



**T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ
SONUC RAPORU**

Optoelektronik Uygulamalar İçin Zn Katkılı PbS Yarıiletkeninin Optik Özelliklerinin İyileştirilmesi

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Dr. Öğr. Üyesi Erman ERDOĞAN

ARAŞTIRMACILAR: Doç. Dr. Ayça KIYAK YILDIRIM

BAŞLAMA TARİHİ: 22.06.2021

BİTİŞ TARİHİ: 21.12.2022

**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLECİK, 2022**

ICINDEKILER

Sayfa No

ICINDEKILER	i
SEKILLER DIZINI	ii
TABLolar DIZINI	iii
OZET	iv
ABSTRACT	v
1. GIRIS	1
2. BAP PROJESİ DONEMİNDE YAPILAN CALISMALAR	2
2.1 Kullanılan Malzemeler	2
2.2 Yapılan Calismalar	3
3. DENEYSEL SONUCLAR	4
3.1 XRD Arastirmalari	4
3.2 SEM Arastirmalari	7
3.3 Optik Incelemeler	10
3.3.1 Sogurma, Gecirgenlik ve Optik Bant Araligi	10
3.3.2 Optik Sabitler (n,k)	14
3.3.3 Dielektrik Ozellikler	16
3.3.4 Dispersiyon Parametreleri	19
4. MALI ETKINLIKLER	21
5. SONUC VE YORUM	22
KAYNAKLAR	22

SEKILLER DIZINI

Sayfa No

Şekil 1. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin XRD grafiği	5
Şekil 2. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin Scherrer grafikleri.	6
Şekil 3. Saf, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin SEM görüntüleri	8
Şekil 4. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin EDX grafiği ve element bileşimleri	10
Şekil 5. Çeşitli Zn içeriğine sahip PbS filmlerinin sogurma grafiği	11
Şekil 6. Çeşitli Zn içeriğine sahip PbS filmlerinin geçirgenlik grafiği	12
Şekil 7. Zn içerikli PbS filmlerin optik bant aralığı değerlerinin değişimi	13
Şekil 8. Katkisiz ve Zn katkılı PbS için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak kırılma indeksindeki değişiklikler.....	15
Şekil 9. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin sönüm katsayısı grafiği.....	16
Şekil 10. Katkisiz ve Zn katkılı PbS için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dielektrik sabitinin gerçek kısmındaki değişiklikler	17
Şekil 11. Katkisiz ve Zn katkılı PbS için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hayali kısım dielektrik sabitindeki değişiklikler	18
Şekil 12. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmler için dağılım faktörü ve foton dalga boyu	19
Şekil 13. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmler için $(n^2 - 1)$ 'in $(h\nu)^2$ 'ye karşı grafiği	20

TABLolar DIZINI

Sayfa No

Tablo 1. Yapısal incelemeden elde edilen çeşitli parametreler (dhkl: düzlemler arası mesafe, FWHM: tam genişlik yarı maksimum, DSR-ort: çizimden elde edilen kristal boyutu **6**

Tablo 2. Katkisiz, %2 ve %4 Zn-PbS ince filmlerin hesaplanan bazı optik değerleri **20**

OZET

Gelişen teknoloji ile birlikte birçok çalışma alanına sahip olan PbS ve Zn katkılı PbS malzemeleri, elektro-optik teknolojisindeki uygulamaları ile öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, 250 °C tavlama sıcaklığında tavlanan katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS filmler, elektrodepozisyon yöntemiyle İTO altlıklar üzerinde üretilmiştir. Üretilen bu filmlerin yapısal, optik ve yüzey özellikleri geniş kapsamlı analiz yöntemleri ile incelenmiş ve farklı oranlarda katkılanan Zn elementinin filmler üzerindeki etkisi raporlanmıştır. Filmlerin X-ışınları kırınımı (XRD) ile belirlenen yapısal özelliklerinden, filmlerin tamamının polikristal yapıda olduğu sonucuna varılmıştır. Filmlerin kalınlıkları ve bazı optik özellikleri tanımlayan parametreler (sönme katsayısı ve kırılma indisi) spektroskopik elipsometre ile belirtilmiş ve kalınlık değerleri 245-232 nm arasında ölçülmüştür. Optik yöntemle belirlenen ölçümlerden tüm filmlerin optik bant aralıklarının 1.95 eV ile 2.07 eV arasında olduğu bulunmuştur. Görünür dalga boyunda (400 nm-700 nm) filmlerin geçirgenlik değerlerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Filmlerin yüzey morfolojileri ve elementel analizleri sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ile elde edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda Zn katkı maddesinin filmlerin yapısal, optik ve yüzey özellikleri üzerinde iyileştirici etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: PbS, Elektrodepozisyon, Karakterizasyon, Zn katkilama, Optoelektronik

ABSTRACT

With the advancing technology, PbS and Zn doped PbS materials, which have many fields of study, stand out with their applications in electro-optic technology. In this study, pure, 2% and 4% Zn doped PbS films annealed at 250 °C annealing temperature were produced on ITO substrates by electrodeposition method. Structural, optical and surface properties of these produced films were examined with having broad range analysis methods, and the effect of Zn element doped at different rates on the films was reported. From the structural features of the films specified by X-ray diffraction (XRD), it was concluded that all of the films were in polycrystalline structure. The thickness of the films and the parameters defining some optical properties (extinction coefficient and refractive index) were stated by spectroscopic ellipsometer and the thickness values were measured between 245-232 nm. From the measurements determined by the optical method, it was found that the optical band gaps of all the films were between 1.95 eV and 2.07 eV. It has been determined that the transmittance values of the films at the visible wavelength (400 nm-700 nm) are low. The surface morphologies and elemental analyzes of the films obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), respectively. As a result of the investigations, it was concluded that the Zn dopant had a healing effect on the structural, optical and surface properties of the films.

Keywords: PbS, Electrodeposition, Characterization, Zn doping, Optoelectronics

1. GIRIS

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler yeni malzemelerin geliştirilmesi için çok önemlidir. Malzeme alanındaki yenilikler ve keşifler, yüksek kaliteli malzemelerin üretimine odaklanmaktadır. Malzeme özelliklerini ve performansını belirleyen parametreler arasında sadece kompozisyon değil, aynı zamanda yapı ve/veya mikroyapının uygun üretim yöntemleri ile kontrolü de yer almaktadır. Yarı iletkenlerin teknolojik uygulamalarda önemi oldukça büyüktür. Elektronik ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, yarı iletkenlerin özelliklerinin daha iyi bilinmesi ile mümkün olmuş ve bu sayede teknolojik gelişmeler hızlanmıştır [1]. İnce filmler, hacimli malzemelerin yüzeyine kaplandıklarında tek başlarına sağlayamayacakları birçok özelliği kazandırdıkları için optik, elektronik, manyetik, kimya ve mekanik ile ilgili endüstrilerde ileri teknoloji malzemeler olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çok katmanlı olarak üretildiklerinde hacim özelliklerinden tamamen farklı yeni malzemeler gibi davrandıkları için elektronik devre elemanları olarak da kullanılabilirler [2]. Günümüz bilim ve teknolojisinde önemli bir yere sahip olan yarı iletken ince filmler farklı tekniklerle üretilmektedir. İnce filmlerin kullanım alanlarının belirlenmesinde yapısal, morfolojik, optik, elektriksel ve manyetik özellikler gibi fiziksel özellikleri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca kullandıkları yarı iletken ince film cihazlarının fiziksel özellikleri geliştirilerek performansları artırılabilir. Bu nedenle ince filmlerin yapısal, yüzey, optik ve elektriksel özelliklerinin ve bunun için kullanılan deneysel yöntemlerin detaylı olarak incelenmesi önemlidir [3,4].

Güneş pillerinde soğurucu tabaka olarak kullanılabilen Kurşun Sülfür (PbS) IV-VI yarı iletken grubundadır [5]. Çalışmalar, PbS'nin diğer IV-VI yarı iletkenlere kıyasla sıcaklık ve bant aralığı değişikliklerine çok daha fazla yanıt verdiğini göstermiştir [6]. Ayrıca Si gibi diğer yarı iletkenlere kıyasla tane boyutuna karşı oldukça hassastır. Bu özellikler, nanoyapılı cihazların üretiminde PbS'nin yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır. PbS yarı iletken filmler birçok yöntemle hazırlanabilir. Mikrodalga ısıtma [7], SILAR [8], sactırma [9], sprey piroliz [10] ve kimyasal banyo biriktirme [11] yöntemleri PbS filmlerin üretiminde kullanılan yöntemlerden bazılarıdır.

Bahsedilen yöntemlerin çoğu, geniş yüzeyli kaplamalar, düşük sıcaklıkta işlem ve düşük üretim maliyeti için uygun değildir. Ayrıca geniş alanları kaplamak için kullanılacak malzemeler oldukça pahalıdır. Bu çalışmada kullanılan elektrodpozisyon yöntemi, maliyetinin oldukça düşük olması ve uygulanmasının kolay olması nedeniyle ince film üretimi için ilgi çekici bir yöntemdir. Bu yöntemle film, elektrik alan, pH ve biriktirme süreleri kontrol edilerek istenilen yoğunluk ve kalınlıkta bırakılabilir. Elektrokimyasal biriktirme yöntemi ayrıca film parametrelerinin kolay kontrolü ve herhangi bir karmaşık deney düzeneğine ihtiyaç duymadan oda koşullarında uygulanabilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir [12,13].

Katkılama, kaliteli yarı iletken malzemelerin elde edilmesinde önemli bir rol oynar. Katkılama genellikle tane boyutunu, yüzey morfolojisini ve kristal yapısını kontrol etmede etkilidir [14]. Bu nedenle PbS ince filmlerin yapısal, optik, elektriksel ve manyetik özelliklerini çeşitli elementlerle katkılama yoluyla değiştirmek mümkündür. Ayırt edici unsurlarla katkılanmış PbS ince filmler hakkında çeşitli raporlar vardır [15-18], ancak, yüksek kaliteli PbS ince filmler elde etmek için uygun katkılama elemanlarını ve en iyi oranı seçmek, araştırmacılar için hala bir sorundur.

Bu çalışmada, PbS ince filmlerin optoelektronik özelliklerini optimize etmek için bir katkı maddesi olarak çinko seçilmiştir. Elektrokimyasal biriktirme kullanılarak İndiyum Kalay Oksit (ITO) substratları üzerinde başarılı bir şekilde katkisiz ve Zn katkılı PbS filmler elde ettik, ardından Zn katkılama konsantrasyonunun PbS ince filmlerin mikroyapısal, morfolojik ve özellikle optik özelliklerini nasıl etkilediğini araştırdık.

