

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİC SCHOTTKY DİYOTLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU
VE SENSÖR UYGULAMALARININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Lutfi Uğur KENDİRLİ

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Necmettin KILINÇ

EKİM 2025

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİC SCHOTTKY DİYOTLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU
VE SENSÖR UYGULAMALARININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Lutfi Uğur KENDİRLİ
(36223612902)

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Necmettin KILINÇ

EKİM 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Necmettin KILINÇ'a,

Çalışmalarında tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen annem Sakine KENDİRLİ, babam Ali Naki KENDİRLİ ve kardeşim Ahmet Umut KENDİRLİ'ye,

Desteğinden güç aldığım kıymetli eşim Duygu DURAK KENDİRLİ'ye,

Tez çalışmam sırasında göstermiş olduğu anlayış ve desteklerinden dolayı çalıştığım kurum olan Şehit Kenan Çetin Ortaokulu Okul Müdürüm Mustafa EMRE'ye ve iş arkadaşım Ahmet BALIK'a,

Tezin uygulama aşamasında vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, FYL-2023-3378 numaralı projesi ile İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)'ne,

Tez süresince bilgi ve deneyimlerini paylaşan jürideki değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Serdar ALTIN'a ve Sayın Doç. Dr. Harun KAYA'ya

Tez çalışmasındaki analizler konusunda bilgi ve desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Murat ÖZABACI'ya

Proje süresince benden yardımlarını esirgemeyen hocalarım, Sayın Doç. Dr. Lütfi Bilal TAŞYÜREK, Sayın Doç. Dr. Esmem İŞİK, Sayın Doç. Dr. İbrahim İŞİK, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emir TOSUN ve Nanosensör Araştırma Laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarıma ayrı ayrı,

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “SiC Schottky Diyotların Üretimi, Karakterizasyonu ve Sensör Uygulamalarının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Lutfi Uğur KENDİRLİ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vi
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1 Metal – Yarıiletken Kontaklar	5
2.2 SiC Yapısı ve Özellikleri	6
2.3 Schottky Diyotlar	10
2.4 Hidrojen Sensörler	14
2.4.1 SiC tabanlı hidrojen sensörleri.....	16
3. DENEYSEL YÖNTEM	19
3.1 SiC Shottky Diyot Üretimi	21
3.1.1 Numulerin Temizlenmesi.....	21
3.1.2 Alt Kontak Oluşturma	21
3.1.3 Üst Kontak Oluşturma.....	22
3.2 Yapısal Karakterizasyon	24
3.3 Üretilen SiC Shottky Diyotun Elektriksel Karakterizasyonu	25
3.4 Gaz Sensör Testlerinin Yapılması.....	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1 Yapısal Karakterizasyon.....	27
4.2 Sıcaklığa Bağlı Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri.....	29
4.3 Hidrojen Gaz Sensör Ölçümleri.....	35
5. SONUÇLAR	37
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 SiC'in, 3C, 2H, 4H, 6H, 15R ve 21R politiplerinin kristal yapılarının çizimleri...	9
Şekil 2.2 Termiyonik emisyon süreciyle akım iletimi. (a) Termal denge; (b) ileri önyargı; ve (c) ters önyargı.....	10
Şekil 2.3 W-Si ve W-GaAs diyotlarının ileri akım yoğunluğu ve uygulanan voltaj n tipi 4H-SiC'ye Schottky Kontakları Üzerine Literatür Verileri İncelenmesi.....	12
Şekil 2.4 (a)termiyonik emisyon (TE) veya (b) termiyonik alan emisyonu (TFE) akım taşımamekanizmasının baskınlığına göre, ileri önyargı VF altında metal/4H-SiC kontağı için şematik enerji bandı diyagramları.....	13
Şekil 3.1 PVD kaplama cihazının fotoğrafı	19
Şekil 3.2 Schottky diyot oluşturulurken kullanılan maske örneği	20
Şekil 3.3 Al-4H SiC/metal Schottky bariyer diyot(SBD) diyagramı ve görüntüsü.....	23
Şekil 3.4 SEM-EDX cihaz ve bilgisayar fotoğrafı.....	24
Şekil 3.5 AFM cihazına ve bilgisayarına ait fotoğraf.....	24
Şekil 3.6 Gaz ölçüm sisteminin fotoğrafı (a) ve şematik gösterimi (b).....	26
Şekil 4.1 4H SiC alttaşın farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri 100 KX (a) ve 20 KX (b).....	27
Şekil 4.2 4H SiC üç boyutlu AFM görüntüsü.....	28
Şekil 4.3 4H SiC EDX Spektrum grafiği (a) ve spektrumun alındığı bölgenin SEM görüntüsü (b).....	28
Şekil 4.4 Al-4H SiC-Ti aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen I-V grafiği.....	30
Şekil 4.5 Al-4H SiC-Ti aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen yarı-logaritmik In(I)-V karakteristikleri.....	30
Şekil 4.6 Al-4H SiC-Pt aygıt için elde edilen I-V grafiği.....	31
Şekil 4.7 Al-4H SiC-Pt aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen yarı-logaritmik In(I)-V karakteristikleri.....	31
Şekil 4.8 Al-4H SiC-Ni aygıt için elde edilen I-V grafiği.....	32
Şekil 4.9 Al-4H SiC-Ni aygıt için elde edilen In (I) -V grafiği.....	32
Şekil 4.10 Al-4H SiC-Ag aygıt için elde edilen I-V grafiği.....	33
Şekil 4.11 Al-4H SiC-Ag aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen yarı-logaritmik In(I)-V karakteristikleri.....	33
Şekil 4.12 Al-4H SiC-Ni aygıtı için elde edilen frekansa bağlı Cp ölçüm grafiği	34
Şekil 4.13 Al-4HSiC-Ni aygıt için elde edilen frekansa bağlı Z ölçüm grafiği.....	34
Şekil 4.14 Al-4H SiC-Ni aygıtının kuru havadaki ve %1 hidrojen ortamında alınan I-V grafiği	35
Şekil 4.15 Al-4H SiC-Ni aygıtının kuru hava ve %1 hidrojen ortamında alınan In (I) -V grafiği	35
Şekil 4.16 Al-4H SiC-Ni aygıtının farklı hidrojen konsantrasyonuna karşı zamana bağlı sensör tepkisi grafiği.....	36

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. 3C-SiC, 4H-SiC ve 6H-SiC ‘in önemli parametreleri ile diğer yarı iletkenlerin parametrelerinin karşılaştırılması.....	8
Tablo 2.2 Farklı metaller için metal/n-tipi 4H-SiC sistemi için Schottky bariyer yüksekliği.....	13
Tablo 3.1. Al alt kontak film oluşturmak için kullanılan DC saçırma parametreleri	21
Tablo 3.2. Al/4HSiC üst kontak DC saçırma Parametreleri	22



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ρ	: Yoğunluk
μm	: Mikro Metre
$^{\circ}\text{C}$: Santigrad derece
1D	: Bir Boyutlu
2D	: İki Boyutlu
A	: Diyodun etkin alanı
AC	: Alternatif Akım
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
Ag	: Gümüş
C	: Kapasitans
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$: İzopropil alkol
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
dk	: Dakika
EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yasak enerji aralığı
eV	: Elektron volt
FESEM	: Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu
H	: Planck sabiti
H	: Isı miktarı
h(t)	: Film Kalınlığı
H_2	: Hidrojen
HCL	: Hidroklorik Asit
HF	: Hidroflorik Asit

J_{m→s}	: Metalden yarıiletkeneye doğru akan akım yoğunluğu
J_{s→m}	: Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_o	: Ters doyma akım yoğunluğu
K	: Boltzmann sabiti
K	: Kelvin
KX	:Büyütme Oranı
m_e	: Elektronun kutlesi
MIS	: Metal-Insulator-Semiconductor (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken)
ml	:Mili Litre
MOS	: Metal-Oxide-Semiconductor (Metal-Oksit-Yarıiletken)
MS	: Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken)
n	: İdealite faktoru
N₂	:Azot
Ni	:Nikel
nm	:Nano Metre
Pd	:Paladyum
ppm	: Milyonda bir birim (Parts Per Million)
Pt	:Platin
PVD	:Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition)
q	: Faz yükü
R₀	:Kuru Havadaki Direnç Değeri
R_a	:Ortalama değer (Average)
R_H	:Hidrojen Gazı Varlığındaki Direnç Değeri
R_q	:Karekök ortalaması (Root mean square)
SBDs	: Schottky Barrier Diodes (Schottky Engel Diyotları)
SBH	: Schottky Barrier Hight (Schottky Engel Yüksekliği)

SDs	: Schottky Diodes (Schottky Diyotları)
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
t	: Zaman
Ti	:Titanyum
XC	: Kapasitif reaktans
XL	: Endüktif reaktans
XRD	:X-Işını Kırınım yöntemi
Z	: Empedans
ΔR	:Dirençteki Toplam Değişim
μl	:Mikro Litre
σ_s	: Standart sapma
Φ_B	: Ortalama engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
Φ_n	: İletim bandı enerji seviyesi ile fermi enerji seviyesi arasındaki fark

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİC SCHOTTKY DİYOTLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE SENSÖR UYGULAMALARININ ARAŞTIRILMASI

Lutfi Uğur KENDİRLİ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

41 + X sayfa

2025

Danışman: Doç.Dr.Necmettin KILINÇ

Schottky diyotlar, 19. yüzyıldan itibaren elektroniğe artan ilgi sayesinde metal - yarı iletken teknolojisi için vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Özellikle güneş pilleri ve elektrikli araçların hızlı çoğalması bu malzemeye olan ihtiyacı artırmıştır.

Bu tezdeki amacımız, Schottky bariyer diyotların yapısını, elektriksel ve gaz algılama özelliklerini incelemektir. Çalışmamızda DC saçırma (sputter) yöntemiyle farklı metaller hazır satın alınan 4H SiC alltaşın (wafer) üzerine kaplanarak Schottky bariyer diyot üretimi gerçekleştirilmiştir. Omik(ohmic) kontak için bir yüzüne Al kaplanmıştır ve diğer yüzüne ise Ti, Ni, Pt, Ag gibi metaller kaplanarak farklı tipte Schottky bariyer diyotlar üretilmiştir. Al/4H-SiC/Metal (Ti,Ni,Pt,Ag) Schottky bariyer diyotların sıcaklığa bağlı olarak DC ve AC elektriksel özellikleri incelenmiştir ve hidrojen gaz testleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda 4H SiC alltaşın yapısal analizleri için SEM, EDX ve AFM görüntüleri alınmıştır.

Ölçümler sonucunda elde edilen verilerden çizdiğimiz akım-gerilim (I-V) ve yarı logaritmik I-V grafiklerine baktığımızda 4H SiC-Ti aygıtının simetrik bir Schottky davranış göstermiştir. Al-4H SiC-Pt aygıtının tek taraflı çalıştığı ve Schottky diyot özellik gösterdiği, Al-4H SiC-Ni aygıtının düşük sıcaklıklarda Schottky diyot gibi davrandığı ve yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ise omik davranış gösterdiği ve Al-4H SiC-Ag aygıtında tüm sıcaklıklarda Schottky diyot davranışı gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca SiC Schottky diyotların hidrojen gaz ölçümleri yapılarak elde edilen veriler tartışılmıştır. Al-4H SiC-Ni aygıtının hidrojen algılama özelliği incelendiğinde %1 hidrojen konsantrasyonu altında çok yüksek olmayan bir sensör davranışı gösterdi.

Anahtar Kelimeler: SiC, Schottky bariyer diyot, Gaz sensörleri, Metal-yarı iletken kontaklar, I-V karakteristikleri.

ABSTRACT

Master Thesis

RESEARCH OF MANUFACTURING, CHARACTERIZATION AND SENSOR APPLICATIONS OF SiC SCHOTTKY DIODES

Lutfi Uğur KENDİRLİ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Physical

41 + X sayfa

2025

Supervisor: Doç.Dr.Necmettin KILINÇ

Schottky diodes have become an indispensable material for metal-semiconductor technology, thanks to the increasing interest in electronics since the 19th century. The rapid proliferation of solar cells and electric vehicles, in particular, has increased the demand for this material.

Our aim in this thesis is to investigate the structure, electrical, and gas-sensing properties of Schottky barrier diodes. In our study, Schottky barrier diodes were produced by coating various metals onto a commercially available 4H SiC wafer using the DC sputtering method. Al was coated on one side for ohmic contact, and metals such as Ti, Ni, Pt, and Ag were coated on the other side to produce different types of Schottky barrier diodes. The DC and AC electrical properties of Al/4H-SiC/Metal (Ti, Ni, Pt, Ag) Schottky barrier diodes were investigated depending on temperature, and hydrogen gas tests were conducted. SEM, EDX, and AFM images were also taken for structural analysis of the 4H SiC wafer.

When we examined the current-voltage (I-V) and semi-logarithmic I-V graphs drawn from the measurement data, we observed that the 4H SiC-Ti device exhibited symmetrical Schottky behavior. It was understood that the Al-4H SiC-Pt device operated unilaterally and exhibited Schottky diode properties; the Al-4H SiC-Ni device behaved like a Schottky diode at low temperatures and exhibited ohmic behavior at high temperatures; and the Al-4H SiC-Ag device exhibited Schottky diode behavior at all temperatures. Furthermore, data obtained from hydrogen gas measurements of SiC Schottky diodes were discussed. When the hydrogen sensing properties of the Al-4H SiC-Ni device were examined, it showed a sensor behavior that was not very high at 1% hydrogen concentration.

Keywords: SiC, Schottky barrier diode, Gas sensors, Metal-semiconductor contacts, Characteristics I-V.

1. GİRİŞ

19. yy dan beri insanoğlunun elektroniğe olan ilgisi elektrik-elektronik alanının gelişmesine ve günümüzde de hayatın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Elektrik endüstrisi şuan dünyanın en büyük endüstrilerinden biridir. İnsan ihtiyaçlarının her geçen gün farklılaşması teknolojiyi daha da geliştirmektedir. Bu çalışmalarda katıların elektriksel özelliklerinin araştırılması ve elde edilen bulgular elektronik için büyük katkı sağlamıştır.

Metal-yarıiletken doğrultma sistemleri üzerine ilk sistematik araştırma 1874'te Braun tarafından yapılmıştır. Çeşitli formlardaki nokta temaslı doğrultucu pratik uygulamalar buldu. 1931'de Wilson, yarı iletkenlerin taşınım teorisini formüle etti. Katıların bant teorisine dayanan bu teori daha sonra metal-yarıiletkenlere uygulandı. 1938'de Schottky potansiyel bariyerin olabileceğini öne sürdü. Kimyasal katmanın bir varlığı olmadan yalnızca yarı iletkendeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını ifade etmiştir. Bu değerlendirmeden doğan model Schottky bariyer olarak bilinir. 1938'de Mott aynı zamanda süpürülüp atılanlar için daha uygun bir teorik model tasarladı. Mott bariyeri olarak bilinen bu model metal-yarı iletken kontaklar içerisinde yer alır. Bu modeller 1942'de Bethe tarafından daha da geliştirilerek termiyonik emisyon modeli haline getirildi. (Sze ve Ng 2007).

Metal bir yarı iletkenle temas ettiğinde metal yarı iletkende bir bariyer oluşur. Bu bariyer akım iletimini kontrol etmekten sorumludur. Bariyer yüksekliğinin oluşumuna yol açan enerji bant diyagramları ve bazı etkiler bu bariyerin değerini değiştirebilir. Şekil 1'de metal-yarı iletken kontakların enerji bantı diyagramları kontak oluşmadan önce ve sonraki halleri verilmiştir (Sze ve Ng 2007).

İş fonksiyonu vakum seviyesi ile fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Burada iş fonksiyonu, metal için $q\phi_m$ ile gösterilir ve yarı iletken için $q(\chi + \phi_n)$ 'ye eşittir. Yarı iletken için verilen $q\chi$, iletim bandının (EC) alt kısmından vakum seviyesine ölçülen elektron ilgisidir. Buradaki $q\phi_n$ ise EC ile fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır (Sze ve Ng 2007).

Yüksek performanslı güç cihazlarının hayata geçirilmesi yüksek enerji tasarrufuna, fosil yakıtların korunmasına ve daha az çevre kirliliği sağladığı için yarı iletken kullanılan cihazlara ilgi artmaktadır. Şu anda çoğu alanda kullanılan Si güç cihazlarının teknolojisi uygulamalarda yenilikçi atılımlarda zorluklar yaşanmaktadır. Yeni ortaya çıkan yarı iletkenlerden biri olan SiC (Silisyum karbür) üstün fiziksel özellikleri nedeniyle oldukça dikkat çekmektedir. SiC'nin olağanüstü geniş bant aralıklı bir yarı iletken olması kullanımını her geçen gün artırmaktadır. SiC levhanın kayda değer gelişimi sayesinde kalitesi ve cihaz teknolojisindeki ilerleme, yüksek gerilim SiC Schottky bariyer diyotları (SBD'ler) ve alan etkili transistörler (FET'ler), Si muadillerinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır. Güç kaybının önemli ölçüde azaltılmasını sağlayan bileşenler gelecekte çeşitli güç dönüştürücülerinde kullanılacağını, bu durumun SiC güç cihazlarının anahtar haline geleceğini gösteriyor (La Via vd. 2014).

