

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Yeni Nesil Çekirdek-Kabuk Nanokompozit Heteroyapılar: $Ag@Cu_xO$ ve
 $Ag@Cu_xO:rGO$ Aygıtlarında Yüksek Verimli UV Işık Algılama Mekanizmasının
İncelenmesi

Çiğdem EDEN

Danışman: Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Ali Ercan EKİNCİ

Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

Prof. Dr. Adem KOÇYİĞİT

Dr. Öğr. Üyesi Emre YAVUZ

DOKTORA TEZİ

ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Çiğdem EDEN]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK danışmanlığında, iğdem EDEN tarafından hazırlanan bu çalışma 25.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ali Ercan EKİNCİ İmza:

Üye : Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK İmza:

Üye : Prof. Dr. Mehmet YILMAZ İmza:

Üye : Prof. Dr. Adem KOÇYİĞİT İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre YAVUZ İmza:

Yukarıdaki Doktora Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, Şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Yeni Nesil ekirdek-Kabuk Nanokompozit Heteroyapılar: Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO Aygıtlarında Yüksek Verimli UV Işıık Algılama Mekanizmasının İncelenmesi” isimli Doktora tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 25/09/2025

(İmza)

Çiğdem EDEN

ÖZET

Yeni Nesil Çekirdek-Kabuk Nanokompozit Heteroyapılar: Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO Aygıtlarında Yüksek Verimli UV Işık Algılama Mekanizmasının İncelenmesi

Çiğdem EDEN

Doktora Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK

2025, 137 sayfa

Bu tez çalışmasında, kolloidal Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapılar ıslak kimyasal yöntemle sentezlenmiş ve UV-Vis, XRD, XPS, SEM, TEM ile analiz edilmiştir. Kolloidal yapılar, n-Si plaka üzerine damlatma yöntemiyle kaplanarak n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem aygıtlar üretilmiştir. Bu aygıtların akım-voltaj ölçümleri, farklı ışık şiddetlerinde ve 365, 395, 590, 850 nm dalga boylarında gerçekleştirilmiştir. Schottky diyotların idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri Termiyonik Emisyon Teorisi, Cheung ve Norde yöntemleriyle hesaplanmıştır. Fotodiyotların kapasite – voltaj karakteristikleri incelenmiş ve aygıtların yüksek frekanslarda AC sinyallerini iletmediği ve dolayısıyla düşük kapasitif özellik gösterdiği görülmüştür. Fotodedektör performans analizinde ise her iki aygıt için duyarlılık değerleri sırasıyla 1,53 A/W ve 4,26 A/W (365 nm, -2 V) olarak bulunmuş, harici kuantum verimliliği %100'ü aşmıştır. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının, UV ışığı altında n-Si/Ag@Cu_xO aygıtından daha yüksek performans göstermesi, rGO'nun yüksek elektron hareketliliğine bağlanmıştır ve nanokompozit yapıların UV ışık altında mükemmel fotodedektör performansı sunduğu görülmüştür. Bu bulgular, bu yapıların gelişmiş optoelektronik uygulamalar için büyük potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Ag, Cu_xO, rGO, Schottky Diyot, Fotodedektörler

ABSTRACT

Novel Core-Shell Heterostructures: Investigation of High-Efficiency UV Light Detection Mechanism of Ag@Cu_xO and Ag@Cu_xO:rGO Devices

Çiğdem EDEN

Doctoral Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Physics

Advisor: Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK

2025, 137 pages

In this thesis, colloidal Ag@Cu_xO and Ag@Cu_xO:rGO core@shell nanocomposite structures were synthesized by wet chemical methods and analyzed by UV-Vis, XRD, XPS, SEM, and TEM. The colloidal structures were deposited onto n-Si wafers using the drop casting method to synthesize n-Si/Ag@Cu_xO and n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heterojunction devices. Current-voltage measurements of these devices were performed at different light intensities and wavelengths of 365, 395, 590, and 850 nm. The ideality factor, barrier height, and series resistance values of Schottky diodes were calculated using Thermionic Emission Theory and Cheung and Norde methods. The capacitance-voltage characteristics of the photodiodes were investigated, and it was observed that the devices could not transmit AC signals at high frequencies and therefore exhibited low capacitive properties. In the photodetector performance analysis, the responsivities for both devices were found to be 1.53 A/W and 4.26 A/W (365 nm, -2 V), respectively, and the external quantum efficiency exceeded 100%. The higher performance of the n-Si/Ag@Cu_xO:rGO device under UV light compared to the n-Si/Ag@Cu_xO device was attributed to the high electron mobility of rGO, and it was observed that the nanocomposite structures offer excellent photodetector performance under UV light. These findings indicate that these structures have great potential for advanced optoelectronic applications.

Keywords: Ag, Cu_xO, rGO, Schottky Diode, Photodetectors

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sürecinde ilgi ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşan değerli danışmanım Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez İzleme Komitesindeki saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ali Ercan EKİNCİ ve Dr. Öğr. Üyesi Emre YAVUZ'a, çok değerli katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca, araştırmalarımı gerçekleştirebilmem için gerekli tüm imkânları sağlayan ve kıymetli bilgilerini paylaşan Prof. Dr. Mehmet YILMAZ'a gönülden teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerinden yararlanma fırsatı bulduğum Prof. Dr. Adem KOÇYİĞİT, Prof. Dr. Bülent ÇAĞLAR ve Öğr. Gör. Dr. Fatma YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Başım her sıkıştığında yanına gittiğim ve tüm sorunlarıma çözüm odaklı yaklaşan değerli hocam Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR'a içten teşekkür ederim.

Bu doktora çalışması FDK-2023-952 numaralı BAP projesi ile desteklenmiştir. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Birlikte çalışmaktan büyük zevk aldığım laboratuvar arkadaşlarım Dr. Bilge DOĞAN ve Burak ŞAHİN'e yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Son olarak, desteklerini her zaman yürekten hissettiğim sevgili eşim Arif Onur EDEN ve sevgili oğlum Umut Emre EDEN'e, bana gösterdikleri sonsuz sevgi ve sabır için minnettarım.

Çiğdem EDEN

Eylül, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLOLAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	2
1.2. Araştırmanın Önemi	2
1.3. Varsayımlar	3
1.4. Sınırlılıklar	4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Kaynak Özetleri	5
2.2. Yarıiletkenler	12
2.2.1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler	14
2.2.2. Fermi enerjisi (E_F)	15
2.2.3. İş fonksiyonu (ϕ_m, ϕ_s)	15
2.2.4. Vakum seviyesi	16
2.2.5. Elektronun iyonizasyon enerjisi (E_s)	16
2.2.6. Elektron ilgisi (χ_s)	16
2.3. Metal Oksitler	16
2.3.1. Yarıiletken metal oksitler	21
2.3.2. Metal oksitlerin sentez yöntemleri	22
2.3.3. Metal oksitlerin elektronik özellikleri	24
2.4. Bakır Oksit	26
2.5. İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO)	28
2.6. Metal Nanoparçacıklar	29
2.6.1. Gümüş nanopartiküller (Ag Np'ler)	30
2.6.2. Ag Np'lerin sentez yöntemleri	31
2.6.3. Ag Np'lerin foto-uyarılması	34
2.7. Çekirdek@Kabuk Nanokompozit Yapılar	38
2.7.1. Çekirdek boyutu ve kabuk kalınlığı	39
2.7.2. Sinerjik elektronik etkiler	39
2.7.3. Metal-çekirdek@metal oksit-kabuk nanopartiküllerinin sentezi	40
2.8. Ag@Cu _x O ve Ag@Cu _x O:rGO Çekirdek@Kabuk Nanokompozit Yapılar	41
2.9. Eklemlerin Akım – Gerilim Karakteristikleri	42
2.10. Metal/Yarıiletken Kontaklar	43
2.10.1. Metal/n-tipi yarıiletken schottky kontaklar	44
2.10.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	46
2.10.3. Metal (omik) / n-tipi yarıiletken / metal (schottky) yapısı	48
2.11. Termiyonik Emisyon Modeli ile Schottky Diyotta Akım İletimi	49
2.11.1. İdealite faktörü (n)	51
2.11.2. Bariyer yüksekliği (ϕ_b)	52
2.12. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	52
2.13. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	54
2.14. Fotodiyotlar için Kapasite – Voltaj (C-V) Karakteristiği	55
2.15. Fotodedektörler	57

2.16. Fotodetektör Parametreleri	59
2.16.1. Fotoakım (I_{foto}).....	59
2.16.2. Duyarlılık (R)	59
2.16.3. Açık / kapalı (On/Off) oranı	60
2.16.4. Spesifik algılayıcılık (D^*)	60
2.16.5. Gürültü eşdeğer gücü (NEP).....	60
2.16.6. Normalize edilmiş fotoakımın karanlık akım oranı (NPDR)	61
2.16.7. Harici kuantum verimliliği (EQE).....	61
3. YÖNTEM	62
3.1. Ag@Cu _x O Çekirdek/Kabuk Nanokompozitlerin Sentezi	62
3.1.1. Ag Np'lerin sentezi	62
3.1.2. Ag@Cu _x O sentezi	63
3.1.3. Ag@Cu _x O:rGO sentezi	63
3.1.4. Silisyumun Kimyasal Temizleme Adımları ve Amaçları	64
3.2. Omik Kontakt Eldesi	65
3.3. Ag@Cu _x O ve Ag@Cu _x O:rGO Heteroeklemlerin Üretimi.....	65
3.4. Metalik Kontakt Oluşturulması	66
3.5. Karakterizasyon.....	66
4.BULGULAR	67
4.1. UV-VIS Analizi.....	67
4.2. XRD Analizi	69
4.3. SEM (EDS) Analizi	70
4.4. XPS Analizi	71
4.5. TEM Analizi	74
4.6. Elektriksel Ölçümler.....	75
4.7. Fotodetektör Parametreleri	84
4.7.1. Aygıtların fotoakım sonuçları.....	85
4.7.2. Aygıtların On/Off sonuçları.....	86
4.7.3. Aygıtların R sonuçları	86
4.7.4. Aygıtların D^* sonuçları	88
4.7.5. Aygıtların NEP sonuçları.....	91
4.7.6. Aygıtların NPDR sonuçları	92
4.7.7. Aygıtların EQE sonuçları	100
4.8. Fotodetektörlerin Kararlılık Ölçümleri.....	102
4.9. C-V Ölçümleri	107
4.9.1. Kondüktans – gerilim (G-V) ölçümleri	108
4.9.2. C ⁻² -V değişimleri	109
4.9.3. Direnç – gerilim (R_i -V) değişimleri	111
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	113
KAYNAKÇA	116

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Cu_2O ve CuO 'nun fiziksel özellikleri	27
Tablo 2. GO ve rGO'nun fiziksel özellikleri	29
Tablo 3. Silisyumun kimyasal temizleme adımları	65
Tablo 4. Üretilen aygıtların ± 2 V'da hesaplanan doğrultma oranı değerleri.....	77
Tablo 5. n-Si/Ag@ Cu_xO aygıtının ışık şiddetine bağlı n , ϕ_b ve R_s değerleri	79
Tablo 6. n-Si/Ag@ Cu_xO :rGO aygıtının ışık şiddetine bağlı n , ϕ_b ve R_s değerleri	79
Tablo 7. Hesaplanan fotodedektör parametrelerinin en yüksek değerleri	94
Tablo 8. Fotodedektör parametrelerinin önceki çalışmalarda rapor edilen sonuçlarla karşılaştırılması.....	101
Tablo 9. Farklı günlerde ölçülen R değerleri (-2 V).....	107
Tablo 10. Farklı günlerde ölçülen D^* değerleri (-2 V)	107
Tablo 11. n-Si/Ag@ Cu_xO aygıtının $C - V$ parametreleri	110
Tablo 12. n-Si/Ag@ Cu_xO :rGO aygıtının $C - V$ parametreleri	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Metal, yarıiletken ve yalıtkanların bant yapıları	13
Şekil 2. Örnek bir n-tipi yarıiletken a) kovalent bağlanma, b) bant yapısı (Gürgeç, 2022) ...	14
Şekil 3. Örnek bir p-tipi yarıiletken a) kovalent bağlanma, b) bant yapısı (Gürgeç, 2022)	15
Şekil 4. Farklı morfolojiye sahip nanoyapılar	18
Şekil 5. Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya sentez yöntemleri (Huston vd., 2021).....	23
Şekil 6. Cu ₂ O ve CuO'nun kristal yapıları (Lv, 2013; Toprak,2022)	28
Şekil 7. (a) GO ve (b) rGO'nun kimyasal yapıları (Tamang vd., 2023)	29
Şekil 8.(a) Yarıiletkenlerdeki ve (b) metal parçacıklardaki enerji seviyelerinin karşılaştırılması (Kamat, 2002).....	30
Şekil 9. (a) Ag Np'lerin LSPR sırasında elektronların toplu titreşimi. (b) LSPR'nin sıcak elektron oluşumu ve enerji seviyeleri üzerindeki etkisi (Zhang vd., 2017).	35
Şekil 10. Işık ve malzeme etkileşimleri sonucu ortaya çıkan fiziksel süreçler	37
Şekil 11. Çekirdek@kabuk nanopartikül.....	39
Şekil 12. Metal çekirdek ve oksit kabuğun iş fonksiyonlarındaki farktan kaynaklanan elektron transferi, a) kabuktan çekirdeğe ve b) çekirdekten kabuğa (Mendes vd., 2023).	40
Şekil 13. Yarıiletken eklemlerin $I - V$ karakteristiği (Yıldırım, 2024)	43
Şekil 14. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontak. (a) Kontakta önce, (b) Kontakta sonra (denge durumu) (Kacuş, 2014).....	45
Şekil 15. Doğru beslem ve ters beslem altındaki metal/n tipi yarıiletken Schottky kontak, a) $V < 0$ durumunda enerji band diyagramı, b) $V > 0$ durumunda enerji band diyagramı (Kacuş, 2014).....	46
Şekil 16. Metal/n tipi omik kontak, a) Kontakta önce, b) Kontakta sonra ve dengede (Kacuş, 2014).....	47
Şekil 17. Doğru beslem ve ters beslem altındaki metal/n tipi yarıiletken omik kontak enerji band diyagramları, a) $V < 0$ durumunda, b) $V > 0$ durumunda (Kacuş, 2014).....	48
Şekil 18. Metal (omik)/n tipi yarıiletken/Metal (Schottky) yapısı enerji band diyagramı (Kacuş, 2014).....	49
Şekil 19. Elektromanyetik spektrum ve fotodedektör uygulamaları (Garcia de Arquer vd., 2017).....	58
Şekil 20. Fotodedektörlerin çalışma prensibi (Aleie vd., 2015).....	58
Şekil 21. Ag Np'lerin sentezi	62
Şekil 22. Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin sentezi.....	64

Şekil 23. Al/n-Si/Ag@Cu _x O/Au ve/veya Al/n-Si/Ag@Cu _x O:rGO/Au aygıtının şematik gösterimi.....	66
Şekil 24. Kolloidal Ag Np'lerin numunesinin yapısı/optik haritası. (Gonzalez vd.2014).	67
Şekil 25. Ag Np, Ag@Cu _x O ve Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin a) UV-Vis absorpsiyon spektrumları, b) 1mM konsantrasyonla sentezlenen Ag Np.....	68
Şekil 26. Ag Np, Ag@Cu _x O ve Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların XRD desenleri.....	69
Şekil 27. a) Ag Np, b) Ag@Cu _x O, c) Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin SEM görüntüleri, d) Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin EDS sonucu.....	70
Şekil 28. Ag@Cu _x O çekirdek@kabuk nanokompozit yapının XPS Analizi a) surway, b) Ag 3d, c) Cu 2p ve d) O1s spektrumları.....	72
Şekil 29. Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının XPS analizi a) surway, b) Ag 3d, c) Cu 2p, d) O1s ve e) C 1s spektrumları	73
Şekil 30. a) Ag Np, b)Ag@Cu _x O çekirdek@kabuk nanokompozit yapı, c) Ag@Cu _x O:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların TEM görüntüleri, d) Ag@Cu _x O çekirdek@kabuk nanokompozit yapının HRTEM görüntüsü, e) Ag, Cu ve O'nun EDS haritası	75
Şekil 31. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının $I - V$ grafikleri.....	76
Şekil 32. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının ışık şiddetine bağlı doğrultma oranı grafikleri.....	77
Şekil 33. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının $I - V$ grafiğine göre hesaplanan ışık şiddetine bağlı n ve ϕ_b grafikleri	80
Şekil 34. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının $dV/dlnI - I$ grafikleri...	81
Şekil 35. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının $HI - I$ grafikleri.....	81
Şekil 36. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının ışık şiddetine bağlı idealite faktörü grafikleri.....	82
Şekil 37. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının $FV - V$ grafikleri	83
Şekil 38. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının ϕ_b -ışık şiddeti grafikleri	83
Şekil 39. a) n-Si/Ag@Cu _x O ve b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının R_s -ışık şiddeti grafikleri	84
Şekil 40. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtları için farklı ışık şiddetlerine bağlı fotoakım grafikleri.....	85
Şekil 41. a) n-Si/Ag/Cu _x O, b) n-Si/Ag/Cu _x O:rGO, aygıtlarının farklı ışık şiddetlerinde gerilime bağlı $OnOff$ grafikleri	86

Şekil 42. a) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, c) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki <i>R – V</i> grafikleri.....	88
Şekil 43. a) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki <i>D * –V</i> grafiği, c) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki <i>D * –V</i> grafikleri.....	90
Şekil 44. CuO ve Cu ₂ O'nun dönüşüm mekanizması (Kajli vd., 2022).....	91
Şekil 45. a) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, c) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki <i>NEP – V</i> grafikleri.	92
Şekil 46. a) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, c) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 10-80 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının 90-150 mW/cm ² ışık şiddeti arasındaki <i>NPDR – V</i> grafikleri.....	93
Şekil 47. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki <i>I – V</i> grafikleri	95
Şekil 48. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki Fotoakım-dalga boyu grafikleri.....	96
Şekil 49. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki gerilime bağlı <i>OnOff</i> grafikleri.....	97
Şekil 50. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki <i>R – V</i> grafikleri	98
Şekil 51. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki <i>D * –V</i> grafikleri.....	99
Şekil 52. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki <i>NEP – V</i> grafikleri.....	99
Şekil 53. a) nSi/Ag@Cu _x O, b) nSi/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki <i>NPDR – V</i> grafikleri	100
Şekil 54. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki <i>EQE – V</i> grafikleri.....	101

Şekil 55. n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının görünür ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri.....	103
Şekil 56. n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının görünür ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri.....	104
Şekil 57. n-Si/Ag@Cu _x O aygıtının UV, görünür ve IR ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri	105
Şekil 58. n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtının UV, görünür ve IR ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri	106
Şekil 59. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $C - V$ grafikleri	108
Şekil 60.a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $G - V$ grafikleri	109
Şekil 61. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $C - 2 - V$ grafikleri.....	110
Şekil 62. a) n-Si/Ag@Cu _x O, b) n-Si/Ag@Cu _x O:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $Ri - V$ grafikleri	112

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Etkin Alan
A*	Richardson Sabiti
Ag	Gümüş
AgNO ₃	Gümüş nitrat
Al	Alüminyum
Au	Altın
C	Kapasite
CuO	Bakır (II) Oksit
Cu ₂ O	Bakır (I) Oksit
CuNO ₃	Bakır nitrat
D*	Spesifik Algılayıcılık
E _F	Fermi Enerjisi
EDS	Enerji dağılımlı X ışını spektrometresi
EQE	Harici kuantum verimliliği
G	Kondüktans
h	Planck sabiti
I ₀	Doyma akımı
IR	Kızılötesi
k	Boltzman sabiti
LSPR	Lokalize olmuş yüzey plazmon rezonansı
m*	Etkin kütle
n	İdealite faktörü
N _c	İletkenlik bandındaki hal konsantrasyonu
N _d	İyonize olmuş donör konsantrasyonu
NEP	Gürültü eşdeğer gücü
nm	Nanometre
Np	Nanopartikül
NPDR	Normalize edilmiş fotoakımın karanlık akıma oranı
n-Si	n tipi silisyum
P	Işık şiddeti
PVP	Polivinilpirolidon
q	Elektron yükü

R	Duyarlılık
R_s	Seri direnç
rGO	İndirgenmiş grafen oksit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
T	Sıcaklık
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TSC	Trisodyum nitrat
UV	Ultraviyole
V_d	Difüzyon potansiyeli
ω	Açısal hız
XPS	X ışını fotoelektron spektrometresi
XRD	X ışını difraktometresi
ϵ_0	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϕ_b	Bariyer yüksekliği
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Elektron ilgisi

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojik cihazlar, yaşamımızın hemen her alanında vazgeçilmez bir yer edinmiştir. Hızla ilerleyen teknoloji sayesinde, bu cihazların boyutları da giderek küçülmekte ve aynı zamanda daha hızlı, hassas ve verimli hale gelmektedir. “Yeni nesil” olarak adlandırılan bu cihazlar, gelişmiş özelliklerini büyük ölçüde nanoteknolojiye borçludur. Nanoteknolojinin temel hedefi, son derece küçük boyutlu, akıllı ve çok işlevli nano cihazlar geliştirmektir. Bu cihazlar, düşük enerji tüketimi ve yüksek hassasiyetle çalışabilme kapasitelerini nanomalzemeler ve nano üretim tekniklerine borçludur. Kendi enerjisini üretebilen bu teknolojiler, sürdürülebilir ve bağımsız sistemlerin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Nanoteknolojinin etkisi, bilgi teknolojisi, ulusal güvenlik, tıp, enerji, gıda güvenliği ve çevre bilimi gibi birçok alanda devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Bu teknoloji sayesinde malzemeler daha dayanıklı, hafif, hızlı ve verimli hale gelmektedir. Bugün, ticari ürünlerin önemli bir kısmı nano ölçekli malzemeler ve süreçlerle üretilmektedir.

Nanoteknolojinin bilgi işlem ve elektronik alanındaki katkıları da dikkat çekicidir. Daha hızlı ve taşınabilir cihazların geliştirilmesini mümkün kılan bu teknoloji, aynı zamanda enerji üretimi ve yenilenebilir enerji çözümleri açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır. Araştırmalar, çevre dostu, düşük maliyetli ve toksik olmayan enerji kaynaklarının keşfi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Fotodedektörler, nanoteknoloji araştırmalarında öne çıkan bir başka önemli alandır. Bu aygıtlar, ışığı elektrik sinyaline dönüştüren optoelektronik elemanlardır ve otomatik kapılardan güneş hücrelerine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Yarıiletken teknolojisi ile üretilen fotodedektörler, yüksek hassasiyet, düşük enerji tüketimi ve hızlı tepki süreleri sayesinde fotonik sistemlerde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Huo ve Konstantos, 2018; Xie ve Shen, 2015; Zhan vd., 2012).

Son yıllarda, fototransistörler, fotodiyotlar ve fotoiletkenler gibi farklı fotodedektör türlerine olan ilgi artmıştır. Özellikle görünür ışık fotodedektörleri, güneş enerjisi ve görüntüleme uygulamalarında hayati bir öneme sahiptir. Optik sinyallerin elektrik sinyallerine dönüştürülmesinde kullanılan fotodedektörler, dalga boyuna bağlı olarak ışık algılama kapasitesine sahiptir ve termal dedektörlerle birlikte iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Görünür bölge fotodedektörlerinin tasarımında, p-n homoelem, p-n heteroelem, Schottky

eklem ve metal-yarıiletken-metal yapılar gibi çeşitli yaklaşımlar benimsenmektedir (Bielecki vd., 2022).

Bu çalışma kapsamında, n-tipi silisyum altlıklar üzerine ıslak kimyasal yöntemle $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanokompozit yapılar üretilmiştir. Elde edilen kompozit yapıların optik ve elektriksel özellikleri incelenmiş ve fotodedektör üretiminde kullanılmıştır. Böylece, bu araştırma, özellikle $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların fotodedektör performansına katkısını analiz ederek literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Fotodedektörler, evrenin farklı taraflarından gelen radyasyonu tespit etmekten basit otomatik olarak açılan süpermarket kapılarına kadar son teknolojiye yaygın bir kullanıma sahip optoelektronik aygıtlardır. Bir fotodedektörün performansı, uygun malzeme seçimi ve aygıt konfigürasyonu ile artırılabilir. Çekirdek@kabuk heteroyapısı, ışık emilimini ve fotodedektör performansını artıran genişletilmiş aktif yüzey alanı ile fotodedektör uygulaması için yeni ve araştırmaya aç bir mimaridir. Bu tarz mimarilerde homoyapıya kıyasla heteroyapılardaki performans artışından dolayı heteroyapılar fotodedektör uygulamalarında daha fazla tercih edilir (Chen vd., 2020). Homoyapıya kıyasla heteroyapıdaki performansın artmasının nedeni, ara yüzde yaratılan yerleşik potansiyelden kaynaklanmaktadır. Bu yerleşik potansiyel, fotojenleştirilmiş elektron boşluk çiftlerini ayırmaya ve taşıyıcıların karşı elektrota taşınmasını hızlandırmaya yardımcı olur. Bu yapılarda, rekombinasyon hızının yanı sıra taşıyıcı geçiş süresi etkili bir şekilde azalır ve aygıt ışığa daha duyarlı hale gelerek performansı artar. Bu bağlamda $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk yapıların tasarımı ile maksimum verimli ve kararlı fotodedektör fabrikasyonu yapılarak literatürdeki diyot karakteristikleri ile kıyaslanabilir bir performansa sahip yeni bir aygıt elde etmek amaçlanmaktadır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Metal@yarıiletken çekirdek@kabuk nanokompozitlerin sentezi, elektronik özelliklerinin ayarlanabilirliği nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmekle birlikte birçok ilgili nanoteknolojik ve optoelektronik alanlarda uygulaması olan bir konudur. Öyle ki son zamanlarda bu konudaki çalışmalar yüksek etki faktörüne sahip dergilerde yüksek oranda kabul görmektedir (Alikhaidarova vd., 2022; Butanovs vd., 2021). Metal nanopartikülleri önemli

kılan özellik ise, parçacık boyutu ışığın dalga boyuna yakın veya ondan daha küçük olduğunda, ışık aydınlatması altında nanoparçacık çevresinde üretilen toplu elektron salınımlarıdır. Lokalize olmuş yüzey plazmon rezonansı (LSPR) etkisi nanopartikül temelli çekirdek@kabuk nanoyapıların üretimi ile istenilen uygulamalara yönelik olarak ayarlanabilir. Bu durum, nanopartikül boyutu ve morfolojisi arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya çıkarmak için çekirdek@kabuk nanopartiküllerin sentezlemesine yönelik önemli araştırmalar yapmayı zorunlu kılar. Bu bağlamda, son zamanlarda farklı yöntem ve tekniklerle farklı malzeme, boyut ve şekillerde çekirdek@kabuk nanoyapıların sentezi ve karakterizasyonuna dair çok sayıda çalışmanın literatürde raporlanmış olduğu görülmektedir (Kadhim vd., 2021; Spitaleri vd., 2019). Çalışmalardan farklı olarak sunulan bu tez çalışması kapsamında $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanokompozitlerin sentezi ve karakterizasyonu ve aygıt performansının araştırılmasına odaklanılmıştır. Web of Science veritabanında yapılan ayrıntılı araştırmalar sonucunda, $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanoyapıların sentez-karakterizasyon ve aygıt performansının araştırılmasına yönelik sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanoyapıların optimum sentez şartlarının belirlenerek literatürdeki boşluğa katkı sağlayacak olması bu tez önerisinin bir özgünlüğü olarak gösterilebilir.

1.3. Varsayımlar

Sentezlenen $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanokompozit malzemelerin yapısal, yüzey ve morfolojik özelliklerinin, kullanılan yöntemlere ve sentez parametrelerine bağlı olarak doğru bir şekilde belirlenebileceği varsayılmıştır. Islak kimyasal yöntemle sentezlenen nanomalzemelerin homojen ve tekrarlanabilir bir yapıya sahip olduğu beklenmektedir. Kullanılan karakterizasyon yöntemlerinin (XRD, SEM, TEM, UV-Vis ve XPS), nanomalzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğru ve güvenilir bir şekilde ortaya koyduğu göz önünde bulundurulmuştur. $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanokompozitlerinin, literatürde belirtilen performans sınırlarıyla karşılaştırılabilir sonuçlar vereceği esas alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan aygıt ve ölçüm sistemlerinin kalibrasyonlarının doğru bir şekilde yapıldığı kabul edilmiştir. Nanomalzemelerin sentez ve karakterizasyon süreçleri sırasında çevresel etkilerin (sıcaklık, nem vb.) ölçüm sonuçlarına minimal düzeyde etki ettiği öngörülmüştür. Çalışmada kullanılan analiz yöntemlerinin, araştırma kapsamındaki nanomalzemelerin davranışlarını ve performanslarını açıklamak için yeterli olduğu kabul edilmiştir.

1.4. Sınırlılıklar

Bu tez çalışmasında, $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ çekirdek@kabuk nanokompozit malzemeler ıslak kimyasal yöntemle sentezlenmiştir. Elde edilen nanomalzemelerin yapısal, yüzey ve morfolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir ve elektrikli ve optik özellikleri araştırılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kaynak Özetleri

Metalik gümüş (Ag) dayanıklı bir geçiş elementidir ve nadir olması (elementler arasında bolluk bakımından 67. sırada) ve çekici beyaz metalik parlaklığı nedeniyle uzun zamandır mücevher, para ve gümüş eşya olarak kullanılmaktadır. Ag'nin tıp alanında kullanılması da çok eski zamanlara dayanmaktadır. Gümüş nitrit 17. ve 18. yüzyıllarda ülser tedavisinde uygulanmıştır (Klasen, 2000). Bunu takip eden yıllarda sağlık alanında birçok tedavi yönteminde kullanılmıştır (Yu vd. 2013). Aynı zamanda Ag, metanolün formaldehite ve etilenin etilen okside oksidasyonu için bir katalizör olarak yaygın bir şekilde bilinmektedir (Nagy ve Mestl, 1999).

Kolloidal Ag nanoparçacıklar (Ag Np'ler), iyi iletkenlik, kimyasal stabilite, katalitik ve antibakteriyel aktivite, yüzey geliştirilmiş Raman saçılması, sensörler, güneş pilleri ve fotodedektörler gibi ayırt edici uygulamalar nedeniyle özellikle ilgi çekicidir (Frattini vd., 2005).

Genel olarak, metal nanopartiküller fiziksel ve kimyasal yöntemlerle hazırlanabilir ve stabilize edilebilirler. Kimyasal indirgeme, elektrokimyasal teknikler ve fotokimyasal indirgeme gibi kimyasal yaklaşım en yaygın olarak kullanılmaktadır (Sharma vd., 2009). Çalışmalar, metal nanoparçacıkların boyutunun, morfolojisinin, stabilitesinin, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, deney koşullarından, metal iyonlarının indirgeme ajanları ile etkileşim kinetiğinden ve metal nanoparçacıklarla stabilize edici ajan adsorpsiyon süreçlerinden güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermiştir (Knoll ve Keilmann, 1999; Sengupta vd., 2005). Bu nedenle, boyut, morfoloji, stabilite ve özelliklerin kontrol edildiği bir sentez yönteminin tasarımı önemli bir ilgi alanı haline gelmiştir (Wiley vd., 2007).

Kimyasal indirgeme, su veya organik çözücülerdeki stabil, kolloidal dispersiyonlar olarak Ag Np'lerin hazırlanması için en sık kullanılan yöntemdir (Tao vd., 2006; Wiley vd., 2005). Yaygın olarak kullanılan indirgeyiciler borohidrit, sitrat, askorbat ve elemental hidrojenidir (Ahmadi vd., 1996; Chou ve Ren, 2000; Creighton vd., 1979; Evanoff ve Chumanov, 2004; Lee ve Meisel, 1982; Merga vd., 2007; Nickel vd., 2000; Shirtcliffe vd, 1999; Sonni vd., 2003).

Sulu çözelti içindeki Ag iyonlarının (Ag^+) indirgenmesi, genellikle nanometre ölçeğinde kolloidal Ag parçacıkları oluşturur (Wiley vd., 2005). Başlangıçta, çeşitli komplekslerin Ag^+

iyonları ile indirgenmesi, gümüş atomlarının (Ag^0) oluşumuna yol açar, bunu oligomerik kümelerle toplama izler. Bu kümeler, sonunda kolloidal Ag Np'lerin oluşumuna yol açar (Kapoor vd., 1994).

Nie ve Emory, borohidrit gibi güçlü bir indirgeyicinin kullanımının, bir şekilde mono-dağılmış küçük parçacıklarla sonuçlandığını, ancak daha büyük parçacıkların oluşumunu kontrol etmenin zor olduğunu göstermişlerdir (Nie ve Emory, 1997). Sitrat gibi daha zayıf bir indirgeyicinin kullanımı, daha yavaş bir indirgeme oranıyla sonuçlanmıştır, ancak boyut dağılımı dar olmaktan uzaktır (Lee ve meissel, 1982, Shirlcliffe vd., 1999). Huang ve Xu, Ag_2O 'nun indirgenmesi için sodyum borhidrür ($NaBH_4$) kullanmışlardır ve boş Ag Np'ler oluşturmuşlardır (Huang ve Xu, 2019). $NaBH_4$ indirgemesi en popüler yöntemdir (Belteky vd., 2019; Hedge vd., 2019; Liu vd., 2012; Polte vd., 2012). Turkevich yöntemi olarak adlandırılan sitrat indirgeme yönteminin toksik olmayan maddelerin kullanımını ve minimum atık oluşumunu içeren çevreci özellikleri nedeniyle, küresel Ag Np'leri elde etmek için en popüler yoldur (Kimling vd., 2006; Turkevich vd., 1951). Ag Np'lerin indirgenmesi için en popüler indirgeyici sitrat iyonlarıdır (Desai vd., 2012). Bu durum >8 nm boyutlu (Taleb vd., 1997) ve hatta bazen ~ 30 nm boyutlarında parçacıklara yol açar (Pimpang vd., 2008). Teodoro ve arkadaşları, kaynayan bir sulu gümüş nitrat ($AgNO_3$) çözeltisinin, sodyum sitrat varlığında, $NaBH_4$ gibi güçlü bir indirgeyici madde ile indirgendiğinde, FESEM analizi ile ortaya koydukları üzere ortalama 15 nm çapında küresel Ag Np'lerin oluştuğunu rapor etmişlerdir (Teodoro vd., 2019). Zanotti ve arkadaşları, sırasıyla kapama ve dağıtma ajanları olarak trisodyum sitrat (TSC) ve polivinilpirolidon (PVP) varlığında $AgNO_3$ 'ün $NaBH_4$ ile indirgenmesiyle farklı boyut ve morfolojilerde Ag Np'ler sentezlemişlerdir (Zanotti vd., 2020). Zhang ve arkadaşları, indirgeyici ajan olarak TSC kullanılması, 100 °C sıcaklıkta gliserin varlığında ~ 30 nm'lik ortalama çapa sahip küresel Ag Np'ler üretmişlerdir (Zhang vd., 2020). Toh ve arkadaşları ise, $AgNO_3$, TSC ile biraz daha yüksek bir sıcaklıkta (110 °C) başka herhangi bir indirgeyici veya kapatıcı madde kullanmadan indirgendiğinde, nispeten daha büyük (~ 40 nm) Ag Np'ler oluşturmuşlardır (Toh vd., 2013). Raza vd. (2016), reaktifin türünün/konsantrasyonunun ve reaksiyon koşullarının Ag Np'lerin şekli ve boyutu üzerindeki etkisini göstermek için bir sentetik deney gerçekleştirmişlerdir. Burada Ag öncüllerinin ($AgNO_3$) türü ve konsantrasyonu, indirgeyici ajanlar (TSC, $NaBH_4$), kapama ajanları (TSC, PVP), oksitleyici ajanlar (H_2O_2) ve reaksiyon koşulları (sıcaklık/karıştırma) değiştirilerek farklı şekil ve boyutlarda Ag Np'ler sentezlenmiştir (Raza vd., 2016). Vorobyev vd. (2020), sitrat iyonları varlığında sulu $AgNO_3$ 'ü demir sülfat ($FeSO_4$) ile indirgeyerek çapları 5 ila 15 nm

arasında değişen tek tip küresel Ag Np'leri sentezlemişlerdir. Bu yöntemle, konsantrasyonu 1000 g/L'den fazla olan son derece konsantre ve kararlı bir gümüş hidroksil üretmişlerdir (Vorobyev vd., 2020). Chen ve arkadaşları, tannik asit (TA) ve PVP gibi bir kapama maddesi karışımı kullanarak etilen glikol içinde çapları 16 ila 18 nm arasında değişen tek dağılımlı küresel Ag Np'lerin kolay bir şekilde sentezlendiğini bildirmişlerdir (Chen vd., 2020).

Asil metaller, görünür bölgede güçlü yüzey plazmon rezonansı (SPR) üretebildikleri için yüzeylerindeki foton Emilimini arttırabilirler (Di vd., 2022). Araştırmacılar, yarıiletken malzemelerin güçlü SERS sinyalleri üretebildiğini ve yüksek stabilite ve kimyasal özelliklerin kolay kontrolü gibi avantajlara sahip olduğunu bulmuşlardır (Lombardi ve Birke, 2014; Wang vd., 2022; Yang vd., 2019). Asil metal/yarıiletken kompozit malzemeler her iki malzemenin kusurları kendi başına giderir ve malzeme ara yüzünde bir Schottky bariyeri oluşturur. Bu da fotojenere elektriksel gözenek çiftlerinin ayrılmasını önemli ölçüde hızlandırır ve elektronların yarıiletkenden asil metallere enjeksiyonunu teşvik ederek yük transferi katkısının artmasına neden olur. Dahası, elektronların enjekte edilmesi yarıiletken bir katalizörün yüzey aktivitesini hızlandırarak toksik maddelerin bozunmasına ve yüzey geliştirilmiş raman spektroskopisi (SERS) tabanlı değerlendirmeye katkıda bulunabilir (Yan vd., 2014).

Kolloidal çekirdek@kabuk nanoparçacıkların geometri kontrollü sentezindeki son gelişmeler, çekirdek şekli, kabuk mimarileri, bilişimsel düzenleme ve ara yüz yapıları gibi önemli geometrik parametreler üzerinde kasıtlı kontrol yoluyla parçacıkların sinerjik özelliklerinin ince ayarlanmasına olanak tanır (Jing vd., 2014). Bir soy metal çekirdek ve bir Cu₂O kabuktan oluşan hibrit nanoparçacıklar, geometrik olarak ayarlanabilir optik özelliklere sahip ilginç bir metal/yarıiletken heteroyapıyı temsil etmektedir (Li vd., 2013). Ag/Cu₂O gibi metal oksit nanokompozitler, Cu₂O ile karşılaştırıldığında büyüleyici özellikler sergiler (Chen vd., 2007). Çekirdek@kabuk Ag@Cu₂O nanoyapıların hazırlamanın en yaygın yolu, önce Ag çekirdeğin hazırlandığı ve ardından Cu₂O kabuğunun çekirdeğin yüzeyine büyütüldüğü birbirini izleyen iki aşamalı yaklaşımdır (Sayson vd., 2022). Jing ve arkadaşları, Cu₂O'nun Ag yüzeyleri üzerinde epitaksiyel büyümesinin mümkün olduğunu söylemişlerdir. Çünkü hem Ag hem de Cu₂O, %5'ten (f= %4,2) daha az bir kafes uyumsuzluğuna (f) sahip yüz merkezli kübik kristal yapıya sahiptir (Jing vd., 2014). Feng ve arkadaşları, çekirdek@kabuk Ag@Cu₂O nanoyapılarını hazırlarken iki aşamalı protokol kullanmışlardır. Kolloidal Ag Np'ler ilk olarak AgNO₃'ün PVP ve askorbik asit indirgenmesiyle hazırlanmıştır. Daha sonra, Ag Np'ler bakır nitrat (Cu(NO₃)₂) çözeltisine eklenmiştir ve sodyum hidroksit (NaOH) ve askorbik asit ard arda

eklenerek Cu₂O kabuklara dönüştürülmüştür (Feng vd., 2021). Chen vd. (2017), benzer iki aşamalı sentetik yaklaşım uygulamışlardır. Ancak Cu₂O kabuğunun oluşumu için indirgeyici olarak hidrazin kullanmışlardır (Chen vd., 2017).

Yüzey aktif maddeler, biriken metal nanopartiküllerin şeklini, boyutunu ve büyümesini etkiler ve düşük fotokimyasal stabiliteye sahip büyük boyutlu toplanmış nanopartiküllerin oluşumunu teşvik eder (Kearns, 2006; Sharma vd., 2009). Bu bağlamda, grafen oksit (GO), geniş yüzey alanı, yüksek elektron iletkenliği ve yüksek optik şeffaflığı nedeniyle kararlı kompozit malzemelerin oluşumunda etkili bir destek olarak kullanılır (Alivisatos, 2004; Burda vd., 2005; Gao vd., 2004; Knoll ve Keilmann, 1999; Mulvaney, 1996; Sengupta vd., 2005; Tessier vd., 2000). Ayrıca GO'nun yüzeyinde bulunan sarkık fonksiyonel gruplar (-COOH, epoksit ve -OH), suda yüksek dağılıbilirlik ve Cu₂O Np'lerin stabilizasyonu için bir alan sağlar (Chen vd., 2001; Frattini vd., 2005).

Metal oksit yarıiletkenler arasında, CuO, kızılötesi (IR) dedektörü için umut verici bir aday olarak işlev görebilen malzeme olarak bilinmektedir (Ashok vd., 2014; Padil ve Cernik, 2013). Diğer inorganik yarıiletkenlerle karşılaştırıldığında, metal oksit yarıiletkenler daha yüksek hareket kabiliyetine, düşük maliyete, çevre dostu, termal ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Tetseo ve arkadaşları, Ag/CuO NW/Ag fotodedektörünü düşük açılı buhar biriktirme (GLAD) tekniği kullanılarak üretmişlerdir. Görünür bölgeye kıyasla kızılötesi bölgede gelişmiş optik emilim gözlemlemişlerdir (Tetseo vd., 2021).

Proença vd. (2019), Ag katkılı CuO ince filmlerde 719 ve 393 nm'de LSPR bantlarını farketmişlerdir (Proença vd., 2019). Ghodselahi ve arkadaşları, Cu@CuO çekirdek@kabuk hazırladılar ve LSPR etkisi nedeniyle düşük konsantrasyonda CO gazı tespit ettiler (Gholdselahi vd., 2011).

Gnanasekar vd. (2022), CuO:Ag fotodedektörlerini farklı Ag konsantrasyonlarında sentezlemişlerdir. %2 ağırlık oranında Ag ile katkılanmış CuO, çok daha iyileştirilmiş kuantum verimliliği (%818,3), duyarlılık (3,51 A/W) ve algılama ($2,04 \times 10^{10}$ Jones) sağlamıştır (Gnanasekar vd., 2022).

Metal oksitler, özellikle geçiş metal oksitleri, dopingle veya diğer karbonlu malzemelerle kompozit oluşturarak daha da değiştirilebilen güçlü elektrokimyasal özelliklere sahiptir (Wang vd., 2015). Yüksek spesifik yüzey alanı, kararlı morfoloji ve üstün elektronik özellikler

indirgenmiş grafen oksit (rGO) tarafından sergilenebilmektedir. rGO yüzeyindeki metal oksit elektronik özellikleri arttırmaktadır (Tamang vd., 2023).

rGO sentezlemek için GO indirgenmesi, günümüzde nanokatalizörün özelliklerini iyileştirmek ve desteklemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ali vd., 2018). Ali ve arkadaşları (2022), rGO@Ag hibrit nanoparçacıkları üretmişlerdir ve fotokatalitik süreçleri etkileyen faktörleri göstermişlerdir (Ali vd., 2022). Hidrazin, GO'nun rGO'ya indirgemisini sağlar. Bu da artan parçacık toplanmasına ve yarıiletken metal nanopartiküllere elektron enjeksiyon oranının azalmasına neden olur (Frattini vd., 2005; Nagy ve Mestl, 1999). Krishnamurty ve Namitha, rGO-TiO₂ nanotüp kompozitleri içindeki taşıyıcı üretimi ve taşıma süreci gibi temel süreçleri anlamak için bilimsel bir merak uyandırmışlardır (Krishnamurty ve Namitha, 2013). Meng ve arkadaşları, Ag-rGO nanokompozitinin Rodamin B (RhB) kirleticisinin ümit verici adsorpsiyonunu ve fotodegradasyonunu gösterdiğini ve bunun Ag-rGO'yu RhB için bir fotokatalizör adayı yaptığını göstermişlerdir (Menga vd., 2013).

Ag-rGO plazmon kompozit yapı, ultraviyole (UV) fotodedektörlerin performansını iyileştirmek için umut verici modifiye edici plazmonik malzemeler olarak ortaya çıkmıştır (Abdalla vd., 2019; An vd., 2014). Grafen hibrit kompozitleri, grafenin kendine özgü olumlu özellikleri ve yüklü elektronları depolama veya taşıma yeteneği nedeniyle uygun malzeme olarak bilinmektedir (Williams and Kamat vd., 2009; Zhang vd., 2010). Keshvari ve arkadaşları, rGO/Ag nanopartiküllerin heteroyapısındaki plazmon destekli duyarlılık nedeniyle geliştirilmiş temas yüzey alanına sahip aktif kendi kendine güç sağlayan UV dedektörü olarak çalışan bir triboelektrik nanojenaratör bildirmişlerdir (Keshvari vd., 2018). Paria ve arkadaşları, hassas bir fotodedektör için plazmonik grafen-gümüş hibrit kompozitleri oluşturan Ag Np'lerle sentezlenmiş grafen tabakaları, 330 ila 450 nm dalga boyu aralığında 3,2 A/W plazmon duyarlılık artışı göstermektedir (Paria vd., 2018).

Sharma vd., Ag-Cu₂O/rGO nanokompozitlerin indirgeyici ajan olarak glikoz kullanılarak oda sıcaklığında herhangi bir toksik veya stabilizatör ajana ihtiyaç duymadan yeşil ve kolay hazırlanması için ekonomik ve çevre dostu bir yol geliştirmişlerdir (Sharma vd., 2009). Ngo ve arkadaşları, Ag/CuO/rGO hibrit yapısını sentezleyerek bir fotodedektör çalışması gerçekleştirmişlerdir. rGO ve CuO/rGO örnekleriyle karşılaştırıldığında hibrit Ag/CuO/rGO'nun görünür bölgede belirgin bir şekilde daha yüksek emilime sahip olduğunu ortaya koymuşlardır (Ngo vd. 2024) .

Schottky diyotları, yarıiletken teknolojisinin en erken geliştirilen bileşenlerinden biri olup, metal ve yarıiletken arasındaki doğrultucu özelliklere dayanarak çalışmaktadır (Sheng vd., 2002). Bu diyotlarda elektrik akımı, yalnızca çoğunluk taşıyıcıları tarafından iletilir (AL-Oqla vd., 2018). Braun (1875), metal-yarıiletken diyotların doğrultucu özelliklerini, ilk olarak 1874 yılında keşfedilmiştir. Schottky ve Mott (1938), teorik açıklamasını 1938'de yayınlamışlardır. (Mott ve Littleton, 1938). Daha sonra, Bethe tarafından 1942 yılında, bu doğrultucu etkiyi açıklayan termiyonik emisyon modeli geliştirilmiş ve Schottky diyotlarının elektriksel davranışlarını doğru bir şekilde ifade eden bir teori haline getirilmiştir (Bethe, 1991).

Özmen ve arkadaşları, Au/ZnO:F/p-Si aygıtında karanlık ve aydınlık koşullarda akım – gerilim ($I - V$) analizi yapmışlardır. İdealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi bazı diyot parametreleri hesaplayarak detaylı olarak tartışmışlardır. Karanlık ve aydınlık koşullarda bariyer yüksekliğini sırasıyla 2,94 – 2,79 ve 2,88 – 2,73 aralığında bulmuşlardır. İdealite faktörü değerlerinin karanlık koşullarda elde edilenlere göre daha düşük olmasının, aydınlık koşullar altında foto üretilen taşıyıcılardan kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, seri direnç ve bariyer yüksekliklerinin karanlık koşulda elde edilenlerden biraz daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Bunun sonucunda üretilen foto-elektron ve boşlukların transferinden kaynaklanan uzay yük tabakasının iyileşmesi değerlendirmişlerdir (Özmen vd., 2019).

Jabr vd., (2023), p-CuO/n-Si heteroekleminin $I - V$ özelliklerini karanlıkta ve aydınlatma altında incelemişlerdir. Maksimum fotoakım, 550 nm dalga boyunda bulunmuştur. Spektral duyarlılık, fotodedektörlerini 450 ve 800 nm'de iki tepe zirvesi sergilendiğini ortaya koydu. 550 nm dalga boyunda -5 V'luk doğru beslem gerilimiyle hazırlanan bir fotodedektör için ulaşılan maksimum duyarlılık 450 nm'de 0,44 A/W ve 800 nm'de 0,65 A/W elde edilmiştir. 450 nm'deki kuantum verimliliği $\%1,2 \times 10^2$ ve algılaması $1,46 \times 10^{12}$ Jones'tur (Jabr vd., 2023).

Chahrour vd. (2016), yüksek performanslı CuO nanorod dizileriyle hızlı, metal/yarıiletken/metal (MSM) tabanlı IR fotodedektörlerini Alüminyum (Al) elektrotlarıyla üretmişler ve optoelektronik özelliklerini incelemişlerdir. Elektriksel performansı ve fotoelektrik tepki performansı incelenen IR fotodedektörünün 808 nm IR ışığına karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini belirtmişlerdir (Chahrour vd., 2016).

Kalita ve arkadaşları, katı faz reaksiyonu yaklaşımı ile n-Si üzerinde doğrudan büyüyen grafen ile bir Schottky bağlantı diyotunun üretimini göstermişlerdir. n-Si alt tabaka üzerinde doğrudan büyütülen grafen, 0,44 eV potansiyel bariyeri ve doğrultma diyotu karakteristiği olan bir

Schottky bağlantısı oluşturdular. Çalışma, verimli bir Schottky bağlantı aygıtı üretmek için umut verici bir teknik olabileceğini göstermektedir (Kalita vd., 2013).

Orhan vd. (2021), Cu/n-Si aygıtının elektriksel özelliklerini geliştirmek için insan serum albümini (HSA) kullanmışlardır. Cu/HSA/n-Si aygıtının mimarisinin optoelektronik uygulamalardaki performansını araştırmışlardır. Sonuçlar aygıtın karanlıkta iyi bir doğrultma karakteristiği göstermesinin yanı sıra farklı ışık yoğunluklarında iyi bir fotodiyot özelliği de gösterdiğini de göstermişlerdir. Ayrıca idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi ana diyot parametrelerini termiyonik emisyon ve Cheung yaklaşımıyla değerlendirdiler. Her iki hesaplama yönteminde elde edilen sonuçlar diyot parametrelerinin ışık gücü yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca aygıtın kapasitif özellikleri 200-1000 kHz frekans aralığında $C - V$ ölçümleriyle araştırılmış ve aygıtın bu aralıkta kapasitif özellikler sergilediği gözlemlenmiştir (Orhan vd., 2021).

Tombak vd. (2015), bir diyot olarak Ag/CuO/n-Si'nin ideal olmayan bir davranış sergilediğini söylemişlerdir ve idealite faktörü 3,57'dir. Norde yöntemi ile bariyer yüksekliği ve seri direnci hesaplamışlar ve sırasıyla 0,96 eV ve 86,6 Ω olduğunu bulmuşlardır (Tombak vd., 2015). Patel vd. (2016), kendi kendine çalışan Ag nanoteller şablonlanmış Schottky fotodedektörünü üretmişlerdir ve yüksek duyarlılık (42,4 A/W) ve algılama ($2,75 \times 10^{15}$ Jones) ile geniş dalga boyu foto-algılama göstermiştir (Patel vd., 2016).

Yıldırım vd. (2024), çalışmalarında PVA – rGO nanofiberler/n-Si heteroeklem fotodedektörleri üretmişlerdir. Üretilen heteroeklem fotodedektörün ışık yoğunluğuna bağlı olarak görünür ışık, UV ve IR ışıkları altında incelendiğinde, fotodedektörün her iki ışık kaynağı altında hem kendi kendine güç sağlama davranışı hem de çok yüksek foto tepkisi sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak en yüksek optik performans, PVA-rGO katmanından kaynaklanan UV (365 nm) ve IR (850 nm) ışık altında elde edilmiştir. 365 nm UV ışığı altında, maksimum R değeri 688 mA/W, D^* değeri $1,15 \times 10^{15}$ Jones, On/Off değeri $2,49 \times 10^6$, NPDR değeri $8,28 \times 10^{10}$ 1/W ve EQE %234 olarak elde edilmiştir (Yıldırım vd., 2024).

Yılmaz vd. (2024), Ag@ZnO çekirdek-kabuk nanoyapılar ıslak kimyasal yöntemle hazırlamışlardır. Ag@ZnO/p-Si heteroeklem aygıtının deneysel $I - V$ ölçümleri hem görünür hem de 365 ve 395 nm UV aydınlatma altında incelenmiştir. Fotoakım, duyarlılık, algılama yeteneği ve on/off oranının görünür ışığın şiddetine ve UV ışığının dalga boyuna bağlı olduğu bulunmuştur. Düşük ışık şiddetlerindeki düşük fotoakım ve yüksek ışık şiddetlerindeki hızlı

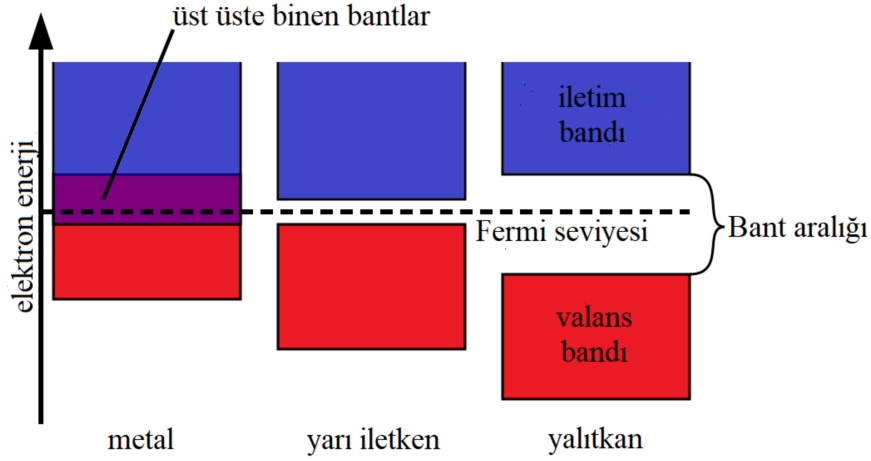
artışı, elektronların ve boşlukların rekombinasyonuna ve ayrıca düşük ışık şiddetlerindeki tuzakların varlığına atfedilmiştir. Fotodiyotun duyarlılığı ve algılama yeteneği sırasıyla 365 nm'de 1,32 A/W ve $5,47 \times 10^{11}$ Jones'a ulaştı. Öte yandan, UV ışığı altında yüksek performans, Ag ve ZnO arasındaki yüzey plazmon rezonansı ile açıklanmıştır (Yılmaz vd., 2024).

2.2. Yarıiletkenler

Malzemeler, elektriksel özelliklerine göre iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, malzemelerin elektrik akımını iletme kapasitelerine dayanmaktadır ve özdirenç değerleri gruplar arasındaki ayrımı belirlemektedir. İletkenler, elektrik akımını en iyi ileten malzeme grubudur ve özdirençleri genellikle 10^{-6} ile 10^{-4} $\Omega \cdot m$ arasında değişir. Bu gruba dahil olan metaller, yüksek iletkenlikleri ile öne çıkar. Yalıtkanlar, elektrik akımını ya hiç iletmez ya da çok düşük seviyede iletir ve bu malzemelerin özdirenç değerleri genellikle 10^{10} $\Omega \cdot m$ ve üzerindedir. Yarıiletkenler ise özdirenç değerleri 10^{-4} ile 10^{10} $\Omega \cdot m$ arasında değişen malzemelerdir. İletkenlikleri, metallerden düşük, ancak yalıtkanlardan daha yüksektir. Bu malzemelerin elektriksel iletkenlik özellikleri sıcaklık, kimyasal saflık ve üretim süreçlerindeki varyasyonlara oldukça duyarlıdır. Mikroelektronik ve fotovoltaik uygulamalarda kritik bir öneme sahip olan yarıiletkenler, özellikle elektronik endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elementer yarıiletkenler arasında silisyum ve germanyum bulunmaktadır. Silisyum, kimyasal olarak yüksek saflıkta üretilebilmesi ve geniş bir sıcaklık aralığında kararlı bir şekilde çalışabilmesi nedeniyle yarıiletken devrelerin üretiminde en çok tercih edilen malzeme olmuştur. Bu bağlamda, malzemelerin elektriksel özelliklerine göre sınıflandırması, mühendislik ve fizik alanlarında önemli bir kavramdır (Şahin, 2022).

Bohr atom modeline göre, pozitif yüklü çekirdeği çevreleyen elektronlar yalnızca birbirlerinden ayrık olan belirli enerji seviyelerinde bulunabilir. İzole bir atomda bu ayrık enerji seviyeleri, katı ortamda enerji bantlarına dönüşür ve bu bantlar arasındaki enerji seviyeleri yasak enerji aralıkları ile birbirinden ayrılır. Elektronların hareket edebileceği enerji seviyelerine enerji bantları adı verilir. Mutlak sıfır sıcaklıkta ($T = 0 K$) elektronlar tarafından tamamen doldurulmuş olan en yüksek enerji seviyesine valans bandı denir. Yine mutlak sıfırda, elektronlar tarafından doldurulmamış olan ve en düşük enerji seviyesine sahip banda ise iletkenlik bandı adı verilir. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasında kalan enerji seviyesi bölgesine ise yasak enerji aralığı veya bant aralığı (E_g) denmektedir. İletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı iç içe geçmiş durumdadır ve bu nedenle yasak enerji aralığı bulunmaz. Bu

özellikleri sayesinde, mutlak sıfır sıcaklıkta bile en küçük bir dış etkide (örneğin elektrik alanı) valans bandındaki elektronlar kolayca kinetik enerji kazanarak serbest hale geçebilir ve elektrik akımına katkıda bulunabilir. Yalıtkanlarda ise valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji aralığı çok büyüktür. Bu nedenle valans bandındaki elektronları iletkenlik bandına geçirmek için çok yüksek bir enerji gereklidir. Bu durum yalıtkanların elektrik akımını iletmesini neredeyse imkansız hale getirir. Yarıiletkenlerde, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında belirli bir yasak enerji aralığı vardır. Ancak sıcaklık arttığında ($T > 0 K$), valans bandındaki bazı elektronlar bu yasak enerji aralığını geçebilecek kadar enerji kazanabilir ve iletkenlik bandına geçiş yapabilir. Bu durumda yarıiletkenler, iletkenlik özellikleri göstermeye başlar ve elektrik akımını iletilebilir hale gelir. Yarıiletkenlerin bu özelliği, malzeme özellikleri ve sıcaklığa bağlıdır. Enerji bantları arasındaki bu farklılıklar, iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar arasındaki temel elektriksel davranış farklarını açıklar. Enerji bant değişimleri, bu malzeme türlerinin elektriksel özelliklerini gösteren temel bir kavramdır (Yıldız, 2023). Şekil 1’de metal, yarıiletken ve yalıtkanların bant aralıkları verilmiştir.



