Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi
The Black Sea Journal of Sciences
DOI: 10.31466/kfbd.1739077
ISSN (Online): 2564-7377
https://dergipark.org.tr/tr/pub/kfbd
Araştırma Makalesi / Research Article

Beyaz Işık Yayan İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerde Tavlama Sıcaklığının Etkisi

Effect of Annealing Temperature on Indium-Doped ZnO Thin Films Emitting White Light

Osman Salih GÜNDOĞDU[1]*, Fikret KARADUMAN[2], Elif GÜNGÖR[3]

Öz

Bu çalışmada, %7 indiyum katkılı ZnO ince filmler, farklı tavlama sıcaklıklarında (150 °C, 350 °C, 550 °C) daldırma kaplama tekniği ile üretildi. Üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve fotolüminesans özelliklerine sıcaklık etkisi incelendi. XRD sonuçları, düşük sıcaklıkta kristallenmenin gerçekleşmediğini, yüksek sıcaklıklara çıkıldığında filmlerin hekzagonal wurtzit yapıda oluştuğunu gösterdi. Ancak yüksek sıcaklık, artan ısıl gerilim ve dislokasyon yoğunluğu nedeniyle kristal kalitesinde kısmi bozulmaya neden olmuştur. SEM analizleri, 350 °C'de elde edilen filmlerin daha homojen, yoğun ve düzgün yüzey morfolojisine sahip olduğunu, 550 °C'de ise tanecik birleşmesiyle yüzey pürüzlülüğünün arttığını gösterdi. Fotolüminesans analizi, yüksek sıcaklıklarda tavlanan filmlerin 380 nm mor ve 550 nm sarı emisyonların birleşmesiyle beyaz ışık yaydığını, bu durumun kusur merkezlerinden kaynaklanan geçişlerle ilişkili olduğunu gösterdi. Yüksek indiyum katkısı ile sentezlenen ve yüksek sıcaklıklarda tavlanan IZO filmlerin, yüksek kristal bütünlüğü, düşük kusur yoğunluğu ve belirgin beyaz ışık emisyonu nedeniyle aydınlatma ve yeni nesil ekran teknolojilerinde kullanılan beyaz ışık yayan diyotlar (WOLED) için potansiyel bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.
Anahtar Kelimeler: IZO ince film, Daldırma kaplama, Kristalleşme, Fotolüminesans.

Abstract

In this study, 7% indium-doped ZnO (IZO) thin films were produced using the dip-coating technique at different annealing temperatures (150 °C, 350 °C, 550 °C). The effect of temperature on the structural, morphological, and photoluminescence properties of the produced films was investigated. XRD results showed that crystallization did not occur at low temperatures, and that the films formed in a hexagonal wurtzite structure at higher temperatures. However, high temperatures caused partial deterioration in crystal quality due to increased thermal stress and dislocation density. SEM analyses showed that films obtained at 350 °C had a more homogeneous, dense, and smooth surface morphology, while at 550 °C, grain coalescence increased surface roughness. Photoluminescence analysis showed that films annealed at high temperatures emitted white light through the combination of 380 nm blue and 550 nm yellow emissions, which was related to transitions originating from defect centers. It is thought that IZO films synthesized with high indium doping and annealed at high temperatures could be a potential alternative for white light-emitting diodes (WOLEDs) used in lighting and next-generation display technologies due to their high crystal integrity, low defect density, and distinct white light emission.

Keywords: IZO thin film, Dip coating, Crystallisation, Photoluminescence.

[1,2,3]Balıkesir Üniversitesi, Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Balıkesir, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** osmansalihgundogdu@hotmail.com

Geliş/Received: 10.07.2025 **Kabul/Accepted:** 11.12.2025 **Yayın/Published:** 04.06.2026

Gündoğdu, O. S., Karaduman, F., Güngör, E. (2026). Beyaz Işık Yayan İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerde Tavlama Sıcaklığının Etkisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 16(2), 806-826. https://doi.org/10.31466/kfbd.1739077

1. Giriş

Günümüzde ince film teknolojisi malzeme bilimi alanında önemli unsurlardan biridir. Genellikle çeşitli alt tabakalar üzerine üretilen ince filmler elektriksel iletkenlik, optik geçirgenlik ve manyetik özellikleri sayesinde teknolojik gelişmelere önemli katkılar sağlamaktadır (Choi vd., 2025; Seçkin ve Koralay, 2025; Srinivasulu vd., 2025). Manyetik veri saklama, dayanıklı kaplamalar, yarı iletken elemanlar, yüzey işleme ve enerji dönüşüm sistemleri gibi yüksek teknoloji gerektiren alanlarda da temel yapı elemanı olarak kullanılmaktadır (Asha Hind vd., 2025; Choi vd., 2025; Srinivasulu vd., 2025). İnce film kaplama teknolojilerindeki ilerlemeler, film yüzeyinin morfolojisi, yapısal bütünlüğü ve kimyasal bileşimi üzerinde kontrol olanağı sunarak hem verimliliği artırmış hem de yenilikçi cihazların geliştirilmesine katkı sağlamıştır (Prokhorov vd., 2012). Özellikle biriktirme süreçlerindeki gelişmeler, ince film temelli sistemlerin ekranlar, sensörler ve güneş pilleri gibi birçok alanda daha verimli kullanılmasına zemin hazırlamıştır (Chandak vd., 2025; Cui vd., 2025; Sivasankar vd., 2025). Metal oksitler ya da alaşımlar gibi farklı kimyasal bileşimlerle üretilebilmeleri, ince filmlerin performans ve uygulama esnekliğini artırmaktadır.

Metal oksitler arasında ZnO, doğada bol miktarda bulunması, toksik olmaması ve çevre dostu olması gibi özellikleri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından oldukça avantajlı bir malzemedir (Ahmed vd., 2023). Hava ve su ortamlarındaki organik kirleticilerin giderilmesine yönelik çevresel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır (Baig vd., 2025; Toma vd., 2025). Piezoelektrik özellikleri sayesinde mekanik gerilmeleri elektriksel sinyallere dönüştürebilmesi, onu sensör, aktüatör ve enerji toplama sistemleri için ideal bir malzeme haline getirmektedir (Legardinier vd., 2025; Ramyashri vd., 2025). Ayrıca biyo-uyumlu yapısı ve toksik olmaması nedeniyle ZnO ilaç salım sistemleri, biyosensörler ve antimikrobiyal yüzey kaplamaları gibi biyomedikal uygulamalarda güvenle kullanılabilmektedir (Abdel-Hameed vd., 2025; Naorem vd., 2025; Umar vd., 2019). Şeffaf iletken oksit yapısı sayesinde ise ekran teknolojileri ve güneş enerjisi sistemlerinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır (Ferhati vd., 2025). Ayrıca, geniş bant aralığı, yüksek eksiton bağlanma enerjisi ve kimyasal kararlılığı ile elektronik, optoelektronik, fotokatalitik uygulamalar ve gaz sensörleri gibi birçok teknolojik alanda yüksek potansiyel sunmaktadır (Bhat vd., 2025; Haritha vd., 2025; Loo vd., 2025; Yeom vd., 2025). Düşük üretim maliyeti, kimyasal kararlılığı ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı gibi özellikleri, bu malzemenin hem akademik çalışmalarda hem de sanayide öne çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar ZnO ince filmlerde farklı üretim teknikleriyle farklı konsantrasyonlarda metal katkılaması ve farklı tavlama sıcaklığı gibi parametreleri değiştirerek filmlerin yapısal, morfolojik, elektrik, manyetik, optik ve biyolojik özellikleri üzerine çalışmalar yapmaktadır. (Akash vd., 2025; Bappy ve Subramani, 2025; Bellili vd., 2025; Milisav vd., 2025; Nur-

E-Alam vd., 2025; Srinivasulu vd., 2025). Çünkü üretim parametrelerinde değişiklik bu özellikleri daha iyi bir hale getirebilmektedir.

ZnO ve IZO ince filmlerin üretiminde farklı fiziksel ve kimyasal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, püskürtme pirolizi, radyo frekans magnetron saçtırma, hidrotermal sentez, atomik katman biriktirme ve daldırma kaplama gibi teknikler yer almaktadır (Cristina Carranza vd., 2025; Cuadra vd., 2023; Krajian vd., 2021; Kumar vd., 2004; Luna-Arredondo vd., 2005a; Marouf vd., 2017; Masmitjà vd., 2024; Pan vd., 2006; Ramos-Carrazco vd., 2021; Rekkache vd., 2025; Toma vd., 2025b; Wang vd., 2026; Znaidi, 2010; Znaidi vd., 2016). Her yöntemin film kalitesi, kalınlık kontrolü ve yüzey morfolojisi üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan sol-jel daldırmalı kaplama yöntemi, basit donanım gereksinimi, kolay uygulanabilirlik, düşük maliyet, tekrarlanabilirlik ve geniş yüzey alanlarını kaplayabilme gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca bu yöntem, çözelti konsantrasyonu, çekilme hızı ve ortam sıcaklığı gibi parametrelerin hassas kontrolü sayesinde ince filmlerin kalınlığı ve yüzey homojenliği üzerinde etkili bir kontrol sağlamaktadır (Caballero-Güereca vd., 2023; Patil vd., 2023). Böylece, elde edilen filmler fotokatalitik, optoelektronik ve sensör uygulamaları açısından uygun nitelikte morfoloji ve optik özellikler sunmaktadır. Bu tür üretim parametrelerinin optimize edilmesiyle birlikte, ZnO filmlerin performansını daha da iyileştirmek amacıyla metal katkılama yaklaşımı da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Katkı metalleri arasında, çok yönlü bir geçiş metali olan indiyum (In) önemli ilgi görmektedir. İndiyumun opto-elektriksel özellikleri iyileştirmek için kullanılan en etkili elementlerden biri olduğu bildirilmiştir (Goyal vd., 1993; Tokumoto vd., 2000). İndiyum katkısı, ZnO kristal yapısına entegre olarak taşıyıcı yoğunluğunu artırmakta ve bu sayede elektriksel iletkenliği iyileştirmektedir. Ayrıca, bu katkı sayesinde film morfolojisinde daha homojen yüzey yapıları elde edilebilmekte ve optik bant aralığında belirgin değişiklikler gözlemlenmektedir. Bu nitelikler, indiyum katkılı çinko oksit (IZO) ince filmleri güneş pilleri, saydam iletken elektrotlar ve gaz sensörleri gibi çeşitli teknolojik alanlarda daha verimli hale getirmektedir (Badadhe ve Mulla, 2009; Bharath vd., 2018; Jung vd., 2003; Luna-Arredondo vd., 2005; Tokumoto vd., 2000).