SiC'nin GaAs ve Si gibi yarı iletkenlere göre yüksek enerjili radyasyona dayanıklı olması, uzay teknolojilerinde kullanılmasını sağlamaktadır. SiC'ün kullanım alanları yüksek voltaj, yüksek frekans, yüksek sıcaklığa dayanıklı aletlerde rastlanılmaktadır. UV fotodiyotlarda, mavi ışık yayan diyotlarda ve dedöktör diyotların yapısında SiC bulunmaktadır (Sefaoğlu, 2008).

3C-SiC, 6H-SiC ve 4H-SiC'in Mesfet perfonmaları karşılaştırıldığında 4H-SiC'in elektron mobilitesi daha fazla olduğu görülmüştür (Codreanu vd. 2000). SiC politiplerinin termal iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı yüksek güç gerektiren aygıtlarda kullanıldığı bulunmuştur (Tang vd. 1992). SiC kullanılan transistörlerde daha iyi performans, daha iyi doğrusallık ve daha düşük maliyet sağladığını ve yüksek DC akım ile yüksek elektronik gücüne sahip olduğu açıklanmıştır (Masri, 2002).

SiC Schottky diyotlar geçmişte mikrodalgalarda, radyo ve radar dedöktörü olarak kullanılırken günümüzde eşsiz özelliklerden dolayı yarı iletken endüstrisinde bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu alanların başlıcaları MESFET elemanları, güneş pilleri, varaktör, yüksek enerjili dedöktörler, anahtarlama devreleri gibi alanlardır. Gelişime açık bir diyot çeşidi olduğundan gelecekte daha bir çok alanda kullanılacağı öngörülmektedir (Tan, 2018).

Artan Dünya nüfusunun ihtiyaçlarının biride şüphesiz enerji ihtiyacıdır. Fosil kaynakların hızla tükendiği günümüzde yenilenebilir enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Bu talebi Hidrojenden karşılamak için yapılan çalışmalarda son yıllarda artış meydana gelmiştir. Dünya'nın temiz enerji üretmek için karşılaştığı zorluklar karşısında Hidrojenin sürdürülebilir bir kaynak olacağı genel kabul görmeye başlamıştır. Ayrıca Hidrojenin uzay çalışmaları ve endüstrideki bir çok alanda kullanılıyor olması bilimsel çalışmalara da büyük katkı sağlamaktadır. (Şener, 2024)

Hidrojenin endüstride çok sayıda uygulaması vardır; kimyasal üretim, yakıt hücresi teknolojisi ve roket motorları gibi alanlardır (Şennik vd. 2010). Fosil yakıtların tükenmesinin hızla devam ettiği günümüz koşullarında hidrojen gazı potansiyel bir enerji kaynağı olarak büyük ilgi görmektedir. Evrende bol miktarda bulunan hidrojen gazı, yanması sonucu sadece su oluşması nedeniyle temiz bir alternatif enerji seçeneği olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak hafif olması nedeniyle hidrojen gazı kolaylıkla sızabilir ve belirli konsantrasyonların ötesinde yanıcı ve patlayıcı hale gelebilir. (Taşyürek vd. 2023) Gaz sensörlerinin bir çok teknolojik alanda kullanım alanı bulunmasından dolayı bu konuda oldukça çok çalışma yapılmıştır ve hala da çalışmalar artarak devam etmektedir. Genelde sensörler üç ana birimden oluşmaktadır; Bunlar, algılanacak analit, algılayıcı malzeme ve transduser. Gaz sensörleri için en çok kullanılan algılayıcı malzemeler, metal oksit bileşiler (SnO_2 , ZnO , MgO , In_2O_3 , Ga_2O_3 , TiO_2 vs), organik bileşikler (ftalosiyaninler, iletken polimerler, vs), katalitik malzemeler (Pd, Pt, vs) dir. Bu algılayıcı malzemeler, farklı yöntemlerle ince film, nanotüp, nanotel, nanotoz yapılarında elde edilerek sensör parametreleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Metal oksit tabanlı gaz sensörleri indirgeyici gazlara karşı algılama özellikleri oldukça fazla araştırılmış ve ucuz, yüksek sensör cevabı ve basit algılama metodu elde edilmiştir (Comini ve diğ, 2009; Fine ve diğ, 2010; Gardon ve Guilemany, 2013).

Ancak, hala metal oksit bazlı gaz sensörlerinin yüksek çalışma sıcaklığı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Alternatif olarak, ftalosiyanin ve polimer gibi organik bazlı gaz sensörleri oda sıcaklığında çalışabilmektedirler (Adhikari vd. 2004; Bai vd. 2007). Katalitik malzemelerin kullanıldığı gaz sensörleri pek çok açıdan avantaja sahiptir, fakat bir dezavantaj bu katalitik malzemelerin pahalı olmasıdır. Gaz sensörlerini fiziko-kimyasal algılama mekanizmalarına göre altı farklı grupta sınıflandırabiliriz. Bunlar: katalitik (pellistör ve termo-elektrik), termal iletkenlik (kalorimetrik), elektrokimyasal (amperometrik ve potansiyometrik), rezistif tabanlı, metal oksit ve akustik (quartz crystal microbalance, surface acoustic wave) şeklindedir (Boyras, 2023).

Hidrojen sensörleri, hidrojen gazı moleküllerini algılayan ve hidrojen gazı konsantrasyonu ile orantılı büyüklükte elektrik sinyali üreten dönüştürücü cihazlardır (Hulanicki ve diğ, 1991).

Gelecekteki hidrojen ekonomisinin taleplerini karşılamak için sensör boyutunu, maliyeti ve güç tüketimini azaltmanın yanı sıra hassasiyeti, seçiciliği, tepki süresini ve güvenilirliği sürekli olarak iyileştirmeye yönelik araştırmalar devam etmektedir (Hübert ve diğ, 2011; Pan ve diğ, 2011; Boon Brett ve diğ, 2010).

Hidrojen sensörleri, son yıllarda çeşitli performans iyileştirmeleriyle sürekli olarak yeniden tasarlanmaktadır. Mevcut teknoloji artık hidrojen gazının son derece eser (milyarda bir-ppb) seviyesinde tespitinin yapılmasına yöneliktir. Hidrojen gazı molekülleri, küçük boyutları nedeniyle çok küçük çatlaklardan ve deliklerden, yüksek akış hızıyla sızarlar. Sızan gaz konsantrasyonu kısa sürede patlama sınırına ulaşabilir. Bu nedenle, H₂ gazı izleme, çeşitli endüstriyel uygulamalarda esastır. Güvenilir hidrojen gaz sensörlerinin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Buttner ve diğ, 2011):

- Sensör, düşük ile orta seviye gaz konsantrasyonlarını (%0.01-10) algılayabilmelidir.
- Sensör, hidrojen gazını kesinlik ve doğrulukla algılamalıdır.
- Nem ve diğer gazların etkileşimi sensörü minimum düzeyde etkilememelidir.
- Yüksek basınç, sıcaklık değişimi ve gaz akışı gibi çalışma koşullarında bile düzgün çalışmalıdır.
- Sensörlerin sinyalleri düşük bir gürültüye sahip olmalıdır.
- Tepki ve toparlanma süreleri 5 s' den daha az olmalıdır.
- İmalat ve bakım maliyeti daha az olmalıdır.
- Sensör küçük ve kompakt olmalıdır (Zhou ve diğ, 2015).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Metal – Yarıiletken Kontaklar

Günümüz teknolojisinde elektronik araçların yeri oldukça fazladır. Bu sebeple metal-yarıiletken malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Kullanım alanları oldukça fazla olup elektrikli otomobiller, güneş pilleri, mikrodalga devreleri, kondansatörler, dedöktörler gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.

Yarı iletken cihazın oldukça uzun bir geçmişi vardır, ancak IC teknolojisindeki en büyük patlama son iki veya üç on yılda meydana gelmiştir. Metal-yarı iletken teması, 1874'te Braun'un erken çalışmalarına dayanır. Braun, metal temaslar ile bakır, demir ve kurşun sülfür gibi yarı iletkenler arasındaki elektriksel iletimin asimetrik doğasını keşfetmiştir. Bu cihazlar, radyodaki erken deneylerde dedektör olarak kullanılmıştır. 1906'da Pickard, silikon kullanan bir nokta temas dedektörü için patent aldı ve 1907'de Pierce, çeşitli yarı iletkenlere metal püskürtülerek yapılan diyotların doğrultma özelliklerini yayınladı. 1935'e gelindiğinde, selenyum doğrultucular ve silikon nokta temas diyotları radyo dedektörleri olarak kullanılabilir hale geldi. Metal-yarı iletken temasına ilişkin anlayışımızdaki önemli ilerleme, yarı iletken fiziğindeki gelişmelerle desteklendi. 1942'de Bethe, akımın sürüklenme veya difüzyondan ziyade elektronların metale emisyon süreciyle belirlendiği termyonik emisyon teorisini geliştirdi. Radarın gelişmesiyle birlikte daha iyi ve daha güvenilir dedektör diyotlarına ve karıştırıcılara olan ihtiyaç arttı. Bu süre zarfında yüksek saflıkta silikon ve germanyum elde etme yöntemleri geliştirildi ve germanyum diyotlar İkinci Dünya Savaşı sırasında radar sistemlerinde önemli bir bileşen haline geldi. Aralık 1947'de ilk transistörün William Shockley, John Bardeen ve Walter Brattain tarafından Bell Telephone Laboratuvarları'nda yapıp test edilmesiyle bir başka büyük atılım gerçekleşti. Bu ilk transistör bir nokta temas cihazıydı ve polikristalin germanyum kullanıyordu. Transistör etkisi kısa süre sonra silikonda da gösterildi. Polikristalin malzeme yerine tek kristalli malzeme kullanıldığında 1949'un sonunda önemli bir gelişme oldu. Tek kristal, tüm yarı iletken malzemedeki tekdüze ve gelişmiş özellikler sağlar. Transistörün geliştirilmesindeki bir sonraki önemli adım, gerekli bağlantıları oluşturmak için difüzyon işleminin kullanılmasıydı. Bu işlem, transistör özelliklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağladı ve daha yüksek frekanslı cihazlar üretti. Diffüze mesa transistörü, 1957'de germanyumda ve 1958'de silikonda ticari olarak mevcuttu. Difüzyon işlemi ayrıca birçok transistörün tek bir silikon diliminde üretilmesine olanak sağladı, bu nedenle bu cihazların maliyeti azaldı. (Neamen, 2003)

2.2 SiC Yapısı ve Özellikleri

Silisyum karbür (SiC), aşındırıcı toz ve refrakter tuğlalar için malzemeler yaratma fikriyle 19. yüzyılın sonunda yapay olarak sentezlendi. 20. yüzyılın başında bir voltaj uygulanması üzerine nokta temaslı bir yapıdan ışık emisyonu gözlemlendi. Germanium (Ge) transistörlerinin icadından sonra, yüksek sıcaklıklarda çalışan elektronik cihazların gerçekleştirilmesi şiddetle istendi, çünkü Ge transistörleri dar bant aralığı (0,6 eV) nedeniyle 60 °C'nin üzerinde çalışmıyordu. 1955'te, yüksek kaliteli SiC tek kristalleri bir süblimasyon büyüme yöntemi (Lely yöntemi) ile büyütüldü. Bu, Si elektronik cihazlarının ortaya çıkmasından önceydi ve SiC yüksek sıcaklıklı elektronik cihazlar ilgi odağı haline geldi. ABD'de ulusal bir proje başladı, ardından Hollanda, İngiltere ve Japonya'da çalışmalar yapıldı. Ancak, politip kontrolüyle ilgili zorluklar nedeniyle SiC'nin yüksek kaliteli tek kristallerini büyütme çok zordu. 1950'lerin ortasında, Si bipolar transistörler duyuruldu ve MOSFET'ler (metal oksit yarı iletken alan etkili transistörler) 1960'ta bildirildi. Si elektronik cihazları 125 °C'de bile çalışabilir ve bu da SiC üzerindeki neredeyse tüm araştırma faaliyetlerinin 1970'lerin başında durdurulmasına neden oldu. Tohumlu süblimasyon yöntemi, mavi ışık yayan diyotlar ve bipolar transistörler kullanılarak SiC toplu kristal büyümesiyle ilgili küçük çabalar devam etti ve bunlar kısmen günümüz SiC güç cihazlarının ilerlemesine katkıda bulundu. Çağ açan teknolojiler tarafından teşvik edilen, SiC'yi güç elektroniği cihazlarında kullanma fırsatı 1990'ların başında olgunlaştı. (Matsunami, 2020)

Günümüzde, geniş bant aralığına sahip yarı iletkenler SiC ve GaN, güç elektroniğinde büyük bir ilerlemenin temeli olarak kabul ediliyor ve geleneksel Si tabanlı cihazlarla karşılaştırıldığında üstün performansa sahip, oyunun kurallarını değiştiren bir cihaz neslinin tanımlanmasını sağlıyor. Bunun nedeni, bu sınıf malzemelerin geniş bant aralığı, yüksek kritik elektrik alanı ve yüksek doyum hızı gibi olağanüstü fiziksel özellikleridir ve bu özellikler, Si tabanlı güç elektroniğinin ulaştığı sınırları daha da ileriye taşır. Daha verimli bir performansa ek olarak, geniş bant aralıklı yarı iletkenlerin üstün özellikleri, yüksek sıcaklık, yüksek güç ve yüksek frekans rejimlerinde çalışabilen cihazlara da dönüşür ve güç elektroniği için uygulama alanını genişletme olasılığı vardır. Geniş bant aralıklı yarı iletkenler arasında, silisyum karbürün altıgen politiplerinden biri olan 4H-SiC, ticari olarak temin edilebilen alt tabakalar ve epikatmanlardan elde edilen mükemmel kalite ve mevcut Si tabanlı cihaz üretim tesisleri ve teknolojisiyle yüksek düzeyde uyumluluk nedeniyle güç elektroniğinde önemli bir rol oynar. Nicel olarak, 4H-SiC 3,26 eV'lik geniş bir bant aralığına, yüksek kritik elektrik alanına >2 MV/cm, 4,9 WK'lık yüksek termal iletkenliğe 1cm'lik yüksek termal iletkenliğe ve 2 107 cm

s'den daha yüksek doymuş sürüklenme hızına sahiptir, bu da onu orta/yüksek voltaj aralığında (600–3000 V) çalışan çeşitli güç cihazları için tercih edilen malzeme haline getirir. SiC kristalleri ve güç elektroniği cihazlarıyla ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları dünya çapında hız kazanmış durumdadır. (Matsunami, 2020)

SiC politipizm gösteren bir malzeme olarak bilinir. Politipizm aynı kimyasal bileşimi korurken tek boyutlu varyasyonda farklı kristal alma olgusudur.

İşgal bölgelerinin c-ekseni boyunca değişimi, 200 den fazla SiC politipler farklı kristal yapılar verir. Politipler ifade edilirken birim hücredeki katmanların sayısı ve kristal sistemi (C için kübik, altıgen için H ve eşkenar dörtgen için R) göz önünde bulundurulur. Şekil 1'de gösterilen farklı politipler arasındaki 3C-SiC, 4H-SiC ve 6H-SiC en yaygın ve aynı zamanda teknolojik olarak en önemli olanlardır (La Via ve diğ, 2014).

Genel olarak 3C-SiC düşük sıcaklıkta kararlı bir politip olarak bilinirken, 4H- ve 6H SiC yüksek sıcaklığa dayanıklı politipler olarak bilinen ve büyümek için nispeten yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyar.

