

SPİN KAPLAMA TEKNİĞİ İLE ELDE EDİLEN KATKISIZ VE AL KATKILI ZNO İNCE FİLMLERİN OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF UNDOPUTED AND AL-DOPPED ZNO THIN FILMS OBTAINED BY SPIN COATING TECHNIQUE

Mehdi TONKA

Öğr. Gör., Şırnak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Optisyenlik Programı,
Şırnak/Türkiye
İstanbul Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, İstanbul/Türkiye(Doktora öğrencisi)
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2493-4345>

Osman ÜRPER

Dr. Öğr. Üyesi, Departman of Micro and Nano System Technology, University of South-Eastern,
Norway, ORCID ID: 0000-0002-9681-3035

Feyza Güzelçimen

Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi , Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, İstanbul/Türkiye
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8453-9975>

Nilgün BAYDOĞAN

Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversite, Enerji Enstitüsü, Ayazağa Kampüsü, Maslak, İstanbul/Türkiye
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9843-1615>

ÖZET

Ekonomik koşulların ve çevresel faktörlerin etkisiyle alternatif enerji kaynakları arayışları bilim dünyasında önemli bir yer edinmiştir. Enerji tüketimi kaçınılmaz olarak artmış olup, sentez tekniklerinin kalitesinin artması bilim ve teknolojiye gelişmelere bağlıdır. Güneş ışığı, güneş hücreleriyle birlikte termal veya elektrik enerjisine dönüştürülen en temiz ve en bol yenilenebilir enerji kaynağıdır. Şeffaf iletken oksit (TCO) ince filmler, uygun elektro-optik özellikleri nedeniyle güneş hücrelerinin ön tarafında yaygın olarak kullanılmaktadır. ZnO (saf ve katkılı) gibi toksik olmayan TCO'lar, uyarlanabilir elektronik uygulamalar için üstün ilgi görmüştür. Saf ve farklı oranlarda Al katkılı ZnO ince film, uygun maliyetli ve basit bir yöntem olan sol-jel döndürerek kaplama tekniği kullanılarak düşük hacimli çözeltiyle soda kireç camı üzerinde üretildi. Optimum tavlama sıcaklığı 700 °C' 1 saat süreyle kristal ince film katmanları elde edilmiştir. Optik geçirgenlik ve yapısal özellikler, saf ve farklı oranlarda Al katkılı ince filmler sistematik olarak karşılaştırılarak incelenmiştir. Al katkılı ZnO ince filmlerin (002) kırınım düzlemi boyunca tercihli bir yönelim sergilediği görülmüştür. Al katkılı atomların etkisi, ZnO kafes yapısının yeniden düzenlenmesine ve tane büyümesinin desteklenmesine yol açtı. Dolayısıyla taneler arasındaki tane sınırı azaldı ve kafesteki düzensizlikler ve kusurlar azaldı. Görünür aralıkta % 85'in üzerinde geçirgenlik sergileyen optik şeffaflık ve kritik üretim parametreleri sol-jel döndürerek kaplama tekniği ile edilen ZnO ince filmin ticarileştirilmesiyle uygun yatırım olanağını göstermiştir. Artan Al konsantrasyonu nedeniyle, filmlerin UV soğurma kenarı maviye kayma gösterdi ve buda enerji bant aralığının genişlemesine neden olmuştur. Yapısal ve mikroelektronik özellikler XRD analiz edilmiştir. XRD analizi sonucunda ZnO:Al altıgen wurtzite kristal yapısı sergilediği görülmüştür. Artan Al konsantrasyonuna bağlı olarak atomların çapları arasındaki fark nedeniyle filmin kristalliği bir miktar azaldı. Öte yandan tavlama sıcaklığının artmasıyla tanecikler arasındaki tane sınırı azalmıştır. Bu çalışmada, ZnO ince filmlerin mikroelektronik cihazlarda ve güneş enerjisi sistemlerinde daha verimli kullanılmasının ve nispeten daha uygun maliyetli bir kaplama teknolojisinin araştırılması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: ZnO ince filmler, Sol-jel tekniği, Güneş hücresi, Döndürerek kaplama

ABSTRACT

With the influence of economic conditions and environmental factors, the search for alternative energy sources has gained an important place in the scientific world. Energy consumption has inevitably increased, and the improvement in the quality of synthesis techniques depends on developments in science and technology. Sunlight is the cleanest and most abundant renewable energy source, converted into thermal or electrical energy by solar cells. Transparent conductive oxide (TCO) thin films are widely used on the front side of solar cells due to their favorable electro-optical properties. Nontoxic TCOs such as ZnO (pure and doped) have received outstanding attention for adaptive electronic applications.

