

**Au/SiO₂/n-Si (MYY) YAPILARIN ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİNİN
SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ**

Mert YILDIRIM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2010

ANKARA

Mert YILDIRIM tarafından hazırlanan “Au/SiO₂/n-Si (MYY) YAPILARIN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ” adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Perihan Durmuş
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

Doç. Dr. İlbilge DÖKME
Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Perihan Durmuş
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 29 / 12 / 2010

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

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

Mert YILDIRIM

**Au/SiO₂/n-Si (MY) YAPILARIN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN
SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Mert YILDIRIM

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2010**

ÖZET

Bu çalışmada 79 Å yalıtkan tabaka kalınlığına sahip Au/SiO₂/n-Si yapılarının arayüzey durumları (N_{ss}) ve direncinin sıcaklık ve voltaja bağılıkları 1 MHz ve 80–400 K sıcaklık aralığındaki ileri ve ters öngerilim kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/\omega-V$) ölçümlerinden elde edildi. Bu yapıların katkı konsantrasyonu (N_D), Fermi enerji seviyesi (E_F), tükenim tabakası genişliği (W_D), arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) ve engel yüksekliği (Φ_{CV}) gibi temel elektriksel parametreleri de aynı aralıktaki ters öngerilim $C^{-2}-V$ eğrilerinden elde edildi. Φ_{CV} (T=0 K) ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı (α) değerleri sırasıyla 1,152 eV ve $-2,4 \times 10^{-4}$ eV/K olarak bulundu. Bu değerler Silikon'un (Si) 0 K'deki bant genişliği değeri ($E_g = 1,17$ eV) ve bant genişliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı ($-4,73 \times 10^{-4}$ eV/K) ile uyum içerisindedir. Tüm sıcaklık değerlerindeki C–V eğrileri seri direnç (R_s) etkisinden dolayı yığılım bölgesinde anormal pikler gösterdi. Benzer şekilde, $G/\omega-V$ eğrileri de tükenim bölgesinde 160–320 K sıcaklık aralığında pikler gösterdi. Seri direncin (R_s) Kapasitans (C) ve İletkenlik (G) üzerindeki etkisi özellikle yüksek sıcaklıklarda daha belirgindir. Dolayısıyla, ölçülen C ve G değerleri R_s etkisini minimize etmek için Nicollian ve Brews metodu kullanılarak düzeltildi. Ek olarak, 200–400 K sıcaklık aralığında elde edilen sıcaklığa bağlı ac iletkenlik (σ_{ac}) değerleri lineer davranış gösterdi ve bu değerler Arrhenius eğrilerine fit edildi. $\ln \sigma_{ac}/kT$ eğrilerinin eğiminden elde

edilen aktivasyon enerjisi (E_a) değerleri 3,5, 4,0, 4,5 ve 5,0 V öngerilim değerleri için sırasıyla 21,7, 18,5, 15,0 ve 11,5 meV bulundu.

Bilim kodu : 202.1.035
Anahtar Kelimeler : MYY yapı; Sıcaklığa bağlılık; Engel yüksekliği; Seri direnç; Arayüzey durumları; C-V eğrilerindeki anormal pikler
Sayfa adedi : 58
Tez yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Perihan DURMUŞ

**THE INVESTIGATION OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF
ELECTRICAL PARAMETRES OF Au/SiO₂/n-Si (MIS) STRUCTURES**

(M. Sc. Thesis)

Mert YILDIRIM

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2010

ABSTRACT

In this study, the temperature and voltage dependence of interface states (N_{ss}) and resistance profile of Au/SiO₂/n-Si structure with 79 Å insulator layer thickness were obtained from the forward and reverse bias capacitance-voltage ($C-V$) and conductance-voltage ($G/\omega-V$) measurements in the temperature range of 80-400 K at 1 MHz. The main electrical parameters, such as doping concentration (N_D), Fermi energy level (E_F), depletion layer width (W_D), density of interface states (N_{ss}) and barrier height (Φ_{CV}), of these structures were also determined from the reverse bias C^2 vs V plots in the same range. The values of Φ_{CV} at the absolute temperature ($T=0$ K) and the temperature coefficient (α) of barrier height were found as 1.152 eV and -2.4×10^{-4} eV/K, respectively. These values are in a close agreement with the bandgap value of Si at 0 K ($E_g = 1.17$ eV) and its temperature coefficient value (-4.73×10^{-4} eV/K). $C-V$ plots for all temperature levels show an anomalous peak in the accumulation region because of the effect of series resistance (R_s). Similarly, $G/\omega-V$ plots also show a peak in the depletion region in the temperature range of 160-320 K. The effect of series resistance (R_s) on the capacitance (C) and conductance (G) is found noticeable especially at high temperatures. Therefore, the measured C and G values were corrected in order to minimize the effect of R_s using Nicollian and Brews method. In addition, the temperature dependent ac conductivity (σ_{ac}) data obtained

between 200 and 400 K showed a linear behavior and was fitted to the Arrhenius plot. The values of activation energy (E_a) obtained from the slope $\ln \sigma - q/kT$ plots are 21.7, 18.5, 15.0 and 11.5 meV for the values of applied biases 3.5, 4.0, 4.5 and 5.0 V, respectively.

Science Code : 202.1.035
Keywords : MIS structure; Temperature dependence; Barrier height; Series resistance; Interface states; Anomalous peaks in C-V plots
Page number : 58
Advisor : Assist. Prof. Dr. Perihan DURMUŞ

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Perihan DURMUŞ'a teőekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmalarıml boyunca yaptığı katkılardan dolayı engin tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teőekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MYY) YAPILAR.....	6
2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) Yapısı.....	6
2.1.1. İdeal MYY yapısı.....	7
2.1.2. Gerçek MYY yapısı	16
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	23
3.1. Au/SiO ₂ /n-Si (MYY) Yapıların Hazırlanması	23
3.1.1. Kristal temizleme	23
3.1.2. Omik kontağın oluşturulması.....	24
3.1.3. Yalıtkan silisyum dioksit (SiO ₂) tabakanın oluşturulması.....	25
3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması.....	27
3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri	28
4. DENEYSEL SONUÇLAR	30
4.1. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik- Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri	30

	Sayfa
5. SONUÇ	51
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	58

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Au/SiO ₂ /n-Si yapının sıcaklığa bağlı temel elektriksel parametreleri ...	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) yapının şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.2. $V_G = 0$ durumunda p-tipi ve n-tipi yarıiletkenli ideal bir MYY yapı için enerji-bant diyagramı	7
Şekil 2.3. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapının enerji bant diyagramı (p-tipi yarıiletken için)	9
Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapının eşdeğer kapasitans devresi	11
Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda a) Yığılım, b) Tükenim ve c) Tersinim bölgeleri için ideal MYY yapının enerji-bant şeması.....	13
Şekil 2.6. İdeal bir MYY yapının a) Yığılım, b) Tükenim ve c) Tersinim bölgelerine karşılık gelen devre şeması	16
Şekil 2.7. İdeal olmayan MYY yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	17
Şekil 2.8. MYY yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için	22
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi	24
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske.....	25
Şekil 3.3. Yalıtkan/oksit tabakanın büyütülmesinde kullanılan oksidasyon fırını ..	26
Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske.....	27
Şekil 3.5. Au/SiO ₂ /n-Si (MYY) yapının şematik gösterimi	28
Şekil 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği	29
Şekil 4.1. MYY yapının sıcaklığa bağlı 1 MHz'deki (a) Kapasitans-Voltaj (C-V) ve (b) İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) eğrileri	31

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. MYY yapının öngerilim voltajına bağlı 1 MHz'deki (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω –V) eğrileri.....	33
Şekil 4.3. MYY yapının 1 MHz'deki (a) sıcaklığa bağlı Direnç–Voltaj (R–V) ve (b) öngerilim voltajına bağlı Seri direnç–Voltaj (R_s –V) eğrileri	36
Şekil 4.4. MYY yapının 80 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω –V) eğrileri.....	38
Şekil 4.5. MYY yapının 200 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω –V) eğrileri.....	39
Şekil 4.6. MYY yapının 300 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω –V) eğrileri.....	40
Şekil 4.7. MYY yapının 400 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω –V) eğrileri.....	41
Şekil 4.8. MYY yapının sıcaklığa bağlı ters öngerilimdeki C^{-2} –V eğrileri	42
Şekil 4.9. MYY yapının Φ_{CV} – T eğrisi	47
Şekil 4.10. MYY yapının öngerilim voltajına bağlı σ_{ac} – T eğrileri	49
Şekil 4.11. MYY yapının öngerilim voltajına bağlı $\ln\sigma_{ac} - q/kT$ eğrileri.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
\AA	Angström
d_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakasının kalınlığı
V_G	Diyota uygulanan gerilim
q	Temel elektronik yük
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_B	Metal ve yalıtkan arasında oluşan potansiyel engeli
χ	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
χ_i	Yalıtkanın elektron yakınlığı
E_V	Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_i	Saf Fermi enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_{Fn}	n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
E_{Fp}	p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
ψ_B	Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
Q_{sc}	Yarıiletkendeki uzay yükü
V_{ox}	Yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim
Q_n	Tersinim bölgesinde birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük
Q_s	Yarıiletkendeki toplam yük
Q_m	Metal yüzeyindeki toplam yük
C_{ox}	Yalıtkan/oksit kapasitansı
C_{sc}	Yüzey yük kapasitansı

Simgeler	Açıklama
ϵ_{ox}	Yalıtkan tabakasının dielektrik/geçirgenlik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik/geçirgenlik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik/geçirgenlik sabiti
A_{ox}	Metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı
N	İyonlaşmış alıcı yoğunluğu
Q_a	Birim yüzeydeki alıcı yükü
Q_n	Tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü
N_{ss}	Arayüzey durumlarının yoğunluğu
ΔV_{FB}	Düz bant gerilim kayması
ΔQ_{His}	Histeresis yük yoğunluğu
ΔV_{HisFB}	Düz banttaki kayma miktarı
$+Q_f$	Pozitif sabit oksit yükleri
$-Q_f$	Negatif sabit oksit yükleri
ΔV	Kayma miktarı
ΔQ_{ox}	Yalıtkan içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu
ΔQ_{eff}	Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük
ΔQ_{ss}	Arayüzey yük yoğunluğu
ΔV_{MG}	Gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kayması
R_{ss}	Arayüzey direnci
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
W_D	Tükenim tabakası genişliği
R_s	Seri direnç
C	Kapasitans
G	İletkenlik
Y	Admittans
σ_{ac}	a.c. iletkenlik
N_D	Katkı konsantrasyonu

Simgeler	Açıklama
V_0	Sıfır öngerilimdeki dahili voltaj
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_R	Ters öngerilim voltajı
V_F	Doğru öngerilim voltajı
k	Boltzmann sabiti
N_C	İletkenlik bandının etkin durum yoğunluğu
m_0	Elektronun durgun kütlesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
$\Delta\Phi_B$	Schottky engel alçalması
E_m	Maksimum elektrik alan
$\Phi_{CV} (T=0)$	Sıfır Kelvin'deki engel yüksekliği
α	Engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı
$E_g (0 K)$	Sıfır Kelvin'deki bant genişliği
E_a	Aktivasyon enerjisi

Kısaltmalar	Açıklama
ac	Alternatif gerilim
AET	Alan etkili transistör
C-V	Kapasitans-gerilim
dc	Doğru gerilim
G/ω-V	İletkenlik-gerilim
MOY	Metal-oksit-yarıiletken
MY	Metal-yarıiletken
MYY	Metal-yalıtkan-yarıiletken

1. GİRİŞ

Elektriğin keşfinden sonra katı malzemelerin iletkenlikleri hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış ve bunun sonucunda katıların bir kısmının elektriği iyi iletirken bir kısmının da elektriği hiç iletmediği gözlemlendi. İletkenlik genel olarak iletim ve valans bantlarındaki taşıyıcı (elektron veya deşik) yoğunluğu ile bu bantlar arasındaki yasak enerji bant aralığına bağlıdır. Bu açıdan katılar iletkenliklerine göre sınıflandırılırken bu iki kavram göz önüne alınmıştır. İletkenliklerine göre katılar; iletken, yalıtkan ve yarıiletken olmak üzere üç gruba ayrılırlar. İletim ve valans bantlarının birbirine çok yakın veya üst üste binmiş olduğu katılar iletken olarak adlandırılır. İletkenlere örnek olarak yüksek iletkenliğe sahip altın ve gümüş örnek olarak verilebilir ki iletkenlerin iletkenlik değerleri 10^8 ile 10^2 $(\Omega.cm)^{-1}$ arasında değişmektedir. Taşıyıcı sayısı çok az, yasak enerji bant aralığı çok geniş olan katılar yalıtkan sınıfına girerler ve iletkenlik değerleri 10^{-8} ile 10^{-18} $(\Omega.cm)^{-1}$ arasındadır. Elmas, porselen, düşük iletkenli kadmiyum sülfür ve çinko sülfür bunlara örnek verilebilir. İletken ve yalıtkanlara ek olarak, taşıyıcı sayısı az, yasak enerji bandı yalıtkan ile iletken arasında bir bölgede ve iletkenliği 10^2 ile 10^{-8} $(\Omega.cm)^{-1}$ arasında olan katılara da yarıiletken adı verilir. Silisyum (Si), germanyum (Ge) ve galyum arsenik (GaAs) gibi kristaller ise yarıiletkenlere örnek verilebilir. Yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak doğada bol miktarda bulunması ve üzerine oksit tabakanın kolayca büyütülebilmesi nedenlerinden dolayı zaman içinde ağırlıklı olarak kullanılan yarıiletken malzeme Si olmuştur. Metal ile yarıiletken arasında yarıiletken üzerine silisyum dioksit (SiO_2) gibi yalıtkanlar büyütülerek; metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY), metal-oksit-yarıiletken (MOYO) yapılar veya diğer adıyla kapasitörler, alan etkili transistörler (AET) ve entegre devrelerin yapılması mümkün olmuştur [1]. Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklık, aydınlatma şiddeti, elektrik alan, manyetik alan, safsızlık atomlarının yoğunluğu v.b. parametrelerdeki değişimlere bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterir. Yarıiletkenlerin elektronikte kullanılması, katıhal fiziğinin 20. yüzyıl teknolojisine getirdiği en büyük katkılardan biridir.

Tarihçe olarak metal-yarıiletken (MY) kontaklar 18. yüzyılın sonlarında ilk olarak çalışılmaya başlanmış ancak asıl çalışmalar 20. yüzyılın ortalarından itibaren ağırlık kazanmıştır. Metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koyduğu için bu kontaklara atfen Schottky diyotlar ya da Schottky kontaklar denilmektedir [2,9].

Yarıiletkenin temiz oda havasına maruz kalmasıyla kimyasal olarak temizlenmiş yarıiletken yüzeylerde yalıtkan/oksit tabaka oluşur ve bu tabakanın kalınlığı numune üzerindeki kalıntı gazlara ve yarıiletken yüzeyin çevreye maruz kalma süresine bağlıdır [1,3]. Metal ile yarıiletken arasında doğal ya da yapay olarak yalıtkan bir tabakanın oluşturulması ile MY yapı metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) yapıya dönüştürülmüş olur. Metal ile yarıiletken tabakalar arasındaki bu yalıtkan/oksit tabaka hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler [4-11]. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde çok sayıda enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar. Metal-yarıiletken arayüzeyine yalıtkan/oksit katman yerleştirilmesi ile birlikte kristalin temizlenmesi sırasında kristal yapıdan kaynaklanan bir bozukluğa veya termal ve oksidasyon işlemlere bağlı olarak yarıiletken-yalıtkan (Si/SiO₂) arayüzeyinde çok sayıda istenmeyen arayüzey durumları oluşur [9,12-14]. Ayrıca MY veya MYG 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. Bu izinli enerji seviyelerinin mertebesi teorik olarak 10¹² eV⁻¹cm⁻² civarındadır, ancak deneysel sonuçlar bunların 10¹³ eV⁻¹cm⁻² ile 10¹⁴ eV⁻¹cm⁻² civarında olduğunu göstermiştir. Bu seviyelerin tümü arayüzey durumları veya arayüzey tuzakları olarak adlandırılır. Arayüzey durumlarının yoğunluğunu elde etmek için çok sayıda deneysel ve teorik metot vardır ve bu metotların kendi aralarında bazı avantaj ve dezavantajları vardır [9].

Genellikle, MYG yapılarında yalıtkan/oksit olarak genelde SiO₂, kalay dioksit (SnO₂), titanyum dioksit (TiO₂) ve silisyum nitrat (Si₃N₄) gibi yalıtkanlar kullanılır. Bir

MYY yapıda arayüzey oksit tabakası termal oksidasyon, buharda oksidasyon, anodik oksidasyon, püskürtme, daldırma gibi farklı yöntemlerle büyütülebilir. Ayrıca, metal ile yarıiletken arasında fabrikasyon aşamasında doğal olarak da ince bir yalıtkan tabaka oluşabilir. MYY veya MOY yapılarda yalıtkan arayüzey tabakası genelde bir oksidasyon fırınında belirli sıcaklıklarda ve belirli hızlarda ortamdan kuru O_2 geçirilmesi ile büyütülebilir [15]. Burada oluşan yalıtkan tabakanın kalınlığı ortamın sıcaklığı ve fırından geçirilen kuru O_2 miktarına oldukça bağlıdır. Yalıtkan/oksit tabaka olarak genelde SiO_2 'in tercih edilmesinin sebebi SiO_2 'in Si kristali üzerine kolayca büyütülebilmesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmasıdır. Aynı zamanda SiO_2 tabaka birçok yüzey etkilerini azaltmak yoluyla MYY yapının karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlamaktadır. MY yapılarda SiO_2 'in oksit tabaka olarak kullanılması ile birlikte 20. yüzyılın ortalarından itibaren AET, kapasitörler ve entegre devrelerin yapılması mümkün olmuştur [16]. Buna ilaveten, SiO_2 düşük elektriksel özdirenci ve yüksek optik geçirgenliği nedeniyle opto-elektronik devre elemanlarında, ince filmlerde, güneş pillerinde, anti statik tabakalarda ve gaz algılayıcılarında da kullanılmaktadır [17,18].

