



**INSE YARIİLETKEN İNCE FİMLERİN CAM VE SİYAH SİLİKON
ÜZERİNE BÜYÜTÜLEREK YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Cansu EMİR

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Cansu EMİR

27/05/2024

INSE YARIİLETKEN İNCE FİMLERİN CAM VE SİYAH SİLİKON ÜZERİNE BÜYÜTÜLEREK YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Cansu EMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2024

ÖZET

Bu tez, cam ve siyah silikon substratlar üzerine InSe ince film yarıiletkenlerinin büyümesini, yapısal ile optik özelliklerini incelemektedir. İnce film yarıiletkenler, fotovoltaik cihazlar, sensörler ve optoelektronik gibi bir dizi gelişmiş teknolojinin önemli bileşenleridir. Bu tez çalışmasında kullanılan siyah silikon substratlar, metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilmiştir. Süre kontrollü yapılan bu üretim sayesinde farklı morfolojilere sahip siyah silikonlar elde edilmiştir. Termal buharlaştırma yöntemi kullanarak, cam ve üretilen siyah silikon substratlar üzerine InSe ince film yarıiletkenleri büyütülmüştür. Cam, şeffaflığı ve biriktirme yöntemi ile uyumluluğu nedeniyle ince film büyümesi için çok yönlü ve düşük maliyetli bir platform sağlar. Yüksek yüzey alanına ve benzersiz nano yapı yüzeyine sahip siyah silikon, ışık tuzağı yeteneklerini ve elektronik özelliklerini geliştirir, bu da onu yüksek verimlilik uygulamaları için cazip bir seçenek haline getirir. Çalışma, büyütülen InSe ince filmlerin yapısal ve optik özelliklerinin kapsamlı bir analizini içerir. Filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektrometre (EDX) ve DEKTAK profilometresi gibi teknikler kullanılmıştır. Optik özelliklerini incelemek için UV-Vis spektroskopisi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, belirli uygulamalar için arzu edilen özellikleri elde etmek adına siyah silikon büyüme sürecini optimize etme konusunda literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Biriktirme koşulları, malzeme özellikleri ve cihaz performansı arasındaki ilişkileri anlayarak, bu araştırma yeni nesil elektronik ve optoelektronik cihazların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, bu tez, cam ve siyah silikon substratlar üzerine ince film yarıiletkenlerinin büyümesi ve karakterizasyonu hakkında değerli bilgiler sunar. Bulgular, çeşitli teknolojik alanlarda yüksek performanslı malzemelerin tasarımında ve optimizasyonunda önemli sonuçlar taşımaktadır.

Bilim Kodu : 93008

Anahtar Kelimeler : İndiyum selenit (InSe) ince filmi, siyah silikon (BSi), 2 boyutlu malzemeler, yapısal karakterizasyon, UV-Vis spektroskopisi, optik parametreler

Sayfa Adedi : 93

Danışman : Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

GROWTH OF INSE THIN FILM SEMICONDUCTOR ON GLASS AND BLACK
SILICON SUBSTRATES INVESTIGATION OF THEIR STRUCTURAL AND
OPTICAL PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Cansu EMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2024

ABSTRACT

This thesis examines the growth and structural and optical properties of InSe thin-film semiconductors on glass and black silicon substrates. Thin-film semiconductors are crucial components of advanced technologies such as photovoltaic devices, sensors, and optoelectronics. The black silicon substrates used in this thesis study were obtained by the metal-assisted chemical etching method. Different morphologies of black silicon were achieved through this controlled production. InSe thin-film semiconductors were grown on glass and produced black silicon substrates using the thermal evaporation method. Glass is a versatile and low-cost platform for thin-film growth due to its transparency and compatibility with the deposition method. Black silicon, with its high surface area and unique nanostructured surface, enhances light-trapping capabilities and electronic properties, making it an attractive option for high-efficiency applications. The study includes a comprehensive analysis of the structural and optical properties of the grown InSe thin films. Techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDX), and DEKTAK profilometry were used to examine the structural properties of the films. UV-Vis spectroscopy measurements were performed to study their optical properties. The findings make significant contributions to the literature on optimizing the black silicon growth process to achieve desired properties for specific applications. By understanding the relationships between deposition conditions, material properties, and device performance, this research contributes to the development of next-generation electronic and optoelectronic devices. In conclusion, this thesis provides valuable insights into the growth and characterization of thin-film semiconductors on glass and black silicon substrates. The findings have important implications for the design and optimization of high-performance materials in various technological fields.

Science Code : 93008

Key Words : Indium selenide (InSe) thin film, black silicon (B-Si), 2D materials, structural characterization, UV-Vis spectroscopy, optical parameters

Page Number : 93

Supervisor : Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında bana rehberlik eden, araştırma sürecimde karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımcı olan öğrencisi olmaktan gurur duyduğum tez danışmanım sayın Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK, bilgi birikimi ve deneyimleriyle tezime değer katmıştır. Kendisinin yönlendirmeleri olmasaydı, bu çalışmayı bu seviyeye getirmem mümkün olmazdı. Tez çalışmam boyunca bana sabır ve anlayış göstermiş, zorlu anlarda bana güç ve motivasyon kaynağı olmuştur, kendisine sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Desteğini, bilgisini ve emeğini benden esirgemediği için kendimi çok şanslı hissediyorum. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojileri Anabilim Dalı ve Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerine, değerli katkılarından ve manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Özellikle, akademik kariyerimde bana yol gösteren ve bilimsel gelişimime katkıda bulunan sayın Prof. Dr. Adem TATAROĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Makbule TERLEMEZOĞLU BİLMİŞ'e, tez sürecinde bilgi ve desteklerini esirgemedikleri için minnettarım. Ayrıca, çalışma arkadaşlarım Atılım Üniversitesi Fizik Grubu öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine, bu süreçte bana verdikleri destek ve gösterdikleri sabır için teşekkür ederim. Onların yardımları olmadan, bu çalışmanın bu seviyede gerçekleşmesi mümkün olmazdı. Sadece akademik hayatımı şekillendirmemde değil, aynı zamanda bu tezin yazım sürecinde de her zaman yanımda olan, ihtiyacım olduğu her an desteğine ve değerli bilgilerine başvurduğum, ailemden biri olarak kabul ettiğim sayın Prof. Dr. Emre COŞKUN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun desteği, bu çalışmanın temel taşlarından biri olmuştur. Hayatım boyunca bana sonsuz emek veren, beni yetiştiren ve her daim yanımda olan değerli aileme, özellikle annem Canan EMİR'e, beni gökyüzünden izlediğine inandığım sevgili babam Yakup EMİR'e ve kıymetli kardeşim Can EMİR'e tüm kalbimle teşekkür ederim. Onların sevgisi, desteği ve inancı olmadan, bugünlere gelmem mümkün olmazdı. Onlara olan minnettarlığım kelimelerle ifade edilemez. Anneme, babama ve kardeşime olan sonsuz sevgim ve şükranımla, bu tezi onlara ithaf ediyorum. Bu süreçte bana destek olan ve katkı sağlayan herkese teşekkür eder, onların desteğinin hayatımda ve kariyerimde ne kadar önemli olduğunu belirtmek isterim. Hepinize sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
RESİMLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK ARKA PLAN	7
2.1. Yarıiletkenlerin Kısa Tarihçesi	7
2.2. İnce Film Teknolojisi ve InSe Yarıiletken İnce Filmler	9
2.2.1. İnce film elde etme teknikleri	11
2.2.2. InSe ince filmlerin kullanım alanları	17
2.3. Yarıiletkenlerin Temeli	19
2.3.1. Yarıiletkenlerin yapısal	25
2.3.2. Yarıiletkenlerin optiksel özellikleri	27
2.4. Siyah Silikon (B-Si) Teknolojisi.....	29
3. DENEYSEL PROSEDÜR VE BULGULAR.....	33
3.1. Siyah Silikon (B-Si) Substratların Üretilmesi.....	33
3.2. InSe İnce Filmlerin Üretim Süreci	38
3.2.1. Malzeme hazırlama.....	39
3.2.2. InSe ince filmlerin büyütülmesi.....	41
3.3. InSe İnce Filmlerin Karakterize Edilmesi.....	42
3.3.1. Yapısal analizler ve bulgular	43

	Sayfa
3.3.2. Optiksel analizler ve bulgular	57
4. SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. InSe malzemesinin kristal yapısı.....	16
Şekil 2.2. Yarıiletken özellik gösteren elementlerin periyodik tablodaki yerleşimi	19
Şekil 2.3. Yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin bant yapıları.....	22
Şekil 2.4. Dolaylı ve doğrudan bant aralıkları.....	23
Şekil 2.5. p-n bağlantı eklemi.....	24
Şekil 3.1. Çalışılan InSe ince filminin XRD deseni	44
Şekil 3.2 Solüsyona 60 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 60 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 60 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.....	47
Şekil 3.3. Solüsyona 30 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 30 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 30 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.....	48
Şekil 3.4 Solüsyona 20 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.....	49
Şekil 3.5. Solüsyona 10 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.....	50
Şekil 3.6. (a) Solüsyona 5 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 5 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 5 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.....	51
Şekil 3.7. 30dk solüsyona maruz bırakılan B-Si 'un EDX spektrumu.....	52
Şekil 3.8. (a)- (b) Cam üzerine büyütülen InSe ince filmlerin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri (c)- (d) Siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM görüntüleri.....	54
Şekil 3.9. (a), (b), (c), (d) Siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerin SEM görüntüleri	55

Şekil	Sayfa
Şekil 3.10. Çalışılan InSe ince filminin EDX spektrumu.	56
Şekil 3.11. (a) İletim, (b) Emilim ve (c) Yansıma spektrumlarının dalga boyuna göre değişimi.....	60
Şekil 3.12. Soğurma katsayısı (α) ile dalga boyunun değişimi.	61
Şekil 3.13. $(\alpha h\nu)^2$ 'ye karşılık foton enerjisi grafiği	62
Şekil 3.14 (a) Sönüm katsayısı ve (b) kırılma indisinin dalga boyuna göre değişimi...	63
Şekil 3.15. (a) Kompleks dielektrik sabitinin (ϵ^*) gerçek bileşeni (ϵ_r) ve (b) hayali bileşeni (ϵ_i) ile (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$)'nın dalga boyuna göre değişimi.....	64
Şekil 3.16. Optik iletkenliğin (σ_{opt}) foton enerjisine göre değişimi.	65
Şekil 3.17 İletim ve $(\alpha h\nu)^2$ 'ye karşılık foton enerjisi grafiği.....	66
Şekil 3.18. Silikon ve siyah silikon emilim grafiği.....	67

RESİMLER LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. P-tipi silikon kullanılarak metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilen siyah silikon.....	30
Resim 3.1. (a) Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilen B-Si üretim aşamaları, (b) Aşındırma yapılan ve aşındırma yapılmayan silikon alttaşlar, (c) B-Si SEM görüntüsü.....	35
Resim 3.2 Kullanılan termal buharlaştırma sisteminin şematiği.....	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
2D	İki Boyutlu
Å	Angstrom
A	Emilim
α	Emilim katsayısı
cm	Santimetre
°C	Santigrat Derece
d	Kalınlık
dk	Dakika
eV	Elektron Volt
E_g	Optik Bant Boşluğu
hν	Foton Enerjisi
k	Sönme Katsayısı
λ	Dalga Boyu
mbar	Milibar
mg	Miligram
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
n	Kırılma İndisi
R	Yansıma
σ_{opt}	Optik İletkenlik
T	İletim

Kısaltmalar	Açıklamalar
AgNO₃	Gümüş Nitrat
ALD	Atomik Katman Birikimi
B-Si	Siyah Silikon

Kısaltmalar**Açıklamalar**

C	Karbon
CBD	Kimyasal Banyo Birikimi
CVD	Kimyasal Buhar Birikimi
EDX	Enerji Dağılımı X ışını Spektroskopisi
Fed	Alan Etkili
GaSe	Gallium Selenide
GaTe	Gallium Telluride
H₂O	Saf Su
H₂O₂	Hidrojen Peroksit
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidroflorik Asit
HNO₃	Nitrik Asit
In	Indium
InSe	Indium Selenid
JCPDS	Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi
LCD	Sıvı Kristal Ekranlar
LPCVD	Düşük Basıncılı Kimyasal Buhar Biriktirme
MBE	Moleküler Işın Epitaksi
MIM	Metal Oksit Yalıtkan
Mo	Molibden
MOSFET	Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör
NH₄OH	Amonyak
O	Oksijen
PECVD	Plazma Geliştirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme
PET	Polietilen Tereftalat
PLD	Darbeli Lazer Biriktirme
Po	Polonyum
PV	Fotovoltaik
PVD	Fiziksel Buhar Birikimi
RF	Radyo Frekans
RIE	Reaktif İyon Aşındırma

Kısaltmalar**Açıklamalar****Se**

Selenid

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

Si

Silikon

SiNW

Silikon Nanotel

SiO₂

Silikon Dioksit

Sol-jel

Çözeltiden jelleşme

S

Kükürt

Te

Telür

TFT

İnce Film Transistör

TMD

Geçiş Mettali Dikalkojenit

UV

Ultraviyole

XRD

X ışını Kırınımı

1. GİRİŞ

Son yıllarda, ince film yarı iletkenlerin geliştirilmesi, fotovoltaik cihazlar, sensörler ve optoelektronik gibi çeşitli ileri teknolojilere yönelik potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir [1]. Bu malzemelerin farklı substratlar, örneğin cam ve siyah silikon üzerinde büyüme ve özelliklerini kontrol etme yeteneği, belirli uygulamalar için elektriksel ve optiksel özellikleri şekillendirme ve kontrol etme fırsatı sunmaktadır [2]. Ayrıca, ince film yarı iletkenler, azaltılmış malzeme kullanımı, geniş alan biriktirme potansiyeli ve esnek cihazlara entegrasyon olasılığı gibi avantajlar sunar [3].

Cam ve siyah silikon, ince film biriktirme için farklı avantajlar sunan iki substrat malzemesidir. Cam substrat yaygın bir kullanıma sahiptir fakat siyah silikon (B-Si) son zamanlarda gelişen teknoloji ile substrat olarak kullanılmaya başlanmıştır ve bu kullanım ile birlikte nanoteknoloji alanında birçok avantaj sağlamıştır [4]. Cam, çeşitli biriktirme yöntemleri ve sonrasındaki işlemlerle uyumlu olan, yaygın olarak kullanılan, şeffaf ve düşük maliyetli bir substrattır [5]. Diğer yandan, benzersiz nano yapı yüzeyi ve yüksek yüzey alanına sahip siyah silikon, mükemmel ışık tuzağı yetenekleri ve geliştirilmiş elektronik özellikler sunar [6]. Bu da siyah silikonu yüksek verimlilikte fotovoltaik cihazlar ve sensör uygulamaları için özellikle uygun kılmaktadır.

Artan küresel enerji talebi, araştırmacıları geleneksel seçeneklerin ötesinde alternatif enerji kaynaklarını keşfetmeye yöneltmiştir. Geleneksel yöntemlerin oluşturduğu kirlilikten kaynaklanan endişeler, doğal gaz, petrol ve nükleer reaktörler gibi enerji kaynaklarının daha temiz alternatif arayışlarını yoğunlaştırmıştır [7]. Son on yılda, yenilenebilir enerji formlarına özel bir önem verilmiş olup, güneş enerjisi uygun fiyatlılığı, temizliği ve neredeyse sınırsız arzı nedeniyle gelecek vaat eden bir aday olarak ortaya çıkmıştır [8].

Güneş enerjisi, fototermal, fotokimyasal, fotoelektrokimyasal, fotobiyokimyasal ve fotovoltaik gibi yöntemlerle çeşitli formlara dönüştürülebilmektedir [9]. Bunlar arasında fotovoltaik (PV) ve güneş pili cihazları, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmenin en temiz ve verimli yolu olarak öne çıkmaktadır. Bir güneş pili, yarı iletken içindeki ışık emilimi ile üretilen elektronları ve deşikleri (hole) ayırabilen bir yarı iletken malzeme içinde potansiyel bir bariyer içerir [10].

Atomların, moleküllerin veya iyonların yoğunlaşması sonucu oluşan iki boyutlu malzemeler olan ince filmler, çeşitli elektronik ve optik cihazlarda çok önemli bir rol oynamaktadır [11]. Fotovoltaik hücreler iki ana biçimde bulunur: geniş alanlı ve ince film güneş pilleri. İnce film fotovoltaik cihazlar, daha küçük miktarlarda malzeme kullanması ve uygun maliyetli işleme olanağı sunması nedeniyle emsallerine göre daha büyük avantajlar sunar [12].

Son yıllarda, III–VI ailesinin katmanlı yarı iletkenleri, özellikle InSe, cihaz uygulamalarına uygun benzersiz özelliklerinden dolayı hem ince film hem de tek kristal formlarda büyük ilgi görmektedir [13]. InSe katmanlı yarı iletkenler, her pakette Van der Waals tipi ara katman (Se-Se) bağı ve katmanlar içinde büyük ölçüde kovalent bağ bulunan iki In ve iki Se alt katmanından oluşur [14]. Bu bağlanma düzenlemesi, yüzeyde sarkan bağların yokluğuna neden olur ve metal-yarı iletken veya p-n hetero eklemlerin üretilmesi için ideal bir koşul yaratır. Sonuç olarak, bu tür katmanlı malzemeler arasındaki arayüzler, nispeten yüksek kafes uyumsuzluklarında bile gerilimsiz kalır.

InSe katmanlı yarı iletkenlerin keşfi, fotovoltaikte dikkate değer bir gelişmeyi temsil etmekte, ince film teknolojisinde potansiyel ilerlemeler sunmakta ve sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarından yararlanmaya yönelik devam eden çabalara katkıda bulunmaktadır [15].

Geçiş sonrası metal kalkojenitlerden (TMD) biri olan indiyum selenit (InSe), toplu formda yaklaşık 1,25 eV ile tek katmanlı formda 2,8 eV arasında değişen büyük bir optik bant aralığına sahiptir [16]. Üstelik InSe, iki boyutlu katmanlı bir yapıdır yani geçiş metali dikalkojenit, grafen ve altıgen bor nitrür gibi malzemelere alternatif olabilir. Bu özelliği ile InSe aynı zamanda gelecek vaat eden iki boyutlu (2D) bir yarı iletkendir [17,18]. Bu nedenle, bu yarı iletkenler, nanomalzemeler ve nano aygıtlar alanında üstün elektriksel ve optoelektronik özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir [19]. InSe, GaSe, GaS, GaTe vb. Grup III–VI katmanlı yarı iletkenler 2 boyutlu malzemeler arasındadır. Grafen mükemmel bir 2 boyutlu katmanlı yapıdır. 2D malzemeler arasında geçiş metali dikalkojenitler (TMD'ler), fotodiyotlar, transistörler, fotodetektörler ve sensörler gibi çeşitli cihazlar için büyük önem taşır [20]. Dikkate değer bir TMD olan indiyum selenit (InSe), elektriksel ve optiksel özellikleri açısından geniş bir yelpazeye sahip, umut verici bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır [21]. Pratik uygulamalarda InSe, en yeni teknolojilerde

önemli bir rol oynamaktadır. Buna ek olarak, InSe'nin olağanüstü yarı iletken özellikleri, onu yeni nesil elektronik cihazlar için ideal bir aday haline getirmektedir. Üreticiler, ultra ince, yüksek performanslı transistörler ve fotodetektörler oluşturmak için atomik incelikte InSe katmanları kullanmaktadır [21]. Bu cihazlar kompakt olmalarının yanı sıra, enerji tasarrufludurlar [22]. Üstelik InSe'nin bant aralığı ayarlanabilirliği ve güçlü ışık-madde etkileşimi, onu fotonik için benzersiz bir malzeme haline getirmektedir. Araştırmacılar, modülatörler, ışık yayan diyotlar ve optik sensörler gibi kompakt ve verimli fotonik cihazlar geliştirmek için InSe'nin benzersiz özelliklerinden yararlandılar [23]. InSe'nin bu uygulamalardaki rolü, yüksek hızlı veri iletişimi sağlamak ve kuantum bilgi işlemede çığır açıcı gelişmelere yol açmaktır [24]. InSe tabanlı sensörler çevresel izleme, sağlık hizmetleri ve güvenlik alanlarında kullanılmakta ve bu alanlarda devrim yaratan özellikler sunmaktadır. InSe çevredeki değişikliklere karşı yüksek duyarlılığı nedeniyle, ultra duyarlı gaz sensörlerinin, biyosensörlerin ve kızılötesi dedektörlerin geliştirilmesine olanak sağlar [25]. Örneğin InSe tabanlı sensörler tehlikeli gazları tespit etmek, sağlık parametrelerini izlemek ve gece görüş teknolojisini geliştirmek için kullanılabilir. Bunlara ek olarak InSe'nin geniş yüzey alanı ve mükemmel elektrik iletkenliği onu enerji depolama uygulamaları için umut verici bir malzeme haline getirmektedir. Araştırmacılar, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemleri için yüksek kapasiteli, uzun ömürlü enerji depolama çözümleri geliştirmeyi amaçlayarak InSe'yi süper kapasitörler ve lityum iyon pillerde kullanmayı hedeflemektedirler ve bu konudaki çalışmalarını yoğun bir şekilde sürdürmektedirler [7]. Sonuç olarak InSe, çeşitli endüstrileri dikkate değer bir şekilde yeniden şekillendiren TMD'den biridir. InSe gibi TMD'lere yönelik araştırmalar ilerlemeye devam ettikçe, malzeme bilimi, elektronik, fotonik ve ötesindeki alanlarda daha da çığır açıcı uygulamalar öngörülebilir [26].

InSe yüksek yük taşıyıcı hareketliliği (oda sıcaklığında $103 \text{ cm}^2 / (\text{V s})$), görünür ışık bölgesini kaplayan bant aralığı [27], hafif elektron etkin kütlesi ve büyük mekanik esneklik gibi üstün özellikleri nedeniyle nanoelektronik ve optoelektronikte çeşitli uygulamalara sahiptir. InSe, doğrudan ve dolaylı optik geçiş sergiler. Bu malzemenin optik emisyon üzerinde önemli bir etkisi vardır [28]. InSe, altıgen bir atomik kafes şeklinde düzenlenmiş Se-In-In-Se katmanlarına kovalent olarak bağlanmıştır. Se-Se atomları arasındaki Van der Waals bağlanma kuvvetleri InSe kristalini bir arada tutar [29].

InSe, sensörler, fotodedektörler, fed-etkili transistörler ve güneş enerjisi dönüştürme cihazları dahil olmak üzere elektronik ve optoelektronik cihazların çeşitli uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahiptir [30].

InSe ince filmleri, moleküler ışın epitaksisi, darbeli lazer biriktirme, RF püskürtme, termal buharlaştırma, elektrokaplama, sol-jel, vakum buharlaştırma ve e-ışın tekniği gibi çeşitli yöntemler kullanılarak üretilir [31]. Bu tez çalışmasında kullanılan InSe ince filmler termal buharlaştırma yöntemi ile üretilmiştir.

İnce film substratları, modern teknolojinin çeşitli alanlarında, örneğin elektronik, fotonik ve enerji depolama gibi uygulamalarda temel bir rol oynar. Silikon, cam, kuvars, safir ve polimer gibi substratlar, farklı amaçlar için uygun hale getiren belirgin özelliklere sahiptirler [32]. Örneğin, silikon substratlar, mükemmel termal iletkenlikleri ve entegre devrelerle uyumlulukları nedeniyle yarı iletken endüstrisinin temel taşı oluşturur. Cam substratlar ise yüzeylerinin düzgünlüğü ve şeffaflığı nedeniyle ekranlar ve güneş pilleri gibi optik ve şeffaf uygulamalar için genellikle tercih edilir. Kuvars substratlar, yüksek termal kararlılık ve ultraviyole (UV) aralığında şeffaflık sunarak fotonik ve yüksek frekanslı elektronik için idealdirler [33]. Sertliği ve termal ve mekanik strese dayanıklılığı ile bilinen safir, genellikle yüksek frekanslı elektronik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılır. Hafif ve esnek doğaları nedeniyle, polimerler gibi PET ve poliamid, esnek ve giyilebilir elektronik için uygundur.

İnce film substratının seçimi önemlidir, çünkü ince filmlerin üzerine kaplandığı yüzeyin düzgün, stabil ve kusursuz olması, aynı zamanda çeşitli işlem koşullarına karşı kimyasal olarak hareketsiz ve termal olarak stabil olması gerekmektedir. Bu substratlar, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve atomik tabaka biriktirme (ALD) gibi çeşitli kaplama teknikleri için temel oluşturur ve her biri film özellikleri üzerinde hassas kontrol sağlar. Doğru substrat ve kaplama yönteminin seçilmesiyle, araştırmacılar ve mühendisler ince film performansını optimize edebilirler ve en ileri düzey cihazların geliştirilmesinde yenilikçi ilerlemeler sağlayabilirler.

İnce film substratları, elektronikten enerjiyle ilgili uygulamalara kadar çeşitli teknolojik alanlarda belirleyici bir rol oynamaktadır. Cam substratlar, şeffaflıkları ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle, ekranlar ve fotovoltaik cihazlar gibi optik netlik gerektiren

alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Silikon substratlar, olağanüstü elektriksel özellikleri ve termal iletkenlikleri ile yarı iletken endüstrisinin temelini oluşturarak entegre devrelerin ve elektronik cihazların üretimini kolaylaştırır. Ayrıca, siyah Si substratlar, geliştirilmiş ışık emilimi için optimize edilmiş nano yapıları yüzeyleriyle dikkat çeker ve güneş enerjisi toplama ve optoelektronik cihazların verimliliğini artırmak için umut vadeder [34]. Bu substratların benzersiz özelliklerinden faydalanarak, mühendisler ve araştırmacılar yenilik sınırlarını zorlayabilir, acil toplumsal ihtiyaçları ele alabilir ve ileri teknolojilerle sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerleyişte hız kazanabilirler.

Bu tez, cam ve siyah silikon (B-Si) substratlar üzerinde ince film yarı iletkenlerin büyümesini, yapısal ve optik özelliklerinin incelemesini amaçlamaktadır. Termal buharlaştırma yöntemi, malzeme bileşimleri ve büyüme parametrelerini araştırarak, bu ince filmlerin kalitesini ve performansını optimize etmek hedeflenmektedir. Bu çalışma, büyüme koşulları, malzeme özellikleri ve pratik uygulamalardaki performans arasındaki ilişkiler hakkında literatüre önemli bilgiler sunacaktır. Ayrıntılı yapısal ve optik karakterizasyonlar aracılığıyla, bu ince film yarı iletkenlerin yeni nesil elektronik ve optoelektronik cihazlarda kullanımı için potansiyeli değerlendirilecektir.

Cam ve siyah silikon üzerine termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak biriktirilen InSe ince filminin optik ve yapısal özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Yapısal özellikler, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Öte yandan, incelenen malzemenin optik özelliklerini analiz etmek amacıyla optik sabitlerini belirlemek için ultraviyole görünürlük (UV-vis) spektroskopisi kullanılmıştır.

2. TEORİK ARKA PLAN

Çeşitli substratlar üzerine ince film yarı iletken malzemelerin büyümesi, elektronik, fotonik ve optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamaları nedeniyle ilgi görmektedir. Özellikle, İndiyum Selenit (InSe), bu tür uygulamalar için umut vadeden benzersiz yapısal ve optik özellikler sunan bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, InSe ince filmlerinin iki farklı substrat üzerinde büyümesini incelemeye odaklanmaktadır; bu substratlar cam ve siyah silikondur (B-Si). Cam substratlar, optik ve şeffaf uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Siyah silikon ise nanoyapıya sahip yüzeyi ile ışık emilimini artırmak ve cihaz performansını iyileştirmek için önemli fırsatlar sunmaktadır. Siyah silikonun hazırlanması, istenen nanoyapıların oluşturulması için metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilirken, InSe ince filmleri termal buharlaştırma tekniği kullanılarak hazırlanmaktadır. Hem cam hem de siyah silikon substratlar üzerinde büyütülen InSe ince filmlerin yapısal ve optik özelliklerinin incelenmesiyle, bu çalışma, bu substratların çeşitli yarı iletken uygulamalar için uygunluğuna ilişkin bilgi sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, araştırma, substrat özelliklerinin InSe ince filmlerin büyümesi ve karakteristikleri üzerindeki etkisini inceleyerek, ince film yarı iletken teknolojisinin ve pratik uygulamalarının ilerlemesine katkıda bulunmaktadır.

Bu bölümde yarı iletkenlerin temeli hakkında kısa bilgi verilmiştir, yapısal ve optik özellikleri anlatılmış ve deneylerin arkasındaki teori tartışılmıştır. İnce film teknolojisi ve bu teknolojinin kullanım alanları incelenmiştir. Ayrıca InSe ince filmleri tanıtılmıştır. Son yıllarda popüler olarak çalışılan ve birçok alanda yeniliklere kapı açan siyah silikon (B-Si) teknolojisi derinlemesine incelenmiştir.

2.1. Yarıiletkenlerin Kısa Tarihçesi

Yarı iletken teknolojisinin evrimi, 20. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır; bu, modern elektroniği devrimlerinden sayısız teknolojik yeniliğin yolunu açan bir alanın başlangıcını işaret etmektedir [35]. Yarı iletken etkisinin keşfiyle başlayıp diyotlar ve transistörler gibi ilk yarı iletken cihazların geliştirilmesiyle devam eden bu yolculuk, yıllar içinde dikkate değer ilerlemeler görmüştür. Yarı iletken biliminin ilkel başlangıçlarından bugünün

karmaşık üretim süreçlerine kadar olan bu yolculuk, sürekli bir küçültme, performans artışı ve işlevsellik genişlemesi arayışını yansıtmaktadır.

Yarıiletkenler modern elektronik teknolojinin temelini oluşturduğundan, yarıiletkenlerin temelleri elektronik cihazların çalışmasını anlamak için gereklidir.

Yarıiletken teknolojisinin kullanımı 20. yüzyılın ortasında başlamıştır. Önemli dönüm noktalarından biri, 1947 yılında Bell Laboratuvarlarında John Bardeen, Walter Brattain ve William Shockley tarafından transistörün icat edilmesidir [36]. Yarı iletken bir cihaz olan transistör, elektronik devrelerde vakum tüplerinin yerini alarak modern elektroniğin gelişiminin temelini atmıştır [37].

Transistörlerin icadının ardından yarıiletken endüstrisi hızla gelişmiştir. 1960'ların başında entegre devreler kullanılmaya başlanmıştır. Jack Kilby ve Robert Noyce, bağımsız olarak, birden fazla elektronik bileşenin minyatürleşmesine ve tek bir yarıiletken alt tabaka üzerine üretilmesine olanak sağlayan entegre devre kavramını geliştirmişlerdir [38].

20. yüzyılın ortasında transistörlerin ve entegre devrelerin ortaya çıkışı, yarı iletken teknolojisinin çeşitli alanlarda kullanılmasında önemli bir dönüm noktası olmuştur [39]. Bu gelişmeler, bilgisayarların, iletişim cihazlarının ve birçok tüketici elektroniği ürününün temelini oluşturmuştur. Yarı iletken teknolojisi, Moore Yasası olarak bilinen ve her iki yılda bir entegre devrelerdeki transistör sayısının iki katına çıkmasını öngören prensip doğrultusunda hızlı bir şekilde ilerlemiştir [39]. Moore Yasası, Intel'in kurucularından Gordon Moore tarafından 1965 yılında öne sürülen bir gözlemdir. Bu yasa, entegre devrelerdeki transistör sayısının yaklaşık her iki yılda bir iki katına çıkacağını ve bunun sonucunda bilgisayarların işlem gücünün de aynı oranda artacağını öngörür. Başlangıçta 10 yıllık bir dönem için öne sürülen bu gözlem, yarı iletken endüstrisinin gelişimi ve teknolojik ilerlemeler sayesinde uzun yıllar boyunca geçerliliğini korumuştur. Bu süreç, elektronik cihazların performansında sürekli bir artış ve maliyetlerinde düşüş sağlamıştır.

Sonuç olarak, yarıiletken teknolojisinin tarihçesi, elektronik cihazların performansını ve işlevselliğini sürekli olarak artıran önemli dönüm noktaları ve inovasyonlarla doludur. Bu teknoloji, günümüz modern dünyasında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır ve gelecekte de birçok yeni uygulama ve gelişme ile bu rolünü sürdürecektir.

2.2. İnce Film Teknolojisi ve InSe Yarıiletken İnce Filmler

İnce film teknolojisinin kökenleri, sabun köpükleri ve su üzerindeki yağ tabakaları gibi doğal olayların gözlemlenmesine dayanır ve 17. ile 19. yüzyıllarda Isaac Newton ve Thomas Young gibi erken bilim insanlarını etkilemiştir [40]. Bu gözlemler, ince malzeme tabakalarının davranışlarını ve ışıkla etkileşimlerini anlamak için temel oluşturmuştur.

İnce filmlerin pratik uygulamaları, 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında ince tabakaların altına çökertme gibi deneysel tekniklerin geliştirilmesiyle başlamıştır [41]. Bu dönem, malzemelerin yüzeylere kontrollü bir şekilde çöktürülmesini sağlayan termal buharlaşma ve püskürtme gibi vakum çökertme yöntemlerinin keşfedilmesine sahne olmuştur.