Pure and Al-doped ZnO thin film at different ratios was produced on soda-lime glass with a low volume solution using the sol-gel spin coating technique, which is a cost-effective and simple method. Crystalline thin film layers were obtained at the optimum annealing temperature of 700 °C for 1 hour. Optical transmittance and structural properties were investigated by systematically comparing pure and Al-doped thin films at different ratios. It has been observed that Al-doped ZnO thin films exhibit a preferential orientation along the (002) diffraction plane. The influence of Al doped atoms led to the rearrangement of the ZnO lattice structure and promoted grain growth. Therefore, the grain boundary between the grains decreased and the irregularities and defects in the lattice decreased.

Optical transparency and critical production parameters, which exhibit a transmittance of over 85% in the visible range, have shown a suitable investment opportunity with the commercialization of ZnO thin film obtained by sol-gel spin coating technique. Due to increasing Al concentration, the UV absorption edge of the films showed a blue shift, which caused the energy band gap to widen. Structural and microelectronic properties were analyzed by XRD. As a result of XRD analysis, it was seen that ZnO:Al exhibited hexagonal wurtzite crystal structure. Due to the increasing Al concentration, the crystallinity of the film decreased slightly due to the difference between the diameters of the atoms. On the other hand, as the annealing temperature increased, the grain boundaries between the particles decreased.

In this study, a more efficient use of ZnO thin films in microelectronic devices and solar energy systems and a relatively more cost-effective coating technology were investigated.

Keywords: ZnO thin films, Sol-gel technique, Solar cell, Spin coating.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların ekonomik koşulları ve çevresel faktörlerin etkisiyle alternatif enerji kaynakları arayışları bilim dünyasında önemli bir yer edinmiştir. Alternatifler arasında yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi en güçlü adaylardan biridir. Çünkü dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisi miktarı 120.000 TW civarındadır. Bu devasa enerji kaynağının çok küçük bir kısmı bile yarıiletkenlerin sentez şartlarına bağlı olarak alternatif ve kullanılabilir enerji formlarına dönüştürülebilse enerji ihtiyacı konusundaki endişeleri ortadan kaldıracaktır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında oldukça önemli bir yere sahip olan güneş enerjisinin elektrik üretimindeki payı her geçen gün artmakta ve yarı iletken katmanların sentezine yönelik bilimsel çalışmalar önem kazanmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan fotovoltaik cihazlar üzerine düşen güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürür [18].

Yarı iletken katmanların sentez parametreleri, fotovoltaik cihazlardaki potansiyel uygulamalar için yapıyı etkilemiştir. Güneş ışığının elektriğe dönüştürülmesi, fotovoltaik bilimi ve teknolojisi ile güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle ilgili olarak uzun yıllardır çalışılmaktadır. Yarı iletken katmanların sentez parametrelerindeki gelişmelere bağlı olarak güneş hücrelerin üretim teknikleri ve enerji dönüşüm verimliliği de artmaktadır [9-13].

Şeffaf iletken oksit (TCO) ince filmler, uygun elektro-optik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Görünür aralıkta (%80-90) yüksek optik geçirgenliğe sahiptir. ZnO'nun optimum

optik kaybı ve elektriksel iletkenliği, zehirli olmaması ve ucuz olması gibi özelliklerinden dolayı son zamanlarda üzerinde yoğun olarak çalışılmasının önünü açmıştır [13-19].

