

**Al/SiO₂/p-Si (MIS) YAPILARIN ELEKTRİK KARAKTERİSTİKLERİNİN
FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

Ahmet KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2010
ANKARA**

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet KAYA

Ahmet KAYA tarafından hazırlanan "Al/SiO₂/p-Si (MIS) Yapıların Elektrik Karakteristiklerinin Frekansa Bağlı İncelenmesi" adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

Doç. Dr. Metin ÖZER
G. Ü. Fen Edeb. Fak. Fizik Bölümü

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL
G. Ü. Fen Edeb. Fak. Fizik Bölümü

Doç. Dr. İlbilge DÖKME
G. Ü. Eğitim Fak. İlköğretim Fenbilgisi Öğretmenliği

Tarih: 18 / 06/ 2010

Bu tez ile G. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Al/SiO₂/p-Si (MIS) YAPILARIN ELEKTRİK KARAKTERİSTİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HAZİRAN 2010

ÖZET

Al/SiO₂/p-Si yapılar, [100] yönelimli, 1 Ω cm öz dirençli p-Si üzerine oluşturuldu. Bu yapıların frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ ω -V) karakteristikleri, seri direnç (R_s) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) etkileri dikkate alınarak incelendi. C-V ve G/ ω -V ölçümleri oda sıcaklığında ve 1 kHz-1 MHz aralığında gerçekleştirildi. Deneysel sonuçlar, yapının hem C hem de G/w değerlerinin artan frekansla azaldığını gösterdi. Düşük frekanslarda C ve G/w'nin bu davranışı, Si/SiO₂ arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedildi. R_s 'nin C ve G/w üzerinde etkisi yüksek frekanslarda olduğu görüldü. Bu yüzden, gerçek C_c ve G_c/w değerlerini elde etmek için ölçülen C_m ve G_m/w değerleri, R_s etkisi dikkate alınarak düzeltildi. Voltaja bağlı R_s profili tüm frekanslar için yaklaşık 0 V civarında bir anormal pik gösterdi. Ayrıca, yapının; kesişim voltajı (V_0), engel yüksekliği ($\Phi_B(C-V)$), Fermi seviyesi (E_F) gibi temel parametreleri farklı frekanslar için C^{-2} -V grafiklerinden elde edildi. Engel yüksekliği, arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımı tarafından etkili bir şekilde kontrol edildiği için arayüzey durumlarının yoğunluğunun ve onların zaman sabitlerinin uygulanan gerilimle ve enerjiye bağlı değişimi, admittans spektroskopisi metodu ile elde edildi.

Bilim Kodu : 202. 1. 47

**Anahtar Kelimeler : Schottky diyotlar; Arayüzey durumları; Seridirenç; Yalıtkan
tabaka; Frekansa bağlılık**

Sayfa Adedi : 57

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

**THE INVESTIGATION OF FREQUENCY DEPENDENT ELECTRIC
CHARACTERISTICS OF Al/SiO₂/p-Si (MIS) STRUCTURES
(M. Sc. Thesis)**

Ahmet KAYA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
JUNE 2010**

ABSTRACT

Al/SiO₂/p-Si structures were fabricated on p-Si with [100] orientation and 1 Ωcm resistivity. The frequency dependent capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/w-V) characteristics of the Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures have been investigated by considering series resistance (R_s) and interface states (N_{ss}) effects. The C-V and G/w-V measurements of these structures were carried out in the frequency range of 1 kHz-1 MHz at room temperature. Experimental results show that both C and G/w of sample decreases with increasing frequency. Such behavior of C and G/w at low frequencies results from the existence of N_{ss} at Si/SiO₂ interface. The effect of R_s on the C and G/w are found noticeable at high frequency. Therefore, the high frequencies C_m and G_m/w values measured under both forward and reverse bias were corrected for the effect of R_s to obtain the real C_c and G_c/w of structure. The profile of R_s exhibits an anomalous peak at each frequency about at zero-bias. Furthermore, the characteristic parameters of structure such as intercept voltage (V_0), barrier height ($\Phi_B(c-v)$), Fermi level (E_F) were determined from C^{-2} -V characteristics for various frequencies. Since the barrier height is controlled by the density distribution of the N_{ss} , the variation of interface states density and their relaxation time constant were obtained from admittance Spectroscopy method as function of voltage and energy.

Science Code : 202. 1. 47

Key Words : Schottky diodes; Interface states; Series resistance; Insulator layer; Frequency dependence

Page Number : 57

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL rehberliğinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmam boyunca her türlü desteğini gördüğüm, engin tecrübelerinden ve bilgilerinden yararlandığım ve gelecekte de bu tecrübelerden ve bilgilerden istifade edeceğim, değerli hocam Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a teşekkürlerimi arz ederim. Tez çalışmalarım boyunca yönlendirmeleriyle yaptığı katkılardan dolayı Araş. Gör. Yasemin ŞAFAK arkadaşşıma teşekkür ederim.

Ayrıca manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen eşime ve kızşıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. METALYALITKANYARIİLETKEN(MIS)YAPILAR.....	4
2. 1. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri.....	8
2. 1. 1. Metal p-tipi yarıiletken kontaklar.....	10
2. 1. 2. Schottky engel alçalması.....	14
2. 2. İdeal MIS Yapılar.....	16
2. 3. Gerçek MIS Yapısı.....	23
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	30
3. 1. MIS Yapının Hazırlanması.....	30
3. 2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....	33
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	34
4. 1. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik- Voltaj (G/ω -V) Karakteristikler....	34

Sayfa

4. 2. Kapasite-gerilim Ölçümlerinden Schottky Diyot Parametrelerinin Bulunması.....	37
4. 3. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması.....	46
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	51
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2. 1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.....	6
Çizelge 2. 2. Silisyum-dioksit'in oda sıcaklığındaki (300 K) temel bazı fiziksel özellikleri	8
Çizelge 2. 3. Yarıiletken tipine göre doğrultucu ve omik kontağın oluşumu.....	9
Çizelge 4. 1. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının C ⁻² -V grafiğinden ve teorik hesaplamalardan elde edilen bazı temel parametreler.....	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. Şematik MIS yapısı.....	4
Sekil 2. 2. Bir metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramı	10
Sekil 2. 3. $\phi_m < \phi_s$ olduğu bir metal p-tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı.....	12
Sekil 2. 4. Metal p-tipi omik kontağın enerji bant diyagramı	13
Şekil 2. 5. (a) Görüntü yükü (b) Schottky engelini görüntü yükü alçalması.....	15
Şekil 2. 6. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken (MIS) Yapısı.....	16
Şekil 2. 7. Denge durumunda ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramı a) n-tipi yarıiletken b) p-tipi yarıiletken.....	17
Şekil 2. 8. Farklı voltajlar altında ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramı a) yığılma b) tüketim c) terslenim.....	18
Şekil 2. 9. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	19
Şekil 2. 10. İdeal bir MIS yapının devre şeması a) Yığılma b) Tüketim c) Tersinim.....	23
Şekil 2. 11. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	23
Şekil 2. 12. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.....	28
Şekil 3. 1. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....	32
Şekil 3. 2. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....	32
Şekil 3. 3. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) diyotun şematik gösterimi.....	32
Şekil 4. 1. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının yüksek frekanslardaki a) C-V eğrileri b) G/w-V eğrileri.....	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4. 2. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının voltaja bağlı a) C-log(f) eğrileri b) G/w-log(f) eğrileri.....	36
Şekil 4. 3. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen C ⁻² -V eğrileri.....	38
Şekil 4. 4. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında frekans fonksiyonu olarak değişen V _o , E _F , Φ _B (c-v) eğrileri.....	40
Şekil 4. 5. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında a) düşük frekanslarda elde edilen seri direnç-voltaj (R _s -V) eğrileri b) yüksek frekanslarda elde edilen seri direnç-voltaj (R _s -V) eğrileri.....	43
Şekil 4. 6. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında 1MHz için ölçülen ve düzeltilmiş a) C _c -V eğrileri b) G _c /ω-V eğrileri.....	44
Şekil 4. 7. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının yüzey potansiyeline karşı voltaj eğrisi.....	46
Şekil 4. 8. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslarda ölçülen eşdeğer paralel kondüktans G _p /ω-logf eğrileri.....	47
Şekil 4. 9. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının arayüzey durum yoğunluklarının enerji pozisyonuna göre dağılımı.....	48
Şekil 4. 10. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının zaman sbitinin enerji pozisyonuna göre dağılımı.....	48
Şekil 4. 11. C _{LF} -C _{HF} değerlerinin voltaja bağlı değişim grafiği.....	49
Şekil 4. 12. Ara yüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişimi (N _{ss} -V).....	50

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3. 1. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek Hawlett Packard 4192 LF Empedaes Analizmetre	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
d_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakasının kalınlığı
V	Uygulanan gerilim
V_0	Kesme gerilimi
V_D	Difüzyon potansiyeli
E_F	Fermi enerjisi
E_m	Maksimum elektrik alanı
E_{fm}	Metalin Fermi seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
φ^*	İntegrasyon sabitidir
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
χ_i	Yalıtkanın elektron yakınlığı
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
τ	Zaman sabiti
C_{ox}	Yalıtkan/oksit kapasitansı
C_{sc}	Yüzey yük kapasitansı
A_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakasının alanı
$\text{\AA}$	Angstrom
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
$\Delta\Phi_B$	Schottky engel alçalması
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
φ_i	Yüzey potansiyeli
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti

ϵ_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakasının dielektrik sabiti
ΔV_{FB}	Düz bant gerilim kayması
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
W_D	Tükenim bölgesi kalınlığı
Q_{sc}	Yarıiletkendeki uzay yükü
R_s	Seri direnç
C	Kapasitans
G	İletkenlik
n	İdealite Faktörü
N_{ss}	Arayüzey durumlarının yoğunluğu
N_A	Akseptör yoğunlukları

Simgeler	Açıklama
Z	Empedans
Y	Admittans

Kısaltmalar	Açıklama
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
C-V	Kapasitans-gerilim
G/ω-V	İletkenlik-gerilim
ac	Alternatif gerilim
dc	Doğru gerilim

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar veya diğer adıyla Schottky diyotları, elektronik sanayinde mikrodalga karıştırıcı dedektörleri, hızlı anahtar (switching) uygulamaları, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilime göre değişen kondansatörler) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bundan dolayı, bu tip diyotların özelliklerini ayrıntılı bir şekilde belirlemek için literatörde çok sayıda çalışma mevcuttur [1-32]. Bunlar arasında, 1947 yılında Walter H. Brattain ve John Barden [1,2] kristal redresör (doğrultmaç) yapmak için Bell Laboratuvarında araştırmaya başlamışlardır. Esas olarak yapılan çalışma çeşitli kristallere temas eden bir “catwhisker” in tek yönde iletken, diğer yönde büyük bir direnç göstermesi üzerinedir. Yapılan deneyler sırasında Ge kristalinin ters akıma daha fazla direnç gösterdiği ve daha iyi bir doğrultma işlemi yaptığı gözlenmiştir.

Metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koyduğu için bu kontaklara atfen Schottky diyotlar ya da Schottky kontaklar denilmektedir [27]. Metal ile yarıiletken arasında doğal ya da yapay olarak oluşturulan bir yalıtkan tabaka MS yapıyı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya dönüştürür. Bu yalıtkan tabaka hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. M/S arayüzeyinde oluşan potansiyel engelinin yüksekliği, seçilen metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlıdır. Doğrultucu kontak elde etmek için n tipi yarıiletkenlerde metalin iş fonksiyonu (Φ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük ve omik kontak için ise Φ_s değeri Φ_m değerinden büyük olmalıdır. P tipi yarıiletkenlerde ise durum bunun tam tersinedir. Bu yapıların hazırlamasında, yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi olmasına göre uygun iş fonksiyonu metaller seçilir [9]. Metal olarak genelde altın (Au), alüminyum (Al) gibi yüksek saflıktaki metaller kullanılırken yalıtkan olarak silisyum-dioksit (SiO_2), kalay dioksit (SnO_2) ve silisyum nitrat (Si_3N_4) gibi materyaller kullanılır. Bunlardan özellikle SiO_2 daha yaygın olarak kullanılmasının sebebi; silisyum üzerine daha kolay ve homojen büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine

yakın bir eklem oluşturmaktadır. Ayrıca SiO_2 birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar.

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. 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. Taam ve Schockley tarafından ileri sürülen bu seviyelerin tümüne arayüzey durumları veya arayüzey tuzakları adı verilir. Arayüzey durumlarının yoğunluğunu elde etmek için çok sayıda deneysel ve teorik metot vardır ve bu metotların kendi aralarında bazı avantaj ve dezavantajları vardır [3]. Ancak bunların en pratik ve en hızlı olanı doğru beslem akım- gerilim grafiği (I-V) metodudur. Bu metot, idealite faktörü ile potansiyel engel yüksekliğinin gerilime bağlı değiştiği ilkesinden hareketle her sıcaklık için gerilime bağlı bir $\ln I$ -V eğrisini ihtiva eder [4, 5]. Metal-yalıtkan/oksit-yarıiletken (MIS) ya da (MOS) yapılarda M/S arayüzeyindeki yalıtkan tabakadan dolayı bu yapılar paralel levhalı bir kondansatörlere benzemektedir. Bu yapılar ilk kez J. L. Moll tarafından deneyleri de içeren çok sayıda makaleler yayınlanarak oluşturulmuştur [28]. Bu yapı, termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmuştur. Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemeye oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

M/S arayüzeyindeki yalıtkan tabakanın kalınlığı yaklaşık $100 \text{ \AA}$ ' dan küçük ise bu yapılara MIS tipi Schottky diyotlar denilir. Ancak bu yalıtkan tabaka $100 \text{ \AA}$ ' dan büyük olması durumunda yapı bir MOS kondansatör gibi davranır. Bu yüzden bu MOS yapıların temel elektriksel parametreleri genelde frekansa veya sıcaklığa bağlı

kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümlerinden belirlenir [29, 30]. Ancak MIS tipi Schottky diyotların temel elektriksel parametreleri ise hem frekansa veya sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri hem de frekansa veya sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω -V ölçüm metotlarından belirlenir.

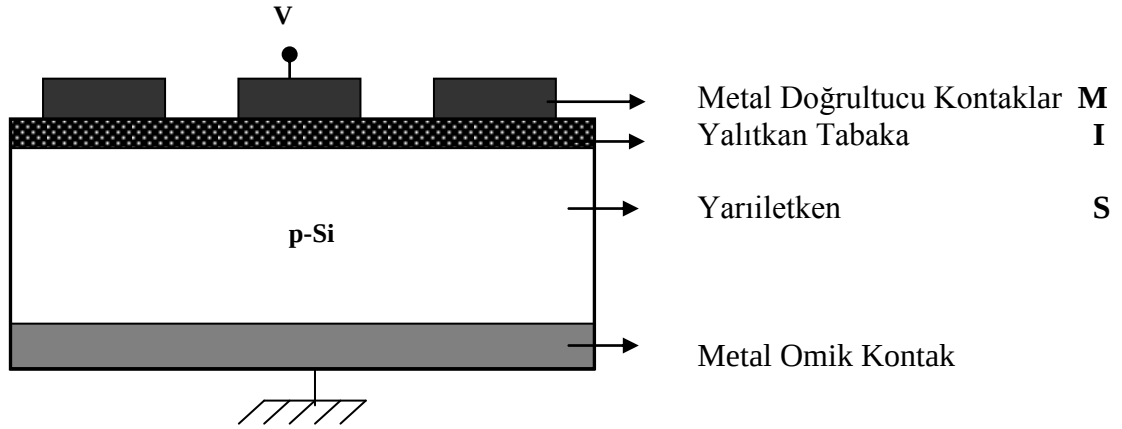
Bu yapıların performansını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerin başında M/S arayüzeyinde büyütülen yalıtkan tabakanın kalınlığı ve homojenliği, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumları, yapının seri direnci ve sıcaklığı gelmektedir. Bütün bu faktörler yarıiletken aygıtın ideal durumdan sapmasına neden olur. Bu yüzden hesaplamalarda bu faktörlerin dikkate alınması, sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artıracaktır.