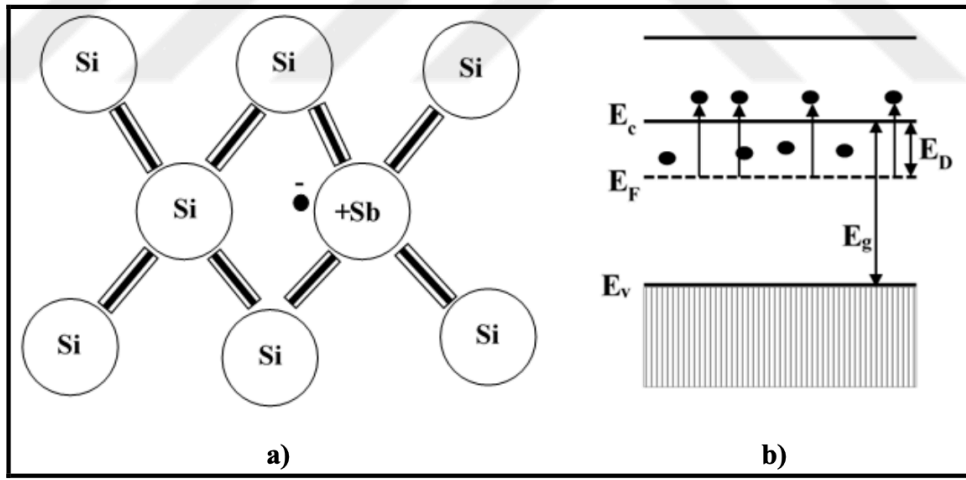
Şekil 1. Metal, yarıiletken ve yalıtkanların bant yapıları

Yarıiletkenler, katkısız ve katkılı olmak üzere iki gruba ayrılır.

- ◇ *Katkısız Yarıiletkenler*: Saf elementlerden (örneğin, silikon veya germanyum) oluşur. Çevresel faktörlerle iletkenlikleri artırılabilir.
- ◇ *Katkılı Yarıiletkenler*: Safsızlık atomları eklenerek (örneğin, n-tipi veya p-tipi) elektron yapıları değiştirilir ve istenen özellikler kazandırılır.

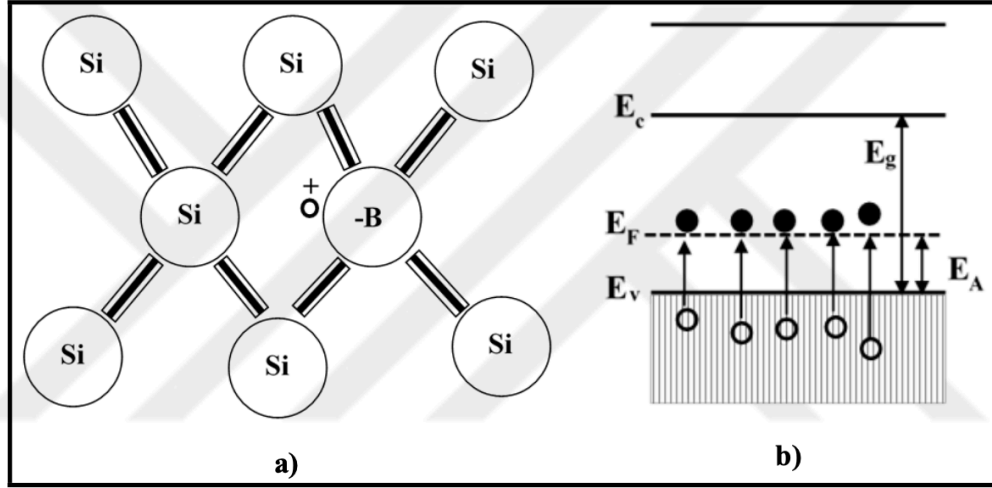
2.2.1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler

Yarıiletkenler, katkılama işlemiyle n-tipi veya p-tipi olmak üzere iki farklı türde elde edilebilir. Şekil 2’de örnek bir n-tipi yarıiletken verilmiştir. Son yörüngesinde 4 elektronu bulunan Silisyum (Si) veya Germanyum (Ge) gibi elementler, son yörüngesinde 5 elektronu bulunan arsenik (As), fosfor (P) veya antimon (Sb) gibi atomlarla katkılandığında n-tipi yarıiletken hâline gelir. Bu işlem sırasında atomlar arasında kovalent bağlar oluşur, ancak beşinci elektron bağ yapmaz ve kristal yapı içinde serbestçe dolaşır. Bu serbest elektronlar, negatif yüklü çoğunluk taşıyıcılar olarak bilinir ve elektrik akımının iletilmesinde görev yapar. Bu nedenle n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluktadır (Sproul, 2003).



Şekil 2. Örnek bir n-tipi yarıiletken a) kovalent bağlanma, b) bant yapısı (Gürgeç, 2022)

Şekil 3’te örnek bir p-tipi yarıiletken verilmiştir. Son yörüngesinde 4 elektronu bulunan Si veya Ge, son yörüngesinde 3 elektronu bulunan alüminyum (Al), galyum (Ga) ya da bor (B) gibi atomlarla katkılandığında p-tipi yarıiletken oluşur. Bu işlem sonucunda, atomlar arasında kovalent bağlar oluşurken bir elektron eksik kalır ve kristal yapıda bir "boşluk" meydana gelir. Bu boşluk, elektronların hareket etmesini kolaylaştırır. p-tipi yarıiletkenlerde, artı yüklü iyonlar (boşluklar) çoğunlukta olup elektrik akımının iletiminde görev yapar. Elektron sayısının boşluk sayısından az olması, p-tipi yarıiletkenlerin karakteristik özelliğidir (Sproul, 2003).



Şekil 3.Örnek bir p-tipi yarıiletken a) kovalent bağlanma, b) bant yapısı (Gürgeç, 2022)

2.2.2. Fermi enerjisi (E_F)

Fermi enerjisi, bir malzemenin temel enerji seviyelerini ve taşıyıcı yoğunluğunu anlamak için kritik bir parametredir. İletkenlerde, mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronlar tarafından işgal edilen en yüksek dolu enerji seviyesi Fermi enerjisi olarak tanımlanır. Bu sıcaklıkta, Fermi seviyesinin üzerindeki enerji seviyeleri tamamen boştur. Yarıiletkenlerde ise Fermi enerjisi, iletkenlik ve valans bandındaki izinli enerji durumlarının yoğunluğu (N_c veya N_V), katkı atomlarının yoğunluğu (N_d veya N_a) ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Fermi enerji seviyesi, yasak enerji aralığında yer alan ve taşıyıcı yoğunluğunun dağılımını belirleyen izafi bir seviyedir. n-tipi yarıiletkenlerde, Fermi enerjisi genellikle iletkenlik bandının (E_c) alt kenarından itibaren ölçülür. p-tipi yarıiletkenlerde ise, Fermi seviyesi valans bandının (E_v) üst kenarından itibaren değerlendirilir. Fermi enerji seviyesi, iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcıların sayısı ile ilişkilidir ve yarıiletkenin elektriksel özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar (Özerden, 2014).

2.2.3. İş fonksiyonu (ϕ_m, ϕ_s)

İş fonksiyonu, bir metalin veya yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinden bir elektronu sıfır kinetik enerji ile yüzeye çıkarmak için gereken minimum enerjidir. Bu, elektronun malzeme yüzeyinden serbest hale geçmesi için aşması gereken bir enerji bariyeridir. Dışarıdan verilen kinetik enerji, öncelikle bu bariyeri aşmak için kullanılır. Eğer verilen enerji iş fonksiyonunu aşarsa, artan kısım elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Bu nedenle iş fonksiyonu, malzemenin yüzey özelliklerini ve elektron salınımını anlamak için temel bir parametre olarak kabul edilir (Özerden, 2014).

2.2.4. Vakum seviyesi

Vakum seviyesi, bir metalin veya yarıiletkenin yüzeyindeki elektronların malzemeden tamamen ayrılarak serbest hale geçtiği ve kinetik enerjilerinin sıfır olduğu enerji seviyesidir. Vakum seviyesi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkı, iş fonksiyonu (ϕ) olarak tanımlanır ve bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gereken minimum enerjiyi ifade eder. Bu enerji, elektronun yüzeyden kopmasını ve vakumda hareketsiz bir şekilde durmasını sağlar (Özerden, 2014).

2.2.5. Elektronun iyonizasyon enerjisi (E_s)

Elektronun iyonizasyon enerjisi (E_s), bir metalin veya yarıiletkenin valans bandının maksimumu (E_v) ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Bu enerji, bir elektronu değerlik bandından çıkarıp yüzeyden tamamen serbest hale getirmek için gereklidir. Başka bir deyişle, E_s , bir elektronun malzemenin yüzeyinden koparak serbest hale geçmesi için aşması gereken enerji bariyerini temsil eder (Özerden, 2014).

2.2.6. Elektron ilgisi (χ_s)

Elektron ilgisi (χ_s), kimyasal bağlamda bir atomun bir elektron alırken açığa çıkardığı ya da serbest kalan enerji olarak tanımlanır ve bir atomun elektron alma eğilimini belirler. Yarıiletken fiziğinde ise bu kavram, iletkenlik bandının (E_c) tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkını ifade eder. Bu fark, bir elektronu iletkenlik bandına yerleştirip vakum seviyesine çıkarmak için gereken enerji miktarını gösterir. Kimyada bir atomun elektron alma kapasitesiyle ilişkilendirilen elektron ilgisi, yarıiletkenlerde enerji seviyelerini anlamada önemli bir parametredir.

2.3. Metal Oksitler

Metal oksitler, nanoteknolojinin önemli bir araştırma ve uygulama alanını oluşturmaktadır. Metal oksit nanoyapılar, malzeme bilimi ve mühendisliğin farklı disiplinlerinde kullanılmakta olup, özellikle algılama ve optik cihazlarda önemli işlevlere sahiptir. Bu nanoyapıların başlıca avantajları arasında yüksek yüzey-hacim oranı, kimyasal kararlılık, değişken fiziksel özellikler, nanoölçek boyutların olduğu sınırlandırma etkileri ve gazlı ortamlarda gözlemlenen özdirenç değişimleri bulunmaktadır. Son yıllarda, metal oksit nanoyapılar, geleneksel uygulama alanlarının ötesine geçerek modern optoelektronik ve biyomedikal mühendislikte yapı taşı olarak öne çıkmıştır. Bu malzemeler, nanoboyutlu elektrik ve optoelektronik cihazların yanı

sıra biyolojik nanoprobların geliştirilmesine de olanak tanımaktadır. Ayrıca, yarıiletken metal oksit nanoyapılar, elektriksel iletkenlik davranışlarıyla dikkat çekerken, yalıtkan metal oksit nanoyapılar ise proton ayrışmasıyla iletkenlik özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu özellikler, söz konusu nanoyapıları sensörler, enerji depolama ve dönüşüm sistemleri, optik ekranlar, yakıt hücreleri ve güneş enerjisi uygulamaları gibi çevre dostu ve "yeşil" teknolojiler için son derece umut verici malzemeler haline getirmektedir. Ek olarak, metal oksit nanoyapıların sunduğu potansiyel ve geniş kullanım alanları, bu malzemeleri dünya genelinde araştırmacılar için cazip bir çalışma konusu haline getirmiştir (Gangwar vd., 2016; Nunes vd., 2018).

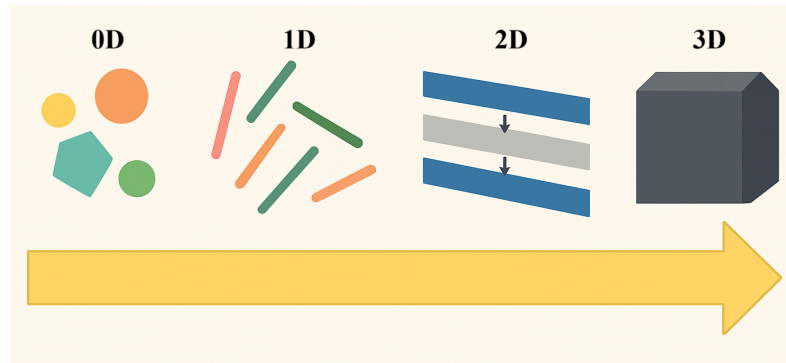
Süperiletken oksitlerin (Cava, 2000) ve büyük manyetik dirençli metal oksitlerin (Sun ve Gupta, 1998) keşfinden sonra, özellikle geçiş metal oksitlerine olan ilgi daha da artmıştır (Rao vd., 2006). Geçiş metal oksitleri ayrıca yaygın olarak katalizör ve elektronikte kullanılır ve yarıiletkenler, dielektrikler ve iletken elektrotlar gibi çeşitli uygulamalara sahiptir. Bu da malzemelerin önemini ve çok yönlülüğünü açıkça göstermektedir (Nunes vd., 2018).

Metal oksitler, yakındaki atomlarla güçlü elektron bağlantıları kurmak için oksijenin büyük elektronegatifliğinden yararlanır. Bu da malzemelerin kimyasal özelliklerini ve yüzey enerjisini etkiler. Metal oksitler, pozitif metalik ve negatif oksijen iyonlarından oluşan iyonik bileşiklerdir. Pozitif metalik ve negatif oksijen iyonları arasındaki elektrostatik etkileşimler, sağlam ve dayanıklı iyonik bağlarla sonuçlanmaktadır. Metal oksitlerin s-kabuklarının tamamen dolu olması, onlara yüksek termal ve kimyasal kararlılık kazandırır (Bolink vd., 2009; Lee vd., 2008). Ancak, d-kabuklarının tamamen dolu olmaması, metal oksitlere elektronik cihazlarda kullanılabilen benzersiz özellikler sağlamaktadır (Devan vd., 2012). Bu benzersiz özellikler arasında ayarlanabilir bant aralıkları (Aydoğan vd., 2022), yüksek dielektrik sabitleri (Robertson, 2005), iyi elektriksel (Lee vd., 2009), optik (Dev vd., 2011) ve elektrokromik (Granqvist, 2008) özellikler bulunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle metal oksitler, işlevsel malzemeler arasında en dikkat çekici olanlardan biridir ve birçok teknolojik uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda, nanoyapılı metal oksitler, yığın malzemelerle karşılaştırıldığında, diğer yüzey özellikleri ile birlikte mekansal sınırlamalar (büyük yüzey atomları kesri, yüksek yüzey enerjisi, güçlü yüzey absorpsiyonu), artan yüzey – hacim oranından ve kimyasal bileşimden yararlanır (Nunes vd., 2018). Kristallik (saflık), gözeneklilik, şekil, kümelenme ve kusur merkezleri (yükü ve nötr boşluklar) bu malzemelerin performansını büyük ölçüde iyileştirmektedir (Devan vd., 2012). Bu nedenle bu özellikleri değiştirerek, metal oksit yapılarının yapısal, algılama, optik ve kimyasal özellikleri ayarlanabilir ve hem temel

araştırmaları hem de pratik uygulamaları kolaylaştırmak için iyileştirilebilir. Bu yeni özellikler, farklı morfolojilere sahip nanoyapılar üretilerek önemli ölçüde uyarlanabilir (Nunes vd., 2018).

Metal oksit nano yapıları, lityum iyon pilleri (Liu vd., 2016), yakıt hücreleri (Bi vd., 2014), güneş hücreleri (Çırak vd., 2020), fotodedektörler (Aydoğan vd., 2022), kataliz (Tsui and Zangari, 2014) ve nanojeneratörler (Fan vd., 2016) gibi enerji dönüşümü, hasadı ve depolama gibi alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Nanobilim ve nanoteknolojinin hızla gelişmesi, bilim camiasını ve endüstriyi, malzemelerin nanoboyuttaki benzersiz özelliklerini keşfetmeye motive etmiştir. Genel olarak nanomalzemeler; 0D, 1D, 2D ve 3D olmak üzere farklı morfolojiye veya nanoyapıya ayrılmaktadır. Bu nanoyapılar Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Farklı morfolojiye sahip nanoyapılar

Boyut azaldığında, nanomalzemelerin elektronik yapılarının yığın malzemelerinkinden farklı olduğu bilinmektedir. Elektronik yapılardaki bu farklılıklar hem kimyasal hem de fiziksel özelliklerde çeşitli değişikliklere neden olabilmektedir. Bu nedenle, en az bir boyutu 1 ile 100 nm arasında olan nanomalzemeler yeni malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Devan vd., 2012).

Fotodedektörlerde benimsenen metal oksit yarıiletkenlerin farklı nanoyapıları nedeniyle, fotojenlenmiş yük taşıyıcıları farklı boyutlara taşınabilir ve ayrılmış yük taşıyıcılarının elektrotlara ulaşmadan önce geçmesi gereken taşıma kanalları oldukça farklıdır. Bu nedenle bu fotodedektörlerin özelliklerinde büyük bir fark yaratır.

0D metal oksit nano yapılar

“0D nanoyapılar” terimi, parçacıkların üç uzamsal boyutunun da 100 nm’nin altında olduğunu belirtmektedir. 0D nanomalzemeler nanoparçacıkların birbirinden izole edildiği malzemeleri içermektedir. 0D nanoparçacıkları, elektronların veya taşıyıcıların üç uzamsal boyutta da sınırlandırıldığı kadar küçük boyutlara sahipse, bunlar belirli bir 0D nanoyapı – kuantum noktaları sınıfına girmektedir. Yüksek yüzey enerjileri nedeniyle, 0D malzemeler oldukça aktiftir ve termodinamik olarak kararsızdır. Bu durum parçacıkların birleşip daha büyük parçacıklar haline gelmesi demektir. 0D nanomalzemelerin sentezindeki temel faktör, nanokristallerin büyümesini geciktirmek ve nanopartiküllerin bir araya gelmesini önlemektir. (Sun vd., 2017).

Nanoparçacıklar ve kuantum noktaları gibi 0D yapılar metal oksit bazlı fotodedektörlerde kullanılmıştır. Jin vd. (2008), kolloidal ZnO nanoparçacıklarına dayalı bir UV fotodedektör üretmişlerdir. ZnO nanoparçacıklar çok büyük yüzey-hacim oranı nedeniyle, nanoparçacık yüzeylerinden ışık kaynaklı oksijen desorpsiyonu elektron tuzaklarını önemli ölçüde ortadan kaldırmış ve serbest taşıyıcı yoğunluğunu arttırmıştır, bu da elektron enjeksiyonu için Au/ZnO Schottky bariyerinin yüksekliğini etkili bir şekilde azaltmış ve tatmin edici UV foto-algılamaya katkıda bulunmuştur.

1D Metal Oksit Nano Yapılar

1D nanoyapılar, yanal boyutları 1 ila 100 nm arasında, uzunlukları ise birkaç yüz nm’den birkaç cm’ye kadar değişebilen nanomalzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Örnekleri arasında nanoçubuklar, nanoteller ve nanotüpler yer alır (Xia vd., 2003). Sentez yöntemleri buhar fazda büyüme ve sıvı fazda büyüme olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Buhar fazda büyüme atmosferde, sıvı fazda büyüme çözeltide gerçekleştirilmektedir. Buhar fazı büyütme teknikleri fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sıvı fazda büyüme yöntemlerine elektrokimyasal biriktirme ve sol-jel yöntemleri örnek verilebilir (Diao ve Wang, 2018).

1D nanoyapılar, büyük yüzey-hacim oranları nedeniyle onları yüksek performanslı fotodedektörler için aday yapan çeşitli özelliklere sahiptir (Zheng vd.,2017). Yüzeyde çok sayıda tuzak durumunun varlığına neden olur ve bu da fotojenlenmiş taşıyıcıların önemli ölçüde

uzun ömürlü olmasına yol açar. Öte yandan, 1D nanoyapılar, foton emilimi için uzun yol uzunluğu sağlarken taşıyıcı taşımıcılığı için kısa kanallar sağlayabilir ve bu da artan ışık emilimine ve hızlı taşıyıcı geçişine yol açar. Ayrıca, devasa en boy oranları nedeniyle, 1D nanoyapı uzunlamasına yönleri boyunca mekanik olarak esnektir ve bu da onu esnek fotodetektörler için uygun hale getirir. 1D metal oksit nanoyapılarının morfolojisi ve bileşiminin rasyonel tasarımı, benzersiz spektral seçicilik ve hassasiyete sahip fotodetektörler oluşturmak için işlevsel yapı taşları olarak kullanılmalılarını sağlayacaktır. İkili oksitler (ZnO, SnO₂, Ga₂O₃, Nb₂O₅, Cu₂O ve WO₃ gibi) ve üçlü oksitler (Zn₂SnO₄, ZnGa₂O₄, In₂Ge₂O₇ gibi) dahil olmak üzere çeşitli 1D metal oksit nanoyapıları başarıyla sentezlenmiş ve fotodetektörlere dönüştürülmüştür (Tian vd., 2015).

Molina-Mendoz vd., SiO₂/Si alt tabakalar üzerindeki önceden modifiye edilmiş Ti/Au elektrotlarına ayrı ayrı TiO₂ lifleri yerleştirmiş ve bunların optoelektronik özelliklerini karakterize etmiştir (Molina-Mendoza vd., 2016). Ürettikleri fotodetektörler, %12'lik bir anizotropi oranıyla ışık polarizasyonuna duyarlıdır. TiO₂ liflerindeki büyük yüzey alanı ve düşük 1D taşıma direncinin birleşiminin hızlı yanıt ve yüksek duyarlılığa katkıda bulunduğuna inanılmaktadır.

2D Metal Oksit Nano Yapılar

Nanoölçekli kalınlığa ve sonsuz düzlemsel boyutlara sahip iki boyutlu nanoyapılar benzersiz elektronik ve optik özelliklere sahiptirler. 2D nanoyapıları üretmek için birçok gelişmiş yöntem vardır. 2D metal oksit nanoyapıların inşa edilmesi esas olarak üç yaklaşımdan oluşmaktadır: katmanlı ana malzemelerin sıvı/kimyasal eksfoliasyonu, CVD büyümesi ve ıslak kimyasal sentez (Liu vd., 2016; Osada ve Sasaki, 2012).

2D malzemeler, atomik veya moleküler kalınlıkta ve sonsuz düzlemsel boyutlarda van der Waals kuvvetleri tarafından zayıf bir şekilde bağlanmış katmanlı bir yapıya sahiptir ve hazırlanması ve aktarılması kolaydır. Sıfır boşluklu ve yarı metalik grafenden geniş bant aralıklı yarıiletkenlere ve büyük bant aralıklı yalıtkanlar kadar değişen 2D malzemeleri dikkate değer elektronik, fotonik ve mekanik özelliklere sahip çok çeşitli yapı taşları sunar. Li vd., düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile yüksek kaliteli ultra ince Bi₂O₂Se levhaları ve bir arada bulunan Bi₂O_xSe nanolevhaları hazırladılar ve bunların yakın IR foto-algılama performanslarını karakterize ettiler. Elde ettikleri sonuçlara göre R değerini 6,5 A/W, D*

değerini ise $8,3 \times 10^{11}$ Jones olarak belirlemişlerdir (Li vd., 2018).

2.3.1. Yarıiletken metal oksitler

Yarıiletkenlik, elektroniğin ve optoelektroniğin temelini oluşturan bir malzeme özelliği olarak, 20. yüzyılın en devrimsel bilimsel keşiflerinden biri olmuştur. Bu özellik, modern teknolojinin gelişimini mümkün kılmış olsa da, yarıiletken uygulamaları için kullanılan malzeme çeşitliliği oldukça sınırlıdır. Silisyum (Si), mikroelektronik devrelerin ve güneş pillerinin temel yapı taşı olarak öne çıkmakta ve bu alanlarda “işgücü” yarıiletkeni olarak tanımlanmaktadır. Bunun yanı sıra, III–V. bölge bileşik yarıiletkenler, özellikle ışık yayan diyotlar (LED) ve lazer diyotlar gibi optoelektronik cihazlarda kritik bir rol oynamaktadır. Oksit içermeyen II–VI. bölge yarıiletkenler ise kızılötesi dedektörler ve ince film güneş pilleri gibi daha spesifik uygulamalarda kullanılmaktadır. Geniş bant aralığına sahip oksit malzemeler, özellikle ikincil cihaz bileşenleri olarak önemli işlevler üstlenmektedir. Bunlar arasında kapı dielektrikleri, şeffaf iletken oksitler (TCO) ve şeffaf ince film transistörleri (TFT) gibi yapılar yer almakta ve bu malzemeler, elektronik cihaz performansını artırmada kritik öneme sahiptir (Lany, 2015).

Metal oksitlerin yarıiletken özellikleri, valans bandı ve iletkenlik bandı arasındaki enerji farkına (bant aralığına) bağlıdır. Bant aralığı küçükse (< 3 eV), elektronlar enerji alarak valans bandından iletkenlik bandına geçebilir ve bu da yarıiletken davranışa yol açar (Concina vd., 2017).

Metal oksit yarıiletkenler, belirli elektronik ve optoelektronik özellikleri nedeniyle fotoelektrik cihazlarda yararlı yapı taşlarıdır. Uygun bant aralığına, benzersiz iletkenlik özelliklerine ve sınırlı taşıyıcı iletkenlik yollarına sahip düşük boyutlu nanoyapıları, onları fotoelektrik cihazlarda hassas malzemeler için uygun adaylar haline getirdi. Bunun yanında, metal oksit yarıiletken nanoyapıları kararlı olup, hazırlanması ve işlenmesi kolaydır. Bu da onları büyük ölçekte yüksek performanslı fotodedektörleri birleştirmek için umut verici hale getirir. ZnO, CuO ve kalay oksit (SnO_2) gibi yaygın olarak kullanılan metal oksit yarıiletken nanoyapılarına dayanan fotoiletken tip fotodedektörler için, belirgin yüzey etkilerinden kaynaklanan yüksek emilim katsayısı ve yüksek tepki gösterebilirler (Liu vd., 2010). Ancak, bu yüzey etkileri bu fotodedektörlerin yavaş tepki hızına da neden olur, bu da oksit yarıiletkenlerin yüzeyindeki oksijen emilim/desorpsiyon süreciyle ilgilidir. Karanlıkta, oksijen molekülleri bu oksit yarıiletkenlerin iletim bandından serbest elektronları yakalayarak oksit yüzeyinde emilim yapar ve düşük iletkenliğe sahip bir yüzey tükenme tabakası oluşturur. Düşük aydınlatma altında,

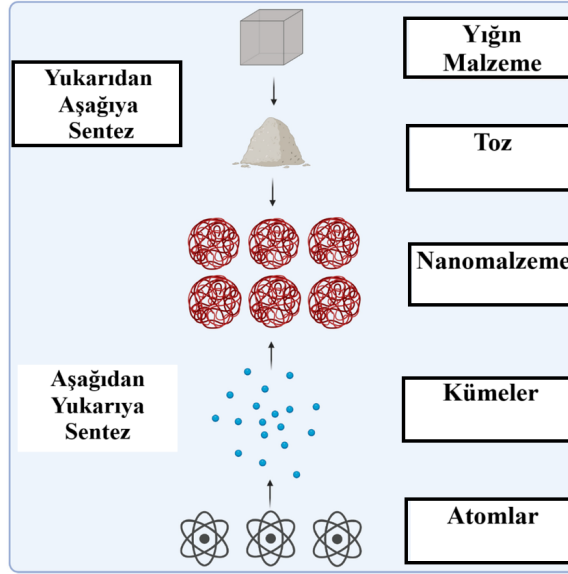
fotojenlenmiş boşluklar yüzeye göç eder ve negatif yüklü emilen oksijen iyonlarını boşaltır, bu da oksijen moleküllerinin yüzeyden fotodesorpsiyonuna neden olur. Işık kapalıyken, oksijen molekülleri oksit yüzeyinde yeniden emilir ve fotodedektörlerde fotojenerasyonlu elektronları çıkarır, bu da akımın azalmasına yol açar. Böylece belirgin yüzey etkileri oksit yarıiletkenlerin yüzeyinde yavaş oksijen emilim/desorpsiyon sürecine yol açar. Bu da ilgili fotodedektörlerin uzun yükselme/bozulma sürelerine neden olur (Zhai vd., 2009; Zheng vd., 2017). Diğer durumlarda, fotojenerasyonlu elektron-boşluk çiftlerinin hızlı rekombinasyonu (taşıyıcı ömrü) ve yarıiletken nanomalzemelerin düşük emilim katsayısı düşük kuantum verimliliğine ve zayıf foto-algılama performansına yol açar (Fang vd., 2011; Liv d., 2016). Duyarlılığı artırma ve yükselme/bozulma sürelerini azaltma arasındaki uzlaşma, metal oksit yarıiletkenlere dayalı fotodedektörlerin pratik uygulamalarını ciddi şekilde sınırlar (Hsu vd., 2012).

Foto-üretilen elektronların ve boşlukların konsantrasyonunu arttırmak için, fotodedektörlerdeki aktif yarıiletken malzemelerin ışık emilimini arttırmak gerekmektedir. Özel yapıların inşası, katkılama ve yüzey plazma rezonans etkisinden, sıcak elektron enjeksiyon etkisinden ve çoklu eksiton etkisinden yararlanma, ışık emilimini arttırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

2.3.2. Metal oksitlerin sentez yöntemleri

Metal oksit nanopartiküllerinin sentezindeki ilerlemeler, bu malzemelerin elektronik, optik, enerji depolama ve kataliz gibi alanlardaki geniş uygulama potansiyeli nedeniyle dikkat çekicidir (Parashar vd., 2020). Özellikle 1980'den beri, istenen özelliklere sahip nanopartiküller üretmek için çeşitli sentetik yöntemler geliştirilmiştir. Nanomalzemelerin sentezi, "yukarıdan aşağıya" ve "aşağıdan yukarıya" olmak üzere iki temel yaklaşıma ayrılmaktadır. Şekil 5'te, yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya sentez yöntemlerinin süreçleri ve malzeme dönüşümleri verilmiştir. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, büyük bir malzeme parçasının nano boyutlu varlıklara ayrılması esasına dayanır. Bu yaklaşım, belirli koşulları (örneğin, basınç, sıcaklık ve çevre) sağlamak için karmaşık, pahalı ve enerji yoğun sistemler gerektirir. Bununla birlikte, bu yöntemin yüksek maliyetli kurulum ve enstrümantasyona rağmen yüzey kusurları ve düzgün olmayan şekillere sahip nanomalzemeler ürettiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, aşağıdan yukarıya yaklaşım, atomik veya moleküler türlerin bir araya gelerek nanoyapılar oluşturmasını temel alır. Bu yöntem genellikle nispeten basit, modüler ve ölçeklenebilir olan ıslak kimyasal senteze dayanır. Kimyasal yöntemlerin en büyük avantajı, belirli boyut, şekil, bileşim ve yapıya sahip nanopartiküller üretmeye olanak tanınmasıdır.

Ayrıca, sol-jel yöntemi gibi kimyasal yöntemler düşük işlem sıcaklığı gerektirir ve enerji tasarrufu sağlar, bu da onları fiziksel yöntemlere kıyasla daha ekonomik hale getirir (Nikam vd., 2018).



Şekil 5. Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya sentez yöntemleri (Huston vd., 2021)

Metal oksit nanopartiküllerinin uygulamaları, bu parçacıkların yüzey alanı, şekli, boyutu, kararlılığı, kristallik derecesi, korozyon önleyici özellikleri, iletkenliği ve fotokatalitik aktivitesi gibi özelliklerine bağlıdır (Akın ve Sonmezoglu, 2018; Chen ve Selloni, 2014). Bu nedenle, ticari uygulamalar için sentez sırasında bu özelliklerin iyi kontrol edilebilmesi büyük önem taşır.

Sonuç olarak, metal oksit nanopartiküllerinin sentezinde kullanılan yöntemlerin seçimi, hedeflenen uygulamalara ve malzemenin istenen özelliklerine bağlıdır. Bu alandaki gelişmeler, nanopartiküllerin daha verimli ve ekonomik şekilde üretilmesini sağlamaktadır.

Islak kimyasal işlemler nanoyapı üzerinde daha iyi kontrol sağlamak için kullanılmıştır. Islak kimyasal sentez yaklaşımı, optik, elektronik ve yüzey özelliklerindeki değişimi yansıtabilen boyut, şekil ve bileşimi ayarlamak için kinetik ve termodinamik bir düzenlemeye sahip olmasına yardımcı olduğu için büyük başarı elde etmiştir. Nanopartiküllerin kontrollü sentezi, istenen özelliklere ulaşmak için temel bir ön koşuldur. Reaksiyon parametreleri, nanopartiküllerin boyutunu ve şeklini belirleyen hayati bir rol oynar (örn. öncül türü, ısıtma yöntemi, ısıtma/soğutma oranları, sıcaklık, konsantrasyon, karıştırma ve ligand türleri, çözücü özellikleri).

Islak kimyasal sentez yaklaşımları, tekrarlanabilir bir şekilde istenen boyut ve şekilde metal oksit nanopartikülleri üretmek için gerçekleştirilmiştir. Boyut ve şekil üzerinde kontrol, temel olayların, öncünün, yüzey sabitleyici ajanın ve sistemdeki reaktifin dönüşümüyle mekanizmanın ve büyüme ve çekirdeklenme hızıyla ilişkisinin daha iyi anlaşılmasıyla sağlanır (Nikam vd., 2018).

2.3.3. Metal oksitlerin elektronik özellikleri

Hidrojene edilmiş amorf silisyum (a-Si:H) keşfi, geniş alanlı elektronikte yeni ufuklar açmıştır (Spear ve Le Comber,1975). Fakat düşük taşıyıcı hareketliliği ($\sim 0,5 - 1,0 \text{ V}^{-1}\text{S}^{-1}$), optik opaklığı, zayıf akım taşıma kapasitesi ve mütevazı mekanik eksikliği, gelecekteki uygulamalar için zorluklar teşkil etmekteydi. Bu tür sınırlamaların üstesinden gelmek için araştırmacılar, kristalin silisyum ve diğer III-V grubu yarıiletkenleriyle karşılaştırıldığında, amorf halde bile mükemmel taşıyıcı hareketliliği, mekanik stres toleransı, organik dielektrik ve fotoaktif malzemelerle uyumluluk ve yüksek optik şeffaflık gibi benzersiz özellikler gösteren metal oksitlerin kullanımını araştırmışlardır (Yu vd., 2016).

Metal oksitlerin gücü, enerji seviyelerinin hizalanmasını belirleyen ve böylece elektronik cihazların performansını dikte eden optik ve elektronik özelliklerin çeşitliliğinde yatmaktadır. Metal oksit malzemelerinin çoğu yarıiletken olarak kabul edilmektedir ve SnO₂, indiyum oksit (In₂O₃), çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂) gibi n-tipi malzemeler ile nikel oksit (NiO) ve bakır oksit (CuO) gibi p-tipi malzemeler olmak üzere iki türe ayrılmaktadır. Bu türlerin yük taşıyıcıları, n-tipi için elektronlar, p-tipi için ise boşluklardır. Farklı metal oksit malzemelerinin birleşimini n-p, n-n ve p-p gibi nano bağlantıların oluşmasına yol açmaktadır. Malzemelerin bir araya getirilme şekli farklı yapılardan ve dolayısıyla bağımsız olarak incelenmesi gereken farklı özelliklerden kaynaklanmaktadır (Odeh ve Al-Douri, 2020).

Metal oksitler, metallerden, yarıiletkenlerden ve yalıtkanlardan çok farklı elektriksel özelliklere sahiptirler ve süperkapasitörler (Huang vd., 2019), sensörler (Chen vd., 2019), süperiletkenler (Slimani vd., 2019), güneş pili (Neugebohrn vd., 2019) ve su arıtma (Neto vd., 2019) gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

Metal oksitlerin performansları, yük taşıyıcılarının hareketliliğinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu oksitlerin elektronik özellikleri arasında geniş bant aralığı doğası,

elektronik yapı, taşıyıcı hareketliliği ve etkili kütleler gibi önemli unsurlar yer almaktadır. Örneğin, ZrO_2 ve Cu_2O gibi bazı metal oksitler, diğer metal oksitlerden farklı olarak yüzeyde azalma meydana getirdiği için katkıldıklarında farklı davranışlar sergilemektedir (Nkele vd., 2021). Yüzey alanları, tane boyutunu nano boyuta düşürerek etkinleştirilebilir. Bu durum, gaz algılama özelliklerinin geliştirilmesine olanak tanır. Metal oksitlerin taşıma mekanizmalarını tanımlamak için bant teorileri kullanılmaktadır. 3 eV'nin üzerinde enerji bant aralıklarına sahip malzemeler, görünür bölgede optik olarak şeffaftır. Düşük optik emilim, yüksek taşıyıcı hareketliliği ve geniş enerji bant aralıkları, metal ve oksijen orbitalleri arasında hareketli taşıyıcılara sahip bant yapıları oluşturur. Metal oksitlerin büyük enerji bant aralıkları, bant aralığının görünür bölgeye doğru en aza indirilebilmesi için Ag gibi plazmonik malzemelerle entegre edilerek azaltılabilir (Ling vd., 2018). Ag, nispeten ucuz, kararlı, optik emilimi görünür spektruma kaydırma kapasitesine sahip ve yüksek performans üretme potansiyeli taşımaktadır. Karimi-Maleh vd., TiO_2 , ZnO ve NiO 'yu Ag ile entegre ederek yüksek fotokatalitik aktiviteler ve düşük bant aralığı enerjileri elde etmişlerdir (Karimi-Maleh vd., 2020).

Metal oksitlerin ara yüzlerinde meydana gelen sıvı etkileşimleri, metal oksitin yüzeyler arası bağlanma gücünü etkilemektedir. Oksijen ve metaller arasındaki endotermik kimyasal reaksiyonlar, minimum entropi ve yüzey enerjisine sahip metal oksitler oluşturan bağlar geliştirmektedir. Oksijenin basıncı, yüzey enerjisi, sıcaklık ve kısmi basınç, metal ve oksit arasındaki bağı etkileyen önemli faktörlerdir. Metallerin ve oksitlerinin bağımsız özellikleri, sentezlenen malzemelerin toplu özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Yüzeyler arası bağlanma gücünü sağlayan bağ türleri, dağıtıcı, difüzyon, elektrostatik veya kimyasal olabilir. Metal ve oksit arasındaki ara yüzeyde var olan bağ sayısı, yüzeydeki pürüzlülüğünden etkilenmektedir. Metal oksit ara yüzleri heterojen yapıda olup, kristalografik olarak yönlendirilmiştir; yüzeyde kusurlar barındırır ve safsızlık ile çıkıklık etkilerine maruz kalır.

Metal oksitlerin elektronik özellikleri, yüksek voltajlı alanlarda oksijen boşlukları oluşturarak veya farklı sentez yöntemleri kullanılarak değiştirilebilir; böylece taşıyıcı hareketi ve elektrokimyasal aktiviteler iyileştirilebilir. Ayrıca, hidrojenasyon, fotoakım, ışık emilimi ve kararlılığın artırılabilmesi şeklinde elektronik özelliklerin modüle edilmesinde de önemli bir rol oynamaktadır (Ezema vd., 2021).

2.4. Bakır Oksit

Bakır oksit, yarıiletken özellikler göstermesi nedeniyle bilimsel araştırmaların ilgi odağı olmuştur. Bu maddelerle ilgili çalışmalar, 19. yüzyılın başlarına kadar uzanır. Bakır oksitin fotovoltaiik etkisi ise ilk kez 1917 yılında Kennard ve Dieterich tarafından keşfedilmiştir (Kennard ve Dieterich, 1917).

Bakır oksitin dikkat çekmesinin başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- ◇ Çeşitli yöntemlerle kolayca üretilebilir olması,
- ◇ Üretim maliyetinin düşük olması,
- ◇ Fotovoltaiik uygulamalar için uygun bir bant boşluğuna sahip olması (Hou vd., 2012; Kumar vd.,2023),
- ◇ p-tipi yarıiletken özelliği sergileyebilmesi (Chen vd., 2009; Ganesh Babu ve Karvembu, 2011; Okoye vd., 2023),
- ◇ Elektronik cihaz üretiminde yaygın kullanım alanına sahip olması (Brandt vd., 2015; Tuama vd., 2020),
- ◇ Görünür ışık bölgesinde yüksek emme kapasitesine sahip olması (Lu vd., 2005).

Bakır oksit, monoklinik yapıya sahip CuO ve kübik yapıya sahip Cu₂O olmak üzere iki temel fazda bulunur (Korzavyi ve Johansson, 2011; Whang vd., 2004). Yapısında bulunan boşluklar nedeniyle bakır oksit genellikle p-tipi yarıiletken özellik göstermektedir. Bununla birlikte, bakır oksitin iki fazı (CuO ve Cu₂O), hızlı oksitlenme eğilimi göstermektedir.

Bakır oksitin CuO ve Cu₂O fazları, elektriksel özellikleri, kristal yapıları ve fiziksel özellikleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Absorpsiyon spektrumları, büyüme koşullarına bağlı olarak UV ve IR bölgesinin geniş bir bölümünü kaplamaktadırlar (Gupta vd., 2018). CuO, Cu₂O'ya göre görünür bölgedeki güneş ışığı fotonlarını daha etkili bir şekilde soğurabilmektedir (Gao, 2012). CuO, Cu₂O'ya kıyasla daha yüksek bir iletkenliğe sahiptir (Yoon, 2000). Cu₂O'nun oksitlenme eğilimi CuO'ya göre daha yüksektir (Arulkumar vd., 2023). CuO, Cu₂O'ya kıyasla daha kararlı bir yapıya sahiptir (Kaur vd.,2022).

Shockley ve Queisser'in termodinamik değerlendirmesine dayanarak, CuO'nun bant aralığı, en yüksek verimliliği elde etmek için en uygundur (Shockley ve Queisser, 2018). Ancak, yük taşıyıcı hareketliliği ($\sim 0,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) (Dolai vd., 2017), daha iyi bir boşluk hareketliliğine sahip olan Cu₂O'dan çok daha düşüktür ($\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) (Lee vd., 2011). Ayrıca CuO, fazla sayıda

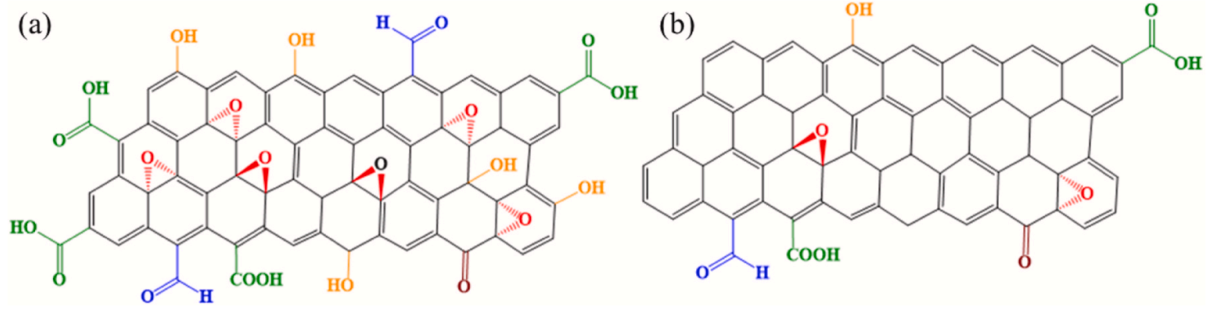
bakır boşluğunun varlığı nedeniyle daha fazla p tipi karaktere sahiptir (Gupta vd., 2018). Bu özelliklerinden dolayı, çeşitli morfolojilerdeki bakır oksit nanoyapıların yük depolama ve yük taşıma yetenekleri oldukça yüksektir (Ameri vd., 2017).

Cu₂O, kupröz oksit olarak da bilinir ve karakteristik olarak kübik bir kristal yapıya sahiptir (Wang, 2004). Genellikle p-tipi yarıiletken özellik sergileyen bu malzeme, 2,1 eV 'lik bir bant aralığına sahiptir (Tuama vd., 2020). Kristal yapısında her bir Cu atomu, iki oksijen atomuna bağlanırken, her oksijen atomu dört Cu atomu ile çevrelenmiştir. Dört Cu atomu ve iki oksijen atomu, Cu₂O'nun birim hücrelerini oluşturmaktadır (Siddiqui vd., 2012).

CuO, kuprik oksit olarak da bilinir ve monoklinik bir kristal yapıya sahiptir. p-tipi yarıiletken özellik sergileyen CuO, 1,2 eV'lik bir bant aralığına sahiptir. Bu özelliği sayesinde yarıiletken uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, oksijenin yoğun olduğu ortamlarda kararlı bir yapı sergilemesi, CuO'nun uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Kumar vd., 2023). CuO'nun kristal yapısı incelendiğinde, birim hücrede iki atomun bulunduğu görülmektedir. Her bir bakır (Cu) atomu, dört oksijen (O) atomuna bağlanmıştır ve bu düzenleme, malzemenin yarıiletken özelliklerini destekleyen temel yapısal özelliklerinden biridir (Siddiqui vd., 2012). Cu₂O ve CuO'nun fiziksel özellikleri Tablo 1'de kristal yapıları ise Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 1. Cu₂O ve CuO'nun fiziksel özellikleri (Lv, 2013; Toprak, 2022)

Fiziksel Özellikler	Cu ₂ O	CuO
Yoğunluk	6 g/cm ³	6,3 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	1235 °C	1336 °C
Molekül Ağırlığı	143,09 g/mol	79,45 g/mol
Aktivasyon Enerjisi	140 meV	4,07 eV



Şekil 7. (a) GO ve (b) rGO'nun kimyasal yapıları (Tamang vd., 2023)

GO ve rGO arasındaki temel fark, oksijen içeren fonksiyonel grupların konsantrasyonudur. GO, hidrofilik bir karakter sergilerken, %100 indirgeme mümkün olmadığından, rGO kısmen hidrofilik özellik gösterir. Ayrıca, GO'nun optik ve elektriksel özellikleri, indirgenme derecesine bağlı olarak ayarlanabilir. Örneğin, GO'nun optik bant aralığı 1–3,5 eV arasında değişirken, rGO'da bu değer 0,2–2 eV aralığına düşer (Bhattacharjee vd., 2019; Sachdeva, 2020). GO'nun indirgenmesi, π -konjugasyonun yeniden oluşmasını sağlayarak yük taşınmasını iyileştirir ve elektriksel iletkenliği artırır (Tamang vd., 2023).

Grafen, sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarından oluşur ve yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, esnek morfoloji, olağanüstü mekanik mukavemet ve sıfır bant aralığı gibi özellikler sergiler (Bano vd., 2019). Bu özellikler, kataliz, süperkapasitörler ve enerji depolama cihazları gibi birçok alanda kullanılmasını sağlamaktadır (Liang vd., 2014). Ayrıca, GO ve rGO'nun zengin fonksiyonel grupları, bu malzemelerin mekanik mukavemet gibi fiziksel özelliklerini güçlendirmektedir. GO ve rGO'nun fiziksel özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

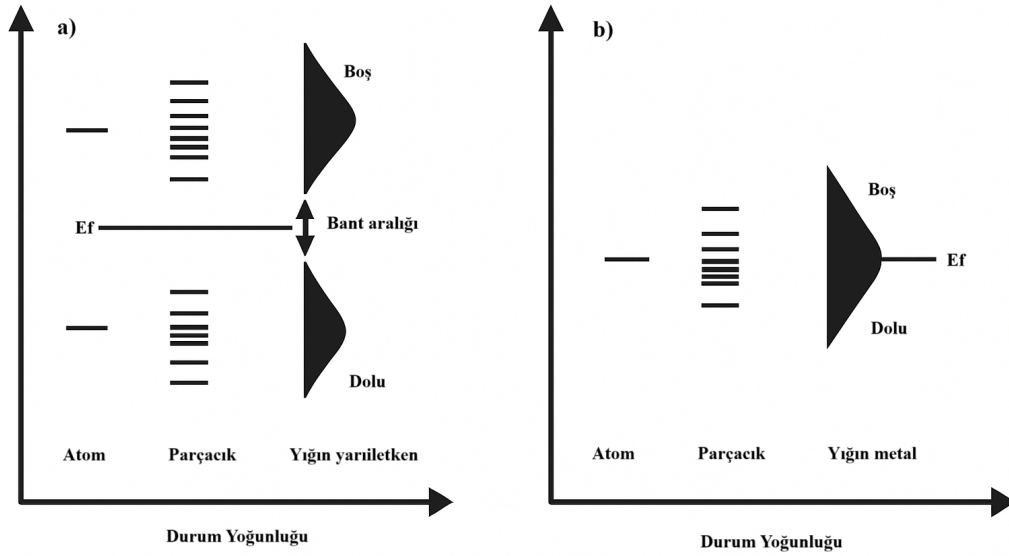
Tablo 2. GO ve rGO'nun fiziksel özellikleri (Tamang vd., 2013)

Fiziksel Özellikler	GO	rGO
Yüzey Alanı	2600 m ² g ⁻¹	466 – 758 m ² g ⁻¹
Bant Aralığı	2 – 4 eV	Ayarlanabilir (0,2 – 2 eV)
Elektriksel İletkenlik	5,72×10 ⁻⁶ Sm ⁻¹	4,82×10 ² - 10 ⁵ Sm ⁻¹
Çözünürlük	Hidrofilik	Hidrofilik/Hidrofobik

2.6. Metal Nanoparçacıklar

Metal ve yarıiletken nanoparçacıklar arasında fiziksel özellikleri açısından bazı benzerlikler vardır. Hem metal hem de yarıiletken nanoparçacıklar optik olarak şeffaftır ve dipol görevi görür (Kamat, 2002).

Yarıiletken nanopartiküllerdeki valans ve iletkenlik bantları Şekil 8(a)'da gösterildiği gibi iyi tanımlanmış bir enerji bant aralığı (E_F) ile ayrılmıştır. Şekil 8(b)'de sunulan metal nanoparçacıklar, elektronların serbestçe hareket etmesini sağlayan yakın bantlarla karakterize edilir. Şekil 8(a) ayrıca yarıiletken nanoparçacıkların, yığın malzemelerinden daha büyük bant aralıklarına sahip olduğunu ve valans ve iletkenlik bantlarının ayrı enerji seviyelerine ayrıldığını gösterir. Metal nanoparçacıklar ve yığın malzemeler Şekil 8(b)'de gösterildiği gibi yakın bantlara sahiptir ve bant aralığı yoktur.



Şekil 8. (a) Yarıiletkenlerdeki ve (b) metal parçacıklardaki enerji seviyelerinin karşılaştırılması (Kamat, 2002).

2.6.1. Gümüş nanopartiküller (Ag Np'ler)

İnorganik nanopartiküllerin potansiyeli, biyomedikal cihazlar, kozmetik, elektronik, enerji sektörü ve çevre koruma gibi birçok alanda dünya çapında araştırılmıştır (Chaudhuri ve Paria, 2012; De vd., 2008; Lu vd., 2007). Bu nanopartiküller arasında, boyutlarına oranla sahip oldukları yenilikçi kimyasal, fiziksel ve biyolojik özellikler nedeniyle Ag Np'ler, bilim insanlarının dikkatini çekmiştir (Sharma vd., 2009).

Ag Np'ler, 100 yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Lea (1889), sitratla stabilize edilmiş gümüş kolloidinin ilk sentezini rapor etmiş ve bu çalışmayla Ag Np'lerin temelini atmıştır (Lea, 1889). Literatür, resmi olarak kayıt altına alınmamış ya da "nano" olarak adlandırılmamış olsa da,

gümüş kolloidlerin 1897 yılından itibaren "Collargo" adıyla tıp alanında kullanıldığını göstermektedir (Yu vd., 2013).

Son yıllarda nanoteknolojinin hızla ilerlemesi, Ag Np'ler için yeni fırsatlar yaratmıştır. Nano boyuttaki Ag Np'ler, sergiledikleri benzersiz özellikler sayesinde yenilikçi uygulamaların geliştirilmesine büyük bir ilgi uyandırmıştır (Yu vd., 2013).

Tüm asil metaller arasında Ag, en yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri ve en düşük erime ve kaynama noktalarını sergiler. Nanopartikül formundaki Ag, teknik alanlarda ve tıbbın çeşitli alanlarında daha da benzersiz özellikler ortaya koymaktadır (Pryshchepa ve ark., 2020). Bu özellikler, güneş enerjisi hasadı (Yang vd., 2016), fotodiyotlar ve fotodedektörler (Wang vd., 2017; Yılmaz vd., 2023), gelişmiş analitik teknikler (örneğin, SERS) (Svecova vd., 2018), kataliz ve fotokataliz (Kang vd., 2019), çevresel uygulamalar (Tiantian vd., 2017), kimyasal ve biyolojik sensörler (Evtugyn vd., 2014; Thanh ve Green, 2010), kanser araştırmaları (Jadhav vd., 2018) ve antibakteriyel ajan olarak kullanımı (Pomastowski vd., 2016) gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

2.6.2. Ag Np'lerin sentez yöntemleri

Ag Np'lerin sentezi için kimyasal, fiziksel, fotokimyasal ve biyolojik gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Ag Np'ler için maliyet, kararlılık, ölçeklenebilirlik, parçacık boyutları ve boyut dağılımları gibi parametrelerle ilişkili sentez yöntemleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Haider and Kang, 2015).

Gümüş tuzlarının indirgenmesi sonucu kolloidal çözeltilerin oluşumu çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Sentezlenen Ag nanoparçacıkların boyutu ve şekli, bu aşamalarda kullanılan deneysel parametrelere bağlıdır. Tekdüze boyut ve homojen dağılıma sahip Ag nanoparçacıkların sentezi için eş zamanlı çekirdeklenme gereklidir. Çekirdeklenme ve çekirdeklerin büyümesi, aşağıdaki reaksiyon parametrelerinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle optimize edilebilir:

- ◇ Reaksiyon sıcaklığı,
- ◇ pH,
- ◇ Kullanılan öncül maddeler,
- ◇ İndirgeyici maddeler (örneğin TSC, NaBH₄, etilen glikol),
- ◇ Stabilize edici maddeler (örneğin PVA, PVP).

Bu parametrelerin kontrolü, nanoparçacıkların istenen özelliklerde sentezlenmesini ve uygulama alanlarına uygun hale getirilmesini sağlamaktadır (Sharma vd., 2014).

Nanopartikül üretimindeki en önemli zorluklardan biri boyut kontrolüdür. Çünkü boyut, nanopartiküllerin fiziksel ve biyolojik özelliklerini belirlemektedir. Nanopartiküllerin oluşumu karmaşık bir süreçtir ve genel olarak birkaç ana aşamaya ayrılabilir:

- ◇ Çekirdeklenme
- ◇ Me^0 (metal atomunun nötr hali) katılımıyla büyüme ve kümelenme

Çekirdek oluşumu termodinamik olarak bağımlı bir süreçtir. Yüzey serbest enerjisi her zaman pozitifdir; dolayısıyla çekirdek oluşumu termodinamik olarak dezavantajlı bir süreçtir. Buna karşın, kristal büyümesi, sistem enerjisinde bir azalmaya yol açmaktadır. Bu nedenle büyüme süreci, esas olarak nanopartikül tohumları ile çözelti arasındaki kütle alışverişine ve kümelenme yeteneğine bağlıdır (Thanh vd., 2014). Thanh vd. (2014), nanopartiküllerin çekirdeklenmesi ve büyüme mekanizmalarının teorik ayrıntılarını incelemişlerdir.

Ag Np boyutunun ve boyut dağılımının, çözeltide zamanla çözülen Ag^0 konsantrasyonuna sıkı sıkıya bağlı olduğu; bunun da kullanılan metal öncülünün miktarına ve Ag^+ indirgenmesinin reaksiyon hızına bağlı olduğu görülmüştür. Genel olarak, metal öncülünün fazlalığı daha büyük nanopartikül oluşumuna yol açmaktadır. Bunun aksine, sürecin başlangıcındaki yüksek reaksiyon hızı, daha küçük boyutta ve daha büyük miktarda nanopartikül üretimini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle reaksiyon hızını etkileyen indirgeme potansiyelinin ve kullanılan indirgeyici madde miktarının anahtar faktörlerden biri olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Ag^+ 'nın redoks potansiyeli pH değerinden etkilenebilmekte ve reaksiyon, sıcaklıktaki değişikliklere karşı duyarlı olabilmektedir (Sangar vd., 2019).

Toplanma, nanopartikül oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Yaygın olarak kabul gören teori, nanopartiküllerin çekirdeklerin bir araya gelmesiyle oluştuğunu göstermektedir (Sangar vd., 2019; Thanh vd., 2014). Ancak kontrolsüz toplanma, artık nanopartiküllerin benzersiz özelliklerine sahip olmayan daha büyük yapıların oluşumuna yol açmaktadır. Bu nedenle yeterli stabilizasyon, nanopartikül sentezinin ve depolanmasının vazgeçilmez bir parçasıdır (Pryshchepa vd., 2020). Kang vd. (2019), plazmonik nanopartiküllerin stabilizasyonunda kullanılan çeşitli yaklaşımları incelemelerinde göstermişlerdir.

Kimyasal olarak sentezlenen Ag Np'lerin çoğunluğu dört kimyasal reaksiyonla yapılmaktadır.

- ◇ Sitrat (Turkevich) Yöntemi (Blommaerts vd., 2019)
- ◇ Borohidrit İndirgenmesi (Hegde vd., 2019)
- ◇ Tollens (gümüş ayna) Reaksiyonu (Yang vd., 2015)
- ◇ Poliol İşlemi (Chen vd., 2019)

Sitrat yöntemi, metal öncüsü olarak AgNO_3 'ün kullanıldığı bir nanopartikül sentez tekniğidir. Bu yöntemde TSC, hem kaplama maddesi hem de stabilize edici ajan olarak rol oynar (Desai vd., 2012). Ag Np'lerin sentezinde önerilen ilk yöntemlerden biri olan sitrat yöntemi, uygun maliyetli ve ileri düzey manipülasyon gerektirmeyen bir yöntemdir. Bu nedenle, nanopartikül davranışlarının incelenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Blommaerts vd., 2019).

Borhidrit indirgeme yöntemi, indirgeyici madde olarak NaBH_4 kullanımını içerir. NaBH_4 'ün, gümüş nanopartikül sentezi için popüler bir kimyasal olması, sitrattan daha yüksek bir indirgeme kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, hassas boyut ve şekil kontrolü gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Agnihotri vd., 2014). NaBH_4 ile farklı şekil ve boyutlarda nanopartiküller (küre, çubuk, üçgen vb.) sentezlenebilmektedir (Huang ve Xu, 2010). Örneğin, Ben Moshe ve Mirkovich (2011), Ag_2O 'nun indirgenmesiyle içi boş gümüş nanopartiküller elde etmiştir. Buna karşın, daha az indirgeyici ajanların (hidrazin, askorbik asit gibi) kullanımı, düşük verimlilik ve içi dolu morfolojilerle sonuçlanmaktadır. Agnihotri vd. (2014), $\text{Ag}(\text{NO}_3)$ öncülü ve NaBH_4 ile TSC hem indirgeyici hem de dengeleyici madde olarak kullanarak, 5-100 nm aralığında kontrol edilebilen Ag Np'ler sentezlemiştir. Ayrıca, sentezlenen nanopartiküllerin boyutunun farklı uygulamalardaki etkisini açıklamışlardır.