MYY yapılar, pozitif ve negatif plakalar arasında bir yalıtkan madde doldurulmuş bir kapasitöre benzerler. Aradaki yalıtkan tabakanın 100 \AA 'dan büyük olması durumunda bu yapılar MOY ve 100 \AA 'dan küçük olması durumunda ise MYY yapılar ya da MYY tipi Schottky engel diyotları olarak adlandırılır. Yalıtkan tabaka çok ince ise ($d_{ox} < 30 \text{ \AA}$), arayüzey durumları (N_{ss}) metal ile dengede, büyük ise yarıiletken ile dengede olurlar. Aradaki yalıtkan arayüzey tabakadan dolayı MYY yapılar MY yapılardan oldukça farklı davranış gösterirler. Schottky diyotu hem yalıtkan bir arayüzey tabakaya hem de seri dirence (R_s) sahip ise diyot üzerine uygulanan gerilim; diyotun tüketim tabakası, yalıtkan tabaka ve R_s tarafından bölüşülecektir.

MYY, MY veya bir güneş pilinin temel elektriksel parametreleri ve metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinin biçimi geniş bir sıcaklık ve voltaj aralığında gerçekleştirilen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ya da akım-voltaj (I-V) ölçüm metotları ile belirlenebilir. Kalın yalıtkan tabakalı MYY veya MOY yapılarda, kalın yalıtkan tabakadan dolayı I-V ölçümleri iyi bir

doğrultma özelliği vermez. Bundan dolayı, bu yapıların temel elektriksel ve dielektriksel parametreleri genelde sıcaklık ve frekansa bağlı C-V ve G/ ω -V ölçümlerinden hesaplanır. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu yapılar hakkındaki çalışmaların en kapsamlısı ilk olarak 1959 yılında J.L. Moll [19] tarafından yapılan deneyleri ve sonuçlarını içeren çok sayıda makalelerden oluşan çalışmadır. MYY yapıların önemi, ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerinin incelenmesinde sıklıkla kullanılmalarından gelmektedir [20].

Bir MY veya MYY yapıda yarıiletken olarak genellikle Si, Ge veya GaAs; metal olarak yüksek saflıktaki (%99,999) altın (Au), alüminyum (Al) veya titanyum (Ti) gibi materyaller kullanılır. Kontaklarda kullanılan metalin cinsi hangi tip kontak (omik veya doğrultucu) oluşturulmak istenildiğine bağlıdır. Örneğin; 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 [1,2,9]. P tipi yarıiletkenlerde ise durum bunun tam tersinedir. Bu durum M/Y arayüzeyinde oluşan potansiyel engel yüksekliğinin seçilen metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu yapıların hazırlanmasında, yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi olmasına göre uygun iş fonksiyonu değerine sahip metaller seçilir [1,9].

MYY yapıların performansını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerin başında M/Y arayüzeyinde büyütülen yalıtkan tabakanın kalınlığı ve homojenliği, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarının yoğunluğu, 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 artırması açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada Au/SiO₂/n-Si (MY) yapılar, (100) yüzey yönelimine sahip 8 Ω.cm öz dirençli, 350 µm kalınlıklı, 2 inç çapında fosfor (P) katkı (n-tipi) Si tek kristal üzerine oluşturuldu. Hazırlanan bu yapıların elektriksel karakteristikleri geniş bir sıcaklık aralığında (80-400 K), C-V ve G/ω-V deneysel ölçüm metotları kullanılarak belirlendi. Ayrıca sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümleri, seri direnç ve arayüzey durumlarının etkisi dikkate alınarak incelendi.

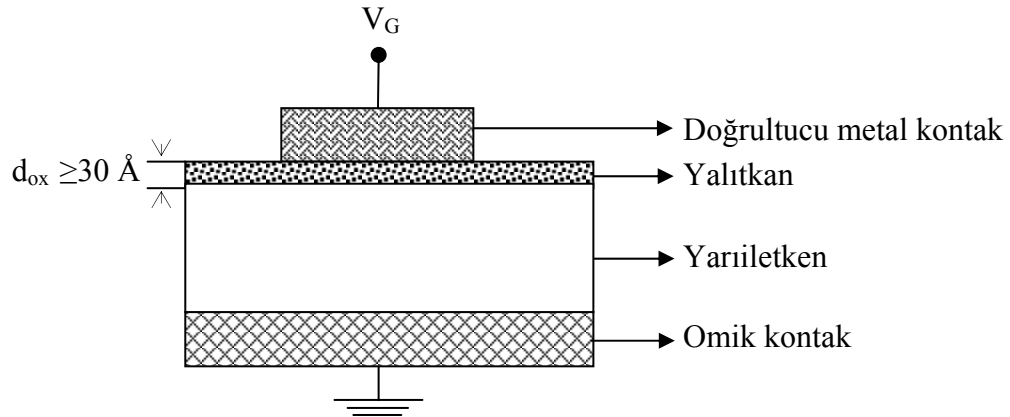
Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Schottky diyotların tarihsel gelişimi ve önemi üzerinde duruldu. İkinci bölümde, Schottky diyotların teorisi ve çalışma prensibi üzerinde duruldu. Üçüncü bölümde, Au/SiO₂/n-Si yapıların hazırlanması ile ilgili işlemler ve kullanılan deneysel ölçüm sistemleri hakkında bilgi verildi. Dördüncü bölümde, deneysel ölçümlerden ilgili grafik ve çizelgeler elde edilerek mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak yorumlandı. Beşinci bölümde ise varılan sonuçlarla ilgili yorum, tartışma ve önerilere yer verilmiştir.

2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MYY) YAPILAR

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) veya orijinal adıyla metal-insulator-semiconductor (MIS) yapılar metal yarıiletken arasında yarı iletkenin üzerine yalıtkan (dielektrik) tabaka büyütülmesiyle elde edilir. Bu yalıtkan arayüzey tabakası SiO_2 , SnO_2 , Si_3N_4 vb dielektrik malzemelerden çeşitli yöntemlerle ile oluşturulabilir ki bu yöntemlerden bazıları termal oksidasyon, buharda oksidasyon, anodik oksidasyon ve püskürtme olarak sıralanabilir. M/Y arayüzeyindeki yalıtkan/oksit tabaka metal ile yarıiletken arasında izolasyon görevi yapar ve birçok yüzey durumunu pasivize eder. Ayrıca yalıtkan/oksit arayüzeyle birlikte artık yapı üzerine uygulanan voltaj, yapı, yalıtkan tabaka ve seri direnç tarafından bölüşülecektir.

2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) Yapısı

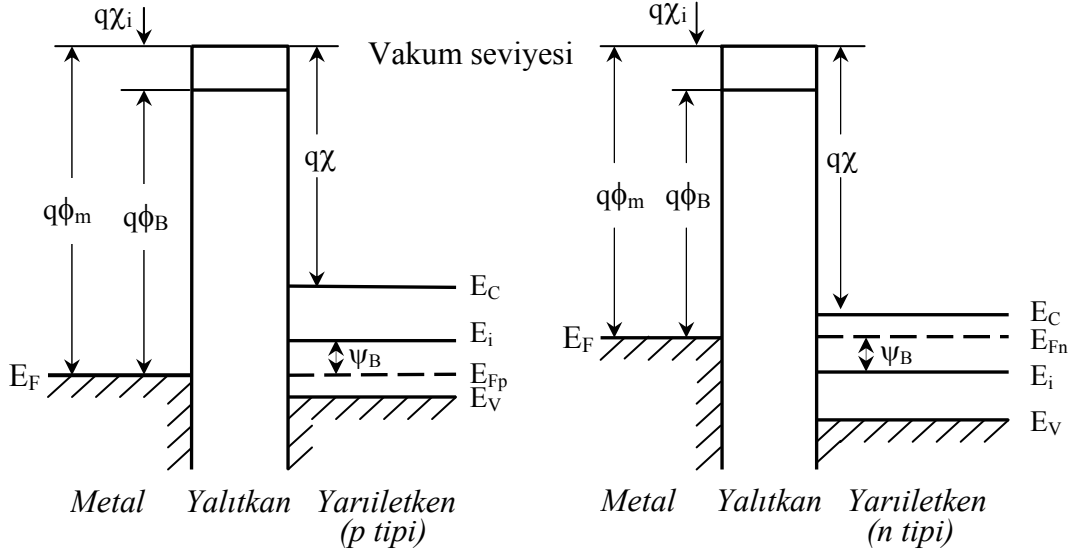
Bir MYY yapı Şekil 2.1’de gösterildiği gibi metal-yalıtkan-yarıiletken tabakalardan oluşur. Bu yapılar, üstte metal altta yarıiletken levhalardan oluşan paralel plakalı bir kondansatöre benzer [21]. Burada d_{ox} yalıtkan tabakanın kalınlığı, ϵ_{ox} yalıtkan dielektrik/geçirgenlik sabiti ve V_G ise dışarıdan metal plakaya uygulanan gerilimdir ve yönü de ona göre belirlenir. V_G gerilimi, metal plaka omik kontakta göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir.



Şekil 2.1. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) yapının şematik gösterimi

2.1.1. İdeal MYY yapısı

İdeal bir MYY yapıda yapıya gerilim uygulanmadığı andaki enerji-bant diyagramı p ve n tipi yarıiletkenler için Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. $V_G = 0$ durumunda p-tipi ve n-tipi yarıiletkenli ideal bir MYY yapısı için enerji-bant diyagramı

Burada;

q : Temel elektronik yük ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_B : Metal ve yalıtkan arasında oluşan potansiyel engeli

χ : Yarıiletkenin elektron yakınlığı

χ_i : Yalıtkanın elektron yakınlığı

E_V : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_C : İletkenlik bandı enerji seviyesi

E_i : Saf Fermi enerji seviyesi ($E_i = \frac{E_C - E_V}{2}$)

E_{Fn} : n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi

E_{Fp} : p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi

ψ_B : Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark

Şekil 2.2 üzerinde gösterilen bazı temel sembolleri tanımlamak gerekirse Fermi enerjisi iletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. İletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak, yarıiletkenlerde Fermi enerjisi yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviye baz alınarak bulunur. Fermi enerjisi n tipi yarıiletkenler için iletim bandıyla izafi seviyenin enerjilerinin farkıdır, p tipi için ise valans bandıyla izafi seviyenin enerjilerinin farkıdır. Vakum seviyesi bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronun yüzeyden kopup serbest hale gelebilmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olup Şekil 2.2’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 da (ϕ_s) benzer olarak yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Burada yarıiletkenler için Fermi enerjisi katılanan madde atomlarının yoğunluğuna bağlı olarak değiştiğinden dolayı ϕ_s sabit bir nicelik olmaktan ziyade değişen bir niceliktir. Elektron yakınlığı (χ) bir elektronun vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır.

İdeal bir MYY yapıdaki özellikler aşağıdaki gibi tanımlanabilir [9,21,22]:

- Sıfır öngerilimde metalin iş fonksiyonu ϕ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasında enerji farkı olan ϕ_{ms} iş fonksiyonunun değeri sıfırdır, yani ϕ_m ile ϕ_s arasında bir enerji farkı yoktur.

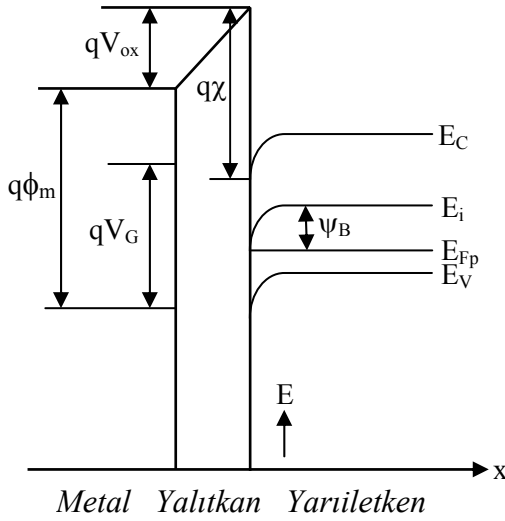
$$\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s = (\chi + E_g/2q - \psi_B) = 0 \quad n\text{-tipi için} \quad (2.1)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s = (\chi + E_g/2q + \psi_B) = 0 \quad p\text{-tipi için} \quad (2.2)$$

Burada E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve ψ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.

- Herhangi bir öngerilim altında yarıiletkendeki yükler ile metalin yalıtkana yakın yüzeyindeki yükler eşit ve ancak zıt yönlüdürler.
- D.C. öngerilim şartları altında yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur. Yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.
- Yalıtkan bant aralığı o kadar büyüktür ki, yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz.

Bu durumun enerji bant diyagramı Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapının enerji bant diyagramı (p-tipi yarıiletken için)

İdeal bir MYY yapıda, doğrultucu metal kontak üzerine bir gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha azdır ve bu yoğunluk uygulanan gerilime bağlıdır. Uygulanan gerilimle birlikte yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükleri (Q_{sc}) oluşur. Termal denge durumunda arayüzey

bölgesindeki Q_{sc} yoğunluğu potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılanma türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olarak adlandırılır. n-tipi bir yarıiletkende elektronlar çoğunluk, holler ise azınlık taşıyıcılarıdır, p-tipi yarıiletkenlerde ise durum bunun tam tersidir. Yarıiletkendeki bu taşıyıcılar metallerdeki gibi serbest olmadıklarından dolayı uygulanan gerilime bağlı olarak ya uzay yükü bölgesinde ya da arayüzey bölgesinde yük yığılmasına neden olurlar. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşer. Bu yüzden,

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

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim, ψ_s ise arayüzeydeki bant gerilimidir [21]. Sistemin sahip olduğu toplam yük, kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki denklemler ile bulunabilir.

$$Q_m = Q_n + qN_A W = Q_s \quad (2.4a)$$

$$Q_m + Q_{sc} = 0 \quad (2.4b)$$

Burada Q_n tersinim bölgesinde birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük, $qN_A W$ ise W genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş alıcı katkı atomlarının sayısıdır. Q_s yarıiletkendeki toplam yük, Q_m metal yüzeyindeki toplam yük ve Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür [23].

M/S arayüzeyindeki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Kondansatörlerin özelliklerini metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Oluşan kapasitans yalıtkan tabakanın dielektrik/geçirgenlik sabitine bağlıdır. Bir MYY yapının kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MYY yapının kapasitansı C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer

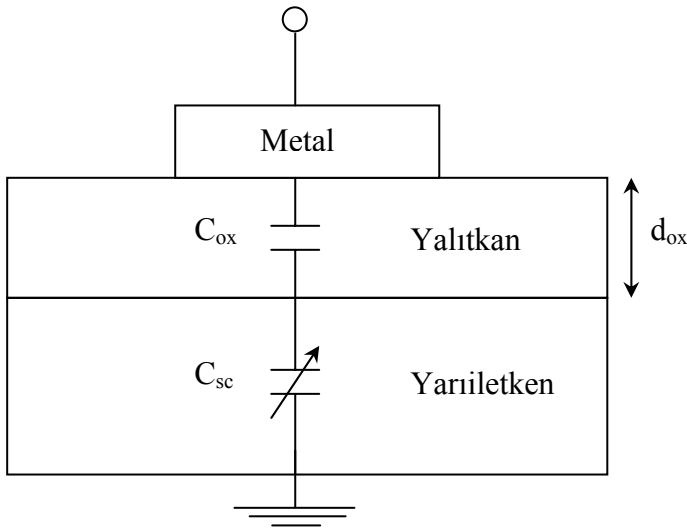
kapasitansları bize MYY kapasitansını verecektir. Uygulanan gerilimde çok küçük diferansiyel değişimlerin olduğunu varsayarak MYY, yalıtkan ve uzay yükü bölgesinin kapasitansları sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A_{ox} \quad (2.5a)$$

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \quad (2.5b)$$

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} A_{ox} \quad (2.5c)$$

Burada A_{ox} metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı, diğer bir ifadeyle MYY doğrultucu kontağın alanıdır.



Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapının eşdeğer kapasitans devresi

Şekil 2.4'den de görülebileceği gibi MYY yapının eşdeğer kapasitansı, yüzey yük kapasitansı C_{sc} ile yalıtkan/oksit kapasitansı C_{ox} 'in seri olarak bağlandığı durumu temsil eden aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilebilir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.6)$$

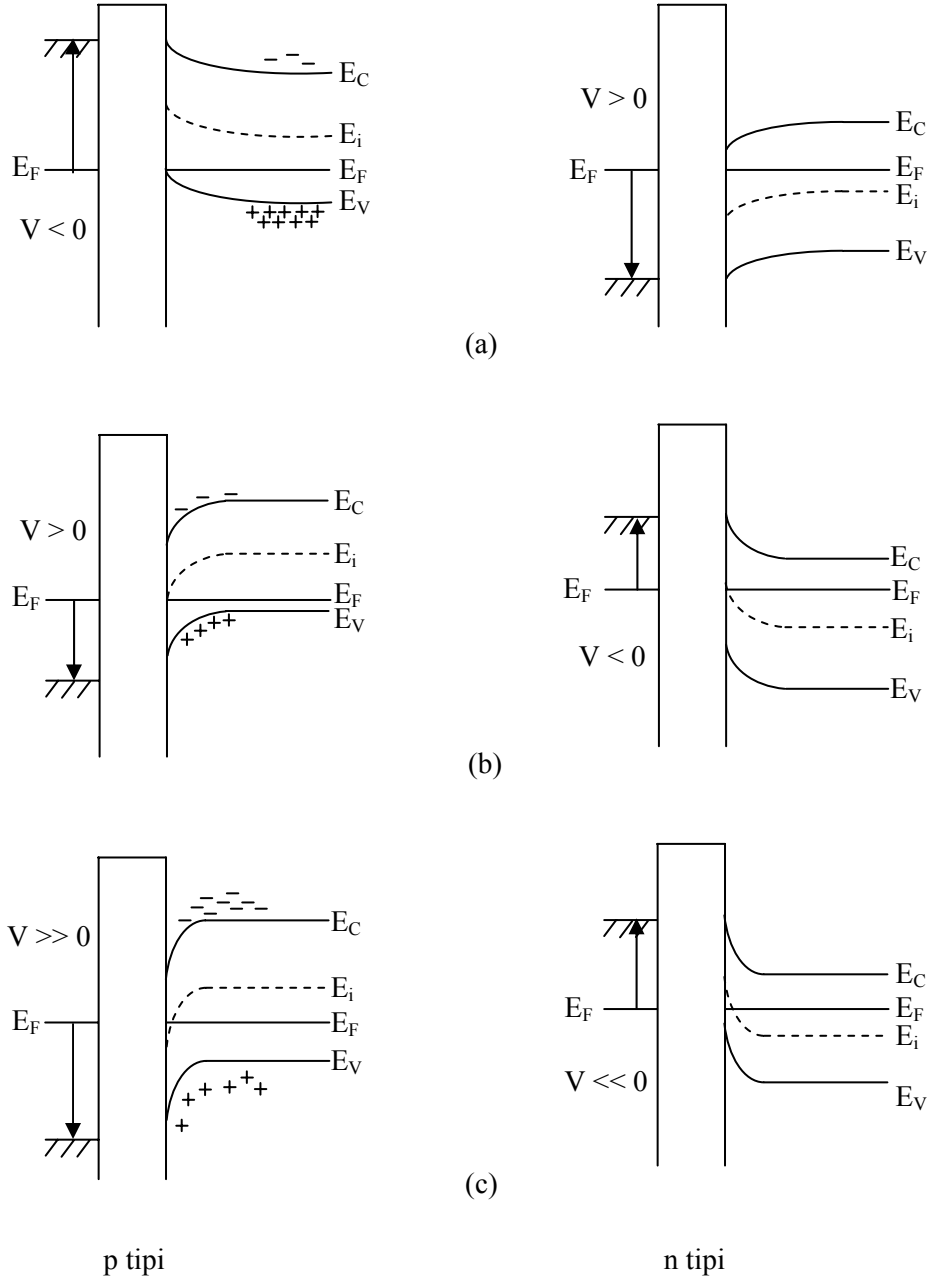
Burada yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox}

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir. Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik/geçirgenlik sabiti, d_{ox} ise onun kalınlığıdır. Bunlar uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox} de uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MYY yapının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MYY yapının enerji-bantında meydana gelen durumlar Şekil 2.5’de gösterilmiştir ve bu durumlardan p-tipi için olanı aşağıda açıklanmıştır [9,21,22].

Yığılım: P-tipi yarıiletkenli MYY yapılarda 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 2.5a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerjisi yarıiletkende sabit kalır.

Bunun nedeni $E_F - E_V$ enerji farkının üstel olarak taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olmasıdır. Dolayısıyla, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına neden olur. Valans bandı yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaşır, yasak enerji bant aralığı sabit olduğundan iletim bandı da yukarı doğru bükülür, bu duruma *yığılıma (accumulation)* durumu denir. Yığılıma durumunda arayüzeyde biriken yük yüzey yükü olduğundan dolayı uzay yük kapasitansı sonsuza gideceğinden ($C_{sc} \rightarrow \infty$) toplam kapasitans değeri de C_{ox} ’e gidecektir ($C \rightarrow C_{ox}$).



Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda a) Yığılım, b) Tükenim ve c) Tersinim bölgeleri için ideal MYY yapının enerji-bant şeması

Tükenim: P-tipi yarıiletkenli MYY yapılarda metale küçük bir pozitif gerilim ($V>0$) uygulandığında yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki deşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindeki deşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki deşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür (Şekil 2.5b).

İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen belirli bir genişlikteki bölgede deşiklerin azaldığı “tükenim bölgesi” olarak adlandırılan bölge oluşur. Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk yük taşıyıcısı deşikler arayüzey bölgesinde tükenirler. Dolayısıyla bu duruma *tükenim (depletion)* durumu denir. Uygulanan gerilim arttığında ise tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamak durumunda kalacağından dolayı genişler. Tükenim bölgesinin genişliği aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir,

$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.8)$$

Bu denklemde ε_s , A_{ox} ve C_{ox} sırasıyla yarıiletkenin dielektrik/geçirgenlik sabiti, doğrultucu kontağın alanı ve yalıtkan oksit kapasitansıdır. Tükenim durumunda uzay yükü yoğunluğu

$$Q_{sc} = q \cdot N_a^- \cdot W = Q_a \quad (2.9)$$

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

Bu bölgede MYY 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 durum C-V

eğrisinin C_{\min} 'un altına düşmesine sebep olur. Bu dengesiz bir durumdur ve *derin tükenim* olarak tanımlanır.

Tersinim: P-tipi yarıiletkenli MYY yapılarda metale büyük bir pozitif gerilim ($V \gg 0$) uygulandığı zaman bandlar aşağı doğru oldukça fazla bükülür öyle ki saf durumdaki enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesi E_F 'nin altına düşer (Şekil 2.5c). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcı 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.

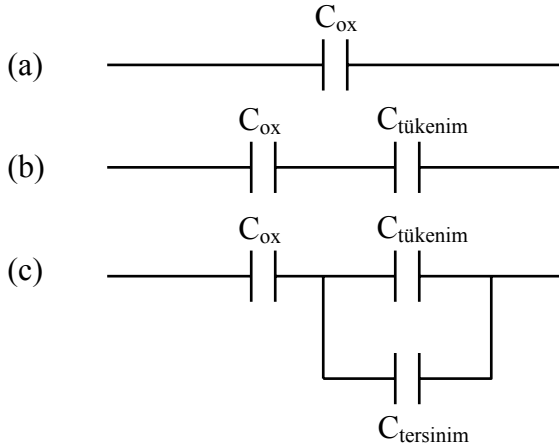
Bu durumda oluşan uzay yükü,

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü, Q_a ise birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Bu bölgede MYY kapasitansını, elektron yoğunluğunun, uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Yapılan çalışmalarda uygulanan a.c. gerilimin düşük frekansa sahip olması durumunda MYY yapının kapasitansına ek bir kapasitans değerinin dahil olduğu saptanmış ve bu durum arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilmiştir ki; bu durumu ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak incelenecek.

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 MYY yapıda yığılım, tükenim ve tersinim durumları için devre şeması Şekil 2.6'daki gibidir [9].

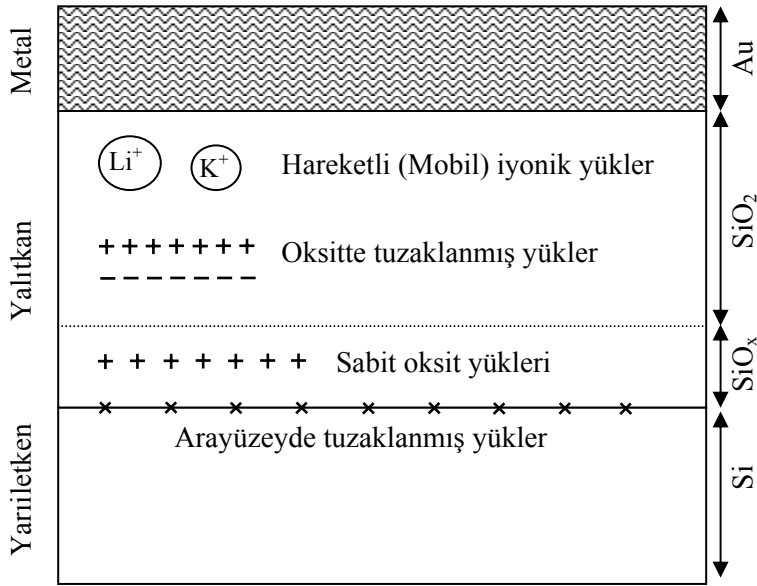


Şekil 2.6. İdeal bir MYY yapının a) Yığılım, b) Tükenim ve c) Tersinim bölgelerine karşılık gelen devre şeması

2.1.2. Gerçek MYY yapısı

MYY yapıdaki ideal bir yalıtkanın içerisinde ya da yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir hareketli yük bulunmaz. Ancak 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 MYY yapının ideal özelliklerinden sapmasına neden olur [24].

Gerçek bir MYY yapısında birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Bunlar sırayla yalıtkan içindeki hareketli iyonlar, numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşan iyonize tuzaklar, yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumlarıdır ve Şekil 2.7'de gösterilmiştir [9].



Şekil 2.7. İdeal olmayan MYY yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Hareketli İyonlar

Hareketli iyonlar (yükler) bir MYY yapıda ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Bu iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ gibi iyonlarıdır [25]. Hareketli iyonların yapıdaki hareketsiz yüklerden ayrımı belsem sıcaklığı ile yapılabilir. Yapıda hareketli iyonların ortaya çıkması bir takım etkenlere bağlanabilir ki; bunlardan önemli olanları kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içinde bulundurması, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını kuartz tutucularının kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar olarak sıralandırılabilir. Düşük sıcaklıklarda bu iyonların oksit içindeki hareketlilikleri artacağından iyonların sürüklenmesi gözlenebilir. Bu yükler uygulanan elektrik alanında altında hareket ettiklerinden MYY yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

İyonlaşmış Tuzaklar

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan içinde bulunurlar ve yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece 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 *hysteresis* etkisi gözlenir. Kapasitans-gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla hysteresis yük yoğunluğu:

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (2.11)$$

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 [26]. Bu yüklerin başlıca özelliği, yalıtkan-yarıiletken yapısına uygulanan gerilimden yük durumlarının bağımsız olmasıdır. Yarıiletken ile bu yük merkezleri arasında yük alışverişi olmaz. Aynı

zamanda, yalıtkan oksidin büyüme hızı, oksitleyen gaz ve sıcaklık gibi bir takım büyüme koşulları yük yoğunluğuna etki eder [27].

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

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (2.12)$$

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} ;

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

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

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.13c)$$

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 ya da yalıtkan içindeki hareketli yükler neden olabilir [28].

Arayüzey durumları

Shockley, Taam ve diğer bilim adamları tarafından teoriksel olarak araştırılan arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleri olarak tanımlanır. 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 MYY kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MYY 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 pikedir. 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 [27].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.14)$$

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 gözükür.

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

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.15)$$

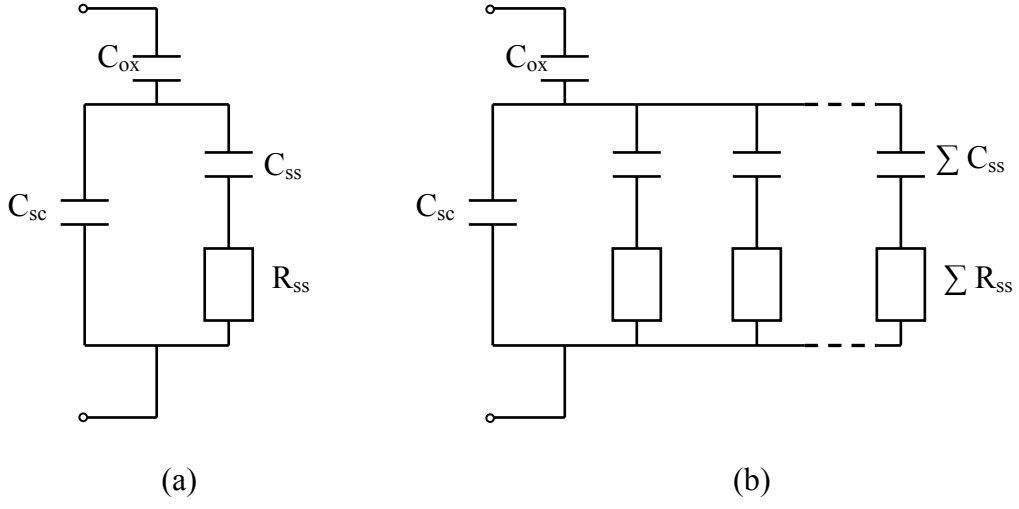
ile verilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır. Burada E enerji olup $E = q.\psi_s$ ile verilir. E' nin diferansiyeli alınırsa $dE = q.d\psi_s$ elde edilir. Bunu Eş. 2.15'de yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez [11].

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 bağıl 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 2.8'de verildiği gibidir.



Şekil 2.8. MYY yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Au/SiO₂/n-Si (MYY) Yapıların Hazırlanması

3.1.1 Kristal temizleme

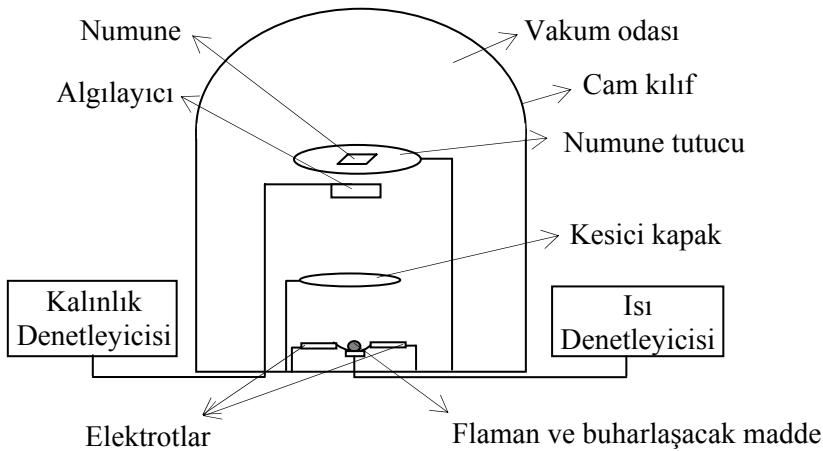
İdeale yakın bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) tipi Schottky diyotu hazırlayabilmek için yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. Böylece iyi temizlenmiş olan bir yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusuru ortadan kaldırabilir. Kullanılan kristaller, yurt dışından CrysTec firmasından 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, 8 Ω.cm öz dirençli, 350 µm kalınlıklı, 2 inç çapında P katkılı (n-tipi) Si tek kristal yapraklar kullanıldı. Bu n-tipi Si yapraklar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya (çeyrek yaprak) bölündü. Bu çalışmada yarıiletken kristallerin temizlenmesinde aşağıda verilen işlemler takip edildi.

- 1) Temizleme işleminde, RO&UP Water Purification System' de hazırlanan yüksek dirençli (18 MΩ) de-iyonize su kullanıldı. Öncelikle temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız v.b. araç ve kaplar asetonla iyice yıkandı ve de-iyonize su ile durulandıktan sonra etüv fırınında yaklaşık 80 °C ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra yarıiletken kristaller önce aseton ve de-iyonize su karışımında (1:5 ölçeğinde) ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika kadar yıkandıktan sonra deiyonize su (H₂O) ile durulandı.
- 2) Kristal trikloretilen (C₂HCl₃) + aseton (CH₃COCH₃) + metil alkol (CH₃OH) içinde üç dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından de-iyonize 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 de-iyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 4) Eşit oranlardaki %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve de-iyonize su karışımı içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından de-iyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle yıkandı.
- 5) 3:1:5 hacim oranında nitrik asit (HNO_3), hidroflorik asit (HF) ve de-iyonize su karışımında 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlenip de-iyonize su ile yıkandı.
- 6) 4:3 hacim oranında %38'lik hidroflorik asit (HF) ve de-iyonize su karışımında 3 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 7) Si yapraklar de-iyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle durulandı.
- 8) Son olarak kimyasal olarak temizlenmiş n-tipi silisyum kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kurutma işlemi kuru azot (N_2) ile yapıldı.

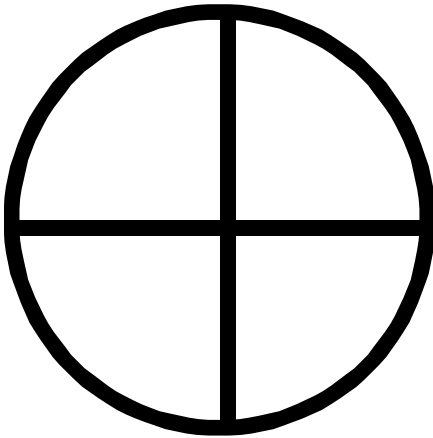
3.1.2. Omik kontağın oluşturulması

Au/SiO₂/n-Si yapılar veya diğer adıyla MYY tipi Schottky diyotlar hazırlanırken omik ve doğrultucu kontağın oluşturulması için yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında, Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen vakumda buharlaştırma sistemi kullanıldı.