Bu çalışmada, yalıtkan arayüzey tabakalı Al/SiO₂/p-Si (MIS) diyotların oda sıcaklığında kapasitance-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümlerinden Schottky engel yüksekliği (Φ_B), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), kesme gerilimleri (V_o), difüzyon potansiyelleri (V_D), akseptör yoğunlukları (N_A), tüketim tabakası genişliği (W_D) ile Fermi enerji seviyelerinin (E_F), maksimum elektrik alanı (E_m), seri direnç (R_s) bulunması hedeflenmiştir.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Schottky diyotların tarihsel gelişimi ve önemi üzerinde duruldu. İkinci bölümde, Schottky diyotların teorisi ve çalışma prensibi üzerinde duruldu. Üçüncü bölümde, Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların hazırlanması ile ilgili işlemler ve kullanılan deneysel ölçüm sistemleri hakkında bilgi verildi. Dördüncü bölümde, deneysel ölçümler sonucunda elde edilen C-V ve G/ω -V ölçümlerinden elde edilen deneysel sonuçların genel bir değerlendirmesi, literatürle kıyaslamalı olarak yapıldı. Beşinci bölümde ise varılan sonuçlarla ilgili yorumlar ve tartışmalar yapılmıştır.

2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken yapılar, bir yüzeyine omik kontak yapılmış bir yarıiletken yaprağın üzerine yalıtkan bir tabaka ve bu tabaka üzerine de bir metal tabakanın büyütülmesiyle oluşan sandviç yapılardır. Şematik bir MIS yapısı Şekil 2. 1’de gösterilmiştir. Dışarıdan uygulanan gerilim V , metal plakaya uygulanır ve yönü de ona göre belirlenir. Yani metal plakaya omik kontağa göre pozitif bir gerilim uygulanırsa MIS yapıya uygulanan gerilim pozitif, metal plakaya omik kontağa göre negatif bir gerilim uygulanırsa MIS yapıya uygulanan gerilim negatif olarak tanımlanır.



Şekil 2. 1. Şematik MIS yapısı

MIS yapımında kullanılan (Si) kristalinin temel fiziksel özellikleri:

Yıldızlarda, meteorlarda daha çok bulunan silisyum dünya kabuğunun yüzde 27,6 gibi büyük bir kısmını meydana getirir. Dünyada bulunan elementler içinde oksijenden sonra ikinci sırayı alır. Normal olarak tabiatta serbest olarak bulunmaz. İlk olarak 1826 senesinde İsveçli kimyager Jakob Berzelius tarafından element olduğu fark edilmiştir. Silisyumun bazı özellikleri metallere, ancak genel olarak metal karakterlerin de değildir ve metaloid olarak bilinen maddelerden biridir. Silisyumun rengi gri ve siyahtır. Çok sert bir elementtir, kristal yapısı elması andırır.

Oda sıcaklığında kararlıdır. Isıtılınca giderek reaktifleşir. Halojenlerle (Fluor ve İyot gibi) Halojenür bileşiklerini verir. Silisyumun en önemli özelliği yarı iletken olmasıdır. Elektrik devrelerinde Silisyumun yarı iletkenlik özelliğinden yararlanılır. Peryodik tabloda Grup IVA da yer alır. Atom numarası 14 atom ağırlığı 28,086 olup, kristal heykelden siyahtan griye değişen renge sahip kırılğan sert bir yapıdadır. Yoğunluğu $2,33\text{g/cm}^3$ ve Mohs skalasına göre 7 sertliktedir. Silisyum, bor gibi III A grubu elementlerinden biri ile katkıldığında oluşan madde bir elektron eksiği nedeniyle elektron alma eğilimindedir. Böylece p-tipi yarıiletken elde edilmiş olur ve bu yarıiletkende deşik yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır. Benzer şekilde silisyuma fosfor gibi VA grubu elementlerinden biri katkılanırsa bir elektron fazlalığı nedeniyle oluşan madde elektron verme eğilimdedir ve bu tür yarıiletkene n-tipi yarıiletken adı verilir. Burada Silisyumun (Si) ilk keşfi 1824 yılında Berzelius tarafından gerçekleştirilmiştir. Silisyum doğada silikat ve tuzları halinde bulunur. Yerkabuğunun yaklaşık %25.7'si Si elementinden oluşur. Oksijenden sonra bileşikleri halinde en fazla bulunan elementtir. Bunlardan birincisi saf kristal silisyumdur. Saydam olmayan koyu gri renkli, parlak, sert ve kırılğan olup örgü yapısı elmas yapıdadır. Diğeri ise amorf silisyumdur. Koyu kahve renkli olup tane büyüklüğü nedeni ile kristal silisyumdan ayırt edilebilir ve kolay reaksiyon verir. Silisyum dioksitin (SiO_2) 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 cihaz yapımı için yeterli saflığa ulaşmamıştır [33]. Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden faydalanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır. Böylece saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bu aşamadan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülerek içine istenilen özdirenci sağlayacak oranda safsızlık (katkı) maddelerinin katkılanması gerekir. Silisyum son yörüngesinde 4 elektron taşıyan (IVA grubu) bir

elementtir. Silisyum, bor gibi III A grubu elementlerinden biri ile katkıldığında oluşan madde bir elektron eksikliği nedeniyle elektron alma eğilimindedir. Böylece p-tipi yarıiletken elde edilmiş olur ve bu yarıiletken de değişik yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır. Benzer şekilde silisyuma fosfor gibi VA grubu elementlerinden biri katkılanırsa bir elektron fazlalığı nedeniyle oluşan madde elektron verme eğilimindedir ve bu tür yarıiletken n-tipi yarıiletken adı verilir. Burada elektron yoğunluğu değişik yoğunluğundan daha büyüktür. Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri

Özellikler	Si
Atom yoğunluğu (Atom/cm ³)	5,0 x 10 ²²
Atom ağırlığı	28,09
Kırılma alanı (V/cm)	3x10 ⁵
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N _c (cm ⁻³)	2,8 x 10 ¹⁹
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N _v (cm ⁻³)	1,04 x 10 ¹⁹
Saf taşıyıcı yoğunluğu n _i (cm ⁻³)	1,45 x 10 ¹⁰
Saf öz direnci (Ω.cm)	2,3x10 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 _{lh} [*] =0,16, m _{hh} [*] =0,49
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4,05
Yasak enerji aralığı (eV)	1.12
Mobilitesi elektron – hole (cm ² /V.s)	1.450-500
Erime sıcaklığı (°C)	1414
Termal iletkenliği (W/cm.K)	1.56
Kaynama noktası (°C)	2900
Molar hacmi (ml/ mol)	12.06
Mineral Sertliği	6.5

Metal-yarıiletken sistemler yıllardır incelenmektedir. Bu incelemeler temelde Si ve GaAs tabanlı Schottky kontaklar üzerinde yapılmıştır. Özellikle Si elektronik cihazlarda kullanılan çok önemli bir malzemedir ve Si tabanlı Schottly kontaklar birçok cihazda ve entegre devrelerde kullanılmaktadır.

Silisyumun diğer yarıiletkenlere göre önemli avantajlarından bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir [18]:

- Yüzey passivasyonu kolaydır. Böylece yüzey rekombinasyon hızını azaltan kararlı bir oksit tabaka oluşur.
- Silisyumun sertliğinden dolayı geniş waferlar şeklinde hazırlanabilir.
- Silisyum termal olarak çok kararlıdır. Bu özellik difüzyon, oksidasyon ve tavlama gibi işlemlerde yüksek sıcaklıklarda çalışmaya izin verir.
- Doğada bol miktarda bulunduğu için maliyeti düşüktür.
- Silisyumun yasak enerji aralığının şekli ve boyutudur. Silisyum indirekt bant aralıklı bir yarıiletkendir ve yasak enerji değeri (1,12 eV) onun optoelektronik uygulamaları için limit değeridir.

MIS yapımında kullanılan SiO_2 yalıtkanının temel fiziksel özellikleri:

Dielektrik (yalıtkan) tabakalar genel olarak elektronik devreleri birbirinden izole etmek ve cihazı mekanik ve kimyasal olarak korumak için kullanılırlar. MOS yapılarda ise metal ve yarıiletken arasındaki izolasyonu sağlamak için kullanılır. Son zamanlarda kullanılmaya başlayan dielektrik sabiti çok büyük yalıtkanlar olmasına rağmen SiO_2 , gerek Si ve gerekse diğer yarıiletkenlerle birlikte halen sıklıkla kullanılmaktadır. SiO_2 özellikle Si kullanılan kontak yapılarda, örgü sürekliliği ve arayüzey safsızlıklarının diğer yalıtkanlara göre daha iyi olması, yarıiletken üzerine kolay büyümesi ve özelliklerinin iyi biliniyor olması nedeniyle tercih edilmektedir. Çünkü bir MOS yapıdaki arayüzey tabakasının kusursuzluğu ve dielektrik özellikleri cihazın tüm karakteristiklerini etkilemektedir. Yalıtkan tabakada veya

yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde oluşacak bir kusur, homojensizlik, örgü bozukluğu veya safsızlık yasak enerji aralığında izinli bir durum gibi davranarak cihazın verimini düşürür. Bu nedenle arayüzey yalıtkan tabakanın mümkün olduğunca kusursuz olmasına ve iyi nitelikli bir yalıtkan olmasına dikkat edilmelidir. MOS yapısını oluşturmak üzere, metal/yarıiletken arayüzeyine oluşturulan yalıtkan tabaka olan silisyum-dioksitin (SiO_2) bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.2’ de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Silisyum-dioksit’in oda sıcaklığındaki (300 K) temel bazı fiziksel özellikleri

Atom ağırlığı (g/mol)	60,07
Kristal yapısı	Amorf
Yoğunluğu (g/cm^3)	2,2
Öz direnci (Ohm.cm)	$1,0 \times 10^{14}$ - $1,0 \times 10^{16}$
Dielektrik sabiti	3,9
Dielektrik sertlik (V/cm)	10^6 - 10^7
Yasak enerji aralığı (eV)	9
Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	~ 1600

2. 1. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri

Metal-yarıiletken kontak türlerinden bahsetmeden önce bunlara ait bazı nicelikleri tanımlamak gerekmektedir. Bu nicelikler:

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 geçirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Metalin iş fonksiyonu (ϕ_m): Bir metaldeki 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 değişken bir niceliktir.

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

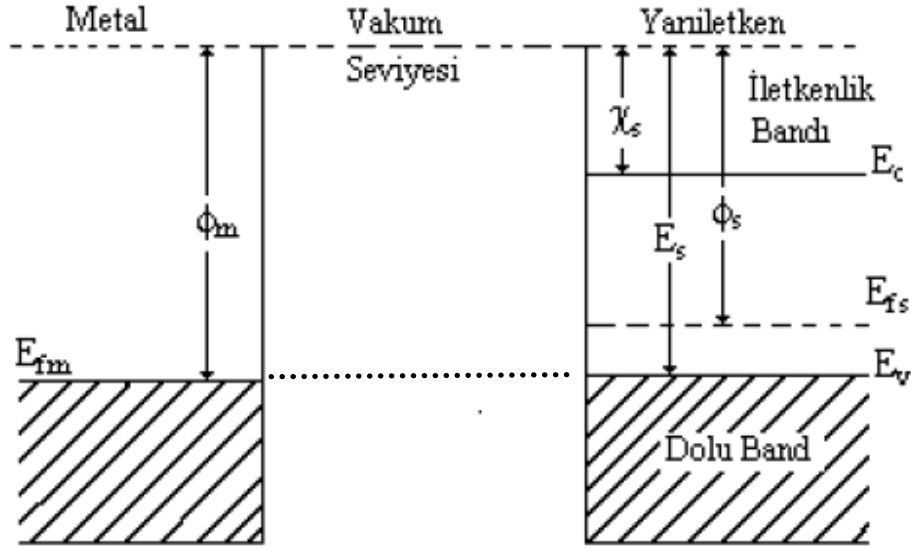
Bir metal ile bir yarıiletkenin oluşturduğu kontağın türünün doğrultucu veya omik olması, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile yarıiletkenin p veya n tipi olmasına bağlıdır. Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\phi_s < \phi_m$ olması halinde doğrultucu kontak ve $\phi_s > \phi_m$ olması halinde omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\phi_s < \phi_m$ olması halinde omik kontak ve $\phi_s > \phi_m$ olması halinde de doğrultucu kontak oluşur.

Çizelge 2. 3. Yarıiletken tipine göre doğrultucu ve omik kontağın oluşumu

	n -tipi	p-tipi
Doğrultucu kontak	$\phi_s < \phi_m$	$\phi_s > \phi_m$
Omik kontak	$\phi_s > \phi_m$	$\phi_s < \phi_m$

2. 1. 1. Metal p-tipi yarıiletken kontaklar

Sekil 2. 2’de bir metal ve p-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı görülmektedir.



Sekil 2. 2. Bir metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramı [31]

Burada ϕ_m metalin iş fonksiyonu, E_{fm} metalin Fermi seviyesi, ϕ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu, E_{fs} yarıiletkenin Fermi seviyesi, χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığı, E_s yarıiletkenin dolu bandının vakum seviyesi altındaki derinliği, E_c iletkenlik bandının minimumu, E_v valans bandının maksimumudur.

Şimdi metal-p tipi yarıiletken kontağı tartışalım. Burada iki durum mevcuttur.

Birincisi yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s ’nin, metalin iş fonksiyonu ϕ_m ’den büyük olduğu doğrultucu kontak durumudur. İkincisi ise ϕ_m ’nin, ϕ_s ’den büyük olduğu omik kontak durumudur. Birinci durumu ele alalım. Tüm alıcılar iyonlaşmış olsun. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden $\phi_s - \phi_m$ kadar aşağıdadır (Sekil 2.3.a). Kontakta sonra metalin Fermi seviyesi ile yarıiletkenin Fermi seviyesi aynı seviyeye ulaşıncaya kadar metalden yarıiletkene

