

**Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) YAPILARIN KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) VE
İLETKENLİK-VOLTAJ (G/ω-V) KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Şenay SEZGİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2011
ANKARA**

Şenay SEZGİN tarafından hazırlanan Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Yapıların Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinin İncelenmesi adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Adem TATAROĞLU
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Fizik Anabilim Dalı G.Ü.

Doç. Dr. Adem TATAROĞLU
Fizik Anabilim Dalı G.Ü.

Doç. Dr. İlbilge DÖKME
Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı G.Ü.

Tarih: 26/05/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü 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 yapıldığını bildiririm.

Şenay SEZGİN

**Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) YAPILARIN KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) VE
İLETKENLİK-VOLTAJ (G/ω-V) KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Şenay SEZGİN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2011**

ÖZET

Bu çalışmada, n tipi silisyum (Si) alttaş üzerine radyo frekans (RF) püskürtme metoduyla hazırlanmış Si₃N₄ yalıtkan tabakalı Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri incelendi. C-V ve G/ω-V ölçümleri, HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak ve seri direnç (R_s) ve arayüzey durum (N_{ss}) etkisi dikkate alınarak, sırasıyla 1 kHz-1 MHz frekans ve 80-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. R_s hem artan frekans hem de artan sıcaklık ile azalmaktadır. Ayrıca, ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri MIS yapının gerçek kapasitans ve iletkenliğini bulmak için, seri direnç etkisinden dolayı düzeltilmiştir. N_{ss}'nin varlığı, C-V ve G/ω-V eğrilerinin ideal durumdan sapmasına yol açar. Arayüzey durumları özellikle düşük frekanslarda ac sinyali kolayca takip edebilir ve böylece kapasitansa katkıda bulunurlar.

Bilim Kodu : 202.1.166

Anahtar Kelimeler : MIS yapı; C-V ve G/ω-V karakteristikleri; Seri direnç; Arayüzey durumlar

Sayfa Adedi :64

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

**THE INVESTIGATION OF CAPACITANCE-VOLTAGE (C-V) AND
CONDUCTIVITY-VOLTAGE (G/ω -V) CHARACTERISTICS OF
Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) STRUCTURES
(M. Sc. Thesis)**

Şenay SEZGİN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2011

ABSTRACT

In this study, capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω -V) characteristics of Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) structure with insulator layer Si₃N₄ deposited on n type Si substrate by radio frequency (RF) supettering method was investigated. The C-V and G/ω -V measurements were performed by use of HP 4192A LF Impedance Analyser and considering series resistance (R_s) and interface state (N_{ss}) effect in the frequency and temperature ranges of 1 kHz-1 MHz and 80-400 K, respectively. The R_s decreases with both increasing frequency and temperature. Also, the measured capacitance and conductance values were corrected for the effect of series resistance to obtain the real capacitance and conductance of MIS structure. The presence of N_{ss} causes the C-V and G/ω -V characteristics deviate from the ideal case. Interface states can follow ac signal particulary at low frequencies and thereby yield an excess capacitance.

Science Code : 202.1.166

Key Words : MIS structure; C-V and G/ω -V characteristics; Series resistance; Interface states

Page Number : 64

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren ve çok büyük yardımlarını gördüğüm Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Doç. Dr. Adem TATAROĞLU' na teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar.....	3
2.1.1. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar	3
2.1.2. Metal/n tipi yarıiletken omik kontaklar.....	6
2.2. Metal Yalıtkan Yarıiletken (MIS) Yapılar.....	7
2.3. İdeal MIS Yapısı.....	9
2.3.1. Yığılım.....	13
2.3.2. Tükenim.....	14
2.3.3. Tersinim.....	15
2.4. Gerçek MIS Yapısı.....	16
2.4.1. İyonlanmış tuzaklar	17
2.4.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri	18

Sayfa

2.4.3. Arayüzey durumları	20
2.4.4. Hareketli iyonlar.....	22
2.5. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi.....	22
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	28
3.1. MIS Yapımında Kullanılan Silisyum (Si) Kristalinin Fiziksel Özellikleri...	28
3.2. Silisyum Nitrür (Si_3N_4) Kristali Yapısı.....	29
3.3. Au/ Si_3N_4 /n-Si (MFS) Yapıların Hazırlanması.....	30
3.3.1. Kristal temizleme.....	30
3.3.2. Yalıtkan silisyum nitrat (Si_3N_4) tabakasının RF püskürtme yöntemiyle oluşturulması.....	31
3.3.3. Omik kontakın oluşturulması	34
3.3.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması	35
3.4. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri	36
4. DENEYSEL SONUÇLAR	38
4.1. MIS yapının frekansa bağlı elektrik özellikleri.....	38
4.1.1. C-V ve G/ω -V eğrileri	38
4.1.2. Seri direnç değerlerinin frekans ve gerilime bağlı incelenmesi.....	42
4.1.3. Paralel iletkenlik-frekans (G_p/ω -log f) eğrileri.....	45
4.1.4. Arayüzey durum yoğunluğu.....	46
4.2. MIS yapının sıcaklığa bağlı elektrik özellikleri.....	48
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	56
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	64

ÇİZELGELERİN LİSTESİ**Çizelge****Sayfa**

Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.....28

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Metal ve n tipi yarıiletken için enerji band diagramları	4
Şekil 2.2. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji bant diyagramı	5
Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/n tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı.....	7
Şekil 2.4. Bir MIS yapının şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.5. $V = 0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı.....	9
Şekil 2.6. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	12
Şekil 2.7. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması	13
Şekil 2.8. İdeal bir MIS yapının devre şeması	16
Şekil 2.9. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	17
Şekil 2.10. p tipi ve n tipi MIS yapı için pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj ekseninde boyunda C-V eğrilerinin değişimi.....	18
Şekil 2.11. MIS yapısının eşdeğer devresi.....	22
Şekil 2.12. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre.....	24
Şekil 2.13. MIS yapının eşdeğer devresi.....	26
Şekil 3.1. α - Si_3N_4 ve β - Si_3N_4 kristal yapılarının gösterimi.....	29
Şekil 3.2. (a) Ar^+ iyonlarının hedeften molekül sökmesi.....	32
Şekil 3.2. (b) sökülen molekülün alttaşa (substrate) yerleşmesi.....	32
Şekil 3.3. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi.....	34
Şekil 3.4. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....	35
Şekil 3.5. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. Oluşturulan Au/Si ₃ N ₄ /n-Si (MIS) yapının şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.7. C-V ve G/ω-V ölçümleri için kullanılan düzenek.....	37
Şekil 4.1. MIS yapı için farklı frekanslarda çizilen a) C-V ve b) G/ω-V eğrileri.....	39
Şekil 4.2. Farklı doğru beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren a) C-log f ve b) G/ω-log f eğrileri.....	41
Şekil 4.3. Farklı frekanslar için seri direncin voltaja bağlı R _s -V eğrileri.....	43
Şekil 4.4. Farklı doğru beslem gerilimleri için seri direncin frekansa bağlı değişimin gösteren R _s -log f eğrileri.....	43
Şekil 4.5. Yüksek frekans (1 MHz) için düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik eğrilerinin voltaja bağlı a) C-V ve b) G/ω-V eğrileri.....	44
Şekil 4.6. Farklı doğru beslem gerilimleri için paralel iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren G _p /ω-log f eğrileri.....	46
Şekil 4.7. Arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim (N _{ss} -V) eğrisi.....	47
Şekil 4.8. MIS yapının 100 kHz frekansında, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen a) C-V b) G/ω-V karakteristikleri.....	48
Şekil 4.9. MIS yapının 1 MHz frekansında, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen C-V b) G/ω-V karakteristikleri.....	49
Şekil 4.10. MIS yapının 100 kHz için, 80-400 K sıcaklık aralığında farklı doğru beslem gerilimlerinde a) C-T b) G/ω-T eğrileri.....	51
Şekil 4.11. MIS yapının 1 MHz için, 80-400 K sıcaklık aralığında farklı doğru beslem gerilimlerinde a) C-T b) G/ω-T eğrileri.....	52
Şekil 4.12. MIS yapının 100 kHz'de sıcaklığa bağlı elde edilen R _s -V eğrileri.....	53
Şekil 4.13. MIS yapının 100 kHz'de elde edilen farklı gerilimler için sıcaklığa bağlı R _s -T eğrileri.....	54

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. BESTEC firmasından alınan 3” ultra yüksek vakuma sahip püskürtme sistemi.	33
Resim 3.2. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları.....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	MIS yapının alanı
C	Kapasitans
G	Kondüktans (İletkenlik)
C_D	Yarıiletken tüketim tabakasının kapasitansı
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
d_{ox}	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
A_c	Alternatif gerilim
D_c	Doğru gerilim
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
R_s	Seri direnç
ω	Açısal frekans ($=2\pi f$)
V_{ox}	Oksit üzerine düşen gerilim
G_p	Paralel iletkenlik
W_D	Tüketim tabakasının genişliği
V	Metal plakaya uygulanan gerilim
Y	Admittans
Z	Empedans (Rezistans)
ϵ_{ox}	Yalıtkanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Q_{sc}	Uzay yükü bölgesinde biriken yük
Q_M	Metal yüzeyindeki toplam yük
Q_{ss}	Arayüzey yük yoğunluğu

Simgeler**Açıklama**

τ	Arayüzey tuzaklarının ömrü
ϕ_B	Potansiyel engel yüksekliği
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ψ_B	Fermi ve saf Fermi enerjisi arasındaki fark
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi

Kısaltmalar**Açıklama**

MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
C-V	Kapasitans-Voltaj
G/ω-V	İletkenlik-Voltaj

1. GİRİŞ

Katıhal fiziğinin 20. Yüzyıl teknolojisine getirdiği belki de en büyük katkı yarıiletkenlerin elektronikte kullanılmasıdır. Elektronikte yarıiletken malzemenin kullanımıyla büyük bir sanayi endüstrisi oluşmuş ve yarıiletken teknolojisi gelişmiştir. Yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak zaman içinde silisyum kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunun yanı sıra silisyum dioksit kullanılarak Schottky diyotlar, kapasitörler, alan etkili transistörler, ve entegre devrelerinin yapılması mümkün olmuştur.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-oksiyarıiletken (MOS) yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasına yalıtkan bir tabakanın oluşturulmasıyla meydana gelir. Metal ile yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak bir yalıtkan tabaka (SiO_2 , SnO_2 , Si_3N_4 vb.) oluşturulması metal-yarıiletken (MS) diyotları MIS ve MOS yapıya dönüştürür ve bu yalıtkan tabaka, hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de yük geçişlerini düzenler. Bu yalıtkan tabaka çok ince ise ($\sim 25\text{-}100 \text{ \AA}$), bu kontaklar MIS tipi kontaklar olarak adlandırılır. Yalıtkan tabakanın kalınlığı $100 \text{ \AA}$ 'dan büyük olması halinde yapı MOS kapasitörlere dönüşür. Metal ile yarıiletken arasında oluşturulan yalıtkan tabakanın varlığı, seri direnci (R_s) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) gibi temel diyot parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [1-7].

Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, metal-yarıiletken arasında ve yasak enerji bölgesinde çok sayıda istenmeyen enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu izinli enerji seviyelerinin mertebesi teorik olarak $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ civarında olması beklenirken deneysel sonuçlar bunların $10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ile $10^{14} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ civarında olduğunu göstermiştir[5, 8]. Ayrıca MS veya MIS gibi yapıların hazırlanışı sırasında yarıiletken yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen ve yarıiletken kristal örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir [8-11]. 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 [12-14].

Silisyum nitratın (Si_3N_4) tarihsel gelişimi incelendiğinde yüz yıllık bir gelişimi olduğu görülmektedir [15]. Doğal olarak bulunabilen tek Si_3N_4 malzemesi meteorit taşların analizi sonucu ortaya çıkarılmıştır [16]. Taşlar incelendiğinde Si_3N_4 'ün α - Si_3N_4 olarak çekirdeklendiği görülmüş ve nierite olarak isimlendirilmiştir. İlk sentetik Si_3N_4 malzemesi 1896 yılında SiO_2 'nin karbotermal redüksiyonu ile elde edilmiştir. 1950'li yıllarda ise Si_3N_4 'ün refrakter malzeme olarak kullanılabilirliği belirlenmiş ve 1955'te SiC ve farklı oksit refrakter malzeme ilaveleri ile birlikte kullanımı başlamıştır [17]. Daha sonraki yıllarda visker şeklindeki Si_3N_4 tanelerinin metal sistemler içerisine ilave edilerek jet ve roketlerde yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı gerçekleşmiştir. 1970'li yıllarda Amerika Birleşik Devletinde birçok firmanın katılımı ile Si_3N_4 'ün seramik içeren gaz türbin motorlarında kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır [18, 19].

Hazırlanan $Au/Si_3N_4/n-Si$ (MIS) yapıların elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) karakteristikleri geniş bir frekans aralığında (1 kHz-1 MHz) incelendi. Ayrıca, sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj C-V ve iletkenlik-voltaj G/ω -V ölçümleri geniş bir sıcaklık aralığında (80-400 K) 100 kHz ve 1 MHz frekans değerleri için ayrı ayrı tekrarlandı. Buna ek olarak, hem sıcaklığa hem de voltaja bağlı R_s profili ve frekansa bağlı N_{ss} değerleri deneysel C-V ve G/ω -V ölçümlerinden yararlanılarak elde edildi.

Bu tez çalışması aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölüm, metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının teorik bilgilerini içermektedir. Üçüncü bölüm, numune hazırlama tekniği, deneysel sistem ve kullanılan araç ve gereçleri içermektedir. Dördüncü bölüm, deneysel ölçüm sonuçlarından elde edilen verileri ve bunlarla ilgili grafikleri içermektedir. Beşinci bölüm, elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili genel bir değerlendirme ve deneysel sonuçların tartışmasını içermektedir.

2. TEORİK BİLGİLER

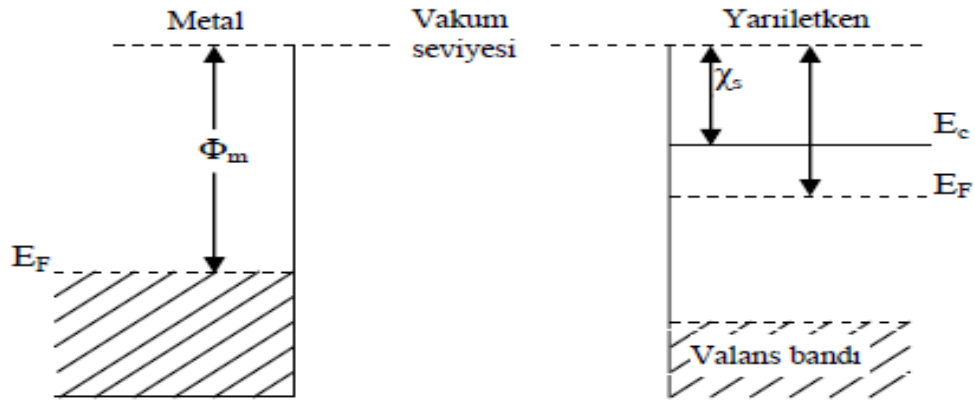
2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar

Metal/yarıiletken kontaklar olan Schottky diyotlarda meydana gelen doğrultma işlemi yarıiletkenin eklem tarafındaki tükenim tabakası tarafından sağlanır [20]. Bir metal/yarıiletken kontak ani bir ara yüzey oluşuncaya kadar metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri arasındaki farkın ortadan kalkması ile elde edilebilir. Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılabilmesinin bir yolu da kristale uygun kontakların seçilmesi ile mümkündür. Kontak, kristal ile kristale uygulanacak olan kontak malzemesinin en az dirençle temas etmeleridir. Kontakın ideal olması, kontak malzemelerinin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Kontak haline getirilen maddeler arasında, elektrokimyasal potansiyelleri aynı düzeye gelinceye kadar bir yük alışverişi olur [21, 22]. Metal-yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına (Φ_m , Φ_s) bağlı olarak, omik ve doğrultucu kontak (Schottky kontak) olmak üzere iki kısımda incelenir. p-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m < \Phi_s$ ise, doğrultucu kontak; eğer $\Phi_m > \Phi_s$ ise, omik kontak oluşur. n-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve eğer $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda ise omik kontak oluşur.

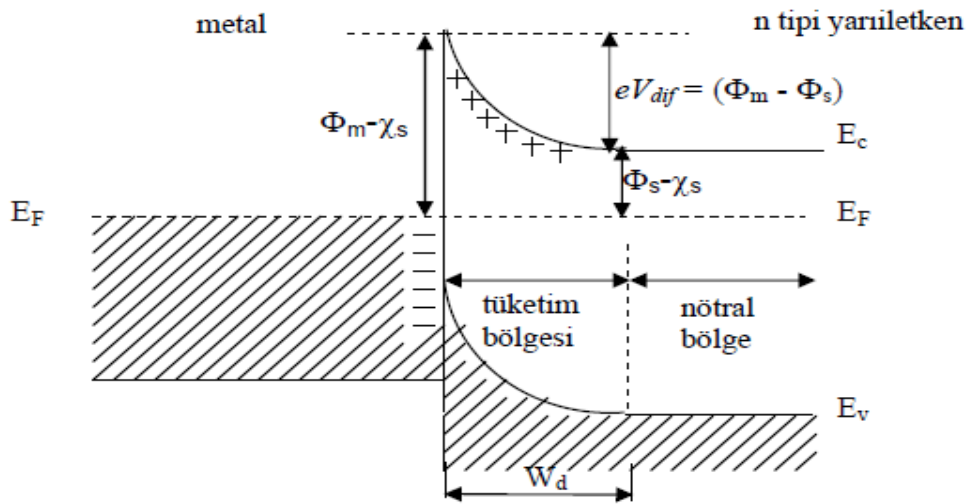
2.1.1. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki hareketleri, kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli yüzünden zorlaşır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilgilidir [22]. Bu olayı izah etmek için, bir metal ve bir n tipi yarıiletken kontağı göz önüne alalım. Yarıiletken içindeki donör konsatrasyonunun nisbeten yüksek ve oda sıcaklığında bütün donörler iyonize olmuş olsunlar. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir; yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ise, vakum seviyesi ile yarıiletkenin Fermi enerji

seviyesi arasındaki farktır. Yarıiletkenin elektron ilgisi χ_s , iletkenlik bandının en üst sınırından bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır.



