

**BAKIR NANOPARÇACIKLARLA KATKILANMIŞ
BEYAZ DUTTAN SENTEZLENEN KARBON KUANTUM
NOKTALARIN Al/n-GaP EKLEMDE ARAYÜZEY
TABAKASI OLARAK KULLANILMASI VE
ELEKTRİKSEL VE FOTOELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Osman Nuri ENİS

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Ana Bilim dalı

Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

**BAKIR NANOPARÇACIKLARLA KATKILANMIŞ BEYAZ DUTTAN
SENTEZLENEN KARBON KUANTUM NOKTALARIN Al/n-GaP EKLEMDE
ARAYÜZEY TABAKASI OLARAK KULLANILMASI VE ELEKTRİKSEL VE
FOTOELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Use of Carbon Quantum Dots Synthesized from White Mulberry Doped with Copper Nanoparticles as Interfacial Layers in Al/n-GaP Junction and Investigation of Their Electrical and Photoelectrical Properties)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman Nuri ENİS

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Erzurum
Eylül, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Bakır Nanoparçacıklarla Katkılanmış Beyaz Duttan Sentezlenen Karbon Kuantum Noktalarının Al/n-GaP Ekleme Arayüzey Tabakası Olarak Kullanılması ve Elektriksel ve Fotoelektriksel Özelliklerinin Araştırılması

Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM danışmanlığında, Osman Nuri ENİS tarafından hazırlanan bu çalışma, 11/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK** Anabilim Dalı **KATİHAL FİZİĞİ** Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Songül DUMAN
Erzurum Teknik Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Betül GÜZELDİR
Atatürk Üniversitesi

[Signature]
.....

[Signature]
.....

[Signature]
.....

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

[Signature] 28.01.2026
Prof. Dr. Alper NUHOGLU
Enstitü Müdürü



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM danışmanlığında sunulan **"Bakır Nanoparçacıklarla Katkılanmış Beyaz Duttan Sentezlenen Karbon Kuantum Noktaların Al/n-GaP Ekleme Arayüzey Tabakası Olarak Kullanılması ve Elektriksel ve Fotoelektriksel Özelliklerinin Araştırılması"** başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	10	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Yöntem	13	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	12	20
Sonuç ve Öneriler	13	20
Tezin Geneli	15	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Osman Nuri ENİS	Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM
17.9.2025	17.9.2025
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM hocama teşekkür ederim. Ayrıca Prof. Dr. Betül GÜZELDİR ve Prof. Dr. Hayrunnisa NADAROĞLU hocalarıma da katkıları ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme de çok teşekkürlerimi sunarım.

Osman Nuri ENİS

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAKIR NANOPARÇACIKLARLA KATKILANMIŞ BEYAZ DUTTAN SENTEZLENEN KARBON KUANTUM NOKTALARIN Al/n-GaP EKLEMDE ARAYÜZEY TABAKASI OLARAK KULLANILMASI VE ELEKTRİKSEL VE FOTOELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Osman Nuri ENİS

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Amaç: Karbon kuantum dot (CQD)'lar, optoelektronik, algılama ve biyolojik görüntüleme gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadırlar. Günümüzde CQD'ler, brokoli, gıda atıkları, kurutulmuş yaprak ve ginkgo yaprağı gibi çeşitli düşük maliyetli ve çevre dostu yeşil karbon kaynaklarından üretilmektedirler. Bu çalışmada, daha önce yapılanlardan farklı olarak, beyaz duttan sentezlenen CQD'lere farklı miktarlarda Cu nanoparçacıklar (NC) katkılanmış ve bu malzeme Al/n-GaP Schottky diyot yapısında metal ile yarıiletken arasına arayüzey tabakası olarak yerleştirilmiştir. Bu araştırmada, pratikte uygulanabilirliğini görme amacıyla, diyot üretiminde arayüzey tabakası olarak ilk kez kullanılan Cu NC'lerle katkılanmış CQD'lerin, diyot I-V karakteristikleri üzerindeki etkileri hem Cu NC yüzde oranına hem de farklı dalga boylarındaki ışık etkisine bağlı olarak raporlanmıştır.

Yöntem: CQD'ler, öncül olarak üre ve sitrik asit kullanılarak, basit ve yeşil hidrotermal yöntemle beyaz duttan sentezlenmiştir. Cu NC'ler, 0,01 g amonyum sitrat, 0,01 g üre ve 0,05 g bakır klorür kullanılarak ve çeşitli işlemlerden geçirilerek üretilmiştir. Cu NC'ler CQD çözeltisi içerisine sırasıyla %1, %3, %5 ve %10 oranlarında katılarak dört farklı oranda Cu NC'lerle katkılanmış beyaz dut karbon kuantum dot (WM-CQD:CuNCs) çözeltileri elde edilmiştir. Her bir çözeltinin yapısal ve optik özellikleri XRD, TEM, FTIR ve PL spektroskopisi teknikleriyle incelendikten sonra, çözeltiler döndürerek kaplama yöntemiyle n-GaP yarıiletkeni yüzeyi üzerine ince film halinde yerleştirilmiştir. Üretilen diyotların I-V ölçümleri önce oda sıcaklığında ve karanlıkta sonra farklı dalga boylarında aydınlatma altında alınarak, Rhoderick, Norde ve Cheung metodları yardımıyla karakteristik parametreleri hesaplanmıştır.

Bulgular: Yapılan SEM analizi ile üretilen WM-CQD:CuNCs filmlerin aygıt üretimine uygun olduğu belirlenmiştir. Üretilen diyotlar iyi derecede doğrultucu davranış sergilemiştir. WM-CQD ince film içerisindeki Cu NC'lerin yüzde miktarlarının artmasıyla R_s değerlerinin azaldığı ortaya çıkmıştır. Hesaplanan n değerlerinin birden büyük olması, diyotların ideal olmadığını göstermiştir. WM-CQD arayüzey tabakasına katkılanan Cu NC'lerin yüzde olarak miktarının artmasıyla n değerlerinin bir miktar azaldığı, Φ_B değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir. Uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak I-V karakteristiklerinden hesaplanan parametrik değerler, WM-CQD ince filmine katkılanan Cu NC'lerin yüzdesinin artmasıyla fototepkinin de arttığını göstermiştir.

Sonuç: I-V karakteristiklerinden elde edilen foto tepki, laboratuvar koşullarında çevre dostu biyolojik moleküller kullanılarak üretilen bu arayüzey tabakalı diyotların farklı optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği potansiyelini ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beyaz dut, Karbon kuantum dot, Bakır nanoparçacık, Arayüzey tabakası, Elektriksel karakteristikler, Schottky diyot

Eylül 2025, 116 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

USE OF CARBON QUANTUM DOTS SYNTHESIZED FROM WHITE MULBERRY DOPED WITH COPPER NANOPARTICLES AS INTERFACIAL LAYERS IN Al/n-GaP JUNCTION AND INVESTIGATION OF THEIR ELECTRICAL AND PHOTOELECTRICAL PROPERTIES

Osman Nuri ENİS

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Objective: Carbon quantum dots (CQDs) are used across a wide range of applications, including optoelectronics, sensing and biological imaging. Today, CQDs are produced from a variety of low-cost and environmentally friendly green carbon sources, including broccoli, food waste, dried leaves, and ginkgo leaves. In this study, unlike previous studies, different amounts of Cu nanoparticles (NC) were doped into CQDs synthesized from white mulberry and this material was placed as an interface layer between the metal and the semiconductor in the Al/n-GaP Schottky diode structure. In this research, to assess practical applicability, the effects of Cu NC-doped CQDs, used for the first time as the interface layer in diode production, on diode I-V characteristics were reported as a function of both the Cu NC percentage and light wavelength.

Method: CQDs were synthesized from white mulberry by a simple and green hydrothermal method using urea and citric acid as precursors. Cu NCs were produced using 0.01 g ammonium citrate, 0.01 g urea and 0.05 g copper chloride and following various processes. White mulberry carbon quantum dot (WM-CQD:CuNCs) solutions doped with Cu NCs at four different ratios were prepared by adding Cu NCs to the CQD solution at 1%, 3%, 5%, and 10%, respectively. After the structural and optical properties of each solution were examined by XRD, TEM, FTIR and PL spectroscopy techniques, the solutions were deposited as thin films on the n-GaP semiconductor surface by spin coating method. I-V measurements of the produced diodes were first taken at room temperature and in the dark, and then under illumination at different wavelengths. Their characteristic parameters were calculated using the Rhoderick, Norde, and Cheung methods.

Findings: SEM analysis revealed that the produced WM-CQD: CuNC films were suitable for device fabrication. The produced diodes exhibited good rectifying behavior. It was shown that R_s values decreased with increasing percentage amounts of Cu NCs in the WM-CQD thin film. The calculated n values, which are greater than 1, indicate that the diodes are not ideal. As the percentage amount of Cu NCs doped into the WM-CQD interface layer increased, n values decreased slightly, while Φ_B values increased. Parametric values calculated from the I-V characteristics, depending on the wavelength of the applied light, showed that the photoresponse increased with the increasing percentage of Cu NCs doped into the WM-CQD thin film.

Results: The photoresponse obtained from I-V characteristics revealed that the interfacial layered diodes produced using environmentally friendly biological molecules under laboratory conditions have potential for use in various optoelectronic applications.

Keywords: White Mulberry, Carbon Quantum Dot, Copper Nanocluster, Interfacial Layer, Electrical Characteristic, Schottky Diod

September 2025, 116 pages

İÇİNDEKİLER

<u>ÖZET</u>	IV
<u>ABSTRACT</u>	Error! Bookmark not defined.
<u>TEŞEKKÜR</u>	III
<u>İÇİNDEKİLER</u>	VI
<u>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</u>	XIII
<u>ŞEKİLLER DİZİNİ</u>	IX
<u>ÇİZELGELER DİZİNİ</u>	VIII
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	7
2.1. Yarıiletken Materyallerin Temel Özellikleri	7
2.1.1. Enerji Bantları ve Yük Taşıyıcıları.....	7
2.1.2. Direkt ve İndirekt Bant Aralıkları	12
2.1.3. Elemental ve Bileşik Yarıiletkenler	13
2.1.3.1. Elemental Yarıiletkenler.....	13
2.1.3.2. Bileşik Yarıiletkenler.....	15
2.1.4. Katkılı Yarıiletkenler	17
2.2. Yük Taşıyıcıları ile Fotonların Etkileşimleri.....	18
2.2.1. Bulk Yarıiletkenlerde Foton Etkileşimleri	18
2.2.2. Bulk Yarıiletkenlerde Banddan Banda Geçişler	20
2.2.2.1. Band Aralığı Dalga Boyu	20
2.2.2.2. Soğurma ve Emisyon Şartları	21
2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklar	26
2.3.1. Schottky Diyot: Doğrultucu Metal-Yarıiletken Kontak	27
2.3.2. Omik Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	33
2.3.3. Gerçek Schottky Kontaklar.....	35
2.4. Schottky Engel Yüksekliğinin Belirlenmesi	36
2.5. Schottky Diyotlarda Seri Direnç	39
2.6. Eklem Fotodiyotlar	41
2.7. Schottky Fotodiyotlar	45
2.8. Kuantum Dot'lar	47
3. MATERYAL ve YÖNTEM	50
3.1. Bakır Nano Parçacık Katkılı Dut Karbon Kuantum Noktaların Sentezi	50

3.2. <i>n</i> -GaP Yarıiletkeninin Kimyasal Olarak Temizlenmesi ve Omik Kontakın Yapılması.....	51
3.3. Bakır Nano Parçacık Katkısız ve Katkılı Dut Karbon Kuantum Noktaların <i>n</i> -GaP Üzerine İnce Film Şeklinde Yerleştirilmesi	53
3.4. Referans ve Bakır Nano Parçacık Katkısız ve Katkılı Dut Karbon Kuantum Nokta Arayüzey Tabakalı Diyotların Üretilmesi ve Elektriksel ve Foto-Elektriksel Karakterizasyonları	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	55
4.1. Giriş.....	55
4.2. Bakır Nano Parçacıklarla Katkılanmış Dut Karbon Kuantum Noktaların Analizi..	55
4.3. Laboratuvar Şartlarında Üretilen Referans ve Arayüzey Tabakalı Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Cu Nano Parçacık Katkılama Oranına Bağlı Olarak İncelenmesi	62
4.4. Laboratuvar Şartlarında Üretilen Arayüzey tabakalı Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Uygulanan Işığın Dalga Boyuna Bağlı Olarak İncelenmesi	73
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	85
KAYNAKÇA.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	99

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Seçilmiş bazı yarıiletken malzemelerdeki elektron ve boşluk etkin kütlelerinin tipik değerleri.	11
Tablo 2. Seçilmiş bazı elemental ve III-V ikili yarıiletkenlerin kristal yapıları, bant aralığı türleri, bant aralığı enerjileri ve bant aralığı dalga boyları.	14
Tablo 3. Sık kullanılan bazı malzemelerin 300 K'deki iş fonksiyonu ve elektron ilgisi değerleri.	28
Tablo 4. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta akım-gerilim karakteristiklerinden farklı yöntemlerle hesaplanan parametrelerinin değerleri.	72
Tablo 5. Karanlık ve çeşitli aydınlatma koşulları altında Al/WM-CQD/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının akım-gerilim karakteristiklerinden farklı yöntemlerle hesaplanan parametrelerinin değerleri.	84

ŞEKİLER DİZİNİ

- Şekil 1.** Si ve GaAs' deki enerji bantları. Valans ve iletkenlik bantlarını ayıran bant aralığı enerjisi E_g , oda sıcaklığında Si için 1,12 eV ve GaAs için 1,42 eV' dir. 7
- Şekil 2.** (a) Örgü sabiti a olan sonsuz bir boyutlu atom topluluğuyla ilişkili kristal örgü potansiyeli, (b) Kronig-Penney modelinde kullanılan idealize edilmiş V_0 yükseklikli dikdörtgen engel potansiyeli. 8
- Şekil 3.** $T > 0^\circ K$ ' de iletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki boşluklar. 9
- Şekil 4.** Si ve GaAs'ın E-k fonksiyonlarının iki kristal yönelimi boyunca görünümü: $[111]$ sola doğru ve $[100]$ sağa doğru. 10
- Şekil 5.** Si ve GaAs için E-k diyagramları, iletim bandının alt kısmında ve değerlik bandının üst kısmında bulunan parabol ile iyi bir şekilde yaklaşık olarak çizilebilir. 12
- Şekil 6.** Periyodik tablonun yarıiletkenlerle ilgili bölümü. Mavi, sarı ve gümüş rengiyle gösterilen elementler oda sıcaklığında sırasıyla gaz, sıvı ve katı formlarını alırlar. 13
- Şekil 7.** Bulk yarıiletkenlerde fotonların soğrulması ve emisyonuna dair örnekler. (a) GaAs'deki banttan banda geçişler, $\lambda_0 < \lambda_g = hc_0/E_g = 0,87 \mu m$ dalga boyundaki fotonların soğrulması veya emisyonuyla sonuçlanabilir, (b) $\lambda_A = hc_0/E_A = 14 \mu m$ dalga boyundaki bir fotonun soğrulması, Hg katkılı Ge'de (Ge:Hg) değerlik bandından akseptör seviyesine geçişle sonuçlanır, (c) Ge'nin iletim bandındaki serbest taşıyıcı geçişleri. 19
- Şekil 8.** (a) Bir fotonun soğrulması, bir elektron-delik çiftinin oluşumuyla sonuçlanır. Bu işlem, ışığın foto algılanmasında kullanılır, (b) Bir elektron-delik çiftinin yeniden birleşmesi, bir fotonun kendiliğinden yayılmasıyla sonuçlanır. Işık yayan diyotlar (LED'ler) bu temelde çalışır, (c) Elektron-delik yeniden birleşmesi bir foton tarafından indüklenebilir. Sonuç, özdeş bir fotonun uyarılmış emisyonudur. Bu, yarıiletken lazer diyotlarının çalışmasından sorumlu olan temel işlemdir. 21
- Şekil 9.** $h\nu$ enerjili bir fotonun etkileştiği durumların yoğunluğu, karekök yasasına uygun olarak $h\nu - E_g$ ile artmaktadır. 24
- Şekil 10.** İndirekt bant aralıklı yarıiletkendeki foton emisyonu. İletkenlik bandının tabanına yakın bir elektronun, valans bandının tepesine yakın bir delikle yeniden birleşmesi, enerji ve momentum alışverişini gerektirir. Enerji bir foton tarafından taşınabilir,

ancak momentumu korumak için bir veya daha fazla fonon da gereklidir. Bu nedenle bu tür çok parçacıklı etkileşimin olması olası değildir.	25
Şekil 11. Dikey (k-korunumlu) bir geçiş yoluyla indirekt bant aralıklı yarıiletkende foton soğrulması. Foton, iletkenlik bandında uyarılmış bir elektron üretir ve değerlik bandında bir delik bırakır. Daha sonra elektron ve delik, sırasıyla iletkenlik ve değerlik bantlarında mümkün olan en düşük ve en yüksek seviyelere hızlı geçişler gerçekleştirirler ve enerjilerini fononlar biçiminde serbest bırakırlar. İşlem ardışık olduğundan, foton soğrulması olası değildir..	26
Şekil 12. Termal dengede metal-n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak (a) metal ve n-tipi yarıiletken ayrı halde, (b) elektriksel temas halinde metal ve n-tipi yarıiletken, (c) metal ve n tipi yarıiletken arasındaki ideal fiziksel kontak.	27
Şekil 13. (a) Ters beslem, (b) Doğru beslem Schottky diyotların gösterimi.	30
Şekil 14. Metalde (a) negatif, (b) pozitif voltaj bulunan omik metal-yarıiletken kantağın gösterimi.....	34
Şekil 15. Arayüzey tabakası ve arayüzey durumlarının varlığında bir metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kantağın enerji bant diyagramı.	36
Şekil 16. (a) Schottky fotodiyotun üst yüzeyinden gelen aydınlatma, (b) Elektronların foto uyarılması: (i) $q\Phi_B < h\nu < E_g$ aralığında metalden yarıiletken, (ii) $h\nu > E_g$ durumunda yarıiletkenin içinde	38
Şekil 17. Bir p-n fotodiyotun fotouyarılması ve enerji bandı gradyanı.	44
Şekil 18. Çeşitli optik aydınlatma güç seviyelerinde bir eklem fotodiyotunun akım-gerilim karakteristikleri.	44
Şekil 19. (a) $\Phi_s < \Phi_m$ olan bir metal ve n-tipi yarıiletkenin arayüzeyindeki, (b) $\Phi_s > \Phi_m$ olan bir metal ve p-tipi yarıiletkenin arayüzeyindeki Schottky eklemleri.	45
Şekil 20. Termal buharlaştırma cihazı	52
Şekil 21. Tavlama işlemlerinde kullanılan fırın.....	52
Şekil 22. Laboratuvar koşullarında üretilen diyotların üretim aşamalarını gösteren şematik diyagram (Kuantum noktaları ile ilgili şekil " https://www.studyiq.com/articles/quantum-dots/ " web sitesinden alınmıştır).	54
Şekil 23. (a) Cu NC'lerin ve (b) WM-CQD'lerin TEM görüntüleri.....	55
Şekil 24. (a) Cu NC'lerin ve (b) WM-CQD'lerin XRD desenleri.	56
Şekil 25. WM-CQD ve Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerin FTIR analizi.....	57
Şekil 26. (a) %1Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin, (b) %3Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin, (c) %5Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin ve (d) %10Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin floresan spektrumları.	61

Şekil 27. n-GaP yarıiletken altlık üzerine biriktirilen Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD ince filminin SEM görüntüsü.....	62
Şekil 28. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen $\ln(I)$ -V grafikleri.	63
Şekil 29. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafiklerinden elde edilen doğrultma oranı-gerilim eğrileri.	64
Şekil 30. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafikleri.	65
Şekil 31. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafiklerinden elde edilen doğru beslem voltajına karşılık eklem dirençlerinin değişimi.	66
Şekil 32. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri.	68
Şekil 33. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen $F(V)$ -V eğrileri.	69
Şekil 34. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen E_c - E_{ss} 'ye karşılık N_{ss} eğrileri.....	71
Şekil 35. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğru ve ters beslem $\ln(I)$ -V eğrileri.	74
Şekil 36. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğrultma oranı-gerilim eğrileri.....	75
Şekil 37. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğru ve ters beslem I-V eğrileri. Büyütülmüş ters beslem I-V karakteristikleri grafiklerin içerisinde gösterilmiştir.	77
Şekil 38. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğru beslem voltajına karşılık eklem dirençlerinin değişimi.	79

Şekil 39. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri.....	80
Şekil 40. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının $F(V)$ -V eğrileri.	82
Şekil 41. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının E_c - E_{ss} 'ye karşılık N_{ss} eğrileri.....	83

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Φ_B	Engel yüksekliği
A	Etkin diyot alanı
A^*	Richardson sabiti
GaN	Galyum nitrat
GaAs	Galyum arsenik
InP	İndiyum fosfat
GaP	Galyum fosfat
SiC	Silisyum karbür
q	Elektron yükü
E_c	İletkenlik bandının tabanı
E_{Fm}	Metalin Fermi enerji seviyesi
E_{Fs}	Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
E_v	Valans bandının tavanı
NC	Nano küme
Cu	Bakır
K	Kelvin
P	Momentum
k	Dalga vektörü
$\hbar$	Planck sabiti
m_0	Elektronun durgun kütlesi
m_v	Boşluk kütlesi
D	Elmas yapı
Z	Çinkoblend yapı
W	Wurtzite yapı
λ_g	Bant aralığı dalga boyu
c_0	Işık hızı
n	Elektron konsantrasyonu
p	Boşluk konsantrasyonu
n_i	Asal taşıyıcı konsantrasyonu

$h\nu$	Foton enerjisi
$g_c(E)$	İletkenlik bandındaki hallerin yoğunluğu
$g_v(E)$	Valans bandındaki hallerin yoğunluğu
V_{bi}	Built-in potansiyeli
CQD	Karbon kuantum nokta
WM-CQD	Beyaz dut karbon kuantum nokta
LED	Işık yayan diyot
Si	Silisyum
Ge	Germanyum
InGaAsP	İndiyum galyum arsenik fosfat
AlInGaN	Aliminyum indiyum galyum nitrat
E_g	Yasak enerji aralığı
a	Örgü aralığı
V_o	Örgü potansiyeli
T	Sıcaklık
k	Boltzmann sabiti
V_R	Ters beslem voltajı
V_D	Doğru beslem voltajı
V_t	Termal potansiyel
V_{on}	Açılma voltajı
ϕ_o	Yüzey potansiyeli
D_{it}	Birim alan başına arayüzey durumlarının yoğunluğu
N_a	Akseptör atomlarının konsantrasyonu
N_d	Donor atomlarının konsantrasyonu
δ	Arayüzey tabakasının kalınlığı
ΔV_{ox}	Oksit üzerinde düşen potansiyel
Q_{ss}	Arayüzey durumlarında bulunan yük
n	İdealite faktörü
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_i	Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti
C	Birim alan başına eklem kapasitesi
N_c	İletkenlik bandındaki hallerin etkin yoğunluğu
I_{ph}	Fotoakım
$F(V)$	Norde fonksiyonu
TEM	Geçirmeli elektron mikroskobu

SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UV-vis	Ultraviyole görünür spektroskopisi
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
XPS	X-ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	X-ışını kırınımı
CND	Karbon nanonoktalar
PD	Polimer noktalar
CPD	Karbonize polimer noktalar
GQD	Grafen kuantum noktalar
PL	Fotoluminesans
I_s	Doyma akımı
I_{min}	Minimum akım değeri
V_{min}	Minimum gerilim değeri
$F(V)_{min}$	Norde fonksiyonunun minimum değeri
fcc	Yüzey merkezli kübik
N_{ss}	Arayüzey durumlarının yoğunluğu
E_{ss}	Arayüzey durumlarının enerjisi
I-V	Akım-voltaj
R_s	Seri direnç
R_i	Eklem direnci
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
W	Tükenim tabaka genişliği
γ	n'den büyük ilk tam sayı

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, metaller ile yalıtkanlar arasında elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. Bu iletkenlik, sıcaklığın, safsızlık içeriğinin ve optik uyarımın değiştirilmesiyle değiştirilebilir. Elektriksel özelliklerdeki bu çeşitlilik, yarıiletkenlerin elektronik aygıtlarda kullanılmasının temel nedenidir. Yarıiletken malzemelerin elektriksel karakterizasyonunu yapabilmek için temel özelliklerinin anlaşılması gerekir. Yarıiletken bir malzemede elektriksel iletim, işgal edilmiş hallerdeki taşıyıcıların (iletkenlik bandındaki elektronlar veya valans bandındaki boşluklar) hareketi ile kolaylaştırılır. Bu elektronların ve boşlukların konsantrasyonu, yarıiletkenlere bilerek katılan kirliliklerin miktarıyla kontrol edilebilir. Yarıiletkenler, atomlarının en yakın komşu atomlar arasındaki güçlü ve yönlü kovalent bağlarla bir arada tutulması gerçeğiyle diğer malzemelerden ayrılırlar (Neamen 2012).

Modern yarıiletken endüstrisinin çoğu, küçük bant aralığına (1,12 eV), daha düşük maliyete ve nispeten büyük çalışma sıcaklığı aralığına sahip silikona dayanmaktadır. Öte yandan galyum nitrat (GaN), galyum arsenik (GaAs), indiyum fosfat (InP), Galyum fosfat (GaP), silisyum karbür (SiC) ve diğer yarıiletkenlerden, yüksek güç veya fotovoltaiik aygıtlar gibi daha spesifik uygulamalarda faydalanılmaktadır (Nicollian and Brews 1982, Ghandhi 1983 ve Adachi 1992). Ancak, daha küçük boyutlu elektronik bileşenlere olan sürekli talep nedeniyle silikon ve diğer yarıiletken aygıtlar üretim ve performans açısından sınırlarına ulaşmıştır. Bu nedenle, yeni nesil elektronik aygıtların geliştirilmesi için daha küçük ölçekte geliştirilmiş elektronik özelliklere sahip yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür yeni malzemelerin arayışında, kalınlığı bir nanometreden daha az olan düzlemsel yapıları nedeniyle iki boyutlu (2D) malzemeler olası bir çözüm sunmaktadır (Sze 1988, Shur 2013 ve Kimoto and Cooper 2014).

Doğrultucu metal-yarıiletken eklemi, engel oluşumunun modelini ilk öneren Alman Fizikçi W. H. Schottky'nin ardından Schottky eklemi olarak bilinmektedir (Schottky 1938). 20. yüzyılın başlarında, ince bir metal telin bir yarıiletken yüzeyle temas ettirilmesiyle Schottky kontakları üretilmiştir ve erken dönem radyo dalgası dedektörlerinde kullanışlı olduğu kanıtlanmıştır. Ancak, güvenilirlik özellikleri nedeniyle, bu tür kontaklar, temiz bir yarıiletken yüzeyi üzerine ince bir metal film biriktirilerek elde edilen doğrultucularla değiştirilmiştir. O zamandan beri Schottky doğrultucular, birçok elektronik ve optoelektronik aygıtta önemli bir rol oynamaktadır.

Bir metal bir yarıiletkenle temas ettiğinde bir Schottky eklemi oluşmaktadır ve bu eklemin iş fonksiyonları arasındaki fark, arayüzeyde Schottky engeli adı verilen bir enerji engeli oluşturmaktadır (Schottky 1938). İdeal bir metal-n tipi yarıiletken eklemin Schottky engel yüksekliği, Schottky-Mott modeli kullanılarak ifade edilebilir. İdeal bir eklemden, imaj kuvvetinden ve arayüzey durumlarından kaynaklanan engel alçalmasının dikkate alınmadığını belirtmek önemlidir. Schottky-Mott modeli, yüzey durumları, kusurlar ve imaj kuvvetinden dolayı engel alçalmasının katkısını ve bunların Schottky aygıtının performansını nasıl etkilediğini göz ardı etmektedir. Ancak gerçekte yüzey durumları bir yarıiletkenin doğal bir özelliğidir ve doğru bir şekilde anlaşılabilmesi için dikkate alınması gerekir. Ayrıca, termiyonik alan emisyonu ve engelden doğrudan tünelleme gibi diğer faktörler de gerçek Schottky engel yüksekliği değerini Schottky-Mott modeli kullanılarak elde edilen değerden değiştirebilir (Sze 1981). Aslında, yüksek yüzey durum yoğunluklu bir yarıiletken için engel yüksekliği, Schottky-Mott modelinin aksine metal iş fonksiyonuna bağlı değildir (Bardeen 1947). Bu nedenle, gerçek Schottky eklemlerinin daha iyi anlaşılması için imaj kuvvet etkisi, arayüzey durumları ve tünelleme gibi faktörlerin katkısının dahil edilmesi gerekmektedir.

İmaj kuvvetinin neden olduğu Schottky engel yüksekliği düşüşüne Schottky etkisi denir. Bu olayda, metalden x uzaklıktaki bir elektronun, metalin içinde $-x$ mesafesinde pozitif bir yük oluşturduğu düşünülmektedir. Bu pozitif yüke görüntü yükü ve bu yükler arasındaki çekim kuvvetine imaj kuvveti adı verilmektedir (Shockley 1939).

Tünelleme etkisi, tükenim tabakasının genişliğinin artan katkı maddesi konsantrasyonu ile azaldığı yüksek oranda katkılanmış yarıiletkenlerde baskın bir taşıma sürecidir (Chang and Sze 1970). Engel üçgen şeklinde ve üst tarafta daha küçük olduğundan, yük taşıyıcıları bu engeli tünellemek için yeterli enerjiye sahip olabilirler. Bu işleme termiyonik alan emisyonu adı verilmektedir. Ancak tünelleme, dejenere yarıiletkenlerde Fermi seviyesine yakın taşıyıcılar tarafından da gerçekleştirilebilmektedir. Bu işleme de alan emisyonu adı verilmektedir. Her ne kadar akım iletim mekanizması termiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu için farklı olsa da, her iki işlemde Schottky engel yüksekliğinde etkin bir azalmaya neden olmaktadır (Padovani and Stratton 1966 ve Crowell and Rideout 1969).

Yukarıda kısaca tartışılan Schottky-Mott modelinin çoğu metal-yarıiletken kontak için işe yaramadığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Schottky-Mott modelinden sapma, metal-yarıiletken arayüzeyinde yeterli sayıda yüzey durumu mevcutsa Schottky engel yüksekliğinin metal iş fonksiyonundan bağımsız olacağını öne süren Bardeen tarafından açıklanmıştır (Bardeen 1947). Shockley-Tamm durumları olarak bilinen yüzey durumları, yarıiletken kristalin yüzeyinde lokalize olan elektronik durumlar olup, kristal örgünün yüzeyde ani olarak

sonlanmasından kaynaklanmaktadır ve iletim ve değerlik bantları arasında yer alan bant aralığı içerisinde dağılmaktadır (Shockley 1939). Bu Yüzey durumları devre elemanlarının performansını olumsuz etkilemektedir. Yüzey durumları rekombinasyon merkezleri olarak hareket ederek, yük taşıyıcılarının uyarılmadan sonra kolayca orijinal enerji bantlarına dönebilecekleri bir konum sağlamaktadırlar. Yüzey pasivasyonu yüzey durumlarıyla mücadelede etkili bir yöntemdir ve bu işlem ya tuzakları bastırarak (tuzak yoğunluğunu düşürerek) ya da taşıyıcıların kusur durumlarına ulaşmasını önleyen bir elektrik alanı oluşturarak yapılabilmektedir. Bir diğer yöntem ise yarıiletkenin üzerine ince bir yalıtkan film biriktirilerek pasifleştirme tabakaları kullanılmasıdır. Pasivasyon tabakaları kullanılarak, doymamış bağlar doyurulabilmekte ve rekombinasyon olasılığı azaltılabilmektedir. Bunun yanı sıra, pasivasyon tabakaları, arayüzeyde veya arayüzeye yakın konumlarda elektrostatik yükler oluşturarak, doping durumunda olduğu gibi bir elektrik alanı oluşturabilmekte ve bu da performansı artırabilmektedir. Pasivasyon tabakaları bu sayede hem durum yoğunluğunu azaltabilmekte hem de aygıtın toplam verimliliğini artıran bir alan etkisi yaratabilmektedir (Dingemans et al. 2011).

Schottky engel diyotlar, yarıiletken devre elemanı teknolojisi alanında en çok kullanılan devre elemanları arasındadır. Sıcaklık, basınç ve atmosferik gaz bileşimi sensörlerinin tasarımında bunların kullanılması önerilmektedir (Gupta et al. 2014, Li et al. 2018, Bey et al. 2020, Li et al. 2022, Taube et al. 2023 ve Bekaddour et al. 2023). 2,26 eV'luk geniş bir bant aralığına sahip GaP, düşük sızıntı akımı davranışına sahip Schottky engel diyotlar için potansiyel bir adaydır (Orak et al. 2015, Orak et al. 2015, Kabushemeye et al. 1989 ve Das et al. 2022). Metal-GaP tabanlı yarıiletken devre elemanları, yüksek sıcaklık ve radyasyonun yoğun olduğu ortamlarda ve opto-elektronik uygulamalarda (LED) (Shiwakoti et al. 2017, Horley et al. 2016 ve Ejderha and Türüt 2021) ve özellikle nükleer reaktörlerde ve uzay uydu iletişim sistemlerinde doğrultucu ve dedektör olarak uygulama bulmaktadır (Gorji and Cheong 2015, Türüt 2021 ve Güzeldir et al. 2022). Schottky engel sıcaklık sensörü, ölçülen sıcaklık değişimiyle birlikte oluşan çıkış voltajı veya diyotun seri direnci gibi fiziksel parametrelerdeki değişiklikleri belirlemektedir (Gümüş and Aydoğan 2021 ve Shao et al. 2022). Günümüzde termal sensör olarak kullanılan Schottky engel diyotlar, havacılık, metalurji, nükleer uzay, tıp, otomotiv gibi birçok araştırma ve endüstri alanında ve akıllı cihazlar ve akıllı evler, yüksek vakum, yapay zeka mekanizmaları gibi birçok diğer endüstri ve tüketici uygulamasında ve biyokimya ve biyofizik, metroloji, robotik vb. gibi bilimsel araştırmalarda kimyasal ve fiziksel analiz ve prosesler için kullanılan en temel devre elemanlarıdır (Shao et al. 2022, Pristavu et al. 2019, Duman et al. 2022 ve Yıldırım et al. 2011). Schottky engel termal sensörler, belirli bir

doğru beslem akım seviyesinde, aygıt boyunca doğru beslem gerilim düşüşünün azalan sıcaklıkla birlikte artması temel gerçeğiyle çalışmaktadırlar.

Özellikle metal-yarıiletken doğrultucu eklemlerde metal ile yarıiletken arasında oluşan arayüzey, eklem parametreleri üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğundan, bu eklemlerin arayüzeyleri üzerine çalışmalar günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir (Rhoderick and Williams 1988, Neamen 2012, Sze 1981, Ghione 2009, Liu 2005, Özakın et al 2024, Rani et al. 2024, El-Menyawy et al. 2024 ve Mu et al. 2024). Üretilen aygıtların performans ve kararlılığını artırmak için, eklem arayüzeyleri çeşitli yöntemlerle iyileştirilebilir (Kasim et al. 2024, Şenarslan et al. 2020 ve Baltakesmez et al. 2019). Metal-yarıiletken eklem arayüzeyini iyileştirmenin bir yolu, metal ve yarıiletken arasına organik veya inorganik malzemeden oluşan ince bir arayüzey tabakası yerleştirmektir (Alsharari et al. 2020, Hermi et al. 2022, Çakıcı et al. 2023 ve Türüt et al. 2020). Bu arayüzey tabakası aygıtın engel yüksekliğini artırabilir ve böylece kaçak akım azalır ve aygıtın performansı iyileşir. Sonuç olarak, arayüzey tabakası, metal ile yarıiletken alt tabaka arasında doğrudan teması önleyen fiziksel bir engel oluşturmak için kullanılabilir (El-Menyawy et al. 2024). Arayüzey tabakası, yarıiletken yüzeyinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan arayüzey durumlarını değiştirerek enerji seviyesi uyumunu belirlediği için önemlidir. Eklem arayüzeyinde biriktirilen ince tabakalar sayesinde yüksek kaliteli metal-yarıiletken eklemler elde edilebilir. Bu nedenle, arayüzey tabakalarına sahip metal-yarıiletken doğrultucu eklemlerinin üretimi önemlidir ve aygıt optimizasyonu için bu tabakaların ayrıntılı yapısal ve elektriksel özelliklerinin araştırılması gerekmektedir.

Kümeler (clusters), atom veya molekül kümeleri olarak var olurlar, boyutları değiştirilebilir ve herhangi bir maddeden oluşabilirler. Bu kümeler incelenerek, belirli küme boyutlarının sergilendiği yeni özellikler ortaya çıkarılabilir ve böylece çeşitli alanlardaki uygulama olanakları genişletilebilir. Nanokümeler (NC'ler), boyutları nanometre cinsinden ölçülen büyük kümelerdir. Metal nanokümeler, onlarca atomdan oluşan nanokristal yapılardır ve güçlü fotoluminesansları ve dikkat çekici kimyasal özellikleri nedeniyle son zamanlarda bilim camiasının dikkatini çekmektedir (Trapiella-Alfonso et al. 2022). NC'ler, daha büyük metal nanokümeler ile organometalik bileşikler arasında köprü görevi görürler. Bu malzemeler güçlü bir kuantum sınırlama etkisi gösterdiğinden, 10 nm'nin altındaki boyutlara sahip NC'ler, bir elektromanyetik alanla etkileşime girdiklerinde belirgin molekül benzeri davranışlar sergilerler (Chakraborty and Pradeep 2017). Metal NC'ler altın, gümüş, platin ve bakır gibi soy metallerden elde edilebilirler (Lu and Chen 2012). Fotoluminesans, elektrolüminesans ve olağanüstü fotostabilite sergileyen metal NC'ler, günümüzde de çok sayıda teknolojik uygulamanın ilerlemesine katkıda bulunmaktadırlar (Du et al. 2020, Porret et al. 2020 ve Tang

et al. 2020). Yeni nesil nanoyapılı aygıtlar ve malzemeler için önemli bir bileşen olan NC'lerin boyutunu, bileşimini ve yapısını kontrol etme yeteneği, özelliklerinin hassas bir şekilde ayarlanmasına olanak tanımaktadır. Özellikle Cu'nun, Au, Ag, Pd ve Pt gibi metallere göre küresel olarak daha uygun fiyatlı ve erişilebilir olması, NC içeren sistemlerin gelişimini olumlu yönde etkilemektedir. Tipik olarak 2 ila 13 atom arasında değişen ve 2 nm'yi aşmayan birkaç metal atomundan oluşan Cu NC'ler, nanometre ölçeğindeki malzemelerin karakteristik optik özelliklerini gösteren nanoparçacık boyutlu malzemelerdir. Yüksek kuantum verimleri, fotostabiliteleri ve önemli Stokes kaymaları nedeniyle Cu NC'ler karbon kuantum noktalarına (CQD'ler) ve organik boyalara mükemmel alternatiflerdir (Benavides et al. 2020 ve Prakash et al. 2019). Uygulamada, NC'ler, boyutları ve davranışları düzenlenerek bir yarıiletken alt tabaka üzerinde sentezlenebilirler. Sonuç olarak, düzgün boyutlu, iyi tanımlanmış NC'lerin düzenli dizilerinin sentezi, birçok araştırma çabasının hedefidir (Peressi 2015, Orhan et al. 2025 ve Can et al. 2025).

Yaklaşık 10 nm boyutlarındaki karbonlardan oluşan CQD'ler, büyüleyici bir karbon nanoparçacık sınıfı olarak tanımlanabilirler (Rani et al. 2020 ve Rani and Singh 2025). Ayarlanabilir yüzey özelliklerine, yüksek biyouyumluluğa, üstün optik özelliklere, mükemmel elektronik transfer verimliliğine ve floresan lüminesansa sahip CQD'ler, kataliz, optoelektronik, algılama ve biyolojik görüntüleme gibi çok çeşitli alanlarda kullanıldıkları için araştırmacıların odak noktasındadır (Yan et al. 2025). Çevre dostu ve düşük maliyetli CQD üretim tekniklerine yönelik artan talep, bilim camiasını mikroorganizmaların, bitki özlerinin ve diğer biyomalzemelerin kullanımını araştırmaya yöneltmiştir (Kitching et al. 2015 ve Çakıcı et al. 2019). Günümüzde CQD'ler sitrik asit, grafit mikro parçacıkları, denatüre süt, zein biyopolimeri, sodyum hidroksit, brokoli, gıda atıkları, pomelo meyvesi, çimen, amonyum sitrat, kurutulmuş yaprak, ginkgo yaprağı, jelatin, humik asit ve askorbik asit gibi çeşitli doğal karbon kaynaklarından üretilmektedirler (Lim et al. 2018, Aghamali et al. 2018, Wang et al. 2019, Arvind et al. 2019, Athika et al. 2019, Azizi et al. 2019, Joshi et al. 2018, Sabet and Mahdavi 2019, Ramar et al. 2018, Ratnayake et al. 2019, Fan et al. 2020, Lei et al. 2019, Arumugam and Kim 2018, Cheng et al. 2019 ve Jiang et al. 2019). Gelecekte, CQD'lerin üretiminde kullanılacak hammaddelerin yerini bitki atıkları, meyve lifleri, kahve veya çay tozu atıkları ve yüksek karbon içeriğine sahip palmiye yağı endüstrisi atıkları gibi sürdürülebilir malzemelerin alması oldukça olası görünmektedir (Rani et al. 2020). CQD'lerin üretiminde yeşil karbon kaynaklarının veya atık organik ürünlerin kullanılmasının maliyet açısından etkili, çevre dostu ve doğada yaygın olarak bulunabilen bir yöntem olması gibi yaygın faydaları vardır (Das et al. 2018 ve Gonzalez-Martinez et al. 2025).

Fotodiyot, elektrik akımı üretmek için ışık enerjisi tüketen ve genellikle yarıiletken malzemelerden üretilen bir aygıttır. Bazen fotodedektör, fotosensör veya ışık dedektörü olarak da adlandırılırlar. Fotodiyotlar, ters beslem koşullarında çalışmak üzere özel olarak tasarlanmışlardır. Fotodiyot ışığa karşı çok hassastır, bu nedenle üzerine ışık veya foton düştüğünde ışığı kolayca elektrik akımına dönüştürür. Güneş hücresi, güneş enerjisini veya ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdüğü için geniş alanlı fotodiyot olarak da bilinir. Pratikte, p-n eklem fotodiyotları, Schottky engel fotodiyotları ve metal-yalıtkan-yarıiletken fotodiyotları gibi farklı tiplerde üretimleri söz konusudur (Bielecki et al. 2022). Schottky engel fotodiyot, metal-yarıiletken ekleminden oluşan bir çoğunluk taşıyıcı aygıtıdır. p-n eklemine benzer şekilde, metal-yarıiletken arayüzeyinde optik olarak üretilen elektron-boşluk çiftlerini ayıran bir potansiyel engeli vardır. Taşıyıcıların üretimi hem nötral yarıiletken bölgesinde hem de metal-yarıiletken arayüzeyindeki uzay yükü bölgesinde gerçekleşebilir. Schottky engeli, p-n eklem fotodiyotuna kıyasla üretim kolaylığı, yüksek sıcaklıkta difüzyon işlemi gerektirmemesi ve yüksek tepki hızı gibi bazı avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, nispeten yüksek bir karanlık akıma sahiptirler (Averin et al. 2012 ve Bielecki et al. 2022). Metal-yalıtkan-yarıiletken fotodiyot, metal bir geçidi yarıiletken yüzeyden ayıran bir yalıtkindan oluşmaktadır. Bu tür fotodiyot tasarımında temel konu, yaklaşık 10 nm'nin altına düşmeyecek şekilde yalıtım tabakasının uygun kalınlığıdır. Daha ince yalıtım tabakalarında, bu tabakadan kuantum elektron tünellemesi meydana gelebilmektedir. Metal elektroda negatif voltaj uygulandığında, elektronlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinden itilerek bir tükenim bölgesi oluşturulmaktadır. Fotokapıda toplanabilen toplam yüke kuyu kapasitesi denir. Bu kapasite, kapı polarizasyonuna, yalıtkan kalınlığına, elektrot yüzeyine ve yarıiletkenin arka plan katkılmasına bağlıdır (Averin et al. 2012 ve Bielecki et al. 2022).

Yukarıdaki paragraflarda özetlenen CQD'lerin ve metal NC'lerin özelliklerinden yararlanmak için bu çalışmada, beyaz duttan sentezlenen CQD'lere farklı miktarlarda Cu NC'ler eklenmiş ve Al/n-GaP Schottky diyot yapısında metal ile yarıiletken arasına ince bir arayüzey tabakası yerleştirilmiştir. Farklı miktarlarda Cu NC'lerle katkılanmış WM-CQD ince filmler aygıt üretiminde ilk kez bu çalışmada arayüzey tabakası olarak kullanılmıştır. Farklı miktarlarda Cu NC'lerle katkılanan WM-CQD arayüzey tabakalarının diyot karakteristikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla, arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız olarak üretilen diyot yapılarının I-V karakteristikleri oda sıcaklığında ve farklı aydınlatma koşulları altında incelenmiştir. Diyotların karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında termiyonik emisyon teorisine dayalı Rhoderick, Cheung ve Norde metotları kullanılmıştır.