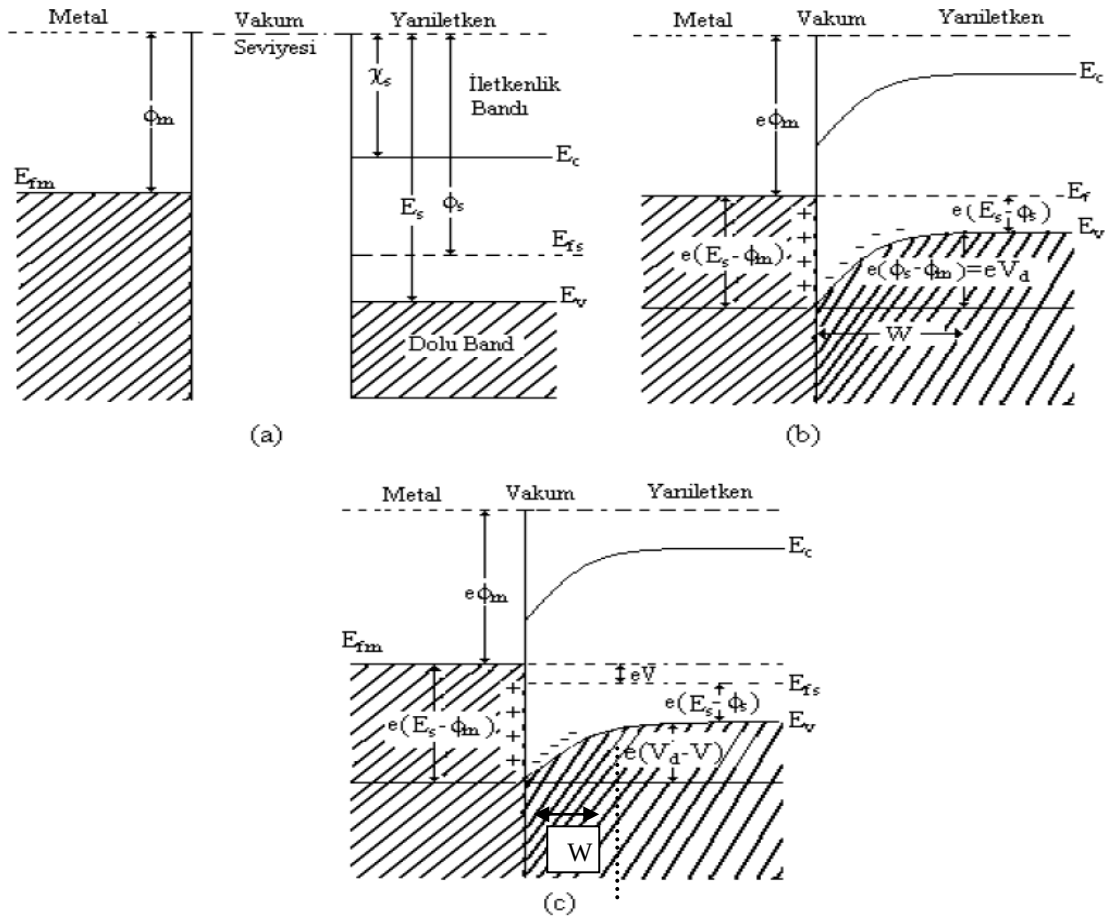
elektron akışı olur. Bunun sonucu olarak yarıiletkenin ön yüzeyi negatif olarak yüklenir (Şekil 2. 3b). Ayrıca metalden yarıiletkene geçen elektronlar arkasında boşluklar bırakarak metalin ön yüzeyinin de yüklenmesine neden olur. Bu negatif yük tabakası iyonlaşmış alıcılar tarafından oluşturulur ve yük W kalınlıklı uzay yük tabakası boyunca yayılır. Yarıiletken bloktaki enerji seviyeleri $(\phi_s - \phi_m)$ kadar yükseltildiğinden, yarıiletken tarafındaki boşluklar için yüzey engeli

$$e(\phi_s - \phi_m) = eV_d \quad (2.1)$$

kadardır. Burada V_d difzyon potansiyelidir. Metalin yüzeyine göre alınmış olan yarıiletken içindeki potansiyel, $-V_d$ ' dir. Metaldeki boşluklar için potansiyel engeli ise,

$$(\phi_s - \phi_m) + (E_s - \phi_s) = (E_s - \phi_m) \quad (2.2)$$

kadardır. Termal uyarılmadan dolayı yarıiletken ve metal tarafındaki bazı boşluklar potansiyel engelini aşıp, sırasıyla metal ve yarıiletken tarafına geçebilecek yeterli enerjiyi kazanırlarsa, engeli geçen eşit fakat zıt yönlü iki I_0 akımı oluşacaktır. Bu durumda sistem termal dengededir ve net akım akısı sıfırdır. Yarıiletkene bir V potansiyeli uygulanırsa, bu durumun enerji bant diyagramı Şekil 2. 3c' de görülmektedir.



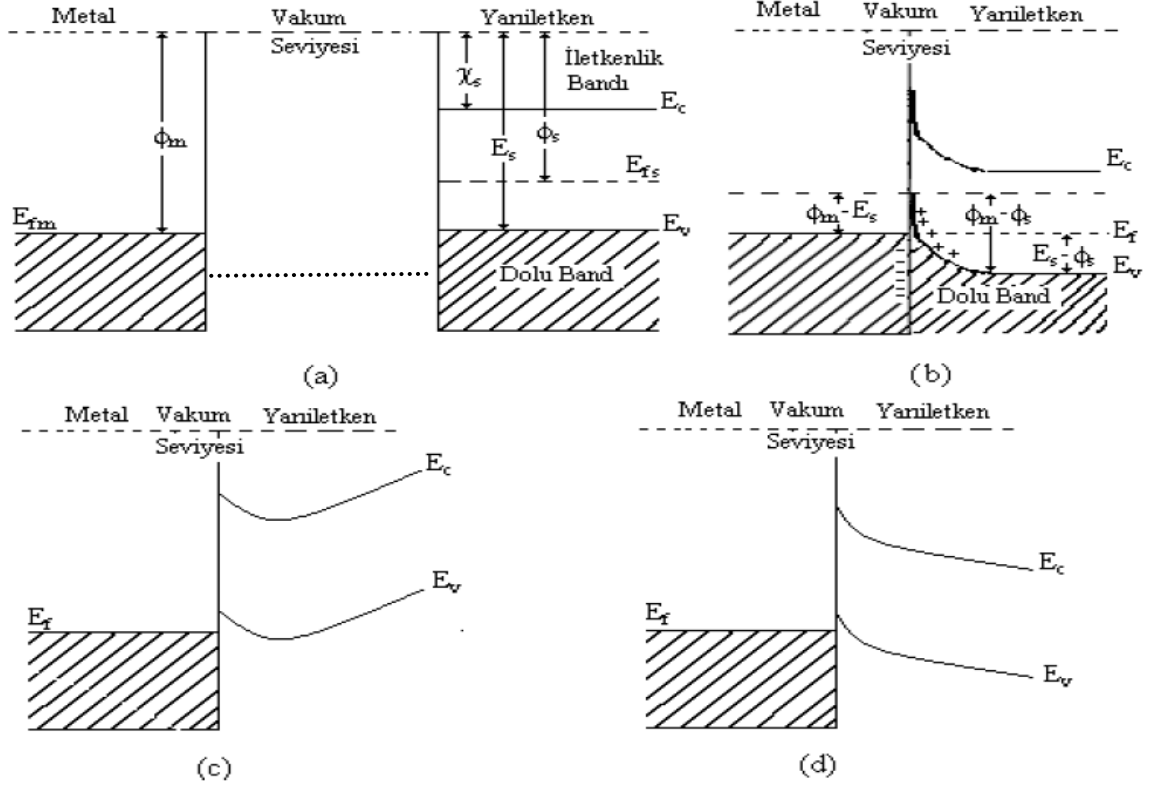
Şekil 2. 3. $\phi_m < \phi_s$ olduğu bir metal p-tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı
a) Kontakdan önce b) Kontakdan sonra c) Yarıiletkene $V > 0$ voltajı uygulanmış[31]

Bu durumda metalden yarıiletkene akandeşik akımında değışiklik olmayacak fakat yarıiletkendен metale akandeşik akımı, yarıiletkendeki enerji seviyeleri eV kadar düştüğü için $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değışir. Bunlar göz önüne alındığında, sağdan sola yön pozitif akım yönü olarak alınırsa karakteristik akım,

$$I = I_0 [\exp(eV/kT) - 1] \quad (2.3)$$

olacaktır. Burada I_0 doyma akımıdır ve bu bir doğrultucu kontakdır. Şimdi ikinci durumu göz önüne alalım. Kontakdan önceki durum Şekil 2.4.a' da görölmektedir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalinkinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakdan

sonra yük alış verişi olur. Bunun sonucunda yarıiletken metale, yarıiletken tarafında deşik bırakarak elektron geçişi olur. Fermi seviyeleri dengeye ulaştığında, yarıiletken tarafında pozitif yüzey yükü ve metal tarafında da negatif yüzey yükü yer alır. Bu geçişten sonra yarıiletkendeki Fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar düşer (Sekil 2. 4b)



Sekil 2. 4. Metal p-tipi omik kontakın enerji bant diyagramı a) Kontakdan önce b)Kontaktan sonra c) Kontakta $V > 0$ gerilimi uygulandığında d) Kontakta $V < 0$ gerilimi uygulandığında [31].

Kontakta ters yönde gerilim uyguladığında, yarıiletken metale deşikler kolayca geçebilir ve çok yüksek elektron yoğunluğundan dolayı anında nötralize olurlar. Uygulanan gerilimin zıt polarizasyonu için metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan deşikler kolayca yarıiletken içine hareket edebilirler. Bu durumda kontak omiktir.

2. 1. 2. Schottky engel alçalması

Bir metal-vakum sisteminde, metalin yüzeyinden x kadar uzakta bulunan bir elektron göz önüne alınırsa metalin yüzeyinden x kadar içeride pozitif değerli bir hayali (görüntü) yük oluşur [1]. Bu durumda Coulomb denkleminde göre elektronu metale doğru çeken kuvvet [32],

$$F = -\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)\left(\frac{q}{2x}\right)^2 \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϵ_0 , boşluğun dielektrik geçirgenliği olup değeri $8,85 \times 10^{-14}$ F/cm'dir. Bu Coulomb kuvveti, $+\infty$ ile x arasında integre edilirse,

$$\int_{\infty}^x F dx = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (2.5)$$

elde edilir. Metal-yarıiletken Schottky diyotları (kontaklar) için bu metalden vakuma doğru olan emisyon, metalden yarıiletkeneye doğru emisyon şeklinde düşünülebilir [7]. O halde, metalden x kadar uzakta yarıiletken içinde bir elektron dikkate alınırsa, metal yüzeyinden x kadar arkada pozitif değerli bir görüntü yük oluşur. Schottky engelinin uygulanan elektrik alanı ve görüntü yük etkisiyle $q\Delta\Phi_B$ kadar azalmasına *Schottky engel alçalması* denir. Bu durum Şekil 2.5' de gösterilmiştir. Yapıya bir dış elektrik alan (ξ) uygulandığında uzaklığın fonksiyonu olarak toplam potansiyel enerji Eş. 2. 6' da ki gibi olur.

$$U(x) = -q^2/(16\pi\epsilon_0 x) - q\xi x \quad (2.6)$$

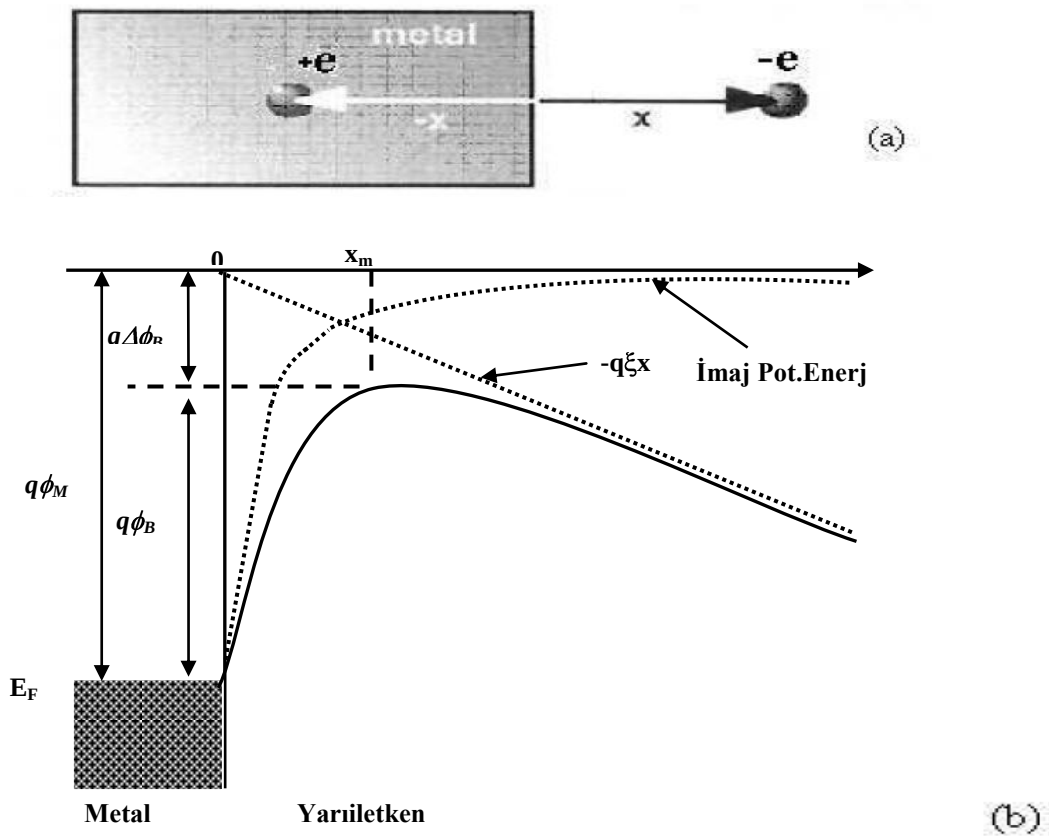
Schottky engel alçalması metal yüzeyinden x_m kadar uzakta potansiyel enerji değişiminin $dU(x)/dx=0$ olduğu noktada meydana gelir. Eş. (2.6)' ın x' e göre türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde,

$$\xi_\mu = (q/(16\pi\epsilon_0\xi))^{1/2} \quad (2.7)$$

elde edilir ve bu değer Eş. (2. 6) de yerine yazılırsa $\Delta\Phi_B$ için,

$$\Delta\phi_B = (q\xi/4\pi\epsilon_\sigma)^{1/2} \quad (2.8)$$

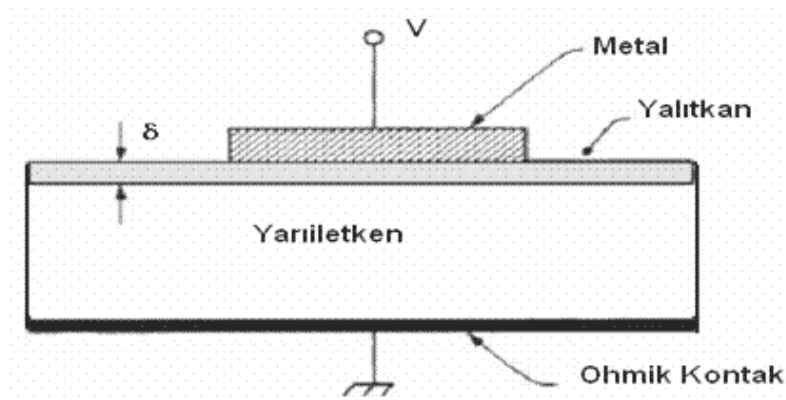
ifadesi elde edilir ve engel alçalması uygulanan gerilimin bir fonksiyonudur.



Şekil 2. 5. (a) Görüntüyükü (b) Schottky engelinin görüntü yükü alçalması (Rhoderick, 1988)

2. 2. İdeal MIS Yapılar

MIS kontaklarda Şekil 2.6' de görüldüğü gibi metal-yarıiletken arasında δ kalınlıklı bir yalıtkan tabaka vardır. Bu yalıtkan tabaka kendiliğinden oluşabildiği gibi çeşitli yöntemlerle de oluşturulabilir. İdeal bir MIS kontakın voltaj uygulanmadan önceki enerji bant diyagramı n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için Şekil 2.7' de verilmektedir.



Şekil 2. 6. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken (MIS) Yapısı

Metal-yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakanın genişliği büyük olduğu için ideal bir dielektrik gibi davranır. İdeal bir MIS kapasitör aşağıdaki gibi tanımlanır [8]:

- Metal-yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka içerisinde ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli yükler bulunmaz. Yine yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve arayüzey yükleri bulunmaz.
- Yalnızca bir voltaj uygulandığında MIS kontakta yükler mevcuttur. Bu yükler yalıtkan ile bitişik metal yüzeyinde ve yarıiletken içerisindeki bulunurlar. Metal yüzeyindeki ve yarıiletkendeki yükler eşit miktarda ama zıt işaretlidirler.

