



**VANADYUM OKSİT İNCE FİMLERİN OPTİK SENSÖRLERİN
ALGILAMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Adem SARAÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Adem SARAÇ

29/11/2021

VANADYUM OKSİT İNCE FİLMLERİN OPTİK SENSÖRLERİN ALGILAMA
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Adem SARAÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2021

ÖZET

Bu çalışmada, VOx arayüzün diyot ve sensör parametreleri üzerine etkisinin araştırılması Au/n-Si ve Au/VOx/n-Si örnekleri üretildi. İnce filmler, magnetron sıçratma sistemi kullanılarak büyütüldü. Cihazın yüzey morfolojisi SEM kullanılarak gözlemlendi ve XRD ve EDS kullanılarak yapısal karakterizasyon araştırıldı. Bu analizler, n-Si yüzeyinde homojen olarak kaplanmış VOx ince film olduğunu gösterdi. Au/VOx/n-Si/Au cihazının akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ω-V) karakteristikleri 1 kHz ile 1 MHz frekans aralığında +4V ile -4V besleme voltajları arasında oda sıcaklığında ölçüldü. Deneysel sonuçlar, Au/VOx/n-Si/Au cihazının elektriksel özelliklerinin frekans ve bias gerilimi ile yakın bir ilişkisi olduğunu gösterdi. Cihazın kapasitans değeri VOx etkisi ile 2.5×10^{-9} F'den 4.5×10^{-9} F'ye yükseldi ve kapasitans artışı sonucunda dielektrik sabiti 3000'den 5000'e yükseldi. Ayrıca, her iki numune de 300 K-500 K sıcaklık aralığında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında C-V ve G-V ölçümleri yapıldı ve aygıt performansının sıcaklığa bağlı olduğu anlaşıldı. Karşılaştırma için oluşturulmuş ve metal oksit yapısı VOx etkisi ile yüksek dielektrik katsayısına sahip bir aygıt olarak başarıyla kullanılabileceği gösterildi. Ayrıca, üretilen aygıtın beyaz ışığa ve 380 nm- 780 nm arasında değişen dalgaboylarındaki ışığa karşı duyarlılıkları ölçüldü. Özellikle 380-480 nm dalga boyu aralığında VOx ara yüz malzemesinin etkisi ile foto akım (I_{ph}) değeri arttı ve yine ara yüz malzemesinin etkisi ile ışığa karşı olan tepki özellikle de 480 nm dalga boyunda tepe noktasına ulaştı. Bütün sonuçlar ele alındığında, Vanadyum Oksit ara yüz malzemesinin yapının diyot parametrelerine pozitif yönde etki ettiği ve bu yapının iyi bir foto sensör olarak kullanılabileceği anlaşıldı.

Bilim Kodu : 20215
Anahtar Kelimeler : Vanadyum oksit, optik sensör, Schottky diyot
Sayfa Adedi : 89
Danışman : Prof. Dr. Selim ACAR

THE EFFECT OF VANADIUM OXIDE THIN FILMS ON THE DETECTION PROPERTIES OF OPTICAL SENSORS

(M. Sc. Thesis)

Adem SARAÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2021

ABSTRACT

In this work, Au/n-Si and Au/VO_x/n-Si samples were produced to investigate diode parameters of VO_x interface effect. Thin films were deposited using the magnetron sputtering system. Surface morphology of the device was observed using SEM and structural characterization was explored using XRD and EDS. These analyses showed deposited VO_x thin film coated on n-Si surface homogeneously. The capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage characteristics of Au/VO_x/n-Si/Au device were measured in the frequency range of 5 kHz to 1 MHz between +4V and -4V bias voltages at room temperature. The experimental results showed that, the electrical properties of Au/VO_x/n-Si/Au device has a close relationship with frequency and the bias voltage. The capacitance value of the device increased from 2.5×10^{-9} F to 4.5×10^{-9} F with the effect of VO_x and as a result of capacitance increase, the dielectric constant increased from 3000 to 5000. In addition, C-V and G-V measurements were performed between frequency range of 1 kHz-1MHz and temperature range of 300 K- 500 K and seen that, the device performance is related with temperature. For the purpose of comparison, two structures have been created and the metal oxide structure can be used successfully as a device which has a high dielectric coefficient with the effect of VO_x. The photocurrent (I_{ph}) value increased with the effect of the VO_x interface material, especially in the wavelength range of 380-480 nm, and the response to light, especially with the effect of the interface material, reached its peak, especially at the wavelength of 480 nm. Considering all the results, it is understood that the Vanadium Oxide interface material has a positive effect on the diode parameters of the structure and this structure can be used as a photo sensor.

Science : 20215

Key Words : Vanadium oxide, optical sensor, Schottky diode

Page : 89

Supervisor : Prof. Dr. Selim ACAR

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasındaki değerli katkıları ve yol göstericiliği ile zamanını ve desteğini esirgemeyen, saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Selim ACAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma boyunca yardımları ile önümü açan sayın ODTÜ MEMS Merkezi Yönetimine teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamında malzeme üretimi ve karakterizasyonu amacıyla kullanılan tüm olanakları sağlayan ODTÜ MEMS Merkezi'ne, ışık altında yapılan ölçümler için laboratuvarını kullanmama izin veren ve yardımcı olan Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR'a, yardımlarını esirgemeyen, bilgilerini ve deneyimlerini paylaşan, özellikle ince film büyütme konusunda yardımlarını esirgemeyip bilgi ve tecrübelerini paylaşan Dr. Mustafa YILDIRIM'a, elektriksel ölçümler sırasında yardımlarını esirgemeyen Ali Orkun ÇAĞIRTEKİN'e ve değerli çalışma arkadaşlarım Evren ERDİL, Semih İNCEÇAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman bir adım ötesine gidebileceğime inanan, annem Yaşare SARAÇ'a, hangi yöne gidersem gideyim yanımda olacağını bildiğim babam, Recep SARAÇ'a, her hayalimi gerçekliğimiz kabul ederek yaşanmasına destek olan eşim Mesude SARAÇ'a ve neşe kaynağım kızım Zeynep SARAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
1. GİRİŞ.....	1
2. SCHOTTKY DİYOT YAPILARI	5
2.1. Metal/Yarıiletken (MY) Kontak Türleri.....	5
2.2. Metal-Yarıiletken Ara yüzeyinde Schottky Mott Teorisi.....	6
2.3. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MY Y) Schottky Diyotların Yapısı	14
2.4. İdeal Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MY Y) Tipi Schottky Diyotların Yapısı	15
2.4.1. Yığılma bölgesi.....	17
2.4.2. Tüketim bölgesi.....	18
2.4.3. Terslenim bölgesi.....	18
2.5. MY Y Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar.....	19
2.6. Ara yüzey Durumları.....	19
2.7. Ara yüzey Yükleri	21
2.8. Hareketli İyonlar.....	21
2.9. İyonlaşmış Tuzaklar	22
2.10. Kontak Direnci	22
3. TEORİK BİLGİLER	25

	Sayfa
3.1. İnce Film Büyütme Teknikleri	25
3.2. Yapısal Karakterizasyon Teknikleri	26
3.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	26
3.2.2. X-ışını kırınımı (XRD).....	28
3.3. Elektriksel Karakterizasyon	30
3.3.1. DC analizler.....	30
3.3.2. AC analizler.....	30
3.3.2. Empedans analizleri	31
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
4.1. Alttaşların Hazırlanması.....	33
4.2. Au ve VO _x İnce Filmlerin Üretilmesi.....	33
4.3. Akım-Gerilim ve Kapasitans-Gerilim Ölçümleri.....	33
4.3.1. Akım-gerilim ölçümleri.....	34
4.3.2. Kapasitans-gerilim ölçümleri	35
4.3.3. Işık-akım ölçümleri	36
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
5.1. Giriş.....	37
5.2. XRD ve SEM Analizleri.....	37
5.3. Akım-Gerilim Ölçümleri.....	38
5.4. Kapasitans-Gerilim Ölçümleri	41
5.4.1. Gerilime bağlı oda sıcaklığında yapılan ölçümler.....	41
5.4.2. Frekansa bağlı oda sıcaklığında yapılan ölçümler	53
5.4.3. Farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı yapılan ölçümler	58
5.5. Farklı Işık ŞiddetindeYapılan Ölçümler.....	67
5.6. Farklı Dalgaboylarında Yapılan Ölçümler	71

	Sayfa
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ.....	89



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge

Sayfa

Çizelge 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken türlerine göre kontak oluşumu. 6



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal-Yarıiletken Schottky diyotun kontaklarının şematik görünümü	5
Şekil 2.2. Basit Schottky modeline göre meta-yarı iletken kontaklar.....	7
Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarı iletken doğrultucu kontak $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda elektron enerji-bant diyagramı a) Metal ile yarıiletken eklemi birleştirilmeden önceki enerji-bant diyagramı, b) Eklemleri birleştirildikten sonraki temel denge durumunun diyagramı	7
Şekil 2.4. n ve p tipi alt tabakalarda tükenme tipi kontaklar.....	9
Şekil 2.5. Artan doping konsantrasyonları ile n-tipi alttaşlara tükenme tipi temaslar.....	10
Şekil 2.6. E_{00} ve kT nin, Si için $T=300$ K’de katkılama konsantrasyonuna göre grafiği.....	11
Şekil 2.7. Metal/n-tipi Schottky diyot için (a) Isıl denge durumunda iken (b) Doğru besleme (c) Ters besleme	13
Şekil 2.8. Metal/n-tipi yarıiletken $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğru besleme uygulandığında akım ve elektron akış yönü.....	14
Şekil 2.9. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ters besleme uygulandığında akım ve elektron akış yönü.....	14
Şekil 2.10. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapının şematik görünümü.....	15
Şekil 2.11. $V=0$ durumdaki ideal bir YYS Schottky diyotun (a) p-tipi yarıiletken için (b) n-tipi yarıiletken için enerji-bant diyagramı	16
Şekil 2.12. YYS yapının kapasitans eşdeğer devresi.....	17
Şekil 2.13. Gerilimin 0 olmadığı durumda YYS yapının enerji-bant diyagramı (a) yığılma (b) tüketim ve (c) terslenim	18
Şekil 2.14. İdeal YYS yapının (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri.....	19
Şekil 2.15. YYS yapının (a) aynı enerji seviyesi eşdeğer devre (b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için eşdeğer devre	21
Şekil 2.16. (a) Dikey ve (b) Yatay kontak	22
Şekil 2.17. Metal direnci, kontak dirençleri ve belirtilen yarı iletken direnci ile birlikte, dağınık bir yarı iletken katmana iki kontağı gösteren şematik diyagram....	22
Şekil 3.1. Taramalı Elektron Mikroskopunun (SEM) şematik yapısı.....	27

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Bragg yasası.....	29
Şekil 4.1. Au/VO _x /n-Si/Au ve Au/n-Si/Au Schottky cihazının kesit görünümü	33
Şekil 4.2. Metal-yalıtkan-yarıiletken bağlantı yapısının şematik gösterimi	34
Şekil 5.1. VO _x ince filmin (a) XRD verisi ve (b) SEM görüntüsü	37
Şekil 5.2. -3V/+3V gerilim altında 300 K-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının I-V grafikleri	39
Şekil 5.3. -3V/+3V gerilim altında 300 K-420 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının İdealite Faktörü (n)-Sıcaklık grafikleri.....	40
Şekil 5.4. -3V/+3V gerilim altında 300 K-420 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının Bariyer Yüksekliği-Sıcaklık grafikleri.....	41
Şekil 5.5. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının C-V grafikleri.....	43
Şekil 5.6. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının G/ω-V grafikleri.....	43
Şekil 5.7. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının seri direnç-gerilim (R _s -V) grafikleri....	44
Şekil 5.8. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının D _{it} -f grafikleri.....	46
Şekil 5.9. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının ε' (a,b), ε'' (c,d) ve tanδ (e,f) grafikleri	47
Şekil 5.10. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b,d) Schottky diyotlarının elektrik modülünün gerçek (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı grafikleri	49
Şekil 5.11. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının Cole-Cole eğrilerinin frekansa bağlı grafikleri	50
Şekil 5.12. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının AC iletkenlik grafikleri.....	51
Şekil 5.13. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının gerçek empedans grafikleri.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının sanal empedans grafikleri.....	52
Şekil 5.15. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının empedans Cole-Cole grafikleri.....	52
Şekil 5.16. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının kapasitans-gerilim (C-V) grafikleri....	54
Şekil 5.17. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının kondüktans-gerilim (G/ω-f) grafikleri	54
Şekil 5.18. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının $\epsilon'(a,b)$, $\epsilon''(c,d)$ ve $\tan\delta(e,f)$ grafikleri	55
Şekil 5.19. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VO _x /n-Si/Au (b,d) Schottky diyotlarının elektrik modülünün gerçek (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı grafikleri	56
Şekil 5.20. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO _x /n-Si-Au Schottky diyotlarının Cole-Cole elektrik modül grafikleri.....	57
Şekil 5.21. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı AC iletkenlik grafikleri.....	57
Şekil 5.22. 300-500K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının kapasitans-frekans (C-f) grafikleri	59
Şekil 5.23. 300-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının kapasitans-frekans (C-f) grafikleri	59
Şekil 5.24. 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı Z' (a,b), Z'' (c,d), Cole-Cole (e,f) grafikleri...	61
Şekil 5.25. 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı dielektrik sabiti ϵ' (a,b), dielektrik kayıp $\epsilon''(c,d)$ ve $\tan\delta$ (e,f,) grafikleri	63
Şekil 5.26. 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı elektrik modülü gerçek kısmı $M'(a,b)$, elektrik modülü sanal kısmı $M''(c,d)$ ve elektrik modülü Cole-Cole eğrileri (e,f) grafikleri	65
Şekil 5.27. 300-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VO _x /n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı AC iletkenlik grafikleri	67
Şekil 5.28. Au/n-Si/Au (a) Au/VO _x /n-Si/Au (b) numuneleri için beyaz ışık altında ölçüm alınan noktalar	68

Şekil

Sayfa

Şekil 5.29. Au/n-Si/Au (a,c) Au/VO _x /n-Si/Au (b,d) numuneleri için beyaz ışık altında 0 mW/cm ² -100 mW/cm ² ışık şiddetleri arasında 20 mW/cm ² aralıklarla 1. ölçüm (a,b) ve 2. ölçüm (c,d) için alınan akım-gerilim (I-V) grafikleri.....	69
Şekil 5.30. Au/n-Si/Au (a,c) Au/VO _x /n-Si/Au (b,d) numuneleri için beyaz ışık altında 0 mW/cm ² -100 mW/cm ² ışık şiddetleri arasında 20 mW/cm ² aralıklarla 1. ölçüm (a,b) ve 2. ölçüm (c,d) için alınan akım-gerilim (lnI-V) grafikleri.....	70
Şekil 5.31. Au/n-Si/Au (a,c) Au/VO _x /n-Si/Au (b,d) numuneleri için beyaz ışık altında 100 mW/cm ² ışık şiddetine kadar arasında 20 mW/cm ² aralıklarla 1. Ölçüm (a,b) ve 2. Ölçüm (c,d) için alınan geçici akım-zaman (I-V) grafikleri.....	71
Şekil 5.32. Au/n-Si/Au (a) Au/VO _x /n-Si/Au (b) numuneleri için 380 nm-780 nm dalgaboyu aralığında 50 nm adımlarla yapılan fotoakım-gerilim (I _{ph} -V) ölçüm grafikleri.....	72
Şekil 5.33. Au/n-Si/Au (a) Au/VO _x /n-Si/Au (b) numuneleri için 380 nm-480 nm dalgaboyu aralığında 20 nm adımlarla yapılan fotoakım-gerilim (I _{ph} -V) ölçüm grafikleri.....	73
Şekil 5.34. Au/n-Si/Au (a) Au/VO _x /n-Si/Au (b) numuneleri için Işığa Duyarlılık-Işık Şiddeti grafiği.....	74
Şekil 5.35. Au/n-Si/Au (a) Au/VO _x /n-Si/Au (b) numuneleri için Tepki-Dalga boyu grafiği....	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1.ODTÜ MEMS Merkezi ATC Orion AJA sıçratma sistemi.....	26
Resim 3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	28
Resim 3.3. XRD cihazı	30



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Au	Altın
Al	Alüminyum
C	Kapasitans
D_{it}	Ara yüzey tuzak yoğunluğu
E_c	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji düzeyi
E_v	Valans bandı enerji seviyesi
F	Farad
Ga₂O₃	Galyum trioksit
I	Akım
M'	Elektrik modülü
n-Si	n-tipi silisyum
N_{ss}	Ara yüzey durum yoğunluğu
p-Si	p-tipi silisyum
SiO₂	Silisyum dioksit
Si	Silisyum
TE	Termiyonik emisyon
TiO₂	Titanyum dioksit
VO_x	Vanadyum oksit
ZnO	Çinko oksit
ε'	Dielektrik sabiti
ε''	Dielektrik kayıp
σ_{AC}	AC iletkenlik
G/ω	Kondüktans
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarı iletkenin iş fonksiyonu
Φ_b	Potansiyel engel yüksekliği
mV	Milivolt

Simgeler**Açıklamalar****mW**

Miliwatt

NH₄-N

Amonyum azotu

°C

Celsius derece

q

Elektron yükü

t

Süre

V

Gerilim, Volt

X_s

Yarı iletkenin elektron yakınlığı

W

Watt

µm

Mikrometre

Kısaltmalar**Açıklamalar****EDS**

Enerji Dağılım Spektrometrisi

MY

Metal-Yalıtkan

MYY

Metal-Yalıtkan-Yarı iletken

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

TE

Termiyonik Emisyon

XRD

X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Metal ve yarı iletken kontaklar ile ilgili ilk doğrulama davranışını anlamak için Schottky ve arkadaşları ilk çalışmayı gerçekleştirmiştir [1]. Metal yarı iletken kontakların uygun bir şekilde hazırlanabilmesi için, malzemenin elektriksel, termal ve optik karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [2]. Metal ve yarı iletken kontakların ara yüz özelliklerinin cihazın performansı ve kararlılığı üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir [2]. Metal ve yarı iletken malzemenin kontak oluşturması ile oluşan Schottky yapılar, yarı iletkene bağlı olan elektronik ve optoelektronik cihazların en temel ve vazgeçilmez parçalarındandır. Ayrıca bu yapılar, düşük güç kaybı ve çoğunluk taşıyıcı akım ile birleşen yüksek tepki hızı sebebiyle anahtarlama devreleri, güneş pilleri, fotodedektör uygulamaları, kontrol sistemleri gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir. Çok yüksek frekans değerlerinde anahtarlama yapabildikleri için telekömünikasyon alanında da önemli bir yere sahiptirler [3].

Schottky kontakların elektriksel özelliklerinin belirleyen en önemli unsur ara yüzey özellikleridir. Özel olarak üretilmedikleri sürece metal ile yarıiletken kontak arasında oksit bir tabaka meydana gelir ve bu tabaka ile yapı metal-yarı iletken (MY) metal-yalıtkan-yarı iletken (MYY) yapıya dönüşür. MYY yapı ile ilgili ilk başarılı çalışma Ligenze ve Spitter isimli araştırmacılar tarafından silisyum altaş üzerine silisyum dioksit (SiO_2) ince film büyütülmesiyle yapılmıştır [2]. Metal-Yarı iletken (MY) yapıların elektriksel özellikleri metal ile yarı iletken malzeme arasında kullanılan ara yüz malzemesinin özelliğine bağlı olarak değişiklik gösterir. Metal ile yarı iletken arasındaki ara yüz malzemesi metal-yarı iletken yapının idealite faktörü, bariyer yüksekliği gibi çeşitli özelliklerini değiştirmesinden dolayı, aygıtın performansını ve verimini etkiler [3]. Aygıtın performansı ve verimi uygun bir ara yüz malzemesi seçimi ile artırılabilir.

Örneğin; MYY (Metal-Yalıtkan-Yarı iletken) yapılarında artan kaçak akım, cihazın performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, bu yapılarda, kaçak akımı en aza indirmek için yalıtkan ara yüz tabakası, dielektrik sabiti yüksek malzemelerden seçilir. Düşük kaçak akımlı MYY yapıları, hızlı tepki süresi, azaltılmış güç kayıpları ve daha kararlı çalışma ile entegre elektronik cihazların yapımına olanak tanır [1–6]. VO_x 'in dielektrik sabiti oda sıcaklığında 36'dır ve 100°C 'de 6104'ü aşan bir değere sahiptir. Bu nedenle, ara yüz katmanı olarak VO_x seçilmiştir ve VO_x ara yüz katmanının ana etkisi, dielektrik sabitini arttırmaktır. Dielektrik sabitinin artması nedeniyle kapasitansın artması ve kapasitansın artırılması optoelektronik uygulamalar için önemlidir. Metal oksit yarı iletken bazlı Schottky cihazları, elektronik ve optik uygulamalarda

önemli bir yere sahiptir [7–13]. SiO_2 [14], Ga_2O_3 [15], TiO_2 [16] gibi metal oksitler, Schottky diyotları için ara yüzey tabakaları olarak kullanılmıştır. Metal-oksit Schottky cihazları, bariyer yüksekliğini artıran ve kaçak akımları azaltan oksit tabakası nedeniyle metal-yarı iletken Schottky cihazlarıyla karşılaştırıldığında gelişmiş performans sunuyor [17]. VO_x kapasitif özelliklerinden dolayı tercih edilir. Bu film kapasitans değerini diğer metal oksit ince filmlerden daha fazla artırır, örneğin ZnO ince film kapasitans değeri 10 kHz'de 0.47 nF [18] iken VO_x ince film 3.5 nF'dir. Vanadyum oksit ince filmin, kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda oldukça fazla incelenmiştir [12]. Nanoteller, nanoşeritler ve nanolifler gibi vanadyum oksit nanoyapıları, alan yayıcı [19-20], alan etkili transistörler [21], sensörler [20–22], fotodedektörler [23-25] gibi çoklu elektrikli cihazlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bir ara yüz tabakası olarak VO_x 'in etkisi, bu malzeme ile ve bu malzeme olmadan karşılaştırmalı olarak incelenmemiştir.

Bu çalışmada, Si tabanlı bir Schottky cihazında ara yüz katmanı olarak kullanılan VO_x 'in iyileştirme etkisini araştırmak için $\text{Au/VO}_x/\text{n-Si/Au}$ ve Au/n-Si/Au Schottky cihazlarının elektriksel özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu nedenle $\text{Au/VO}_x/\text{n-Si/Au}$ ve Au/n-Si/Au Schottky cihazları magnetron sıçratma yöntemiyle üretilmiş ve VO_x ince filmin yapısal özellikleri SEM, EDS ve XRD kullanılarak karakterize edilmiştir. Cihazların elektriksel özellikleri; oda sıcaklığında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında +4V ile -4 V gerilim bandında ve farklı sıcaklıklarda (300-500 K) yine 1 kHz-1 MHz frekans aralığında ve 0.5V -3V gerilim bandında I-V, C-V ve G-V ölçümlerinden elde edilmiştir. Ölçümlerden elde edilen sonuçlardan üretilen aygıtların empedans, elektrik modülü, iletkenlik gibi diğer diyot parametreleri hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları ve yapılan hesaplamalardan görüldüğü üzere, yapılan çalışma literatür ile yakından benzerlik sahibidir.

Ayrıca, üretilen aygıtların beyaz ışık altında ve 380 nm- 780 nm arasında değişen dalgaboylarındaki ışığa karşı duyarlılıkları ölçülmüştür. Beyaz ışık altında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar neticesinde, aygıtların her ikisinin de özellikle yığılma bölgesinde artan gerilimle arttığı ve belirli bir noktadan sonra sabitlendiği görülmüştür. Işığın şiddeti arttıkça ölçülen akım değerinin arttığı ve 100 mW şiddetinde tepe noktasına ulaştığı gözlemlenmiştir. Vanadyum oksit ara yüz malzemesinin etkisi ile aygıtın ışık şiddetine daha fazla tepki verdiği ölçülen akım değerinin yükselmesinden anlaşılmıştır ve yine 100 mW ışık şiddetinde tepe noktasına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca gerilime karşı ölçülen foton akımı değerlerinde de anadyum oksit ara yüz malzemesine sahip olan aygıtın özellikle yığılma bölgesinde daha fazla ölçülen akımı arttırdığı gözlemlenmiştir. Geçici akım-zaman grafiklerinden de görülebileceği

üzere, her iki aygıtta oldukça hızlı bir şekilde ışığa tepki vermişlerdir. Işık şiddeti arttıkça geçici akım değeri de artmış ve 100 mW ışık şiddetinde tepe noktasına ulaşmıştır. Yine burada da vanadyum oksit ara yüz malzemesi ölçülen akım değerini arttırmıştır.

Bunun yanı sıra, her iki aygıt içinde 380-780 nm dalbayu aralığında 50 nm aralıklarla ve 380-480 nm dalga boyu aralığında 20 nm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar neticesinde, özellikle 380-480 nm dalga boyu aralığında ölçülen foto akım değerlerinde artış gözlenmiştir. Vanadyum oksit ara yüz malzemesinin etkisi ile foto akım (I_{ph}) değerinin artış aralığı daha geniştir ve yine ara yüz malzemesinin etkisi ile ışığa karşı olan tepki özellikle de 480 nm dalga boyunda tepe noktasına ulaşmıştır. Vanadyum oksit aynı zamanda ışığa duyarlılığı da arttırmıştır.

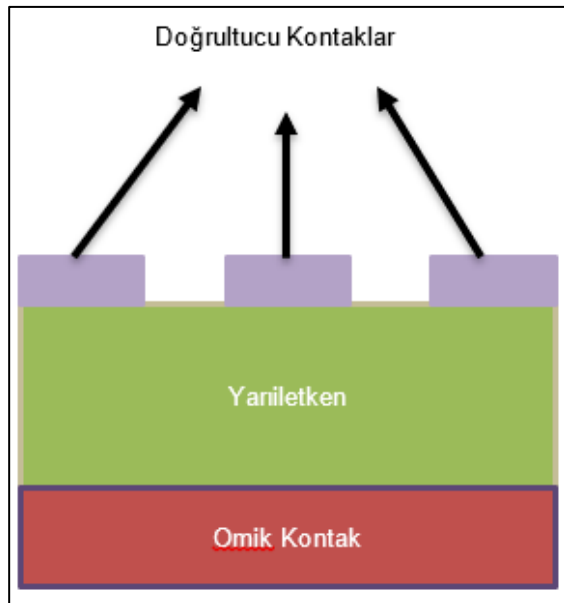
Bütün sonuçlar ele alındığında, Vanadyum Oksit ara yüz malzemesinin yapının diyot parametrelerine pozitif yönde etki ettiği ve bu yapının iyi bir foto sensör olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.

2. SCHOTTKY DİYOT YAPILARI

2.1. Metal/Yarıiletken (MY) Kontak Türleri

Metal sıklıkla kullanılmasının nedeni, diğer metal malzemelerle karışımlarının kontrol altına alınmasının görece olarak kolay olması, istenilen şekle sokularak dayanıklılık özelliklerinin artırılabilmesi ve en önemlisi elektrik ve ısıyı iyi iletebilmeleridir. Altın (Au) ve Alüminyum (Al) gibi saflığı oldukça yüksek olan metal ve yarı iletken malzemeler doğrultucu kontak ve omik kontak olarak yarı iletken teknolojisinde kullanılmaktadır. Yarı iletken malzeme olarak kullanılan alttaşın p veya n tipi olmasına göre Au veya Al metallerinden uygun olanları seçilmektedir [26-27].

Metal-yarı iletken (MY) kontakları yarı iletken aygıt teknolojisinin en önemli yapıtaşlarından biridir. Metal-yarı iletken (MY) kontak yapısı, metal ve yarı iletken malzemelerin düşük basınçta ve yüksek sıcaklıkta birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kontak bölgesinin oluşmasından sonra ayrılan yükler nedeniyle metal ile yarıiletken tabakalarının iş fonksiyonları farkından dolayı potansiyel bariyer yüksekliği meydana gelir ve engel yüksekliğini ilk defa Schottky, metal malzeme ile yarı iletken malzeme arasında oluşan potansiyel engelin metal-yarı iletken arasındaki iş fonksiyonları farkından dolayı oluştuğunu ise ilk defa Mott yorumlamıştır [28].



Şekil 2.1. Metal-Yarıiletken Schottky diyotun kontaklarının şematik görünümü.

Metal-yarı iletken Schottky diyotların karakteristik özelliklerinin detaylı anlaşılabilmesi için, iletken metal malzeme ve yarı iletken alttaş malzemesinin iletim özelliklerinin ayrıntılı şekilde

incelenmesi gerekir. Yarı iletken malzemeye özgü temas bölgesi oluşturulması ve uygun gerilim uygulanması ile karakteristik özellikleri ortaya çıkar. Kontak bölgeleri iki malzeme arasına neredeyse sıfır direnç ile temas etmelidirler. İdeal bir kontak bölgesi için, kontak olarak kullanılan metal ve yarıiletken malzemelerin çok temiz ve pürüzsüz bir yapıda olmaları gerekir [28].

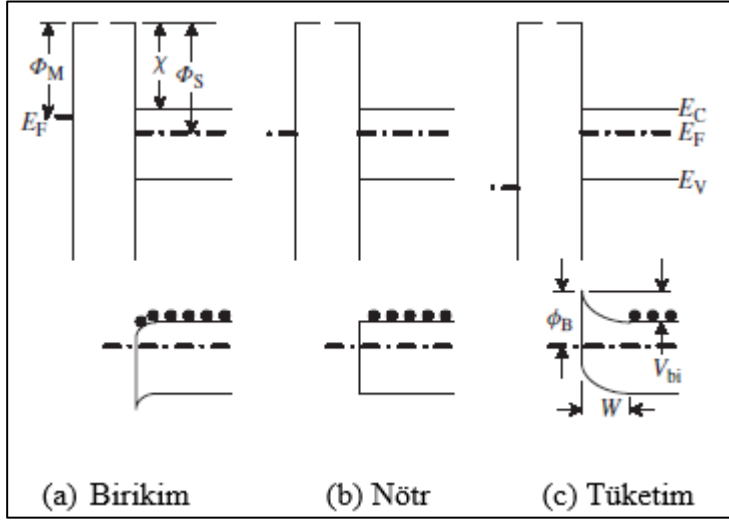
Metal-yarıiletken (MY) kontaklar, omik ve doğrultucu olarak sınıflandırılırlar ve omik veya doğrultucu kontak olması metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarı iletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki duruma göre belirlenir ve metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu durumlarda “doğrultucu kontak”, $\Phi_m < \Phi_s$ olduğu durumlarda ise “omik kontak” olarak adlandırılır. Metal/p-tipi kontaklarda ise, tam tersi bir durum göstermektedir [29]. Çizelge 2.1’de bu durumlar gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken türlerine göre kontak oluşumu [29].

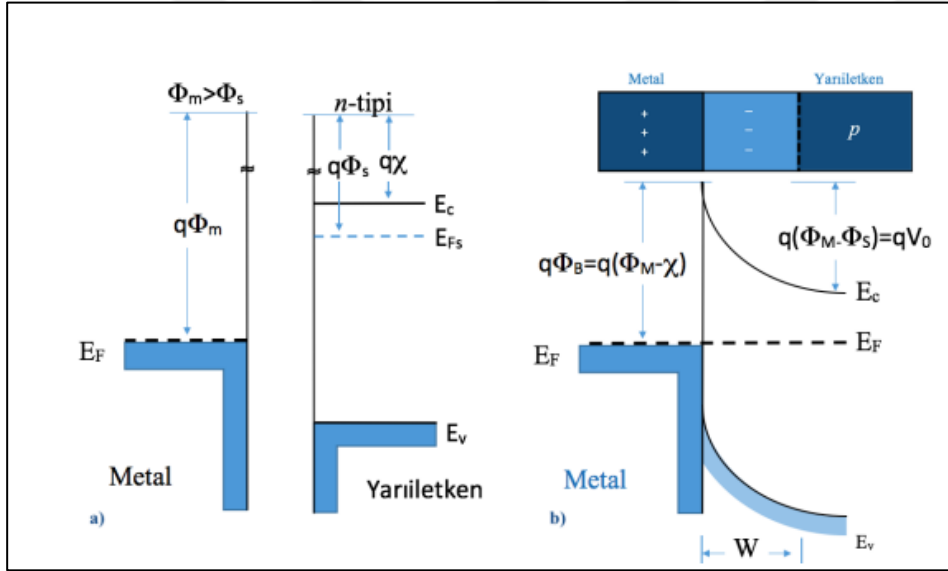
Yarıiletken Malzeme Türü	Kontak Türü	
	Doğrultucu Kontak	Omik Kontak
n-tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	$\Phi_m < \Phi_s$
p-tipi	$\Phi_m < \Phi_s$	$\Phi_m > \Phi_s$

2.2. Metal-Yarıiletken Ara Yüzeyinde Schottky Mott Teorisi

Schottky diyot yapısı oluşturmak için, metal ile yarı iletken malzemelerin temas ettirilmesi sırasında metal ile yarı iletken malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki farktan oluşan metal-yarıiletken ara yüzeyinde yük ayrışması nedeniyle meydana gelen bariyer yüksekliği bulunur ve bu nedenden dolayı, metal-yarı iletken arasındaki hareketli yüklerden yalıtılmış, yüksek direnç gösteren bir bölge oluşmaktadır [26–32]. Schottky -Mott teorisine göre, metal ve yarı iletken malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki fark metal-yarı iletken ara yüzeyindeki potansiyel engeli oluşturur [33]. Bir katının iş fonksiyonu, vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. Metal ve yarı iletken için iş fonksiyonları Şekil 2.2’de gösterilmiştir, metal iş fonksiyonu Φ_m , Şekil 2.2(a)’daki yarı iletken iş fonksiyonu Φ_s ’den daha küçüktür. İş fonksiyonu, $\Phi_m = \Phi_m / q$ ile potansiyel Φ_m ile ilgili enerji Φ_m olarak verilir. Şekil 2.2(b)’de, $\Phi_m = \Phi_s$ ve Şekil 3.2(c)’de $\Phi_m > \Phi_s$ olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Basit Schottky modeline göre metal-yarı iletken kontaklar. Şeklin üst ve alt kısımları sırasıyla temas öncesi ve sonrası metal-yarı iletken sistemi göstermektedir [33].



Şekil 2.3. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontak $\Phi_M > \Phi_S$ durumunda elektron enerji-bant diyagramı. a) Metal ile yarıiletken eklemi birleştirilmeden önceki enerji-bant, b) Eklemleri birleştirildikten sonraki temel denge durumunun diyagramı [33].

Şekil 2.2 ve 2.3'te temsili olarak ifade edilen temel fiziksel simgeleri aşağıdaki gibi açıklayabiliriz.

Φ_S : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Φ_M : Metalin iş fonksiyonu.

χ_S : Yarıiletkenin elektron yakınlığı

Φ_b : Potansiyel engel yüksekliği

E_V : Valans bandı enerji seviyesi

E_c : İletkenlik bandı enerji seviyesi

W : Tüketim tabakası kalınlığı

E_F : Fermi enerji seviyesi

Fermi Enerjisi; iletkenlerde mutlak sıfırda, elektronların taban durumundan işgal ettikleri en yüksekteki dolu seviyenin enerjisidir. Yarı iletkenlerde ise, iletkenlik ile valans bandındaki yasak olmayan enerji durum yoğunluğu, taşıyıcı sayısı, katkı atomları yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji bölgesindeki seviye Fermi enerjisidir. Fermi enerji seviyesi, p-tipi yarı iletkenlerde valans bandının üst noktasından, n-tipi yarı iletkenlerde ise iletkenlik bandının alt noktasından başlayarak ölçülür.

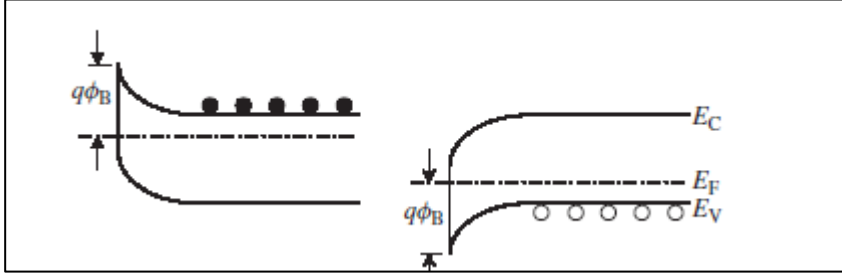
Metalin iş fonksiyonu (Φ_m); bir elektronu, Fermi enerji bandından vakum bandına çıkarmak için uyarmak veya metalden koparıp serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olarak tanımlanır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s); Yarı iletkenin Fermi enerji bandı ile vakum bandı arasındaki enerji farkı veya Fermi bandındaki bir elektronu vakum bandına çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Yarı iletken katkılanan atomların yoğunluğu nedeniyle Fermi enerjisi değiştiğinden dolayı Φ_s 'de buna bağlı olarak değişen temel bir parametredir.

Elektron yakınlığı (χ); Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanan niceliktir.

Schottky teorisine göre, bariyer yüksekliği sadece metal iş fonksiyonuna ve yarı iletken elektron ilgisine bağlıdır ve yarı iletken katkı yoğunluğundan bağımsızdır. Şekil 2.2'den açıkça görüldüğü gibi, biriktirme tipi bir kontak tercih edilen omik kontak türüdür çünkü metaldeki elektronlar, yarı iletken içine veya dışına akışlarına karşı en az engelle karşılaşır. Pratikte, farklı iş fonksiyonlarına sahip metalleri kullanarak bariyer yüksekliğini değiştirmek zordur. Ortak yarı iletkenler Ge, Si, GaAs ve diğer III-V malzemeleri için bariyer yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan nispeten bağımsız olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir [34-36].

Şekil 2.4'de gösterildiği gibi, genellikle hem n-tipi hem de p-tipi alttaşlar üzerinde bir tükenme kontağı oluşturulur. n-alttaşlar için $\phi_B \approx 2E_g / 3$ ve p-alttaşlar için $\phi_B \approx E_g / 3$ tür [37].



Şekil 2.4. n ve p tipi alt tabakalarda tükenme tipi kontaklar [37].

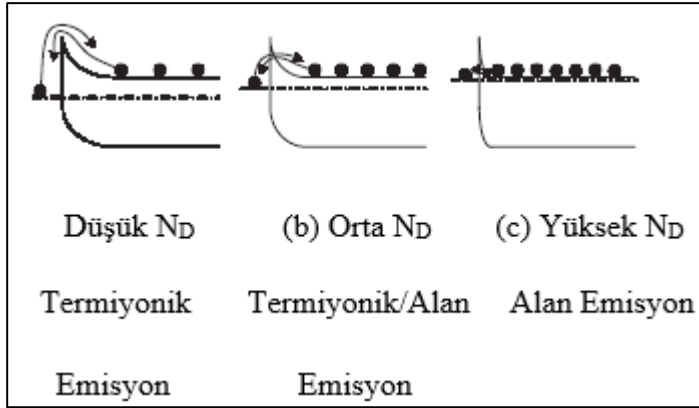
Çeşitli iş fonksiyonu metalleri ile bariyer yüksekliğinin nispi sabitliği, bazen, yarı iletkendeki Fermi seviyesinin, tükenme tipi bir temas oluşturmak için bant boşluğunda bir miktar enerjide sabitlendiği Fermi seviye sabitlemesine atfedilir. Schottky bariyer oluşumunun detayları tam olarak anlaşılmamıştır. Bununla birlikte, kontak oluşumu sırasında yarı iletken yüzeyindeki kusurların önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Bardeen, bariyer yüksekliğini belirlemede yüzey durumlarının önemine dikkat çekti [37-38].