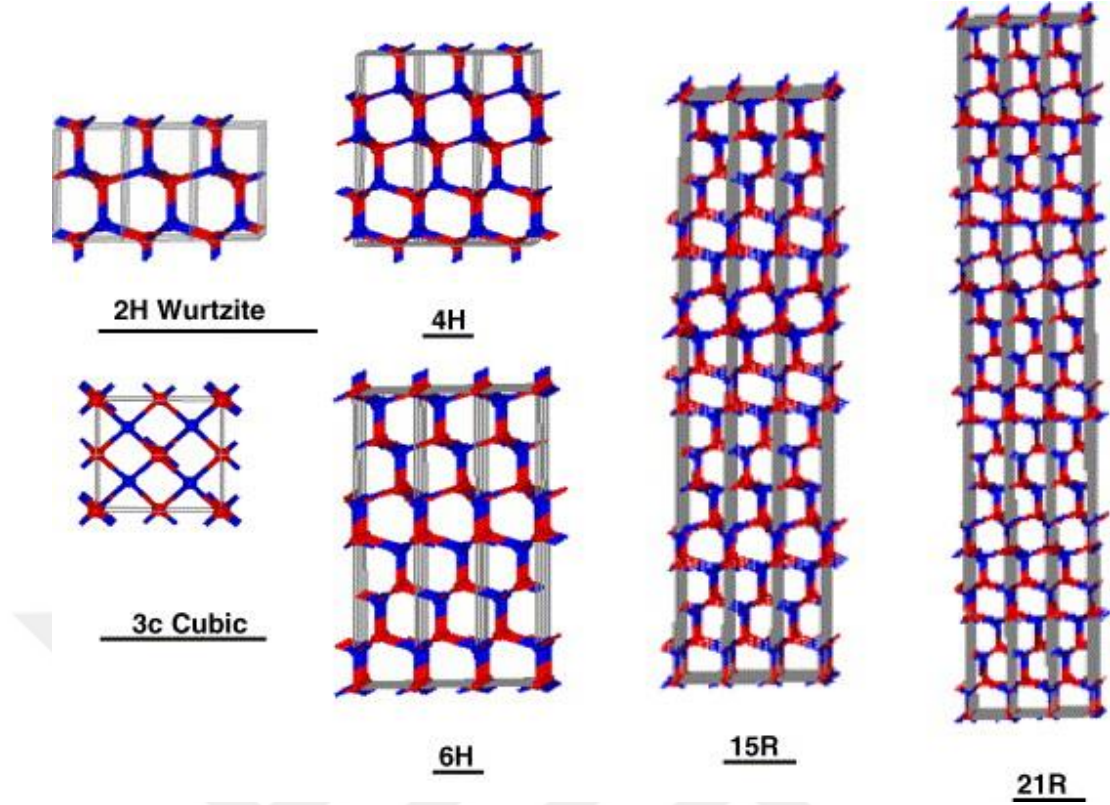
Tablo 2.1'de 3C-SiC, 4H-SiC ve 6H-SiC 'in önemli parametreleri ile Si, GaAs ve GaN gibi diğer yarı iletkenlerin parametreleri de karşılaştırma için verilmiştir (Sefaoğlu, 2008).

Tablo 2.1. 3C-SiC, 4H-SiC ve 6H-SiC 'in önemli parametreleri ile diğer yarı iletkenlerin parametrelerinin karşılaştırılması (Sefaoğlu, 2008).

Özellikler	Si	GaAs	GaN	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC
Yasak enerji aralığı. (eV) (300K' de)	1.1	1.4	3.4	2.3	3.2	3.0
Dielektrik sabiti	11.9	13.1	9	9.7	9.7	9,7
Erime noktası (K)	1690	1510	~250 0	~3100 at 35 atm	~3100 at 35 atm	3100 at35 atm
Fiziksel stabilitesi	İyi	Oldukça iyi	İyi	İyi	Süper	Süper
Termal iletkenliği (W/cm-K)	1.5	0.5	1.3	3-5	3-5	3-5
Electron mobilitesi (cm ² /V-s) (300K' de)	1400	8500	900	800	900	400
hol mobilitesi (cm ² /V-s) (300K' de)	600	400	250-350	320	120	90
Doyma Elektron hızı (cm/s)	1.0 x10 ⁷	2 x10 ⁷	2.7x10 ⁷	2.5x10 ⁷	2x10 ⁷	2. x10 ⁷
Kırılma (breakdown) bölgesi (V/cm)	0.3x10 ⁶	0.4 x10 ⁶	5 x10 ⁶	1 x10 ⁶	3x10 ⁶	3,5 x10 ⁶

4H-SiC ve 6H-SiC yarı iletkenlerinin enerji bant aralığı geniş ve 3eV civarındadır. En yaygın SiC politiplerinin kristal yapıları Şekil 3'te şematik olarak gösterilmiştir (Ching vd. 2006).

En basit SiC, kübik SiC'dir (3C-SiC veya β -SiC olarak etiketlenir). Diğer yaygın polimorflar altıgen bir kafese sahiptir ve 2H-SiC, 4H-SiC ve 6H-SiC olarak etiketlenir. Daha nadir ve karmaşık olanlar, 15R-SiC, 21R-SiC vb. olarak gösterilen eşkenar dörtgen yapıya sahip olanlardır ve eşkenar dörtgen birim hücreden üç kat daha büyük olan altıgen hücrenin c eksenini boyunca giderek karmaşılaşan bir istiflenme dizisine sahiptirler.



Şekil 2.1. SiC'in, 3C, 2H, 4H, 6H, 15R ve 21R politiplerinin kristal yapılarının çizimleri (Ching vd. 2006).

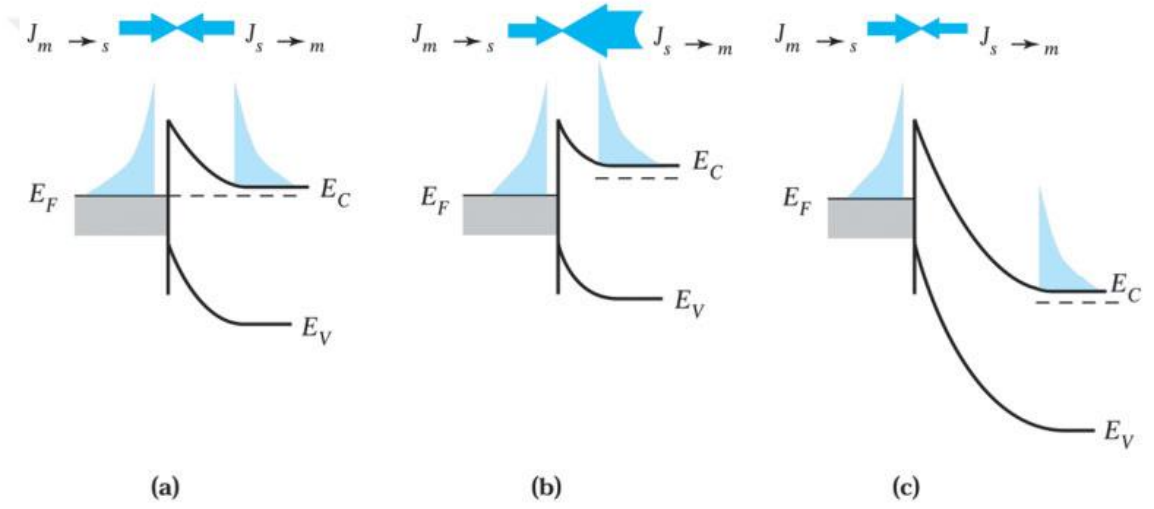
SiC'nin GaAs ve Si gibi yarı iletkenlere göre yüksek enerjili radyasyona dayanıklı olması, uzay teknolojilerinde kullanılmasını sağlamaktadır. SiC'ün kullanım alanları yüksek voltaj, yüksek frekans, yüksek sıcaklığa dayanıklı aletlerde rastlanılmaktadır. UV fotodiyotlarda, mavi ışık yayan diyotlarda ve dedöktör diyotların yapısında SiC bulunmaktadır (Sefaoğlu, 2008).

3C-SiC, 6H-SiC ve 4H-SiC'in MESFET performansları karşılaştırıldığında 4H-SiC'in elektron mobilitesi daha fazla olduğu görülmüştür (Codreanu vd. 2000). SiC politiplerinin termal iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı yüksek güç gerektiren aygıtlarda kullanıldığı bulunmuştur (Tang vd. 1992). SiC kullanılan transistörlerde daha iyi performans, daha iyi doğrusallık ve daha düşük maliyet sağladığını ve yüksek DC akım ile yüksek elektronik gücüne sahip olduğu açıklanmıştır (Masri 2002).

2.3 Schottky Diyotlar

Schottky bariyeri, büyük bir bariyer yüksekliğine (yani ϕ_{Bn} veya $\phi_{Bp} \gg kT$) ve iletkenlik bandındaki veya değerlik bandındaki durum yoğunluğundan daha düşük bir doping konsantrasyonuna sahip bir metal-yarı iletken temasını ifade eder. (Sze ve Lee, 2013)

Bir Schottky bariyerindeki akım iletimi, esas olarak çoğunluk taşıyıcılarından kaynaklanırken, akım iletiminin esas olarak azınlık taşıyıcılarından kaynaklandığı bir p-n bağlantısından farklıdır. Orta sıcaklıkta (örn.300 K) çalıştırılan Schottky diyotları için baskın iletim mekanizması, yarı iletkenin çoğunluk taşıyıcılarının potansiyel bariyer üzerinden metale termiyonik emisyonudur. (Sze ve Lee, 2013)



Şekil 2.2. Termiyonik emisyon süreciyle akım iletimi. (a) Termal denge; (b) ileri önyargı; ve (c) ters önyargı. (Sze ve Lee, 2013)

Şekil 2.2 termiyonik emisyon sürecini göstermektedir. Termal dengede (Şekil 2a), akım yoğunluğu iki eşit ve zıt taşıyıcı akışıyla dengelenir ve böylece sıfır net akım olur. Yarı iletkenindeki elektronlar metale akma (veya yayılma) eğilimindedir ve metalden yarı iletken karşıt dengeli bir elektron akışı vardır. Bu akım bileşenleri, sınırdaki elektronların yoğunluğuyla orantılıdır. (Sze ve Lee, 2013)

Yarı iletken yüzeyde bir elektron, enerjisi bariyer yüksekliğinin üzerindeyse termiyonik olarak metale yayılabilir. Burada yarı iletken iş fonksiyonu ϕ_s , ϕ_{Bn} ile değiştirilir ve

$$N_{th} = N_C \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right), \quad (2.1)$$

burada N_C , iletkenlik bandındaki durumların yoğunluğudur. Termal dengede,

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| \propto n_{th} \quad (2.2)$$

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| = C_1 N_C \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right), \quad (2.3)$$

burada $J_{m \rightarrow s}$ metalden yarı iletkene giden akımdır, $J_{s \rightarrow m}$ yarı iletkenden metale giden akımdır ve C_1 bir orantı sabitidir. Temas noktasına ileri yönde bir V_F önyargısı uygulandığında (Şekil 2b), bariyer boyunca elektrostatik potansiyel farkı azalır ve yüzeydeki elektron yoğunluğu

$$N_{th} = N_C \exp\left(-\frac{q(\phi_{Bn} - V_F)}{kT}\right) \quad (2.4)$$

Yarı iletkenden elektron akışından kaynaklanan akım $J_{s \rightarrow m}$ bu nedenle aynı faktör tarafından değiştirilir (Şekil 4b). Ancak metalden yarı iletkene elektron akışı aynı kalır çünkü bariyer ϕ_{Bn} denge değerinde kalır.

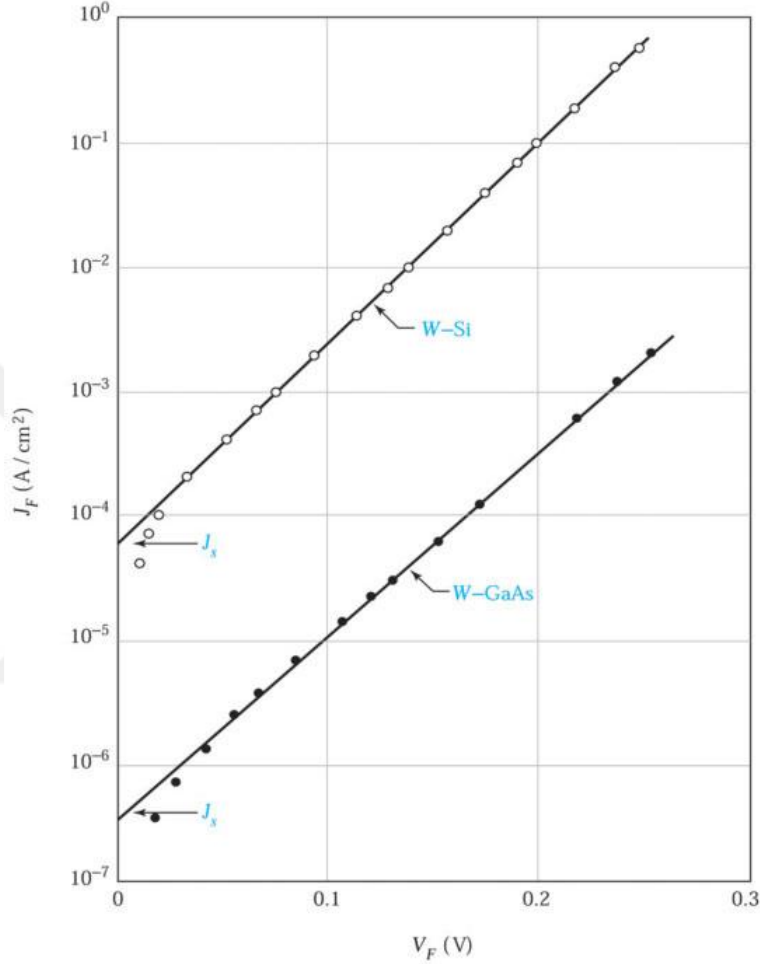
Termiyonik emisyon koşulu altında bir metal-yarı iletken temasının akım-gerilim karakteristiği

$$J = J_s (e^{qV/Kt} - 1) \quad (2.5)$$

$$J_s = A^* T^2 e^{-q\phi_{Bn}/Kt} \quad (2.6)$$

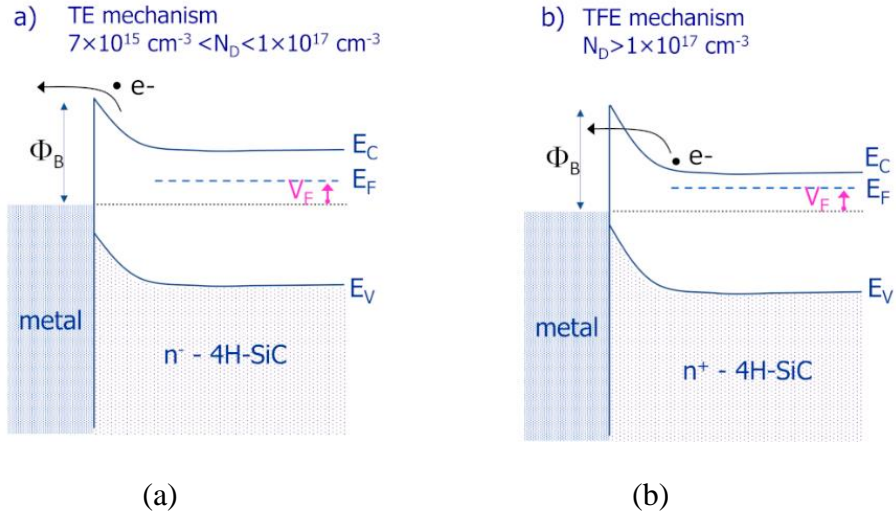
burada J_s doyma akım yoğunluğudur ve uygulanan voltaj V ileri önyargı için pozitif ve ters önyargı için negatiftir. İki Schottky diyotunun deneysel ileri I-V karakteristikleri Şekil 2.3'de gösterilmiştir. İleri I-V eğrisini $V = 0$ ' a çıkararak J_s ' yi bulabiliriz. J_s ve Denklem 6' dan bariyer yüksekliğini elde edebiliriz. (Sze ve Lee, 2013)

Normal çalışma koşulları altında, azınlık taşıyıcı difüzyon akımı çoğunluk taşıyıcı akımından çok daha küçüktür. Bu nedenle, bir Schottky diyotu tek kutuplu bir cihazdır (yani, iletim sürecine çoğunlukla yalnızca bir tür taşıyıcı katılır). Minimum azınlık taşıyıcı depolaması, Schottky bariyerinin p-n bağlantısına (~1 GHz) kıyasla çok daha yüksek frekanslarda (~100 GHz) çalışmasını sağlar. (Sze ve Lee, 2013)



Şekil 2.3. W-Si ve W-GaAs diyotlarının ileri akım yoğunluğu ve uygulanan voltaj n-tipi 4H SiC'ye Schottky kontaktları üzerine literatür verilerinin incelenmesi (Neamen,2012)

Literatürde, metal/n-tipi 4H-SiC sistemleri üzerine birçok çalışma rapor edilmiştir ve bunlar metalin seçimi ve Schottky kontak oluşumundaki evrimine odaklanmıştır. Tablo 2.2'de, en yaygın metal/n-tipi 4H-SiC kontaktlarından bazılarıyla ilgili literatür sonuçlarının bir koleksiyonu raporlanmıştır; bunlar arasında biriktirilmiş (tavlanmamış) Schottky kontaktları veya termal tavlama işlemlerine tabi tutulmuş kontaktlar da yer almaktadır. Raporlanan bariyer yüksekliği değerleri, Schottky diyotları üzerindeki I-V ölçümleriyle belirlenmiştir. (Vivona ve diğ, 2021)



Şekil 2.4.(a)termiyonik emisyon (TE) veya (b) termiyonik alan emisyonu (TFE) akım taşıma mekanizmasının baskınlığına göre, ileri önyargı VF altında metal/4H-SiC kontağı için şematik enerji bandı diyagramları. (Vivona ve diğ, 2021)

Tablo 2.2 Farklı metaller için metal/n-tipi 4H-SiC sistemi için Schottky bariyer yükseklikleri. (Vivona ve diğ, 2021)

Metal	ϕ_B (eV)	Thermal Treatment
Ta	1.10	none
Ti	0.95	none
Ti	0.78	none
Ti	0.96	none
Ti	1.15	600 °C for 10 min in Ar
Ti	0.95	500 °C for 60 h in vacuum
W	1.11	none
W	1.14- 1.25	475-700 °C for 10 min in N ₂
W	1.17	none
W	1.09	600 °C for 10 min in Ar
W	1.11	500°C in N ₂
Mo	1.04	none
Mo	1.11	none

Mo	1.21	600 °C for 10 min in Ar
Mo	1.17	none
Mo	1.01	400 °C for 30 min in Ar
Ni	1.45	none
Ni	1.62	none
Ni	1.52	none
Ni	1.52	400°C, RTA
Au	1.73	none
Ir	1.31	none
Pt	1.39	none
Pt	1.72	200°C

Görüldüğü gibi, metallere ve metalleştirme sonrası termal işlemlere bağlı olarak çok çeşitli bariyer yüksekliği değerleri bulunur.