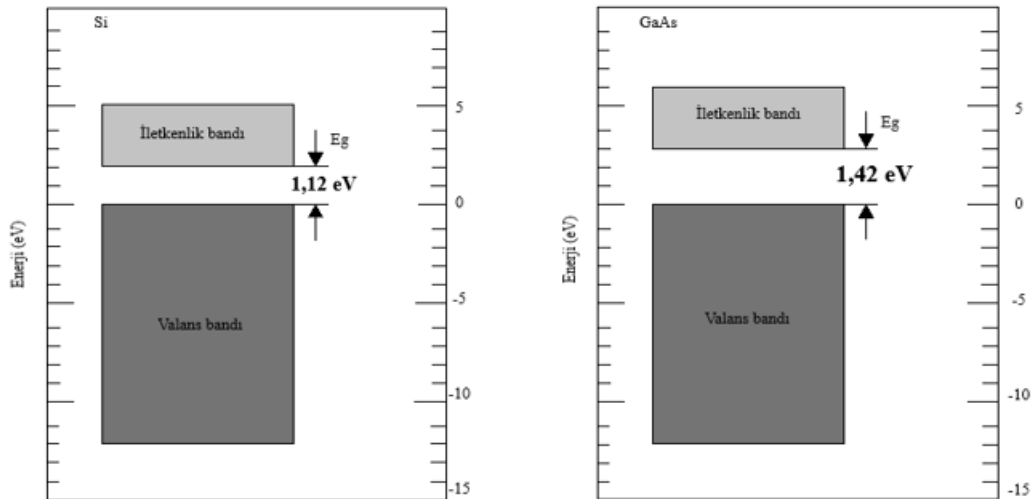
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yarıiletken Malzemelerin Temel Özellikleri

Bir yarıiletken, elektriksel iletkenliği tipik olarak bir metalin ve bir yalıtkanın iletkenliği arasında olan kristal veya amorf bir katı malzemedir. Yarıiletkenin iletkenliğini, malzemenin sıcaklığını veya katkı konsantrasyonunu değiştirerek veya onu ışıkla aydınlatarak önemli ölçüde değiştirebiliriz. Yarıiletkenlerin bant yapısı, eklemler ve hetero yapılar oluşturma açısından benzersiz özellikler sunar. Kuantum-sınırlı yarıiletken yapılar, mevcut özelliklerin aralığını daha da genişletir. Elektronik yarıiletken devre elemanları esas olarak silikondan (Si) üretilirken, optoelektronik yarıiletken devre elemanları genellikle InGaAsP ve AlInGaN gibi üçlü veya dördü yarıiletken bileşikler kullanılarak üretilirler (Saleh and Teich 2007).

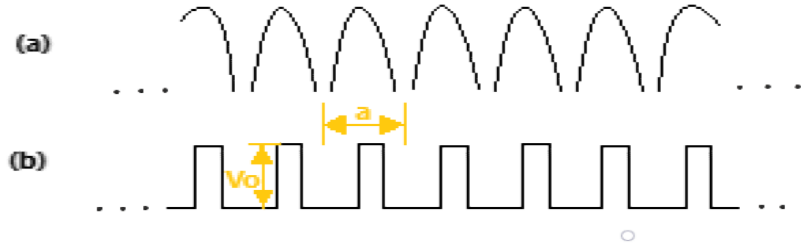
2.1.1. Enerji Bantları ve Yük Taşıyıcıları

Katıhal malzemelerini oluşturan atomlar tek başlarına ele alınamayacak kadar güçlü atomlar arası etkileşime sahiptirler. İletim elektronları bireysel atomlara bağlı olmayıp, bunun yerine bir bütün olarak atomlar topluluğuna aittirler. Kristal kafesteki atom topluluğu tarafından oluşturulan periyodik potansiyeldeki elektron enerjisi için Schrödinger dalga denkleminin çözümü, atomik enerji seviyelerinin yarılmasına ve enerji bantlarının oluşumuna neden olur. Her bant, çok sayıda yoğun şekilde paketlenmiş ayrık enerji seviyeleri içerir. Şekil 1’de gösterildiği gibi, değerlik ve iletim bantları, malzemenin elektriksel ve optik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynayan bant aralığı enerjisi E_g ile ayrılır.



Şekil 1. Si ve GaAs' deki enerji bantları. Valans ve iletkenlik bantlarını ayıran bant aralığı enerjisi E_g , oda sıcaklığında Si için 1,12 eV ve GaAs için 1,42 eV' dir.

Bant aralığının kökeni Kronig-Penney modeli aracılığıyla gösterilebilir. Bu basit teoride, Şekil 2(a)'da bir boyutlu bir versiyonu gösterilen kristal örgü potansiyeli, Şekil 2(b)'de gösterildiği gibi, bir boyutlu periyodik dikdörtgen engel potansiyeli ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.



Şekil 2. (a) Örgü sabiti a olan sonsuz bir boyutlu atom topluluğuyla ilişkili kristal örgü potansiyeli, (b) Kronig-Penney modelinde kullanılan idealize edilmiş V_0 yükseklikli dikdörtgen engel potansiyeli.

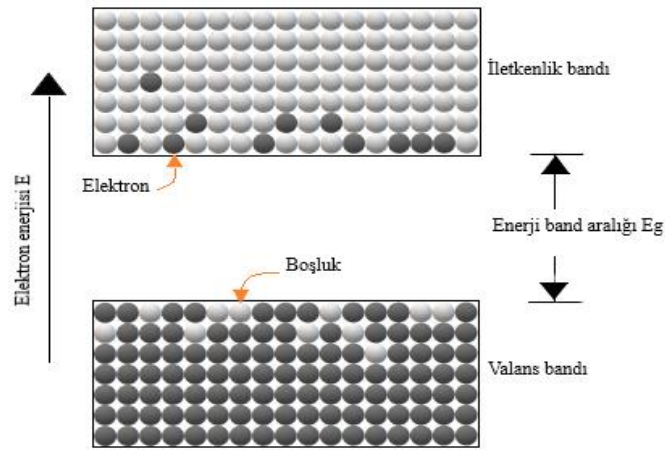
Bu potansiyel için Schrödinger denkleminin çözümü, üstel olarak azalan çözümlere sahip yasak bantlarla ayrılmış, hareket eden dalga çözümlerine sahip izinli enerji bantları üretir. Sonuçların genel olduğu ve üç boyuta uygulanabileceği gösterebilir. Bu yaklaşım, bir boyutlu periyodik ortamların optiğini analiz etmek için kullanılan yaklaşıma benzerdir. Hareket eden dalga öz fonksiyonları, kristal örgünün periyodikliğine sahip Bloch modlarıdır.

Bir yarıiletkendeki elektronların dalga fonksiyonları üst üste biner ve bu nedenle Pauli dışarlama ilkesi uygulanır. Bu ilke iki elektronun aynı kuantum durumunu işgal edemeyeceğini ve önce en düşük mevcut enerji seviyelerinin dolmasını gerektirir. Si ve Ge gibi elemental yarıiletkenler, kovalent bağlar oluşturan atom başına dört değerlik elektronuna sahiptirler. $T=0^\circ\text{K}$ ' de değerlik bandı tamamen dolu, iletkenlik bandı ise tamamen boştur ve malzeme bu koşullar altında elektriği iletmeyecektir.

Ancak sıcaklık arttıkça, Şekil 3'de görüldüğü gibi, bazı elektronlar valans bandından boş durumların bol miktarda bulunduğu iletkenlik bandına termal olarak uyarılabilirler. Bu elektronlar daha sonra hareketli taşıyıcılar olarak hareket edebilirler, uygulanan bir elektrik alanının etkisi altında kristal örgü boyunca sürüklenebilirler ve böylece elektrik akımına katkıda bulunabilirler. Ayrıca, valans bandından ayrılan bir elektron geride boş bir kuantum durumu bırakır, bu da valans bandındaki kalan elektronların harici bir alanın etkisi altında birbirleriyle yer değiştirmesine izin verir. Böylece valans bandında kalan elektron topluluğu hareket eder.

Bu, aynı şekilde, ayrılan elektronun geride bıraktığı boşluğun ters yöndeki hareketi olarak da düşünülebilir. Bu nedenle boşluk, +q pozitif yükü varmış gibi davranır (Saleh and Teich 2007).

Net sonuç, her elektron uyarımının iletim bandında serbest bir elektron ve değerlik bandında serbest bir boşluk yaratmasıdır. İki yük taşıyıcısı, uygulanan elektrik alanın etkisi altında serbestçe sürüklenebilirler ve böylece bir elektrik akımı üretebilirler. Malzeme, termal olarak daha fazla hareketli taşıyıcı üretildikçe, artan sıcaklıkla iletkenliği keskin bir şekilde artan bir yarıiletken gibi davranır.



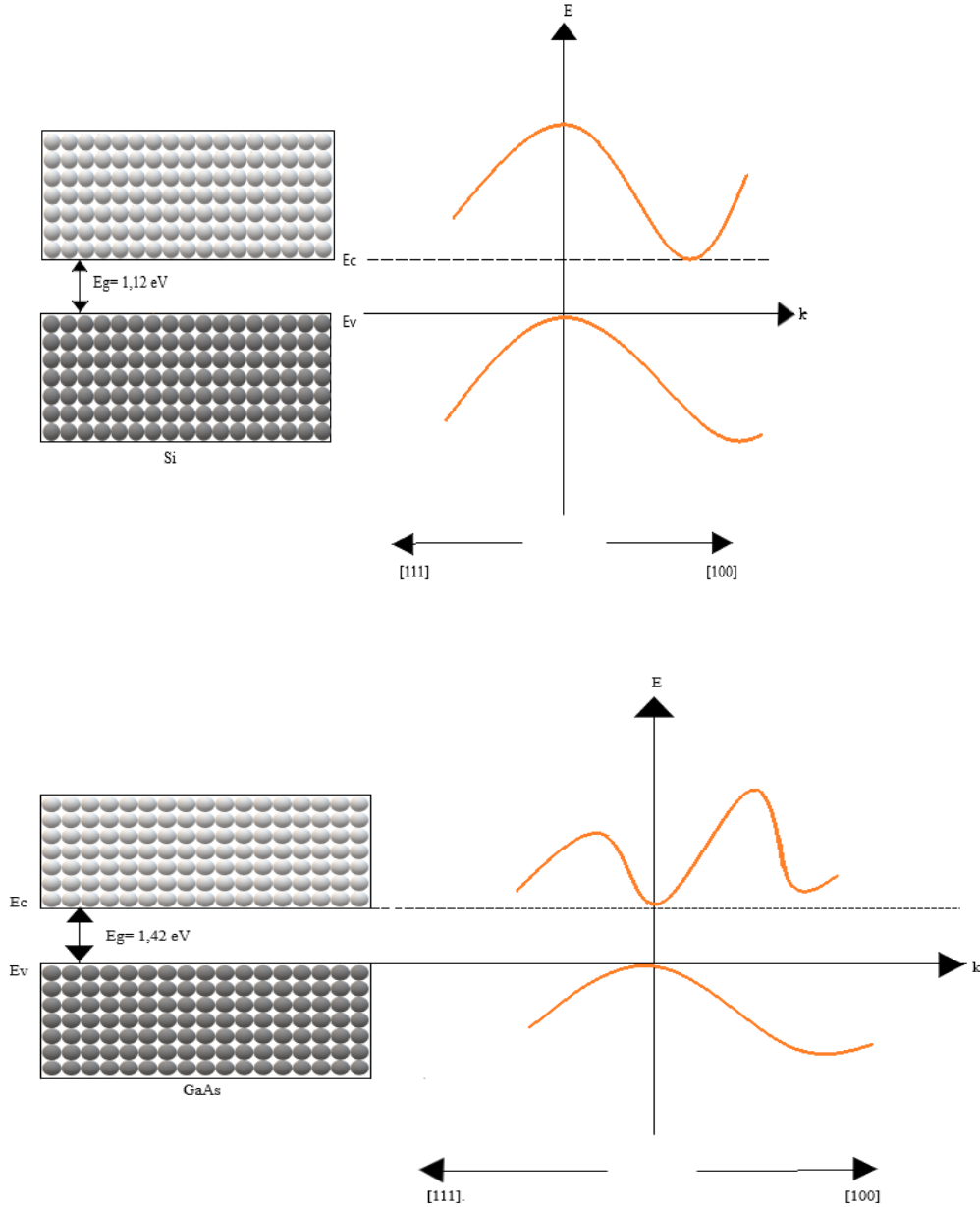
Şekil 3. $T > 0^\circ \text{ K}$ ’ de iletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki boşluklar.

Dalga mekaniğine göre, sabit potansiyelli bir bölgede (örneğin serbest uzayda) bir elektronun enerjisi E ve mometumu P ,

$$E = \frac{P^2}{2m_0} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \quad (2.1)$$

ile ilişkilidir. Burada P momentumun büyüklüğü, k dalga vektörünün büyüklüğü ($k=P/\hbar$) ve m_0 elektronun kütlesidir ($9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$). Dolayısıyla serbest bir elektron için E - k ilişkisi basit bir parabolüdür.

Yarıiletken bir malzemedeki bir elektronun hareketi, malzemenin periyodik kristal örgüsündeki yükler tarafından üretilen bir potansiyelle, benzer şekilde Schrodinger denklemi yardımıyla açıklanabilir. Daha önce tartışıldığı gibi, bu yapı, Kronig-Penney modeli tarafından öngörüldüğü gibi, yasak bantlarla ayrılmış müsaadeli enerji bantlarıyla sonuçlanır. Si ve GaAs için iletkenlik ve değerlik bantlarındaki elektronlar ve boşluklar için ortaya çıkan E-k ilişkileri Şekil 4'te gösterilmiştir (Saleh and Teich 2007).



Şekil 4. Si ve GaAs'ın E-k fonksiyonlarının iki kristal yönelimi boyunca görünümü: [111] sola doğru ve [100] sağa doğru.

Enerji E, dalga vektörü k 'nin bileşenlerinin (k_1, k_2, k_3) periyodik bir fonksiyonudur ve periyodiklikleri ($\pi/a_1, \pi/a_2, \pi/a_3$) olup burada a_1, a_2, a_3 kristal örgü sabitleridir. Şekil 4, bu ilişkinin dalga vektörü k 'nin iki belirli yönü boyunca kesitlerini göstermektedir. $[-\pi/a, \pi/a]$

aralığındaki k değerleri aralığı, ilk Brillouin bölgesini tanımlamaktadır. Bu nedenle, iletkenlik bandındaki bir elektronun enerjisi yalnızca momentumunun büyüklüğüne değil, aynı zamanda kristalde hareket ettiği yöne de bağlıdır.

Şekil 4'den de görülebileceği gibi, iletim bandının tabanına yakın bir yerde E-k ilişkisi aşağıdaki parabolik bağıntı yardımıyla yaklaşık olarak ifade edilebilir:

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \quad (2.2)$$

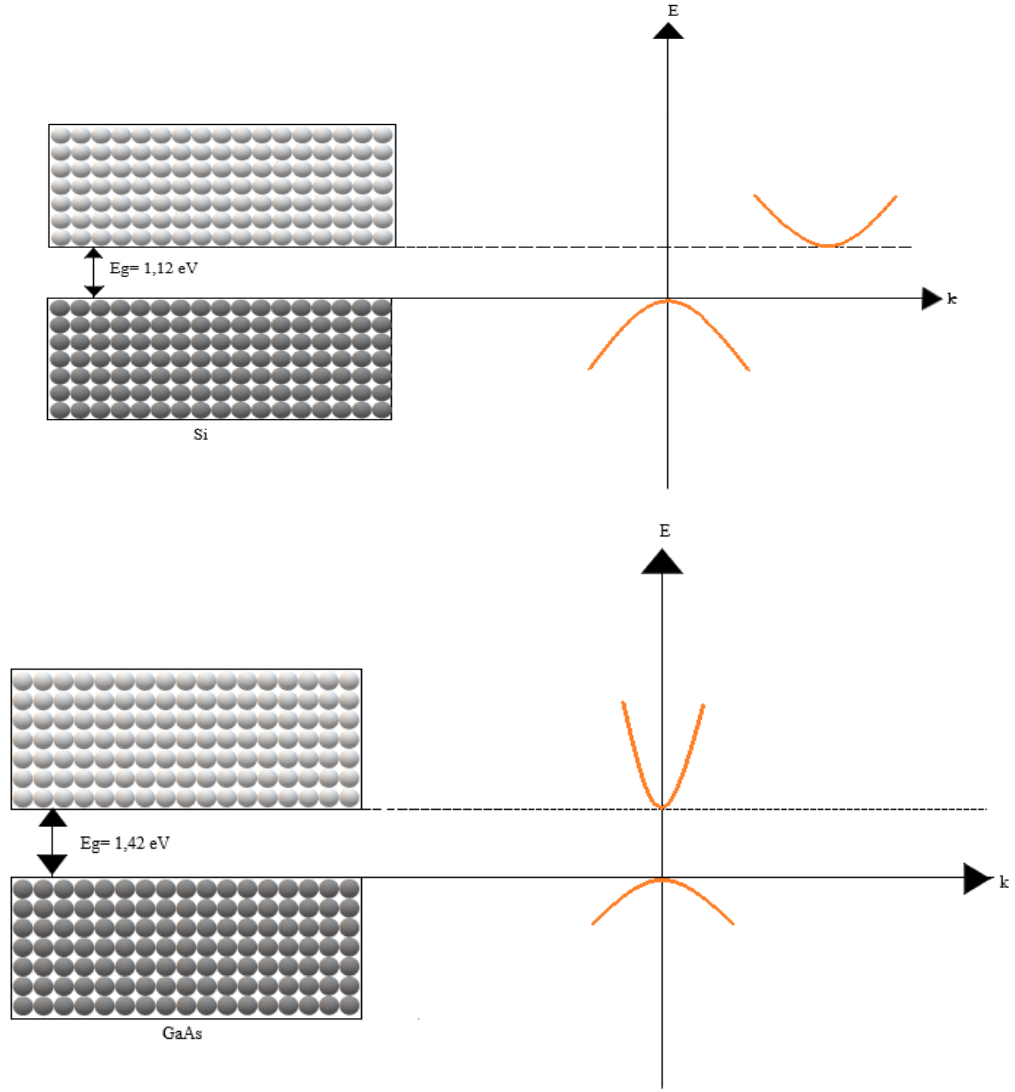
Burada E , iletim bandının tabanındaki enerjidir ve k , minimumun meydana geldiği dalga vektörü üzerinden ölçülür. Bu ilişki, iletim bandı elektronunun serbest bir elektrona benzer şekilde davrandığını, ancak elektronun (iletim bandı) etkin kütlesi olarak bilinen m_c kütesinin, serbest elektron kütlesi m_0 'dan farklı olduğunu söylemektedir. Böylece, örgü iyonlarının iletim bandı elektronunun hareketi üzerindeki etkisi etkin kütle m_c 'de yer almaktadır. Bu davranış Şekil 5' de vurgulanmıştır. Benzer şekilde, değerlik bandının tepesine yakın enerji

$$E = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_v} \quad (2.3)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Burada $E_v = E_c - E_g$ değerlik bandının tepesindeki enerjidir ve m_v Şekil 5'de gösterildiği gibi boşluk (değerlik bandı) etkin kütlesidir. Örgü iyonlarının değerlik bandı boşluğunun hareketi üzerindeki etkisi, etkin kütle m_v ile ifade edilmektedir. Etkin kütle, atomlar arası mesafe kristalografik yöne göre değiştiği için, malzemenin kristal yapısına ve örgüye göre hareket yönüne bağlıdır. Ayrıca, etkin kütle dikkate alınan banda da bağlıdır. Gerçekten de, farklı eğriliğe sahip birkaç parabol, değerlik bandının tepesine yakın bir yerde sıklıkla bir arada bulunmaktadır. Bunlar ağır boşluk, hafif boşluk ve ayrılmış bantla ilişkili boşluk olarak adlandırılanlara karşılık gelmektedir. Si, GaAs ve GaN için ortalama etkin kütlelerin serbest elektron kütlesi m_0 'a göre tipik oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Seçilmiş bazı yarıiletken malzemelerdeki elektron ve boşluk etkin kütlelerinin tipik değerleri.

Malzeme	m_c/m_0	m_v/m_0
Si	0,98	0,49
GaAs	0,07	0,50
GaN	0,20	0,80



Şekil 5. Si ve GaAs için E-k diyagramları, iletim bandının alt kısmında ve değerlik bandının üst kısmında bulunan paraboller ile iyi bir şekilde yaklaşık olarak çizilebilir.

2.1.2. Direkt ve İndirekt Bant Aralıkları

İletim bandının minimum enerjisi ve değerlik bandının maksimum enerjisi aynı k dalga sayısı değerine (aynı momentum) karşılık gelen yarıiletkenlere direkt (doğrudan) bant aralıklı malzemeler denir. Böyle olmayan yarıiletkenler de indirekt (dolaylı) bant aralıklı malzemeler olarak bilinir. Şekil 5’ de görüldüğü gibi, GaAs direkt bant aralıklı yarıiletken iken, Si indirekt bant aralıklı yarıiletkenidir. İndirekt bant aralığına sahip bir yarıiletkende iletim bandının tabanı ile değerlik bandının tavanı arasındaki geçiş, elektronun momentumunda önemli bir değişikliği telafi etmesi gerektiğinden, bu ayrım önemlidir. Daha sonra, GaAs gibi direkt bant aralığına sahip yarıiletkenlerin verimli foton yayıcıları olduğu, Si gibi indirekt bant aralığına sahip

yarıiletkenlerin ise normal koşullar altında verimli ışık yayıcıları olarak işlev göremeyeceği gösterilecektir (Saleh and Teich 2007).

2.1.3. Elemental ve Bileşik Yarıiletkenler

Şekil 6’da, yarıiletken elektroniği ve fotonikte önemli olan elementlerin çoğunu içeren periyodik tablonun bir bölümü gösterilmiştir. Hem elemental hem de bileşik yarıiletkenler bu teknolojilerde önemli roller oynamaktadırlar. Bundan dolayı aşağıda sırasıyla elemental, ikili, üçlü ve dörtlü bileşik yarıiletkenler ele alınmıştır.

	II	III	IV	V	VI
2		5 <i>B</i>	6 <i>C</i>	7 <i>N</i>	8 <i>O</i>
3	12 <i>Mg</i>	13 <i>Al</i>	14 <i>Si</i>	15 <i>P</i>	16 <i>S</i>
4	30 <i>Zn</i>	31 <i>Ga</i>	32 <i>Ge</i>	33 <i>As</i>	34 <i>Se</i>
5	48 <i>Cd</i>	49 <i>In</i>	50 <i>Sn</i>	51 <i>Sb</i>	52 <i>Te</i>
6	80 <i>Hg</i>		82 <i>Pb</i>		

Gaz
 Katı
 Sıvı

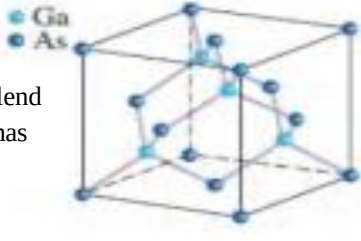
Şekil 6. Periyodik tablonun yarıiletkenlerle ilgili bölümü. Mavi, gümüş rengi ve sarıyla gösterilen elementler oda sıcaklığında sırasıyla gaz, katı ve sıvı formlarını alırlar.

2.1.3.1. Elemental Yarıiletkenler

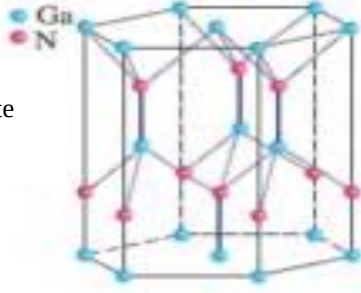
Periyodik tablonun IV. sütununda yer alan Silisyum (Si) ve germanyum (Ge) önemli elemental yarıiletkenlerdir. Neredeyse tüm ticari elektronik entegre devreler ve devre elemanları Si kullanılarak üretilmektedir. Hem Si hem de Ge, esas olarak fotodedektör olarak fotonikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, indirekt bant aralıkları nedeniyle geleneksel olarak ışık yayıcıların üretiminde kullanılmamıştır. Ancak, Si’ nin bazı formları ışık yayıcı olarak uygulanabildiğinden, silikon fotonik ön plana çıkmıştır. Si ve Ge dahil bir çok yarıiletkenin temel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Seçilmiş bazı elemental ve III-V ikili yarıiletkenlerin kristal yapıları, bant aralığı türleri, bant aralığı enerjileri ve bant aralığı dalga boyları.

Çinkoblend
ve Elmas



Wurtzite



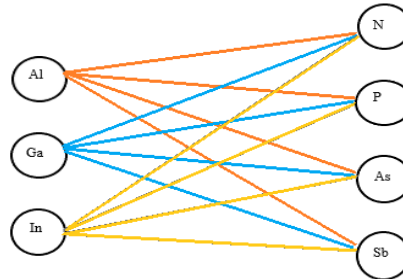
Malzeme	Kristal Yapı (D/Z/W)	Bant Aralığı Türü (I/D)	Bant Aralığı Enerjisi E_g (eV)	Bant Aralığı Dalga Boyu λ_g (μm)
Si	D	I	1,12	1,11
Ge	D	I	0,66	1,88
AlN	W	D	6,20	0,200
AlP	Z	I	2,45	0,506
AlAs	Z	I	2,16	0,574
AlSb	Z	I	1,58	0,785
GaN	W	D	3,39	0,366
GaP	Z	I	2,26	0,549
GaAs	Z	D	1,42	0,873
GaSb	Z	D	0,73	1,700
InN	W	D	0,65	1,910
LnP	Z	D	1,35	0,919
InAs	Z	D	0,36	3,440
InSb	Z	D	0,17	7,290

Listelenen kristal yapı, malzemenin en yaygın kullanılan formunu göstermektedir: D = Elmas, Z = Çinkoblend, W = Wurtzite, yukarda gösterildiği gibidir. Çinkoblend yapısı, her bir element için bir tane olmak üzere, gövde köşegeninin 1/4'ü kadar birbirinden kaydırılmış, iki iç içe geçmiş yüzey merkezli kübik örgüden oluşmaktadır. Elmas örgü, tüm atomların aynı olması dışında çinkoblend ile aynıdır. Wurtzite yapısı, her bir element için bir tane olmak üzere, üç katlı c eksen boyunca uzunluğunun 3/8'i kadar birbirinden kaydırılmış iki altıgen sıkı paketlenmiş örgüden oluşmaktadır. Tüm atomlar komşularıyla tetrahedral bağ yapmıştır. Tabloda I = İndirekt bant aralığını ve D = Direkt bant aralığını göstermektedir. Tabloda verilen bant aralığı değerleri $T = 300^0 \text{ K}$ içindir. Bant aralığı dalga boyu λ_g , bant aralığı enerjisi E_g ile $\lambda_g = hc_0/E_g$ şeklinde ilişkilidir. Bant aralığı enerjisi eV ve bant aralığı dalga boyu μm olarak ifade edildiğinde bu ilişki $\lambda_g = 1,24/E_g$ olmaktadır (Saleh and Teich 2007).

2.1.3.2. Bileşik Yarıiletkenler

a) İkili (Binary) III-V Yarıiletkenler

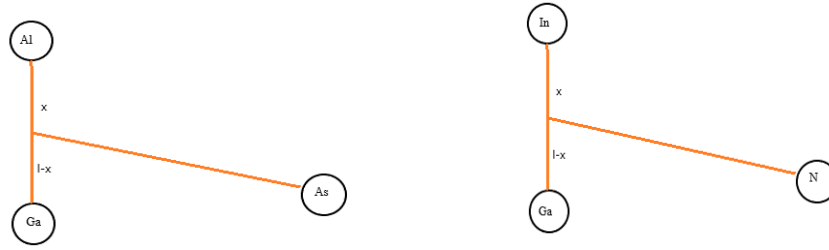
Periyodik tabloda sütun III'teki bir elementin, örneğin alüminyum (Al), galyum (Ga) veya indiyum (In) ile sütun V'teki bir elementin, örneğin azot (N), fosfor (P), arsenik (As) veya antimon (Sb) ile birleştirilmesiyle oluşan bileşikler, fotonikte önemli yarıiletkenlerdir. Bu 12 III-V bileşik, kristal yapıları (çinkoblend veya wurtzit), bant aralığı türü (direkt veya indirekt), bant aralığı enerjisi E_g ve bant aralığı dalga boyu $\lambda_g = hc_0/E_g$ (E_g enerjili bir fotonun serbest uzay dalga boyu) ile birlikte Tablo 2'de listelenmiştir. Foton kaynakları (ışık yayan diyotlar ve lazerler) ve dedektörler bu ikili bileşiklerin çoğundan kolayca üretilebilirler. Fotonikte kullanılan ilk ikili yarıiletken, bazen hızlı elektronik devre elemanları ve devreler için Si'ye alternatif olarak da kullanılan galyum arsenik (GaAs) bileşik yarıiletkenidir. Galyum nitrid (GaN), yakın-ultraviyole bant aralığı dalga boyu sayesinde fotonikte merkezi bir rol oynamaktadır; ayrıca yüksek sıcaklıklara dayanma kabiliyeti nedeniyle elektronikte de önemlidir. Bir yalıtkan olan AlN, tüm III - V bileşikleri arasında en yüksek bant aralığına sahiptir ve orta-ultraviyole bölgesinde en kısa dalga boyunda fotonlar yaymaktadır (Saleh and Teich 2007).



b) Üçlü (Ternary) III-V Yarıiletkenler

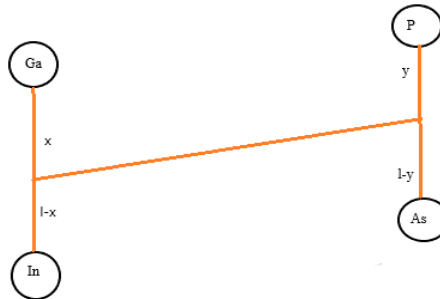
Periyodik tablonun III. sütündeki iki elementin V. sütündeki bir elementle (veya III. sütündeki bir elementle V. sütündeki iki element) oluşturduğu bileşikler önemli üçlü yarıiletkenlerdir. Örneğin $(Al_xGa_{1-x})As$, kompozisyonel karışım oranı x 'e (GaAs'deki Ga atomlarının Al atomlarıyla yer değiştiren oranı) bağlı olarak AlAs ve GaAs'nin özellikleri arasında geçiş yapan bir bileşiktir. Bu malzeme için bant aralığı enerjisi E_g , GaAs için 1,42 eV ile AlAs için 2,16 eV arasında değişmektedir. Burada x , 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bir diğer yararlı III-V üçlü bileşik $Ga(As_{1-x}P_x)$ 'dir. $(In_xGa_{1-x})As$, spektrumun yakın-kızılötesi bölgesindeki foton kaynakları ve dedektörleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde, $(Al_xGa_{1-x})N$ ve $(In_xGa_{1-x})N$, spektrumun morötesi, mor, mavi ve yeşil bölgelerinde çalışan fotonik aygıtlar için

önemli üçlü yarıiletkenlerdir. Elektronik alanında yapılan $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{As}/\text{InP}$ heteroeklem bipolar transistörler 1 THz'e yaklaşan hızlarda anahtarlanabilirler; gerçekten de, ışık yayan ultra hızlı transistörler üretmek için çeşitli III-V bileşikleri kullanılabilir (Saleh and Teich 2007).



c) Dörtlü (Quaternary) III-V Yarıiletkenler

Bu bileşikler, periyodik tablonun III. sütunundaki iki elementin V. sütunundaki iki elementle (veya III. sütundaki üç elementle V. sütundaki bir elementin) karıştırılmasıyla oluşmaktadır. Dörtlü yarıiletkenler, ilave bir serbestlik derecesi sayesinde, üçlü yarıiletkenlere kıyasla istenilen özelliklere sahip malzemelerin üretiminde daha fazla esneklik sunmaktadır. Bir örnek, bant aralığı enerjisi 0,36 eV (InAs) ile 2,26 eV (GaP) arasında değişen ve kompozisyonel karışım oranları x ve y , 0 ile 1 arasında değişen $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ tarafından sağlanmıştır. Örgü sabiti genellikle karışım oranıyla doğrusal olarak değişmektedir (Vegard yasası). Bu dörtlü bileşik, özellikle 1550 nm optik fiber iletişim dalga boyu civarında, ışık yayan diyotlar, lazer diyotlar ve fotodedektörlerin üretiminde kullanılmaktadır. Başka bir örnek, GaAs'ın şablon görevi gördüğü $(\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y})\text{P}$ tarafından sağlanır; bu bileşik, kırmızı, turuncu ve sarı spektral bölgelerde yüksek parlaklıkta emisyon sunar. Bir diğer önemli dörtlü malzeme, yeşil, mavi, mor ve ultraviyole spektral bölgelerine aynı şekilde hizmet eden III-nitrür bileşiği olan $(\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y})\text{N}$ ' dir. III-nitrürler için kullanışlı şablonlar safır ve SiC'dir.



Sütun IV elementleri ayrıca bileşik yarıiletkenler oluşturmak için alaşımlanabilirler. Karborundum olarak da bilinen ikili alaşım silisyum karbür (SiC), indirekt bir bant aralığına sahiptir ve ultraviyole fotodedektörleri üretmek ve III-nitrür bileşikleri için bir şablon olarak kullanışlıdır. Silisyum germanyum ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$), kızılötesi fotodedektör malzemesi olarak

kullanımı da dahil olmak üzere elektronik ve fotonikte çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Üçlü ve dörtlü sütun-IV yarıiletken bileşikleri sırasıyla $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ ve $Si_{1-x-y-z}Ge_xC_ySn_z$ 'yi içermektedir.

İkili II-VI malzemeleri, yani periyodik tablonun II. sütunundaki (örneğin Zn, Cd, Hg) ve VI. sütunundaki (örneğin S, Se, Te) elementlerinden oluşan bileşikler de yararlı yarıiletkenlerdir. ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, HgS, HgSe ve HgTe bu aileye ait bileşik yarıiletkenlerdir. Tüm bu malzemeler çinkoblend yapısına sahiptir ve hepsi direkt bant aralıklı yarıiletkenlerdir; istisnalar, küçük negatif bant aralıklarına sahip yarı metaller olan HgSe ve HgTe'dir. ZnSe'nin özel bir avantajı, örgü yapısı nedeniyle nispeten düşük bir kusur yoğunluğuna sahip bir GaAs alt tabakasına büyütülebilmesidir. Dahası, HgTe ve CdTe'un neredeyse örgü yapıları eşleşmiştir, bu nedenle üçlü yarıiletken $Hg_xCd_{1-x}Te$ bir CdTe alt tabakasında zorlanma olmadan büyütülebilir. Bu malzeme sistemi, diğer II-VI bileşikleri gibi, foton dedektörlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Saleh and Teich 2007).

2.1.4. Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri, özel olarak seçilmiş katkı maddeleri adı verilen az miktardaki safsızlıkların malzemeye kontrollü bir şekilde sokulmasıyla önemli ölçüde değiştirilebilir. Bu safsızlıkların yapıya eklenmesi, hareketli yük taşıyıcılarının konsantrasyonunu değiştirebilir. Kristal örgüdeki normal atomların küçük bir kısmını değiştiren, donör adı verilen fazla değerlik elektronlu katkı maddeleri, hareketli elektronların baskınlığını oluşturur ve bu yarıiletken n tipi yarıiletken adı verilir. Böylece, V. sütundaki atomlar (örneğin P veya As), bir elemental yarıiletkende (örneğin Si veya Ge) IV. sütundaki atomların yerini aldığı anda veya VI. sütundaki atomlar (örneğin Se veya Te), III-V ikili yarıiletkende (örneğin As veya Sb) V. sütundaki atomların yerini aldığı anda, n tipi özellik gösteren bir malzeme üretilir. Benzer şekilde, p tipi bir yarıiletken, akseptörler olarak adlandırılan değerlik elektronu eksikliği olan katkı maddeleri kullanılarak yapılır ve hareketli deliklerin baskınlığı oluşturulur. Bir elemental yarıiletkendeki sütun IV atomları sütun III atomlarıyla (örneğin, B veya In) veya bir III-V ikili yarıiletkendeki sütun III atomları sütun II atomlarıyla (örneğin, Zn veya Cd) değiştirildiğinde, p tipi malzeme elde edilir. Sütun IV atomları, sütun III için donör ve sütun V için akseptör olarak görev yapar ve bu nedenle III-V bileşik malzemelerinde hem elektron hem de boşluk fazlalığı üretmek için kullanılabilirler. Elbette, malzemenin yük nötrallığı, katkı maddelerinin eklenmesiyle değişmez.

Katkılama yapılmamış yarıiletkenler asal malzemeler olarak adlandırılırken, katkı yapılan yarıiletkenler katkılı malzemeler olarak adlandırılırlar. Hareketli elektronların ve deliklerin konsantrasyonları asal bir yarıiletkende eşittir, $n=p=n_i$, burada asal konsantrasyon n_i artan sıcaklıkla birlikte üstel bir oranda artar. Öte yandan, n-tipi bir yarıiletkendeki hareketli elektronların konsantrasyonu (çoğunluk taşıyıcıları), deliklerin konsantrasyonundan (azınlık taşıyıcıları) çok daha büyüktür, yani $n \gg p$ 'dir. Bunun tersi, deliklerin çoğunluk taşıyıcıları ve $p \gg n$ olduğu p tipi yarıiletkende geçerlidir. Oda sıcaklığında katkılanmış bir yarıiletken, genellikle katkılama konsantrasyonuna yaklaşık olarak eşit olan bir çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. Tek iyon aşılama teknikleri, katkı atomlarının sayısının ve konumlarının hassas bir şekilde kontrol edildiği yarıiletken malzemeler üretmek için kullanılabilirler. Ortaya çıkan malzemeler, belirli uygulamalarda yararlı olan, rastgele sayıda katkı atomuna sahip olanlardan daha kesin özellikler sergilerler (Saleh and Teich 2007).

2.2. Yük Taşıyıcıları ile Fotonların Etkileşimleri

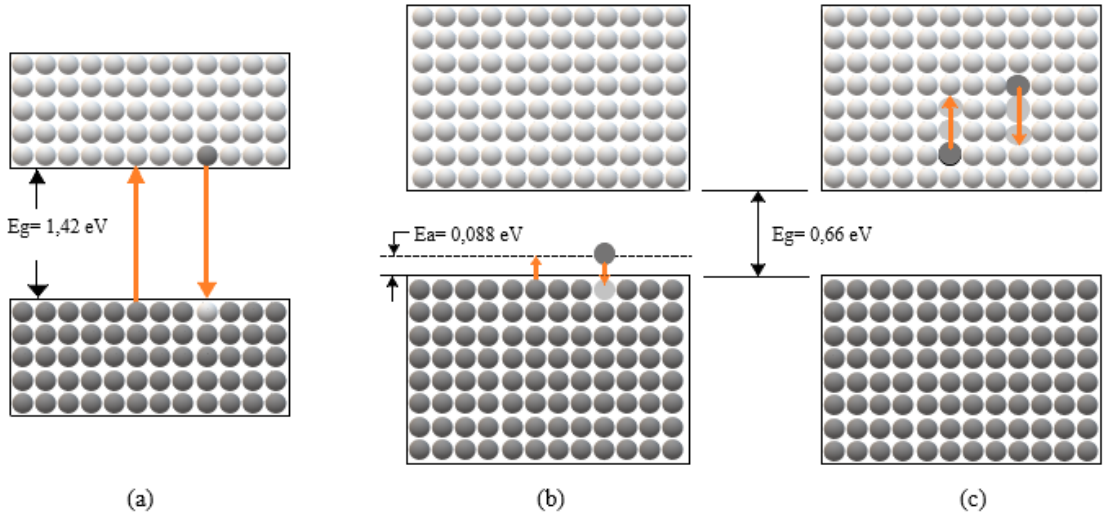
Fotonik cihazların çalışmasında önemli olan soğrulma ve emisyon süreçlerine vurgu yaparak, yarıiletkenlerin bazı temel optik özellikleri ele alınabilir. Bu çalışma alanı yarıiletken optiği olarak bilinir.

2.2.1. Bulk Yarıiletkenlerde Foton Etkileşimleri

Bulk yarıiletkenlerde fotonların soğrulmasına ve yayılmasına yol açan mekanizmaların en önemlileri şunlardır:

- Banttan Bantta (Bantlar Arası) Geçişler

Soğrulan bir foton, valans bandındaki bir elektronun iletkenlik bandına yukarı doğru bir geçiş yapmasıyla sonuçlanabilir ve böylece bir elektron-boşluk çifti yaratılabilir [Şekil 7 (a)]. Elektron-boşluk rekombinasyonu bir fotonun emisyonuyla sonuçlanabilir. Banttan banda geçişler bir veya daha fazla fonon tarafından desteklenebilir. Bir fonon, bir malzemedeki atomların moleküler veya akustik titreşimleriyle ilişkili örgü titreşimlerinin bir kuantumudur.



Şekil 7. Bulk yarıiletkenlerde fotonların soğrulması ve emisyonuna dair örnekler. (a) GaAs'deki banttandır geçişler, $\lambda_o < \lambda_g = hc_o/E_g = 0,87 \mu\text{m}$ dalga boyundaki fotonların soğrulması veya emisyonuyla sonuçlanabilir. (b) $\lambda_A = hc_o/E_A = 14 \mu\text{m}$ dalga boyundaki bir fotonun soğrulması, Hg katkılı Ge'de (Ge:Hg) değerlik bandından akseptör seviyesine geçişle sonuçlanır. (c) Ge'nin iletim bandındaki serbest taşıyıcı geçişleri.

- Kirlilikten Banta Geçişler

Soğrulan bir foton, katkılı bir yarıiletkende bir verici (veya alıcı) seviyesi ile bant arasında bir geçişe neden olabilir. Örneğin, p tipi bir malzemede, düşük enerjili bir foton bir elektronu değerlik bandından alıcı seviyesine çıkarabilir ve burada elektron alıcı atom tarafından tuzaklanır [Şekil 7 (b)]. Böylece değerlik bandında bir boşluk oluşmuştur ve alıcı atom iyonize olmuştur. Veya bir boşluk iyonize bir alıcı atom tarafından yakalanmıştır; sonuç olarak elektron alıcı seviyesinden ayrılarak boşlukla yeniden birleşir. Enerji radyasyonel olarak (yayılan bir foton biçiminde) veya radyasyonel olmayan şekilde (fononlar biçiminde) serbest bırakılabilir. Geçiş ayrıca, kusur durumlarındaki tuzaklar tarafından da desteklenebilir (Saleh and Teich 2007).

- Serbest Taşıyıcı (Bant İçi) Geçişler

Soğrulan bir foton, enerjisini belirli bir banttaki bir elektrona aktarabilir ve bu da elektronun o bant içinde daha yükseğe hareket etmesine neden olabilir. Örneğin, iletim bandındaki bir elektron bir fotonu soğurabilir ve iletim bandı içinde daha yüksek bir enerji seviyesine hareket edebilir [Şekil 7 (c)]. Bunu, elektronun iletim bandının dibine kadar inerek enerjisini fononlar biçiminde serbest bıraktığı bir süreç olan termalizasyon izler. Serbest taşıyıcı soğrulmasının gücü, taşıyıcı yoğunluğuyla orantılıdır.

- Fonon Geçişleri

Uzun dalga boylu fotonlar enerjilerini doğrudan örgü titreşimlerini uyatarak, yani fononlar oluşturarak serbest bırakabilirler.

- Eksitonik Geçişler

Bir fotonun soğrulması bir eksiton oluşumuyla sonuçlanabilir. Bu oluşum, bir deliğin proton rolünü oynadığı bir hidrojen atomuna çok benzer. Delik ve elektron, karşılıklı Coulomb etkileşimleriyle birbirine bağlıdır. Bir foton, elektron ve deliğin yeniden birleşmesinin bir sonucu olarak yayılabilir ve böylece eksiton yok edilebilir.

Bant aralığı enerjisinden daha büyük foton enerjileri için, soğrulma, birçok fotonik aygıtın temelini oluşturan banttandır. Bantta geçişler tarafından domine edilir. Malzemenin nispeten şeffaf ($h\nu < E_g$) olmaktan güçlü bir şekilde soğurucu ($h\nu > E_g$) olmaya geçtiği spektral bölgeye soğurma kenarı denir. Direkt bant aralığına sahip yarıiletkenler, indirekt bant aralığına sahip yarıiletkenlere göre daha keskin bir soğurma kenarına sahiptirler (Saleh and Teich 2007).

2.2.2. Bulk Yarıiletkenlerde Banttandır Banda Geçişler

Diğer geçiş tiplerini göz ardı ederek, bulk yarıiletkenlerde direkt banttandır banda foton soğrulması ve yayılmasının basit bir teorisini geliştirelim.

