
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

InSb KOLOİDAL KUANTUM NOKTA FOTODEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ, OPTİMİZASYONU VE KARAKTERİZASYONU

Betül SATILMIŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FOTONİK BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

ETİK BEYAN

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

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

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

Betül SATILMIŞ
15/01/2026

InSb KOLOİDAL KUANTUM NOKTA FOTODEDEKTÖRLERİN ÜRETİMİ, OPTİMİZASYONU VE KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Betül SATILMIŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2026

ÖZET

Işık–madde etkileşimlerinin anlaşılması, modern optoelektronik aygıtların geliştirilmesinde temel bir yere sahiptir. Bu kapsamda fotodedektörler, gelen fotonları elektrik sinyaline dönüştürme yetenekleri sayesinde geniş uygulama alanlarında kritik önem taşır. Boyutla ayarlanabilir bant aralığı ve çözelti temelli üretim imkânı sunan koloidal kuantum noktalar, son yıllarda kızılötesi algılama teknolojileri için güçlü bir alternatif hâline gelmiştir. Bu tez çalışması, çevre açısından güvenli bir malzeme olan indiyum antimonit (InSb) koloidal kuantum noktalar (KKN) kullanılarak sol-jel tabanlı kızılötesi fotodedektörlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Önerilen aygıt yapısı, delik taşıma katmanı olarak NiO, elektron taşıma katmanı olarak SnO_2 ve titanyum katkılı altın kontaklar içermekte olup, yük taşınımı açısından dengeli ve verimli bir mimari sunmaktadır. Konvansiyonel fotodedektörlerde karşılaşılan toksisite, yüksek maliyet ve karmaşık üretim gibi kısıtları aşmak adına InSb KKN tabanlı yaklaşım daha sürdürülebilir, düşük maliyetli bir çözüm ortaya koymaktadır. Bu tez kapsamında, kızılötesi fotodedektörlerin çalışma prensipleri, kuantum noktaların temel özellikleri, NiO–SnO_2 ince film üretim yöntemleri ve InSb kuantum noktalarının sentez süreçleri ayrıntılı şekilde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, InSb tabanlı çözelti işlenebilir fotodedektörlerin yeni nesil optoelektronik uygulamalar için umut vadeden bir platform sunduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu	:	20217
Anahtar Kelimeler	:	InSb, toksik olmayan, sıcak enjeksiyon, koloidal kuantum nokta fotodedektör, SWIR, Schlenk sistemi, nanoteknoloji, kuantum nokta
Sayfa Adedi	:	88
Danışman	:	Doç. Dr. Tuğçe ATAŞER

FABRICATION, OPTIMIZATION, AND CHARACTERIZATION OF InSb COLLOIDAL QUANTUM DOT PHOTODETECTORS
(M. Sc. Thesis)

Betül SATILMIŞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

Understanding light–matter interactions is essential for the advancement of modern optoelectronic technologies. Photodetectors, which convert incident photons into electrical signals, play a central role in a wide range of applications. Colloidal quantum dots, offering size-tunable bandgaps and solution-processable fabrication, have recently emerged as promising materials for infrared detection. This thesis focuses on the development of environmentally benign indium antimonide (InSb) colloidal quantum dot (CQD)-based infrared photodetectors fabricated through a solution-processed sol–gel approach. The proposed device structure incorporates NiO as the hole transport layer, SnO_2 as the electron transport layer, and titanium-modified gold contacts, providing balanced charge transport and enhanced device stability. Compared with conventional photodetectors, which often suffer from toxicity issues, high fabrication costs or complex epitaxial growth requirements, the InSb CQD architecture offers a more sustainable, flexible, and cost-effective alternative. Within the scope of this thesis, the operating principles of infrared photodetectors, the fundamental properties of quantum dots, the fabrication methods of NiO–SnO_2 thin films, and the synthesis processes of InSb quantum dots were examined in detail. The findings demonstrate that solution-processable InSb-based photodetectors offer a promising platform for next-generation optoelectronic applications.

Science Code : 20217
Key Words : InSb, non-toxic material, hot injection, colloidal quantum dot photodetector, SWIR, Schlenk line system, nanotechnology, quantum dots
Page Number : 88
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuğçe ATAŞER

TEŞEKKÜR

Gazi Fotonik'e adım attığım ilk günden beri, bana duyduğu inanç ve güveni hiçbir zaman boşa çıkarmamayı arzuladığım, bilimsel gelişimime yön veren, her aşamada içimdeki gücü görmemi sağlayan, yapıcı rehberliği ve destekleriyle çok değerli danışmanım Doç. Dr. Tuğçe ATAŞER' e tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Akademik yolculuğum boyunca duruşu, çalışma disiplini, bilimsel yetkinliği ve insani yaklaşımıyla her zaman örnek aldığım; bilgi birikimi ve tecrübeleriyle bana ilham veren hocam ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK' e, bana her zaman hissettirdiği sahiplenici güveni, sağladığı çalışma imkânları ve gösterdiği anlayış için yaşam boyu sürecek saygı ve minnetle teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca akademik desteğini her zaman yanımda hissettiğim; zamanla desteğinden çok dostluğuyla güç bulduğum ODTÜ Kimya Bölümü Arş. Gör. İrem KOLAY' ı katkı ve arkadaşlığını da şükranla anmak isterim. Hem bilimsel katkıları hem de bu süreci paylaşılabilir ve daha anlamlı kılan arkadaşlığı için teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bana destek olan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki kıymetli hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma değerli vakitlerini ayırdıkları için teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde bana güç veren, desteği ve sevgisiyle bu yolculuğu anlamlandıran sevgili eşim Mert SATILMIŞ' a ve varlıklarıyla daima yanımda olduklarını hissettiren aileme tüm kalbimle teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Son olarak varlıklarını anmadan geçemeyeceğim, bu sürecinin en sessiz ama en sadık eşlikçileri olan patili çocuklarım, Loki ve Lily'ye de yanımda ve bilgisayarımın üstünde uyuyarak, mırlayarak ve varlıklarıyla içimi ısıtarak bu yolculuğu daha katlanılabilir, daha huzurlu hâle getirdikleri için minnettarım.

Bu tez çalışmasına katkı sağlayan, CB-SBB tarafından desteklenen CB-SBB-2019K12-149045 numaralı projeye ve TÜBİTAK tarafından desteklenen 1002-124F292 numaralı projeye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELER LİSTESİ x

ŞEKİLLER LİSTESİ xi

RESİMLER LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER 3

2.1. Kızılötesi Fotodedektörler 4

2.2. Kızılötesi Fotodedektörler Parametreleri 7

2.2.1. Fotoyanıt (Responsivity – R) 7

2.2.2. Karanlık akım 7

2.2.3. Kuantum verimliliği (η) 8

2.2.4. Dedektivite (D*) 8

2.3. Koloidal Kuantum Nokta Tabanlı Fotodedektörler 9

2.4. Kuantum Nokta 10

2.4.1. Kuantum nokta üretim yöntemleri 12

2.4.2. InSb kuantum nokta 13

2.5. Fotodedektör Mimarisi 16

2.5.1. p-i-n hetero yapılar 17

2.5.2. NiO/InSb KKN/SnO_2 mimarisi 18

3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER 21

3.1. Fotodedektörlerin Büyütülmesi 21

Sayfa

3.2. Sıcak Enjeksiyon Yöntemi 21
3.2.1. Schlenk sistemi 24
3.2.2. Schlenk sisteminin çalışma prensibi 28
3.2.3. Dönel kaplama 30
3.2.4. Magnetron püskürtme sistemi 30
3.2.5. Eş püskürtme sistemi 31
3.3. InSb Koloidal Kuantum Nokta Karakterizasyonu 32
3.3.1. X-Işını kırınımı cihazı (XRD) 33
3.3.2. UV-Visible-NIR spektrometresi 34
3.3.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) 36
3.3.4. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) 38
4. KKN FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU 41
4.1. Alttaş Temizliği 41
4.2. Deşik Taşıma Katmanı ve Karakterizasyonu: NiO 42
4.2.1. Optik analiz 44
4.2.2. Yapısal analiz 47
4.2.3. Morfolojik analiz 48
4.3. Kuantum Nokta Aktif Katmanı: InSb 49
4.3.1. Sıcak enjeksiyon yöntemi ile InSb kuantum nokta sentezi 49
4.4. InSb KKN Karakterizasyonu 53
4.4.1. Yapısal analiz 53
4.4.2. Morfolojik analiz 61
4.4.3. Optik analiz 63
4.5. Elektron Taşıma Katmanı ve Karakterizasyonu: SnO_2 65
4.5.1. Optik analiz 67
4.5.2. Yapısal analiz 69

Sayfa

4.5.3. Morfolojik analiz 70
4.6. InSb KKN Fotodedektör Yapısının Fabrikasyonu 71
4.7. InSb. KKN Fotodedektörlerin Karakterizasyonu 75
4.7.1. Elektriksel analiz 75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 81
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 87

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. InSb KKN kaplama parametreleri 52

Çizelge 4.2. XRD deseni ile InSb KKN boyut analizi..... 56

Çizelge 4.3. TEM ve XRD gözlemleri arasındaki ilişki 60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kızılötesi dedektörleri ve sistemlerinin gelişim tarihi 3

Şekil 2.2. Bir kara cisim kaynağının dalga boyuna göre spektral yayılımı 5

Şekil 2.3 Kızılötesi bölgede atmosferik geçirgenlik ve soğurucu gazlar 6

Şekil 2.4. Kuantum nokta boyut değişimi 11

Şekil 2.5. Kuantum noktaların uygulama alanlarına örnekler 12

Şekil 2.6. Kuantum Nokta üretim yöntemleri ve uygulamaları 13

Şekil 2.7. InSb için kafes yapısı ve bulk yapıları ve wafer hali 13

Şekil 2.8. InSb nin yansıma ve foton enerji grafiği 15

Şekil 2.9. InSb'nin soğurma ve foton enerji grafiği 16

Şekil 2.10. p-i-n yapısı 17

Şekil 2.11. p-i-n yapı bant geçişi 18

Şekil 2.12. NiO/InSb KKN/SnO_2 mimarisi ve enerji band diyagramı 19

Şekil 2.13 Fotodedektör yapısının enerji band seviyeleri 20

Şekil 3.1. Çekirdeklenme özeti 22

Şekil 3.2. LaMer Modeli akış şeması 24

Şekil 3.3. Wilhelm Schlenk Viyana'daki konferansta 25

Şekil 3.4. Aktivasyon enerjisi grafiği 26

Şekil 3.5. Magnetron püskürtme tekniğinin şematik gösterimi 30

Şekil 3.6. X-Işını saçılma prensibi 33

Şekil 4.1. Alttaş temizlik aşamaları 41

Şekil 4.2. NiO sol-jeli ile dönel kaplama 43

Şekil 4.3. Püskürtme Yöntemi ile NiO kaplama 44

Şekil 4.4. NiO sol-jel FTIR analizi 45

Şekil 4.5. Cam alttaş üzeri dönel NiO kaplama geçirgenlik grafiği 46

Şekil 4.6. Safir alltaş üzeri dönel NiO kaplama geçirgenlik grafiği 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. NiO UV dedektör yapısı 47

Şekil 4.8. NiO ince film XRD analizi 48

Şekil 4.9. NiO AFM analizleri 49

Şekil 4.10. InSb KKN hazırlığı 50

Şekil 4.11. Santrifüjleme aşamaları 51

Şekil 4.12. InSb KKN XRD Analizi 54

Şekil 4.13.InSb KKN, XRD PDF kartları 54

Şekil 4.14. Williamson-Hall grafiği 57

Şekil 4.15. InSb KKN TEM görüntüsü 59

Şekil 4.16. InSb kuantum noktalarının TEM parçacık boyutu dağılımı. 60

Şekil 4.17. A)Tek kat ve B) Çift katlı InSb KKN' lerin AFM analizi 62

Şekil 4.18. InSb KKN soğurma grafiği 63

Şekil 4.19. SnO_2 üretim aşaması 66

Şekil 4.20. Eş püskürtme yöntemi ile SnO_2 Kaplaması 67

Şekil 4.21. SnO_2 dalgaboyuna göre geçirgenlik grafiği 69

Şekil 4.22. SnO_2 XRD analizi 70

Şekil 4.23. SnO2 Farklı kaplama türleriyle AFM analizi 71

Şekil 4.24. InSb KKN Fotodedektör 74

Şekil 4.25.1300 nm ışık altında Fotoakım 75

Şekil 4.26. 1400 nm ışık altında Fotoakım 76

Şekil 4.27. 1300 nm ışık altında Fotoakım 78

RESİMLER LİSTESİ

Sayfa

Resim 3.1. Schlenk sistemi (Gazi Fotonik Aaştırma Merkezi) 27

Resim 3.2 Dönel kaplama cihazı (Gazi Fotonik Araştırma Merkezi) 30

Resim 3.3. Magnetron püskürtme Sistemi (BesTec) 31

Resim 3.4. Eş püskürtme sistemi (Nanovak NVTS-500) 32

Resim 3.5. X-ışını kırınım cihazı 34

Resim 3.6. UV-Vis-NIR spektrometresi (JASCO) 36

Resim 3.7. AFM cihazı (NanoMagnetics) 37

Resim 3.8. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM-EOL1220) 39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
Å	Angström
Au	Altın
µm	Mikro metre
µm²	Mikro metre kare
m	Metre
cm	Santimetre
In	İndiyum
Sb	Antimonit
NiO	Nikel oksit
Ti	Titanyum
SnO_2	Kalaydioksit
N_2	Azot gazı
Nm	Nanometre

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
3D	3 Dimensional
AFM	Atomic Force Microscope
AJP	Aerosol Jet Printing
ATR	Attenuated Total Reflectance
ETL	Electron Transport Layer
FET	Field Effect Transistor
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
HTL	Hole Transport Layer
IR	Infrared
KKN	Koloidal Kuantum Nokta
MCT	Mercury Cadmium Telluride

Kısaltmalar	Açıklamalar
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
PMT	Photomultiplier Tube
XRD	X-Işınları Kırınımı
Rpm	Revolutions Per Minute
TEM	Transmission Electron Microscopy
Ra	Average Roughness
Rq	Root Mean Square Roughness

1. GİRİŞ

Işık–madde etkileşimlerinin incelenmesi, malzeme bilimi ve aygıt mühendisliğinde dönüştürücü ilerlemelere yön vererek modern optoelektroniğe katkıda bulunan araştırma alanlarından biridir. Bunlar arasında, gelen fotonları ölçülebilir elektriksel sinyallere dönüştüren fotodedektörler önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, boyuta bağlı bant aralığı ayarlanabilirliği, yüksek soğurma katsayısı ve düşük sıcaklıklarda çözelti temelli üretim imkânı sayesinde kuantum noktalar bu alanda yenilikçi bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmıştır. Çözeltiyle işlenebilir koloidal kuantum noktaların geliştirilmesi, geniş spektral aralıkta çalışabilen, esnek platformlara entegre edilebilen ve düşük maliyetli yeni nesil fotodedektör mimarilerinin ortaya çıkmasını mümkün kılarak optoelektronik teknolojilerinde önemli bir paradigma değişimi yaratmıştır.

Mevcut fotodedektör teknolojileri önemli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Örneğin, kurşun kalkojenit tabanlı fotodedektörler, kızılötesi (IR) bölgede güçlü performans göstermelerine rağmen, toksisite sorunları barındırır. HgCdTe (MCT) tabanlı aygıtlar yüksek hassasiyet sunmasına karşın karmaşık üretim süreçleri ve özel çalışma koşulları gerektirir [1]. Si tabanlı dedektörler, yaygın kullanılmalarına rağmen, yakın kızılötesi (NIR) bölgede dolaylı bant aralığı sebebiyle sınırlı performans sergilerken, InGaAs tabanlı dedektörler maliyeti yüksek epitaksiyel büyütme gerektirir. Ayrıca, ultra yüksek hassasiyet sağlayan fotokatot esaslı fotomultiplier tüpleri (PMT) hacimli yapıları ve yüksek çalışma gerilimleri nedeniyle modern kompakt veya esnek yapılı platformlarla uyumsuzdur [1].

Bu tez, çevre dostu indiyum antimoni (InSb) koloidal kuantum nokta (KKN) fotodedektörlerin, çözelti temelli sol-jel yaklaşımı ile geliştirilmesine odaklanmaktadır. Geleneksel fotodedektörlerin çoğu toksik ağır metal içeren malzemelere veya maliyetli epitaksiyel büyütme yöntemlerine dayanırken, önerilen InSb KKN sistemi çevresel sürdürülebilirliği, maliyet etkinliği ve geliştirilebilir yüksek performansı bir araya getirmektedir. Cihaz mimarisi, nikel oksit (NiO) tabanlı bir delik taşıma katmanı (HTL) ve kalay di oksit (SnO_2) tabanlı bir elektron taşıma katmanı (ETL) içermekte, böylece verimli yük taşımaya olanak sağlamaktadır. Titanyum katkılı Altın kontaklarla yüksek uyumluluk sağlamaktadır.

Yukarıda bahsedilen sınırlamalara karşılık, bu çalışma kızılötesi bölgede geniş dalga boyu aralığına duyarlı fotodedektör uygulamaları için umut verici bir malzeme olarak InSb KKN'ler araştırılmaktadır. Boyutla ayarlanabilir bant aralığı, çözeltide işlenebilirliği ve esnek alttaşlarla uyumluluğu, KKN'ları yeni nesil çoklu spektral aygıtlar için ideal adaylar haline getirmektedir. Sol-jel yöntemiyle elde edilen NiO ve SnO_2 katmanlarının entegrasyonu, cihazın verimli yük taşınımı, düşük kayıplar ve kararlı çalışma göstermesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım yalnızca çevre dostu fotodedektörlere yönelik ihtiyacı karşılamakla kalmamakta, aynı zamanda ölçeklenebilir, düşük maliyetli ve esnek optoelektronik sistemlere giden yolu açmaktadır.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, kızılötesi fotodedektörler genel çerçevede ele alınmış; fotoyanıt (responsivity), karanlık akım, kuantum verimliliği ve dedektivite gibi temel performans parametreleri tanımlanmıştır. Ayrıca koloidal kuantum nokta tabanlı fotodedektörler, kuantum nokta kavramı ve InSb kuantum noktalarının fiziksel özellikleri literatür ışığında incelenmiş; çalışmada kullanılan NiO/InSbKKN/SnO_2 fotodedektör mimarisi açıklandı.

Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan deneysel yöntemler ve sistemler ayrıntılı olarak sunuldu. InSb koloidal kuantum noktalarının sıcak enjeksiyon yöntemiyle sentezi, Schlenk sistemi kullanımı, santrifüjleme ve dönel kaplama süreçleri açıklanmış; ayrıca XRD, UV-Vis-NIR spektroskopisi ve AFM gibi karakterizasyon tekniklerinin çalışma prensipleri verildi.

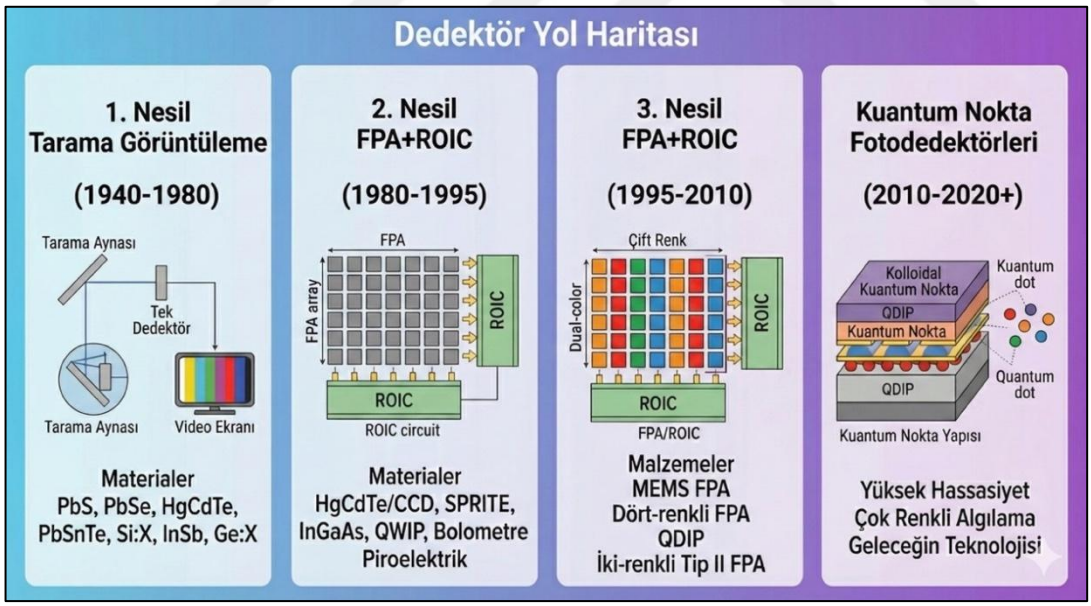
Dördüncü bölüm, tezin ana deneysel bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölümde InSb KKN fotodedektörlerinin üretim aşamaları detaylı biçimde anlatılmış; alttaş temizliği, NiO ve SnO_2 taşıma katmanlarının biriktirilmesi, InSb KKN aktif katmanının kaplanması ve fotodedektör yapısının tamamlanması ele alındı. Ayrıca elde edilen yapıların yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyon sonuçları sunularak fotodedektör performansı değerlendirildi.

Beşinci ve son bölümde ise, çalışmadan elde edilen sonuçlar genel olarak özetlendi; InSb koloidal kuantum nokta tabanlı fotodedektörlerin performansı tartışılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunuldu.

2. KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER

Kızılötesi dedektörler, doğası gereği belirli dalga boylarındaki ışığı elektriksel sinyallere dönüştürebilen aygıtlardır. Işığın ölçülebilir fiziksel niceliklere dönüştürülme sürecinin kontrolü, ışık-madde etkileşimlerinin dikkate alınmasını gerektirir.

Kızılötesi algılamanın temelleri, 1800 yılında Herschel'in Güneş ışığını bir prizmadan geçirerek renk bileşenlerine ayırması ve kırmızı ışığın ötesinde, görünür bölgede bulunmayan ısıl etkili bir ışınımın varlığını keşfetmesiyle atılmış, 1920'lerde T.W. Case'in bu bölgede kullanılan ışığa duyarlı malzeme gruplarını belirlemeye yönelik çalışmalarıyla gelişim göstermiştir. Bu çalışmaların ardından, teknoloji Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, HgCdTe fotodiyotları, tip-II gerilimli tabaka süper örgüleri (SLS), kuantum kuyusu IR fotodedektörleri (QWIP) ve kuantum nokta IR fotodedektörlerini (QDIP) içeren en yeni FPA'lara kadar ilerlemiş [3], dedektör geliştirme zincirine günümüzde kuantum noktalı dedektörler de eklenmiş; her bir grubun gelişme çalışmaları halen devam etmektedir.



Şekil 2.1. Kızılötesi dedektörleri ve sistemlerinin gelişim tarihi

Genel olarak kızılötesi dedektörler, termal dedektörler ve foton dedektörleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Termal dedektörlerde; soğurulan ışığın enerjisi dedektörün sıcaklık değerini değiştirerek sinyal üretmesini sağlarken, fotodedektörlerde gelen ışık elektronik değişikliklere sebep olarak sinyal üretmektedir. Kızılötesi termal dedektörlerin istenilenin

dışında ortamdaki sıcaklıktan da etkilenmesi ve yalıtımının zor olması, tepki verme süresinin yavaş olması ve spektral olarak seçici olmaması gibi nedenlerden dolayı kızılötesi fotodedektörlerin gerisinde kalmıştır [4]. Termal dedektörlere Bolometreler ve Pyroelektrik Dedektörler örnek verilebilir [5]. Fotodedektörler, yapı ve çalışma prensiplerine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Güncel çalışmalarda; kuantum nokta ve koloidal kuantum nokta tabanlı dedektörlerin yanı sıra metal–yarıiletken temasına dayalı Schottky bariyerli yapılar, taşıyıcı ayrışmasını eklem üzerinden gerçekleştiren p-i-n ve p-n mimarileri ile fotoiletken esaslı fotodedektörler farklı uygulama alanları için kullanılmaktadır.

2.1. Kızılötesi Fotodedektörler

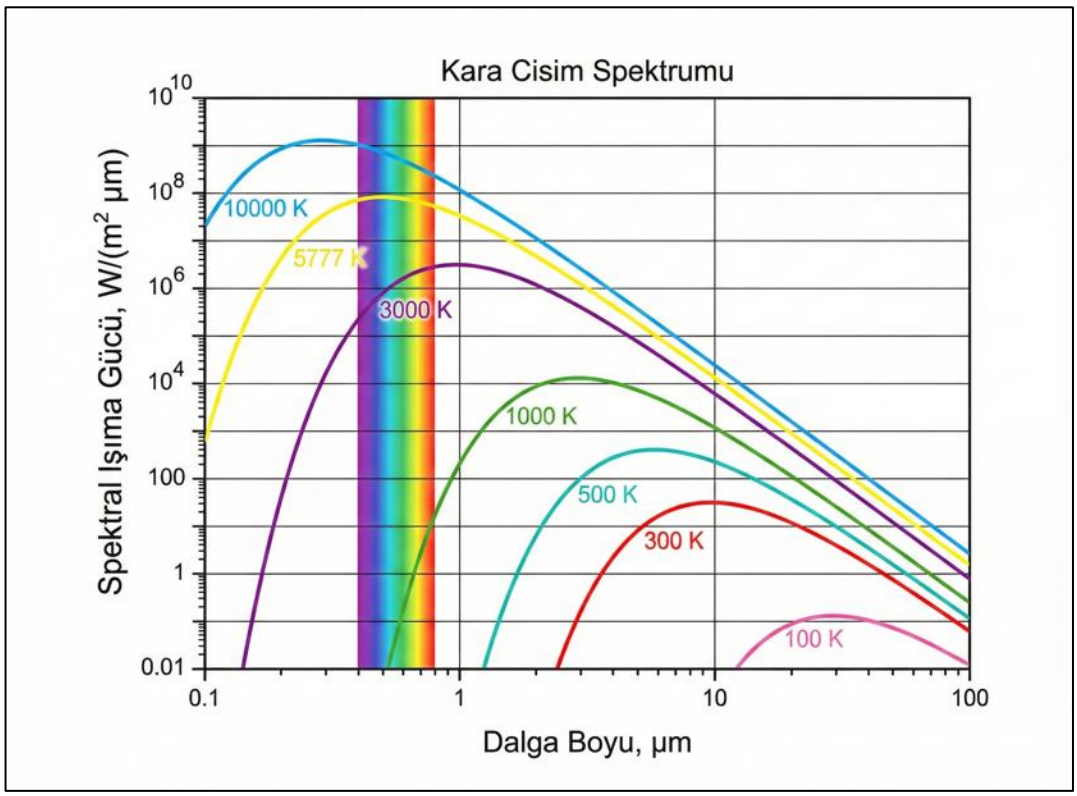
Görünür bölge dedektörleri nesnelerden yansıyan ışığı algılarken, kızılötesi dedektörler doğrudan nesnelerin yaydığı ışınıma dayanır. Kızılötesi dedektörlerin performansı, birim ışınıma karşı oluşturduğu tepki ve sahip olduğu gürültü düzeyi ile belirlenir. Ayrıca, algılama dalga boyu performansı büyük ölçüde etkiler; çünkü hem nesnelerden yayılan foton miktarı hem de atmosferin geçirgenliği dalga boyuna bağlı olarak değişkenlik gösterir.
Planck'ın ışınım yasasına göre, mutlak sıfırın üzerinde sıcaklığa sahip tüm cisimler foton yayar ve bu fotonların dalga boyu ile sıcaklığa bağlı dağılımı Planck dağılımı ile tanımlanır.

$$I_{BB}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \tag{2.1}$$

Eşitlik 2.1' de λ, ışınımın dalga boyunu; T ise kara cismin sıcaklığını gösterir. Işınıma maruz kalan bir cisim, yalnızca foton yaymaz; aynı zamanda gelen ışınımı soğurabilir veya bir kısmını geri yansıtabilir. Kara cisim, kendisine ulaşan tüm elektromanyetik ışınımı eksiksiz soğuran ve hiçbirini yansıtmayan ideal bir modeldir. Termal denge koşullarında, kara cisim soğurduğu enerji kadar ışınım yayarak enerji alışverişini dengeler. Bu nedenle, kara cismin yayma katsayısı (emissivity, ε) 1 olarak kabul edilir [6-7].

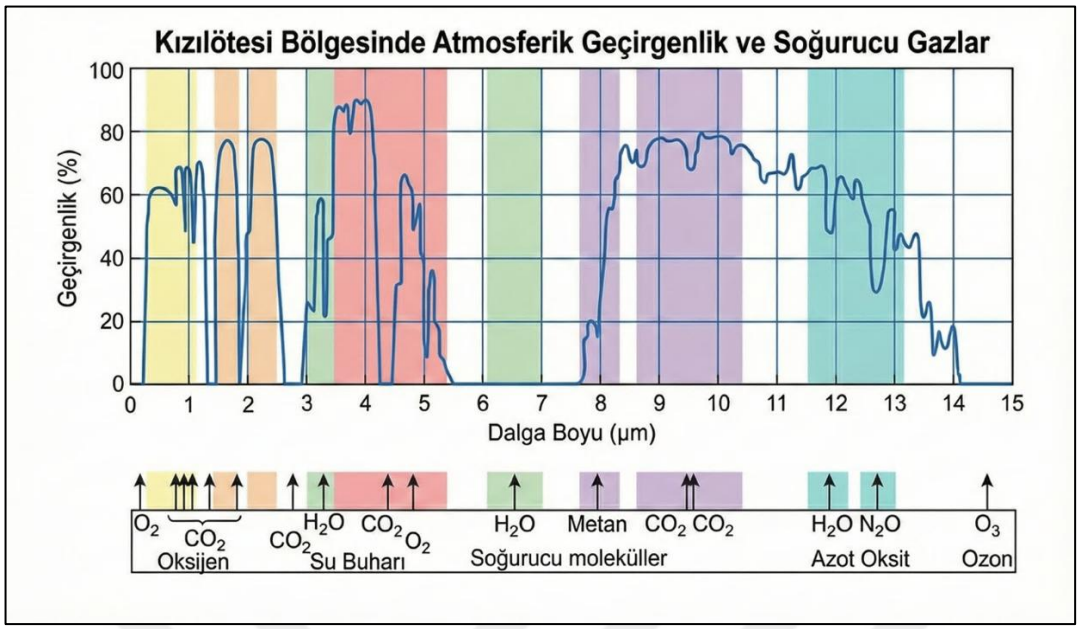
Şekil 2.2'de gösterilen Planck dağılımı, farklı sıcaklıklardaki nesnelerin dalga boyuna bağlı ışınım miktarlarını ortaya koymakta ve sıcaklık arttıkça maksimum ışınım dalga boyunun kısaldığını göstermektedir. Görünür ışığın olmadığı tamamen karanlık ortamlarda dahi, kızılötesi dedektörler bu karakteristik ışınımı algılayarak nesnelerin gözlemlenmesine imkân tanır. Bu ilke, güvenlik ve gözetimden askeri teknolojilere, endüstriyel süreç takibinden tıbbi

görüntülemeye kadar pek çok alanda kullanılan termal görüntüleme sistemlerinin temelini oluşturur.



Şekil 2.2. Bir kara cisim kaynağının dalga boyuna göre spektral yayılımı

Kızılötesi fotonlar atmosferden geçerken H_2O, CO_2, CH_4, N_2O, O_3 gibi gazlar tarafından soğurulur. Özellikle su buharı, yoğunluğu hava ve bölge koşullarına bağlı olarak değiştiğinden, IR sistem performansını en çok etkileyen faktördür. Şekil 2.3'de gözlemlenebilen bu durum, kızılötesi fotodedektörlerin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken temel bir etkendir; çünkü dedektörün duyarlı olduğu dalga boyu aralığı, atmosferdeki gazların soğurma davranışları ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle SWIR ve MWIR bölgelerinde atmosferik pencere seçimleri performansı belirleyici olmaktadır.



Şekil 2.3 Kızılötesi bölgede atmosferik geçirgenlik ve soğurucu gazlar

Atmosferin geçirgenlik özellikleri dikkate alındığında, atmosferik pencere kısa dalgaboylu (SWIR), orta dalgaboylu (MWIR) ve uzun dalgaboylu (LWIR) kızılötesi bölgelerine ayrılmaktadır. Kızılötesi (infrared), görünür kırmızı ışığın eşiğinden (700 nm / 430 THz / 1,7 eV) başlayarak elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinin kısa dalga boylu kısmına (1 mm / 300 GHz / 1,24 meV) kadar uzanan bölgeyi tanımlar [8-9]. Kızılötesi bölgelerin dalgaboyuna göre dağılımı aşağıda verilmiştir:

- Yakın Kızılötesi (NIR): 0,75–1,4 µm
- Kısa Dalga Boylu Kızılötesi (SWIR): 1,4-3 µm
- Orta Dalga Boylu Kızılötesi (MWIR): 3-5 µ
- Uzun Dalga Boylu Kızılötesi (LWIR): 8-14 µm
- Çok uzun dalga boylu kızılötesi (VLWIR): 12 - 20 µm
- Uzak kızılötesi (FIR): 20-1000 µm

Özellikle 1,4-3 µm dalgaboyu aralığını kapsayan SWIR, öne çıkan düşük saçılma kaybı, yüksek kontrastlı görüntüleme olanakları gibi nitelikleriyle dikkat çekmektedir. Bu özellikler, SWIR bölgesinde en verimli dedektör tasarımını mümkün kılacak malzemelerin araştırılmasını önemli hale getirmiştir.

