

**Yb₂O₃/SiO₂ YIĞIN KAPI OKSİT TABAKASININ MOS
TABANLI RADYASYON SENSÖRLERİNDE DUYAR
BÖLGE OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Berk MORKOÇ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Yb₂O₃/SiO₂ YIĞIN KAPI OKSİT TABAKASININ MOS TABANLI
RADYASYON SENSÖRLERİNDE DUYAR BÖLGE OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Berk MORKOÇ
0000-0002-9573-5805

Doç. Dr. Ayşegül KAHRAMAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Berk MORKOÇ tarafından hazırlanan “Yb₂O₃/SiO₂ YIĞIN KAPI OKSİT TABAKASININ MOS TABANLI RADYASYON SENSÖRLERİNDE DUYAR BÖLGE OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ayşegül KAHRAMAN

Başkan : Doç. Dr. Ayşegül KAHRAMAN
0000-0002-1836-7033
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ercan YILMAZ
0000-0002-6652-4662
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Ürkiye AKAR TARIM
0000-0002-5494-5128
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/07/2020

Berk MORKOÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Yb₂O₃/SiO₂ YIĞIN KAPI OKSİT TABAKASININ MOS TABANLI RADYASYON SENSÖRLERİNDE DUYAR BÖLGE OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Berk MORKOÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ayşegül KAHRAMAN

Bu çalışmada, Yb₂O₃ ile n-Si arasına konulacak SiO₂ katmanın arayüzey kalitesine etkisi ve Yb₂O₃/SiO₂ yığın kapı oksit tabakasının MOS tabanlı radyasyon sensörlerinde duyar bölge olarak kullanılabilirliği araştırıldı. 20 ve 36 nm kalınlıklarında SiO₂ tabaka termal oksidasyon ile n-Si alttaşlar üzerine büyütüldü. Yb₂O₃ filmlerinin kaplanması EBPVD sistemi kullanıldı. Yb₂O₃/SiO₂/Si yapıları azot ortamında beş farklı sıcaklıkta tavlandı. Poli-kristal yapıya sahip Yb₂O₃ filmlerinin kübik fazda olduğu bulundu. Al/Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al ve Al/Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al MOS kapasitörlerinin ışınlama öncesi-sonrası elektriksel karakteristikleri 50 kHz ile 1000 kHz arasında değişen altı farklı frekansta ölçüldü. Q_{eff} , ϵ_k , N_{it} değerleri hesaplandı. En iyi elektriksel karakteristiğe sahip Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al ve Al/200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al kapasitörlerinin radyasyon cevapları ⁶⁰Co kaynağı kullanılarak 1 – 500 Gy doz aralığında 100 kHz ve 1 MHz’ de incelendi. Artan doz ile birlikte Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al ve Al/200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al kapasitörlerinin C – V eğrileri her iki frekans için de sırasıyla sola ve sağa doğru kaydı. Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al kapasitöründe çalışılan doz aralığında ΔN_{it} , ΔN_{ox} ile benzer düzeyde kaldığı için aygıtın radyasyon cevabında bozulmalar meydana geldi. Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al kapasitöründe radyasyon dozuyla birlikte ΔN_{it} ’ de büyük değişimler gözlenmezken ΔN_{ox} sürekli olarak arttı. Araştırma sonucunda SiO₂ tabaka ile arayüzey kalitesinin geliştiği belirlenirken ileri çalışmalarda negatif yük tuzaklanmasına yol açan kusur merkezlerinin yoğunluğunun azaltılması gerekliliği vurgulandı.

Anahtar Kelimeler: MOS kapasitör, radyasyon sensörü, yüksek- k , dielektrik, EBPVD, Yb₂O₃, ince film

2020, xi + 82 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF Yb₂O₃/SiO₂ STACK GATE OXIDE LAYER AS A SENSITIVE REGION IN MOS-BASED RADIATION SENSORS

Berk MORKOÇ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayşegül KAHRAMAN

In this study, effect of the SiO₂ layer to be deposited between Yb₂O₃ and n-Si on the interface quality, and the usability of the Yb₂O₃/SiO₂ stack gate oxide layer as a sensitive region in MOS-based radiation sensors were investigated. 20 and 36 nm thick-SiO₂ layers were grown on the n-Si substrates by thermal oxidation. EBPVD system was used for coating Yb₂O₃ films. Yb₂O₃/SiO₂/Si structures were annealed at five different temperatures in nitrogen environment. Polycrystalline Yb₂O₃ films were found to be in the cubic phase. The pre/post-irradiation electrical characteristics of Al/Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al and Al/Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al MOS capacitors were measured at six different frequencies ranging from 50 kHz to 1000 kHz. The Q_{eff} , ϵ_k , N_{it} values were calculated. The radiation responses of Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al and Al/200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al capacitors with the best electrical characteristics were analyzed at 100 kHz and 1 MHz in the 1 – 500 Gy dose range using ⁶⁰Co source. C-V curves of the Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al and Al/200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al capacitors for both frequencies shifted with increasing dose to left and right, respectively. In Al/RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al capacitor, degradation occurred in the radiation response of the device as ΔN_{it} remained at the same level as ΔN_{ox} in the studied dose range. In Al/200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al capacitor, ΔN_{ox} was constantly increasing, while major changes in ΔN_{it} was not observed with radiation dose. As a result of the research, it was determined that the interface quality improved with SiO₂ layer, and it was emphasized that density of the defect centers leading to negative charge trapping should be reduced, in further studies.

Key words: MOS capacitor, radiation sensor, high-k, dielectric, EBPVD, Yb₂O₃, thin film

2020, xi + 82 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım sırasında bilgisini benden esirgemedi paylaşan, tecrübe ve katkılarıyla beni yönlendiren, her zaman yardımcı ve destekleyici olan saygıdeğer, değerli danışman hocam Doç. Dr. Ayşegül KAHRAMAN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

T.C. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin (NÜRDAM) kapılarını açarak deneysel çalışmalarımı yapmama olanak tanıyan, eğitimime yön veren Sayın Prof. Dr. Ercan YILMAZ' a teşekkürlerimi sunar ve yardımları, destekleri, arkadaşlıkları için tüm NÜRDAM ekibine teşekkür ederim.

Ders aşamam süresince danışmanlığımı üstlenen Sayın Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK' a verdiği katkılar ve motivasyon için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım, TÜBİTAK ARDEB-1001 (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Araştırma Destek Programları Başkanlığı) 117R054 numaralı ve "Akıllı Radyasyon Sensörleri İçin SiO₂ Alternatifi Yüksek-k Dielektriklerinin Tavlama-Işınlama Altındaki Yapısal Dönüşümlerinin İncelenmesi ve Aygıt Performanslarının Araştırılması" başlıklı projesi kapsamında yapılmıştır. Projeye destek sağlayan TÜBİTAK ARDEB' e teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olduklarını hissettiğim, varlıkları ile kocaman bir mutluluk kaynağı olan sevgili annem Selma MORKOÇ ve bir tanecik kardeşim Eylül MORKOÇ' a sonsuz sevgi, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Berk MORKOÇ
01/07/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Yapı.....	6
2.1.1. İdeal MOS yapı.....	6
2.1.2. İdeal olmayan MOS yapı.....	11
2.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	20
2.2.1. Ağır yüklü parçacıklar ve elektronların madde ile etkileşmesi.....	20
2.2.2. Gama ışınlarının madde ile etkileşmesi.....	22
2.2.3. MOS Kapasitörlerde Radyasyon Etkileri.....	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	30
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	38
4.1. XRD ile Yapısal Karakterizasyon.....	38
4.2. Elektriksel Karakterizasyon.....	39
4.3. Radyasyon Cevapları.....	60
5. SONUÇ.....	69
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ω	Açısal frekans
m_{hp}	Ağır yüklü parçacık kütlesi
N_a	Alıcı-tipi katkı konsantrasyonu
C_{it}	Arayüzey kapasitansı
ψ_s	Arayüzey potansiyeli
N_{it}	Arayüzey seviye yoğunluğu
ΔN_{it}	Arayüzey seviye yoğunluğundaki değişim miktarı
τ_{it}	Arayüzey seviyeleri ömrü
ΔV_{it}	Arayüzey tuzaklarının neden olduğu düz-bant voltaj kayması
Q_{it}	Arayüzey yükleri
Z	Atom numarası
E_b	Bağlanma enerjisi
E_g	Bant aralığı enerjisi
ϕ_B	Bariyer yüksekliği
k_B	Boltzmann sabiti
θ	Bragg/Kırınım açısı
σ	Compton saçılımı tesir kesiti
κ	Çift oluşumu tesir kesiti
λ	Dalgaboyu
k	Dielektrik sabit
V_D	Difüzyon potansiyeli
D	Doz
C_{LF}	Düşük frekans kapasitansı
ΔV_{fb}	Düz-bant voltaj kayması
V_{fb}	Düz-bant voltajı
C_c	Düzeltilmiş kapasitans
G_c	Düzeltilmiş kondüktans
C_{acc}	Düzeltilmiş yığılım bölgesi kapasitansı
ψ_{Bn}	E_F ile E_i arasındaki potansiyel fark (n-tipi için)
ψ_{Bp}	E_F ile E_i arasındaki potansiyel fark (p-tipi için)
ϕ_n	E_F ile iletim bant kenarı arasındaki potansiyel fark
ϕ_p	E_F ile valans bant kenarı arasındaki potansiyel fark
q	Elektrik yükü
m_e	Elektron kütlesi
E	Enerji
V_{th}	Eşik gerilimi
Q_{eff}	Efektif oksit yük yoğunluğu
E_F	Fermi enerji seviyesi
τ	Fotoelektrik olay tesir kesiti
E_e	Fotoelektronun kinetik enerjisi
E_γ	Foton enerjisi
V	Gerilim/Voltaj

C_{ma}	Güçlü yığılım bölgesinden ölçülen kapasitans
G_{ma}	Güçlü yığılım bölgesinden ölçülen kondüktans
Q_m	Hareketli (mobil) iyonik yükler
ΔV_m	Hareketli iyonik yüklerin neden olduğu düz-bant voltaj kayması
c	Işık hızı
V_0	İç potansiyel
E_C	İletim bandı enerji seviyesi
N_C	İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu
$\Delta\phi_B$	İmaj kuvveti bariyer düşmesi
C	Kapasitans
V_G	Kapı gerilimi
N	Katkı konsantrasyonu
ϵ_{max}	Maksimum elektrik alanı
ϕ_{ms}	Metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı
ϕ_m	Metal iş fonksiyonu
E_{mg}	Mid-gap enerjisi
ΔV_{mg}	Mid-gap voltaj kayması
V_{mg}	Mid-gap voltajı
C_{ox}	Oksit kapasitansı
V_{ox}	Oksit tabaka gerilimi
t_{ox}	Oksit tabaka kalınlığı
ϵ_{ox}	Oksit tabakanın dielektrik sabiti
χ_i	Oksit tabakanın elektron alınganlığı
A	Oksit tabakanın yüzey alanı
ΔN_{ox}	Oksit tuzak yük yoğunluğundaki değişim miktarı
Q_{ot}	Oksit tuzak yükleri
ΔV_{ot}	Oksit tuzak yüklerinin neden olduğu düz-bant voltaj kayması
Q_{ox}	Oksit yükleri
Y_{ma}	Ölçülen admitans
C_m	Ölçülen kapasitans
G_m	Ölçülen kondüktans
h	Planck sabiti
E_p	Pozitron enerjisi
m_p	Pozitron kütlesi
S	Radyasyon duyarlılığı
Q_f	Sabit oksit yükleri
ΔV_f	Sabit oksit yüklerinin neden olduğu düz-bant voltaj kayması
E_i	Saf Fermi seviyesi
ϵ_o	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık
P	Tanecik boyutu
W_{dep}	Tükenim bölgesi kalınlığı
C_{dep}	Tükenim bölgesi kapasitansı
C_{sc}	Uzay-yük bölgesindeki kapasitans
E_V	Valans bandı enerji seviyesi

N_V	Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_d	Verici-tipi katkı konsantrasyonu
ν_k	X-ışını frekansı
ϕ_s	Yarıiletken iş fonksiyonu
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
χ	Yarıiletkenin elektron alınganlığı
C_{HF}	Yüksek frekans kapasitansı
ϵ_k	Yüksek- k oksiti dielektrik sabiti

Kısaltmalar	Açıklama
FET	Alan Etkili Transistor
AC	Alternatif Akım
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
NH ₄ OH	Amonyum Hidroksit
Ar	Argon
N	Azot/Nitrojen
Cu	Bakır
BiFeO ₃	Bizmut Ferrit
B	Bor
CMOS	Bütünleşik Metal/Oksit/Yarıiletken
DC	Doğru Akım
LET	Doğrusal Enerji Transferi
EBPVD	Elektron Demeti ile Fiziksel Buhar Biriktirme
Er ₂ O ₃	Erbiyum Oksit
Eu	Evropiyum
Gd ₂ O ₃	Gadolinyum Oksit
HfO ₂	Hafniyum Oksit
HfSiO ₄	Hafniyum Silikat
HF	Hidroflorik Asit
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
HCl	Hidroklorik Asit
OH	Hidroksil
Yb	İterbiyum
Yb ₂ O ₃	İterbiyum Oksit
Y ₂ O ₃	İtriyum Oksit
Sn	Kalay
C – V	Kapasitans-Voltaj
C	Karbon
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
Co	Kobalt
G/ω – V	Kondüktans-Voltaj
Xe	Ksenon
Li	Lityum
MOS	Metal/Oksit/Yarıiletken
MOSFET	Metal/Oksit/Yarıiletken Alan Etkili Transistör

NÜRDAM	Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi
RT	Oda Sıcaklığı/Tavlanmamış
O	Oksijen
pMOS	p-kanallı Metal/Oksit/Yarıiletken
K	Potasyum
RCA	Radio Corporation of America
RadFET	Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör
RF	Radyo Frekans
Sm ₂ O ₃	Samaryum Oksit
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
SiO ₂	Silikon Dioksit
Si	Silisyum/Silikon
Sc ₂ O ₃	Skandiyum Oksit
Na	Sodyum
H ₂ O	Su
ICDD	The International Centre for Diffraction Data
TiO ₂	Titanyum Oksit
XRD	X-ışını Difraksiyon Spektroskopisi
XPS	X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. MOS Yapı.....	6
Şekil 2.2. İdeal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramları; a) n-tipi yarıiletken, b) p-tipi yarıiletken.....	7
Şekil 2.3. İdeal bir MOS yapının eşdeğer devresi.....	8
Şekil 2.4. Enerji-bant diyagramları: a) n-tipi yığılım, b) p-tipi yığılım, c) n-tipi tükenim, d) p-tipi tükenim, e) n-tipi tersinim, f) p-tipi tersinim bölgeleri.....	10
Şekil 2.5. İdeal olmayan bir MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.6. n-Si MOS yapısının C – V karakteristiğinde Q_f 'lere bağlı olarak V_{fb} kayması.....	13
Şekil 2.7. n-tipi ve p-tipi MOS yapıları için yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinde verici-tipi ve alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin pozisyonları.....	14
Şekil 2.8. İdeal olmayan n-Si MOS C – V karakteristikleri; a) Yüksek frekanslarda eğri üzerindeki N_{it} etkisi, b) Düşük frekanslarda eğri üzerindeki N_{it} etkisi.....	15
Şekil 2.9. a) Yüksek frekanslar ve b) düşük frekanslar için eşdeğer devreler.....	16
Şekil 2.10. Serbest bir atomda fotoelektrik etkinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.11. Compton saçılmasının bir gösterimi.....	24
Şekil 2.12. Çift oluşumunun şematik bir tanımı.....	25
Şekil 2.13. Malzemenin atom numarası ve foton enerjisi arasındaki ilişki.....	25
Şekil 2.14. Oksit içinde taşıyıcıların iletimi.....	28
Şekil 2.15. a) Oksit tuzak yükleri b) arayüzey tuzak yüklerinin C – V karakteristiği üzerindeki etkileri.....	29
Şekil 3.1. Altaşların temizlenmesi sırasında kullanılan ıslak tezgahlar.....	31
Şekil 3.2. SiO ₂ tabakasının büyütülmesinde kullanılan difüzyon fırını.....	32
Şekil 3.3. EBPVD sistemi çalışma prensibinin şematik bir gösterimi.....	33
Şekil 3.4. Yb ₂ O ₃ ince filminin büyütüldüğü EBPVD sistemi.....	34
Şekil 3.5. XRD sistemi.....	35
Şekil 3.6. Metal kontakların atıldığı RF/DC magnetron saçtırma sistemi.....	36
Şekil 3.7. MOS kapasitörlerin elektriksel karakteristiklerinin ölçüldüğü ölçüm düzeneği.....	37
Şekil 4.1. a) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)/Si ve b) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)/Si yapıları için farklı tavlama sıcaklıklarındaki XRD spektrumları.....	38
Şekil 4.2. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm) MOS kapasitörlerinin frekansa bağlı $C_c - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C.....	41
Şekil 4.3. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm) MOS kapasitörlerinin frekansa bağlı $C_c - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C.....	42
Şekil 4.4. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm) kapasitörlerinin frekansa bağlı $G_c/\omega - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C.....	43
Şekil 4.5. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm) kapasitörlerinin frekansa bağlı $G_c/\omega - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C.....	44
Şekil 4.6. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm) ve Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm) kapasitörleri için eşdeğer kapasitans devre diyagramı.....	48
Şekil 4.7. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm) kapasitörü $C_c^{-2} - V$ eğrileri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C.....	50
Şekil 4.8. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm) kapasitörü $C_c^{-2} - V$ eğrileri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C.....	51

Şekil 4.9. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı dielektrik sabitleri: a) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm), b) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)	54
Şekil 4.10. Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm) yapılarının O 1s XPS spektrumu.....	55
Şekil 4.11. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı arayüzey tuzakları: a) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm), b) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)	55
Şekil 4.12. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı oksit tuzak yükleri: a) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm), b) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)	57
Şekil 4.13. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı bariyer yükseklikleri: a) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm), b) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)	58
Şekil 4.14. MOS kapasitörlerin radyasyon ile değişen C – V karakteristikleri a) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)-100 kHz, b) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)-1 MHz, c) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)-100 kHz, d) Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)-1 MHz	61
Şekil 4.15. Radyasyon dozu ile oksit tuzak yük yoğunluklarının ve arayüzey tuzak yük yoğunluklarının değişimi; a) RT-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm), b) 200 °C- Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)	63
Şekil 4.16. MOS kapasitörlerin doz-kalibrasyon eğrileri; a) RT-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)-100 kHz, b) RT-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)-1 MHz, c) 200 °C-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)-100 kHz, d) 200 °C-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)-1 MHz	65
Şekil 4.17. MOS kapasitörlerin C _c ⁻² – V eğrileri; a) RT-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)-100 kHz, b) RT-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)-1 MHz, c) 200 °C-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)-100 kHz, d) 200 °C-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)-1 MHz	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Farklı tavlama koşullarındaki yapıların tanecik boyutları	39
Çizelge 4.2. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20 \text{ nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörleri için hesaplanan C_{acc} , N_{it} , R_s ve Q_{eff} değerleri	46
Çizelge 4.3. Literatürdeki bazı aygıtların R_s değerleri ve C ile C_c arasındaki yüzdesel farklar	47
Çizelge 4.4. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20 \text{ nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörleri için hesaplanan elektriksel parametreler.....	53
Çizelge 4.5. Literatürdeki $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Si}$ yapılarıyla üretilmiş MOS kapasitörlerin N_{it} değerleri	57
Çizelge 4.6. Literatürdeki bazı aygıtlar için duyarlılıklar ve düz-bant voltajı kayma yönleri	66
Çizelge 4.7. RT- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve 200 °C- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörleri için ışınlama sonrası hesaplanan elektriksel parametreler	68

1. GİRİŞ

Günümüz mikroişlemcileri, dijital lojik devreleri, bilgisayar hafıza kartları gibi birçok son teknolojik nano/mikro boyutlu aygıtın temelini oluşturan MOS (Metal/Oksit/Yarıiletken) yapılarının en dikkat çekici uygulama alanlarından birisi de radyasyon sensörleridir. Kapı oksit tabaka kalınlığı, kanal genişlik/uzunluk oranı radyasyon duyarlılığının geliştirilmesi amacıyla optimize edilmiş p-kanallı MOSFET' ler (Metal/Oksit/Yarıiletken Alan Etkili Transistör) pMOS dozimetreleri ya da RadFET (Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör) radyasyon sensörleri olarak isimlendirilirler (Pejovic 2016). RadFET' ler uzay araçlarında, yüksek radyasyon alanlı merkezlerde, nükleer santrallerde, ABD silahlı kuvvetlerinde, radyoterapi ve brakiterapi gibi ünitelerde yaygın olarak kullanılırlar (Rosenfeld ve ark. 1995, Price ve ark. 2004, Mekki ve ark. 2009, Othman ve ark. 2010, Seon ve ark. 2010).

RadFET' lerin çalışma prensibi, radyasyonun kapı oksit tabakası (dielektrik tabaka ya da duyar bölge) ile etkileşmesi sonucunda yapı içinde tuzaklanan yüklere dayanır. İyonize edici radyasyonun oksit tabakada oluşturduğu elektron-deşik çiftlerinin küçük bir bölümü çok kısa bir süre içinde rekombine olurken, büyük bir bölümü ise DC gerilim altında hareket ederler. Silikon dioksit (SiO_2) tabakasındaki elektronlar, pozitif yüklere kıyasla daha fazla hareketli oldukları için hızlı bir şekilde tuzaklardan kaçabilirler. SiO_2/Si arayüzeyine doğru hareket eden pozitif yükler ise bir bölümü arayüzey yakınında oksit tabaka içinde bir bölümü de arayüzeyde olmak üzere tuzaklanırlar. Tuzaklanan pozitif yükler RadFET' lerin eşik geriliminde (V_{th}) negatif voltaj değerlerine (sola) doğru bir kaymaya neden olur. Işınlama ile eşik geriliminde meydana gelen kayma miktarı RadFET' lerin kalibrasyon eğrisini oluşturur. RadFET' lerin diğer dozimetrelere göre avantajları:

- Dozimetrik bilginin tahribatsız, gerçek zamanlı (in-vivo aktif dozimetre) veya gecikmeli (pasif dozimetre) okunabilmesi,
- 10^8 cGy/s' ye kadar doz oranından bağımsız bir şekilde radyasyon dozunu ölçebilmesi,
- CMOS (Bütünleşik Metal/Oksit/Yarıiletken) teknolojisi ile uyumlu olması,
- Sıcaklıktan diyotlara kıyasla daha az etkilenmesi,

- Boyutlarının küçük olması (kanal genişlik: 300 μm /690 μm , kanal uzunluk: 50 μm /15 μm , kapı oksit tabaka/duyar bölge kalınlığı: 100 nm – 1000 nm),
- Üretim maliyetlerinin düşük olması (bir silikon (Si) alttaşı üzerinde ~100,000 adet sensör)

şeklinde verilebilir (Jornet ve ark. 2004, Rosenfeld 2007, Pejovic ve ark. 2012a, Wang ve ark. 2013, Martinez-Garcia ve ark. 2014). RadFET' lerin dezavantajları:

- Belirli bir doz değerinden sonra doyuma ulaşmaları ve tekrar kullanımlarının mümkün olmaması,
- Sensörün doz cevabının radyasyonun yönüne ve enerjisine bağlı olması,
- Kişisel/çevresel doz ölçümü yapamamalarıdır.

RadFET' lerin 20 °C ya da daha yüksek sıcaklıklarda belirli bir süre tutulması ya da akım ile tavlama sonucunda yeniden kullanımlarının mümkün olabileceğini gösteren çalışmalar mevcut olsa da bu yöntemlerin henüz uygulaması yoktur (Pejovic ve ark. 2012a,b, Luo ve ark. 2014, Alshaiikh ve ark. 2014). Sensörün farklı elektronik paketler içerisine konularak enerji bağımlılığının azaltılması üzerine de yoğun araştırmalar sürdürülmektedir (Panettieri ve ark. 2006, Beck ve ark. 2007, Wind ve ark. 2009, Kahraman ve ark. 2015a,b).

Ticari RadFET' lerin duyar bölgesi, kolay üretim, yüksek termodinamik ve elektriksel kararlılık, kaliteli bir oksit/Si arayüzeyi nedenleriyle SiO_2 ' ten oluşur (Niu ve ark. 2009). SiO_2 -RadFET' lerin yüksek doğrulukla okuyabildikleri minimum radyasyon dozu 40 mGy'dir. pMOS dozimetrelerinin kanal bölgesine ve oksit tabakasına B^+ implantasyonu uygulanması ile hassasiyetlerinin bir miktar geliştiğini gösteren çeşitli çalışmalar vardır (≥ 10 mGy) (Jaksic ve ark. 2002, Haran ve ark. 2004, Gavelle ve ark. 2011, Kahraman ve Yılmaz 2017a,b). RadFET' lerin duyarlılığının artırılması için uygulanan bir diğer yöntem, yapının yığın şeklinde üretilmesidir. Bu tip radyasyon sensörlerinde duyarlılık, yığında kullanılan çip sayısına ve sisteme uygulanan gerilime bağlı olarak değişmekle birlikte ~100 μGy mertebesine düşürülebilir (O'Connell ve ark. 1996, Martinez-Garcia ve ark. 2016). Ancak yığın-RadFET' lerin en büyük dezavantajı güç tüketimi ve sensör boyutlarının artmasıdır. Bu tez çalışmasında, RadFET' lerin duyar bölgesinde yer alan SiO_2 tabakasına alternatif olarak bir yüksek- k malzeme olan itterbiyum oksit (Yb_2O_3) ile $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ tabakası oluşturularak sensör duyarlılığının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

CMOS teknolojisinde çip boyutlarının giderek küçülmesi nedeniyle SiO₂ fiziksel limitlerine ulaşmış ve bu aygıtlarda sızıntı akımı önemli bir problem haline gelmiştir (Wilk ve ark. 2001). Araştırmacılar kapasitans değerini koruyarak sızıntı akımını düşürmek için dielektrik sabiti yüksek olan oksitlere yönelmişlerdir. Bu seçimin nedeni yüksek-*k* dielektrikleri ile fiziksel olarak daha ince/eşdeğer oksit kalınlığı yüksek kapı oksit tabakalarının elde edilmesidir. (Robertson 2006, Houssa 2006). Yüksek-*k* kapı oksit tabakalı FET tabanlı yapılarda sızıntı akımı önemli ölçüde azaltılsa da yüksek-*k*/Si arayüzey kalitesi hala önemli bir problemdir (Yue ve ark. 2008, Srinivasan ve Pandya 2011, Novkovski 2018, Kahraman 2018). Diğer yandan bu alanda kaydedilen gelişmeler henüz radyasyon sensörü boyutuna yeterince aktarılmamıştır.

CMOS, MOSFET, RadFET gibi FET tabanlı aygıtlarda yüksek-*k* dielektriklerinin olası kullanımı, kolay üretim nedeniyle çoğunlukla MOS kapasitörler üzerinden yapılan ön araştırmalar ile değerlendirilir (Xia ve ark. 2017, Hourdakis ve ark. 2018, Park ve ark. 2019, Toumi ve ark. 2020). Yüksek-*k* malzemelerin seçilmesi sırasında;

- Si alttaş ve metal kapı arasında kaçak akımın azaltılması için daha yüksek bariyer yüksekliği ile daha geniş enerji bant aralığı,
- Si ile yüksek termodinamik kararlılık ve kaliteli bir elektriksel arayüzey oluşumu,
- Yüksek kinetik kararlılık,
- Tavlama etkilerine karşı morfolojinin korunması için yüksek amorf-kristal geçiş sıcaklığı,
- Düşük sabit oksit yük yoğunluğu ($\sim 10^{10}$ eV⁻¹cm⁻²) ve düşük arayüzey seviye yoğunluğu ($< 10^{10}$ eV⁻¹cm⁻²),
- Güvenilirlik ve uzun çalışma ömrü,

gibi özellikler aranmaktadır (Houssa 2004). Er₂O₃ ($\epsilon_k = 12,2$), Gd₂O₃ ($\epsilon_k = 12,5$), Sm₂O₃ ($\epsilon_k = 22$), Y₂O₃ ($\epsilon_k = 13,0$), Yb₂O₃ ($\epsilon_k = 9,8$) yüksek-*k* dielektrikleri ile MOS kapasitörler üretilmiş ve bu aygıtların radyasyon duyarlılıkları SiO₂ tabanlı kapasitörlere göre daha yüksek bulunmuştur (Kaya ve ark. 2015, Karaman ve ark. 2016, Abubakar ve ark. 2017, Kahraman ve Yılmaz 2017c, Kahraman ve Yılmaz 2018). Kahraman ve ark. (2016) RF magnetron saçtırma sistemi kullanarak p-Si alttaş üzerine 254 nm kalınlığında Er₂O₃ ince filmini büyütmüş ve azot (N₂) ortamı altında 500 °C' de tavlamışlardır. Ön ve arka metal kontakları alüminyumdan (Al) oluşan Er₂O₃ MOS kapasitörü, ⁶⁰Co (Kobalt-60)

radioaktif kaynağı ile 4 – 76 Gy doz aralığında ışınlanmış ve aygıtın radyasyon cevabı 100 kHz AC voltaj frekansı için incelenmiştir. Kapasitörün düz bant voltajı (V_{fb}) 0 – 16 Gy arasında artan radyasyon dozu ile birlikte sürekli olarak sağa doğru kayarken, bu değerden sonra yönünü sola çevirmiştir. Aygıtın radyasyon duyarlılığı 16 Gy ve 76 Gy için sırasıyla 107 mV/Gy ve 61 mV/Gy olarak bulunmuştur. Aygıt, SiO₂ tabanlı kapasitöre kıyasla yüksek radyasyon duyarlılığına sahip olmasına rağmen düz-bant voltajında gözlenen çift yönlü kayma istenmeyen bir durumdur. Elde edilen sonuçlar 4 – 16 Gy doz aralığında elektronların pozitif yüklere kıyasla yapıda daha fazla tuzaklandıklarını göstermektedir. 254 nm kalınlığında Gd₂O₃ oksit tabakası, p-Si altaş üzerine RF magnetron saçtırma ile büyütüldükten sonra N₂ ortamında 800 °C’ de tavlansmıştır. Ön ve arka kontakların oluşturulmasıyla elde edilen Gd₂O₃ MOS kapasitörleri 0,5 – 70 Gy doz aralığında ⁶⁰Co kaynağı ile ışınlansmıştır. Aygıtların C – V eğrileri hem 100 kHz hem de 1 MHz’ de artan radyasyon dozuyula birlikte sürekli olarak sağa doğru kaymıştır. 254 nm-Gd₂O₃ MOS kapasitörlerinin duyarlılığı 100 kHz ve 1 MHz için sırasıyla 59,2 ± 2,9 ve 62,7 ± 2,9 mV/Gy olarak belirlenmiştir (Kahraman ve Yılmaz 2018). Kaya ve ark. (2015) çalışmalarında Sm₂O₃ oksit tabakasını RF magnetron saçtırma sistemi kullanarak n-tipi Si altaş üzerine büyütüştür. Oluşturulan film N₂ ortamında 200 °C’ de tavlansmış ve kalınlığı 120 nm olarak ölçülmüştür. Sm₂O₃ MOS kapasitörü 0,6 – 30 Gy doz aralığında ⁶⁰Co ile ışınlansmıştır. Aygıtın C – V eğrisi 100 kHz için artan radyasyon dozuyula birlikte sürekli olarak sağa doğru kayarken, 1 MHz’ de tersi bir durum gözlenmiştir. Sm₂O₃ MOS kapasitörünün duyarlılığı, 1 MHz’de 30 Gy için alınan ölçümden 10 mV/Gy olarak hesaplanmıştır. Y₂O₃ oksit tabakası RF magnetron saçtırma sistemi kullanılarak p-Si altaş üzerine büyütülmüş ve ince filmin kalınlığı 150 nm olarak belirlenmiştir. Y₂O₃ ince filmi N₂ ortamı altında 1 saat boyunca 900 °C’ de tavlandıktan sonra metalizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve Y₂O₃ MOS kapasitörü üretilmiştir. 2 – 128 Gy doz aralığında ışınlanan Y₂O₃ MOS kapasitörünün radyasyon cevabı 1 MHz’ de alınan C – V ölçümleri ile belirlenmiştir. Alınan ölçümler sonucunda artan dozla birlikte kapasitörün düz-bant voltaj değerleri sürekli olarak sola doğru kaymıştır. Aygıtın duyarlılığı ise 10,8 mV/Gy olarak bulunmuştur (Abubakar ve ark. 2017). Kahraman ve Yılmaz (2017c) 114 nm kalınlığında Yb₂O₃ ince filmini p-Si altaş üzerine RF magnetron saçtırma sistemi ile büyütülmüş ve Al/Yb₂O₃/p-Si/Al MOS kapasitörlerinin radyasyon cevaplarını 0,5 – 70 Gy doz aralığında incelemiştirlerdir. Aygıtın 100 kHz ve 1 MHz’ de

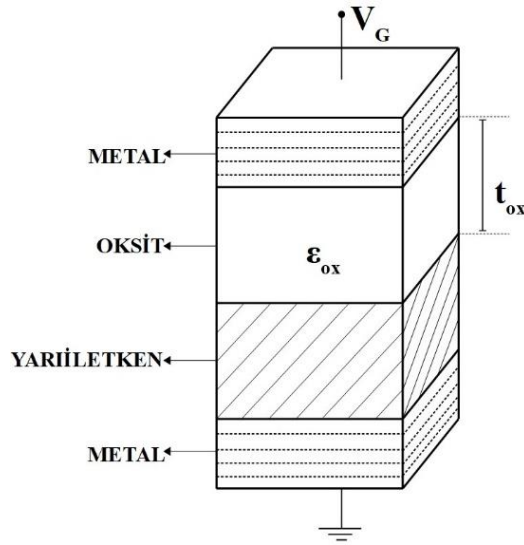
radyasyon duyarlılığı sırasıyla $27,5 \pm 1,14$ ve $28,1 \pm 1,31$ mV/Gy olarak belirlenmiştir. Yb_2O_3 MOS kapasitörünün C – V eğrisi/düz bant voltajı her iki frekans için de artan radyasyon dozuyla birlikte sürekli olarak daha büyük negatif voltaj değerlerine doğru kaymıştır. Bu durum pozitif yüklerin negatiflere göre dielektrik tabakada daha fazla tuzaklandıklarını göstermektedir. Yb_2O_3 MOS kapasitörünün mid-gap voltajı (V_{mg}) ise 0,5 Gy' lik ışınlamanın ardından sağa doğru hareket etmiştir. Oksit tabaka içerisinde pozitiflere kıyasla baskın negatif tuzak yüküne işaret eden bu durumun olası nedenleri $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Si}$ arayüzey problemi ve $\text{Yb}^{3+}/\text{Yb}^{2+}$ elektron tuzak merkezleridir (Kahraman ve ark. 2020a).

