.B., Özbay, E. (2018, Mayıs). *GaN tabanlı transistörlerde SiC arka yüzey kanal aşındırma uygulaması*. 12. Adım Fizik Günleri, Manisa.

Toprak, A., Haliloglu, M.T., Durmuş, Y., Şen, Ö.A., Özbay, E. (2015, Eylül). *Effect of Gate Field Plate and γ -Gate Structures on RF Power Performance of AlGaIn/GaN HEMTs*, 10th European Microwave Integrated Circuit Conference, Paris.

Hobiler

Sinema, Tiyatro, Spor



GAZİ GELECEKTİR..