

**Al/SiO₂/p-Si (MIS) YAPILARDA TEMEL FİZİKSEL
PARAMETRELERİN
FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ**

İlke TAŞÇIOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2008
ANKARA**

İlke TAŞÇIOĞLU tarafından hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) YAPILARDA TEMEL FİZİKSEL PARAMETRELERİN FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Akif ÖZBAY

Tez Danışmanı, Fizik

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

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Akif ÖZBAY

Fizik, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İlbilge DÖKME

Fizik, Ahi Evran Üniversitesi

Tarih: 26 / 05 / 2008

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

Prof. Dr. Nermin ERTAN

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 orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İlke TAŞÇIOĞLU

**Al/SiO₂/p-Si (MIS) YAPILARDA TEMEL FİZİKSEL PARAMETRELERİN
FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

İlke TAŞÇIOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2008**

ÖZET

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) karakteristikleri, seri direnç (R_s) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) etkileri dikkate alınarak incelendi. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların C-V ve G/w-V ölçümleri oda sıcaklığında ve 500 Hz-5 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Deneysel sonuçlar, yapının hem C hem de G/w değerlerinin artan frekansla azaldığını gösterdi. Düşük frekanslarda C ve G/w'nın bu davranışı, Si/SiO₂ arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarının bir sonucudur. Seri direncin C ve G/w üzerindeki etkisi yüksek frekanslarda daha belirgindir. Bu yüzden, gerçek (düzeltilmiş) C_c ve G_c/w değerlerini elde etmek için ölçülen C_m ve G_m/w değerleri seri direnç etkisi dikkate alınarak olarak düzeltildi. Her frekans için elde edilen R_s profili beklenmeyen bir pik gösterdi. Buna ilave olarak ⁶⁰Co γ-ışınlarının bu yapılar üzerindeki etkisi oda sıcaklığındaki akım-voltaj (I-V), C-V and G/w-V karakteristiklerinden incelendi. İdealite faktörü (n), radyasyon sonucunda ortaya çıkan N_{ss}'den dolayı artan radyasyonla artmaktadır. Enerjiye (E_{ss}-E_v) bağlı N_{ss} dağılım profili, etkin engel yüksekliği (Φ_e) değeri dikkate alınarak doğru ön gerilimdeki I-V karakteristiklerinden elde edildi. N_{ss} değerleri valans bandının tepesinden yasak enerji aralığına doğru üstel bir azalma göstermektedir. MIS yapının C-V ve G/w-V karakteristiklerinin de radyasyona bağlı değiştiği açıkça görülmektedir. R_s dağılım profili C-V ve G/w-V ölçümlerinden admittans metoduna göre elde

edildi. Deneysel sonuçlar, metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakanın ve γ -radyasyonunun idealite faktörü, engel yüksekliği ve arayüzey durumları (N_{ss}) gibi elektriksel parametreler üzerinde önemli bir etki yaptığını gösterdi.

Bilim kodu : 202.1.47
Anahtar Kelimeler : MIS yapı; Arayüzey durumları; Seri direnç; Frekansa bağıllık; Radyasyona bağıllık
Sayfa adedi : 59
Tez yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Akif ÖZBAY

**THE INVESTIGATION OF FREQUENCY AND RADIATION DEPENDENT
OF MAIN PHYSICAL PARAMETRES OF Al/SiO₂/p-Si (MIS) STRUCTURES**

(M. Sc. Thesis)

İlke TAŞÇIOĞLU

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
May 2008**

ABSTRACT

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 the Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures were carried out in the frequency range of 500 Hz-5 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 sample. The profile of R_s exhibits an anomalous peak at each frequency about at zero-bias. In addition, the effect of ⁶⁰Co γ-ray exposure on the MIS structures has been investigated using the current-voltage (I-V), C-V and G/w-V characteristics at room temperature. The ideality factor (n) increases with irradiation dose due to an increase radiation induced interface states (N_{ss}). The energy density of N_{ss} distribution profiles as a function E_{ss}-E_v was extracted from the forward bias I-V characteristics taking into account the bias dependence of the effective barrier height (Φ_c). The values of N_{ss} showing an exponential decrease with bias from the top of the valance band towards the mid gap. Also, the C-V and G/w-V

characteristics of MIS structures show fairly large radiation dispersion. The R_s profile of MIS structures was extracted from the C_m and G_m/w measurements according to admittance method and its value increases with increasing dose. Experimental results show that the insulator layer between metal and semiconductor γ -radiation play an important role in the electrical parameters such as ideality factor, barrier height and interface states (N_{ss}).

Science Code : 202.1.47
Key words : MIS structure; Interface states; Series resistance;
Frequency dependence; Radiation dependence
Page number : 59
Adviser : Assist. Prof. Dr. Akif ÖZBAY

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve engin tecrübelerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Akif ÖZBAY'a teőekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalıőmalarım boyunca yönlendirmeleriyle yaptığı katkılardan dolayı hocam, saygıdeğer 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 (MIS) YAPILAR.....	4
2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapısı.....	4
2.1.1. İdeal MIS yapısı.....	5
2.1.2. Gerçek MIS yapısı.....	16
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	24
3.1. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) Yapıların Hazırlanması.....	24
3.1.1. Kristal temizleme.....	24
3.1.2. Omik kontağın oluşturulması.....	25
3.1.3. Yalıtkan silisyum dioksit (SiO ₂) tabakanın oluşturulması.....	26
3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması.....	28
3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....	29
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	31
4.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri.....	31
4.2. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik- Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri...38	38

Sayfa

4.2.1. Radyasyondan önce frekansa bağılı C-V ve G/ω -V ölçümleri.....	38
4.2.2. Radyasyondan sonra C-V ve G/w -V ölçümleri	47
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	50
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Al/SiO ₂ /p-Si yapısı için doğru ön gerilim I-V verilerinden elde edilen N _{ss} 'lerin enerji aralığındaki dağılım profili.....	37

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. $V=0$ durumunda ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı. a) p-tipi yarıiletken b) n-tipi yarıiletken.....	5
Şekil 2.3. İdeal bir MIS yapısı için enerji bant diyagramı (n tipi yarıiletken için).....	8
Şekil 2.4. İdeal bir MIS yapısı için enerji bant diyagramı (p tipi yarıiletken için).....	9
Şekil 2.5. Bir MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	12
Şekil 2.6. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması. a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....	14
Şekil 2.7. İdeal bir MIS yapının devre şeması. a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....	16
Şekil 2.8. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	17
Şekil 2.9. p tipi ve n tipi MIS yapı için pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj ekseni boyunca C-V eğrilerinin değişimi.....	19
Şekil 2.10. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.....	22
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakum düzeneği.....	25
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske.....	26
Şekil 3.3. Yalıtkan/oksit tabakanın büyütülmesinde kullanılan oksidasyon fırını.....	27
Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske	28
Şekil 3.5. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.6. Akım-gerilim ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği.....	30
Şekil 3.7. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği	30

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapısı için radyasyondan önce ve sonraki akım-voltaj karakteristiği.....	34
Şekil 4.2. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapı için idealite faktörünün radyasyondan önce ve sonraki voltaja bağlı değişimi.....	34
Şekil 4.3. Al/SiO ₂ /p-Si yapısı için doğru öngerilim I-V karakteristiklerinden elde edilen arayüzey durumlarının radyasyondan önce ve sonraki enerji dağılım profili.....	36
Şekil 4.4. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının düşük frekanslardaki a) C-V eğrileri b) G/w-V eğrileri.....	39
Şekil 4.5. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının yüksek frekanslardaki a) C-V eğrileri b) G/w-V eğrileri.....	40
Şekil 4.6. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının voltaja bağlı a) C-log(f) eğrileri b) G/w-log(f) eğrileri.....	41
Şekil 4.7. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının oda sıcaklığında farklı frekanslardaki 1/C ² -V eğrileri.....	42
Şekil 4.8. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen seri direnç-voltaj (R _s -V) eğrileri.....	45
Şekil 4.9. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının oda sıcaklığında iki farklı yüksek frekans için ölçülen ve düzeltilmiş a) C _c -V eğrileri b) G _c /w-V eğrileri.....	46
Şekil 4.10. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının 1 MHz' de radyasyondan önce ve sonraki a) C-V eğrileri b) G/w-V eğrileri.....	48
Şekil 4.11. Al/SiO ₂ /p-Si yapısının 1 MHz' de radyasyondan önce ve sonraki seri direnç-voltaj (R _s -V) eğrileri.....	49

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
χ	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
χ_i	Yalıtkanın elektron yakınlığı
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
A^{**}	Etkin Richardson sabiti
C_{ox}	Yalıtkan/oksit kapasitansı
C_{sc}	Yüzey yük kapasitansı
A_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakasının alanı
Å	Angström
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
Ψ_s	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

Simgeler **Açıklama****Z** Empedans**Y** Admittans**Kısaltmalar** **Açıklama****MS** Metal-Yarıiletken**MIS** Metal-Yalıtkan-Yarıiletken**MOS** Metal-Oksit-Yarıiletken**I-V** Akım-gerilim**C-V** Kapasitans-gerilim**G/ ω -V** İletkenlik-gerilim**TE** Termiyonik emisyon**ac** Alternatif gerilim**dc** Doğru gerilim

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) kontakların tarihçesi 18. yüzyılın sonlarına kadar uzanır ancak bu konu üzerindeki asıl çalışmalar, 1960 yıllarında yoğunluk kazanmıştır. Metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koyduğu için bu kontaklara atfen Schottky diyotlar ya da Schottky kontaklar denilmektedir [1]. 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 hazırlanmasında, yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi olmasına göre uygun iş fonksiyonu metaller seçilir [2]. 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 oluşturmasıdır. Ayrıca SiO_2 birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Yarıiletken olarak ise genelde silisyum (Si), germanyum (Ge) kullanılır.

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 sadece her sıcaklık için gerilime bağlı sadece 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 [6]. Bu yapı, termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmuştur. Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılır [7].

M/S arayüzeyindeki yalıtkan tabakanın kalınlığı 100 Å'dan küçük ise bu MIS yapılara MIS tipi Schottky diyotlar denilir. Ancak bu yalıtkan tabaka 100 Å'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/w-V) ölçümlerinden belirlenir [8,9]. Ancak MIS tipi Schottky diyotların temel elektriksel parametreleri ise hem frekansa veya sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri hem de C-V ve G/w-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 arttıracaktır.

Bu çalışmada Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapılar, (100) yüzey yönelimine sahip 8 Ω.cm öz dirençli, 280 µm kalınlıklı, yaklaşık 50 mm çapında bor katkılı (p-tipi) Si tek kristal üzerine oluşturuldu. Hazırlanan bu yapıların elektriksel karakteristikleri radyasyondan önce ve sonra I-V, C-V ve G/ω-V deneysel ölçüm metodları kullanılarak belirlendi. Ayrıca frekansa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümleri, seri direnç ve arayüzey durumlarının etkisi dikkate alınarak incelendi.

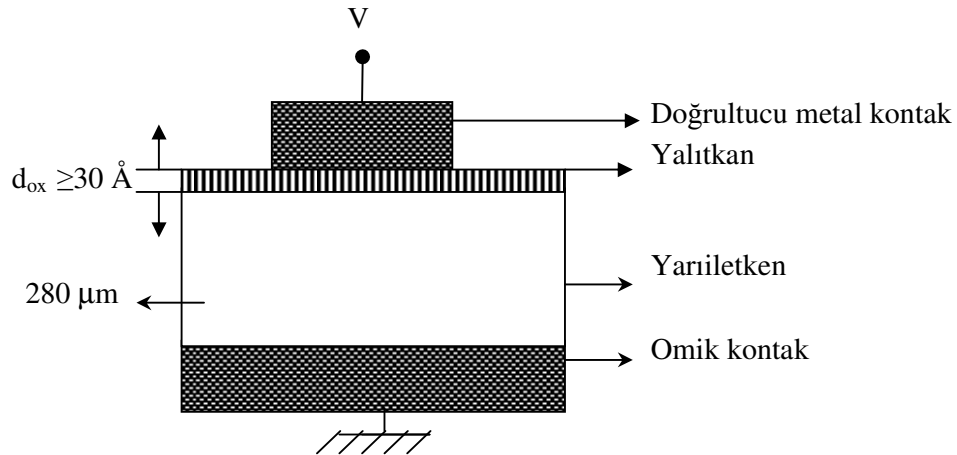
Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Schottky diyotların tarihsel gelişimi ve önemi üzerinde duruldu. İkinci bölümde, Schottky diyotların teorisi ve çalışma prensibi üzerinde duruldu. Üçüncü bölümde, Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların hazırlanması ile ilgili işlemler ve kullanılan deneysel ölçüm sistemleri hakkında bilgi verildi. Dördüncü bölümde, deneysel ölçümler sonucunda elde edilen grafik ve tablolar mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Beşinci bölümde ise varılan sonuçlarla ilgili yorumlar ve tartışmalar yapılmıştır.

2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan oksit tabakası doğal yollarla oluşabileceği gibi farklı yöntemlerle de oluşturulabilir. Bu yöntemlerin başında termal oksidasyon, buharda oksidasyon, anodik oksidasyon ve püskürtme gelir. M/S arayüzeyinde yalıtkan yada diğer bir adıyla oksit tabakası, metal ile yarıiletken arasında izolasyon görevi yaptığı gibi birçok yüzey durumunu pasivize edebilir. Böylece yapı üzerine uygulanan voltaj, yapı ile yalıtkan tabaka arasında bölüşülecektir. Ayrıca yapı bir seri dirence sahip ise voltajın bir kısmı da onun üzerine düşecektir. Yalıtkan arayüzey tabakası yeterince kalın ise ($d_{ox} \geq 30 \text{ \AA}$) arayüzey durumları yarıiletken ile dengededir. Ancak yalıtkan tabaka bu değerden daha küçük ise arayüzey durumları metal ile dengede olurlar.

2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapısı

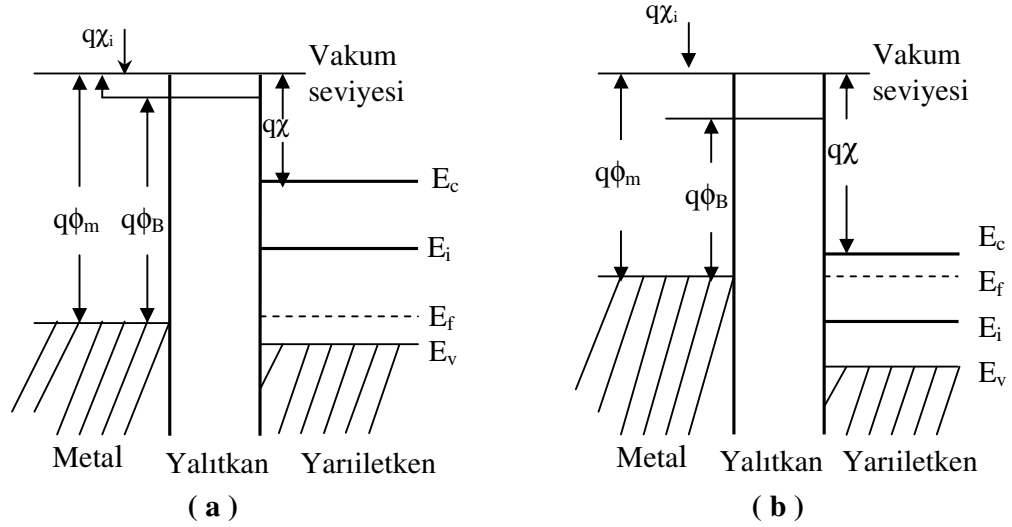
Bir MIS yapı Şekil 2.1’de gösterildiği gibi metal-yalıtkan-yarıiletken tabakalardan oluşur. Burada d_{ox} yalıtkan tabakanın kalınlığıdır. Dışarıdan uygulanan gerilim V , metal plakaya uygulanır ve yönü de ona göre belirlenir. V gerilimi, metal plaka omik kontakta göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhali kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir.