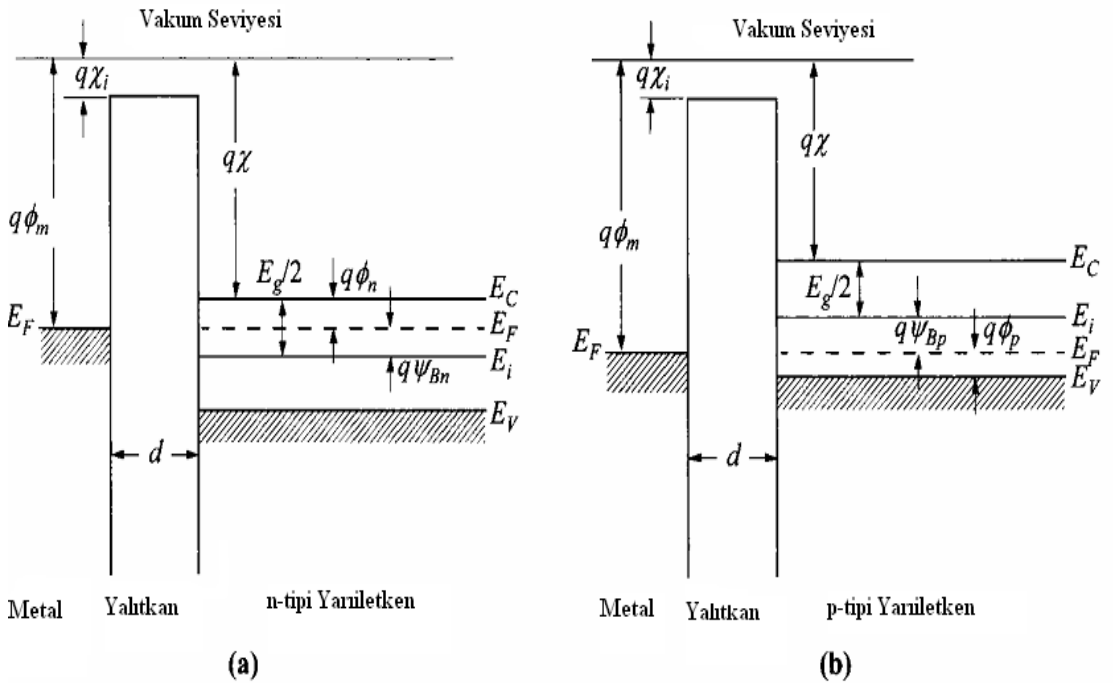
- Herhangi bir dc gerilim altında yalıtkan içerisinde yük iletimi olmaz ve yalıtkanın öz direnci sonsuzdur.

Böylece denge durumunda metalin iş fonksiyonu Φ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s arasındaki farkın sıfır ($\Phi_{ms}=0$) olduğu kabul edilir [8] ve

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \Psi_{Bn} \right) = 0 \quad (\text{n-tipi yarıiletken}) \quad (2.9)$$

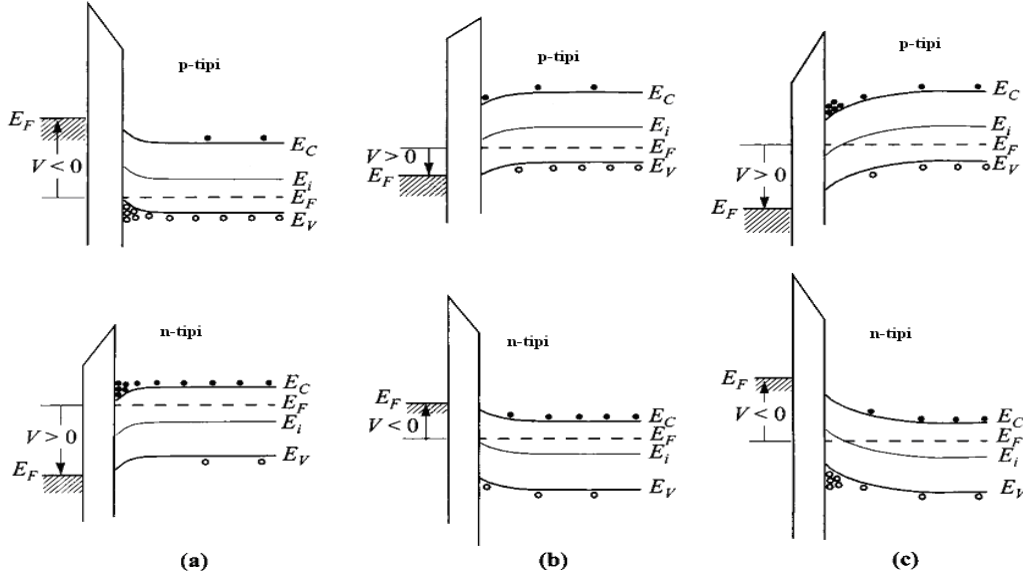
$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \Psi_{Bp} \right) = 0 \quad (\text{p-tipi yarıiletken}) \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada Ψ_{Bn}, Ψ_{Bp} fermi potansiyelleridir. Yani burada sıfır beslem ve düz bant durumu mevcuttur.



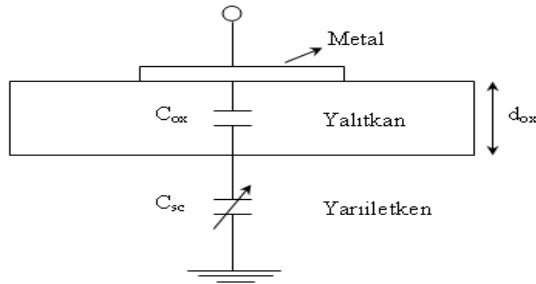
Şekil 2. 7. Denge durumunda ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramı a) n-tipi yarıiletken b) p-tipi yarıiletken.

İdeal bir MIS kapasitör negatif veya pozitif voltajlarla beslendiğinde yarıiletken yüzeyinde temelde üç durum oluşabilir. Bu durumlar Şekil 2.8’ de üst tarafta p-tipi yarıiletken için, alt kısımda n-tipi yarıiletken için verilmiştir. Metal kısma negatif bir voltaj ($V < 0$) uygulandığında valans bant kenarı E_V yüzey yakınlarında yukarı doğru bükülür ve fermi seviyesine daha yakın olur. İdeal bir MIS kapasitörde yapı içinde akım akışı olmaz böylece yarıiletkende fermi seviyesi sabit olur. Çünkü taşıyıcı yoğunluğu $E_F - E_V$ enerji farkına exponansiyel olarak bağlıdır. Bu bant bükülmesi çoğunluk taşıyıcıların (deşiklerin) yarıiletken yüzeyinde birikmesine sebep olur. Bu yığılma (accumulation) durumudur. Küçük bir pozitif voltaj ($V > 0$) uygulandığında bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcılar tükenir. Bu tüketim (depletion) durumudur. Daha büyük bir pozitif voltaj ($V \gg 0$) uygulandığında band bükülmesi daha da aşağıda olur böylece yüzeyde saf durumdaki enerji seviyesi E_i fermi enerji seviyesinin aşağısında olur. Bu durumda yüzeydeki elektron sayısı (azınlık taşıyıcılar)deşiklerden daha fazladır. Böylece yüzeyde durum tersine dönmüş olur ve bu terslenim (inversion) durumudur. Benzer durumlar n-tipi yarıiletken içinde açıklanabilir. n-tipi yarıiletken için voltajın polaritesi değiştirilmelidir.



Şekil 2. 8. Farklı voltajlar altında ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramı a) yığılma b) tüketim c) terslenim

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur [9]. Bu kapasitans MIS kapasitansı olarak adlandırılır. Kondansatörlerin özelliklerini metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasitans arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.9’ de gösterilmiştir. Burada 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. 9. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.

Uygulanan gerilimde çok küçük diferansiyel değişimlerin olduğunu varsayarak sırasıyla yalıtkan, uzay yükü bölgesi ve MIS kapasitanslarını aşağıdaki gibi tanımlayalım:

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \quad (2.11)$$

$$C_{sc} = -\frac{dQ_{sc}}{d\Psi_{sc}} A_{ox} \quad (2.12)$$

$$C = \frac{dQ_m}{dV} A_{ox} \quad (2.13)$$

Burada A_{ox} metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı yani MIS doğrultucu kontağın alanıdır. Şekil 2. 9’da verilen eşdeğer devrede görüldüğü gibi MIS yapının eşdeğer kapasitansı, yüzey yük kapasitansı C_{sc} ile yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} in seri bağlanmasına eşdeğerdir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.14)$$

Yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} ,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.15)$$

ile verilir. Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} ise yalıtkan tabakanın kalınlığıdır. Bunlar uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox} de uygulanan gerilimle değişmez. Buna göre MIS kapasitansındaki değişimi sadece uzay yükü kapasitansının belirlediğini söyleyebiliriz. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen durumları Şekil 2. 8’de gösterilen durumları bir p tipi yarıiletken için tanımlayalım [1, 11, 14].

Yığılım: P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale negatif gerilim ($V < 0$) uygulandığında bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olandeşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru çeker, yarıiletkendeki değerlik (valans) elektronları bandının tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine yükselir (Şekil 2. 8a). 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 olandeşiklerin yığılmasına neden olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak yukarı

büküldüğü bu duruma *yığılma (accumulation)* durumu denir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

Tükenim: P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale küçük bir pozitif gerilim ($V > 0$) uygulandığında yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindekideşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındakideşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. (Şekil 2. 8b) 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:

$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.16)$$

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

$$Q_{sc} = q N_a^- W = Q_a \quad (2.17)$$

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

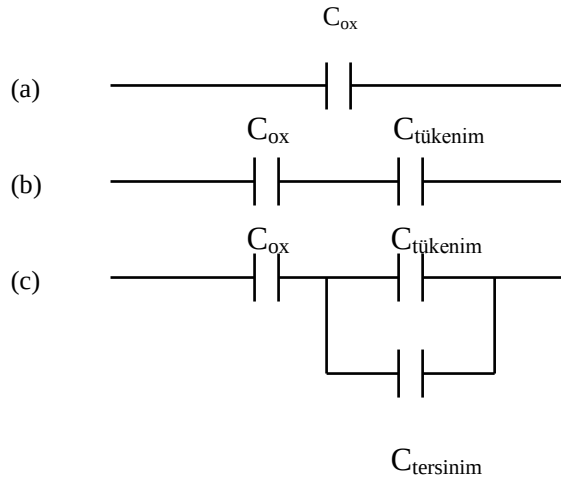
Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir bu da C-V eğrisinin C_{min} ' un altına düşmesine sebep olur. Bu dengesiz bir durumdur ve *derin tükenim* olarak tanımlanır.

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 2.8c). 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,

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \quad (2.18)$$

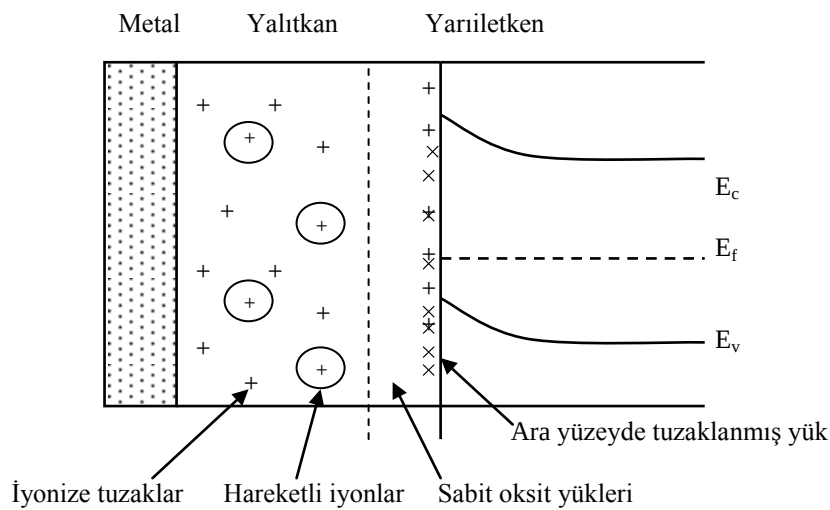
eşitliği ile verilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_a birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Bu bölgede MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun, uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu a.c. sinyalini küçük frekanslarda 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 2.10'daki gibidir [1].



Şekil 2. 10. İdeal bir MIS yapının devre şeması a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2. 3. 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 [15]. Bu durumların sınıflandırılması Şekil 2.11. de gösterilmiştir [1].



Şekil.2. 11. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.

Bunları sırayla yazalım:

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

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:

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (2.19)$$

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

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.

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 [3]. 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) [13].

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

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (2.20)$$

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} ;

$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.21)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.22)$$

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.23)$$

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 [9].

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 dolum boşalım zamanıdır ve $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve R_{ss} arayüzey direncidir [13].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.24)$$

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;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.25)$$

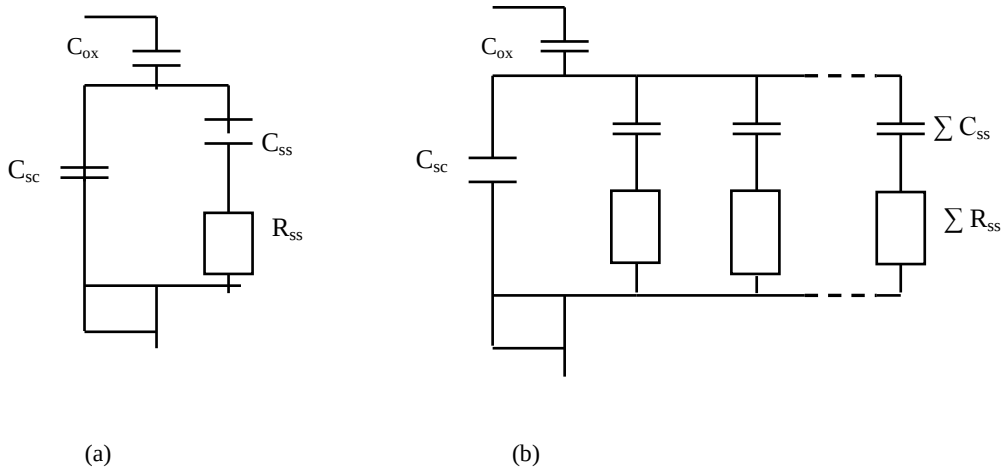
ile verilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır. Burada E enerji olup $E = q\psi_s$ ile verilir. E' nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Bunu (2.31) eşitliğinde yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (2.26)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez [17].

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 2.12’de verildiği gibidir.



Şekil 2. 12. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

Hareketli iyonlar:

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [16]. 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.

3. DENEYSEL YÖNTEM

Çalışmamızda (MIS) Schottky diyotların oluşturulması için $\langle 100 \rangle$ yönelimine sahip, $1 \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli ve $280 \mu\text{m}$ kalınlıklı, fabrikasyon olarak parlatılmış p-tipi (boron katkılı) tek kristal Si yapraklar kullanıldı.

3. 1. MIS Yapının Hazırlanması

$\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ (MIS) Schottky diyotların oluşturulması için $\langle 100 \rangle$ yönelimine sahip, $1 \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli ve $280 \mu\text{m}$ kalınlıklı, fabrikasyon olarak parlatılmış p-tipi (bor katkılı) tek kristal Si yapraklar kullanıldı. Yaklaşık 2" çaplı p-tipi Si yapraklar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya (çeyrek yaprak) bölündü ve bir çeyrek yaprak içerisindeki 33 adet diyot incelendi. Doğrultucu ve omik kontaklardan iyi sonuç alabilmek için mekanik ve kimyasal temizlemenin çok iyi yapılması gerekir. Bu çalışmada kullanılan kristaller fabrikasyon olarak parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı sadece kimyasal temizleme yapıldı. Kimyasal temizleme aşamaları aşağıda sırasıyla verildi.

1. Temizleme sırasında öz direnci yaklaşık $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ olan deiyonize su kullanıldı. Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız v.b araç ve kaplar fırında yaklaşık 100°C ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra hidrojen peroksit (H_2O_2) ve aseton ile yaklaşık 5 dakika yıkanarak ardından da deiyonize su ile (5 dakika) iyice durulandı.
2. Si yapraklar Trichloroethylene, acetone ve metanol içinde 3 dakika ultrosonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
3. Eşit miktarda sülfirik asit (H_2SO_4), hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltilerinden oluşturulan karışımda ultrosonik olarak 3 dakika temizlendi. Deiyonize su içerisinde ultrosonik olarak 10 dakika yıkandı.

4. Hacim oranları sırasıyla verilen 6:1:35 $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ ve % 20 HF karışımında

3 dakika ultrasonik olarak temizlendi sonra deiyonize suda yıkandı.

5. Ardından Si yapraklar yeteri kadar uzun bir süre deiyonize suda durulandı.

Kimyasal olarak temizlenmiş p-tipi silisyum kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kuru azot (N_2) ile kurutulduktan sonra hemen vakum ortamına alındı.