Malzeme seçiminde HgTe, PbS, CdSe, gibi sık kullanılan malzemeler yerine bunlara göre daha az toksik olan InSb seçildi. 1950'lerin başında, InSb dar bant aralığı, SWIR bölgesine uygun optoelektronik özellikleri ve dönemin mevcut teknikleriyle tek kristal formda üretilebilmesi sayesinde ön plana çıkmıştır [9]. Fotodedektör teknolojilerindeki gelişmelerin devamında bu malzemelerin nanokristallerinde kuantum sınırlama etkisi ilk olarak 1981 yılında gözlemlenmiş ve tek boyut dağılımlı nanokristal sentezi halinde Bawendi ve ekibi tarafından başarıyla gerçekleştirilmiştir [10]. Tek boyut dağılımlı nanokristal sentezinin başarılması ile koloidal kuantum noktalarının optik ve elektronik özelliklerinin hassas biçimde kontrol edilebilmesi sağlanmıştır [11]. Tekrarlanabilir ve ölçeklenebilir üretim, ayarlanabilir band aralığı ile koloidal kuantum nokta teknolojisinin temelini atarak, IR fotodedektörler gibi yeni nesil cihazların geliştirilmesinin önünü açtı.

2.2. Kızılötesi Fotodedektörler Parametreleri

Kızılötesi dedektörlerin kalitesini veya performasını fotoyanıt, karanlık akım, kuantum verimliliği, dedektivite gibi parametrelerin analizi ile mümkündür.

2.2.1. Fotoyanıt (Responsivity – R)

Kızılötesi bir dedektörün tepkiselliği (responsivity), dedektörün çıktısının, girişteki ışınım gücüne oranıdır. Eşitlik 2.2'de de görüldüğü gibi eşitliği ile ifade edilir.

$$R = \frac{I_{signal}}{\Phi_{girdi}} \tag{2.2}$$

I_{signal}: çıkış sinyalini gösterir ve Amper (A) cinsinden ifade edilir. Φ_{girdi} ise dedektöre giren optik gücü temsil eder ve gelen ışınım gücü watt veya saniye başına foton cinsinden ifade edilebililir. Kızılötesi fotodedektörlerde en yaygın duyarlılık birimi amper/watt (A/W)'tır. Ayrıca bir dedektörün tepkisi dedektörün spektral tepkisellik (spectral responsivity) bağlıdır.

2.2.2. Karanlık akım

Karanlık akım, diğer bir adıyla "kaçak akım" olarak adlandırılan bu akım hem dedektörün fotoyanıt parametresini doğrudan etkiler hem de herhangi bir ışık kaynağı olmaksızın

fotodedektörün verdiği elektriksel tepkidir. Eşitlik 2.3 ve 2.4' te ifade edildi. Tuzaklar, kusurlar bu akımı etkilemektedir ve genellikle ters besleme (forward bias) altında doğru orantılı olarak karanlık akımda artar.

$$I_d = I_s \left[exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] - 1 \tag{2.3}$$

$$I_s = n_i^2 A (qkT)^{1/2} \left[\frac{1}{N_d}\left(\frac{\mu_p}{t_p}\right)^{1/2} + \frac{1}{N_A}\left(\frac{\mu_n}{t_n}\right)^{1/2} \right] \tag{2.4}$$

2.2.3. Kuantum verimliliği (ŋ)

Kuantum verimliliği elektron-deşik çifti oluşturan fotonların fotodedektöre gelen fotonlara göre yüzdesi olarak verilmektedir. Dolayısıyla kuantum verimlilik ışımaya karşı oluşan elektriksel hassasiyet olarak tanımlanır. Eşitlik 2.5' de gösterildiği gibidir.

$$\eta = \frac{R}{\lambda}\frac{1}{g}\frac{hc}{q} \tag{2.5}$$

Formülde η dedektörün kuantum verimliliği, q elektron yükü, g dedektör kazancıdır ve dedektör için her zaman 1' dir. Dolayısıyla eşitlik 2.6'daki gibi olur.

$$\eta = \frac{R}{\lambda}\frac{hc}{g} \tag{2.6}$$

2.2.4. Dedektivite (D*)

Dedektivite dedektörde birim alan başına ve birim bant genişliği içinde üretilen fotoyanıtın gürültüye kıyasla ne kadar belirgin olduğunu gösteren performanstır. Bir dedektörde ne kadar çok fotoyanıt (sinyal) alabiliyorsak o kadarda gürültüsünün az olması gerekir.

$$D^* = D\sqrt{A_d \Delta_f} = \frac{\sqrt{A_d \Delta_f}}{NEP} \tag{2.7}$$

Eşitlik 2.7‘de de görüldüğü gibi; A_d dedektör alanı, Δ_f frekans bant genişliği, NEP dedektörün özel halidir ve özel dedektivite olarak kullanılır. Birimi, R. C. Jones’a ithafen “jones” yani / cm $\sqrt{Hz}W$ ’tır.

2.3. Koloidal Kuantum Nokta Tabanlı Fotodedektörler

KKN’ lar, çözelti temelli yöntemlerle üretilebilen ve boyuta bağlı bant aralığı ayarı yapılabilen yarıiletken nanokristaller olup, son yıllarda fotodedektör teknolojilerinde yoğun ilgi görmektedir. KKN yapıları, yarıçapları eksiton Bohr yarıçapının yaklaşık iki katından daha küçük boyutlara indiğinde (örneğin PbS için ~18 nm), bant aralığını boyuta bağlı olarak ayarlayabilme özelliği kazanan inorganik nanokristaller olarak tanımlanmaktadır. Bu özellik, özellikle kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgesine kadar uzanan geniş bir spektral ayarlanabilirlik sağlamaktadır.

Geleneksel InGaAs fotodedektörler, kısa dalgaboyu kızılötesi (SWIR) görüntüleme sensör teknolojisi için yüksek hassasiyeti nedeniyle günümüzde kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Ancak InGaAs' ın yüksek üretim ve hammadde maliyetleri, uzun üretim koşulları ve hibridizasyon sürecinde karşılaşılan sorunlar gibi dezavantajları vardır [12]. Üretim gibi sınırlı kaynaklar, bu tür dedektör ihtiyaç duyulan otomotiv ve savunma sanayi gibi alanların geliştirilmesinin önünde bir engeldir. Bu bağlamda, koloidal kuantum noktalarına dayalı dedektörler, InGaAs'a alternatif olarak yeni nesil fotodedektörler olarak kabul edilmektedir.

KKN tabanlı fotodedektörler; düşük maliyetli üretim olanakları, geniş spektral ayarlanabilirlikleri ve esnek taban malzemelerle uyumlulukları sayesinde geleneksel yarıiletken tabanlı dedektörlere alternatif oluşturmaktadır. Kuantum noktaların yüzeyinde yer alan ligand grupları hem yüzeyin pasivasyonu hem de yük taşıyıcıların hareketliliği açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, KKN fotodedektörlerin performansı; nokta sentezi, ligand mühendisliği ve yük taşıyıcı katmanların optimize edilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

PbS ve HgTe KKN'lar sırasıyla en yaygın olarak incelenen SWIR ve orta dalga kızılötesi (MWIR) yarı iletken malzemelerdir. Ancak PbS ve HgTe KKN' ların aksine, InAs ve InSb gibi III–V KKN' lar, Avrupa Standartları Birliği'nin RoHS (Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması) gereksinimlerini karşılayan "yeşil" malzemelerdir ve bant aralıkları kısa dalga

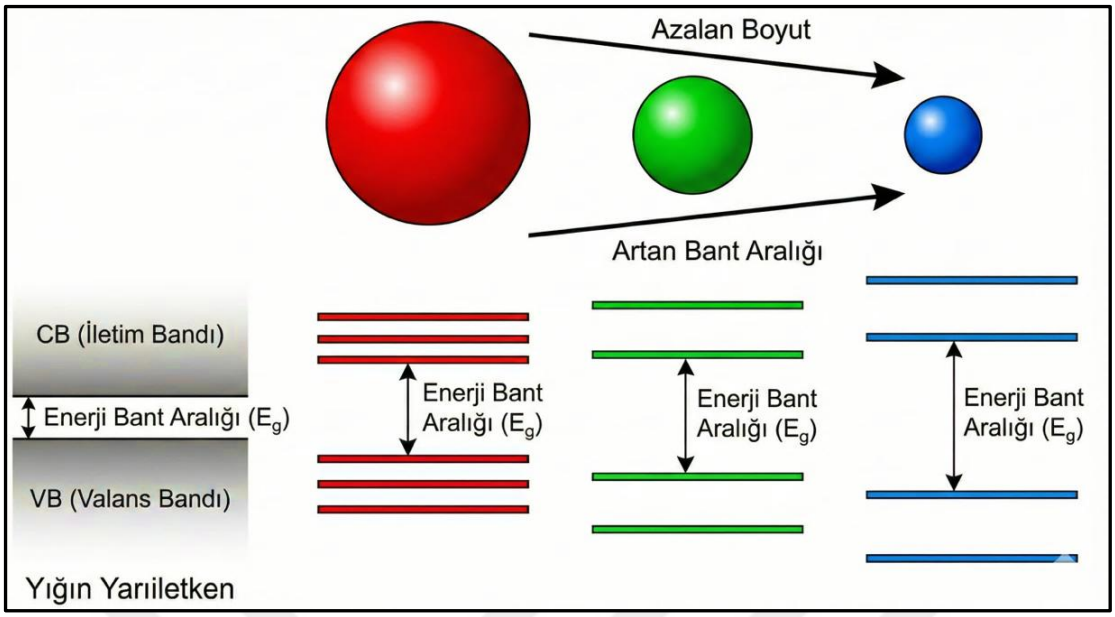
kızılötesi bölgesinde sürekli olarak ayarlanabilir. 300 K'de 0,17 eV lik bir optik bant aralığına sahip ve 5 μm'ye kadar ışık emilimi yapabilirler. InSb 60 nm'lik büyük bir Bohr yarıçapına sahip olduğu için kuantum hapsetme etkilerini korumaktadır.

2.4. Kuantum Nokta

İlk olarak 1981 yılında, AL Ekimov ve AA Onushchenko tarafından aşırı doymuş bir katı çözeltinin termal olarak başlatılan difüzyonlu faz ayrımı yoluyla çok bileşenli silikat camlarda büyütülen CuCl nanoparçacıkları büyütülerek, ultra ince yarı iletkenlerin spektral ve lüminesans özelliklerinin boyut bağımlılığı olduğu ortaya çıkmıştır [13]. Bu durum Al.L. Efros ve AL Efros tarafından matematiksel olarak da doğrulanmıştır [14]. Sonrasında Louis E. Brus, CdS'nin koloidal çözeltileri için de aynı bağımlılığı elde etmiştir [15]. İlerleyen yıllar içinde bu durum birçok yarı iletken parçacıklar içinde doğrulanmıştır: CdS, CuBr, CdSe, PbS, ZnS, $Zn_3 P_2$ ve $Cd_3 P_2$ [16].

"Kuantum noktası" terimi ilk defa MA Reed ve arkadaşları tarafından ortaya atılmıştır. [17]. 1988'den beri literatürde ultra ince parçacık veya nanokristal terimi yerine kullanılmaya başlandı. Bu alanda yapılan öncü çalışmalarıyla Louis Brus, Aleksey Yekimov ve Alexander Efros 2006 yılında, Louis Brus ise 2008 yılında Nanobilim alanında Kavli Ödülü'nü almıştır [18].

Kuantum nokta (KN), elektron veya delik taşıyıcılarının üç uzaysal yönde (x, y, z) sınırlandırıldığı sıfır boyutlu yarıiletken nanokristal yapılara denir. Bu durumda üç boyutlu yarıiletkenlerin süreklilik gösterdiği enerji seviyeleri kuantize olur yani Şekil 2.4' deki gibi kesikli hale gelir. Ayrıca emisyon pikleri oldukça dardır. Optik ve elektronik davranışları bir atomunkine benzediğinden bunlara yapay atomlar da denilebilmektedir. Kristal yapıları kullanılan sentez yöntemine göre küresel, eliptik piramit ya da tepesi kesik piramit gibi şekillerle değişkenlik göstermektedirler.



Şekil 2.4. Kuantum nokta boyut değişimi

Kuantum noktaların boyutuna bağlı olarak etkin bant aralığı değişmekte olup, kuantum sınırlanmanın baskın olduğu küçük boyut rejiminde bant aralığı bulk malzemeye kıyasla artmakta, boyutun büyümesiyle birlikte ise bulk bant aralığına yaklaşmaktadır. Kuantum noktada soğurma grafiğinde çıkan pik tepe değerine göre band gap hesabı ve buradan da Brus denklemi ile çap hesabı yapılabilmektedir.

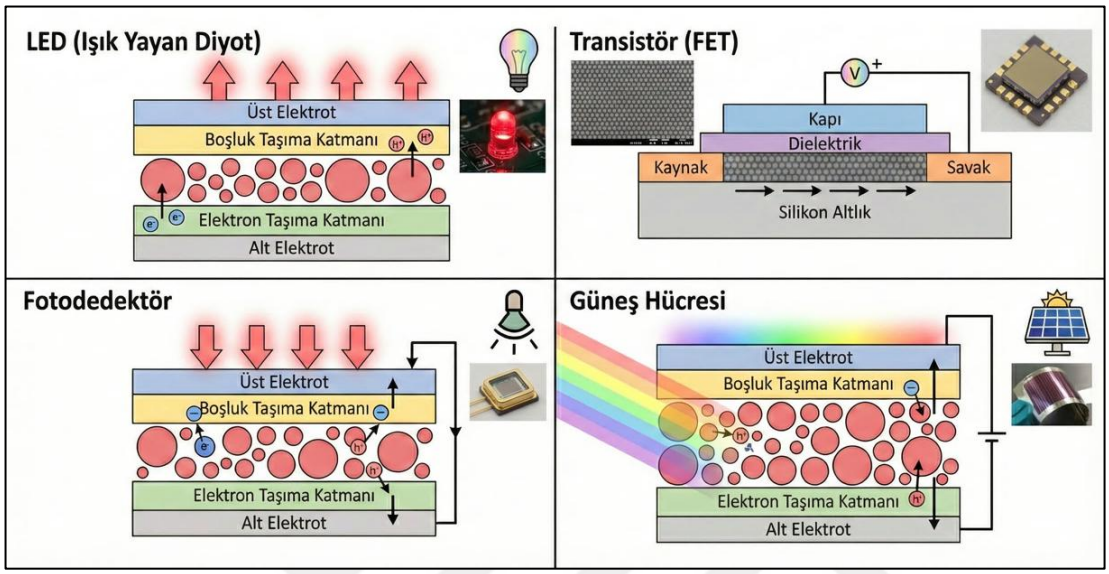
$$E_g(R) = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2\pi^2}{2R^2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) - \frac{1.8e^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R} \tag{2.8}$$

(2.8) denkleminde son terim olan Coulomb terimi çok çok küçük kalacağından (~0,03 eV) genellikle ihmal edilip denklem (2.9) haline dönüşür:

$$E_g(R) = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2\pi^2}{2R^2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) \tag{2.9}$$

Bir kuantum noktasının en önemli özelliği ayarlanabilir boyutlara sahip olmasıdır. Bu özelliği sayesinde geniş bir renk spektrumu oluşturulabilir ve renk saflığı seçeneğiyle de LED ve ekran teknolojilerinde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Boyutları arttıkça mavi kısa dalga boylarından kırmızı dalga boylarına kadar soğurma ve yansıtma özellikleri bulunur. Bu sayede fotodedektör ve güneş hücresi yapımında da son zamanlarda geliştirilmekte olan

performansı dışında düşük maliyeti ile göz önündedir. Bunların dışında transistörler (FET), bellek elemanları ve kuantum hesaplamaları gibi teknolojilerde de aygıt geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Şekil 2.5' de çeşitli örnekler bulunmaktadır.



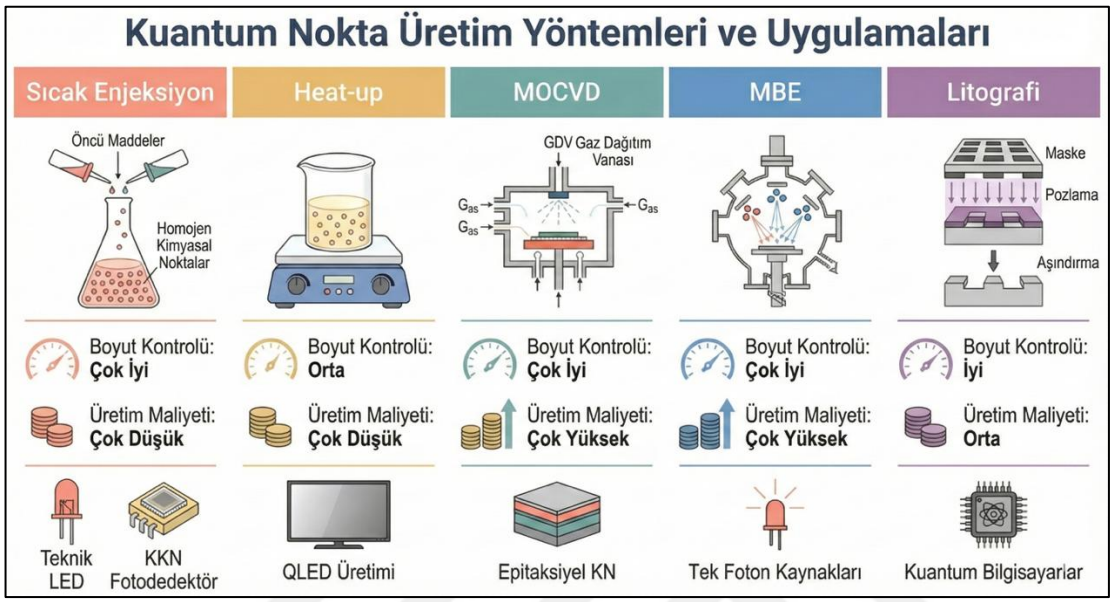
Şekil 2.5. Kuantum noktaların uygulama alanlarına örnekler

2.4.1. Kuantum nokta üretim yöntemleri

1970'lerde kuantum kuyularının keşfi ile başlayan iki boyutlu teller ve tek boyutlu noktalarla fotonik yapıların geliştirilmesinde büyük etki yaratan bir teknolojinin adımları atılmıştır [19]. Kuantum kuyuları MOCVD ve MBE gibi epitaksiyel büyütme cihazlarıyla hassas heteroyapılarda yüksek doğrulukla üretilebilmektedir. 1980'lerde Litografi tekniği ile heteroyapılar dikey sınırlandırılarak ve aşındırma yaparak yapılarak kuantum nokta yapılar üretilmiştir [19]. Ancak hassas boyut ayarlaması yapılabilse de sıcak ejeksiyon yöntemi gibi bir sentez yöntemindeki kadar küçük boyutlara ulaşmakta elverişli olamamıştır. Bu büyütme yöntemleri, yüksek maliyet yerini koloidal yöntemlere düşük maliyete, esnek ve ölçeklendirilebilir büyütme kontrolü sağlama gibi avantajlara sahip büyütme yöntemlerine gelinmesini sağladı.

21. yüzyılın başlarında bu yapıların geliştirilmesine, uygun kristal yapıya sahip yüksek yoğunluklu düzgün kuantum nokta yapıların oluşturulmasına odaklanılmıştır [20-21]. Çözelti fazında yani koloidal kuantum nokta üretmek Heat-up ve hidrotermal yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerde de farklı süreçlere oluşan çekirdeklenme farklı

boyutların oluşturmasına neden olmuştur. Daha sonra sıcak enjeksiyon yöntemi ile ligand-metal kontrolü sağlayarak en elverişli yöntem olabilmiştir [22]. Yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kuantum Nokta üretim yöntemleri ve uygulamaları

2.4.2. InSb kuantum nokta

InSb, III–V bileşik yarıiletkenleri arasında yer almakta olup ilk kez 1950'li yılların başında tek kristal formda büyütülmüş ve 1960'lı yıllara kadar temel elektronik ve optik özellikleri kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Şekil 2.7'deki gibi, Çinko-blend (zinc-blende) kristal yapısına sahip olan InSb'nin kafes sabiti yaklaşık a ≈ 6,48 Å'dur. Malzeme, doğal olarak dar bant aralığı sayesinde yakın ve orta kızılötesi (1–7 μm) dalga boyu aralığında yüksek duyarlılık sağlar [22].



Şekil 2.7. InSb için kafes yapısı ve bulk yapıları ve wafer hali

InSb malzemesi genellikle Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi koyu gri–gümüş tonlarında metalik parçacıklar ya da cam benzeri parlaklığa sahip ince bir toz olarak görülür. 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ısıl kararlılığını kaybederek erimeye başlar ve bozunma sonucunda antimon ile antimon oksit içeren buhar fazı oluşur.

Yığın (bulk) InSb'nin bant aralığı oda sıcaklığında (300 K) yaklaşık 0,17–0,18 eV, 77 K'de ise ≈0,23 eV değerine yükselir. Bu dar bant aralığı, InSb'nin yüksek kızılötesi duyarlılığının temel nedenlerinden biridir. Ek olarak, yaklaşık 78000 $cm^2\ V^{-1}\ s^{-1}$ düzeyindeki yüksek elektron hareketliliği, malzemeyi hızlı taşıyıcı dinamikleri gerektiren IR fotodedektör uygulamaları için son derece avantajlı kılar.

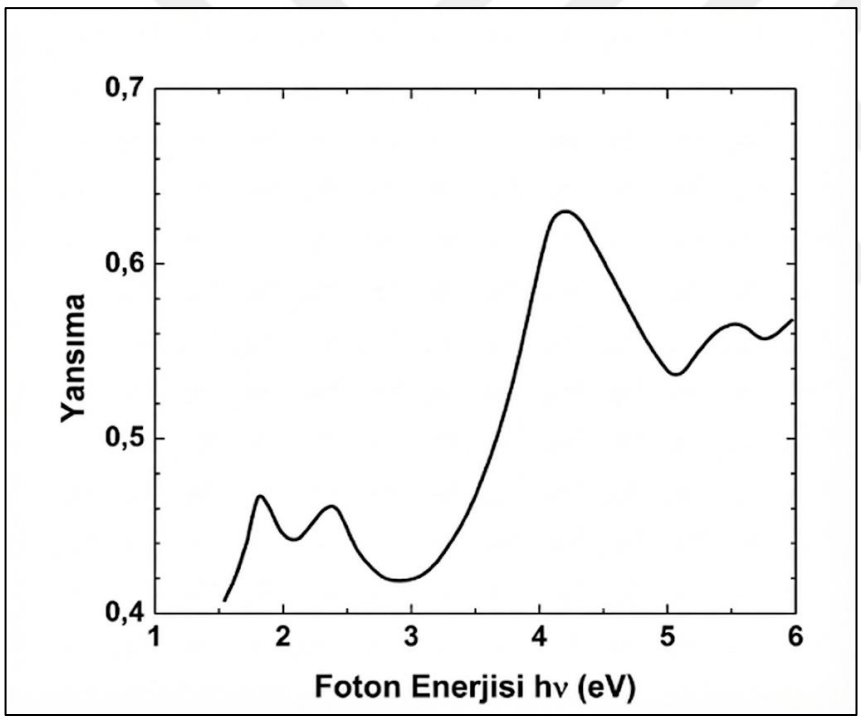
Elektron etkin kütlesi oldukça küçüktür ($m^*e \approx 0{,}013–0{,}03\ m_0$), delik etkin kütlesi ise nispeten daha büyük olup $m^*h \approx 0{,}2–0{,}4\ m_0$ aralığındadır. Küçük etkin kütle değerleri hem yüksek hareketliliğin hem de güçlü kuantum sınırlanma etkilerinin temelini oluşturur. Ayrıca InSb'nin yaklaşık 60 nm'lik büyük Bohr yarıçapı ve ~0,5 meV gibi düşük eksiton bağlanma enerjisi, bu malzemenin kuantum nokta formunda kolayca kuantum sınırlanma göstererek boyuta bağlı optik özellikler sergilemesini mümkün kılar.

Kuantum nokta boyutunun birkaç nanometre ölçeğine indirilmesiyle elektron-delik dalga fonksiyonları sıkışır ve bu sıkışma; bant aralığının genişlemesine, soğurma tepe dalga boyunun kısalmasına ve ayarlanabilir optik özelliklere neden olmaktadır. Bu sayede 7-12 µm kızılötesi bölgesine duyarlı olan InSb 1-5 µm aralığına kadar genişletilebilir ve NIR-SWIR fotodedektörler içinde cazip hale gelmektedir.

Şekil 2.8'de InSb'nin foton enerjisine bağlı olarak gösterdiği yansıma davranışını ortaya koymaktadır. Spektrumun genel görünümü, malzemenin bant yapısındaki optik geçişlerin farklı enerji bölgelerinde nasıl etkin hâle geldiğini açıkça yansıtır. Düşük foton enerjilerinde (yaklaşık 1-2 eV) gözlenen küçük dalgalanmalar, valans bandındaki çeşitli alt bantlardan iletkenlik bandına yapılan zayıf optik geçişlere karşılık gelir. Bu bölgedeki nispeten düzensiz yapı, düşük enerjili uyarımların InSb içinde sınırlı fakat ölçülebilir optik yanıt oluşturduğunu göstermektedir. Foton enerjisi 2,5-3 eV aralığına yaklaştığında yansımanın belirgin biçimde azalması, malzemenin soğurma katsayısının bu bölgede arttığını ve dolayısıyla bantlar arası geçiş olasılığının yükseldiğini gösterir. Şekil 2.8'de en baskın özellik ise yaklaşık 4 eV görülen yüksek yansıma tepeciğidir. Bu maksimum, InSb'nin bant yapısında yoğun

durumların bulunduğu kritik bir optik geçiş noktasını temsil eder ve bu nedenle yansıma seviyesi bu bölgede keskin bir şekilde yükselir. Daha yüksek enerjilere geçildiğinde (5-6 eV) eğride tekrar ortaya çıkan küçük salınımlar, derin valans bantlarından iletkenlik bandının üst enerji bölgelerine yönelen ek geçişlerin optik yansıma üzerine yaptığı katkıyı göstermektedir.

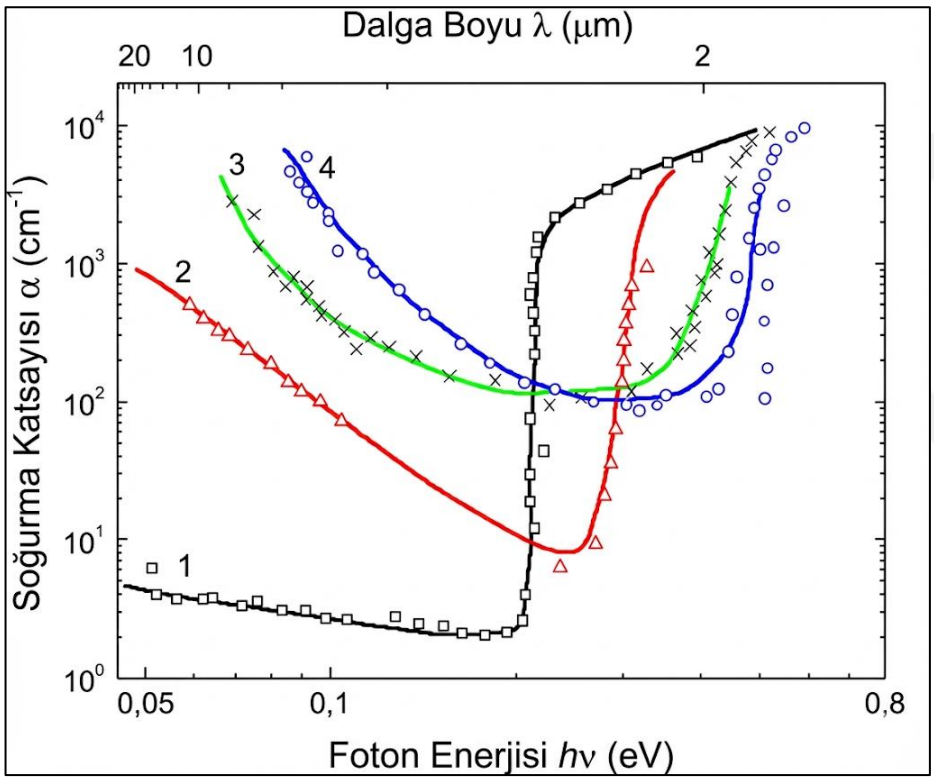
Bu genel eğilim, InSb'nin oldukça geniş bir enerji aralığında çok kademeli optik tepkiler sergilediğini ve bant yapısının foton enerjisine duyarlı karmaşık bir karaktere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece yansıma spektrumu, InSb'nin hem elektronik bant yapısını doğrulayan hem de fotodedektör uygulamaları için kritik olan optik geçiş mekanizmalarını anlaşılır hâle getiren önemli bir gösterge niteliği taşır.



Şekil 2.8. InSb nin yansıma ve foton enerji grafiği

Şekil 2.9'da verilen soğurma katsayısının foton enerjisine bağlı değişimi, InSb'nin kızılötesi ışıkla etkileşiminde rol oynayan temel optik süreçleri ortaya koymaktadır. Düşük enerji bölgesinde (≈0,05-0,15 eV) gözlenen yüksek absorpsiyon, malzemenin serbest elektronlarının bant içi geçişinden kaynaklanır ve InSb'nin küçük etkin kütleli taşıyıcılar barındırmasının doğal bir sonucudur. Enerji arttıkça eğrinin minimuma yaklaşması, serbest taşıyıcı katkısının zayıfladığı ara bir bölgeyi işaret eder.

Yaklaşık olarak 0,23 eV soğurma katsayısının hızlı biçimde yükselmesi, InSb'nin bant aralığına karşılık gelen direkt bant geçişinin karakteristiğidir. Bu enerjinin üzerindeki bölgede (≈0,3-0,8 eV) soğurmanın 10^3-10^4 cm^{-1} mertebelerine ulaşması, valans bandının daha derin bölgelerinden iletkenlik bandına gerçekleşen yüksek enerjili optik geçişlerin baskın hâle geldiğini göstermektedir. Bu genel eğilim, InSb'nin IR bölgesinde hem serbest taşıyıcı hem de bantlar arası geçiş mekanizmalarını güçlü şekilde sergileyen bir malzeme olduğunu doğrulamaktadır.

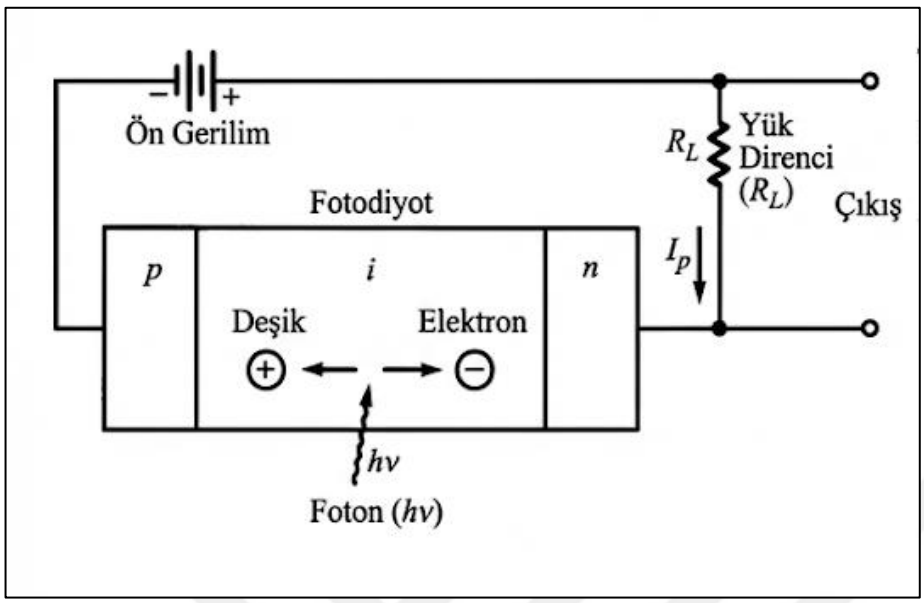


Şekil 2.9. InSb'nin soğurma ve foton enerji grafiği

2.5. Fotodedektör Mimarisi

Bu tezde kullanılan fotodedektör, çözelti temelli yöntemler ile oluşturulmuş çok katmanlı bir yapıya sahip olup, taşıyıcıların etkin biçimde ayrışmasını sağlayan p–i–n düzenine benzer bir tasarım yaklaşımıyla oluşturulmuştur. Yapının işlevi; ışığın aktif bölgede soğurulması sonucunda ortaya çıkan elektron ve deliklerin birbirinden ayrılarak uygun elektrotlara yönlendirilebilmesi için, farklı fonksiyonlara sahip ince tabakaların belirli bir sırayla bir araya getirilmesine dayanmaktadır.