(a)



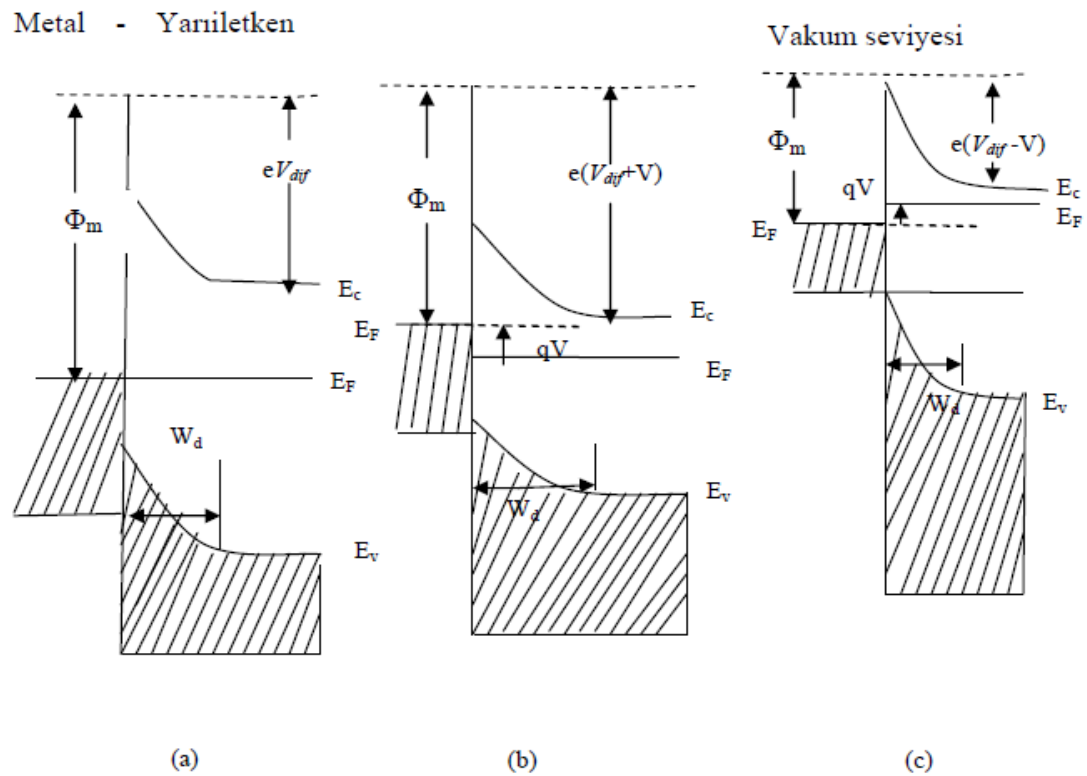
(b)

Şekil 2.1. Metal ve n tipi yarıiletkenle ait enerji band diagramları (a) Kontakdan önce (b) Kontakdan sonra termal denge durumunda

Şekil 2.1, $\Phi_m > \Phi_s$ olan metal ve n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın elektron enerjisi band diagramını göstermektedir. Kontakdan önceki durumda, Şekil 2.1.a' da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakdan sonra yarıiletken yüzeyden metale elektronlar geçerken, geride iyonize olmuş donörler bırakılırlar. Yük değişimi tamamlandıktan

sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.1.b' de görüldüğü gibi $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar düşmüştür. Sonuç olarak, yüzeyde bir potansiyel engeli oluşur. Yarıiletken tarafında bu engelin yüksekliği $(\Phi_m - \Phi_s)$ ve metal tarafında bu engelin yüksekliği $\Phi_m - \chi_s$ kadardır.

Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metal tarafına geçerken bu engelle karşılaşır. Kontakın yarıiletken tarafındaki pozitif yüklere, yoğunluğu metal tarafındaki iyonize olmuş yük yoğunluğundan çok daha az olan iyonize olmuş donörler sebep olur ve bu yüklere yarıiletken içinde hareketsiz olması sebebiyle yüzey yükü olarak değil, bir uzay yükü olarak bakmak gerekir. Kontaktaki potansiyel engeli yüzünden, yüzey tabakası engel tabakası olarak da bilinir. Bu tabakanın kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve V_{dif} difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır [23].



Şekil 2.2. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji bant diyagramı (a) termal denge durumu (b) ters beslem ve (c) doğru beslem

Şekil 2.2 bir metal/n tipi yarıiletken diyodun dengede, ters ve doğru beslem altındaki enerji bant diagramını gösterir [5]. Şekil 2.2.(a) doğrultucu kontağın termal dengedeki enerji bant diagramını gösterir. Termal dengede metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engelini aşmasına yetebilecek büyüklükte olduğunda, kontakten eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer. Şekil 2.2.(b)'de görüldüğü gibi, yarıiletkene bir pozitif voltaj uygulanırsa metalden yarıiletkene geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu nedenle bu elektronların oluşturacakları akım da değişmez. Fakat yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı qV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği qV kadar azalacaktır. Dolayısıyla metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artacaktır. Sonuç olarak net akım;

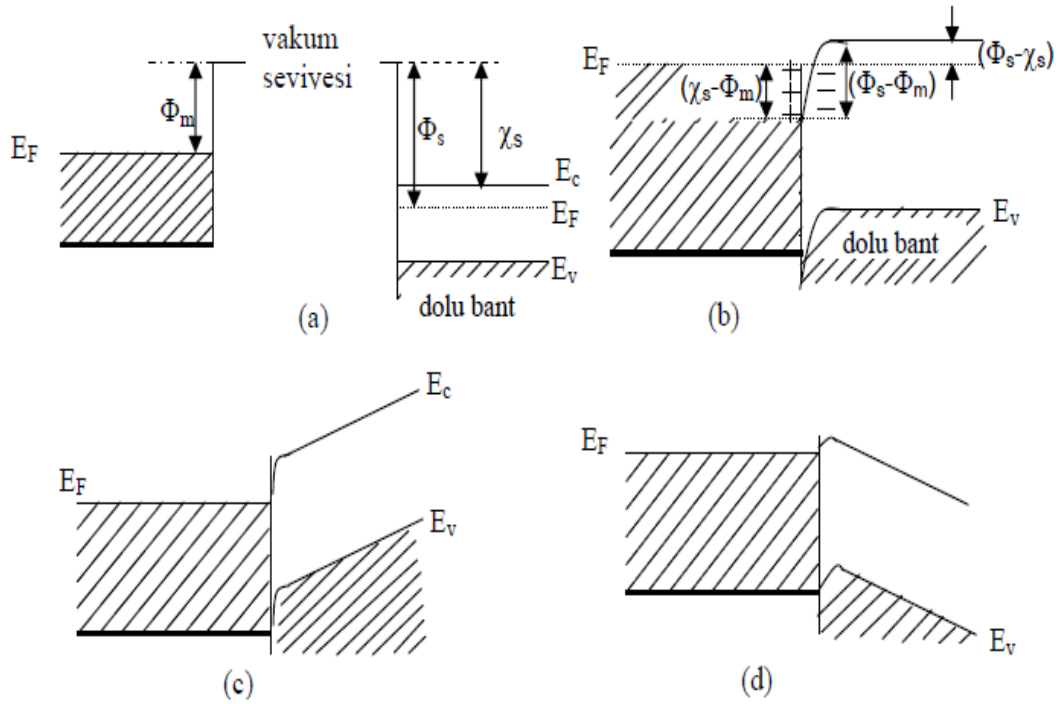
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

ile verilir. I net akımı pozitiftir. Bu doğrultucu kontakttır. Tüketim bölgesinin genişliği artmıştır. Şekil 2.2.(c)' de görüldüğü gibi, yarıiletken tarafına negatif gerilim uygulandığında tüketim bölgesinin genişliği azalır. İletkenlik bandı qV kadar alçalır ve yarıiletkenden metale elektron akımı termal dengedeki değerine göre artar.

2.1.2. Metal /n tipi yarıiletken omik kontaklar

Bir metalle bir n tipi yarıiletkenin kontak haline getirildiği $\Phi_m < \Phi_s$ durumunu dikkate alırsak, kontakten önce, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontakten önceki enerji-bant diyagramları Şekil 2.3.(a)'daki gibidir. Kontakten sonra bir yük değişimi gerçekleşir. Elektronlar metalden, kontağın metal kısmında bir pozitif yüzey yükü bırakıp yarıiletken kısmına akarlar ve kontağın yarıiletken kısmında bir negatif yüzey yüküne neden olurlar. Sonuçta kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.3.(b)'de görülmektedir. Yük değişimi bittikten sonra yarıiletken gövdedeki Fermi seviyesi $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar yükselir. Bir V potansiyeli uygulanırsa, bu potansiyel

farkı kontak bölgesinde değil yarıiletken boyunca dağılacaktır. Metal kısmına pozitif bir gerilim, yarıiletken kısmına negatif bir gerilim uygulanırsa yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler (Şekil 2.3.(c)). Yarıiletkene pozitif ve metale negatif bir gerilim uygulanırsa, metalde olan elektronlar yarıiletken kısmına geçerler (Şekil 2.3.(d)). Bu sebeple omik kontaklara enjeksiyon kontakları da denir [22].



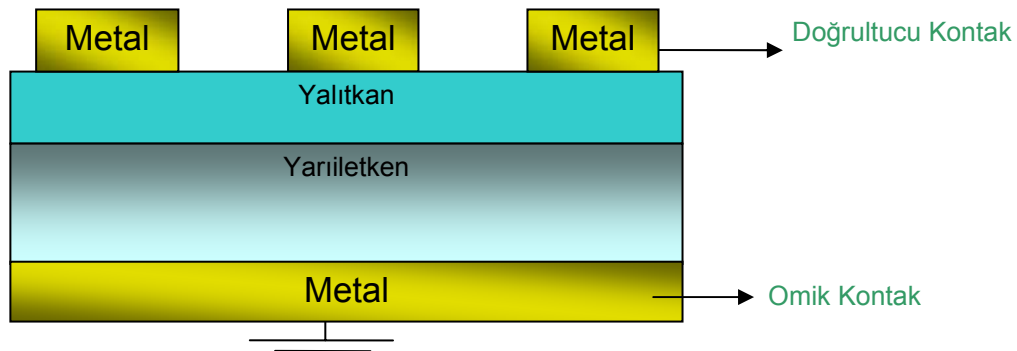
Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/n tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı (a) kontak öncesi, (b) kontak sonrası, (c) düz beslem altında, (d) ters beslem altında

2.2. Metal Yalıtkan Yarıiletken (MIS) Yapılar

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar, metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabakaya sahip olduğundan kapasitörlere benzemektedir. Bu yapılar ilk olarak 1959 yılında J.L.Moll tarafından ortaya konulmuştur [24]. Yalıtkan ince filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerinin incelemesinde MIS yapılar yaygın olarak kullanılır. Terman, MIS yapıda, termal yöntemle oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali ve üzerinde alüminyum metal elektrot kullanmıştır. MIS

kapasitörün, yalıtkan/silisyum arayüzey durumları araştırmış ve d.c. gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağıllığını ölçmüştür [11]. Deneysel ve teorik kapasitans-voltaj (C-V) değerlerini karşılaştırmış, arayüzey elektron vedeşik tuzaklarının zaman sabitlerini elde etmiştir.

Terman, yüksek frekans C-V ölçümlerinden, arayüzey tuzak yoğunluğunun elde edilebileceğini göstermiştir [11]. Transistörlerde kullanılan metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörlere ait C-V verilerinin ilk detaylı gösterimi ve yarıiletken yüzeyler üzerinde oksit tabakasının büyütülmesi ise Grove, Deal, Snow ve Sah tarafından literatüre katılmıştır [25]. MIS yapılarda bulunan yalıtkan tabaka kalınlığının 100 Å'dan büyük olması durumunda MIS yapılar, MOS yapı olarak adlandırılır. Yalıtkan tabaka kalınlığı çok ince (~10-40 Å) olduğunda, bu yapılar MIS tipi Schottky diyotu olarak adlandırılır ve elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) gibi deneysel ölçümler kullanılarak elde edilir. Şekil 2.4'de bir MIS yapı şematik olarak verilmiştir.



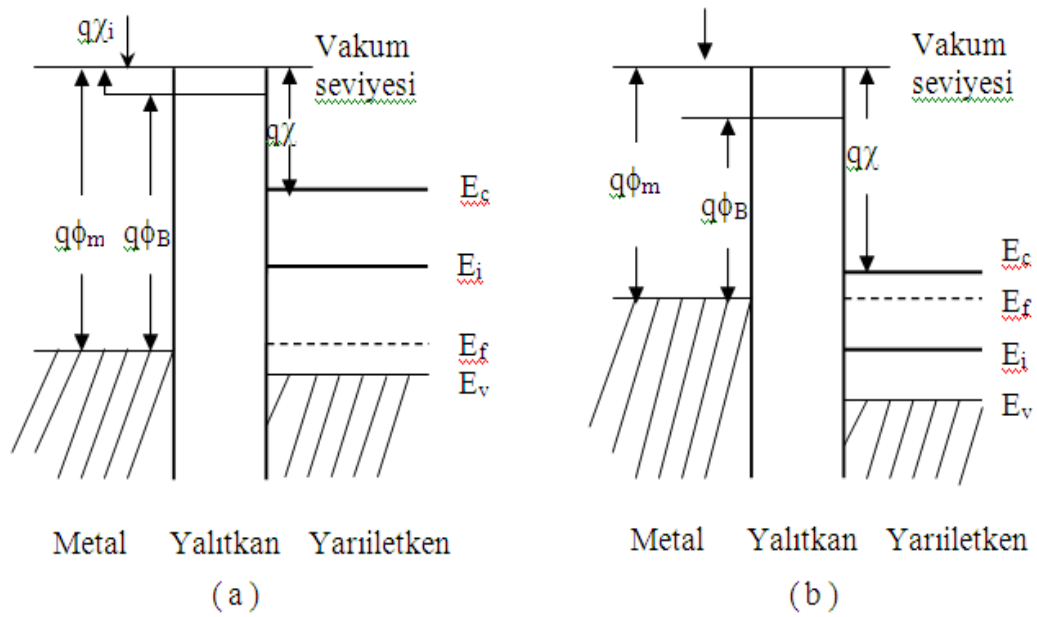
Şekil 2.4. Bir MIS yapının şematik gösterimi

MIS veya MOS yapılarda, elektriksel ve dielektrik parametreler genellikle frekans ve sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümlerinden hesaplanır. Bu yapıların belirgin özellikleri, yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenir. İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), taban durumu ile en yüksek enerji seviyesi arasındaki farka Fermi enerjisi denir. Yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi katkı durumuna göre iletkenlik veya değerlik bandına yakın bir seviyede oluşur.

Vakum seviyesi; bir metalin dış yörüngesindeki bir elektronun, yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Metalin iş fonksiyonu (ϕ_m); bir elektronu Fermi enerji seviyesinden, vakum seviyesine çıkarmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s), yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve bu enerji seviyesi, katkı atomlarının yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı değişen bir niceliktir. Elektron yakınlığı (χ), vakum seviyesi ile yarıiletkenin iletim bandı arasındaki bir elektronun enerji farkıdır [13, 26].

2.3. İdeal MIS Yapısı

İdeal bir MIS yapıda sıfır voltajdaki enerji-bant diyagramı Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken

Fermi enerjisi: 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 2.5’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 yapıdaki özellikler aşağıdaki gibi tanımlanabilir [5, 27-29];

1. Sıfır beslem durumunda metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasındaki fark sıfırdır.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.2)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.3)$$

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

2. d.c. beslem şartları altında yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.
3. Herhangi bir beslem şartı altında, yapıdaki yükler yalıtkan ile bitişik, metal yüzeyindekiler ile yarıiletkendekiler eşit miktarda fakat zıt yönlüdür.
4. Yalıtkan bant aralığı o kadar büyüktür ki, yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
5. Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz.

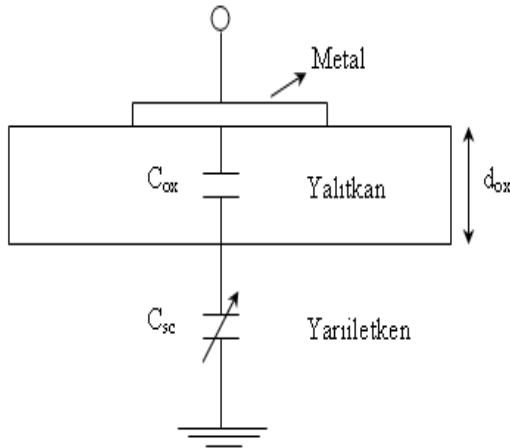
İdeal bir MIS yapıda metal elektroda gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü Q_{sc} oluşur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, yarıiletkende metallerdekine 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,

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.4)$$

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} yalıtkan üzerine düşen gerilim, ψ_s arayüzeydeki bant gerilimidir [28].

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. 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 2.6'da gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel 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 verecektir.



Şekil 2.6. MIS kapasitansının eşdeğer devresi

Şekil 2.6' daki eşdeğer devrenin çözümünde MIS kapasitansı aşağıdaki eşitlikle verilir.

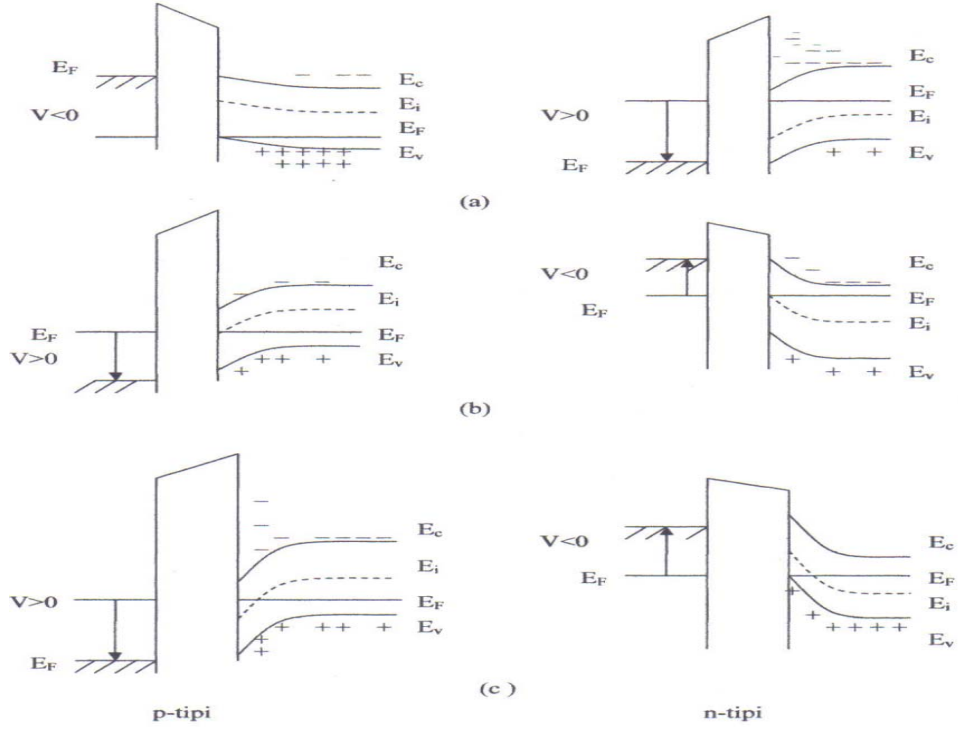
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.5)$$

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

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.6)$$

olarak verilir. Bağlantıda ϵ_{ox} yalıtkan tabakasının dielektrik sabiti, d_{ox} ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından C_{ox} değeri uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{sc} uzay

yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen durumları Şekil 2.7' de gösterilen p-tipi bir yarıiletken için tanımlayalım [5,28].