Bu tür yüzey durumları, yüzeyde sarkan bağlar veya diğer bazı kusur türleri olabilir [34-39]. Bununla birlikte, Fermi düzeyinde sabitlemeye neden olan çeşitli önerilen mekanizmalar arasında hala tutarsızlıklar vardır [40-42].

Bariyer yüksekliklerinin metal işleme işlevinden nispeten bağımsız olmasına neden olan mekanizmalar ne olursa olsun, birikim tipi bir temas tasarlamak zordur. Bariyer yüksekliği mühendisliği pratik olmadığı için, ohmik kontakları uygulamanın başka yollarına bakmalıyız. Ohmik kontaklar sıklıkla yüksek rekombinasyon oranlarına sahip bölgeler olarak tanımlanır. Bu, yüksek derecede hasarlı bölgelerin iyi omik kontaklar olarak hizmet etmesi gerektiği anlamına gelir. Bu tür üretim yöntemleri pratik değildir, çünkü hasar genellikle bir yarı iletken cihazda istenecek en son şeydir. Hasar kaynaklı omik kontaklar da tekrar üretilemez. Bu, yarı iletken katkı yoğunluğunu kontaklarına tek alternatif olarak bırakır [43]. Daha önce belirtildiği gibi, bariyer yüksekliği nispeten katkı yoğunluğundan bağımsızdır, ancak bariyer genişliği katkı yoğunluğuna bağlıdır. Bariyer yüksekliği, aslında görüntü kuvveti bariyerini düşürerek doping yoğunluğuna zayıf bir şekilde bağlıdır.

Dar uzay yük bölgesi genişliğine sahip metal-yarı iletken kontaklar için, elektronlar metalden yarı iletkene ve yarı iletken metale tünel açabilir. P tipi yarı iletkenler için delik tüneli. Bazı okuyucular, metalden yarı iletkene tünel oluşturan delikler kavramından rahatsız olabilir.

Metalden yarı iletkenle delik tünellemeyi, yarı iletken değerklik değerkinden elektron tünelleme olarak düşünmek faydalı olabilir.

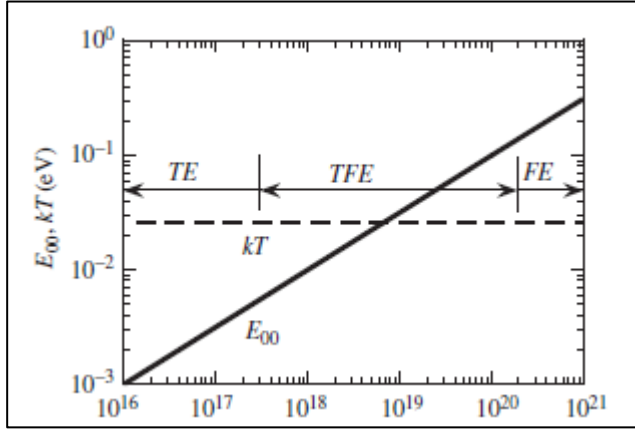


Şekil 2.5. Artan doping konsantrasyonları ile n-tipi altaşlara tükenme tipi temaslar. Elektron akışı, elektronlar ve oklarıyla şematik olarak gösterilir [44].

Metal-n-tipi bir yarı iletken için iletim mekanizmaları Şekil 2.5'te gösterilmektedir [44]. Hafifçe katkı yarı iletkenler için akım, Şekil 2.5 (a) 'da gösterilen termiyonik emisyonun (TE) sonucu olarak bariyer üzerinden termal olarak uyarılmış elektronlarla akar [1]. Ara katkılama aralığında termiyonik alan emisyonu (TFE) termal olarak taşıyıcılarda baskındır ve bariyerin tünellemesinin gerçekleşmesi için yeterince dar olduğu yerde bir enerjiye uyarılır [44–47]. Yüksek doping yoğunlukları için bariyer, elektronların doğrudan tünel yapması için iletim bandının altında veya yakınında yeterince dardır, alan emisyonu (FE) olarak bilinir. Üç rejim, Eşitlik 2.1'deki E_{00} karakteristik enerjisi dikkate alınarak ayırt edilebilir [48].

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N}{K_s \epsilon_0 m^* t_{un}}} = 1.86 \times 10^{-11} \sqrt{\frac{N(cm^{-3})}{K_s (\frac{m^* t_{un}}{m})}} [eV] \quad (2.1)$$

N : Katkılama konsantrasyonu, m^*_{tun} tünelleme efektif kütlesi ve m serbest elektron kütlesidir. Eşitlik (2.1), Şekil 2.6'da çizilmiştir. E_{00} termal enerji kT ile karşılaştırılması, termiyonik emisyonun $kT < E_{00}$ için, termiyonik alan emisyonu $kT \approx E_{00}$ ve alan emisyonu $kT > E_{00}$ için baskın olduğunu gösterir. Basit olması için Şekil 2.6'daki sınır noktalarını şu şekilde seçildi: TE için: $E_{00} \leq 0,5 kT$, TFE için: $0,5 kT < E_{00} < 5 kT$ ve FE için: $E_{00} \geq 5 kT$. Tünel açma etkin kütlesi $0,3 m$ olan Si için bu, $N \leq 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ için yaklaşık olarak TE'ye, $3 \times 10^{17} < N < 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ için TFE'ye ve $N \geq 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ için FE'ye karşılık gelir. Tünel açma etkin kütlesi n-Si ve p-Si için farklıdır ve ayrıca katkı yoğunluğuna da bağlıdır.



Şekil 2.6. E_{00} ve kT nin, Si için $T=300$ K’de katkılama konsantrasyonuna göre grafiği [48].

Yarı iletkenin, iletkenlik bandındaki elektronlar metale doğru ilerlerken pozitif yüklü donör iyonları arkalarında bıraktıkları için, yarıiletkenin metale bakan ön alanında hareketli yükler azalır. Bu nedenle, ara yüzeyin metal tarafında yarıiletkenden metale ilerleyen elektronların oluşturduğu ve adına negatif uzay yük bölgesi denilen ince negatif yük tabakası oluşurken, ara yüzeyin yarıiletken tarafında da pozitif yükler oluşmaktadır ve bu yük bantlarının genişliği tüketim bandı olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca bu tabaka ara yüzeyden kalınlığı yaklaşık $0.5\text{\AA}$ olan ve adına Thomas-Fermi film denilen yapı kadar uzaktadır ve sonuç olarak, metal yapıya doğru doğal bir elektrik alan oluşur [49].

Şekil 2.3’te enerji bant diyagramı gösterilen ve $\Phi_m > \Phi_s$ durum şartını sağlayan metal-yarıiletken/n-tipi kontaklarda doğrultucu kontakta vakum seviyesi, referans olarak alınan Şekil 2.3a’da metalin dışındaki kinetik enerjisi sıfır olan elektronun enerji seviyesi olduğunu göstermektedir [50]. Burada, Φ_m metalin iş fonksiyonudur ve Fermi enerji seviyesinden bir elektronu uyararak vakum seviyesini geçmesini sağlamak için gerekli olan minimum enerji miktarıdır. Φ_m iş fonksiyonu, kristal örüntünün periyodik potansiyeli nedeniyle oluşan hacim katkısı ile dipol tabakasından dolayı oluşan yüzey katkısına sahiptir. Değişken bir parametre olan Φ_s yarıiletken iş fonksiyonu, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesine doğru katılanan verici veya alıcı atomlarının miktarına bağlı olarak değişir. Yarıiletkenin katılanmasından etkilenmeyen χ_s elektron yakınlığı parametresi, iletkenlik bandının en üst seviyesinde bulunan ve koparılması için az miktarda gerekli olan enerji ile elektronu uyarıp vakum seviyesine çıkaran enerji miktarıdır. Metal ve yarı iletken eklemesinde, metalde bulunan elektronlardan daha yüksek enerjili yarı iletkenin iletkenlik bandında bulunan elektronlar, yarı iletken ile metalin Fermi enerji seviyeleri aynı olana kadar yarıiletkenden metale doğru geçerler. Sonuç olarak, Fermi enerji seviyesi referans olarak Şekil 2.3b’de görüldüğü üzere enerji-bant diyagramında yasak enerji aralığının

ortasına doğru kaymaya başlamasının nedeni, yarıiletkenin sınır bölgesinde serbest elektron yoğunluğunun azalmasıdır. Bu şekilde E_C iletkenlik bandı ile E_F Fermi enerji seviyesi arasındaki fark, azalan elektron yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artar ve ısı dengede E_F sabit kaldığından iletkenlik ve valans bantlarının kenar kısımları Şekil 2.3b'deki gibi bükülür [49-50]. İş fonksiyonları arasındaki fark kadar bütün seviyelerde bükülme görülür [30].

Metal-yarıiletken eklem yapısı ısı dengede durumunda iken, geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanır, bantın bükülmesi, metal ile yarı iletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark kadardır ve bu durumda kurulma gerilimi

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.2)$$

ile verilir [2], [33], [49], [50]. Engel yüksekliği qV_i kadardır ve bununla beraber, yarıiletken metal ile geçen yüklerin karşılaştığı engel yüksekliği, metalden yarıiletkene geçecek olan yüklerin karşılaştığı engel yüksekliğinden küçüktür ve Eşitlik 2.3'teki gibi verilir [2], [33], [51].

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.3)$$

Şekil 2.3b'den anlaşılacağı üzere; $\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$ tir ve bu eşitlikler dikkate alınarak Eşitlik 2.3 aşağıdaki gibi elde edilir.

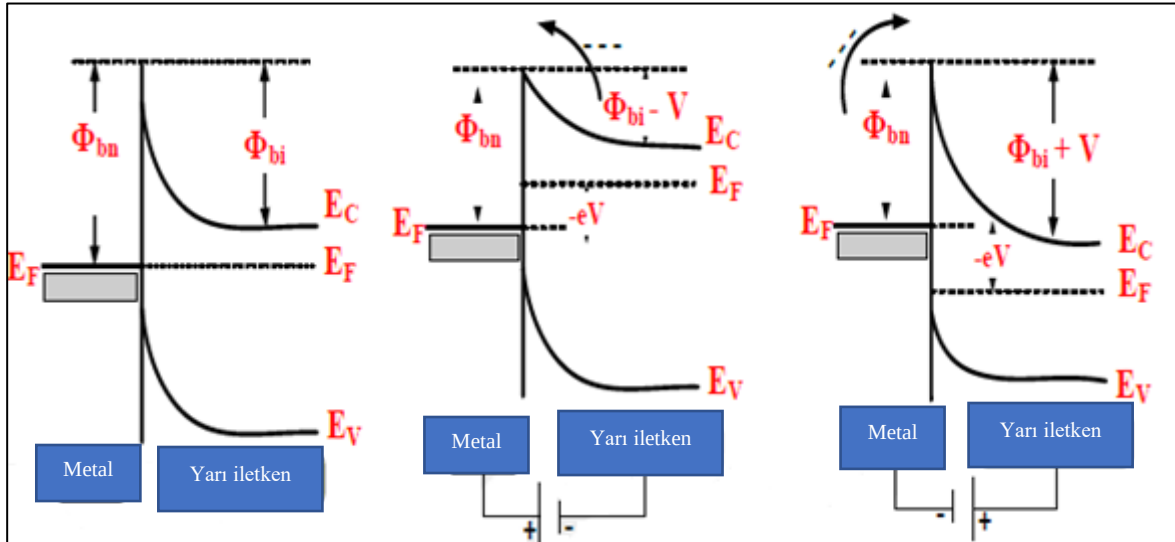
$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (2.4)$$

Φ_n iletim bandı ile Fermi enerji seviyesi arasındaki farkı temsil etmektedir.

$$\Phi_n = E_C - E_F \quad (2.5)$$

Ancak E_C sıfır alındığında $\Phi_n = E_F$ olur. Eşitlik 2.3 Schottky ve Mott tarafından birbirlerinden habersiz ve bağımsız olarak açıklanmıştır.

Şekil 2.7'de metal ile yarıiletkenin eklemleme durumu sonrasında sırasıyla; ısı dengesi, doğru besleme ve ters besleme enerji-bant diyagramları verilmiştir.

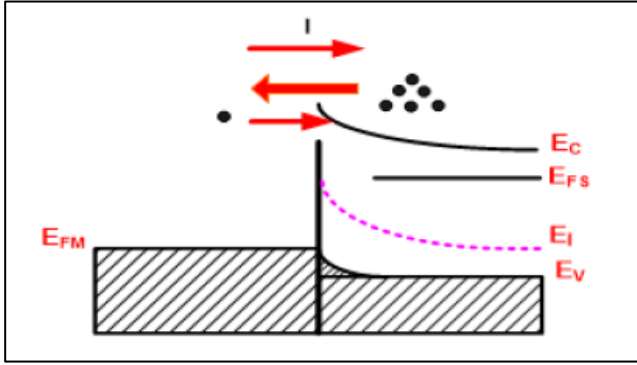


Şekil 2.7. Metal/n-tipi Schottky diyot için (a) Isıl denge durumunda iken (b) doğru besleme (c) ters besleme [30].

Şekil 2.7a’da ısı denge halinde iken metal-yarıiletken ve yarıiletken-metal elektron geçişleri sonucunda, elektronlar denge haline gelirler. Bunun sonucunda, net bir yük akışı olmaz ve akım geçişinin olmadığı ısı denge durumu sağlanmıştır. Yarıiletkenin minimum seviyede hareketli taşıyıcı içeren tüketim katmanını, metal ile yarı iletkenin nötr kısmının direnci ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. Bu nedenle, tüketim bölgesi üzerine, uygulanan gerilimin tamamı düşmektedir. Ters veya doğru besleme ise ısı denge enerji-bant diyagramını değişikliğe uğrattır [33]. Metal/n-tipi Schottky diyotun ters ve doğru besleme enerji-bant diyagramları Şekil 2.7b ve Şekil 2.7c’de gösterilmiştir.

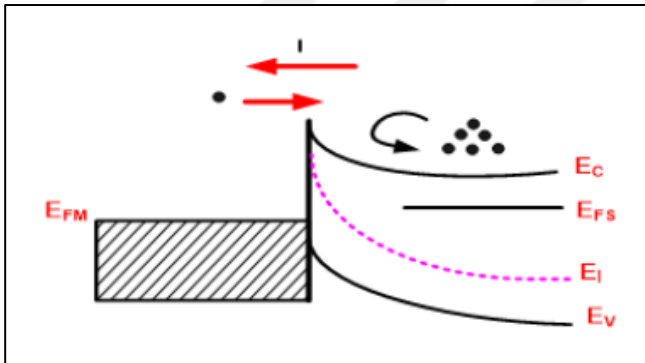
Yarıiletken ucun metal uçtan daha negatif gerilim durumunda olduğunda ($V=V_F$) ısı denge durumunda oluşan yeni potansiyel engel yüksekliği (qV_i) V_F kadara azalarak ($q(V_i-V_F)$) değişikliğe uğrayacaktır. Engel yüksekliğinin düşmesi ve tüketim bölgesinin daralması ile beraber artan akım geçişi bu durumu açıklayabilir. Metal tarafında yarıiletken tarafından daha fazla gerilim düşeceği için, yarıiletken-metal arasındaki elektron geçişi artarken, metal-yarıiletken arasındaki elektron geçişi değişmez. Bu nedenle, doğru beslemede azalan engel yüksekliği nedeniyle akım geçişi yaşanırken, ters beslemede ise neredeyse hiç akım geçişi olmaz.

Metal-yarı iletken (MY) kontak durumunda, kontağın metal olan tarafına pozitif ve yarı iletken olan tarafına negatif dış besleme uygulandığında, elektronlar yarı iletken metalden doğru akarlar ve elektrik akımının yönü Şekil 2.8’de görüldüğü üzere metalden yarıiletkenine doğru olacaktır [52].



Şekil 2.8. Metal/n-tipi yarıiletken $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğru besleme uygulandığında akım ve elektron akış yönü [52].

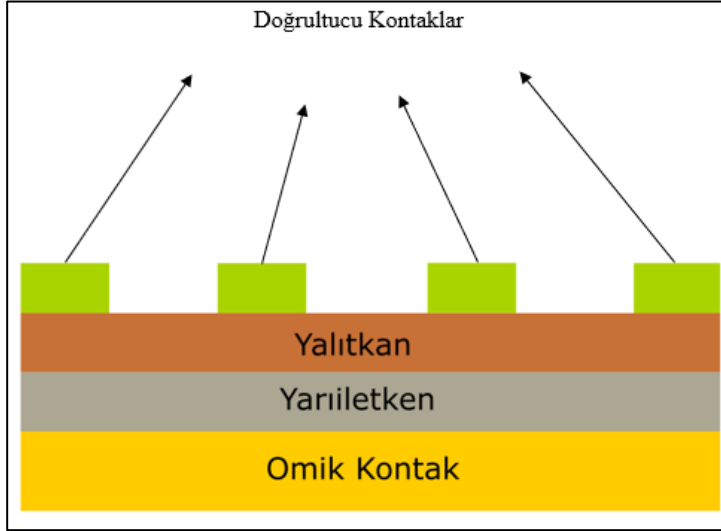
Doğru ön besleme akımı, uygulanan ileri beslemedeki gerilim (V_F) artışı üstel bir fonksiyondur [2]. Yarı iletken ucuna metal ucuna göre daha pozitif bir gerilim uygulanırsa ($V = -V_R$) yani Schottky diyotun ters besleme altında olması durumunda, enerji-bant diyagramı Şekil 2.7c'deki gibi olur ve tüketim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği $+qV_R$ kadar artar. Bu durum, ısı dengesi durumu ile kıyaslandığında Şekil 2.9'dan görüleceği üzere azınlık bölgesinin büyümesine ve yarıiletkenden metal tarafına doğru elektron akışının artmasına neden olur.



Şekil 2.9. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ters besleme uygulandığında akım ve elektron akış yönü [52].

2.3. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) Schottky Diyotların Yapısı

Metal-yalıtkan-yarı iletken (MYY) yapılar, metal malzeme ile yarı iletken malzeme arasına doğal veya deneysel bir yolla yalıtkan katman eklenmesi ile elde edilen yapılardır [2], [26–33], [49–52]. MY Y yapı Şekil 2.10'da gösterildiği gibi yalıtkan tabaka ile metal-yarıiletken tabaka ayrılır ve metal-yarıiletken tabaka arası yük akışı düzenlenmektedir. MY Y yapılar ilk olarak 1959 yılında J. L. Moll tarafından oluşturulmuştur [53].



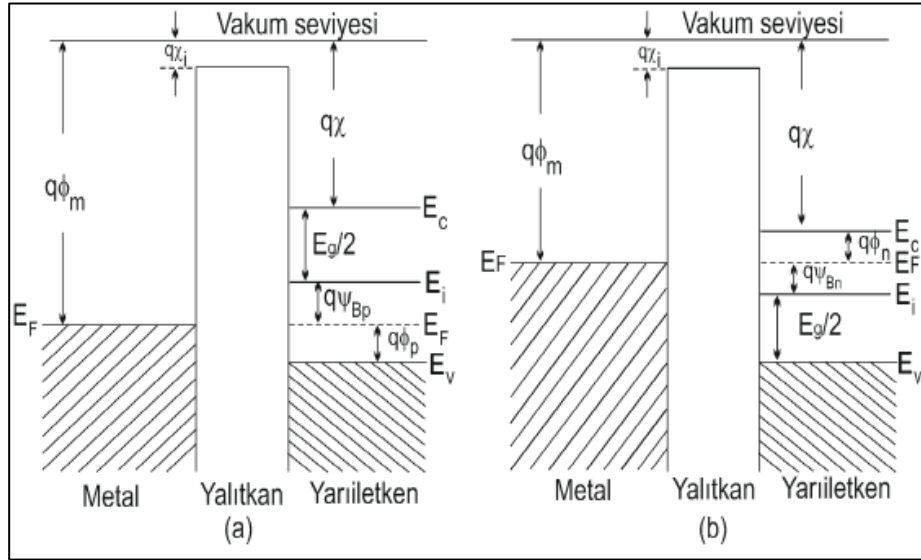
Şekil 2.10. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapının şematik görünümü.

Schottky diyotların veya metal-yarıiletken yapıların üzerine uygulanan V_G gerilimi arayüzey tabakası, seri direnç ve diyot tarafından paylaşılacağı için $V_G = V_D + V_{RS} + V_i$ olur. Bu özelliklerinden dolayı, metal-yalıtkan-yarıiletken yapıların akım iletim yapısı meta-yarıiletken yapılara göre farklıdır.

Yalıtkan yapılardan oluşturulan ince filmler ve yarı iletken malzmemelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesinde metal-yalıtkan-yarı iletken (MYY) yapılar oldukça sık kullanılır [54].

2.4. İdeal Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) Tipi Schottky Diyotların Yapısı

Metal-yalıtkan-yarı iletken (MYY) Schottky yapıların ideal olması için seri direnç (R_s) ve ara yüzey durumlarının diyotu etkilemeyecek kadar küçük olması ve kısa devre direnci (R_{sh}) ise $M\Omega$ mertebelerinde olması gerekir [55]. İdeal MYY Schottky diyotların idealite faktörü 1 olarak kabul edilir. $V=0$ yani gerilim uygulanmamış durumdaki MYY Schottky diyotun hem n-tipi yarıiletken hem de p-tipi yarıiletkenler için enerji-bant diyagramları Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. V=0 durumdaki ideal bir MIS Schottky diyotun (a) p-tipi yarıiletken için (b) n-tipi yarıiletken için enerji-bant diyagramı [52].

MYY yapıda V=0 olduğu durumlarda Φ_m metalin iş fonksiyonu ve Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_{ms}) birbirini ile aynıdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \chi + \frac{E_g}{2q} - \Psi_{Bn} \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.6)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \chi + \frac{E_g}{2q} - \Psi_{Bp} \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.7)$$

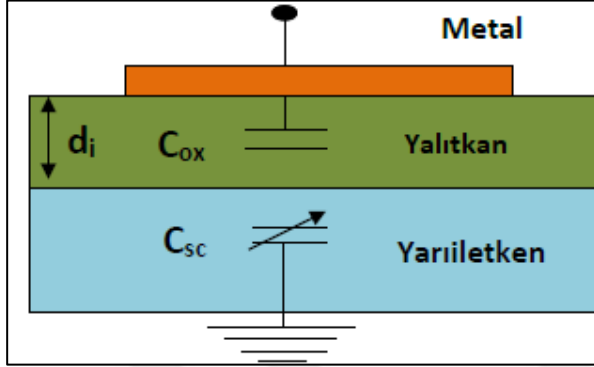
Eşitlik 2.6 ve 2.7’de χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığını, E_g yarı iletkenin yasak enerji bant aralığını, Ψ_B ise Fermi enerji seviyesi ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.

Metallerdeki serbest yük yoğunluğu yarıiletkenlerdeki serbest yük yoğunluğundan daha fazladır ve bu durum dışarıdan uygulanan gerilimle doğrudan bağlantılıdır. İdeal MYY yapıda, metal yapıya uygulanacak gerilim ile yarıiletkende yük kayması meydana gelmesiyle yarıiletkenin arayüzeyindeki uzay yükü olan Q_{sc} oluşur.

Yarı iletken malzemelere katılan atomların cinsi, çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcılarını belirler. Silisyum kristaline, 3A grubu elementi olan bor katkılандığında p-tipi silisyum meydana gelir ve çoğunluk yük taşıyıcısı boşluklar, azınlık yük taşıyıcısı ise elektronlardır. Silisyum kristaline 5A grubu elementi fosfor katkılanırsa n-tipi silisyum meydana gelir ve çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar, azınlık yük taşıyıcısı deşiklerdir.

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapılar paralel plakalı kondansatöre benzetilebilir ve burada yalıtkan

tabaka, metal ile yarı iletken arasında bir kapasitans meydana getirir. Metal-yalıtkan-yarıiletken yapının kapasitansı, yalıtkan malzemenin kapasitansı (C_{ox}) ve uzay yükü kapasitansından (C_{sc}) meydana gelir. Şekil 2.12’de metal-yalıtkan-yarıiletken yapının kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre gösterilmiştir.



Şekil 2.12. MYY yapının kapasitans eşdeğer devresi [52].

Şekil 2.12’de gösterilen eşdeğer devrenin çözülmesiyle meydana gelen toplam kapasitans değeri Eşitlik 2.8’de ifade edilmiştir [55].

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_i} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8’den görüleceği üzere, metal-yalıtkan-yarı iletken yapının kapasitans eşdeğeri, yalıtkan tabakanın kapasitansı ve uzay yük kapasitansının seri bağlanması ile elde edilir. Yalıtkan tabakanın kapasitansı ise Eşitlik 2.9’da gösterilmiştir [55-56].

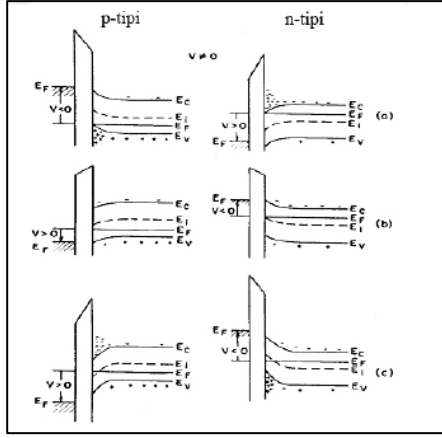
$$C_i = \frac{\epsilon_{ox}}{d_i} A \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.10’da ϵ_{ox} yalıtkan yapının dielektrik sabiti, d_i ara yüzey yapı kalınlığını ve A doğrultucu kontak alanını ifade eder. Uzay yükü kapasitansı, MYY yapının kapasitansını değiştirebilecek tek değerdir. MYY yapının kapasitans-voltaj (C-V) eğrisi yığılma bölgesi, tüketim bölgesi ve terslenim bölgesi olarak üç farklı bölgede incelenir.

2.4.1. Yığılma bölgesi

MY Y yapıda, metale pozitif yani $V_G > 0$ gerilim uygulandığında meydana gelen elektrik alan nedeniyle çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar yarıiletken ara yüzeyine toplanmaya başlar bunun

neticesinde bantlar Şekil 2.13a’da olduğu gibi yukarı yönlü bükülür. Yığılma bölgesi çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronların ara yüzeyde birikmesiyle meydana gelir.



Şekil 2.13 Gerilimin 0 olmadığı durumda MYY yapının enerji-bant diyagramı (a) yığılma (b) tüketim ve (c) terslenim [52].

2.4.2. Tüketim bölgesi

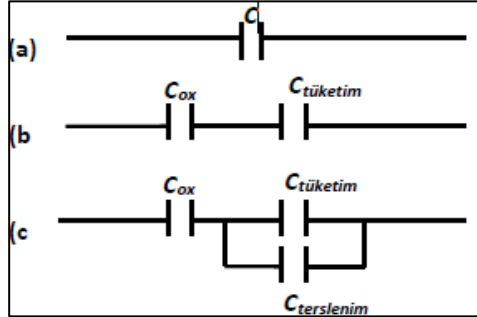
MYY yapılarda, negatif besleme uygulandığında yani $V_G < 0$ durumunda oluşan elektrik alan nedeniyle yük taşıyıcısı olan elektronlar yarıiletken malzemenin ara yüzeyinde uzaklaşırlar ve arkada kalan pozitif yük sonucunda yarı iletken malzemenin iç bölümlerindeki elektron yoğunluğu, yarı iletken yüzeyindeki elektron yoğunluğunu aşar. Bunun sonucunda, Şekil 2.13b’de görüldüğü üzere enerji bantları aşağı yönlü bükülmeye başlar. Negatif gerilimin uygulanmasıyla tüketim tabakasının W_D genişliğindeki bölgede elektronların sayısının düşmesi sebebi ile tüketim bölgesi oluşur ve dielektrik sabiti ϵ_s olan bir yarı iletkenin tüketim bölgesinin genişliği Eşitlik 2.10’daki gibi ifade edilir.

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.10)$$

2.4.3. Terslenim bölgesi

MYY yapılarda, metal malzemeye uygulanan çok büyük negatif gerilim ($V_G \ll 0$) nedeni ile, enerji bantlarındaki bükülme olayı daha fazla olmaya başlar. Yarıiletken malzeme yüzeyinde çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar azınlık taşıyıcı deşiklerin yoğunluğu artar ve bunun sonucunda, Şekil 2.13c’de görüleceği üzere Fermi enerji seviyesi E_F saf durumdaki E_i enerji seviyesinin altına düşer. N-tipi yarıiletken malzeme p-tipi yarıiletken gibi davranır ve bu olaya yarıiletken yüzeyin

tersinimi denir. İdeal MYY yapılarda taşıyıcı yükler yarıiletken malzeme içerisinde ve metal malzemenin yalıtkan malzemeye yakın bölümünde konumlanırlar ve yapıya uygulanan doğru akım ile yalıtkan kısımdan yük geçişi gerçekleşmez.



Şekil 2.14. İdeal MYY yapının (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri [52].

2.5. MYY Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar

Metal-yalıtkan- yarı iletken (MY Y) yapılarda yarı iletken ile yalıtkan arasında kalan alan elektriksel açıdan nötr değildir. Yapının üretimi sırasında ortaya çıkan safsızlıklar, tuzaklanmış yükler, hareketli iyonlar gibi sebepler nedeniyle, yapı elektriksel olarak ideal MYY yapıdan farklı olur [50].

2.6. Arayüzey Durumları

Yarıiletken ile yalıtkan arasında kalan yüklerin enerji seviyesi ara yüzey durumudur. Ara yüzey durumları, valans ve iletim bandı ile yük alışverişi yapabildiği için alıcı veya verici seviyeler olabilir. Ara yüzey durumlarındaki Q_{ss} yük yoğunluğu, yalıtkan maddenin kalınlığından ve yarıiletken yapıda bulunan katkı yoğunluğundan etkilenmez. Ara yüzey durumları MYY yapının kapasitansını etkiler, MYY yapı ideal yapıdan sapar ve ara yüzey durumlarının elektriksel etkileri aşağıdaki kavramlarla açıklanır.

Kapasite; yapı içerisinde bulunan ara yüzey durumlarına yine yapı içerisinde ayrı ara yüzey durumlarının eklenmesi sebebiyle meydana gelir ve bu nedenle, temel yük başına kapasite eklenir. Uygulanan gerilim neticesinde kapasite değeri zirve yapar ve ara yüzey durum enerji seviyesi Fermi enerji seviyesinden daha aşağıda olduğu için ortaya çıkan bu zirve uygulanan gerilim için görülür.

İletim; yük taşıyıcılarının ara yüzey durumları ile tuzaklanması sonrasında bırakılması zaman açısından gecikmeye neden olur. Ara yüzey durumlarında oluşan zaman gecikmesi eşdeğer bir RC devresi ile tanımlanabilir ve meydana gelen bu zaman gecikmesi dolma-boşalma zamanıdır, $\tau = 1/(R_{ss} C_{ss})$ ile ifade edilir. Bu eşitlikteki R_{ss} değeri ara yüzey direncidir [1]. Ara yüzey kapasitansı C_{ss} ise Eşitlik 2.11'deki gibi ifade edilir [1].

$$C_{ss} = \frac{\partial C_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.11)$$

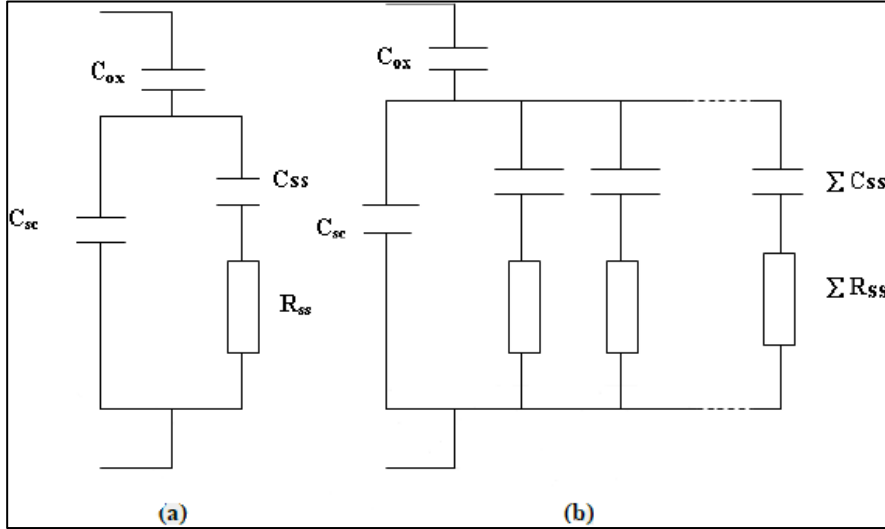
Ara yüzey potansiyeli; ara yüzey durumlarının kapasite ve iletme olan etkileri AC sinyal etkisi altındadır. Ancak DC etkisi de bulunmaktadır. Ara yüzey durumlarında bulunan yükler nedeniyle ara yüzey elektrik alanı değişir. Bu nedenle, ara yüzey durumlarının bulunduğu zamanlarda ara yüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumda yeterli olacak potansiyelden daha fazlası gerekir. Bu durum kapasite geriliminin zorunlu genişlemesi etkisinden kaynaklanmaktadır. Ara yüzey durum yoğunluğu birim enerji başına birim ara yüzey durum yüküdür ve Eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilir [1].

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.12)$$

Eşitlikteki E enerjidir ve $E = q \cdot \Psi_s$ şeklinde ifade edilir. Enerjinin diferansiyeli alını Eşitlik 2.13'te yerine konulduğunda durum yoğunluğu aşağıdaki gibi olacaktır [1].

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (2.13)$$

Mazlemenin Fermi enerji seviyesi, yük taşıyıcıların arayüzey hali ile kaplanması ihtimalini oluşturur. Malzemenin yüzey potansiyeli değiştikçe arayüzey enerjisi içinde değişiklik olur. Ara yüzey durumlarının, Q_{ss} yük yoğunluğuna paralel bir kapasitans ve aynı anda seri direnç etkisi yaptığında oluşan durumun eşdeğer devresi Şekil 2.15'te gösterilmiştir [57].



Şekil 2.15. MYY yapının (a) aynı enerji seviyesi eşdeğer devre (b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için eşdeğer devre [50].

2.7. Arayüzey Yükleri

MY Y yapıda ara yüzey yükleri yalıtkan ve yarıiletken malzeme ara yüzeyindedir. Yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin kristal formlarının aynı olmamasından dolayı bu bölgede yerel yükler oluşur. Bu yükler genelde pozitif yüklerdir ama bazen negatif de olabilir. MYY yapının ara yüzeyinde negatif veya pozitif yüklerin olması halinde yüksek frekanslarda gerçekleşen ölçümlerde C-V eğrilerinde gerilim ekseninde kaymalar oluşur. MYY yapının C-V eğrilerinin uygulanan gerilimin negatif tarafında kaymasına neden pozitif yüklerken, C-V eğrisinin uygulanan gerilimin pozitif yöne doğru kaymasına neden olan yükler ise negatif yüklerdir [55–63].

2.8. Hareketli İyonlar

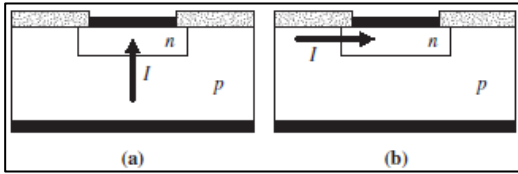
Hareketli iyonlar metal-yalıtkan veya yarıiletken-yalıtkan ara yüzeylerinde bulunur ve bunlar 100°C'den daha sıcak ortamlarda hareketli olan H_3O^+ , Na^+ , Li^+ , H^+ , K^+ gibi iyonlardır [64]. Bu iyonlar, genellikle maddelerin üretimi esnasında kullanılan kimyasal malzemeler içinde bulunmaları, örnek turuculardan gelen kirlilik, oksidasyon esnasında kullanılan gazlardaki safsızlıklardan meydana gelir. Bahsedilen iyonlar kristal yüzeye yapışır ve maddeye uygulanan elektrik alan etkisi ile hareket etmeye başlar ve MYY yapının ideal halden sapmasına neden olan kusurlardır [65].

2.9. İyonlaşmış Tuzaklar

İyonlaşan tuzaklar kimyasal yapı bozukluklarına bağlı olarak ortaya çıkan ve yalıtkan katmanda bulunmaktadır ve bunlar alıcı veya verici olabilir dolayısıyla yarı iletken ara yüzeyi ile yük alışverişinde bulunabilirler. Bu nedenle bu bölgede fazladan bir yük meydana getirirler. Elektron-boşluk çiftinin iyonize radyasyon etkisi sonucu yalıtkan katman içerisinde oluşmasıyla bunların bir bölümü oksit katman içerisinde tuzaklanabilirler. Yapının üretimi sırasında oluşan elektron-boşluk tuzakları ise yapının üretimi sonrasında uygulanacak olan tavlama işlemi ile ortadan kaldırılmaktadır. Yapı içerisindeki iyonlaşmış tuzaklar elektron hapsederek ya da serbestleştirerek yüksüz olurlar ve MYY yapının C-V eğrilerine etki ederler. MYY yapıya uygulanan gerilim negatiften pozitive veya pozitiften negatife doğru değiştirildiğinde ölçülen C-V değerleri arasında farklılıklar meydana gelir [66]. İki taraflı yapılan ölçümlerden edinilen C-V grafiğinde oluşan kayma miktarı, MYY yapının yalıtkan malzemedeki tuzaklarının miktarını gösterir.

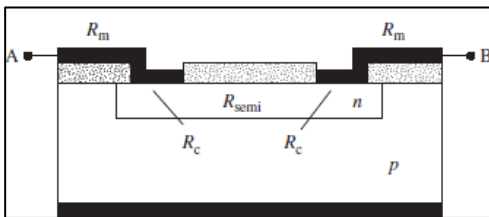
2.10. Kontak Direnci

Metal-yarı iletken kontaklar, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi iki temel kategoriye ayrılır. Akım, kontağa dikey veya yatay olarak akar.



Şekil 2.16. (a) Dikey ve (b) Yatay kontak [55].

Etkili temas alanı gerçek temas alanından farklı olabileceğinden, dikey ve yatay veya yanal temaslar oldukça farklı davranabilir. Şekil 2.17'de bir yalıtkan üzerinde uzanan ve p-tipi bir alt tabakada n-tipi bir tabakaya omik kontaklar yapan metalik iletkenlere sahip numunenin A ve B noktaları arasındaki direnci ele alalım.