Şekil 3.1. 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 (N₂) gazı ile kurulandı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirilerek hemen vakum ortamına alındı. Fanus hemen kapatılarak vakum 10⁻⁶ Torr değerine kadar dūřürüldü. Omik kontaklar için şekil 3.2’de gösterilen 50 mm çaplı ve yaklaşık 500 μm kalınlıklı bakır maske kullanıldı. Vakum 10⁻⁶ Torr’a ulaştığında, flaman üzerinden akım geçirilerek (35A) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş alüminyum (Au) tel buharlaştırıldı. Buharlaşmanın başlamasından kısa bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa çekilerek, silisyumun mat yüzeyine 1500 Å kalınlığında Au kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine çökmesini önlemektir. Omik kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan Au, vakum ortamında 650 °C’de tavlanarak Au’nun Silisyum içerisine çöktürülmesi sağlandı.

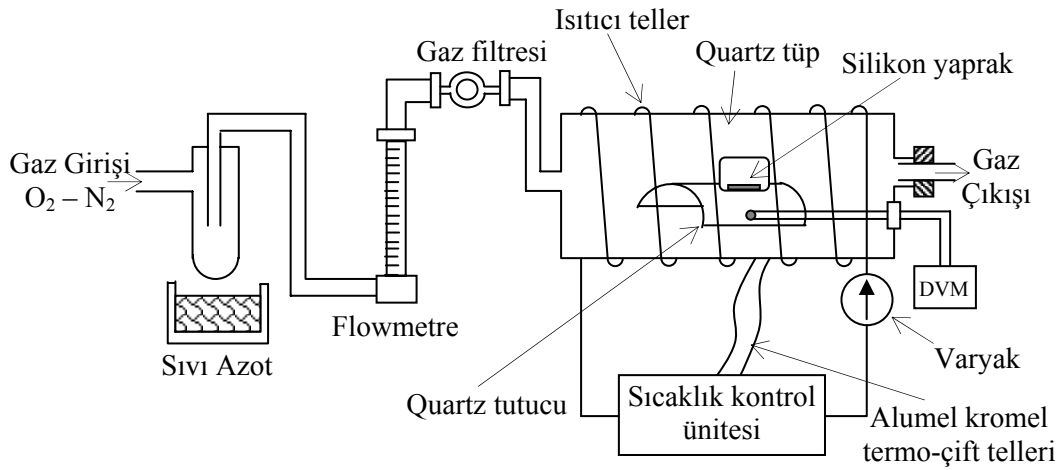


şekil 3.2. Omik kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske

3.1.3. Yalıtkan silisyum dioksit (SiO₂) tabakanın oluşturulması

Yarıiletken yüzeyine bir yalıtkan veya oksit tabakası büyütmenin birçok yöntemi vardır. Bunlardan özellikle SiO₂ daha yaygın olarak kullanılmasının sebebi; Silisyum üzerine daha kolay ve homojen büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem

oluşturmasıdır. Bu nedenle bu çalışmada yalıtkan tabaka, silisyum üzerine Şekil 3.3’de verilen termal büyütme yöntemi kullanılmıştır. 700 °C’deki oksidasyon fırınına konulan Si kristali ortamdan oksijen (O_2) gazının 1.5 l/dk hızında 2 saat süreyle geçirilmesiyle $Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ reaksiyonu sonucunda 79 Å kalınlığında yalıtkan SiO_2 tabakası oluşturuldu. Kimyasal reaksiyonu sonucu büyütülen d_{ox} kalınlığındaki SiO_2 yalıtkan tabakasının % 45 kadarı silisyum yüzeyinden içeri, kalanı da dışarı doğru büyür [9].



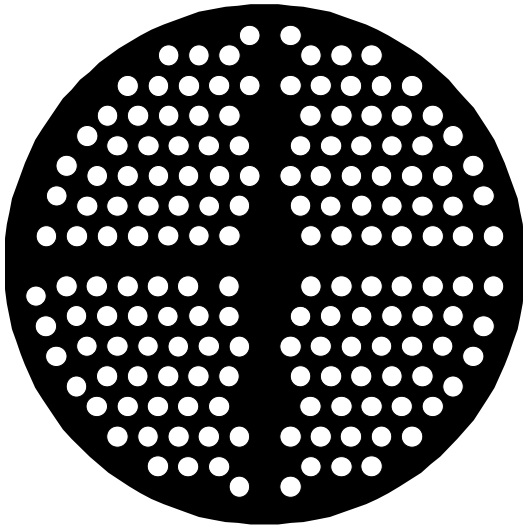
Şekil 3.3. Yalıtkan/oksit tabakanın büyütülmesinde kullanılan oksidasyon fırını

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi kuartz tüp, direnç telinden geçen akım vasıtasıyla ısıtıldı ve ortamın sıcaklığı, ELİMKO 6000 kontrol ünitesi ile kontrol edildi. Ayrıca kuartz tüpün içindeki yarıiletken kristallerin olduğu bölgeye yerleştirilen kromel-alümel termo-çifti ile sıcaklık ayrıca kontrol edildi. Oksitleme için gerekli gaz akış hızı bir flowmetre ile kontrol edildi. Oksitleme işleminde kullanılan gazlar, nemin alınması için Şekil 3.3’de gösterildiği gibi, gazlar bir filtreden geçirilip ve filtrenin altına yerleştirilen bir sıvı azot kabı yardımıyla atık kirlerin çöktürülmesi sağlandıktan sonra oksidasyon fırınına gönderildi. Ayrıca oksidasyon fırını 700 °C’ye ayarlanarak ve numunenin bulunduğu ortamdan 1.5 l/dk hızında nitrojen (O_2) gazı geçirilerek 79 Å kalınlığında yalıtkan SiO_2 tabakası oluşturuldu. Bu yalıtkan tabakanın kalınlığı 1MHz’de HP 4192A empedans metre yardımıyla elde edilen C-V ölçümündeki kuvvetli yığılım bölgesinden ($C \cong C_{ox} = \epsilon\epsilon_0 A/d_{ox}$) hesaplandı.

3.1.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

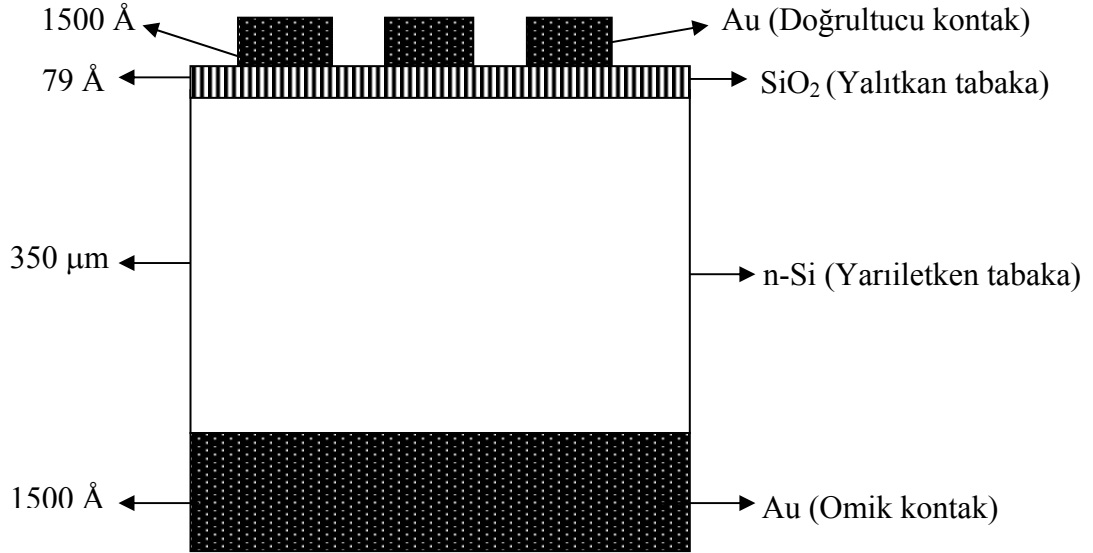
Üzerine SiO₂ kaplanmış n-Si kristali, Şekil 3.4’de verilen bakır maske üzerine parlak yüzeyi aşağı gelecek şekilde yerleştirildikten sonra flaman üzerine yerleştirilen kimyasal olarak temizlenmiş 1 mm çapında ve 1 cm uzunluğunda Au tel 10⁻⁶ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine 1mm çaplı ve 1500 Å kalınlığında Au doğrultucu kontaklar yine vakum sisteminde oluşturuldu. Böylece yaklaşık 40 adet Au/SiO₂/n-Si (MYY) yapıların fabrikasyon işlemi tamamlanmış oldu.

Oluşturulan bu MY Y yapılar, kriyostat içindeki bakır tutucuya göre hazırlanan özel bir bakır tutucu üzerine iletken gümüş pastası yardımı ile yapıştırılıp üzerine gümüş kaplı iletken bakır teller yardımıyla elektriksel kontaklar oluşturuldu. Elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek için hazırlanan bakır tutucu üzerine yerleştirilmiş MY Y yapılar kriyostat içindeki tutucu üzerine monte edilerek kriyostat vakuma alındı (10⁻³ Torr).



Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske

Hazırlanan Au/SiO₂/n-Si (MY) yapıların şematik bir gösterimi Şekil 3.5’ de verilmiştir.

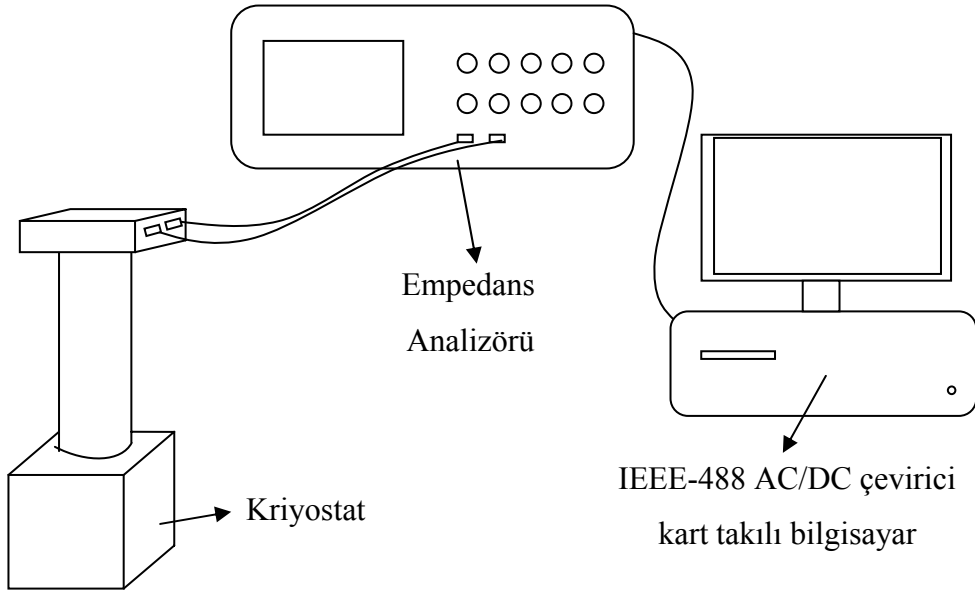


Şekil 3.5. Au/SiO₂/p-Si (MY) yapının şematik gösterimi

3.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Elektriksel karakteristiklerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Starlab Yarıiletken Laboratuvarı’nda yapıldı. C-V ve G/ω-V ölçümlerinde Hawlett Packard 4192 A LF Empedans Analizmetre (5 Hz–13 MHz) kullanıldı.

Tüm bu ölçümler Hawlett Packard bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek Janes vpf-475 kriyostat içinde 10⁻³ Torr’da gerçekleştirildi. Sıcaklık kontrolü ise bir Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemiyle kontrol edildi. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



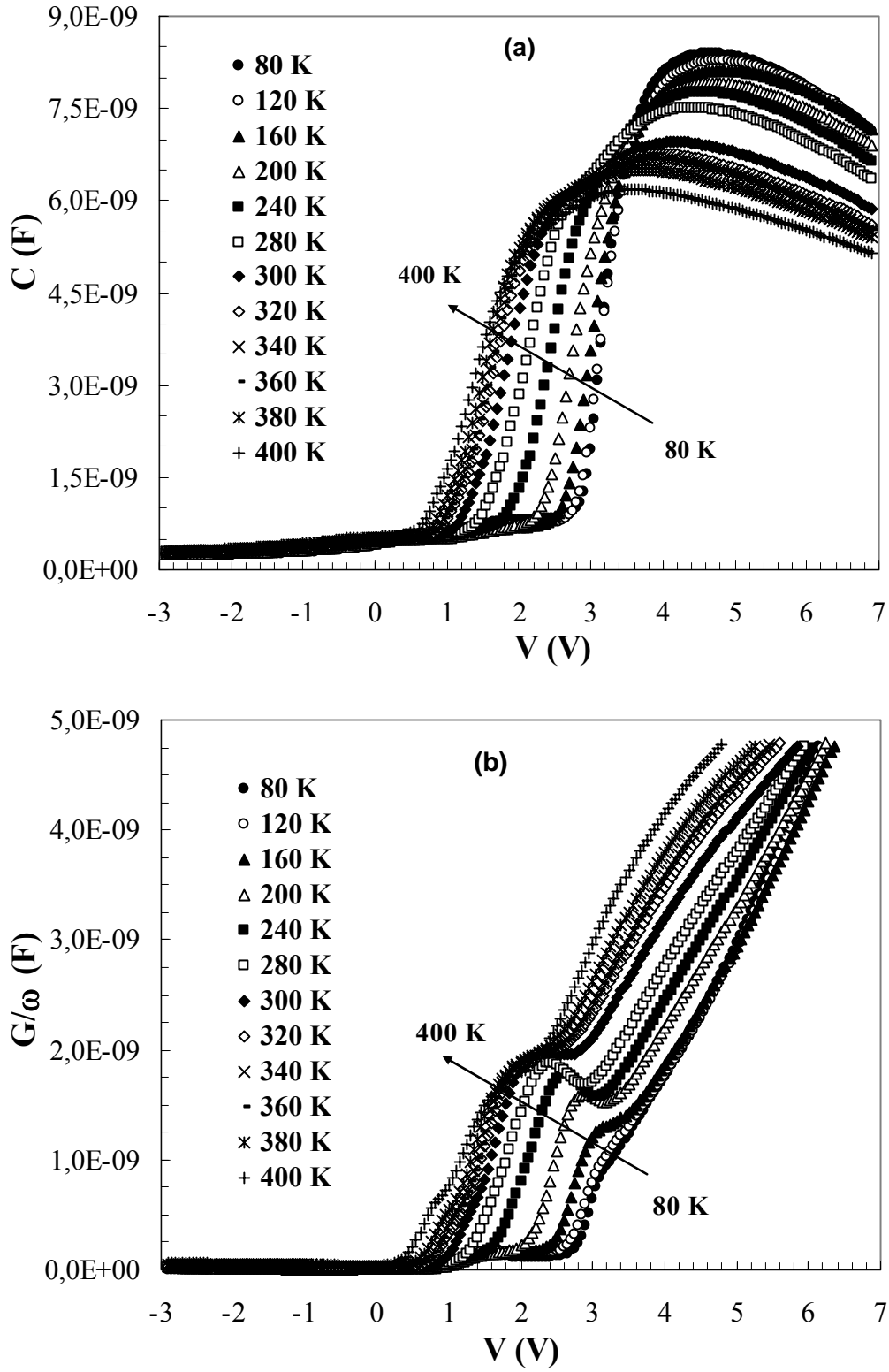
Şekil 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Hazırlanan Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Au/SiO₂/n-Si yapıların bazı temel fiziksel özelliklerini geniş bir sıcaklık aralığında araştırmak için; kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri 80-400 K sıcaklık aralığında 1 MHz'de gerçekleştirildi. Au/SiO₂/n-Si (MY) yapıların C-V ve G/ω-V ölçümleri hem negatif hem de pozitif gerilimde geniş bir aralıkta (-3V ile +7V) ölçüldü. Böylece, C-V ve G/ω-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar elde edildi. Deneysel C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları kullanılarak MY yapının seri direnç (R_s) ve a.c. iletkenlik (σ_{ac}) gibi bazı temel elektriksel parametreleri hesaplandı. Elektriksel özelliklerden katkı konsantrasyonu (N_D), Fermi enerjisi (E_F), tükenim tabakası genişliği (W_D), arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) ve engel yüksekliği (Φ_{CV}) gibi temel elektriksel parametreler ise aynı aralıktaki C²-V eğrilerinden yararlanarak sıcaklığa bağlı olarak hesaplandı. C-V ve G/ω-V ölçümleri Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre (5 Hz-13 MHz) ve bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kumanda edilerek gerçekleştirildi. Sıcaklık ölçümlerinde ise, Janes vpf-475 kriyostat içinde yaklaşık 10⁻³ Torr basınç altında bir Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirildi.

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

Ölçümleri alınan Au/SiO₂/n-Si yapının kapasitans ve iletkenlik eğrileri Şekil 4.1 (a) ve (b)'de verildi. Şekil 4.1 (a) ve (b)'den de görülebileceği gibi -3V ile 7V öngerilim voltajı aralığındaki hem C-V hem de G/ω-V eğrileri yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinin üçünü de sergiledi. Şekillerden görülebileceği gibi kapasitans ve iletkenlik değerlerinde artan sıcaklıkla birlikte tükenim bölgesinde bir artış gözlenmektedir. C-V eğrileri seri direncin (R_s) etkisinden dolayı tüm sıcaklık değerleri için yığılım bölgesinde anormal pikler vermektedir. Benzer şekilde, G/ω-V eğrileri de 160-320 K aralığında tükenim bölgesinde pikler vermektedir.