Şekil 2.7. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2.3.1. 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 çeker, yarıiletkendeki değerlik (valans) elektronları bandının tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine yükselir (Şekil 2.7.a). İdeal bir diyotta yük akışı 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.

2.3.2. Tükenim

P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale küçük bir pozitif gerilim ($V > 0$) uygulandığında yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindekideşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındakideşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür (Şekil 2.7.b). 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 taşıyıcısıdeşikler 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 μm civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir. Bu bölgenin genişliği aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.7)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A_{ox} MIS doğrultucu kontağın alanı ve C_{ox} yalıtkan oksit kapasitansıdır. Tükenim durumunda uzay yükü yoğunluğu:

$$Q_{sc} = q N_a^- W = Q_a \quad (2.8)$$

eşitliği ile verilir. Burada N_a^- iyonlaşmış alıcı yoğunluğu ve Q_a birim yüzeydeki alıcı yüküdür.

Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak tersinim 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.

2.3.3. Tersinim

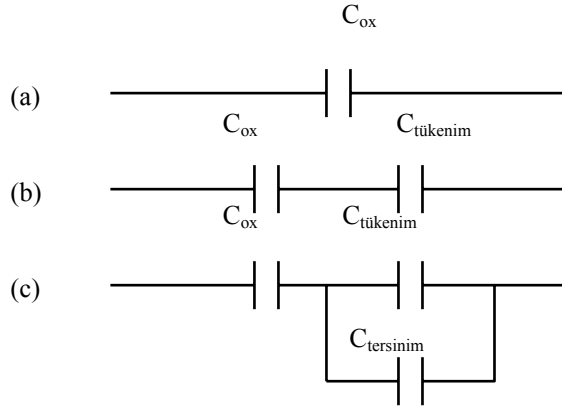
P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarında metale büyük bir pozitif gerilim ($V \gg 0$) uygulandığı zaman bandlar oldukça aşağı doğru bükülür öyle ki saf durumdaki enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesi E_f 'nin altına düşer (Şekil 2.7.c). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar ve elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu duruma tersinim (inversion) durumu denir.

Bu durumda oluşan uzay yükü,

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \quad (2.9)$$

eşitliği ile verilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_a birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Bu bölgede MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun, uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu a.c. sinyalini 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 tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'in altında değerler almasına neden olur.

İdeal bir MIS yapıda yığılım, tükenim ve tersinim durumları için devre şeması Şekil 2.8'deki gibidir [5].



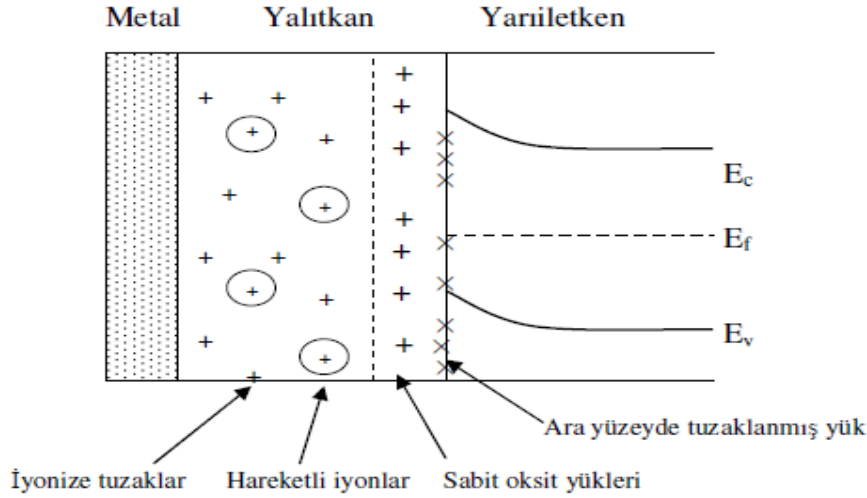
Şekil 2.8. İdeal bir MIS yapının devre şeması a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2.4. Gerçek MIS Yapısı

İdeal bir yalıtkanda, kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir 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 birçok durum ortaya çıkar ve bu durumlar MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına neden olur [28]. Bu durumların sınıflandırılması Şekil 2.9'da gösterilmiştir [5].

Bunları sırayla ;

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



Şekil.2.9. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

2.4.1. İyonlaşmış tuzaklar

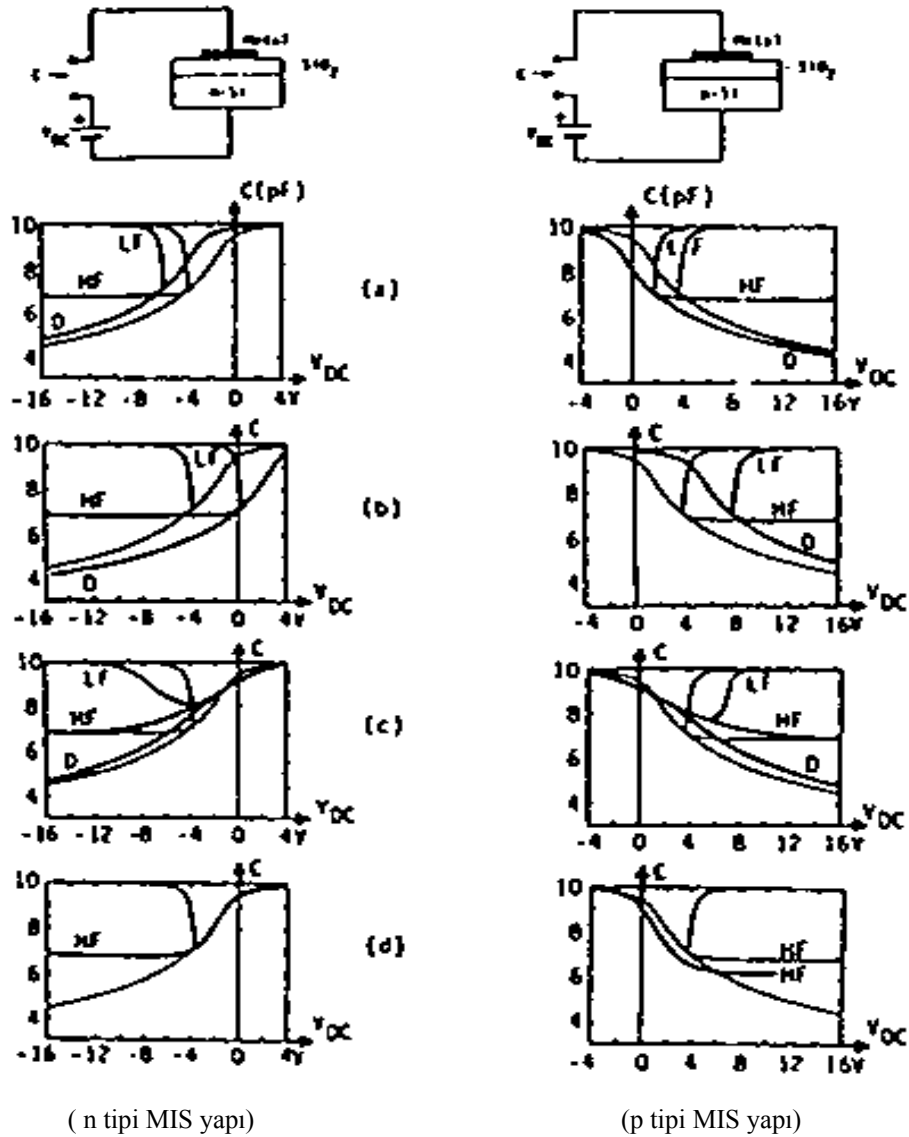
Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Bu şekilde yalıtkan oksit ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçerler. Bu tuzaklar kapasitans-voltaj eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklardan dolayı kapasitans-voltaj eğrisinde histeresis etkisi gözlenir. Kapasitans-gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla histeresis yük yoğunluğu:

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (2.10)$$

şeklinde yazılır. Burada ΔV_{HisFB} düz banttaki kayma miktarıdır.

2.4.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit ve arayüzey yükleri yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. 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 değişimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. n tipi ve p tipi MIS yapı için pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenini boyunca C-V eğrilerinin değişimi.

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 [8]. Bu yüklerin başlıca özelliği, yalıtkan-yarıiletken yapısına uygulanan gerilimden yük durumlarının bağımsız olmasıdır. Yarıiletken ile bu yük merkezleri arasında yük alışverişi olmaz. Yalıtkan oksidin büyüme koşulları yük yoğunluğuna etki eder (yalıtkan oksidin büyüme hızı, oksitleyen gaz, sıcaklık gibi) [29].

MIS kapasitansı eğrisinde sabit yükün etkisi, gerilim eksenini boyunca C-V eğrisinin paralel kaymasıdır ve ΔV kayma miktarı,

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (2.11)$$

şeklinde yazılır. Sabit oksit yüklerinin sebep olduğu kaymadan faydalanılarak yalıtkan içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük ΔQ_{eff} ve arayüzey yük yoğunluğu ΔQ_{ss} hesaplanır. Buna göre ΔQ_{ox} , ΔQ_{eff} ve ΔQ_{ss} ;

$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.12)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.13)$$

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.14)$$

bağıntılarıyla verilir. Burada, ΔV_{MG} gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve ΔV_{FB} düz bant durumunda gerilim kaymasını göstermektedir. Düz bant gerilim kaymasına, yalıtkan içine enjekte olmuş yükler yada yalıtkan içindeki hareketli yükler neden olabilir [14].

2.4.3. 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 dolun boşalım zamanıdır ve $\tau=1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve R_{ss} arayüzey direncidir [14, 29].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.15)$$

Arayüzey potansiyeli; yukarıda ifade ettiğimiz kapasite ve iletim a.c. etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir d.c. 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 (stretch out) olarak gözüktür.

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

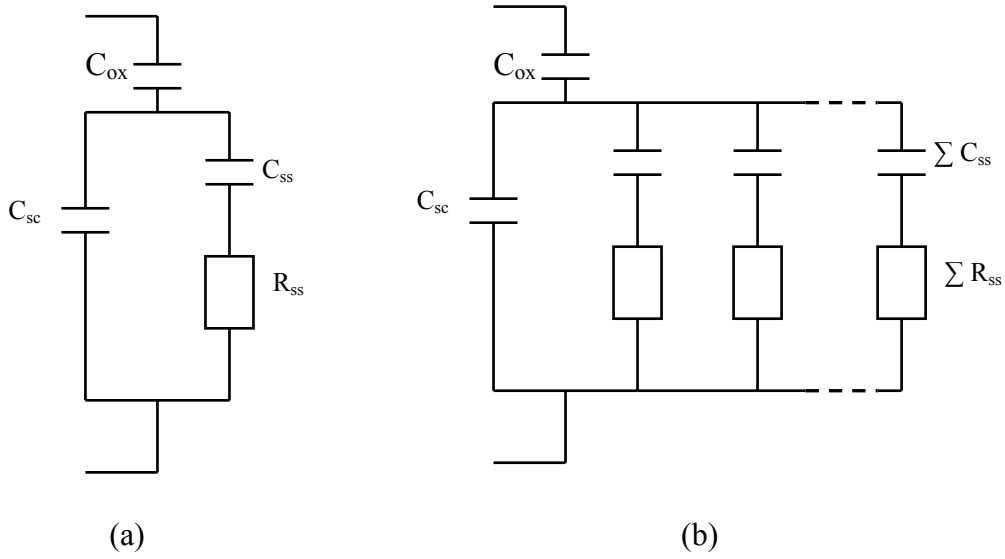
$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.16)$$

ile verilir. 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 Eş.2.31'de yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (2.17)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez [12].

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 2.11'de verildiği gibidir.



Şekil 2.11. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

2.4.4. Hareketli iyonlar

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [30]. 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.

2.5. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi

Bir MIS yapıda arayüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığı ideal MIS karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya

çıkmasına yol açabilir. Bir MIS yapılışı sırasında silisyum yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [5].

Yüzey durumları yoğunluğu için kuramsal tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani 10^{15} cm^{-2} civarında fakat deneysel sonuçlar bunun sadece 10^{11} - 10^{12} cm^{-2} mertebesinde olduğunu göstermektedir [5]. Yüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyinde bulunur. Bunlar yalıtkan yapısındaki hareketsiz yükler ihtiva eden bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan altında yalıtkan içerisinde göç etmeye yatkın, hareketli iyonlar tarafından meydana getirilir. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile hemen hemen giderilebilir. Yavaş yüzey durumları MIS kapasitesini etkilemez. Hızlı yüzey durumları yalıtkanla yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi ile yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da bükülmeyen Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alışverişi yapar. Arayüzeyde bulunan ve yasak enerji bölgesi dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit yüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit yüzey yükü veya oksit yükü denir.

Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede silisyumdaki iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alış verişi yapabildiklerinden dolayı bu yüzey durumlarına yüzey rekombinasyon (yeniden birleştirme) merkezleri de denir. Temiz yüzeylerde ve yüksek vakum altındaki ölçümler, yüzey atomlarının yoğunluğunun mertebesini çok yüksek yapar. Arayüzey tuzaklar için dağılım fonksiyonu; verici arayüzey tuzaklar için,

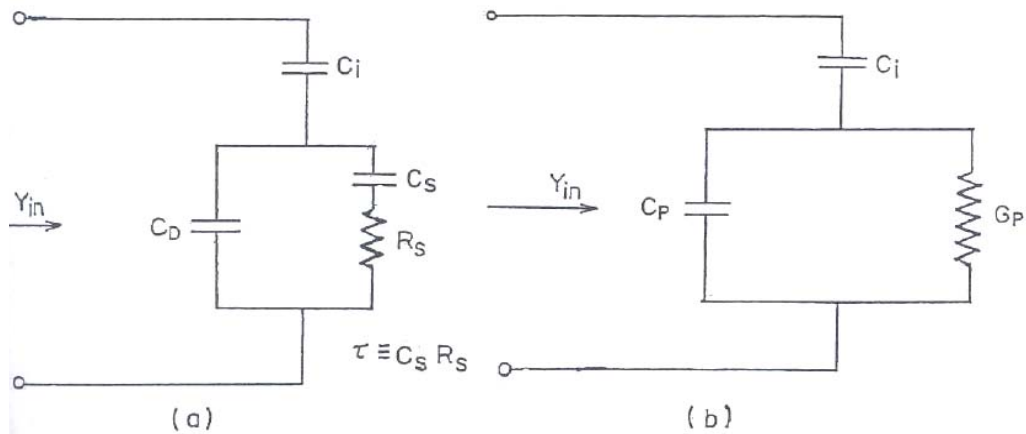
$$f_{SD}(E_t) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right)} \quad (2.18)$$

ve alıcı arayüzey tuzaklar için ise,

$$f_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.19)$$

şeklindedir. Burada E_t , arayüzey tuzak seviyesi enerjisi, E_F Fermi enerji seviyesi ve g ise termal durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için 4'dür [26].

Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket eder. Bu değişme MIS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur. Arayüzey tuzaklarının etkisini kapsayan eşdeğer devre Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre

Burada C_i ve C_D sırası ile yalıtkan kapasitans ve yarıiletken tüketim tabaka kapasitansıdır. $C_S R_S$ çarpımı arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanmış ve

bu arayüzey tuzaklarının davranışını belirler. Şekil 2.12.a'nın paralel kolu, Şekil 2.12.b'deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_p ve ona paralel bağılı frekans bağımlı iletkenlik G_p şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_S + \frac{1}{j\omega C_S}} = G_p + j\omega C_p \quad (2.20)$$

şeklindedir. Burada iletkenlik G_p ve kapasitans C_p ,

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.21a)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.21b)$$

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans Z ise,

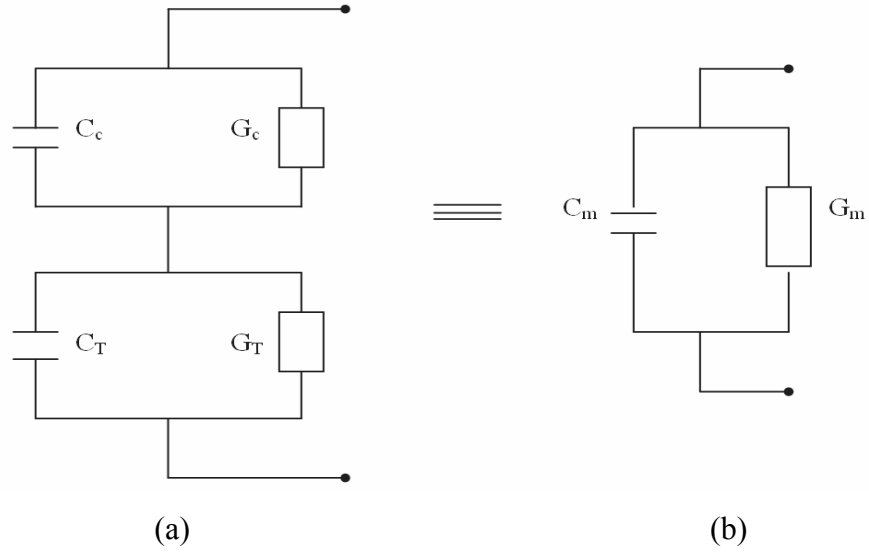
$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}\right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.22)$$

ve buradan toplam admittans Y_{top} için,

$$Y_{top} = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p}\right) + j\omega\left(\frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2)C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p}\right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.23)$$

eşitliği elde edilir [5, 31, 32].

Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik G_m ve kapasitans C_m gerçek değerler değildir [33]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. MIS yapının eşdeğer devresi

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.24)$$

Şimdi C_c ve G_c analitik çözümünü yapılabilir.

