

133347

**MOS YAPILARDA KAPASİTANS-VOLTAJ(C-V) VE
İLETKENLİK-VOLTAJ(G/w-V) KARAKTERİSTİKLERİNİN
FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ**

Muharrem GÖKÇEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2003
ANKARA**

133347

Muharrem GÖKÇEN tarafından hazırlanan MOS YAPILARDA KAPASİTANS-VOLTAJ(C-V) VE İLETKENLİK-VOLTAJ(G/w-V) KARAKTERİSTİKLERİNİN FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



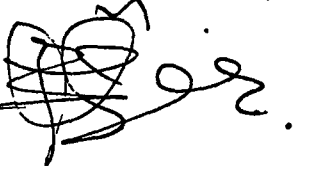
Şemsettin ALTINDAL

Tez Yöneticisi

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

Başkan: : Doç. Dr. Raviit Ahıska 

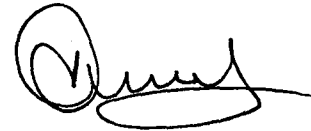
Üye : Yrd. Doç. Dr. Şemsettin Altındal 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin Özer 

Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR	2
2.1. İdeal MOS Yapısı	3
2.1.1. Yığılım	8
2.1.2. Tükenim	8
2.1.3. Tersinim	9
2.2. Gerçek MOS Yapısı	11
2.2.1. İyonlaşmış tuzaklar	12
2.2.2. Hareketli iyonlar	12
2.2.3. Sabit oksit ve arayüzey yükleri	12
2.2.4. Arayüzey durumları	13
3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN YAPILARDA $C - V_G$ EĞRİLERİ	21
3.1. İdeal $C - V_G$ Eğrileri	21
3.2. Gerçek $C - V_G$ Eğrileri	23
4. DENEYSEL YÖNTEM	25
4.1. MOS Yapıların Hazırlanması	25

4.1.1. Kristal temizleme	25
4.1.2. Omik kontağın oluşturulması	26
4.1.3. Yalıtkan kalay dioksit (SnO_2) tabakanın oluşturulması.....	28
4.1.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması	30
4.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....	31
5. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE BULGULAR.....	32
5.1. Radyasyondan Önce Kapasite-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçümleri.....	33
5.1.1. Kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrileri	33
5.1.2. Seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri.....	40
5.1.3. Arayüzey durum yoğunluğu	42
5.2. Radyasyondan Sonra Kapasite-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçümleri.....	44
5.2.1 Kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrileri	44
5.2.2. Seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri.....	50
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	60

**MOS YAPILARDA KAPASİTANS-VOLTAJ(C-V) VE
İLETKENLİK-VOLTAJ(G/w-V) KARAKTERİSTİKLERİNİN
FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Muharrem GÖKÇEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2003

ÖZET

Bu çalışmada, n-Si yarıiletken üzerine buharlaştırma yöntemiyle omik ve doğrultucu kontaklar, püskürtme yöntemiyle de metal-yarıiletken arasına yalıtkan SnO₂ tabakası oluşturulmuş Au/SnO₂/n-Si MOS yapısının temel bazı fiziksel parametrelerinin frekansa ve radyasyona bağlı değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Au/SnO₂/n-Si (MOS) yapının C-V ve G/w-V ölçümleri farklı frekanslar için oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Bu ölçümlerden yapının seri direnç, ilave kapasitans, arayüzey durumları gibi bazı temel karakteristikleri frekansa bağlı hesaplandı. Daha sonra yapı Co⁶⁰ radyasyon kaynağından farklı dozlarda radyasyona tabi tutularak benzer ölçüm ve hesaplamalar tekrarlandı. Yapılan deneysel ölçümler ve hesaplamalar, bu yapıların hemen hemen tüm temel fiziksel parametrelerinin yapıdaki arayüzey durum yoğunluğuna, uygulanan dc gerilime, frekansa ve radyasyon dozuna bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 404.05.01
Anahtar Kelimeler : MOS yapılar, arayüzey durumları, seri direnç, frekans ve radyasyon etkileri
Sayfa Adedi : 60
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

**THE INVESTIGATION OF CAPACITANCE-VOLTAGE (C-V) AND
CONDUCTIVITY-VOLTAGE (G/w-V) CHARACTERISTIC DEPEND ON
FREQUENCY AND RADIATION IN MOS STRUCTURE
(M.Sc. Thesis)**

Muharrem GÖKÇEN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2003

ABSTRACT

In this study Au/SnO₂/n-Si MOS structure was made, by top of n-Si semiconductor with evaporation technique ohmic and rectifier contacts, with spray technique insulator SnO₂ layer is formed between metal layer and semiconductor layer. Our aim is to analyse Au/SnO₂/n-Si structure some basis physical parameters by the changing frequency and radiation. Au/SnO₂/n-Si (MOS) structure C-V and G/w-V measurements for different frequency were made at room temperature. From these measurements we calculate structure serial resistance, excess capacitance and interface state density by frequency. After than with the Co⁶⁰ radiation source in different doses we made same measurement and calculations. Result shows that in experiments this structure almost all physical parameters change by interface state density, dc voltage, frequency and radiation.

Science Code : 404.05.01

**Key Words : MOS structure, interface states, serial resistance, effects of
frequency and radiation**

Page Number : 60

Adviser : Yrd. Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd. Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a, ölçümleri almamda ve düzenlememde yardımcı olan Araştırma Görevlisi Adem TATAROĞLU' na, numunelerin hazırlanmasında yardımcı olan “Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinde (ANAEM)” görevli Serdar KARADENİZ ve Nihat TUĞLUOĞLU' na, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarıma, bugüne kadar olan eğitim ve öğretimimde çok büyük destek ve fedakarlıkları olan aileme ve tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.



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

Çizelge 5.1. Çeşitli frekanslar için ilave kapasitans değerleri..... 37



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. MOS yapısı	2
Şekil 2.2. $V=0$ için p-tipi yarıiletken tabanlı ideal MOS yapının enerji-bant diyagramı	2
Şekil 2.3. İdeal bir MOS yapısı için enerji-bant diyagramı.....	4
Şekil 2.4. MOS kapasitesinin eşdeğer devresi.....	6
Şekil 2.5. a) Metal-yalıtkan-p tipi yarıiletken (MOS) yapısı.....	7
b) İdeal MOS yapısı için enerji bant diyagramları	7
c) Yük dağılımları.....	7
d) Kapasite durumları	7
Şekil 2.6. Yığılma, tükenim ve tersinim durumları için MOS kapasitesinin eşdeğer devresi	10
Şekil 2.7. İdeal olmayan MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin temel sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.8. MOS yapısının eşdeğer devresi	
a) Bir enerji seviyesi için	15
b) Birbirinden farklı bir çok enerji seviyesi için	15
Şekil 2.9. Arayüzey tuzaklar ve seri direnç etkisini içeren eşdeğer devre	16
Şekil 2.10. C_{ox} ve C_D etkisini içeren eşdeğer devre	17
Şekil 2.11. MOS yapının eşdeğer devresi	19
Şekil 2.12. Arayüzey durumlarını ihtiva eden MOS eşdeğer devresi.....	20
Şekil 2.13. Arayüzey durum yoğunluğunun teorik eğrisi	20
Şekil 3.1. İdeal MOS kapasitörünün, (a) n-Si , (b) p-Si MOS $C-V_G$ eğrileri	21
Şekil 3.2. n-Si MOS için $C-V_G$ eğrileri	24
Şekil 3.3. p-Si MOS için $C-V_G$ eğrileri	24
Şekil 4.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmada kullanılan Edwards marka Bendrix CVC1S buharlaştırma sistemi	27

Şekil 4.2. Omik kontak oluşturulurken kullanılan maske	28
Şekil 4.3. SnO ₂ tabakanın oluşturulduğu püskürtme düzeneği	29
Şekil 4.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske	30
Şekil 4.5. Au/SnO ₂ /n-Si/Al (MOS) yapının şematik gösterimi.....	30
Şekil 4.6. Kapasite-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleri için kullanılan düzenek	31
Şekil 5.1. Çeşitli frekanslar için Kapasitans-Voltaj (C-V) eğrileri.....	34
Şekil 5.2. Çeşitli frekanslar için İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) eğrileri.....	36
Şekil 5.3. Çeşitli frekanslar için 1/C ² -V eğrileri.....	38
Şekil 5.4. Çeşitli frekanslar için C - (V ₀ -V) ^{-1/2} eğrileri.....	39
Şekil 5.5. 3 kHz-500 kHz arasında çeşitli frekanslar için Seri Direnç-Voltaj (R _S -V) eğrileri.....	41
Şekil 5.6. Yığılım bölgesinde (-3 V' ta) seri direncin frekansa bağlı değişimini gösteren R _S -Log(f) eğrisi	43
Şekil 5.7. Arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim (D _{it} -V) eğrisi	43
Şekil 5.8. Au/SnO ₂ /n-Si yapının 10 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Kapasitans-Voltaj (C-V) eğrileri	45
Şekil 5.9. Au/SnO ₂ /n-Si yapının 500 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Kapasitans-Voltaj (C-V) eğrileri	46
Şekil 5.10. Au/SnO ₂ /n-Si yapının 10 kHz' de farklı radyasyon değerleri için İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) eğrileri	48
Şekil 5.11. Au/SnO ₂ /n-Si yapının 500 kHz' de farklı radyasyon değerleri için İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) eğrileri	49
Şekil 5.12. Au/SnO ₂ /n-Si yapının 10 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Seri direnç-Voltaj (R _S -V) eğrileri.....	51
Şekil 5.13. Au/SnO ₂ /n-Si yapının 500 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Seri direnç-Voltaj (R _S -V) eğrileri.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
ΔV_{FB}	Düz bant durumundaki gerilim kayması
ϵ_{OX}	Oksidin dielektrik sabiti
ϵ_S	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ΔV_{MG}	Gerçek ve ideal C-V _G eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kayması
Q_{SS}	Arayüzey yük yoğunluğu
ρ_n	n-tipi silisyum için özdirenç
ρ_p	p-tipi silisyum için özdirenç
χ	Yarıiletkenin elektron alınganlığı
τ	Arayüzey tuzaklarının ömrü
ϕ_B	Potansiyel engel yüksekliği
ψ_B	Fermi ile saf Fermi enerjisi seviyesi arasındaki fark
$(C_{LF} - C_{HF})$	Düşük frekans-yüksek frekans
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
χ_o	Oksidin elektron alınganlığı
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
A	Mos yapının alanı
A_{OX}	Yalıtkan tabakanın alanı
C	Kapasitans
C_D	Yarıiletken tüketim tabakasının kapasitansı
D_{it}	Arayüzey durum yoğunluğu
d_{ox}	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi

E_i	Saf Fermi enerji seviyesi ($(E_C - E_V)/2$)
E_V	Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
g	Temel seviye dejenerasyonu
G	Kondüktans (İletkenlik)
N_A	Katkılanan alıcı atomların (akseptör) yoğunluğu
N_D	Katkılanan verici atomların (dönör) yoğunluğu
Q_A	Birim yüzeydeki akseptörlerin (alıcıların) yükü
Q_M	Metal yüzeyindeki toplam yük
Q_N	Tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü
Q_{SC}	Uzay yükü bölgesinde biriken yük
R_s	Seri direnç
T	Periyot
V	Metal plakaya uygulanan gerilim
V_{ox}	Oksit üzerine düşen gerilim
ω	Açısal frekans($=2\pi f$)
W_D	Tüketim tabakasının genişliği
Y	Admitans
Z	Empedans (Rezistans)

Kısaltmalar**Açıklama****MOS**

Metal–oksit–yarıiletken

ANAEM

Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi

1. GİRİŞ

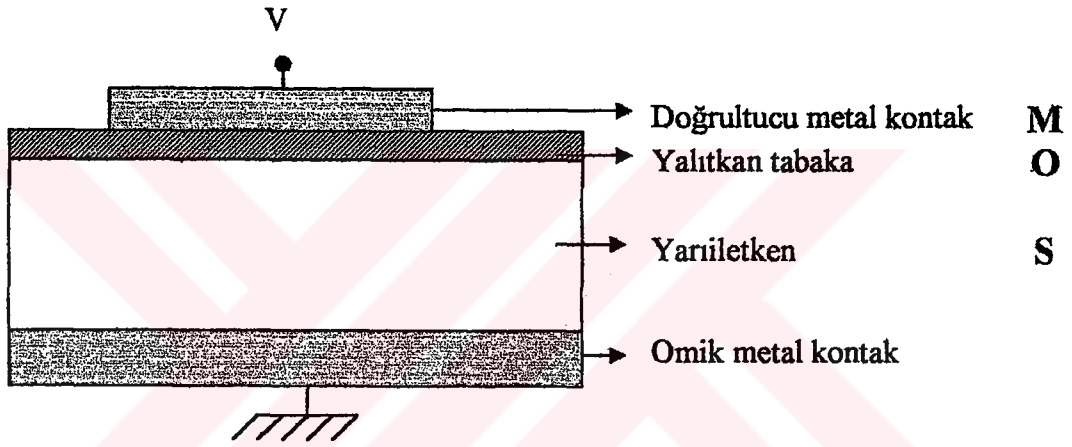
Metal–oksit–yarıiletken (MOS) yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasına yalıtkan bir tabakanın oluşturulmasıyla meydana gelir. Yalıtkan tabaka, metal ve yarıiletken tabakaları birbirinden izole eder. Bu yapılarda yarıiletkenin p veya n-tipi olmasına göre metal olarak sırasıyla alüminyum veya altın kullanılır. Yarıiletken olarak genelde silisyum(Si), germanyum(Ge) ve galyum-arsenide(GaAs), yalıtkan olarak da genelde silisyum dioksit (SiO_2) seçilir. Özellikle SiO_2 seçilmesinin sebebi; silisyum üzerine kolay büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmasıdır. Dolayısıyla SiO_2 bir çok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Bu çalışmada ise yalıtkan tabaka olarak SnO_2 kullanılmıştır.

MOS yapılar arada bir yalıtkan tabakası olmasından dolayı birer yük depolama kapasitörü olarak kullanılırlar. Bir orijinal MOSC yapısı 1959 da John L. Moll (1) tarafından voltaj-kontrol kapasitans olarak önerilmiştir. Bu yapı; AM-FM, CB radyolarda, TV ve diğer alıcılarda kullanılır.

Birçok alanda değişik amaçlar için kullanılan metal–oksit–yarıiletken yapıların C-V, G/w-V ölçümleri oda sıcaklığında farklı frekanslar için yapılmış ve yapının seri direnç, arayüzey durumları gibi diğer karakteristikleri hesaplanmıştır. Daha sonra yapı farklı dozlarda radyasyona tabi tutularak benzer ölçüm ve hesaplamalar tekrarlanmıştır. Burada $\text{Au/SnO}_2/\text{n-Si}$ yapının ve bu tür kontak yapısına sahip malzemelerin C-V, G/w-V ve diğer karakteristiklerinin frekansa ve radyasyona bağlı değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle MOS yapılar hakkında teorik bilgi verilmiş daha sonra deneysel yöntemle yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. İlerleyen bölümlerde yapının karakteristiklerinin frekansa ve radyasyona bağlı değişimi ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

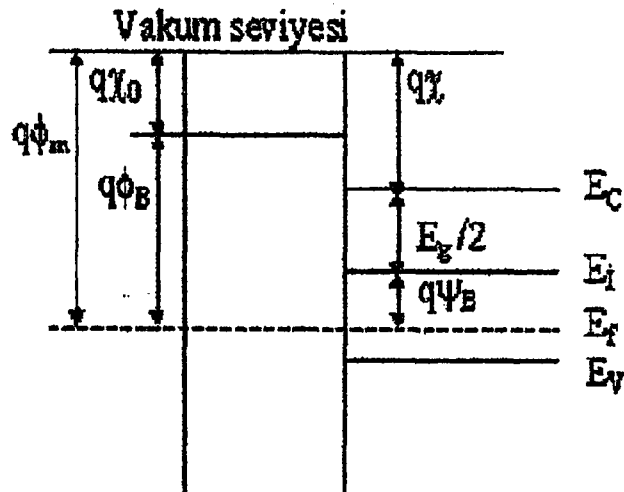
2. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR

MOS yapısı Şekil 2.1 de gösterildiği gibi metal–oksit–yarıiletken plakalardan oluşur. Dışarıdan uygulanan gerilim V , metal plakaya uygulanır ve yönü de ona göre belirlenir. Yani metal plakaya omik kontağa göre pozitif bir gerilim uygulanırsa MOS yapıya uygulanan gerilim pozitif, metal plakaya omik kontağa göre negatif bir gerilim uygulanırsa MOS yapıya uygulanan gerilim negatif olarak tanımlanır.



Şekil 2.1. MOS yapısı

$V=0$ için P-tipi yarıiletken tabanlı bir ideal MOS yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.2 deki gibidir.



Şekil 2.2. $V=0$ için p-tipi yarıiletken tabanlı ideal MOS yapının enerji-bant diyagramı

Burada;

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

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_B : Metal ve oksit arasındaki potansiyel engeli

χ : Yarıiletkenin elektron alınganlığı

χ_0 : Oksidin elektron alınganlığı

E_V : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_C : İletkenlik bandı enerji seviyesi

E_i : Saf Fermi enerji seviyesi ($E_g/2$)

E_F : Fermi enerji seviyesi

ψ_B : Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark

2.1. İdeal MOS Yapısı

Aşağıdaki özellikleri taşıyan MOS yapısı ideal MOS olarak ifade edilir.

i) 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 ve n-tipi yarıiletken için şu şekilde verilir :

$$\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad [2.1]$$

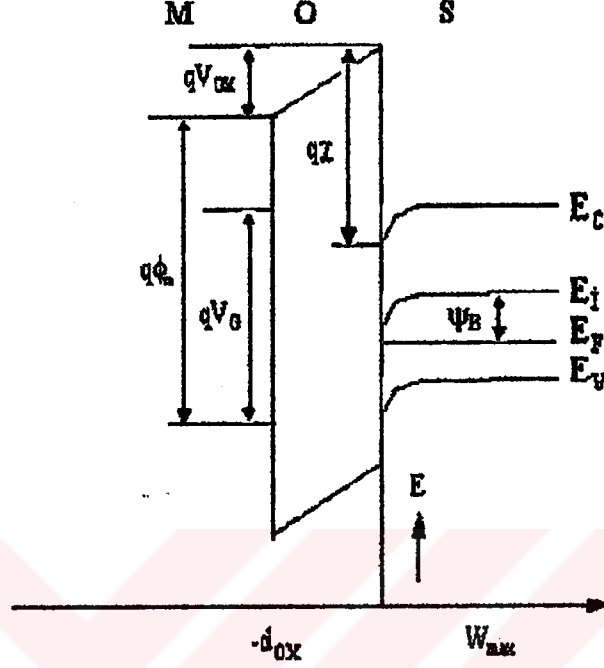
ii) Herhangi bir beslem şartı altında, yapıdaki yükler okside bitişik metal yüzeydekiler ile yarıiletkendekiler eşit miktarda fakat zıt yönlüdür.

iii) dc beslem şartları altında okside doğru taşıyıcı geçişi yoktur.

iv) Oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeyine yakın bölgelerde tuzaklar, sabit veya hareketli yükler bulunmaz. Yani oksit iyi nitelikli bir yalıtkandır.

v) Oksidin bant aralığı büyüktür, öyle ki oksidin iletim bandında termik taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilecek kadar küçüktür.

İdeal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramı Şekil 2.3 teki gibidir.



Şekil 2.3. İdeal bir MOS yapısı için enerji-bant diyagramı

İdeal MOS yapısına uygulanan gerilim aşağıdaki gibidir (2).

$$V = V_{ox} + \psi_s \quad [2.2]$$

V : Metal plakaya uygulanan gerilim

V_{ox} : Oksit üzerine düşen gerilim

ψ_s : Arayüzeydeki bant gerilimidir.