Şekil 2.17. Metal direnci, kontak dirençleri ve belirtilen yarı iletken direnci ile birlikte, dağınmık bir yarı iletken katmana iki kontağı gösteren şematik diyagram [55].

A ve B noktaları arasındaki R_T toplam direncini üç bileşene ayırılır: (1) metalik iletken R_m 'nin direnci, (2) kontak dirençleri R_c ve (3) yarı iletken direnci R_{semi} . Toplam direnç [67];

$$R_T = 2R_m + 2R_c + R_{semi} \quad (2.14)$$

şeklinde olur.

Yarı iletken direnci, n-tabakanın levha direnci ile belirlenir. Temas direnci daha az net bir şekilde tanımlanmıştır. Kesinlikle, bazen spesifik arayüz öz direnci ρ_i olarak adlandırılan metal yarı iletken kontağın direncini içerir [67]. Ancak aynı zamanda metal-yarı iletken ara yüzünün hemen üzerindeki metalin bir kısmını, bu ara yüzün altındaki yarı iletkenin bir kısmını, mevcut kalabalıklaşma etkilerini ve metal ile yarı iletken arasında mevcut olabilecek herhangi bir ara yüzey oksit veya diğer tabakayı da içerir.

Bir metal-yarı iletken kontağının akım yoğunluğu (J), Şekil 2.5'teki üç iletim mekanizmasının her biri için değişen bir şekilde uygulanan voltaj (V), bariyer yüksekliği (ϕ_B) ve doping yoğunluğuna (N_D) bağlıdır. Bu bağımlılığı aşağıdaki yazılır.

$$J = f(V, \phi_B, N_D) \quad (2.15)$$

Temas direnci iki nicelik ile karakterize edilir: temas direnci (ohm) ve özel kontak direnci, ρ_c ($\text{ohm} \cdot \text{cm}^2$), bazen temas direnci veya spesifik temas direnci olarak adlandırılır. Özel kontak direnci sadece gerçek arayüzü değil, arayüzün hemen üstündeki ve altındaki bölgeleri de içerir. Özel kontak direnci, eşitlik 2.16'daki gibi tanımlanır.

$$\rho_i = \left. \frac{\partial V}{\partial J} \right|_{V=0} \quad (2.16)$$

Bu spesifik ara yüzey direnci, yalnızca metal-yarı iletken ara yüzüne atıfta bulunan teorik bir niceliktir. Yukarıda belirtilen etkilerden dolayı aslında ölçülebilir değildir. Ölçülen kontak direncinden belirlenen parametre, spesifik kontak direncidir. Omik kontaklar için çok kullanışlı bir terimdir çünkü kontak alanından bağımsızdır ve çeşitli boyutlardaki kontakları karşılaştırırken uygun bir parametredir.

Termiyonik emisyonun hakim olduğu bir metal-yarı iletken kontağın akım yoğunluğu, en basit haliyle Eşitlik 2.17'deki gibi verilir [2]:

$$J=A^*T^2e^{-q\Phi_B/kT}(e^{qV/kT}-1) \quad (2.17)$$

Burada $A^* = 4\pi q k^2 m^* / h^3 = 120(m^*/m) \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$ Richardson sabitidir, m serbest elektron kütlesi, m^* etkin elektron kütlesi ve T mutlak sıcaklıktır. Eşitlik (2.16) ile termiyonik emisyon için özel ara yüzey öz direnci bulunur.

$$\rho_i(TE) = \rho_1 e^{q\Phi_B/kT}; \rho_1 = \frac{k}{qA^*T} \quad (2.18)$$

Termiyonik-Alan emisyonu için [68];

$$\rho_i(TFE) = C_1 \rho_1 e^{q\Phi_B/E_0} \quad (2.19)$$

Alan emisyonu için [68];

$$\rho_i(FE) = C_2 \rho_1 e^{q\Phi_B/E_{\infty}} \quad (2.20)$$

şeklinde olur.

3. TEORİK BİLGİLER

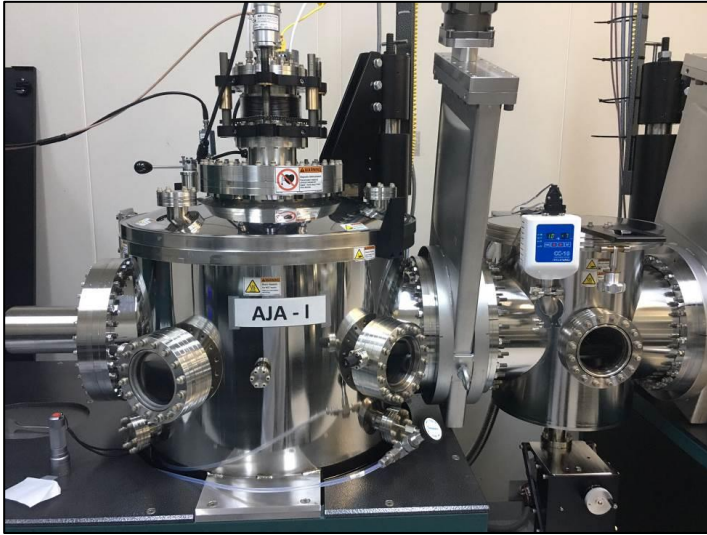
Bu bölümde yapılan çalışmaya ışık tutan ve çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanabilecek literatür çalışmalarından bazılarına yer verilmiştir.

3.1. İnce Film Büyütme Teknikleri

İnce filmler, kaplanacak malzemenin türü ve alttaş çeşidine bağlı olarak farklı yöntemlerle kaplanabilirler. İnce film kaplama teknikleri arasında Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi (PVD), Kimyasal Buharlaştırma Yöntemi (CVD) olarak iki ana başlık altında incelenir. Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi ile kaplama teknikleri arasında Manyetik Saçırma (Magnetron Sputter), Elektron Demeti ile Buharlaştırma (E-Beam Evaporator), Isıl Buharlaştırma (Thermal Evaporator), Atomik Katman Büyütme (ALD) yöntemleri sayılabilir.

Bu çalışmada ince filmler, Manyetik Saçırma (Magnetron Sputtering) yöntemi ile silisyum (Si) alttaş üzerine büyütülmüştür. Magnetron püskürtme, üretilen ve biriktirilecek malzemeyi içeren bir boşlukla sınırlanan gaz halindeki bir plazmayı içeren bir biriktirme teknolojisidir. Hedefin yüzeyi, plazma içindeki yüksek enerjili iyonlar tarafından aşındırılır ve serbest kalan atomlar, vakum ortamında hareket eder ve ince bir film oluşturmak üzere bir alt-tabaka üzerine çöker. Tipik bir püskürtme biriktirme işleminde, tüm arka plan gazlarının ve potansiyel kirleticilerin kısmi basınçlarını en aza indirmek için bir oda ilk önce yüksek vakuma boşaltılır. Baz basınca ulaşıldıktan sonra, plazmayı içeren püskürtme gazı hazneye akıtılır ve toplam basınç, bir basınç kontrol sistemi kullanılarak düzenlenir. Plazma üretimini başlatmak için, genellikle doğrudan püskürtme hedefinin arkasında bulunan katot ile genellikle odaya elektriksel topraklama olarak bağlanan anot arasına yüksek voltaj uygulanır. Püskürtme gazında bulunan elektronlar, yakındaki püskürtme gazı atomlarıyla çarpışmalara neden olarak katottan uzaklaşarak hızlandırılır. Bu çarpışmalar, sıçrayan gaz atomlarından elektronları vurduran ve iyonlaşmaya neden olan bir elektrostatik itmeye neden olur. Pozitif püskürtücü gaz atomları artık negatif yüklü katoda doğru hızlandırılarak hedefin yüzeyi ile yüksek enerjili çarpışmalara yol açar. Bu çarpışmaların her biri, hedefin yüzeyindeki atomların, substratın yüzeyine ulaşmak için yeterli kinetik enerjiyle vakum ortamına fırlatılmasına neden olabilir. Mümkün olduğunca çok sayıda yüksek enerjili çarpışmayı kolaylaştırmak için püskürtme gazı tipik olarak argon veya ksenon gibi yüksek moleküler ağırlıklı bir gaz olarak seçilir. Reaktif saçırma işlemi isteniyorsa, film büyümesi sırasında odaya oksijen veya nitrojen gibi gazlar da verilebilir.

Bir manyetik saçırma kaynağı, plazmadaki elektronları hedefin yüzeyinde veya yakınında tutmak için çok güçlü mıknatıslar kullanır. Elektronların sınırlandırılması sadece daha yüksek yoğunluklu bir plazmaya ve artan birikme hızlarına yol açmakla kalmaz, aynı zamanda bu elektronların alttaş veya büyüyen film ile doğrudan etkisinin neden olacağı hasarı da önler. Manyetik saçırma ile ince film kaplama tekniğinde, kaynak malzemenin erimesini ve buharlaşmasını gerektirmez ve diğer PVD teknolojilerine göre birçok avantaja yol açar: ilk olarak, hemen hemen tüm malzemeler, erime sıcaklıklarından bağımsız olarak manyetik saçırma ile büyütülebilir; ikincisi, kaynaklar, alttaşın ve kaplamanın gereksinimlerine bağlı olarak oda içinde herhangi bir yere ölçeklenebilir ve yerleştirilebilir; son olarak, kaynak malzemenin bileşimine benzer bir bileşim korunurken alaşım ve bileşiklerden oluşan filmler biriktirilebilir.



Resim 3.1. ODTÜ MEMS Merkezi ATC Orion AJA sıçratma sistemi

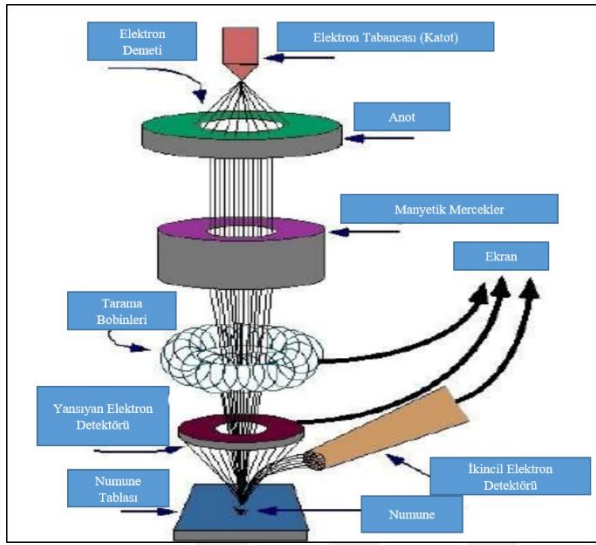
3.2. Yapısal Karakterizasyon Teknikleri

3.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numuneleri odaklamak ve taramak için belirli bir enerjide hareket eden bir elektron demeti kullanan mikro yapıların yüzeylerini tarayan bir elektron mikroskobu türüdür. İletilen elektronları kullanan İletim Elektron Mikroskobunun (TEM) aksine, taramalı elektron mikroskobu yayılan elektronları kullanır.

Taramalı elektron mikroskobu, elektronların etkileşimi üzerine sinyaller üretmek için kinetik enerji uygulama prensibi ile çalışır. Elektron demetini oluşturan katoda, 5-8 kV arasında dışarıdan bir gerilim uygulanır ve elektronların katottan kopmaları sağlanır. Kopan ve rastgele saçılan

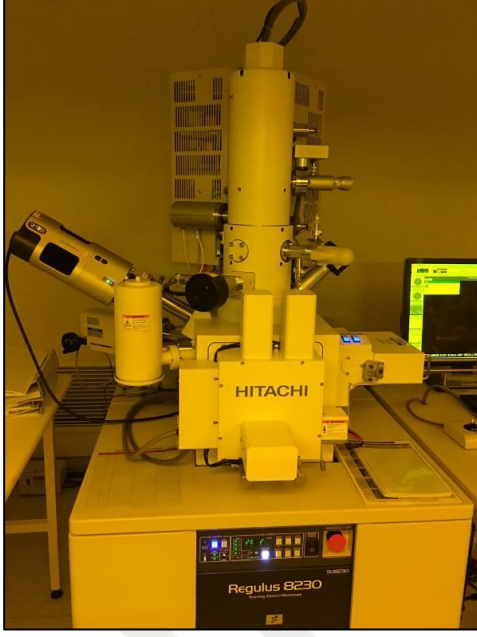
elektronlar; anot, manyetik mercekler ve tarama bobinleri yardımıyla düzgün bir demet haline getirilerek numune üzerine düşürülür. Numune yüzeyinden yansıyan elektronlara ikincil elektronlar denir ve görüntü ikincil elektronların detektöre gelmesiyle oluşur. Görüntüleme için kullanılan ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar ve kırınan geri saçılan elektronlardır. Numuneden yayılan ikincil elektronlar, numunenin morfolojisini ve topografisini tespit etmede birincil rolü oynarken, geri saçılan elektronlar numunenin elemanlarının bileşiminde kontrast gösterir.



Şekil 3.1. Taramalı Elektorn Mikroskobunun (SEM) şematik yapısı.

Numunenin elementel olarak analiz edilmesi için Enerji Yayımlı Spektrometre (EDS) kullanılır ve EDS sistemi SEM cihazlarında oldukça yaygın olarak bulunmaktadır. Numunenin elementel yapısı, numune üzerine elektron demeti gönderilerek analiz işlemi gerçekleştirilir.

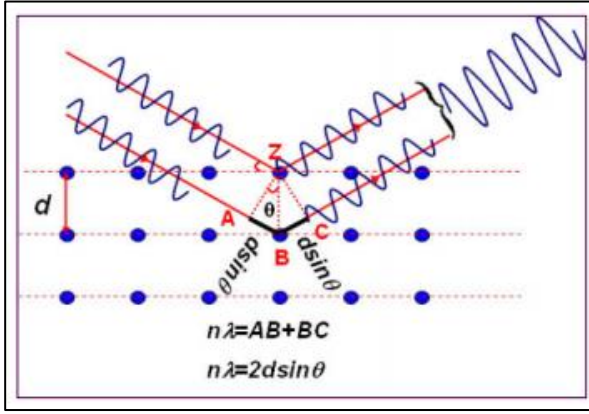
Bu tez çalışması kapsamında, Resim 3.1' de fotoğrafı görülen ODTÜ MEMS Merkezi temizlanda bulunan Hitachi SU-8230 SEM cihazı ve üzerindeki Oxford EDS cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).

3.2.2. X-ışını kırınım (XRD) yöntemi

X-ışınları 1895 yılında Wilhelm Konrad Roentgen tarafından bulunmuştur. X-ışınları, katot ışınları baryum platin siyanür kristalinin üzerine gönderildiğinde, kristalin floresan bir ışın yayması ve bu ışınların katot tüpünün camından geçerek ve havada absorbe edilmediğinin gözlenmesi ile keşfedilmiştir. Röntgen, yapısını tam olarak açıklayamadığı, içinden geçtiği katı maddelerin ekran üzerinde gölgeler oluşturmalarına neden olan bu ışınımlara, bilinmeyen anlamında “X” sembolünü kullanarak “X-ışınları” adını verdi [69]. Daha sonra, Laue 1912 yılında, kristallerde kırınım olayını keşfetti. Bragg ise (Şekil 3.2) ile kristalografinin temellerini atmış ve XRD spektroskopisine yol göstermiştir. Bragg Eşitliği, gelen X-ışınının kırılma açısı ve uzunluğunun, kristal yapısını oluşturan atom katmanları arasındaki uzaklığa bağlı olarak değişmesi tabanına oturtulması ile oluşmuştur. Bu kırılan ışınların dedektörde kaydedilmesi ile hedef kristalin katman sayısı ve düzeni anlaşılabilir.



Şekil 3.2. Bragg Yasası [69]

Bragg Yasası: W. L. Bragg tarafından geliştirilen teori, X-ışınları kırınım teorileri içinde en yaygın olarak kullanılanıdır. Aralarında ‘d’ kadar mesafe bulunan kristal düzlemlerinden saçılan ‘λ’ dalga boyulu X-ışınları, ‘θ’ açısını oluştururlar. Deneysel parametre olan 2θ değeri ise saçılan ve geldiği doğrultusunda devam eden X-ışınları demet arasındaki açıdır. Birbirine paralel bütün kristal düzlemler arasındaki mesafe ‘d’ kadardır.

X-ışını demeti, düzenli atom gruplarından oluşan kristal bir yapıya çarptığında saçılım oluşturur ve bu saçılımı oluşturan ışın dalgaları birbirlerini etkileyerek girişim yapar ve birbirlerini yok eder. Bu oluşum X-ışınlarının kırınımı olayıdır. Kırınımın olduğu bu yönler, kristalin birim hücre boyutuna, şekline göre değişiklik gösterir. Kırınım şiddeti ise, kristalin birtakım yapısal özellikleri ile belirlenir. Atom düzlemlerinden yansıyan kırınımli x-ışınları aynı fazda olduklarında bir kırınım deseni oluştururlar. Bu kırınım olayında X-ışınları elastik olarak saçılır, dolayısıyla enerjileri değişmez. Bir alttaş üzerinde üretilen ince filmleri karakterize etmek için X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılır. X-ışınları malzemelere nüfuz eder ve böylece hem film hem de alt tabakanın nitelikleri hakkında bilgi sağlayabilir. Difraktometre, gonyometre, tüp, tüp konumu, ölçümler için gerekli olan yarıklı sistemi, numune taşıyıcı ve dedektör, tümü X-ışını difraktometre tasarımının bir parçasıdır.

Bu tez çalışmasında üretilen numunelerin XRD ölçümleri, ODTÜ Merkezi Laboratuvarında bulunan ve Reim 4.2’de fotoğrafı görülen dalgaboyu $\lambda = 1,5405 \text{ Å}$ olan CuK α olan XRD cihazı ile ölçümler yapıldı. Ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapıldı.



Resim 3.3. XRD cihazı [69].

3.3. Elektriksel Karakterizasyon

Üretilen numunelerin elektriksel karakterizasyonu için I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. Ölçüm sistemi; Keithley 2400 Akım-Gerilim cihazı, LakeShore Sıcaklık Kontrol Cihazı ve Keysight E4990A empedans ölçüm cihazından oluşmaktadır.

Üretilen numuneler ölçümlerin yapılabilmesi için sensör hücresine konuldu. Sensör hücresi; numune tutucu, Keithley 2400 Akım-Gerilim cihazı için bağlantı uçları, ısıtma için LakeShore Sıcaklık Kontrol cihazına ait bağlantı uçları ve Keysight E4990A empedans ölçüm cihazı için kullanılan bağlantı uçlarından oluşmaktadır.

I-V ve C-V ölçümleri için, üretilen sensör gerekli bağlatılar yapılarak sensör hücresine yerleştirildi. Öncelikle oda sıcaklığında I-V ve C-V ölçümleri yapıldı daha sonra Lake Shore Sıcaklı kontrol cihazı yardımı ile sıcaklığa bağlı I-V ve C-V ölçümleri yapıldı.

3.3.1. DC analizler

İnce filmlerin direnci, Keithley 2400 Akım-Gerilim cihazı kullanılarak iki prob yöntemi ile ölçüldü. Gümüş pasta kullanılarak elektrik kontaklar alındı ve -4V ile +4V arasında ölçümler alındı.

3.3.2. AC analizler

İletken elektronların yanında, üretilen yapıların elektriksel özelliklerini incelemek için empedans spektroskopisinde incelenmektedir. Bu yöntemle parçacık, parçacık sınırı ve elektronların çeşitli

etkileri düzgün bir şekilde ortaya konulabilir.

3.3.3. Empedans analizleri

Devre içerisinde AC (Alternatif Akım) akıma karşı oluşan dirence empedans denir. Empedans ölçümleri, mikron seviye altında dielektrik iletim ve gevşeme yapılarının elektriksel özelliklerini analiz etmek için kullanılır ve parçacıkların empedansı ile elektrot etkileri arasında farkı anlamamıza yardımcı olur.

Empedans ölçüm sonuçlarının hem gerçek hem de sanal bileşeni vardır ve gerçek kısmı Z' ile sanal kısmı ise Z'' ile tanımlanır ve gerçek ve sanal kısmın fonksiyonu olarak Nyquist Eğrisi (Cole-Cole eğrisi) tanımlanır.

Empedans, $Z(w)$ olarak gösterilir Eşitlik 3.1'deki gibi formülize edilir.

$$Z(w) = Z'(w) + Z''(w) \quad (3.1)$$

Empedans analizleri ile hesaplanan gerçek ve sanal kısımdan yararlanarak Nyquist eğrileri oluşturulur ve bu modellerle yardımıyla devrenin eşdeğerinin fiziksel yapısı hakkında fikir sahibi olunabilir. Nyquist eğrilerinin grafiklerinden faydalananarak R_s ve R_p parametreleri belirlenebilir.

Bu tez çalışmasında üretilen numunelerin empedans ölçümleri, Keysight E4990A empedans analizörü, LakeShore 325 sıcaklık kontrolörü, test hücresinden oluşan empedans analizörü ölçüm sistemi kullanılarak elektriksel karakterizasyonlar gerçekleştirilmiştir. C-V ölçümleri Keysight E4990A empedans analizörü kullanılarak 1 kHz ile 1.5 MHz frekans aralığında, sıcaklığa bağlı ölçümler ise 300 K ile 440 K arasında 20 K'lık adımlarla gerçekleştirilmiştir.

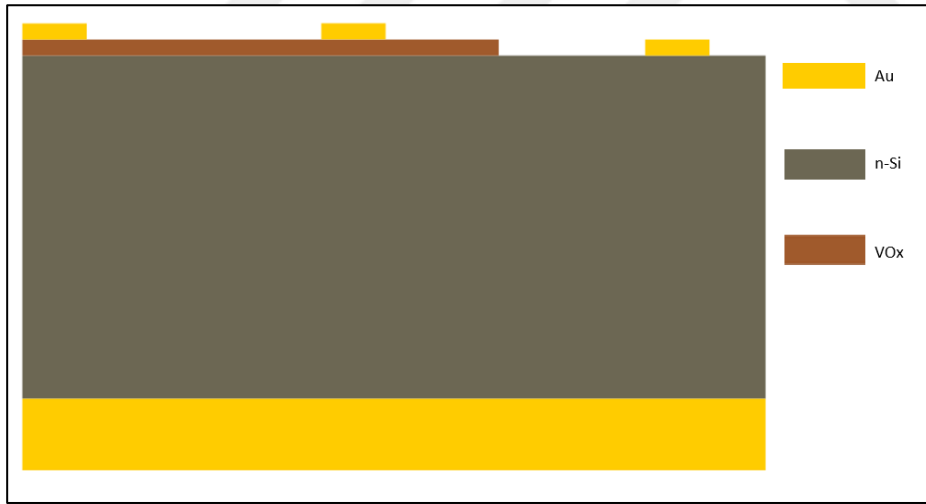
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Alttaşların Hazırlanması

Altlık olarak 1-20 Ω .cm dirençli ve 525 ± 25 μ m kalınlığında tek tarafı parlak n-tipi silikon (100) pul kullanıldı. Kullanılan pul piranha solüsyonu ile (Sülfürik Asit (1): Hidrojen Peroksit (1)) kullanılarak temizlendi ve 2 cm x 2 cm büyüklüğünde parçalara ayrıldı.

4.2. Au ve VO_x İnce Filmlerin Üretilmesi

Temizlenen örnek yüzeyinin öncelikle arka tarafı Manyetik Püskürtme Yöntemi ile omik kontak olarak kullanılmak üzere 200 nm altın (Au) ile kaplandı ve örnek 400°C sıcaklık altında 4 dakika tavlandı. Daha sonra örneğin ön yüzeyinin bir kısmı kapatılarak açıkta kalan bölge yine Manyetik Sıçratma Yöntemi ile 50 nm VO_x ile kaplandı. Açıkta kalan Si yüzey ile VO_x kaplanan yüzey gölge maske (shadow mask) kullanılarak yine Manyetik Püskürtme Yöntemi ile 100 nm Schottky kontak olarak kullanılmak üzere altın (Au) kaplandı.



Şekil 4.1 Au/VO_x/n-Si/Au ve Au/n-Si/Au Schottky cihazının kesit görünümü.

4.3. Akım-Gerilim ve Kapasitans-Gerilim Ölçümleri

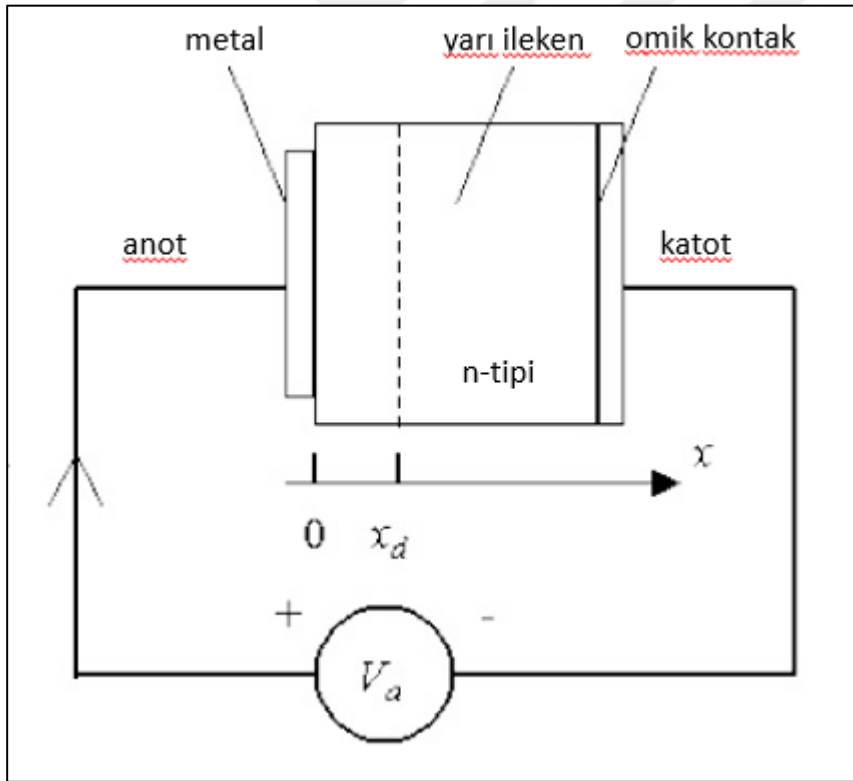
Üretilen numunelerin elektriksel karakterizasyonu için I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. Ölçüm sistemi; Keithley 2400 Akım-Gerilim cihazı, LakeShore Sıcaklık Kontrol Cihazı ve Keysight E4990A empedans ölçüm cihazından oluşmaktadır.

Üretilen numuneler ölçümlerin yapılabilmesi için sensör hücresine konuldu. Sensör hücresi; numune tutucu, Keithley 2400 Akım-Gerilim cihazı için bağlantı uçları, ısıtma için LakeShore Sıcaklık Kontrol cihazına ait bağlantı uçları ve Keysight E4990A empedans ölçüm cihazı için kullanılan bağlantı uçlarından oluşmaktadır.

I-V ve C-V ölçümleri için, üretilen sensör gerekli bağlatılar yapılarak sensör hücresine yerleştirildi. Öncelikle oda sıcaklığında I-V ve C-V ölçümleri yapıldı daha sonra Lake Shore Sıcaklı kontrol cihazı yardımı ile sıcaklığa bağlı I-V ve C-V ölçümleri yapıldı.

4.3.1. Akım-gerilim ölçümleri

Şekil 4.3, bir yarı iletken parçasına temas eden bir metalden, uygulanan voltaj ve akımın uygulama yönünü gösteren metal-yalıtkan-yarı iletken bağlantı yapısının şematik bir gösterimini göstermektedir; burada x_d , tükenme bölgesi genişliğidir.



Şekil 4.2. Metal-yalıtkan-yarıiletken bağlantı yapısının şematik gösterimi.

Katkılı yarı iletkenler için $V=3kT/q$ ile ileri yönde I-V karakteristiği Eşitlik 4.1'deki gibi verilir.

$$J = A^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] - 1 \quad (4.1)$$

Bu eşitlikten;

$$J = A^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(\Delta\Phi+V)}{kT}\right)\right] \quad (4.2)$$

elde edilir ve burada, A^{**} Richardson sabiti, $\Delta\Phi$ sanal kuvvetinin azalması ve Φ_{b0} sıfır alan asimetrik bariyer yüksekliğidir. İdealite faktörü n şu şekilde verilir:

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\partial v}{\partial (\ln J)} \quad (4.3)$$

ve

$$\Phi_{bn} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{A^{**}T^2}{J_s}\right) \quad (4.4)$$

Ters yöndeki en büyük etki, $V_R > 3kt/q$ ile Schottky bariyerinin düşmesidir ve bu ters akım bileşeni, metal plakanın sınırı etrafında keskin kenarı meydana getiren kenar kaçak akımıdır. Bu, kavşak eğriliği etkisi ile bir benzerlik gösterir.

$$J_R = J_s = A^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{q\sqrt{q\varepsilon/4\pi\varepsilon_s}}{kT}\right) \quad (4.5)$$

Ters kaçak akım, diyot parametresinin fonksiyonu olarak ölçülebilir ve çizilebilir [69]. Bariyer yüksekliği bant aralığından daha küçükse, böylece tükenme bölgesindeki rekombinasyon-jenerasyon akımı, denklem 4.5 ile verildiği gibi ters öngerilim ile yavaşça artan Schottky emisyon akımı ile küçülür.

4.3.2. Kapasitans-gerilim ölçümleri

Bariyer yüksekliğini hesaplamak için kapasitans ölçümleri de kullanılabilir. Küçük bir ac voltajı bir dc ön gerilimi ile entegre edildiğinde, yükler metal yüzeyde ve yarı iletken de karşıt yükler üzerinde aşamalı olarak indüklenir. Kapasitans (C) ve voltaj (V) arasındaki ilişkinin formülü Eşitlik 4.6 ve 4.7’de gösterilmiştir.

$$C = \frac{\partial Q_{sc}}{\partial v} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_D}{2(vbi - vkt/q)}} = \frac{\varepsilon_s}{w} \quad (4.6)$$

ve

$$\Phi_{bn} = V_{bi} + V_n(kT/q) - \Delta\Phi \quad (4.7)$$

burada, Q_{sc} yarıiletkenin birim alanı başına uzay yükü yoğunluğudur, C , birim alan başına tükenme bölgesi kapasitansdır, $\Delta\Phi$, Schottky bariyerinin azalmasıdır, N_D , n-tipi yarıiletkenin katkılama konsantrasyonudur, W , tükenme bölgesinin genişliğidir, V voltajdır ve V_n , katkılı yarı iletkenin konsantrasyonu biliniyorsa elde edilebilecek olan iletim bandının altındaki Fermi seviyesinin derinliğidir [1].

4.3.3. Işık-akım ölçümleri

Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si/Au yapılar için beyaz ışık altında 0 mW/cm²- 100 mW/cm² ışık şiddeti arasında 20 mW/cm² aralıklarla akım-gerilim (I-V) ve kısa devre akımı-zaman (I_{sc}-T) ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, FYTRONIK SOLAR SIMULATOR cihazı kullanılarak yapılmıştır. Beyaz ışık altında yapılan ölçümlerde her bir numuneden iki farklı noktadan ölçümler alınmıştır.

Bu sonuçlara göre; Au/n-Si/Au numunesi için daha düşük değer gösteren noktadan, Au/VO_x/n-Si/Au numunesi için ise daha yüksek değer gösteren noktadan fotoakım-gerilim (I_{ph}-V) ölçümleri 380 nm- 780nm dalgaboyu aralığında 50 nm adımlarla ölçümler alınmıştır. 480 nm dalgaboyundan itibaren, dalgaboyu arttıkça fotoakım aralığı düşmektedir. Bu nedenle her iki numune içinde 380 nm- 480 nm dalgaboyu aralığında 20 nm adımlarla fotoakım-gerilim (I_{ph}-V) ölçümü tekrarlanmıştır. Ayrıca alınan ölçümlerden ışık şiddetine karşı duyarlılık ve dalgaboyuna karşılık tepki grafikleri de çizdirilmiştir.

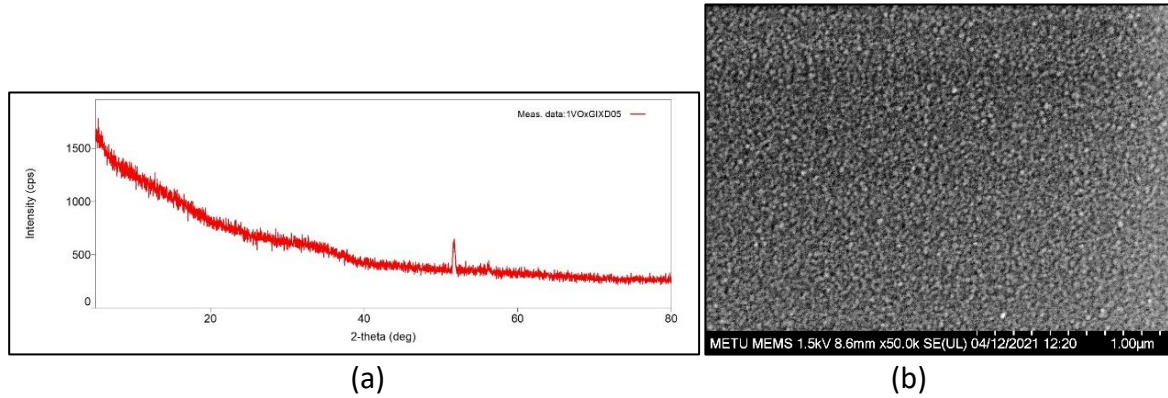
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Giriş

Bu bölümde, üretilen VO_x ince filmin X-Işını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), akım-gerilim ve kapasitans-gerilim karakteristikleri, ışık şiddetine ve ışık dalgaboyuna bağlı ölçümleri yapıldı ve analiz edildi. Silisyum (Si) ve vanadyum oksit (VO_x) diyot yapılarının kapasite ve iletkenlik karşılaştırmaları yapılmıştır. Kapasite ve iletkenlik ölçümlerinden, diğer diyot parametreleri hesaplanıp karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ışık şiddetine ve ışığın farklı dalgaboylarına karşılık akım değerleri ölçülüp karakterize edilmiştir. Bu ölçümlerden, yanıt ve geri dönüş zamanları gözlemlenmiştir. Bütün bu ölçümler detaylı olarak yorumlanmıştır.

5.2. XRD ve SEM Analizleri

Manyetik Saçtırma tekniği ile silisyum alttaşı üzerine büyütülerek elde edilen VO_x ince filmin, X-ışını kırınım tekniği kullanılarak analizi Rigaku Ultima XRD ile yapılmıştır. Silisyum alttaşı üzerine büyütülen VO_x ince filmin XRD verisi Şekil 5.1a'da verilmiştir.



Şekil 5.1. VO_x ince filmin (a) XRD verisi ve (b) SEM görüntüsü.

X-ışını kırınım verisi analiz edildiğinde silisyum alttaşı üzerine büyütülen VO_x ince filmin amorf yapıda olduğu gözlemlenmektedir. 51.16° üzerinde bulunan pik, literatürden de anlaşılabileceği üzere silisyum alttaştan gelmektedir. Manyetik saçtırma yöntemi kullanılarak silisyum alttaşı üzerine büyütülmüş VO_x ince filmin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüleri Resim 5.1'de görülen Hitachi SU-8230 SEM ile yapılmıştır. Büyütülen VO_x (Vanadyum Oksit) ince filmin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüsü Şekil 5.1b'de verilmiştir. Büyütülen ince filmin yüzey morfolojisinden de anlaşılabileceği üzere büyütülen ince film amorf yapıdadır.

5.3. Akım-Gerilim Ölçümleri

Schottky diyotu, doğrultucu metal-yarı iletken (MS) kontağı olarak adlandırılır ve çoğunluk taşıyıcılarına dayalı bir cihazdır. İleri kutuplamalı Schottky kontağı, akımın belirli bir voltajdan sonra bir yönde akmasına izin verir, ancak ters ön besleme durumunda akımı ters yönde düzeltir. Buna göre SBD'ler doğrultucu güç elektroniği devreleri için idealdir. Taşıyıcıların çoğunluğunu temel alıyor olması hız açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Ancak, Schottky diyotlar radyo frekansı ve diğer güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İleri kutuplama durumunda, Schottky diyotlar aynı potansiyel farkı altında p-n bağlantı diyotlarından çok daha yüksek akım yoğunluğuna sahiptir [69–72]. Ayrıca üretim kolaylığı ve elektronik özellikleri hakkında genel bilgi sahibi olunması nedeniyle opto-elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahiptirler. Yani MS kontakları, MOS veya MYY kapasitör veya yapıları, FET'ler (alan etkili transistörler), MESFET'ler (metal-yarı iletken FET'ler), MOSFET'ler, güneş pilleri, fotodiyotlar, MFIS (metal ferroelektrik- yalıtkan yarı iletken) yapıları, MFISFET bellekleri, p-n bağlantıları, heteroeklemler gibi optoelektronik devre yapılarının temelini oluşturur [72-82]. Bu çalışmada n-tipi (100) oryantasyonuna 525 µm kalınlığa ve 1-20 Ω.cm öz dirence sahip silisyum pul kullanılmıştır.

Üretilen aygıtların elektriksel karakterizasyonu yapılırken akım-gerilim ve kapasitans-gerilim ölçümleri oda sıcaklığında ve 300-500 K sıcaklık aralığında 20 K adımlarla ayrı ayrı alınmıştır. İdeal durumda metal-yarı iletken ara yüzey arasında akımın akış mekanizması Termiyonik Emisyon Teorisi (TE) ile açıklanmıştır. Termiyonik Emisyon Teorisine göre [1-2]; Schottky kontaklardaki akım Eşitlik 5.1'deki gibi gösterilmiştir. Burada; q elektron yükünü, V ileri besleme akımını, k Boltzmann sabitini ve T ise mutlak sıcaklığı temsil eder. Eşitlik 5.3'te I_0 olarak gösterilen doyum akımı ise Eşitlik 5.2'de gösterilmiştir. Eşitlik 5.2'de gösterilen A efektif diyot alanını, A^* ise n-tipi silisyum pul için değeri $112 \text{ A m}^{-2} \text{ K}^{-2}$ olan Richardson sabitini [1-2],[83-85] Φ_{b0} 0 V değerindeki efektif bariyer yüksekliğini ve n ise idealite faktörünü temsil eder [86].

$$I = I_0 \exp(qV/nkT) [1 - \exp(-qV/kT)] \quad (5.1)$$

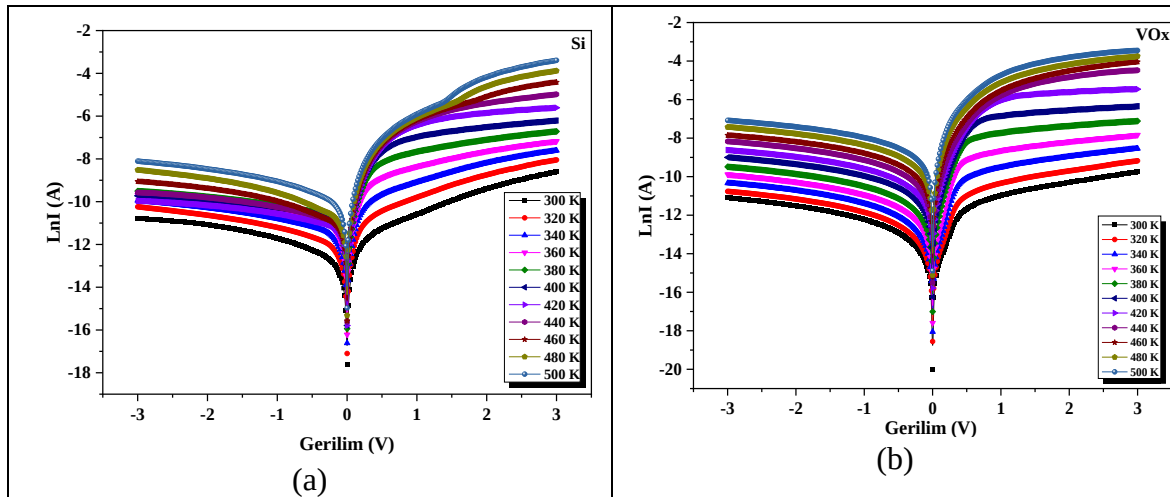
$$I_0 = AA^* T^2 \exp(-q\Phi_{b0}/kT) \quad (5.2)$$

İdealite faktörü $\ln I$ - V grafiğinin eğiminin lineer kısmından elde edilir ve Eşitlik 5.1'den n , idealite faktörü Eşitlik 5.3'te gösterilmiştir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (5.3)$$

İdeal termiyonik emisyon modelinden deneysel I-V verilerinin sapmasını hesaba katmak için tanımlanan idealite faktörü, ideal bir Schottky diyotu için karakteristik olan göreceli yüksek sıcaklık bölgesinde birliğe yakındır.