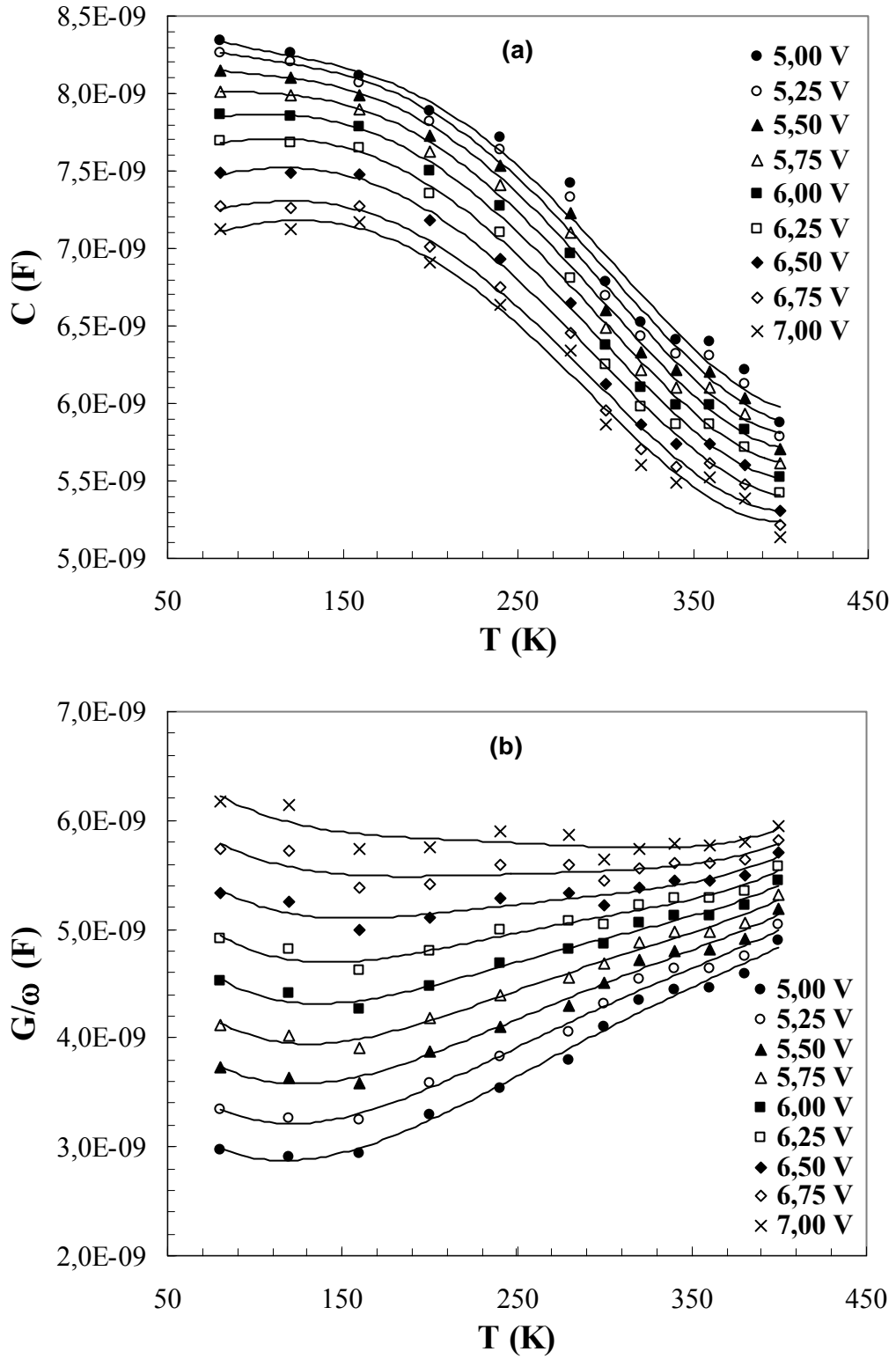


Şekil 4.1. MYY yapının sıcaklığa bağlı 1 MHz'deki (a) Kapasitans-Voltaj (C-V) ve (b) İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) eğrileri

C-V eğrilerindeki diğer bir önemli özellik ise belirli bir öngerilim voltajı değerinde gözlemlenen kesişmedir. Bu kesişme voltajından önceki kapasitans değerleri artan sıcaklıkla artarken, kesişme voltajından sonraki kapasitans değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte azaldığı görülmektedir.

Öngerilim voltajının yapı üzerindeki etkisini açıklayabilmek için, yığılım bölgesindeki (kesişme noktasından sonraki) C ve G değerleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak 0,25 V aralıklı olarak Şekil 4.2 (a) ve (b)'de verilmiştir. Şekillerden görülebileceği gibi, tüm öngerilim voltajındaki kapasitans değerleri artan sıcaklıkla birlikte azalırken, iletkenlik değerlerinde artan sıcaklıkla birlikte bir artış gözlemlendi. Ancak, kapasitans ve iletkenlikteki değişim düşük sıcaklıklarda belirgin bir şekilde daha fazladır. Bunun nedeni, tuzak yüklerinin Si bant aralığındaki M/Y arayüzeyinde lokalize olmuş tuzaklardan kaçmaya yetecek miktarda enerjiye sıcaklığın etkisiyle birlikte sahip olabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, bu durum artan sıcaklıkla birlikte seri dirençteki azalmaya atfedilebilir. R_s 'nin kapasitans ve iletkenlik üzerindeki etkisinin yüksek sıcaklıkta ve yığılım bölgesinde daha belirgin olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, ölçülen C ve G değerleri seri direncin etkisini minimize edebilmek için düzeltildi.

Bir MYY yapının seri direnç değerini elde edebilmek için literatürde birçok metot önerilmiştir [26,29-32]. Ancak bunlardan birçoğu oksit ya da arayüzeyel yalıtkan tabakalı cihazlar üzerinde pratik olarak uygulanması açısından sınırlı düzeyde kalmaktadır. Pratiklik ve uygulama kolaylığı nedeniyle, bu çalışmadaki hesaplamalarda R_i değerlerini elde ederken Nicollian ve Goetzberger [26] tarafından sunulan admittans metodu kullanılmıştır. Bu metoda göre, bir MYY veya MOY yapının gerçek R_s değeri kuvvetli yığılım bölgesindeki yeterli seviyedeki yüksek frekans değerlerinde ($f \geq 1$ MHz) ölçülen kapasitans (C_{ma}) ve iletkenlik (G_{ma}) değerlerinden yararlanarak bulunabilir [26].



Şekil 4.2. MYY yapının öngerilim voltajına bağlı 1 MHz'deki (a) Kapasitans-Sıcaklık (C-T) ve (b) İletkenlik-Sıcaklık (G/ω-T) eğrileri

Yapının öngerilim voltajına bağlı direnç (R_i) değerleri deneysel C ve G ölçüm verileriyle aşağıdaki denklemi kullanarak elde edildi,

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

Burada C_m ve G_m herhangi bir öngerilim voltajı değerinde ölçülen C ve G'yi temsil etmektedir. Böylece Eş. 4.1 ile voltaja bağlı direnç değerleri her sıcaklık için elde edildi. Ancak ileri pozitif voltajlar için ölçülen bu direnç değerleri yapının seri direncine (R_s) karşılık gelmektedir. R_s değerleri bulunduğundan sonra, arayüzeysel yalıtkan/oksit tabakanın kapasitansı C_{ox} 1 MHz'deki kuvvetli yığılım bölgesi için aşağıdaki denkleme seri direnç değerlerini yerleştirerek elde edilebilir.

$$C_{ma} = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{ox}^2)} \quad (4.2)$$

Bu denklemde C_{ox} aynı zamanda

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (4.3)$$

olarak bulunabilir ki; burada $\epsilon_i=3,8\epsilon_0$ [9,26] ve $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm sırasıyla arayüzeysel yalıtkan/oksit tabakanın ve boşluğun dielektrik/geçirgenlik sabitidir. Bu denklem kullanılarak yalıtkan/oksit tabaka kalınlığı d_{ox} yüksek frekanstaki ($f = 1$ MHz) C-V eğrilerinden 79 Å olarak bulundu.

Son olarak, düzeltilmiş admittansın ($Y_c = G_c + j\omega C_c$) imajiner ve reel kısımlarının karşılaştırarak, düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik değerleri (G_c)

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

ve

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

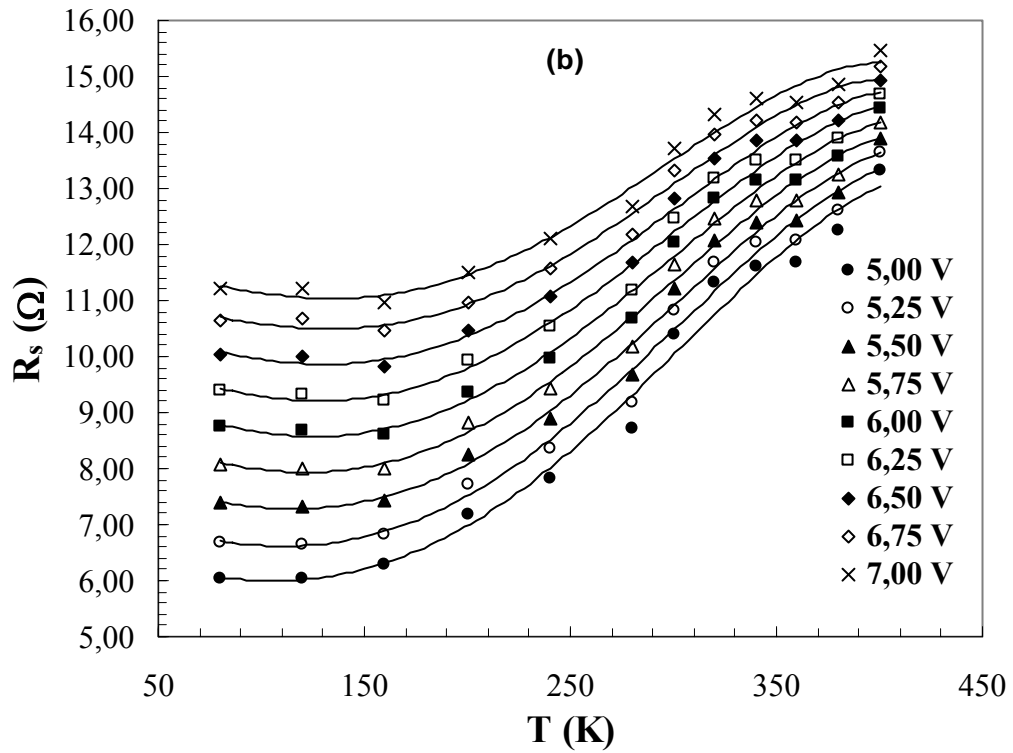
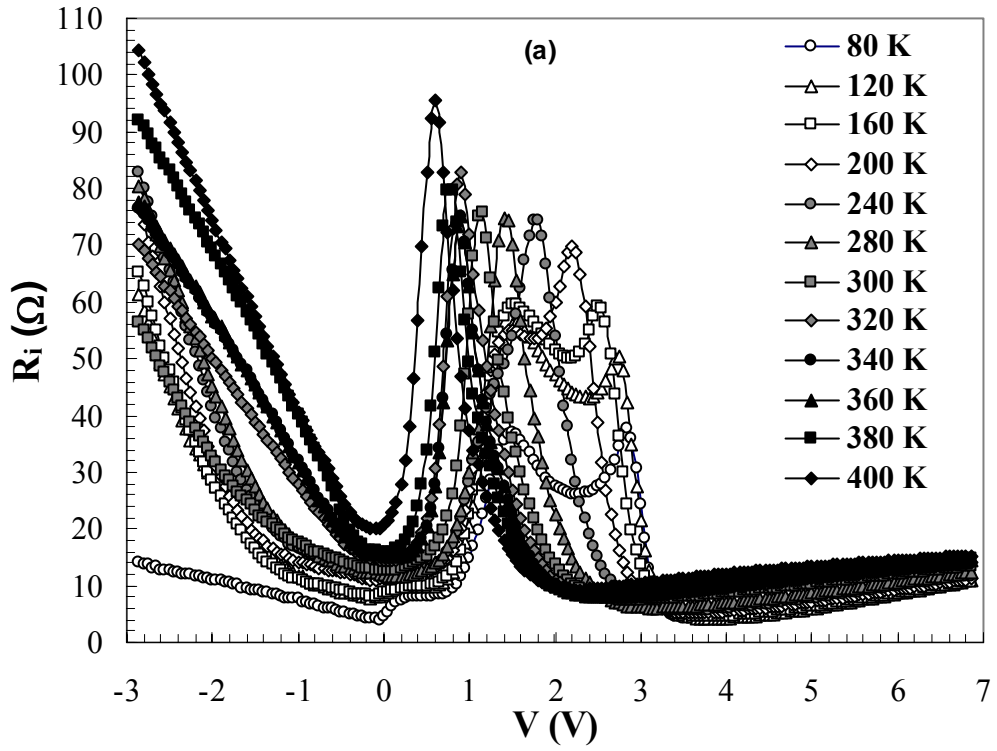
olarak bulunur. Burada a,

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

eşitliği ile elde edilir.

MYT yapının öngerilim voltajına bağlı R_i değerleri Şekil 4.1 (a) ve (b)'deki verilerin Eş. 4.1 hesaplamalarda kullanılmasıyla elde edildi ve değişik sıcaklıklar (80-400 K) için elde edilen direnç değerleri R_i -V eğrisi üzerinde Şekil 4.3 (a)'da verildi. Aynı zamanda yığılım bölgesine ait 0,25 V aralıklı çeşitli öngerilim voltajlarına ait sıcaklığa bağlı R_s değerleri de Şekil 4.3 (b)'de gösterilmiştir.

Buradan görülüyor ki; admittans ölçüm metotlarının (C-V ve G/ ω -V) yürütüldüğü uygulamalarda R_s etkisine özellikle dikkat edilmelidir. Şekil 4.3 (a)'da görüldüğü gibi R_i -V eğrileri düşük sıcaklıklarda iki adet pik göstermektedirler. Sıcaklığın artmasıyla birlikte bu piklerden ikincisi azalma eğilimine girer ve yüksek sıcaklıklarda R_i -V eğrilerinde yalnızca tek bir pik gözlemlenmektedir.

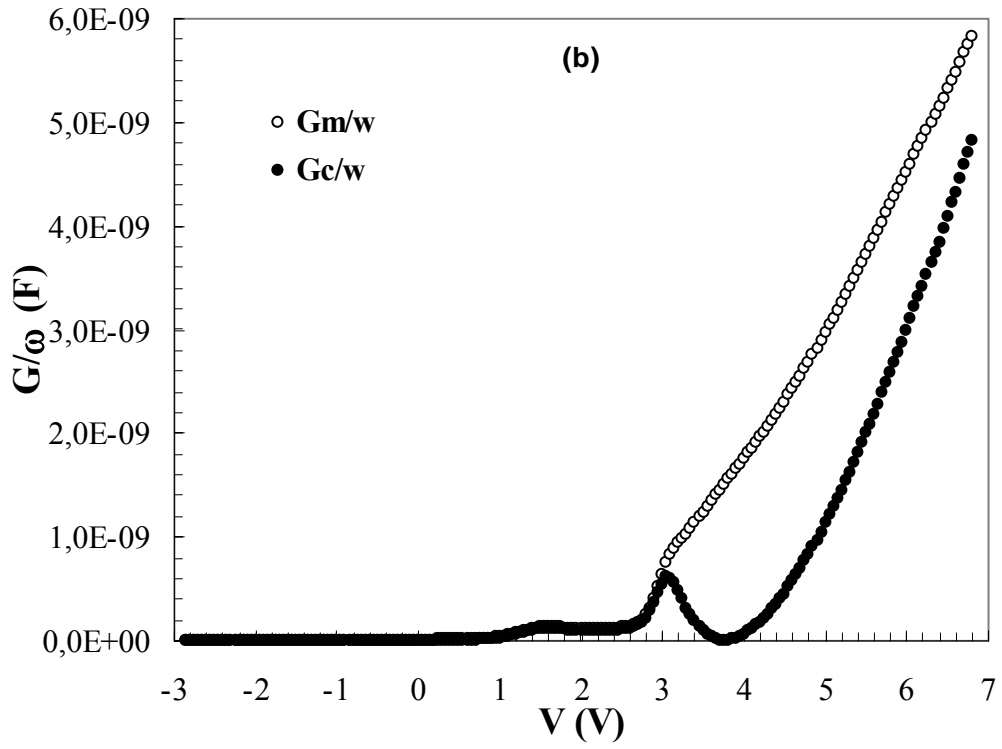
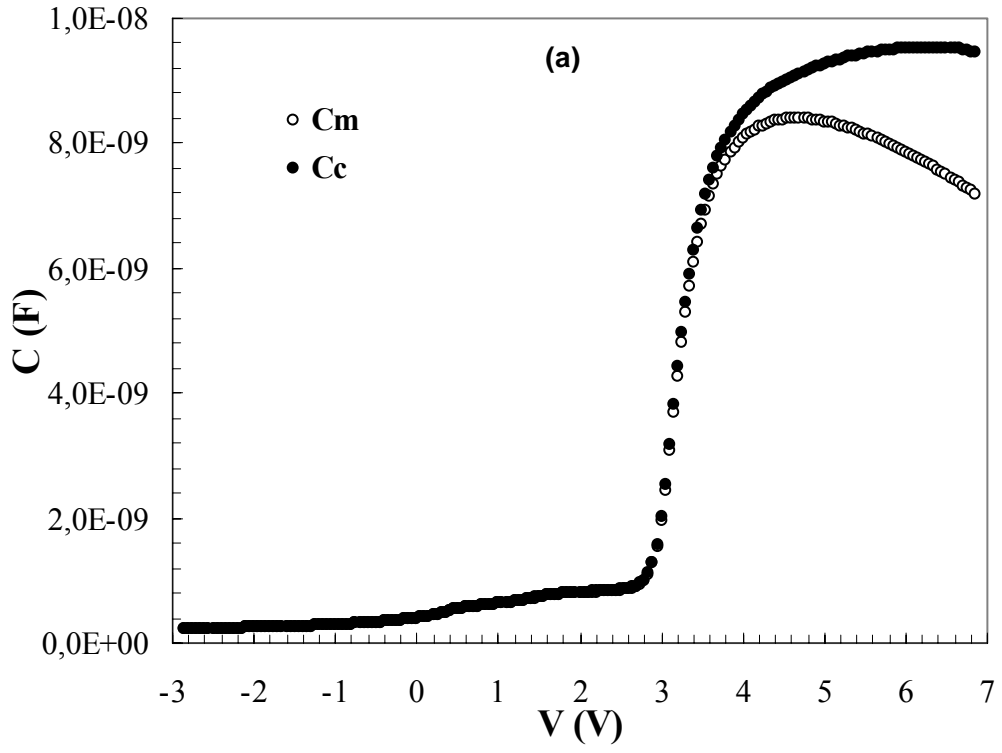