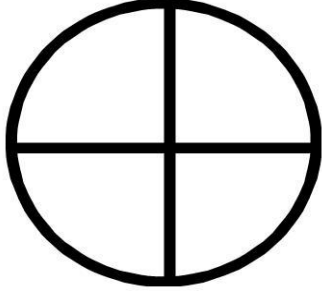
$\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ (MIS) diyotların yapımında alt ve üst kontakları almak için gerekli kalınlıktaki Aleminyum tabaka, yağ-vakum pompa sisteminde buharlaştırma yöntemiyle aşağıdaki adımlarda oluşturuldu:

1. Öncelikle Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Omik kontaklar için Şekil 3.1’de gösterilen maskeye benzer bir maske kullanıldı. Vakum sisteminde elde edilen 2×10^{-6} Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile oldukça saf aleminyum ($\sim 99.99\%$) buharlaştırılarak Si yaprağın arka yüzeyine $\sim 2500 \text{ \AA}$ Al tabaka oluşturuldu.

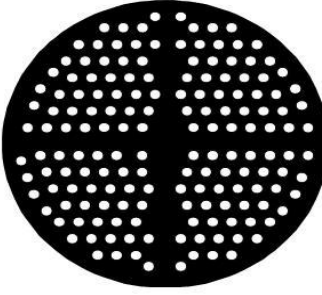
2. Buharlaştırma ile elde edilen bu arka kontağın, Si yaprağın üzerine çöktürülmesi ile omik kontak elde edildi. Bu işlem 550°C sıcaklık içerisinde 60 dakika süreyle ortamdan ~ 2 litre/dakika hızında kuru azot gazı (N_2) geçirilerek yapıldı.

3. Omik kontakten sonra Si yaprağın ön yüzeyi steril cam bir kutu içinde oda sıcaklığında iki yıl havaya maruz bırakıldı ve doğal oksit tabaka (SiO_2) oluştu.

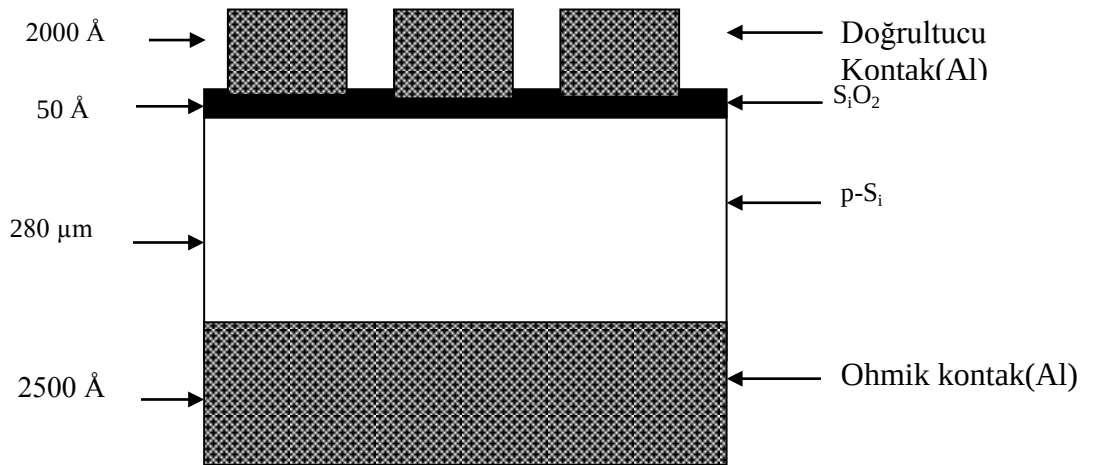
4. Gerekli elektriksel ölçümleri alabilmek için $\sim 2000 \text{ \AA}$ kalınlığında, 1mm çapında Al kontaklar Şekil 3.2’de görülen maske yardımıyla doğal oksit tabaka üzerine buharlaştırıldı. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}/\text{Al}$ şeklinde MIS diyotlar elde edildi. Soğuması için bir süre bekletilen kristal vakum ortamından çıkartıldı.



Şekil 3. 1. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske



Şekil 3. 2. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske



Şekil 3. 3. Al/SiO₂/p-Si (MIS) diyotun şematik gösterimi

3. 2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Elektriksel karakteristikler için gerekli ölçümlerin tamamı Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yarıiletken Laboratuvarında gerçekleştirildi. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerinde Hawlett Packard 4192 LF Empedaes Analiz metre kullanıldı (Resim 3. 1).



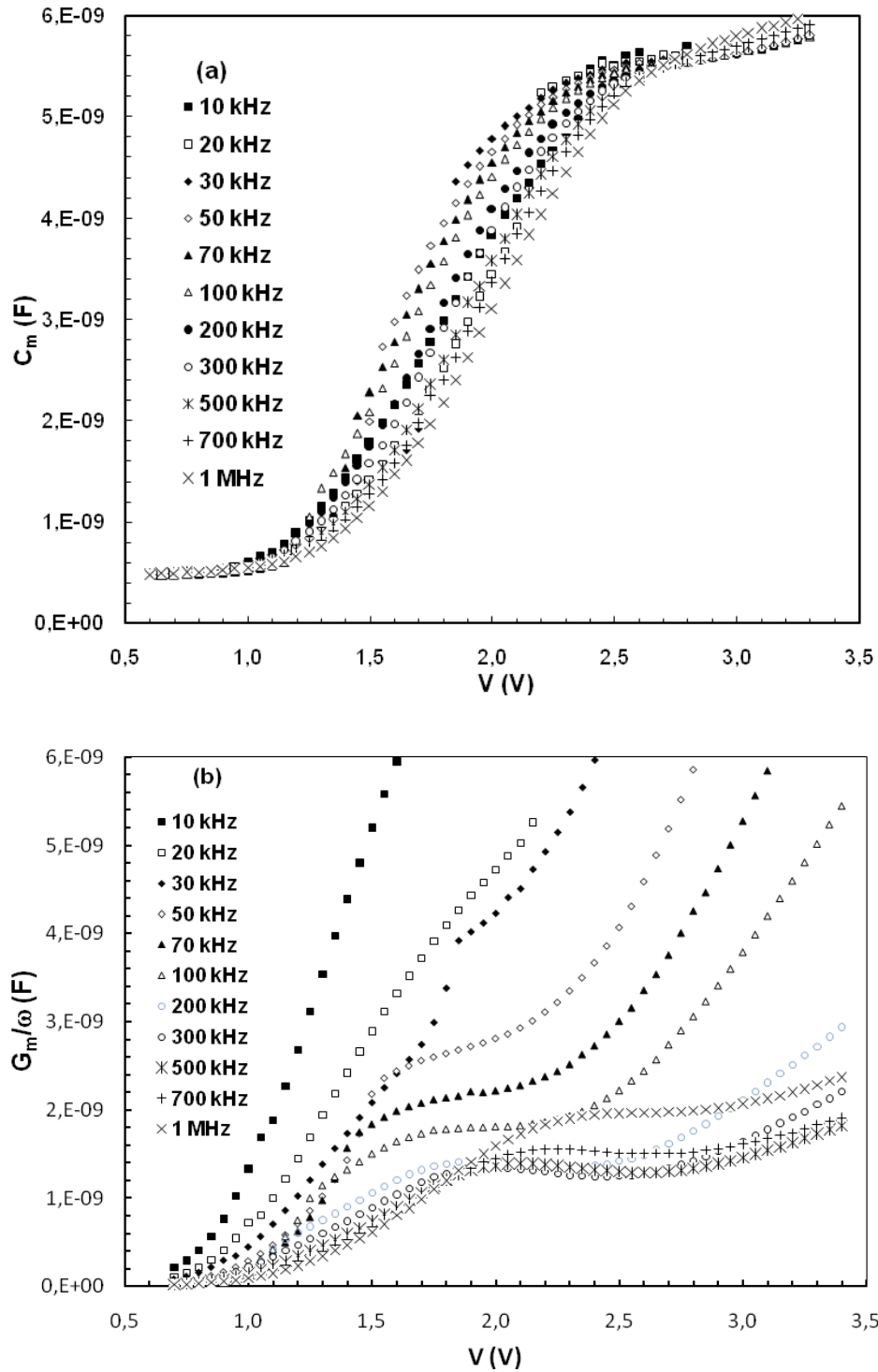
Resim 3. 1. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek
Hawlett Packard 4192 LF Empedaes Analiz metre

4. DENEYSEL SONUÇLAR

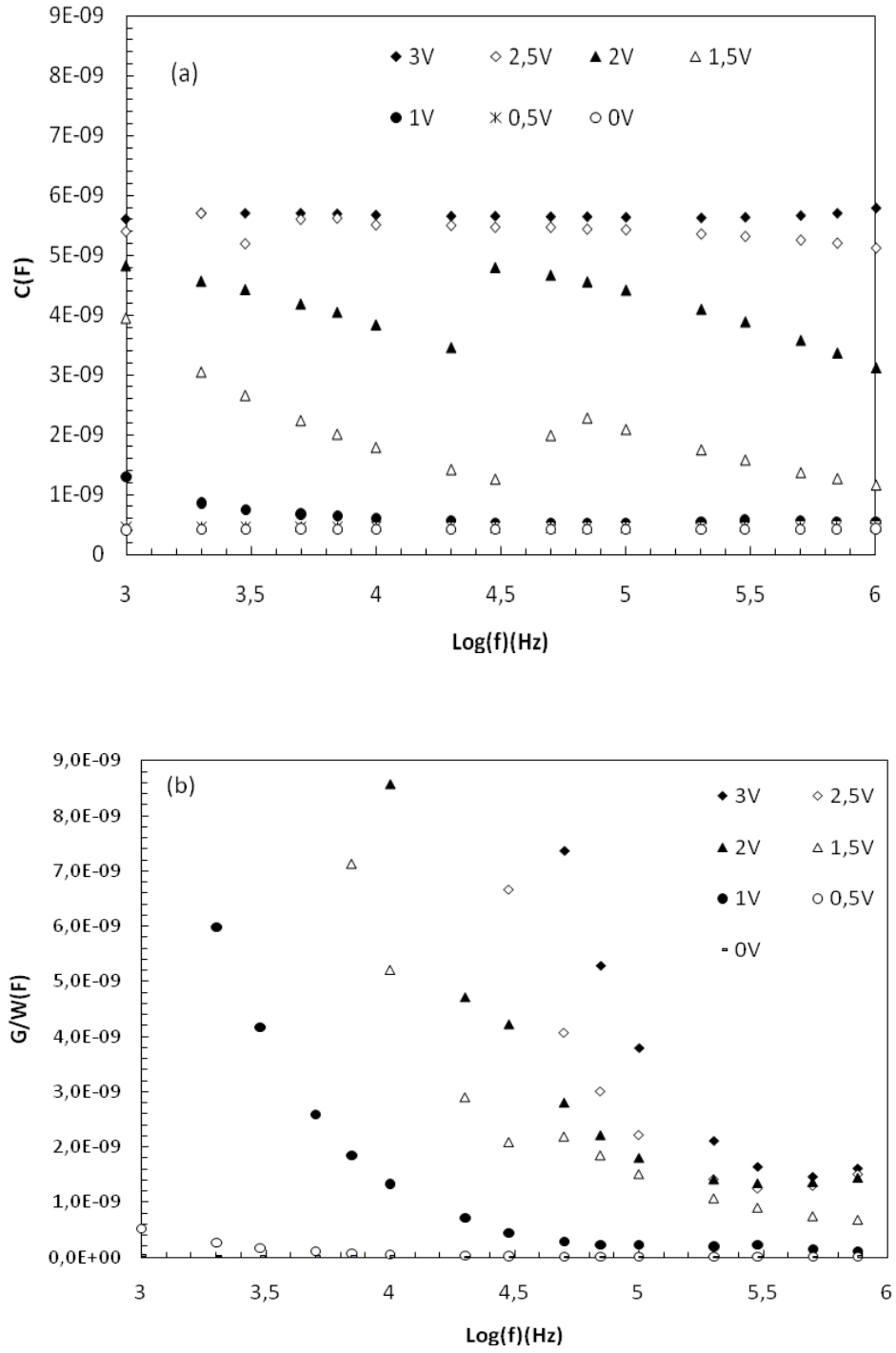
4.1 . Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik- Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapısının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri oda sıcaklığında geniş frekans (1kHz-1MHz) ve voltaj aralığında (-3V ile 7V) alındı. Al/SiO₂/p-Si yapısının C-V ve G/ω-V grafikleri Şekil 4.1’de verildi. Geniş bir frekans aralığında C-V ve G/ω-V ölçümleri bize hazırlanan aygıtın temel elektriksel özellikleri hakkında daha geniş ve önemli bilgiler verir. Son zamanlarda, MIS yapılarla ilgili literatürde bir çok deneysel çalışma bulunmaktadır [19,20,21,22]. Ancak bu yapılarda yalıtkan arayüzey tabakası, arayüzey durumları, seri direnç ve radyasyon etkisinin temel elektriksel parametreler üzerindeki etkileri henüz tam aydınlığa kavuşturulmamıştır.

Şekil 4.1 de görüldüğü gibi tükenim ve yığılma bölgesinde kapasitans ve iletkenlik değerleri frekansa bağlı farklılık göstermektedir. Bu bölgelerde kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekansla azalmaktadır. Yüksek frekanslardaki daha düşük C ve G/w değerlerinin gözlenmesi, S_i ile dengede olan arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilebilir[3,16,23-24].Çünkü yüksek frekans C-V ve G/ω-V eğrisi $T=1/\omega=1/2\pi f$ periyoduna sahip olacak ve bu süre oldukça küçük olduğu için arayüzey durumlarındaki taşıyıcılar a.c sinyalinin takip edemeyeceklerdir. Bu nedenle yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) C-V ve G/ω-V eğrilerinde arayüzey durumlarının katkısı yoktur ya da ihmal edilebilecek kadar küçüktür .Böylece kapasitansa ve iletkenliğe, yüksek frekanslarda arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşırlar. Literatürde arayüzey durumlarından hiçbir katkının gelmemesi için C-V ve G/ω-V ölçümleri en az 500 kHz’ de ve tüm arayüzey durumlarını görebilmek için ise en fazla 50 Hz’de yapılmalıdır.



Şekil 4. 1. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının yüksek frekanslardaki a) C-V eğrileri b) G_m/ω -V eğrileri.



Şekil 4. 2. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının voltaja bağlı a) C-log(f) eğrileri
b) G/w- log(f) eğrileri.

C-V ve G/w-V ölçümlerinde; arayüzey durumları tersinim ve tükenim bölgesinde etken olurken seri direnç ise yığılma bölgesinde etkilidir[23-24]. Yani kuvvetli yığılma bölgesinde C-V ve G/w-V ölçümlerinde R_s ' den dolayı bir pik vermektedir [3]. Gerilimin kapasitans ve iletkenlik değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı voltajlarda frekansa bağlı C ve G/w eğrileri Şekil 4.2' de verildi. Şekillerden görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri voltaj arttıkça artmakta yeterince ileri voltajlarda ise hemen hemen değişmemektedir.