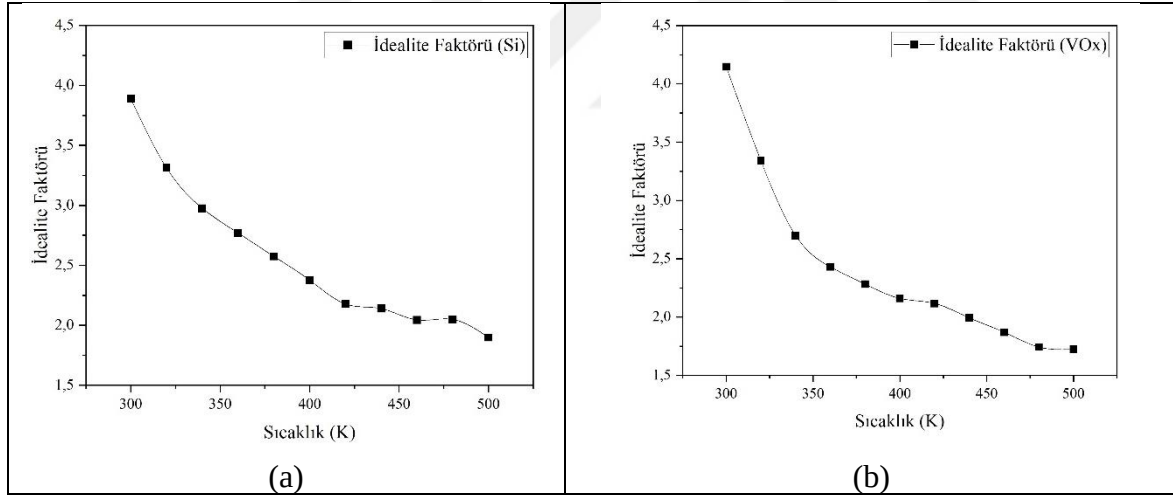
Şekil 5.2’den de anlaşılabileceği gibi, üretilen numuneler, tüm sıcaklıklarda iyi bir doğrultma özelliğine sahiptir ve bu, sıcaklık artışının veya azalmasının cihazın doğrultma özelliklerini değiştirmediğini gösterir. Bu sonuç, bu cihazın geniş sıcaklık aralıkları için kullanılabileceğini göstermiştir [87–88]. Ayrıca, Şekil 5.2’den görülebileceği üzere hem ters besleme bölgesinde hem de doğru besleme bölgesinde gerilim arttıkça grafik doğrusallıktan saparak plato oluşturma eğilimine doğru gittiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak seri direncin varlığı gösterilebilir. Seri direncin kaynağı olarakta, VO_x ince filmin direnci, kontak noktaları direnci ve n-Si yarı iletkenin direnci olarak söylenebilir [88]. Ayrıca, Poole-Frenkel etkisi ile tuzak destekli elektron taşıma mekanizmasının değişmesi veya sıcaklık etkisi ile bariyer yüksekliğinin ters beslemede değişiklik göstermesi söylenebilir. Ayrıca bir diğer neden olarak, üst elektrot ile alt elektrot arasındaki oksijen boşluklarının iletkenliğe katkısı gösterilebilir [89].



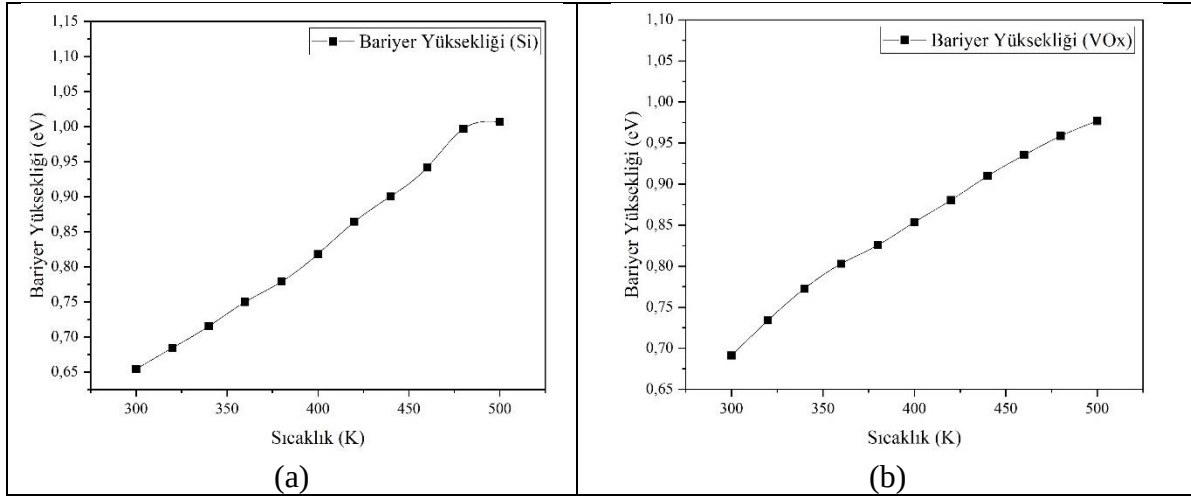
Şekil 5.2. -3V/+3V gerilim altında 300 K-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının I-V grafikleri.

Bir diyotun idealite faktörü, diyotun ideal diyot denklemini ne kadar yakından takip ettiğinin bir ölçüsüdür ve bariyer yüksekliği, metalin Fermi enerjisi ile çoğunluk taşıyıcının bulunduğu bant kenarı arasındaki potansiyel fark olarak tanımlanır. Şekil 5.3’te, 300-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının İdealite Faktörü (n)-Sıcaklık grafikleri ve

Şekil 5.4'te ise, 300-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının Bariyer Yüksekliği-Sıcaklık grafikleri görülmektedir. Schottky bariyer diyotlar için ileri yönlü I-V ölçümünden bariyer yüksekliği ve idealite faktörü gibi temel ifadeler türetilebilir [50]. Bu ifade, düz bant koşulları altında tanımlanan elektrik alanla değişmeyen temel bariyer yüksekliğine dayandırılır [50]. Gerekli ifadeyi elde etmek için önce gerilime bağlı bariyer yüksekliğine sahip ideal bir diyot denklemi için Eşitlik 5.1'de ($n = 1$) yazılır ve $V \gg kT/q$ olduğundan Φ_{bo} için sıfır ileri beslemedeki bariyer yüksekliği denebilir [51]. Bariyer yüksekliği Eşitlik 5.1 ve 5.2'den, idealite faktörü ise Eşitlik 5.3'ten hesaplanmıştır. Şekil 5.3 ve 5.4'ten görülebileceği üzere artan sıcaklık ile bariyer yüksekliğinde bir artış ve idealite faktöründe ise bir düşüş olduğunu ortaya koymaktadır. Buradan, idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin ön gerilim ve sıcaklığa bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu tür sıcaklık bağımlılıkları, Schottky engel diyotlarının bilinen negatif sıcaklık katsayısı ile bariz bir tutarsızlıktır. Bu davranış biçimi, homojen olmayan arayüzler ve bariyer yükseklikleri ile açıklanabilir [51]. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağımlılığı, sıcaklıktaki değişiklik ve arayüzün homojen olmayan doğası ile yük taşıma mekanizmasının baskınlığındaki değişikliklerle de ilişkili olabilir [49].



Şekil 5.3. -3V/+3V gerilim altında 300 K-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının İdealite Faktörü (n)-Sıcaklık grafikleri.



Şekil 5.4. -3V/+3V gerilim altında 300 K-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının Bariyer Yüksekliği-Sıcaklık grafikleri.

5.4. Kapasitans-Gerilim Ölçümleri

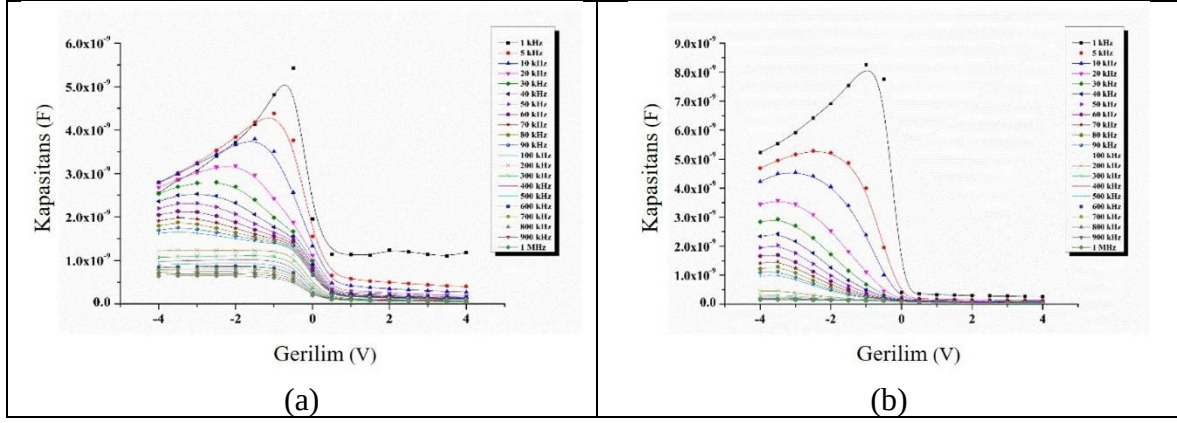
Bu çalışmada öncelikli olarak, Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si-Au Schottky diyotlarının kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleri -4V ile +4V gerilim aralığında 1 kHz-1MHz aralığındaki farklı frekanslar için oda sıcaklığında yapılmıştır. Farklı besleme gerilimleri için 1 kHz-1 MHz frekans aralığında oda sıcaklığında frekansa bağlı ölçümler ve 300-500K sıcaklık aralığında 20 K adımlarla ölçüm alınmıştır. Frekansa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümlerinden dielektrik sabitinin (ε) gerçek ve sanal kısımları, tanδ, modülüsün (M) gerçek ve sanal kısımları, AC iletkenlik (σ_{AC}) ve empedansın (Z) gerçek ve sanal kısımları hesaplandı ve bu hesaplanan öğelerin farklı frekanslarda gerilime bağlı ve farklı gerilimlerde frekansa bağlı grafikleri çizdirildi.

5.4.1. Gerilime bağlı oda sıcaklığında yapılan ölçümler

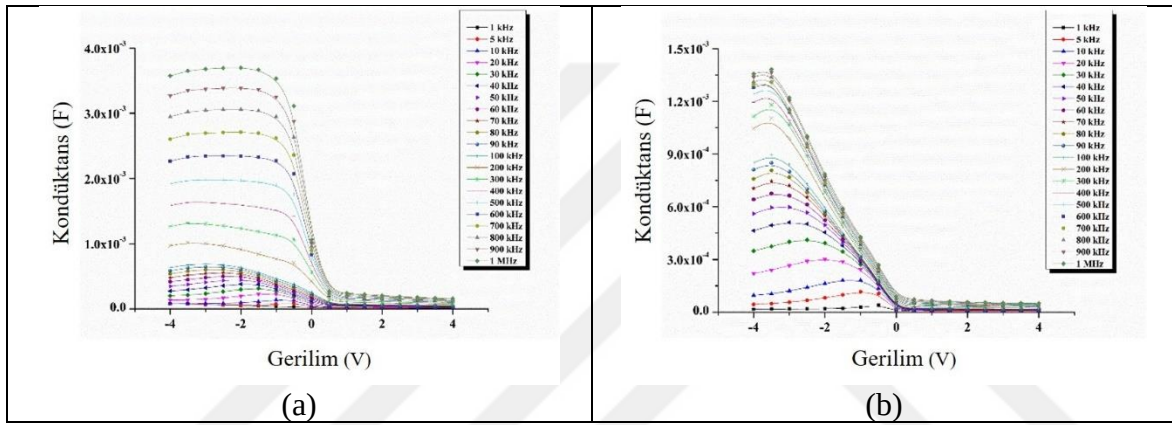
Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si-Au (MY) Schottky diyotlarının kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleri 1 kHz-1MHz frekans ve -4V/+4V gerilim aralıklarında oda sıcaklığında ölçümleri yapılmıştır ve bu ölçüm sonuçlarından çeşitli diyot parametreleri hesaplanıp grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.5'te üretilen Schottky diyotların kapasitans-gerilim, Şekil 5.6'da ise G/ω-V grafiği verilmiştir. Her iki şekilden de görülebileceği üzere hem kapasitans (C) hem de kontüktans (G/ω) değerleri frekans ile yakın ilişki içerisindedir. Şekil 5.5'te kapasitans-gerilim (C-V) eğrilerinin her birinde yığılma-tüketim ve terslenim bölgeleri açıkça görülebilmektedir. Frekansa bağlı olarak C ve G/ω değerlerinde oluşan değişimler özellikle terslenim ve tüketim bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Şekil 5.5'ten görülebileceği üzere C-V grafiğinde C değeri, özellikle tüketim bölgesinde artan frekans ile azalmaktadır. Kapasitans değeri terslenim ve tüketim bölgesinde artan

gerilim ile artmakta, düşük frekanslarda ($f < 30 \text{ kHz}$) tüketim bölgesi ve civarında bir pik vermekte, daha sonra azalmakta ve yığılma bölgesinde ise neredeyse sabit kalmaktadır. Tüketim bölgesi civarında oluşan pik, hem yasak enerji aralığında mevcut ara yüzey durumlarının varlığına hem de diyotun ara yüzey tabakasının varlığına bağlanabilir. Şekil 5.5a ve b'den görülebileceği üzere, VO_x ara yüzün etkisi ile kapasitans değeri düşük frekanslarda ($f < 30 \text{ kHz}$) artmaktadır. Grafiğin yığılma bölgesi başlangıcındaki aşağı doğru sert bir şekilde bükülmesi seri direncin büyüklüğüne bağlanabilir. Düşük frekanslarda yüzey polarizasyon etkisi görülmektedir ve ara yüzey (N_{ss}) durumlarında bulunan yükler düşük frekanslarda AC sinyali takip edebilmelerine rağmen yüksek frekanslarda takip edemezler. Bunun nedeni ise, metal-yarı iletken arasında yerleşen tuzaklar farklı yaşam ömürlerine (τ) sahiptir ve düşük frekans değerlerinde periyot (T) bu tuzakların ömründen daha büyük olduğu için AC sinyali takip edebilirler. Bu durumdan dolayı diyotun kapasitansı tüketim bölgesinde baskın bir hale gelir. Yüksek frekanslarda ise ara yüzey durumlarında bulunan yükler AC sinyali takip edemedikleri için hem C hem de G/ω değerlerine bir katkısı olmaz ve toplam kapasitans tüketim kapasitansı tarafından etkilenir [17-18], [83], [90–96]. Şekil 5.6'dan görülebileceği üzere, kondüktans-gerilim (G/ω -V) grafiğindeki G/ω değerleri terslenim bölgesinde artan frekans ile artmaktadır ve bu davranışı ile C-V karakteristiği benzerlik göstermektedir. Buradan açıkça anlaşılabileceği üzere G/ω değeri, artan frekans ve uygulanan ters besleme gerilim ile doğrudan ilişkilidir. Bütün bunlara ek olarak yüksek iletkenlik, kapasitörün iç sızıntısına neden olarak daha düşük kapasitansa neden olur. Bu nedenle, frekans arttıkça iletkenliğin aksine kapasitans azalır [48].

Ayrıca Şekil 5.5 ve 5.6'dan elde edilen sonuçlar, ara yüzey durumlarının (N_{ss}) hem terslenim hem de tükenme bölgelerinde düşük ve orta frekansta daha etkili olduğunu, seri direncin ise birikim bölgesinde sadece daha yüksek frekanslarda geçerli olduğunu göstermektedir. Bu olgu da, daha düşük kapasitansa neden olur. Bu nedenle, frekans arttıkça iletkenliğin aksine kapasitans azalır [48].



Şekil 5.5. -4V+4V gerilim altında 1 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının C-V grafikleri.

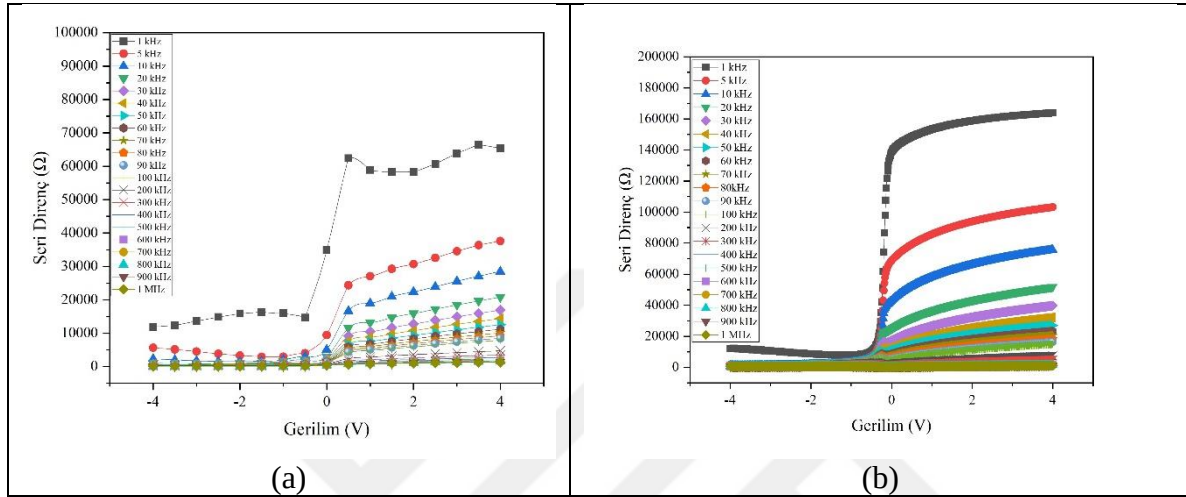


Şekil 5.6. -4V+4V gerilim altında 1 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının G/ω -V grafikleri.

Seri direnç, özellikle yüksek frekanslarda ve birikim bölgesinde yapının elektriksel özelliklerini belirler. Seri direnç değerinin hem kapasitans hem de iletkenlik özelliklerini etkileyebileceğine dikkat edilmelidir. Şekil 5.7’de 1 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının seri direnç-gerilim (R_s -V) grafikleri gösterilmektedir. Şekilden görülebileceği üzere, yığılma bölgesinde artan frekans ile seri direnç düşmektedir. VO_x ara yüz malzemesi etkisi ile seri direnç (R_s) neredeyse her frekans değeri için iki kat artmaktadır. Şekil 5.7’de elde edilen ideal olmayan davranışlar baskın olarak R_s , D_{it} ’e ve diyota uygulanan gerilim ve frekansın değiştirilmesi sonucu değişimlerine bağlıdır [73–76]. Bu noktada D_{it} değerleri hesaplanarak ara yüzey tabakasının etkileri değerlendirilebilir; bununla birlikte, R_s , arka omik metal ve üst doğrultucu kontak oluşumundan, diyottaki kontak ara yüzlerinden ve diyottaki homojen olmayanlardan kaynaklanmaktadır [73–76]. Gerilime bağlı değerler, yüksek frekansta güçlü tükenme bölgesindeki karakteristik olabilir [77]. Nicollian ve Brews tarafından önerilen yöntem olan ve diyotun en yüksek C değeri, ara yüz katmanı kapasitansından gelen katkıyı değerlendirmek için kullanılır ve R_s Eşitlik 5.4’teki gibi gösterilir [78].

$$R_s = \frac{G}{G^2 + (\omega C)^2} \quad (5.4)$$

Burada, ω açısal frekans, G kondüktans ve C ise kapasitanstır. Şekil 5.26'da artan ön besleme gerilimi ve ayrıca frekans ile C değerlerindeki azalma, Şekil 5.5 kapasitans-gerilim (C - V) ve Şekil 5.6 kondüktans-gerilim (G/ω - V) grafiklerinde benzer bir varyasyon olarak açıkça görülmektedir.



Şekil 5.7. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının seri direnç-gerilim (R_s - V) grafikleri.

Ara yüz tuzaklarının yoğunluğu D_{it} , yüzeydeki periyodik kafes yapısına, yüzeyin hazırlanmasına, ara yüzey tabakasının birikmesine ve yarı iletkendeki safsızlıklara bağlanabilir. Şekil 5.8'de (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının ara yüzey tuzakları-frekans (D_{it} - f) grafikleri gösterilmektedir. Her iki grafikten de görülebileceği gibi frekans arttıkça D_{it} azalmaktadır. Ancak VO_x ara yüz etkisiyle, D_{it} düşük frekans bölgesinden itibaren hızla azalmaktadır. Tepeli yapı bölgelerine sahip gözlenen D_{it} dağılımları, MYY diyotları üzerinde rapor edilen çalışmalarla benzerdir ve D_{it} 'in diyotta ara yüzey VO_x katmanında ve Si'nin lokalizasyonuna atfedilebilir [79]. Uygulanan gerilim ve frekans ile C ve G/ω değerlerinde gözlenen değişimler, ara yüzde amaçlanan VO_x katmanına atfedilebilir ve ayrıca yarı iletken yüzeyinde istenmeyen doğal oksit katmanından etkilenmesi de mümkündür [79]. Her iki durumda da metal ve yarı iletken arasındaki ara yüzde bulunan yalıtkan/oksit tabakası ve yarı iletkenin bant aralığındaki D_{it} dağılımı, elektriksel karakteristikleri yönlendiren kilit işlevlerden ikisidir. D_{it} 'nin R_s değerleri üzerindeki etkisine ek olarak (Şekil 5.5) frekans artışı ile kapasitans değerinin azalmasında ve ayrıca gerilime bağlı değişimlerinde etkindir. Bu nedenle diyottaki D_{it} , iyi bilinen Hill-Coleman ve yüksek-düşük frekans yöntemleri yardımıyla $C - V$ ve $G/\omega - V$ grafiklerinden

çıkarılır[80]. Her iki yöntem hakkında tez kapsamında bilgi verilmiştir ancak Hill-Coleman yöntemi kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve grafikleri çizdirilmiştir.

$$D_{it}=2/qA ((G/\omega)_{max}/((G/\omega)_{max}C_i)^2+(1-C_{max}/C_i)^2) \quad (5.5)$$

Bu ifadede, frekans eğrilerinde $(G/\omega)_{max}$ notasyonu ile maksimum iletkenlik değeri ve buna karşılık gelen kapasitans değeri C_{max} olarak elde edilen her frekansta deneysel değerler hesaplanabilir. q ve A parametreleri, denklemdaki sabitleri sırasıyla doğrultucu temas alanı tarafından sınırlandırılan diyotun elektrik yükü ve aktif alanıdır. Diğer sabit C_i , formdaki ara yüzey tabakası nedeniyle kapasitans etkisi ile ilgili birikim alanındaki kapasitansdır [81].

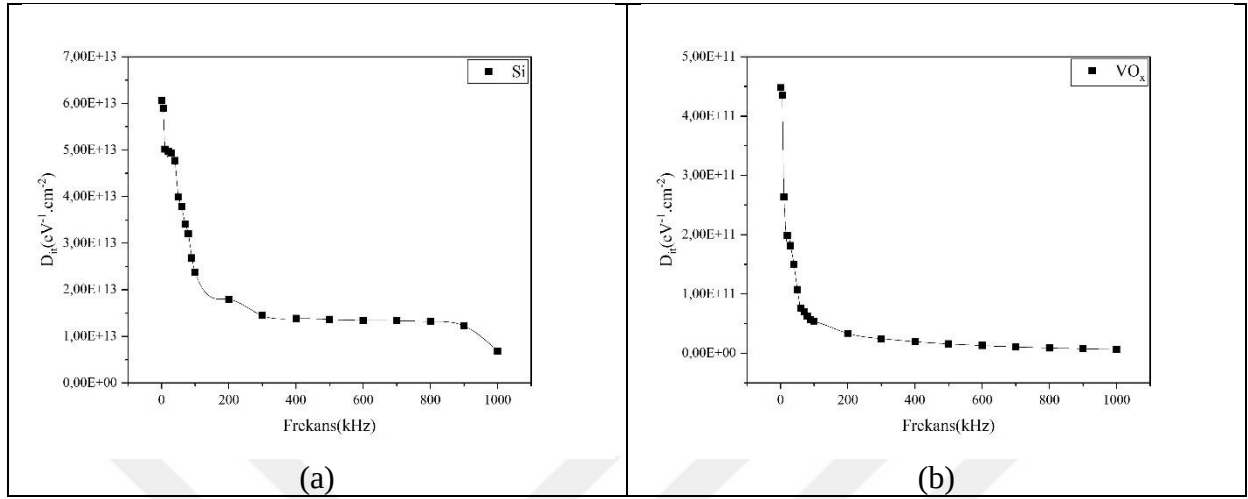
$$C_i = C(1+(G/\omega C)^2) \quad (5.6)$$

Eşitlik 5.7 sadece yüksek frekanslarda geçerlidir [82]. Güçlü birikim bölgesinde formüle edilmiştir çünkü bu iletim yöntemi, bu durumlarda tutulan yüklerin neredeyse tamamının AC sinyalinde uygulanan frekansı izleyemeyeceğini varsaymaktadır [1], [80-83]. Öte yandan, yüksek-düşük frekans yöntemi, D_{it} dağılımının ifadesi ile ara yüz katmanının gerilime bağlı tepkisini analiz etmek için kullanılabilir [84-85].

$$D_{it} = 1/qA[(1/C_{LF} - 1/C_i)^{-1} - (1/C_{HF} - 1/C_i)^{-1}] \quad (5.7)$$

C_{LF} ve C_{HF} sırasıyla C-V ölçümlerinde elde edilen kapasitansın en düşük ve en yüksek değerleridir. Frekanstaki değişimlere bağlı deneysel D_{it} eğrileri Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Yarı iletken silisyum yüzeyinin yakınında gözlenen bu Gauss profili, ara yüz tuzaklarından gelen kapasitans katkısının diyot özelliklerinde sınırlayıcı faktör olduğunu gösterir [85]. Ara yüzdeki lokalize ara yüz durumları, kapasitans eğrilerinin frekans dağılımından genellikle sorumlu olan baskın roldedir. VO_x tabakasından kaynaklanan tuzak durumlarının bu etkisi ile birlikte, yüzey hazırlığının, film tabakaları için biriktirme işlemlerinin ve ayrıca Si tabakasının safsızlık konsantrasyonunun beklenmedik zararlı etkileri nedeniyle yüzeydeki kafes periyodikliğinin kesintiye uğradığı gözlemlenebilir [79-86]. İnce film büyütme işlemleri sırasında yüzey hazırlığına özen gösterilerek temiz oda koşullarında üretilse bile, olası istenmeyen doğal oksit ara yüzey tabakası ve ayrıca doğrultucu metal ve aktif yarı iletken ara yüzeyindeki VO_x tabakasının kalınlığı ile birlikte homojenlik, D_{it} 'in VO_x ara yüzey film tabakası ve yarı iletken arasındaki dağılımı ve diyot yapısının R_s 'si olan lokalize yüzey durumlarının kaynakları olabilir. Bu tür MYY

diyot yapısındaki cihazların performansı, ara yüzdeki yalıtkan/oksit/dielektrik katmanın dielektrik özelliklerinin güçlü etkisi altındadır [82].



Şekil 5.8. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının D_{it} -f grafikleri

Diğer önemli dielektrik parametreleri ise dielektrik sabiti, dielektrik kayıp ve bu ikisinin birbirine oranını veren $\tan\delta$ değerleridir. Dielektrik sabiti, malzemenin elektrik alan içerisindeki elektrik enerjisini depolama yeteneğini belirtirken, dielektrik kayıp ise, değişen elektrik alan içerisinde dielektrik malzemeyi ısıtmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Şekil 5.9'da, oda sıcaklığında farklı frekanslar için dielektrik sabiti $\epsilon'(a,b)$ ve $\tan\delta(c,d)$ 'nin voltaja bağlı ölçümlerini göstermektedir. Dielektrik sabiti, düşük frekans bölgesinde belirli bir ön gerilimde bir tepe yapar, ancak yüksek frekans bölgesinde bir tepe yapmaz. Ayrıca, ara yüz durumlarındaki yükün belirli bir ön gerilimde yüksek frekanslarda AC sinyalini takip edememesi nedeniyle artan frekansla dielektrik sabit değerinin değeri azalır [97]. Dielektrik sabiti Eşitlik 5.9 kullanılarak hesaplandı. Dielektrik sabit değerinin aksine $\tan\delta$ (c,d) değerleri ileri ön gerilim bölgesinde artar. $\tan\delta$ değerleri ise Eşitlik 5.11'de görüldüğü üzere dielektrik kaybın (ϵ'') dielektrik sabitine (ϵ') oranıdır. Dielektrik kayıp Eşitlik 5.10 ile hesaplanmıştır. Ek olarak, düşük frekanslar için $\tan\delta$ (c,d) değerleri ters bias bölgesinde yüksek frekanslardan daha düşük, ancak ileri gerilim bölgesinden daha yüksektir. Ayrıca, $\tan\delta$ değeri, dielektrik sabiti gibi aynı öngerilim voltajı çevresinde bir tepe noktası verir. Bu benzerlik, VO_x/n-Si [91] arayüzünde lokalize edilmiş arayüz durumlarının spesifik dağılımı ile ilgilidir. Cihazın kapasitans değeri VO_x etkisi ile 2.5x10⁻⁹ Farad'dan 4.5x10⁻⁹ Farad'a yükselmiştir ve kapasitans artışı sonucunda dielektrik sabiti 3000'den 5000'e yükselmiştir.

$$C_0 = \epsilon_0 (A/d) \quad (5.8)$$

Burada, ϵ_0 vakum yalıtkanlık sabiti, C_0 uzay yük geçirgenliği ve değeri 8.85×10^{-13} F/m dir, A alan, d ise uzaklıktır. Dielektrik sabiti formülü ise;

$$\epsilon' = C/C_0 \quad (5.9)$$

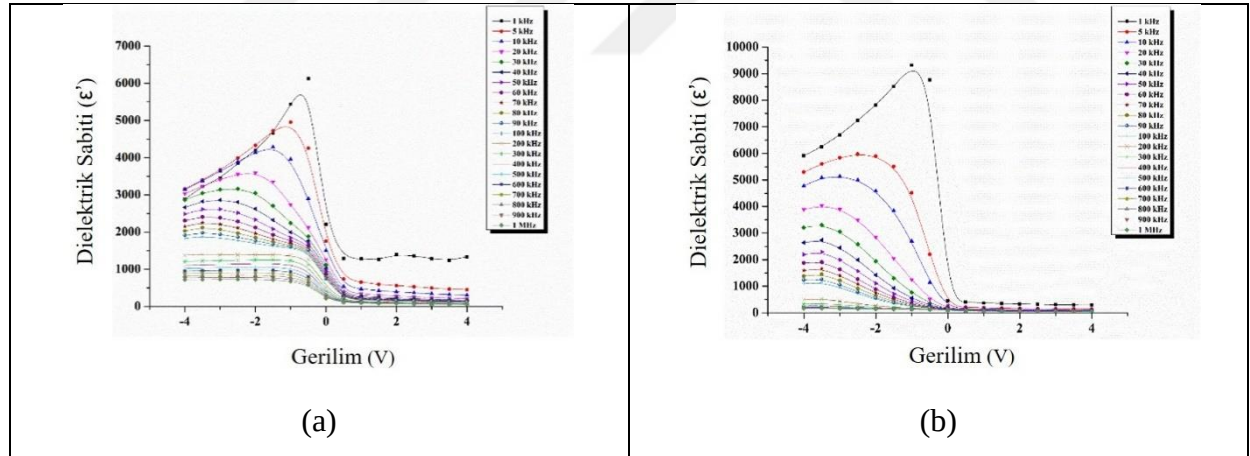
Dielektrik kayıp, kondüktansın açısıl frekans ve uzay yük geçirgenliğine oranıdır.

$$\epsilon'' = G / (C_0 * w) \quad (5.10)$$

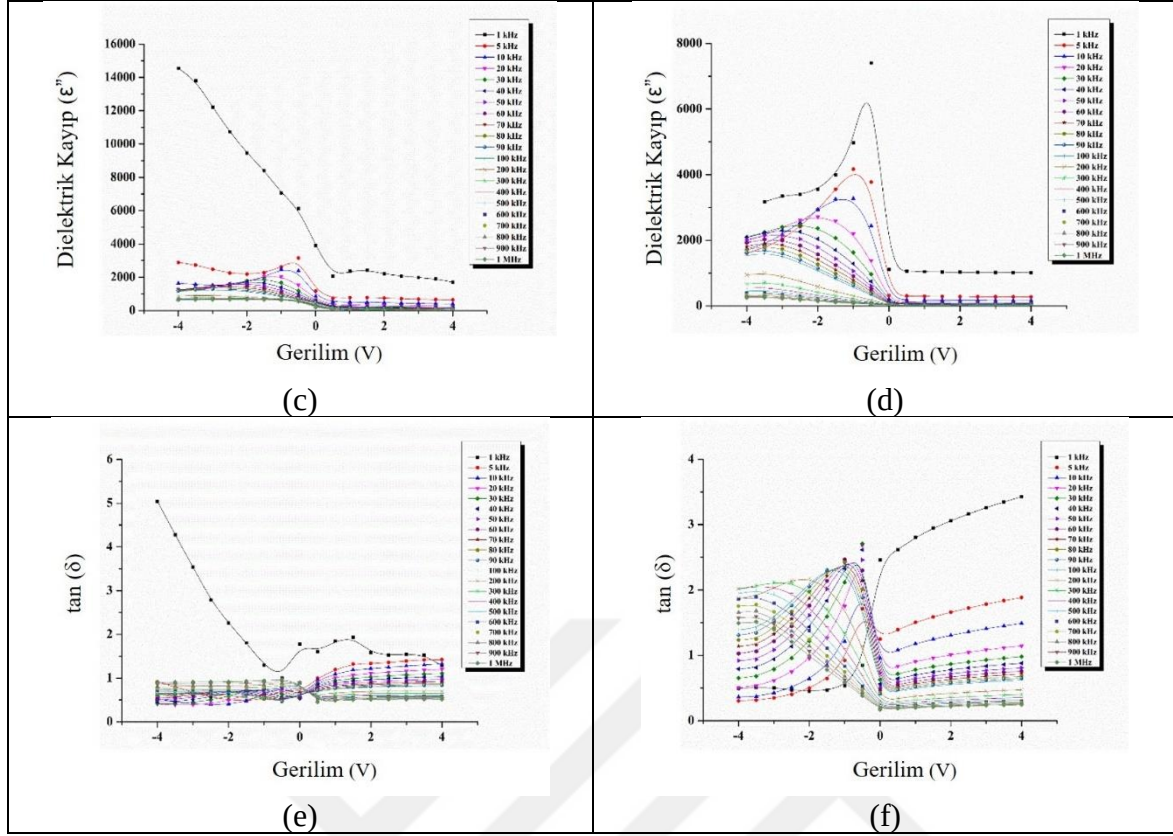
Burada, G kondüktans, C_0 uzay yük geçirgenliği ve değeri 8.85×10^{-13} F/m dir, w ise açısıl frekanstır.

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (5.11)$$

Burada, ϵ'' dielektrik kayıp, ϵ' ise dielektrik sabitidir. $\tan \delta$ değerinin düşük olması dielektrik kaybın az olduğunu gösterir ve üretilen aygıtlarında bir o kadar iyi çalıştığının göstergesidir.



Şekil 5.9. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının ϵ' (a,b), ϵ'' (c,d) ve $\tan \delta$ (e,f) grafikleri.



Şekil 5.9. (devam) -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının ϵ' (a,b), ϵ'' (c,d) ve $\tan \delta$ (e,f) grafikleri.

Önemli diyot parametrelerinden bir diğeri de elektrik modülüdür. Elektrik modülü, malzemedeki elektrik alanının gevşemesine fiziksel olarak karşılık gelir, böylece elektrik modülü gerçek dielektrik gevşeme sürecini temsil eder. Karmaşık elektrik modülü olan $M^* = M' + jM''$, malzemenin geçirgenliği ile ters orantılıdır. Kompleks modülü ayrıca malzemelerin elektriksel tepkisini analiz etmek için alternatif bir yaklaşım sağlar ve bilim adamları tarafından seramik malzemeler ve iyonik iletkenlerdeki gevşeme olaylarını incelemek için benimsenmiştir. Ayrıca, karmaşık empedans grafiklerinden ayırt edilemeyen yüksek sıcaklıklarda tane veya tane sınırı etkisinden kaynaklanan belirsizliğin doğrulanmasına yardımcı olur. Karmaşık elektrik modülü, malzemelerin gevşeme mekanizmasına tane sınırının katkısını incelemek ve analiz etmek için hem geçirgenlik hem de empedans ile tartışılmıştır, ayrıca bize uzun menzilli iletimleri ve lokalize dielektrik gevşeme olgusunu mikroskobik düzeyde araştırma fırsatları sunar [96]. Karmaşık elektrik modülü, karmaşık geçirgenliğin tersidir ve Eşitlik 5.12'deki gibi verilir.