2.5.1. p-i-n hetero yapılar

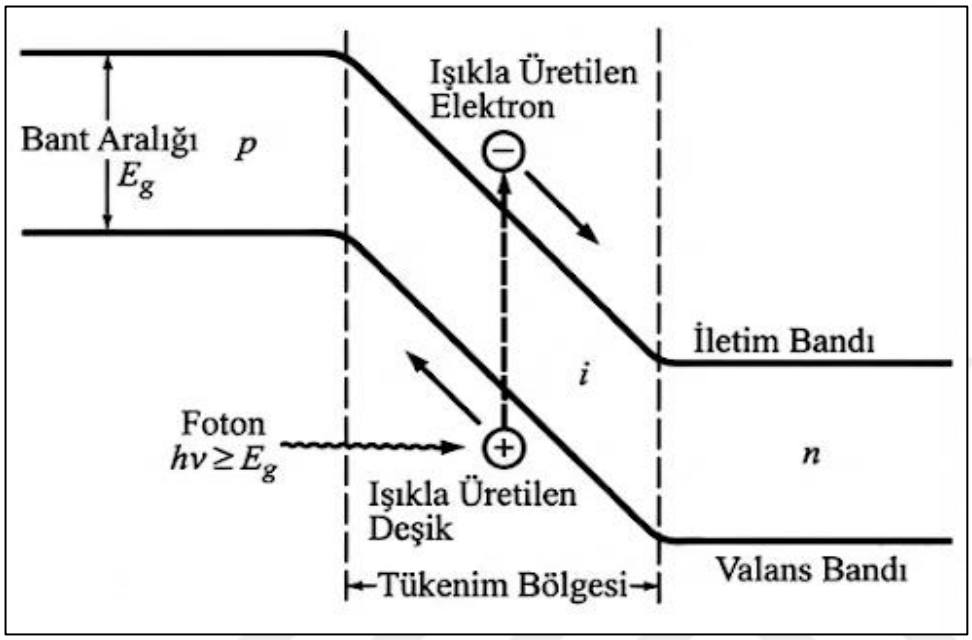


Şekil 2.10. p-i-n yapısı

p-i-n heteroyapılar gelen ışığı soğurup taşıyıcı katmanların ayrışmasını kolaylaştıran yapılardır. Burada p-tipi (p), intrinsic (i), n-tipi (n) olarak isimlendirilen katmanlar bir elektrik alan oluşturarak fotodedektörün performansını artmasını sağlar. p-tipi olan bölge delik yoğunluğuna sahip taşıyıcı tabaka iken n-tipi bölge ise elektron yoğunluğuna sahip taşıyıcı tabakadır. Intristic tabaka ise herhangi bir katkısı olmayan aktif bölge, tükenme bölgesi, soğurucu bölge denilen ışığı soğuran ve burada elektron-delik çiftlerini yani eksitonları oluşturan bölgedir. Şekil 2.10'da p ve n katmanları arasında bir elektrik alan oluşur. Elektrik alan foton soğurulması sonucu iletim bandına uyarılan elektronları n-bölgesine doğru taşırken, valans bandında oluşan deşikler elektronların ters yöndeki yer değiştirmesi sonucu p-bölgesinde deşik yoğunluğu artar. Böylece taşıyıcılar etkin şekilde ayrıştırılarak yeniden birleşme ihtimali azaltılır.

Fotodedektörde tükenme bölgesinde olan koloidal kuantum nokta tabaka ile p ve n taşıyıcı arayüzlerin enerji seviyelerinin uyumlu olması, yüksek verimlilik, düşük gürültü ve uzun ömürlü cihazlar için önemlidir. Fotodedektör tarafından emilen fotonlar, elektronları koloidal kuantum nokta tabakasından arayüzeye kolayca enjekte edebilir ve böylece daha fazla fotoakım üretilerek fotodedektörün kuantum verimliliğinin artmasına neden olur. Enerji seviyeleri uyumlu olduğunda arayüzde daha az rekombinasyon oluşacağından

fotodedektörün gürültü seviyesi azalır. Ayrıca enerji seviyeleri uyumlu olduğunda, koloidal kuantum nokta tabaka ile arayüzde daha az bozulma meydana gelir ve bu da fotodedektörün ömrünü uzatır [24].



Şekil 2.11. p-i-n yapı bant geçişi

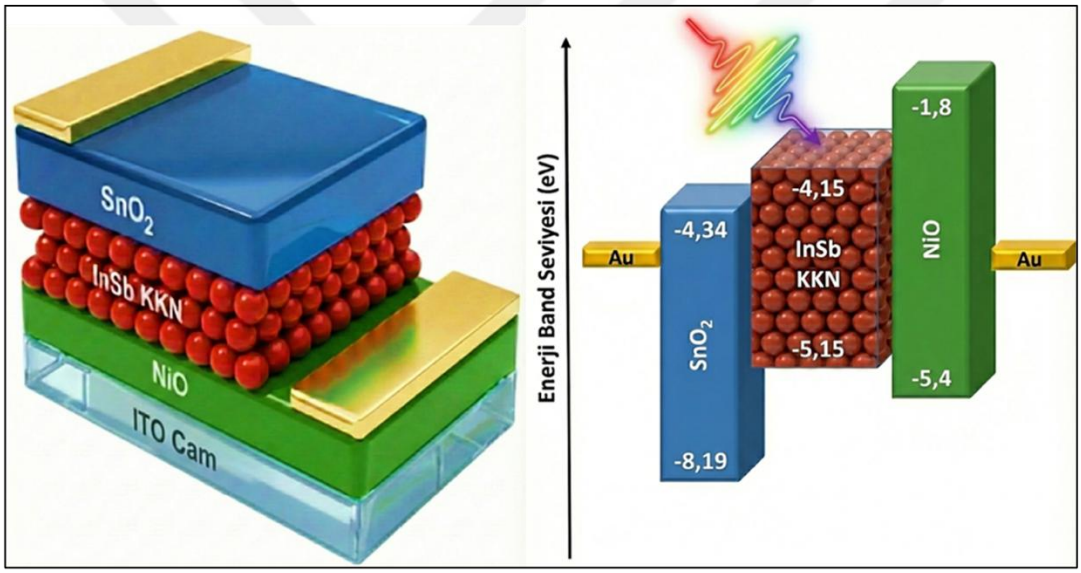
p, i ve n tabakalarının bant aralıklarına sahip yarıiletkenlerden seçilmesiyle bant hizalaması mühendisliği yapılabilir. Bu sayede kuantum noktalar, metal oksitler, organik ara tabakalar veya heteroyapı bariyerleri kullanılarak taşıyıcı taşınımı optimize edilebilir. Özellikle InSb, PbS ve InAs gibi geniş Bohr yarıçapına sahip kuantum noktalarda p–i–n mimarisi, düşük boyutun getirdiği kuantum sınırlama etkileriyle birleşerek SWIR bölgesinde yüksek verimli fotodedeksiyon sağlar.

2.5.2. NiO/InSb KKN/SnO_2 mimarisi

Geliştirilen mimarideki fotodedektör yapısında deşik taşıma tabakası olarak; InSb koloidal kuantum nokta tabakası geniş band aralığına, yüksek optik geçirgenliğe ve üstün içsel deşik mobilitesine sahip p-tipi NiO tercih edildi. Böylece, arayüzeyde deşik taşıma için elverişli olan NiO materyalinin iletim bandı seviyesi ile InSb'in iletim bandı arasında uyumlu bir eşleşme sağlanır. Ayrıca, SnO_2 iletim bandı seviyesi InSb'nin iletim bandı seviyesinden daha düşüktür. Bu da InSb'den Ag elektrota elektron taşınmasını engelleyerek taşıyıcı rekombinasyonu engelleyebilir. Genellikle fotodedektör yapısına bakıldığında elektron

taşıma tabakası olarak ZnO tercih edilmiştir. Tasarlanan fotodedektör yapısında InSb koloidal kuantum nokta tabakası için elektron taşıma tabakası olarak ZnO yerine geniş bir bant aralığı ve yüksek iş fonksiyonuna sahip SnO_2 malzemesi tercih edildi. Böylece koloidal kuantum nokta tabakada üretilen elektronlar daha fazla iletime katılarak fotodedektörün çıktı parametrelerinin iyileşmesi beklenmektedir. Yukarıda belirtilen deşik ve elektron tabakalarının InSb ile enerji bant uyumlulukları

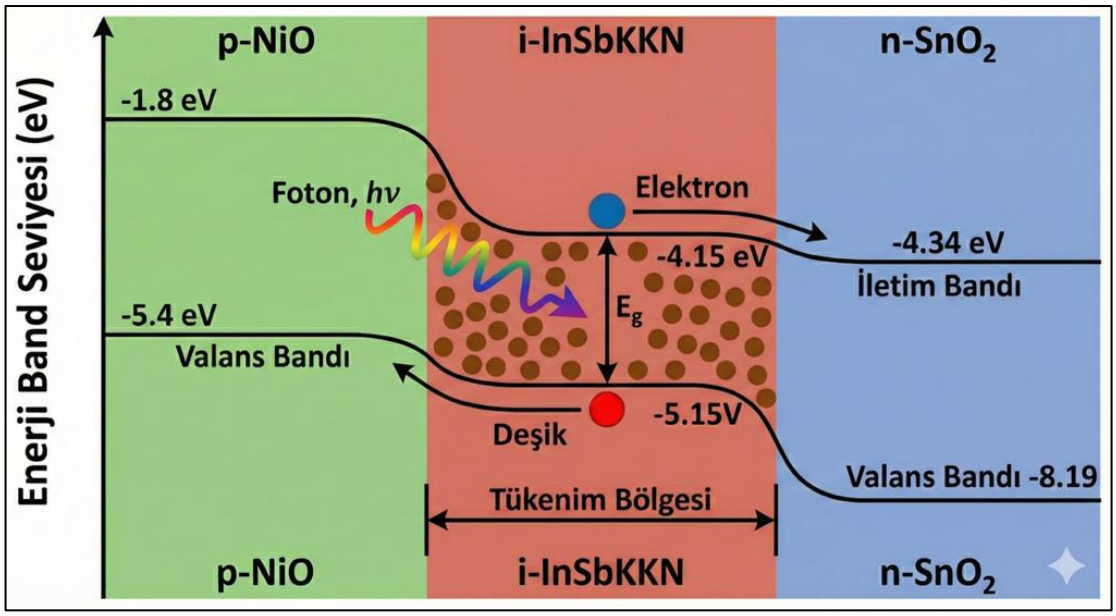
Şekil 2.12'den de görülmektedir. Bunlara ek olarak, SnO_2 tabaka üzerine Au kontakları geliştirilerek yüksek geçirgenliğinden dolayı üzerine düşürülen ışığın tamamı fotodedektör tarafından soğrulacaktır.



Şekil 2.12. NiO/InSb KKN/SnO_2 mimarisi ve enerji band diyagramı

Cihaz mimarinde de görüldüğü gibi fotodedektörde koloidal kuantum nokta tabaka ile arayüzeylerin enerji seviyelerinin uyumlu olması, yüksek verimlilik, düşük gürültü ve uzun ömürlü cihazlar için önemlidir. Fotodedektör tarafından emilen fotonlar, elektronları koloidal kuantum nokta tabakasından arayüzeye kolayca enjekte edebilir ve böylece daha fazla fotoakım üretilerek fotodedektörün kuantum verimliliği artar. Enerji seviyeleri uyumlu olduğunda arayüzde daha az rekombinasyon oluşacağından fotodedektörün gürültü seviyesi azalır. Ayrıca enerji seviyeleri uyumlu olduğunda, koloidal kuantum nokta tabaka ile arayüzde daha az bozulma meydana gelir ve bu da fotodedektörün ömrünü uzatır.

Geliştirilen InSb koloidal kuantum nokta tabanlı fotodedektör yapısının Şekil 2.12'deki gibi enerji bant ilişkisini içeren çalışma mekanizması fotodedektör üzerine ışık düşürüldüğünde, InSb koloid kuantum nokta tabakasında soğurulur ve elektron-deşik çifti oluşturulur. Elektron-deşik çiftleri elektik alan içinde ayrılarak sürüklenme hızlarıyla birlikte hareketlerine devam ederler. Elektronlar SnO_2 (Eg ≈ 4,3-8,1 eV) elektron taşıma tabakası üzerinden taşınarak Au elektrota aktarılır, deşikler ise NiO (Eg ≈ 1,8-5,4 eV) deşik taşıma tabakası üzerinden hareket ederek Au elektrota aktarılır. Böylece yükler elektrota taşınarak kontaklar aracılığı ile toplanıp devre tamamlanmış olur ve InSb koloidal kuantum nokta tabanlı fotodedektör fotoakım üretilir.



Şekil 2.13 Fotodedektör yapısının enerji band seviyeleri

3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

3.1. Fotodedektörlerin Büyütülmesi

Bu çalışmada fotodedektörlerin üretimi, belirlenen katmanlı yapının kontrollü biçimde alttaş üzerine biriktirmesiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir tabakanın kalınlığı, sürekliliği ve yüzey kalitesi, cihazın genel performansını belirlediği için her bir tabakanın kaplama parametreleri deneysel olarak optimize edilmiştir. Üretim aşamasında, aktif malzemenin optik soğurma özelliklerini koruyacak ve taşıyıcı taşınımını destekleyecek bir film morfolojisi elde edilmesine özellikle dikkat edilmiştir.

3.2. Sıcak Enjeksiyon Yöntemi

Kuantum noktalarının keşfinin 30. Yıldönümünde 2014 yılında Paris'te düzenlenen "Koloidal Kuantum Noktalarının 30 Yılı" konferansı'nda, kuantum noktalarının üretimi konusunda yeni fikirler konmuştur [25]. Bu alanın önemli göstergelerinden biri, sadece 2019'dan 2023'e kadar olan süreçte, Scopus ve Web of Science veri tabanlarında indekslenen bilimsel dergilerde bu konu hakkında 17 binden fazla makalenin yayınlanmış olması ve Moungi Bawendi, Louis Brus ve Aleksey Yekimov'un koloidal kuantum noktalarının keşfi ve sıcak enjeksiyon yöntemi ile sentezi nedeniyle 2023 Nobel Kimya ödülü'ne layık görülmesidir [25-26].

Brus ve Yekimov, koloidal kuantum noktaları (KKN) yarattılar ve nanometre boyutlarını gözlemlenebilir optik kuantum özelliklerini keşfettiler. Ancak ilk dönem sentez çalışmalarında tekrarlanabilirliğin düşük olması, sentezlenen KKN'ların geniş bir boyut dağılımına sahip olmaları yüzünden optik özelliklerinin çeşitli olması gibi önemli sorunlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca farklı partikül büyümeleri, büyüme hızı ve çekirdeklenme zamanının kontrol edilememesi gibi sorunlar süreci zorlaştırmıştır. Bu durumu için önemli bir dönüm noktası olan, Christopher Murray, David Norris ve Moungi Bawendi'nin Amerikan Kimya Derneği Dergisi'nde ödül aldıkları, sıcak enjeksiyon yöntemini kullanarak ve CdS, CdSe, CdTe malzemelerinin nanokristallerini sentezleyerek çözüme ulaştırmışlardır [22].

Sıcak enjeksiyon yöntemi, KKN'ların çekirdeklenme ve büyüme aşamalarını ayırarak, boyutlarını kontrol ederek ve eşit boyutlarda KKN'lar üretebilme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile yüksek sıcaklıklara çıkılabilir ve iyonik olmayan karışımlar organik bileşiklerde çözdürülebilir hale getirilebilir. Bu özellikleri sayesinde boyut seçici kullanılmasına gerek duyulmadan yüzey pasivasyonu yüksek, kusurları azaltılmış KKN'lar üretilebilmektedir [26].

Genel olarak çözücüler belli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak hazırlanan öncü çözeltiyi ise istenilen sıcaklığa gelince enjekte edilir. Sonrasında bazı sentezlerde hemen soğutma işlemine geçilirken bazılarında ise bir süre sabit sıcaklıkta tutulup sonrasında soğutma işlemine geçilebilmektedir. Böylece çekirdeklenme ve büyüme istenildiği gibi kontrol edilebilmektedir.

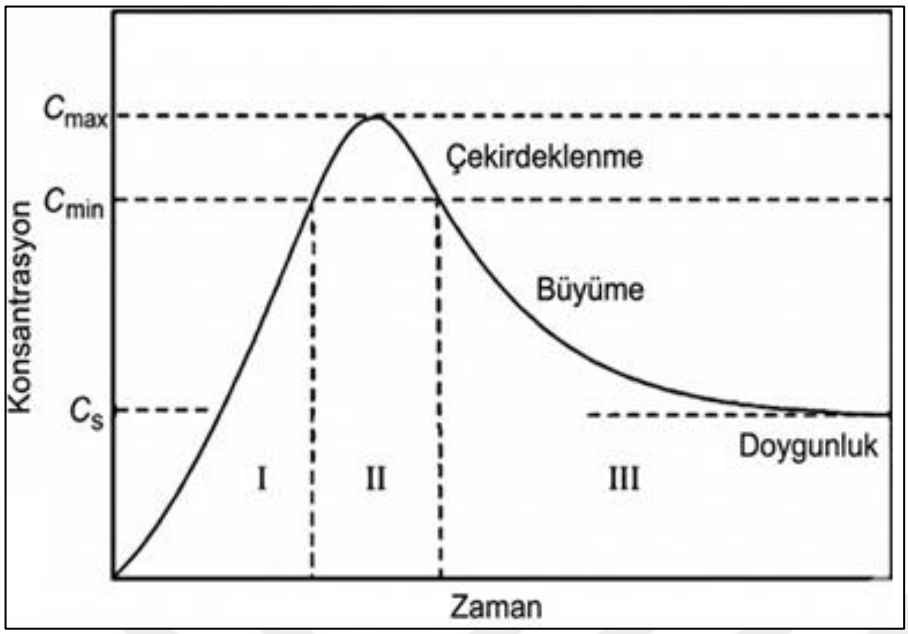


Şekil 3.1. Çekirdeklenme özeti

Reaksiyon ortamında genellikle hem çözücü hem ligand olarak görev yapabilen oleilamin (OLA), sadece çözücü olarak dioctyl ether (ODE), ve ligand görevi gören oleik asit (OA), TOP (trioctylphosphine), TOPO (trioctylphosphine oxide) gibi yüksek kaynama noktalı bileşikler kullanılmaktadır. Bu tür bileşikler iyonik metal tuzlarını direkt çözemediklerinden metal-ligand kompleksi oluştururlar. Böylece iyonik metal tuzlarını iyonik olmayan türlere dönüşüp organik bileşik içinde çözünür hale getirebilmektedirler. Günümüzde kavramı giderek genişleyen ligandlar, uzun zincir yapılarına, bağlanabilir elektron çiftlerine ve metal iyonları ile bağ yapma özelliklerine sahiptirler. Ligandlar, elektron çiftlerini metal iyonuna bağlayarak daha kararlı hale gelmesini sağlamaktadır. Klasik fiziğin aksine kuantum mekaniğinde elektronlar zıt spinlere (+½, –½) sahip olduklarından dolayı manyetik çekim

ile dengelenip çift oluşturabilirler. Bu durum Pauli ilkesi ile de açıklanabilir; bir enerji seviyesinde en fazla iki elektron bulunur ve bunların spinleri zıt olmak zorundadır. Dolayısıyla elektronlar, atomların değerlik bantlarında enerji minimizasyonu doğrultusunda elektron çifti oluşturarak kararlı hale gelmeye çalışırlar. Bu elektron çiftleri de sentez sırasında metal iyon boşluklarına bağlanarak bağ yapabilmekte ve metal ligand kompleksi oluşturabilmektedirler.

Reaksiyon istenilen sıcaklığa gelindiğinde metalin bulunduğu öncü çözelti hızlıca eklenir eklenip metal-ligand kompleksi oluşmaya ligandlar metali taşımaya başlar. Bir süre sonra sıcaklık bu kompleks yapıyı bozup parçalamaya başlar ve monomer denilen atomik yapı taşlarını serbest bırakır. Monomer oluşumu devam ettikçe derişim artar ve aşırı doygunluk/eşik seviyesine gelinceye kadar da artmaya devam eder. Bir an geldiğinde çok sayıda küçük çekirdekler oluşmaya başlar. Bu durum LaMer modeli ile açıklanabilmektedir. LaMer modeli; sentez esnasında oluşan monomer derişiminin zamanla nasıl değiştiğini ve çekirdeklenmenin nasıl gerçekleştiğini açıklar. Monomer oluşumu eşik değere ulaştıktan sonra kararsız hale gelmeye başlar ve bu sırada ani bir çekirdek patlaması gerçekleşir. Çok sayıda çekirdek aynı anda oluşmaya başlar. Şekil 3.2'de de özetlendiği gibi çekirdeklenme tamamlanınca derişim azalır kritik değerin altına düşer yani artık çekirdeklenecek kadar yoğunluk kalmaz [27]. Bu aşamadan sonra sistem, mevcut çekirdeklerin monomer eklenmesiyle büyüdüğü büyüme evresine geçer. Sonrasında devreye girip yoğunluğuna göre hızını ayarlayıp KKN'ların kristal şeklini, boyutunu, yüzey pasivasyonunu doğrudan kontrol eder. Kuantum noktası büyüdüğünde yüzeyi aslı kalan bağlar, bağ yapamamış boşluklar ve kristal kusurları olabileceğinden ligandlar yüzeyi pasive ederler. Böylece koloidal stabilite artar, çözücüde dağılması kolaylaşır ve PL verimi yükselir.

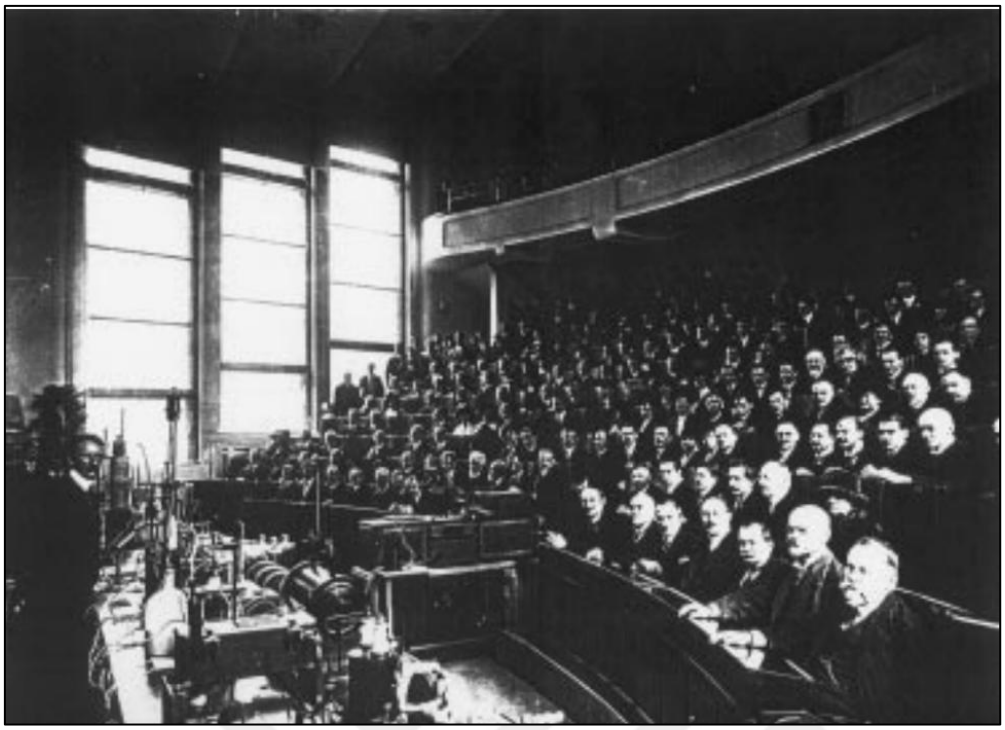


Şekil 3.2. LaMer Modeli akış şeması

3.2.1. Schlenk sistemi

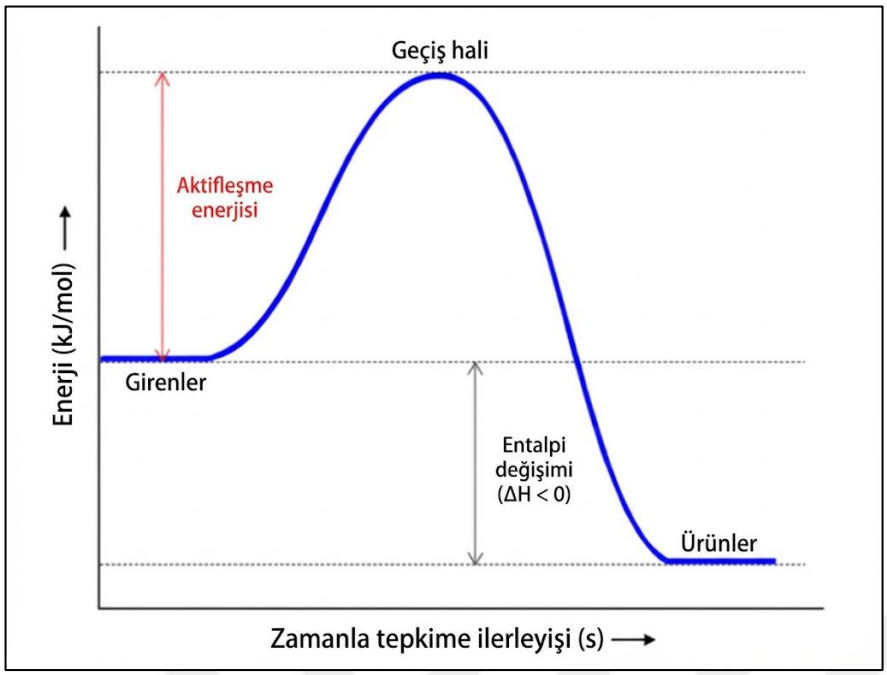
Schlenk sistemi, 20. yüzyılın ortalarında özellikle organometalik bileşiklerin sentezinde havadaki oksijen ve su buharı ile temas ettiğinde hızla hidroliz olma, oksitlenme veya tamamen bozunma gibi temel problemler amacıyla geliştirilmiştir. 1913 yılında Wilhelm Schlenk ve ekibi tarafından geliştirilen, hava ve neme duyarlı bileşiklerin sentezinde veya saflaştırılması sırasında reaktif gazların çözeltiden uzaklaştırılıp inert bir ortam sağlamak amacıyla üretilen cam manifold sistemidir [28]. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi 15 Ocak 1921'de Viyana Üniversitesi Kimya Enstitüsü II'de yeni açılan büyük amfinin açılışında Wilhelm Schlenk, *"Kimyada Elektriğin Uygulamaları"* başlıklı bir konferans vermiştir. Bu önemli etkinliğe Albert Einstein'ın da katılmış olması (ikinci sıra), söz konusu konferansın yalnızca kimya değil, genel bilim tarihi açısından da yüksek bir değere sahip olduğunu ve Schlenk'in uluslararası düzeydeki bilimsel saygınlığını göstermektedir.

Dolayısıyla bu bileşiklerin hazırlanması, saflaştırılması ve saklanması için açık sistem laboratuvar koşulları uygun değildir. Schlenk sistemi aynı sistem üzerinde vakum ve inert gaz hatlarını birleştirerek, ortamı vakumlama veya inert gazla doldurma imkânı sağlamıştır. Böylece, hava ile teması engellenmiş kapalı bir sistem içinde reaktiflerin güvenli saflaştırılması ve kontrollü taşınması mümkün hale gelmiştir.



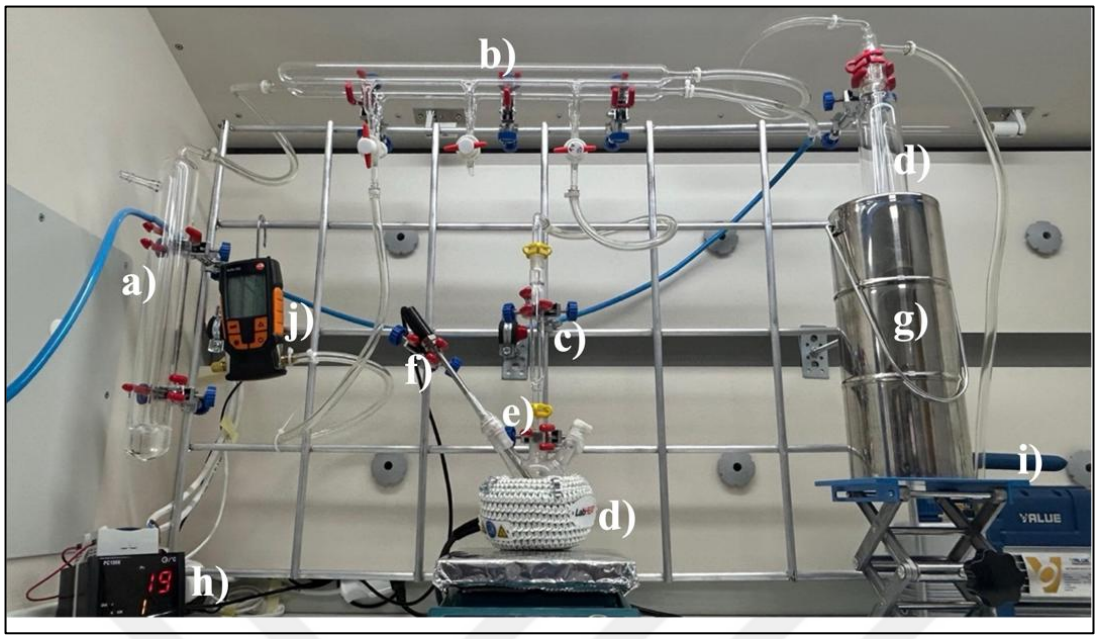
Şekil 3.3. Wilhelm Schlenk Viyana'daki konferansta [28].

Reaktif gazlar, kararsız elektron yapısına ve yüksek kimyasal enerjiye sahip oldukları için ısı, katalizör veya başka maddelerle etkileşime girdiklerinde kimyasal bağ oluşturarak kararlı hale gelmeye çalışan atomlardan oluşurlar. Bu etkileşimleri sonucu ısı, ışık gibi enerji salınımları yaparak yanıcı veya parlayıcı olabilirler. Şekil 3.4'de sunulan potansiyel enerji diyagramında görüldüğü üzere, reaktifler başlangıçta yüksek bir kimyasal potansiyel enerjiye sahiptir. Termodinamik açıdan kararsız olan bu maddeler etkileşime girdiklerinde, tepkimenin ilerleyebilmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Ea) bariyerini aşarlar. Geçiş hali (aktifleşmiş kompleks) sürecinde mevcut kimyasal bağların kırılması ve yeni bağların oluşmasıyla birlikte sistem, enerjisini minimize ederek daha kararlı bir yapıya sahip olan ürünlere dönüşür. Örneğin; O_2, H_2, Cl_2, CO gibi.



Şekil 3.4. Aktivasyon enerjisi grafiği

Bu sistem vakum ve inert gaz hattı olmak üzere iki hat üzerinde çalışmaktadır. Bu durum hem çözeltiyi vakum ortamına alarak reaktif gazlarından arındırmak hem de inert gaz ile oksidasyon ve nemden çözeltiyi koruyabilmemizi sağlar. Bu hat gövdesinde çalışma sayısına göre değişiklik gösterecek sayıda musluk çıkışları bulunmaktadır. Bu musluklar iki yollu eğik musluklardır ve vakumu seçmek için bir yöne, inert gazı seçmek için diğer yöne doğru çevrilerek iki tane farklı yol oluşturmaktadır. Böylece iki hat aynı anda açılamaz ve karışamaz. Manifoldun biri inert gaza direkt bağlı iken diğeri ise soğuk tuzak ile vakum pompasına bağlıdır. Burada amaç çözeltiyi reaktif gazlardan uzaklaştırmak ve çözeltiyi gazından arındırmaktır.