2.2.2.1. Bant Aralığı Dalga Boyu

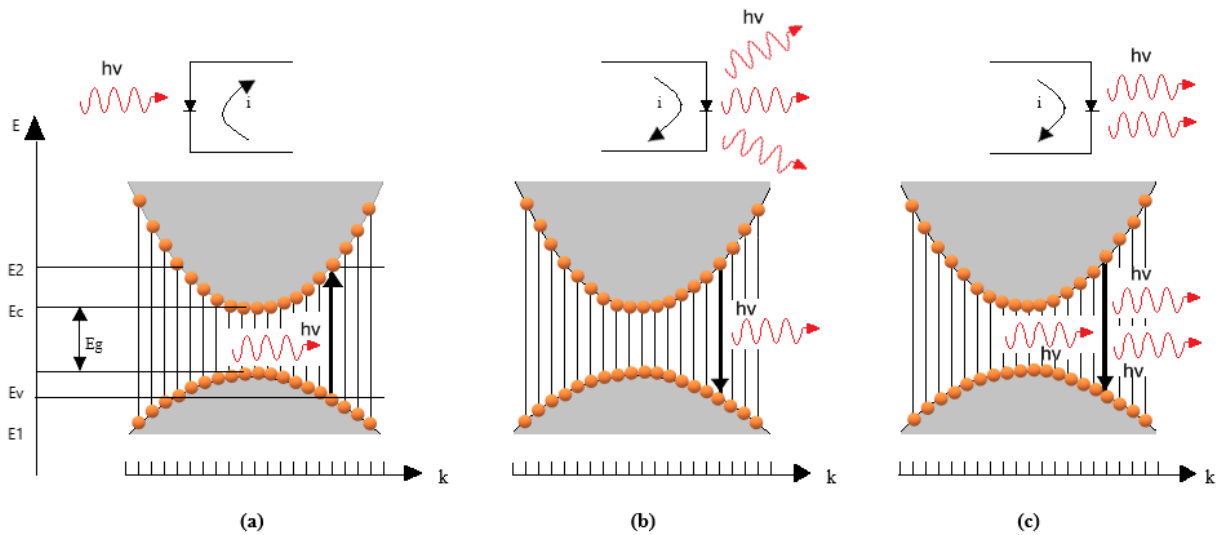
Doğrudan banttandır banda soğrulma ve emisyon yalnızca foton enerjisinin $h\nu > E_g$ olduğu frekanslarda gerçekleşebilir. Bunun gerçekleşmesi için gereken minimum frekans ν , $\nu_g = E_g/h$ 'dir, dolayısıyla buna karşılık gelen maksimum dalga boyu $\lambda_g = c_0 / \nu_g = hc_0 / E_g$ 'dir. Eğer bant aralığı enerjisi eV cinsinden (J cinsinden değil) verilirse, bant aralığı dalga boyu $\lambda_g = hc_0/eE_g$ μm cinsinden şu şekilde olur:

$$\lambda_g \approx \frac{1,24}{E_g} \quad (2.4)$$

λ_g niceliği bant aralığı dalga boyu (veya kesim dalga boyu) olarak bilinir (Saleh and Teich 2007).

2.2.2.2. Soğurma ve Emisyon Şartları

Valans bandından iletkenlik bandına elektron uyarımı, uygun enerjili bir fotonun ($h\nu > E_g$ veya $\lambda < \lambda_g$) soğrulmasıyla indüklenebilir ve bir elektron-delik çifti üretilebilir [Şekil 8 (a)]. Bu elektron, hareketli yük taşıyıcılarının konsantrasyonuna eklenir ve malzemenin iletkenliğini artırır. Malzeme, foton akısıyla orantılı bir iletkenliğe sahip bir fotoiletken gibi davranır. Bu etki, ışığı algılamak için kullanılabilir. İletkenlik bandından değerlik bandına elektron deeksitasyonu (elektron-delik rekombinasyonu), $h\nu > E_g$ enerjili bir fotonun kendiliğinden emisyonuyla [Şekil 8 (b)] veya başlangıçta $h\nu > E_g$ enerjili bir fotonun mevcut olması koşuluyla bir fotonun uyarılmış emisyonuyla [Şekil 8 (c)] sonuçlanabilir. Kendiliğinden emisyon, ışık yayan diyotun dayandığı temel olgu, uyarılmış emisyon ise, yarıiletken optik amplifikatörlerin ve lazer diyotların çalışmasından sorumlu olgudur. Soğrulma ve emisyonun gerçekleştiği koşullar aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Şekil 8. (a) Bir fotonun soğrulması, bir elektron-delik çiftinin oluşumuyla sonuçlanır. Bu işlem, ışığın foto algılanmasında kullanılır. (b) Bir elektron-delik çiftinin yeniden birleşmesi, bir fotonun kendiliğinden yayılmasıyla sonuçlanır. Işık yayan diyotlar (LED'ler) bu temelde çalışır. (c) Elektron-delik yeniden birleşmesi bir foton tarafından indüklenebilir. Sonuç, özdeş bir fotonun uyarılmış emisyonudur. Bu, yarıiletken lazer diyotlarının çalışmasından sorumlu olan temel işlemdir.

- Enerjinin korunumu

$h\nu$ enerjili bir fotonun soğrulması veya emisyonu, etkileşime dahil olan iki durumun enerjilerinin (örneğin, Şekil 8'de gösterildiği gibi, sırasıyla değerlik bandında ve iletim

bandında E_1 ve E_2) $h\nu$ ile yarılmaması gerektirir. Bu nedenle, örneğin, elektron-delik rekombinasyonu foton emisyonunun gerçekleşmesi için, E_2 enerji seviyesini işgal eden bir elektron, E_1 enerji seviyesini işgal eden bir delikle etkileşime girmelidir, böylece enerji korunur, yani,

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (2.5)$$

olur.

- Momentumun korunumu

Momentum, foton emisyonu/soğrulması sürecinde de korunmalıdır, böylece $P_2 - P_1 = h\nu/c = h/\lambda$ veya $k_2 - k_1 = 2\pi/\lambda$ olur. Ancak foton-momentum büyüklüğü h/λ , elektronların ve deliklerin alabileceği momentum değerleri aralığına kıyasla çok küçüktür. Yarıiletken E-k diyagramı, örgü sabiti a 'nın dalga boyu λ 'dan çok daha küçük olduğu $2\pi/a$ mertebesindeki k değerlerine kadar uzanır, böylece $2\pi/\lambda \ll 2\pi/a$ olur. Bu nedenle etkileşime katılan elektronun ve deliğin momentumları yaklaşık olarak eşit olmalıdır. Bu koşul, $k_2 = k_1$, k -seçim kuralı olarak adlandırılır. Bu kurala uyan geçişler, E-k diyagramında (Şekil 8) dikey çizgilerle gösterilmiştir ve bu da k 'daki değişimin diyagram ölçeğinde ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

- Bir Fotonun Etkileştiği Elektron ve Deliğin Enerjileri ve Momentumları

Şekil 8'den de anlaşılacağı üzere, enerji ve momentumun korunumu, ν frekansındaki bir fotonun, yarıiletken E-k ilişkisi tarafından belirlenen belirli enerjilere ve momentumlara sahip elektronlar ve deliklerle etkileşime girmesini gerektirir. (2.2) ve (2.3) denklemlerini kullanarak bu ilişkiyi direkt bant aralığına sahip bir yarıiletken için, iki parabol ile yaklaşık olarak hesaplayıp $E_c - E_v = E_g$ yazarak (2.5) denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$E_2 - E_1 = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_v} + E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c} = h\nu \quad (2.6)$$

Burada

$$k^2 = \frac{2m_r}{\hbar^2} (h\nu - E_g) \quad (2.7)$$

ve

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_v} + \frac{1}{m_c} \quad (2.8)$$

şeklindedir. Denklem (2.7)'nin (2.2)'de yerine koyulmasıyla, fotonun etkileşime girdiği E_1 ve E_2 enerji seviyeleri

$$E_2 = E_c + \frac{m_r}{m_c} (h\nu - E_g) \quad (2.9)$$

$$E_1 = E_v - \frac{m_r}{m_v} (h\nu - E_g) = E_2 - h\nu \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. $m_c = m_v$ özel durumunda, simetri gereği $E_2 = E_c + (1/2)(h\nu - E_g)$ elde edilir.

- Durumların Optik Eklem Yoğunluğu

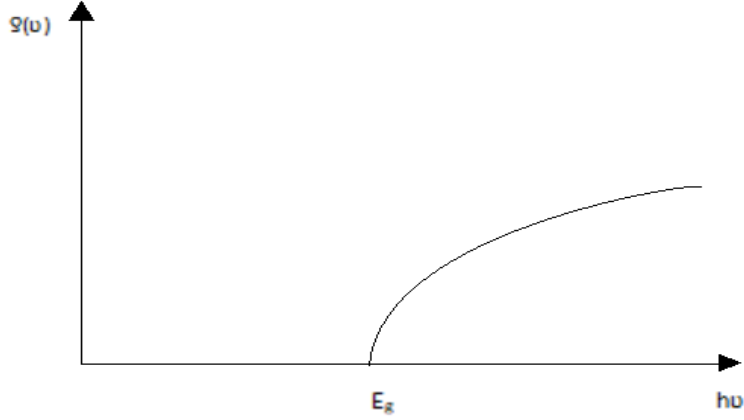
Şimdi, enerji ve momentum korunumu koşulları altında direkt bant aralıklı yarıiletkenlerde bir fotonun $h\nu$ enerjisiyle etkileşime girdiği durumların yoğunluğu $g(v)$ 'yi belirleyelim. Bu nicelik, hem iletim hem de değerlik bantlarındaki durumların yoğunluğunu içerir ve durumların optik eklem yoğunluğu olarak adlandırılır. Yukarıda somutlaştırılan E_2 ve v arasındaki birebir ilişki, $g(v)$ 'yi iletim bandındaki $g_c(E_2)$ durumlarının yoğunluğuna $g_c(E_2)dE_2 = g(v)dv$ ilişkisini kullanarak kolayca ilişkilendirmemize olanak tanır, $g(v) = (dE_2/dv) g_c(E_2)$ 'den böylece

$$g(v) = \frac{hm_r}{m_c} g_c(E_2) \quad (2.11)$$

elde edilir. Nihayet birim hacim ve birim frekans başına durumların sayısı

$$g(v) = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi\hbar^2} \sqrt{h\nu - E_g}, \quad h\nu \geq E_g \quad (2.12)$$

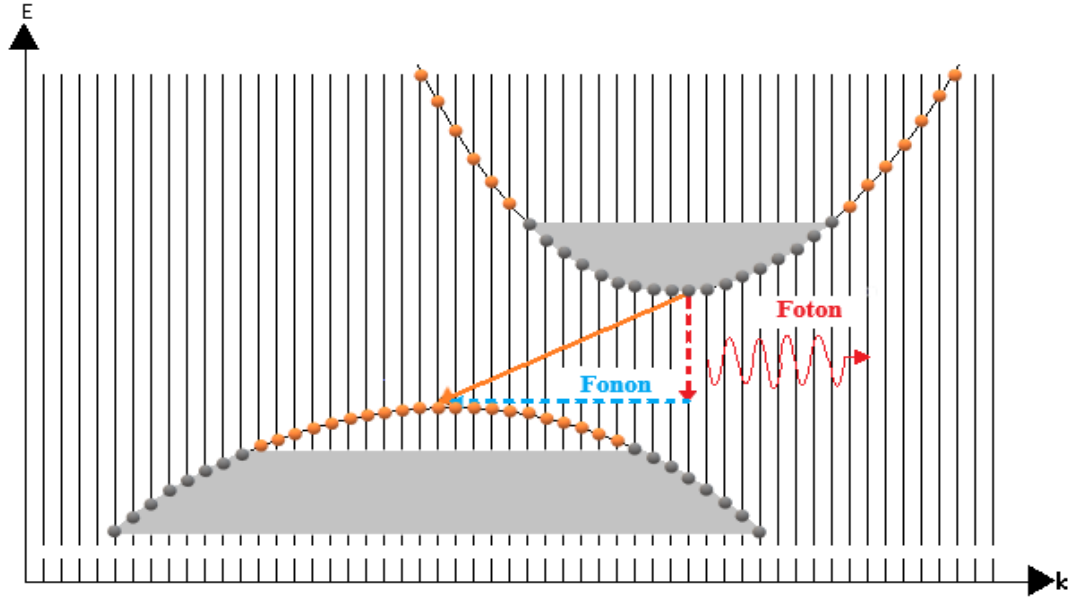
şeklinde elde edilir. Bu ilişki Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. $h\nu$ enerjili bir fotonun etkileştiği durumların yoğunluğu, karekök yasasına uygun olarak $h\nu - E_g$ ile artmaktadır.

- İndirekt Bant Aralıklı Yarıiletkenlerde Foton Emisyonu Olası Değildir

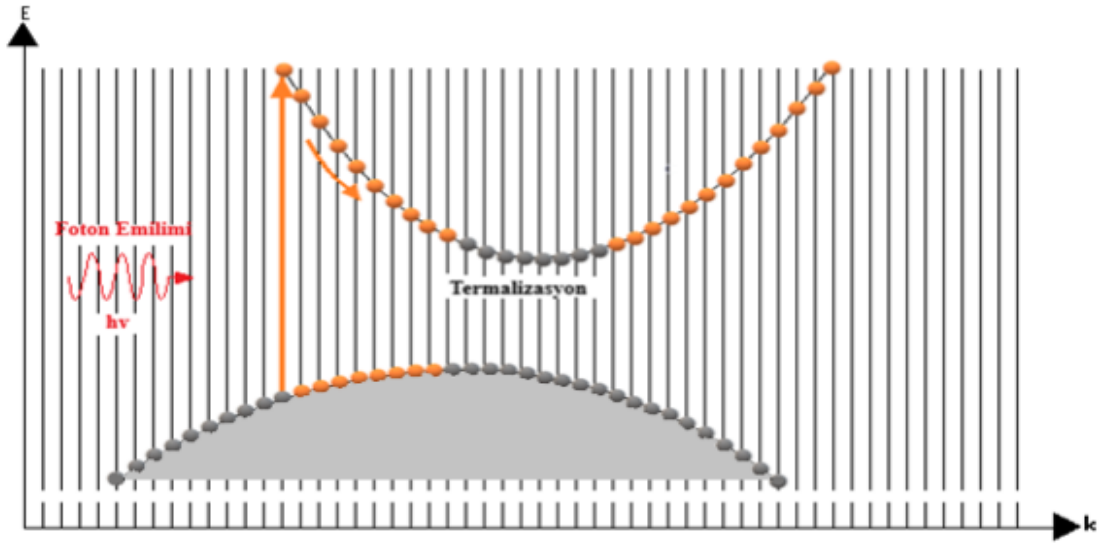
İndirekt bant aralıklı yarıiletkenlerde radyatif elektron-delik rekombinasyonu olası değildir. Bunun nedeni, iletim bandının alt kısmından değerlik bandının üst kısmına (elektronların ve deliklerin sırasıyla bulunma olasılığının en yüksek olduğu yer) geçişlerin, yayılan foton tarafından karşılanamayan bir momentum değişimi gerektirmesidir. Fakat momentum, etkileşimdeki fononların katılımıyla korunabilir. Fononlar nispeten büyük momentumlar taşıyabilir ancak tipik olarak küçük enerjilere ($\approx 0,01-0,1$ eV) sahiptirler, bu nedenle fonon geçişleri, Şekil 10'da da görüldüğü gibi, E-k diyagramında yatay olarak gösterilir. Net sonuç momentumun korunduğu ancak k-seçim kuralının ihlal edildiğidir. Fonon destekli emisyon üç cismin (elektron, foton ve fonon) katılımını içerdiğinden, bunun meydana gelme olasılığı oldukça düşüktür. Bu nedenle, indirekt bant aralıklı yarıiletken olan Si, direkt bant aralıklı yarıiletken olan GaAs'dan önemli ölçüde daha düşük bir radyatif rekombinasyon katsayısına sahiptir. Bu nedenle GaAs verimli bir ışık yayıcı iken, silikon verimli bir ışık yayıcı değildir (Saleh and Teich 2007).



Şekil 10. İndirekt bant aralıklı yarıiletkendeki foton emisyonu. İletkenlik bandının tabanına yakın bir elektronun, valans bandının tepesine yakın bir delikle yeniden birleşmesi, enerji ve momentum alışverişini gerektirir. Enerji bir foton tarafından taşınabilir, ancak momentumu korumak için bir veya daha fazla fonon da gereklidir. Bu nedenle bu tür çok parçacıklı etkileşimin olması olası değildir.

- İndirekt Bant Aralıklı Yarıiletkende Foton Soğrulması Olası Değildir

Foton soğrulması, indirekt bant aralıklı yarıiletkende enerji ve momentumun korunumunu gerektirse de, bu iki adımlı bir işlemle kolayca elde edilebilir (Şekil 11). Elektron önce k -korunumlu dikey bir geçişle iletim bandında yüksek bir enerji seviyesine uyarılır. Daha sonra, momentumunun fononlara aktarıldığı termalizasyon adı verilen bir işlemle iletim bandının tabanına hızla geri döner. Oluşturulan delik de benzer şekilde davranır. İşlem ardışık olarak gerçekleştiğinden, üç cismin aynı anda bulunmasını gerektirmez ve bu nedenle foton soğrulması olası değildir. Bu nedenle silikon, GaAs gibi, verimli bir foton detektörüdür (Saleh and Teich 2007).



Şekil 11. Dikey (k-korunumlu) bir geçiş yoluyla indirekt bant aralıklı yarıiletkende foton soğrulması. Foton, iletkenlik bandında uyarılmış bir elektron üretir ve değerlik bandında bir delik bırakır. Daha sonra elektron ve delik, sırasıyla iletkenlik ve değerlik bantlarında mümkün olan en düşük ve en yüksek seviyelere hızlı geçişler gerçekleştirirler ve enerjilerini fononlar biçiminde serbest bırakırlar. İşlem ardışık olduğundan, foton soğrulması olası değildir.

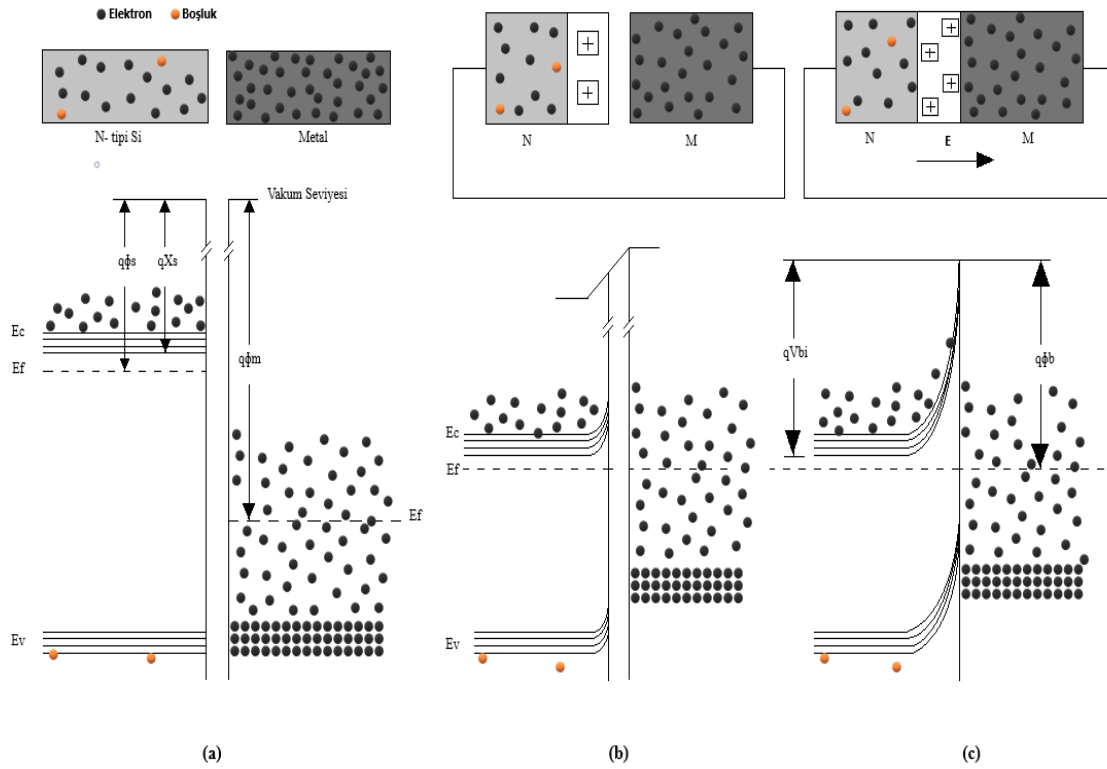
2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Pratik açıdan, Schottky diyotları olarak bilinen doğrultucu kontaklar ve omik kontaklar olmak üzere iki farklı tipte metal-yarıiletken kontak vardır.

Schottky diyotları, p-n eklemine çok benzeyen akım-gerilim karakteristiklerine sahip olmasına rağmen, aralarında önemli bir fark da vardır. Schottky diyotları tek bir taşıyıcı türüyle (çoğunluk taşıyıcıları) çalışmaktadır. Azınlık taşıyıcılarının önemsiz olması, depolanmış yük etkisinin olmadığı anlamına gelmektedir, buda Schottky diyotlarını hızlı anahtarlama uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Omik kontaklar doğrusal akım-gerilim karakteristiğine sahip olduklarından, yarıiletken aygıtların metal iletkenlerle temas etmesini sağlarlar (Dimitrijević 2006).

2.3.1 Schottky-Diyot: Doğrultucu Metal-Yarıiletken Kontak

Genel olarak metal-yarıiletken doğrultucu kontakların eklem özellikleri enerji bant diyagramları göz önüne alınarak incelenmektedir. Şekil 12 (a) kontak halinde olmayan bir metalle n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramlarını göstermektedir. Bu iki malzemenin enerji-bant diyagramları, vakum seviyeleri aynı hizada olacak şekilde çizilmiştir. Vakum



Şekil 12. Termal dengede metal-n-tipi yarıiletken doktrultucu kontak (a) metal ve n-tipi yarıiletken ayrı halde (b) elektriksel temas halinde metal ve n-tipi yarıiletken (c) metal ve n tipi yarıiletken arasındaki ideal fiziksel kontak.

seviyesi tamamen serbest bir elektronun (vakumdaki izole edilmiş bir elektron) enerji seviyesidir. Katılardaki elektronlar vakum seviyesine göre negatif enerjilere sahiptir: kristaldeki çekim kuvvetlerinden kurtulup serbest elektron olabilmek için biraz enerjiye ihtiyaçları vardır. Metalden ortalama bir elektronu (Fermi seviyesindeki bir elektronu) uzaklaştırmak için gereken enerjiye (iş) iş fonksiyonu denir ve Şekil 12 (a)'da $q\phi_m$ ile gösterilmiştir. Başka bir deyişle, iş fonksiyonu, vakum seviyesinde bulunan bir serbest elektronun enerjisine göre Fermi seviyesinin konumunu ifade eder. Bazı metallerin iş fonksiyonu değeri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Sık kullanılan bazı malzemelerin 300 K'deki iş fonksiyonu ve elektron ilgisi değerleri.

Malzeme	İş Fonksiyonu ϕ_m (eV)	Elektron İlgisi χ_s (eV)
Al	4,10	
Gr	4,50	
Ni	5,15	
Pt	5,70	
PtSi	5,40	
W	4,60	
WSi ₂	4,70	
Si		4,05
GaAs		4,07
Ge		4,00
SiO ₂		1,00
N ⁺ Si	4,05	4,05
P ⁺ Si	5,17	4,05

Yarıiletkenlerle uğraşırken, tipik olarak Fermi seviyesinde ve civarında elektron olmaması gerçeğine bakılmaksızın, aynı fonksiyon tanımı kullanılmalıdır. Şekil 12 (a)'da, yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s ile etiketlenmiştir. Fermi seviyesinin konumu katkılama türü ve seviyesine bağlı olduğundan, yarıiletkenlerin iş fonksiyonu tanımı bir malzeme sabiti değildir. Ancak, katkılama bantların vakum seviyesine göre konumunu etkilememektedir. İletkenlik bandının tabanının vakum seviyesine göre konumu elektron ilgisi olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 12 (a)'da χ_s olarak etiketlenmiştir. Elektron ilgisi, yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu sıfır kinetik enerjiyle vakum seviyesine çıkarmak için gereken enerjiye eşittir. Elektron ilgisi malzeme sabitlerinden olup, bazı önemli yarıiletkenlerin ve yalıtkanların χ_s değerleri Tablo 3'de listelenmiştir. Şekil 12 (a)'da, n tipi yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden daha yüksektir. Bu da yarıiletkendeki hareketli elektronların metaldeki elektronlardan daha yüksek enerji seviyelerinde olduğu anlamına gelmektedir. Şimdi, iki malzeme arasında elektrik teması olduğunda (örneğin, Şekil 12 (b)'de gösterilen tel ile) ne olduğunu düşünelim. Bu durumda, iki malzeme tek bir sistemi temsil etmektedir. Yarıiletkendeki yüksek enerji seviyelerindeki elektronlar telden metale doğru hareket ederek yarıiletken yüzeyinde bir tükenim tabakası oluştururlar. Tükenim tabakasındaki telafi edilmemiş pozitif donör iyonları, metalin yüzeyi ile yarıiletkenin bulk kısmı arasında potansiyel farkının ortaya çıkmasıyla ilişkili bir elektrik alanı oluştururlar. Termal denge kurulduğunda, bu potansiyel farkı Fermi seviyeleri arasındaki başlangıç farkına tam olarak eşittir, bu da yarıiletkendeki ve metaldeki Fermi seviyelerinin artık birbirleriyle mükemmel bir şekilde hizalandığı anlamına gelmektedir. Termal dengedeki bir sistemin Fermi seviyesinin sabit olduğunu zaten biliyoruz (Dimitrijević 2006).

Şekil 12 (b)'de metal ve yarıiletken arasında bir boşluk vardır. Gerçekte ara yüzeyde atom mesafeleri mertebesinde küçük bir boşluk olması çok olasıdır. Bu durum metal-yarıiletken kontağın özelliklerini etkilese de, esasen önemli değildir. Daha kolay anlaşılması için, ideal kontak varsaymak faydalıdır. İdeal metal-yarıiletken kontak Şekil 12 (c)'de gösterilmiştir. Enerji bant diyagramı aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

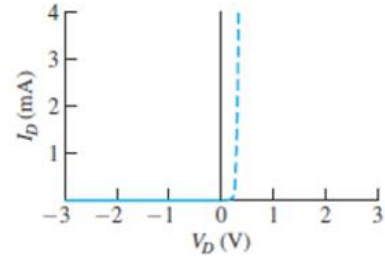
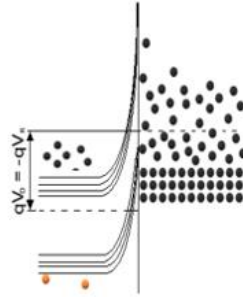
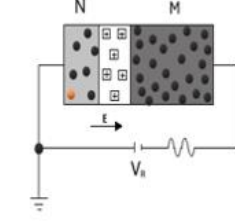
1. İlk önce Fermi seviyesi (Şekil 12 (c)'deki kesikli çizgi) çizilir.
2. Yarıiletkenin nötral bölgesinde iletim ve değerlik bantları çizilir. Bantlar, yarıiletkenin katkılanma seviyesini ifade etmek için Fermi seviyesine göre uygun şekilde yerleştirilir (nötral bölgedeki enerji-bant diyagramı, Şekil 12 (a)'daki ile aynı olmalıdır).
3. Metalin içerisinde elektronların bolluğu ve buna bağlı olarak elektrik alanının ancak atom mesafelerine kadar nüfuz etmesi nedeniyle pratik olarak hiçbir değişiklik gözlenmez.
4. Yarıiletken-metal arayüzeyinde, yarıiletken ile metal arasındaki enerji bandı ofseti korunur. Buna göre E_C ve E_V 'nin arayüzey konumları, metal içerisinde E_F 'ye göre aynı enerji konumlarında kalacak şekilde belirlenir. Bu nedenle, arayüzeydeki E_F ve E_C arasındaki fark $q\Phi_B = q\Phi_m - q\chi_s$ (2.13) şeklinde ifade edilir. $q\Phi_B$, metaldeki elektronlar için enerji engelidir ve hem $q\Phi_m$ hem de $q\chi_s$ malzeme sabitleri oldukları için, bu engelin değeri yarıiletken katkısından veya uygulanan önbeslemenden bağımsızdır.
5. Bulk ve arayüzey seviyelerini birleştirmek için yarıiletkenin tükenim tabakasında enerji bantları bükülür. Bu bükülme, metalin ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri arasındaki orijinal farka eşittir:

$$qV_{bi} = q\Phi_m - q\Phi_s = q\Phi_{ms} \quad (2.14)$$

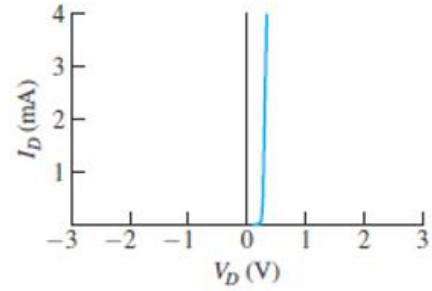
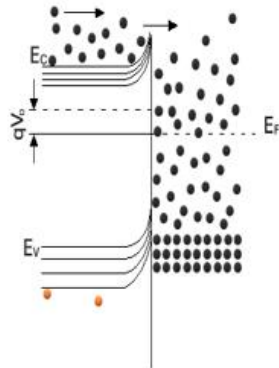
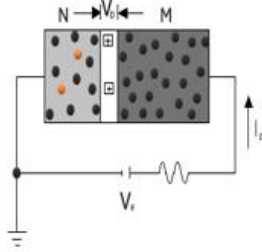
qV_{bi} , yarıiletkendeki elektronlar için enerji engelidir ve bu engel, yarıiletkenin tükenim tabakasındaki yerleşik voltaj V_{bi} ile doğrudan ilişkilidir.

Şimdi metal ile yarıiletken arasında uygulanan voltajın etkilerini inceleyelim. Şekil-13 (a) ters beslem durumunu göstermektedir. n-tipi yarıiletkene göre metale $V_D = -V_R$ negatif voltajının uygulanması, termal dengedeki Fermi seviyesinin yarıiletkenin Fermi seviyesinden qV_R miktarı kadar yüksek olması anlamına gelir. *Potansiyel enerji* = $-q$ (*elektiriksel potansiyel*) olduğunu unutmayınız.

Ters beslem $V_D = -V_R$, yarıiletkendeki elektronlar için enerji engel yüksekliğini $q(V_{bi} + V_R)$ 'ye yükseltir. Yarıiletkenin tükenim tabakasındaki artan enerji engeli, yarıiletkenden gelen elektronların kontak bölgesinden geçmesini engeller (Dimitrijević 2006).



Ters Beslem
(a)



Doğru Beslem
(b)

Şekil-13. (a) Ters beslem (b) Doğru beslem Schottky diyotların gösterimi.

Metaldeki elektronlar için engel ($q\Phi_B$) değişmez. Metaldeki potansiyel engelini aşabilen ve n tipi yarıiletkenle ulaşan az sayıdaki elektron Schottky diyotunun ters önbeslem akımını oluşturur. $q\Phi_B$ 'nin önbeslemden bağımsız olduğu göz önüne alındığında, ters önbeslem akımı ters önbeslem voltajına bağlı değildir:

$$I_D = -I_S \quad (2.15)$$

Eğer I_S bir parametre olarak ele alınırsa, Schottky diyotun ters-beslem akımı, p-n eklem diyotlarında olduğu gibi aynı şekilde ifade edilir. Schottky diyotlar ile p-n eklemleri arasındaki fark I_S 'nin bileşenlerindedir. Schottky diyotunda I_S , elektronların $q\Phi_B$ engeli üzerinden termal emisyonundan kaynaklanmaktadır. Bu akım, p-n eklemlerindeki azınlık taşıyıcılarından dolayı oluşan I_S akımından farklıdır. Ancak, doğru beslenmiş p-n eklemlerindeki azalan engel üzerinden taşıyıcıların enjeksiyonuna benzerdir. p-n eklemi engeli üzerinden taşıyıcı enjeksiyonu için kullanılan mantığa benzer bir mantık izleyerek, $q\Phi_B$ üzerinden geçebilen elektron sayısının $\exp(-q\Phi_B/kT)$ ile orantılı olduğu sonucuna varabiliriz. Daha doğrusu, termal emisyonundan kaynaklanan akım:

$$I_S = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. Burada A diyot alanı, T mutlak sıcaklık, $q\Phi_B$ engel yüksekliği ve A^* etkin Richardson sabitidir. n-Si, n-GaAs ve n-GaP için A^* 'ın değerleri sırasıyla $120 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$, $140 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve $98,4 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ 'dir.

Schottky diyotun ters beslem akımını önemli ölçüde etkileyen ikinci dereceden bir etki vardır. Bu etki, yarıiletkendeki elektronlar ile yakındaki yüksek iletkenliğe sahip metal arasında bir görüntü kuvvetinin ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Bu etkiden dolayı engel yüksekliğindeki azalma

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_{\max}}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.17)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Burada $E_{\max}$ maksimum elektrik alanıdır. Bu alan, ani p-n eklemi için elde edilenle aynıdır ve bu nedenle $\sqrt{V_R}$ ile orantılıdır. Açıkçası, bu etki artan ters beslem gerilimi ile Schottky diyotun ters beslem akımı I_S 'de önemli bir artışa neden olur (Rhoderic 1988 ve Sze 1981).

Şekil 13 (b)'den de görüldüğü gibi, doğru beslem voltajı V_D , p-n eklemi durumuna benzer şekilde, tükenim tabakasındaki enerji engelini $q(V_{bi}-V_D)$ kadar düşürmektedir. Bu, yarıiletken den gelen bir miktar elektronun engeli aşarak metal içerisinde ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Metalden yarıiletkene doğru zıt yönde hareket eden elektronların sayısı, ters beslem durumundakiyle aynıdır. Önemli olan, yarıiletken den gelen elektronların akımının baskın olmasıdır. Üstelik bu akım doğru beslem voltajıyla üstel olarak artmaktadır. Yine bu durum, elektronların iletim bandındaki enerjiler boyunca üstel olarak dağılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Enerji engel yüksekliği qV_D kadar azaldığında, engeli aşabilen elektron sayısı V_D ile üstel olarak artmaktadır (Dimitrijevi 2006).

I_S 'nin farklı fiziksel geçmişine rağmen, Schottky diyotunun doğru beslem akımı, p-n ekleminin doğru beslem akımıyla aynı şekilde ifade edilmektedir:

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{V_D}{nV_t}\right) \quad (2.18)$$

Burada n diyotun idealite faktörüdür.

Aynı matematiksel denklem Schottky diyotlarının I_D - V_D karakteristiğini modellemek için kullanılsa da önemli pratik farklılıklar vardır. Genellikle Schottky diyotlarda built-in voltajı (V_{bi}) daha küçüktür (Denklem (2.14)'den, Schottky diyotların V_{bi} değerlerinin farklı iş fonksiyonlarına (Φ_m) sahip metaller kullanılarak teknolojik olarak değiştirilebileceği anlaşılmaktadır). Silisyum p-n eklemlerinde akım yaklaşık 0,7 V'ta önemli hale gelirken, Schottky diyotlar durumunda aynı akım 0,2 V kadar düşük bir voltajla elde edilebilmektedir. Bu durum, diyot boyunca $V_D I_D$ güç kaybının kritik olduğu uygulamalarda Schottky diyotların bir avantajını temsil etmektedir. Ancak bu iyileştirme, ters beslem akımı I_S 'nin artması pahasına elde edilmektedir. Matematiksel olarak, I_D 'deki önemli artışı hesaba katmak için Denklem (2.18)'deki I_S 'nin önemli ölçüde artırılması gerektiği görülebilir. Bu, enerji bantlarından da çıkarılabilir. Built-in voltajını azaltmak için daha küçük $q\Phi_m$ 'ye sahip bir metal kullanmak (Denklem 2.14), $q\Phi_B$ 'nin azalmasına [Denklem (2.13)] ve dolayısıyla I_S 'de bir artışa [Denklem (2.16)] yol açmaktadır. $q\Phi_B = 0$ sınır durumunda, elektronlar metalden yarıiletkene ve tam tersi şekilde serbestçe hareket ederler ve bu durum mükemmel bir omik kontakla karşılık gelir (Dimitrijevi 2006).

p-n eklemi ile Schottky diyotları arasındaki bir diğer önemli fark dinamik karakteristiklerindedir. Doğru beslenmiş bir p-n eklem diyotunda, n-tipi yarıiletken den gelen

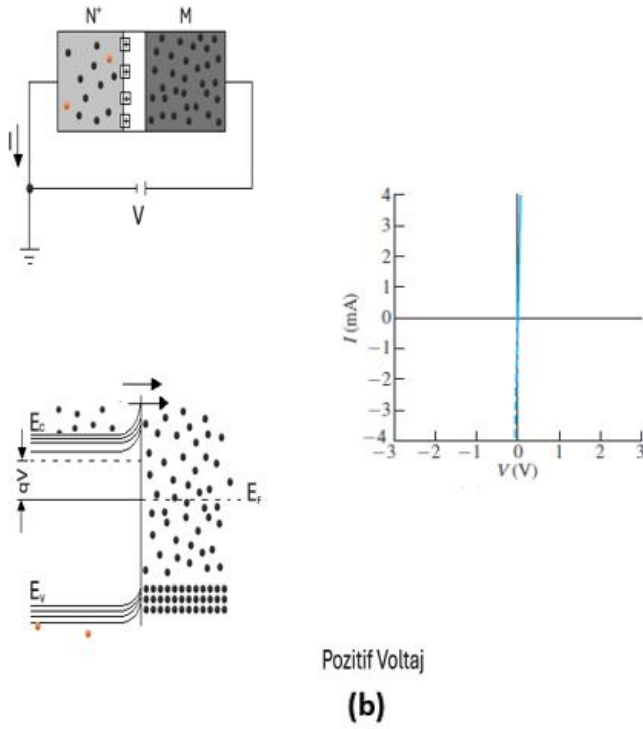
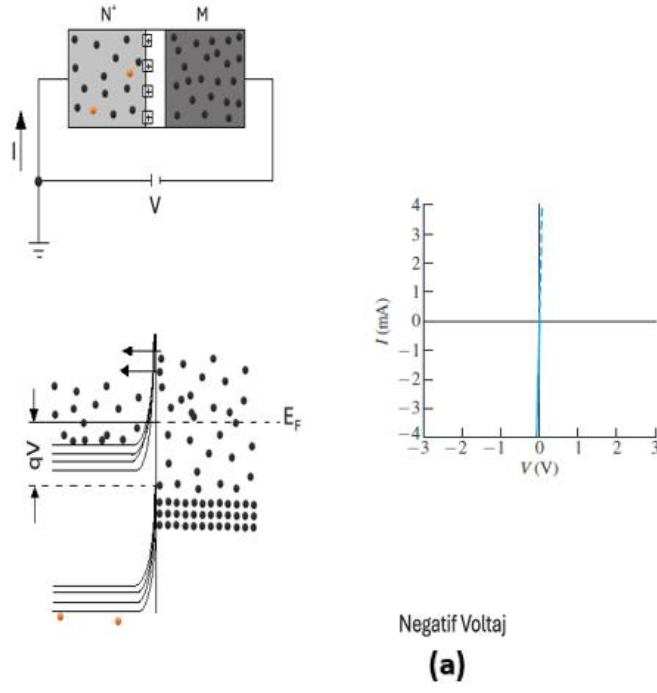
elektronlar eklemiden geçtikten sonra p-tipi bölgede azınlık taşıyıcılar olarak grnrleri. Bu, tükenim tabakasının kenarlarında azınlık taşıyıcılarının (depolanan yk) birikmesine yol açmaktadır. Doğru beslem voltajı kapatıldığında, depolanan yk kaldırılmadan önce kararlı durum ters beslem akımı oluşturulamaz. Schottky diyotlarda silikondan gelen elektronlar kontakdan geçtikten sonra metalde grnrleri (şekil 13 (b)). Bu elektronlar metalde zaten var olan çok sayıdaki elektronun arasında ortaya çıkarlar. Bunlar azınlık taşıyıcısı değillerdir ve bir fark yaratmazlar. Depolanmış yk etkilerinin olmaması nedeniyle Schottky diyot, p-n eklem diyotuna göre voltaj değişikliklerine çok daha hızlı yanıt vermektedir (Dimitrijev 2006).

2.3.2 Omik Metal-Yarıiletken Kontaklar

Schottky kontağındaki enerji engelini genişliği, yarıiletkendeki katkılama seviyesine bağlıdır. Bu tükenim tabakasının genişliğinin katkılamaya olan bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Metal-n tipi yarıiletken kontak için Poisson denklemi zlerek tükenim bölgesinin genişliği elde edilebilir. Bir taraflı p-n eklemindeki yoğun katkı p tipi yarıiletken, tükenim tabakası açısından Schottky diyotundaki metale benzer şekilde davranır (Dimitrijev 2006).

şekil 14, metal ile yoğun şekilde katkılanmış n-tipi yarıiletken arasındaki kontağı göstermektedir. Katkılama seviyesinin yüksek olduğunu ifade etmek için yarıiletkene n^+ -tipi denilmektedir. Yüksek katkılama seviyesi nedeniyle, yarıiletkenin yüzeyindeki enerji engeli çok dardır. Sonuç olarak, metale negatif voltaj uygulandığında metaldeki elektronlar engeli aşabilirler (şekil 14 (a)). Uygulanan voltaj artırıldıkça, Fermi seviyelerinin birbirinden uzaklaşması bant bükülmesini artırarak enerji engelini daha da daraltır. Bu, tünelleme akımında önemli bir artışa yol açar.

şekil 14 (b), metale uygulanan pozitif voltaj durumunu göstermektedir. Bu durumda yarıiletkenden gelen elektronlar yalnızca alçalan engeli aşmakla kalmaz (Schottky diyotunda olduğu gibi), aynı zamanda engeli tünelleyerek akımı önemli ölçüde artırır.



Şekil 14. Metalde (a) negatif, (b) pozitif voltaj bulunan omik metal-yarıiletken kontağın gösterimi.

Dolayısıyla metaldeki pozitif voltaj, kontak üzerinden, voltaj artışıyla birlikte hızla artan bir akım akışı da üretir. Bir metal ile çok fazla katkılanmış bir yarıiletken arasındaki kontağın elektriksel karakteristiği, küçük bir direncin karakteristiğine eşdeğerdir (Dimitrijević 2006).

2.3.3. Gerçek Schottky Kontaklar

Uygulamada, Schottky engel yüksekliği denklem (2.13)'de verilenden oldukça farklıdır. Gerçek bir metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın termal dengedeki enerji bant diyagramı Şekil 15'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, metal ve yarıiletken arasında ince bir arayüzey tabakası (veya oksit tabakası) ve yarıiletkenin bant aralığı içerisinde arayüzey halleri bulunmaktadır. Bardeen tarafından geliştirilen modelde arayüzey tabakasının elektronların tunellenebileceği kadar ince olduğu ve arayüzey hallerinin yarıiletkenin yasak bant aralığı içerisinde sürekli bir şekilde dağıldığı kabul edilmiştir (Neamen 2012). Arayüzey halleri yüzeydeki bir ϕ_0 nötral seviyesiyle karakterize edilmektedir. Yüzey potansiyeli ϕ_0 'ın altındaki bütün hallerin donör halleri olduğu ve bu hal bir elektron tarafından işgal edilirse, halin nötr olduğu veya eğer bu hal bir elektron tarafından işgal edilmemiş ise halin pozitif olarak yüklendiği kabul edilmektedir. Benzer şekilde ϕ_0 'ın üzerindeki bütün hallerin akseptör halleri olduğu ve eğer bu hal bir elektron tarafından işgal edilmemiş ise halin nötr olduğu ve yine eğer bu hal bir elektron tarafından işgal edilmiş ise halin negatif olarak yüklendiği kabul edilmektedir.

Şekil 15'de, ϕ_0 'ın üzerindeki ve E_F 'nin altındaki bazı akseptör hallerinin elektronlar tarafından işgal edilmiş oldukları ve negatif olarak yüklendikleri görülmektedir. Yüzey hal yoğunluğunun sabit ve D_{it} 'e (haller/cm²-eV) eşit olduğunu kabul ederek, ϕ_0 , D_{it} ve diğer yarıiletken parametreleri arasındaki ilişki

$$(E_g - q\phi_0 - q\phi_B) = \frac{1}{qD_{it}} \sqrt{2q\epsilon_s N_d (\phi_B - \phi_n)} - \frac{\epsilon_i}{qD_{it}} [\phi_m - (\chi_s + \phi_B)] \quad (2.19)$$

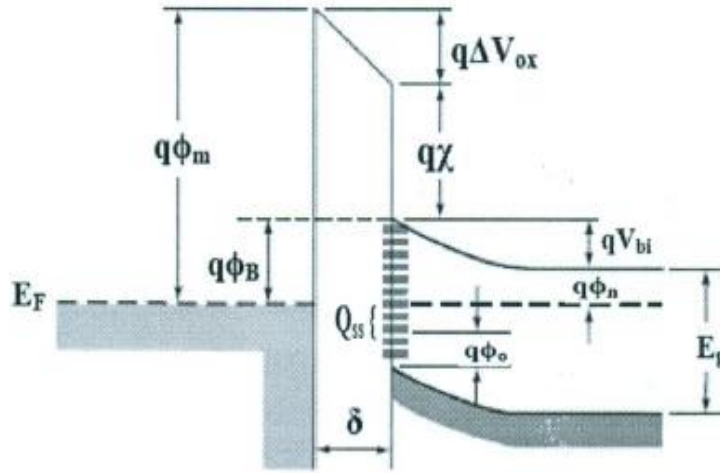
bağıntısıyla verilmektedir (Neamen 2012). Bu ifade $D_{it} \rightarrow \infty$ sınır durumunda

$$\phi_B = \frac{1}{q} (E_g - q\phi_0) \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu sınır halinde engel yüksekliğinin bant aralığı enerjisi E_g ve yüzey potansiyeli ϕ_0 ile sabitlendiği ve engel yüksekliğinin metal iş fonksiyonu ve yarıiletken elektron ilgisinden bütünüyle bağımsız olduğu söylenebilir. Bu durumda Fermi seviyesi, yüzey potansiyeli ϕ_0 'da, yüzeyde "çakılmıştır". $D_{it} \delta \rightarrow 0$ sınır durumunda ise denklem (2.19) ideal durum için verilen

$$\phi_B = (\phi_m - \chi_s) \quad (2.21)$$

bağıntısına dönüşmektedir. Dolayısıyla Schottky engel yüksekliği, hem imaj kuvvet etkisinden dolayı yarıiletkendeki elektrik alanın hem de yarıiletkendeki arayüzey hallerinin bir fonksiyonudur. Bu yüzden engel yüksekliği teorik değerinden sapmalar göstermektedir. Ekleme yerleşmiş olan arayüzey hal yoğunluğunu tam olarak belirlemek mümkün olmadığından, Schottky engel yüksekliği değerinin deneysel olarak belirlenmesi gereken bir parametre olduğu kuvvetle vurgulanmaktadır (Neamen 2012).