Gelecek vaat eden yarı iletken metal oksitlerden biri olan Çinko Oksit (ZnO), optoelektronik özelliklerinden dolayı büyük ilgi görmüştür. ZnO, geniş bir doğrudan bant aralığı (3,3 eV) ve büyük eksiton bağlanma enerjisi (60 meV) bu da bir malzemenin oda sıcaklığında bulunabileceği anlamına gelir. ZnO, optoelektronik uygulamalara katkı sağlamak için büyük bir potansiyele sahip olup ışık yayan diyotlar, gaz sensörleri, transistörler ve güneş pilleri gibi yarı iletken uygulamalarda benzersiz özelliklere sahiptir. ZnO, yüksek optik şeffaflık, düşük elektriksel direnç ve kimyasal stabilite gibi mükemmel ve çeşitli özelliklere sahiptir. ZnO'nun optik özelliklerinin artırılması, yeni nanoyapıların geliştirilmesi için kristal özelliklerinin kontrolü ile gerçekleştirilir. Saf ZnO filmleri n-tipi yarı iletken görevi görür [19-23]. Katkı elemanları (Al, Ga gibi), filmlerin optoelektronik performansını arttırmak için yapısal özellikleri daha uygun hale gelmesini sağlar. Al, doğada bolca bulunmasından dolayı düşük maliyetli olması nedeniyle daha çekici hale gelen katkı maddesi olarak sol-jel bazlı ince filmler için en iyi adaylardan biridir [23-26].

İnce filmleri hazırlamak için sprey pirolizi, magnetron püskürtme, buhar biriktirme tekniği, atomik katman biriktirme ve sol-jel tekniği gibi çeşitli teknikler kullanılır. Bu teknikler ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerini etkiler. Kontrol edilebilir biriktirme, düşük direnç ve yüksek optoelektronik özellikler aktif katman kalınlığı, üretim tekniği ve optik özellikler elektronik cihaz uygulamalarında yüksek verimlilikleri nedeniyle önemli bir rol oynamaktadır. Düşük maliyeti, kalınlık kontrolünün basitliği, geniş alan uygulamaları ve kolay kontrol edilebilir prosesi nedeniyle sol-jel tekniği yarı iletken cihazların hazırlanmasında en kullanışlı tekniklerden biridir. Sol-jel kaplama işlemi çevre kirliliğinin önlenmesinde birçok avantaj sağlamıştır. Düşük sıcaklıklarda enerji tasarrufu sağlayan saf ince filmler ve düşük üretim maliyetleriyle homojen filmler elde etmek mümkündür [26-27].

ZnO:Al ince film yapısı, sol-jel daldırılmalı kaplama tekniği ile türetilen ince film, oksidasyon koşullarından kaçınılarak şeffaf ince filmin gerekli optik özelliklerine sahip olduğundan, fotonları seçici olarak absorbe etme konusunda optimum yeteneğe sahiptir. İnce filmin dielektrik fonksiyonu ile yapısal morfolojisi arasındaki güvenilir korelasyon, sol-jel tekniği kullanılarak Al miktarının hassas kontrolü ile gösterilebilmiştir. Polikristal yapıda Al katkısının etkisi ile optik hassasiyetin kontrol altına alınmasıyla ince filmin iletkenliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada fotovoltaiik katmanın uygulamalarda kullanılması için optimize edilmiş koşullar ile düşük maliyetli sol-jel döndürmeli kaplama tekniği kullanılarak ince film örneklerinin sentezlenmesi mümkün olmuştur. Al katkısının ZnO yapısı üzerindeki etkisi, saf ZnO filmlerin optik özellikleri ve yüzey özellikleri dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, Al:ZnO ince film üzerine optoelektronik uygulamalar alanında uygulamalı araştırmalara öncülük etmek ve optoelektronik özelliklere sahip yapısal değişiklikler, farklı atmosferik koşullar altında türetilen Al:ZnO'nun yapısal değişikliklerinin karşılaştırmalı analizine bağlı olarak farklı oranlarda Al katkılanan numunelerin yapısal özellikleri hakkında deneysel bilgiler sunmaktır [26-32].