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

2.1.1. İdeal MIS yapısı

İdeal bir MIS yapıda sıfır voltajdaki enerji-bant diyagramı şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. $V=0$ durumunda ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı.

(a) p- tipi yarıiletken (b) n- tipi yarıiletken

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 ($E_i = (E_c - E_v)/2$)

E_f : Fermi enerji seviyesi

ψ_B : Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark

Şekil üzerinde gösterilen bazı temel semboller aşağıda tanımlandı:

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

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olup şekil 2.2 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(ϕ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi katılanan madde atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden dolayı Φ_s de değişen bir niceliktir.

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

İdeal bir MIS yapıdaki özellikler aşağıdaki gibi tanımlanabilir [3,10,16]:

- Sıfır beslemde metalin iş fonksiyonu ϕ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasında enerji farkı yoktur. Diğer bir deyişle ϕ_{ms} iş fonksiyonu sıfırdır.

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

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

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 beslem altında yarıiletken ve yalıtkanın yakın metal yüzeyindeki yükler eşit ve fakat zıt yönlüdürler.
- D.C beslem şartları altında yalıtkanın 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.

İdeal MIS yapıda yalıtkan tabakanın iletkenliği sıfırdır. Fakat gerçekte yeterli büyüklükte elektrik alan ve sıcaklık varsa iletkenlik gösterebilir. Metal-yarıiletken yapılarda akım voltaj ilişkisi,

$$J_F = J_o \left[\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada,

$$J_o = A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.4)$$

ifadesiyle verilen J_o doyma akım yoğunluğudur. T sıcaklık, V_F doğru beslem gerilimi, A^{**} etkin Richardson sabitidir. Metal/yarıiletken yapılarda akım voltaj ilişkisini gösteren Eş. 2.3 ifadesinde $\ln I-V$ grafiğinin eğimi q/kT dir. Ancak metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan olduğunda doğru beslem altında bu yapılarda akım iletimi bu bağıntıdan biraz farklı olur. Bu durumda $\ln I-V$ grafiğinin eğimi q/kT değerinden küçük olur hatta $q/2kT$ yada daha da küçük olabilir. MIS Schottky engelli yapılarda yalıtkan tabakanın etkisi Card, Rhoderick [13] ve Fonash [14] tarafından araştırılmıştır.

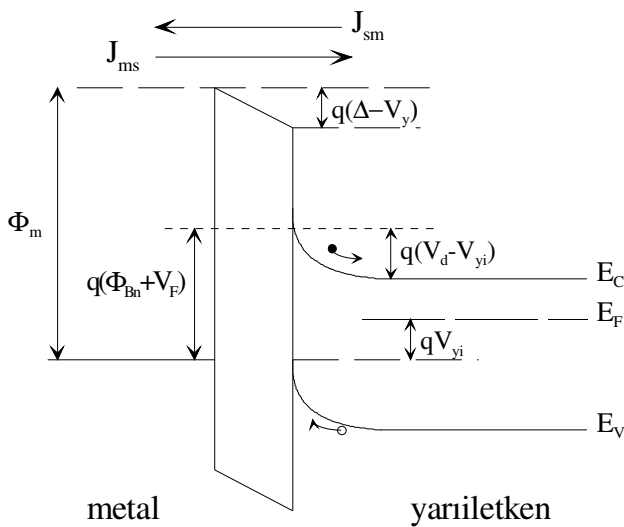
İdeal bir MIS yapıda, doğrultucu metal kontağa bir gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Uygulanan V_f geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşer.

$$V_F = V_{yi} + V_y \quad (2.5)$$

Burada, V_{yi} uygulanan V_F geriliminin yarıiletken üzerine düşen kısmı, V_y ise yalıtkan üzerine düşen kısmıdır. V_F doğru beslem gerilimi altında metal/yalıtkan/ n-Si yapılar için akım yoğunluğu azınlık taşıyıcı etkiler ihmal edilerek,

$$J_{Fn} = J_{sm}^{-e} - J_{ms}^{-e} \quad (2.6)$$

eşitliği yazılır. Burada, J_{Fn} doğru beslem altında metalden yarıiletkene geçen akım yoğunluğudur. J_{sm}^{-e} yarıiletkenden metale geçen elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu ve J_{ms}^{-e} metalden yarıiletkene geçen elektronların oluşturduğu akım yoğunluğudur. Şekil 2.3.'de doğru beslem (V_F) altında MIS yapının (n tipi yarıiletken için) enerji bant diyagramı gösterilmiştir

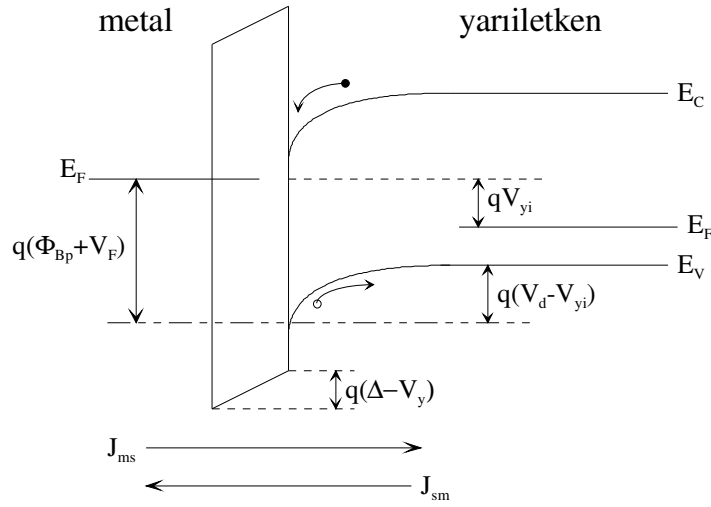


Şekil 2.3. İdeal bir MIS yapısı için enerji bant diyagramı (n tipi yarıiletken için).

Doğru beslem V_F gerilimi altında metal/yalıtkan/ p-Si için akım yoğunluğu ise,

$$J_{FP} = J_{sm}^h - J_{ms}^h \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Burada, J_{ms}^h metalden yarıiletken, J_{sm}^h ise yarıiletkenden metale geçen deşiklerin oluşturduğu akım yoğunluklarıdır. Şekil 2.4'de doğru beslem altında metal/yalıtkan/p-Si yapısının enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. İdeal bir MIS yapısı için enerji bant diyagramı (p tipi yarıiletken için).

Doğru beslem V_F gerilimi altında metal/yalıtkan/yarıiletken p-Si için akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_{FP} = J_{sm}^h - J_{ms}^h = A^* T^2 \left(\exp[\beta(-\Phi_{Bp} + V_{yi})] - \exp[\beta(\Phi_{Bp} - V_y)] \right) \quad (2.8)$$

şeklinde yazılır. Burada $\beta = q/kT$ dir. Bu ifade $\exp[-\beta(\Phi_{Bp} + V_y)]$ parantezine alınır,

$$J_{FP} = A^* T^2 \exp[-\beta(\Phi_{Bp} + V_y)] \left[\exp(\beta V_F) - 1 \right] \quad (2.9)$$

şekline dönüşür. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabaka yoksa ($V_y=0$) Eş. 2.9 ile Eş. 2.3 aynı olur. Eş. 2.9'da görüldüğü gibi yalıtkan tabaka varlığı, J_F 'nin V_F 'ye bağımlılığını azaltır. Yani yalıtkan tabakanın kalınlığı artınca $\ln I_F$ 'nin V_F 'ye göre grafiğinin eğimi q/kT den küçük olur.

Doğru beslem altında metal/yalıtkan/n-Si için akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_{Fn} = J_{sm}^{-e} - J_{ms}^{-e} = A^* T^2 \left(\exp[\beta(-\Phi_{Bn} + V_{yi})] - \exp[\beta(\Phi_{Bn} - V_y)] \right) \quad (2.10)$$

$$= A^* T^2 \exp[\beta(\Phi_{Bn} + V_y)] \exp[(\beta V_F) - 1] \quad (2.11)$$

şekline dönüşür. Sonuçta, n veya p- tipi MIS yapı için akım yoğunluğu ifadesi $V_F > 3kT/q$ için;

$$J_{Fn} = J_{Fp} = J_o \exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılır. Burada J_o doyum akım yoğunluğu olup ,

$$J_o = A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.13)$$

ile verilir. Φ_B , n ve p-tipi MIS yapı için Schottky engel yüksekliği olup sırasıyla Φ_{Bn} ve Φ_{Bp} 'ye karşılık gelir. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotta $n=1$ dir. İdeal diyottan sapmaları belirlemek amacıyla bir idealite faktörü, n tanımlanır. n idealite faktörü birden uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır [15]. İdealite faktörü, yarıiletken ile dengede arayüzey durumları (N_{ss}) ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı (δ) cinsinden:

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.14)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey durumlarının artmasıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.

Arayüzeydeki yalıtkan tabakanın yeterince kalın olması durumunda (elektron tünelleme geçiş katsayısı 1 değilse) ters doyum akımı, arayüzey olmadığı durumda ters doyum akımı ile arayüzey yalıtkanın geçiş katsayısının çarpımına eşittir. Yani; $J_0(\text{yalıtkan}) = T(\delta)J_0$ dır. Burada $J_0(\text{yalıtkan})$, kalınlığı δ olan bir arayüzey yalıtkan tabakasının varlığında ve $T(\delta)$ geçiş katsayısına sahip olması durumundaki ters doyma akımıdır. Doğru beslemede I-V karakteristikleri beslemin çoğu üzerinde çizgisel ise Eş. 2.36'da J_0 yerine $J_0(\text{yalıtkan})$ yazılarak buradan etkin engel yüksekliği ϕ_c hesaplanabilir. Etkin engel yüksekliği ϕ_c ise:

$$\Phi_c = \frac{kT}{q} \left[\ln \left(\frac{A^* T^2}{J_0} \right) \right] - \frac{kT}{q} (\ln T(\delta)) = \Phi_B - \frac{kT}{q} (\ln(\delta)) \quad (2.15)$$

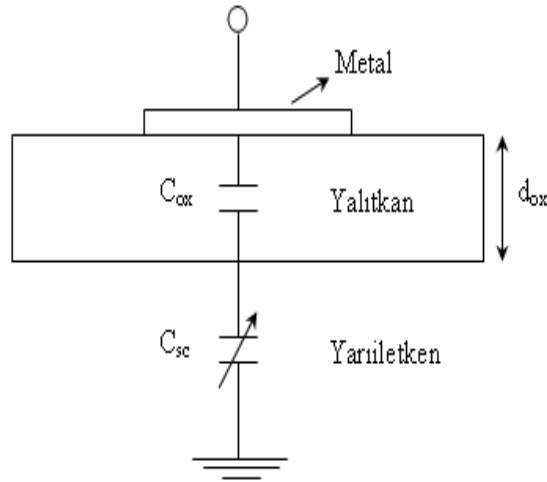
şeklinde yazılır. Buna göre $T(\delta)$ 1'den küçük ise etkin engel yüksekliği (ϕ_c) yalıtkan tabakanın olmadığı durumdaki ϕ_B engel yüksekliğinden daha büyüktür [15].

İdeal bir MIS yapıda toplam yük aşağıdaki eşitlik ile verilebilir:

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_n + q N_A W = Q_s \\ Q_m + Q_{sc} &= 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

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.

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur [2]. 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 2.5’ 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 2.5. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.

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

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \quad (2.17)$$

$$C_{sc} = -\frac{dQ_{sc}}{d\Psi_{sc}} A_{ox} \quad (2.18)$$

$$C = \frac{dQ_m}{dV} A_{ox} \quad (2.19)$$

Burada A_{ox} metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı yani MIS doğrultucu kontağın alanıdır. Şekil 2.5’de verilen eşdeğer devrede görüldüğü gibi MIS yapının eşdeğer kapasitansı, yüzey yük kapasitansı C_{sc} ile yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} in seri bağlanmasına eşdeğerdir.

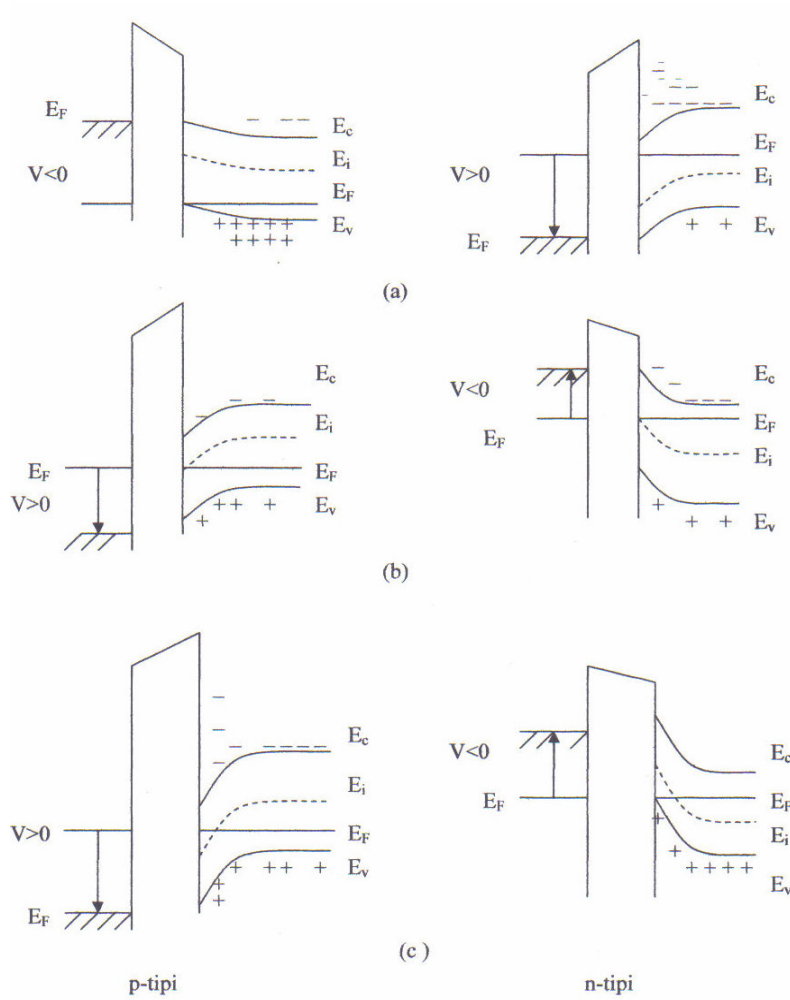
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.20)$$

Yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} ,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.21)$$

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 2.6’da gösterilen durumları bir p tipi yarıiletken için tanımlayalım [3,10,16].

Yığılım: P-tipi yarıiletkenli MIS 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 2.6a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_F - E_V$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına neden olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak yukarı büküldüğü bu duruma *yığılıma (accumulation)* durumu denir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur.



Şekil 2.6. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması.
a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

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 2.6b). 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 katkı iyonların bölgesini içerir. Bu bölgenin genişliği aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.22)$$

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

$$Q_{sc} = q N_a^- W = Q_a \quad (2.23)$$

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

Bu bölgede MIS kapasitansı 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.

