

**Au/n-4H-SiC (MS) SCHOTTKY DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE
ELEKTRİKSEL KAREKTERİSTİKLERİNİN FREKANSA BAĞLI
İNCELENMESİ**

Ömer SEVGİLİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2013
ANKARA**

Ömer SEVGİLİ tarafından hazırlanan “Au/n-4H-SiC (MS) SCHOTTKY DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL KAREKTERİSTİKLERİNİN FREKANSA BAĞLI İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

Fizik, G. Ü.

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik, G. Ü.

Doç. Dr. Abdullah YILDIZ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Y. B. Ü.

Tez Savunma Tarih:01 / 08 / 2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesi onanmıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı bildiririm.

Ömer SEVGİLİ

**Au/n-4H-SiC (MS) SCHOTTKY DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE
ELEKTRİKSEL KAREKTERİSTİKLERİNİN FREKANS BAĞLI
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ömer SEVGİLİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2013**

ÖZET

Bu çalışmada, Au/n-4HSiC (MS) Schottky engel diyotları hazırlandı ve bunların temel elektriksel karakteristikleri oda sıcaklığında frekansa bağlı kapasitans/iletkenlik-voltaj (C-V ve G/w-V) verileri kullanılarak incelendi. Katılanan verici atomların (N_D) yoğunluğu, Fermi enerji seviyesi (E_F), ve potansiyel engel ($\Phi_{b(C-V)}$) yüksekliği değerleri geniş bir frekans aralığında (0,7 kHz-1MHz) ölçülen ters gerilimdeki C^{-2} -V eğrilerinden elde edildi. Hem C hem de G/w değerleri oldukça frekansa bağlı olup artan frekansla üstel olarak azalmaktadır. C ve G/w değerlerinde özellikle tüketim bölgesindeki bu değişiklikler, metal yarıiletken arasında yerleşmiş olan arayüzey durumlarının (N_{ss}) varlığına atfedildi. Seri direnç (R_s)-logf grafiği, C ve G/w değerleri kullanılarak elde edildi ve artan frekansla azaldığı gözlemlendi. Yüksek-düşük frekans kapasitans (C_{HF} - C_{LF}) değerleri kullanılarak elde edilen N_{ss} -V grafiğinde bir pik gözlemlendi. Özellikle yüksek frekanslardaki C-V eğrilerinde ileri voltajlarda gözlenen bükülme R_s değerine atfedildi.

Bilim kodu :202.1.47
Anahtar kelimeler :Au/n-4H-SiC (MS) Schottky diyotları; Frekansa bağı
C ve G; Seri direnç; Yüzey durumlarının yoğunluğu
Sayfa adedi :49
Tez yöneticisi : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

**THE PREPARATION OF Au/n-4H-SiC (MS) SCHOTTKY DIODES AND
THE INVESTIGATION THEIR ELECTRICAL CHARACTERISTICS AS
FUNCTION OF FREQUENCY**

(M. Sc. Thesis)

Ömer SEVGİLİ

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2013

ABSTRACT

In this study, Au/n-type 4H-SiC Schottky diodes were fabricated and their main electrical characteristics have been investigated as function of frequency by using the capacitance/conductance-voltage (C-V and G/w-V) measurements at room temperature. The doping density of donor atoms (N_D), Fermi energy level (E_F), and barrier height ($\Phi_{b(C-V)}$) values were obtained from the reverse bias C^{-2} -V plots in the wide frequency range of 0,7 kHz-1MHz. Both C and G/w values were found as strongly function of frequency and decrease with increasing frequency as almost exponential. The changes in C and G/w values in depletion region were attributed to the particular density distribution of surface states (N_{ss}) between metal and semiconductor. The series resistance (R_s)-logf plots were also obtained by using the C and G/w data and decreases with increasing frequency. The voltage dependent of N_{ss} was also obtained from high-low frequency capacitance (C_{HF} - C_{LF}) method and shows a peak. Especially the concave curvature in high frequency C-V plots for forward biases was attributed to the value of R_s .

Science Code :202.1.47
Keywords :Au/n-4H-SiC (MS) Schottky diodes; Frequency dependence of C and G; Series resistance; Density distribution of surface states
Page number :49
Supervisor : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluşmasında her konuda yardımını esirgemeyen ve engin tecrübelerinden faydalandığım değerli tez danışmanı hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a ve deneysel tecrübelerini benden esirgemeyen, sabırla öğreten, manevi desteğini ve tez çalışmamın en iyi şekilde noksansız olması için uğraşan Umut AYDEMİR, Hüseyin TECİMER ve Ahmet KAYA' ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Laboratuarda bana manevi destekte bulunan sevgili arkadaşlarım Lütfiye ÖZKURT, H. İbrahim EFKERE, Emre ERBAY, Veysel BARAN, Yunus ÇAT' a ve diğer büyüklerim ve değerli arkadaşlarıma teşekkürlerimi bildiririm.

Ayrıca en önemli teşekkürlerimi, bana her zaman destek veren ve aldığım her kararda daima yanımda olan biricik aileme bildiririm.

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	4
2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapı	6
2.2. İdeal MIS Yapısı.....	7
2.3. MIS Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar	13
2.3.1. Arayüzey durumları.....	14
2.3.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri.....	17
2.3.3. Hareketli iyonlar	18
2.3.4. İyonlaşmış tuzaklar	18
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	19
3.1. Kristal Temizleme	19
3.2. Au/n-4HSiC Yapısının Hazırlanması.....	20
3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi.....	22
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	24
4.1. Giriş.....	24

	Sayfa
4.2. Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri	24
4.3. Kapasite-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/w-V) Karakteristikleri	27
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	42
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4. 1. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısı için farklı frekanslarda deneysel olarak elde edilen N_D , V_o , E_F , $\Phi_{b(C-V)}$ değerleri.....	39

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için doğrultucu ve omik kontak durumundaki enerji-bant diyagramı.....	5
Şekil 2. 2. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının şematik gösterimi.....	6
Şekil 2. 3. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken.....	7
Şekil 2. 4. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	10
Şekil 2. 5. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması (a) Yığılım (b) Tüketim (c) Terslenim.....	11
Şekil 2. 6. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	14
Şekil 2. 7. MIS yapısının eşdeğer devresi a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.....	17
Şekil 3. 1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi.....	20
Şekil 3. 2. (a) Omik ve (b) Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler.....	21
Şekil 3. 3. Au/n-4H-SiC (MS) yapının şematik gösterimi.....	22
Şekil 3. 4. C-V, G/w-V ve I-V ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği.....	23
Şekil 4. 1. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının $\ln(I)-V$ grafiği.....	26
Şekil 4. 2. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının $\ln(I)-\ln(V)$ grafiği.....	26
Şekil 4. 3. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının $\log R_i-V$ grafiği.....	27
Şekil 4. 4. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının (a) düşük frekans (b) yüksek frekans C-V eğrileri.....	28
Şekil 4. 5. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının (a) düşük frekans (b) yüksek frekans G/w -V eğrileri.....	29

Şekil	Sayfa
Şekil 4. 6. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının farklı voltajlarda (a) C-f ve (b) G/w-f eğrileri.....	31
Şekil 4. 7. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının (a) yüksek frekans (b) düşük frekans R_i grafiği.....	33
Şekil 4. 8. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının farklı voltajlarda seri direncin frekansa bağlılığı.....	34
Şekil 4. 9. (a). Oda sıcaklığında 1 MHz'de Au/n-4H-SiC yapısının ölçülen (C_m) ve düzeltilmiş (C_c) kapasitans eğrisi.....	35
(b). Oda sıcaklığında 1 MHz'de Au/n-4H-SiC yapısının ölçülen (G_m/w) ve düzeltilmiş (G_c/w) iletkenlik eğrisi.....	36
Şekil 4. 10. Çeşitli frekanslarda Au/n-4H-SiC yapısının C^2 -V grafiği.....	38
Şekil 4. 11. Au/n-4H-SiC yapısının için düşük (0,7 kHz) ve yüksek (1MHz) C-V eğrisi.....	40
Şekil 4. 12. Au/n-4H-SiC yapısı için N_{ss} eğrisinin voltaja bağlı dağılım eğrisi.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Simgeler	Açıklama
A	Diyotun alanı
Au	Altın
A_{ox}	MIS doğrultucu kontağın alanı
Å	Angstrom
A*	Richardson sabiti
A**	Etkin Richardson sabiti
C	MIS yapının kapasitansı
C_c	Düzeltilmiş kapasitans
Cu	Bakır
C_{ma}	Ölçülen kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın kapasitansı
Q_{sc}	Uzay yükü
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
d_{ox}	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
E	Enerji
E_c	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_i	Saf enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığının
E_V	Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
Fe	Demir
G_c	Düzeltilmiş iletkenlik
G_{ma}	Ölçülen iletkenlik
Hz	Frekans birimi (hertz)
I_o	Ters doyum akımı

Simgeler	Açıklama
k	Boltzmann sabiti
m_0	Elektron kütlesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
n	İdealite faktörü
N	Azot
N_c	İletkenlik bandındaki etin durum yoğunluğu
N_D	Katkılanan verici atomları
N_{ss}	Arayüzey durumları veya arayüzey tuzakları
R_s	Seri direnci
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
V_d	Diyot üzerine düşen gerilim
V_G	Metal plakaya uygulanan gerilim
V_{ox}	Yalıtkan üzerine düşen gerilim
Φ_b	Potansiyel engel
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_n	E_c ile E_F arasındaki enerji farkı
χ_s	Elektron yakınlığı
Ψ_B	E_F ile E_i arasındaki enerji farkı
Q_{sc}	Uzay yükü
Ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
ϵ_{ox}	Yalıtkan tabakasının dielektrik sabiti
ϵ_0	Uzayın geçirgenliği
$+Q_f$	Pozitif sabit oksit yükleri
$-Q_f$	Negatif sabit oksit yükleri

Simgeler **Q_n** **Ω** **w** **Kısaltmalar****ac****dc****C-V****G/w-V****I-V****M-S****MIS****MOS****SiC****TE****Açıklama**

Terslenim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü

Ohm

Açısal frekans

Açıklama

Alternatif Akım

Doğru Akım

Kapasitans-voltaj

İletkenlik-voltaj

Akım-voltaj

Metal-Yarıiletken

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken

Metal-Oksit-Yarıiletken

Silisyum karbür

Termiyonik emisyon teorisi

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken kontaklar veya diğer adıyla Schottky diyotlar hakkında ilk bulgular, 1874 yılında Braun'un [1] yarıiletkenler kristaller üzerine bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi metal kontakların doğrultucu doğasını keşfetmesiyle başlar [2]. 1931 de Wilson [3] katıların bant teorisine dayanan yarıiletkenlerin teorisini ilk kez formülize etti ve bu teori daha sonra metal-yarıiletken (M-S) kontaklara uygulandı. 1938 yılında M/S arayüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koydu ve bundan dolayı bu kontaklara bu bilim adamına atfen "Schottky diyotları" denilmeye başlandı [4]. 1938 yılında ise Schottky [5] ve Mott [6] birbirinden bağımsız olarak potansiyel engel (Φ_b) oluşumunun, metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farkın (Φ_m ve Φ_s) sonucu olduğunu belirttiler.

Bu gelişmeler esnasında katılar üzerinde yapılan araştırmalarda bazı katıların elektriği iyi ilettiği, bazılarının kısmen ve bazılarının da hiç iletmediği gözlemlendi ve bunlar sırasıyla *iletken*, *yarıiletken* ve *yalıtkan* (dielektrik) olarak gruplandırıldı. Genel olarak iletkenlik, iletim bandındaki (E_c) elektron ve valans bandındaki (E_v) deşik yoğunluğu ile bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının (E_g) genişliğine göre tanımlanabilir. Buna göre; iletim ve valans bandı iç-içe olan katılar iletken, aralarındaki fark yaklaşık 0,1-4,0 eV olanlar yarıiletken ve aralarındaki fark ≥ 4 eV olanlar da yalıtkan olmak üzere üç gruba ayrılır. İletkenliklerin iletkenliği 10^8 - 10^2 (Ωcm)⁻¹ ve yalıtkanların ise 10^{-8} - 10^{-18} (Ωcm)⁻¹ arasında değişmektedir. Taşıyıcı sayısı az, yasak enerji bandı yalıtkan ile iletken arasında bir bölgede ve iletkenliği 10^2 - 10^{-8} (Ωcm)⁻¹ arasında olan katılara da *yarıiletken* adı verilir. Silisyum, germanyum ve galyum arsenik gibi kristaller yarıiletkenlere örnek verilebilir. Yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak silisyumun doğada bol miktarda bulunması ve kristal yüzeyinde silisyum dioksit (SiO₂) gibi tabii yalıtkan tabakanın elde edilebilmesinden dolayı zaman içinde silisyum kullanımı hakim olmuştur. Silisyum dioksit kullanılarak Schottky diyotlar, kapasitörler, alan etkili transistörler, ve entegre devrelerin yapılması mümkün olmuştur [7]. Yarıiletkenlerde iletkenlik; genellikle sıcaklığa, elektrik alana, manyetik alana aydınlatma şiddetine ve safsızlık atomlarının yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde

değişir. Yarıiletkenlerin teknolojik aletlerde kullanılması, katıhal fiziğinin 20. yüzyıl teknolojisine getirdiği belki de en büyük katkıdır.

Yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bozunma, metal-yarıiletken arasında ve yasak enerji bölgesinde çok sayıda izinli enerji seviyesinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu izinli enerji seviyelerinin teorik olarak 10^{13} $eV^{-1}.cm^{-2}$ civarında olması beklenirken deneysel sonuçlar bunların 10^{12} $eV^{-1}.cm^{-2}$ ile 10^{14} $eV^{-1}.cm^{-2}$ civarında olduğunu göstermiştir [8]. Ayrıca metal-yarıiletken (MS) veya metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) gibi yapıların hazırlanması sırasında yarıiletken yüzeyi ne kadar temizlenirse temizlensin giderilemeyen ve yarıiletken kristal örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki bozukluklar sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Schockley ve Taam tarafından öne sürülen bu seviyelerin tümüne *arayüzey durumları* veya *arayüzey tuzakları* (N_{ss}) adı verilir. Arayüzey durumlarının yoğunluğunu elde etmek için çok sayıda deneysel ve teorik metot vardır ve bu metotların kendi aralarında bazı avantaj ve dezavantajları vardır [9,10]. Ancak bunların en pratik ve en hızlı olanı doğru ön gerilim akım-voltaj (I-V) sonuçlarından elde edilendir [11,12]. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ya da Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılarında M/S arayüzeyindeki yalıtkan tabakanın kalınlığı ~ 100 Å'den küçük ise bu MIS yapılar MIS tipi Schottky diyotlar denilir. Ancak bu yalıtkan tabaka 100 Å'den büyük olması durumunda yapı bir metal-oksit-yarıiletken (MOS) kondansatör gibi davranır. Bu yüzden bu MOS yapıların temel elektriksel karakteristiklerinin genelde frekansa veya sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerinden belirlenir [13,14]. Bu yapılar ilk kez J.L.Moll tarafından deneyleri de içeren çok sayıda makaleler yayınlanarak oluşturulmuştur [15]. Bu yapı, termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmuştur. Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılır [16].