Bu durumda toplam yük ise şöyledir :

$$Q_M = Q_N + q N_A W = Q_s, \text{ veya}$$

$$Q_M + Q_{sc} = 0 \quad [2.3]$$

Q_M : Metal yüzeyindeki toplam yük

Q_{sc} : Uzay yükü bölgesinde biriken yük

Burada Q_N tersinim bölgesinde birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük, $qN_A W$, W genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş alıcılardır. N_A yarıiletkendeki alıcıların (acceptor) yoğunluğudur. Q_S yarıiletkendeki toplam yük ve Q_{SC} uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür.

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan oksit tabakasından dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasite oluşur. Bu kapasite MOS kapasitesi olarak adlandırılır (3). Bu kondansatörlerin özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki oksit ve oksit–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasite arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MOS kapasitesine karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.4’ de gösterilmiştir. Burada C_{OX} oksidin kapasitesi ve C_{SC} uzay yükü kapasitesidir. Bunların eşdeğer kapasiteleri bize MOS kapasitesini verecektir. Poisson denkleminin çözümünün sonucu ve uygulanan geriliminin çok küçük diferansiyel değişiminin olduğunu varsayarak sırayla oksit, uzay yükü bölgesi ve MOS kapasitelerini tanımlayalım:

$$C_{OX} = \frac{dQ_M}{dV_{OX}} A_{OX} \quad [2.4a]$$

$$C_{SC} = -\frac{dQ_{SC}}{d\Psi_{SC}} A_{OX} \quad [2.4b]$$

$$C = \frac{dQ_M}{dV} A_{OX} \quad [2.4c]$$

A_{OX} oksit alanı, dolayısıyla MOS yapısının alanıdır. Şekil 2.4’ deki eşdeğer devrenin çözümünde MOS kapasitesi :

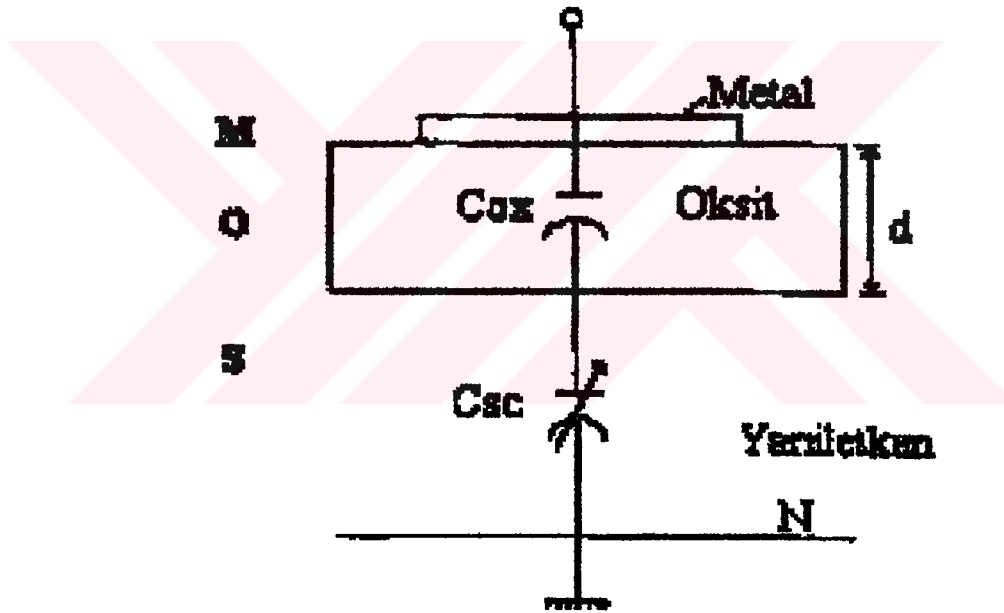
$$C = \left(\frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_{SC}} \right)^{-1} = \frac{C_{SC} \cdot C_{OX}}{C_{SC} + C_{OX}} \quad [2.5]$$

biçiminde olur. Bu, yukarıda yazılan denklemlerden Eş 2.2’ yi Eş 2.4c’ de yerine koyarak doğrulanabilir.

Oksit kapasitesi C_{ox} eşitliğinin diğer bir tanımı,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad [2.6]$$

olarak ifade edilir. Burada ϵ_{ox} oksidin dielektrik sabiti ve d_{ox} oksit kalınlığıdır. Bu eşitlik sabittir, çünkü eşitlikteki bütün nicelikler MOS yapısı için sabittir. Bu sonuçlara bağlı olarak MOS kapasitesini sadece uzay yükü kapasitesi belirleyebilir.



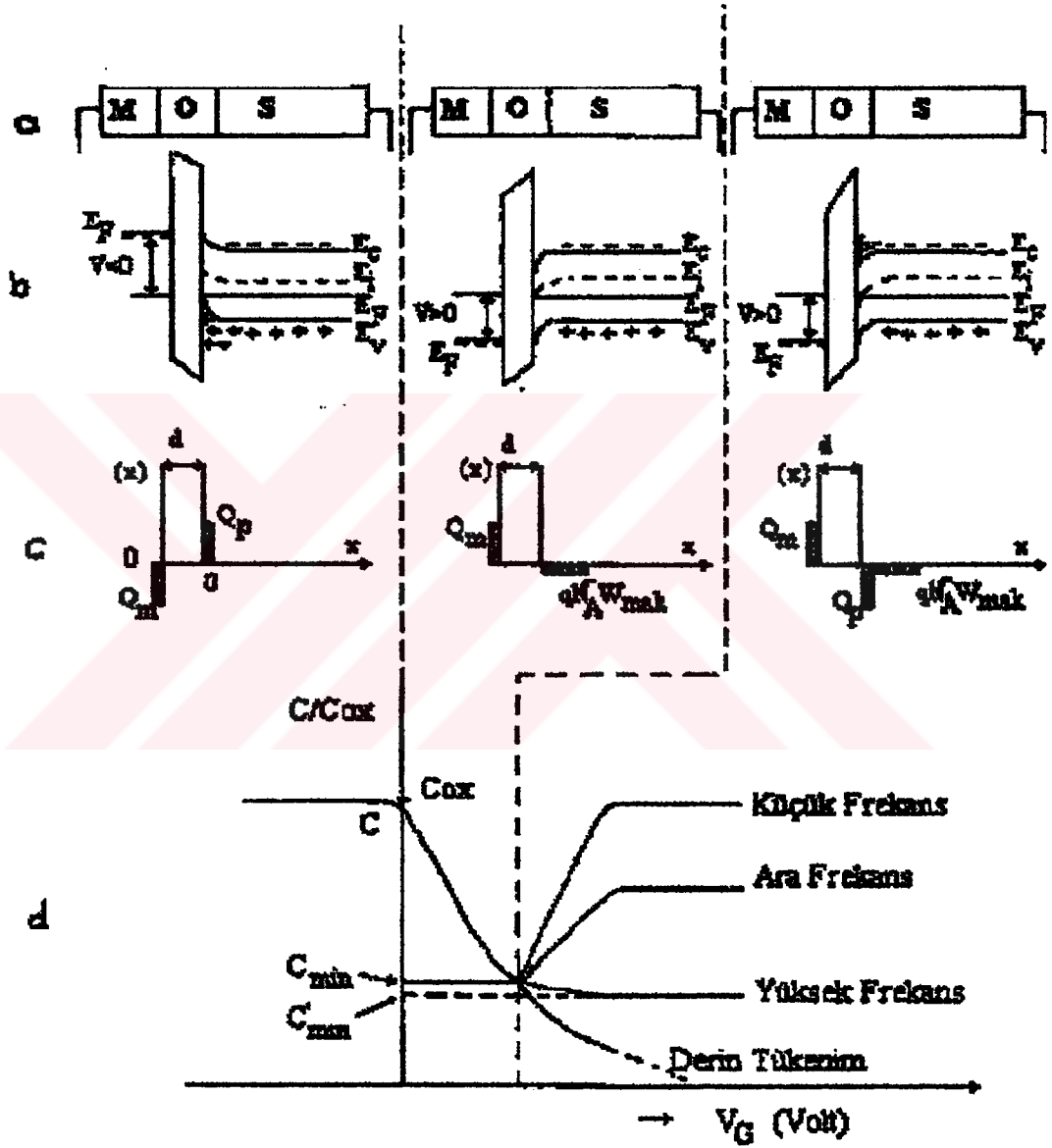
Şekil 2.4. MOS kapasitesinin eşdeğer devresi

Uygulanan gerilime bağlı olarak MOS kapasitesinde meydana gelen Şekil 2.5' de gösterilen durumları p-tipi bir yarıiletken için tanımlayalım.

Yığılım

Tükenim

Tersinim



Şekil 2.5. a) Metal-yalıtkan-p tipi yarıiletken (MOS) yapısı
 b) İdeal MOS yapısı için enerji bant diyagramları
 c) Yük dağılımları
 d) Kapasite durumları

2.1.1. Yığılım

Şekil 2.5a' da metal plakaya negatif bir gerilim ($V < 0$) uygulandığında, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olandeşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru çekecektir; yarıiletkendeki değerlik (valans) elektronları bandı yukarı bükülür ve fermi enerjisine yaklaşır.

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 yüzeyinde çoğunluk taşıyıcı olandeşiklerin yığılmasına sebep olur. Değerlik bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak yukarı büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmesinden dolayı *yığılım* adı verilir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$ ve $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

2.1.2. Tükenim

Şekil 2.5b'de metal plakaya küçük bir pozitif gerilim ($V > 0$) uygulandığında, oksit içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindekideşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındakideşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen w genişliğinde bir bölgede,deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur.

Deşiklerin azaldığı bu bölgeye *tükenim bölgesi*, bu olaya da *tükenim* denir. Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk yük taşıyıcısıdeşikler arayüzey bölgesinde tükenirler. Uygulanan gerilim arttığında, tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamakla genişler. Tükenim yaygınlaştığı zaman, Silisyum gibi yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin beslem tükenimi ve katkı yoğunluğu 0,1-10 μm civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir.

Bu bölgenin genişliği W ile temsil edilir ve

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

bağıntısı ile tanımlanır. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A_{ox} oksit kalınlığı ve C_{ox} oksit kapasitesidir.

Tükenim durumunda oluşan uzay yükü,

$$Q_{sc} = q N_A^- W = Q_A \quad [2.8]$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada N_A^- iyonlaşmış alıcı yoğunluğu ve Q_A birim yüzeydeki alıcı yüküdür. Bu bölgede MOS kapasitesi, uzay yükü kapasitesi ve oksit kapasitesi ile belirlenir.

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

2.1.3. Tersinim

Şekil 2.5c de metale büyük bir pozitif gerilim uygulandığı zaman bantlar daha fazla aşağı doğru bükülürler ve E_i has öz durumdaki enerji seviyesi, E_F Fermi enerji seviyesinin altına düşer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar ve bunun sonucunda elektron yoğunluğu deşiklerin yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin *tersinimi* olarak adlandırılır.

Oluşan uzay yükü,

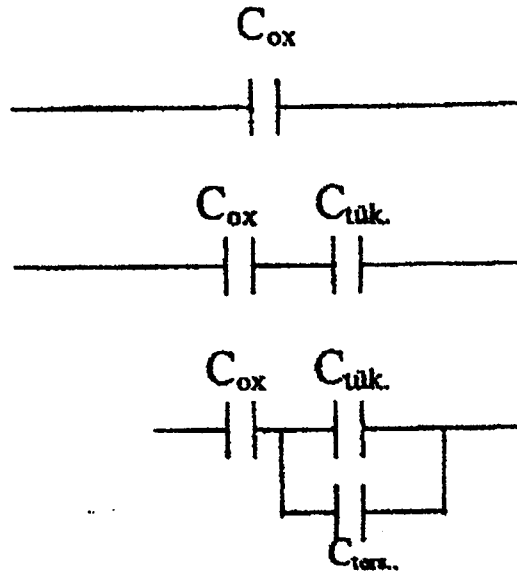
$$Q_{sc} = Q_N + Q_A \quad [2.9]$$

denklemleriyle verilir.

Burada Q_N tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_A birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Bu durum Şekil 2.5c de gösterilmiştir. Bu durumda MOS kapasitesini, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin ac sinyalini takip edebilme yeteneği belirler.

Elektron yoğunluğu ac sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasite artan gerilimle oksit kapasitesinin 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 kapasite C_{min} 'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların rekombinasyon hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'un altında değerler almasına sebep olur. Bu dengesizlik durumu derin tükenim durumudur.

Yukarıda anlatılan ve uygulanan gerilime bağlı yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde meydana gelen yığılm, tükenim ve tersinim durumları için MOS kapasitelerinin eşdeğer devreleri sırasıyla Şekil 2.6' da ki gibidir.



Şekil 2.6. Yığılm, tükenim ve tersinim durumları için MOS kapasitesinin eşdeğer devresi

2.2. Gerçek MOS Yapısı

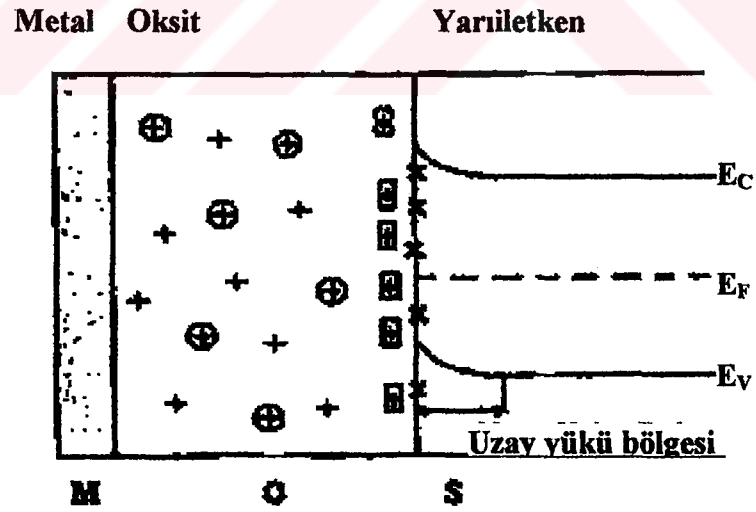
Gerçek bir MOS yapısında bir çok durumlar ve yükler mevcuttur. Bu durumların sınıflandırılması Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Bunlar sırayla;

i) Örneğin numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşturulabilen iyonize tuzaklar,

ii) Beslem sıcaklığı altında oksit içinde hareketli iyonlar,

iii) Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri,

iv) Oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasaklanmış bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumlarıdır.



x : Arayüzey durumları
+ : İyonize tuzaklar

⊕ : Sabit yüzey yükleri
⊕ : Hareketli iyonlar

Şekil 2.7. İdeal olmayan MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin temel sınıflandırılması

2.2.1. İyonlaşmış tuzaklar

İyonlaşmış tuzaklar hem oksit içinde hem de oksit-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçerler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere artırırken ki ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru azaltırken ki ölçülen kapasite değerleri arasında farklılıklardan dolayı kapasite –gerilim eğrisinde *histeresis* etkisi gözlenir. Kapasite-gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla histeresis yük yoğunluğu aşağıdaki formülle verilir:

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad [2.10]$$

Burada ΔV_{HisFB} düz banttaki kayma miktarıdır.

2.2.2. Hareketli iyonlar

Hareketli iyonlar oksit içinde bulunurlar. Hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır (4). hareketli iyonlar kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuvarz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanda altında hareket ettiklerinden MOS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

2.2.3. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit arayüzey yükleri oksit içinde ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Oksitle yarıiletkenin kristal yapılarının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıiletkenin oksit tabakasına geçerken kaçınılmaz olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olurlar.

Bu yüklerin başlıca özelliği, oksit-yarıiletken yapısına uygulanan gerilimden yük durumlarının bağımsız olmasıdır. Yarıiletken ile bu yük merkezleri arasında yük alış-verişi olmaz. Oksidin büyüme koşulları yük yoğunluğuna etki eder (oksidin büyüme hızı, oksitleyen gaz, sıcaklık gibi). Sabit oksit arayüzey yükleri $C-V_G$ eğrilerinin ideal $C-V_G$ eğrisinden kaymasına neden olurlar. Bu kaymadan faydalanılarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{OX} , oksit-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük ΔQ_{eff} ve arayüzey yük yoğunluğu ΔQ_{SS} hesaplanır.

$$\Delta Q_{OX} = \frac{\Delta V_{MG} C_{OX}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad [2.11]$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{OX}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad [2.12]$$

$$\Delta Q_{SS} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{OX} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad [2.13]$$

burada, ΔV_{MG} gerçek ve ideal $C-V_G$ eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve ΔV_{FB} düz bant durumundaki gerilim kaymasını göstermektedir.

2.2.4. Arayüzey durumları

Arayüzey durumlarının tanımı Shockley, Tamın ve diğer bilim adamları tarafından teoriksel olarak araştırılmış ve bir kristalin arayüzeyinde periyodik örgü yapılarının kesilmesinden dolayı yasaklanmış bant aralığı içinde var olduğu gösterilmiştir. Tanım olarak, “kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasaklanmış bant aralığı içindeki enerji seviyeleri” olarak verilir. Arayüzey durumları verici veya alıcı tipte olabilirler. Alıcı tipte; enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Verici tipte ise; enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür.

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şu niceliklere ayrılabilir:

a) 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.

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

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

Arayüzey durum yoğunluğu şu şekilde verilir:

$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} \quad [2.14]$$

Yani birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır.

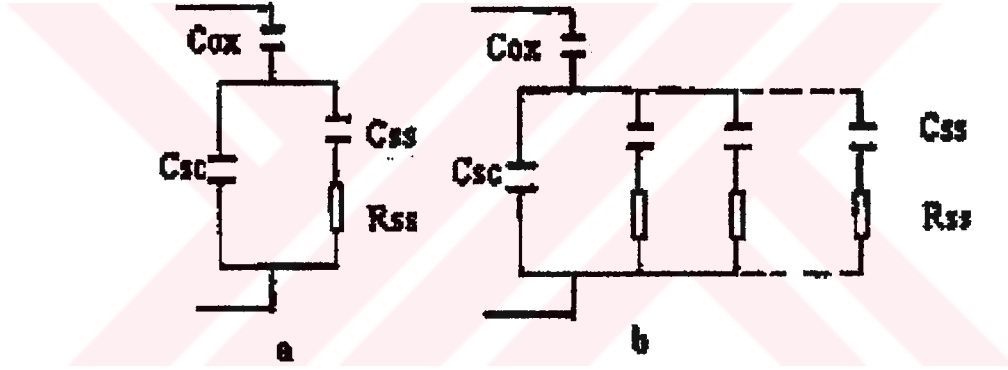
Burada E enerji olup $E=q\psi_s$ ile verilir. E' nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Eş. 2.14 tekrar düzenlenirse durum yoğunluğu şu şekli alır:

$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} = \frac{dQ_{ss}}{d\psi_s} \frac{d\psi_s}{dE} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{ss}}{d\psi_s} \quad [2.15]$$

Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez. Devredeki arayüzey kapasitesi ise şu şekilde verilir:

$$C_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} A_{ox} \quad [2.16]$$

Yukarıda ifade edilen MOS yapısındaki arayüzey durumlarına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. MOS yapısının eşdeğer devresi

a) Bir enerji seviyesi için

b) birbirinden farklı bir çok enerji seviyesi için

Arayüzey durumu için alıcı ve verici dağılım fonksiyonu $f(E)$ Fermi-Dirac dağılımı ile verilir.