2. BAP PROJESİ DONEMİNDE YAPILAR CALISMALAR

2.1. Kullanılan malzemeler

PbS ve Zn katkılı PbS ince filmler üretilirken 0,01 M $Pb(NO_3)_2$ (Kurşun Nitrat) Pb kaynağı olarak; 0,05 M $Na_2S_2O_3$ bileşiği S kaynağı olarak kullanılmıştır. 0,0025 M EDTA (Etilen Diamin Tetra Asetik Asit) kompleks ajan olarak kullanılmıştır. Ortamın asitliğini düzenlemek için 0.1 M KCl (Potasyum Klorür) kullanılmıştır. PbS filmlerinin üretiminin gerçekleştirilmesi için 0,01 M $Pb(NO_3)_2$ ve 0,005 M $Na_2S_2O_3$ (Sodyum Tiyosülfat) bileşikleri

sırasıyla yapılan deneylerde kullanılmıştır. Ortamın asitliğini düzenlemek KCl (Potasyum Klorür) kullanılmıştır. Zn katkılı PbS ince filmler üretilirken 0,01 M $Pb(NO_3)_2$ ve 0,005 M $Na_2S_2O_3$ (Sodyum Tiyosülfat) bileşikleri yanı sıra farklı ağırlıkça oranlarda (%1, 2, 3, ve 4) $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (Çinko nitrat hekza hidrat) yapılan deneylerde kullanılmıştır. Ortamın asitliğini düzenlemek KCl (Potasyum Klorür) kullanılmıştır.

Çözelti hazırlıkları esnasında kütle ölçümü için KERN marka ABJ 220-4m modeli ve 0,1 mg hassasiyetli maksimum 220 g tartabilen hassas terazi kullanılmıştır. Tartım işlemleri tamamlandıktan sonra belirtilen bileşikler DI suda çözülmüştür. Çözeltilerin pH ölçümü için Hanna marka HI9025 modeli mikro bilgisayarlı pH metre kullanılmıştır. PbS ve Zn katkılı PbS filmlerinin üretiminin gerçekleştirilmesi için alt taban olarak optik olarak geçirgen $1,65 \text{ cm}^2$ yüzey alanına, $25 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$ dirence ve 80 nm kalınlığa sahip ITO kaplı camlar kullanılmıştır. ITO kaplı camlar izopropil alkol çözeltisinde 10 dk bekletilmiştir. Daha sonra DI suda durulanmıştır. Durulanmış ITO kaplı camlar yüzeylerinde nem kalmaması için 25°C 'de 1000 s boyunca kurutulmaya bırakılmıştır.

2.2 Yapılan çalışmalar

Satın aldığımız tüm kimyasal reaktifler analitik kalitedeydi ve daha fazla saflaştırılmadan kullanıldı. PbS yarı iletken filmler üretmek için $1,65 \text{ cm}^2$ yüzey alanına, $25 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$ dirence ve 100 nm kalınlığa sahip optik olarak şeffaf ITO kaplı camlar kullanıldı. ITO kaplı camlar önce deiyonize suya (DI) batırıldı. İzopropil alkol solüsyonunda 10 dakika bekletildikten sonra DI su ile durulandı. Durulanan ITO kaplı camlar, yüzeyde nem kalmayacak şekilde oda sıcaklığında (25°C) 30 dakika kurutuldu.

PbS bileşiği için solüsyon hazırlama adımları; Pb kaynağı olarak $Pb(NO_3)_2$, S kaynağı olarak $Na_2S_2O_3$, reaksiyon hızlandırıcı olarak Etilendiamintetraasetik asit (EDTA) ve destek elektrolit olarak potasyum klorür (KCl) kullanıldı. Zn katkı maddesi için çözelti hazırlama adımları; Çinko nitrat hekzahidrat ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) kullanıldı. Film üretiminde çözücü olarak DI su kullanılmıştır. pH farkı olmaması için önce solüsyonlar 1L olarak hazırlanmış ve her birinden 100'er mL alınarak üretim gerçekleştirilmiştir. 0,01M $(NO_3)_2$; 0,05M $Na_2S_2O_3$;

0.0025 M EDTA ve 0.1 M KCl'den oluşan sulu bir çözelti hazırlamak için 1 L DI su bir kaba döküldü. Bu bileşikler ilave edildikten sonra manyetik karıştırıcıda 1 saat karıştırıldı. Çözelti pH değeri tüm karışımlar için 2.5 olarak ayarlandı. PbS filmlerin elektrokimyasal biriktirme yöntemi ile üretimi, DC besleme ünitesi olarak görev yapan ve 1,8 V sabit voltajda 100 s için ayarlanmış üç elektrotlu IVIUM VERTEX Potentiostat/Galvanostat cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Elektrokimyasal biriktirme işlemi yapılırken Ag/AgCl referans Elektrodu kullanılmıştır. Seçilen referans elektrotun standart potansiyeli 25 °C'de 0,222 V'dir. Karşı elektrot olarak platin yassı tel kullanıldı. Çalışma elektrotları olarak hazırlanan ITO kaplı cam substratlar kullanıldı. Film üretimi sırasında çözeltilerin karıştırılması ve ısıtılması için WiseStir marka MSH-20D model elektronik manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı kullanılmıştır. Kaplanan tüm ince filmler 2500°C'de 5 dakika tavlansmıştır.

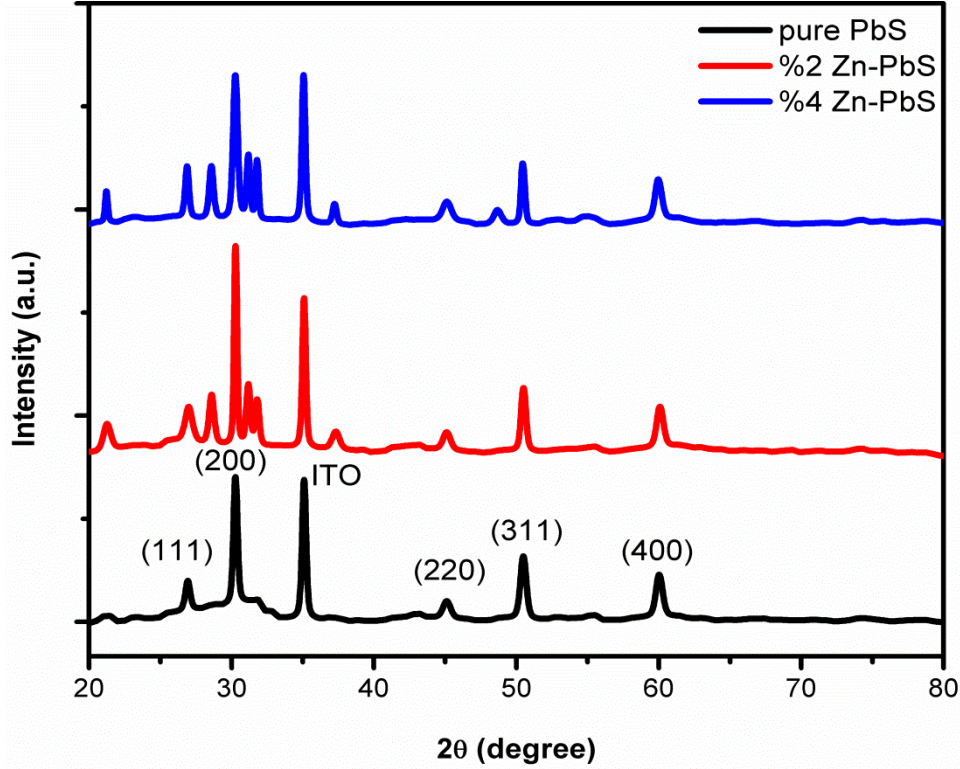
ITO kaplı substrat üzerinde biriken katkisiz %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin yüzey oluşumları, ZEISS Supra 40 VP elektron mikroskobu (SEM) ile taranarak incelenmiştir. Bu ince filmlerin atomik bileşenlerinin yüzdeleri, enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) sistemi ile belirlendi. Malzemelerin kristal yapısını (Panalytical Empyrean) tespit etmek için CuK α radyasyonlu ($\lambda K\alpha = 1,542 \text{ \AA}$) X-ışını sistemi kullanıldı. Optik absorpsiyon ve yansıma spektrumları, UV-vis Spektrometresi kullanılarak ölçüldü. Bu ölçümlerin tamamı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Film kalınlığı, kırılma indisleri ve sönme katsayısı spektroskopik bir elipsometre cihazı kullanılarak belirlendi. Bu ölçümler Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkez Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Spektroskopik elipsometre yardımıyla katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin kalınlıkları sırasıyla 245 nm, 238 nm ve 232 nm olarak belirlendi.

3. DENEYSEL SONUCLAR

3.1 XRD Arastirmalari

X-ışını difraktometrisi (kırınım), kristal malzemelerin yapısını analiz etmek için kullanılan tahribatsız bir test yöntemidir. XRD analizi, kristal yapının incelenmesi yoluyla bir

malzemede bulunan kristal fazları tanımlamak ve böylece kimyasal bileşim bilgilerini ortaya çıkarmak için kullanılır. Biriken katkısız ve Zn katkılı PbS ince filmlerin yapısal özelliklerini farklı oranlarda analiz etmek için X-ışını kırınım desenleri elde edildi. Elde edilen kırınım modellerini referans JCPDS (Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi) kartları ile karşılaştırarak, model üzerinde görülen piklerin ve bunların kristal sistemlerinin miller indeksleri belirlendi. PbS:Zn filmlerinin XRD desenleri Şekil 1'de verilmiştir.