MIS veya MOS tipi Schottky diyotların temel elektriksel parametreleri genelde frekansa veya sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerinden belirlenir [13,14]. Bu ölçüm metotlarından elde edilen

sonuçlara dayanarak yapıların özelliklerini etkileyen faktörler bulunmaya çalışılır. Bu faktörlerin başında M/S arayüzeyinde büyütülen yalıtkan tabakanın kalınlığı ve homojenliği, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde yerleşmiş arayüzey durumları, yapının seri direnci ve sıcaklığı gelmektedir. Bütün bu faktörler yarıiletken aygıtın ideal durumdan sapmasına neden olur. Bu yüzden hesaplamalarda bu faktörlerin dikkate alınması, sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaya yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada hazırlanan Au/n-4H-SiC (MS) yapılarının elektriksel karakteristikleri I-V, C-V ve G/w-V deneysel ölçüm metotları kullanılarak belirlendi. Ayrıca frekansa bağlı C-V ve G/w-V ölçümleri, seri direnç ve arayüzey durumlarının etkisi dikkate alınarak incelendi.

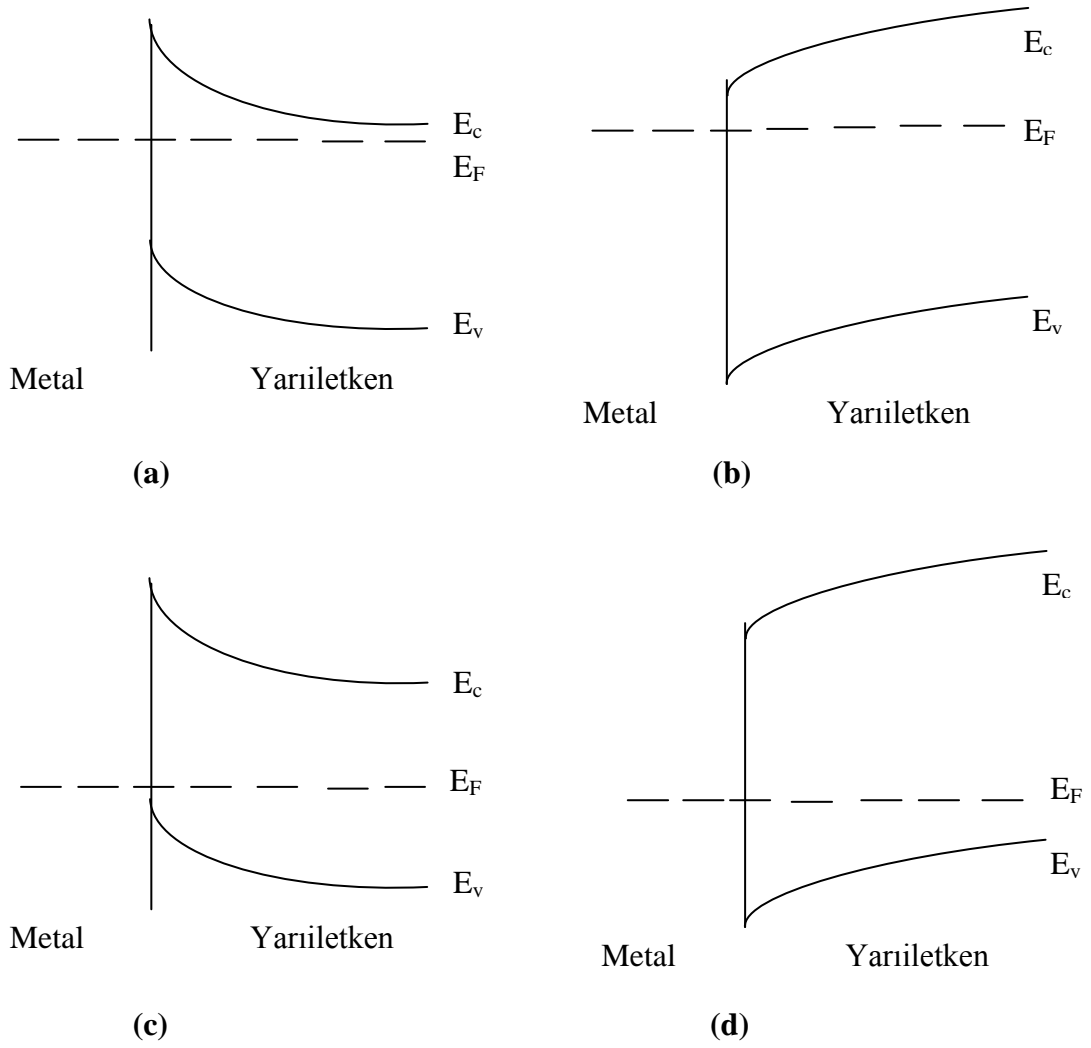
Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Schottky diyotların tarihsel gelişimi ve önemi üzerinde duruldu. İkinci bölümde, Schottky diyotların teorisi ve çalışma prensibi üzerinde duruldu. Üçüncü bölümde, Au/n-4H-SiC (MS) yapıların hazırlanması ile ilgili işlemler ve kullanılan deneysel ölçüm sistemleri hakkında bilgi verildi. Dördüncü bölümde, deneysel ölçümler sonucunda elde edilen grafik ve çizelgeler mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Beşinci bölümde ise varılan sonuçlarla ilgili yorumlar ve tartışmalar yapılmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

Metal-yarıiletken (MS) diyotların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi gerekir. Bu tür bir inceleme yapabilmek için kristale uygun kontaklar alınarak Schottky diyot yapısının elde edilmesi gerekir. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak metal veya alaşımın olabildiğince düşük bir dirençle atomik boyutta temas etmeleri istenir. Oluşturulan kontakın ideal olması için, kontak olarak kullanılan malzemelerin yüzeylerinin yeteri kadar temiz ve pürüzsüz olması gereklidir [17].

MS diyotların iyi bir doğrultma özelliği göstermesi için yarıiletken ve ona uygun saf metallerin seçimi iyi yapılmalıdır. Kullanılan yarıiletken malzemelerin yüzeylerinin yeteri kadar temiz ve pürüzsüz olması gereklidir. Bir metal, yarıiletken ile kontak edildiğinde, termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken kristal arasında yük geçişleri (difüzyon) olur. Metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri (E_F) eşit oluncaya kadar hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale doğru yük alışverişi gerçekleşir.

Metal-yarıiletken kontaklar doğrultucu ve omik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kontakın omik veya doğrultucu olmasını, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda da doğrultucu kontak oluşur [9,18]. Şekil 2.1'de metal/n-tipi ne metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için doğrultucu ve omik kontak oluşumu gösterilmiştir.



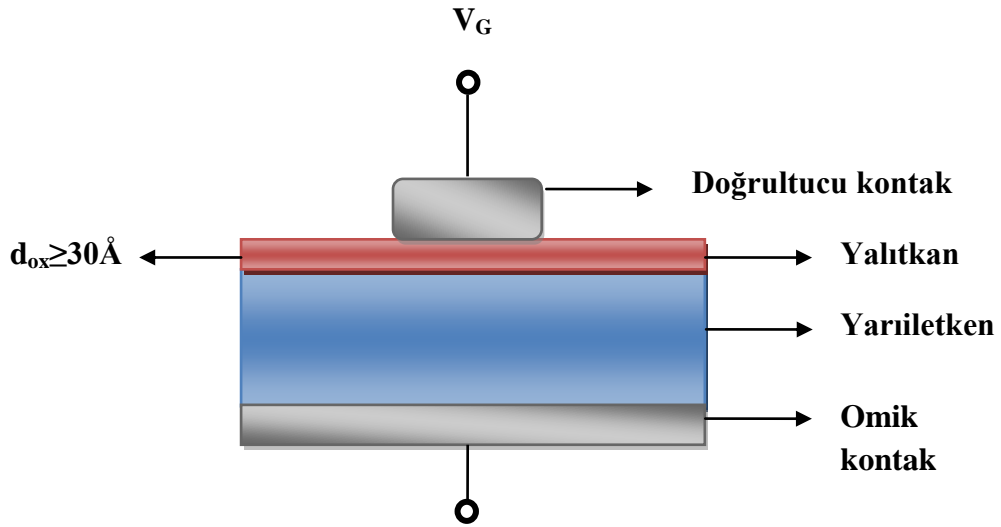
Şekil 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için doğrultucu ve omik kontak durumundaki enerji-bant diyagramı

n-tipi yarıiletken için: a) $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak) b) $\Phi_s > \Phi_m$ (omik kontak)

p-tipi yarıiletken için : c) $\Phi_m > \Phi_s$ (omik kontak) d) $\Phi_s > \Phi_m$ (doğrultucu kontak)

2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapı

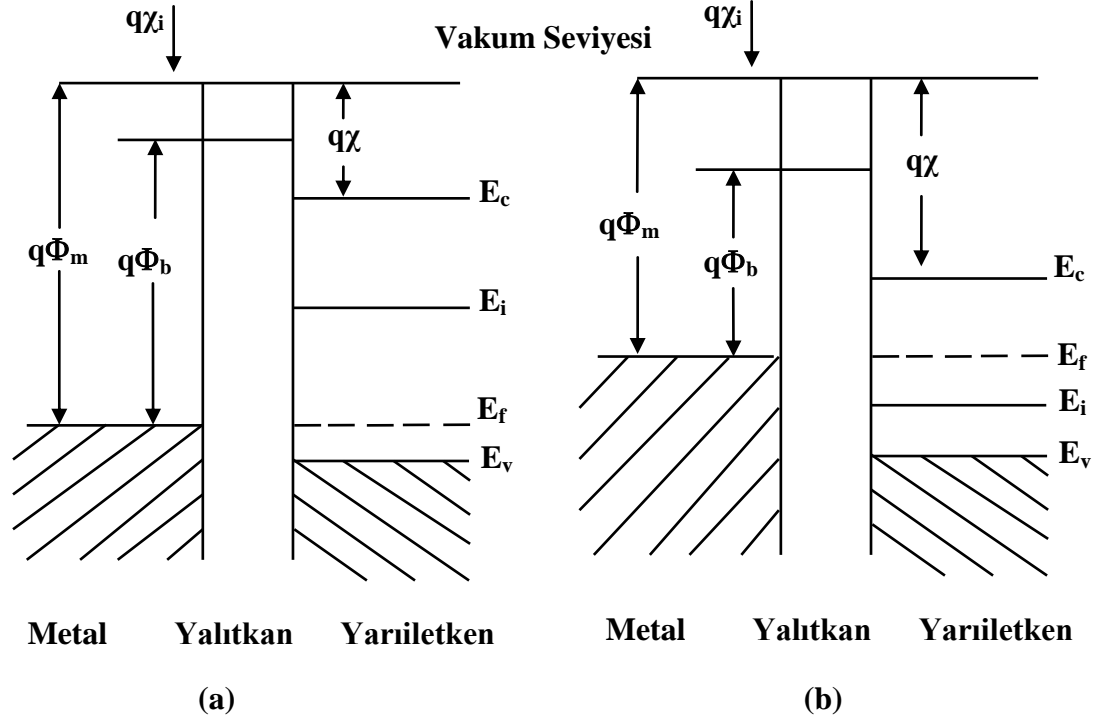
Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabaka ister deneysel yöntemlerle oluşturulsun ister doğal yolla oluşsun metal-yarıiletken (MS) yapısı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısına dönüştürür. Arada bir yalıtkan tabakanın varlığı metali yarıiletken sistemden ayırır ve böylece yarıiletkendeki arayüzey durumları metaldeki elektron durumlarından izole edilmiş olur [19]. Bu durumda arayüzey durumları yarıiletkenin Fermi seviyesi ile belirlenir. Şekil 2.2'de bir MIS yapı şematik olarak gösterilmiştir. Burada V_G metal plakaya dışarıdan uygulanan gerilim, d_{ox} yalıtkan oksit tabakanın kalınlığıdır. V_G gerilimi metal plaka omik kontağa göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhali kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan- yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir.



Şekil 2.2. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının şematik gösterimi

2.2. İdeal MIS Yapısı

İdeal bir MIS yapıda sıfır voltajdaki enerji-bant diyagramı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil2.3. $V=0$ da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı
(a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken

Bazı Temel Kavramlar

Fermi enerjisi (E_F): İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviye *Fermi enerjisi* olarak tanımlanır. n-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi iletim bandından itibaren ölçülürken p-tipinde ise valans bandından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç

duyulan minimum enerji miktarı olup Şekil 2.3’de referans olarak alınmıştır.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi katkılanan madde atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden dolayı Φ_s ’de değişen bir niceliktir.

Elektron yakınlığı (χ): Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanır.

İdeal bir MIS yapının özellikleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir [8,9,17,20,21]:

- Sıfır beslemde metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s arasında enerji farkı yoktur. Diğer bir deyişle Φ_{ms} iş fonksiyonu sıfırdır.

$$\text{n -tipi için; } \Phi_{ms} = \Phi_m - \left\{ \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right\} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{p -tipi için; } \Phi_{ms} = \Phi_m - \left\{ \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right\} = 0 \quad (2.2)$$

Burada χ yarıiletken elektron yakınlığı, E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve ψ_B ise Fermi enerji seviyesi (E_F) ile saf enerji seviyesi (E_i) arasındaki enerji farkıdır.

- Yalıtkan bant aralığı o kadar büyüktür ki, yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- Herhangi bir beslem altında yarıiletkende ve yalıtkana yakın metal yüzeyindeki yükler eşit ve fakat zıt yönlüdürler.
- Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz.

- DC beslem şartları altında yalıtkanına doğru taşıyıcı geçişi yoktur. Yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.

İdeal MIS yapıda yalıtkan tabakanın iletkenliği sıfırdır. Fakat gerçekte yeterli büyüklükte elektrik alan ve sıcaklık varsa iletkenlik gösterebilir. MIS Schottky engelli yapılarda yalıtkan tabakanın etkisi Card, Rhoderick [22] ve Fonash [23] tarafından araştırılmıştır.

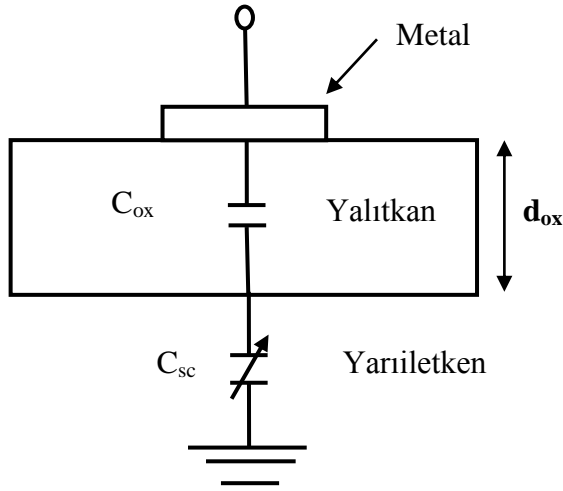
İdeal bir MIS yapıda metal elektroda gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük geçişleri oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü Q_{sc} oluşur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, yarıiletken metaldekine göre serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan gerilime bağlı olarak yük, ya uzay yükü bölgesini ya da arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer. Bunun için,

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.3)$$

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} yalıtkan üzerine düşen gerilim, ψ_s arayüzeydeki bant gerilimidir [20].