WOLED olarak bilinen beyaz organik ışık yayan diyotlar beyaz ışık yaymaktadır. Emisyon tipik olarak, geniş bir spektral aralığı kapsayan farklı emisyon profillerinden oluşmaktadır. WOLED'ler, tam görünür spektrumda (380- 780 nm) ışık yayabilir ve bu da onları çok çeşitli aydınlatma ve ekran uygulamaları için oldukça çok yönlü hale getirmektedir. İlk beyaz organik ışık yayan diyotlar Kido ve arkadaşları tarafından tanıtıldı ve organik elektronikte önemli bir atılım olmuştur (Kido vd., 1995). Onlar iki tür WOLED cihazı geliştirdiler. Birincisi, farklı emisyon renklerine sahip birkaç floresan boya içeren bir polimerden oluşan tek ışık yayan katman, ikincisi farklı taşıyıcı taşıma özelliklerine ve farklı emisyon renklerine sahip çoklu emisyon katmanlarına

sahip yığılmış moddur. Her iki yaklaşım da organik maddelerden beyaz ışık üretmenin uygulanabilirliğini gösterdi. Araştırmacılar 4100 cd/m2'ye kadar ışıklılık/parlaklığa sahip cihazlar üretebildiler. Bu başarı, WOLED'lerin enerji tasarruflu aydınlatma ve yeni nesil ekran teknolojilerinde pratik uygulama potansiyelini ortaya koydu.

WOLED teknolojisinde son dönemde kaydedilen ilerlemeler, metal oksit tabanlı iletken ve taşıyıcı katmanların cihaz performansını belirlemede önemli bir role sahiptir. Literatürde, ZnO ince filmlerin organik katmanlarla birleştirilmesi sayesinde ters yapılı OLED yapılarında elektron taşınımının iyileştirilebildiği bildirilmektedir (Gültekin vd., 2025). Benzer şekilde, ultra-şeffaf IZO türevi elektrotların yüksek elektriksel iletkenlik ve düşük yüzey direnci sayesinde WOLED'lerin parlaklık ve enerji verimliliğini artırdığı görülmektedir (Nirmal vd., 2024). Ayrıca, tek emisyon katmanlı WOLED mimarilerinin sadeleştirilmiş yapılarla yüksek renk kararlılığı ve verimlilik düzeylerine ulaşabildiği vurgulanmaktadır (Zhao vd., 2024).Bu bulgular genel olarak, WOLED aygıtlarında enerji seviyesi hizalaması, taşıyıcı dengesi ve elektrot optimizasyonunun performans üzerinde ne kadar etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

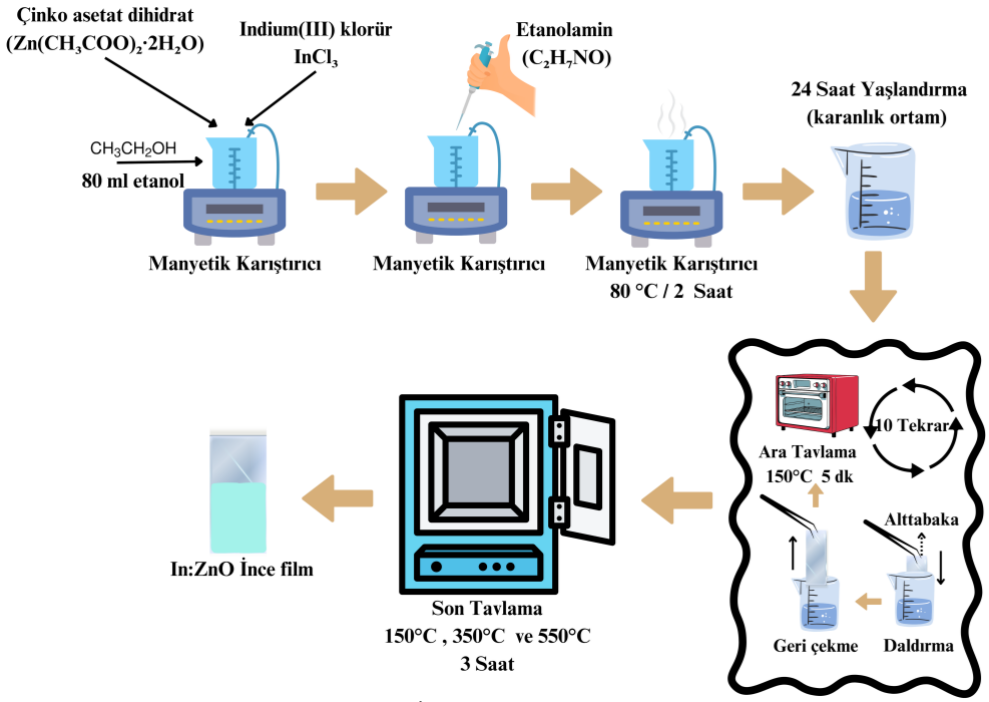
Literatürde düşük indiyum katkı oranına sahip ZnO ince filmlerin incelendiği birçok çalışma olmasına rağmen (Li vd., 2020; Park vd., 2008; Caglar vd., 2006; Kocyigit vd., 2019; Fang vd., 2012; Peng vd., 2009; Hasssan vd., 2014; Luna-Arredondo vd., 2005; Benouis vd., 2010; Dhahri vd., 2017), yüksek indiyum katkı oranına sahip ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve fotolüminesans davranışlarının incelendiği çalışmalar azdır (Benzitouni vd., 2018; ; Jung vd., 2003; Chen vd., 2009; Benzitouni vd., 2018). Nitekim, yüksek indiyum katkılı ZnO ince filmlere yönelik çalışmaların sınırlı olduğu daha önceki raporlarda da vurgulanmıştır (Chen vd., 2009; Jung vd., 2003) . Mevcut çalışmalar, yüksek In katkısının filmin optik emisyonu etkilediğini göstermektedir. Chen vd. (2009), In katkılı ZnO filmlerde yüksek sıcaklıklarda UV bant emisyonunun güçlendiğini ve geniş görünür band kusurunun ise bastırılarak hafif maviye kaydığını bildirmiştir. Benzitouni vd. (2018), yüksek In katkılı ZnO filmlerde bant aralığındaki daralma ve Urbach enerjisindeki artışın, kristalde düzensizlik ve oksijen boşluğu gibi kusurlar nedeniyle bant aralığı içinde oluşan ara enerji seviyelerinin artırdığını ve bu kusur kaynaklı enerji durumlarının bant kenarlarında daha belirgin biçimde birikmesine yol açtığını ortaya koymuştur. Jung vd. (2003) ise amorf IZO'nun yüksek geçirgenlik ve düşük pürüzlülük sayesinde OLED aygıtlarında daha yüksek lüminesans sağladığını rapor ederek yüksek In katkılı IZO'nun elektrolüminesans açısından avantajlı olabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, yüksek indiyum katkı oranına sahip ve farklı sıcaklıklarda tavlanan indiyum katkılı çinko oksit (IZO) filmlerin kütüphanesini genişletmek amacıyla, bu çalışmada farklı tavlama sıcaklıklarının film kalitesi ve fotolüminesans davranışı üzerindeki etkilerini inceleme hedefledik. Bu çalışmada, %7 In katkılı IZO ince filmlerde farklı tavlama sıcaklıklarının yapısal, morfolojik ve fotolüminesans özellikler üzerine etkisi incelendi.

2. Materyal ve Metot

2.1. IZO İnce Filmlerin Üretilmesi

Bu çalışmada kullanılan kimyasallar ve çözücüler Sigma-Aldrich firmasından temin edildi. IZO ince filmlerin üretilmesinde ZnO malzemesi olarak çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), In kaynağı olarak indiyum triklorür ($InCl_3$), çözücü olarak etanol (CH_3CH_2OH) kullanıldı. In^{+3}/Zn^{+2} = %7 atomik oranında $InCl_3$ eklendi. 80 ml etanolde $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ çözüldü ve manyetik karıştırıcıda 80 °C' de 400 rpm'de çözülerek 0,2 M çözelti hazırlandı. Oluşan bulanık çözeltiyi şeffaf ve homojen bir hale getirmek için monoetanolamin eklendi. 2 saat 80 °C'de karıştırıldı ve 2 saatin sonunda berrak ve homojen hale gelen çözelti yaşlandırma işlemi için 24 saat oda sıcaklığında ve karanlık ortamda bekletildi.

Cam alttabakalar temizlendikten sonra daldırmalı kaplama yöntemi ile kaplandı. Her bir daldırma işleminden sonra, 150 °C sıcaklıkta 5 dakika süreyle ara tavlama uygulandı. Bu işlem toplam 10 kez tekrar edildi. 10. daldırma işleminin ardından 3 saat 150 °C, 350 °C ve 550 °C sıcaklıklarda son tavlama işlemi yapıldı. İnce film üretim aşaması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. İnce film üretim prosedürü.