Literatür verileri ışığında Yb_2O_3 MOS kapasitörleri, düşük ve yüksek frekans bölgesinde radyasyon ile birlikte kararlı bir davranış göstermesi, elektriksel karakteristiklerinin artan dozla birlikte sürekli olarak daha büyük negatif voltaj değerlerine doğru hareket etmesi ve yüksek hassasiyetleri nedenleriyle ön plana çıkmaktadır. Ancak bu aygıtlar için 0,5 Gy' lik dozda mid-gap voltajında gözlenen sağ yönlü kayma probleminin çözülmesi oldukça önemlidir. Bu tezde Yb_2O_3 ile Si arasına SiO_2 tabakası büyütülerek arayüzey kalitesinin geliştirilmesi, RF magnetron saçırma sistemi yerine EBPVD tekniği ile filmin büyütülerek $\text{Yb}^{3+}/\text{Yb}^{2+}$ elektron tuzak merkezi yoğunluğunun düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu tez kapsamında literatürde ilk defa $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ duyar bölgesi MOS kapasitörlerin elektriksel karakteristikleri ve radyasyon cevapları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma konusu, TÜBİTAK ARDEB-1001 117R054 numaralı ve “Akıllı Radyasyon Sensörleri İçin SiO_2 Alternatifi Yüksek-k Dielektriklerinin Tavlama-Işınlama Altındaki Yapısal Dönüşümlerinin İncelenmesi ve Aygıt Performanslarının Araştırılması” başlıklı projesinde B planı kapsamında sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Yapı

MOS yapılarında yarıiletken ile metal elektrot birbirlerinden oksit tabaka ile ayrılır. Bu oksit tabakanın dielektrik özellik taşımasından dolayı MOS yapılar, paralel plakalı kondansatörlere benzetilmektedir (Neamen 1997). MOS yapının Şekil 2.1’ de şematik olarak bir gösterimi verilmiştir. Burada V_G metale (kapıya/kapı terminaline) uygulanan gerilim (voltaj), t_{ox} oksit tabaka kalınlığı ve ϵ_{ox} oksit tabakanın dielektrik sabitidir.



Şekil 2.1. MOS yapısı

MOS kapasitörlerin elektriksel karakteristiği negatif-pozitif voltaj aralığında kapı terminalinin beslenmesi ile elde edilir. Bu aygıtların performanslarını etkileyen en önemli parametreler oksit ve oksit/yarıiletken arayüzünün incelenmesi ile belirlenir.

2.1.1. İdeal MOS yapı

n- ve p-tipi yarıiletken tabanlı ideal MOS yapılarının sıfır kapı voltajı için ($V_G = 0$) enerji-bant diyagramları Şekil 2.2’ de verilmiştir. Enerji-bant diyagramlarına göre ideal bir MOS yapının aşağıda verilen özelliklere sahip olması gerekmektedir (Sze ve Ng 2007):

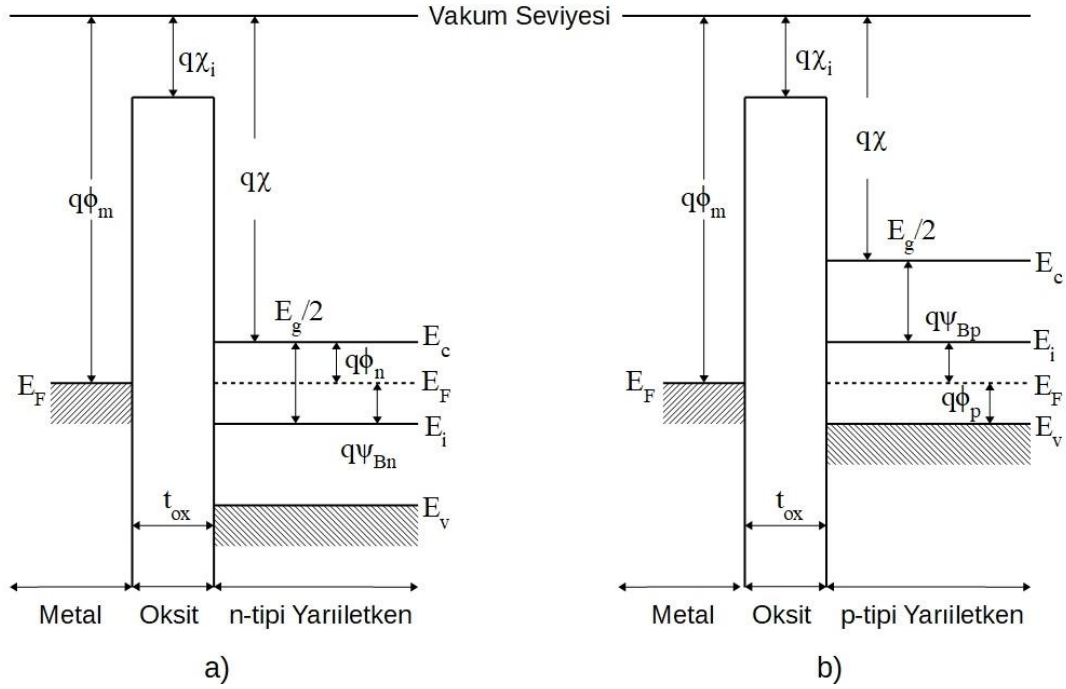
- $V_G = 0$ durumunda metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı ($\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s$) sıfırdır. Yarıiletkenin türüne göre ϕ_{ms} aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bn} \right) = 0 \quad , n - tipi \quad (2.1a)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = 0 \quad , p - tipi \quad (2.1b)$$

Burada ϕ_m metal iş fonksiyonu, χ yarıiletkenin elektron alınganlığı, E_g bant aralığı enerjisi, q elektrik yükü, ψ_{Bn} ve ψ_{Bp} sırasıyla n-tipi ve p-tipi yarıiletken için Fermi enerji seviyesi ile saf Fermi seviyesi arasındaki farktır.

- İdeal bir MOS kapasitör termal denge durumunda iken kapı elektroduna gerilim uygulanmadığında ($V_G = 0$) yarıiletken düz-bant durumundadır ve oksit/Si arayüzeyi ile Si' nin diğer bölgeleri arasında elektron-deşik yoğunluğu eşittir.
- DC voltaj altında oksit tabaka üzerinden akım geçmez.
- Oksitin bant aralığı oldukça geniştir ve bu tabaka ideal bir dielektrik gibi davranır. Bu nedenle oksit içinde ve oksit/yarıiletken arayüzeyinde kusurlar, bu merkezlerde tuzaklanmış yükler, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Oksitin iletkenlik bandında yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilir durumdadır.

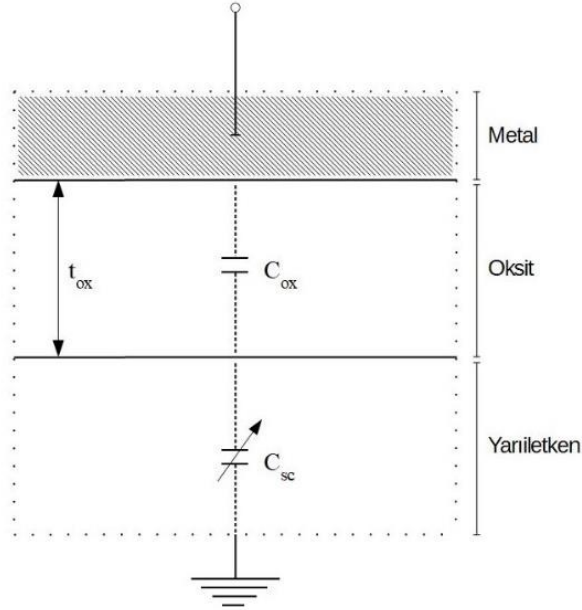


Şekil 2.2. İdeal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramları; a) n-tipi yarıiletken, b) p-tipi yarıiletken

İdeal bir MOS yapıda kapı elektroduna herhangi bir voltaj uygulandığı durumda yarıiletkende yükler hareket etmeye başlar. Gerilimin büyüklüğüne ve paritesine bağlı olarak çoğunluk veya azınlık taşıyıcıları arayüze doğru hareket ederler ve bunun sonucunda yığılma ya da uzay yük bölgeleri oluşur. Bu olay ayrıca oksit tabakada ve arayüzeyde bir potansiyel farkın meydana gelmesine yol açar. Bu değişimler cinsinden kapı gerilimi,

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada V_{ox} oksit tabaka üzerindeki gerilim ve ψ_s arayüzeydeki potansiyel farktır. Oksit tabakanın varlığından dolayı metal ve yarıiletken arasında MOS kapasitansı oluşur. Şekil 2.3' te MOS kapasitansının eşdeğer devresi verilmiştir. Oksit tabaka ve arayüzeyin kalitesi MOS kapasitansına etki eden en önemli parametrelerdir (Nicollian ve Brews 1982).



Şekil 2.3. İdeal bir MOS yapının eşdeğer devresi

Şekil 2.3' te görüldüğü gibi eşdeğer MOS kapasitansı, uzay-yük bölgesindeki kapasitans (C_{sc}) ile oksit kapasitansın (C_{ox}) seri bağlanmasıyla elde edilir ve

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.3)$$

ile verilir. Oksit kapasitansı ise

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0 A}{t_{ox}} \quad (2.4)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada ϵ_0 serbest uzayın elektriksel geçirgenliği ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) ve A oksit tabakanın yüzey alanıdır. Uygulanan gerilime bağlı olarak MOS yapıda yığılım, tükenim ve tersinim olmak üzere üç çalışma bölgesi oluşur. Bir MOS yapısının üç farklı çalışma bölgesinde enerji-bant diyagramı Şekil 2.4' te verilmiştir.

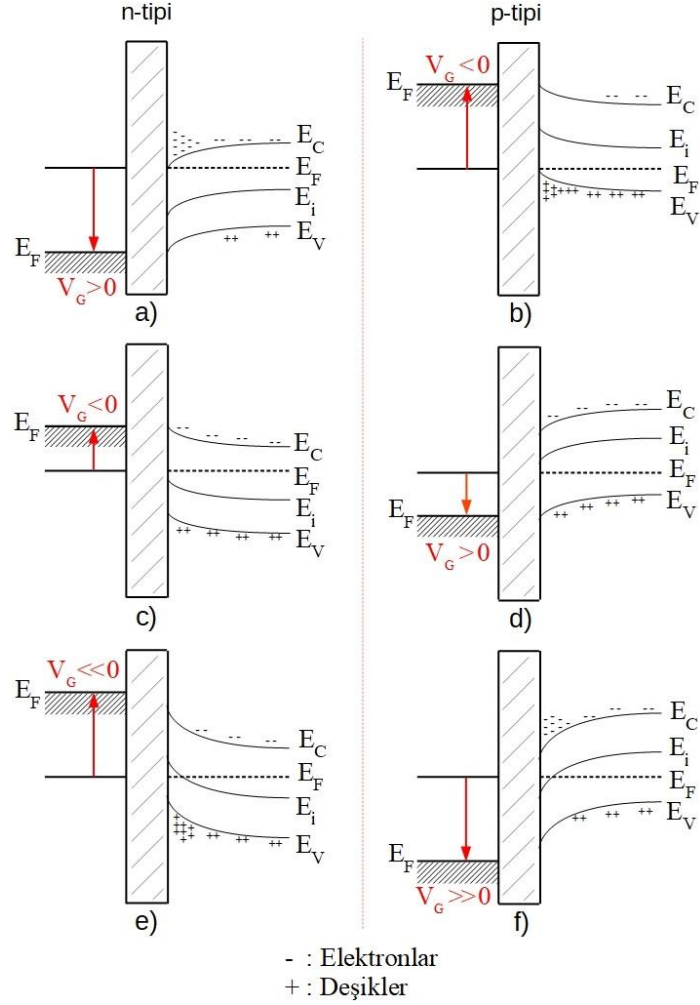
i. Yığılım bölgesi

İdeal bir n-tipi yarıiletkenine sahip MOS yapısında metal elektroda $V_G > 0$ geriliminin uygulanmasıyla bir elektrik alan oluşur ve bu alan, çoğunluk taşıyıcıları olan elektronları arayüze doğru hareketlendirir. Bu bölgede yığılan elektronlar iletkenlik bandının Fermi, valans (değerlik) bandının ise vakum seviyesine doğru bükülmesine neden olur. Bu durumda MOS kapasitörün elektriksel karakteristiği yığılım bölgesindedir ve Şekil 2.4 a' da bu koşul için yüklerin dağılımı verilmiştir. Arayüzeydeki yük birikimi nedeniyle C_{sc} sonsuza gidecek ve dolayısıyla Denklem 2.3' te $C = C_{ox}$ olacaktır. p-tipi yarıiletken tabanlı MOS yapısı için yığılım bölgesi $V_G < 0$ geriliminin uygulanmasıyla oluşur. Çoğunluk taşıyıcıları olan deşikler arayüze doğru hareket ederler. Değerlik bandı, Fermi enerji seviyesine doğru bükülür (Şekil 2.4 b).

ii. Tükenim bölgesi

İdeal bir n-MOS yapısında kapı terminaline uygulanan küçük bir $V_G < 0$ gerilimi ile oluşan elektrik alan, elektronları arayüzeyden uzaklaştırmaktadır. Böylece arayüzeyde elektron yoğunluğu azalırken yarıiletken içinde artmaktadır. Valans bandında ve arayüzey yakınlarında deşikler birikmektedir. Bu durumda bantlar yukarı doğru bükülür (Şekil 2.4 c). Yarıiletken arayüzeyinde V_G ' ye bağlı olarak elektron konsantrasyonunun azaldığı

W_{dep} derinliğinde bir bölge oluşur ve bu olay tükenim (fakirleşme) olarak adlandırılmaktadır. p-MOS yapısında ise $V_G > 0$ olduğundadeşiklerin arayüzeyden uzaklaşması sonucunda tükenim bölgesi meydana gelir (Şekil 2.4 d). Bu bölgede C_{ox} ile C_{sc} 'nin seri kombinasyonu ölçülen kapasitans değerini vermektedir.



Şekil 2.4. Enerji-bant diyagramları: a) n-tipi yığılım, b) p-tipi yığılım, c) n-tipi tükenim, d) p-tipi tükenim, e) n-tipi tersinim, f) p-tipi tersinim bölgeleri

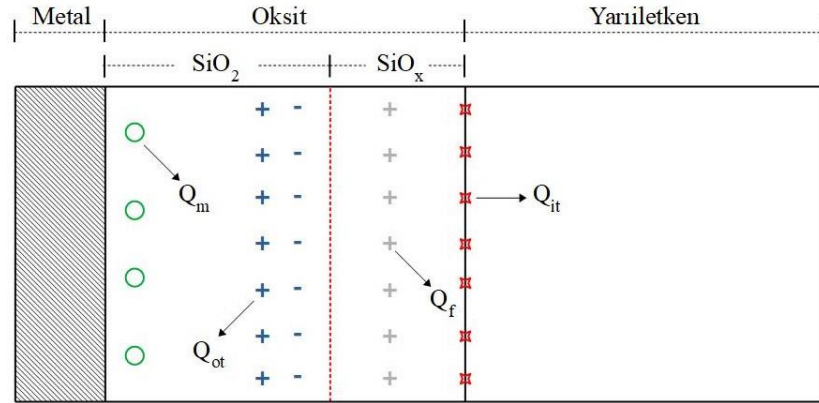
iii. Tersinim bölgesi

İdeal n-MOS yapısında kapıya daha büyük bir $V_G \ll 0$ voltajı uygulandığında bantlar yukarı doğru bükülmeye devam eder. Valans bandı Fermi enerji seviyesine yaklaşırken E_i ise Fermi seviyesinin üzerine çıkmaktadır. Aynı zamanda arayüzeyde birikendeşiklerin sayısı artar ve bu bölgededeşik yoğunluğu elektron yoğunluğundan daha

yüksek olur (Şekil 2.4 e). Bu durum, n-tipi yarıiletkenin p-tipi gibi davranması olarak yorumlanır ve bu olay tersinim olarak adlandırılır. p-tipi yarıiletken tabanlı MOS yapısında ise tersinim bölgesi $V_G \gg 0$ ile oluşur. Elektronlarındeşiklere göre tüketim bölgesinde konsantrasyonunun artmasıyla p tipi yarıiletken n-tipi gibi davranır (Şekil 2.4. f).

2.1.2. İdeal olmayan MOS yapı

İdeal bir MOS yapıda oksit içinde ve oksit/yarıiletken arayüzeyinde hiçbir tuzak yükü bulunmamaktadır. İdeal olmayan (gerçek) MOS yapılarında ise oksit ve oksit/yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr durumda değildir. Yarıiletken üzerine oksitin büyütülme yöntemi, kirlilik, kusurlu bağlar gibi çeşitli nedenlerle hareketli iyonik yükler (Q_m), oksit tuzak yükleri (Q_{ot}), sabit oksit yükleri (Q_f) ve arayüzey tuzak yükleri (Q_{it}) oluşmaktadır. Bu yükler MOS yapının ideal olmayan bir davranış sergilemesine neden olur. İdeal olmayan bir MOS yapısında oluşan tuzak yükleri ve oluştukları bölgeler Şekil 2.5 ile şematize edilmiştir.



Şekil 2.5. İdeal olmayan bir MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

i. Oksit yükleri

Oksit yükleri hareketli iyonik yükler, oksit tuzak yükleri ve sabit oksit yükleri olmak üzere üç gruba ayrılır. Hareketli iyonik yükler, potasyum (K^+), sodyum (Na^+), lityum (Li^+) (Goetzberger ve ark. 1976) başta olmak üzere alkali metal iyonlarıdır. Bu yükler,

gerilim uygulandığında oda sıcaklığında dahi hareketli duruma geçebilmektedirler. V_{fb} ' ye etki eden hareketli yükler, yapının ideal durumdan sapmasına neden olmaktadır. Hareketli iyonik yüklerin varlığından kaynaklanan düz-bant voltaj kayması

$$\Delta V_m = \frac{Q_m}{C_{ox}} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Oksit tuzak yükleri, metal/oksit arayüzeyi ile yarıiletken/oksit arayüzeyi arasındaki bölgede konumlanırlar. Oksit içindeki kusur merkezlerinde elektronlar ya da pozitif yükler tuzaklanabilir (Ristic ve ark. 2007). Oksit tuzak yükü konsantrasyonu dielektrik tabakanın büyütülme yöntemine göre değişirken buralarda tuzaklanan yükler C – V eğrisinin gerilim eksenine paralel olarak kaymasına neden olurlar. Oksit tuzak yükleri nedeniyle gerilimde meydana gelen kayma miktarı

$$\Delta V_{ot} = \frac{Q_{ot}}{C_{ox}} \quad (2.6)$$

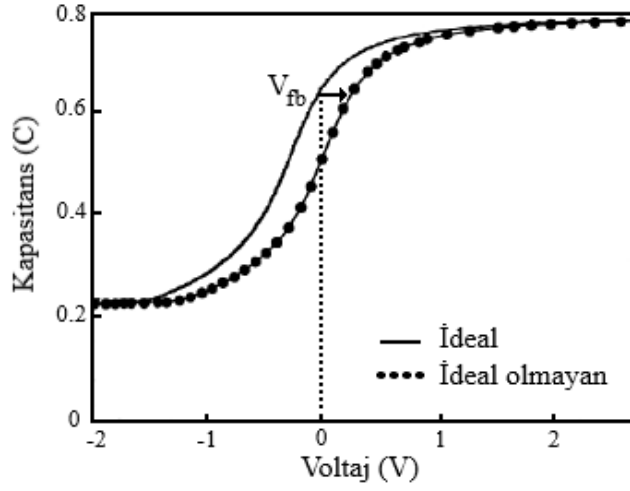
ile verilir. Sabit oksit yükleri, oksit/yarıiletken arayüzeyine yakın bölgede konumlanırlar. Genellikle pozitif olan Q_f ' nin oluşumu oksit büyütme koşullarına ve Si alttaşın yönelimine bağlıyken dielektrik tabakanın kalınlığından bağımsızdır. Sabit oksit tuzak yükleri C – V eğrisini gerilim eksenine paralel olarak kaydırırlar. Pozitif sabit oksit tuzak yükleri C – V eğrisinin sola doğru, negatifler ise sağa doğru hareket etmesine yol açarlar (Nicollian ve Brews 1982). Q_f nedeniyle gerilimde meydana gelen değişim

$$\Delta V_f = \frac{Q_f}{C_{ox}} \quad (2.7)$$

ile ifade edilir. Şekil 2.6' da görüldüğü gibi sabit oksit yük yoğunluğunun belirlenmesinde ideal olmayan bir C – V eğrisinin düz bant voltajındaki kayma miktarı, ideal C – V eğrisiyle ($V_{fb} = 0$) karşılaştırıldığında kritik bir parametredir. Q_f ile V_{fb} arasındaki ilişki

$$Q_f = (\phi_{ms} - V_{fb})C_{ox} \quad (2.8)$$

ile verilir (Schroder 2006).



Şekil 2.6. n-Si MOS yapısının C – V karakteristiğinde Q_f ’ lere bağlı olarak V_{fb} kayması

Oksit yüklerinin neden olduğu toplam voltaj kayması

$$\Delta V = \frac{Q_m + Q_{ot} + Q_f}{C_{ox}} = \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (2.9)$$

ifadesi ile verilir. Böylece düz bant voltaj kayması (ΔV_{fb})

$$\Delta V_{fb} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (2.10)$$

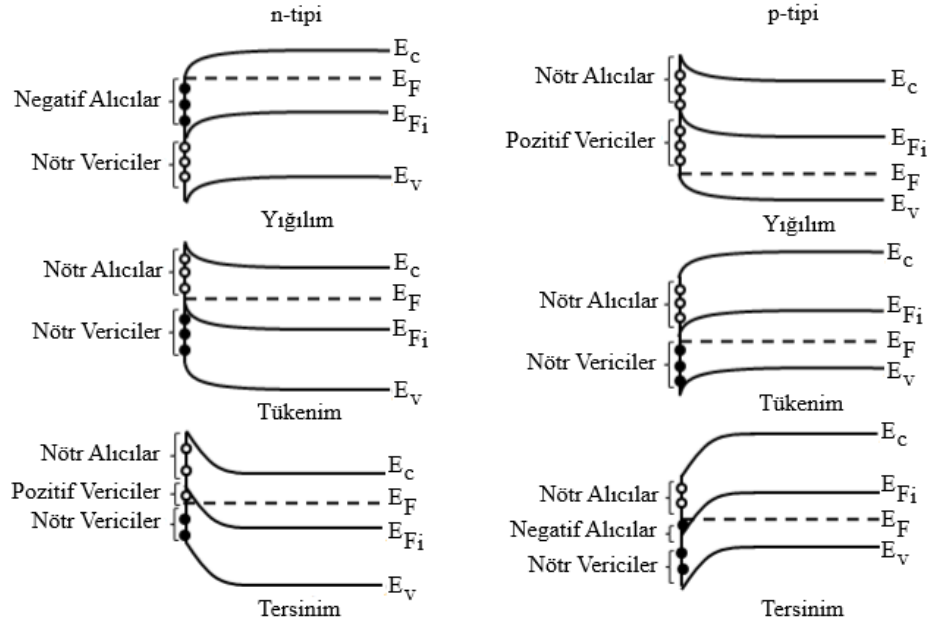
eşitliği ile verilir (Sze ve Ng 2007). Efektif oksit yük yoğunluğu (Q_{eff}) ise

$$Q_{eff} = \frac{C_{ox}(\phi_{ms} - V_{fb})}{qA} \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir (Kahraman ve ark. 2020a).

ii. Arayüzey seviyeleri

Oksit/yarıiletken arayüzeyi içinde yasak bant aralığındaki enerji düzeyleri arayüzey seviyeleri (tuzakları) olarak adlandırılır. Kirlilik, dielektrik/Si arasında örgü uyumsuzluğu, kimyasal bağ kırılmaları gibi olaylar bu tuzakların oluşma nedenleri arasında gösterilmektedir (Breedon ve ark. 2019). Arayüzey tuzakları, verici-tipi ve alıcı-tipi olarak iki şekilde karakterize edilir. Verici-tipi arayüzey seviyeleri, enerji düzeyleri doluyken nötrdür ve bir elektron vererek pozitif yüklü duruma geçerler. Alıcı-tipi arayüzey seviyeleri ise enerji düzeyleri boş iken nötrdür ve bir elektron alarak negatif yüklenirler (Ma ve Dressendorfer 1989). Şekil 2.7 ile verici/alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin konumları gösterilmektedir.



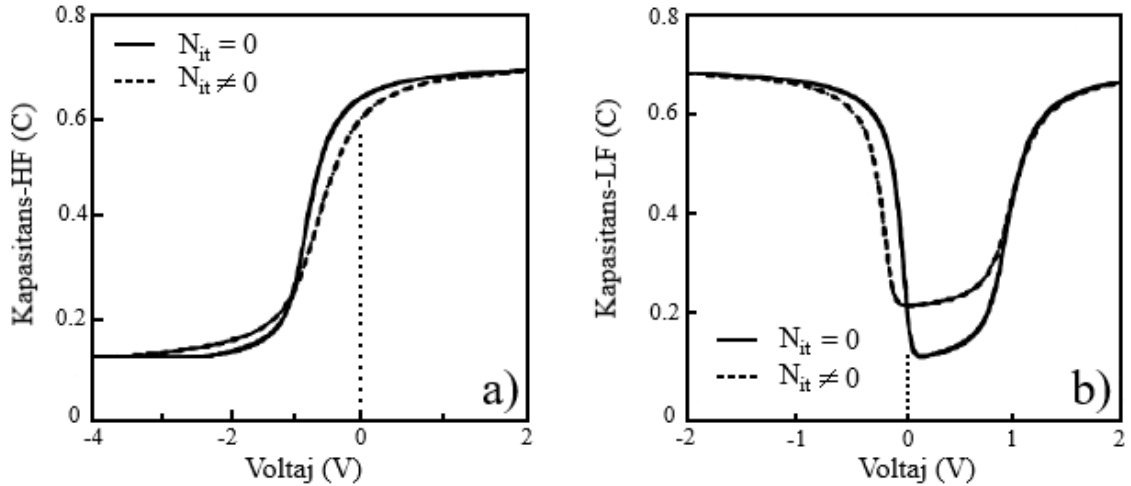
Şekil 2.7. n-tipi ve p-tipi MOS yapıları için yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinde verici-tipi ve alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin pozisyonları

MOS yapısına gerilim uygulanmasıyla birlikte arayüzey seviyeleri ile valans ya da iletkenlik bandı arasında yük alışverişi meydana gelebilir. Arayüzey seviyelerinde meydana gelen yük değişimi ideal MOS davranışını ve dolayısıyla da $C - V$ eğrisini değiştirir. Arayüzey seviye kapasitansı ise

$$C_{it} = \frac{dQ_{it}}{dE} A \quad (2.12)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada E bir arayüzey seviyesine ait enerjidir. Arayüzey seviyeleri kapasitans, kondüktans, arayüzey potansiyeli gibi MOS yapısına ait elektriksel karakteristikleri etkiler ve $C - V$ eğrisinde voltaj eksenine paralel olmayan bir kaymaya neden olurlar. Eğer arayüzeyde verici-tipi arayüzey seviyeleri baskınsa $C - V$ eğrisinde kayma yönü ideal olana göre sola doğrudur. Baskın olan alıcı-tipi arayüzey seviyeleri ise kayma ideal olana göre sağ tarafa doğru olur.