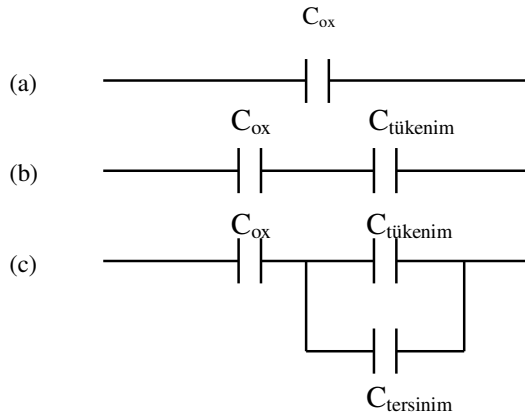
Tersinim: P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale büyük bir pozitif gerilim ($V \gg 0$) uygulandığı zaman bandlar oldukça aşağı doğru bükülür öyle ki saf durumdaki enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesi E_f 'nin altına düşer (Şekil 2.6c). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan 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,

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \quad (2.24)$$

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 2.7'deki gibidir [3].

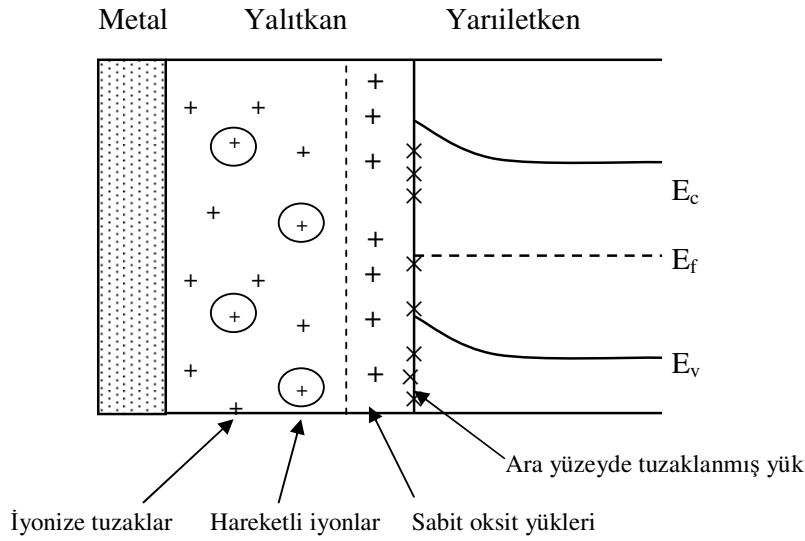


Şekil 2.7. İdeal bir MIS yapının devre şeması.
a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2.1.2. Gerçek MIS yapısı

İdeal bir yalıtıkanda, kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman

elektiriksel olarak nötr değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yönleme bağlı olarak birçok durum ortaya çıkar ve bu durumlar MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına neden olur [17]. Bu durumların sınıflandırılması Şekil 2.8. de gösterilmiştir [3].



Şekil.2.8. 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 *hysteresis* etkisi gözlenir. Kapasitans-gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla hysteresis yük yoğunluğu:

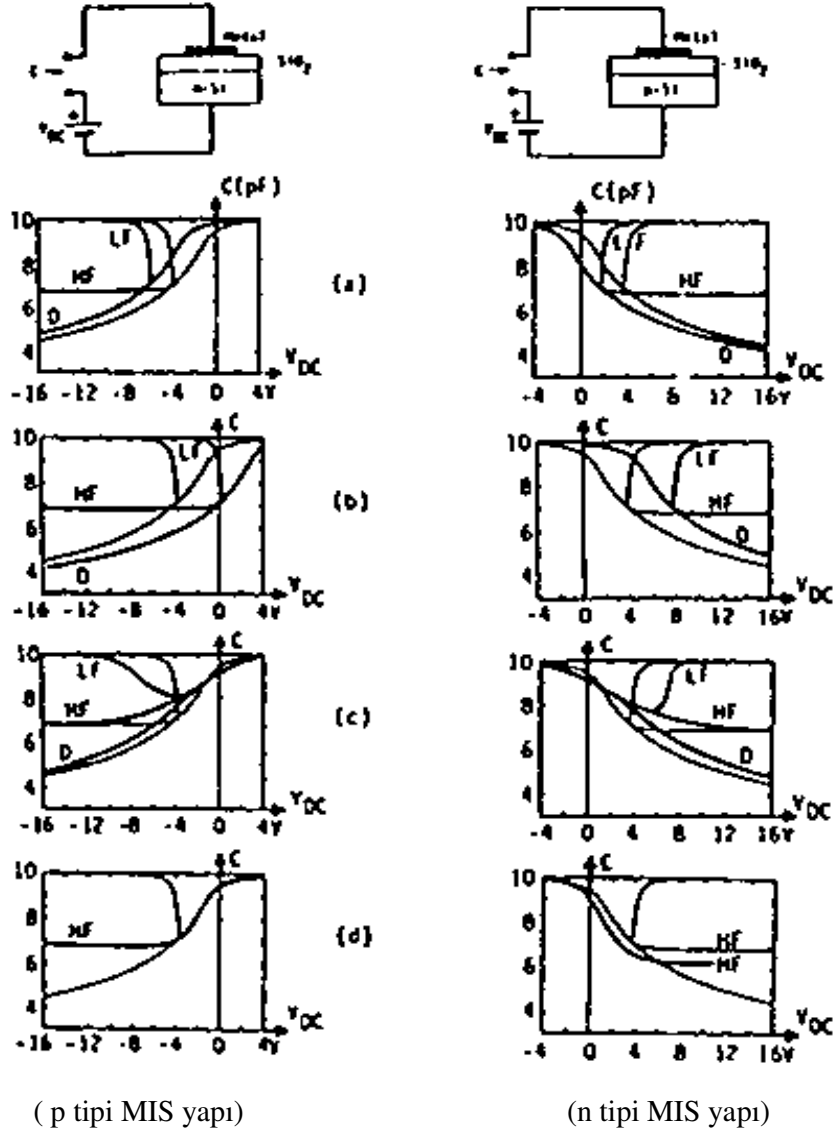
$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (2.25)$$

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. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri mevcut olduğu zaman yüksek frekans C-V eğrilerinin gerilim eksenini boyunca değişimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

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 [11]. 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) [12].



Şekil 2.9. p tipi ve n tipi MIS yapı için pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenini boyunca C-V eğrilerinin değişimi.

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

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (2.26)$$

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} ;

$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.27)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.28)$$

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.29)$$

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 [2].

Arayüzey durumları

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

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şu niceliklere ayrılabilir:

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

İletim: Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. Bu zaman gecikmesi arayüzey durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolun boşalın zamanıdır ve $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve R_{ss} arayüzey direncidir [12].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.30)$$

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;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.31)$$

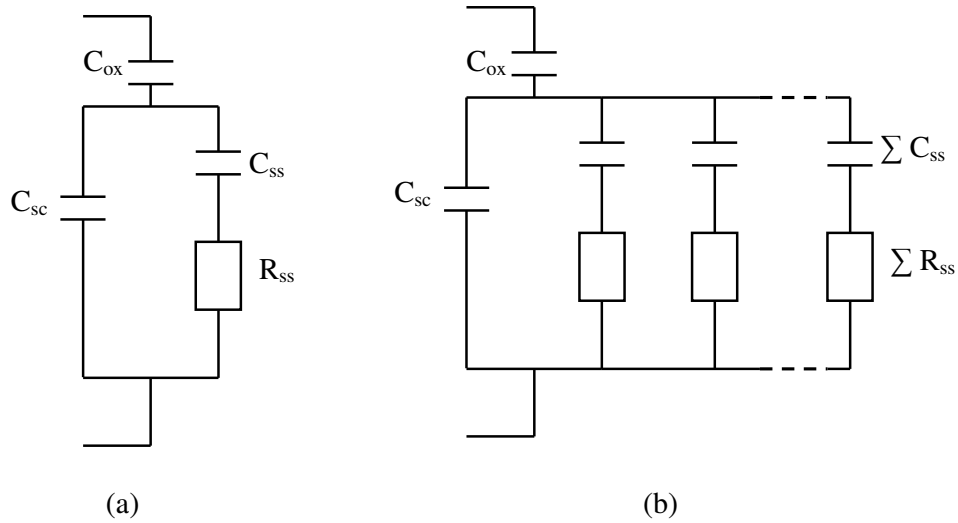
ile verilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır. Burada E enerji olup $E = q\psi_s$ ile verilir. E' nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Bunu (2.31) eşitliğinde yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (2.32)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez [19].

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 2.8'de verildiği gibidir.



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

Hareketli İyonlar

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [18]. 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

3.1. Al/SiO₂/p-Si (MIS) Yapıların Hazırlanması

3.1.1 Kristal temizleme

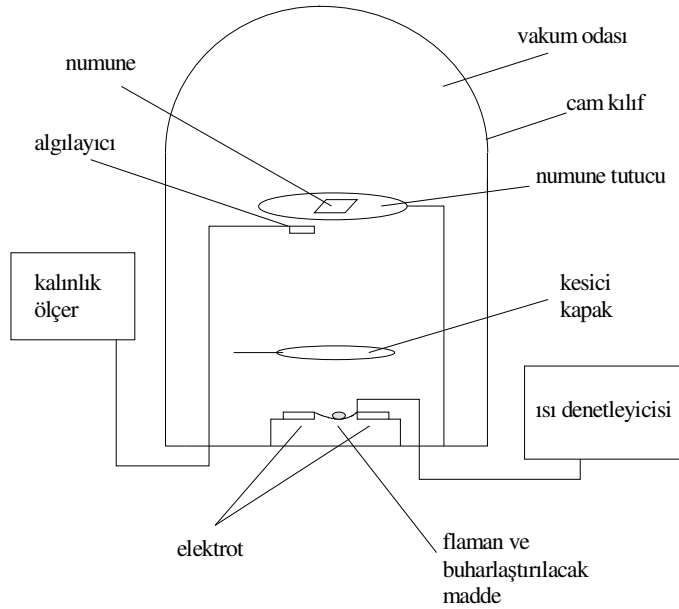
İdeale yakın bir metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi Schottky diyodu hazırlayabilmek için yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. Böylece iyi temizlenmiş olan bir yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusuru ortadan kaldırılabılır. 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. Diyod yapımında (100) yüzey yönelimli, 8 Ω.cm öz dirençli, 280 µm kalınlıklı, yaklaşık 50 mm çapında bor katkılı (p-tipi) Si tek kristal yapraklar kullanıldı. Bu p-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 (~16-18 MΩ) deiyonize su kullanıldı. Öncelikle temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız v.b. araç ve kaplar asetonla iyice yıkayıp deiyonize su ile durulandıktan sonra etüv fırınında yaklaşık 80 °C ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra yarıiletken kristaller önce aseton ve deiyonize su karışımında (1:5 ölçeğinde) ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika kadar yıkandıktan sonra deiyonize su (H₂O) ile durulandı.
- 2) Kristal trikloretilen (C₂HCl₃) + aseton (CH₃COCH₃) + metil alkol (CH₃OH) içinde üç dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 3) Sülfürik asit (H₂SO₄) ve hidrojen peroksit (H₂O₂)'in 1:1 hacim oranındaki karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.

- 4) Eşit oranlardaki %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle yıkandı.
- 5) 3:1:5 hacim oranında nitrik asit (HNO₃), hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlenip deiyonize su ile yıkandı.
- 6) 4:3 hacim oranında %38'lik hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 3 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- 7) Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle durulandı.
- 8) Son olarak kimyasal olarak temizlenmiş p-tipi silisyum kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kurutma işlemi kuru azot (N₂) ile yapıldı.

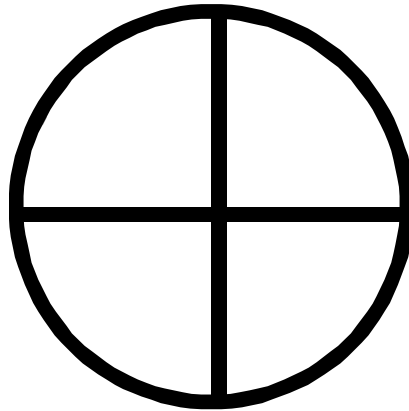
3.1.2 Omik kontakın oluşturulması

Al/SiO₂/p-Si yapılar veya diğer adıyla MIS tipi Schottky diyotlar hazırlanırken omik ve doğrultucu kontakın oluşturulması için yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı ve bu sistemin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verildi.



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 4.2'de gösterilen 50 mm çaplı ve ≈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 (Al) tel buharlaştırıldı. Buharlaşmanın başlamasından kısa bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa çekilerek, silisyumun mat yüzeyine ≈ 2000 Å kalınlığında Al kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine çökmesini önlemektir. Omik kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan Al, vakum ortamında ≈ 500 °C'de tavlansarak Al'nin silisyum içerisine çöktürülmesi sağlandı.

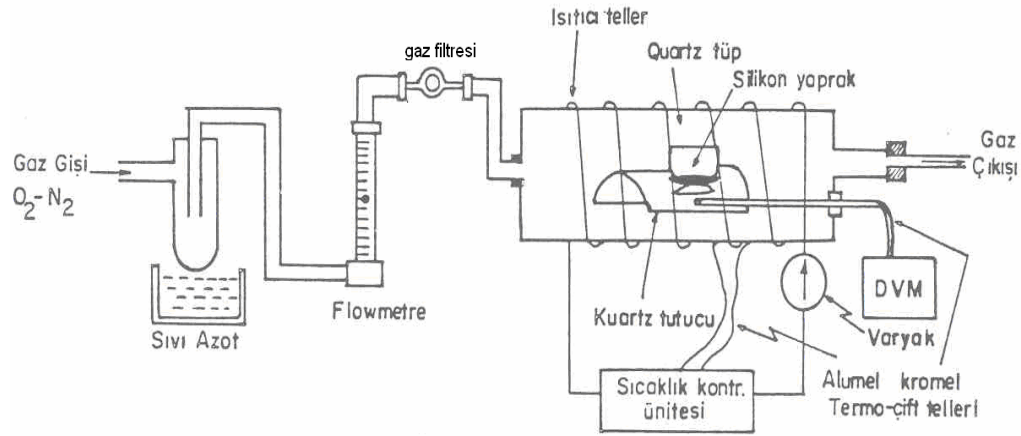


şekil 3.2. Omik kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske.

3.1.3 Yalıtkan silisyum dioksit (SiO₂) tabakanın oluşturulması

Yarıiletken yüzeyine bir yalıtkan veya oksit tabakası büyütmek için 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. Yani Si kristali oksidasyon fırınında ≈ 700 °C’de ve ortamdaki kuru nitrojen gazı (N_2) 1.5 l/dk hızında 1 saat süreyle geçirilerek ortamda bulunan eser miktarda bulunan O_2 gazı, $Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ reaksiyonu sonucunda ≈ 40 Å kalınlığında yalıtkan SiO_2 tabakası oluşturuldu. Kimyasal reaksiyonu sonucu büyütülen d kalınlığındaki SiO_2 yalıtkan tabakasının % 45 kadarı silisyum yüzeyinden içeri, kalanı da dışarı doğru büyür [9].



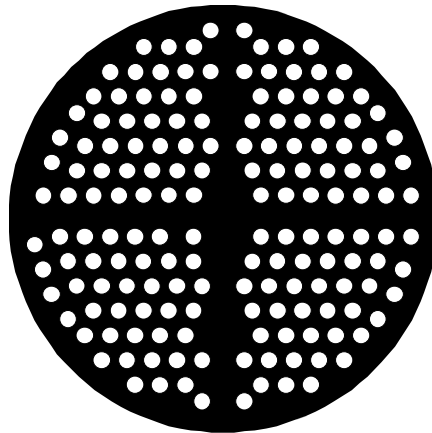
Şekil 3.3. Yalıtkan/oksit tabakanın büyütülmesinde kullanılan oksidasyon fırını.

