

Atf İçin: Gündoğdu, O. S. ve Güngör, E. (2024). ZnO İnce Filmlerin Yapı, Morfolojik ve Lüminesans Özelliklerine Tavlama Sıcaklığının Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(4), 1529-1537.

To Cite: Gundogdu, O. S. & Gungor, E. (2024). Effect of Annealing Temperature on Structure, Morphological and Luminescence Properties of ZnO Thin Films. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(4), 1529-1537.

ZnO İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik ve Lüminesans Özelliklerine Tavlama Sıcaklığının Etkisi

Osman Salih GÜNDOĞDU^{1*}, Elif GÜNGÖR¹

Öne Çıkanlar:

- ZnO ince film
- Yapı özellikleri
- Yüzey özellikleri
- Fotolüminesans

Anahtar Kelimeler:

- ZnO
- Sol-jel
- Nanoyapı
- Daldırma kaplama tekniği

ÖZET:

Bu çalışmada, ZnO ince filmler farklı tavlama sıcaklıklarında dip coating (daldırma kaplama) metodu ile cam alt tabakalar üzerine üretildi. Filmlerin yapısal, morfolojik ve fotolüminesans özelliklerine tavlama sıcaklığının etkisi incelendi. XRD yapı analizi sonuçları filmlerin 150°C ve 250 °C'de amorf, 350 °C, 450 °C ve 550 °C'de ise hegzagonal wurtzite kristal yapıya sahip olduğunu gösterdi. Filmlerin yapı parametreleri tercihli yönelim düzlemine (002) göre hesaplandı. SEM yüzey görüntüleri, artan tavlama sıcaklıklarıyla filmlerin homojen bir şekilde kaplandığını gösterdi. SEM kesit görüntülerinden kalınlıkların 407.096 nm-616.310 nm aralığında olduğu belirlendi. Fotolüminesans spektrumlarına göre filmler 385 nm ve 765 nm'de keskin bir pik ve 450 nm ile 735 nm arasında geniş bir band gösterdi. Filmler yakın UV bölgesinde (385 nm) mor bir emisyonla sahip olduğu görüldü. Sonuç olarak, tavlama sıcaklığının artmasıyla filmlerin kalitesi iyileşmekte ve homojen bir kristal yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak da mor renkte bir emisyonuna sahip bu filmlerin tavlama sıcaklığının artması ile emisyon pik şiddeti artmaktadır. Üretilen filmler, mor ışık yayan optoelektronik aletlerde alternatif malzeme olarak kullanılabilir.

Effect Annealing Temperature on Structural, Morphological and Luminescence Properties of ZnO Thin Films

Highlights:

- ZnO thin film
- Structure properties
- Surface properties
- Photoluminescence

Keywords:

- ZnO
- Sol-gel
- Nanostructure
- Dip coating technique

ABSTRACT:

In this study, ZnO thin films were fabricated on glass substrates by dip coating method at different annealing temperatures. The effect of annealing temperature on the structural, morphological and photoluminescence properties of the films was investigated. XRD structure analysis results showed that the films were amorphous at 150 °C and 250 °C and hexagonal wurtzite crystal structure at 350 °C, 450 °C and 550 °C. The structure parameters of the films were calculated according to the preferential orientation plane (002). SEM surface images showed that the films were homogeneously coated with increasing annealing temperatures. From the SEM cross-sectional images, it was determined that the thicknesses ranged from 407.096 - 616.310 nm. According to the photoluminescence spectra, the films showed a sharp peak at 385 nm and 765 nm and a broad band between 450 nm and 735 nm. The films were observed to have a violet emission in the near UV region (385 nm). As a result, the quality of the films improves with increasing annealing temperature and a homogeneous crystal structure is formed. Accordingly, the emission peak intensity of these films with a violet emission increases with increasing annealing temperature. The produced films can be used as alternative materials in optoelectronic devices emitting violet light.

¹ Osman Salih GÜNDOĞDU ([Orcid ID: 0009-0008-9417-4824](https://orcid.org/0009-0008-9417-4824)), Elif GÜNGÖR ([Orcid ID: 0000-0002-7158-9604](https://orcid.org/0000-0002-7158-9604)), Balıkesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Osman Salih GÜNDOĞDU, e-mail: osmansalihgundogdu@hotmail.com