İkinci Dünya Savaşı'nın gereksinimleri, özellikle lensler için optik kaplamalar ve radar sistemleri gibi askeri uygulamalar için ince film teknolojisinde önemli ilerlemeleri beraberinde getirmiştir [42]. Savaştan sonra, bu gelişmeler sivil kullanım için uyarlanmış ve çöktürme tekniklerinde daha fazla yeni uygulamada kullanılmasına olanak sağlamıştır.

1950'ler ve 1960'lar, yarı iletken malzemelerin, özellikle silikonun keşfi ve gelişimi ile ince film teknolojisi için yeni bir dönemin başlangıcı olmuştur [43]. İnce filmler, transistörler ve entegre devreler gibi yarı iletken cihazların üretiminde temel hale gelmiştir. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve moleküler ışın epitaksisi (MBE) gibi teknikler, yarı iletken malzemelerin hassas ince filmlerinin çöktürülmesi için geliştirilmiştir [44].

Paralel olarak, ince film teknolojisi optik ve fotonik alanlarda yaygın uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Lensler, aynalar ve filtreler için optik kaplamalar önem kazanırken, telekomünikasyon, fotoğrafçılık ve astronomi gibi endüstriler için de kullanılmaya başlanmıştır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi teknikler, belirli optik özelliklere sahip ince filmlerin çöktürülmesi için kullanılmaya başlamıştır [45].

1970'lerin enerji krizi, alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmış ve bu da ince film güneş pillerinin geliştirilmesine yol açmıştır [46]. Bu güneş pilleri, güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için ince yarı iletken malzeme tabakalarını kullanmaktadır. İnce film güneş

pilleri, esneklik, hafiflik ve düşük maliyetli üretim potansiyeli gibi avantajlar sunmaktadır ve bu nedenle gözde bir alternatif enerji kaynağıdır [47].

Son yıllarda, ince film teknolojisi esnek elektronikler, ekran teknolojisi (örneğin, OLED ekranlar) ve tıbbi cihazlar gibi yeni uygulamalarda gelişmekte olan bir alandır. Araştırmacılar, ince filmlerin yeteneklerini genişletmek için yeni malzemeler ve üretim teknikleri üzerinde çalışmaktadırlar ve bu da çeşitli endüstrilerde inovasyonu teşvik etmektedir [48].

Yüzyıllar boyunca yapılan bilimsel araştırmalar ve teknolojik ilerlemelerle, ince film teknolojisi, doğal merakın ötesine geçerek modern teknolojinin temel bir unsuru haline gelmiş ve bugün ve gelecekte dünyamızı şekillendiren ilerlemeleri mümkün kılmıştır [49].

İnce film teknolojisi, çeşitli uygulamalar için farklı malzemelerin amaca uygun farklı alt tabakalar üzerine ince bir katman olarak biriktirilmesi ve sonrasında kullanılması anlamına gelir. Çoğunlukla nanometreden mikrometreye kadar değişen kalınlıktaki bu ince filmler, benzersiz yapısal, optiksel ve elektriksel özellikler sergiler. Bu özellikleri sayesinde geniş alanlarda kullanıma sahiptir [50]. Kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Mikroelektronik: İnce filmler, entegre devrelerin, transistörlerin ve diğer yarı iletken cihazların üretiminde çok önemli bir role sahiptir. Yalıtım katmanları, iletken yollar ve dielektrik malzemeler olarak kullanılmaktadır [51].

Optik: İnce filmler, ışığın yansımalarını, iletimini ve emilimini kontrol etmek için mercek ve ayna kaplamalarında kullanılır. Gözlükler ve kamera lensleri üzerindeki yansıma önleyici kaplamalar olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [52].

Fotovoltaik: Güneş pillerinde güneş ışığını absorbe etmek ve elektriğe dönüştürmek için ince filmler kullanılır. Örnekler arasında amorf silikon ve kadmiyum tellür ince film güneş pilleri bulunur [53].

Ekranlar: İnce filmler, sıvı kristal ekranlar (LCD) ve organik ışık yayan diyot ekranlar (OLED) dahil olmak üzere ince film transistörlü ekranların (TFT) üretiminde rol oynamaktadır [54].

Sensörler: İnce filmlerin özelliklerinin dış uyaranlara tepki olarak değiştiği gaz sensörleri, biyosensörler ve nem sensörleri gibi sensör teknolojilerinde ince filmler kullanılmaktadır [55].

İnce filmler, metaller, oksitler, nitrürler, polimerler ve organik bileşikler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerden büyütülebilir. Malzeme seçimi, istenen özelliklere ve uygulamaya göre uyarlanır [56]. İnce filmlerin özellikleri, biriktirme parametrelerinin ayarlanmasıyla hassas bir şekilde kontrol edilir. Başlıca büyütme teknikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

2.2.1. İnce film elde etme teknikleri

Fiziksel Buhar Birikimi (PVD)

Buharlaştırma: Bu işlemde, bir malzeme buharlaştırma sıcaklığına ulaşıncaya kadar ısıtılır ve buharlaşan atomlar daha sonra bir alt tabaka üzerinde biriktirilir. Buharlaştırma tekniği, yüksek buhar basıncına sahip malzemeler için uygundur [57].

Püskürtme: Püskürtme, hedef malzemenin vakumda yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilmesini içerir. Hedeften çıkarılan atomlar daha sonra bir substrat üzerine biriktirilir. Metaller ve dielektrik malzemeler için yaygın olarak kullanılır [58].

Kimyasal Buhar Birikimi (CVD)

Düşük Basıncılı CVD (LPCVD): Düşük Basıncılı Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD), yarı iletken endüstrisinde, substrat üzerine ince filmlerin yüksek hassasiyet ve kontrol ile titizlikle biriktirilmesini sağlayan kilit bir tekniktir [59]. Bir düşük basınç odasına gazlı öncüllerin tanıtılması prensibine dayanan LPCVD, substratın yüzeyinde reaksiyonları başlatarak katı bir film oluşturur. Bu süreç genellikle birkaç yüz ila bin derece Selsiyus arasında değişen yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. LPCVD, yalıtım katmanları, kapı elektrotları ve ince film transistörler gibi çeşitli uygulamalar için silikon dioksit, silikon nitrit, polisilikon ve amorf silikon gibi malzemelerin biriktirilmesini sağlayarak yarı iletken üretiminde geniş kullanım bulur [60]. Film kalınlığı, homojenlik ve bileşim üzerinde yüksek kontrol sağlama yeteneğiyle bilinen LPCVD, gelişmiş yarı iletken cihazlar için

vazgeçilmez bir yöntemdir ve elektronik, optoelektronik ve yenilenebilir enerji sektörlerinde yeniliklerin yolunu açmıştır [61].

Plazmayla Geliştirilmiş CVD (PECVD): Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD), yarı iletken endüstrisinde substrat üzerine çeşitli malzemelerin ince filmlerinin olağanüstü hassasiyet ve kontrol ile biriktirilmesi için yaygın olarak kullanılan kilit bir tekniktir [62]. Gazlı öncüllerin vakum odasına tanıtılması prensibine dayanan PECVD, substratın yüzeyinde kimyasal reaksiyonları başlatan bir plazma deşarjı oluşturur [63]. Diğer biriktirme yöntemlerine kıyasla göreceli olarak düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu süreç, silikon dioksit, silikon nitrit ve amorf silikon gibi malzemelerin biriktirilmesini sağlar. PECVD, entegre devreler, ince film transistörler ve fotovoltaik cihazların üretiminde geniş kullanım bulur; önemli özelliklere sahip yüksek kaliteli filmlerin üretimini mümkün kılar. Karmaşık substrat topografyaları üzerinde düzgün ve homojen filmlerin biriktirilmesindeki yeteneği ile tanınan PECVD, ileri düzey yarı iletken teknolojilerinin gelişiminde önemli bir yöntemdir ve çeşitli endüstrilerde inovasyonu teşvik etmektedir [64].

Atomik Katman Birikimi (ALD)

Atomik Katman Birikimi (ALD), yarı iletken endüstrisinde önemli yer tutan bir tekniktir ve ince filmlerin substrat üzerine atomik hassasiyetle biriktirilmesini sağlar. Bu teknik, gaz halindeki ön maddelerin altın bir atmosferde sırayla substrat üzerine biriktirilmesi prensibine dayanır [65]. Her bir adım, yüzeyde atomik düzeyde bir reaksiyonla sonuçlanır ve sonuç olarak, istenen malzemeyle kaplanmış bir atomik katman oluşur. ALD'nin büyük bir avantajı, son derece ince ve homojen filmlerin üretilmesine olanak tanınmasıdır, bu da yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda idealdir [66]. Bu teknik, yarı iletkenlerdeki geçiş metal oksit yalıtkan (MIM) yapısı gibi karmaşık yapıların üretiminde ve nanoteknolojide önemli bir rol oynamaktadır. ALD'nin ürettiği yüksek kaliteli, kontrollü ince filmler, yarı iletken cihazların performansını ve dayanıklılığını artırmak için kullanılmaktadır ve gelecekteki nanoteknoloji ve yarı iletken endüstrilerinde daha fazla yenilik için bir temel oluşturmaktadır [67].

Moleküler Işın Epitaksi (MBE)

Moleküler Işın Epitaksi (MBE), yarı iletken endüstrisinde, malzemelerin kristalin tabakalarının substrat üzerine moleküler düzeyde hassas bir şekilde biriktirilmesine izin veren bir tekniktir [68]. Süreç, moleküler veya atomik ışınların kontrollü olarak ısıtılmış bir substrat üzerine yüksek vakum ortamında çökertilmesine dayanır. Bu, atomik ölçekte hassas bir şekilde ultra-ince filmlerin oluşmasını sağlar. MBE, yarı iletken malzemelerin büyütülmesi üzerinde benzersiz bir kontrol sunar ve karmaşık hetero yapıların oluşturulmasını sağlar [69]. Kuantum noktaları ve kuantum kuyuları gibi yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılır. MBE'nin atomik hassasiyetle yüksek kaliteli epitaksi tabakaları üretme yeteneği, yarı iletken fiziği ve cihaz mühendisliği alanlarında araştırma ve geliştirmede vazgeçilmezdir ve gelecek nesil yarı iletken teknolojilerinde inovasyonu sürdürür [70].

Döndürerek kaplama

Döndürerek kaplama, ince filmlerin substrat üzerine hızlı ve homojen bir şekilde uygulanmasını sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, sıvı bir çözeltinin veya dispersiyonun bir substrat üzerine damlatılmasını ve ardından yüksek hızda döndürülmesini içerir [71]. Dönme işlemi, yüzey gerilimi ve santrifüj kuvvetlerin etkisiyle sıvının yüzeyin üzerine eşit bir şekilde yayılmasını sağlar, böylece ince bir film oluşturur. Döndürülerek kaplama, polimerler, organik elektronik malzemeleri ve inorganik malzemeler gibi çeşitli malzemelerin uygulanmasında yaygın olarak kullanılır [72]. Özellikle yarı iletken endüstrisinde, spin kaplama, fotolitografi ve diğer mikrofabrikasyon süreçlerine entegre edilerek nanoölçekteki yapıların üretilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Esneklik, hız ve basitlik gibi avantajları nedeniyle döndürerek kaplama, laboratuvar araştırmalarından endüstriyel üretime kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Daldırarak kaplama

Daldırarak kaplama, ince filmlerin substrat üzerine homojen bir şekilde biriktirilmesi için kullanılan çok yönlü bir tekniktir. Bu yöntemde, substrat dikey olarak bir sıvı çözeltime veya dispersiyona batırılır ve kaplama malzemesinin ince bir tabakası oluşur. Substrat çözeltime çıkarıldığında, kılcal kuvvetler ve çözücünün buharlaşması, homojen bir film

oluşturur. Daldırma kaplama, basitlik, düşük maliyet ve karmaşık şekillerin ve geniş alanların kaplanabilmesi gibi avantajlar sunar [73]. Elektronik, optik ve biyomedikal mühendisliği gibi çeşitli endüstrilerde koruyucu kaplamalar, fonksiyonel katmanlar ve yüzey modifikasyonları için kullanılan bir tekniktir. Ayrıca, daldırma kaplamanın mevcut üretim süreçlerine kolayca entegre edilebilmesi hem araştırma hem de endüstriyel uygulamalar için yaygın olarak benimsenen bir teknik olmasını sağlar [74].

Kimyasal Banyo Birikimi (CBD)

Kimyasal Banyo Biriktirme (CBD), özellikle yarı iletken malzemelerin ve fotovoltaik cihazların üretiminde kullanılan çok yönlü bir ince film biriktirme tekniğidir. CBD'de, substrat istenen malzemenin öncüllerini içeren bir kimyasal banyo çözeltisine batırılır [75]. Sıcaklık ve pH gibi kontrol edilen koşullar altında, öncüler substrat yüzeyinde reaksiyona girer ve ince bir film biriktirilir. CBD, basitlik, düşük maliyet ve büyük alanlı ve karmaşık şekilli substratlar üzerine homojen filmler biriktirme yeteneği de dahil olmak üzere birçok avantaj sunar. Metal oksitler, sülfürler ve kalkojenidler gibi malzemelerin biriktirilmesinde yaygın olarak kullanılır ve güneş hücreleri, sensörler ve elektrokromik cihazlar gibi uygulamalarda kullanılır. CBD'nin ölçeklenebilirliği ve geniş bir substrat yelpazesi ile uyumluluğu, ince film biriktirme alanında hem araştırma hem de endüstriyel uygulamalar için umut vadeden bir tekniktir [76].

Elektrokaplama

Elektrokaplama, bir iletken alt tabakaya elektrik akımı uygulanarak bir metal kaplamanın biriktirildiği yaygın bir işlemdir. Bu süreçte, kaplanacak alt tabaka katot olarak hizmet ederken, kaplama malzemesinden yapılmış bir anot elektrolit çözeltisine batırılır [77]. Elektrik akımı uygulandığında, elektrolit içindeki metal iyonları katotta indirgenir ve istenen metalin ince, yapışkan bir tabakası alt tabakanın yüzeyinde oluşur. Elektrokaplama, birikim tabakasının kalınlığını ve bileşimini kontrol etme yeteneği ile, alt tabaka özelliklerini, korozyon direncini, iletkenliği ve estetiği artırma gibi avantajlar sunar. Otomotiv, elektronik, mücevher ve havacılık gibi çeşitli endüstrilerde dekoratif kaplamalar, koruyucu kaplamalar ve fonksiyonel yüzeylerin üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır [78]. Elektrokaplama, modern imalatta yüksek kaliteli ürünlerin üretilmesini sağlayan temel bir işlemdir ve performansı ile dayanıklılığı artırır.

Darbeli Lazer Biriktirme (PLD)

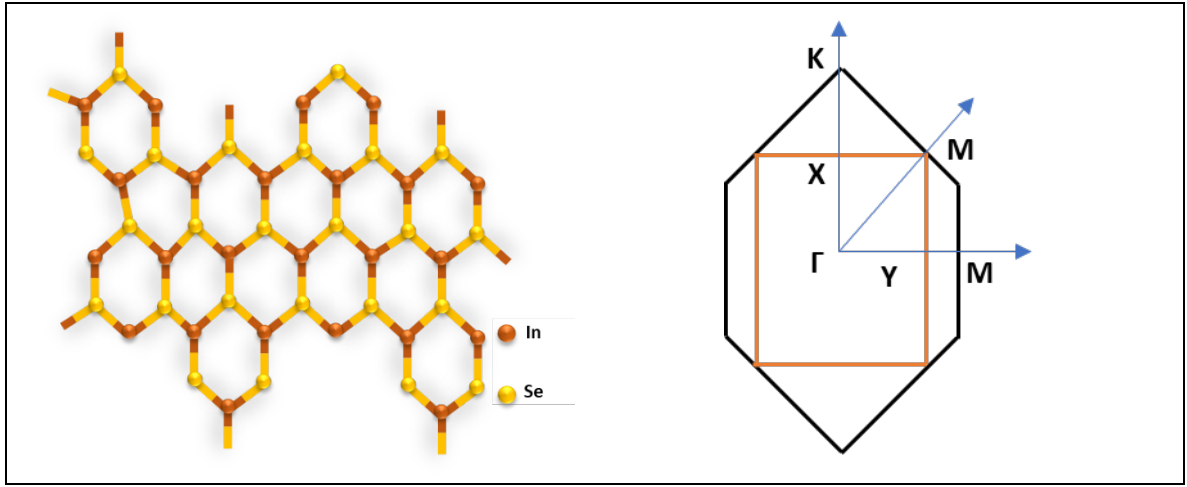
Darbeli Lazer Biriktirme (PLD), çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan son derece esnek bir ince film biriktirme tekniğidir. PLD'de, yüksek enerjili bir darbeli lazer ışını, bir vakum odasında bir hedef malzemeye odaklanır. Yoğun lazer darbesi, hedef yüzeyinden atomları veya molekülleri ablasyona uğratarak bir plazma bulutu oluşturur [79]. Bu kaplama sonucu oluşan türler, hedefin karşısındaki bir substrata kondense olur ve kalınlık ve bileşim üzerinde hassas kontrol sağlayarak ince bir film oluşturur. PLD, metallerden, oksitlere, nitritlere ve karmaşık bileşiklere kadar geniş bir malzeme yelpazesini, silikon, cam ve esnek polimerler gibi çeşitli substratlara biriktirme yeteneği gibi birçok avantaj sunar [80]. Bu teknik, epitaksiyal tabakaların, çok katmanlı yapıların ve özellikleri özelleştirilmiş nano yapı malzemelerin üretimi için özellikle uygun bir tekniktir. PLD'nin esnekliği, ölçeklenebilirliği ve yüksek kaliteli filmler biriktirme yeteneği, mikroelektronik, fotonik ve malzeme bilimi gibi alanlarda araştırma ve geliştirmelerde vazgeçilmez kılar. Ayrıca, PLD, enerji depolama, biyomedikal cihazlar ve kuantum teknolojileri gibi alanlarda gelişen uygulamalar için de umut vaat etmektedir [81].

Biriktirme tekniğinin seçimi, biriktirilen malzeme, gerekli film özellikleri, alt tabaka ve spesifik uygulama gibi faktörlere bağlıdır. Farklı teknikler, film kalınlığı, homojenlik ve yapışma üzerinde değişen derecelerde kontrol sunarak bunları elektronik cihazların, sensörlerin, optiklerin ve daha fazlasının imalatında farklı amaçlar için uygun hale getirmektedir [82].

İnce filmlerin biriktirilmesi için birçok farklı malzeme kullanılabilir. Kullanım alanı ve benzersiz yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri açısından bakıldığında indiyum selenit (InSe) popüler yarı iletkenlerin başında gelmektedir [46]. InSe, geçiş metali dikalkojenitler (TMD) olarak bilinen katmanlı malzeme ailesine ait bir bileşik yarı iletkenidir [83].

İndiyum selenit (InSe), katmanlı kristal yapıya sahip bir bileşik yarı iletkenidir. Atomik yapısı indiyum (In) ve selenyum (Se) atomlarının dizilimi ile karakterize edilir. InSe, benzersiz elektronik ve optik özellikleriyle bilinen geçiş metali dikalkojenitler (TMD'ler) ailesine aittir [84]. Dikalkojenitler, oksijen (O), kükürt (S), selenyum (Se), tellür (Te) ve polonyumdan (Po) oluşan kalkojen grubundan iki elementten oluşan bileşikleridir ifade eder. Malzeme bilimi ve yoğun madde fiziği bağlamında "dikalkojenitler" terimi genellikle geçiş

metali dikalkojenitler (TMD'ler) olarak bilinen belirli bir bileşik sınıfını tanımlamak için kullanılır [85]. Geçiş metali dikalkojenitler, benzersiz bir kristal yapıya sahip, katmanlı bir malzeme ailesidir [86]. Her katman tipik olarak iki kalkojen atomu katmanı (genellikle kükürt, selenyum veya tellür) arasına sıkıştırılmış bir geçiş metali atomundan (genellikle titanyum, tantal veya tungsten gibi periyodik tablonun 4 ila 7. gruplarından) oluşur. Katmanlar nispeten zayıf van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutularak birbirlerinin üzerinden kolayca kaymalarına olanak tanır [87].



Şekil 2.1. InSe malzemesinin kristal yapısı

InSe'nin kristal yapısı, Se atomlarının düzlemleri arasına sıkıştırılmış In atomlarının düzlemlerinden oluşur. Şekil 2.1.'de bu kristal yapı gösterilmiştir ve grafene benzer şekilde altıgen bir kafes veya bal peteği kafesi olarak tanımlanabilir [88]. Bu altıgen kafeste her indiyum atomu altı selenyum atomuna bağlanarak 2 boyutlu bir katman oluşturur. Katmanlar van der Waals kuvvetleri aracılığıyla birbirine zayıf bir şekilde bağlanmıştır ve bu da onların birbirleri üzerinde kolayca kaymasına olanak tanır. Bu katmanlı yapı, TMD'lerin önemli bir özelliğidir ve anizotropik elektriksel ve optik davranış gibi önemli özelliklerin ortaya çıkmasına neden olur. İndiyum atomları tipik olarak trigonal prizmatik bölgeleri işgal ederken selenyum atomları her bir indiyum atomunun etrafında altıgen bir düzenleme oluşturur [89]. Bu katmanlar arasındaki zayıf van der Waals kuvvetleri, InSe'yi değişen kalınlıklarda ince filmlerin üretimi için uygun hale getirir.

InSe ince filmleri, fotodetektörler, alan etkili transistörler ve güneş pilleri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için manipüle edilebilen kullanışlı elektronik bant yapıları

nedeniyle elektronik ve optoelektronik alanında ilgi çekmektedir [90]. InSe ince filmlerinin atomik yapısının anlaşılması ve kontrolü, özelliklerini uyarlamak ve farklı elektronik cihazlarda performanslarını optimize etmek için çok önemlidir. InSe ince filmlerin kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

2.2.2. InSe ince filmlerin kullanım alanları

Optoelektronik

Fotodedektörler: InSe ince filmleri, ışığı elektrik sinyallerine dönüştürerek fotodedektörlerde kullanım için ümit vericidir. Kızılötesi aralıktaki hassasiyetleri onları görüntüleme ve algılama uygulamaları için uygun kılmaktadır [91].

Işık yayan cihazlar: InSe ince filmleri, ışık yayan cihazlarda kullanılarak verimli ve kompakt ışık kaynaklarının geliştirilmesine katkıda bulunabilir [92].

Elektronik

Alan etkili transistörler (FET'ler): InSe ince filmleri, alan etkili transistör davranışı sergileyerek onları elektronik cihazlar için uygun hale getirir. İnce filmin elektronik özellikleri, dijital ve analog devrelerdeki çeşitli uygulamalara yönelik transistörler oluşturmak üzere modüle edilebilir [93].

Entegre devreler: InSe ince filmleri, elektronik cihaz ve sistemlerdeki ilerlemelere katkıda bulunarak entegre devrelerin geliştirilmesinde kullanım alanı bulmaktadır [94].

Fotovoltaikler

Güneş pilleri: InSe ince filmlerinin güneş pillerinde kullanılması araştırılmıştır. Eşsiz elektronik yapıları ve yarı iletken özellikleri, onları güneş ışığını elektriğe dönüştürmeye uygun hale getirmektedir [95].

Esnek elektronikler

Esnek ve şeffaf elektronikler: Katmanlı yapıları ve esneklikleri sayesinde InSe ince filmleri esnek ve şeffaf elektronik cihazlara entegre edilerek esnek ekranlar ve giyilebilir elektronikler gibi uygulamalara olanak sağlar [96].

Sensörler

Gaz sensörleri: InSe ince filmleri, çevredeki değişikliklere karşı hassasiyetleri nedeniyle gaz sensörlerinde kullanılabilir. Bu, onları belirli gazların tespit edilmesi veya hava kalitesinin izlenmesi için uygun hale getirmektedir [97].

Kataliz

Katalitik uygulamalar: InSe ince filmleri, kimyasal dönüşümler için benzersiz özelliklerinden yararlanılarak katalitik uygulamalar için araştırılabilir [98].

Enerji depolama

Süper kapasitörler ve piller: InSe ince filmleri, enerji depolama cihazlarında kullanım alanı bulabilir ve yüksek performanslı süper kapasitörlerin veya pillerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir [99].

Yarı iletken malzemeler alanında, indiyum selenit (InSe), elektronik, fotonik ve optoelektronik cihazlarda uygulamalar için farklı olanaklar sunan dikkate değer bir aday olarak ortaya çıkmaktadır. Yarı iletken araştırması, ince film teknolojisinin alanına daha derinlemesine indikçe, çeşitli substratlar üzerinde büyütülen InSe ince filmlerin araştırılması büyük bir önem taşımaktadır [100]. Optik şeffaflıkları ve çeşitlilikleriyle ünlü olan cam substratlar, ince film biriktirme için cazip bir platform sunarken, nano yapıya sahip yüzeyiyle karakterize edilen siyah silikon (B-Si), ışık emilimini ve cihaz performansını artırmak için umut vadeder.

InSe ince filmleri alanındaki araştırmalar devam etmektedir ve bilim insanları ve mühendisler ince filmlerin özelliklerini keşfetmeye ve anlamaya devam ettikçe yeni

uygulamalar ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu alanlar, InSe ince filmlerinin çeşitli teknolojik uygulamalardaki çeşitli potansiyel kullanımlarını vurgulamaktadır [101].

2.3. Yarıiletkenlerin Temeli

Yarı iletken, bir iletken ile bir yalıtkan arasında elektriksel iletkenliğe sahip olan bir malzeme türüdür. Yarı iletkenler belirli koşullar altında elektriği iletebilirler [57]. Modern elektronikte çok önemli bir role sahiptirler çünkü elektriksel özellikleri, katılama (safsızlıkların eklenmesi) ve sıcaklık ile elektrik alanları gibi dış faktörler yoluyla kontrol edilebilir [101]. Yarıiletken özellik gösteren malzemelerin periyodik cetveldeki yerleşimi Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir.

IA												VIII B																							
1	H											2	He																						
3	Li	IIA												5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne										
11	Na	12	Mg	IIIA		IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	IB	II B	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar								
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	57	La*	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89	Ac**	104	Unq	105	Unp	106	Uns																								

Yarıiletken özellik gösteren elementler

Şekil 2.2. Yarıiletken özellik gösteren elementlerin periyodik tablodaki yerleşimi [101]

Yarı iletkenlerin tarihi, birkaç yüzyıla yayılan bilimsel keşiflerin ve teknolojik yeniliklerin hikayesidir. Yarı iletken davranışının ilk gözlemleri 19. yüzyılda yapıldı. Michael Faraday ve arkadaşları bazı malzemelerde olağandışı iletkenlik özellikleri gözlemlediler, ancak o zamanlar bu fenomenin anlaşılması sınırlıydı [102]. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında katı hal fiziğindeki ilerlemeler, malzemelerin elektriksel özelliklerinin anlaşılmasına yönelik teorik temelleri oluşturmaya başladı. Enerji bantları ve bant aralıkları gibi temel kavramlar geliştirildi. 1904 yılında Greenleaf Whittier Pickard, kablosuz telgraf için galen (kurşun sülfür) gibi bir mineral kullanarak, yarı iletken diyotun erken bir biçimi olan kristal diyotu icat etti [103]. 1947 yılında yarı iletken tarihinin en

önemli gelişmesi, John Bardeen, Walter Brattain ve William Shockley tarafından Bell Laboratuvarlarında transistörün icat edilmesiydi [104]. İlk transistör germanyumdan yapılmış nokta temaslı bir transistördü. Silikon, 1950'lerde bolluğu, maliyeti ve germanyumla karşılaştırıldığında üstün özellikleri nedeniyle tercih edilen yarı iletken malzeme olarak ortaya çıktı ve kullanılmaya başlandı [105]. 1958 yılına gelindiğinde Texas Instruments'tan Jack Kilby ve Fairchild Semiconductor'dan Robert Noyce bağımsız olarak entegre devreyi icat ettiler; bu, elektronikte devrim yaratan büyük bir atılımdı. 1960'lar ve sonrasında metal oksit-yarı iletken alan etkili transistörler (MOSFET'ler) gibi yeni yarı iletken cihazların geliştirilmesi, bu alanı daha da geliştirdi ve elektronik cihazların minyatürleştirilmesini mümkün kıldı [106]. Yarı iletken endüstrisi, bilgisayarlar, mobil cihazlar, iletişim ve diğer birçok alanda inovasyonu teşvik eden küresel bir güç merkezi haline geldi. Sektör, malzeme bilimi, cihaz mimarisi ve üretim tekniklerinde devam eden araştırmalarla hızla gelişmeye devam etmektedir.

Yarı iletkenleri anlamak ve geliştirebilmek için onların yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini derinlemesine incelemek gerekir. Bu malzemeler bilgisayar, akıllı telefon ve güneş pilleri dahil olmak üzere modern elektronik teknolojisinin temelini oluşturur.

Yarı iletkenlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini bilmek, modern yaşamın merkezinde yer alan çok çeşitli teknolojilerin geliştirilmesi, tasarımı ve optimizasyonu için temeldir [107]. Bu bilgi, bilim insanlarının ve mühendislerin yarı iletken malzemeleri belirli uygulamalar için uyarlamalarına, verimliliği ve performansı artırmalarına ve yeni işlemlere olanak tanımalarına zemin hazırlamıştır.

Enerji bant diyagramı, özellikle katı hal fiziği ve yarı iletken elektroniğinde kullanılan, bir malzeme içindeki elektronların enerji seviyelerini göstermek için kullanılan bir görsel temsil şeklidir. Bu diyagram, elektronların erişebileceği enerji durumlarını, elektronların atomlara bağlandığı değerlik bandı ve elektronların serbestçe hareket edip elektrik iletebildiği iletkenlik bandını içerir [108]. Tipik olarak diyagram, malzeme içindeki mekânsal konuma bağlı olarak enerji seviyelerini gösterir. Malzemelerin elektriksel ve optik özelliklerini anlamak için temel bir araçtır ve elektronik cihazların analizi ve tasarımında yaygın olarak kullanılır. Yarı iletkenler enerji bant yapılarıyla tanımlanır. Bu enerji bantları birbirlerinden enerji aralığı veya bant aralığı adı verilen bölgelerle ayrılır. Enerji bantları, enerji boşlukları veya bant boşlukları olarak adlandırılan bölgeler

tarafından birbirinden ayrılırlar. Bu boşluklar, malzemenin elektronik yapısındaki enerji seviyeleri arasındaki farkları temsil eder [109]. Enerji seviyesi temelde, değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki enerji farkıdır.

Değerlik bandı (Valence Band): Mutlak sıfır sıcaklıkta tamamen elektronlarla dolu olan en yüksek enerji bandıdır. Bu banttaki değerlik elektronları kristal kafesteki atomlar arasındaki kimyasal bağlardan sorumludur [110].

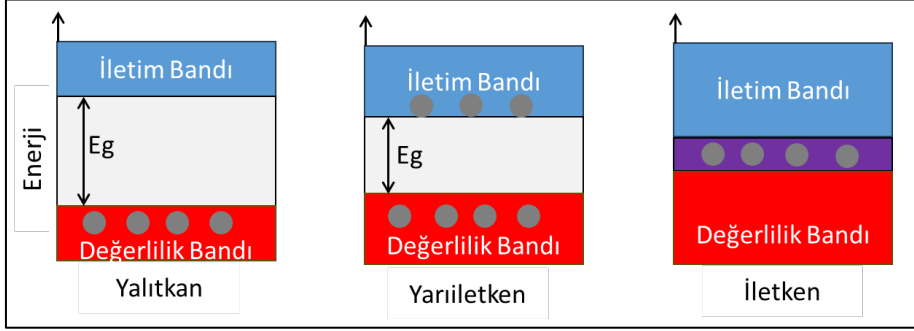
İletim bandı (Conduction Band): Değerlik bandının üzerindeki bir sonraki yüksek enerji bandıdır. Bu bant genellikle mutlak sıfır sıcaklıkta boştur, ancak yarı iletkene enerji sağlandığında (örneğin ısı veya ışık yoluyla) elektronlar bu banda uyarılabilir [111].

Enerji bantları, bir malzemede bulunan elektronların enerji seviyelerini temsil eder. Bu bantlar, elektronların serbestçe hareket edebileceği iletkenlik bandı ve elektronların atomlara bağlı olduğu değerlik bandı gibi farklı enerji seviyelerini içerir. Bu bantlar arasında ise enerji boşlukları veya bant boşlukları olarak adlandırılan bölgeler bulunur [112].

Bant boşlukları, iletkenlik bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji farkını (E_g) ifade eder. Bu enerji farkı, elektronların bir banttaki en yüksek enerji seviyesinden diğerine geçebilmeleri için gerekli olan enerji miktarını gösterir. Bant boşluğunun büyüklüğü, malzemenin iletkenlik özelliklerini belirler [113]. Genellikle, daha geniş bir bant boşluğu olan malzemeler yalıtkan olarak adlandırılırken, daha küçük bir bant boşluğuna sahip malzemeler yarı iletken veya iletken olarak sınıflandırılır bu sınıflandırma Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Bant boşluğu, malzemenin elektronik ve optik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Örneğin, yarı iletkenlerde, bant boşluğunun büyüklüğü, malzemenin iletkenlik, yarı iletkenlik veya yalıtkanlık özelliklerini belirler. Ayrıca, optik özellikler üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir; bant boşluğunun büyüklüğü, malzemenin yansıtma, absorpsiyon ve geçirgenlik özelliklerini belirler. Bu nedenle, bant boşluğunun doğası ve boyutu, bir malzemenin potansiyel uygulamalardaki kullanılabilirliğini belirleyen önemli bir özelliktir [114].