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 set edilerek ve numunenin bulunduğu ortamdaki 1.5 l/dk hızında nitrojen (N_2) gazı geçirilerek 40 Å kalınlığında yalıtkan SiO_2 tabakası oluşturuldu. Bu yalıtkan tabakanın kalınlığı

1MHz'de HP 4192A empedans metre yardımıyla elde edilen C-V ölçümündeki kuvvetli yığılma bölgesinden ($C \cong C_{ox} = \epsilon \epsilon_0 A / d_{ox}$) hesaplandı.

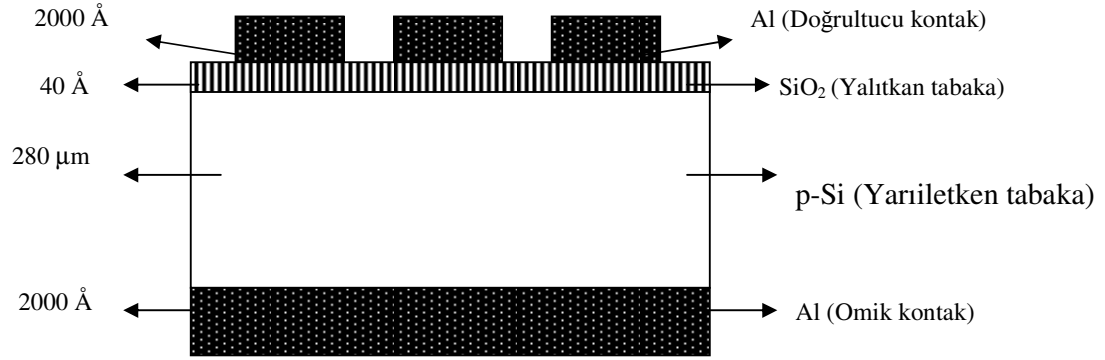
3.1.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzerine SiO₂ kaplanmış p-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 Al tel $\approx 10^{-6}$ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine 1mm çaplı ve ≈ 2000 Å kalınlığında Al doğrultucu kontaklar yine vakum sisteminde oluşturuldu. Böylece yaklaşık 40 adet Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapılar veya diğer adıyla MIS tipi Schottky diyotların/kontakların fabrikasyon işlemi tamamlanmış oldu. Oluşturulan bu MIS 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 MIS yapılar kriyostat içindeki tutucu üzerine monte edilerek kriyostat vakuma alındı. Deneysel ölçümlerin vakumlanmış ($\approx 10^{-3}$ Torr) kriyostat içinde gerçekleştirilmesi sonucunda gürültü gibi dış etkenler minimize edildi.



Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan bakır maske.

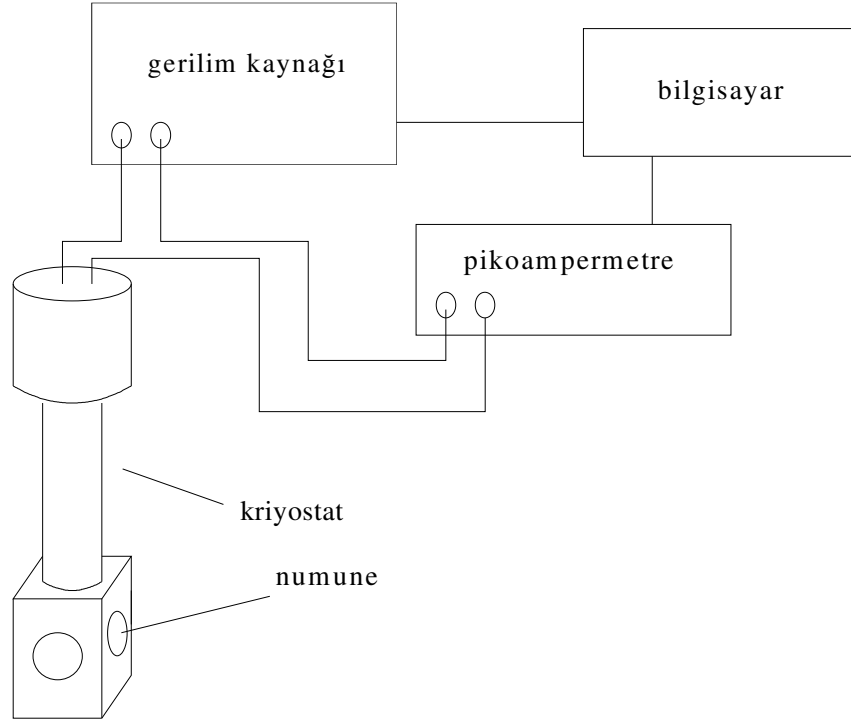
Hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların şematik bir gösterimi Şekil 3.5’ de verilmiştir.



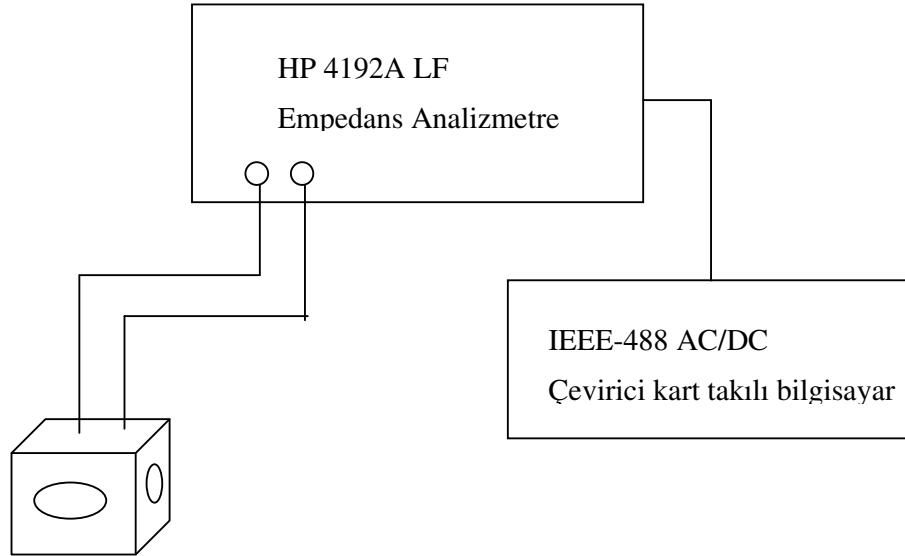
Şekil 3.5. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının şematik gösterimi

3.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Tüm deneysel ölçümler, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yarıiletken Laboratuvarında gerçekleştirildi. Hazırlanan numuneler radyasyona tutulmadan önceki elektriksel ölçümleri gerçekleştirildikten sonra Türkiye Atom Enerjisi Kurumuna (TAEK) bağlı Sarayköy’deki nükleer araştırma-eğitim merkezinde (SNAEM) bulunan ⁶⁰Co γ -ışınları kaynağında 5 kGy radyasyona maruz bırakıldı. Elektriksel ölçümler radyasyondan sonra yeniden tekrarlandı. Burada amaç, radyasyonun elektriksel ölçümler veya yapının temel fiziksel parametreleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Akım-gerilim (I-V) ölçümlerinde Keithley 220 programlanabilir sabit akım kaynağı, Keithley 614 elektrometre kullanıldı. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ ω -V) ölçümlerinde ise Hawlett Packard 4192 A LF (5 Hz-13 MHz) empedans analizmetre kullanıldı. Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenekler sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verildi.



Şekil 3.6 Akım-gerilim ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği.



Şekil 3.7. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Hazırlanan metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) yapıların bazı temel elektriksel parametreleri hem frekansa hem de radyasyona bağlı olarak deneysel akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçüm metotları kullanılarak incelendi. C-V ve G/ω-V ölçümleri doğru ve ters ön gerilim altında (-3 V ile +4V) geniş bir frekans aralığında (0.2 kHz-10 MHz) ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Ölçülen bu değerler kullanılarak yapının seri direnç eğrileri hem radyasyondan önce hem de radyasyondan sonra elde edildi. Ayrıca I-V ölçümlerinden yararlanılarak diyodun doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B(I-V)) ve arayüzey durumların (N_{ss}) dağılım profili hem radyasyondan önce hem de radyasyondan sonra, idealite faktörü ve etkin potansiyel engel yüksekliği kullanılarak elde edildi.

4.1 Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Metal-yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak oluşturulmuş yalıtkan tabaka metal-yarıiletken yapıyı metal-yalıtkan yarıiletken (MIS) yapısına dönüştürür. Yalıtkan tabakanın kalınlığı, $\approx 30 \text{ \AA}$ 'dan küçük ise arayüzey durumları metal ile dengede olurlar. Ancak yalıtkan tabakanın kalınlığı, $\approx 30 \text{ \AA}$ 'dan büyük ise arayüzey durumları yarıiletkenle dengede olurlar [3,13]. Yani bu yapıların hem I-V hem de C-V ve G/w-V karakteristikleri ve dolayısıyla temel elektriksel parametreler, yalıtkan arayüzey tabakası, seri direnç ve arayüzey durumlarından büyük ölçüde etkilenirler. Ayrıca akım-iletim mekanizması yüzey hazırlama işlemleri, metalden/yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği, sıcaklık ve gerilim gibi birçok parametreye de bağlı olabilir [20,21].

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

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) \quad (4.1)$$

Burada V_D diyot üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve I_0 ise ters doyum akımı olup

$$I_0 = AA^{**}T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

eşitliği ile verilir. Burada Φ_{Bo} sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği, A diyodun alanı ve A^{**} etkin Richardson sabitidir olup değeri p-tipi Si için $32 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ dir. Buna göre Eş. 4.2, Eş 4.1'de yerine yazılırsa;

$$I = AA^{**}T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) \right] \quad (4.3)$$

şekline dönüşür. Genelde idealite faktörünün 1 olması beklenir. Ancak pratikte idealite faktörünün, 1'den büyük olduğu ve hem sıcaklığa hem de uygulanan gerilime bağlı olduğu gözlenir. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının pek çok nedeni vardır. Bunlardan en çok karşılaşılan yalıtkan tabakanın kalınlığı, arayüzey durumları ve ϕ_B 'nin homojensizliğidir. Eğer yapı bir seri dirence sahip ise Eş. 4.3 ifadesi,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s)\right) \quad (4.4)$$

şeklinde olacaktır. Burada IR_s terimi yapının seri direnci üzerine düşen voltajdır.

Genelde $\ln I$ 'nın V 'ye göre grafiğinin bir doğru olması beklenir. Ancak deneysel sonuçlar doğru ön gerilim $\ln I$ - V grafiğinin yüksek voltajlarda özellikle seri direnç ve arayüzey durumlarından dolayı lineerlikten saptığını göstermiştir. Grafiğin doğrusallıktan sapması neticesinde idealite faktörü 1'den büyük olacaktır. Eş. 4.1 ifadesinde her iki tarafın \ln 'i alınırsa,

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{nkT} V_D \quad (4.5)$$

şeklinde bir doğru denklemi elde edilir.

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki doğru ve ters ön gerilim altındaki yarı-logaritmik akım-voltaj (I-V) karakteristiği, radyasyondan önce ve sonrası için Şekil 4.1’de verildi. Yapının idealite faktörü, Şekil 4.1’deki lnI-V eğrilerinin eğiminden ($\tan\theta = q/nkT$) yararlanılarak,

$$n = \frac{q}{kT \tan \theta} \quad (4.6a)$$

eşitliğinden radyasyondan önce ve sonrası için hesaplandı. Ayrıca idealite faktörünün voltaja bağlı değişimi de Eş. 4.5’den yararlanılarak,

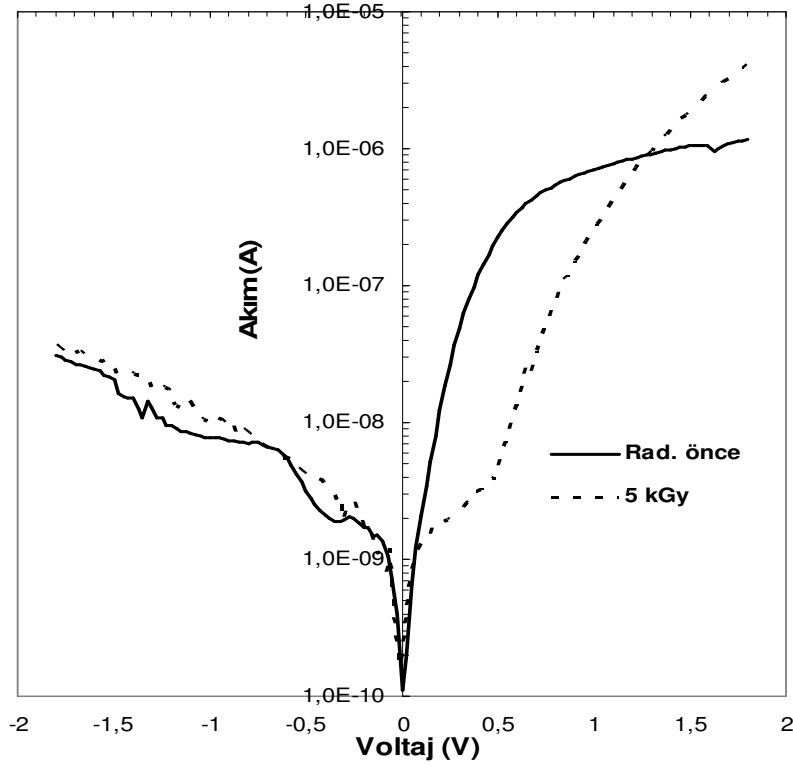
$$n_{(v)} = \frac{qV}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)kT} \quad (4.6b)$$

eşitliğinden radyasyondan önce ve sonrası için elde edilerek Şekil 4.2’de verildi. I₀ doyma akımı değeri ise lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının lnI eksenini sıfır voltajda kestiği noktadan elde edildi. Bu I₀ ve diyodun alanı (A) değerleri kullanılarak potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) değerleri Eş 4.2’den yararlanılarak ,

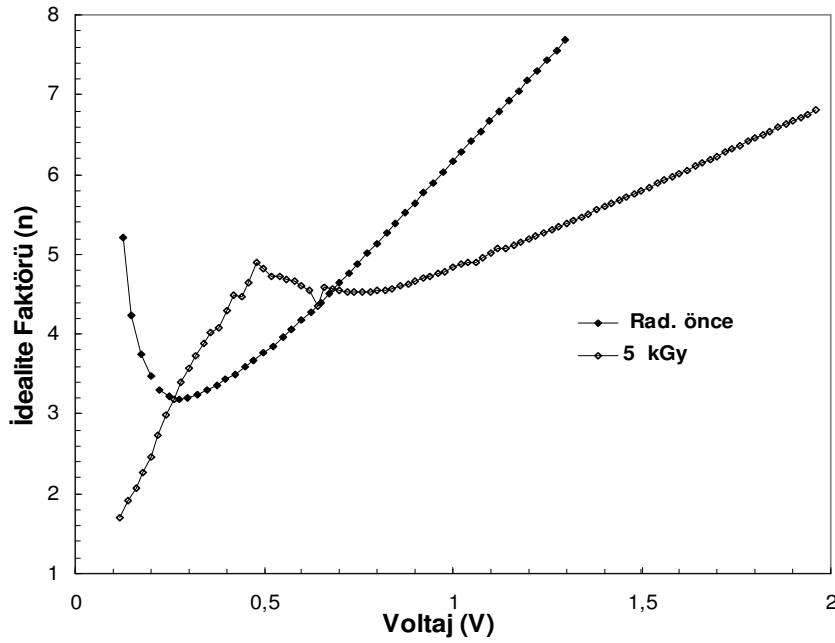
$$\Phi_B(I-V) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA * T^2}{I_0}\right) \quad (4.7)$$

eşitliğinde radyasyondan önce ve sonrası için elde edildi.