$Z = Z_1 + Z_2$ 'den $Z_1 = Z - Z_2$ 'dir. Buna göre,

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1}$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (2.25)$$

denkleminin paydası eşleniği ile çarpılır. $G_T = 1/R_s$ yazılır ve C_T değeri ihmal edilirse düzeltilmiş iletkenlik için,

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.26)$$

elde edilir. Burada seri direnç R_s , Şekil. 2.13.b' deki devrenin empedansı Z' nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir [8].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.27)$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.28)$$

elde edilir. Eş. 2.25'in düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı yani düzeltilmiş kapasitans aşağıdaki gibidir.

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.29)$$

Eş. 2.26 ve Eş. 2.29 denklemlerini yeniden düzenlersek [8],

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.30a)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.30b)$$

elde edilir. Burada,

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (2.31)$$

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

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. MIS Yapımında Kullanılan Silisyum (Si) Kristalinin Fiziksel Özellikleri

Silisyum doğada bol miktarda, silikat ve silisyum dioksit (kum) bileşikleri halinde bulunur. Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Silisyum dioksitin elektrik arkında redüklenmesi ile elde edilen silisyum saf olmaması nedeniyle, silanli (SiH_4) bir bileşiğe dönüştürülür. Sıvı olan bu bileşik, kademeli distilasyon yöntemi ile ayrılır ve silisyumu içeren kısım kendi başına veya hidrojen atmosferinde ısıtılarak saf silisyuma ulaşılır. Bu yöntemlerle kimyasal saflığa getirilen silisyum yarıiletkeni henüz elektronik eleman yapımı için yeterli saflıkta değildir.

Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri

Özellikleri	
Atom/cm ³	$5,0 \times 10^{22}$
Atom ağırlığı (kg/mol)	28,09
Kırılma alanı (V/cm)	3×10^5
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N_c (cm ⁻³)	$2,8 \times 10^{19}$
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N_v (cm ⁻³)	$1,04 \times 10^{19}$
Saf taşıyıcı yoğunluğu n_i (cm ⁻³)	$1,45 \times 10^{10}$
Saf öz direnci ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$2,3 \times 10^5$
Örgü sabiti (Å)	5,43095
Elektronların etkin kütlesi, m^*/m_0	$m_l^*=0,98$, $m_t^*=0,19$
Deşiklerin etkin kütlesi, m^*/m_0	$m_{hh}^*=0,16$, $m_{hh}^*=0,49$
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4,05
Yasak enerji aralığı (eV)	1,12
Hareketliliği (cm ² /V.s)	1500 (elektron için) 450 (deşik için)
Erime sıcaklığı (°C)	1415
Azınlık taşıyıcı yaşam süresi (s)	$2,5 \times 10^{-3}$
Termal iletkenlik (W/cm-°C)	1,5

$a=7,7541\text{\AA}$ ve $c=5,6217\text{\AA}$ dir ve ABCDABCD... şeklinde Si-N tabaka dizilimine sahiptir. β - Si_3N_4 ise $a=7,6044\text{\AA}$ ve $c=2,9075\text{\AA}$ örgü parametrelerine sahip olup ABAB... şeklinde Si-N tabaka dizilimine sahiptir. Her köşe üç tetrahedra ünitesine aittir. Yapılan araştırmalarda ilk olarak, α fazının ağırlıkça % 0,9 -1,8 miktarında oksijen içeren bir oksinitrür olduğu düşünülmüştür [15].

3.3. Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Yapıların Hazırlanması

3.3.1. Kristal temizleme

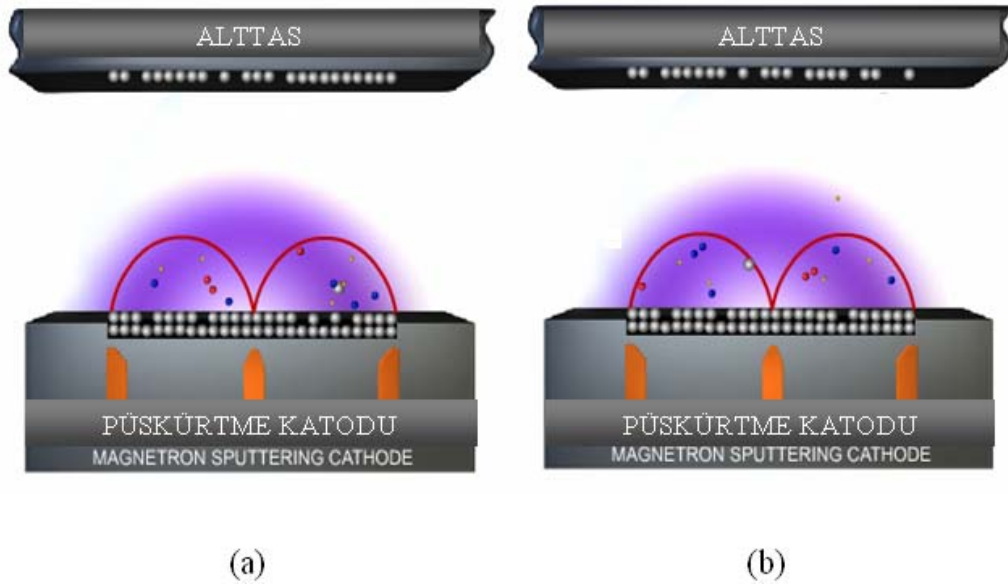
İdeale yakın bir metal Schottky diyot hazırlayabilmek için yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. İyi bir temizleme işlemi ile bir yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusuru ortadan kaldırılabilir. Kullanılan kristaller, fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi mekanik parlatılmış olarak satın alındığı için sadece kimyasal temizleme işlemi yapıldı. Kristal yüzeyindeki organik ve diğer kirleri temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri gidermek için yarıiletken kristallerin tüm kimyasal temizleme ve durulama işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Diyot yapımında (100) yüzey yönelimli, 0.5 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirençli, 300 μm kalınlıklı, 2" çapında fosfor katkılı (n-tipi) Si tek kristal alttaş kullanıldı. Bu çalışmada yarıiletken kristallerin temizlenmesinde aşağıda verilen işlemler takip edildi.

- 1) Temizleme işleminde, RO&UP Water Purification System' de hazırlanan yüksek dirençli ($\sim 16\text{-}18\text{ M}\Omega$) deiyonize su kullanıldı. Öncelikle temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız v.b. araç ve kaplar asetonla iyice yıkanıp deiyonize su ile durulandıktan sonra etüv fırınında yaklaşık 80 °C ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra yarıiletken kristaller önce aseton ve deiyonize su karışımında (1:5 ölçeğinde) ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika kadar yıkandıktan sonra deiyonize su (H_2O) ile durulandı.

- 2) Kristal trikloretilen (C_2HCl_3) + aseton (CH_3COCH_3) + metil alkol (CH_3OH) içinde üç dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 3) Sülfürik asit (H_2SO_4) ve hidrojen peroksit (H_2O_2)'in 1:1 hacim oranındaki karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 4) Eşit oranlardaki %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle yıkandı.
- 5) 3:1:5 hacim oranında nitrik asit (HNO_3), hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlenip deiyonize su ile yıkandı.
- 6) 4:3 hacim oranında %38'lik hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 3 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 7) Si alttaş deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle durulandı.
- 8) Son olarak kimyasal olarak temizlenmiş n-tipi silisyum kristal saf azot (N_2) gazı ile kurulandı.

3.3.2. Yalıtkan silistum nitrat (Si_3N_4) tabakasının RF püskürtme yöntemiyle oluşturulması

Püskürtme vakum ortamında fiziksel olarak hedef malzemeden, kaynağa ince film biriktirmek için yaygınca kullanılan sistemlerdendir. Bu sistemde yüksek gerilimle hızlandırılan iyonların hedef malzemenin yüzeyini bombardıman ederek söktükleri molekülerin alttaş üzerine biriktirilir. Bu sistemin en büyük avantajlarından bir tanesi de düşük sıcaklıklarda biriktirme işlemi yapılabilmesidir dolayısıyla hemen her tür taban malzemeye istenilen malzeme biriktirilebilir.



Şekil 3.2. (a) Ar^+ iyonlarının hedeften molekül sökmesi, (b) sökülen molekülün altaşa (substrate) yerleşmesi

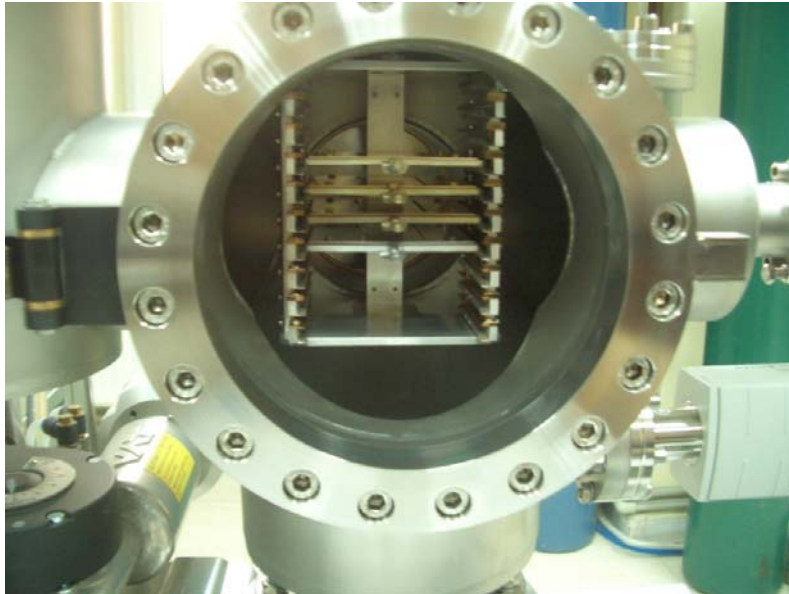
Püskürtme sistemi çok çeşitli iletken, yarıiletken veya yalıtkan malzeme biriktirilmesine imkân tanır. İletken olan malzemeler DC Magnetron Püskürtme, yalıtkan olan malzemeler ise (Radyo Frekansı) RF Magnetron Püskürtme yöntemiyle biriktirilir. Bizim sistemimizde 2 RF kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağı olup Resim 3.2’de açıkça görülmektedir.

Şekil 3.2’de mor renkle temsili gösterilen Ar^+ iyonlarından oluşturulan plazma ortamıdır. Turuncu renklerle gösterilen mıknatıslar elektronları manyetik alanda tutmayı ve Ar^+ iyonlarının hedef malzemeyi bombardıman etmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 3.2.a ve 3.2.b’de gösterildiği gibi hedef malzemeden bir molekül kopmuş ve altaş yüzeyine yerleşmesi gösterilmiştir.

Resim 3.2’de açıkça görüldüğü gibi yükleme raflarına 10 adet numune yerleştirilebilmekte ve asansör sistemi ve taşıyıcı kol yardımıyla istenilen numune biriktirme odasına taşınmaktadır.



Resim 3.1. BESTEC firmasından alınan 3'' ultra yüksek vakuma sahip Püskürtme sistemi.

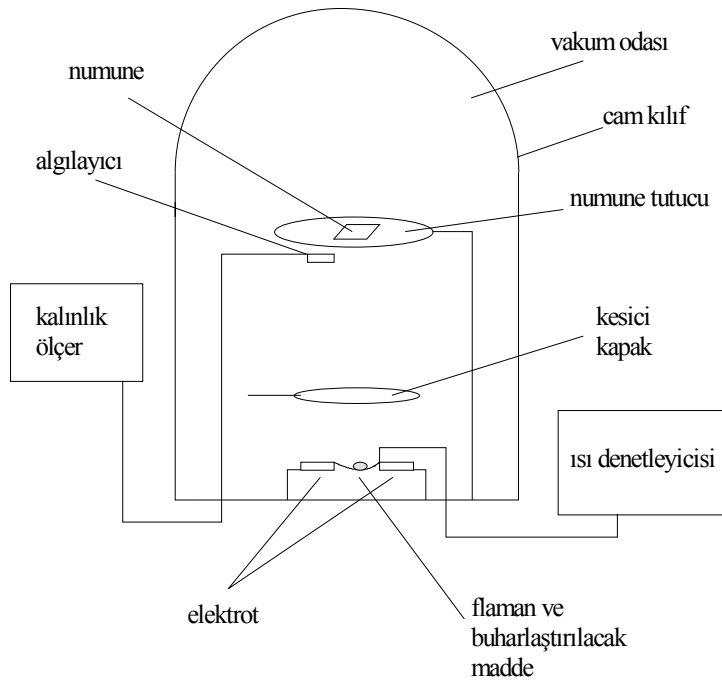


Resim 3.2. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları

İnce film Si_3N_4 hazırlamak için temizlenen n-Si alttaşı öncelikle yükleme odasına alındı ve ardından püskürtme odasına transfer edildi. Püskürtme odasının taban basıncı $\sim 10^{-8}$ Torr civarında iken alttaşı $200\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtıldı. Si_3N_4 hedeften 80/20 oranında ortama Ar/O₂ O₂'de vererek, Si_3N_4 tabakası n-Si üzerine biriktirildi. Püskürtme esnasında püskürtme basıncı $\sim 10^{-3}$ Torr olacak şekilde sabitlendi.

3.3.3. Omik kontağın oluşturulması

Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapıların oluşturulması için gerekli omik ve doğrultucu kontaklar yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında, Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilen BESTEC marka yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi kullanıldı.

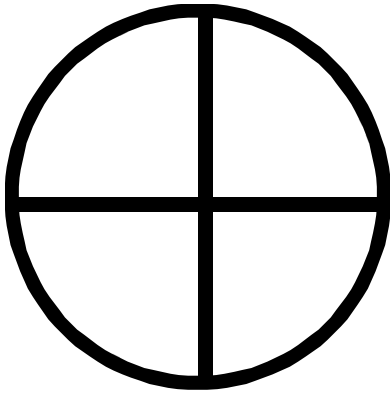


Şekil 3.3. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi

Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında kullanılan bakır maskeler ve flaman (tungsten) ultrasonik banyoda kimyasal olarak iyice temizlenip durulandıktan sonra kuru nitrojen (N_2) gazı ile kurulandı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine

yerleştirilerek hemen vakum ortamına alındı ve vakum 10^{-6} Torr değerine kadar düşürüldü.

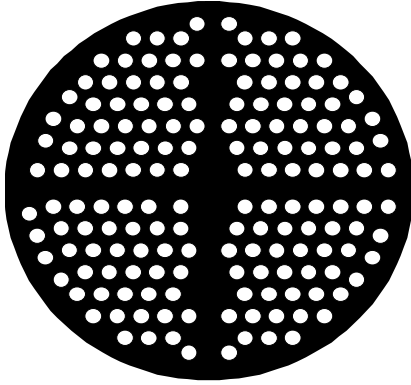
Omik kontaklar için Şekil 3.4’de gösterilen 50 mm çaplı ve $\approx 300 \mu\text{m}$ kalınlıklı bakır maske kullanıldı. Vakum $\approx 10^{-6}$ Torr’a ulaştığında, flaman üzerinden akım geçirilerek ($\approx 260\text{A}$) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş altın (Au) tel buharlaştırıldı. Buharlaşmanın başlamasından kısa bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yana açılarak, önceden ısıtılmış (400°C) Si alttaşın mat yüzeyine $\approx 2000 \text{ \AA}$ kalınlığında Au kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine birikmesini önlemektir. Omik kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan altın, vakum ortamında 375°C ’de tavlanoarak saf altın silisyum içerisine çöktürüldü.



Şekil 3.4. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

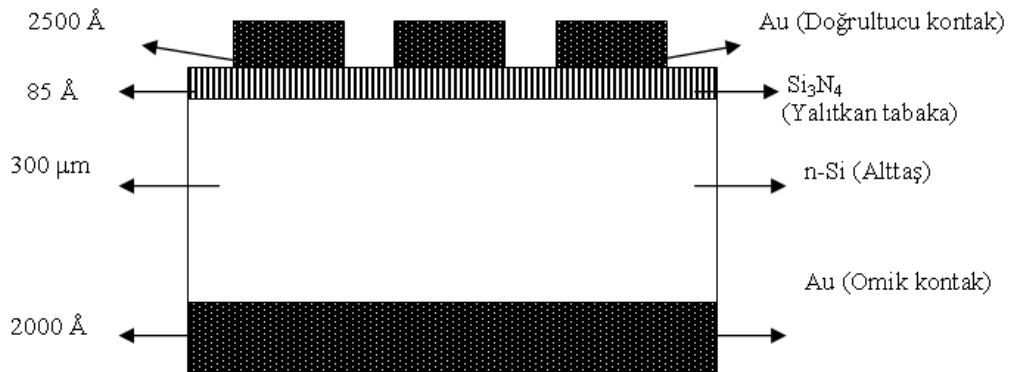
3.3.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzeri Si_3N_4 ile kaplanmış yüzey, üzeri çok sayıda 1mm çaplı delikler açılmış ve Şekil 3.5’de gösterilen bakır maske üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen altın (Au) metal parçası $\approx 10^{-6}$ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler şeklinde ve $\approx 2500 \text{ \AA}$ kalınlığında altın doğrultucu kontaklar oluşturuldu.



Şekil 3.5. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla Au/ Si_3N_4 /n-Si şeklinde MIS yapılar elde edildi. Daha sonra doğrultucu kontaklar üzerine iletken teller gümüş pasta ile tutturuldu ve böylece yapı elektriksel ölçümler için hazır hale getirildi. MIS yapının hazırlanış şeması Şekil 3.6' da verilmiştir.