GİRİŞ

Elektronik aygıt teknolojisinin temelini teknolojiye yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları arasında büyük bir ivme kazanan ince filmler oluşturmaktadır. Modern teknolojiye yarıiletken ince filmlerin, güneş filmleri, aydınlatma teknolojileri, elektronik cihazlar, havacılık sanayisi, optik, optoelektronik ve sensör teknolojisi gibi birçok alanda önemli uygulamaları bulunmaktadır (Kanagamani ve ark., 2021; Wasman ve Hamadameen, 2022; Shanmugapriya ve ark., 2023; Xue ve Ratajczak, 2003; Stolyarchuk ve ark., 2023; Govindaraj ve ark., 2023; Madadi ve ark., 2024; Shkir ve ark., 2024). Transistörler, entegre devreler, ışık yayan diyotlar (LED) ve organik ışık yayan diyotlar (OLED), ekranlar, lazerler, gece görüş dürbünleri, optik ve manyetik kayıt cihazları gibi malzemeler ince film teknolojisi ile yapılmaktadır (Chen, 2018; Altinolcek ve ark., 2020). Özellikle de ZnO ince filmler, 3.37 eV'lik geniş bant aralığı, oda sıcaklığında 60 meV bağlanma enerjisi, kimyasal ve termal stabilitesi ve kendine has özellikleri nedeniyle yoğun ilgi görmektedir. Katkılı ve katkısız ZnO ince filmler, güneş pili, düz gösterge panelleri, optoelektronik devre elemanı, gaz sensörleri ve ışık yayan lazer diyot olarak sıklıkla kullanılan ve halen araştırılmaya devam edilen malzemelerdir (Ahmad ve ark., 2021; Thomas ve ark., 2024; Jain ve ark., 2024). ZnO katkılı ince filmlerin elektriksel iletkenliklerinin ve optik özelliklerinin iyi olması, üretim maliyetlerinin düşük olması, yüksek elektriksel direnç sahip olması, elektro-optik aygıtlar için istenen birçok özelliği birlikte bulundurması ve toksik olmaması nedeniyle bilimsel ve teknolojik alanda büyük öneme sahiptir (Wasman ve Hamadaeen, 2022; Yadav ve Rai, 2023; Shkir ve ark., 2024; Buzok ve ark., 2024). Bu filmler kimyasal kararlılık, elektrokimyasal aktivite ve hızlı elektron transfer özelliklerinden dolayı biyosensörler için aranan metal oksit malzemelerdir. Sahip olduğu piezoelektrik ve piroelektrik özelliklerinden dolayı optoelektronik ve sensör uygulamaları üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Fan ve ark., 2020; Cheng ve ark., 2022; Hossain ve ark., 2024; Badrudin ve ark., 2024).

Fotodetektörler, ışık sensörü, optik dedektör, optoelektronik sensörler telekomünikasyon görüntüleme ve algılama gibi alanlarda çeşitli uygulamaları kolaylaştıran optik sinyalleri elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Fotodetektör teknolojisindeki gelişmeler, daha hızlı ve daha verimli iletişim sistemlerinin, yüksek çözünürlüklü görüntüleme cihazlarının ve çeşitli uygulamalar için hassas sensörlerin üretilmesini sağlamaktadır. Son zamanlarda yapılan araştırmalar, ZnO, CuO, CdO, In₂O₃, TiO₂, Nb₂O₅, MoO₃ gibi çeşitli metal oksitleri keşfederek fotodetektörlerin performansını, hassasiyetini ve güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. Farklı yöntem ve parametreler ile üretilen metal oksit malzemelerin fotolüminesans özellikleri incelenerek, farklı spektral aralıklarda farklı avantajlar sunarak çeşitli teknolojik uygulamaların farklı gereksinimleri karşılayacaktır. Bu nedenle üretilen metal oksitlerin fotolüminesans özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir. Fotolüminesans bantlarının emisyon yoğunlukları sentez ve ısıl işlem teknolojisine, nanokristallerin boyutu ve yapısal mükemmelliğine, amorf fazın içeriğine ve yüzey kusurlarının sayısına önemli ölçüde bağlıdır (Korbutyak ve ark., 2024).

Günümüz teknolojisinde yarıiletken ince filmler birçok cihazın ve uygulamanın temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle, farklı uygulamalar ve teknolojiler için farklı yöntemlerle ve farklı üretim parametrelerinde yeni ince filmler üretilip, sahip oldukları özellikler araştırılmakta ve yeni teknolojiler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Çünkü, üretilen filmlerin performansı üretim teknikleriyle ve üretim parametreleriyle doğrudan ilişkilidir. Literatürde birçok katkılı ve katkısız ZnO ince film çalışması bulunmaktadır (Gültekin ve ark., 2016; Koç, 2021; Ahmad ve ark., 2021; Wasman ve Hamadaeen, 2022; Yadav ve Rai, 2023; Thomas ve ark., 2024; Jain ve ark., 2024). Fakat, üretim teknikleri ve üretim koşullarındaki farklılıklar ince filmlerde mevcut malzemelerde bulunmayan pek çok özelliği

ortaya çıkardığı için hala araştırılmaya devam edilmektedir. Bu nedenle, biz bu çalışmada daldırma kaplama yöntemi ile üretilen 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C ve 550 °C’de 2 saat tavlanan ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve fotolüminesans özellikleri üzerine sıcaklığın etkisini araştırdık. Bu çalışmanın ZnO ince filmlerin optik ve optoelektronik uygulamalarda kullanımı üzerine bir altyapı oluşturabileceği düşünülmektedir.