Resim 3.1. Schlenk sistemi (Gazi Fotonik Aaştırma Merkezi)

Resim 3.1'de görüldüğü gibi Schlenk sisteminin elemanları aşağıdaki gibidir:

a) Bubbler: İnert gazın sistemde akışının olup olmadığını kontrol etmek için kullanılır. İçerisindeki parafin yağının kabarcık oluşturması sonucu gazın varlığı kontrol edilir.
b) Manifold: Biri gaz geçişi diğeri de vakum geçişini saplar ve musluklarla bu geçişler kontrol edilir.
c) Condenser: Çözelti buharının bulunduğu cam boru.
d) Isıtıcı: Üç boyunlu şişenin içine oturtulduğu sıcaklık kontrolü ile çalışan bir ısıtıcıdır.
e) Üç boyunlu cam şişe: Biri çözeltinin sıcaklık kontrol probu, diğeri condenser, bir diğeri de enjeksiyon için kullanılır. Bunlar septum veya su basili ile kapalı tutulup vakuma destek olması sağlanır.
f) Sıcaklık Ölçme Probu: Çözeltinin sıcaklığını algılamak için kullanılır.
g) Devar: Sıvı azot ile doldurulan trap'in içine oturtulup soğutulduğu kaptır.
h) Sıcaklık kontrol cihazı: Isıtıcının sıcaklığını kontrol edip proptan ölçüm alan kontrol cihazıdır.
i) Vakum pompası: Sistemi vakumlar.
j) Vakum ölçer: Sistemde kaçak olup olmadığını ölçülen vakum değerinden anlamamızı sağlar.

3.2.2. Schlenk sisteminin çalışma prensibi

Kapalı bir kap içindeki çözeltide hareket eden çözünmüş gaz moleküllerinden bazıları yüzeye ulaşır ve tekrar gaz fazına geçer. Kapta bulunan diğer gazların (O_2, N_2, CO_2, vb.) bir kısmı ise çözeltinin içine girer ve çözünür. Bu süreç ilk başta farklı hızlarda olur ama zamanla hızları eşitlenir ve denge durumuna gelmiş olurlar. Sonuçta sistemdeki gaz miktarı ne artar ne de azalır böylece denge sağlanmış olur. Buradaki denge basınca ve sıcaklığa bağlıdır. Schlenk sistemine bağlanan bu çözeltide vakum çalıştığı andan itibaren işte bu denge bozulur.

Ortam sıcaklığı sabit tutularak sistemde vakum pompası açıldığında, Boyle Charles yasalarından olan ideal gaz yasasına göre;

$$PV = nRT \tag{3.1}$$

Eşitlik 3.1'de *P:basınç, V:hacim, n:molekül sayısı, R:rayleigh sabiti, T:ortam sıcaklığını* ifade etmektedir.

Sistem içindeki gaz molekül sayısı sistemin hacmi değişmeyip sabit kalacağından azalır. "n" mol sayısı basınçla doğru orantılı olduğundan sıvı yüzeyindeki gazların basıncı azalır ve yukarıdaki açıklamaya göre artık çözeltide çözünmüş gazlarında denge durumu bozulur ve bu gazlar hızla dışarı çıkmış olur.

Henry yasasına göre;

$$C = k_H \, x \, P \tag{3.2}$$

Eşitlik 3.2'deki *C:sıvıda çözünmüş gazın derişimi,* k_H*:Henry sabiti, P:basıncı* ifade etmektedir.

Belirli bir sıcaklıkta bir sıvı içinde çözünmüş gazın derişimi, o gazın sıvı üzerindeki kısmi basıncıyla doğru orantılıdır. Yani basıncın azalmasıyla çözeltideki çözünmüş gazların düşük basınca uyum sağlayarak sıvı yüzeyine doğru hareket eder ve kabarcıklar oluştrurur. Sonuçta bu gazlar çözeltiden atılmış olur. Bu işleme gaz alma "degassing" denir. Tabi ki çözeltinin

gazını almak için bu işlemi birden fazla kere yapmak gerekmektedir. Bu sırada her adımda sisteme inert gaz verip sistemi oksidasyon ve nemden koruyoruz. Burada sistemdeki muslukları açıp kapatma hızına göre gaz akışını da kontrol edebiliriz. Bu oldukça yumuşak yavaş geçişler olmalı. Reynolds sayısı (Re) varlığına göre;

$$R_e = \frac{pVD}{\mu} \tag{3.3}$$

p: gazın yoğunluğu, V:akış hızı, D:boru çapı, μ:akışkanın viskozitesi
R_e<2000 ise Laminer akış
Re>4000 ise Türbülanslı akış

Schlenk hattında laminer akış tercih edilir. Türbülanslı akışta ani dalgalanmalara neden olur. Bu durum çözeltinin gazı alırken çözeltinin kendisinin de manifolda karışmasına neden olabilir. Bu sistemi kirleten ve patlama riski bulunduran duruma geri çekilme denir. Bu manifoldun kirlenmesiyle kalmayıp vakum pompasına doğru ilerleyip pompanın ömrünün azalmasına neden olur. Bu nedenle düşük Reynolds sayısı yani laminer akış sağlanacak şekilde sistemdeki musluklar yavaşça ve kontrollü hareket ettirilmelidir.

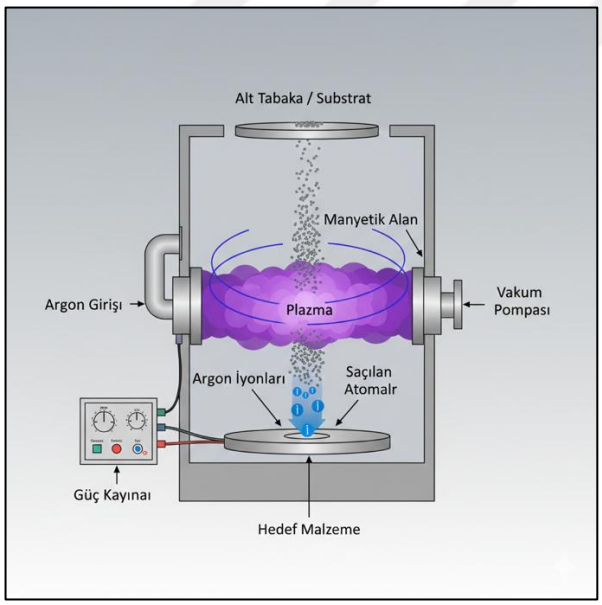
Schlenk sistemine göre çözeltiden arınmış gazlar vakum pompasına aktarılmaz “soğuk tuzak” denilen sıvı azot içerisine duran uzun bir cam şişenin içinde birikir. Böylece vakum pompasına ulaşmaz ve pompanın ömrü korunmuş olur.

3.2.3. Dönel kaplama



Resim 3.2. Dönel kaplama cihazı (Gazi Fotonik Araştırma Merkezi)

3.2.4. Magnetron püskürtme sistemi



Şekil 3.5. Magnetron püskürtme tekniğinin şematik gösterimi

SnO_2 ince film tabakaları, iki odalı püskürtme sistemi kullanılarak biriktirildi. Sistem, 3″ alttaşlara kaplama yapabilen çoklu sputter kaynaklarına sahiptir; iki adet RF kaynağı yalıtkan/oksit malzemeler, üç adet magnetron kaynağı metal malzemeler için tasarlanmıştır. Numuneler, giriş odasında yükleme magazininden vakum ortamına alınıp ve ters püskürtme

ile yüzey temizliği yapıldı. Ardından silindirik hacimde, koordinat kontrollü dönen numune tutucu altında RF magnetron püskürtme ile film biriktirildi. Cihazın temel vakumu ~10^{-8} mbar seviyesine ulaşabilmekte ve reaktif gaz kullanımıyla farklı oksit/nitrit tabanlı kaplamalar elde edilebilmektedir.



Resim 3.3. Magnetron püskürtme Sistemi (BesTec)

3.2.5. Eş püskürtme sistemi



Şekil 3.6. Eş püskürtme çalışma prensibi

NiO ince film tabakası, Resim 3.4'de gösterilen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Eş püskürtme (Co-Sputtering) sistemi kullanılarak biriktirildi. Biriktirme işlemi 13.56 MHz radyo frekans güç kaynağı altında argon plazması ortamında gerçekleştirildi. RF modunun tercih edilme

nedeni, NiO gibi oksit hedeflerde yüzey yük birikimini engelleyerek kararlı plazma oluşumunu sağlamasıdır. Magnetron konfigürasyonu sayesinde plazma yoğunluğu artırılarak homojen, kompakt ve düşük pürüzlülüğe sahip NiO ince filmler elde edilmiştir. Bu özellikler, NiO tabakasının p-tipi taşıyıcı katman olarak cihaz performansına olumlu katkı sağlaması açısından önemlidir.

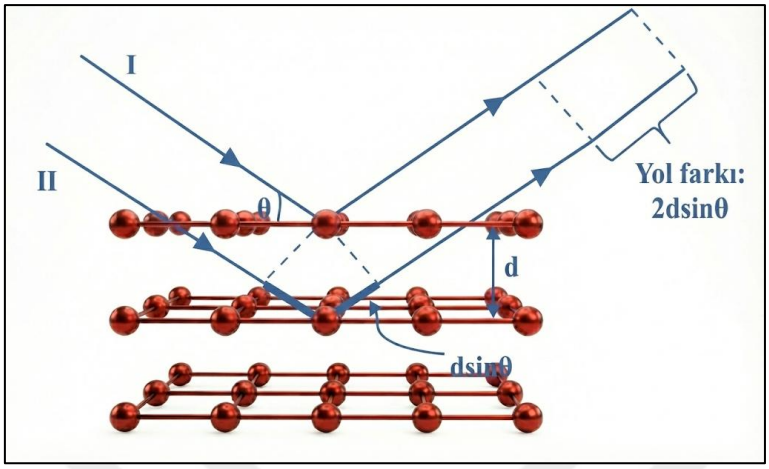


Resim 3.4. Eş püskürtme sistemi (Nanovak NVTS-500)

3.3. InSb Koloidal Kuantum Nokta Karakterizasyonu

Bu bölümde, sentezlenen InSb koloidal kuantum noktalarının yapısal, optik ve yüzey özelliklerini incelemek amacıyla kullanılan analiz cihazları tanıtıldı. Kuantum noktalarının kristal fazının belirlenmesi için X-ışını kırınımı (XRD) uygulanmış, partikül boyutu ve morfolojisi ise yüksek çözünürlüklü görüntüleme teknikleriyle değerlendirildi. Optik davranışın anlaşılabilmesi amacıyla UV-Vis-NIR spektrofotometresi kullanılıp ve absorpsiyon kenarı, bant aralığı ve kuantum sınırlanmasıyla ilişkili özellikler incelendi. Film yüzeylerinin düzgünlüğü ve topografik yapısı ise atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile analiz edildi. Böylece InSb kuantum noktalarının fotodedektör performansını etkileyen temel fiziksel ve kimyasal özellikleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirildi.

3.3.1. X-Işını kırınımı cihazı (XRD)



Şekil 3.6. X-Işını saçılma prensibi

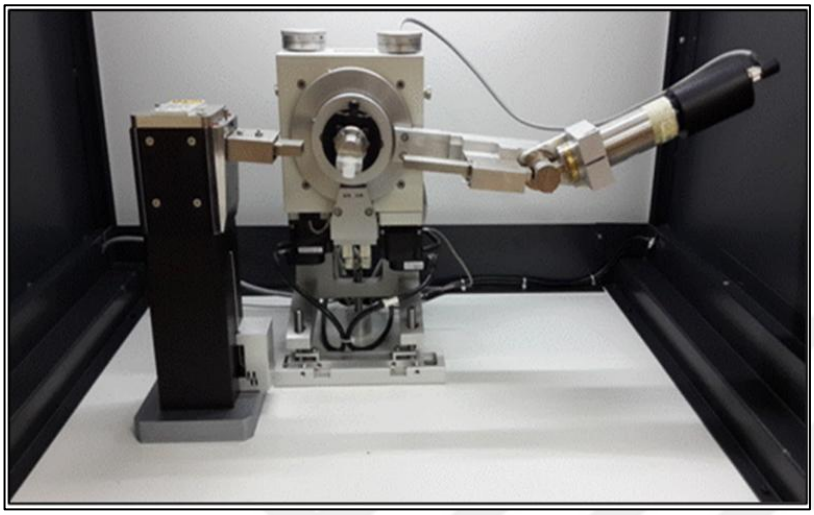
Kristal yapıya sahip malzemelerin atomik düzenini incelemede en yaygın kullanılan, numuneye zarar vermeyen yöntemlerden biri X-ışını kırınımı (XRD) tekniğidir. Monokromatik ve paralel bir X-ışını demeti, kristal düzlemlerine θ açısı ile gönderildiğinde, bu düzlemlerden belirli yönlerde kırınıma uğrar. θ açısı, kırınımın gerçekleştiği özel bir konum olduğundan Bragg açısı olarak adlandırılır. İlk atomik düzlemden yansıyan X-ışınları ile derindeki ikinci (veya daha alt) düzlemlerden aynı açıyla yansıyan ışınlar arasında bir yol farkı oluşur. Şekil 3.6'de görüldüğü gibi ardışık kristal düzlemlerinden geri saçılan ışınlar arasındaki yol farkı 2d·sinθ değerine eşittir.

Bu yol farkının, kullanılan X-ışınının dalga boyunun tam sayı katlarına karşılık gelmesi durumunda ışınlar yapıcı girişim oluşturur. Bu koşul, literatürde Bragg yasası olarak bilinir ve şu şekilde ifade edilir:

$$2dsin\theta = n\lambda \qquad (3.4)$$

Bragg yasasına göre; kristal düzlemdeki atomların yerleşimi özdeş kabul edildiğinden, kırınım şartı sadece kristal düzlemler arasındaki d uzaklığına göre değişir, n katsayısı tam sayı olup, kristal düzlemlerinin periyodik yapısından kaynaklanan girişim koşullarını temsil eder. Atomların her bir düzlemde düzenli konumlandığı varsayıldığında, kırınımın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği yalnızca düzlemler arası mesafe d ile ilişkilidir. Bu nedenle, X-ışınının dalga boyu λ bilindiğinde, ölçülen θ açıları üzerinden d mesafesi hesaplanabilir.

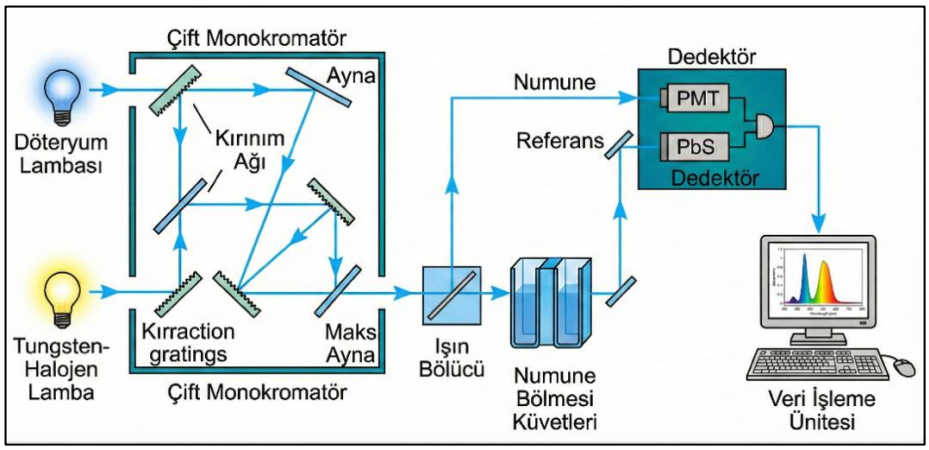
Malzemenin kristal örgü yapısını, kristal boyutunu, ince film gerginliği, simetriden kaynaklı kusurları, parametrelerini belirlemek için kullanılan en temel karakterizasyon cihazlarından biridir. Bu çalışmada Resim 3.5’ te de görüldüğü gibi Gazi Fotonik Araştırma Merkezindeki XRD cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.5. X-ışını kırınım cihazı

3.3.2. UV-Visible-NIR spektrometresi

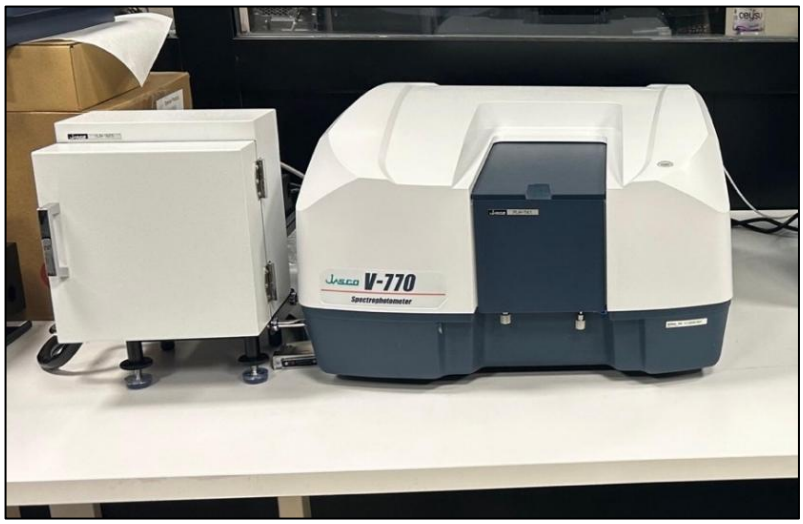
UV-Vis-NIR spektrofotometresi, numunelerin ultraviyole bölgeden yakın kızılötesi dalga boylarına kadar uzanan geniş bir spektral aralıkta ışıkla etkileşimini incelemek amacıyla kullanılan bir optik karakterizasyon cihazıdır. Şekil 7’de cihazın bir çalışma prensibi verildi. Sistem, yaklaşık 190–2500 nm arasında çalışabilmekte ve bu sayede hem çözelti hem de katı fazdaki malzemelerin absorpsiyon ve geçirgenlik özelliklerinin ayrıntılı biçimde ölçülmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.7. UV-Vis-NIR spektrometresinin çalışma prensibi

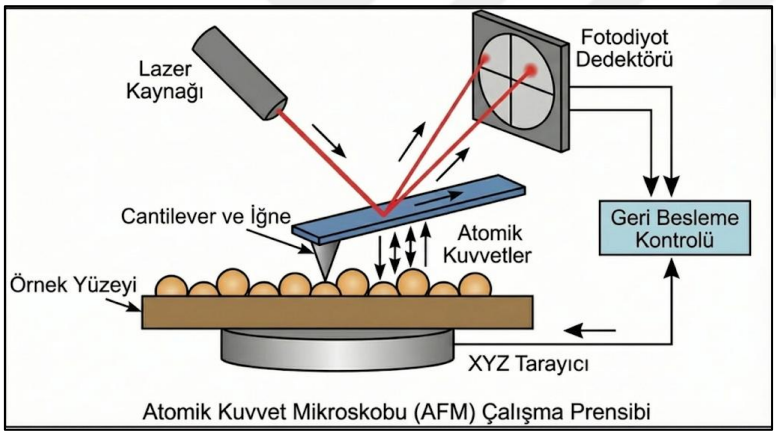
Cihazın çift ışınlı optik mimarisi, ölçüm sırasında kaynak dalgalanmalarından doğabilecek hataları azaltarak yüksek kararlılık sunar. UV bölgesi için döteryum, görünür ve NIR bölgesi için tungsten–halojen ışık kaynaklarının kullanılması, geniş dalga boyu aralığında sürekli ve güçlü bir ışık akısı elde edilmesini sağlar. Monokromatör tabanlı tarama mekanizması ise dalga boyu seçiminin yüksek doğrulukla yapılmasına ve düşük saçılma ışığıyla güvenilir spektrumların alınmasına imkân verir.

Farklı numune tutucularıyla film, ince kaplama, toz veya çözelti hâlindeki numuneler analiz edilebilir. Cihaz, özellikle optik bant aralığının belirlenmesi, absorpsiyon kenarının incelenmesi ve spektral özelliklerin değerlendirilmesi gibi çalışmalar için üniversite ve araştırma laboratuvarlarında sık tercih edilen bir UV-Vis–NIR ölçüm sistemidir. Bu çalışmada Resim 3.6’ da ki Gazi Fotonik raşatırma Merkezindeki JASCO marka Uv-Vis-NIR cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.6. UV-Vis-NIR spektrometresi (JASCO)

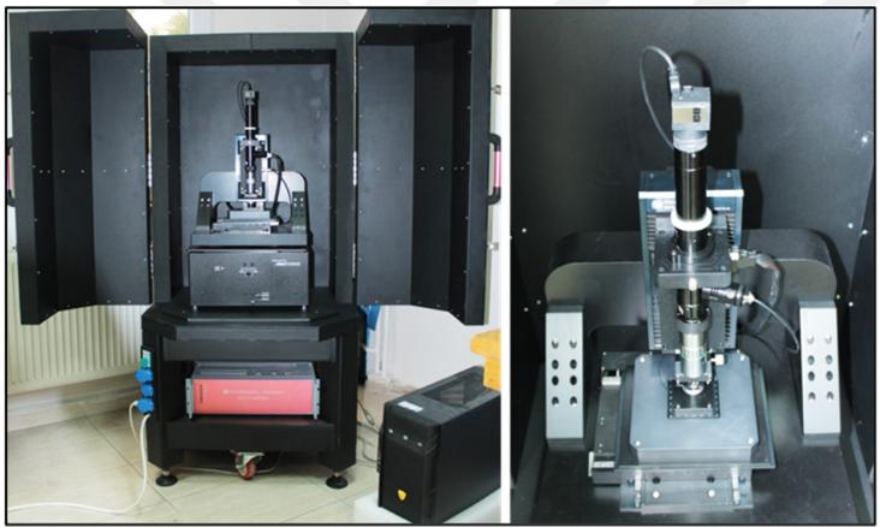
3.3.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)



Şekil 3.8. AFM çalışma prensibi

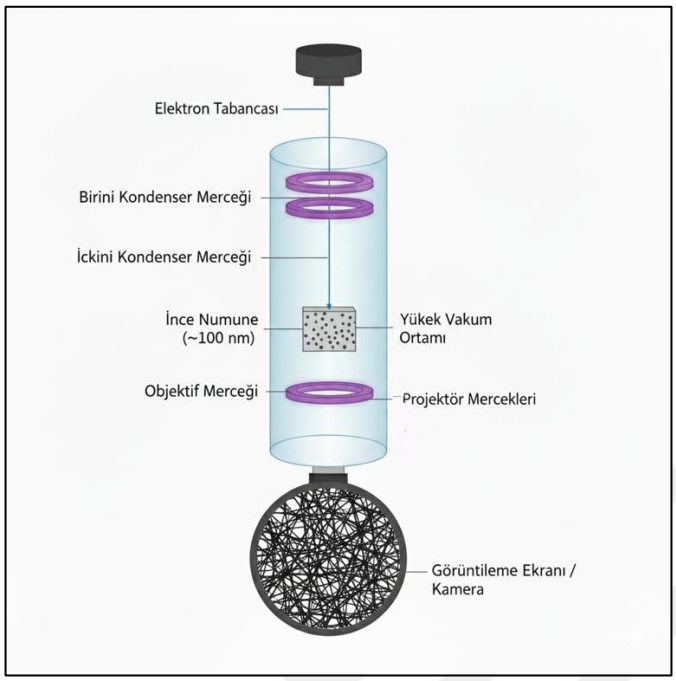
Şekil 3.8'deki AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu), numunenin yüzeyini nanometre ölçeğinde haritalayan, yüksek çözünürlüklü bir taramalı prob mikroskobudur. Şekilde görüldüğü gibi; ışık ya da elektron demeti değil, yüzeye çok ince bir uç (cantilever ucundaki tip) ile fiziksel bir temas ya da yakın etkileşim kurulmasıyla ve lazer kaynağının bu titreşimi dedektöre yansıtmasıyla çalışır. Bu sayede difraksiyon sınırının (optik mikroskoplarda olduğu gibi) aşılması mümkün olur; yüzey topografisi, pürüzlülük, mekanik özellikler, hatta iletkenlik veya manyetik haritalama yapılabilir.

XY taraması 100 µm genişlikte, 0.1 nm hassasiyet ile, Z yönünde tarama: 0.01 nm hassasiyet, 12 µm yükseklik aralığı, Contact (temas) mod, tapping/dinamik mod gibi geleneksel modlar; ayrıca yüzey elektriği, manyetik, mekanik haritalama opsiyonları, yüzey topografisi, yüzey pürüzlülüğü, 3D harita, yüzey morfolojisi analizleri; iletken ya da dielektrik materyaller, ince film, nanokristal, kompozit, polimer ve yarıiletken yüzeyler üzerinde çalışılabilir. Optik mikroskoplara göre 1000 kat daha yüksek çözünürlük, yüzeyin pürüzlülüğü, düzensizlikleri, tabaka kalınlığı, tane büyüklüğü, agregasyon gibi kritik parametreler niceliksel olarak değerlendirilebilir. Frekans modlarında, mekanik sertlik, yapışma, esneklik, hatta elektriksel iletkenlik/manyetik özellikler gibi farklı fiziksel özelliklerin haritalanması mümkündür. Bu çalışmada Resim 3.7’ de gösterilen Gazi Fotonik Araştırma Merkezinde bulunan AFM cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.7. AFM cihazı (NanoMagnetics)

3.3.4. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)

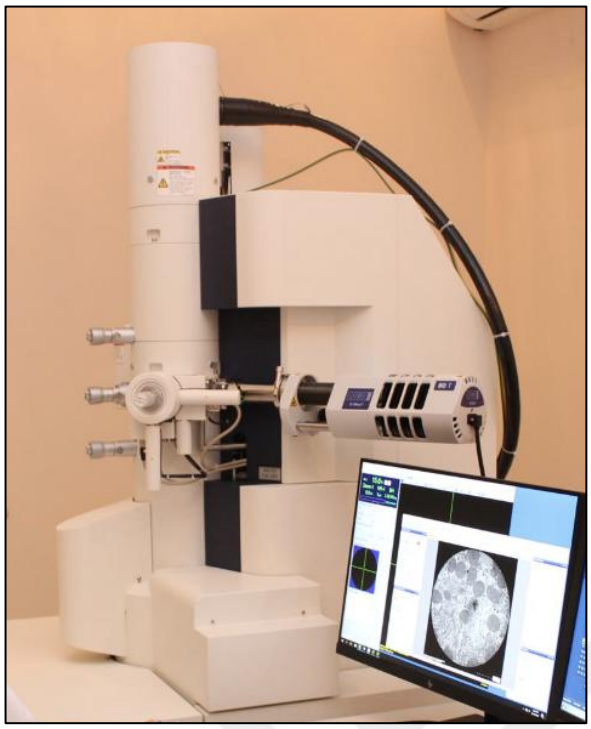


Şekil 3.9. Geçirimle elektron mikroskobu çalışma prensibi

Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), Şekil 3.9'da gösterildiği gibi yüksek enerjili elektron demetinin çok ince numuneler içerisinden geçirilmesi prensibine dayanan bir karakterizasyon tekniğidir. Elektronların numune ile etkileşimi sonucunda elde edilen görüntüler, nanometre ve atomik ölçeklerde yüksek çözünürlük sağlar. Bu nedenle TEM, özellikle nanoyapıların morfolojik ve yapısal özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

TEM analizleri ile parçacık boyutu, şekli, boyut dağılımı ve kristal yapı hakkında bilgi elde edilebilir. Yüksek çözünürlüklü TEM (HRTEM) görüntülerinde kristal düzlemlere ait kafes saçakları gözlenebilirken, seçilmiş alan elektron kırınımı (SAED) desenleri malzemenin kristalin karakterini doğrulamak için kullanılmaktadır.

Bu teknik, nanomalzemelerin optik ve elektronik özellikleri ile doğrudan ilişkili olan boyut ve kristal yapı parametrelerinin belirlenmesi açısından önemli bir karakterizasyon yöntemidir. Bu çalışmada Resim 3.8' de gösterilen ARUM Merkezi Laboratuvardaki TEM cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.8. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM-EOL1220)

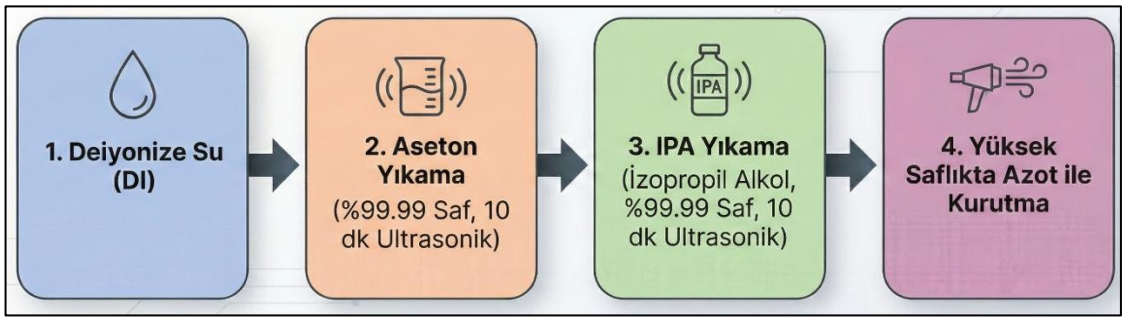
4. KKN FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

4.1. Alttaş Temizliği

Kaplamaların alttaş yüzeyine güçlü bir şekilde tutunabilmesi ve fotodedektör aygıtının yüksek performansla çalışabilmesi için alttaş yüzeyinin uygun şekilde hazırlanması kritik bir adımdır. Özellikle optoelektronik aygıtlarda, yüzeyde kalabilecek en küçük kir, partikül veya organik kalıntı bile film morfolojisini bozarak taşıyıcı taşınımını engelleyebilir, arayüzde tuzak seviyeleri oluşmasına neden olabilir ve tüm cihaz performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle alttaş temizliği, üretim sürecinin en temel ve hassas aşamalarından biri olarak değerlendirilir.

Bu tez kapsamında InSb koloidal kuantum nokta tabanlı fotodedektörler ITO cam alttaşlar üzerine üretileceğinden, optik ve kimyasal açıdan temiz bir yüzey elde etmek özellikle önem taşımaktadır. Cam yüzeyinin düzgün olması, hem NiO ve SnO_2 gibi ince filmlerin homojen şekilde kaplanmasına olanak sağlar hem de InSb kuantum noktalarının düzenli bir tabaka oluşturmasını mümkün kılar.

Yüzeydeki organik kalıntıları, iyonik kirleri ve ince partikülleri ortadan kaldırmak amacıyla daha hassas bir temizleme prosedürü uygulanır. Şekil 4.1'de alttaş temizlik aşamaları verilmiştir.

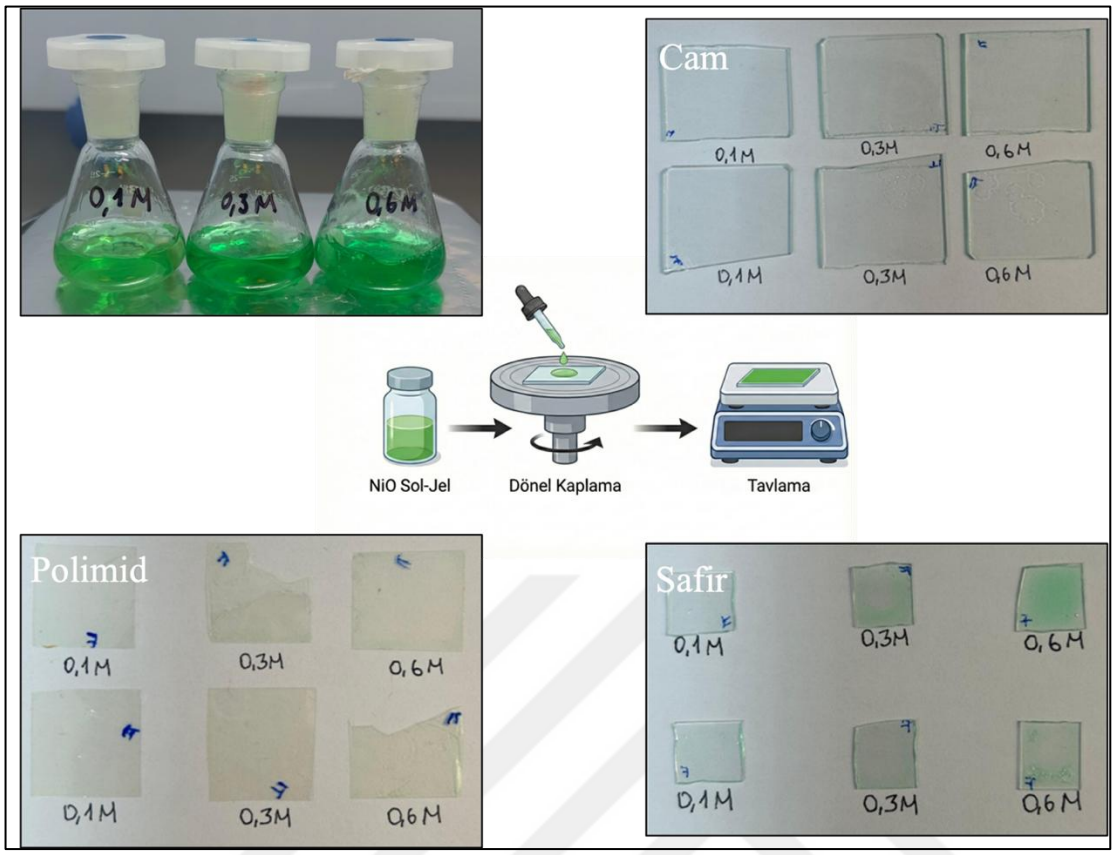


Şekil 4.1. Alttaş temizlik aşamaları

4.2. Deşik Taşıma Katmanı ve Karakterizasyonu: NiO

Son yıllarda, geçiş metal oksitlerinin bir üyesi olan nikel oksit (NiO), termal ve kimyasal dayanıklılığı, düşük maliyeti, üstün elektriksel, optik ve antiferromanyetik özellikleri [19] nedeniyle manyetik malzemeler, katalizörler, akıllı pencereler, güneş pilleri [30] ve fotodedektör [31-32] gibi birçok sistem ve cihazda büyük ölçüde kullanılmaktadır. NiO, basit kübik yapıya ve 3,6 ile 4,0 eV bant aralığı enerjisine sahip p tipi yarı saydam iletken filmler için umut verici bir adaydır. NiO ince film biriktirilmesi için birlikte sol-jel yöntemi [33-34], püskürtme, kimyasal buhar biriktirme ve püskürtme pirolizi gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında sol-jel yaklaşımı, nispeten basit uygulanabilirliği, düşük maliyeti ve uygunluğu nedeniyle öne çıkmaktadır. Geleneksel fotodedektörlerde genellikle kullanılan deşik taşıma tabakası için MoO_3, PEDOT: PSS, Spiro-Ome TAD gibi malzemelerin yanı sıra kalınlığı optimize edilerek oksijen boşlukları arasındaki azalmanın deşik konsantrasyonunda artışa neden olması sayesinde fotodedektörün performansını artıran NiO malzemesi bu tez çalışması için tercih edildi.