Şekil 15. Arayüzey tabakası ve arayüzey durumlarının varlığında bir metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı.

2.4 Schottky Engel Yüksekliğinin Belirlenmesi

İdeal bir metal-n tipi yarıiletken Schottky engel diyotun engel yüksekliğinin (2.13) ve (2.21) bağıntılarıyla verildiği yukarıdaki kesimlerde ifade edilmişti. Ancak, bu ifadelerin yalnızca imaj kuvvet etkisiyle engelin alçalması etkisi ihmal edilebilir olduğunda ve arayüzey durum yoğunluğunun oldukça düşük olduğu durumlarda kullanılabileceği de daha önce vurgulanmıştı. Ancak, çoğu III-V bileşik yarıiletkende, arayüzey durum yoğunluğu genellikle çok yüksektir ve engel yüksekliği ifadesine arayüzey durum yoğunluğu etkisinin dahil edilmesi gerekir. Yani engel yüksekliği deneysel olarak belirlenmelidir.

Schottky engel diyotlarının engel yüksekliğini belirlemede yaygın olarak kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V) ve foto-emisyon (I-E) yöntemleridir. Akım-gerilim yöntemiyle bir diyotun engel yüksekliği hesaplanırken aşağıda verilen akım-gerilim ilişkisinden yararlanılır (Rhoderic 1988 ve Sze 1981);

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

Denklem (2.22) dikkate alınarak Schottky engel diyotu için $\ln(I)$ 'nin uygulanan gerilim V 'ye karşı grafiği çizilerek önce diyotun doyma akımı I_s belirlenir. Sonra deneysel olarak belirlenen I_s değeri denklem (2.16)'dan elde edilen

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right) \quad (2.23)$$

bağıntısında yerine yazılarak engel yüksekliği değeri hesaplanır.

Schottky diyotunun engel yüksekliğini belirlemenin bir başka yöntemi de kapasitans-gerilim ölçümlerini kullanmaktır. Düzgün olarak katkılanmış bir yarıiletken üretilen Schottky diyotun birim alan başına kapasitansı

$$C = \left[\frac{q\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Neamen 2012, Rhoderick and Williams 1988 ve Sze 1981). Bu denklem aynı zamanda

$$\left(\frac{1}{C} \right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{q\epsilon_s N_d} \quad (2.25)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Denklem (2.25)'e göre, C^{-2} - V_R grafiği doğrusal olarak değişmelidir ve bu doğrunun gerilim eksenini kestiği nokta built-in potansiyeli V_{bi} 'yi ve eğimi donör atomlarının konsantrasyonu N_d 'yi vermelidir. Schottky diyotun enerji bant diyagramı dikkate alındığında, Schottky engel yüksekliği

$$\phi_B = V_{bi} + \phi_n \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Neamen 2012). Bu bağıntıda ϕ_n , iletkenlik bandının tabanı ile Fermi seviyesi arasındaki potansiyeldir ve değeri deneysel olarak C^{-2} - V_R grafiğinin eğiminden belirlenen N_d değeri kullanılarak

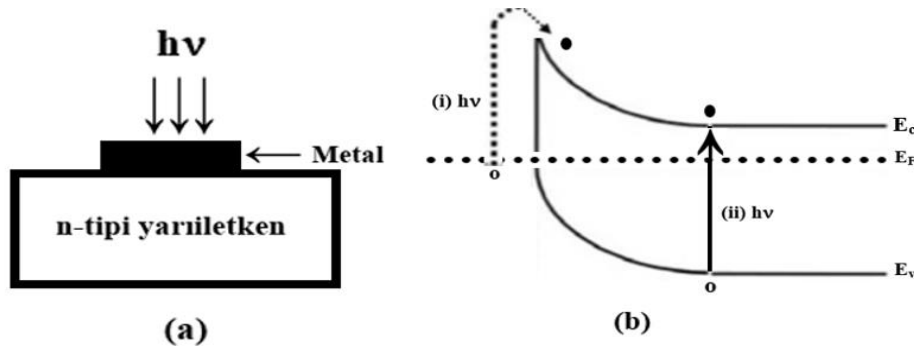
$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (2.27)$$

bağıntısından hesaplanabilir (Sze 1981). Burada N_c iletkenlik bandındaki hallerin yoğunluğudur. Dolayısıyla kapasite-gerilim yönteminde, deneysel olarak belirlenen V_{bi} ve ϕ_n değerleri denklem (2.26)'da kullanılarak Schottky diyotun gerçek engel yüksekliği değeri belirlenebilir.

Bir Schottky diyotunun engel yüksekliği, Şekil 16'da gösterildiği gibi, temel soğurma kenarına yakın gelen fotonların dalga boyuna karşılık fotoakım ölçülerek de belirlenebilir. Yarıiletkenin engel yüksekliği ile bant aralığı enerjisi arasındaki enerjilere sahip fotonlar (yani $q\Phi_B < h\nu < E_g$) Schottky kontağına çarptığında, elektronlar metalden uyarılırlar ve yarıiletkenine enjekte olurlar. Bu durum Şekil 16 (b)'de (i) numaralı işlemle gösterilmiştir. Eğer gelen fotonların enerjisi yarıiletkenin bant aralığı enerjisinden büyükse (yani $h\nu > E_g$ ise), o zaman doğrudan banttan banda uyarım meydana gelir ve yarıiletkende elektron-delik çiftleri oluşur. Bu durum da, Şekil 16 (b)'deki (ii) numaralı işlemle gösterilmiştir. (ii) numaralı süreç baskın hale geldiğinde, soğurma kenarına yakın foto tepkide keskin bir artış gözlemlenir ve asal (intrinsic) fotoiletim baskın süreç haline gelir. Fotoemiyon yönteminde, gelen fotonların enerjileri, yarıiletkenin engel yüksekliği ile bant aralığı enerjisi arasında sınırlandırılır. Fowler'ın teorisine göre, metaldeki fotojenerasyonlu elektronlar tarafından üretilen bir Schottky engel diyotunun fotoakımı [yani, işlem (i)] aşağıdaki gibi verilir (Li 2006):

$$I_{ph} = C(h\nu - q\Phi_B)^2 \quad (2.28)$$

Bu bağıntı $(h\nu - q\Phi_B) \geq 3kT$ ve $q\Phi_B < h\nu < E_g$ aralığında geçerlidir. Denklem (2.28)'den, fotoakımın foton enerjisinin karesiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, fotoakımın karekökünün foton enerjisine göre grafiği doğrusal olarak değişir ve bu doğrunun yatay eksenin kesim noktasına ekstrapolasyonu engel yüksekliği Φ_B 'yi verir.



Şekil 16. (a) Schottky fotodiyotun üst yüzeyinden gelen aydınlatma, (b) Elektronların foto uyarılması: (i) $q\Phi_B < h\nu < E_g$ aralığında metalden yarıiletkene, (ii) $h\nu > E_g$ durumunda yarıiletkenin içinde.

2.5 Schottky Diyotlarda Seri Direnç

Seri direnci göz önüne alınmadan bir Schottky engel diyotun akım-gerilim karakteristiği yukarıdaki kesimlerde tartışılmıştı. Seri dirençli bir Schottky engel diyotunun termiyonik emisyon akım-gerilim ifadesi (Sze 1981);

$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.29)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi burada I_s değeri (2.16) bağıntısıyla verilen doyma akımıdır. Denklem (2.29) bazen aşağıdaki gibi de ifade edilebilir;

$$I = I_s \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \left(1 - \exp \left(\frac{-qV}{kT} \right) \right) \quad (2.30)$$

Bu denklem $IR_s \ll V$ durumunda geçerlidir. Denklem (2.29)'a göre çizilen veriler yalnızca $V > kT/q$ için doğrusaldır. (2.30) denklemi kullanılarak V 'ye karşı $\log[I/(1 - \exp(-qV/kT))]$ grafiği çizildiğinde, veriler $V = 0$ 'a doğrusaldır.

Diyot seri direncini hesaplamak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan biri de Norde yöntemi. Norde tarafından geliştirilen fonksiyon

$$F = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.31)$$

şeklindedir (Norde 1979). (2.29), (2.30) ve (2.31) denklemleri birleştirildiğinde

$$F = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) V + \frac{IR_s}{n} + \Phi_B \quad (2.32)$$

denklemini elde edilir.

Bu oldukça tuhaf tanımlanmış F fonksiyonu neden kullanılmaktadır? F 'nin V 'ye karşı grafiği çizildiğinde, F fonksiyonu, R_s ve Φ_B 'yi belirlemek için kullanılan bir minimum değere sahip olur. F 'nin V 'ye bağımlılığını görmek için düşük ve yüksek voltaj sınırlarını dikkate alalım. Düşük uygulanan voltajlarda, $IR_s \ll V$ olduğunda, (2.32) denklemi $n \approx 1$ için $dF/dV = 1/2 - 1/n \approx -1/2$ değerini verir. Yüksek voltajlarda, $IR_s \gg V$ olduğunda, $dF/dV = 1/2$ olur.

Dolayısıyla F'nin minimumu bu iki sınır arasında yer alır. Minimumdaki voltaj V_{min} 'dir ve karşılık gelen akım I_{min} 'dir. Minimumda $dF/dV = 0$ 'dan, seri direnç

$$R_s = \frac{2 - n kT}{I_{min} q} \quad (2.33)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (2.33) Denklem (2.32) ile birleştirildiğinde minimum F değeri

$$F = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) V_{min} + \frac{2 - n kT}{n q} + \Phi_B \quad (2.34)$$

şeklinde elde edilir. Böylece denklem (2.33)'e göre Schottky diyotun seri direnci, idealite faktörü n ve I_{min} değerleri kullanılarak hesaplanabilir. İdealite faktörü, $\log(I)$ - V grafiğinin eğiminden, I_{min} ise, $V = V_{min}$ 'deki akımdan belirlenir (Schroder 2006).

Schottky diyotunun seri direncini değerlendirmek için kullanılabilecek etkili yöntemlerden biri de Cheung-Cheung modeli olarak da bilinen Cheung modelidir (Cheung and Cheung 1986). Cheung modeli denklem (2.29)'dan aşağıdaki şekilde oluşturulabilir:

$$\ln(I) - \ln(I_o) = \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \quad (2.35)$$

$$\frac{nkT}{q} \left(\ln(I) - \ln(I_o) + \frac{qIR_s}{nkT} \right) = V \quad (2.36)$$

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.37)$$

Denklem (2.37), idealite faktörü ve seri direnç değerlerini elde etmek için kullanılan ilk Cheung fonksiyonudur. Denklem (2.22)'den

$$\ln(I) = \ln(AA^*T^2) - \frac{q\Phi_B}{kT} + \frac{qV}{nkT} - \frac{qIR_s}{nkT} \quad (2.38)$$

$$V = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_B + IR_s \quad (2.39)$$

veya

$$V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_B + IR_s \quad (2.40)$$

denklemleri yazılabilir. Denklem (2.40)'tan $H(I)$ fonksiyonunu

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.41)$$

veya

$$H(I) = n\Phi_B + IR_s \quad (2.42)$$

şeklinde oluşturulabilir. Denklem (2.42), bir Schottky diyotun seri direncini ve engel yüksekliğini belirlemek için kullanılabilecek Cheung fonksiyonunun ikincisidir. Denklem (2.37)'ye göre $dV/d\ln(I)$ - I grafiği lineerdir ve grafiğin eğiminden seri direnç değeri, grafiğin düşey eksenini kestiği noktadan da idealite faktörü değeri belirlenebilir. Benzer şekilde denklem (2.42)'ye göre $H(I)$ - I grafiği yine lineerdir ve grafiğin eğiminden seri direnç değeri, grafiğin düşey eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği değeri belirlenebilir (Cheung and Cheung 1986).

2.6 Eklem Fotodiyotlar

Her bir eklem diyotun optik algılama için kullanılabilen bir fototepkisi vardır. Eklem fotodiyotları fotonik endüstrisinde en sık kullanılan fotodedektörlerdir. Bunlar, yarıiletken homoelekmler, yarıiletken heteroelekmler ve metal-yarıiletken eklemeler de dahil olmak üzere birçok farklı form alabilirler. Bir fotoiletkenin fototepkisine benzer şekilde, bir fotodiyotun fototepkisi de elektron-delik çiftlerinin fotoüretiminden kaynaklanmaktadır. Hem intrinsik hem de ekstrinsik tipte olabilen fotoiletkenlerin aksine, bir fotodiyot genellikle elektron-delik çiftlerinin banttan banta optik soğrulma yoluyla üretildiği intrinsik tiptedir. Bu nedenle, bir yarıiletken fotodiyotun eşik foton enerjisi (threshold photon energy, E_{th}), aktif bölgesinin bant aralığı enerjisidir:

$$E_{th} = E_g \quad (2.43)$$

Eklem fotodiyotları ultraviyole'den kızılötesine kadar geniş bir spektral aralığı kapsar. Tüm eklem fotodiyotlar bazı temel prensip ve özellikleri paylaşırlar. Bu nedenle, genel prensipler ve karakteristikler hakkında genel bir tartışma için öncelikle basit bir p-n homoelem fotodiyotu ele alınmalıdır. Yarıiletken bir fotodiyotta, optik soğrulma yoluyla elektron-delik çiftlerinin oluşumu, tükenim tabakası, difüzyon bölgeleri ve homojen bölgelerden herhangi birinde

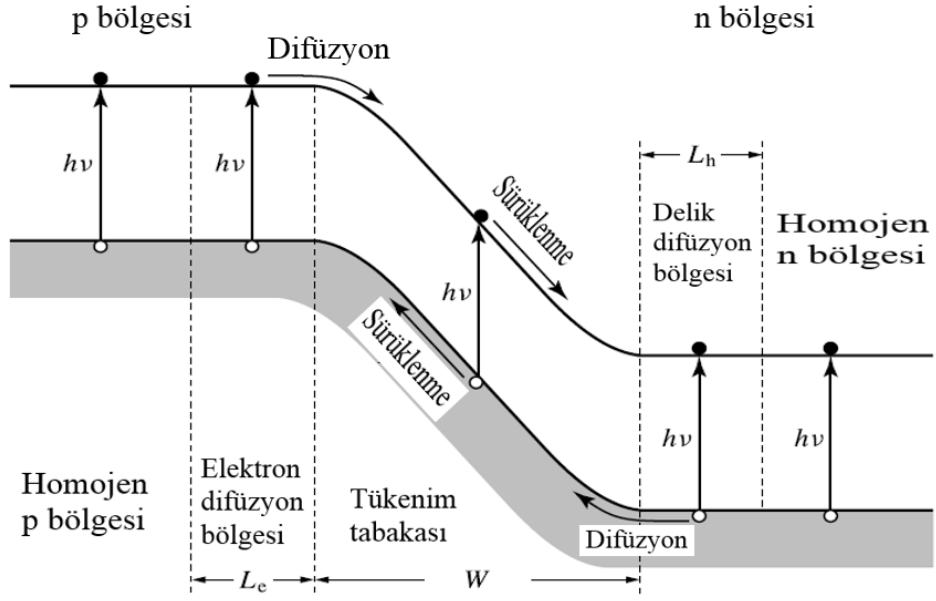
gerçekleşebilir. Bir diyotun tükenim tabakasında, hareketsiz uzay yükleri, n tarafından p tarafına doğru bir polariteye sahip bir iç elektrik alanı oluşturur ve bunun sonucunda Şekil 17'de gösterilen bir elektron enerji bandı gradyanı oluşur. Şekil 17'den de görüldüğü gibi, tükenim tabakasında fotouyarılma ile bir elektron-delik çifti oluşturulduğunda, iç alan elektronu n tarafına, deliği ise p tarafına doğru süpürür. Bu işlem, n tarafındaki katottan p tarafındaki anoda doğru ters yönde akan bir sürüklenme akımına neden olur. Tükenim tabakasının kenarlarındaki difüzyon bölgelerinden birinde fotouyarılmış bir elektron-delik çifti üretilirse, p -tarafı difüzyon bölgesindeki elektron veya n -tarafı difüzyon bölgesindeki delik olan azınlık taşıyıcıları difüzyon yoluyla tükenim tabakasına ulaşabilirler ve daha sonra iç alan tarafından diğer tarafa süpürülebilirler. Bu işlem de Şekil 17'de gösterilmiştir. Bu işlem ters yönde de akan bir difüzyon akımının oluşmasına neden olur. p veya n homojen bölgesinde bir fotonun soğrulmasıyla oluşan bir elektron-delik çifti için, yükleri ayıracak bir iç alan olmadığından akım oluşmaz ve homojen bölgede oluşan bir azınlık taşıyıcısı, çoğunluk taşıyıcısıyla yeniden birleşmeden önce tükenim tabakasına yayılamaz. Homojen bölgelerde soğrulan fotonlar herhangi bir fotoakım üretmediğinden, fotodiyotun aktif bölgesi sadece tükenim tabakası ve difüzyon bölgelerinden oluşur. Yüksek performanslı bir fotodiyot için difüzyon akımı istenmeyen bir durumdur ve en aza indirilmelidir. Dolayısıyla aktif bölge esas olarak sürüklenme fotoakımının olduğu tükenim tabakasından oluşmaktadır. Bir fotodiyotun dış kuantum verimliliği, aktif bölgede soğrulan toplam gelen fotonların gerçekte fotoakıma katkıda bulunan kısmıdır. Kuantum verimliliğini artırmak için yüzey yansıtıcılığı, yansıma önleyici kaplama ile azaltılabilir. Ayrıca optik sinyalin girdiği homojen bölgenin, bu bölgedeki optik sinyalin soğurulmasının azaltılması için inceltmesi gerekmektedir. Fotonların aydınlatıldığı yüzey p tarafında olan bir p - n fotodiyot için, p bölgesi çok ince ve yoğun şekilde katkılanmış olmalıdır; böylece tükenim tabakası çoğunlukla kalın ve hafif katkılanmış n bölgesine kadar uzanır. Sonuç olarak, bir fotodiyotun kuantum verimliliği soğurma katsayısı ve tükenim tabakası kalınlığı tarafından belirlenir. Açıkça, bir eklem fotodiyodundaki fotoakıma, tükenim tabakasındaki fotojenerasyondan kaynaklanan sürüklenme akımı ve difüzyon bölgelerindeki fotojenerasyondan kaynaklanan difüzyon akımı olmak üzere iki katkı vardır. Diyotun iki ucundaki homojen bölgeler, taşıyıcılar bu bölgelerden ne sürüklenip ne de yayılmadıkları için, fotojenerasyon taşıyıcıları için blokaj tabakaları gibi davranırlar. Sonuç olarak, bir eklem fotodiyotu, iki blokaj kontağı olan bir fotoiletken gibi davranır. Fotoakım, sadece optik sinyalin gücüne bağlı olan ters beslem akımıdır. Fotodiyota bir beslem voltajı uygulandığında, fotodiyotun toplam akımı, diyot akımı ile fotoakımın birleşimidir (Liu 2005).

Şekil 18, çeşitli optik aydınlatma güç seviyelerinde bir eklem fotodiyotunun akım-gerilim karakteristiklerini göstermektedir. $P_s=0$ için karanlık karakteristikler, aydınlatılmamış bir

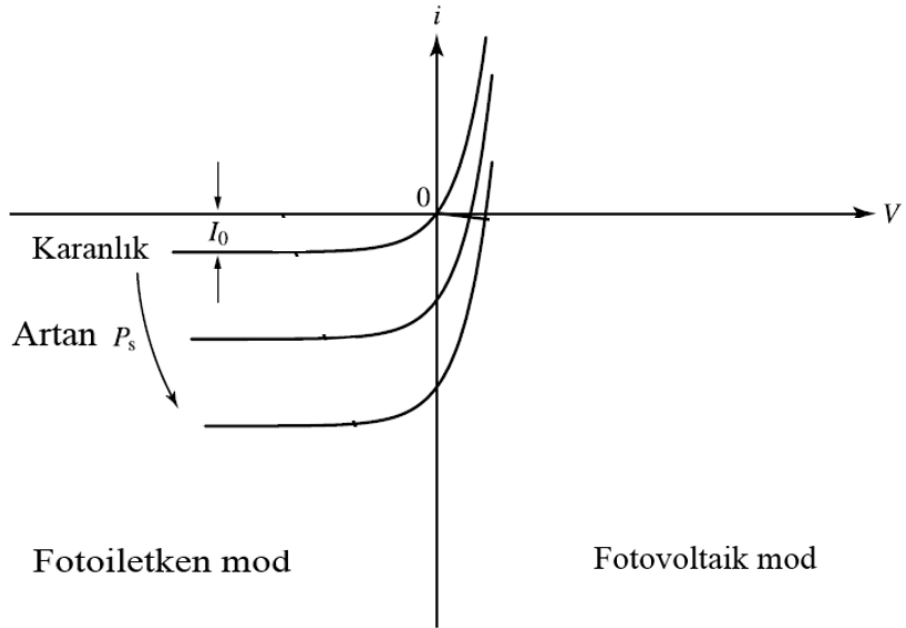
diyotun karakteristikleriyle aynıdır. Aydınlatılmış bir fotodiyotun akım-gerilim karakteristikleri, optik güçle doğrusal orantılı olan fakat beslem voltajından bağımsız olan fotoakım miktarı kadar karanlık karakteristiklerinden aşağı doğru kayar. Şekil 18'de gösterildiği gibi, bir eklem fotodiyotunun iki çalışma modu vardır. Devre elemanı fonksiyonları, $V = 0$ için dikey eksendeki kısa devre koşulu dahil olmak üzere akım-gerilim karakteristiklerinin üçüncü kadranında fotoiletken modda görülür. Dördüncü kadranda, $i = 0$ için yatay eksendeki açık devre koşulu da dahil olmak üzere fotodiyotun fonksiyonları fotovoltajik modda görülür. Çalışma modu dış devreler ve beslem durumu tarafından belirlenir (Liu 2005).

Ters beslem altında fotoiletken modda çalışan bir fotodiyot için, fotoakımın optik sinyale tepki süresi iki faktör tarafından belirlenir: (1) tükenim tabakasında fotojenerasyonla oluşan elektronların ve deliklerin sürüklenmesi ve (2) difüzyon bölgelerinde fotojenerasyonla oluşan elektronların ve deliklerin difüzyonu. Taşıyıcıların tükenim tabakası boyunca sürüklenmesi, fotojenerasyonla oluşan elektronların ve deliklerin tükenim tabakası boyunca geçiş süreleriyle karakterize edilen hızlı bir süreçtir. Buna karşılık, taşıyıcıların difüzyonu, yüksek alan tükenim bölgesinin dışındaki difüzyon bölgelerindeki optik soğrulmadan kaynaklanan yavaş bir işlemdir. Taşıyıcıların ömrü kadar sürebilen bir difüzyon akımı meydana gelir. Yüksek hızlı bir fotodiyot için, aygıt yapısının tasarımı yoluyla tükenim tabakasının dışındaki taşıyıcıların fotoüretimini azaltarak bu difüzyon mekanizmasının ortadan kaldırılması gerekir. Difüzyon mekanizması ortadan kaldırıldığında fotoakımın frekans tepkisi sadece elektron ve boşlukların geçiş süreleriyle sınırlı kalır (Liu 2005).

Genel olarak, taşıyıcı geçiş süresi tarafından belirlenen frekans tepki fonksiyonu, tükenim tabakasındaki elektrik alan dağılımının ve fotojenerasyonlu taşıyıcı dağılımının ayrıntılarına bağlıdır. Yarıiletkenlerde elektronlar genellikle deliklerden daha yüksek bir mobiliteye, dolayısıyla daha kısa bir geçiş süresine sahiptirler. Bir fotodiyotun tepki hızının detaylı analizinde bu farkın göz önünde bulundurulması gerekir. Yüksek hızlı fotodiyotlar, yüksek hızlı veya geniş bantlı fotoalgılama gerektiren uygulamalarda en yaygın kullanılan fotodedektörlerdir. Bir fotodiyotun hızı fotoakımın tepki süresi ve zaman sabiti gibi iki faktör tarafından belirlenir.



Şekil 17. Bir p-n fotodiyotun fotouyarılması ve enerji bandı gradyanı.



Şekil 18. Çeşitli optik aydınlatma güç seviyelerinde bir eklem fotodiyotunun akım-gerilim karakteristikleri.

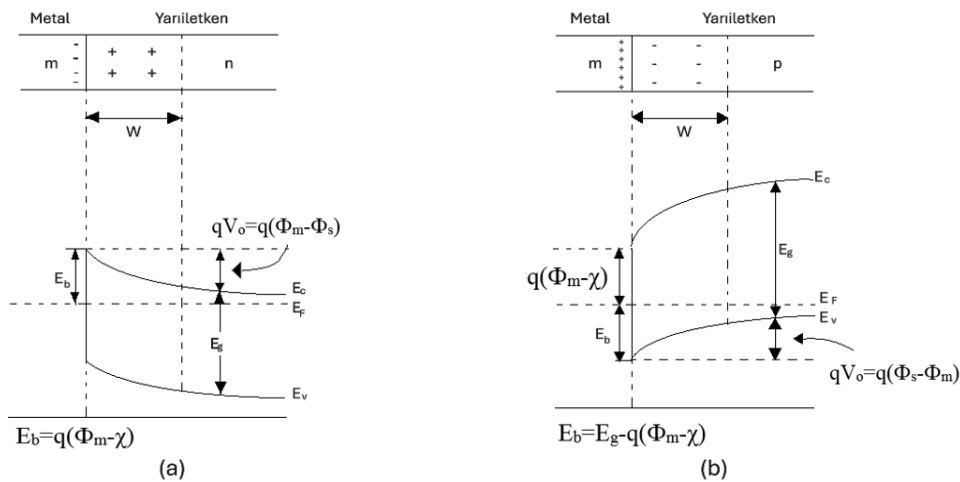
2.7. Schottky Fotodiyotlar

Bir metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyin özelliği, metalin ve yarıiletkenin $q\Phi_m$ ve $q\Phi_s$ olmak üzere sırasıyla iş fonksiyonlarına ve yarıiletken tipine bağlıdır. Metal-yarıiletken eklemi, n tipi yarıiletkenlerde $\Phi_s > \Phi_m$, p tipi yarıiletkenlerde ise $\Phi_s < \Phi_m$ ise potansiyel engeli olmayan bir omik kontaklıdır. Şekil 19 (a)'da gösterildiği gibi, n tipi yarıiletken durumunda $\Phi_s < \Phi_m$ ise, elektronların metalden yarıiletkene akması için metal-yarıiletken eklemünde $\Phi_B = q(\Phi_m - \chi_s)$ yüksekliğinde bir Schottky engeli bulunur. Şekil 19 (b)'de gösterildiği gibi, p tipi bir yarıiletken durumunda $\Phi_s > \Phi_m$ ise, deliklerin metalden yarıiletkene akması için metal-yarıiletken eklemünde $\Phi_B = E_g - q(\Phi_m - \chi_s)$ yüksekliğinde bir Schottky engeli bulunur.

Schottky eklemının genel özellikleri p-n eklemınıninkilere benzerdir. Şekil 19 (a)'da gösterildiği gibi, metal ile n tipi yarıiletken arasında oluşan Schottky eklemının özellikleri, $V_{bi} = \Phi_m - \Phi_s$ built in potansiyeline sahip bir p^+ -n eklemının özelliklerine benzer olarak hesaplanabilir. Benzer şekilde, Şekil 19 (b)'de gösterildiği gibi, bir metal ile p tipi yarıiletken arasındaki Schottky eklemi, $V_{bi} = \Phi_s - \Phi_m$ built in potansiyeline sahip olan bir n^+ -p eklemi olarak düşünülebilir. Bu nedenle, bir Schottky eklemının tükenim tabakası genişliği ve bu tabakanın beslem voltajına bağılılığı,

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) (V_{bi} - V) \right]^{1/2} \quad (2.44)$$

bağıntısı kullanılarak ve n tipi yarıiletken durumunda $N_d \gg N_a$ veya p tipi yarıiletken durumunda $N_a \gg N_d$ alınarak bulunabilir (Liu 2005).



Şekil 19. (a) $\Phi_s < \Phi_m$ olan bir metal ve n-tipi bir yarıiletkenin arayüzeyindeki (b) $\Phi_s > \Phi_m$ olan bir metal ve p-tipi yarıiletkenin arayüzeyindeki Schottky eklemeleri.

Bir Schottky diyotunun, bir metal ile yoğun katkılanmış n^+ yarıiletken bölgesi arasına hafifçe katkılanmış n-tipi yarıiletken bir tabaka yerleştirilerek p-i-n diyot gibi işlev görmesi de mümkündür. Böyle bir yapıda metal p^+ homojen bölge olarak işlev görürken, n- tabakası p-i-n diyotta asal bölge olarak işlev görür. Neredeyse tamamen n-bölgesinde bulunan tükenim tabakası, ters beslem voltajı arttıkça genişler ve delme voltajı (*punchthrough voltage*) olarak bilinen bir voltajda metale ulaşır. Ters beslem gerilimi delme geriliminden daha büyük olduğunda, böyle bir Schottky diyotun tükenim tabakası genişliği gerilimden bağımsız hale gelir ve basitçe n-tabakasının kalınlığı ile tanımlanır (Liu 2005).

Schottky fotodiyotunun karakteristikleri ve eşdeğer devresi yarıiletken eklem fotodiyotunun karakteristiklerine ve eşdeğer devresine benzerdir. Schottky fotodiyotları fotoiletken veya fotovoltaiik modda çalışabilirler, ancak yukarıda diğer eklem fotodiyotları için tartışılan nedenlerle, uygulamalarının çoğunda genellikle fotoiletken modda çalışırlar. Fotoiletken modda çalışan bir Schottky fotodiyot, özellikle n-tipi yarıiletken kullanıldığında çok yüksek bir hıza sahip olabilir. Optik sinyal, eklem arayüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğrulduğu için, yalnızca çoğunluk taşıyıcıları (n-tipi yarıiletkende elektronlar) aktif bölge boyunca sürüklenmek zorundadır. İyi tasarlanmış bir Schottky fotodiyot, 100 GHz kadar yüksek bir asal frekans bant genişliğine ulaşabilir (Liu 2005).

Schottky fotodiyotunun spektral tepkisi, optik sinyalin yarıiletken tarafından mı yoksa metal tarafından mı soğrulduğuna bağlıdır. Optik sinyal yarıiletken tarafından soğurulursa, Schottky fotodiyotunun spektral karakteristiği, soğurucu yarıiletkenin bant aralığı tarafından tanımlanan bir eşik foton enerjisine sahip yarıiletken eklem fotodiyotununkiyle aynıdır: $h\nu > E_{th} = E_g$. Bu işlem, Schottky fotodiyotunun, optik sinyalin tükenim tabakasına ulaşmadan önce çok az zayıflamayla girmesine izin veren ince, yarı saydam bir metalik tabakaya sahip olmasıyla gerçekleşir. Bu, yüksek verimli, yüksek hızlı bir Schottky fotodiyotunun normal çalışma modudur. Bir fotonun metal tarafından eklem arayüzeyinde soğrulması, fotonun Schottky engeli üzerinden bir elektronu uyarmaya yetecek kadar enerjisi varsa bir fototepki de üretebilir. Schottky fotodiyotunun bu modda çalışabilmesi için metalik tabakanın kalın ve soğurucu olması gerekir, ancak soğurma eklem arayüzeyinde gerçekleşmelidir. Bu çalışma modunda spektral tepki aralığı, yarıiletken soğurmadan optik sinyalin yarıiletken tarafından girebilmesi için $\Phi_B < h\nu < E_g$ 'dir. Bu modda çalışan bir Schottky fotodiyot kızılötesi dedektör olarak kullanışlıdır, ancak metal ışığı verimli bir şekilde soğurmadığı için verimliliği düşüktür (Liu 2005).

2.8. Kuantum Noktalar (Dotlar)

Alternatif olarak karbon kuantum noktaları (CQD'ler) olarak da adlandırılan karbon noktaları (CD'ler), tipik olarak 10 nm'nin altında ölçülen sıfır boyutlu (0D) floresan karbon nanomalzemelerinin ortaya çıkan bir sınıfını temsil etmektedirler (Wang and Hu 2014, Cui et al. 2021 ve El-Shafey 2021). Birçok farklı yarıiletken türünden ve birçok geometrik şekilde (örneğin küpler, küreler ve piramitler) üretilebilirler ve genellikle daha büyük bant aralığına sahip yarıiletken malzemelere, camlara ve polimerlere gömülebilirler. 2004 yılında, Xu ve ekibi, tek duvarlı karbon nanotüpleri (single-walled carbon nanotubes) saflaştırırken bu CQD nanoparçacıklarının hazırlanmasına tesadüfen öncülük etmişlerdir (Xu et al. 2004). Daha sonra, Sun ve ekibi, 2006 yılında, grafit tozu ve çimento karışımından oluşan bir karbon hedefini lazer ablasyonuna tabi tutarak CQD'lerin optik özelliklerini geliştirmişlerdir (Sun et al. 2006). "Karbon kuantum noktaları" terimi Sun ve ekibi tarafından ortaya atılmıştır. O zamandan beri, CQD'ler farklı yapıları ve çeşitli alanlardaki büyüleyici özellikleri nedeniyle yaygın bir şekilde ilgi görmektedir. CQD nanoparçacıkları, yüksek kuantum verimi, biyobazlı orijinli basit ve uygun maliyetli üretim, ayarlanabilir uyarma ve emisyon özellikleri, yüksek termal ve optik kararlılık, kolay kimyasal fonksiyonelleştirme ve iyi biyouyumlulukla birlikte önemsiz sitotoksisite gibi olağanüstü fotolüminesans ve optik özellikler sergilemektedirler. Sonuç olarak, floresan CQD'ler enerji dönüşümü ve depolama, fotokataliz, elektrokataliz ve biyolojik uygulamalar gibi çok çeşitli alanlarda önem kazanmaktadır. CQD'lerin elektrokimyasal algılama, biyosensör, biyolojik görüntüleme, ilaç/gen iletimi, enerji dönüşümü ve depolaması ve korozyon önleme uygulamaları gibi çeşitli araştırma çalışmalarındaki uygulamalarına büyük önem verilmektedir (Elugoke 2024).

CQD'ler, yapıları kullanılan özel sentez yöntemlerine bağlı olan küçük boyutları (< 10 nm) ile karakterize edilen özel bir fotolüminesans nanoparçacık sınıfına aittirler (Demchenko and Dekaliuk 2013). Bunlar düşük molekül ağırlığına, yarı küresel bir şekle sahiptirler ve kuantum sınırlama etkisi gösterirler. Kuantum noktalarının boyutları ve dolayısıyla içerdikleri atom sayısı geniş bir aralıkta değişebilir. Elektron sayısı birkaç tane kadar küçük veya milyonlarca kadar büyük olabilir; 10 nm'lik bir GaAs küpü yaklaşık 40.000 atom içerir. Tüm elektronlar bir bütün olarak noktaya aittir; enerji seviyeleri onun eksitonlarının, yani noktanın içinde üretilen ve onunla sınırlanmış elektron-delik çiftlerinin enerji seviyeleridir. Atomlarda olduğu gibi, sıkı elektron sınırlamasından bir dizi keskin enerji seviyesi ortaya çıkar; aslında, kuantum noktalarına sıklıkla yapay atomlar da denir. Ancak atomlardan farklı olarak, belirli bir malzemeden üretilen bir kuantum noktasının enerji seviyelerinin onların büyüklüklerine güçlü bir şekilde bağlı olması gibi sıra dışı özellikleri vardır.

CQD'ler genellikle yüzeylerinde $-OH$, $-NH_2$, $-COOH$ vb. gibi çeşitli fonksiyonel kısımlara sahiptirler. Bu fonksiyonel kısımlar, onların olağanüstü suda çözünürlüklerinden ve biyouyumluluklarından sorumludur. CQD'lerin yüzeyi, özellikle oksijen ve amino bazlı gruplar olmak üzere fonksiyonel gruplardan oluşan bir ağ yapısı sergilemektedir. CQD'lerin yüzeyindeki çok sayıda fonksiyonel kısım, onları çeşitli kimyasal modifikasyonlar için uygun hale getirmektedir. Ayrıca, CQD'ler dikkate değer polimerizasyon yetenekleri göstererek çeşitli biyolojik olarak aktif, inorganik ve organik malzemelerle etkileşimleri kolaylaştırırlar. CQD'ler, fiziksel ve floresan özelliklerini artırabilen bir işlem olan yüzey pasifleştirmeye uygundurlar. Atom katkılanması yardımıyla, CQD'lerin yüzey durumları optik özelliklerini değiştirmek için hassas bir şekilde ayarlanabilir. CQD'lerin kimyasal yapısı, onların lüminesans özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, ultraviyole görünür (UV-vis) spektroskopisi, X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) gibi çeşitli analitik teknikler, CQD'leri karakterize etmek için başarıyla kullanılmaktadır (Huang 2019). Bu ayırt edici özellikler, CQD'lere diğer karbon bazlı nanomalzemelere kıyasla rekabet avantajı sağlamaktadır. CD'lerin araştırma alanında, karbon kuantum noktaları (CQD'ler), karbon nanonoktaları (CND'ler), polimer noktaları (PD'ler), karbonize polimer noktaları (CPD'ler) ve grafen kuantum noktaları (GQD'ler) olmak üzere beş sınıf CD'nin araştırılmasına önemli bir vurgu yapılmaktadır.

CQD'ler için çok sayıda üretim yöntemi geliştirilmiştir ve bunlar temel olarak yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Yukarıdan aşağıya teknikler, büyük karbon öncül malzemelerin parçalanmasını içermektedir ve bu da CD nanoparçacıklarının üretilmesine yol açmaktadır. Bu yöntemler arasında ark deşarjı, lazer ablasyonu, ultrasonik işlem vb. yer almaktadır. Buna karşılık, aşağıdan yukarıya yöntemi, solvotermal/hidrotermal, piroliz, mikrodalga, elektrokimyasal vb. gibi farklı teknikler kullanılarak polimerize edilen ve karbonize edilen küçük boyutlu malzemelerle başlamaktadır. Floresan CQD'lerin tasarımı moleküler durum, yüzey durumu ve kuantum sınırlama etkileri gibi üç temel faktöre dayanmaktadır. Bu kısıtlamalar, farklı öncüller veya hazırlama yöntemleri seçilerek hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir ve bu da karbonil, hidroksil, eter ve epoksi gibi çeşitli fonksiyonel gruplara sahip CQD'lerin özelleştirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, CQD'ler sentez süreci sırasında amin ve kükürt, azot ve bor gibi heteroatomlarla kolayca fonksiyonelleştirilebilirler ve onların floresansları, farklı öncüller ve sentez yöntemleri aracılığıyla CQD'lerin yüzeyindeki fonksiyonel grupların boyutu ve sayısı değiştirilerek ayarlanabilir (Elugoke 2024).

CQD'lerin optik özellikleri, ultraviyole-görünür ışık soğurulması (UV-vis) ve fotoluminesans (PL) çalışmalarından elde edilebilir. CQD'lerin UV soğurma spektrumunun, yüzey fonksiyonel grupları/modifikasyonu, sentez yöntemi, ham öncü, kimyasal ortam (pH ve çözücü) ve CQD yüzeylerindeki N ve S gibi hetero atomların katkılanmasından etkilenebileceği not edilmelidir. 350 nm'nin ötesindeki veya 350-600 nm arasındaki soğurma bantları, CQD'lerin yüzeyindeki fonksiyonel kısımların elektronik geçişine atfedilmektedir. $-NH_2$, $-C=O$, $-OH$ ve $-COOH$ gibi çeşitli fonksiyonel grupların CQD'lerin yüzeyine dahil edilmesi, CQD yüzeyindeki kusurları ortadan kaldırdığı ve foto geri dönüşümlülük, kararlılık, npn-toksitesitesi, biyouyumluluk ve katalitik özellik gibi özelliklerini artıran enerji tuzakları görevi gördüğü için önemlidir [Anwar et al. 2019 ve Jhonsi 2018].

PL özellik, sensörler, kataliz, güneş hücreleri, biyolojik görüntüleme, ışık yayan aygıtlar, fototerapi, süper kapasitörler ve fotokataliz gibi geniş uygulama alanlarına sahip CQD'lerin en ilgi çekici özelliklerinden biri olarak öne çıkmaktadır. PL, bant aralığı, boyut, pH, kimyasal çözücü/çevre, başlangıç malzemesi ve yüzey fonksiyonelleştirme veya pasifleştirme gibi PL mekanizmalarından etkilenebilecek yüzey durumlarına bağlı olarak CQD'lerin optik özelliklerine ilişkin derinlemesine bilgi sağlamaktadır. PL, uyarılmış bir elektronun temel durumuna geri dönmesiyle meydana gelir ve bir boşlukla rekombinasyona yol açar, buda UV'den yakın kızılötesi bölgeye kadar uzanan dar ve simetrik bir enerji bandı ile karakterize edilen elektromanyetik enerji yayılmasına sebep olur. PL emisyonu genellikle uyarım dalga boyundan daha uzun/daha büyük bir emisyon dalga boyunda mevcuttur (Elugoke 2024).

CQD'lerin elektriksel özellikleri sıklıkla ayırık enerji durumlarındaki elektronların ve deliklerin (hareketli pozitif yük) varlığına bağlanır. Yeterli enerji sağlandığında, bu elektronlar en yüksek işgal edilmiş moleküler orbitalden (değerlik bandı) en düşük işgal edilmemiş moleküler orbitale (iletkenlik bandı) doğru uyarılır ve sonuç olarak değerlik bandında delikler kalır. Uyarılma üzerine, elektronlar ve delikler enerjilerini serbest bırakırlar ve sırasıyla iletkenlik bandının alt kısmına ve değerlik bandının üst kısmına yakın enerji seviyelerine geçiş yaparlar. Elektronlar inişleri sırasında bant aralığını aştıkça deliklerle yeniden birleşerek enerji yayarlar. Bu enerji, uyarılmış elektronların ve hareketli pozitif yüklerin toplam hapsedilme enerjilerine, bant aralığı enerjisine ve elektron-delik çiftinin (eksiton) bağlı enerjisine atfedilebilir (Pisanic et al. 2014). CQD'lerin elektriksel davranışı, elektronlar veya delikler ile çevreleyen malzemeler arasındaki etkileşimin derecesinden etkilenir. CQD yüzeyinde veya çevreleyen ortamda ek deliklerin veya elektronların (yüklerin) varlığı, radyasyon dışı enerjinin üçüncü bir yüke aktarılması nedeniyle PL yoğunluklarının sönmesine yol açabilir (Auger rekombinasyonu) (Klimov 2000).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Bakır Nano Parçacık Katkılı Dut Karbon Kuantum Noktaların Sentezi

Erzurum şehir merkezinde bulunan yerel bir pazardan satın alınan beyaz dutlar (White mulberries: WM) öncelikle ince toz haline getirildi. Sonra 25 g toz halindeki WM numunesi 300 mL saf suya ilave edilerek 500 rpm'de 4 saat süreyle reflü edildi. Daha sonra karışım oda sıcaklığında bir gece karıştırıldı. Ardından karışım, Whatman 1 numaralı filtre kağıdından süzülde ve 10.000 x g'de 30 dakika santrifüj edildi. Elde edilen ekstrakt, Beyaz Dut Karbon Kuantum Noktaların (White Mulberries Carbon Quantum Dot: WM-CQD) sentezlenmesinde kullanılabına kadar +5 °C'de saklandı. WM-CQD'ler, öncül olarak üre ve sitrik asit kullanılarak, fiziksel ve kimyasal sentez teknikleriyle karşılaştırıldığında iyileştirilmiş kararlılık, sürdürülebilirlik, ölçeklenebilirlik ve biyouyumluluk gibi birçok belirgin avantaja sahip olan basit yeşil hidrotermal yöntem kullanılarak sentezlendi. Reaksiyon karışımına 0,02 g üre, 0,3 g sitrik asit ve 25 mL dut suyu ekstresi eklendi. Bu karışım teflon kaplı paslanmaz çelik bir otoklava yerleştirildi. Kimyasallar iyice karıştırılıp çözüldükten sonra reaksiyon 210 °C sıcaklıkta ve 1 atm basınçta 4 saat sürdürüldü. Çökelti daha sonra 15.000 x g'de 30 dakika santrifüjleme ile ayrıldı ve çözeltide kalan WM-CQD'ler, her altı saatte bir deiyonize su değiştirilerek, iki kDa diyaliz tüpü kullanılarak 1 gün boyunca saflaştırıldı. Bakır nano parçacıklarını (Cu NC'ler) sentezlemek için 0,01 g amonyum sitrat, 0,01 g üre ve 0,05 g bakır klorür içeren bir karışım hazırlandı. Bu karışım bir havanda iyice ezilerek ince toz haline getirildi. Toz haline getirilen malzeme daha sonra 200 °C'de 30 dakika süreyle kül fırınında bekletildi ve ardından oda sıcaklığına soğutuldu. Daha sonra 4 mL NaOH çözeltisi (100 mM, toplam hacmi 10 mL) ve 6 mL saf sudan oluşan bir çözelti hazırlandı ve son hacmi 10 mL'ye kadar seyreltilde. Elde edilen çözelti filtre kağıdından süzülerek 9.000 rpm'de 30 dakika santrifüj edildi. Daha sonraki filtrasyon, 0,22 µm gözenek boyutuna sahip silindirik filtrasyon membran filtre ile gerçekleştirildi. Sentezlenen tüm Cu NC'ler, reaksiyona girmemiş kalan kimyasalları ortadan kaldırmak için oda sıcaklığında 24 saat boyunca distile su ile diyalize edildi. Son ürün dondurularak kurutuldu ve daha sonra kullanılmak üzere 4 °C'de saklandı. Üretilen Cu NC'ler daha önce sentezlenen WM-CQD çözeltisi içerisine sırasıyla %1, %3, %5 ve %10 oranında katılarak, dört farklı oranda Cu NC'lerle katılanmış WM-CQD:CuNCs çözeltileri elde edildi. Farklı miktarlarda Cu NC'lerle katılanmış WM-CQD'lerin yapısal ve optik özellikleri X-ışını kırınımı (XRD), transmisyon elektron mikroskobu (TEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve fotoluminesans (PL) spektroskopisi teknikleri kullanılarak incelendi.