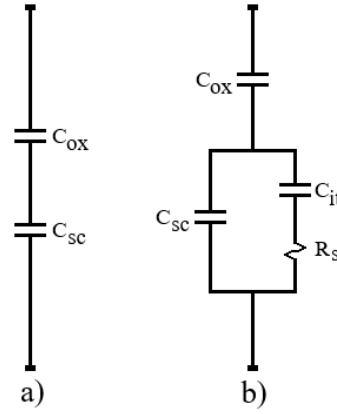
Arayüzey tuzaklarının $C - V$ karakteristiği üzerindeki etkisi, eğrinin yayvanlaşması/dikleşmesi olarak sonuçlanır. Bu değişim yüksek ve düşük frekanslar için sırasıyla Şekil 2.8 a ve Şekil 2.8 b' de görülmektedir. Şekil 2.8 a' da AC voltaj frekansının arayüzey tuzaklarının takip edemeyeceği kadar yüksek olduğu ve bu seviyelerin ölçülen kapasitansa katkı sağlamadığı varsayılmıştır. Bununla birlikte, tuzaklar yavaşça değişen DC gerilimini izleyerek kapasitör yüküne ek bir katkı sağlayabilirler. Şekil 2.8 b' de ise arayüzey tuzaklarının AC ve DC gerilimine tepki verdiği durumdaki $C - V$ eğrisi görülmektedir. Bu durum V_{fb} ' nin ideal değerinden daha fazla sapmasına yol açar.



Şekil 2.8. İdeal olmayan n-Si MOS $C - V$ karakteristikleri; a) Yüksek frekanslarda eğri üzerindeki N_{it} etkisi, b) Düşük frekanslarda eğri üzerindeki N_{it} etkisi

Alıcı-tipi arayüzey seviyeleri mid-gap enerjisinin (E_{mg}) altında, verici-tiptekiler ise üstünde bulunur. Silikon yüzeyinde E_F ile E_{mg} 'nin kesişmesine izin veren kapı gerilimi, arayüzey seviyelerinin nötr olduğu V_{mg} olarak adlandırılır. Bu nedenle, arayüzey durumları V_{mg} 'ye katkıda bulunmazlar (McWhorter ve ark. 1988, Ma ve Dressendorfer 1989).

Seri direnç (R_s) ve zamana bağlı arayüzey seviyeleri elektriksel karakteristikleri etkileyen en önemli parametreler olarak görülebilir. Arayüzey seviyeleri ve seri direncin bir MOS kapasitörünün ölçülen kapasitansı üzerindeki etkileri, Şekil 2.9' da verilen eşdeğer devrelerle açıklanabilir. Burada τ_{it} ($\tau_{it} = C_{it}R_s$) arayüzey seviyelerinin ömürleri veya gevşeme süresi olarak tanımlanır.



Şekil 2.9. a) Yüksek frekanslar ve b) düşük frekanslar için eşdeğer devreler

Yüksek ve düşük frekanslar için kapasitans

$$\frac{1}{C_{LF}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc} + [C_{it}/(1 + \omega^2\tau_{it}^2)]} \quad (2.13)$$

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

denklemleri ile verilir. Burada ω açısal frekans, C_{LF} ve C_{HF} sırasıyla düşük ve yüksek frekanslar için kapasitans değerleridir. SiO₂ veya çeşitli yüksek- k dielektriklerinden

oluşan MOS kapasitörler için gevşeme süresi yaklaşık olarak 10^{-6} s ile 10^{-10} s arasındadır (Bülbül ve ark. 2011). Arayüzey seviye yoğunluğu, artan voltaj frekansı ile azalmaktadır. Bu durumun nedeni yüksek frekanslarda (≥ 500 kHz) arayüzey seviyelerinin AC voltaj sinyaline yanıt vermek için yeterli zamanı bulamaması gösterilmektedir (Nicollian ve Goetzberger 1967). Paralel RC devresi kullanılarak ölçülen admitans (Y_{ma})

$$Y_{ma} = G_{ma} + j\omega C_{ma} \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir (Nicollian ve Brews 1982). Burada G_{ma} ve C_{ma} sırasıyla güçlü yığılım bölgesinde ölçülen kondüktans ve kapasitansdır. Gerçek ve sanal kısımların karşılaştırılması sonucunda ortaya çıkan seri direnç

$$R_s = \frac{G_{ma}}{(G_{ma})^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (2.16)$$

ile verilir. Seri direnç, MOS tabanlı cihazların gürültü oranını belirlemek için etkin bir parametredir. Bu etkinin kaldırıldığı düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve kondüktans (G_c)

$$C_c = \frac{[(G_m)^2 + (\omega C_m)^2]C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (2.17)$$

$$G_c = \frac{[(G_m)^2 + (\omega C_m)^2]a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (2.18)$$

eşitlikleri ile verilir. Burada G_m ve C_m sırasıyla ölçülen kondüktans ve kapasitansdır. a parametresi

$$a = (G_m) - [(G_m)^2 + (\omega C_m)^2]R_s \quad (2.19)$$

ile hesaplanır.

Arayüzey seviye yoğunluğu (N_{it}), bir MOS kapasitörün elektriksel $C_c - V$ ve $G_c/\omega - V$ karakteristikleri kullanılarak hesaplanabilir. N_{it} ' nin belirlenmesinde tek frekans yaklaşımına dayanan Hill ve Coleman (1980) ifadesi yaygın şekilde kullanılır:

$$N_{it} = \frac{2}{qA} \frac{(G_c/\omega)_{max}}{[(G_c/\omega C_{ox})_{max}]^2 + (1 - C_c/C_{ox})^2} \quad (2.20)$$

Burada $G_{c,max}$ maksimum düzeltilmiş kondüktans ve C_c ise $G_{c,max}$ değerine karşılık gelen düzeltilmiş kapasitanstır. Arayüzeyde tuzaklanan baskın yük polaritesinin $C - V$ eğrisi üzerindeki etkisi, yarıiletkenin n-tipi veya p-tipi olmasına bağlı olarak değişmektedir. Bir pMOS kapasitörün arayüzeyinde pozitif yüklerin negatiflere oranla baskın olması eğrinin ideal karakteristiğe kıyasla yayvanlaşmasına, tersi durumda dikleşmesine yol açar (Kahraman ve ark. 2016).

Katkı konsantrasyonu, bariyer yüksekliği gibi bazı elektriksel parametreler cihazın $C_c - V$ eğrisi kullanılarak elde edilebilir. MOS kapasitörün tükenim bölgesi kapasitansı (C_{dep})

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_s \epsilon_o A}{W_{dep}} \quad (2.21)$$

ile verilir. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Tükenim tabakasının genişliği (W_{dep})

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN} (V_0 + V_G)} \quad (2.22)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada V_0 iç potansiyel ve N katkı konsantrasyonudur. Denklem 2.21 ve 2.22 kullanılarak

$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{2(V_0 + V_G)}{\epsilon_s q A^2 N} \quad (2.23)$$

ifadesi elde edilir. $C_c^{-2} - V$ eğrisinin tükenim bölgesinde doğrusal bir değişim gözlenir ve bu doğrunun voltaj eksenine ile kesişmesi V_0 ' ı verir. Difüzyon potansiyeli (V_D) ise

$$V_D = V_0 + \frac{k_B T}{q} \quad (2.24)$$

ile hesaplanır. Denklem 2.25 ile verilen katkı konsantrasyonu doğrunun eğiminden elde edilir:

$$S = \frac{2}{\varepsilon_s q N A^2} \quad (2.25)$$

İmaj yükleri uygulanan kapı voltajı ile metal kontakta birikir ve taşıyıcılar oksit/Si arayüzeyine doğru çekilir. İmaj yüklerinin neden olduğu potansiyel, etkin bariyer yüksekliğini azaltma eğilimindedir, ancak bu değişiklik bariyer yüksekliğine (ϕ_B) göre daha düşüktür. ϕ_B ' nin azaltılması veya imaj kuvveti bariyer düşmesi ($\Delta\phi_B$)

$$\Delta\phi_B = \left[\frac{q \varepsilon_{max}}{4\pi \varepsilon_s} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

ile verilir. ε_{max} tükenim bölgesindeki yük nedeniyle ortaya çıkan maksimum elektrik alandır ve değeri sabit kabul edilir:

$$\varepsilon_{max} = \sqrt{\frac{2qN}{\varepsilon_s} (V_D - V_G)} \quad (2.27)$$

E_F , n-tipi ve p-tipi yarıiletken tabanlı MOS yapıları için

$$E_F = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_d} \right) \quad , n - tipi \quad (2.28a)$$

$$E_F = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_a} \right) \quad , p - tipi \quad (2.28b)$$

denklemleri ile verilir. Burada N_C ve N_V sırasıyla iletkenlik ve valans bantlarındaki etkin durum yoğunlukları, N_d ve N_a ise sırasıyla verici-tipi ve alıcı-tipi katkı konsantrasyonlarıdır. Son olarak ϕ_B

$$\phi_B = V_D + E_F - \Delta\phi_B \quad (2.29)$$

ifadesi ile verilir (Sze ve Ng 2007).

2.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

2.2.1. Ağır yüklü parçacıklar ve elektronların madde ile etkileşmesi

Proton, döteryum, trityum, alfa gibi ağır yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi yörünge elektronları ya da çekirdek üzerinden gerçekleşir. Çekirdek ile etkileşme çok düşük olasılıkla gerçekleşirken Coulomb kuvveti vasıtasıyla soğurucunun yörünge elektronları ile etkileşimi çok daha muhtemeldir. Etkileşme, atomun uyarılması ya da iyonizasyonu sonuçlanır.

Ağır yüklü bir parçacığın bir elektrona bir çarpışma sırasında aktarabileceği enerji

$$E = 4 \frac{E_{hp} m_e}{m_{hp}} \quad (2.30)$$

ile ifade edilir (Knoll 1999). Burada E elektrona aktarılan enerji, E_{hp} çarpışmadan önce ağır yüklü parçacığın enerjisi, m_e elektronun kütlesi ve m_{hp} yüklü parçacığın kütlesidir. Aktarılan enerji, en hafif ağır yüklü parçacık için bile parçacık enerjisinin yaklaşık 1/460' 1 kadardır. Bu nedenle ağır yüklü parçacık soğurucu içinde birçok elektronla etkileşime girebilmektedir. Parçacığın tüm enerjisini aktarana kadar soğurucu içinde aldığı yola menzil denir. Ağır yüklü parçacıklar elektronlar ile etkileşmeleri sırasında büyük açılarda saçılmamaktadır.

Elektronlar ise madde içerisinde elastik veya inelastik çarpışmalar, Bremsstrahlung ışınması (Frenleme ışınımı) ve Çerenkov ışınması olmak üzere dört temel etkileşme

gerçekleştirirler. Elastik çarpışma ve inelastik çarpışmalar sırasında elektronlar, atomik elektronlar veya çekirdek ile etkileşmektedir. Elastik çarpışma olayında momentum ve enerji korunur. Atomik elektronlar ile elastik çarpışma olayı düşük enerjili (< 100 eV) elektronlar için muhtemel iken çekirdek ile elastik çarpışma olayında elektronların enerjileri çekirdeği uyarabilecek büyüklükte değildir. Her iki durumda da elektron geliş doğrultusundan saparak saçılır. İnelastik çarpışma olayında ise sadece momentum korunur. Atomik elektronlar ile inelastik çarpışma olayı gerçekleştiren elektron, enerjisinin bir kısmını yörünge elektronuna aktararak kaybeder. Bu durumda atom uyarılmış halde kalacak ya da iyonize olacaktır. Çekirdek ile inelastik çarpışma olayında elektron enerjisinin bir kısmı çekirdeğe aktarılarak nükleer uyarılma gerçekleşir ve elektron saçılır (Evans 1955).

Bremsstrahlung ışınımı, elektronun çekirdek alanı etkisiyle ivmelenmesi sonucunda yayınlanan elektromanyetik dalgadır. Işıma durdurma gücünün, $(dE/dx)_r$ çarpışma durdurma gücüne oranı, $(dE/dx)_c$,

$$\frac{(dE/dx)_r}{(dE/dx)_c} \approx \frac{T + m_e c^2}{m_e c^2} \frac{Z}{1600} \quad (2.31)$$

ile verilir (Krane 2001). Burada c ışık hızıdır.

Çerenkov ışınması ise elektron hızının, ışığın o ortamdaki faz hızından yüksek olduğu durumda görünür bölgede yayınlanan elektromanyetik dalgadır. Çerenkov ışınmasında Bremsstrahlung ışınımından farklı olarak ortamın atom numarasına veya elektronun kütlesine bağıllık yoktur (Evans 1955).

Yüklü parçacıklar madde ile Coulomb kuvvetine dayalı etkileşim yaparlar. Bu etkileşim atomik elektronların uyarılmasına ya da serbest duruma geçmesine (iyonlaşma) neden olabilir. Yüklü parçacığın ortama aktardığı enerji sonucunda atomlar örgüdeki yerlerinden çıkarak yeni bir düzen de oluşturabilirler. Hedef malzemenin iyonlaştırılması, özellikle elektronlar ve daha ağır yüklü parçacıklar (proton, alfa parçacıkları) için etkileşimlerin önemli bir sonucudur. Yarıiletkenler ve yalıtkanlarda iyonlaşma,

elektronların ve deşiklerin denge dışı yoğunluk fazlalıklarıyla sonuçlanır. Enerjik, yüklü tek bir parçacığın bir ortamdan geçişi süresince çeşitli enerji ve momentumlarda bir dizi yüksek enerjili ikincil elektronlar üretilir. Bununla birlikte, son iyonlaşma olaylarının ve enerji aktarımının çoğu, basit titreşim hareketi yapan birçok değerlik elektronunun kolektif hareketini içeren tek tip bir ara işlem vasıtasıyla meydana gelir. Büyük kütleleri nedeniyle pozitif iyonlar titreşim halindeki elektronlara göre hareketsiz sayılabilir (Pines 1963). Bu plazma titreşimleri veya kuantum mekaniğindeki adıyla plazmonlar, Coulomb etkileşiminin uzun menzilli doğası ile uyarılır ve birçok atom içeren uzak bölgelere uzanır. Çoğu katı için titreşimlerin rezonans frekansına karşılık gelen plazmon enerjileri, değerlik elektronlarının yoğunluğuna bağlı olarak 10 – 20 eV arasındadır. Oluşturulduktan sonra bir plazmon, bant aralığı boyunca tek bir elektron-deşik çiftinin uyarılması yoluyla hızlı (< 1 ps) bir şekilde bozunur. Her bir elektron ve deşik tarafından taşınan fazla kinetik enerji bir veya daha fazla iyonizasyon olayına sebep olabilir ve bunun sonucunda kalan enerji termal örgü hareketine harcanır (McLean ve Oldham 1987).

2.2.2. Gama ışınlarının madde ile etkileşmesi

Gamalar, fotoelektrik etki (olay), Compton saçılması veya çift oluşumu yoluyla hedef malzeme ile etkileşime girer. Her üç durumda da etkileşim enerjik serbest elektronlar üretir.

Fotoelektrik olayda foton ve atoma bağlı elektron arasında etkileşim gerçekleşir. Fotoelektrik etki sürecinde foton enerjisi, yayınlanan elektron (fotoelektron) tarafından tamamen soğurulur. Fotoelektronun kinetik enerjisi (E_e)

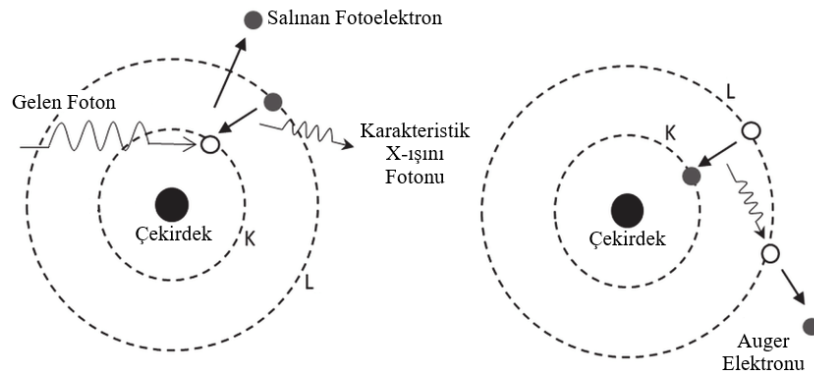
$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.32)$$

ile verilir (Knoll 1999). Burada E_γ foton enerjisi ve E_b elektronun bağlanma enerjisidir. Yayınlanan fotoelektron ile uyarılmış duruma geçen atom kararlı duruma dönmek için kopan elektronun yeri üst yörüngelerden bir elektron ile doldurulur ve bunun sonucunda o tabakaya özgü karakteristik X-ışını yayınlanır (Şekil 2.10). Kararlı duruma geçmek için

ikinci seçenek ise uyarılmış durum enerjisinin üst yörüngelerden bir elektrona aktarılmasıdır. Bu olayın sonucunda Auger elektronu adı verilen bir elektron salınır. Auger elektronun kinetik enerjisi (T_e)

$$T_e = h\nu_k - E_b \quad (2.33)$$

ile verilir. Burada ν_k X-ışını frekansıdır. Fotoelektrik olay tesir kesiti (τ), Z^n ile orantılıdır. n , foton enerjisine göre 3 ile 4 arasında değişen bir değerdir (Knoll 1999).



Şekil 2.10. Serbest bir atomda fotoelektrik etkinin şematik gösterimi

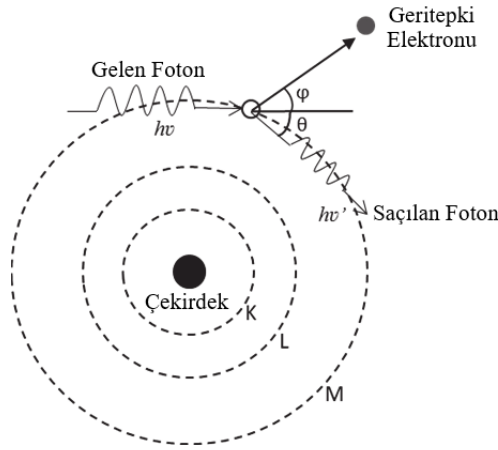
Fotoelektrik etkinin aksine Compton saçılması, gelen foton enerjisinin tamamen soğurulmasını gerektirmez. Enerjisi $h\nu$ (E_γ), momentumu $p = E_\gamma/c$ olan bir foton, atoma bağlı bir elektrona etkileşir ve enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak onun saçılmasına neden olur. Foton ise kalan enerjisiyle birlikte ortam içinde yoluna devam eder (Şekil 2.11). Saçılan fotonun kinetik enerjisi (E'_γ)

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.34)$$

ile verilirken (Knoll 1999) saçılan elektronun kinetik enerjisi (E_e)

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma(1 - \cos\theta)}} \quad (2.35)$$

ile ifade edilir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015). $\theta = 0^\circ$ durumunda foton geliş doğrultusunda hareketini sürdürür ve elektrona enerji aktarılmaz ($E_e = 0$). $\theta = 180^\circ$ durumunda foton geri saçılır ve elektrona aktarılan enerji maksimum olur. Compton saçılımı tesir kesiti (σ), Z ile orantılıdır. Foton enerjisi arttıkça Compton saçılmasının fotoelektrik etki üzerindeki baskınlığı artar.



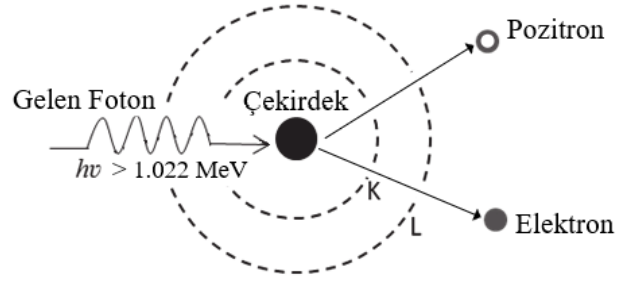
Şekil 2.11. Compton saçılmasının bir gösterimi

Üçüncü tip foton etkileşimi ise çift oluşumdur. Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığı belirli bir eşik enerjisine bağlıdır. Bir atom çekirdeğinin yakınından geçen 1,022 MeV ve üzerinde bir enerjiye sahip olan foton, çekirdek alanıyla güçlü bir etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda foton yok olarak bir elektron-pozitron çiftine dönüşür (Şekil 2.12).

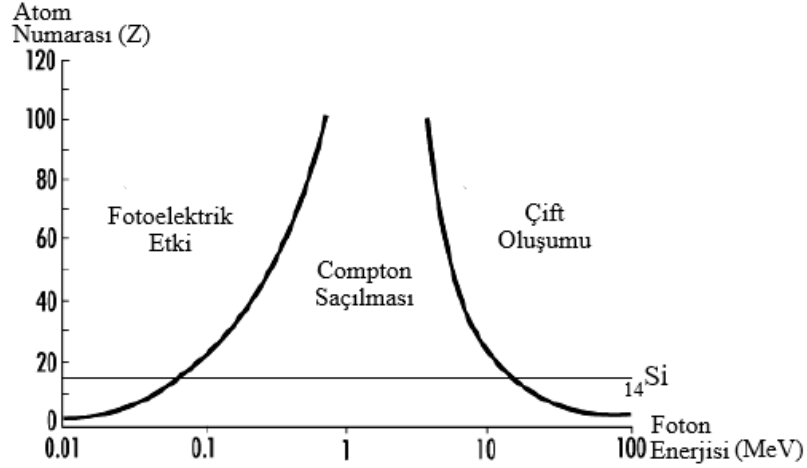
Gelen fotonun enerjisi (E_γ)

$$E_\gamma = E_e + E_p + m_e c^2 + m_p c^2 \quad (2.36)$$

ile verilir (Tsoulfanidis ve Landsberger 2015). Burada E_p ve m_p sırasıyla pozitronun enerjisi ve kütesidir. Elektron ve pozitronun kütleleri birbirine eşit ve durgun kütle enerjileri $m_e c^2 = m_p c^2 = 0,511$ MeV değerindedir. Çift oluşumu tesir kesiti (κ), Z^2 ile orantılıdır.



Şekil 2.12. Çift oluşumunun şematik bir tanımı



Şekil 2.13. Malzemenin atom numarası ve foton enerjisi arasındaki ilişki

Maddenin foton ile etkileşim mekanizmaları, fotonun enerjisi ve atom numarasına bağlı olarak Şekil 2.13 ile gösterilmiştir. Şekil üzerindeki eğriler, komşu etkiler için eşit etkileşim tesir kesitlerine karşılık gelir (Knoll 1999). Silikon için ($Z = 14$), 50 keV altındaki enerjilerde fotoelektrik etki, 20 MeV üzerindeki enerjilerde çift oluşumu baskındır. Aradaki geniş enerji aralığında ise Compton saçılması meydana gelme olasılığı diğerlerine kıyasla daha fazladır. Fotonlardan hedefe birincil enerji transferi ikincil elektron etkileşimleri aracılığıyla gerçekleşmektedir.

2.2.3. MOS Kapasitörlerde Radyasyon Etkileri

Radyasyonun MOS yapıları üzerindeki en büyük etkisi dielektrik tabakadaki sabit yük birikimidir ve biriken sabit yükler nedeniyle yapının elektriksel karakteristiği değişmektedir. Modern MOS yapılarının çoğunda dielektrik tabaka olarak SiO_2 kullanılmaktadır. MOS yapı iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında oksitte enerji

depolanır. Depolanan enerji miktarı, oksit malzemeden geçen birincil ya da ikincil parçacıkların Doğrusal Enerji Transferine (LET) bağlıdır. Bu enerji, uygulanan elektrik alanın etkisi altında hareket eden elektron-deşik çiftleri oluşturur. Oksit içindeki hareketliliği deşiklerden çok daha yüksek olan elektronlar, uygulanan alan ya da iç elektrik alanı tarafından hızlıca süpürülürken deşikler alan yönünde yavaşça hareket eder. Bu sırada deşiklerin bazıları oksit içinde tuzaklanarak sabit bir pozitif tuzak yükü oluşturur. Oluşan tuzak yükleri konumlarına göre MOS kapasitörün V_{fb} ya da V_{mg} etki ederler ve bunun sonucunda C – V eğrisi daha büyük negatif kapı voltajı değerlerine doğru kayar. Radyasyonun neden olduğu hasar, sıcaklık, oksit kalınlığı, uygulanan alan ve oksit tabakanın büyütülme tekniği gibi değişkenlere bağlıdır (Ma ve Dressendorfer 1989).

Gama radyasyonu altında fotonlar, SiO₂ moleküllerindeki elektronlar ile etkileşir ve oksit içindeki $Si_o - O$ ve $Si_o - Si_o$ kovalent bağlarını kırarlar ("o" notasyonu oksit içindeki silikon atomunu belirtmektedir). Bu etkileşim sonucunda ikincil elektronlar ve deşikler açığa çıkar. Yüksek enerjili ikincil elektronlar, deşiklerle rekombine olabilir veya rekombinasyondan kaçabilir. Rekombinasyondan kaçan ikincil elektronlar oksit içinde bir mesafe kat ederek aldıkları yol boyunca kovalent bağlardaki elektronlarla çarpışarak kinetik enerjilerini kaybederler. Bu çarpışmalar sonucunda daha fazla ikincil elektron serbest kalmaktadır. Oksit yığımında açığa çıkan deşikler genellikle geçicidirler ve bu bölgede enerji bakımından derin kusur merkezleri bulunmadığı için kalıcı olarak tuzaklanmazlar. Deşikler, oksit içindeki elektrik alanın yönüne bağlı olarak enerjik olarak daha derin olan deşik tuzak merkezlerinde tuzaklanacakları arayüzeylerden birine (SiO₂/Si veya SiO₂/kapı) doğru hareket ederler (Ristic 2008, Pejovic ve ark. 2012c). Kapı voltajının sıfır olduğu durumda bile elektriksel potansiyel, deşiklerin kapı ve alttaş arasındaki iş fonksiyonu farkından dolayı bir arayüze doğru kısmen veya tamamen hareket etmesi için yeterince yüksektir.

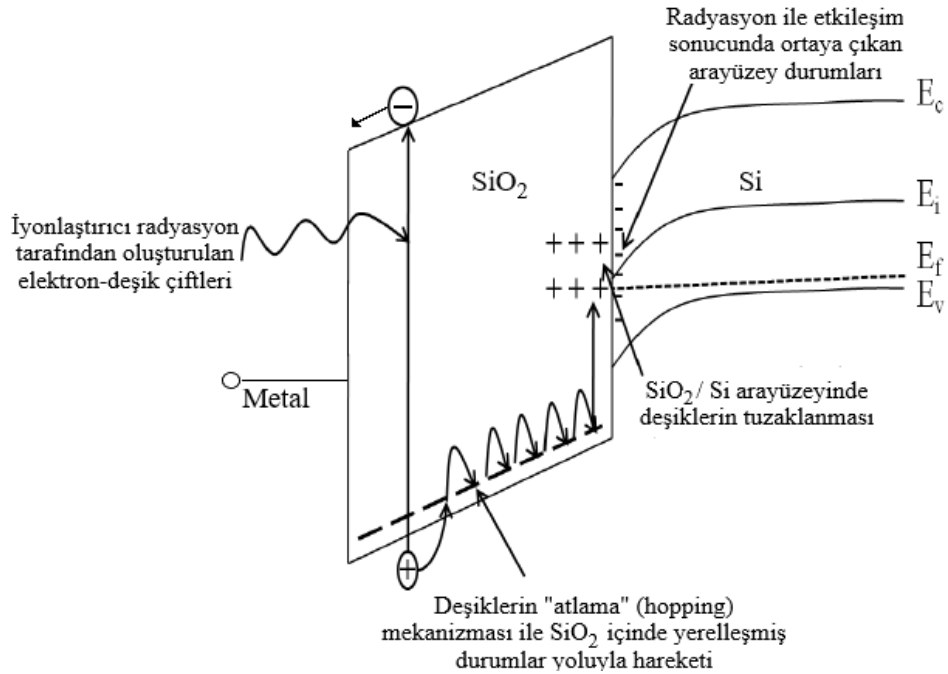
İkincil elektronlar iyonizasyon etkisiyle oksit içindeki kovalent bağları koparır ve $\equiv Si_o - O^{*+} Si_o \equiv$ kompleksi oluşur. Burada " \equiv " ve "*" notasyonları sırasıyla $O3 \equiv Si_o - O$ arasındaki üçlü bağı ve eşlenmemiş elektronu ifade etmektedir. Oluşan kompleks

yapı, enerjik olarak çok sığdır (tuzaklanan deşikler buradan kolayca ayrılabilir (Sah 1976) ve geçici deşik tuzak merkezini temsil eder.

Arayüzey yakınlarına dağılmış olan gerilmiş silikon-oksijen bağları ($\equiv Si_o - O - Si_o \equiv$), genellikle köprülenmeyen oksijen (NBO) merkezi ($\equiv Si_o - O^*$) ve pozitif yüklü E' merkezi (E'_S olarak bilinen $\equiv Si_o^+$ (Griscom 1991)) oluşturacak şekilde ikincil elektronlar tarafından kolayca kırılabilir (Helms ve Poindexter 1994). Bir NBO merkezi kolayca negatif olarak yüklenebilen bir kusurdur. Enerjik olarak daha derin bir merkez olan NBO, oksit yığımında ve arayüzey bölgelerindeki tuzakların (kusurların) başlıca öncülüdür. Diğer yandan oksitten geçen ikincil bir elektron, bir E'_Y merkezinin ($\equiv Si_o^*$) (Weeks 1956) öncülü olan gerilmiş oksijen kusurlu bağlardaki ($\equiv Si_o - Si_o \equiv$) bir elektronla çarpışabilir ve bu bağı kırarak bir elektron koparabilir. Oksijen kusurlu bağların çoğu arayüzey civarına dağılmıştır. Tuzaklanan yük pozitif (oksitte tuzaklanan deşikler) ve negatif (oksitte tuzaklanan elektronlar) olabilir. Tuzaklanan pozitif yükler daha önemlidir, çünkü deşik tuzak merkezleri (E'_S , E'_Y ve NBO) elektron tuzak merkezlerine (NBO) kıyasla sayıca daha fazladır. Si/SiO₂ arayüzeyinin yakınında tuzaklanan deşikler ve elektronlar, kanal taşıyıcıları üzerinde etkili oldukları için MOS yapının elektriksel karakteristikleri üzerinde en büyük etkiye sahiptirler (Ristic ve ark. 2007, Pejovic 2016).