4. 2. Kapasite - Gerilim Ölçümlerinden Schottky Diyot Parametrelerinin Bulunması

Şekil 4.3' de görüldüğü gibi, oda sıcaklığında değişik frekanslarda çizilen C^{-2} -V eğrilerinin hemen hemen birbirlerine paralel doğrular olduğu görülmektedir. C^{-2} -V eğrilerinin doğrusal eğim çizgileri çizilince, yatay eksenini kestiği nokta(V_o) , difizyon potansiyeli ($q.V_D$) ve farklı frekanslardaki eğimlerine bakılarak alıcı yoğunluğu hesaplandı (N_A). C^{-2} -V eğrisinin voltaj eksenini kestiği noktaya kesişim voltajı denir(V_o). Bu voltaj yardımıyla difizyon potansiyeli

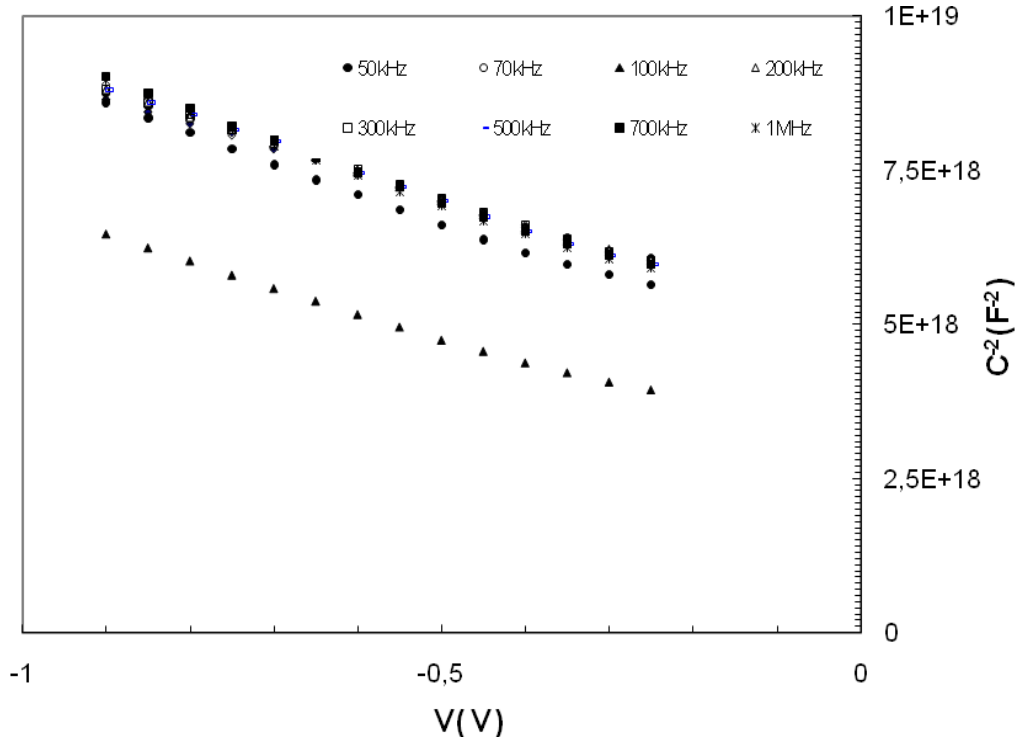
$$V_D = V_o + kT/q \quad (4.1)$$

Alıcı yoğunluğu N_A

$$dC^{-2}/dV = 2/(q \cdot \epsilon_i \cdot N_A \cdot A^2) \quad (4.2)$$

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapısı Eş (4.2) kullanılarak yoğunluğu bulunmuştur.

Burada $\epsilon_i = 3,8\epsilon_o$ [27] ve ($\epsilon_o = 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm) sırasıyla yalıtkan arayüzey tabaka ve boşluğun elektriksel geçirgenlik sabitleridir.



Şekil 4. 3. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen C²-V eğrileri.

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında fermi enerjisi E_F;

$$E_F = kT/q \ln(N_V/N_A) \quad (4.3)$$

bağıntısından hesaplandı burada N_V, valans bandındaki durumların yoğunluğu olup

$$N_V = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_h^*/m_0)^{3/2} \quad (4.4)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada m_h^{*} deşiklerin etkin kütlesi olup değeri m_h^{*}/m₀=0,55 tir [10]. Eş 4.4 ten hesaplanan N_V= 1,02158.10¹⁹ cm⁻³ değeri Eş 4. 3' te yazılırsa oda sıcaklığında değişik frekanslara karşılık gelen Fermi enerjisi bulunur.

Tüketim tabakasının genişliği W_D;

$$W_D = (2\epsilon_s\epsilon_0 V_D / qN_A)^{1/2} \quad (4.5)$$

bağıntısından hesaplanabilir[3].

Maksimum elektrik alanı E_m ve schottky engel alçalması $\Delta\Phi_B$ ise sırasıyla

$$E_m = (2qN_A V_D / \epsilon_s\epsilon_0)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$\Delta\Phi_B = (qE_m / 4\pi\epsilon_s\epsilon_0)^{1/2} \quad (4.7)$$

bağıntılarından hesaplanabilir.

C-V karakteristiklerinden engel yüksekliği $\Phi_B(c-v)$ nin değeri difzyon ifadesi V_D , fermi enerjisi E_F ve schottky engel alçalmasına $\Delta\Phi_B'$ ye bağlılığı şöyle verilir

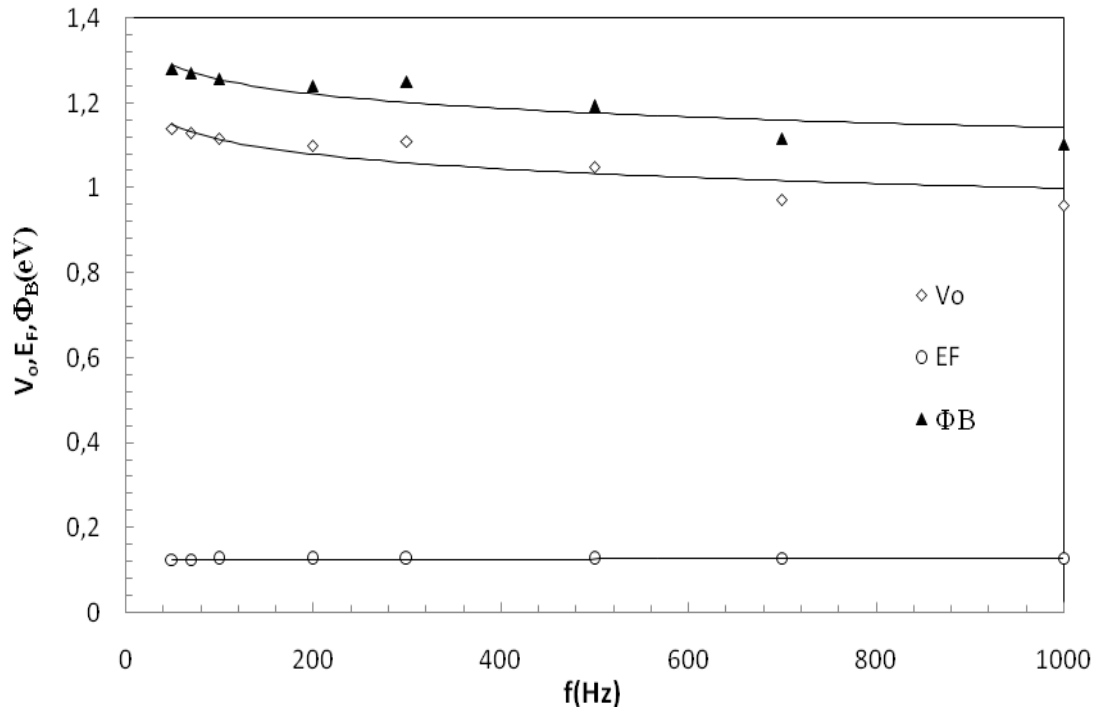
$$\Phi_B(c-v) = V_D + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.8)$$

C^{-2} -V grafiğinin lineer kısmının $C^{-2}=0$ için V eksenini kestiği noktadan, V_o farklı frekanslar için bulunmuştur.

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının C^{-2} -V grafiğinden ve teorik hesaplamalardan elde edilen bazı temel parametreler Çizelge 4. 1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının C⁻²-V grafiğinden ve teorik hesaplamalardan elde edilen bazı temel parametreler.

F (kHz)	eV _o (eV)	N _A (x10 ¹⁶) (cm ⁻³)	E _F (eV)	eV _D (eV)	E _m (x10 ⁵) (Vcm ⁻¹)	ΔΦ _B (x10 ⁻²) (eV)	Φ _B (c-v) (eV)	W _D (x10 ⁻⁶) (cm)
50	1,14	6,80	0,125	1,165	2,74	1,04	1,28	8,48
70	1,13	6,74	0,125	1,156	2,72	1,03	1,27	8,49
100	1,11	6,66	0,125	1,141	2,68	1,02	1,25	8,48
200	1,10	6,62	0,126	1,125	2,66	1,01	1,24	8,45
300	1,11	6,65	0,125	1,135	2,67	1,01	1,25	8,47
500	1,05	6,44	0,126	1,075	2,56	0,97	1,19	8,37
700	0,97	6,09	0,128	0,997	2,40	0,91	1,11	8,29
1000	0,96	6,09	0,128	0,985	2,38	0,90	1,10	8,24



Şekil 4.4. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında frekans fonksiyonu olarak değişen V_o , E_F , $\Phi_B(c-v)$ eğrileri.

Seri direnç değerini belirlemek için, dc gerilim -3V değerinden +7V değerine kadar 0,05V adımlarla değiştirilerek tersinim bölgesinden yığılma bölgesine kadar C-V ve G/ω -V eğrileri değişik frekanslar için elde edildi (Şekil 4. 1). Yüksek frekanslarda, paralel RC devresini [3, 25] kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli yığılma altındaki eşdeğer devrenin toplam admittansı ve empedansı ($Y_{ma}=1/Z_{ma}$),

$$Y_{ma} = 1/Z_{ma} = G_{ma} + j\omega C_{ma} \quad (4.9)$$

eşitliğiyle verilir. Gerçek seri direnç (R_s) değerleri, Al/SiO₂/p-Si (MIS) için elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinin kuvvetli yığılma bölgesindeki değerlerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir [3, 26]:

$$R_s = \frac{G_{ma}}{(G_{ma}^2 + C_{ma}^2 \omega^2)} \quad (4.10)$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Kuvvetli yığılma bölgesindeki kapasitans (C_{ma}) ile R_s ve yalıtkan tabakanın kapasitans (C_{ox}) arasındaki ilişki,

$$C_{ma} = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{ox}^2)} \quad (4.11)$$

eşitliği ile verilir. Eş 4. 12 ve Eş 4. 13 kullanılarak C_{ox} değeri,

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (4.12)$$

Şekline dönüştürülebilir. Son olarak, düzeltilmiş admittansın sanal ve gerçel kısmını ($Y_c = G_c + j\omega C_c$) karşılaştırarak düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c) değerleri ise,

$$C_c = \frac{R_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2 \bar{C}_{ma}}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.13)$$

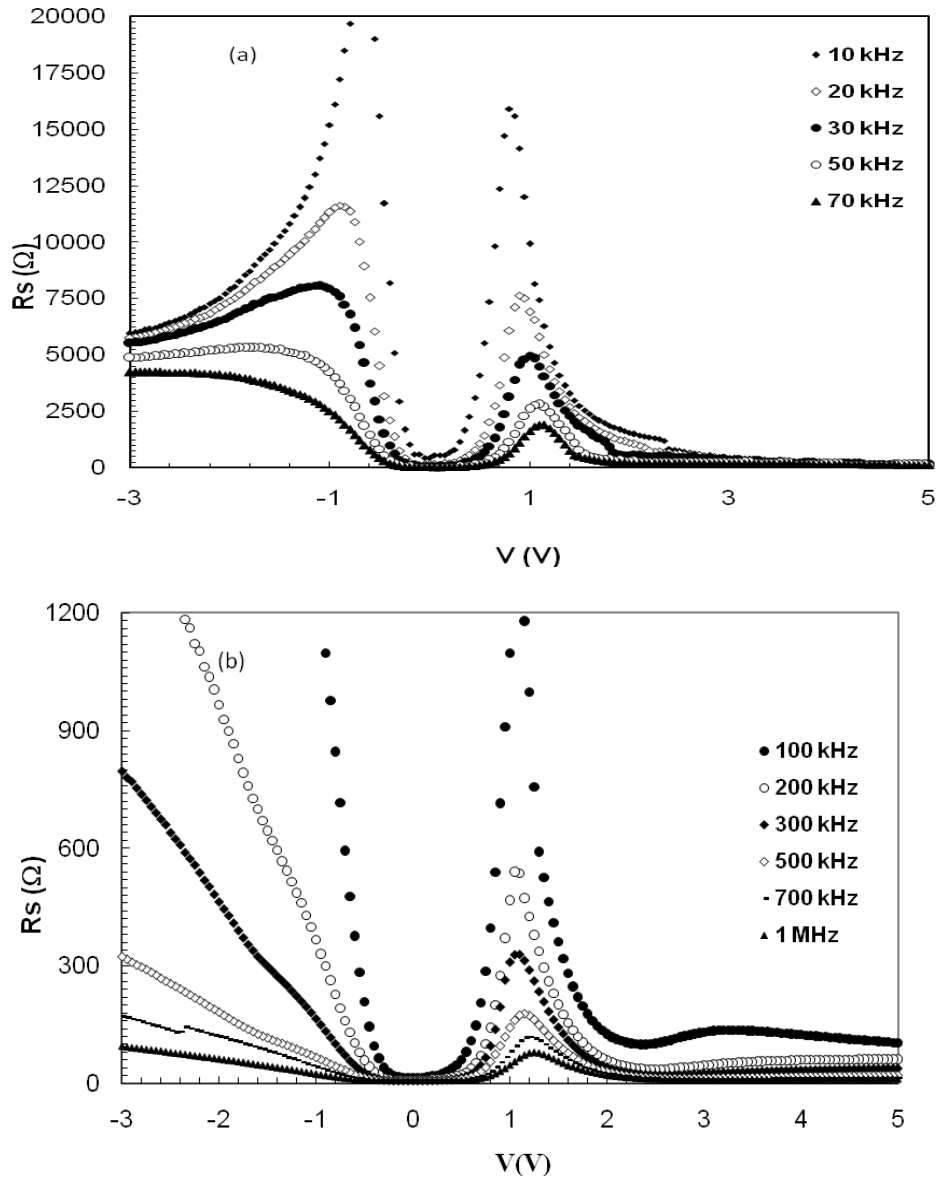
$$G_c = \frac{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2 a}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.14)$$

eşitliklerinden elde edilebilir. Burada α parametresi aşağıdaki şekilde verilir:

$$a = G_{ma} - \frac{R_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2 \bar{R}_s}{\omega C_{ma}} \quad (4.15)$$

Bir yarıiletken aygıtın (diyot v.b.) gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve ters gerilimlerde ise sonsuza doğru gider. MIS yapı için bulunan seri direncin (R_s) farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi Şekil 4. 5 'de verildi.

Şekil 4. 5'den de görüldüğü gibi R_s , frekans arttıkça azalmakta, Şekil 4. 5a' da özellikle düşük frekanslarda iki pik vermektedir. Şekil 4. 5b' de yeterince yüksek frekanslarda ise ($f \geq 1\text{MHz}$) pikler kaybolmaktadır. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının daha yüksek yoğunlukta olduğuna atfedilebilir [3, 16]. Çünkü düşük frekanslarda elde edilen gerek kapasitans-voltaj (C-V) gerekse iletkenlik-voltaj (G/ω -V) değerleri için arayüzey durumları ac sinyali takip edebilir. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumları ac sinyali takip edemez. Bu nedenle R_s değerinin yeterince yüksek frekanslarda elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinden hesaplanması, değer güvenilirliği ve doğruluğu açısından gereklidir.