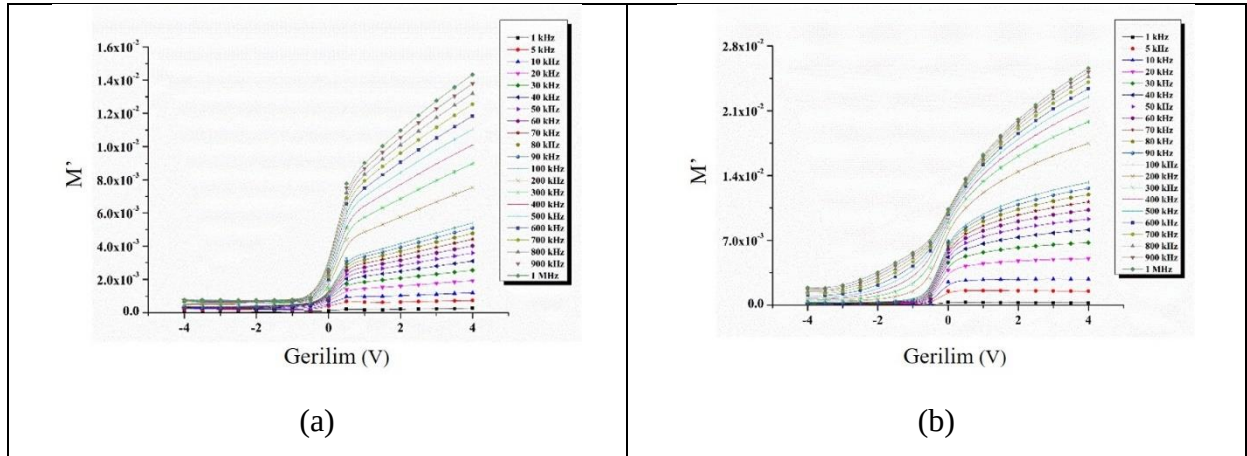
$$\begin{aligned}
 M^* &= \frac{1}{\epsilon^*} = \frac{1}{(\epsilon' - j\epsilon'')} = M' + jM'' \\
 &= \frac{\epsilon'}{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} + j \frac{\epsilon''}{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2}
 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Ayrıca, karmaşık empedans Z 'nin bir türevi cinsinden de Eşitlik 5.13'teki gibi ifade edilebilir.

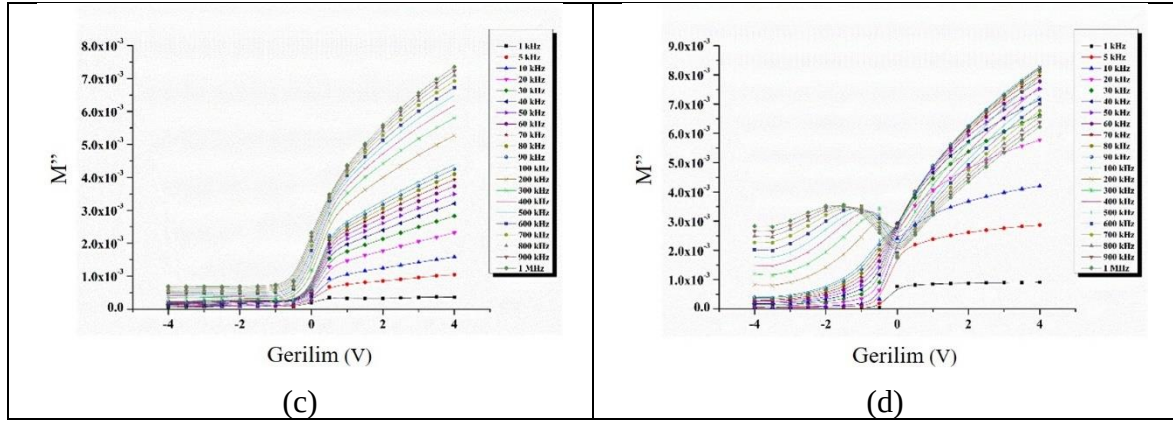
$$M^* = M' + jM'' = j\omega \epsilon_0 Z^* = j\omega \epsilon_0 Z' - \omega \epsilon_0 Z'' \quad (5.13)$$

Burada, M' ve M'' , sırasıyla karmaşık elektrik modülü M^* 'nin gerçekte ve sanal kısımlarıdır ve ω ise açısal frekanstır.

Şekil 5.10'da, oda sıcaklığında farklı öngerilim gerilimleri için elektrik modül değerlerinin gerçekte (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı ölçümünü göstermektedir. Şekil 5.10a ve Şekil 5.10b'de görüldüğü gibi modülün gerçekte kısmı ters öngerilim gerilimi bölgesinde doyuma ulaşır ve hem Au/VO_x/n-Si/Au hem de Au/n-Si/Au Schottky diyotları için 0V civarında yükselmeye başlamıştır. Ancak Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyot modülünün sanal kısmı özellikle yüksek frekans bölgesinde farklı davranır. Şekil 5.10d'de görüldüğü gibi, yüksek frekans bölgesi için M'' değerleri önce azalır ve 0V civarında en küçük değere ulaşır ve daha sonra tekrar yükselirken Au/n-Si/Au Schottky diyot modülünün gerçekte kısmı ile benzer davranır. Yığılma bölgesinde, polarizasyonun gevşemesi nedeniyle tüm frekans değerleri için öngerilim geriden ileri doğru değiştirilerek M' değerleri azalmıştır [91]. Ek olarak, M'' değerleri, yığılma ve tükenme bölgelerinde azalan frekansla azalmıştır ve yüzey durumlarındaki yüklerin özel dağılımı ve gevşeme süreleri nedeniyle tükenme bölgesinde tepe noktaları oluşturmuştur [92]. Ayrıca, iletim mekanizması sadece ön gerilime değil aynı zamanda frekansa da bağlıdır [93].

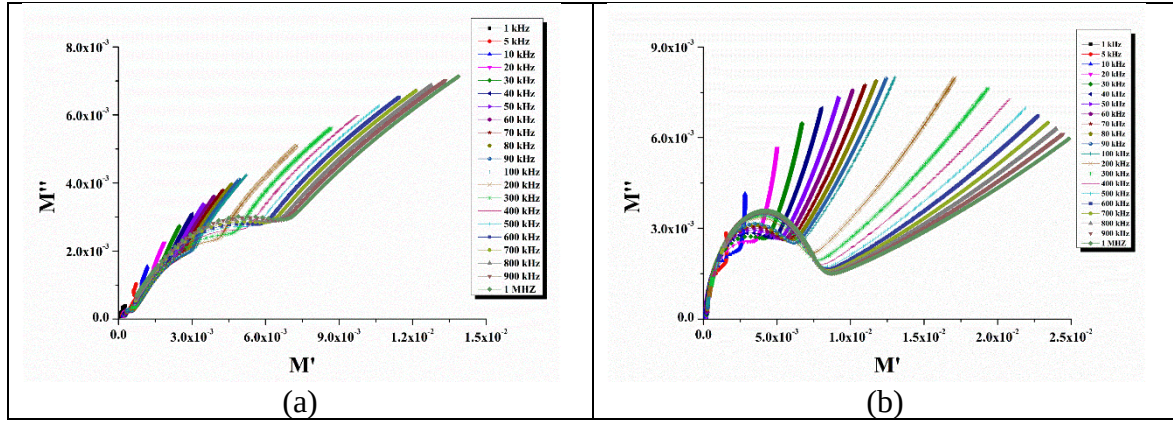


Şekil 5.10. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) Schottky diyotlarının elektrik modülünün gerçekte (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı grafikleri.



Şekil 5.10. (devam) -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d) Schottky diyotlarının elektrik modülünün gerçek (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı grafikleri.

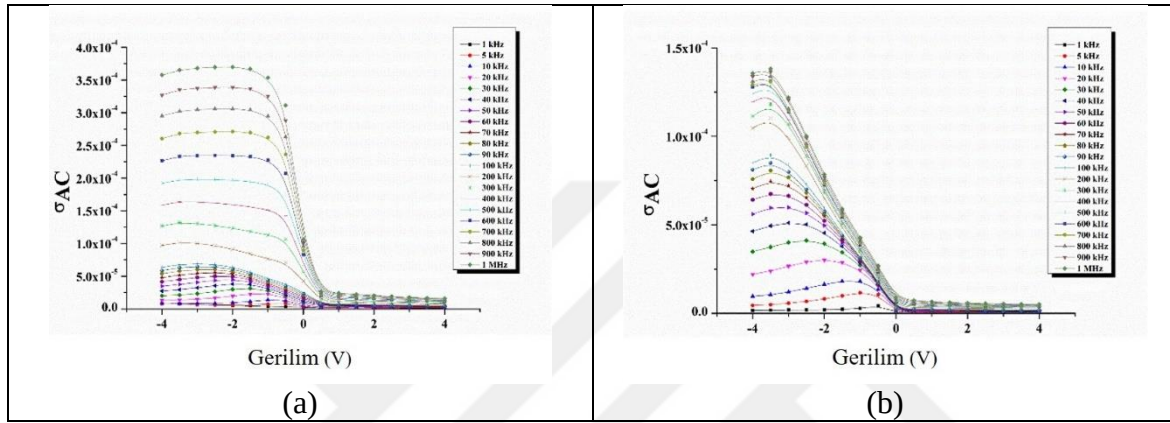
Şekil 5.11’de, M'' - M' Cole-Cole eğrileri görülmektedir. Gerçek eksendeki kesişme, tane veya tane sınırından gelen kapasitansı verir. Her iki numunenin modül düzlemi grafiğinde düşük ve yüksek frekanslarda yarım daire biçimli yaylar gözlemlenmiştir, bu da iki gevşeme sürecinin varlığına işaret etmektedir. Küçük yarım daire biçimli yaylar, baskın tane etkilerinden ziyade zayıf tane sınırı etkilerinin katkısına karşılık gelir. Şekil 5.11b’de yarım daire biçimli yaylar daha geniştir ve bu yayların daha geniş olması VO_x ara yüzey etkisi ile gelen yığın veya tane tepkisini temsil eder [96]. Ayrıca her iki örnek için, frekans artarken yarıçapta da bir artış vardır.



Şekil 5.11. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının Cole-Cole eğrilerinin frekansa bağlı grafikleri.

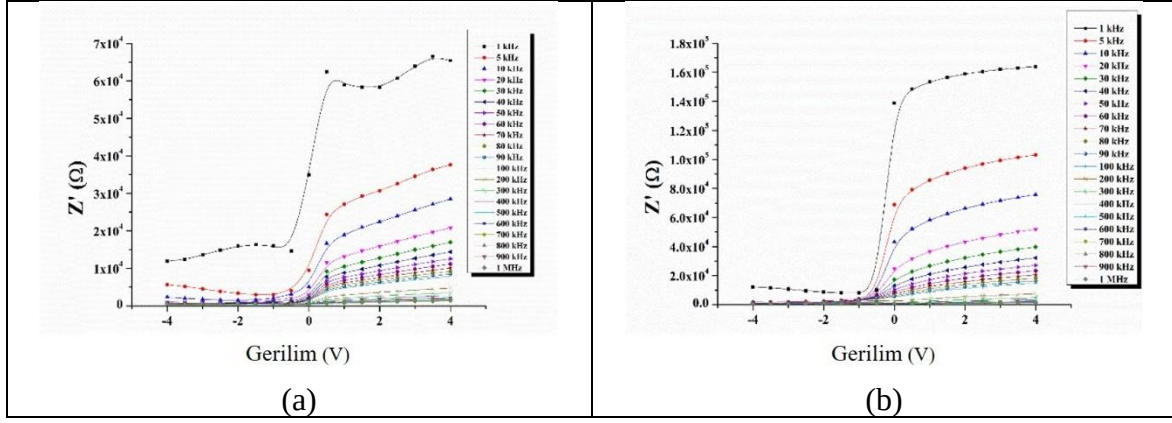
DC iletkenlik sadece dirence bağlı iken, AC iletkenlik direncin yanında özellikle frekans arttıkça iletkenliği azaltma eğiliminde olan indüktif ve kapasitif etkilere de bağlıdır. Şekil 5.12’den görülebileceği gibi, ters besleme bölgesindeki AC iletkenliği frekansla artar ve Au/n-Si/Au Schottky diyotun değeri Au/VOx/n-Si/Au'dan daha yüksektir. Belirli bir sıcaklıkta yüksek frekans

aralığında AC iletkenliğinin artması, iletim mekanizmasındaki artıştan kaynaklanabilir [94]. Ek olarak, Au/VOx/n-Si/Au değeri ters öngerilim bölgesinde yavaş yavaş azalırken, Au/n-Si/Au değeri 0 V civarında daha keskin bir şekilde azalır. Belirli bir voltajda tükenme ve yığılma bölgesinde frekansın azalmasıyla σ değerleri azalmıştır. Artan girdap akımı, seri direncin azalmasına ve artan frekans σ değerlerinde artışa neden olmuştur. Diğer bir deyişle, σ değerlerindeki artış, taşıyıcıların tuzaktan kurtulması ve iletkenliğe katkısından kaynaklanmıştır [92].

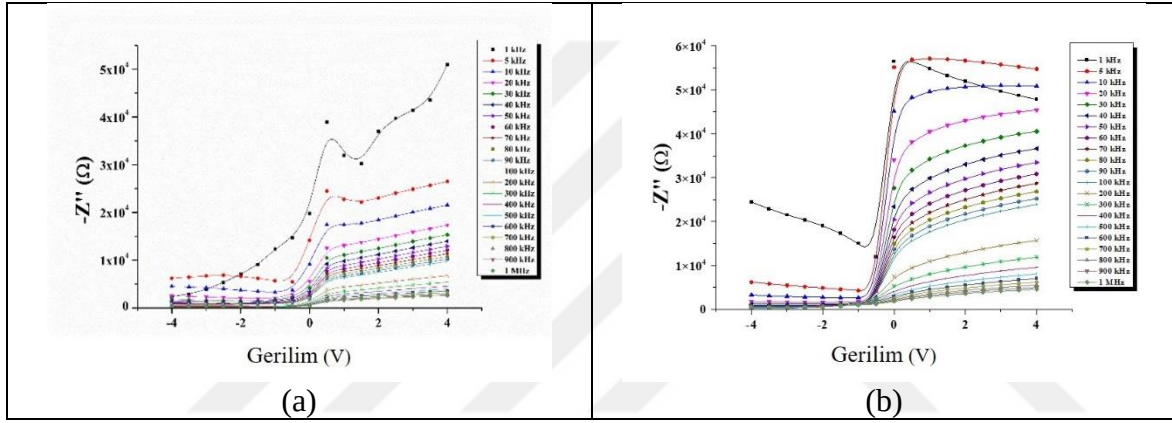


Şekil 5.12. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının AC iletkenlik grafikleri.

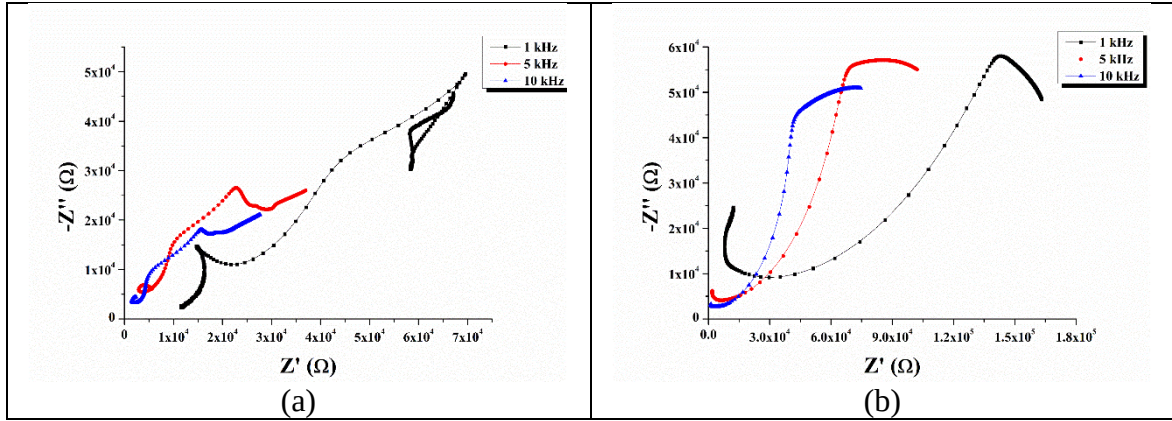
Ohmik direnç ve reaktansın birleşik etkilerinden kaynaklanan, bir elektrik devresinin veya bileşeninin alternatif akıma karşı etkin direnci olarak tanımlanan empedans, bir diğer önemli bir dielektrik parametresidir. Şekil 5.13'te, Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının empedans ölçümlerinin gerçek kısmının Şekil 5.14'te ise, Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının empedans ölçümlerinin sanal kısmının farklı frekanslarda gerilime bağlı değişimini göstermektedir. Terslenim bölgesindeki sabitken, tükenme ve yığılma bölgelerinde voltaj ve frekans değişimlerinden etkilenmişlerdir. Empedansın gerçek ve sanal kısımlarında özellikle düşük frekanslarda yığılma bölgesinde bir pik meydana gelmektedir. Pik oluşması, artan seri direnç etkisine dayanabilir [98]. Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarında ise yığılma bölgesinde böyle pikler olmayışı artan bir seri direnç varlığı olmaması olarak yorumlanabilir. Her iki yapının empedansının gerçek ve sanal kısımları artan frekansla beraber azalmaktadır.



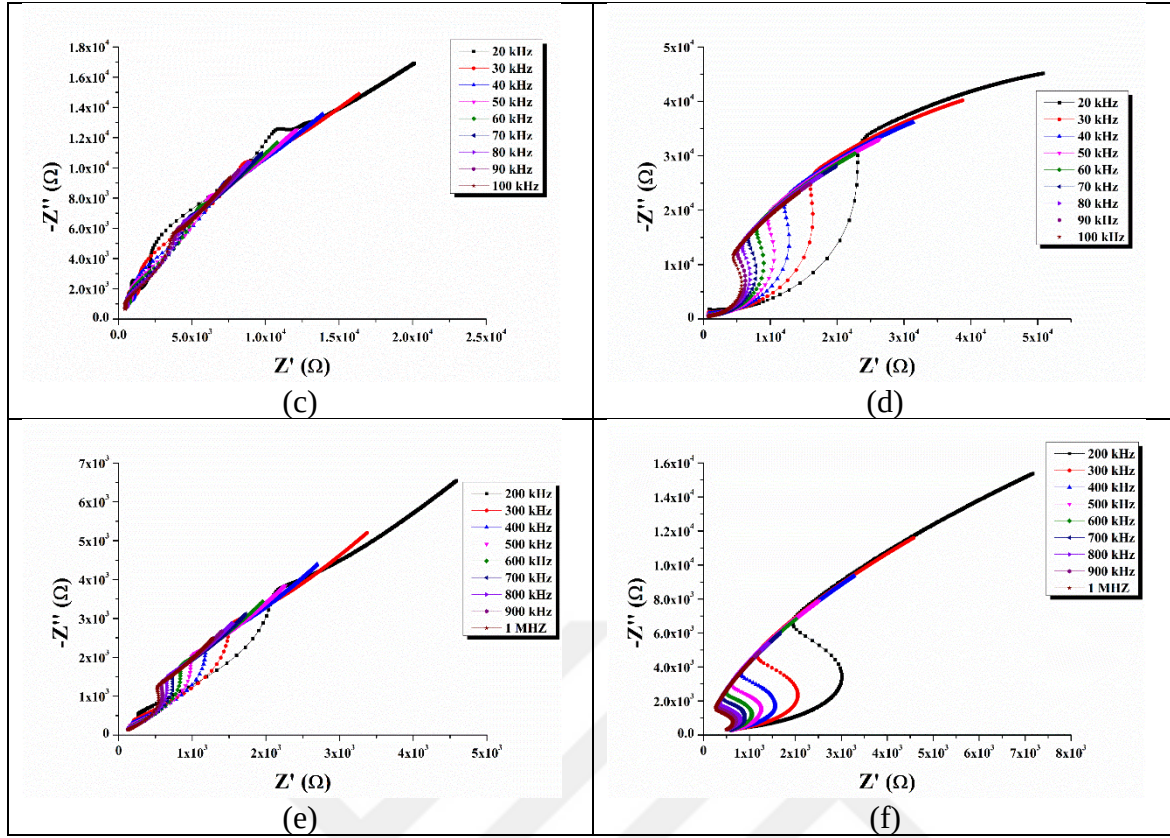
Şekil 5.13. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının gerçek empedans grafikleri.



Şekil 5.14. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının sanal empedans grafikleri.



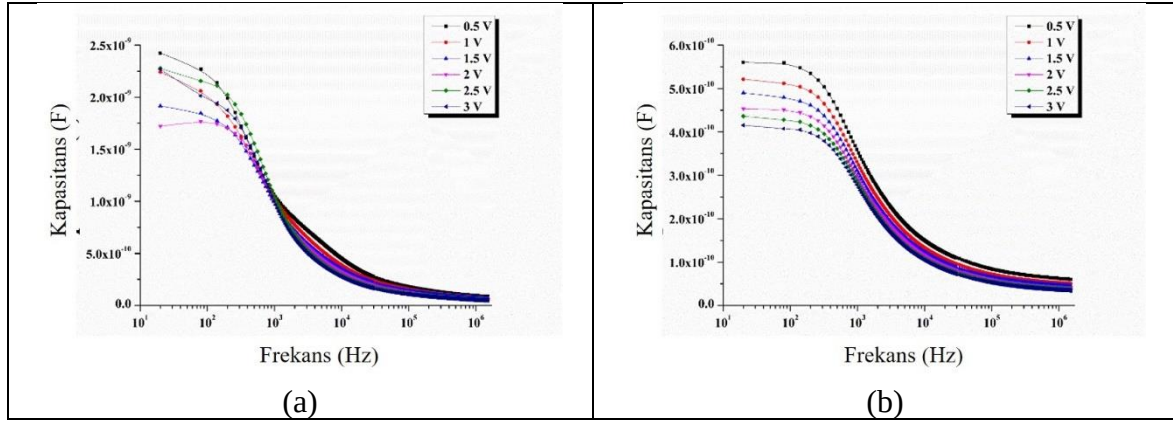
Şekil 5.15. -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının empedans Cole-Cole grafikleri.



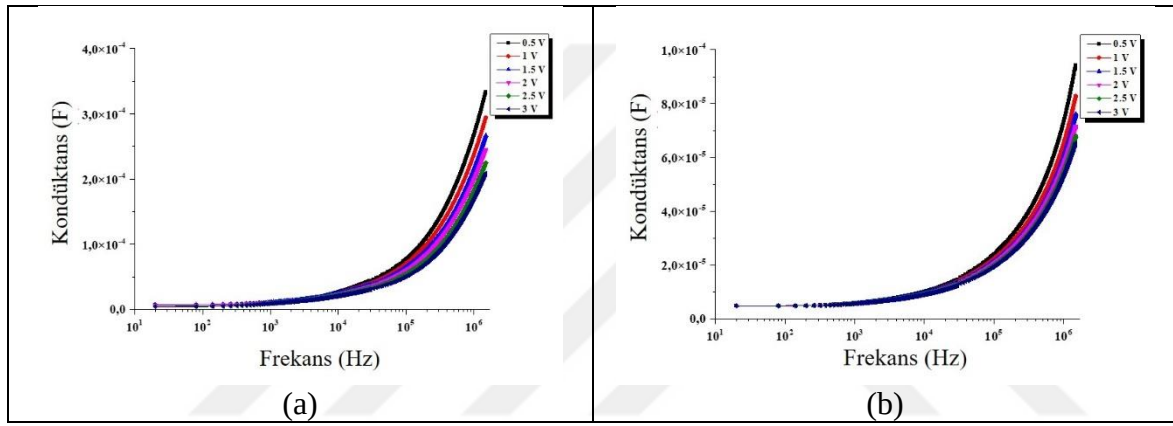
Şekil 5.15. (devam) -4V/4V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının empedans Cole-Cole grafikleri.

5.4.2. Frekansa bağlı oda sıcaklığında yapılan ölçümler

Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si-Au (MY) Schottky diyotlarının kapasitans-frekans ve iletkenlik-frekans ölçümleri 1 kHz-1MHz frekans ve 0.5 V-3 V gerilim aralıklarında oda sıcaklığında ölçümleri yapılmıştır ve bu ölçüm sonuçlarından çeşitli diyot parametreleri hesaplanıp grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.16'da üretilen Schottky diyotların kapasitans-frekans (C-f), Şekil 5.17'de ise, kondüktans-frekans (G/ω-f) grafiği verilmiştir. Her iki şekilden de görülebileceği üzere hem kapasitans (C) hem de kondüktans (G/ω) değerleri frekans ile yakın ilişki içerisindedir. Şekil 5.16, Au/VO_x/n-Si/Au Au/n-Si/Au Schottky diyotlarının 0.5V-3V arasında uygulanan ön besleme gerilimlerinde frekansa bağlı kapasitans karakteristiklerini göstermektedir. Frekansın artmasıyla kapasitans değeri azalır ve bu, arayüz durumunun AC sinyali takip edebileceği anlamına gelir [97-98]. Arayüz durumlarının varlığının bu davranışla doğrulandığını anlayabiliriz. Kapasitansa, düşük frekans bölgesinde arayüz durumları tarafından katkıda bulunulur, ancak yüksek frekans bölgesinde kapasitansa katkıda bulunmaz. Arayüz durumları düşük, orta frekanslarda ve tükenme bölgesinde etkilidir [99]. Ayrıca, bu sonuçlar, C ve G/ω değerlerinin sadece voltaja değil, aynı zamanda frekansa da çok bağımlı olduğunu göstermektedir [100].

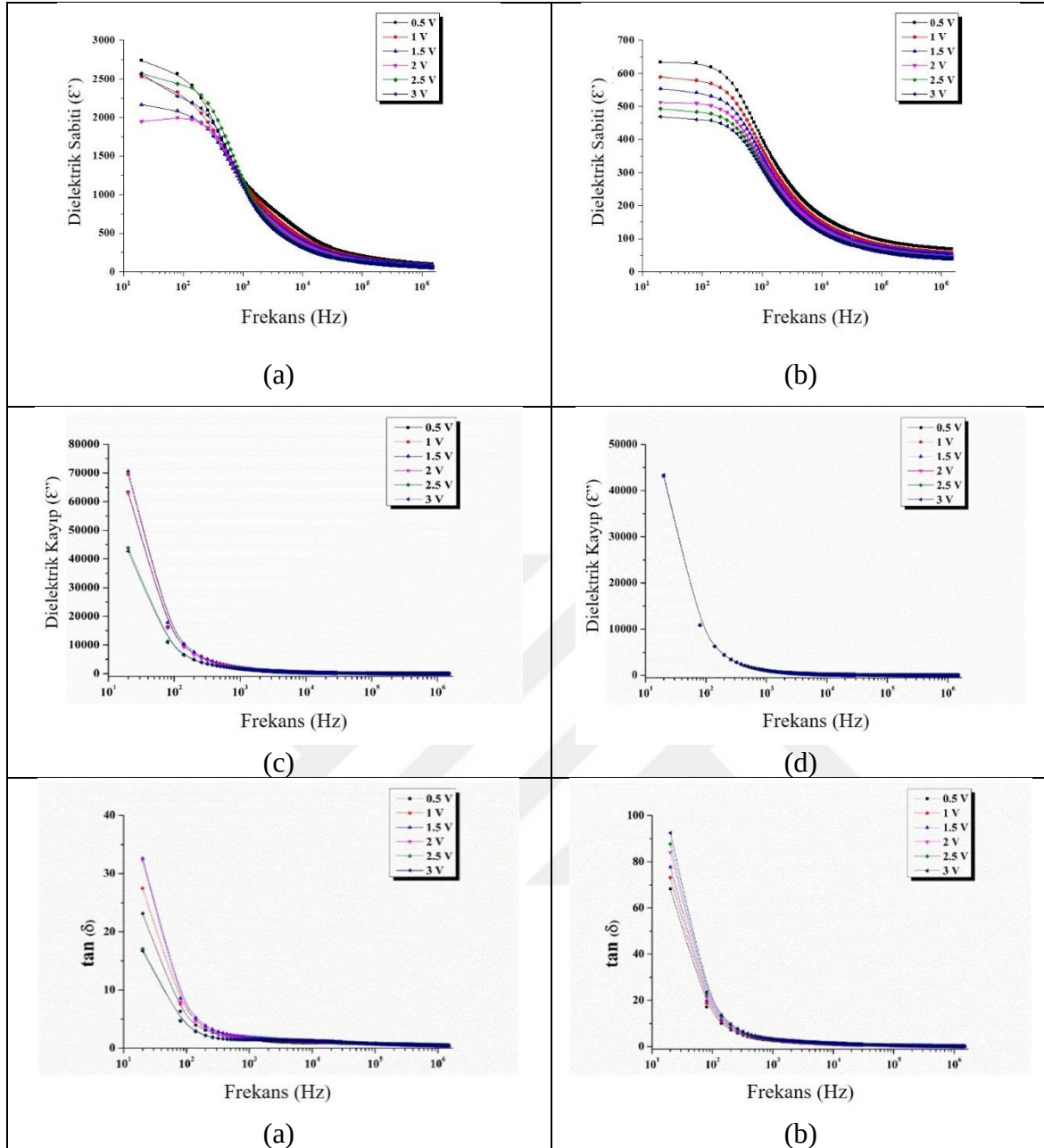


Şekil 5.16. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının kapasitans-frekans (C-f) grafikleri.



Şekil 5.17. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının kondüktans-gerilim (G/ω -f) grafikleri.

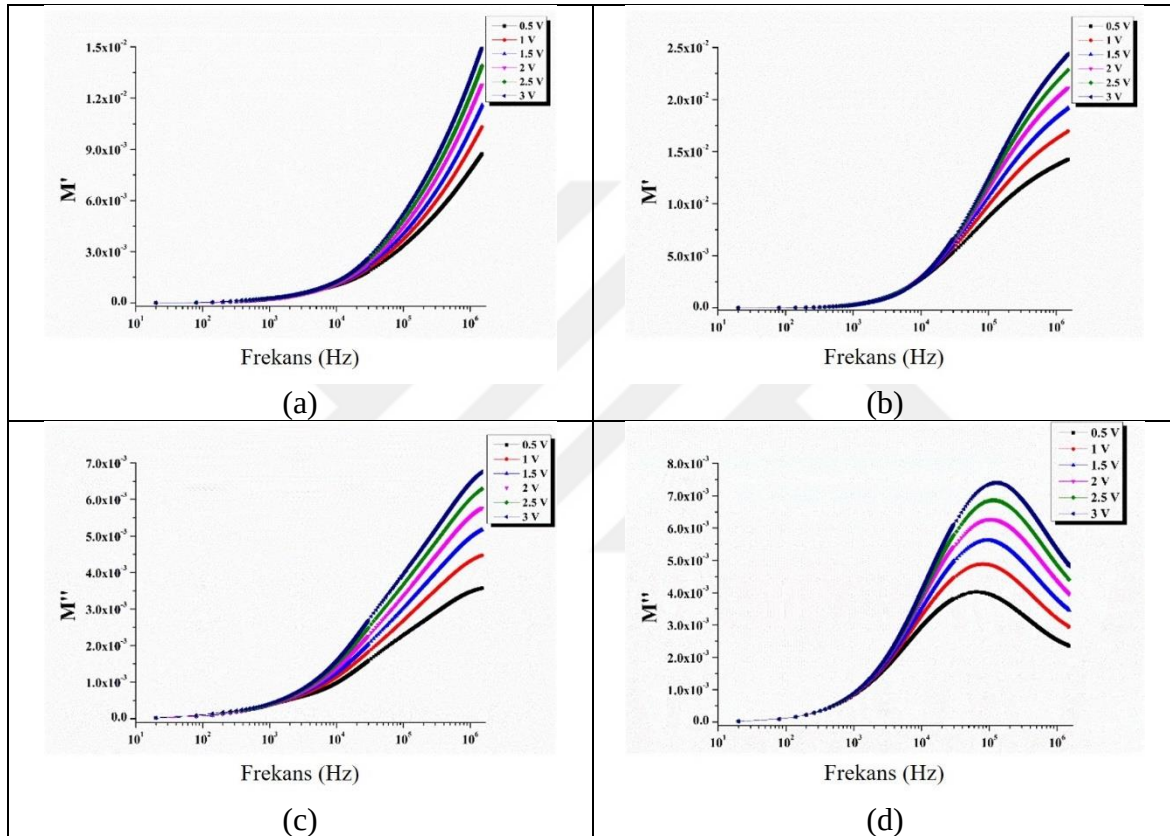
Bütün bunlara ek olarak yüksek iletkenlik, kapasitörün iç sızıntısına neden olarak daha düşük kapasitansa neden olur. Bu nedenle, frekans arttıkça iletkenlik artarken, aksine kapasitans azalır. Şekil 5.18’de, Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotları için dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') ve $\tan\delta$ grafikleri gösterilmektedir. Dielektrik sabiti (ϵ'), kapasitans değerlerinin davranışlı ile benzer davranış göstermektedir. Frekansın artmasıyla dielektrik sabiti azalmaktadır. Buradan dielektrik sabitinde gerilim ve frekansa oldukça bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Dielektrik kayıp ve $\tan\delta$ değerleri de artan frekansla beaber azalmaktadır. Her ikisindeki azalma davranışı oldukça benzerdir. 10 Hz ile 100 Hz arasında keskin bir şekilde düşerek 1 kHz den itibaren ise neredeyse stabil kalmaktadırlar. Ayrıca Au/n-Si/Au Schottky diyotun dielektrik kayıp değeri $\tan\delta$ değerlerinin aksine Au/VOx/n-Si/Au değerinden yüksektir. Au/VOx/n-Si/Au Schotky diyotunun $\tan\delta$ değeri Au/n-Si/Au diyottan daha yüksektir. Ayrıca yüksek frekans tarafında $\tan\delta$ değerlerinin tamamen kesilmesi tanjant kaybının iletimden kaynaklandığını gösterir [99].



Şekil 5.18. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c,e) ve Au/VOx/n-Si/Au (b,d,f) Schottky diyotlarının ϵ' (a,b), ϵ'' (c,d) ve $\tan\delta$ (e,f) grafikleri.

Şekil 5.19’da, Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VOx/ n-Si/Au (b,d) Schottky diyotlar için oda sıcaklığında farklı frekans değerleri için elektrik modülünün gerçek (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı ölçümlerini göstermektedir. Şekil 5.19'dan görülebileceği gibi, elektrik modülünün her iki gerçek sanal kısmı voltaj ve frekans bağımlılığına sahiptir. Alçak frekans bölgesinde modül hemen hemen aynı değerlere sahiptir ve voltajdan bağımsız görünmektedir ancak frekans değeri 10 kHz'den geçerken modülün değeri voltaj ve frekans bağımlılığına sahiptir ve hem ön gerilim hem de frekans ile artar. M'' frekansa bağlı davranışına dikkat edildiğinde, M'' Au/n-Si/Au numunesi içi artan frekansla 2 kHz den sonra önemli bir artış olduğu ve uygulanan bias voltajına

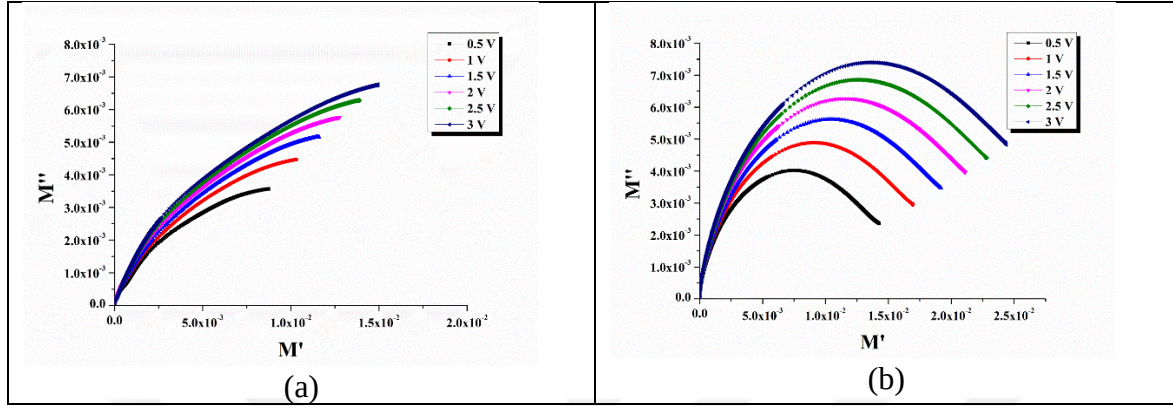
göre de eğrilerin birbirinde ayrıştığı ve artan bias voltaj ile arttığı gözlenmiştir. Ayrıca bu artış ölçüm sınırı olan 1 MHz e kadar artışın devam ettiği görülmüştür. M'' frekansa bağlı davranışına dikkat edildiğinde, M'' Au/VO_x/n-Si numunesi içi artan frekansla önce arttığı belirli bir frekansta tepe noktasına ulaşır artan frekansla daha sonra azalmaya başladığı gözlenmiştir. Bununla birlikte artan bias voltajı ile bu tepelerin yüksekliklerinin arttığı ve yüksek frekansa doğru kaydığı açıkça görülmüştür. Vanadyum oksit (VO_x) etkisi ile Au/n-Si/Au aygıtında görülmeyen piklerin, Au/VO_x/n-Si/Au aygıtında 100 kHz civarında görülmesine neden olmuştur.



Şekil 5.19. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) Schottky diyotlarının elektrik modülünün gerçek (a,b) ve sanal (c,d) kısımlarının frekansa bağlı grafikleri.

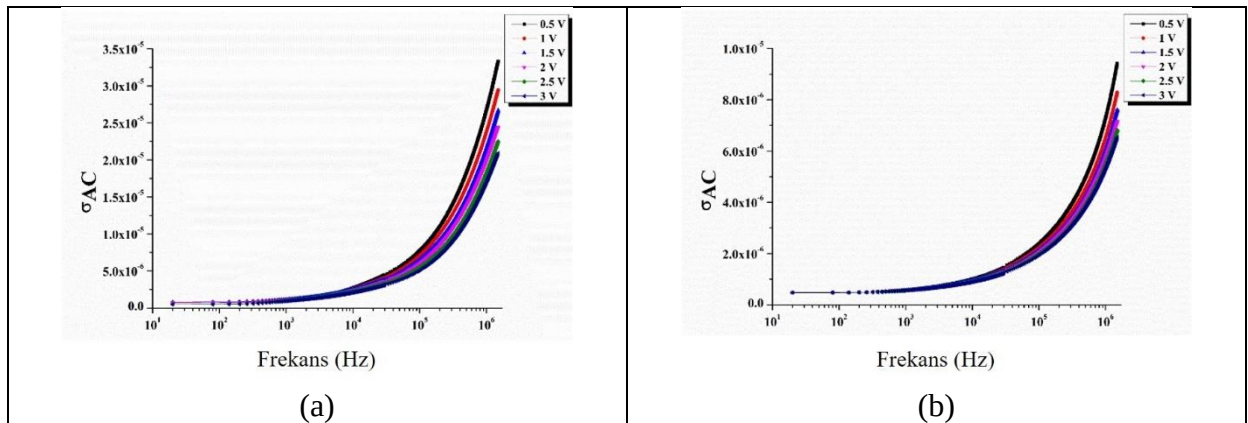
Şekil 5.20'de Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b) Schottky diyotları için oda sıcaklığında farklı ön besleme gerilimleri için Cole-Cole elektrik modül grafikleri görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere, VO_x ara yüz etkisi ile Cole-Cole eğrilerinin yarım daireye daha çok yaklaştığı görülmektedir. M'' ekseninde artan frekans ve artan ön besleme gerilimi ile birlikte, tepe noktaları oluşmaktadır. Uygulanan ön besleme geriliminin etkisi ile bu tepe noktalarının daha yüksek frekans bölgelerine hareket ettiği görülebilir. Bu kayma, artan ön besleme gerilimi ile beraber ara yüzeyde serbest yük birikiminden kaynaklanabilir. Böylece yük taşıyıcı hareketliliğinin artması gevşeme süresini kısaltır. Artan ön besleme gerilimi ile beraber birlikte tepe noktalarının daha

yüksek frekans bölgesine kayması, dielektrik gevşemenin, yük taşıyıcıların atlama mekanizmasının içsel olarak baskın olduğu termal olarak aktive edilmiş bir süreç olduğunu gösterir.