Bir MOS kapasitörün radyasyon cevabını etkileyen önemli faktörlerden biri de Si/SiO₂ arayüzey özellikleridir. Oksit tabaka büyütülürken oksijen, silikon ile reaksiyona girdiği arayüzeye yayılır. Bu sırada arayüzeydeki silikon atomlarının tamamı oksijen ile bağ yapamaz ve arayüzeyde sarkık bağlar bırakır. Arayüzeydeki sarkık bağlar, bant boşluğunda arayüzey seviyelerinin oluşmasına neden olur ve bu durum C – V eğrisini etkilemektedir. Sarkık bağlara ek olarak, dielektrik madde içindeki oksijen boşlukları/kusurları genellikle üretim süreci sırasında ortaya çıkar. Boşluklar, ışınlanma sırasında deşikleri tuzaklayan öncül kusurlar olarak kabul edilir. Farklı oksidasyon tekniklerinin arayüzey tuzakları ve oksijen boşluklarının oluşumu üzerindeki etkisini incelemek, MOS kapasitörün radyasyon duyarlılığını belirlemek için önemlidir.

Deşiklerin oluşumu, hareketi ve tuzaklanmasında yer alan süreçler Şekil 2.14'te gösterilmiştir (Oldham 2003). Deşikler, oksitte üretildikten sonra elektrik alanının etkisiyle "atlama" (hopping) adı verilen bir süreç ile taşınır ve elektrik alanın yönüne bağlı olarak SiO₂/Si arayüzeyine doğru veya tersi yönünde hareket eder. Oksit üzerindeki elektrik alanı SiO₂/Si arayüzeyine doğru yöneldiğinde, iyonlaştırıcı radyasyonun etkisi maksimum olur. Deşikler arayüzeye ulaştıktan sonra oksijen boşluğunda tuzaklanırlar ve C – V eğrisinde voltaj kaymalarına neden olurlar. Çoğu boşluk arayüzeye oldukça yakın fakat arayüzeyde değildir. Bazı durumlarda deşikler arayüzeye ulaşabilir ve C – V eğrilerinde önemli etkilere neden olan arayüzey tuzaklarını oluşturabilir (Oldham 2003).



Şekil 2.14. Oksit içinde taşıyıcıların iletimi

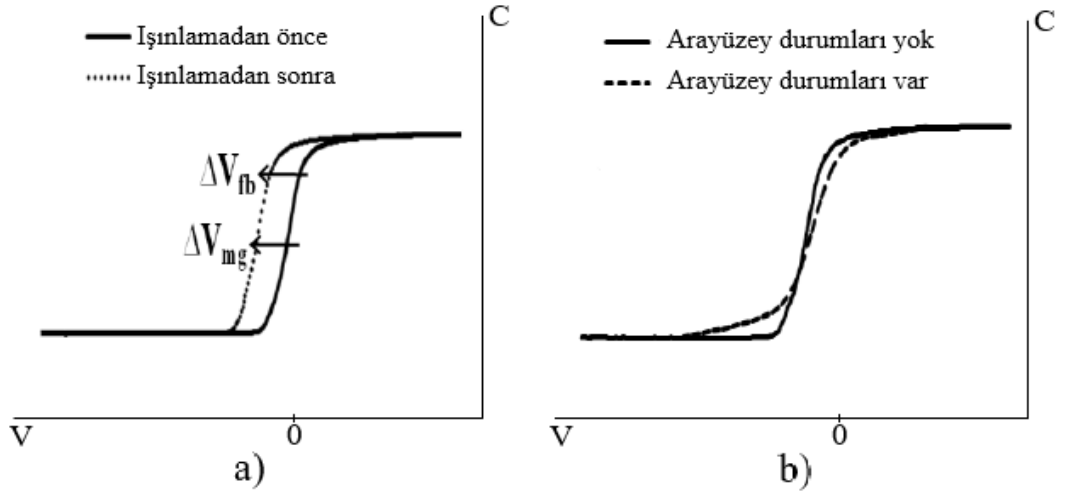
Oksitte tuzaklanan yükler ve arayüzey tuzak yükleri, bir MOS kapasitörünün sırasıyla düz-bant ve mid-gap voltajında değişime neden olurlar. Oksit tuzak yük yoğunluğundaki değişim

$$\Delta N_{ox} = -\frac{C_{ox}}{qA} \Delta V_{mg} \quad (2.37)$$

ile verilir. Burada ΔV_{mg} ışınlama sonucunda mid-gap voltajında meydana gelen değişimdir. Arayüzey tuzak yük yoğunluğundaki değişim

$$\Delta N_{it} = -\frac{C_{ox}}{qA_{ox}} (\Delta V_{fb} - \Delta V_{mg}) \quad (2.38)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ΔV_{fb} düz-bant voltajında meydana gelen değişimdir. Şekil 2.15 a' da, ışınlama öncesi-sonrası düz-bant ve mid-gap voltajı kaymaları ile ilgili simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.15 b' de ise C – V eğrisi şeklinin değişime katkıda bulunan Q_{it} etkilerini sunulmuştur.



Şekil 2.15. a) Oksit tuzak yükleri b) arayüzey tuzak yüklerinin C – V karakteristiği üzerindeki etkileri

3. MATERYAL ve YÖNTEM

MOS kapasitörlerin üretim aşamalarının tamamı T.C. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi' nde (NÜRDAM) bulunan 10, 100 ve 1000 sınıf temiz oda laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

i. Alttaşların Temizlenmesi

Yüksek kalitede MOS kapasitörler üretebilmek için kusursuz bir arayüzey en önemli parametrelerden biridir. Bu şekilde bir arayüzey için Si alttaşların oldukça temiz olması gerekir. Temiz bir Si alttaş birçok yüzey kusurunu ortadan kaldırabildiği gibi üzerinde kirlilik kalan bir Si alttaş ise kapasitörün performansını olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle 500 µm kalınlığa, 2 – 4 Ω.cm elektriksel özdirence ve 6 inç çapa sahip n-tipi Si (100) alttaşlara standart Radio Corporation of America (RCA) temizlik prosedürü uygulanmıştır. Bu sürecin adımları aşağıdaki şekilde verilir:

- Organik Temizlik: Alttaşlar, 5:1:1 oranındaki H₂O:H₂O₂:NH₄OH çözeltisi içine daldırılarak çözünmeyen muhtemel organik kirletici maddeler ortadan kaldırılmıştır.
- Oksit Aşındırma: Alttaşlar, seyreltilmiş H₂O:HF çözeltisi içine daldırılarak ilk basamak sonucunda metalik kirletici maddelerin birikebileceği muhtemel ince SiO_x tabakası ortadan kaldırılmıştır.
- İyonik Temizlik: Alttaşlar, 6:1:1 oranında H₂O:H₂O₂:HCl çözeltisi içine daldırılarak muhtemel iyonik ve ağır metal kirleticiler ortadan kaldırılmıştır.
- Son olarak oksit aşındırma süreci tekrarlanmıştır.

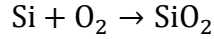
RCA temizlik işleminin tamamı tam otomatik ıslak tezgahlarda (Şekil 3.1) gerçekleştirilmiştir. RCA temizlik işleminin sonunda n-Si alttaşlar el değmeden, N₂ ile kurutulup kullanıma hazır hale getirilmiştir.



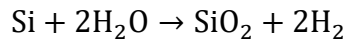
Şekil 3.1. Alttaşların temizlenmesi sırasında kullanılan ıslak tezgahlar

ii. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ Yapısının Oluşturulması ve Yapısal Analizler

$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ yapısını oluşturmak için ilk olarak n-Si alttaş üzerine SiO_2 tabakası, termal oksidasyon yöntemi ile büyütülmüştür. Oksit tabaka, Si alttaşın saf oksijen (O_2) veya su buharı (H_2O) içeren bir ortamda genellikle $900\text{ }^\circ\text{C}$ ile $1200\text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki yüksek sıcaklıklarda ısıtılmasıyla kolayca elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda hem oksijen hem de su buharı SiO_2 yüzey içerisinde yayılır. Si yüzeyine yaklaşan oksijen SiO_2 oluşturmak için Si ile birleşir. Si yüzeyinde meydana gelen kimyasal reaksiyon kuru oksidasyon için



ve ıslak oksidasyon için



ile verilir. Oksidasyon süresince Si tüketilirken SiO_2 tabakası genişler. Kuru oksidasyon yöntemi ile üretilen SiO_2 tabakanın büyüme hızı daha düşük ancak kalitesi daha yüksektir. Bu yöntem genellikle 100 nm ' den az kalınlıklar için kullanılır. Bu çalışmada SiO_2 , difüzyon fırınında (Şekil 3.2) kuru oksidasyon ile büyütülmüştür. Si alttaş fırın içine yerleştirildikten sonra $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ve 7 sccm akış hızındaki O_2 gazı altında SiO_2 ince film birikimi yapılmıştır. Film büyütme işlemi 20 dk ve 40 dk olmak üzere iki farklı Si alttaş için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan SiO_2 ince filmlerin kalınlıkları Angstrom Sun Spektroskopik Rekriftometre kullanılarak 20 nm ve 36 nm olarak ölçülmüştür.



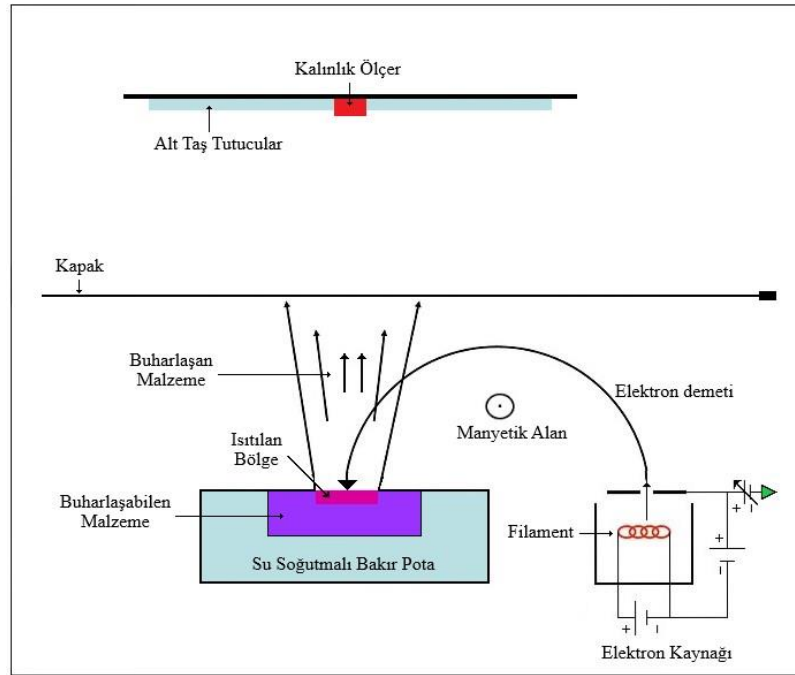
Şekil 3.2. SiO₂ tabakasının büyütülmesinde kullanılan difüzyon fırını

Yb₂O₃/SiO₂/n-Si yapısının oluşturulması için ikinci adım olarak SiO₂ tabakası üzerine Yb₂O₃ tabakası EBPVD yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. EBPVD, kaplama olarak kullanılacak hedef malzemenin tungsten flamandan çıkan yüksek enerjili elektron demeti ile bombalanarak buharlaştırıldığı ve kaplanacak olan malzeme üzerine biriktirilmesi için gaz haline dönüştürüldüğü fiziksel buhar biriktirme yöntemidir. Yüksek vakum odasında oluşturulan gaz fazındaki atomlar veya moleküller, alttaşa yönlendirilerek ince bir film tabakası oluşturur. EBPVD yöntemi ve çalışma prensibi Şekil 3.3' te şematik olarak gösterilmektedir. EBPVD yönteminin birtakım temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Yüksek erime noktasına sahip metaller, oksit bileşikler ve süblimleşebilen maddeler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin buharlaştırılması mümkündür. Buharlaşma, dirençle ısıtma yöntemi veya endüksiyonlu ısıtma yöntemi kullanılarak buharlaşmayan (veya buharlaştırılması zor olan) yüksek erime noktasına sahip metaller ve metal oksitler için de sağlanır. Isı kaynağı elektronların kinetik enerjisi olduğundan buharlaşabilen malzeme doğrudan ısıtılmaktadır. Bu durum film kalınlığının hassas olarak kontrol edilmesine olanak tanır.
- Elektrik, filamanı ısıtmak ve termal elektronların salınımını uyarmak için uygulanır. Normal koşullarda filamana -4 ile -10 kV arasında negatif yüksek voltaj uygulanır ve anotlar arasındaki voltaj farkından dolayı termal elektronlar hızlanır. Hızlanan

elektronlar manyetik alanla (elektromıknatis) saptırılır ve potadaki buharlaşabilen malzemeye gönderilir. Elektron demeti, elektrik alanı ve manyetik alan kullanılarak tam olarak kontrol edilebilmekte ve 180° veya 270° saptırılarak buharlaşabilen madde üzerine yönlendirilebilmektedir.

- Sistem, 10^{-2} ile 10^{-5} Pa arasında, yüksek vakumda kullanılır (Ultra yüksek vakum tipi de vardır).
- Birden fazla pota ve buharlaşabilen malzeme kullanılarak tek bir adımda çok tabakalı ince film yapmak mümkündür.
- EBPVD, magnetron saçtırma (sputtering) ve diğer CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek biriktirme hızına sahiptir. Filmler, 1 μm kalınlığa kadar kolayca oluşturulabilir.



Şekil 3.3. EBPVD sistemi çalışma prensibinin şematik bir gösterimi

Yb_2O_3 ince filmlerinin büyütülmesi için kullanılan EBPVD sisteminde (Şekil 3.4) elektron demeti 180° saptırılarak Yb_2O_3 granüllerinin üzerine yönlendirilmiştir. Filmler, $\sim 5,0 \times 10^{-4}$ Pa vakum ve -8,10 kV yüksek voltaj altında 140 mA seviyesine kadar çıkarılan filaman akımı kullanılarak 250°C ' lik alttaş sıcaklığında büyütülmüştür. İki farklı kalınlığa sahip SiO_2 filmleri üzerine ~ 100 nm kalınlığında Yb_2O_3 filmi biriktirilmiştir.

Oluşturulan $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ yığın oksitlerinin toplam kalınlıkları, 20 nm ve 36 nm SiO_2 tabakasına sahip yapılar için sırasıyla 122 nm ve 140 nm' dir.



Şekil 3.4. Yb_2O_3 ince filminin büyütüldüğü EB-PVD sistemi

Üretilen $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ yığın oksitlerin yapısal karakterizasyonu için X-ışını kırınım (difraksiyon) spektroskopisi (XRD) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır.

XRD, malzemelerde faz, kristal yönelimleri, tanecik boyutu gibi yapısal parametreler hakkında bilgi sağlamak için kullanılan tahribatsız ve güvenilir bir tekniktir. Teknik, her bir kristalin fazın X-ışınlarını karakteristik bir düzende kırması temeline dayanır. XRD pikleri, numunedeki her bir örgü düzleminden belirli açılarda yayılan monokromatik X-ışınlarının yapıcı etkileşimi ile üretilir. Pik yoğunlukları örgü içindeki atomların dağılımı ile belirlenmektedir. Bu çalışmada numunelerin XRD spektrumları, $10^\circ - 80^\circ$ aralığında

ve 0,02°' lik artan adımlar ile Cu-K α (1,5418 Å) radyasyonuna sahip Rigaku MultiFlex X-ışını difraktometre kullanılarak (Şekil 3.5) analiz edilmiştir.



Şekil 3.5. XRD sistemi

XPS, malzeme ile ilgili atomik ve moleküler çerçevede bilgi sağlanması amacıyla kullanılan analiz tekniğidir. Bu teknik, malzemenin yüzeyine ya da herhangi bir katmanına X-ışınlarının gönderilmesi sonucu yayımlanan fotoelektronların dedekte edilmesi esasına dayanır. Fotoelektron piklerinin bağlanma enerjileri ve yoğunluk değişimleri kullanılarak malzemenin elementsel bileşim oranı ve elementlerin elektronik durumları analiz edilebilir. Bu çalışmada XPS ölçümleri için monokromatik Al-K α X-ışını (1486,6 eV) radyoaktif kaynağına sahip Physical Electronics-PHI 5000 VersaProbe cihazı kullanılmıştır. Ölçümler sırasında Ar⁺ (1 keV) iyonları kullanılarak derinlik profilleri elde edilmiştir. XPS spektrumlarına XPSPEAK 4.1 yazılımı ile soyuma işlemi uygulanmıştır. Yüzey kirlenmesi nedeniyle ortaya çıkabilecek muhtemel yüklenme etkisinin ortadan kaldırılması için O 1s spektrumları, 284,8 eV' lik C 1s pikine göre kalibre edilmiştir.

iii. Metal Kontakların Oluşturulması

$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ yapısı elde edildikten sonra ön ve arka Al metal kontaklar DC magnetron saçırma sistemi (Şekil 3.6) kullanılarak oluşturuldu. Ön kontaklar için alttaşlar, üzerlerine 1,5 mm çapında boşluklar bulunan bir maske konulduktan sonra vakum odasına yerleştirildi. Sistem basıncının $6,0 \times 10^{-4}$ Pa' a düşürülmesinin ardından güç kaynağı 160 W' a ayarlandı. Plazma oluşumu için vakum odası içerisine 16 sccm akış oranlı argon gazı gönderildi. Al hedef üzerindeki olası kirliliğin temizlenmesi için 1 Pa altında 15 dk boyunca saçırma işlemi yapıldı. Daha sonra örnek üzerindeki kapaklar açılarak 75 dk süresince ön metal elektrotların oluşumu sağlandı. Arka kontaklar ise alttaş arka yüzeyine maske kullanılmaksızın benzer koşullar altında 35 dk saçırma süreci ile oluşturuldu.



Şekil 3.6. Metal kontakların atıldığı RF/DC magnetron saçırma sistemi

iv. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ MOS Kapasitörlerinin Elektriksel Analizleri

$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ MOS kapasitörlerinin $C - V$ ve $G/\omega - V$ karakteristikleri, düşük ve yüksek frekans bölgelerini kapsayacak şekilde altı farklı frekansta (50, 100, 250, 500, 750

ve 1000 kHz) ve 0,2 V voltaj aralıklarıyla karanlık bir ortam içinde HIOKI 3250 LCR Meter (Şekil 3.7) kullanılarak ölçülmüştür.



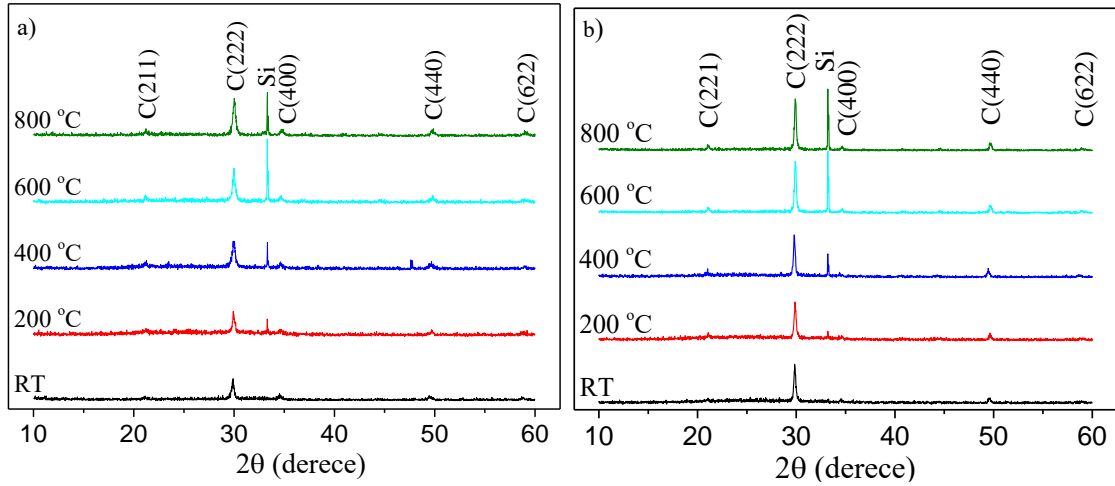
Şekil 3.7. MOS kapasitörlerin elektriksel karakteristiklerinin ölçüldüğü ölçüm düzeneği

MOS kapasitörler, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (SANAEM) Gama Işınlama Tesisi' nde bulunan 1,3 kGy/sa doz hızına sahip Gamma-Cell 220 ⁶⁰Co radyoaktif kaynağı ile 1 – 500 Gy arasında yedi farklı doz değerinde ışınlanmıştır. Elektriksel ölçümler MOS kapasitörlerin radyasyon cevaplarında sönümleme etkisinin en aza indirilmesi için ışınlamadan hemen sonra 100 kHz ve 1 MHz olmak üzere iki farklı AC voltaj frekansında alınmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. XRD ile Yapısal Karakterizasyon

EBPVD kullanılarak üretilen $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ yapılarının kristal özellikleri XRD ile analiz edilmiştir. Tavlanmamış/Oda sıcaklığı (RT) ve 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta tavllanmış numunelerden alınan XRD spektrumları Şekil 4.1 a ve b ile verilmiştir. $10^\circ - 80^\circ$ arasında alınan spektrumlarda 60° ' den sonra gözlenen tek kırınım piki $\sim 70^\circ$ de Si (100)' a aittir. Bu pikin çok şiddetli olması nedeniyle spektrumun geri kalanı baskılandığı için şekillerde 60° ' den sonrasına yer verilmemiştir. XRD spektrumlarında $10^\circ - 60^\circ$ arasındaki piklerin konumları, ICDD (The International Centre for Diffraction Data) 74-1981 numaralı kart referans alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. a) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})/\text{Si}$ ve b) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})/\text{Si}$ yapıları için farklı tavlama sıcaklıklarındaki XRD spektrumları

$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})/\text{Si}$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})/\text{Si}$ yapılarından tüm tavlama sıcaklıkları için alınan XRD spektrumlarında SiO_2 ' nin herhangi bir fazına rastlanmazken Yb_2O_3 ince filmlerinin ise kübik fazda çok kristalli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. (211), (222), (400), (440) ve (622) düzlemlerinden yansımaları temsil eden pikler sırasıyla $21,2^\circ$, $29,9^\circ$, $34,7^\circ$, $49,7^\circ$ ve $59,0^\circ$ kırınım açılarında gözlenmiştir. Spektrumlarda safsızlığa işaret eden herhangi bir pik bulunmamıştır. XRD spektrumlarında (222) düzleminde yansımayı temsil eden $2\theta = 29,9^\circ$ civarındaki pikin şiddeti en yüksektir.

(222) pikine ait veriler Scherrer denkleminde yerine konularak tanecik boyutları hesaplanmıştır ve değerler Çizelge 4.1’ de verilmiştir (Langford ve Wilson 1978).

$$P = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

Burada P tanecik boyutu, λ X-ışını dalgaboyu ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), β rezonans genişliğinde hesaplanan radyan cinsinden ek genişleme ve θ Bragg kırınım açısıdır. Filmlerin kristalleşme derecesiyle doğrudan ilişkili olan tanecik boyutu, $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})/\text{Si}$ yapısında tavlama sıcaklığına bağlı olarak büyük bir değişim göstermemiştir. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})/\text{Si}$ yapısında ise Yb_2O_3 ’ ün tanecik boyutu önceki yapıya kıyasla daha yüksektir. Diğer yandan bu yapıda tanecik boyutları arasında tavlama sıcaklığına bağlı değişim daha fazladır. Her iki yapı için de en küçük tanecik boyutu değeri $800 \text{ }^\circ\text{C}$ termal tavlama sıcaklığı için elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı tavlama koşullarındaki yapıların tanecik boyutları

Yapı	Tavlama Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Tanecik Boyutu (nm)	Yapı	Tavlama Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Tanecik Boyutu (nm)
	RT	27,8		RT	38,6
	200	27,8		200	31,5
$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})/\text{Si}$	400	25,2	$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})/\text{Si}$	400	39,7
	600	26,4		600	38,6
	800	25,1		800	26,9

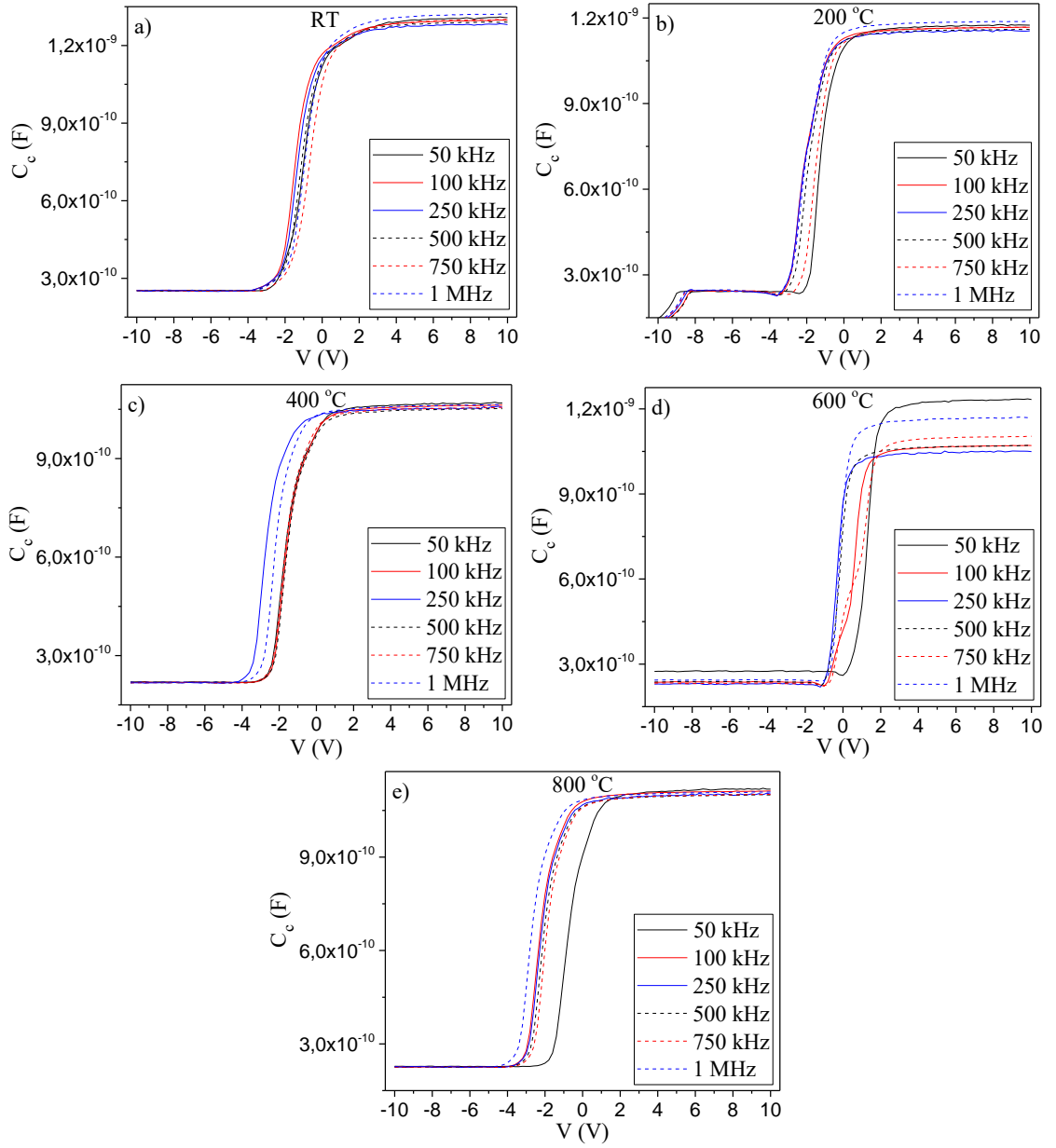
4.2. Elektriksel Karakterizasyon

i. Frekansa Bağlı Elektriksel Karakteristikler

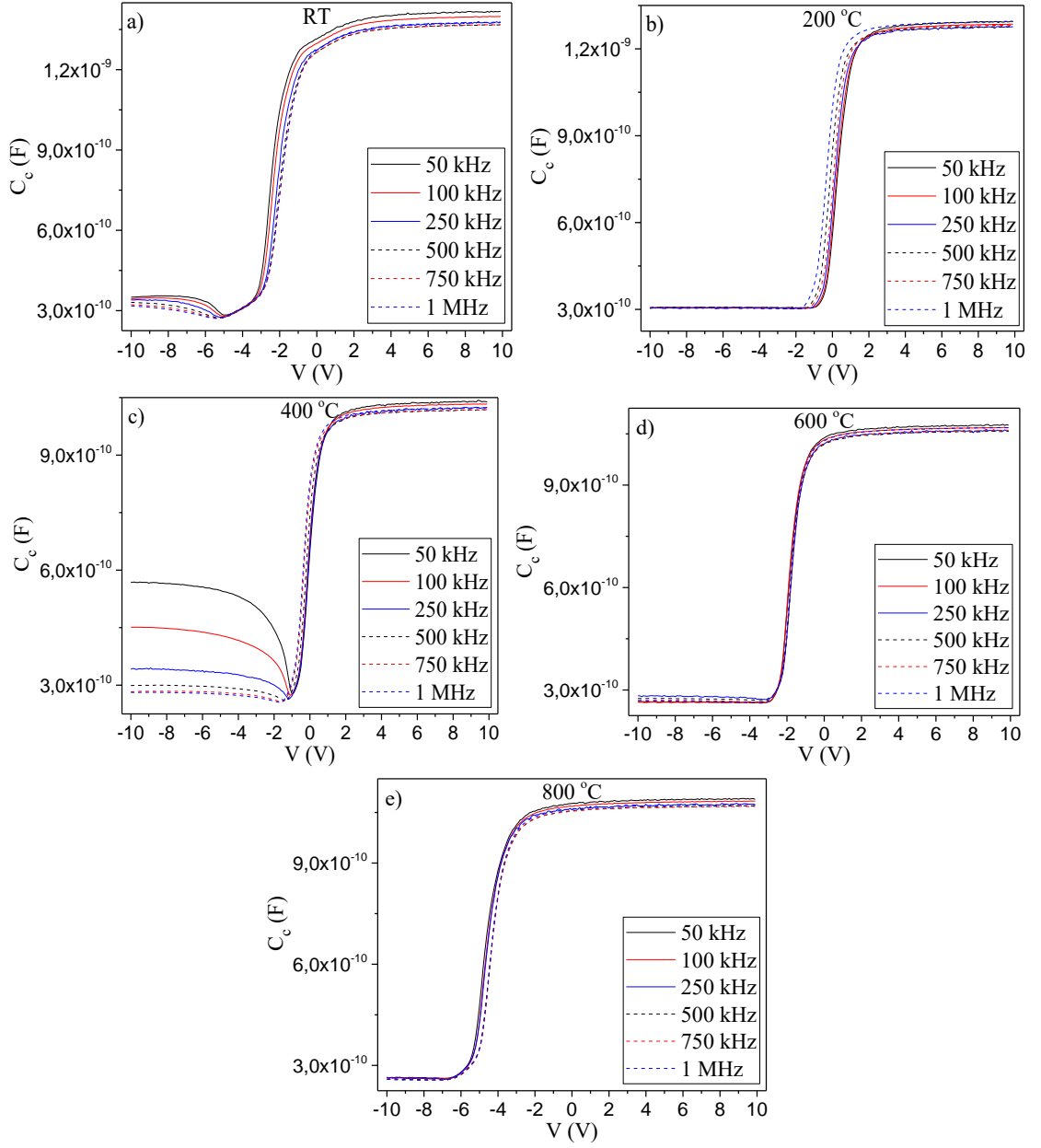
$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin $C_c - V$ ve $G_c/\omega - V$ karakteristikleri, düşük ($< 500 \text{ kHz}$) ve yüksek frekans ($\geq 500 \text{ kHz}$) bölgelerini kapsayacak şekilde $-10 \text{ V} - 10 \text{ V}$ voltaj aralığında altı farklı AC voltaj sinyali için ölçülmüştür. 50 kHz , 100 kHz , 250 kHz , 500 kHz , 750 kHz ve 1000 kHz ’ de elde edilen $C_c - V$ değişimleri $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS tabanlı aygıtlar için sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’ te verilmiştir. Bir MOS kapasitörün kapasitans değerleri seri direnç ve arayüzey seviye yoğunluğundan güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Rideau

ve ark. 2003, Xiao ve Huang 2010, Xia ve ark. 2017, Kahraman 2018). Çizelge 4.2' de $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörleri için C_{acc} (düzeltilmiş yığılım bölgesi kapasitans), N_{it} , yığılım bölgesindeki seri direnç ($R_{s,acc}$), maksimum seri direnç ($R_{s,max}$) ve Denklem 2.11 kullanılarak hesaplanan efektif oksit yük yoğunluğu (Q_{eff}) değerleri verilmiştir. N_{it} değerlerinin bulunmasında kullanılan $G/\omega - V$ karakteristikleri $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ tabanlı aygıtlar için sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5' te görülmektedir.