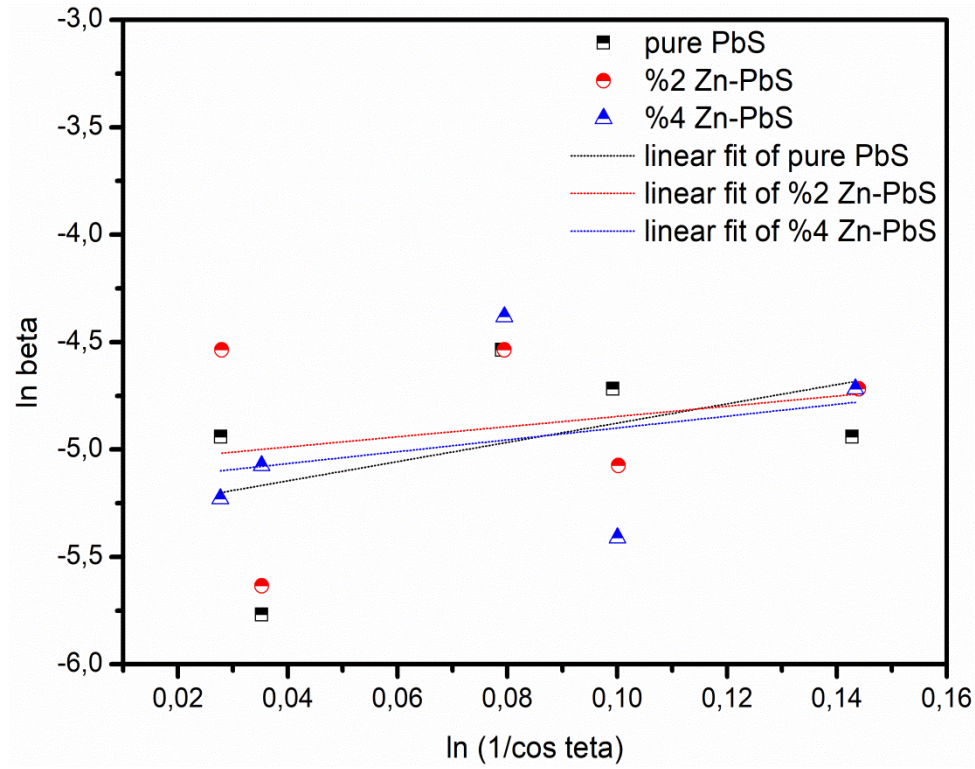


Şekil 1. Katkısız, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin XRD grafiği

Şekil 1'de verilen kırınım modellerinde birden fazla pik bulunması, biriktirilen filmlerin polikristal bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Depolanan tüm filmlerin XRD desenlerinin JCPDS Kart No: 98-006-8701 ile uyumlu olduğu belirlendi. Ayrıca çinko bileşikleri ile ilgili başka yabancı madde fazına rastlanmamıştır. Tam genişlikte yarı maksimum (FWHM) değerleri, ince film numunelerinin Zn içeriğinin artmasıyla değişti. Bu değişiklik, tane boyutundaki değişiklik ile ilgilidir. İnce film numunelerinin tane büyüklükleri, aşağıdaki formüle göre değiştirilmiş Scherrer grafiği ile hesaplanır [19,20]:

$$\ln \beta = \ln \frac{0.9 \lambda}{D} + \ln \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

burada "D" kristalin boyutudur, " λ " gelen X-ışını dalga boyundadır (1.542 \AA), β tam genişlik yarı maksimumdur ve θ X-ışını kırınım tepe noktalarının açısıdır. $\ln \beta$ için verileri $\ln(1/\cos \theta)$ göre çizersek, çizgili bir eğim ve $\ln 0.9\lambda/D$ kesişimi mevcut olmalıdır. Sonuç olarak, tek bir nanometre boyutlu D değeri hesaplanabilir. Şekil 2 ve Tablo-1'de verilen grafiğin kesişme noktasından alınan örneklerin hesaplanan ortalama kristal boyut değerlerine bakıldığında Zn miktarının artmasıyla kristal boyutunun değiştiği anlaşılmıştır. Zn katkılı PbS'nin kristalit boyutundaki değişiklik, büyük boyutlu kurşun iyonları yerine daha küçük boyutlu çinko iyonlarının yer değiştirmesinden kaynaklanıyor olabilir, çünkü kurşun atomunun atomik yarıçapı (1.21 \AA) çinko atomunununkinden daha büyüktür ($0,74 \text{ \AA}$)



Şekil 2. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin Scherrer grafikleri

Tablo 1. Yapısal incelemeden elde edilen çeşitli parametreler (dhkl: düzlemler arası mesafe, FWHM: tam genişlik yarı maksimum, DSR-ort: çizimden elde edilen kristal boyutu

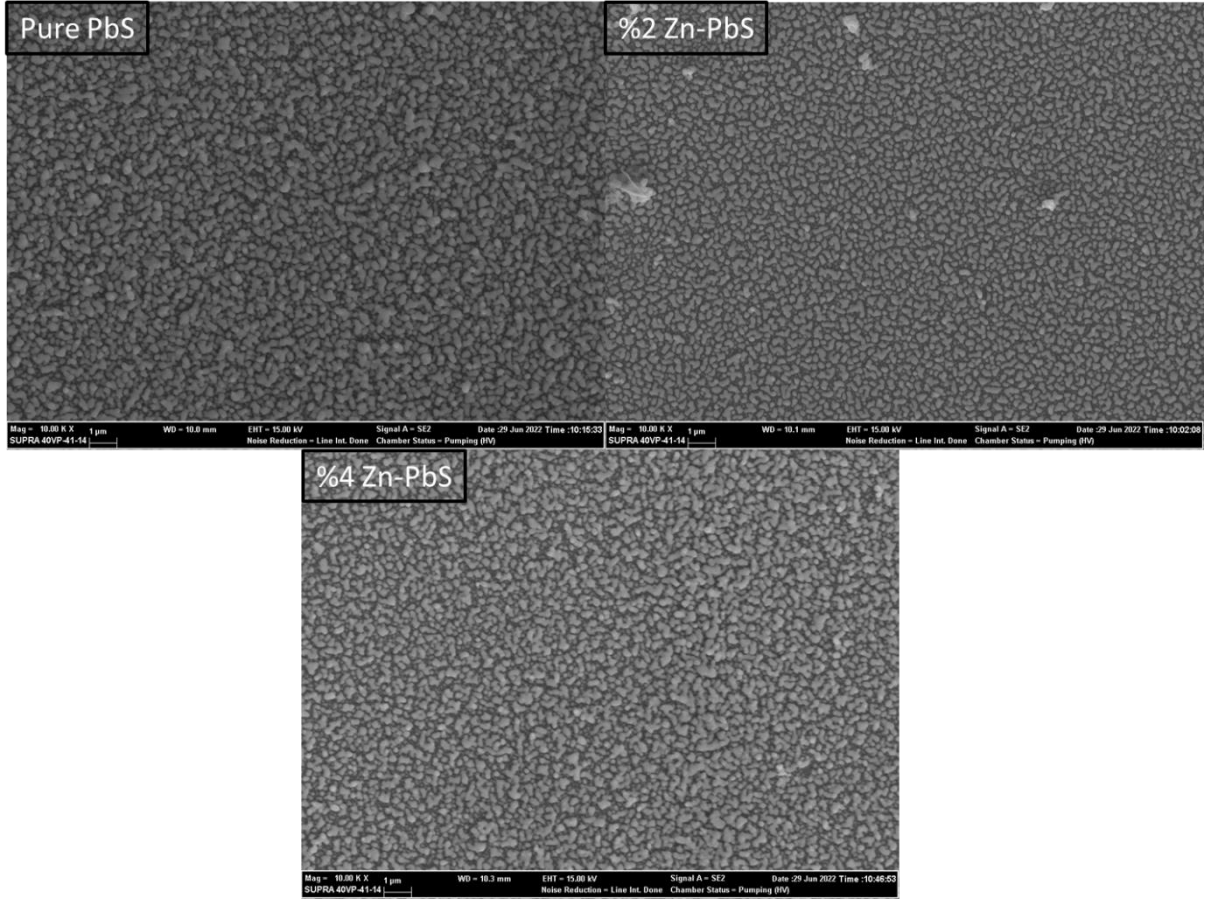
	(hkl)	d_{hkl} (Å)	2θ (°)	FWHM(°)	D_{SR-ort} (nm)
--	-------	---------------	---------------	---------	-------------------

pure PbS	(111)	3.3147	26.09	0.4093	28.53
	(200)	2.9558	30.24	0.1791	
	(220)	2.0168	44.95	0.6140	
	(311)	1.8175	50.20	0.5117	
	(400)	1.5469	59.79	0.4093	
%2 Zn-PbS	(111)	3.3063	26.97	0.6140	22.37
	(200)	2.9548	30.25	0.2047	
	(220)	2.0117	45.07	0.6140	
	(311)	1.8091	50.45	0.3582	
	(400)	1.5413	60.03	0.5117	
%4 Zn-PbS	(111)	3.3208	26.85	0.3070	24.54
	(200)	2.9558	30.24	0.3582	
	(220)	2.0113	45.08	0.7164	
	(311)	1.8104	50.41	0.2558	
	(400)	1.5441	59.91	0.5117	

3.2 SEM Araştırmaları

Yarı iletken film şeklinde elde edilen bir malzemenin yzzey özellikleri, hem optik hem de elektriksel özelliklerini önemli lde etkiler. Bu da opto-elektronik cihazlarda malzemenin verimini etkileyecek önemli bir faktördür. Bu nedenlerle elde edilen filmlerin yzzey özelliklerinin detaylı olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Bunun için kullanılan en yaygın tekniklerden biri taramalı elektron mikroskopudur (SEM).