Bu tez çalışmasında düşük maliyeti ve işlem kolaylığı açısından başlangıçta sol-jel olarak NiO üretilmeye çalışılmıştır. Sol-jel karışımı 0,1M, 0,3M ve 0,6M derişimlerinde denenip çökelme olmadan yani pH'ı uygun, buharlaştırma işleminden sonra jelleşme yapısına gelebilen ve Şekil 4.2'deki gibi hem esnek hem esnek olmayan çeşitli alttaşlar üzerine dönel kaplama ile kaplanabilecek tutuculuk sağlayan bir jel formunda elde edildi. Geleneksel alttaşların dışında esnek bir fotodedektör olabilmesi fikri yoluyla Polimid (PI), cam ve safir üzerine de kaplama yapıldı.



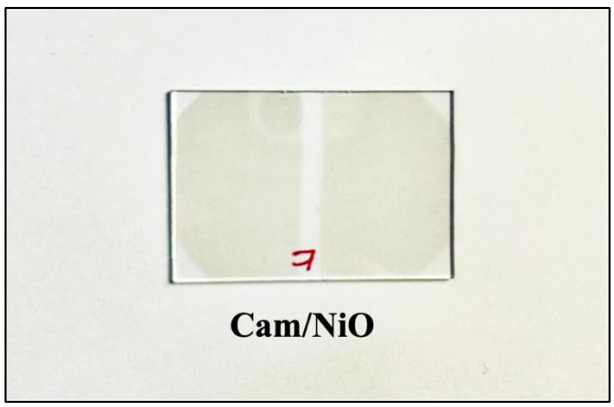
Şekil 4.2. NiO sol-jeli ile dönel kaplama

Atan ve diğerleri (2023) tarafından rapor edilen çalışmada, deşik taşıma tabakası olarak kullanılan NiO'nun yüksek taşıyıcı hareketliliği sayesinde InSb aktif katmanda oluşan elektrik alanın arttığı ve buna bağlı olarak genel taşıma süresinin azaldığı belirtilmiştir [40]. Bu durumun, fotodedektörün tepki süresini iyileştirdiği ifade edilmiştir. Ancak aynı çalışmada, sol-jel yöntemiyle hazırlanan NiO filmlerinin yeterli iletkenliği sağlayamadığı, bu nedenle NiO tabakasının eş püskürtme yöntemiyle kaplandığı özellikle vurgulanmıştır. Literatürde bildirilen bu sonuçlar doğrultusunda, NiO sol-jel filmlerinin fotodedektör yapısındaki uygunluğu tarafımızca sorgulanmıştır. Bu amaçla, NiO sol-jel tabakası cam alttaş üzerine kaplanmış ve üzerine Aerosol Jet Baskı tekniği ile Ag elektrotlar basılarak yapının UV dedektör olarak elektriksel yanıt verip vermediği incelenmiştir. Ancak kaplanan bu numuneden anlamlı bir I–V grafiği elde edilememiştir. Bu sonuç, sol-jel yöntemiyle elde edilen ve dönel kaplama ile kaplanan NiO tabakasının yeterli elektriksel iletkenlik sağlamadığını göstermiş ve bu nedenle NiO kaplamasında eş püskürtme tekniğine geçilmiştir. Ayrıca çözücü buharlaşması ve jel ağının büzülmesi sırasında oluşan gerilmeler, yüzeyde çatlak ve lokal kalınlık farklılıklarına neden olmuştur ve tavlama sürecinde alttaş ile uyumsuzluk ve hacimsel daralma etkileri film bütünlüğünü olumsuz etkilemiştir. Tüm bu

nedenlerden dolayı Şekil 4.3Şekil 2.1'te gösterildiği gibi eş püskürtme yöntemi (co-sputter) kullanılarak bu sorunlar düzeltilmiştir.

Kaplama öncesinde sistem taban basıncı yaklaşık 2×10^{-7} mbar seviyesine düşürülerek hazne içerisindeki artık gazlar ve olası kontaminasyon kaynakları minimize edilmiştir. Bu düşük taban basıncı, film saflığının artırılması ve kaplama sırasında istenmeyen reaksiyonların azaltılması açısından önemlidir. Kaplama sırasında çalışma basıncı yaklaşık 3×10^{-3} mbar olacak şekilde ayarlanmış ve plazma oluşumu için 10 sccm akış hızında argon gazı kullanılmıştır. Püskürtme sürecinde hedefler üzerinden eş zamanlı püskürtme gerçekleştirilmiş, 70 W RF güç altında kararlı bir plazma ortamı sağlanarak film büyümesi alttaş üzerinde oluşturulmuştur. Belirlenen parametreler altında yaklaşık 80 nm kalınlığında NiO ince film elde edilmiştir.

Seçilen çalışma basıncı ve argon akış hızı, plazma kararlılığını sağlayarak alttaş üzerinde süreklilik gösteren ve kompakt bir film oluşumunu desteklemiştir. Uygulanan RF güç, hedeflerden kontrollü ve tekrarlanabilir bir püskürtme verimi sağlayarak film kalınlığının istenen değerde elde edilmesine olanak tanımıştır. Elde edilen NiO tabakası, fotodedektör yapısında delik taşıma katmanı (HTL) olarak kullanılmak üzere uygun bir ince film oluşturmuştur.

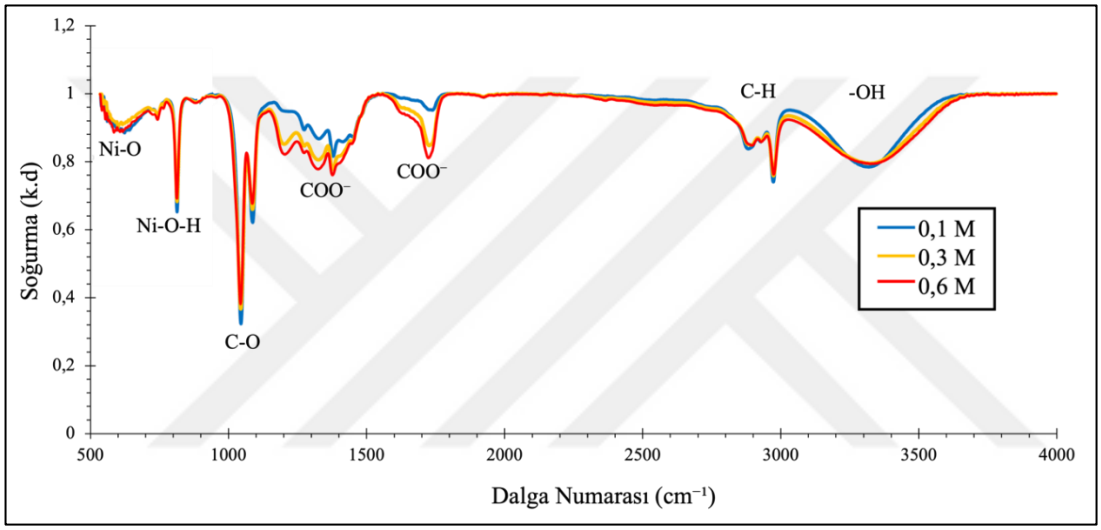


Şekil 4.3. Püskürtme Yöntemi ile NiO kaplama

4.2.1. Optik analiz

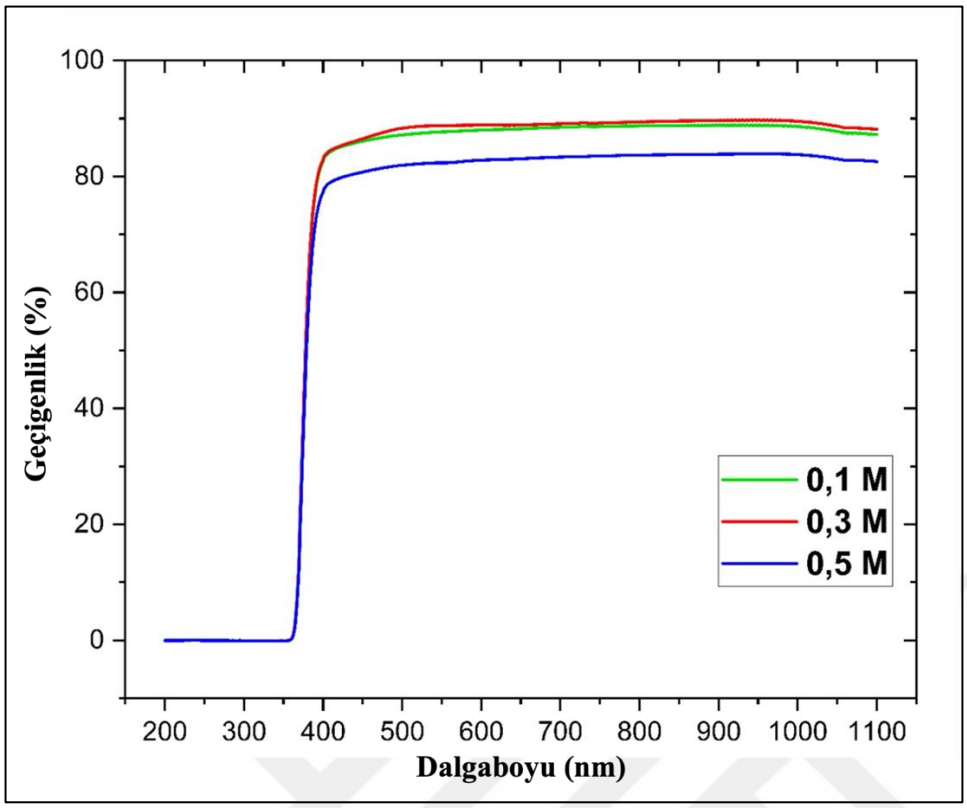
Şekil 4.2'de görülen sol-jel yöntemiyle hazırlanan NiO çözeltisinin kimyasal bağ yapısı ATR modunda FTIR analizi ile incelenmiştir. 3200-3600 cm^{-1} bölgede gözlenen geniş bant,

hidroksil (–OH) gerilme titreşimlerine, 2850–2950 cm^{-1} bölgede ise organik yapı (C-H) gerilimlerine karşılık gelmektedir [39]. 1600-1700 cm^{-1} bölgede ve 1350-1470 cm^{-1} arası bölgede gözlenen soğurma bantlarını ise karboksilat (COO^-) titreşimleri göstermektedir. 1000-1100 cm^{-1} aralığında gözlenen bantlar C–O gerilme titreşimlerine karşılık gelmekte olup, sitrik asit kaynaklı organik kompleks bir yapının varlığını göstermektedir. 700-850 cm^{-1} arasındaki absorpsiyon bandı Ni-O-H gerilme titreşimlerine karşılık gelmekte olup NiO oluşumunu desteklemektedir. 500-650 cm^{-1} arasındaki absorpsiyon bandı ise tipik Ni-O için 400-700 cm^{-1} arası bölgede yer almaktadır [35-36-37-38].



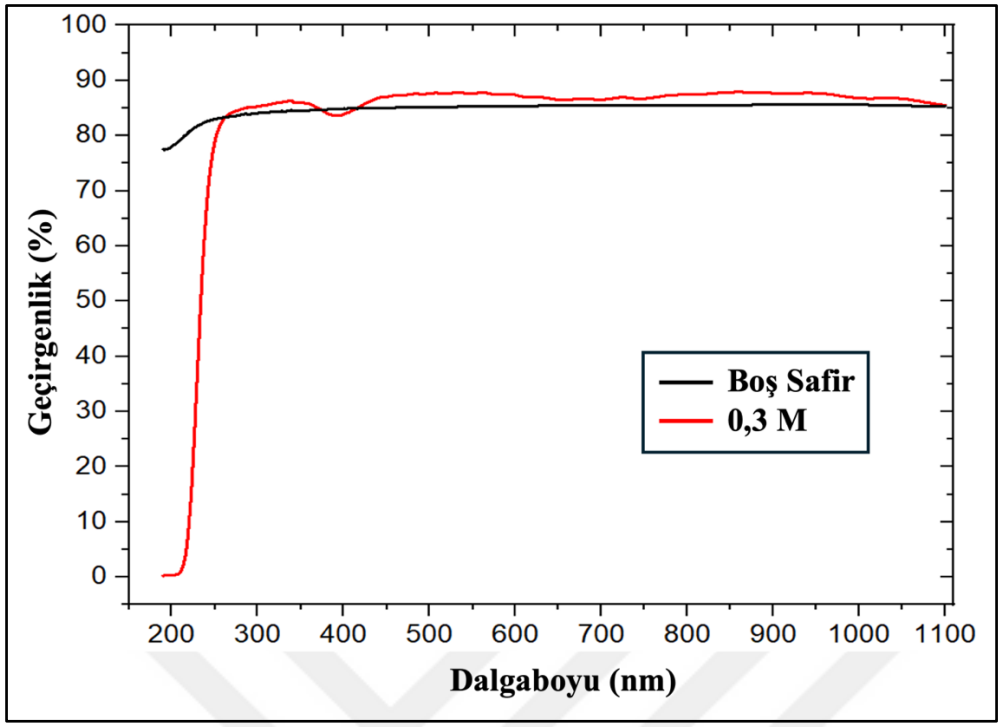
Şekil 4.4. NiO sol-jel FTIR analizi

Cam alttaş üzerine farklı molaritelerde (0.1 M, 0.3 M ve 0.6 M) kaplanan NiO ince filmlerinin UV-Vis geçirgenlik spektrumları Şekil 4.5'de incelendiğine göre incelendiğinde, tüm numunelerin görünür bölge boyunca yüksek optik geçirgenlik sergilediği görülmektedir. 400 nm üzerindeki dalga boylarında geçirgenlik değerleri yaklaşık % 85 - 90 aralığında olup, molarite artışının görünür bölgedeki optik geçirgenlik üzerinde belirgin bir farklı bir etki oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, film kalınlığındaki olası artışa rağmen NiO'nun geniş bant aralıklı bir yarıiletken olması nedeniyle görünür bölgede düşük soğurma göstermesiyle uyumludur.

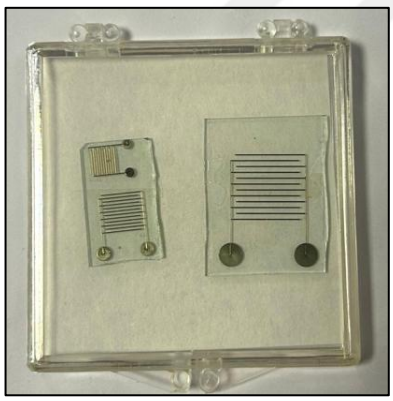


Şekil 4.5. Cam alttaş üzeri dönel NiO kaplama geçirgenlik grafiği

Ancak Şekil 4.4'de ve Şekil 4.5'de görüldüğü gibi cam alttaşın UV bölgesinde (~300-350 nm altında) optik sınırlamaları nedeniyle NiO tabakasının UV geçirgenliğinin net olarak değerlendirilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle 0,3 M konsantrasyona sahip NiO filmi, daha geniş UV geçirgenlik aralığına sahip olan safir alttaş üzerine kaplanarak tekrar analiz edilmiştir. Bu durum UV bölgede safir alttaş üzeri kontak ile UV fotodedektör oluşturma umudununda yolunu açmıştır. Safir alttaş üzerinde elde edilen geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, UV bölgesinde de yüksek optik geçirgenlik değerlerinin korunduğu görülmektedir. Safirin UV bölgesindeki yüksek şeffaflığı sayesinde NiO ince filminin kendi optik davranışı daha doğru şekilde gözlemlenebilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.6'da bir UV dedektöre NiO tabakasının hem görünür hem de UV bölgesinde yüksek geçirgenlik sergilediğini ve fotodedektör yapısında ışığın aktif tabakaya ulaşmasını engelleyecek bir optik kayıp oluşturmadığını göstermektedir. Şekil 4.6' da NiO UV dedektör yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Safir alltaş üzeri dönel NiO kaplama geçirgenlik grafiği

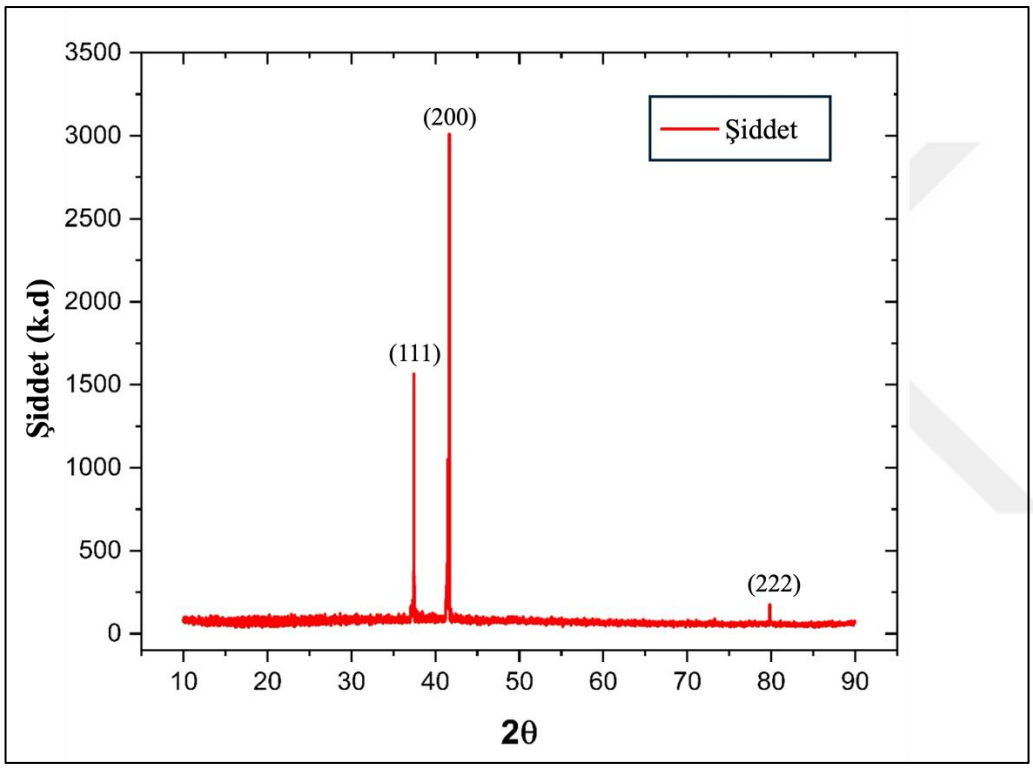


Şekil 4.7. NiO UV dedektör yapısı

4.2.2. Yapısal analiz

NiO ince filminin Şekil 4.8' de kristal yapısı X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile incelenmiştir. Elde edilen difraktogramda yaklaşık olarak 2θ ≈ 37°, 43° ve 79° civarında belirgin pikler gözlenmiştir. Bu pikler sırasıyla NiO'nun kübik yüzey merkezli (FCC) kristal yapısına ait (111), (200) ve (222) düzlemlerine karşılık gelmektedir [41- 43- 44]. Özellikle (200) düzlemine ait pik şiddetinin diğer piklere göre daha yüksek olması, filmin (200) yöneliminde tercihli kristal büyüme gösterdiğini düşündürmektedir. Bu durum, ince film sentez

koşullarına bağlı olarak belirli kristal düzlemlerinin baskın hale geldiğini göstermektedir. Gözlenen kırınım pikleri literatürde rapor edilen NiO'nun kübik yapısı ile uyumludur. Piklerin keskin ve belirgin olması, filmin kristalin yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Difraktogramda $Ni(OH)_2$ veya diğer nikel oksit fazlarına ait ek piklerin gözlenmemesi, elde edilen filmin tek fazlı NiO yapısında olduğunu göstermektedir. Ayrıca (111), (200) ve (222) düzlemlerinin gözlenmesi, NiO'nun iyi kristallenmiş bir yapıya sahip olduğunu ve amorf karakter göstermediğini ortaya koymaktadır.



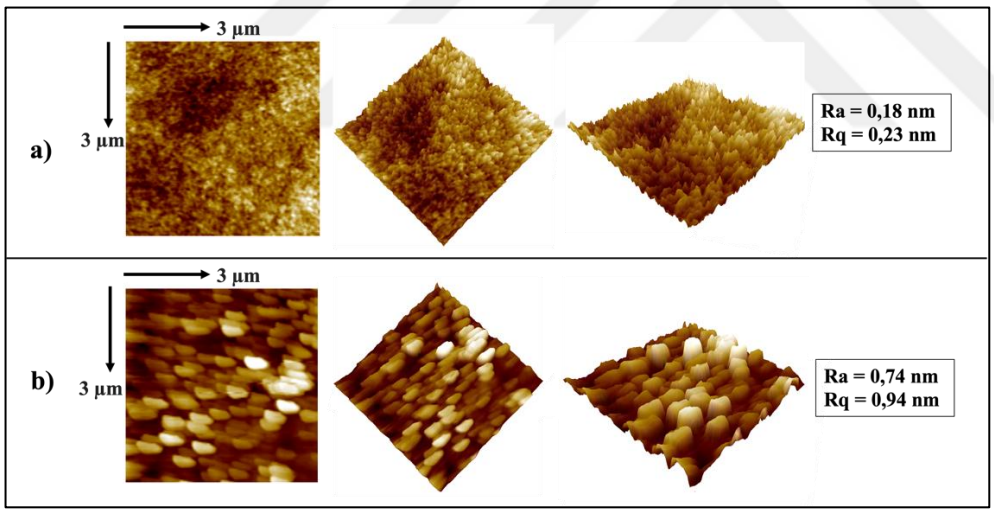
Şekil 4.8. NiO ince film XRD analizi

4.2.3. Morfolojik analiz

Şekil 4.9.a' da dönel kaplama yöntemiyle elde edilen NiO ince filmlerinde Ra = 0,18 nm ve Rq = 0,23 nm değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, yüzeyin oldukça düzgün ve homojen bir morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir. Atomik ölçekte değerlendirildiğinde bu pürüzlülük değerleri, film yüzeyinde belirgin tepe-çukur oluşumlarının bulunmadığını ve kaplamanın topografik açıdan süreklilik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Dönel kaplama yöntemiyle hazırlanan NiO tabakası kullanılarak oluşturulan fotodedektör yapısından ölçülebilir bir I–V karakteristiği elde edilemedi. Bu durum, üretilen NiO filminin megaohm mertebesindeki özdirencinin olumsuzluğundan kaynaklandığı değerlendirildi. Elde edilen sonuçlar, fotodedektör performansının yalnızca topografik düzgünlüğe değil; film yoğunluğu, kristalinite, taşıyıcı konsantrasyonu ve özellikle elektriksel iletkenlik gibi malzemenin içsel karakteristiklerine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 4.9.b' de Eş püskürtme yöntemiyle kaplanan NiO filmlerinin yüzey analizi gözlemlenmektedir. Tanecikler düzenli dağılım göstermektedir ve kusur/boşluk izler belirgin değildir. Cihaz performansının gözlenmesi, başarıyı pürüzlülük farkından ziyade film yapısının elektriksel özelliklerindeki iyileşme ile ilişkilendirmeyi gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında, NiO tabakasının fotodedektör performansındaki belirleyici rolünün yüzey morfolojisinden çok, elektriksel taşıma özellikleri ile bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır.



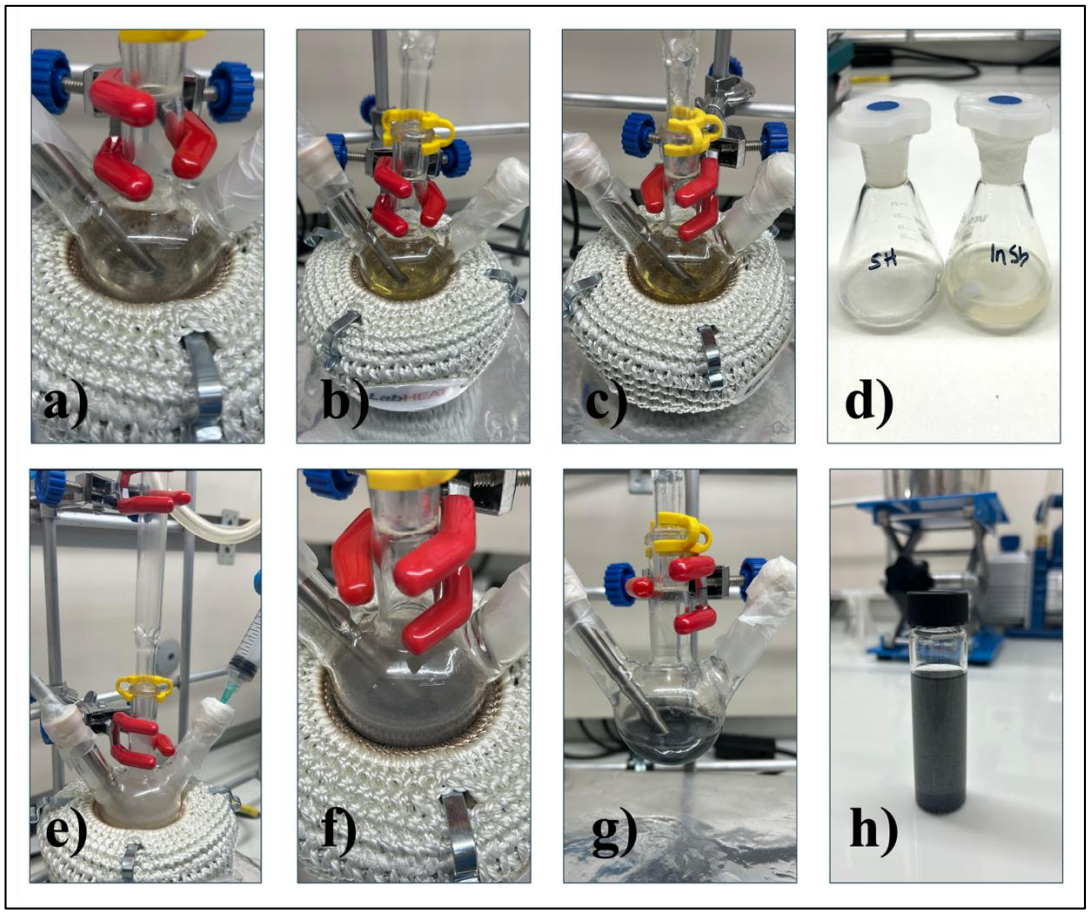
Şekil 4.9. NiO AFM analizleri

4.3. Kuantum Nokta Aktif Katmanı: InSb

4.3.1. Sıcak enjeksiyon yöntemi ile InSb kuantum nokta sentezi

InSb sentezi için; öncelikle indirgeyici Süper Hidrit (SH) çözeltisi hazırlanmakla işe başlanıldı. Glove box içinde dioktil eter (0,5 mL) ile 1M SH (1mL) olacak şekilde yarı yarıya hacimle karıştırılıp schlenk sisteminde degassing yapıldı. Bir yandan da İndiyum (III) Klorür

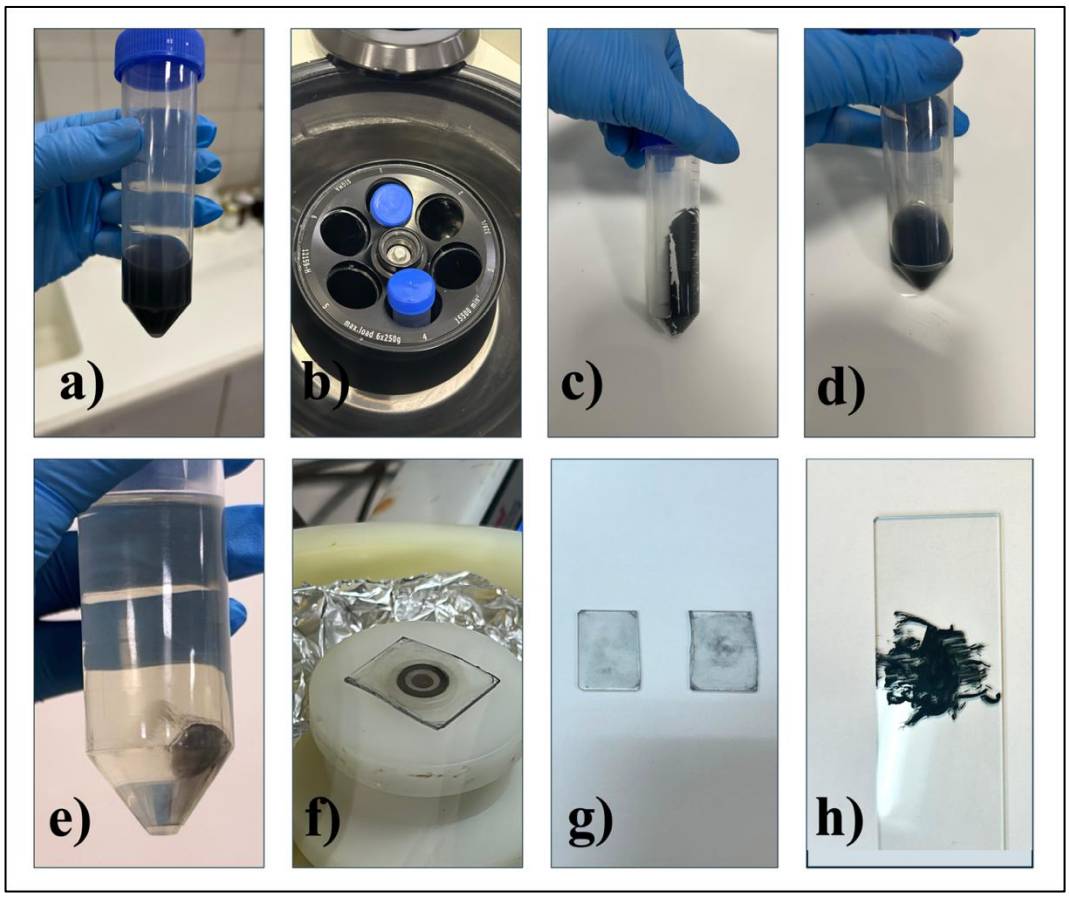
(194 mg), Antimon (III) Klorür (200mg), Toluen (2 mL) öncü karışımı bir saat oda sıcaklığında karıştırıldı. Daha sonra schlenk sisteminde, üç boyunlu cam şişeye 10 mL Oleylamin alınarak ara ara degassing yaparak 240 °C'ye kadar ısıtıldı. Bu süreçte renk koyu sarı olarak gözlemlendi ve 0,7 mL SH çözeltisi ve 0,5 mL InSb öncü çözeltisi hızlıca enjekte edildi. Karışım sıcaklığı 240 °C de tutularak 6 dakika kadar büyümesi için bekletildi ve sonrasında hızlıca oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutuldu. Enjekte anında çözelti renginin kahverengiden siyaha döndüğü gözlemlendi. Şekil 4.9'da aşamalar görülmüştür.



Şekil 4.10. InSb KKN hazırlığı

Çözelti soğuduktan sonra, 6 mL Toluen içine alındı, içine 1 mL Oleik asit eklendi. 3000 rpmde santrifüj edildi. Daha sonra Bütanol ve Metanol eşit oranlarda eklenip 8000 rpmde santrifüj edildi ve bu işlem 3 kere tekrarlandı. Böylece karışımdan süpernatant yani üstfaz/üst sıvı faz ile çöken kısım yani pellet denilen kısım birbirinden ayrılır. İlk santrifüjlemede sıvı kısımda istenmeyen ligandlarla, yan ürünlerle birlikte daha küçük çaplı KKN'ler de bulunmaktadır. Sıvı kısım alınıp daha yüksek hızlarda antrifüjlenerek içindeki

bu noktalar elde edilmeye çalışılır. Sonrasında KKN'lerin birbirine yapışmaması için 5 mL Toluen içine alınır Şekil 4.10'da KKN'lerin tüm oluşum aşamaları görselleştirilmiştir; ; a) Oda sıcaklığındaki Oleylamine renk şeffaf, b) 180 ºC'de Oleylamine, c) 240 ºC'de Oleylamine, d) SH ve InSb öncü çözelti, e) Enjeksiyon aşaması, f) Çekidek büyüme reaksiyonu, g) Çözeltinin soğutulmuş hali, h) Oleik asit eklenmiş halidir.