Gümüş ayna reaksiyonu, $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2\text{OH}$ (Tollen reaktifi) öncülü ve indirgeme için aldehit gruplarını (genellikle şeker) kullanan bir yöntemdir. Tollen reaktifi, AgNO_3 kadar yaygın bir kimyasal olmasa da belirli sentez yollarında değerli seçenekler sunar. Yang vd. (2015), NH_3/O_2 gaz karışımıyla oluşturulan Tollen reaktifini kullanarak, $\text{Ag}@$ resorsinol-formaldehit rezin çekirdek@kabuk nanopartiküllerini ters resorsinol-formaldehit-çekirdek@Ag kabuk nanopartiküllerine dönüştürmek için yenilikçi bir yöntem sunmuştur. Yoo vd. (2019), AgCl 'nin amonyum hidroksit çözeltisi içinde çözülmesinden elde edilen Tollen reaktifinin hidrazinle indirgenmesi sonucu Ag Np'ler üretmiştir. Ancak AgNO_3 'ün düşük çözünürlüğü nedeniyle öncül olarak kullanımı sınırlıdır. Buna rağmen, Tollen reaktifine dönüştürüldüğünde Ag nanopartiküllerin üretimi mümkün hale gelir.

Poliol yöntemi, reaksiyon koşullarının (sıcaklık, reaktif konsantrasyonu, poliol türleri veya eser iyonların varlığı gibi) değiştirilmesiyle yüksek düzeyde şekil ve boyut kontrolü sağlayabilen bir tekniktir (Chen vd., 2019). Bu yöntemde poliol, hem indirgeyici hem de çözücü olarak görev yapar. Tian vd. (2019), askorbik asit (indirgeyici ajan) ve sitrat iyonlarının (kaplama ajanı) varlığında $AgNO_3$ 'ün indirgenmesiyle çiçek şeklinde Ag Np'ler sentezlemiştir.

2.6.3. Ag Np'lerin foto-uyarılması

Fotoelektrik etki, 1887 yılında Heinrich Hertz tarafından ultraviyole ışığın metalik elektrotlardan gelen elektrik deşarjı üzerindeki etkilerini incelerken keşfedilmiştir (Hertz, 1887). Bu olayın altında yatan temel mekanizma, Albert Einstein tarafından 1905 yılında açıklanmıştır (Einstein, 1905). Einstein, ışığın, her biri Planck sabiti h ($E = h\nu$) ile frekansı ν 'ye bağlı kuantize edilmiş enerji paketlerinden (fotonlar) oluştuğunu öne sürmüştür (Planck, 1901). Bu açıklama, belirli bir eşik frekansının altındaki ışığın, yoğunluğundan bağımsız olarak, bir metal yüzeyden elektron salınımını neden başlatamadığını netleştirmiştir. Metal yüzeyindeki bu işlem, metalin iş fonksiyonuna eşit veya daha fazla enerjiye sahip fotonların gerekli olduğunu ortaya koymuştur. Bu temel keşifler, kuantum mekaniğinin gelişimi için önemli bir mihenk taşı olmuş ve enerjik, foto-uyarılmış "sıcak" elektronlarla tetiklenen fiziksel, elektriksel, termal, mekanik ve kimyasal süreçlerin anlaşılmasını sağlayan geniş çaplı araştırmalara ilham vermiştir.

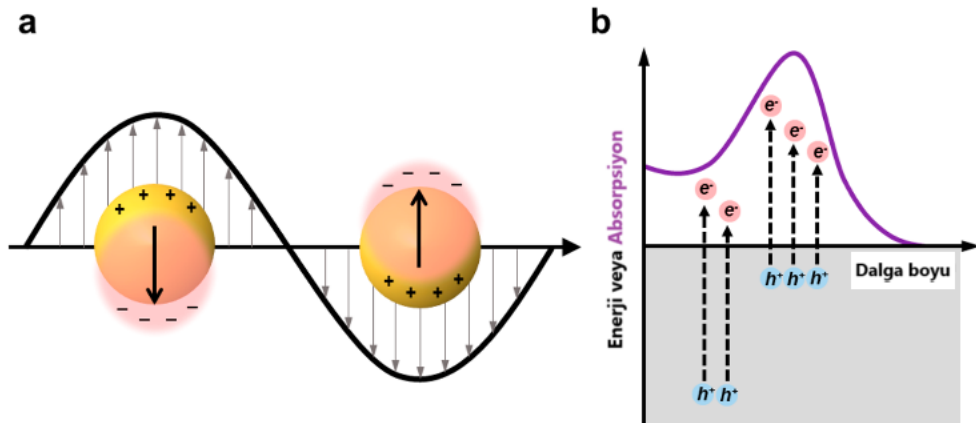
Fotoelektrik etkinin keşfi ve Einstein'ın foton enerjisiyle ilgili açıklamaları, ışık ve madde arasındaki enerji etkileşimlerini anlamamızda devrim niteliğinde bir adım olmuştur. Bu bilgiler, yalnızca kuantum mekaniğinin gelişimine katkıda bulunmakla kalmamış, aynı zamanda modern nanoteknolojideki fotonik süreçlerin anlaşılmasına da olanak sağlamıştır. Özellikle, metal nanoparçacıkların ışıkla uyarılma sonucu ortaya çıkan LSPR ve bununla ilişkili sıcak elektron oluşumu, fotoelektrik etkinin doğrudan nanomalzemelere yansımadır. Bu bağlamda, foto-uyarılma ile LSPR arasındaki ilişki, Ag gibi metallerin plazmonik özelliklerinin anlaşılması açısından büyük bir öneme sahiptir.

Foto-uyarılma, elektronların, gelen ışık enerjisini absorbe ederek daha yüksek enerji seviyelerine geçmesiyle gerçekleşen bir süreçtir (Zhang vd., 2017). Bu fenomen, özellikle Ag gibi metal nanoparçacıkların karakteristik optik ve fiziksel özelliklerini açığa çıkarır. Ag Np'ler, LSPR adı verilen özel bir fenomen sayesinde gelen ışık dalgaları ile rezonansa girebilir. Bu olay, yüzeydeki serbest elektron yoğunluğunun, belirli bir dalga boyunda gelen ışık

enerjisiyle topluca titreşim hareketine geçmesiyle meydana gelir. Bu süreç, nanoparçacıkların optik özelliklerini dramatik bir şekilde artırır ve elektromanyetik alanın yüzeye yakın bir bölgede yoğunlaşmasına neden olur (Brongersma vd., 2015).

LSPR, metal nanoparçacıkların ışıkla etkileşim kurarak rezonans oluşturduğu bir olgudur. Ag Np'ler, ışığın belirli bir dalga boyunda yüzey plazmonlarını uyarır ve bu uyarılma sırasında oluşan enerji, serbest elektronların kolektif titreşimleriyle tanımlanır (Khurgin vd., 2024). Bu süreçte:

- ◇ Işık enerjisi nanoparçacıklar tarafından soğurularak rezonans oluşturur.
- ◇ Rezonans sırasında, ışık enerjisinin bir kısmı yüzeyde "sıcak" elektronlar olarak bilinen yüksek enerjili serbest elektronlara dönüşür (Clavero, 2014).
- ◇ Bu sıcak elektronlar, enerji aktarımı ve kimyasal reaksiyonların başlatılması gibi çeşitli süreçlerde önemli roller üstlenir.



Şekil 9. (a) Ag Np'lerin LSPR sırasında elektronların toplu titreşimi. (b) LSPR'nin sıcak elektron oluşumu ve enerji seviyeleri üzerindeki etkisi (Zhang vd., 2017).

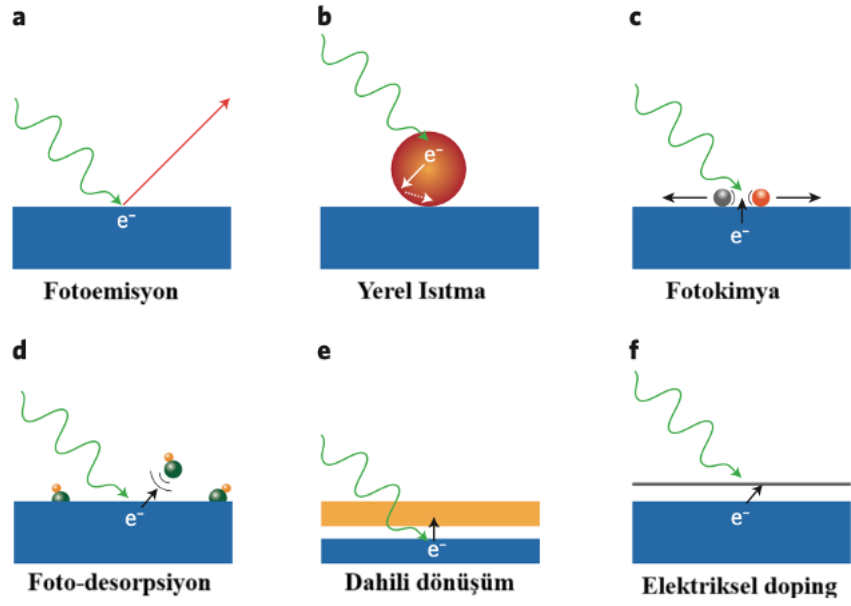
Şekil 9, Ag Np'lerin LSPR sırasında sergilediği toplu elektron titreşimlerini ve bu süreçte sıcak elektronların nasıl oluştuğunu ve enerji seviyelerine olan etkilerini açıklamaktadır. Bu, sıcak elektronların LSPR etkisiyle nasıl tetiklendiğini anlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Sıcak elektronların oluşumu, LSPR sırasında metal nanoparçacıkların yüzeyinde meydana gelen enerji transfer süreçlerinin bir sonucudur. Bu mekanizma şu şekildedir:

- ◇ Plazmon Titreşimlerinin Sönümlenmesi: LSPR sırasında, metal nanoparçacıkların yüzeyindeki serbest elektronlar, gelen ışıkla rezonansa girerek topluca titreşir. Bu

plazmon titreşimleri zamanla sönümlenir ve enerjileri iki ana yolla serbest elektronlara aktarılır:

- ◇ Radyatif Sönümlenme: Plazmon titreşimleri ışık enerjisi olarak yeniden yayılır.
- ◇ Işıma Dışı Sönümlenme: Plazmon enerjisi, metalin içinde serbest elektronlara aktarılır ve bu süreç sıcak elektronların oluşumuna neden olur (Besteiro vd., 2017; Hartland, 2011).
- ◇ Elektron-Uyarılma Süreci (Landau Sönümlenmesi): Işıma dışı sönümlenme sırasında, serbest elektronlar arasındaki çarpışmalar ve enerji transferi, düşük enerjili elektronların yüksek enerjili seviyelere uyarılmasını sağlar. Bu yüksek enerjili serbest elektronlara "sıcak elektronlar" denir (Christopher vd., 2011).
- ◇ Enerji Dağılımı ve Elektron-Fonon Etkileşimi: Sıcak elektronlar, femtosaniye zaman ölçeğinde enerjilerini çevrelere transfer eder. Bu süreçte, sıcak elektronlar metal yüzeyine yakın bölgelerde enerji yoğunluğu oluşturur. Daha sonra, bu enerji metal atomlarının titreşim modlarına (fononlara) aktarılır ve sıcak elektronlar soğur (Sundaraman vd., 2014).

Şekil 10, ışık ve malzeme etkileşimleri sonucu ortaya çıkan fiziksel süreçleri göstermektedir. Fotoemiyon, yüzeyden elektronların ışık etkisiyle salınmasını ifade eder (Şekil 10a). Işık enerjisinin yüzeydeki elektronlar tarafından emilerek ısıya dönüşmesi yerel ısıtma olarak adlandırılır (Şekil 10b). Fotokimya, ışık tarafından tetiklenen kimyasal reaksiyonlar olarak tanımlanırken (Şekil 10c), yüzeydeki moleküllerin ışık etkisiyle serbest bırakılmasına foto-desorpsiyon denmektedir (Şekil 10d). Dahili enerji dönüşümü ise ışık enerjisinin malzeme içinde farklı enerji seviyelerine aktarılması olarak ifade edilir (Şekil 10e). Son olarak elektriksel doping, ışığın yüzey elektron yoğunluğunu değiştirme etkisi olarak adlandırılır. Bu süreçler, Ag Np'lerin LSPR etkisiyle fotodetektörler ve enerji dönüşüm uygulamalarındaki mekanizmalarını açıklamaktadır.



Şekil 10. Işık ve malzeme etkileşimleri sonucu ortaya çıkan fiziksel süreçler

LSPR'nin optik enerjiyi toplama ve lokal olarak yoğunlaştırma kapasitesi, sıcak elektronların oluşumunu ve enerji transferini daha verimli hale getirir. Özellikle, Ag nanoparçacıklar, altın (Au) gibi diğer metallere göre daha güçlü bir plazmonik yanıt sunar ve geniş bir dalga boyu aralığında foto-uyarılmaya olanak tanır (Khurana ve Jaggi, 2021).

Ag Np'ler, görünür ve ultraviyole bölgedeki geniş bir dalga boyu aralığında güçlü bir LSPR yanıtı verir. Optik enerji kayıplarının düşük olması, sıcak elektronların oluşumunda daha yüksek verimlilik sağlar ve bu durum Ag'yi Au ve Cu gibi diğer metallere göre üstün kılar (Christopher vd., 2011). Ayrıca, geniş spektral aralık, sıcak elektronların farklı foton enerjileriyle tetiklenmesini mümkün kılar (Atwater ve Polman, 2010); bu da Ag'nin fotokataliz ve enerji dönüşüm uygulamalarında kullanımını artırır (Besteiro vd., 2017; Linic vd., 2011).

Ag Np'lerin LSPR ve foto-uyarıma süreçlerindeki davranışları, boyut, şekil ve çevresel faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. Nanoparçacıkların boyutları küçüldükçe, LSPR tepe dalga boyu maviye kayma eğilimi gösterir. Küçük boyutlu Ag nanoparçacıklar, kısa dalga boylarında rezonans oluştururken, daha büyük partiküller kızılötesi bölgeye yakın rezonans gösterir (Zhang vd., 2017). Küresel, çubuk, üçgen gibi farklı geometriler, LSPR'nin dalga boyunu ve optik özelliklerini etkiler. Örneğin, çubuk şeklindeki nanoparçacıklar hem boyuna hem de enine plazmon modları sergiler ve bu modlar farklı dalga boylarında rezonans yapabilir (Brongersma vd., 2015). Çevresel faktörler, özellikle dielektrik ortamın özellikleri, LSPR frekansını modüle eder. Yüzey kaplamaları ve ligandlar,

nanoparçacıkların plazmonik yanıtını değiştirerek performansını optimize edebilir (Clavero, 2014).

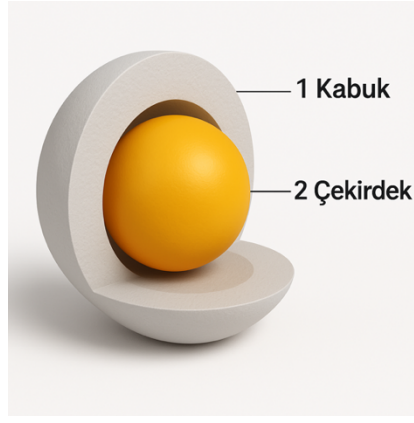
Sıcak elektronların enerjisi, suyun ayrışması veya organik kirleticilerin indirgenmesi gibi reaksiyonlarda kullanılabilir. Ayrıca, LSPR'nin elektromanyetik alan yoğunlaştırma yeteneği, Ag Np'lerin biyosensörlerde, güneş hücrelerinde ve fotodedektörlerde kullanımını mümkün kılmaktadır (Khurana ve Jaggi, 2021).

Fotodedektörlerde Ag Np'lerin LSPR özellikleri, aygıtların performansını artırmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle, Ag Np'ler tarafından oluşturulan sıcak elektronlar, foton enerjisinin yarıiletken bir tabakaya hızlı bir şekilde aktarılmasını sağlayarak algılama verimliliğini artırır. Örneğin, Ag Np'lerle modifiye edilmiş silikon fotodedektörler, ultraviyole ve görünür ışık spektrumunda daha yüksek hassasiyet göstermekte ve optik sinyalleri elektriksel sinyallere dönüştürmede daha yüksek verimlilik sunmaktadır. Bu tür fotodedektörler, düşük ışık seviyelerinde bile yüksek doğrulukla çalışabilir ve optik iletişim, güvenlik uygulamaları ve biyomedikal alanlarında kullanılabilecek yeni nesil cihazların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Jang vd., 2012; Neo vd., 2014; Yan vd., 2017). Bunun yanı sıra, Ag Np'lerin geniş bir spektral aralıkta LSPR oluşturma yeteneği, kızılötesi fotodedektörlerde de kullanım potansiyelini artırmaktadır (Atwater ve Polman, 2010).

Sonuç olarak, LSPR ve foto-uyarılma arasındaki bağlantıyı anlamak, Ag Np'lerin enerji transfer mekanizmalarını ve çeşitli uygulamalardaki etkilerini açıklamak açısından kritik öneme sahiptir.

2.7. Çekirdek@Kabuk Nanokompozit Yapılar

Nanopartiküller, tek veya çoklu malzemelere göre basit ve çekirdek@kabuk veya kompozit olarak kategorize edilebilmektedirler. Genel olarak, basit nanopartiküller tek bir malzemeden yapılır, kompozit ve çekirdek@kabuk nanopartiküller ise iki veya daha fazla malzemeden oluşmaktadırlar. Çekirdek@kabuk tipi nanopartiküller, genel olarak bir çekirdek (iç malzeme) ve bir kabuk (dış katman malzemesi) içerdiği şekilde tanımlanabilmektedir. Bunlar inorganik/inorganik, inorganik/organik, organik/inorganik ve organik/organik gibi farklı kombinasyonlardan oluşabilmektedir. Çekirdek@kabuk nanopartikülünün kabuk malzeme seçimi genellikle son uygulamaya ve kullanıma büyük ölçüde bağlıdır (Chaudhuri ve Paria, 2012). Şekil 11'de çekirdek@kabuk nanopartiküllerin sembolik gösterimi verilmiştir.



Şekil 11. Çekirdek@kabuk nanopartikül

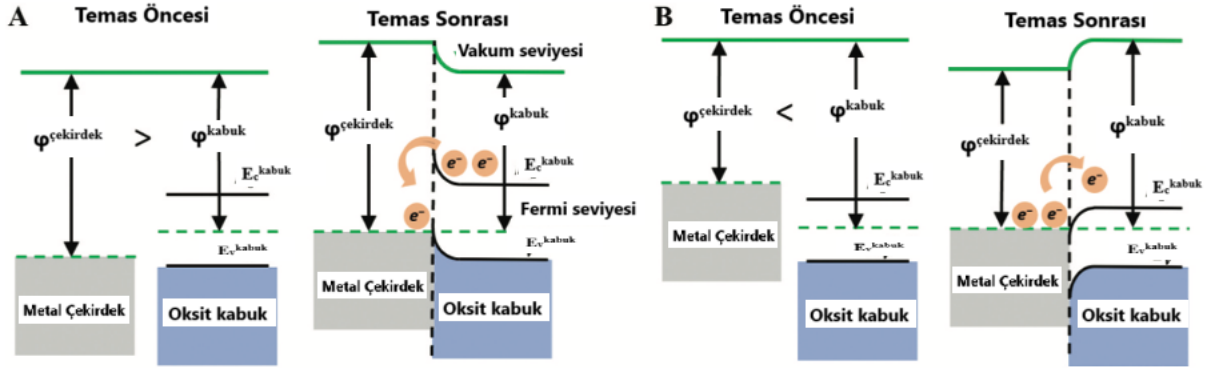
2.7.1. Çekirdek boyutu ve kabuk kalınlığı

Metal@metal oksit çekirdek@kabuk nanokompozitlerinin temel yapısal özelliklerinden biri, metal oksit kabuğunun kalınlığıdır. Bu kabuğun kalınlığı, nanoparçacıkların dielektrik özelliklerini, metal çekirdeğin dış ortam ile etkileşimini ve ışığın saçılma davranışını belirlemede önemli bir rol oynar. Kabuk kalınlığının kontrol edilmesi, spektroskopik özelliklerin ince ayarlanmasına da olanak tanımaktadır. Lee vd. (2019), Cu_2O kabuk kalınlığı 5,8 nm'den 11 nm'ye çıktığında $\text{Ag@Cu}_2\text{O}$ çekirdek@kabuk nanoparçacıkları için kırmızıya kayma gözlemlenmiştir. Her uygulamada belirli bir malzeme için optimum kabuk kalınlığını bulmak kapsamlı bir araştırma gerektirmektedir. Liu vd. (2013), daha ince kabuklar kısa devre akımını artırırken, daha kalın kabuklar boya duyarlı Au@TiO_2 güneş hücrelerinde açık devre potansiyelini iyileştirdiğini söylemişlerdir. Çekirdek boyutunun mühendisliği, metal/metal oksit nanopartiküllerin genel boyutunu değiştirmek ve nanokompozitlerin özelliklerini büyük oranda değiştirmek için bir diğer uygun stratejidir. Xu vd. (2014), Ag@WO_3 nanopartikülleri için çekirdek boyutlarının 25 nm ila 60 nm aralığında azaltmak, Ag Np'lerin iyonlaşma potansiyellerinin azalmasına, WO_3 kabuğunun elektron yoğunluğunda ayarlanabilir tükenmeye ve sensör iyileşmesine yol açtığını söylemektedirler.

2.7.2. Sinerjik elektronik etkiler

Sinerjik etkiler, yani tek bileşenli metal oksit veya metal parçacıklarında bulunmayan metal@metal oksit çekirdek@kabuk nanokompozitlerinin ortaya çıkan işlevsellikleri veya iyileştirmeleri, metal çekirdeğin metal oksit kabuğu tarafından basit bir şekilde pasifleştirilmesi veya metal@metal oksit etkileşimlerinin nanokompozitin elektronik özellikleri üzerindeki etkisi olarak ortaya çıkabilmektedir. Metaller ve metal oksitler arasındaki ara yüzlerdeki

etkileşimlerin ana itici güçlerinden birinin işlevleri arasındaki fark olduğu düşünülmektedir (Mendes vd., 2023). Şekil 12, metal çekirdek ve oksit kabuğun iş fonksiyonlarındaki farktan kaynaklanan elektron transferinin nasıl olduğunu göstermektedir. Oksit kabuğunun iletim bandı minimum ve değerlik bandı maksimum enerjileri E_{kabukC} ve E_{kabukV} olarak işaretlenmiştir.



Şekil 12. Metal çekirdek ve oksit kabuğun iş fonksiyonlarındaki farktan kaynaklanan elektron transferi, a) kabuktan çekirdeğe ve b) çekirdekten kabuğa (Mendes vd., 2023).

$\phi_{çekirdek}$ ve ϕ_{kabuk} , Fermi seviyelerinin dengelenmesine neden olan ara yüz yük transferine yol açmaktadır. Metalin işlevi oksidin işlevinden düşük ise, elektron transferi oksit kabuğuna doğru olma eğilimindedir. Elektronların yüzey bölgesine doğru bir şekilde aktarılması genellikle nanokompozitlerin katalitik özellikleri için faydalıdır. Co@CoO'daki Co'ya kıyasla CoO'nun daha yüksek iş fonksiyonu, çekirdek@kabuk ara yüzünde bir elektrik alan oluşturur ve nanokompozitin d-bant merkezini Fermi seviyesine doğru kaydırır. Bu durum nanokompozitin elektrokimyasal hidrojen evrimindeki yüksek aktivitesini rasyonelize etmeye yardımcı olur (Wu vd., 2022). Metal çekirdek, metal oksit kabuktan daha yüksek bir fonksiyona sahip olduğunda, metal çekirdeğin elektron yoğunluğunun zenginleşmesi beklenir. Bu durum da algılama ve plazmonik özellikler üzerine faydalı olabilmektedir. Örneğin TiO₂'nin (4,3 eV) fonksiyonu Ag'nin (4,6 eV) fonksiyonundan daha küçüktür ve bu da Ag@TiO₂'deki Ag çekirdeğini negatif yüklü hale getirir ve Ag@TiO₂'nin sensör olarak uygulanması sırasında metal oksit kabuktaki elektron tükenmesini artırır (Yang vd., 2019).

2.7.3. Metal-çekirdek@metal oksit-kabuk nanopartiküllerinin sentezi

Genel olarak, çekirdek@kabuk nanopartikülleri iki aşamalı bir işlemle sentezlenir. İlk aşamada çekirdek sentezlenir, ikinci aşamada ise çekirdeğin üzerine kabuk malzemesi kaplanır. Çekirdek@kabuk nanoparçacıklarının sentez yöntemleri, çekirdek partiküllerinin varlığına göre iki türe ayrılabilir.

- i) Çekirdek partikülleri önce sentezlenir, ardından uygun yüzey modifikasyonları ile kabuk malzemesini kaplamak için sisteme ayrı ayrı dahil edilir (Carusa vd., 2001; Kim vd., 2005; Sung ve Lee, 2004; Zanella vd., 2006).
- ii) Çekirdek partiküller, yerinde sentezlenir ve bu işlem kabuk malzemesinin kaplanmasıyla tamamlanır (Kabayashi vd., 2003; Phadtare vd., 2003; Wang vd., 2005).

Harici çekirdek sentezinin temel avantajı, çekirdek parçacıklarının saf formda mevcut olması ve bu nedenle çekirdek yüzeyinde kirlenme ihtimalinin düşük olmasıdır. Buna karşın, yerinde sentez yönteminde reaksiyon ortamından kaynaklanan kirlilikler, çekirdek ve kabuk tabakası arasında sıkışma eğiliminde olabilir.

2.8. Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO Çekirdek@Kabuk Nanokompozit Yapılar

Nanokompozitler, farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle çok çeşitli işlevsel özellikler sunan, modern malzeme biliminin önemli bir sınıfını oluşturur. Özellikle metal ve oksit malzemelerin birleşimiyle elde edilen metal oksit kompozitleri, optik ve plazmonik uygulamalarda büyük bir potansiyel taşımaktadır (Liu vd., 2016; Sayson ve Regulacio, 2022).

Metal nanomalzemelerde, bir elektromanyetik dalga yüzeye çarptığında, serbest elektronlar sabit bir frekansta topluca salınım yapar. Bu olgu, LSPR olarak adlandırılır ve metallerin ışığı dalga boyundan daha küçük ölçekte kontrol etmesini sağlar. LSPR özellikleri sayesinde metal nanoparçacıklar (Ag Np'ler gibi), optik uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir (Gao vd., 2014; Mahmoud ve El-Sayed, 2013). Bu bağlamda, Ag Np'ler, ışıkla en güçlü plazmonik etkileşimi sağlayan malzemelerden biri olarak öne çıkar (Distefano vd., 2018).

Ag'nin LSPR özelliklerinin optimize edilmesi, özellikle optik uygulamalar için büyük önem taşır. Bu özelliklerin hassas bir şekilde kontrol edilmesi için en basit yöntemlerden biri, nanoparçacık boyutunun ayarlanmasıdır. Parçacık boyutundaki değişiklikler, LSPR bandını görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde ayarlamayı mümkün kılar (Agnihodri vd., 2014; Bastus vd., 2015). Bunun yanı sıra, nanoparçacıkların geometrik şekilleri de LSPR bantlarının konumunu ve sayısını etkiler. Küresel Ag Np'ler, görünür bölgede 400–450 nm arasında zirve yapan tek bir LSPR bandına sahipken, anizotropik Ag Np'ler daha geniş bir spektral aralığı kapsayan birden fazla bant sergiler (Fan vd., 2020; Scardaci vd., 2021; Sarina vd., 2013).

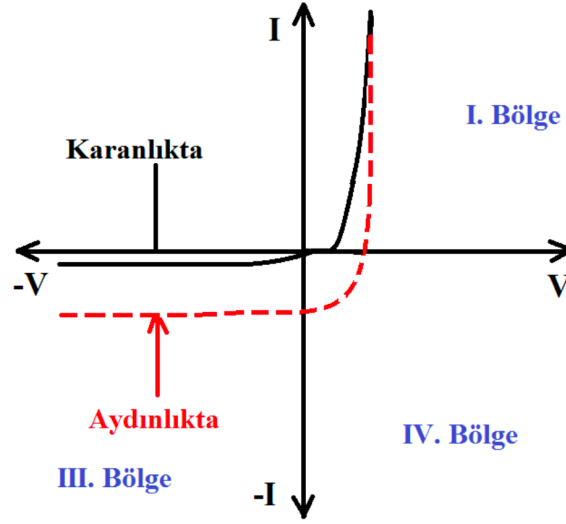
Cu_xO (bakır oksit), 1,2 eV ile 2,1 eV arasında değişen dar bant aralığı ve görünür ışık absorpsiyonundaki yüksek verimliliği ile öne çıkan bir yarıiletken malzemedir. Bu özellikler, onu güneş enerjisi soğurucu bir malzeme olarak oldukça cazip kılmaktadır (Cao vd., 2014; Sun vd., 2018; Zhu vd., 2019). Ancak, Ag Np'ler oksidasyona karşı yeterince dayanıklı olmadığından, Cu_xO ile kaplanmaları bu parçacıkların dayanıklılığını artırmaktadır (Lee vd., 2018). Dahası, Ag ve Cu_xO'nun bir araya getirilmesi, güneş enerjisinden maksimum faydalanmak için daha geniş bir ışık emilim aralığı sağlar (Ma vd., 2025; Mozafari vd., 2021).

Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanoyapılarının hazırlanmasında genellikle iki aşamalı bir yöntem uygulanır. İlk aşamada Ag çekirdeği hazırlanırken, ikinci aşamada Cu_xO kabuğu bu çekirdeğin yüzeyine büyütülür. Bu yapılar, yalnızca plazmonik özelliklerin geliştirilmesiyle kalmaz, aynı zamanda dayanıklılığı artırır ve optik performansı optimize eder. Grafen türevleri gibi geniş yüzey alanına sahip malzemeler, bu yapılar için etkili taşıyıcılar olarak kullanılabilir (Di vd., 2023). Özellikle rGO, düzensiz yapısı ve boşlukları sayesinde yük transferine önemli ölçüde katkıda bulunur ve çekirdek@kabuk yapılarının zenginleştirilme kapasitesini artırır (Liu vd., 2021; Zhang vd., 2014).

Cu_xO'nun dar bant aralığı ile görünür ışığı yakalama yeteneği, rGO'nun iletkenlik bandına elektron transferini kolaylaştırır. Bu transfer, valans bandında boşluklar bırakarak yüzey geliştirilmiş Raman saçılması (SERS) performansının artmasını sağlar (Bai vd., 2021). Sonuç olarak, Ag@Cu_xO nanoyapılarının rGO ile entegre edilmesi, hem optik uygulamalar hem de güneş enerjisi teknolojileri için oldukça umut verici bir yaklaşım sunmaktadır (Cushing vd., 2015; Gao vd., 2011; Wu vd., 2015).

2.9. Eklemlerin Akım – Gerilim Karakteristikleri

Yarıiletken eklemlerin ters ve doğru beslem altında elde edilen akım-gerilim ($I - V$) grafiği Şekil 13'te verilmiştir. Grafikte, $I > 0$ ve $V > 0$ aralığı I. bölge olarak isimlendirilmektedir. Bu bölgedeki elektriksel özellikler, optoelektronik uygulamalarda LED ve lazer gibi ışık kaynaklarının üretiminde kullanılmaktadır. Aynı şekilde, $I < 0$ ve $V < 0$ aralığı III. bölgeyi, $I < 0$ ve $I > 0$ aralığı ise IV. bölgeyi ifade etmektedir. III. bölge, fotodetektör gibi ışık algılayıcılarının üretiminde, IV. bölge ise güneş pillerinin geliştirilmesinde dikkate alınan elektriksel özellikleri kapsamaktadır (Sarı 2008).



Şekil 13. Yarıiletken eklemlerin $I - V$ karakteristiği (Yıldırım, 2024)

2.10. Metal/Yarıiletken Kontaklar

Günümüzde elektronik cihazların büyük bir kısmı doğru akımla çalışmaktadır. Alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemi, genellikle diyotlar aracılığıyla gerçekleştirilir. p-n eklem diyotları, n-tipi bir yarıiletken ile p-tipi bir yarıiletkenin atomik seviyede birleşmesiyle oluşurken, doğrultucu (Schottky) diyotlar bir metal ile yarıiletkenin belirli koşullar altında temasa geçirilmesiyle elde edilir. Metal/yarıiletken ara yüzeyinde oluşan potansiyel engeli, ilk kez Schottky tanımladığı için bu diyotlara "Schottky diyot" adı verilmiştir (Cowley and Sze, 1965). Metal/yarıiletken kontaklarda doğrultma işlemi, yarıiletkenin eklem bölgesindeki deplasyon tabakasından kaynaklanmaktadır (Schottky, 1938). Bu tür kontaklar, metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyelerinin dengelenmesiyle oluşur. Mikroelektronik cihazların çoğu, metal/yarıiletken veya p-tipi/n-tipi yarıiletken kontaklarının fiziksel özelliklerine dayanır. Bu kontakların sınır bölgelerinde potansiyel engeller oluşur ve bu engeller, yük taşıyıcıların konsantrasyonlarının yeniden dağılımına bağlıdır.

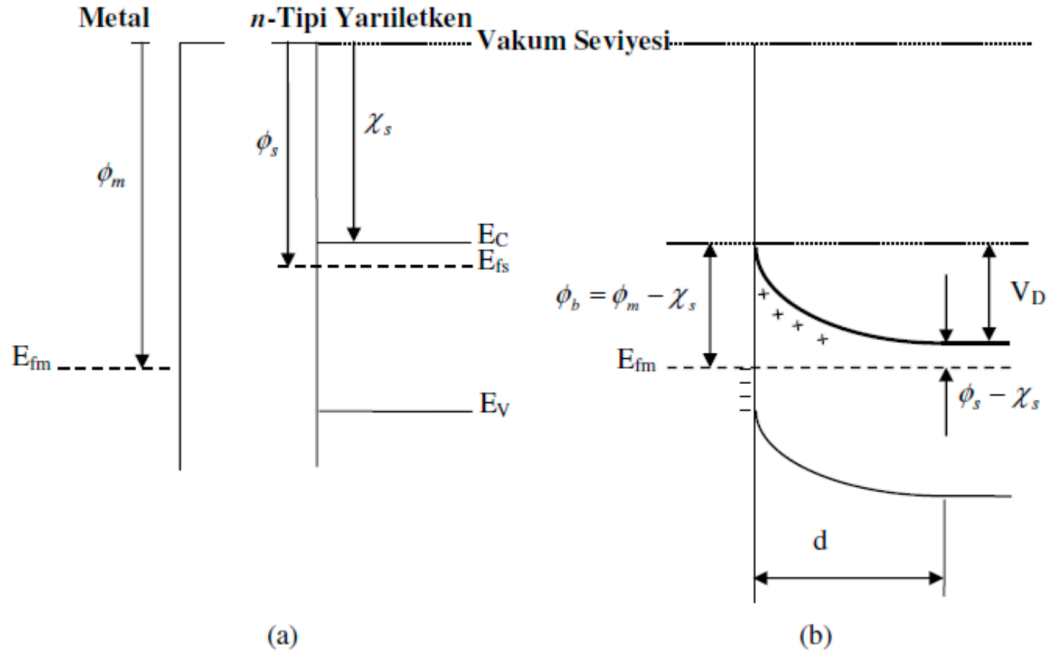
Yarıiletken kontakların elektriksel özellikleri, uygulanan gerilimin büyüklüğüne ve yönüne bağlı olarak değişir. Bu kontaklar, doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristikleri sergiler. Doğrusal olmayan bu özellikler, elektrik akımının doğrultulması, güç dönüşümleri, amplifikasyonlar veya elektrik sinyallerinin üretilmesi gibi birçok elektronik işlevde kullanılır. Bu doğrultucu yapıların temelini diyotlar, transistörler, tünel diyotlar ve Schottky diyotları oluşturur.

Metal/yarıiletken kontaklar, modern yarıiletken teknolojisinin temel taşlarını oluşturur ve elektronik devre elemanlarının işlevselliğinde kritik bir rol oynar. Bu kontaklar, ara yüzey özelliklerine göre omik veya Schottky kontaklar olarak sınıflandırılır. Omik kontaklar, elektrik akımının iki yönde serbestçe akabildiği düşük dirençli bağlantılardır. Buna karşın, Schottky kontaklar akımın yalnızca bir yönde kolayca hareket etmesine izin verirken, ters yöndeki akımı potansiyel engellerle sınırlar (Ziel, 2018).

Bir metal ve yarıiletken arasında oluşan kontak, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki ilişkiye bağlıdır. Örneğin, n-tipi bir yarıiletkenle metal arasında $\phi_m > \phi_s$ olduğunda doğrultucu kontak, $\phi_m < \phi_s$ olduğunda ise omik kontak meydana gelir. Benzer şekilde, p-tipi yarıiletken/metalde bu durum tersine döner. Bu işlevsel farklılıklar, kontak bölgesinde yük taşıyıcılarının (elektronlar ve boşluklar) hareketine doğrudan etki eder (Card ve Rhoderick, 1973).

2.10.1. Metal/n-tipi yarıiletken schottky kontaklar

Yarıiletken tarafındaki uzay yükü bölgesi, yalnızca pozitif yüklü donör atomları içerir ve bir kondansatör gibi davranarak belirli bir kapasite oluşturur. Bu kapasite, uzay yükü bölgesinin kalınlığıyla ters orantılı, iyonize donör yoğunluğu ve difüzyon potansiyeliyle doğru orantılıdır. Schottky kapasitansı olarak bilinen bu değer, p-n eklemlerindeki eklem kapasitansına kıyasla oldukça küçüktür ve yüksek frekanslı uygulamalarda avantaj sağlar. Schottky kontaklarda potansiyel engel, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile yarıiletkenin elektron ilgisi arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu engel, yarıiletken tarafında bantların aşağı doğru bükülmesine yol açarak akım taşıyıcılarının hareketini düzenler. Sonuç olarak, Schottky kontaklar, doğrultma ve yüksek hızlı elektronik uygulamalar için kritik bir yapı taşıdır (Rhoderick, 1982).



Şekil 14. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontak. (a) Kontakdan önce, (b) Kontakdan sonra (denge durumu) (Kacuş, 2014).

Schottky kontaklarda metal ve n-tipi yarıiletken arasındaki denge durumunda, termal uyarılma ile yeterli enerjiye sahip bazı elektronlar potansiyel engeli aşarak metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçer. Bu geçişler sırasında, eşit büyüklükte ancak zıt yönlü doyma akımları (I_0) oluşur. Eğer yarıiletkene negatif bir potansiyel uygulanırsa, metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu yöndeki akım sabit kalır. Ancak yarıiletkenin iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri, uygulanan potansiyel nedeniyle 1 eV kadar yükselir. Bu durum, yarıiletkenden metale geçiş yapan elektronlar için engel yüksekliğini 1 eV kadar azaltır ve bu yöndeki akımı $\left(\frac{eV}{kT}\right)$ faktörüyle artırır (Kacuş, 2014). Bu durum Şekil 14’te gösterilmiştir.

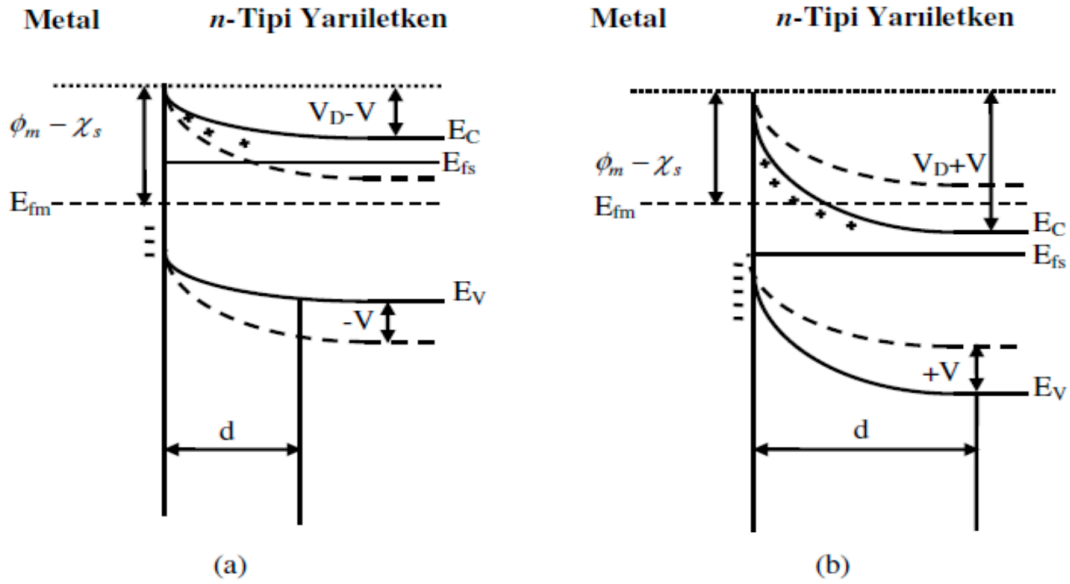
Net akım, Denklem (1) ile ifade edilmektedir. Burada I_0 , V , k ve T sırasıyla doyma akımı, uygulanan potansiyel, Boltzman sabiti ve mutlak sıcaklıktır.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Metal tarafındaki engel yüksekliği, uygulanan voltajdan bağımsız olduğu için sabit kalır. Ancak yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği, uygulanan potansiyelle doğru orantılı olarak değişir ve

sabit değildir. Bu farklılık, Schottky kontakların enerji bandı diyagramlarında gözlemlenebilir ve potansiyel farkına bağlı olarak yarıiletkenin davranışını doğrudan etkiler.

Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda, yarıiletken tarafına negatif bir voltaj ($V < 0$) uygulandığında, kontak doğru besleme durumundadır. Bu durumda, akım taşıyıcılarının metalden yarıiletkene geçişi kolaylaşır ve kontak üzerinden ileri yönde bir akım akışı gerçekleşir. Buna karşılık, yarıiletken tarafına pozitif bir voltaj ($V > 0$) uygulandığında, kontak ters besleme durumuna geçer. Bu durumda, potansiyel engeli artar ve yarıiletkenden metale akım akışı önemli ölçüde sınırlandırılır. Bu kutuplanma özellikleri, Schottky kontaklarının doğrultma işlevini sağlar ve bu tür kontakları elektronik devrelerde doğrultucu elemanlar olarak ideal hale getirir (Kacıuş, 2014). Bu durum Şekil 15'te verilmiştir.



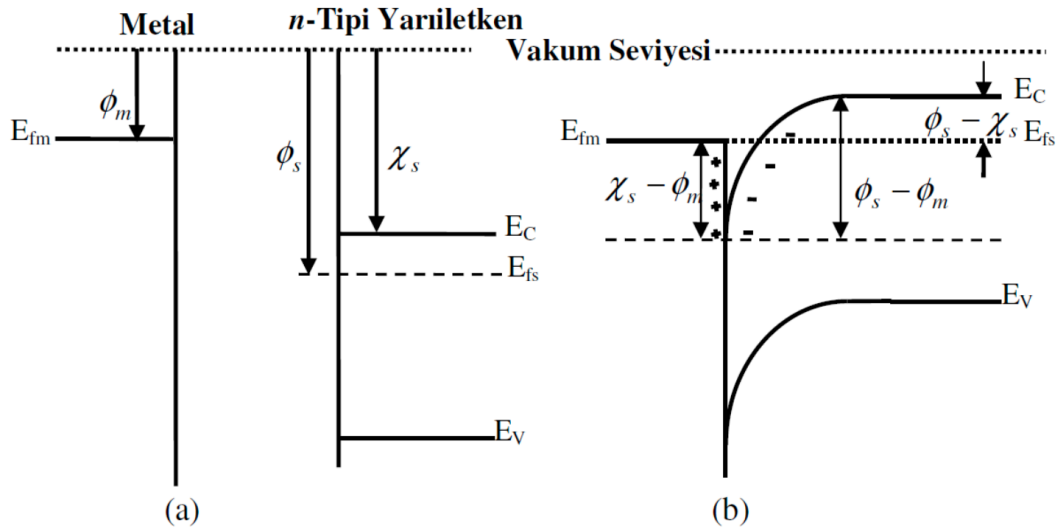
Şekil 15. Doğru beslem ve ters beslem altındaki metal/n tipi yarıiletken Schottky kontak, a) $V < 0$ durumunda enerji band diyagramı, b) $V > 0$ durumunda enerji band diyagramı (Kacıuş, 2014).

2.10.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Omik kontaklar, metal ile yarıiletken arasındaki akım taşıyıcıların her iki yönde de serbestçe hareket edebildiği düşük dirençli bağlantılardır. Bu tür kontaklar, özellikle n-tipi yarıiletkenlerde, yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) metalin iş fonksiyonundan (ϕ_m) büyük olduğunda ($\phi_s > \phi_m$) oluşur. Bu durumda, elektronlar metalden yarıiletken içerisine doğru akar ve bu akış, metal ve yarıiletken arasında termal denge sağlanana kadar devam eder. Termal

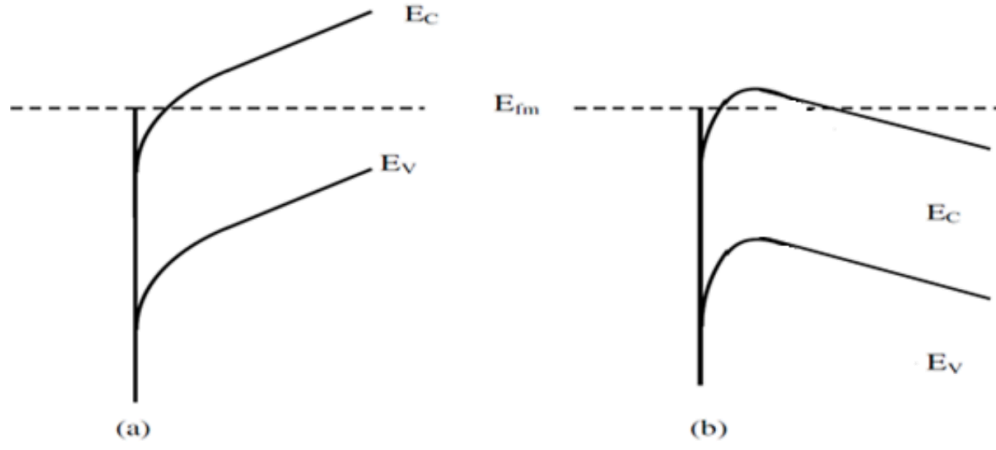
denge sağlandığında, metalde pozitif yüzey yükleri, yarıiletkenin uzay yük bölgesinde ise negatif yükler birikir. Böylece bir dipol tabakası oluşur (Deneuille vd., 1974).

Omik kontaklarda, uygulanan voltajla birlikte potansiyel farkı yalnızca belirli bir bölgede yoğunlaşmaz, aksine tüm yarıiletken gövdesine yayılır. Bu tür kontakların pratikte elde edilebilmesi için n-tipi yarıiletken yüzeyine metal buharlaştırılır ve belirli bir sıcaklıkta tavlansak yüzeyde elektron bakımından zengin bir n^+ tabakası oluşturulur. Bu tabaka, yarıiletkenin gövdesine göre daha fazla taşıyıcı içerir ve omik kontak oluşumunu destekler. Bu özellikler, akım taşıyıcıların etkili bir şekilde iletilmesini sağlayarak düşük dirençli bağlantılar oluşturur. Bu durum Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Metal/n tipi omik kontak, a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası ve dengede (Kacı, 2014)

Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklarda, yarıiletken tarafına negatif veya pozitif gerilim uygulandığında enerji-bant diyagramında belirgin değişimler meydana gelir. Negatif gerilim uygulandığında yarıiletkenin enerji bantları yukarı doğru kayar, bu da metalden yarıiletkene elektron akışını kolaylaştırır. Pozitif gerilim uygulandığında ise enerji bantları aşağı doğru kayar ve yarıiletken içerisinden metale doğru elektron akışı artar. Bu değişimler, omik kontakların düşük dirençli bir bağlantı sağlamasına olanak tanır ve yük taşıyıcılarının her iki yönde de etkin bir şekilde hareket etmesine olanak verir. Şekil 17'de bu durumun enerji-bant diyagramı verilmiştir.

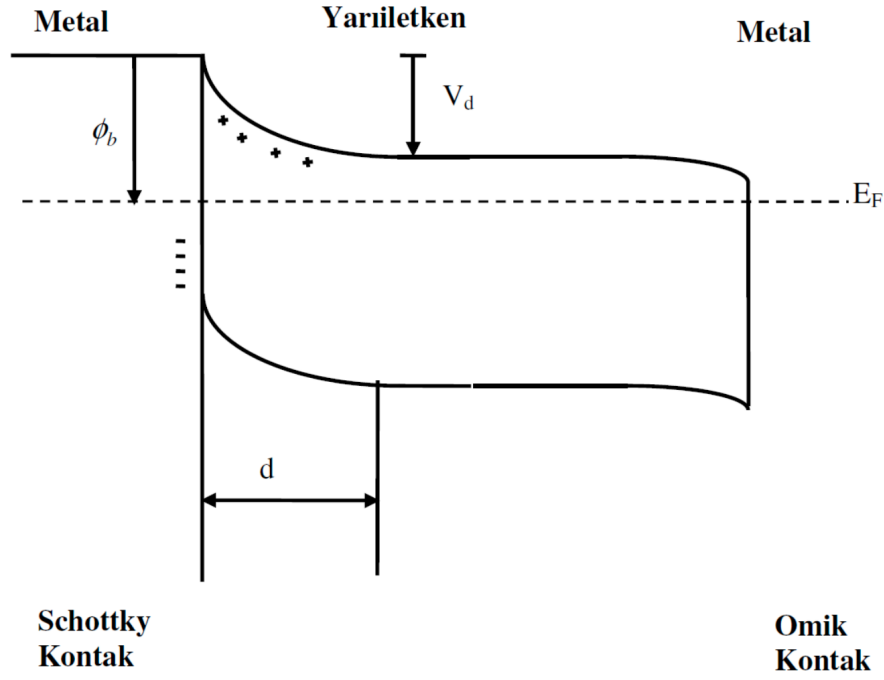


Şekil 17. Doğru beslem ve ters beslem altındaki metal/n tipi yarıiletken omik kontak enerji band diyagramları, a) $V < 0$ durumunda, b) $V > 0$ durumunda (Kacış, 2014).

2.10.3. Metal (omik) / n-tipi yarıiletken / metal (schottky) yapısı

n-tipi yarıiletkenin bir tarafında omik kontak, diğer tarafında ise Schottky kontak oluşturularak metal/n-tipi yarıiletken/metal yapısı elde edilir. Omik kontak tarafında, yarıiletken yüzeyinde elektron yoğunluğu artırılarak elektron bakımından zengin bir bölge (n^+) oluşturulur. Bu işlem genellikle metal buharlaştırma ve tavlama yöntemleriyle gerçekleştirilir. Schottky kontak tarafında ise, yarıiletken yüzeyine metal (M) buharlaştırılarak, metal-yarıiletken Schottky diyodu elde edilir. Bu yapı genel olarak n^+nM şeklinde gösterilir.

Termal denge durumunda bu yapının enerji-band diyagramı, metal ve yarıiletken arasındaki enerji seviyelerinin hizalanmasıyla oluşur. Enerji-band diyagramı, omik kontak tarafında potansiyel bariyerin düşük olduğunu, Schottky kontak tarafında ise belirgin bir bariyer olduğunu gösterir. Bu durum, taşıyıcıların omik kontak üzerinden kolayca iletilmesini sağlarken, Schottky kontak tarafında akımın yönüne bağlı olarak geçişin kontrol edilebilmesine olanak tanır. Şekil 18'de bu yapının enerji-band diyagramı detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir.



Şekil 18. Metal (omik)/n tipi yarıiletken/Metal (Schottky) yapısı enerji band diyagramı (Kacış, 2014)

n^+nM yapısı, karakteristik olarak diyot davranışı sergilediğinden bu yapılara Schottky diyotlar denir. Schottky diyotlarda akımın yönüne bağlı olarak farklı davranışlar gözlemlenir. Bu yapıyı düz beslemek için, omik kontak tarafına negatif bir voltaj ($V < 0$) uygulanmalıdır. Bu durumda, Schottky diyot ileri yönde iletim yapar ve akım kolaylıkla geçer. Ters besleme durumunda ise, omik kontak tarafına pozitif bir voltaj ($V > 0$) uygulanır. Bu voltaj, Schottky kontak tarafındaki bariyeri artırır ve akım geçişini sınırlar. Böylece, Schottky diyotun doğrultucu özelliği ortaya çıkar ve akım yalnızca belirli bir yönde geçebilir. Bu özellik, Schottky diyotları yüksek hızlı anahtarlama ve düşük ileri voltaj düşümü gerektiren uygulamalar için ideal hale getirir.

2.11. Termiyonik Emisyon Modeli ile Schottky Diyotta Akım İletimi

Termiyonik emisyon, yüksek sıcaklığa maruz kalan bir yüzeyden elektron veya boşlukların serbest hale gelme süreci olarak tanımlanır. Metal-yarıiletken diyotlarda bu teori, taşıyıcıların sahip oldukları termal enerji sayesinde metal ve yarıiletken arasındaki potansiyel bariyerleri aşarak hareket etmesine dayanmaktadır. Elektronların geçişi genellikle metal oksit/n-tipi yarıiletkenlerde, boşlukların geçişi ise metal oksit/p-tipi yarıiletkenlerde gerçekleşir (Zhang vd., 2022). Bu teoriye göre, termal uyarımla oluşan akım, çoğunluk taşıyıcılarının katkısı ile sağlanmaktadır. Potansiyel bariyer yüksekliği, termal enerjiden önemli ölçüde büyüktür

($q\phi_b \gg kT$). Boşlukların yarıiletken-metal geçişi, tükenme bölgesinde ihmal edilebilir seviyededir. Görüntü kuvvetleri, bariyer yüksekliğine olan etkisi açısından ihmal edilebilecek düzeydedir (Tung, 2014; Zhang vd., 2022).

Metalden yarıiletkene geçiş yapan elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu (J_{sm}), taşıyıcıların kinetik enerjileri ve metalin iş fonksiyonu ile ilişkilidir. Bu ilişki Denklem (2) ile tanımlanır. Burada $E_F + q\phi_b$ termiyonik emisyonun gerçekleşmesi için gerekli minimum enerji seviyesidir. V_x , elektronların metalden yarıiletken içerisine geçiş hızını belirleyen bileşendir, dn , belirli bir enerji aralığında bulunan taşıyıcı yoğunluğunu ifade eder.

$$J_{sm} = \int_{E_F+q\phi_b}^{\infty} qV_x dn \quad (2)$$

Bu bağıntıdan hareketle, metal/n-tipi yarıiletken temasında metalden yarıiletkene geçen elektron akım yoğunluğu Denklem (3) ile ifade edilir:

$$J_{ms} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp(-q(\phi_b)k_B T) \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (3)$$

veya daha yaygın kullanılan Richardson-Schottky denklemi formatında Denklem (4)'teki gibi ifade edilir. Burada, A^* , Richardson sabiti, k_B , Boltzmann sabiti ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), m^* , taşıyıcının etkin kütlesi, h , Planck sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s), T , mutlak sıcaklık (Kelvin), q , elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C), ϕ_b , bariyer yüksekliği ve V , uygulanan doğru gerilimdir.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_b)}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (4)$$

Elektronların metalden yarıiletkene geçişi, akım oluşumunun temel mekanizmasını sağlar. Bu akım, Denklem (5) ile ifade edilir.

$$J_{sm} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_b)}{k_B T}\right) \quad (5)$$

Toplam akım yoğunluğu, metalden yarıiletken içerisine ve yarıiletken içinden metale olan akımların toplamı olarak tanımlanır. Akımın metalden yarıiletkene doğru pozitif olarak kabul edilmesiyle Denklem (6)'daki gibi yazılabilir.

$$J_n = J_{sm} + J_{ms} \quad (6)$$

Bu ifade, Schottky diyot akım denklemi olarak da bilinen genelleştirilmiş termiyonik emisyon denklemi ile Denklem (7)'deki gibi formüle edilir.

$$J_n = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_b)}{k_B T}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1\right) \quad (7)$$

Özellikle düşük öngerilim değerlerinde, ters doyma akımı J_0 , Denklem (8)'deki gibi ifade edilir.

$$J_0 = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_b)}{k_B T}\right) \quad (8)$$

Bu model, Schottky diyotları ve metal-yarıiletken temas alanlarında elektron geçiş mekanizmasını açıklamak için kullanılan temel teorik çerçeveyi oluşturmaktadır.

2.11.1. İdealite faktörü (n)

İdealite faktörü (n), bir diyotun ideal davranıştan sapma derecesini gösteren boyutsuz bir parametredir. Teorik olarak, tamamen ideal bir diyotta bu faktör $n = 1$ olarak kabul edilir. Ancak, gerçek diyotlarda taşıyıcı yeniden birleşimi, ara yüzey etkileri ve malzeme kusurları nedeniyle idealite faktörü $n > 1$ olabilir.

Denklem (1)'e göre ileri öngerilim bölgesinde, $eV \gg kT$ olduğunda, denklemin içindeki "-1" terimi ihmal edilebilir. Bu durumda diyot akımı Denklem (9)'daki gibi sadeleşir.

$$I \cong I_0 \left(e^{\frac{eV}{n k T}}\right) \quad (9)$$

Bu ifadeyi doğal logaritmaya (\ln) alarak elde edilen türev ifadesi ile n Denklem (10)'dan hesaplanır.

$$n = \frac{e}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (10)$$

Denklem (10), n 'nin deneysel olarak belirlenmesini sağlar. Gerçek diyotlarda $n = 1$ olması beklenirken, 1'den büyük değerler, malzeme içinde taşıyıcı yeniden birleşimi veya ara yüzey

etkileri gibi ideallikten sapmaları gösterir. Gerçek Schottky diyotlarda n genellikle 1 ile 2 arasında değişirken, bazı özel malzemelerde daha yüksek değerlere ulaşabilir.

2.11.2. Bariyer yüksekliği (ϕ_b)

Metal-yarıiletken diyotlarda, temas bölgesinde bir potansiyel bariyer oluşur. Bu potansiyel farkı, elektronların hareketini kısıtlayarak akımın geçişini kontrol eden bir engel görevi görür. Bariyer yüksekliği (ϕ_b), diyotların elektriksel özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biridir.

Diyot üzerinden geçen akım Denklem (1)'de verilmiştir. Diyot karakteristiklerini belirlemek için I-V grafiği çizilir. Bu grafikte, doğru gerilim bölgesinde akımın logaritması alınarak doyma akımı I_0 belirlenebilir. $V = 0$ 'da, akımın dikey eksenini kestiği nokta doyma akımı olarak adlandırılır ve Denklem (11) ile hesaplanır.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e(\phi_b)}{kT}\right) \quad (11)$$

Bu ifadeden yola çıkarak, ϕ_b Denklem (12) ile hesaplanmaktadır. Burada A , diyot kontak alanı (cm^2) dır.

$$\phi_b = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (12)$$

Bu denklem, metal-yarıiletken temas noktalarında ϕ_b 'nin deneysel olarak belirlenmesini sağlar. Richardson-Schottky modeline göre, ϕ_b , diyotun malzeme özelliklerine ve metal-yarıiletken ara yüzeyinin elektron afinitesine bağlı olarak değişir.