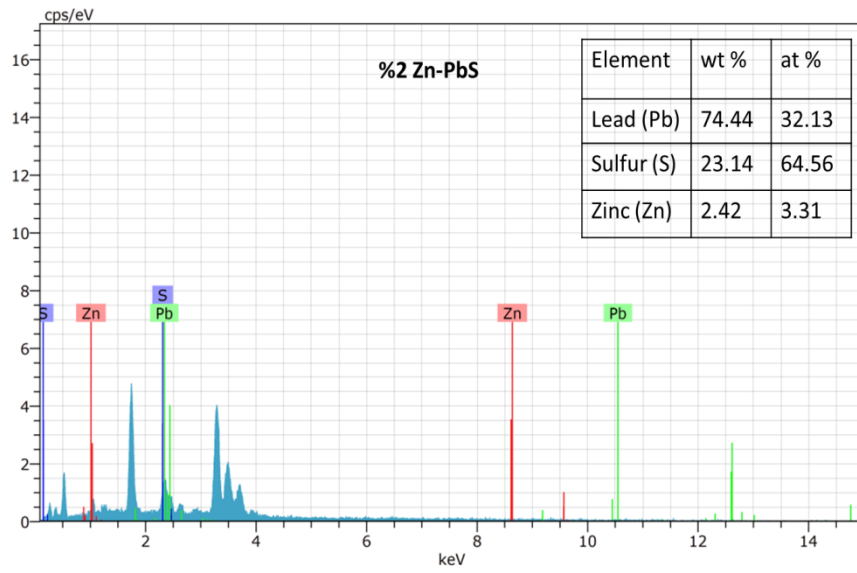
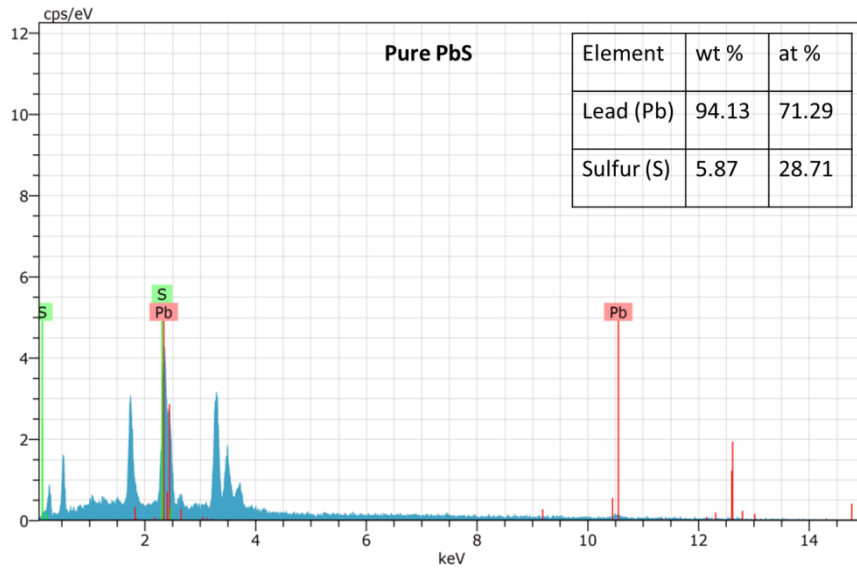
Katkısız, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film örneklerinin morfolojik incelemeleri SEM ile yzzey görüntüleri alınarak yapılmıştır. Üretilen numunelerin element bileşimi, SEM cihazına entegre edilmiş EDX (Enerji-dağılımlı X-ışını spektroskopisi) kullanılarak belirlendi. katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin SEM grafikleri şekil 3'te verilmiştir.

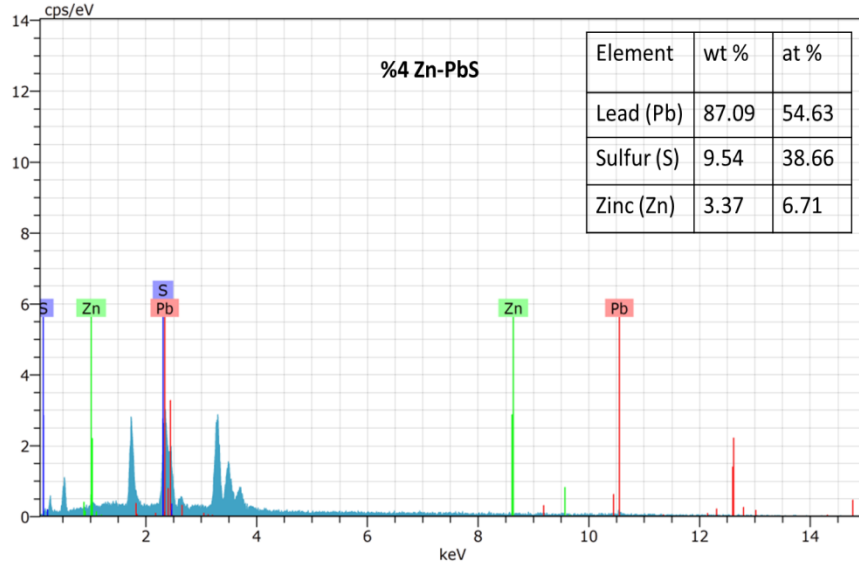


Şekil 3. Saf, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin SEM görüntüleri

Şekil 3'teki katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, filmin homojen bir şekilde yüzeye dağıldığı ve topaklanma oluşturmadan yüzeyin her yerini kapladığı görülmüştür. Artan Zn katkı oranı nedeniyle üretilen PbS ince filmlerin yüzeyinde homojenlik açısından herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. Saf, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin EDX grafikleri Şekil 4'te gösterilmektedir.

EDX grafikleri incelendiğinde ağırlıklı olarak kurşun ve kükürtün bulunduğu görülmektedir. %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin EDX grafiklerinde atomik olarak sırasıyla %2,42 ve %3,37 Zn elementi olduğu görülmekte ve bu sonuçlar da Şekil 4'te verilmektedir. Bu sonuçlar Zn elementinin PbS ince film yapısına girdiğinin kanıtıdır.





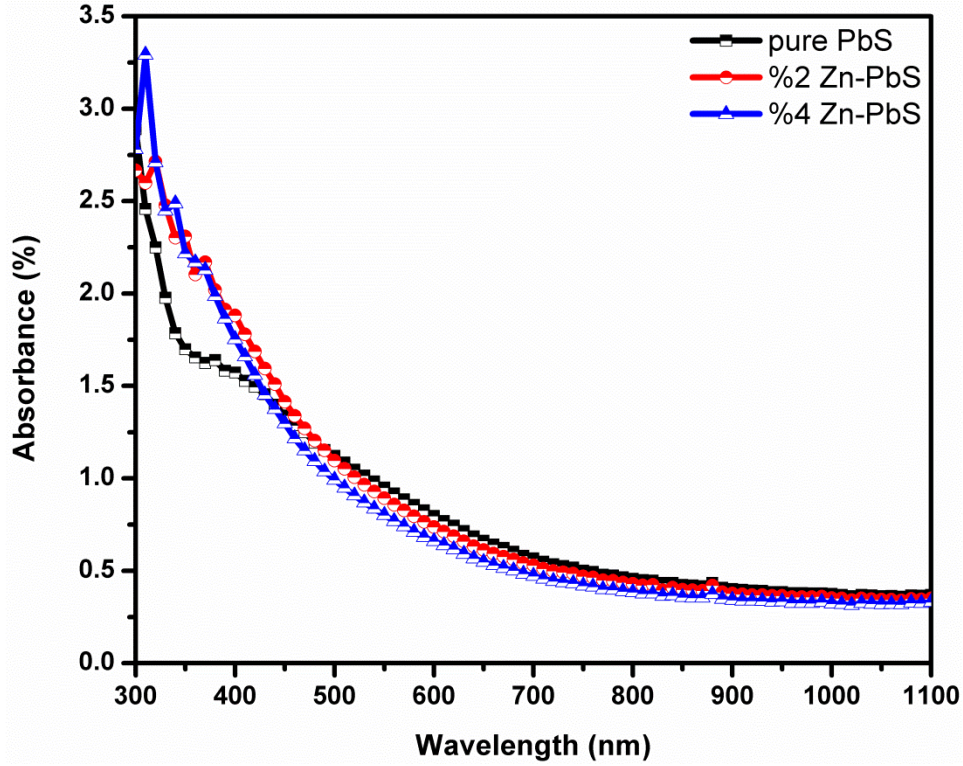
Şekil 4. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince film numunelerinin EDX grafiği ve element bileşimleri

Kükürt elementinin kurşun elemente göre daha düşük erime noktasına sahip olması ve dolayısıyla film yüzeyinden kükürdün buharlaşmasının mümkün olabilmesi EDX sonuçlarında farklı ve az miktarlarda kükürt elementinin bulunmasına bağlanabilir [21].

3.3 Optik İncelemeler

3.3.1 Sogurma, Geçirgenlik ve Optik Bant Aralığı

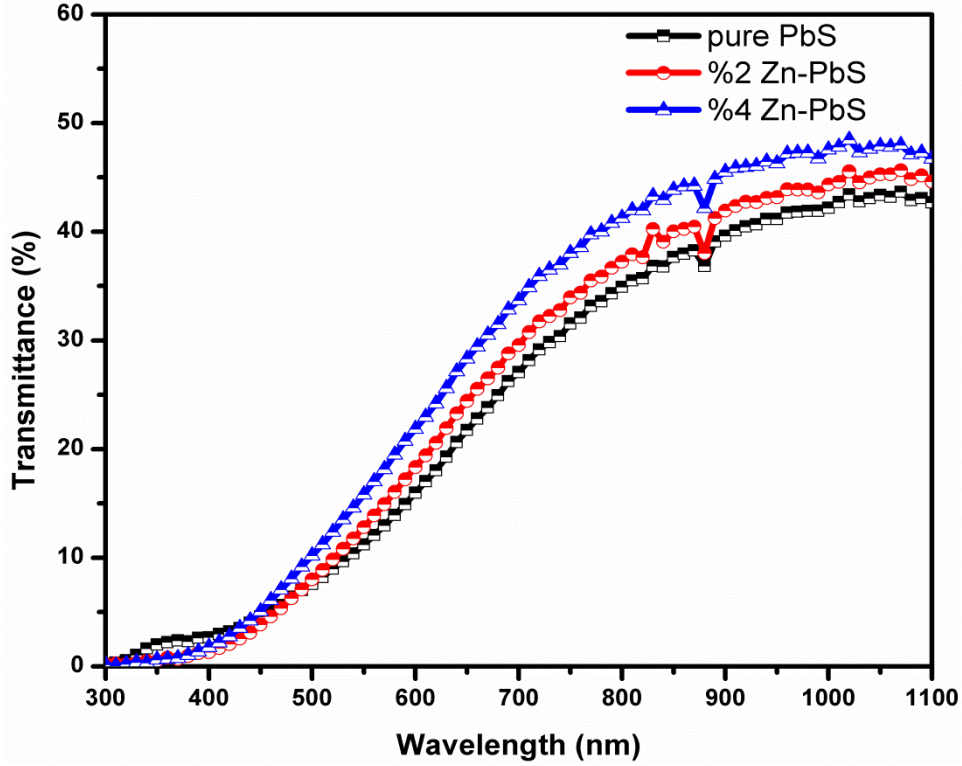
Bu çalışmada katkisiz PbS ve %2 ve %4 Zn katkılı PbS filmlerin optik özelliklerini incelemek amacıyla geçirgenlik ve sogurma spektrumları alınmış, optik enerji aralıkları belirlenmiş, geçirgenlik ve sogurma spektrumları oda sıcaklığında ve 300 ile 1100 nm dalga boyu aralığında, spektrofotometre cihazı yardımıyla tespit edildi. Bu filmlerin kalınlık, kırılma indisleri ve sönüm katsayıları spektroskopik elipsometre cihazı yardımıyla belirlenmiş ve kırılma indislerinin dalga boyuna karşı değişimi incelenmiştir. Ancak ölçümler yapılmadan önce zemin düzeltilmesi yapılmış ve böylece camdan geçen radyasyon %100'e normalize edilmiştir. Bu sayede filmler üzerinde okunacak optik geçirgenlik ve absorpsiyon değerleri, alt tabaka absorpsiyonundan bağımsız hale getirilir. Daha sonra Zn katkılı PbS ince filmlerin temel optik sabitleri, spektrofotometreden elde edilen veriler kullanılarak bazı bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 5. Çeşitli Zn içeriğine sahip PbS filmlerinin soğurma grafiği

Katkısız, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin soğurma spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Soğurma spektrumlarından da görüldüğü gibi ince filmler görünür bölgede yüksek optik soğurma sergilerken, dalga boyu azaldıkça soğurma artar. Görünür bölgede, geçirgenlik spektrumundaki artışın tersine soğurmanın azaldığı görülmektedir. Ayrıca tüm ince filmlerde dalga boyu 700 nm'den büyük olan fotonların soğurulmasının oldukça düşük olduğu ve bunun sonucunda soğurma kenarının net bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Buradan, optik enerji aralığı içinde lokalize olan farklı enerji seviyelerine sahip derin ve sığ tuzak seviyelerinin daha yoğun olabileceği ve bu nedenle düşük enerji soğurmalarının daha fazla olabileceği söylenebilir. Şekil 5'te görüldüğü gibi Zn katkılı filmlerin soğurma kenarları saf PbS filmlere göre daha düşük dalga boylarına doğru kaymıştır. Bu olayın nedeni maviye kayma da olabilir.