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi n idealite faktörünün değeri, orta gerilim bölgesinde radyasyondan sonra artarken daha ileri gerilim bölgelerinde azalmaktadır. Bu durum seri direncin radyasyondan dolayı azaldığının bir göstergesidir.



Şekil 4.1. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının radyasyondan önce ve sonraki akım-voltaj karakteristiği.



Şekil 4.2. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için idealite faktörünün radyasyondan önce ve sonra voltaja bağlı değişimi.

İdealite faktörünün birden büyük olması yalıtkan arayüzey tabakasının bir sonucu olduğundan idealite faktörü arayüzey parametrelerine de bağlı olmalıdır [13,21,28]. Metal p-tipi bir yarıiletken arayüzey durumlarının enerjisi (E_{ss}), valans bandının tepesine göre,

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (4.8)$$

eşitliği ile verilir. Arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) dağılım profili doğru ön gerilim I-V ölçümlerinden enerjinin ($E_{ss} - E_v$) bir fonksiyonu olarak, engel yüksekliğinin (Φ_e) gerilime bağlı olduğu dikkate alınarak elde edildi. Yarıiletken ile dengede olan arayüzey durumları için idealite faktörünü oksit tabaka kalınlığı (δ) ve arayüzey durum yoğunluğu N_{ss} niceliklerine bağlayan ifade

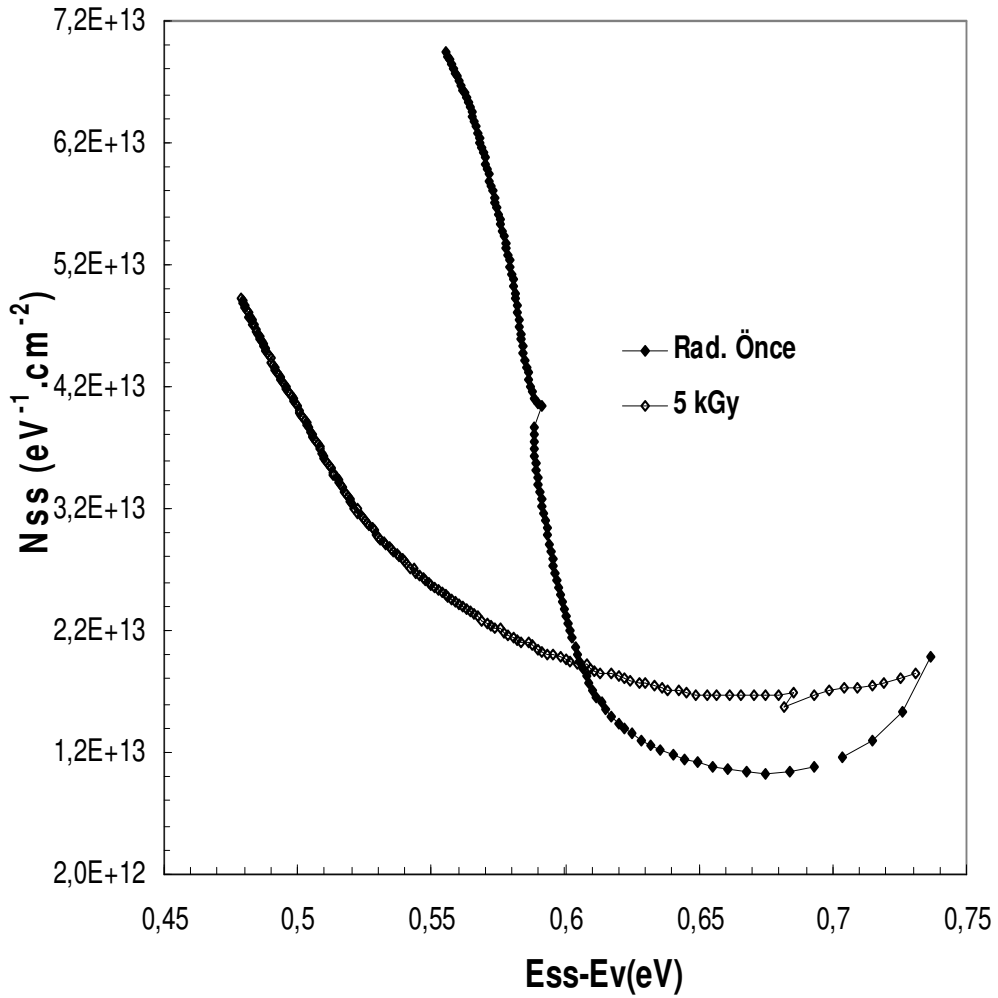
$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (4.9)$$

ile verilir [13,20,28]. Burada δ yalıtkan ara yüzey tabaka kalınlığı, W_D uzay yükü tabakasının kalınlığı, ϵ_s ve ϵ_i sırasıyla yarıiletkenin ve yalıtkan tabakanın dielektrik sabitlerdir. Yalıtkan tabaka (SiO_2) kalınlığı δ , yüksek frekanstaki (1 MHz) C-V karakteristiklerinden yararlanarak $C_{ox} = \epsilon_i \epsilon_0 A / \delta$ eşitliğinden $\delta = 40 \text{ \AA}$ olarak elde edildi. Burada p-tipi Si için $\epsilon_s = 11,8 \epsilon_0$, $\epsilon_i = 3,8 \epsilon_0$ ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitleridir [3,11,23]. Eş.4.9'da, köşeli parantez içerisindeki terim, yalıtkan tabaka kalınlığına ve arayüzey durumlarının büyüklüğüne bağlı olarak ideal durumdan uzaklaşır. Eş. 4.9'dan yararlanılarak gerilime bağlı $N_{ss}(V)$ değerleri,

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} ((n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D}) \right] \quad (4.10)$$

eşitliğinden elde edilebilir [13,22,29]. Eş. 4.8 ve Eş. 4.10'dan yararlanılarak arayüzey durumlarının enerjeye bağlı dağılım profili, hem radyasyondan önce hem de sonrası için elde edilerek Şekil 4.3'de verildi. Şekilden görüldüğü gibi ara yüzey

durumlarının yoğunluğu, radyasyondan sonra valans bandından yasak enerji aralığının yaklaşık ortasına doğru azalırken daha sonrasında ise artmaya başlamakta ve yaklaşık $E_{ss}-E_v$ 'nin 0,61 eV değerinde kesişmektedir. Bu davranış arayüzey durumlarının farklı voltaj altındaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir. Deneysel ölçümlerden arayüzey durumlarının yoğunluğu yaklaşık $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ bulundu. Benzer sonuçlara literatürde de rastlanmıştır [22-27]. Al/SiO₂/p-Si yapısı için n , \square_e , I_o , $E_{ss}-E_v$ ve N_{ss} değerlerinin radyasyondan önce ve sonraki voltaja bağlı değişimi sırasıyla Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının doğru öngerilim I-V karakteristiklerinden elde edilen arayüzey durumlarının radyasyondan önce ve sonraki dağılım profili.

Çizelge 4.1. Al/SiO₂/p-Si yapısı için doğru ön gerilim I-V verilerinden elde edilen N_{ss}'lerin enerji aralığındaki dağılım profili a) Radyasyondan önce
b) Radyasyondan sonra

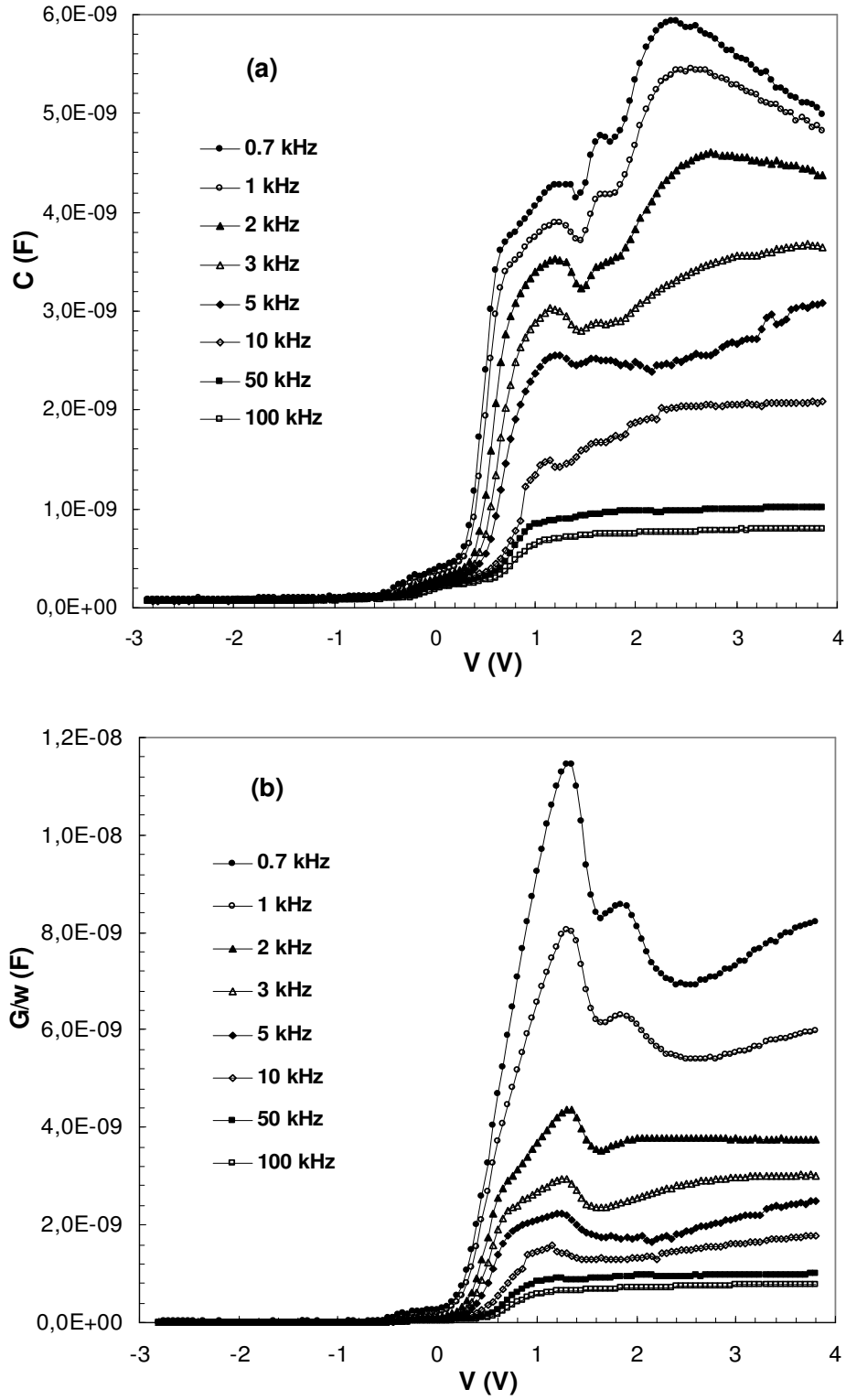
a) Radyasyondan önce				
V (V)	n _(v)	Φ _e (eV)	E _{ss} -E _v (eV)	N _{ss} (eV ⁻¹ .cm ⁻²)
0,125	5,211	0,862	0,737	1,988E+13
0,175	3,746	0,888	0,715	1,296E+13
0,225	3,305	0,917	0,693	1,088E+13
0,275	3,189	0,949	0,675	1,033E+13
0,325	3,238	0,985	0,661	1,056E+13
0,375	3,358	1,024	0,650	1,113E+13
0,425	3,504	1,064	0,640	1,182E+13
0,475	3,670	1,106	0,632	1,260E+13
0,525	3,856	1,149	0,625	1,348E+13
0,575	4,061	1,193	0,620	1,445E+13
0,625	4,282	1,239	0,615	1,549E+13
b) Radyasyondan sonra				
V (V)	n _(v)	Φ _e (eV)	E _{ss} -E _v (eV)	N _{ss} (eV ⁻¹ .cm ⁻²)
0,125	1,708	0,879	0,759	3,332E+12
0,175	2,264	0,930	0,750	5,962E+12
0,225	2,744	0,969	0,749	8,227E+12
0,275	3,389	1,026	0,746	1,127E+13
0,325	3,727	1,063	0,743	1,287E+13
0,375	4,089	1,116	0,736	1,458E+13
0,425	4,481	1,155	0,735	1,643E+13
0,475	4,905	1,211	0,731	1,843E+13
0,525	4,733	1,239	0,719	1,762E+13
0,575	4,661	1,285	0,705	1,728E+13
0,625	4,557	1,313	0,693	1,679E+13

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

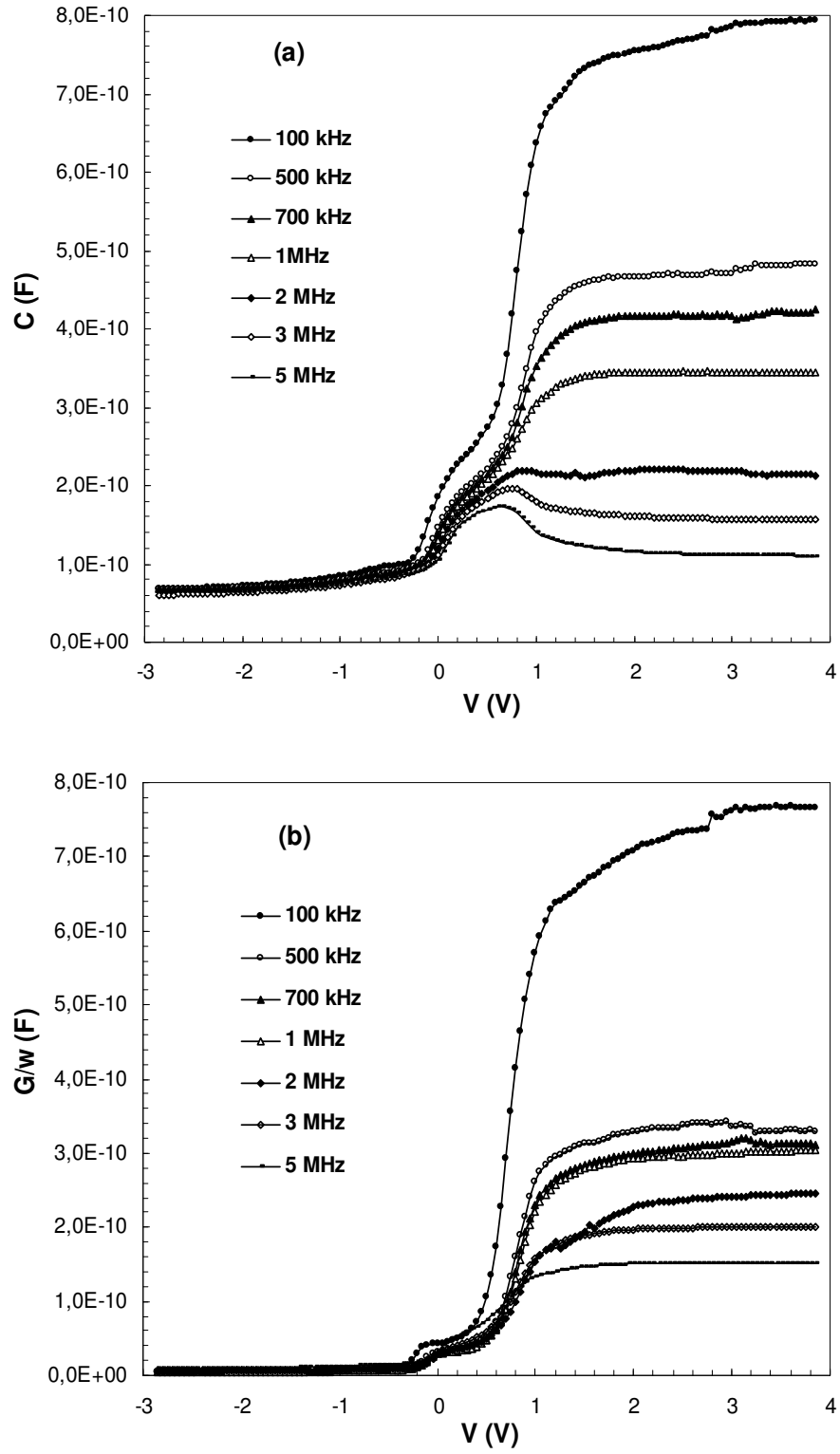
4.2.1. Radyasyondan önce frekansa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümleri

Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapısının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri oda sıcaklığında hem geniş bir frekans (0,2 kHz-10MHz) hem de voltaj aralığında (-3 ile 4V) alındı. Al/SiO₂/p-Si yapısının düşük frekanslar aralığında (0,7 kHz-100 kHz) elde edilen C-V ve G/ω -V grafikleri Şekil 4.4'de, yüksek frekanslar aralığında (100 kHz-5 MHz) elde edilen C-V ve G/ω -V grafikleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Geniş bir frekans aralığında C-V ve G/ω -V ölçümleri bize hazırlanan aygıtın temel elektriksel ve dielektrik özellikleri hakkında daha geniş ve önemli bilgiler verir. Son zamanlarda, MIS yapılarla ilgili literatürde bir çok deneysel çalışma bulunmaktadır [37,39,41,42]. Ancak bu yapılarda yalıtkan arayüzey tabakası, arayüzey durumları, seri direnç ve radyasyon etkisinin temel elektriksel parametreler üzerindeki etkileri henüz tam aydınlığa kavuşturulmamıştır.

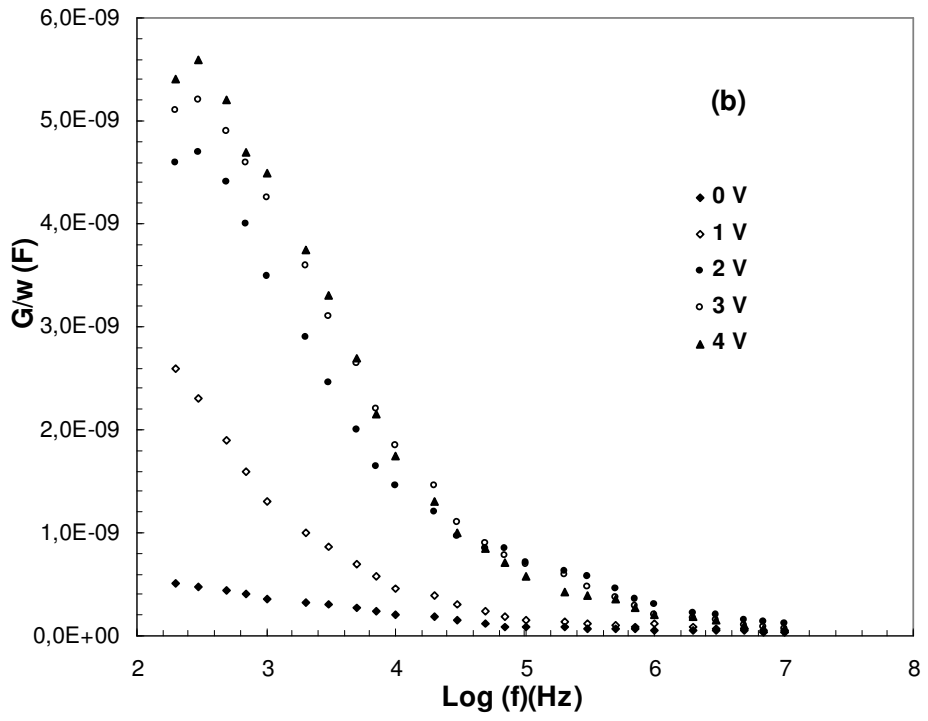
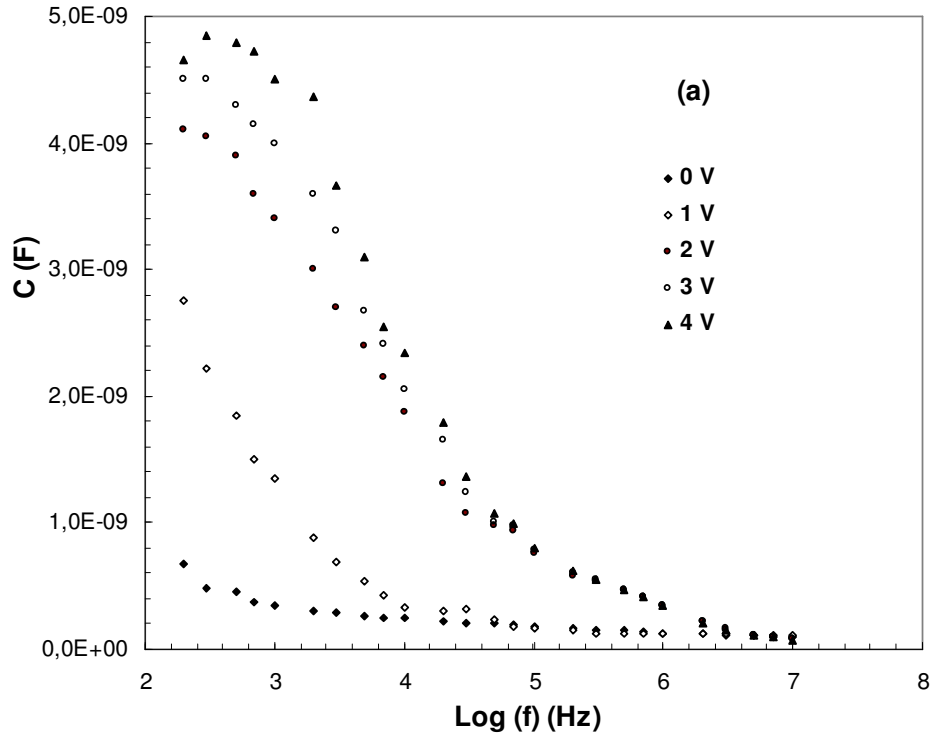
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'den de görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri tüm frekanslar için tersinim bölgesinde (-3 V ile -1V arasında) neredeyse sabit kalmaktadır. Ancak tükenim ve yığılma bölgesinde kapasitans ve iletkenlik değerleri frekansa bağlı farklılık göstermektedir. Bu bölgelerde kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekansla azalmaktadır. Yüksek frekanslardaki daha düşük C ve G/ω değerlerinin gözlenmesi, Si ile dengede olan arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilebilir [3,11,18,30-34]. 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 sinyali 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 [3,11,35]. Böylece kapasitansa ve iletkenliğe, yüksek frekanslarda arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşır. 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 4.4. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının düşük frekanslardaki a) C-V eğrileri b) G/w-V eğrileri



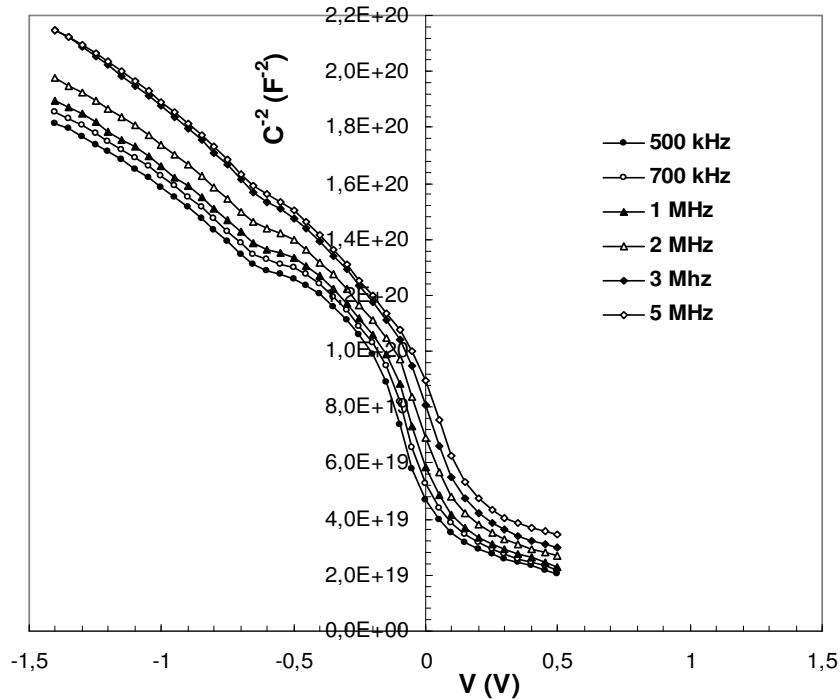
Şekil 4.5. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının yüksek frekanslardaki a) C-V eğrileri
b) G/w-V eğrileri



Şekil 4.6. 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 [30-34]. Yani kuvvetli yığılma bölgesinde C-V ve G/w-V ölçümlerinde R_s 'den dolayı bir pik vermektedir [11]. Gerilimin kapasitans ve iletkenlik değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı voltajlarda frekansa bağlı C ve G/w eğrileri Şekil 4.6'da verildi. Şekillerden görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri voltaj arttıkça artmakta yeterince ileri voltajlarda ise hemen hemen değişmemektedir.

Arayüzey durumlarından dolayı Şekil 4.7' de görüldüğü gibi düşük frekanslardaki C^2 -V eğrileri, ters beslemde lineer bir davranış sergilememektedir. Çünkü düşük frekanslarda C-V eğrilerinin periyodu ($T=1/w$), arayüzeyde yerleşmiş olan taşıyıcıların ömrüne göre yeterince büyük olduğundan hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilir ve dolayısıyla hem kapasitans hem de iletkenliğe bir katkı getirecektir [12]. Arayüzey durumlarından dolayı oluşan kapasitans ve iletkenliğe ilave kapasitans ve iletkenlik adı verilir.



Şekil 4.7. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen $1/C^2$ -V eğrileri.

Seri direnç değerini belirlemek için, MIS yapılar önce 40mV_{rms} 'lik bir osilasyon voltajı altında uyarıldı ve sonra dc gerilim -3V değerinden $+4\text{V}$ değerine kadar 50mV adımlarla değiştirilerek tersinim bölgesinden yığılım bölgesine kadar C-V ve G/ω -V eğrileri yüksek frekanslar için elde edildi. Yüksek frekanslarda, paralel RC devresini [11,38] kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli yığılım altındaki eşdeğer devrenin toplam admittansı ve empedansı ($Y_{\text{ma}}=1/Z_{\text{ma}}$),

$$Y_{\text{ma}} = 1/Z_{\text{ma}} = G_{\text{ma}} + j\omega C_{\text{ma}} \quad (4.11)$$

eşitliğiyle verilir. Gerçek seri direnç (R_s) değerleri, $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$ (MIS) için elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki değerlerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir [11,36]:

$$R_s = \frac{G_{\text{ma}}}{(G_{\text{ma}}^2 + C_{\text{ma}}^2 \omega^2)} \quad (4.12)$$

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

$$C_{\text{ma}} = \frac{C_{\text{ox}}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{\text{ox}}^2)} \quad (4.13)$$

eşitliği ile verilir. Eş 4.12 ve Eş 4.13 kullanılarak C_{ox} değeri,

$$C_{\text{ox}} = C_{\text{ma}} \left[1 + \left(\frac{G_{\text{ma}}}{\omega C_{\text{ma}}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{\text{ox}}} \quad (4.14)$$

Şekline dönüştürülebilir. Burada $\epsilon_i=3,8\epsilon_0$ [1] ve $\epsilon_0 (=8,85 \times 10^{-14} \text{ F/cm})$ sırasıyla yalıtkan arayüzey tabaka ve boşluğun geçirgenlik sabitleridir. 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,

$$C_c = \frac{[G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2] C_{ma}}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.15)$$

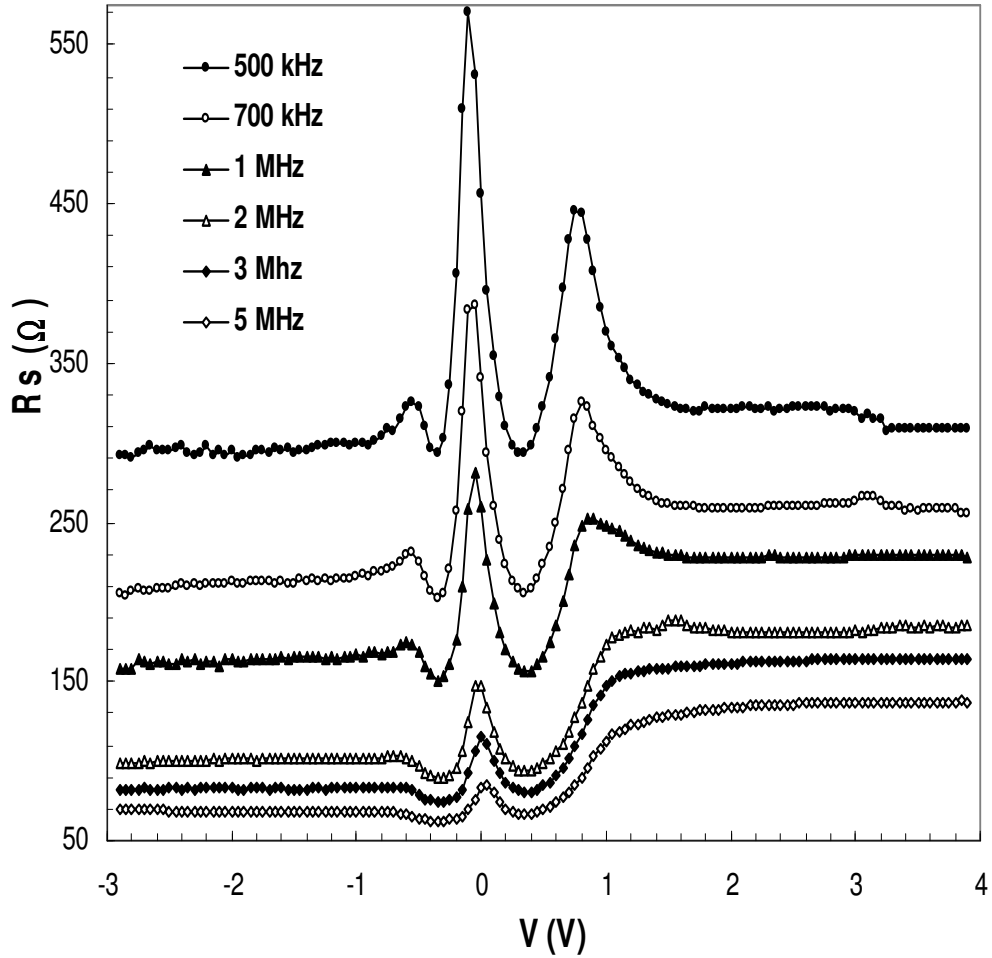
$$G_c = \frac{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2 a}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.16)$$

eşitliklerinden elde edilebilir. Burada a parametresi aşağıdaki şekilde verilir:

$$a = G_{ma} - [G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2] R_s \quad (4.17)$$