Yarı iletkenlerde bant aralığı nispeten küçüktür ve enerji sağlandığında elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmesine izin verir. Şekil 2.3'te, yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerde bant yapılarının farklılıkları şematize edilmiştir.

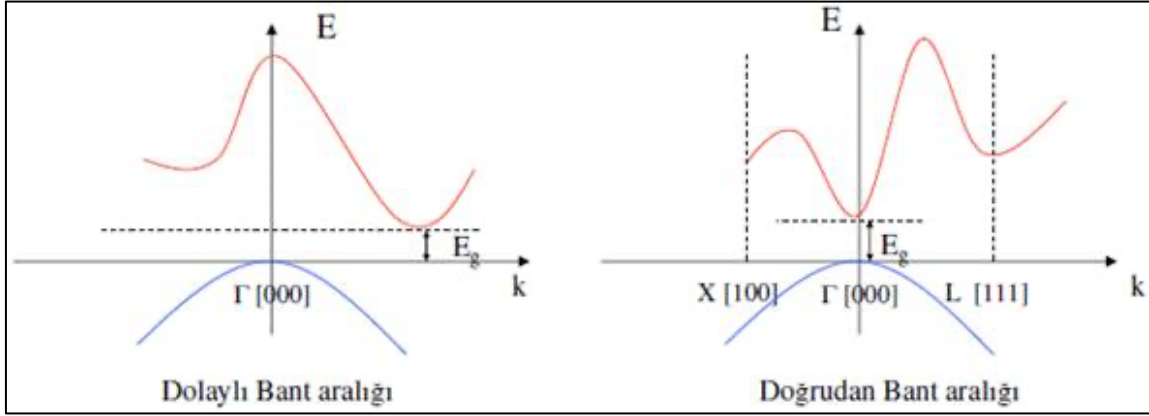


Şekil 2.3. Yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin bant yapıları

Değerlik bandındaki bir elektron yeterli enerjiye ulaştığında bant aralığını geçerek iletim bandına geçer. Bu, değerlik bandında bir deşik (pozitif yüklü bir boşluk) yaratır. İletim bandındaki elektronların ve değerlik bandındaki deşiklerin hareketi, yarı iletkenlerin elektriği iletmesini sağlayan mekanizmadır.

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi yarıiletkenler doğrudan veya dolaylı bant aralıklarına sahip olabilir. Doğrudan bant aralıklı yarı iletkenlerde (örneğin galyum arsenit), değerlik bandının maksimumu ve iletim bandının minimumu aynı momentum değerinde meydana gelir ve verimli ışık emisyonuna izin verir [115]. Yani doğrudan bir bant aralığına sahip materyallerde, değerlik bandının maksimum enerjisi, momentum uzayında iletkenlik bandının minimum enerjisiyle doğrudan hizalanır. Bu, değerlik bandındaki bir elektronun bir fotonu emerken hem enerji hem de momentumun korunmasıyla iletkenlik bandına doğrudan geçebileceği anlamına gelir [116]. Buna karşılık, dolaylı bir bant aralığına sahip materyallerde, iletkenlik bandının minimum enerjisi, değerlik bandının maksimum enerjisinin farklı bir momentum değerinde meydana gelir. Bu, doğrudan elektron geçişlerini daha az olası hale getirir ve dolaylı geçişlerin momentumun korunmasını sağlamak için bir fotona katılımını gerektirir. Dolaylı bant aralıklı yarı iletkenlerde ise (örneğin silikon), değerlik bandının maksimumu ve iletim bandının minimumu farklı momentum değerlerinde meydana gelir, bu da onları ışık emisyonu için daha az verimli hale getirir, ancak yine de elektronik cihazlar için kullanılır [117]. Yani, dolaylı bir bant aralığına sahip malzemelerde, dolaylı geçişleri, doğrudan geçişlere kıyasla daha az olası

kılar ve dolaylı bant aralığına sahip malzemeler genellikle ışığın emilim katsayılarının ve zayıf ışımaya hızlarının doğrudan bant aralığına sahip malzemelere kıyasla daha düşük olmasına neden olur [118].



Şekil 2.4. Dolaylı ve doğrudan bant aralıkları [118]

Bir yarı iletkenin bant yapısı özellikleri, gerilme, katkılama (doping) veya nano yapıların boyut sınırlaması gibi faktörlerden etkilenebilir; bu da bir yarı iletkenin bant aralığı doğasını değiştirebilir [119].

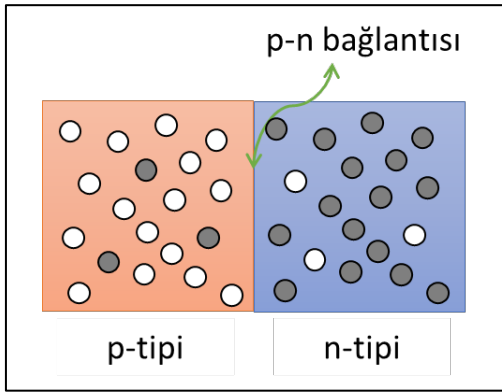
Katkılama, bir yarı iletkenin elektriksel özelliklerini değiştirmek için ona yabancı maddeler ekleme işlemidir. Katkılama çeşitleri N-tipi ve P-tipi olmak üzere ikiye ayrılır. N-tipi katkılama, ekstra elektronlu elementlerin (örneğin fosfor) eklenmesi ile iletim bandına serbest elektronlar ekler. P-tipi katkılama ise, daha az değerlik elektronuna sahip elementlerin (örneğin bor) eklenmesi ile değerlik bandında ek boşluklar oluşturur [120].

P-n bağlantısı, fazla pozitif yük taşıyıcıları (p-tipi) olan bir yarı iletken malzeme ile fazla negatif yük taşıyıcıları (n-tipi) olan bir yarı iletken malzeme arasındaki sınır veya arayüzey olarak tanımlanır. Bu bağlantı, diyotlar, transistörler ve güneş pilleri gibi yarı iletken cihazlarda önemli bir bileşeni oluşturur. Bahsedildiği gibi, P-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları pozitif yüklü "deşiklerdir", bunlar elektronlar tarafından bırakılan boşluklardır [121]. Buna karşılık, n-tipi yarı iletkenlerde, çoğunluk yük taşıyıcıları negatif yüklü elektronlardır.

P-tipi ve n-tipi bölgeler arasındaki arayüzeyde, difüzyon ve elektrik alan etkileri, bir boşaltma bölgesi oluşturur, aynı zamanda alan yük bölgesi olarak da bilinir. Bu bölge,

hareketsiz iyonlar içerir ve bağlantı üzerindeki yük taşıyıcılarının daha fazla difüzyonunu engelleyen bir elektrik alan oluşturur [122]. P-n bağlantısına bir yönlü gerilim uygulandığında (p- tarafına pozitif gerilim ve n- tarafına negatif gerilim uygulandığında), boşaltma bölgesinin genişliğini azaltır ve bağlantı üzerinden akımın geçmesine izin verir [123]. Ters bir yönlü gerilim uygulandığında (n- tarafına pozitif gerilim ve p- tarafına negatif gerilim uygulandığında), boşaltma bölgesini genişletir ve önemli bir akım akışını engeller.

Şekil 2.5'te gösterilen P-n bağlantısının davranışı, doğrultma (bir yönde akım akışına izin verme), amplifikasyon (transistörlerde) ve ışığın elektriğe dönüştürülmesi (güneş pillerinde) dahil olmak üzere çeşitli elektronik uygulamalarda faydalı olmasını sağlar [124]. P-n bağlantısı, n-tipi ve p-tipi yarı iletkenler temas halinde yerleştirildiğinde, diyotlar, transistörler ve güneş pilleri gibi birçok yarı iletken cihazın temelini oluşturan bir p-n bağlantısı oluştururlar. Mühendisler, katkının türünü ve düzeyini değiştirerek, çok çeşitli elektronik uygulamalar için belirli elektriksel özelliklere sahip yarı iletkenler oluşturabilirler [125].



Şekil 2.5. p-n bağlantı eklemi

Dış elektrik alanı uygulandığında malzemenin tepkisi, enerji bantlarının doluluğuna bağlı olarak önemli farklılıklar gösterir. İzin verilen enerji bantları tamamen dolu veya boşsa, elektronlar elektrik alanıyla birlikte hareket etmeyecektir, bu nedenle malzeme yalıtkan olarak adlandırılır [126]. Enerji bantları kısmen doluyorsa elektronlar elektrik alanıyla hareket eder ve bu malzemelere iletken denir. Ayrıca yarı iletken olan yalıtkanların ve iletkenlerin orta durumu da vardır. Yarı iletkenlerde az dolu veya boş enerji bantları, sıcaklık gibi dış koşullara bağlı olarak elektronlara hareket özgürlüğü sağlar.

2.3.1. Yarıiletkenlerin yapısal

Yarıiletkenler, benzersiz elektronik özellikleriyle, elektronikten fotoniklere ve optoelektronığe kadar çeşitli teknoloji alanlarında vazgeçilmez hale gelmiştir. Özellikle ince film olarak üretildiğinde, yarıiletkenlerin yapısal özelliklerinin anlaşılması, elektronik cihazlardaki performanslarının optimize edilmesi için hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada konu edilen yarıiletken İndiyum Selenid (InSe) ince filmleri, termal buharlaştırma teknikleriyle hazırlanmış ve cam ve siyah silikon (B-Si) gibi substratlar üzerine büyütülmüştür. Optoelektronik cihazlardaki vaat eden uygulamaları nedeniyle bu filmler önemli ilgi görmektedir.

Bu bölümde, cam ve siyah silikon substratlar üzerine üretilen InSe ince filmlerinin yapısal karakterizasyonuna odaklanılmıştır. Bu karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), X-ışını kırınımı (XRD) ve bir Dektak profilometresi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu teknikler, filmlerin morfolojisi, elementel bileşimi, kristal yapı ve yüzey pürüzlülüğü gibi çeşitli yapısal özelliklerinin değerlendirilmesini sağlar.

SEM kullanarak, InSe ince filmlerinin yüzey morfolojisini ve tane yapısını inceleyerek, büyüme mekanizmalarının ve yüzey özelliklerinin anlaşılması sağlanmıştır. EDX analizi, ince filmlerin elementel bileşimini belirlemesini sağlamaktadır ve indiyum ve selenyum elementlerinin varlığını doğrular. XRD analizi, filmlerin kristal yapısını ve yönelimini tespit ederek, filmlerde tercih edilen kristalografik yönelimleri ve mevcut fazları tanımlayıp tamamlamadığının anlaşılması konusunda kullanılır. Ayrıca, Dektak profilometresi ile ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünü ve kalınlık düzgünlüğünü incelemek için kullanılmıştır. İncelenen bu parametreler, cihaz imalatı ve performansı için temel parametrelerdir.

Bu yapısal özelliklerin kapsamlı değerlendirmesiyle, cam ve siyah silikon substratlar üzerine depolanan InSe ince filmlerinin özelliklerinin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Bu bilgi, üretim sürecinin optimize edilmesi ve InSe tabanlı elektronik ve optoelektronik cihazların performansının artırılması için kritiktir.

Yarıiletkenlerin yapısal özellikleri, kristal kafesteki atomların düzenine ve bu düzenlemenin malzemenin elektronik ve optik özelliklerini nasıl etkilediğine bağlıdır. Bu özellikleri anlamak, elektronik cihazlardaki yarıiletkenlerin davranışını açıklamak için gereklidir.

Yarıiletkenlerin yapısal özelliklerinin temel yönleri, elektronik cihazlardaki davranışlarını ve performanslarını anlamak için hayati öneme sahiptir. Bu özellikler, yarıiletkenlerin elektrik alanlarla, ışıkla ve diğer dış uyarıcılardan nasıl etkileşime girdiğini belirleyen ve sonuç olarak işlevselliklerini yöneten kritik unsurlardır. Yarıiletkenlerin yapısal özelliklerinin temel yönleri aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. **Kristal Yapı:** Yarıiletkenler genellikle iyi tanımlanmış atomik düzenlemelere sahip kristal yapısal malzemelerdir. Bir yarıiletkenin kristal yapısı, elmas, silikon veya galyum arsenit gibi, elektronik özelliklerini, bant yapısını ve taşıyıcı hareketliliğini etkiler. Farklı kristal yapıları, farklı elektronik davranışlara ve belirli uygulamalara uygunluklara neden olabilir [127].
2. **Kafes Sabitleri:** Kafes sabiti veya kafes parametresi, bir kristal örgüdeki birim hücrenin uzunluğunu temsil eder. Kristal yapının içindeki atomlar veya iyonlar arasındaki aralığı belirler. Kafes sabitlerindeki değişiklikler, yarıiletkenlerin elektronik bant yapısını ve optik özelliklerini etkiler [128].
3. **Bağlanma Özellikleri:** Yarıiletkenler, kovalent, iyonik ve metalik bağlanma dahil olmak üzere çeşitli bağlanma tiplerini sergiler. Bağlanma özellikleri, kristal örgüdeki atomlar arasındaki bağların gücünü ve yönlülüğünü belirler; bu da elektronik bant yapısını ve mekanik özellikleri etkiler [129].
4. **Defektler ve Dopantlar:** Kristal örgüdeki hatalar, boşluklar, aralıklar ve kirleticiler, yarıiletkenlerin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Üretim veya işleme sırasında oluşabilirler. Dopantlar, bilinçli olarak eklenen kirleticiler, yarıiletkenlerin elektrik iletkenliğini ve elektronik özelliklerini değiştirir [130].
5. **Bant Yapısı:** Bir yarıiletkenin elektronik bant yapısı, malzemenin içindeki elektronlar ve boşluklar için izin verilen enerji seviyelerini tanımlar. Değerlik bantları

(elektronlarla dolu olanlar) ve iletkenlik bantları (boş veya kısmen dolu olanlar) içerir. Değerlik ve iletkenlik bantları arasındaki enerji bant aralığı, bir yarıiletkenin iletkenlik ve optik özelliklerini belirler [131].

6. Taşıyıcı Hareketliliği: Taşıyıcı hareketliliği, yük taşıyıcılarının (elektronlar ve boşluklar) bir yarıiletken içinde bir elektrik alanına karşılık hareket etme yeteneğidir. Kristal yapısı, saçılma mekanizmaları ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Yüksek taşıyıcı hareketliliği, hızlı elektronik cihazlar için arzu edilirken, düşük hareketlilik artmış dirence ve azalmış cihaz performansına yol açabilir [132].

2.3.2. Yarıiletkenlerin optiksel özellikleri

Yarı iletkenlerin optik özellikleri, malzeme ve elektromanyetik radyasyon arasındaki etkileşimin sonuçlarıyla tanımlanır. Yarı iletken üzerindeki elektromanyetik alanın bozulması, elektronik durumlar veya titreşim durumları veya her ikisi arasında geçişlerle sonuçlanabilir. Bu nedenle optik çalışmalar malzemenin kafes titreşimleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Ayrıca, gelen ışınım ile enerji durumları arasındaki yakın ilişki nedeniyle yarı iletkenlerin bant aralığı optik ölçümlerle belirlenebilmektedir.

Malzemelerin optik karakterizasyonunda genellikle iki önemli büyüklük ölçülür; geçirgenlik ve yansımaya. Geçirgenlik, bir malzemenin ışığı geçirmesinin ölçüsüdür. Malzemenin ışığın bir kısmını geçirme kabiliyetini ifade eder ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Geçirgenlik, malzemenin optik özellikleri, kalınlığı ve ışığın dalga boyu gibi faktörlerden etkilenir. Öte yandan, yansımaya, ışığın malzemenin yüzeyinden yansıtılmasıyla meydana gelir. Malzemenin yüzeyinden geri yansıyan ışığın miktarını ölçer ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Yansımaya, giriş açısı, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme ile çevresi arasındaki kırılma indisi farkı gibi faktörlere bağlıdır.

Özetle, geçirgenlik bir malzemenin ışığı geçirme yeteneğini tanımlarken, yansımaya ise bir malzemenin yüzeyinden geri yansıyan ışığı tanımlar. Her iki özellik de malzemelerin ışıkla etkileşimini anlamının önemli bir parçasıdır ve çeşitli optik uygulamalarda hayati öneme sahiptir. Yüzeye normal ışık düşen bir numunenin geçirgenliği T şu şekilde verilir [133]:

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 + R^2 e^{-2\alpha d} - 2R e^{-\alpha d} \cos\Phi} \quad (2.1)$$

$$\Phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (2.2)$$

Formülde d numunenin kalınlığı, λ gelen radyasyonun dalga boyu, n kırılma indisi olarak tanımlanır ve genellikle frekansa bağlıdır.

Emilim katsayısı, bir malzemenin belirli bir dalga boyundaki elektromanyetik radyasyonu, örneğin ışığı veya kızılötesi radyasyonu ne kadar etkin bir şekilde absorbe ettiğini ölçen bir değerdir. Absorpsiyon katsayısı, malzemenin bileşimi, kalınlığı ve gelen radyasyonun dalga boyu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Görece daha yüksek bir Emilim katsayısı, bir malzemenin daha fazla radyasyonu absorbe ettiğini, görece daha düşük bir Emilim katsayısı ise daha az absorpsiyon olduğunu belirtir [134]. Bir malzemenin absorpsiyon katsayısını anlamak, spektroskopi, fotovoltailer ve optik kaplamalar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için önemlidir. Mühendisler ve bilim insanlarına, istenen optik özelliklere sahip malzemeleri tasarlamak veya cihazların performansını uygun Emilim özelliklerine sahip malzemeleri seçerek optimize etmek için yardımcı olur. Emilim katsayısı şu şekilde tanımlanır:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.3)$$

Sönme katsayısı bir malzemenin içinden geçerken ışığı veya elektromanyetik radyasyonu ne kadar güçlü bir şekilde emdiğini ve saçtığını ölçen bir değerdir [135]. Yalnızca emme değil, saçılma etkilerini de içerdiği için Emilim katsayısından farklıdır. Sönme katsayısı, malzemenin bileşimi, yapısı ve gelen radyasyonun dalga boyu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Sönme katsayısı, bir malzemenin ışıkla etkileşim şekli hakkında değerli bilgiler sağlar ve spektroskopi, optik kaplamalar ve fotovoltailer gibi çeşitli alanlarda belirleyici rol oynar. k sönme katsayısıdır ve yansıma R 'dir [136],

$$R = \frac{(n_0 - n)^2 + k^2}{(n_0 + n)^2 + k^2} \quad (2.4)$$

Önceki bölümde bahsedildiği gibi yarıiletkenlerin bant yapısının optik özellikler üzerinde önemli etkisi vardır. Gelen fotonun enerjisi bant aralığı değerinden daha düşükse, yarı

iletken şeffaftır ve dolayısıyla $\alpha \approx 0$ olur, böylece yukarıda verilen denklem şöyle ifade edilir:

$$T = \frac{(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos \Phi} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan kosinüs terimi, karakteristik uzaysal frekans ile ilgilidir ve optik sistem enstrümantasyonunun çözünürlük gücü, katkısını ölçmek için yetersiz olabilir bu nedenle denklem şu şekilde ifade edilir,

$$T = \frac{(1 - R)^2}{1 - R^2} = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (2.6)$$

Ancak bir malzemedeki safsızlıkların, gelen fotonların emilmesinde rolü vardır [137]. Safsızlıkların yoğunluğu α ile orantılı olduğundan emilimli geçirgenlik formülü şu şekildedir:

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 + R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.7)$$

α aşağıda belirtildiği şekilde yazılabilir;

$$\alpha = \ln \left[\frac{\sqrt{(1-R)^2 + 4T^2 R^2} - (1-R)^2}{1 + R^2 e^{-2\alpha d}} \right] \quad (2.8)$$

InSe gibi soğurma katsayısı yüksek olan yarı iletkenlerde yansıma ihmal edilebilir değerler alır. Üstelik girişimden kaynaklanan etkiler göz ardı edilebilir. Bu nedenle sadeleştirme ile α ifade edilebilir;

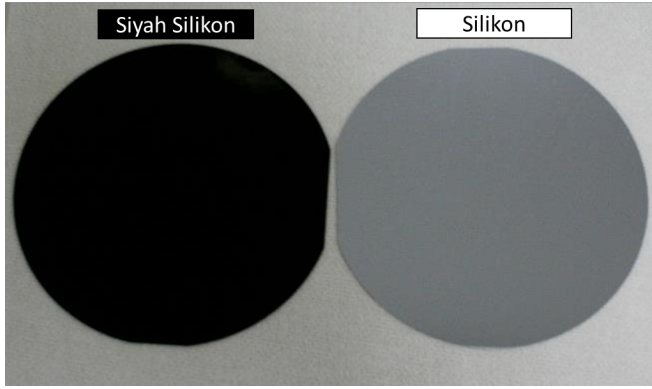
$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln (T) \quad (2.9)$$

2.4. Siyah Silikon (B-Si) Teknolojisi

Siyah silikon (B-Si) teknolojisinin gelişimi, araştırmacıların silikon bazlı cihazların, özellikle de fotovoltaiik hücrelerin ışık emilimini ve verimliliğini artırmanın yollarını aramasıyla 1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başlarında başlamıştır. Araştırmacılar,

silikonun yüzey yapısını değiştirerek ışık emme özelliklerini iyileştirmenin yollarını aramışlardır [137]. 1990'ların sonlarında, silikon plakalar üzerinde nanoyapılar oluşturmak için kimyasal aşındırma yöntemleri kullanılarak ilk siyah silikon yüzeyler üretilmiştir. 2001 yılında Harvard Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, yüksek yoğunluklu lazer darbeleri kullanarak siyah silikon oluşturmanın bir yöntemini keşfetmişlerdir. "Femto-saniye lazer işleme" olarak bilinen bu yöntem, silikona siyah görünümünü veren ve ışık emilimini önemli ölçüde artıran, oldukça dokulu, nanoyapılı bir yüzey oluşturmaktadır [138].

Siyah silikon (B-Si) teknolojisi, gelişmiş ışık emme özelliklerine sahip oldukça dokulu, koyu renkli bir yüzey oluşturmak için silikon levhanın yüzeyini değiştiren bir işlemi ifade eder [139]. Bu teknoloji, verimliliği artırma kabiliyeti nedeniyle özellikle fotovoltaik (güneş) hücrelerde ve optoelektronik cihazlarda değerlidir.



Resim 2.1. P-tipi silikon kullanılarak metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilen siyah silikon

Siyah silikonun yüzeyi oldukça dokulu olup, genellikle mikroskobik veya nanoskobik sivri uçlar, iğneler veya sütunlardan oluşan bir ormanı andırır. Bu dokulandırma, lazerle aşındırma, reaktif iyonla aşındırma veya kimyasal aşındırma gibi çeşitli teknikler kullanılarak elde edilebilir. Sunulan bu tezde elde edilen siyah silikonlar kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilmiştir.

Siyah silikonun sahip olduğu dokulu yüzey, yüzey alanını artırır ve yansımayı azaltır, böylece siyah silikonun ultraviyole, görünür ve kızılötesi ışık dahil daha geniş bir spektrumda daha fazla ışık emmesine olanak tanır [140]. Bu avantaj göz önünde bulundurulduğunda siyah silikonun geniş bir uygulama alanının olduğu anlaşılmaktadır ve son zamanlarda çok popüler bir çalışma alanıdır. Siyah silikon, güneş pillerinde ışık

emilimini artırmak ve güneş ışığını elektriğe dönüştürmenin genel verimliliğini artırmak için kullanılır. Artan emilim, daha uygun maliyetli ve esnek olabilen daha ince hücrelerin kullanılmasına olanak tanır. Siyah silikon, hassasiyeti ve performansı artırmak için fotodetektörler ve görüntü sensörleri gibi optoelektronik cihazlarda kullanılabilir [141].

Siyah silikonu elde etmek için farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Son zamanlarda popüler olarak kullanılan tekniklerden biri lazer gravürdür (laser etching). Lazer aşındırma, silikon yüzeyinde nano yapılar oluşturmak için yüksek yoğunluklu lazer darbeleri kullanır ve sonuçta siyah silikon elde edilir. Bir diğer teknik ise reaktif iyon aşındırma (reactive ion etching) yöntemidir. Reaktif iyon aşındırma (RIE), malzemeyi silikon yüzeyinden çıkarmak için plazmayı kullanarak dokulu bir yapı oluşturur [142]. Yoğun olarak kullanılan bir diğer teknik ise kimyasal aşındırma yöntemidir. Sunulan bu tezde elde edilen siyah silikonlar için kullanılan yöntem de kimyasal aşındırma yöntemidir. Kimyasal aşındırma, malzemeyi silikon yüzeyinden seçici olarak çıkarmak ve nanoyapılar oluşturmak için kimyasal çözeltilerin kullanılmasını içerir. Bu işlem, malzemeyi silikon yüzeyinden seçici olarak aşındırmak veya çıkarmak için kimyasal bir çözeltinin kullanılmasını içerir ve böylece ışık emilimini artıran pürüzlü, dokulu bir yapı oluşturulur. Kimyasal aşındırma işlemi tipik olarak hidroflorik asit (HF) ile nitrik asit (HNO₃) veya gümüş nitrat (AgNO₃) gibi diğer oksitleyici maddelerin bir karışımının kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Aşındırma çözeltisinin seçimi ve konsantrasyonu, siyah silikonun son yüzey dokusunu ve özelliklerini etkiler. Aşındırma hızını ve nanoyapıların oluşumunu kontrol etmek için aşındırma çözeltisine hidrojen peroksit (H₂O₂) veya diğer oksitleyiciler dahil edilir [143].

Silikon levha, işlemi etkileyebilecek her türlü yabancı madde veya kirletici maddenin uzaklaştırılması için kimyasal işleme tabi tutulmadan önce temizlenir ve B-Si oluşturmak için hazırlanır. Aşındırma çözeltisi silikon levhaya, tipik olarak levhanın çözeltiliye batırılmasıyla veya bir püskürtme tekniği kullanılarak uygulanır [144]. Tez çalışmasında elde edilen siyah silikonlar çözeltiliye batırılarak oluşturulmuştur. Aşındırma işlemi, aşındırma çözeltisinin konsantrasyonu, sıcaklığı ve aşındırma süresi ayarlanarak kontrol edilir. Farklı parametreler, değişen derecelerde yüzey dokusuna ve kararmaya neden olur. Aşındırma çözeltisi silikonla reaksiyona girdiğinde malzemeyi yüzeyden uzaklaştırarak dokulu bir yapı oluşturur. Nanoyapılar, spesifik aşındırma koşullarına bağlı olarak sivri uçlar, sütunlar veya ipliksi şekiller şeklini alabilir. Bu çalışmada elde edilen B-Si alttaşlar

nanoteller içermektedir. Zaman kontrollü olarak farklı boyutlarda nanoteller içeren B-Si'ler elde edilmiştir. B-Si nanotellerinin morfolojileri ile ilgili detaylı bilgiler deneysel prosedür ve bulgular kısmında verilmiştir. Dokulu yüzey silikona koyu, neredeyse siyah bir görünüm kazandırır, dolayısıyla "siyah silikon" adı da buradan gelir.

Kimyasal aşındırma genellikle lazer dağlama gibi diğer yöntemlere göre daha uygun maliyetlidir ve bu da onu büyük ölçekli üretim için pratik bir seçim haline getirir. İşlem, dokulandırma derecesi ve sonuçta ortaya çıkan optik özellikler üzerinde hassas kontrole izin verir. Bu nedenle sunulan bu tezde kimyasal aşındırma tekniği tercih edilmiştir.

Kimyasal aşındırma, maliyet etkinliği ve çeşitli nanoyapılı yüzeyler üretme yeteneği nedeniyle siyah silikon oluşturmak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Aşındırma parametrelerini ayarlayarak üreticiler, siyah silikonun yüzey özelliklerini güneş pilleri ve fotodetektörler gibi özel uygulamalara göre uyarlayabilirler. Ancak sürecin çevre ve güvenlik yönlerinin yönetilmesine dikkat edilmelidir.

3. DENEYSEL PROSEDÜR VE BULGULAR

Bu bölümde sunulan tezde kullanılan siyah silikon (B-Si) alttaş üretim prosedürü ve farklı substratlar (cam, silikon ve siyah silikon) üzerine büyütülen InSe ince filmlerin üretim prosedürü anlatılmıştır. Üretim prosedürü tamamlanan ince filmlerin yapısal ve optiksel karakterizasyonlarında kullanılan teknikler ve elde edilen bulgular derinlemesine incelenmiştir.

3.1. Siyah Silikon (B-Si) Substratların Üretilmesi

Nanoteknolojide siyah silikon (B-Si), nanoyapılı bir yüzeye sahip olacak şekilde tasarlanmış ve ona ayırt edici bir koyu renk veren silikon formunu ifade eder. Bu genellikle silikonun yüzeyinde çok ince yapılar oluşturan aşındırma (kimyasal, plazma veya lazer) gibi işlemlerle gerçekleştirilebilir. B-Si üretim yöntemleri teorik arkaplanda detaylı olarak anlatılmıştır. B-Si'ler benzersiz optik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Bu nedenle sunulan bu tezde kullanılan substratların bir tanesi B-Si olarak tercih edilmiştir.

B-Si yapılarının çok çeşitli kullanım alanları vardır. Optoelektronik alanında siyah silikon fotodetektörlerde ve güneş pillerinde kullanılabilir. Nanoyapılı yüzeyi, geniş bir spektrumda daha fazla ışık emmesine olanak tanıyarak, düşük ışık koşullarında malzemenin performansını artırır. Fotovoltaik teknolojisinde, güneş pillerinde siyah silikon, ışık emilimini artırır ve potansiyel olarak güneş panellerinin verimliliğini olumlu yönde etkiler. Sensör teknolojisinde ise siyah silikonun ışığa karşı yüksek hassasiyeti, onu kameralarda, biyomedikal görüntüleme ve çevresel izlemede kullanılanlar da dahil olmak üzere optik sensörlerde faydalı kılar. Mikroakışkanlar ele alındığında yüzey özellikleri, küçük hacimli sıvıları manipüle eden ve analiz eden mikroakışkan cihazlarda kullanılabilir. Enerji depolama alanında ise, siyah silikon, yüksek yüzey alanı ve yüksek şarj depolama kapasitesi potansiyeli nedeniyle gelişmiş pillerde ve süper kapasitörlerde kullanılır.

Siyah silikonun nanoyapılı yüzeyi, geniş bir spektrumda ışığı emmede oldukça etkilidir, bu da onu optik uygulamalar için faydalı kılar. Gelişmiş ışık emme ve yük taşıma özellikleri nedeniyle güneş pilleri ve sensörler gibi cihazların verimliliğini artırabilir. Siyah silikonun artan yüzey alanı, enerji depolama uygulamalarında avantaj sağlar ve daha fazla kapasiteye

ve daha hızlı şarj sürelerine olanak tanır. Siyah silikon, nanoyapıları ayarlayarak belirli uygulamalar için tasarlanabilir ve bu da onu çok çeşitli alanlar için çok yönlü bir malzeme haline getirir.

Siyah silikon, optoelektronik, fotovoltaik ve algılama gibi çeşitli yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılabilen benzersiz optik, elektriksel ve termal özellikleri nedeniyle nanoteknolojide popülerdir. Çok yönlülüğü ve verimliliği artırma potansiyeli onu bu alanlarda değerli bir malzeme haline getirir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan B-Si alttaşlar çalışmaya özgünlük sağlamak ve literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

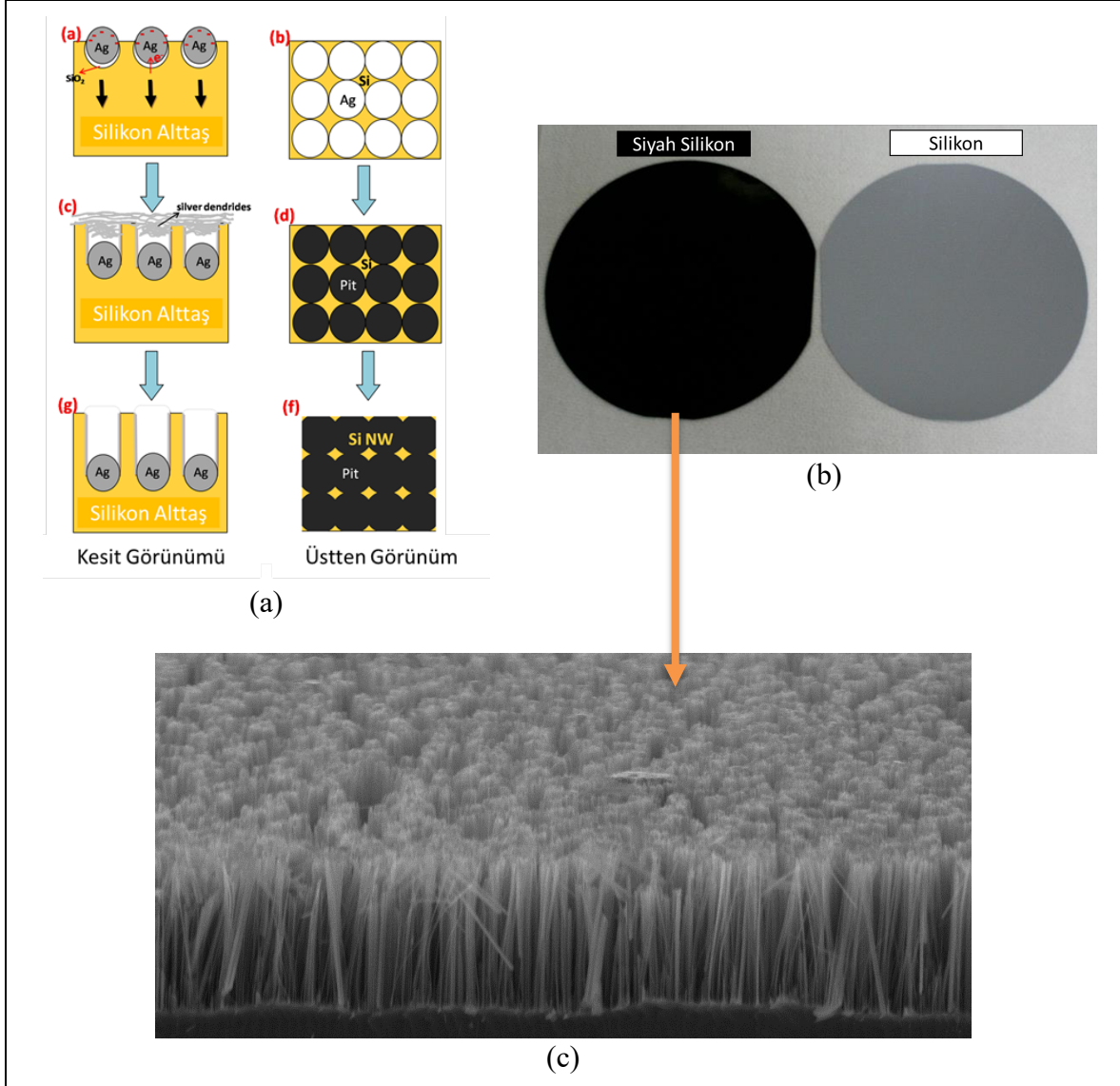
Sunulan bu tezde B-Si substratlar metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntemde, bir metal katalizörün (genellikle gümüş veya altın) bir silikon substratın yüzeyine biriktirilmesiyle başlar. Bu genellikle elektriksiz kaplama, püskürtme veya buharlaştırma gibi yöntemler kullanılarak yapılır. Bu çalışmada metal olarak gümüş kullanılarak elektriksiz kaplama (electroless plating) yöntemi ile elde edilmiştir.