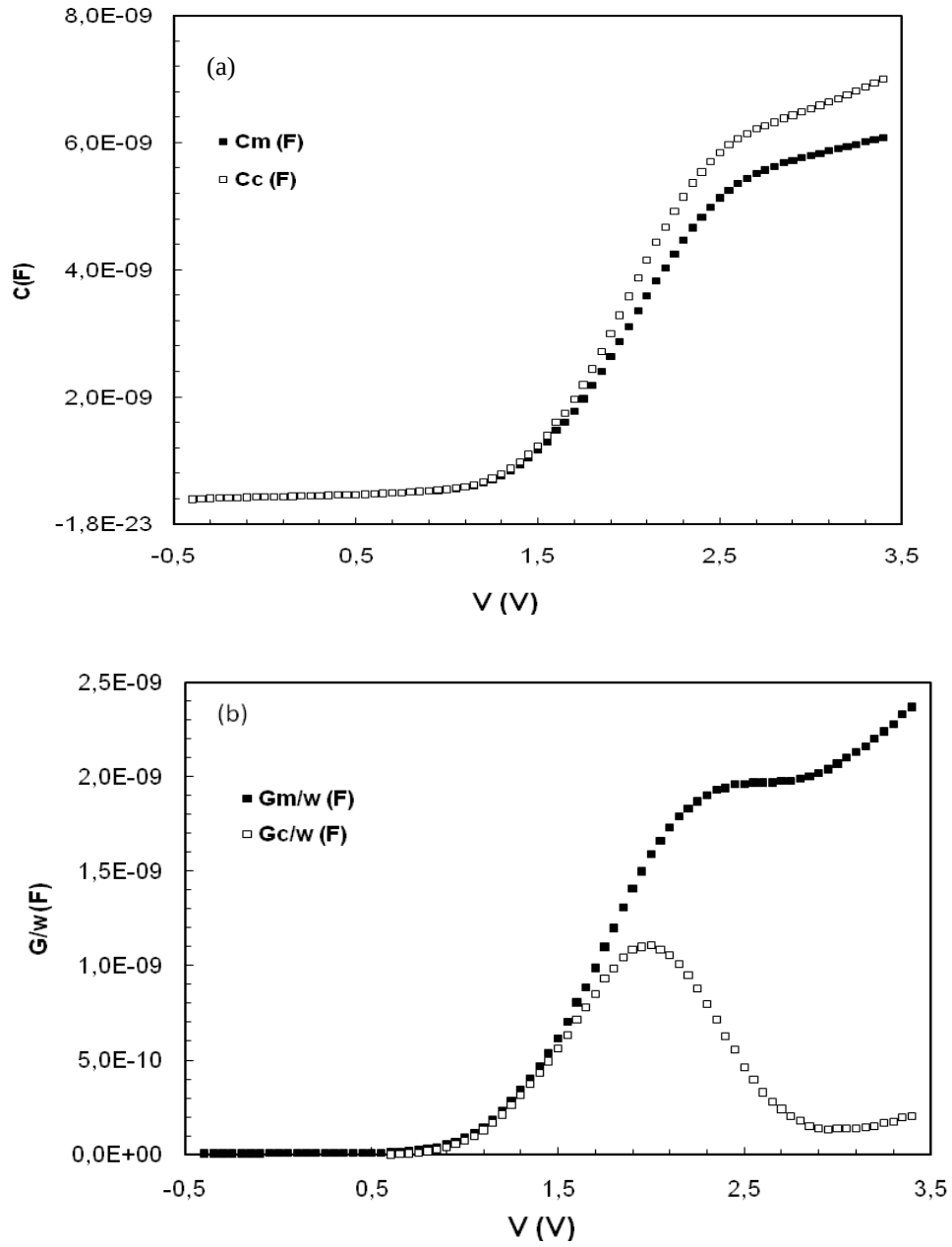


Şekil 4.

5. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında a) düşük frekanslarda elde edilen seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri b) yüksek frekanslarda elde edilen seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri.

Gerçek MIS kapasitans ve iletkenlik veya düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/ω)'i elde etmek için, iki farklı yüksek frekansta (1 MHz için), doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C_c -V ve hem de G_c/ω -V eğrileri Eş 4.13 ve Eş 4.14 kullanılarak seri direnç için düzeltildi ve 4.6'de verildi. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitans (C_c) değerleri Şekil 4.6a'da görüldüğü gibi özellikle doğru

beslem altında artan voltajla artarken, düzeltilmiş iletkenlik (G_c/ω) değerleri ise azalmaktadır (Şekil 4.6b).



Şekil 4. 6. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında 1MHz için ölçülen ve düzeltilmiş a) C_c -V eğrileri b) G_c/ω -V eğrileri

C ve G/ω nın güçlü akümülayon bölgesinde C_{ma} ve G_{ma} ölçüldü. $\omega=2\pi f$ açısal frekanstır, τ zaman sabiti olup

$$\tau = \frac{1}{\sigma v_{th} N_A} \exp(qV_d / kT) \quad (4.16)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada V_{th} deşiklerin termal hızı, σ ise yine deşiklerin tesir kesitidir. N_A ise katkılanan alıcı atomların (akseptör) yoğunluğudur. Arayüzey durumlarının enerjisi p-tipi yarıiletkenler için E_{ss} ve yarıiletken yüzeyinin valans band kenarı tepesi ile

$$E_{ss} - E_v = q(\phi_s - E_F) \quad (4.17)$$

şeklinde verilir. Burada ϕ_s integral sabitini ihtiva eden yüzey potansiyeli ve E_F Fermi enerjisinin seviyesidir.

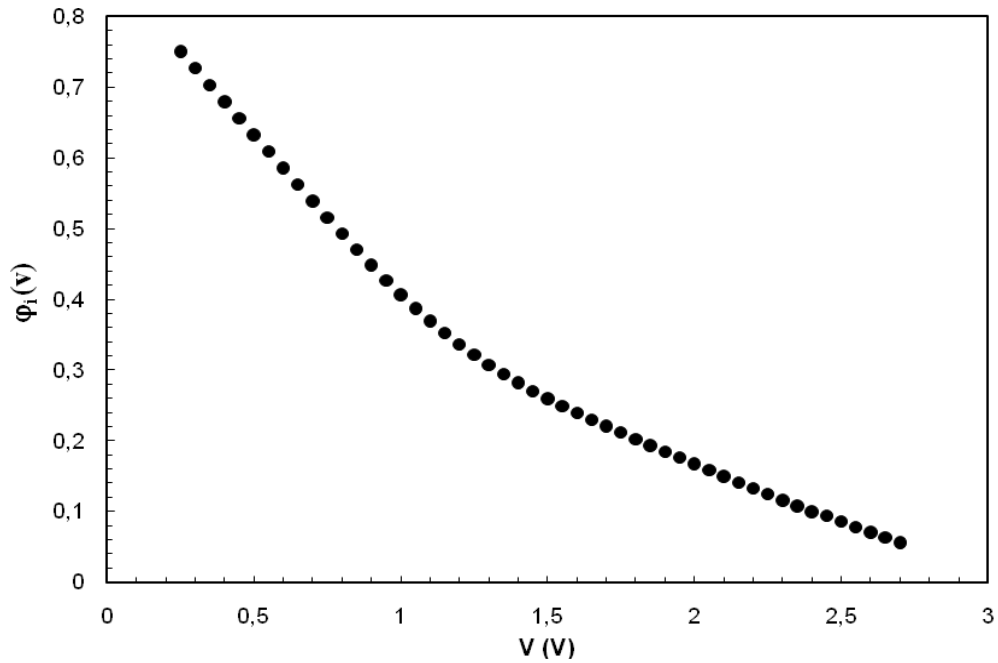
$$E_F = kT/q \ln(N_V/N_A) \quad (4.19)$$

Eşitliği ile verilir.

Yüzey potansiyeli ile voltaj ilişkisi

$$\phi_s = \int_{V_a}^{V_G} \left(1 - \frac{C_{LF}}{C_{ox}} \right) dV_G + \phi^* \quad (4.20)$$

ile verilir ve burada ϕ^* bir integrasyon sabitidir.



Şekil 4. 7. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının yüzey potansiyeline karşı voltaj eğrisi.

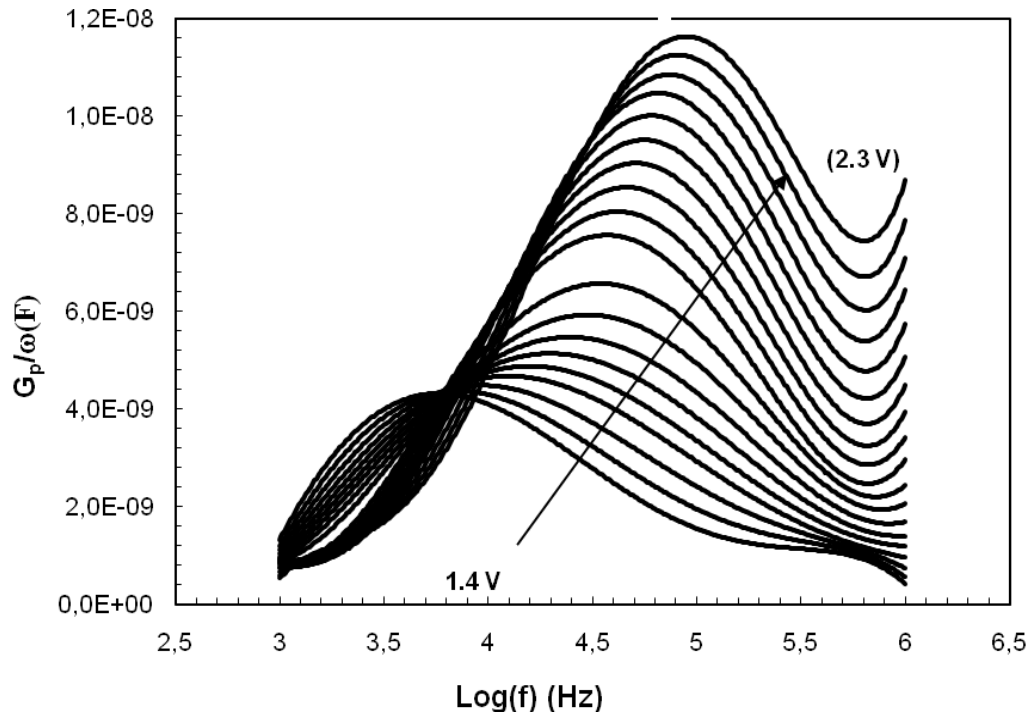
4. 3. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması

Paralel kondüktans G_p veya G_p/ω , frekans parametre iken gerilim fonksiyonu olarak, veya gerilim parametre iken frekansın fonksiyonu olarak değişik frekanslardaki C_m -V ve G_m -V ölçümlerinden elde edilebilir.

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapısının paralel kondüktans (G_p/ω)'nın frekansa göre eğrileri Şekil 4.1 deki C_m -V ve G_m/ω -V eğrilerinden faydalanılarak

$$G_p/\omega = G_m/\omega / ((G_m/\omega \cdot C_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2) \quad (4.19)$$

bağıntısından hesaplanmıştır ve grafik Şekil 4.8 de verilmiştir. Burada $\omega = 2\pi f$, C_m ve G_m MIS yapısının eşdeğer devresine göre seri dirençler için düzeltilmiştir ve C_{ox} ise MIS kapasitanstır.



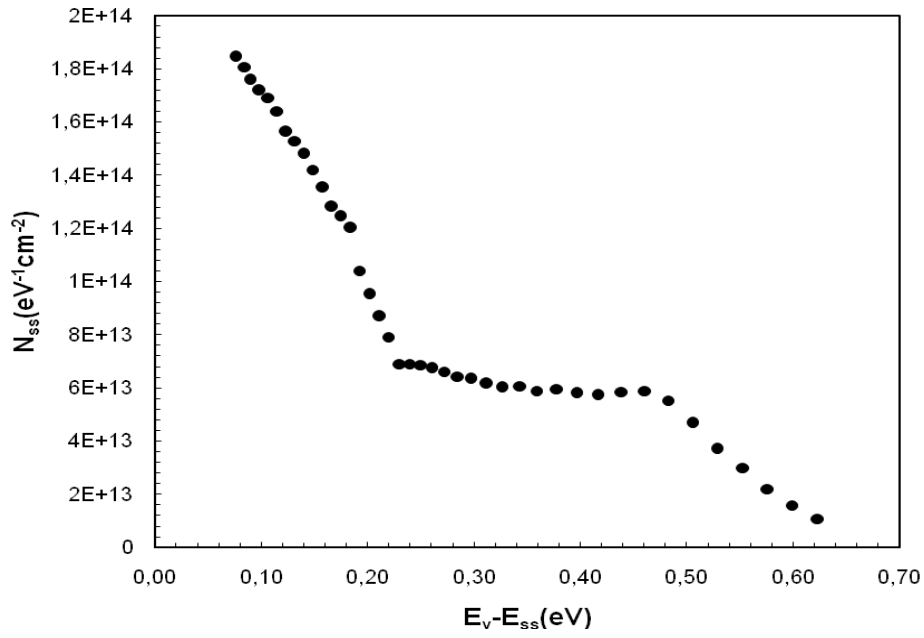
Şekil 4. 8. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslarda ölçülen eşdeğer paralel kondüktans G_p/ω -logf eğrileri.

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının G_p/ω -logf karakteristikleri her beslem değerinde bir pik vermektedir. Bu G_p/ω -logf karakteristiklerindeki geniş pik yüzey potansiyellerin dalgalanmalarına atfedilir. Yüzey potansiyeli ise oksit yükünde ve arayüzey durumlarındaki düzensizliklerden ileri gelir.

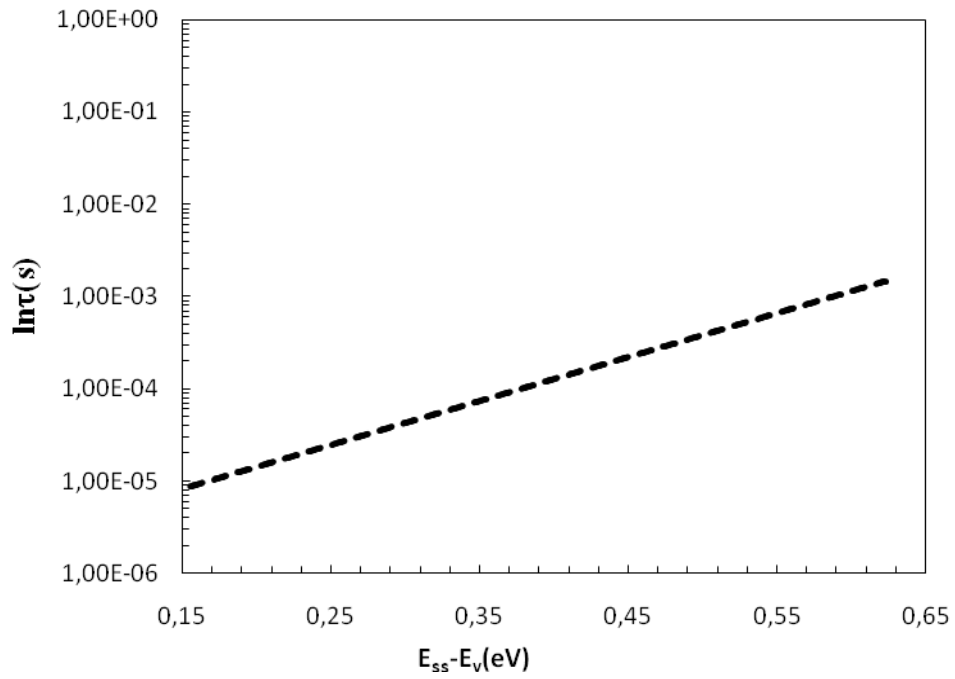
Arayüzey yoğunlukları,

$$D_{it} = (G_p/\omega)_{\max} / 0,402 \cdot q \cdot A \quad (4.20)$$

eşitliğinden elde edildi. A ifadesi yalıtkan tabakanın alanı olup değeri 0,0113cm² dir. G_p/ω -logf karakteristiklerinin pik değerleri $\omega \cdot \tau = 1,98$ değerine karşılık gelmektedir. Her gerilim değerinde meydana gelen G_p/ω -logf pikinin maksimum değerine karşılık gelen frekans değerinden durumların zaman sabiti τ elde edilir.



Şekil 4. 9. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının arayüzey durum yoğunluklarının enerji pozisyonuna göre dağılımı.

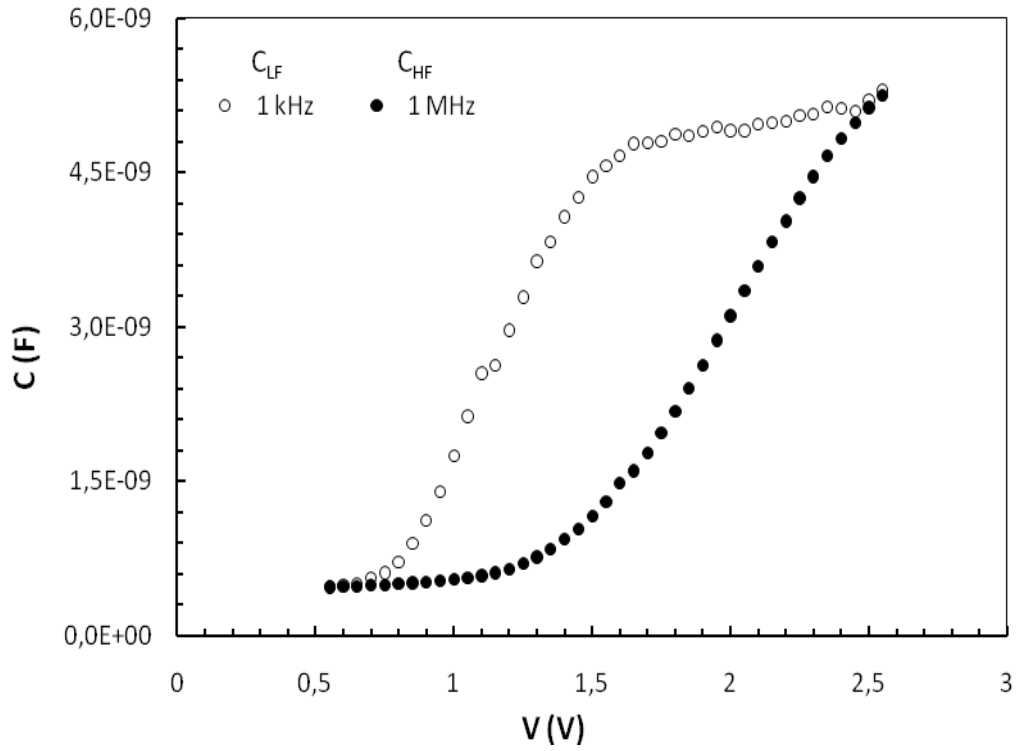


Şekil 4. 10. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının zaman sbitinin enerji pozisyonuna göre dağılımı.