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur ve bu kapasitans MIS kapasitansı olarak adlandırılır. Bu kondansatörlerin özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasitans, arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük değişimler varsa MIS yapının kapasitansı

C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını vermektedir.



Şekil 2.4. MIS kapasitansının eşdeğer devresi

Şekil 2.4'deki eşdeğer devrenin çözümünde MIS kapasitansı aşağıdaki eşitlikle verilir.

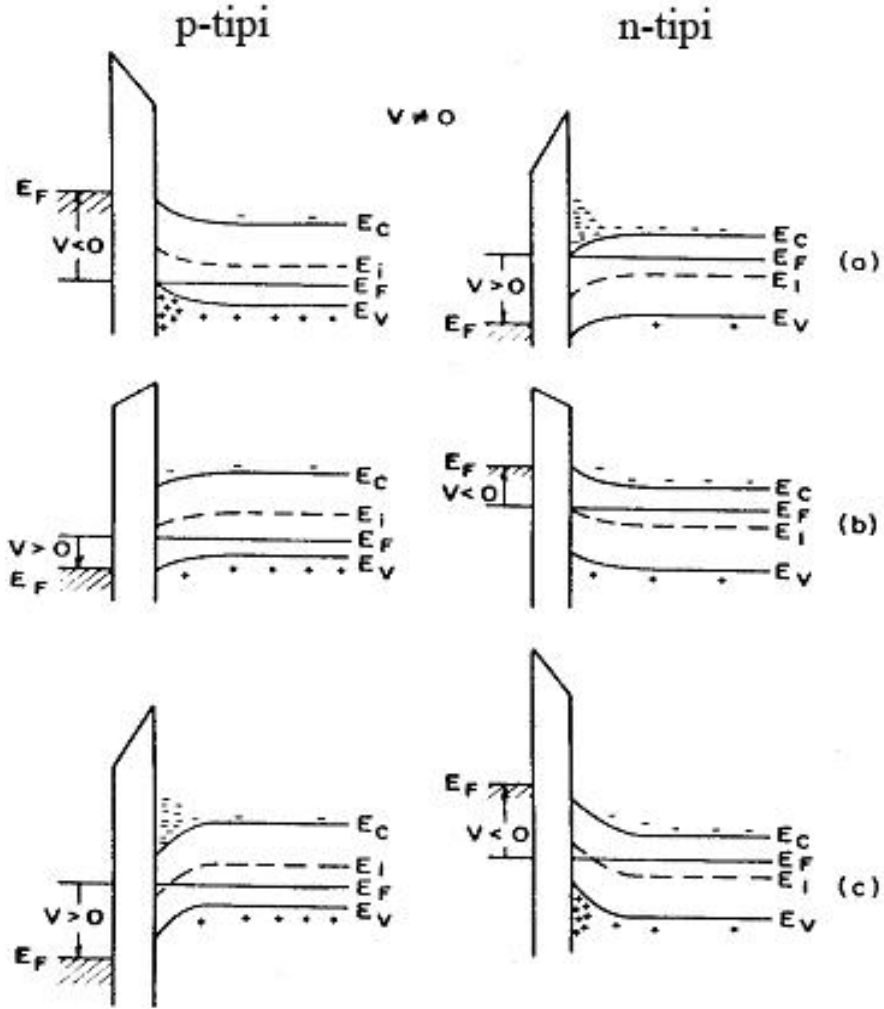
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.4)$$

Bu sonuca göre MIS yapının eşdeğer kapasitansı, C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ise,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.5)$$

olarak verilir. Burada A_{ox} metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı yani MIS doğrultucu kontağın alanı, ϵ_{ox} yalıtkan tabakasının dielektrik sabiti, d_{ox} ise yalıtkan tabakanın kalınlığıdır. Bunlar uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox} de uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapının

kapasitansındaki değişimi sadece uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen Şekil 2.5’de gösterilen durumları p-tipi bir yarıiletken için tanımlayalım [9,20].



Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant Şeması
(a) Yığılım (b) Tüketim (c) Terslenim

Yığılım: P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarında metale negatif gerilim ($V < 0$) uygulandığında bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan deşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru eker, yarıiletkendeki değerlik (valans) elektronları bandının tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine yükselir (Şekil 2.5a). İdeal bir diyotta yk akısı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi

yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_F - E_V$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına neden olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak yukarı büküldüğü bu duruma *yığılma (accumulation)* durumu denir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

Tükenim: P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale küçük bir pozitif gerilim ($V > 0$) uygulandığında yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki deşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindeki deşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki deşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür (Şekil 2.5b). İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen w genişliğinde bir bölgede, deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Bu duruma *tükenim (depletion)* durumu denir. Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk yük taşıyıcısı deşikler arayüzey bölgesinde tükenirler. Uygulanan gerilim arttığında ise tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamakla genişler. Tükenim yaygınlaştığı zaman, Silisyum gibi yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin beslem tükenimi ve katkı yoğunluğu $0,1-10 \mu\text{m}$ civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir. Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak terslenim yükü daha geç birikir bu da C-V eğrisinin C_{min} 'un altına düşmesine sebep olur. Bu dengesiz bir durumdur ve *derin tükenim* olarak tanımlanır.

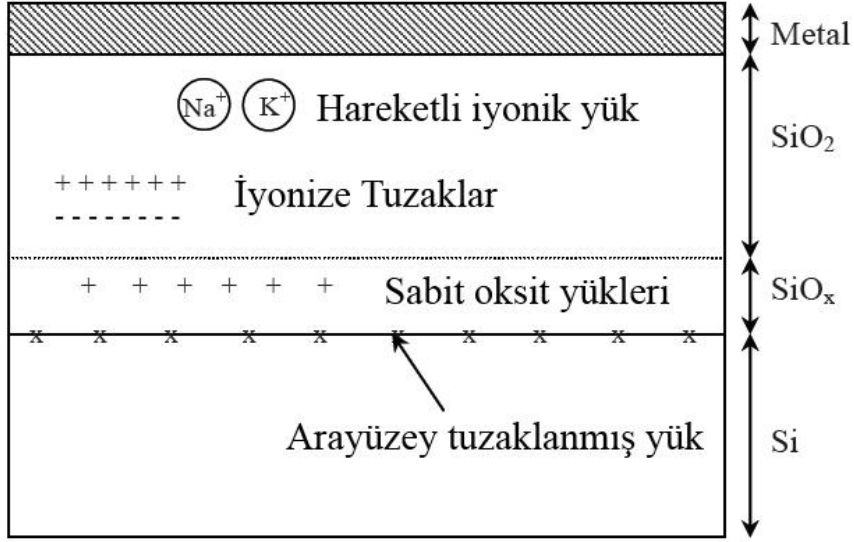
Terslenim: P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale büyük bir pozitif gerilim ($V \gg 0$) uygulandığı zaman bantlar oldukça aşağı doğru bükülür öyle ki saf durumdaki enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesi E_F 'nin altına düşer (Şekil 2.5c). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar ve elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu duruma *terslenim (inversion)* durumu denir. Bu durumda oluşan uzay yükü,

$$Q_{sc}=Q_n+Q_a \quad (2.6)$$

eşitliği ile verilir. Burada Q_n terslenim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_a birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Bu bölgede MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun, uygulanan gerilimin ac sinyalinin takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu ac sinyalinin küçük frekanslarda takip edebilir ve kapasitans artan gerilimle yalıtkan kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür, yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasitans C_{min} 'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak terslenim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'in altında değerler almasına neden olur.

2.3. MIS Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar

İdeal bir yalıtkanın kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir boşluk yükü veya hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yükleri ortaya çıkar. Bunlar MIS yapısının özelliklerini değiştirir, böylece MIS yapısının ideallikten sapmasına sebep olmaktadır [24]. Bu durumların ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 2.6'da gösterilmiştir [9].



Şekil 2.6. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Bunları sırayla yazarsak:

- Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları,
- Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri,
- Yalıtkan içindeki hareketli iyonlar.
- Numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşabilen iyonize tuzaklardır.

2.3.1. Arayüzey durumları

Arayüzey durumlarının tanımı Shockley, Taam ve diğer bilim adamları tarafından teoriksel olarak araştırılmıştır. Buna göre arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Arayüzey durumları verici veya alıcı tipte olabilirler. Alıcı, enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Verici, enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. Bir gerilim uygulandığında, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi,

arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Bu yükün değişimi MIS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS eğrisini değiştirir.

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şu niceliklere ayrılabilir:

Kapasite: Bir arayüzey duruma, arayüzeyde izin verilen başka bir durumun eklenmesiyle meydana gelir. Bu yüzden durum başına temel yükün bir kapasitesi eklenir. Bu kapasite uygulanan gerilimin keskin bir pikidir. Fermi seviyesi Arayüzey durum seviyesini aştığı için pik gerilim için görülür.

İletim: Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. Bu zaman gecikmesi arayüzey durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolmuş boşalım zamanıdır ve $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve burada R_{ss} arayüzey direncidir [25].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.7)$$

Arayüzey potansiyeli: Yukarıda ifade ettiğimiz kapasite ve iletim ac etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir dc etkisine de sebep olur. Arayüzey durumlarında depo edilmiş yük, arayüzey elektrik alanını değiştirir. Arayüzey durumları mevcut iken arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite-gerilimin zorunlu genişlemesi (stretchout) olarak gözükür.

Arayüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına sebep olur. Arayüzey durumlarının birim enerji ve birim alan başına durum yoğunluğu;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.8)$$

ileverilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır.

Burada E enerji olup $E=q\psi_s$ ile verilir. E'nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir.

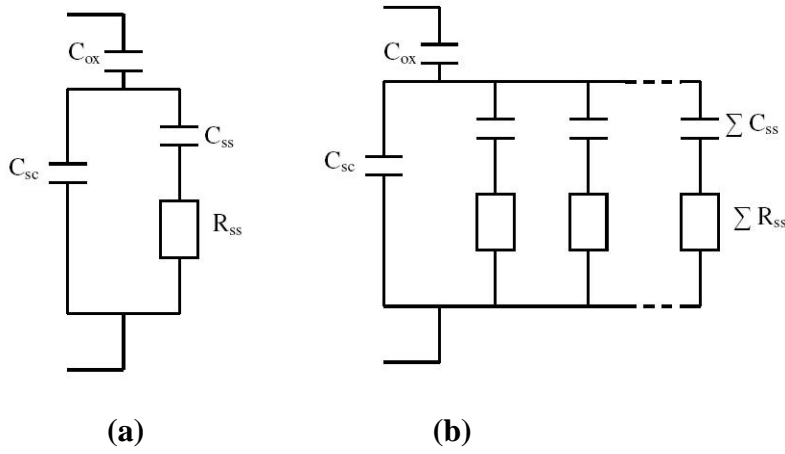
Bunu (2.8) eşitliğinde yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (2.9)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez [9].

Bir elektron veya deşik tarafından bir arayüzey durumunun işgal edilme olasılığı, bu yüzey durumunun safsızlık enerji seviyelerindeki gibi Fermi seviyesiyle belirlenir. Bu şekilde yüzey potansiyeli değiştikçe arayüzey durumun enerji seviyesi de onunla hareket eder. Sonuçta Fermi seviyesinin bu bağlı değişikliği bir elektron tarafından bu arayüzey durumunun işgal edilme olasılığının değişimine sebep olur.

Arayüzey durumları, uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptığında temel eşdeğer devre Şekil 2.7'de verildiği gibidir [8,17].



Şekil 2.7. MIS yapısının eşdeğer devresi

a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

2.3.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit yükleri yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Genellikle pozitif ve oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönüne bağlıdır. Yalıtkanla yarıiletkenin kristal yapılarının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıiletkenden yalıtkan tabakasına geçerken kaçınılmaz olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olurlar. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri mevcut olduğu zaman yüksek frekans C-V eğrilerinin gerilim eksenini boyunca değişimler meydana gelir. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde yerleşmiş yükler gibi görülebilir. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için, ideal C-V eğrisine göre, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru C-V eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_f$), C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ($-Q_f$) sebep olurlar [18,26]. Pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal- yalıtkan arayüzeyine çekilir.

2.3.3. Hareketli iyonlar

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Bu hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [27]. Böyle iyonlar nispeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içinde bulundurması, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanda altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

2.3.4. İyonlaşmış tuzaklar

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan tabaka içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakada elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan tavlama ile kaldırılabilir. Oksitte tuzaklanmış yük, yalıtkan doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmezler [27]. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçerler. Bu tuzaklar kapasitans-voltaj eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklar meydana gelir [28]. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Kristal Temizleme

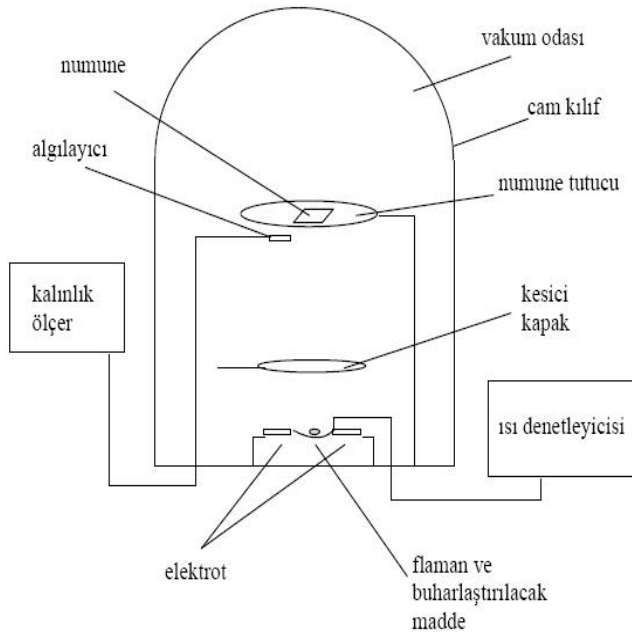
İdeale yakın bir Schottky diyotu yapabilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemi ultrasonik banyoda yapıldı. Diyotu oluşturmak için (001) yüzey yönelimli, 8 Ω cm özdirençli, 500 μ m kalınlıklı, 2" çaplı ve azot katkılı n-tipi 4H-SiC tek kristal yapraklar kullanıldı. Kullanılan kristaller yurt dışından Crys.Tec. firmasından, fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi parlatılmış olarak satın alınmıştır. Diyottan çok iyi verim elde edebilmek için yüzeyin son derece temiz olması gerekir. Kimyasal temizleme için çeşitli metotlar kullanılabilir. Bu çalışmada diyotun temizlenmesinde kullanılan kimyasal temizleme işlemi aşağıda verilmiştir.