Metal katalizör yerleştirildikten sonra silikon substrat (p-tipi ya da n-tipi) bir dağlama çözeltisine maruz bırakılır. Bu çözelti tipik olarak hidroflorik asit (HF) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi bir oksitleyici maddenin bir karışımından oluşur. Metal katalizör aşındırma işleminin yönlendirilmesinde kritik bir rol oynar.

Metal katalizör, silikon substratın lokal olarak aşındırılmasını kolaylaştırır. Metal, yüzeyindeki oksitleyici maddeyi (H_2O_2) azaltır ve metal parçacıklarının etrafındaki silikonda yüksek konsantrasyonda deşikler oluşturur. Bu deşikler hidroflorik asidin silikonu doğrudan metalin altında seçici olarak çözmesine olanak tanır.

Aşındırma ilerledikçe silikon yüzeyi gözenekli hale gelir ve nanoyapılı bir yüzey oluşur. Bu, nanosütunlar, nanoteller veya nanokoniler gibi özellikleri içerebilir. Genel olarak bu yapılar arasındaki temel fark geometrilerinde yatmaktadır. Nanosütunlar silindirik, nanoteller uzundur ve nanokoniler konik yapılardır. Bu farklı şekiller, özelliklerini ve çeşitli uygulamalarda kullanılma yollarını etkiler. Spesifik yapı ve morfoloji, aşındırma süresi, aşındırma çözeltisinin konsantrasyonu ve kullanılan metal katalizörün türü gibi faktörlere bağlıdır. Bu çalışma bünyesinde süre ve çözelti kontrollü olarak nanoteller üretilmiştir.

Aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra metal katalizör, silikon substratın yüzeyinden çıkarılır ve saf su ile silikon substratın yüzeyi temizlenir ve ardından kurutulur. Bu kimyasal sürecin sonunda nanoyapılı yüzeye sahip bir silikon elde edilir ve bu silikon siyah silikon (B-Si) olarak adlandırılır.



Resim 3.1. (a) Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilen B-Si üretim aşamaları, (b) Aşındırma yapılan ve aşındırma yapılmayan silikon alttaşlar, (c) B-Si SEM görüntüsü

Nanoteknolojide siyah silikon (B-Si), nanoyapılı bir yüzeye sahip olacak şekilde tasarlanmış ve ona ayırt edici bir koyu renk veren silikon formunu ifade eder. Bu genellikle silikonun yüzeyinde çok ince yapılar oluşturan aşındırma (kimyasal, plazma veya lazer) gibi işlemlerle gerçekleştirilebilir. B-Si üretim yöntemleri teorik arkaplanda detaylı olarak

anlatılmıştır. B-Si'lar benzersiz optik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Bu nedenle sunulan bu tezde kullanılan substratların bir tanesi B-Si olarak tercih edilmiştir.

B-Si yapılarının çok çeşitli kullanım alanları vardır. Optoelektronik alanında siyah silikon fotodetektörlerde ve güneş pillerinde kullanılabilir. Nanoyapılı yüzeyi, geniş bir spektrumda daha fazla ışık emmesine olanak tanıyarak, düşük ışık koşullarında malzemenin performansını artırır. Fotovoltaik teknolojisinde, güneş pillerinde siyah silikon, ışık emilimini artırır ve potansiyel olarak güneş panellerinin verimliliğini olumlu yönde etkiler. Sensör teknolojisinde ise siyah silikonun ışığa karşı yüksek hassasiyeti, onu kameralarda, biyomedikal görüntüleme ve çevresel izlemede kullanılanlar da dahil olmak üzere optik sensörlerde faydalı kılar. Mikroakışkanlar ele alındığında yüzey özellikleri, küçük hacimli sıvıları manipüle eden ve analiz eden mikroakışkan cihazlarda kullanılabilir. Enerji depolama alanında ise, siyah silikon, yüksek yüzey alanı ve yüksek şarj depolama kapasitesi potansiyeli nedeniyle gelişmiş pillerde ve süper kapasitörlerde kullanılır.

Siyah silikonun nanoyapılı yüzeyi, geniş bir spektrumda ışığı emmede oldukça etkilidir, bu da onu optik uygulamalar için faydalı kılar. Gelişmiş ışık emme ve yük taşıma özellikleri nedeniyle güneş pilleri ve sensörler gibi cihazların verimliliğini artırabilir. Siyah silikonun artan yüzey alanı, enerji depolama uygulamalarında avantaj sağlar ve daha fazla kapasiteye ve daha hızlı şarj sürelerine olanak tanır. Siyah silikon, nanoyapıları ayarlayarak belirli uygulamalar için tasarlanabilir ve bu da onu çok çeşitli alanlar için çok yönlü bir malzeme haline getirir.

Siyah silikon, optoelektronik, fotovoltaik ve algılama gibi çeşitli yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılabilen benzersiz optik, elektriksel ve termal özellikleri nedeniyle nanoteknolojide popülerdir. Çok yönlülüğü ve verimliliği artırma potansiyeli onu bu alanlarda değerli bir malzeme haline getirir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan B-Si alttaşlar çalışmaya özgünlük sağlamak ve literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

Sunulan bu tezde B-Si substratlar metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntemde, bir metal katalizörün (genellikle gümüş veya altın) bir silikon substratın yüzeyine biriktirilmesiyle başlar. Bu genellikle elektriksiz kaplama, püskürtme

veya buharlaştırma gibi yöntemler kullanılarak yapılır. Bu çalışmada metal olarak gümüş kullanılarak elektriksiz kaplama (electroless plating) yöntemi ile elde edilmiştir.

Metal katalizör yerleştirildikten sonra silikon substrat (p-tipi ya da n-tipi) bir dağlama çözeltisine maruz bırakılır. Bu çözelti tipik olarak hidroflorik asit (HF) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi bir oksitleyici maddenin bir karışımından oluşur. Metal katalizör aşındırma işleminin yönlendirilmesinde kritik bir rol oynar.

Metal katalizör, silikon substratın lokal olarak aşındırılmasını kolaylaştırır. Metal, yüzeyindeki oksitleyici maddeyi (H_2O_2) azaltır ve metal parçacıklarının etrafındaki silikonda yüksek konsantrasyonda deşikler oluşturur. Bu deşikler hidroflorik asidin silikonu doğrudan metalin altında seçici olarak çözmesine olanak tanır.

Aşındırma ilerledikçe silikon yüzeyi gözenekli hale gelir ve nanoyapılı bir yüzey oluşur. Bu, nanosütunlar, nanoteller veya nanokoniler gibi özellikleri içerebilir. Genel olarak bu yapılar arasındaki temel fark geometrilerinde yatmaktadır. Nanosütunlar silindirik, nanoteller uzundur ve nanokoniler konik yapılardır. Bu farklı şekiller, özelliklerini ve çeşitli uygulamalarda kullanılma yollarını etkiler. Spesifik yapı ve morfoloji, aşındırma süresi, aşındırma çözeltisinin konsantrasyonu ve kullanılan metal katalizörün türü gibi faktörlere bağlıdır. Bu çalışma bünyesinde süre ve çözelti kontrollü olarak nanoteller üretilmiştir.

Aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra metal katalizör, silikon substratın yüzeyinden çıkarılır ve saf su ile silikon substratın yüzeyi temizlenir ve ardından kurutulur. Bu kimyasal sürecin sonunda nanoyapılı yüzeye sahip bir silikon elde edilir ve bu silikon siyah silikon (B-Si) olarak adlandırılır.

Resim 3.1, metal destekli kimyasal aşındırma işlemini göstermektedir. Resmin (a) bölümü yukarıda anlatılan metal destekli kimyasal aşındırma yönteminin basamaklarını içerir. (b) kısmı siyah silikonun sahip olduğu nanoyapıdan dolayı aşındırılmamış bir silikon ile karşılaştırılmasını içerir. Resimde de görüldüğü gibi aşındırma işlemi sonrası silikonun renginde koyulaşma (neredeyse siyah renge varan bir değişim) gözlenmektedir. Resim 3.1 (c) bölümünde ise elde edilen siyah silikonun taramalı elektron mikroskobu (SEM)

altındaki görüntüsü verilmiştir. Görüldüğü gibi homojen bir nanotel oluşumu gözlenmektedir.

B-Si elde edilme sürecinde yukarıda bahsedildiği gibi bir solüsyon hazırlanmış ve metal katalizör olarak gümüş kullanılmıştır. Siyah silikonlar süre kontrollü olarak elde edilmiştir. Silikon alttaşlar solüsyona 60 dk, 30 dk, 20 dk, 10 dk ve 5 dk maruz bırakılmıştır. Farklı sürelerde üretim yapılmasının sebebi farklı uzunluklarda nanotel elde etmektir. Bu şekilde elde edilen siyah silikonların SEM görüntüleri incelenerek oluşan nanotellerin boyutları tespit edilmiş ve en iyi özelliklere sahip siyah silikon üzerine InSe ince filmi termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. Bahsedilen bu incelemeler ile ilgili detaylı bilgi “SEM ve EDX Analizi ve Bulgular” başlığı altında verilmiştir.

Kimyasal aşındırma genellikle lazer dağlama gibi diğer yöntemlere göre daha uygun maliyetlidir ve bu da onu büyük ölçekli üretim için pratik bir seçim haline getirir. İşlem, dokulandırma derecesi ve sonuçta ortaya çıkan optik özellikler üzerinde hassas kontrole izin verir. Bu nedenle sunulan bu tezde kimyasal aşındırma tekniği tercih edilmiştir.

Kimyasal aşındırma, maliyet etkinliği ve çeşitli nanoyapılı yüzeyler üretme yeteneği nedeniyle siyah silikon oluşturmak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Aşındırma parametrelerini ayarlayarak üreticiler, siyah silikonun yüzey özelliklerini güneş pilleri ve fotodetektörler gibi özel uygulamalara göre uyarlayabilirler. Ancak sürecin çevre ve güvenlik yönlerinin yönetilmesine dikkat edilmelidir.

3.2. InSe İnce Filmlerin Üretim Süreci

Termal buharlaştırma yöntemi, InSe ince filmlerinin üretiminde temel yöntemlerden biridir ve basit, maliyet-etkin bir yaklaşım sunar. Bu süreçte, yüksek saflıkta indiyum selenid (InSe) kaynak malzemesi olarak kullanılır ve vakum odası içinde kontrollü buharlaşma gerçekleştirilir. Daha sonra, buharlaşan InSe molekülleri hazırlanmış alt tabakaların üzerine büyümesi sağlanır ve ince film oluşturulur. Bu süreçte sıcaklık ve buharlaşma hızı gibi birçok parametre kontrol edilir. Bu yöntemin çok yönlülüğü, cam ve siyah silikon dahil olmak üzere çeşitli alt tabakaların üzerine üretim yapabilme imkânı sunmasıdır. Bu da InSe'nin farklı yüzey morfolojileri üzerindeki yapısal ve optik özelliklerini keşfetmeyi kolaylaştırır.

3.2.1. Malzeme hazırlama

InSe ince filmlerini termal buharlaştırma yöntemi ile büyütmeden önce malzemelerin hazırlanması ve alt tabakaların temizlenmesi kritik derecede önem taşımaktadır. Kullanılan malzemenin safsızlık oranı ve alt tabakalara uygulanan temizlik işlemi büyütme sonucunda elde edilecek ince filmin performansını doğrudan etkilemektedir.

InSe ince filmin kalitesini ve homojenliğini sağlamak için alt tabakaların uygun şekilde temizlenmesi çok önemlidir. Temizleme işlemi toz, yağ, tortu ve yapışmayı engelleyebilecek diğer kalıntılar gibi kirletici maddeleri ortadan kaldırır. Bu çalışmada cam ve siyah silikon (B-Si) InSe üretimi için kullanılmıştır. B-Si üretimi içinse silikon kullanılmıştır. Bu üç farklı malzeme için farklı temizleme prosedürleri uygulanmıştır.

B-Si üretimi için silikon substrat temizleme

B-Si üretimi için silikon substrat temizleme, yarı iletken ve siyah silikon üretim süreçlerinde hayati bir adımdır ve sonuç olarak elde edilen cihazların saflığını ve kalitesini doğrudan etkiler. Temizlik işlemi, substrat yüzeyinden kirleticileri ve parçacıkları uzaklaştırmak için bir dizi titiz adımı içerir. İlk olarak, substrat organik çözücü temizliğe tabi tutulur, burada aseton veya metanol gibi çözücülerde yıkanarak yağları ve organik kalıntıları uzaklaştırılır. Bunu takiben, RCA (Radio Corporation of America) temizliği gerçekleştirilir; sülfürik asit, hidrojen peroksit ve deiyonize suyun karışımından oluşan bir çözelti kullanılarak, metal iyonlarını uzaklaştırmak ve yüzeyi daha temiz hale getirmek hedeflenir. Bu yöntem, ilk olarak RCA Corporation (Radio Corporation of America) tarafından geliştirilmiştir.

RCA temizliği genellikle üç ana adımdan oluşur,

1. RCA-1 (Standard Clean 1): Bu adım, alttaş yüzeyindeki organik kirlilikleri ve partikülleri temizler. Karışım, genellikle amonyak (NH_2OH), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve saf su (H_2O) içerir ve yaklaşık $75\text{-}80^\circ\text{C}$ 'de uygulanır.
2. RCA-2 (Standard Clean 2): Bu adım, alttaş yüzeyindeki metalik kirlilikleri giderir. Karışım, genellikle hidroklorik asit (HCl), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve saf su (H_2O) içerir ve yine yaklaşık $75\text{-}80^\circ\text{C}$ 'de uygulanır.

3. Hidroflorik Asit Daldırma (HF Daldırma): Bu adım, alttaş yüzeyindeki doğal oksit tabakasını kaldırır. Karışım, hidroflorik asit (HF) ve saf su (H_2O) içerir ve genellikle oda sıcaklığında uygulanır.

RCA temizliğinden sonra, substrat deiyonize su ile durulanarak kalan kalıntılar temizlenir. Bazı durumlarda, inatçı kirleticileri ortadan kaldırmak için ek bir asit temizleme adımı uygulanabilir. Son olarak, substrat nitrojen gazı ile iyice kurutulur.

Cam alt tabakaların temizliği

InSe ince film üretiminde kullanılan cam alt tabakalar için öncelikle yağ ve benzeri istenmeyen maddelerden uzaklaştırmak için sırasıyla aseton ve izopropil alkol ile ultrasonik banyoda 10 dakika süre ile yıkama işlemi yapılmıştır. Sonrasında kullanılan bu solventin kalıntılarını gidermek için deiyonize su kullanılarak durulama işlemi yapılmıştır. Durulama işlemi tamamlandıktan sonra cam alt tabaka nitrojen kullanılarak kurutulmuştur.

Siyah silikon (B-Si) alt tabakaların temizliği

Üretilen siyah silikonlar (B-Si), InSe ince film büyütme öncesi nazik temizleme işlemine tabi tutulur. Siyah silikonların üzerindeki nanoipliksi yapıların zarar görmemesi için hassas temizleme yapmak çok önemlidir. Yüzey morfolojisini değiştirecek aşındırıcı temizleme tekniklerinin kullanımından uzak durmak gerekir. İzopropil alkol ve deiyonize su kullanarak temizleme işlemi tamamlanır ve nitrojen kullanımı dikkatli bir şekilde yapılarak alt tabakaların kurutulması sağlanır.

Alt tabakaların temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra maskeleme işlemlerinin yapılması gerekir. Bu çalışmada yapısal ve optiksel ölçümler yapılmış olup ilerleyen çalışmalarda ise elektriksel ölçümler yapılacaktır. Bu nedenle alt tabakaların belirli bölgelerinin InSe ince filminden arındırılması gerekir. Bu maskeleme işlemi termal buharlaştırma sisteminin vakum değerlerini olumsuz etkilememek için teflon bant kullanılarak yapılmıştır.

3.2.2. InSe ince filmlerin büyütülmesi

Bu çalışmada InSe ince filmlerinin üretilmesi termal buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde kullanılmak için yüksek saflıkta (%99.9) In ve Se tozları kullanılmıştır. Bu tozlar ince film üretme işlemi için 2 mg In ve 2 mg Se olmak üzere grafit pota (crucible) içerisine eklenmiştir.

Temizleme ve maskeleme işlemi yapılan cam, silikon ve siyah silikon alt tabakalar molibden (Mo) tutucu tekne üzerine termal bant yardımı ile sabitlenmiştir. Bu sabitleme işlemi yapılmadan önce önceki çöktülerden kalan kalıntıları gidermek için buharlaşma kaynağını veya tutucu aseton veya izopropil alkol ile temizlenmiştir.

Bu araştırmada, InSe ince filmini 10⁻⁶ mbar'lık bir vakum altında bir cam, silikon ve siyah silikon altlık üzerine biriktirmek için termal buharlaştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde alümina kaplı tungsten tekne içerisine In ve Se tozları eklenmiştir. Bu cam, silikon ve siyah silikon alt tabakalar, buharlaştırma kaynağı ünitesinin yaklaşık 25 cm yukarısına yerleştirildikten sonra tüm biriktirme işlemi boyunca döndürüldü. Cam alt katmanın döndürülmesi, düzgün bir ince film elde etmemizi sağlamaktadır. Biriktirme hızını belirlemek için Inficon XTM/2 kuvars kristali dönüştürücü tipi biriktirme işlemi monitörü kullanılmıştır ve bu örneklerin ~2-3 Å/s olduğu bulundu. InSe film kalınlığını ölçmek için Dektak 6M kalınlık profilometresi kullanıldı ve kalınlığının ~637 nm olarak ölçülmüştür. Bu kalınlık değeri SEM ölçümü ile doğrulanmıştır. Farklı alt tabakalar üzerine üretilen InSe ince filminin tavlama çeşitli sıcaklıklarda 45 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir (150°C, 250°C ve 350°C) ve 250°C'lik tavlama sıcaklığının nitrojen atmosferi altında 45 dakika süreyle en iyi kristal özellikleri sağladığı gözlenmiştir.

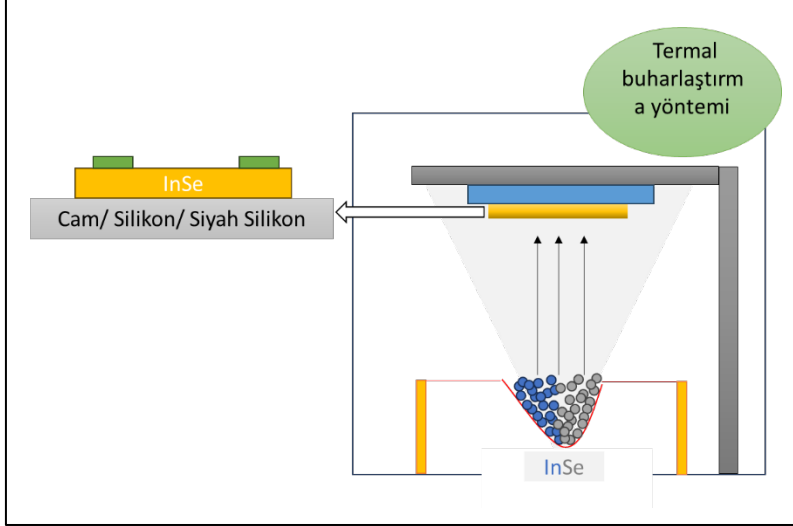
Resim 3.2, kullanılan termal buharlaştırma sisteminin basit bir şematüğünü göstermektedir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan termal buharlaştırma sistemi kullanılarak bu çalışmada incelenen ince filmlerin üretimi yapılmıştır. Burada termal buharlaştırma işleminin temel adımları gösterilmektedir;

Kaynak Malzeme: InSe tozları, yüksek vakum altında grafit pota içinde buharlaştırılır.

Buharlaşma: Buharlaşan InSe molekülleri, vakum ortamında serbestçe hareket eder.

Alt Tabaka: Cam ve siyah silikon alt tabakalar, buharlaşan InSe moleküllerini yakalamak için vakum odasında uygun bir pozisyonda yerleştirilir.

Film Büyümesi: InSe molekülleri, alt tabaka yüzeyine kondanse olur ve ince film tabakası oluşturur.



Resim 3.2. Kullanılan termal buharlaştırma sisteminin şematığı

3.3. InSe İnce Filmlerin Karakterize Edilmesi

Cam ve siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerinin yapısal ve optiksel özelliklerinin karakterize edilmesi ve kıyaslanması yapılmıştır.

Büyütülen ince filmin yapısal özelliklerini incelemek için XRD, EDX ve SEM ölçümleri yapılmıştır. XRD yönteminde $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) ile Rigaku MiniFlex difraktometresi kullanılmıştır. Öte yandan, ilgili elementlerin atomik bileşimini ve yüzey morfolojisini ortaya çıkarmak için EDX ve SEM deneylerinde Zeiss EVO 15 SEM ve EDX dedektörü kullanılmıştır. İncelenen ince filmlerin optik karakterizasyonu oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Cam alt tabaka üzerindeki InSe filminin iletim, yansımaya ve soğurma spektrumları, 500-1000 nm dalga boyu aralığını kullanarak HITACHI UV-2600 ultraviyole-görünür (UV-Vis) Spektrometre ile ölçülmüştür.

3.3.1. Yapısal analizler ve bulgular

Yapısal analiz, mühendislik, malzeme bilimi, fizik ve biyoloji gibi çeşitli alanlarda bir köşe taşı olarak hizmet eder ve karmaşık sistemlerin davranışı ve özellikleri hakkında çok değerli içgörüler sunar. Temelde, yapısal analiz, bir sistem içindeki bileşenlerin nasıl etkileştiğini ve dış kuvvetlere veya uyarıcılara nasıl yanıt verdiğini incelemeyi içerir. Çeşitli analitik teknikler ve metodolojiler kullanılarak, yapısal analiz araştırmacılara, mühendislere ve bilim insanlarına yapıların, malzemelerin ve sistemlerin performansını öngörmelerini, anlamalarını, optimize etmelerini ve geliştirmelerini sağlar. Köprülerin ve binaların istikrarını değerlendirmekten kristal malzemelerdeki atom düzenlemelerini karakterize etmeye kadar, yapısal analiz, fiziksel dünyanın anlayışını ilerletmede ve teknoloji ve tasarım alanlarında yenilikleri harekete geçirmede hayati bir rol oynar.

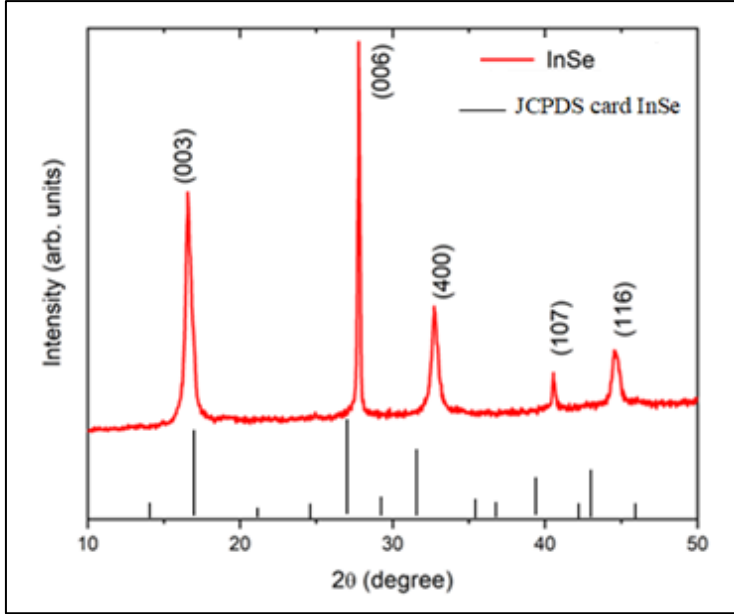
Yapısal analizler, nanomalzemeler için kullanıldığında, genellikle nanoyapıların ve nanomalzemelerin özelliklerini anlamak ve manipüle etmek için büyük önem taşır. Nanomalzemelerin boyutları genellikle nanometre ölçeğinde olduğu için, geleneksel karakterizasyon teknikleri genellikle yetersiz kalır ve özel teknikler ve ekipmanlar gerektirir. Bu nedenle, yapısal analiz nanomalzemeler için önemli bir araçtır.

Nanomalzemelerin yapısal analizi, genellikle yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve analiz tekniklerini içerir. Bu teknikler arasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, yapısal analiz, nanomalzemelerin kristalografik yapılarını belirlemek için X-ışını kırınımı (XRD) da önemli analizler arasında yer alır. Bu teknikler, nanomalzemelerin kristal yapılarını, kristal yönelimlerini ve kristal kusurlarını belirlemek için kullanılır.

Bu yapısal analiz teknikleri, nanomalzemelerin özelliklerini, performanslarını ve uygulamalarını anlamak ve geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Nanomalzemelerin yapısal özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, nanoteknoloji ve nanobilim alanlarında yeni keşifler yapılmasına ve yeni nesil malzemelerin tasarımına ve geliştirilmesine olanak tanır.

XRD analizi ve bulgular

InSe ince filminin kristal yapısı ve yönelimini analiz etmek için X-ray kırınımı (XRD) yöntemi kullanılmıştır. İncelenen InSe ince filminin XRD desenini Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Gözlemlenen tabakalar arası mesafe d_{hkl} , JCPDS kart No. 34-1431 verileriyle karşılaştırılmıştır. InSe filminde sırasıyla (003), (006), (400), (107) ve (116) düzlemlerine karşılık gelen 17.36° , 28.21° , 33.83° , 41.60° ve 45.97° açılarında beş kırınım tepe noktası gösterilmiştir. Kırınım zirveleri, örneğin bir InSe filmi olduğunu gösterir [18-21]. Ayrıca, en güçlü kırınım zirvesi (006) kafes düzleminde gözlemlendi. Sonuç olarak, XRD deseni, incelenen InSe ince filminin başarıyla hazırlandığını ve iyi bir kristallığe sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Çalışılan InSe ince filminin XRD deseni

Gözlemlenen katmanlar arası mesafeler (d_{hkl}), referans verilen verilerle iyi bir şekilde eşleşerek InSe ince filmin yapısal bütünlüğünü ve kalitesini doğrular. Bu kırınım tepe noktalarının belirlenmiş standartlarla tutarlılığı, filmin mükemmel kristallik ile başarılı bir şekilde hazırlanmasının altını çizmektedir.

Verilen XRD grafiği, InSe ince filminin kristal yapısını ve kalitesini detaylı bir şekilde analiz etmemizi sağlar. Grafikte, InSe filminin (003), (006), (400), (107) ve (116) düzlemlerine karşılık gelen beş kırınım tepe noktası sırasıyla 17.36° , 28.21° , 33.83° ,

41.60° ve 45.97° açılarında gözlemlenmiştir. En güçlü kırınım zirvesi (006) düzleminde 28.21° açısında gözlemlenmiştir, bu da filmin kristal yapısında bu düzlemin baskın olduğunu gösterir. Tepe noktalarının keskinliği ve şiddeti, filmin yüksek kristal kalitesine ve iyi kristalleşmiş bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Ayrıca, gözlemlenen tepe noktaları JCPDS kart No. 34-1431 verileriyle iyi bir uyum sağlamaktadır, bu da filmin InSe yapısına sahip olduğunu ve referans verilerle tutarlı bir şekilde büyütüldüğünü doğrular. Grafik üzerinde başka fazlara ait herhangi bir ek tepe noktası gözlemlenmemesi, filmin tek fazlı ve yüksek saflıkta olduğunu gösterir. Yüksek kristallik ve belirgin kristal yönelimi, InSe ince filmini optoelektronik, fotovoltaiik ve sensör uygulamaları gibi ileri teknolojik alanlarda kullanım için uygun hale getirmektedir. Bu bulgular, filmin üstün yapısal özelliklerini ve potansiyel uygulama alanlarını ortaya koyar.

Özetle, XRD analizi yalnızca InSe ince filmin kimliğini doğrulamakla kalmıyor, aynı zamanda güçlü ve iyi tanımlanmış kırınım tepe noktalarının kanıtladığı gibi üstün kristal kalitesini de vurguluyor. Bu yüksek kristallik, hassas kristal yöneliminin ve yapısının çok önemli olduğu potansiyel uygulamalar için çok önemlidir. Bulgular, hazırlanan InSe ince filminin yüksek kalitede olduğunu ve iyi tanımlanmış kristal malzemeler gerektiren ileri teknolojik uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir.

SEM ve EDX analizi ve bulgular

Bu başlık altında tez çalışması sırasında üretilen siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerin SEM ve EDX analizleri incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerinin yüzey morfolojisinin ayrıntılı görüntülerini sağlamaktadır. Siyah silikon substratların SEM görüntüleri, yüzey alanını önemli ölçüde artıran nanoyapılara sahip oldukça dokulu bir yüzey ortaya koymaktadır. Bu benzersiz morfoloji, fotovoltaiik hücreler ve sensörler gibi gelişmiş ışık emilimi gerektiren uygulamalar için faydalıdır.

InSe ince filmleri için SEM analizi, siyah silikon substrat üzerinde düzgün ve sürekli bir film birikimi göstermektedir. Yüzey morfolojisi, görünür herhangi bir çatlak veya boşluk olmaksızın InSe katmanının iyi bir şekilde kaplandığını göstermektedir. Bu homojenlik, filmin optik özellikleri açısından çok önemlidir ve potansiyel uygulamalarda tutarlı performans sağlamaktadır.

Siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerin elementel bileşimini analiz etmek için Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDX) kullanılmıştır. EDX spektrumları, siyah silikon substratlarda silikonun varlığını doğrulamakta ve karakteristik tepe noktaları silikona karşılık gelmektedir. InSe ince filmleri için EDX analizi, indiyum (In) ve selenyuma (Se) karşılık gelen tepe noktalarını tespit ederek InSe katmanının başarılı bir şekilde biriktirildiğini doğrulamaktadır. Element haritalaması ayrıca In ve Se'nin film boyunca homojen bir dağılımını göstererek homojen bir bileşime işaret etmektedir.

Birleştirilmiş SEM ve EDX analizleri, siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerinin yapısal ve bileşimsel bütünlüğüne ilişkin kapsamlı bilgiler sağlamıştır. Bu bulgular, malzeme özelliklerinin anlaşılması ve üretim süreçlerinin gelecekteki uygulamalar için optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Sonuçlar, üretilen siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerinin istenen yapısal ve bileşimsel niteliklere sahip olduğunu ve bu özelliklerin onları ileri teknolojik uygulamalar için uygun hale getirdiğini doğrulamaktadır.