Şekil 5.20. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b) Schottky diyotlarının Cole-Cole elektrik modül grafikleri.

Şekil 5.21’de ise, Au/n-Si/Au (a) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b) Schottky diyotları için oda sıcaklığında farklı ön besleme gerilimleri için AC iletkenlik-frekans grafiği görülmektedir. Belirli bir sıcaklıkta yüksek frekans aralığında AC iletkenliğinin artması, iletim mekanizmasındaki artıştan kaynaklanabilir [94]. Bu davranış literatürdeki diğer çalışmalardan da anlaşılabilir [83], [95-96]. Şekil 5.19’den da görülebileceği gibi üretilen Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotun iletkenliği metal oksit ara yüz katmanını sebebiyle düşmektedir. Benzer davranış literatürdeki diğer çalışmalarda da gözlemlenebilir [101–105].

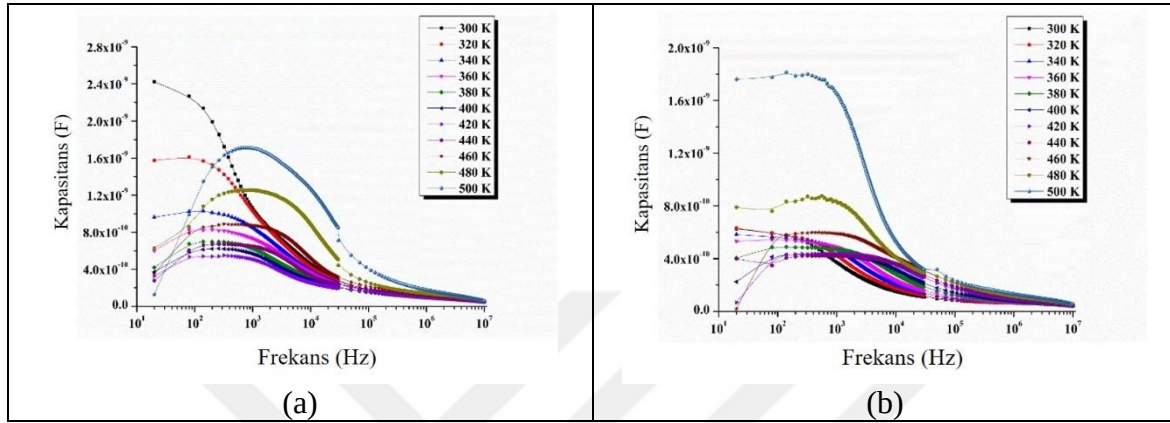


Şekil 5.21. 0.5V/3V gerilim altında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı AC iletkenlik grafikleri.

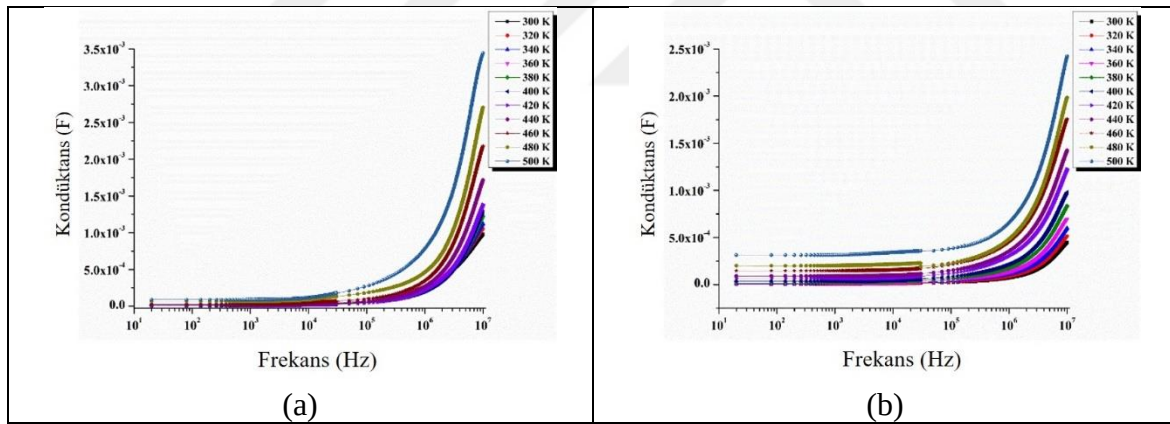
5.4.3. Farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı yapılan ölçümler

Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si-Au (MYY) Schottky diyotlarının kapasitans-frekans ve iletkenlik-frekans ölçümleri 300 K ile 500 K sıcaklık aralığında 20 K adımlarla yapılmıştır ve bu ölçüm sonuçlarından çeşitli diyot parametreleri hesaplanıp grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.22’de üretilen Schottky diyotların 300-500 K sıcaklık aralığında kapasitans-frekans (C-V), Şekil 5.23’te ise kondüktans-frekans (G/ω-V) grafiği verilmiştir. Her iki şekilden de görülebileceği üzere hem kapasitans (C) hem de kontüktans (G/ω) değerleri frekans ile yakın ilişki içerisinde. Şekil 5.22’den görülebileceği üzere, Au/n-Si/Au Schottky diyot için 300-400K sıcaklık aralığında frekans ve sıcaklık arttıkça kapasitans değerinde düşme gözlemlenmektedir. Ancak 400-500K sıcaklık aralığında, kapasitans değeri sıcaklık ve frekans ile birlikte artıp, 1 kHz civarında tepe noktasına ulaşp daha sonra 300-400K sıcaklık aralığındaki davranışına dönerek, frekans ve sıcaklık arttıkça kapasitans değeri düşmeye başlamaktadır. Au/VO_x/n-Si/Au diyot ise farklı şekilde davranmaktadır. 500 K sıcaklık değerinde kapasitans en yüksek değerindedir ve sıcaklık azalıp frekans arttıkça kapasitans değerinde azalma başlamaktadır. Şekil 5.23’ten anlaşılabileceği üzere, Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotları için frekans ve sıcaklık arttıkça kondüktans değeri de artmaktadır. Au/n-Si/Au Schottky diyot için 1 MHz frekans değerinden itibaren kondüktans sıcaklık ve frekans ile birlikte artarken, Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyot için 10 MHz frekans değerinden itibaren artma başlamaktadır. Düşük frekanslarda yüzey polarizasyon etkisi görülmektedir ve ara yüzey (N_{ss}) durumlarında bulunan yükler düşük frekanslarda AC sinyali takip edebilmelerine rağmen yüksek frekanslarda takip edemezler. Bunun nedeni ise, metal-yarı iletken arasında yerleşen tuzaklar farklı yaşam ömürlerine (τ) sahiptir ve düşük frekans değerlerinde periyot (T) bu tuzakların ömründen daha büyük olduğu için AC sinyali takip edebilirler. Yüksek frekanslarda ise ara yüzey durumlarında bulunan yükler AC sinyali takip edemedikleri için hem C hem de G/ω değerlerine bir katkısı olmaz ve toplam kapasitans tüketim kapasitansı tarafından etkilenir [17-18],[83], [90-96]. Bir başka deyişle, frekansın artmasıyla kapasitans değeri azalır ve bu, arayüz durumunun AC sinyalini takip edebileceği anlamına gelir [97]. Arayüz durumlarının varlığının bu davranışla doğrulandığını anlayabiliriz. Kapasitansa, düşük frekans bölgesinde arayüz durumları tarafından katkıda bulunulur, ancak yüksek frekans bölgesinde kapasitansa katkıda bulunmaz. Arayüz durumları düşük ve orta frekanslarda [99] etkilidir. Sıcaklık arttıkça kondüktans değerinin artmasının en önemli nedenlerinden birisi vanadium oksit (VO_x) ince filmin karışık faza doğru ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle, oda sıcaklığında büyütülen vanadium oksit (VO_x) amorf bir yapı özelliği göstermektedir. Ancak, numune ısıtıldıkça amorf yapıdaki vanadium oksit ince filmin içerisinde vanadium dioksit

(VO₂) ve vanadium pentaoksit (V₂O₅) fazlar oluşmaktadır. Karışık fazların VO_x amorf yapı içerisinde oluşması nedeniyle sıcaklık arttıkça vanadium oksit (VO_x) ince filmin direnci de düşmektedir [106]. Dolayısıyla kondüktans artmaktadır. Ayrıca, bu sonuçlar, kapasitans (C) ve kondüktansın (G/ω) sadece frekansa değil, aynı zamanda sıcaklığa da bağımlı olduğunu göstermektedir [100].



Şekil 5.22. 300-500K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarının kapasitans-frekans (C-f) grafikleri.

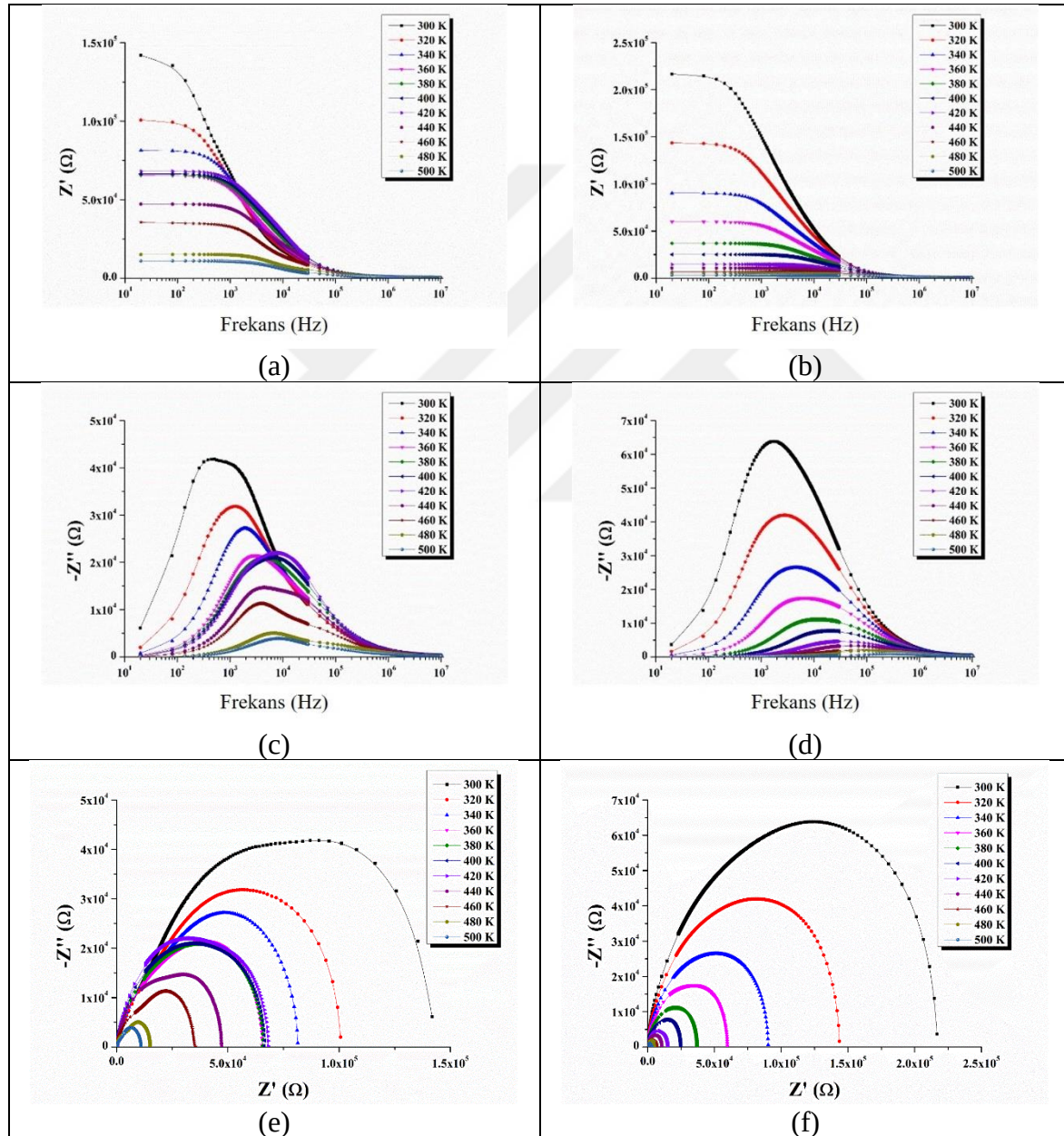


Şekil 5.23. 300-500K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarının kondüktans-frekans (G/ω-f) grafikleri.

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'ten elde edilen sonuçlar, ara yüzey durumlarının (N_{ss}) hem terslenim hem de tükenme bölgelerinde düşük ve orta frekansta daha etkili olduğunu, seri direncin ise birikim bölgesinde sadece daha yüksek frekanslarda geçerli olduğunu göstermektedir. Bütün bunlara ek olarak yüksek iletkenlik, kapasitörün iç sızıntısına neden olarak daha düşük kapasitansa neden olur. Bu nedenle, frekans arttıkça iletkenlik artarken, aksine kapasitans azalır [48].

Şekil 5.24a'da Au/n-Si/Au ve Şekil 5.24b'de ve Au/VOx/n-Si/Au yapılarında empedansın gerçek kısmı (Z') 300-500 K sıcaklık aralığında frekansa bağlı ölçümleri görülmektedir. Her iki numune için de empedans, belirli bir frekansta azalan sıcaklıkla artar. Düşük sıcaklık ve düşük frekansta, Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyot için empedans değeri Şekil 5.24a ve Şekil 5.24b'den de görülebileceği gibi Au/n-Si/Au Schottky diyotun yaklaşık iki katıdır. Au/n-Si/Au için 300 K'de düşük frekanslarda $1.5 \times 10^5 \Omega$ iken Au/VOx/n-Si/Au için aynı sıcaklık ve benzer frekans aralığında değerinde $2.5 \times 10^5 \Omega$ dur. Genel olarak, toplam empedans, daha yüksek frekanslarda saf kapasitans ve daha düşük frekanslarda saf direnç gibi davranır [96]. Frekanstan bağımsız düz bölge DC iletkenlik verir, Frekansa bağlı dağılım bölgesi AC iletkenlik verir. Frekans platosu, yüksek sıcaklık evrimi ile kademeli olarak kısılar ve artan frekansla düz bir bölgeye dönüşür. Yük taşıyıcının uzun menzilli veya lokalize hareketi, empedans grafiğinde plato şekline yol açar. Yük taşıyıcılar uzun mesafeli hareket yaptıklarında, en yakın komşu yük parçacığı başarılı bir şekilde zıplayarak konumlarına gevşer ve DC iletkenliği ile sonuçlanır. Z' değeri hem frekansın hem de sıcaklığın artmasıyla kademeli olarak azalır ve sıcaklığın artmasıyla AC iletkenliğinin arttığını gösterir [107]. Ayrıca empedansın gerçek kısmının (Z') düşük frekanslarda artan sıcaklık ile düşmesi, malzemenin negatif bir sıcaklık direnç katsayısına sahip olduğunu gösterir. Ayrıca tüm eğrilerin sıcaklıktan bağımsız olarak yüksek frekanslarda tek bir eğride birleştiği ve malzemenin uzay yüküne bağlı davranışını gösterdiği bulunmuştur [108]. Şekil 5.24c ve Şekil 5.24d'de Au/n-Si/Au ve Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotların Empedans değerlerinin sanal kısımları verilmiştir. Şekil 5.24c'den görülebileceği üzere Au/n-Si/Au Schottky diyot için, empedansın sanal kısmı (Z'') 10^2 Hz ila 10^3 Hz arasında geniş bir maksimum tepe gösterir ve sıcaklığın artmasıyla daha yüksek frekans bölgesine doğru kayar. Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyot için ise, 10^3 Hz ila 10^4 Hz arasında geniş bir maksimum tepe gösterir ve sıcaklığın artmasıyla daha yüksek frekans bölgesine doğru kayar. Ayrıca, Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyot için, geniş tepe noktaları, 380 K'den itibaren büyük ölçüde bastırılır ve VO_x ara yüzün sıcaklığa bağlı elektriksel gevşeme sürecinin varlığını doğrular [107]. Şekil 5.24e'de Au/n-Si/Au Schottky diyot için ve Şekil 5.24f'de Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyot için empedans Cole-Cole eğrileri gösterilmektedir. Her iki şekilden de görüldüğü üzere, Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotun tepe noktası Au/n-Si/Au Schottky diyotun tepe noktasından daha yüksektir. Ayrıca, karmaşık empedans spektrumları, sıcaklıktaki artışla yarıçapları azalan, tipik bir yarı iletken özelliği gösteren, yani direnç davranışının negatif sıcaklık katsayısı olan yarım daire biçimli yaylar gösterir [109]. Her iki yapı içinde, sıcaklık arttıkça yarım dairelerin çapları azalır ve bu davranış dirençteki azalmayı gösterir. Ölçülen sıcaklıklar üzerindeki tüm grafikler, dairesel tek bir yay gösterdiği için tanecik etkisinin olduğunu kanıtlar. Yarım dairenin merkezleri, gerçek eksenin altındaki bir doğru üzerindedir. Bu

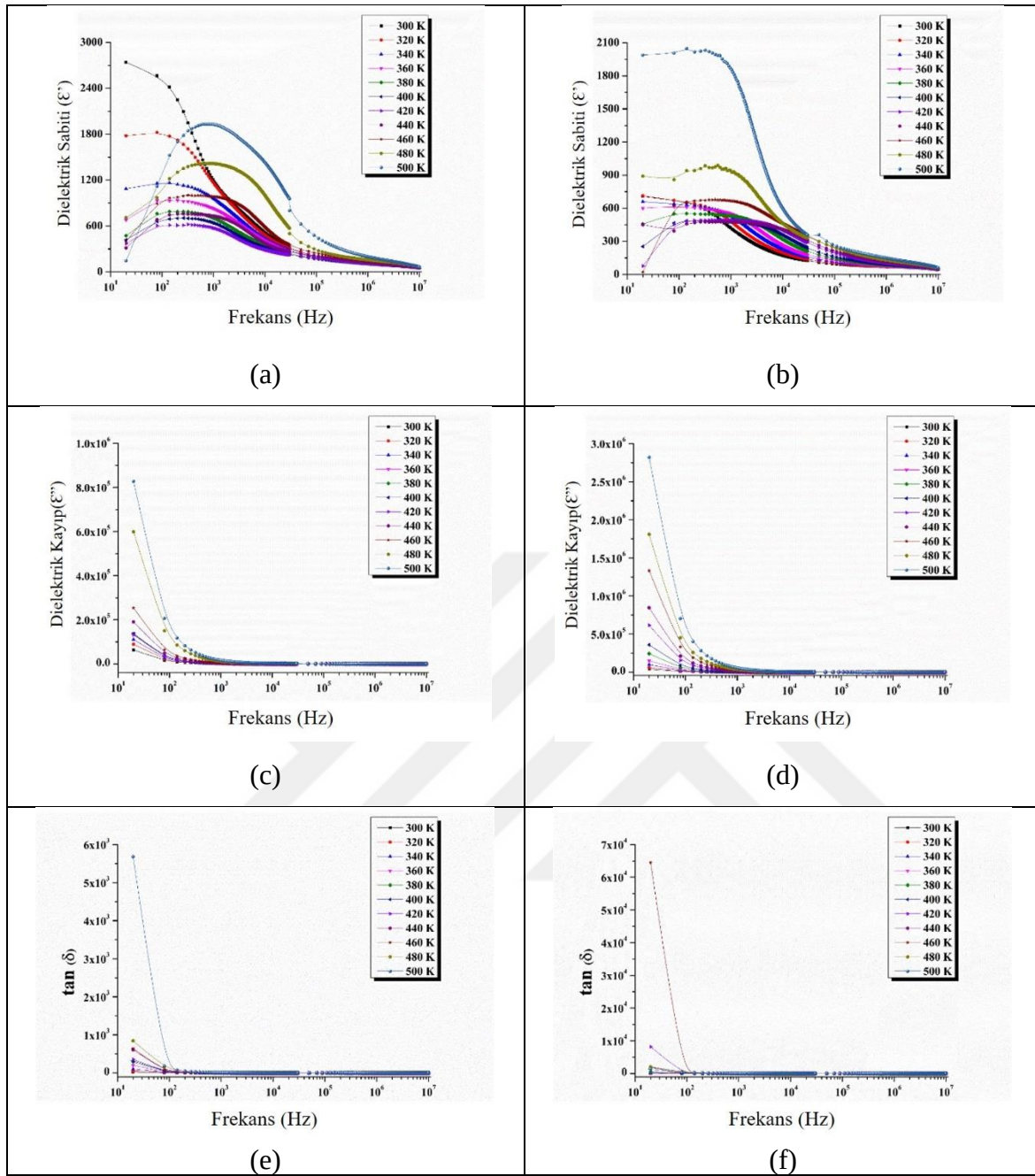
depresyon, gevşeme zamanlarının istatistiksel dağılımından kaynaklanmaktadır. Yarım dairenin çöküşü, gevşeme zamanlarının dağılımı ile kutuplaşmanın bir başka kanıtı olarak kabul edilir ve gevşeme zamanlarının bir dağılımının olduğu Debye olmayan gevşeme tipini doğrular. Bu tür ideal olmayan davranış için tane yönelimi, tane sınırı ve atomik kusurlar gibi çeşitli faktörler vardır. Şekil 5.24, ayrıca termal olarak uyarılmış iletim mekanizması nedeniyle sıcaklık arttıkça tane direncinin azaldığını göstermektedir. Bu, malzemenin direnç davranışının negatif sıcaklık katsayısının kanıtıdır [110–112].



Şekil 5.24. 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı Z' (a,b), Z'' (c,d), Cole-Cole (e,f) grafikleri.

Şekil 5.25'te, Au/n-Si/Au ve Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlar için dielektrik sabiti gerçek kısmı (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') ve $\tan\delta$ grafikleri gösterilmektedir. Şekil 5.25a'da görülebileceği üzere, dielektrik sabiti sıcaklık ve frekans arttıkça azalmaktadır ve frekans 1 MHz civarına yaklaştığında sönümlenmektedir. Dielektrik sabiti 300-440 K aralığında belirli frekans için sıcaklık ile birlikte azalmakta iken, 460-500K aralığında belirli bir frekans değeri için sıcaklık ile artarak tepe noktasına ulaşmakta ve daha sonra frekans ile birlikte azalarak 1 MHz civarında sönümlenmektedir. Aynı olgu, Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyot yapısı içinde geçerlidir. Bu yapı için, dielektrik sabiti belirli bir frekansta, artan sıcaklık ile artmaktadır. Düşük frekans bölgesinde dielektrik sabitinin artan sıcaklık ile beraber artması, mevcut dipollerin, uygulama sonrasında polarize olmak için yeterli bir termal enerjiye ihtiyaç duyduğunu gösterir [113]. Ayrıca her iki yapı içinde dielektrik sabitinin frekanslarla azalması, polarizasyon mekanizmasına katkıda bulunan dipol sayısındaki azalma ile ilgili olabilir [114]. Yüksek frekanslarda, dielektrik sabiti, muhtemelen malzemedeki hızlı polarizasyon olgusundan dolayı sabit değere gitme eğilimi gösterir [115]. Öte yandan, dielektrik kayıp (ϵ'') için Şekil 5.25c ve 5.25d'den açıkça görüldüğü üzere düşük frekanslardan başlamak üzere hızlı bir şekilde düşmektedir. Yüksek frekanslarda, dielektrik kaybı sıfır olur ve bu frekans aralığında enerji kaybının olmadığını gösterir. Bu sonuç, dielektrik sabitinin, örneğin bu frekans aralığında polarizasyon yeteneğinin azalması nedeniyle daha çok beklenir. Aslında, VO_x ince filmdeki dielektrik dispersiyon süreci Maxwell-Wagner Etkisi ile açıklanabilir [116]. Bu modelde, dielektrik ortamın dirençli tane sınırları ile ayrılmış yüksek iletken taneler olduğu varsayılır. Sonuç olarak, bir elektrik alanı uygulandıktan sonra, yük taşıyıcılar tane sınırlarında birikmeden önce taneler içinde kolaylıkla hareket edebilirler. Bu davranış, homojen olmayan dielektrik yapı nedeniyle arayüzey/uzay yükü polarizasyonu temelinde açıklanabilen düşük frekanslarda yüksek dielektrik sabitine yol açar [116]. Dielektrik kayıp faktörü $\tan\delta$ hesaplandı ve Şekil 5.25e ve 5.25f'deki grafikler çizdirildi.

Dielektrik kayıp faktörü, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp davranışlarına benzer şekilde düşük frekanslarda nispeten yüksek değerler alır. Dielektrik kayıp davranışları, 300-500K arasındaki herhangi bir belirli sıcaklıkta azalan frekansla kaybın arttığı gözlemlendi. İnce filmin frekansıyla geçirgenlikteki azalma, öncelikle azalan dipol sayısı nedeniyle oluşabilecek deformasyon ve gevşeme polarizasyonlarının bağıllığının sonucudur. Bu, dipollerin hızlı bir şekilde dönme konusundaki güçsüzlüğünden kaynaklanır ve uygulanan alan ile salınan dipollerin frekansı arasında gevşemeyi teşvik eder [107].



Şekil 5.25. 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı dielektrik sabiti ϵ' (a,b), dielektrik kayıp ϵ'' (c,d) ve $\tan \delta$ (e,f) grafikleri.

Şekil 5.26a'da Au/n-Si/Au Schottky diyot için frekansa bağlı farklı sıcaklıklarda elektrik modülü, Şekil 5.26b'de ise Au/VOx/n-Si/Au frekansa bağlı farklı sıcaklıklarda Schottky diyot için elektrik modülü grafikleri gösterilmektedir. Elektrik modülü, malzemedeki elektrik alanının gevşemesine fiziksel olarak karşılık gelir, böylece elektrik modülü gerçek dielektrik gevşeme sürecini temsil eder [96]. Bir başka deyişle, Modül spektrumları en az kapasitif bölge ve empedans grafiği en dirençli elemanı vurgular. Kompleks elektrik modülü elektrik modülünün gerçek ve sanal kısımlarından meydana gelir.

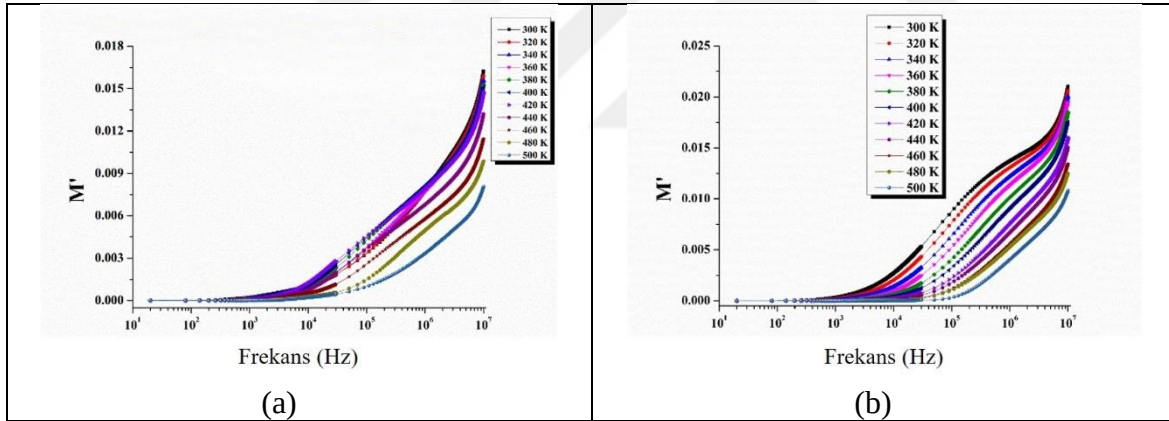
Kompleks modülü ayrıca malzemelerin elektriksel tepkisini analiz etmek için alternatif bir yaklaşım sağlar ve bilim adamları tarafından seramik malzemeler ve iyonik iletkenlerdeki gevşeme olaylarını incelemek için benimsenmiştir. Ayrıca, karmaşık empedans grafiklerinden ayırt edilemeyen yüksek sıcaklıklarda tane veya tane sınırı etkisinden kaynaklanan belirsizliği doğrulamaya yardımcı olur. Karmaşık elektrik modülü, malzemelerin gevşeme mekanizmasına tane sınırının katkısını incelemek ve analiz etmek için hem geçirgenlik hem de empedans ile tartışılmıştır, ayrıca bize uzun menzilli iletimleri ve lokalize dielektrik gevşeme fenomenini mikroskobik düzeyde araştırma fırsatları sunar [117–121]. Karmaşık elektrik modülü, karmaşık geçirgenliğin tersidir.

Şekil 5.26a ve 5.24b’den görüldüğü üzere her iki Schottky diyot yapısı için de elektrik modülün gerçek kısmı azalan sıcaklık ile beraber artmaktadır. Ayrıca, her iki şekilden de görüldüğü üzere VO_x ara yüzey kullanıldığında 500K sıcaklık için elektrik modülü artışı 10^5 Hz civarında başlamakta iken, VO_x ara yüzey olmayan Schottky diyotta aynı sıcaklık değeri için artış 10^4 - 10^5 Hz civarında başlamaktadır. Dahası, VO_x ara yüzey olmayan yapıda elektrik modülü artışı bütün sıcaklık değerleri için neredeyse benzer frekans deerinde başlarken, VO_x ara yüzey olan yapıda sıcaklık azaldıkça elektrik modülün artışı frekans ekseninde sola doğru kaymaktadır. Elektrik modülü değişim aralığı VO_x ara yüzey katmanı ile artan sıcaklıkla beraber genişlemekte ve her sıcaklık değeri için elektrik modülünün maksimum değeri VO_x ara yüzey olmayan yapıya göre %30 daha fazladır.

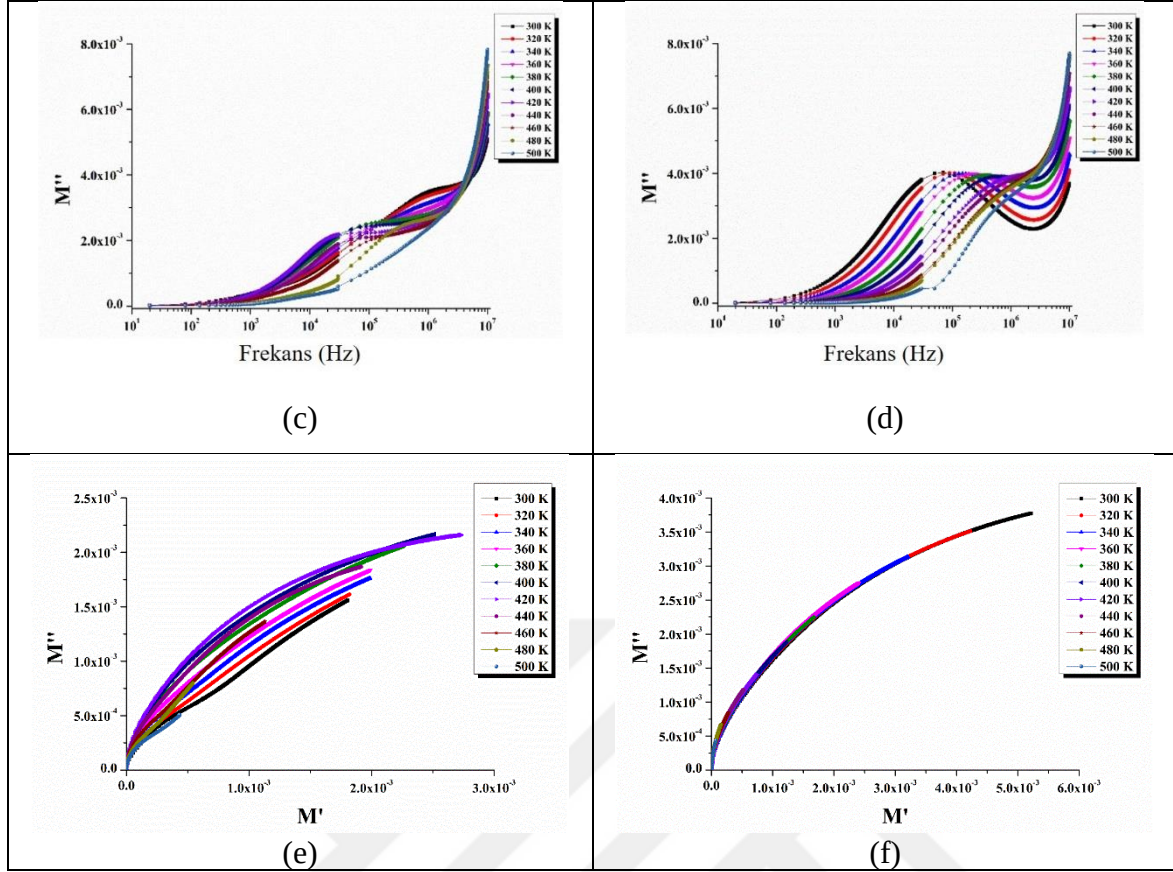
Elektrik modülünün sanal kısmı Şekil 5.26c ve 5.26d’de gösterilmiştir. Her iki örnek için de adım benzeri davranışın gözlemlendiği açıkça görülmektedir. Şekil 5.26c ve Şekil 5.26d’den, M'' -f eğrilerinin her sıcaklıkta iki tepeye sahip olduğu, tepe noktalarından birinin düşük frekansta ve diğerinin yüksek frekans bölgesinde olduğu açıkça görülmektedir. Uygulanan sıcaklığın artmasıyla bu tepe noktalarının daha yüksek frekans bölgesine hareket ettiği fark edilebilir. Bu kayma, sıcaklığın artmasıyla ara yüzeyde serbest yük birikiminden kaynaklanır. Böylece yük taşıyıcı hareketliliğinin artması gevşeme süresini kısaltır. Artan sıcaklıkla birlikte tepe noktalarının daha yüksek frekans bölgesine kayması, dielektrik gevşemenin, yük taşıyıcıların atlama mekanizmasının özünde baskın olduğu termal olarak aktive edilmiş bir süreç olduğunu gösterir. Düşük ve yüksek frekans bölgelerindeki bu pikler bize iyon göçünün kısa zaman sabitinden uzun zaman sabitine hareketliliğinin azaltıcı frekans yoluyla geçtiğini göstermektedir. M'' -frekans eğrilerindeki tepe yüksekliği Eşitlik 5.14’ten görülebileceği üzere kapasitansla orantılıdır [96], [119–121].

$$M'' \propto C^{-1} \text{ ve } M''_{maks.} = C_0/2C \text{ di ve } C_0 \text{ boş uzay yük kapasitansdır.} \quad (5.14)$$

Şekil 5.24e ve 5.24f’de, elektrik modülün Cole-cole eğrileri düşük frekans yayı için tanecik sınırı nedeniyle, yüksek frekans yayı ise tanecikler nedeniyle oluşmaktadır. Şekil 5.24e’den görüldüğü üzere Au/n-Si/Au Schottky diyot yapısı için sıcaklık arttıkça grafiğin tepe noktasının yükseldiği gözlenirken, Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyot yapısı için eğrilerin tepe noktaları neredeyse benzer yüksekliktedir. Ayrıca her iki yapıda da yayların yarım kalmasının nedeni, yüzey polarizasyon etkisi nedeniyle gevşeme süreçlerinden birinin kritik olarak bastırıldığını gösteren yalnızca bir yarım daire biçimli ark göstermesine bağlanabilir. Şekil 5.26f’de görüldüğü üzere, tanecik sınırından kaynaklanan gevşemeye atfedilen daha büyük yarım daire biçimli arkın varlığı ve artan sıcaklıkla kısılması, tane sınırı katkısının kademeli olarak azaldığını gösterir [122]. VO_x arayüz katkısı, bundan sonra 360K’nin üzerinde önemli bir rol oynar ve bunun güçlü kanıtı, Cole-Cole empedans grafiğinin verilerinden elde edilir. Hem gerçek hem de sanal modül spektrumları, empedans spektroskopisinde vurgulanan yüksek sıcaklık elektrot polarizasyonunun burada yüksek oranda bastırıldığını gösterir [123-124].



Şekil 5.26. 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı elektrik modülü gerçek kısmı M' (a,b), elektrik modülü sanal kısmı M'' (c,d) ve elektrik modülü Cole-Cole eğrileri (e,f) grafikleri.



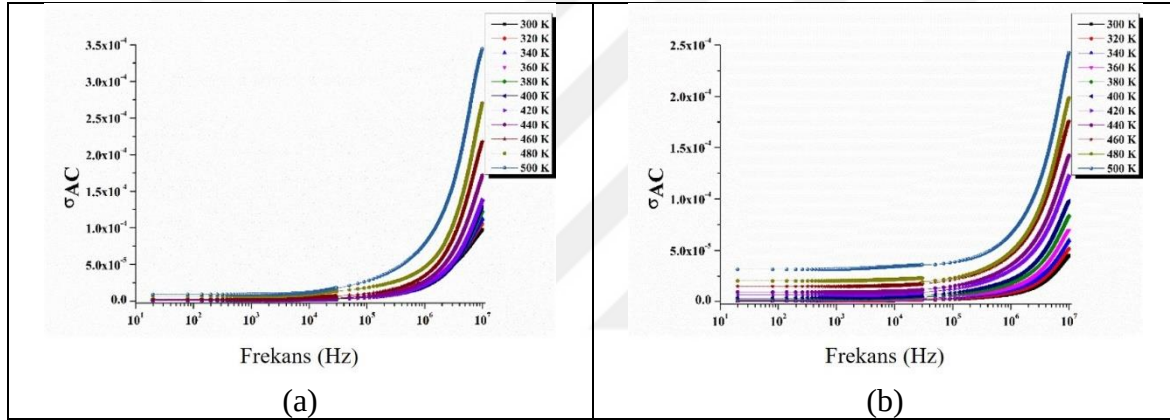
Şekil 5.26. (devam) 300-500 K sıcaklık aralığında (a,c,e) Au/n-Si/Au ve (b,d,f) Au/VOx/n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı elektrik modülü gerçekte kısmı M' (a,b), elektrik modülü sanal kısmı M'' (c,d) ve elektrik modülü Cole-Cole eğrileri (e,f) grafikleri.