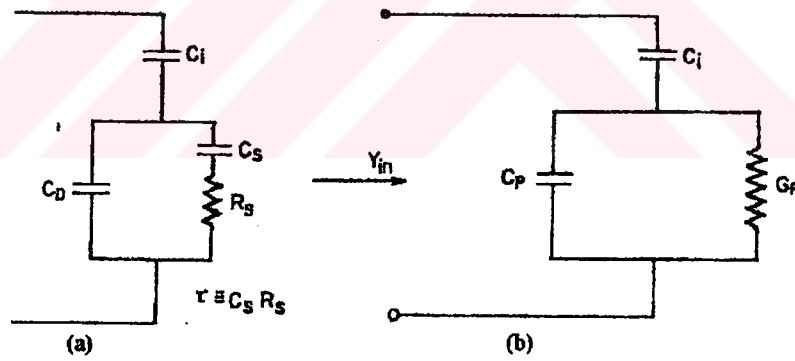
Alıcı arayüzey tuzaklar için :

$$f(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} \quad [2.17]$$

Verici arayüzey tuzaklar için :

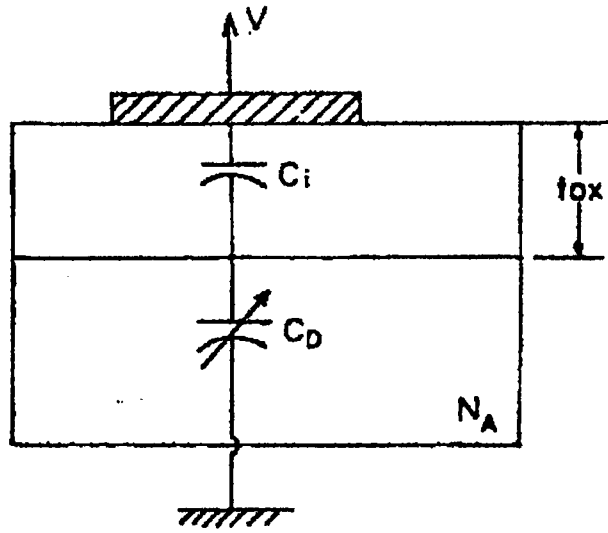
$$f(E_t) = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} \quad [2.18]$$

Burada E_t arayüzey durum seviyesi enerjisi, E_f fermi enerjisi ve g ise temel seviye dejenerasyonu olup değeri verici tuzaklar (arayüzey durumları) için 2, alıcı tuzaklar (arayüzey durumları) için 4 tür. Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans ve iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar aşağı veya yukarı hareket ederler. Bu hareket MOS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur (5). Arayüzey tuzakların etkisini içeren MOS yapının eşdeğer devresi Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Arayüzey tuzaklar ve seri direnç etkisini içeren eşdeğer devre

Burada C_{OX} ve C_D sırası ile oksit(yalıtkan) kapasitans ve yarıiletken tüketim tabakasının kapasitansı olup Şekil 2.10' da gösterilmiştir. $C_S R_S$ çarpanı arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanır ve arayüzey tuzakların davranışını belirler.



Şekil 2.10. C_{ox} ve C_D etkisini içeren eşdeğer devre

Şekil 2.9a' nın paralel kolu, Şekil 2.9b' deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_P ve ona paralel frekans bağımlı kondüktans G_P şeklinde yazılabilir. Paralel koldaki admitans, $j = \sqrt{-1}$ olmak üzere aşağıdaki şekilde verilir:

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}}$$

$$= \frac{R_s^2 \omega^2 C_s^2}{1 + R_s^2 \omega^2 C_s^2} + j\omega \left(C_D + \frac{C_s}{1 + R_s^2 \omega^2 C_s^2} \right) = G_P + j\omega C_P \quad [2.19]$$

Burada kapasitans C_P ve kondüktans G_P ;

$$C_P = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad [2.20a]$$

$$G_P = \frac{1}{R_p} + \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad [2.20b]$$

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans Z ise,

$$Z = \frac{1}{j\omega C_I} + \frac{1}{G_P + j\omega C_P} = -j \left(\frac{1}{\omega C_I} + \frac{1}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2} \right) + \frac{1}{G_P + \omega^2 C_P^2}$$

şeklindedir. Buradan toplam admitans Y_{top} için,

$$Y_{top} = \left(\frac{G_P^2 + \omega^2 C_P^2}{G_P} \right) + j\omega \left(\frac{(G_P^2 + \omega^2 C_P^2) C_I}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2 + \omega C_P} \right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad [2.21]$$

eşitliği elde edilir (6). Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen kondüktans G_m ve kapasitans C_m gerçek değerler değildir (7).

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C'_m + G'_m}, \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T}, \quad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad \text{dir.}$$

Ölçülen C_m ve G_m değerlerinin düzeltilmiş halleri için aşağıdaki yol takip edilebilir. $Z = Z_1 + Z_2$ ise $Z_1 = Z - Z_2$ olur. Buna göre,

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C'_m + G'_m = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1}$$

$$\frac{1}{Z_1} = \left(\frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \right) \quad [2.22]$$

Eş. 2.22 denkleminin paydası eşleniği ile çarpılır, $G_T = 1/R_S$ yazılır ve C_T değeri ihmal edilirse düzeltilmiş kondüktans için,

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_S) - \omega^2 C_m^2 R_S}{(1 - G_m R_S)^2 + \omega^2 C_m^2 R_S^2} \quad [2.23]$$

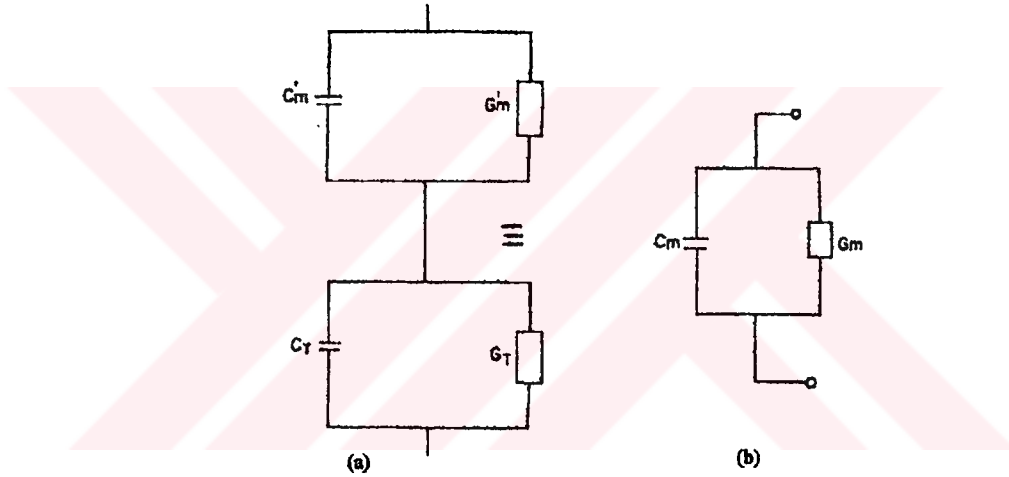
elde edilir. Burada seri direnç R_S , Şekil 2.11b' deki devrenin empedansı Z' nin reel kısmı olup yüksek frekanslarda ve kuvvetli akümülyasyondaki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir (8).

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

rezistans değerinden,

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad [2.24]$$

elde edilir.



Şekil 2.11. MOS yapının eşdeğer devresi

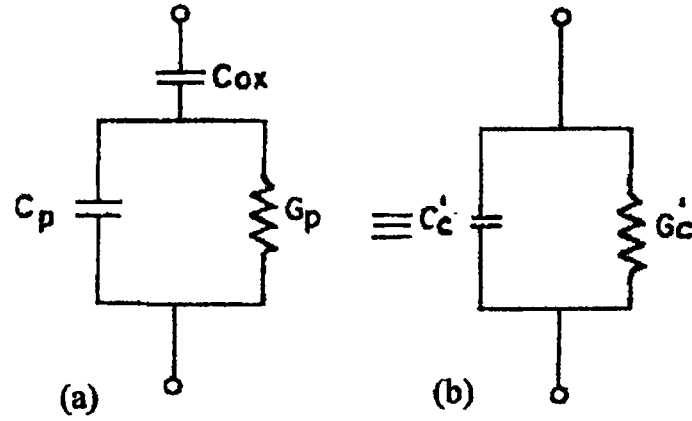
Eş. 2.22' nin düzenlenmiş imajiner kısmı ise

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad [2.25]$$

şeklindedir. $R_s = 0$ durumunda $C_c = C_m$ ve $G_c = G_m$ olur. Benzer şekilde G_p / ω için Şekil 2.12' den C_{ox} , oksit kapasitans olmak üzere,

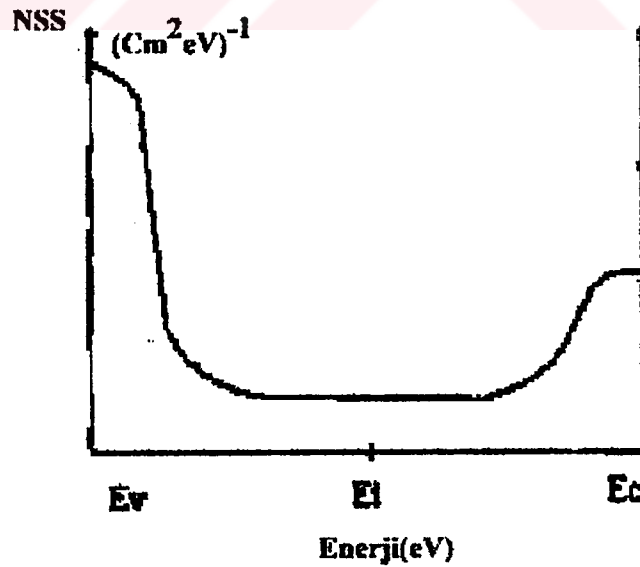
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{G_c / \omega}{(G_c / \omega C_{ox})^2 + (C_c / \omega C_{ox})^2} \quad [2.26]$$

denklemini elde edilir (9).



Şekil 2.12. Arayüzey durumlarını ihtiva eden MOS eşdeğer devresi

Tuzaklanmış arayüzey yük yoğunluğunu hesaplamak için ya kapasitans-voltaj (C-V) ya da kondüktans-voltaj (G-V) ölçüm teknikleri kullanılır. Her iki teknikte arayüzey durumları (tuzakları) hakkında benzer bilgiler verir. Arayüzey durumlarının yasak enerji aralığına dağılımının teorik eğrisi Şekil 2.13' de verilmiştir (10).

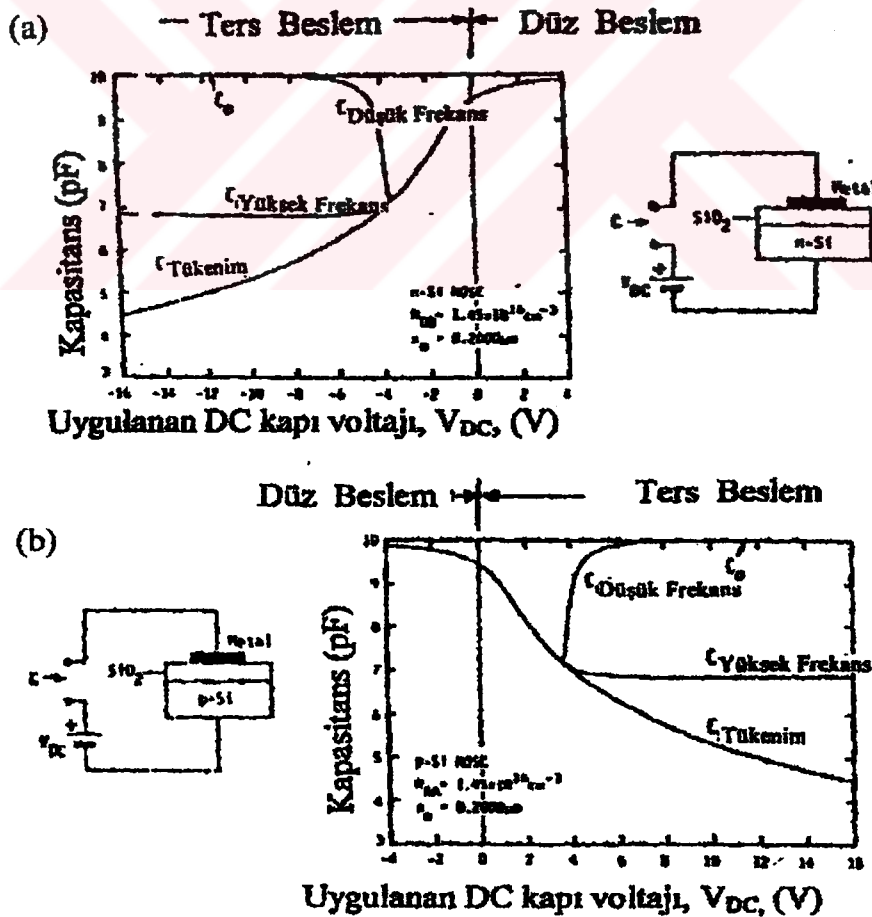


Şekil 2.13. Arayüzey durum yoğunluğunun teorik eğrisi

3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN YAPILARDA $C - V_G$ EĞRİLERİ

3.1. İdeal $C - V_G$ Eğrileri

MOS kapasitörünün üzerinde; uygulanan dc voltajıyla üç tipik kapasitans değişimi, üç farklı ölçüm koşulunda gözlenebilir. Şekil 3.1 a' da n-Si yapısı üzerinde üç MOS kapasitans-voltaj ($C-V_G$) eğrisi, Şekil 3.1 b' de p-Si yapısı üzerinde üç MOS kapasitans-voltaj ($C-V_G$) eğrisi gösterilmektedir. Buradaki üç eğri; düşük-frekans kapasitans-voltaj (LFCV, $C_{LF}-V_G$) karakteristikleri, yüksek-frekans kapasitans-voltaj (HFCV, $C_{HF}-V_G$) karakteristikleri, ve tükenim kapasitans-voltaj (DCV, C_D-V_G) karakteristikleridir.



Şekil 3.1. İdeal MOS kapasitörünün, (a) n-Si, (b) p-Si MOS $C-V_G$ eğrileri

Şekil 3.1 (a)' da n-Si MOS' ı göz önüne alalım. Büyük pozitif kapı besleminde birçok elektron n-Si bölgesinden alüminyum kapı elektrodu altındaki yarıiletken yüzeyine doğru çekilir. Si yüzeyinde elektronların yüksek konsantrasyonlarının toplanması Si yüzeyini metalik gibi yapar. Bu da sabit kapasitans C_{OX} ' ı verir. Düz beslem dc voltajının bir doğrultucu diyota uygulanması bir pozitif dc voltajının bir p/n kavşak diyotunun p-tip ucuna yada bir metal/n-yarıiletken kavşak diyotunun metal ucuna uygulamasına benzerdir. Farklılık şudur; MOS dc akımını geçirmez, oksit çok ince olduğu zaman elektronlar veya deşikler (hole) ince oksit tabakasından tünelleme ile geçebilirler. Bu nedenle n-Si MOS üzerinde pozitif kapı beslemi düz beslem ve negatif kapı beslemi ters beslem olarak adlandırılır. p-Si MOS üzerinde pozitif kapı beslemi ters beslem ve negatif kapı beslemi ise düz beslem olarak adlandırılır.

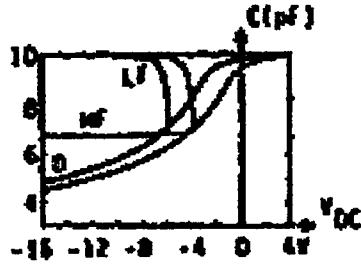
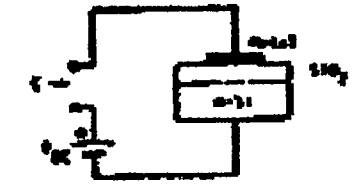
p-Si MOS' ı göz önüne alalım. Ters kapı besleminde, Si yüzeyinden çoğunluk taşıyıcı deşiklerin geri çekilmesi ile Si yüzeyinden azınlık taşıyıcı elektronların çekilmesi eş zamanlıdır. Bu, tersinim olarak bilinir, çünkü Si yüzeyinde azınlık taşıyıcıları çoğunluk taşıyıcılardan daha çoktur, bu da yüzeyin iletkenliğinin yani tipinin değişmesine sebep olur.

LFCV ve HFCV eğrileri, dc kapı akımının sıfır olduğu zaman gözlemlenir. Böylece termal ve elektriksel denge eğrileri çizilir. SiO_2 hemen hemen mükemmel bir yalıtkanlık gösterir. Si yüzeyinde azınlık taşıyıcıların yüksek sabit konsantrasyonlarının toplanması Si yüzey tabakasının tersine çevrilmesine neden olur. Bu da bir dc kapı besleminin uygun yönelimde uygulanmasıyla olur. Tükenim kapasitansı yada DCV eğrisi, oksit/silisyum arayüzeyinde azınlık taşıyıcıları toplanmazsa görülebilir.

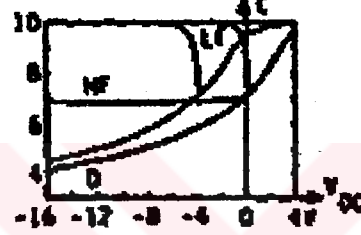
3.2. Gerçek $C-V_G$ Eğrileri

Deneyssel $C-V_G$ eğrileri Şekil 3.1 (a) ve 3.1 (b) ideal teorisinden farklıdır. Deneyssel $C-V_G$ eğrileri Şekil 3.2 (a)' dan 3.2 (d)' ye kadar n-MOS ve Şekil 3.3 (a)' dan 3.3 (d)' ye kadar p-MOS için çizilmiştir. Uygulanan bir dc voltajı, $C-V_G$ eğrisinin ideal $C-V_G$ eğrisinden paralel kaymasına sebep olur. Şekil 3.2 (a) ve Şekil 3.3 (a) oksit içinde uzay yükleri, oksit yükleri diye bilinir. Bu yüklerin taşınması Si MOS transistörlerde elektriksel kararsızlığa sebep olmaktadır. Şekil 3.2 (a) oksit içinde pozitif oksit yükü olduğu zaman, n-Si üzerinde üç MOS $C-V_G$ eğrisinin negatif kapı voltaj kaymasını göstermektedir. Şekil 3.2 (b) oksit içinde negatif uzay yükü yada negatif oksit yükü olduğu zaman, n-Si üzerinde üç MOS $C-V_G$ eğrisinin pozitif kapı voltaj kaymasını göstermektedir. p-Si üzerinde MOS için uygun eğri Şekil 3.3 (a) ve 3.3 (b)' de gösterilmektedir. Gerilim eksenile ideal $C-V_G$ eğrisinin kıyaslanması n-Si MOS için Şekil 3.2 (c)' de ve p-Si MOS için Şekil 3.3 (c)' de görülmektedir.

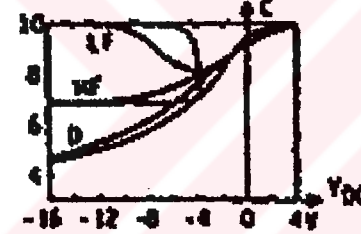
Oksit/Si arayüzeyinde yada Si yüzeyindeki tuzaklar arayüzey tuzakları diye bilinirler. Genelde gerilim kayması ve bükülme $C-V_G$ eğrisinde birlikte ortaya çıkar. Terman birçok frekansta $C-V_G$ eğrisinin ölçümüyle arayüzey tuzakları ve oksit tuzaklarını ayırmıştır. HFCV eğrisinin düşük kapasite platosu p-Si' da aşağıya doğru kayarken (Şekil 3.3 (d)' deki gibi) n-Si' da yukarı doğru kayma vardır (Şekil 3.2 (d)).