Şekil 4.11. Santrifüjleme aşamaları

InSb koloidal kuantum noktaların (KKN) yapı ve faz özelliklerini daha ayrıntılı biçimde inceleyebilmek amacıyla, santrifüjleme işlemi sonrasında elde edilen pelet (çökelti) ve süpernatant (sıvı) fraksiyonları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Santrifüjleme işlemi, çözelti içerisinde farklı boyut, kütle ve yüzey özelliklerine sahip kuantum noktalarının ayrışmasına neden olduğundan, çöken ve çözeltide kalan fraksiyonların yapısal davranışlarının karşılaştırılması önemli görülmüştür.

Pelet fraksiyonu, görece daha büyük veya yoğun kuantum noktalarını temsil ederken, süpernatant kısmın daha küçük boyutlu ve çözeltide stabil kalan kuantum noktalardan

oluştuğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle her iki fraksiyonun ayrı ayrı incelenmesi, sentez sürecinde oluşan boyut dağılımının ve kristalizasyon davranışının anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 4.11'de bu aşamalar görselleştirilmiştir; a) Santrifüjleme öncesi InSb KKN'ler, b) Santrifüjleme aşaması, c) 3000 rpm sonrası pelet kısmı, d) 3000 rpm sonrası süpertant kısmı, e) Santrifüjleme işleminin sonu, f) Dönel kaplama incelenmesi, g) Cam üzerine elli hızlarda dönel kaplama, h) Cam üzerinde çözeltinin pelet kısmıdır.

Süpernatant fraksiyonu ayrıca, fotodedektör uygulamalarına uygun aktif katman kalınlığının belirlenmesi amacıyla dönel kaplama yöntemi ile cam alttaşlar üzerine farklı dönme hızlarında (rpm) Şekil 4.11.g' deki gibi kaplanmıştır. Farklı rpm değerleri kullanılarak elde edilen filmler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Bu sayesinde, kuantum nokta tabakasının yüzey homojenliği ve etkin kaplama kalınlığı kontrol edilmiştir. Bu yaklaşım, dedektör yapısında istenen optik soğurma ve taşıyıcı taşınım özelliklerini sağlayacak optimum film koşullarının belirlenmesine olanak tanımıştır.

Çizelge 4.1. InSb KKN kaplama parametreleri

Alttaş	Dönel Hız(rpm)	Dönel Süre(s)	Kaplama (Katı)	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (dk)
Cam	1 000	20	Tek	100	30
Cam	1 000	20	Çift	100	30
Cam	1 500	20	Tek	100	30
Cam	1 500	20	Çift	100	30
Cam	2 000	20	Tek	100	30
Cam	2 000	20	Çift	100	30

Bu kaplamalardan fotodedektör yapısında kullanmak için 1 000,1 500 rpm ve 2 000 rpm hızlarına sahip tek katlı olan dönel kaplamalar tercih edildi. XRD analizlerinde, çift katlı InSb KKN kaplamalara ait numunelerde belirgin ve ayırt edilebilir kırınım özelliklerinin elde edilemediği görülmüştür. Çift kaplama uygulamalarında aktif katman kalınlığının artmasıyla birlikte, kuantum noktalarının üst üste birikmesi ve düzensiz paketlenmesi sonucu kristal düzenin XRD algılama sınırlarının altında kaldığı değerlendirilmiştir. Buna karşılık, tek katlı kaplamalarda elde edilen XRD desenleri, nanokristal yapı ile uyumlu geniş

Bragg saçılmaları sergileyerek kuantum nokta yapısının daha belirgin şekilde izlenmesine olanak tanımıştır.

AFM yüzey topografyası görüntüleri de bu bulguları destekler niteliktedir. Tek katlı InSb KKN filmlerinde, yüzeyin daha homojen, süreklilik gösteren ve daha düzenli bir morfolojiye sahip olduğu gözlenmiştir. Çift katlı kaplamalarda ise yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve lokal birikimlerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, tek katlı kaplamanın hem daha iyi kristalize olmuş bir nanokristal yapı sunduğunu hem de fotodedektör uygulamaları için gerekli olan düzgün ve homojen aktif katman koşullarını sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, cihaz üretiminde tek katlı InSb KKN aktif tabakası tercih edilmiştir.

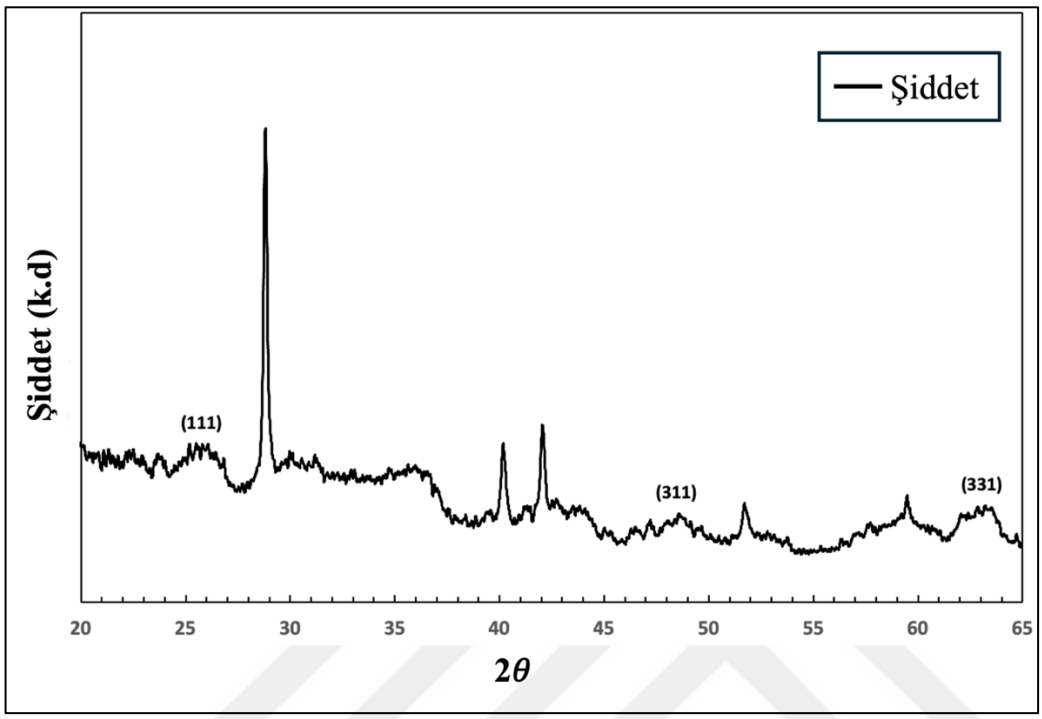
4.4. InSb KKN Karakterizasyonu

4.4.1. Yapısal analiz

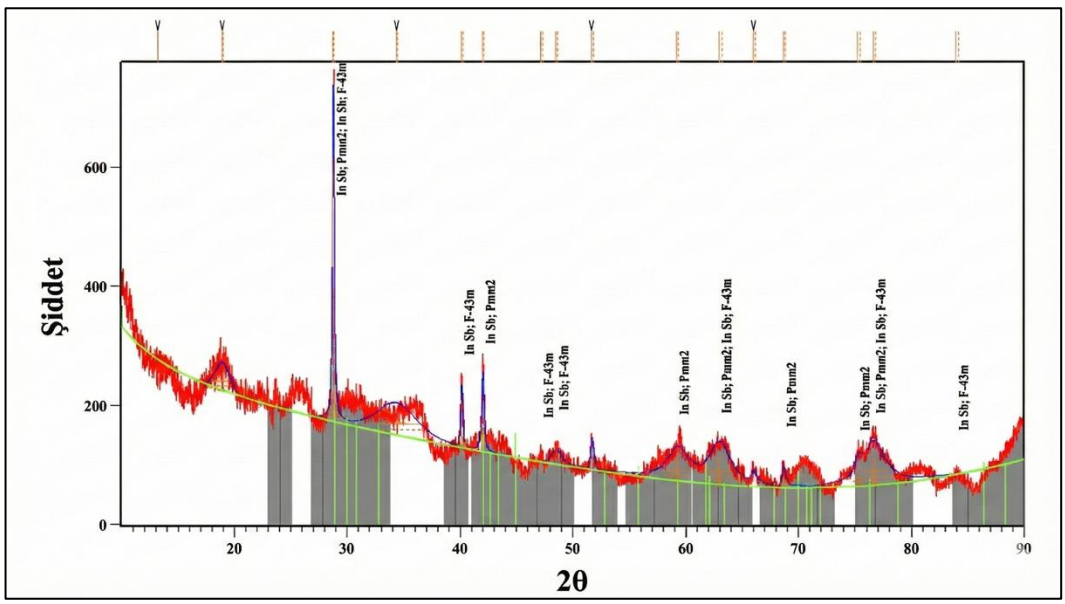
Şekil 4.12’ de cam yüzey üzerine dökülerek kurutulan InSb KKN örneğine ait X-ışını kırınımı (XRD) deseni sunulmaktadır. Elde edilen XRD deseninde gözlenen pik genişlemesi, InSb kristalitlerinin nanometre ölçeğinde olduğunu ve kuantum nokta yapısının oluştuğunu göstermektedir. Keskin ve dar Bragg pikleri yerine geniş saçılma profillerinin ortaya çıkması, küçük kristal boyutlarına bağlı olarak meydana gelen Scherrer genişlemesi ile ilişkilendirilmektedir. Bu durum, InSb kuantum noktalarının kuantum sınırlanma etkisi altında, rastgele yönelimli ve nanokristal bir yapı sergilediğini göstermektedir. Gözlenen geniş Bragg saçılmaları, uzun menzilli kristal düzen yerine kuantum sınırlanmış nanokristal bir yapının varlığı ile uyumlu olup, koloidal kuantum nokta tabanlı sistemler için beklenen XRD davranışını doğrulamaktadır. Cam yüzey üzerine dökülerek kurutma yöntemi sırasında çözücünün görece yavaş uzaklaşması, kuantum noktalarının yüzey üzerinde lokal birikim göstermesine ve film kalınlığının homojen olmamasına neden olabilmektedir. Bu durum, XRD deseninde bazı açılarda düzensiz yoğunluk değişimleri şeklinde kendini göstermektedir.

InSb’ye özgü karakteristik kristal piklerin belirgin olmaması, kuantum sınırlanma etkisi nedeniyle kristal düzenin XRD tekniğinin algılama sınırlarının altında kaldığını işaret etmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, cam üzerine dökülerek kurutulan InSb KKN tabakasının

uzun menzilli kristal düzen içermeyen, ancak fotodedektör uygulamalarında aktif katman olarak kullanılabilecek izotropik bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.12. InSb KKN XRD Analizi



Şekil 4.13.InSb KKN, XRD PDF kartları

Şekil 4.13'de InSb koloidal kuantum nokta (KKN) numunesine ait X-ışını kırınımı (XRD) deseni ve ilgili InSb malzemesinin PDF kartları kullanılarak gerçekleştirilen faz eşleştirme

analizi sunulmaktadır. Ölçülen deneysel XRD deseni, ICDD veri tabanında yer alan InSb fazına ait referans kartlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, numunede InSb kristal fazının bulunduğunu doğrulamaktadır [41-42-43].

XRD deseninde gözlenen kırınım piklerinin konumları, InSb'nin literatürde raporlanan karakteristik düzlemleri ile uyum göstermektedir. Buna karşılık, pik şiddetlerinin görece düşük olması ve arka plan sinyalinin baskın olması, kristalit boyutlarının nanometre ölçeğinde olduğunu ve yapının koloidal kuantum nokta karakteri sergilediğini göstermektedir. Küçük kristal boyutlarına bağlı olarak ortaya çıkan pik genişlemesi, Scherrer genişlemesi ile ilişkilendirilmiş ve kuantum sınırlanmış nanokristal yapı ile uyumlu bulunmuştur.

XRD deseninde $2\theta \approx 25{,}85°$, $48{,}58°$ ve $63{,}04°$ civarında gözlenen kırınım pikleri sırasıyla InSb kristal yapısına ait (111), (311) ve (331) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu pikler literatürde koloidal InSb kuantum noktaları için rapor edilen kırınım konumları ile uyumludur [42]. Gözlenen pik konumları ve bağıl şiddetleri, sentezlenen yapının kübik zinc-blende kristal fazına sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Difraktogramda hem geniş hem de nispeten dar karakterli piklerin birlikte gözlenmesi, numune içerisinde farklı kristalit boyut dağılımlarının bulunduğunu düşündürmektedir. Geniş kırınım pikleri nanometre boyutlu kristalitlere özgü olup, kuantum noktaların sınırlı kristal boyutundan kaynaklanan pik genişlemesi ile ilişkilidir. Nanokristallerde kristal boyutunun azalması, koherent saçılma uzunluğunu düşürerek pik genişlemesine neden olur.

Buna karşılık, daha dar ve yüksek şiddetli piklerin varlığı, kuantum noktaların bir kısmının kümelenmesi (aggregation) veya koalesansı sonucu daha büyük kristal domain'lerin oluştuğuna işaret edebilir. Literatürde koloidal kuantum noktaların büyüme sürecinde koalesans mekanizmasının gerçekleşebileceği ve bunun XRD deseninde dar pik bileşenleri oluşturabileceği bildirilmiştir [44]. Koalesans sonucu oluşan bu domain'ler birden fazla kristalit içerebilir ve tane sınırları barındırabilir.

Dolayısıyla XRD deseninde hem geniş hem dar piklerin birlikte gözlenmesi, kuantum nokta oluşumunun başarılı şekilde gerçekleştiğini; ancak büyüme koşullarının bir kısmında tane büyümesi veya aglomera oluşumunun da eş zamanlı olarak meydana geldiğini

göstermektedir. Bu durum, koloidal sentezlerde sıklıkla gözlenen boyut dağılımı ve kısmi koalesans fenomeni ile uyumludur.

Şekil 4.13'de işaretlenen InSb kuantum noktalara karşılık gelen piklerin analizinden

$$D_{SC} = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{4.1}$$

Scherrer formülüne göre partikül boyutları hesaplanabilir. Burada β pik yarı genişliği (FWHM), K = 0,9, D_{SC} partikül büyüklüğü, λ X-ışınının dalgaboyudur (0,15406 nm). Bu ifadeye göre üretilen InSb kuantum noktaların kristalik (partikül) büyüklüğünün 5 nm civarında olduğu hesaplandı ve Çizelge 4.2'de sunuldu.

Çizelge 4.2. XRD deseni ile InSb KKN boyut analizi

hkl	2θ (°)	θ (°)	θ (rad)	FWHM (°)	D_{SC}, nm	D_{WH}, nm
111	25,85	12,93	0,2256	1,671	4,88	4,50
311	48,58	24,29	0,4239	1,631	5,35	
331	63,04	31,52	0,5501	1,684	5,53	

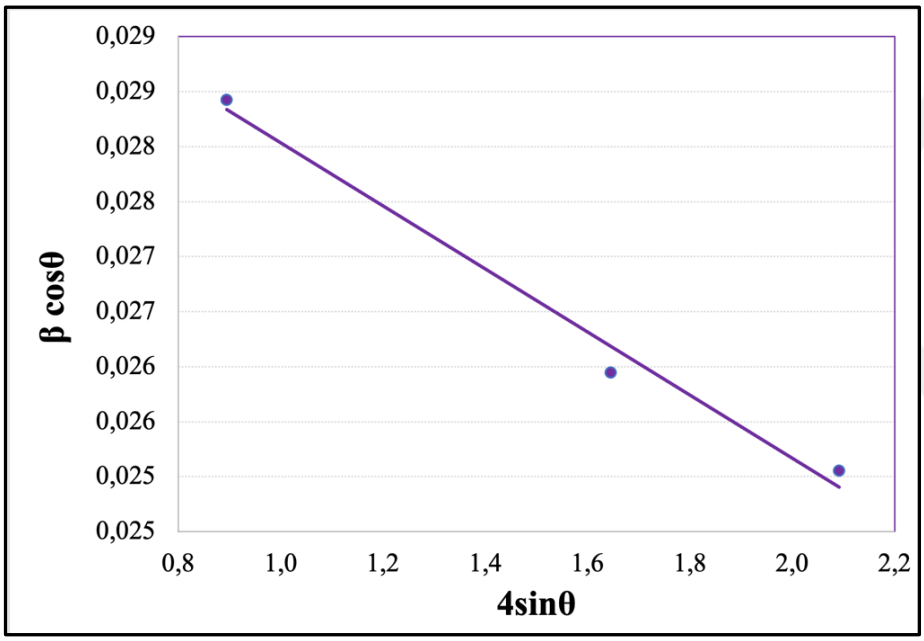
Williamson-Hall yöntemi, kuantum noktaları gibi nanokristalin sistemlerde X-ışını kırınım (XRD) pik genişlemesine katkı sağlayan sonlu kristalit boyutu ve kafes mikrogerinimi etkilerinin birbirinden ayrıştırılabilmesi amacıyla uygulanmıştır. Kuantum nokta yapılarında, yüksek yüzey/hacim oranı, yüzey bağ bozulmaları ve yapısal kusurlar nedeniyle mikrogerinim oluşması beklenen bir durumdur. Bu nedenle, yalnızca kristalit boyutuna bağlı genişlemeyi esas alan Scherrer denklemi, pik genişlemesinin fiziksel kökenini tam olarak yansıtamayabilir.

Bu nedenle, XRD deseninde belirgin şekilde genişlemiş olan InSb kuantum noktalara karşılık gelen (111), (311) ve (331) kırınım pikleri kullanılarak Williamson–Hall analizi gerçekleştirildi. Bu yöntem sayesinde, farklı Bragg açılarında gözlenen pik genişlikleri birlikte değerlendirildi; böylece kristalit boyutu ve mikrogerinim katkıları aynı anda incelendi.

William-Hall (W-H) metoduna göre;

$$\beta cos\theta = \frac{K\lambda}{D_{WH}} + 4\varepsilon sin\theta \tag{4.2}$$

dir. Burada β pik yarı genişliği (FWHM), K=0,9, D partikül büyüklüğü λ X-ışınının dalgaboyu (1,5406 Å) ve ε mikrogerilimi tarif eder. Şekil 4.14'de Williamson-Hall grafiği (cosθ'nın 4sinθ'ya göre değişimi verildi.



Şekil 4.14. Williamson-Hall grafiği

Kesişim noktası (β_0)= 0,03082± 0,00229 ve Eğim (mikrogerinim, ε) = - 0,00278 ± 0,00125 olarak bulunur. W-H düzeltmesi sonucunda ortalama kristalit boyutu (partikül büyüklüğü)

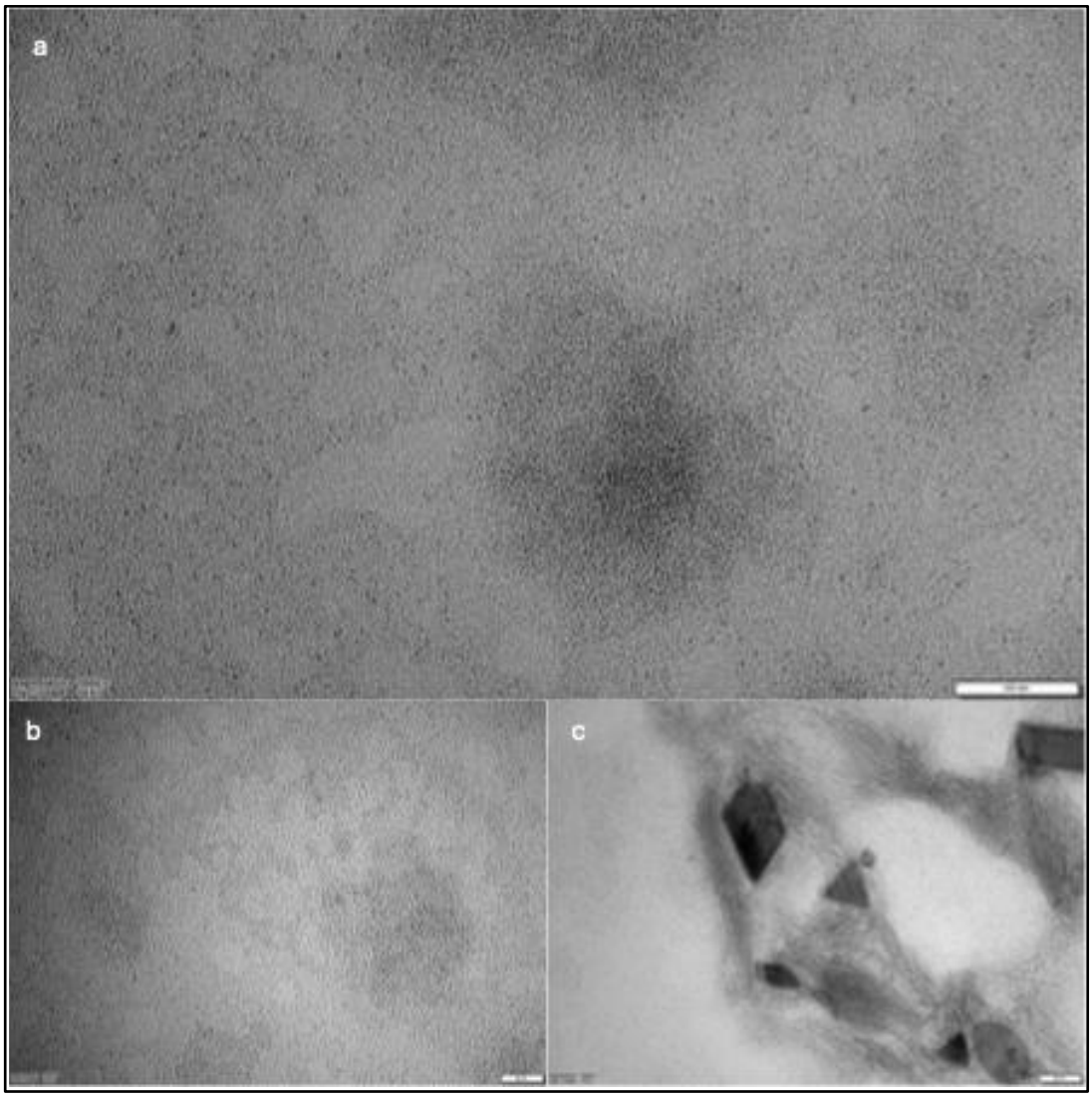
$$D_{WH} = \frac{K\lambda}{\beta_0} = 4{,}50 \pm 0{,}33 \text{ nm} \tag{Şekil 4.5}$$

İle bulunur. Bu Williamson–Hall grafiğinin doğrusal uyumu, pik genişlemesinin baskın olarak, mikrogerinimden ziyade kristalit boyutundan kaynaklandığını göstermektedir. Elde edilen Williamson–Hall grafiğinin eğiminin ihmal edilebilir düzeyde olması, numunedeki mikrogerinim etkisinin çok zayıf olduğunu ve XRD pik genişlemesinin esas olarak InSb kuantum noktalarının küçük kristalit boyutundan kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Bu

sonuç, Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanan kristalit boyutlarının fiziksel olarak tutarlı ve güvenilir olduğunu doğrulamaktadır. Dolayısıyla Williamson–Hall yöntemi, bu çalışmada kristalit boyutunun doğrulanması ve mikrogerinim katkısının değerlendirilmesi amacıyla tamamlayıcı bir analiz aracı olarak kullanıldı.

Buna ek olarak, XRD deseninde gözlenen geniş piklerin bir kısmının kümeleşmiş/koalesans göstermiş kuantum noktalarına ait kristal domain'lerden kaynaklandığı dikkate alındığında, bu domain'lerin çok sayıda küçük nanokristalin birleşmesiyle oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu tür koalesans süreçlerinde, birleşen nanokristaller arasındaki yerel gerinimler, yeniden düzenlenme ve sınır bölgelerinde rahatlama yoluyla kısmen giderilebilmektedir. Bu durum da ölçülen ortalama mikro gerinimin düşük çıkmasına katkı sağlamaktadır.

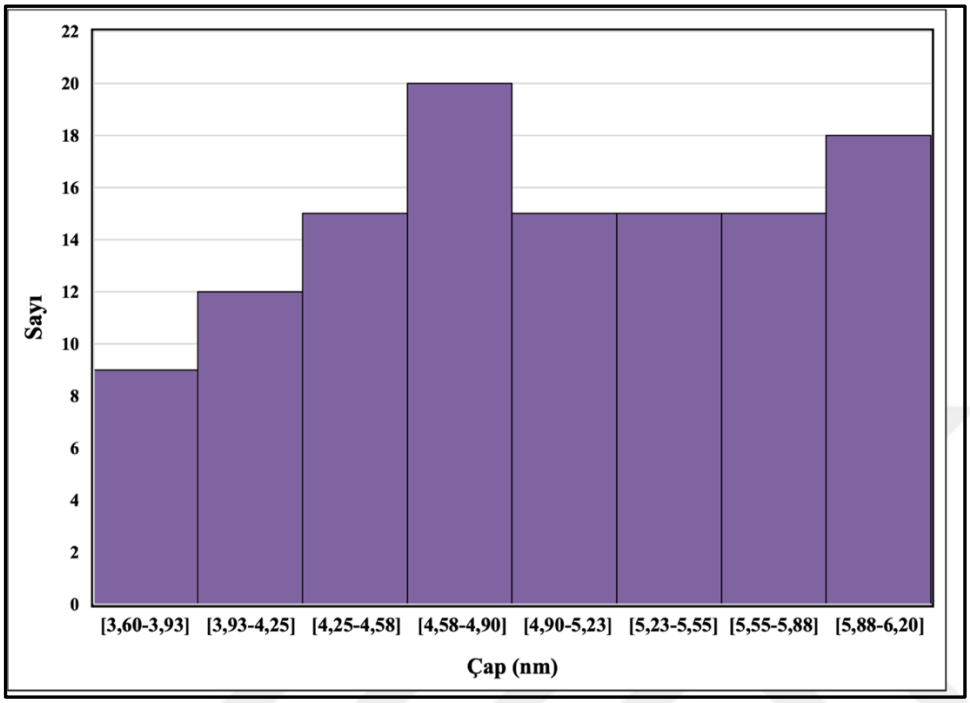
InSb kuantum noktalarının morfolojik özelliklerini ve kristal yapısını çok-ölçekli olarak ortaya koymak amacıyla transmisyon elektron mikroskobu (TEM) analizleri gerçekleştirildi. Şekil 4.15'de sunulan ve farklı büyütmelerde elde edilen yüksek çözünürlüklü TEM görüntüleri, bireysel kuantum noktalarının boyut ve dağılım özelliklerini göstermektedir. Filmin farklı bir bölgesinden alınan görüntü (Şekil 4.15c), kuantum noktaların yerel olarak kümeleşmesi ve koalesansı sonucu oluşan daha büyük kristal domain'lerin varlığını anlatmak amacıyla, bir örnek olarak verildi.



Şekil 4.15. InSb KKN TEM görüntüsü

Şekil 4.15’te (a) 150000X büyütme (resimdeki çubuk uzunluğu 100 nm), (b) 200000X büyütme (resimdeki çubuk uzunluğu 50nm), (c) Filmin bir bölgesindeki 200000X büyütme ile alınan görüntüdür (resimdeki çubuk uzunluğu 50nm). TEM görüntüleri, yaklaşık 3-6 nm boyutunda InSb kuantum noktalarının oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bu kuantum noktalarının bir kısmının, büyüme sırasında kümeleşerek veya koalesans göstererek daha büyük (20-50 nm) ikincil yapılar oluşturduğu gözlenmiştir. Bu yapılar, XRD deseninde gözlenen dar ve yüksek şiddetli kırınım piklerinin kaynağı olarak değerlendirilmektedir. TEM ve XRD sonuçları birlikte ele alındığında, numunenin hem bireysel InSb kuantum noktalarını hem de bu noktaların birleşmesiyle oluşmuş daha büyük kristal alanları içerdiği anlaşılmaktadır. Williamson–Hall analizinde mikro gerinimin ihmal edilebilir düzeyde çıkması, kuantum noktalarının küçük boyutları sayesinde yüzeyde gerinim rahatlaması

göstermesi ve koalesans sırasında iç gerinimlerin kısmen giderilmesiyle fiziksel olarak tutarlıdır.



Şekil 4.16. InSb kuantum noktalarının TEM parçacık boyutu dağılımı.

Şekil 4.16' daki histogram, yalnızca tek tek kuantum noktaları dikkate alınarak ve agregasyon veya birleşme sonucu oluşan ikincil kümeler hariç tutularak oluşturuldu.

Çizelge 4.3. TEM ve XRD gözlemleri arasındaki ilişki

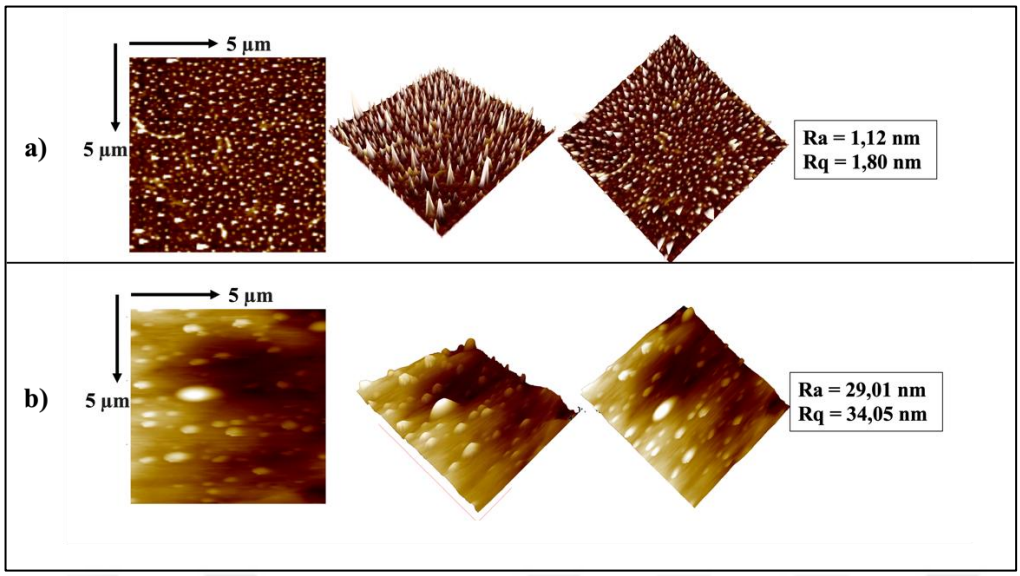
Gözlem	TEM	XRD/ W-H
Bireysel KKN	3-6 nm	Geniş pikler
Koalesans	Var	Dar pikler
Mikrogerinim	Relaxed	$\varepsilon \approx 0$
İki popülasyon	Var	Var

Geniş alan TEM görüntülerinden elde edilen istatistiksel analiz, bireysel InSb kuantum noktalarının ortalama çapının 4,47±0,58 nm olduğunu göstermektedir. Bu analizde, yalnızca

bireysel kuantum noktaları dikkate alınmış; kuantum noktalarının birbirleriyle birleşmesi-koalesansı sonucu oluşan 20-50 nm boyutlarındaki ikincil yapılar istatistiksel değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Elde edilen TEM tabanlı boyut dağılımı, XRD-Scherrer ve Williamson–Hall analizleriyle hesaplanan kristalit boyutlarıyla iyi bir uyum göstermektedir. Çizelge 4.3'te TEM görüntüleri ve XRD deseninin karşılaştırmalı değerlendirmesi sunuldu. Bu tablodan da görüldüğü gibi geliştirdiğimiz malzeme küçük kristalit boyutuna sahip InSb kuantum noktalarından oluşmaktadır. Aynı ölçekli TEM görüntülerinde (Şekil 4.15B ve Şekil 4.15C) farklı yüzey morfolojilerinin gözlenmesi, InSb kuantum noktalarının numune yüzeyi boyunca homojen olmayan bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bazı bölgelerde bireysel kuantum noktaları baskınken, bazı lokal alanlarda kuantum noktalarının koalesansı sonucu daha büyük kristal domain'ler oluşmuştur. Bu durum, XRD analizinde gözlenen hem geniş hem de dar kırınım piklerinin bir arada bulunmasını fiziksel olarak açıklamaktadır.