Şekil 5.27’de Au/n-Si/Au (a) ve Au/VOx/n-Si/Au (b) Schottky diyotlar için farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı AC iletkenlik grafikleri verilmiştir. Her iki grafikten de görülebileceği üzere, belirli bir sıcaklıkta düşük frekans bölgesinde iletkenlik çok düşük iken, 10^5 Hz’ten itibaren hızla artmaya başlamaktadır. Yüksek frekanslarda, σ_{ac} atlama frekansı adı verilen belirli bir frekans aralığından keskin bir şekilde arttığında, iletkenliğin frekans bağımlılığı belirgin olmaya başlar [125]. Artan sıcaklıkla bu frekansın daha düşük değerlere kaydığı görülmektedir. Elde edilen eğriler, genellikle oksitlerdeki AC iletkenliğe uyacak şekilde benimsenen ve Eşitlik 5.15’ten görülebilecek olan Jonscher güç yasası kullanılarak ayarlanabilir [125].

$$\sigma_{ac}(\omega) = \sigma_{dc} + A_1(\omega)^{s_1} + A_2(\omega)^{s_2} \quad (5.15)$$

Burada, $\sigma_{dc} = (0)$, doğru akımla iletkenliktir. A_1 ve A_2 sabit ve s_1 ve s_2 , genellikle $s_1 > 0$ ve $s_2 < 1$ ’i doğrulayan karakteristik parametredir, s_1 ve s_2 üsleri, hareketli iyonlar ile etraflarını saran kafes arasındaki etkileşimin derecesini temsil ederken, ön faktör üsleri A_1 ve A_2 , polarize edilebilirliğin

gücünü temsil eder [125]. AC iletkenlik değişiminin de sabit sıcaklıkta DC iletkenlikte gözlemlenenle aynı davranışı gösterdiğine dikkat edilmelidir. Düşük frekanslarda, düşük iletkenlik değerleri, uygulanan düşük elektrik alanı nedeniyle yük taşıyıcılarının birikmesine bağlanabilir. Bu frekans aralığında, elektrot polarizasyon etkilerinin baskın olduğu ve yüksek frekans bölgesinde olmadığı ileri sürülmektedir [126]. Yüksek frekanslarda, frekansla AC iletkenliğinin eğiminde gözlenen değişiklik, tane sınırı direnci üzerinde yığın tane direncinin baskınlığı ile ilgilidir. Burada, tane sınırlarındaki kümülatif yük taşıyıcıları, bu lokalize potansiyel engeli aşmak için yeterli enerjiye sahiptir [127]. Genel olarak, bu uyum, yerelleştirilmiş durumlar arasında atlama mekanizmasının varlığını doğrular. Genel olarak, bu uyum, yerelleştirilmiş durumlar arasında atlama mekanizmasının varlığını doğrular. Sonuç olarak, küçük polaron atlama mekanizması, VO_x numunesinde daha olası iletim sürecidir [126].

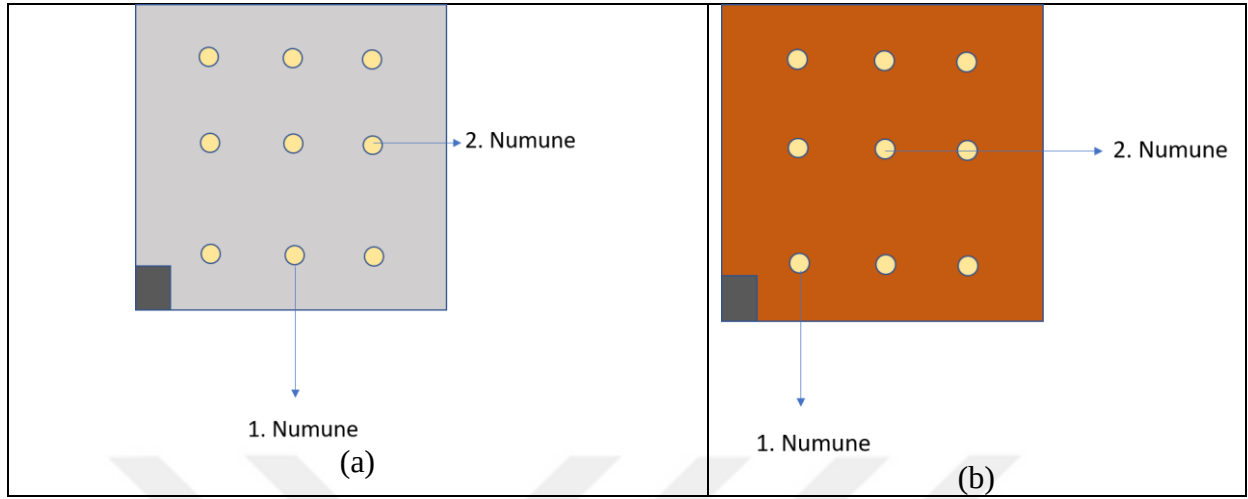


Şekil 5.27. 300-500 K sıcaklık aralığında (a) Au/n-Si/Au ve (b) Au/VO_x/n-Si/Au Schottky diyotlarının frekansa bağlı AC iletkenlik grafikleri.

5.5. Farklı Işık Şiddetinde Yapılan Ölçümler

Fotoiletkenlik çalışması, optoelektronik cihazlar için önemli bir unsurdur. Diyot ışığa maruz kaldığında, tuzaklanan yük taşıyıcıları foton enerjisini emer ve akımı iletmek için serbest hale gelir [128-129]. Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si/Au yapılar için beyaz ışık altında 0 mW/cm^2 - 100 mW/cm^2 ışık şiddeti arasında 20 mW/cm^2 aralıklarla akım-gerilim (I-V) ve kısa devre akımı-zaman (I_{sc} -T) ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, FYTRONIK SOLAR SIMULATOR cihazı kullanılarak yapılmıştır. Her bir numuneden Şekil 5.28'de gösterildiği gibi iki farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Her iki noktadan akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Ayrıca her iki numune içinde 100 mW/cm^2 kadar 20 mW/cm^2 aydınlatılarak geçici akım incelenmiştir. Aynı şekilde her iki numunenin her iki noktasından, geçici akım-zaman (I_{sc} -T) ölçümü yapılmıştır. Yüzey kaplama homojenliğini inceleyebilmek için her bir Si yonga üzerine büyütülen 9 farklı diyottan 2 si

üzerinde ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm noktaları numune 1 ve numune 2 olarak isimlendirilmiştir.

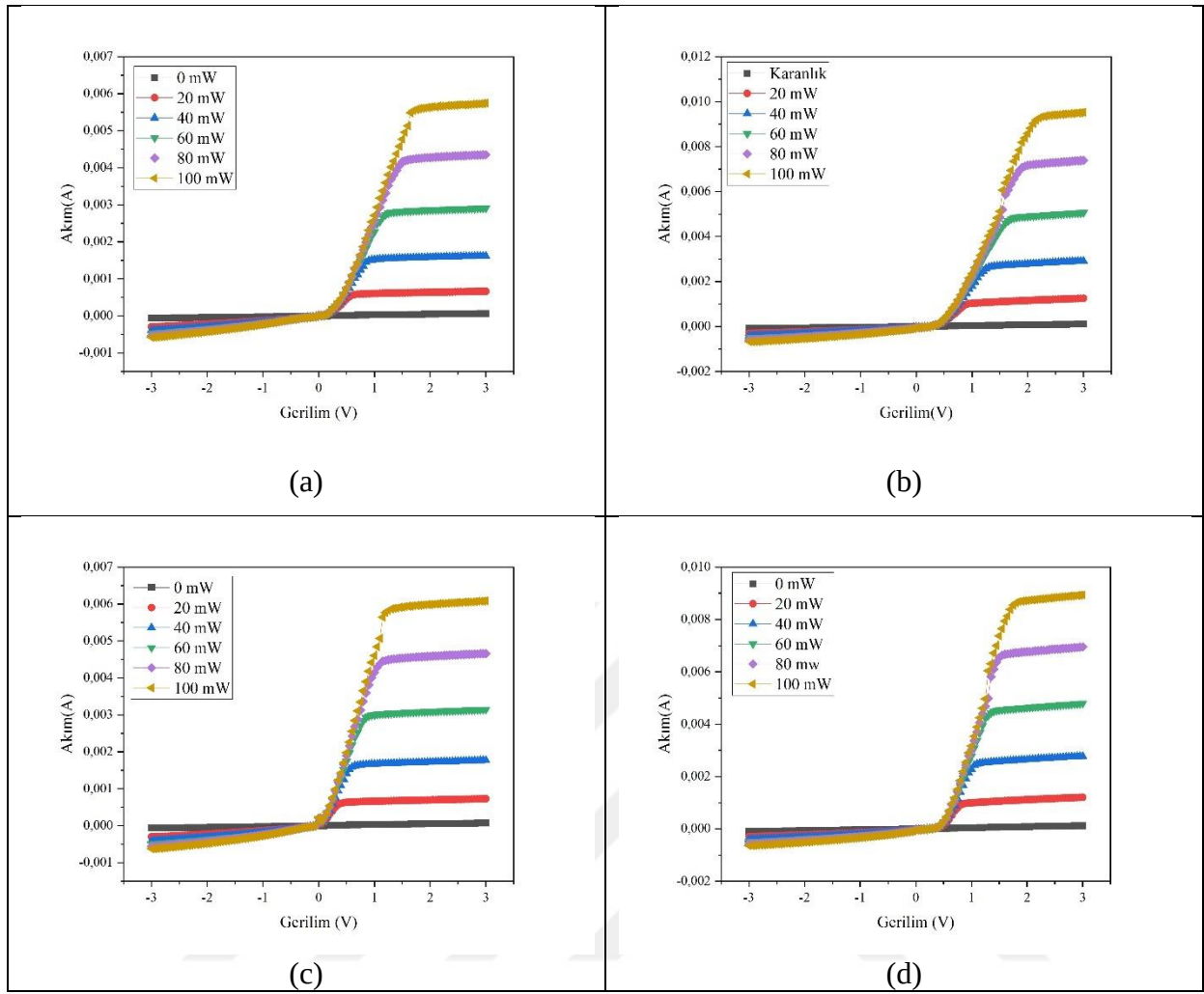


Şekil 5.28. Au/n-Si/Au (a) Au/VO_x/n-Si/Au (b) numuneleri için beyaz ışık altında ölçüm alınan noktalar.

Şekil 5.29’da gösterildiği gibi, diyotların I–V eğrileri, diyot benzeri doğrultma davranışı gösterir. Diyotların I–V özellikleri, termiyonik emisyon teorisi kullanılarak hesaplanabilir. Bir diyot, seri direnç etkisi ve ara yüz durumları nedeniyle ideal diyot durumundan sapar [130-131].

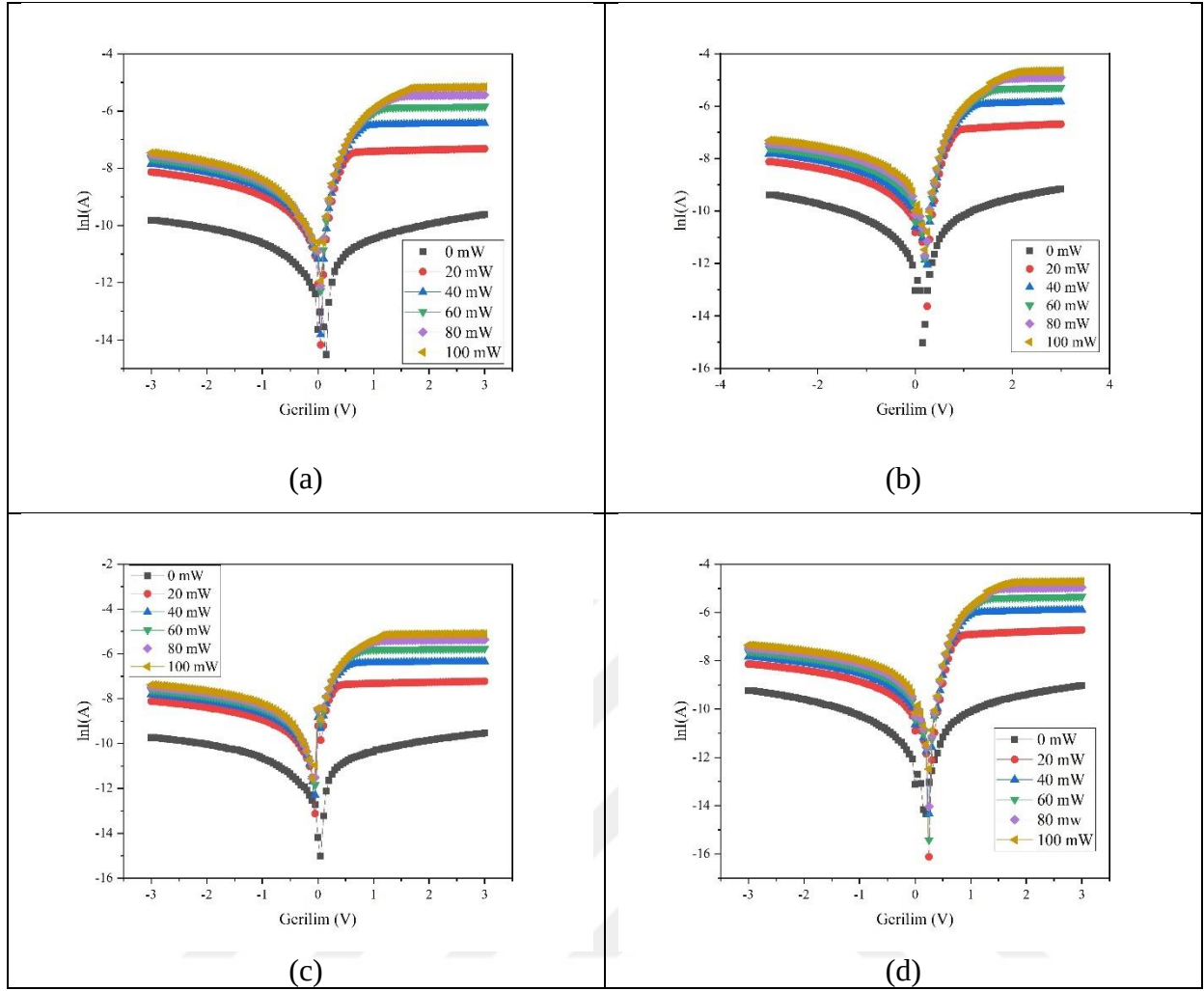
İdeal diyot davranışından kaynaklanan sapmalar, seri direnç etkisi ile açıklanabilir [132]. Cheung yöntemi ve Norde yöntemi diyotların elektriksel özellikleri incelemektedir. [133]. Bariyer yüksekliği Cheung yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. I-V özellikleri Cheung yöntemiyle açıklanabilir.

Au/VO_x/n-Si/Au fotodiyotun birinci ölçümde ters akımı karanlıkta 0.106 mA değerinden, 100 mW/cm² ışık altında yaklaşık 9.53 mA değerine yükseldi. Aynı numune için ikinci ölçümde ölçümde ters akımı karanlıkta 0.120 mA değerinden 100 mW/cm² ışık altında yaklaşık 8.95 mA değerine yükseldi. Au/n-Si/Au numune için birinci ölçümde ters akımı karanlıkta 0.72 mA değerinden 100 mW/cm² ışık altında yaklaşık 5.75 mA değerine yükseldi. Aynı numune için ikinci ölçümde ters akımı karanlıkta 0.120 mA değerinden 100 mW/cm² ışık altında yaklaşık 6.1 mA değerine yükseldi. Ayrıca Şekil 5.29’dan görülebileceği üzere, her iki numune için yapılan her iki ölçümde de ara yüz malzemesi olarak kullanılan VO_x ince film her iki ölçümde de bütün ışık şiddetlerinde akım değerini arttırmıştır.



Şekil 5.29. Au/n-Si/Au (a,c) Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) numuneleri için beyaz ışık altında 0 mW/cm²-100 mW/cm² ışık şiddetleri arasında 20 mW/cm² aralıklarla 1. ölçüm (a,b) ve 2. ölçüm (c,d) için alınan akım-gerilim (I-V) grafikleri.

Şekil 5.30'da Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) diyotları için 0 mW/cm²-100 mW/cm² ışık şiddetleri arasında 20 mW/cm² aralıklarla 1. ölçüm (a,b) ve 2. ölçüm (c,d) için alınan akım-gerilim (lnI-V) grafikleri gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere ışık yoğunluğu aygıtın fotoelektrik performansı üzerinde etkiye sahiptir. VO_x ara yüz malzemesi olan diyotta artış VO_x olmayan diyot yapısına göre daha fazladır ve bu etki grafiklerden rahatça görülebilmektedir. Her iki aygıtında ışığa karşı duyarlılığı özellikle pozitif besleme bölgesinde daha da açığa çıkmaktadır. Bir başka deyişle, aygıtların ışığa karşı duyarlılıkları ışık şiddeti arttıkça artmıştır. Özellikle pozitif besleme bölgesinde bu ayrışma daha da belirgindir. Aygıtın ışığa karşı duyarlılığı, aygıtın fotodiyot özelliğine yani elektron-boşluk çiftlerinin optik soğurma sonrası oluşumuna bağlanabilir [134-135].

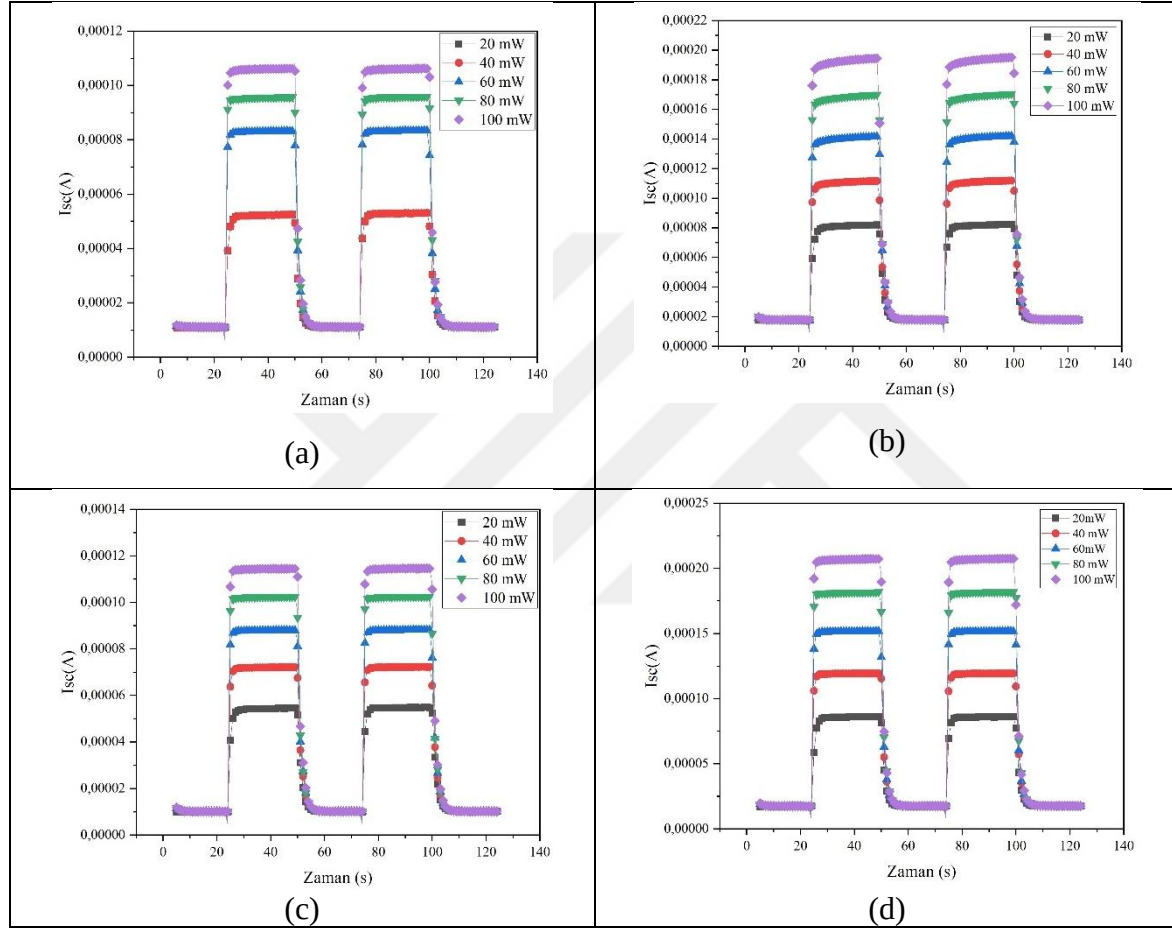


Şekil 5.30. Au/n-Si/Au (a,c) Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) numuneleri için beyaz ışık altında 0 mW/cm²-100 mW/cm² ışık şiddetleri arasında 20 mW/cm² aralıklarla 1. ölçüm (a,b) ve 2. ölçüm (c,d) için alınan akım-gerilim ($\ln I$ -V) grafikleri.

Şekil 5.31’de ise Au/n-Si/Au (a,c) ve Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) numuneleri için 100 mW/cm² değerine kadar 20 mW/cm² aralıklarla yapılan geçici akım-zaman grafikleri gösterilmektedir. Şekil 5.31’den anlaşılabileceği üzere, ışık açıldıktan sonra akım hızla artarak maksimuma ulaşır ve düz bir şekil alır. Işığı kapattıktan sonra, derin seviyelerde sıkışan yükler ve akım aniden ilk durumuna tekrar geri döner [128-136]. Bir başka deyişle, ışık aydınlatması altındaki Schottky diyotu, akıma atfedilen yük taşıyıcıları ve elektronlar üretir [137-138]. Darbelerin görünümünün cihazın ışığa duyarlılığını yansıttığını açıkça görülmektedir. Diyotların ışık iletme davranışı tuzak merkezlerine bağlıdır. VO_x için elde edilen yüksek fotoakım, büyük yüzey/hacim oranının, daha düşük gürültü akımının ve çok büyük yanıtın, daha yüksek hassasiyetin, kuantum verimliliğin ve yüksek algılamanın geliştirilmesinden kaynaklanmaktadır [137-139]. Serbest yüklerin yüzeye ulaşması için gereken sürenin çok kısa olduğu, yani yük oluşturma rekombinasyon dengesinin olmadığı gözlemlendi [140]. Ayrıca akımın üst kısmı, güneş enerjisi sistemleri ve ışık yayan

diyotların imalatında büyük önem taşıyan serbest yük taşıyıcılarının üretimini destekleyen sabit bir seviyeye ulaşmadan düz bir şekil alır [141-142]. Fotodiyotun ışık yoğunluğuna duyarlılığı Eşitlik 5.16 ile belirlenir [140–142]. Burada, I_{ph} fotoakım, A sabit, P ışık gücü ve m ise $\ln I_{ph}$ 'nin $\ln P$ 'ye karşı eğiminden hesaplanan üs ifadesidir.

$$I_{ph} = A * P^m \quad (5.16)$$

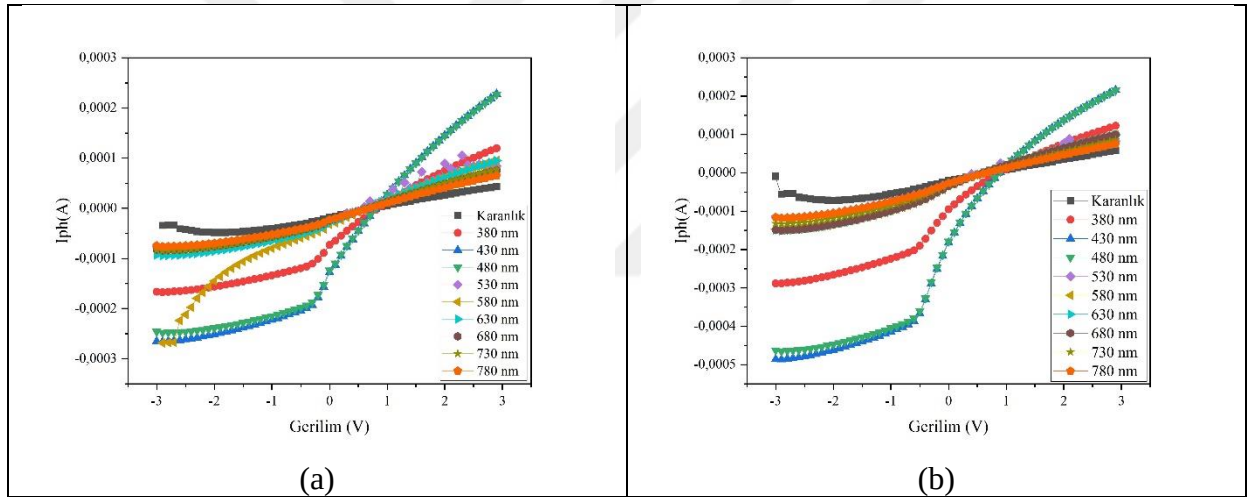


Şekil 5.31. Au/n-Si/Au (a,c) Au/VO_x/n-Si/Au (b,d) numuneleri için beyaz ışık altında 100 mW/cm² ışık şiddetine kadar arasında 20 mW/cm² aralıklarla 1. Numune (a,b) ve 2. Numune (c,d) için alınan geçici akım-zaman (I-t) grafikleri.

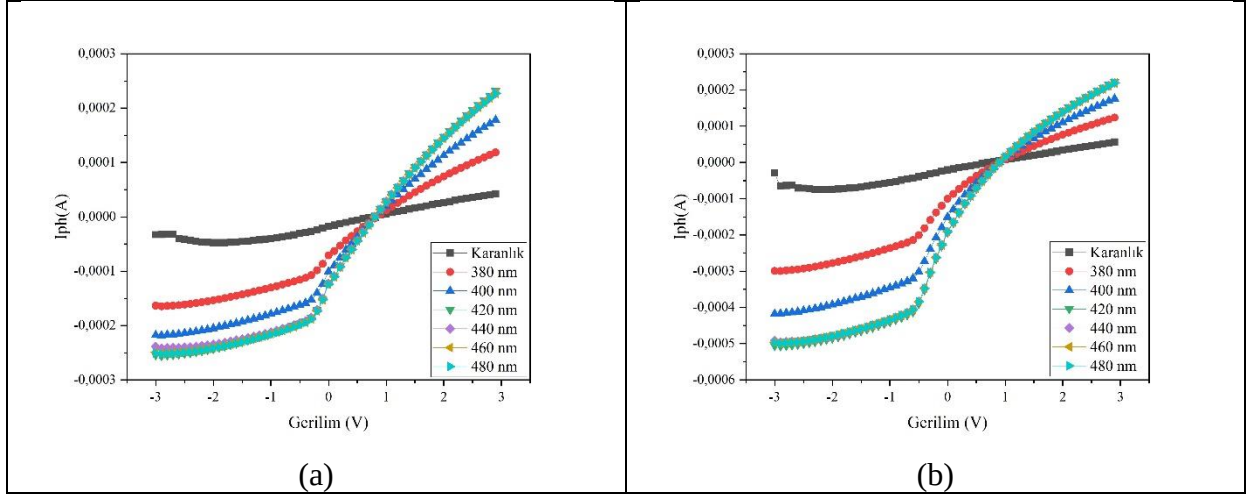
5.6. Farklı Dalgaboylarında Yapılan Ölçümler

Beyaz ışık altında Au/n-Si/Au ve Au/VO_x/n-Si/Au numuneleri için iki farklı noktadan yapılan akım-gerilim (I-V) ölçüm sonuçlarına göre; Au/n-Si/Au numunesi için daha düşük değer gösteren 1 nolu noktadan, Au/VO_x/n-Si/Au numunesi için ise daha yüksek değer gösteren 1 nolu noktadan fotoakım-gerilim (I_{ph} -V) ölçümleri 380 nm- 780nm dalgaboyu aralığında 50 nm adımlarla ölçümler alınmıştır. Ölçümler, FYTRONIK SOLAR SIMULATOR cihazı kullanılarak

yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre; Şekil 5.30'dan da görülebileceği üzere her iki numune içinde, Au/VO_x/n-Si/Au numunesi için daha fazla olmak üzere, 380 nm dalgaboyundan 480 nm dalgaboyuna kadar, dalgaboyu ile beraber fotoakım (I_{ph}) değeri artmaktadır. Ancak 480 nm dalgaboyundan itibaren, dalgaboyu arttıkça fotoakım değeri düşmektedir. Bu nedenle daha detaylı olarak bu aralığı taramak için her iki numune içinde 380 nm- 480 nm dalgaboyu aralığında 20 nm adımlarla fotoakım-gerilim (I_{ph} -V) ölçümü tekrarlanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre; Şekil 5.32'den de görülebileceği üzere her iki numune içinde, Au/VO_x/n-Si/Au numunesi için daha fazla olmak üzere, 380 nm dalgaboyundan 480 nm dalgaboyuna kadar, dalgaboyu ile beraber fotoakım (I_{ph}) aralığı artmaktadır. Ancak her iki numune içinde karanlık ortamda, 380 nm ve 400 nm dalgaboylarında fotoakım (I_{ph}) aralığı daha düşük ve birbirlerinden uzak olmalarına rağmen 420 nm-480 nm dalgaboyu aralığında hem fotoakım (I_{ph}) aralığı daha yüksek hemde birbirlerine oldukça yakındır. Neredeyse iç içe geçmiş durumdadırlar.



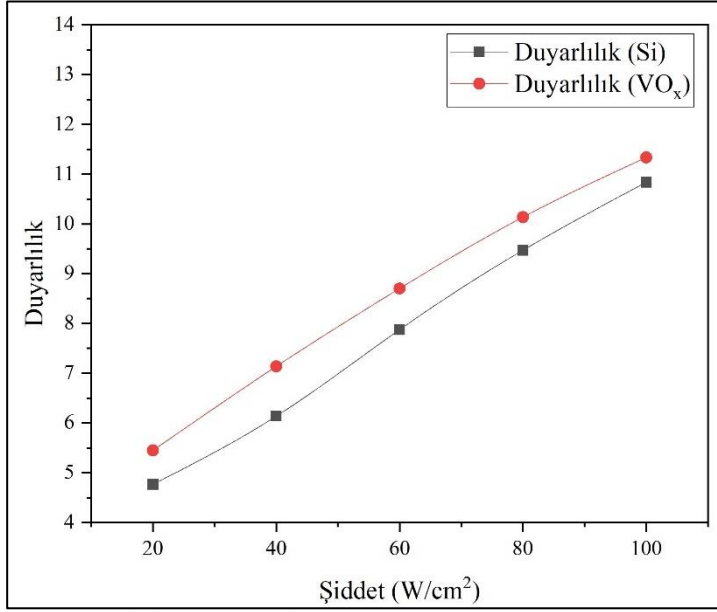
Şekil 5.32. Au/n-Si/Au (a) Au/VO_x/n-Si/Au (b) numuneleri için 380 nm-780 nm dalgaboyu aralığında 50 nm adımlarla yapılan fotoakım-gerilim (I_{ph} -V) ölçüm grafikleri.



Şekil 5.33. Au/n-Si/Au (a) Au/VO_x/n-Si/Au (b) numuneleri için 380 nm-480 nm dalgaboyu aralığında 20 nm adımlarla yapılan fotoakım-gerilim (I_{ph} -V) ölçüm grafikleri.

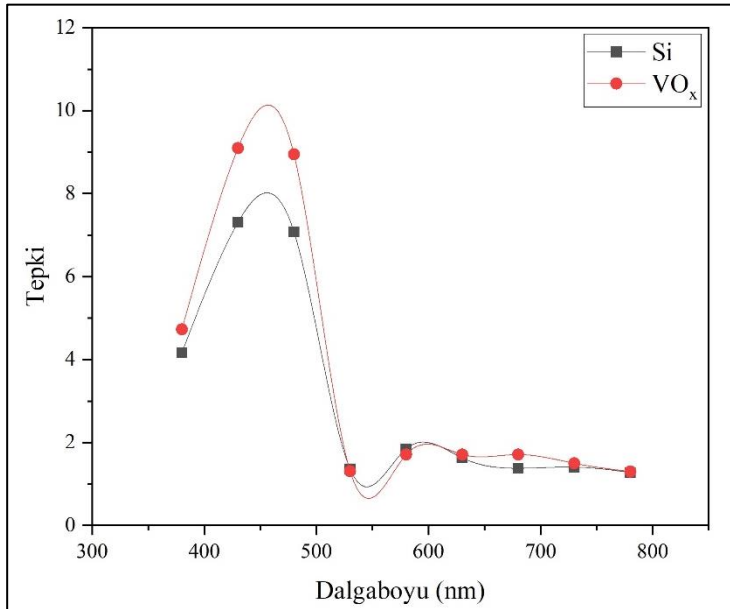
Ayrıca, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'ten de görülebileceği üzere her iki numune içinde fotoakım (I_{ph}) artan gerilim ile beraber artmaktadır. Her iki numune içinde hem gerilime hem de dalgaboyuna bağlı olarak fotoakım (I_{ph}) artmaktadır. Ancak, VO_x arayüze sahip olan numunede bu artış daha fazladır ve bu olgu artan etkin ışığa duyarlı bağlantı alanına bağlanabilir. Yansıtıcı ve opak metal teması, fotoiletken alanı çevre bölgesiyle sınırlarken, VO_x ince filmi metale göre şeffaftır ve ışığa duyarlı yüzey alanını arttırır [143]. Ön besleme gerilimi ayarlı foto-duyarlılık, cihaza ek işlevler sağlar ve onu daha düşük veya daha yüksek güç uygulamaları için uygun hale getirir [143]. Şekil 5.33'te cihazın doğrultma performansı gösterdiği ve verilerin standart termiyonik emisyon (TE) teorisi ile analiz edildiği açıktır ve bu, Schottky temasının VO_x ince film ve Au elektrotları arasında kurulduğunu gösterir. Temas alanında bulunan Schottky bariyerleri sadece foto-oluşturulmuş elektron-delik çiftlerinin ayrılmasını hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda benzer şekilde elektron-delik rekombinasyon oranını düşürür ve fotoakım ve tepki hızını iyileştirir [139].

Şekil 5.34'te ışığa duyarlılık-ışık şiddeti grafiği görülmektedir. Grafikten görülebileceği üzere, VO_x ara yüzün etkisi ile ışığa duyarlılık artmıştır. Ancak her iki numune arasında bari bir fark oluşmamıştır. Buradan yüzey kaplamasının homojen olduğu sonucuna varılabilir. Ancak üretilen her iki numunede ışık şiddetine karşı oldukça duyarlıdır. Duyarlılığın VO_x ara yüz tabakası ile artması, üretilen numunenin elektron-deşik çiftlerinin oluşmasını sağlayan optik soğurmaya bağlanabilir ve fotodiyot özelliğine sahip olduğu anlamına gelir. Bu özellik daha önce yapılan bazı çalışmalarda da gözlenmiştir [144].



Şekil 5.34. Au/n-Si/Au (a) Au/VO_x/n-Si/Au (b) numuneleri için Işığa Duyarlılık-Işık Şiddeti grafiği.

Şekil 5.35'te tepki-dalga boyu grafiği gösterilmektedir. Grafikten görülebileceği üzere VO_x ara yüzün etkisiyle tepe noktası benzer dalga boyunda daha yüksek bir noktada oluşmaktadır. Tepkideki bu artış, filmin büyük hareketliliği nedeniyle tükenme bölgesinin genişlemesine ve difüzyon uzunluğunun (L_e) artmasına bağlanabilir [145].



Şekil 5.35. Au/n-Si/Au (a) Au/VO_x/n-Si/Au (b) numuneleri için Tepki-Dalga boyu grafiği.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, literatür taraması sonucunda Vanadyum Oksit ince film malzemesinin silisyum ile karşılaştırmalı olarak elektriksel ve optik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmediği gözlenmiştir. Bu nedenle, VO_x ara yüz malzemesi kullanılarak elektrik özelliklerine katkısı, beyaz ışık altında ışık şiddetine olan tepkisi ve 380-780 nm dalga boyu arasında farklı dalga boylarına olan tepkisi, Si alttaş üzerine üretilen Schottky diyot ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu nedenle, 4" boyutunda 525 ± 25 μm kalınlığa sahip öz direnci 1-20 $\Omega\cdot\text{cm}$ olan n-tipi Si alttaş yaklaşık olarak 2 cm x 2 cm boyutlarda elmas kalem ile kesildi. İki adet parça alınarak parlak olmayan tarafları manyetik saçtırma yöntemi ile 20 nm altın (Au kaplandı) ve numuneler 400°C sıcaklık altında 4 dakika tavlandı. Bu iki numuneden bir tanesinin parlak olan ön yüzeyi yine manyetik saçtırma yöntemi ile 50 nm VO_x ince film ile kaplandı. Daha sonra her iki numunede gölge maske (shadow mask) kullanılarak 1 mm çapındaki delikler yardımı ile manyetik sıçratma yöntemi ile 50 nm altın (Au) kaplandı.

Kaplanan VO_x ince film için yapılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizlerinde, ince film yüzeyinin düzgün ve homojen bir şekilde kaplandığı gözlemlendi. İnce filmin görüntülerden de görülebileceği üzere çakıl taşı şeklinde büyüdüğü gözlemlendi.

Ayrıca VO_x ince film için X-Işını Kırınımı (XRD) yöntemi ile de analizler gerçekleştirildi. Üretilen ince filmin XRD analizi neticesinde kırınım desenlerinde herhangi bir pike rastlanmadı. Böylece kaplanan ince filmin amorf bir yapıya sahip olduğu anlaşılmış oldu. Sadece 51.16° de bir pike rastlandı. Ancak bu pikin ICCD kütüphanesinden yararlanılarak faz eşlemesi yapıldığında silisyum alt taştan geldiği anlaşıldı.

Üretilen numunelerden kontaklar alınarak, 1 kHz-1MHz frekans aralığında ve -4V/+4V gerilim altında, oda sıcaklığında ve 300 K-500 K sıcaklık aralığında akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V), kondüktans-gerilim (G/ω -V) ölçümleri alındı. C-V ve G/ω -V ölçümlerinden yararlanılarak dielektrik sabiti, dielektrik kayıp, elektrik modülü, empedansları gibi dielektrik özellikleri hesaplandı ve grafikleri çizdirildi.