2.2. Karakterizasyon Teknikleri

Üretilen ince filmlerin kristal yapıları, Rigaku SmartLab toz kırınım sistemi ($\lambda_{Cu\text{-}K\alpha}$ = 1.5418 Å) X-ışını difraktometresi (XRD) ile incelendi. Filmlerin yüzey morfolojileri, Tescan MAIA3 XMU

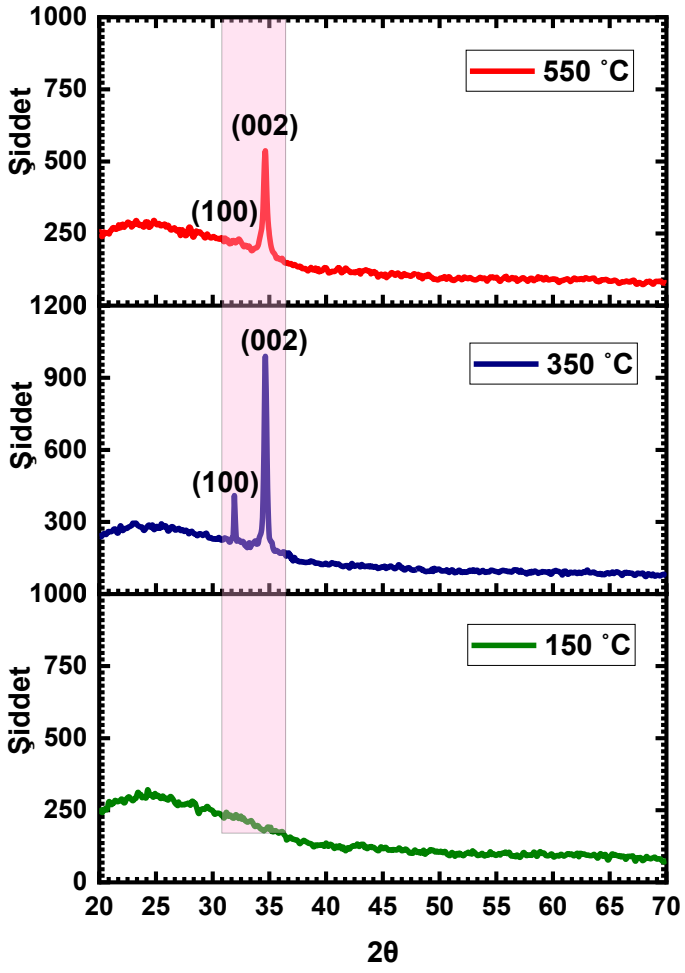
model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntülendi. Film kalınlıkları Veeco Dektak-6M yüzey profilometresi ile belirlendi. Fotolüminesans (PL) özellikler Perkin Elmer LS 55 moleküler florometre ile birlikte Andor Solis SR 500i-BL model spektrometre ile ölçüldü.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yapısal Özellikler

%7 In katkılı IZO ince filmlerin yapı parametreleri XRD analiziyle belirlendi. 150 °C, 350 °C ve 550 °C sıcaklıklarında tavlanan IZO ince filmlerin XRD desenleri Şekil 2'de verilmektedir. XRD deseninde sadece ZnO'ya ait karakteristik kırınım pikleri görülür. İndiyum ya da onun oksitlerine ait pikler tespit edilmemiştir. Bu durum, ZnO kristal yapısı içerisine dahil edilen In'un çok küçük boyutlarda ve düzensiz şekilde dağılmış olmasından kaynaklanabilir (Benzitouni vd., 2018). 150 °C'de tavlanan filmde herhangi bir belirgin kırınım piki gözlemlenmemiştir. Ancak, 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmde ZnO'nun hekzagonal wurtzit kristal yapısına ait (100) ve (002) düzlemlerine karşılık gelen kırınım pikleri ortaya çıkmıştır (Bouderbala vd., 2024). Bu filmlerde tavlama sıcaklığının artmasıyla beraber kırınım piklerinin şiddetinin arttığı görülür ve en yüksek şiddete sahip kırınım piki (002) düzlemine aittir. Bu nedenle 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmlerin tercihli yönelimi (002) yönündedir (Kavitha vd., 2017). Tavlama sıcaklığındaki artış, filmlerdeki moleküler yapıların termal enerjisinin artmasına neden olur ve moleküllerin içerdiği organik taşıyıcı gruplardan ayrılarak daha kararlı bağlar oluşturmasını sağlar. Bu durum kristallenmeyi olumlu bir şekilde etkiler (Koç, 2021). 350 °C ve 550 °C de tavlanan filmlerin kırınım desenleri karşılaştırıldığında, 550 °C'de tavlanan filmin kırınım piklerinin şiddetinde bir azalma gözlenmiştir.

Bu durum, yüksek sıcaklıkta artan termal difüzyon ve içsel gerilim nedeniyle mikroyapısal bozulmaların oluşması ve kristal kalitesinin azalmasıyla ilişkilidir. Artan tavlama sıcaklığı, Zn ve O atomlarının örgü içerisindeki hareketliliğini artırarak (002) yönelimli kristal büyümeyi termodinamik olarak daha kararlı hâle getirir. Bu nedenle, (002) düzlemi baskın hâle gelirken (100) düzleminin katkısı bastırılmakta ve pik şiddeti ölçüm sınırının altına inmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yoğun termal difüzyon, tanecik birleşmesi ve içsel gerilim artışı, kristal kusurlarının çoğalmasına ve yapı bütünlüğünün kısmen bozulmasına neden olur. Bu etkenler birlikte değerlendirildiğinde, 550 °C'de filmdeki kristal kalitesinin azalması ve (100) yöneliminin kaybolması sonucu toplam kırınım şiddetinin azaldığı söylenebilir. Bu durum, literatürde yüksek sıcaklıkta tavlama sonrası ZnO benzeri filmlerde (002) yöneliminin güçlendiği ve yapısal bozulma nedeniyle diğer düzlemlerin şiddetlerinin azaldığı bulgularla uyumludur (Amakali vd., 2020; Deng vd., 2025a; Deng vd., 2025b; Moustaghfir vd., 2003).



Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda tavlanan IZO ince filmlerin XRD spektrumları

Hekzagonal wurtzit kristal yapıya sahip ince filmlerde düzlemler arası mesafe (d) değerleri, Bragg yasasına Denklem (1) göre, kristalin örgü sabitleri olan a ve c parametreleri Denklem (2) ile tanecik boyutu (D) Denklem (3) Debye-Scherrer ile, mikrogerinim (ε) Denklem (4) Williamson–Hall yaklaşımıyla ve dislokasyon yoğunluğu (δ) Denklem (5) ile hesaplanmıştır (Butt vd., 2015a; Butt vd., 2015b; Moustaghfir vd., 2003; Seyhan vd., 2023; Song vd., 2002; Suganya vd., 2024).

Williamson–Hall yaklaşımı, kırınım piklerinin genişlemesine hem kristalit boyutu hem de örgü içi mikrogerinimlerin katkıda bulunduğunu varsayan doğrusal bir modeldir. Bu ilişki, X-ışını hat genişlemesinin hem kristalit boyutu hem de mikrogerinim etkilerini doğrusal olarak ayırmak için kullanılır (Butt vd., 2015a; Seyhan vd., 2023; Williamson ve Hall, 1953).

$$n\lambda = 2d_{hkl}Sin\theta \tag{1}$$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3}\left[\frac{h^2+hk+k^2}{a^2}\right] + \frac{l^2}{c^2} \tag{2}$$

$$D = \frac{0,9\,\lambda}{\beta\, Cos\theta} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta Cos\theta}{4} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (5)$$

Burada, λ kullanılan X-ışınının dalga boyunu (λ= 0,154069nm), d_{hkl} düzlemler arası mesafeyi, h, k, l kristal düzlemlerini belirten Miller indislerini, θ Bragg kırınım açısını, β yarı maksimum şiddetteki pik genişliğini ifade etmektedir (Bharath vd., 2017, 2018). Williamson–Hall analizinden elde edilen tanecik boyutu değerine bağlı olarak hesaplanan dislokasyon yoğunluğu, kristal içi kusur miktarını temsil eder. Dislokasyon yoğunluğunun artışı, kristal bozulması ve örgüdeki bozulmaların arttığını göstermektedir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla tanecik boyutunun azalması ve buna karşılık dislokasyon yoğunluğu ile mikrogerinim değerlerinin artması, yüksek sıcaklıkta örgü içi gerilimlerin artarak yeni dislokasyonlar oluşturduğunu göstermektedir. Dislokasyon yoğunluğu ile tanecik boyutu arasında ters; dislokasyon yoğunluğu ile mikrogerinim arasında ise paralel bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu durum, ITO/IZO ince filmler üzerine yapılan benzer çalışmalarla uyum içindedir (Butt vd., 2015a; Butt vd., 2015b; Seyhan vd., 2023).

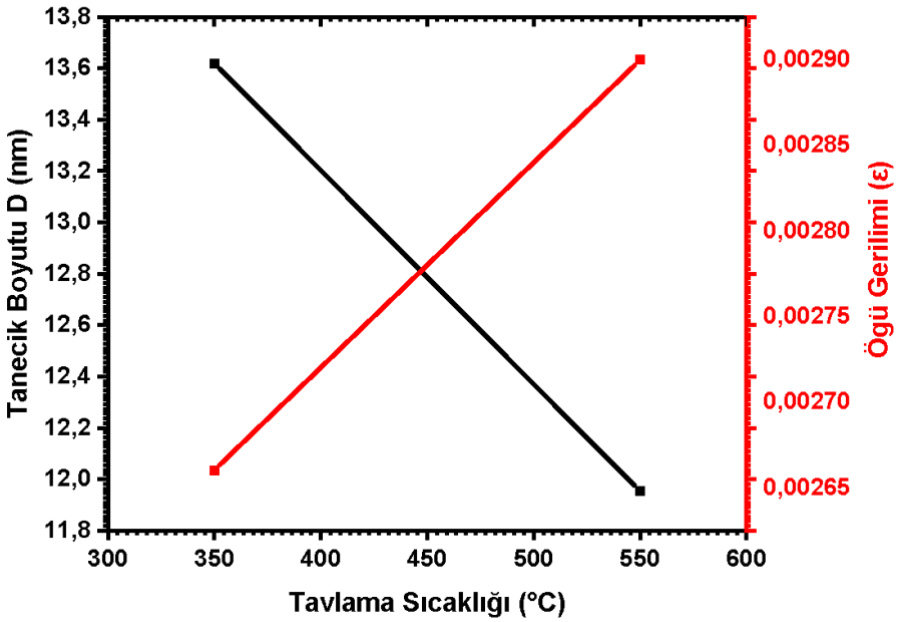
150 °C'de tavlanan IZO filmin XRD spektrumlarında herhangi bir pik görülmediği için tercihli yönelim belirlenememiştir. Bu nedenle, 350 °C ve 550 °C sıcaklıklarında tavlanan IZO ince filmlere ait yapısal parametreleri (002) tercihli yönelimine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan tüm parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. 350 °C ve 550 °C tavlanan IZO filmlerin yapısal parametreleri