MATERYAL VE METOT

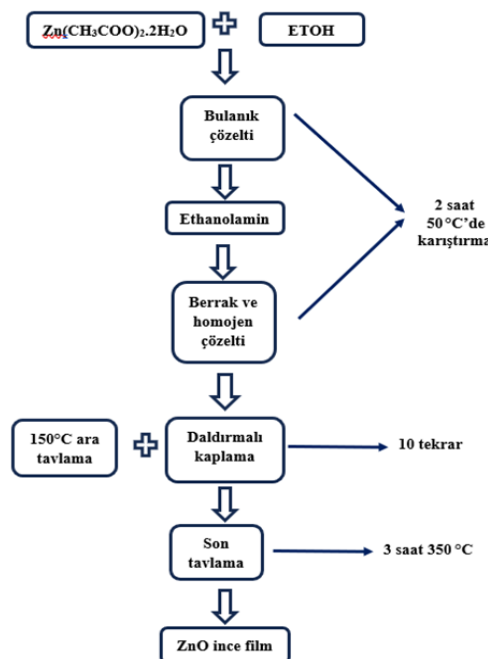
Deney aşamasında kullanılan, çinko asetat dihidrat, etanol ve etanolamin Sigma-Aldrich firmasından ticari olarak alındı ve kullanıldı. Filmlerin X-ışınları analizi Rigaku SmartLab X-ışınları Toz Kristal Difraktometre cihazı (XRD) ile Cu-K_α ışını ($\lambda=1.5418\text{\AA}$) kullanılarak ölçüldü. Filmlerin morfolojik özelliklerini belirlemek için Tescan MAIA3 XMU Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanıldı. Uyarma kaynağı olarak Spectra Physics model Nd-YLF (349 nm) lazer kullanılan Perkin Elmer LS 55 moleküler florometre ve Andor Solis SR 500i-BL model spektrometresi (PL) ile oda sıcaklığında filmlerin fotolüminesans ölçümleri yapıldı.

Alttabakanın Hazırlanması

ZnO ince film üretiminde 1 mm kalınlıkta ve 26 x 76 mm boyutlarında cam alttabakalar kullanıldı. Kaplama öncesinde cam alttabakaların üzerindeki kirlilikten kurtulmak için alttabakalar önce sabunlu su ile temizlendi. Daha sonra, ultrasonik banyoda 80 °C’ de 15 dakika süreyle sırasıyla aseton, etanol ve saf suda temizlendi ve etüvde kurutuldu. İnce film kaplamalarında kullanılan çözelti sol-jel metodu ile üretilip elde edilen solüsyon dip coating (daldırma kaplama) yöntemi kullanılarak cam altlıklar üzerine uygulandı.

Çözeltinin hazırlanması

0.2 M bir çözelti hazırlamak için 80 ml etanol içinde Zn(CH₃COO)₂.2H₂O manyetik karıştırıcıda karıştırılarak çözülmüştür. Oluşan bulanık çözeltinin şeffaflaşması ve stabil olması için etanolamine eklendi. Hazırlanan çözelti manyetik karıştırıcıda 2 saat 50 °C’de karıştırıldı. 2 saat sonunda berrak ve homojen hale gelen çözelti oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yaşlandırma işlemi için 48 saat bekleme bırakıldı.