2.4 Hidrojen Sensörleri

Hidrojen, metan, propan veya benzin buharı gibi diğer yanıcı gazlar ve buharlarla karşılaştırıldığında bir dizi sıra dışı özelliğe sahiptir. Bunlar arasında çok düşük yoğunluk (0,0899 kg/m³) ve kaynama noktası (20,39 K), yüksek difüzyon katsayısı (havada 0,61 cm²/s) ve kaldırma kuvveti bulunur. Yanma özellikleri açısından düşük minimum tutuşma enerjisine (0,017 mJ), yüksek yanma ısısına (142 kJ/g H₂) ve geniş yanıcı aralığa (4–75% l) ve yüksek yanma hızına, patlama hassasiyetine ve 560 °C'lik tutuşma sıcaklığına sahiptir. Hidrojen ayrıca birçok element için güçlü bir indirgeyici madde görevi görür ve birçok malzemede yüksek geçirgenliğe sahiptir, bu da belirli uygulamalarda özel önlemler gerektirir. (Hübert ve diğ,2011)

Renksiz, kokusuz ve tatsız yanıcı bir gaz olan hidrojen insan duyuları tarafından tespit edilemez ve bu nedenle varlığını tespit etmek ve konsantrasyonunu ölçmek için başka araçlara ihtiyaç vardır. Hızlı ve doğru hidrojen gazı konsantrasyonu ölçümü hava ile potansiyel olarak patlayıcı karışımların oluşumuna karşı uyarmak ve patlama riskini önlemeye yardımcı olmak için önemlidir. (Hübert ve diğ, 2011)

Hidrojenin tespiti ve konsantrasyon ölçümü, hava gemileri için dolum istasyonlarında hidrojen ölçümleriyle başlayan 100 yılı aşkın bir geçmişe sahiptir. Ancak, hidrojen konsantrasyonunun izlenmesi ve kontrolü için endüstrinin çeşitli alanlarında hidrojen gazının

daha hızlı, daha doğru ve daha seçici bir şekilde tespit edilmesine yönelik devam eden bir ihtiyaç vardır. Örneğin, hidrojen gazı konsantrasyonunun izlenmesi, amonyak ve metanol sentezinde, hidrokarbonların hidrasyonunda, petrol ürünlerinin kükürttan arındırılmasında ve roket yakıtlarının üretiminde önemlidir. Metalurjik proseslerde, hidrojen konsantrasyonunun ölçümü de gereklidir. Örneğin alüminyumun eritilmesi sırasında, metal suyla reaksiyona girerek alümina ve hidrojen oluşturabilir ve bu da eriyikte çözülmüş olarak kalır. Hidrojen gevrekleşmesini önlemek için kaynak ve galvanik kaplama sırasında hidrojen konsantrasyonu izlenmelidir ve ayrıca pillerin karakterizasyonunda da önemli bir parametredir. (Hübert ve diğ, 2011)

Hidrojen konsantrasyonunun izlenmesi nükleer reaktör güvenliği için elzemdir. Nükleer santrallerde hidrojen, radyoaktif atık tanklarında, plütonyum yeniden işlenmesi sırasında, suyun radyolizi yoluyla veya suyun yüksek sıcaklıklı reaktör çekirdeği ve kaplama malzemeleriyle (uranyum oksit, zirkonyum) istenmeyen tepkimesi yoluyla oluşabilir. Bir hidrojen patlaması, 1979'da Three Mile Island'daki nükleer kazaya ve 2011'de Fukuşima kazasına katkıda bulunmuştur. (Hübert ve diğ, 2011)

Kömür madenlerinde hidrojen, metan veya kömür tozu patlamaları veya kömürün kendiliğinden ısınması ve düşük sıcaklıkta oksidasyonu ile ppm2 aralığında üretilebilir. Hidrojenin varlığı, yangının erken aşamasında olduğunu belirtmek veya elektrik santrallerinde yaklaşan trafo arızasını tespit etmek için kullanılabilir. Hidrojen gazı konsantrasyonu, silanlar ve nitrojen gibi gazların çok yüksek saflıkta üretilmesi gereken yarı iletken üretiminde önemlidir. Aydınlatma endüstrisinde de hidrojen, kripton, ksenon ve neon üretimi sırasında miktarının belirlenmesi gereken bir kirleticidir. Hidrojen sızıntı tespiti, gaz besleme borularında ve varlığının korozyonu gösterebileceği veya hidrojenin türbin jeneratörleri için soğutucu olarak kullanıldığı proses tesislerinde yapılır. Sıvı hidrojen, uzay uygulamalarında yakıt olarak kullanılır ve bu nedenle hidrojen sensörleri, mekik fırlatmaları sırasında ve diğer havacılık operasyonlarında sızıntı tespiti için kullanılır. Hidrojen algılama ayrıca biyomedikal uygulamalarda belirli hastalıkların bir göstergesi olarak ve çevre kirliliğinin tespiti için de rol oynayabilir. (Hübert ve diğ, 2011)

Hidrojen bir enerji taşıyıcısıdır ve azalan fosil yakıt rezervleri, enerji tedarik güvenliği ve küresel ısınma sorunlarının üstesinden gelmeye katkıda bulunabilir. Devam eden araştırma, geliştirme ve henüz küçük ölçekli hidrojen teknolojilerinin dağıtımı bu potansiyeli gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu ortaya çıkan hidrojen ekonomisinde, hidrojen sızıntılarının tespiti ve hidrojen konsantrasyonunun ölçülmesi hem sabit hem de mobil

uygulamalarda üretim, depolama, taşıma ve kullanım sırasında gereklidir. Sensörler bu nedenle hidrojen üretim tesislerinin, boru hatlarının, depolama tanklarının, yakıt ikmal istasyonlarının ve otomotiv araçlarının güvenlik izlemesi için kullanılacaktır. (Hübert ve diğ, 2011)

Alternatif hidrojen tespit yöntemleri, gaz kromatografları, kütle spektrometreleri veya spesifik iyonizasyon gaz basınç sensörleri gibi cihazları kullanır. Gaz kromatografları, bir karışımdaki bireysel gaz bileşenlerini ayırmak için kolonlar ve her bir bileşeni tanımlamak için farklı dedektör türleri kullanır. Kütle spektrometreleri, gaz moleküllerini manyetik alandan karakteristik sapmalarına göre tanımlar. Geleneksel olarak, bu cihazlar nispeten büyük, pahalı, yüksek bakım gerektirir ve örnekleme ve reaksiyon süreleri açısından yavaştır. Ancak, son on yılda minyatürleştirmede önemli ilerlemeler kaydedilmiştir ve mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) bildirilmiştir. (Hübert ve diğ, 2011)

Hidrojen sensörleri, hidrojen gazı moleküllerini algılayan ve hidrojen gazı konsantrasyonuna orantılı büyüklükte bir elektrik sinyali üreten dönüştürücü cihazlardır. Hidrojen sensörleri, yukarıda belirtilen geleneksel hidrojen algılama yöntemlerine göre daha düşük maliyet, daha küçük boyut ve daha hızlı tepki gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, onları çeşitli uygulamalarda taşınabilir ve yerinde hidrojen algılama için daha uygun hale getirir. Bu tür sensörler, düzenli olarak kalibre edilebilecekleri ve eğitimli personel tarafından çalıştırılabilecekleri endüstride kullanım için iyi bir şekilde yerleşmiştir. Ancak, bir hidrojen ekonomisinin ortaya çıkması, çeşitli uygulamalarda eğitimsiz kişiler tarafından kullanılmaya uygun, düşük maliyetli, düşük bakım gerektiren, kurulumu kolay, kullanımı kolay, doğru hidrojen sensörleri üretmeye yönelik ivme sağlar. Ticari olarak mevcut veya geliştirilmekte olan birçok farklı hidrojen sensörü türü vardır. Çoğu hidrojen algılama prensibi on yıllardır bilinmektedir ve hidrojen sensörleri yıllardır ticari olarak mevcuttur. Ancak gelecekteki bir hidrojen ekonomisinin taleplerini karşılamak için, sensör boyutunu, maliyetini ve güç tüketimini azaltmanın yanı sıra hassasiyeti, seçiciliği, tepki süresini ve güvenilirliği sürekli olarak iyileştirmek için çok sayıda araştırma devam etmektedir. (Hübert ve diğ, 2011)

2.4.1 SiC Tabanlı Hidrojen Sensörleri

Hidrojene edilmiş amorf silisyum karbür, (a-S i C:) H ince filmlere olan büyük ilgi, esas olarak geniş optik bant aralığı, mekanik mukavemet, fotoluminesans ve elektrolüminesans gibi bazı karakteristik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikler, a-S i C: H ince filmlerin çeşitli mikroelektronik cihazlarda, örneğin güneş pilleri, optotiristörler, toplu tek kutuplu diyotlar gibi uygulamalara yol açar. Yukarıdaki tüm mikroelektronik cihazlar kısmen

a-S i C: H ince filmler kullanılarak üretilmiş olsa da, çok az sonuç yayınlanmıştır. (Magafas ve diğ,2007)

Hidrojene amorf silisyum karbür (a-SiC:H), mikroelektronik ve optoelektronik alanındaki potansiyel uygulamaları nedeniyle 30 yılı aşkın süredir kapsamlı bir şekilde incelenmiştir; örneğin İnce Film Transistörler, Schottky diyotlar, ışık yayan diyotlar, fotokuplörler ve optik sensörler. Bu cihazların özelliklerinin optimizasyonu, farklı biriktirme teknikleri kullanılarak veya biriktirme parametreleri değiştirilerek ve C/Si atom oranı değiştirilerek a-SiC:H kalitesinin iyileştirilmesine dayanmaktadır. Amorf a-SiC:H ince filmlerin termal tavlama işlemleri kullanılarak daha fazla kalite iyileştirmesi bildirilmiş olsa da , a-SiC:H filmlerle üretilen bu tür cihazların elektronik ve optoelektronik özelliklerini optimize etmek amacıyla bu yönde çok az çalışma yapılmıştır. Öte yandan, a-SiC:H, spektrumun düşük dalga boyu ve UV aralığındaki fotoalgılama uygulamaları için ilginç bir malzeme olmasına rağmen, metal/a-SiC:H Schottky diyotlarının optoelektronik özellikleri üzerine çok az çalışma yayınlanmıştır. Bu nedenlerden dolayı, a-SiC:H ince filmlerinin tavlama işleminin metal/a-SiC:H Schottky diyotlarının optoelektronik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek önemlidir. a-SiC:H/c-Si(n) heterojunsiyonunun optik tepkisiyle birlikte,500 ila 850 nm dalga boyu aralığında çok yüksek ve neredeyse sabit değerler (X80%) sunar ve bu da bu yapıları optik sensörler olarak oldukça cazip hale getirir. Ta=675 1C durumunda, 350 ila 600 nm dalga boyu aralığında ölçülen kuantum verimliliği, Al/a-SiC:H/c-Si(n) yapısı hidrojene maruz kaldığında artar ve bu da hidrojen algılama sensörü olarak ilginç özellikler gösterir. (Magafas ve diğ,2007)

SiC tabanlı hidrojen sensörlerinin çoğu, özellikleri büyük ölçüde cihazlar içindeki bir bölge üzerindeki elektrik alanının etkisiyle belirlenen alan etkili cihazlar olarak gruplandırılır. SiC alan etkili cihazların benzersiz çalışma prensibi, onu hidrojen veya hidrokarbonlar gibi çeşitli gazlara karşı yüksek hassasiyet ve iyi seçiciliğe sahip bir gaz sensörü yapar. Ayrıca, bu SiC tabanlı cihazlar, tepkinin milisaniyeler mertebesinde olduğu geniş bir sıcaklık aralığında hızlı sensörler olarak performans gösterebilir. Bu yapıdaki gaz sensörü, zorlu ortam uygulamaları için büyük bir kararlılığa ve güvenilirliğe sahiptir. Bu alan etkili cihazlar arasında, metal oksit yarı iletken (MOS) SiC tabanlı hidrojen sensörü tercih edilir. MOS kapasitör hidrojen sensörlerinin üretimi çok basittir. Bu nedenle, araştırma çalışmalarında tercih edilir. (Soo ve diğ, 2010)

SiC tabanlı hidrojen sensörleri, 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. Bu benzersiz özellik, elektronik cihazları zorlu ortamlardan koruyan pahalı ve hacimli soğutma sistemlerini ortadan kaldırma veya en azından en aza indirme şansı sunar. Yanma süreçlerinin

doğrudan izlenmesi de mümkündür. Sonuç olarak, sensör sistem mimarileri iyileştirilir, çevresel etkiler azaltılır ve sensörlerin verimliliği ve performansı artırılır. Bunlar, sistem maliyetlerini düşürerek maliyet tasarrufu sağlar veya sistem ağırlığının azaltılmasıyla artan verimlilik sayesinde güvenilirliği artırır. Ağırlık azaltılarak, tüketilen enerji tasarrufu sağlanır. (Soo ve diğ, 2010)

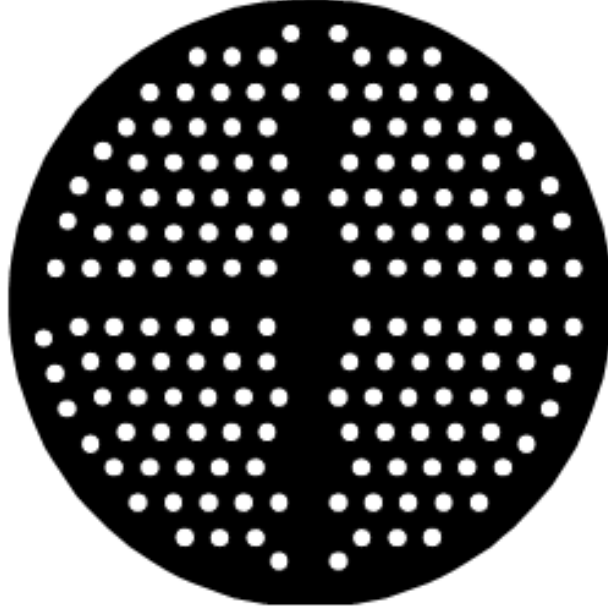
Yüksek sıcaklık uygulamaları ve hızlı tepkiye ek olarak, SiC tabanlı hidrojen sensörlerinin düşük hidrojen konsantrasyonlarında ve geniş bir algılama aralığında çalışabilme yeteneği, hidrojen yakıtının otomobillerde yaygın olarak kullanılmasına katkıda bulunur. Ayrıca, geniş bir sıcaklık aralığında yüksek hassasiyet, seçicilik ve güvenilirlik sağlayan bir gaz sensörü olarak performans gösterebilir. Dahası, SiC tabanlı hidrojen sensörü mükemmel termal iletkenliğe ($3-4,9 \text{ W/cm}^2$), yüksek kırılma elektrik alanına, yüksek kimyasal atalet ve yüksek radyasyon sertliğine sahiptir. Bu nedenle, yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında ve aşındırıcı koşullarda kullanılabilir. Bu, kimya, cam ve petrol endüstrilerinde hidrojen sızıntısı tespiti için önemlidir. Ayrıca, kuyu kaydı ve askeri uygulamalar gibi daha az maliyete duyarlı endüstrilerde de kullanılmaktadır. (Soo ve diğ, 2010)

3. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada metal kaplama için şekil 3.1’de fotoğrafı verilen PVD (fiziksel buhar biriktirme, Physical Vapor Deposition) sistemindeki DC saçtırma (Sputtering) yöntemi kullanıldı. Nanosensör laboratuvarımızda yer alan Nanovak firmasından temin ettiğimiz NVBJ300 modelinde iki tane termal, bir tane DC saçtırma ünitesi bulunmaktadır. Deneyde SiC Schottky diyot aygıtı elde etmek için üç aşamalı bir yol izlendi. İlk aşamada hazır olarak satın alınan SiC altaşların (wafer) yıkama ve kurutma işlemi gerçekleştirildi. İkinci aşamada SiC altaşın ohmik alt kontakları oluşturuldu. Son aşamada üst kontak için farklı metaller kullanılarak kaplama yapıldı.