1. Temizleme işleminde direnci yaklaşık 16-18 M Ω olan deiyonize su (H₂O) kullanıldı. Bu deiyonize su (saf su) RO&UP Water Purification System ile elde edildi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız v.b araç ve kaplar fırında yaklaşık 80 °C ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra hidrojen peroksit (H₂O₂), aseton ve ardından da deiyonize su ile iyice durulandı. Kristaller önce deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak yaklaşık 10 dakika kadar yıkandı.
2. Kristaller ilk önce 20 ml trikloretilen (C₂HCl₃), daha sonra 20 ml aseton ve en son da 20 ml metil alkol (CH₃OH) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlendi ve kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
3. 30 ml sülfürik asit (H₂SO₄) ve 30 ml hidrojen peroksit (H₂O₂) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
4. 30 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 10 dakika ultrasonik olarak yıkandı.

5. 30 ml nitrik asit (HNO_3), 10 ml hidroflorik asit (HF) ve 50 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
6. 40 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
7. Son olarak 4H-SiC yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika temizlendi ve kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kuru azot (N_2) ile kurutulduktan sonra hemen vakum ortamına alındı.

3.2. Au/n-4HSiC Yapısının Hazırlanması

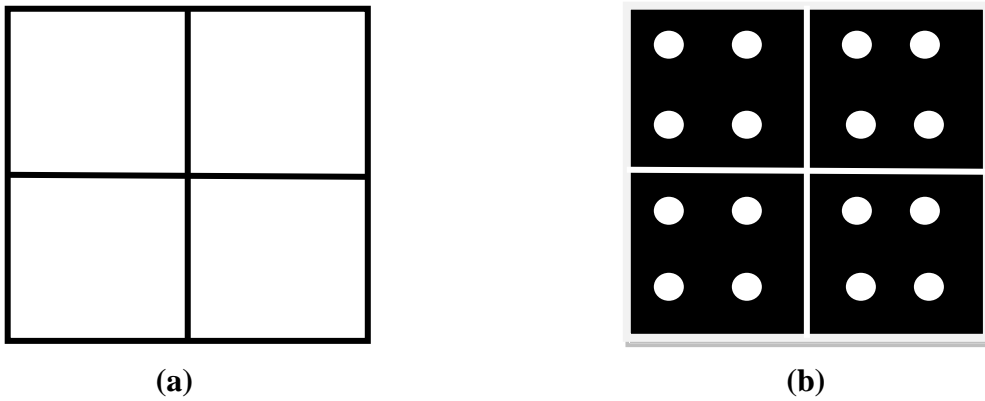
Omik ve doğrultucu kontaktların oluşturulmasında Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen yüksek vakumlu termal buharlaştırma sistemi kullanıldı.



Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi

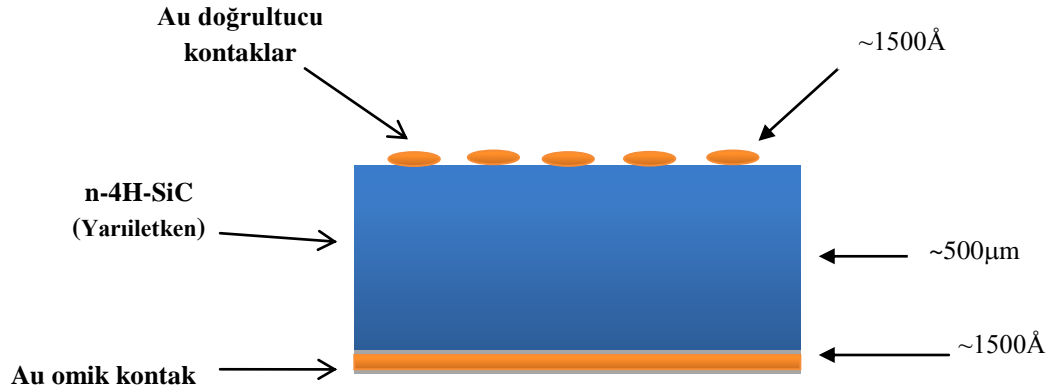
Omik kontağı oluşturmak için, kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde 1cmx1cm ebatlarında bir maske üzerine yerleştirildi. Omik kontaktların oluşturulmasında Şekil 3.2a' ya benzer bir maske kullanıldı. Vakum

sistemi ile elde edilen $\sim 10^{-6}$ Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile oldukça saf altın (Au) ($\sim 99.999\%$) buharlaştırılarak 4H-SiC yaprağın arka yüzeyine ~ 1500 Å Au tabakası oluşturuldu. İyi bir omik kontak oluşturmak için ise numune ~ 400 °C de tavlandı. Buharlaştırma ile elde edilen arka kontağın, 4H-SiC yaprağın arka yüzeyine çöktürülmesi ile omik kontak elde edilmiş oldu.



Şekil 3.2. (a) Omik ve (b) Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler

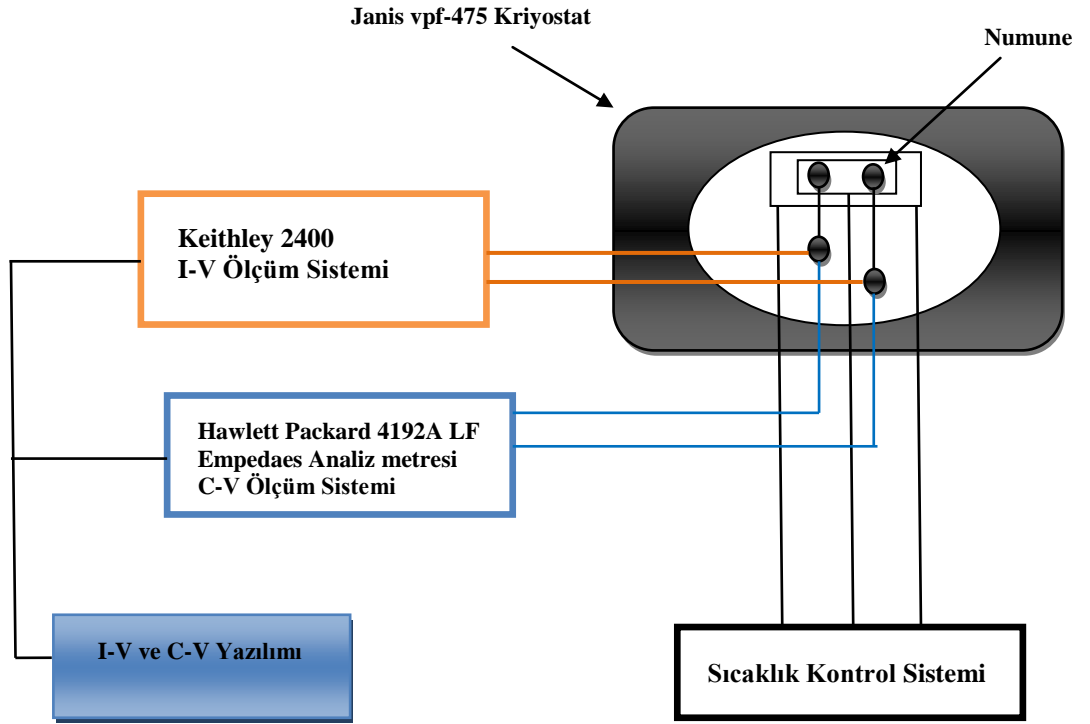
Üzeri çok sayıda 1 mm çaplı delikler açılmış olan Şekil 3.2b'ye benzer bakır maske üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen altın (Au) metal parçası $\sim 10^{-6}$ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1 mm çaplı) şeklinde ve ~ 1500 Å kalınlığında altın kaplanması sağlandı. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla Au/n-4H-SiC yapısı elde edilmiş oldu. Soğuması için bir süre bekletilen kristal vakum ortamından çıkartılarak her bir dairecik (diyot) ortada kalacak şekilde, elmas kesici yardımıyla eşit dört parçaya bölündü. MS yapının hazırlanmış şeması Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Au/n-4H-SiC (MS) yapının şematik gösterimi

3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi

Elektriksel karakteristikler için gerekli tüm ölçümlerin tamamı Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi laboratuvarında gerçekleştirildi. Akım-voltaj (I-V) ölçümlerinde Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanıldı. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerinde ise Hawlett Packard 4192A LF Empedaes Analiz metre (5 Hz-13 MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 ac/dc çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek Janis vpf-475 kriyostat içinde $\sim 10^{-3}$ Torr basınç altında gerçekleştirildi. Kapasitans-voltaj (C-V) , iletkenlik-voltaj (G/w-V) ve akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin yapıldığı deneysel ölçüm sistemleri şematik olarak Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. C-V, G/w-V ve I-V ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş

Hazırlanan Au/n-4H-SiC yapıların bazı temel elektriksel karakteristیکlerinin akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri kullanılarak incelendi. C-V ve G/w-V ölçümleri oda sıcaklığında Hawlett Packard 4192A LF Empedaes Analiz metresi kullanılarak hem doğru hem de ters ön gerilim altında -4V' dan +12V' a kadar 0,2 V adım aralıklarla ve 0,1 kHz - 1MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. C-V ve G/w-V ölçümlerinden yapının katkılanan verici atomların (N_D) yoğunluğu, Fermi enerji seviyesi (E_F), metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_{b(C-V)}$), yapının seri direnci (R_s) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) yoğunluğu elde edildi. Oda sıcaklığında doğru ön gerilim I-V ölçümleri Keithley 2400 I-V ölçüm sistemi ile yapıldı.

4.2. Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

MS ve MIS tipi Schottky diyotlarında akım-voltaj ilişkisi $V \geq 3kT/q$ için termiyonik emisyon teorisine (TE) göre aşağıdaki eşitlikle verilir [9].

$$I = \underbrace{AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bo}}{kT}\right)}_{I_0} \left\{ \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad (4.1)$$

burada IR_s yapının seri direnci üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, I_0 ters doyum akımı, Φ_{bo} metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği, A diyodun doğrultucu kontak alanı ve A^{**} etkin Richardson sabiti olup değeri n-tipi 4H-SiC için $146 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ 'dir [29,30]. Ancak bu denklemde ikinci ifadedeki 1 rakamı üstel ifade yanında oda sıcaklığı ve üstündeki değerler için rahatlıkla ihmal edilebilir. Buna ilaveten, TE teorisine göre idealite faktörünün 1 olması beklenir. Ancak pratikte idealite faktörü 1'den büyük çıkmaktadır. Bunun nedeni ise; metal ile yarıiletken (MS) arasına büyütülen yalıtkan tabakasına, arayüzey durumlarının büyüklüğüne,

Schottky engel alçalmasına, M/S arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinin homojensizliğine ve fabrikasyon sırasında laboratuvar ortamında bulaşan muhtelif organiklerin varlığına atfedilir [22,31,32]. Schottky diyotlarda $\ln I$ 'nın V ' ye göre grafiğinin genelde lineer bir doğru olması beklenir fakat deneysel verilerden de görüldüğü gibi yüksek voltajlarda ($V \geq 1$ V) lineerlikten sapmaktadır. Seri direnç (R_s)'den dolayı olan bu durum $\ln I$ - V eğrisinin bükülmesine yol açar. Lineerliğin doğrusallıktan saptığı bölgede hem idealite faktörü 1'den büyük olacak hem de lineer bölgenin daralmasından dolayı hesaplamaların güvenilirliği azalacaktır.

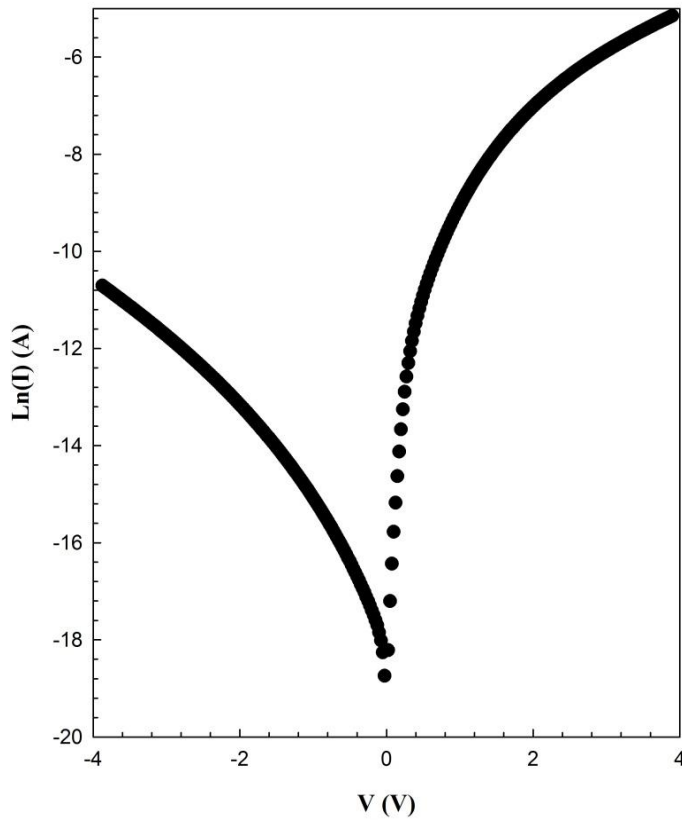
Lineer bölge için Eş. 4.1 ifadesinin \ln 'i alınırsa,

$$\ln I = \ln I_o + \left(\frac{q}{nkT} \right) V_d \quad (4.2)$$

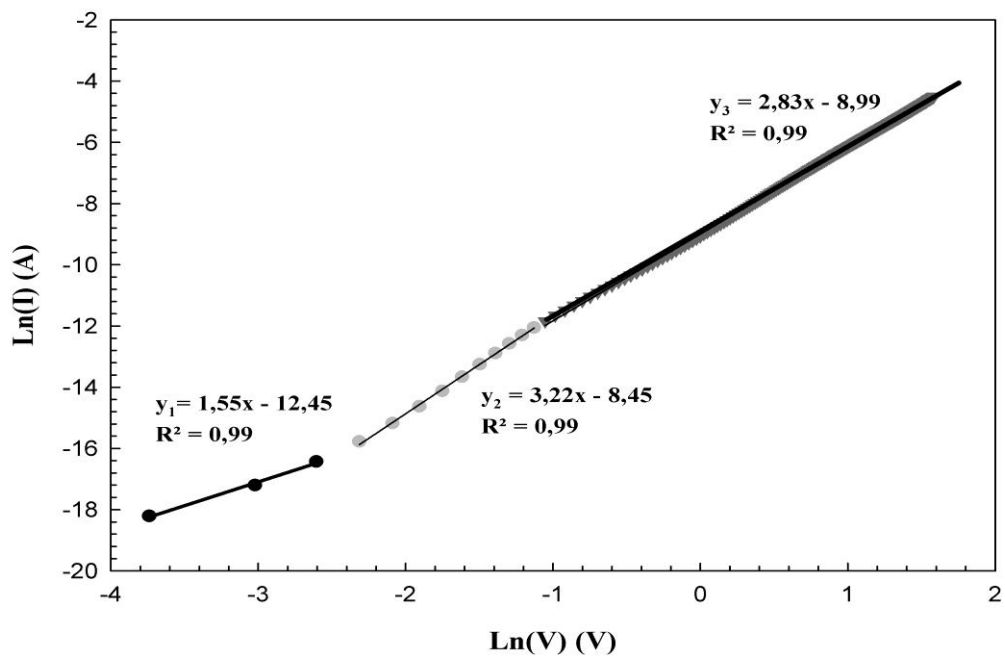
şeklinde bir doğru denklemi elde edilir. Burada $V_d = V - IR_s$ dir ve V diyot üzerine düşen gerilim, R_s seri direnç V ise uygulanan voltajdır. Au/n-4H-SiC (MS) yapısının oda sıcaklığındaki doğru ve ters ön gerilim altındaki yarı-logaritmik akım-voltaj ($\ln I$ - V) eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yüksek voltajlarda ($V \geq 1$ V) $\ln I$ - V eğrisi lineerlikten sapmaktadır.