Şekil 1. ZnO İnce Filmlerin Hazırlanma Aşaması

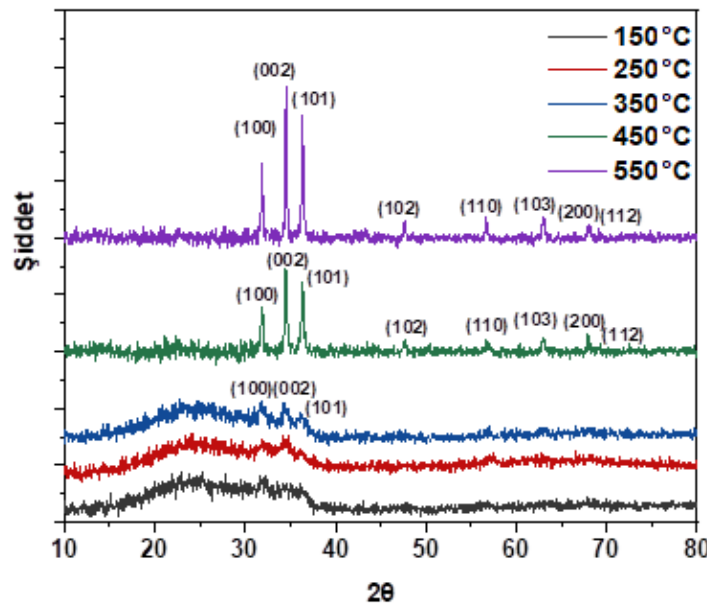
Filmlerin kaplanması

48 saat yaşlandırma işleminden sonra, alttabakaya 10 defa kaplama işlemi yapıldı. Her daldırmanın sonrasında numuneler 10 dakika 150 °C'de etüvde kurutuldu. Daha sonra oda sıcaklığına soğutulularak bir diğer kaplama işlemi uygulandı. 10. kaplamanın ardından numunelere 2 saat 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C ve 550 °C'de son tavlama yapıldı. Üretilen bu ince filmlerin yapısal, morfolojik ve fotolüminesans özellikleri incelendi.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Üretilen ince filmlerin kristal yapılarının ve örgü parametrelerinin tespit edilmesi için XRD analizi yapıldı. Şekil 2'de cam alttabaka üzerine kaplanan ve 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C ve 550 °C'de sıcaklıklarda 2 saat tavlanan ZnO filmlerin XRD spektrumu görülmektedir.

150 °C ve 250 °C'de 2 saat tavlanan filmler kristal yapıda olmadığı için kırınım pikleri görülmezken 350 °C, 450 °C ve 550 °C'de tavlanan filmlerde hexagonal wurtzite kristal yapıya sahip ZnO filmlerin pikleri görülmektedir. Bu kristal yapıdaki ZnO'nun karakteristik pikleri (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200) ve (112) düzlemlerine karşılık gelmektedir (Bouderbala ve ark., 2024). Fakat, 350 °C tavlama sıcaklığında bu karakteristik piklerin ilk üçü görülürken 450 °C ve 550 °C'de tüm kırınım pikleri görülmektedir. Ayrıca, XRD spektrumunda tavlama sıcaklığının artmasıyla kırınım piklerinin şiddetlerinin arttığı ve tam genişlik yarı maksimumun (FWHM) azalmasıyla daha keskin hale geldiği bulundu. Bu durum, tavlama sıcaklığının artması ile kristal yapıda iyileşme olduğuna bağlanabilir (Kavitha ve ark., 2017). Bu iyileşmenin sebebi olarak, artan tavlama sıcaklığı ile yeterli termal enerjiye sahip olan molekül gruplarının organik taşıyıcılarından (C, H vb.) kurtulması ve sahip oldukları enerji ile daha uygun bağlar yaparak kristallenmeye katkı sağladığı düşünülmektedir (Koç, 2021). ZnO ince filmler yüksek tavlama sıcaklıklarında daha kararlı bir yapıya sahip olmaktadır. Şekil 2'ye göre üretilen ince filmlerde en şiddetli pik (002) olduğundan ve tercihli yönelimin bu düzlemde olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan ZnO İnce Filmlerin XRD Spektrumları

Denklem (1) Bragg yasası ile düzlemler arası mesafe (d), denklem (2) Debye-Scherrer formülü ile Williamson-Hall metodu tanecik boyutu (D), denklem (3) ile dislokasyon yoğunluğu (δ) ve denklem (4) ile örgü gerilimi sırasıyla hesaplandı (Suganya ve ark., 2024).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

$$D = \frac{0,9 \lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

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

Burada λ , kullanılan X-ışınının dalga boyu, d düzlemler arası mesafe, θ Bragg açısı ve β yarı maksimum şiddetin radyal çizgi genişliğidir.