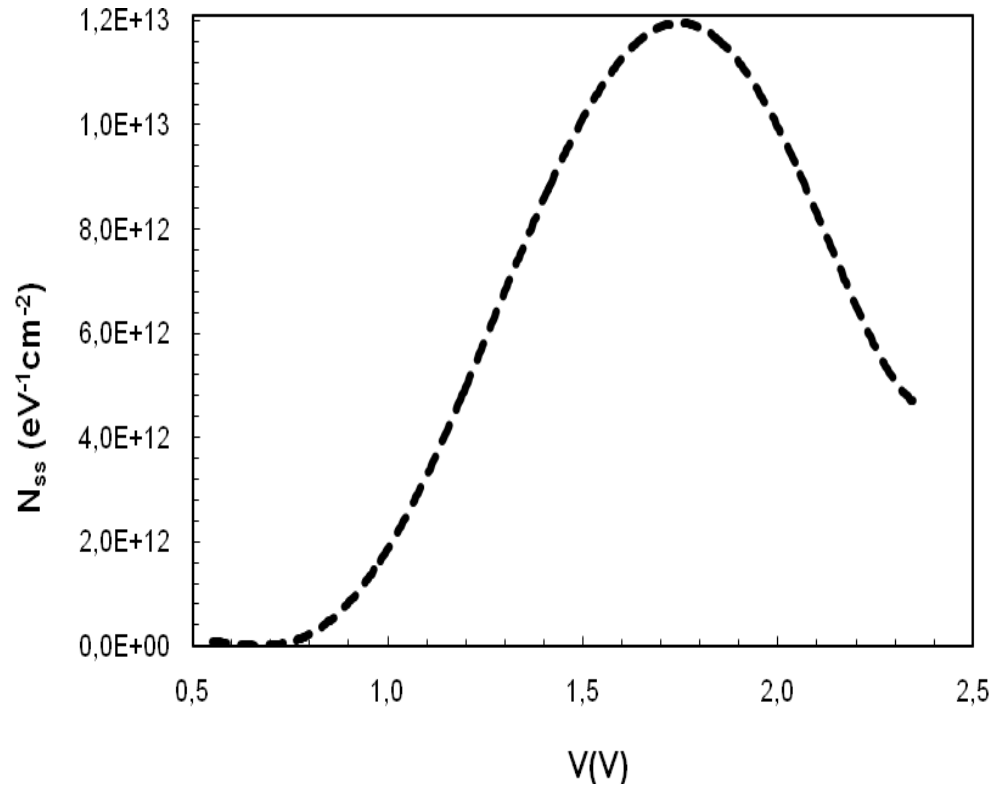
Hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için arayüzey durumları Şekil 4.11’da verilen, düşük frekans ($C_{LF}=1$ kHz)- yüksek frekans ($C_{HF}=1$ MHz) metodu ile hesaplandı. Tüm C-V ve G/ω-V ölçümleri, oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Bu ölçümlerden arayüzey durumları (N_{ss}), C_{LF} - C_{HF} frekans metoduna göre [3]

$$N_{ss} = ((1/C_{LF} - 1/C_{ox})^{-1} - (1/C_{HF} - 1/C_{ox})^{-1}) / qA \quad (4.21)$$

denklemini kullanılarak hesaplandı. Burada C_{ox} Eş 4.12 kullanılarak hesaplandı



Şekil 4. 11. C_{LF} - C_{HF} değerlerinin voltaja bağlı değişim grafiği.



Şekil 4. 12. Ara yüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişimi (N_{ss} -V).

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) yapıların elektriksel karakteristikleri, hem doğru hem de ters beslem kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçüm teknikleri kullanılarak incelendi. Ayrıca hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının C-V ve G/ω-V ölçümleri diyot parametrelerinin uygulanan frekansla değişimini gözlemek amacıyla geniş bir frekans aralığında (1 kHz-1 MHz) oda sıcaklığında ölçüldü.

MIS yapıların, elektrik karakteristiklerinin frekansa bağlı incelenmesinde; özellikle yığılım bölgesinde belirgin olarak kapasitans ve kondüktansın azalan frekansla arttığı ve düşük frekanslardaki kapasitans ve kondüktans değerlerindeki bu artışın, Al/SiO₂ arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dolup boşalma zamanının frekans bağımlılığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyali takip edebilmesi sonucu frekansa bağlı olarak hem bir ilave kapasitans hem de kondüktans meydana gelmektedir. Buna karşın yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumları ac sinyali takip edememesi (periyot, M/S arayüzeyinde lokalize olan arayüzey durumlarının ömründen daha kısa olduğu için) arayüzey kapasitansını ihmal edilebilecek kadar küçültmektedir. C-V ve G/ω-V eğrilerinin frekansa karşı bu davranışı numunenin diğer elektrik karakteristiklerinin frekansa bağımlılığının da bir göstergesidir. Şöyleki, artan frekansla; arayüzey durum yoğunluğu, seri direnç ve iletkenlik azalmaktadır. Bu nedenle bir MIS yapıda, C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçlarını oldukça etkileyen yapının seri direnci, arayüzey durumları ve yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığı ölçümlerde mutlaka dikkate alınmalı ve gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

Kapasitance-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri ve farklı frekanslar için C⁻²-V grafiklerinden faydalanılarak Schottky engel yüksekliği (Φ_B), N_{ss}, kesme gerilimleri (V_o), maksimum elektrik alanı E_m, difüzyon potansiyelleri (V_d), akseptör yoğunlukları (N_A), seri direnç (R_s), tüketim tabakası genişliği (W_D) ile Fermi enerji

seviyelerinin (E_F) gibi temel elektriksel parametreleri frekansa bağlı değişimi incelenmiştir literatürdeki değerlere yakın değerler elde edildi (Çizelge 4.1).

Arayüzey durumları, arayüzey oksit/yalıtkan tabakanın kalınlığına bağlı olarak metal veya yarıiletken ile yük alışverişinde bulunurlar. Genelde yalıtkan tabaka ince ise ($d_{ox} \leq 30 \text{ Å}$) arayüzey durumları metal ile dengede ve yalıtkan tabaka kalın ise ($d_{ox} \geq 30 \text{ Å}$) yarıiletken ile dengededir denilir [1,34,12,20]. Hazırlanan MIS yapılarında yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığı yığılma bölgesindeki yüksek frekans (1MHz) C-V eğrisinden $\approx 50 \text{ Å}$ elde edildi.

Literatürde MIS ve MOS yapıların seri direnci farklı yöntemlerle hesaplanmış ancak geniş bir voltaj aralığında dağılım profili çıkarılmamıştır. Bu çalışmada R_s değerleri admittans tekniğiyle hesaplandı [3]. Buna göre seri direncin voltaja bağlı farklı frekanslardaki eğrileri Şekil 4.5’ de verildi. Düşük frekanslarda gözlenen pikler yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 1 \text{ MHz}$) kaybolmaktadır. Bu nedenle düşük frekanslarda yapılan ölçümlerden elde edilen bulgular arayüzey durumlarından dolayı gerçek değerlerden çok farklı olabilmektedir. Ayrıca, gerçek MIS kapasitans ve iletkenlik değerlerini elde etmek için, oda sıcaklığında 1MHz için, doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C_c -V ve hem de G_c/ω -V eğrileri seri direnç için düzeltildi. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitansın (C_c) değerleri özellikle doğru beslem altında voltaja bağlı artarken (Şekil 4.6a), düzeltilmiş iletkenlik (G_c/ω) değerleri ise azalmaktadır (Şekil 4.6b). Oysa mevcut literatürün çoğunda bu R_s etkisi pek dikkate alınmamakta ve dolayısıyla ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği azalmaktadır.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) yapısı için voltajın fonksiyonu olarak ölçülen yüzey potansiyeli ϕ_i , ölçülebilir en düşük frekans kapasitans-voltaj eğrisinin nümerik integrasyonundan bulundu ve eğrisi(ϕ_i -v) Şekil 4.7 de verildi. Çünkü arayüzeytuzakları terslenim(inversion) ve tüketim (deplation) bölgesi üzerinde

yüksek frekansı takip edemez ve bu bölgede ölçülen yüksek frekans kapasitansı sadece tüketim tabakasının kapasitansını içerir.

Şekil 4.8 de Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının G_p/ω -logf karakteristikleri her beslem değerinde bir pik vermektedir. Bu G_p/ω -logf karakteristiklerindeki geniş pik yüzey potansiyellerin dalgalanmalarına atfedilir. Yüzey potansiyeli ise oksit yükünde ve arayüzey durumlarındaki düzensizliklerden ileri gelir.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) Schottky diyot için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) dağılım profili enerjinin ($E_{ss}-E_v$) bir fonksiyonu olarak elde edildi (Şekil 4.9). (Al/SiO₂/p-Si) Schottky diyot için N_{ss} değerleri yasak enerji aralığının ortasından E_v bandına doğru exponansiyel olarak artar. Çünkü p-tipi bir yarıiletkende akseptör tipi katkılar yoğunudur ve bunlar sığ seviyeler oluştururlar.

Her gerilim değerinde meydana gelen G_p/ω -logf pikinin maksimum değerine karşılık gelen frekans değerinden durumların zaman sabiti τ elde edildi (Şekil 4.10) .

Hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için arayüzey durumları (N_{ss}) Şekil 4.11’de verilen, düşük frekans ($C_{LF}=1$ kHz)- yüksek frekans ($C_{HF}=1$ MHz) metodu ile hesaplandı. Bu ölçümlerden arayüzey durumları (N_{ss}), $C_{LF}-C_{HF}$ frekans metoduna [3] göre hesaplandı (şekil 4.12). Hesaplanan arayüzey durumlarının yoğunluğu $\sim 10^{12}(\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2})$ mertebesinde olup elde edilen sonuçlar literatürle uyum halindedir. Bu mertebedeki arayüzey durumları neredeyse ideal bir davranış göstermektedir. Literatürde $10^{12}-10^{14}$ mertebesinde bulunan değerlerde mevcuttur.

KAYNAKLAR

1. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd Ed.", **Wiley**, New York, 1-16, 245-300, 362-390 (1981).
2. Bardeen, J. and Brattain, W. H., "The Transistor, a Semiconductor Triode," **Phys. Rev.**, 71: 230-236 (1948).
3. E. H. Nicollian and J. R. Brews, "MOS (Metal-Oxides-Semiconductor) Physics and Technology", **John Willey and Sons, New York**, (1982).
4. Song, Y. P. Van Meirhaeghe, R. L. Lafl re, W. H., Cardon, F., "On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers", **Solid State Electron.**, 29:633-638 (1986).
5. Mui, D., Striteon, S., Marko , H., "On the barrier lowering and ideality factor of ideal Al/GaAs Schottky diodes", **Solid State Electron.**, 34: 1077-1082 (1991).
6. Hahn B. R., Yoon D. Y., "Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide-Silicon Structure", **Journal Of Applied Physics**, 65(7): 2766-2771 (1989).
7. Milness A. G., Feucht D. L., "Heterojunctions and Metal-Semiconductor Contacts", **Academic Press**, New York and London, 156-165 (1972).
8. Sze, S. M., and Kwok K. Ng, "Metal-Semiconductor Contacts", Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed., **John Wiley & Sons**, New York, 245-300 (2007).
9. Y ceda ,  ., "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik  zelliklerinin sıcaklık ve frekansa ba lı incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara**, 1: 9-10 (2007).
10. M. Jaros, "Physics and Applications of Semiconductor Microstructures", **Carlendon Press, Oxford**, (1989)
11. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", **Mc Graw-Hill**, New York, 420-450, 517-523 (1997).
12. Kanbur, H., Altındal,  ., Tataro lu, A., "The effect of states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes", **Appl. Surface Sci.** 252:1732 (2005).

13. 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).
14. Cooke, M. J., “Semiconductor Devices”, *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
15. Ghandhi, S. K., “VLSI Fabrication Principles”, *John Wiley & Sons*, New York, 401-405 (1983).
16. Schroder, D. K., “Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.”, *John Wiley & Sons*, New York, 337-379 (1998).
17. 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).
18. Sharma, B.L., “Physics of Schottky Barrier Junctions”, Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications, *Plenum Press*, New York and London, 1-56 (1984).
19. A. Tataroğlu, Ş. Altındal, M.M. Bülbül, “Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure”, *Microelectronic Engineering*, 81: 140-149 (2005).
20. Chattopadhyay P., Raychaudhuri B., “New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diodes” *Solid-State Electronics*, 35(7): 1023-1024 (1992).
21. Şahin B., Çetin H., Ayyıldız E., “The effect of series resistance on capacitance–voltage characteristics of Schottky barrier diodes”, *Solid-State Communications*, 135(8): 490-495 (2005).
22. Tataroğlu B., Altındal Ş., Tataroğlu A., “The $C-V-f$ and $G/\omega-V-f$ characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures”, *Microelectronic Engineering*, 83(10): 2021-2026 (2006).
23. Kar, S. and Dahlke, W. E., “Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si”, *Solid-State Electronics*, 15: 221-237 (1972).

24. Konofaos, N., McClean, I. P., Thomas, C. B., "Characterisation of the interface states between amorphous diamond-like carbon films and (100) silicon", **Phys. Stat. Sol. (a)**, 161: 111-123 (1997).
25. Kwa K.S.K, Chattopadhyay S., Jankovic N.D., Olsen S.H., Driscoll L.S., O'Niell A.G., "Thermal oxidation of strained Si/SiGe: impact of surface morphology and effect on MOS devices" **Materials Science and Engineering**, 109(1-3): 78-84 (2004).
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. Cowley, A.M., Sze, S.M., "Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems", **J. Appl. Phys.**, 36: 3212-3216 (1965).
28. Berger, L. I., "Semiconductor Materials", **CRC Press**, New York, 145-152 (1997).
29. Jarzebski, Z. M., "Physical properties of SnO₂ materials: Preparation and defect structure", **J. Electrochem. Soc.**, 123(7): 199-205 (1976).
30. Maudes, J. S. and Rodriguez, T., "Sprayed SnO₂ films: Growth mechanism and film structure characterization", **Thin Solid Films**, 69(2): 183-189 (1980).
31. Ziel, A. V., Solid State Physical Electronics, 2nd Edn., **Prentice Hall**, 245 s, New Jersey. (1968)
32. E. H. Rhoderick, R. H. Williams, "Metal-Semiconductor Contacts 2nd Ed.", **Oxford University Press**, Oxford, 257-300 (1988).
33. Shuer, M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed", **Prentice-Hall, Int. Inc.**, New Jersey, 194-225 (1990).
34. Card, H. C., Rhoderick, E. H., "Studies of tunnel MOS diodes Interface effects in silicon Schottky diodes", **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 4:1589-1601 (1971).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYA, Ahmet
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.03.1979-Ergani
Medeni hali : Evli
e-mail : ahkaya@windowslive.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Harran Üniversitesi - Fizik	2001
Lise	Ergani Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-	Dershane	Fizik Öğretmeni

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Kitap okuma, Masa tenisi, Futbol

Bilgisayar

Mikrosoft Ofis 2007, Excel, Word, PowerPoint, İnternet