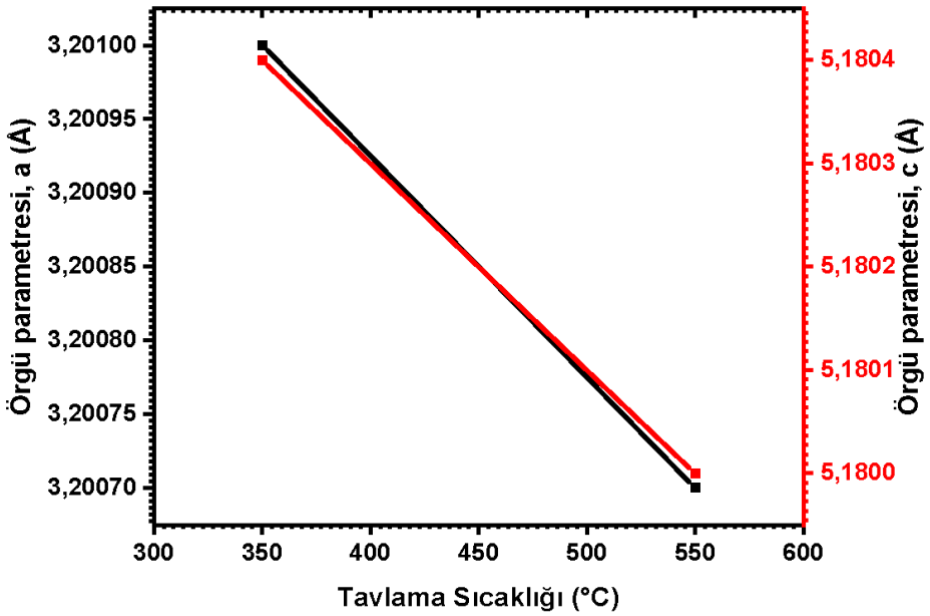
İnce film	2θ	d $_{(002)}$	FWHM (radyan)	D (nm)	δ (nm^{-2})	ε	Örgü parametresi (Å)	
							a	c
350 °C	34.6321	2.5902	0.01118	13.618	0.00539	0.00266	3.2010	5.1804
550 °C	34.6322	2.5900	0.01215	11.954	0.00699	0.00290	3.2007	5.1800

Üretilen IZO filmlerinin tavlama sıcaklığı ile tanecik boyutu ve örgü gerilimi arasındaki değişim Şekil 3'te verilmektedir. IZO filmi 350 °C'de tavlandığında tanecik boyutu 13.618 nm, 550 °C'de tavlandığında 11.954 nm olarak hesaplanmıştır. Tavlama sıcaklığının artışıyla tanecik boyutundaki bu azalma kristal yapının 350 °C de tavlanan filme göre biraz bozulduğunu, kristal kalitesinin azaldığını göstermektedir (Choi vd., 1995; Moustaghfir vd., 2003). Hesaplanan dislokasyon yoğunluğu (δ) ve örgü gerilimi (ε) değerleri tavlama sıcaklığı 350 °C'den 550 °C'de çıkarıldığında yükselmiştir (Tablo 1, Şekil 3). Bu artış, yüksek sıcaklıkta artan ısıl gerilimlerin kristal

örgüsünde yeni dislokasyonlar oluşturduğunu ve mikrogerinimi artırdığını göstermektedir. Bu durum literatürde benzer çalışmalar ile uyumludur (Butt vd., 2015a; Butt vd., 2015b; Seyhan vd., 2023). Bu parametrelerde film kristal kusurunda ve filmin içsel geriliminde artışın olması yüksek sıcaklıkta kristal kalitesinin bozduğunu göstermektedir. (Das vd., 2023; Handani vd., 2024; Sharma vd., 2024). 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmlerde tavlama sıcaklığı ile örgü parametrelerinin (a ve c) değişimi Şekil 4'te gösterilmektedir. Tavlama sıcaklığının artışıyla örgü parametrelerinde bir azalma gözlenmiştir. 350 °C'de tavlanan IZO filmlerin daha düşük kristal kusurları, daha büyük tanecik boyutlu ve atomlar arası elastik gerilme kuvvetinin daha düşük olmasıyla birlikte daha kaliteli kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, filmlerin kristalliği ve kalitesi tavlama sıcaklığından etkilenmektedir (Das vd., 2023; Handani vd., 2024; Sharma vd., 2024; Subramanyam vd., 1998).



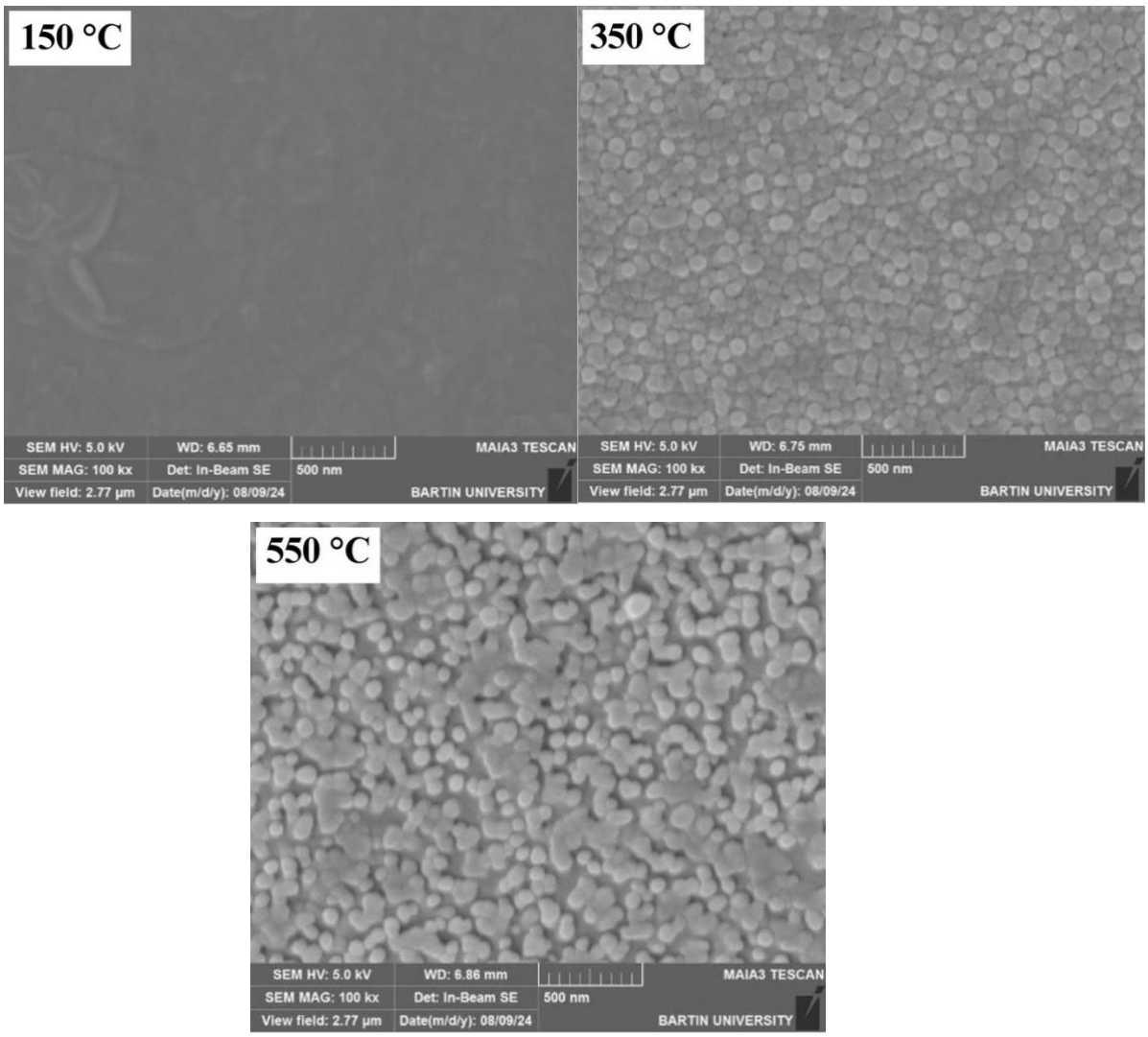
Şekil 3. Tavlama sıcaklığı ile tanecik boyutu ve örgü gerilimi değişimi.



Şekil 4. Tavlama sıcaklığı ile örgü parametresi (a ve c) değişimi

3.2. Morfolojik Özellikler

Şekil 5'te farklı sıcaklıklarında tavlanan IZO ince filmlerin SEM yüzey görüntülerini görülmektedir. 150 °C'de tavlanan filmde, yüzeyde belirgin kristal yapının oluşmadığı görülür. Bu durum, düşük sıcaklıkta atomik hareketliliğin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır (Bharath vd., 2017). Tavlama sıcaklığının 350 °C'ye yükseltilmesiyle birlikte, yüzeyde belirgin ve homojen bir nano tanecikli yapı oluşmuştur. Bu sıcaklıkta atomların malzeme içindeki hareketliliği artmış, dolayısıyla kristal boyutlarında büyüme meydana gelmiştir. Ayrıca, tavlama sırasında uçucu bileşenlerin uzaklaşması ile kaplama yapısında meydana gelen gerilim gevşemesi sonucunda tanecikli yüzey morfolojisinin daha düzenli bir yapıya dönüştüğü anlaşılmaktadır (Kwon vd., 2005). 550 °C'de tavlanan numunelerde ise tanecik boyutunda artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta atomik difüzyonun artması ve taneciklerin birleşmesi ile daha büyük toplu kümeler oluşmaktadır (Bu ve Cole, 2014; Jung vd., 2003).



Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda tavlanan IZO ince filmlerin yüzey görüntüleri

Film kalınlıkları Veeco Dektak-6M yüzey profilometresi kullanılarak ölçülen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Kalınlık ölçümleri beş farklı noktadan ortalama alınarak belirlendi.

Tablo 2. 150 °C, 350 °C ve 550 °C'de tavlanan IZO ince filmlerin kalınlık değerleri.