Siyah silikon alttaşların SEM ve EDX analizleri

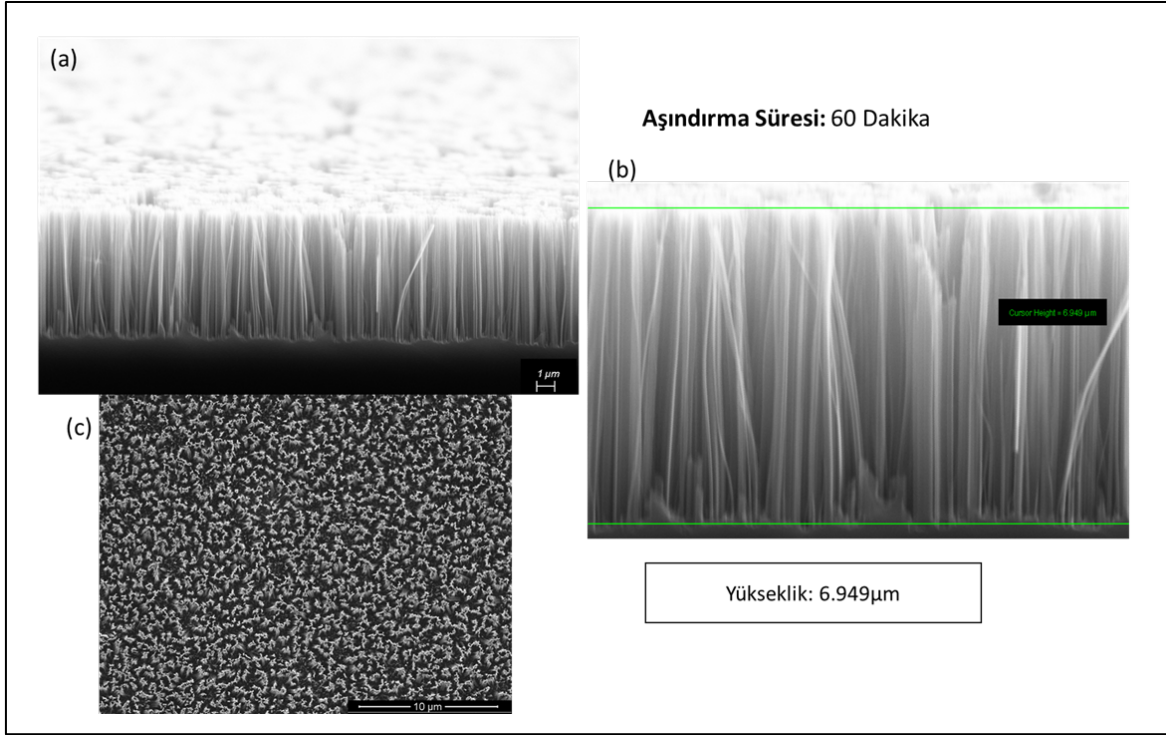
Siyah Silikon (B-Si), siyah renkli, yüksek yüzey alanına sahip mikro ve nano ölçekte pürüzlülük bulunan bir silikon formudur. Bu yüzey morfolojisi, siyah silikonun karakteristik siyah görünümünü verir ve ona benzersiz optik ve elektronik özellikler kazandırır. Tarama elektron mikroskobu (SEM), siyah silikonun yapısal ve morfolojik özelliklerini analiz etmek ve karakterize etmek için kullanılan anahtar bir tekniktir.

SEM, siyah silikon yüzeyinin mikro ve nano ölçekteki yapıları, örneğin sivri uçlar, koniler veya piramidal özellikler gibi özelliklerini yüksek çözünürlüklü görüntüleme ile ortaya çıkarır. Bu çalışmada, metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile nanoteller elde edilmiş ve bu nano yapılar SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir.

SEM görüntüleri, siyah silikon yüzeyinin topografisini incelemeye olanak sağlar. Araştırmacılar, yansıma önleyici kaplamalar ve sensör yüzeyleri gibi uygulamalar için kritik olan nano yapıların dağılımını, yüksekliğini ve boyut oranını değerlendirebilirler.

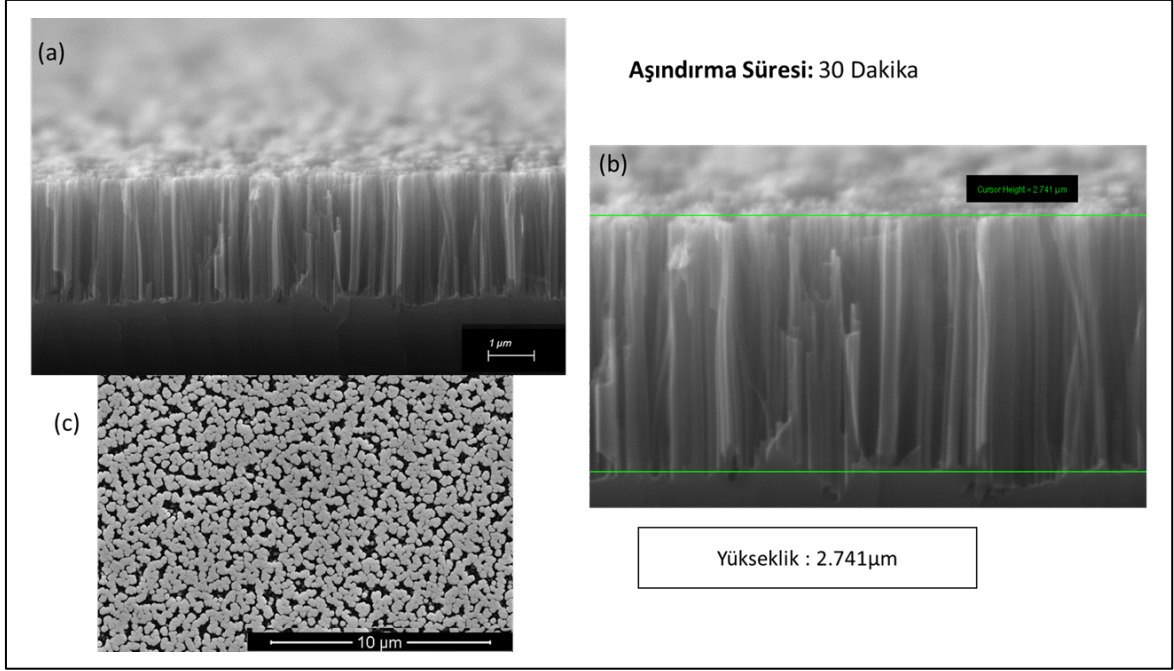
Siyah silikonun kesitsel örneklerini incelemek için SEM kullanılabilir; bu, nano yapıların derinliğini ve materyal boyunca nasıl değiştiğini incelemeyi sağlar. Metal destekli

kimyasal aşındırma yöntemi ile süre kontrollü olarak bu nano yapıların boyutları değiştirilebilir. Yani süre kontrollü olarak farklı uzunluklarda nanoteller üretilir. Bu çalışmada, silikon alttaşlar 5 dakika, 10 dakika, 20 dakika, 30 dakika ve 60 dakika süre ile solüsyona maruz bırakılmış ve farklı boyutlarda nanoteller elde edilmiştir. Bu nanoteller ve boyutları SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir.



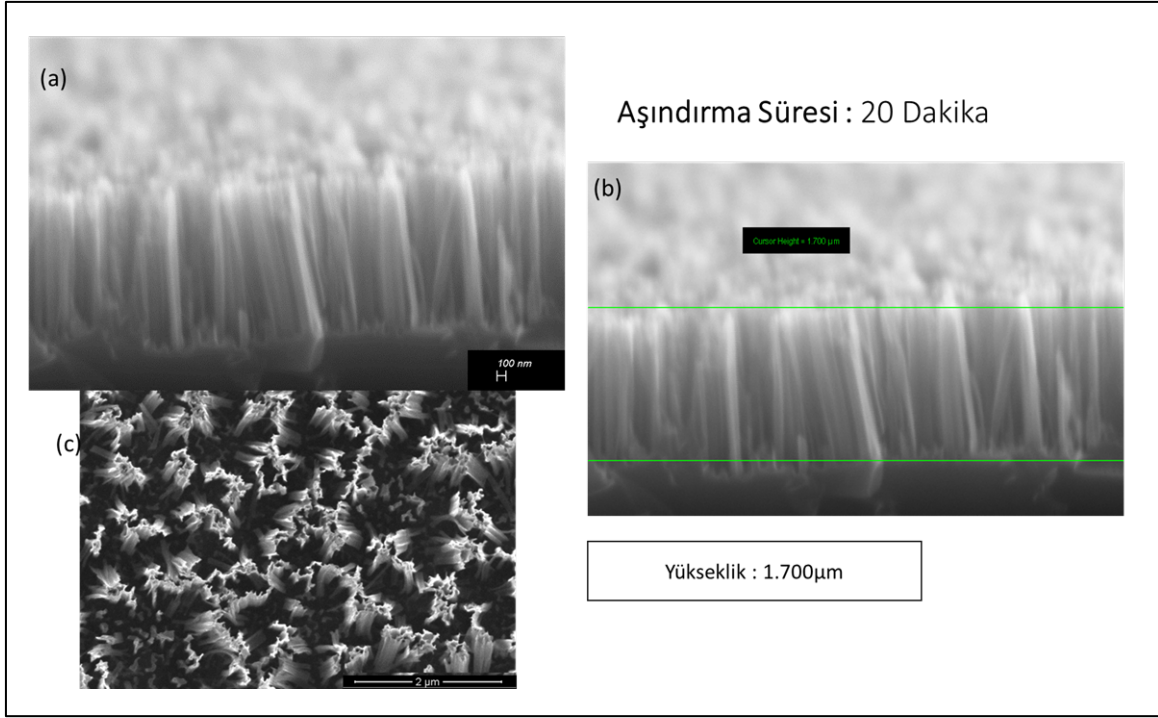
Şekil 3.2. Solüsyona (a) 60 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 60 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 60 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü

Şekil 3.2, Solüsyona 60 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntülerini içermektedir. 60 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nanotellerinin uzunluklarını gösteren kesit SEM görüntüsü şekilde belirtilmiştir. Bu üretim sonucunda 6.949 µm uzunluğunda nanoteller oluşmuştur. Oluşan bu nanoteller SEM görüntülerinde net bir şekilde görünmektedir. Alınan bu SEM görüntüleri kullanılarak nanotellerin uzunlukları rahatça tespit edilmiştir. Bu üretimden elde edilen B-Si'un yukarıdan çekilen SEM görüntüsü de Şekil 3.2'de verilmiştir.



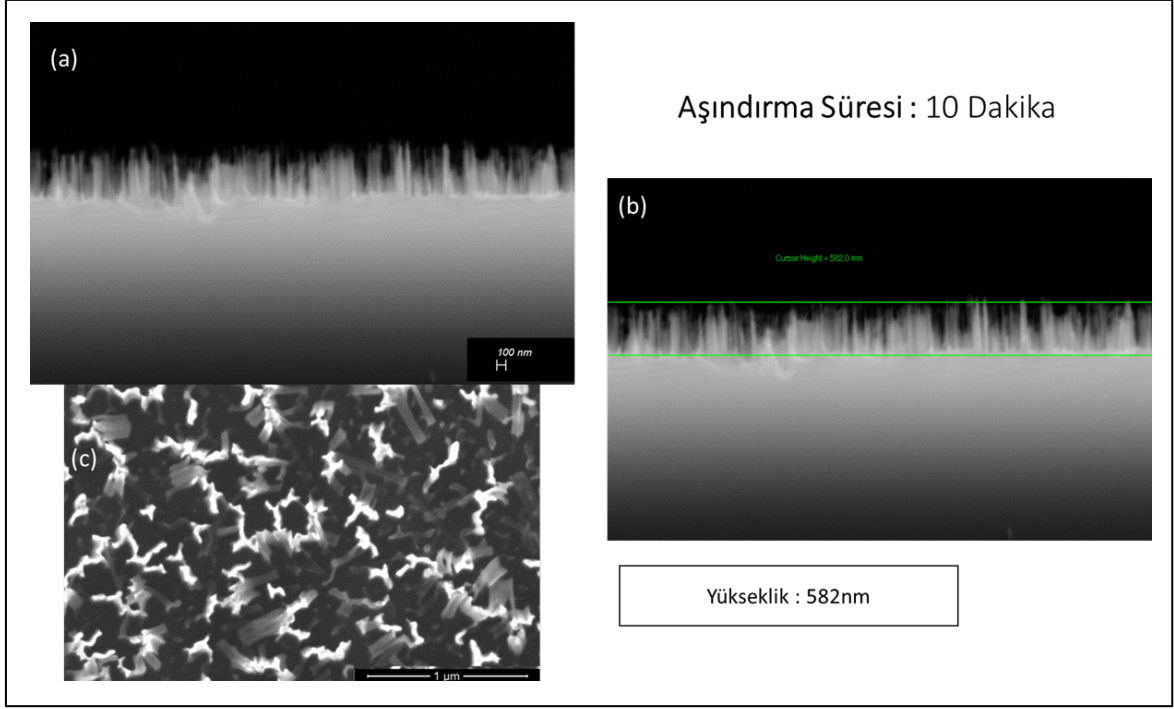
Şekil 3.3. Solüsyona (a) 30 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 30 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 30 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.

Şekil 3.3, Solüsyona 30 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntülerini içermektedir. 30 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nanotellerinin uzunluklarını gösteren kesit SEM görüntüsü şekilde belirtilmiştir. Bu üretim sonucunda 2.741 µm uzunluğunda nanoteller oluşmuştur. Oluşan bu nanoteller SEM görüntülerinde net bir şekilde görünmektedir. Alınan bu SEM görüntüleri kullanılarak nanotellerin uzunlukları rahatça tespit edilmiştir. Bu üretimden elde edilen B-Si'un yukarıdan çekilen SEM görüntüsü de Şekil 3.3'te verilmiştir. En ideal boyuttaki nanoteller bu üretimde elde edilmiştir. Nanoteller üzerinde herhangi bir topaklanma mevcut değildir. Bu nedenle, InSe ince filmlerinin üretimi sırasında 30 dakika solüsyona maruz bırakılmış B-Si alttaşlar kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda farklı uzunlukta nanotel içeren B-Si'lara da aynı parametrelerde InSe üretimi yapılacak ve alınan sonuçlar karşılaştırılacaktır.



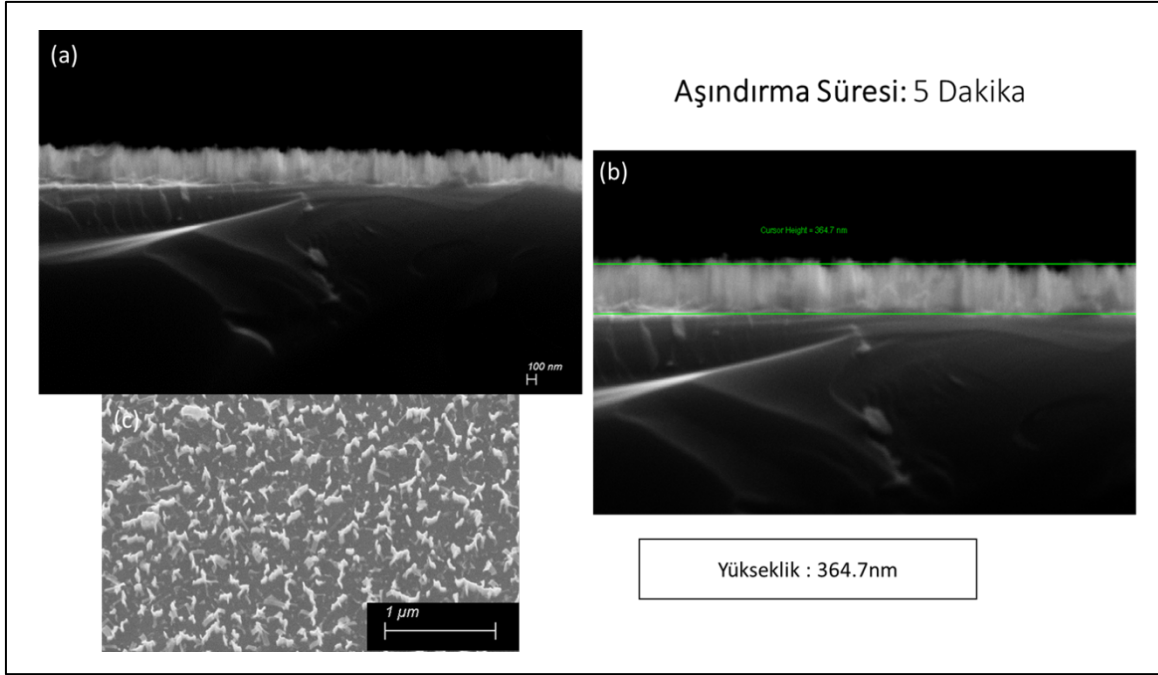
Şekil 3.4. Solüsyona (a) 20 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü

Şekil 3.4, Solüsyona 20 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntülerini içermektedir. 20 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nanotellerinin uzunluklarını gösteren kesit SEM görüntüsü şekilde belirtilmiştir. Bu üretim sonucunda 1.700 µm uzunluğunda nanoteller oluşmuştur. Oluşan bu nanoteller SEM görüntülerinde net bir şekilde görünmektedir. Alınan bu SEM görüntüleri kullanılarak nanotellerin uzunlukları rahatça tespit edilmiştir. Bu üretimden elde edilen B-Si'un yukarıdan çekilen SEM görüntüsü de Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Solüsyona (a) 10 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü.

Şekil 3.5, Solüsyona 10 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntülerini içermektedir. 10 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren kesit SEM görüntüsü şekilde belirtilmiştir. Bu üretim sonucunda 582 nm nanoteller oluşmuştur. Oluşan bu teller SEM görüntülerinde net bir şekilde görünmektedir. Alınan bu SEM görüntüleri kullanılarak nanotellerin uzunlukları rahatça tespit edilmiştir. Bu üretimden elde edilen B-Si'un yukarıdan çekilen SEM görüntüsü de Şekil 3.5.'de verilmiştir. Solüsyona maruz bırakılma süresi görece olarak diğer örneklere göre daha kısa olduğu için homojen bir nanotel oluşumu gözlenmemektedir. Homojen oluşum olmadığı için bazı bölgelerde nanoteller üst üste yıkılmış ve topaklanmalar oluşmuştur.



Şekil 3.6. (a) Solüsyona 5 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntüsü (kesit). (b) 5 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nano tel uzunluklarını gösteren SEM görüntüsü (kesit). (c) 5 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un SEM görüntüsü

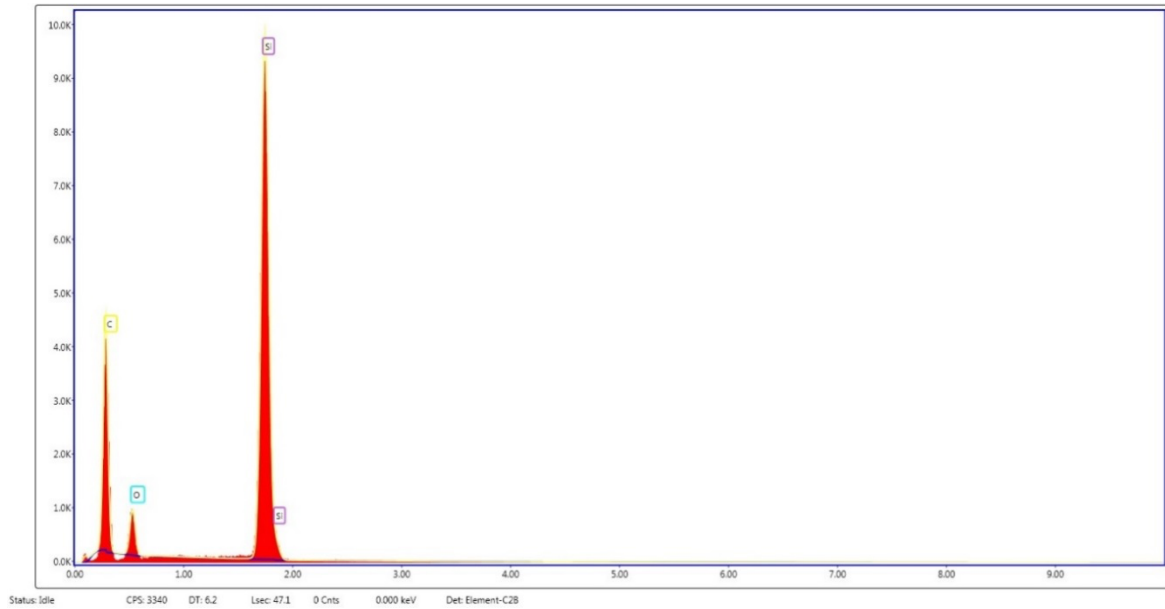
Şekil 3.6. Solüsyona 5 dakika maruz bırakılan silikon alttaşın SEM görüntülerini içermektedir. 5 dakikalık üretimden elde edilen B-Si'un nanotellerinin uzunluklarını gösteren kesit SEM görüntüsü şekilde belirtilmiştir. Bu üretim sonucunda 365.7 nm uzunluğunda nanoteller oluşmuştur. Oluşan bu teller SEM görüntülerinde net bir şekilde görünmektedir. Alınan bu SEM görüntüleri kullanılarak nanotellerin uzunlukları rahatça tespit edilmiştir. Bu üretimden elde edilen B-Si'un yukarıdan çekilen SEM görüntüsü de Şekil 3.6'da verilmiştir. Solüsyona maruz bırakılma süresi görece olarak diğer örneklere göre daha kısa olduğu için homojen bir nanotel oluşumu gözlenmemektedir. Homojen oluşum olmadığı için bazı bölgelerde nanoteller üst üste yıkılmış ve topaklanmalar oluşmuştur. Hatta bazı bölgelerde nanotel oluşumu gözlenmemiştir.

60 dakika, 30 dakika, 20 dakika, 10 dakika ve 5 dakikalık üretimleri içeren bu çalışmaya bakıldığında; alttaşların solüsyona maruz bırakıldığı süre azaldıkça siyah silikonların üzerinde oluşan nanotel yapıların boylarının kısaldığı gözlenmiştir. 60 dakikalık üretimde nanotellerin boyları görece diğer üretimlere göre daha uzun olduğu için bazı bölgelerde nanotellerde kırılmalar ve nanotellerin üst kısmında birleşmeler ve topaklanmalar görülmüştür. 30 dakikalık aşındırmanın bu deney seti içerisinde en ideal morfolojiye sahip

olduğu tespit edilmiş ve InSe ince film üretimlerinde bu siyah silikonlar kullanılmıştır. Solüsyona tabi tutulma süresi azaldıkça nanotellerin boylarında bir kısalma olduğu görülmüştür. Hatta 10 dakikalık ve 5 dakikalık üretimler incelendiğinde, silikonun bazı bölgelerinde nanotel oluşmadığı ya da bu nano yapıların yeni yeni oluşmaya başladığı tespit edilmiştir.

Siyah silikonun SEM analizi, üretim süreçlerinde kalite kontrolü için önemli bir araçtır. Nano yapılarıdaki kusurların, tutarsızlıkların veya istenmeyen değişkenliklerin tespitini sağlar. Sonuç olarak, SEM analizleri, siyah silikonun mikro ve nano ölçekteki özelliklerine, morfolojisine, yapısına ve bileşimine dair temel bilgiler sunar. Bu analizler, araştırmacılara ve üreticilere, siyah silikonu fotovoltaik, fotodedektörler ve diğer optoelektronik cihazlar gibi çeşitli uygulamalar için optimize etmede yardımcı olur.

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) analizi, siyah silikon (B-Si) substratlarının elementel bileşimini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. En iyi morfolojiye sahip olan 30 dakika üretimden elde edilen siyah silikonun EDX spektrumu alınmış ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. 30dk solüsyona maruz bırakılan B-Si 'un EDX spektrumu.

EDX spektrumları, substratın beklenen bileşimi ile uyumlu olarak baskın elementin silikon (Si) olduğunu ortaya koymaktadır. Silikonun karakteristik zirveleri açıkça tanımlanabilir olup, substratın saflığını ve bileşimini doğrulamaktadır. Ek olarak, silikon yüzeylerinde

tipik olarak bulunan doğal oksit tabakasına atfedilebilecek iz miktarda oksijen (O) tespit edilmiştir. EDX analizinden elde edilen element haritalama, substrat boyunca homojen bir silikon dağılımı göstermekte ve yüzey özelliklerinin düzgün olduğunu belirtmektedir. Bu bulgular, siyah silikon substratlarının yüksek kaliteli hazırlığını doğrulamakta ve bu substratların sonraki ince film kaplamaları ve çeşitli teknolojik alanlarda kullanılabilirliğini sağlamaktadır.

EDX spektrumunun analizi, siyah silikon (B-Si) substratlarının elementel bileşimini ve saflığını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Spektrumda görülen yüksek ve keskin silikon (Si) tepe noktası, silikonun yüksek saflıkta olduğunu ve substratın ana bileşeni olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, spektrumda küçük bir karbon (C) zirvesi gözlemlenmiştir, bu da yüzeyde organik kirleticilerin veya karbon bazlı kalıntıların varlığını işaret edebilir. Ölçümün yüksek hassasiyetle gerçekleştirildiği ve elde edilen verilerin güvenilir olduğu anlaşılmaktadır. İz miktarda oksijen (O) tespit edilmesi, yüzeyde doğal bir oksit tabakasının varlığını gösterir; bu da silikonun havadaki oksijenle reaksiyona girerek ince bir SiO₂ tabakası oluşturduğunu belirtir. Element haritalama sonuçları, silikonun substrat boyunca homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymakta ve yüzey özelliklerinin tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu homojenlik ve yüksek saflık, siyah silikonun fotovoltaik cihazlar, fotodetektörler ve sensörler gibi çeşitli teknolojik uygulamalarda kullanılabilirliğini doğrulamaktadır. Ayrıca, spektrum, üretim sürecinde oluşabilecek kontaminasyon veya kusurları belirlemede önemli bir araç olarak kullanılmıştır, bu da üretim sürecinin iyileştirilmesine yönelik değerli bilgiler sunmaktadır.

InSe ince filmlerin SEM ve EDX analizi ve bulguları

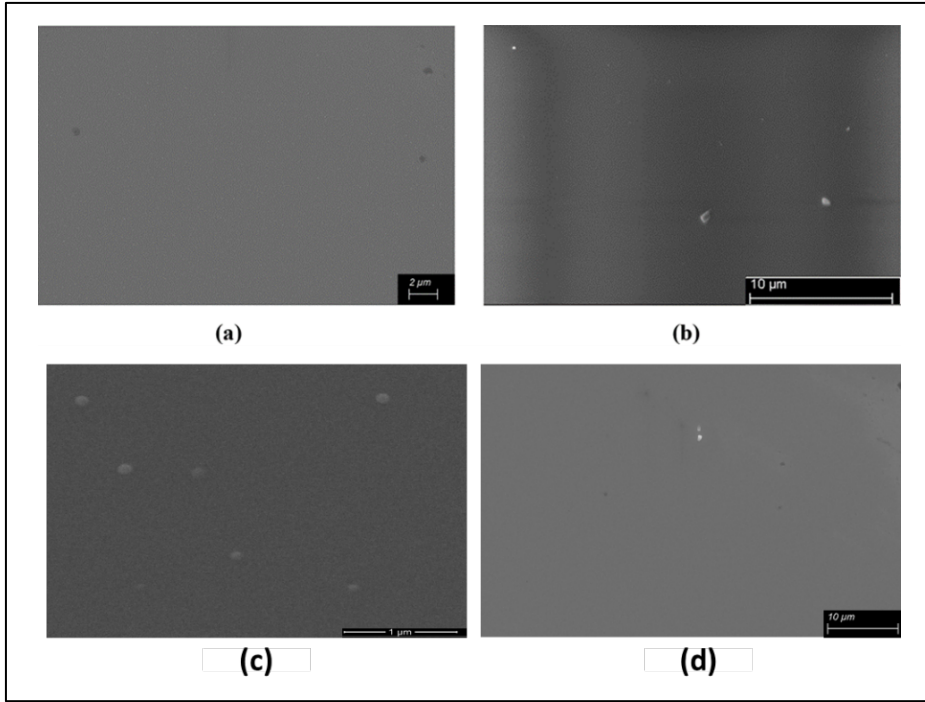
Çalışmada kullanılan siyah silikon (B-Si) alttaşlar sabit bir solüsyon hazırlanarak süre kontrollü olarak elde edilmiştir. Silikon alttaşlar 60 dakika, 30 dakika, 20 dakika, 10 dakika ve 5 dakika süreleri boyunca hazırlanan solüsyona maruz bırakılmışlardır. Farklı sürelerde yapılan aşındırma işlemi farklı boyutlarda nanotel oluşumunu sağlamıştır. Nanotel boyutları SEM cihazı kullanılarak tespit edilmiştir.

İncelenen InSe ince filmin yüzey morfolojisini incelemek için SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) kullanılmıştır. Cam ve siyah silikon üzerine büyütülen (30dk solüsyona maruz bırakılan alttaş kullanılmıştır) InSe filmin SEM görüntüleri incelenmiştir (Şekil

3.8). Bu SEM görüntüleri, InSe filminin düzgün ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğunu göstermektedir.

(a) ve (c) alt görüntülerinde, daha küçük ölçeklerdeki detaylar gözlemlenebilirken, (b) ve (d) alt görüntülerinde daha geniş alanlar incelenmiştir. Bu kapsamlı analiz, filmin homojenliğini ve yüzey pürüzsüzlüğünü doğrulamakta olup, film üretim sürecinin kalitesini göstermektedir.

(a)ve (b) Cam üzerine büyütülen InSe ince filmlerin farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri (c)- (d) Siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerin farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri



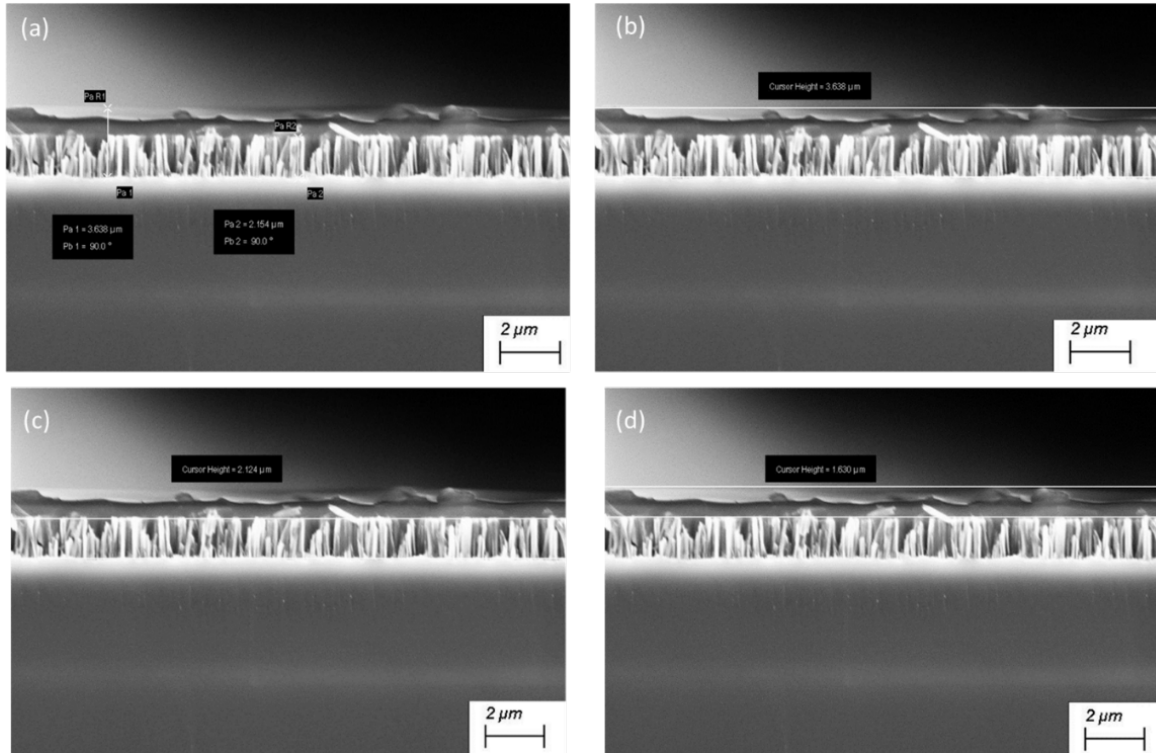
Şekil 3.8. (a)- (b) Cam üzerine büyütülen InSe ince filmlerin farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri (c)- (d) Siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerin farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri

Solüsyona 30 dakika maruz bırakılarak üretilen siyah silikon deney setinin en ideal morfolojiye sahip olduğu SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir ve InSe ince film üretimlerinde bu siyah silikonlar kullanılmıştır. Şekil 3.10'da siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerin SEM görüntüleri verilmiştir.

Şekil 3.9. (a) kısmında filmin toplam kalınlığı 3.638 μm olarak görülmektedir. Nanotel boyu ise 2.154 μm olarak ölçülmüştür. InSe ince film kaplamadan önce 30 dakika süre ile üretilen nanotellerin boyu 2.741 μm olarak ölçülmüştür. Kaplama öncesi ve sonrası nanotellerin uzunluklarında oluşan 0.587 μm 'lik küçük farkın sebebi, kaplama yapılırken nanoteller üzerinde oluşan deformasyonlar olabilir.

Şekil 3.9. (b) kısmında nanotel ve InSe ince filminin toplam kalınlığı 3.638 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.9. (c) görüntüsünde ise nanotellerin ortalama olarak boyutları 2.124 μm olarak tespit edilmiştir. Son SEM görüntüsünde (d) ise InSe ince filminin kalınlığı 1.630 μm olarak ölçülmüştür.