2. DENEYSEL KISIM

Sentez işleminin optimizasyonu fotovoltaiik malzemelerde yüksek performans sağlayabilir. Bu nedenle sentezlenen çözelti örnekleri bu çalışmada sol-jel yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Al: ZnO filmleri, Zn öncüsü olarak çinko asetat dehidrat [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$] (başlangıç kimyasalı, ~%99.5 saflık), çözücü olarak etanol, Al kaynağı olarak Alüminyum nitrat [$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$] kullanılarak sol-jel işlemiyle üretildi. Zn (0.5 M) etanol içerisinde çözüldü ve çözünme işlemi sırasında katalizör aktivitesi sergileyen bir stabilizatör olarak DEA (Dietanolamin) ilave edildi. Karışım, şeffaf bir çözelti elde edilene kadar bir karıştırıcı üzerinde 60°C'de karıştırıldı. Dört farklı Al konsantrasyonu (%0,8–1,0–1,2–1,6) gerçekleştirilmiştir. Çözelti oda sıcaklığında 24 saat bekletildi. İnce filmler hazırlamak için, temizlenmiş altlıklar yedi kez bir çözeltiye daldırılarak oda sıcaklığında oksijen içerisinde ince film katmanları elde edildi. Ön ısıtma işlemi, çözücünün ve kimyasal inorganiklerin buharlaştırılması için bir fırında 300 C'de oksijen içerisinde 10 dakika süreyle

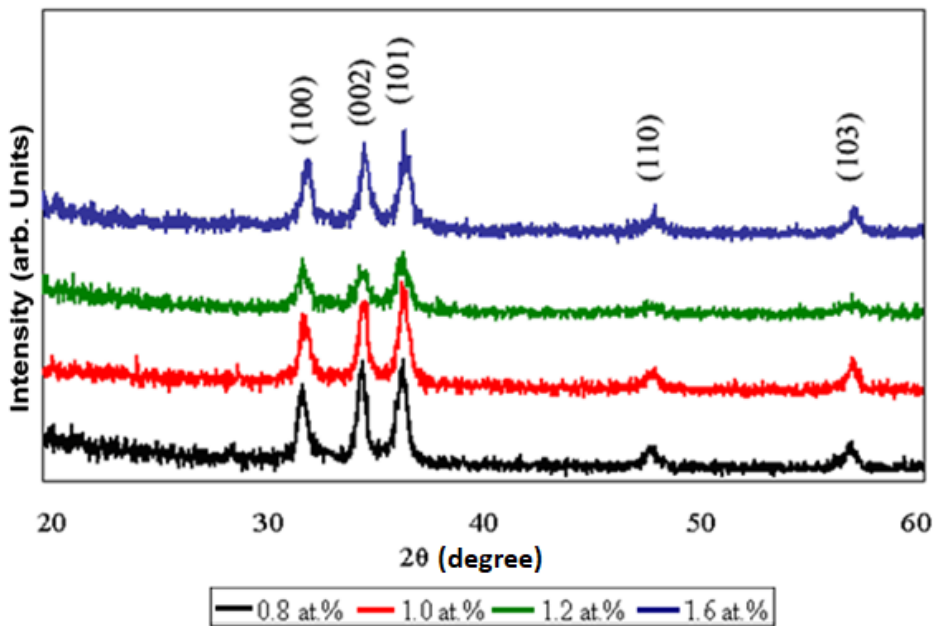
uygulandı. Her katman için işlem yedi kez tekrarlandı ve oksijen ve nitrojen atmosferik koşullarda 550, 600, 700 ve 800 °C'de 60 dakika süreyle tavlandı.

Sentezlenen yarı iletken ince film katmanları, bu fotovoltaiik malzeme (ince film katmanları gibi) ışığı emen ve elektrik üreten bir yarı iletken malzeme olduğundan, filmlerin yapısal ve optik özelliklerini analiz etmek için çeşitli karakterizasyon teknikleri ile karakterize edildi. Yapısal özellikler, 20-600 aralığında XRD desenleri, Cu K α radyasyonu ($\lambda=1,5418\text{\AA}$) yoluyla X-ışını Difraktometresi (XRD) ile kaydedildi. Yüzey morfolojisi ve parçacık dağılımı JEOL 6335F SEM ile karakterize edildi. Kalınlık ölçümü yüzey profilometresi (Veeco Dektak-6 M) ile yapıldı. Ayrıca SEM kesit özellikleri ile film kalınlığı hesaplanmıştır [30-32].