Şekil 4.3. MYY yapının 1 MHz'deki (a) sıcaklığa bağlı Direnç-Voltaj (R_i -V) ve (b) öngerilim voltajına bağlı Seri direnç-Voltaj (R_s -V) eğrileri

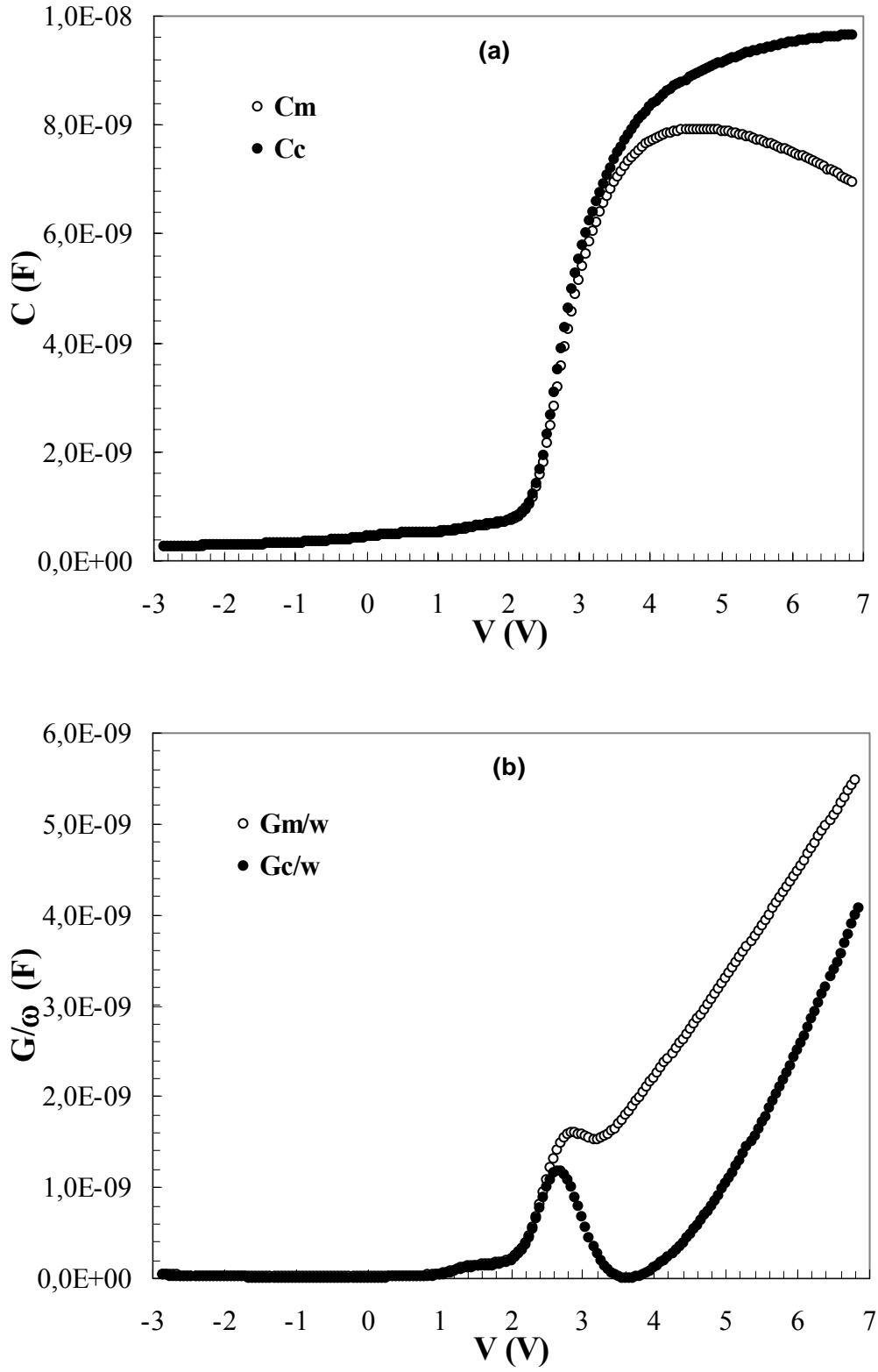
Ayrıca, R_i-V eğrilerine bakıldığında ilk pikin artan sıcaklıkla birlikte şiddetini arttırdığı ve yine artan sıcaklıkla birlikte kuvvetli yığılım bölgesine doğru hareket ettiği görülmektedir. R_i-V eğrilerindeki değişim tükenim ve yığılım bölgelerinde daha belirgindir, fakat yüksek yığılım bölgesine bakıldığında değişimin sıcaklığa çok da bağlılık gösterdiği söylenemez. Tükenim bölgesi göz önüne alındığında R_i ile birlikte C ve G'deki değişim Si/SiO₂ arayüzeyindeki arayüzey durumlarının özel yoğunluk dağılımına ve tuzaklanmış yüklerin Si bant boşluğundaki metal ile yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş tuzaklardan kaçmaya yetecek kadar enerjiye sahip olmalarına atfedilebilir. Sıcaklıkla birlikte meydana gelen R_s 'deki bu değişim taşıyıcı yüklerin donma davranışının olmadığı sıcaklık aralığındaki yarıiletkenler için beklenen bir durumdur. Sonuç olarak Şekil 4.3 (a) ve (b)'den açıkça görülüyor ki; R_s değerleri hem sıcaklık hem de öngerilim voltajındaki değişimlere bölgeden bölgeye bağlılık göstermektedirler. R_s ile C ve G'deki bu davranışın diğer bir nedeni de sıcaklık etkisi altında yüzey atomlarının yeniden yapılanma ve sıralanması olabilir [33].

MYY yapının gerçek kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/ω) değerlerini elde etmek için, 1 MHz'de ileri ve ters öngerilim için ölçülen C ve G değerleri R_s etkisini minimize etmek amacıyla Eş. 4.4, 4.5 ve 4.6 kullanılarak dört farklı sıcaklık değeri için (80, 200, 300, 400 K) düzeltildi ve düzeltilen bu veriler Şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7'de (a) ve (b) olarak sırasıyla verildi. Düzeltme işlemi yapıldıktan sonra görüldü ki; C_c-V eğrilerindeki düzeltilmiş değerler artan öngerilim voltajıyla birlikte artış gösteriyorlar ve ölçülen C-V eğrileriyle kıyaslandığında onlardan farklı olarak özellik kuvvetli yığılım bölgesinde C_c-V eğrilerinin C-V eğrilerinden farklı davrandığı gözlemlendi. C-V eğrileri kuvvetli yığılım bölgesinde kesişme noktasından itibaren artan öngerilim voltajıyla azalırken, C_c-V eğrileri artan öngerilim voltajıyla birlikte artmaya devam etmişlerdir.

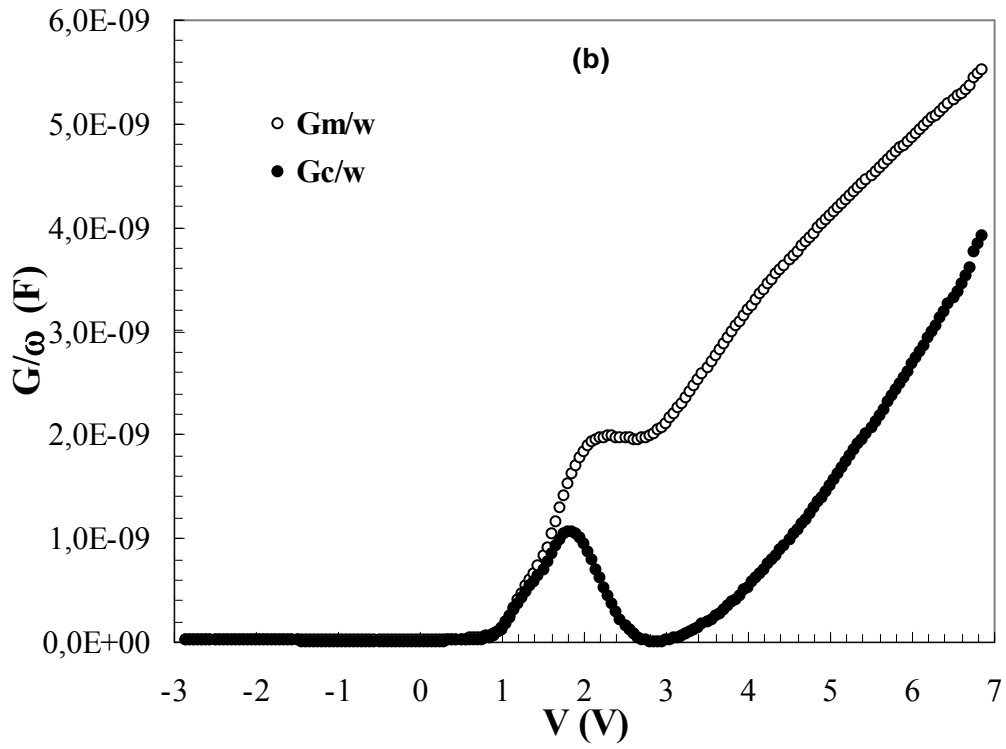
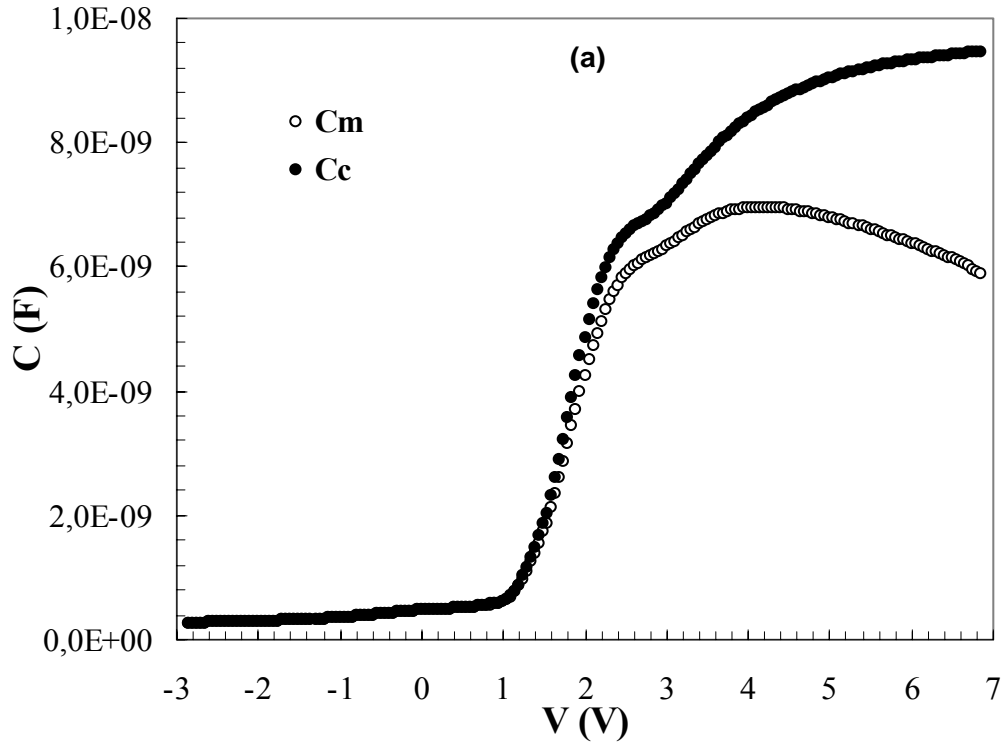
Diğer yandan, düzeltme işleminden sonra elde edilen $G_c/\omega-V$ eğrilerinin pik davranışı gösterdiği görüldü ki; bu durum bize yük transferinin arayüzey boyunca gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.



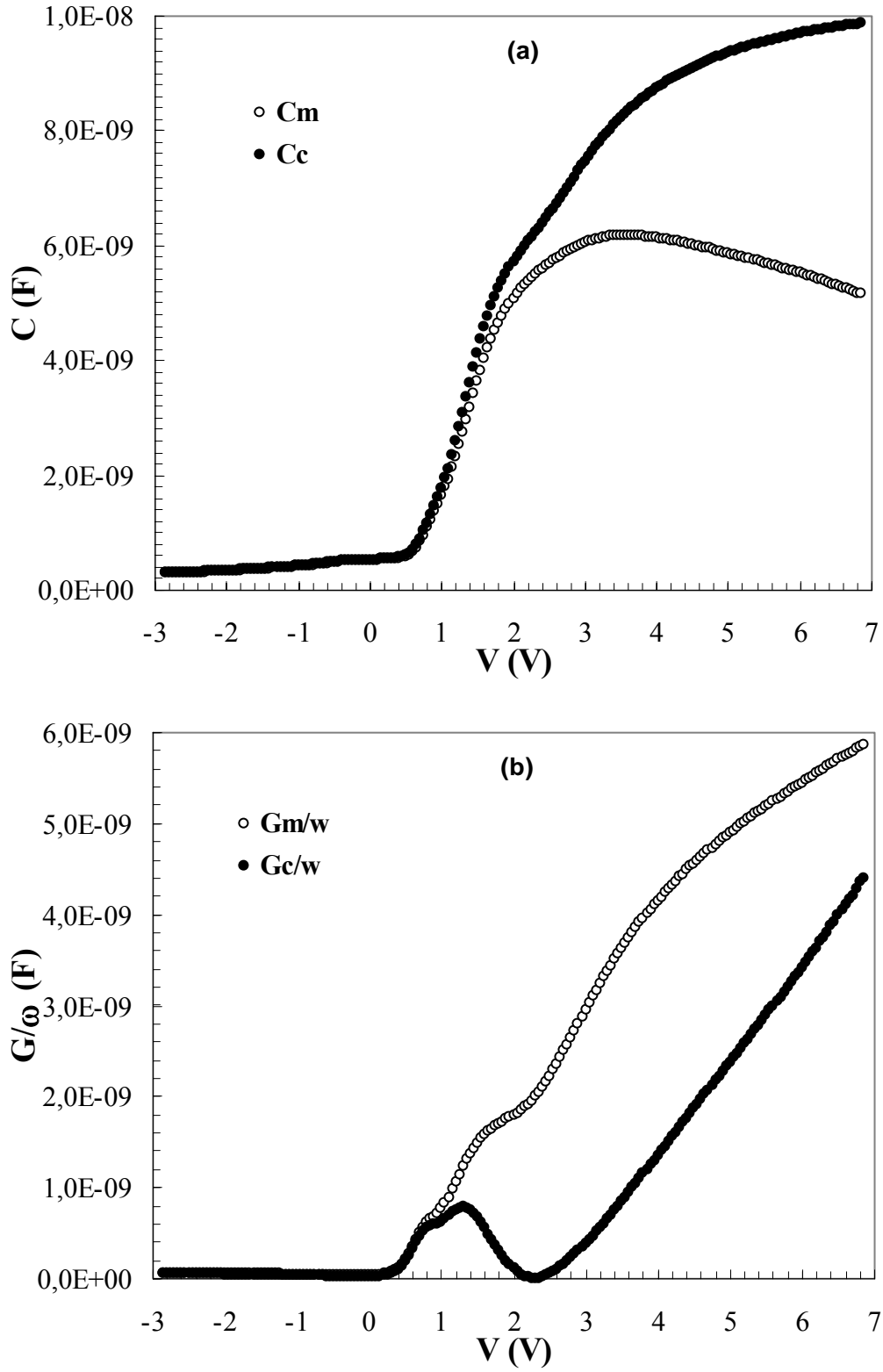
Şekil 4.4. MYY yapının 80 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω–V) eğrileri



Şekil 4.5. MYY yapının 200 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans-Voltaj (C - V) ve (b) İletkenlik-Voltaj (G/ω - V) eğrileri