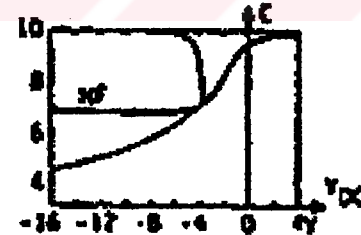
(a)



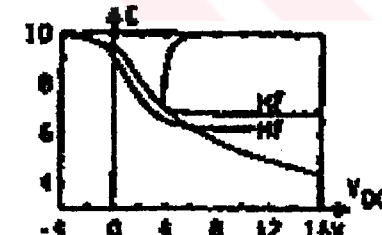
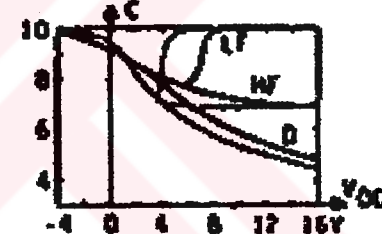
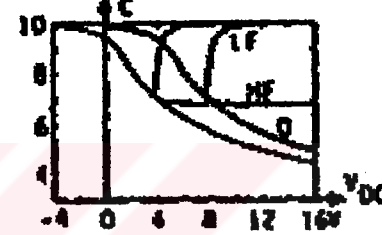
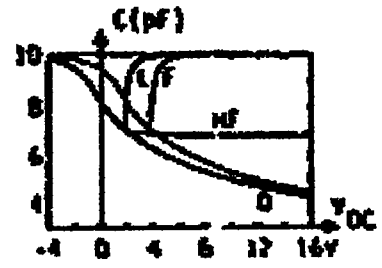
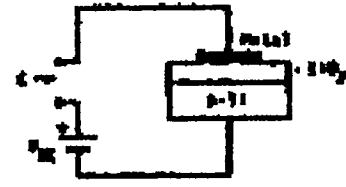
(b)



(c)



(d)

Şekil 3.2. n-Si MOS için C-V_G eğrileri

- (a) Pozitif oksit yüküyle
- (b) Negatif oksit yüküyle
- (c) Yüklenmiş arayüzey tuzaklarıyla
- (d) Verici yüküyle

Şekil 3.3. p-Si MOS için C-V_G eğrileri

- (a) Pozitif oksit yüküyle
- (b) Negatif oksit yüküyle
- (c) Yüklenmiş arayüzey tuzaklarıyla
- (d) Alıcı yüküyle

4. DENEYSEL YÖNTEM

4.1. MOS Yapıların Hazırlanması

Kullanılan numuneler daha önceden hazırlanmış olup, bu çalışmada hazır numuneler içinden uygun bir örnek seçilerek ölçümler alınmıştır. Numune hazırlanırken sırayla kristal temizlenmiş, omik kontak (Al) oluşturulmuş, yalıtkan tabaka (SnO_2) oluşturulmuş ve daha sonra doğrultucu kontak (Au) oluşturularak $\text{Au/SnO}_2/\text{n-Si/Al}$ yapısı elde edilmiştir. Kontaklar ve yalıtkan tabakanın oluşturulmasında Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ANAEM) Katıhal Laboratuvarı imkanlarından yararlanılmıştır. Bu tabakaların oluşturulma işlemlerini sırasıyla inceleyelim.

4.1.1. Kristal temizleme

İyi bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MOS) yapı gerçekleştirebilmek için seçilen yarıiletken kristalin yüzeyi çok temiz olmalıdır. İyi temizlenmiş bir yarıiletken kristal bir çok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırabilir. Kullanılan kristaller yurt dışından CrysTec firmasından, fabrikasyon olarak bir yüzeyi parlatılmış olarak satın alınmıştır. Kristal yüzeyleri üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için yarıiletken kristal kimyasal olarak ultrasonik banyoda farklı aşamalardan geçirilerek temizlenmiştir. Diyot yapımında (111) doğrultusunda büyütülmüş, öz direnci $4,45 \Omega\text{cm}$ olan, $280 \mu\text{m}$ kalınlığındaki, fosfor katkılı n-tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Yaklaşık 50 mm çaplı n-Si yapraklar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya (çeyrek yaprak) bölünerek kullanılmıştır. Bu çalışmada yarıiletken kristaller aşağıda verilen kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur.

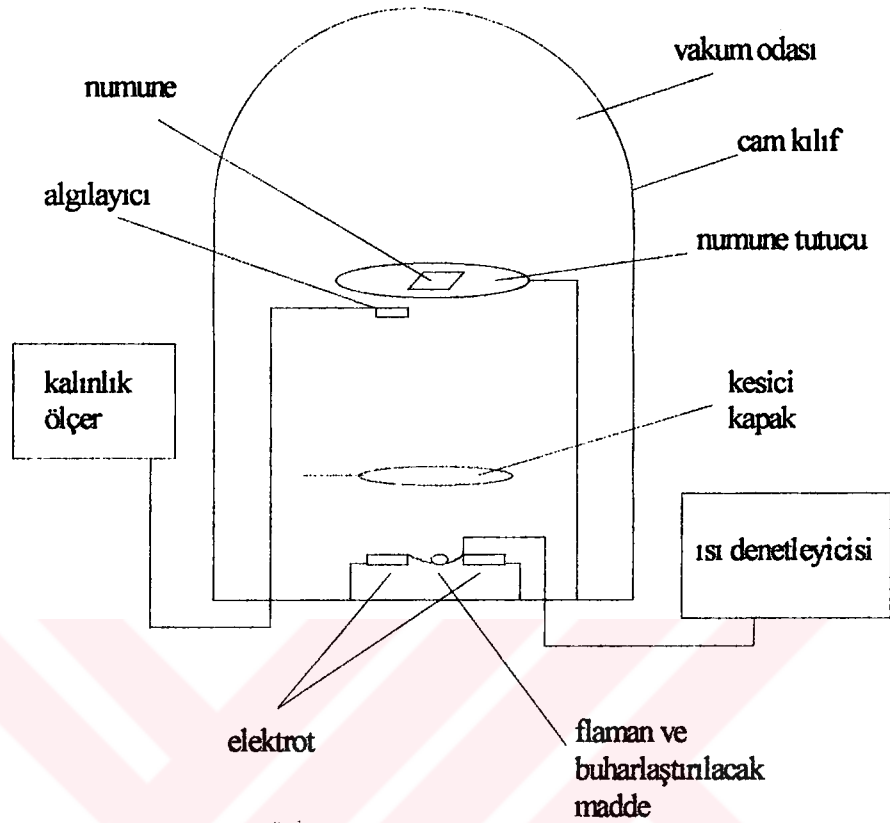
Yarıiletken yüzeylerinin temizlenmesinde RO&UP Water Purification System' de hazırlanan 14-16 M Ω dirençli de-iyonize su kullanılmıştır. Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız, beher v.b. araç ve kaplar asetonla yıkanıp de-iyonize su ile durulandıktan sonra etülide yaklaşık 100 °C ısıtılarak sterilize edilmiştir. Yarıiletken kristaller önce de-iyonize su içerisinde ultrasonik olarak yeterince uzun süre (10dk) yıkanmış ve sonra aşağıdaki aşamalardan geçirilmiştir.

1. Yarıiletken kristal, triklor-etilen + aseton + CH_3OH içinde üç dakika süreyle ultrasonik olarak temizlenmiş ve sonra deiyonize suda 5 dakika yıkanmıştır.
2. Sülfürik asit (H_2SO_4) ve hidrojen peroksit (H_2O_2)'in 1:1 hacim oranındaki karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
3. De-iyonize suda 10 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
4. %38'lik hidroflorik asit (HF) ve deiyonize suyun 1:5 hacim oranındaki karışımı içerisinde 3 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
5. De-iyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika yıkanmıştır.
6. 3:1:5 hacim oranında nitrik asit (HNO_3), hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 5 dakika ultrasonik olarak yıkanıp de-iyonize su ile durulanmıştır.
7. 4:3 hacim oranında %38'lik hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
8. Son olarak kristal deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika durulanmıştır.

Kimyasal olarak temizlenmiş n-tipi yarıiletken silisyum kristallerin yüzeyinde oksitlenme olma olasılığını önlemek için yarıiletken kristaller kuru azot (N_2) ile iyice kurutulduktan sonra hemen vakum ortamına yerleştirilmiştir.

4.1.2. Omik kontağın oluşturulması

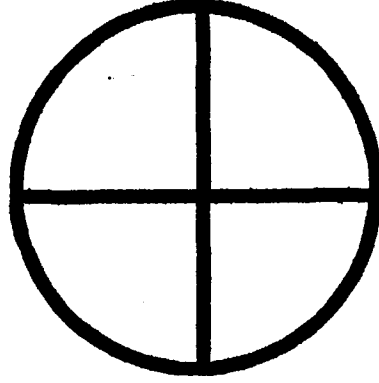
$\text{Au/SnO}_2/\text{n-Si}$ yapı hazırlanırken omik ve doğrultucu kontağın oluşturulmasında Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Katıhal Laboratuvarında bulunan Edwards marka Bendrix CVC1S buharlaştırma sistemi kullanılmıştır. Sistemin MOS yapıların hazırlanması için kullanılan kısmı Şekil 4.1' de şematik olarak gösterilmiştir. Bu kısımdaki parçalar ile flaman (tungsten) ve ince bir bakır levhadan hazırlanan maskeler kimyasal olarak ultrasonik banyoda iyice temizlenmiştir. Bu temizleme işlemi, karbon-tetraklorür, triklor-etilen ve aseton içerisinde 5 dakikalık süreler ile yapılmış ve daha sonra de-iyonize su ile yıkanmıştır. Fanus (cam kılıf), NaOH çözeltisi ve de-iyonize su kullanılarak temizlenmiş ve tüm parçalar yaklaşık 100°C ' de etülide sterilize edilmiştir. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirilmiş ve fanus hemen kapatılarak vakumlama işlemine geçilmiştir (10^{-6} Torr).



Şekil 4.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmada kullanılan Edwards marka Bendrix CVC1S buharlaştırma sistemi

Omik kontaklar için Şekil 4.2’de gösterilen 50 mm çaplı ve $\approx 350 \mu\text{m}$ kalınlıklı bakır maske kullanılmıştır. Vakum $\approx 10^{-6}$ Torr’a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek ($\approx 35\text{A}$) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş alüminyum metal parçacıkları buharlaştırılmıştır. Buharlaşmanın başlamasından bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa çekilerek, silisyumun mat yüzeyine alüminyum (Al) kaplanmıştır. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine yapışmasını önlemektir.

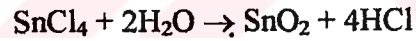
Yarıiletkenin mat olan yüzeyine alüminyum (Al) kaplama işleminden sonra aynı vakum ortamında 900°C ’de alüminyum (Al) silisyum içerisine çöktürülerek omik kontak sağlanmıştır.



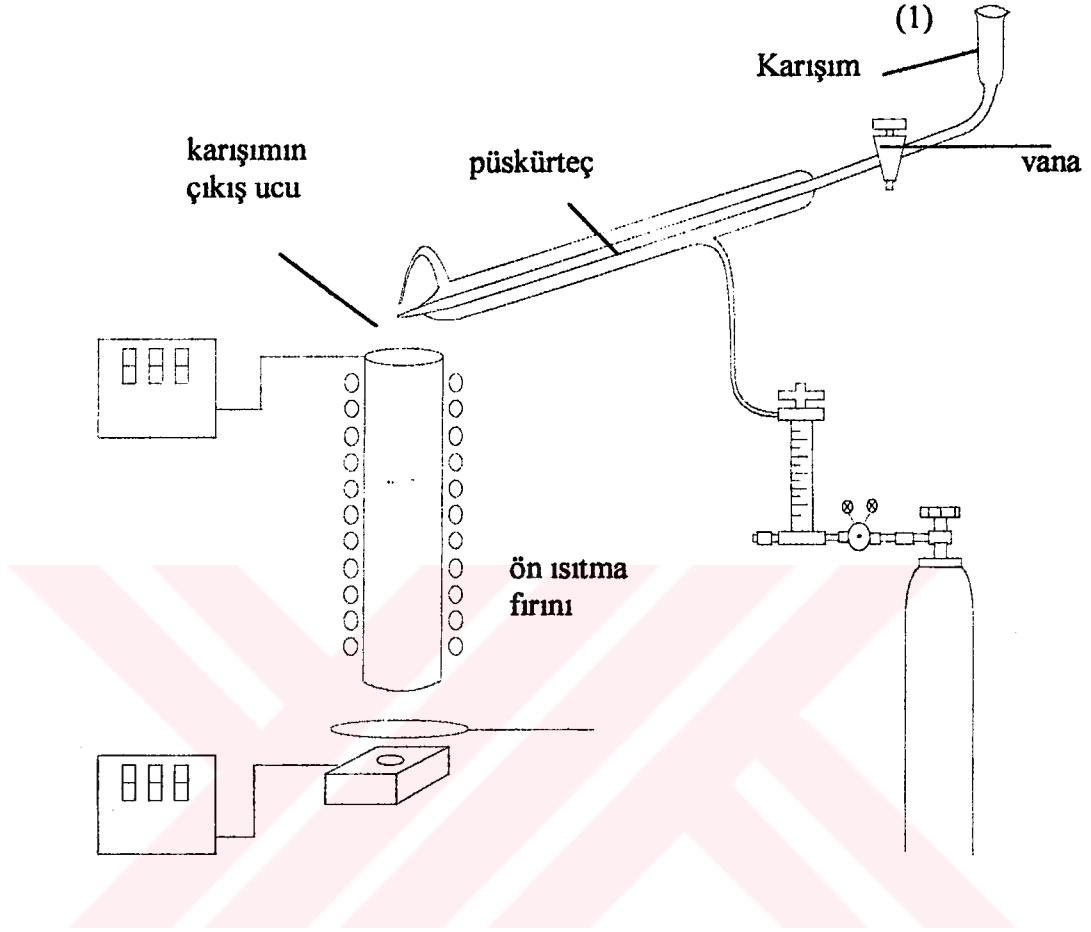
Şekil 4.2. Omik kontak oluşturulurken kullanılan maske

4.1.3. Yalıtkan kalay dioksit (SnO_2) tabakanın oluşturulması

Temizlenen yarıiletken kristallerin yüzeyine kalay dioksit (SnO_2) tabakası püskürtme yöntemi ile oluşturulmuştur. Bu yöntemde ısı alan bir reaksiyon olan,



denkleminde yararlanılmıştır. Hacimce %32,2 etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), %40,4 deiyonize su ve %27,4 kalay klorür ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) karışımı taşıyıcı kuru azot gazı (N_2) kullanılarak püskürtülmüştür. Öncelikle oluşturulan $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ karışımı Şekil 4.3' de gösterilen düzenek üzerinde belirtilen (1) numaralı kısma yerleştirilmiştir. Sonra, gaz akış düzenleyicisi yardımıyla gaz akış oranı 3 lt/dak olarak ayarlanmış, böylece püskürteç püskürtme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Karışım vanası açılarak karışımın püskürtülmesi gerçekleştirilmiştir.

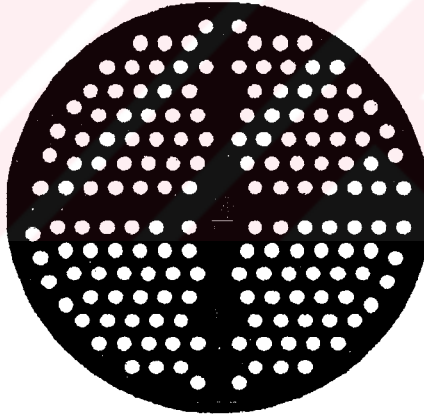


Şekil 4.3. SnO₂ tabakanın oluşturulduğu püskürtme düzeneği

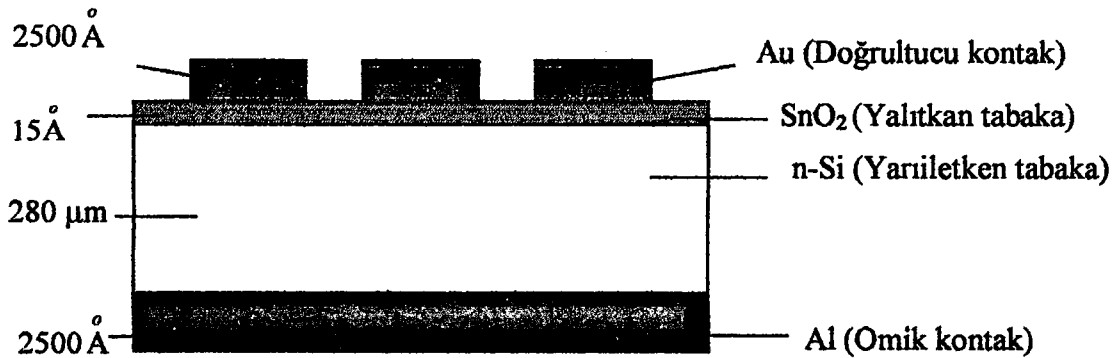
Püskürtülen karışım önce ön ısıtma fırınından geçirilerek karışımla alt tabaka arasındaki sıcaklık farkı ortadan kaldırılmıştır. İlk püskürtmede oluşabilecek safsızlıkları önlemek amacıyla kesici kapak kullanılmış ve numune korunmuştur. Kısa bir süre sonra kesici kapak açılarak karışımın numune üzerine püskürtülmesi sağlanmış ve kesici kapak tekrar kapatılarak püskürtme işlemine son verilmiştir. SnO₂ tabakasının numune üzerine püskürtüldüğü sırada alt tabaka sıcaklığı 400 °C'de tutulmuştur.

4.1.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzerine çok sayıda 2mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske (Şekil 4.4) numune tutucuya yerleştirildikten sonra, SnO_2 kaplanmış yüzey aşağı gelecek şekilde numune maskenin üzerine yerleştirilmiştir. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenmiş altın (Au) metal parçası yaklaşık 10^{-6} Torr vakumda buharlaştırılarak numune üzerine küçük dairecikler (2mm çaplı) şeklinde ve yaklaşık $2500 \text{ \AA}$ kalınlığında altın kaplanması sağlanmıştır. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla Au/ SnO_2 /n-Si /Al şeklinde MOS diyotlar elde edilmiştir. Soğuması için bir süre bekletilen kristal vakum ortamından çıkartılarak her bir dairecik (diyot) ortada kalacak şekilde elmas kesici yardımıyla beş eşit parçaya bölünmüştür. Hazırlanan MOS diyotun şeması Şekil 4.5' de verilmiştir.



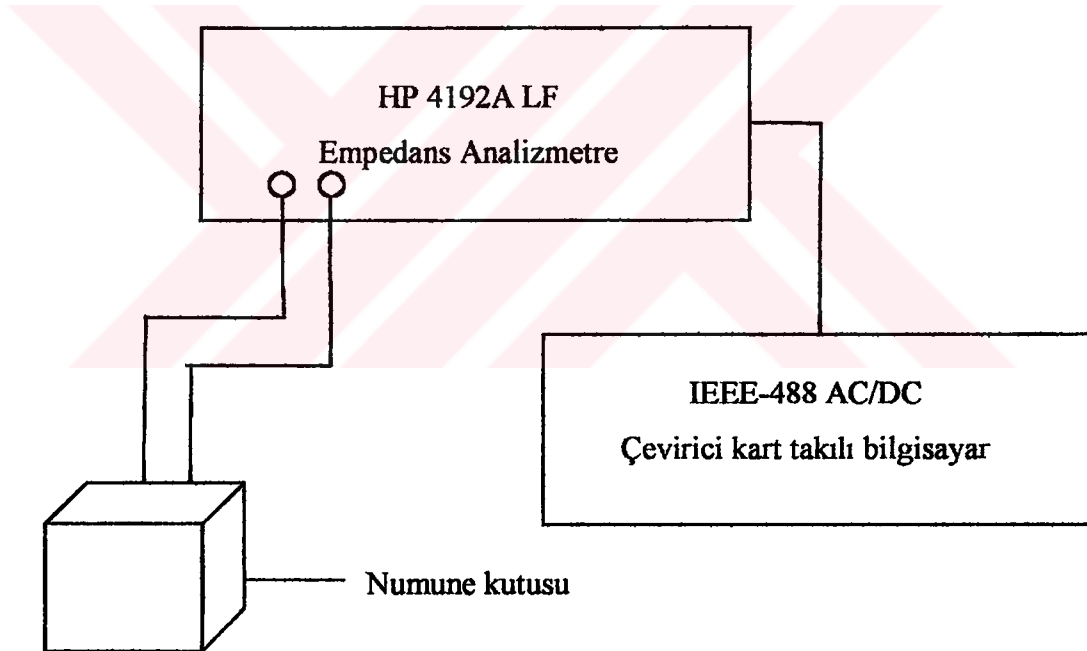
Şekil 4.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske



Şekil 4.5. Au/ SnO_2 /n-Si/Al (MOS) yapının şematik gösterimi

4.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Fiziksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Katıhal Laboratuvarında yapıldı. Kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ω -V) ölçümlerinde Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metre (5Hz–13MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ω -V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 4.6 da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kapasite-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleri için kullanılan düzenek

5. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE BULGULAR

Hazırlanan metal–yalıtkan–yarıiletken yapılarının temel fiziksel özelliklerini belirlemek ve bu değerlerin frekans ve radyasyona bağlı olarak değişimini incelemek için seçilen örnek Au/SnO₂/n-Si yapının, oda sıcaklığındaki kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri farklı radyasyon dozlarında gerçekleştirildi. Kapasite- voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) değerleri Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metre (5Hz – 13MHz) ile ölçüldü. Tüm bu ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Au/SnO₂/n-Si örneğinin 100 Hz – 1 MHz arasındaki çeşitli frekanslar için kapasite ve iletkenlik değerleri 0,1 volt aralıklı olarak hem negatif hem de pozitif gerilim bölgelerinde ölçüldü.