Yapılan ölçümler sonucunda, üretilen numunelerin tüm sıcaklıklarda iyi bir doğrultma özelliklerine sahip olduğu anlaşılmıştır ve sıcaklık artışından etkilenmediği için geniş sıcaklık aralıklarında kullanılabileceği açıktır. Yapılan ölçümlerde numunelerin hem frekans hem de uygulanan gerilim ile direkt bağlantılı olduğu açıktır. Seri direnç R_s nin varlığı nedeniyle hem doğru besleme hem de ters besleme bölgesinde gerilim arttıkça akım-gerilim grafiği doğrusallıktan saparak plato eğilimine doğru gittiği açıkça gözlenmiştir. Seri direnç ve D_{it} frekans arttıkça azaldığı, özellikle VO_x ara yüz etkisiyle seri direncin VO_x olmayan numuneye göre daha fazla olduğu ve D_{it} düşük frekans bölgesinde VO_x ara yüz etkisiyle oldukça hızlı azaldığı çizilen grafiklerden açıkça görülmüştür. D_{it} 'nin R_s değerleri üzerindeki etkisine ek olarak frekans artışı ile kapasitans değerinin azalmasında ve ayrıca gerilime bağlı değişimlerinde etkindir

Kapasitans-gerilim (C-V) ve kondüktans-gerilim (G/ω -V) ölçümlerinden açıkça görülebileceği üzere, kapasitans ve kondüktans değerleri frekans ile yakın bir ilişki içerisindedir. Kapasitans-gerilim (C-V) grafiklerinden açıkça görülebileceği üzere yığılma-tüketim ve terslenim bölgeleri oluşmuştur. Frekansa bağlı olarak kapasitans ve kondüktans değerlerinde oluşan değişimler özellikle terslenim ve tüketim bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle VO_x ara yüzün etkisi ile kapasitans değerinin özellikle düşük frekanslarda arttığı gözlenmiştir. Düşük frekanslarda yüzey polarizasyon etkisi görülmektedir ve ara yüzey (N_{ss}) durumlarında bulunan yükler düşük frekanslarda AC sinyali takip edebilmelerine rağmen yüksek frekanslarda takip edememelerine bağlanır. Bir başka deyişle, bu tür MYD diyot yapısındaki cihazların performansı, ara yüzdeki yalıtkan/oksit/dielektrik katmanın dielektrik özelliklerinin güçlü etkisi altında olduğu sonucuna varılabilir. Düşük frekanslarda metal-yarı iletken arasında yerleşen tuzaklar farklı yaşam ömürlerine (τ) sahiptir ve düşük frekans değerlerinde periyot (T) bu tuzakların ömründen daha büyük olduğu için AC sinyali takip edebilirler. Bu durumdan dolayı diyotun kapasitansı tüketim bölgesinde baskın bir hale gelir. Yüksek frekanslarda ise ara yüzey durumlarında bulunan yükler AC sinyali takip edemedikleri için hem kapasitans (C) hem de kondüktans (G/ω) değerlerine bir katkısı olmadığı ve toplam kapasitansın tüketim kapasitansı tarafında etkilendiği anlaşılmıştır. Kondüktans (G/ω) değerleri terslenim bölgesinde artan frekans ile artmaktadır ve bu davranışı ile kapasitans-gerilim (C-V) karakteristiği benzerlik göstermektedir. Buradan açıkça anlaşılabileceği üzere kondüktans (G/ω) değeri, artan frekans ve uygulanan ters besleme gerilim ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Bütün bunlara ek olarak yüksek iletkenlik, kapasitörün iç sızıntısına neden olarak daha düşük kapasitansa neden olduğu ve bu nedenle, frekans arttıkça iletkenliğin aksine kapasitansın azaldığı anlaşılmıştır. Bütün bunlara ek olarak, ara yüzey durumları olan D_{it} in terslenim ve tüketim bölgelerinde düşük ve orta frekanslarda etkili olduğu ve birikme

bölgesinde yüksek frekanslarda seri direnç R_s nin etkili olmasından dolayı frekans arttıkça kapasitans değerinde azalma olduğu anlaşılmıştır. Kapasitans ve kondüktans değerlerinde elde edilen diğer dielektrik özellikler ise silisyum ve VO_x için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçların literatürdeki diğer metal oksit malzemeler ile tutarlı olduğu anlaşılmıştır.

Ayrıca, optoelektronik cihazlar için foto iletkenlik ölçümleri de oldukça önemlidir. Diyotların ışığa maruz bırakıldıklarında tuzaklanan yük taşıyıcılarının foton enerjisini emerek serbest hale geldikleri ve iletme katkısı sağladıkları bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, $Au/n-Si/Au$ ve $Au/VO_x/n-Si/Au$ yapılar için beyaz ışık altında 0 mW/cm^2 - 100 mW/cm^2 ışık şiddeti arasında 20 mW/cm^2 aralıklarla akım-gerilim (I-V) ve kısa devre akımı-zaman (I_{sc} -T) ölçümleri yapılmıştır. Akım-gerilim (I-V) ölçümlerinden açıkça görülebileceği üzere, üretilen numuneler diyot benzeri bir doğrultma davranışı göstermektedir. Ayrıca VO_x ara yüz malzemesinin etkisi ile ölçülen akım değerinin arttığı ve ışığa karşı verilen tepkinin arttığı gözlemlenmiştir. Işık yoğunluğu aygıtın fotoelektrik performansı üzerinde etkiye sahiptir. VO_x ara yüz malzemesi olan diyotta artış VO_x olmayan diyot yapısına göre daha fazladır. Bir başka deyişle, aygıtların ışığa karşı duyarlılıkları ışık şiddeti arttıkça artmış olduğu ve özellikle pozitif besleme bölgesinde bu ayrışma daha da belirgin olduğu sonuçlardan açıkça görülmüştür. Aygıtların ışığa karşı duyarlılığı, aygıtın foto diyot özelliğine yani elektron-boşluk çiftlerinin optik soğurma sonrası oluşumuna bağlanabileceği düşünülmüştür.

Geçici akım-zaman (I_{sc} -t) ölçümlerinden açıkça anlaşılabileceği üzere ışık açıldıktan sonra akım hızla artarak maksimuma ulaşır ve plato oluşturmuştur. Işık kapatıldığında ise hızla eski haline dönmektedir. Bu nedeninin derin seviyelerde sıkışan yüklerin aniden ilk durumuna dönmesine bağlanabilir. Ayrıca bu sonuçlardan açıkça anlaşılabileceği üzere üretilen aygıtların ışığa karşı olan tepkilerinin oldukça iyi ve hızlı olduğu anlaşılmıştır. Işığa karşı duyarlılığın VO_x ara yüz tabakası ile artması, üretilen numunenin elektron-deşik çiftlerinin oluşmasını sağlayan optik soğurmaya bağlanabilir ve fotodiyot özelliğine sahip olduğu anlamına gelir.

Son olarak, üretilen numuneler için 380-780 nm dalga boyları arasında fotoakım-gerilim (I_{ph} -V) ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlardan açıkça görülebileceği üzere, VO_x ara yüz malzemesi etkisi ile 380-480 nm dalga boyu aralığında dalga boyu ile foto akım (I_{ph}) aralığı artmıştır. Bunun nedeni olarak, artan etkin ışığa duyarlı bağlantı alanı gösterilebilir. Yansıtıcı ve opak metal teması, fotoiletken alanı çevre bölgesiyle sınırlarken, VO_x ince filmi metale göre şeffaftır ve ışığa duyarlı yüzey alanını artırır. Ön besleme gerilimi ayarlı foto-duyarlılık, cihaza ek işlevler sağlar ve onu

daha düşük veya daha yüksek güç uygulamaları için uygun hale getireceği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, VO_x ara yüzün etkisi ile ışığa karşı olan tepki özellikle belirli bir dalga boyunda (480 nm) maksimuma ulaştığı sonuçlardan açıkça görölmüştür ve bu da iyi bir foto sensör olabileceği sonucuna ulaşılmasını sağlar.

Özetle, reaktif DC magnetron sıçratma yöntemi ile üretilen VO_x ince filmin ara yüzey malzemesi olarak kullanıldığında diyot yapısının kapasitif özelliklerine katkıda bulunduğu, diğ er metal oksit malzemelere göre kapasitansını ve dielektrik sabitini önemli oranda arttırdığı anlaşılmıştır. Ayrıca ışık altında yapılan ölçümler sonucunda iyi bir foto sensör malzemesi olabileceği görölmüştür.



KAYNAKLAR

1. Ligenza, S. (1960). Mechanisms for Silicon Oxidation in Steam and Oxygen. *Journal of Physics and Chemistry Solids*, 14,131-136.
2. Tung, T. (2001). Recent Advances in Schottky Barrier Concepts. *Material Science and Engineering Reports*, 35, 1-138.
3. Tuğluoğlu, N., Koralay, H., Akgül, K. B., and Çavdar, Ş. (2016), Detailed Analysis of Device Parameters by Means of Different Techniques in Schottky Devices, *Journal of Electronic Materials*, 45, 3859-3865.
4. Kumar, A., Mondal, S., and Rao, K. S. R. K. (2016). Low temperature solution processed high-K ZrO₂ gate dielectrics for nanoelectronics. *Thin Solid Films*, 370, 373-379.
5. Jiang, H., Tang, C. W., and Lau, K. M. (2018) Enhancement-Mode GaN MOS-HEMTs with Recess-Free Barrier Engineering and High-k ZrO₂ Gate Dielectric. *IEEE Electronic Device Letters*, 39, 405-408.
6. Ahn, K. T., (2018) Carrier Transport Mechanism via a High-k HfO₂ Thin Layer Between GaAs Layers. *Thin Solid Films*, 657, 6016-6018.
7. Demircioglu, Ö., Karataş, S., Yildirim, N., Bakkaloglu, Ö., F. and Türüt, A. (temperature dependent current-voltage and capacitance-voltage characteristics of chromium Schottky contacts formed by electrodeposition technique on n-type Si. *Jornal of Alloys Compounds*, 509 (22), 6433-6439.
8. El-Atab, N., Alqatari, S., Oruç, B. F. Souier, T., Chiesa, M., Okayay, A. K., and Nayfey, A. (2013). Diode behavior in ultra-thin low temperature ALD grown zinc-oxide on silicon. *AIP Advances*, 3 (10) 3-7.
9. Dahlan, A., Tataroğlu, A., Al-Ghamdi, A., and Binomran, S. (2015). Photodiode and photocapacitor properties of Au/CdTe/p-Si/Al device. *Journal of Alloys and Compounds*, 646, 1151-1156.
10. Güllü, Ö., Türüt, A. (2010). Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 87(12), 2482–2487.
11. Feng, H., Yang, W., and Sin, J. K. (2018). A Low Recovery Loss Reverse-Conducting IGBT with Metal/P-body Schottky Junctions for Hard-Switching Applications. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 5(2), 61–67.
12. Tuan, T. T. A. and Kuo, D. H. (2015). Temperature-dependent electrical properties of the sputtering-made n-InGaN/p-GaN junction diode with a breakdown voltage above 20 V. *Material Science and Semiconductor Processes*, 32, 160-165.
13. Sekhar Reddy, P. R., Janardhanam, V., Lee, H., Shim, K., Lee, S., Reddy, R., and Choi, C. (2020). Schottky Barrier Parameters and Low-Frequency Noise Characteristics of Au/Ni Contact to n-Type β -Ga₂O₃. *Journal of Electronic Materials*, 49(1), 297-305.
14. Chen, Y., Kim., J. and Jang, S. D. (2012). Grain size and thickness effect on the performance of sol-gel based TiO₂ Schottky diodes. *Materials Chemistry and Physics*, 132 (2), 591-595.

15. Al-Ahmadi, N. A. (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: A review of recent advances. *Material Research Express*, 7 (3) 1-20.
16. Ondo-Ndong, R., Essone Obame, H., Moussambi, Z. H. and Koumba, N. (2018). Capacitive properties of zinc oxide thin films by radiofrequency magnetron sputtering. *Journal of Theoretical Applied Physics*, 12(4), 309-317.
17. Wu, M. C., and Lee, C. S. (2009). Field emission of vertically aligned V_2O_5 nanowires on an ITO surface prepared with gaseous transport. *Journal of Solid State Chemistry*, 192(8), 2285–2289.
18. Zhai, T., Liu, H., Fang, X., Liao, M., Li, L., Zhou, H., Koide, Y., Bando, Y., and Golberg, D. (2018). Centimeter-long V_2O_5 nanowires: From synthesis to field-emission, electrochemical, electrical transport, and photoconductive properties. *Advanced Materials*, 22(23), 2547–2552.
19. Kim, M. G. B. T., Muster, J., Park, J. G. and Park, Y. W. (2000). Field-effect transistor made of individual V_2O_5 nanofibers. *Applied Physics Letter*, 76, 1875–1877.
20. Vieira, N. C. S., Avansi, W., Figueiredo, A., Riberio, C., Mastelaro V. R. and Guimaraes, F. E. G. (2012) Ion-sensing properties of 1D vanadium pentoxide nanostructures. *Nanoscale Research Letter*, 7, 1–5.
21. Raible, I., Burghard, M., Schlecht, U., Yasuda, A. and Vossmeier, T. (2005). V_2O_5 nanofibres: Novel gas sensors with extremely high sensitivity and selectivity to amines. *Sensors Actuators B:Chemical*, 106(2), 730–735.
22. Wu, S. Y. C., Yu, G. T. K. H., Kang, B. H., Pi, U. H., and Park, C. W. (2005). V_2O_5 nanowire-based nanoelectronic devices for helium detection. *Applied Physics Letter*, 86, 230–235.
23. Chen, R. S., Wang, W. C., Chan, C. H, Hsu, H. P., Tien, L. C. and Chen, Y. J. (2013). Photoconductivities in monocrystalline layered V_2O_5 nanowires grown by physical vapor deposition. *Nanoscale Research Letter*, 8(1), 1-8.
24. Karabulut, A., Orak. I., and Türüt, A. (2018). The photovoltaic impact of atomic layer deposited TiO_2 interfacial layer on Si-based photodiodes. *Solid State Electronics*, 144(2), 39-48.
25. Parlaktürk, F. (2007). *Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MFIS) Yapıların Hazırlanması, Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. Bilkan, Ç. (2011). *Perilensiz ve Perilenli Al/p-Si Schottky Engel Diyotların Elektriksel Özelliklerinin Oda Sıcaklığında Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
27. Kaplan, K. (2018). *Atomik Katman Biriktirme Yöntemi ile Büyütülmüş Al₂O₃ İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karatekin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankırı.
28. Güçlü, Ç. Ş. (2013). *Arayüzeyleri Farklı Kalınlıklarda İmal Edilmiş Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In Schottky Diyotların Dielektriksel Özelliklerinin ve AC Elektriksel İletkenliklerinin Frekansa*

ve Sıcaklığa Bağlılıkları. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

29. Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Laflere, W. H. and Cardon, F. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid State Electronics*, 29(6), 633-638.
30. Uğur, A. ve Ay, N. (2018). Atomik Katman Biriktirme (ALD) Cihazları Çeşitlerindeki Gelişmeler,” *Mühendislik Bilim. ve Tasarım Dergisi*, 6(4), 590–605.
31. Sharma, B. L. (1984). *Physics of Schottky Barrier Junctions, Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions Their Applications. (Second Edition)* Plenum New York and London, 1–56.
32. Monch, W. (1990). On the physics of metal-semiconductor interfaces,” *Reports on Progress in Physics*, 53(110), 221–278.
33. P. R. S., Spicer, C. Y. S. W. E. and Lindau, I. (1981). The Unified Model for Schottky Barrier Formation and MOS Interface States in 3–5 Compounds. *Applied Surface Science*, 9, 83-91.
34. Brillson, L. J. (1983). Advances in Understanding Metal-Semiconductor Interfaces by Surface Science Techniques. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 44, 703-733.
35. Mead, C. A. (1969). Physics of Interfaces in Ohmic Contacts to Semiconductors. *Electrochemical Society*, 11, 3-16.
36. Bardeen, J. (1947). Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact. *Physics Review*, 71(10), 717–727.
37. Williams R. H. (1982). The Schottky Barrier Problem. *Contemporary Physics*, 23, 329-351.
38. Brillson, L. J. (1982). Surface Photovoltage Measurements and Fermi Level Pinning Comment on Development and Confirmation of the Unified Mode. *Thin Solid Films*, 16(6), 27–33.
39. Tersoff, J. (1985). Recent Models of Schottky Barrier Formation. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 3, 1157-1161.
40. Kendelewicz, T. and Lindau, I. (1986). Schottky Barrier Formation on III–V Semiconductor Surfaces A Critical Evaluation. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 13, 27-55.
41. Kroger, H. A. K. F. A., and Dierner, G. (1956). Nature of Ohmic Metal-Semiconductor Contacts. *Physics Review*, 103, 279-286.
42. Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices. Elsevier, USA*, 255-258.
43. Padovani, F. A. and Stratton, R. (1966). Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers. *Solid State Electronics*, 9, 695-707.
44. Padovani, F. A. (1971). The Current-Voltage Characteristics of Metal-Semiconductor Contacts. *Academic Press*, 12, 75-146.

45. Crowell, R. and Rideout, V. L. (1969). Normalized Thermionic-Field (TF) Emission in Metal-Semiconductor (Schottky) Barriers. *Applied Physics*, 13, 85-88.
46. Crowell, R. and Rideout, V. L. (1969). Thermionic-Field Resistance Maxima in Metal-Semiconductor (Schottky) Barriers. *Solid-State Electronics*, 15, 89-105.
47. Schroder, D. K. (2005) *Semiconductor Material and Device Characterization. (Third Edition)*. IEEE, USA, 568–596.
48. Kanbur, H. (2008). *Yalıtkan Tabakalı Al/p-Si Schottky Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
49. Yacobi, B. G.. (2003) *Semiconductor Materials: an Introduction to Basic Principles*. Springer, UK, 116-117.
50. Rhoderick, E. H., and Williams, R. H. (1988). *Metal Semiconductor Contacts*. Clarendon, UK, 250–257.
51. Donald, N. A., (2011). *Semiconductor Physics and Devices. (Fourth Edition)* Elsevier, USA, 517-523.
52. Tan, S. O. (2016). *ZnO Ara yüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotlarının Elektriksel Özellikleri*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1–9.
53. Moll, J. L., and Tarui, Y., (1963). A New Solid State Memory Resistor. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 8, 338–341.
54. Park, C. H., Won, M. S., Oh, Y. H., and Son, Y. G. (2005). An XPS Study and Electrical Properties of $\text{Pb}_{1.1}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$ /PbO/Si (MFIS) Structures According to the Substrate Temperature of the PbO Buffer Layer. *Applied Surface Science*, 252(5), 268–275.
55. Nicollian, E. H., and Brews, J. R. (1982). *MOS Physics and Technology. (Third Edition)* Elsevier, USA, 150-160.
56. Lu, G. (2006). *Organic Semiconductor. (Second Edition)* Rochester, USA, 162-168.
57. Aydemir, U. (2009). *AuSrTiO₃/n-Si (MFS) Schottky Diyotların Elektriksel Parametrelerinin I-V, C-V ve DLTS Metodu ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
58. Farag, A. A. M., Yahia, I. S., and Fadel, M. (2009). Electrical and Photovoltaic Characteristics of Al/n-CdS Schottky Diode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 4906–4913.
59. Farag, A. A. M., Ashery, A., Ahmed, E. M. A., and Salem, M. A. (2010). Effect of Temperature, Illumination and Frequency on the Electrical Characteristics of Cu/p-Si Schottky Diode Prepared by Liquid Phase Epitaxy. *Journal of Alloys and Compounds*, 495(1), 116-120.
60. Yakuphanoglu, F., (2007). The Current-Voltage Characteristics of FSS/n-Si Heterojunction Diode Under Dark and Illumination. *Physics B: Condensed Matter*, 338(1), 226-229.

61. Akkal, B., Benamara, Z., Bouiadjra, N. B., Tizi, S. and Gruzza, B. (2006). Illumination Dependence of I-V and C-V Characterization of Au/InSb/InP(1 0 0) Schottky Structure. *Applied Surface Science*, 253(3), 1065–1070.
62. Özmen, T. Ö. (2014). Effects of PCBM Concentration on the Electrical Properties of the Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes. *Material Science in Semiconductor Processing*, 26(1), 448-454.
63. Schulz, M. J., Goetzberger, A., and Klausmann, E., (1976). Interface states on semiconductor_insulator surfaces. *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 5, 226-233.
64. Schröder, D. K. (1998). *Semiconductor Material and Device Characterization. (Third Edition)*, Elsevier, USA, 337-379.
65. Ghandhi, S. K. (1983). *VLSI fabrication Principles. (Second Edition)*, Wiley, New Delhi, India, 401-405.
66. Hofstein, S. R., and Warfield, G. (1965). Physical Limitations on the Frequency Response of a Semiconductor Surface Inversion Layer. *Solid State Electronics*, 11, 321–341.
67. Yu, A. Y. C. (1970). Electron tunneling and contact resistance of metal-silicon contact barriers. *Solid State Electronics*, 6, 239-247.
68. Schröder, D. K., and Meier, D. L. (1984). Solar Cell Contact Resistance-A Review. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 31(5), 637-647.
69. Andrews, J. M., and Koch, F. B. (1971). Formation of NiSi and Current Transport Across the NiSi-Si Interface. *Solid-State Electronics*, 14, 896-901.
70. Mönch, W., (2014). On the Band-Structure Lineup at Schottky Contacts and Semiconductor Heterostructures. *Material Science in Semiconductor Processing*, 28(2), 2-12.
71. Card, H. C and Rhoderick, E. H. (1971). Studies of Tunnel MOS Diodes Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. *Journal of Physics D Applied Physics*, 4(10), 1589-1601.
72. Türüt, A. (2007). On current-voltage and capacitance-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts. *Turkish Journal of Physics*, 44(4), 302-347.
73. Yıldız, D.-E., Yıldırım, M., and Gökçen, M. (2014). Investigation on Dielectric Properties of Atomic Layer Deposited Al₂O₃ Dielectric Films. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 32, 202-208.
74. Ashery, A., Elnasharty, M. M., and Hameed, T. A. (2020). Investigation of electrical and dielectric properties of epitaxially grown Au/n-GaAs/p-Si/Al heterojunction. *Optical and Quantum Electronics*, 52(4), 1-19.
75. Akın, Ü., Yüksel, Ö. F., and Tuğluoğlu, N. (2021). Dielectric properties of coronene film deposited onto silicon substrate by spin coating for optoelectronic applications. *Silicon*, 10(2). 2379-2388.
76. Dökme, I., and Yıldız, D. E. (2011). Frequency and Gate Voltage Effects on the Dielectric Properties and Electrical Conductivity of Al/SiO₂/p-Si Metal-Insulator-Semiconductor Schottky Diodes. *Journal of Applied Physics*, 110(1), 237-244.

77. Kuruoğlu, F., Çalışkan, M., Yıldırım, S., and Serin M. (2021). Detailed study on effects of gate voltage, frequency and temperature on dielectric properties of Cu/Par/n-CdS/SnO₂ MIS Schottky diode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(14), 145-153.
78. Brews, J. R., and Nicollian, E. H. (1984). Improved MOS capacitor measurements using the Q-C method. *Solid State Electronics*, 27(11), 963–975.
79. Güllü, H. H., Yıldız, D. E., Sürücü, O., and Parlak, M. (2020). Frequency Effect on Electrical and Dielectric Characteristics of HfO₂-Interlayered Si-Based Schottky Barrier Diode. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 31(12), 9394-9407.
80. Hill, W. A., and Coleman, C. C. (1980). _A Single-Frequency Approximation for Interface-State Density Determination. *Solid State Electronics*, 23(9), 987-993.
81. Türüt, A., Karabulut, A., Ejderha, K., and Bıyıklı, N. (2015). Capacitance-Conductance-Current-voltage Characteristics of Atomic Layer Deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS Structures. *Material Science and Semiconductor Processing*, 39, 400-407.
82. Popescu, M., and Bunget, I. (1984). *Physics of solid dielectrics*. Elsevier, USA, 62-80.
83. Aydın, S. B. K., Yıldız, D. E., Çavuş, H. K. and Şahingöz, R. (2014). ALD TiO₂ Thin Film as Dielectric for Al/p-Si Schottky Diode. *Bulletin Material Science*, 37(7), 1563-1568.
84. Catagne, R., and Vapaille, A. (1970). Description of SiO₂/Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements. *Surface Science*, 28(1), 691-694.
85. Sürücü, B., Güllü, H. H., Terlemezoğlu, M., Yıldız, D. E. and Parlak, M. (2019). Determination of Current Transport Characteristics in Au-Cu/CuO/n-Si Schottky Diodes. *Physics B Condensed Matter*, 570(7), 246-253.
86. Saloma, E., Alcantara, S., Hernandez-Como, N., Villanueva-Cab, J., Chavez, M., Perez-Luna, G., and Alvarado, J. (2020). Photoelectric effect on an Al/SiO₂/p-Si diode structure. *Material Reseach Express*, 7(1), 1495-1507.
87. Navar, M. A., Abd-Elselem, M., El-Mahalawy, M. A., and El-Nahass, M. M. (2020). Analyzed electrical performance and induced interface passivation of fabricated Al/NTCDA/p-Si MIS Schottky heterojunction. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 126(113), 332–349.
88. Williamson, G. K., and Hall, W. H. (1953). Transport Properties of Y_{0.95}Ca_{0.05}MnO₃/Si Thin Film Junction. *Physics B Condensed Matter*, 518(1), 33–38.
89. Rajkumari, R., Ngangbam, C., and Singh, N. K. (2021). Presence of Capacitive Memory in GLAD Synthesized WO₃ Nanowire. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 32, 3191-3200.
90. Abubakar, S., and Yılmaz, E. (2020). Effects of series resistance and interface state on electrical properties of Al/Er₂O₃/Eu₂O₃/SiO₂/n-Si/Al MOS capacitors. *Microelectronic Engineering*, 232(15), 2256-2262.
91. Durmuş, P. (2005). Metal / Ferro-Elektrik/Yarıiletken (Au/Bi₄Ti₃O₁₂/n-Si) (MFS) Yapıların Hazırlanması ve Kompleks Dielektrik ile Elektrik Modülüsün 1 MHz için Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 336-344.

92. Yıldız, D. E., Koçyiğit, A., Erdal, M.O. and Yıldırım, M. (2021). Dielectric Characterization of Al/PCBM:ZnO/p-Si Structures for Wide-Range Frequency. *Bulletin Material Science*, 44(1), 2-8.
93. Kumar, N., and Chand, S. (2020). Effects of Temperature, Bias and Frequency on the Dielectric Properties and Electrical Conductivity of Ni/SiO₂/p-Si/Al MIS Schottky Diodes. *Journal of Alloys Compounds*, 817, 229-236.
94. Shukla, N., and Dwivedi, D. K. (2016) Dielectric Relaxation and AC Conductivity Studies of Se₉₀Cd_{10-x}In_x Glassy Alloys. *Journal of Asian Ceramics Society*, 4(2), 178–184.
95. Coşkun, M., Polat, O., Coşkun, F. M., Durmuş, Z., Çağlar, M., and Türüt, A. (2019). The Influence of Cobalt (Co) Doping on the Electrical and Dielectric Properties of LaCr_{1-x}Co_xO₃ Perovskite-Oxide Compounds. *Material Science in Semiconductor Processing*, 109(12), 97–103.
96. Izumi, F., and Ikeda, T. (2014). The Electrical Modulus and Other Dielectric Properties by the Impedance Spectroscopy of LaCrO₃ and LaCr_{0.90}Ir_{0.10}O₃ Perovskites. *Royal Society of Chemistry Advances*, 8(9), 4634-4648.
97. Türüt, A., Karabulut, A., Ejderha, K. and Bıyıklı, N. (2015). Capacitance-Conductance-Current-Voltage Characteristics of Atomic Layer Deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS Structures. *Material Science in Semiconductor Processing*, 39, 400–407.
98. Koçyiğit, A., Yıldız, D. E., Sarılmaz, A., Özel, F., and Yıldırım, M. (2020). The dielectric performance of Au/CuCo₅S₈/p-Si heterojunction for various frequencies. *J. Material Science: Materials in Electronics*, 31(24), 22408-22416.
99. Er, I. K., Çağırtekin, A. O., Artuç, M., and Acar, S. (2021). Synthesis of Al/HfO₂/p-Si Schottky Diodes and the Investigation of Their Electrical and Dielectric Properties, *J. Material Science Materials in Electronics*, 32(2), 1677-1690.
100. Boutelala, A., Bourfa, F., and Mahtali, M. (2020). Effect of Light on Electrical and Photoelectrical Characteristics of Al/TiO₂/p-Si Schottky Diode. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 31(14), 11379-11389.
101. Tataroğlu, A. (2006). Electrical and Dielectric Properties of MIS Schottky Diodes at Low Temperatures. *Microelectronics Engineering*, 11(12), 2551–2557.
102. Szu, S. P., and Lin, C. Y. (2003). AC Impedance Studies of Copper Doped Silica Glass. *Materials Chemistry and Physics*, 82(2), 295–300.
103. Pisis, P. and Kyritsis, A. (1997). Electrical conductivity studies in hydrogels. *Solid State Ionics*, 1(4), 105-113.
104. Prabakar, A., Narayandass, S. K., and Mangalaraj, D. (2003). Dielectric Properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te Thin Films. *Physica Status Solidi Applied Research*, 3, 507-514.
105. Migahed, M. D., Ishra, M., Fahmy, T., and Barakat, A. (2003). Electric Modulus and AC Conductivity Studies in Conducting PPy Composite Films at Low Temperature. *Journal of Physics and Chemical Solids*, 6, 1121–1125.

106. Öksüzoğlu, R. M., Bilgiç, P., Yıldırım, M., and Deniz, O. (2013). Influence of Post-Annealing on Electrical, Structural and Optical Properties of Vanadium Oxide Thin Films. *Optics and Laser Technology*, 48, 102-109.
107. Karmakar, S., Panda, B., Sahoo, B., Routray, K. L., Varma, S., and Behera, D. (2018). A Study on Optical and Dielectric Properties of Ni-ZnO nanocomposite. *Material Science in Semiconductor Processing*, 88, 198-206.
108. Rouahi, A., Kahouli, A., and Fatiha, C. (2013). Impedance and Electric Modulus Study of Amorphous TiTaO Thin Films: Highlight of the Interphase Effect. *Journal of Physics:D Applied Physics*, 46(6), 1112–1114.
109. Chaari, M., Ben Belgacem, R., and Matoussi, A. (2017). Impedance Analysis, Dielectric Relaxation and Modulus Behaviour of ZnO-Sn₂O₃ Ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 726, 49–56.
110. Al-Hardan, N., Abdullah, M. J., and Aziz, A. A. (2011). Impedance Spectroscopy of Undoped and Cr-Doped ZnO Gas Sensors Under Different Oxygen Concentrations. *Applied Surface Science*, 257(21), 8993-8997.
111. Mhamdi, A., Mimouni, R., Amlouk, A., and Belgacem, S. (2014). Study of Copper Doping Effects on Structural, Optical and Electrical Properties of Sprayed ZnO Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, 610, 250-257.
112. Kumar, M., Shankar, S., Brijmohan, S., Kumar, S., Thakur, O. P., and Ghosh, A. K. (2017). Impedance Spectroscopy and Conductivity Analysis of Multiferroic BFO–BT Solid Solutions. *Physics Letter: A*, 381(4), 379-386.
113. Nasser, R., Othmen, W. B. H., and Elhouichet, H. (2018). Effect of Sb Doping on the Electrical and Dielectric Properties of ZnO Nanocrystals. *Ceramics International*, 45(6), 8000-8007.
114. Pandey, K., Dwivedi, M. M., Asthana, N., Singh, M., and Agrawal, S. L. (2011). Structural and Ion Transport Studies in (100-x) PVdF SCN Gel Electrolyte. *Material Science and Applications*, 2(7), 721–728.
115. Srilatha, N. V. K., Sambasiva, K., Ghandhi, Y., and Ravikumar, V. (2010). Fe Concentration Dependent Transport Properties of LiI-AgI-B₂O₃ Glass System. *Journal of Alloys and Compounds*, 507(2), 391-398.
116. Born, M. (1901). Die Theorie des starren Elektrons in der Kinematik des Relativitätsprinzips. *Annalen der Physik*, 11, 433-438.
117. Coondoo, I., Panwar, N., Bdikin, I., Puli, V. S., Katiyar, R. S., and Kdeşikkin, A. L. (2012). Structural, Morphological and Piezoresponse Studies of Pr and Sc Co-Substituted BiFeO₃ Ceramics. *Journal of Physics:D Applied Physics*, 45(5), 6402–6413.
118. Cao, Z., Liu, X., He, W., Ruan, X., Gao, Y., and Liu, J. (2015). Extrinsic Contributions for Dielectric Behaviour of La₂NiMnO₆ Ceramic. *Physics B Condensed Material*, 477, 8-13.
119. Lvovich, V. F. (2012). *Impedance Spectroscopy Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena. (First Edition) Wiley, New Delhi, India*, 207-220.

120. Barsoukov, E., and Macdonald, J. R. (2005). *Impedance Spectroscopy: Theory and Applications. (Second Edition)* Wiley, New Delhi, India, 156-180.
121. Chhoker, S., Kumar, M., Sati, P. C., and Jewariya, M. (2015) Influence of Eu Substitution on Structural, Magnetic, Optical and Dielectric Properties of BiFeO₃ Multiferroic Ceramics. *Ceramics International*, 41(2), 2389-2398.
122. Karmakar, S., Varma, S., and Behera, D. (2018). Investigation of Structural and Electrical Transport Properties of Nano Flower Shaped NiCo₂O₄ Supercapacitor Electrode Materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 757, 49-59.
123. Srivasatava, A., Garg, A., and Morison, F., D. (2009). Impedance Spectroscopy Studies on Polycrystalline BiFeO₃ Thin Films on Pt/Si Substrates. *Journal of Applied Physics*, 105(5), 79-85.
124. Sivakumar, N., Narayanasamy, A., Chinnasamy, C. N., and Jeyadevan, B. (2007). Influence of Thermal Annealing on the Dielectric Properties and Electrical Relaxation Behaviour in Nanostructured CoFe₂O₄ Ferrite. *Journal of Physics Condensed Matter*, 19(38), 1-8.
125. Tabib, A., Sdiri, N., Elhouchiet, H., and Ferid, M. (2015). Investigations on Electrical Conductivity and Dielectric Properties of Na Doped ZnO Synthesized from Sol-Gel Method. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 687-694.
126. Mimouni, R., Kamoun, O., Yumak, A., and Mhamdi, A. (2015). Effect of Mn Content on Structural, Optical, Opto-Thermal and Electrical Properties of ZnO:Mn Sprayed Thin Films Compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 645, 100-111.
127. Monch, W. (1990). On the Physics of Metal-Semiconductor Interfaces. *Reports on Progress in Physics*, 53(3), 221-278.
128. Elgazzar, E. (2020). Improvement the Efficacy of Al/CuP/n-Si/Al Schottky Diode Based on Strong Light Absorption and High Photocarriers Response. *Material Research Express*, 7(9), 220-238.
129. Benhaliliba, M. (2020). A growth of A-Z phthalocyanine Layers onto Si by Thermal Evaporation Process to Achieve Organic Heterojunction Diodes. *Optik*, 217, 164832.
130. Janardhanam, V., Yun, H. J., Jyothi, I., Lee, J. (2015). Energy Level Alignment and Electrical Properties of Al/p-Si Schottky Diodes with Sorbitol Doped PEDOT:PSS as an Organic Interlayer. *Journal of Alloys and Compounds*. 637, 84-89.
131. Yalçın, M., Özmen, D., and Yakuphanoglu, F. (2019). Perovskite Cobaltates/ p-Si Heterojunction Photodiodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 796, 243-254.
132. Yalçın, M., Özmen, D., and Yakuphanoglu, F. (2020). Sr Doped Yttrium Nickel Oxide Based Photodetectors. *Journal of Material Science*, 31, 3441-3455.
133. Yıldırım, M. (2018). Characterization of the Framework of Cu Doped TiO₂ Layers and Insight into Optical, Electrical and Photodiode Parameters. *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 890-904.
134. Ocak, Y. S., Genişel, M. F., and Kılıçoğlu, T. (2010). Ta/Si Schottky Diodes Fabricated by Magnetron Sputtering Technique. *Microelectronics Engineering*, 87(11), 2338-2342.

135. Özalp, R. (2019). *V₂O₅ İnce Filmlerin Saçtırma Yöntemi ile Biriktirilmesi v ediyot Üretiminde Kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
136. Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and Bülbül, M. M. (2008). The Effect of ⁶⁰Co (γ-ray) Irradiation on the Electrical Characteristics of Au/SnO₂/n-Si (MIS) Structures. *Radiation of Physics and Chemistry*, 77(1), 74-78.
137. Balaji, M., Chandrasekaran, J., Raja, M., Marnadu, R., Ramamurthy, M. and Shkir, M. (2020). Fabrication of On/Off Switching Response Based in n-Ni Doped MoO₃/p-Si Junction Diodes using Ni-MoO₃ Thin Films as n-Type Layer Prepared by JNS Pyrolysis. *Applied Physics: A Material Science in Processing*, 126(3), 1-14.
138. Balasubramani, V., Chandrasekaran, J., Manikandan, V., Le, T. K., Marnadu, R., and Vivek, P. (2021). Improved Photodetector Performance of High-k Dielectric Material (La) Doped V₂O₅ Thin Films as an Interfacial Layer in Schottky Barrier Diodes. *Surfaces and Interface*, 25(4), 101297.
139. Ben, I., Hamdaoui, N., Mezni, A., Ajjel, R., and Beji, L. (2019). Synthesis and Characterization of Cu Doped ZnO Nanoparticles for Stable and Fast Response UV Photodetector at Low Noise Current. *Journal of Material Science Materials in Electronics*, 30(10), 9444-9454.
140. Gupta, R. K., and Singh, R. A. (2004). Electrical Properties of Junction Between Aluminium and poly(aniline)-poly(vinyl chloride) Composite. *Materials in Chemistry and Physics*, 86(2), 279-283.
141. Bell, N. J., Ng, Y. H., Du, A., Coster, H., Smith, S. C., and Amal, R. (2011). Understanding the Enhancement in Photoelectrochemical Properties of Photocatalytically Prepared TiO₂-Reduced Graphene Oxide Composite. *Journal of Physics and Chemistry: C*, 115(13), 6004-6009.
142. Zhou, M., Bao, J., Xu, Y., Zhang, J., Xie, J., Guan, M., Wang, C., Wen, L., Lei, Y., and Xie, Y. (2014). Photoelectrodes Based Upon Mo:BiVO₄ Inverse Opals for Photoelectrochemical Water Splitting. *ACS Nano*, 8(7), 7088-7098.
143. Bartolomeo, A., Giubileo, F., Grillo, A., Luongo, G., Lemmo, L., Urban, F., Lozzi, L., Capista, D., Nardone, M., and Passacantando, M. (2019). Bias Tunable Photocurrent in Metal-Insulator-Semiconductor Heterostructures with Photoresponse Enhanced by Carbon Nanotubes. *Nanomaterials*, 9(11), 29-31.
144. Ocak, Y. S., Issa, A. A., Genişel, M. F., Tombak, A., and Kılıçoğlu, T. (2016). Substrate Temperature Effects on Reactively Sputtered Cr₂O₃/n-Si Heterojunctions. *Journal of Physics Conference Series*, 707(1), 012026.
145. Kadhm, A. J., Ismail, R. A., and Atwan, A. F. (2021). Fabrication of Visible-Enhanced Nanostructured Mn₂O₃/Si Heterojunction Photodetector by Rapid Thermal Oxidation. *Silicon*, 77(1), 104-112.



GAZİ GELECEKTİR..