4.4.2. Morfolojik analiz

InSb koloidal kuantum nokta (KKN) filmlerinin yüzey morfolojisi ve kaplama homojenliği, tek ve çift katlı kaplamalar için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. Şekil 4.17.b' de görüldüğü gibi çift katlı kaplamaya ait AFM analizinde, ortalama yüzey pürüzlülüğünün yani Ra = 29,01 nm değerinin ve kök-ortalama-kare pürüzlülüğünün Rq = 34,05 nm olduğu görülmektedir. Bu durum, çift katlı kaplamada kuantum noktalarının üst üste birikmesi sonucu yüzey sürekliliğinin bozulduğunu ve film morfolojisinin homojen olmadığını işaret etmektedir.



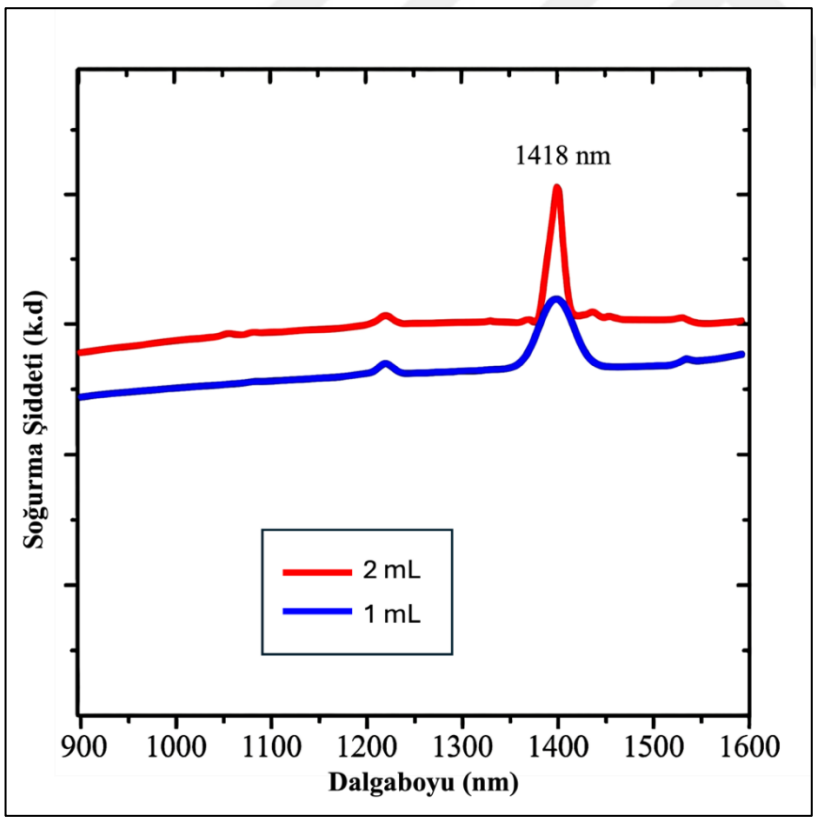
Şekil 4.17. a)Tek kat ve b) Çift katlı InSb KKN' lerin AFM analizi

Buna karşılık, Şekil 4.17.a'da tek katlı InSb KKN kaplamaya ait AFM sonuçları, yüzeyin belirgin biçimde daha düzgün ve homojen olduğunu ortaya koymaktadır. Tek katlı kaplamada Ra = 1,12 nm ve Rq = 1,80 nm değerleri elde edilmiş olup, bu değerler çift katlı kaplamaya kıyasla yaklaşık bir büyüklük mertebesi daha düşüktür. Maksimum yükseklik farkının Rt ≈ 24,28 nm seviyesinde kalması, yüzeyde büyük topografik düzensizliklerin bulunmadığını ve kuantum noktalarının daha kontrollü bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, tek katlı kaplamada daha düzgün bir film oluştuğunu ve aktif tabakanın sürekliliğinin daha iyi sağlandığını ortaya koymaktadır.

AFM verilerinden elde edilen bu bulgular, tek katlı InSb KKN kaplamaların fotodedektör uygulamaları için daha uygun olduğunu göstermektedir. Daha düşük RMS pürüzlülüğü, aktif katman–taşıyıcı taşıma katmanları (NiO ve SnO_2) arasındaki arayüzlerin daha düzgün olmasını sağlamakta; bu durum taşıyıcıların tuzaklanma ve rekombinasyon olasılığını azaltarak elektriksel taşınıma olumlu katkı sunmaktadır. Dolayısıyla, tek katlı InSb KKN kaplamalar hem yapısal hem de fonksiyonel açıdan fotodedektör performansı için tercih edilen aktif tabaka konfigürasyonu olarak değerlendirilmiştir.

4.4.3. Optik analiz

InSb koloidal kuantum noktaların (KKN) optik özelliklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen UV-Vis-NIR spektroskopik ölçümlerde, kuantum nokta çözeltileri belirli oranlarda seyreltilmiştir. InSb KKN'lerin özellikle 900nm-2000nm kızılötesi bölgede yüksek ışık soğurma yol açtığından, yüksek derişimli çözeltilerle yapılan ölçümlerde dedektör doygunluğu, sinyal kaybı veya Beer-Lambert yasasının doğrusal aralığından sapma gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle çözelti derişimi kontrollü biçimde düşürülerek hem spektral bant kenarının doğru şekilde izlenmesi hem de absorpsiyon değerlerinin güvenilir biçimde elde edilmesi hedeflenmiştir. Seyreltme işlemi ayrıca, numunedeki olası agregasyon etkisini azaltarak parçacıklar arası etkileşimin spektrum üzerindeki bozucu katkılarını minimize etmiştir. Bu sayede elde edilen spektrumlar, InSb KKN'lerin gerçek optik davranışını daha doğru yansıtmakta ve bant aralığı hesaplamalarında daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır.



Şekil 4.18. InSb KKN soğurma grafiği

Şekil 4.18’ de, Toluen sıvısı içinde 2 mL InSb koloidal kuantum nokta (KKN) çözeltilerinin yani az seyreltilmiş ve 1 mL yani çok seyreltilmiş durumlarına ait UV-Vis-NIR soğurma spektrumları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Her iki spektrumda da yaklaşık 1418 nm belirgin bir soğurma bandının gözlenmesi, soğurma tepe konumunun çözelti derişiminden bağımsız olduğunu ve bu bandın InSb KKN’lerin intrinsik elektronik geçişlerine karşılık geldiğini göstermektedir. Bu durum, gözlenen soğurma bandının kuantum nokta boyutuna bağlı bant kenarını temsil ettiğini göstermektedir.

Az seyreltilmiş çözeltide, 1418 nm civarındaki soğurma bandının daha yüksek şiddette ve daha keskin biçimde ortaya çıktığı görülmektedir. Buna karşılık, çok seyreltilmiş çözeltide soğurma şiddeti genel olarak azalmakta ve pik daha geniş ve düşük genlikli bir yapı sergilemektedir. Bu fark, Beer-Lambert yasası ile uyumlu olup, optik yol boyunca bulunan kuantum nokta sayısının azalmasına bağlı olarak soğurma şiddetinin düşmesiyle ilişkilendirilmektedir.

Her iki spektrumda da dalga boyu arttıkça baz çizginin yukarı yönlü bir eğim sergilemesi, koloidal kuantum nokta çözeltilerinde yakın kızılötesi bölgede artan saçılma katkıları ve ölçüm sisteminin dalga boyuna bağlı dedektör cevabı ile açıklanmaktadır. Ancak bu baz çizgi değişimi, absorpsiyon bandının konumunu etkilememekte; yalnızca spektrumun mutlak şiddet değerleri üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle bant aralığı değerlendirmeleri, spektrumun genel eğimi yerine absorpsiyon tepe konumu (1418 nm) esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Band aralığı için öncelikle, Denklem (4.4) kullanılarak kuantum nokta yapısı ile bulk InSb arasındaki bant aralığı farkı ΔEg tanımlanmıştır. UV–Vis–NIR soğurma spektrumunda gözlenen 1418 nm dalga boyuna karşılık gelen soğurma tepe noktası esas alınarak, InSb için elektron ve delik etkin kütleleri sırasıyla $m_e^* \approx 0{,}02m_0$ ve $m_h^* \approx 0{,}3m_0$ olarak alınıp, InSb KKN’lerin optik bant aralığı $Eg \approx 0{,}87$ eV olarak hesaplanmıştır. Bu değer, bulk InSb’nin yaklaşık 0,17 eV olan bant aralığı ile karşılaştırıldığında, $\Delta Eg \approx 0{,}70$ eV mertebesinde belirgin bir bant aralığı genişlemesine işaret etmektedir. Elde edilen bu sonuç, InSb kuantum noktalarının güçlü kuantum sınırlanma rejiminde bulunduğunu ve malzemenin özgün kızılötesi duyarlılığının MWIR bölgesinden SWIR bölgesine doğru kaydığını göstermektedir.

$$\Delta E_g = E_g(KKN) - E_g(bulk) \tag{4.4}$$

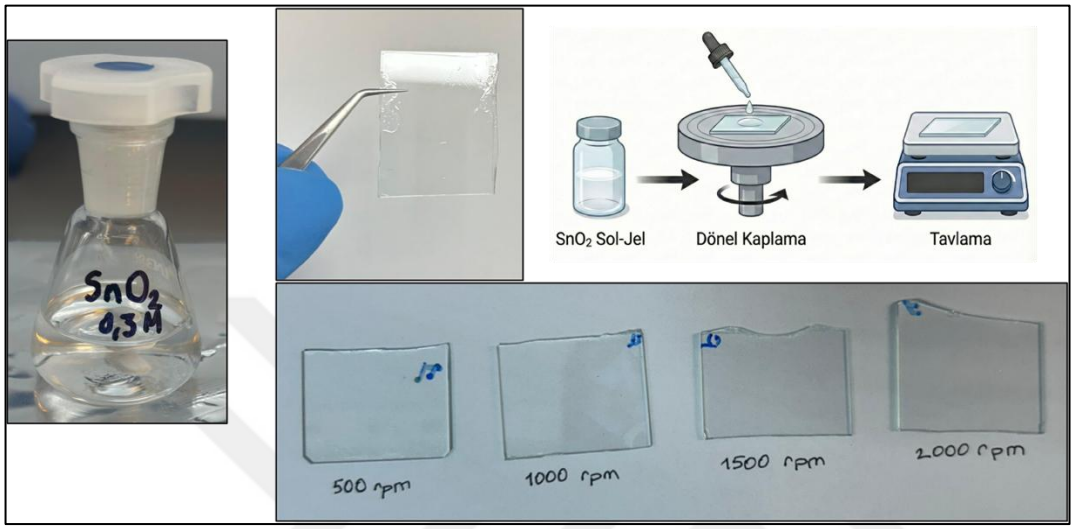
$$E_g(R) = E_g(bulk) + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) \tag{4.5}$$

He ve ark. kendi çalışmalarında 1406 nm ve 1700 nm de iki pik değerini görüp InSb KKN çaplarını 4,4 ve 11,6 nm arasında olarak ifade etmişlerdir [41]. Bimodal (iki tepecikli) olan bu sonuç iki tane eksitonik tepeyi belirtir ve iki ayrı KN grubunun boyut dağılımını gösterir. 1406 nm lerde kuantum sınırlama orta seviyelerdeyken 1700 zayıf bir sınırlama gözlemlenmektedir. Şekil 4.18'de gözlemlenen 1200 nm civarındaki pik de tıpkı bu şekilde zayıf bir sınırlama göstermektedir. Ayrıca içeriğinde bulunan organik malzemelerin farklı bağlarının sonucuda olabilmektedir. Seo ve ark. yaptıkları çalışmada sıcaklık değerlerini değiştirerek farklı dalga boylarında soğurma elde etmişlerdir. Buradaki en iyi sonuç düşük sıcaklıkta 990 nm de soğurma piki elde etmeleridir [42].

4.5. Elektron Taşıma Katmanı ve Karakterizasyonu: SnO_2

Bu tez çalışmasında elektron taşıma katmanı olarak kullanılan SnO_2 ince filmler, kontrollü bir sol-jel kimyası ile hazırlanmıştır. Sol-jel yöntemi, metal oksit filmlerinin düşük maliyetle, geniş yüzeylere ve düşük sıcaklıklarda üretilebilmesine olanak tanıyan esnek bir yaklaşımdır. Temel süreç; metal prekürsörlerinin uygun bir çözücü içinde çözünmesi, hidrojen bağı etkileşimleri ve kontrollü hidroliz-kondenzasyon reaksiyonları ile koloidal bir sol oluşturması, ardından bu solün alttaş üzerinde düzgün bir ince film hâline dönüştürülmesi üzerine kuruludur. SnO_2 solü için başlangıç maddesi olarak genellikle $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ veya alkoksit türevleri tercih edilir. Etanol veya izopropanol gibi düşük kaynama noktalı bir çözücü içinde çözülür. Reaksiyon hızını stabilize etmek için hafif asidik bir ortam tercih edilmelidir. Bu aşamada solün homojenliğini artırmak ve partikül büyümesini kontrol altında tutmak adına karışım manyetik karıştırıcı altında 24 saat bekletildi. Böylece kaplama için uygun akışkanlığa ve kararlılığa sahip SnO_2 sol-jeli elde edildi. Hazırlanan sol, temizlenmiş cam alttaşlar üzerine dönel kaplama yöntemiyle uygulandı. Dönme hızı ve kaplama süresi, elde edilen filmin kalınlığını ve yüzey düzgünlüğünü belirleyen kritik parametrelerdir. Dolayısıyla 500, 1000, 1500, ve 2000 rpm hızlarında aynı sürede Şekil 4.19' daki gibi dönel kaplama ile kaplandı. Kaplama sonrasında alttaş oda sıcaklığında kısa bir ön kurutma aşamasından geçirilir; bu adım çözücünün uzaklaştırılmasını sağlar. Ardından film,

SnO_2 yapısının olgunlaşması ve organik artıkların tamamen uzaklaştırılması amacıyla 200-350 °C aralığında bir tavlama işlemine tabi tutulur. Bu ısıl işlem, filmin yoğunlaşmasına, bağ yapısının inorganik Sn–O ağına dönüşmesine ve film-alttaş etkileşiminin güçlenmesine katkı sağlar.



Şekil 4.19. SnO_2 üretim aşaması

Sol-jel yöntemi ile biriktirilen SnO_2 ince filmlerde gerçekleştirilen XRD analizlerinde belirgin kristal pikler elde edilememiş olup, filmin düşük kristalizasyon derecesine sahip olduğu değerlendirildi. Hall etkisi ölçümlerinde ise kararlı ve ölçülebilir elektriksel parametreler alınamadı. Bu durum, filmin düşük iletkenlik ve yetersiz taşıyıcı yoğunluğu sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle daha kompakt, homojen ve elektriksel olarak kararlı film elde etmek amacıyla magnetron püskürtme yöntemi tercih edildi.

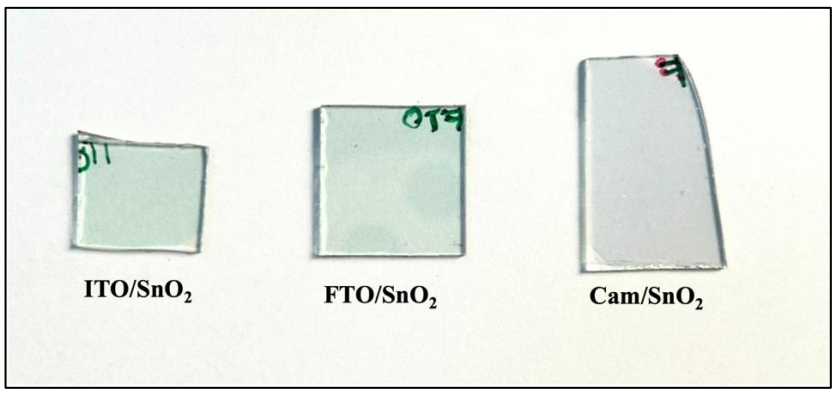
SnO_2 ince filmler magnetron püskürtme (magnetron sputtering) yöntemi kullanılarak ITO, FTO ve cam alttaşlar üzerine kaplanmıştır. Kaplama işlemi öncesinde sistem taban basıncı 2.3×10^{-7} mbar seviyesine düşürülerek ortam içerisindeki artık gaz molekülleri minimize edilmiştir. Düşük taban basıncı, film saflığının artırılması ve istenmeyen oksitlenme veya kontaminasyonun önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Kaplama sırasında çalışma basıncı 3.41×10^{-3} mbar olarak ayarlanmış ve püskürtme gazı olarak 10 sccm akış hızında argon kullanılmıştır. Argon plazması altında SnO_2 hedef (target), 75 W RF güç uygulanarak sputter edilmiştir. Uygulanan güç değeri, hedef malzemeden

kontrollü ve kararlı bir atom koparma (sputtering yield) sağlarken, film büyümesinin homojen şekilde gerçekleşmesine olanak tanımıştır. Bu parametreler altında yaklaşık 90 nm kalınlığında SnO_2 ince film elde edilmiştir.

Seçilen çalışma basıncı ve argon akış oranı, plazma yoğunluğunun dengeli kalmasını sağlayarak alttaş yüzeyinde kompakt ve süreklilik gösteren bir film oluşumuna katkıda bulunmuştur. 75 W güçte gerçekleştirilen kaplama, film yoğunluğunu artırırken aşırı yüzey pürüzlülüğüne neden olmayacak bir büyüme rejimi sunmuştur. Elde edilen 90 nm kalınlık, elektron taşıma katmanı (ETL) olarak kullanılacak SnO_2 tabakasının yeterli örtücülük sağlaması ve aynı zamanda seri direnci artırmayacak optimum bir kalınlıkta olmasını mümkün kılmaktadır.

Şekil 4.20' de gösterildiği gibi 3 farklı alttaş üzerine kaplama yapılmıştır. ITO ve FTO gibi iletken şeffaf oksit alttaşlar üzerine yapılan kaplamalarda, SnO_2 filmi düzgün ara yüzey teması oluşturarak elektron taşınımını destekleyecek bir yapı sergilemiştir. Cam alttaş üzerine yapılan kaplamalar ise morfolojik ve optik karakterizasyon için referans numune olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen kaplama parametreleri, yüksek saflıkta, homojen ve kompakt bir SnO_2 ince film elde edilmesini sağlamış olup fotodedektör yapısında elektron taşıma katmanı olarak kullanılmaya uygun özellikler sunmaktadır.



Şekil 4.20. Eş püskürtme yöntemi ile SnO_2 Kaplaması

4.5.1. Optik analiz

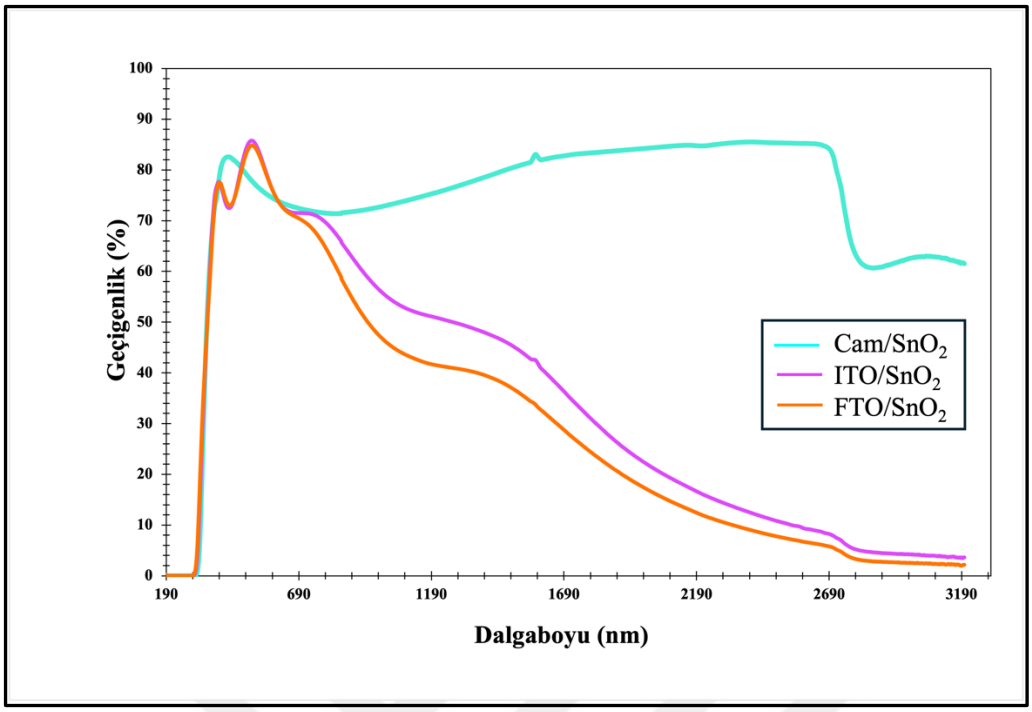
Şekil 4.21'de SnO_2 ince filmlerine ait UV–Vis–NIR optik geçirgenlik spektrumları verildi. Spektrumlar incelendiğinde, UV bölgesinde belirgin bir soğurma kenarı gözlenmektedir. Bu

durum SnO_2'nin geniş bant aralıklı yarıiletken karakterini doğrulamaktadır. Soğurma kenarının yaklaşık 300-350 nm civarında yer alması, SnO_2'nin literatürde rapor edilen bant aralığı değerleri ile uyumludur [45].

Görünür bölge (400–800 nm) incelendiğinde, özellikle düşük molariteli numunelerde yüksek geçirgenlik değerleri (%70-85) elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç, filmlerin optik olarak şeffaf yapıda olduğunu ve optoelektronik uygulamalar açısından uygun özellikler sergilediğini göstermektedir. Molarite arttıkça geçirgenlik değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bu durum, film kalınlığının artması, yüzey pürüzlülüğünün yükselmesi veya kusur yoğunluğunun artması ile ilişkilendirilebilir.

Yakın kızılötesi (NIR) bölgesinde bazı numunelerde geçirgenliğin dalga boyu arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu davranış, serbest taşıyıcı absorpsiyonu ve oksijen boşlukları gibi kusur kaynaklı optik kayıplarla açıklanabilir. 2600 nm civarında gözlenen belirgin düşüşler ise film içerisinde bulunan hidroksil grupları veya adsorbe nem kaynaklı absorpsiyon bantları ile ilişkilendirilebilir.

Elde edilen sonuçlar, sol-jel yöntemiyle hazırlanan SnO_2 filmlerin optik olarak şeffaf yapıda olduğunu ve molarite değişiminin optik özellikler üzerinde belirgin bir etkisi bulunduğunu göstermektedir.

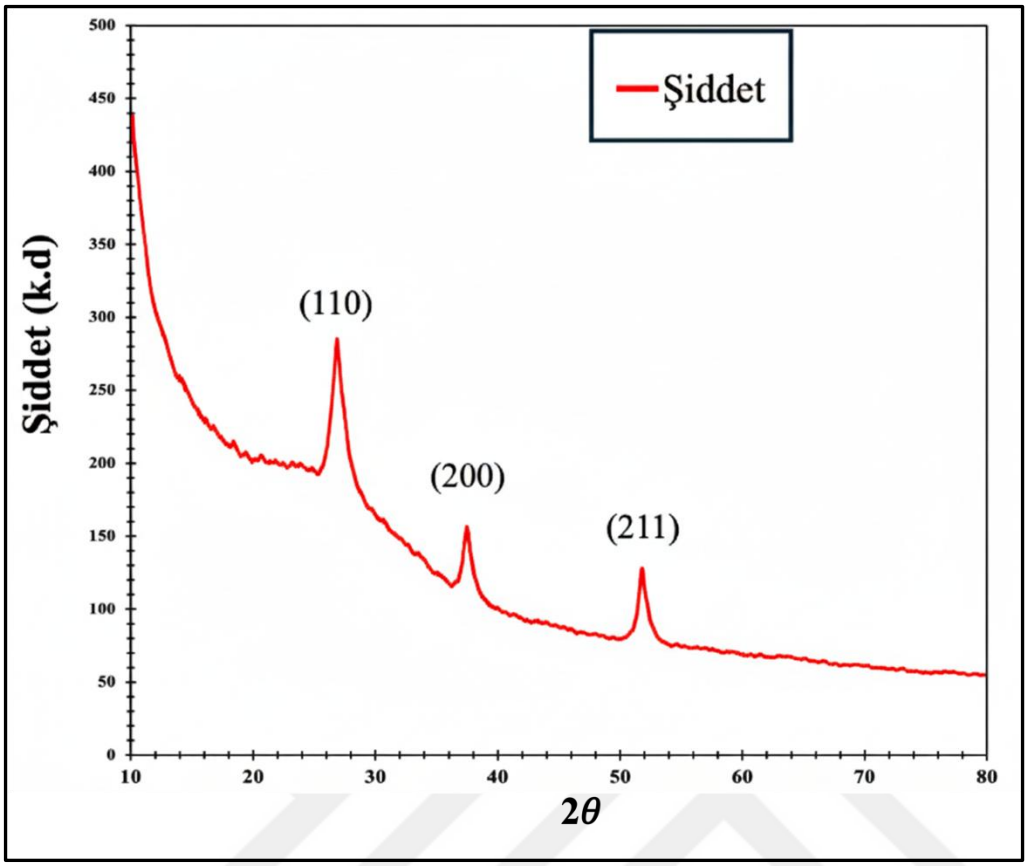


Şekil 4.21. SnO_2 dalgaboyuna göre geçirgenlik grafiği

4.5.2. Yapısal analiz

SnO_2 sol-jel çözeltisi üzerinden elde edilen filmlerde XRD analizinde belirgin kırınım pikleri gözlemlenmedi. Bu durum, sol-jel yönteminde başlangıçta amorf veya düşük kristallenmiş bir yapı oluşmasından kaynaklanmaktadır. XRD analizi yalnızca uzun menzilli kristal düzene sahip yapıları belirgin şekilde ortaya koyabildiğinden, amorf veya yetersiz kristallenmiş filmlerde kırınım pikleri zayıf ya da arka plan içerisinde kaybolmuş olarak gözlenebilir.

Şekil 2.22' de verilen püskürtme yöntemi ile XRD deseni incelenen numunelerde ise yaklaşık $2\theta \approx 26°$, 33° ve 51° civarında gözlenen kırınım pikleri sırasıyla (110), (200) ve (211) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu pikler tetragonal rutile yapıya sahip SnO_2 fazının karakteristik yansımalarıdır. Özellikle (110) düzleminin en yüksek şiddete sahip olması, rutile fazın baskın olduğunu göstermektedir. Pik konumlarının literatürde rapor edilen standart SnO_2 verileri ile uyumlu olması, sentezlenen numunenin saf SnO_2 fazında kristallendiğini doğrulamaktadır. Piklerin genişliği ise nanopartikül boyutuna bağlı çizgi genişlemesi ile ilişkilendirilebilir [45-46].



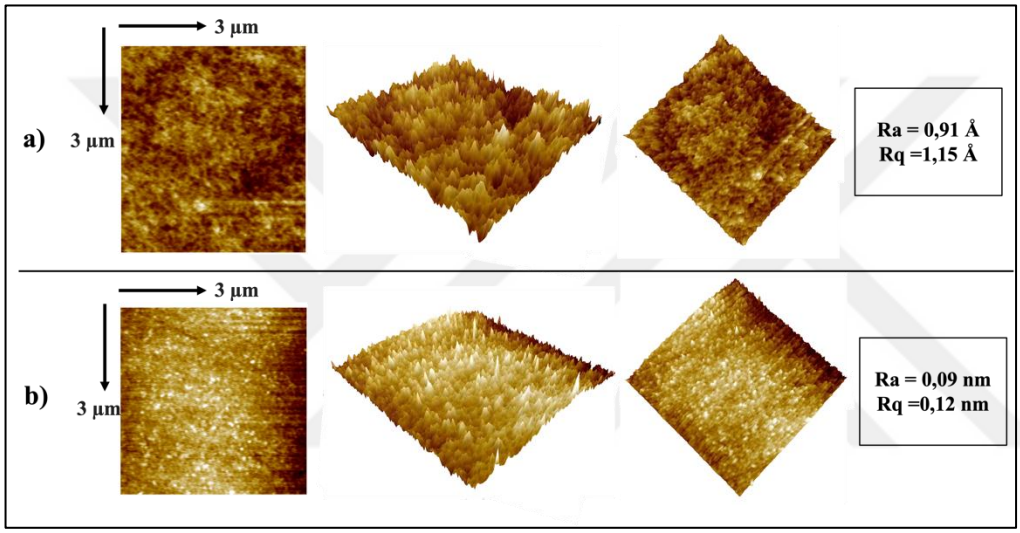
Şekil 4.22. SnO_2 XRD analizi

4.5.3. Morfolojik analiz

Şekil 4.23' de eş-püskürtme yöntemi ile kaplanan SnO_2 ince filmi (A) ile sol-jel yöntemi kullanılarak hazırlanıp dönel kaplama ile kaplanan SnO_2 ince filminin (B) 3 µm × 3 µm tarama alanında elde edilen AFM yüzey görüntüleri verilmiştir. Her iki numuneye ait iki boyutlu topografik görüntüler ve üç boyutlu yüzey rekonstrüksiyonları birlikte değerlendirildiğinde, filmlerin morfolojik özellikleri arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir.

Püskürtme yöntemi ile elde edilen A numunesinde yüzeyin homojen, kompakt ve süreklilik gösteren bir yapıya sahip olduğu gözlenmektedir. Yüzey boyunca belirgin çatlak, boşluk veya makroskobik kusur tespit edilmemiştir. Üç boyutlu görüntüler incelendiğinde yükseklik dağılımının dengeli olduğu ve ani tepe-çukur geçişlerinin sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır. Granüler yapı nanoölçekte olup yüzey boyunca düzenli bir dağılım sergilemektedir. Bu durum, püskürtme yönteminin daha kontrollü film büyümesi sağlaması ve yüksek yoğunluklu, kompakt bir tabaka oluşturması ile ilişkilendirilmektedir.

Sol-jel yöntemi ile hazırlanıp dönel kaplama ile kaplanan Şekil 4.23.b numunesinde ise yüzey morfolojisinin daha heterojen olduğu görülmektedir. İki boyutlu görüntülerde yer yer kümelenmiş yapılar ve lokal yükseklik farklılıkları dikkat çekmektedir. Üç boyutlu yüzey rekonstrüksiyonlarında tepe-çukur dağılımının daha belirgin olduğu ve yüzey pürüzlülüğünün Şekil 4.23.a numunesine kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Sol-jel sürecinde çözücü buharlaşması, jel ağının büzülmesi ve partikül aglomerasyonu gibi etkiler yüzeyde lokal düzensizliklere neden olabilmektedir. Bu durum film sürekliliğini ve yüzey düzgünlüğünü sınırlayabilmektedir.



Şekil 4.23. SnO_2 Farklı kaplama türleriyle AFM analizi

SnO_2 tabakası bu çalışmada elektron taşıma katmanı (ETL) olarak kullanılmaktadır. ETL yüzey morfolojisi, üzerine kaplanan InSb koloidal kuantum noktalar ile olan ara yüzey temasını ve dolayısıyla taşıyıcı taşınım mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. Daha düşük yüzey pürüzlülüğüne ve daha homojen bir yapıya sahip olan püskürtme yöntemiyle kaplanan SnO_2 filmi, üst katman ile daha düzgün bir temas yüzeyi oluşturmakta ve ara yüzey tuzak yoğunluğunun azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, elektron taşınımının iyileşmesi, yeniden birleşme kayıplarının azalması ve elektrik alan dağılımının daha homojen hale gelmesi açısından avantaj oluşturmaktadır.

4.6. InSb KKN Fotodedektör Yapısının Fabrikasyonu

NiO delik taşıma katmanı, InSb koloidal kuantum nokta (KKN) aktif tabakası ve SnO_2 elektron taşıma katmanının ardışık olarak biriktirilmesinin ardından fotodedektör yapısının

fabrikasyonu gerçekleştirildi. Elde edilen cihaz mimarisi, ITO/NiO/InSbKKN/SnO_2 katman dizilimine sahip dikey bir fotodedektör konfigürasyonu sunmaktadır. Bu çok katmanlı yapı, her bir katmanın taşıyıcı seçicilik ve taşıma özelliklerinden faydalanacak şekilde tasarlandı.

Alt elektrot görevi gören ITO tabakası üzerine, elektriksel temasın iyileştirilmesi amacıyla ince bir titanyum (Ti) ara tabakası ve bunun üzerine altın (Au) metal kontaklar oluşturuldu. Ti tabakası, metal-ITO arayüzünde yapışmayı ve temas kararlılığını artırırken, Au tabakası düşük temas direnci ve yüksek kimyasal kararlılığı sayesinde güvenilir bir alt elektrot teması sağlandı. ITO'nun yüksek optik geçirgenliği ve iyi elektriksel iletkenliği, ışığın aktif katmana etkin bir şekilde ulaşmasına ve deliklerin toplanmasına olanak tanımaktadır.

Delik taşıma katmanı olarak kullanılan NiO ince filmi, temizlenmiş ITO alttaşlar üzerine sıçratma kaplama yöntemi ile 90 nm kalınlığında biriktirildi. Sputter kaplama tekniği sayesinde NiO tabakası, yüzey boyunca düzgün kalınlık dağılımına ve iyi arayüz kalitesine sahip olacak şekilde elde edildi. NiO'nun p-tipi karakteri, delik taşıyıcıların seçici olarak alt elektrota taşınmasını sağlarken, elektronların bu yönde taşınmasını engelleyerek taşıyıcı ayrışmasını iyileştirmektedir. Bu durum, karanlık akımın baskılanmasına ve cihazın sinyal-gürültü oranının artmasına katkı sağlamaktadır.