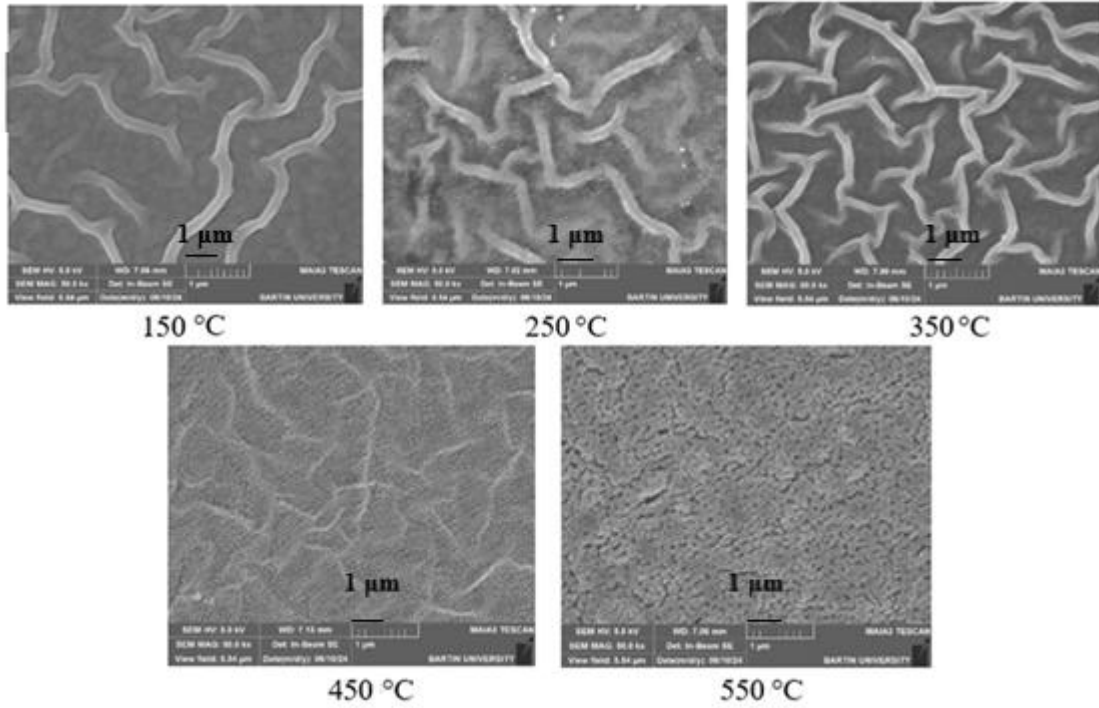
350 °C tavlanan filmlerin XRD spektrumunda pik şiddetleri aynı olduğu için tercihli yönelim belirlenememiştir. Bu nedenle örgü parametreleri hesaplanmadı. Tablo 1’de 450 °C ve 550 °C tavlanan ZnO filmlerinin hesaplanan yapısal parametreleri verilmektedir. Tablo 1’e göre tavlama sıcaklığının artmasıyla tanecik boyutunun arttığı görülmektedir. 450 °C tavlanan filmlerin tanecik boyutu 29.066 nm iken 550 °C’de tanecik boyutu 45.280 nm olarak hesaplandı. Ayrıca, tavlama sıcaklığı arttıkça dislokasyon yoğunluğu ve örgü gerilimi değerleri de azalmaktadır. Tavlama sıcaklığı arttıkça bu değerlerdeki azalma, filmlerin kristalleşme seviyesinin iyi olduğunu, filmin kalitesinin arttığını ve malzemenin kusurlu yapısının azaldığını göstermektedir (Subramanyam ve ark., 1998; Sharma ve ark., 2024; Das ve ark., 2023; Handani ve ark., 2024).

Çizelge 1. 450 °C ve 550 °C Tavlanan ZnO Filmlerin Yapısal Parametreleri

Filmler	2 θ (°)	Yüzeyler arası mesafe $d_{(002)}$ (Å)	Tanecik boyutu (D) (nm)	Dislokasyon yoğunluğu (δ) (nm ⁻²)	Örgü gerilimi (ε)
ZnO-450 °C	34.55	2.259	29.066	0.00183	0.001193
ZnO-550 °C	34.52	2.597	45.280	0.000487	0.0007666