Akım iletim mekanizmalarından hangisinin ve ya hangilerinin etkili olduğu gerilim bölgesini belirlemek amacıyla $\ln I$ - $\ln V$ eğrisi Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi $\ln I$ - $\ln V$ eğrisi üç farklı lineer bölgeye sahiptir.

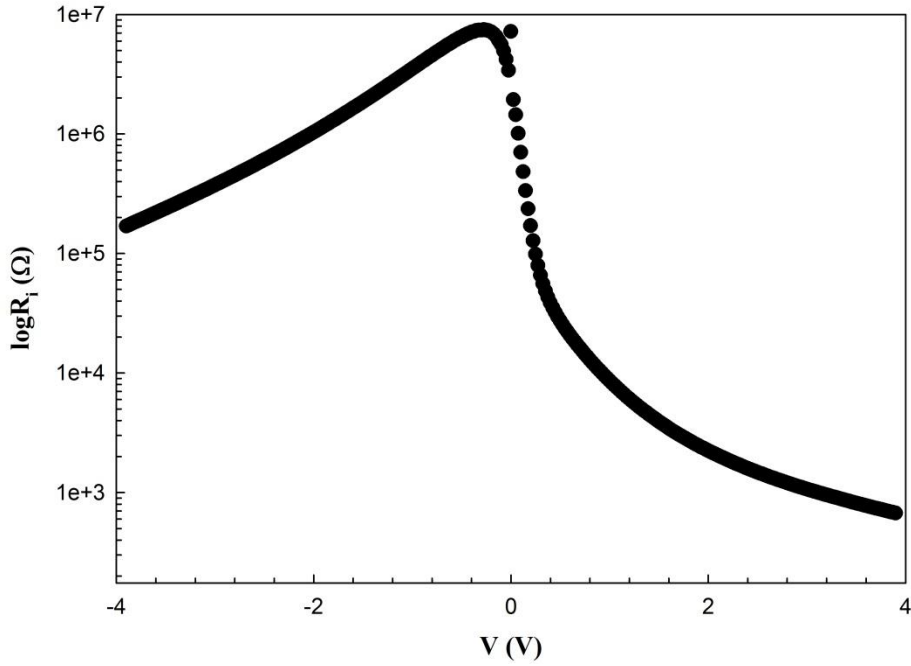
Direncin (R_i) voltaja bağlı büyüklüğünü incelemek amacıyla Ohm yasası ($R_i = dV_i/dI_i$) kullanılarak hesaplanan direnç değerlerinin voltaja bağlı grafiği de Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının $\ln(I)$ - V grafiği



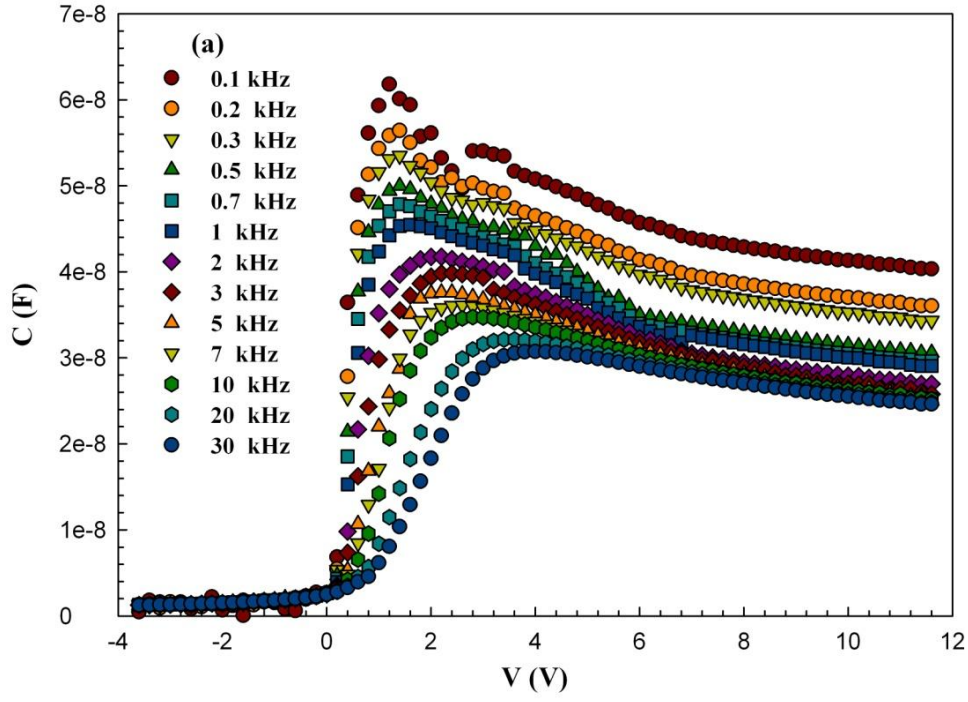
Şekil 4.2. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiği



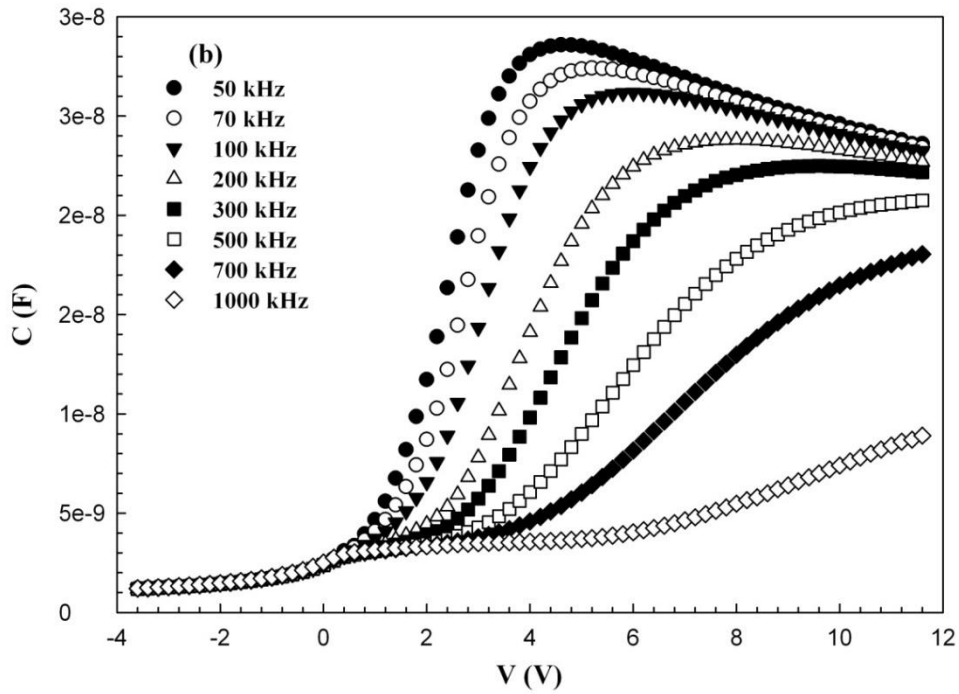
Şekil 4.3. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının $\log R_i$ -V grafiği

4.3. Kapasite-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/w-V) Karakteristikleri

Au/n-4H-SiC yapısının C-V ve G/w-V ölçümleri oda sıcaklığında Hawlett Packard 4192A LF Impedance Analyzer kullanılarak hem doğru hem de ters ön gerilim altında -4V ile +12V aralığında 0,2 V aralıklarla ve 0,1 kHz - 1 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Ölçülen C-V ve G/w-V eğrileri sırasıyla Şekil 4.4 ve 4.5'de verildi. Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi, C-V eğrileri terslenim-tükenim-yığılma bölgelerine sahiptir. Yani tipik bir MS veya MIS karakteristiği sergilemektedirler. C' nin değeri artan voltajla artıyor ve tükenim bölgesinde düşük frekanslarda ($f \leq 30\text{kHz}$) $\sim 1,5\text{ V}$ ' da Au/n-4H-SiC yapısının arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımından dolayı pik vermektedir.

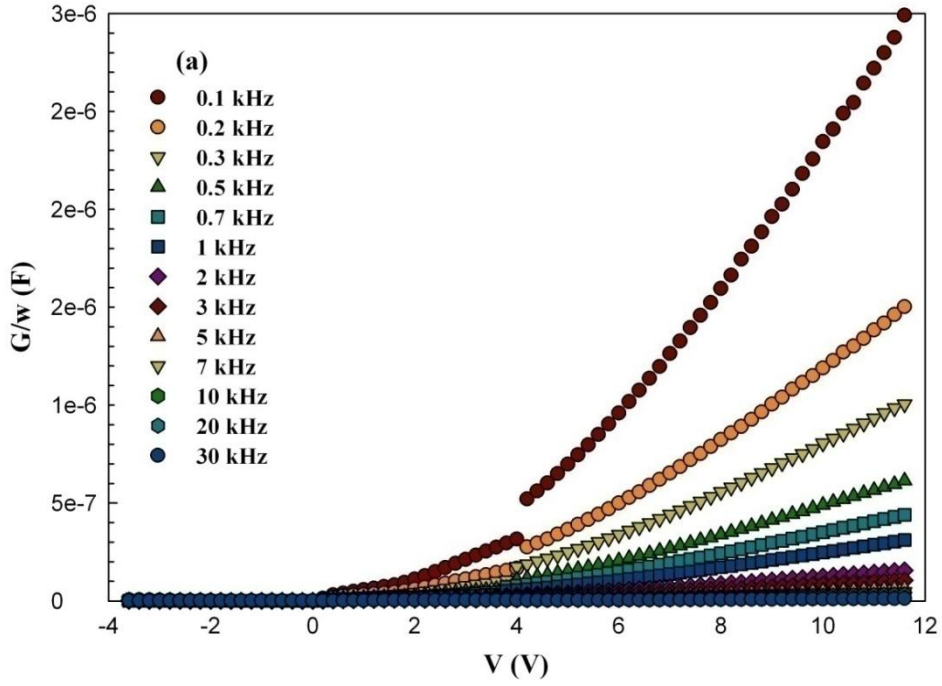


(a)

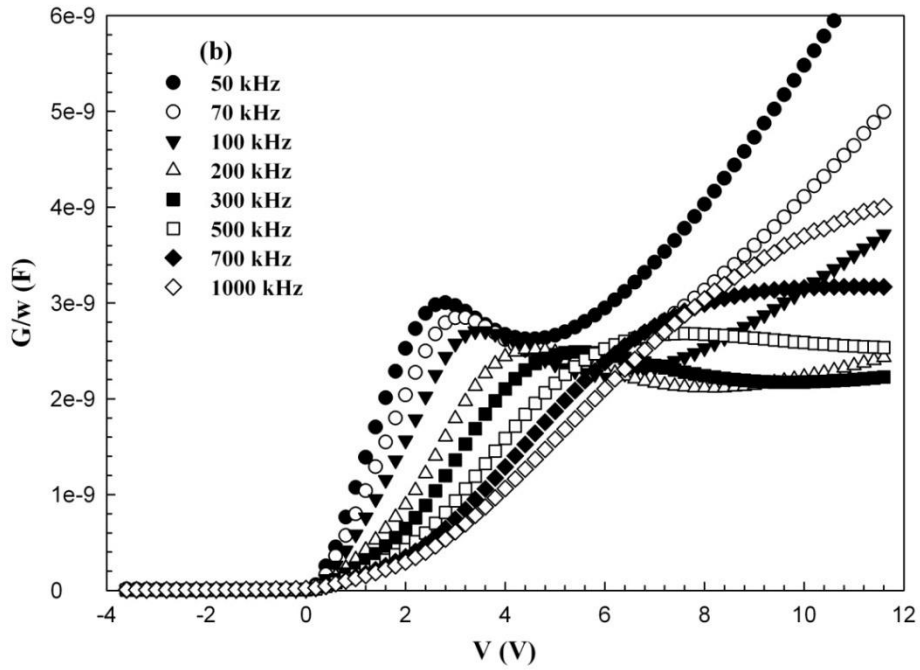


(b)

Şekil 4.4. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının (a) düşük frekans, (b) yüksek frekans C-V eğrileri



(a)

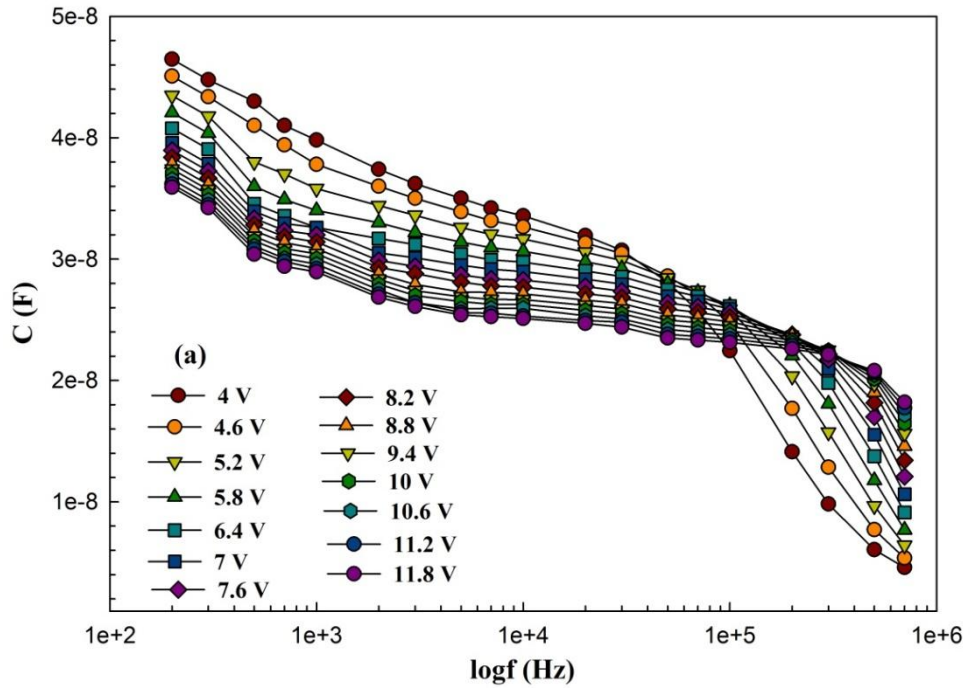


(b)