2.12. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Cheung ve Cheung (1986), Schottky diyotların düz besleme $I - V$ karakteristiklerini kullanarak, diyot parametrelerinin belirlenmesine yönelik yeni bir analiz yöntemi önermiştir. Bu yöntem, termoiyonik emisyon teorisine dayalı akım yoğunluğu denklemini temel alır ve diyotun farklı parametrelerini elde etmeyi kolaylaştırır. Aşağıda bu yöntemin temel unsurları ve hesaplama süreci detaylandırılmıştır:

Termoionik emisyon teorisine dayalı akım yoğunluğu ifadesi, diyotun etkin alanı A ile çarpıldığında, diyottan geçen toplam akım, n 'nin dikkate alınması durumunda Denklem (13)'deki gibi ifade edilir.

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (13)$$

Eğer $eV \gg kT$ koşulu sağlanıyorsa, Denklem (13)'teki “-1” terimi ihmal edilebilir. Ancak, gerçek uygulamalarda uygulanan gerilimin tamamının deplasyon bölgesine düşmediği göz önüne alındığında, belirli sapmaların meydana geldiği söylenebilir. Bu sapmaları açıklamak için, n kullanılmalıdır. Böylece, Denklem (13)'te verilmiş olan akım ifadesi Denklem (14)'teki gibi düzenlenebilir.

$$I = A.J = \left[AA^* \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (14)$$

Uygulanan gerilim V 'nin bir miktarı (IR_s) seri direnç bölgesine düşeceği için, V yerine $V - IR_s$ yazılarak Denklem (15) oluşturulabilir.

$$I = A.J = \left[AA^* \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (15)$$

Denklem (15)'den Denklem (16) elde edilmektedir.

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (16)$$

Denklem (16)'nın $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa Denklem (17) elde edilmektedir.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (17)$$

Denklem (17)'deki $dV/d(\ln I)$ 'nin I 'ya göre grafiği bir doğru olacaktır. Bu grafikten elde edilen doğrunun eğimi, nötral bölge direncini veya R_s seri direncini temsil eder. Ayrıca, bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan n hesaplanabilir. ϕ_b 'yi belirleyebilmek için şu adımlar takip edilebilir.

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (18)$$

Denklem (18)'deki gibi bir fonksiyon tanımlanabilir ve Denklem (16) ve (17)'den, Denklem (19) oluşturulmaktadır.

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (19)$$

Denklem (19)'dan $H(I) - I$ grafiği çizildiğinde bir doğruyu verecektir ve bu doğrunun eğimi R_s 'yi vermektedir. Ayrıca, bu doğrunun $H(I)$ eksenini kesen nokta ϕ_b 'yi vermektedir.

2.13. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Metal-yarıiletken kontaklarda, yüksek seri direnç durumunda fiziksel parametrelerin belirlenebilmesi için üretilen analiz yöntemlerinden biri de Norde tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem $n = 1$ durumu için R_s ve ϕ_b 'yi tanımlayan $F(V)$ fonksiyonudur. Norde'nin yöntemi, seri direnç ve engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olmadığı durumlarda geçerlidir ve yalnızca bir sıcaklıkta alınan $I - V$ verilerine ihtiyaç duymaktadır (Norde, 1979).

Norde, ϕ_b ve R_s hesaplanmasında yeni bir yöntem önermiştir. Norde fonksiyonu Denklem (20)'de verilmiştir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (20)$$

Burada γ ve $I(V)$ sırasıyla, n değerinden büyük olan ilk tamsayı değeri ve $I - V$ grafiğinin eğiminden elde edilen akım değeridir. Bu yöntemden türetilen ϕ_b Denklem (21)'de verilmiştir.

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (21)$$

$F(V_0)$, $F - V$ grafiğinin minimum $F(V)$ değeri, V_0 ise bu değere karşılık gelen gerilim değeridir.

Bu metottan elde edilen R_s değeri Denklem (22)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI} \quad (22)$$

2.14. Fotodiyotlar için Kapasite – Voltaj (C-V) Karakteristiği

Schottky diyotlar ve pn eklemler gibi diyotların $C - V$ ölçümleri, cihazların yapısı ve parametreleri hakkında önemli bilgiler sağlar. $C - V$ ölçümleri, uygulanan DC gerilimi altında ara yüzeydeki faz kaymalarını ölçer ve bu nedenle, yarıiletkenin deplasyon bölgesindeki yük dağılımlarını anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Simetrik olmayan $I - V$ karakteristiği sergileyen pn eklemleri ve Schottky diyotlarda, ters beslem altında deplasyon bölgesinin kapasitesi ölçülerek net safsızlık konsantrasyonları belirlenebilir. Bu analiz, cihazların elektriksel özelliklerini anlamak ve malzeme parametrelerini değerlendirmek için sıkça kullanılan bir yöntemdir (Aydoğan, 2015).

$C - V$ ve $G - V$ ölçümleri n-Si için Denklem (23) kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada ϵ_s , ϵ_0 , V_d ve N_d , k , T sırasıyla yarıiletken dielektrik sabiti (Si için $\epsilon_s=11,8$), boşluğun elektriksel geçirgenliği ($8,85 \times 10^{-14}$ F/cm), difüzyon potansiyeli, iyonize olmuş donör konsantrasyonu, Boltzmann sabiti ($8,625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve Kelvin sıcaklıktır.

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{1/2} \quad (23)$$

Denklem (23) n-Si için düzenlendiğinde Denklem (24) elde edilmektedir. Buradaki V uygulanan gerilimdir.

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (24)$$

Hesaplamalar sonucunda, $C^{-2} - V$ grafiği çizilir ve bu grafiğe uygun bir lineer fit yapılır. Bu işlemin ardından, $C^{-2} = 0$ olduğu durumda, $V_d = V$ ilişkisi elde edilir. Böylece, sonuç olarak V_d değeri belirlenmiş olur.

Denklem (24)'ün V 'ye göre türevi alınırsa n-Si için Denklem (25) elde edilir.

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (25)$$

Bu ifadeden N_d çekilirse Denklem (26) elde edilmiş olur.

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (26)$$

Termal denge halinde n-tipi yarıiletkenin elektron konsantrasyonu Denklem (27)'de verilmiştir.

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (27)$$

Buradaki N_c , iletkenlik bandındaki hal konsantrasyonudur ($2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). n-tipi yarıiletkenler için $N_d \gg n_i$ olacağından $n_0 \cong N_d$ olacaktır (Neamen, 1992). Burada n_i , asal elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alınırsa Denklem (28) elde edilir.

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (28)$$

Denklem (28)'in tabii logaritması alınır ve $E_c = 0$ kabul edilirse fermi enerji seviyesi n-Si için Denklem (29) ile hesaplanmaktadır.

$$E_F = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (29)$$

Ayrıca $C - V$ grafiğinden elde edilen bariyer yükseklikleri Denklem (30)'daki gibi hesaplanmaktadır (Neamen, 1992).

$$\phi_b = E_F + V_d \quad (30)$$

Denklem (30) ideal diyotlar için geçerli olan bir ifadedir. İdeal olmayan diyotlar için fermi enerjisi Denklem (31)'deki gibi hesaplanmaktadır. Sonuç olarak hesaplanan engel yüksekliği değerleri, "düzeltilmiş engel yükseklikleri" olarak adlandırılır. Bu noktada, n değeri, $I - V$ grafiğinden elde edilen n 'yi temsil etmektedir.

$$\phi_b = \frac{V_d}{n} + E_F \quad (31)$$

Schottky diyot yapısını analiz etmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, Nicollian ve Brews yöntemi tercih edilmiştir (Nicollian ve Brews, 2012). Gerilime bağlı direnç (R_i) değerlerini belirlemek amacıyla, bu yöntem ile gerilim aralığındaki tüm R_i değerleri

hesaplanmıştır. Ardından, güçlü birikim bölgelerinde ölçülen kapasitans (C_m) ve kondüktans (G_m) değerleri ilgili denklemde kullanılarak gerçek seri direnç (R_s) değerleri elde edilmiştir (Aydoğan vd., 2022).

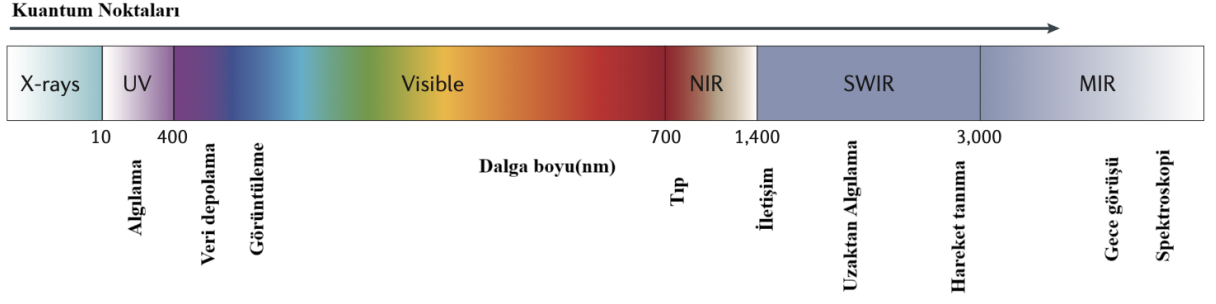
R_s değerlerinin hesaplanması için ölçülen G_m ve C_m değerleri kullanılır ve Denklem (32) ile elde edilir (Orak vd., 2017). Burada ω , C_m ve G_m sırasıyla, açısal hız ($2\pi f$), $C - V$ grafiklerindeki maksimum C değeri ve $G - V$ grafiklerindeki maksimum G değeridir.

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (32)$$

2.15. Fotodedektörler

Fotodedektörler, ışık sinyallerini elektrik sinyallerine dönüştürebilen modern teknolojilerin temel bileşenlerindedir (Yang vd., 2021; Yang vd., 2023). Bu cihazlar, görüntüleme, çevresel izleme, optik iletişim, askeri ve güvenlik uygulamaları gibi birçok alanda kritik bir rol oynar (Vuuren vd., 2016; Zhou vd., 2022; Mueller vd., 2010; Yan vd., 2018). Çoğu optoelektronik sistemin performansı, fotodedektörlerin işlevselliğine bağlı olduğundan, düşük karanlık akım, yüksek hassasiyet, kısa tepki süresi ve düşük gürültü gibi özellikler büyük önem taşır. Ayrıca, düşük üretim maliyetleri, uzun kullanım ömrü ve dayanıklılık gibi pratik uygulamalara yönelik gereksinimler de göz önünde bulundurulmalıdır (Bielecki vd., 2022).

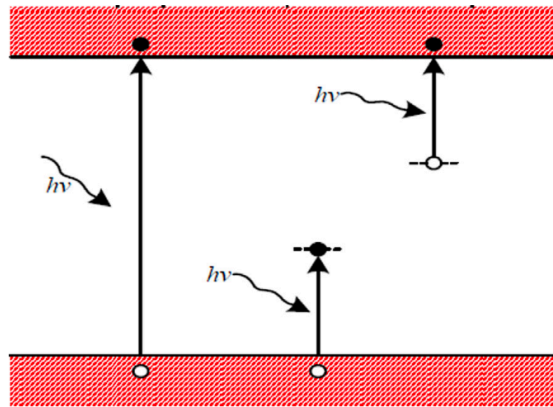
Fotodedektörler, elektromanyetik spektrumun UV, görünür ve IR gibi farklı dalga boyu aralıklarında çalışır ve p-i-n, p-n, Schottky engelli fotodiyotlar gibi çeşitli yarıiletken yapılardan üretilir (Bonifacio ve Pires, 2019; Tian vd., 2017). Bu çeşitlilik, farklı malzemelerin bant aralıklarına bağlıdır. Örneğin, IR dedektörleri fiber optik iletişimde, görünür ışık algılayıcıları günlük uygulamalarda, UV dedektörleri ise biyolojik analiz ve astronomik araştırmalarda yaygın olarak kullanılır (Fang vd., 2020). Elektromanyetik spektrum üzerindeki bu uygulamalar Şekil 19'da gösterilmektedir.



Şekil 19. Elektromanyetik spektrum ve fotodedektör uygulamaları (Garcia de Arquer vd., 2017).

Geleneksel fotodedektörler genellikle belirli bir dalga boyu aralığında çalışır. Örneğin, silikon tabanlı fotodedektörler, yalnızca görünür ve yakın kızılötesi ışığı algılayabilir (Berencen vd., 2017; Casalino vd., 2012). Çok bantlı algılamanın gerektiği durumlarda, bu cihazların birden fazla dedektörle desteklenmesi gerekir, bu da sistem karmaşıklığını artırır. Özellikle iletişim, tıbbi görüntüleme ve savunma gibi alanlarda, geniş dalga boyu aralıklarında çalışabilen ve performansı artıran yeni nesil fotodedektörlere ihtiyaç duyulmaktadır (Lian vd., 2024).

Fotodedektörlerin temel çalışma prensibi, ışığın (fotonların) elektriksel bir sinyale dönüştürülmesine dayanır. Fotodedektör yüzeyine gelen fotonlar, eğer enerjileri malzemenin bant aralığından büyükse, bir elektron valans bandından iletim bandına uyarılarak elektron-boşluk çiftleri oluşturur (Şekil 20). Bu taşıyıcılar, p-n bağlantısı veya Schottky bariyeri gibi elektrik alanlar yardımıyla ayrılarak elektrik akımı oluşturur. Oluşan akımın büyüklüğü, gelen ışığın yoğunluğu ile doğru orantılıdır ve bu sinyal amplifikasyon devreleri ile ölçülebilir hale getirilir (Rogalski, 2003; Bielecki vd., 2022).



Şekil 20. Fotodedektörlerin çalışma prensibi (Aleie vd., 2015)

Fotoelektrik dönüşüm süreçleri, yük taşıyıcılarının oluşumu, ayrılması, taşınması ve toplanması olmak üzere dört temel adımdan oluşur (Ouyang vd., 2019). Bu süreçlerin etkin bir şekilde optimize edilmesi, fotodedektörlerin hassasiyetini artırırken tepki süresini kısaltır ve gürültüyü azaltır.

2.16. Fotodedektör Parametreleri

Bir fotodedektörün elektriksel performansını analiz ederken dikkate alınması gereken bir dizi önemli parametre bulunmaktadır. Bu parametreler arasında, fotoakım düzeyleri, fotodedektörün duyarlılığını ifade eden R (responsivity), aygıtın açma/kapama (on/off) oranı, ışık algılama yeteneğini temsil eden D^* (detectivity), gürültü eşdeğer gücü olarak bilinen NEP (Noise equivalent power), aydınlık ve karanlık akım oranlarının normalize edilmiş değerlerini tanımlayan NPDR (Normalized photocurrent to dark current ratio), ve harici kuantum verimliliği olarak adlandırılan EQE (external quantum efficiency) yer almaktadır.

2.16.1. Fotoakım (I_{foto})

I_{foto} , aydınlıkta ($I_{aydınlık}$) ve karanlıkta ($I_{karanlık}$) ölçülen değerler arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır ve fotoakım olarak adlandırılmaktadır. Fotoakım Denklem (33)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$I_{foto} = I_{aydınlık} - I_{karanlık} \quad (33)$$

2.16.2. Duyarlılık (R)

Fotodedektörlerde karanlık akım, malzemeyle ilgili doyma akımını, dedektör yüzeyinde oluşan sızıntı akımını ve tükenme tabakasının rekombinasyon merkezinde oluşan elektron veya boşluk akımını içerir. Karanlık akımın miktarı, aygıtın ortam sıcaklığı ve uygulanan doğru besleme voltajının değeri gibi faktörlerle yakından ilişkilidir. Karanlık akımın varlığı atış gürültüsüne neden olur ve atış gürültüsü alınan sinyalin sinyal-gürültü oranını ve hassasiyetini doğrudan etkiler. Bu nedenle, fotodedektörler için karanlık akımın daha düşük olması daha iyi bir aygıt performansı elde etmek için çok faydalıdır.

R , fotodedektör tarafından üretilen fotoakımın etkin gelen ışığı gücüne oranıdır. Bu parametre, aygıtın ışık radyasyon enerjisine olan duyarlılığını karakterize etmek için kullanılır. Duyarlılık, matematiksel olarak bir birim olay ışığı gücü tarafından üretilen fotoakım olarak tanımlanır ve

birimi A/W olarak yazılabilir. Denklem (34) bu ilişkiyi açıklar (Dai vd., 2024). Burada P , ışık gücü (mW/cm^2), A ise etkin alandır ($A = 0,00785 \text{ cm}^2$).

$$R = \frac{I_{foto}}{P \cdot A} \quad (34)$$

2.16.3. Açık / kapalı (On/Off) oranı

Fotoakım/karanlık akım oranı, fotodetektörün bir diğer önemli parametresidir ve bu parametreye fotodetektörün açma-kapama oranı denir (Denklem (35)). Bu değer, dedektörün ışığın varlığında veya yokluğunda sinyalleri ayırt etme yeteneğini karakterize eder.

$$\frac{On}{Off} = \frac{I_{aydınlık}}{I_{karanlık}} \quad (35)$$

Yüksek bir On/Off , aygıtın optik performansının yüksek olduğunu ve karanlık ile aydınlık sinyallerin etkili bir şekilde algılandığını göstermektedir (Song vd., 2021).

2.16.4. Spesifik algılayıcılık (D^*)

Bir fotodetektörün düşük ışık seviyesindeki sinyalleri algılama yeteneği, "spesifik algılayıcılık" olarak adlandırılır (Denklem (36)). D^* ile gösterilmektedir. Birimi $\text{cmHz}^{-1}\text{W}^{-1}$ (Jones) olarak yazılır (Yıldırım vd., 2023). Algılayıcılık ne kadar yüksek ise fotodetektörün performansı o kadar iyidir (Alaie vd., 2015).

$$D^* = R \sqrt{\frac{A}{2qI_{karanlık}}} \quad (36)$$

2.16.5. Gürültü eşdeğer gücü (NEP)

Bir fotodetektörün hassasiyetini belirleyen temel niceliklerden birisi de NEP 'dir. NEP , fotodetektördeki gürültü kaynaklarının ürettiği güçtür ve $\text{W/Hz}^{1/2}$ birimiyle ifade edilir (Denklem (37)) (Yıldırım vd., 2023).

$$NEP = \frac{\sqrt{A}}{D^*} \quad (37)$$

2.16.6. Normalize edilmiş fotoakımın karanlık akım oranı (NPDR)

NPDR, ışığın gücünden bağımsız olarak normalize edilmiş halidir. Birimi $1/W$ 'dır. *NPDR* düşük karanlık akımlarda yüksek değerler almaktadır (Yıldırım vd., 2024).

$$NPDR = \frac{I_{aydınlık}/I_{karanlık}}{P} \quad (38)$$

2.16.7. Harici kuantum verimliliği (EQE)

EQE, gelen fotona karşılık üretilen elektron-boşluk çiftlerinin miktarı olarak tanımlanabilir. *EQE* parametresi verimliliği % olarak ifade edilmektedir. Kuantum verimliliğinin hesaplama formülü aşağıda gösterilmiştir (Richter vd., 2017). Burada, c ve λ sırasıyla ışık hızı ve dalga boyudur.

$$EQE = \frac{Rhc}{\lambda q} \quad (39)$$

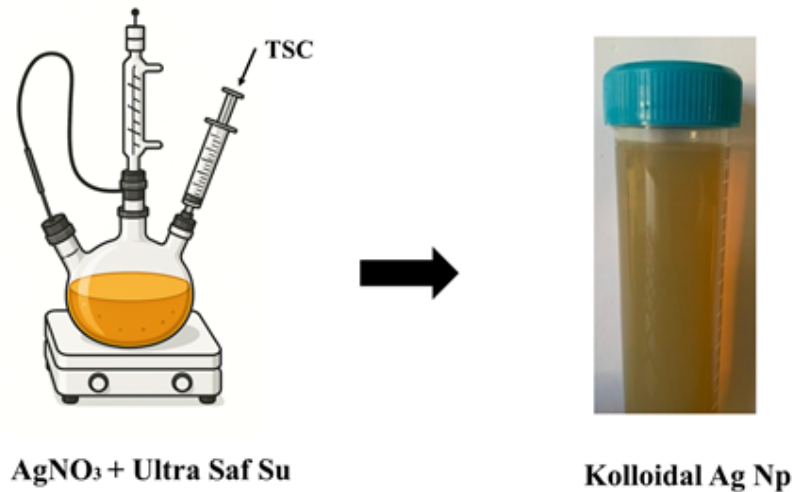
3. YÖNTEM

3.1. Ag@Cu_xO Çekirdek/Kabuk Nanokompozitlerin Sentezi

Ag@Cu_xO çekirdek/kabuk nanokompozitlerinin sentezi için üç ayrı çözelti hazırlanmıştır. İlk olarak, 1 gr triasodyum sitrat (TSC), 100 gr olana kadar ultra saf su ile seyreltilmiş ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra, 3,5 gr hidrazin, 10 gram olana kadar ultra saf su ile seyreltilmiş ve iyice karıştırılarak çözünmesi sağlanmıştır. Son olarak, 483,2 mg Cu(NO₃)₂·3H₂O, 200 ml ultra saf su ile karıştırılarak tamamen çözülmüştür. Hazırlanan çözeltiler, karanlık bir ortamda ve +4 °C'de muhafaza edilmiştir.

3.1.1. Ag Np'lerin sentezi

Ag nanoparçacıklar, ıslak kimyasal bir yöntem kullanılarak sentezlenmiştir. Bu süreçte, indirgeyici madde olarak TSC kullanılmıştır. Sentez işlemine, 36 mg AgNO₃'nin üç boyunlu bir balona eklenmesi ve 200 ml ultra saf suyun ilavesiyle başlanmıştır. Reaksiyon için geri soğutucu bir sistem kurulmuş ve çözelti 90 °C'de reflüks yapılarak 350 rpm hızında karıştırılmıştır. Daha sonra sistemin sıcaklığı 85 °C'ye ayarlanmıştır. Önceden hazırlanmış TSC çözeltisinden 4 ml alınarak hızla çözeltilere eklenmiş ve karışım 40 dakika boyunca bekletilmiştir. Bu süre zarfında, sarı-yeşil bir renk oluşumu gözlemlenmiştir. Sürecin sonunda, kolloidal Ag Np'ler başarıyla elde edilmiştir. Elde edilen kolloidal Ag Np'ler, +4 °C'de ve karanlık bir ortamda muhafaza edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 21'de gösterilmektedir.



Şekil 21. Ag Np'lerin sentezi

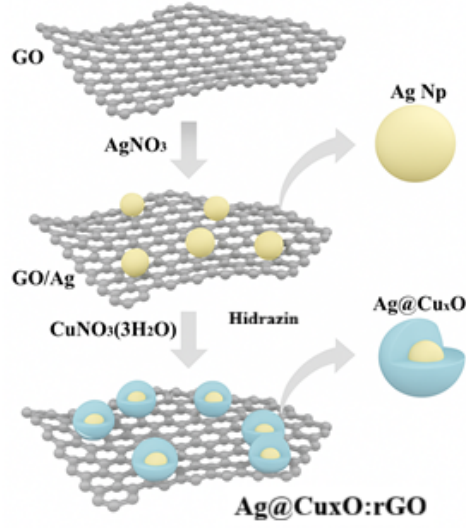
3.1.2. Ag@Cu_xO sentezi

Daha önce hazırlanmış olan bakır çözeltisinden 50 ml alınmış ve çözeltiliye 1 gr PVP ilave edilmiştir. Ardından, önceden hazırlanan koloidal Ag Np'den 20 ml çözeltiliye eklenmiştir. Bu karışım, 300 rpm hızında 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Son aşamada, daha önce hazırlanmış olan hidrazin çözeltisinden 68 µl alınarak çözeltiliye eklenmiş ve karışım 90 saniye boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen ürün, 10.000 rpm hızında santrifüjlenerek iki kez ultra saf su ile yıkanmış ve sonrasında tekrar ultra saf su içinde yeniden dağıtılmıştır.

3.1.3. Ag@Cu_xO:rGO sentezi

10 mg GO, 1 ml ultra saf suda karıştırılarak GO çözeltisi hazırlanmıştır. Ardından, 36 mg AgNO₃, üç boyunlu bir balona eklenmiş ve üzerine 200 ml ultra saf su ilave edilmiştir. Elde edilen karışım bir süre karıştırıldıktan sonra, hazırlanan GO çözeltisinden 10 µl çözeltiliye eklenmiştir. Bu karışım, 20 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra geri soğutucu sistem kurulmuş ve çözelti 90 °C'de reflüks yapılmıştır. Aynı anda, çözelti 350 rpm hızında karıştırılmaya devam edilmiştir. Sistem sıcaklığı daha sonra 85 °C'ye ayarlanmış ve önceden hazırlanmış TSC çözeltisinden 4 ml alınıp çözeltiliye hızlı bir şekilde ilave edilmiştir. TSC hem Ag⁺'nin Ag⁰'a indirgenmesini hem de GO'nun rGO'ya indirgenmesini sağlamaktadır. Karışım, 40 dakika boyunca bekletilmiş ve bu süreçte sarı-yeşil bir renk oluşumu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, Ag:rGO koloidal nanoparçacıklar başarıyla elde edilmiştir. Elde edilen koloidal Ag:rGO nanoparçacıklar, +4 °C'de ve karanlık bir ortamda saklanmıştır.

Devamında, önceden hazırlanmış olan bakır çözeltisinden 50 ml alınmış ve çözeltiliye 1 gr PVP eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan koloidal Ag:rGO çözeltisinden 20 ml alınarak karışıma ilave edilmiştir. Bu çözelti, 300 rpm'de 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Son aşamada, önceden hazırlanan hidrazin çözeltisinden 68 µl alınarak karışıma eklenmiş ve çözelti 90 saniye boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen ürün, 10.000 rpm'de santrifüjlenerek iki kez ultra saf su ile yıkanmış ve ardından tekrar ultra saf su içinde dağıtılmıştır. Şekil 22, Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerinin sentez aşamalarını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 22. Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin sentezi

3.1.4. Silisyumun Kimyasal Temizleme Adımları ve Amaçları

RCA temizliği, 1965 yılında Radio Corporation of America (RCA) tarafından geliştirilen, silisyum yüzeyindeki kirleticileri, organik kalıntıları ve metal iyonlarını gidermek için kullanılan bir temizleme prosedürüdür (Kern, 1990). İki ana aşamadan oluşur:

RCA1 (SC-1 - Standard Clean)

Bileşimi: H₂O : H₂O₂ : NH₃ (6:1:1)

Amaç: Organik kirleri ve partikülleri uzaklaştırmak.

Etki: Yüzeyi hidrofilik hale getirir.

RCA2 (SC-2 - Standard Clean 2)

Bileşimi: H₂O : H₂O₂ : HCl (6:1:1)

Amaç: Metal iyonlarını temizlemek.

Etki: Yüzeyi saf hale getirir ve metal kontaminasyonunu azaltır.

Tablo 3'te silisyumun kimyasal temizleme adımları verilmiştir.

Tablo 3.Silisyumun kimyasal temizleme adımları

Adım	Kimyasal işlem	Amaç
1	Aseton'da ultrasonik yıkama (10 dk)	Yağ, organik kirleticiler ve bazı partiküllerin uzaklaştırılması
2	Metanol'de ultrasonik yıkama (10 dk)	Aseton kalıntılarının uzaklaştırılması, yüzeyin daha temiz hale getirilmesi
3	Deiyonize (DI) su ile yıkama	Çözücü kalıntılarının giderilmesi
4	RCA1 (H ₂ O:H ₂ O ₂ :NH ₃ ; 6:1:1) 60°C'de 10 dk kaynatma	Organik kirleticilerin ve partiküllerin temizlenmesi, yüzeyin hidrofilik hale getirilmesi
5	Seyreltik HF (H ₂ O:HF; 10:1) ile 30 sn yıkama	Silisyum yüzeyindeki doğal oksit tabakasının (SiO ₂) uzaklaştırılması
6	RCA2 (H ₂ O:H ₂ O ₂ :HCl; 6:1:1) 60°C'de 10 dk kaynatma	Metal iyonlarının (Fe, Al gibi) giderilmesi ve yüzeyin temizlenmesi
7	Deiyonize su ile yıkama	RCA2 işleminden sonra kalan kimyasal kalıntıların uzaklaştırılması
8	Seyreltik HF (H ₂ O:HF; 10:1) ile 30 sn yıkama	Son oksit tabakasının temizlenmesi ve yüzeyin hidrojenle kaplanması
9	Deiyonize suda 15-20 dk yıkama ve azot gazı ile kurutma	Son kalıntıların giderilmesi ve yüzeyin kuru ve temiz hale getirilmesi

3.2. Omik Kontakt Eldesi

Alüminyum (Al), n-tipi silisyum ile temas ettiğinde yüksek taşıyıcı konsantrasyonu nedeniyle omik kontakt oluşturur. Termal buharlaştırma yöntemi, ince ve homojen bir metal tabakası elde etmek için yaygın olarak kullanılır. n-tipi yarıiletkenin mat yüzeyine Al metali, 10⁻⁷ Torr basınçla kaplanmıştır. Tavlama işlemi sırasında Al-Si ara yüzeyinde alaşım oluşumu gerçekleşir, bu da temas direncini düşürerek elektron akışını kolaylaştırır. 580 °C'de yapılan kısa süreli tavlama (3 dakika), metalin silisyum yüzeyiyle güçlü bir bağ oluşturmasını sağlar ve stabil bir elektriksel temas elde edilir. Tavlama sırasında azot gazı atmosferi kullanılmasının amacı, oksitlenmeyi önlemektir. Bu yöntem, yarıiletken aygıt üretiminde düşük temas direnci sağlayan güvenilir ve tekrarlanabilir bir omik kontakt oluşturmak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir.

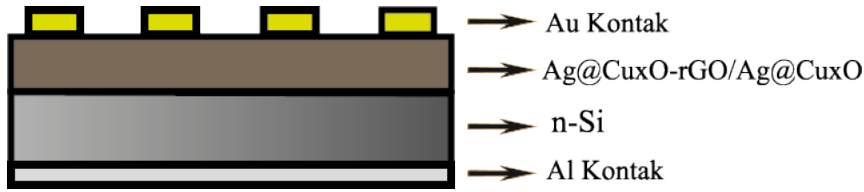
3.3. Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO Heteroeklemlerin Üretimi

Omik kontakt işlemi tamamlanan n-Si numunesinin parlak yüzeyine Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO ince filminin kaplama işlemi için damlatma yöntemi kullanılmıştır. Her seferinde 60 µl olmak üzere koloidal Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO, n-Si üzerine damlatıldı ve Ag Np'lerin oksitlenmemesi amacıyla UV lamba altında kurutuldu. Bu işlem 4 kez tekrarlandı. Ayrıca sentezlenen koloidal malzemelerin XRD ve SEM ölçümlerinin yapılabilmesi için de damlatma yöntemi kullanıldı. 1×1 cm boyutlarında camlar kesildi ve

temizlendi. Yine her seferinde 60 µl olmak üzere çözeltilerden cam üzerine damlatıldı ve UV lamba altında kurutuldu. Bu işlem 10 kez tekrarlandı.

3.4. Metalik Kontak Oluşturulması

Optiksel analizleri tamamlanan elektronik aygıtların metalik kontaklarını oluşturmak amacıyla, $Ag@Cu_xO$ ve $Ag@Cu_xO:rGO$ üzerine Au metali kaplanmıştır. Bu işlem, omik kontak oluşumundaki gibi yaklaşık 10^{-7} Torr vakum basıncında, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aygıtların şematik gösterimi Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23. Al/n-Si/Ag@Cu_xO/Au ve/veya Al/n-Si/Ag@Cu_xO:rGO/Au aygıtının şematik gösterimi

3.5. Karakterizasyon

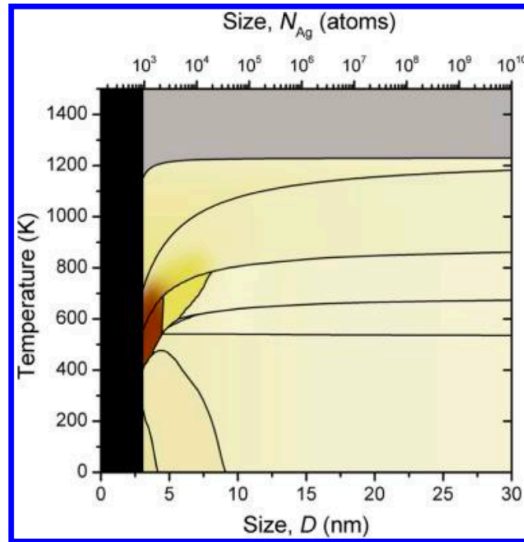
Sentezlenen çekirdek@kabuk nanokompozitlerin optik absorbans spektrumları Perkin Elmer marka UV-VIS cihazı ile belirlenmiştir. Faz analizleri Cu-K_α radyasyonu ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, 45 mV ve 40 mA) kullanılarak 10°-90° açıları arasında PANanalytical-Empyrean marka X ışını difraktometresiyle (XRD) yapılmıştır. Yüzey morfolojileri, FEI Quanta 450 marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve Tecnai G2 F30 marka kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca enerji dağılımı X ışını spektrometresi (EDS) ile incelenmiştir. Elemental analizler, Thermo Scientific-K_α marka monokromik Al K_α X ışını kaynağı kullanılarak X ışını fotoelektron spektrometresi (XPS) kullanılarak yapılmıştır. Kompozit malzemelerin geçirimli elektron mikroskopu (TEM) görüntüleri Tecnai G2 F30 marka cihazla ölçülmüştür.

4.BULGULAR

4.1. UV-VIS Analizi

Optik absorbans spektrumlarını ölçerek Ag Np oluşumunu belirlemek mümkündür. Parçacıkların boyutu ve en boy oranı, emilen ışığın dalga boyunu büyük ölçüde etkiler. Boyutlardaki farklılıklar her çözümün farklı bir renge sahip olmasına neden olur. Plazmonik Np'lerin canlı renkleri, her bir nanoparçacığın yüzeyindeki iletim elektronlarının belirli bir dalga boyunda ışıkla uyarıldığında titreşmesi nedeniyle oluşur. Bu titreşimler, parçacık boyutu ve şekli değiştirilerek ayarlanabilecek son derece parlak renklerle sonuçlanır (Shenashen vd., 2014).

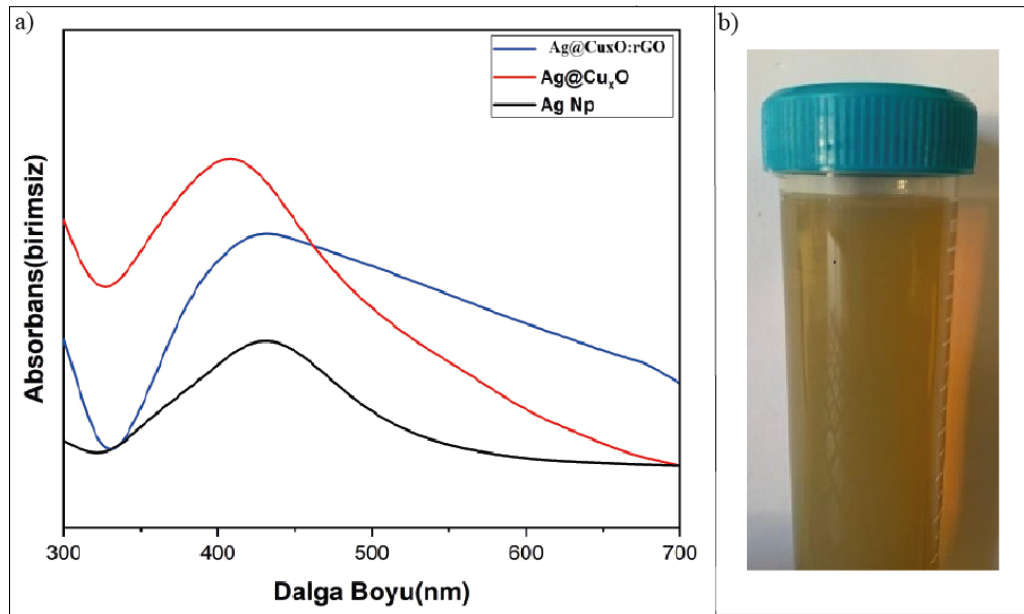
Şekil 24'te farklı boyutlarda ve sıcaklıklarda Ag Np'lerin kolloidlerinin renk haritası gösterilmektedir. Renkler, tüm numuneler için aynı hacim konsantrasyonu dikkate alınarak hesaplanmıştır. Renk haritasının tüm boyut ve sıcaklık aralığı için, parlak sarı ton ve koyu kırmızı rengin olduğu küp ve tetrahedronun hakim olduğu bölge dışında, açık sarı renk görülmektedir. Yönlü küresel şekillerin spektrumları arasındaki benzerlikler ile küp ve tetrahedronun spektrumları arasındaki farklılıklar nedeniyle bu beklenmedik bir durum değildir (Gonzalez vd., 2014).



Şekil 24. Kolloidal Ag Np'lerin numunesinin yapısı/optik haritası. (Gonzalez vd.2014).

Şekil 25a'da Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO kolloidal çekirdek@kabuk nanokompozitlerin UV-Vis absorpsiyon spektrumları, Şekil 25b'de ise 1mM konsantrasyonla

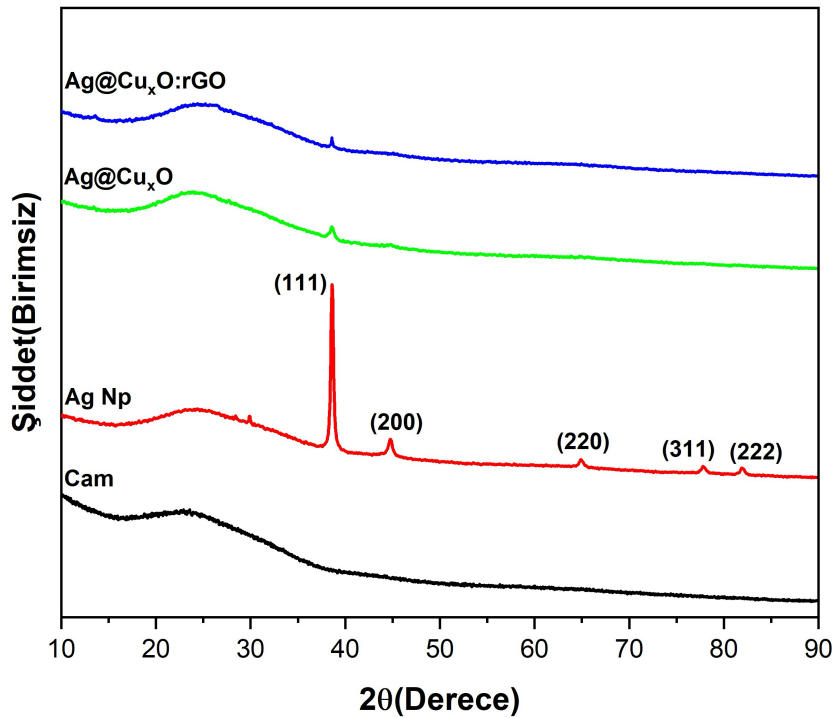
sentezlenen Ag Np'lerin görüntüsü verilmiştir. Sentezlenen kolloidallerin absorpsiyon zirvesi sırasıyla 430 nm, 410 nm ve 423 nm'dir. Üretilen Ag Np'lerin rengi ve 430 nm'deki yüzey plazmon rezonansı pikinin varlığı literatürle karşılaştırıldığında küresel Ag Np'lerin varlığını gösterir (Chovdhuri vd., 2016; Yosuf vd., 2017). Sentezlenen Ag Np'lerin rengi literatürle uyum içindedir. Spektrumlara bakıldığında Ag Np ve Ag@Cu_xO arasında 20 nm'lik, Ag Np ve Ag@Cu_xO:rGO arasında 7 nm'lik bir kayma gözlemlenmektedir. Bu durum bize sentezlediğimiz kolloidallerin çekirdek@kabuk nanokompozit olduğuna kuvvetle işaret etmektedir. Aynı zamanda, sentezlenen saf Ag Np'leri Cu_xO kabuğu tarafından örtüldükten sonra 430 nm'den UV bölgeye kayan 410 nm'de yüzey plazmon rezonansı sergilemektedir. Ag Np ve Cu_xO nun biraraya gelmesinden kaynaklanan sinerjik etkinin sonucu olarak, Ag@Cu_xO yapısı hem UV hem de görünür bölge uygulamaları için uygun hale gelmiştir. Ag Np ile Ag@Cu_xO:rGO arasındaki 7 nm'lik kayma Ag@Cu_xO'ya göre daha az olmasına rağmen rGO'nun avantajları kompozit yapıya pozitif etkiler sağlayacağı düşünülmektedir. rGO'nun avantajları, Cu_xO'nun iletim bandındaki optik olarak uyarılmış elektronların tercihen ona transfer olması ve valans bandında boşluklar bırakmasıdır. Böylece SERS performansı artmaktadır (Bai vd., 2021).



Şekil 25. Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin a) UV-Vis absorpsiyon spektrumları, b) 1mM konsantrasyonla sentezlenen Ag Np

4.2. XRD Analizi

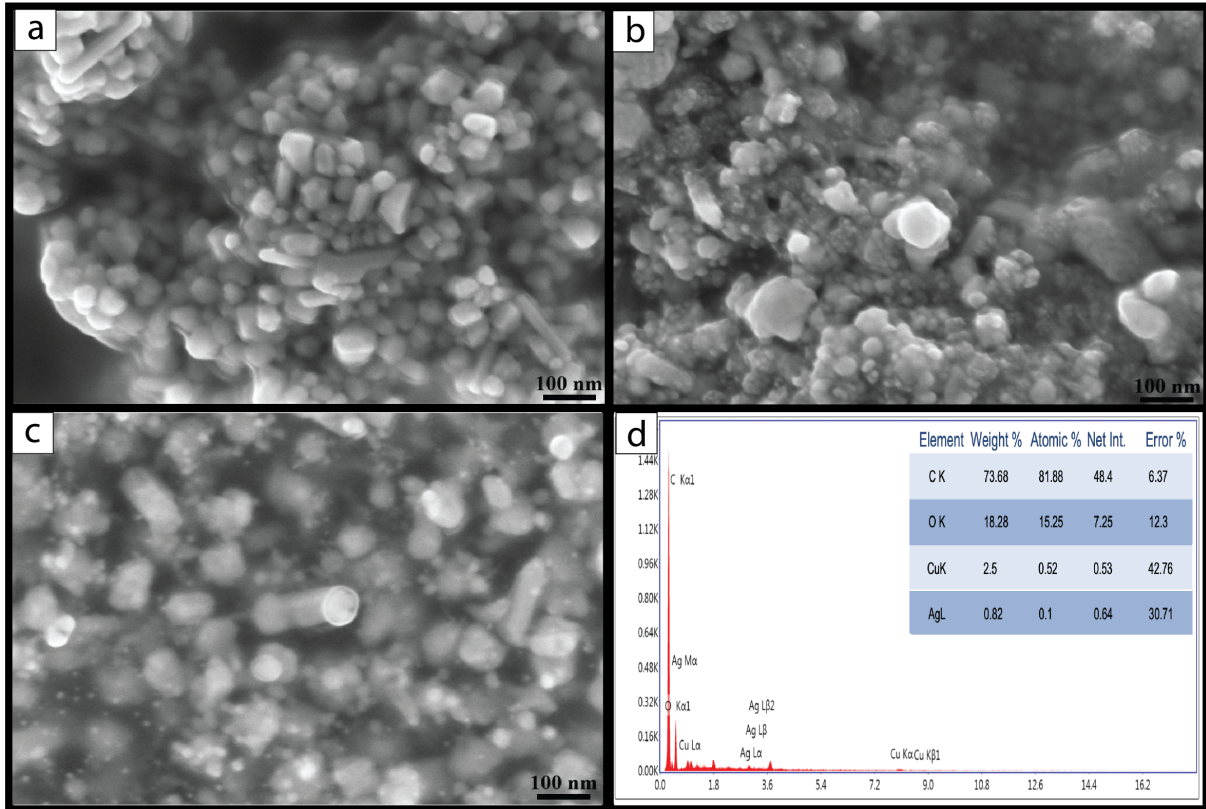
Kolloidal olarak üretilen Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin XRD analizinin yapılabilmesi için, numuneler cam yüzey üzerine damlatma yöntemiyle hazırlanmıştır. Şekil 26, Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların XRD desenlerini vermektedir. Ag Np'ler için, Ag'nin (111), (200), (220), (311) ve (222) kırınimleri sırasıyla 38,1°, 44,3°, 64,5°, 77,5° ve 81,6° (2θ) değerlerinde gözlenmiştir (JCPDS No: 98-004-4387). Cu_xO'nun Ag Np'ler üzerine büyütülmesiyle, Cu_xO'nun ana pik noktası ve diğer kırınım tepe yoğunlukları, küçük parçacık boyutları nedeniyle Ag@Cu_xO'nun XRD desenlerinde net olarak görülmemektedir. Aynı şekilde rGO, çekirdek@kabuk nanokompozit yapıya dekore edildiğinden kırınım tepe yoğunlukları Ag@Cu_xO:rGO'nun XRD desenlerinde görülememektedir. Ancak Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların desenleri dikkatlice incelendiğinde, Cu_xO'nun ana piki Ag Np'nin ana pikiyle aynı 2θ bölgesine denk geldiği için, Ag'nin keskin pik tabanının genişlediği görülmektedir. Cu_xO'nun 37,23° 'deki (111) kırınımı nedeniyle (JCPDS No: 98-001-6025), temel bozulmanın Ag'nin 38,1° (111) zirvesinde görülebileceğini göstermektedir (Davaslıoğlu vd., 2021).



Şekil 26. Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların XRD desenleri

4.3. SEM (EDS) Analizi

Kolloidal olarak üretilen Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin SEM analizinin yapılabilmesi için, numuneler karbon bant üzerine damlatılmış ve kurutulmuştur. Islak kimyasal yöntemle sentezlenen Ag Np'lerin, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların SEM görüntüleri Şekil 27(a-c)'de verilmiştir. Küresel Ag Np'lerin görüntüleri incelendiğinde (Şekil 27a), ~30-60 nm civarında Ag Np'ler olduğu görülmektedir. Bunu yanında Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin rGO tabakasına tutunduğu görülmektedir (Şekil 27c). Şekil 27d'de Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının EDS sonuçları verilmiştir. EDS sonuçlarında Ag, Cu, C ve O'nun varlığı açıkça görülmektedir. Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin varlığı ışık ile uyarılmış yük taşıyıcılarının kolayca ayrılıp bozunma reaksiyonuna katılmak üzere yüzeye aktarılabilceği anlamına gelir; bu, özellikle Cu_xO gibi sınırlı taşıyıcı difüzyon uzunluğuna sahip yarı iletkenler için önemlidir (Ren vd., 2015).



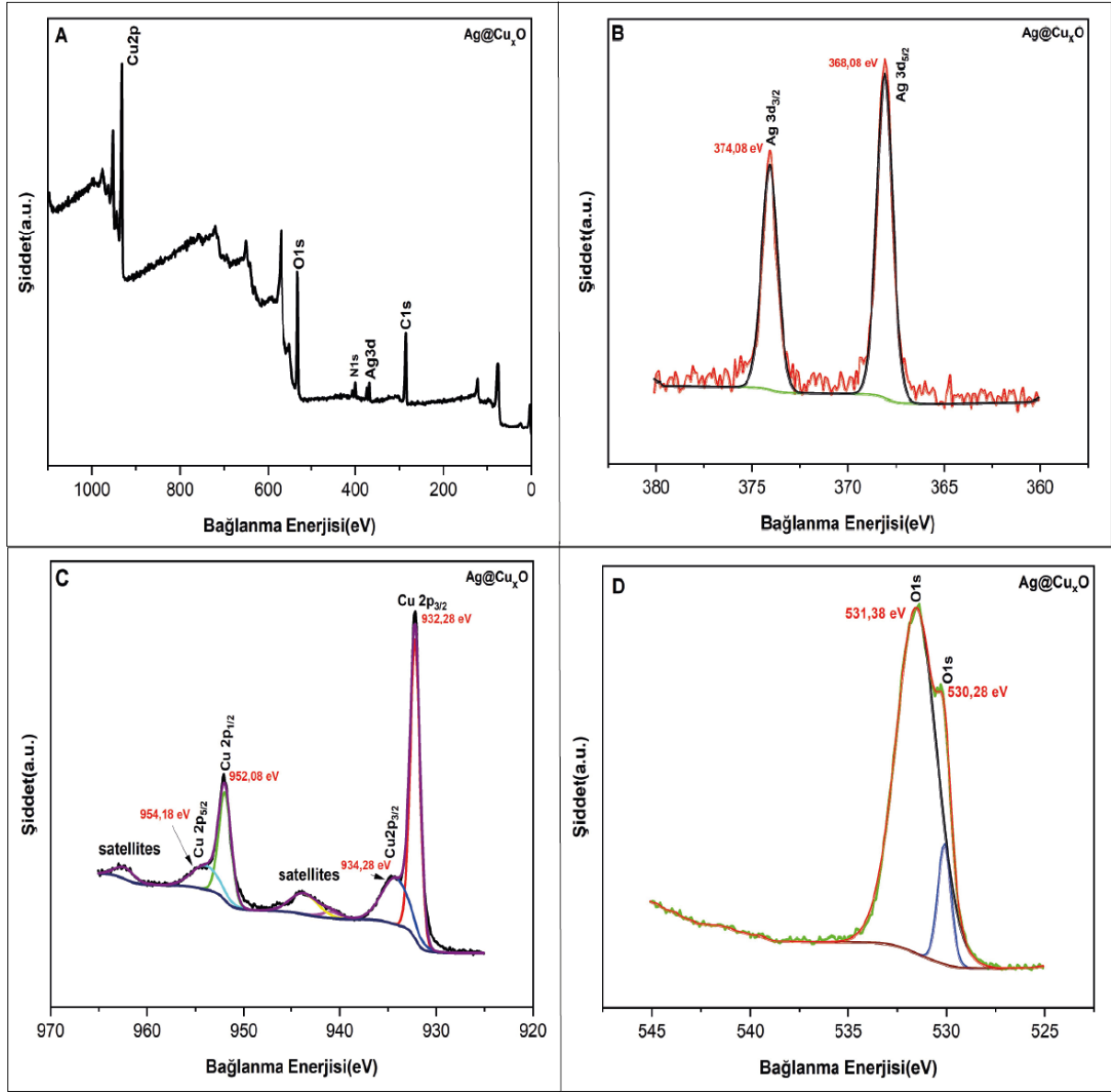
Şekil 27. a) Ag Np, b) Ag@Cu_xO, c) Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin SEM görüntüleri, d) Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin EDS sonucu

4.4. XPS Analizi

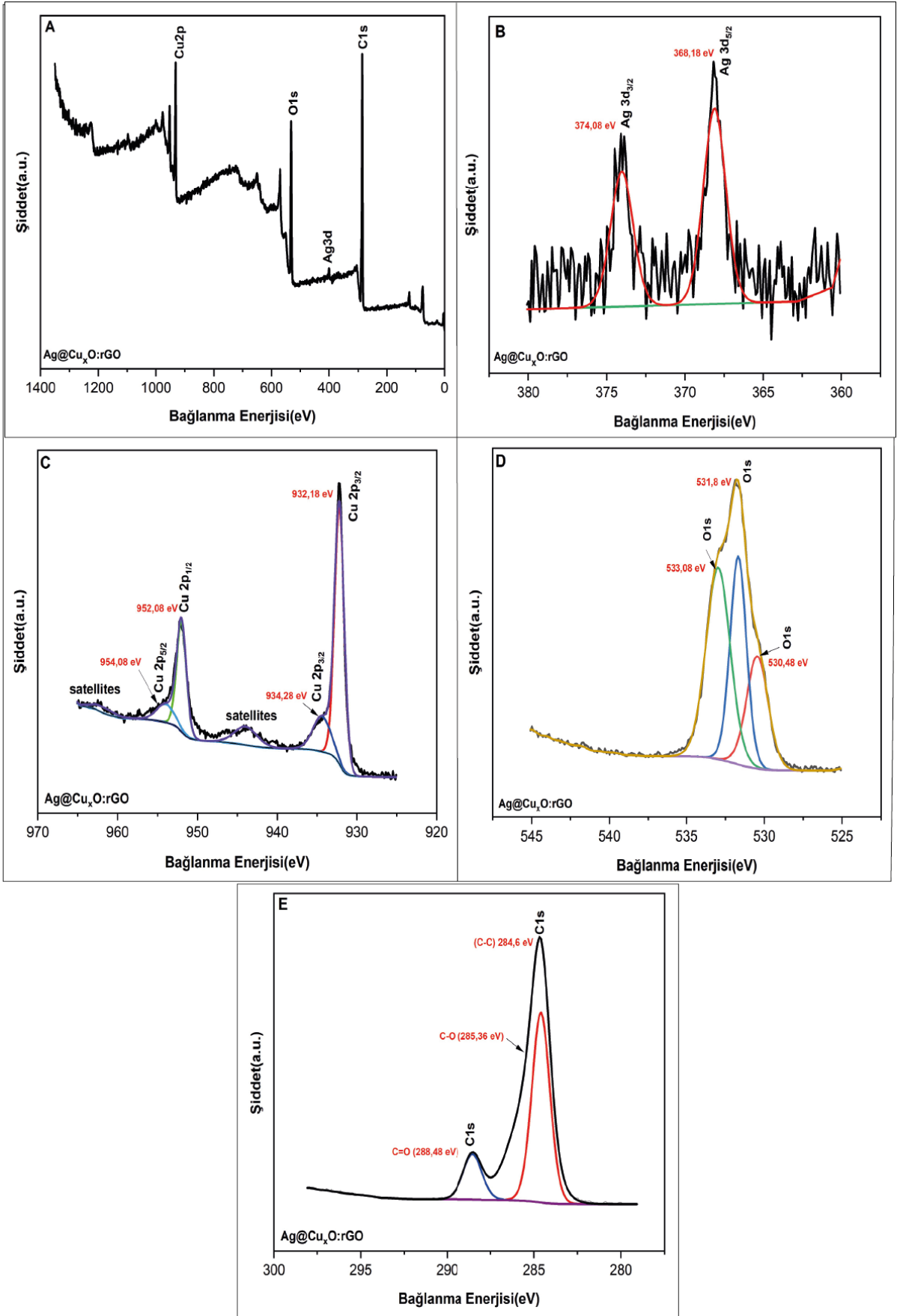
Şekil 28’de Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının XPS analizi verilmiştir. Kimyasal durum, değerlik ve bağlanma enerjisi XPS ile araştırılmaktadır. Optik uygulamalar nanopartiküllerin değerlik durumlarına dayanmaktadır (Parvathiraja and Shailajha, 2021). Şekil 28(a-d) sırasıyla yüzey, Ag, Cu ve O spektrumlarındaki Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların XPS spektrumunu göstermektedir. Şekil 28a’da çekirdek Ag metalleri, Cu 2p ve O1s’den oluşan geniş yüzey spektrumları verilmiştir. Şekil 28b’deki 374,08 eV ve 368,08 eV bağlanma enerjileri, hazırlanan nanokompozitteki metalik Ag (Ag⁰)’ı gösteren Ag 3d_{3/2} ve Ag 3d_{5/2}’ye tahsis edilmiştir (Sahu vd., 2020). Şekil 28c Cu 2p spektrumunu göstermektedir. 954,18 eV ve 934,28 eV bağlanma enerjileri CuO’nun Cu²⁺’sına atfedilmektedir (Viswonathan vd. 2020). 932,28 eV ve 952,08 eV bağlanma enerjileri ise Cu₂O’ya atanmıştır (Xiong vd., 2014). Bu nedenle XPS pikleri hazırlanan nanokompozitte Cu²⁺ ve Cu¹⁺’nın her iki oksidasyon halinin oluşumunu doğrulamıştır. Şekil 28d O1s spektrumunu göstermektedir. 530,28 eV’deki gözlemlenen pik, CuO’daki örgü oksijen atomlarına atanmıştır ve 531,38 eV’deki pik ise, adsorbe edilen OH gruplarından kaynaklanmaktadır (Hajakbari and Shafieinejad, 2014; Yang vd., 2014).

Şekil 29’da Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının XPS analizi verilmiştir. Şekil 29(a-e) sırasıyla yüzey, Ag, Cu, O ve C spektrumlarındaki Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların XPS spektrumunu göstermektedir. Şekil 29a’da çekirdek Ag metalleri, Cu 2p ve O1s’den oluşan geniş yüzey spektrumları verilmiştir. Şekil 29b’deki 374,08 eV ve 368,18 eV bağlanma enerjileri, hazırlanan nanokompozitteki metalik Ag (Ag⁰)’ı gösteren Ag 3d_{3/2} ve Ag 3d_{5/2}’ye tahsis edilmiştir (Wei vd., 2018). Şekil 29c Cu 2p spektrumunu göstermektedir. 954,08 eV ve 934,28 eV bağlanma enerjileri CuO’nun Cu²⁺’sına atfedilmektedir (Viswonathan vd. 2020). 932,18 eV ve 952,08 eV bağlanma enerjileri ise Cu₂O’ya atanmıştır (Xiong vd., 2014). Şekil 29d O1s spektrumunu göstermektedir. 530,48 eV’deki gözlemlenen pik, metal oksidin oksijenine aittir. 531,8 eV’deki bağlanma enerjisi rGO yüzeyindeki hidroksil ve epoksi gruplarındaki oksijene atfedilmektedir. 533,8 eV bağlanma enerjisi ise rGO yüzeyleri karboksil gruplarında oksijen içerdiğinden adsorbe edilmiş su moleküllerindeki oksijene karşılık gelmektedir (Kousar vd., 2024). Şekil 29e 284,6 eV, 285,36 ve 288,48 eV’deki pikler sırasıyla C-C, C-O ve C=O’nun bağlanma enerjilerine karşılık gelmektedir (Li vd. 2011; Luo vd., 2012). Ag@Cu_xO:rGO’daki C-O pikinin yokluğu ve C=O

pikin önemli ölçüde azalması esas olarak GO'nun rGO'ya indirgenmesine atfedilebilir (Wei vd. 2018).