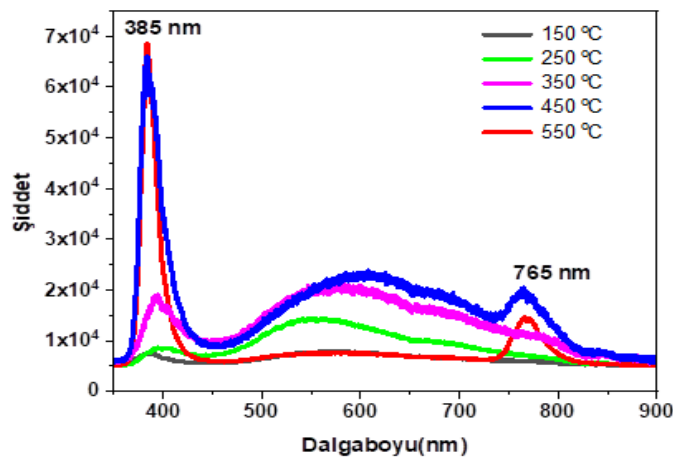
Farklı sıcaklıklarda tavlanan ZnO filmlerin $\times 50000$ büyütme oranındaki SEM yüzey görüntüleri Şekil 3’de verilmektedir. Farklı sıcaklıklarda üretilen ZnO filmleri homojen bir yapıya sahiptir ve herhangi bir çatlak, deformasyon ya da kaplanmamış bir bölgenin bulunmadığı görülmektedir. Üretilen ince filmlerin ağaç dalları gibi kıvrımlı yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu kıvrımlı silindirik dallar, birbiriyle bağlanarak nano-çubuk yapılar oluşturmaktadır. Tavlama süreci boyunca film ve alttabaka termal genleşme katsayıları arasındaki farktan dolayı yapıda bir basma gerilimi oluşmaktadır. Bu basma gerilimi jelleşen ince filmlerin kıvrılmasına neden olmaktadır (Kwon ve ark., 2005). Ayrıca, tavlama sırasında uçucu bileşenlerin uzaklaşması ile kaplama yapısında oluşan gerilim gevşemesi de üretilen filmlerde kıvrımlı bir yüzey morfolojisine sebep olmaktadır. Çözelti hazırlanmasında kullanılan çinko asetat, çözücü etanol ve etanolamine gibi malzemelerin kombinasyonu nanoyapılı filmlerin yüzey morfolojisini etkilemektedir (Bu ve Cole, 2014). Literatürde Şekil 3’e benzer görüntülere sahip çalışmalar bulunmaktadır (Gültekin ve ark., 2016; Koç, 2021; Motla ve ark., 2024). Şekil 3’te görüldüğü gibi tavlama sıcaklığının artması ile nano-çubukların birbiriyle bağlanması artmış ve aralarında bulunan nano boyuttaki boşluklar kapanmıştır. ZnO filmleri artan sıcaklıkla birlikte daha homojen bir yapıya sahip olmaktadır.

Farklı sıcaklıklarda tavlanan ZnO filmlerin SEM cihazında alınan kesit alanı görüntülerinde film kalınlıkları 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C ve 550 °C tavlama sıcaklıkları için sırasıyla ortalama 407.096 nm-616.310 nm arasında belirlenmiştir. ZnO ince filmlerde düşük sıcaklıktan, yüksek tavlama sıcaklığına gidildikçe amorf fazdan kristal faza geçişi tam olarak gerçekleştiğinden film kalınlığı artmaktadır.



Şekil 3. Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan ZnO Filmlerin Yüzey Görüntüleri

Farklı tavlama sıcaklıklarında üretilen ZnO filmlerin fotolüminesans ölçümleri görünür bölgede ve oda sıcaklığında $\lambda=349$ nm lazer uyarması ile yapıldı. 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C ve 550 °C tavlanan filmlerin emisyon spektrumları Şekil 4’de verilmektedir. Şekil 4’e göre filmler benzer emisyon spektrumu göstermektedir. Filmler 385 nm ve 765 nm keskin bir pik gösterirken 450 nm ve 735 nm arasında geniş bir band göstermektedir. Filmlerin emisyon spektrumundaki bu pikler uyarma sonucunda filmlerde bulunan elektron-boşluk çiftinin yeniden birleşmesiyle oluşan yakın bant kenarı emisyonunu göstermektedir (Chang ve ark., 2017; Abisheva ve ark.,2024). Filmler yakın UV bölgesinde (385 nm) mor bir emisyonla sahiptir ve tavlama sıcaklığının artması ile piklerin konumunda değişme olmaksızın özellikle de 385 nm ve 765 nm’deki emisyon şiddetlerinde büyük bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu durum tüm filmler için bant aralığı geçişlerinden kaynaklanmaktadır (Dolai ve ark., 2017). Sonuç olarak; filmlerde tavlama sıcaklığı arttıkça kristal yapı iyileşmekte ve filmlerin emisyon şiddeti artmaktadır.