Tavlama Sıcaklığı	Film Kalınlığı (nm)
150 °C	3220
350 °C	9330
550 °C	1720

Tavlama sıcaklığının artışıyla film kalınlığında doğrusal olmayan bir değişim gözlenmiştir. 350 °C'de kalınlığın maksimuma ulaşması, bu sıcaklıkta çözelti viskozitesinin ve film oluşum verimliliğinin optimum olduğu anlamına gelmektedir. 550 °C'de film kalınlığındaki düşüş, yüksek sıcaklıkta uçucu

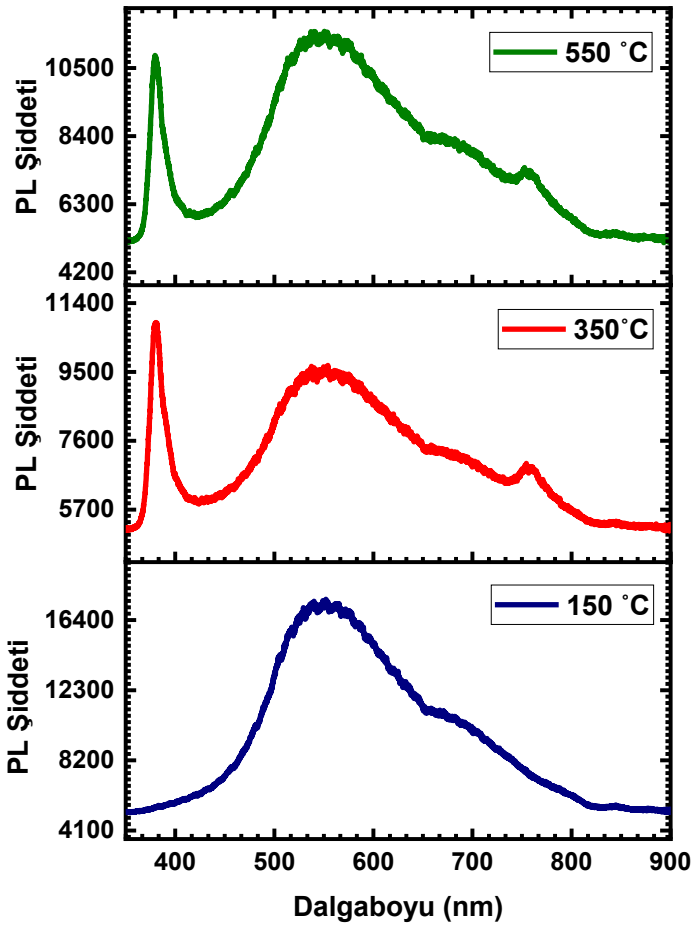
bileşenlerin buharlaşmasıyla oluşan malzeme kaybı sonucu, filmdeki yoğunlaşma ve yeniden düzenlenme süreçleriyle ilişkilidir.(İloğlu ve Yurtsever, 2024; Scherer, 1997).

Film kalınlığı değişimi, XRD sonuçlarında gözlenen kristal kalite farklılıklarıyla doğrudan ilişkilidir. 350 °C'de elde edilen daha kalın film, yüksek kristalizasyon derecesiyle ve (002) yönelimli yapı ile uyumludur. Bu nedenle, 550 °C'de film kalınlığının azalması, XRD pik şiddetlerinde gözlenen azalmayı desteklemektedir.

SEM analizleri de bu bulguları desteklemektedir; 350 °C'de daha kalın ve homojen bir yüzey yapısı görülürken, 550 °C'deki ince film tabakası tanecik aglomerasyonu nedeniyle düzensizlik göstermiştir. Bu durum, film kalınlığının morfolojik pürüzlülük ve yüzey enerjisiyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

3.3. Fotolüminesans Özellikler

Üretilen IZO ince filmlerin PL ölçümleri, oda sıcaklığında ve görünür bölgede λ=349 nm dalga boyuna sahip ultraviyole lazer uyarımı kullanılarak yapılmıştır. IZO ince filmlerin PL spektrumları Şekil 6'da gösterilmektedir. Genel olarak ZnO ince filmlerin PL spektrumu, UV bölgesinde dar bir emisyon piki ve görünür bölgede daha geniş bir emisyon piki göstermektedir (Karunakaran vd., 2010; Sagar vd., 2007; Umar vd., 2006). UV bölge emisyon piki elektron boşluk çiftlerinin yeniden birleşmesi sonucu kristal yapının kalitesinin arttığını gösteren yakın bant kenarı emisyonudur (Abisheva vd., 2024; Chang vd., 2017; Sagar vd., 2007). Görünür bölge emisyon piki ise kristal yapıdaki oksijen ve çinko boşlukları, yüzey kusurları ve yapısal kusurlardan kaynaklanmaktadır (Devi, Velu, 2015; Djurišić vd., 2007); Ouarez vd., 2018).



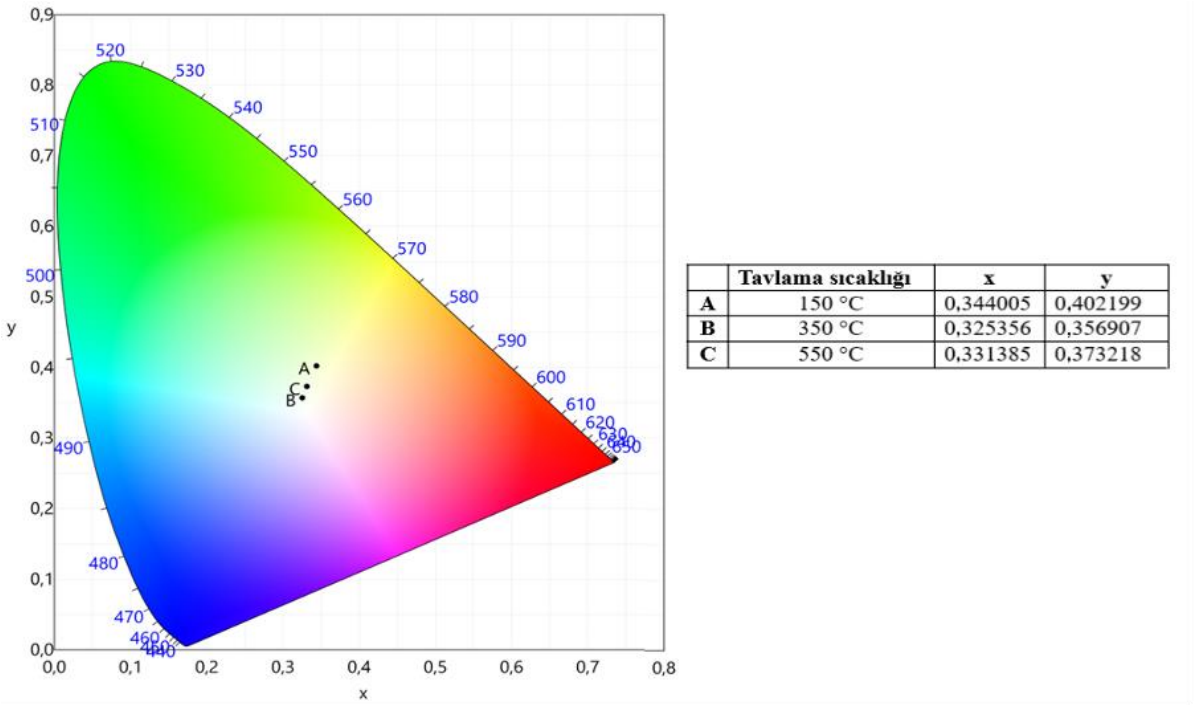
Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda tavlanan IZO ince filmlerin PL spektrumları.

350 °C ve 550 °C de tavlanan filmlerde 380 nm'de UV bölge mor emisyon piki ve 550 nm'de görünür bölge sarı emisyon piki görülürken 150 °C' de tavlanan filmde ise yalnızca 551 nm'de bir görünür bölge sarı emisyon piki gözlenmiştir. 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmlerde mor emisyon ve sarı emisyon birlikte görülür. Bu nedenle farklı taşıyıcı taşıma özelliklerine ve farklı emisyon renklerine sahip olması nedeniyle 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmler beyaz emisyon göstermektedir. Bu belirlenen CIE renk koordinatları ile desteklenmektedir.

350 °C ve 550 °C'de tavlanan örneklerde 750–800 nm aralığında dar yapılı zayıf tepecikler gözlenmiştir. Ancak bu sinyaller, gerçek fotolüminesans geçişleri değildir. Bu bölgedeki tepecikler, kullanılan monokromatör sisteminde meydana gelen ikinci mertebe kırınım etkisinin bir sonucudur. Yaklaşık 390 nm civarındaki güçlü yakın bant kenarı emisyonunun ikinci mertebesi, 780 nm civarında bir tepe olarak yeniden görünmektedir. Bu nedenle, 750–800 nm aralığında görülen bu sinyaller ölçüm sisteminden kaynaklanan yapay sinyallerdir ve fiziksel kusur seviyeleriyle ilişkili değildir (Kanosue vd., 2018; Lee vd., 2014; Stöger-Pollach vd., 2023; Zheng vd., 2020). Gerçek ZnO

emisyonu ise 500–600 nm civarındaki geniş bant olup, oksijen boşlukları ve çinko ara boşlukları gibi kusurlardan kaynaklanmaktadır.

Üretilen IZO ince filmlerin 349 nm lazer uyarımı ile yayılan renkleri CIE (Commission International de I'Eclainage) 1931 kromatiklik diyagramı kullanılarak incelenmiştir (Jayasimhadri vd., 2009). Şekil 7'de 150 °C, 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmlerin CIE renk koordinatları (x, y), emisyon spektrumu verileri kullanılarak hesaplanmıştır. 150°C'de tavlanan film için (0,344005; 0,402199), 350 °C'de tavlanan film için (0,325556; 0,356907) ve 550 °C'de tavlanan film için ise (0,331385; 0,373218) olarak bulunmuştur. Bu koordinatlara göre 350 °C ve 550 °C'de tavlanan filmlerin CIE koordinatları beyaz renk bölgesine, 150°C'de tavlanan filmin koordinatları sarı renge yakın bir bölgeye karşılık gelmektedir. Bu nedenle 350 °C ve 550 °C'de tavlanan IZO filmler WOLED'lerin enerji tasarruflu aydınlatma ve yeni nesil ekran teknolojilerinde alternatif malzeme olarak kullanılabilir.