Ayrıca tüm filmlerin soğurma spektrumları incelendiğinde Zn katkısı ile katkısız filme göre bant kenarlarında iyileşmeler ve toparlanmalar olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni soğurma kenarlarındaki bant sarkmasının Zn katkısı ile azalması olabilir.

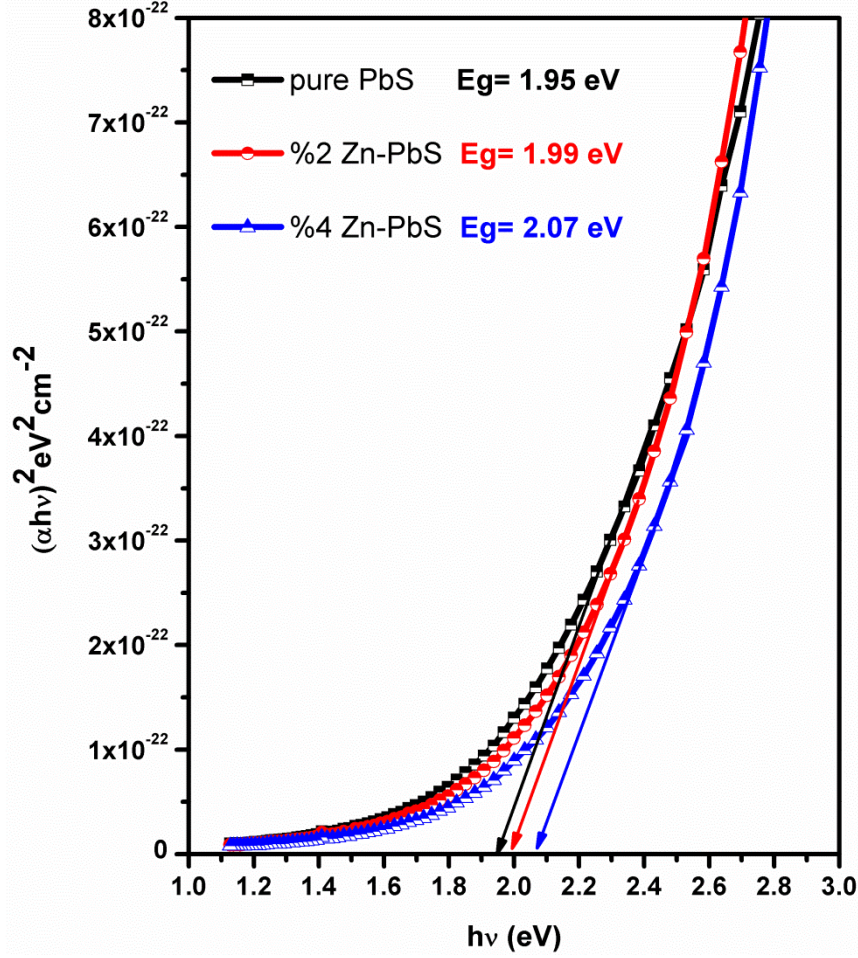


Şekil 6. Çeşitli Zn içeriğine sahip PbS filmlerinin geçirgenlik grafiği

Katkısız, %2 ve %4 (ağırlıkça) Zn katkılı PbS ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları sırasıyla Şekil 6'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde Zn katkılı tüm ince film örneklerinin katkisiz PbS örneğine göre daha iyi optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür. En yüksek optik geçirgenlik %4 Zn katkılı PbS ince film numunesinde gözlenmiştir. Şekil 6 incelendiğinde Zn katkı oranının artmasıyla PbS örneklerinin optik geçirgenlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi her bir ince film görünür bölgede çok düşük geçirgenlik sergilerken, daha uzun dalga boylarına doğru geçirgenliğin arttığı görülmektedir. Ayrıca optik geçirgenlikteki bu artışta Zn katkısının artmasıyla filmlerin yapısal özelliklerindeki iyileşmenin etkili olduğunu düşünmekteyiz.

Film oluşumu sırasında yüzeyin homojen olmaması ve pürüzlü olması nedeniyle film yüzeyine ışık düştüğünde yüzeyde meydana gelen optik saçılmanın artması geçirgenliğin azalmasına neden olur. Bu nedenle Zn katkı maddesi, filmlerin yüzeylerinde veya iç bölgelerinde meydana gelen optik saçılmayı azaltarak geçirgenliği arttırmış olabilir.

Filmlerin optik bant aralıkları, spektroskopik elipsometre cihazı ile ölçülen kalınlık ve UV cihazı tarafından ölçülen absorpsiyon spektrumları kullanılarak $(\alpha h\nu)^2$ değerinin foton enerjisine ($h\nu$) karşı çizilmesiyle belirlendi [22].



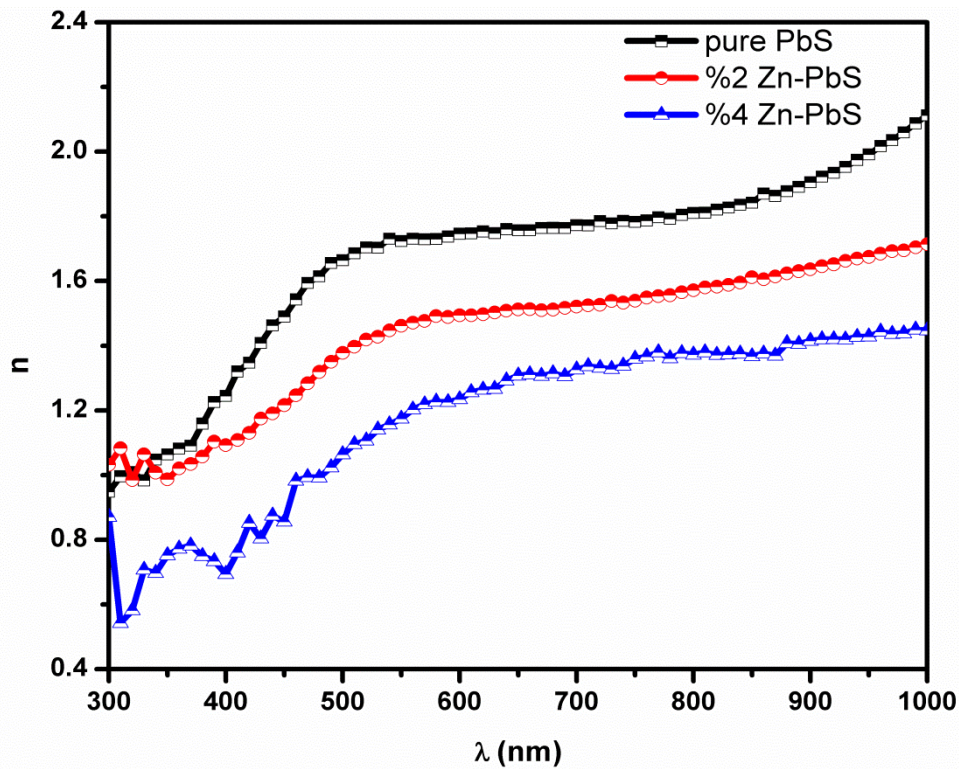
Şekil 7. Zn içerikli PbS filmlerin optik bant aralığı değerlerinin değişimi

Grafik incelendiğinde katkısız PbS yarı iletken ince filmlerin optik bant aralığı 1,95 eV olarak hesaplanmıştır. %2 ve %4 Zn katkılı PbS yarı iletken ince filmlerin optik bant aralığı değerleri sırasıyla 1.99 eV ve 2.07 eV olarak bulundu (bkz. Şekil 7). Elde edilen veriler incelendiğinde yarı iletken ince filmlerin optik bant aralıklarının Zn katkı oranı arttıkça arttığı görülmektedir. Bu değişiklik ince film yapısına Zn ilavesinin beklenen etkisidir. Çöktürülmüş ince filmlerin bant aralığının, yığın PbS malzemesinin bant aralığından (0.41 eV) oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Bahsi geçen çalışmalar ve literatürdeki birçok çalışma incelendiğinde nano boyutlu kristallerden oluşan PbS ince filmlerin optik bant aralığının, kuantum boyut etkisinden dolayı yığın halindeki değerinden daha büyük olduğu, optik bant aralığı ile ters değiştiği ve kristal boyutunun ise daha büyük olduğu belirtilmektedir [23-24]. Bu çalışmada buyutulen polikristalin PbS ince filmlerin yüksek optik bant aralığı değerlerinin ince filmlerin kristal boyutuyla ilgili olabileceğini düşünüyoruz. Ancak buyutulen ince filmlerin polikristal formda olduğu göz önüne alındığında, optik bant aralık aralığındaki değişimi değerlendirmek için kristal boyut dağılımlarının dikkate alınması gerektiğini düşünüyoruz. Çünkü malzemeler tekdüze kristallerden ziyade farklı yönlerde farklı boyutlarda birçok kristalden oluşur [25].