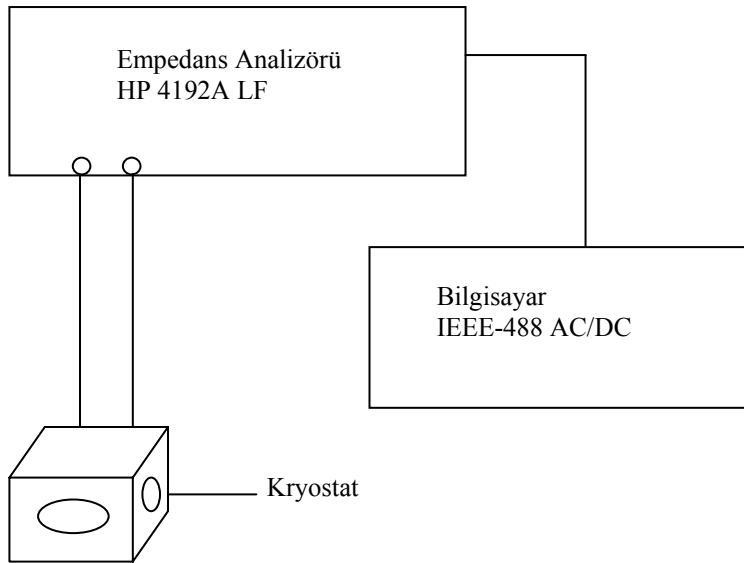
Şekil 3.6. Oluşturulan Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapının şematik gösterimi

3.4. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Tüm deneysel ölçümler, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yarıiletken İleri Araştırmalar Laboratuvarında gerçekleştirildi. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ ω -V) ölçümleri, 1 kHz-1 MHz frekans

aralığında, HP 4192A LF empedans analizörü (5 Hz-13 MHz) ve $50 \text{ mV}_{\text{rms}}$ test sinyali ile bilgisayar kontrollü olarak elde edilmiştir. Ölçümler ters ve doğru beslem altında, karanlık ortamda bilgisayar kontrollü alınmıştır. Ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 ac/dc çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümleri, 80-400 K sıcaklık aralığında, 100 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan MIS yapı için, CRYO CRC-102 kryostat içinde $\approx 10^{-3}$ Torr basınç altında bakır tutucuda konumlandırılmış ve bilgisayar kontrollü olarak, hassasiyeti $\pm 0.1 \text{ K}$ olan Lakeshore model 321 Auto-tuning sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak, ters ve doğru dc geriliminde ölçümler gerçekleştirilmiştir. C-V ve G/ω -V ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. C-V ve G/ω -V ölçümleri için kullanılan düzenek

4. DENEYSEL SONUÇLAR

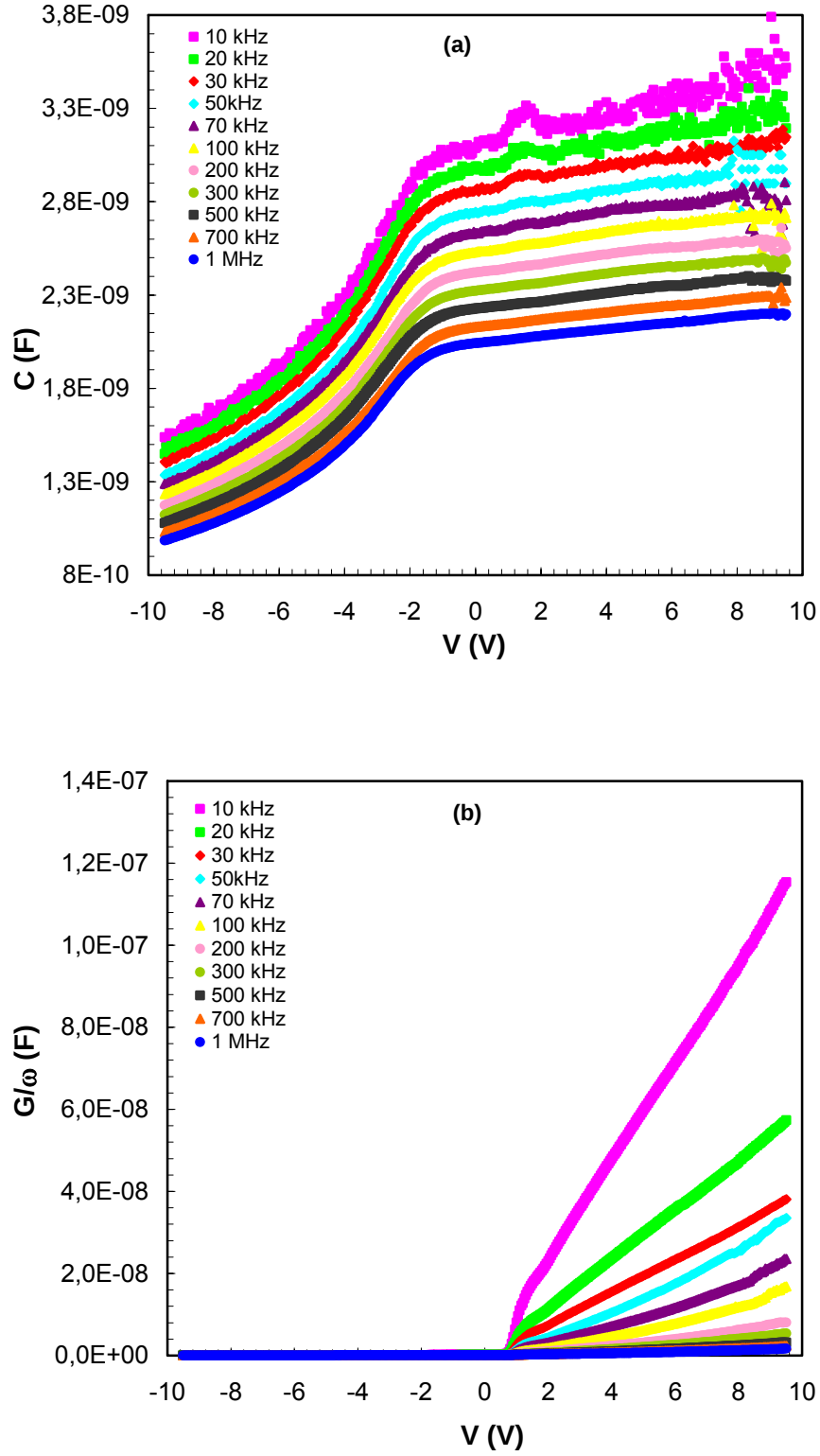
Hazırlanan metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının temel elektriksel özelliklerini belirlemek için oda sıcaklığında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştirildi. MIS yapının C-V ve G/ω -V ölçümleri negatif gerilimden pozitif gerilime geniş bir aralıkta ölçüldü. C-V ve G/ω -V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar elde edildi. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre (5 Hz-13 MHz) ve bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda gerçekleştirildi.

Bu çalışmada $Au/Si_3N_4/n$ -Si (MIS) yapının, oda sıcaklığında C-V ve G/ω -V ölçümlerinin frekansa bağlı değişimi geniş bir aralıkta (1 kHz -1 MHz) incelendi. Bu MIS yapının sıcaklığa bağlı değişimini incelemek için, C-V ve G/ω -V ölçümleri 80-400 K sıcaklık aralığında 100 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde gerçekleştirildi. Deneysel C-V ve G/ω -V ölçüm sonuçları kullanılarak yapının seri direnci ve arayüzey durum yoğunluğu frekansa bağlı olarak hesaplandı. Hem frekansa hem de sıcaklığa bağlı elde edilen sonuçların grafikleri aşağıda verildi.

4.1. MIS Yapının Frekansa Bağlı Elektrik Özellikleri

4.1.1. C-V ve G/ω -V eğrileri

$Au/Si_3N_4/n$ -Si (MIS) yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri oda sıcaklığında frekansa (1 kHz-1 MHz) bağlı olarak elde edildi. Ölçümler, MIS yapı dc gerilimi altındayken, genliği dc gerilimden çok küçük olan (50 mV) bir ac uyarma sinyali uygulanarak gerçekleştirildi. MIS yapının C-V ve G/ω -V eğrileri Şekil 4.1'de verildi. Şekil 4.1.a'dan görüldüğü gibi, frekansa bağlı kapasitans değerleri tersinim bölgesinden yığılım bölgesine doğru gittikçe artmakta ve yığılım ile tükenim bölgesinde kapasitans değeri artan frekansla azalmaktadır [9, 31, 33, 36].

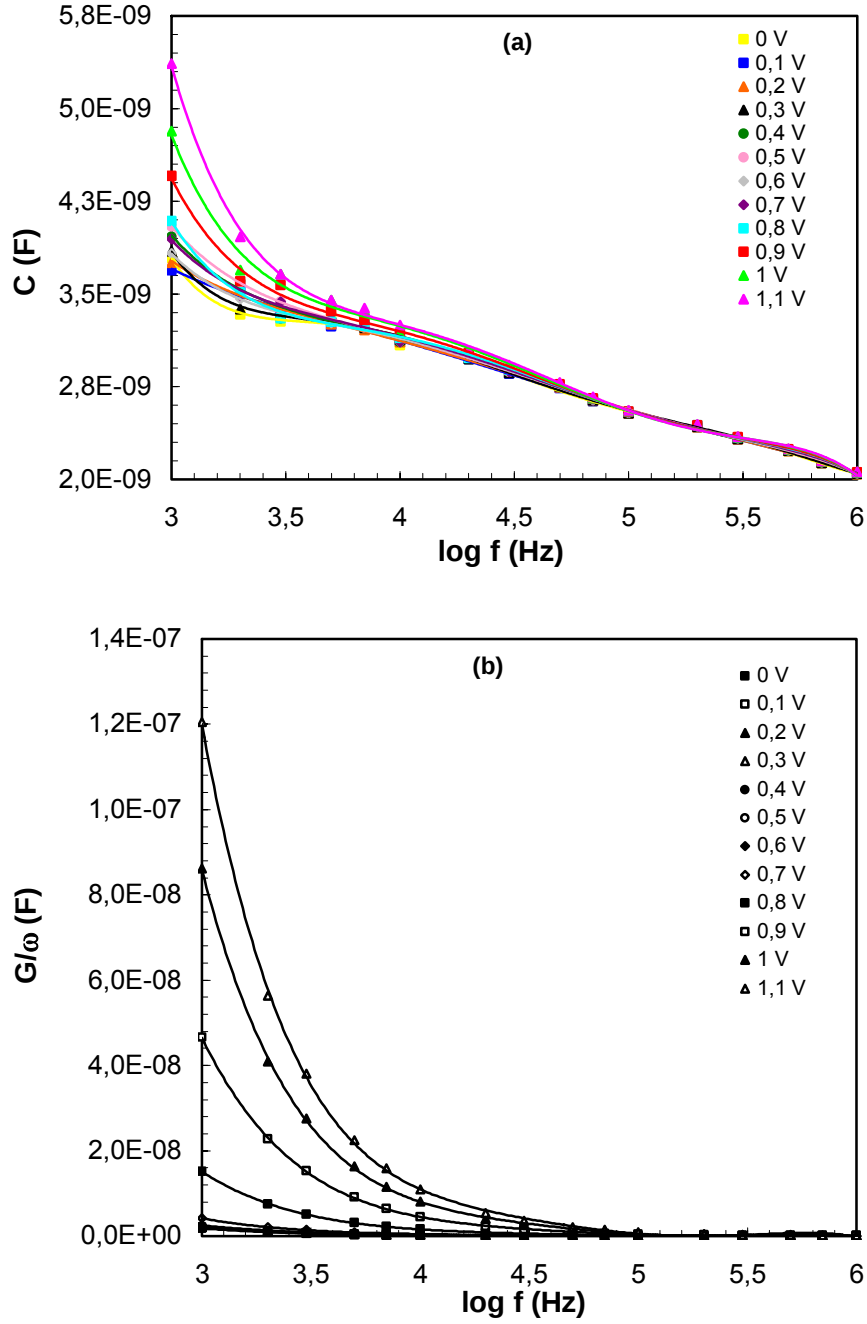


Şekil 4.1. MIS yapı için farklı frekanslarda çizilen a) C-V ve b) G/ω -V eğrileri

Şekil 4.1.b'den görüldüğü gibi G/ω -V eğrileri C-V eğrilerine benzer şekilde frekansa bağlılık göstermektedir. Yani, G/ω -V eğrilerinin değerleri azalan frekansla artmaktadır. Düşük frekanslardaki C-V ve G/ω -V eğrileri daha uzun zaman sabitine sahip olduklarından arayüzey durumlarını takip edebilmekte ve yüksek frekanslarda ise zaman sabiti küçük olduğundan takip edememektedir [36-38]. Yüksek frekans C-V eğrisinin sahip olduğu $1/\omega$ yaşam süresi, taşıyıcının yaşam süresi (τ) civarında ya da daha küçükse arayüzey durumlarındaki taşıyıcı ac sinyali takip edemez. Bu nedenle yeteri kadar yüksek frekans ($\sim 1\text{MHz}$) bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı kapasitansa gelen bir katkı yoktur ya da ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece kapasitansa, yüksek frekanslarda olduğu gibi arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşırlar. Bu durum, arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda ac sinyali takip edememesi olarak belirtilir [37-40].

Arayüzey durumlarının etkisinin hemen hemen hiç olmadığı, yüksek frekans C-V eğrilerinin, kuvvetli yığılım bölgesindeki maksimum değerlerine karşılık gelen kapasitans değeri (C_{ox}), yalıtkan tabakanın kapasitansıdır [3, 41]. Kapasitansın bu maksimum değeri ($C = C_{ox} = \epsilon'A/d$), arayüzey yalıtkan tabakası için dielektrik sabitinin teorik değeri ($\epsilon'_{Si_3N_4} = 7,5\epsilon_0$) ve MIS alanı ($A = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$) kullanılarak metal ile yarıiletken arasında oluşturulan yalıtkan tabakasının kalınlığı hesaplandı ve 85 Å olarak bulundu.

Oda sıcaklığında farklı doğru beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişim eğrileri sırasıyla Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.2.a'da görüldüğü gibi, kapasitans değerleri her gerilim değerinde artan gerilimle artmakta ve artan frekansla azalmaktadır. Bu sonuç C-V karakteristiklerinin frekansa ve gerilime kuvvetlice bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2. Farklı doğru beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren a) C - $\log f$ ve b) G/ω - $\log f$ eğrileri

Benzer davranış Şekil 4.2.b’de verilen G/ω - $\log f$ eğrilerinde de gözlenmektedir. Yani her iki durumda da düşük frekanslardaki kapasitans-voltaj veya iletkenlik-voltaj eğrileri daha uzun zaman sabitine sahip olduklarından arayüzey durumlarını takip

edebilmekte ve yüksek frekanslarda ise zaman sabiti küçük olduğundan takip edemediğine bağlıdır [36].

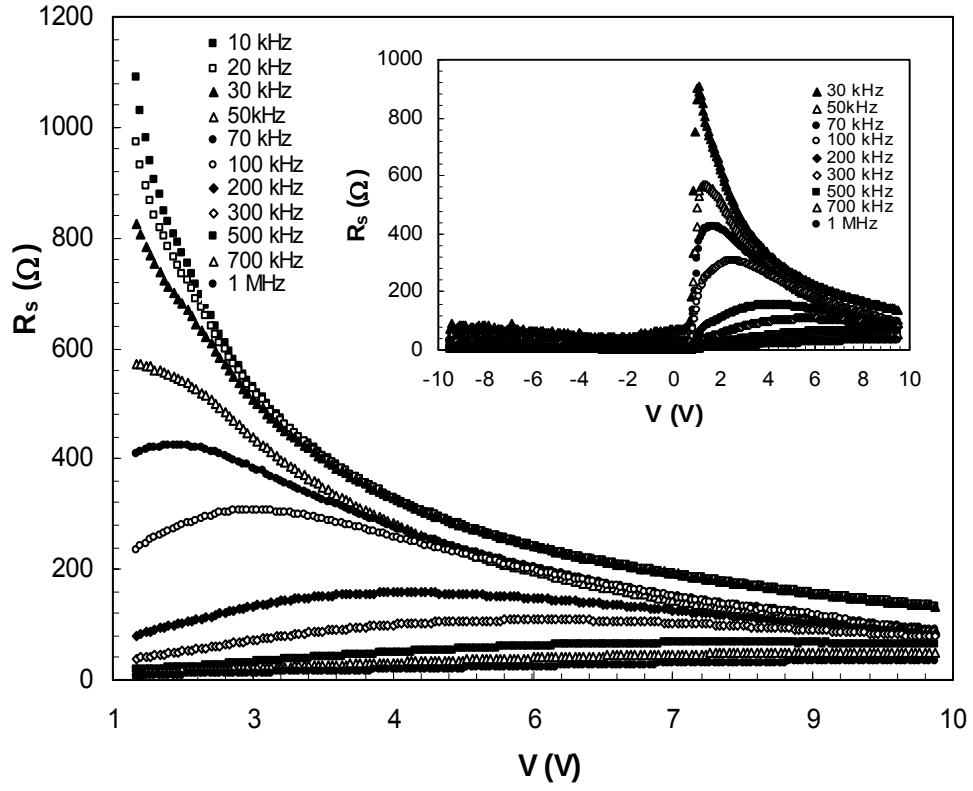
4.1.2. Seri direncin frekans ve gerilime bağlı incelenmesi

Au/ Si₃N₄/n-Si yapının, her voltaj değerine karşılık gelen C-V ve G/ω-V eğrilerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki değerleri aşağıdaki eşitlikte yerine yazılarak her voltaj değeri için seri direnç (R_s) değerleri hesaplandı [9].

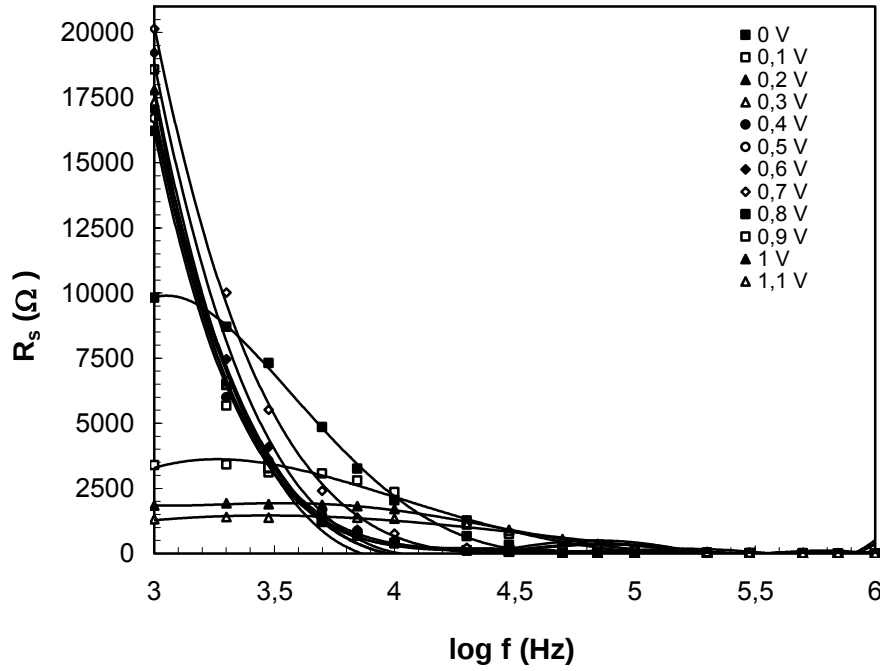
$$R_s = \frac{G_m}{(G_m^2 + C_m^2 \omega^2)} \quad (4.1)$$

Burada C_m ve G_m sırasıyla kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Bir yarıiletken yapının gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken yapının seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve ters gerilimlerde sonsuza gider. MIS yapı için bulunan R_s değerlerinin voltaja bağlı değişimi Şekil 4.3’de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi seri direnç eğrileri, arayüzey durumlarının etkili olduğu doğru beslem bölgesinde pik vermekte ve bu pik artan frekansla yığılım bölgesine doğru kaymaktadır. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının daha yoğun şekilde yerleşmiş olduğuna atfedilebilir [3, 37, 38, 41-43].