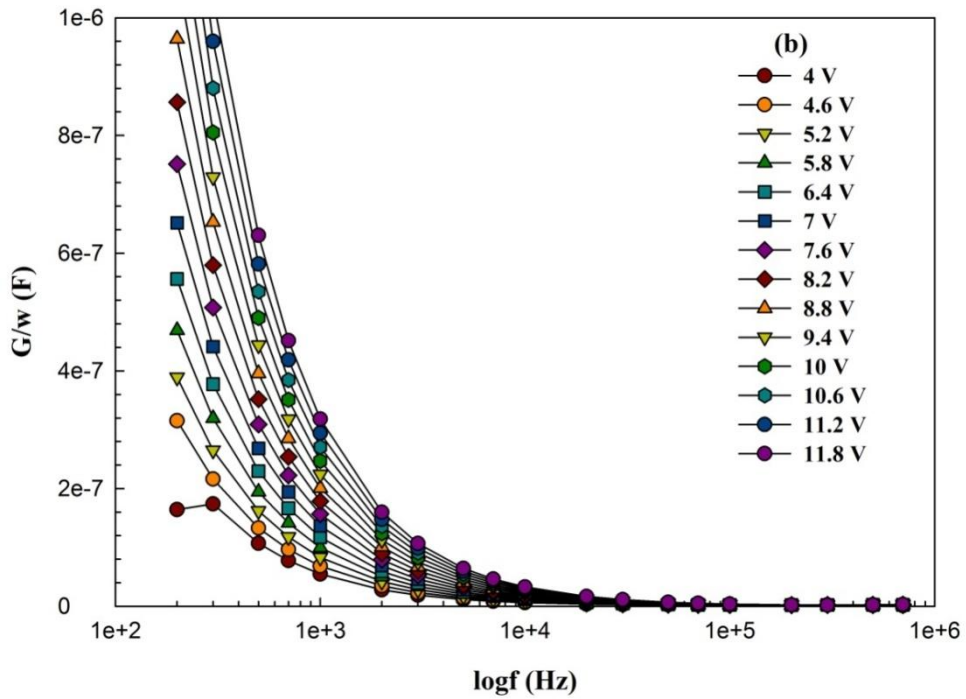
Şekil 4.5. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının (a) düşük frekans, (b) yüksek frekans G/w - V eğrileri

C-V ve G/w-V ölçümleri yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) alınırsa arayüzey durumları (N_{ss}) uygulanan dış ac sinyali takip edemez ve dolayısıyla hem C hem de G/w değerlerine ya çok küçük ya da hiç bir katkı getirmez [17,18]. Bu nedenden dolayı yüksek frekanslarda C ve G/w değerleri ideallığe yaklaşır. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi gözlenen yarımalar ve piklerin nedeni arayüzey durumlarının özel dağılımına atfedilir [18,27]. Ayrıca C ve G/w değerlerinin frekansa oldukça bağlı olup özellikle tükenim ve yığılma bölgesinde frekansın etkisi daha fazla olduğu görülmektedir. Yeterince küçük negatif voltajlarda (terslenim bölgesi) C ve G/w değerlerinde önemli bir değişme olmayıp bu bölgede voltajın C ve G/w değerlerine etkisi hemen hemen hiç yoktur.

Gerilimin, kapasitans ve iletkenlik değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı voltajlarda hesaplanan C ve G/w değerlerinin frekansa bağlı eğrileri Şekil 4.6'da verildi. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi C ve G/w değerleri artan frekansla azalıyor. C ve G/w değerlerindeki değişimler düşük frekanslarda yüzey durumlarının katkısından dolayı oldukça yüksektir. Voltajın yüksek frekanslardaki G/w değerleri üzerinde hemen hemen hiçbir etkisinin olmadığı görülür.



(a)



(b)

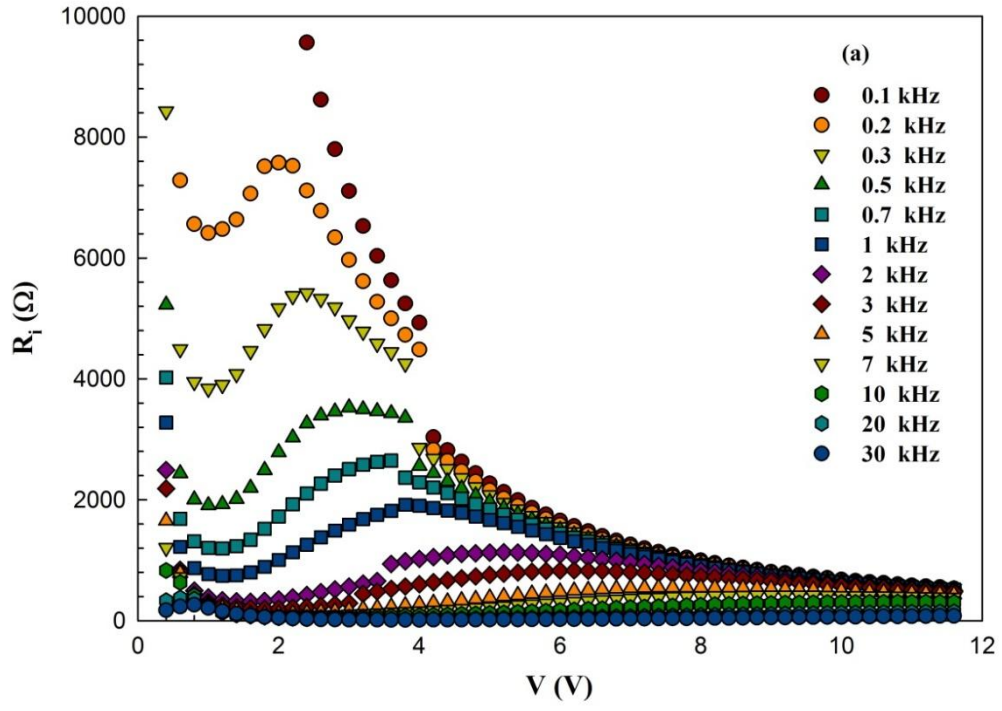
Şekil 4.6. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının farklı voltajlarda (a) C-f ve (b) G/w-f eğrileri

Au/n-4H-SiC yapının frekansa bağılı (direnç) R_i değerleri C ve G/w değerlerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı [18,27].

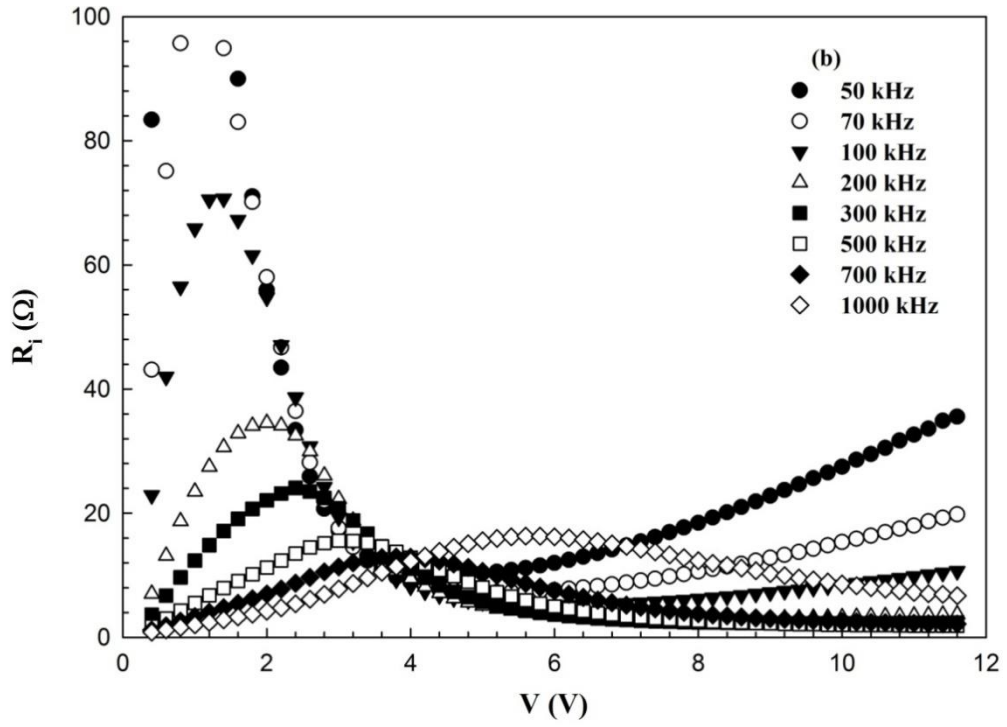
$$R_i = \frac{G_m}{G_m^2 + (wC_m)^2} \quad (4.3)$$

burada C_m ve G_m güçlü yığılım bölgesindeki ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri, $w (=2\pi f)$ ise açısal frekanstır. R_i değerlerinin özellikle düşük frekanslarda arayüzey durumlarının daha yoğun olmasından dolayı piklerin şiddetinin çok büyük olduğu açıkça görülmektedir [18,27]. Çünkü düşük frekanslarda arayüzey durumları ac sinyali takip eder. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumları ac sinyali takip edemez ve hem C hem de G/w değerlerine bir katkıda bulunmaz. Bu nedenden dolayı daha güvenilir direnç değeri elde etmek için yüksek frekanslardaki C-V ve G/w-V değerleri kullanılması gerekir. Au/n-4H-SiC yapısı için elde edilen R_i değerlerinin grafikleri Şekil 4.7(a) ve (b) de verildi. Şekillerden de görüldüğü gibi uygulanan voltaj ve artan frekansla direncin değeri azalmaktadır [31-36].

Ayrıca seri direnç (R_s) değerinin frekansa bağılılığını incelemek amacıyla farklı voltaj değerleri için hesaplanan seri direncin frekansa bağılılığı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yüksek frekanslarda seri direnç voltajdan bağımsızdır.

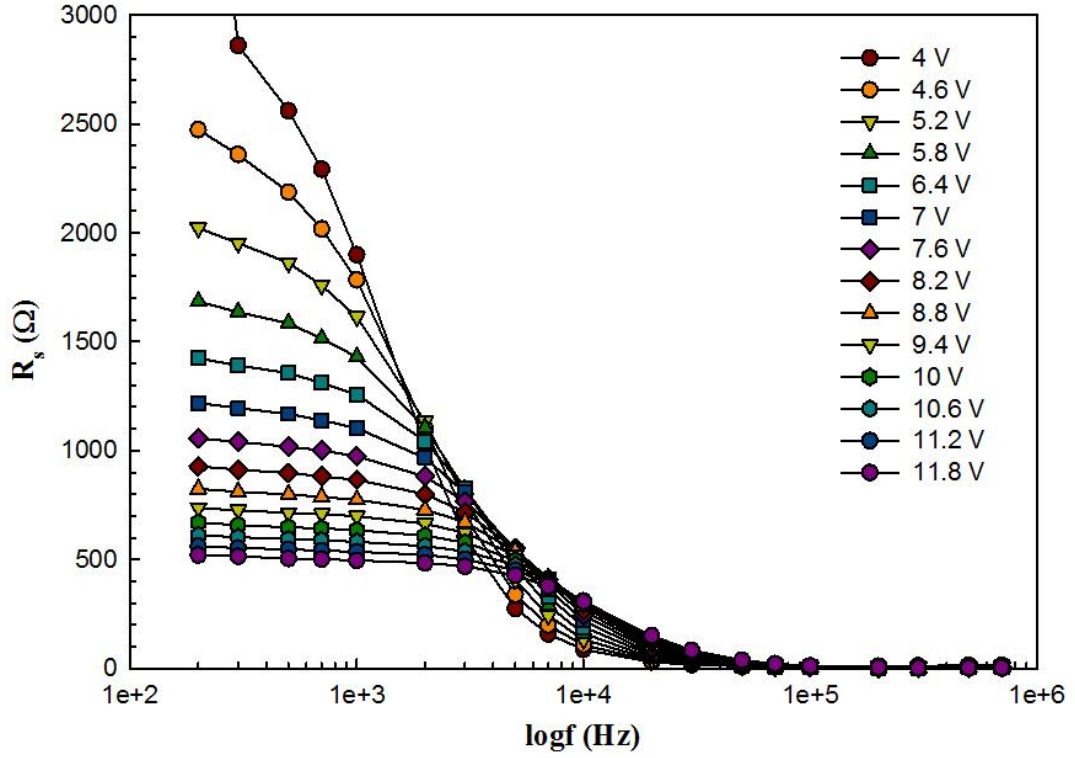


(a)



(b)

Şekil 4.7. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının (a) yüksek frekans (b) düşük frekans R_i -V grafiği



Şekil 4.8. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısının farklı voltajlarda seri direncin frekansa bağıllığı

Şekil 4.9(a) ve (b)'de görüldüğü gibi direncin değeri özellikle yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m/w) değerlerini etkilemektedir. Bu nedenle, hesaplamalarda doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için yüksek frekanslarda kapasitans ölçümleri Eş. 4.4 ve 4.5 kullanılarak direncin etkisini ortadan kaldırmak veya azaltmak için düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/w) değerlerinin hesaplaması için kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir [18].