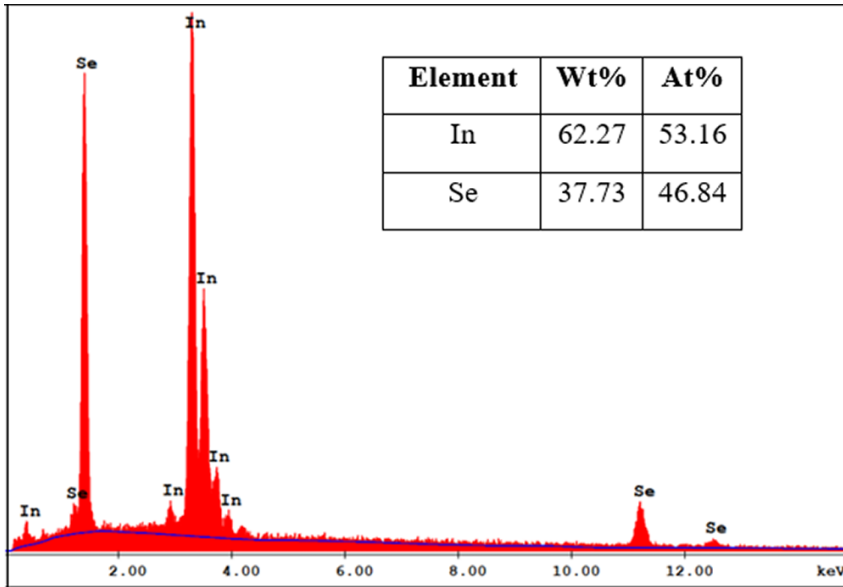
Bu SEM görüntüleri, üretim sürecinde elde edilen nanoyapıların boyutlarının ve morfolojilerinin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. InSe ince film kaplamadan önce ve sonra nanotellerin boylarındaki değişiklikler, kaplama sürecinde oluşabilecek mekanik deformasyonların bir göstergesi olabilir. Bu tür analizler, ince filmlerin ve nanoyapıların üretim süreçlerinde kalite kontrolü ve optimizasyonu için kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.9. (a), (b), (c), (d) Siyah silikon üzerine büyütülen InSe ince filmlerin SEM görüntüleri

Şekil 3.9. (a), (b), (c), ve (d) kısımlarında görüldüğü gibi metal destekli aşındırma yöntemi ile üretilen siyah silikonlar üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen InSe ince filmler yer almaktadır. SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi homojen bir kaplama gerçekleşmiştir. Üretim sırasında nanotellerde ciddi kırıklar gözlenmemiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi hem nanotel üretim yöntemi hem de ince film üretim yöntemi sağlıklı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar hem siyah silikon nanotellerin hem de InSe ince filmlerin üretim süreçlerinin başarılı olduğunu ve kaliteli, homojen yapılar elde edildiğini göstermektedir.

Sunulan bu tezde termal büyütme yöntemi ile farklı alttaşlar üzerine büyütülen InSe ince filminin elementel bileşimi EDX kullanılarak incelenmiştir. İncelenen InSe ince filminin EDX (Enerji Dağılım X-ışını Spektrometresi) spektrumu Şekil'de gösterilmektedir. Spektrumda gözlenen tepe noktaları, indiyum (In) ve selenyum (Se) elementlerinin karakteristik emisyon tepe noktaları ile ilişkilidir, ayrıca InSe ince filminin atomik bileşim oranını da göstermektedir. Spektrum analizleri, In 'nin atomik bileşim oranının 53.16:46.84 (53:47) olduğunu tespit etmiştir. Bu oran, InSe ince filminin kimyasal formülü için kabul edilebilir bir orandır. Elementel bileşimin bu doğruluğu, filmin üretim sürecinin kontrollü ve başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. In ve Se'nin ağırlık yüzdeleri sırasıyla %62.27 ve %37.73 olarak belirlenmiştir, bu da filmin homojen bir bileşime sahip olduğunu doğrulamaktadır. EDX analizi, üretilen InSe ince filminin yüksek kalitede olduğunu ve çeşitli teknolojik uygulamalar için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.10. Çalışılan InSe ince filminin EDX spektrumu.

3.3.2. Optiksel analizler ve bulgular

Bu başlık altında, cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerin optik özellikleri UV-Vis spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. UV-Vis spektroskopisi, ince filmlerin şeffaflık, absorpsiyon ve bant aralığı gibi optik özelliklerine dair değerli bilgiler sağlamıştır.

InSe ince filmlerin cam ve siyah silikon substratlar üzerindeki UV-Vis spektrumları, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde belirgin emilim pikleri ortaya koymuştur. Emilim spektrumları, dalga boyları uzadıkça emilimin kademeli olarak arttığını göstermiş ve yarı iletkenlerin karakteristik doğrudan bant aralığı geçişlerinin varlığını ortaya koymuştur.

UV-Vis spektrumlarındaki absorpsiyon analizi, InSe ince filmlerin optik bant aralığının belirlenmesine imkân vermiştir. Bant aralığı enerjisinin substrat tipine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiş ve cam ile siyah silikon substratlar üzerine depolanan filmler arasında farklılıklar tespit edilmiştir. Bu bant aralığı enerjisinin farklılığı, ince filmlerin elektronik yapısını etkileyen substrat morfolojisi ve yüzey özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, InSe ince filmlerin optik geçirgenliği görünür spektrum boyunca değerlendirilmiştir. Geçirgenlik spektrumları, görünür bölgede yüksek şeffaflık göstermiş ve InSe ince filmlerin verimli ışık iletimi gerektiren optoelektronik uygulamalar için potansiyelini ortaya koymuştur. Bu bulgular, InSe ince filmlerin ileri teknolojik uygulamalarda kullanılabilirliğini ve performansını değerlendirmek açısından önemlidir.

UV-Vis analizi ve bulgular

Genel olarak, UV-Vis spektroskopisi analizi, cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerin optik özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlamıştır. UV-Vis analizi, ince filmlerin şeffaflık, absorpsiyon ve bant aralığı gibi temel optik özelliklerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur.

İnce filmlerin UV-Vis spektrumları, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde belirgin emilim pikleri göstermiştir. Bu spektrumlar, yarı iletkenlerin karakteristik doğrudan bant aralığı geçişlerini ve dalga boyları uzadıkça emilimin kademeli olarak arttığını ortaya koymuştur.

Absorbsiyon analizi, InSe ince filmlerin optik bant aralığının belirlenmesine olanak tanımış ve bant aralığı enerjisinin substrat tipine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Cam ve siyah silikon substratlar üzerindeki filmler arasında bant aralığı enerjilerinde farklılıklar tespit edilmiştir. Bu farklılıklar, substrat morfolojisi ve yüzey özelliklerinin ince filmlerin elektronik yapısını etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, InSe ince filmlerin optik geçirgenliği görünür spektrum boyunca değerlendirilmiş ve filmlerin yüksek şeffaflık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yüksek geçirgenlik, InSe ince filmlerin verimli ışık iletimi gerektiren optoelektronik uygulamalar için potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bulgular, ince filmin optik davranışının daha iyi anlaşılmasına ve fotonığe ve optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamalarına katkıda bulunmaktadır. UV-Vis spektroskopisi ile elde edilen bu değerli bilgiler, InSe ince filmlerin ileri teknolojik uygulamalarda kullanılabilirliğini ve performansını değerlendirmek açısından önemlidir.

Cam üzerine üretilen InSe ince filminin UV-Vis analizi ve bulgular

UV-Vis spektroskopisi yöntemi, bir malzeme tarafından iletilen veya emilen ışığın yoğunluğunu ölçer. Bu çalışmada, UV-Vis spektroskopisi, incelenen InSe filminin optik özelliklerini dalga boyu işlevi olarak belirlemek için kullanıldı. InSe filminin optik özelliklerini incelemek için optik iletim (T), emilim (A) ve yansıma (R) spektrumları kullanılmıştır. İncelenen filmin 500-1000 nm dalga boyu aralığında ölçülen yansıma, iletim ve emilim değerlerini göstermektedir. İletim spektrumları, ~575 nm ve ~805 nm dalga boyu değerlerinde iki tepe noktası gözlemlendiğini göstermektedir. 575 nm'den sonraki dalga boyu değerlerinde gözlemlenen iletimdeki azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilebilir ve InSe'de yaklaşık 800 nm dalga boyundan sonraki emilimdeki artış, malzemenin elektronik yapısı ve fotonların yük taşıyıcılarla etkileşimi ile açıklanabilir.

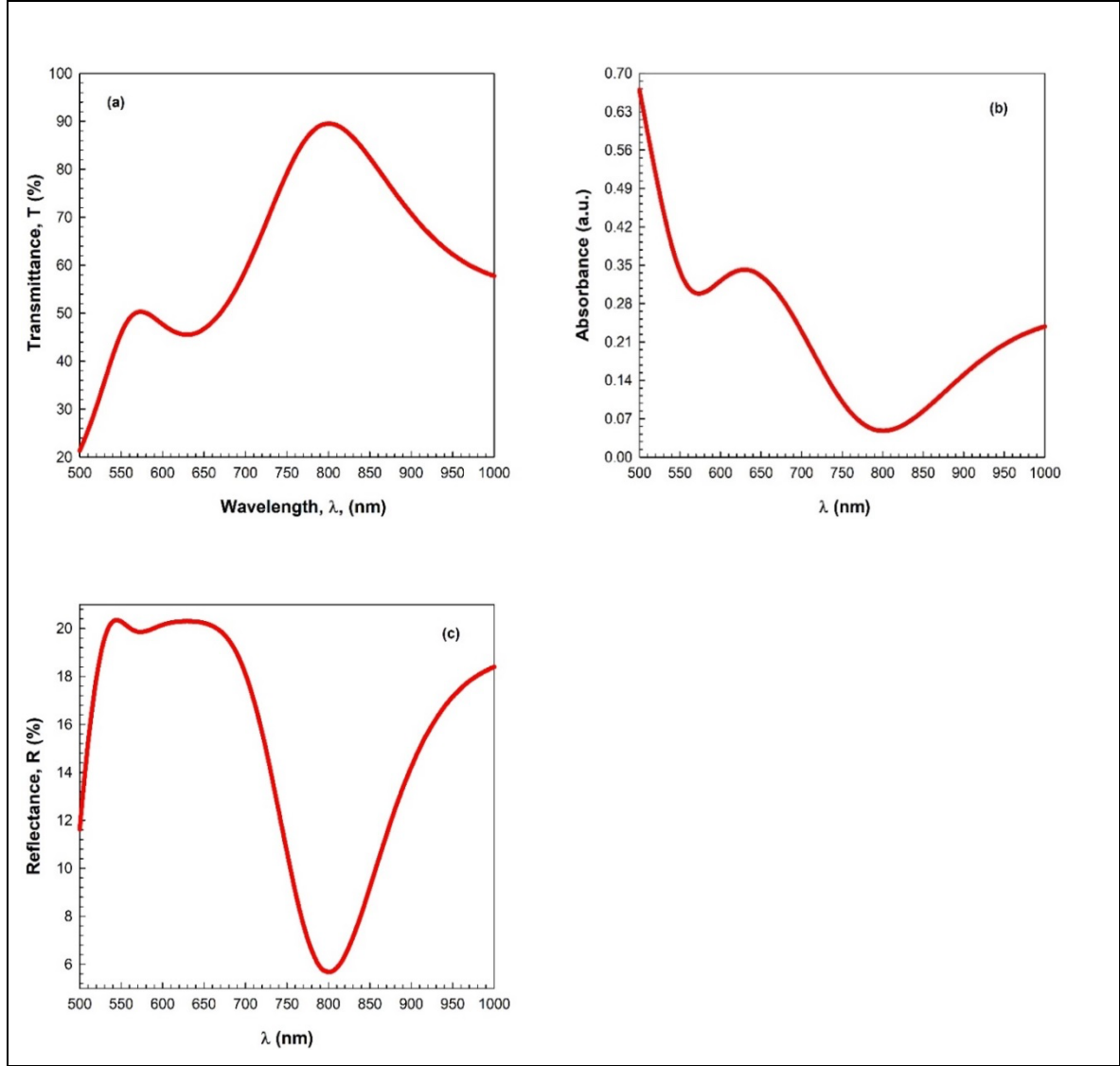
İletimde Azalma (575 nm): InSe gibi yarı iletkenlerde, serbest taşıyıcılar (elektronlar ve deşikler), enerji seviyeleri malzemenin bant boşluğu ile eşleştiğinde fotonları emebilirler. Bant boşluğunun ötesinde, emilim artar ve bu da iletimde bir azalmaya neden olur. Bu, serbest taşıyıcı emilimi olarak bilinen yaygın bir fenomendir.

Emilimde Artış (800 nm): Daha uzun dalga boylarında, özellikle yaklaşık 800 nm, emilimdeki artış, serbest eksitonların (excitons) oluşumuna ve emilimine bağlanabilir. Serbest eksitonlar, bağlı elektron-deşik çiftleridir ve emilim spektrumu tipik olarak daha uzun dalga boylarına kadar uzanır. Serbest eksitonların varlığı, bu spektral bölgede emilimin artmasına katkıda bulunabilir.

InSe, doğrudan bant boşluğuna sahip katmanlı bir yarı iletkenidir ve ince filmlerdeki kuantum sınırlaması etkileri, elektronik özelliklerini etkiler. Gözlemlenen optik davranışlar, katmanlı yarı iletkenlerin özellikleriyle uyumludur ve InSe'deki serbest taşıyıcılar ve eksitonlarla ilişkili elektronik geçişlerle tutarlıdır.

575 nm dalga boyu değerinden sonra iletimdeki azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilebilir. Ayrıca, InSe filmi görünür ışık bölgesinde yüksek şeffaflığa sahiptir ve yaklaşık %90 oranında yüksek iletim sergiler. Optik emilimin dalga boyu ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Görünür bölgede optik emilim spektrumunun düşük emilim sergilediği açıktır. Bu düşük emilim, InSe filminin kusurlarıyla ilişkilendirilebilir. Filmin emilim kenarları yaklaşık olarak 630 nm dalga boyunda bulunmuştur. Ayrıca, emilim spektrumunda gözlemlenen zirve, elektronik geçişlerden kaynaklanmaktadır. İncelenen malzemenin optik yansımalarının dalga boyu ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu şekle göre, yansıma görünür bölgede geniş bir zirve gösterir. Görünür bölgeden sonra, gelen foton veya radyasyonun enerjisindeki düşüş nedeniyle yansıma yükselir. Ayrıca, film görünür aralıkta yansıma gösterir. Şekil 3.11'de gösterildiği gibi InSe filmi için elde edilen İletim, Absorbsiyon ve Yansıma değerleri, literatürdeki değerlerle uyumludur.

Bu bulgular, ince filmin optik davranışının daha iyi anlaşılmasına ve fotonik ile optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamalarına katkıda bulunmaktadır.

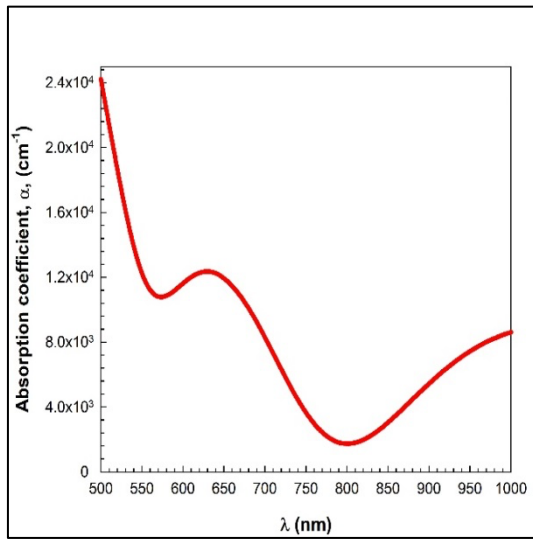


Şekil 3.11. (a) İletim, (b) Emilim ve (c) Yansımaya spektrumlarının dalga boyuna göre değişimi.

Optik sabitler arasında yer alan soğurma katsayısı (α), kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) ölçülen iletim ve yansımaya verileri kullanılarak belirlendi. Önemli bir parametre olan soğurma katsayısı (α), malzemenin optik bant boşluğunu (E_g) tahmin etmek için kullanılır. Ayrıca, soğurma katsayısı malzemedeki doğrudan ve dolaylı elektronik geçişler hakkında bilgi sağlar. $\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$ için geçiş doğrudan geçişe karşılık gelirken, $\alpha < 10^4 \text{ cm}^{-1}$ için dolaylı geçişe karşılık gelir [125-131]. Soğurma katsayısının değeri teorik arka planda da belirtildiği gibi aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplanabilir.

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln(T) \quad (3.1)$$

Çalışılan InSe filmi için yaklaşık 637 nm kalınlığındadır. Soğurma katsayısının (α) dalga boyu (λ) ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu şekil aynı zamanda, soğurma katsayısı değerinin düşük dalga boylarında ($\lambda < 800$ nm veya yüksek foton enerjilerinde) yüksek olduğunu, yüksek dalga boylarında ($\lambda > 800$ nm veya düşük foton enerjilerinde) ise düşük olduğunu ortaya koyar. Bu sonuç, düşük dalga boylarında elektronik geçiş olasılığının yüksek olduğunu gösterir. Ayrıca, α değeri düşük dalga boylarında 104 cm^{-1} 'den yüksektir. Bu, doğrudan geçiş olasılığını gösterir. Sunulan InSe filminin doğrudan bant boşluğuna sahip olduğu belirtilmiştir. Bu bulgu literatür ile tutarlıdır.



Şekil 3.12. Soğurma katsayısı (α) ile dalga boyunun değişimi.

Tauc grafiği, InSe filminin optik bant boşluğunu (E_g) elde etmek için kullanıldı [27,36]. α ve E_g arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^m \quad (3.2)$$

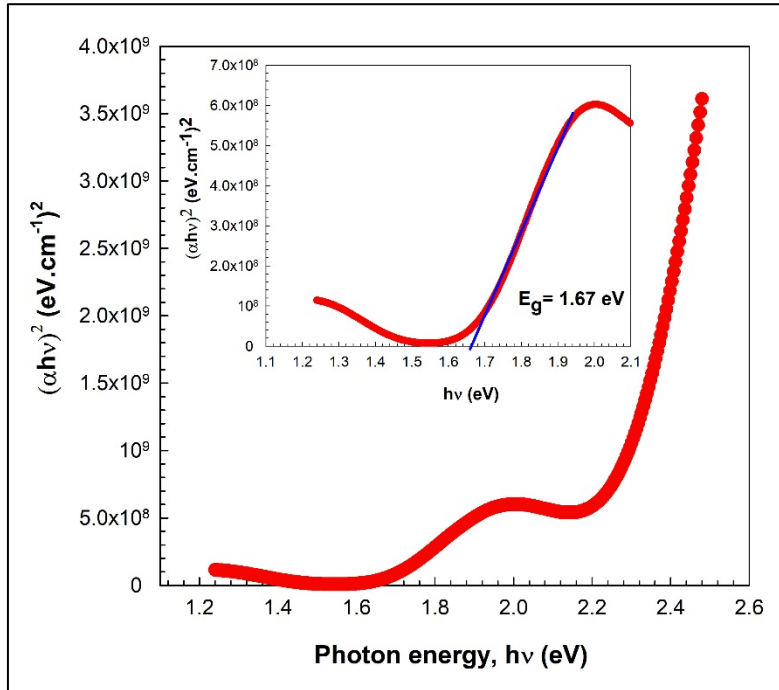
Teorik arka planda da bahsedildiği gibi A, orantı sabitini ve $h\nu$, foton enerjisini ifade eder. Elektronik geçişe bağlı olarak m değeri değişir. Doğrudan geçiş için m değeri 1/2 veya 3/2 iken dolaylı geçiş için 2 veya 3 olur. InSe'nin soğurma kenarı, doğrudan izin verilen geçişle tanımlanır. Doğrudan geçişler için ($m=1/2$) $(\alpha h\nu)^2$ 'ye karşı foton enerjisi grafiğini göstermektedir. Bu grafik, $h\nu$ eksenini kesen düz bir çizgi gösterir. Doğrusal bölümün $(\alpha h\nu)^2=0$ 'ya kadar uzatılması E_g 'ye karşılık gelir. Çalışılan InSe filminin yaklaşık 1.67

eV'lik bir optik bant boşluğuna sahip olduğu bulundu. Elde edilen değer, InSe'nin optik özelliklerini inceleyen diğer araştırmalar tarafından bildirilenlerle tutarlı bulunmuştur.

2B (iki boyutlu) malzemelerde kuantum sınırlama etkisi, malzemenin kalınlığı azaltıldıkça elektronik bant boşluğundaki artışla daha uygun bir şekilde karakterize edilir. InSe gibi 2B malzemeler bağlamında, kuantum sınırlama etkisi, boyutsallığını azaltılması nedeniyle meydana gelir. Malzemenin kalınlığı birkaç atom katmanına düşürüldükçe, elektronik durumlar kuantize olur ve bant boşluğu, kütle malzemeye kıyasla artar. Bu etki, 2B malzemelerin temel bir özelliğidir.

InSe'deki kuantum sınırlaması kaynaklı bant boşluğunun belirli değeri, katman kalınlığı ve malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bu, Bor yarıçapı tarafından belirlenmez, aksine malzemenin elektronik yapısı üzerine yapılan teorik ve deneysel çalışmalar yoluyla belirlenir.

Kalın InSe film için toplu değerinden daha büyük bir bant boşluğu, kuantum sınırlama etkisinin nispeten kalın filmlerde bile mevcut olduğunu göstermektedir. Bu fenomen, InSe gibi 2B malzemelerin benzersiz özelliklerinden kaynaklanabilir [144].



Şekil 3.13. $(\alpha h\nu)^2$ 'ye karşılık foton enerjisi grafiği

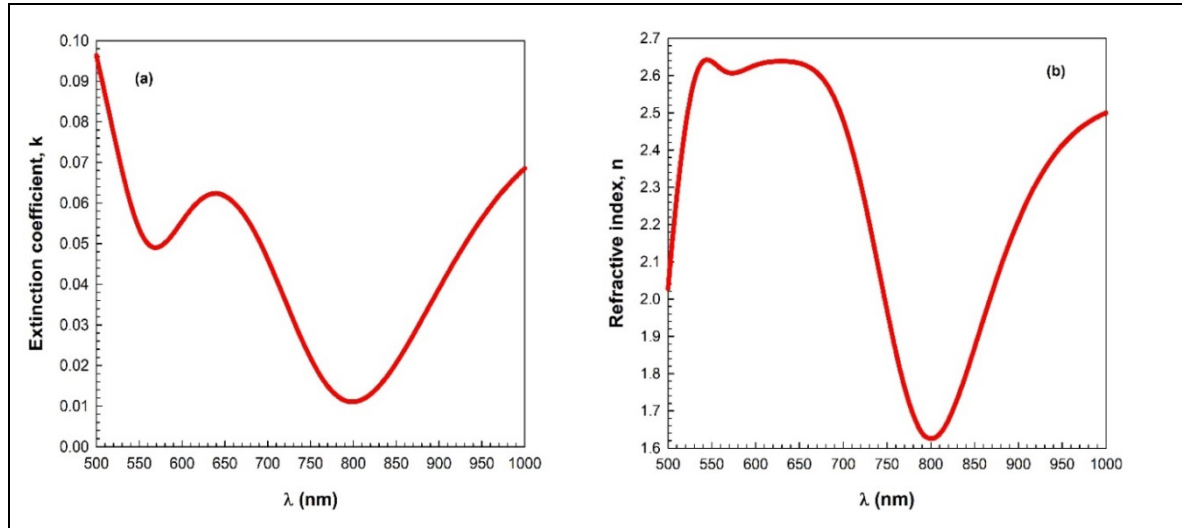
Teorik arka planda da anlatıldığı gibi diğer optik sabitler, kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k), iletim ve yansıma ölçümlerini kullanarak belirlenebilir. Soğurma ve saçılmadan kaynaklanan ışık kaybının miktarını gösteren k büyüklüğü aşağıdaki şekilde hesaplanır [145-149].

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (3.3)$$

Öte yandan, kırılma indisinin (n) değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [20,40-43]:

$$n = \left(\frac{1 + R}{1 - R} \right) + \sqrt{\frac{4R}{(1 - R)^2} - k^2} \quad (3.4)$$

k 'nın dalga boyuna karşı ve n 'nin dalga boyuna karşı grafiklerini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi, k - λ grafiği görünür bölgede yaklaşık 640 nm'de bir tepe noktasına sahiptir. Öte yandan, n - λ grafiği görünür bölgede geniş bir zirve göstermektedir. Daha yüksek dalga boyu bölgelerinde (800 nm'den sonra), hem k hem de n değerleri dalga boyunun artmasıyla birlikte artar. Sonuç olarak, n , tüm dalga boyları için k 'dan daha büyük bir değere ulaşır.



Şekil 3.14. (a) Sönüm katsayısı ve (b) kırılma indisinin dalga boyuna göre değişimi.

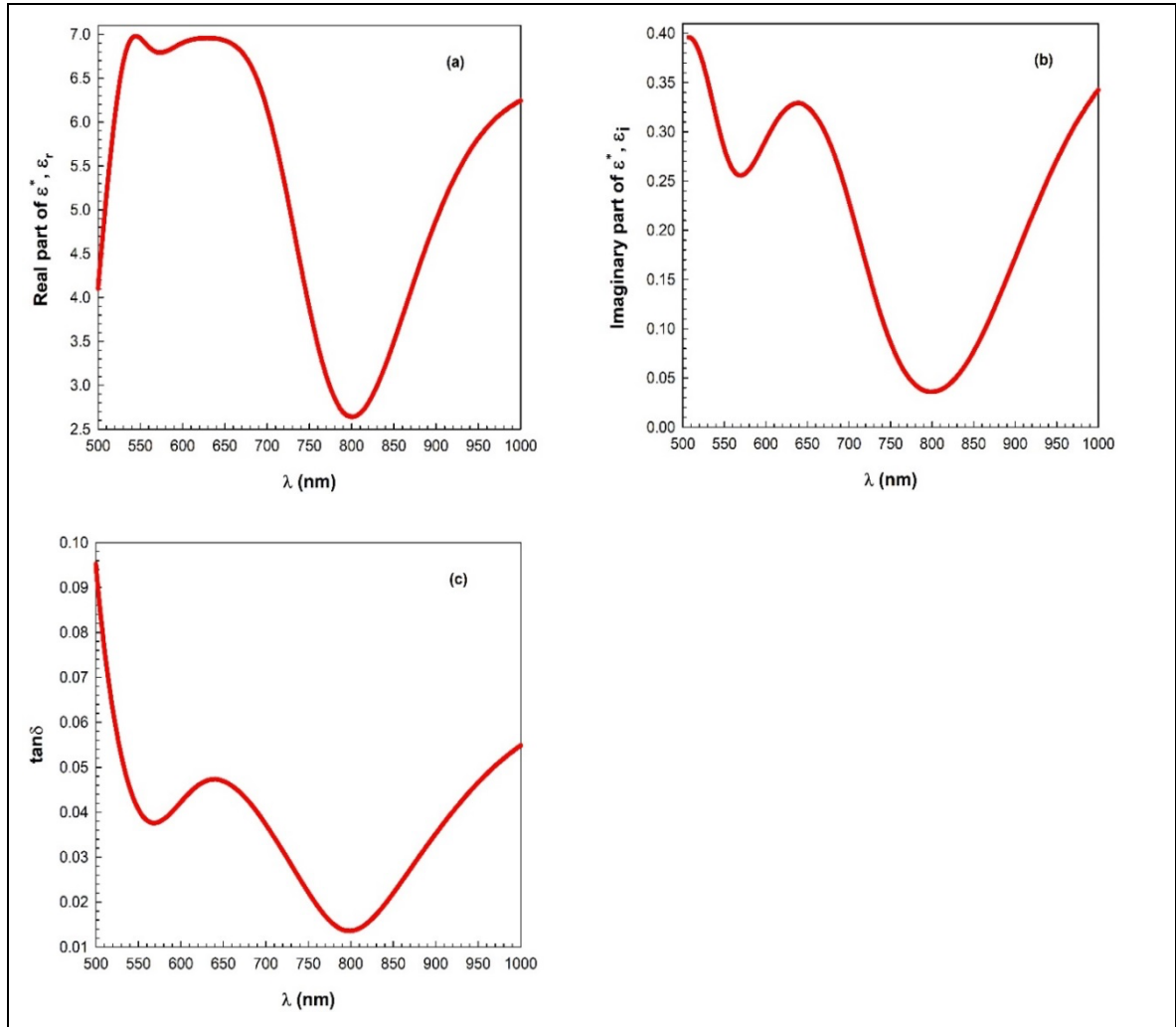
Malzeme üzerine gelen ışık radyasyonu, malzeme içinde indüklenmiş polarizasyona neden olur. ϵ_r , bir elektrik alan tarafından polarize edilmiş malzeme içinde enerji depolanmasıyla ilişkilidir, $\epsilon_r \omega$ ϵ_i , malzeme içindeki enerji kaybı veya enerji emilimiyle ilişkilidir. Öte

yandan, karmaşık dielektrik sabiti k ve n ile ilişkilidir. ϵ_r ve ϵ_i değerleri sırasıyla aşağıdaki denklemleri kullanarak hesaplanabilir.

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 \quad (3.5)$$

$$\epsilon_i = 2nk \quad (3.6)$$

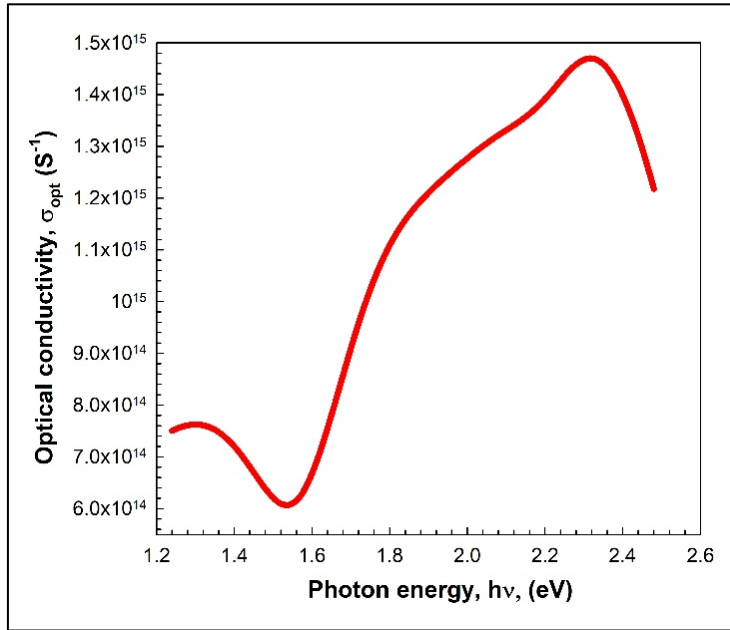
Gerçek ve sanal bileşenleri olan ϵ^* , yani ϵ_r ve ϵ_i , dalga boyu ile ilişkili olarak çizilmiştir ve sırasıyla Şekil 3.14.(a) ve 9(b)'de gösterilmektedir. Şekil 3.14. (c), InSe filminin kayıp tanjantının dalga boyu ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu rakam, kayıp tanjantının dalga boyunun artmasıyla azaldığını ve görünür bölgede bir zirveye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.15. (a) Kompleks dielektrik sabitinin (ϵ^*) gerçek bileşeni (ϵ_r) ve (b) hayali bileşeni (ϵ_i) ile (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$)'nın dalga boyuna göre değişimi.

Şekil 3.14. (a)'ya göre, ϵ_r - λ grafiği görünür bölgede kırılma indisinde olduğu gibi geniş bir zirve sergiler. Şekil 3.14. (b), bir tepe noktasına sahip olan ϵ_i - λ grafiğini göstermektedir; bu, sönüm katsayısına benzerdir. Ayrıca hem ϵ_r hem de ϵ_i değerleri, 800 nm'den sonra dalga boyunun artmasıyla yükselir. Bu rakamlar, ϵ_r ve ϵ_i değerlerinin oldukça farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece, gerçek kısmı, sanal kısım ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Ek olarak, karmaşık dielektrik sabitinin ϵ_i ile ϵ_r oranı dielektrik kayıp tanjantı ($\tan \delta$) olarak tanımlanır.

Şekil 3.15., optik iletkenliğin (σ_{opt}) foton enerjisi ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Foton enerjisinin artmasıyla birlikte σ_{opt} değerinin yükseldiği gözlemlenmektedir. Yüksek soğurma değeri bu artışa neden olur. Ayrıca bu, foton enerjisinin artmasıyla elektronların hareketliliğinin arttığını gösterir.