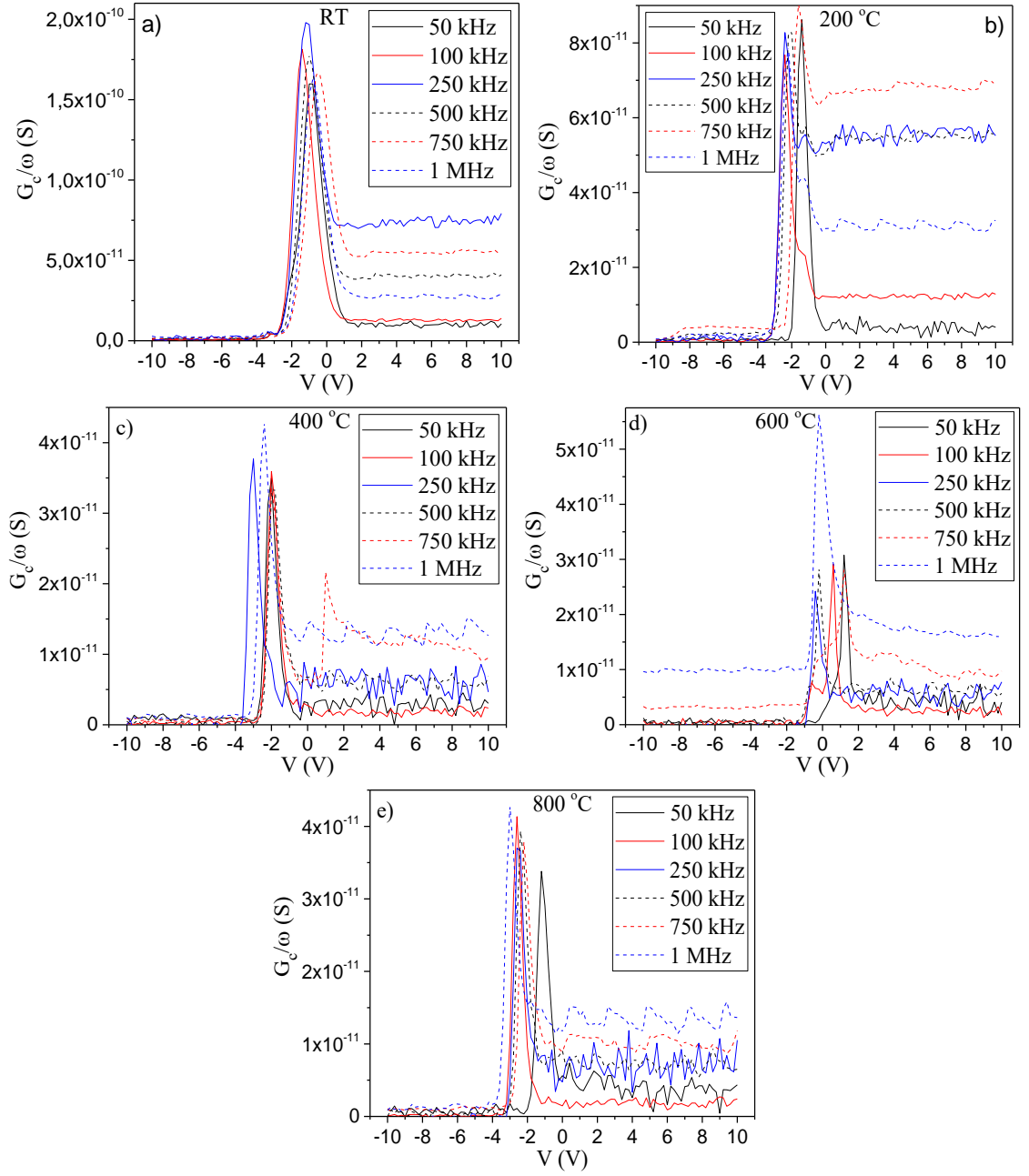
RT, 200 °C, 400 °C ve 800 °C' de tavllanmış $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin yığılım bölgesi kapasitans (C_{acc}) değerlerinde frekansa bağlı olarak önemli bir değişim gözlenmemiştir. Çizelge 4.2' den görüldüğü gibi RT, 200 °C ve 400 °C' de N_{it} değerlerinde artan frekansla birlikte sürekli bir artma ya da azalma gözlenmemekle birlikte değişim oldukça küçük boyuttadır. 800 °C' de 250 kHz' den sonra N_{it} değerleri artan frekansla yükselse de değişim büyük değildir.



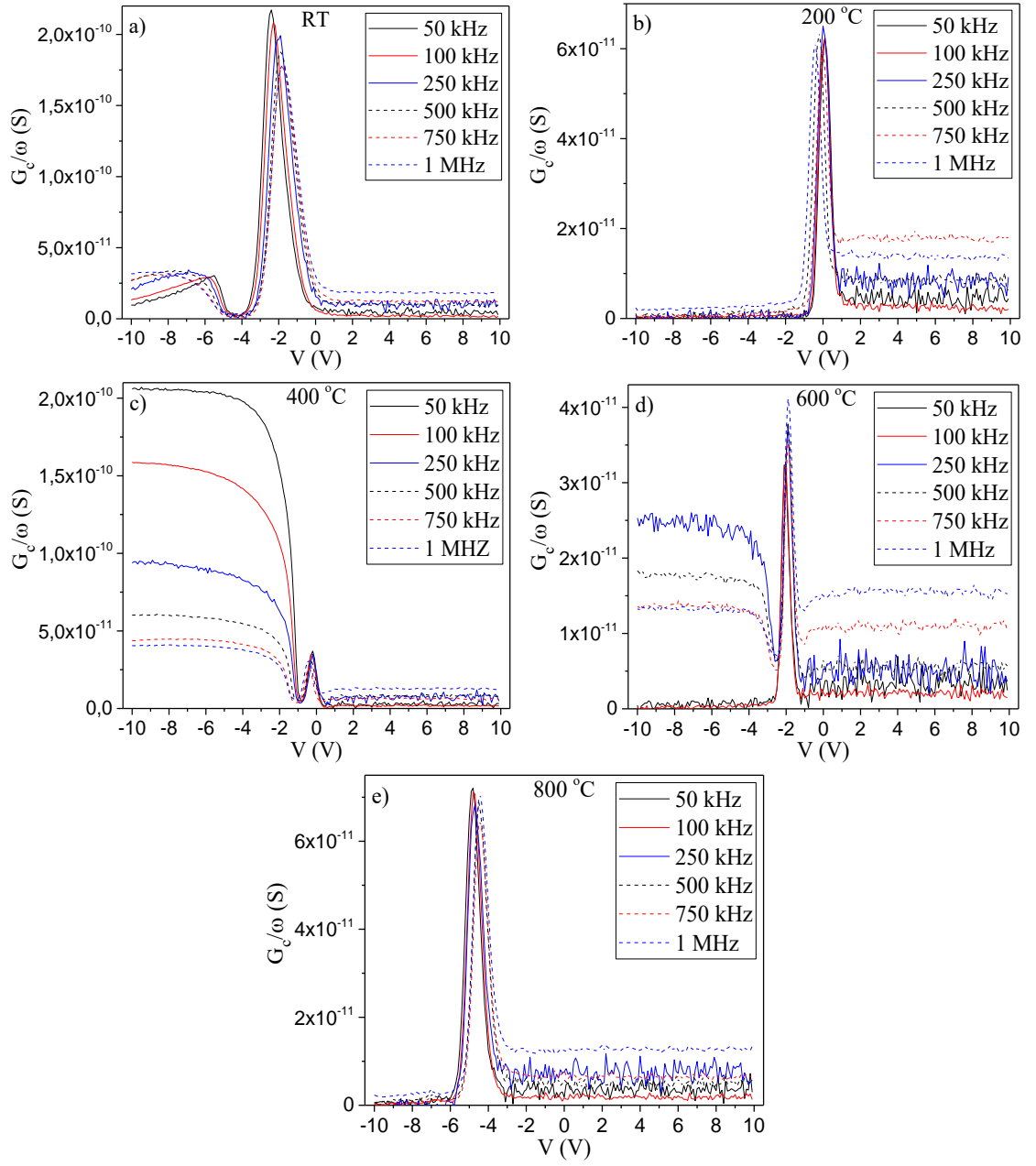
Şekil 4.2. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin frekansa bağlı $C_c - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C



Şekil 4.3. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin frekansa bağlı $C_c - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C



Şekil 4.4. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ kapasitörlerinin frekansa bağlı $G_c/\omega - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C



Şekil 4.5. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörlerinin frekansa bağlı $G_c/\omega - V$ karakteristikleri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C

800 °C' de tavllanmış $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ yapısıyla üretilmiş MOS kapasitörlerin yığılım bölgesi kapasitans değerleri 750 kHz' e kadar azalmış ve 1 MHz' de artmıştır. Ancak bu aygıtın frekansa bağlı olarak en düşük ve en yüksek kapasitans değerleri arasında fark %2,3 civarındadır. Bu nedenle 800 °C- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS aygıtının yığılım bölgesi kapasitans değerlerine 250 kHz – 1000 kHz arasında artış gösteren arayüzey tuzak yüklerinin katkı sağlamadığı sonucuna ulaşılabilir. Artan frekansla birlikte bu aygıttaki N_{it} değerlerinde meydana gelen küçük miktardaki artışların olası nedeni arayüze yakın bölgelerde konumlanmış ve frekansa bağlı davranış gösterebilen sınır tuzak yükleridir (Kim ve ark. 2001, Kahraman ve ark. 2018). 600 °C- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ yapısı ile üretilmiş MOS kapasitörlerin yığılım kapasitans değerleri frekansla birlikte diğer aygıtlara kıyasla daha büyük değişim göstermiştir. 250 kHz' e kadar azalan C_{acc} değerleri bu frekanstan sonra artan frekansla birlikte yükselmiştir. N_{it} ise bu tavlama sıcaklığı için 500 kHz' den sonra yüksek oranda artış göstermiş ve 1 MHz' de 750 kHz' e kıyasla çok küçük bir miktar düşmüştür (Çizelge 4.2). Burada bir diğer önemli husus 250 kHz sonrası yığılım bölgesi seri direnç değerlerinin yükselmesidir. Genellikle seri direncin yüksek frekans bölgesinde etkisinin azalması beklenmektedir (Xiao ve Huang 2010, Kahraman ve ark. 2015c). 600 °C' de bu artışın olası nedeni yüksek- k/Si arayüzeyindeki yük taşıyıcılarının arayüzeyde konumlanmış tuzaklardan kaçabilecek kadar enerjiye sahip olmamalarıdır (Kaya ve ark. 2014). Dolayısıyla bu bölgedeki yüksek seri direncin kapasitans üzerindeki etkisi daha fazladır. Düzeltilmiş kapasitans değerlerindeki artış, yüksek seri direnç etkisinin elimine edilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Diğer yandan 600 °C' de 750 kHz ve 1 MHz' de N_{it} değerlerinin diğer frekanslara kıyasla daha yüksek seviyede seyretmesi ölçülen kapasitansa arayüzey tuzak yüklerinin katkı sağlama olasılıklarının olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.2. Yb₂O₃/SiO₂(20 nm) ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) kapasitörleri için hesaplanan C_{acc} , N_{it} , R_s ve Q_{eff} değerleri

Numune		Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)					Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)				
Tavlama Sıcaklığı (°C)	Frekans (kHz)	$C_{acc} \times 10^{-9}$ (F)	$N_{it} \times 10^{11}$ (eV ⁻¹ cm ⁻²)	$R_{s,acc}$ (Ω)	$R_{s,max}$ (Ω)	$Q_{eff} \times 10^{11}$ (cm ⁻²)	$C_{acc} \times 10^{-9}$ (F)	$N_{it} \times 10^{11}$ (eV ⁻¹ cm ⁻²)	$R_{s,acc}$ (Ω)	$R_{s,max}$ (Ω)	$Q_{eff} \times 10^{11}$ (cm ⁻²)
RT	50	1,31	8,61	50	1120	-0,95	1,41	8,04	77	1655	7,39
	100	1,30	7,08	40	784	1,02	1,39	7,34	51	801	6,41
	250	1,28	8,82	28	317	0,29	1,37	10,74	29	308	5,08
	500	1,28	8,28	25	154	-0,36	1,36	7,82	22	151	4,29
	750	1,28	7,33	23	90	-2,10	1,36	8,09	20	100	3,98
	1000	1,28	8,20	22	81	-0,68	1,37	8,24	18	77	4,09
200	50	1,17	2,58	49	1226	0,95	1,29	1,65	45	697	-5,18
	100	1,17	1,92	38	584	3,43	1,28	1,89	32	350	-4,86
	250	1,16	2,04	25	227	3,31	1,27	1,91	20	140	-4,31
	500	1,15	2,90	22	123	2,92	1,27	2,13	18	74	-3,17
	750	1,16	2,96	21	79	1,96	1,28	2,18	17	51	-3,82
	1000	1,16	2,53	20	65	3,66	1,29	2,15	16	42	-2,05
400	50	1,06	0,32	46	1098	0,64	1,04	5,86	48	2929	-2,60
	100	1,05	0,35	39	533	0,44	1,03	3,29	39	1433	-2,44
	250	1,05	0,30	23	211	4,97	1,01	1,52	25	521	-2,34
	500	1,04	0,36	22	100	0,21	1,01	8,64	21	226	-1,99
	750	1,05	0,26	20	69	0,97	1,02	6,17	19	134	-1,50
	1000	1,06	4,02	19	63	3,51	1,02	5,57	17	97	-1,30
600	50	1,23	0,96	52	229	-8,72	1,07	0,70	49	533	3,98
	100	1,07	1,32	35	186	-4,75	1,07	0,72	36	279	4,02
	250	1,05	0,71	20	74	-1,40	1,06	1,07	22	238	3,58
	500	1,07	1,05	35	60	-1,84	1,05	1,08	18	96	3,62
	750	1,10	3,51	48	57	-6,57	1,06	1,05	16	64	3,73
	1000	1,17	3,17	53	93	-2,30	1,07	1,25	15	45	3,87
800	50	1,12	0,60	40	755	-2,57	1,09	2,36	50	997	13,77
	100	1,11	0,83	32	439	3,49	1,08	1,97	38	506	13,46
	250	1,11	0,66	16	155	3,08	1,07	2,26	24	199	13,35
	500	1,10	0,79	14	88	2,59	1,07	2,19	21	105	12,54
	750	1,1	0,84	13	56	2,11	1,07	2,52	19	70	12,53
	1000	1,10	0,94	12	50	5,17	1,07	2,87	17	58	12,72

Çizelge 4.2' den görüldüğü gibi $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinde N_{it} değerleri, 200 °C, 600 °C ve 800 °C' de frekansa bağlı olarak küçük miktarlarda değişim göstermektedir. Bu değişim, 200 °C için 1 MHz ve 600 °C için 750 kHz' e kadar frekansla birlikte sürekli küçük bir artış şeklindedir. C_{acc} değerlerinde önemli bir değişimin olmaması, arayüzey tuzak yüklerinin ölçülen kapasitansa katkılarının oldukça az olduğunu gösterebilir. Diğer yandan yığılım bölgesi seri direnç değerlerinin düşük seviyede olması da frekansa bağlı olarak C_{acc} ' nin büyük oranda değişmemesini sağlamıştır. 400 °C' de artan frekansla azalan N_{it} değerleri 500 kHz' de ani bir artış gösterdikten sonra azalmaya devam etmiştir. Diğer taraftan, RT ve 400 °C' de tavlanmış $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ yapılarıyla üretilen aygıtların tersinim bölgesinde ölçülen kapasitans değerleri frekansa bağlı olarak karakteristiği etkileyecek bir değişim göstermiştir. Özellikle 400 °C' de artan frekansla birlikte tersinim bölgesi kapasitans değerlerinin büyük ölçüde azaldığı görülmektedir (Şekil 4.3). Tersinim bölgesindeki bu değişimin en önemli nedeni arayüzey tuzak yükleri ve sınır tuzak yükleridir (Xia ve ark. 2017, Lok ve ark. 2018, Kahraman ve ark. 2018).

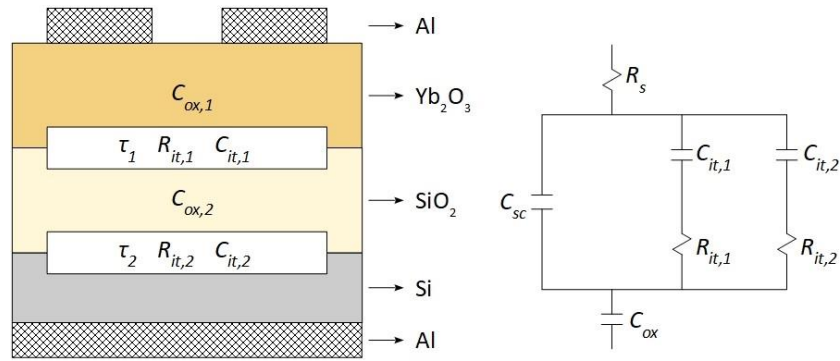
Çizelge 4.3. Literatürdeki bazı aygıtların R_s değerleri ve C ile C_c arasındaki yüzdesel farklar

Yapı	$R_{s,acc}$ (Ω) (50 kHz)	$R_{s,acc}$ (Ω) (1 MHz)	C ve C_c Farkı (~%) (50 kHz)	C ve C_c Farkı (~%) (1 MHz)
Er_2O_3 – MOS (Morkoc ve ark. 2019)	245	59	0,65	20,4
Gd_2O_3 – MOS (Kahraman 2018)	-	38-78	-	21,3
Sc_2O_3 – MOS (Kahraman ve Yılmaz 2018)	221,2	44,1	2,33	24,5
Sn/p-Si (Schottky) (Karataş ve Türüt 2010)	71,1	52,3	-	-
HfO_2 – MOS (Singh ve ark. 2011)	-	97	-	30,0
$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{n-Si}$ (Kahraman ve ark. 2020a)	37,8	11,2	0,28	3,6
Bu çalışma:				
$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$				
RT	50	22	0,06	3,1
200 °C	49	20	0,04	2,5
400 °C	48	18	0,05	2,2
600 °C	52	53	0,05	14,6
800 °C	40	12	0,03	0,9
$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$				
RT	77	18	0,13	2,2
200 °C	45	16	0,04	1,6
400 °C	48	17	0,03	1,0
600 °C	49	15	0,03	1,9
800 °C	50	17	0,03	0,9

Bu çalışma ve literatürdeki farklı araştırmalarda 50 kHz ile 1 MHz frekansları için elde edilen $R_{s,acc}$ değerleri ve ölçülen – düzeltilmiş kapasitanslar arasındaki yüzdesel fark

Çizelge 4.3' te verilmiştir. 50 kHz için 40 – 77 Ω ve 1 MHz için 12 – 53 Ω arasında değişen R_s değerleri literatürle karşılaştırıldığında nispeten daha küçüktür. R_s değerlerindeki azalış düzeltmeden önce ve sonra elde edilen kapasitans değerleri arasındaki yüzdesel farkın az olmasına neden olmuştur. Ayrıca düşük R_s değerleri MOS kapasitörün elektriksel karakteristiğinde daha az sinyal kayıplarıyla sonuçlanır.

Her iki aygıtın yığılım bölgesi kapasitans değerlerinde çalışılan AC voltaj frekansının büyük etkiye sahip olmaması, yüksek arayüzey kalitesine ve düşük seri direnci sağlayan güçlü metal elektrot oluşumuna işaretir (Tao ve ark. 2012). Genel olarak N_{it} değerlerinin artan frekansla birlikte azalması beklenir (Konofaos 2004, Xiao ve Huang 2010, Tataroğlu ve ark. 2016, Kaymak ve ark. 2020). $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinde N_{it} değerlerinin frekansla birlikte hemen hemen kararlı bir davranış sergilemesi yapının SiO_2/Si ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ arayüzeyleri olmak üzere iki adet arayüzey içermesi nedeniyle olabilir (Kahraman ve ark. 2018). Bu yapı ve eşdeğer devresi Şekil 4.6' da verilmiştir. Farklı iki aygıt, τ_1 ve τ_2 olmak üzere farklı ömür sürelerine ve/veya iki arayüzeyde de birbirinden farklı arayüzey tuzak yüklerine sahip olabilir. Bu durum, özellikle 400 °C- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörü başta olmak üzere N_{it} dağılımlarının davranışlarını açıklayabilir.

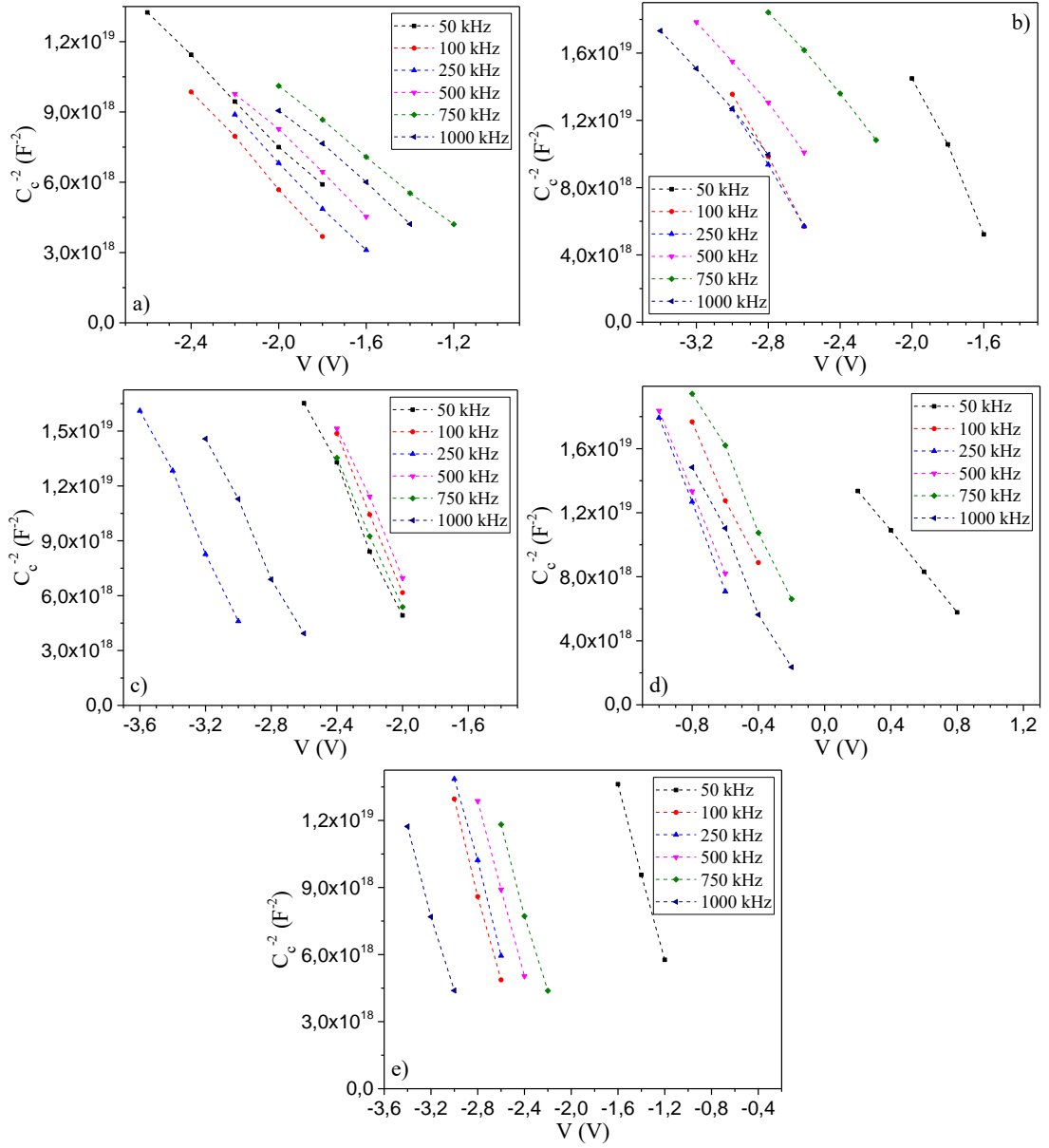


Şekil 4.6. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörleri için eşdeğer kapasitans devre diyagramı (Brammertz ve ark. 2008, Kahraman ve ark. 2018)

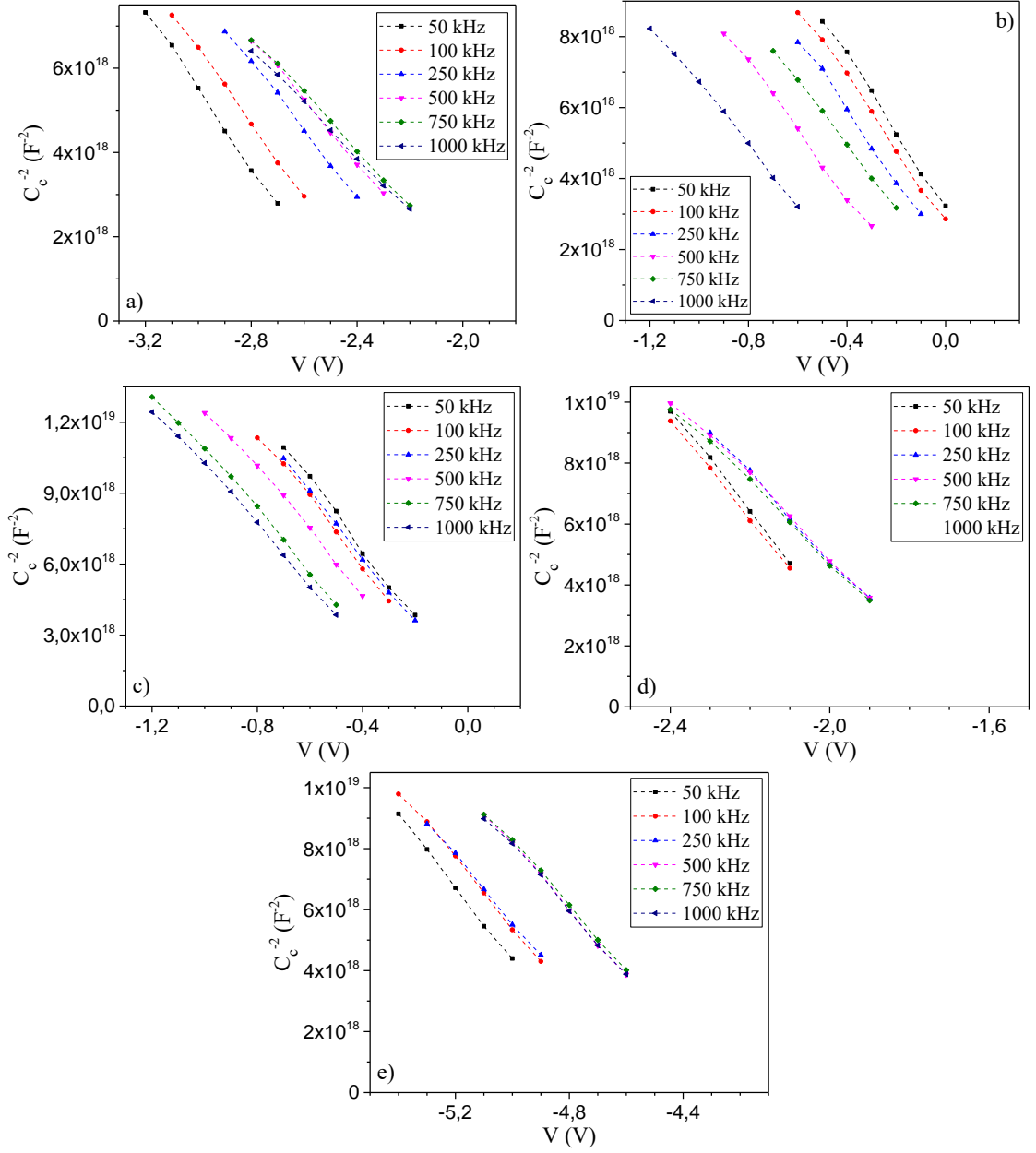
Q_{eff} , düz-bant voltajının bir fonksiyonudur ve tüm aygıtlarda frekansa bağlı olarak büyük değişimler göstermiştir. Ana kaynağı Q_m , Q_{ot} ve Q_f olan oksit tabakadaki yüklerin frekansa bağlı olarak değişim göstermesi beklenmektedir (Nicollian ve Brews 1982). $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitöründe tüm tavlama sıcaklıkları için Q_{eff} tuzak yükleri

frekansa bağılı olarak sürekli bir artış ya da azalış göstermemiştir. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitöründe ise RT, 400 °C ve 800 °C’ de Q_{eff} değerleri artan frekansla birlikte sürekli olarak azalırken, 200 °C ve 600 °C’ de genel eğilimden sapma olsa da artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu aygıt için arayüzey tuzak yüklerinin frekansla sürekli bir artış ya da azalış göstermemesi, frekansa bağılı davranış gösteren sınır tuzak yüklerinin elektriksel karakteristikler üzerindeki etkinliğini işaret edebilir (Zhao ve ark. 2018).