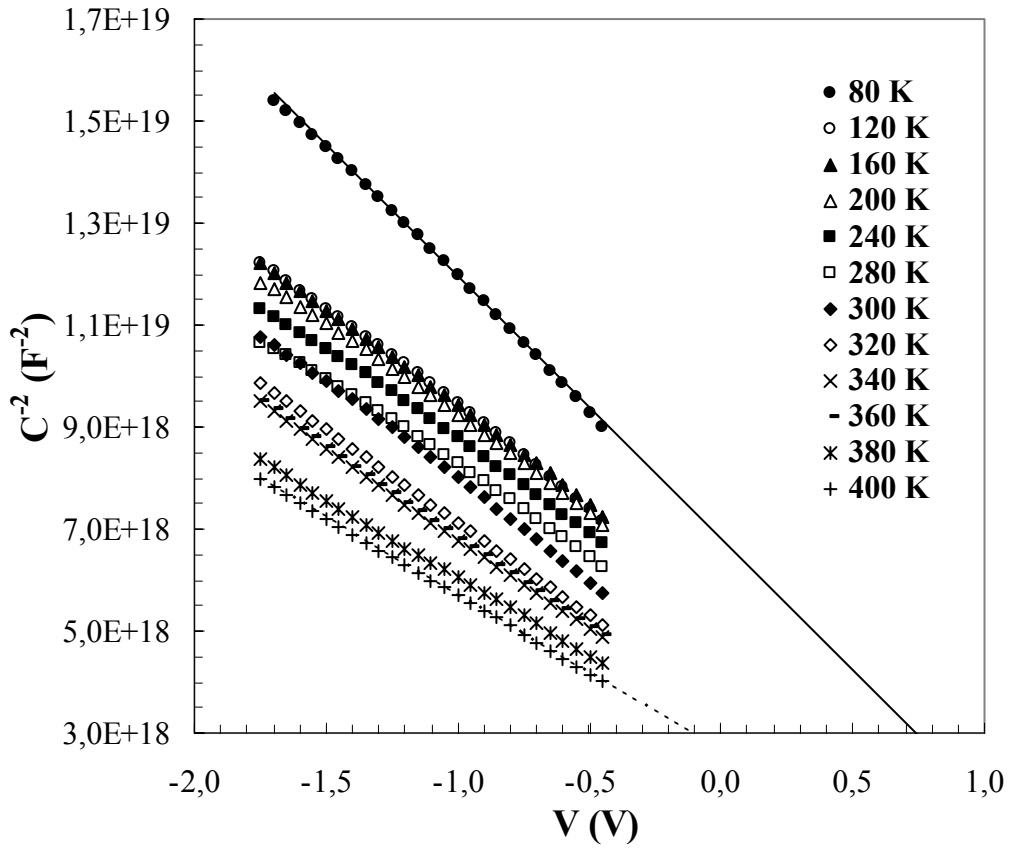
Şekil 4.6. MYY yapının 300 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans–Voltaj (C–V) ve (b) İletkenlik–Voltaj (G/ω–V) eğrileri



Şekil 4.7. MYY yapının 400 K'deki düzeltilmiş (a) Kapasitans-Voltaj (C - V) ve (b) İletkenlik-Voltaj (G/ω - V) eğrileri

Şekil 4.4 (a), 4.5 (a), 4.6 (a) ve 4.7 (a)'ya bakıldığında, yüksek sıcaklıklara doğru gittikçe kuvvetli yığılım bölgesindeki C-V ve C_c -V eğrileri arasındaki fark açılmaktadır, bu durum bize bu bölgede yüksek sıcaklıklarda R_s 'nin daha etkili olduğunu göstermektedir ki; bu durum Şekil 4.3 (b) ile uyum içerisindedir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; R_s yalnızca yığılım bölgesinde etkiliyken, N_{ss} ise yalnızca tükenim bölgesinde etkilidir.

Ters öngerilimde ölçülen kapasitans değerleri kullanılarak MYY yapının C^{-2} -V eğrileri elde edildi ve Şekil 4.8'de verildi. Şekil 4.8'den de görülebileceği gibi C^{-2} -V eğrileri geniş bir öngerilim voltajı aralığında bir doğru çizgi veriyorlar ki; bu durum bir açıdan admittans ölçümlerin yeterli seviyede yüksek frekansta yapıldığının kanıtıdır.



Şekil 4.8. MYY yapının sıcaklığa bağlı ters öngerilimdeki C^{-2} -V eğrileri

Şekil 4.8'de belirtilen aralıklardaki C^{-2} - V eğrilerinin voltaj eksenine olan uzantılarının eksenle kesiştikleri noktalardan yararlanarak, o sıcaklık değeri için MYY yapının difüzyon potansiyeli (V_D) bulunabilmektedir. Bir MYY yapının tüketim tabakası kapasitansı,

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_o)}{q\epsilon_s N_D A^2} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilir [1,9,26]. Burada V_R ters öngerilim voltajı, N_D katkı konsantrasyonu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik/geçirgenlik sabiti ve V_o ise sıfır öngerilimdeki dahili voltajdır ve her sıcaklık değeri için C^{-2} - V eğrisinin voltaj eksenini kestiği noktadaki voltaj değerine eşittir.

V_o 'ın bulunmasıyla birlikte her sıcaklık değerine ait N_D değerleri Eş. 4.7 kullanılarak bulundu ve V_D değerlerine ise aşağıdaki denklem yardımıyla ulaşıldı.

$$V_D = V_o + \frac{kT}{q} \quad (4.8)$$

Burada k ve T sırasıyla Boltzman sabiti ve Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Tüketim tabakası genişliği (W_D) ve Fermi enerji seviyesi (E_F) değerleri ise sırasıyla

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

ve

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

denklemleri ile bulundu. Burada N_C iletkenlik bandının efektif durum yoğunluğudur ve aşağıdaki denklem ile bulunur,

$$N_C = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e^* / m_o)^{3/2} \quad (4.11)$$

burada m_o elektronun serbest kütesidir, ve m_e^* ise elektronun etkin kütesidir. Böylece artık her bir sıcaklık değerine karşılık gelen engel yüksekliği (Φ_{CV}) değerleri

$$\Phi_{CV} = V_o + \frac{kT}{q} + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.12)$$

denklemleri ile bulundu ki; burada $\Delta\Phi_B$ engel alçalmasıdır ve

$$\Delta\Phi_B = \left(\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_o} \right)^2 \quad (4.13)$$

denklemlerinden bulunur. Burada E_m maksimum elektrik alanıdır ve

$$E_m = \left(\frac{2qN_D V_d}{\epsilon_s\epsilon_o} \right)^{1/2} \quad (4.14)$$

Genelde, yeteri miktardaki yüksek frekanslarda ($f \geq 1$ MHz) arayüzey durumlarının yarıiletkenle dengede olmasından dolayı arayüzey durumlarından MYY yapının kapasitansına herhangi bir katkı gelmez [1,9,26].

Teorik katkı konsantrasyonu N_D' 'nin ($1,73 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) deneysel katkı konsantrasyonu N_D 'ye olan oranı c_2 olarak bilinir ve

$$c_2 = \frac{N_D'}{N_D} \quad (4.15)$$

denklemleri ile bulunur [5,8,34,35]. c_2 aynı zamanda

$$c_2 = \frac{1}{1 + \beta} \quad (4.16)$$

denklemleri ile de ifade edilir, burada β

$$\beta = \frac{qd_{ox} N_{ss}}{\varepsilon_i} \quad (4.17)$$

eşitliğiyle bulunur [36,37]. Bu sayede katkı konsantrasyonu değerleri yardımıyla bulunan c_2 değerleriyle her sıcaklık değerine karşılık gelen arayüzey durumlarının yoğunluğu bu denklemler aracılığıyla bulundu.

C^2-V eğrilerinden yola çıkarak bulunan her bir sıcaklık değerine karşılık gelen V_o , N_D , E_F , Φ_{CV} , E_{max} , W_D , c_2 ve N_{ss} değerleri Çizelge 4.1’de verildi. Çizelge 4.1’den de görülebileceği gibi elde edilen V_o , Φ_{CV} , W_D ve c_2 değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte azalırken N_D , E_F ve N_{ss} değerleri artış göstermektedirler.

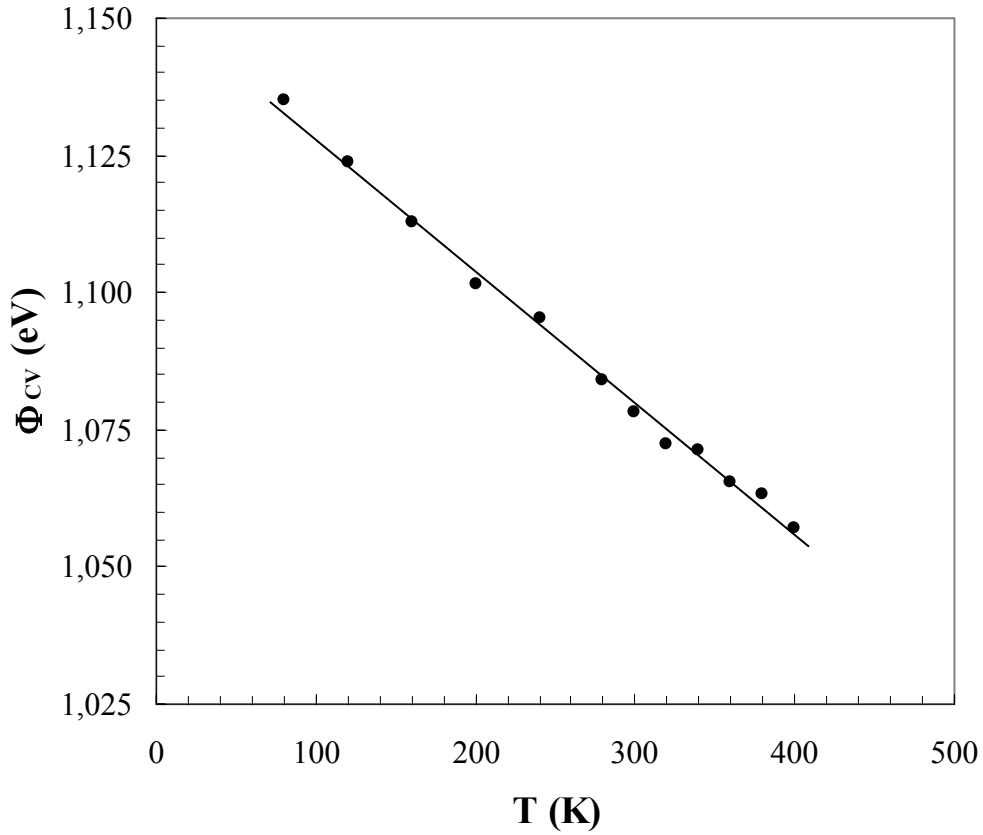
Çizelge 4.1’deki parametrelere ek olarak, Φ_{CV} ’nin sıcaklığa bağlı eğrisi Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.9 ve Çizelge 4.1’den de görülebileceği gibi sıcaklığa bağlı Φ_{CV} değerleri artan sıcaklıkla beraber azalmıştır. Sıcaklığa bağlı Φ_{CV} değerleri aynı zamanda

$$\Phi_{CV}(T) = \Phi_{CV}(T=0) + \alpha T \quad (4.18)$$

eşitliği ile ifade edilir. Denklemdaki $\Phi_{CV}(T=0)$ ve α sırasıyla sıfır Kelvin’deki engel yüksekliği ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısıdır.

Çizelge 4.1 Au/SiO₂/n-Si yapının sıcaklığa bağlı temel elektriksel parametreleri

T (K)	V_o (V)	N_D (cm⁻³)	E_F (meV)	Φ_{CV} (eV)	E_{max} (V.cm⁻¹)	W_d (cm)	c₂	N_{ss} (eV⁻¹.cm⁻²)
80	1,07	5,80x10 ¹⁵	53,7	1,135	4,39x10 ⁴	4,93x10 ⁻⁵	0,298	1,94x10 ¹³
120	1,03	6,70x10 ¹⁵	79,1	1,124	4,63x10 ⁴	4,51x10 ⁻⁵	0,258	2,37x10 ¹³
160	0,99	7,10x10 ¹⁵	104,7	1,113	4,68x10 ⁴	4,31x10 ⁻⁵	0,244	2,56x10 ¹³
200	0,95	7,60x10 ¹⁵	129,7	1,101	4,76x10 ⁴	4,09x10 ⁻⁵	0,228	2,80x10 ¹³
240	0,92	7,80x10 ¹⁵	155,1	1,095	4,74x10 ⁴	3,97x10 ⁻⁵	0,222	2,90x10 ¹³
280	0,88	7,95x10 ¹⁵	180,5	1,084	4,69x10 ⁴	3,85x10 ⁻⁵	0,218	2,97x10 ¹³
300	0,86	8,15x10 ¹⁵	192,7	1,078	4,70x10 ⁴	3,77x10 ⁻⁵	0,212	3,07x10 ¹³
320	0,84	8,25x10 ¹⁵	205,3	1,072	4,68x10 ⁴	3,71x10 ⁻⁵	0,210	3,11x10 ¹³
340	0,82	8,38x10 ¹⁵	217,6	1,071	4,68x10 ⁴	3,65x10 ⁻⁵	0,206	3,18x10 ¹³
360	0,80	8,55x10 ¹⁵	229,7	1,065	4,68x10 ⁴	3,57x10 ⁻⁵	0,202	3,26x10 ¹³
380	0,79	8,90x10 ¹⁵	241,2	1,063	4,74x10 ⁴	3,47x10 ⁻⁵	0,194	3,42x10 ¹³
400	0,77	9,10x10 ¹⁵	253,2	1,057	4,74x10 ⁴	3,40x10 ⁻⁵	0,190	3,52x10 ¹³



Şekil 4.9. MYY yapının $\Phi_{CV} - T$ eğrisi

Şekil 4.9'daki Φ_{CV} eğrisinin sıcaklık eksenine fit edilmesi yoluyla $\Phi_{CV} (T=0)$ ve α değerleri sırasıyla 1,152 eV ve $-2,404 \times 10^{-4}$ eV/K olarak bulundu. İlgili sıcaklık aralığında elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı Si yarıiletkenine ait teorik değere ($-4,73 \times 10^{-4}$ eV/K) yakın olduğu gözlemlendi. Engel yüksekliğinin sıcaklığa bu tarz bağlı olması Fermi seviyesi pimlemeyle (Fermi level pinning) veya difüzyon potansiyelindeki azalmayla açıklanabilir. Fermi seviyesi metal indüklenmiş boşluk durumları (Metal Induced Gap States – MIGS) veya arayüzeydeki bozuk durumlar aracılığıyla pimlenebilir [38]. Eğer Fermi seviyesi bozukluklar nedeniyle pimlenmişse, engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlılığı bant genişliğinin sıcaklığa bağlılığı tarafından yönetileceğinden dolayı engel yüksekliği sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağlı olur. Sonuç olarak, engel yüksekliğinin sıcaklıkla birlikte değişim yarıiletkenin yasak enerji bant boşluğununkine benzer olur. Bir yarıiletkenin bant genişliğinin sıcaklıkla birlikte değişimi

$$E_g(T) = E_g(0K) + \frac{\alpha T^2}{(\beta + T)} \quad (4.19)$$

denklemleri ile verilir. Burada $E_g(0K)$, α ve β sırasıyla yarıiletkenin sıfır Kelvin'deki bant genişliği, bant genişliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı ($-4,73 \times 10^{-4}$ eV/K) ve Si için değeri 636 olan bir sabittir.

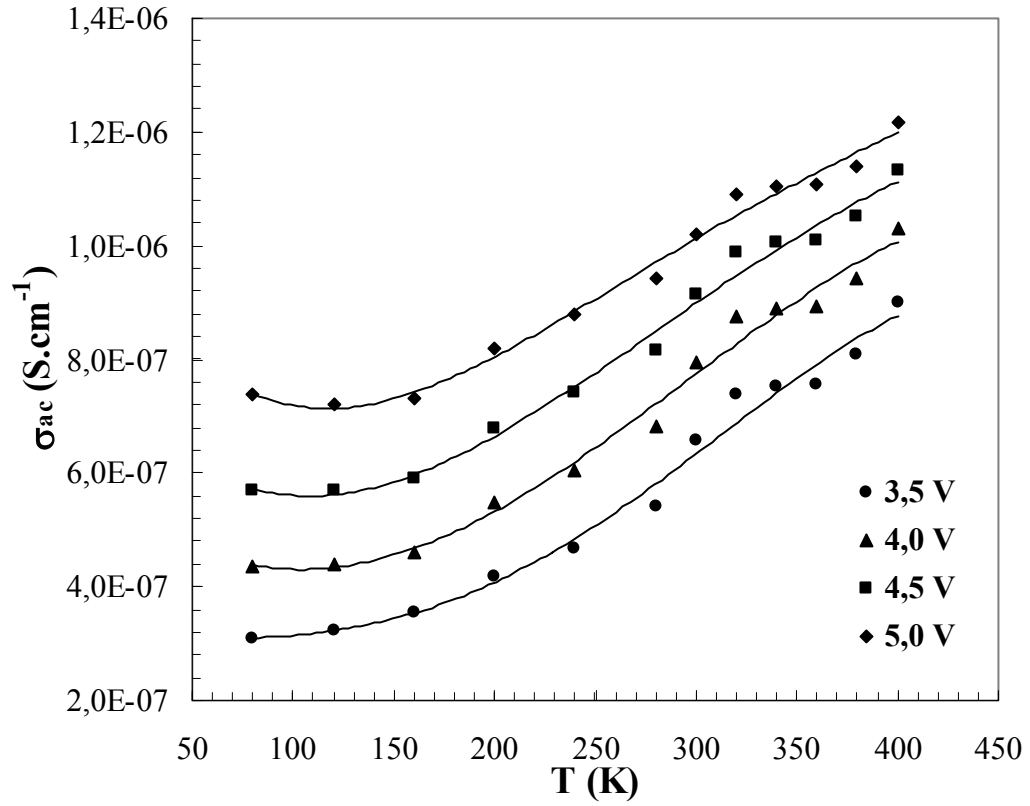
Yukarıda açıklanan bu denklemler sayesinde bu çalışmadaki engel yüksekliği ve bant genişliğindeki artan sıcaklıkla birlikte gözlemlenen azalmanın açıklanabilmesi mümkün olmuştur.