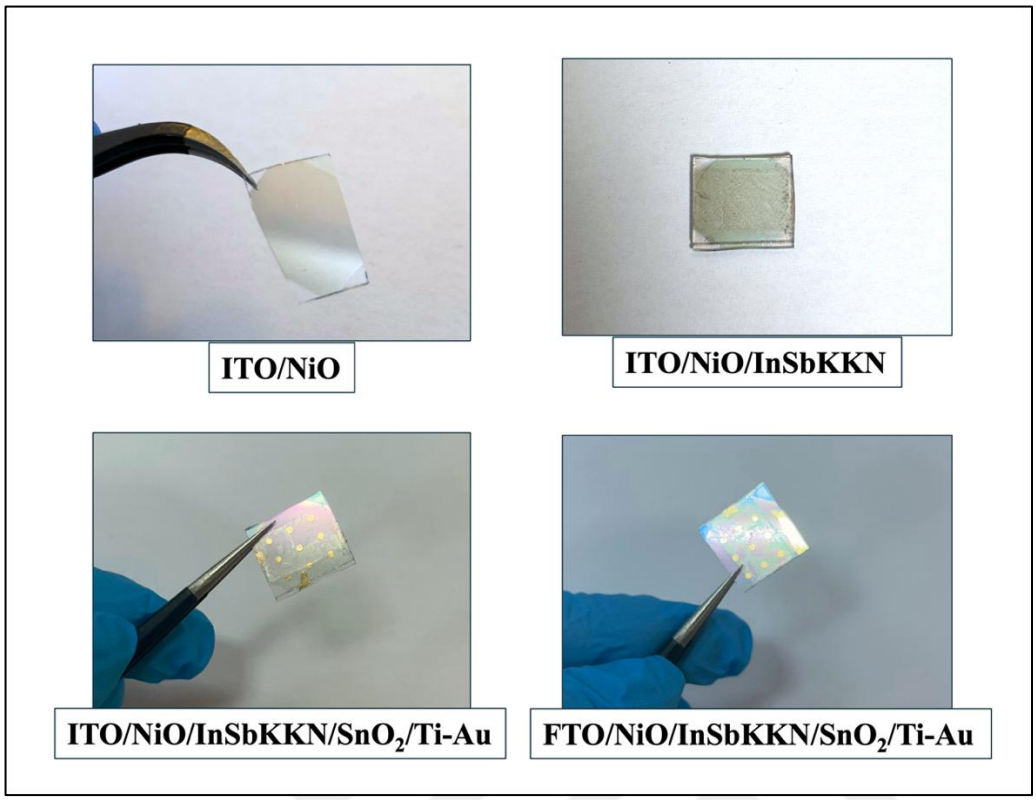
NiO tabakası üzerine dönel kaplama yöntemi ile InSb KKN aktif katmanı, tek kat olacak şekilde; 1000 rpm, 1500 rpm ve 2000 rpm hızlarında döndürülerek kaplandı. Bu aktif katman fotodedektörün temel ışık soğurma bölgesi olarak görev yapmaktadır. InSb kuantum noktalarının dar bant aralığı ve güçlü kızılötesi soğurma özellikleri sayesinde, gelen fotonlar etkin bir şekilde soğurulmakta ve aktif tabaka içerisinde elektron–delik çiftleri oluşturulmaktadır. Kuantum nokta tabanlı yapının izotropik doğası ve sınırlı tane sınırı etkileri, taşıyıcıların düzensiz saçılmasını azaltarak fotoyanıt oluşumuna olumlu katkı sağlamaktadır.

Aktif katmanın üzerine elektron taşıma katmanı olarak görev yapan SnO_2 ince filmi, sputter kaplama yöntemi ile 80 nm kalınlığında biriktirilmiştir. SnO_2 tabakası, n-tipi karakteri sayesinde elektronların üst elektrota doğru taşınmasını kolaylaştırırken, deliklerin bu yönde taşınmasını engellemektedir. SnO_2 tabakası üzerine de Ti-Au metal kontaklar oluşturularak üst elektrot tanımlanmıştır. Bu metal temas yapısı, elektronların dış devreye etkin bir şekilde

aktarılmasını sağlarken, SnO_2-metal arayüzündeki enerji seviye uyumunu iyileştirerek temas kaynaklı kayıpları azaltmaktadır.

Bu katman dizilimi, cihazın harici bir öngerilim altında çalıştırılması durumunda aktif tabaka içerisinde güçlü bir elektrik alan oluşmasına imkân tanımaktadır. Oluşan elektrik alan, foton soğurulması sonucu üretilen taşıyıcıların karşıt elektrotlara doğru sürüklenmesini hızlandırmakta ve taşıyıcıların rekombinasyona uğramadan devre dışına aktarılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu mekanizma, fotodedektörün fotoakımının artmasına ve buna bağlı olarak ölçülebilir responsivite değerleri sergilemesine belirleyici katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Şekil 4.24' de verilen ITO/NiO/InSbKKN/SnO_2/Ti-Au katman dizilimine sahip çok katmanlı fotodedektör yapısı, taşıyıcı seçiciliği, katmanlar arası enerji seviye uyumu ve metal–yarıiletken temas kalitesi açısından fotodedektör uygulamaları için uygun bir platform sunmaktadır. Bu yapı kapsamında üretilen fotodedektörler arasından, aktif tabakası 2000 rpm hızında kaplanan FTO/NiO/InSbKKN/SnO_2/Ti-Au ve aktif tabakası 1500 rpm hızında kaplanan ITO/NiO/InSbKKN/SnO_2/Ti-Au konfigürasyonlarına sahip numunelerde ölçülebilir fotoakım elde edildi. Fotoakımın yalnızca geliştirilen birkaç numunede gözlenmesi, aktif katman kalınlığının ve alttaş–film uyumunun fotodedektör performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu kaplama koşullarında elde edilen InSb KKN tabakaları hem yeterli optik soğurma sağlayan hem de foto yük taşıyıcılarının elektrotlara etkin şekilde taşınmasına olanak tanıyan bir kalınlık ve süreklilik sergilemiştir. Buna karşılık, farklı dönel kaplama parametrelerinde üretilen numunelerde aktif katman kalınlığının aşırı artması veya azalması nedeniyle taşıyıcı taşınımı sınırlandırılmış ve ölçülebilir bir fotoakım elde edilememiştir. Bu sonuçlar, fotodedektör performansının yalnızca katman mimarisine göre değil, aynı zamanda aktif tabaka kaplama koşullarının hassas biçimde optimize edilmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda sadece bu iki yapıda aktif katman kalınlığı, yüzey uyumu ve enerji seviye hizalanması birlikte sağlanmış olup; diğer numunelerde bu denge sağlanmadığı için fotoakım oluşmamıştır.



Şekil 4.24. InSb KKN fotodedektör

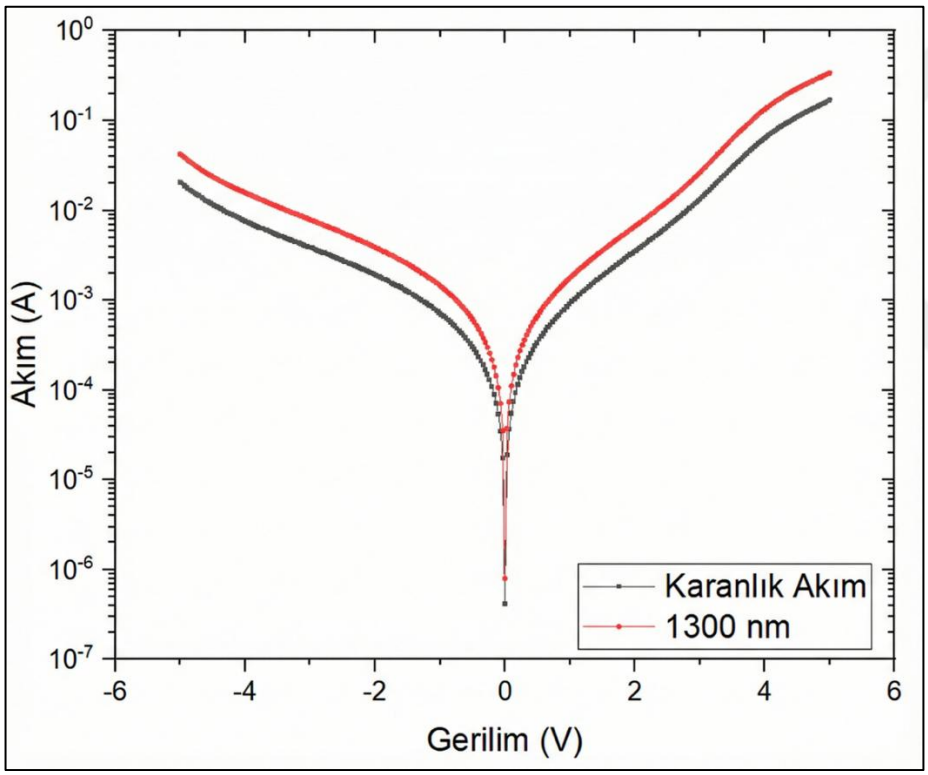
Bu katman dizilimi, cihazın harici bir ön gerilim altında çalıştırılması durumunda aktif katman içerisinde güçlü bir elektrik alan oluşmasına imkân tanımaktadır. Oluşan elektrik alan, foton soğurulması sonucu üretilen taşıyıcıların karşıt elektrotlara doğru sürüklenmesini hızlandırmakta ve taşıyıcıların rekombinasyona uğramadan devre dışına aktarılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu mekanizma, fotodedektörün fotoakımı ve fotoyanıt (responsivite) değerleri sergilemesinde belirleyici rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, ITO/NiO/InSbKKN/SnO_2/Ti-Au şeklinde geliştirilen çok katmanlı fotodedektör mimarisi, taşıyıcı seçiciliği, arayüz uyumu ve metal-yarıiletken temas kalitesi açısından fotodedektör uygulamaları için uygun bir platform sunmaktadır. Bu yapı, InSb kuantum noktalarının yakın kızılötesi bölgedeki algılama yeteneğini etkin bir şekilde ortaya çıkarırken, çözelti bazlı ve düşük sıcaklıklı üretim süreçleri sayesinde esnek ve ölçeklenebilir cihaz mimarilerine de olanak tanımaktadır. Tamamlanan fotodedektörler, bir sonraki bölümde sunulan elektriksel ve optoelektronik karakterizasyon analizlerinde değerlendirildi.

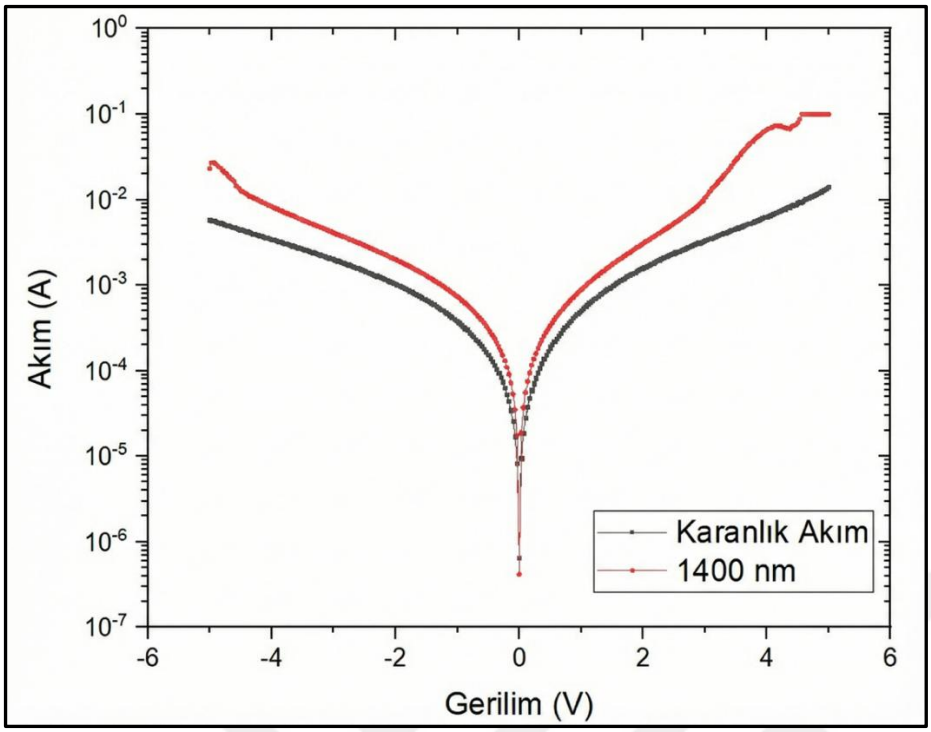
4.7. InSb. KKN Fotodedektörlerin Karakterizasyonu

4.7.1. Elektriksel analiz

Şekil 4.25'de FTO alttaş üzerine geliştirilen NiO/InSbKKN/SnO_2/Ti-Au, tabanlı fotodedektörlerin karanlık, 1300 nm ve 1400 nm ışık altındaki I-V karakteristikleri sunulmaktadır. Her iki yapıda da aydınlatma altında ölçülen akımın karanlık akıma kıyasla belirgin şekilde arttığı görülmekte olup, bu durum cihazların yakın kızılötesi bölgedeki fotoyanıta sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.25.1300 nm ışık altında fotoakım



Şekil 4.26. 1400 nm ışık altında fotoakım

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26' da görüldüğü gibi her iki dalga boyundaki ışık altında ölçülen akım değerlerinin, karanlık akıma kıyasla tüm gerilim aralığında belirgin biçimde artmaktadır. Bu durum, InSb KKN aktif tabakasında foton soğurulması sonucu üretilen fotoyük taşıyıcılarının harici elektrik alan yardımıyla etkin şekilde toplanabildiğini ve cihazın fotodedektör olarak çalıştığını doğrulamaktadır.

1300 nm ışık altında (Şekil 4.25), karanlık akıma göre ölçülen akım artışı özellikle ileri ve ters polarma bölgelerinde belirginleşmektedir. Bu dalga boyunda foton enerjisinin InSb KKN'lerin optik bant aralığının üzerinde olması, aktif tabaka içerisinde etkin bir soğurma rejimi oluşturarak taşıyıcı üretimini desteklemektedir. Buna bağlı olarak, uygulanan gerilimin artmasıyla birlikte fotoakımın monoton biçimde yükseldiği gözlenmektedir.

1400 nm ışık altında elde edilen sonuçlar (Şekil 4.26) incelendiğinde ise, fotoakımın yine karanlık akıma kıyasla belirgin şekilde arttığı, ancak bazı gerilim değerlerinde fotoakım seviyesinin 1300 nm ölçümlerine göre farklılık gösterebildiği görülmektedir. 1400 nm dalga boyu, InSb KKN'lerin yaklaşık 1418 nm de belirlenen soğurma bandına oldukça yakın olduğundan, bu bölgede bant kenarına yakın soğurma mekanizmalarının etkili olduğu değerlendirilmektedir. Bant kenarına yakın uyarımlarda taşıyıcı üretimi etkin olmakla

birlikte, taşıyıcıların enerji fazlalığının sınırlı olması nedeniyle taşınım ve toplanma süreçleri gerilime daha duyarlı hale gelebilmektedir. Her iki dalga boyunda da fotoakımın gerilimle birlikte artış göstermesi, cihazın harici öngerilim altında çalışan bir fotodedektör rejiminde olduğunu ve aktif tabaka içerisinde oluşan elektrik alanın fotoyük taşıyıcılarını karşıt elektrotlara doğru sürüklediğini göstermektedir. Karanlık akım ile aydınlatma altındaki akım arasındaki farkın açık biçimde ayırt edilebilmesi, fotodedektörün sinyal–gürültü oranı açısından işlevsel olduğunu ortaya koymaktadır.

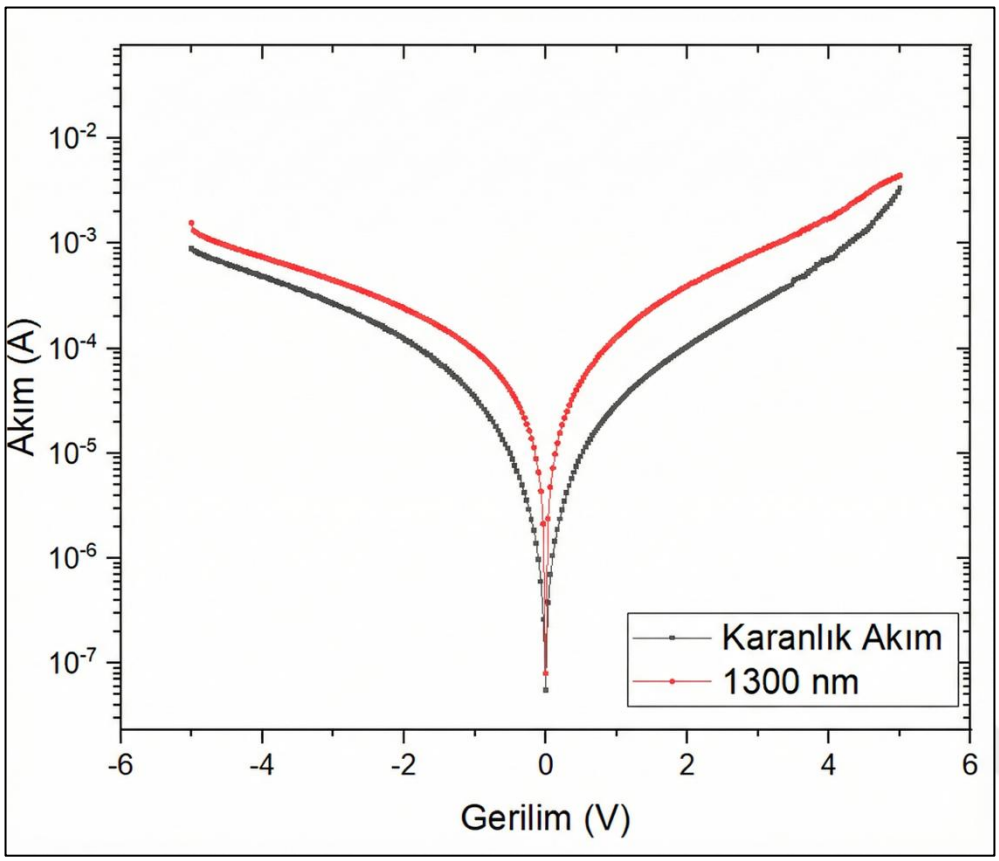
Sonuç olarak, 1300 nm ve 1400 nm dalga boylarında elde edilen fotoakım yanıtları, InSb KKN'lerin optik soğurma spektrumunda gözlenen 1418 nm bant kenarı ile doğrudan ilişkilidir. Bu durum, fotodedektörün spektral yanıtının aktif malzemenin optik özellikleri tarafından belirlendiğini ve cihazın SWIR bölgesinde etkin algılama yapabildiğini doğrulamaktadır.

Şekil 4.25'de ki FTO kullanılan fotodedektör yapısında hem karanlık hem de ışık altında ölçülen akımların mutlak değerlerinin daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle ileri ve ters besleme bölgelerinde karanlık akım seviyesinin görece yüksek olması, FTO'nun yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek doğal taşıyıcı yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. FTO'nun tanecikli yüzey morfolojisi, NiO ve aktif katman ile olan arayüzde sızıntı akım yolların oluşmasına neden olabilmekte ve bu durum karanlık akımın artmasına yol açmaktadır. Işık altında ise FTO alttaşlı yapının fotoakımı belirgin olmakla birlikte, karanlık akımın yüksek olması nedeniyle ışık/karanlık akım oranının sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, cihazın fotoyanıt üretmesine rağmen sinyal–gürültü performansının istenilen seviyenin altında kalmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'de karanlık akım ile aydınlatma altındaki akım arasındaki farkın belirginleşmesi, her iki dalga boyunda da anlamlı bir fotoakım oluştuğunu ve buna karşılık responsivitenin sıfırdan büyük olduğunu göstermektedir.

Aynı optik güç altında aydınlatma eğrisinin karanlık akımdan daha fazla ayrıldığı gerilim bölgelerinde I_{ph} arttığı için responsivitenin de yükseldiği beklenir. 1300 nm uyarımında elde edilen eğrinin karanlık akımdan daha belirgin ayrılması, bu dalga boyunda foton enerjisinin bant aralığının üzerinde olmasıyla uyumlu şekilde daha güçlü taşıyıcı üretimine işaret etmekte; dolayısıyla responsivitenin 1400 nm'ye kıyasla daha yüksek veya daha kararlı

olabileceğini düşündürmektedir. 1400 nm ölçümleri ise bant kenarına yakın bir uyarımı temsil ettiğinden, responsivite davranışının gerilime daha duyarlı olması olasıdır.



Şekil 4.27. 1300 nm ışık altında fotoakım

Şekil 4.27' de ITO alttaş üzerine geliştirilen NiO/InSbKKN/SnO_2/Ti-Au, tabanlı fotodedektörlerin karanlık ve 1300 nm ışık altındaki I-V karakteristikleri sunulmaktadır. ITO kullanılan fotodedektörde ise karanlık akım seviyesinin FTO alttaşlı yapıya kıyasla daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. ITO'nun daha düzgün yüzey morfolojisi ve NiO ile daha iyi arayüz uyumu ve InSb KKN katmanının 1500 rpm hızla döndürülerek kaplanması, kaçak akım yollarının azalmasına ve karanlık akımın azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

1300 nm aydınlatma altında ölçülen akım, ITO alttaşlı yapıda karanlık duruma kıyasla belirgin şekilde artmakta ve fotoakımı daha net bir şekilde ayrışmaktadır. Bu durum, ITO/NiO arayüzünün taşıyıcı seçiciliğini daha etkin bir şekilde yerine getirdiğini ve foton soğurulması sonucu oluşan taşıyıcıların daha verimli bir biçimde toplandığını

göstermektedir. Sonuç olarak, ITO alttaşlı fotodedektörde aydınlık/karanlık akım oranının daha yüksek olduğu ve fotodedektör performansının daha kararlı olduğu söylenebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, çözelti-bazlı üretim yöntemleri kullanılarak yakın ve orta kızılötesi bölgeye duyarlı InSb koloidal kuantum nokta (KKN) fotodedektörlerinin geliştirilmesi hedeflendi. Bu amaç doğrultusunda hem aktif soğurucu tabakanın hem de taşıyıcı iletiminden sorumlu ara katmanların optimize edildiği çok katmanlı bir dedektör mimarisi oluşturuldu. Özellikle NiO tabanlı delik iletim katmanı ile SnO_2 elektron iletim katmanının üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelendi.

InSb kuantum noktalarının sentezlenmesi ve ardışık saflaştırma adımları başarıyla yürütüldü; parçacık boyutunun optik özellikler üzerinde belirleyici olduğu deneysel bulgularla gösterildi. Yapılan optik karakterizasyonlarda, boyuta bağlı bant aralığı değişimleri ve soğurma kenarındaki değişimler net biçimde gözlenerek kuantum sınırlanma olgusu doğrulandı. Ayrıca elde edilen InSb KKN çözeltisinin film oluşturma davranışı iyileştirildi, böylece aktif tabakada daha düzgün ve hatasız bir morfoloji elde edildi.

Cihaz tasarımında görev alan NiO deşik katmanı, yüksek optik geçirgenliği ve enerji bant hizalanmasının uygunluğu sayesinde delik taşınımını ve taşıyıcı ayrışmasını kolaylaştırıldı. Benzer şekilde SnO_2 elektron katmanı, elektron taşınımına katkı sağlamış ve arayüz kaynaklı kayıpların azalmasına yardımcı olmuştur. Bu iki tabakanın ardışık dizilimi, yapıya p–i–n benzeri bir enerji profili kazandırarak fotoyanıtın etkin şekilde toplanmasını mümkün kılmış ve genel cihaz performansında belirgin bir iyileşme sağlandı.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, çözelti süreçleriyle üretilebilen InSb KKN fotodedektörlerin düşük maliyet, oda sıcaklığında çalışma potansiyeli ve geniş dalga boyu algılama aralığı gibi avantajları sayesinde SWIR/MWIR uygulamaları için güçlü bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile, hem InSb tabanlı koloidal malzemelerin temel optik ve elektronik özelliklerinin anlaşılması hem de bu malzemelerin cihaz yapılarında nasıl daha verimli kullanılabileceğine ilişkin önemli bir altyapı sunuldu. İlerleyen çalışmalarda, yüzey ligandlarının yeniden tasarlanması, ara yüzey kalitesinin artırılması ve büyük alanlı üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle cihaz performansının daha da yükseltilebileceği hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kopytko, M., Rogalski, A. (2022). New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 339, 113511.

2. Saran, R., Curry, R. J. (2016). Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies. *Nature Photonics*, 10(2), 81-92.

3. Rogalski, A., Antoszewski, J., Faraone, L. (2009). Third-generation infrared photodetector arrays. *Journal of applied physics*, 105(9), 85.

4. Özer, S. (2005). *InSb and InAsSb Infrared Photodiodes On Alternative Substrates And InP/InGaAs Quantum Well Infrared Photodetectors: Pixel And Focal Plane Array Performance*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-9.

5. Putley, E. H. (2005). *Optical and Infrared Detectors*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 71-100.

6. Silk, J. (1968). Cosmic black-body radiation and galaxy formation. *Astrophysical Journal*, 15, 459.

7. Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., Wilkinson, D. T. (1965). Cosmic black-body radiation. *Astrophysical Journal*, 142, 414-419

8. Myers, V. I., Allen, W. A. (1968). Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. *Applied optics*, 7(9), 1819-1838.

9. Howarth, D. J., Jones, R. H., Putley, E. H. (1957). The Dependence of the Hall Coefficient of a Mixed Semiconductor upon Magnetic Induction as Exemplified by Indium Antimonide. *Proceedings of the Physical Society*, 70(1), 124.

10. Pisano, R., Durlo, A. (2025). Historical Foundations of Nanotechnology: Emergences, Inventions and Discoveries. *Nanoscience & Nanotechnologies*, 581-629.

11. Kouwenhoven, L., Marcus, C. (1998). Quantum dots. *Physics World*, 11 (6), 35.

12. Uzun, B. (2024). *Development Of Ligand Exchange And Coating Strategies For The Colloidal Quantum Dot Based High Resolution Short-Wave Infrared Imaging Sensors*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-32.

13. Ekimov, A. I., Efros, A. L., Onushchenko, A. A. (1985). Quantum size effect in semiconductor microcrystals. *Solid State Communications*, 56(11), 921-924.

14. Efros, A. L., Efros, A. L. (1982). Interband light absorption in semiconductor sphere. *Semiconductors*, 16, 1209-1214.

15. Brus, L. E. (1983). A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites. *The Journal of chemical physics*, 79(11), 5566-5571.

16. Rossetti, R., Nakahara, S., Brus, L. E. (1983). Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution. *The Journal of Chemical Physics*, 79(2), 1086-1088.

17. Reed, M. A., Randall, J. N., Aggarwal, R. J., Matyi, R. J., Moore, T. M., Wetsel, A. E. (1988). Observation of discrete electronic states in a zero-dimensional semiconductor nanostructure. *Physical Review Letters*, 60(6), 535.

18. Manna, L., Odom, T. W. (2024). Profile of Alexei I. Ekimov, Louis E. Brus, and Moungi G. Bawendi: 2023 Nobel laureates in chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(29), 2410357121.

19. Zhou, W., Coleman, J. J. (2016). Semiconductor quantum dots. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 20(6), 352-360.

20. Bhat, R., Kapon, E., Hwang, D. M., Koza, M. A., Yun, C. P. (1988). Patterned quantum well heterostructures grown by MOCVD on non-planar substrates: Applications to extremely narrow SQW lasers. *Journal of Crystal Growth*, 93(4), 850-856.

21. Petroff, P. M., DenBaars, S. P. (1994). MBE and MOCVD growth and properties of self-assembling quantum dot arrays in III-V semiconductor structures. *Superlattices and microstructures*, 15(1), 15.

22. Murray, C., Norris, D. J., Bawendi, M. G. (1993). Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E=sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites. *Journal of the American Chemical Society*, 115(19), 8706-8715

23. Chatterjee, S., Nemoto, K., Sun, H. T., Shirahata, N. (2024). Rational ligand design for enhanced carrier mobility in self-powered SWIR photodiodes based on colloidal InSb quantum dots. *Nanoscale Horizons*, 9(5), 817-827.

24. Chauhan, K., Pandey, A. K., Bhattacharjee, M. (2025). Quantum dot-based flexible photodetectors: A Review. *ACS Applied Electronic Materials*, 7(9), 3632-3649.

25. Sarma, D. D., Kamat, P. V. (2023). 2023 Nobel Prize in chemistry: a mega recognition for nanosized quantum dots. *ACS Energy Letters*, 8(12), 5149-5151.

26. de Mello Donegá, C., Liljeroth, P., Vanmaekelbergh, D. (2005). Physicochemical evaluation of the hot-injection method, a synthesis route for monodisperse nanocrystals. *Small*, 1(12), 1152-1162.

27. Chu, D. B., Owen, J. S., Peters, B. (2017). Nucleation and growth kinetics from LaMer burst data. *The Journal of Physical Chemistry A*, 121(40), 7511-7517.

28. Tidwell, T. T. (2001). Wilhelm Schlenk: the man behind the flask. *Angewandte Chemie International Edition*, 40(2), 331-337.

29. Saran, R., Curry, R. J. (2016). Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies. *Nature Photonics*, 10(2), 81-92.

30. Cao, F., Liu, L., Li, L. (2023). Short-wave infrared photodetector. *Materials Today*, 62, 327-349.

31. Schneider, H., Liu, C., (2007). Quantum well infrared photodetectors: physics and applications. *Springer Series in Optical Sciences*, 64-72.

32. Hudson, R. D., Hudson, J. W. (1975). The military applications of remote sensing by infrared. *Proceedings of the IEEE*, 63(1), 104-128.

33. Herschel, W. (1800). XIV. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, (90), 284-292.

34. Myers, V. I., Allen, W. A. (1968). Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. *Applied optics*, 7(9), 1819-1838.

35. Katumba, G., Mwakikunga, B. W., Mothibinyane, T. R. (2008). FTIR and Raman spectroscopy of carbon nanoparticles in SiO_2, ZnO and NiO matrices. *Nanoscale Research Letters*, 3(11), 421.

36. Teoh, L. G., Li, K. D. (2012). Synthesis and characterization of NiO nanoparticles by sol-gel method. *Materials transactions*, 53(12), 2135-2140.

37. Akkaya, M., Akman, E. (2021). The synthesis copper-doped nickel oxide and application of hybrid nano-lubricants as a compressor oil. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 134-142.

38. Bonomo, M. (2018). Synthesis and characterization of NiO nanostructures: a review. *Journal of Nanoparticle Research*, 20(8), 222.

39. Alagiri, M., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C. (2012). Synthesis and characterization of NiO nanoparticles by sol–gel method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 23(3), 728-732.

40. Atan, O., Pina, J. M., Parmar, D. H., Xia, P., Zhang, Y., Gulsaran, A., Sargent, E. H. (2023). Control over charge carrier mobility in the hole transport layer enables fast colloidal quantum dot infrared photodetectors. *Nano letters*, 23(10), 4298-4303.

41. Xie, Haixia, (2025). From synthesis to application in infrared photodetectors: A review of InSb colloidal quantum dots. *Laser & Photonics Reviews* 19(4), 2401204.

42. He, M., Xu, Z., Zhang, S. W., Zhang, M., Wu, C., Li, B., Wei, G. (2022). Colloidal InSb quantum dots/organic integrated bulk heterojunction for fast and sensitive near-infrared photodetectors. *Advanced Photonics Research*, 3(4), 2100305.

43. Seo, H., Eun, H. J., Lee, A. Y., Lee, H. K., Kim, J. H., Kim, S. W. (2024). Colloidal InSb quantum Dots for 1500 nm SWIR photodetector with antioxidation of surface. *Advanced Science*, 11(4), 2306439.

44. Pejova, B., do Nascimento, J. A., Talbi, F., Fawcett-Houghton, T. J., Kerrigan, A., Lari, L., Lazarov, V. K. (2025). 2 eV band gap tuning and optical properties of AgIn 5 S 8 quantum dots. *Nanoscale,* 17(30), 17846-17861.

45. Naje, A. N., Norry, A. S., Suhail, A. M. (2013). Preparation and characterization of SnO_2 nanoparticles. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(12), 7068-7072.

46. Akgul, FA, Gumus, C., Ali, OE, Farha, AH, Akgul, G., Ufuktepe, Y., Liu, Z. (2013). SnO_2'nin yapısal ve elektronik özellikleri. *Alaşımlar ve Bileşikler Dergisi* , 579 , 50-56.



Gazili olmak ayrıcalıktır