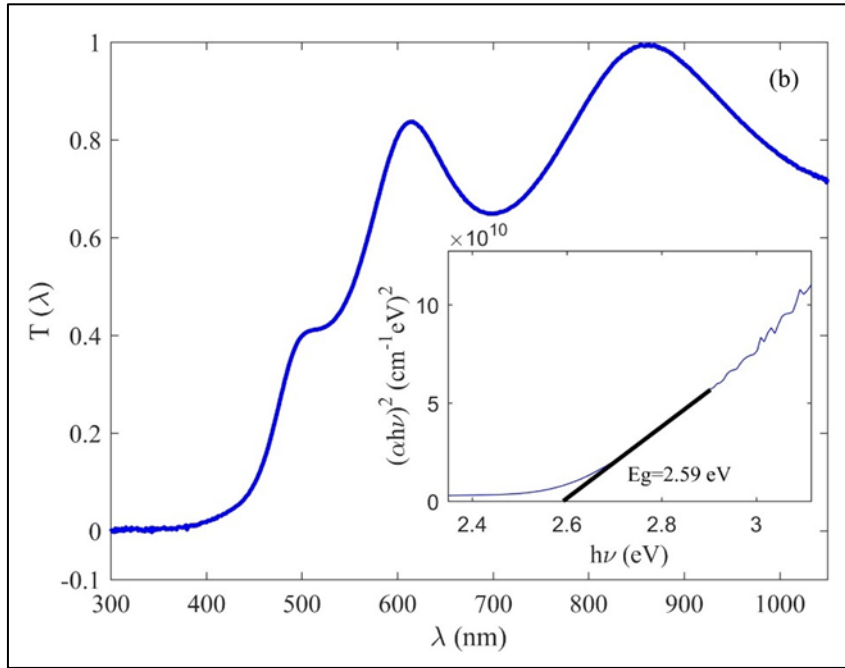
Şekil 3.16. Optik iletkenliğin (σ_{opt}) foton enerjisine göre değişimi.

Siyah silikon üzerine üretilen InSe ince filminin UV-Vis analizi ve bulgular

Siyah silikon üzerine üretilen InSe ince filminin UV-Vis analizi, malzemenin optik özelliklerini belirlemek için önemli bir yöntemdir. Bu analiz, malzemenin bant yapısını, bant boşluğunu ve optik geçirgenliğini incelemek için kullanılır. InSe ince filmi için yapılan UV-Vis analizinde, 500-1000 nm dalga boylarında emilim veya yansıma ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen spektral veriler, malzemenin optik özelliklerini anlamak için analiz

edilmiştir. Bu bulgular, InSe ince filminin optik özelliklerinin ve uygun uygulamaların anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

InSe ince filminin B-Si üzerine üretilen örneklerinin optik özelliklerini incelemek için optik iletim (T) ve yansımaya (R) spektrumları kullanılmıştır, incelenen filmin 500-1000 nm dalga boyu aralığında ölçülen yansımaya, iletim ve emilim değerlerini göstermektedir, iletim spektrumları ~ 612 nm ve ~ 857 nm dalga boyu değerlerinde iki tepe noktası gözlemlendiğini göstermektedir. 575 nm'den sonraki dalga boyu değerlerinde gözlemlenen iletimdeki azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilebilir ve InSe'de yaklaşık 800 nm dalga boyundan sonraki emilimdeki artış, malzemenin elektronik yapısı ve fotonların yük taşıyıcılarla etkileşimi ile açıklanabilir. İncelenen InSe filmi için elde edilen T ve R değerleri, literatürdeki değerlerle uyumludur.

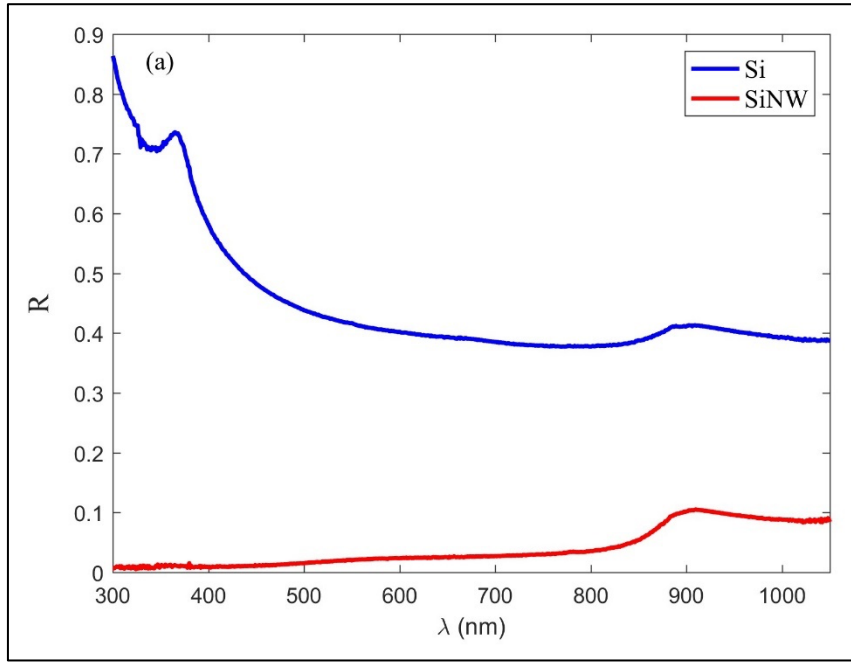


Şekil 3.17. İletim ve $(\alpha h\nu)^2$ 'ye karşılık foton enerjisi grafiği.

612 nm dalga boyu değerinden sonra iletimdeki azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilebilir [150]. 575 nm dalga boyu değerinden sonra iletimdeki azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilebilir.

Sağlanan grafikte (Şekil 3.17.), 300 nm ile 1000 nm arasındaki dalga boylarında (λ) transimiyon spektrumu $T(\lambda)$ gösterilmektedir. X eksenini dalga boyunu (nm), Y eksenini ise transimiyonu (0-1 aralığında) göstermektedir. Grafik, malzemenin çeşitli emilim ve

transmisyon özelliklerini ortaya koyan karakteristik zirve ve vadilere sahiptir. Küçük grafik ise optik bant aralığını E_g belirlemek için kullanılan Tauc grafiğidir. Tauc grafiğinde, X eksenini foton enerjisini (2.4 eV - 3 eV aralığında) ve Y eksenini $(\alpha h\nu)^2$ değerini göstermektedir. Doğrusal kısmın X eksenini kestiği nokta, malzemenin optik bant aralığını $E_g=2.59$ eV olarak belirlemektedir. Bu analiz, malzemenin optik özelliklerini ve bant aralığını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 3.18. Silikon ve siyah silikon emilim grafiği

Şekil 3.18.'de verilen grafikte, 300 nm ile 1000 nm arasındaki dalga boylarında (λ) yansıtma spektrumu $R(\lambda)$ gösterilmektedir. X eksenini dalga boyunu (nm), Y eksenini ise yansıtmayı (0-0.9 aralığında) göstermektedir. Mavi çizgi, saf silikonun (Si) yansıtma spektrumunu, kırmızı çizgi ise silikon nanotelin (SiNW) yansıtma spektrumunu göstermektedir. Saf silikonun, dalga boyu arttıkça yansıtma azalmakta, ancak daha uzun dalga boylarında yeniden artış göstermektedir. Silikon nanotel ise, genel olarak çok daha düşük bir yansıtma değeri sergilemekte ve bu, malzemenin optik özelliklerinin dalga boyuna bağlı olarak nasıl değiştiğini açıkça göstermektedir. Bu analiz, SiNW'nin optik özelliklerinin Si'ye göre daha düşük bir yansıtma oranına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Siyah silikon alt tabakalarına depolanan InSe ince filmlerin UV-Vis spektrumları, optik özelliklerine ilişkin değerli bilgiler içermektedir. İnce filmlerin iletim spektrumu, dalga boyu arttıkça iletimde azalma göstermiş ve bu da InSe ince filmler tarafından emilim olduğunu göstermektedir. Bu emilim davranışı, yarı iletken malzemelere özgüdür ve InSe ince filmlerin bu spektral aralıkta bir bant aralığına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Absorpsiyon spektrumlarının analizi, InSe ince filmlerin bant aralığı enerjisini belirlemek için kullanılmıştır. Tauc çizimi yöntemi kullanılmış, bu yöntemde $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisi $(h\nu)$ karşısındaki grafiği çizilir, α emilim katsayısı ve $h\nu$ foton enerjisidir. Tauc çiziminin lineer bölümünün x-eksenine ekstrapolasyonu, bant aralığı enerjisinin bir tahminini sağlar.

Siyah silikon alt tabakalarındaki InSe ince filmler için Tauc çizimi, absorpsiyon kenarına karşılık gelen lineer bir bölüm göstermiştir. Bu lineer bölümün x-eksenine ekstrapolasyonu, bant aralığı enerjisinin 2.57 eV olarak hesaplandığını göstermiştir. Bu değer, InSe ince filmlerin bilinen elektronik yapısıyla uyumludur.

Hesaplanan 2.57 eV band aralığı enerjisi, InSe ince filmlerin optoelektronik uygulamalarda kullanılmak üzere uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, UV-Vis spektrumlarında gözlemlenen emilim davranışı, InSe ince filmlerin yarı iletken doğasını doğrular ve fotovoltaj cihazlar, sensörler ve diğer optoelektronik uygulamalarda kullanılmak üzere potansiyelini vurgular.

Siyah silikon alt tabakalarındaki InSe ince filmlerin yansımaya spektrumu da optik özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlar. Yansımaya spektrumlarında görülen interferans kenarları, ince film yapısı içinde birden fazla yansımının varlığını gösterir. Bu kenarların analizi, ince filmlerin kalınlığı ve kırılma indisleri hakkında ek bilgi sağlayarak, çeşitli uygulamalar için optik performanslarının optimizasyonuna yardımcı olabilir.

Genel olarak, siyah silikon alt tabakalarına depolanan InSe ince filmlerin UV-Vis analizi, iletim, emilim ve yansımaya davranışları da dahil olmak üzere optik özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler sağlar. 2.57 eV hesaplanan bant aralığı enerjisi, bu ince filmlerin belirli bant aralığı enerjileri gerektiren optoelektronik uygulamalar için potansiyelini vurgular ve pratik cihazlardaki performanslarını araştırmak için ilave araştırmaları teşvik eder.

4. SONUÇLAR

Bu tezde siyah silikon (B-Si) substratların üretim süreçleri ve bu substratların farklı yüksek teknoloji uygulamalarındaki potansiyel kullanımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Siyah silikon, nanoyapılı yüzeyi sayesinde geniş bir spektrumda ışığı emebilme yeteneğine sahiptir ve bu özelliği ile optoelektronik, fotovoltaik, sensör teknolojileri ve enerji depolama gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Çalışmada, metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile B-Si substratlar üretilmiştir. Bu yöntem, gümüş katalizör kullanılarak gerçekleştirilmiş ve silikon yüzeyinde homojen nanotel yapılarının oluşumu sağlanmıştır. Aşındırma işlemi, hidroflorik asit ve hidrojen peroksit karışımı bir çözelti kullanılarak kontrollü sürelerle yapılmıştır. Farklı sürelerde (5 dk, 10 dk, 20 dk, 30 dk, 60 dk) yapılan aşındırma işlemleri sonucunda, farklı uzunluklarda nanotel yapılar elde edilmiş ve bu yapıların boyutları SEM görüntüleri ile doğrulanmıştır.

Elde edilen siyah silikon substratlar, optik sensörler ve güneş pilleri gibi cihazların performansını artırmada potansiyel göstermektedir. Nanoyapılı yüzeyleri sayesinde, düşük ışık koşullarında dahi yüksek verimlilik sağlanabilmektedir. Enerji depolama uygulamalarında, artan yüzey alanı ve yüksek şarj depolama kapasitesi ile gelişmiş piller ve süper kapasitörler için uygun bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada üretilen B-Si substratlar hem literatüre önemli katkılar sunmakta hem de nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanlarında yenilikçi uygulamalara kapı aralamaktadır. Siyah silikonun geniş bir yelpazede uygulanabilirliği, onu gelecekteki araştırmalar ve teknolojik geliştirmeler için değerli kılmaktadır.

Sonuç olarak, bu tezde elde edilen bulgular, siyah silikonun nanoyapılı yüzeyi ve benzersiz optik, elektriksel ve termal özellikleri ile yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılabilirliğini doğrulamakta ve gelecekteki çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu bağlamda, B-Si substratların farklı üretim süreçleri ve süre kontrollü aşındırma yöntemleri ile elde edilen nanotel yapıların performansı üzerine yapılan incelemeler, siyah silikonun çok yönlü bir malzeme olarak potansiyelini göstermektedir.

Ayrıca, bu tezde siyah silikon (B-Si) substratlar üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile İndiyum Selenit (InSe) ince filmlerin üretimi ve karakterizasyonu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Siyah silikon, nanoyapılı yüzeyi sayesinde geniş bir spektrumda ışığı emebilme yeteneği sunarken, InSe ince filmler yüksek optik ve elektriksel özellikleri ile dikkat çekmektedir.

Çalışmada, B-Si substratlar metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiş ve ardından termal buharlaştırma yöntemi ile InSe ince filmler bu substratlar üzerine büyütülmüştür. B-Si üretimi, silikon yüzeyinde homojen nanotel yapıların oluşumu ile sağlanmış, farklı sürelerde aşındırma işlemleri yapılarak çeşitli nanoyapılar elde edilmiştir. InSe ince filmlerinin üretiminde, yüksek saflıkta indiyum ve selenyum tozları kullanılmış ve temizleme ile maskeleyme işlemleri titizlikle gerçekleştirilmiştir.

InSe ince film üretimi sürecinde, cam ve siyah silikon substratlar kullanılmıştır. Substratların temizliği, filmin homojenliği ve performansı açısından kritik öneme sahiptir. Cam substratlar aseton ve izopropil alkol ile temizlenirken, siyah silikon substratlar nazik temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler, substrat yüzeyinden kirleticilerin uzaklaştırılması ve film kalitesinin artırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Termal buharlaştırma yöntemi, InSe ince filmlerinin üretiminde basit ve maliyet-etkin bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemle üretilen filmler, 10^{-6} mbar'lık vakum altında cam, silikon ve siyah silikon alt tabakalar üzerine biriktirilmiştir. Üretim sürecinde, alümina kaplı tungsten tekne kullanılarak In ve Se tozları buharlaştırılmış ve alt tabakalar üzerine büyütülmüştür. Filmlerin kalınlığı Dektak 6M kalınlık profili ile ölçülmüş ve yaklaşık 637 nm olarak belirlenmiştir. SEM ölçümleri ile bu değer doğrulanmıştır.

Üretilen InSe ince filmlerinin tavlama işlemleri, çeşitli sıcaklıklarda (150°C, 250°C ve 350°C) gerçekleştirilmiş ve en iyi kristal özelliklerin 250°C'de 45 dakika süreyle yapılan tavlama işlemi sonucunda elde edildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar, InSe ince filmlerin optik performansını optimize etmek için uygun tavlama koşullarının belirlenmesinde önemli bir rehberlik sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler, siyah silikon substratlar ve InSe ince filmlerin üretiminde kullanılan yöntemlerin ve bu malzemelerin potansiyel uygulama

alanlarının derinlemesine incelenmesini sağlamıştır. Siyah silikonun nanoyapılı yüzeyi ve InSe ince filmlerin üstün özellikleri, optoelektronik, fotovoltaik ve sensör teknolojileri gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Bu araştırma, siyah silikon ve InSe ince filmlerin üretim süreçlerini optimize ederek, gelecekteki araştırmalar ve teknolojik gelişmeler için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesi ve kıyaslanması gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler için XRD, EDX ve SEM teknikleri kullanılmıştır. XRD analizinde $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) ile Rigaku MiniFlex difraktometresi kullanılarak filmin kristal yapısı ve yönelimi belirlenmiştir. InSe ince filmin XRD deseninde gözlemlenen (003), (006), (400), (107) ve (116) düzlemlerine karşılık gelen kırınım tepe noktaları, filmin iyi bir kristalliliğe sahip olduğunu ve JCPDS kart No. 34-1431 verileriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

SEM ve EDX analizleri, siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerinin yüzey morfolojisi ve elementel bileşimleri hakkında detaylı bilgiler sağlamıştır. Siyah silikon substratların SEM görüntüleri, yüksek yüzey alanına sahip nanoyapılar içerdiğini ve InSe ince filmlerin bu substratlar üzerine homojen ve sürekli olarak biriktirildiğini göstermiştir. EDX spektrumları, siyah silikon substratlarda silikonun ve InSe filmlerinde indiyum (In) ve selenyum (Se) elementlerinin varlığını doğrulamıştır.

Optik karakterizasyon, HITACHI UV-2600 UV-Vis Spektrometre kullanılarak cam alt tabaka üzerindeki InSe filminin 500-1000 nm dalga boyu aralığındaki iletim, yansıma ve soğurma spektrumlarının ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, filmin optik özelliklerinin anlaşılmasına ve potansiyel uygulamalar için uygunluğunun değerlendirilmesine katkıda bulunmuştur.

Sonuç olarak, cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin detaylı karakterizasyonu, bu filmlerin ileri teknolojik uygulamalar için yüksek kalitede hazırlandığını ve iyi tanımlanmış kristal yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, InSe ince filmlerin özellikle fotovoltaik hücreler ve sensörler gibi optoelektronik cihazlar için uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Yapısal

analizlerin sunduğu bu değerli bilgiler, gelecekteki malzeme geliştirme ve optimizasyon çalışmaları için önemli bir temel teşkil etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerin optik özelliklerini UV-Vis spektroskopisi kullanarak başarılı bir şekilde incelemiştir. Bu teknik, ince filmlerin şeffaflık, absorpsiyon ve bant aralığı gibi özelliklerine dair değerli bilgiler sağlamıştır.

InSe filmlerinin UV-Vis spektrumları, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde belirgin emilim pikleri ortaya koymuş, bu da yarı iletkenlerin karakteristik doğrudan bant aralığı geçişlerinin varlığını göstermiştir. Absorpsiyon analizi, optik bant aralığı enerjisinin belirlenmesini sağlamış ve bu enerji değerinin substrat tipine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu farklılık, ince filmlerin elektronik yapısını etkileyen substrat morfolojisi ve yüzey özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, InSe filmlerin optik geçirgenliği değerlendirilmiş ve görünür spektrumda yüksek şeffaflık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yüksek geçirgenlik, InSe filmlerin verimli ışık iletimi gerektiren optoelektronik uygulamalar için potansiyelini ortaya koymaktadır.

Çalışma, InSe filmlerin optik absorpsiyon katsayısı (α), kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısının (k) dalga boyu ile değiştiğini göstermiştir. Absorpsiyon kenarı yaklaşık 630 nm'de olup, bant aralığı enerjisi yaklaşık 1.67 eV olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatürde bildirilenlerle uyumlu olup, doğrudan bant aralığı doğasını teyit etmektedir.

InSe filmler, iki boyutlu malzemelerin karakteristik özelliği olan kuantum sınırlama etkilerini göstermiştir. Bu etkiler, gözlemlenen optik davranışlara katkıda bulunmuş ve InSe'nin ileri düzey elektronik ve optoelektronik uygulamalar için potansiyelini vurgulamıştır.

Genel olarak, UV-Vis spektroskopisi analizi, farklı substratlar üzerindeki InSe ince filmlerin optik özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler sunmuştur. Bulgular, ince filmlerin optik davranışının daha iyi anlaşılmasına ve fotonik ve optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamalarına katkıda bulunmaktadır. Sonuçlar, teorik tahminler ve mevcut

literatürle uyumlu olup, InSe ince filmlerin optik özelliklerinin belirlenmesinde kuantum sınırlama ve substrat etkilerinin önemini vurgulamaktadır.

Siyah silikon üzerine üretilen InSe ince filminin UV-Vis analizi, malzemenin optik özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Bu analizde, 500-1000 nm dalga boylarında iletim, yansıtma ve emilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İletim spektrumlarında yaklaşık 612 nm ve 857 nm'de iki tepe noktası gözlemlenmiş ve 575 nm'den sonraki dalga boylarında iletimde azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilmiştir. Tauc grafiği kullanılarak, optik bant aralığı 2.59 eV olarak belirlenmiştir. Bu bant aralığı, InSe ince filmin optoelektronik uygulamalarda kullanılmak üzere uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, silikon nanotellerin (SiNW) yansıtma spektrumu, saf silikona (Si) kıyasla çok daha düşük yansıtma oranına sahip olduğunu göstermektedir. Yansıtma spektrumlarında görülen interferans kenarları, ince film yapısı içinde birden fazla yansımının varlığını işaret etmekte ve bu, ince filmlerin kalınlığı ve kırılma indisleri hakkında ek bilgi sağlamaktadır. Bu bulgular, InSe ince filmin optik özelliklerini detaylı bir şekilde ortaya koymakta ve fotovoltaiik cihazlar, sensörler ve diğer optoelektronik uygulamalarda kullanılmak üzere potansiyelini vurgulamaktadır.

Termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak cam altlık üzerine hazırlanan InSe filmin optik özellikleri ve yapısal özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırıldı. Çalışılan InSe filmin kristal yapısını, element bileşimlerini ve yüzey morfolojisini analiz etmek için XRD, EDX ve SEM yöntemleri kullanıldı. Ayrıca XRD yöntemi, InSe filmin oluşumunu doğruladı. InSe film düzgün ve pürüzsüz bir yüzey morfolojisine sahiptir. Kırılma indisi, soğurma katsayısı, sönme katsayısı, optik bant aralığı, karmaşık optik dielektrik sabitinin gerçek ve sanal bileşenleri ve optik iletkenlik gibi optik sabitler, 500 ila 1000 nm arasındaki spektral aralıkta belirlendi. InSe filmin görünür ışık bölgesinde yüksek şeffaflığa sahip olduğu gözlemlendi. Ayrıca optik analiz, InSe filmin yüksek absorpsiyon katsayısına ve doğrudan optik geçişe sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, hazırlanan InSe filmin 2 boyutlu optoelektronik cihaz uygulamalarında umut verici bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tezde siyah silikon (B-Si) substratların üretim süreçleri ve bu substratların farklı yüksek teknoloji uygulamalarındaki potansiyel kullanımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Siyah silikon, nanoyapılı yüzeyi sayesinde geniş bir spektrumda ışığı emebilme yeteneğine

sahiptir ve bu özelliği ile optoelektronik, fotovoltajik, sensör teknolojileri ve enerji depolama gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Çalışmada, metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile B-Si substratlar üretilmiştir. Bu yöntem, gümüş katalizör kullanılarak gerçekleştirilmiş ve silikon yüzeyinde homojen nanotel yapılarının oluşumu sağlanmıştır. Aşındırma işlemi, hidroflorik asit ve hidrojen peroksit karışımı bir çözelti kullanılarak kontrollü sürelerle yapılmıştır. Farklı sürelerde (5 dk, 10 dk, 20 dk, 30 dk, 60 dk) yapılan aşındırma işlemleri sonucunda, farklı uzunluklarda nanotel yapılar elde edilmiş ve bu yapıların boyutları SEM görüntüleri ile doğrulanmıştır.

Elde edilen siyah silikon substratlar, optik sensörler ve güneş pilleri gibi cihazların performansını artırmada potansiyel göstermektedir. Nanoyapılı yüzeyleri sayesinde, düşük ışık koşullarında dahi yüksek verimlilik sağlanabilmektedir. Enerji depolama uygulamalarında, artan yüzey alanı ve yüksek şarj depolama kapasitesi ile gelişmiş piller ve süper kapasitörler için uygun bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada üretilen B-Si substratlar hem literatüre önemli katkılar sunmakta hem de nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanlarında yenilikçi uygulamalara kapı aralamaktadır. Siyah silikonun geniş bir yelpazede uygulanabilirliği, onu gelecekteki araştırmalar ve teknolojik geliştirmeler için değerli kılmaktadır.

Sonuç olarak, bu tezde elde edilen bulgular, siyah silikonun nanoyapılı yüzeyi ve benzersiz optik, elektriksel ve termal özellikleri ile yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılabilirliğini doğrulamakta ve gelecekteki çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu bağlamda, B-Si substratların farklı üretim süreçleri ve süre kontrollü aşındırma yöntemleri ile elde edilen nanotel yapıların performansı üzerine yapılan incelemeler, siyah silikonun çok yönlü bir malzeme olarak potansiyelini göstermektedir.

Ayrıca, bu tezde siyah silikon (B-Si) substratlar üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile İndiyum Selenit (InSe) ince filmlerin üretimi ve karakterizasyonu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Siyah silikon, nanoyapılı yüzeyi sayesinde geniş bir spektrumda ışığı emebilme yeteneği sunarken, InSe ince filmler yüksek optik ve elektriksel özellikleri ile dikkat çekmektedir.

Çalışmada, B-Si substratlar metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiş ve ardından termal buharlaştırma yöntemi ile InSe ince filmler bu substratlar üzerine büyütülmüştür. B-Si üretimi, silikon yüzeyinde homojen nanotel yapıların oluşumu ile sağlanmış, farklı sürelerde aşındırma işlemleri yapılarak çeşitli nano yapılar elde edilmiştir. InSe ince filmlerinin üretiminde, yüksek saflıkta indiyum ve selenyum tozları kullanılmış ve temizleme ile maskeleyme işlemleri titizlikle gerçekleştirilmiştir.

InSe ince film üretimi sürecinde, cam ve siyah silikon substratlar kullanılmıştır. Substratların temizliği, filmin homojenliği ve performansı açısından kritik öneme sahiptir. Cam substratlar aseton ve izopropil alkol ile temizlenirken, siyah silikon substratlar nazik temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler, substrat yüzeyinden kirleticilerin uzaklaştırılması ve film kalitesinin artırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Termal buharlaştırma yöntemi, InSe ince filmlerinin üretiminde basit ve maliyet-etkin bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemle üretilen filmler, 10⁻⁶ mbar'lık vakum altında cam, silikon ve siyah silikon alt tabakalar üzerine biriktirilmiştir. Üretim sürecinde, alümina kaplı tungsten tekne kullanılarak In ve Se tozları buharlaştırılmış ve alt tabakalar üzerine büyütülmüştür. Filmlerin kalınlığı Dektak 6M kalınlık profili ile ölçülmüş ve yaklaşık 637 nm olarak belirlenmiştir. SEM ölçümleri ile bu değer doğrulanmıştır.

Üretilen InSe ince filmlerinin tavlama işlemleri, çeşitli sıcaklıklarda (150°C, 250°C ve 350°C) gerçekleştirilmiş ve en iyi kristal özelliklerin 250°C'de 45 dakika süreyle yapılan tavlama işlemi sonucunda elde edildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar, InSe ince filmlerin optik performansını optimize etmek için uygun tavlama koşullarının belirlenmesinde önemli bir rehberlik sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler, siyah silikon substratlar ve InSe ince filmlerin üretiminde kullanılan yöntemlerin ve bu malzemelerin potansiyel uygulama alanlarının derinlemesine incelenmesini sağlamıştır. Siyah silikonun nano yapı yüzeyi ve InSe ince filmlerin üstün özellikleri, optoelektronik, fotovoltaik ve sensör teknolojileri gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Bu araştırma, siyah silikon ve InSe ince filmlerin üretim süreçlerini optimize ederek, gelecekteki araştırmalar ve teknolojik gelişmeler için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesi ve kıyaslanması gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler için XRD, EDX ve SEM teknikleri kullanılmıştır. XRD analizinde $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) ile Rigaku MiniFlex difraktometresi kullanılarak filmin kristal yapısı ve yönelimi belirlenmiştir. InSe ince filmin XRD deseninde gözlemlenen (003), (006), (400), (107) ve (116) düzlemlerine karşılık gelen kırınım tepe noktaları, filmin iyi bir kristalliliğe sahip olduğunu ve JCPDS kart No. 34-1431 verileriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

SEM ve EDX analizleri, siyah silikon substratların ve InSe ince filmlerinin yüzey morfolojisi ve elementel bileşimleri hakkında detaylı bilgiler sağlamıştır. Siyah silikon substratların SEM görüntüleri, yüksek yüzey alanına sahip nanoyapılar içerdiğini ve InSe ince filmlerin bu substratlar üzerine homojen ve sürekli olarak biriktirildiğini göstermiştir. EDX spektrumları, siyah silikon substratlarda silikonun ve InSe filmlerinde indiyum (In) ve selenyum (Se) elementlerinin varlığını doğrulamıştır.

Optik karakterizasyon, HITACHI UV-2600 UV-Vis Spektrometre kullanılarak cam alt tabaka üzerindeki InSe filminin 500-1000 nm dalga boyu aralığındaki iletim, yansıma ve soğurma spektrumlarının ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, filmin optik özelliklerinin anlaşılmasına ve potansiyel uygulamalar için uygunluğunun değerlendirilmesine katkıda bulunmuştur.

Sonuç olarak, cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin detaylı karakterizasyonu, bu filmlerin ileri teknolojik uygulamalar için yüksek kalitede hazırlandığını ve iyi tanımlanmış kristal yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, InSe ince filmlerin özellikle fotovoltajik hücreler ve sensörler gibi optoelektronik cihazlar için uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Yapısal analizlerin sunduğu bu değerli bilgiler, gelecekteki malzeme geliştirme ve optimizasyon çalışmaları için önemli bir temel teşkil etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, cam ve siyah silikon substratlar üzerine büyütülen InSe ince filmlerin optik özelliklerini UV-Vis spektroskopisi kullanarak başarılı bir şekilde incelemiştir. Bu teknik, ince filmlerin şeffaflık, absorpsiyon ve bant aralığı gibi özelliklerine dair değerli bilgiler sağlamıştır.

InSe filmlerinin UV-Vis spektrumları, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde belirgin emilim pikleri ortaya koymuş, bu da yarı iletkenlerin karakteristik doğrudan bant aralığı geçişlerinin varlığını göstermiştir. Absorpsiyon analizi, optik bant aralığı enerjisinin belirlenmesini sağlamış ve bu enerji değerinin substrat tipine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu farklılık, ince filmlerin elektronik yapısını etkileyen substrat morfolojisi ve yüzey özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, InSe filmlerin optik geçirgenliği değerlendirilmiş ve görünür spektrumda yüksek şeffaflık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yüksek geçirgenlik, InSe filmlerin verimli ışık iletimi gerektiren optoelektronik uygulamalar için potansiyelini ortaya koymaktadır.

Çalışma, InSe filmlerin optik absorpsiyon katsayısı (α), kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısının (k) dalga boyu ile değiştiğini göstermiştir. Absorpsiyon kenarı yaklaşık 630 nm'de olup, bant aralığı enerjisi yaklaşık 1.67 eV olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatürde bildirilenlerle uyumlu olup, doğrudan bant aralığı doğasını teyit etmektedir.

InSe filmler, iki boyutlu malzemelerin karakteristik özelliği olan kuantum sınırlama etkilerini göstermiştir. Bu etkiler, gözlemlenen optik davranışlara katkıda bulunmuş ve InSe'nin ileri düzey elektronik ve optoelektronik uygulamalar için potansiyelini vurgulamıştır.

Genel olarak, UV-Vis spektroskopisi analizi, farklı substratlar üzerindeki InSe ince filmlerin optik özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler sunmuştur. Bulgular, ince filmlerin optik davranışının daha iyi anlaşılmasına ve fotonik ve optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamalarına katkıda bulunmaktadır. Sonuçlar, teorik tahminler ve mevcut literatürle uyumlu olup, InSe ince filmlerin optik özelliklerinin belirlenmesinde kuantum sınırlama ve substrat etkilerinin önemini vurgulamaktadır.

Siyah silikon üzerine üretilen InSe ince filminin UV-Vis analizi, malzemenin optik özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Bu analizde, 500-1000 nm dalga boylarında iletim, yansımaya ve emilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İletim spektrumlarında yaklaşık 612 nm ve 857 nm'de iki tepe noktası gözlemlenmiş ve 575 nm'den sonraki dalga boylarında iletimde azalma, serbest taşıyıcı emilimine atfedilmiştir. Tauc grafiği kullanılarak, optik bant aralığı 2.59 eV olarak belirlenmiştir. Bu bant aralığı, InSe ince filmin optoelektronik

uygulamalarda kullanılmak üzere uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, silikon nanotellerin (SiNW) yansıtma spektrumu, saf silikona (Si) kıyasla çok daha düşük yansıtma oranına sahip olduğunu göstermektedir. Yansıtma spektrumlarında görülen interferans kenarları, ince film yapısı içinde birden fazla yansımanın varlığını işaret etmekte ve bu, ince filmlerin kalınlığı ve kırılma indisleri hakkında ek bilgi sağlamaktadır. Bu bulgular, InSe ince filmin optik özelliklerini detaylı bir şekilde ortaya koymakta ve fotovoltaik cihazlar, sensörler ve diğer optoelektronik uygulamalarda kullanılmak üzere potansiyelini vurgulamaktadır.

Termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak cam altlık üzerine hazırlanan InSe filmin optik özellikleri ve yapısal özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırıldı. Çalışılan InSe filmin kristal yapısını, element bileşimlerini ve yüzey morfolojisini analiz etmek için XRD, EDX ve SEM yöntemleri kullanıldı. Ayrıca XRD yöntemi, InSe filmin oluşumunu doğruladı. InSe film düzgün ve pürüzsüz bir yüzey morfolojisine sahiptir. Kırılma indisi, soğurma katsayısı, sönme katsayısı, optik bant aralığı, karmaşık optik dielektrik sabitinin gerçek ve sanal bileşenleri ve optik iletkenlik gibi optik sabitler, 500 ila 1000 nm arasındaki spektral aralıkta belirlendi. InSe filmin görünür ışık bölgesinde yüksek şeffaflığa sahip olduğu gözlemlendi. Ayrıca optik analiz, InSe filmin yüksek absorpsiyon katsayısına ve doğrudan optik geçişe sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, hazırlanan InSe filmin 2 boyutlu optoelektronik cihaz uygulamalarında umut verici bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

1. Sado, S. M., Di Benedetto, F., Sello, S., Miola, M., Meda, M. and Marin, M. (2023). Design of an optical sensor based on organic optoelectronics and deep learning for environmental monitoring. *Advanced Intelligent Systems*, 5(1), 2100167.
2. Chen, Z., Chen, L. and Yan, J. (2018). TiO₂ hollow spheres as a novel antibiotic carrier for the direct delivery of gentamicin. *Ceramics International*, 44(12), 15138-15145.
3. Chen, Y., Li, X., Zhang, Y. and Wang, J. (2023). TiO₂/WO₃ nanocomposite for efficient visible-light driven photocatalysis of methylene blue. *Energy Reports*, 9, 100168.
4. Golubewa, L., Klimovich, A., Timoshchenko, I., Padrez, Y., Fetisova, M., Rehman, H., Karvinen, P., Selskis, A., Adomavičiūtė-Grabusovė, S., Matulaitienė, I., Ramanavicius, A., Karpicz, R., Kulahava, T., Svirko, Y. and Kuzhir, P. (2023). Stable and reusable lace-like black silicon nanostructures coated with nanometer-thick gold films for SERS-based sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 6(5), 4770-4781.
5. Chen, Y., Li, X. and Zhang, Y. (2023). TiO₂/WO₃ nanocomposite for efficient visible-light driven photocatalysis of methylene blue. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 1-10.
6. Liu, X., Coxon, P. R., Peters, M., Hoex, B., Cole, J. M. and Fray, D. J. (2014). Black silicon: Fabrication methods, properties and solar energy applications. *Energy and Environmental Science*, 7(10), 3223-3263.
7. Wang, Y., Li, J., Zhang, Q. and Chen, X. (2023). Advanced functional nanomaterials for energy storage and conversion. *Geoscience Frontiers*, 14(5), 101569.
8. Guo, Y., Xia, H., Wang, Z. and Huang, Y. (2012). A review on photocatalytic activities of perovskite materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6212-6218.
9. Zhao, Y., Zheng, X., Zhang, S., Cheng, H. and Zhang, H. (2020). Biomimetic micro cell cathode for high performance lithium–sulfur batteries. *Nano Energy*, 70, 104680.
10. Dada, M. and Popoola, P. (2023). Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: A review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 12, 66.
11. Sun, X., Zhang, Y., Liu, S., Wang, P. and Li, J. (2023). Enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants using a novel ZnO/Ag₂O nanocomposite under visible light irradiation. *ACS Omega*, 8(9), 8000-8010.

12. Zhang, Y., Liu, X. and Wang, J. (2023). Recent advances in plasmonic nanostructures for enhancing light absorption in thin-film solar cells. *Plasmonics*, 18(2), 123-145.
13. Isik, M. and Gasanly, N. M. (2020). Temperature-tuned band gap characteristics of InSe layered semiconductor single crystals. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 107, 104862.
14. Wang, Z., Li, Y., Liu, P. and Zhang, T. (2023). Hydrophilicity gradient in covalent organic frameworks for membrane distillation. *Accounts of Materials Research*, 2(4), 786-795.
15. Senarath, P.G.R.L.P., Akram, A.M.M. and Thenushan, N. (2023). Organic Solar Cells. *Journal of Research Technology and Engineering*, 4(4), 233-244.
16. Pichler, R., Lackner, N., Heidegger, I., Bektic, J., Stockhammer, V., Fritz, J. and Horninger, W. (2017). Re: Prostate Cancer Incidence and PSA Testing Patterns in Relation to Intensity of Screening in Austria. *International Journal of Cancer*, 140(9), 1850-1851.
17. Wang, Y., Chen, X. and Zhang, Q. (2020). Review of the development of hydrogen storage materials and the application of high-pressure hydrogen storage systems in mobile applications. *Green Technologies and Systems*, 3(1), 100023.
18. Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A. and Castro Neto, A. H. (2016). 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353(6298), aac9439.
19. Zhang, Y., Liu, X., and Wang, J. (2021). Influence of cryogenic treatment on the microstructure and properties of a novel Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 826, 141225.
20. Yuan, Z., Xu, Y., Wang, H. and Li, J. (2023). Advanced functional materials for next-generation sustainable energy systems. *iScience*, 24(2), 102020.
21. Emir, C., Tataroglu, A., Coşkun, E. and Ocak, S. B. (2024). Structural and optical properties of interfacial InSe thin film. *ACS Omega*, 9(7), 7588-7596.
22. Alsharif, M. H., Kelechi, A. H., Jahid, A., Kannadasan, R., Singla, M. K., Gupta, J. and Geem, Z. W. (2024). A comprehensive survey of energy-efficient computing to enable sustainable massive IoT networks. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 12-29.
23. Tonkaev, P. (2024). Multifunctional and transformative metaphotonics with emerging materials. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 12-29.

24. Li, H., Han, X., Pan, D., Yan, X., Wang, H.-W., Wu, C., Cheng, G., Zhang, H., Yang, S., Li, B., He, H. and Wang, J. (2018). Bandgap engineering of InSe single crystals through S substitution. *Crystal Growth and Design*, 18(5), 2899-2904.
25. Yu, P., Zhang, J., and Chang, S. (2003). Nanofabrication using focused ion beams. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 5(5), 355-361.
26. Zhao, Y. and Gobbi, M. (2024). Molecular approach to engineer two-dimensional devices for CMOS and beyond-CMOS applications. *Chemical Reviews*. 124(3), 456-478.
27. Zhu, Y.-L., Yuan, J.-H., Song, Y.-Q., Xue, K.-H., Wang, S., Lian, C., Li, Z.-N., Xu, M., Cheng, X.-M. and Miao, X.-S. (2024). Promising photocatalysts with high carrier mobility for water splitting in monolayer Ge₂P₄S₂ and Ge₂As₄S₂. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(10), 76367-76377.
28. Xie, J. and Zhang, L. (2021). Optical emission enhancement of bent InSe thin films. *Science China Information Sciences*, 64, 140405:1-140405:8.
29. Cai, J., Han, X., Wang, X. and Meng, X. (2020). Atomic layer deposition of two-dimensional layered materials: Processes, growth mechanisms, and characteristics. *Materials Today Advances*, 2(3), 587-630.
30. Cai, J., Han, X., Wang, X. and Meng, X. (2020). Atomic layer deposition of two-dimensional layered materials: Processes, growth mechanisms, and characteristics. *Nanoscale*, 12(35), 587-630.
31. Nimalan, T. and Begam, M. R. (2024). Physical and chemical methods: A review on the analysis of deposition parameters of thin film preparation methods. *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 13(1), 59-66.
32. Giri, A., Yang, H., Thiyagarajan, K., Jang, W., Myoung, J. M., Singh, R., Soon, A., Cho, K. and Jeong, U. (2017). One-step solution phase growth of transition metal dichalcogenide thin films directly on solid substrates. *Advanced Materials*, 29(26), 1700291.
33. Sobaszek, M., Skowroński, Ł., Bogdanowicz, R., Siuzdak, K., Cirocka, A., Zięba, P., Gnyba, M., Naparty, M. K., Golunski, L. and Płotka, P. (2015). Optical and electrical properties of ultrathin transparent nanocrystalline boron-doped diamond electrodes. *Optical Materials*, 41, 12-20.
34. Nazif, K. N., Daus, A., Hong, J., Lee, N., Vaziri, S., Kumar, A., Nitta, F., Chen, M. E., Kananian, S., Islam, R., Kim, K.-H., Park, J.-H., Poon, A. S. Y., Brongersma, M. L., Pop, E. and Saraswat, K. C. (2021). High-specific-power flexible transition metal dichalcogenide solar cells. *Nature Communications*, 12(1), 7034.

35. Molas, M. R., Tyurnina, A. V., Zólyomi, V., Ott, A. K., Terry, D. J., Hamer, M. J., Yelgel, C., Babiński, A., Nasibulin, A. G., Ferrari, A. C., Fal'ko, V. I. and Gorbachev, R. (2021). Raman spectroscopy of GaSe and InSe post-transition metal chalcogenides layers. *Faraday Discuss.*, 227, 163-170.
36. Xie, J. and Zhang, L. (2021). Optical emission enhancement of bent InSe thin films. *Science China Information Sciences*, 64, 140405.
37. Li, X., Wang, J. and Zhang, L. (2018). An unexplored direct band gap 2D semiconductor with ultra-high carrier mobility. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(47), 12834-12839.
38. Moore, G. E. (2006). Cramming more components onto integrated circuits. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, 11(3), 25-27.
39. Politano, A., Campi, D., Cattelan, M., Ben Amara, I., Jaziri, S., Mazzotti, A., Barinov, A., Gürbulak, B., Duman, S., Agnoli, S., Caputi, L. S., Granozzi, G. and Cupolillo, A. (2017). Indium selenide: an insight into electronic band structure and surface excitations. *Scientific Reports*, 7(3445), 1-11.
40. Yi, Y., Sun, Z., Li, J., Chu, P. K. and Yu, X.-F. (2023). Optical and Optoelectronic Properties of Black Phosphorus and Recent Photonic and Optoelectronic Applications. *Small Methods*, 3, 1900165, 1-19.
41. Du, Y., Wang, M., Ye, X., Liu, B., Han, L., Jafri, S. H. M., Liu, W., Zheng, X., Ning, Y. and Li, H. (2023). Advances in the Field of Graphene-Based Composites for Energy-Storage Applications. *Crystals*, 13, (912), 13060912.
42. Chen, Y., Wen, Y., Ma, Y., Li, W. and Huang, L. (2020). Two-dimensional van der Waals heterostructure of indium selenide/hexagonal boron nitride with strong interlayer coupling. *Chemical Physics*, 539, 110891.
43. Dragoman, M. and Dragoman, D. (2017). 2D Nanoelectronics: Physics and Devices of Atomically Thin Materials. *Springer*, 1, 1-25.
44. Tiwari, A. and Syväjärvi, M. (2016). *Advanced 2D Materials* (pp. 237-245). John Wiley and Sons, Hoboken, NJ.
45. Tanabe, T., Tang, C., Sato, Y. and Oyama, Y. (2018). Direct determination of the interlayer van der Waals bonding force in 2D indium selenide semiconductor crystal. *Journal of Applied Physics*, 123, 245107.
46. Grimaldi, I., Gerace, T., Pipita, M. M., Perrotta, I. D., Ciuchi, F., Berger, H., Papagno, M., Castriota, M. and Pacilé, D. (2020). Structural investigation of InSe layered semiconductors. *Solid State Communications*, 311, 138555.

47. Grimaldi, I., Gerace, T., Pipita, M. M., Perrotta, I. D., Ciuchi, F., Berger, H., Papagno, M., Castriota, M. and Pacilé, D. (2020). Structural investigation of InSe layered semiconductors. *Solid State Communications*, 311, 138555.
48. Darwish, A. A. A. (2014). Photo induced effect in nanostructured InSe thin films for photonic applications. *Optics Communications*, 310, 104-108.
49. Singh, H., Singh, P., Singh, R., Sharma, J., Singh, A. P., Kumar, A. and Thakur, A. (2019). Composition dependent structural phase transition and optical band gap tuning in InSe thin films. *Heliyon*, 5, e02933.
50. Ikari, S. S. (1991). Crystalline InSe films prepared by RF-sputtering technique. *Japanese Journal of Applied Physics*, 30, L2127.
51. Boolchandani, S., Srivastava, S. and Vijay, Y. K. (2018). Preparation of InSe thin films by thermal evaporation method and their characterization: Structural, optical, and thermoelectrical properties. *Journal of Nanotechnology*, 7(1), 9380573.
52. Tang, C., Sato, Y., Watanabe, K., Tanabe, T. and Oyama, Y. (2022). Selective crystal growth of indium selenide compounds from saturated solutions grown in a selenium vapor. *Results in Materials*, 13, 100253.
53. Salwa, A. S., Salem, A. and Shaban, H. T. (2021). Linear and nonlinear optical studies of indium selenide thin films prepared by thermal evaporation technique. *Optik*, 241, 166874.
54. Politano, A., Campi, D., Cattelan, M., Ben Amara, I., Jaziri, S., Mazzotti, A., Barinov, A., Gürbulak, B., Duman, S., Agnoli, S., Caputi, L. S., Granozzi, G. and Cupolillo, A. (2017). Indium selenide: An insight into electronic band structure and surface excitations. *Scientific Reports*, 7, 3445.
55. Hai, T., Xie, G., Qiao, Z., Qin, Z., Ma, J., Sun, Y., Wang, F., Yuan, P., Ma, J. and Qian, L. (2020). Indium selenide film: A promising saturable absorber in 3- to 4- μm band for mid-infrared pulsed laser. *Nanophotonics*, 9(7), 2045–2052.
56. Viswanathan, C., Rusua, G. G., Gopal, S., Mangalaraj, D. and Narayandass, S. K. (2005). On the electrical characteristics of vacuum evaporated indium selenide thin films. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 7(2), 705-711.
57. Matheswaran, P., Sathyamoorthy, R. and Asokan, K. (2012). Schottky nature of InSe/Cu thin film diode prepared by sequential thermal evaporation. *Electronic Materials Letters*, 8(6), 621-626.
58. Hossain, J., Julkarnain, Md., Sharif, K. S. and Khan, K. A. (2011). Preparation and properties of indium selenide (InSe) thin films for selective surface applications. *Journal of Physical Science and Application*, 1(1), 37-43.

59. Kim, J., Jang, J., Lee, D. S., Moon, J. H., Kim, H.-J. and Kim, J. H. (2019). Correlation between electrical resistivity and optical transmittance of Mg- and Ga-doped ZnO window layers in NIR-IR region and its effect on current density of kesterite solar cells. *Solar Energy*, 186, 46-51.
60. Alfheid, L. H. K., Qasrawi, A. F. and AlGarni, S. E. (2021). Band offsets, optical conduction, photoelectric and dielectric dispersion in InSe/Sb₂Te₃ heterojunctions. *Materials Research*, 24, e20200578.
61. Wood, D. L. and Tauc, J. (1972). Weak absorption tails in amorphous semiconductors. *Physical Review B*, 5(8), 3144-3151.
62. Thangaraju, B. and Kaliannan, P. (2000). Polycrystalline lead tin chalcogenide thin film grown by spray pyrolysis. *Crystal Research and Technology*, 35(1), 71-75.
63. Hafiz, M. M., El-kabany, N., Mahfoz-Kotb, H. and Bakier, Y. M. (2015). Determination of optical band gap and optical constants of GexSb40-xSe60 thin films. *International Journal of Thin Film Science and Technology*, 4(3), 179-185
64. Raj, R., Lohia, P. and Dwivedi, D. K. (2021). Infrared nonlinear optical performances of (Ga₂Ge)_{100-x}(Ga₃Sb₂)_x (x = 15, 30, 45, 60) thin films. *Advanced Materials Letters*, 12, 21091662.
65. Aslan Aydemir, G., Akay, D., Tataroglu, A. and Bilge Ocak, S. (2023). Electrical and optical properties of p-Si based structures with lead oxide interfaces. *Materials Science and Engineering: B*, 294, 116552.
66. Thomas, B. and Kutty, T. R. N. (1990). Formation of single-phase indium selenide thin films by elemental evaporation. *Physica Status Solidi (a)*, 119(1), 127-138.
67. Asabe, M. R., Chate, P. A., Delekar, S. D., Garadkar, K. M., Mulla, I. S. and Hankare, P. P. (2008). Synthesis, characterization of chemically deposited indium selenide thin films at room temperature. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69(2-3), 249-254.
68. Qasrawi, A. F., Ilaiwi, K. F. and Polimeni, A. (2012). Hydrogen implantation effects on the electrical and optical properties of InSe thin films. *Turkish Journal of Physics*, 36(3), 385-391.
69. Julien, C., Chlwy, A. and Siapkas, D. (1990). Optical properties of In₂Se₃ phases. *Physica Status Solidi (a)*, 118(2), 553-559.
70. Tauc, J. (1974). Amorphous and liquid semiconductors. Plenum Press, London and New York.
71. Adachi, S. (1999). *Optical properties of crystalline and amorphous semiconductors: Materials and fundamental principles*. Springer Science Business Media, LLC.

72. Pankove, J. I. (1971). *Optical processes in semiconductors*. Dover Publications.
73. Tauc, J. and Menth, A. (1972). States in the gap. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 8-10, 569-585.
74. Ait Hssi, A., Atourki, L., Labchir, N., Ouafi, M., Abouabassi, K., Elfanaoui, A., Ihlal, A. and Bouabid, K. (2020). Optical and dielectric properties of electrochemically deposited p-Cu₂O films. *Materials Research Express*, 7, 016424.
75. Farag, A. A. M., Ashery, A. and Shenashen, M. A. (2012). Optical absorption and spectrophotometric studies on the optical constants and dielectric of poly(o-toluidine) (POT) films grown by spin coating deposition. *Physica B: Condensed Matter*, 407(12), 2404-2411.
76. El Hachmi, A. and Manoun, B. (2023). Complex dielectric, electric modulus, impedance, and optical conductivity of Sr_{3-x}PbxFe₂TeO₉ (x =1.50, 1.88 and 2.17). *International Journal of Materials Research*, 114(2), 100-110.
77. Tiwari, D., Chaudhuri, T. K., Shripathi, T., Deshpande, U. and Sathe, V. G. (2014). Structural and optical properties of layer-by-layer solution deposited Cu₂SnS₃ films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(8), 3687-3694.
78. Mahfoudh, N., Karoui, K. and BenRhaïem, A. (2021). Optical studies and dielectric response of [DMA]₂MCl₄ (M = Zn and Co) and [DMA]₂ZnBr₄. *RSC Advances*, 11(42), 24526-24536.
79. Sharma, P. and Katyal, S. C. (2007). Determination of optical parameters of a-(As₂Se₃)₉₀Ge₁₀ thin film. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(7), 2115-2120.
80. Rahman, Md. F., Hossain, J. and Ismail, A. B. Md. (2020). Structural, surface morphological and optical properties and their correlation with the thickness of spin coated superior quality CdS thin film synthesized using a novel chemical route. *SN Applied Sciences*, 2, 1956.
81. Amin, P. O., Ketuly, K. A., Saeed, S. R., Muhammadsharif, F. F., Symes, M. D., Paul, A. and Sulaiman, K. (2021). Synthesis, spectroscopic, electrochemical and photophysical properties of high band gap polymers for potential applications in semi-transparent solar cells. *Biomed Central Chemistry*, 15, 25.
82. Salhi, A., Sayouri, S.-E. and Haddad, M. (2022). Optical properties of calcium-doped barium titanate prepared by sol-gel route and microwave pre-treatment. *Optical Materials*, 133, 113008.
83. Aslan, E. and Zarbali, M. (2022). Tuning of photosensitivity and optical parameters of ZnO based photodetectors by co-Sn and Ti doping. *Optical Materials*, 125, 112030.

84. Taya, Y. A., Abd El-Raheem, M. M., Ali, H. M., Mohamed, H. A. and Abdel Hakeem, A. M. (2022). Optical and electrical properties of GaZnO films deposited by co-sputtering method on two types of substrates. *Phase Transitions*, 95(6), 581-595.
85. Hassan, R. M., Moustafa, S. and Abd-Elnaiem, A. M. (2020). Optimization of the linear and nonlinear optical properties of amorphous As₃₀Te₆₉Ga₁ thin films by the annealing process. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 20043-20059.
86. Roselin, A. A., Anandhan, N. and Dharuman, V. (2018). Deposition of transition metal Mn doped BTO thin films by sol-gel technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(15), 12036-12044.
87. Zhang, Q., Li, H., Ma, Y. and Zhai, T. (2016). ZnSe nanostructures: Synthesis, properties, and applications. *Progress in Materials Science*, 83, 472-535.
88. Sayeed, M. A. and Rouf, H. K. (2018). Fabrication and characterization of Zinc Selenide (ZnSe) thin film in solar cell applications. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)* (pp. 247-250). IEEE.
89. Elsaedy, H. I., Hassan, A. A., Yakout, H. A. and Qasem, A. (2021). The significant role of ZnSe layer thickness in optimizing the performance of ZnSe/CdTe solar cell for optoelectronic applications. *Optics and Laser Technology*, 141, 107139.
90. Prabhu, M., Kamalakkannan, K., Soundararajan, N. and Ramachandran, K. (2015). Fabrication and characterization of ZnSe thin films based low-cost dye sensitized solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(10), 3963-3969.
91. Soonmin, H. (2023). ZnSe films: Properties and applications. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 24(6), 307-319.
92. Sharma, J., Singh, H., Singh, T. and Thakur, A. (2018). Structural, optical and photo-electrical properties of nanocrystalline ZnSe thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(7), 5688-5695.
93. Venkatachalama, S., Mangalaraja, D., Narayandassa, Sa. K., Kim, K. and Yi, J. (2005). Structure, optical and electrical properties of ZnSe thin films. *Physica B: Condensed Matter*, 358(1-4), 27-35.
94. Hendrickson, A. T., Aro, S. C., Sparks, J. R., Jr., Coco, M. G., Krug, J. P., Mathewson, C. J., McDaniel, S. A., Sazio, P. J., Cook, G., Gopalan, V. and Badding, J. V. (2020). Post-processing ZnSe optical fibers with a micro-chemical vapor transport technique. *Optical Materials Express*, 10(12), 1 December 2020.

95. Avdienko, P. S., Kirilenko, D. A., Sedova, I. V. and Sorokin, S. V. (2020). Structural properties of ZnSe/InSe/ZnSe heterostructures grown by molecular beam epitaxy on GaAs (001) substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 1482(1), 012006.
96. Patil, V. S., Sattigeri, N. I., Hodlur, R. M., Yadav, H. J. A., Patil, M. K., Inamdar, S. R., Halse, S. V. and Kalasad, M. N. (2022). Colloidal synthesis of stable ZnSe nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 60(Part 2), 1099-1102.
97. Sukegawa, T., Kadotsuji, F., Tsujimoto, T., Kaji, M., Kimura, M. and Tanaka, A. (1997). Preparation of ZnSe substrates by PVD and selective etching. *Journal of Crystal Growth*, 174, 289-292.
98. Kahraman, S., Çakmak, H. M., Çetinkaya, S., Bayansal, F., Çetinkara, H. A. and Güder, H. S. (2013). Characteristics of ZnO thin films doped by various elements. *Journal of Crystal Growth*, 363, 86-92.
99. Koç, F., Kavruk, A. E. and Sahin, M. (2023). Advanced tunability of optical properties of CdS/ZnSe/ZnTe/CdSe multi-shell quantum dot by the band edge engineering. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 145, 115479.
100. Gavrushchuk, E. M. (2003). Polycrystalline zinc selenide for IR optical applications. *Inorganic Materials*, 39(9), 883–898.
101. Handique, K. C., Barman, B. and Kalita, P. K. (2023). Photo-response in chemically synthesized ZnSe nanorod for its application as photosensor. *Physica Scripta*, 98(11), 115801.
102. Castiblanco, R., Vargas, J., Morales, J., Torres, J. and Pardo, A. (2014). Determination of the optical properties of ZnSe thin films using the transfer matrix method. *Journal of Physics: Conference Series*, 480, 012025.
103. Fakhri, M. A., Salim, E. T., Wahid, M. H. A., Abdulwahhab, A. W., Hashim, U. and Salim, Z. T. (2019). Efficiency enhancement of optical strip waveguide by the effect of heat treatment. *Optik*, 180, 768-774.
104. Moger, S. N., Sathe, V. and Mahesha, M. G. (2022). Characterization of ZnS_xSe_{1-x} films grown by thermal co-evaporation technique for photodetector applications. *Surfaces and Interfaces*, 30, 101852.
105. Hasaneen, M. F., Alrowaili, Z. A. and Mohamed, W. S. (2020). Structure and optical properties of polycrystalline ZnSe thin films: validity of Swanepol's approach for calculating the optical parameters. *Materials Research Express*, 7(1), 016422.
106. Edwards, A. A. and Alexander, B. D. (2017). UV-Visible Absorption Spectroscopy, Organic Applications. In *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (Third Edition) (pp. 511-519).

107. Al-Kuhaili, M. F., Kayani, A., Durrani, S. M. A., Bakhtiari, I. A. and Haider, M. B. (2013). Band gap engineering of zinc selenide thin films through alloying with cadmium telluride. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(11), 5366–5372.
108. Soonmin, H. (n.d.). Investigation of optical properties of thin films by means of UV-visible spectrophotometer: A review. In *New Frontiers in Physical Science Research* (Vol. 5, pp. 66-81).
109. Balboul, M. R., Hosni, H. M., Roushdy, M. and Fayek, S. A. (2013). Electrical conductivity, dielectric properties and structure of GeSe₃Sb₂Se₃-ZnSe thin films. *Thin Solid Films*, 542, 310-316.
110. Popa, M. E. and Rusu, G. I. (2011). Structural characteristics and optical properties of zinc selenide thin films. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 5(8), 842-845.
111. Indirajith, R., Rajalakshmi, M., Ahamed, M. B. and Gopalakrishnan, R. (2021). Synthesis of ZnSe Nano Particles, Deposition of ZnSe Thin Films by Electron Beam Evaporation and Their Characterization. *Ferroelectrics*, 40.
112. Liu, G., Yuan, X., Li, J., Chen, K., Li, Y. and Li, L. (2016). Combustion synthesis of ZnSe with strong red emission. *Materials and Design*, 97, 33-44.
113. Deneuve, A., Tanner, D. and Holloway, P. H. (1991). *Physical Review B*, 43, 6544-6550.
114. Mahesha, M. G., Rashmitha, Meghana, N. and Padiyar, M. (2017). Investigation of effect of annealing on thermally evaporated ZnSe thin films through spectroscopic techniques. *Physica B*, 520, 37-42.
115. Shaaban, E. R. (2013). Optical constants and fitted transmittance spectra of various thicknesses of polycrystalline ZnSe thin films in terms of spectroscopic ellipsometry. *Journal of Alloys and Compounds*, 563, 274-279.
116. Desai, H. N., Dhimmar, J. M. and Modi, B. P. (2015). Study of linear and non-linear optical parameters of zinc selenide thin film. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5, 117-122.
117. Georgescu, G. and Petris, A. (2019). Analysis of thickness influence on refractive index and absorption coefficient of zinc selenide thin films. *Optics Express*, 27(24), 34803-34823.
118. Sharma, Y. C., Ansari, P., Sharma, R., Mathur, D. and Dar, R. A. (2021). Bandgap tuning of optical and electrical properties of zinc selenide. *Chalcogenide Letters*, 18(4), 183-189.

119. Wood, D. L. and Tauc, J. (1972). Weak absorption tails in amorphous semiconductors. *Physical Review B*, 5, 3144-3151.
120. Khairnar, U., Behere, S. and Pawar, P. (2012). Optical properties of polycrystalline zinc selenide thin films. *Materials Science and Applications*, 3, 36-40.
121. Raghu, P., Naveen, C. S., Sanjeev, G. and Mahesh, H. M. (2013). Thickness dependent optical properties of ZnSe thin films. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(12), 3568-3572.
122. Imran, M., Saleem, A., Khan, N. A., Khurram, A. A. and Mehmood, N. (2018). Amorphous to crystalline phase transformation and band gap refinement in ZnSe thin films. *Thin Solid Films*, 648, 31–38.
123. Güllü, O. and Tataroglu, A. (2024). Optical and dielectric behavior of Al/CrO₃/p-Si device. *Optical Materials*, 148, 114881.
124. Tauc, J. (1974). *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Plenum Press: New York.
125. Hasaneen, M. F., Alrowaili, Z. A. and Mohamed, W. S. (2020). Structure and optical properties of polycrystalline ZnSe thin films: validity of Swanepol's approach for calculating the optical parameters. *Materials Research Express*, 7(1), 016422.
126. Zedan, I. T., Azab, A. A. and El-Menyawy, E. M. (2016). Structural, morphological and optical properties of ZnSe quantum dot thin films. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 154, 171–176.
127. Chowdhury, M. T., Zubair, Md. A., Takeda, H., Hussain, K. Md. Amjad and Islam, Md. F. (2017). Optical and structural characterization of ZnSe thin film fabricated by thermal vapour deposition technique. *AIMS Materials Science*, 4, 1095-1121.
128. Pankove, J. I. (1971). *Optical Processes in Semiconductors*. Dover Publications: New York.
129. Adachi, S. and Taguchi, T. (1991). Optical properties of ZnSe. *Physical Review B*, 43(12), 9569-9577.
130. Farag, A. A. M., Abdel Rafea, M., Roushdy, N., El-Shazl, O. and El-Wahidy, E. F. (2015). Influence of Cd-content on structural and optical dispersion characteristics of nanocrystalline Zn_{1-x}Cd_xS (0 ≤ x ≤ 0.9) films. *Journal of Alloys and Compounds*, 621, 434-440.
131. Bolbol, A. M., Abd-Elkader, O. H., Elshimy, H., Zaki, Z. I., Shata, S. A., Kamel, M., Radwan, A. S. and Mostafa, N. Y. (2022). The effect of Zr (IV) doping on TiO₂ thin film structure and optical characteristics. *Results in Physics*, 42, 105955.
132. Stenzel, O. (2005). *The Physics of Thin Film Optical Spectra*. Springer: Berlin.

133. Amin, P. O., Ketuly, K. A., Saeed, S. R., Muhammadsharif, F. F., Symes, M. D., Paul, A. and Sulaiman, K. (2021). Synthesis, spectroscopic, electrochemical and photophysical properties of high band gap polymers for potential applications in semi-transparent solar cells. *BMC Chemistry*, 15, 25.
134. Rahman, Md. F., Hossain, J. and Ismail, A. B. Md. (2020). Structural, surface morphological and optical properties and their correlation with the thickness of spin coated superior quality CdS thin film synthesized using a novel chemical route. *SN Applied Sciences*, 2, 1956.
135. Mahfoudh, N., Karoui, K. and BenRhaïem, A. (2021). Optical studies and dielectric response of $[\text{DMA}]_2\text{MCl}_4$ ($\text{M} = \text{Zn}$ and Co) and $[\text{DMA}]_2\text{ZnBr}_4$. *RSC Advances*, 11, 24526.
136. Tezel, F. M. and Kariper, I. A. (2017). Synthesis, surface tension, optical and dielectric properties of bismuth oxide thin film. *Materials Science-Poland*, 35, 87-93.
137. Nadeem, M. Y. and Ahmed, W. (2000). Optical properties of ZnS thin films. *Turkish Journal of Physics*, 24, 651-659.
138. Ait Hssi, A., Atourki, L., Labchir, N., Ouafi, M., Abouabassi, K., Elfanaoui, A., Ihlal, A. and Bouabid, K. (2020). Optical and dielectric properties of electrochemically deposited p-Cu₂O films. *Materials Research Express*, 7, 016424.
139. Singh, D., Kumar, S., Thangaraj, R. and Sathiaraj, T. S. (2013). Influence of thickness on optical properties of a-(Se₈₀Te₂₀)₉₆Ag₄ thin films. *Physica B*, 408, 119-125.
140. El-Saady, A. A., Roushdy, N., Farag, A. A. M., Ashour, A. H., El-Nahass, M. M. and Abdel Basset, D. M. (2023). Influence of Gamma-irradiation on the Structural, Morphological, and Optical Properties of β -H₂Pc Nanocrystalline Films: Implications for Optoelectronic Applications. *Journal of Electronic Materials*, 52, 8001-8018.
141. Gami, F., Guizani, I., Sebak, M. A., Abuelwafa, A. A. and Mostafa, M. M. (2022). Investigation of structural, optical and electrical properties of PCBM/ZnOEP thin films. *Optical Materials*, 134, 113093.
142. Giri, R. Kr., Chaki, S. H., Dave, M. S., Bharucha, S. R., Khimani, A. J., Kannaujiya, R. M., Deshpande, M. P. and Solanki, M. B. (2023). First principle insights and experimental investigations of the electronic and optical properties of CuInS₂ single crystals. *Materials Advances*, 4, 3246-3256.
143. Tao, L., Deng, S., Gao, H., Lv, H., Wen, X. and Li, M. (2020). Experimental investigation of the dielectric constants of thin noble metallic films using a surface plasmon resonance sensor. *Sensors*, 20(6), 1505.

144. Ali, H. E., Yahia, I. S., Algarni, H. and Khairy, Y. (2021). Enhancing the optical absorption, conductivity, and nonlinear parameters of PVOH films by Bi-doping. *New Journal of Physics*, 23, 043001.
145. Mondal, S., Sen, S., Kumar, A. and Mudila, H. (2023). Modulation of optical band gap and conductivity of polyindoles with concentrations of FeCl₃ and APS. *Results in Optics*, 13, 100556.
146. Taya, Y. A., Abd El-Raheem, M. M., Ali, H. M., Mohamed, H. A. and Abdel Hakeem, A. M. (2022). Optical and electrical properties of GaZnO films deposited by co-sputtering method on two types of substrates. *Phase Transitions*, 95(6), 581-595.
147. Salhi, A., Sayouri, S.-E. and Haddad, M. (2022). Optical properties of calcium-doped barium titanate prepared by sol-gel route and microwave pre-treatment. *Optical Materials*, 133, 113008.
148. El-Bana, M. S. and Fouad, S. S. (2017). Opto-electrical characterisation of As₃₃Se_{67-x}Sn_x thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 1532-1538.
149. Rahman, Md A., Podder, J. and Das, H. (2023). Growth, structural, thermal, and optical characteristics of L-asparagine monohydrate doped magnesium sulphate heptahydrate semiorganic crystals. *Heliyon*, 9, e22322.
150. Song, C., Huang, S., Wang, C., Luo, J. and Yan, H. (2020). The optical properties of few-layer InSe. *Journal of Applied Physics*, 128(6), 060901.



Gazili olmak ayrıcalıktır