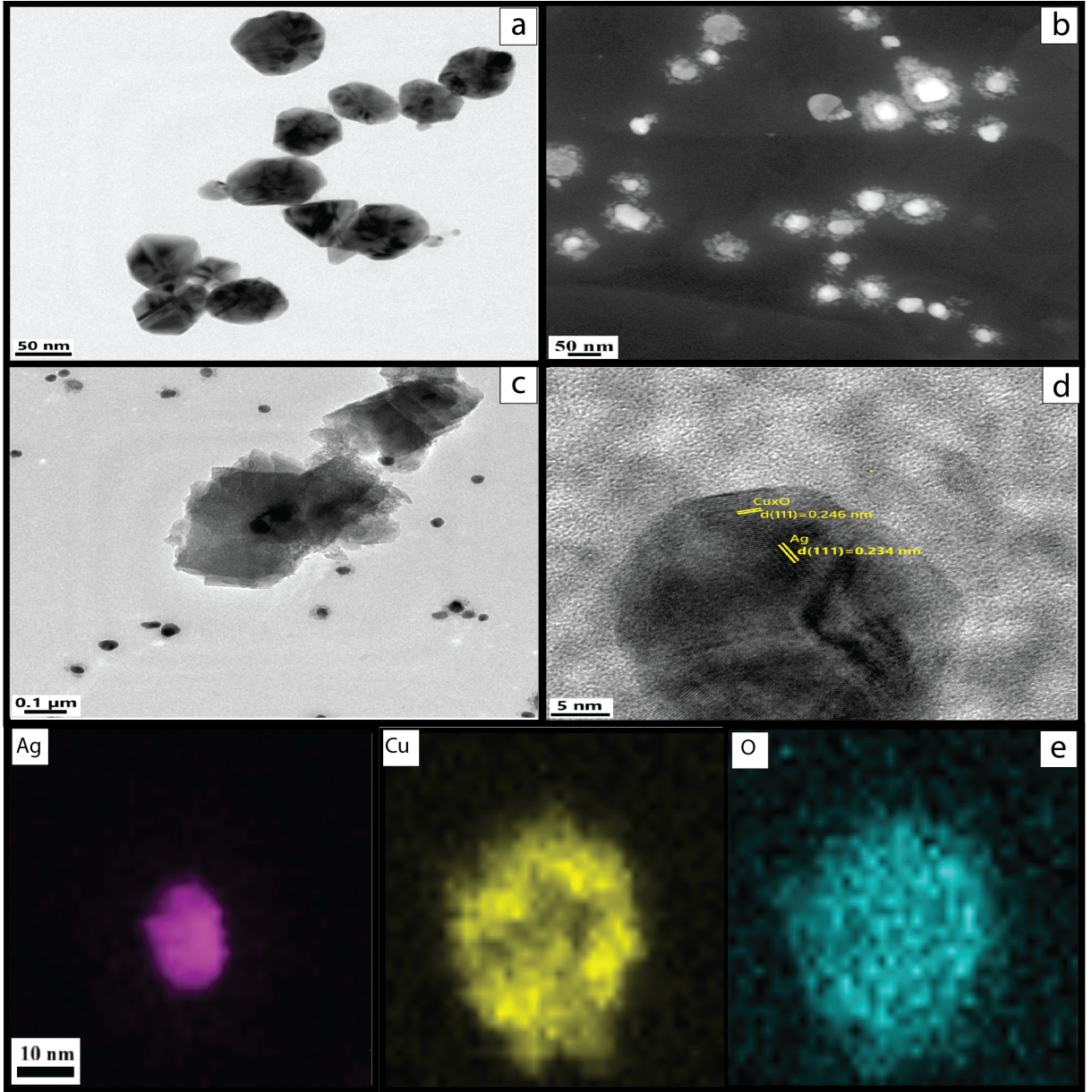
Şekil 28. Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının XPS Analizi a) surway, b) Ag 3d, c) Cu 2p ve d) O1s spektrumları



Şekil 29. Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının XPS analizi a) survey, b) Ag 3d, c) Cu 2p, d) O 1s ve e) C 1s spektrumları

4.5. TEM Analizi

Şekil 30(a-c)'de sırasıyla Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin TEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 30a incelendiğinde, Ag Np'lerin küresel, yarım küresel ve hegzagonal benzeri geometrilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Sentezlenen nanopartiküllerin boyut dağılımının yanı sıra geometrisinin de çoğunlukla indirgeyici maddenin doğasına bağlı olduğu bilinmektedir (Yerragopu vd., 2020). TSC ayrıca bir stabilizasyon maddesi olarak da işlev görmektedir. Yani, karboksil gruplarındaki serbest elektron çiftlerine sahip nanopartikülleri elektrostatik olarak stabilize ederek, serbest orbitallere sahip metalik atomlar içeren bileşiklerde bir stabilize edici madde olarak kullanılabilir. Özetlemek gerekirse, metal tuzlarının indirgeme süreci boyunca indirgeyici maddenin reaktifliğini metalin redoks potansiyeline göre kontrol etmek kritik öneme sahiptir. Sentez süreci sırasında bu reaksiyonun hızı aşırı yüksekse, çok sayıda metal çekirdeği ve son derece küresel parçacıklar hızla üretilecektir. Öte yandan, reaksiyon hızı çok yavaş ise, parçacıklar birleşecek ve farklı şekilli parçacıklar oluşacaktır. Ayrıca, yüzey aktif madde nedeniyle, düzenlenmiş kararlılık, çözünürlük, reaktivite, dağılılabirlik, boyut ve şekle sahip nanoparçacıklar yaratılabilir (Suriati vd., 2014; Yılmaz vd., 2023). Ancak, bu kontrollü yapıların tekrarlanabilirliği ve kontrolü bir zorluk olmaya devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, Ag Np'lerin sentezi için indirgeyici madde olarak sadece TSC kullanıldığından ve yüzey aktif madde kullanılmamasından dolayı farklı geometrilere sahip Ag Np'ler elde edilmiştir. Şekil 30(b,c)'de Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin varlığı açıkça görülmektedir. Şekil 30d'de Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin oluşumunu daha da doğrulamak için Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozitin HRTEM görüntüsü alınmıştır. HRTEM görüntüsünde Ag ve Cu_xO için düzlemler arası boşlukların sırasıyla 0,234 nm ve 0,246 nm olduğu belirlenmiştir ve bu, Ag ve Cu_xO'nun (111) düzlemine atfedilmektedir (Li vd., 2024; Park vd., 2022). Şekil 30e, Ag, Cu ve O'nun EDS haritasını göstermektedir. EDS haritası incelendiğinde Ag çekirdeğin merkezde yoğunlaştığı ve Cu ve O elementlerinin bir arada bulunduğunu ve çekirdeğin çevresinde kabuk yapısını oluşturduğunu doğrulamaktadır. Oksijenin yoğun olarak çekirdek etrafında bulunduğu gözlemlenmektedir; ancak daha geniş bir alanda seyrek şekilde dağılan oksijen, rGO'ya ait oksijen atomlarını temsil etmektedir. Şekil 30e, rGO/Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanoyapısının kabuk kısmındaki oksijen dağılımını başarıyla göstermektedir. Bu yapı, UV ışık algılama gibi optoelektronik uygulamalarda verimli bir performans için mükemmel bir düzenlilik ve homojenlik sunabilir.

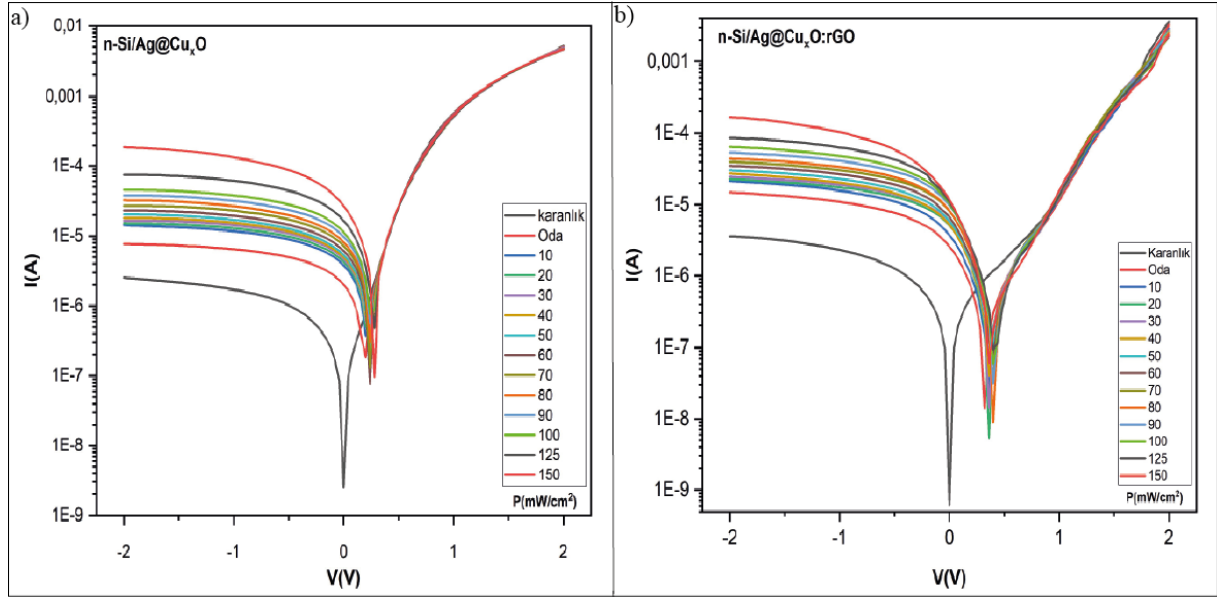


Şekil 30. a) Ag Np, b) Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit yapı, c) Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapıların TEM görüntüleri, d) Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit yapının HRTEM görüntüsü, e) Ag, Cu ve O'nun EDS haritası

4.6. Elektriksel Ölçümler

Al omik kontak kaplanan n-tipi silisyum üzerine drop casting yöntemiyle Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO kolloidal çekirdek@kabuk nanokompozitler kaplanmıştır. Daha sonra Au metal kontaklar alınmıştır ve Al/n-Si/Ag@Cu_xO/Au ve Al/n-Si/Ag@Cu_xO:rGO/Au aygıtları üretilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklemlerinin ışığa tepkisi ve fotodedektör performansı, karanlıkta ve görünür bölgedeki farklı ışık şiddetlerinde (10-150 mW/cm²), ±2 V aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen *I* – *V* ölçümleriyle

incelenmiştir. Aygıtların karanlıkta ve görünür ışık altındaki $I - V$ özellikleri Şekil 31’de verilmiştir. $I - V$ grafiklerine bakıldığında, akımın ters beslem bölgesinde artan ışık şiddeti ile kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın $10 - 100 \text{ mW/cm}^2$ ışık şiddetlerinde daha az olduğu ve yüksek ışık şiddetlerinde (125 ve 150 mW/cm^2) daha belirgin olduğu açıkça görülmektedir. Diyotların akımları doğru beslem bölgesindeki ışık şiddetiyle çok fazla değişmemektedir. Akım, ters beslem bölgesinde yüksek ışık şiddetleriyle artmasına rağmen, artan doğru beslem voltajıyla düşük ışık şiddetlerine göre daha doymuş olma eğilimindedir.



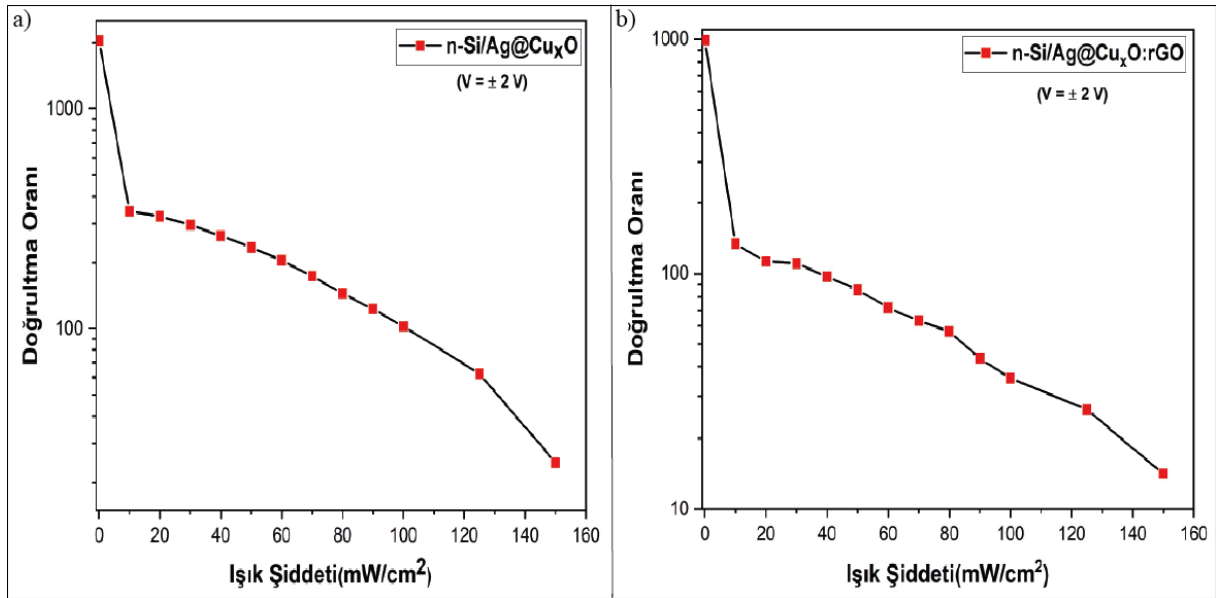
Şekil 31. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $I - V$ grafikleri

Doğrultma oranı, bir diyotun doğru beslemde akımı nasıl ilettiğini ve ters beslemde akımı nasıl engellediğini gösterir ve doğrultma oranı, doğru ve ters beslemlerdeki akımların oranından belirlenir (Eden vd., 2024). Doğru beslem akım değerleri, ters beslem akım değerlerine bölünerek doğrultma oranı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, tüm aygıtlar için ± 2 volt gerilim aralığında gerçekleştirilmiştir. Doğru beslem altında, artan ışık şiddetiyle akımda önemli bir değişiklik olmazken, ters beslem altında, ışığa akım tepkisi geleneksel bir fotodiyotun karakteristiğidir (Yılmaz vd., 2023). Bu, doğrultma oranının artan ışık şiddeti ile azaldığı anlamına gelir. Bu, fotoakımın artan ışık şiddetiyle artarken, doğru beslem akımının neredeyse değişmeden kalmasıyla açıklanabilir. Yüksek fotoakım yoğunluğu ile yük rekombinasyonunun engellendiği anlamına gelmektedir. Başka bir ifadeyle, etkili elektron-boşluk ayrımı gerçekleşir (Li vd., 2022; Yılmaz vd., 2023). ± 2 V için hesaplanan doğrultma oranı değerleri Tablo 4’te

verilmiştir. Ayrıca, ± 2 V için ışık şiddetine bağlı doğrultma oranı grafikleri Şekil 32’de verilmiştir. En yüksek doğrultma oranı değerleri n-Si/Ag@Cu_xO aygıtında gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Üretilen aygıtların ± 2 V’da hesaplanan doğrultma oranı değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	Doğrultma Oranı	
	n-Si/Ag@Cu _x O	n-Si/Ag@Cu _x O:rGO
Karanlık	2030,93	990,89
10	341,84	134,65
20	324,09	112,93
30	296,29	110,49
40	263,64	97,30
50	233,74	85,41
60	204,67	71,71
70	174,20	63,08
80	145,03	56,78
90	123,12	43,30
100	102,42	35,78
125	62,40	26,36
150	24,63	14,13



Şekil 32. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının ışık şiddetine bağlı doğrultma oranı grafikleri

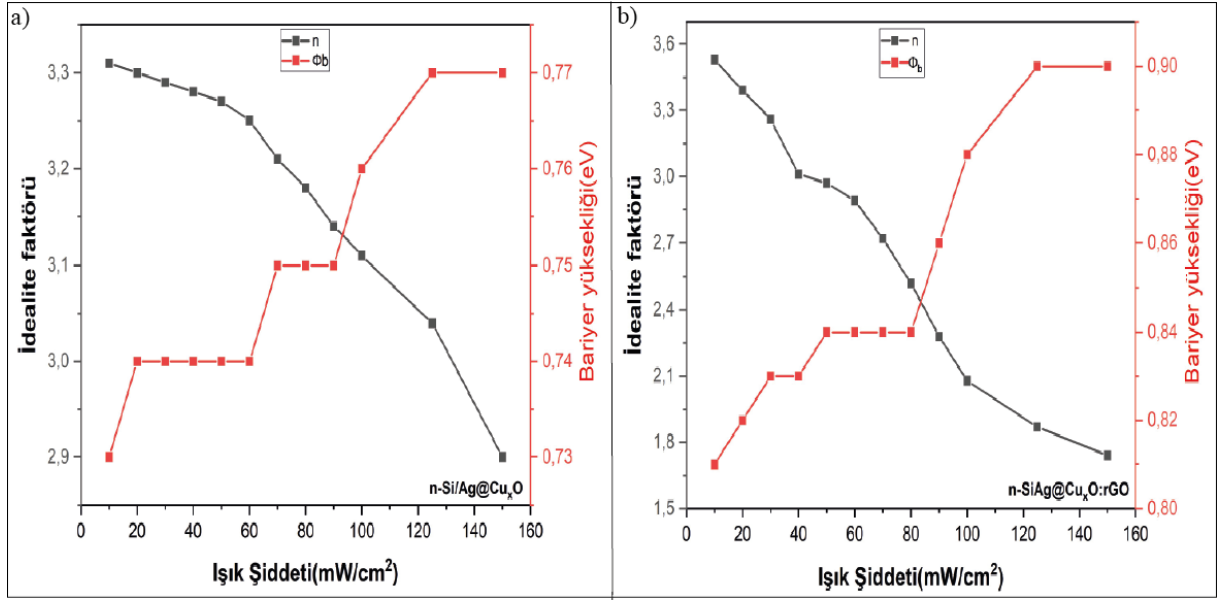
Elektriksel ölçümler sonucunda, tüm aygıtların idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerleri sırasıyla denklem (10) ve (12) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 33'te, ışık şiddetine bağlı n ve ϕ_b grafikleri sunulmuştur. n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $I - V$ grafiklerine göre hesaplanan n değerleri, karanlıkta ortamda sırasıyla, 3,25 ve 3,79 iken 150 mW/cm² ışık şiddetinde ise sırasıyla 2,90 ve 1,74 olarak belirlenmiştir. Aynı koşullarda ϕ_b değerleri karanlıkta sırasıyla 0,71 eV ve 0,72 eV değerlerinde iken 150 mW/cm² ışık şiddetinde ise sırasıyla, 0,77 eV ve 0,90 eV olarak hesaplanmıştır. Tablo 5 ve 6'da her iki aygıt için hesaplanan n ve ϕ_b değerleri verilmiştir. Bu tablolara bakıldığında, n 'nin ışık şiddetinin artmasıyla azaldığı görülmektedir. ϕ_b 'nin ise arttığı gözlemlenmektedir. Yüksek n değerleri, ara yüzey ince doğal oksit tabakasının varlığına ve düşük bariyer düzensizliklerinin geniş bir dağılımına atfedilebilir. (Huang ve Wang, 2015; Marıl vd., 2015; Orak vd., 2018; Turut vd., 2015). Ayrıca n 'nin 1'den büyük olması ($n > 1$), Schottky diyotunun ideal bir davranış sergilemediğini göstermektedir (Tatar vd., 2009). Tablolarda görüldüğü gibi ϕ_b ışık şiddeti arttıkça artmaktadır. Öte yandan, $I - V$ ölçümü aydınlatılmış koşullar altında gerçekleştirilmiştir ve aydınlatma nedeniyle oluşanların yanı sıra fazladan elektronlar da sağlanmıştır (Tatar vd., 2009). Başka bir ifadeyle, aydınlatılmış koşullar altında oluşturulan boşluklar arka kontağa çekilirken, elektronlar eklemde toplanır (Card ve Rhoderick,1971; Cowley ve Sze, 1965; Orak vd., 2018). Bu durum, taşıyıcıların yeniden dağılımına neden olarak bariyer yüksekliğini etkileyebilir. Ayrıca, aydınlatma altında ek elektronların oluşması, mevcut $I - V$ karakteristiklerini de değiştirmektedir. Bu nedenle, aydınlatılmış durumda ters beslem akımı, doğru beslem akım değerlerini miktar olarak aşar (Orak vd., 2018).

Tablo 5. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının ışık şiddetine bağlı n , ϕ_b ve R_s değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	I-V		dV/dlnI		H(I) – I		F(V) - V	
	n	ϕ_b (eV)	n	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)
karanlık	3,25	0,71	3,33	0,84	0,71	0,70	0,78	0,77
oda	3,33	0,72	3,33	0,97	0,71	0,81	0,78	0,81
10	3,31	0,73	3,32	1,03	0,71	0,90	0,72	0,83
20	3,30	0,74	3,30	1,09	0,71	0,96	0,78	0,84
30	3,29	0,74	3,28	1,13	0,71	0,99	0,78	0,85
40	3,28	0,74	3,28	1,14	0,71	1	0,78	0,86
50	3,27	0,74	3,27	1,16	0,71	1,02	0,78	0,88
60	3,25	0,74	3,29	1,16	0,71	1	0,78	0,91
70	3,21	0,75	3,25	1,23	0,71	1,05	0,78	0,96
80	3,18	0,75	3,25	1,27	0,71	1,06	0,78	1,49
90	3,14	0,75	3,12	1,37	0,72	1,17	0,78	1,05
100	3,11	0,76	3,10	1,42	0,72	1,19	0,79	1,10
125	3,04	0,77	3,05	1,36	0,72	1,23	0,79	1,18
150	2,90	0,77	2,88	1,55	0,73	1,35	0,80	0,27

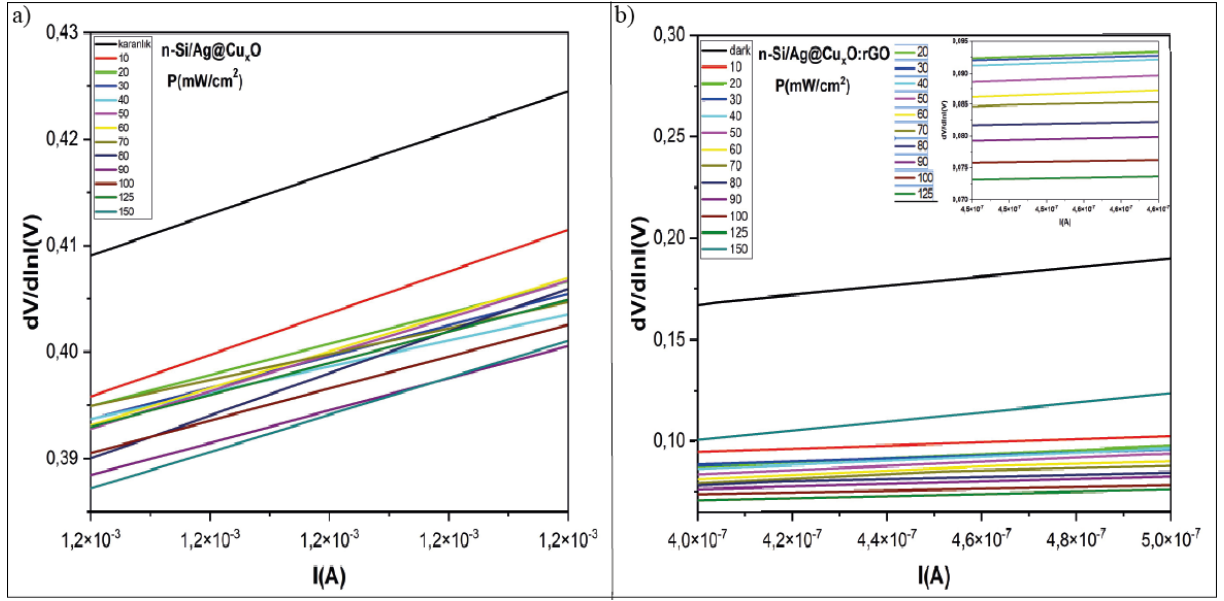
Tablo 6. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının ışık şiddetine bağlı n , ϕ_b ve R_s değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	I-V		dV/dlnI		H(I) – I		F(V) - V	
	n	ϕ_b (eV)	n	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)
karanlık	3,79	0,72	2,99	226	0,71	82	0,72	18
oda	3,79	0,81	3,11	70	0,80	60	0,86	12
10	3,53	0,81	2,48	76	0,85	60	0,88	23
20	3,39	0,82	2,62	66	0,83	54	0,88	26
30	3,26	0,83	2,36	70	0,85	57	0,89	22
40	3,01	0,83	2,82	49	0,83	40	0,89	32
50	2,97	0,84	2,57	54	0,85	43	0,96	1,6
60	2,89	0,84	2,34	59	0,87	46	0,96	6,1
70	2,72	0,84	2,32	55	0,87	43	0,96	16
80	2,52	0,84	2,22	54	0,88	41	0,97	30
90	2,28	0,86	2,00	61	0,91	46	0,98	28
100	2,08	0,88	2,18	43	0,89	32	0,98	39
125	1,87	0,90	1,93	52	0,92	38	1,13	10
150	1,74	0,90	1,36	183	0,95	165	1,09	19



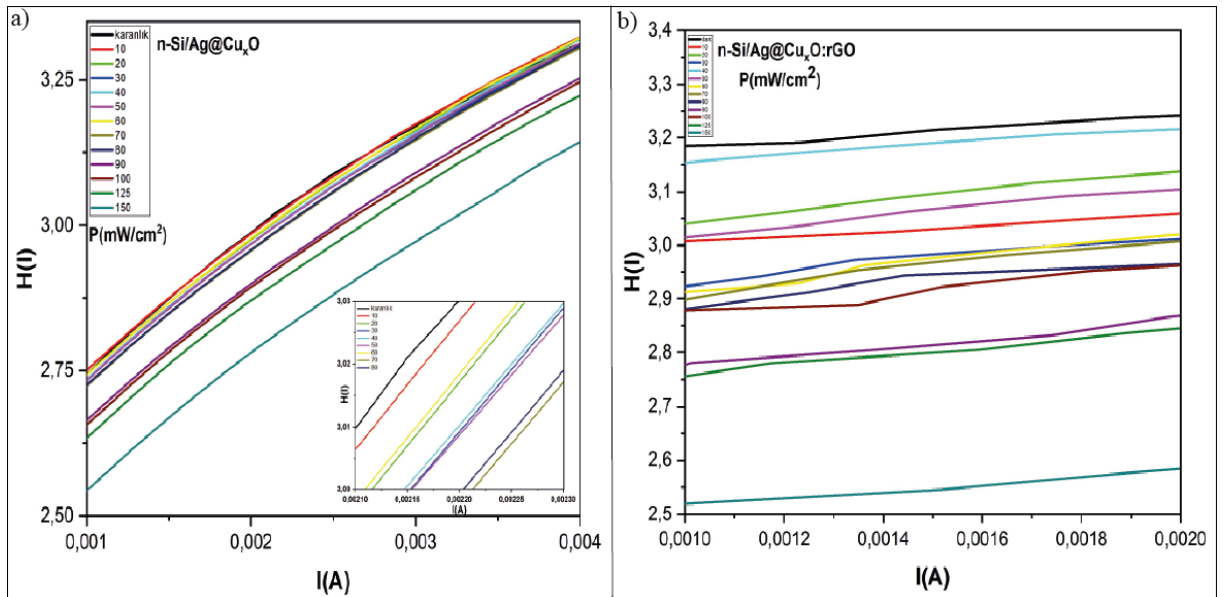
Şekil 33. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $I - V$ grafiğine göre hesaplanan ışık şiddetine bağlı n ve ϕ_b grafikleri

Cheung fonksiyonlarına ait $dV/dlnI - I$ grafikleri Şekil 34'te verilmiştir. Denklem (17) dikkate alınarak çizilen grafik bir doğruyu vermektedir. Bu doğrunun eğimi ise bize R_s değerlerini vermektedir. Ayrıca $I = 0$ noktasında düşey eksen kesen noktadan n hesaplanmaktadır. Cheung fonksiyonlarından hesaplanan n ve R_s değerleri Tablo 5 ve 6'da verilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtı için, 60 mW/cm² ışık şiddetinde minimal bir artış gözlemlenmesine rağmen, genel olarak ışık şiddetinin artmasıyla birlikte n değerlerinde bir azalma eğilimi görülmüştür. Buna karşılık, R_s değerleri ışık şiddeti arttıkça küçük dalgalanmalar dahilinde bir artış göstermiştir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı için ise, karanlık ortamdaki ışık koşullarına geçişte n değerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. 40 mW/cm² ışık şiddetine kadar olan aralıkta dalgalanmalar görülmekle birlikte, genel anlamda ışık şiddetinin artışıyla n değerleri azalma eğilimindedir. R_s değerleri, ışık şiddetinin artmasıyla birlikte genel olarak azalma eğilimi göstermiştir. Ancak, 150 mW/cm² ışık şiddetinde R_s değerinde bir yükselme kaydedilmiştir.



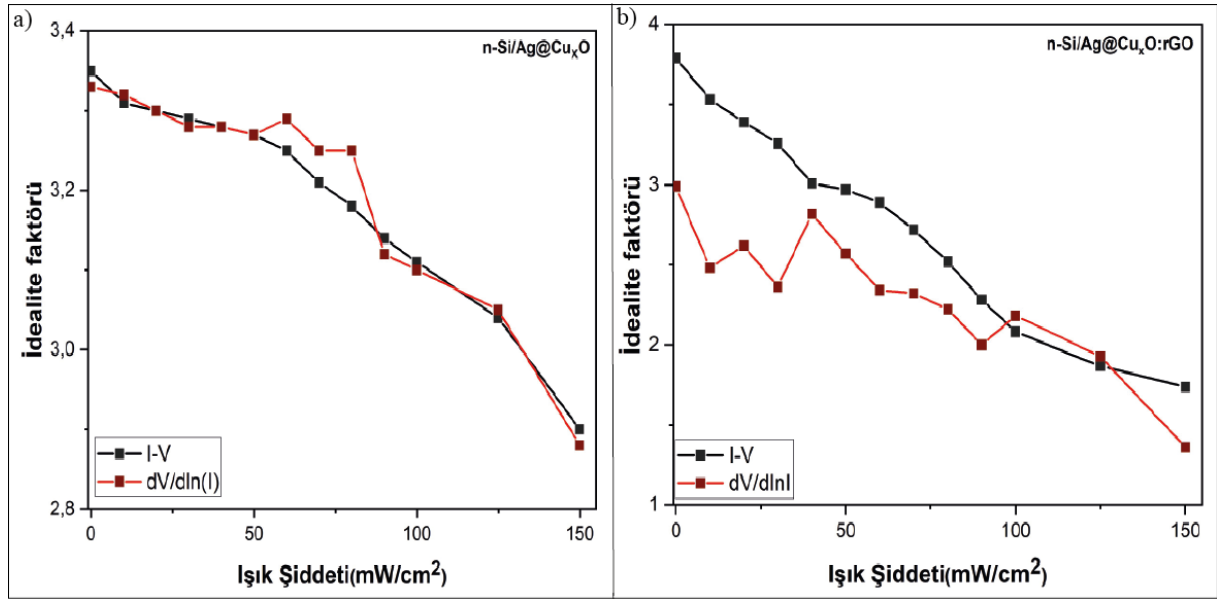
Şekil 34. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $dV/d\ln I - I$ grafikleri

Denklem (18) kullanılarak elde edilen $H(I) - I$ grafikleri Şekil 35'te verilmiştir. $H(I) - I$ grafiğinin eğimi R_s 'yi, $I = 0$ noktasında doğrunun düşey eksenini kestiği nokta ise ϕ_b 'yi vermektedir. Tablo 5 ve 6'ya bakıldığında her iki aygıt için de ışık şiddeti arttıkça ϕ_b 'nin arttığı görülmektedir. R_s değerlerine bakıldığında ise n-Si/Ag@Cu_xO aygıtı için ışık şiddeti arttıkça arttığı görülmektedir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtında ise R_s değerleri ışık şiddeti arttıkça azalmış, fakat 150 mW/cm² ışık şiddetinde bir yükselme görülmektedir.



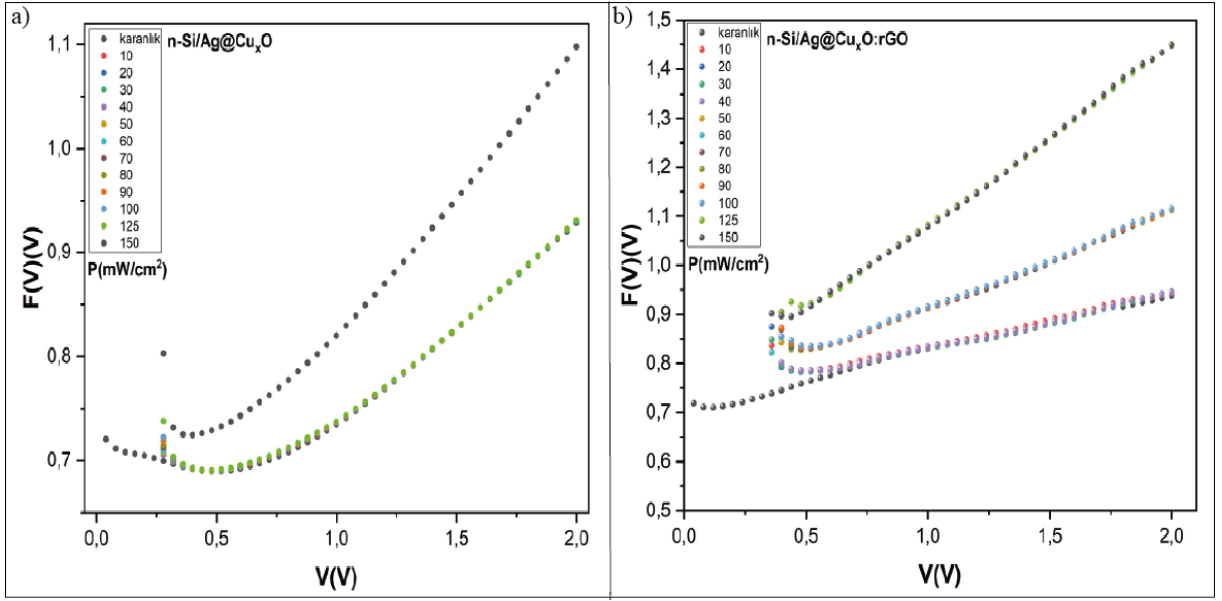
Şekil 35. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $H(I) - I$ grafikleri

Aygıtların Cheung fonksiyonları ve geleneksel $I - V$ ölçümlerinden elde edilen n değerlerinin ışık şiddetiyle nasıl değiştiği Şekil 36'da gösterilmiştir. Şekil 36'da görüleceği üzere, hem Cheung fonksiyonları hem de geleneksel $I - V$ ölçümleriyle hesaplanan n , ışık şiddeti arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Her iki yöntemle elde edilen n sonuçlarının uyumlu bir şekilde değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, farklı analiz yöntemleri arasında tutarlılık olduğunu ortaya koymaktadır.



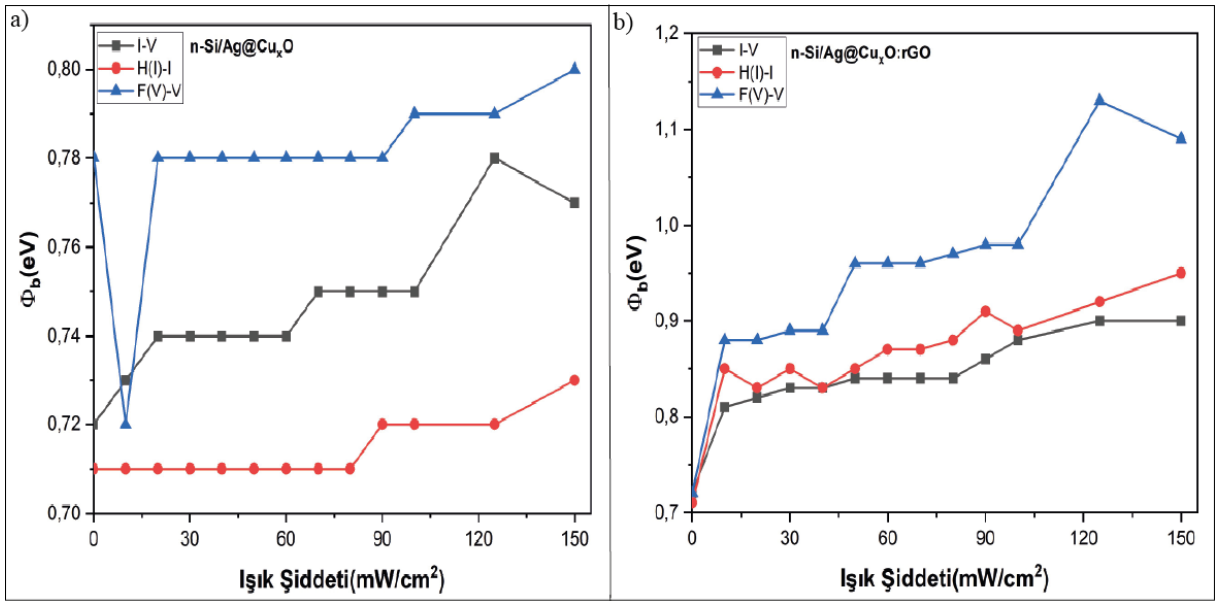
Şekil 36. a) $n-Si/Ag@Cu_xO$ ve b) $n-Si/Ag@Cu_xO:rGO$ aygıtlarının ışık şiddetine bağlı idealite faktörü grafikleri

Norde fonksiyonları kullanılarak ϕ_b ve R_s değerleri hesaplanabilmektedir (Denklem (21) ve (22)). Şekil 37'de $F(V) - V$ grafikleri verilmiştir. Tablo 5 ve 6'ya bakıldığında $n-Si/Ag@Cu_xO$ aygıtı için ışık şiddetinin artışıyla birlikte ϕ_b değerlerinde minimal değişimler gözlemlenmiştir. Genel olarak 0,78 eV olarak hesaplanan ϕ_b , 150 mW/cm^2 'de 0,80 eV olarak hesaplanmıştır. R_s değerlerine bakıldığında ise ışık şiddeti arttıkça artış gözlemlenmekle beraber 150 mW/cm^2 ışık şiddetinde bir düşüş görülmektedir. $n-Si/Ag@Cu_xO:rGO$ aygıtında ise ışık şiddeti arttıkça ϕ_b değerleri artmakla birlikte 150 mW/cm^2 ışık şiddetinde bir düşüş gözlemlenmiştir. R_s değerleri analiz edilecek olursa oldukça dalgalı bir davranış sergilemektedir.



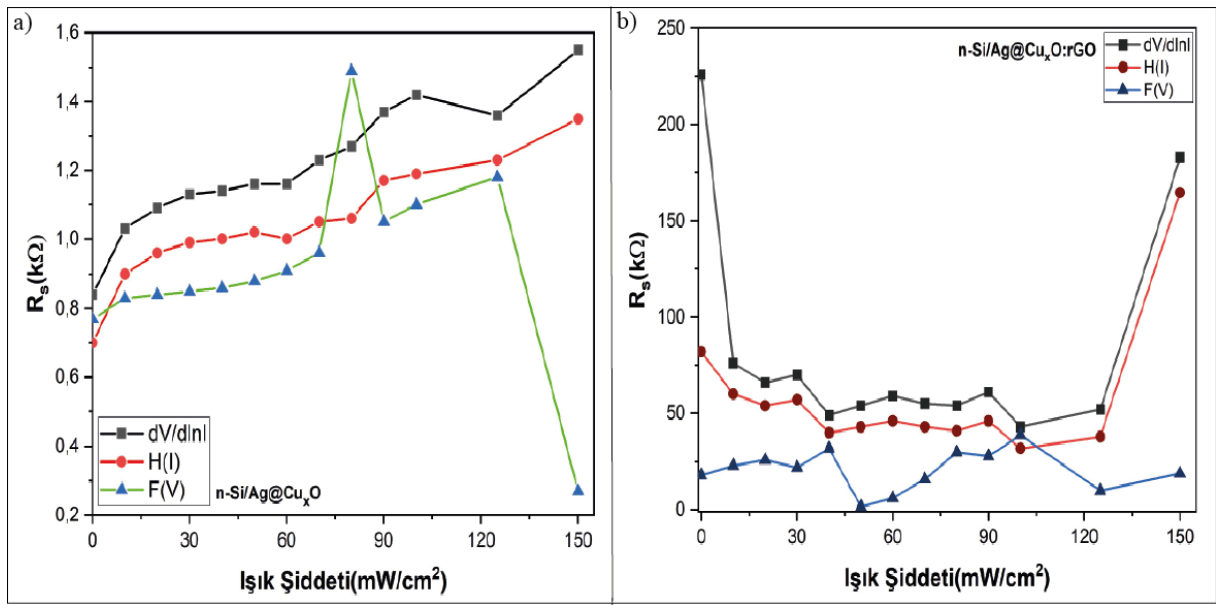
Şekil 37. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $F(V) - V$ grafikleri

Şekil 38, n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının farklı yöntemler için ϕ_b -ışık şiddeti grafiklerini vermektedir. Geleneksel $I - V$ ölçümleri, Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonlarından elde edilen ϕ_b değerleri, ışık şiddetinin artışıyla birlikte yükselme eğilimindedir. Her üç yöntemle elde edilen ϕ_b sonuçlarının uyumlu bir şekilde değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, farklı analiz yöntemleri arasında tutarlılık olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 38. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının ϕ_b -ışık şiddeti grafikleri

Şekil 39’da, geleneksel $I - V$ ölçümleri, Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonlarından elde edilen R_s değerleri gösterilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının R_s değerleri ışık şiddeti arttıkça genel olarak bir artış eğilimi göstermektedir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının R_s değerleri ise ışık şiddeti arttıkça önce azalmış sonra artmıştır. Bu durum, artan ışık şiddetinin aygıtın taşıyıcı yoğunluğunu artırarak iletkenliği iyileştirmesi ve dolayısıyla R_s değerlerini düşürmesiyle açıklanabilir. Belirli ışık şiddetlerindeki dalgalanmalar, aygıt içindeki malzeme özelliklerinden ve/veya ara yüzdeki yük taşıyıcı hareketliliğinden kaynaklanabilir. Genel olarak, yüksek ışık şiddetlerinde daha düşük R_s değerleri elde edilmesi, aygıt performansının ışığa duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 39. a) n-Si/Ag@Cu_xO ve b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının R_s -ışık şiddeti grafikleri

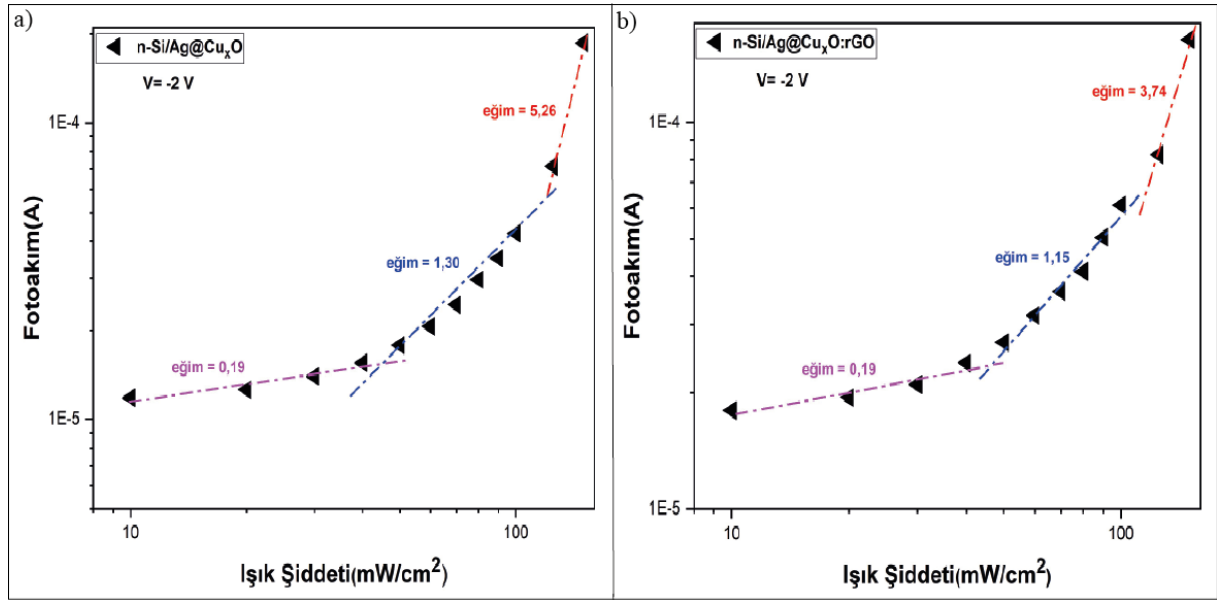
Aygıtların, $I - V$ grafiklerinden, Cheung fonksiyonlarından ve Norde fonksiyonlarından hesaplanan doğrultma oranları, n , ϕ_b ve R_s değerleri Tablo 5 ve 6’da verilmiştir. Üç yöntem ile hesaplanan veriler incelendiğinde, birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır.

4.7. Fotodedektör Parametreleri

n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının fotodedektör parametrelerinden, fotoakım, On/Off , duyarlılık, spesifik algılayıcılık, gürültü eşdeğer gücü, normalize edilmiş fotoakım oranı ve harici kuantum verimliliği incelenmiştir.

4.7.1. Aygıtların fotoakım sonuçları

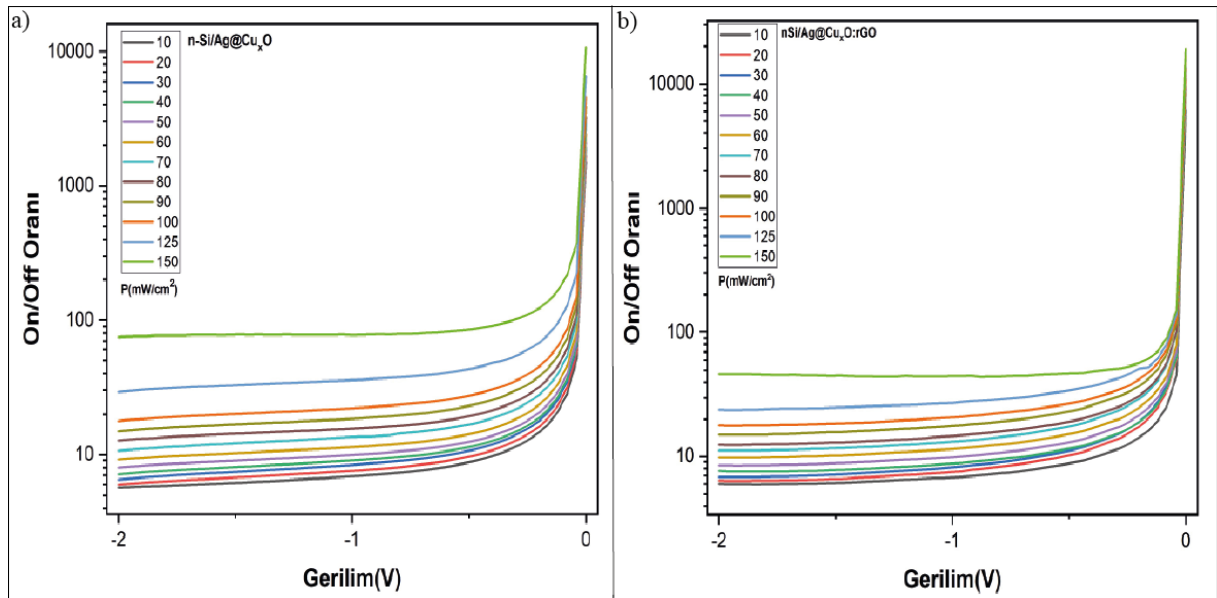
Denklem (33)'e göre hesaplanan fotoakım değerleriyle oluşturulan ışık şiddetine bağlı fotoakım grafikleri Şekil 40'ta -2 V'ta logaritmik bir ölçekte gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde fotoakımın artan ışık şiddetleriyle artmaktadır. Bu artışın 125 ve 150 mW/cm² ışık şiddetlerinde daha fazla olduğu açıktır. Bu durum, yüksek ışık şiddetlerinde rekombinasyonun ve tuzakların etkisinin azaldığı anlamına gelmektedir (Yılmaz vd., 2024). Fotoakım artan ışık şiddetiyle artmasına rağmen, bu artış doğrusal değildir. Grafiklerde üç farklı doğrusal bölge gösterilmiştir ve bu doğrusal bölgelerin eğimi artan ışık şiddetiyle artmaktadır. Farklı eğimlerin varlığı, artan ışık şiddeti ile birlikte aktif olan tuzakların davranışının değiştiği anlamına gelir (Zhao vd., 2019). Eğim düşük ışık şiddetlerinde 1'den azdır ve bu Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO ile n-Si ara yüzünde tuzakların (azınlık taşıyıcıları için) varlığına atfedilebilir (Yıldırım vd., 2022). Yani, eğim Ag, Cu_xO ve rGO ara yüzlerindeki yüksek tuzak yoğunluğu oranı ve uzun ömürlü yük tuzaklarının yüksek oranı nedeniyle 1'den düşüktür (Shkir vd., 2019). Benzer şekilde, daha yüksek ışık şiddetlerine doğru, ara yüz tuzakları, 1'den daha yüksek eğim veren bölgede tuzaktan kurtulmaya başlar. 5'ten büyük bir eğim, yüksek ışık şiddetlerinde yük taşıyıcılarının tuzaklardan kaçtığı ve rekombinasyon etkilerinin azaldığı anlamına gelmektedir (Yıldırım vd., 2024).



Şekil 40. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtları için farklı ışık şiddetlerine bağlı fotoakım grafikleri

4.7.2. Aygıtların On/Off sonuçları

Aygıtların görünür ışık altında Denklem (35)'e göre *On/Off* değerleri hesaplanmış ve Şekil 41'de sunulmuştur. Genel olarak, bu oranların gerilime bağımlılığı zayıftır. Karanlık akım değerleri çok düşük olduğundan en yüksek *On/Off* değerleri sıfır gerilimde elde edilmiştir. nSi/Ag@Cu_xO aygıtı için en yüksek *On/Off* değeri 10.688 iken n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı için ise 19.150'dir. 125 ve 150 mW/cm²'de, *On/Off*'un artan doğru beslem ile birlikte daha hızlı arttığı görülmektedir. Bu durum, artan ışık şiddetleriyle artan doğru beslem ile birlikte fotoakımın artmasının bir sonucudur. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının *On/Off* değeri n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının *On/Off* değerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, rGO'nun yüksek taşıyıcı hareketliliğinden kaynaklanmaktadır.

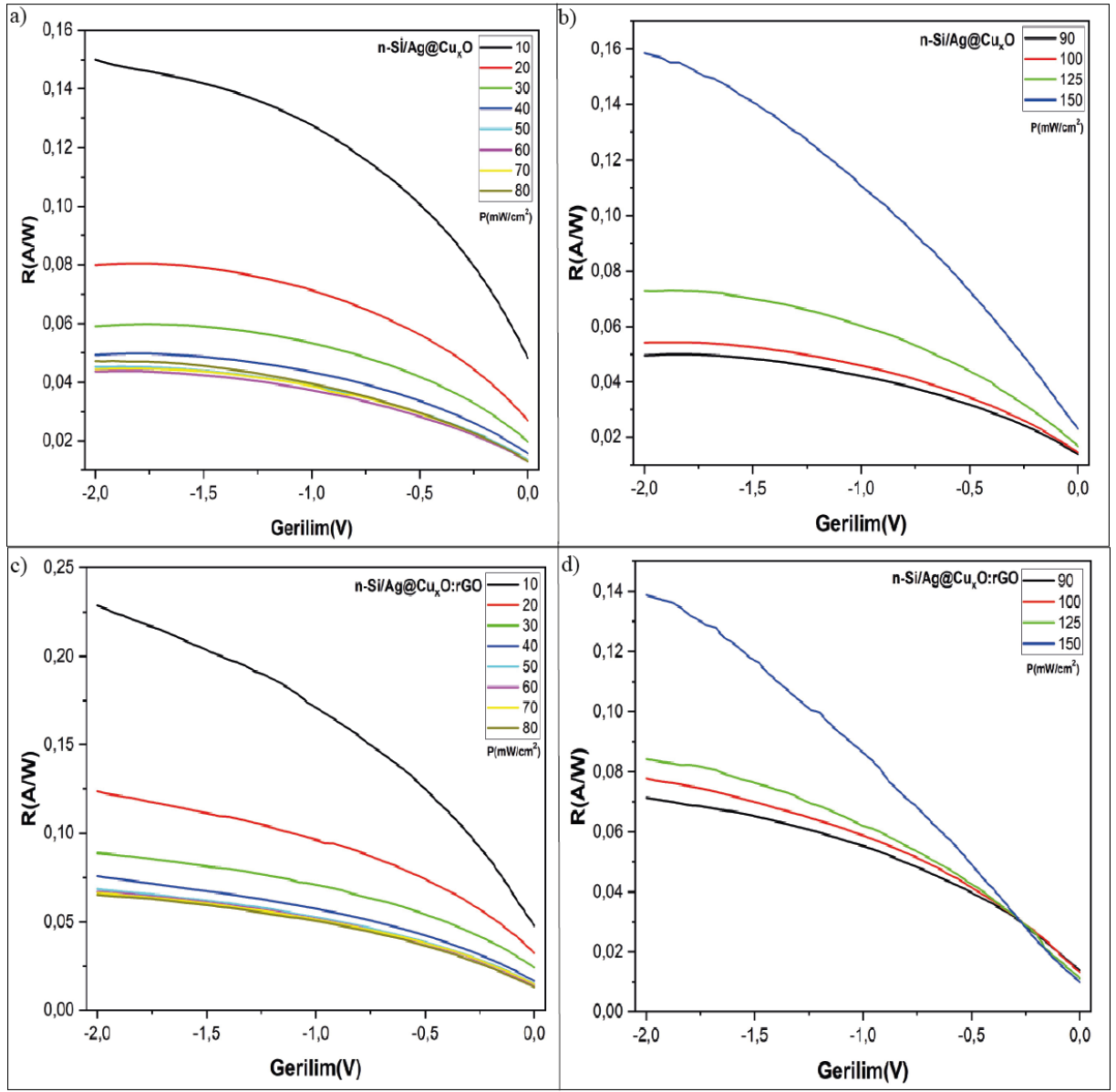


Şekil 41. a) n-Si/Ag/Cu_xO, b) n-Si/Ag/Cu_xO:rGO, aygıtlarının farklı ışık şiddetlerinde gerilime bağlı *On/Off* grafikleri

4.7.3. Aygıtların R sonuçları

Aygıtların görünür ışık altındaki *R* değerleri Denklem (34) ile hesaplanmış ve gerilime bağlı *R – V* grafikleri Şekil 42'de verilmiştir. Her iki aygıtta da *R* değerleri ışık şiddeti arttıkça (10–80 mW/cm² arasında) azalır. 90 mW/cm² ışık şiddetinden sonra (90 – 150 mW/cm² arasında) ise artma gözlemlenmiştir. *R – V* grafiklerinde, *R*'nin artan ışık şiddetiyle olan bağımlılığı doğrusal bir ilişki göstermemektedir. 10 mW/cm² ışık şiddetinde *R* değerleri oldukça yüksektir, ancak 60 mW/cm²'ye kadar belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 70

mW/cm²'nin üzerindeki ışık şiddetlerinde R değerlerinde eksponansiyel bir artış başlamıştır. Özellikle 90 mW/cm²'nin ardından bu artış dramatik bir şekilde hızlanmış ve adeta bir çıkış etkisi yaratmıştır. Bu durum, aygıtların belirli bir ışık şiddeti eşiğini aştığında farklı bir çalışma rejimine geçtiğini ve daha etkin bir yanıt verdiğini göstermektedir. Bu durum, heteroeklemlerin ara yüzündeki tuzak durumlarının varlığına atfedilir (Wang vd., 2015). R 'nin ışık şiddetinin artmasıyla azalmasının bir başka nedeni de foto-uyarılmış taşıyıcıların rekombinasyon oranındaki artış olabilir (Yıldırım vd., 2023; Zeng vd., 2018). n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının -2 V'ta en yüksek R değerleri sırasıyla 0,16 ve 0,22 A/W'dır. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının R değeri, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtına göre daha yüksektir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı, daha yüksek duyarlılık değeri ile ışık algılama açısından daha verimli bir performans sergilemektedir. rGO'nun varlığı Cu_xO tabakasındaki elektron taşıma kanallarını iyileştirmiştir. Bu durum, taşıyıcıların yeniden birleşmesini azaltmış ve fotonların daha etkin bir şekilde elektrona dönüştürülmesini sağlamıştır. Bu durum, rGO'nun fotodetektör performansını algılama açısından da arttırdığını göstermektedir.

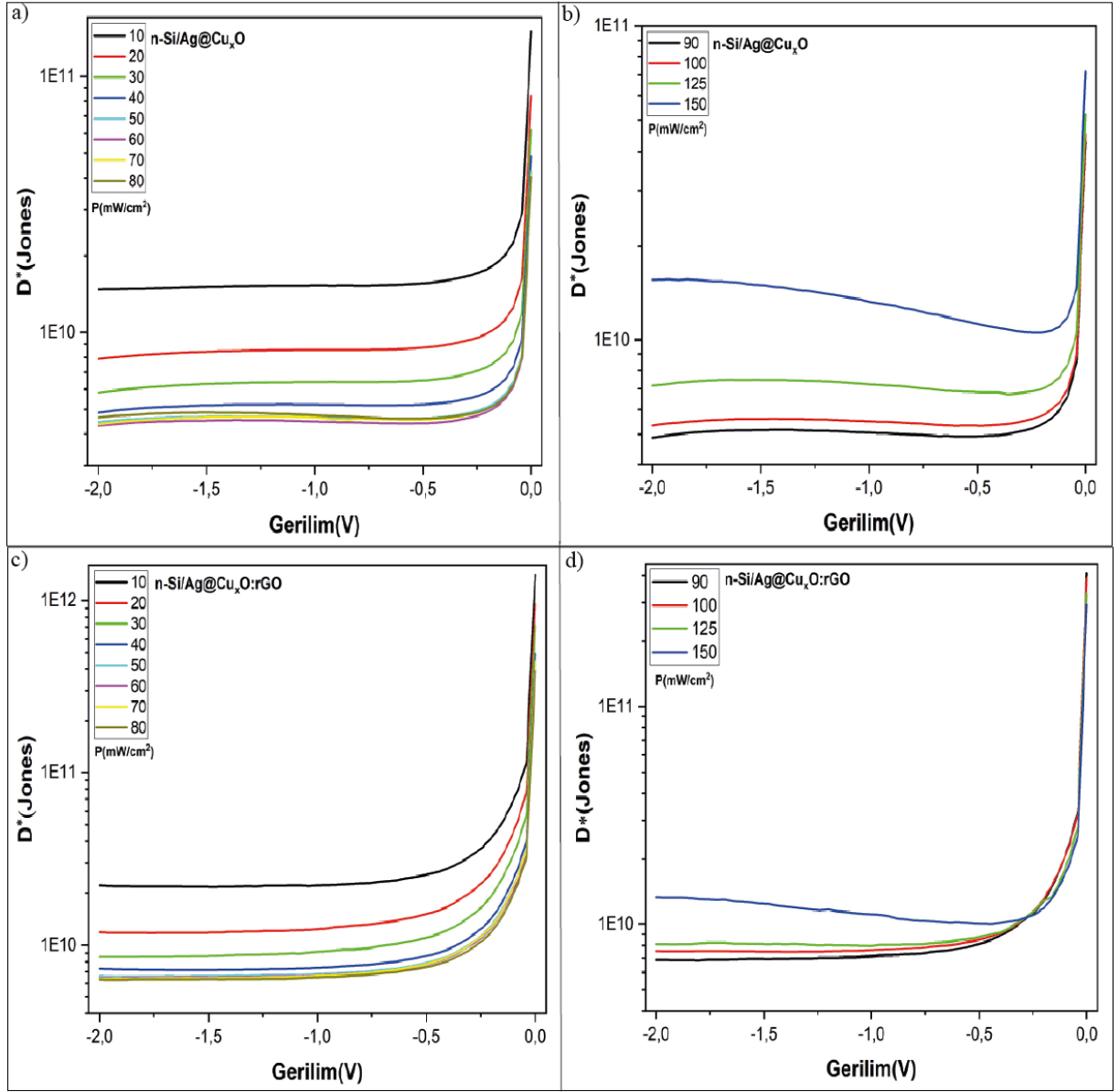


Şekil 42. a) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, c) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki $R - V$ grafikleri

4.7.4. Aygıtların D^* sonuçları

Aygıtların görünür ışık altındaki D^* değerleri Denklem (36) ile hesaplanmış ve gerilime bağlı D^* grafikleri Şekil 43'te verilmiştir. Her iki aygıtta da $R - V$ grafiğinde olduğu gibi D^* değerleri ışık şiddeti arttıkça (10-80 mW/cm² arasında) azalır. 90 mW/cm² ışık şiddetinden sonra (90 – 150 mW/cm² arasında) ise artma gözlemlenmiştir. $D^* - V$ grafiklerinde, D^* 'nin ışık şiddetiyle olan bağıntısının doğrusal bir yapıda olmadığı görülmektedir. 10 mW/cm² ışık şiddetinde oldukça yüksek olan D^* değerleri, 60 mW/cm²'ye kadar belirgin bir şekilde azalmıştır. Bununla birlikte, ışık şiddeti 70 mW/cm²'yi aştığında D^* 'de eksponansiyel bir

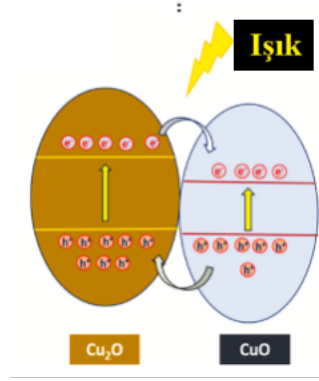
yükseliş gözlemlenmiştir. Özellikle 90 mW/cm^2 'den itibaren bu artış hızlanarak adeta bir çığ etkisi yaratmıştır. Bu durum, aygıtların belli bir ışık şiddeti eşiğini geçtikten sonra farklı bir çalışma moduna geçerek daha güçlü bir yanıt verdiğine işaret etmektedir. Bu davranış, heteroeklemlerin ara yüzlerinde bulunan tuzak durumlarının varlığı ile açıklanabilir (Wang vd., 2015). Ayrıca, ışık şiddetinin artmasıyla D^* 'nin azalmasının bir diğer nedeni, foto-uyarılmış taşıyıcıların artan rekombinasyon oranı olabilir (Yıldırım vd., 2023; Zeng vd., 2018). n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının -2 V'ta en yüksek D^* değerleri sırasıyla $1,56 \times 10^{10}$ ve $2,20 \times 10^{10}$ Jones'tur. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının D^* değeri, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtına göre daha yüksektir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı, daha yüksek spesifik algılayıcılık değeri ile algılayıcılık açısından daha verimli bir performans sergilemektedir. rGO'nun varlığı Cu_xO tabakasındaki elektron taşıma kanallarını iyileştirmiştir. Bu durum, taşıyıcıların yeniden birleşmesini azaltmış ve fotonların daha etkin bir şekilde elektrona dönüştürülmesini sağlamıştır. Bu durum, rGO'nun fotodedektör performansını spesifik algılayıcılık açısından da arttırdığını göstermektedir.