Tüm frekanslar için kuvvetli yığılım bölgesinde hesaplanan ve farklı doğru beslem gerilimleri için seri direnç değerlerinin frekansa bağlı değişimi Şekil 4.4’de verildi. Şekilden görüldüğü gibi seri direnç değerleri her gerilim değerinde artan frekansla azalmakta ve yüksek frekanslarda sabit hale gelmektedir [44, 45]. Bu sonuç, arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda uygulanan ac sinyali takip edilemediğini göstermektedir.

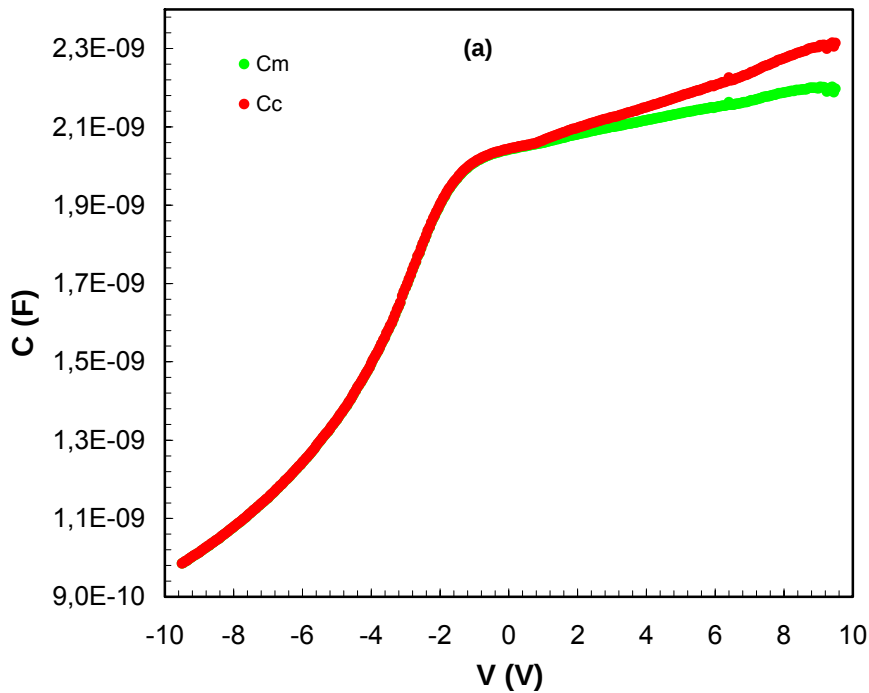


Şekil 4.3. Farklı frekanslar için seri direncin voltaja bağlı R_s - V eğrileri

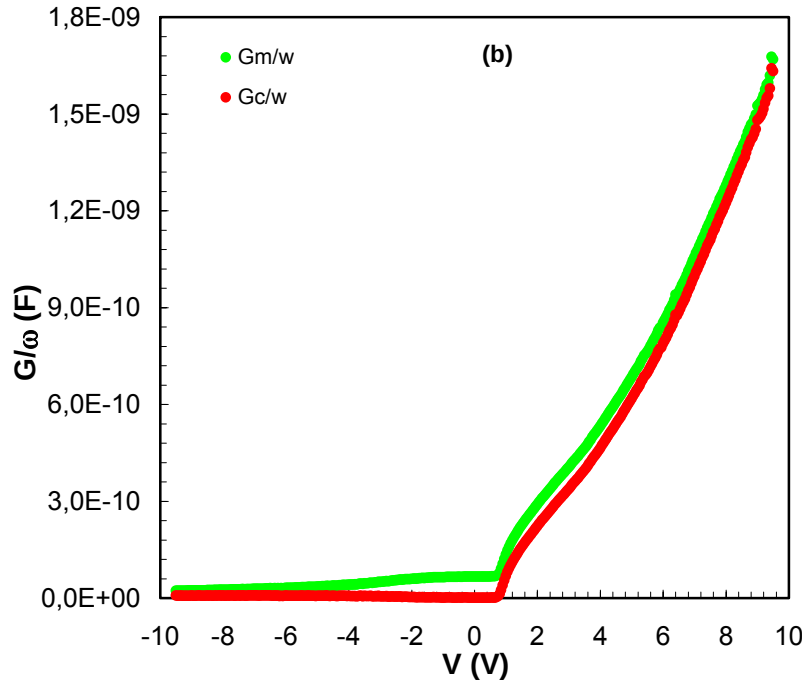


Şekil 4.4. Farklı doğru beslem gerilimleri için seri direncin frekansa bağlı değişimini gösteren R_s - $\log f$ eğrileri

Şekil 4.5'den görüldüğü gibi özellikle yüksek frekanslarda ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri hem tükenim hem de tersinim bölgesinde seri dirençten (R_s) oldukça etkilenmektedir. Bu yüzden, MIS yapının gerçek kapasitans ve iletkenliğini elde etmek için yüksek frekans (1 MHz) kapasitans ve iletkenlik sırasıyla Eş. 2.30.a ve Eş. 2.30.b kullanılarak seri direnç etkisi için doğru ve ters gerilim altında düzeltildi. Seri direnç etkisi için C-V ve G/ω eğrileri düzeltildiği zaman Şekil 4.5.a ve Şekil 4.5.b'de görüldüğü gibi özellikle doğru gerilim altında düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/ω) değerleri değişmektedir. Özellikle C-V ve G/ω eğrileri ile kıyaslandığında bir farklılık olduğu gözlenmektedir. C_c -V eğrisi kesişme noktasından itibaren artan gerilimle artmakta, G_c/ω -V eğrisi ise artan gerilimle azalmaktadır. Bu durum seri direncin özellikle yığılım bölgesinde kapasitans ve iletkenlik değerlerini oldukça etkilediğini göstermektedir. Bu sebepten yarıiletkenlerde seri direnç göz ardı edilmemesi gereken önemli bir parametredir.



Şekil 4.5. Yüksek frekans (1 MHz) için düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik eğrilerinin voltaja bağlı a) C-V ve b) G/ω -V eğrileri



Şekil 4.5.(Devam) Yüksek frekans (1 MHz) için düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik eğrilerinin voltaja bağlı a) C-V ve b) G/ω-V eğrileri

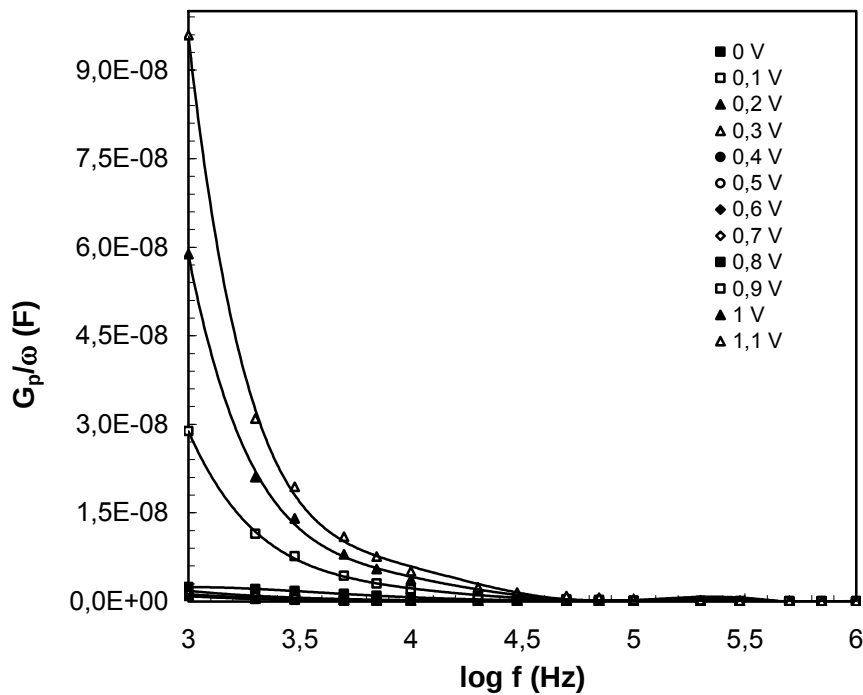
4.1.3. Paralel iletkenlik-frekans (G_p/ω -log f) eğrileri

Paralel iletkenlik G_p veya G_p/ω , frekans parametre iken gerilimin bir fonksiyonu olarak ya da gerilim parametre iken frekansın bir fonksiyonu olarak farklı frekanslardaki C-V ve G/ω-V ölçümlerinden elde edilebilir [5, 8]. Farklı gerilim değerleri için MIS yapının paralel iletkenlik (G_p/ω -log f) karakteristikleri Şekil 4.6'da verildi.

Paralel iletkenlik, Şekil 4.1'de verilen C-V ve G/ω-V eğrilerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten elde edildi [9, 40].

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (4.2)$$

Burada C_m ve G_m , ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi G_p/ω -log f eğrileri her gerilim değerinde artan gerilimle artmakta ve artan frekans ile azalmakta ve yüksek frekanslara doğru sabit hale gelmektedir [32, 46, 47]. Uygulanan küçük ac sinyalleri için arayüzey tuzak seviyelerini yakalama oranına bağlı olarak bu tuzak seviyelerine karşı artan frekansla bir azalma meydana gelir. Çünkü yüksek frekanslarda arayüzey tuzak seviyeleri ac sinyaline cevap veremez [5].

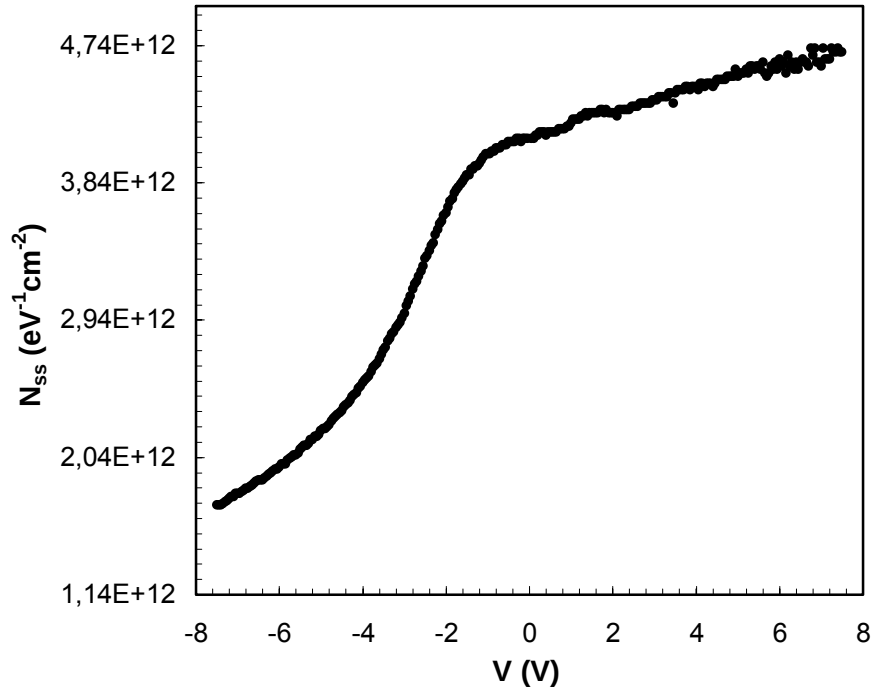


Şekil 4.6. Farklı doğru beslem gerilimleri için paralel iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren G_p/ω -log f eğrileri

4.1.4. Arayüzey durum yoğunluğu

Au/ Si₃N₄/n-Si MIS yapıda yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının büyüklüğü ve voltaja göre dağılım eğrisi düşük frekans (1 kHz) - yüksek frekans (1 MHz) (C_{LF} - C_{HF}) metodu kullanılarak [3, 12, 37, 48, 49] aşağıdaki eşitlikten hesaplandı ve sonuçlar Şekil 4.7'de verildi.

$$N_{ss} = \frac{1}{qA} \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} \right] \quad (4.3)$$



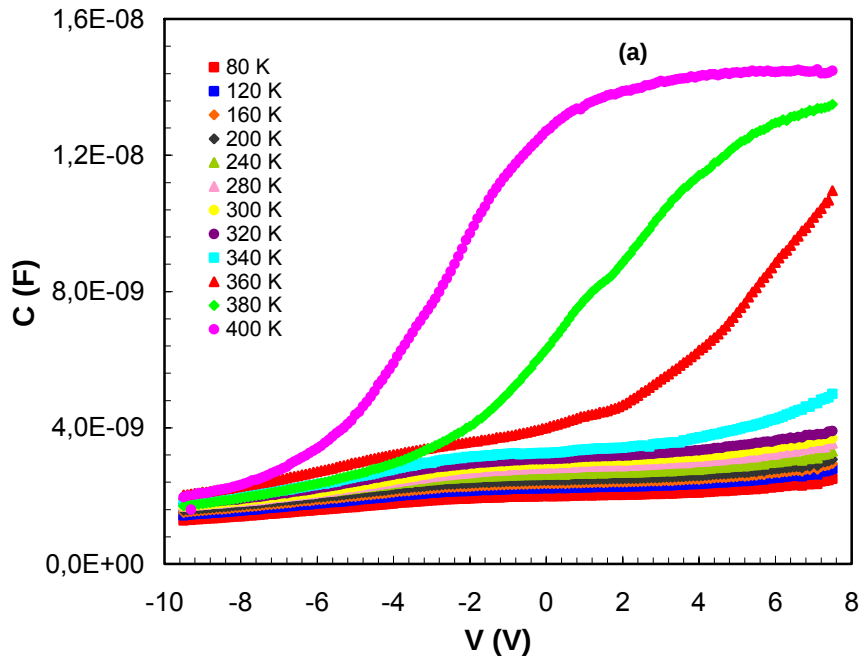
Şekil 4.7. Arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim (N_{ss} -V) eğrisi

Arayüzey durumları yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) ac sinyalini takip edemez ve düşük frekanslarda ($f \leq 100$ Hz) ise ac sinyalini takip edebilir. Bu nedenle düşük frekans olarak 1 kHz, yüksek frekans olarak da 1 MHz seçilmiştir. N_{ss} değerleri tüketim bölgesinde yüksek frekanslarda ac sinyalini takip edemediğinden ölçülen yüksek frekans kapasitans değerleri arayüzey durumlarının kapasitansını içermez. Şekilden de görüldüğü gibi arayüzey durum yoğunluklarının maksimum değeri $\sim 10^{12}$ eV⁻¹cm⁻² mertebesinde olup uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir ve negatif gerilim bölgesinden pozitif gerilim bölgesine doğru artmakta ve sabit hale gelmektedir. Bu durum arayüzey durumlarının yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde özel bir dağılım profiline sahip olduğunu gösterir [5, 8, 14, 26].

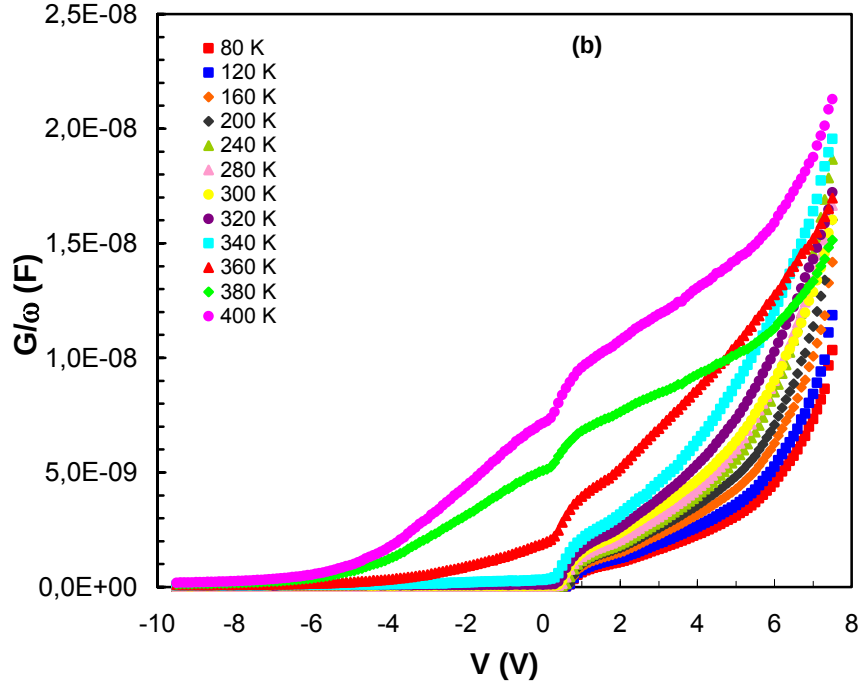
4.2. MIS Yapının Sıcaklığa Bağlı Elektrik Özellikleri

Au/Si₃N₄/n-Si yapının sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri ac sinyali uygulanarak, 100 kHz ve 1 MHz frekans değerleri için 80-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, bakır tutuculu ısılıçift ve hassasiyeti ± 0.1 K'dan daha iyi olan Lakeshore 321 Auto-tuning sıcaklık kontrolörü ile gerçekleştirilmiştir. MIS yapı için 100 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde ve 80-400 K sıcaklık aralığında ölçülen kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj eğrileri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verildi. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri tüm sıcaklıklar için artan sıcaklık ile artmaktadır.

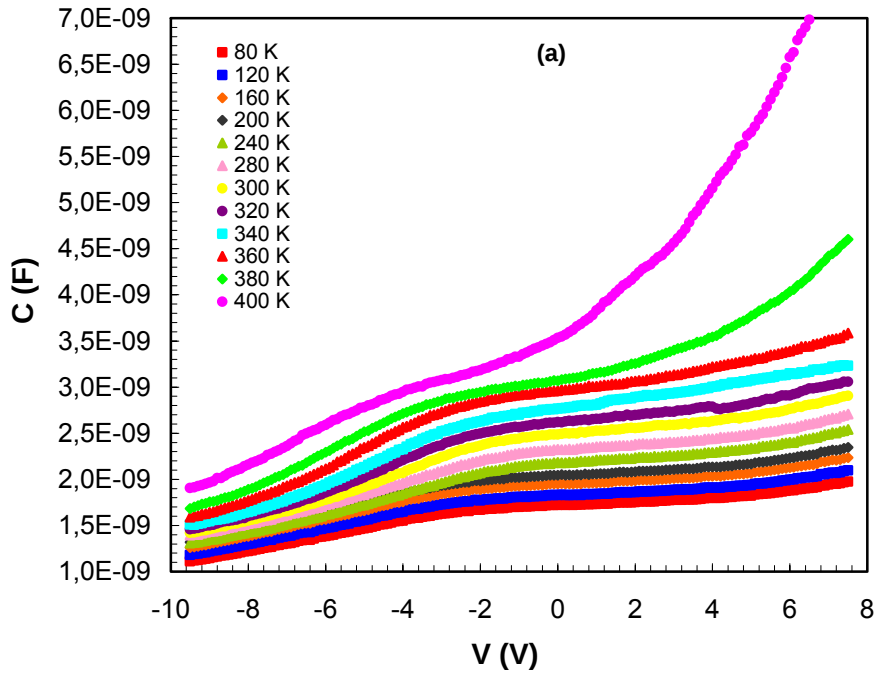
Şekillerden de görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri özellikle oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara karşı oldukça duyarlıdır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda etkili olan arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanır. Ayrıca uzay yükü değerlerinin artması kapasitans ve iletkenliğe katkıda bulunur [5, 8, 50-52].