	Tavlama sıcaklığı	x	y
A	150 °C	0,344005	0,402199
B	350 °C	0,325356	0,356907
C	550 °C	0,331385	0,373218

Şekil 7. Farklı sıcaklıklarda tavlanan IZO ince filmlerin CIE diyagramı.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, yüksek indiyum katkılı ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve fotolüminesans özellikleri üzerine tavlama sıcaklığının etkisi incelendi. XRD sonuçları, 350 °C ve 550 °C'de üretilen filmlerin hekzagonal würtzit kristal yapısına sahip olduğunu gösterdi. Bu sıcaklıklarda tavlanan IZO filmler yoğun ve artan tanecikli bir yüzey morfolojisine sahiptir ve tavlama sıcaklığı yüzey düzenliliğini etkilediği görüldü. PL analizleri, 350 °C ve 550 °C tavlama sıcaklıklarında UV mor (380

nm) ve görünür sarı (550 nm) emisyonun birlikte ortaya çıktığını ve beyaz ışık yaydığını gösterdi. Ayrıca, bu durum filmlerin beyaz ışık bölgesinde kalan CIE koordinatları ile de desteklendi. Bu sonuçlar, yüksek indiyum katkılı IZO ince filmlerin 350 °C ve 550 °C tavlama sıcaklıklarında yapısal bütünlüğünü ve geniş spektrumlu emisyon karakterini koruyabildiğini gösterdi. Filmlerin beyaz ışık emisyonu göstermesi, bu filmlerin görünür ışık temelli sensör ve fotonik uygulamalarda kullanılma potansiyelini işaret etmektedir. Bunula birlikte, IZO filmler dokunmatik paneller, ekran teknolojileri ve akıllı cam uygulamalarında kullanılan şeffaf iletken elektrotlar için, aydınlatma ve yeni nesil ekran teknolojilerinde kullanılan beyaz ışık yayan diyotlar (WOLED) için potansiyel bir alternatif olabilir.

Teşekkür

Fotolüminesans ölçümleri için Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine ve Dr. Mustafa Burak ÇOBAN'a teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

Abdel-Hameed, R., Ashmawy, A. M., AlElaimi, M., Abourashed, N. M., Hegazy, A., Alshammari, O. A. O., Tantawy, A., Elgazzar, E., Batakoushy, H. A., Abbas, A. E. F., and Abdel-Raoof, A. M. (2025). Electrochemical platform with Ag/ZnO nanorods for green, blue, and white determination of the newly approved drug roxadustat in pharmaceuticals and plasma: NQS assessment and UN-SDGs alignment. *Microchemical Journal*, *212*, 113326. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113326

Abisheva, A. K., Afanasyev, D. A., Ilyassov, B. R., Aimukhanov, A. K., Kulbachinskii, V. A., and Zeinidenov, A. K. (2024). The influence of annealing environment of ZnO thin film on its optical, structural and photovoltaics performance. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, *159*, 115932. https://doi.org/10.1016/J.PHYSE.2024.115932

Ahmed, Z., Rahman, T., Hussain, K. M. A., Khatun, M. T., Chowdhury, M. S. S., Faruqe, T., Toma, F. T. Z., Ahmed, Y., Khan, M. N. I., and Alam, M. M. (2023). Characterization and optimization of ZnS thin

film properties synthesis via chemical bath deposition method for solar cell buffer layer. *Main Group Chemistry*, *22*(1), 79-91. https://doi.org/10.3233/MGC-210127

Akash, R., Ganesh, V., Thirumoorthi, M., and Deivatamil, D. (2025). Fabrication of high-performance UV photodetector using gallium doped ZnO thin films by nebulizer spray pyrolysis method. *Optical Materials*, *160*, 116715. https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2025.116715

Amakali, T., Daniel, Likius. S., Uahengo, V., Dzade, N. Y., Leeuw, N. H. de, Amakali, T., Daniel, Likius. S., Uahengo, V., Dzade, N. Y., and Leeuw, N. H. de. (2020). Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by molecular precursor and Sol–Gel methods. *Crystals 2020, Vol. 10, 10*(2). https://doi.org/10.3390/cryst10020132

Asha Hind, P., Kumar, P., Goutam, U. K., and Rajendra, B. V. (2025). Tuning of electrical properties and persistent photoconductivity of SnO2 thin films via La doping for optical memory applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *186*, 109073. https://doi.org/10.1016/J.MSSP.2024.109073

Badadhe, S. S., and Mulla, I. S. (2009). H2S gas sensitive indium-doped ZnO thin films: Preparation and characterization. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *143*(1), 164-170. https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.08.056

Baig, U., Al-Kuhaili, M. F., and Dastageer, M. A. (2025). Remediation of crude oil contaminated oily wastewater using nanostructured ZnO-decorated ceramic membrane: Membrane fouling and their mitigation using photo-catalytic self-cleaning process. *Desalination*, *597*, 118333. https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118333

Bappy, N. F., and Subramani, S. (2025). A comprehensive review on Mg-doped ZnO thin film and nanostructure: Properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, *318*, 118251. https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2025.118251

Bellili, I., Darenfad, W., Guermat, N., and Bouarissa, N. (2025). Optimizing the structural, optical, hydrophobic, and electrical properties of (Sn/Mg) co-doped ZnO thin films for application as solar cell electrodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *36*(15). https://doi.org/10.1007/S10854-025-14918-5

Benouis, C. E., Benhaliliba, M., Juarez, A. S., Aida, M. S., Chami, F., and Yakuphanoglu, F. (2010). The effect of indium doping on structural, electrical conductivity, photoconductivity and density of states properties of ZnO films. *Journal of Alloys and Compounds*, *490*(1-2), 62-67. https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2009.10.098

Benzitouni, S., Zaabat, M., Mahdjoub, A., Benaboud, A., and Boudine, B. (2018). High transparency and conductivity of heavily In-doped ZnO thin films deposited by dip-coating method. *Materials Science-Poland*, *36*(3), 427-434. https://doi.org/10.1515/msp-2018-0037

Bharath, S. P., Bangera, K. V., and Shivakumar, G. K. (2017). Properties of CdxZn1-xO thin films and their enhanced gas sensing performance. *Journal of Alloys and Compounds*, *720*, 39-46. https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2017.05.240

Bharath, S. P., Bangera, K. V., and Shivakumar, G. K. (2018). Enhanced gas sensing properties of indium doped ZnO thin films. *Superlattices and Microstructures*, *124*, 72-78. https://doi.org/10.1016/J.SPMI.2018.10.010

Bhat, S. S., Shetty, S. J., Shilpa, M. P., Shet, S., Eshwarappa, K. M., and Gurumurthy, S. C. (2025). Neutron irradiation induced transmuted Ga-doping of ZnO thin films: Structural and opto-electronic investigations. *Ceramics International*, *51*(2), 2695-2700. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.252

Bouderbala, I. Y., Guessoum, A., Rabhi, S., Bouhlassa, O., and Bouras, I. E. (2024). Optical band-diagram, Urbach energy tails associated with photoluminescence emission in defected ZnO thin films deposited by sol–gel process dip-coating: effect of precursor concentration. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, *130*(3), 1-19. https://doi.org/10.1007/S00339-024-07366-1

Bu, I. Y. Y., and Cole, M. T. (2014). A highly conductive and transparent solution processed AZO/MWCNT nanocomposite. *Ceramics International*, *40*(1), 1099-1104. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2013.06.109

Butt, M. Z., Ali, D., Aftab, M., and Tanveer, M. U. (2015a). Surface topography and structure of laser-treated high-purity zinc. *Surface Topography: Metrology and Properties*, *3*(3), 035002. https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/3/035002

Butt, M. Z., Ali, D., Farooq, H., and Bashir, F. (2015b). Structural, electrical, and mechanical characteristics of proton beam irradiated Al5086 alloy. *Physica B: Condensed Matter*, *456*, 275-282. https://doi.org/10.1016/j.physb.2014.09.014

Caballero-Güereca, C. E., Cruz, M. R. A., Luévano-Hipólito, E., and Torres-Martínez, L. M. (2023). Transparent ZnO thin films deposited by dip-coating technique: Analyses of their hydrophobic properties. *Surfaces and Interfaces*, *37*, 102705. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102705

Caglar, M., Caglar, Y., and Ilican, S. (2007). Electrical and optical properties of undoped and In-doped ZnO thin films. *physica status solidi c, 4(*3), 1337-1340. https://doi.org/10.1002/pssc.200673744

Chandak, V. S., Kathwate, L. H., Kumbhar, M. B., and Kulal, P. M. (2025). Spray deposited high performance Fe-doped ZnO ethanol sensor operating at low temperatures. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *149*, 397-411. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.01.053

Chang, Y. C., Guo, J. Y., Chen, C. M., Di, H. W., and Hsu, C. C. (2017). Construction of CuO/In2S3/ZnO heterostructure arrays for enhanced photocatalytic efficiency. *Nanoscale*, *9*(35), 13235-13244. https://doi.org/10.1039/C7NR03630B

Chen, K. J., Hung, F. Y., Chang, S. J., and Hu, Z. S. (2009). Microstructures, optical and electrical properties of In-doped ZnO thin films prepared by sol–gel method. *Applied Surface Science, 255*(12), 6308-6312. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.02.007

Choi, C. G., No, K., Lee, W. J., Kim, H. G., Jung, S. O., Lee, W. J., Kim, W. S., Kim, S. J., and Yoon, C. (1995). Effects of oxygen partial pressure on the microstructure and electrical properties of indium tin oxide film prepared by d.c. magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, *258*(1-2), 274-278. https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)06354-0

Choi, Y., Shin, S., Byun, C., Kim, H. S., and Jeon, H. (2025). Improving the electrical properties and stability of amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors through ozone treatment. *Journal of the Korean Physical Society*, *86*(6), 529-534. https://doi.org/10.1007/S40042-025-01290-0

Cristina Carranza, A., Camacho-Espinosa, E., Mis-Fernández, R., Zambrano-Serrano, M. A., Rosendo-Andrés, E., and Flores, E. (2025). Controlled increase of indium content in IZO thin films used as window layer in solar cells. *Vacuum*, *239*, 114425. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114425

Cuadra, J. G., Estrada, A. C., Oliveira, C., Abderrahim, L. A., Porcar, S., Fraga, D., Trindade, T., Seabra, M. P., Labrincha, J., and Carda, J. B. (2023). Functional properties of transparent ZnO thin films synthetized by using spray pyrolysis for environmental and biomedical applications. *Ceramics International*, *49*(20), 32779-32788. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.246

Cui, Z., Duan, W., Lu, Z., Huang, L., Che, H., Gou, B., Xu, Z., Liang, H., Huang, J., Mao, D., Chen, S., Jiang, Z., Chen, X., and Zhang, K. (2025). A high-temperature resistant curved conformal thin-film polymer derived SiCN temperature sensor based on screen printing. *Journal of Alloys and Compounds*, *1013*, 178566. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178566