3.2 n-GaP Yarıiletkeninin Kimyasal Olarak Temizlenmesi ve Omik Kontağın Yapılması

Diyotların üretiminde altlık malzemesi olarak kullanılan n-GaP yarıiletkeni, yüzeyindeki organik ve inorganik kirleri uzaklaştırmak ve kusurları azaltmak için, aşağıda işlem basamakları verilen geleneksel kimyasal yöntemle temizlendi;

- ✓ 20 saniye $3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ içerisinde ultrasonik olarak yıkandı.
- ✓ 30 saniye $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (1:10) içerisinde ultrasonik olarak yıkandı.
- ✓ Deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak yıkandı.
- ✓ Azot gazı yardımıyla iyice kurutuldu.

Kimyasal temizleme işleminden sonra n-GaP yarıiletkenine omik kontak yüksek saflıkta altın (99.999) metali kullanılarak yapıldı. Au metali önce yüzeyindeki organik ve inorganik kirlilikleri uzaklaştırmak için, bir beher içerisinde bulunan $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ (1:10) çözeltisi içerisine koyuldu ve ultrasonik küvet içerisine yerleştirilerek yaklaşık 10 dakika yıkandı. Ardından deiyonize suyla ultrasonik olarak iyice yıkandı ve azot gazı ile kurutulduktan sonra hemen hazır halde bulunan termal buharlaştırma cihazının vakum odası içerisindeki molibden ısıtıcı üzerine yerleştirildi. Vakum odası içerisinde elektrotlara bağlanan molibden ısıtıcı da $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ (1:10) çözeltisiyle temizlendi ve azot gazı ile kurutuldu. Kimyasal temizleme işlemleriyle yüzeyleri organik ve inorganik kirlerden arındırılmış olan n-GaP yarıiletkeni uygun yükseklik ayarlanarak vakum odası içerisine yerleştirildi, vakum odası atmosfere kapatıldı ve vakum pompası çalıştırılarak ortam yaklaşık 10^{-6} Torr basınca düşürüldü. Bu basınç değerinde yaklaşık üç saat bekledikten sonra, cihaz üzerindeki güç kaynağı yardımıyla molibden ısıtıcıya yavaşça akım verilerek Au metali buharlaştırıldı ve n-GaP yarıiletkenin yüzeyinde ince bir Au film oluşturuldu. Ardından molibden ısıtıcıya uygulanan akım kesildi ve numune bu ortamda yaklaşık bir saat bekletildikten sonra vakum ortamı atmosfere açıldı. Au/n-GaP numunesi çıplak elle temas olmadan vakum odasından alınarak bir kuvars pota içerisine koyulduktan sonra önceden $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanan ve içerisinden azot gazı geçen termal tavlama fırını içerisine yerleştirildi. Au/n-GaP eklemi bu ortamda 3 dakika bekletilerek termal tavlama işlemi gerçekleştirildi. Numune yavaşça fırından çıkarılarak soğuması sağlandı. Böylece Au metali ile n-GaP yarıiletkeni arasında omik özellik gösteren kontak oluşturuldu. Au/n-GaP omik eklemin üretiminde kullanılan termal buharlaştırma cihazı Şekil 20'de, tavlama işlemlerinin gerçekleştirildiği fırın da Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 20. Termal buharlaştırma cihazı



Şekil 21. Tavlama işlemlerinde kullanılan fırın

3.3 Bakır Nano Parçacık Katkısız ve Katkılı Dut Karbon Kuantum Noktaların n-GaP Üzerine İnce Film Şeklinde Yerleştirilmesi

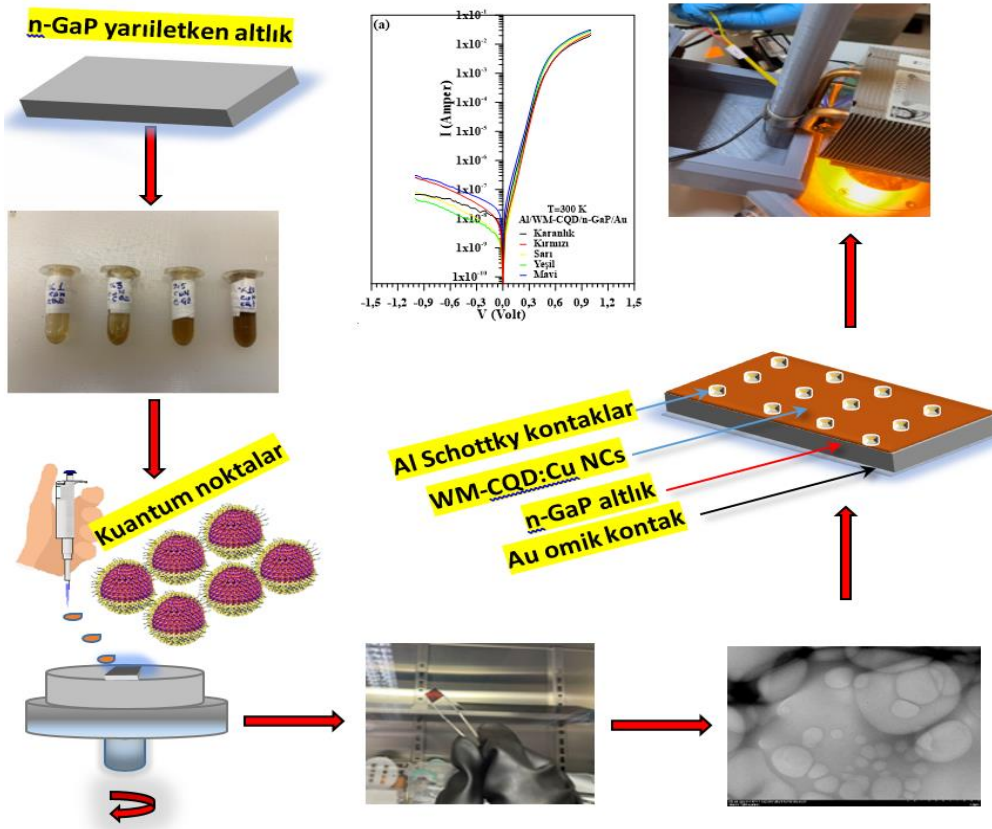
Referans ve arayüzey tabakalı diyotlar üretebilmek için Au metali kullanılarak omik kontak yapılan n-GaP yarıiletkeni elmas uçlu kalem yardımıyla yaklaşık 0,5x0,5 cm boyutlarında altı parçaya bölündü. Parçalardan beşinin temiz ve parlatılmış yüzeyleri üzerinde sırasıyla WM-CQD, WM-CQD:%1CuNCs, WM-CQD:%3CuNCs, WM-CQD:%5CuNCs ve WM-CQD:%10CuNCs çözeltileri spin kaplama tekniğı ile yaydırılarak ince film arayüzey tabakaları oluşturuldu. Geriye kalan bir parça ise referans diyot yapımında kullanıldı. Üretilen ince filmlerin n-GaP yarıiletken yüzeyini homojen bir şekilde kaplayıp kaplamadığı alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleriyle kontrol edildi. Böylece metal ile yarıiletken arasına arayüzey tabakası olarak yerleştirilecek nanokompozit ince filmlerin üretim süreci tamamlandı.

3.4 Referans ve Bakır Nano Parçacık Katkısız ve Katkılı Dut Karbon Kuantum Nokta Arayüzey Tabakalı Diyotların Üretilmesi ve Elektriksel ve Foto-Elektriksel Karakterizasyonları

Önce üzerinde arayüzey tabakası oluşturulmayan parça, hazır durumdaki termal buharlaştırma cihazının içerisinde bulunan ve molibden ısıtıcıdan yaklaşık 10 cm yukarıda olan 1 mm çapında dairesel deliklere sahip bir tugsten maskenin üzerine temiz ve parlak yüzeyi ısıtıcıya bakacak şekilde yerleştirildi. Kimyasal olarak temizlenip azot gazıyla kurutulan yüksek saflıktaki (99.999) aliminyum metalinin yeterli bir miktarı molibden ısıtıcı üzerine yerleştirildikten sonra vakum odası atmosfere kapatıldı ve vakum pompası çalıştırılarak ortamın basıncı 10^{-6} Torr'a düşünceye kadar beklendi. Sonra güç kaynağı yardımıyla molibden ısıtıcıdan akım geçirilerek aliminyum metalinin buharlaşması ve n-GaP yüzeyinde ince bir film oluşturması sağlandı. Vakum odası atmosfere açılarak numune cihazdan çıkarıldı. Böylece Al/n-GaP/Au referans diyotunun üretim işleminin tamamlandı. Aynı işlem basamakları üzerlerinde sırasıyla WM-CQD, WM-CQD:%1CuNCs, WM-CQD:%3CuNCs, WM-CQD:%5CuNCs ve WM-CQD:%10CuNCs arayüzey tabakaları bulunan n-GaP parçaları için tekrarlanarak, Al/WM-CQD/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:1%CuNCs/n-GaP/Au and Al/WM-CQD:3%CuNCs/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:5%CuNCs/n-GaP/Au ve Al/WM-CQD:10%CuNCs/n-GaP/Au diyotları üretildi. Laboratuvar koşullarında üretilen diyotların üretim aşamaları şematik diyagram olarak Şekil 22'de gösterildi. Özel olarak üretilen bu altı adet diyotun I-V ölçümleri önce oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alınarak, Rhoderick, Norde ve Cheung metodları yardımıyla karakteristik parametreleri hesaplandı. Daha sonra, arayüzey tabakalarının farklı dalga boylarındaki aydınlatmaya duyarlılığını ortaya koymak amacıyla, Al/WM-CQD/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve Al/WM-

CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının I-V ölçümleri, oda sıcaklığında, karanlıkta ve farklı dalga boylarındaki aydınlatma altında, HP p-n:450666-001 model simülatörü ve Keithley 2400 Pikoampermetre/Gerilim Kaynağı kullanılarak alındı ve karakteristik parametreler aynı metotlarla yeniden hesaplandı. Diyotların aydınlatılmasında, simülatörden gelen 30 mW/cm² şiddetinde kırmızı (~665 nm), sarı (~600 nm), yeşil (~550 nm) ve mavi (~470 nm) renkli ışıklar kullanıldı. Karışıklığa mahal vermemek için yukarıda üretimi özetlenen altı numune aşağıdaki gibi isimlendirildi ve bundan sonra metinde bu isimlerle anıldı;

Al/n-GaP/Au referans diyot : D0
 Al/WM-CQD/n-GaP/Au : D1
 Al/WM-CQD:%1CuNCs/n-GaP/Au : D2
 Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au : D3
 Al/WM-CQD:%5CuNCs/n-GaP/Au : D4
 Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au: D5



Şekil 22. Laboratuvar koşullarında üretilen diyotların üretim aşamalarını gösteren şematik diyagram (Kuantum noktaları ile ilgili şekil "<https://www.studyiq.com/articles/quantum-dots/>" web sitesinden alınmıştır).

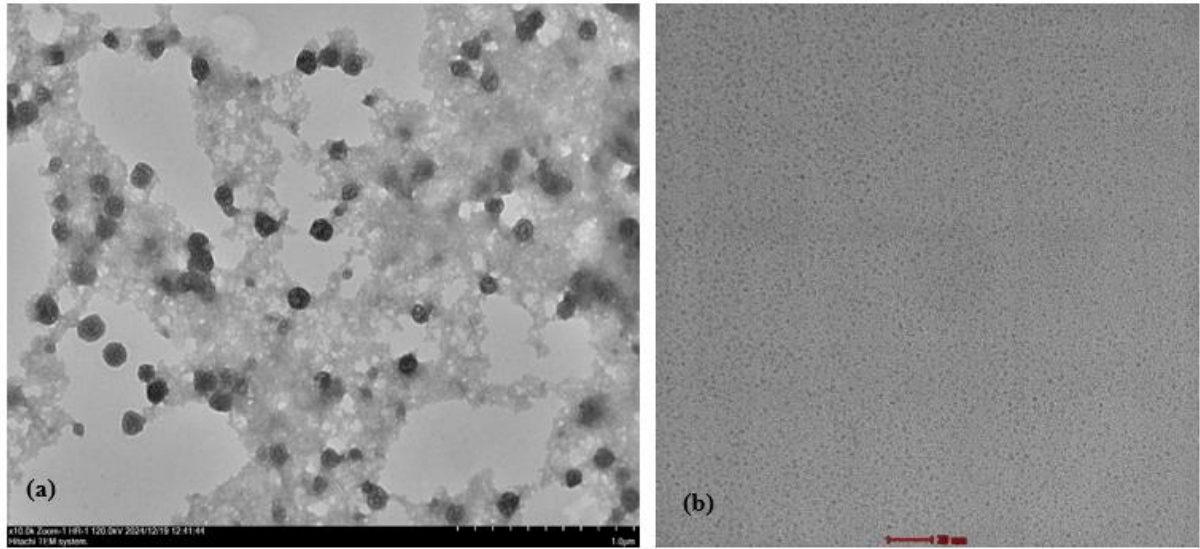
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde basit ve yeşil hidrotermal yöntem kullanılarak sentezlenen Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerin TEM, XRD, FTIR ve PL spektroskopi analizleri ile üretilen D0, D1, D2, D3, D4 ve D5 diyotlarının elektriksel karakteristiklerinin hem Cu NC'lerle katkılama oranına hem de uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak incelenmesi yer almaktadır.

4.2. Bakır Nano Parçacıklarla Katkılanmış Dut Karbon Kuantum Noktaların Analizi

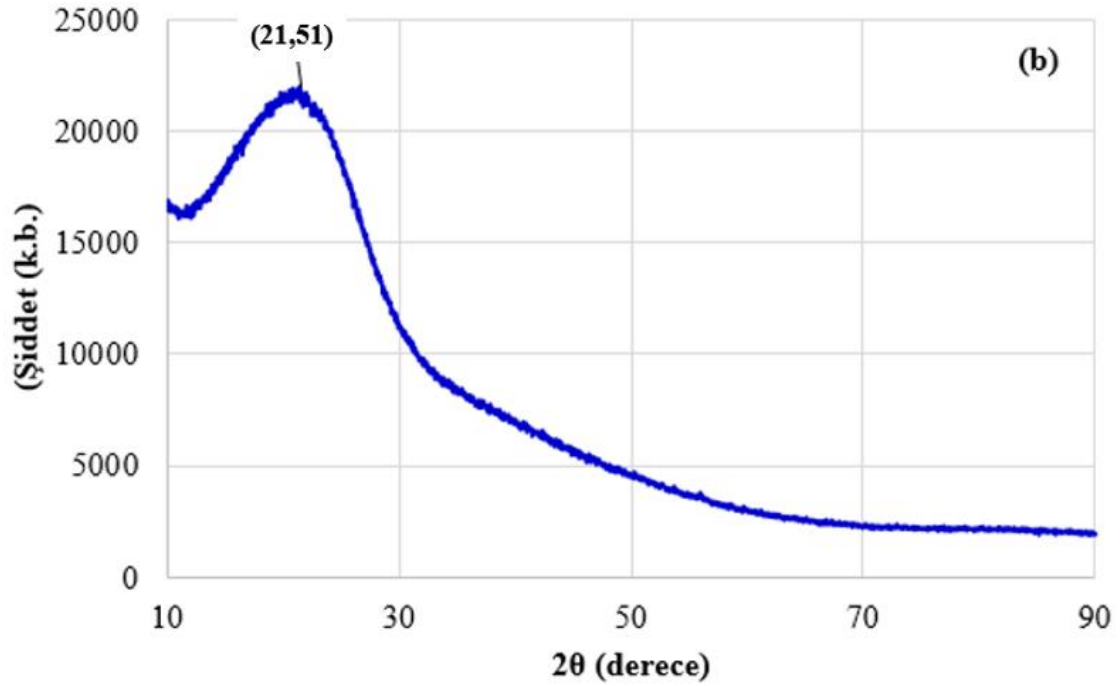
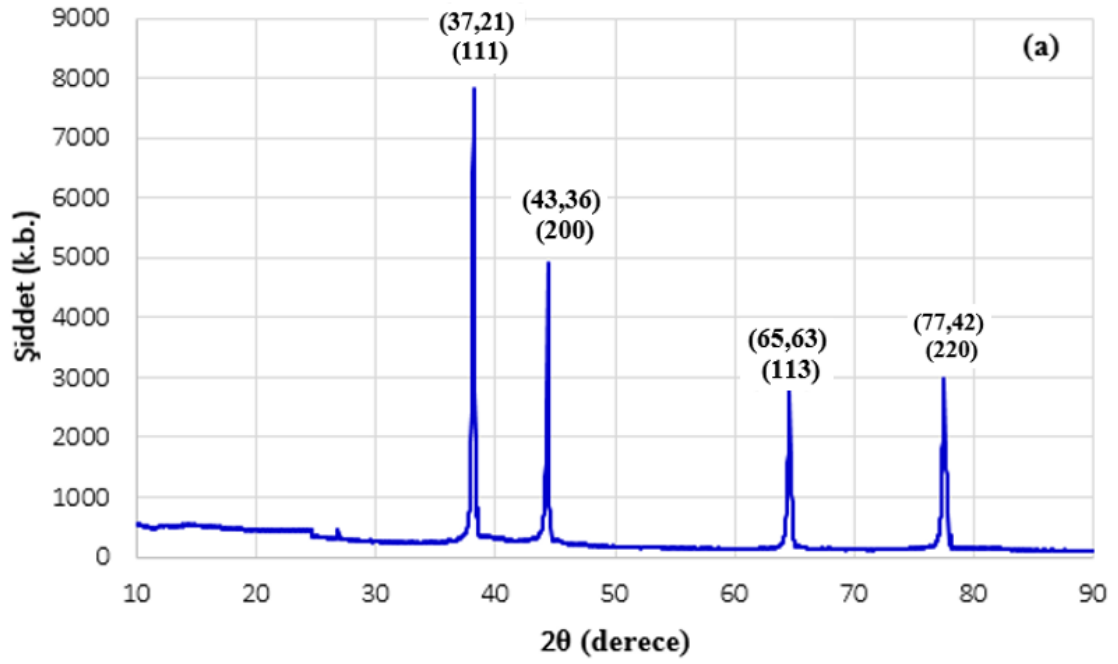
Sentezlenen WM-CQD'lerin ve Cu NC'lerin yapısal ve optik özellikleri, TEM, XRD, FTIR ve PL spektroskopisi teknikleri kullanılarak araştırıldı. CQD'lerin ve metal NC'lerin TEM görüntüleri, bu yapıların şekli, boyutu ve dağılımı gibi morfolojiye ilişkin değerli bilgiler sağlamaktadır. Cu NC'lerin ve WM-CQD'lerin TEM görüntüleri sırasıyla Şekil 23(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Bu görüntüler, Cu NC'lerin 2 ila 10 nm arasında değişen ortalama parçacık boyutuna sahip homojen ve küresel bir morfoloji sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 23. (a) Cu NC'lerin ve (b) WM-CQD'lerin TEM görüntüleri.

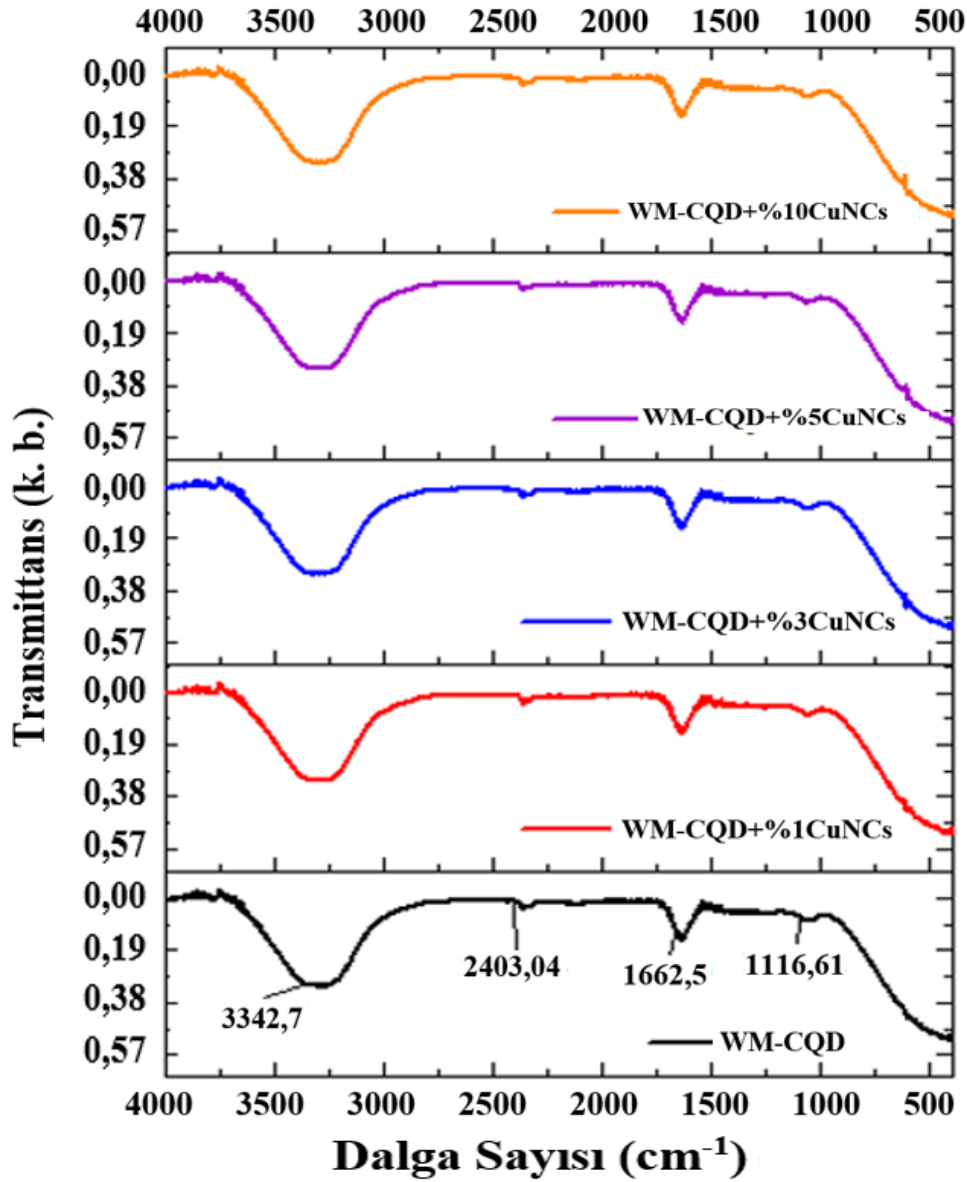
Sentezlenen Cu NC'lerin ve WM-CQD'lerin kristal yapıları ve faz kompozisyonları XRD tekniği ile incelenmiştir. Cu NC'lerin ve WM-CQD'lerin XRD desenleri sırasıyla Şekil 24(a) ve (b)'de sunulmuştur. Şekil 24(a)'da, $37,21^\circ$, $43,36^\circ$, $65,63^\circ$ ve $77,42^\circ$ 'de gözlemlenen pikler sırasıyla (111), (200), (113) ve (220) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu kırınım verileri, bakır nanoparçacıklarının, spesifik kırınım pikleriyle karakterize edilen, yüzey merkezli kübik (fcc) bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 24(b)'de, elde edilen tüm WM-CQD'ler

için XRD desenleri, JCPDS 41-1487'ye (grafit) göre $2\theta = 21,51^\circ$ 'de (002) düzlemine karşılık gelen tek bir geniş kırınım piki göstermektedir.



Şekil 24. (a) Cu NC'lerin ve (b) WM-CQD'lerin XRD desenleri.

CQD'lerin yüzeyindeki fonksiyonel gruplar FTIR analizleri yardımıyla belirlenebilir (Roy et al. 2015 ve Singh 2018). CQD'ler esas olarak oksijen, karbon ve hidrojenle oluştuğundan, karbon öncülünün kısmi oksidasyonu ile CQD'lerin geliştirilmesinde CQD'lerin yüzeyinde karboksil veya karboksilik asit grupları, hidroksil grupları ve eter/epoksi grupları bol miktarda bulunmaktadır. Bu nedenle, FTIR bu oksijen içeren grupların incelenmesinde yararlı olabilir (Singh 2018). Karboksil veya karbonil gruplarının bandı genellikle 1660-1500 ve 1390-1260 cm^{-1} 'de bulunmaktadır. Nanoparçacıkların spektrumunun bu bölgedeki geçirgenliğinin azalması bu nedene bağlanabilir. Metal karbonil gruplarının oluşumu 1656'dan 1586'ya bant kaymasına neden olabilir. Bu, trisodyum sitratın $-\text{COO}-$ grubu tarafından Cu nanoparçacıklarının stabilizasyonuna atfedilebilir (Karikalan 2018). Şekil 25'de gösterildiği gibi, Üre-Cu-NC'lerin yüzey fonksiyonel gruplarını incelemek için FTIR spektroskopisi

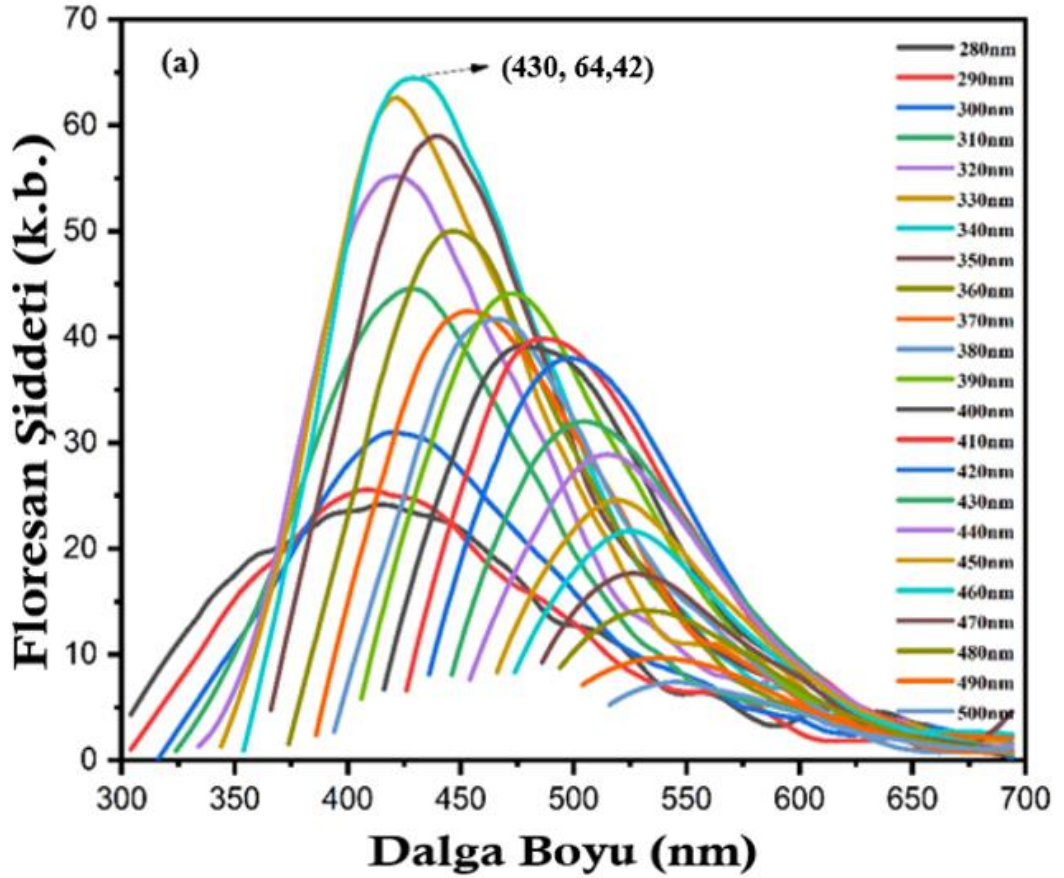


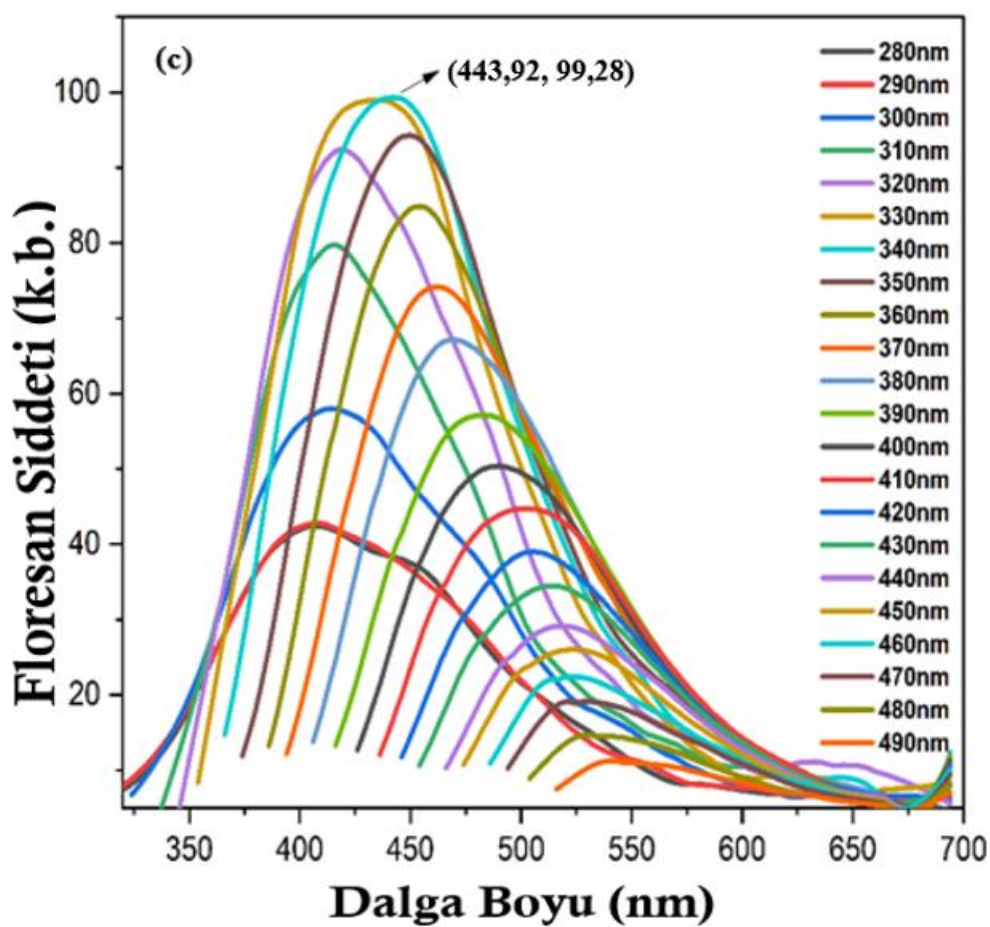
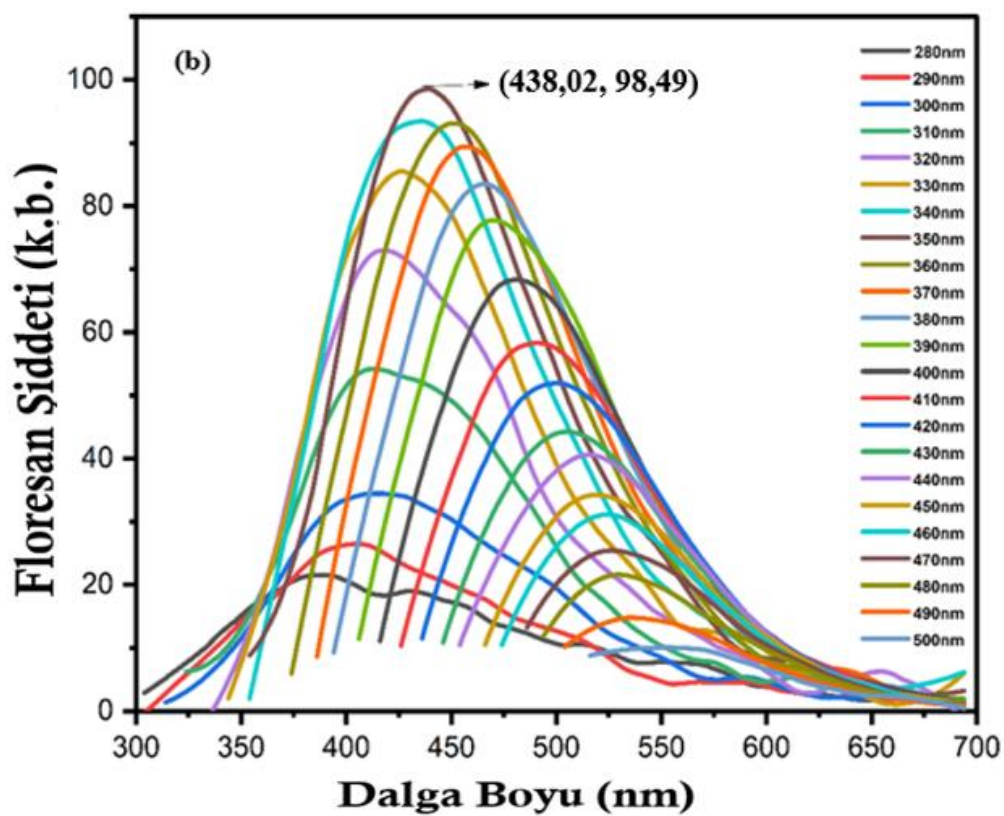
Şekil 25. WM-CQD ve Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerin FTIR analizi.

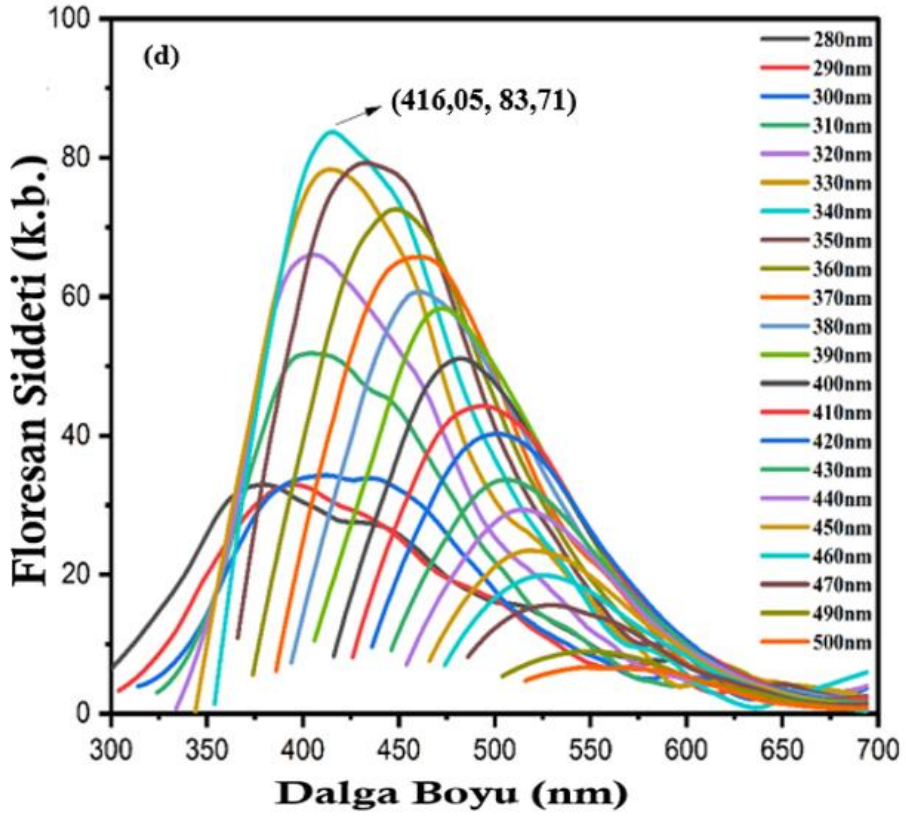
kullanılmıştır. 3342,7 cm^{-1} civarında gözlenen geniş bant, amino ($-\text{NH}_2$) ve hidroksil ($-\text{OH}$) gruplarının gerilme titreşimlerine atfedilmiştir. 2403,04 cm^{-1} 'deki pikin $-\text{C}=\text{C}-$ bağının gerilme titreşimine karşılık geldiği söylenebilir. 1662,5 cm^{-1} 'deki bir diğer belirgin soğurma bandı, $-\text{NH}_2$ gruplarının amid bağları aracılığıyla varlığını doğrulamakta ve harici bir azot kaynağına ihtiyaç duyulmadan azotun dahil edildiğini göstermektedir. C-O bağının gerilme titreşimi 1458 cm^{-1} 'de tespit edilmiştir. 1116,61 cm^{-1} 'deki bant C-OH bağlarının düzlem dışı bükülmesini göstermektedir. Bu sonuçlar, sodyum sitrat ve üreden gelen karboksil ($-\text{COOH}$) ve amino ($-\text{NH}_2$) grupları gibi fonksiyonel grupların Cu NC'lerin yüzeyinde bulunduğunu göstermektedir. Hem WM-CQD'lerin hem de Cu NC'lerin piklerinin birbirleriyle etkileşime girdiği Şekil 25'de görülmektedir.

Fotoluminesans spektroskopisi, malzemelerin elektronik yapısını incelemek için kullanılan temas gerektirmeyen, tahribatsız bir tekniktir. Bu yöntemde ışık, malzemeye yönlendirilir ve burada soğrulur ve foto-uyarılma adı verilen bir işlemle fazla enerji malzemeye aktarılır. Numune daha sonra bu fazla enerjiyi ışık emisyonu olarak dağıtır, buna luminesans denir. Foto-uyarılma ile ilgili olduğunda bu luminesansa fotoluminesans denir. Foto-uyarılma sırasında, malzeme içindeki elektronlar izin verilen uyarılmış durumlara yükselirler. Bu elektronlar denge durumuna döndüklerinde, fazla enerji serbest bırakılır; bu, ışık emisyonunu (radyatif bir süreç) veya içermeyen bir süreci (radyatif olmayan bir süreç) içerebilir. Yayılan ışığın enerjisi (fotoluminesans), iki elektron durumu arasındaki enerji düzeyi farkıyla ilişkilidir. 280 ila 500 nm arasında değişen farklı dalga boylarında uyarılan %1, %3, %5 ve %10 Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerin kaydedilen emisyon spektrumları sırasıyla Şekil 26(a), (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir. CQD'lerin emisyonunun uyarım dalga boyuna bağlı olduğu görülmektedir; bu durum CQD'lerin boyutlarındaki değişikliklere, rastgele dağılımlarına ve yüzeylerinde bulunan fonksiyonel gruplara atfedilebilir. Şekil 26(a)'dan da görülebileceği gibi, %1 Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'de en güçlü emisyon piki 430 nm'de yer almakta, 340 nm'de uyarılmakta ve pik yoğunluğu 64,42'ye karşılık gelmektedir. %3 Cu NC ile modifiye edilmiş WM-CQD'de en güçlü emisyon piki 438,02 nm'de yer almakta, 350 nm'de uyarılmakta ve pik yoğunluğu 98,49'a karşılık gelmektedir. %5 Cu NC ile modifiye edilmiş WM-CQD'de en güçlü emisyon piki 443,92 nm'de yer almakta, 340 nm'de uyarılmakta ve pik yoğunluğu 99,28'e karşılık gelmektedir. Son olarak %10 Cu NC ile modifiye edilmiş WM-CQD'de en güçlü emisyon piki 416,05 nm'de yer almakta, 340 nm'de uyarılmakta ve pik yoğunluğu 83,71'e karşılık gelmektedir. Tüm numunelerde pik emisyon pozisyonu artan uyarım dalga boyuyla yavaşça kırmızıya doğru kaymıştır; bu da Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerin PL bağımlılığına sahip olduğunu göstermektedir. Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerdeki fotoluminesans genellikle kuantum sınırlama etkilerine, kenar etkilerine ve yüzey fonksiyonel

gruplarına atfedilebilir (Chandra et al. 2012). Kuantum hapsedme etkisinin, WM-CQD'lerin küçük boyutları içerisinde elektronların ve boşlukların kuantum hapsedilmesinden kaynaklandığı, bunun sonucunda ayırık enerji seviyelerinin ve gözlenen boyuta bağlı emisyonun ortaya çıktığı söylenebilir. Aynı zamanda, yüzey fonksiyonelleştirmesi WM-CQD'lerin fotoluminesansını önemli ölçüde etkileyebilir (Dang et al. 2019). Bu fonksiyonel gruplar elektronik yapıyı değiştirerek yüzey kusurlarını pasifleştirebilir, kararlılığı artırabilir ve emisyon özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. WM-CQD'lerin yüzeylerine bağlı çeşitli fonksiyonel gruplar, gelen ışıkla etkileşime girebilir ve WM-CQD'lerin elektronik yapısını değiştirebilir (Saraswat et al. 2024). Cu NC'lerin kuantum verimi 0,97 olarak hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler ve kuantum verimliliği hesaplamalarında WM-CQD'nin kuantum veriminin 0,768 olduğu tespit edilmiştir. Kuantum verimliliğinin 1'e yaklaşmasının iyi olduğu bilindiğinden, Cu NC'lerin WM-CQD'lerinden daha verimli olduğu söylenebilir.

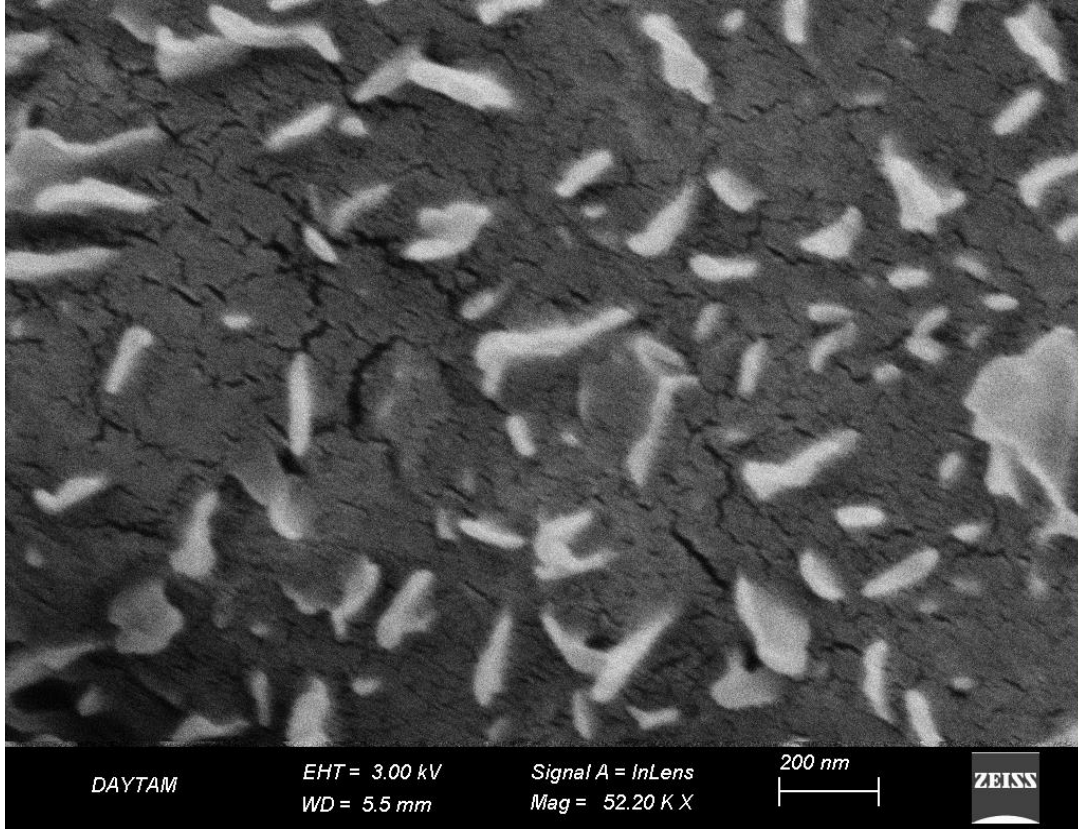






Şekil 26. (a) %1Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin, (b) %3Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin, (c) %5Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin ve (d) %10Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'nin floresan spektrumları.

n-GaP yarıiletken altlık üzerine biriktirilen Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD ince filminin SEM görüntüsü Şekil 27'de görülmektedir. Bu imajdan, çok sayıda farklı şekilli Cu NC'den oluşan WM-CQD ince filmlerin, altlık yüzeyini düzgün bir şekilde kaplayan sürekli ve homojen tanelere sahip pürüzsüz bir yüzey sunduğu görülmektedir. Ancak filmde ufak çatlaklar veya boşluklar da söz konusudur.