Çizelge 4.4’ te, Denklem 2.4 ile verilen eşitlikten yığılım bölgesi kapasitans değerleri kullanılarak hesaplanmış ϵ_k değerleri görülmektedir. n-tipi yarıiletken üzerine üretilmiş bir MOS kapasitörün bariyer yüksekliğindeki artış, alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin verici-tipi arayüzey seviyelerine kıyasla daha etkin olduklarını göstermektedir (Kahraman ve Yılmaz 2017d, Kahraman ve ark. 2020a). Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile kapasitörlerin $C_c^{-2} - V$ eğrilerinin tükenim bölgelerindeki doğrusal değişim verilmiştir ve burada doğruların x-ekseni ile kesişim noktalarından V_0 elde edilmektedir. Çizelge 4.4’ te ϕ_B (Denklem 2.29) ve bu parametrenin hesaplanmasında kullanılan V_D (Denklem 2.24), N_d (Denklem 2.25), $\Delta\phi_B$ (Denklem 2.26) ve E_F (Denklem 2.28a) değerleri verilmiştir. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörlerinde RT ve 200 °C’ de bariyer yüksekliği, 100 – 750 kHz arasında artan frekansla birlikte sürekli azalmıştır. Bu frekans aralığında cihazın elektriksel performansı üzerinde verici-tipi arayüzey seviyelerinin alıcı-tipi arayüzey seviyelerine göre daha aktif rol aldığı sonucuna ulaşılmaktadır. 50 – 100 kHz ve 750 – 1000 kHz arasında ise ϕ_B değerlerindeki artış alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin daha etkili olduklarını göstermektedir. 400 °C’ de ϕ_B değerleri 50, 100, 500 ve 750 kHz frekanslarında neredeyse aynı değerlere sahipken 250 kHz ve 1 MHz’de artış göstermiştir. 600 °C’ de 100 kHz’de azalan ϕ_B değerlerinden verici-tipi arayüzey seviyelerinin baskın olduğu sonucuna varılmaktadır ve 100 kHz’ den sonra artan frekanstan bağımsız olarak bariyer yüksekliği değerleri benzer düzeylerde kalmıştır. 800 °C’ de 250 – 750 kHz arasında neredeyse sabit kalan ϕ_B değerlerinin 50 kHz ve 1 MHz frekanslarındaki davranışı RT ve 200 °C’ dekine benzer şekildedir.



Şekil 4.7. $Yb_2O_3/SiO_2(20nm)$ kapasitörü $C_c^{-2} - V$ eğrileri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C



Şekil 4.8. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ kapasitörü $C_c^{-2} - V$ eğrileri: a) RT, b) 200 °C, c) 400 °C, d) 600 °C, e) 800 °C

$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinde RT, 600 °C ve 800 °C tavlama sıcaklıkları için bariyer yükseklikleri, düşük frekans bölgesinde artan frekansla birlikte küçük bir azalma gösterirken yüksek frekanslar için benzer değerler almıştır. Bu durum düşük frekans bölgesinde verici-tipi arayüzey seviyelerinin daha etkin olduklarını gösterir. 200 °C’ de 50 – 500 kHz arasında artan frekansla azalan ϕ_B değerleri 750 kHz ve 1 MHz’ de artmıştır. 400 °C’ de ϕ_B değerleri ise 50 – 500 kHz arasında önemli bir değişim

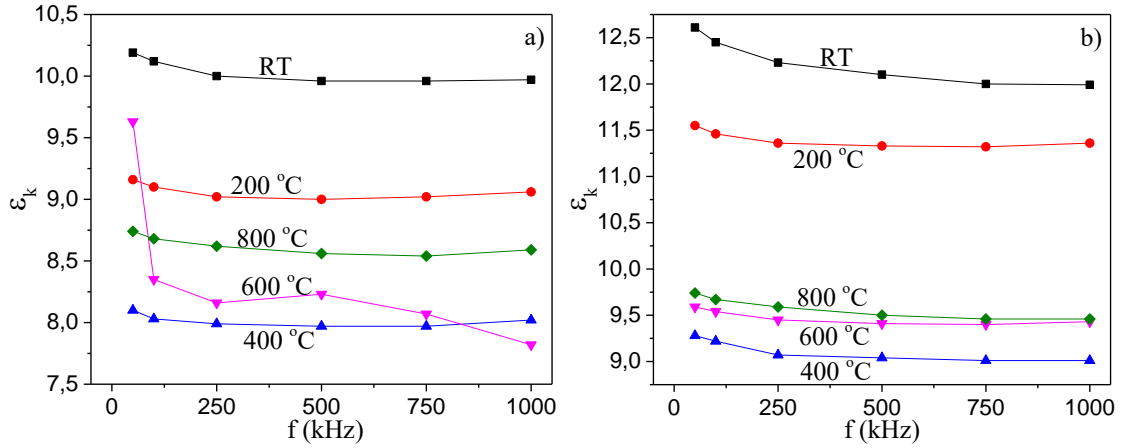
göstermezken 750 kHz' den itibaren artan frekansla birlikte artış göstermiştir. Bu sonuçlar 200 °C ve 400 °C' de, yüksek frekans bölgesindeki alıcı/verici-tipi arayüzey seviyelerinin elektriksel karakteristikler üzerindeki etkinliklerinin değiştiğini ifade etmektedir.

Çizelge 4.4. Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) kapasitörleri için hesaplanan elektriksel parametreler

Numune		Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (20nm)							Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)					
Tavlama Sıcaklığı (°C)	Frekans (kHz)	ϵ_k	V_D (eV)	$N_d \times 10^{15}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	ϕ_B (eV)	$\Delta\phi_B$ (meV)	ϵ_k	V_D (eV)	$N_d \times 10^{15}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	ϕ_B (eV)	$\Delta\phi_B$ (meV)	
Tavlanmamış	50	10,19	1,0	4,13	0,223	1,4	21,8	12,61	2,4	4,13	0,223	2,6	26,0	
	100	10,12	1,5	3,70	0,226	1,8	22,3	12,45	2,3	4,38	0,222	2,5	26,0	
	250	10,00	1,3	3,98	0,224	1,5	22,1	12,23	2,1	4,80	0,219	2,3	25,9	
	500	9,96	1,1	4,38	0,222	1,3	21,6	12,10	1,9	5,18	0,217	2,1	26,0	
	750	9,96	0,7	5,14	0,217	0,9	19,8	12,00	1,8	5,74	0,215	2,0	26,3	
	1000	9,97	0,9	4,75	0,219	1,1	20,9	11,99	1,8	6,02	0,214	2,0	26,6	
200	50	9,16	1,4	1,66	0,246	1,6	19,1	11,55	0,3	3,58	0,227	0,5	14,9	
	100	9,10	2,3	1,96	0,242	2,6	22,5	11,46	0,3	3,82	0,225	0,5	14,9	
	250	9,02	2,3	2,21	0,239	2,5	23,0	11,36	0,2	3,84	0,225	0,4	13,6	
	500	9,00	1,8	2,99	0,231	2,0	22,6	11,33	0,1	4,09	0,223	0,3	8,5	
	750	9,02	1,4	3,03	0,231	1,6	20,9	11,32	0,2	4,28	0,222	0,4	13,2	
	1000	9,06	2,0	3,14	0,230	2,2	23,3	11,36	0,2	4,52	0,221	0,5	14,6	
400	50	8,10	1,8	1,94	0,242	2,0	19,6	9,28	0,1	2,62	0,235	0,3	8,9	
	100	8,03	1,7	1,77	0,244	2,0	19,4	9,22	0,1	2,72	0,234	0,3	6,9	
	250	7,99	2,8	1,97	0,242	3,0	22,4	9,07	0,1	2,76	0,233	0,3	9,0	
	500	7,97	1,7	1,88	0,243	1,9	19,5	9,04	0,1	2,94	0,232	0,3	8,2	
	750	7,97	1,8	1,88	0,243	2,0	19,7	9,01	0,2	3,03	0,231	0,4	12,1	
	1000	8,02	2,4	2,12	0,240	2,6	22,0	9,01	0,2	3,07	0,230	0,4	12,8	
600	50	9,63	1,3	3,03	0,231	1,5	20,5	9,59	1,8	2,30	0,238	2,1	21,0	
	100	8,35	0,0	1,75	0,245	0,3	4,2	9,54	1,9	2,37	0,237	2,1	21,1	
	250	8,16	0,4	1,42	0,250	0,6	12,2	9,45	1,7	2,77	0,233	1,9	21,4	
	500	8,23	0,3	1,51	0,248	0,5	11,8	9,41	1,7	2,94	0,232	1,9	21,7	
	750	8,07	0,1	1,75	0,245	0,4	9,6	9,40	1,7	2,99	0,231	1,9	21,8	
	1000	7,82	0,1	1,79	0,244	0,4	9,7	9,43	1,7	2,98	0,231	1,9	21,8	
800	50	8,74	0,9	1,96	0,242	1,2	16,9	9,74	4,7	3,20	0,229	4,9	28,8	
	100	8,68	2,4	1,90	0,243	2,6	21,4	9,67	4,5	3,42	0,228	4,7	29,1	
	250	8,62	2,3	1,94	0,242	2,5	21,3	9,59	4,5	3,51	0,227	4,7	29,2	
	500	8,56	2,2	1,96	0,242	2,4	21,0	9,50	4,3	3,58	0,227	4,5	29,0	
	750	8,54	2,0	2,07	0,241	2,2	20,8	9,46	4,2	3,68	0,226	4,4	29,1	
	1000	8,59	2,8	2,09	0,240	3,0	22,8	9,46	4,2	3,66	0,226	4,5	29,1	

ii. Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakteristikler

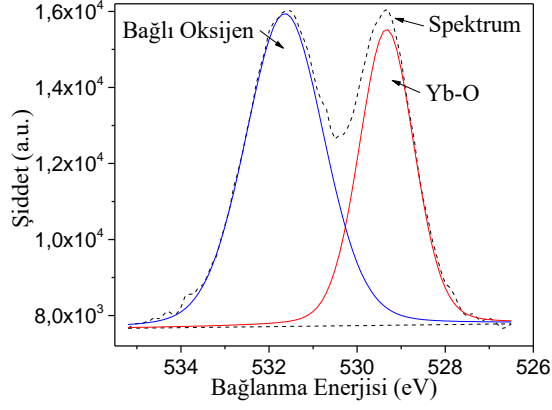
Farklı sıcaklıklarda tavllanmış $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin frekansa bağlı ϵ_k değerlerindeki değişim sırasıyla Şekil 4.9 a ve b ile verilmiştir. Her iki aygıtta da en yüksek ϵ_k değeri RT' de tavllanmış yapılarla üretilen MOS kapasitörlerde gözlenmiştir.



Şekil 4.9. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı dielektrik sabitleri: a) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$, b) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$

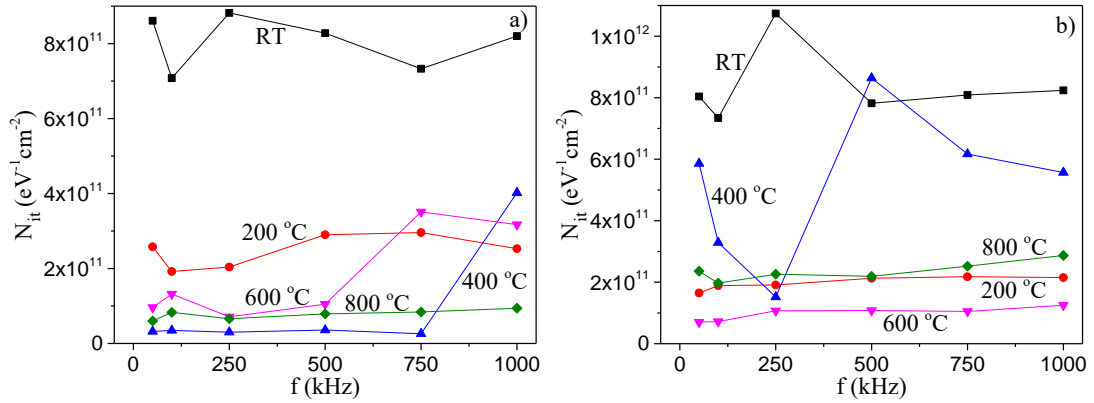
Nadir toprak oksitleri, hidroksil grupları ile yüksek oranda bağ yapabilme özelliğine sahiptir (Zhao ve ark. 2010, Kahraman ve ark. 2020a). Su moleküllerinin oda sıcaklığındaki elektriksel geçirgenlikleri ~ 80 olduğundan ölçülen kapasitans değerlerinde artış meydana gelmiş olabilir. Bu durumun doğrulanması için RT, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C' de tavllanmış $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ yapılarının O 1s XPS derinlik profilleri alınmıştır. RT' de tavllanmış numunelerin tüm derinliklerinden ve diğer sıcaklıklarda tavllanmış numunelerin sadece yüzeylerinden alınan O 1s spektrumları iki adet G-L fonksiyonuna fit edilmiştir (Şekil 4.10). Bu spektrumlarda, düşük enerjili ($\sim 529,29$ eV) pik Yb–O bağı ile ilişkilendirilirken yüksek enerjili ($\sim 531,61$ eV) diğer pik ise oksijen kusurlarına, hidroksil türlerine, film yüzeyinde soğurulan su moleküllerine veya diğer bağlı oksijen türlerine atfedilmiştir (Guo ve ark. 2017). Film yüzeyi dışındaki diğer derinliklerde yalnızca tavlannmamış yapıda $\sim \%10$ oranında bağlı oksijen türlerine rastlanmıştır. Artan tavlama sıcaklığıyla birlikte bağlı oksijen türleri birbirinden ayrılmış ve yeni Yb–O–Yb bağları meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, Guo ve ark. (2017) tarafından

Yb₂O₃/Si yapısı için elde edilen bulgular ile uyumludur. Hidroksil türlerine yalnızca RT’ de rastlandığı için diğer tavlama koşullarında dielektrik sabiti değerlerine buradan gelen katkı ihmal edilebilir.



Şekil 4.10. Yb₂O₃/SiO₂(20nm) yapılarının O 1s XPS spektrumu

Yığılım bölgesi kapasitans değerlerine/dielektrik sabitine bir diğer önemli katkı arayüzey tuzaklarından gelebilir. Şekil 4.11’ de RT, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C tavlama koşullarında üretilmiş Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS tabanlı aygıtlar için frekansa bağlı N_{it} değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.11. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı arayüzey tuzakları: a) Yb₂O₃/SiO₂(20nm), b) Yb₂O₃/SiO₂(36nm)

En yüksek N_{it} değerleri her iki aygıt için de RT’ de gözlenmiştir. Bu sonuçlar oda sıcaklığında tavlanan yapılar ile üretilmiş MOS kapasitörlerin ölçülen kapasitansına arayüzey tuzak yüklerinin katkı sağladığını göstermektedir. Yb₂O₃/SiO₂(20nm) için 400

°C' de ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) için 600 °C' de en düşük N_{it} değerleri hesaplanmıştır. Arayüzey seviye yoğunluğunda tavlama ile birlikte meydana gelen büyük miktardaki azalma ölçülen kapasitans değerlerini etkileyerek dielektrik sabiti değerinin düşmesine neden olmuş olabilir. Yb₂O₃/SiO₂(20nm) aygıtlarında N_{it} değerleri, 600 °C' ye kadar artan tavlama sıcaklığıyla birlikte azalırken 600 °C' de bir miktar artış göstermiştir. 800 °C' de ise tekrar bir azalma meydana gelmiştir. Yb₂O₃/SiO₂(36nm) aygıtında ise artan tavlama sıcaklığıyla N_{it} değerlerindeki değişim daha karmaşıktır. 400 °C' de tavllanmış yapı ile üretilen MOS kapasitöründe N_{it} değerleri, 200 °C, 600 °C, 800 °C' dekilere kıyasla daha yüksek olmasına rağmen (250 kHz hariç), en düşük dielektrik sabiti bu aygıttan elde edilmiştir. 200 °C ve 800 °C' de tavllanmış yapılar ile üretilmiş Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinde arayüzey tuzak konsantrasyonları birbirine oldukça yakındır, ancak Yb₂O₃ filmlerinin dielektrik sabiti değerleri arasında bu tavlama sıcaklıkları için büyük farklılıklar mevcuttur. Her iki aygıtta da N_{it} değerlerinin RT sonrası tavlama sıcaklığına bağlı olarak sürekli bir artış ya da azalış göstermemesi Yb₂O₃/Si ve SiO₂/Si arayüzeylerinde meydana gelen yapısal dönüşümler ile ilgili olabilir. Bu bölgelerde tavlama ile birlikte meydana gelmesi muhtemel stokiometrik olmayan silikat benzeri yapıların konsantrasyonları, katmanın iterbiyum ya da silikon atomlarınca zengin olması kapasitörün dielektrik değerini yüksek ölçüde etkilemektedir (Tan ve ark. 2009, Khairnar ve Mahajan 2013, Kahraman ve ark. 2015c, Kahraman ve ark. 2020a).

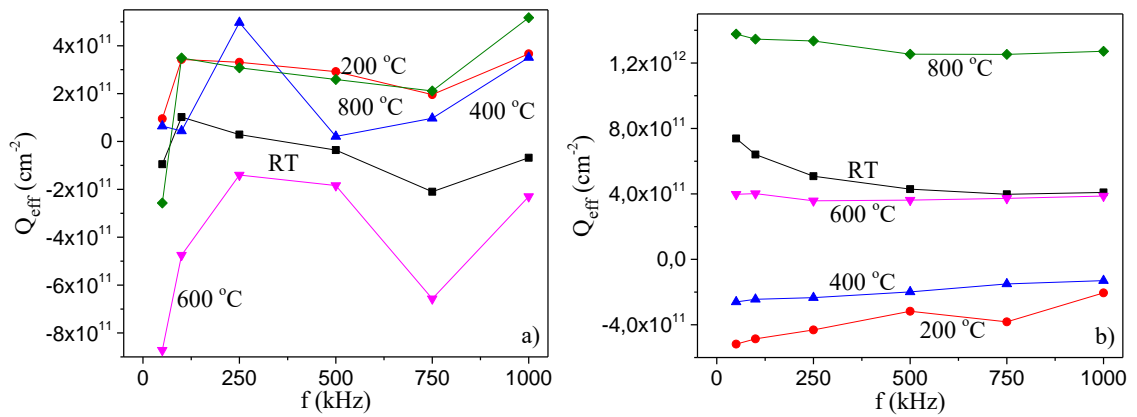
Literatürde çeşitli tekniklerle büyütülen Yb₂O₃ filmlerinin ϵ_k değerleri 7,0 – 15,0 arasında rapor edilmiştir (Koleshko ve Babushkina 1979, Wiktorczyk ve Wesolowska 1980, Ohmi ve ark. 2003, Kahraman ve Yılmaz 2017c). Bu çalışmada 7,82 – 12,61 arasında elde edilen ϵ_k değerleri literatür verileri ile uyumludur.

Yb₂O₃/Si yapılarıyla üretilmiş MOS kapasitörlere ait N_{it} değerleri literatürden derlenmiş ve Çizelge 4.5' te sunulmuştur. Bu çalışmada her iki yapı ve tüm tavlama sıcaklıkları için hesaplanan arayüzey seviye yoğunlukları $0,26 - 10,74 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ arasındadır (bkz. Çizelge 4.2). Elde edilen sonuçlar Yb₂O₃/Si arasına SiO₂ tabakasının eklenmesi ile arayüzey seviye yoğunluğunun düştüğüne işaret edebilir.

Çizelge 4.5. Literatürdeki $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Si}$ yapılarıyla üretilmiş MOS kapasitörlerin N_{it} değerleri

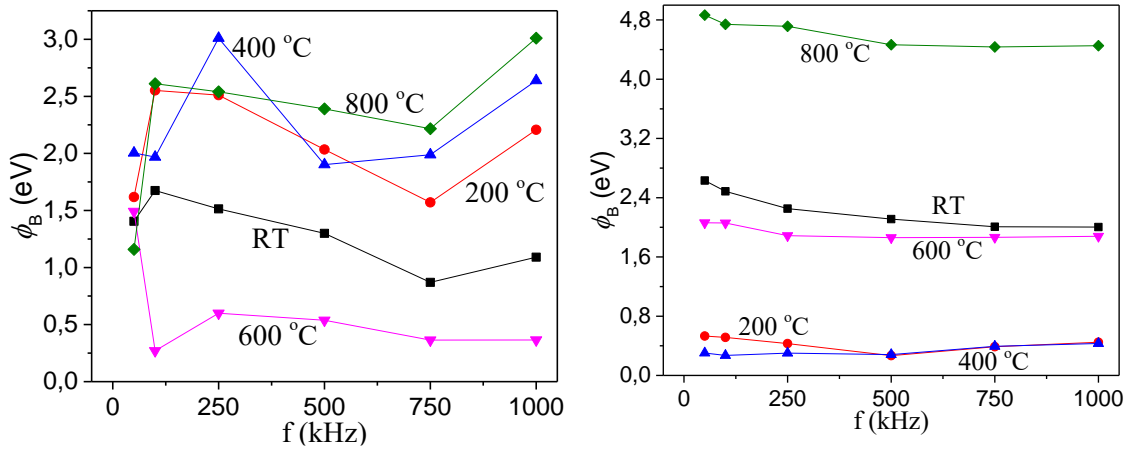
Yapı	Kalınlık (nm)	Tavlama Sıcaklığı (°C)	$N_{it} \times 10^{11}$ ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$)	Üretim Yöntemi	Referans
Yb_2O_3	332	RT	6,61	RF magnetron Saçtırma	(Kahraman ve ark. 2020b)
	125	RT	22,00 (100 kHz)	RF magnetron Saçtırma	(Kahraman ve ark. 2020a)
			16,80 (1 MHz)		
			16,10 (100 kHz)		
			12,10 (1 MHz)		
	400	RT	8,50 (100 kHz)	RF magnetron Saçtırma	(Kahraman ve ark. 2020a)
11,50 (1 MHz)					
600	RT	2,50 (100 kHz)	RF magnetron Saçtırma	(Kahraman ve ark. 2020a)	
		2,60 (1 MHz)			
114	RT	3,34 (100 kHz) 2,55 (1 MHz)	RF magnetron Saçtırma	(Kahraman ve Yılmaz 2017c)	

$\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin beş farklı tavlama sıcaklığı için frekansla değişen Q_{eff} değerleri sırasıyla Şekil 4.12 a ve b' de verilmiştir. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ tabanlı aygıtlarda 600°C ' de tüm frekanslarda, RT' de ise 50 kHz, 500 kHz, 750 kHz ve 1 MHz' de efektif oksit tuzak yük yoğunluğu negatif değerler almıştır. 200°C , 400°C ve 800°C - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörlerinde ise efektif oksit tuzak yükü pozitiftir. En büyük pozitif ve negatif oksit tuzak yük yoğunluğu sırasıyla 800°C ve 600°C ' de elde edilmiştir. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ tabanlı aygıtlar için 200°C ve 400°C ' de negatif yükler pozitiflere kıyasla daha yüksek oranda oksit tabakada tuzaklanırken, RT, 600°C ve 800°C ' de ise tersi bir durum gözlenmiştir.



Şekil 4.12. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı oksit tuzak yükleri: a) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$, b) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$

Kahraman ve ark. (2020a) RF magnetron saçtırma sistemi kullanarak n-Si (100) alttaş üzerine 125 nm kalınlığında Yb_2O_3 ince filmi büyütmüş ve RT, 200 °C, 400 °C, 600 °C’ de tavladıkları yapılar için kapasitörlerin elektriksel karakteristiklerini incelemiştir. Aynı çalışmada tüm aygıtlar için oksit tabakada negatif yükler pozitif yüklere kıyasla daha büyük oranda tuzaklanmış ve Q_{eff} değerleri 10^{12} cm^{-2} mertebesinde. Ayrıca 800 °C’ de tavllanmış yapı için çok yüksek tuzak yük yoğunluğu nedeniyle elektriksel ölçümler gerçekleştirilememiştir. Bu çalışmada ise sadece 800 °C- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitöründe 10^{12} düzeyinde efektif oksit tuzak yük yoğunluğu gözlenmiş olup diğer aygıtlar için değerler Kahraman ve ark. (2020a) tarafından raporlanan verilerden daha düşüktür. Hem arayüzeyde ince bir SiO_2 tabakasının kullanılması hem de EBPVD sistemiyle filmlerin büyütülmesi daha yüksek kalitede/daha az kusur yoğunluğuna sahip bir oksit tabakasının elde edilmesini sağlamış olabilir.



Şekil 4.13. MOS kapasitörlerin frekansa bağlı bariyer yükseklikleri: a) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$, b) $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$

RT, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C tavlama koşulları için $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS tabanlı cihazların ϕ_B ’ deki değişimleri frekansa bağlı olarak Şekil 4.13 a ve b’ de verilmiştir. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitöründe artan tavlama sıcaklığı ile 400 °C’ ye kadar yükseliş gösteren ϕ_B değerleri, 600 °C’ de önemli ölçüde düşmüştür. 800 °C’ de ise 600 °C’ ye kıyasla daha yüksek ϕ_B değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitöründe alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin verici-tipi arayüzey seviyelerine göre RT – 400 °C tavlama sıcaklığı aralığında daha etkin olduklarını göstermektedir. 600 °C ve 800 °C’de sırasıyla verici-tipi ve alıcı-tipi arayüzey

seviyeleri $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörünün elektriksel karakteristiklerde daha baskındır. $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ yapısında ϕ_B değerleri ise artan tavlama sıcaklığıyla birlikte önce azalırken $600\text{ }^\circ\text{C}$ ' den itibaren artmış ve $800\text{ }^\circ\text{C}$ ' de en yüksek değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar RT – $400\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında verici-tipi, $600\text{ }^\circ\text{C}$ – $800\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında ise alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörünün elektriksel karakteristiklerinde daha etkin olduğunu göstermektedir.

$200\text{ }^\circ\text{C}$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörü için tersinim bölgesi kapasitans değerlerinde $\sim -8,2\text{ V}$ ' den sonra sürekli olarak azalma gözlenmiştir ve $600\text{ }^\circ\text{C}$ ' de tükenim bölgesinde bozulmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.2 b ve d). $400\text{ }^\circ\text{C}$ ve $800\text{ }^\circ\text{C}$ ' de ise N_{it} değerleri her ne kadar diğer tavlama sıcaklıklarına kıyasla düşük olsa da düz-bant voltajları frekansla birlikte büyük ölçüde değişmiştir. RT- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ filmi ile üretilen MOS kapasitörü;

- İdeale yakın V_{fb} değerleri,
- N_{it} ve Q_{eff} değerlerinin frekansla birlikte büyük değişim göstermemesi (Çizelge 4.2),
- Farklı frekanslarda ölçülen $C_c - V$ eğrilerinin düzgün bir yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerine sahip olması (Şekil 4.2 a),
- Diğer tavlama sıcaklıklarına kıyasla RT'de gözlenen yüksek ϵ_k değeri (Çizelge 4.4) nedenleriyle ışınlama deneylerinde kullanılmıştır.

RT ve $400\text{ }^\circ\text{C}$ $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinde tükenim-tersinim bölgesi geçişlerinde ve tersinim bölgelerinde bozulmalar mevcuttur (Şekil 4.3 a ve c). $800\text{ }^\circ\text{C}$ ' de tavllanmış $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ filmi ile üretilen aygıtta en yüksek efektif oksit tuzak yük yoğunluğu gözlenmiştir. Bir diğer ifade ile V_{fb} ideal değerinden en fazla bu aygıtta sapmıştır. $600\text{ }^\circ\text{C}$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitöründe $200\text{ }^\circ\text{C}$ ' ye kıyasla N_{it} ve Q_{eff} değerleri daha düşük olmasına rağmen bu aygıtın tersinim bölgesi kondüktans değerleri frekansla birlikte büyük ölçüde değişmiştir (Şekil 4.5 d). $200\text{ }^\circ\text{C}$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörü;

- Diğer tavlama sıcaklıklarına kıyasla yüksek dielektrik sabiti (Çizelge 4.4),
- $C_c - V$ ve $G_c/\omega - V$ karakteristiklerinin yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinde bozulmaların gözlenmemesi (Şekil 4.3 b ve Şekil 4.5 b)

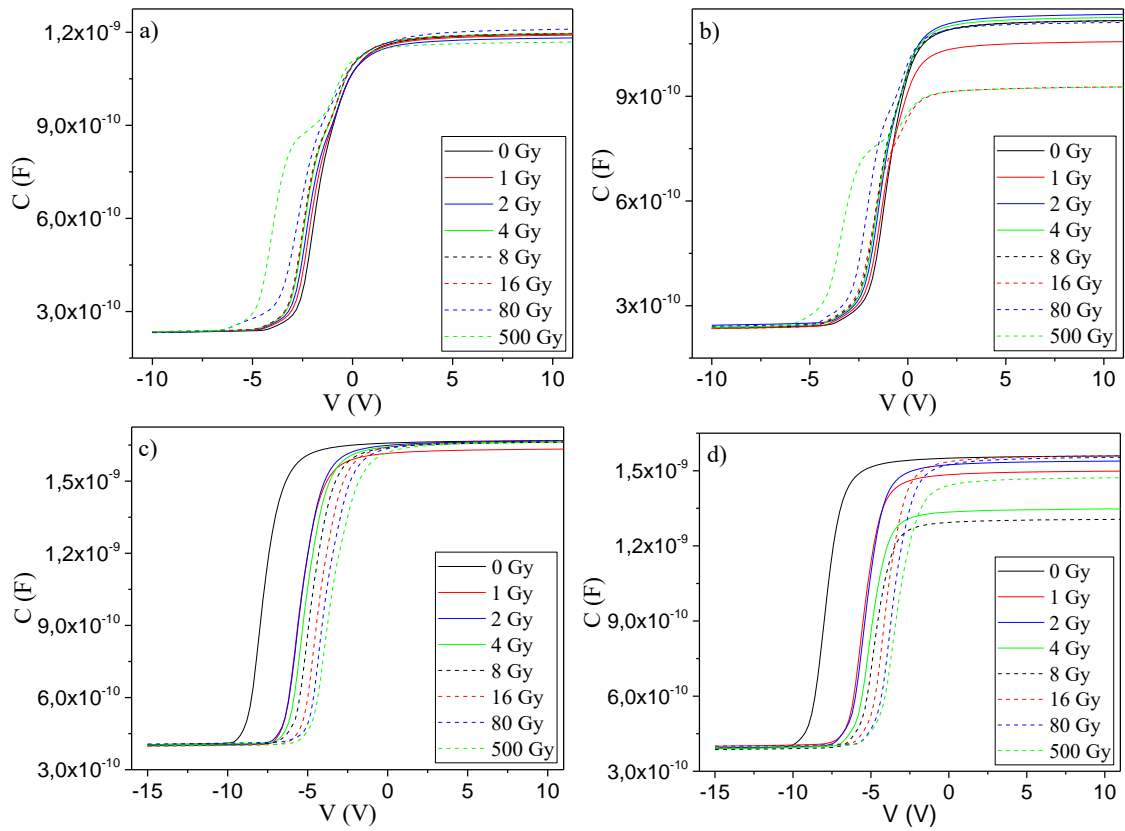
nedenleriyle ışınlama deneylerinde tercih edilmiştir.