Ölçülen bu değerler kullanılarak öncelikle kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) eğrileri farklı frekanslar için aynı grafik penceresinde çizilerek kapasite ve iletkenliğin frekansa bağlılığı gösterildi. Yine bu değerler kullanılarak hesaplanan seri dirençler aynı şekilde çeşitli frekanslar için çizildi. Hesaplanan seri direncin uygulanan dc voltajına ve frekansa bağlılığı açıkça görüldü ve bunun sebepleri sonraki bölümde tartışıldı. Yine bu ölçüm sonuçları kullanılarak numunenin arayüzey durum yoğunluğunun (D_{it}) voltaja bağlı dağılım profili düşük frekans-yüksek frekans (LF-HF) metoduyla elde edildi.

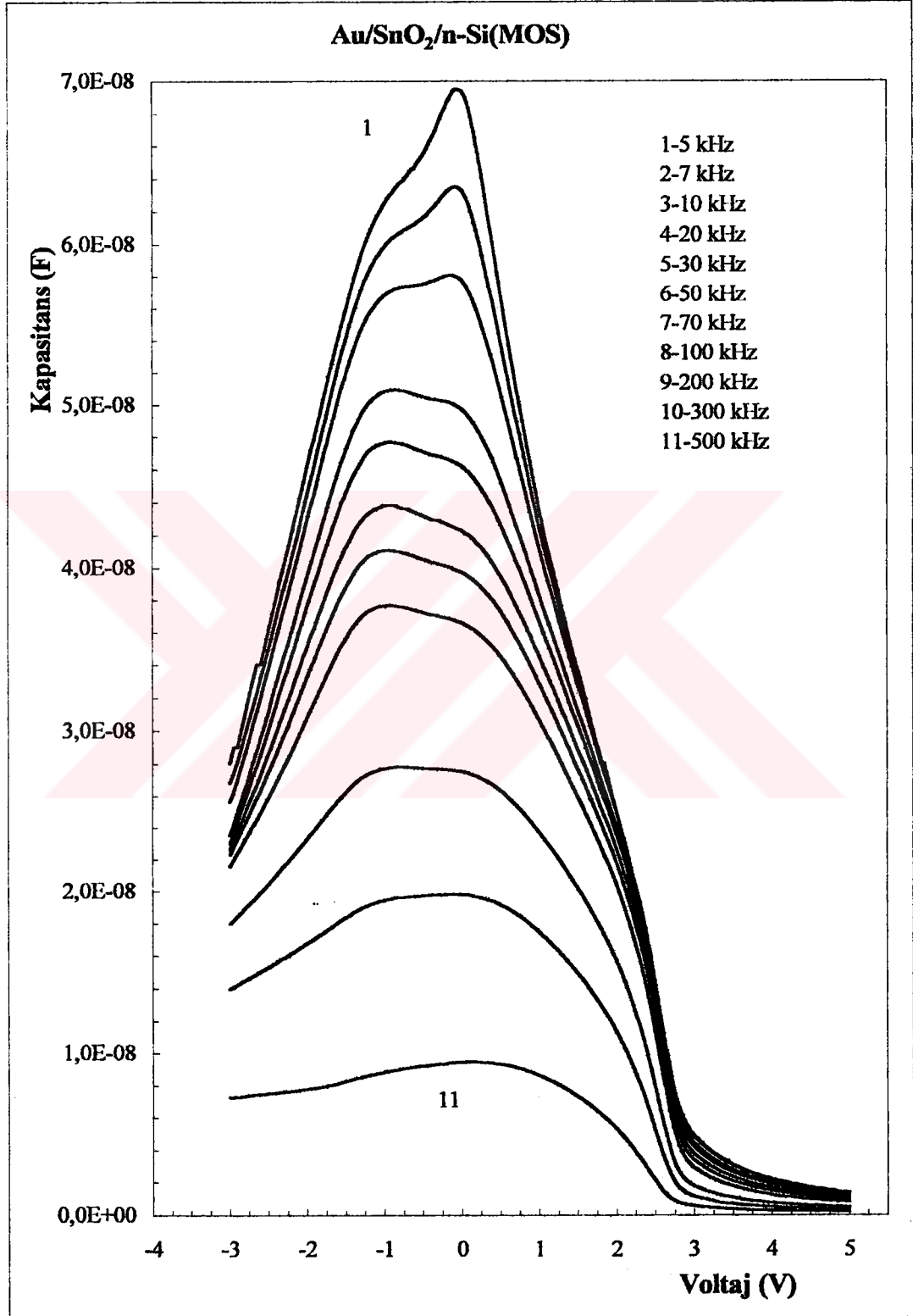
Daha sonra numune farklı dozlarda ki (0,5; 3; 10; 30; 100 ve 500 kGray) radyasyona tabi tutularak benzer ölçümler tekrar alındı ve radyasyona bağlı değişimleri incelemek için, hesaplamalar yeniden yapılarak radyasyondan önceki değerlerle karşılaştırıldı.

5.1. Radyasyondan Önce Kapasite-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçümleri

5.1.1. Kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrileri

Au/SnO₂/n-Si yapının tüm kapasite-voltaj(C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri oda sıcaklığında 100 Hz ile 1 MHz frekans aralığında alındı. MOS yapı dc gerilimi altındayken, genliği dc gerilimden çok küçük olan (50 mV) bir ac uyarma sinyali uygulanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel verilerin 5 kHz-500 kHz aralığında C-V grafikleri Şekil 5.1' de G/ω -V grafikleri Şekil 5.2' de verildi.

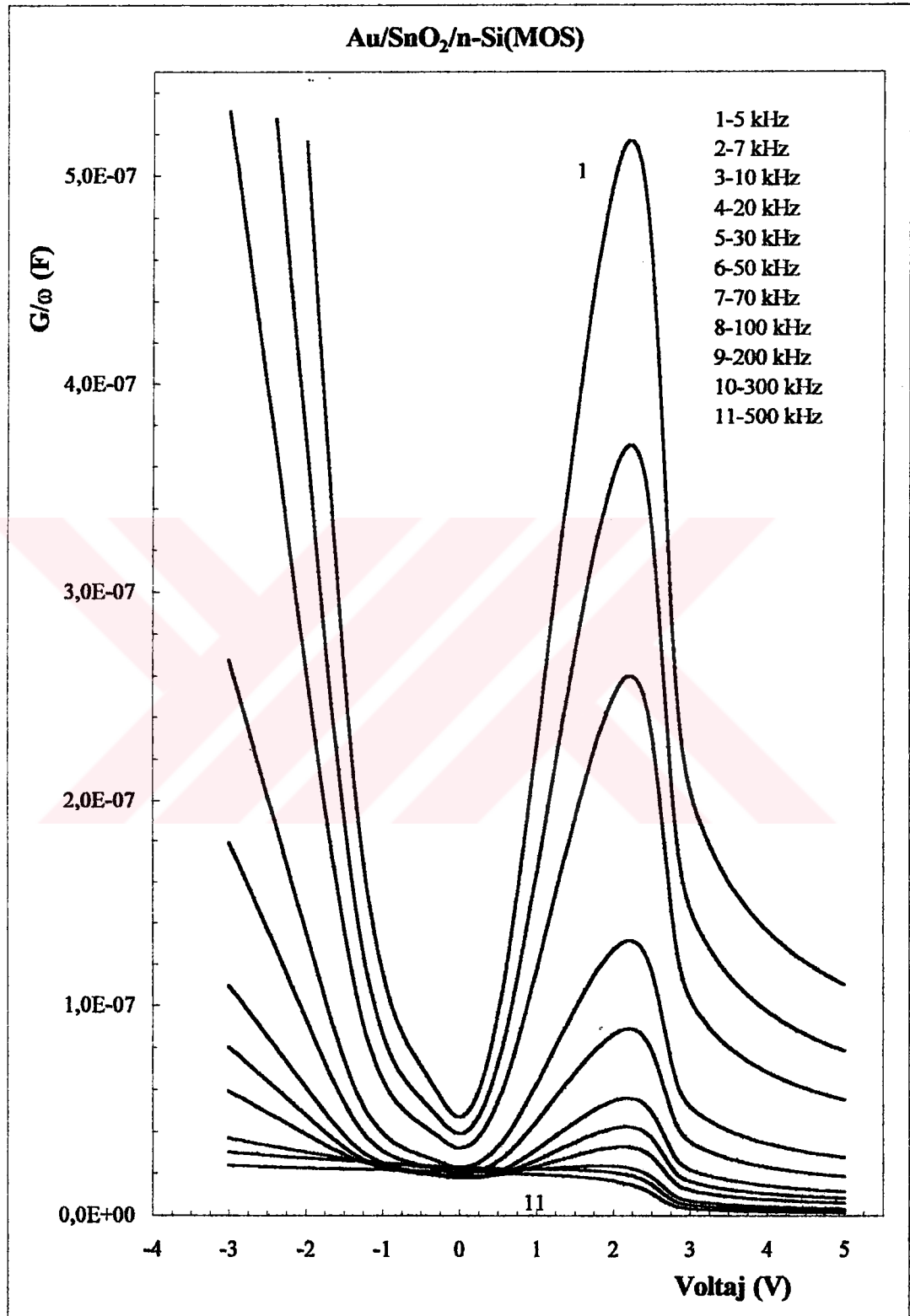
Şekil 5.1' de verilen eğrilerden de görüldüğü gibi frekansın artmasıyla kapasite değerleri azalmakta olup düşük frekanslarda gözlenen iki adet pik kaybolmaktadır. Kapasitenin bu frekansa bağıllığı arayüzey durumlarından kaynaklanmaktadır (10, 12, 16). Arayüzey durumlarının ortalama ömürleri (τ) yüksek frekanslarda ($\omega=2\pi f=2\pi/T$) çok küçülen ac sinyalin periyodunu (T) takip edemezler. Çünkü yüksek frekanslar için $T < \tau$ olmaktadır. Bu durumda yüksek frekans bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı kapasiteye gelen bir katkı yoktur veya ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece kapasiteye, düşük frekanslarda olduğu gibi arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşırlar. Bu olay kısaca "*arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda ac sinyali takip edememesi*" olarak belirtilir. Literatürde arayüzey durumlarından hiçbir katkının gelmemesi için C-V ölçümü en az 500 kHz' de ve tüm arayüzey durumlarını görebilmek için ise en fazla 100 Hz' de yapılmalıdır (17, 18). Şekil 5.1' e bakılacak olursa bu kabulün isabetli olduğu görülecektir.



Şekil 5.1. Çeşitli frekanslar için Kapasitans-Voltaj (C-V) eğrileri

Şekil 5.1' de görülen kapasite-voltaj eğrilerinde piklerin voltaja göre açıklaması ise bölüm-2' de yığılma, tükenim ve tersinim (Bkz 2.1.1-2.1.3) başlıkları altında incelenmiş olup yarıiletken yüzeyinde uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan bu üç durumdan kaynaklanmaktadır. Hazırlanan n-tipi Si yapı için (Au/SnO₂/n-Si) yığılma bölgesi yaklaşık $V < 0$ V (negatif voltajlar) bölgesi, tükenim bölgesi yaklaşık $0 < V < 2,5$ V aralığı, tersinim bölgesi ise yaklaşık $V > 2,5$ V bölgesi arasında olduğu Şekil 5.1' den görülmektedir. Yığılma bölgesinde kapasitans eğrilerindeki bükülme hazırlanan yapının iç direncinden kaynaklandığı söylenebilir ve literatürde benzer sonuçlar elde edilmiştir (5, 12). Hazırlanan numunenin seri direnci, yüksek frekans ve kuvvetli yığılma bölgesinde (yeterince ileri pozitif gerilimde) yaklaşık 10Ω civarında elde edildi.

Hazırlanan (Au/SnO₂/n-Si) yapının 5 kHz-500 kHz aralığında elde edilen deneysel $G/\omega - V$ grafikleri Şekil 5.2' de verildi. Şekil 5.2' de verilen eğrilerden de görüldüğü gibi frekansın artmasıyla G/ω değerleri azalmakta olup düşük frekanslarda gözlenen pik kaybolmaktadır. G/ω ' nın bu frekansa bağlılığı arayüzey durumlarından kaynaklanmaktadır (10, 12, 16). Arayüzey durumlarının ortalama ömürleri (τ) yüksek frekanslarda ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$) çok küçülen ac sinyalin periyodunu (T) takip edemezler. Çünkü yüksek frekanslar için $T < \tau$ olmaktadır. Bu durumda yüksek frekans bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı G/ω ' ya gelen bir katkı yoktur veya ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece G/ω ' ya düşük frekanslarda olduğu gibi arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşır. Bu olay kısaca "*arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda sinyali takip edememesi*" olarak belirtilir. Literatürde arayüzey durumlarından hiçbir katkının gelmemesi için C-V ölçümü en az 500 kHz' de ve tüm arayüzey durumlarını görebilmek için ise en fazla 100 Hz' de yapılmalıdır (5, 10, 12, 16). Şekil 5.2' ye bakılacak olursa bu kabulün isabetli olduğu görülmektedir.

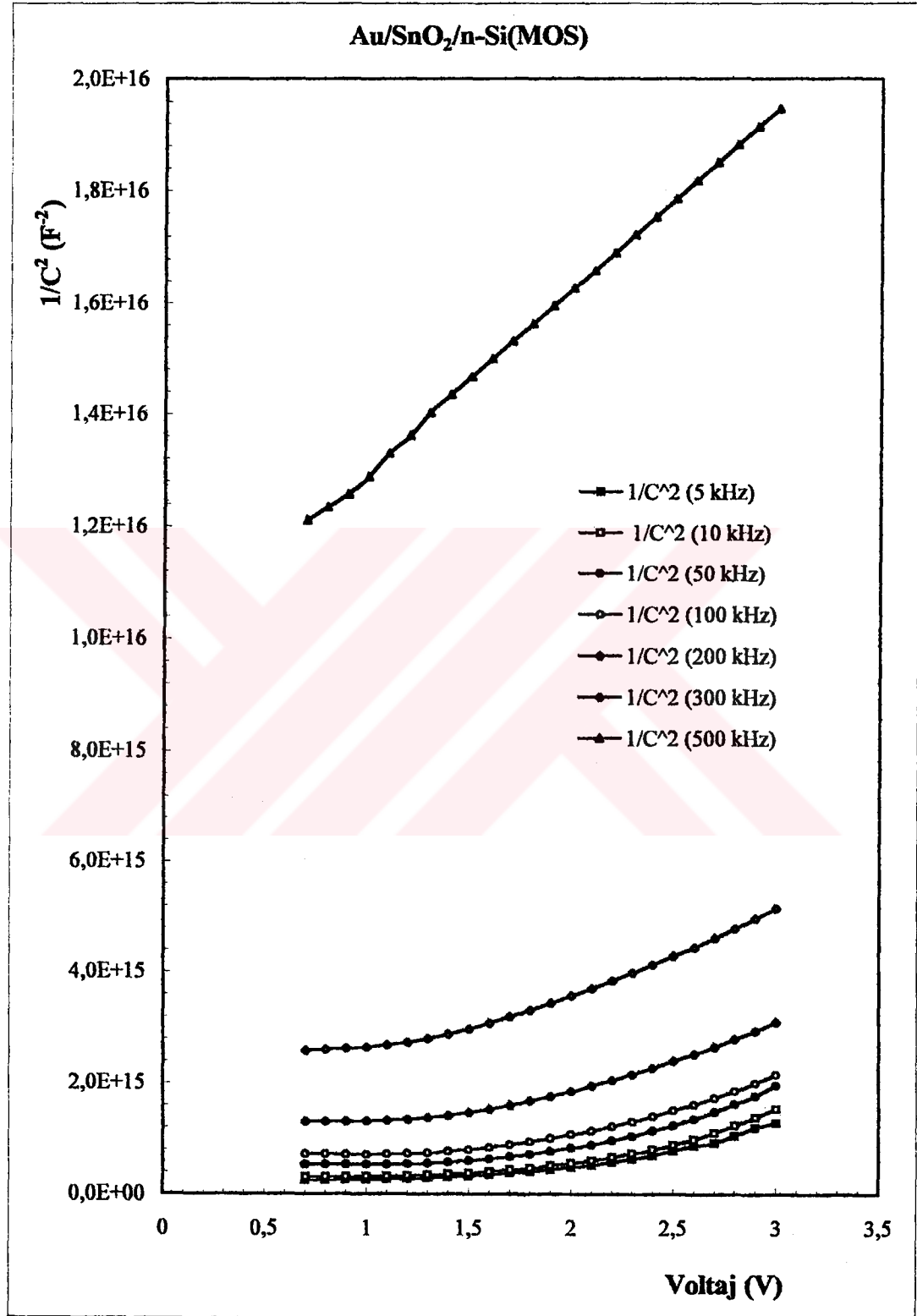


Şekil 5.2. Çeşitli frekanslar için İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) eğrileri

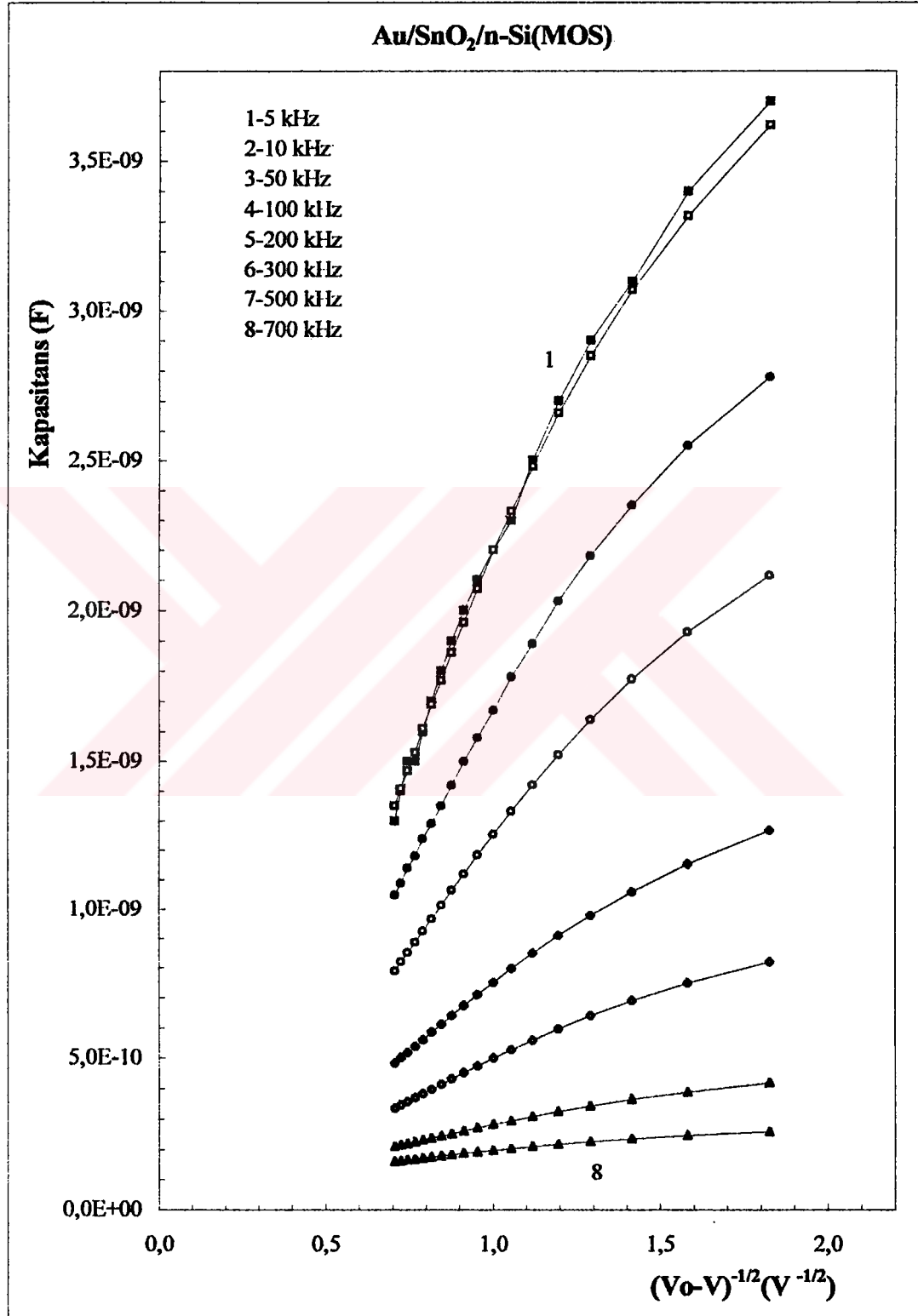
Arayüzey durumlarından dolayı Şekil 5.3' de görüldüğü gibi küçük frekanslarda ki C^2-V eğrileri, ters beslemde lineer bir davranışa sahip değildir. Çünkü düşük frekanslarda $C-V$ eğrilerinin $1/\omega$ ($\omega=2\pi/T$) süresi yeterince büyük olduğundan arayüzey durumlarının etkisi kendini göstermektedir (18, 19). İdeal bir davranış göstermeyen bu kapasite-voltaj eğrileri $C-(V_0-V)^{-1/2}$ formunda yeniden çizilerek lineer duruma dönüştürülebilir ve küçük frekanslarda kapasitans-voltaj eğrisine arayüzey durumlarından dolayı meydana gelen ilave kapasitans hesaplanabilir. Burada V_0 , yüksek frekansta C^2-V eğrisinden lineer kısmın voltaj eksenini kestiği nokta, V ise uygulanan ters gerilim voltajıdır. Şekil 5.4' de görüldüğü gibi düşük frekanslara doğru gidildikçe ilave kapasitansın azalan frekansla arttığı gözlenmektedir. Şekil 5.4' de eğrilerinin lineer kısmını sıfır beslemde kapasite eğrisini kestiği noktalar 5, 10, 50, 100, 200, 300, 500 kHz değerleri için sırasıyla 0,52; 0,50; 0,31; 0,21; 0,12; 0,10; 0,03 nF değerleridir. Bu değerler kapasiteye gelen katkı, ilave kapasitans olup çizelge 5.1' de verilmiştir. Yeterince yüksek frekans (700 kHz) için $C-(V_0-V)^{-1/2}$ eğrisi sıfır beslemde kapasitans eksenini sıfırda kesmektedir. Bu sonuç $f \geq 700$ kHz için arayüzey durumlarından dolayı kapasitansa bir katkı gelmediğini göstermektedir. Daha küçük frekanslarda azalan frekansla arayüzey durumlarından dolayı kapasitansa gelen katkı artmaktadır. Literatürde benzer sonuçlar elde edilmiştir (5-9,11-14).