Şekil 3.1. PVD kaplama cihazının fotoğrafı



Şekil 3.2. Schottky diyot oluşturulurken kullanılan maske örneği. (Ak, 2020)

Genellikle PVD malzeme biliminde kullanılan ince film kaplama yöntemidir. Kaplanacak malzeme (genellikle metal, alaşım vb.) buharlaştırılarak veya plazma saçırma yapılarak hedef yüzeye kaplama gerçekleştirilir. PVD sisteminin çalışma mekanizmasına baktığımızda, ilk olarak cihaz yüksek vakum (10^{-5} - 10^{-7} Torr altında) altına alınır. İşlem sırasında ortamın oksijen, su buharı ve diğer gazlardan arındırılmış olması oldukça önemlidir. Sonra içeriye genellikle Ar gazı verilerek cihaz basınç değeri 1-10 mTorr seviyesinde tutulur. Bunun amacı plazma oluşturduktan sonra uygun elektriksel güç koşullarında hedef malzemeden atom koparmasını sağlamaktır. Kaplanacak malzeme yüksek saflıkta (genellikle 99.99%+) 2-10 cm çapında disk veya levha formunda (target) metal, alaşım, seramik veya kompozit özellikte olmaktadır. PVD sisteminde kaplanacak numune yüzeyi üzerinde homojen bir film elde etmek için numune tutucusu genellikle belli hızlarda döndürülebilir ve bazı durumlarda numunenin kaplama sırasında belli sıcaklıkta bulunması gerektiğinden ısıtma özelliği bulunur. Saçırma için genelde güç kaynağı olarak DC ve RF güç kaynakları kullanılmaktadır. Kaplama kalınlığı nanometre mertebesinde ölçülebilmektedir. (Ohring, 2002)

Bu çalışmamızda PVD sistemi kullanılarak hazır alttaş olarak alınan 4H SiC üzerine kaplama yapıldı. Üst kontak metal kaplamaları için şekil 3.2’de yer alan bakır gölge maske kullanıldı. Bunun için önce Al kullanılarak alt (omik) kontak, daha sonra titanyum (Ti), platin (Pt), nikel (Ni) ve gümüş (Ag) metalleri kullanılarak üst kontak oluşturuldu.

3.1 SiC Schottky Diyot Üretimi

SiC Schottky diyot üretimi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak hazır alttaş olarak ticari Nanografi şirketinden alınan 3” boyutunda, 0,35 mm kalınlığında ve 0,015-0,03 Ω .cm aralığında öz dirence sahip 4H SiC için temizleme prosedürleri gerçekleştirildi. İkinci aşamada alt kontak oluşturmak için Al kaplama yapıldı. Son aşamada üst kontak için farklı metaller (Ti, Pt, Ni, Ag) kaplandı.

3.1.1 Numuların Temizlenmesi

4H SiC Schottky diyotu oluşturmak için (0001) yönelimine sahip fabrikasyon olarak parlatılmış 4H SiC yarıiletken alttaş kullanıldı. Sırasıyla aşağıdaki aşamalardan geçirilerek temizleme işlemi yapıldı.

- %20 lik HF çözeltisinde 40 dk daldırıldı.
- Aseton ile 10 dakika ultrasonik banyoda temizlendi.
- İzopropil alkol ile 10 dakika ultrasonik banyoda temizlendi.
- Ultra saf su ile yıkandı.
- Kimyasal olarak temizlenmiş 4H SiC yüksek saflıkta azot (N_2) ile kurutuldu.

3.1.2 Alt Kontak Oluşturma

Al-4H SiC Schottky diyotların yapımında alt omik (ohmic) kontak oluşturmak için alüminyum (Al) ince film, DC saçtırma yöntemiyle PVD sisteminde üretildi. Temizlenen 4H SiC yüzeyinde omik kontak oluşturmak için tablo-1’de verilen parametreler altında Al kaplama yapıldı. 4H SiC numuneleri PVD sistemine yerleştirildikten sonra makine $3 \cdot 10^{-6}$ Torr basınca kadar vakumlandı. Daha sonra, içeriye yaklaşık 10 sccm Ar gazı verildikten sonra basınç 5,6 mTorr seviyesine sabit tutuldu. Al hedefine 370 V gerilim 0,19 A akım uygulanarak 0,8 A/s kaplama hızıyla 100 nm Al film kaplama yapılarak alt kontak oluşturuldu.

Tablo 3.1. Al alt kontak film oluşturmak için kullanılan DC saçtırma parametreleri

Numune	Base Vakum (Torr)	Kaplama Hızı(A/s)	Kaplama Kalınlığı(nm)	Kaplama Basıncı(mTorr)	Gerilim(V)	Akım(A)
4H SiC	$3 \cdot 10^{-6}$	0,8	100	5,6	370	0,19

3.1.3 Üst Kontak Oluşturma

Üst Schottky kontak yapmak için Ti, Pt, Ni ve Ag gibi farklı metaller kullanıldı. Temizlenen ve arka yüzeyine Al kaplanan 4H SiC yüzeyinde Schottky kontak oluşturmak için ön yüzeyine bakır maske yerleştirildi. Tablo 3.2’de verilen parametreler altında metal kaplamalar yapıldı.

Tablo 3.2. Al/4HSiC üst kontak DC saçtırma Parametreleri

Numune	Kaplanan Malzeme	Base Vakum (Torr)	Kaplama Hızı(A/s)	Kaplama Kalınlığı(nm)	Gerilim(V)	Akım(A)
Al- 4H SiC	Ti	6.10^{-6}	0,9	100	343	0,3
Al- 4H SiC	Pt	$8.7.10^{-6}$	0,5	100	460	0,04
Al-4H SiC	Ni	5.10^{-6}	0,6-1,1	100	450	0,094-0,15
Al-4H SiC	Ag	6.10^{-6}	0,9	100	360	0,044

Üst Schottky Ti kontak için, temizlenen ve arka yüzeyine Al kaplanan 4H SiC numunesi yerleştirilen PVD sistemine yerleştirildikten sonra 6.10^{-6} Torr base vakuma gelmesi beklendi ve sonra PVD sistemine 10 sccm Ar gazı verildi. Basınç değeri 5,2 mTorr seviyesine sabitlendikten sonra Ti hedefine 343 V gerilim 0,3 A akım uygulanarak 0,9 A/s kaplama hızıyla 100 nm Ti kaplama yapıldı. Böylece Al/4H SiC/Ti aygıtı elde edildi.

Üst Schottky Pt kontak için, temizlenen ve arka yüzeyine Al kaplanan 4H SiC numunesi yerleştirilen PVD sistemine yerleştirildikten sonra $8.7.10^{-6}$ Torr base vakuma gelmesi beklendi ve sonra PVD sistemine 10 sccm Ar gazı verildi. Basınç değeri 5,7 mTorr seviyesine sabitlendikten sonra Pt hedefine 460 V gerilim 0,04 A akım uygulanarak 0,5 A/s kaplama hızıyla 100 nm Pt kaplama yapıldı. Böylece Al/4H SiC/Pt aygıtı elde edildi.

Üst Schottky Ni kontak için, temizlenen ve arka yüzeyine Al kaplanan 4H SiC numunesi yerleştirilen PVD sistemine yerleştirildikten sonra 5.10^{-6} Torr base vakuma gelmesi beklendi ve sonra PVD sistemine 10 sccm Ar gazı verildi. Basınç değeri 5,7 mTorr seviyesine

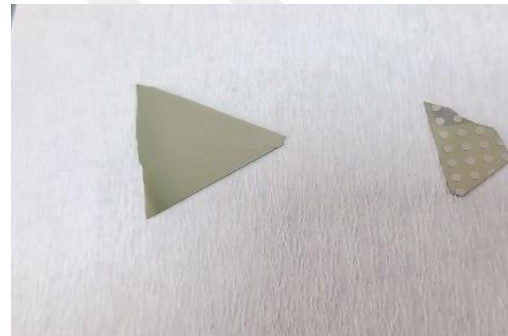
sabitlendikten sonra Pt hedefine 450 V gerilim 0,094A-0,15 A akım uygulanarak 0,6-1,1 A/s kaplama hızıyla 100 nm Ni kaplama yapıldı. Böylece Al/4H SiC/Ni aygıtı elde edildi.

Üst Schottky Ag kontak için, temizlenen ve arka yüzeyine Al kaplanan 4H SiC numunesi yerleştirilen PVD sistemine yerleştirildikten sonra 6.10^{-6} Torr base vakuma gelmesi beklendi ve sonra PVD sistemine 10 sccm Ar gazı verildi. Basınç değeri 4,68 mTorr seviyesine sabitlendikten sonra Ag hedefine 360 V gerilim 0,044 A akım uygulanarak 0,9 A/s kaplama hızıyla 100 nm Ag kaplama yapıldı. Böylece Al/4H SiC/Ag aygıtı elde edildi

Şekil 3.3a'da Ti, Ni, Pt ve Ag gibi metaller kullanılarak farklı türde Schottky bariyer diyotlar (SBD) için şematik bir diyagram verilmiştir. Şekil 3.3b'de 4H SiC alttaşın kendisinin (fotoğrafın solundaki üçgen yapıda kesilmiş hali) ve metal kaplandıktan sonra Al/4H SiC/Ag aygıtının fotoğrafı görülmektedir.



(a)



(b)

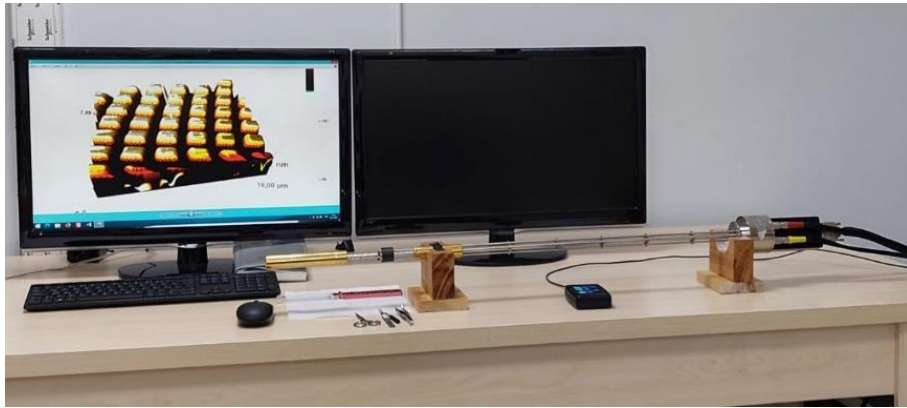
Şekil 3.3 Al-4H SiC/metal Schottky bariyer diyot(SBD) diyagramı ve görüntüsü

3.2. Yapısal Karakterizasyon

Hazır olarak alınan 4H SiC alltaşın İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi (İBTAM) içerisinde şekil 3.4’de fotoğrafı verilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı ve bu cihazı bağlı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile yüzey ve element analiz incelemeleri yapıldı. Burada SEM için İngiltere yapımı LEO-EVO 40 cihazı ve EDX için ise Almanya yapımı Bruker-125 eV cihazı kullanıldı. Yine aynı merkezde yer alan şekil 3.5’de fotoğrafı verilen atomik kuvvet mikroskobu (AFM, Atomic Force Microscope) ile yüzey topoğrafisi ölçümleri alındı. AFM ölçümleri için İngiltere yapımı Low Temperature Scanning Tunneling Microscopy System (LT-STM) Nanomagnetics Instruments cihazı kullanıldı.



Şekil 3.4 SEM-EDX cihaz ve bilgisayar fotoğrafı



Şekil 3.5 AFM cihazına ve bilgisayarına ait fotoğraf

3.3 Üretilen SiC Schottky Diyotun Elektriksel Karakterizasyonu

Laboratuvarında ürettiğimiz 4H SiC Schottky diyotların AC ve DC ölçümleri alınarak I-V grafikleri sonuç ve tartışma bölümünde çizildi. Fizik bölümü nanosensör araştırma laboratuvarında yer alan KEYSIGHT B2901BL Precision Source/Measure Unit cihazıyla DC elektriksel ölçümler, HIOKI IM3523 LCR METER cihazı ile de AC elektriksel ölçümler alındı. LabVIEW programıyla anlık otomatik olarak cihazlardan elde edilen ölçüm verileri bilgisayara kaydedildi. Daha sonra bu veriler analiz edildi.

3.4 Gaz Sensör Testlerinin Yapılması

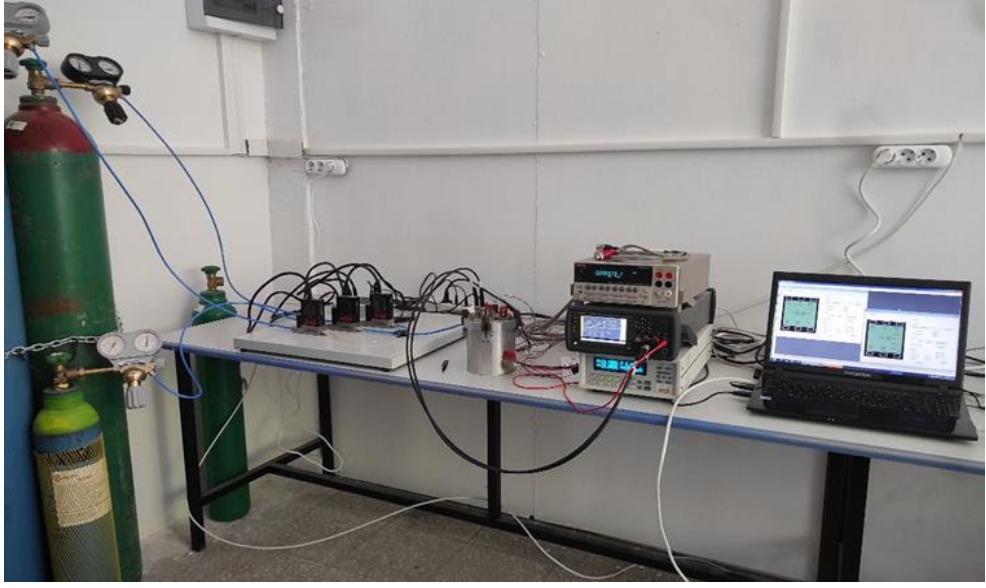
Fizik nanosensör araştırma laboratuvarımızda fotoğrafı ve şematik gösterimi şekil 3.6' da verilen gaz sensörü ölçüm sistemi yardımıyla, ürettiğimiz 4H SiC Schottky diyotların hidrojen sensör ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Burada şekil 3.6.a'daki fotoğrafta yer alan tüplerden kontrollü gaz akışı için üç tane kütle akış kontrol cihazı (ALICAT) bulunmakta olup istediğimiz konsantrasyonda gazın elde edilmesi sağlanmaktadır. Hemen ona bağlı olarak numeneleri yerleştirdiğimiz ölçüm hücresi yer almaktadır. Ölçüm hücresinin hacmi 1 litre, gaz giriş-çıkışları bulunmakta ve ısıtılabilir numune tutucu içermektedir. Sıcaklık ölçümünü ve kontrolü Lakeshore 335 Temperature Controller cihazı ile, AC ölçümleri HIOKI IM3523 LCR METER cihazı ile ve DC ölçümleri ise KEYSIGHT B2901BL Precision Source/Measure Unit cihazıyla gerçekleştirildi. Elektriksel ölçümler kuru hava ortamında alındı. Hidrojen gaz sensör ölçümlerinde istenen konsantrasyonda hidrojen elde etmek için yüksek saflıktaki karışım (%5 N₂ + %95 H₂) gaz tüpü ve yüksek saflıkta kuru hava tüpü kullanıldı. Ölçümler 200 sccm'lik sabit toplam gaz akış hızı uygulanarak ölçüm gerçekleştirildi. Ölçüm hücresindeki numune tutucunun sıcaklığı 25°C ile 200 °C arasında değiştirilerek üretilen Schottky diyotların sıcaklığa bağlı ölçümleri yapıldı.