3.3.2 Optik Sabitler (n,k)

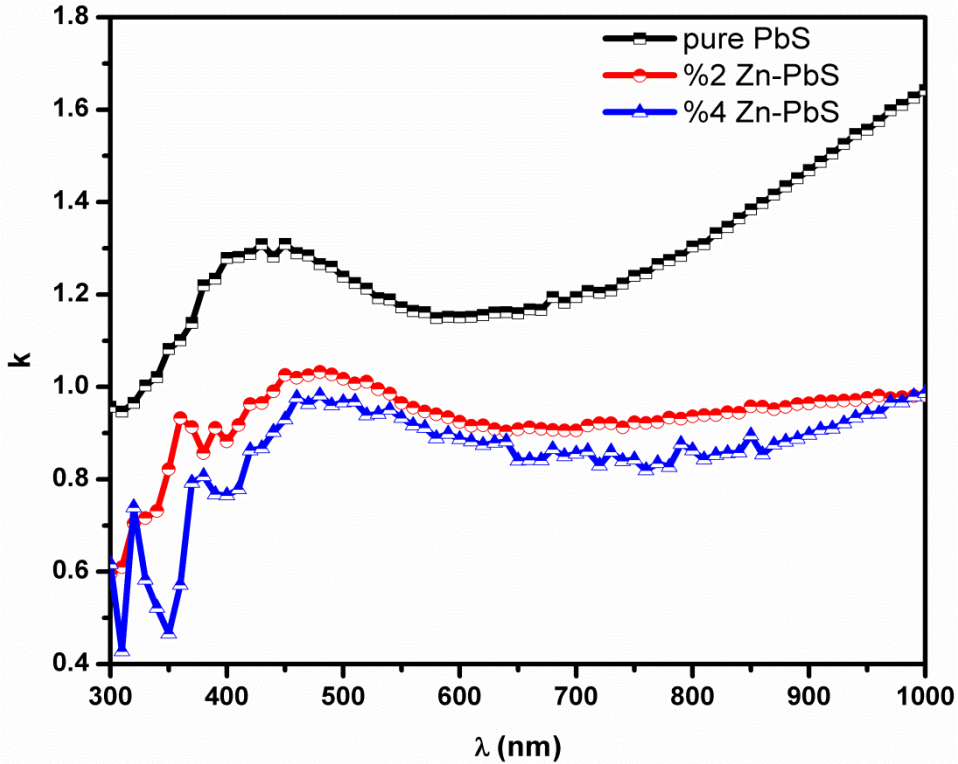
Yarı iletken cihazları düzgün bir şekilde tasarlamak için kırılma indislerinin dağılımının bilinmesi gerekir. Cihaz tasarımında malzemenin optik dağılımının ve diğer optik parametrelerinin bilinmesi, filtreler, anahtarlar ve modülatörler gibi kırılma indisinin önemli olduğu birçok entegre cihaz çalışması için önemlidir. Bir optik ortamın kırılma indisi, ışığın o ortam boyunca yayılmasını tanımlayan boyutu olmayan niceliktir. Kırılma indisi, ışığın bir nesneden ne kadar hızlı geçtiğini belirler [26].



Şekil 8. Katkisiz ve Zn katkılı PbS için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak kırılma indeksindeki değişiklikler

Şekil 8 dikkatlice incelendiğinde katkisiz ve Zn katkılı PbS ince filmlerin kırılma indis değerlerinin görünür bölgede 0.6-1.8 aralığında değiştiği görülmektedir. Kırılma indisleri araştırıldığında, Zn katkı maddesinin kırılma indis değerlerinin katkisiz PbS ince filme göre düştüğü gözlenmiştir. Kırılma indeksi değerindeki bu azalma, malzemenin optik dağılım davranışından kaynaklanmaktadır. Zn katkılı PbS filmlerin kırılma indislerinin katkisiz PbS filminkinden biraz daha düşük olduğu da görülmektedir. Bunun nedeni, PbS yapısında Zn elementinin varlığının elektronların polarizasyon kabiliyetini düşürmesi olabilir.

Malzemenin soğurma özelliği ile ilgili bir katsayı olan sönüm katsayısı, ışının ortamdan geçerken kaybolan kısmının bir ölçüsüdür. Radyasyon kaybı, ortamın birim mesafesi başına saçılma ve soğurmasının bir sonucudur [27]. Şekil 9'dan görülebileceği gibi; sönüm katsayılarının değerleri tüm yarı iletken ince filmler için 0,75 ile 1,2 arasında değişmiş ve soğurucu tabaka için uygun bir aralıkta olmuştur. Ek olarak, Zn katkı maddesi sönüm katsayısında bir azalmaya neden olmuştur.



Şekil 9. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmlerin sönüm katsayısı grafiği

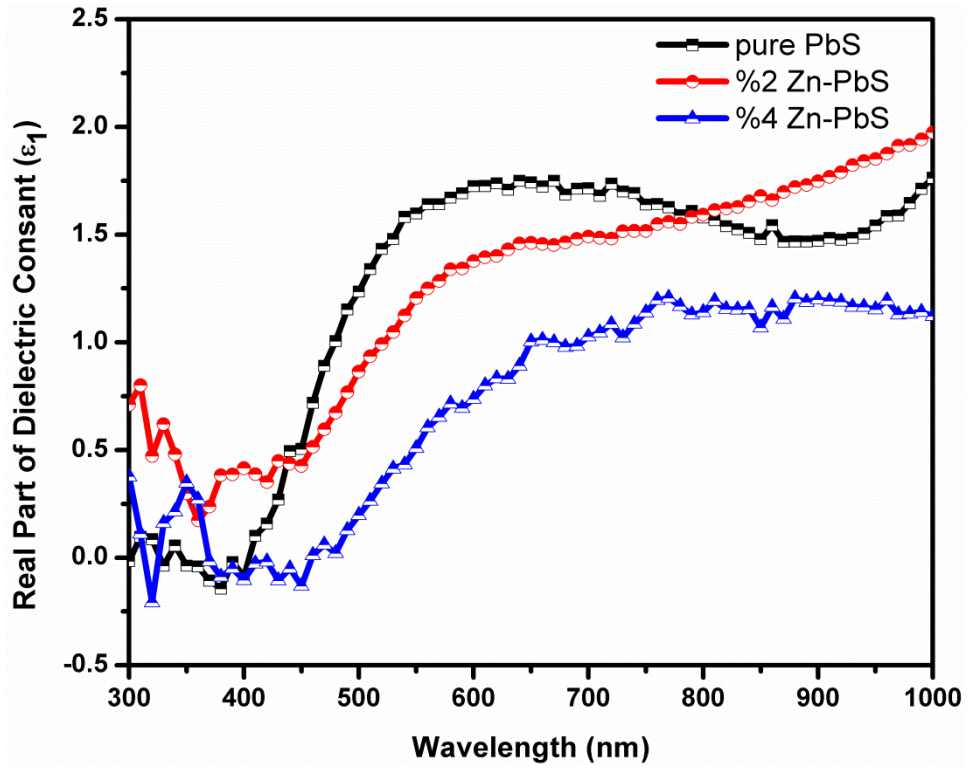
3.3.3 Dielektrik Özellikler

Genel olarak, dielektrik sabitleri, malzemenin elektronik yapısına oldukça bağlıdır ve malzemenin geçen elektromanyetik radyasyon üzerinde etkisi olan bant aralığındaki durum yoğunluğu ile tam olarak ilgili olduğu söylenebilir. Dielektrik sabitlerin sanal ve gerçek kısımları aşağıdaki bağıntıları kullanılarak belirlendi [28-29]:

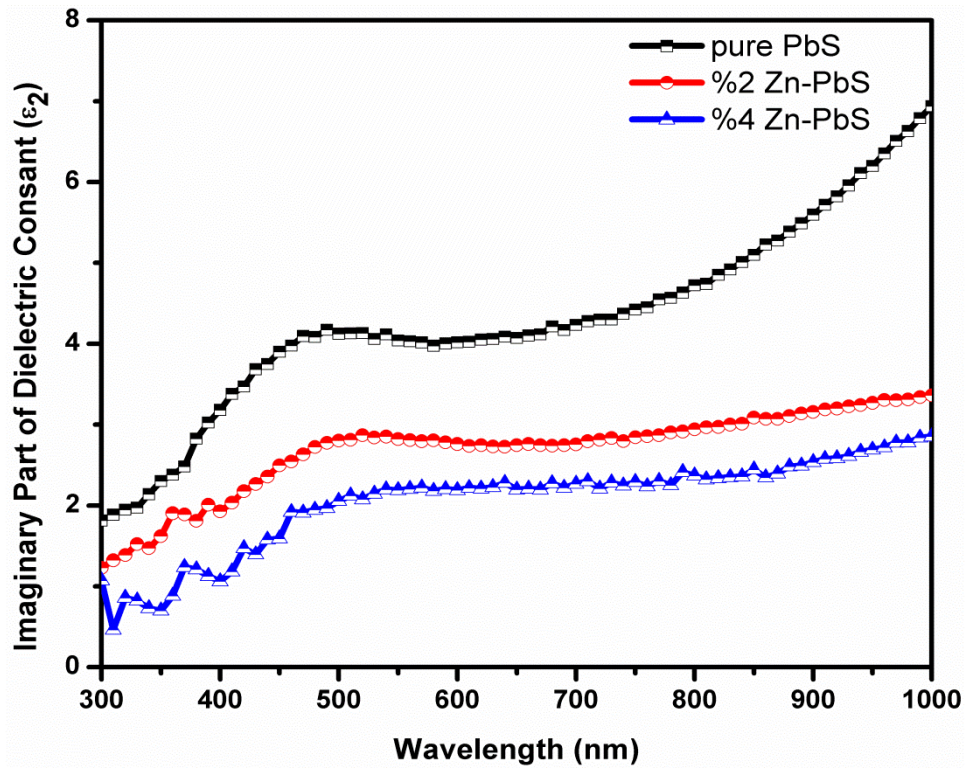
$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (3)$$

Şekil 10-11'de katkisiz ve Zn katkılı PbS ince filmlerin sanal ve gerçek dielektrik sabit değerlerinin dalga boyunun artmasıyla arttığı ve kırılma indisi grafikleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Gerçek dielektrik sabiti değerleri, 400-700 nm dalga boyu aralığında daha keskin bir artış göstermektedir. Ayrıca Zn katkısının dielektrik sabitlerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Ayrıca grafikler incelendiğinde tüm nanoyapılı ince filmler için gerçek ve sanal dielektrik sabit değerlerinin görünür bölgede önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Tüm örneklerde ortalama ε_2 değerlerinin ε_1 değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Gerçek ve sanal kısımlar arasındaki bu fark, filmlerin enerji bant aralıklarındaki durum yoğunluklarıyla ilgilidir.