$$C_c = \frac{|G_m^2 + (wC_m)^2| C_m}{a^2 + (wC_m)^2} \quad (4.4)$$

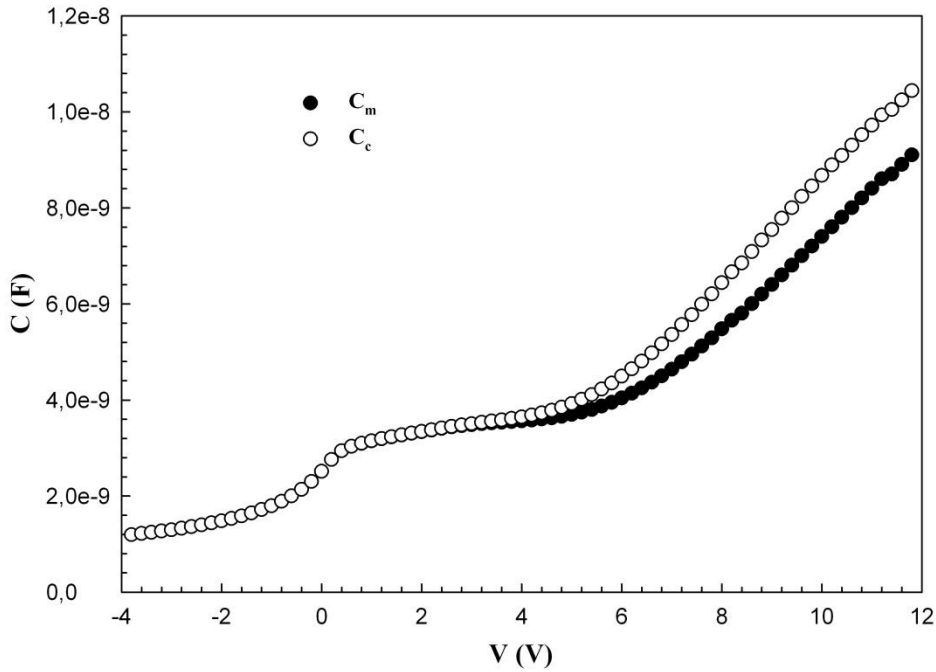
$$G_c = \frac{|G_m^2 + (wC_m)^2| a}{a^2 + (wC_m)^2} \quad (4.5)$$

elde edilir. Burada,

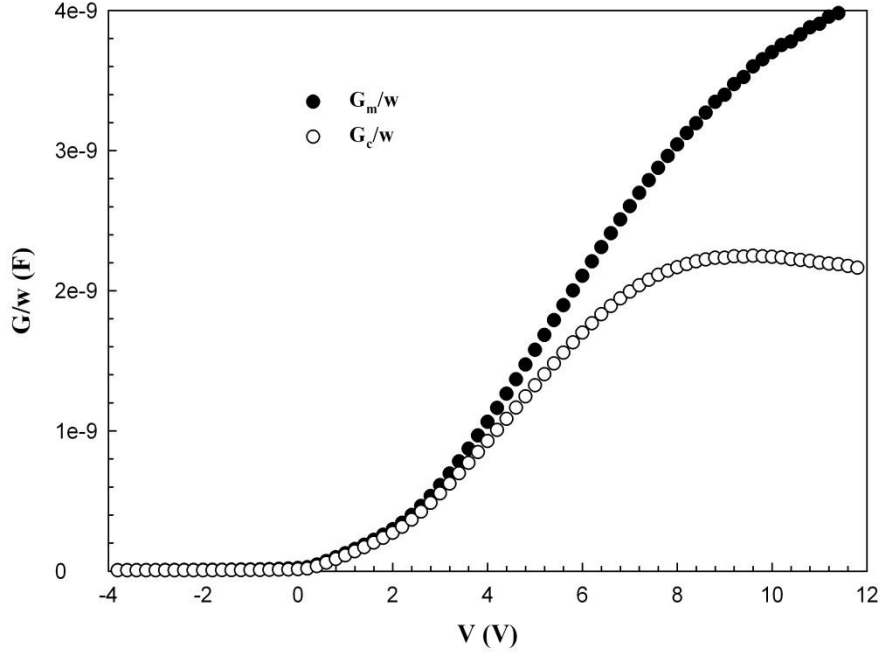
$$a = G_m - (G_m^2 + w^2 C_m^2) R_s \quad (4.6)$$

olup $R_s = 0$ durumunda $C_c = C_m$ ve $G_c = G_m$ olur.

Ölçülen kapasitans (C_m), iletkenlik (G_m/w) ve düzeltilmiş kapasitans (C_c), iletkenlik (G_c/w) eğrileri karşılaştırılması Şekil 4.9(a) ve (b)'de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi C_c değeri özellikle yığılma bölgesinde artarken, G_c/w değeri ise bir pik vermektedir. C_c ve G_c/w değerlerindeki bu davranış R_s değerinin çok önemli bir faktör olduğunu ve hesaplamalarda dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.9.(a). Oda sıcaklığında 1 MHz'de Au/n-4H-SiC yapısının ölçülen (C_m) ve düzeltilmiş (C_c) kapasitans eğrisi



Şekil 4.9.(b). Oda sıcaklığında 1 MHz’de Au/n-4H-SiC yapısının ölçülen (G_m/w) ve düzeltilmiş (G_c/w) iletkenlik eğrisi

Şekil 4.10’da çeşitli frekanslarda Au/n-4H-SiC yapısı için deneysel $C^{-2}-V$ grafiği verilmiştir. $C^{-2}-V$ eğrisinin ters beslemde lineer bir davranışa sahip olduğu görülmektedir. N_{ss} ’nin tükenim ve terslenim bölgelerinde düşük frekanslarda baskın oluyorken, R_s ’nin yığılma bölgesinde yüksek frekanslarda etkili olduğu görülür. Her bir frekans için Φ_b değeri $C^{-2}-V$ eğrisinin voltaj eksenini kestiği nokta (V_o) değerleri Eş. 4.7’de kullanılarak hesaplandı.

$$\Phi_{b(C-V)} = V_o + E_F + \frac{kT}{q} - \Delta\phi \quad (4.7)$$

denklemden $\Delta\phi$ imaj kuvveti engel düşmesidir [7,9,18] ve Eş. 4.8’deki gibi verilir,

$$\Delta\phi = \left(\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

Burada E_m elektrik alandır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$E_m = \left(\frac{2qN_D V_o}{\epsilon_s \epsilon_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

E_F ise Fermi enerji seviyesidir ve

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right) \quad (4.10)$$

şeklinde verilir. Burada N_D katkılanan verici atomların, N_c ise n-4H-SiC için iletkenlik bandındaki etin durum yoğunluğudur ve

$$N_c = 4,82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m_e^*}{m_o} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ ve } \left(\frac{m_e^*}{m_o} \right) = 0.55 \quad (4.11)$$

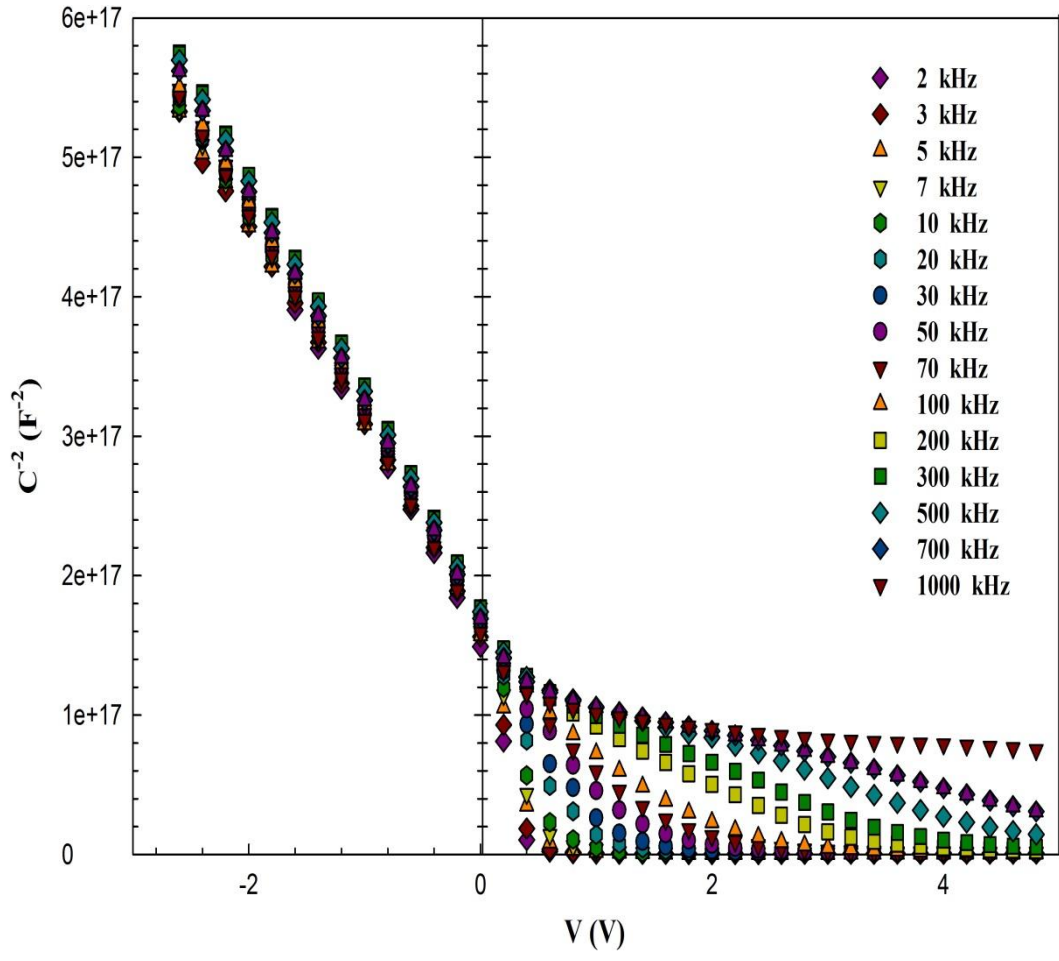
şeklinde verilir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesi m_o ise elektronun kütlesidir.

Katılanan verici atomları (N_D)'nin değeri Eş. 4.12 kullanılarak C^{-2} -V grafiğinin lineer bölgelerinin eğiminden elde edilir.

$$N_D = \frac{2}{q \epsilon_s A^2} \left[- \frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right] = \frac{2}{q \epsilon_s A^2 \tan(\theta)} \quad (4.12)$$

burada ϵ_s n-4H-SiC için yarıiletken geçirgenliğidir ve değeri $9,66\epsilon_o$ 'dır. ϵ_o ise uzayın geçirgenliğidir ve değeri $8,85 \times 10^{-14}$ F/cm' dır.

Oda sıcaklığında her bir frekans için hesaplanan N_D , kesme gerilimi (V_o), E_F ve $\Phi_{b(C-V)}$ değerleri C^{-2} -V eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır ve Çizelge 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.10 da görüldüğü gibi grafik neredeyse tam paraleldir, bu yüzden N_D ve E_F 'nin değerinde çok büyük değişiklikler olmaz.



Şekil 4.10. Çeşitli frekanslarda Au/n-4H-SiC yapısının C^{-2} -V grafiği

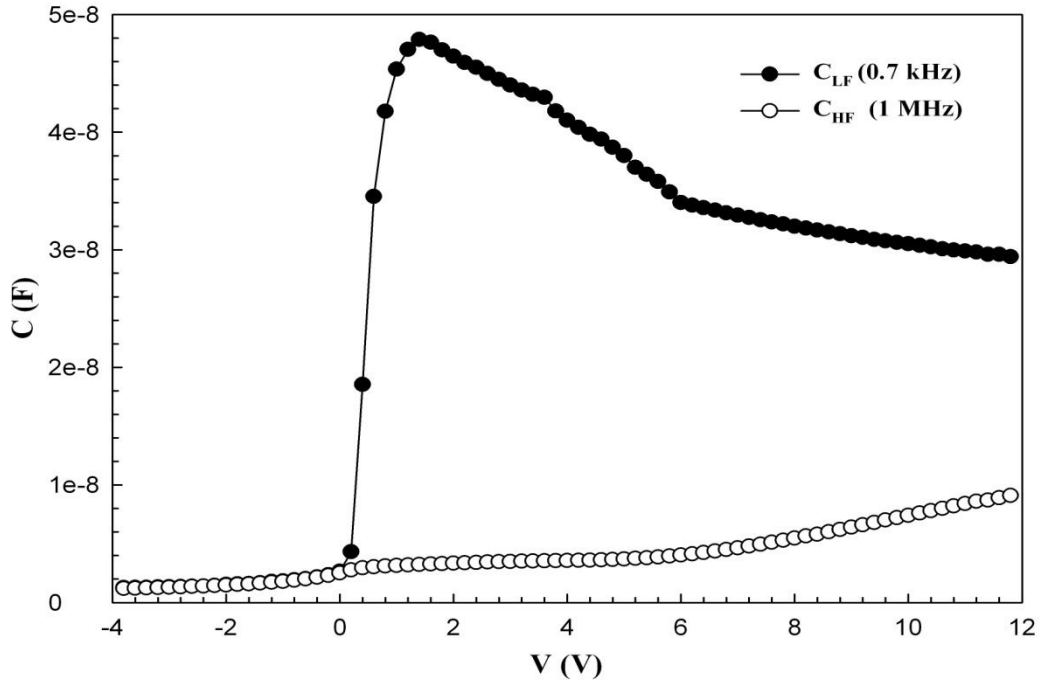
Çizelge4.1. Oda sıcaklığında Au/n-4H-SiC yapısı için farklı frekanslarda deneysel olarak elde edilen N_D , V_0 , E_F , $\Phi_{b(C-V)}$ değerleri

f (kHz)	$N_D(x10^{18})$ (cm^{-3})	V_0 (V)	E_F (eV)	$\Phi_{b(C-V)}$ (eV)
2	1,58	0,98	0,072	0,97
3	1,58	1,05	0,072	1,04
5	1,58	1,07	0,072	1,06
7	1,58	1,10	0,072	1,09
10	1,58	1,11	0,072	1,10
20	1,58	1,14	0,072	1,13
30	1,58	1,15	0,072	1,14
50	1,58	1,16	0,072	1,15
70	1,58	1,17	0,072	1,15
100	1,58	1,22	0,072	1,20
200	1,58	1,18	0,072	1,16
300	1,58	1,18	0,072	1,16
500	1,58	1,16	0,072	1,14
700	1,58	1,14	0,072	1,12
1000	1,58	1,09	0,072	1,08

Arayüzey durumları (N_{ss}) yoğunluğunu elde etmede birçok metod vardır [9,18,36]. Bunlar arasında arayüzey durumlarını hesaplamak için Şekil 4.13' de verilen düşük (0,7 kHz)-yüksek (1MHz) frekans (C_{LF} - C_{HF}) metodu kullanıldı[37]. Bu metoda göre; N_{ss} değerleri deneysel olarak ölçülen kapasitans-voltaj (C-V) eğrisinden Eş. 4.13 kullanılarak elde edilir.

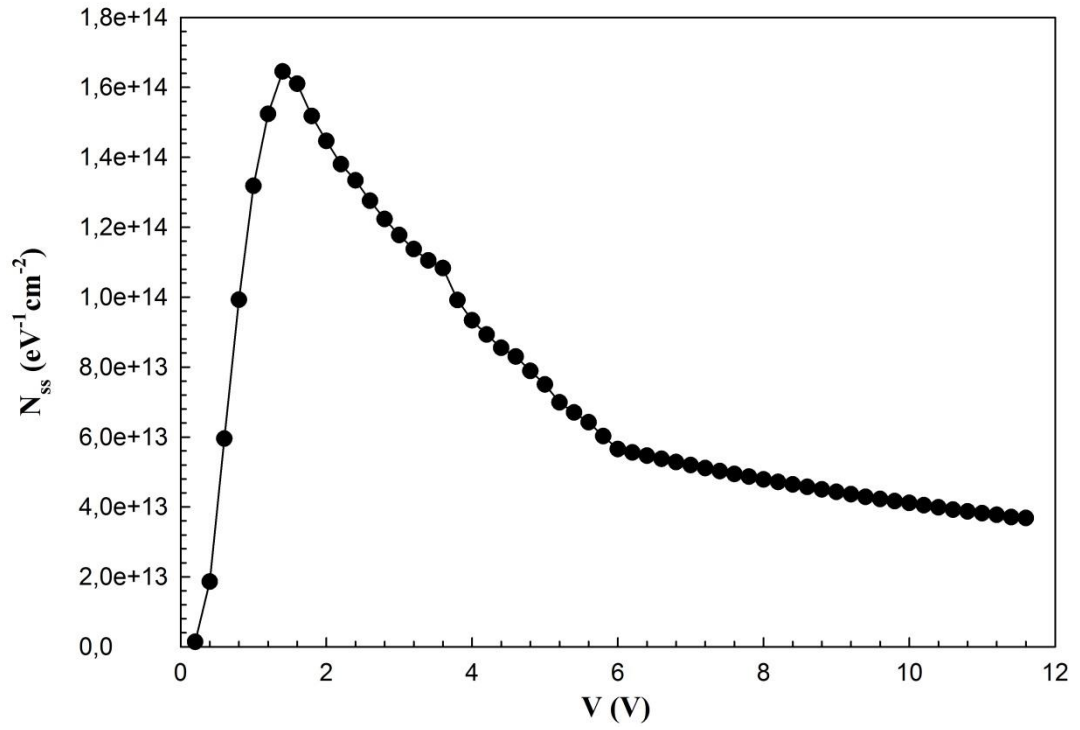
$$qAN_{ss} = \left[\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right]^{-1} - \left[\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right]^{-1} \quad (4.13)$$

burada A diyotun alanı, C_{LF} düşük frekansta her bir voltaja karşı gelen kapasitans değeri, C_{HF} yüksek frekansta her bir voltaja karşı gelen kapasitans değeri, C_{ox} yalıtkan tabakanın kalınlığı ve q ise elektron yüküdür.