4.3. Radyasyon Cevapları

1 – 500 Gy doz aralığında ^{60}Co kaynağı ile ışınlanan RT- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ ve $200\text{ }^\circ\text{C}$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS kapasitörlerinin 100 kHz ve 1 MHz’ de elde edilen C – V eğrileri Şekil 4.14’ te verilmiştir. RT- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörü için her iki frekansta da C – V eğrileri artan radyasyon dozu ile birlikte sürekli olarak sola doğru hareket ederken $200\text{ }^\circ\text{C}$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ MOS tabanlı aygıtta karakteristikler yönlerini daha büyük pozitif voltaj değerlerine (sağa doğru) çevirmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, RT- $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(20\text{nm})$ MOS kapasitörünün duyar bölgesinde pozitif yüklerin negatif yüklere kıyasla daha fazla tuzaklandıklarını göstermektedir. $200\text{ }^\circ\text{C}$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2(36\text{nm})$ aygıtında ise artan radyasyon dozuyla birlikte negatif yük tuzaklarının etkinliği pozitiflere kıyasla artmıştır.

Bir MOS kapasitörün dielektrik tabakasında kusur oluşumuna neden olan en önemli mekanizmalar yüksek elektrik alan stresi ve iyonize edici radyasyondur. Her iki durumda da oksit içerisinde oluşacak kusur tipinde elektronların enerjileri önemli rol oynamaktadır (Ristic ve ark. 2003, Ristic ve ark. 2006, Ristic ve ark. 2007). ^{60}Co radyoaktif kaynağından yüksek olasılıkla yayınlanan gama enerjileri 1,173 MeV (%99,85) ve 1,332 MeV’dir (%99,982) (Anonim 2020a, 2020b). Bu enerjideki gama ışınları dielektrik tabakası ile etkileştiklerinde öncelikli olarak fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu yoluyla ortama enerjilerini aktarırlar. Bu etkileşmeler sonucunda da dielektrik tabakada elektron-deşik çiftleri oluşur. Elektronların mobiliteleri yüksek olduğu için metal kontağa birkaç pikosaniye içerisinde ulaşmaları beklenir. Mobiliteleri elektronlara kıyasla oldukça küçük olan ve rekombinasyon sürecinden kaçabilen deşikler oksit tabakada ya da oksit/Si arayüzeyinde tuzaklanırlar. Bu nedenle tipik bir MOS kapasitörün duyar bölgesinde ışınlama sonucu beklenen net tuzak yükü pozitifdir ve bu tuzak yüklerinin C – V eğrisini ışınlama öncesi karakteristiğe kıyasla sola doğru kaydırması beklenir (Ma ve Dressendorfer 1989, Yilmaz ve ark. 2008, Kaya ve Yilmaz 2014). Bununla birlikte son yıllarda HfO_2 ($\epsilon_k=24$), BiFeO_3 ($\epsilon_k=18$), Er_2O_3 ($\epsilon_k=9-14$), Gd_2O_3 ($\epsilon_k=7-20$), Sm_2O_3 ($\epsilon_k=7-15$) gibi bazı yüksek- k dielektrikleri ile yapılan çalışmalarda ışınlama dozuna bağlı olarak MOS kapasitörlerin C – V eğrilerinde sağa yönlü kayma rapor edilmiştir (Srinivasan ve Pandya 2011, Kaya ve ark. 2015, Robertson ve Wallace

2015, Kahraman ve ark. 2016, Yılmaz ve Kaya 2016, Kahraman ve Yılmaz 2017c). Ayrıca MOS tabanlı aygıtlarda toplam doz modellemesi üzerine yapılan bir çalışmada oksit/Si arayüzeyine yakın bölgelerde negatif yük tuzaklarının pozitif yük tuzakları kadar önemli olduğu gösterilmiştir (Fleetwood ve ark. 1999). Bu çalışmada dielektrik tabaka iki farklı oksitten oluşmaktadır. Bölüm 2.3.3' te belirtildiği gibi SiO₂ tabakada değişik tuzak merkezlerinin sayısı (E'_S , E'_V ve NBO) elektron tuzak merkezlerine (NBO) kıyasla daha fazladır. Bu nedenle iki farklı yapıda gözlenen sağ ve sol yönlü kaymaların olası nedenleri Yb₂O₃/Si ve Yb₂O₃/SiO₂ arayüzeyleri olabilir.



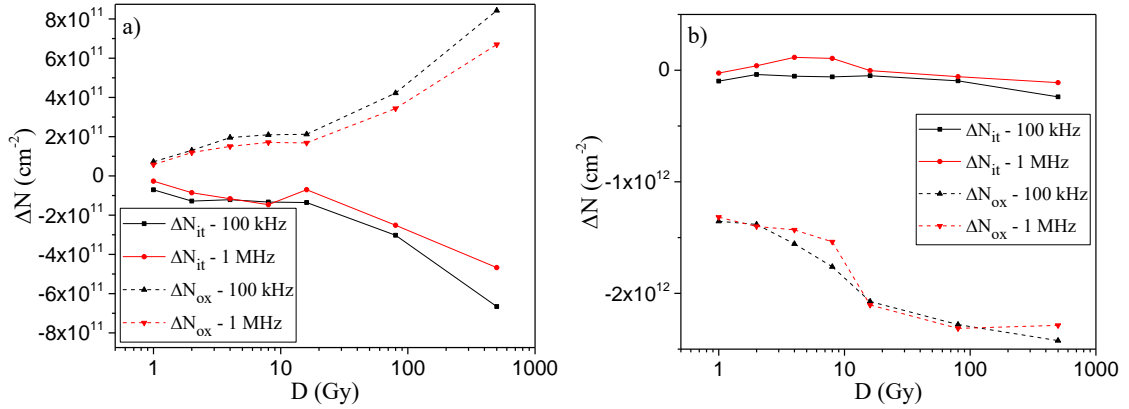
Şekil 4.14. MOS kapasitörlerin radyasyon ile değişen C – V karakteristikleri a) Yb₂O₃/SiO₂(20nm)-100 kHz, b) Yb₂O₃/SiO₂(20nm)-1 MHz, c) Yb₂O₃/SiO₂(36nm)-100 kHz, d) Yb₂O₃/SiO₂(36nm)-1 MHz

Nadir toprak elementlerinin en kararlı oksidasyon durumu 3+’ dır. Yb, Eu gibi bazı nadir toprak elementleri iki değerlikli de olabilir. Yb²⁺ tamamen dolu 4f alt kabuğuna sahip olduğundan kararlı bir oksidasyon durumunu temsil eder ([Xe]4f¹⁴6s²). Yb³⁺ iyonunda ise 4f alt kabuğu tam olarak doldurulmaz ([Xe]4f¹³5d¹6s²) (Tian ve ark. 2016). Yb³⁺

iyonları yüksek sıcaklık ya da radyasyon gibi dış bir stres altında elektron tuzaklayarak Yb^{2+} iyonlarına dönüşebilir. Hem Yb^{3+} hem de Yb^{2+} seviyeleri elektron tuzak merkezleri gibi davranabilirler (Kim ve Lim 2010, Kahraman ve ark. 2020a). Kahraman ve ark. (2020a) tarafından yapılan çalışmada Yb_2O_3 ince filmleri RF magnetron saçtırma sistemi ile n-Si alttaş üzerine üretilmiş ve RT, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C’ de tavlanan yapıların bağ özellikleri XPS derinlik analizleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma sonucunda RT- Yb_2O_3/Si ’ de yalnızca 3+ oksidasyon seviyesi gözlenirken, 2+ oksidasyon seviyesine 200 °C- Yb_2O_3/Si arayüzeyinde rastlanmıştır. $SiO_2/n-Si$ yapısı üzerine Yb_2O_3 filmi üretilirken alttaşa 250 °C’ lik bir sıcaklık uygulanmıştır. Radyasyonun yapıyla etkileşmesi sonucunda ortama aktarılan enerji de bir miktar ısınmaya neden olmaktadır. $Yb_2O_3/SiO_2(20nm)$ kapasitörlerinin üretimi esnasında kullanılan 250 °C’ lik sıcaklık film içerisinde negatif yük tuzaklanmalarına neden olan Yb^{3+} ve Yb^{2+} iyonlarında bir miktar artışa neden olmuş olabilir. Ancak negatif yük tuzaklarının yoğunluğu pozitiflerden daha fazla olmadığı için RT- $Yb_2O_3/SiO_2(20nm)$ MOS kapasitöründe ışınlama ile birlikte V_{mg} ve V_{fb} sürekli olarak daha büyük negatif voltaj değerlerine doğru kaymıştır. 100 kHz ve 1 MHz’ de radyasyon cevapları incelenen RT- $Yb_2O_3/p-Si$ MOS kapasitörlerinin de C – V eğrileri 0,5 – 70 Gy doz aralığında sürekli olarak sola doğru kaymıştır (Kahraman ve Yılmaz 2017c). $Yb_2O_3/SiO_2(36nm)$ MOS kapasitöründe yapıya uygulanan 200 °C’ lik tavlama sıcaklığı ilave bir katkı getirerek Yb^{3+} ve Yb^{2+} elektron tuzak merkezlerinde artışa neden olmuş olabilir. Tuzaklanan elektron sayısındaki artış ile pozitif yüklere kıyasla baskın hale gelen negatif yüklerin 200 °C- $Yb_2O_3/SiO_2(36nm)$ MOS kapasitörünün C – V eğrisini artan radyasyon dozuyla birlikte sürekli olarak sağa doğru kaydırmış olması muhtemeldir.

Denklem 2.37’ den hesaplanan radyasyon dozuna bağlı oksit tuzak yük yoğunluğunda meydana gelen değişim (ΔN_{ox}) Şekil 4.15 a ve b’ de görülmektedir. $Yb_2O_3/SiO_2(20nm)$ ve $Yb_2O_3/SiO_2(36nm)$ MOS kapasitörlerinde artan doz ile birlikte oksit tabakadaki tuzak yük yoğunluğunun artma eğiliminde olduğu görülmektedir. RT- $Yb_2O_3/SiO_2(20nm)$ MOS kapasitöründe ΔN_{ox} değerleri, 100 kHz için $7,24 \times 10^{10} - 8,44 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ve 1 MHz için $5,72 \times 10^{10} - 6,70 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 200 °C- $Yb_2O_3/SiO_2(36nm)$ kapasitöründe ise 100 kHz için $-1,35 - -2,40 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ve 1 MHz için $-1,32 - -2,29 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ aralığındadır. Denklem 2.38 kullanılarak hesaplanan radyasyona bağlı arayüzey tuzak yük yoğunluğunda

meydana gelen değişim (ΔN_{it}) Şekil 4.15 a ve b' de verilmiştir. RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) kapasitöründe ΔN_{it} değerleri 100 kHz için $-7,09 \times 10^{10} - -6,66 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ve 1 MHz için $-2,66 \times 10^{10} - -4,68 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ aralığındadır. 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitöründe ΔN_{it} , 100 kHz için $-3,86 \times 10^{10} - -2,39 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ve 1 MHz için $1,16 - -1,11 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ aralığındadır.



Şekil 4.15. Radyasyon dozu ile oksit tuzak yük yoğunluklarının ve arayüzey tuzak yük yoğunluklarının değişimi; a) RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm), b) 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)

Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinde her iki frekans için de radyasyon dozuyla birlikte oksit tuzak yük yoğunluğu artma eğilimindedir. RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS kapasitöründe ΔN_{ox} ve ΔN_{it} değerleri benzer düzeyde seyretmiştir. Bu aygıtın 500 Gy' lik doz ile ışınlanması sonucunda arayüzeyde büyük oranda negatif yük tuzaklanması meydana gelmiş ve bu durum Şekil 4.14 a ve b' de görüldüğü gibi kapasitörün elektriksel karakteristiğinde bozulmaya yol açmıştır. Oksit tabakada ve arayüzeye yakın bölgelerde pozitif yükler negatiflere kıyasla daha fazla tuzaklandıkları için V_{mg} sola doğru hareket ederken, arayüzeyde tersi bir durum meydana gelmesi V_{fb} ' nin V_{mg} ile benzer oranda değişmemesine yol açmıştır. Bir MOS kapasitörde arayüzey tuzak yüklerinin ışınlama ile birlikte hemen hemen sabit kalması/büyük oranda değişmemesi, yüksek dozlarda aygıtın bozulmaması için son derecede önemlidir. Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS kapasitöründe ΔN_{ox} değerleri, ΔN_{it} ' lerden tüm dozlarda bir miktar fazla olduğu için C – V eğrisinin sürekli sola doğru kaydığı sonucuna ulaşılabilir. Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitöründe ΔN_{it} değerleri artan radyasyon dozuyla birlikte her iki frekans için de benzer düzeyde seyretmiştir (Şekil 4.15

b). ΔN_{ox} ' lerde ΔN_{it} ' ye kıyasla değişim daha fazla olduğu için aygıtın 100 kHz ve 1 MHz'de ölçülen C – V eğrilerinin yığılım, tükenim ve tersinim bölgelerinde herhangi bir bozulma meydana gelmemiştir.

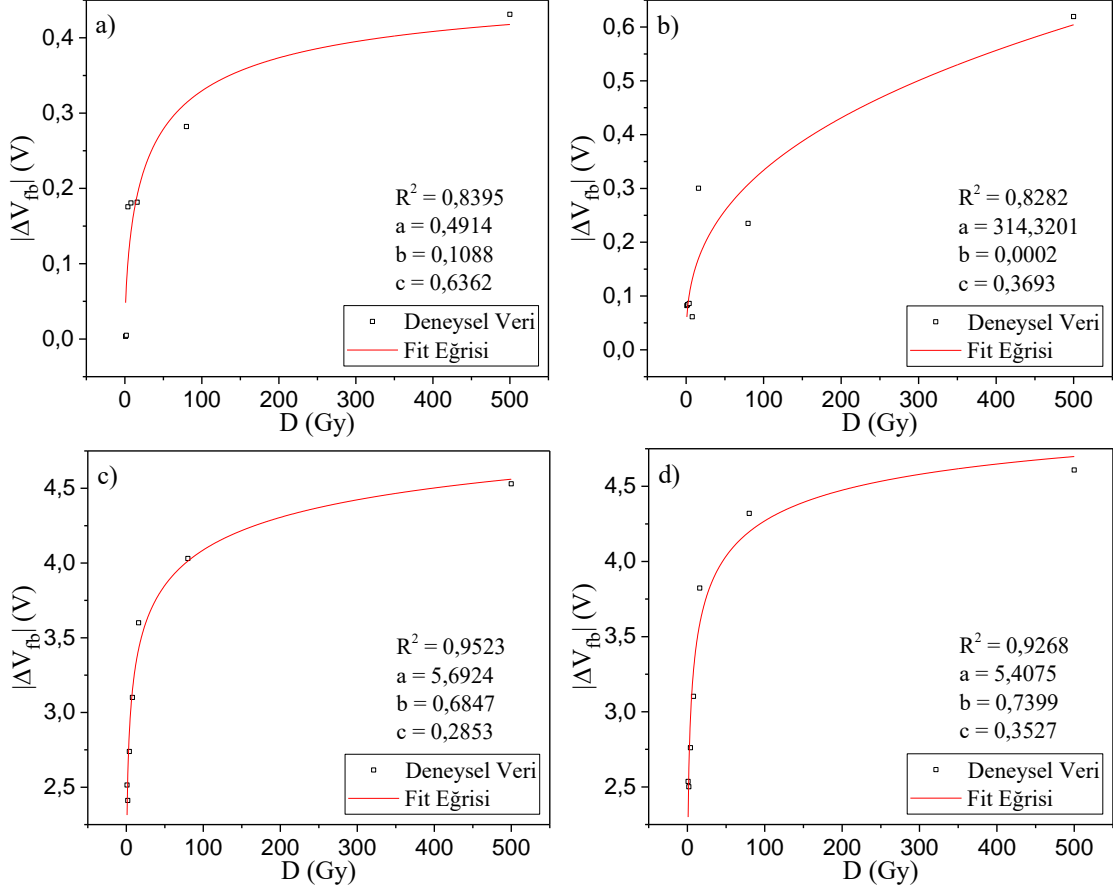
Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinin 1 MHz' de ölçülen C – V eğrilerinden görüldüğü gibi (Şekil 4.14 b ve d) yığılım bölgesi kapasitans değerleri radyasyon dozuna bağlı olarak bir değişim göstermiştir. Bu sonuçlar radyasyon kaynaklı oluşan arayüzey tuzak yüklerinin güçlü ölçüde frekans bağlı olduklarını göstermektedir. Işınlama sonucu oluşan arayüzey seviyelerinin ömür sürelerindeki farklılık, yüksek ve düşük frekans bölgesinde AC sinyalini takip edebilme özelliklerini etkiler (Tataroğlu ve ark. 2006, Kaya ve Yılmaz 2015, Kahraman ve ark. 2020b).

RadFET radyasyon sensörlerinin doz-kalibrasyon eğrilerinin oluşturulmasında Ristic ve ark. (2011) tarafından önerilen

$$\Delta V_{th} = a - \frac{a}{1 + bD^c} \quad (4.2)$$

eşitliğinden yararlanılmaktadır. Burada ΔV_{th} , doza bağlı eşik voltajında meydana gelen değişim, D , uygulanan doz ve a , b , c fit parametreleridir. RadFET radyasyon sensörlerinde doza bağlı eşik voltajı değişimine hem oksit hem de arayüzey tuzak yükleri katkı sağlamaktadır. MOS kapasitörlerde ise bu parametreye ΔV_{fb} karşılık gelebilir. Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinin 100 kHz ve 1 MHz için doz-kalibrasyon eğrileri Şekil 4.16' da verilmiştir. Şekil 4.16 a ve b' den görüldüğü gibi RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS kapasitörlerinin $D - \Delta V_{fb}$ değişimleri, RadFET' lerin doza bağlı davranışıyla uyum göstermemektedir (100 kHz için $R^2 = 0,8395$ ve 1 MHz için $R^2 = 0,8282$). Bu durumun en önemli sebebi ΔN_{it} ve ΔN_{ox} ' lerin 1 – 500 Gy arasında benzer düzeyde seyretmesidir. Şekil 4.16 c ve d' den görüldüğü gibi 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinin $D - \Delta V_{fb}$ değişimlerinin RadFET radyasyon sensörlerinin doza bağlı davranışıyla uyumu RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS tabanlı aygıtlara kıyasla daha yüksektir (100 kHz için $R^2 = 0,9523$ ve 1 MHz için $R^2 = 0,9268$). 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinde çalışılan doz aralığında ΔN_{it} değerlerinde

büyük değişimlerin meydana gelmemesi deneysel veriler ile fit fonksiyonunun uyumunu arttırmıştır.



Şekil 4.16. MOS kapasitörlerin doz-kalibrasyon eğrileri; a) RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)-100 kHz, b) RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)-1 MHz, c) 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)-100 kHz, d) 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)-1 MHz

MOS kapasitörün duyarlılığı (S),

$$S = \frac{\Delta V_{fb}}{D} \quad (4.3)$$

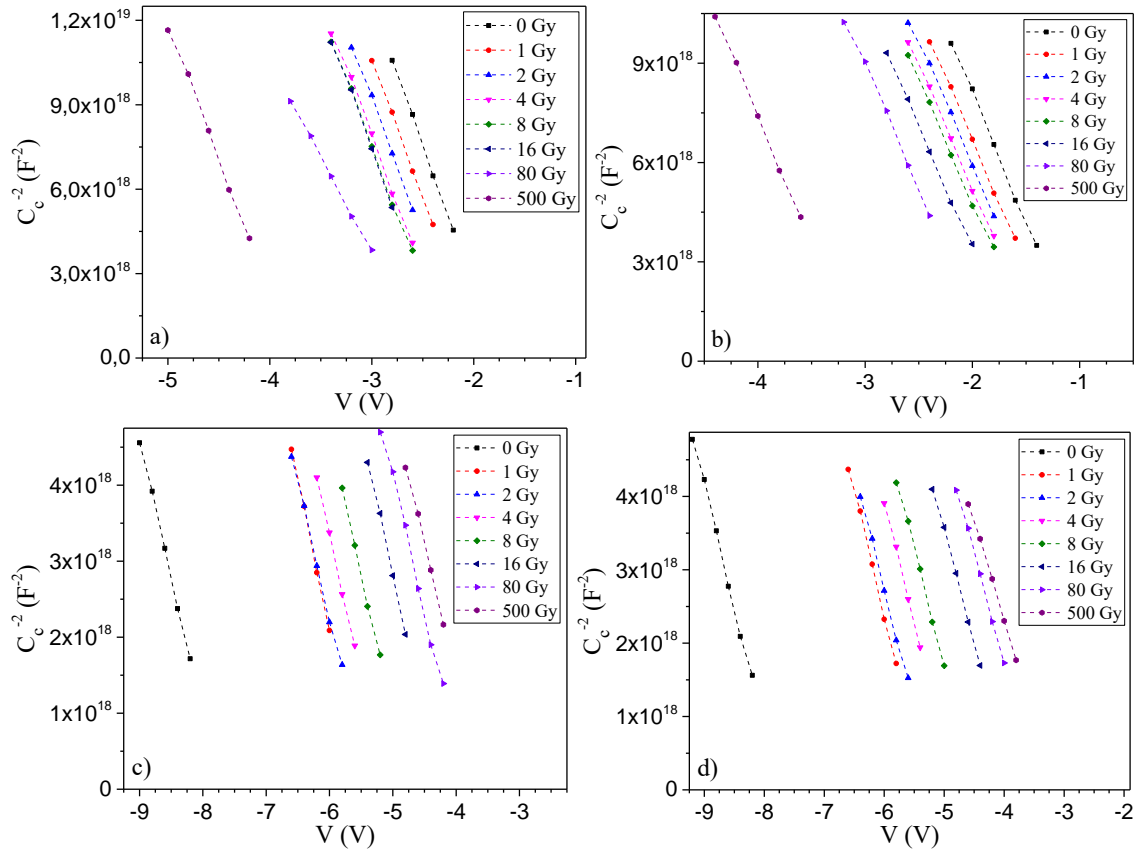
ifadesi ile hesaplanır (Ristic 2009). RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinin duyarlılıkları ve C – V eğrilerinin çalışılan doz aralığındaki davranışı literatürde farklı aygıtlardan elde edilen veriler ile birlikte Çizelge 4.6’ da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Literatürdeki bazı aygıtlar için duyarlılıklar ve düz-bant voltajı kayma yönleri

Oksit Tabaka	Frekans (kHz)	Doz (Gy)	Duyarlılık (mV/Gy)	Düz-bant Voltajında Kayma Yönü	Referans
Yb ₂ O ₃ /SiO ₂					
(140 nm)	1000	80 – 500	54,0 – 9,2	Sağ	
	100	80 – 500	50,4 – 9,1	Sağ	-
(122 nm)	1000	80 – 500	2,9 – 1,2	Sol	
	100	80 – 500	3,5 – 0,9	Sol	
SiO ₂ (240 nm)	1000	64	4,1	Sol	(Yilmaz ve ark. 2007)
	1000	16	7,8	Sol	
Yb ₂ O ₃ (114 nm)	1000	70	28,1	Sol	(Kahraman ve Yilmaz 2017c)
	100	70	27,5	Sol	
Al ₂ O ₃ (30 nm)	1000	3000	~1,0	Sağ	(Soliman ve ark. 1995)
Er ₂ O ₃					
(100 nm)	1000	1500	~1,7	Çift yönlü	(Kaya ve Yilmaz 2018)
(254 nm)	100	76	61	Çift yönlü	(Kahraman ve ark. 2016)
	100	16	107	Çift yönlü	
Gd ₂ O ₃					
(114 nm)	100	50	39,7	Sağ	(Kahraman ve Yilmaz 2017)
(254 nm)	1000	50 – 70	82,4 – 62,7	Sağ	(Kahraman ve Yilmaz 2018)
	100	50 – 70	78,9 – 59,2	Sağ	
HfO ₂					
(100 nm)	100	1500	-	Sağ	(Kaya ve ark. 2018)
(180 nm)	1000	480	~1,93	Sağ	(Srinivasan ve Pandya 2011)
HfSiO ₄ (300nm)	1000	70	4,41	Sağ	(Lok ve ark. 2017)
Sm ₂ O ₃ (120 nm)	1000	30	10	Sol	(Kaya ve ark. 2015)
	100	30	-	Sağ	
Y ₂ O ₃ (150 nm)	1000	128	10,8	Sol	(Abubakar ve ark. 2017)

Çizelge 4.6’ dan görüldüğü gibi RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS kapasitörünün C – V eğrisi RF magnetron saçtırma sistemi ile üretilen Yb₂O₃(114 nm)/p-Si MOS tabanlı aygıtın elektriksel karakteristiği gibi sürekli olarak sola hareket etmesine rağmen duyarlılığı oldukça küçüktür. Yb₂O₃(114 nm)/p-Si MOS kapasitörde 100 kHz ve 1 MHz’ de ΔN_{it} , genellikle 0,5 – 70 Gy doz aralığında 10^9 mertebesinde değişim gösterirken, ΔN_{ox} sürekli artarak $\sim 10^{12}$ düzeyinde değerler almıştır (Kahraman ve Yilmaz 2017c). RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS kapasitöründe ΔN_{it} ’ lerin ΔN_{ox} ’ ler ile benzer değerler alması aygıtın performansını büyük ölçüde etkilemiştir. 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörün duyarlılığı Yb₂O₃(114 nm)/p-Si MOS tabanlı aygıtla kıyasla daha yüksek olmasına rağmen C – V eğrilerinin ışınlama ile birlikte sürekli olarak sağa doğru kayması RadFET radyasyon sensörlerinde bu yapının kullanılmayacağını göstermektedir. Şekil 4.17’ de V_D ’ nin bulunmasında kullanılan $C_c^{-2} - V$ eğrilerinin tükenim bölgelerindeki doğrusal değişim verilmektedir. Çizelge 4.7’ de RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörleri için ışınlama sonrası bariyer yüksekliği

değerleri ve bunların hesaplanmasında kullanılan parametreler görülmektedir. RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) MOS kapasitöründe 100 kHz ve 1 MHz için artan radyasyon dozuyla birlikte bariyer yüksekliğinin artması alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin verici-tipi arayüzey seviyelerine kıyasla etkinliklerini giderek arttırdıklarını göstermektedir. 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitöründe ise radyasyon dozu, verici-tipi arayüzey seviyelerinin alıcı-tipi arayüzey seviyelerine kıyasla etkinliğini arttırmış ve bunun sonucunda ϕ_B değerleri sürekli olarak azalmıştır.



Şekil 4.17. MOS kapasitörlerin $C_c^{-2} - V$ eğrileri; a) RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)-100 kHz, b) RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)-1 MHz, c) 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)-100 kHz, d) 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)-1 MHz

Çizelge 4.7. RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) kapasitörleri için ışınlama sonrası hesaplanan elektriksel parametreler

Yapı		RT-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)					200 °C-Yb ₂ O ₃ /SiO ₂ (36nm)				
Frekans (kHz)	Doz (Gy)	V _D (eV)	N _d × 10 ¹⁵ (cm ⁻³)	E _F (eV)	φ _B (eV)	Δφ _B (meV)	V _D (eV)	N _d × 10 ¹⁵ (cm ⁻³)	E _F (eV)	φ _B (eV)	Δφ _B (meV)
100	0	1,8	3,79	0,225	2,0	23,6	7,8	10,6	0,199	7,9	44,2
	1	1,9	3,93	0,224	2,2	24,3	5,5	9,6	0,202	5,7	39,5
	2	2,1	3,96	0,224	2,3	24,8	5,4	11,0	0,198	5,5	40,6
	4	2,2	4,04	0,224	2,4	25,2	5,1	10,3	0,200	5,3	39,5
	8	2,2	4,05	0,224	2,4	25,4	4,8	10,4	0,200	4,9	38,8
	16	2,3	3,90	0,224	2,5	25,2	4,3	10,1	0,200	4,5	37,6
	80	2,5	5,72	0,215	2,7	28,3	3,8	11,1	0,198	4,0	37,4
	500	3,8	4,07	0,223	4,0	29,0	3,6	11,1	0,198	3,8	36,8
1000	0	1,0	4,93	0,219	1,2	21,6	7,8	11,6	0,197	7,9	45,1
	1	1,1	5,10	0,218	1,3	22,6	5,3	11,4	0,197	5,5	40,8
	2	1,2	5,20	0,217	1,4	23,1	5,2	12,1	0,196	5,3	41,2
	4	1,3	5,17	0,217	1,5	23,6	4,8	11,6	0,197	5,0	40,1
	8	1,4	5,22	0,217	1,6	23,9	4,5	12,1	0,196	4,7	39,7
	16	1,6	5,23	0,217	1,8	24,7	3,9	12,6	0,195	4,0	38,7
	80	1,8	5,18	0,217	2,0	25,6	3,5	12,8	0,194	3,6	37,8
	500	3,1	5,00	0,218	3,3	29,0	3,2	14,3	0,192	3,3	38,0

5. SONUÇ

Kuru oksidasyon ile büyütülmüş 20 ve 36 nm kalınlığındaki SiO₂ tabakalarının üzerine EB-PVD yöntemi ile ~100 nm kalınlığında Yb₂O₃ depozite edilerek Yb₂O₃/SiO₂/n-Si yığın oksit tabakası üretilmiştir. Radyasyon sensörlerinde muhtemel yüksek-*k* kapı dielektriği uygulamaları için öncelikle Yb₂O₃/SiO₂/n-Si ince filmlerinin yapısal analizi yapılmış, daha sonra üretilen Al/Yb₂O₃/SiO₂/n-Si/Al MOS kapasitörlerinin elektriksel karakteristikleri ve radyasyon cevapları incelenmiştir. XRD analizleri sonucunda Yb₂O₃/SiO₂ ince filmlerinde SiO₂' nin herhangi bir fazı bulunmamış, Yb₂O₃' ün kübik kristal yapıda olduğu belirlenmiştir. Yb₂O₃/SiO₂/n-Si (20nm) ve Yb₂O₃/SiO₂/n-Si(36 nm) yapıları için 800 °C tavlama sıcaklığında en küçük tanecik boyutu elde edilmiştir. Al/Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al ve Al/Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al MOS kapasitörlerinin elektriksel karakterizasyonu, ölçülen C – V ve G/ω – V eğrileri üzerinden frekansa ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak detaylı bir şekilde yapılmıştır. Kapasitörlerin yığılım bölgesi kapasitans değerleri, frekansa bağlı olarak küçük miktarlarda değişim gösterirken tavlama sıcaklığına bağlı olarak önemli ölçüde bir değişim gerçekleşmiştir. Her iki aygıt için de dielektrik sabiti, RT' de en yüksek 400 °C' de ise en düşük değerini almıştır. En yüksek N_{it} değerleri RT ile tavllanmış yapılar ile üretilen MOS kapasitörlerden elde edilmiştir. Arayüzey seviye yoğunluğunda frekansa bağlı olarak meydana gelen değişim miktarı, 800 °C' de tavllanmış Al/Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al kapasitöründe en düşük ve 400 °C' de tavllanmış Al/Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al kapasitöründe en yüksektir. Dielektrik sabitinin N_{it} ' e, –OH vb. hidroksil türleri içeriğine ve silikat benzeri arayüzey oluşumuna bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Seri direnç değerleri, her iki aygıtta da artan AC voltaj frekansı ile birlikte azalmıştır.