Şekil 27. n-GaP yarıiletken altlık üzerine biriktirilen Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD ince filminin SEM görüntüsü.

4.3. Laboratuvar Şartlarında Üretilen Referans ve Arayüzey Tabakalı Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Cu Nano Parçacık Katkılama Oranına Bağlı Olarak İncelenmesi

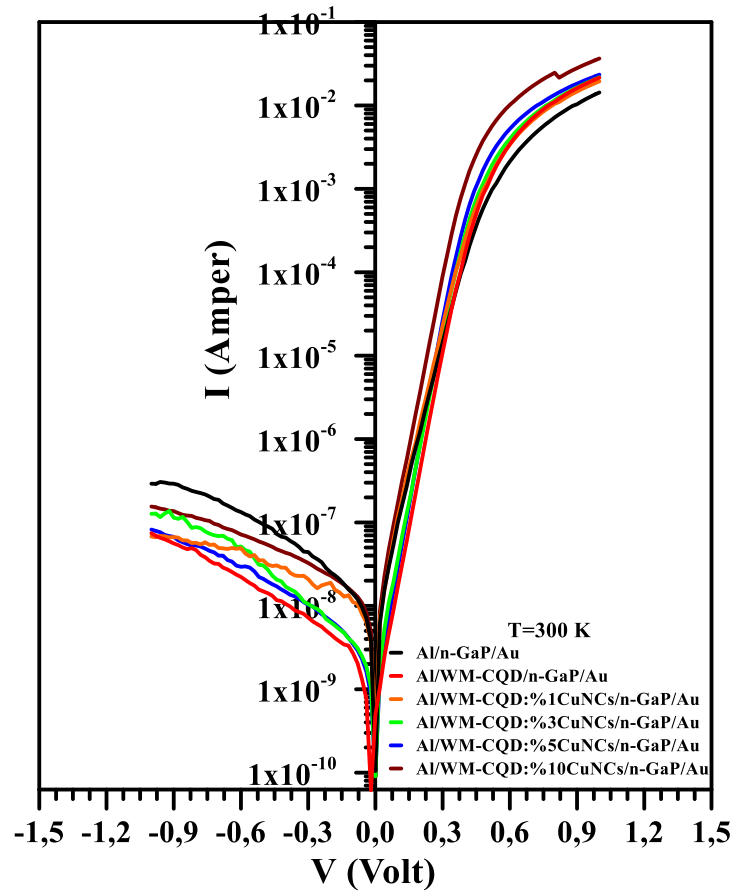
Genellikle diyot ve transistör gibi yarıiletken tabanlı aygıtların elektriksel davranışları, oda sıcaklığında alınan I-V ölçümlerinden oluşturulan grafiklerden elde edilen parametreler yardımıyla analiz edilmektedir. Bu analizlerde, üretilen eklemlerin engel karakterini yansıtan doyma akımı (I_s), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B), seri direnç (R_s), doğrultma oranı ve açılma voltajı (V_{on}) gibi temel diyot parametreleri, I-V ve $\ln(I)$ -V grafiklerinden yararlanılarak ve termiyonik emisyon teorisine dayanan Rhoderick, Cheung ve Norde yöntemleri gibi hesaplama yöntemleri kullanılarak hesaplanabilir (Rhoderick and Williams 1988, Norde 1979 ve Cheung and Cheung 1986). Kesim 2.3.1’de tartışıldığı gibi, termiyonik emisyon teorisinde, metal-yarıiletken doğrultucu eklemin akımı ile gerilimi arasındaki ilişki denklem (2.18) ile verilmektedir. Dolayısıyla bu denklemden türetilen

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3.1)$$

ve

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right) \quad (3.2)$$

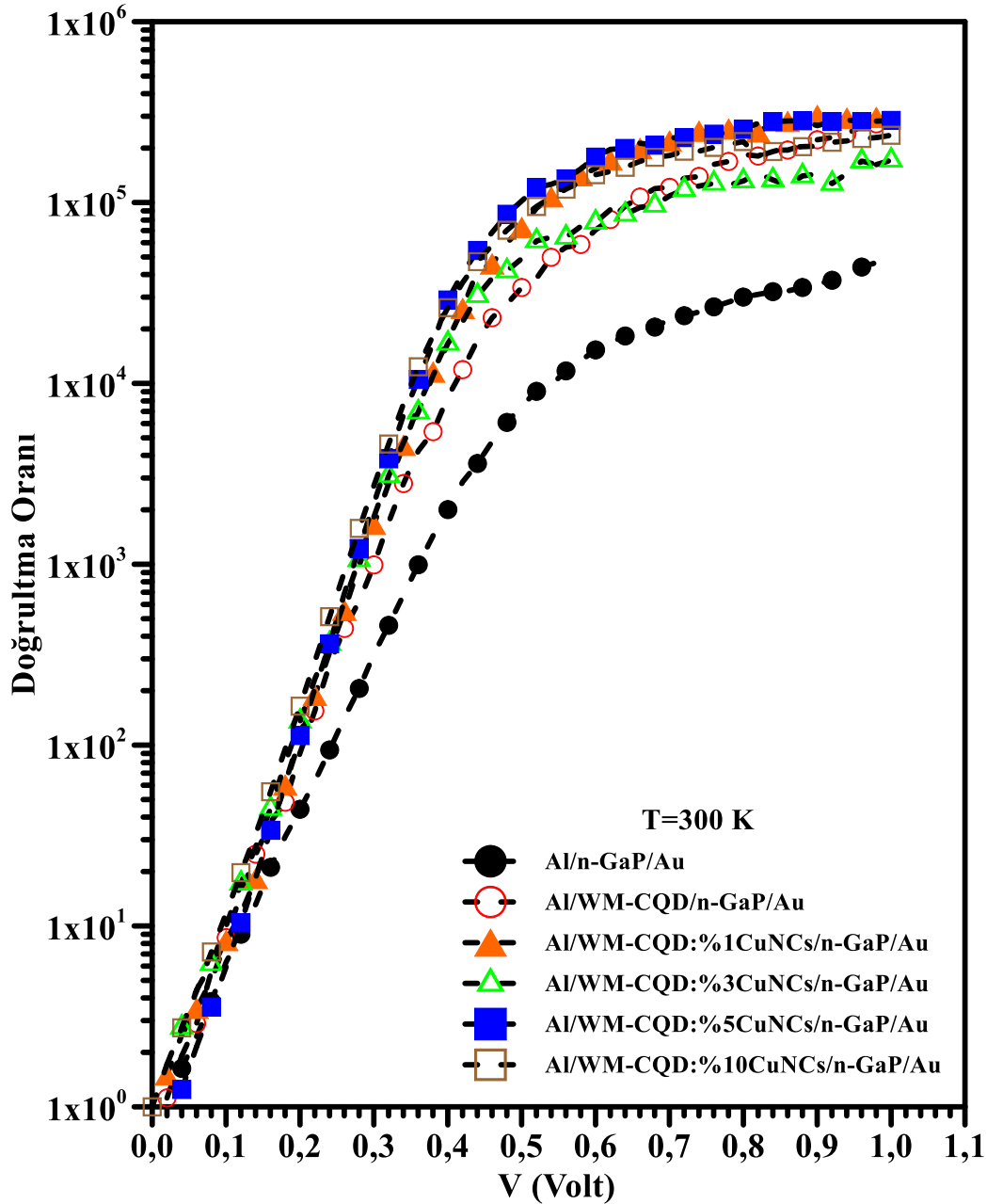
bağıntıları kullanılarak diyotların n ve Φ_B değerleri hesaplanabilir. Referans ve arayüz tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V verilerinden üretilen doğru ve ters beslem $\ln(I)$ -V grafikleri Şekil 28'de sunulmuştur. Bu grafikler tüm numuneler için ters beslem durumunda karakteristiklerde yaklaşık bir doyum olduğunu, düşük doğru beslem gerilimlerinde doğrusal bir değişim ve büyük doğru beslem gerilimlerinde ise seri direnç, arayüz tabakası ve arayüz durumları gibi nedenlerden dolayı aşağı doğru bükülme olduğunu açıkça göstermektedir. Yani, tüm diyotlar iyi derecede doğrultma özelliklerine sahiptir.



Şekil 28. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen $\ln(I)$ -V grafikleri.

Eklem üzerinde güçlü bir asimetric elektron akışı olduğunda, bu eklem doğrultucu eklem olarak adlandırılmaktadır. Bu tür kontaklarda, doğru beslemde uygulanan gerilim arttıkça akım hızla artarken, ters beslemde, ters besleme gerilimi arttıkça akım neredeyse doyuma ulaşmaktadır veya çok az miktarda artmaktadır. Dolayısıyla diyotun asimetric I-V karakteristikleri onun doğrultucu davranış sergilediğini göstermektedir. Teorik olarak, bir metal-n tipi yarıiletken eklemün doğrultucu karakter göstermesi için, metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha büyük olmalıdır (Şenarslan et al. 2020). Ancak pratikte bu kural geçerli

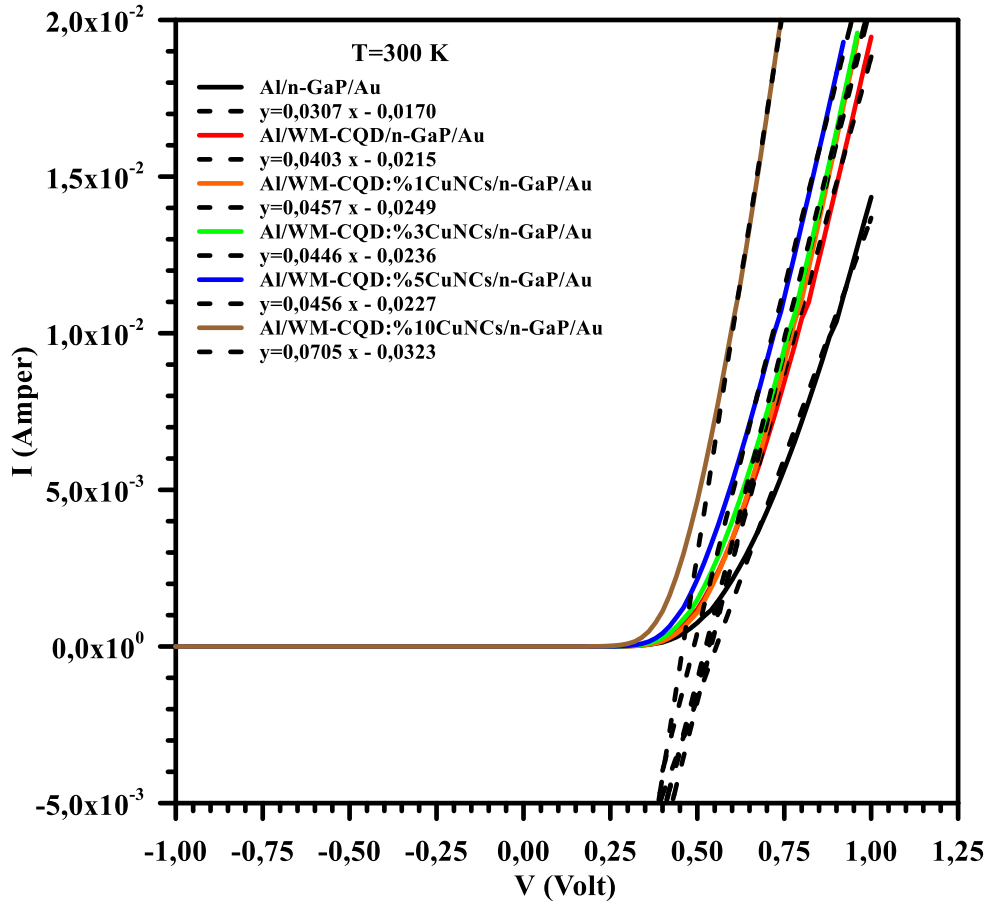
olmayabilir. Bir diyotun doğrultma oranı, uygulanan belirli bir voltajda doğru beslem akımının ters beslem akımına oranıyla belirlenir. Laboratuvar koşullarında üretilen diyotların gerçek ters ve doğru beslem gerilimlerdeki akım değerleri dikkate alınarak I-V grafiklerinden elde edilen doğrultma oranı-gerilim grafikleri Şekil 29’da sunulmuştur. Bu grafikler, arayüzey tabakalı diyotlarda doğrultma oranının referans diyota göre arttığını göstermektedir. Referans diyotun 0,5-1,0 V aralığındaki doğrultma oranı değerleri yaklaşık olarak 10^4 - 10^5 arasında değişmektedir. Ancak arayüzey tabakalı diyotlarda aynı gerilim aralığında bu oran 10^5 - 10^6 ’dır.



Şekil 29. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafiklerinden elde edilen doğrultma oranı-gerilim eğrileri.

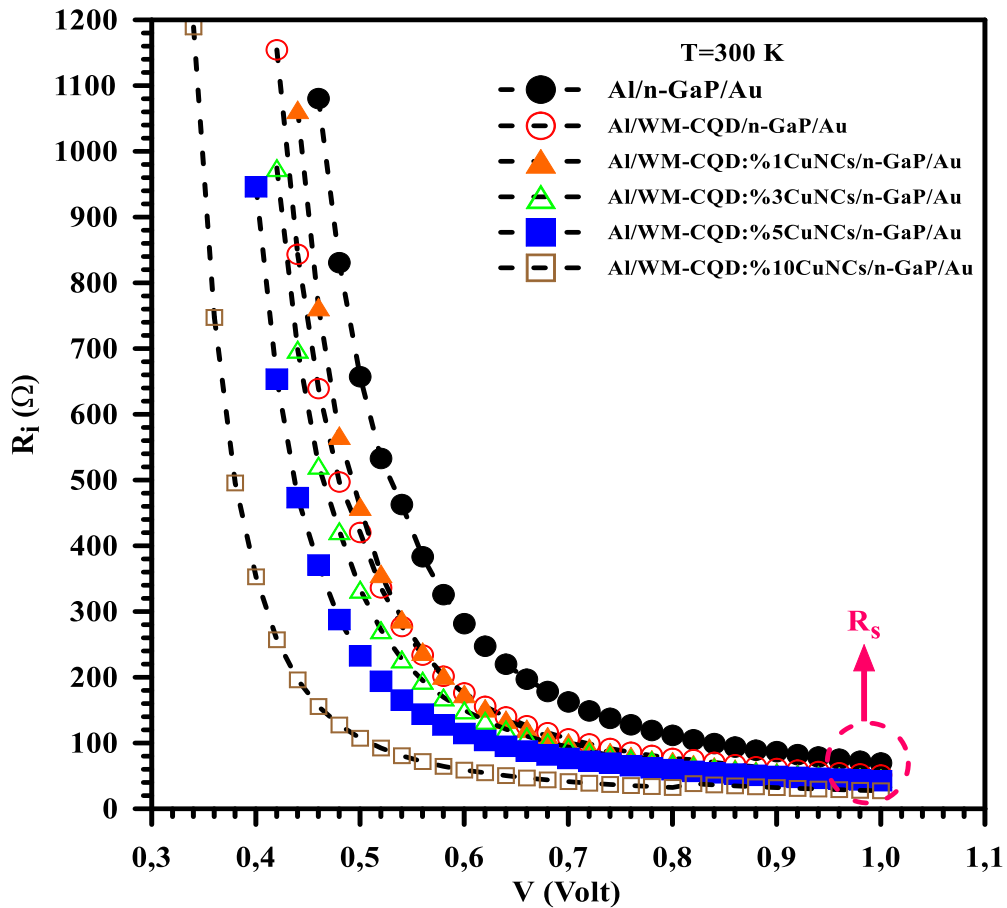
Yani, farklı miktarlarda Cu NC'lerle katkılanan WM-CQD:CuNC arayüz tabakaları, diyotların doğrultma oranlarında yaklaşık bir mertebe artışa neden olmuştur. Dolayısıyla bu sonuç, ince WM-CQD:CuNC arayüzey tabakaları kullanılarak yüksek doğrultma oranına sahip Al/n-GaP/Au diyotların kolaylıkla üretilebileceğini göstermektedir. Bu durum, arayüz tabakası tarafından gerçekleştirilen yüzey modifikasyonunun diyotlarda düşük enjeksiyonla sınırlı akım kontakları yerine, bulk sınırlı akım oluşturmaktan kaynaklanabilir. Tuzaksız ince film WM-CQD:CuNC arayüzey malzemesi diyottaki yük enjeksiyonunu azaltmış olabilir.

Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafikleri Şekil 30'da verilmiştir. Diyotların doğru beslem koşulunda tamamen iletken olduğu voltaj değerleri, açılma voltajı olarak tanımlanmaktadır (Seymen et al. 2022). Şekil 30'da verilen grafiklere yerleştirilen doğrusal fitlerin gerilim eksenini kestiği noktalar kullanılarak diyotların V_{on} değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 4'de sunulmuştur. D0 diyotu için hesaplanan V_{on} değeri 0,554 V iken, D5 diyotunda bu değer 0,458 V'a azalmıştır. Bu durum, metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen WM-CQD:CuNC arayüzey tabakasının, yarıiletken bant aralığında bulunan arayüzey durumlarını, kusurları ve çeşitli tuzakları pasifleştirerek yarıiletken yüzeyini modifiye etmesine atfedilmiştir.



Şekil 30. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafikleri.

Eklem direnci, diyotların $\ln(I)$ -V grafiklerinin yaklaşık 0,5 V'dan büyük voltajlarda doğrusallıktan sapmasının (aşağı doğru bükülmesinin) nedenlerinden biridir (bkz. Şekil 28) (Seymen et al. 2022 ve Özerli et al. 2017). Bu direnç $R_i = \partial V / \partial I$ ilişkisi kullanılarak hesaplanabilir (El-Menyawy 2015). Üretilen diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafiklerinden elde edilen doğru beslem gerilimine karşı eklem direncinin değişimi Şekil 31'de gösterilmiştir. Şekil 31'den de görülebileceği gibi, düşük gerilim değerlerinde R_i değerleri uygulanan gerilimin artmasıyla azalmakta ve daha yüksek gerilim değerlerinde doyuma yaklaşmaktadır. Doyumdaki R_i değerinin diyotun R_s değerine karşılık geldiği literatürden bilinmektedir (El-Menyawy et al. 2024). Tüm numunelerin oda sıcaklığında ve karanlıkta doğru beslem I-V eğrilerinden 1 V'da hesaplanan R_s değerleri Tablo 4'de sunulmuştur. İlginç bir şekilde, WM-CQD ince film içerisindeki Cu NC'lerin artmasıyla birlikte R_s değerleri D0 diyotunda 69,712 Ω 'dan D5 diyotunda 27,411 Ω 'a azalmıştır. Bu değişim, WM-CQD arayüzey tabakasına katkılanmış Cu NC'lerin artmasıyla filmin iletkenliğinin artmasından kaynaklanıyor olabilir.

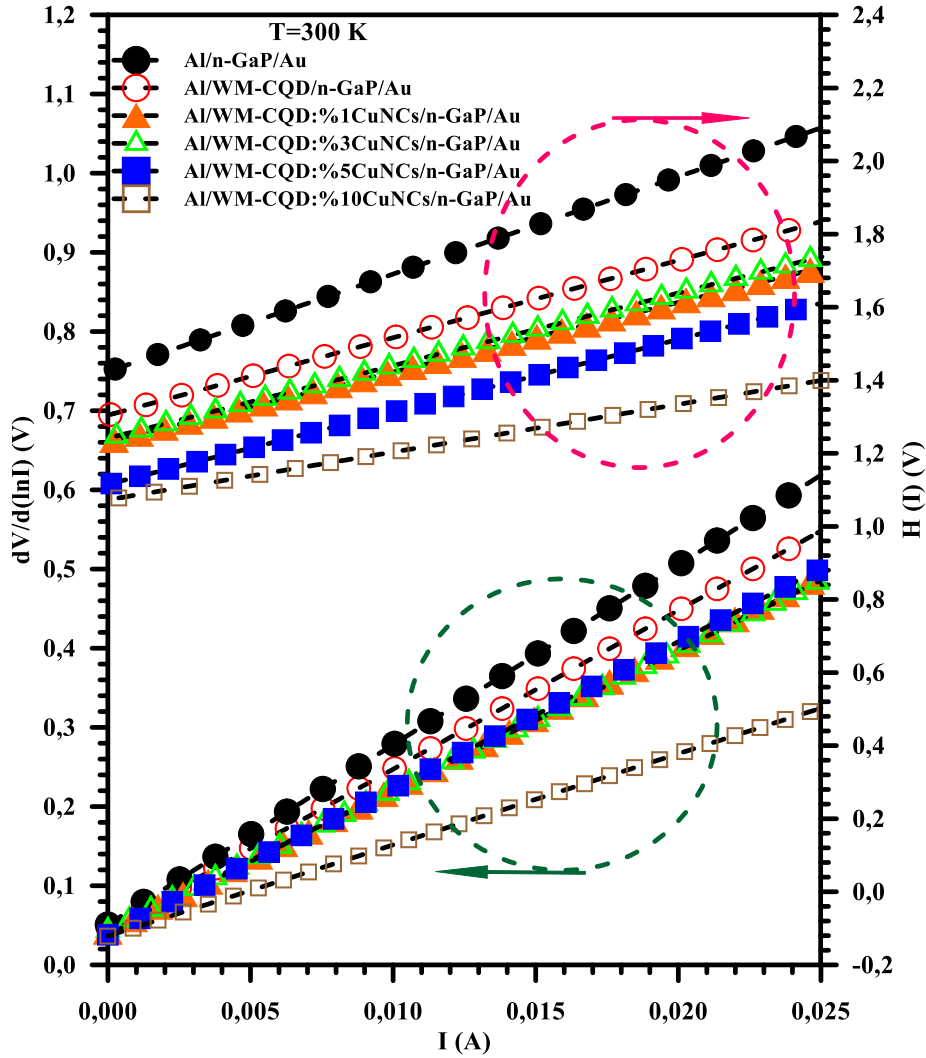


Şekil 31. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen I-V grafiklerinden elde edilen doğru beslem voltajına karşılık eklem dirençlerinin değişimi.

Ayrıca diyotların I_s , n , Φ_B ve R_s değerleri Rhoderick (I-V yöntemi), Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Rhoderick yönteminde, Şekil 28'deki grafiklerin doğru beslem kısmının doğrusal bölgesine yapılan doğrusal fitlerin $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği noktalar kullanılarak I_s değerleri belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 4'de listelenmiştir. Aynı zamanda, doğrusal fitlerin eğimleri, n değerlerini hesaplamak için Denklem (3.1)'de ve Φ_B değerlerini hesaplamak için de I_s değerleri denklem (3.2)'de kullanılmıştır ve hesaplanan tüm değerler Tablo 4'de sunulmuştur. İdeal bir diyot için n değeri 1 olmalıdır. Birden büyük n değeri, diyotun ideal olmadığını, yani termiyonik emisyon teorisinden sapmalar olduğunu göstermektedir. Tünelleme, jenerasyon-rekombinasyon, imaj kuvveti etkisi, arayüzey tabakası, arayüzey durumları ve engel yüksekliğinin besleme bağımlılığı gibi faktörler genellikle bu sapmadan sorumludur (Rhoderick and Williams 1988, Sze 1981 ve Neamen 2012). D0 diyotu için n ve Φ_B değerleri sırasıyla 1,623 ve 0,764 eV olarak belirlenmişken, D5 diyotu için bu değerler sırasıyla 1,262 ve 0,770 eV olarak belirlenmiştir. Yani üretilen diyotlar ideal değildir ve WM-CQD arayüzey tabakasına katılan Cu NC'lerin miktarının artmasıyla n değerleri bir miktar azalırken Φ_B değerleri artmaktadır. Bir diyotta arayüzey özelliklerini değiştirerek n değerini düşürmek ve Φ_B değerini artırmak arzu edilen bir durumdur. Diyotların doğrultucu karakterlerinin, ekleme oluşan potansiyel engelinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu nedenle diyotların elektriksel özelliklerini iyileştirmek için genellikle metal-yarıiletken arayüzeyine bir arayüzey tabakası yerleştirilir. Bu tabaka, arayüzey durumlarının yeniden dağılımını kontrol ederek yarıiletken yüzeyindeki kimyasal etkileşimi azaltabilir (Choi et al. 2015).

Schottky diyotların $\ln(I)$ - V grafikleri düşük doğru beslem gerilimlerinde doğrusal iken, yüksek gerilimlerde genellikle doğrusallıktan saparak aşağı doğru bükülürler. Bu aşağı doğru bükülme R_s 'den kaynaklanmaktadır. R_s , nötral bölgeden, omik kontaklardan ve bağlantı tellerinden ileri gelen diyotun toplam direncidir. Kesim 2.5'de tartışıldığı gibi, Cheung tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak, diyotların I-V karakteristiklerinin doğrusal olmadığı yüksek akım bölgesinden n , Φ_B ve R_s parametreleri hesaplanabilir (Cheung and Cheung 1986). Cheung yönteminde kullanılan fonksiyonlar (2.37) ve (2.42) denklemlerinde verilmiştir. Bu fonksiyonlar göz önüne alınarak hazırlanan $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri Şekil 32'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, bu grafikler lineerdir ve eğimlerinden diyotların R_s değerleri, $I=0$ 'da düşey eksenini kestiği noktalardan da sırasıyla n ve Φ_B değerleri hesaplanmıştır. Tüm diyotlar için hesaplanan n , Φ_B ve R_s değerleri Tablo 4'de sunulmuştur. Bu yöntemle elde edilen n değerlerinin Rhoderick yöntemiyle elde edilenlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu fark, hesaplamalarda doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinin farklı bölgelerinin seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Cheung yönteminde $\ln(I)$ - V grafiğinin aşağı doğru bükülme bölgesi

dikkate alınırken, Rhoderick yönteminde doğrusal bölge dikkate alınmaktadır. Φ_B değerlerindeki farklılıklar da aynı nedene atfedilebilir (Rhoderick and Williams 1988, Sze 1981 ve Neamen 2012). Aynı zamanda her iki fonksiyondan elde edilen R_s değerlerinin birbirleriyle tutarlı olduğu görülmektedir.



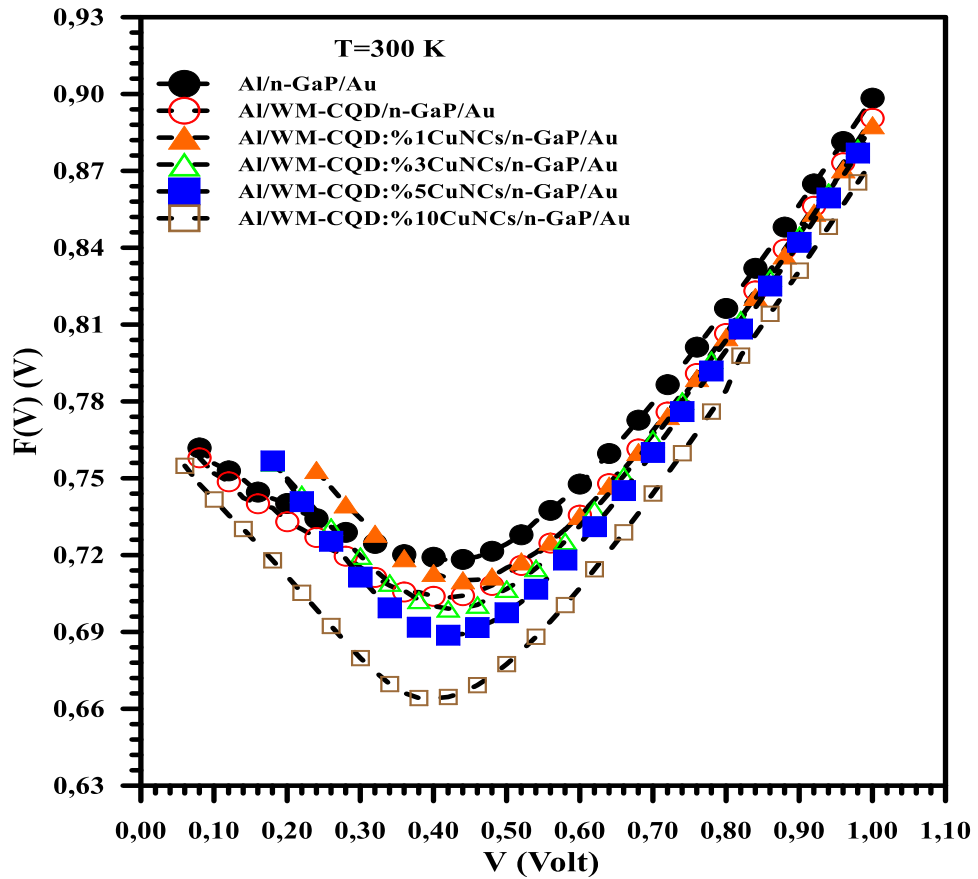
Şekil 32. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri.

Diyotların Φ_B ve R_s değerleri aynı zamanda Bohlin tarafından modifiye edilen Norde yöntemiyle de hesaplanmıştır. Bu yöntemin ayrıntıları da kesim 2.5’de verilmiştir (Norde 1979 ve Bohlin 1986). Norde fonksiyonu dikkate alınarak Φ_B ve R_s için geliştirilen denklemler

$$\Phi_B = F_{min} + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (3.3)$$

$$R_s = (\gamma - n) \left(\frac{kT}{qI_{min}} \right) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Burada $F_{\min}$, $F(V)$ fonksiyonunun minimum değerini temsil ederken, $V_{\min}$ ve $I_{\min}$, bu değere karşılık gelen gerilim ve akımdır. γ , n 'den büyük bir tamsayıdır. Tüm numuneler için hazırlanan $F(V)$ - V grafikleri Şekil 33'de gösterilmiştir. Bu grafiklerin minimum noktasındaki değerler (3.3) ve (3.4) denklemlerinde kullanılarak Φ_B ve R_s değerleri hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 4'de listelenmiştir. Tablo 4'den de görüldüğü gibi, Φ_B ve R_s değerleri sırasıyla D0 diyotu için 0,902 eV ve 46,898 Ω ve D5 diyotu için de 0,864 eV and 16,839 Ω olarak belirlenmiştir. Norde yöntemiyle elde edilen R_s değerlerinin, diğer yöntemlerle hesaplanan değerlerle büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak Norde yöntemiyle elde edilen Φ_B değerleri Rhoderick ve Cheung yöntemlerinden elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bu tutarsızlıklar kullanılan yöntemlerdeki farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir. Seri direnç, diyottaki doğru beslem akımını sınırlayan ve diyotun elektriksel özelliklerini etkileyen kritik bir parametredir. Bir diyota doğru yönde bir beslem gerilimi uygulandığında, gerilim arayüzey tabakası, tükenim tabakası ve seri direnç üzerinde paylaşılır. Sonuç olarak, diyottan daha fazla akım geçmesine izin vermek için daha yüksek voltajlara ihtiyaç duyulur. Böylece, yüksek voltajlarda, $\ln(I)$ - V eğrileri R_s 'nin etkisi nedeniyle aşağı doğru bükülme eğilimindedir (Sağlam et al. 2010).



Şekil 33. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyetlerin oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen $F(V)$ - V eğrileri.

Metal-yarıiletken doğrultucu eklemlerdeki arayüzey durumları, üretilen aygıtların performansını ve kararlılığını etkileyebileceğinden aygıt fiziğinde yakından incelenmelidir. Çeşitli sebeplerden dolayı aygıt arayüzeyinde arayüzey durumları meydana gelebilir. Bir metal ile bir yarıiletkenin kontak halinde olduğu arayüzeyde atomların dizilimi ve yüzeylerdeki yük dağılımı değişebilir. Metallerde ve yarıiletkenlerde, iş fonksiyonu kristal örgünün periyodik potansiyelinden gelen bir hacim katkısına ve yüzey dipollerinden gelen bir yüzey katkısına sahiptir. Periyodik örgü yüzeyde sonlandığında, bulk kristalin enerji bant yapısından farklı, yüzeye özgü elektronik durumlar oluşur. Bu yüzey durumları tüm malzemelerin yüzeylerinde bulunabilir. Yüzey durumları, bir yüzey dipolü oluşturarak metalin metalik yüzeylerdeki iş fonksiyonuna katkıda bulunabilir. Yarıiletkenlerde ise, bant aralığı içindeki yüzey durumlarının yarıiletkenin Fermi seviyesini sabitlediği (pin) bilinmektedir. Ayrıca, yarıiletken yüzeyindeki yüzey durumları, yüzey dipolleri oluşturarak yarıiletkenin elektron ilgisini doğrudan etkileyebilir. Bu dipollerin etkisi aynı zamanda arayüzeydeki uzaysal yük dağılımına da bağlıdır. Arayüzeydeki arayüzey durumlarının özellikleri büyük ölçüde yüzey hazırlama koşullarına da bağlıdır. Aygıt fiziğinde yüzey durumları ve bunların elektriksel karakteristikler üzerindeki etkileri araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde araştırmıştır (Sağlam et al. 2010, Taşer et al. 2017, Özdemir et al. 2002 ve Tataroğlu et al. 2003). Diyotların doğru beslem I-V karakteristikleri kullanılarak, arayüz durumlarının yoğunluğu aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanabilir (Rhoderick and Williams 1988, Sze 1981 ve Taşer et al. 2017);

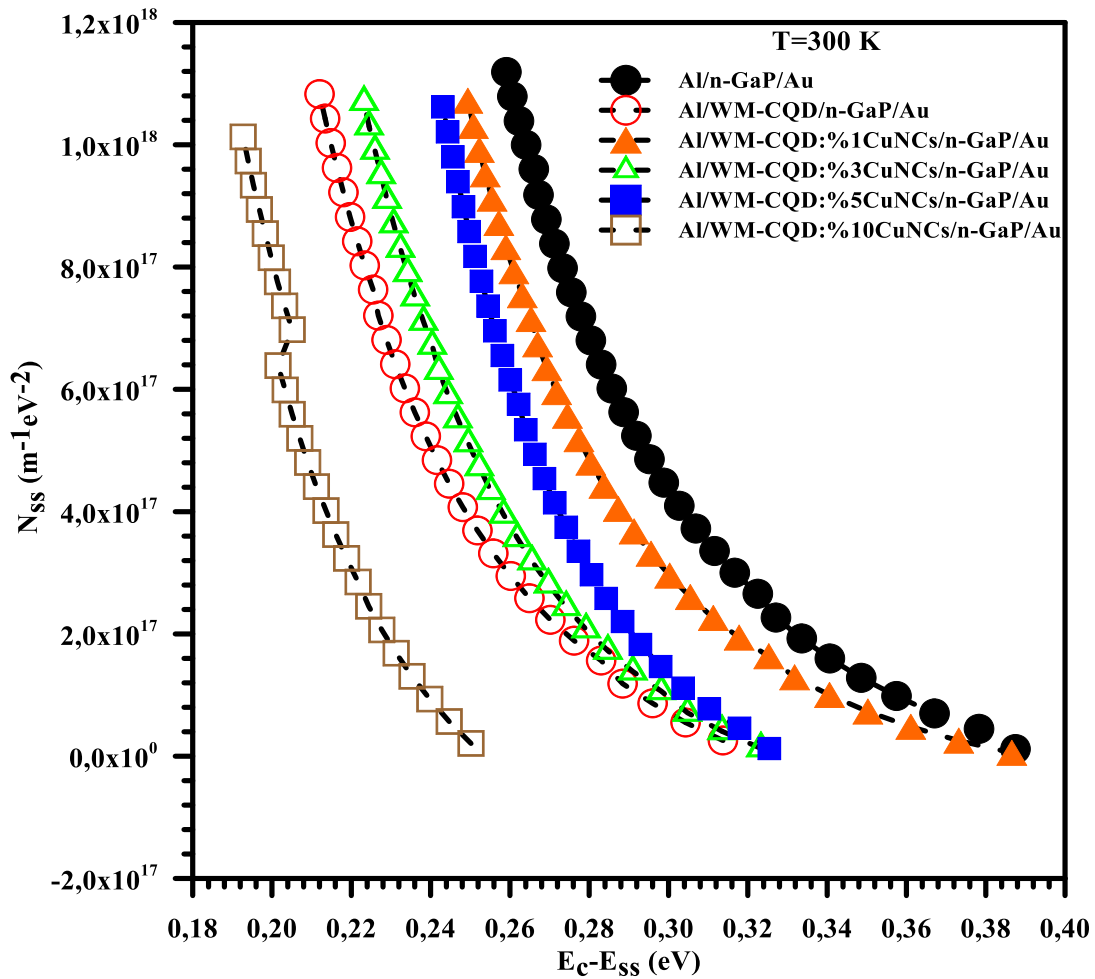
$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W} + qN_{ss} \right] \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte W tükenim tabakasının genişliği, N_{ss} arayüzey durumlarının yoğunluğu, ϵ_s ve ϵ_i sırasıyla yarıiletken ve arayüzey tabakasının dielektrik sabitleridir. İletkenlik bandının tabanına göre arayüz durumlarının enerjisi (E_{ss}) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Card and Rhoderick 1971 ve Kolnik and Ozvold 1990);

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_B - V) \quad (3.6)$$

Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen $N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ eğrileri Şekil 34'te verilmiştir. Literatürde rapor edilen sonuçlarla uyumlu olarak, tüm numuneler için arayüzey durum yoğunluğunun yarıiletkenin iletim bandının tabanından bant aralığının ortasına doğru eksponansiyel olarak azaldığı gözlenmiştir. Aynı zamanda, N_{ss} büyüklükleri tüm numunelerde aynı mertebede olmasına rağmen, arayüzey tabakalı diyotlardaki N_{ss} eğrileri D0 diyotuna göre düzensiz bir şekilde sola kaymıştır. En belirgin sola kayma D5 diyodunda gözlenmiştir. Yarıiletken bant aralığındaki doymamış bağlar, kusurlar veya tuzaklar, arayüzey durumlarının

yoğunluk dağılımlarını etkileyebilir. Yoğunluk fonksiyonel teorisi, yüzeydeki farklı atomlarla etkileşime giren bu doymamış bağların enerjisinin bant aralığında bir enerji seviyesine sahip olduğunu ve eğer bu atomlar arayüzeyde doymamış bağın yakınında yer alıyorsa ve zayıf bir şekilde etkileşime giriyorsa, doymamış bağ enerjisi seviyesinin bant aralığından aşağıya doğru kaydığını göstermektedir. Arayüzey durumlarının bazı elektronları yakalamasıyla oluşan akım bileşeni, termiyonik emisyon mekanizmasıyla oluşan akım bileşenine eklendiğinde diyotun elektriksel karakteristikleri değişebilir. Bu nedenle, metal-yarıiletken arayüzeyindeki hem fiziksel kusurlar hem de kimyasal safsızlıklar, yarıiletken aygıtların elektriksel karakteristiklerinde baskın bir rol oynayabilir ve arayüzeye ince bir arayüzey tabakası eklenerek onların rolleri değiştirilebilir (Sah 1991).



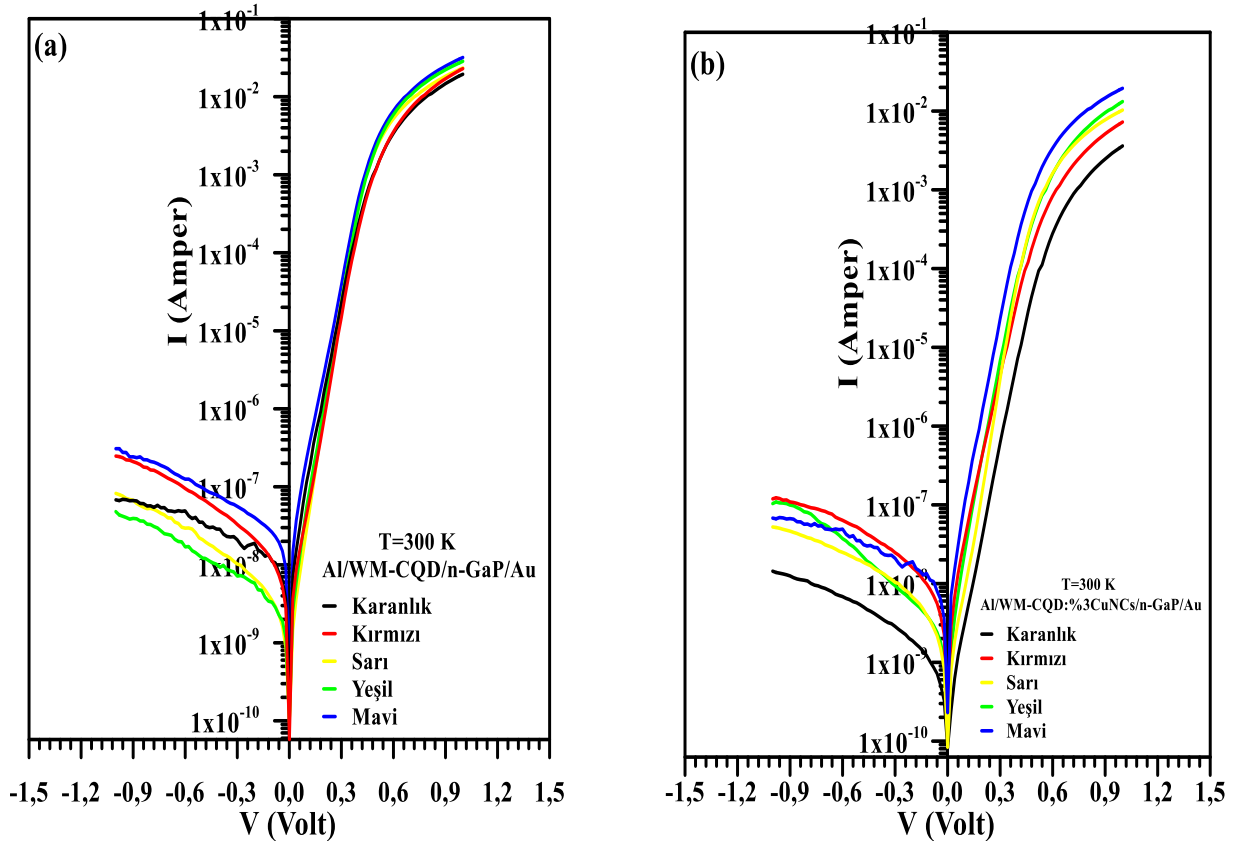
Şekil 34. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen E_c-E_{ss} 'ye karşılık N_{ss} eğrileri.

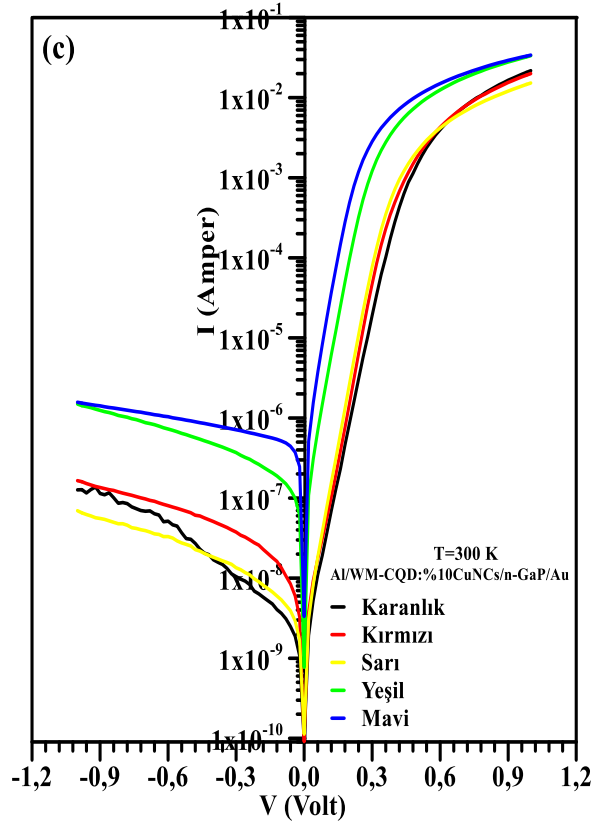
Tablo 4. Laboratuvar şartlarında üretilen referans ve arayüzey tabakalı diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta akım-gerilim karakteristiklerinden farklı yöntemlerle hesaplanan parametrelerinin değerleri.