Şekil 43. a) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki $D^* - V$ grafiği, c) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki $D^* - V$ grafikleri.

XPS sonuçlarından da anlaşıldığı gibi (Şekil 28 ve 29) Cu_xO tabakası, hem CuO (bakırın 2 değerlikli hali) hem de Cu₂O (bakırın 1 değerlikli hali) içerir. Bu durum, ışık şiddetine bağlı olarak farklı bir elektron salınım mekanizmasını tetikler. Düşük ışık şiddetlerinde, bakırın 1 değerlikli hali (Cu⁺) elektron salınımına katkıda bulunur. Ancak ışık şiddeti arttıkça, bakırın 2 değerlikli hali (Cu²⁺) baskın hale gelir ve bu nedenle daha fazla elektron ortama salınır. Bu durum, başlangıçta R ve D^* değerlerinde bir düşüşe neden olurken, belirli bir ışık şiddetinin (yaklaşık 70 mW/cm²) üzerine çıktığında, Cu²⁺ iyonlarının sayısındaki artış nedeniyle ekponansiyel bir yükseliş gözlemlenir. Özellikle 90 mW/cm²'nin üzerindeki ışık şiddetlerinde

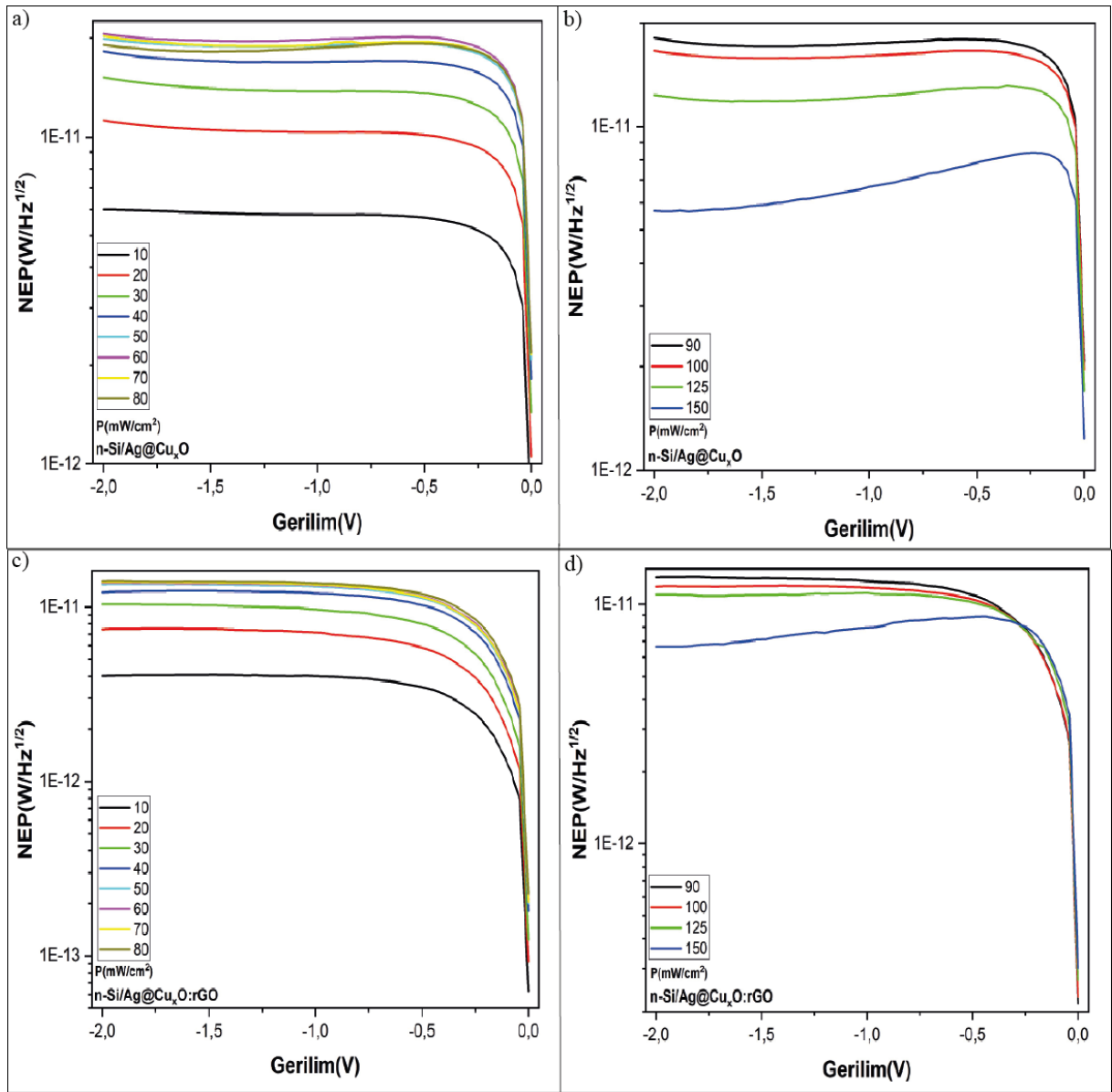
bu artış çığ etkisi yaratır ve fotodedektörün performansında belirgin bir iyileşme sağlar (de Almeida vd., 2022; Gupta vd., 2018; Kajli vd., 2022; Zhang vd., 2014). Şekil 44’te CuO ve Cu₂O’nun dönüşüm mekanizması verilmiştir.



Şekil 44. CuO ve Cu₂O’nun dönüşüm mekanizması (Kajli vd., 2022)

4.7.5. Aygıtların NEP sonuçları

NEP değeri, fotodedektör parametrelerinden D* değeriyle ilişkilidir. Aygıtların etkin alanlarının aynı olması nedeniyle, D* değerleriyle paralel sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir. NEP değerleri Denklem (37) kullanılarak, aygıtların görünür ışık altındaki NEP değerleri hesaplanmış ve grafikleri Şekil 45’te sunulmuştur. NEP değerleri incelendiğinde, diğer parametrelerle uyum içinde olduğu görülmektedir. n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının en yüksek NEP değerleri sırasıyla $5,69 \times 10^{-12}$ ve $4,02 \times 10^{-12}$ W/Hz^{1/2}’dir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının NEP değeri n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının NEP değerinden daha düşüktür.

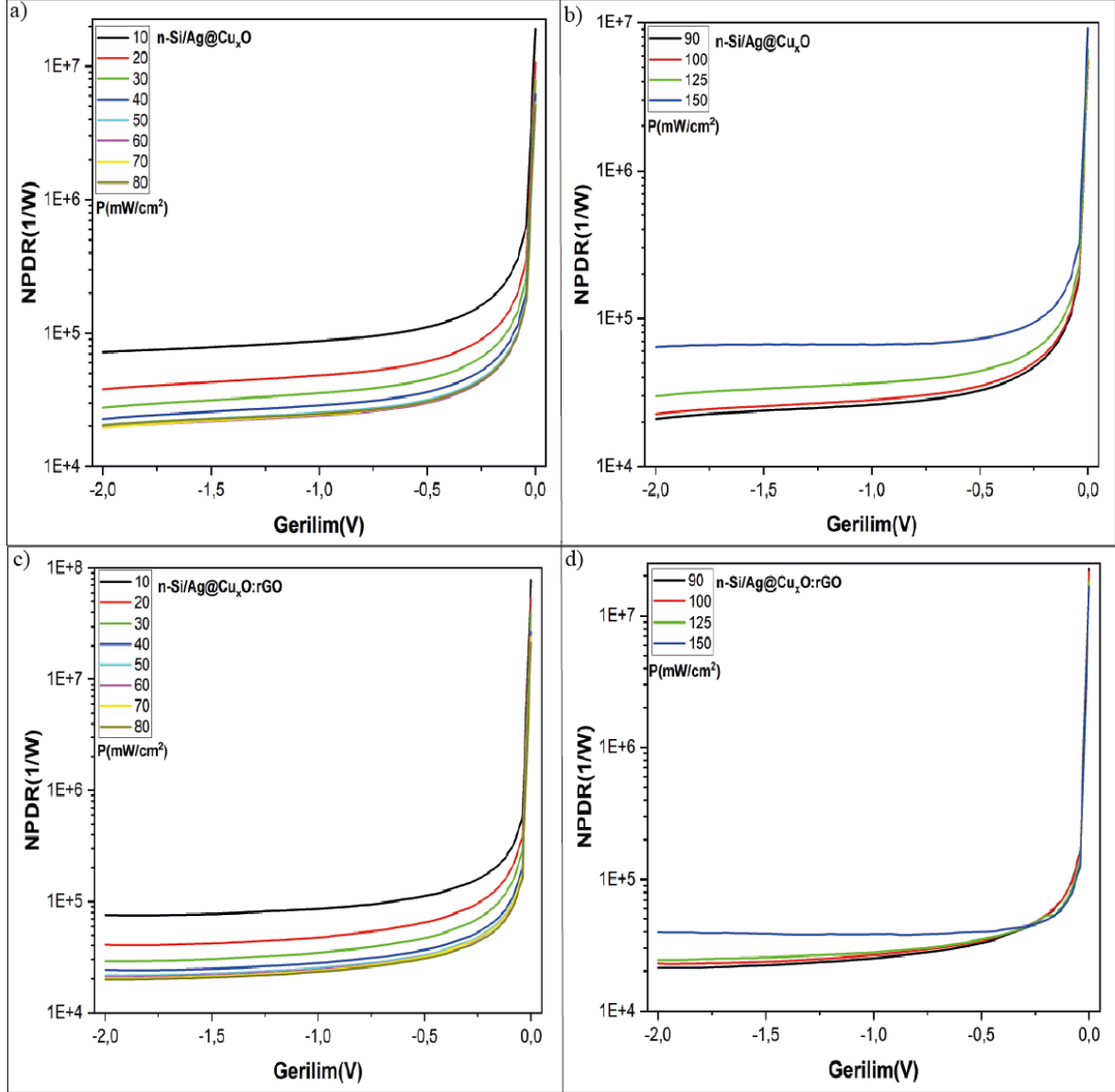


Şekil 45. a) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, c) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki *NEP* – *V* grafikleri.

4.7.6. Aygıtların NPDR sonuçları

Büyük *NPDR* değerleri, fotodedektörün gürültüyü reddetme ve gürültü mevcut olduğunda performans gösterme yeteneği o kadar iyidir. Bir başka deyişle, yüksek fotodedektör performansı için yüksek bir *NPDR* değeri arzu edilir. Aygıtların farklı ışık şiddetlerindeki *NPDR* değerleri, Denklem (38) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 46’da sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde, diğer parametrelerle tutarlı bir uyum içinde olduğu görülmektedir. 10-80 mW/cm² ışık şiddetleri arasında *NPDR* değerlerinde bir düşüş, 90-150 mW/cm² ışık şiddetleri arasında ise bir artış tespit edilmiştir. Bu davranışın nedenleri, *R* – *V* ve *D** – *V*

grafiklerinin analizinde açıklanmıştır. Ek olarak, n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının -2 V'ta en yüksek NPDR değerleri sırasıyla $6,28 \times 10^4$ ve $7,60 \times 10^4$ 1/W'dır. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının NPDR değeri n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının NPDR değerinden daha düşüktür.



Şekil 46. a) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, b) n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, c) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 10-80 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki, d) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının 90-150 mW/cm² ışık şiddeti arasındaki NPDR – V grafikleri.

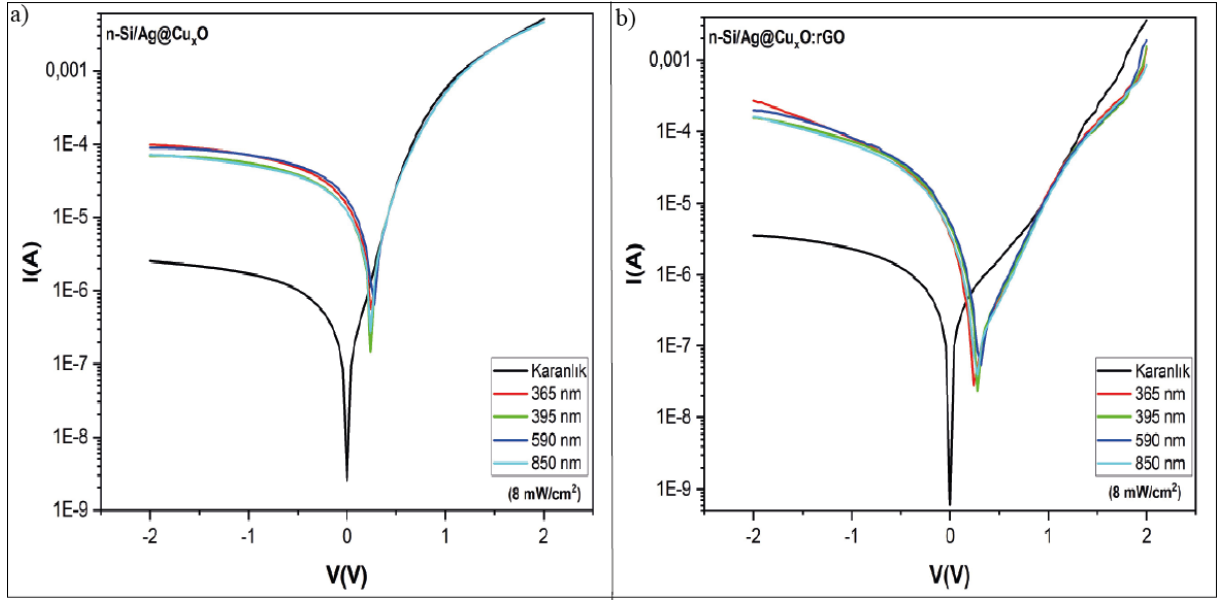
Tablo 7’de, aygıtların hesaplanan fotodedektör parametrelerinin en yüksek R , D^* , On/Off oranı, NEP ve $NPDR$ değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.Hesaplanan fotodedektör parametrelerinin en yüksek değerleri

Aygıt İsmi	R(A/W)	On/Off	$D^*(Jones)$	$NEP(W/Hz^{1/2})$	$NPDR(1/W)$
n-Si/Ag@Cu _x O	0,16	10.688	$1,56 \times 10^{10}$	$5,69 \times 10^{-12}$	$6,38 \times 10^4$
n-Si/Ag@Cu _x O:rGO	0,22	19.150	$2,20 \times 10^{10}$	$4,02 \times 10^{-12}$	$7,60 \times 10^4$

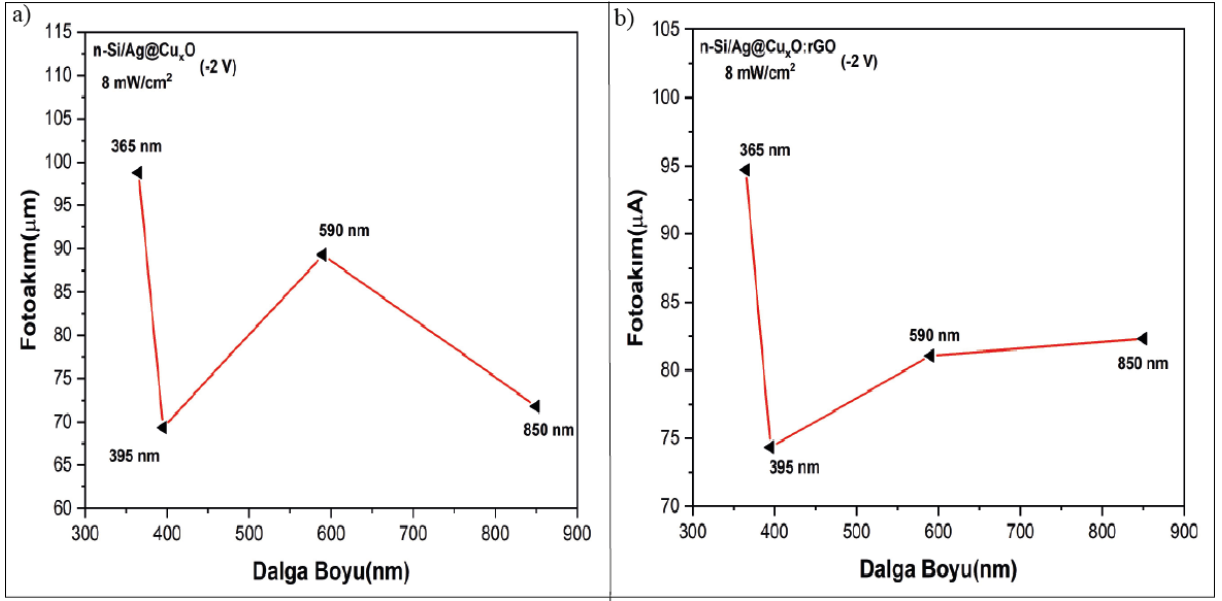
Fotodedektör parametrelerinin analizi yalnızca görünür ışık altında değil, aynı zamanda UV ve IR spektral bölgelerinde de gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, aygıtın farklı dalga boylarındaki performansını değerlendirmek ve genel özelliklerini daha kapsamlı bir şekilde anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Şimdi, fotodedektörlerin UV, görünür ve IR bölgelerindeki parametrelerini detaylı bir şekilde inceleyeceğiz.

n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklemlerinin fotodedektör performansı, karanlıkta ve UV, görünür ve IR bölgelerindeki farklı dalga boylarında (365, 395, 590 ve 850 nm dalga boylarında), ∓ 2 V aralığında ve oda sıcaklığında, 8 mW/cm^2 sabit ışık şiddeti kullanılarak gerçekleştirilen $I - V$ ölçümleriyle incelenmiştir. Aygıtların karanlıkta ve UV, görünür ve IR bölgelerindeki $I - V$ özellikleri Şekil 47’de verilmiştir. $I - V$ grafiklerine bakıldığında, her iki aygıtta da UV, görünür ve IR bölgesindeki ışık altında da akım artışları açık bir şekilde görülmektedir. Dalga boyuna bağlı ters beslem akım farkları çok yüksek olmasa da, tüm dalga boylarında mükemmel duyarlılık elde edildi. Yani n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem fotodedektörleri geniş bir spektral algılama yeteneğini ortaya koymuştur.



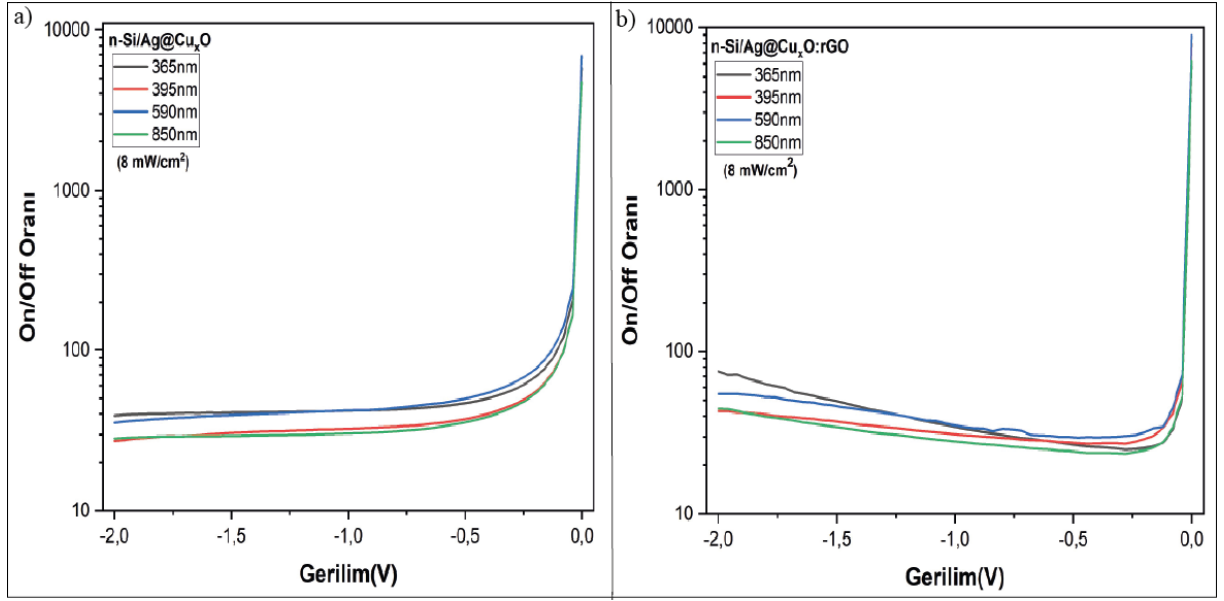
Şekil 47. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki $I - V$ grafikleri

Şekil 48'de UV, görünür ve IR ışıkları altında dalga boyuna bağlı fotoakım grafikleri verilmiştir. Şekil 48a incelendiğinde, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının 365 nm'de (UV bölge) en yüksek fotoakım değerine ulaştığı görülmektedir (98,78 μ A). Bu durum, aygıtın UV bölgesine karşı oldukça hassas olduğunu ve UV ışığında yüksek verimlilikle çalıştığını göstermektedir. 395 nm'de (yakın UV bölge) ise fotoakım değeri 365 nm'ye kıyasla azalmış (69,36 μ A) olsa da, aygıtın UV ışığını algılamada etkili olduğu anlaşılmaktadır. 590 nm'de (görünür bölge) fotoakımda bir artış gözlemlenmiş (89,36 μ A) ve bu durum, fotodetektörün görünür bölgede de yüksek verimlilikle çalışabildiğini göstermektedir. Son olarak, 850 nm'de (IR bölgesi) fotoakım değeri 395 nm'ye göre daha yüksek bir seviyeye ulaşmıştır (71,80 μ A). Bu, aygıtın IR bölgesindeki algılama kapasitesinin en az UV bölgesi kadar iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Şekil 48b incelendiğinde, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının fotoakım değerleri 365 nm'de 94,72 μ A, 395 nm'de 74,35 μ A, 590 nm'de 81,05 μ A ve 850 nm'de 82,31 μ A olarak hesaplanmıştır. Fotoakım değerlerinde UV ve görünür bölgede küçük düşüşler gözlemlenirken, IR bölgesinde bir artış olduğu dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının her bölgede, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtıyla neredeyse aynı tepkiyi verdiğini göstermektedir. Özellikle IR bölgesinde, hassasiyetin daha yüksek olduğu görülmektedir.



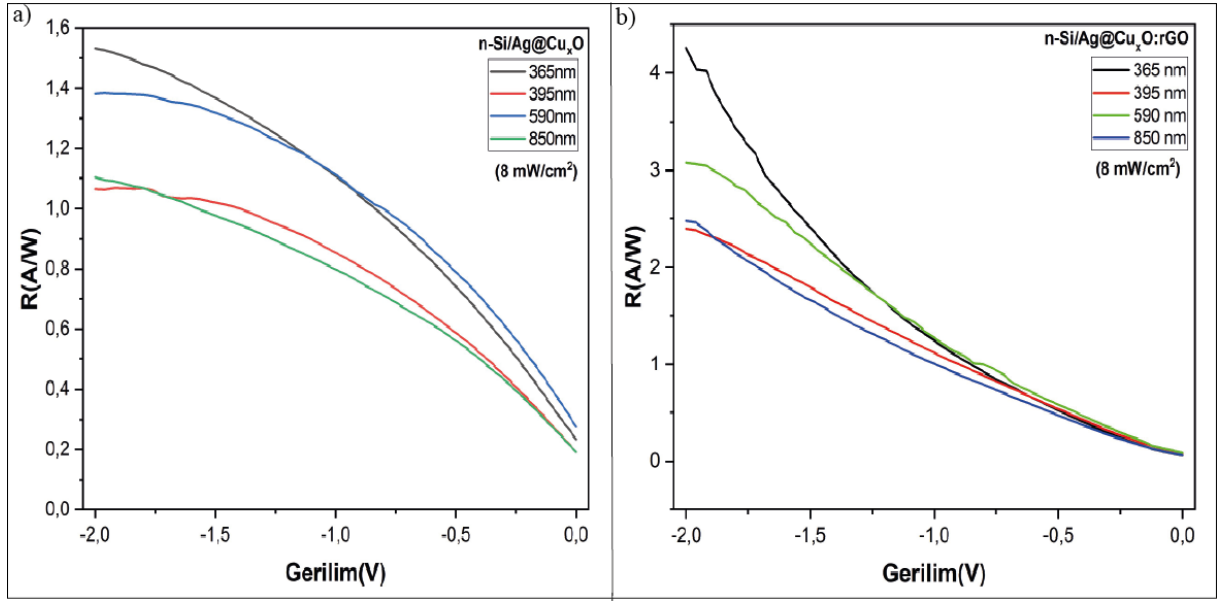
Şekil 48. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki Fotoakım-dalga boyu grafikleri

Şekil 49’da UV, görünür ve IR ışıkları altında gerilime bağlı *On/Off* grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, *On/Off* değerlerinin sıfır gerilim hariç artan gerilimle arttığı görülmektedir. Her dalga boyunun maksimum değeri sıfır gerilimde elde edilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO heteroeklem fotodedektörde, 365, 395, 590 ve 850 nm dalga boyları için en yüksek *On/Off* değerleri sırasıyla 5821, 4743, 6874 ve 4750 olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan, n-Si/Ag/Cu_xO:rGO heteroeklem fotodedektör için 365 nm’de 5867, 395 nm’de 7983, 590 nm’de 8957 ve 850 nm’de 6235 değerleri gözlemlenmiştir. Her iki aygıt için de en yüksek *On/Off* değeri 590 nm dalga boyunda elde edilmiştir. -2 V gerilimde en yüksek değerlerin 365 nm dalga boyunda olduğu görülmektedir. Bu durum, aygıtların özellikle UV bölge olmak üzere tüm bölgelerde oldukça verimli çalıştığını ve optik performanslarının yüksek olduğunu göstermektedir. İki aygıt karşılaştırıldığında, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem fotodedektörünün düşük gerilim değerlerinde de n-Si/Ag@Cu_xO aygıtına göre daha yüksek *On/Off* değerlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, rGO’nun fotodedektörlerde ışık sinyalini güçlendiren bir malzeme olarak kullanılabileceğini desteklemektedir (Yıldırım vd., 2024).



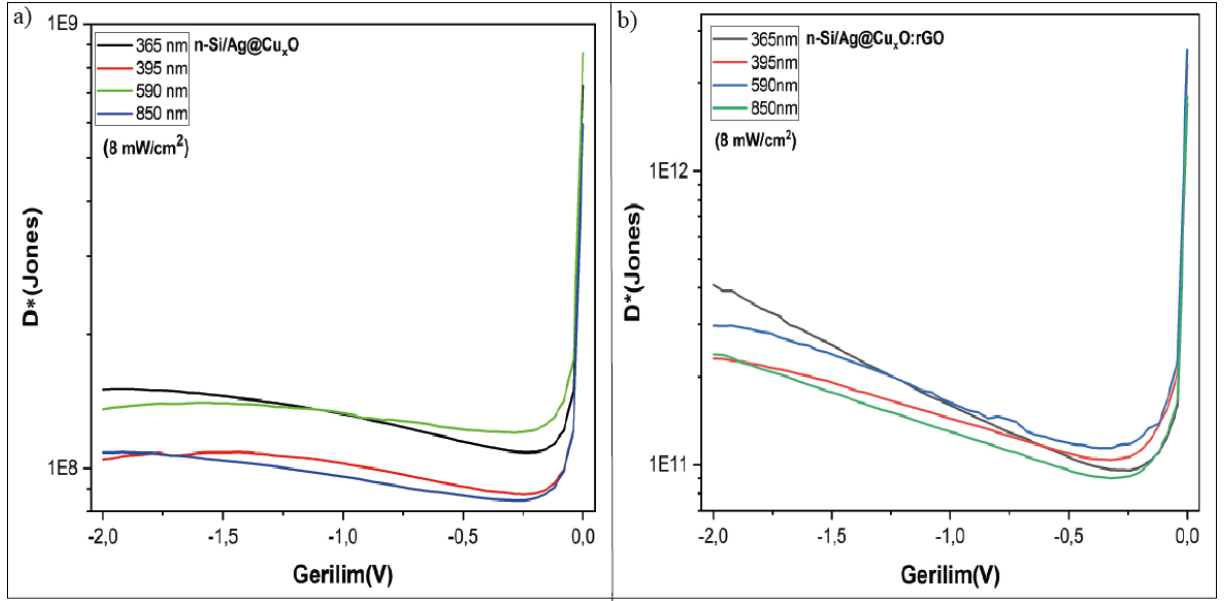
Şekil 49. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki gerilime bağlı *On/Off* grafikleri

Aygıtların UV, görünür ve IR ışık altındaki gerilime bağlı $R - V$ grafikleri Şekil 50'de verilmiştir. Şekil 50a incelendiğinde, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının -2 V için 365, 395, 590 ve 850 nm dalga boylarındaki R değerleri sırasıyla 1,53, 1,06, 1,38 ve 1,10 A/W'dır. En yüksek R değeri 365 nm'de hesaplanmıştır. Bu durum, aygıtın UV bölgesinde oldukça hassas olduğunu ve yüksek performans sergilediğini göstermektedir. 395 nm'de duyarlılık, 365 nm'ye kıyasla azalsa da, aygıtın UV bölgesindeki hassasiyetini koruduğu anlaşılmaktadır. Tüm dalga boyundaki değerler dikkate alındığında aygıt tüm dalga boylarında (UV, görünür ve IR bölgede) duyarlılık kapasitesine sahiptir. Şekil 50b incelendiğinde, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı için de en yüksek R değeri 365 nm'de 4,26 A/W, en düşük R değeri ise 395 nm'de 2,39 A/W'dır. 590 ve 850 nm dalga boyları için R değerleri ise sırasıyla 3,08 ve 2,47 A/W'dır. İki aygıt karşılaştırıldığında ise n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının R değerleri tüm bölgeler için n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının R değerlerinden daha yüksektir. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO daha yüksek algılama yeteneği göstermektedir. Bu durum, rGO'nun fotodetektör performansını algılama açısından da arttırdığını göstermektedir.



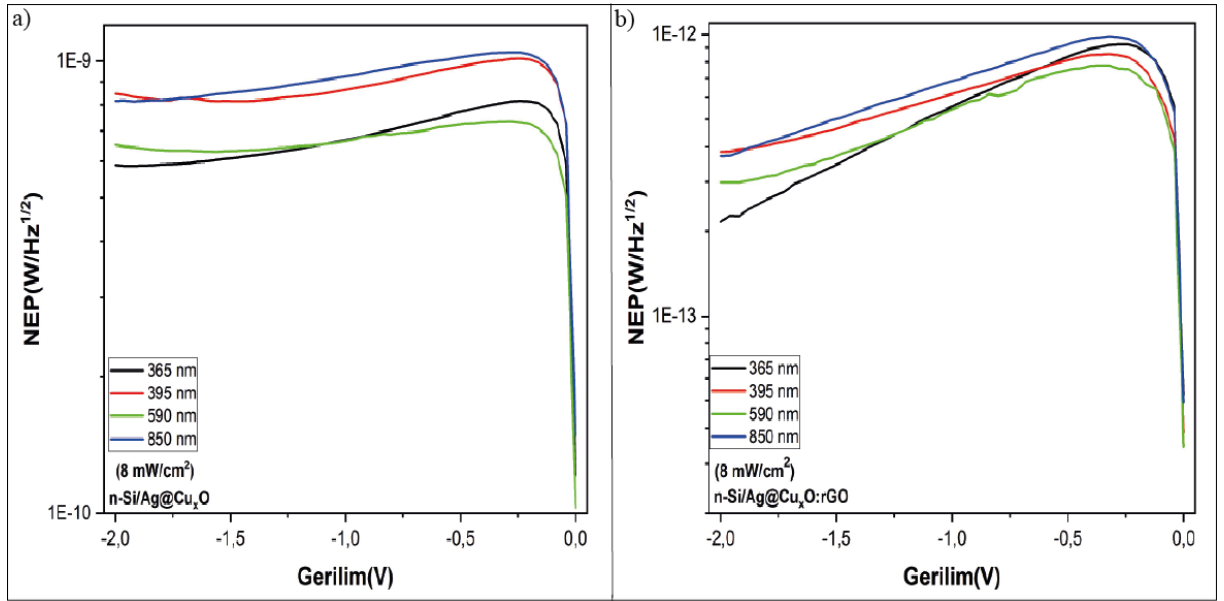
Şekil 50. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki $R - V$ grafikleri

Şekil 51’de aygıtların UV, görünür ve IR ışık altındaki gerilime bağlı $D^* - V$ grafikleri verilmiştir. Şekil 51a’daki n-Si/Ag@Cu_xO heteroeklem fotodetektörünün en yüksek D^* değerleri 365 nm dalga boyunda ($1,51 \times 10^{11}$ Jones), en düşük D^* değerleri ise 395 nm dalga boyunda ($1,05 \times 10^{11}$ Jones) hesaplanmıştır. Bu durum, aygıtın UV bölgesinde oldukça hassas olduğunu ve zayıf sinyalleri bile algılayabildiğini göstermektedir. 395 nm’deki D^* değeri, 365 nm’ye kıyasla düşüktür. Ancak aygıt yine de UV bölgesinde etkili bir performans göstermektedir. 590 nm ve 850 nm’de, D^* değerleri birbirlerine çok yakın değerlerdir (sırasıyla $1,36 \times 10^{11}$ ve $1,09 \times 10^{11}$ Jones). Görünür bölge ve IR bölgesinde de zayıf sinyallerin algılanabilirliği yüksektir. Şekil 51b incelendiğinde, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem fotodetektörü için de benzer yorumlar yapılabilir. En yüksek D^* değeri 365 nm’de en düşük D^* değeri ise 395 nm’de gözlemlenmiştir. 365, 395, 590 ve 850 nm dalga boylarındaki D^* değerleri -2 V için sırasıyla $4,10 \times 10^{11}$, $2,31 \times 10^{11}$, $2,96 \times 10^{11}$ ve $2,38 \times 10^{11}$ Jones’tur. İki aygıt karşılaştırıldığında ise n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının algılama değerleri tüm bölgeler için n-Si/Ag/Cu_xO aygıtının algılama değerlerinden daha yüksektir. nSi/Ag@Cu_xO:rGO daha yüksek algılama yeteneği göstermektedir. Bu durum, rGO’nun fotodetektör performansını algılama açısından da arttırdığını göstermektedir.



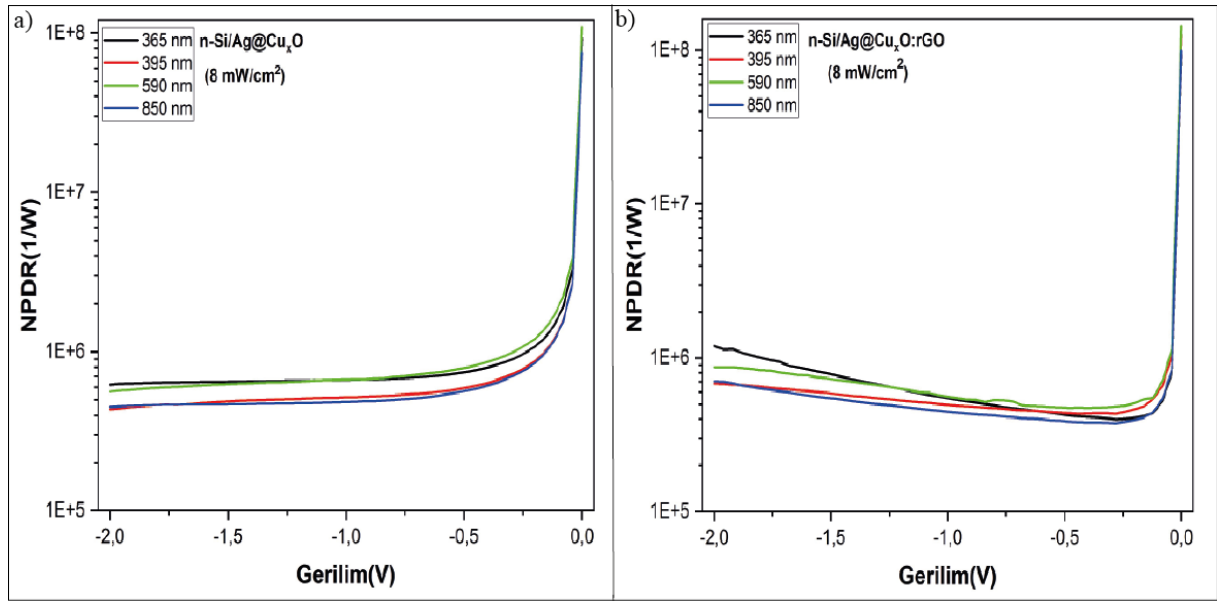
Şekil 51. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki $D^* - V$ grafikleri

Tüm dalga boyları için gerilime bağlı olarak heteroeklem fotodetektörlerinin hesaplanan NEP değerlerinin çizimleri Şekil 52’de verilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO heteroeklem fotodetektörünün -2 V’teki NEP değerleri 365, 395, 590 ve 850 nm için sırasıyla $5,88 \times 10^{-13}$, $8,46 \times 10^{-13}$, $6,52 \times 10^{-13}$ ve $8,16 \times 10^{-13}$ W/Hz^{1/2}, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem fotodetektörünün NEP değerleri ise -2 V için sırasıyla $2,17 \times 10^{-13}$, $3,84 \times 10^{-13}$, $2,99 \times 10^{-13}$ ve $3,72 \times 10^{-13}$ W/Hz^{1/2} olarak hesaplanmıştır. NEP sonuçları, her iki aygıtın $10^{-12} - 10^{-13}$ kadar küçük aralıkta düşük sinyalleri tespit edebildiğini göstermektedir.



Şekil 52. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki $NEP - V$ grafikleri

Tüm dalga boyları için gerilime bağlı heteroeklem fotodedektörler için hesaplanan *NPDR* değerleriyle hazırlanan grafikler Şekil 53'te verilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO için 365, 395, 590 ve 850 nm dalga boylarında hesaplanan *NPDR* değerleri (-2 V için) sırasıyla, $6,22 \times 10^5$, $4,36 \times 10^5$, $5,62 \times 10^5$ ve $4,52 \times 10^5$ 1/W, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO için ise sırasıyla $1,20 \times 10^6$, $6,80 \times 10^5$, $8,70 \times 10^5$ ve $7,02 \times 10^5$ 1/W olarak verilmiştir. Her iki aygıt için de en yüksek *NPDR* değerleri 365 nm'de görülmektedir. Bu durum UV bölgede fotodedektörün gürültüyü reddetme ve gürültü mevcut olduğunda performans gösterme yeteneğinin yüksek olduğunu göstermektedir. İki aygıt karşılaştırıldığında, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtına kıyasla gürültü altında daha yüksek performans sergilediği görülmektedir.

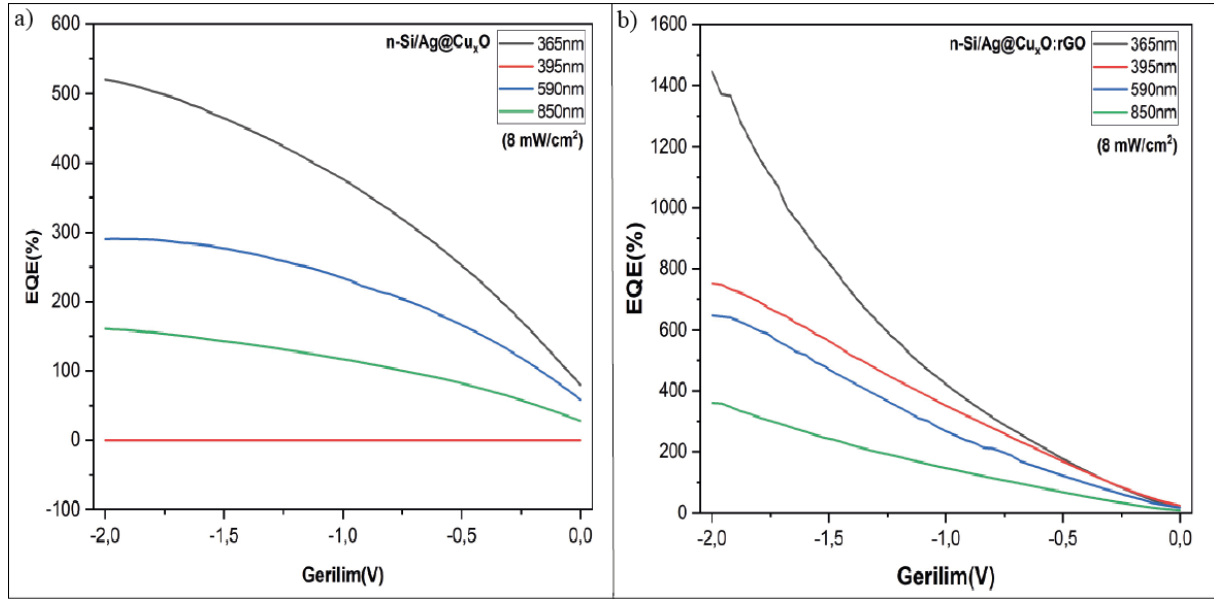


Şekil 53. a) nSi/Ag@Cu_xO, b) nSi/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki *NPDR* – *V* grafikleri

4.7.7. Aygıtların EQE sonuçları

Bir optik aygıtın *EQE*'si gelen fotonik sinyali elektrik sinyaline dönüştürmede fotodedektörün verimliliğini analiz etmeye yardımcı olan bir parametredir (Yılmaz vd., 2024). Denklem (39) kullanılarak, UV, görünür ve IR ışık altındaki *EQE* değerleri hesaplanmış ve grafikleri Şekil 54'te sunulmuştur. Her iki aygıt için, tüm dalga boylarında hesaplanan *EQE* değerleri %100'ü aşmıştır. Bu durum, tüm dalga boylarında tuzakların azaldığı ve fotoiletkenlik kazancının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının *EQE* değerleri 365, 395, 590 ve 850 nm dalga boyları için sırasıyla %521, %335, %290 ve %160 olarak hesaplanmıştır. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı için ise 365, 395, 590 ve 850 nm dalga boyları için *EQE* değerleri sırasıyla %1447, %752, %647 ve %361 olarak hesaplanmıştır. Her iki aygıt için de en yüksek

EQE değerleri 365 nm’de olmakla birlikte n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtındaki *EQE* değerleri daha yüksektir. Bu durum, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının verimliliğinin daha yüksek olduğunu anlatmaktadır.



Şekil 54. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının UV, görünür ve IR ışıkları altındaki *EQE* – *V* grafikleri

Bu çalışmada elde edilen fotodetektör parametreleri, literatürde daha önce rapor edilmiş benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları aşağıdaki Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Fotodetektör parametrelerinin önceki çalışmalarda rapor edilen sonuçlarla karşılaştırılması.

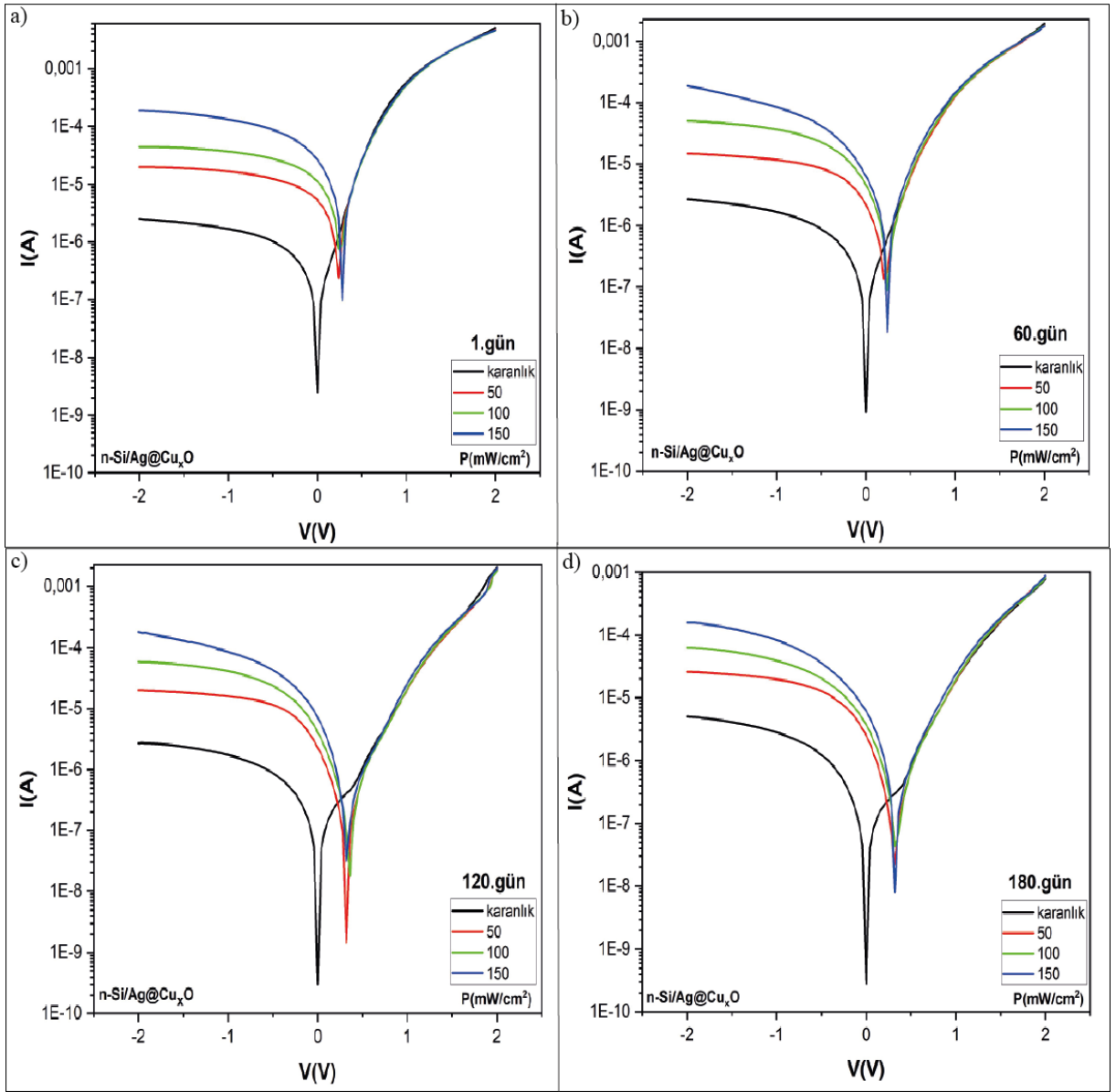
Malzeme	Dalga Boyu (nm)	D* (Jones)	R (A/W)	Referans
nSi/Ag@Cu _x O	365	1,51×10 ¹¹	1,53	Bu çalışma
	395	1,05×10 ¹¹	1,06	
	590	1,36×10 ¹¹	1,38	
	850	1,09×10 ¹¹	1,10	
nSi/Ag@Cu _x O:rGO	365	4,10×10 ¹¹	4,26	Bu çalışma
	395	2,31×10 ¹¹	2,39	
	590	2,96×10 ¹¹	3,08	
	850	2,38×10 ¹¹	2,47	
Cu ₂ O/ZnO	564	8,90×10 ⁸	0,0013	Li vd., 2018
Cu ₂ O/Ag/ZnO		3,30×10 ¹⁰	0,27	
Ag@ZnO/n-Si	365	5,47×10 ¹¹	1,32	Yılmaz vd., 2024
p-CuO/n-Si	900	1,56×10 ¹¹	0,23	Gunasekaranvd.,2020
rGO/n-Si	600	-----	1,52	Li vd., 2016
rGO/n-Si	445	45,23×10 ¹¹	0,128	Zhu vd., 2014
HBC/n-Si	850	2×10 ¹²	1,16	Yuca vd., 2023
rGO/AgNps/Si	785	7,17×10 ¹¹	17,23	Rohizatud vd.,2021
CuO:Cu ₂ O/p-Si	750	~9×10 ⁹	~0,6	Hassan vd., 2024
CuONps/ZnONrs	395	4,48×10 ¹¹	1,38	Giang vd., 2023

4.8. Fotodedektörlerin Kararlılık Ölçümleri

Bir fotodedektörün performans değerlerinin yanı sıra, aygıtın performansını zaman içinde koruyabilme kapasitesi de uygulama açısından büyük önem taşır. Bu doğrultuda, aygıtların fotodedektör performans ölçümleri 60. gün, 120. gün ve 180. günlerde yeniden yapılmıştır ve aygıtların zamanla performansındaki değişiklikler analiz edilmiştir. n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem fotodedektörleri için Şekil 55 ve 56'da görünür ışık ve Şekil 57 ve 58 ise UV, görünür ve IR ışık altında tekrarlanan kararlılık ölçümleri sonucunda elde edilen $I - V$ grafikleri verilmiştir.

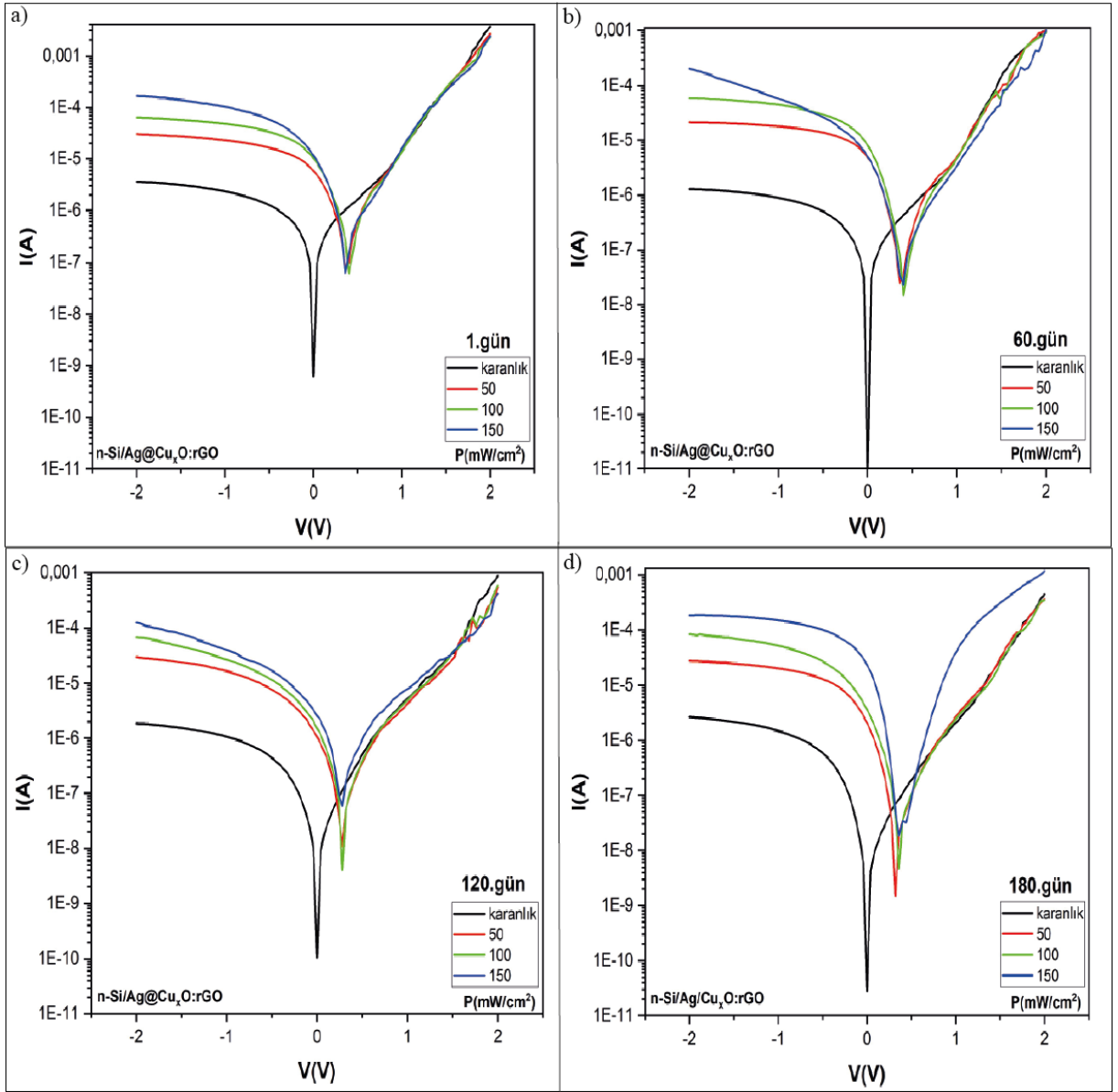
Şekil 55a'da verilen grafiğe bakılacak olursa n-Si/Ag@Cu_xO heteroeklem fotodedektörü için karanlık durumda, aygıtın $I - V$ eğrisi 1. gün ile 180. gün arasında önemli bir değişiklik göstermemektedir. Bu, aygıtın karanlık akımının zamanla büyük ölçüde sabit kaldığını ve elektronik stabilitesinin korunduğunu göstermektedir. Şekil 55b, c ve d'de 50, 100 ve 150 mW/cm² ışık şiddetlerinde, aygıtın $I - V$ eğrileri günler arasında çok büyük farklılıklar göstermemektedir. 1. gün ve 180. gün arasında küçük farklar oluşsa da, genel olarak aygıtın ışık altında kararlılığını iyi bir şekilde koruduğu söylenebilir. Karanlıkta aygıtın akımı oldukça düşüktür ve ışık olmadığında aygıtın istenmeyen akım üretimini baskıladığı görülmektedir. Bu, aygıtın karanlık akımının düşük olduğunu ve iyi bir başlangıç performansı sergilediğini göstermektedir.

Bu grafikler, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının uzun vadeli kullanımda hem karanlık hem de ışık altındaki performansını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. Aygıt, farklı günlerde ve değişen ışık yoğunluklarında stabil bir şekilde çalışarak güvenilir bir fotodedektör olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar, aygıtın pratik uygulamalarda uzun süreli kullanım için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.



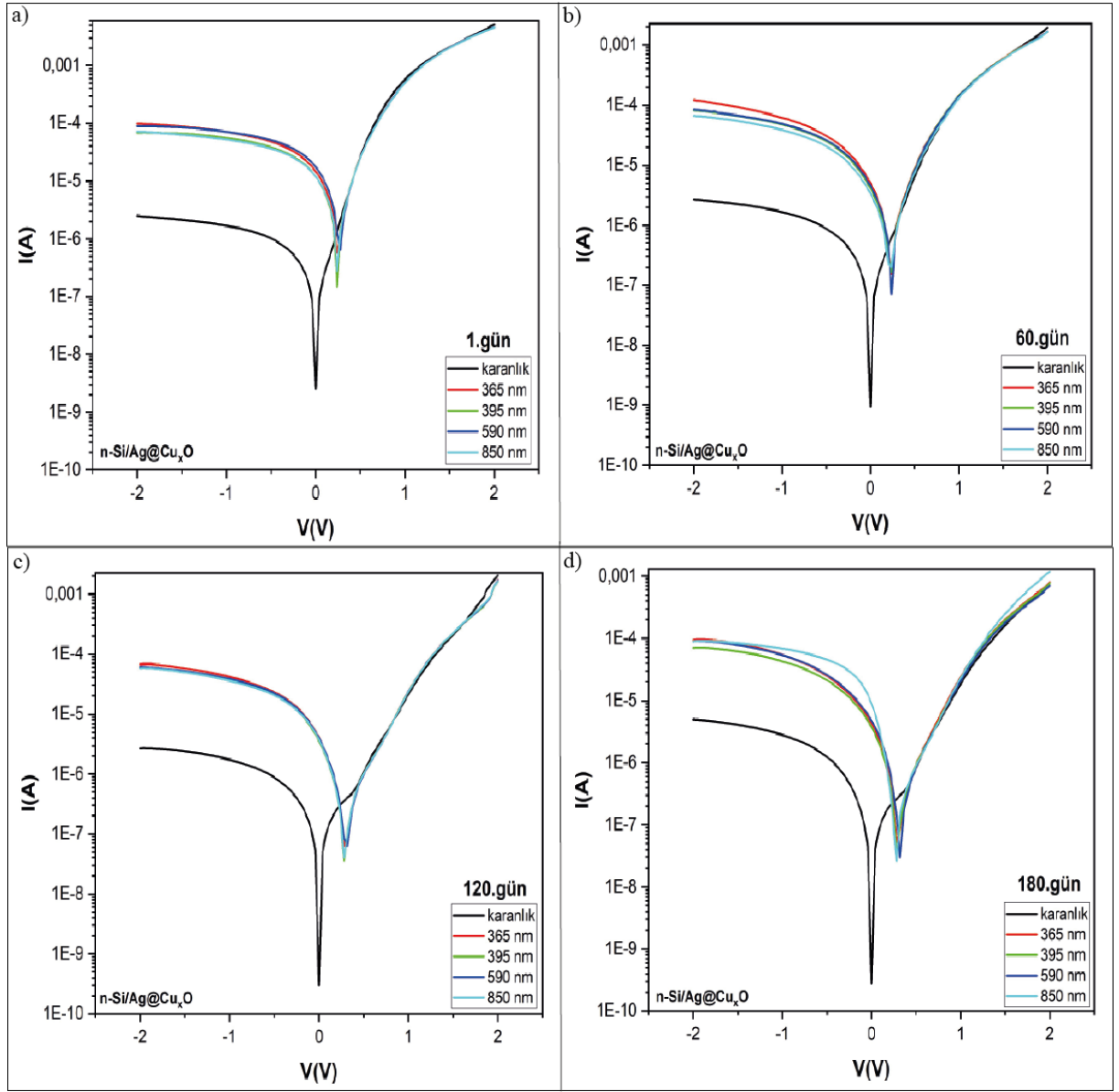
Şekil 55. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının görünür ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri

Şekil 56’da verilen grafiklere bakılacak olursa n-Si/Ag@Cu_xO:rGO heteroeklem fotodetektörü için karanlık durumda, aygıtın $I - V$ eğrisi 1. gün ile 180. gün arasında önemli bir değişiklik göstermemektedir. 1. gün ile 180. gün arasında karanlık akım oldukça sabit kalmıştır. Işık şiddeti arttıkça akımın düzenli bir şekilde artması, aygıtın ışık algılama performansını zamanla koruduğunu göstermektedir. Küçük farklılıklar aygıtın yaşlanma etkileri veya çevresel koşullardan kaynaklanabilir, ancak bu farklar performansı ciddi şekilde etkilememiştir. Aygıt, 1. günden 180. güne kadar hem karanlık hem de ışık altındaki performansını büyük ölçüde korumuştur.