Al/Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al kapasitörü için Q_{eff} değerleri frekansa bağlı olarak sürekli bir artış veya azalış göstermemiştir. 600 °C için bütün frekanslarda, 800 °C için 50 kHz' de ve RT için 50, 500, 750 ve 1000 kHz' de oksit tabaka içinde baskın olarak negatif yükler tuzaklandığından Q_{eff} negatif değer almıştır. Al/Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al kapasitörü için ise Q_{eff} değerlerinde frekansa bağlı bir değişim neredeyse gözlenmemiştir. Bu kapasitör için RT, 600 °C ve 800 °C' de pozitif yükler negatiflere kıyasla oksit tabakada daha fazla tuzaklanmıştır.

Al/Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si/Al ve Al/Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si/Al kapasitörleri için frekansa ve tavlama sıcaklığına bağlı farklı davranışlar gösteren ϕ_B , her iki aygıt için de en yüksek değerleri 800 °C’ de almıştır. 800 °C’ de gerçekleşen bu artış alıcı-tipi arayüzey seviyelerinin verici-tipi arayüzey seviyeleri ile karşılaştırıldığında elektriksel karakteristikler üzerinde daha aktif olduklarını göstermiştir.

Radyasyon cevaplarının araştırılması için seçilen RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm)/n-Si ve 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm)/n-Si kapasitörleri, 1 – 500 Gy doz aralığında ⁶⁰Co kaynağı ile ışınlanmıştır. Düşük (100 kHz) ve yüksek (1 MHz) frekanslarda ölçülen C – V eğrilerinde artan dozla birlikte düz-bant voltajları, RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) kapasitörü için sürekli sola doğru ve 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) kapasitörü için sürekli sağa doğru kaymıştır. RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) kapasitöründe artan dozla birlikte arayüzey seviye yoğunluğu ve oksit tuzak yük yoğunluğu artmıştır. 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) kapasitöründe ise artan doz ile oksit tuzak yük yoğunluğu artarken arayüzey seviye yoğunluğu benzer düzeyde kalmıştır. Doz – kalibrasyon eğrilerinden hesaplanan radyasyon duyarlılıkları, 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörünün diğer kapasitöre kıyasla daha duyarlı olduğunu göstermiştir. RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) kapasitörü için ΔN_{it} ve ΔN_{ox} değerlerindeki değişim miktarının benzer düzeyde kalması aygıt performansını etkileyerek kalibrasyon eğrisinin RadFET’ lerin kalibrasyon eğrisi ile düşük oranda uyum göstermesine neden olmuştur. 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) kapasitöründe yapıya uygulanan 200 °C tavlama sıcaklığı Yb³⁺ ve Yb²⁺ elektron tuzak merkezlerinde artışa neden olmuş ve tuzaklanan negatif yük miktarı baskın hale gelerek eğri sağa doğru kaymıştır.

Nadir toprak oksitleri yüksek ölçüde nem tutma özelliğine sahip olduklarından dolayı uygun bir elektronik paket içerisine yerleştirilerek hava ile temaslarının önlenmesi son derece önemlidir. Yb₂O₃ ile Si arasına büyütülen SiO₂ tabakasının arayüzey kalitesini geliştirdiği belirlenmiştir. EBPVD yöntemi ile üretilen Yb₂O₃ filminin RF magnetron saçtırma ile üretilene kıyasla daha az efektif oksit tuzak yük yoğunluğuna sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte RT-Yb₂O₃/SiO₂(20nm) ve 200 °C-Yb₂O₃/SiO₂(36nm) MOS kapasitörlerinde artan radyasyon dozuyla birlikte oluşan N_{it} değerlerindeki yükseliş ve elektron tuzak merkezi artışı problemlerinin giderilmesine yönelik araştırmalar devam etmelidir. Bu amaca yönelik ileriki çalışmalarda filmin azot yerine oksijen ya da hidrojen

ile tavlanaarak tuzak merkezi tiplerinin değiştirilmesi sağlanabilir. Ayrıca XPS analizleri ile tavlama ve ışınlama sonrası bağ oluşumlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesi tuzak merkezi tiplerinin tanımlanmasında yarar sağlayabilir.

KAYNAKLAR

Abubakar, S., Kaya, S., Karacali, H., Yilmaz, E. 2017. The gamma irradiation responses of yttrium oxide capacitors and first assessment usage in radiation sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 258: 44-48.

Alshaikh, S., Carolan, M., Petasecca, M., Lerch, M., Metcalfe, P., Rosenfeld, A. 2014. Direct and pulsed current annealing of p-MOSFET based dosimeter: the "MOSkin". *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 37(2): 311-319.

Anonim, 2020a.

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/decaysearchdirect.jsp?nuc=60CO&unc=nds>-(Erişim tarihi: 01.05.2020).

Anonim, 2020b.

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=27&n=33>-(Erişim tarihi: 01.05.2020).

Beck, P., Bock, F., Bock, H., Latocha, M., Price, R.A., Rollet, S., Wind, M. 2007. Investigations on Photon Energy Response of RadFET Using Monte Carlo Simulations. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 54(4): 1151-1157.

Brammertz, G., Lin, H.C., Martens, K., Mercier, D., Merckling, C., Penaud, J., Adelman, C., Sioncke, S., Wang, W.E., Caymax, M., Meuris, M., Heyns, M. 2008. Capacitance-Voltage (CV) Characterization of GaAs-Oxide Interfaces. *ECS Transactions*, 16(5): 507-519.

Breeden, M., Wolf, S., Ueda, S., Fang, Z., Chang, C.-Y., Tang, K., McIntyre, P., Kummel, A.C. 2019. Al₂O₃/Si_{0.7}Ge_{0.3}(001) & HfO₂/Si_{0.7}Ge_{0.3}(001) interface trap state reduction via in-situ N₂/H₂ RF downstream plasma passivation. *Applied Surface Science*, 478: 1065-1073.

Bülbül, M.M., Altındal, ř., Parlaktürk, F., Tataroğlu, A., 2011. The density of interface states and their relaxation times in Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si(MFIS) structures. *Surface and Interface Analysis*, 43: 1561-1565.

Evans, R.D. 1955. The Atomic Nucleus. McGraw-Hill, New York, 972pp.

Fleetwood, D.M., Winokur, P.S., Riewe, L.C., Flament, O., Paillet, P., Leray, J.L. 1999. The role of electron transport and trapping in MOS total-dose modeling. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 46(6), 1519-1525.

Gavelle, M., Sarrabayrouse, G., Scheid, E., Siskos, E., Fragopoulou, M., Zamani, M. 2011. MOSFET with a boron-loaded gate as a low-energy neutron dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 80: 1437-1440.

Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz, M.J. 1976. Interface states on semiconductor/insulator surfaces. *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6(1): 226-233.

- Griscom, D.L. 1991.** Optical Properties and Structure of Defects in Silica Glass. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 99: 923-942.
- Guo, Z., Liu, A., Meng, Y., Fan, C., Shin, B., Liu., G., Shan, F. 2017.** Solution-processed ytterbium oxide dielectrics for low-voltage thin-film transistors and inverters. *Ceramics International*, 43: 15194-15200.
- Haran, A., Jaksic, A., Refaeli, N., Eliyahu, A., David, D., Barak, J. 2004.** Temperature effects and long term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(5): 2917-2921.
- Helms, C.R., Poindexter, E.H., 1994.** The silicon-silicon-dioxide system: its microstructure and imperfections. *Reports on Progress in Physics*, 57(8): 791-852.
- Hill, W.A., Coleman, C.C. 1980.** A single-frequency approximation for interface state density determination. *Solid State Electron.*, 23(9): 987-993.
- Hourdakis, E., Casanova, A., Larrieu, G., Nassiopoulou, A.G. 2018.** Three-dimensional vertical Si nanowire MOS capacitor model structure for the study of electrical versus geometrical Si nanowire characteristics. *Solid-State Electronics*, 143: 77-82.
- Houssa, M. 2004.** High-k Gate Dielectrics. Institute of Physics Publishing, London, 614 pp.
- Houssa, M., Pantisano, L., Ragnarsson, L.-A., Degraeve, R., Schram, T., Pourtois, G., De Gendt, S., Groeseneken, G., Heyns, M.M. 2006.** Electrical properties of high-k gate dielectrics: Challenges, current issues, and possible solutions. *Materials Science and Engineering: Reports*, 51: 37-85.
- Jaksic, A., Ristic, G., Pejovic, M., Mohammadzadeh, A., Lane, W. 2002.** Characterisation of radiation response of 400 nm implanted gate oxide RADFETs. Proceedings of 23rd International Conference on Microelectronics (MIEL), 2002, IEEE, Nis, 727-730.
- Jornet, N., Carrasco, P., Jurado, D., Ruiz, A., Eudaldo, T., Ribas, M. 2004.** Comparison study of MOSFET detectors and diodes for entrance in vivo dosimetry in 18 MV x-ray beams. *Medical Physics*, 31(9): 2534-2542.
- Kahraman, A., Kaya, S., Jaksic, A., Yilmaz, E. 2015a.** A comprehensive study on the photon energy response of RadFET dosimeters using the PENELOPE Monte Carlo code. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 170(5): 367-376.
- Kahraman, A., Yilmaz, E., Kaya, S., Aktag, A. 2015b.** Effects of packing materials on the sensitivity of RadFET with HfO₂ gate dielectric for electron and photon sources. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 170(10): 832-844.

- Kahraman, A., Yilmaz, E., Kaya, S., Aktag, A. 2015c.** Effects of post deposition annealing, interface states and series resistance on electrical characteristics of HfO₂ MOS capacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26: 8277-8284.
- Kahraman, A., Yilmaz, E. Aktag, A., Kaya, S. 2016.** Evaluation of Radiation Sensor Aspects of Er₂O₃ MOS Capacitors under Zero Gate Bias. *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, 63(2): 1284-1293.
- Kahraman, A., Yilmaz, E. 2017a.** Farklı B⁺ İmplantasyon Koşulları için RadFET'lerin Elektriksel Karakterizasyonunun TCAD Benzetim Programı ile İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(2): 53-64.
- Kahraman, A., Yilmaz, E. 2017b.** Evaluation of the pre-irradiation electrical characteristics of the RadFET dosimeters with diverse gate oxides by TCAD simulation program. *Sakarya University Journal of Science*, 21(6): 1258-1265.
- Kahraman, A., Yilmaz, E. 2017c.** Proposal of alternative sensitive region for MOS based radiation sensors: Yb₂O₃. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 35: 061511.
- Kahraman A., Yilmaz, E. 2017d.** Irradiation response of radio-frequency sputtered Al/Gd₂O₃/p-Si MOS capacitors. *Radiation Physics and Chemistry*, 139: 114-119.
- Kahraman, A. 2018.** Understanding of post deposition annealing and substrate temperature effects on structural and electrical properties of Gd₂O₃ MOS capacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29: 7993-8001.
- Kahraman, A., Gurer, U., Lok, R., Kaya, S., Yilmaz, E. 2018.** Impact of interfacial layer using ultra-thin SiO₂ on electrical and structural characteristics of Gd₂O₃ MOS capacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29: 17473-17482.
- Kahraman, A., Yilmaz, E. 2018.** Ara yüzey seviyelerinin ve seri direncin Sc₂O₃ MOS kapasitörünün elektriksel karakteristiği üzerine etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(3): 915-921.
- Kahraman, A., Yilmaz, E. 2018.** A comprehensive study on usage of Gd₂O₃ dielectric in MOS based radiation sensors considering frequency dependent radiation response. *Radiation Physics and Chemistry*, 152: 36-42.
- Kahraman, A., Karacali, H., Yilmaz, E. 2020a.** Impact and origin of the oxide-interface traps in Al/Yb₂O₃/n-Si/Al on the electrical characteristic. *Journal of Alloys and Compounds*, 825: 154171.
- Kahraman, A., Deevi, S.C., Yilmaz, E. 2020b.** Influence of frequency and gamma irradiation on the electrical characteristics of Er₂O₃, Gd₂O₃, Yb₂O₃, and HfO₂ MOS-based devices. *Journal of Materials Science*, 55(81):1-42.

- Karataş, Ş. Türüt, A. 2010.** The frequency-dependent electrical characteristics of interface states in the Sn/p-Si metal semiconductor structures, *Microelectronics Reliability*, 50: 351-355.
- Kaya, S., Yilmaz, E. 2014.** Influences of Co-60 gamma-ray irradiation on electrical characteristics of Al₂O₃ MOS capacitors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 302(1): 425-431.
- Kaya, S., Lok, R., Aktag, A., Seidel, J., Yilmaz, E. 2014.** Frequency dependent electrical characteristics of BiFeO₃ MOS capacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 583: 476-480.
- Kaya, S., Yilmaz, E. 2015.** A Comprehensive Study on the Frequency-Dependent Electrical Characteristics of Sm₂O₃ MOS Capacitors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(3): 980-987.
- Kaya, S., Yilmaz, E., Kahraman, A., Karacali, H. 2015.** Frequency dependent gamma-ray irradiation response of Sm₂O₃ MOS capacitors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 358: 188-193.
- Kaya, S., Yilmaz, E. 2018.** Modifications of structural, chemical, and electrical characteristics of Er₂O₃/Si interface under Co-60 gamma irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 418: 74-79.
- Kaya, S., Yıldız, I., Lok, R. Yilmaz, E. 2018.** Co-60 gamma irradiation influences on physical, chemical and electrical characteristics of HfO₂/Si thin films. *Radiation Physics and Chemistry*, 150: 64-70.
- Kaymak, N., Efil, E., Seven, E., Tataroğlu, A., Ocak, S.B., Orhan, E. 2020.** Effects of temperature and frequency on capacitance and conductance characteristics of zinc-oxide based MIS-Structure. *Pyhsica B*, 576: 411721.
- Khairnar, A.G., Mahajan, A.M. 2013.** Effect of post-deposition annealing temperature on RF-sputtered HfO₂ thin film for advanced CMOS technology. *Solid State Sciences*, 15: 24-28.
- Kim, Y., Park, K.H., Chung, T.H., Bark, H.J., Yi, J.-Y., Choi, W.C., Kim, E.K., Lee, J.W., Lee, J.Y. 2001.** Ultralarge capacitance–voltage hysteresis and charge retention characteristics in metal oxide semiconductor structure containing nanocrystals deposited by ion-beam-assisted electron beam deposition. *Applied Physics Letters*, 78(7): 934-936.
- Kim, D.H., Lim, D. 2010.** Charge Trapping Behavior of Rare-earth Ion-doped Al₂O₃ and Its Application to Nonvolatile Memories. *Journal of the Korean Physical Society*, 57(6): 1444-1448.
- Knoll, G.F. 1999.** Radiation detection and measurement. 3rd Ed., John Wiley and Sons, New York, 802 pp.

- Koleshko, V.M., Babushkina, N.V. 1979.** Properties of Rare Earth Oxide Films. *Thin Solid Films*, 62: 1-4.
- Konofaos, N. 2004.** Electrical characterisation of SiON/n-Si structures for MOS VLSI electronics. *Microelectronics Journal*, 35: 421-425.
- Krane, K.S. 2001.** Nükleer Fizik 1.Cilt. Palme Yayıncılık, Ankara, 839 s.
- Langford, J.I., Wilson, J.C. 1978.** Scherrer after Sixty Years: A Survey and Some New Results in the Determination of Crystallite Size. *Journal of Applied Crystallography*, 11: 102-113.
- Lok, R., Kaya, S., Karacali, H., Yilmaz, E. 2017.** The Co-60 gamma-ray irradiation effects on the Al/HfSiO₄/p-Si/Al MOS capacitors. *Radiation Physics and Chemistry*, 141: 155-159.
- Lok, R., Kaya, S., Yilmaz, E. 2018.** Thermal phase separation of ZrSiO₄ thin films and frequency- dependent electrical characteristics of the Al/ZrSiO₄/p-Si/Al MOS capacitors. *Semiconductor Science and Technology*, 33: 055007.
- Luo, G.-W., Qi, Z.-Y., Deng, X.-W., Rosenfeld, A. 2014.** Investigation of a pulsed current annealing method in reusing MOSFET dosimeters for in vivo IMRT dosimetry. *Medical Physics*, 41(5): 051710.
- Ma, T.P., Dressendorfer, P.V. 1989.** Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. John Wiley and Sons, New York, pp: 87-231.
- McWhorter, P.J., Winokur, P.S., Pastorek, R.A. 1988.** Donor/acceptor nature of radiation-induced interface traps. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 35(6): 1154-1159.
- Martinez-Garcia, M.S., Simancas, F., Palma, A.J., Lallena, A.M., Banqueri, J., Carvajal, M.A. 2014.** General purpose MOSFETs for the dosimetry of electron beams used in intraoperative radiotherapy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 210: 175-181.
- Martinez-Garcia, M.S., del Rio, J.T., Jaksic, A., Banqueri, J., Carvajal, M.A. 2016.** Response to ionizing radiation of different biased and stacked pMOS structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 252: 67-75.
- McLean, F.B., Oldham, T.R. 1987.** Basic mechanisms of radiation effects in electronic materials and devices. HDL-TR-2129, Harry Diamond Labs, Adelphi, MD.
- Mekki, J., Laurent, D., Glaser, M., Guatelli, S., Moll, M., Pia, M.G., Ravotti, F. 2009.** Packaging effects on RadFET sensors for high energy physics experiments. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56: 2061-2069.

- Morkoc, B., Kahraman, A., Aktag, A., Yilmaz, E. 2019.** Electrical Parameters of the Erbium Oxide MOS Capacitor for Different Frequencies. *Celal Bayar University Journal of Science*, 15(2): 139-143.
- Neamen, D.A. 1997.** Semiconductor Physics and Devices. 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, pp: 420-450, 517-523.
- Nicollian, E.H., Goetzberger, A., 1967.** The Si-SiO₂ interface – electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon conductance technique. *The Bell System Technical Journal*, 46(6): 1055-1133.
- Nicollian, E.H., Brews, J.R. 1982.** MOS Physics and Technology. John Wiley and Sons, New York, pp: 40-175, 222-226, 423-439.
- Niu, G., Vilquin, B., Baboux, N., Plossu, C., Becerra, L., Saint-Grions, G., Hollinger, G., 2009.** Growth temperature dependence of epitaxial Gd₂O₃ films on Si (111). *Microelectronic Engineering*, 86: 1700-1702.
- Novkovski, N., Paskaleva, A., Skeparovski, A., Spassov, D. 2018.** Analysis of Conduction and Charging Mechanisms in Atomic Layer Deposited Multilayered HfO₂/Al₂O₃ Stacks for Use in Charge Trapping Flash Memories. *Advances in Condensed Matter Physics*, 1-9.
- O'Connell, B., Kelleher, A., Lane, W. 1996.** Stacked RADFETs for increased radiation sensitivity. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 43: 985-990.
- Ohmi, S., Kobayashi, C., Kashiwagi, I., Ohshima, C., Ishiwara, H., Iwai, H. 2003.** Characterization of La₂O₃ and Yb₂O₃ Thin Films for High-k Gate Insulator Application. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(7): F134-F140.
- Oldham, T.R. 2003.** Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(3): 483-499.
- Othman, M.A.R., Cutajar, D.L., Hardcastle, N., Guatelli, S., Rosenfeld, A.B. 2010.** Monte Carlo Study of MOSFET Packaging, Optimized for Improved Energy Response: Single MOSFET Filtration. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(1): 10-17.
- Panettieri, V., Duch, M.A., Jornet, N., Ginjaume, M., Carrasco, P., Badal, A., Ortega, X., Ribas, M. 2006.** Monte Carlo simulation of MOSFET detectors for high-energy photon beams using the PENELOPE code. *Physics in Medicine and Biology*, 52(1): 303-316.
- Park, D., Kim, M., Beom, K., Cho, S.-Y., Kang, C. J., Yoon, T.-S. 2019.** Reversible capacitance changes in the MOS capacitor with an ITO/CeO₂/p-Si structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 786: 655-661.

- Pejovic, M.M., Pejovic, M.M., Jaksic, A. 2012a.** Contribution of fixed oxide traps to sensitivity of pMOS dosimeters during gamma ray irradiation and annealing at room and elevated temperature. *Sensors and Actuators A: Physical*, 174: 85-90.
- Pejovic, M.M., Pejovic, M.M., Jaksic, A.B., Stankovic, K.Dj., Markovic, S.A. 2012b.** Successive gamma-ray irradiation and corresponding post-irradiation annealing of PMOS dosimeters. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 27(4): 341-345.
- Pejovic, M.M., Osmokrovic, P., Pejovic, M., Stankovic, K. 2012c.** Influence of Ionizing Radiation and Hot Carrier Injection on Metal-Oxide-Semiconductor Transistors: Current Topics in Ionizing Radiation Research, Editor: Neno, M., InTech, pp: 761-816.
- Pejovic, M.M. 2016.** P-Channel MOSFET as a Sensor and Dosimeter of Ionizing Radiation. *Electronics and Energetics*, 29(4): 509-541.
- Pines, D. 1999.** Elementary Excitations in Solids. 1st Ed., CRC Press, 312 pp.
- Price, R.A., Benson, C., Joyce, M.J., Rodgers, K. 2004.** Development of a RadFET linear array for intracavitary in vivo dosimetry during external beam radiotherapy and brachytherapy. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(4): 1420-1426.
- Rideau, D., Scheer, P., Roy, D., Gouget, G., Minondo, M., Juge, A. 2003.** Series resistance estimation and C(V) measurements on ultra thin oxide MOS capacitors. International Conference on Microelectronic Test Structures, 17-20 Mart 2003, Monterey, USA.
- Ristic, G.S., Pejovic, M.M., Jaksic, A.B. 2003.** Comparison between post-irradiation annealing and post-high electric field stress annealing of n-channel power VDMOSFETs. *Applied Surface Science*, 220: 181-185.
- Ristic, G.S., Pejovic, M.M., Jaksic, A.B. 2006.** Defect behaviors in n-channel power VDMOSFETs during HEFS and thermal post-HEFS annealing. *Applied Surface Science*, 252: 3023-3032.
- Ristic, G.S., Pejovic, M.M., Jaksic, A.B. 2007.** Physico-chemical processes in metal-oxide-semiconductor transistors with thick gate oxide during high electric field stress. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(2): 170-179.
- Ristic, G.S. 2008.** Influence of ionizing radiation and hot carrier injection on metal-oxide-semiconductor transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(2): 023001.
- Ristic, G.S. 2009.** Thermal and UV annealing of irradiated pMOS dosimetric transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42: 135101.
- Ristic, G.S., Vasovic, N.D., Kovacevic, M., Jaksic, A.B. 2011.** The sensitivity of 100 nm RADFETs with zero gate bias up to dose of 230 Gy(Si). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 269: 2703-2708.

- Robertson, J. 2006.** High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors. *Reports on Progress in Physics*, 69(2): 327-396.
- Robertson, J., Wallace, R.M. 2015.** High-K materials and metal gates for CMOS applications. *Materials Science and Engineering R*, 88: 1-41.
- Rosenfeld, A.B., Carolan, M.G., Kaplan, G.I., Allen, B.J., Khivrich, V.I. 1995.** MOSFET dosimeters: the role of encapsulation on dosimetric characteristics in mixed gamma-neutron and megavoltage x-ray fields. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 42: 1870-1877.
- Rosenfeld, A.B. 2007.** Electronic dosimetry in radiation therapy. *Radiation Measurements*, 41: S134-S153.
- Sah, C.T. 1976.** Origin of Interface States and Oxide Charges Generated by Ionizing Radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 23(6): 1563-1568.
- Schroder, D.K. 2006.** Semiconductor Material and Device Characterization. 3rd Ed., John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 840 pp.
- Seon, J., Kim, S.-J., Sung, B.-I., Marri, S.A., Lee, S.-H. 2010.** A small space radiation monitor capable of measuring multiple ISD-VGS values of MOSFET. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47: 340-344.
- Singh, V., Shashank, N., Kumar, D., Nahar, R. 2011.** Investigation of the interface trap density and series resistance of a high-k HfO₂-based MOS capacitor: before and after 50 MeV Li³⁺ ion irradiation, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 166(2): 80-88.
- Soliman, F.A.S., Al-Kabbani, A.S.S., Sharshar, K.A.A., Rageh, M.S.I. 1995.** Characteristics and radiation effects of MOS capacitors with Al₂O₃-based layers in p-type silicon. *Applied Radiation and Isotopes*, 46(5): 355-361.
- Srinivasan, V.S.S., Pandya, A. 2011.** Dosimetry aspects of hafnium oxide metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitor. *Thin Solid Films*, 520: 574-577.
- Sze, M.S., Ng K.K. 2007.** Physics of Semiconductor Devices. 3rd Ed., John Wiley and Sons, New Jersey, 815 pp.
- Tan, T., Liu, Z., Lu, H., Liu, W., Yan, F. 2009.** Chemical structure and electrical properties of sputtered HfO₂ films on Si substrates annealed by rapid thermal annealing. *Vacuum*, 83: 1155-1158.
- Tao, J., Zhao, C.Z., Zhao, C., Taechakumput, P., Werner, M., Taylor, S., Chalker, P.R. 2012.** Extrinsic and Intrinsic Frequency Dispersion of High-k Materials in Capacitance-Voltage Measurements. *Materials*, 5(12): 1005-1032.
- Tataroğlu, B., Altındal, Ş, Tataroğlu, A. 2006.** The C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures. *Microelectronic Engineering*, 83: 2021-2026.

- Tataroğlu, A., Al-Ghamdi, A.A., El-Tantawy, F., Farooq, W.A., Yakuphanoglu, F. 2016.** Analysis of interface states of FeO-Al₂O₃ spinel composite film/p-Si diode by conductance technique. *Applied Physics A*, 122: 220-226.
- Tian, Z., Zheng, L., Li, Z., Wang, J. 2016.** Exploration of the low thermal conductivities of γ -Y₂Si₂O₇, β -Y₂Si₂O₇, β -Yb₂Si₂O₇, and β -Lu₂Si₂O₇ as novel environmental barrier coating candidates. *Journal of the European Ceramic Society*, 36: 2813-2823.
- Toumi, S., Ouennoughi, Z., Murakami, K. 2020.** Effect of temperature on the Fowler-Nordheim barrier height, flat band potentials and electron/hole effective masses in the MOS capacitors. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 585: 412125.
- Tsoufanidis, N., Landsberger, S. 2015.** Measurement and Detection of Radiation. 4th Ed., CRC Press, 606 pp.
- Wang, S., Liu, P., Zhang, J. 2013.** Simulation of threshold voltage adjustment by B+ implantation for pMOS-RADFET application. 8th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2013, IEEE, Suzhou, 262-265.
- Weeks, R.A. 1956.** Paramagnetic Resonance of Lattice Defects in Irradiated Quartz. *Journal of Applied Physics*, 27(11): 1376-1381.
- Wiktorczyk, T., Wesolowska, C. 1980.** Dielectric Properties of Ytterbium Oxide Films Deposited by Electron Beam Evaporation. *Thin Solid Films*, 71: 15-21.
- Wilk, G.D., Wallace, R.M., Anthony, J.M. 2001.** High-k gate dielectrics: Current status and materials properties considerations. *Journal of Applied Physics*, 89(10): 5243-5275.
- Wind, M., Beck, P., Jaksic, A. 2009.** Investigation of the Energy Response of RADFET for High Energy Photons, Electrons, Protons, and Neutrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56(6): 3387-3392.
- Xia, P., Feng, X., Ng, R.J., Wang, S., Chi, D., Li, C., He, Z., Li, X., Ang, K.-W. 2017.** Impact and Origin of Interface States in MOS Capacitor with Monolayer MoS₂ and HfO₂ High-k Dielectric. *Scientific Reports*, 7(1): 40669.
- Xiao, H., Huang, S. 2010.** Frequency and voltage dependency of interface states and series resistance in Al/SiO₂/p-Si MOS structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13: 395-399.
- Yilmaz, E., Kaleli, B., Turan, R. 2007.** A systematic study on MOS type radiation sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 264: 287-292.
- Yilmaz, E., Doğan, İ., Turan, R. 2008.** Use of Al₂O₃ layer as a dielectric in MOS based radiation sensors fabricated on a Si substrate. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 266: 4896-4898.

Yilmaz, E., Kaya, S. 2016. A Detailed Study on Zero-Bias Irradiation Responses of La_2O_3 MOS Capacitors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 63(2): 1301-1305.

Yue, S., Wei, F., Wang, Y., Yang, Z., Tu, H., Du, J. 2008. Phase control of magnetron sputtering deposited Gd_2O_3 thin films as high-k gate dielectrics. *Journal of Rare Earths*, 26(3): 371-374.

Zhao, Y., Kita, K., Toriumi, A. 2010. Thermodynamic analysis of moisture absorption phenomena in high-permittivity oxides as gate dielectrics of advanced complementary-metal-oxide-semiconductor devices. *Applied Physics Letters*, 96: 242901.

Zhao, S.E., Jiang, R., Zhang, E.X., Liao, W., Liang, C., Fleetwood, D.M., Schrimpf, R.D., Reed, R.A., Linten, D., Mitard, J., Collaert, N., Sioncke, S., Waldron, N. 2018. Capacitance–Frequency Estimates of Border-Trap Densities in Multifin MOS Capacitors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 65: 175-183.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Berk MORKOÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 24.09.1992
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa İMKB Gürsu Anadolu Lisesi, 2010
Lisans : Yıldız Teknik Üni., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Böl., 2017

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Teknik Üniversitesi, Araştırma Görevlisi

İletişim (e-posta) : bergmorkoc@gmail.com

Yayımları :

Morkoc, B., Kahraman, A., Aktag, A., Yilmaz, E. 2019. Electrical Parameters of the Erbium Oxide MOS Capacitor for Different Frequencies. *Celal Bayar University Journal of Science*, 15(2): 139-143.

Morkoc, B., Kahraman, A., Yegen, D., Yilmaz, E. 2019. Evaluation of the RadFET Radiation Sensor Performance in 18 MV-External Beam. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(3): 309-318.

Kahraman, A., Morkoc, B., Mutale, A., Gurer, U., Yilmaz, E. 2019. Irradiation Effect on Er₂O₃/n-Si Structure under High Gamma-Ray Dose. *RAP Conference Proceedings*, 4: 152-155.