Numune Adları →			Al/n-GaP/Au	Al/WM-CQD/n-GaP/Au	Al/WM-CQD:%1CuNCs/n-GaP/Au	Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au	Al/WM-CQD:%5CuNCs/n-GaP/Au	Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au
M E T O D L A R	ln(I)-V Metodu	I ₀ (A)	1,05x10 ⁻⁸	8,84x10 ⁻⁹	7,63x10 ⁻¹⁰	1,83x10 ⁻⁹	1,14x10 ⁻⁹	8,24x10 ⁻⁹
		Φ _b (eV)	0,764	0,768	0,832	0,809	0,821	0,770
		n	1,623	1,484	1,222	1,263	1,167	1,262
		V _{on} (V)	0,554	0,533	0,545	0,529	0,498	0,458
		R _s (Ω) (+1 V'da)	69,712	51,390	46,385	46,025	42,784	27,411
	Cheung M. dV/d(lnI)-I	n	1,973	1,798	1,611	1,679	1,466	1,486
		R _s (Ω)	22,704	20,067	17,948	17,699	18,512	10,929
	Cheung M. H(I)-I	Φ _b (eV)	0,722	0,725	0,765	0,739	0,761	0,722
		R _s (Ω)	26,667	21,197	19,055	19,873	19,837	13,062
	Norde Metodu	F(V) _{min} (V)	0,7180	0,7035	0,7101	0,6991	0,6887	0,6641
		V _{min} (V)	0,4202	0,4202	0,4402	0,4202	0,4202	0,4002
		I _{min} (A)	2,08x10 ⁻⁴	3,64x10 ⁻⁴	4,14x10 ⁻⁴	4,31x10 ⁻⁴	6,43x10 ⁻⁴	11,34x10 ⁻⁴
		Φ _b (eV)	0,902	0,888	0,904	0,883	0,873	0,864
		R _s (Ω)	46,898	36,680	48,625	44,246	33,521	16,839

4.4. Laboratuvar Şartlarında Üretilen Arayüzey tabakalı Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Uygulanan Işğın Dalga Boyuna Bağlı Olarak İncelenmesi

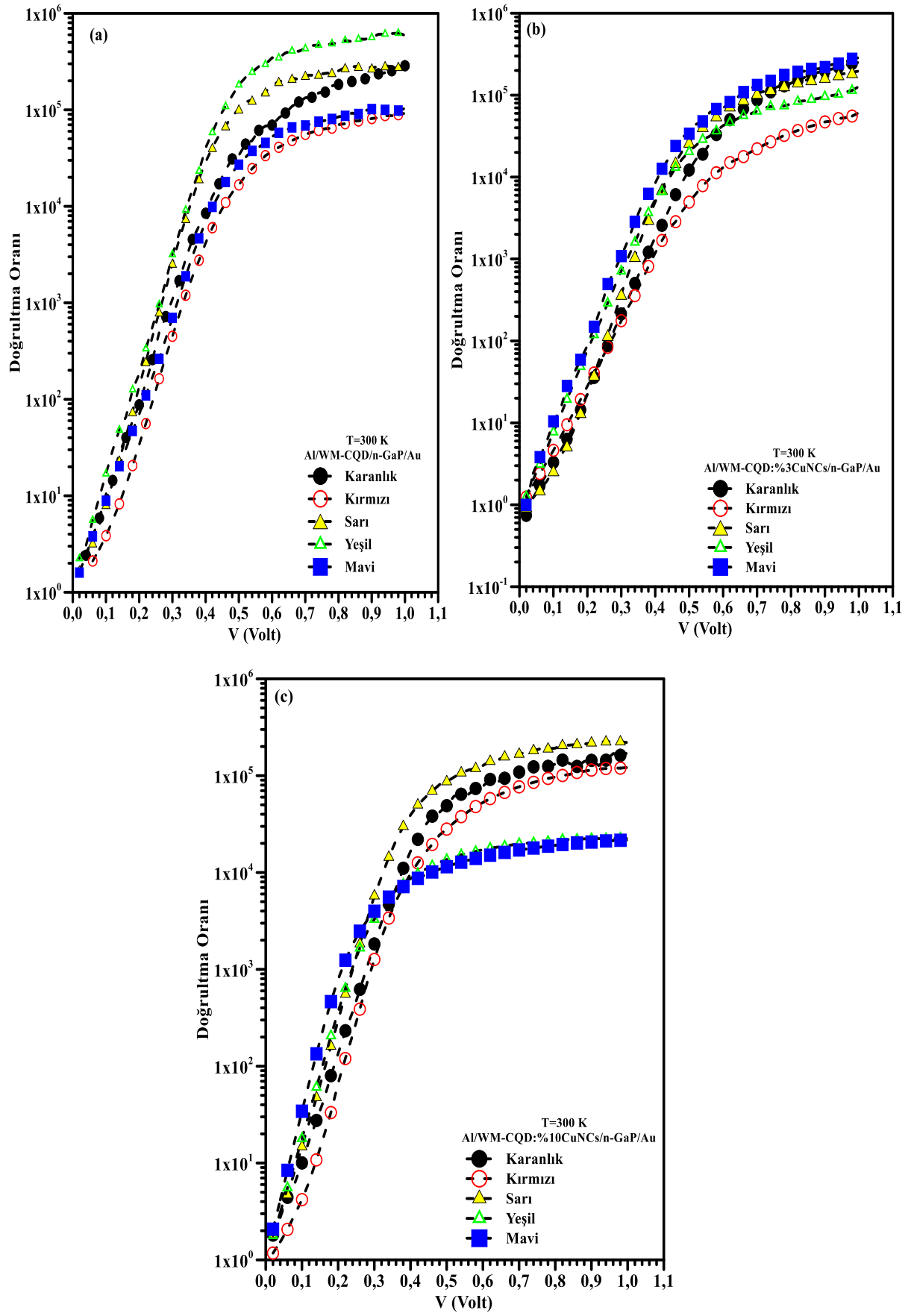
Arayüzey tabakalarının farklı dalga boylarındaki aydınlatmaya olan duyarlılığını ortaya koymak için, üretilen D1, D3 ve D5 diyotlarının I-V ölçümleri, oda sıcaklığında, karanlıkta ve farklı dalga boylarındaki aydınlatma altında, HP p-n:450666-001 model simülatörü ve Keithley 2400 Pikoammeter/Gerilim Kaynağı kullanılarak alınmıştır. Numunelerin aydınlatılmasında simülatörden gelen 30 mW/cm² şiddetindeki kırmızı (~665 nm), sarı (~600 nm), yeşil (~550 nm) ve mavi (~470 nm) renkli ışıklar kullanılmıştır. D1, D3 ve D5 diyotlarının karanlık ve çeşitli aydınlatma koşulları altındaki doğru ve ters beslem ln(I)-V eğrileri sırasıyla Şekil 35(a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir. Şekil 35'den de görüldüğü gibi, diyotların aydınlatma altındaki foto tepkisi, özellikle D3 ve D5 numunelerinde, karanlıktaki ölçümlerden önemli ölçüde daha büyük görünmektedir. Başka bir deyişle, WM-CQD ince filmine katkılanan Cu NC'lerin yüzdesi arttıkça fototepki de artmaktadır. Bu, numuneleri aydınlatmak için kullanılan ışğın dalga boyu maviye doğru değıştikçe, eklemdeki foto taşıyıcıların sayısının artmasından dolayı foto tepkinin arttığı anlamına gelmektedir. Şekil 35 (b) ve (c)'deki karakteristikler göz önüne alındığında, WM-CQD:%3CuNC ve WM-CQD:%10CuNC ince tabakalarının aydınlatma altında eklemde yük taşıyıcıları oluşturarak etkili bir optik soğurucu olarak davrandığı söylenebilir. Şekil 35'de verilen karakteristikler kullanılarak Rhoderick yöntemi yardımıyla D1, D3 ve D5 diyotlarına ait I_0 , Φ_B ve n değeri hesaplanmış olup, bu değeri Tablo 5'de sunulmuştur.



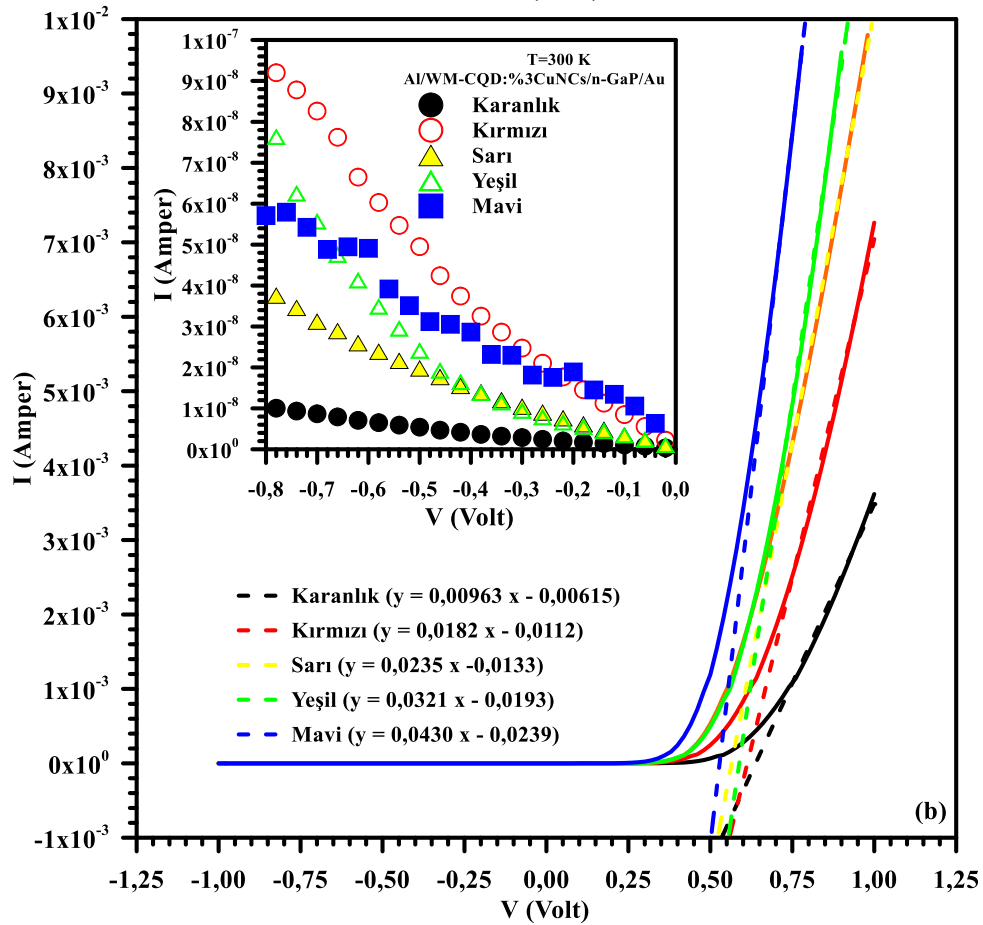
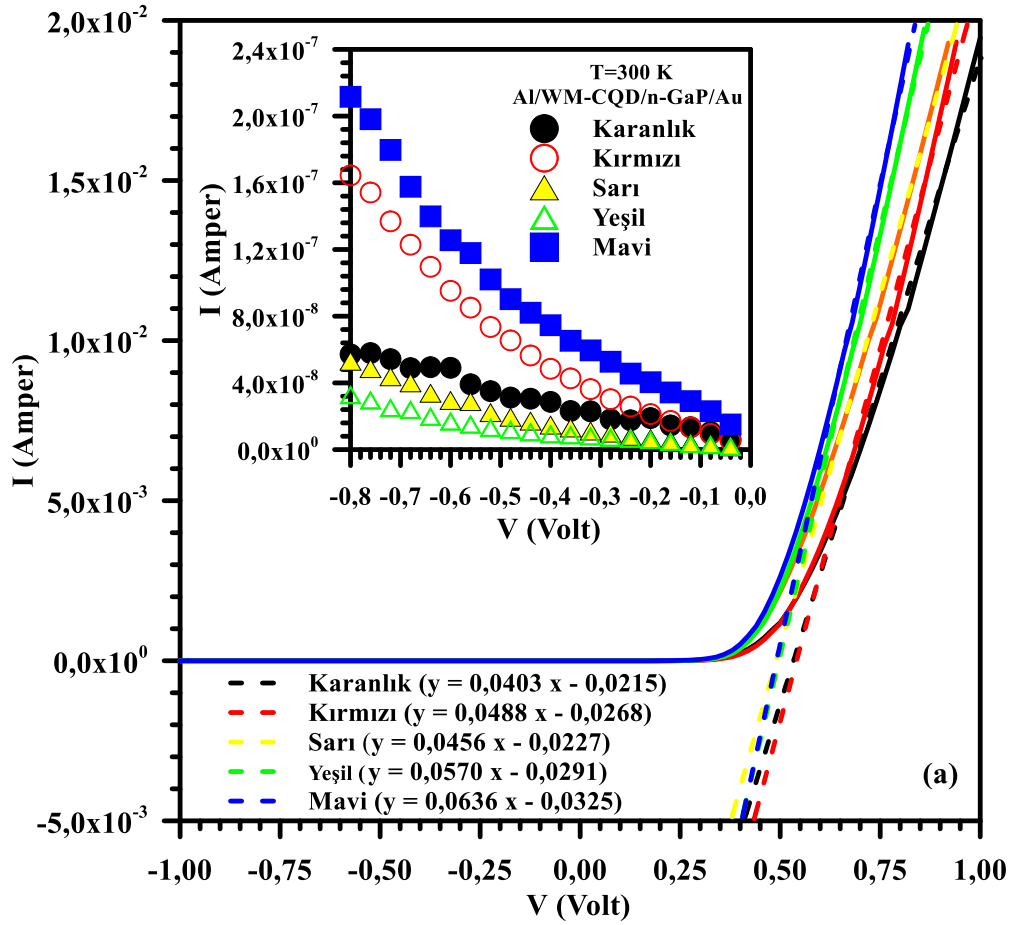


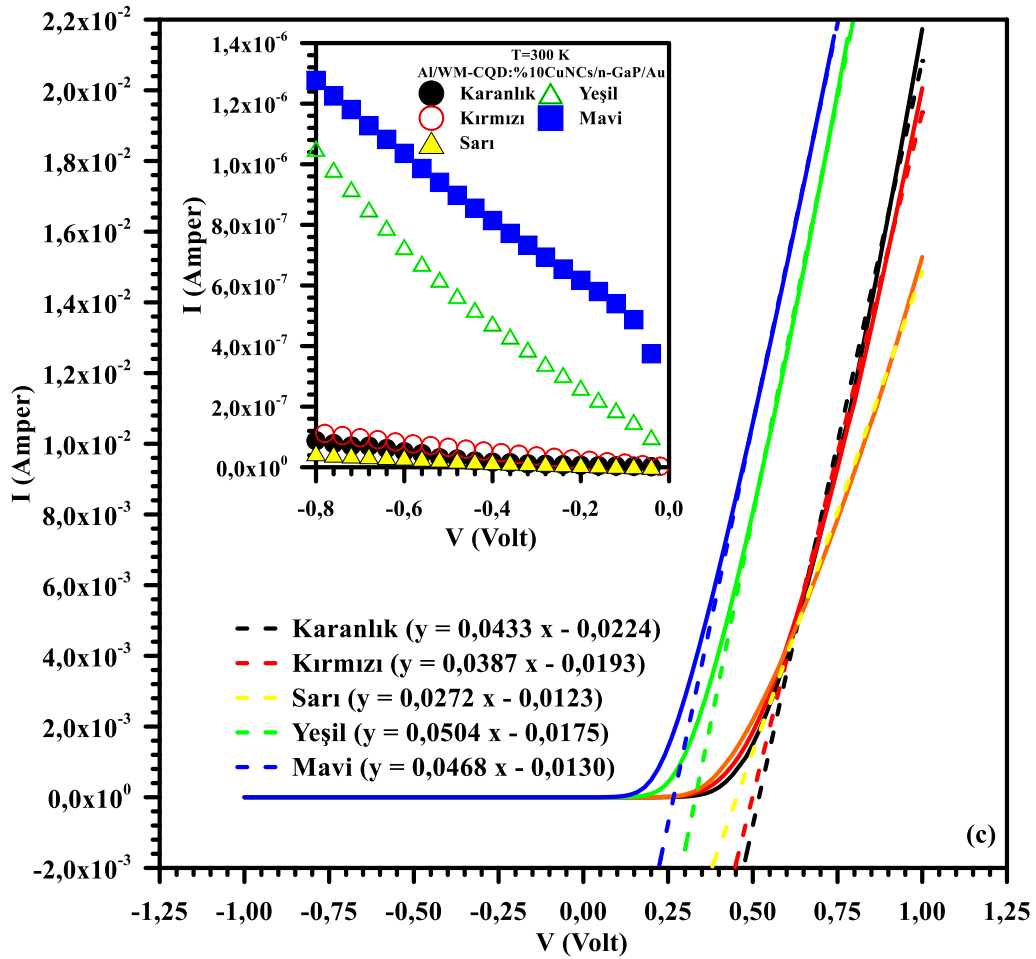
Şekil 35. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğru ve ters beslem $\ln(I)$ -V eğrileri.

Aynı zamanda D1, D3 ve D5 diyotlarının karanlık ve çeşitli aydınlatma koşulları altındaki doğrultma oranı-gerilim eğrileri Şekil 36’da verilmiştir. WM-CQD:%3CuNC ve WM-CQD:%10CuNC arayüzey tabakalarının ışığa duyarlılığı bu grafiklerden de açıkça görülmektedir. D1, D3 ve D5 diyotlarının karanlık ve farklı aydınlatma koşullarındaki I-V eğrileri sırasıyla Şekil 37 (a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Ayrıca grafiklerin içerisinde büyütülmüş ters beslem I-V karakteristikleri de gösterilmiştir. Şekil 37’nin içerisindeki grafikler, uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak diyotların ters beslem akımlarındaki değişimleri göstermektedir. Yeterli miktarda foton diyot eklemine çarptığında, elektron-delik çiftleri oluşur ve bu elektron-delik çiftlerinin miktarına bağlı olarak, serbest taşıyıcılar ters beslem akımında bir artışa neden olurlar (Alyamani et al. 2016 ve Yükseltürk et al. 2021). Yukarıda kesim 4.3’de anlatılan yöntem kullanılarak, uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak bu grafiklerden açılma gerilimi değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 5’de verilmiştir. Her üç numunede de V_{on} değerleri ışığın dalga boyunun maviye kaymasıyla azalmıştır. D1, D3 ve D5 numunelerinde karanlıkta V_{on} değerleri sırasıyla 0,533, 0,639 ve 0,517 V olarak belirlenirken, mavi ışık altında bu değerler sırasıyla 0,511, 0,556 ve 0,278 V olarak belirlenmiştir.



Şekil 36. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/W-M-CQD/n-GaP/Au, b) Al/W-M-CQD:3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/W-M-CQD:10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğrultma oranı-gerilim eğrileri.

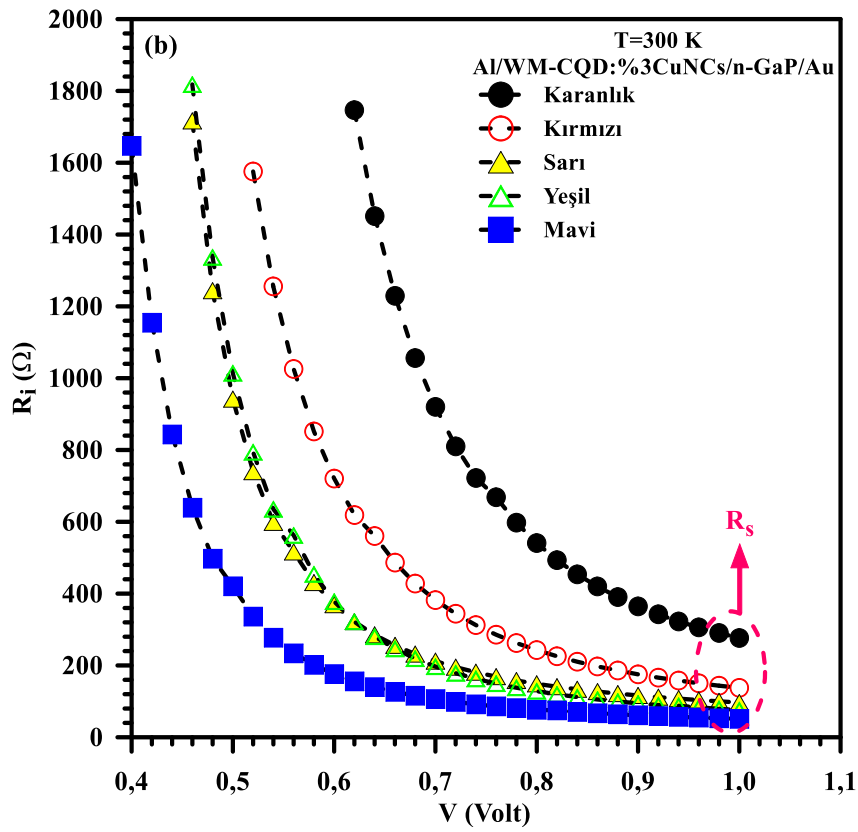
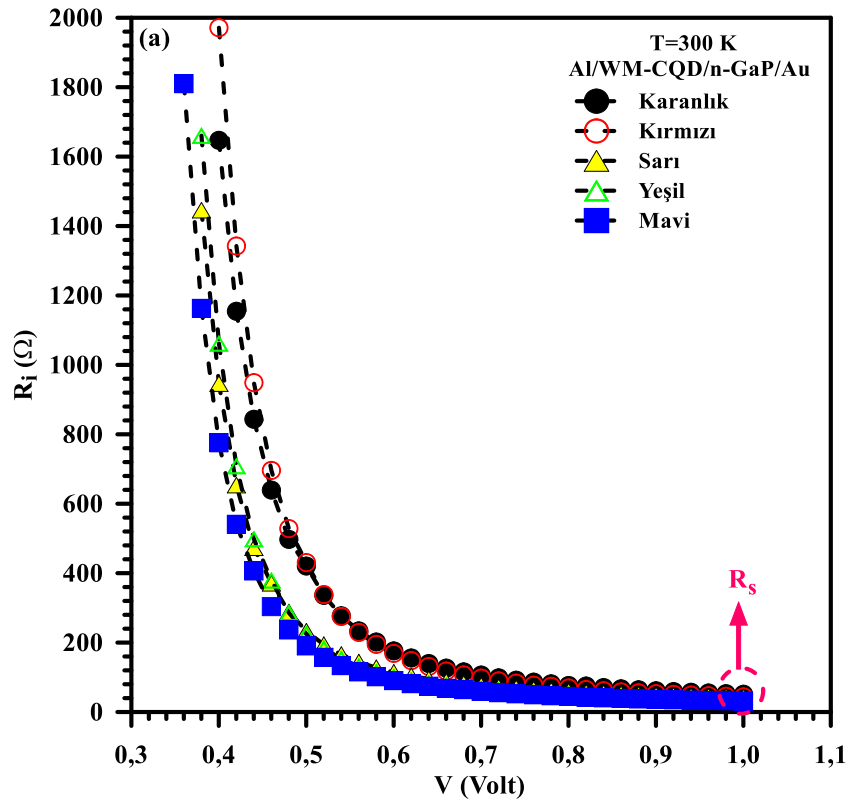


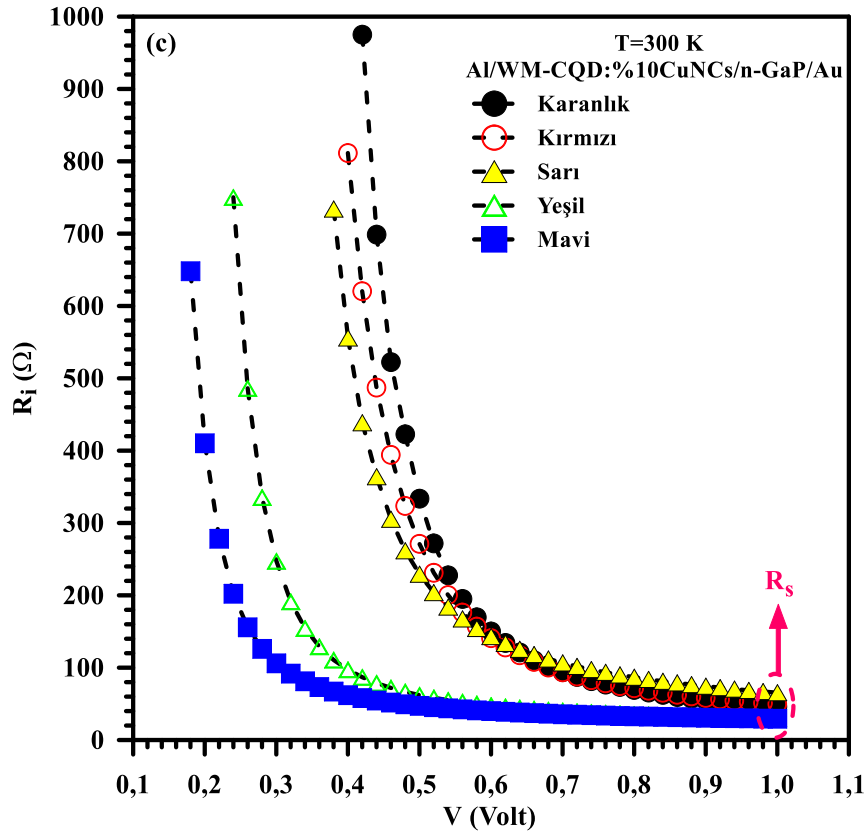


Şekil 37. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğru ve ters beslem I-V eğrileri. Büyütülmüş ters beslem I-V karakteristikleri grafiklerin içerisinde gösterilmiştir.

D1, D3 ve D5 diyotlarının doğru beslem gerilimine karşı eklem dirençlerinin karanlık ve çeşitli ışık koşullarındaki değişimi sırasıyla Şekil 38(a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Grafiklerden, D1, D3 ve D5 diyotları için hesaplanan R_i değerlerinin düşük gerilim değerlerinde uygulanan gerilim arttıkça azaldığı, daha yüksek gerilim değerlerinde ise doyuma yaklaştığı görülmüştür. Aynı zamanda ışığın kırmızıdan mavi dalga boyuna doğru uygulanmasıyla her üç numune de R_i değerleri azalmıştır ve eğriler sola doğru kaymıştır. Bu grafikler kullanılarak 1 V doğru beslem geriliminde hesaplanan R_s değerleri Tablo 5'de sunulmuştur. Karanlıkta D1, D3 ve D5 diyotlarının hesaplanan R_s değerleri sırasıyla 51,390, 276,394 ve 46,025 Ω olarak belirlenirken, mavi ışık altında bu değerler sırasıyla 31,450, 51,390 ve 29,405 Ω olarak belirlenmiştir. Bu analiz, direnç değerleri ile aydınlatma arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Uygulanan ışığın dalga boyunun maviye doğru değişmesiyle R_i ve R_s değerlerinde meydana gelen azalma, aydınlatma nedeniyle beslem bölgelerinin her iki tarafındaki bağ kırılmasının veya yük taşıyıcılarının serbest kalmasının artmasına bağlanabilir (Sürücü et al. 2024, Karabulut et al. 2022 ve Çoşkun et al. 2015). Diyotların direnci hem ışığın dalga boyundan hem

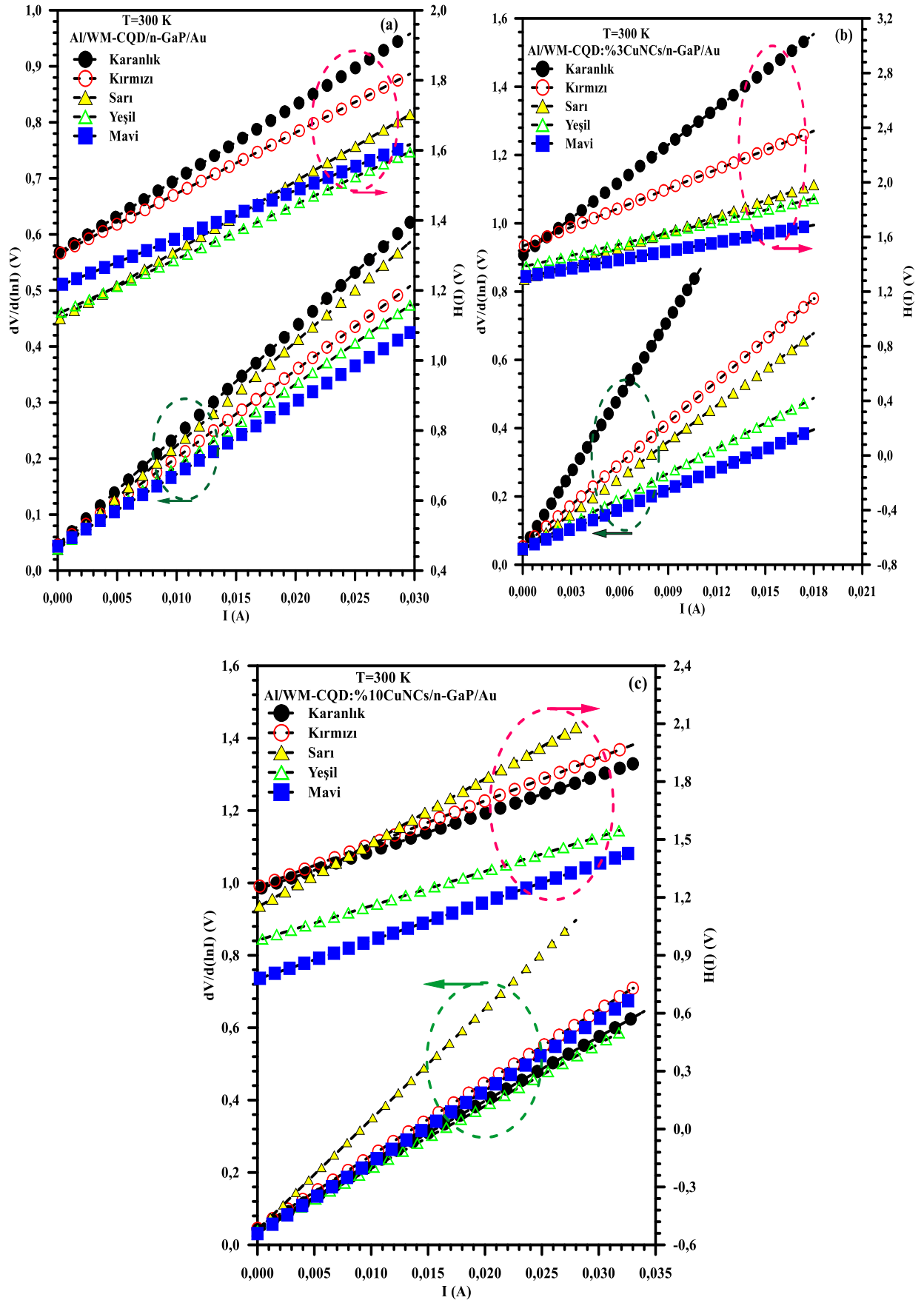
de uygulanan beslem voltajından etkilenmiştir. Yine WM-CQD ince filmine katkılanmış CuNC yüzdesine bağlı olarak R_i ve R_s 'de en önemli değişim D3 diyotunda gözlenmiştir.





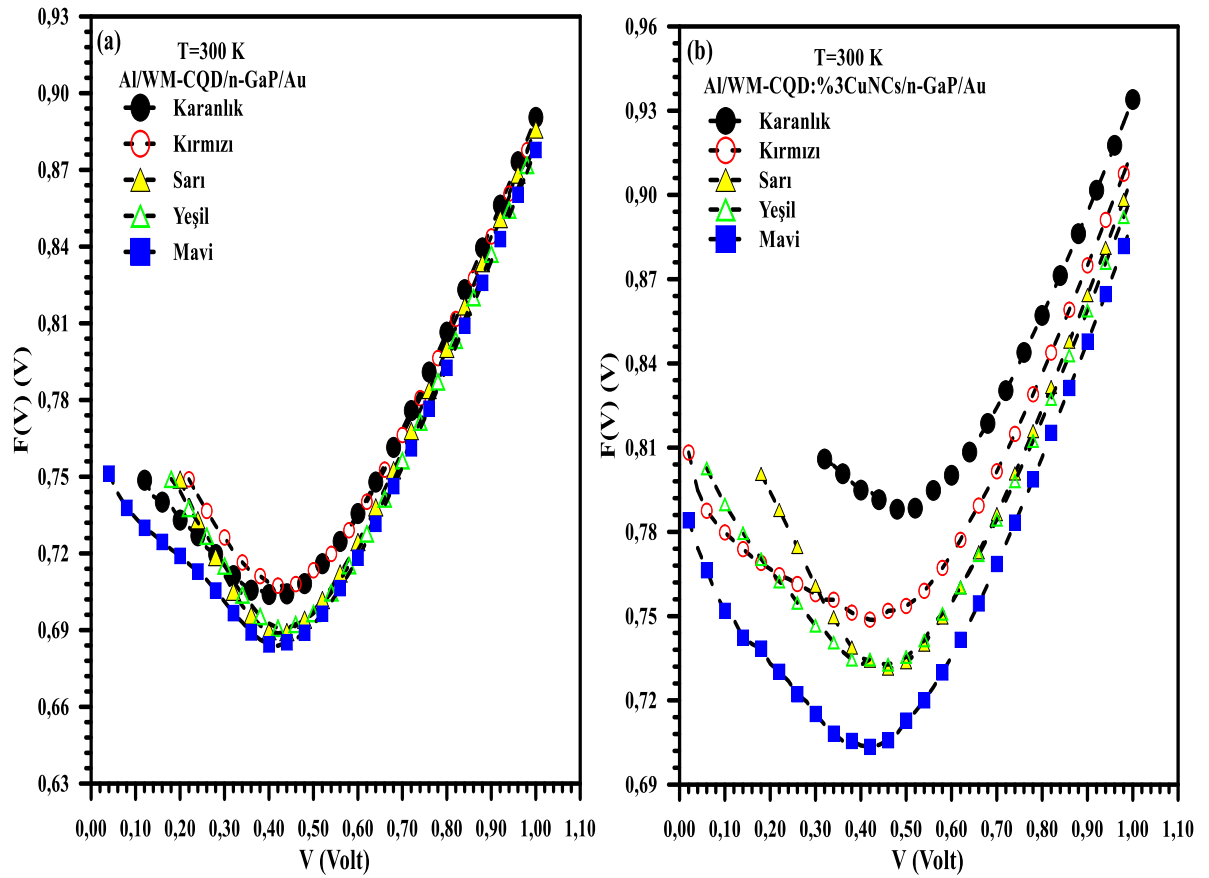
Şekil 38. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının doğru beslem voltajına karşılık eklem direncinin değişimi.

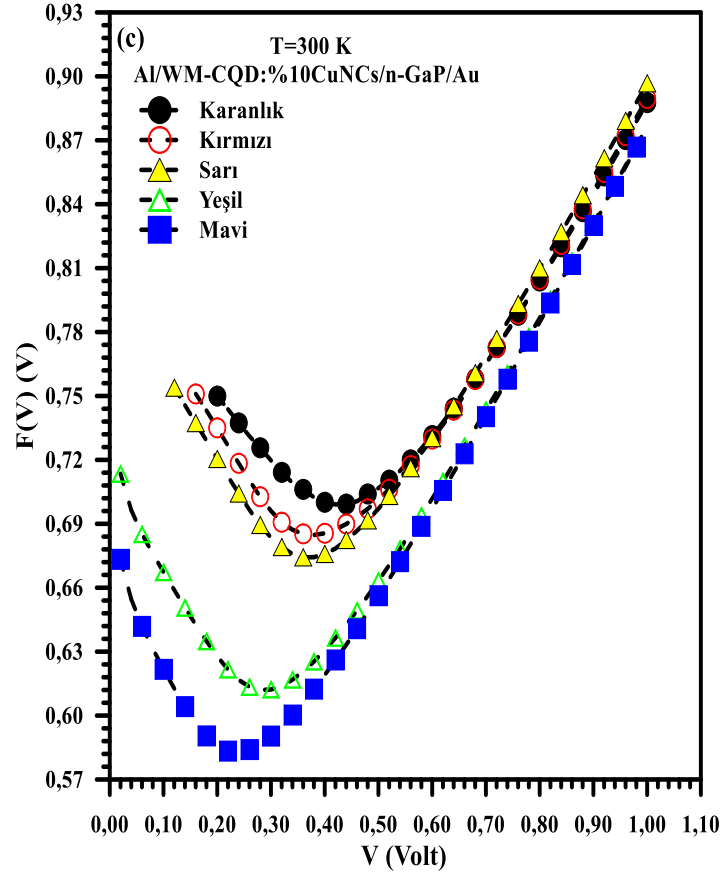
D1, D3 ve D5 diyotlarının karanlık ve farklı aydınlatma koşullarındaki $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri sırasıyla Şekil 39 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Kesim 2.5'de detayları verilen Cheung fonksiyonları yardımıyla, uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak diyotların n , Φ_B ve R_s değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 5'de sunulmuştur. Özellikle %3 ve %10 Cu NC'lerle katkılı D3 ve D5 numunelerinde uygulanan ışığın dalga boyu maviye doğru kaydıkça bu parametrelerin değerlerinin önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 39. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri.

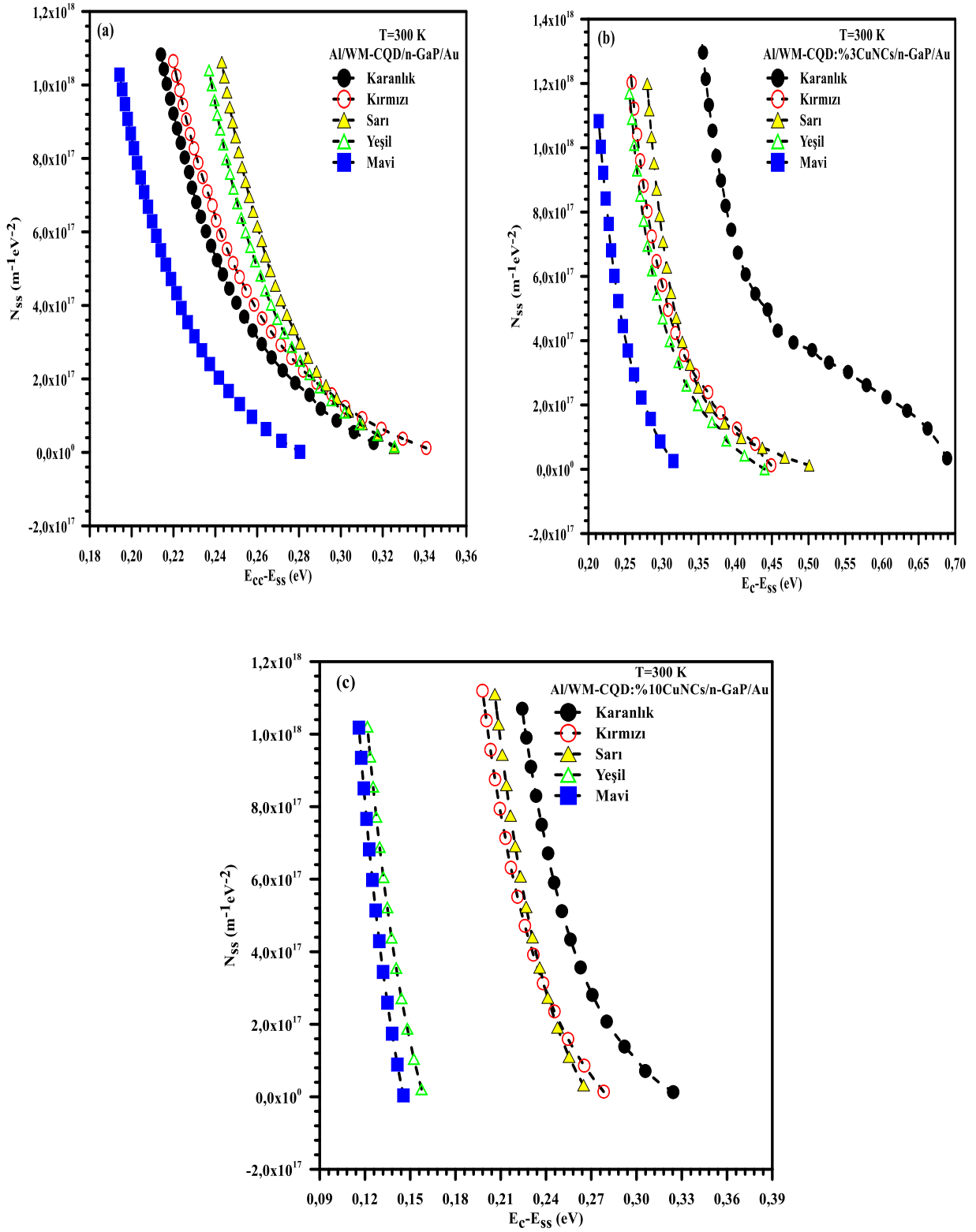
Yine kesim 2.5’de detayları verilen Norde yöntemi dikkate alınarak, D1, D3 ve D5 diyotlarının karanlık ve çeşitli aydınlatma koşullarında hazırlanan $F(V)$ - V eğrileri sırasıyla Şekil 40 (a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Bu eğriler ve denklem (3.3) ve (3.4) kullanılarak uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak diyotların Φ_B ve R_s değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 5’de sunulmuştur. Her üç numune için de bu yöntemle elde edilen Φ_B ve R_s değerleri, uygulanan ışığın dalga boyu maviye doğru kaydıkça önemli ölçüde azalmıştır. Başka bir deyişle, hem Cheung hem de Norde yöntemlerinden hesaplanan parametrik değerler de üretilen diyotların ışığa duyarlı olduğunu doğrulamaktadır.





Şekil 40. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının $F(V)$ - V eğrileri.

Diyotların arayüzey durum yoğunluklarının ışığa duyarlılığını ortaya koymak için, kesim 4.3’de açıklanan yöntemle, uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak D1, D3 ve D5 diyotlarının arayüzey durum yoğunluk dağılımları hesaplanmış ve E_c - E_{ss} ’ye karşılık N_{ss} grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler Şekil 41(a), (b) ve (c)’de görülmektedir. Tüm numuneler için, arayüzey durum yoğunlukları yarıiletkenin iletim bandının tabanından bant aralığının ortasına doğru eksponansiyel olarak azalmaktadır. D1 diyotundaki arayüzey durum yoğunluk eğrileri uygulanan ışığın dalga boyuna göre rastgele bir değişim gösterirken, D3 ve D5 diyotlarının arayüzey durum yoğunluk eğrileri uygulanan ışığın dalga boyu maviye doğru değiştiğinde önemli ölçüde daha düşük enerjilere doğru kaymıştır. Yani WM-CQD ince filmine %3 ve %10 oranında katılanmış Cu NC’ler, arayüzeylerin ışığa duyarlılığını artırmış ve en büyük fotoduyarlılık mavi dalga boyunda gözlenmiştir. n-GaP yarıiletkeninin bant kenarı bu sonuca neden olabilir. Bu veriler, WM-CQD:CuNC arayüzey tabakasının n-GaP yüzeyini etkili bir şekilde pasifleştirdiğini ve n-GaP yüzeyindeki derin tuzak seviyelerini azalttığını göstermektedir (Rani et al. 2024).



Şekil 41. Karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında a) Al/WM-CQD/n-GaP/Au, b) Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve c) Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının $E_c - E_{ss}$ 'ye karşılık N_{ss} eğrileri.

Tablo 5. Karanlık ve çeşitli aydınlatma koşulları altında Al/WM-CQD/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının akım-gerilim karakteristiklerinden farklı yöntemlerle hesaplanan parametrelerinin değerleri.