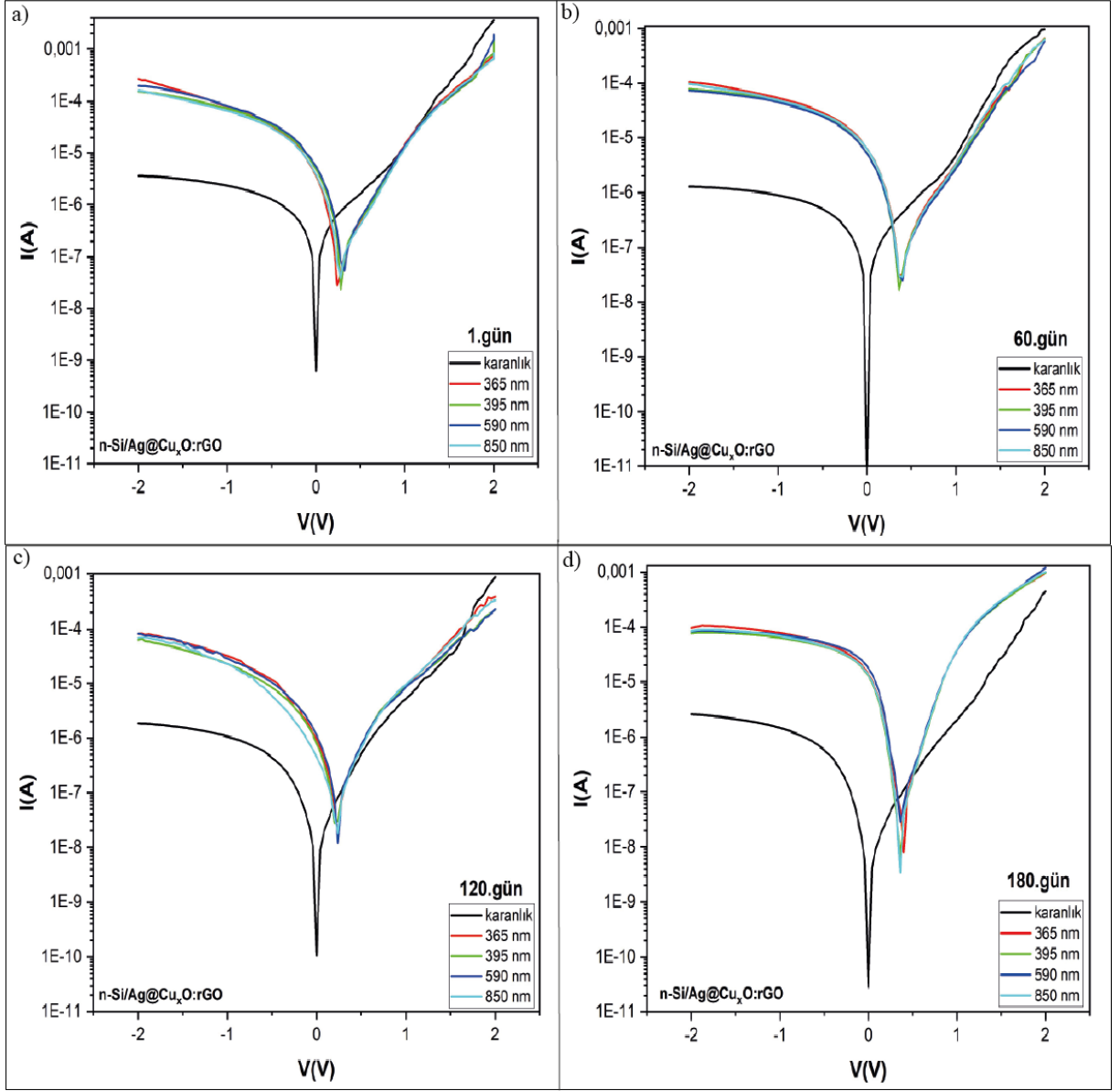
Şekil 56. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının görünür ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri

n-Si/Ag@Cu_xO heteroeklem fotodedektöre ait UV, görünür ve IR ışık altında tekrarlanan kararlılık ölçümleri sonucunda elde edilen $I - V$ grafikleri Şekil 57’de görülmektedir. Bu grafikler, n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının uzun vadeli kullanımda UV ışık algılama kapasitesini başarılı bir şekilde koruduğunu göstermektedir. Aygıt, karanlık stabilitesini ve ışık altındaki performansını tüm dalga boylarında büyük ölçüde sabit tutarak güvenilir bir fotodedektör olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 57. $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O}$ aygıtının UV, görünür ve IR ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri

Şekil 58'de $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O:rGO}$ heteroeklem fotodedektörünün UV, görünür ve IR ışık altında kararlılık ölçümleri verilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O}$ aygıtı ile aynı yorumlar yapılabilir. Aygıt, görünür ve IR bölgelerinde de stabil bir performans sergileyerek uzun vadeli kullanım için uygun bir fotodedektör olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 58. $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O:rGO}$ aygıtının UV, görünür ve IR ışık altında kararlılık ölçümleri. a) 1. gün b) 60. gün, c) 120. gün, d) 180. gün $I - V$ grafikleri

Tablo 9 ve 10'da $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O}$ ve $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O:rGO}$ heteroeklem fotodedektörlerinin farklı günler için (1. gün 60. gün, 120. gün ve 180. gün), farklı ışık şiddetlerinde (50 , 100 ve 150 mW/cm^2) ve farklı dalga boylarında (365 , 395 , 590 ve 850 nm) hesaplanan fotodedektör parametreleri verilmiştir.

Bu sonuçlar, $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O}$ ve $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O:rGO}$ aygıtlarının uzun vadeli kullanımda performansının büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir. Uzun süreli kararlılık ve yüksek performans, aygıtların güvenilir ve pratik fotodedektörler olduklarını kanıtlamaktadır.

Tablo 9.Farklı günlerde ölçülen R değerleri (-2 V)

n-Si/Ag@Cu _x O	50 mW/cm ²	100 mW/cm ²	150 mW/cm ²	365 nm	395 nm	590 nm	850 nm
R(A/W)							
1. gün	0,045	0,05	0,16	1,53	1,06	1,38	1,10
60. gün	0,012	0,014	0,02	0,19	0,13	0,13	0,10
120. gün	0,032	0,04	0,05	0,10	0,09	0,09	0,09
180. gün	0,04	0,05	0,07	0,14	0,10	0,14	0,14
n-Si/Ag@Cu _x O:rGO	50 mW/cm ²	100 mW/cm ²	150 mW/cm ²	365 nm	395 nm	590 nm	850 nm
R(A/W)							
1. gün	0,07	0,08	0,14	4,26	2,39	3,08	2,47
60. gün	0,05	0,07	0,17	1,64	1,22	1,14	1,51
120. gün	0,07	0,08	0,10	1,28	0,98	1,30	1,07
180. gün	0,06	0,10	0,16	1,51	1,18	1,29	1,31

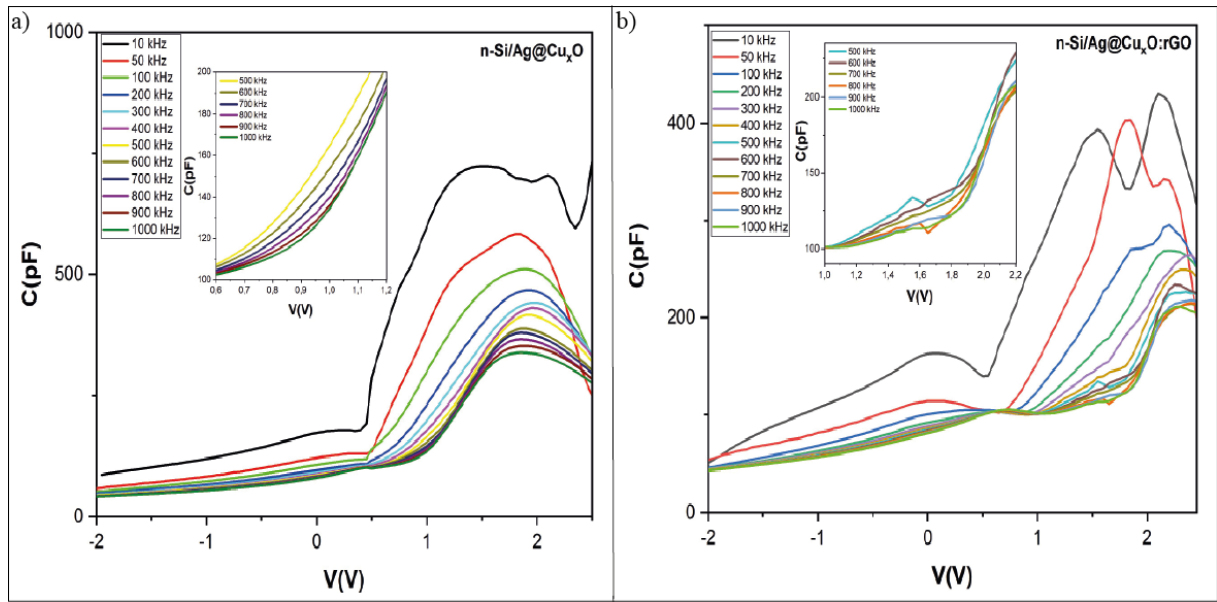
Tablo 10.Farklı günlerde ölçülen D* değerleri (-2 V)

n-Si/Ag@Cu _x O	50 mW/cm ²	100 mW/cm ²	150 mW/cm ²	365 nm	395 nm	590 nm	850 nm
D*(Jones)							
1. gün	4,45×10 ⁹	5,33×10 ⁹	1,56×10 ¹⁰	1,51×10 ⁸	1,05×10 ⁸	1,36×10 ⁸	1,09×10 ⁸
60. gün	3,11×10 ⁹	5,44×10 ⁹	8,55×10 ⁹	1,81×10 ¹⁰	1,2×10 ¹⁰	1,23×10 ¹⁰	9,73×10 ⁹
120. gün	4,39×10 ⁹	6,02×10 ⁹	8,56×10 ⁹	9,79×10 ⁹	8,52×10 ⁹	8,8×10 ⁹	8,34×10 ⁹
180. gün	4,01×10 ⁹	4,39×10 ⁹	6,53×10 ⁹	9,92×10 ⁹	7,23×10 ⁹	9,49×10 ⁹	9,48×10 ⁹
n-Si/Ag@Cu _x O:rGO	50 mW/cm ²	100 mW/cm ²	150 mW/cm ²	365 nm	395 nm	590 nm	850 nm
D*(Jones)							
1. gün	6,61×10 ⁹	7,49×10 ⁹	1,34×10 ¹⁰	4,10×10 ¹¹	2,31×10 ¹¹	2,96×10 ¹¹	2,38×10 ¹¹
60. gün	4,93×10 ⁹	7,12×10 ⁹	1,65×10 ¹⁰	1,57×10 ¹¹	1,17×10 ¹¹	1,10×10 ¹¹	1,46×10 ¹¹
120. gün	6,89×10 ⁹	8,02×10 ⁹	9,98×10 ¹⁰	1,23×10 ¹¹	9,39×10 ¹⁰	1,25×10 ¹¹	1,03×10 ¹¹
180. gün	6,10×10 ⁹	9,93×10 ⁹	1,50×10 ¹⁰	1,45×10 ¹¹	1,14×10 ¹¹	1,24×10 ¹¹	1,26×10 ¹¹

4.9. C-V Ölçümleri

Fotodiyotlarda bulunan deplasyon bölgesi, kapasitif bir davranış sergilemektedir. n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO fotodiyotlarına ait C – V değişim grafikleri, karanlıkta, -3V ile +3V gerilim aralığında ve 10-1000 kHz frekans aralığında ölçülmüş olup, bu grafikler sırasıyla Şekil 59’da sunulmaktadır. Grafikler dikkatlice incelendiğinde, kapasitans değerlerinin hem uygulanan voltaj hem de frekans ile önemli ölçüde değişim gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu durum, her iki yapı için de kapasitansın elektriksel özelliklerinin gerilim ve frekans gibi dış etkenlere olan duyarlılığını ortaya koymaktadır.

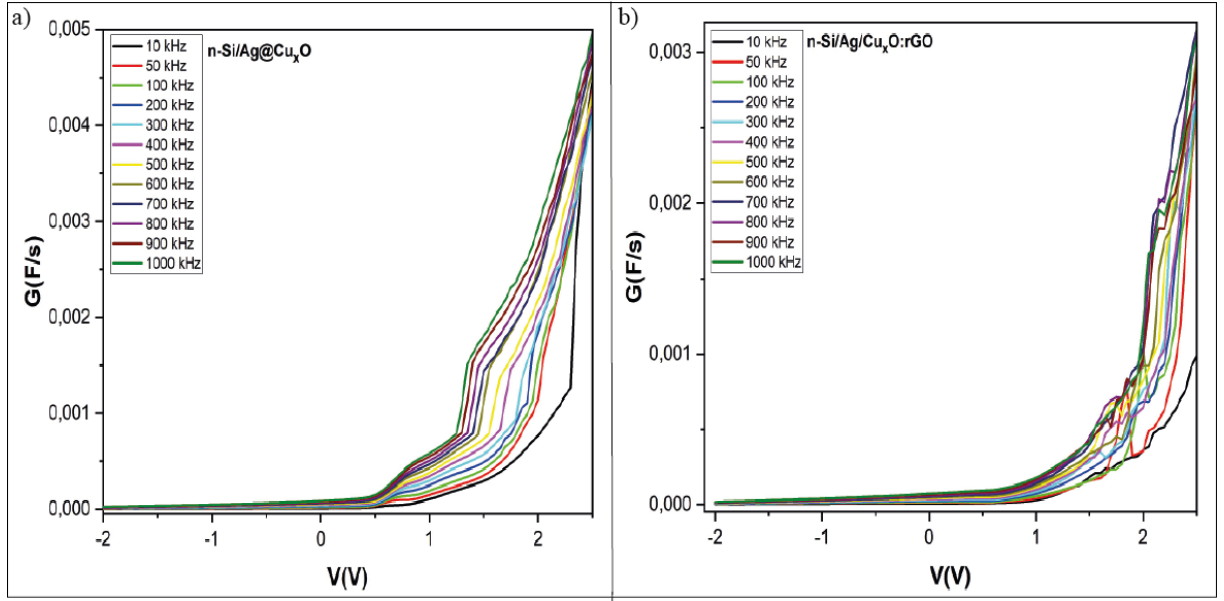
Kapasitans profili, film üretim süreci sırasında oluşan kusurlar ve heteroyapıda bulunan arayüzey durumları nedeniyle 10-1000 kHz frekans aralığında piklerin oluşumuna neden olmuştur (Meftah vd., 2020). $C - V$ grafiklerinde gözlenen doğrusal olmayan davranışlar, eğriler ve pikler, ara yüzey durumlarının varlığına ve seri direnç etkisine bağlanmaktadır (Karabulut vd., 2018). Her iki aygıtta da frekans arttıkça kapasitansın azaldığı görülmektedir. Ayrıca, piklerin düz beslem bölgesinde gerçekleştiği ve frekansın artmasıyla birlikte bu piklerin daha yüksek gerilim değerlerine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ara yüzey durumlarının yüksek frekanslarda AC sinyaline yanıt verememesi ve buna bağlı olarak seri direnç etkisinin baskın hale gelmesiyle ilişkilendirilmektedir (Yıldırım ve Koçyiğit, 2018).



Şekil 59. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $C - V$ grafikleri

4.9.1. Kondüktans – gerilim (G-V) ölçümleri

n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO fotodiyotlarına ait $G - V$ grafikleri Şekil 60'ta sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, her iki aygıtta da frekans arttıkça iletkenlikte ani bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, ara yüz durumlarının varlığına bağlanmaktadır (Orainy ve Hendi, 2014). Yüksek iletkenlik değerleri, ara yüz durumlarının ve seri direnç etkisinin varlığıyla ilişkilendirilmektedir. Çünkü ara yüz durumları, tercih edilen frekans aralığında hemen hemen her frekansta AC sinyalini takip edebilmektedir (Bilkan vd., 2017).

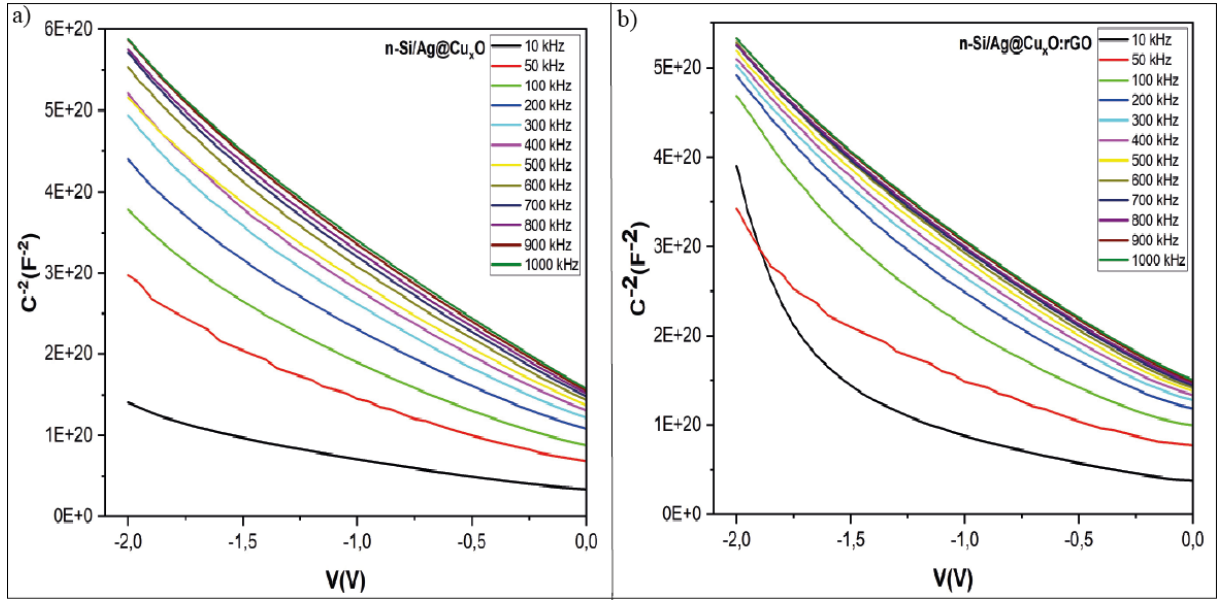


Şekil 60. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $G - V$ grafikleri

4.9.2. $C^{-2} - V$ değişimleri

n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının $C^{-2} - V$ grafikleri Şekil 61’de 10 kHz’den 1000 kHz’e kadar artan frekanslar ile gösterilmiştir. Tüm $C^{-2} - V$ eğrileri, ters beslem bölgesinde doğrusal bir davranış sergilemiştir ve artan frekansla artmıştır. Ancak, metal ve yarıiletken arasında ara yüz tabakasının varlığı nedeniyle bu doğrusal çizgilerde sapmalar gözlemlenmiştir (Orainy ve Hendi, 2014).

Şekil 61’deki doğrusal çizgilerin eğimleri ve x eksenine kesişim noktaları, E_F , difüzyon potansiyeli (V_d), iyonize olmuş donör konsantrasyonu (N_d), ϕ_b ve R_s gibi parametrelerin hesaplanmasına olanak tanımaktadır. (Yıldırım ve Koçyiğit, 2018). Bu parametreler, n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtları için farklı frekans değerlerinde hesaplanmış ve Tablo 11 ve 12’de sunulmuştur.



Şekil 61. a) n-Si/Ag@Cu_xO, b) n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının farklı frekanslardaki $C^{-2} - V$ grafikleri

Tablo 11. n-Si/Ag@Cu_xO aygıtının $C - V$ parametreleri

Frekans(kHz)	V_d (V)	$N_d \times 10^{15}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	ϕ_b (eV)	R_s (Ω)
10	1,25	7,33	0,21	0,59	124,8
50	1,33	3,79	0,22	0,62	132,2
100	1,15	2,57	0,24	0,58	136,7
200	1,15	2,07	0,25	0,59	139,4
300	1,07	1,72	0,25	0,57	140,1
400	1,03	1,54	0,25	0,56	138,2
500	1,06	1,51	0,25	0,57	134,1
600	0,97	1,32	0,26	0,54	134,7
700	0,98	1,28	0,27	0,55	134,4
800	0,95	1,22	0,26	0,54	137,7
900	0,94	1,18	0,26	0,54	129,9
1000	0,928	1,148	0,26	0,54	126,8

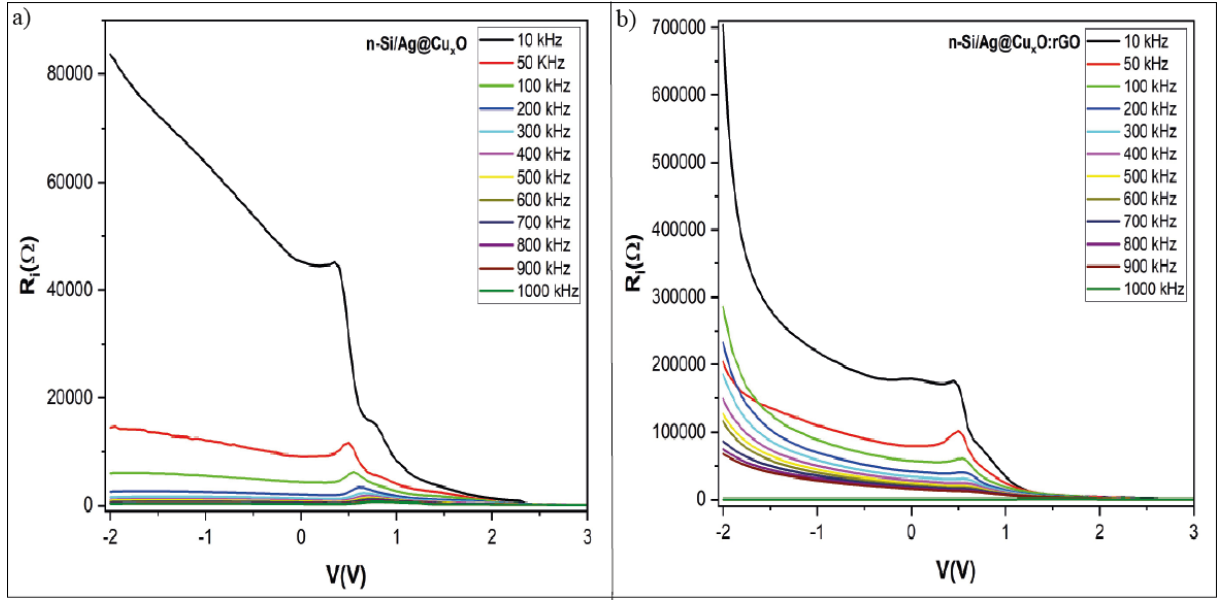
Tablo 12.n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının $C - V$ parametreleri

Frekans(kHz)	V_d (V)	$N_d \times 10^{15}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	ϕ_b (eV)	R_s (Ω)
10	1,52	7,92	0,21	0,61	171,7
50	1,69	4,36	0,23	0,67	176,9
100	1,82	3,57	0,23	0,71	171,9
200	1,53	2,38	0,30	0,70	172,2
300	1,47	2,25	0,24	0,63	169,6
400	1,44	2,10	0,25	0,63	170,8
500	1,41	1,99	0,25	0,62	173,6
600	1,39	1,90	0,25	0,62	169,9
700	1,33	1,79	0,28	0,63	167,4
800	1,30	1,64	0,25	0,60	171
900	1,27	1,67	0,25	0,59	165,5
1000	1,25	1,62	0,25	0,58	164,6

Tablo 11 ve 12 incelendiğinde, aygıtların ϕ_b değerlerinin düşük frekanslarda artış gözlemlenmesine rağmen genellikle artan frekansla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, V_d ve E_F seviyelerinin toplamındaki artış ile birlikte kapasitansların azalmasıdır. Bu durum, oluşan elektron-boşluk çiftleri ve ara yüzey yüklerinin yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca, ara yüz durumlarının AC sinyalini daha yüksek frekanslarda takip edememesi de bu davranışı açıklamaktadır (Kanbur vd., 2005).

4.9.3. Direnç – gerilim (R_i - V) değişimleri

Şekil 62’de verilen $R_i - V$ grafikleri incelendiğinde, frekans arttıkça gerilime bağlı R_i değerlerinin daha düşük seviyelere gerilediği görülmektedir. Her iki heteroeklem fotodetektöründe, şönt direncin etkisi nedeniyle R_i değerlerinin ters beslem bölgesine doğru aniden yükseldiği gözlemlenmiştir (Orak vd., 2017). Ancak, artan frekansla birlikte, R_i değerleri azalan bir profil sergilemiştir. Bu durum, AC sinyallerinin ara yüz durumları tarafından takip edilememesi veya yüksek frekanslarda bu durumların etkisiz hale gelmesinden kaynaklanmaktadır (Aydoğan vd., 2022).



Şekil 62. a) $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O}$, b) $n\text{-Si/Ag@Cu}_x\text{O:rGO}$ aygıtlarının farklı frekanslardaki $R_i - V$ grafikleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında ıslak kimyasal yöntemle sentezlenen koloidal Ag Np, Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin elektriksel özellikleri ve fotoddedektör uygulamaları incelenmiştir. Bu amaca yönelik malzemeler, n-Si üzerine damlatma yöntemiyle kaplanmıştır. Fotoddedektör parametrelerinin belirlenmesinde farklı ışık kaynakları kullanılmıştır.

Ag Np, Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin UV-Vis absorpsiyon spektrumları incelendiğinde, absorpsiyon zirvelerinin sırasıyla 430, 410 ve 423 nm olduğu görülmüştür. Spektrumlara bakıldığında Ag Np ve Ag@Cu_xO arasında 20 nm'lik, Ag Np ve Ag@Cu_xO:rGO arasında 7 nm'lik bir kayma gözlemlenmektedir. Bu durum, sentezlenen kolloidallerin hem çekirdek@kabuk nanokompozitlerin varlığına hem de UV ve görünür bölge fotoddedektör uygulamalarına uygun hale geldiğini işaret etmektedir. Koloidal malzemelerin XRD desenleri incelendiğinde Ag'nin (111), (200), (311) ve (222) kırınımları sırasıyla 38,10, 44,30, 64,50, 77,50 ve 81,60 (2 θ)'da net bir şekilde görülmektedir. Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO'da ise Cu_xO ve rGO'nun kırınım pik yoğunlukları, küçük parçacık boyutları nedeniyle XRD desenlerinde açık bir şekilde görülmemektedir. Cu_xO'nun ana piki Ag'nin ana pikiyle aynı fazdadır ve Ag'nin keskin pik tabanının genişlediği görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde Ag Np'lerin boyutlarının ~ 30-60 nm civarında olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanında Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin rGO tabakasına tutunduğu görülmektedir. XPS sonuçlarında Ag metali, CuO, Cu₂O ve C'nin varlığı net bir şekilde görülmektedir. Cu_xO tabakası, hem CuO (bakırın 2 değerlikli hali) hem de Cu₂O (bakırın 1 değerlikli hali) içerir. Bu durum, ışık şiddetine bağlı olarak farklı bir elektron salınım mekanizmasını tetikler. TEM görüntülerinde Ag Np'lerin küresel, yarım küresel ve hegzagonal benzeri geometrilere sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozitlerin varlığı açıkça görülmektedir. HRTEM görüntüsüne bakıldığında ise Ag ve Cu_xO için düzlemler arası boşlukların sırasıyla 0,234 ve 0,246 nm olduğu belirlenmiştir ve bu, Ag ve Cu_xO'nun (111) düzlemine atfedilmektedir.

Al/n-Si/Ag@Cu_xO/Au ve Al/n-Si/Ag@Cu_xO:rGO/Au aygıtları üretilmiş ve fotoddedektör performansları karanlıkta ve görünür bölgedeki farklı ışık şiddetlerinde (10-150 mW/cm²), \mp 2 V aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen $I - V$ ölçümleriyle incelenmiştir. $I - V$

grafiklerine bakıldığında, akımın ters beslem bölgesinde artan ışık şiddeti ile kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış 100 mW/cm² ışık şiddetine kadar yavaş ilerlediği ve 125 ve 150 mW/cm² ışık şiddetlerinde hızlandığı görülmektedir.

Doğru beslem akım değerleri, ters beslem akım değerlerine bölünerek doğrultma oranı hesaplanmıştır. Işık şiddeti arttıkça doğrultma oranının düştüğü her iki aygıt için de gözlemlenmiştir. Tüm aygıtların n ve ϕ_b değerleri hesaplanmıştır. n değerleri ışık şiddeti arttıkça azalmış, ϕ_b değerleri ise ışık şiddeti arttıkça artmıştır. Bu durum metal/yarıiletkenin ara yüzünün homojen olmamasından kaynaklanmaktadır (Orak vd., 2018). Cheung fonksiyonları ile hesaplanan n değerleri ışık şiddeti arttıkça azalmış, R_s değerleri ise artmıştır. $H(I) - I$ grafiklerinden hesaplanan ϕ_b değerlerinin ışık şiddeti arttıkça arttığı görülmektedir. R_s değerleri ise n-Si/Ag@Cu_xO aygıtı için ışık şiddeti arttıkça artmış, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı için ise ışık şiddeti arttıkça azalmış fakat 150 mW/cm²'de yükselmiştir. Norde fonksiyonları ile hesaplanan ϕ_b değerleri ışık şiddeti arttıkça azalmıştır. R_s değerleri ise n-Si/Ag@Cu_xO aygıtı için ışık şiddetinin artmasıyla artış gözlemlenmiş fakat 150 mW/cm² ışık şiddetinde azalma görülmüştür. n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtı için ise R_s değerlerinde dalgalanmalar görülmekle birlikte azalma eğilimindedir. Tüm yöntemlerden elde edilen n , ϕ_b ve R_s değerleri birbirleriyle uyum içindedir.

n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtlarının fotodetektör parametrelerinden, fotoakım, On/Off , R , D^* , NEP , $NPDR$ ve EQE incelenmiştir. Fotoakım değerleriyle oluşturulan ışık şiddetine bağlı fotoakım grafikleri incelendiğinde fotoakımın artan ışık şiddetleriyle arttığı görülmektedir. Bu artışın 125 ve 150 mW/cm² ışık şiddetlerinde daha fazla olduğu açıktır. Bu durum, yüksek ışık şiddetlerinde rekombinasyonun azaldığı ve tuzakların serbest bırakıldığı anlamına gelmektedir (Yılmaz vd., 2024). Farklı ışık şiddetleri (10-150 mW/cm²) altında yapılan hesaplamalar, n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının R , D^* , NEP ve $NPDR$ değerleri açısından daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, rGO içeren aygıtın farklı ışık şiddetlerinde daha etkili çalıştığını göstermektedir.

Fotodetektör parametrelerinin analizi UV, görünür bölge ve IR spektral bölgelerinde de gerçekleştirilmiştir. $I - V$ grafiklerine bakıldığında, her iki aygıtta da UV, görünür ve IR bölgesindeki akım artışları açık bir şekilde görülmektedir. Fotodetektör parametrelerinin hesaplanması sonucunda, her iki aygıtın da UV bölgede yüksek performans sergilediği, ancak n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtının duyarlılık, spesifik algılayıcılık, ışık sinyallerini güçlendirme,

düşük sinyalleri tespit etme ve gürültü altında daha iyi performans sergileme açısından daha üstün olduğu belirlenmiştir. Ayrıca her iki aygıt için de en yüksek *EQE* değerleri 365 nm’de olmakla birlikte n-Si/Ag@Cu_xO:rGO aygıtındaki *EQE* değerleri daha yüksektir.

Her iki aygıtın da kararlılık testlerine bakıldığında, aygıtların uzun vadeli kullanımda performansının yüksek oranda korunduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlarla birlikte aygıtların güvenilir ve pratik fotodedektörler oldukları söylenebilir.

n-Si/Ag@Cu_xO ve n-Si/Ag@Cu_xO:rGO fotodiyotlarına ait $C - V$ ve $G - V$ değişimleri incelenmiştir. $C^{-2} - V$ eğrilerinin eğimlerinden ve x eksenine kesişim noktalarından, E_F , V_d , N_d , ϕ_b ve R_s hesaplanmıştır. Aygıtların ϕ_b değerlerinin düşük frekanslarda artış gözlemlenmesine rağmen genellikle artan frekansla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. R_s değerleri ise frekans arttıkça düştüğü görülmektedir.

Tüm ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde Ag@Cu_xO çekirdek@kabuk nanokompozit yapılarla inşa edilen fotodedektörlerin ışığa karşı yüksek duyarlılıkta oldukları anlaşılmıştır. Üretilen fotodedektörlerin UV bölge başta olmak üzere, görünür ve IR bölgesinde yüksek performansla etkili bir şekilde kullanılabilmesi net bir şekilde ifade edilmiştir.

Bu tez çalışmasında n-Si üzerine Ag@Cu_xO ve Ag@Cu_xO:rGO çekirdek@kabuk nanokompozit yapılar dekore edilmiş ve elektriksel özellikler, fotodedektör performansı ve kapasitans özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Üretilen fotodedektörler, yüksek performanslı, düşük maliyetli ve kararlı olmalarıyla birlikte literatüre katkı sağlamışlardır.

KAYNAKÇA

- Abdalla, J. T., Wang, J., & Wang, D. (2019). Effect of Ag/rGO on the optical properties of plasmon-modified SnO₂ composite and its application in self-powered UV photodetector. *Crystals*, 9(12), 648.
- Agnihotri, S., Mukherji, S., & Mukherji, S. (2014). Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5–100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy. *Rsc Advances*, 4(8), 3974-3983.
- Ahmadi, T. S., Wang, Z. L., Green, T. C., Henglein, A., & El-Sayed, M. A. (1996). Shape-controlled synthesis of colloidal platinum nanoparticles. *Science*, 272(5270), 1924-1925.
- Ahmed, A., Singh, A., Young, S. J., Gupta, V., Singh, M., & Arya, S. (2023). Synthesis techniques and advances in sensing applications of reduced graphene oxide (rGO) Composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 165, 107373.
- Akin, S., & Sonmezoglu, S. (2018). Metal oxide nanoparticles as electron transport layer for highly efficient dye-sensitized solar cells. In *Emerging materials for energy conversion and storage*(pp. 39-79). Elsevier.
- Alaie, Z., Nejad, S. M., & Yousefi, M. H. (2015). Recent advances in ultraviolet photodetectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 16-55.
- Ali, M. H., Al-Afify, A. D., & Goher, M. E. (2018). Preparation and characterization of graphene–TiO₂ nanocomposite for enhanced photodegradation of Rhodamine-B dye. *Egyptian journal of aquatic research*, 44(4), 263-270.
- Ali, M. H., Goher, M. E., Al-Afify, A. D., & El-Sayed, S. M. (2022). A facile method for synthesis rGO/Ag nanocomposite and its uses for enhancing photocatalytic degradation of Congo red dye. *SN Applied Sciences*, 4(10), 276.
- Alikhaidarova, E., Afanasyev, D., Ibrayev, N., & Nuraje, N. (2022) “Plasmonic enhanced polymer solar cell with inclusion of Ag@SiO₂ core-shell nanostructures” *Polymers for Advanced Technologies*, 33(3), 1000–1008.
- Alivisatos, P. (2004). The use of nanocrystals in biological detection. *Nature biotechnology*, 22(1), 47-52.
- Al-Oqla, F. M., Sapuan, S. M., & Fares, O. (2018). Electrical–based applications of natural fiber vinyl polymer composites. In *Natural fibre reinforced vinyl ester and vinyl polymer composites*(pp. 349-367). Woodhead Publishing.
- Ameri, B., Davarani, S. S. H., Roshani, R., Moazami, H. R., & Tadjarodi, A. (2017). A flexible mechanochemical route for the synthesis of copper oxide nanorods/nanoparticles/nanowires for supercapacitor applications: The effect of morphology on the charge storage ability. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 114-123.
- An, X., Teng, F., Zhang, Z., Pan, X., Zhou, J., & Xie, E. (2014). Ultrafast UV switch based on ZnO-Ag heterostructures. *Electronic Materials Letters*, 10, 95-99.
- Arulkumar, E., Thanikaikarasan, S., & Tesfie, N. (2023). Influence of deposition parameters for Cu₂O and CuO thin films by electrodeposition technique: a short review. *Journal of Nanomaterials*, 2023(1), 8987633.
- Ashok, C. H., Rao, K. V., & Chakra, C. S. (2014). Structural analysis of CuO nanomaterials prepared by novel microwave assisted method. *Journal of Atoms and Molecules*, 4(5), 803-806.
- Atwater, H. A., & Polman, A. (2010). Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nature materials*, 9(3), 205-213.

- Aydoğan, Ş. (2015). Katıhal elektroniği. *Nobel Yayıncılık, Ankara*, 63s.
- Aydoğan, S., Kocyigit, A., Cirak, B. B., Erdogan, E., & Yilmaz, M. (2022). The electrical and dielectric characterization of the Co/ZnO-Rods/p-Si heterostructure depending on the frequency. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(9), 6059-6069.
- Bai, W., Wu, M., Du, X., Gong, W., Ding, Y., Song, C., & Liu, L. (2021). Synergistic effect of multiple-phase rGO/CuO/Cu₂O heterostructures for boosting photocatalytic activity and durability. *Applied Surface Science*, 544, 148607.
- Bano, N., Hussain, I., El-Naggar, A. M., & Albassam, A. A. (2019). Reduced graphene oxide nanocomposites for optoelectronics applications. *Applied Physics A*, 125, 1-7.
- Bastús, N. G., Piella, J., & Puntès, V. (2016). Quantifying the sensitivity of multipolar (dipolar, quadrupolar, and octapolar) surface plasmon resonances in silver nanoparticles: The effect of size, composition, and surface coating. *Langmuir*, 32(1), 290-300.
- Belessiotis, G. V., Falara, P. P., Ibrahim, I., & Kontos, A. G. (2022). Magnetic metal oxide-based photocatalysts with integrated silver for water treatment. *Materials*, 15(13), 4629.
- Bélteky, P., Rónavári, A., Igaz, N., Szerencsés, B., Tóth, I. Y., Pfeiffer, I., Kiricsi, M. & Kónya, Z. (2019). Silver nanoparticles: Aggregation behavior in biorelevant conditions and its impact on biological activity. *International journal of nanomedicine*, 667-687.
- Ben Moshe, A., & Markovich, G. (2011). Synthesis of single crystal hollow silver nanoparticles in a fast reaction-diffusion process. *Chemistry of Materials*, 23(5), 1239-1245.
- Berencén, Y., Prucnal, S., Liu, F., Skorupa, I., Hübner, R., Rebohle, L., Zhou, S., Schneider, H., Helm, M. & Skorupa, W. (2017). Room-temperature short-wavelength infrared Si photodetector. *Scientific reports*, 7(1), 43688.
- Besteiro, L. V., Kong, X. T., Wang, Z., Hartland, G., & Govorov, A. O. (2017). Understanding hot-electron generation and plasmon relaxation in metal nanocrystals: quantum and classical mechanisms. *Acs Photonics*, 4(11), 2759-2781.
- Bethe, H. A. (1991). Theory of the boundary layer of crystal rectifiers. In *Semiconductor Devices: Pioneering Papers* (pp. 387-399).
- Bhattacharjee, S., Joshi, R., Chughtai, A. A., & Macintyre, C. R. (2019). Graphene modified multifunctional personal protective clothing. *Advanced materials interfaces*, 6(21), 1900622.
- Bi, L., Boulfrad, S., & Traversa, E. (2014). Steam electrolysis by solid oxide electrolysis cells (SOECs) with proton-conducting oxides. *Chemical Society Reviews*, 43(24), 8255-8270.
- Bielecki, Z., Achtenberg, K., Kopytko, M. E., Mikołajczyk, J. A., Wojtas, J., & Rogalski, A. W. (2022). Review of photodetectors characterization methods. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 70(2).
- Bilkan, Ç., Altındal, Ş., & Azizian-Kalandaragh, Y. (2017). Investigation of frequency and voltage dependence surface states and series resistance profiles using admittance measurements in Al/p-Si with Co₃O₄-PVA interlayer structures. *Physica B: Condensed Matter*, 515, 28-33.
- Blynskii, V. I., Vasileuskii, Y. G., Malyshev, S. A., & Chizh, A. L. (2007). Silicon photodiode with a grid pn junction. *Semiconductors*, 41, 223-226.
- Blommaerts, N., Vanrompay, H., Nuti, S., Lenaerts, S., Bals, S., & Verbruggen, S. W. (2019). Unraveling structural information of Turkevich synthesized plasmonic gold-silver bimetallic nanoparticles. *Small*, 15(42), 1902791.
- Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224.
- Bolink, H. J., Coronado, E., Orozco, J., & Sessolo, M. (2009). Efficient polymer light-emitting diode using air-stable metal oxides as electrodes. *Advanced Materials*, 21(1), 79-82.
- Bonifacio, V. D., & Pires, R. F. (2019). Photodiodes: Principles and recent advances. *Journal of Materials NanoScience*, 6(2), 38-46.

- Brandt, I. S., Zoldan, V. C., Stenger, V., Pla Cid, C. C., Pasa, A. A., Oliveira, T. J., & Arao Reis, F. D. A. (2015). Substrate effects and diffusion dominated roughening in Cu₂O electrodeposition. *Journal of Applied Physics*, 118(14).
- Brongersma, M. L., Halas, N. J., & Nordlander, P. (2015). Plasmon-induced hot carrier science and technology. *Nature nanotechnology*, 10(1), 25-34.
- Burda, C., Chen, X., Narayanan, R., & El-Sayed, M. A. (2005). Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes. *Chemical reviews*, 105(4), 1025-1102.
- Butanovs, E., Kuzmin, A., Piskunov, S., Smits, K., Kalinko, A., & Polyakov, B. (2021) "Synthesis and characterization of GaN/ReS₂, ZnS/ReS₂ and ZnO/ReS₂ core/shell nanowire heterostructures" *Applied Surface Science*, 536, 147841.
- Cao, Y., Xu, Y., Hao, H., & Zhang, G. (2014). Room temperature additive-free synthesis of uniform Cu₂O nanocubes with tunable size from 20 nm to 500 nm and photocatalytic property. *Materials Letters*, 114, 88-91.
- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589.
- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1973). The effect of an interfacial layer on minority carrier injection in forward-biased silicon Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 16(3), 365-374.
- Caruso, R. A., Susha, A., & Caruso, F. (2001). Multilayered titania, silica, and laponite nanoparticle coatings on polystyrene colloidal templates and resulting inorganic hollow spheres. *Chemistry of Materials*, 13(2), 400-409.
- Casalino, M., Coppola, G., Iodice, M., Rendina, I., & Sirleto, L. J. I. J. (2012). Near-Infrared All-Silicon Photodetectors. *International Journal of Photoenergy*, 2012(1), 139278.
- Cava, R. J. (2000). Oxide superconductors. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(1), 5-28.
- Chahrour, K. M., Ahmed, N. M., Hashim, M. R., Elfadill, N. G., & Bououdina, M. (2016). Self-assembly of aligned CuO nanorod arrays using nanoporous anodic alumina template by electrodeposition on Si substrate for IR photodetectors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 239, 209-219.
- Chee, W. K., Lim, H. N., Zainal, Z., Huang, N. M., Harrison, I., & Andou, Y. (2016). Flexible graphene-based supercapacitors: a review. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(8), 4153-4172.
- Chen, A., Long, H., Li, X., Li, Y., Yang, G., & Lu, P. (2009). Controlled growth and characteristics of single-phase Cu₂O and CuO films by pulsed laser deposition. *Vacuum*, 83(6), 927-930.
- Chen, D., Lv, L., Peng, L., Peng, J., Cao, Y., Wang, X., Wang, X., Wu, Q. & Tu, J. (2019). Controlled synthesis of mesoporous zinc oxide containing oxygen vacancies in low annealing temperature for photoelectrochemical biosensor. *Ceramics International*, 45(14), 18044-18051.
- Chen, J. Y., Zhou, P. J., Li, J. L., & Li, S. Q. (2007). Depositing Cu₂O of different morphology on chitosan nanoparticles by an electrochemical method. *Carbohydrate polymers*, 67(4), 623-629.
- Chen, L., Sun, H., Zhao, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, X., Jiang, Y., Hua, Z. & Yang, J. (2017). Plasmonic-induced SERS enhancement of shell-dependent Ag@Cu₂O core-shell nanoparticles. *RSC advances*, 7(27), 16553-16560.
- Chen, Z., Balankura, T., Fichthorn, K. A., & Rioux, R. M. (2019). Revisiting the polyol synthesis of silver nanostructures: role of chloride in nanocube formation. *ACS nano*, 13(2), 1849-1860.

- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied physics letters*, 49(2), 85-87.
- Christopher, P., Xin, H., & Linic, S. (2011). Visible-light-enhanced catalytic oxidation reactions on plasmonic silver nanostructures. *Nature chemistry*, 3(6), 467-472.
- Çırak, B. B., Eden, Ç., Erdoğan, Y., Demir, Z., Özdokur, K. V., Çağlar, B., Morkoç Karadeniz, S., Kılınç, T., Ekinçi, A.E., & Çırak, Ç. (2020). The enhanced light harvesting performance of dye-sensitized solar cells based on ZnO nanorod-TiO₂ nanotube hybrid photoanodes. *Optik*, 203, 163963.
- Chen, S., Drehmel, J. R., & Penn, R. L. (2020). Facile synthesis of monodispersed Ag NPs in ethylene glycol using mixed capping agents. *ACS omega*, 5(11), 6069-6073.
- Chen, J., Ouyang, W., Yang, W., He, J. H., & Fang, X. (2020). Recent progress of heterojunction ultraviolet photodetectors: materials, integrations, and applications. *Advanced Functional Materials*, 30(16), 1909909.
- Chen, X., & Selloni, A. (2014). Introduction: titanium dioxide (TiO₂) nanomaterials. *Chemical reviews*, 114(19), 9281-9282.
- Chen, W., Cai, W., Zhang, L., Wang, G., & Zhang, L. (2001). Sonochemical processes and formation of gold nanoparticles within pores of mesoporous silica. *Journal of colloid and interface science*, 238(2), 291-295.
- Chen, Z., Balankura, T., Fichthorn, K. A., & Rioux, R. M. (2019). Revisiting the polyol synthesis of silver nanostructures: role of chloride in nanocube formation. *ACS nano*, 13(2), 1849-1860.
- Chou, K. S., & Ren, C. Y. (2000). Synthesis of nanosized silver particles by chemical reduction method. *Materials chemistry and physics*, 64(3), 241-246.
- Clavero, C. (2014). Plasmon-induced hot-electron generation at nanoparticle/metal-oxide interfaces for photovoltaic and photocatalytic devices. *Nature Photonics*, 8(2), 95-103.
- Costas, A., Florica, C., Preda, N., Apostol, N., Kuncser, A., Nitescu, A., & Enculescu, I. (2019). Radial heterojunction based on single ZnO-Cu_xO core-shell nanowire for photodetector applications. *Scientific reports*, 9(1), 5553.
- Cowley, A. M., & Sze, S. M. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3220.
- Crane, C. C., Manso, R. H., Li, J., Benamara, M., Tao, J., Zhu, Y., Wang, F., & Chen, J. (2020). A metal-on-metal growth approach to metal-metal oxide core-shell nanostructures with plasmonic properties. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(31), 17191-17203.
- Creighton, J. A., Blatchford, C. G., & Albrecht, M. G. (1979). Plasma resonance enhancement of Raman scattering by pyridine adsorbed on silver or gold sol particles of size comparable to the excitation wavelength. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics*, 75, 790-798.
- Cushing, S. K., Li, J., Bright, J., Yost, B. T., Zheng, P., Bristow, A. D., & Wu, N. (2015). Controlling plasmon-induced resonance energy transfer and hot electron injection processes in Metal@TiO₂ core-shell nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(28), 16239-16244.
- Dai, M., Zhang, X., & Wang, Q. J. (2024). 2D materials for photothermoelectric detectors: mechanisms, materials, and devices. *Advanced Functional Materials*, 34(21), 2312872.
- Davashioğlu, İ. Ç., Özdokur, K. V., Koçak, S., Çırak, Ç., Çağlar, B., Çırak, B. B., & Ertaş, F. N. (2021). WO₃ decorated TiO₂ nanotube array electrode: Preparation, characterization and superior photoelectrochemical performance for rhodamine B dye degradation. *Journal of Molecular Structure*, 1241, 130673.
- De, M., Ghosh, P. S., & Rotello, V. M. (2008). Applications of nanoparticles in biology. *Advanced Materials*, 20(22), 4225-4241.

- De Almeida, J., Pacheco, M. S., de Brito, J. F., & de Arruda Rodrigues, C. (2020). Contribution of Cu_xO distribution, shape and ratio on TiO_2 nanotubes to improve methanol production from CO_2 photoelectroreduction. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 24(11), 3013-3028.
- Deneuveville, A., Keradec, J. P., Gerard, P., & Mini, A. (1974). DC electrical, optical and photoelectrical properties of $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$ amorphous thin films. *Solid State Communications*, 14(4), 341-346.
- Desai, R., Mankad, V., Gupta, S. K., & Jha, P. K. (2012). Size distribution of silver nanoparticles: UV-visible spectroscopic assessment. *Nanoscience and nanotechnology letters*, 4(1), 30-34.
- Dev, A., Richters, J. P., Sartor, J., Kalt, H., Gutowski, J., & Voss, T. (2011). Enhancement of the near-band-edge photoluminescence of ZnO nanowires: Important role of hydrogen incorporation versus plasmon resonances. *Applied Physics Letters*, 98(13).
- Devan, R. S., Patil, R. A., Lin, J. H., & Ma, Y. R. (2012). One-dimensional metal-oxide nanostructures: recent developments in synthesis, characterization, and applications. *Advanced Functional Materials*, 22(16), 3326-3370.
- Di, S., Qian, Y., Wang, L., & Li, Z. (2022). Biofunctionalization of graphene and its two-dimensional analogues and synthesis of biomimetic materials: A review. *Journal of Materials Science*, 1-29.
- Di, S., Guo, S., Wang, Y., Wang, W., Jung, Y. M., Chen, L., & Wang, L. (2023). Surface plasmon resonance effect on charge transfer in $\text{Ag}@\text{Cu}_2\text{O}$ -rGO composites. *Materials Chemistry and Physics*, 301, 127621.
- Diao, F., & Wang, Y. (2018). Transition metal oxide nanostructures: premeditated fabrication and applications in electronic and photonic devices. *Journal of materials science*, 53, 4334-4359.
- DiStefano, J. G., Li, Y., Jung, H. J., Hao, S., Murthy, A. A., Zhang, X., Wolverton, C. & Dravid, V. P. (2018). Nanoparticle@ MoS_2 core-shell architecture: role of the core material. *Chemistry of Materials*, 30(14), 4675-4682.
- Dolai, S., Dey, R., Das, S., Hussain, S., Bhar, R., & Pal, A. K. (2017). Cupric oxide (CuO) thin films prepared by reactive dc magnetron sputtering technique for photovoltaic application. *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 456-464.
- Eden, C., Kocyigit, A., Aydogan, S., Cirak, C., & Yilmaz, M. (2024). Detection performance of flower-like hydrothermally synthesized ZnO in silicon-type photodetector. *Physica Scripta*, 99(6), 065945.
- Einstein, A. (1905, January). *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*.
- Erickson, K., Erni, R., Lee, Z., Alem, N., Gannett, W., & Zettl, A. (2010). Determination of the local chemical structure of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Advanced materials*, 22(40), 4467-4472.
- Evanoff, D. D., & Chumanov, G. (2004). Size-controlled synthesis of nanoparticles. 1. "Silver-only" aqueous suspensions via hydrogen reduction. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(37), 13948-13956.
- Evtugyn, G. A., Shamagsumova, R. V., Padnya, P. V., Stoikov, I. I., & Antipin, I. S. (2014). Cholinesterase sensor based on glassy carbon electrode modified with Ag nanoparticles decorated with macrocyclic ligands. *Talanta*, 127, 9-17.
- Ezema, F. I., Lokhande, C. D., & Jose, R. (Eds.). (2021). *Chemically Deposited Nanocrystalline Metal Oxide Thin Films: Synthesis, Characterizations, and Applications*. Springer International Publishing.

- Fan, F. R., Tang, W., & Wang, Z. L. (2016). Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics. *Advanced Materials*, 28(22), 4283-4305.
- Fan, R., Yang, Y., Xue, J., Zhang, F., Sun, J., Xu, H., & Jiang, T. (2020). Synthesis of photothermally stable triangular silver nanoplates for SERS applications, photokilling of bacteria. *ChemNanoMat*, 6(1), 148-153.
- Fang, J., Zhou, Z., Xiao, M., Lou, Z., Wei, Z., & Shen, G. (2020). Recent advances in low-dimensional semiconductor nanomaterials and their applications in high-performance photodetectors. *InfoMat*, 2(2), 291-317.
- Fang, X., Hu, L., Huo, K., Gao, B., Zhao, L., Liao, M., Chu, P.K., Bando, Y. & Golberg, D. (2011). New ultraviolet photodetector based on individual Nb₂O₅ nanobelts. *Advanced Functional Materials*, 21(20), 3907-3915.
- Fatimah, I., Fadillah, G., Purwiandono, G., Sahroni, I., Purwaningsih, D., Riantana, H., Avif, A.N., & Sagadevan, S. (2022). Magnetic-silica nanocomposites and the functionalized forms for environment and medical applications: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, 137, 109213.
- Feng, H., Wang, W., Wang, W., Zhang, M., Wang, C., Ma, C., Li, W. & Chen, S. (2021). Charge transfer channels of silver@ cuprous oxide heterostructure core-shell nanoparticles strengthen high photocatalytic antibacterial activity. *Journal of Colloid and Interface Science*, 601, 531-543.
- Frattini, A., Pellegrini, N., Nicastro, D., & De Sanctis, O. (2005). Effect of amine groups in the synthesis of Ag nanoparticles using aminosilanes. *Materials chemistry and physics*, 94(1), 148-152.
- Ganesh Babu, S., & Karvembu, R. (2011). CuO nanoparticles: a simple, effective, ligand free, and reusable heterogeneous catalyst for N-arylation of benzimidazole. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(16), 9594-9600.
- Gangwar, J., Gupta, B. K., & Srivastava, A. K. (2016). Prospects of Emerging Engineered Oxide Nanomaterials and their Applications. *Defence Science Journal*, 66(4).
- Gao, C., Hu, Y., Wang, M., Chi, M., & Yin, Y. (2014). Fully alloyed Ag/Au nanospheres: combining the plasmonic property of Ag with the stability of Au. *Journal of the American Chemical Society*, 136(20), 7474-7479.
- Gao, F., Liu, X. J., Zhang, J. S., Song, M. Z., & Li, N. (2012). Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering. *Journal of applied physics*, 111(8).
- Gao, S., Ueno, K., & Misawa, H. (2011). Plasmonic antenna effects on photochemical reactions. *Accounts of chemical research*, 44(4), 251-260.
- Gao, X., Cui, Y., Levenson, R. M., Chung, L. W., & Nie, S. (2004). In vivo cancer targeting and imaging with semiconductor quantum dots. *Nature biotechnology*, 22(8), 969-976.
- García de Arquer, F. P., Armin, A., Meredith, P., & Sargent, E. H. (2017). Solution-processed semiconductors for next-generation photodetectors. *Nature Reviews Materials*, 2(3), 1-17.
- Ghodselahi, T., Zahrabi, H., Saani, M. H., & Vesaghi, M. A. (2011). CO gas sensor properties of Cu@CuO core-shell nanoparticles based on localized surface plasmon resonance. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(45), 22126-22130.
- Ghosh Chaudhuri, R., & Paria, S. (2012). Core/shell nanoparticles: classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications. *Chemical reviews*, 112(4), 2373-2433.
- Giang, D. N., Nguyen, N. M., Ngo, D. A., Tran, T. T., Duy, L. T., Tran, C. K., Tran, T.T.V., La, P.P.H. & Dang, V. Q. (2023). A visible-light photodetector based on heterojunctions between CuO nanoparticles and ZnO nanorods. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 14(1), 1018-1027.