Şekil 10. Katkısız ve Zn katkılı PbS için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dielektrik sabitinin gerçek kısmındaki değişiklikler

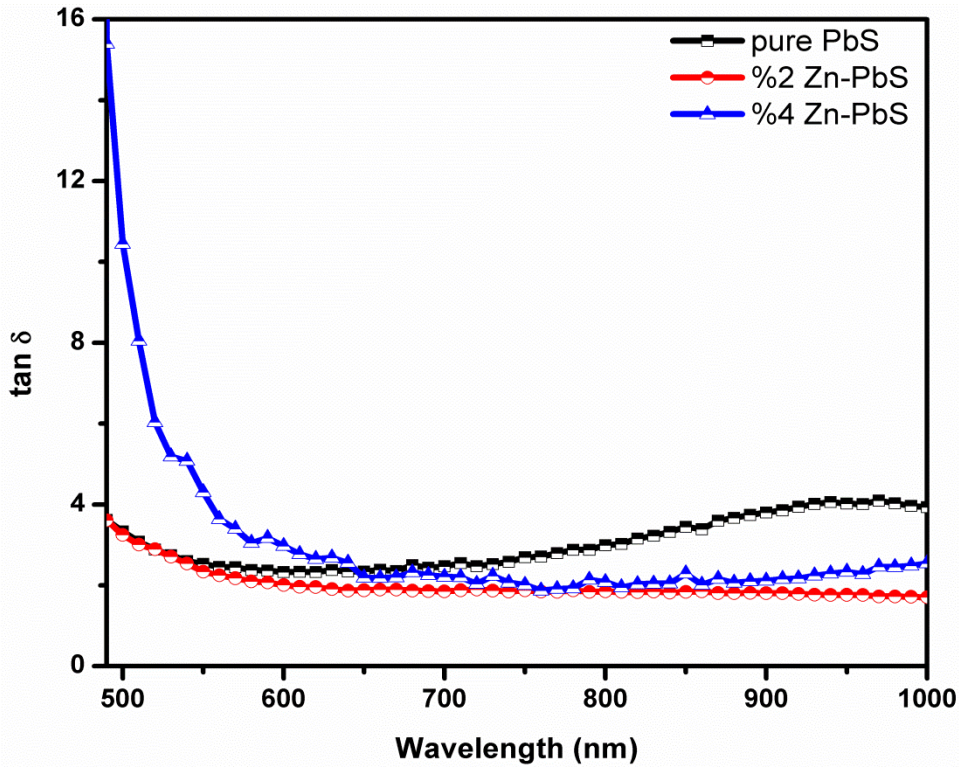


Şekil 11. Katkisiz ve Zn katkılı PbS için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hayali kısım dielektrik sabitindeki değişiklikler

Enerji kaybı fonksiyonu, optoelektronik cihaz uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Dielektrik boyunca aktarılan toplam güç kaybı (hacim ve yüzey enerjisi) önemlidir. Yayıma faktörü ($\tan(\delta)$) malzemelerdeki yapı ve kusurların incelenmesinde değerli bir terimdir ve aynı zamanda malzemelerde enerji kaybı nedeniyle oluşan faz farkını da sembolize eder. Dielektrigin kabul edilebilir bir özellik olarak mükemmelliği, dağılım faktörünün düşük değerleri ile karakterize edilir. Bir kayıp modülü sisteminde, kayıp faktörü, $\tan \delta$ gücündeki kayıp oranıyla ilişkilidir. $\tan(\delta)$, dielektrik sabitlerinin gerçekte ve sanal kısmına aşağıdaki gibi bağlıdır [30]:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (4)$$

burada ϵ karmaşık dielektrik sabitidir ve gerçekte ve sanal kısımlar ϵ_1 ve ϵ_2 'den oluşur. (gerçekte ϵ_1 , sanal ϵ_2).



Şekil 12. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmler için dağılım faktörü ve foton dalga boyu

Şekil 12, dalga boyuna karşı $\tan(\delta)$ grafiğini gösterir. Katkisiz ve %2 Zn katkılı PbS ince filmler için grafikteki tüm dalga boyu değerleri için hemen hemen sabit bir bağımlılık gözlenir ve %4 Zn katkılı PbS ince filmler için 500-650 nm dalga boyu aralığında güçlü bir bağımlılık gözlenir, bunun nedeni ani soğurma katsayısındaki artıştır.

3.3.4 Dağılım Parametreleri

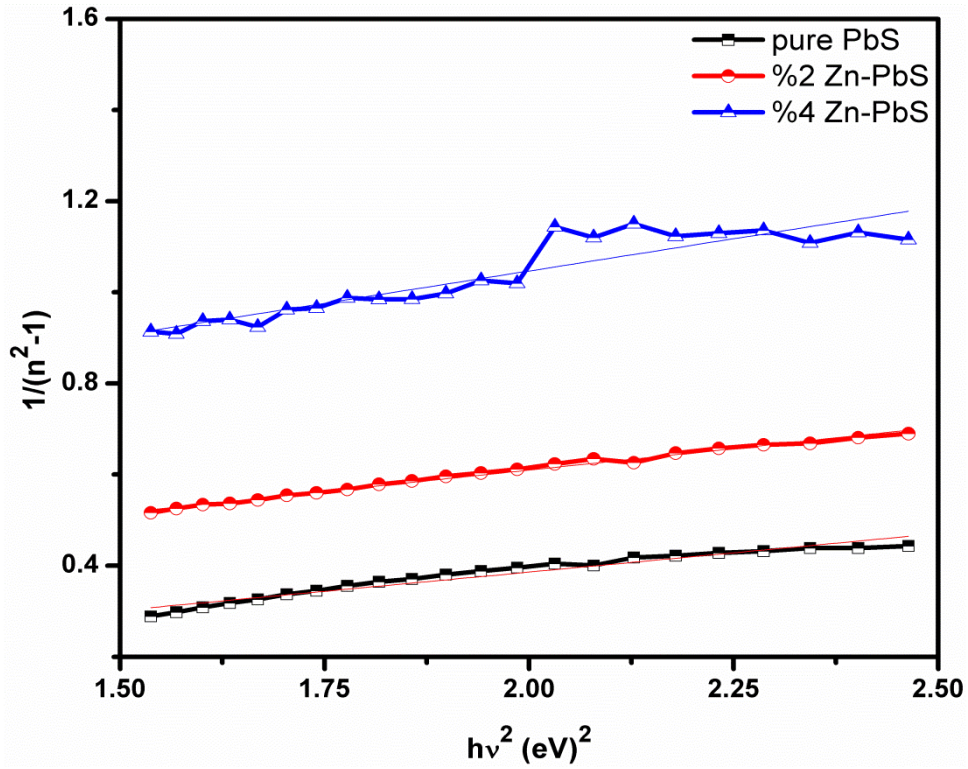
Optik parametrelerin dağılımı, elektro-optik cihaz ve iletişimdeki önemi nedeniyle malzeme araştırması üzerinde bir etkiye sahiptir. Herhangi bir malzemedeki kırılma indisinin ve dolayısıyla dielektrik sabitinin foton enerjisi ile değiştiği ve bu değişimin dağılım ifadeleriyle açıklandığı iyi bilinmektedir [31]. Gelen foton enerjisi ile birçok yarı iletken malzemenin kırılma indisinin değişimi, Wemple-DiDomenico tarafından önerilen tek osilatör modelinin yardımıyla basitçe açıklanabilir. Bu model oldukça basit yarı ampirik bir ilişkiye dayanmaktadır ve şu şekilde verilmektedir [32,33]:

$$n^2(h\nu) = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (h\nu)^2} \quad (5)$$

burada h , Planck sabitidir; E_0 , tek osilatör enerjisidir, ν frekanstır ve E_d , bantlar arasındaki optik geçişlerin ortalama yoğunluğunun bir ölçüsü olarak tanımlanan dağılım enerjisidir. Dağılım enerjisi temel olarak birim hücredeki yük dağılımıyla ve dolayısıyla kimyasal bağla neredeyse ilgili bir niceliktir. Wemple-DiDomenico modelinde dağılım parametreleri E_0 ve E_d 'yi belirlemek için ilgili denklem aşağıdaki gibi düzenlenebilir [34]:

$$\frac{1}{n^2 - 1} = \frac{E_0^2 - (h\nu)^2}{E_d E_0} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{(h\nu)^2}{E_d E_0} \quad (6)$$

E_0 ve E_d değerlerinin hesaplanması için öncelikle Şekil 13'te $1/(n^2-1)$ 'in $(h\nu)^2$ 'ye göre değişiminin grafiği çizilmiştir.



Şekil 13. Katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS ince filmler için $(n^2 - 1)$ 'in $(hv)^2$ 'ye karşı grafiği

Bu grafikten beklendiği gibi tüm malzemeler için lineer bir bölge elde edilmiştir. Bu lineer eğrinin düşey eksenini kestiği nokta E_0/E_d oranını, eğimi ise $1/E_0E_d$ değerini verir. Grafikteki değişikliklerden yapılan hesaplamalardan katkisiz, %2 ve %4 Zn katkılı PbS filmler için E_0 ve E_d dispersiyon parametreleri bulunarak Tablo-2'de tablolatırılmıştır. Wemple DiDomenico modelinde, E_0 'ın E_g ile ilişkili olduğu ve birçok malzeme için ampirik olarak $E_0 \approx 1.5 E_g$ olarak değiştiği bilinmektedir. Katkisiz PbS, %2 ve %4 Zn katkılı PbS filmler için E_0 tek osilatör enerjisinin $E_0 \approx 0.5 E_g$ olduğu gözlenmiştir.

Tablo 2. Katkisiz, %2 ve %4 Zn-PbS ince filmlerin hesaplanan bazı optik değerleri

Some optical values of PbS film samples	pure PbS	%2 Zn-PbS	%4 Zn-PbS
E_g (eV)	1.95	1.99	2.07
E_0 (eV)	0.53	1.11	1.30
E_d (eV)	11.08	4.77	2.71
M_{-1}	20.90	4.29	2.08
M_{-3}	74.40	3.48	1.23
f (eV)	5.87	5.29	3.52

Verilen denklemler, katkısız PbS, %2 ve %4 Zn katkılı PbS filmlerinin M_{-1} ve M_{-3} optik spektrumunun sanal kısmının momentlerini elde etmek için kullanılır;

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (7)$$

ve

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (8)$$

Katkısız PbS, %2 ve %4 Zn katkılı PbS filmleri için M_{-1} ve M_{-3} değerleri hesaplanmış ve Tablo-2'de tablolatırılmıştır. Bu değerler, ortalama bağ kuvvetinin bir ölçüsüdür. Optik moment değerleri, etkin dielektrik sabiti ve etkin valans elektronlarının sayısı gibi incelenen malzemelerdeki makro kapsam miktarıyla ilişkilidir.