Çizelge 5.1. Çeşitli frekanslar için ilave kapasitans değerleri

Frekans (kHz)	İlave kapasitans (nF)
5	0,52
10	0,50
50	0,31
100	0,21
200	0,12
300	0,10
500	0,03
700	0,00



Şekil 5.3. Çeşitli frekanslar için $1/C^2$ -V eğrileri



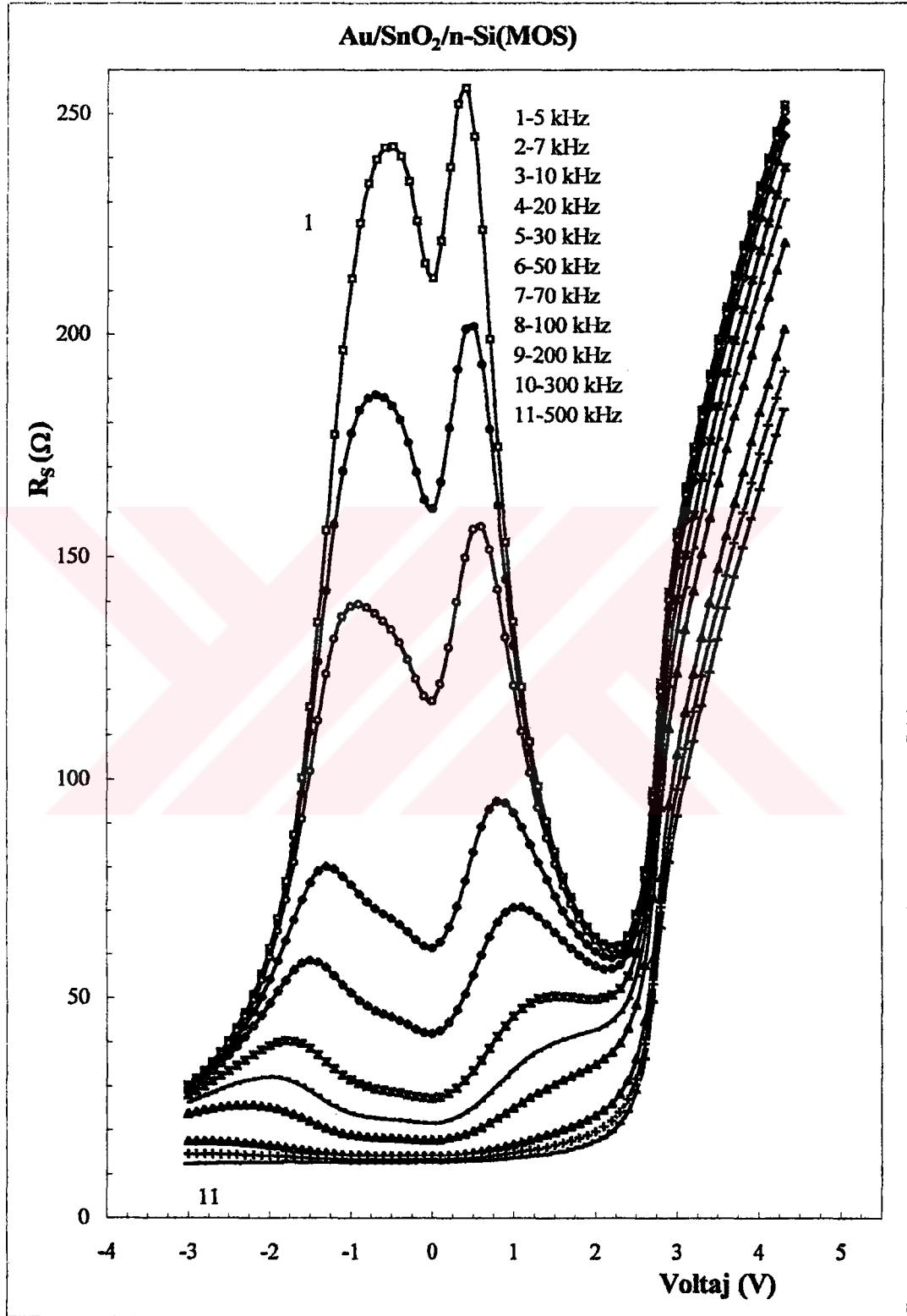
Şekil 5.4. Çeşitli frekanslar için $C - (V_0 - V)^{-1/2}$ eğrileri

5.1.2. Seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri

Seri dirençler ölçülen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) deneysel ölçümlerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten hesaplandı (12).

$$R_s = \frac{G_{ma}}{(G_{ma}^2 + C_{ma}^2 \omega^2)} \quad [5.1]$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesinde (yeterince ileri pozitif gerilimde) ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Bir yarıiletken aygıtın (diyot v.b.) gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve yeterince ters gerilimlerde (terslenim bölgesinde) sonsuza gider. Şekil 5.5' de seri direncin frekans ve voltaja bağlı değişimi verildi. Şekilden de görüldüğü gibi seri direnç voltaja bağlı olarak değişmekte ve bilhassa düşük frekanslarda iki pik vermektedir. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının yerleşmiş olduğuna atfedilebilir (10, 12, 16). Çünkü düşük frekanslarda elde edilen gerek kapasitans-voltaj (C-V) gerekse iletkenlik-voltaj (G/ω -V) değerleri için arayüzey durumları a.c. sinyali takip edebilir (5, 10, 12, 16-18). Yine şekilden de görüldüğü gibi yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) her iki pik de kaybolmuştur. Çünkü yüksek frekanslarda arayüzey durumları a.c. sinyali takip edemez. Bu nedenle Au/SnO₂/n-Si yapı veya benzeri eklem içeren yapıların temel parametreleri olan; katkı atomların yoğunluğu (N_a veya N_d), Fermi enerjisi (E_F), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve seri direnç (R_s) gibi değerler mutlaka yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinden hesaplanmalıdır. Aksi taktirde arayüzey durumlarından dolayı bu parametrelere katkılar gelir ve dolayısıyla bu değerler gerçek ve güvenilir değerler olmaz.



Şekil 5.5. 3 kHz-500 kHz arasında çeşitli frekanslar için Seri Direnç-Voltaaj (R_s -V) eğrileri

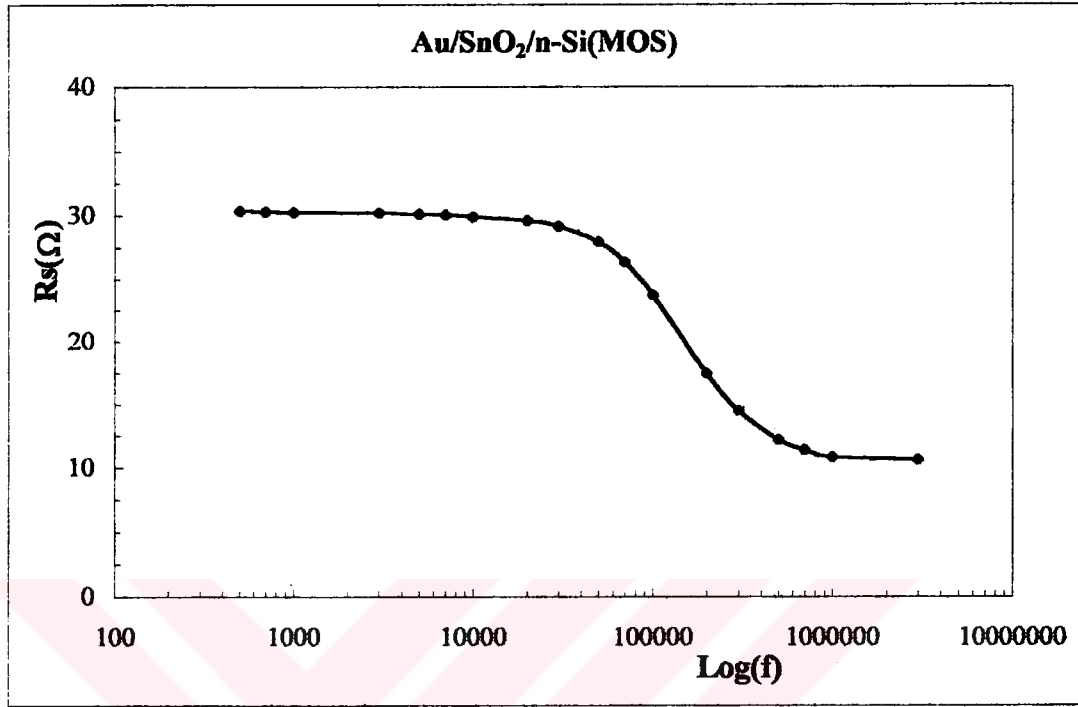
Au/SnO₂/n-Si yapının yığılma bölgesinde ki seri direnç değerleri frekansa bağlı (100 Hz-3 MHz) olarak oda sıcaklığında elde edildi ve şekil 5.6' da verildi. Frekans aralığı çok geniş olduğundan R_s-f grafiği yarı logaritmik olarak verildi. Artan frekansla seri direnç değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Küçük frekans (100 Hz) için seri direnç yaklaşık 30 Ω iken bu değer yeterince yüksek frekansta (3 MHz) yaklaşık 10 Ω' a düşmektedir.

5.1.3. Arayüzey durum yoğunluğu

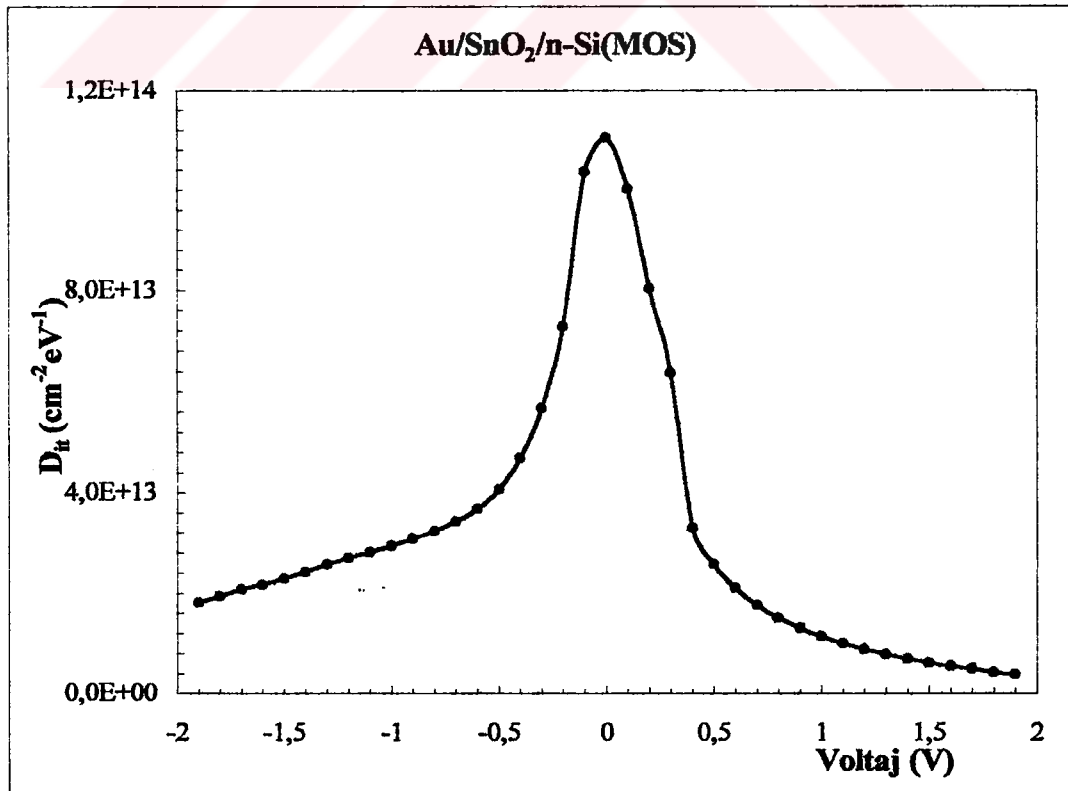
Yukarıda bahsedilen bir çok etkiye arayüzey durumlarının neden olduğu söylenmişti. Bu nedenle hazırlanan Au/SnO₂/n-Si yapıda yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının büyüklüğü ve voltaja göre dağılım profili düşük frekans(100 Hz)-yüksek frekans(1 MHz) (C_{LF}-C_{HF}) metoduna göre (5, 20, 21) eşitlik 5.2' den hesaplandı ve sonuçlar şekil 5.7' de verildi.

$$D_{it} = \frac{1}{qA} \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} \right] \quad [5.2]$$

Literatüre göre f≥500 kHz için arayüzey durumları a.c. sinyali takip edemez ve f≤100 Hz' de ise arayüzey durumlarının tümü a.c. sinyali takip edebilir. Bu nedenle düşük frekans olarak 100 Hz, yüksek frekans olarak da 1 MHz seçilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi arayüzey durum yoğunluklarının maksimum değeri yaklaşık 10¹⁴cm⁻²eV⁻¹ mertebesinde olup bir pikten geçmektedir. Yani arayüzey durumlarının yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir. Çünkü arayüzey durumları yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde özel bir dağılım profiline sahiptir. Bu arayüzey durumların mevcut olduğu bölgelerde, büyüklükleri ve yoğunlukları mertebesinde C-V veya G/ω-V eğrileri bir pikten geçer. Sonuç olarak Au/SnO₂/n-Si yapı için elde edilen bu arayüzey durumları yeterince yüksek olup aygıtın bir çok parametresini etkileyebileceği görülmektedir.



Şekil 5.6. Yığılım bölgesinde (-3 V' ta) seri direncin frekansa bağlı değişimini gösteren R_s -Log(f) eğrisi



Şekil 5.7. Arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim (D_{it} -V) eğrisi

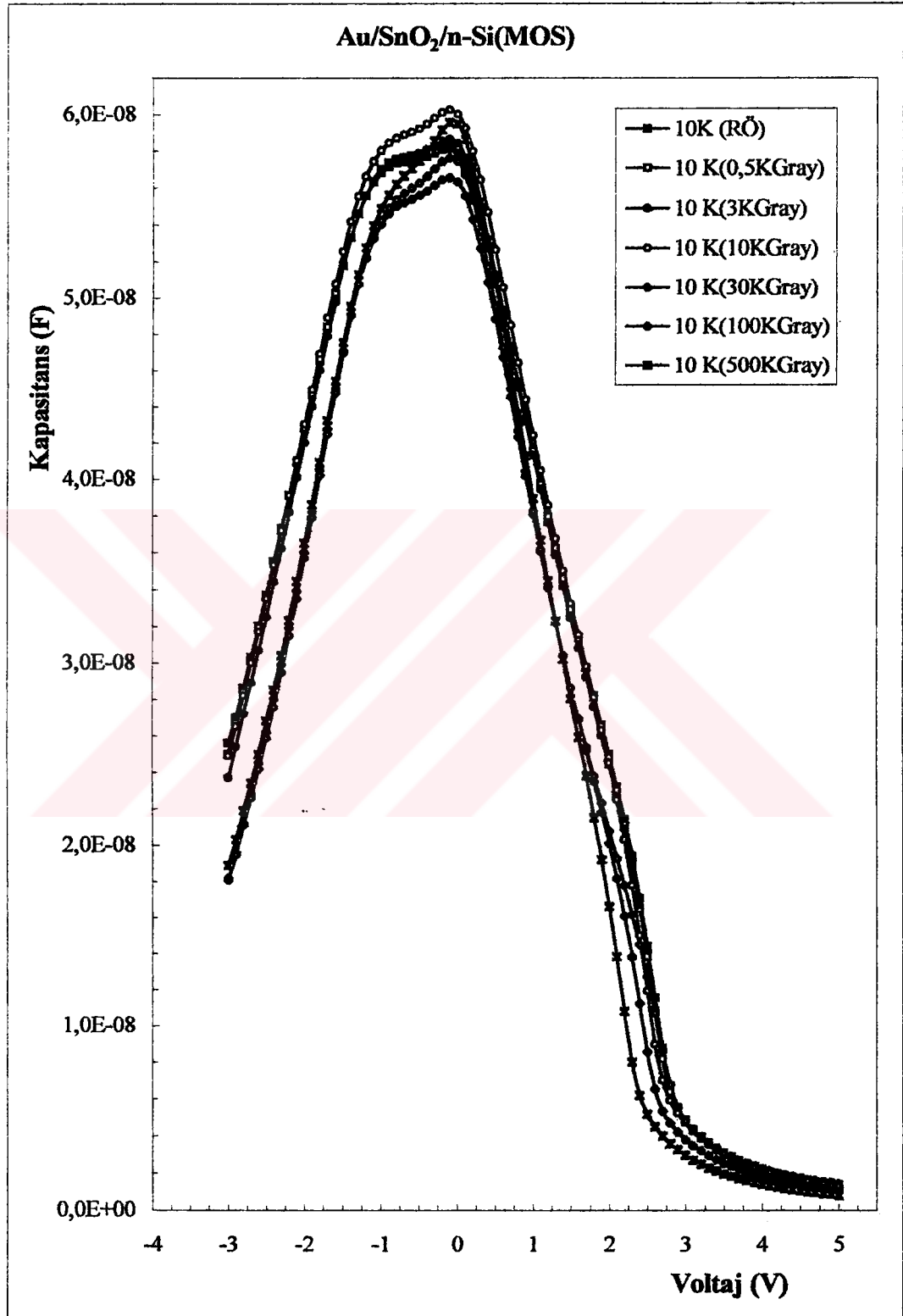
5.2. Radyasyondan Sonra Kapasite-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçümleri

Au/SnO₂/n-Si yapının kapasite-voltaj(C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri frekansa bağlı (100 Hz-1 MHz) yapıldıktan sonra radyasyonun temel yapı karakteristiklerine etkisini incelemek amacıyla yapı Co⁶⁰ 2,12 kGy/Sa şiddetindeki radyasyon kaynağından sırasıyla 0,5; 3; 10; 30; 100 ve 500 kGray radyasyona tabi tutularak bu ölçümler farklı frekanslarda (5, 10, 50, 100 ve 500 kHz) tekrar gerçekleştirildi.