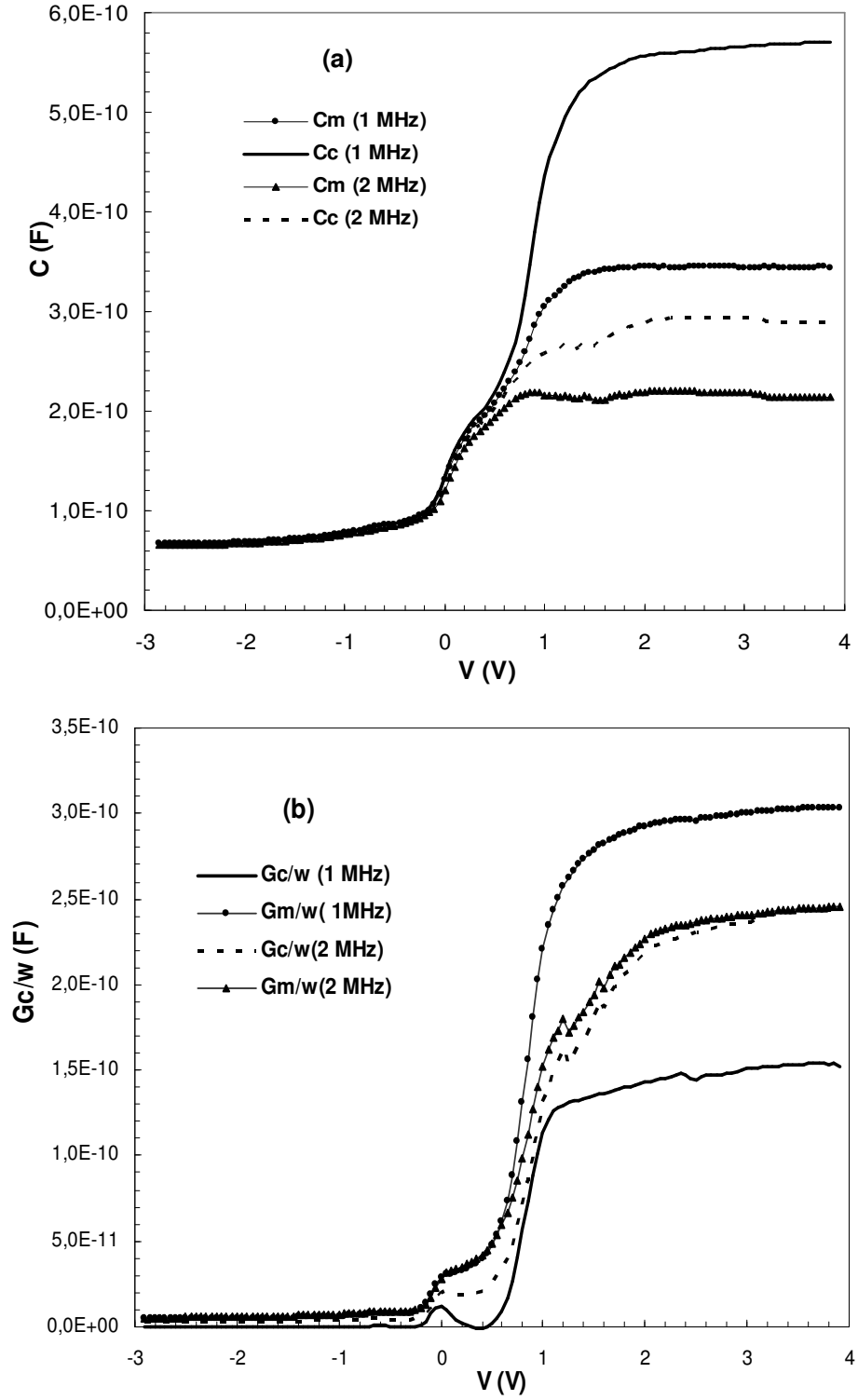
Bir yarıiletken aygıtın (diyot v.b.) gerçək seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçək değeri ve ters gerilimlerde ise sonsuza doğru gider. MIS yapı için bulunan seri direncin (R_s) farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi Şekil 4.8'de verildi.

Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi R_s , frekans arttıkça azalmakta, özellikle düşük frekanslarda iki pik vermektedir. Yeterince yüksek frekanslarda ise ($f \geq 2\text{MHz}$) pikler kaybolmaktadır. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının daha yüksek yoğunlukta olduğuna atfedilebilir [3,11,18]. Çünkü düşük frekanslarda elde edilen gerek kapasitans-voltaj (C-V) gerekse iletkenlik-voltaj (G/ω -V) değerleri için arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilir. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumları ac sinyalini takip edemez. Bu nedenle R_s değerinin yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 500 \text{ kHz}$) elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinden hesaplanması, değerin güvenilirliği ve doğruluğu açısından gereklidir.



Şekil 4.8. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri.

Gerçek MIS kapasitans ve iletkenlik veya düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/w)'i elde etmek için, iki farklı yüksek frekansta (1 MHz ve 2 MHz için), doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C_c -V ve hem de G_c/w -V eğrileri Eş 4.15 ve Eş 4.16 kullanılarak seri direnç için düzeltildi ve Şekil 4.9'da verildi. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitans (C_c) değerleri Şekil 4.9a'da görüldüğü gibi özellikle doğru beslem altında artan voltajla artarken, düzeltilmiş iletkenlik (G_c/w) değerleri ise azalmaktadır (Şekil 4.9b).

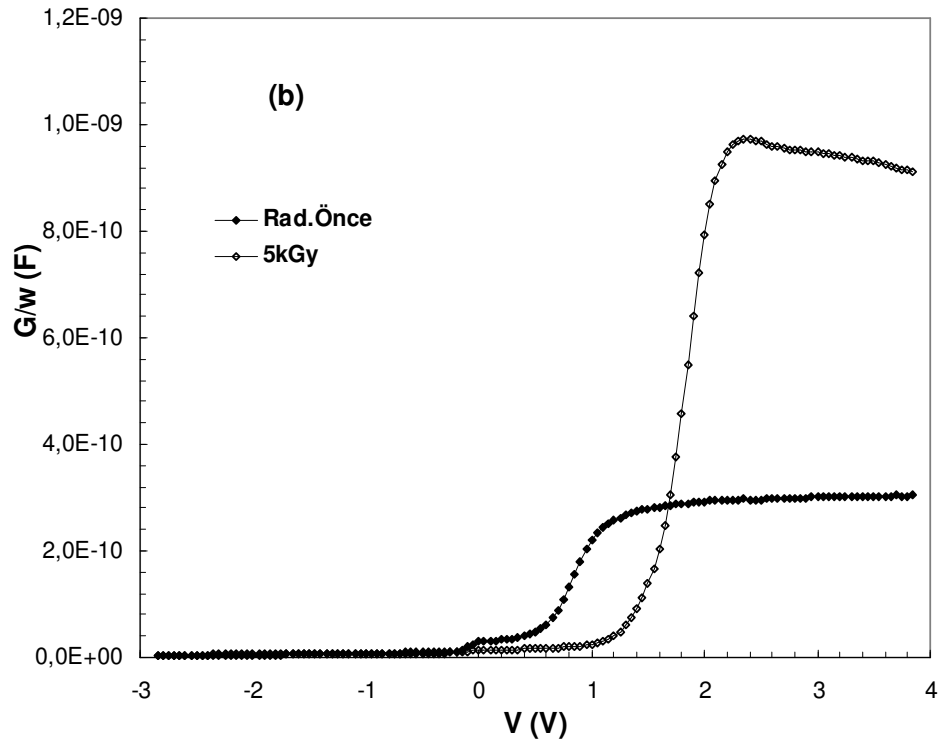
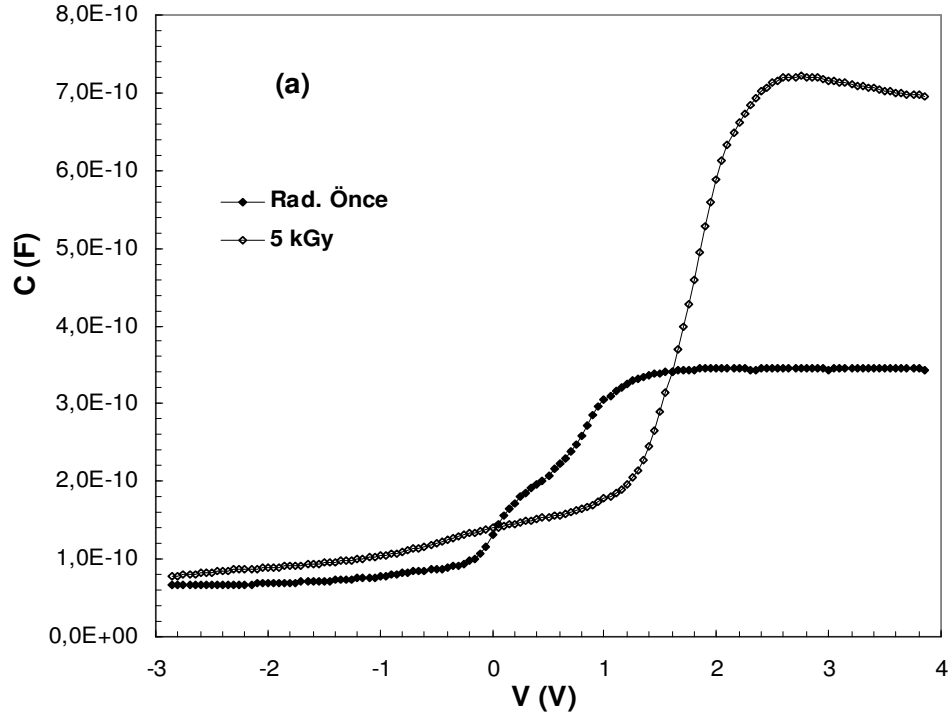


Şekil 4.9. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığında iki farklı yüksek frekans için ölçülen ve düzeltilmiş a) C_c -V eğrileri b) G_c/\square -V eğrileri.

4.2.2. Radyasyondan sonra C-V ve G/w-V ölçümleri

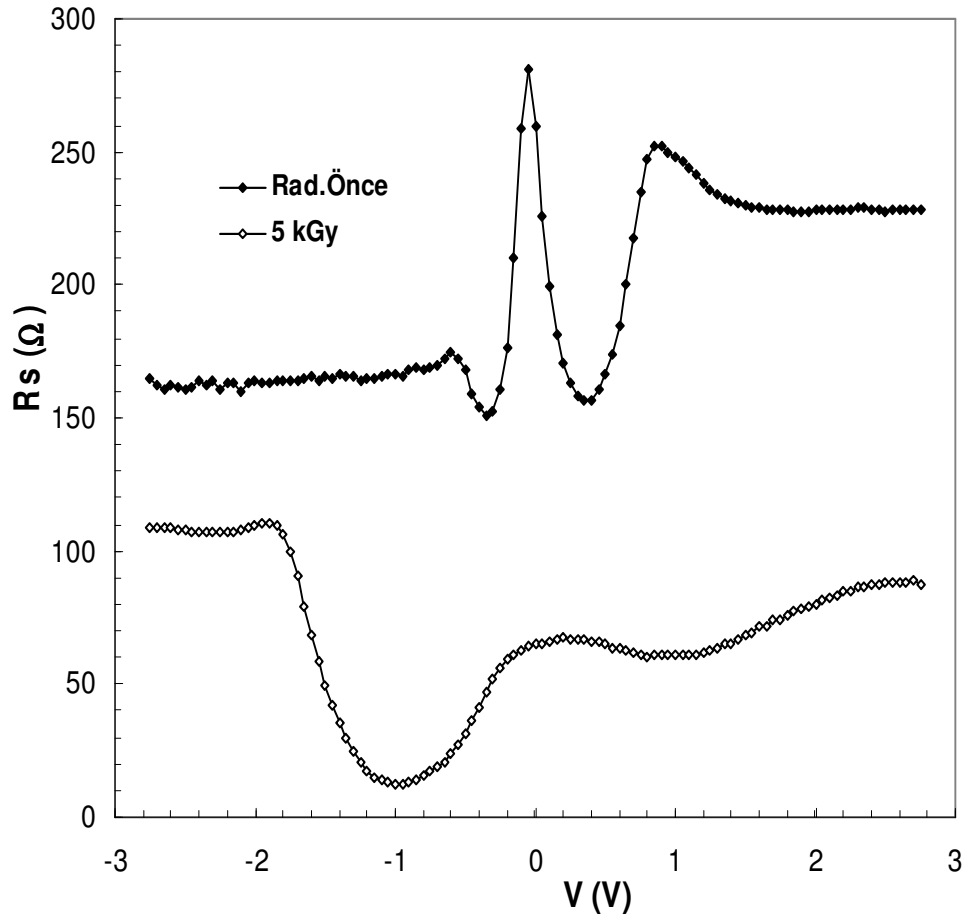
Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapısının frekansa bağlı C-V, G/w-V ölçümleri gerçekleştirildikten sonra radyasyonun temel elektriksel parametreler üzerine etkisini incelemek amacıyla yapı çıkış hızı 2,12 kGy/saat olan ⁶⁰Co γ -ışınlarına toplam 5 kGy radyasyona maruz bırakılarak bu ölçümler 1 MHz frekansında tekrar alındı. Radyasyona bağlı 1MHz'de elde edilen C-V, G/w-V eğrileri radyasyon öncesi eğrileriyle birlikte Şekil 4.10'da verildi. Şekilden görüldüğü gibi, radyasyondan sonra kapasitans ve iletkenlik değerleri genelde artmakta ancak bölgeden bölgeye farklılıklar göstermektedir.

Radyasyon etkisiyle oluşan elektronlar deşiklerden daha hareketlidir. Pozitif yüklü deşikler nispeten hareketsiz ve oksit içerisinde tuzaklanmış olabilir. Diğerleri ise Si-SiO₂ ara yüzeyinde hareket edebilirler ve burada arayüzey tuzakların oluşumuna neden olurlar. Radyasyon sonucunda bir taşıyıcı olan arayüzey durumları ya iyonize olmakta veya tersine nötral olabilmektedirler. Aynı olay yarıiletken yüzeyinde de gerçekleşeceğinden net etki bu iki etkinin toplamı olacaktır. Radyasyon yarıiletkenin tükenim bölgesinde elektron-deşik çiftleri üretimine neden olur. Elektronlar arayüzeye doğru, deşikler ise tükenim bölgesindeki mevcut alan altındaki gövdeye doğru hareket ederler. Arayüzey yakınında biriken fazlalık elektronlar kuvvetli tersinim altında yapının kapasitans ve iletkenliğinde bir artışa neden olurlar [40,43,44].



Şekil 4.10. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının 1 MHz' de radyasyondan önce ve sonraki
a) C-V eğrileri b) G/w-V eğrileri.