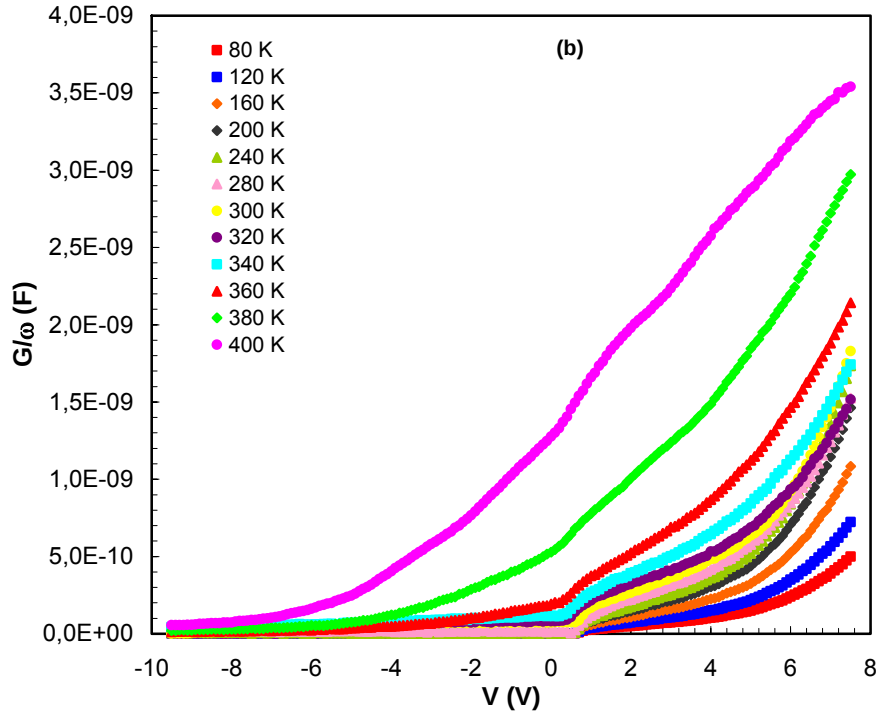
Şekil 4.8. MIS yapının 100 kHz frekansında, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen
a) C-V b) G/ω-V karakteristikleri



Şekil 4.8. (Devam) MIS yapının 100 kHz frekansında, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen a) C-V b) G/ω -V karakteristikleri

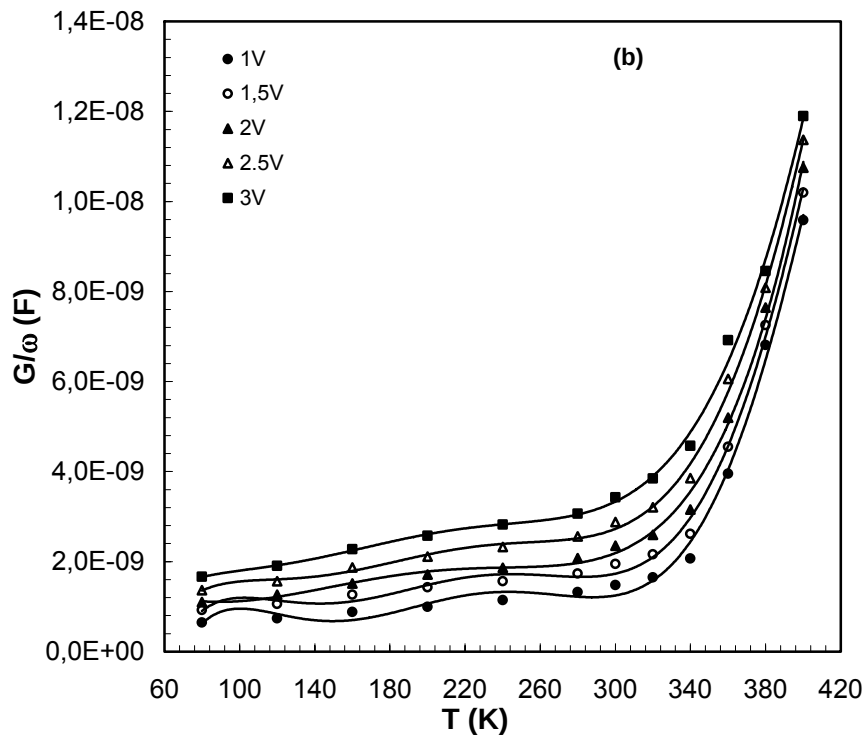
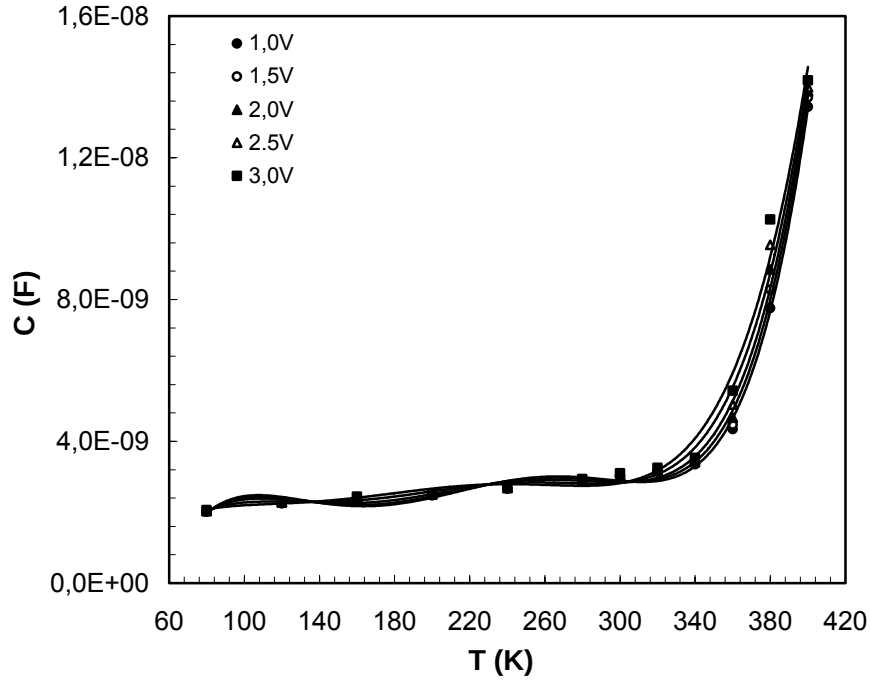


Şekil 4.9. MIS yapının 1 MHz frekansında, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen C-V b) G/ω -V karakteristikleri

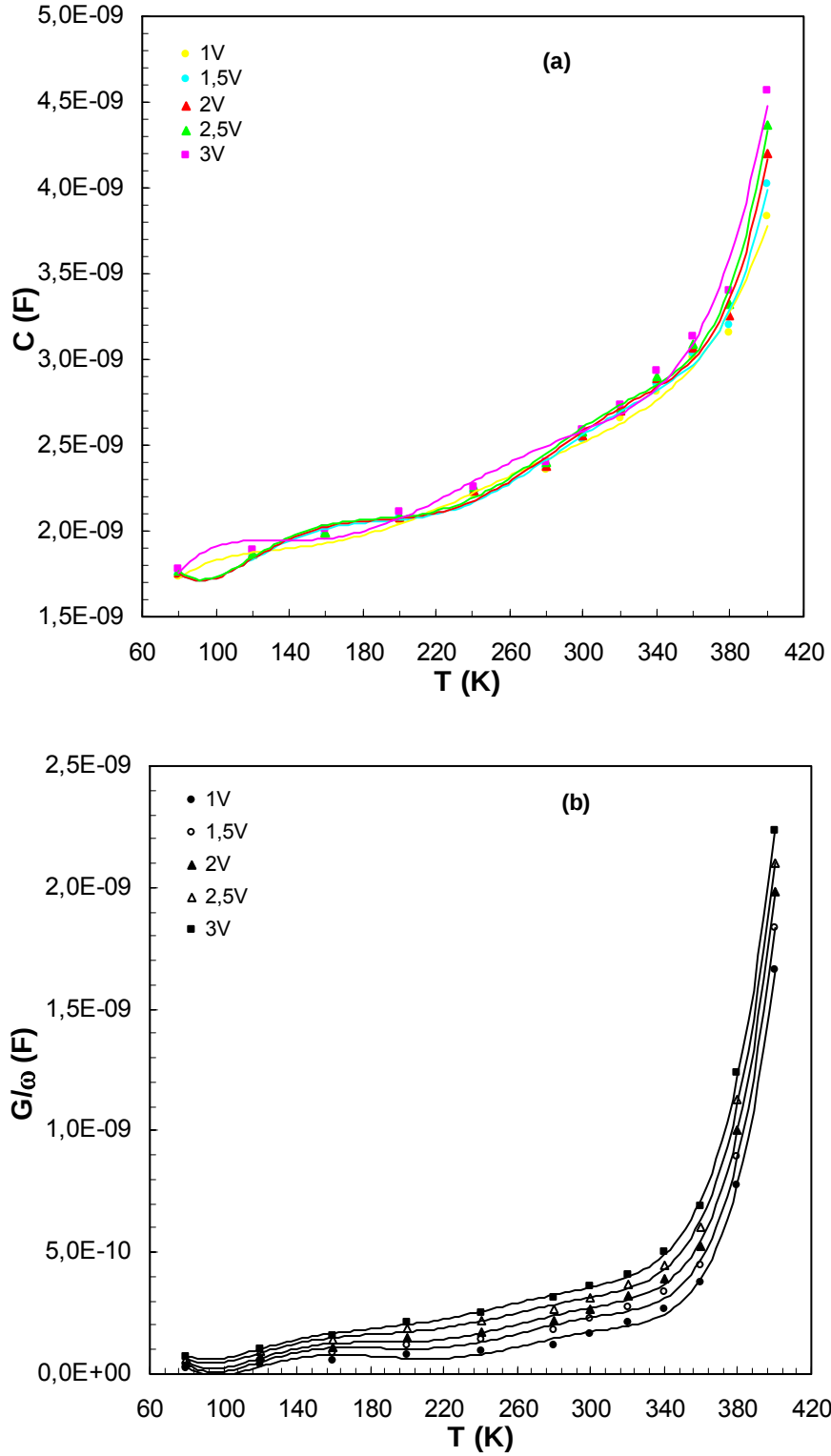


Şekil 4.9. (Devam) MIS yapının 1 MHz frekansında, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen a) C-V b) G/ω -V karakteristikleri

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de 100 kHz ve 1 MHz için farklı doğru belsem gerilimleri için sıcaklığın fonksiyonu olarak kapasitans ve iletkenlik değerleri verilmiştir. 100 kHz için sıcaklığa bağlı ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri, 1 MHz için ölçülen değerlerden büyüktür. Çünkü frekanstaki azalma ile kapasitans artar ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde homojen olmayan tabakanın kapasitansı ile frekans dağılımının neden olduğu yalıtkan kapasitansından etkilenir. Bu frekansa bağımlılık arayüzey durumlarının düşük frekanslarda ac sinyali takip edebilmesinden dolayı hem C hem de G/ω değerlerinde ilave katkı meydana gelir. Ancak, yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumları ac sinyallerini takip edemez. Bu da arayüzey durumları kapasitansının, toplam kapasitans katkısını dikkate alınamayacak kadar küçüktür [50, 53,54].



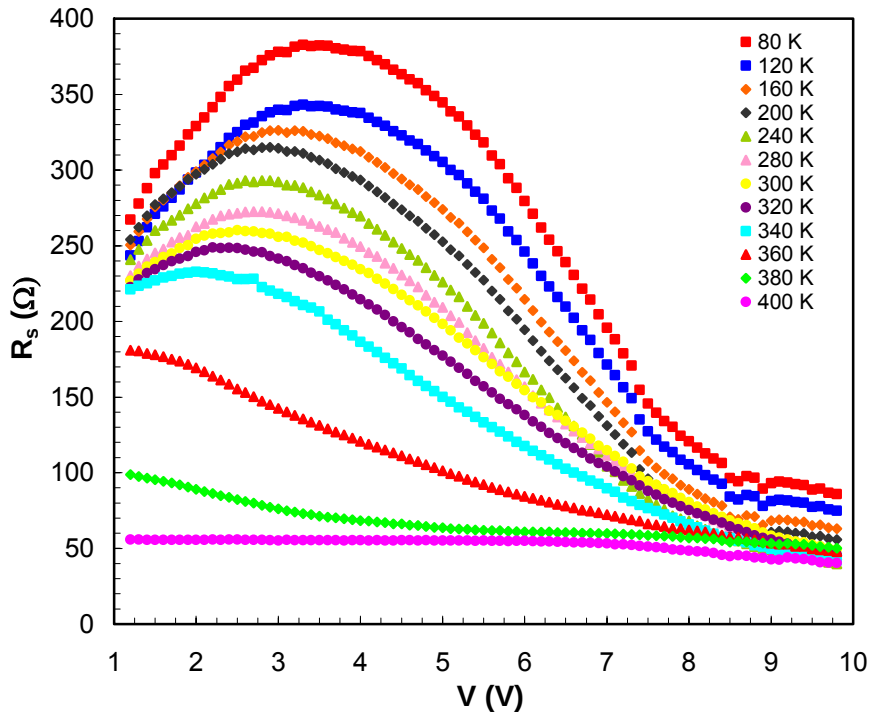
Şekil 4.10. MIS yapının 100 kHz için, 80-400 K sıcaklık aralığında farklı doğru beslem gerilimlerinde a) C - T b) G/ω - T eğrileri



Şekil 4.11. MIS yapının 1 MHz için, 80-400 K sıcaklık aralığında farklı doğru beslem gerilimlerinde a) C-T b) G/ω -T eğrileri

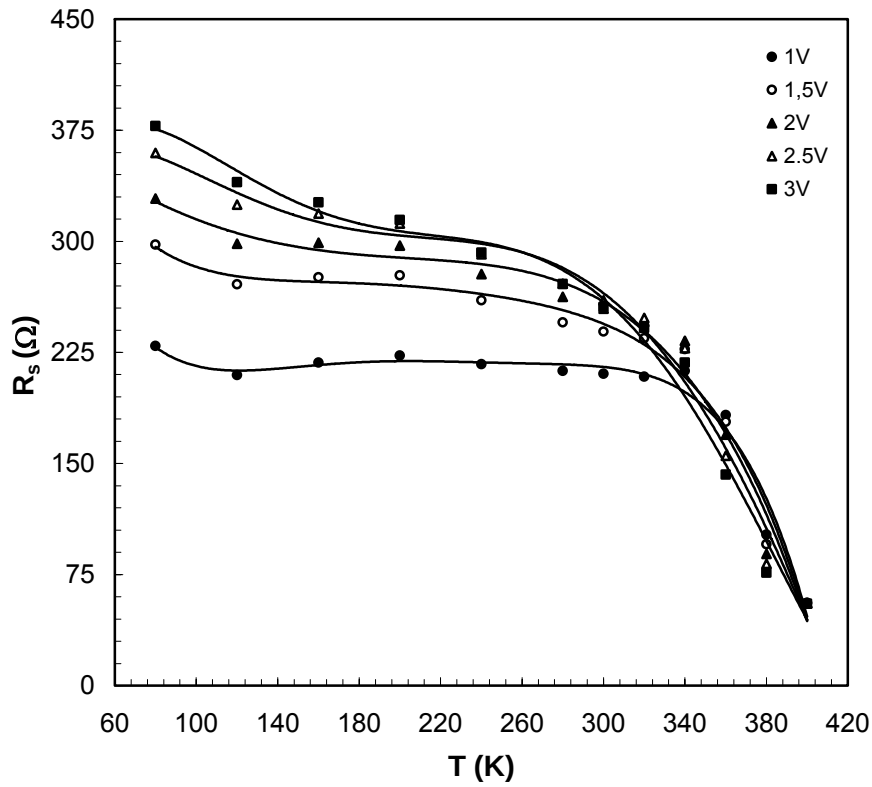
100 kHz için, MIS yapının sıcaklığa bağlı pozitif gerilim bölgesinde çizilen R_s -V eğrileri Şekil 4.12’de verildi.

R_s -V eğrileri yaklaşık 2-4 V arasında bir pik vermektedir. Bu pikin değeri artan sıcaklıkla azalmaktadır. Seri direnç hem uygulanan gerilime hem de sıcaklığa bağlı olarak bölgeden bölgeye (yığılım, tükenim ve tersinim) değişmektedir. Artan sıcaklıkla kapasitans ve iletkenlikte meydana gelen artma hem arayüzey durumlarının sıcaklık (termal uyarma) bağımlılığıyla hem de seri direncin bu davranışıyla açıklanabilir [55, 56]. MIS yapının seri direnci artan sıcaklıkla azalmaktadır. Artan sıcaklıkla hem yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıların hem de arayüzey durumlarının iletme katkısından dolayı iletkenliğin artması seri direncin artan sıcaklıkla azalmasına sebep olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ki frekans dağılımı yüksek sıcaklıklara göre daha belirgindir. Bu durum arayüzey durumları üzerinde düşük sıcaklıklarda frekansın, yüksek sıcaklıklarda ise termal uyarmanın yani sıcaklığın daha etkili bir mekanizma olduğunu göstermektedir.