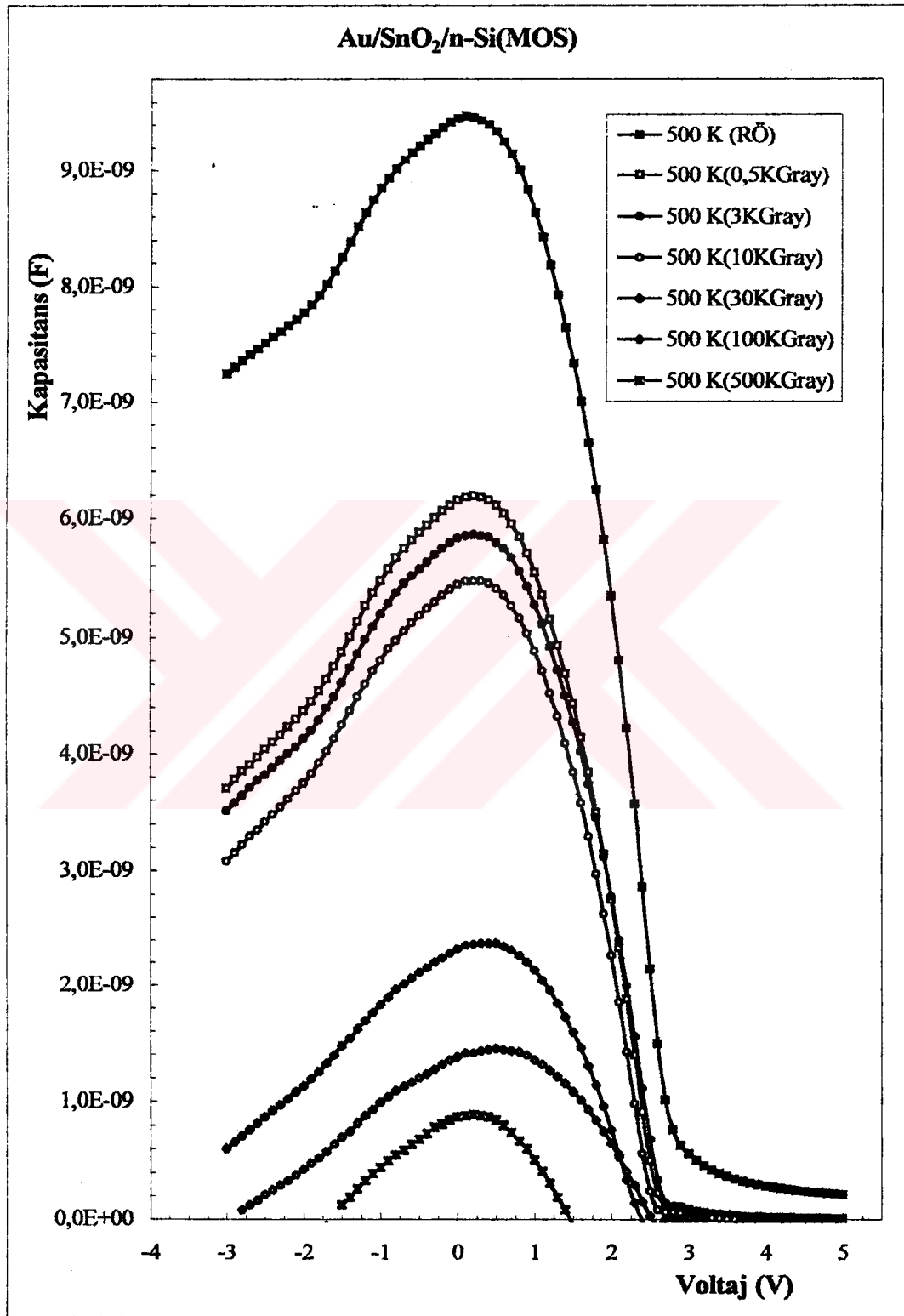
5.2.1 Kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) eğrileri

Au/SnO₂/n-Si yapısı farklı dozlarda radyasyona (0,5; 3; 10; 30; 100 ve 500 kGray) tabi tutulduktan hemen sonra her defasında C-V ve G/ω-V ölçümleri farklı frekanslarda (5, 10, 50, 100; 500 kHz) tekrar yapıldı. Radyasyona bağlı 10 kHz ve 500 kHz' de elde edilen C-V eğrileri sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' da; G/ω-V eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.11' de radyasyondan önceki eğrileriyle birlikte verildi.

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' dan görüldüğü gibi, artan radyasyon miktarına bağlı olarak kapasite değerlerinde bir düşme gözlenmiştir. Radyasyondan dolayı kaynaklanan kapasite düşmesi yüksek frekanslarda daha açık olarak kendini göstermektedir. Yani yüksek frekanslarda C-V eğrilerinde radyasyondan kaynaklanan yarılmalar daha fazladır ve artan radyasyonla C-V eğrileri negatif voltaja doğru kaymaktadır. Literatürde benzer sonuçlar bir çok yazar tarafından birbirinden bağımsız olarak gözlenmiştir (22-27). Bu kaymanın mertebesi genelde yalıtkan tabaka kalınlığına, uygulanan gerilime ve radyasyon dozuna bağlıdır (28-32).

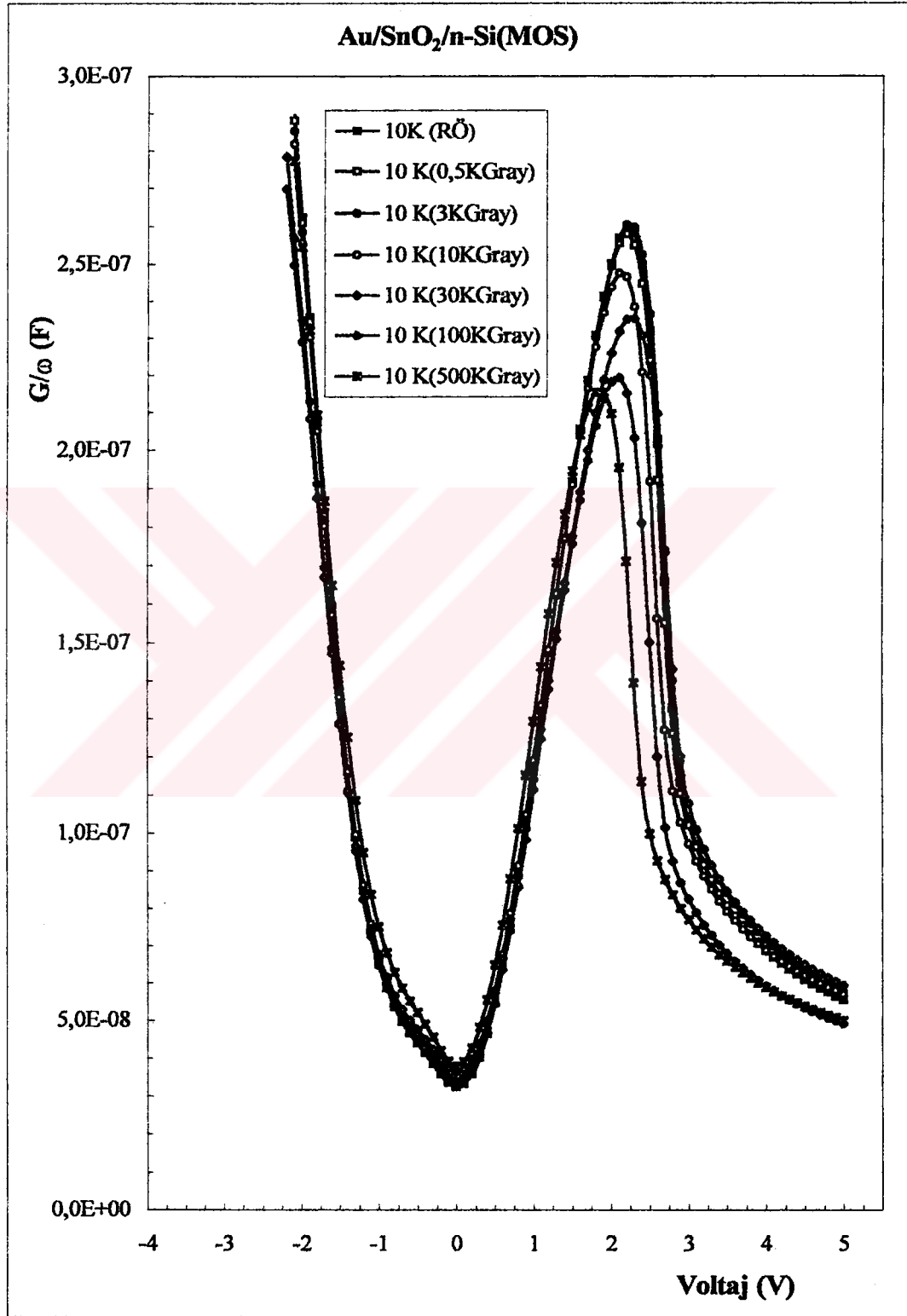


Şekil 5.8. Au/SnO₂/n-Si yapının 10 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Kapasitans-Voltaj (C-V) eğrileri

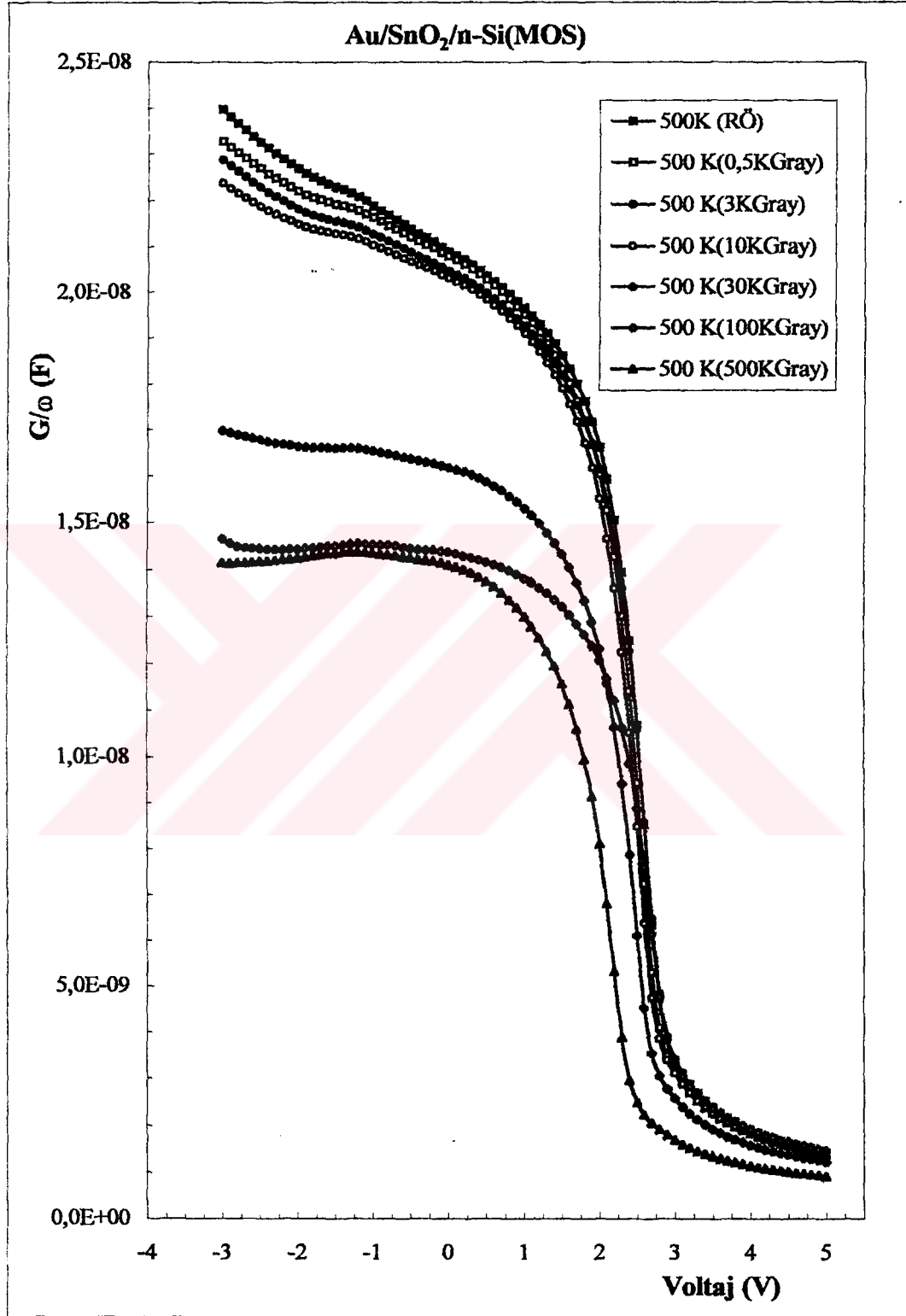


Şekil 5.9. Au/SnO₂/n-Si yapının 500 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Kapasitans-Voltaj (C-V) eğrileri

Benzer şekilde radyasyon miktarı artıkça G/ω -V değerlerinde de düşme olmakta ve bu eğrilerde artan radyasyonla negatif voltaja doğru kaydığı Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’ de görülmektedir. Ayrıca hem C-V hem de G/ω -V eğrileri tüm frekanslarda ve tüm radyasyon değerlerinde yaklaşık sıfır gerilim civarında bir pik vermektedir. Bu pikler artan radyasyonla negatif voltaja doğru kaymaktadır. Bu sonuçlar; yapı radyasyona tabi tutulduktan sonra arayüzeyde radyasyondan kaynaklanan arayüzey durumlarının oluştuğunu ve bunların radyasyon dozuna bağlı olarak konum değiştirdiğini göstermektedir. Radyasyon sonucunda nihayetinde 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. Düşük frekanslar taşıyıcı ömürlerinden daha uzun bir periyoda (zamana) sahip olduklarından, arayüzey durumlarının etkisiyle yarıiletken taşıyıcıların etkisinin toplamı şeklinde net bir etki bu frekanslarda açıkça görülecektir. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının etkisi hemen hemen hiç gözlenmeyecektir. Şekiller incelendiğinde yüksek frekanslardaki yarılmaların daha fazla olmasından dolayı, radyasyon sonucu oluşan net etkinin bir söndürme etkisi olduğu ve bu etkilerin düşük frekanslarda açıkça kendini gösterdiği söylenebilir. Yani arayüzey durumlarından gelen katkı yarıiletkenden kaynaklanan değeri söndürecek niteliktedir. Bu nedenle düşük frekanslarda yarılmalar daha azdır.



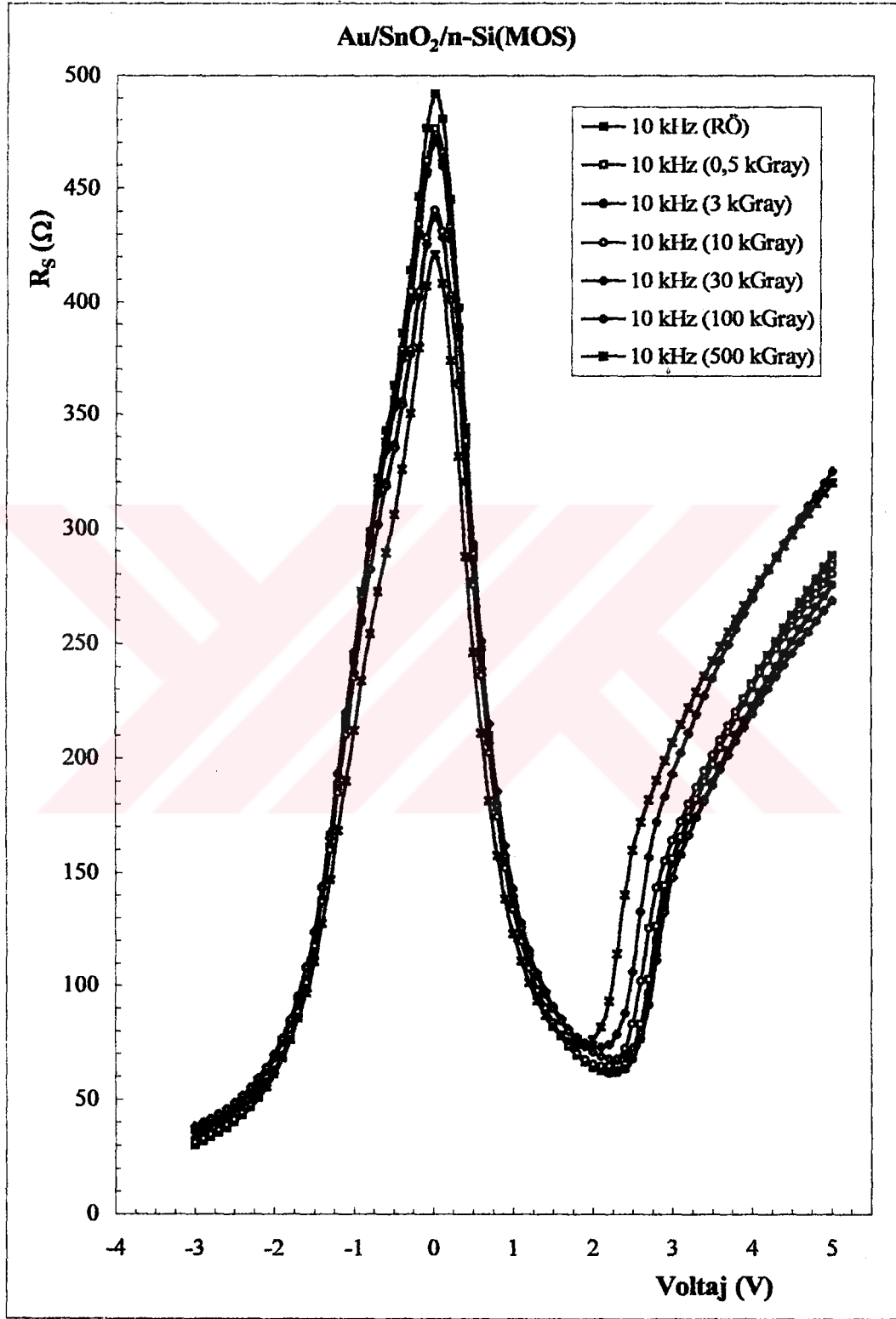
Şekil 5.10. Au/SnO₂/n-Si yapının 10 kHz' de farklı radyasyon değerleri için İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) eğrileri