Şekil 4.11. Au/n-4H-SiC yapısının için düşük (0,7 kHz) ve yüksek (1MHz) C-V eğrisi

Literatüre göre $f \geq 500$ kHz için arayüzey durumları ac sinyali takip edemediğinden dolayı C ve G/w değerine katkı getirmez, $f \leq 100$ Hz'de ise arayüzey durumlarının tümü ac sinyali takip edebilir ve C ve G/w değerine katkı getirebilir [38-43]. Bu nedenle düşük frekans 0,7 kHz yüksek frekans 1000 kHz (=1 MHz) seçildi. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi N_{ss} değerleri MS ve MIS tipi diyotlar için uygun olan 10^{14} $eV^{-1}cm^{-2}$ mertebesindedir ve bir literatürde de görüldüğü gibi pik vermektedir [38-43]. Çünkü arayüzey durumlarının yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir. Bu arayüzey durumların mevcut olduğu bölgelerde, büyüklükleri ve yoğunlukları mertebesinde C-V veya G/w-V eğrileri bir pikten geçer [43].



Şekil 4.12. Au/n-4H-SiC yapısı için N_{ss} eğrisinin voltaja bağlı dağılım eğrisi

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, hazırlanan Au/n-4HSiC yapının temel elektriksel karakteristikleri oda sıcaklığında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) deneysel ölçüm metotları kullanılarak belirlendi. Bu yapının C-V ve G/w-V ölçümleri geniş bir frekans aralığında (0,1-1000 kHz) oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Burada amaç hazırlanan bu yapıların potansiyel engel yüksekliği (Φ_b), yapının seri direnci (R_s) ve arayüzey durumları (N_{ss}) gibi temel elektriksel karakteristiklerinin hesaplamak ve bunların Au/n-4HSiC yapıları üzerine etkisini incelemektir. N_D , V_o , E_F ve potansiyel engel ($\Phi_{b(C-V)}$) gibi yapının ana karakteristiklerinin her bir frekans için ters beslemede C^{-2} -V eğrisi kullanılarak hesaplandı. N_D ve E_F değeri frekansa bağımsız bulunuyorken $\Phi_{b(C-V)}$ ve V_o değerinde ise frekansa bağlı küçük değişimlerin olduğu gözlemlendi.

Şekil 4.1’de Au/n-4H-SiC (MS) yapısının oda sıcaklığındaki doğru ve ters ön gerilim altındaki $\ln(I)$ -V eğrisi çizildi ve $V \geq 1$ V’ da lineerlikten sapmakta olduğu görüldü. $\ln(I)$ - $\ln(V)$ eğrisinden de daha net görülebileceği gibi yapının $\ln(I)$ - $\ln(V)$ eğrisi (Şekil 4.2) üç farklı lineer bölgeye sahiptirler. Ayrıca $\ln(I)$ -V eğrisinin lineerlikten sapmanın nedeni seri direnç (R_s) varlığına atfedildi. Direncin değerinin büyüklüğünü incelemek amacıyla Ohm yasası ($R_i = dV_i/dI_i$) kullanılarak direnç değerleri hesaplandı ve voltaja bağlı grafiği Şekil 4.3’de gösterildi.

Au/n-4H-SiC yapısının oda sıcaklığında frekansa bağlı C ve G/w eğrileri hem düşük hemde yüksek frekansta çizildi ve sırasıyla Şekil 4.4 ve 4.5’de verildi. Şekillerden de görüldüğü gibi gözlenen yarımalar ve piklerin nedeni arayüzey durumlarının özel dağılımına atfedilir. Ayrıca C ve G/w değerleri frekansa oldukça bağlı olup özellikle tükenim ve yığılma bölgesinde frekansın etkisi daha fazladır. Yeterince küçük negatif voltajlarda (terslenim bölgesi) C ve G/w değerlerinde önemli bir değişim olmayıp bu bölgede voltajın C ve G/w değerlerine etkisi hemen hemen hiç yoktur. C’nin değeri artan voltajla artıyor ve tükenim bölgesinde düşük frekanslarda ($f \leq 30$ kHz) $\sim 1,5$ V’ da Au/n-4H-SiC yapısının arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımından

dolayı pik vermektedir. C-V ve G/w-V ölçümleri yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) alınırsa arayüzey durumları (N_{ss}) uygulanan dış ac sinyali takip edemez ve dolayısıyla hem C hem de G/w değerlerine bir katkı getirmez [8,17,18].

Gerilimin kapasitans ve iletkenlik değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı voltajlarda hesaplanan C ve G/w değerlerinin frekansa bağlı değerleri hesaplandı ve Şekil 4.6' da verildi. Grafiklerden de görüldüğü gibi C ve G/w değerleri artan frekansla azalıyor.

Şekil 4.7'de Au/n-4H-SiC yapısı için oda sıcaklığında Eş. 4.3 [18,27] kullanılarak hesaplanan direnç eğrisi hem düşük hemde yüksek frekansa bağlı olarak verildi. R_s değerleri arayüzey durumlarının yoğun olduğu doğru beslem durumunda pikler verir. Özellikle düşük frekanslarda piklerin şiddetinin çok büyük olduğu açıkça görülmektedir. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının katkısından dolayı seri direnç gerçek değerinden yüksek çıkmaktadır. Ayrıca şekilden de görüldüğü gibi uygulanan voltaj ve artan frekansla direncin değeri azalmaktadır. Şekil 4.8'de ise seri direncin frekansa bağıllığı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yüksek frekanslarda seri direnç voltajdan bağımsızdır. Ayrıca, gerçek kapasitans ve iletkenlik değerlerini elde etmek için ölçülen C_m -V ve G_m/w -V eğrileri seri direnç içindüzeltildi [18]. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitansın (C_c) değerleri voltaja bağlı artarken (Şekil 4.9(a)), düzeltilmiş iletkenlik (G_c/w) değerleri ise azalmaktadır (Şekil 4.9(b)).

Arayüzey durumları (N_{ss}) yoğunluğunu elde etmek için düşük (0,7 kHz)-yüksek (1MHz) frekans ($C_{LF} - C_{HF}$) metodudur kullanıldı [37]. Literatüre göre $f \geq 500$ kHz için arayüzey durumları ac sinyali takip edemez ve $f \leq 100$ Hz'de ise arayüzey durumlarının tümü ac sinyali takip edebilir [38-43]. Bu nedenle düşük frekans 0,7 kHz yüksek frekans 1000 kHz (=1 MHz) seçildi. Arayüzey durumlarının yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olarak değiştiği Şekil 4.12'de görülmektedir.

Bu çalışmada hazırlanan Au/n-4H-SiC yapısı için elde edilen tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip aygıtlar için

arayüzey durumlarının, seri direnç ve diyotun I-V, C-V ve G/w-V ölçümleri üzerinde ki etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Bu nedenle yapının elektriksel karakteristiklerinin analizinde bu parametrelerin mutlaka dikkate alınması sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir.

KAYNAKLAR

1. Braun, F., "Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle", *Ann. Phys. Chem.*, Leipzig, 153, 556, (1874).
2. Sharma, B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications", *Plenum Press*, New York, (1984).
3. Wilson, A.H., "The theory of Electronic Semi-Conductors", *Proc. Roy. Soc.*, London, A133, 458, (1931).
4. Cowley, A.M., Sze, S.M., "Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems", *J. Appl. Phys.*, 36:3212-3216, (1965).
5. Schottky, W., "Halbleitertheorie der Sperrschicht", *Naturwissenschaften*, 26, 843, (1938).
6. Mott, N. F., "Note on contact between a metal and an insulator or semiconductor", *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 34: 568-572, (1938).
7. Rhoderick, E.H., Williams R.H., "Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed.", *Oxford University Press*, Oxford, 257, (1988).
8. Taşcıoğlu, İ., "Al/SiO₂/p-Si (MIS) Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans Ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-7,17-18,35-43,(2008).
9. Sze, S.M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", *John Willey & Sons*, New York, 245-300, 362-390, (1981).
10. Yücedağ, İ., "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1, 9-10, (2007).
11. Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflère, W.H., Cardon, F., "On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers", *Solid State Electron.*, 29:633-638, (1986).
12. Mui, D., Striteon, S., Markoç, H., "On the barrier lowering and ideality factor of ideal Al/GaAs Schottky diodes", *Solid State Electron.*, 34: 1077-1082, (1991).
13. Jarzebski, Z.M., "Physical properties of SnO₂ materials: 1. Preparation and defect structure", *J. Electrochem. Soc.*, 123(7):199-205, (1976).
14. Maudes, J. S., Rodriguez, T., "Sprayed SnO₂ films: Growth mechanism and film structure characterization", *Thin Solid Films*, 69(2):183-189, (1980).

15. Berger, L.I., "Semiconductor Materials", **CRC Press**, New York, 145-152, (1997).
16. Hahn B.R., YoonD.Y., "Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide-Silicon Structure", **Journal Of Applied Physics**, 65(7): 2766-2771, (1989).
17. Aydemir, U., "Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) Schottky Diyotların Elektriksel Parametrelerinin I-V, C-V Ve DLTS Metodu İle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4-8,12-13,51-53, (2009).
18. Nicollian, E.H., Brews, J.R. "Experimental evidence for interface trap properties", MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology", **John WileyandSons**, New York, 40-175, 285-318, 423-439 (1982).
19. Sing, A., Reinhard, K. C., Anderson, W. A., "Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-Insulator-Semiconductor Junctions"., **J. Appl. Phys.**,68(7):3475-3479, (1990).
20. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", **McGraw-Hill**, New York, 420-450, 517-523, (1997).
21. Cooke, M. J., "Semiconductor Devices", **Prentice Hall**, New York, 294-308, (1990).
22. Card, H.C., Rhoderick, E.H., "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes", **J.Phys.D: Appl. Phys.**, 4: 1589-1601 (1971).
23. Fonash, S.J., "The role of the interfacial Layer in Metal–Semiconductor Solar Cells", **J. Appl. Phys.**,46:1286-1289, (1975).
24. Ghandhi, S.K., "VLSI Fabrication Principles", **John Wiley&Sons**, New York, 401-405,(1983).
25. Gökçen,M., "MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlıncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 13-15, (2005).
26. Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz, M. J., "Interface states on semiconductor/insulator surfaces", **CRC Critical Reviews in Solid State Sciences**, 6(1): 226-233, (1976).
27. Schroder, D. K., "Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.", **John Wiley&Sons**, New York, 337-379, (1998).

28. Hofstein, S.R., Warfield, G., "Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer", *Solid-State Electronics*, 8(3): 321-341, (1965).
29. Aydın, M.E., Yıldırım N., Türüt, A., "Temperature-dependent behavior of Ni/4H-nSiC Schottky contacts", *J. Appl. Phys.*,102:043701, 2007.
30. Yue-Hu, W., Yi-Men, Z., Yu-Ming, Z., Qing-Wen, S., Ren-Xu, J., "Al/Ti/4H-SiC Schottky barrier diodes with inhomogeneous barrier heights", *Chin. Phys. B*, 20:087305, (2011).
31. Özdemir, S., Altındal, Ş., "Temperature dependent electrical Characteristics of Al-SiO_x-p-Si solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32:115- 127, (1994).
32. Singh, A., "Characterisation of Interface States at Ni/nCdF₂ Schottky Barrier Type Diodes and the Effect of CdF₂ Surface Preparation", *Solid State Electron.*, 28(3): 223-232,(1985).
33. Berglund, C. N., "Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Ed-13(10): 701-705 (1966).
34. Nicollian, E. H., Goetzberger, A., Lopez, A. D., "Expedient method of obtaining interface state properties from MIS conductance measurements", *Solid-State Electronics*, 12(12):937-944, (1969).
35. Kelberlau, U., Kassing, R., "Theory of nonequilibrium properties of MIS capacitors including charge exchange of interface states with both bands", *Solid-State Electronics*, 22(1): 37-45, (1979).
36. Nicollian, E. H., Goetzberger, A., "The Si-SiO₂ interface electrical properties as determined by the MIS conductance technique", *BellSyst. Tech. J.*, 46: 1055-1133, (1967).
37. Castagne, R., Vapaille, A., "Description of the SiO₂ Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements", *Surface Science*, 28(1): 157-193, (1971).
38. Kar, S., Narasimhan, R. L., "Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures", *J. Appl. Phys.*, 61(12): 5353-5359, (1987).
39. Hung, K. K., Cheng, Y. C., " Characterization of the Si-SiO₂ interface traps in p-metal-oxide-semiconductor structures with thin oxides by conductance technique", *J. Appl. Phys.*, 62(10): 4204-4211, (1987).

40. Tatarođlu, A., Altındal, Ő., Karadeniz, S., Tuđluođlu, N., "Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures response to radiation and frequency", *Microelectron. J.*, 34: 1043-1049, (2003).
41. Kar, S., Varma, S., "Determination of siliconsilicon dioxide interface state properties from admittance measurements under illumination", *J. Appl. Phys.*, 58(11): 4256-4266, (1985).
42. Deuling, H., Klausmann, E., Goetzberger, A., "Interface state Si-SiO₂ interface", *Solid-State Electron.*, 15(5): 559-571, (1972).
43. Tatarođlu, B., "MIS yapıların frekans ve radyasyona bağlı temel elektriksel parametreleri", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 53-54, (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : SEVGİLİ, Ömer
Uyruğu : T.C
Medeni hali : Bekâr
Doğum tarihi ve yeri : 03.10.1990 - Çankırı
Telefon : 0505 942 84 83
e-mail : omersevgili06@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik Bölümü	2013
Lisans	Ahi Evran Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2011
Lise	Ankara Pursaklar Lisesi	2007

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Kitap okuma, yüzme, sinema.