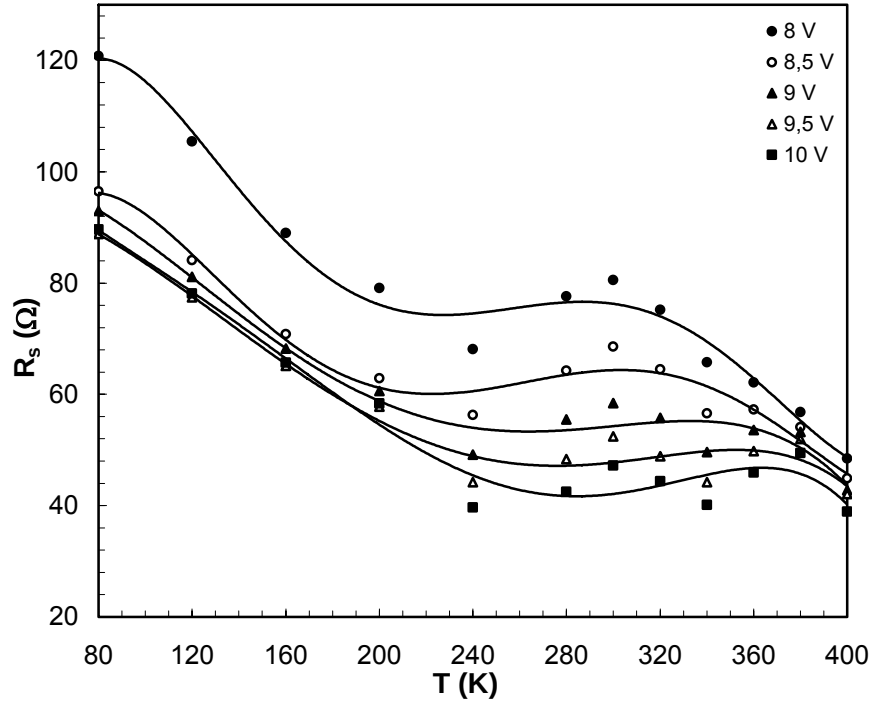


Şekil 4.12. MIS yapının 100 kHz’de sıcaklığa bağlı elde edilen R_s -V eğrileri

İleri pozitif gerilimlerdeki direnç değeri, gerçek seri dirence karşılık gelmektedir. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi düşük ve yüksek pozitif uygulama gerilimleri için R_s değerleri artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu durum metal-yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş yeterli enerjiye sahip tuzaklanmış yüklerin aktif olmasına atfedilebilir [57-60]. Sıcaklık artarken, termal enerjileri artan çoğunluk taşıyıcılar ve arayüzey durumları kapasitans ve iletkenlikte bir artışa sebep olmaktadır. Bu durumda C ve G/ω artarken MIS yapının seri direnci artan sıcaklıkla azalır. Ayrıca artan gerilimle seri direnç değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.13. MIS yapının 100 kHz’de elde edilen farklı gerilimler için sıcaklığa bağlı R_s -T eğrileri



Şekil 4.13. (Devam) MIS yapının 100 kHz’de elde edilen farklı gerilimler için sıcaklığa bağlı R_s -T eğrileri

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada hazırlanan Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapıların elektriksel özelliklerini incelemek amacıyla kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri 1 kHz - 1 MHz frekans ve 80-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler geniş bir voltaj aralığında, hem oda sıcaklığı hem de 100 kHz ve 1 MHz frekans değerleri için farklı sıcaklıklarda elde edildi. Yapılan bu ölçümlerden MIS yapının seri direnç (R_s), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), paralel iletkenlik (G_p/ω) gibi elektriksel parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, MIS yapının elektriksel karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı olduğunu göstermektedir.

MIS yapının oda sıcaklığında farklı frekanslarda elde edilen kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekansla azalmaktadır. Frekans azaldıkça, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleri olan arayüzey durumları ac sinyali takip edebildiğinden dolayı C-V ve G/ω-V değerlerine ilave bir katkı gelmektedir. Artan frekansla arayüzey durumlarının bu katkıları azalmakta ve kapasitans ve iletkenlik değerlerine arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmemektedir. Bu nedenle yapının gerçek elektriksel parametrelerini hesaplamak için C-V ve G/ω-V ölçümlerinin yüksek frekanslarda (f≥500 kHz) yapılması daha güvenilir olacaktır.

Farklı doğru beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren C-f ve G/ω-f eğrilerinden görüldüğü gibi, kapasitans ve iletkenlik değerleri her gerilim değerinde artan frekansla azalmaktadır. MIS yapının C-V ve G/ω-V ölçümlerinin kuvvetli yığılma bölgesindeki kapasitans ve iletkenlik değerleri kullanılarak yapının seri direnç değerleri elde edildi. R_s'nin gerilim ve frekansa bağlı eğrilerinden görüldüğü gibi gerilime bağlı seri direnç değerleri her frekansta bir pik değerinden geçmekte ve artan frekanslarda bu pik sağa doğru kaymaktadır. Bu sonuç arayüzey durumlarının yasak enerji aralığında özel bir dağılıma sahip ve yeteri kadar büyük mertebede olduğunu göstermektedir. Tüm

frekanslar için yığılım bölgesinde hesaplanan seri direnç değerlerinin her gerilim değerinde artan frekansla azaldığı gözlemlendi.

Seri direncin, ölçülen hem C_m ve hem de G_m/ω değerleri üzerindeki etkisi incelemek amacıyla ters ve doğru beslem altında kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/ω) değerleri düzeltildi ve C_c -V ve G_c/ω -V eğrileri elde edildi. Düzeltilmiş kapasitans eğrisi özellikle doğru beslem altında artan voltajla artmakta iken iletkenlik eğrisi ise azalmaktadır. Bu nedenle ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği için R_s etkisi dikkate alınmalıdır.

Düşük frekans(C_{LF})-yüksek frekans(C_{HF}) metoduyla hesaplanan arayüzey durum yoğunluğunun gerilime bağlı dağılım profili elde edilmiştir. N_{ss} 'in maksimum değeri $\sim 10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olup uygulanan gerilime bağlı olarak değişmekte ve negatif gerilim bölgesinden pozitif gerilim bölgesine doğru artmaktadır. Bu durum arayüzey durumlarının yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde özel bir dağılım profiline sahip olduğunu gösterir.

MIS yapının oda sıcaklığında frekans bağımlılığı incelendikten sonra yapının 80-400 K aralığında sıcaklık bağımlılığı incelendi. 100 kHz ve 1 MHz frekansları için ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri tüm sıcaklıklarda artan sıcaklık ile artmaktadır. Artan sıcaklıkla arayüzey uzay yükü değerlerinin artması kapasitans ve iletkenliğe katkıda bulunur. Ayrıca, tüm sıcaklıklar için artan frekans ile kapasitans ve iletkenlik değerleri azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru kapasitans ve iletkenlikte artma, düşük frekanslarda etkili olan arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanmaktadır.

MIS yapının sıcaklığa bağlı seri direnç-voltaj eğrileri yaklaşık 2-4 V arasında bir pik vermektedir. Bu pikin değeri artan sıcaklıkla azalmaktadır. Artan sıcaklıkla kapasitans ve iletkenlikte meydana gelen artma hem arayüzey durumlarının sıcaklık (termal uyarma) bağımlılığıyla hem de seri direncin bu davranışıyla açıklanabilir. MIS yapının seri direnci artan sıcaklıkla azalmaktadır. Artan sıcaklıkla hem

yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıların hem de arayüzey durumlarının iletme katkısından dolayı iletkenliğin artması seri direncin artan sıcaklıkla azalmasına sebep olmaktadır.

Hazırlanan MIS yapının frekansa ve sıcaklığa bağlı elektriksel karakteristikleri incelendi. Yapılan tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu tür yarıiletken aygıtlar için seri direnç ve arayüzey durumlarının etkisi önemsenecek kadar büyüktür. Özellikle arayüzey durumlarının kapasitans ve iletkenlik değerleri üzerindeki etkisini azaltmak için ölçümler yeterince yüksek frekanslarda alınmalıdır. Ayrıca, seri direnç etkisini azaltmak için kontaklar oluşturulurken yüksek saflıkta metaller kullanılmalıdır. Seri direnç ve arayüzey durumlarının etkisinden başka MIS yapının elektriksel özelliklerini etkileyen diğer bir parametre ise arayüzey yalıtkan tabakasıdır. Doğal ya da yapay olarak oluşturulan yalıtkan tabaka her zaman homojen yapılmayabilir ve dolayısıyla yalıtkan tabaka kalınlığı bölgeden bölgeye farklılık gösterebilir.

KAYNAKLAR

1. Berger, L.I., "Semiconductor Materials", **CRC Press**, New York, 145-152 (1997).
2. Jarzebski, Z., "Oxide Semiconductors", **Pergammon**, New York, 300-306 (1973).
3. Rhoderick, E.H., "Metal-Semiconductor Contacts", **IEE PROC.**, 29(1): 1-14 (1982).
4. Milnes, A.G., Feucht D.L., "Heterojunction and Metal-Semiconductor Junctions" **Academic Press**, New York and London, 156-200 (1972).
5. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", **John Wiley & Sons**, New York, 245-300, 362-390 (1981).
6. Yu, A.Y.C., Snow, E.H., "Surface Effects on Metal-Silicon Contacts", **J. Appl. Phys.**, 39: 3008- 3014 (1968).
7. Crowell, C.R., Sze, S.M., "Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers", **Solid State Electron.**, 9: 1035-1040 (1966).
8. Nicollian, E. H., Brews, J. R. "Experimental evidence for interface trap properties", MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology", **John Willey and Sons**, New York, 285-318 (1982)
9. Crowell, C. R, Sze S. M., Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems", **Journal of Applied Physics**, 36(10): 3212-3220 (1965).
10. Altındal, Ş., Tataroglu, A., Dökme, İ., "Density of interface states, excess capacitance and series resistance in the metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells", **Solar Energy Mater. Solar Cells**, 85: 345 (2005).
11. Terman, L. M., "An investigation of surface states at a silicon-silicon dioxide interface employing metal-oxide-silicon diodes", **Solid-State Electronics**, 5(5): 259-285 (1962).
12. Goetzberger, A., Klausmann, E. and Schulz, M. J., "Interface states on semiconductor/insulator surfaces", **CRC Critical Reviews in Solid State Sciences**, 6(1): 226-233 (1976).
13. Sharma, B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications", **Plenum Press**, New York, 113-118 (1984).

14. Tataroğlu, A., “MOS yapılarda temel fiziksel parametrelerin frekans ve radyasyon miktarına bağlı incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 67-77 (2004).
15. Ayas, E., “Si₃N₄ esaslı kompozit malzemelerin elektriksel ve ısı ilekenliklerinin geliştirilmesi”, Doktora Tezi, **Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-7 (2009).
16. Lee, M.R., Russell, S.S., Arden, J.W. ve Pillinger, C.T., “Nierite (Si₃N₄), a new mineral from ordinary and enstatite chondrites,” **Meteoritics**, **30**, 387-98, (1995).
17. Collins, J.F. ve Gerby, R.W., “New refractory uses for silicon nitride reported,” **J. Met.**, **7**, 612-615, (1955).
18. R. N. Katz, U.S. “National programmes for energy conversion; progress in nitrogen ceramics,”(Ed: F. L. Riley), **NATO ASI Series E: Applied Sciences**, No: 65, Martinus Nijhoff, Boston, A.B.D., 727-735, (1983).
19. Katz, N.R., “Applications of silicon nitride based ceramics,” **Ind. Ceram.**, **17** (3), 158-164, (1997).
20. Schottky, W., “The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers”, **Z. Phys.** **113**, 367-414 (1938).
21. Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., “Metal-Semiconductor Contacts”, 2nd ed. **Clerendon, Oxford**, (1988).
22. Ziel, A., “Solid State Physical Electronics”, **Prentice-Hall International Inc.**, Minnesota, 119-124 (1968).
23. Brillson, L.J., “Contacts To Semiconductors”, **Noyes Publications**, New Jersey, 40-44 (1993).
24. Moll J.L., Tarui Y., “A new solid state memory resistor”, **IEEE Trans. Electron Devices**, ED-10, 338-341 (1963).
25. Grove A. S., Deal, B. E., Snow, E. H., Sah, C. T., “Investigation of thermally oxidized silicon surfaces metal-oxide-semiconductor structures”, **Solid-State Electronics**, **8**(2): 145-163 (1965).
26. Altındal, Ş., “Al - SiO_x - pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri.”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 52-74 (1993).

27. Durlu T., “Katıhal Fiziğine Giriş”, **Ankara Üniversitesi Yayınları**, 2.Baskı, 2 (1992).
28. Ghandhi, S. K., “VLSI Fabrication Principles”, **John Wiley & Sons**, New York, 401-405 (1983).
29. Gökçen, M., “MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 13-15, 37 (2005).
30. Schroder, D. K., “Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.”, **John Wiley & Sons**, New York, 337-379 (1998).
31. Ulrich, B., Kuchar, F., “Capacitance-voltage measurements on a p-type InSb metal/insulator/semiconductor structure with Si₃N₄ as the insulator”, **Thin Solid Films**, 168(2):157-168 (1989).
32. Cooke, M. J., “Semiconductor Devices”, **Prentice Hall.**, New York, 294-308 (1990).
33. Haddara, S. H., El-Sayed, M., “Conductance technique in MOSFETs: study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes”, **Solid-State Electronics**, 31(8):1289-1298 (1988).
34. Shuer, M., “ Physics of Semiconductor Devices 2nd ed”, **Prentice-Hall, Int.Inc.**, New Jersey, 194-225 (1990).
35. Zerr, A., Miehe, G., Serghiou, G., Schwarz, M., Kroke, E., Riedel, R., Fuess, H., Kroll, P. ve Boehler, R., Synthesis of cubic silicon nitride, **Lett. Nature**, 400, 340-342, (1999).
36. Fonash, S. J., “The role of the interfacial Layer in Metal - Semiconductor Solar Cells”, **J. Appl. Phys.**, 46: 1286-1289 (1975).
37. Kuhn M., “A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements” **Solid State Electron.**, 13(6): 873-885 (1970).
38. Castagne, R. and 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).
39. Larin, F., “Radiation Effects in Semiconductor Devices”, **John Wiley & Sons**, New York, 8-16 (1968).

40. Ishikawa, Y., Kosugi, M. et al., "Capacitance-voltage study of single-crystalline Si dots on ultrathin buried SiO₂ formed by nanometer-scale local oxidation", *Thin Solid Films*, 369: 69-72 (2000).
41. Sah, C. H., "Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Ns-23(6): 1563-1568 (1976).
42. Şahin B., Çetin H., Ayyıldız E., "The effect of series resistance on capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes", *Solid-State Comm.*, 135(8): 490-495 (2005).
43. H. Kanbur, Ş. Altındal, A. Tataroğlu, "The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes" *Appl. Surf. Sci.*, 252(5): 1732-1738 (2005).
44. Hung, K. K. and Cheng, Y. C., "Determination of Si-SiO₂ interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurement", *Appl. Surf. Sci.*, 30: 114-119 (1987).
45. Chattopadhyay P., Raychaudhuri B., "New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diodes" *Solid State Electron.*, 35(7): 1023-1024 (1992).
46. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., "MOS conductance technique for measuring surface states parameters", *Appl. Phys. Lett.*, 7: 216-219 (1965).
47. Singh, R. J. and Srivastava, R. S., "Investigations of interface-state density in Si MOS structures", *Solid State Electron.*, 25(3): 227-232 (1982).
48. Tataroğlu B., Altındal Ş., Tataroğlu A., "The C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures", *Microelectron. Eng.*, 83(10): 2021-2026 (2006).
49. Kelberlau, U. and Kassing, R., "Theory of nonequilibrium properties of MIS capacitors including charge exchange of interface states with both bands" *Solid State Electron.*, 22(1): 37-45 (1979).
50. Tataroğlu A., Altındal Ş., Bülbül M.M. "Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure", *Microelectron. Eng.*, 81: 140-149 (2005).
51. Cova P., Singh A., Masut R.A., "A self-consistent technique for the analysis of the temperature dependence of current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a tunnel metal-insulator-semiconductor structure" *J. Appl. Phys.*, 15(82): 5217-5226 (1997).

52. Prabakar, K., Narayandass, S. K., Mangalaraj, D., “Dielectric studies on Cd_{0.4}Zn_{0.6}Te thin films” **Mater. Chem. and Phys.**, 78(3): 809-815 (2003).
53. Akkal B, Benamara Z, Gruzza B, Bideux L., “Characterization of interface states at Au/InSb/InP(100) Schottky barrier diodes as a function of frequency”, **Vacuum**, 57(2): 219-228 (2000).
54. Ng, K.K., Card, H.C., “Image force effect on the short wavelength (UV) photoresponse of silicon Schottky barriers”, **J. Appl. Phys.**, 51: 2153-2158 (1980).
55. Bülbül M.M., Zeyrek S., Altındal Ş. and Yüzer H., “On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diodes” **Microelectron. Eng.**, 83(3): 577-581 (2006).
56. Yücedağ İ., Altındal Ş., Tataroğlu A., “On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure”, **Microelectron. Eng.**, 84(1): 180-186 (2007).
57. Demirezen, S. and Altındal, Ş., ” On the temperature dependent profile of interface states and series resistance characteristics in (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN heterostructures” **Physica B**, 405: 1130–1138 (2010).
58. Tekeli, Z., Altındal, Ş., Çakmak, M., Özçelik, S. And Özbay, E., “The profile of temperature and voltage dependent series resistance and interface states in (Ni/Au)/GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N heterostructures”, **Microelectric Engineering**, 85: 2316-2321 (2008).
59. A. Keffous, M. Siad, S. Mamma, Y. Belkacem, C. Lakhdar Chaouch, H.Menari, A. Dahmani, W. Chergui, “Effect of series resistance on the performance of high resistivity silicon Schottky diode”, **Applied Surface Science** 218: 336–342 (2003)
60. H. Uslu, S. . Altındal, U. Aydemir, İ. Dökme, İ.M. Afandiyeva, “The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I–V, C–V and G/ω–V characteristics of Al–TiW–Pd₂Si/n-Si Schottky barrier diodes”, **Journal of Alloys and Compounds** 503: 96–102 (2010)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SEZGİN, Şenay
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.07.1980 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : (505) 708 59 92
 e-mail : senay.sezgin@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Tezsiz Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Eğitim Bil. Ens.	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik Bölümü	2004
Lise	Keçiören Süper Lisesi	1999

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Tataroğlu A., Altındal Ş., Pür F. Z., Ataseven T., Sezgin Ş., “ The Gaussian distribution of barrier height in Au/n-GaAs Schottky diodes at high temperatures ”, ***Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications***, 5(4): 438 – 442, (2011).
2. Tataroğlu A., Ataseven T., Sezgin Ş., Pür F. Z., “ γ -ray irradiation effects on dielectric properties of Au/SiO₂/n-Si (MIS) structures”, ***Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications***, 5(4): 443 – 447, (2011).

Hobiler

Yüzme, sinema ve tiyatro, müzik ve seyahat.