Bu çalışmada aynı zamanda MYY yapının dört farklı öngerilim voltaj değerine ait a.c. iletkenlik (σ_{ac}) değerleri de ölçülen iletkenlik (G_m) değerlerinin

$$\sigma_{ac} = \frac{G_m \cdot d_{ox}}{A} \quad (4.20)$$

denkleminde kullanılmasıyla elde edilmiştir.

MYY yapının sıcaklığa bağlı a.c. iletkenlik eğrileri Şekil 4.10'de verilmiştir. Şekil 4.10'den de görülebileceği gibi a.c. iletkenlik değerleri artan sıcaklık değeriyle birlikte tüm sıcaklık aralığında her öngerilim voltaj değeri için artış göstermektedir. Eş. 4.20 göz önüne alındığında, a.c. iletkenlik değerlerindeki artış ve azalmanın iletkenlik değerlerinde gözlemlenen artış veya azalmaya paralellik göstereceği açıkça görülmektedir.

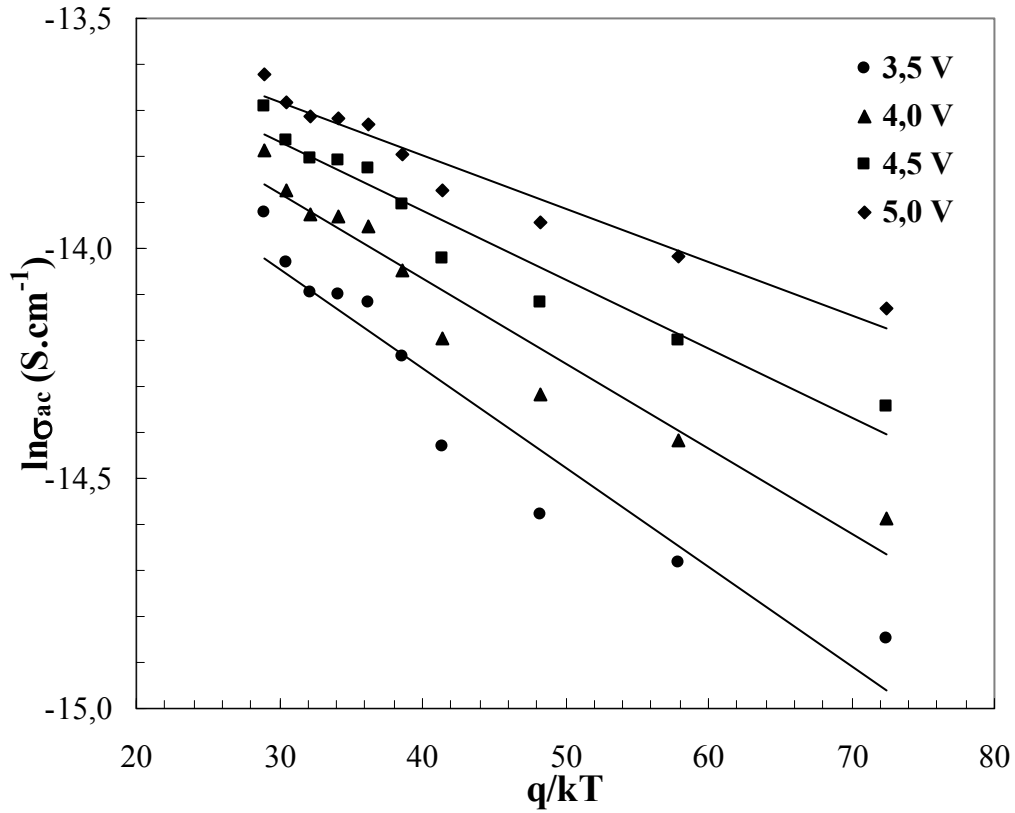


Şekil 4.10. MYY yapının öngerilim voltajına bağlı $\sigma_{ac} - T$ eğrileri

Öte yandan a.c. iletkenlik aynı zamanda

$$\sigma_{ac} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.21)$$

denklemleri ile ifade edilebilir ki; burada σ_0 , ve E_a sırasıyla üstel ön faktör ve aktivasyon enerjisidir. Eş. 4.21 kullanılarak aktivasyon enerjisi değerleri aynı zamanda Arrhenius eğrileri olarak bilinen $\ln\sigma_{ac}-q/kT$ eğrilerinin eğiminden bulunabilir.



Şekil 4.11. MYY yapının öngerilim voltajına bağlı $\ln\sigma_{ac} - q/kT$ eğrileri

MYY yapının dört değişik öngerilim voltaj değeri için elde edilen a.c. iletkenlik verileri 160-400 K sıcaklık aralığında Arrhenius eğrileri olarak fit edildi ve Şekil 4.11'de verildi. Şekil 4.11'den de görülebileceği gibi $\ln\sigma_{ac}-q/kT$ eğrileri dört öngerilim voltaj değeri için de lineer bir davranış göstermektedir. MYY yapının aktivasyon enerjisi değerleri $\ln\sigma_{ac}-q/kT$ eğrilerinin eğimlerinden yola çıkarak 3,5, 4,0, 4,5, 5,0 V öngerilim voltajı değerleri için sırasıyla 21,7, 18,5, 15,0 ve 11,5 meV olarak bulundu. Görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi değerleri artan öngerilim voltajıyla birlikte azalış göstermektedir ki; böylesi düşük değerlerdeki aktivasyon enerjisi Termiyonik Emisyon teorisinden düşük sıcaklıklarda daha fazla sapmalara neden olan yeniden birleşmeye atfedilir [39]. Aynı zamanda düşük aktivasyon enerjisi değerleri uzay yüklerinin varlığına da atfedilebilir. İletim elektronları iyonize oksijen boşluklarının muhtemel bir sonucu olarak verici durumları formunda oluşmuş olabilir.

5. SONUÇ

Hazırlanan metal-yalıtkan-yarıiletken Au/SiO₂/n-Si yapıların temel elektriksel özelliklerini incelemek amacıyla kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri geniş bir sıcaklık aralığında (80-400 K) yüksek frekansta (1 MHz) hem negatif hem de pozitif öngerilimde geniş bir aralıkta (-3V ile 7V) Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre (5 Hz - 13 MHz) ve bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayardan kumanda edilerek gerçekleştirildi. Sıcaklığa bağlı ölçümler Janes vpf-475 kriyostat içinde yaklaşık 10⁻³ Torr basınç altında bir Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirildi.

Ölçümlerin geniş öngerilim voltajı aralığında alınmasıyla C-V ve G/ω-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar elde edildi. Kapasitans (C) ve iletkenlik (G) değerleri artan sıcaklıkla birlikte tükenim bölgesinde bir artış gösterdi. C-V eğrilerinde yığılım bölgesinde gözlemlenen pikler seri direncin (R_s) etkisine atfedildi. G/ω-V eğrilerinde 160-320 K aralığında gözlenen pikler ise arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedildi. Ayrıca C-V eğrileri kuvvetli yığılım bölgesinde bir kesişme davranışı gösterdi. Öngerilim voltajına bağlı C ve G eğrilerinde C değerlerinin artan sıcaklıkla azalırken, G değerlerinin arttığı, ve C ve G değerlerindeki değişikliğin düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğu görüldü ki; bu durum tuzak yüklerinin Si bant aralığındaki M/Y arayüzeyinde lokalize olmuş tuzaklardan kaçmaya yetecek miktarda enerjiye sıcaklığın etkisiyle birlikte sahip olabilmelerine ve artan sıcaklıkla birlikte seri dirençteki azalmaya atfedildi.

Yapının direnç (R_i) değerleri admittans metodu kullanılarak elde edildi. R_i-V eğrilerinde pikler gözlemlendi, ikinci piklerin artan sıcaklık değeriyle birlikte kayboldu görüldü. Yine artan sıcaklıkla birlikte gözlenen ilk pikin şiddetinin arttığı görüldü. Diğer bölgelerin aksine yüksek yığılım bölgesindeki R_s değerlerinin fazla bir değişiklik göstermediği görüldü. Bu bölge için öngerilim voltajına bağlı R_s-T eğrilerinden görüldü ki; artan sıcaklıkla birlikte değerleri artış gösterdi. Sonuç olarak

R_s değerleri sıcaklık ve öngerilim voltajına bölgeden bölgeye değişen şekilde bağlılık gösterdi.

C ve G verileri incelendiğinde R_s 'nin C ve G üzerindeki etkisinin yüksek sıcaklıkta ve yığılım bölgesinde daha belirgin olduğu açıkça görüldü. Dolayısıyla, ölçülen C ve G değerleri seri direncin etkisini minimize etmek için düzeltildi. C_c -V eğrilerinin, C-V eğrilerinden farklı olarak, artan öngerilim voltajıyla birlikte kuvvetli yığılım bölgesinde de artmaya devam ettikleri görüldü. G_c/ω -V eğrilerinde ise yük transferinin arayüzey boyunca gerçekleştiğinin ispatı olan pik davranışı görüldü. Burada N_{ss} 'in tükenim bölgesinde etkiliyken, R_s 'nin yığılım bölgesinde etkili olduğu görüldü.

Ters öngerilimdeki C^2 -V eğrilerinden yararlanarak MYY yapının difüzyon potansiyeli (V_o), katkı konsantrasyonu (N_D), Fermi enerjisi (E_F), tükenim tabakası genişliği (W_D), arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) ve engel yüksekliği (Φ_{CV}) gibi temel elektriksel parametlerine ulaşıldı. Hesaplanan parametrelerden V_o , W_D , N_{ss} ve Φ_{CV} değerlerinin artan sıcaklıkla azaldığı gözlemlenirken N_D , E_F ve c_2 değerlerinin arttığı gözlemlendi. Ayrıca Φ_{CV} -T eğrisinin sıcaklık eksenine fit edilmesiyle Φ_{CV} ($T=0$) ve α değerleri sırasıyla 1,152 ve $-2,404 \times 10^{-4}$ eV/K olarak bulundu.

MYY yapının sıcaklığa bağlı σ_{ac} -V eğrilerinden a.c. iletkenlik değerlerinin artan sıcaklık değeriyle birlikte tüm sıcaklık aralığında artış gösterdiği görüldü. σ_{ac} 'deki artışın aynı aralıktaki G değerlerinde gözlemlenen artışla gösterdi. MYY yapının aktivasyon enerjisi değerleri $\ln \sigma_{ac} - q/kT$ eğrilerinin eğimlerinden yola çıkarak 3,5, 4,0, 4,5, 5,0 V öngerilim voltajı değerleri için sırasıyla 21,7, 18,5, 15,0 ve 11,5 meV olarak bulundu.

Sonuç olarak hazırlanan Au/SiO₂/n-Si (MYY) yapının C-V ve G/ω -V ölçümleri göstermiştir ki; R_s ve N_{ss} 'in etkisi benzeri MYY yapılar için C ve G değerleriyle ve

temel elektriksel parametreleri üzerinde oldukça önemlidir. Dolayısıyla R_s ve N_{ss} 'in etkisi MYY yapıların temel parametrelerinin hesabında dikkat edilmesi gereken unsurlardır. Bu bağlamda, bu etkilerin dikkate alınması ölçülen C ve G değerleriyle birlikte, bunlardan yola çıkarak hesaplanan temel elektriksel parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, bu çalışmadaki deneysel ölçümler ve hesaplamalar Au/SiO₂/n-Si (MY) yapının temel elektriksel parametrelerinin sıcaklığa bağlı olarak artma ya da azalma eğiliminde olduğunu gösterdi. Dolayısıyla bu ve benzeri MY yapılardan oluşan elektronik cihazların yalnızca oda sıcaklığında çalışmayacağı göz önüne alınmalı cihaz verimliliği ve performansı için MY yapıların elektriksel parametrelerinin sıcaklığa ne tarz bir tepki verdiğinin saptanması gerekir.

KAYNAKLAR

1. Rhoderick, E.H., Williams, R.H., “Metal-Semiconductor Contacts”, 2nd ed., **Oxford University Press**, Oxford, 257 (1988).
2. Cowley, A.M., Sze, S.M., “Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems”, **J. Appl. Phys.**, 36: 3212-3216 (1965).
3. Fonash, S.J., “The role of the interfacial layer in Metal-Semiconductor Solar Cells”, **J. Appl. Phys.**, 46: 1286-1289 (1975).
4. Sing, A., Reinhard, K.C., Anderson, W.A., “Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions”, **J. Appl. Phys.**, 68(7): 3475-3479 (1990).
5. Chattopadhyay, P., Daw, A.N., “On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor diode”, **Solid State Electron.**, 29(5): 555-560 (1986).
6. Yu, A.Y.C., Snow, E.H., “Surface Effects on Metal-Silicon Contacts”, **J. Appl. Phys.**, 39: 3008 (1968).
7. Depas, M., Van Meirhaegh, R.L., Laflere, W.H., Cardon, F., “Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation”, **Solid State Electron.**, 37: 433-441 (1994).
8. Card, H.C., Rhoderick, E.H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes”, **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 4:1589-1601 (1971).
9. Sze, S.M., “Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.”, **John Wiley & Sons**, New York, 245-390 (1981).
10. Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Tataroğlu, A., “The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/SnO₂/p-Si Schottky diodes”, **Solid State Electron.**, 47(10): 1847-1854 (2003).
11. Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz, M.J., “Interface states on semiconductor/insulator surfaces”, **CRC Critical Reviews in Solid State Sciences**, 6(1): 226-233 (1976).

12. Crowell, C.R., Sze, S. M., "Surface states and barrier height of metal semiconductor Systems", *J. Appl. Phys.*, 36: 3212-3220 (1965).
13. Tung, R.T., "Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General Theory", *Phys. Rev. B.*, 45: 13509 (1992).
14. Rhoderick, E.H., "Metal-Semiconductor Contacts", *IEE Proc.*, 29 (1): 1-14 (1982).
15. Grove, A.S., Deal, B.E., Snow, E.H., Sah, C.T., "Investigation of thermally oxidized silicon surfaces metal-oxide-semiconductor structures", *Solid State Electron.*, 8(2): 145-163 (1965).
16. Berger, L.I., "Semiconductor Materials", *CRC Press*, New York, 145-152 (1997).
17. Jarzebski, Z.M., "Physical properties of SnO₂ materials: 1. Preparation and defect structure", *J. Electrochem. Soc.*, 123(7): 199-205 (1976).
18. Maudes, J.S., Rodriguez, T., "Sprayed SnO₂ films: Growth mechanism and film structure characterization", *Thin Solid Films*, 69(2): 183-189 (1980).
19. Moll, J.L., "Variable capacitance with large capacitance", *Ire Wescon (Western Convention and Show) Record*, part 3: 32-36 (1959).
20. Hahn, B.R., Yoon, D.Y., "Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide- Silicon Structure", *J. Appl. Phys.*, 65(7): 2766-2771 (1989).
21. Neamen, D.A., "Semiconductor Physics and Devices", 2nd ed., *Mc Graw-Hill*, New York, 420-523 (1997).
22. Cooke, M.J., "Semiconductor Devices", *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
23. Grove, A.S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons*, New York, 91-106, 334-357 (1967).
24. Ghandhi, S.K., "VLSI Fabrication Principles", *John Wiley & Sons*, New York, 401-405 (1983).

25. Schroder, D.K., "Semiconductor Material and Device Characterization", 2nd ed., *John Wiley & Sons*, New York, 337-379 (1998).
26. Nicollian, E.H., Brews, J.R., "MOS Physics and Technology", *John Wiley & Sons*, New York, 40-175, 222-226, 288, 423-439 (1982).
27. 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).
28. Yücedağ, İ., "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1,9-10 (2007).
29. Norde, H., "A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance", *J. Appl. Phys.*, 50: 5052-5054 (1979).
30. Cheung, S.K., Cheung, N.W., "Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics", *Appl. Phys. Lett.*, 49: 85-87 (1986).
31. Sato, K., Yasumura, Y., "Study of the Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance", *J. Appl. Phys.*, 58: 3655-3657 (1985).
32. Werner, J.H., "Schottky Barrier and pn-Junction I/V Plots-Small Signal Evaluation", *Appl. Phys.*, A 47: 291-300 (1988).
33. Durmuş, P., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., "Extraction of the series resistance and interface states in Au/n-Si(111) Schottky barrier diodes (SBDs) with native insulator layer using I-V-T and C-V-T measurement methods", *J. Optoelec. Adv. Mat.*, 12: 1472-1478 (2010).
34. Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T., Uslu, İ., "Temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni, Zn-doped)/n-Si Schottky diodes", *Microelectron. Reliab.*, 50: 39-44 (2009).
35. Türüt, A., Yalçın, N., Sağlam, M., "Parameter extraction from non-ideal C-V characteristics of a Schottky diode with and without interfacial layer", *Solid State Electron.*, 35: 835-841 (1992).

36. Singh, A., "Characterization of interface states at Ni/*n*CdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation", *Solid-State Electron.*, 28: 223-232 (1985).
37. 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: 219-228 (2000).
38. Chand, S., Kumar, J., "Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/p-Si(111) Schottky diodes in a wide temperature range", *Semicond. Sci. Tech.*, 10: 1680-1688 (1995).
39. 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).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIRIM, Mert
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 09.30.1983 - Çankırı
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : mertyildirim@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Boğaziçi Üniversitesi – Fizik Öğretmenliği	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-Halen	Düzce Üniversitesi	Araştırma görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Durmuş, P., Yıldırım, M., “The series resistance and interface states in Au/n-Si(111) Schottky barrier diodes (SBDs) with native insulator layer using I-V-T measurement methods”, *Azerbaijan Journal of Physics*, 16: 447-451 (2010).

Hobiler

Origami, müzik, sinema.