Şekil 4. Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan ZnO Filmlerin Emisyon Spektrumları

SONUÇ

Farklı sıcaklıklarda tavlanan ZnO filmler daldırılmalı kaplama cihazı kullanılarak üretildi ve yapısal, morfolojik ve optik özellikleri incelendi. XRD ölçümü sonuçları filmlerin 150 °C ve 250 °C'de amorf ve 350 °C, 450 °C ve 550 °C'de ise hekzagonal wurtzite yapıya sahip olduğunu gösterdi. Tavlama sıcaklığının artmasına bağlı olarak kırınım deseninde kırınım pikleri şiddetlerinin ve tanecik büyüklüğünün arttığı, ayrıca dislokasyon yoğunluğu ve örgü gerilimi değerlerinin azaldığı gözlemlendi. Bu değerler kristal yapı kalitesinin sıcaklığın artmasıyla iyileştiğini göstermektedir. SEM görüntülerine göre filmler ağaç dalları gibi kıvrımlı bir nano-çubuk yapıya sahiptir. Artan tavlama sıcaklıklarıyla birlikte nano-çubuklar arası boşluklar dolmuş ve üretilen ZnO filmler homojen bir yapıya sahip olmuştur. Fotolüminesans spektrumuna göre, filmler 385 nm ve 765 nm keskin bir pik, 450 nm ve 735 nm arasında geniş bir band göstermektedir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla piklerin konumları değişmedi. Fakat pik şiddetlerinde bir artış gözlemlendi ve filmler yakın UV bölgesinde mor renkte bir emisyon gösterdi. Sonuç olarak, XRD, SEM ve PL sonuçları birbirini desteklemektedir. Tavlama sıcaklığı arttıkça filmlerin kristal yapısı iyileşmekte ve mor emisyon şiddeti artmaktadır. Bu çalışmada üretilen ZnO ince filmler optoelektronik endüstrisindeki potansiyel uygulamalarda mor ışık yayan cihazlarda alternatif malzeme olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

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

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Abisheva, A. K., Afanasyev, D. A., Ilyassov, B. R., Aimukhanov, A. K., Kulbachinskii, V. A., & 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.
- Ahmad, A. A., Migdadi, A. B., Alsaad, A. M., Al-Bataineh, Q. M., & Telfah, A. (2021). Optical, structural, and morphological characterizations of synthesized (Cd–Ni) co-doped ZnO thin films. *Applied Physics A*, 127(12), 922.
- Altinolcek, N., Battal, A., Tavasli, M., Cameron, J., Peveler, W. J., Holly, A. Y., & Skabara, P. J. (2020). Yellowish-orange and red emitting quinoline-based iridium (III) complexes: Synthesis, thermal, optical and electrochemical properties and OLED application. *Synthetic Metals*, 268, 116504.
- Badrudin, S. I., Noor, M. M., Abd Samad, M. I., Zakaria, N. S. N., Yunas, J., & Latif, R. (2024). Eliminating surface cracks in metal film-polymer substrate for reliable flexible piezoelectric devices. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 50, 101617.
- Bouderbala, I. Y., Guessoum, A., Rabhi, S., Bouhlassa, O., & 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*, 130(3), 205.

- Bu, I. Y., & Cole, M. T. (2014). A highly conductive and transparent solution processed AZO/MWCNT nanocomposite. *Ceramics International*, 40(1), 1099-1104.
- Buzok, E. B., Yalcin, S., Demircan, G., Yılmaz, D., Aktas, B., & Aytar, E. (2024). The structural, optical, electrical and radiation shielding properties of Co-doped ZnO thin films. *Radiation Physics and Chemistry*, 222, 111840.
- Chang, Y. C., Guo, J. Y., Chen, C. M., Di, H. W., & Hsu, C. C. (2017). Construction of CuO/In₂S₃/ZnO heterostructure arrays for enhanced photocatalytic efficiency. *Nanoscale*, 9(35), 13235-13244.
- Chen, Y. (2018). Review of ZnO transparent conducting oxides for solar applications. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 423, 012170. Cheng, L. C., Brahma, S., Huang, J. L., & Liu, C. P. (2022). Enhanced piezoelectric coefficient and the piezoelectric nanogenerator output performance in Y-doped ZnO thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 146, 106703.
- Das, A., Das, A., Singha, C., & 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.
- Dolai, S., Dey, R., Das, S., Hussain, S., Bhar, R., & Pal, A. K. (2017). Cupric oxide (CuO) thin films prepared by reactive dc magnetron sputtering technique for photovoltaic application. *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 456-464.
- Fan, Q., Li, D., Li, J., & Wang, C. (2020). Structure and piezoelectricity properties of V-doped ZnO thin films fabricated by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 829, 154483.
- Govindaraj, M., Babu, S., Rathinam, R., Vasini, V., & Vijayakumar, K. (2023). Integrated electrocoagulation–photoelectrocatalytic oxidation for effective treatments of aqueous solution bisphenol-A using green-synthesized ZnO nanoparticles. *Chemical Papers*, 77(1), 169-183.
- Gültekin, D., Kayış, F., & Akbulut, H. (2016). ZnO ince film kaplamaların kıvrımlı ağ morfolojisinin incelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 25-28.
- Handani, S., Putra, I. J., Emriadi, E., Dahlan, D., & Arief, S. (2024). Improved Physical Properties of Green Fabricated ZnO Thin Films by Annealing Temperature. *ChemistrySelect*, 9(2), e202302868.
- Hossain, G. M., Jalal, A. H., Pala, N., & Alam, F. (2024). Advancements in glucose monitoring: A thin film ZnO-nanoflakes based highly sensitive wearable biosensor for noninvasive sweat-based point-of-care monitoring for diabetes. *ECS Transactions*, 113(13), 35.
- Jain, S., Medlin, W., Uprety, S., Isaacs-Smith, T., Olsson, T., Davis, J., & Laurent, G. M. (2024). Nanosecond-laser annealing of zinc oxide thin-films: The effect of the laser wavelength and fluence. *Thin Solid Films*, 791, 140236.
- Kanagamani, K., Muthukrishnan, P., Kathiresan, A., Shankar, K., Sakthivel, P., & Ilayaraja, M. (2021). Detoxication and theranostic aspects of biosynthesised zinc oxide nanoparticles for drug delivery. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 34, 729-740.
- Kavitha, B., Nirmala, M., Poornachandra, S., & Pavithra, M. (2017). Preparation and characterization of CdO thin films prepared by chemical method. *J Environ Nanotechnol*, 6(1), 59-66.
- Koç, M. (2021). Ultrasonik sprej piroliz ile üretilen ZnO ince filmlerin altaş sıcaklıklarının yapısal ve optik özelliklerine etkisi. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 16(1), 169-178.