- Gnanasekar, T., Valanarasu, S., Raj, I. L. P., Mohanraj, P., Ubaidullah, M., Shaikh, S. F., & Tamboli, M. S. (2022). Improved device performance of CuO: Ag photodetectors fabricated by nebulizer spray pyrolysis technique. *Optical Materials*, 124, 112006.
- Gonzalez, A.L., Noguez, C., Beranek, J. and Bernard, A.S. (2014). "Size, Shape, Stability and Color of Plasmonic Silver Nanoparticles", *The Journal of Physical Chemistry*, 118, 9128-9136.
- Granqvist, C. G. (2008). Oxide electrochromics: Why, how, and whither. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(2), 203-208.
- Guo, S., Wang, Y., Zhang, F., Gao, R., Liu, M., Dong, L., Liu, Y., Zhang, Y. & Chen, L. (2018). In situ synthesis of Ag@Cu₂O-rGO architecture for strong light-matter interactions. *Nanomaterials*, 8(6), 444.
- Gunasekaran, S., Thangaraju, D., Marnadu, R., Chandrasekaran, J., Alshahrani, T., Shkir, M., Durairajan, A., Graça, M.P.F. & Elango, M. (2020). Fabrication of high-performance SiO₂@ p-CuO/n-Si core-shell structure based photosensitive diode for photodetection application. *Surfaces and Interfaces*, 20, 100622.
- Gupta, D., Meher, S. R., Illyaskutty, N., & Alex, Z. C. (2018). Facile synthesis of Cu₂O and CuO nanoparticles and study of their structural, optical and electronic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 743, 737-745.
- Gürgeç, E., Dikici, A., & Aslan, F. (2022). Production and Characterization of AlNiOZnOp-SiAl Composite Photodiodes for Solar Energy Tracking Systems. *Turkish Journal of Science and Technology*, 17(1), 109-119.
- Haider, A., & Kang, I. K. (2015). Preparation of silver nanoparticles and their industrial and biomedical applications: a comprehensive review. *Advances in materials science and engineering*, 2015(1), 165257.
- Hajakbari, F. and Shafieinejad, F. (2016). Structural, morphological electrical, and optical properties of silver thin films of varying thickness deposited on cupric oxide. *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 035503, 1-6.
- Hartland, G. V. (2011). Optical studies of dynamics in noble metal nanostructures. *Chemical reviews*, 111(6), 3858-3887.
- Hassan, H. R., Abd, A. N., & Ali, M. J. M. (2024, April). NIR heterojunction based on porous silicon and CuO:Cu₂O nanoparticle for photovoltaic devices. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1325, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- Hegde, H., Santhosh, C., & Sinha, R. K. (2019). Seed mediated synthesis of highly stable CTAB capped triangular silver nanoplates for LSPR sensing. *Materials Research Express*, 6(10), 105075.
- Hertz, H. (1887). Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. *Annalen der Physik*, 267(8), 983-1000.
- Hou, J. W., Yang, X. C., Cui, M. M., Huang, M., & Wang, Q. Y. (2012). Synthesis and optical property of one-dimensional Ag-Cu₂O heterojunctions. *Materials Letters*, 74, 159-162.
- Hsu, C. Y., Lien, D. H., Lu, S. Y., Chen, C. Y., Kang, C. F., Chueh, Y. L., Hsu, W.K. & He, J. H. (2012). Supersensitive, ultrafast, and broad-band light-harvesting scheme employing carbon nanotube/TiO₂ core-shell nanowire geometry. *ACS nano*, 6(8), 6687-6692.
- Huang, L., & Wang, D. (2015). Barrier inhomogeneities and electronic transport of Pt contacts to relatively highly doped n-type 4H-SiC. *Journal of Applied Physics*, 117(20).
- Huang, T., & Xu, X. H. N. (2010). Synthesis and characterization of tunable rainbow colored colloidal silver nanoparticles using single-nanoparticle plasmonic microscopy and spectroscopy. *Journal of materials chemistry*, 20(44), 9867-9876.
- Huang, Y. Y., Lin, L. Y., & Li, X. (2019). Efficient battery supercapacitor hybrid devices with quaternary metal oxide electrodes based on nickel and cobalt. *Journal of Energy Storage*, 25, 100826.

- Huo, N., & Konstantatos, G. (2018). Recent progress and future prospects of 2D-based photodetectors. *Advanced Materials*, 30(51), 1801164.
- Huston, M., DeBella, M., DiBella, M., & Gupta, A. (2021). Green synthesis of nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(8), 2130.
- Iliut, M., Gabudean, A. M., Leordean, C., Simon, T., Teodorescu, C. M., & Astilean, S. (2013). Riboflavin enhanced fluorescence of highly reduced graphene oxide. *Chemical Physics Letters*, 586, 127-131.
- Jabr, M. A., Ali, A. M., & Ismail, R. A. (2023). Preparation of high-performance p-CuO/n-Si heterojunction photodetector by laser-assisted chemical bath deposition: effect of laser wavelength. *Ceramics International*, 49(7), 11442-11451.
- Jadhav, K., Deore, S., Dhamecha, D., Hr, R., Jagwani, S., Jalalpure, S., & Bohara, R. (2018). Phytosynthesis of silver nanoparticles: characterization, biocompatibility studies, and anticancer activity. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 4(3), 892-899.
- Jang, L. W., Jeon, D. W., Kim, M., Jeon, J. W., Polyakov, A. Y., Ju, J. W., Baek, J.H., Yang, J.K. & Lee, I. H. (2012). Investigation of Optical and Structural Stability of Localized Surface Plasmon Mediated Light-Emitting Diodes by Ag and Ag/SiO₂ Nanoparticles. *Advanced Functional Materials*, 22(13), 2728-2734.
- Jansen-van Vuuren, R. D., Armin, A., Pandey, A. K., Burn, P. L., & Meredith, P. (2016). Organic photodiodes: the future of full color detection and image sensing. *Advanced Materials*, 28(24), 4766-4802.
- Jin, R., Cao, Y., Mirkin, C. A., Kelly, K. L., Schatz, G. C., & Zheng, J. G. (2001). Photoinduced conversion of silver nanospheres to nanoprisms. *science*, 294(5548), 1901-1903.
- Jin, Y., Wang, J., Sun, B., Blakesley, J. C., & Greenham, N. C. (2008). Solution-processed ultraviolet photodetectors based on colloidal ZnO nanoparticles. *Nano letters*, 8(6), 1649-1653.
- Jing, H., Large, N., Zhang, Q., & Wang, H. (2014). Epitaxial growth of Cu₂O on Ag allows for fine control over particle geometries and optical properties of Ag–Cu₂O core–shell nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(34), 19948-19963.
- Kacı, H. (2014). Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky Diyodun Temel Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı I-V(Akım-Voltaj) ve C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 1-75.
- Kadhim, M. J., Mahdi, M. A., Hassan, J. J., & Al-Asadi, A. S. (2021) “Photocatalytic activity and photoelectrochemical properties of Ag/ZnO core/shell nanorods under low-intensity white light irradiation” *Nanotechnology*, 32(19), 195706.
- Kajli, S. K., Ray, D., & Roy, S. C. (2022). Efficient UV–visible photodetector based on single CuO/Cu₂O core-shell nanowire. *Journal of Alloys and Compounds*, 895, 162546.
- Kalita, G., Hirano, R., Ayhan, M. E., & Tanemura, M. (2013). Fabrication of a Schottky junction diode with direct growth graphene on silicon by a solid phase reaction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(45), 455103.
- Kamat, P. V. (2002). Photophysical, photochemical and photocatalytic aspects of metal nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(32), 7729-7744.
- Kanbur, H. A. T. İ. C. E., Altındal, Ş., & Tataroğlu, A. (2005). The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. *applied surface science*, 252(5), 1732-1738.
- Kang, W. J., Cheng, C. Q., Li, Z., Feng, Y., Shen, G. R., & Du, X. W. (2019). Ultrafine Ag nanoparticles as active catalyst for electrocatalytic hydrogen production. *ChemCatChem*, 11(24), 5976-5981.

- Kapoor, S., Lawless, D., Kennepohl, P., Meisel, D., & Serpone, N. (1994). Reduction and aggregation of silver ions in aqueous gelatin solutions. *Langmuir*, *10*(9), 3018-3022.
- Karabulut, A., Dere, A., Al-Sehemi, A. G., Al-Ghamdi, A. A., & Yakuphanoglu, F. (2018). Cadmium oxide: titanium dioxide composite based photosensitive diode. *Journal of Electronic Materials*, *47*, 7159-7169.
- Karimi-Maleh, H., Kumar, B. G., Rajendran, S., Qin, J., Vadivel, S., Durgalakshmi, D., Gracia, F., Soto-Moscoso, M., Orooji, Y. & Karimi, F. (2020). Tuning of metal oxides photocatalytic performance using Ag nanoparticles integration. *Journal of Molecular Liquids*, *314*, 113588.
- Kaur, J., Khanna, A., Kumar, R., & Chandra, R. (2022). Growth and characterization of Cu₂O and CuO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *33*(20), 16154-16166.
- Kearns, G. J., Foster, E. W., & Hutchison, J. E. (2006). Substrates for direct imaging of chemically functionalized SiO₂ surfaces by transmission electron microscopy. *Analytical chemistry*, *78*(1), 298-303.
- Kennard, E. H., & Dieterich, E. O. (1917). An effect of light upon the contact potential of selenium and cuprous oxide. *Physical Review*, *9*(1), 58.
- Kern, W. (1990). The evolution of silicon wafer cleaning technology. *Journal of the Electrochemical Society*, *137*(6), 1887.
- Keshvari, A., Darbari, S., & Taghavi, M. (2018). Self-powered plasmonic UV detector, based on reduced graphene oxide/Ag nanoparticles. *IEEE Electron Device Letters*, *39*(9), 1433-1436.
- Khan, M., Tahir, M. N., Adil, S. F., Khan, H. U., Siddiqui, M. R. H., Al-warthan, A. A., & Tremel, W. (2015). Graphene based metal and metal oxide nanocomposites: synthesis, properties and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, *3*(37), 18753-18808.
- Khan, Z. U., Kausar, A., Ullah, H., Badshah, A., & Khan, W. U. (2016). A review of graphene oxide, graphene buckypaper, and polymer/graphene composites: Properties and fabrication techniques. *Journal of plastic film & sheeting*, *32*(4), 336-379.
- Khurana, K., & Jaggi, N. (2021). Localized surface plasmonic properties of Au and Ag nanoparticles for sensors: A review. *Plasmonics*, *16*(4), 981-999.
- Khurgin, J., Bykov, A. Y., & Zayats, A. V. (2024). Hot-electron dynamics in plasmonic nanostructures: fundamentals, applications and overlooked aspects. *Light*, *4*(1), 15.
- Kim, H., Achermann, M., Balet, L. P., Hollingsworth, J. A., & Klimov, V. I. (2005). Synthesis and characterization of Co/CdSe core/shell nanocomposites: bifunctional magnetic-optical nanocrystals. *Journal of the American Chemical Society*, *127*(2), 544-546.
- Kimling, J., Maier, M., Okenve, B., Kotaidis, V., Ballot, H., & Plech, A. (2006). Turkevich method for gold nanoparticle synthesis revisited. *The Journal of Physical Chemistry B*, *110*(32), 15700-15707.
- Knoll, B., & Keilmann, F. (1999). Near-field probing of vibrational absorption for chemical microscopy. *nature*, *399*(6732), 134-137.
- Kobayashi, Y., Horie, M., Konno, M., Rodríguez-González, B., & Liz-Marzán, L. M. (2003). Preparation and properties of silica-coated cobalt nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, *107*(30), 7420-7425.
- Korzavyi, P. A., & Johansson, B. (2011). Literature review on the properties of cuprous oxide Cu {sub 2} O and the process of copper oxidation.
- Kousar, F., Noor. U., Farid, M.F., Ahmed T., and Ali, A. (2024). Synthesis of Ag@CuO nanocomposites supported by reduced graphene oxide nanosheets: harnessing

- photocatalytic degradation of naphthol blue black dye. *Applied Organometallic Chemistry*, 1-14.
- Krishnamurthy, G., & Namitha, R. (2013). Synthesis of structurally novel carbon micro/nanospheres by low temperature-hydrothermal process. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 58(3), 1930-1933.
- Kumar, R., Kumar, K., Sharma, S., Thakur, N., & Thakur, N. (2023). Multifunctional properties of microwave assisted CuO/Cu₂O-ZnO mixed metal oxide nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(16), 1255.
- Lany, S. (2015). Semiconducting transition metal oxides. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27(28), 283203.
- Lea, M. C. (1889). On allotropic forms of silver. *American Journal of science*, 3(223), 47-49.
- Lee, C., Shin, K., Lee, Y. J., Jung, C., & Lee, H. M. (2018). Effects of shell thickness on Ag-Cu₂O core-shell nanoparticles with bumpy structures for enhancing photocatalytic activity and stability. *Catalysis Today*, 303, 313-319.
- Lee, J., Christopher Orilall, M., Warren, S. C., Kamperman, M., Disalvo, F. J., & Wiesner, U. (2008). Direct access to thermally stable and highly crystalline mesoporous transition-metal oxides with uniform pores. *Nature materials*, 7(3), 222-228.
- Lee, J. S., Shevchenko, E. V., & Talapin, D. V. (2008). Au-PbS core-shell nanocrystals: plasmonic absorption enhancement and electrical doping via intra-particle charge transfer. *Journal of the American Chemical Society*, 130(30), 9673-9675.
- Lee, M. J., Han, S., Jeon, S. H., Park, B. H., Kang, B. S., Ahn, S. E., Kim, K.H., Lee, C.B., Kim, C.J., Yoo, I.K., Seo, D.H., Li, X.S., & Park, Y. (2009). Electrical manipulation of nanofilaments in transition-metal oxides for resistance-based memory. *Nano letters*, 9(4), 1476-1481.
- Lee, P. C., & Meisel, D. J. T. J. O. P. C. (1982). Adsorption and surface-enhanced Raman of dyes on silver and gold sols. *The Journal of Physical Chemistry*, 86(17), 3391-3395.
- Lee, Y. S., Winkler, M. T., Siah, S. C., Brandt, R., & Buonassisi, T. (2011). Hall mobility of cuprous oxide thin films deposited by reactive direct-current magnetron sputtering. *Applied Physics Letters*, 98(19).
- Li, G., Liu, L., Wu, G., Chen, W., Qin, S., Wang, Y., & Zhang, T. (2016). Self-powered UV-near infrared photodetector based on reduced graphene oxide/n-Si vertical heterojunction. *Small*, 12(36), 5019-5026.
- Li, J., Cushing, S. K., Bright, J., Meng, F., Senty, T. R., Zheng, P., Bristow, A.D. & Wu, N. (2013). Ag@Cu₂O core-shell nanoparticles as visible-light plasmonic photocatalysts. *Acs Catalysis*, 3(1), 47-51.
- Li, J., Wang, Z., Wen, Y., Chu, J., Yin, L., Cheng, R., Lei, L., He, P., Jiang, C., Feng, L. & He, J. (2018). High-performance near-infrared photodetector based on ultrathin Bi₂O₂Se nanosheets. *Advanced Functional Materials*, 28(10), 1706437.
- Li, M., Zhang, J., Gao, H., Li, F., Lindquist, S. E., Wu, N., & Wang, R. (2016). Microsized BiOCl square nanosheets as ultraviolet photodetectors and photocatalysts. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(10), 6662-6668.
- Li, M., Sun, X., Wang, H., Liu, Y., Pan, F., Wang, Z., Li, Y. & Qin, C. (2024). Synthesis and mechanism of hierarchical porous Ag/Cu_xO (x= 1, 2) nanowire hybrids for high photocatalytic degradation. *Applied Surface Science*, 670, 160648.
- Li, Q., Guo, B., Yu, J., Ran, J., zhang, B., Yan, H. and Gong, J.R.(2011). Highly Efficient Visible-Light-Driven Photocatalytic Hydrogen Production of CdS-Cluster-Decorated Graphene Nanosheets. *Journal of the American Chemical Society*, 133, 10878-10884.
- Li, S., Cai, M., Liu, Y., Wang, C., Lv, K., & Chen, X. (2022). S-Scheme photocatalyst TaON/Bi₂WO₆ nanofibers with oxygen vacancies for efficient abatement of antibiotics

- and Cr (VI): Intermediate eco-toxicity analysis and mechanistic insights. *Chinese Journal of Catalysis*, 43(10), 2652-2664.
- Li, W., Wang, D., Zhang, Z., Chu, X., Fang, X., Wang, X., Fang, D., Lin, F., Wang, X. & Wei, Z. (2018). Enhancement of a Cu₂O/ZnO photodetector via surface plasmon resonance induced by Ag nanoparticles. *Optical Materials Express*, 8(11), 3561-3567.
- Li, Y., DiStefano, J. G., Murthy, A. A., Cain, J. D., Hanson, E. D., Li, Q., Castro, F.C., Chen, X. & Dravid, V. P. (2017). Superior plasmonic photodetectors based on Au@MoS₂ core-shell heterostructures. *ACS nano*, 11(10), 10321-10329.
- Li, Z., Li, H., Wu, Z., Wang, M., Luo, J., Torun, H., Hu, P., Yang, C., Grondmann, M., Liu, X., & Fu, Y. (2019). Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature. *Materials Horizons*, 6(3), 470-506.
- Lian, X., Luo, L., Dong, M., Miao, Z., Qi, X., Cai, Z., & Wang, L. (2024). A review on the recent progress on photodetectors. *Journal of Materials Science*, 1-24.
- Liang, L., Wang, J., Lin, W., Sumpter, B. G., Meunier, V., & Pan, M. (2014). Electronic bandgap and edge reconstruction in phosphorene materials. *Nano letters*, 14(11), 6400-6406.
- Ling, T., Da, P., Zheng, X., Ge, B., Hu, Z., Wu, M., Du, X.W., Hu, W.B., Jaraniec, M. & Qiao, S. Z. (2018). Atomic-level structure engineering of metal oxides for high-rate oxygen intercalation pseudocapacitance. *Science Advances*, 4(10), eaau6261.
- Link, S., & El-Sayed, M. A. (2003). Optical properties and ultrafast dynamics of metallic nanocrystals. *Annual review of physical chemistry*, 54(1), 331-366.
- Linic, S., Christopher, P., & Ingram, D. B. (2011). Plasmonic-metal nanostructures for efficient conversion of solar to chemical energy. *Nature materials*, 10(12), 911-921.
- Liu, K., Sakurai, M., & Aono, M. (2010). ZnO-based ultraviolet photodetectors. *Sensors*, 10(9), 8604-8634.
- Liu, S., Regulacio, M. D., Tee, S. Y., Khin, Y. W., Teng, C. P., Koh, L. D., Guan, G. & Han, M. Y. (2016). Preparation, Functionality, and Application of Metal Oxide-coated Noble Metal Nanoparticles. *The Chemical Record*, 16(4), 1965-1990.
- Liu, T., Yin, B., He, T., Guo, N., Dong, L., & Yin, Y. (2012). Complementary effects of nanosilver and superhydrophobic coatings on the prevention of marine bacterial adhesion. *ACS applied materials & interfaces*, 4(9), 4683-4690.
- Liu, W. L., Lin, F. C., Yang, Y. C., Huang, C. H., Gwo, S., Huang, M. H., & Huang, J. S. (2013). The influence of shell thickness of Au@TiO₂ core-shell nanoparticles on the plasmonic enhancement effect in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale*, 5(17), 7953-7962.
- Liu, X. Y., Wang, K. X., & Chen, J. S. (2016). Template-directed metal oxides for electrochemical energy storage. *Energy Storage Materials*, 3, 1-17.
- Liu, X., Iocozzia, J., Wang, Y., Cui, X., Chen, Y., Zhao, S., Li, Z., & Lin, Z. (2017). Noble metal-metal oxide nanohybrids with tailored nanostructures for efficient solar energy conversion, photocatalysis and environmental remediation. *Energy & Environmental Science*, 10(2), 402-434.
- Liu, Y., Ma, H., Han, X. X., & Zhao, B. (2021). Metal-semiconductor heterostructures for surface-enhanced Raman scattering: synergistic contribution of plasmons and charge transfer. *Materials horizons*, 8(2), 370-382.
- Lombardi, J. R., & Birke, R. L. (2014). Theory of surface-enhanced Raman scattering in semiconductors. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(20), 11120-11130.
- Long, Y., Li, J., Wu, L., Wang, Q., Liu, Y., Wang, X., Song, S., & Zhang, H. (2019). Construction of trace silver modified core@ shell structured Pt-Ni nanoframe@ CeO₂ for semihydrogenation of phenylacetylene. *Nano Research*, 12, 869-875.

- Lu, A. H., Salabas, E. E., & Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte chemie international edition*, 46(8), 1222-1244.
- Lu, Y. M., Chen, C. Y., & Lin, M. H. (2005). Effect of hydrogen plasma treatment on the electrical properties of sputtered N-doped cuprous oxide films. *Materials Science and Engineering: B*, 118(1-3), 179-182.
- Luo, Q., Yu, X., Lei, B., Chen, H., Kuang, D. and Su, C. (2012). Reduced Graphene Oxide-Hierarchical ZnO Hollow Sphere Composites with Enhanced Photocurrent and Photocatalytic Activity. *The Journal of Physical Chemistry*, 116, 8111-8117.
- Lv, W. (2013). *Electrochemical approach to structurally well-defined nano-and micro-materials: synthesis, characterization and applications* (Doctoral dissertation).
- Ma, Y., Lu, W., Wang, W., Zhang, F., Xie, X., Shi, Z., Wang, X. & Xu, C. (2025). 1D Core-Shell Radial Heterojunction for High-Performance and Self-Powered Broadband Photodetector. *Laser & Photonics Reviews*, 2402234.
- Mahmoud, M. A., & El-Sayed, M. A. (2013). Different plasmon sensing behavior of silver and gold nanorods. *The journal of physical chemistry letters*, 4(9), 1541-1545.
- Maril, E., Kaya, A., Çetinkaya, H. G., Koçyiğit, S., & Altındal, Ş. (2015). On the temperature dependent forward bias current-voltage (I-V) characteristics in Au/2% graphene-cobalt doped (Ca₃Co₄Ga_{0.001}O_x)/n-Si structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 332-338.
- Meftah, S. E., Benhaliliba, M., Kaleli, M., Benouis, C. E., Yavru, C. A., & Bayram, A. B. (2020). Optical and electrical characterization of thin film MSP heterojunction based on organic material Al/p-Si/P₃HT/Ag. *Physica B: Condensed Matter*, 593, 412238.
- Mendes, P. C., Song, Y., Ma, W., Gani, T. Z., Lim, K. H., Kawi, S., & Kozlov, S. M. (2023). Opportunities in the design of metal@oxide core-shell nanoparticles. *Advances in Physics: X*, 8(1), 2175623.
- Merga, G., Wilson, R., Lynn, G., Milosavljevic, B. H., & Meisel, D. (2007). Redox catalysis on “naked” silver nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(33), 12220-12226.
- Molina-Mendoza, A. J., Moya, A., Frisenda, R., Svatek, S. A., Gant, P., Gonzalez-Abad, S., Antolin, E., Agrait, N., Rubio-Bollinger, G., de Lara, D.P., Vilatela, J.J. & Castellanos-Gomez, A. (2016). Highly responsive UV-photodetectors based on single electrospun TiO₂ nanofibres. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(45), 10707-10714.
- Mott, N. F., & Littleton, M. J. (1938). Conduction in polar crystals. I. Electrolytic conduction in solid salts. *Transactions of the Faraday Society*, 34, 485-499.
- Mozafari, M., Nasresfahani, S., Sheikhi, M. H., & Agharezaei, H. (2021). An enhanced Vis-NIR photodetector based on Ag@PbS core-shell plasmonic heterostructure. *Journal of Alloys and Compounds*, 850, 156831.
- Mueller, T., Xia, F., & Avouris, P. (2010). Graphene photodetectors for high-speed optical communications. *Nature photonics*, 4(5), 297-301.
- Mulvaney, P. (1996). Surface plasmon spectroscopy of nanosized metal particles. *Langmuir*, 12(3), 788-800.
- Nagy, A., & Mestl, G. (1999). High temperature partial oxidation reactions over silver catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 188(1-2), 337-353.
- Neamen, D. A. (1992). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, Richard D. Irwin Inc., Boston, USA.

- Neo, D. C., Cheng, C., Stranks, S. D., Fairclough, S. M., Kim, J. S., Kirkland, A. I., Smith, J.M., Snaith, H.J., Assender, H.E. & Watt, A. A. (2014). Influence of shell thickness and surface passivation on PbS/CdS core/shell colloidal quantum dot solar cells. *Chemistry of Materials*, 26(13), 4004-4013.
- Neto, V. D. O. S., Freire, T. M., Saraiva, G. D., Muniz, C. R., Cunha, M. S., Fechine, P. B. A., & do Nascimento, R. F. (2019). Water treatment devices based on zero-valent metal and metal oxide nanomaterials. In *Nanomaterials Applications for Environmental Matrices* (pp. 187-225). Elsevier.
- Neugebohrn, N., Gehrke, K., Brucke, K., Götz, M., & Vehse, M. (2019). Multifunctional metal oxide electrodes: colour for thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 685, 131-135.
- Neyman, M. K., & Kozlov, M. S. (2022). *Quantifying interactions on interfaces between metal particles and oxide supports in catalytic nanomaterials*. *NPG Asia Mater* 14: 59.
- Ngo, D. A., Nguyen, N. M., Tran, T. P., Le, G. V., Duy, L. T., La, P. P. H., Tran, C.K. & Dang, V. Q. (2024). Synthesis of Ag/CuO/rGO hybrid structure towards the applications in visible light photodetectors. *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, 27(4), 3654-3661.
- Nicollian, E. H., & Brews, J. R. (2002). *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. John Wiley & Sons.
- Nickel, U., zu Castell, A., Pöpl, K., & Schneider, S. (2000). A silver colloid produced by reduction with hydrazine as support for highly sensitive surface-enhanced Raman spectroscopy. *Langmuir*, 16(23), 9087-9091.
- Nie, S., & Emory, S. R. (1997). Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering. *science*, 275(5303), 1102-1106.
- Nikam, A. V., Prasad, B. L. V., & Kulkarni, A. A. (2018). Wet chemical synthesis of metal oxide nanoparticles: a review. *CrystEngComm*, 20(35), 5091-5107.
- Nkele, A. C., Ezugwu, S., Suguyima, M., & Ezema, F. I. (2021). Structural and electronic properties of metal oxides and their applications in solar cells. In *Chemically deposited nanocrystalline metal oxide thin films: synthesis, characterizations, and applications* (pp. 147-163). Cham: Springer International Publishing.
- Norde, H. (1979). A modified forward IV plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of applied physics*, 50(7), 5052-5053.
- Nunes, D., Pimentel, A., Santos, L., Barquinha, P., Pereira, L., Fortunato, E., & Martins, R. (2018). *Metal oxide nanostructures: synthesis, properties and applications*. Elsevier.
- Odeh, A. A., & Al-Douri, Y. (2020). Metal oxides in electronics. In *Metal Oxide Powder Technologies* (pp. 263-278). Elsevier.
- Okoye, P. C., Azi, S. O., Qahtan, T. F., Owolabi, T. O., & Saleh, T. A. (2023). Synthesis, properties, and applications of doped and undoped CuO and Cu₂O nanomaterials. *Materials Today Chemistry*, 30, 101513.
- Orainy, R. H., & Hendi, A. A. (2014). Fabrication and electrical characterization of CdO/p-Si photosensors. *Microelectronic engineering*, 127, 14-20.
- Orak, I., Kocyigit, A., & Alindal, Ş. (2017). Electrical and dielectric characterization of Au/ZnO/n-Si device depending frequency and voltage. *Chinese Physics B*, 26(2), 028102.
- Orak, İ., Kocyigit, A., & Karataş, Ş. (2018). The analysis of the electrical and photovoltaic properties of Cr/p-Si structures using current-voltage measurements. *Silicon*, 10, 2109-2116.
- Orhan, Z., Yilmaz, M., Aydogan, S., Taskin, M., & Incekara, U. (2021). Improving light-sensing behavior of Cu/n-Si photodiode with Human Serum Albumin: Microelectronic and dielectric characterization. *Optik*, 241, 167069.

- Osada, M., & Sasaki, T. (2012). Two-dimensional dielectric nanosheets: novel nanoelectronics from nanocrystal building blocks. *Advanced Materials*, 24(2), 210-228.
- Ouyang, W., Teng, F., He, J. H., & Fang, X. (2019). Enhancing the photoelectric performance of photodetectors based on metal oxide semiconductors by charge-carrier engineering. *Advanced Functional Materials*, 29(9), 1807672.
- Özerden, E. (2014). Metal/organik/İnorganik Yarıiletken Yapıların Sıcaklığa Bağlı Olarak Elektriksel ve Optik Parametrelerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 1-209.
- Özmen, A., Aydoğan, S., & Yılmaz, M. (2019). Fabrication of spray derived nanostructured n-ZnO/p-Si heterojunction diode and investigation of its response to dark and light. *Ceramics International*, 45(12), 14794-14805.
- Padil, V. V. T., & Černík, M. (2013). Green synthesis of copper oxide nanoparticles using gum karaya as a biotemplate and their antibacterial application. *International journal of nanomedicine*, 889-898.
- Pan, J., Li, J., Yan, Z., Zhou, B., Wu, H., & Xiong, X. (2013). SnO₂@CdS nanowire-quantum dots heterostructures: tailoring optical properties of SnO₂ for enhanced photodetection and photocatalysis. *Nanoscale*, 5(7), 3022-3029.
- Parashar, M., Shukla, V. K., & Singh, R. (2020). Metal oxides nanoparticles via sol-gel method: a review on synthesis, characterization and applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(5), 3729-3749.
- Paria, D., Jeong, H. H., Vadakkumbatt, V., Deshpande, P., Fischer, P., Ghosh, A., & Ghosh, A. (2018). Graphene-silver hybrid devices for sensitive photodetection in the ultraviolet. *Nanoscale*, 10(16), 7685-7693.
- Park, Y., Shin, K., Lee, C., Lee, S. Y., Lee, Y. K., Kim, C. H., Cho, H.S., Henkelman, G. & Lee, H. M. (2022). Iterative redox activation promotes interfacial synergy in an Ag/Cu_xO catalyst for oxygen reduction. *Chemical Engineering Journal*, 446, 136966.
- Parvathiraja, C. And Shailajha, S. (2021). Bioproduction of CuO and Ag/CuO heterogeneous photocatalysis – photocatalytic dye degradation and biological activities. *Original Article*, 11, 1411-1425.
- Patel, M., Kim, H. S., Park, H. H., & Kim, J. (2016). Silver nanowires-templated metal oxide for broadband Schottky photodetector. *Applied Physics Letters*, 108(14).
- Phadtare, S., Kumar, A., Vinod, V. P., Dash, C., Palaskar, D. V., Rao, M., Shukla, P.G., Sivaram, S. & Sastry, M. (2003). Direct assembly of gold nanoparticle “shells” on polyurethane microsphere “cores” and their application as enzyme immobilization templates. *Chemistry of materials*, 15(10), 1944-1949.
- Pimpang, P., Sutham, W., Mangkorntong, N., Mangkorntong, P., & Choopun, S. (2008). Effect of stabilizer on preparation of silver and gold nanoparticle using grinding method. *Chiang Mai J. Sci*, 35(1), 250-257.
- Planck, M. (1901). On the law of the energy distribution in the normal spectrum. *Ann. Phys*, 4(553), 1-11.
- Polte, J., Tuae, X., Wuithschick, M., Fischer, A., Thuenemann, A. F., Rademann, K., Kraehnert, R. & Emmerling, F. (2012). Formation mechanism of colloidal silver nanoparticles: analogies and differences to the growth of gold nanoparticles. *Acs Nano*, 6(7), 5791-5802.
- Pomastowski, P., Sprynskyy, M., Zuvela, P., Rafinska, K., Milanowski, M., Liu, J. J., & Buszewski, B. (2016). Silver-lactoferrin nanocomplexes as a potent antimicrobial agent. *Journal of the American Chemical Society*, 138(25), 7899-7909.

- Proença, M., Rodrigues, M. S., Borges, J., & Vaz, F. (2019). Gas sensing with nanoplasmonic thin films composed of nanoparticles (Au, Ag) dispersed in a CuO matrix. *Coatings*, 9(5), 337.
- Pryshchepa, O., Pomastowski, P., & Buszewski, B. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, investigation techniques, and properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102246.
- Rai, P., Majhi, S. M., Yu, Y. T., & Lee, J. H. (2015). Noble metal@ metal oxide semiconductor core@ shell nano-architectures as a new platform for gas sensor applications. *RSC advances*, 5(93), 76229-76248.
- Rai, P. (2019). Plasmonic noble metal@ metal oxide core-shell nanoparticles for dye-sensitized solar cell applications. *Sustainable energy & fuels*, 3(1), 63-91.
- Rakgalakane, B. P. (2011). *Aqueous Synthesis and Characterization of CdSe/ZnO and Ag/ZnO Core/Shell Nanomaterials*. University of Johannesburg (South Africa).
- Rao, C.N.R., Müller, A., & Cheetham, A.K. (2006), The chemistry of nanomaterials; synthesis, properties and applications. John Wiley & Sons.
- Raza, M. A., Kanwal, Z., Rauf, A., Sabri, A. N., Riaz, S., & Naseem, S. (2016). Size-and shape-dependent antibacterial studies of silver nanoparticles synthesized by wet chemical routes. *Nanomaterials*, 6(4), 74.
- Ren, S., Zhao, G., Wang, Y., Wang, B., & Wang, Q. (2015). Enhanced photocatalytic performance of sandwiched ZnO@ Ag@ Cu₂O nanorod films: the distinct role of Ag NPs in the visible light and UV region. *Nanotechnology*, 26(12), 125403.
- Rhoderick, E. H. (1982). Metal-semiconductor contacts. *IEE Proceedings I (Solid-State and Electron Devices)*, 129(1), 1-14.
- Richter, M., Heumüller, T., Matt, G. J., Heiss, W., & Brabec, C. J. (2017). Carbon photodetectors: the versatility of carbon allotropes. *Advanced Energy Materials*, 7(10), 1601574.
- Robertson, J. (2005). High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors. *Reports on progress in Physics*, 69(2), 327.
- Rohizat, N. S., Ripain, A. H. A., Lim, C. S., Tan, C. L., & Zakaria, R. (2021). Plasmon-enhanced reduced graphene oxide photodetector with monometallic of Au and Ag nanoparticles at VIS-NIR region. *Scientific reports*, 11(1), 19688.
- Sachdeva, H. (2020). Recent advances in the catalytic applications of GO/rGO for green organic synthesis. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 515-537.
- Sahu, K., Bisht, A., Pandey, A., Dutta, A., Khan, S.A., Singhal, R., Som, T. and Mohapatra, S. (2020). RF magnetron sputtered Ag-Cu₂O-CuO nanocomposite thin films with highly enhanced photocatalytic and catalytic performance. *Applied Surface Science*, 517, 146169, 1-14.
- Sangar, S., Sharma, S., Vats, V. K., Mehta, S. K., & Singh, K. (2019). Biosynthesis of silver nanocrystals, their kinetic profile from nucleation to growth and optical sensing of mercuric ions. *Journal of Cleaner Production*, 228, 294-302.
- Sari, H. (2008). Yarıiletkenler. <https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1075/mod-resourcedcontent/Bolum-14.pdf>.
- Sarina, S., Waclawik, E. R., & Zhu, H. (2013). Photocatalysis on supported gold and silver nanoparticles under ultraviolet and visible light irradiation. *Green chemistry*, 15(7), 1814-1833.
- Sayson, L. V. A., & Regulacio, M. D. (2022). Rational design and synthesis of Ag-Cu₂O nanocomposites for SERS detection, catalysis, and antibacterial applications. *ChemNanoMat*, 8(5), e202200052.
- Scardaci, V. (2021). Anisotropic silver nanomaterials by photochemical reactions: Synthesis and applications. *Nanomaterials*, 11(9), 2226.

- Schottky, W. (1938). The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers. *Z. Phys*, 113, 367-414.
- Sengupta, S., Eavarone, D., Capila, I., Zhao, G., Watson, N., Kiziltepe, T., & Sasisekharan, R. (2005). Temporal targeting of tumour cells and neovasculature with a nanoscale delivery system. *Nature*, 436(7050), 568-572.
- Sharma, V. K., Yngard, R. A., & Lin, Y. (2009). “silver nanoparticles: Green Synthesis and their antimicrobial activities.
- Sharma, G., Sharma, A. R., Kurian, M., Bhavesh, R., Nam, J. S., & Lee, S. S. (2014). Green synthesis of silver nanoparticle using myristica fragrans (nutmeg) seed extract and its biological activity. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, 9(1).
- Shenashen, M. A., El-Safty, S. A., & Elshehy, E. A. (2014). Synthesis, morphological control, and properties of silver nanoparticles in potential applications. *Particle & Particle Systems Characterization*, 31(3), 293-316.
- Sheng, H., Muthukumar, S., Emanetoglu, N. W., & Lu, Y. (2002). Schottky diode with Ag on (1120) epitaxial ZnO film. *Applied physics letters*, 80(12), 2132-2134.
- Shkir, M., Khan, M. T., Ashraf, I. M., Almohammed, A., Dieguez, E., & AlFaify, S. (2019). High-performance visible light photodetectors based on inorganic CZT and InCZT single crystals. *Scientific reports*, 9(1), 12436.
- Shockley, W., & Queisser, H. (2018). Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells. In *Renewable energy* (pp. Vol2_35-Vol2_54). Routledge.
- Siddiqui, H., Parra, M. R., Pandey, P., Singh, N., Qureshi, M. S., & Haque, F. Z. (2012). A review: synthesis, characterization and cell performance of Cu₂O based material for solar cells. *Oriental Journal Of Chemistry*, 28(3), 1533.
- Shirtcliffe, N., Nickel, U., & Schneider, S. (1999). Reproducible preparation of silver sols with small particle size using borohydride reduction: for use as nuclei for preparation of larger particles. *Journal of colloid and interface science*, 211(1), 122-129.
- Slimani, Y., Almessiere, M. A., Hannachi, E., Al-qwairi, F. O., Manikandan, A., Baykal, A., & Azzouz, F. B. (2019). AC susceptibility, DC magnetization and superconducting properties of tungsten oxide nanowires added YBa₂Cu₃O_y. *Ceramics International*, 45(17), 21864-21869.
- Sondi, I., Goia, D. V., & Matijević, E. (2003). Preparation of highly concentrated stable dispersions of uniform silver nanoparticles. *Journal of colloid and interface science*, 260(1), 75-81.
- Song, W., Chen, J., Li, Z., & Fang, X. (2021). Self-powered MXene/GaN van der Waals heterojunction ultraviolet photodiodes with superhigh efficiency and stable current outputs. *Advanced Materials*, 33(27), 2101059.
- Spear, W. E., & Le Comber, P. G. (1975). Substitutional doping of amorphous silicon. *Solid state communications*, 17(9), 1193-1196.
- Spitaleri, L., Nicotra, G., Zimbone, M., Contino, A., Maccarrone, G., Alberti, A., & Gulino, A. (2019). “Fast and Efficient Sun Light Photocatalytic Activity of Au/ZnO Core–Shell Nanoparticles Prepared by a One-Pot Synthesis” *ACS Omega*, 4(12), 15061–15066.
- Sproul, A. (2003). Understanding the pn Junction. *Solar Cells: Resource for the Secondary Science Teacher*, 73.
- Sun, J. Z., & Gupta, A. (1998). Spin-dependent transport and low-field magnetoresistance in doped manganites. *Annual review of materials science*, 28(1), 45-78.
- Sun, S., Zhang, X., Yang, Q., Liang, S., Zhang, X., & Yang, Z. (2018). Cuprous oxide (Cu₂O) crystals with tailored architectures: A comprehensive review on synthesis, fundamental properties, functional modifications and applications. *Progress in Materials Science*, 96, 111-173.
- Sun, Z., Liao, T., & Kou, L. (2017). Strategies for designing metal oxide nanostructures.

- Sundararaman, R., Narang, P., Jermyn, A. S., Goddard III, W. A., & Atwater, H. A. (2014). Theoretical predictions for hot-carrier generation from surface plasmon decay. *Nature communications*, 5(1), 5788.
- Sung, Yun-Mo, and Jin-Kyung Lee. "Controlled Morphology and Crystalline Phase of Poly (ethylene oxide)- TiO₂ Nanohybrids." *Crystal growth & design* 4.4 (2004): 737-742.
- Suriati, G., Mariatti, M., & Azizan, A. (2014). Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method: Effect of reducing agent and surfactant concentration. *International journal of automotive and mechanical engineering*, 10, 1920-1927.
- Švecová, M., Ulbrich, P., Dendisová, M., & Matějka, P. (2018). SERS study of riboflavin on green-synthesized silver nanoparticles prepared by reduction using different flavonoids: What is the role of flavonoid used?. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 195, 236-245.
- Şahin, Y. (2022). Sırlar Yöntemi ile Al/Cd:ZnO/p-Si/Al Fotodiyot Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-80.
- Taleb, A., Petit, C., & Pileni, M. P. (1997). Synthesis of highly monodisperse silver nanoparticles from AOT reverse micelles: a way to 2D and 3D self-organization. *Chemistry of Materials*, 9(4), 950-959.
- Tamang, S., Rai, S., Bhujel, R., Bhattacharyya, N. K., Swain, B. P., & Biswas, J. (2023). A concise review on GO, rGO and metal oxide/rGO composites: Fabrication and their supercapacitor and catalytic applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169588.
- Tao, A., Sinsermsuksakul, P., & Yang, P. (2006). Polyhedral silver nanocrystals with distinct scattering signatures. *ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION IN ENGLISH-*, 45(28), 4597.
- Tatar, B., Bulgurcuoğlu, A. E., Gökdemir, P., Aydoğan, P., Yılmaz, D., Özdemir, O., & Kutlu, K. (2009). Electrical and photovoltaic properties of Cr/Si Schottky diodes. *international journal of hydrogen energy*, 34(12), 5208-5212.
- Teodoro, K. B., Shimizu, F. M., Scagion, V. P., & Correa, D. S. (2019). Ternary nanocomposites based on cellulose nanowhiskers, silver nanoparticles and electrospun nanofibers: Use in an electronic tongue for heavy metal detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 290, 387-395.
- Tessier, P. M., Velev, O. D., Kalambur, A. T., Rabolt, J. F., Lenhoff, A. M., & Kaler, E. W. (2000). Assembly of gold nanostructured films templated by colloidal crystals and use in surface-enhanced Raman spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 122(39), 9554-9555.
- Tetseo, M., Deb, P., Daimary, S., & Dhar, J. C. (2021). CuO nanowire-based metal semiconductor metal infrared photodetector. *Applied Physics A*, 127(5), 380.
- Thanh, N. T., & Green, L. A. (2010). Functionalisation of nanoparticles for biomedical applications. *Nano today*, 5(3), 213-230.
- Thanh, N. T., Maclean, N., & Mahiddine, S. (2014). Mechanisms of nucleation and growth of nanoparticles in solution. *Chemical reviews*, 114(15), 7610-7630.
- Tian, Y., Liu, H., Chen, Y., Zhou, C., Jiang, Y., Gu, C., Jiang, T. & Zhou, J. (2019). Seedless one-spot synthesis of 3D and 2D Ag nanoflowers for multiple phase SERS-based molecule detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 301, 127142.
- Tian, W., Lu, H., & Li, L. (2015). Nanoscale ultraviolet photodetectors based on onedimensional metal oxide nanostructures. *Nano Research*, 8, 382-405.
- Tian, W., Wang, Y., Chen, L., & Li, L. (2017). Self-powered nanoscale photodetectors. *Small*, 13(45), 1701848.

- Tiantian, C., Zhen, L., Yong, X., Yue, Y., Shengming, X., Teresa, B., Rejender, G., & Zhenghe, X. (2017). Silica-Silver Nanocomposites as Regenerable Sorbents for Hg⁰ Removal from Flue Gases.
- Toh, H. S., Batchelor-McAuley, C., Tschulik, K., & Compton, R. G. (2013). Electrochemical detection of chloride levels in sweat using silver nanoparticles: a basis for the preliminary screening for cystic fibrosis. *Analyst*, 138(15), 4292-4297.
- Tombak, A., Benhaliliba, M., Ocak, Y. S., & Kiliçoglu, T. (2015). The novel transparent sputtered p-type CuO thin films and Ag/p-CuO/n-Si Schottky diode applications. *Results in Physics*, 5, 314-321.
- Toprak, Ş. (2022). Sol Jel Yöntemiyle Hazırlanan Cr:CuO/n-Si Fotodiyotların Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Batman, 1-67.
- Tsui, L. K., & Zangari, G. (2014). Electrochemical synthesis of metal oxides for energy applications. *Electrodeposition and Surface Finishing: Fundamentals and Applications*, 217-239.
- Tuama, A. N., Abbas, K. H., Hamzah, M. Q., Mezan, S. O., Jabbar, A. H., & Agam, M. A. (2020). An overview on characterization of silver/cuprous oxide nanometallic (Ag/Cu₂O) as visible light photocatalytic. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(3), 5008-5018.
- Turkevich, J., Stevenson, P. C., & Hillier, J. (1951). A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. *Discussions of the faraday society*, 11, 55-75.
- Turut, A., Karabulut, A., Ejderha, K., & Bıyıklı, N. (2015). Capacitance–conductance characteristics of Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs structures with very thin Al₂O₃ interfacial layer. *Materials Research Express*, 2(4), 046301.
- Viswonathan, P., Wang, K., Li, J., and Hong, J.D. (2020). Multicore-shell Ag-CuO networked with CuO nanorods for enhanced non-enzymatic glucose detection. *Colloids and Surfaces A*, 598, 124816, 1-9.
- Vorobyev, S. A., Likhatski, M. N., Romanchenko, A. S., Fetisova, O. Y., Kazachenko, A. S., Volochaev, M. N., & Mikhlin, Y. L. (2020). Fabrication of extremely concentrated silver hydrosols without additional stabilizers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(46), 17225-17233.
- Wang, L., Jie, J., Shao, Z., Zhang, Q., Zhang, X., Wang, Y., Sun, Z. & Lee, S. T. (2015). MoS₂/Si heterojunction with vertically standing layered structure for ultrafast, high-detectivity, self-driven visible–near infrared photodetectors. *Advanced Functional Materials*, 25(19), 2910-2919.
- Wang, Luo, J., Fan, Q., Suzuki, M., Suzuki, I. S., Engelhard, M. H., Lin, Y., Kim, N., Wang, J.Q. & Zhong, C. J. (2005). Monodispersed core– shell Fe₃O₄@ Au nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(46), 21593-21601.
- Wang, X., Hanson, J. C., Frenkel, A. I., Kim, J. Y., & Rodriguez, J. A. (2004). Time-resolved studies for the mechanism of reduction of copper oxides with carbon monoxide: complex behavior of lattice oxygen and the formation of suboxides. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(36), 13667-13673.
- Wang, X., Liu, K., Chen, X., Li, B., Jiang, M., Zhang, Z., Zhao, H., & Shen, D. (2017). Highly wavelength-selective enhancement of responsivity in Ag nanoparticle-modified ZnO UV photodetector. *ACS applied materials & interfaces*, 9(6), 5574-5579.
- Wang, X., Zhang, E., Shi, H., Tao, Y., & Ren, X. (2022). Semiconductor-based surface enhanced Raman scattering (SERS): from active materials to performance improvement. *Analyst*, 147(7), 1257-1272.

- Wang, Y., Guo, J., Wang, T., Shao, J., Wang, D., & Yang, Y. W. (2015). Mesoporous transition metal oxides for supercapacitors. *Nanomaterials*, 5(4), 1667-1689.
- Wei, Q., Wang, Y., Qin, H., Wu, J., Lu, Y., Chi, H., Yang, F., Zhou, B., Yu, H. and Liu, J. (2018). Construction of rGO wrapping octahedral Ag-Cu₂O hererostructure for enhanced visible light photocatalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 227, 132-144.
- Wiley, B., Sun, Y., Mayers, B., & Xia, Y. (2005). Shape-controlled synthesis of metal nanostructures: the case of silver. *Chemistry–A European Journal*, 11(2), 454-463.
- Wiley, B., Sun, Y., & Xia, Y. (2007). Synthesis of silver nanostructures with controlled shapes and properties. *Accounts of chemical research*, 40(10), 1067-1076.
- Williams, G., & Kamat, P. V. (2009). Graphene– semiconductor nanocomposites: excited-state interactions between ZnO nanoparticles and graphene oxide. *Langmuir*, 25(24), 13869-13873.
- Wilmsen, C. (Ed.). (2013). *Physics and chemistry of III-V compound semiconductor interfaces*. Springer Science & Business Media.
- Wu, K., Chen, J., McBride, J. R., & Lian, T. (2015). Efficient hot-electron transfer by a plasmon-induced interfacial charge-transfer transition. *Science*, 349(6248), 632-635.
- Wu, M., Zhao, J., Li, C., & Liu, R. (2022). Heterogeneity in a metal–organic framework in situ guides engineering Co@ CoO heterojunction for electrocatalytic H₂ production in tandem with glucose oxidation. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(9), 4791-4799.
- Xia, Y., Yang, P., Sun, Y., Wu, Y., Mayers, B., Gates, B., Yin, Y., Kim, F., & Yan, H. (2003). One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications. *Advanced materials*, 15(5), 353-389.
- Xie, X., & Shen, G. (2015). Single-crystalline In₂S₃ nanowire-based flexible visible-light photodetectors with an ultra-high photoresponse. *Nanoscale*, 7(11), 5046-5052.
- Xiong, J., Li, Z., Chen, J., Zhang, S., Wang, L.Z. and Dou, S.X. (2014). “Facile synthesis of highly efficient one-dimensional plasmonic photocatalysts through Ag@Cu₂O core-shell hetero-nanowires”, *ACS Applied Materials&Interfaces*, 1-39.
- Xu, L., Yin, M. L., & Liu, S. (2014). Ag_x@ WO₃ core-shell nanostructure for LSP enhanced chemical sensors. *Scientific reports*, 4(1), 6745.
- Yan, F., Wang, Y., Zhang, J., Lin, Z., Zheng, J., & Huang, F. (2014). Schottky or ohmic metal–semiconductor contact: influence on photocatalytic efficiency of Ag/ZnO and Pt/ZnO model systems. *ChemSusChem*, 7(1), 101-104.
- Yan, F., Wei, Z., Wei, X., Lv, Q., Zhu, W., & Wang, K. (2018). Toward high-performance photodetectors based on 2D materials: strategy on methods. *Small Methods*, 2(5), 1700349.
- Yan, Y., Meng, L., Zhang, W., Zheng, Y., Wang, S., Ren, B., Yang, Z.L. & Yan, X. (2017). High-throughput single-particle analysis of metal-enhanced fluorescence in free solution using Ag@ SiO₂ core–shell nanoparticles. *ACS sensors*, 2(9), 1369-1376.
- Yang, B., Jin, S., Guo, S., Park, Y., Chen, L., Zhao, B., & Jung, Y. M. (2019). Recent development of SERS technology: Semiconductor-based study. *Acs Omega*, 4(23), 20101-20108.
- Yang, C., Wang, G., Liu, M., Yao, F., & Li, H. (2021). Mechanism, material, design, and implementation principle of two-dimensional material photodetectors. *Nanomaterials*, 11(10), 2688.
- Yang, G., Li, J., Wu, M., Yu, X., & Yu, J. (2023). Recent advances in materials, structures, and applications of flexible photodetectors. *Advanced Electronic Materials*, 9(10), 2300340.
- Yang, J., Li, Z., Zhao, W., Zhao, C., Wang, Y. and Liu, X. (2014). Controllable synthesis of Ag-CuO composite nanosheets with enhanced photocatalytic property. *Materials Letters*, 120, 16-19.

- Yang, L., Lv, J., Sui, Y., Fu, W., Zhou, X., Ma, J., Su, S., Zhang, W., Lv, P., Wu, D., Mu, Y. & Yang, H. (2014). Fabrication of Cu₂O/Ag composite nanoframes as surface-enhanced Raman scattering substrates in a successive one-pot procedure. *CrystEngComm*, 16(11), 2298-2304.
- Yang, P., Xu, Y., Chen, L., Wang, X., Mao, B., Xie, Z., Wang, S.D., Bao, F., & Zhang, Q. (2015). Encapsulated silver nanoparticles can be directly converted to silver nanoshell in the gas phase. *Nano letters*, 15(12), 8397-8401.
- Yang, S. E., Liu, P., Zhang, Y. J., Guo, Q. N., & Chen, Y. S. (2016). Effects of silver nanoparticles size and shape on light scattering. *Optik*, 127(14), 5722-5728.
- Yang, X., Fu, H., Zhang, L., An, X., Xiong, S., Jiang, X., & Yu, A. (2019). Enhanced gas sensing performance based on the fabrication of polycrystalline Ag@TiO₂ core-shell nanowires. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286, 483-492.
- Yang, Y., Wu, J., & Li, J. (2016). Correlation of the plasmon-enhanced photoconductance and photovoltaic properties of core-shell Au@TiO₂ network. *Applied Physics Letters*, 109(9).
- Yerragopu, P. S., Hiregoudar, S., Nidoni, U., Ramappa, K. T., Sreenivas, A. G., & Doddagoudar, S. R. (2020). Chemical synthesis of silver nanoparticles using tri-sodium citrate, stability study and their characterization. *Int. Res. J. Pure Appl. Chem*, 21(3), 37-50.
- Yıldırım, F. (2024), MoS₂ Tabanlı Fotodedektör Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 1-213.
- Yıldırım, F., Orhan, Z., & Aydoğan, Ş. (2023). UV-Visible photovoltaic detector based on biomaterial-inorganic semiconductor in the propolis/n-Si heterojunction configuration. *Materials Research Bulletin*, 159, 112113.
- Yıldırım, F., Khalili, S., Orhan, Z., Chenari, H. M., & Aydoğan, Ş. (2023). Highly sensitive self-powered UV-visible photodetector based on ZrO₂-RGO nanofibers/n-Si heterojunction. *Journal of Alloys and Compounds*, 935, 168054.
- Yıldırım, F., Bacaksız, E., Türüt, A., & Aydoğan, Ş. (2024). Self-driven, stable broadband photodetector based on GaAs: CdS heterojunction with ultrahigh on/off ratio and detectivity. *Surfaces and Interfaces*, 44, 103709.
- Yıldırım, F., Galehdarvand, S., Chenari, H. M., Yılmaz, M., & Aydoğan, Ş. (2024). Development and characterization of self-powered, highly sensitive optoelectronic device based on PVA-rGO nanofibers/n-Si. *Nanotechnology*, 35(33), 335203.
- Yıldırım, M., & Kocyigit, A. (2018). Characterization of Al/In: ZnO/p-Si photodiodes for various In doped level to ZnO interfacial layers. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 1064-1075.
- Yıldız, F. (2023). Nanoyapılı CuO ve Cu₂O Geçiş Metal Oksitlerin Görünür Bölgede Fotodedektör Uygulaması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 1-135.
- Yılmaz, M., Canpolat, N., & Aydoğan, S. (2024). Surface plasmon resonance effects of Ag@ZnO core-shell nanostructure in UV and visible light for photodiode applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(5), 3390-3402.
- Yoo, J., So, H., Yang, M., & Lee, K. J. (2019). Effect of chloride ion on synthesis of silver nanoparticle using retrieved silver chloride as a precursor from the electronic scrap. *Applied Surface Science*, 475, 781-784.
- Yoon, K. H., Choi, W. J., & Kang, D. H. (2000). Photoelectrochemical properties of copper oxide thin films coated on an n-Si substrate. *Thin solid films*, 372(1-2), 250-256.
- Yu, S. J., Yin, Y. G., & Liu, J. F. (2013). Silver nanoparticles in the environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(1), 78-92.

- Yuca, H., Karakaya, S., Yıldırım, F., İncekara, Ü., & Aydoğan, Ş. (2023). Highly responsive self-driven broadband hybrid photodetector with high detectivity and on/off ratio based on Hibiscus sabdariffa. *Physica Scripta*, 98(12), 125982.
- Yusof, F. Chowdhurt, S., Sulaiman, N. and Faruck, M.O. (2017). "Effect of Process Parameters on the Synthesis of Silver Nanoparticles and Its Effects on Microbes", *Jurnal Teknologi*, 80(3), 115-121.
- Zanella, R., Sandoval, A., Santiago, P., Basiuk, V. A., & Saniger, J. M. (2006). New preparation method of gold nanoparticles on SiO₂. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(17), 8559-8565.
- Zannotti, M., Vicomandi, V., Rossi, A., Minicucci, M., Ferraro, S., Petetta, L., & Giovannetti, R. (2020). Tuning of hydrogen peroxide etching during the synthesis of silver nanoparticles. An application of triangular nanoplates as plasmon sensors for Hg²⁺ in aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 309, 113238.
- Zeng, L., Lin, S., Lou, Z., Yuan, H., Long, H., Li, Y., Lu, W., Lau, S.P., Wu, D. & Tsang, Y. H. (2018). Ultrafast and sensitive photodetector based on a PtSe₂/silicon nanowire array heterojunction with a multiband spectral response from 200 to 1550 nm. *NPG Asia Materials*, 10(4), 352-362.
- Zhai, T., Fang, X., Liao, M., Xu, X., Zeng, H., Yoshio, B., & Golberg, D. (2009). A comprehensive review of one-dimensional metal-oxide nanostructure photodetectors. *Sensors*, 9(8), 6504-6529.
- Zhang, Q., Zhang, K., Xu, D., Yang, G., Huang, H., Nie, F., Liu, C. & Yang, S. (2014). CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications. *Progress in Materials Science*, 60, 208-337.
- Zhang, X., Chen, Z., & Zuo, X. (2020). Chloroauric acid/silver nanoparticle colorimetric sensors for antioxidant discrimination based on a honeycomb Ag-Au nanostructure. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3922-3928.
- Zhan, Z., Zheng, L., Pan, Y., Sun, G., & Li, L. (2012). Self-powered, visible-light photodetector based on thermally reduced graphene oxide-ZnO(rGO-ZnO) hybrid nanostructure. *Journal of Materials Chemistry*, 22(6), 2589-2595.
- Zhang, L. S., Jiang, L. Y., Yan, H. J., Wang, W. D., Wang, W., Song, W. G., Guo, Y.G. & Wan, L. J. (2010). Mono dispersed SnO₂ nanoparticles on both sides of single layer graphene sheets as anode materials in Li-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry*, 20(26), 5462-5467.
- Zhang, T., Li, X., Kang, S. Z., Qin, L., Li, G., & Mu, J. (2014). Facile assembly of silica gel/reduced graphene oxide/Ag nanoparticle composite with a core-shell structure and its excellent catalytic properties. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(9), 2952-2959.
- Zhang, Q., Lee, I., Joo, J. B., Zaera, F., & Yin, Y. (2013). Core-shell nanostructured catalysts. *Accounts of Chemical Research*, 46(8), 1816-1824.
- Zhang, Y., He, S., Guo, W., Hu, Y., Huang, J., Mulcahy, J. R., & Wei, W. D. (2017). Surface-plasmon-driven hot electron photochemistry. *Chemical reviews*, 118(6), 2927-2954.
- Zhang, X., Duan, X., Niu, W., Liu, X., Zou, X., Huang, H., Mudiyansele, D.H., Fu, H., Member, IEEE, Jiang, B., Liu, G. & Yang, Z. (2022). The Mechanism of Performance Variations in MoS₂ Vertical Schottky Metal-Semiconductor Photodiode Based on Thermionic Emission Theory. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 69(10), 5644-5648.
- Zhao, Q., Wang, W., Carrascoso-Plana, F., Jie, W., Wang, T., Castellanos-Gomez, A., & Frisenda, R. (2020). The role of traps in the photocurrent generation mechanism in thin InSe photodetectors. *Materials Horizons*, 7(1), 252-262.
- Zheng, D., Pang, X., Wang, M., He, Y., Lin, C., & Lin, Z. (2015). Unconventional route to hairy plasmonic/semiconductor core/shell nanoparticles with precisely controlled

- dimensions and their use in solar energy conversion. *Chemistry of Materials*, 27(15), 5271-5278.
- Zheng, Z., Zhuge, F., Wang, Y., Zhang, J., Gan, L., Zhou, X., Li, H. & Zhai, T. (2017). Decorating perovskite quantum dots in TiO₂ nanotubes array for broadband response photodetector. *Advanced Functional Materials*, 27(43), 1703115.
- Zhou, Y., Qiu, X., Wan, Z. A., Long, Z., Poddar, S., Zhang, Q., Ding, Y., Chan, C.L.J., Zhang, D., Zhou, K., Lin, Y. & Fan, Z. (2022). Halide-exchanged perovskite photodetectors for wearable visible-blind ultraviolet monitoring. *Nano Energy*, 100, 107516.
- Zhu, H., Li, Y., & Jiang, X. (2019). Room-temperature synthesis of cuprous oxide and its heterogeneous nanostructures for photocatalytic applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 772, 447-459.
- Zhu, M., Li, X., Guo, Y., Li, X., Sun, P., Zang, X., Wang, K., Zhong, M., Wu, D. & Zhu, H. (2014). Vertical junction photodetectors based on reduced graphene oxide/silicon Schottky diodes. *Nanoscale*, 6(9), 4909-4914.
- Ziel, V.A. (2018). *Solid state physical electronics*. Prentice Hall.