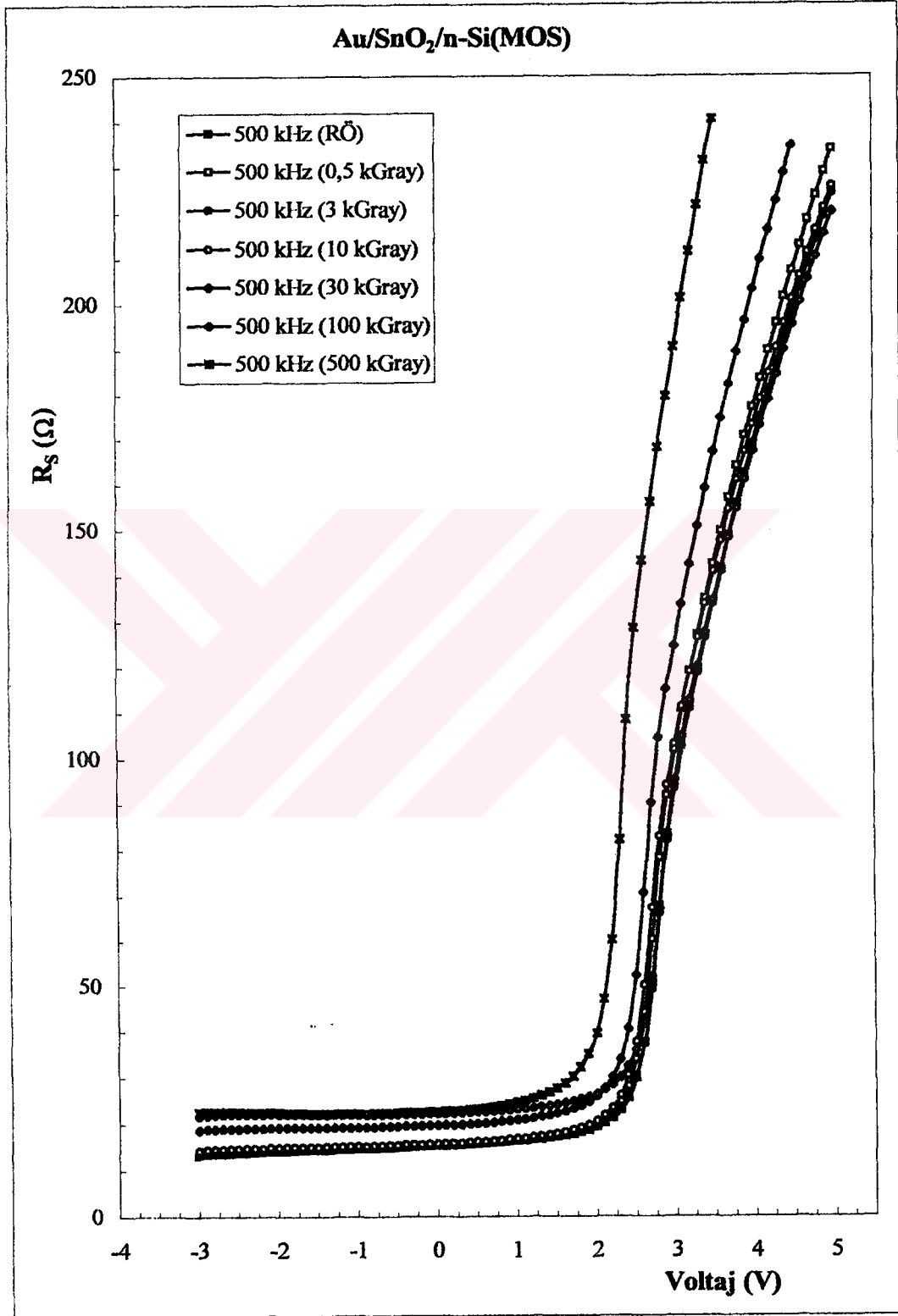
Şekil 5.11. $\text{Au/SnO}_2/\text{n-Si}$ yapının 500 kHz' de farklı radyasyon değerleri için İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) eğrileri

5.2.2. Seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri

Seri direnç değerleri numune radyasyona tabi tutulduktan sonra tekrar hesaplanmış ve farklı radyasyon değerleri (0,5, 3, 10, 30, 100 ve 500 kGray) için 10 kHz ve 500 kHz' deki eğrileri sırasıyla Şekil 5.12 ve Şekil 5.13' de gösterilmiştir. Artan radyasyon miktarına bağlı olarak numunenin seri direnci de artmıştır. Kapasitans ve G/ω eğrilerinde olduğu gibi seri direnç eğrilerinde de yarımalar yüksek frekanslarda daha net ve açık olarak gözlenmektedir. 500 kHz' de voltaja bağlı elde edilen seri direnç değerleri 10 kHz' dekinin aksine bir pik vermemektedir ve terslenim bölgesine doğru gidildikçe sistematik olarak artmaktadır. Bu beklenen bir davranıştır. Çünkü bir elektronik aygıtın seri direnci ileri pozitif beslemlerde (doğru beslem) gerçek değerine, ileri negatif beslemlerde (ters beslem) ise sonsuza gider (5, 12). Küçük frekanslarda (Şekil 5.12) seri direncin bir pik vermesi o bölgede yerleşik olan arayüzey durumlarından kaynaklanmaktadır. 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. Radyasyon dozuna bağlı seri direnç değerleri, pozitif ve negatif gerilim bölgelerinde aynı oranda değişmemektedir. Özellikle pozitif gerilim ve yüksek frekanslarda bu değişim daha hızlıdır.



Şekil 5.12. Au/SnO₂/n-Si yapının 10 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Seri direnç-Voltaj (R_s -V) eğrileri



Şekil 5.13. Au/SnO₂/n-Si yapının 500 kHz' de farklı radyasyon değerleri için Seri direnç-Voltaj (R_s -V) eğrileri

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Hazırlanan metal–yalıtkan–yarıiletken ($\text{Au/SnO}_2/\text{n-Si}$) yapının kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri frekansa bağlı (100 Hz-1 MHz) yapıldıktan sonra radyasyonun temel yapı karakteristiklerine etkisini incelemek amacıyla yapı sırasıyla 0,5, 3, 10, 30, 100 ve 500 kGray radyasyona tabi tutularak bu ölçümler farklı frekanslarda (5, 10, 50, 100, 500 kHz) tekrar gerçekleştirildi.

Numunenin öncelikle C-V ve G/ω -V ölçümleri farklı frekanslar için yapıldı ve bu eğriler Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’ de sırasıyla verildi. Bu eğrilerde gözlenen pik ve yarımaların hem frekansa hem de uygulanan dc gerilime bağlılık göstermesinin sebebi arayüzey durumlarının özel dağılım profiline atfedildi. Düşük frekans bölgelerinde, arayüzey durumları ac sinyali takip edebildiğinden dolayı C-V ve G/ω -V değerlerine ilave bir katkı gelmektedir (5, 12, 33-35). Bu arayüzey durumlarının C-V ve G/ω -V karakteristiklerine etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Artan frekansla arayüzey durumlarının bu katkıları azalmakta ve yaklaşık $f \geq 500$ kHz’ den sonra hemen hemen hiçbir katkı gelmemektedir. Bizim numunemizin C-V ve G/ω -V eğrilerden de görüleceği üzere 500 kHz ve daha yüksek frekanslarda bu katkılar gözlenmemektedir. Dolayısıyla numunenin daha gerçekçi elektriksel parametrelerini hesaplamak için C-V ve G/ω -V ölçümlerinin yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) yapılması daha güvenilir olacaktır (17, 18).

C-V ve G/ω -V eğrilerinde frekansa bağımlılığın dışında uygulanan dc gerilime bağlılık da gözlenmektedir. Özellikle düşük frekanslarda yaklaşık 0 volt civarında pikler oluşmaktadır. Bu piklerin oluşmasında hem uygulanan gerilimle yarıiletken yüzeyinde meydana gelen yığılım, tükenim, tersinim bölgelerindeki fiziksel olaylar hem de arayüzey durumları etkilidir. Çünkü arayüzey durumları metal–yarıiletken arayüzeyindeki yasak enerji aralığına dağılmış özel bir profile sahiptirler.

Arayüzey durum yoğunluğunun gerilime bağlı Şekil 5.7' de ki grafiğine bakıldığında bu durum görülmektedir. Hesaplanan arayüzey durumlarının ortalama değerinin yaklaşık $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ mertebesinde bir pik değerine sahip olması, hazırlanan yapıda arayüzey durumlarının varlığını ve yeterince büyük olduğunu göstermektedir.

Hazırlanan örnek numune için seri direnç değerleri, admitans tekniğiyle hesaplandı ve seri direncin frekans ve gerilime bağlı R_s -V eğrileri Şekil 5.3' de verildi. Kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) eğrilerinde gözlenen iki pikin aynı şekilde R_s -V eğrilerinde de kendini gösterdiği görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere artan frekansla seri direnç değerleri düşmekte ve doğru beslemde yeterince ileri gerilim değerlerinde yaklaşık olarak sabit bir değer vermektedir. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının katkısından dolayı seri direnç gerçek değerinden yüksek çıkmaktadır. Au/SnO₂/n-Si yapı için yüksek frekans bölgesinde bulunan seri direnç değeri yaklaşık 10Ω civarındadır. Düşük frekanslar incelenirse seri direnç bu değer çok üstündedir. Dolayısıyla düşük frekanslarda yapılan ölçümlerden elde edilen bulgular arayüzey durumlarından dolayı gerçek değerlerden çok farklı olabilmektedir.

Şekil 5.6' da düşük frekans(C_{LF})-yüksek frekans(C_{HF}) tekniğiyle hesaplanan arayüzey durumlarının voltaja bağlı dağılım grafiği verilmiştir. Yaklaşık 0 volt civarında grafik keskin bir pik vermektedir. Bu bize arayüzey durumlarının 0 volt civarında yoğunlaştıklarını göstermektedir. Zaten gerek C-V ve G/ω -V gerekse R_s -V eğrilerinden olsun arayüzey durumlarının yaklaşık 0 volt civarında olduğu görülebilmektedir. $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ civarında bir yoğunluğa sahip arayüzey durumları MOS yapının bir çok fiziksel karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir (5, 12, 16, 33).

Hazırlanan Au/SnO₂/n-Si yapının radyasyondan önceki hesaplamaları yapıldıktan sonra aynı numune farklı dozlarda radyasyona tabi tutulduktan sonra benzer ölçümler tekrarlanarak radyasyondan önceki değerleriyle karşılaştırılmıştır. Uygulanan dc gerilim ve ac sinyalin frekansından sonra numunenin karakteristiklerinin radyasyona bağlı olarak da değiştiği gözlenmiştir.

Radyasyondan sonra 10 kHz ve 500 kHz' de elde edilen C-V eğrileri sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' da ve G/ω -V eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.11' de radyasyondan önceki eğrileriyle birlikte verildi. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' dan görüldüğü gibi, artan radyasyon miktarına bağlı olarak kapasite değerlerinde bir düşme gözlenmiş ve eğriler negatif gerilime doğru (sola) kaymıştır. Radyasyondan dolayı kaynaklanan kapasite düşmesi yüksek frekanslarda daha açık olarak kendini göstermektedir. Radyasyon sonucunda bazı arayüzey durumları ya iyonize olmakta veya tersine nötral olabilmektedir. Aynı olay yarıiletken yüzeyinde de gerçekleşeceğinden net etki bu iki etkinin toplamı olacaktır. Düşük frekanslar taşıyıcı ömürlerinden daha uzun bir periyoda sahip olduklarından, hem arayüzey durumlarının etkisi hem de yarıiletken taşıyıcıların etkisi düşük frekanslarda görülecektir. Yeterince yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının etkisi gözlenmeyecektir. Şekiller incelendiğinde yüksek frekanslardaki yarılmalara daha fazla olmasından dolayı, radyasyon sonucu oluşan net etkinin bir söndürme etkisi olduğu ve bu etkinin düşük frekanslarda açıkça görüldüğü söylenebilir. Yani arayüzey durumlarından gelen katkı yarıiletkenden kaynaklanan değeri söndürecek niteliktedir. Bu nedenle de düşük frekanslarda yarılmalar daha azdır. Radyasyon etkisiyle ilgili olarak diğer bir sonuç ise arayüzey durumlarının yerini değiştirmesidir. Artan radyasyonla C-V eğrileri negatif voltaja doğru kaymaktadır. Bu da arayüzey durumlarının negatif voltaja doğru kaydığını göstermektedir.

Seçilen $\text{Au/SnO}_2/\text{n-Si}$ örneği için yapılan tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip aygıtlar için arayüzey durumlarının etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Hiçbir zaman %100 saflıkta bir malzeme ve arayüzey durumsuz kontak oluşturulamayacağından bu tür aygıtlar seçilirken kullanım alanına göre özellikleri belirlenerek, arayüzey durumlarının burada incelenen voltaj, frekans ve radyasyona bağlılığı göz önünde bulundurulmalıdır. Aksi taktirde elde edilen sonuçların doğruluğundan ve güvenilirliğinden emin olunamaz. Ayrıca, bir MOS yapının elektriksel özelliklerini oldukça etkileyen diğer iki parametre olan yalıtkan oksit tabakası ve seri direncin birkaç farklı yöntemle doğru olarak belirlenmesinde büyük yarar vardır.

Çünkü, örnek numuneler hazırlanırken pratikte hiçbir zaman seri direnci sıfır yapmak mümkün değildir. Ayrıca, gerek doğal olarak gerekse yapay olarak oluşturulan yalıtkan tabaka her zaman homojen yapılamayabilir ve dolayısıyla yalıtkan tabaka kalınlığı bölgeden bölgeye farklılık gösterebilir. Bu homojensizlikleri kaldırmak, arayüzey durum yoğunluklarını ve seri direnci azaltmak için yarıiletken kristallerin son derece temiz bir ortamda hazırlanması, kontakların yüksek vakum ortamında (10^{-7} - 10^{-10} Torr) oluşturulması ve numunenin alanının küçük tutulmasının önemi oldukça fazladır.



KAYNAKLAR

- 1- Moll, J. L., "Variable capacitance with large capacitance" , *Ire Wescon (Western Convention and Show) Record*, part 3 : 32-36 (1959)
- 2- Grove, A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices" , *John Wiley and Sons*, New York, 91-106, 334-357 (1967)
- 3- Serin, N., "Entegre Devreler" , *Ankara Ünv. Fen Fak. Yayınları*, kitap no :16, Ankara, 269-280 (1992)
- 4- Burger and Donovan, "Fundamentals of silicon integrated device technology" , *IEEE transactions on nuclear science*, vol.1 : 243-251 (1967)
- 5- Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices" , *Wiley*, New York, 25-146, 193-265 (1981)
- 6- Ulrich, B. and Kuchar, "Capacitance-voltage measurements on a p-type InSb metal/insulator/semiconductor structure with Si₃N₄ as the insulator" , *Thin Solid Films*, 168(2) : 157-168 (1989)
- 7- Hadara, S. H., and Mohammed, "Conductance technique in MOSFETs : study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes" , *Solid-State Electronics*, 31 : 1289-1298 (1988)
- 8- Nicollian, E. H., and Brews, "MOS Physics and Technology" , *John Wiley and Sons*, New York, 26-70, 71-175 (1982)
- 9- Narsale, A. M., and Arora, "C-V-w and G-V-w characteristics of native oxide-GaAs interfaces of $\langle \bar{1} \bar{1} \bar{1} \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ orientations" , *Physica Status Solidi (a)*, 95: 743-748 (1986)
- 10- 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)
- 11- Berglund, C. N., "Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces" , *IEEE transactions on nuclear science*, vol. Ed-13, no.10 : 701-705 (1966)
- 12- Chan, K. K., Amaratunga, G. A. J., Wong, S. P., Veerasamy V. S., "Capacitance-voltage characteristics of a metal-carbon-silicon structure" , *Solid-State Electronics*, 36(3) : 345-349 (1993)
- 13- Castagne, R. and Vapaille, A., "Description of the SiO₂-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements" , *Surface Sci.*, 28 : 157-193 (1971)

- 14- Kar, S. and Dahlke, "Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on n-type Si", *Solid-State Electronics*, 15 : 221-237 (1972)
- 15- Özdemir, S., Altındal, Ş., "Interface state density profile in SiO₂/p-Si from conductance measurements", *Doğa-Tr. J. Of Physics*, 17: 838-846 (1993)
- 16- Hung, K. K. and Cheng, Y. C., "Characterization of Si- SiO₂ interface traps in p-metal-oxide-semiconductor structures with thin oxides by conductance technique", *Journal of Applied Physics*, 62(10) : 4204-4212 (1987)
- 17- 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", *Applied Surface Science*, 30 : 114-119 (1987)
- 18- Türot, 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)
- 19- Szatkowski, J. and Sieranski, K., "Simple Interface-Layer Model for the nonideal characteristics of the schottky-barrier diode", *Solid-State Electronics*, 35(7) : 1013-1015 (1992)
- 20- Konofaos, N., Mc Clean, I. P. and Thomas C. B., "Characterisation of the interface states between amorphous diamond-like carbon films and (100) silicon", *Physica Status Solidi (a)*, 161 : 111-120 (1997)
- 21- Witczak, 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) : 345-555 (1992)
- 22- Zaininger, K. H., and Holmes, A. G., "A survey of radiation effects in metal-insulator-semiconductor devices", *RCA Review*, 209-239 (1967)
- 23- Chanhan, R. K., Chakrabarti, P., "Effect of ionising radiation on MOS capacitors", *Microelectronics Journal*, 33 : 197-203 (2002)
- 24- Martinelli, G., Carotta, M. C., Passari, L., Tracchi, L., "A study of the moisture effects on SnO₂ thick films by sensitivity and permittivity measurements", *Sensors and Actuators B*, 26-27 : 53-55 (1995)
- 25- Candelori, A., Paccagnella, A., Cammarata, M., Ghidini, G., Ceschia, M., "Electron irradiation, effects on thin MOS capacitors", *Journal of non-crystalline Solids*, 245 : 238-244 (1999)
- 26- Lin, Q., Kawano, K., and Nyunt K., "ESR studies of degradation mechanisms of electrical efficiency of CMOS-SRAM due to lattice defects produced by γ -irradiation", *Advances in ESR Applications*, 18 : 279-283 (2002)

- 27- Ma, T. P., "Interface trap transformation in radiation or hot-electron damaged MOS structures" , *Semicond. Sci. Technol.*, 4 : 1061-1079 (1989)
- 28- Winokur, P. S., Mc Garnity, J. M., and Boesch, H. E., "Dependence of interface-state buildup on hole generation and transport in irradiated MOS capacitors" , *IEEE transactions on nuclear science*, vol., NS-23, no.6 , 1580-1585 (1976)
- 29- Winokur, P. S., Schwank, J. R., Mc Whorter, P. J., Dressendorfer, P. V., and Turpin, D. C., "Correlating the radiation response of MOS capacitors and transistors" , *IEEE transactions on nuclear science*, vol. NS-31, no.6, 1453-1460 (1984)
- 30- Silva Jr., E. F., Vasconcelos, E. A., Freire, V. N., "Time evolution of SiO₂ /Si interface defects and dopant passivation in MOS capacitors" , *Microelectronic Engineering*, 51-52 : 567-574 (2000)
- 31- Borch, E., Bruzzi, M., Pirolo, S., and Sciortino, S., "Temperature and frequency dependence of the capacitance of heavily irradiated silicon diodes" , *Solid-State Electronics*, 42(11) : 2093-2096 (1998)
- 32- Schwank, J. R., Winokur, P. S., Sexton, F. W., Fleetwood, D. M., Perry, J. H., Dressendorfer, P. V., Sanders, D. T., and Turpin, D. C., "Radiation-induced interface-state generation in MOS devices" , *IEEE transactions on nuclear science*, vol. NS-33, no.6 , 1178-1184 (1986)
- 33- Singh, A., "Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation" , *Solid-State Electronics*, 28(3) : 223-232 (1985)
- 34- Tayarani-Najaran, M. H., Sands, D., Brunson, K. M., and Thomas, C. B., "Conductance measurements on p-Si/ SiO₂ metal-oxide-semiconductor capacitors" , *Journal of Applied Physics*, 67(4) : 1980-1987 (1990)
- 35- Schulz, M., Klausmann, E., "Transient capacitance measurements of interface states on the intentionally contaminated Si- SiO₂ interface" , *Journal of Applied Physics*, 18 : 169-175 (1979)
- 36- Karadeniz, S., "Al/SnO₂/p-Si/Al yapılarında yüzey şartlarının elektroniksel iletkenliğe etkisi" Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 42-48 (2001)

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Niksar/Tokat’ ta doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Niksar’ da tamamladı. 1997 yılında Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde öğrenime başladı ve 2001 yılında tamamladı. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü’ nde yüksek lisansa kayıt oldu. Halen öğrenimine devam etmekte olup bilim ve teknoloji konusundaki gelişmelere bir katkıda bulunmak için çalışmaktadır.