- Korbutyak, D. V., Lytvyn, O. S., Fedorenko, L. L., Matiuk, I. M., Kolomys, O. F., Oberemok, O. S., & Evtukh, A. A. (2024). Photoluminescence spectra of nanocrystalline ZnO films obtained by magnetron deposition technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(8), 583.
- Kwon, S. J., Park, J. H., & Park, J. G. (2005). Wrinkling of a sol-gel-derived thin film. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(1), 011604.
- Madadi, M., Heikkinen, M., Philip, A., & Karppinen, M. (2024). Conformal high-aspect-ratio solid electrolyte thin films for li-ion batteries by atomic layer deposition. *ACS Applied Electronic Materials*, 6(3), 1574-1580.
- Motla, A., Kumaravelu, T. A., Dong, C. L., Chen, C. L., Asokan, K., & Annapoorni, S. (2024). Role of annealing environments on the local electronic and optical properties of zinc oxide films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(4), 267.
- Shanmugapriya, V., Arunpandiyam, S., Hariharan, G., Bharathi, S., Selvakumar, B., & Arivarasan, A. (2023). Enhanced supercapacitor performance of ZnO/SnO₂: rGO nanocomposites under redox additive electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, 935, 167994.
- Sharma, H., Kumar, S., Yadav, J., Prasad, J., & 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.
- Shkir, M., Khan, M. T., & Khan, A. (2024). Impact of Mo doping on photo-sensing properties of ZnO thin films for advanced photodetection applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 985, 174009.
- Stolyarchuk, I., Kuzyk, O., Dan'kiv, O., Dziedzic, A., Kleto, G., Stolyarchuk, A., & Hadzaman, I. (2023). Growth of Zn_{1-x}Ni_xO Thin Films and Their Structural, Optical and Magneto-Optical Properties. *Coatings*, 13(3), 601.
- Subramanyam, T. K., Uthanna, S., & Naidu, B. S. (1998). Preparation and characterization of CdO films deposited by dc magnetron reactive sputtering. *Materials Letters*, 35(3-4), 214-220.
- Suganya, L., Balamurugan, K. S., Sivakami, A., Sakthivel, P., Asthana, N., & Sundaresan, B. (2024). Ferromagnetic, optical and photoluminescence behavior of Ni-doped ZnO thin films. *Topics in Catalysis*, 67(1), 3-16.
- Thomas, A., Thirumalaisamy, L., Madanagurusamy, S., & Sivaperuman, K. (2024). Switching the selectivity of ZnO thin films for ultra-sensitive acetaldehyde gas sensors through Co doping. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 401, 135043.
- Yadav, R. P., & Rai, K. B. (2023). Tailoring of ZnO thin films: effect of number of coating and sample ageing. *International Journal of Mathematics and Physics*, 14(2), 95-102.
- Wasman, K. M., & Hamadameen, B. (2022). Review of optoelectronic properties of ZnO photodetector. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, 5(1), 9-21.
- Xue, D., & Ratajczak, H. (2003). Constituent chemical bonds and nonlinear optical coefficients of Na₂SeO₄·H₂SeO₃·H₂O molecular crystal. *Chemical physics letters*, 371(5-6), 601-607.