Seri direnç değerleri numune radyasyona tabi tutulduktan sonra tekrar hesaplandı ve 5kGy için 1 MHz'deki R_s -V eğrileri Şekil 4.11'de gösterildi. Şekilden görüldüğü gibi radyasyondan sonra numunenin seri direnci azalmaktadır. 1MHz'de radyasyona bağlı elde edilen R_s -V eğrileri bir pik vermektedir ve radyasyondan sonra bu pik tersinim bölgesine doğru kaymaktadır. Çünkü bir elektronik aygıtın seri direnci ileri pozitif beslemlerde (doğru beslem) gerçek değerine, ileri negatif beslemlerde (ters beslem) ise sonsuza doğru gider [34,45,46]. Yüksek frekanslarda C-V ve G/ω -V eğrilerine arayüzeylerden kaynaklanan bir katkı gelmediğinden dolayı yeterince yüksek gerilim ve frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) ölçülen seri direnç değerleri oldukça güvenilir değerlerdir.



Şekil 4.11. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının 1 MHz' de radyasyondan önce ve sonraki seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) yapıların elektriksel karakteristikleri, doğru ön gerilim (belsem) akım-voltaj (I-V) ve hem doğru hem de ters beslem kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçüm teknikleri kullanılarak incelendi. Hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının C-V ve G/w-V ölçümleri geniş bir frekans aralığında (0,2 -10000 kHz) oda sıcaklığında ölçüldü. Daha sonra hazırlanan bu MIS yapılar, 5 kGy lik bir γ-radyasyonuna maruz bırakılarak I-V, C-V ve G/ω-V ölçümleri tekrar gerçekleştirildi. Burada amaç hazırlanan bu MIS yapıların idealite faktörü (n), sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}), yapının seri direnci (R_s) ve arayüzey durumları gibi temel elektriksel parametreleri frekans ve radyasyona bağlı değişimini incelemektir.

Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi radyasyondan önce ve sonraki yarı-logaritmik LnI-V eğrileri literatüre uygun olarak düşük gerilim (V < 0,1V), orta gerilim (~0,1-0,6 V) ve yüksek gerilim (V > 0,6 V) olmak üzere üç farklı bölgeye sahiptirler. Yüksek gerilim bölgesinde LnI-V eğrileri seri dirençten dolayı lineerlikten sapma göstermektedirler [3,11,23]. Ancak orta gerilim bölgesinde ise yaklaşık lineer bir davranış göstermektedirler. Bu lineer bölgeden faydalanılarak hazırlanan yapının temel elektriksel parametreleri olan idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) ve doyum akımı (I₀) hesaplandı. Bu lineer bölgenin eğiminden hesaplanan idealite faktörü değerleri radyasyondan önce ve sonrası için sırasıyla 3.49 ve 4.61 bulundu. İdealite faktörünün birden büyük olması, yapının seri direncine ve yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarının (N_{ss}) özel bir dağılımına atfedildi [11,51]. Şekil 4.2'den görüldüğü gibi voltaja bağlı n_(V) değerleri, orta gerilim bölgesinde radyasyondan sonra artarken daha ileri gerilim bölgelerinde azalmaktadır. Bu durum seri direncin radyasyondan dolayı azaldığına atfedilebilir [52]. Arayüzey durumları, arayüzey oksit/yalıtkan tabakanın kalınlığına bağlı olarak metal veya yarıiletken ile yük alışverişinde bulunurlar. Genelde yalıtkan tabaka ince ise (d_{ox} ≤ 30 Å) arayüzey durumları metal ile dengede ve yalıtkan tabaka kalın ise (d_{ox} ≥ 30 Å) yarıiletken ile dengededir denilir [3,13,27,39]. Hazırlanan MIS yapılarda yalıtkan

arayüzey tabakasının kalınlığı yığılma bölgesindeki yüksek frekans (1MHz) C-V eğrisinden $\approx 40 \text{ \AA}$ elde edildi.

Arayüzey durumlarının (N_{ss}), $E_{ss}-E_v$ enerji aralığındaki dağılım profili doğru beslem I-V ölçümlerinden, idealite faktörü ve potansiyel engelinin voltaja bağlı değerlerinden faydalanılarak radyasyondan önce ve sonrası için elde edildi. Şekil 4.3'den görüldüğü gibi ara yüzey durumlarının yoğunluğu, radyasyondan sonra valans bandından yasak enerji aralığının yaklaşık ortasına doğru azalırken daha sonrasında ise artmaya başlamakta ve yaklaşık $E_{ss}-E_v$ 'nin 0,61 eV değerinde kesişmektedir. Bu davranış arayüzey durumlarının farklı voltaj altındaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir.

I-V karakteristiklerinden oda sıcaklığında hesaplanan arayüzey durum yoğunluğu değerleri Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi Al/SiO₂/p-Si yapısı için $\sim 10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olup farklı araştırmacılar tarafından elde edilen değerlerle uyumludur [11]. Hazırlanan Schottky diyotlarda hesaplanan diğer bir fiziksel parametre eklemine elektriksel davranışını belirleyen Φ_B potansiyel engel yüksekliğidir. Oda sıcaklığında I-V ölçümlerinden hesaplanan Φ_B değerleri $\sim 0,7-0,8 \text{ eV}$ civarındadır. Bu değerler MS yapılara göre düşüktür. Metal ile yarıiletken arasında yeterince büyük bir oksit tabakası düşünüldüğünde Φ_B değerleri literatürde MIS yapılar için hesaplanan Φ_B değerleri ile uyumludur.

Bunlara ilave olarak Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların radyasyondan önce C-V ve G/w-V eğrileri hem düşük hem yüksek frekanslar için elde edilerek sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de verildi. Bu eğrilerde görüldüğü gibi frekansın artmasıyla C-V ve G/w değerleri azalmakta olup düşük frekanslarda gözlenen C-V ve G/w pikleri kaybolmaktadır. Bu şekilde pik ve yarılımların hem frekansa hem de uygulanan dc gerilimine bağlılık göstermesinin sebebi arayüzey durumlarının özel dağılım profiline atfedildi [3,47,48]. Yüksek frekanslarda, arayüzey durumları ac sinyali takip edemedikleri için C-V ve G/w-V değerlerine arayüzey durumlarının katkısı yoktur ya da ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu nedenle numunenin gerçek

elektriksel parametrelerini hesaplamak için C-V ve G/ω -V ölçümlerinin yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) yapılması daha güvenilir olacaktır [49-51].

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 [11]. Buna göre seri direncin voltaja bağlı farklı frekanslardaki eğrileri Şekil 4.8'de verildi. Düşük frekanslarda gözlenen pikler yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 1$ 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, iki farklı yüksek frekansta, doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C_c -V ve hem de G_c/w -V eğrileri seri direnç için düzeltildi. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitansın (C_c) değerleri özellikle doğru beslem altında voltaja bağlı artarken (Şekil 4.9a), düzeltilmiş iletkenlik (G_c/w) değerleri ise azalmaktadır. Oysa mevcut literatürün çoğunda bu R_s etkisi pek dikkate alınmamakta ve dolayısıyla ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenirliliği azalmaktadır.

Hazırlanan Al/SiO₂/p-Si yapının radyasyondan önceki C-V ve G/w -V ölçümleri alındıktan sonra numune 5kGy radyasyona maruz bırakılıp benzer ölçümler tekrarlanarak radyasyondan önceki durumla karşılaştırıldı. Yapının C-V ve G/w -V karakteristiklerin radyasyona bağlı oldukça değiştiği gözlemlendi. Radyasyondan sonra 1 MHz'de elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinden (Şekil 4.10) de görüldüğü gibi radyasyona bağlı olarak kapasitans ve iletkenlik değerleri artmaktadır. Ayrıca seri direnç değerleri numune radyasyona tabi tutulduktan sonra tekrar hesaplandı ve 1 MHz'de radyasyondan önceki eğrisiyle birlikte Şekil 4.11'de gösterildi. Şekilden görüldüğü gibi radyasyondan sonra numunenin seri direnci azalmakta, radyasyondan önce gözlenen pik, radyasyon uygulandıktan sonra tersinim bölgesine doğru kaymaktadır. Benzer sonuçlar mevcut literatürde gözlenmiştir [48].

Bu çalışmada hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapılar için elde edilen tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip aygıtlar için arayüzey durumlarının, seri direnç ve yalıtkan tabakanın I-V, C-V ve G/w-V ölçümleri üzerine etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Bu nedenle yapının elektriksel karakteristiklerinin analizinde bu parametrelerin mutlaka dikkate alınması sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Ayrıca bu tip yapılar radyasyondan oldukça etkilendiği için bunların radyasyona bağlı elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi ve radyasyonun yapının üzerindeki etkilerinin belirlenmesi de son derece önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Cowley, A.M., Sze, S.M., “Surface State and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems”, *J. Appl. Phys.*, 36: 3212-3216 (1965)
2. 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)
3. Sze, S.M., “Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.”, *John Willey & Sons*, New York, 245-300, 362-390 (1981).
4. Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflère, W.H., Cardon, F., “On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers”, *Solid State Electron.*, 29:633-638 (1986).
5. Mui, D., Striteon, S., Markoç, H., “On the barrier lowering and ideality factor of ideal Al/GaAs Schottky diodes”, *Solid State Electron.*, 34: 1077-1082 (1991)
6. Berger, L. I., “Semiconductor Materials”, *CRC Press*, New York, 145-152 (1997)
7. Hahn B.R., Yoon D.Y., “Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide- Silicon Structure”, *Journal Of Applied Physics*, 65(7): 2766-2771 (1989).
8. Jarzebski, Z. M., “Physical properties of SnO₂ materials: 1. Preparation and defect structure”, *J. Electrochem. Soc.*, 123(7): 199-205 (1976).
9. Maudes, J. S. and Rodriguez, T., “Sprayed SnO₂ films: Growth mechanism and film structure characterization”, *Thin Solid Films*, 69(2): 183-189 (1980).
10. Neamen, D. A., “Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.”, *Mc Graw-Hill*, New York, 420-450, 517-523 (1997).
11. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., “MOS Physics and Technology”, *John Wiley & Sons*, New York, 40-175, 222-226, 288, 423-439 (1982)
12. Gökçen, M., “MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/□- V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-15, 37(2005).

13. 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).
14. Fonash, S. J., “The role of the interfacial Layer in Metal - Semiconductor Solar Cells”, *J. Appl. Phys.*, 46:1286-1289 (1975).
15. Yıldız, D.E, “Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapıların elektriksel özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 24-27, (2002).
16. Cooke, M. J., “Semiconductor Devices”, *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
17. Ghandhi, S. K., “VLSI Fabrication Principles”, *John Wiley & Sons*, New York, 401-405 (1983).
18. Schroder, D. K., “Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.”, *John Wiley & Sons*, New York, 337-379 (1998).
19. 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).
20. 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).
21. Özdemir, S. and Altındal Ş., “Temperature dependent electrical Characteristics of Al-SiO_x-p-Si solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32:115-127 (1994).
22. Çetinkara, H. A., Türüt, A., Zengin, D. M., Erel, Ş., “The energy distribution of the interface state density of Pb/p-Si Schottky contacts exposed to clean room air”, *Appl. Surface Sci.*, 207: 190-199 (2003).
23. Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu N., and 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).
24. Akkal, B., Benamara, Z., Gruzza, B., Bideux, L., Bachir Bouiadjra, N., “Analysis and simulation of Au/InSb/InP diode C-V characteristics: modeling and experiments”, *Mater. Sci. Eng. C*, 21:291-296 (2002).

25. Türüt, A. and Sağlam, M., “Determination of the density of Si-Metal interface states and excess capacitance caused by them”, *Physica B*, 179: 285-294 (1992).
26. Akkal, B., Benemara, Z., Bideux, L., Gruzza, B., “Electrical characterization of the Au/InP(100) and Au/InSb/InP(100) structures”, *Microelectronics J.*, 30:673-678 (1999).
27. Kanbur, H., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., “The effect of states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes”, *Appl. Surface Sci.*, 252:1732 (2005).
28. Singh, A., “Characterisation of Interface States at Ni/nCdF₂ Schottky Barrier Type Diodes and the Effect of CdF₂ Surface Preparation”, *Solid State Electron.*, 28 (3): 223-232 (1985).
29. Sands, D., Brunson, K.M., Najaran, M.H., “Measured intrinsic defect density throughout the entire band gap at the <100> Si/SiO₂ interface” , *Semi. Sci. Tech.*, 7:1091-1096 (1992).
30. 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).
31. Kar S., and Narasimhan R. L., “Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures”, *J. Appl. Phys.*, 61(12): 5353-5359 (1987).
32. Schulz M., Klausmann E., Transient capacitance measurements of interface states on the intentionally contaminated Si-SiO₂ interface *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 18(2): 169-175,(1979).
33. Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H. and Cardon, F., “Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation”, *Solid-State Electronics*, 37(3): 433-441 (1994).
34. 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).
35. Haddara, H.S., El-Sayed, M., “Conductance technique in MOSFETs: Study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes”, *Solid State Electron.*, 31(8):1289-1298 (1988).
36. Altındal, Ş., “Al - SiO_x - pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri.”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 52-74 (1993).

37. 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).
38. 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).
39. Chattopadhyay P., Raychaudhuri B., “New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diodes” *Solid-State Electronics*, 35(7): 1023-1024 (1992).
40. Ma, T.P and Dressendorfer, P.V., “Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits”, *John Wiley & Sons*, New York, 87-231 (1989).
41. 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)
42. 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).
43. Chauhan, R.K. and Chakrabarti, “Effect of ionizing radiation on MOS capacitors”, *Microelectronik Journal*, 33: 197-203 (2002).
44. Benedetto, J.M. and Boesch Jr, H.E., “MOSFET and MOS capacitor responses to ionizing radiation” *IEEE Trans. Elect. Nucl. Sci.*, NS-31(6): 1461-1466.
45. Martinelli, G., Carotta, M.C., Passari, L., Tracchi, L. “A study of the moisture effect on SnO₂ thick films by sensitivity and permittivity measurements”, *Sens. Actuators B: Chem.*, 26-27:53-55 (1995).
46. Witzak, S.C., Suehle, J.S. and Gaitan, M., “An experimental comparison of measurement techniques to extract Si-SiO₂ interface trap density”, *Solid-State Electronics*, 35(3): 345-355 (1992).
47. Singh, R.J. and Srivastava, R.S., “Investigations of interface-state density in Si MOS structures”, *Solid-State Electronics*, 25(3): 227-232 (1982).
48. Iniewski, K., Balasinski, A., Majkusiak, B. et al., “Series resistance in MOS capacitor with a thin gate oxide”, *Solid-State Electronics*, 32(2): 137-140 (1989).

49. Berglund, C. N., "Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces", *IEEE Trans. Nucl. Sci*, Ed-13(10):701-705 (1966).
50. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., "MOS conductance technique for measuring surface states parameters", *Appl. Phys. Lett.*, 7: 216-219 (1965).
51. Hung, K. K. and Cheng, Y. C., "Determination of Si-SiO₂ interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurement", *Appl. Surf. Sci.*, 30: 114-119 (1987).
52. Umana-Membreno, G.A., Dell, J.M., Parish, G., Nener, B.D, Faraone, L. and Mishra, U.K., ⁶⁰Co Gamma Irradiation Effects on n-GaN Schottky Diodes, *IEEE Trans. Electron Devices*, 50:236-333 (2003)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TAŞÇIOĞLU, İlke
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 05.10.1983 - Ankara
Medeni hali : Bekar
e-mail : il_gok@hotmail.com

Eğitim

Derece

Lisans

Lise

Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi - Fizik

Özel Yüce Fen Lisesi

Mezuniyet tarihi

2005

2000

İş Deneyimi

Yıl

2006-2007

Yer

Milli Eğitim Bakanlığı

Görev

Ücretli Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Yüzme, Kitap okuma, Sinemaya ve tiyatroya gitme, Bilgisayar teknolojileri