Üretilen Al-4H SiC-Metal cihazlarının sensör tepkisi (R) aşağıdaki formül ile hesaplandı;

$$\text{Sensör Tepkisi (R)} : \frac{\Delta I}{I_{H_2}} = \frac{I_{Air} - I_{H_2}}{I_{H_2}} \quad (3.1)$$

Buradaki I_{H2} ve I_{Air}, sırasıyla belirlenen konsantrasyondaki hidrojen ortamındaki ve kuru hava akışında ölçülen elektrik akımlarıdır. (Taşyürek ve Kılınç, 2025)



(a)



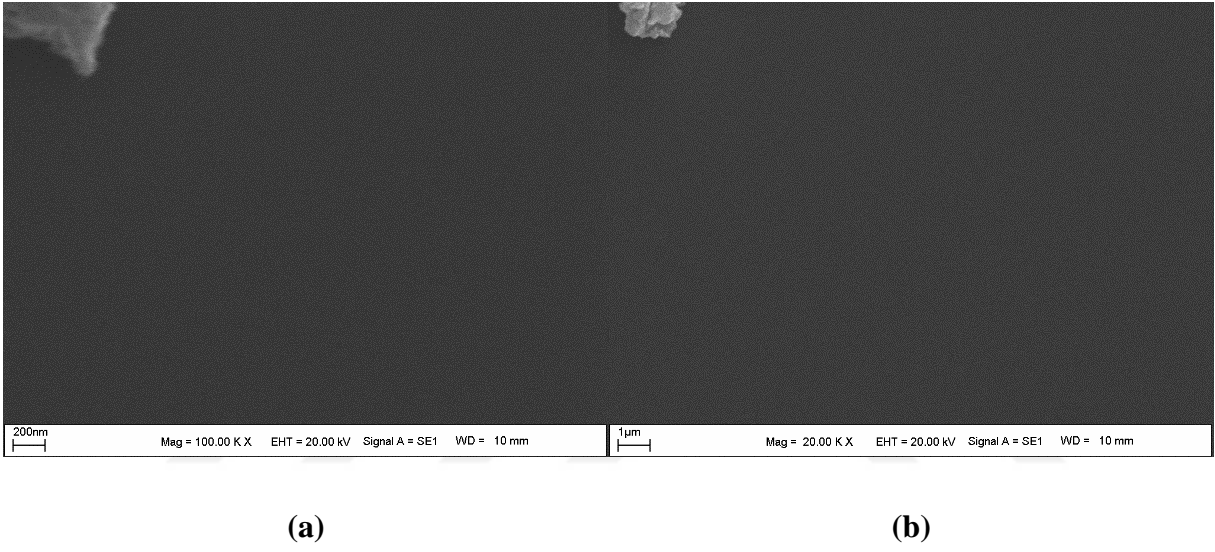
(b)

Şekil 3.6 Gaz ölçüm sisteminin fotoğrafı (a) ve şematik gösterimi (b)
(Kılınç ve diğ, 2022)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Yapısal karakterizasyon

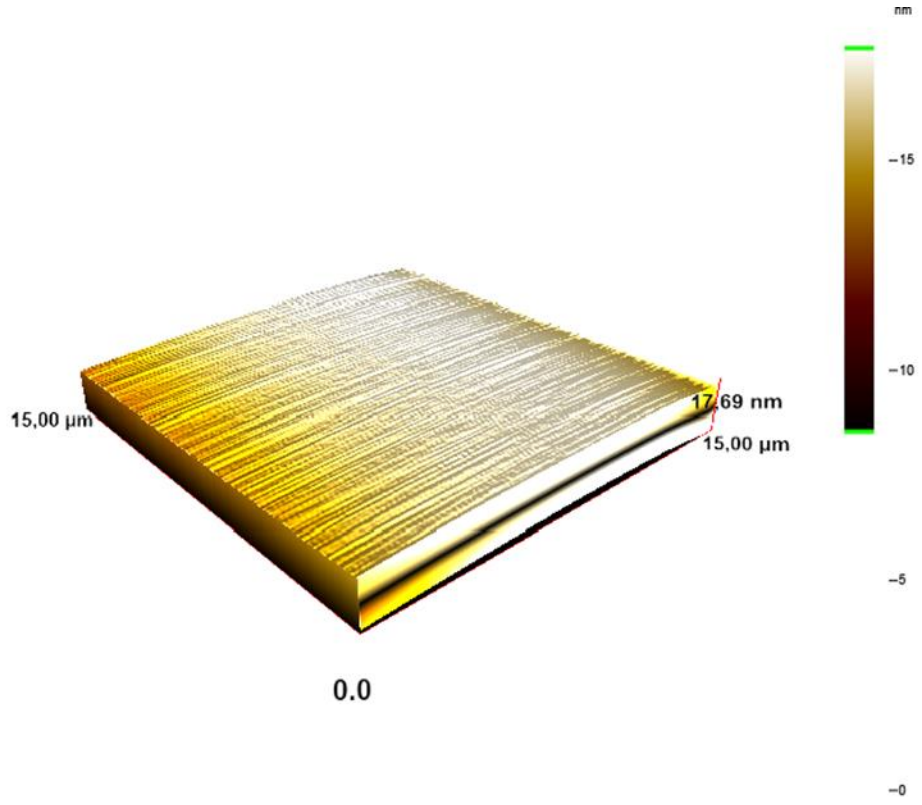
4H SiC altaşın (wafer) şekil 4.1’de SEM görüntüsü yer almaktadır. Şekil 4.1a’da SiC altaşın 100 KX büyütülmüş halinin ve şekil 4.1b’de ise 20 KX büyütülmüş halinin yüzey SEM görüntüleri incelenmiştir. Her iki SEM fotoğrafının sol üst köşesinde toz parçası görülmekte olup diğer kısımlarda yüzeyde herhangi bir ayrıntının olmadığı gözlenmiştir. Bu da yüzeyin pürüzsüz olabileceğinin bir göstergesidir.



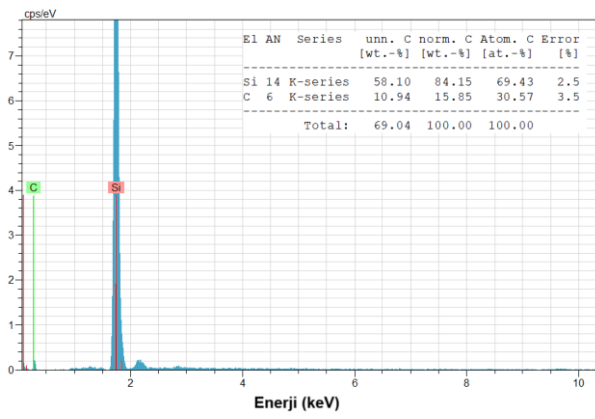
Şekil 4.1 4H SiC altaşın farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri 100 KX (a) ve 20 KX (b)

4H SiC altaşın şekil 4.2’de AFM yüzey görüntüsü yer almaktadır. Burada SiC altaşın eni ve boyu $15\mu\text{m}$ ’lik bir alanda tarama yapılmıştır. SiC altaşın yüzey pürüzlülüğü için ortalama değer (R_a) 0,6 nm ve karekök ortalama değer ise 0,75 nm olarak bulundu. Bu durumda altaşın AFM sonuçlarından anlaşılacağı üzere SiC altaşın oldukça pürüzsüz bir yapı olduğu anlaşılmaktadır.

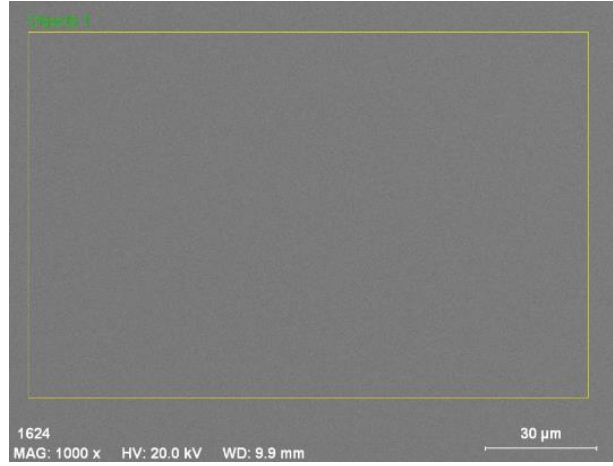
Şekil 4.3’de 4H SiC altaşın EDX spektrurumu yer almaktadır. Burada EDX spektrumu için şekil 4.3b’de sarı dikdörtgen şeklinde çizilmiş alanda tarama yapılmıştır. Tarama sonucunda şekil 4.3a’daki spektrum grafikten anlaşılacağı üzere Si ve C elementlerinin piklerinin varlığı nettir. Si ve C elementlerinin atomik oranlarının sırasıyla %69 ve %31 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2 4H SiC üç boyutlu AFM görüntüsü



(a)



(b)

Şekil 4.3 4H SiC EDX Spektrum grafiği (a) ve spektrumun alındığı bölgenin SEM görüntüsü(b)

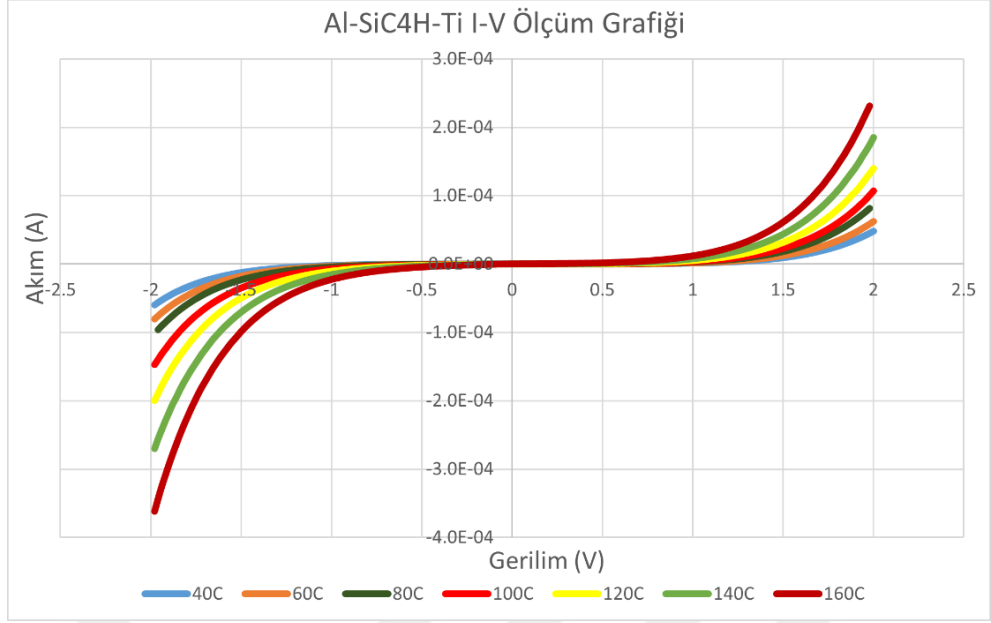
4.2 Sıcaklığa Bağlı Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri

Bu tez çalışmasında Al/4H SiC Schottky diyotun bazı temel elektriksel parametreleri akım-gerilim (I-V), ölçümlerinden faydalanılarak incelendi.

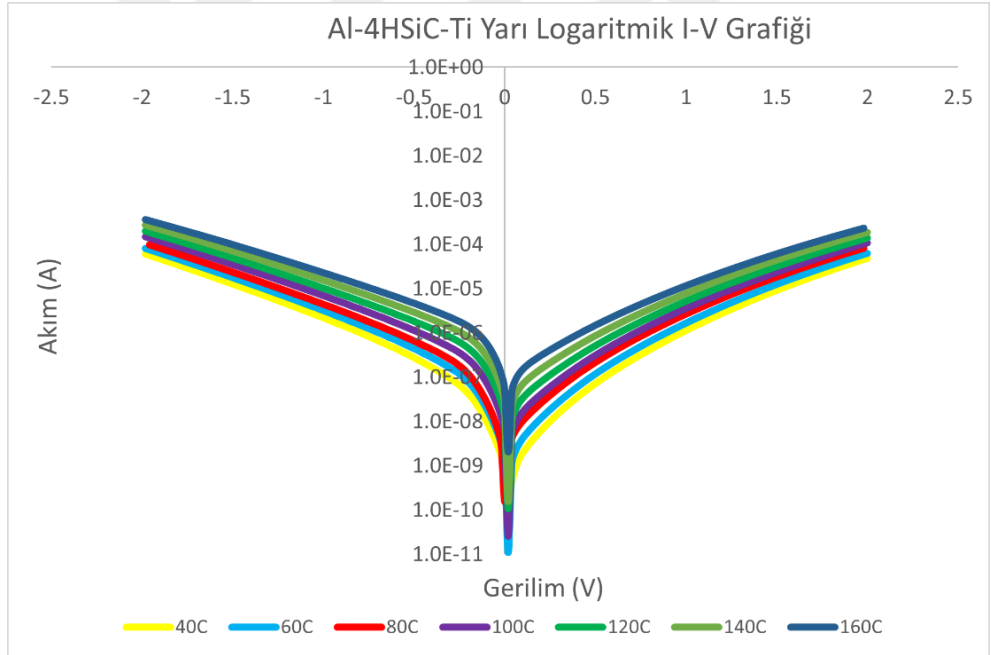
Schottky diyotlarda, akım-iletim mekanizmalarının hangilerinin etkili olduğunu açıklamak oldukça zordur (Kar ve diğ., 1980, 1982). TE teorisi, termiyonik alan emisyonu (TAE) teorisi, termiyonik emisyon-difüzyon teorisi (TED), çok katlı tünelleme teorisi, difüzyon teorisi, alan emisyonu (AE) teorisi, T_0 etkili iletim teorisi, yaratılma-yeniden birleşme teorisi ve azınlık taşıyıcı enjeksiyonu teorisi gibi farklı akım-iletim mekanizmaları MY Schottky diyotlarda etkili olabilir. Oda sıcaklığında elde edilen I-V karakteristikleri diyotun akım iletim mekanizmasının belirlenmesi için yeterli olmaz. Bu nedenle geniş sıcaklık aralığında diyotun akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi ve I-V ölçümlerinden yararlanarak akım-iletim mekanizmalarının belirlenip, engel oluşumunun incelenmesi mümkün olur. Baskın akım iletim mekanizması, yarıiletken ile metal arasında istemeden oluşabilecek dielektrik yüzeyin özelliğine, yüzey hazırlama işlemlerine, yarıiletkenin safsızlık yoğunluğuna, oluşan engelin biçimine, diyot üzerine uygulanan gerilim ve sıcaklık gibi farklı etmenlere bağlıdır (Sing ve diğ., 1990; Kanbur ve diğ., 2005 ; Yiğiterol ve diğ., 2018)

Al-4H SiC-Ti aygıtının -2V ile +2V aralığındaki elektriksel ölçümü alındı. Bu ölçüm 40 °C' den başlanarak 20'şer derece artırılarak gerçekleştirildi. Ölçüm sonucunda elde edilen verilerden Şekil 4.4'deki grafik çizildi. Grafik incelendiğinde Al-4H SiC-Ti diyotunun Schottky davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır.

Al-4H SiC-Ti aygıtının -2V ile +2V aralığında alınan elektriksel ölçüm sonuçlarına göre çizilen yukarıdaki grafiğin yarı-logaritmik $\ln(I)$ -V grafiği Şekil 4.5'de yer almaktadır. Grafik diyotumuzun Schottky diyot özelliğe sahip olduğunu göstermektedir.

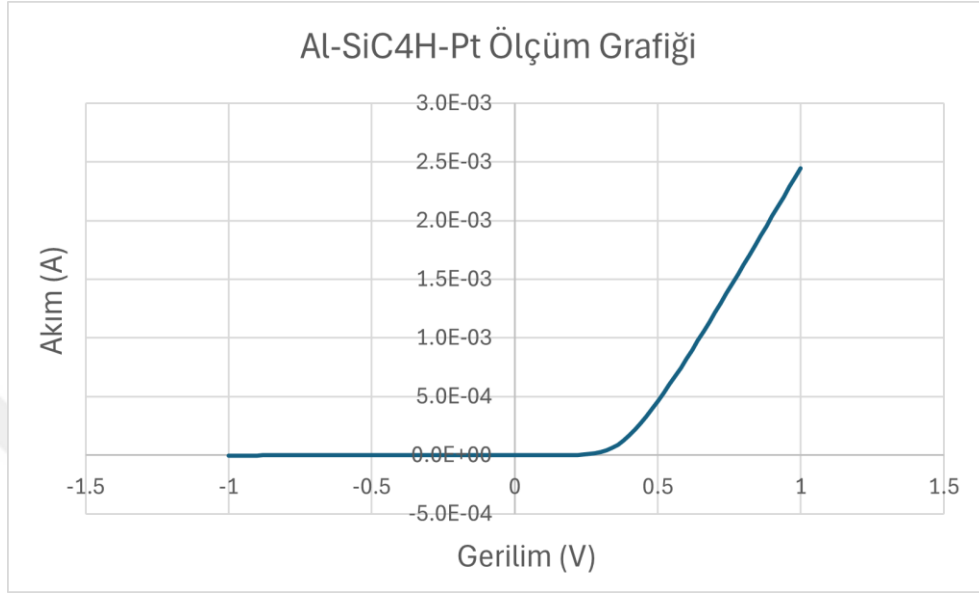


Şekil 4.4 Al-4H SiC-Ti aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen I-V grafiği

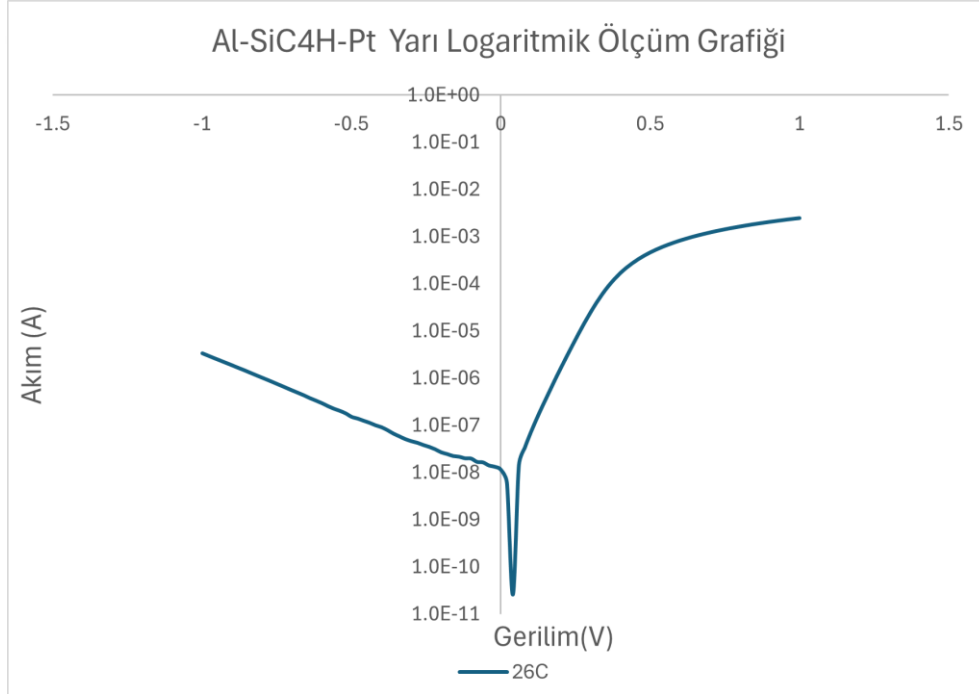


Şekil 4.5 Al-4H SiC-Ti aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen yarı-logaritmik $\ln(I)$ -V karakteristikleri

Al-SiC₄H-Pt aygıtının -1V ile +1V aralığındaki elektriksel ölçümü alındı. Bu ölçümde sadece 26°C’deki değer dikkate alındı. Ölçüm sonucunda elde edilen verilerden Şekil 4.6 ‘daki I-V grafiği çizildi. Bu grafiğe göre elde edilen diyot doğrultucu özellik göstermiştir. Yine aynı verilerden yararlanarak şekil 4.7’deki yarı logaritmik grafik çizildi.