Numune Adları↓	Aydınlatma Renkleri ↓	METODLAR													
		ln(I)-V Metodu					Cheung Metodu				Norde Metodu				
							dV/d(lnI)-I		H(I)-I						
		I ₀ (A)	Φ _b (eV)	n	V _{on} (V)	R _s (Ω)	n	R _s (Ω)	Φ _b (eV)	R _s (Ω)	F(V) _{min} (V)	V _{min} (V)	I _{min} (A)	Φ _b (eV)	R _s (Ω)
Al/WM-CQD/n-GaP/Au	Karanlık	8,84x10 ⁻⁹	0,768	1,484	0,533	51,390	1,796	19,415	0,727	21,155	0,7035	0,4202	3,64x10 ⁻⁴	0,888	36,680
	Kırmızı	2,20x10 ⁻⁹	0,804	1,325	0,549	43,731	1,766	15,591	0,737	17,421	0,7072	0,4402	4,64x10 ⁻⁴	0,901	37,641
	Sarı	1,14x10 ⁻⁹	0,821	1,167	0,498	42,784	1,466	18,512	0,761	19,822	0,6887	0,4202	6,43x10 ⁻⁴	0,873	33,521
	Yeşil	2,74x10 ⁻⁹	0,799	1,289	0,511	35,090	1,490	14,693	0,760	15,625	0,6905	0,4402	8,84x10 ⁻⁴	0,885	20,811
	Mavi	1,65x10 ⁻⁹	0,752	1,490	0,511	31,450	1,683	12,871	0,720	13,678	0,6838	0,4202	7,77x10 ⁻⁴	0,868	16,984
Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au	Karanlık	2,39x10 ⁻¹⁰	0,862	1,488	0,639	276,394	1,778	78,213	0,825	89,951	0,7877	0,4999	6,55x10 ⁻⁴	1,012	20,226
	Kırmızı	4,25x10 ⁻⁹	0,787	1,676	0,615	137,665	2,054	40,998	0,746	46,898	0,7485	0,4400	0,94x10 ⁻⁴	0,943	89,567
	Sarı	3,47x10 ⁻¹⁰	0,852	1,251	0,566	96,900	1,653	35,296	0,778	38,729	0,7313	0,4599	2,68x10 ⁻⁴	0,935	72,315
	Yeşil	2,00x10 ⁻⁹	0,807	1,437	0,601	75,728	1,818	24,522	0,760	27,721	0,7328	0,4599	2,53x10 ⁻⁴	0,937	57,580
	Mavi	8,84x10 ⁻⁹	0,768	1,484	0,556	51,390	1,796	19,415	0,727	21,119	0,7035	0,4202	3,64x10 ⁻⁴	0,888	36,680
Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au	Karanlık	1,83x10 ⁻⁹	0,809	1,263	0,517	46,025	1,679	17,699	0,740	19,686	0,6991	0,4202	4,31x10 ⁻⁴	0,883	44,246
	Kırmızı	2,33x10 ⁻⁹	0,803	1,193	0,499	49,853	1,759	20,113	0,713	22,316	0,6848	0,3800	3,45x10 ⁻⁴	0,849	60,525
	Sarı	3,82x10 ⁻⁹	0,790	1,195	0,452	65,435	1,611	30,548	0,713	33,261	0,6743	0,3602	3,53x10 ⁻⁴	0,828	59,007
	Yeşil	1,48x10 ⁻⁷	0,695	1,220	0,347	29,893	1,506	17,219	0,649	17,889	0,6120	0,2801	8,35x10 ⁻⁴	0,726	24,171
	Mavi	5,79x10 ⁻⁷	0,660	1,121	0,278	29,405	1,206	19,748	0,644	19,976	0,5828	0,2401	11,87x10 ⁻⁴	0,677	19,161

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada n-GaP yarıiletkeni altlık olarak kullanılarak Al/n-GaP/Au, Al/WM-CQD/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:1%CuNCs/n-GaP/Au and Al/WM-CQD:3%CuNCs/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:5%CuNCs/n-GaP/Au ve Al/WM-CQD:10%CuNCs/n-GaP/Au referans ve arayüzey tabakalı diyotları laboratuvar şartlarında üretilmiştir. Önce n-GaP yarıiletken altlık kimyasal olarak temizlendikten sonra, mat yüzeyine 99,999 oranında yüksek saflıkta altın metali kullanılarak omik kontak yapılmıştır. Omik kontak işlemleri termal buharlaştırma cihazının vakum odası içerisinde yaklaşık 10^{-6} Torr basınç altında altın metali buharlaştırılarak ve arkasından 500 °C'de azot gazı ortamında 3 dakika termal olarak tavlanarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada farklı arayüzey özelliklerine sahip altı adet diyotun üretimi planlandığı için, altın omik kontaklı n-GaP yarıiletkeni elmas uçlu bir kalem kesici yardımıyla uygun boyutta altı parçaya bölünmüştür. Diyotların doğrultucu kontak alanlarını belirlemede 99,999 oranında yüksek saflıkta aliminyum metali kullanılmıştır. n-GaP parçalarından birisinin temiz ve parlak yüzeyi üzerine aliminyum metali termal buharlaştırma cihazı içerisinde 10^{-6} Torr basınç altında buharlaştırılarak Al/n-GaP/Au referans diyotu üretilmiştir. Doğrultucu kontak alanı $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olacak şekilde dairesel şekilli maske kullanılmıştır. Geriye kalan beş adet altın omik kontaklı n-GaP yarıiletken parça, farklı arayüzey özelliklerine ve farklı arayüzey tabakalarına sahip diyotların üretiminde kullanılmıştır. Arayüzey tabakası oluşturmak için önce WM-CQD'ler basit ve yeşil hidrotermal yöntem kullanılarak beyaz duttan sentezlenmiştir. Sonra 0,01 g amonyum sitrat, 0,01 g üre ve 0,05 g bakır klorür kullanılarak ve çeşitli işlemlerden geçirilerek üretilen Cu NC'ler daha önce sentezlenen WM-CQD çözeltisi içerisine sırasıyla %1, %3, %5 ve %10 oranında katılarak, dört farklı oranda Cu NC'lerle katılanmış WM-CQD:CuNCs çözeltileri elde edilmiştir. Parçaların her birinin parlak ve temiz yüzeyleri üzerine sırasıyla WM-CQD, WM-CQD:1%CuNCs, WM-CQD:3%CuNCs, WM-CQD:5%CuNCs ve WM-CQD:10%CuNCs çözeltileri döndürerek kaplama yöntemiyle ince film halinde yerleştirilmiştir. Filmlerin üzerine 10^{-6} Torr basınçta buharlaştırılarak yerleştirilen $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ dairesel alana sahip aliminyum kontaklarla arayüzey tabakalı diyotların üretimi tamamlanmıştır. WM-CQD, WM-CQD:1%CuNCs, WM-CQD:3%CuNCs, WM-CQD:5%CuNCs ve WM-CQD:10%CuNCs çözeltileri n-GaP üzerine yerleştirilmeden önce, XRD, TEM, FTIR ve PL spektroskopisi teknikleri kullanılarak onların yapısal ve optik özellikleri incelenmiştir. İnce film halinde n-GaP üzerine yerleştirildikten sonra da filmin SEM görüntüleri alınmıştır. Laboratuvar şartlarında üretilen altı adet diyotun I-V ölçümleri önce oda

sıcaklığında ve karanlıkta alınarak, Rhoderick, Norde ve Cheung metodları yardımıyla karakteristik parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra, Al/WM-CQD/n-GaP/Au, Al/WM-CQD:%3CuNCs/n-GaP/Au ve Al/WM-CQD:%10CuNCs/n-GaP/Au diyotlarının I-V ölçümleri, oda sıcaklığında, karanlıkta ve farklı dalga boylarındaki aydınlatma altında, HP p-n:450666-001 model simülatörü ve Keithley 2400 Pikoampermetre/Gerilim Kaynağı kullanılarak alınmıştır ve karakteristik parametreleri aynı metotlarla yeniden hesaplanmıştır.

TEM görüntülerinden, Cu NC'lerin ortalama parçacık boyutlarının 2 ila 10 nm arasında değiştiği ve küresel bir morfolojiyle homojen bir şekilde dağıldığı anlaşılmıştır. XRD analizlerinden, Cu NC'lerin dört farklı kırınım açısında dört farklı düzleme karşılık gelen kırınım piklerine sahip olduğu, WM-CQD'lerin ise sadece $2\theta = 21,51^\circ$ de (002) düzlemine karşılık gelen geniş bir kırınım pikine sahip olduğu gözlenmiştir. FTIR spektroskopisiyle yapılan incelemede, $3342,7\text{ cm}^{-1}$ civarında gözlenen geniş bantın, amino ($-\text{NH}_2$) ve hidroksil ($-\text{OH}$) gruplarının gerilme titreşimlerine, $2403,04\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikin $-\text{C}=\text{C}-$ bağının gerilme titreşimine ve 1458 cm^{-1} 'deki pik ise C-O bağının gerilme titreşimine atfedilmiştir. $1662,5\text{ cm}^{-1}$ 'deki bir diğer belirgin soğurma bandı ise, $-\text{NH}_2$ gruplarının amid bağları aracılığıyla varlığını doğruladığı ve harici bir azot kaynağına ihtiyaç duyulmadan azotun dahil edildiğini göstermiştir. Yine $1116,61\text{ cm}^{-1}$ 'deki bant ise C-OH bağlarının düzlem dışı bükülmesini göstermiştir. Bu sonuçlar, sodyum sitrat ve üreden gelen karboksil ($-\text{COOH}$) ve amino ($-\text{NH}_2$) grupları gibi fonksiyonel grupların Cu NC'lerin yüzeyinde bulunduğunu ifade etmektedir (Roy et al. 2015 ve Singh 2018). PL analizlerinde, WM-CQD'lerin emisyonunun uyarım dalga boyuna bağlı olduğu görülmüştür. Tüm numunelerde pik emisyon pozisyonunun artan uyarım dalga boyuyla yavaşça kırmızıya doğru kaydığı belirlenmiştir ve bu sonuç Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerin PL bağımlılığına sahip olduğunu göstermiştir. Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD'lerdeki fotolüminesans kuantum sınırlama etkilerine, kenar etkilerine ve yüzey fonksiyonel gruplarına atfedilmiştir (Chandra et al. 2012). Yüzey fonksiyonel grupları elektronik yapıyı değiştirerek yüzey kusurlarını pasifleştirebilirler, kararlılığı artırabilirler ve emisyon özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilirler. Dolayısıyla bu gruplar, gelen ışıkla etkileşime girebilirler ve WM-CQD'lerin elektronik yapısını değiştirebilirler (Dang et al. 2019 ve Saraswat et al. 2024). Döndürerek kaplama yöntemiyle n-GaP yarıiletken altlık üzerine yayılan Cu NC'lerle modifiye edilmiş WM-CQD ince filminin SEM görüntüsü, filmin altlık yüzeyini düzgün bir şekilde kapladığını, sürekli ve homojen tanelere sahip pürüzsüz bir yüzey oluşturduğunu ve yüzeyde ufak çatlaklar veya boşlukların bulunduğunu ortaya koymuştur. Böylece elde edilen yüzeylerin aygıt üretimine uygun olduğu ve filmin arayüzey tabakası olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Üretilen diyotların oda sıcaklığında alınan I - V ölçümlerinden iyi derecede doğrultucu davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Çizilen doğrultma oranı-gerilim grafikleri, referans diyotun 0,5-1,0 V aralığındaki doğrultma oranı değerlerinin yaklaşık olarak 10^4 - 10^5 arasında değiştiğini gösterirken, arayüzey tabakalı diyotlarda aynı gerilim aralığında bu oranın yaklaşık 10^5 - 10^6 olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla bu sonuç, ince WM-CQD:CuNC arayüzey tabakaları kullanılarak yüksek doğrultma oranına sahip Al/n-GaP/Au diyotların kolaylıkla üretilebileceğini göstermiştir.

Açılma voltajı olarak bilinen diyotların doğru beslem koşulunda tamamen iletken olduğu voltaj değerleri, doğru beslem I - V grafiklerine yapılan doğrusal fitler yardımıyla hesaplanmıştır ve D0 diyotu için 0,554 V ve D5 diyotu için de 0,458 V değerleri elde edilmiştir. Yani metal ile yarıiletken arasına bir arayüzey tabakasının girilmesiyle açılma voltajının azaldığı tespit edilmiştir ve bu durum, WM-CQD:CuNC arayüzey tabakasının, yarıiletken bant aralığında bulunan arayüzey durumlarını, kusurları ve çeşitli tuzakları pasifleştirerek yarıiletken yüzeyini modifiye etmesine atfedilmiştir (Seymen et al. 2022).

$R_i = \partial V / \partial I$ ilişkisi kullanılarak diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan I - V verilerinden eklem dirençleri hesaplanmıştır ve düşük gerilim değerlerinde R_i değerlerinin uygulanan gerilimin artmasıyla azaldığı ve daha sonra doyuma ulaştığı tespit edilmiştir. Doyum durumunda R_i değeri diyotun R_s değerine karşılık gelmektedir (El-Menyawy et al. 2024). 1 V'da D0 diyotu için R_s değeri 69,712 Ω ve D5 diyotu için de 27,411 Ω olarak belirlenmiştir. Yani WM-CQD ince film içerisindeki Cu NC'lerin yüzde miktarlarının artmasıyla R_s değerlerinin azaldığı ortaya çıkmıştır ve bu durum filmlerin iletkenliğinin artmasına bağlanmıştır (El-Menyawy 2015).

Rhoderick, Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan I - V ölçümlerinden I_s , n , Φ_B ve R_s karakteristik parametreleri hesaplanmıştır ve bu değerler Tablo 4'de sunulmuştur. Tablo 4'de n değerlerinin 1'den büyük olduğu görülmektedir. Birden büyük n değerleri, diyotların ideal olmadığını, yani termiyonik emisyon teorisinden sapmalar olduğunu göstermektedir. Tünelleme, jenerasyon-rekombinasyon, imaj kuvveti etkisi, arayüzey tabakası, arayüzey durumları ve engel yüksekliğinin besleme bağımlılığı gibi faktörler genellikle bu sapmalardan sorumludur (Rhoderick and Williams 1988, Sze 1981 ve Neamen 2012). Aynı zamanda WM-CQD arayüzey tabakasına katılan Cu NC'lerin yüzde olarak miktarının artmasıyla n değerlerinin bir miktar azaldığı, Φ_B değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir. Bu durum, arayüzey tabakasının arayüzey durumlarının yeniden dağılımını kontrol ederek yarıiletken yüzeyindeki kimyasal etkileşimi azaltmasına atfedilmiştir (Choi et al. 2015).

Hesaplanan parametrik değerlerin hesaplama yöntemlerine göre farklılıklar göstermesi, yöntemlerin I-V karakteristiklerinin farklı bölgeleri kullanmasına bağlanmıştır.

Diyotların oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan doğru beslem I-V karakteristiklerinden arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}) arayüzey durum enerjisine (E_c-E_{ss}) bağlı olarak hesaplanmıştır ve literatürde rapor edilen sonuçlarla uyumlu olarak, tüm numunelerde arayüzey durum yoğunluklarının yarıiletkenin iletim bandının tabanından bant aralığının ortasına doğru eksponansiyel olarak azaldığı gözlenmiştir. Tüm numunelerde N_{ss} büyüklüklerinin hemen hemen aynı mertebede olduğu, ancak arayüzey tabakalı diyotlarda N_{ss} eğrilerinin D0 diyotuna göre düzensiz bir şekilde düşük enerjilere doğru kaydığı tespit edilmiştir. Yarıiletken bant aralığındaki doymamış bağların, kusurların veya tuzakların, arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımlarını etkileyebileceği ve arayüzeye ince bir arayüzey tabakası eklenerek onların rollerinin değiştirilebileceği vurgulanmıştır (Sah 1991).

Arayüzey tabakalarının farklı dalga boylarındaki aydınlatmaya olan duyarlılığını ortaya koymak için, üretilen D1, D3 ve D5 diyotlarının I-V ölçümleri, oda sıcaklığında, karanlıkta ve 30 mW/cm^2 şiddetindeki kırmızı ($\sim 665 \text{ nm}$), sarı ($\sim 600 \text{ nm}$), yeşil ($\sim 550 \text{ nm}$) ve mavi ($\sim 470 \text{ nm}$) dalga boylarındaki aydınlatma altında alınmıştır. Rhoderick, Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak diyotların I-V ölçümlerinden I_s , n , Φ_B ve R_s karakteristik parametreleri kullanılan ışığın dalga boyuna bağlı olarak hesaplanmıştır ve bu değerler Tablo 5’de sunulmuştur. Doğru ve ters beslem $\ln(I)$ -V karakteristiklerinden, D3 ve D5 diyotlarının foto tepkisinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Yani, WM-CQD ince filmine katkılanan Cu NC’lerin yüzdesinin artmasıyla fototepkinin de arttığı gözlenmiştir. Bu durum WM-CQD:%3CuNC ve WM-CQD:%10CuNC ince tabakalarının aydınlatma altında eklemde yük taşıyıcıları oluşturarak etkili bir optik soğurucu olarak davranmasına bağlanmıştır. Aynı zamanda her üç numunede de V_{on} değerlerinin ışığın dalga boyunun maviye kaymasıyla azaldığı görülmüştür. Işığın kırmızıdan mavi dalga boyuna doğru uygulanmasıyla her üç numunede de R_i değerleri azalmıştır ve eğriler sola doğru kaymıştır. Uygulanan ışığın dalga boyunun maviye doğru değişmesiyle R_i ve R_s değerlerinde meydana gelen azalma, aydınlatma nedeniyle beslem bölgelerinin her iki tarafındaki bağ kırılmasının veya yük taşıyıcılarının serbest kalmasının artmasına atfedilmiştir (Sürücü et al. 2024, Karabulut et al. 2022 ve Çoşkun et al. 2015). Hem Cheung hem de Norde yöntemlerinden hesaplanan parametrik değerler, üretilen diyotların ışığa duyarlı olduğunu doğrulamıştır.

D1, D3 ve D5 diyotlarının arayüzey durum yoğunluk dağılımları uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak hesaplanmış ve üç numunede de arayüzey durum yoğunluklarının yarıiletkenin iletim bandının tabanından bant aralığının ortasına doğru eksponansiyel olarak azaldığı

gözlenmiştir. D1 diyotunda arayüzey durum yoğunluk eğrileri uygulanan ışığın dalga boyuna bağlı olarak rastgele bir değişim gösterirken, D3 ve D5 diyotlarının arayüzey durum yoğunluk eğrileri uygulanan ışığın dalga boyu maviye doğru değiştiğinde önemli ölçüde daha düşük enerjilere doğru kaymıştır. Yani %3 ve %10 oranında katılanmış Cu NC'ler, WM-CQD arayüzey tabakasının ve yarıiletken arayüzeylerinin ışığa duyarlılığını artırmış ve en büyük fotoduyarlılık mavi dalga boyunda gözlenmiştir. Bu analiz, WM-CQD:CuNC arayüzey tabakasının n-GaP yüzeyini etkili bir şekilde pasifleştirdiğini ve n-GaP yüzeyindeki derin tuzak seviyelerini azalttığını göstermiştir (Rani et al. 2024).

Sonuç olarak, arayüzey tabakalı diyotların aydınlatma altındaki foto tepkisi, özellikle D3 ve D5 diyotlarında, karanlıkta yapılan ölçümlere göre önemli ölçüde daha yüksek çıkmıştır. WM-CQD ince filmine katılan Cu NC'lerin yüzdesi arttıkça foto tepkinin arttığı açık bir şekilde görülmektedir ve Cu NC'lerin foto tepki mekanizmasında önemli bir rol üstlendiği ifade edilebilir. WM-CQD tabakası, Cu NC'lerin biriktirilmesinde etkili bir yük transfer tabakası görevi görerek Schottky eklemesinin oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla laboratuvar koşullarında çevre dostu biyolojik moleküller kullanılarak üretilen bu arayüzey tabakalı diyotların farklı optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Adachi, S., 1992. Physical properties of III-V semiconductor compounds, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Aghamali, A., Khosravi, M., Hamishehkar, H., Modirshahla, N. and Behnajady, M. A., 2018. Synthesis and characterization of high efficient photoluminescent sunlight driven photocatalyst of N-carbon quantum dots. *Journal of Luminescence*, 201, 265-274.
- Alsharari, A. M., Qashoub, S. I., Darwisha, A. A. A. and El-Nahass, M. M., 2020. Electronic and optoelectronic performance of nano-Vanadyl 2,3-naphthalocyanine/n-Si (organic/inorganic) solar cells: Temperature dependence. *Thin Solid Films*, 704, 137977.
- Alyamani, A., Tataroğlu, A., El Mir, L., Al-Ghamdi, A. A., Dahman, H., Farooq, W. A. and Yakuphanoglu, F., 2016. Photoresponse and photocapacitor properties of Au/AZO/p-Si/Al diode with AZO film prepared by pulsed laser deposition (PLD) method. *Applied Physics A*, 122, 297.
- Anwar, S., Ding, H., Xu, M., Hu, X., Li, Z., Wang, J., Liu, L., Jiang, L., Wang, D., Dong, C., Yan, M., Wang, Q. and Bi, H., 2019. Recent Advances in Synthesis, Optical Properties, and Biomedical Applications of Carbon Dots. *ACS Appl. Bio Mater.* 2(6), 2317–2338.
- Arumugam, N. and Kim, J., 2018. Synthesis of carbon quantum dots from Broccoli and their ability to detect silver ions. *Materials Letters*, 219, 37-40.
- Arvind, S., Mohapatra, P. K., Kalyanasundaram, D. and Kumar, S., 2019. Self-functionalized ultrastable water suspension of luminescent carbon quantum dots. *Materials Chemistry and Physics*, 225, 23-27.
- Athika, M., Prasath, A., Duraisamy, E., Sankar, D. V., Selva, S. A. and Elumalai, P., 2019. Carbon-quantum dots derived from denatured milk for efficient chromium-ion sensing and supercapacitor applications. *Materials Letters*, 241, 156-159.
- Averin, S. V., Kuznetsov, P. I., Zhitov, V. A., Alkeev, N. V., Kotov, V. M., Zakharov, L. Y. and Gladysheva, N. B., 2012. Metal-semiconductor-metal photodiodes based on ZnCdS/GaP wide-gap heterostructures. *Technical Physics*, 57 (11), 1514-1518.
- Azizi, B., Farhadi, K. and Samadi, N., 2019. Functionalized carbon dots from zein biopolymer as a sensitive and selective fluorescent probe for determination of sumatriptan. *Microchemical Journal*, 146, 965-973.
- Baltakesmez, A., Taşer, A., Kudaş, Z., Güzeldir, B., Ekinci, D. and Sağlam, M., 2019. Barrier Height Modification of n-InP Using a Silver Nanoparticles Loaded Graphene Oxide as an Interlayer in a Wide Temperature Range. *Journal of Electronic Materials*, 48(5), 3169-3182.
- Bardeen, J., 1947. Surface states and rectification at a metal semiconductor contact. *Physical Review*, 71, 717.
- Bekaddour, A., Rabehi, A. and Tizi, S., 2023. Effect of the contact area on the electrical characteristics of the Ti/6H–SiC (n) Schottky diode. *Micro and Nanostructures*, 173, 207464.
- Benavides, J., Quijada-Garrido, I. and García, O., 2020. The synthesis of switch-off fluorescent water-stable copper nanocluster Hg²⁺ sensors: via a simple one-pot approach by an *in*

- situ* metal reduction strategy in the presence of a thiolated polymer ligand template. *Nanoscale*, 12, 944-955.
- Bey, A. B., Talbi, A., Berka, M., Benamara, M. A., Ducroquet, F., Khediri, A. H. and Benamara, Z., 2020. Optimization of the Electrical Characteristics of the Au/n-type InN/InP Schottky Diode Based on the Contact Technique of Different Diameters. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12(3), 03027.
- Bielecki, Z., Achtenberg, K., Kopytko, M., Mikolajczyk, J., Wojtas, J. And Rogalski, A., 2022. Review of photodetectors characterization methods. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 70(2), e140534.
- Bohlin, K. E., 1986. Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60, 1223.
- Can, T. Ç., Serçeoğlu, F. and Özdal, M., 2025. Exploring the Electrical Performance of GO:Ag Nanoparticles Synthesized via Bacterial Method for Interfacial Applications in Ag/GO:Ag/p-Si Structures: I-V and C-V Analysis. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, Open access, <https://doi.org/10.1007/s10904-025-03811-7>.
- Card, H. C. and Rhoderick, E. H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4 (10), 1589-1601.
- Chakraborty, I. and Pradeep, T., 2017. Atomically precise clusters of noble metals: Emerging link between atoms and nanoparticles. *Chemical Reviews*, 117 (12), 8208-8271.
- Chandra, S., Pathan, S. H., Mitra, S., Modha, B. H., Goswami, A. and Pramanik, P., 2012. Tuning of photoluminescence on different surface functionalized carbon quantum dots. *RSC Advances*, 2, 3602-3606.
- Chang, C. Y. and Sze, S. M., 1970. Carrier transport across metal-semiconductor barriers. *Solid State Electronics*, 13, 727.
- Cheng, J., Xu, Y., Zhou, D., Liu, K., Geng, N., Lu, J., Yongxia, L. and Jianzhu, L., 2019. Novel carbon quantum dots can serve as an excellent adjuvant for the gp85 protein vaccine against avian leukosis virus subgroup J in chickens. *Poultry Science*, 98, 5315-5320.
- Cheung, S. K. and Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49 (2), 85-87.
- Choi, M. J., Kim, M. H. and Choi, D. K., 2015. A transparent diode with high rectifying ratio using amorphous indium-gallium-zinc oxide/SiN_x coupled junction. *Applied Physics Letters*, 107, 053501.
- Crowell, C. R. and Rideout, V. L., 1969. Normalized thermionic field emission in Metal-Semiconductor Schottky Barriers. *Solid State Electronics*, 12, 89.
- Cui, L., Ren, X., Sun, M., Liu, H. and Xia, L., 2021. Carbon Dots: Synthesis, Properties and Applications. *Nanomaterials (Basel)* 11(12), 3419.
- Çakıcı, T., Özdal, M., Kundakçı, M. and Kayalı, R., 2019. ZnSe and CuSe NP's by microbial green synthesis method and comparison of I-V characteristics of Au/ZnSe/p-Si/Al and Au/CuSe/p-Si/Al structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103, 104610.

- Çakıcı, T., Özdal, Ö. G., Almousa, N., Yıldız, F., Kavaz Perişanoğlu, E., Khalil, H., Ene, A. and Zakaly, H. M. H., 2023. Bacterial MgSe complex nanoparticle synthesis and electrical characterization of fabricated Ag/MgSe/p-Si hetero-structure under dark and illumination. *Heliyon*, 9, e21678.
- Çoşkun, E., Güllü, H. H., Candan, İ., Bayraklı, Ö., Parlak, M. and Erçelebi, Ç., 2015. Device behavior of an In/p-Ag(Ga, In)Te₂/n-Si/Ag heterojunction diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 34, 138-145.
- Dang, T. H. T., Mai, V. T., Le, Q. T., Duong, N. H. and Mai, X. D., 2019. Post-decorated surface fluorophores enhance the photoluminescence of carbon quantum dots. *Chemical Physics*, 527, 110503.
- Das, P., Pal, B., Das, M., Sil, S., Das, D., Layek, A. and Ray, P. P., 2022. Findings of inhomogeneity in barrier height of Schottky junction Al/rGO-SnO₂ having anomaly in theoretical and experimental value of Richardson constant: A Gaussian approach. *Results in Physics*, 42, 105996.
- Das, R., Bandyopadhyay, R. and Pramanik, P., 2018. Carbon quantum dots from natural resource: A review. *Materials Today Chemistry*, 8, 96-109.
- Demchenko, A. P. and Dekaliuk, M. O., 2013. Novel Fluorescent Carbonic Nanomaterials for Sensing and Imaging Methods. *Appl. Fluoresc.* 1 (4), 042001.
- Dimitrijević, S., 2006. Principles of semiconductor devices, Second Edition, Oxford University Press, NewYork.
- Dingemans, G., Terlinden, N. M., Verheijen, M. A., Van de Sanden, M. C. M. and Kessels, W. M. M., 2011. Controlling the fixed charge and passivation properties of Si(100)/Al₂O₃ interfaces using ultrathin SiO₂ interlayers synthesized by atomic layer deposition. *Journal of Applied Physics*, 110 (9), 93715.
- Du, Y., Sheng, H., Astruc, D. and Zhu, M., 2020. Atomically precise noble metal nanoclusters as efficient catalysts: A bridge between structure and properties. *Chemical Reviews*, 120 (2), 526-622.
- Duman, S., Türüt, A. and Doğan, S., 2022. Thermal sensitivity and barrier height inhomogeneity in thermally annealed and un-annealed Ni/n-6H-SiC Schottky diodes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 338, 113457.
- Ejderha, K. And Türüt, A., 2021. Dependence of electrical properties of Ni/n-GaP/Al Schottky contacts on measurement temperature and thermal annealing. *Journal of Electronic Materials*, 50, 6741-6747.
- El-Menyawy, E. M., 2015. Electrical and photovoltaic properties of Gaussian distributed inhomogeneous barrier based on tris(8-hydroxyquinoline) indium/p-si interface. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32, 145-151.
- El-Menyawy, E. M., El-Khalawany, L. M. and Zedan, I. T., 2024. Electrical conduction and photodiode properties of Au/Feq₃/p-Si/al hybrid heterostructure. *Physica B: Condensed Matter*, 685, 416067.
- El-Shafey, A. M., 2021. Carbon Dots: Discovery, Structure, Fluorescent Properties, and Applications. *Green Process. Synth.* 10(1), 134–156.

- Elugoke, S. E., Uwaya, G. E., Quadri, T. W. and Ebenso, E. E., 2024. Carbon Quantum Dots: Basics, Properties, and Fundamentals, ACS Symposium Series Vol. 1465, Chapter 1 (DOI: 10.1021/bk-2024-1465.ch001)
- Fan, H., Zhang, M., Bhandari, B. and Yang, C. H., 2020. Food waste as a carbon source in carbon quantum dots technology and their applications in food safety detection. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 86-96.
- Ghandhi, S. K., 1983. VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ghione, G., 2009. Semiconductor devices for high-speed optoelectronics, New York: Cambridge University Press.
- Gonzalez-Martinez, G. A., García, L. G., Frutis-Murillo, M., Martinez-Torres, P, Lopez-Meza, J. E. and Rosas, G., 2025. Hydrothermal synthesis of carbon quantum dots from *Citrus reticulata* and *Eriobotrya japonica*: Characterization and photothermal evaluation. *MRS Advances*, 10, 87-91.
- Gorji, M. S. and Cheong, K. Y., 2015. Embedded Nanoparticles in Schottky and Ohmic Contacts: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 40(4), 197.
- Gupta, S. K., Shankar, B., Taube, W. R., Singh, J. and Akhtar, J., 2014. Capacitance–conductance spectroscopic investigation of interfacial oxide layer in Ni/4H–SiC (0 0 0 1) Schottky diode. *Physica B: Condensed Matter*, 434, 44-50.
- Gümüş, İ. and Aydoğan, Ş., 2021. Thermal sensing capability of metal/composite-semiconductor framework device with the low barrier double Gaussian over wide temperature range. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 332, 113117.
- Güzeldir, B., Baltakesmez, A. and Sağlam, M., 2022. Microstructural properties of SiC thin film deposited by RF sputtering technique and its role on the barrier parameters of n-InP/Pd and n-GaP/Pd junctions as an interlayer. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 647, 414364.
- Hermi, R., Mahdouani, M., Bourguiga, R. and Mahato, S., 2022. Modelling and simulation of the electrical parameters of DMSO doped PEDOT: PSS/n-Si organic/inorganic solar cells using the Lambert W function. *Micro and Nanostructures*, 168, 207258.
- Horley, P., Vorobiev, Y. V., Makhniy, V. P. and Sklyarchuk, V. M., 2016. Optoelectronic properties of Ni–GaP diodes with a modified surface. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 83, 227-231.
- Huang, C.-C., Hung, Y. S., Weng, Y. M., Chen, W. and Lai, Y. S., 2019. Sustainable Development of Carbon Nanodots Technology: Natural Products as a Carbon Source and Applications to Food Safety. *Trends Food Sci. Technol.* 86, 144–152.
- Jhonsi, M. A., 2018. Carbon Quantum Dots for Bioimaging. *State Art Nano-Bioimaging* 35–53. DOI: 10.5772/intechopen.72723
- Jiang, X., Qin, D., Mo, G., Feng, J., Yu, C., Mo, W. and Deng, B., 2019. Ginkgo leaf-based synthesis of nitrogen doped carbon quantum dots for highly sensitive detection of salazosulfapyridine in mouse plasma. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 164, 514-519.

- Joshi, P. N., Mathias, A., Mishra, A. and Mathias, A., 2018. Synthesis of ecofriendly fluorescent carbon dots and their biomedical and environmental applications. *Materials Technology*, 33, 672-680.
- Kabushemeye, E., Van Meirhaeghe, R. L., Laflere, W. H. and Cardon, F., 1989. On the influence of a thin thermal oxide layer on MIS-type GaP Schottky diode behaviour. *Semiconductor Science and Technology*, 4(7), 543.
- Karabulut, A., Yıldız, D. E., Köse D. A. and Yıldırım, M., 2022. Photosensing performances of heterojunctions-based photodiodes with novel complex interlayers. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 146, 106647.
- Karikalan, N., 2018. Synthesis and characterization of copper nanoparticles and evaluation of antibacterial activity. *Rasayan Journal of Chemistry*, 11 (4) 1451-1457.
- Kasim, S. T., Hadi, H. A. and Ismail, R. A., 2024. Enhancement of optoelectronic properties of Vanadium nitride/porous silicon heterojunction photodetector prepared by electrochemical etching and reactive DC sputtering. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101, 101432.
- Kimoto, T. and Cooper, J. A., 2014. *Fundamentals of SiC technology: growth, characterization, devices and applications*, Wiley-IEEE press.
- Kitching, M., Ramani, M. and Marsili, E., 2015. Fungal biosynthesis of gold nanoparticles: mechanism and scale up. *Microbial Biotechnology*, 8, 904-917.
- Klimov, V., Mikhailovsky, A., McBranch, D., Leatherdale, C. and Bawendi, M., 2000. Mechanisms for Intraband Energy Relaxation in Semiconductor Quantum Dots: The Role of Electron-Hole Interactions. *Phys. Rev. B* 61(20), R13349.
- Kolnik, J. and Ozvold, M., 1990. The Influence of inversion surface layers on the evaluation of the interface state energy distribution from Schottky diode I-U characteristics. *Physica Status Solidi (a)*, 122 (2), 583-588.
- Lei, C. W., Hsieh, M. L. and Liu, W. R., 2019. A facile approach to synthesize carbon quantum dots with pH-dependent properties. *Dyes and Pigments*, 169, 73-80.
- Li, L., Chen, J., Gu, X., Li, X., Pu, T. and Ao, J. P., 2018. Temperature sensor using thermally stable TiN anode GaN Schottky barrier diode for high power device application. *Superlattices and Microstructures*, 123, 274-279.
- Li, L., Pu, Li, T. X. and Ao, J. P., 2022. Effect of Anode Material on the Sensitivity of GaN Schottky Barrier Diode Temperature Sensor, *IEEE Sensors Journal*, 22(3) 1933-1938.
- Li, S. S., 2006. *Semiconductor physical electronics*, Second Edition, Springer, New York
- Lim, H., Liu, Y., Kim, H. Y. and Son, D. I., 2018. Facile synthesis and characterization of carbon quantum dots and photovoltaic applications. *Thin Solid Films* 660, 672–677.
- Liu, J. M., 2005. *Photonic devices*, Cambridge University Press, New York.
- Lu, Y. and Chen, W., 2012. Sub-nanometre sized metal clusters: from synthetic challenges to the unique property discoveries. *Chemical Society Reviews*, 41, 3594-3623.
- Mu, H., Liu, J., Wang, R., Xie, J. and Yin, Z., 2024. Photoresponse dependence of WS₂/Pt Schottky junction on the features of Pt nanoparticles. *Thin Solid Films*, 804, 140465.

- Neamen, D. A., 2012. Semiconductor physics and devices: Basic principles, 4th Edition, New York, The McGraw-Hill Companies
- Nicollian, E. H. and Brews, J. R., 1982. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Norde, H., 1979. A modified forward *I-V* plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
- Orak, İ., Ejderha, K. And Türüt, A., 2015. The electrical characterizations and illumination response of Co/N-type GaP junction device. *Current Applied Physics*, 15(9), 1054-1061.
- Orak, İ., Ejderha, K., Sönmez, E., Alanyalıoğlu, M. and Türüt, A., 2015. The effect of annealing temperature on the electrical characterization of Co/*n* type GaP Schottky diode. *Materials Research Bulletin*, 61, 463-468.
- Orhan, Z., Daş, E. and Bozkurt, G., 2025. Microemulsion synthesis of SnO₂ Nanoparticles and their integration in Au/*n*-Si/Al device structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36, 158.
- Özakın, O., Sağlam, M. and Güzeldir, B., 2024. Statistical analysis of characteristic parameters of graphene/p-Si junctions prepared under similar conditions. *Physica B: Condensed Matter*, 677, 415738.
- Özdemir, A. F., Kökçe, A. and Türüt, A., 2002. The effects of the time-dependent and exposure time to air on Au/*n*-GaAs schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 191(1-4), 188-195.
- Özerli, H., Bekereci, A., Türüt, A. and Karataş, Ş., 2017. Electrical and photovoltaic properties of Ag/p-Si structure with GO doped NiO interlayer in dark and under light illumination. *Journal of Alloys and Compounds*, 718, 75-84.
- Padovani, F. A. and Stratton, R., 1966. Field and thermionic field emission in Schottky barriers. *Solid State Electronics*, 9, 695.
- Peressi, M., 2015. Interaction of carbon monoxide with Cu nanoclusters grown on alumina surface, *Il Nuova Cimento* 38, 68 (Communications: SIF Congress 2014).
- Pisanic I, T., Zhang, Y. And Wang, T., 2014. Quantum Dots in Diagnostics and Detection: Principles and Paradigms. *Analyst* 139(12), 2968–2981.
- Porret, E., Guével, X. L. and Coll, J. L., 2020. Gold nanoclusters for biomedical applications: Toward in vivo studies. *Journal of Materials Chemistry B*, 8, 2216-2232.
- Prakash, K. T., Singh, N. and Venkatesh, V., 2019. Synthesis of novel luminescent copper nanoclusters with substituent driven self-assembly and aggregation induced emission (AIE). *Chemical Communications*, 55, 322-325.
- Pristavu, G., Brezeanu, G., Pascu, R., Drăghici, F. and Bădilă, M., 2019. Characterization of non-uniform Ni/4H-SiC Schottky diodes for improved responsivity in high-temperature sensing. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 94, 64-69.
- Ramar, V., Moothattu, S. and Balasubramanian, K., 2018. Metal free, sunlight and white light based photocatalysis using carbon quantum dots from *Citrus grandis*: A green way to remove pollution. *Solar Energy*, 169, 120-127.

- Rani, A. U., Reddy, D. S., Kumar, A. A. and Reddy, V. R., 2024. Structural, chemical, optical, electrical and photodiode properties of Au/ZnPc/undoped-InP MPS-type diode using a ZnPc interlayer. *Materials Science and Engineering B*, 305, 117436.
- Rani, A. and Singh, S., 2025. Temperature dependent electrical characteristics of Al/CdSe-PVA/Ag Schottky diode: Effect of Cu doping. *Optical Materials*, 162, 116944.
- Rani, U. A., Ng, L. Y., Ng, C. Y. and Mahmoudi, E., 2020. A review of carbon quantum dots and their applications in wastewater treatment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 278, 102124.
- Ratnayake, S. P., Mantilaka, M. M. M. G. P. G., Sandaruwan, C., Dahanayake, D., Murugan, E., Kumar, S., Amaratunga, G. A. J. and Nalin de Silva, K. M., 2019. Carbon quantum dots-decorated nano-zirconia: A highly efficient photocatalyst. *Applied Catalysis A: General*, 570, 23-30.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., 1988. *Metal-semiconductor contacts*, 2nd Edition Oxford: Clarendon Press.
- Roy, P., Chen, P. C., Periasamy, A. P., Chen, Y. N. and Chang, H. T., 2015. Photo luminescent carbon nanodots: Synthesis, physicochemical properties and analytical applications. *Materials Today*, 18 (8) 447-458.
- Sabet, M. and Mahdavi, K., 2019. Green synthesis of high photoluminescence nitrogen-doped carbon quantum dots from grass via a simple hydrothermal method for removing organic and inorganic water pollutions. *Applied Surface Science*, 463, 283-291.
- Sağlam, M., Ateş, A., Yıldırım, M. A., Güzeldir, B. and Astam, A., 2010. Temperature dependent current-voltage characteristics of the Cd/CdO/n-Si/Au-Sb structure. *Current Applied Physics*, 10, 513-520.
- Sah, C. T., 1991. *Fundamentals of Solid-State Electronics*, World Scientific Publishing, Singapore.
- Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., 2007. *Fundamentals of photonics*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Saraswat, S. K., Mustafa, M. A., Ghadir, G. K., Kaur, M., Lozada, D. F. G., Alubiady, M. H. S., Al-Ani, A. M., Alshahrani, M. Y., Abid, M. K., Jumaa, S. S., Alhameedi D. Y. and Redhee, A. H., 2024. Carbon quantum dots: A comprehensive review of green Synthesis, characterization and investigation their applications in bioimaging. *Inorganic Chemistry Communications*, 162, 112279.
- Schottky, W., 1938. Halbleitertheorie der Sperrschicht. *Naturwissenschaften* 26, 843.
- Schroder, D. K., 2006. *Semiconductor material and device characterization*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Seymen, H., Berk, N., Orak, İ. and Karataş, Ş., 2022. Effect of illumination intensity on the electrical characteristics of Au//SiO₂/n-type Si structures with GO and P₃C₄MT interface layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33, 19656-19666.
- Shao, G., Wang, J., Wang, Y., Wang, W. and Wang, H. X., 2022. Inhomogeneous heterojunction performance of Zr/diamond Schottky diode with Gaussian distribution of barrier heights for high sensitivity temperature sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 347, 113906.

- Shiwakoti, N., Bobby, A., Asokan, K. and Antony, B., 2017. The role of electronic energy loss in SHI irradiated Ni/oxide/n-GaP Schottky diode. *Microelectronics Reliability*, 69, 40-46.
- Shockley, W., 1939. On the surface states associated with a periodic potential. *Physical Review*, 56, 317.
- Shur, M. S., 2013. *GaAs devices and circuits*, Springer science & business media.
- Singh, I., Arora, R., Dhiman, H. and Pahwa, R., 2018. Carbon quantum dots: Synthesis, characterization and biomedical applications. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences* 15 (2) 219-230.
- Sun, Y. P., Zhou, B., Lin, Y., Wang, W., Fernando, K. S., Pathak, P., Meziani, M. J., Harruff, B. A., Wang, X. and Wang, H., 2006. Quantum-Sized Carbon Dots for Bright and Colorful Photoluminescence. *J. Am. Chem. Soc.* 128(24), 7756–7757.
- Sürücü, Ö., Yıldız, D. E. and Yıldırım, M., 2024. A study on the dark and illuminated operation of Al/Si₃N₄/p-Si Schottky photodiodes: optoelectronic insights. *Applied Physics A*, 130, 103.
- Sze, S. M., 1988. *VLSI technology*, 2nd edition, McGraw-Hill Sciences.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of semiconductor devices*. 2nd Edition, New York: John Wiley
- Şenarslan, E., Güzeldir, B. and Sağlam, M., 2020. Effects of surface passivation on capacitance-voltage and conductance-voltage characteristics of Al/*p*-type Si/Al and Al/V₂O₅/*p*-type Si/Al diodes. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 146, 109564.
- Tang, J., Shi, H., Ma, G., Luo, L. and Tang, Z., 2020. Ultrasmall Au and Ag nanoclusters for biomedical applications: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 1019.
- Taşer, A., Güzeldir, B. and Sağlam, M., 2017. The stability of electrical characteristics of Ti/n-Si/Ag, Ti/n-Si/Cu and Ti/n-Si/AgCu diodes prepared under the same conditions with respect to increasing aging time. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 68, 186-192.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Karadeniz, S. and Tuğluoğlu, N., 2003. Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures response to radiation and frequency. *Microelectronics Journal*, 34(11), 1043-1049.
- Taube, A., Sadowski, O., Piskorski, K. and Wzorek, M., 2023. Investigation of amorphous (Ir,Ru)-Si and (Ir,Ru)-Si-O Schottky contacts to (001) β-Ga₂O₃. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 154, 107218.
- Trapiella-Alfonso, L., Tasso, M., García, G. R., Martín-Yerga, D. and Bustos, A. R. M., 2022. Editorial: Design, synthesis, characterization and applications of nanoclusters. *Frontiers in Chemistry*, 10, 898480.
- Türüt, A., 2021. Thermal sensitivity from current-voltage-measurement temperature characteristics in Au/n-GaAs Schottky contacts. *Turkish Journal of Physics*, 45(5), 268-280.

- Türüt, A., Yıldız, D. E., Karabulut, A. and Orak, İ., 2020. Electrical characteristics of atomic layer deposited Au/Ti/HfO₂/n-GaAs MIS diodes in the wide temperature range. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 4, 7839-7849.
- Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K. and Scrivens, W. A., 2004. Electrophoretic Analysis and Purification of Fluorescent Single-Walled Carbon Nanotube Fragments. *J. Am. Chem. Soc.* 126 (40), 12736–12737.
- Wang, Q., Wang, G., Liang, X., Dong, X. and Zhang, X., 2019. Supporting carbon quantum dots on NH₂-MIL-125 for enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants under a broad spectrum irradiation. *Applied Surface Science*, 467-468, 320-327.
- Wang, Y. and Hu, A., 2014. Carbon Quantum Dots: Synthesis, Properties and Applications. *J. Mater. Chem. C* 2(34), 6921–6939.
- Yan, F., Meng, T., Xu, J., Li, Y. and Fu, Y., 2025. Revolutionary carbon quantum dots and their applications: A theoretical computations perspective. *Microchemical Journal*, 212, 113392.
- Yıldırım, M. A., Guzeldir, B., Ateş, A. and Sağlam, M., 2011. Temperature dependent current-voltage characteristics of the Zn/ZnO/n-Si/Au-Sb structure with ZnO interface layer grown on n-Si substrate by SILAR method. *Microelectronic Engineering*, 88, 3075-3079.
- Yükseltürk, E., Surucu, O., Terlemezoglu, M., Parlak, M. and Altındal, S., 2021. Illumination and voltage effects on the forward and reverse bias current–voltage (I-V) characteristics in In/In₂S₃/p-Si photodiodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 21825.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı :	Osman Nuri ENİS
Eğitim	
Lise :	Erzurum Lisesi
Lisans:	Erciyes Üniversitesi
Yüksek lisans:	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi; Atatürk Üniversitesi
Doktora:	
Bilimsel Faaliyetleri	
Özkartal, A., & Enis, O. N. (2018). Bi1.6Pb0.4Sr2Ca3Cu4O12 Çubuk Şeklinde Üretilen Süperiletken Üzerinde Doğru Akım Tavlamanın Etkisi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(2), 123-128. Yanmaz, E., Castillo-Berrio, C., Alkan, Ü., Ülgen, A.T., Karaboğa, F., Enis, O. and Saraçoğlu, İ., Bulk MgxB2 superconductor production by excess Mg and hot press methods and their properties, Bor Dergisi, 43-48, (2017). Enis, O. N., Nadaroğlu, H., Güzeldir, B., & Sağlam, M. (2025). Study of how illumination affects the electrical properties of Al/n-gap Schottky diodes with varying amounts of Cu NCs-doped wm-cqd interlayer. <i>Physica B: Condensed Matter</i>, 417776. International Smart Grid Workshop and Certificate Program Istanbul Gelisim University, March 21-25, 2016, (Certificate Supplement)	