Optik geçişlerdeki optik osilatörün gücü (f), geçiş sırasında fotonun elektron tarafından soğurulmasıdır. Osilatör gücü, optik malzemenin radyasyonla nasıl etkileşime girdiğinin bir ölçüsüdür ve f aşağıdaki formülle verilir [35]:

$$f = E_0 \cdot E_d \quad (9)$$

Tüm yarı iletken ince filmler için hesaplanan bu değer Tablo-2'de verilmiştir.

4. MALİ ETKİNLİKLER

Elde edilen tüm filmler için XRD analizi ve SEM analizi hizmet alımları ilk ve ikinci altı aylık süreçlerde Bilecik Seyh Edebali Üniversitesi Barın da yapılmıştır. Optik sabitler için gerekli olan spektroskopik elipsometre analizi hizmet alımları ise son altı aylık süreçte Nigde Omer Halisdemir Üniversitesi merkezi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar malzemesi ile kimyevi ve temrinlik malzeme alımları ilk altı aylık süreçte gerçekleştirilmiştir. Son altı aylık ek surede ise yine bazı karakterizyon işlemleri gerçekleştirilmiştir ve hedefe yönelik hesaplamalar yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

5. SONUC VE YORUM

Bu çalışmada, birçok optoelektronik ve güneş pili uygulamalarında değeri her geçen gün artan katkısız PbS ve Zn katkılı PbS filmler, ITO altlıklar üzerinde elektrodepozisyon yöntemi ile üretilmiştir. Filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılan XRD sonuçlarına göre Zn elementi ile Pb elementi arasındaki iyonik yarıçap farkından dolayı filmlerin kırınım açıları ile örgü düzlemleri arasındaki mesafelerde meydana gelen kaymalar Zn elementinin varlığının kanıtıdır. Filmlerin spektroskopik elipsometre cihazı ile belirlenen kalınlık değerleri incelendiğinde birbirine yakın olduğu belirlendi. Bu küçük farklılıkların, spektroskopik elipsometre ölçümü sırasında kullanılan denklem parametreleri olan teorik ve deneysel delta değerleri arasındaki küçük sapmalardan kaynaklandığını düşünüyoruz. Bu çalışmadaki filmlerin optik özellikleri, üç farklı cihazda sırasıyla; dalga boyuna karşı soğurma, geçirgenlik, kırılma indisi ve sönme katsayısı değerleri alınmıştır. Soğurma spektrumları ve kalınlık değerleri kullanılarak filmlerin optik bant aralıkları grafiklerden optik yöntemle bulundu. Ayrıca bu grafiklerden filmlerin tamamının direkt bant yapılı filmler olduğu tespit edilmiştir. Katkısız, %2 ve %4 Zn katkılı PbS yarı iletken ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları incelendiğinde, tüm Zn katkılı ince film numunelerinin katkısız PbS numunesinden daha iyi optik geçirgenliğe sahip olduğu belirlendi. SEM görüntülerinden filmlerin altlıklar üzerine düzgün bir şekilde kaplandığı belirlendi. Sonuç olarak katkısız ve Zn katkılı PbS yarı iletken ince filmlerin kristal yapıları, yüzey görüntüleri, optik ve dispersiyon özellikleri dikkate alındığında güneş pillerinde katman malzemesi olarak kullanılma potansiyellerinin yüksek olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. M. Sze, Y. Li, K K Ng, Physics of semiconductor devices. John wiley & sons. (2021)
- [2] A. D. Pogrebnjak, L. F. Sukhodub, L. Sukhodub, O. V. Bondar, A. Turlybekuly, Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer. (2019)

- [3] K. M. Gupta, N. Gupta, Recent Advances in Semiconducting Materials and Devices. *Adv. Semicond. Mater. and Dev.* 531-562 (2016)
- [4] M. Eslamian, Inorganic and organic solution-processed thin film devices. *Nano-micro letters* **9**(1), 1-23 (2017)
- [5] A. E. Madani, O. Daoudi, S. Benyoussef, A. Qachaou, M. Fahoume, M. Lharch, Experimental and Ab initio investigation of the physical properties of PbS thin films prepared by chemical bath deposition (CBD). *Braz. J. Phys.* **51**(4), 1166-1174 (2021)
- [6] A. El madani, R. Essajai, A. Qachaou, A. Raidou, M. Fahoume, M. Lharch, The temperature effect on the physical properties of PbS thin films produced by the chemical bath deposition (CBD) technique. *Adv. Mater. Process. Tech.* 1-12 (2021)
- [7] E. Barrios-Salgado et al., Effect of deposition time on the optoelectronics properties of PbS thin films obtained by microwave-assisted chemical bath deposition. *Adv. Cond. Matter Phys.* **2019**, 1-8 (2019)
- [8] R. M. Woo-García et al., Structure, morphology, and local photoelectrical characterization of PbS films grown by SILAR. *Mater. Lett.* **314**, 131844 (2022)
- [9] J. M. C. da Silva Filho, F. C. Marques, Structural and optical temperature-dependent properties of PbS thin films deposited by radio frequency sputtering. *Mater. Sci. Semicond. Process.* **91**, 188-193 (2019)
- [10] E. Sarica, V. Bilgin, Effect of Pb: S molar ratio in precursor solution on the properties of lead sulphide thin films by ultrasonic spray pyrolysis. *Mater. Sci. Semicond. Process.* **71**, 42-49 (2017)
- [11] U. Chalpathi, S. H. Park, W. J. Choi, Chemically grown highly crystalline PbS thin films with ethylenediamine tetraacetic acid complexing agent. *Mater. Sci. Semicond. Process.* **134**, 106022 (2021)
- [12] I. Ikhioya, S. Ehika, B. Ijabor, Influence of deposition potential on lead sulphide (PbS) thin film using electrodeposition technique. *Asian. J. Chem. Sci.* **3**(4), 1-8 (2018)
- [13] S. Ehika, I. L. Ikhioya, Effects of solution concentration of the optical and electrical properties of lead sulphide (PbS) semiconductor thin films deposited by electrodeposition technique. *Niger. Ann. Nat. Sci.* **16**(1), 066-075 (2017)

- [14] E. Erdoğan, M. Yilmaz, S. Aydoğan, G. Turgut, Investigation of neodymium rare earth element doping in spray-coated zinc oxide thin films. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **32**(2), 1379-1391 (2021)
- [15] K. Paulraj et al., Investigation of samarium-doped PbS thin films fabricated using nebulizer spray technique for photosensing applications. *Superlattices Microstruct.* **148**, 106723 (2020)
- [16] S. R. Rosario et al., Ag-doped PbS thin films by nebulizer spray pyrolysis for solar cells. *Int. J. Energy Res.* **44**(6), 4505-4515 (2020)
- [17] U. Chalapathi, S. H. Park, W. J. Choi, Chemically deposited Sn-doped PbS thin films for infrared photodetector applications. *Appl. Phys. A* **127**(9), 1-6 (2021)
- [18] K. Paulraj et al., Comprehensive Study on Nebulizer-Spray-Pyrolyzed Eu-Doped PbS Thin Films for Optoelectronic Applications. *J. Electron. Mater.* **49**(9), 5439-5448 (2020)
- [19] E. Erdoğan, X-ray line-broadening study on sputtered InGaN semiconductor with evaluation of Williamson–Hall and size–strain plot methods. *Indian J. Phys.* **93**(10), 1313-1318 (2019)
- [20] A. Monshi, M. R. Foroughi, M. R. Monshi, Modified Scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD. *World J Nano Sci Eng.* **2012**(2), 154-160 (2012)
- [21] E. Erdoğan, M. Kundakçı, Changes of the physical properties of sputtered InGaN thin films under small nitrogen gas flow variations. *J. Electron. Mater.* **48**(5), 2924-2931 (2019)
- [22] E. Erdoğan, G. Turgut, M. Yilmaz, Sol–gel spin coating derived cadmium oxide semiconductor thin films: Effect of Lutetium contribution. *Optik*, **240**, 166819 (2021)
- [23] E. Yücel, Y. Yücel, Fabrication and characterization of Sr-doped PbS thin films grown by CBD. *Ceram. Int.* **43**(1), 407-413 (2017)
- [24] F. G. Hone, F. B. Dejene, Synthesis and characterization of lead sulphide thin films from ethanolamine (ETA) complexing agent chemical bath. *Mater. Res. Express* **5**(2), 026409 (2018)
- [25] D. H. Yeon et al., Origin of the enhanced photovoltaic characteristics of PbS thin film solar cells processed at near room temperature. *J. Mater. Chem. A* **2**(47), 20112-20117 (2014)

- [26] C. Aydin, The dispersion energy parameters, Linear and nonlinear optical properties of Transparent Mn: ZnO nanolayers. *Eur. Mech. Sci.*, **4**(2), 82-89 (2020)
- [27] H. Zaka et al., Investigation of dispersion parameters, dielectric properties and opto-electrical parameters of ZnO thin film grown by ALD. *Optik*, **203**, 163933 (2020)
- [28] I. M. El Radaf, IH. Y. S. Al-Zahrani, A. S. Hassanien, Novel synthesis, structural, linear and nonlinear optical properties of p-type kesterite nanosized Cu₂MnGeS₄ thin films. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **31**(11), 8336-8348 (2020)
- [29] Y. Bchiri, N. Bouguila, M. Kraini, S. Alaya, Annealed In₂S₃ Thin Films Prepared by Spray Technique: Report on the Structural, Optical and Dispersion Energy Parameters. *Surf. Rev. Lett.* **26**(07), 1850223 (2019)
- [30] E. Erdogan, Coronene Organic Films: Optical And Spectral Characteristics Under Annealing Temperature Influences. *Surf. Rev. Lett.* **28**(09), 2150081 (2021)
- [31] H. A. M. Ali et al., Optical and dispersion properties of thermally deposited phenol red thin films. *Opt. Laser Technol.* **107**, 402-407 (2018).
- [32] S. H. Wemple, Jr. M. DiDomenico Behavior of the electronic dielectric constant in covalent and ionic materials. *Phys. Rev. B* **3**(4), 1338 (1971)
- [33] S. H. Wemple, Refractive-index behavior of amorphous semiconductors and glasses. *Phys. Rev. B* **7**(8), 3767 (1973)
- [34] H. S. Wasly et al., Morphological, structural, and optical properties of flexible Tin Oxide (II) thin film via thermal evaporation technique. *Eur. Phys. J. Plus* **137**(1), 1-10 (2022)
- [35] D. Sahoo, et al., Optimization of linear and nonlinear optical parameters of As₄₀Se₅₀Te₁₀ thin films by thermal annealing. *Opt. Laser Technol.* **140**, 107036 (2021)