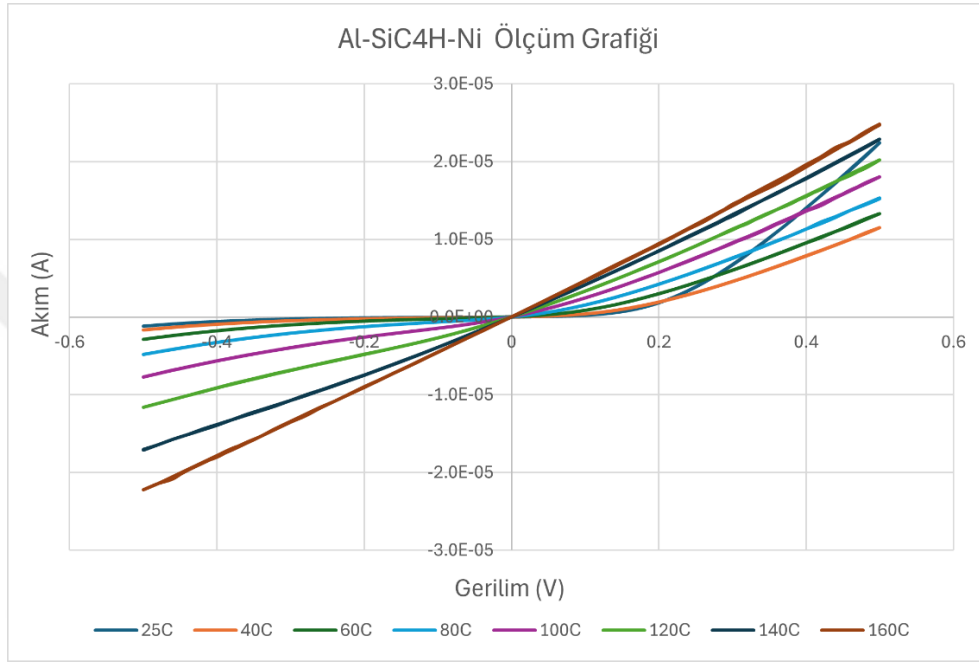


Şekil 4.6 Al-4H SiC-Pt aygıt için elde edilen I-V grafiği

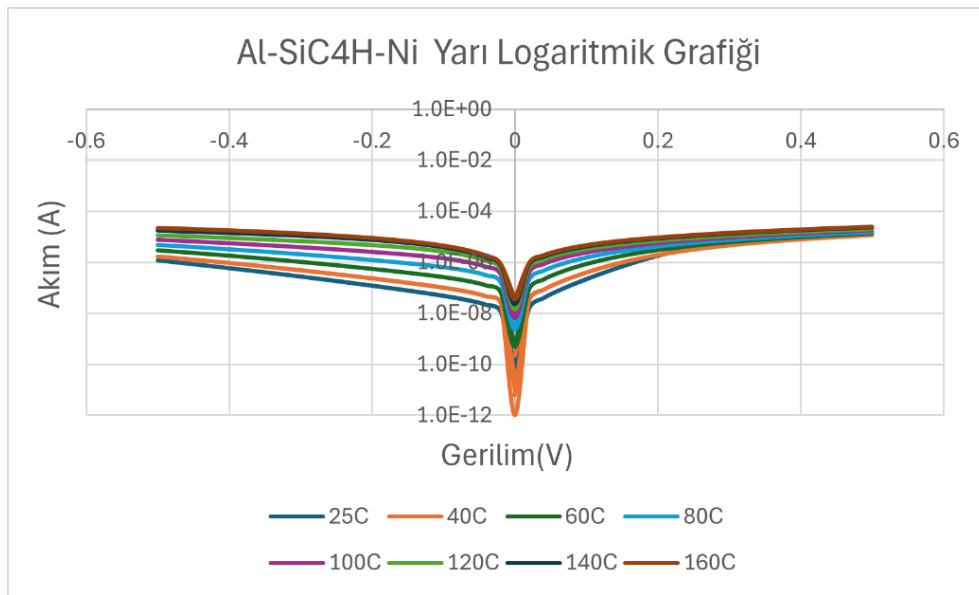


Şekil 4.7 Al-4H SiC-Pt aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen yarı-logaritmik $\ln(I)$ -V karakteristikleri

Al-4H SiC- Ni aygıtının -0,5 V ile +0,5 V aralığındaki elektriksel ölçümü 25 °C – 160 °C sıcaklık aralığında alındı. Ölçüm sonucunda elde edilen verilerden Şekil 4.8 ‘deki I-V grafiği çizildi. Bu grafiğe göre 100 °C ve sonraki sıcaklıklarda Al-4H SiC- Ni aygıtının doğrusal bir I-V görüntüsü oluşmuştur. Düşük sıcaklıklarda ise Schottky davranış gözlemlenmiştir. Yine aynı verilerden yararlanarak şekil 4.9’daki yarı logaritmik grafik çizildi.

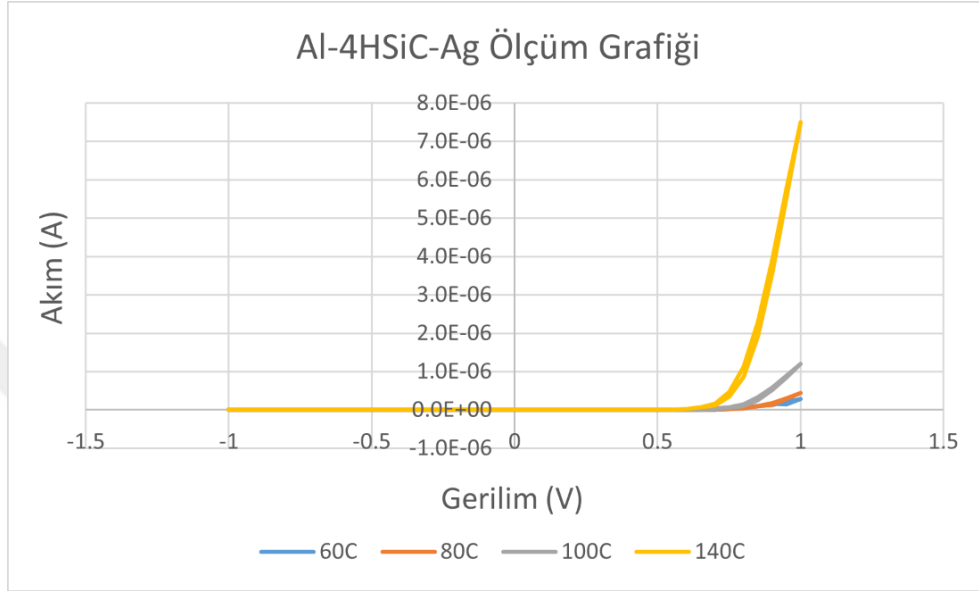


Şekil 4.8 Al-4H SiC-Ni aygıt için elde edilen I-V grafiği

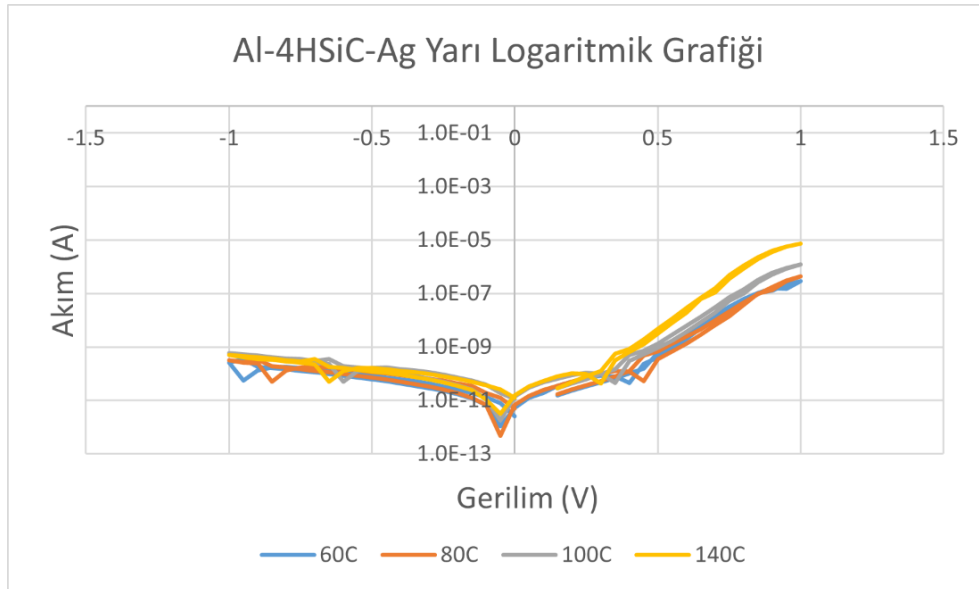


Şekil 4.9 Al-4H SiC-Ni aygıt için elde edilen In (I) -V grafiği

Al-4H SiC-Ag aygıtının -1V ile +1V aralığındaki elektriksel ölçümü alındı. Bu aygıtın elektriksel ölçümleri 60 °C, 80 °C, 100 °C ve 140 °C sıcaklıklarında alındı. Ölçüm sonucunda elde edilen verilerden Şekil 4.10'daki I-V grafiği çizildi. Bu grafiğe göre sıcaklık artışı ile 1V da akım değerlerinin yükseldiği görülmektedir ve tüm sıcaklıklarda Schottky davranış gözlenmiştir. Yine aynı verilerden yararlanarak şekil 4.11'deki yarı logaritmik grafik çizildi.

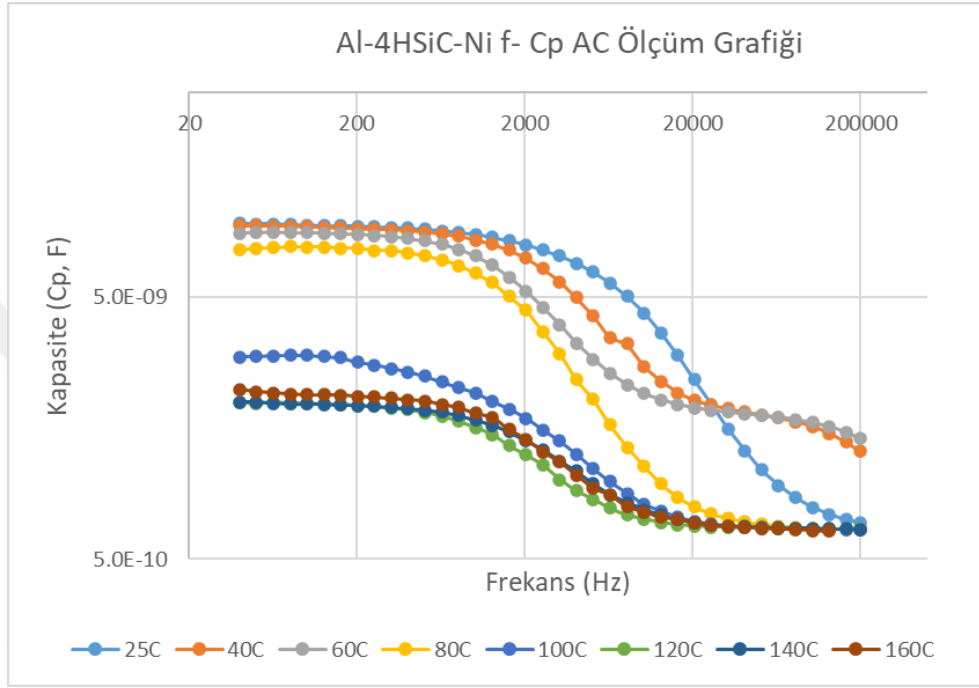


Şekil 4.10 Al-4H SiC-Ag aygıt için elde edilen I-V grafiği

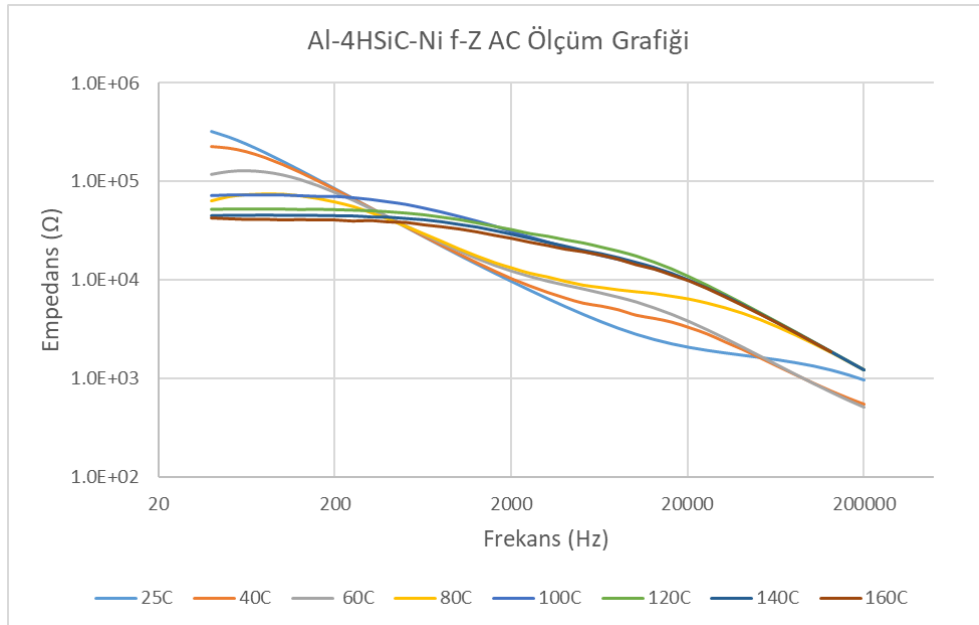


Şekil 4.11 Al-4H SiC-Ag aygıt için farklı sıcaklıklarda elde edilen yarı-logaritmik In(I)-V karakteristikleri

Al-4H SiC-Ni aygıtı için AC ölçümleri 40 Hz ile 200 kHz frekans aralığında 0,1 Volt alternatif gerilim uygulayarak oda sıcaklığı ile 160 °C arasında alındı. Şekil 4.12’de Al-4H SiC-Ni aygıtının frekansa bağlı kapasite (C_p) grafiği verilmiştir. Her sıcaklıkta kapasitenin düşük frekanslarda yaklaşık olarak sabit kaldığı ve yüksek frekanslarda ise kapasitenin frekansla beraber düştüğü gözlenmiştir. Şekil 4.13’de Al-4H SiC-Ni aygıtının ferakansa bağlı empedans (Z) grafiği verilmiştir.