Das, A., Das, A., Singha, C., and Bhattacharyya, A. (2023). Al, Mg Co-doped ZnO thin films: Effect of the annealing temperature on the resistivity and ultraviolet photoconductivity. *Thin Solid Films*, *780*, 139958. https://doi.org/10.1016/J.TSF.2023.139958

Deng, K., Liu, Z., Liu, H., Chen, Y., Li, S., Guo, S., Xiu, B., Dong, X., Cao, H., Deng, K., Liu, Z., Liu, H., Chen, Y., Li, S., Guo, S., Xiu, B., Dong, X., and Cao, H. (2025a). Temperature dependence on microstructure, crystallization orientation, and piezoelectric properties of ZnO films. *Sensors 2025, Vol. 25, 25*(1). https://doi.org/10.3390/s25010242

Deng, W., Liu, H., Luo, J., and Zhang, R. (2025b). The effect of oxygen pressure during annealing on the morphology, structure, and luminescence properties of Te-doped ZnO thin films. *Journal of Electronic Materials,* 1-18. https://doi.org/10.1007/s11664-025-11851-5

Devi, P. G., and Velu, A. S. (2015). Synthesis by co-precipitation method, structural and optical properties of ZnO and nickel doped ZnO nanoparticles. *Journal Of Advanced Applıed Scıentıfic Research*, *1*(2), 130-137. https://doi.org/10.46947/JOAASR12201512

Dhahri, R., Hjiri, M., El Mir, L., Alamri, H., Bonavita, A., Iannazzo, D., ... and Neri, G. (2017). CO sensing characteristics of In-doped ZnO semiconductor nanoparticles. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2*(1), 34-40. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2017.01.003

Djurišić, A. B., Leung, Y. H., Tam, K. H., Hsu, Y. F., Ding, L., Ge, W. K., Zhong, Y. C., Wong, K. S., Chan, W. K., Tam, H. L., Cheah, K. W., Kwok, W. M., and Phillips, D. L. (2007). Defect emissions in ZnO nanostructures. *Nanotechnology*, *18*(9), 095702. https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/9/095702

Ferhati, H., Kacha, K., and Djeffal, F. (2025). Efficient ACZTS solar cells using optimized ZnO/metal/ZnO buffer multilayer: A combined FDTD-PSO approach. *Solid State Communications*, *397*, 115842. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2025.115842

Goyal, D. J., Agashe, C., Takwale, M. G., Bhide, V. G., Kulkarni, S. K., and Mahamuni, S. (1993). Dopant induced modifications in the physical properties of sprayed zno: In films. *Journal of Materials Research*, *8*(5), 1052-1056.

Gültekin, Z., Altınölçek Gültekin, N., and Tavaslı, M. (2025). OLED Fabrication with ZnO and organic active layer ıntegration. *Transactions on Electrical and Electronic Materials 2025 26:3*, *26*(3), 305-313. https://doi.org/10.1007/s42341-025-00597-w

Handani, S., Putra, I. J., Emriadi, E., Dahlan, D., and Arief, S. (2024). Improved Physical Properties of Green Fabricated ZnO Thin Films by Annealing Temperature. *ChemistrySelect*, *9*(2), e202302868. https://doi.org/10.1002/SLCT.202302868

Haritha, A. H., Cruz, M. E., Sisman, O., Duran, A., Galusek, D., Velázquez, J. J., and Castro, Y. (2025). Influence of annealing temperature on the photocatalytic efficiency of sol-gel dip-coated ZnO thin films in methyl orange degradation. *Open Ceramics*, *21*, 100727. https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100727

Hassan, H. S., Kashyout, A. B., Morsi, I., Nasser, A. A. A., and Ali, I. (2014). Synthesis, characterization and fabrication of gas sensor devices using ZnO and ZnO: In nanomaterials. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, *3*(3), 216-221. https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2014.10.007

İloğlu, O., and Yurtsever, H. A. (2024). The effects of annealing temperature on the thickness, morphology, band gap energy, and photocatalytic performance of ZIF-8-derived ZnO/TiO2 thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics 2024 35:18*, *35*(18), 1211. https://doi.org/10.1007/s10854-024-12932-7

Jayasimhadri, M., Jang, K., Lee, H. S., Chen, B., Yi, S. S., and Jeong, J. H. (2009). White light generation from Dy^{3+} -doped ZnO- B_2O_3 - P_2O_5 glasses. *Journal of Applied Physics*, *106*(1). https://doi.org/10.1063/1.3159899/396308

Jo, G. H., and Koh, J. H. (2019). Laser annealing effects on Ga dopants for ZnO thin films for transparent conducting oxide applications. *Ceramics International*, *45*(5), 6190-6197. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2018.12.096

Jung, Y. S., Seo, J. Y., Lee, D. W., and Jeon, D. Y. (2003). Influence of DC magnetron sputtering parameters on the properties of amorphous indium zinc oxide thin film. *Thin Solid Films*, *445*(1), 63-71. https://doi.org/10.1016/J.TSF.2003.09.014

Kanosue, K., Hirata, S., Vacha, M., Augulis, R., Gulbinas, V., Ishige, R., and Ando, S. (2018). A colorless semi-aromatic polyimide derived from a sterically hindered bromine-substituted dianhydride exhibiting dual fluorescence and phosphorescence emission. *Materials Chemistry Frontiers*, *3*(1), 39-49. https://doi.org/10.1039/C8QM00409A

Karunakaran, C., Gomathisankar, P., and Manikandan, G. (2010). Preparation and characterization of antimicrobial Ce-doped ZnO nanoparticles for photocatalytic detoxification of cyanide. *Materials Chemistry and Physics*, *123*(2-3), 585-594. https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2010.05.019

Kavitha, B., Nirmala, M., Poornachandra, S., and Pavithra, M. (2017). Preparation and characterization of CdO thin films prepared by chemical method. *J Environ Nanotechnol*, 6(1), 59-66. https://doi.org/10.13074/jent.2017.03.171228

Kido, J., Shionoya, H., and Nagai, K. (1995). Single-layer white light-emitting organic electroluminescent devices based on dye-dispersed poly(N-vinylcarbazole). *Applied Physics Letters*, *67*(16), 2281-2283. https://doi.org/10.1063/1.115126

Koç, M., (2021). Ultrasonik sprey piroliz ile üretilen ZnO ince filmlerin alttaş sıcaklıklarının yapısal ve optik özelliklerine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 16(1), 169-178. https://doi.org/10.29233/sdufeffd.911477

Kocyigit, A., Erdal, M. O., and Yıldırım, M. (2019). Effect of indium doping on optical parameter properties of sol–gel-derived ZnO thin films. *Zeitschrift für Naturforschung A*, *74*(10), 915-923. https://doi.org/10.1515/zna-2019-0070

Krajian, H., Abdallah, B., Kakhia, M., and AlKafri, N. (2021). Hydrothermal growth method for the deposition of ZnO films: Structural, chemical and optical studies. *Microelectronics Reliability*, *125*, 114352. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114352

Kumar, P. M. R., Kartha, C. S., Vijayakumar, K. P., Abe, T., Kashiwaba, Y., Singh, F., and Avasthi, D. K. (2004). On the properties of indium doped ZnO thin films. *Semiconductor Science and Technology*, *20*(2), 120. https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/2/003

Kwon, S. J., Park, J. H., and Park, J. G. (2005). Wrinkling of a sol-gel-derived thin film. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(1), 011604. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.011604

Lee, W., Lee, H., and Hahn, J. W. (2014). Correction of spectral deformation by second-order diffraction overlap in a mid-infrared range grating spectrometer using a PbSe array detector. *Infrared Physics and Technology*, *67*, 327-332. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.07.032

Legardinier, L., Ardila, G., Gélard, I., Jiménez, C., Weber, M., Donatini, F., and Consonni, V. (2025). Enhancement of the piezoelectric response of ZnO nanowires grown via PLI-MOCVD using post-deposition treatments through adjusted screening and surface effects. *Nanoscale*, *17*(17), 10835-10849. https://doi.org/10.1039/D5NR00591D

Li, W., Yin, H., Mo, H., Lai, L., Fu, S., Li, L., Ye, L., Xiong, Y., and Li, H. (2020). Thermal evolution of point defects in indium doped ZnO transparent conducting films. *Thin Solid Films*, *713*, 138350. https://doi.org/10.1016/J.TSF.2020.138350

Loo, R., Akula, A., Shimura, Y., -, al, Guo, Y.-D., Wang, A.-F., and Huang, Q.-M. (2025). Review—ZnO-based thin film metal oxide semiconductors and structures: transistors, optoelectronic devices and future sustainable electronics. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, *14*(1), 015001. https://doi.org/10.1149/2162-8777/ada3a2

Luna-Arredondo, E. J., Maldonado, A., Asomoza, R., Acosta, D. R., Meléndez-Lira, M. A., and Olvera, M. D. L. L. (2005). Indium-doped ZnO thin films deposited by the sol–gel technique. *Thin Solid Films*, *490*(2), 132-136. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.043

Marouf, S., Beniaiche, A., Guessas, H., and Azizi, A. (2017). Morphological, Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Dip Coating Method. *Materials Research*, *20*(1), 88-95. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0751

Masmitjà, G., Estarlich, P., Lopez, G., Martín, I., Voz, C., Placidi, M., Torrens, A., Saucedo Silva, E., Vasquez, P., Muñoz, D., Puigdollers, J., and Ortega, P. (2024). Impact of atomic layer deposition temperature on electrical and optical properties of ZnO:Al films. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, *9*(2), 100698. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100698

Milisav, A. M., Mičetić, M., Dubček, P., Sotelo, L., Cantallops-Vilà, C., Erceg, I., Fontanot, T., Bojanić, K., Fiket, Ž., Ivanić, M., Sarau, G., Christiansen, S., Meurice, E., Car, T., and Dutour Sikirić, M. (2025). Effect of Ag and Cu doping on the properties of ZnO magnetron sputtered thin films for biomedical applications. *Applied Surface Science*, *690*, 162623. https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2025.162623

Moustaghfir, A., Tomasella, E., Ben Amor, S., Jacquet, M., Cellier, J., and Sauvage, T. (2003). Structural and optical studies of ZnO thin films deposited by r.f. magnetron sputtering: influence of annealing. *Surface and Coatings Technology*, *174-175*, 193-196. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00417-1