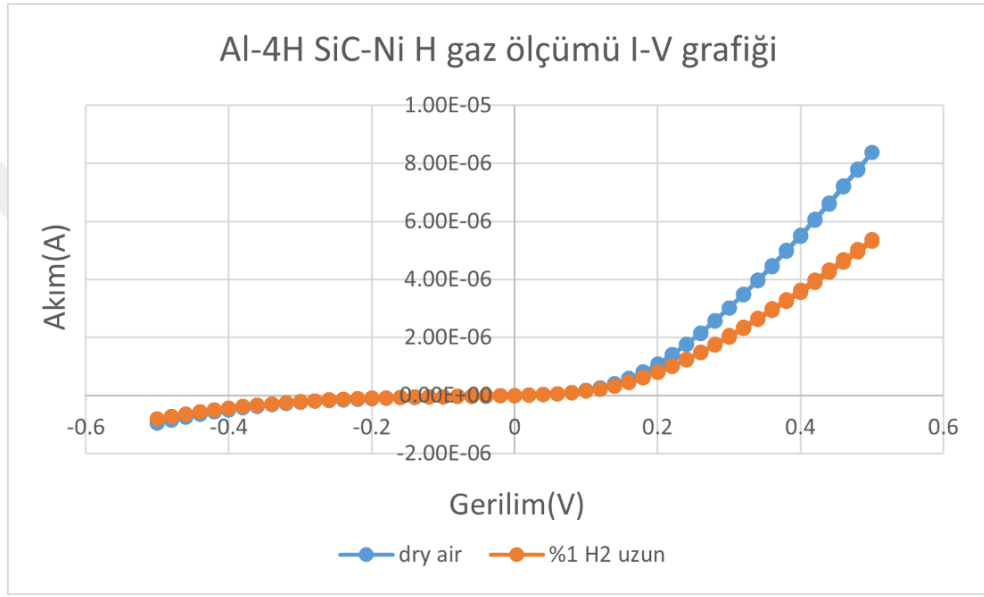
Şekil 4.12 Al-4H SiC-Ni aygıtı için elde edilen frekansa bağlı C_p ölçüm grafiği



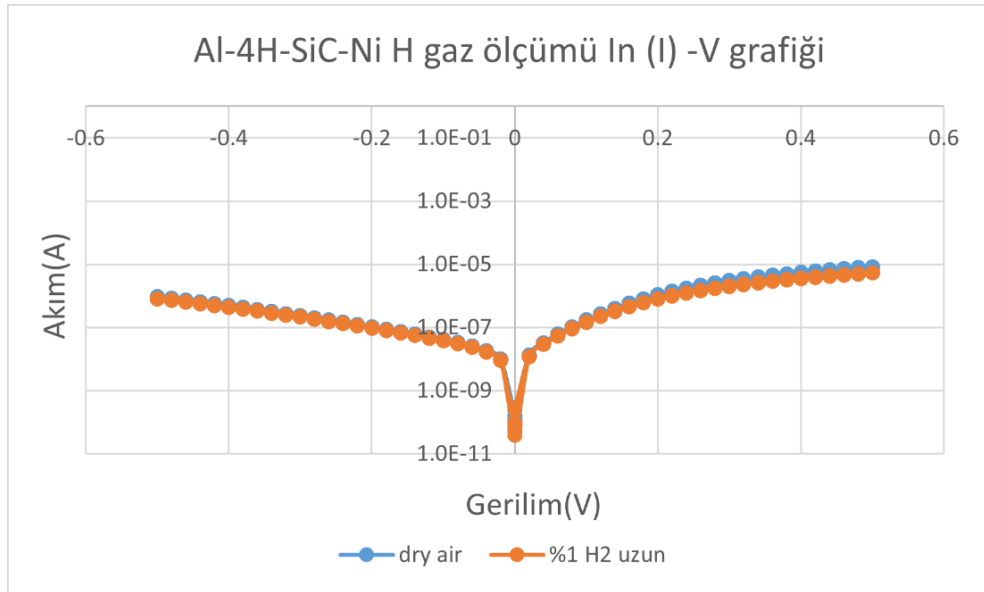
Şekil 4.13 Al-4HSiC-Ni aygıtı için elde edilen frekansa bağlı Z ölçüm grafiği

4.3 Hidrojen Gaz Sensör Ölçümleri

Nanosensör araştırma laboratuvarımızda metal elektrotlarını kaplayarak ürettiğimiz Al-4H SiC-Ni aygıtının -0,5V ile +0,5V gerilim aralığında yüksek saflıkta kuru hava ortamında ve %1 hidrojen içeren ortamda ölçüm alındı. Şekil 4.14’de I-V grafiğinde görüldüğü gibi aynı uygulanan voltajlar için %1 H₂ konsantrasyon ortamındaki akımın kuru hava altındaki akımdan daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda aynı uygulanan gerilim dikkate alınarak sensör tepkisinin 0,56 olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.15’de cihaz oda sıcaklığında farklı gaz ortamlarındaki yarı-logaritmik I-V grafiğinde Schottky davranışı göstermektedir.

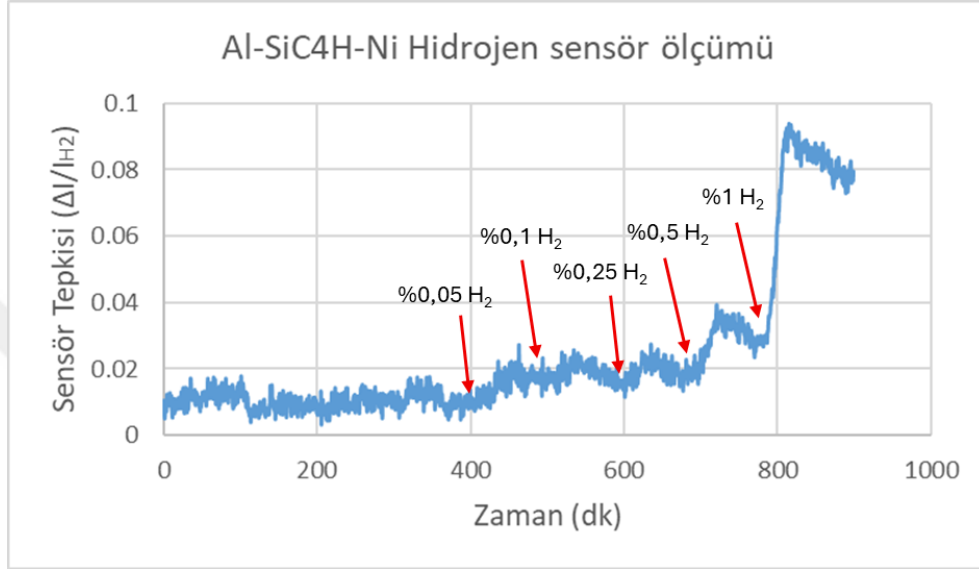


Şekil 4.14 Al-4H SiC-Ni aygıtının kuru havadaki ve %1 hidrojen ortamında alınan I-V grafiği



Şekil 4.15 Al-4H SiC-Ni aygıtının kuru hava ve %1 hidrojen ortamında alınan ln(I) -V grafiği

Al-4H SiC-Ni aygıtı için konsantrasyona bağılı sensör ölçümü yapmak için sabit 0,5 V gerilim uygulandı ve sürekli akım ölçümü yapıp kaydedildi. Bu ölçümler kullanılarak ve denklem 3.1 ile sensör tepkisi hesaplandı. Şekil 4.16'da Al-4H SiC-Ni aygıtının farklı hidrojen konsantrasyonuna karşı zamana bağılı sensör tepkisi grafiğı verilmiştir. Düşük konsantrasyonlarda hidrojene duyarlılığının olmadığını ve %0,5 hidrojen konsantrasyonundan sonra belirgin bir sensör tepkisi elde edildi.



Şekil 4.16 Al-4H SiC-Ni aygıtının farklı hidrojen konsantrasyonuna karşı zamana bağılı sensör tepkisi grafiğı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Nanosensör araştırma laboratuvarımızda hazır olarak satın alınan SiC alttaşın (wafer) alt kontağını oluşturmak için Alüminyum (Al) kaplandı. Üst kontak oluşturmak için de üzerine Titanyum (Ti), Platin (Pt), Nikel (Ni) ve Gümüş (Ag) metalleri kaplanarak farklı tiplerde Schottky bariyer aygıtları elde edildi. Metal kaplama işlemleri DC saçtırma (sputter) yöntemiyle yapıldı.
- Gerekli temizleme ve kaplama prosedürlerini gerçekleştirdikten sonra elde ettiğimiz Al-4H SiC-Ti aygıtının elektriksel ölçümleri alındı ve aygıtın Schottky davranış gösterdiği ve yarı logaritmik I-V grafiğini incelediğimizde ise simetrik bir davranış gösterdiği anlaşıldı.
- Al-4H SiC-Pt aygıtının elektriksel ölçümlerini alıp I-V grafiği ve yarı logaritmik I-V grafiği çizildi. Oda sıcaklığında elde ettiğimiz sonuç aygıtın tek taraflı çalıştığı ve Schottky diyot özellik gösterdiği dir.
- Al-4H SiC-Ni aygıtının hem DC hem de AC elektriksel ölçümlerini sıcaklığa bağlı olarak alındı. DC ölçümler sonucu elde ettiğimiz verilerden çizilen I-V grafiği incelediğinde aygıtın düşük sıcaklıklarda Schottky diyot gibi davrandı ve yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ise omik davranış gösterdi. AC ölçümlerden elde edilen verilerden frekansa bağlı empedans ve kapasitenin sıcaklığa bağlı davranışları incelendi.
- Al-4H SiC-Ag aygıtının elektriksel ölçümlerini alıp I-V grafiği ve yarı logaritmik I-V grafiği çizildi. Grafikleri incelediğimizde aygıtın tüm sıcaklıklarda Schottky diyot davranışı göstermiştir.
- DC saçtırma yöntemiyle elde ettiğimiz Al-4H SiC-Ni aygıtının hidrojen algılama özellikleri de incelenmiştir. %1 H₂ konsantrasyonu altında çok yüksek olmayan bir sensör davranışı gösterdi. Hidrojen konsantrasyonu etkisi hakkında daha ayrıntılı çalışmaya ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- Adhikari, B., & Majumdar, S.** (2004). Polymers in sensor applications. *Progress in polymer science*, 29(7), 699-766.
- Ak, M.** (2020). Au/Al₂O₃/N-Si Schottky Diyotların Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Frekansa Bağlı İncelenmesi (Doctoral Dissertation).
- Boyraz, Z.,** Platin Nanotüp Üretimi, Karakterizasyonu ve Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi, 2023, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ching, W. Y., Xu, Y. N., Rulis, P., & Ouyang, L.** (2006). The electronic structure and spectroscopic properties of 3C, 2H, 4H, 6H, 15R and 21R polymorphs of SiC. *Materials Science and Engineering: A*, 422(1-2), 147-156.
- Codreanu, C., Avram, M., Carbunescu, E., & Iliescu, E.** (2000). Comparison of 3C-SiC, 6H-SiC and 4H-SiC MESFETs performances. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 3(1-2), 137-142.
- Comini, E., Baratto, C., Faglia, G., Ferroni, M., Vomiero, A., & Sberveglieri, G.** (2009). Quasi-one dimensional metal oxide semiconductors: Preparation, characterization and application as chemical sensors. *Progress in Materials Science*, 54(1), 1-67.
- Doğan, S., Teke, A., Morkoc, H.,** III-V Nitrides and Silicon Carbide as Optoelectronic Materials. in Gupta, M. C., & Ballato, J. (Eds.). (2018). *The handbook of photonics*. CRC press.
- Holland, L.** (1967). *Vacuum Deposition of Thin Films*. Chapman and Hall.
- Hübert, T., Boon-Brett, L., Black, G., & Banach, U.** (2011). Hydrogen sensors—a review. *Sensors and actuators B: Chemical*, 157(2), 329-352.
- Kanbur, H., Altındal, Ş., Tataroğlu, A.,** 2005. The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 252(5), 1732-1738.
- Kar, S., Ashok, S. and Fonash, S.,** 1980. Evidence of Tunnel-Assisted Transport in Nondegenerate MOS and Semiconductor-Oxide-Semiconductor Diodes at Room Temperature. *J. Appl. Phys.*, 51, 3417-3421.
- Kar, S., Panchal, K.M., Brattacharya, S. and Varma, S.,** 1982. On The Mechanism of Carrier Transport In Metal -Thin – Oxide – Semiconductor Diodes On Polycrystalline Silicon. *IEEE Trans. On Electron. Devices*, 29, 1839-1845.
- Kilinc, N., Sanduvac, S., & Erkovan, M.** (2022). Platinum-Nickel alloy thin films for low concentration hydrogen sensor application. *Journal of Alloys and Compounds*, 892, 162237.
- Kimoto, T.; Cooper, J.A.** *Fundamentals of Silicon Carbide Technology*; John Wiley & Sons: Singapore, 2014; p. 20.
- La Via, F., Camarda, M., & La Magna, A.** (2014). Mechanisms of growth and defect properties of epitaxial SiC. *Applied Physics Reviews*, 1(3), 031301.
- Magafas, L., & Kalomiros, J.** (2007). Optimization of Al/a-SiC: H optical sensor device by means of thermal annealing. *Microelectronics journal*, 38(12), 1196-1201.

- Masri, P.** (2002). Silicon carbide and silicon carbide-based structures: The physics of epitaxy. *Surface science reports*, 48(1-4), 1-51.
- Matsunami, H.** (2020). Fundamental research on semiconductor SiC and its applications to power electronics. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 96(7), 235-254.
- Mattox, D. M.** (2010). *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Elsevier.
- Mönch, W.** (1994). Metal-semiconductor contacts: electronic properties. *Surface Science*, 299, 928–944.
- Neamen, D. A.** (2012). *Semiconductor Physics And Devices*. Birleşik Krallık: McGraw-Hill Education.
- Ohring, M.** (2002). *Materials Science of Thin Films* (2nd ed.). Academic Press.
- Pezoldt, J., Förster, C., Weih, P., & Masri, P.** (2001). Electrical characterization of SiC/Si heterostructures with Ge-modified interfaces. *Applied Surface Science*, 184(1–4), 79–83.
- Pizzagalli, L., Cicero, G., & Catellani, A.** (2003). Theoretical investigations of a highly mismatched interface: SiC/Si (001). *Physical Review B*, 68(19), 195302.
- Ren, F.; Zopler, J.C.** *Wide Band Gap Electronic Devices*; World Scientific Publishing: Singapore, 2003.
- Roccaforte, F., Fiorenza, P., Greco, G., Nigro, R. L., Giannazzo, F., Iucolano, F., & Saggio, M.** (2018). Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices. *Microelectronic Engineering*, 187, 66-77.
- Sefaoğlu, A.** (2008), Ni/n-6H SiC Schottky Diyodunda Bazı Elektriksel Özelliklerin Sıcaklıkla Değişiminin İncelenmesi , Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- She, X., Huang, A. Q., Lucia, O., & Ozpineci, B.** (2017). Review of silicon carbide power devices and their applications. *IEEE transactions on industrial electronics*, 64(10), 8193-8205.
- Singh, A., Reinhardt, K. C., & Anderson, W. A.** (1990). Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions. *Journal of applied physics*, 68(7), 3475-3483.
- Soo, M. T., Cheong, K. Y., & Noor, A. F. M.** (2010). Advances of SiC-based MOS capacitor hydrogen sensors for harsh environment applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 151(1), 39-55.
- Sze, S. M.** (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. United Kingdom: Wiley.
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K.** (2021). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons.
- Sze, S. M., Lee, M.** (2013). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. Hindistan: Wiley.
- Şennik, E., Colak, Z., Kılınç, N., & Öztürk, Z. Z.** (2010). Synthesis of highly-ordered TiO₂ nanotubes for a hydrogen sensor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(9), 4420-4427.
- Tan, S. O.** (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 977-989.
- Tasyurek, L. B., & Kilinc, N.** (2025). Hydrogen detection and electrical properties of titanium silicate Schottky diode fabricated by RF-magnetron sputtering method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 144, 738-745.
- Tasyurek, L. B., Isik, E., Isik, I., & Kilinc, N.** (2024). Enhancing the performance of TiO₂ nanotube-based hydrogen sensors through crystal structure and metal electrode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 678-690.

- Tong, L., Mehregany, M., & Matus, L. G.** (1992). Mechanical properties of 3C silicon carbide. *Applied physics letters*, 60(24), 2992-2994.
- Trinchi, A., Kandasamy, S., & Wlodarski, W.** (2008). High temperature field effect hydrogen and hydrocarbon gas sensors based on SiC MOS devices. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 133(2), 705–716.
- Vivona, M., Giannazzo, F., & Roccaforte, F.** (2021). Materials and processes for Schottky contacts on silicon carbide. *Materials*, 15(1), 298.
- Vossen, J. L., & Kern, W. (Eds.)**. (1991). *Thin Film Processes*. Academic Press.
- Yığiterol, F., Güllü, H.H., Yıldız, D.E.**, (2018). Influence of Si₃N₄ layer on the electrical properties of Au/n-4H SiC diodes. *Bulletin of Materials Science*, 41 (66), 66-9



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Ad-Soyad : Lutfi Uğur KENDİRLİ

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2014, İnönü Üniversitesi, Eğitim Fakültesi,
Fen Bilgisi Öğretmenliği

Yüksek Lisans (Tezsiz) : 2022, Hoca Ahmet Yesevi Uluslararası Türk-Kazak
Üniversitesi, İnsan Ve Toplum Bilimleri Fakültesi,
Eğitim Yönetimi ve Denetimi

MESLEKİ DENEYİM:

2018 – devam ediyor : MEB’ de çalışıyor.

YABANCI DİLLER : İngilizce

SUNULAN KONGRELER :

9.Uluslararası Hidrojen Teknolojileri Kongresi (IHTEC-2025) , İzmir / Türkiye

YÜKSEK LİSANS VEYA DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

Kendirli, L.U., Kılınç, N., Taşyürek, L.B. (2025, May). SiC Schottky Diodes:
Electrical Characterization and Gas Sensor Applications. 9th International Hydrogen
Technologies Congress – (IHTEC 2025)