Naorem, B. D., Singh, J. P., Sharma, B., Garg, S., C, A., Sherin, H., Momaliya, M., Muskan, Sahu, S., Chowdhuri, A., Verma, M., Tomar, M., and Batra, N. (2025). Mn-doped ZnO thin films as a platform for reagentless uric acid biosensor. *Chemical Physics Impact*, *10*, 100823. https://doi.org/10.1016/j.chphi.2025.100823

Nirmal, K. A., Dongale, T. D., Khot, A. C., Yao, C., Kim, N., and Kim, T. G. (2024). Ultra-transparent and multifunctional IZVO mesh electrodes for next-generation flexible optoelectronics. *Nano-Micro Letters, 17*(1), 12. https://doi.org/10.1007/s40820-024-01525-y

Nur-E-Alam, M., Ferdaous, M. T., Alghafis, A., Vasiliev, M., Yap, B. K., Kiong, T. S., Sapeli, M. M. I., Amin, N., Ibrahim, M. A., and Bin Rafiq, M. K. S. (2025). Tailoring Ga-doped ZnO thin film properties for enhanced optoelectric device performance: argon flow rate modulation and dynamic sputtering geometry analysis. *Solar RRL*, *9*(1), 2400353. https://doi.org/10.1002/SOLR.202400353

Pan, M., Fenwick, W. E., Strassburg, M., Li, N., Kang, H., Kane, M. H., Asghar, A., Gupta, S., Varatharajan, R., Nause, J., El-Zein, N., Fabiano, P., Steiner, T., and Ferguson, I. (2006). Metal-organic chemical vapor deposition of ZnO. *Journal of Crystal Growth*, *287*(2), 688-693. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.10.093

Park, Y. R., Kim, E. K., Jung, D., Park, T. S., and Kim, Y. S. (2008). Growth of transparent conducting nano-structured In doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering. *Applied surface science*, *254*(8), 2250-2254. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.09.008

Patil, S. L., Sankapal, S. R., and Almuntaser, F. M. A. (2023). Dip coating: Simple way of coating thin films. *Simple Chemical Methods for Thin Film Deposition: Synthesis and Applications*, 425-447. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0961-2_10

Peng, L. P., Fang, L., Yang, X. F., Li, Y. J., Huang, Q. L., Wu, F., and Kong, C. Y. (2009). Effect of annealing temperature on the structure and optical properties of In-doped ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, *484*(1-2), 575-579. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.139

Prokhorov, A. M., Santoro, A., Gareth Williams, J. A., Bruce, D. W., Prokhorov, A. M., Santoro, A., Bruce, D. W., and G Williams, J. A. (2012). Phosphorescent mesomorphic dyads based on tetraacetylethane complexes of ıridium(III). *Angewandte Chemie International Edition*, *51*(1), 95-98. https://doi.org/10.1002/ANIE.201105212

Ramos-Carrazco, A., Gallardo-Cubedo, J. A., Vera-Marquina, A., Leal-Cruz, A. L., Noriega, J. R., Zuñiga-Islas, C., Rojas-Hernández, A. G., Gomez-Fuentes, R., and Berman-Mendoza, D. (2021). Characterization of ZnO films grown by chemical vapor deposition as active layer in pseudo-MOSFET. *Journal of Electronic Materials, 50*(9), 5196-5208. https://doi.org/10.1007/s11664-021-09038-9

Ramyashri, S., Amiruddin, R., Emelyanov, A. V., and Santhosh Kumar, M. C. (2025). Development of Al foil-based flexible ZnO nanowires/PTAA hybrid piezoelectric nanogenerators. *Applied Surface Science*, *709*, 163818. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163818

Rekkache, H., Mezrag, S., Fellah, M., Bouras, D., Bechiri, L., Benslim, N., Guesmi, A., and Khezami, L. (2025). Characterization of RF magnetron sputtered pure and aluminum-doped zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics 36*(16), 934. https://doi.org/10.1007/s10854-025-15004-6

Sagar, P., Shishodia, P. K., Mehra, R. M., Okada, H., Wakahara, A., and Yoshida, A. (2007). Photoluminescence and absorption in sol–gel-derived ZnO films. *Journal of Luminescence*, *126*(2), 800-806. https://doi.org/10.1016/J.JLUMIN.2006.12.003

Scherer, G. W. (1997). Sintering of Sol-Gel Films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *8*(1), 353-363.

Seçkin, A., and Koralay, H. (2025). Electrical properties of schottky devices from HfO_2 and ZnO/HfO2 thin films: morphological, structural, and optical ınvestigations. *ACS Omega*, *10*(7), 6520-6533. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06878

Seid, E. T., and Dejene, F. B. (2020). Post-heat treatment effect on the properties of indium doped zinc oxide nanocrystals produced by the sol-gel method. *Optical Materials Express, 10*(11), 2849-2865. https://doi.org/10.1364/OME.400912

Seyhan, A., and Kartal, E. (2023). Optical, electrical and structural properties of ITO/IZO and IZO/ITO multilayer transparent conductive oxide films deposited via radiofrequency magnetron sputtering. *Coatings, 13*(10), 1719. https://doi.org/10.3390/coatings13101719

Sharma, H., Kumar, S., Yadav, J., Prasad, J., and Singh, M. (2024). Temperature treatment effect on the physical and optical properties of ZnO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(1), 20. https://doi.org/10.1007/s10854-023-11793-w

Sivasankar, S. M., Amorim, C. de O., and Cunha, A. F. da. (2025). Progress in Thin-Film Photovoltaics: A Review of Key Strategies to Enhance the Efficiency of CIGS, CdTe, and CZTSSe Solar Cells. *Journal of Composites Science 9*(3), 143. https://doi.org/10.3390/jcs9030143

Song, D., Widenborg, P., Chin, W., and Aberle, A. G. (2002). Investigation of lateral parameter variations of Al-doped zinc oxide films prepared on glass substrates by rf magnetron sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *73*(1), 1-20. https://doi.org/10.1016/S0927-0248(01)00104-0

Srinivasulu, T., Saritha, K., Rasool, S., Babu, P., Reddy, K. T. R., Campa, A., and Topic, M. (2025a). Effect of substrate temperature on the optical and magnetic properties of chemical spray deposited Fe-doped ZnO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *36*(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/S10854-024-14125-8/

Stöger-Pollach, M., Zenz, K., Ursin, F., Schilberg, J., and Stöger, L. (2023). A correction for higher-order refraction in cathodoluminescence spectrometry. *Ultramicroscopy*, *251*, 113770. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113770

Subramanyam, T. K., Uthanna, S., and Srinivasulu Naidu, B. (1998). Preparation and characterization of CdO films deposited by dc magnetron reactive sputtering. *Materials Letters*, *35*(3-4), 214-220. https://doi.org/10.1016/S0167-577X(97)00246-2

Suganya, L., Balamurugan, K. S., Sivakami, A., Sakthivel, P., Asthana, N., and Sundaresan, B. (2024). Ferromagnetic, optical and photoluminescence behavior of Ni-doped ZnO thin films. *Topics in Catalysis*, 67(1), 3-16. https://doi.org/10.1007/S11244-023-01886-5

Tokumoto, M. S., Smith, A., Santilli, C. V., Pulcinelli, S. H., Elkaim, E., and Briois, V. (2000). Effect of In concentration in the starting solution on the structural and electrical properties of ZnO films prepared by the pyrosol process at 450°C. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *273*(1-3), 302-306. https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00176-9

Toma, F. T. Z., Rahman, M. S., and Maria, K. H. (2025). A review of recent advances in ZnO nanostructured thin films by various deposition techniques. *Discover Materials*, *5*(1), 1-31. https://doi.org/10.1007/S43939-025-00201-1

Umar, A., Karunagaran, B., Suh, E. K., and Hahn, Y. B. (2006). Structural and optical properties of single-crystalline ZnO nanorods grown on silicon bythermal evaporation. *Nanotechnology*, *17*(16), 4072. https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/16/013

Umar, H., Kavaz, D., and Rizaner, N. (2019). This article was published in the following Dove Press journal. *International Journal of Nanomedicine*, *14*, 87-100 https://doi.org/10.2147/IJN.S186888

Wang, S. C., Chen, L. Y., Hsiao, W. T., and Hsiao, Y. J. (2026). Indium zinc oxide (IZO) thin film for enhanced NO2 gas sensing using 532 nm laser annealing. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *203*, 110229. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.110229

Williamson, G. K., and Hall, W. H. (1953). X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. *Acta Metallurgica*, *1*(1), 22-31. https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6

Yeom, G., Park, J., Park, M. K., Hwang, J., and Lee, J. H. (2025). Novel floating-gate structure of In_2O_3 thin-film transistor-based gas sensor for improved gas sensing properties. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *426*, 137046. https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.137046

Zhao, W., Hu, X., Kong, F., Tang, J., Yan, D., Wang, J., Liu, Y., Sun, Y., Sheng, R., Chen, P., Zhao, W., Hu, X., Kong, F., Tang, J., Yan, D., Wang, J., Liu, Y., Sun, Y., Sheng, R., and Chen, P. (2024). Progress in research on white organic light-emitting diodes based on ultrathin emitting Layers. *Micromachines 15*(5), 626. https://doi.org/10.3390/mi15050626

Zheng, H., Zhang, X., Chen, D., and Wu, P. (2020). Easily ignored interference light from the second order diffraction of the excitation grating in a xenon lamp-based spectrometer. *Results in Chemistry*, *2*, 100072. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2020.100072

Znaidi, L. (2010). Sol–gel-deposited ZnO thin films: A review. *Materials Science and Engineering: B*, *174*(1-3), 18-30. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.07.001

Znaidi, L., Chauveau, T., Tallaire, A., Liu, F., Rahmani, M., Bockelee, V., Vrel, D., and Doppelt, P. (2016). Textured ZnO thin films by sol–gel process: Synthesis and characterizations. *Thin Solid Films*, *617*, 156-160. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.12.031

Xie, G. C., Fanga, L., Peng, L. P., Liu, G. B., Ruan, H. B., Wu, F., and Kong, C. Y. (2012). Effect of In-doping on the optical constants of ZnO thin films. *Physics Procedia*, *32*, 651-657. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.614