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

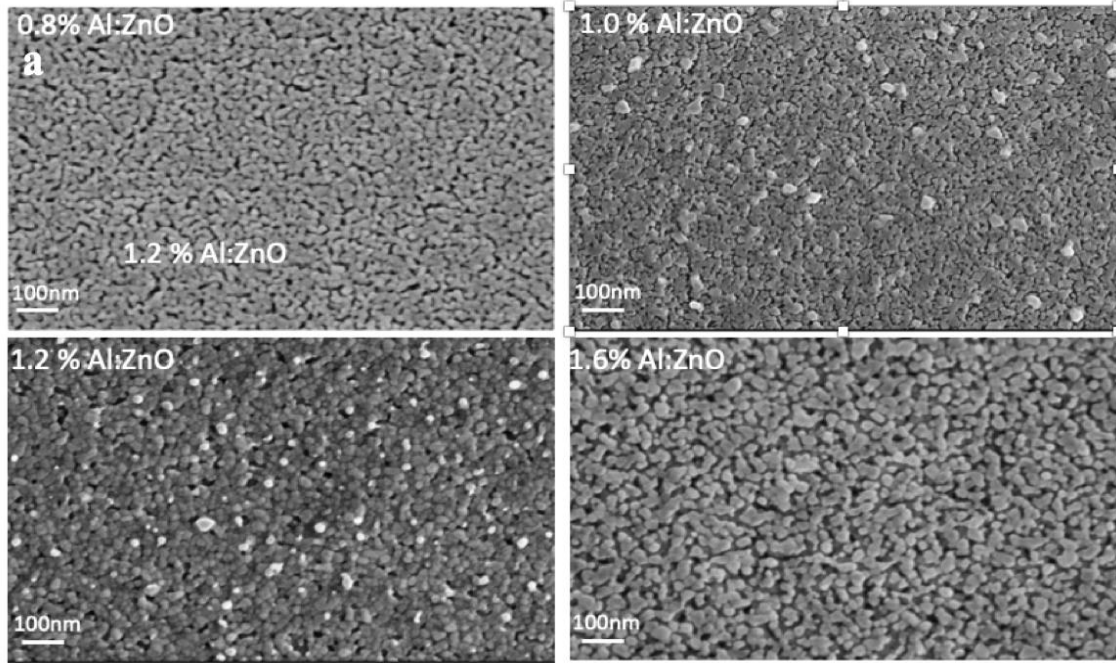
Şekil 1.a' da 700°C'de optik geçirgen substrat üzerinde biriktirilen, çeşitli Al katkıları (%0,8–1,0–1,2–1,6) dahil olmak üzere çinko oksit ince filmlerin XRD desenlerini gösterir. Kırınım zirveleri (1 0 0), (0 0 2) ve (1 0 1) düzlemleri, standart kırınım desenine yakın olan wurtzite ZnO ile eşleştiği görülmüştür (JCPDS Kart No. 80-00075). (0 0 1) ve (0 0 2)'deki kırınım tepe noktalarının yoğunluğu, c eksenini tercih edilen yönelimini sergiler. Bununla birlikte, farklılığa bağlı olarak Al katkı konsantrasyonunun artmasıyla pik yoğunluğu azalmıştır. Alüminyum ($r_{\text{Al}^{3+}}=0,053\text{nm}$) ve çinko ($r_{\text{Zn}^{2+}}=0,074\text{nm}$) iyonlarının atom yarıçapları arasındaki farktan dolayı Al konsantrasyonu arttıkça piklerin şiddetinin azaldığı varsayılmıştır. Katkılı ZnO filmlerin altıgen wurtzit yapısı, Zn²⁺ iyonlarının yerini Al³⁺ iyonları aldığı kademeli olarak değiştiği görülmüştür. XRD analiz sonuçlarından elde edilen kristal boyutu Debye-Scherrer yöntemine göre belirlendi. Kristal boyutu ile X-ışını kırınım deseni yoğunluğu arasında bir ilişki mevcuttur ve kalınlıkla birlikte artan (0 0 2) kırınım düzleminin katman sayısı ve kırınım yoğunluğu arasında bir ilişki mevcuttur. (0 0 2) kırınım zirvesi özellikleri, bağıl yoğunluk kullanılarak analiz edildi. $i(0\ 0\ 2) = I(0\ 0\ 2)/[I(1\ 0\ 0) + I(0\ 0\ 2) + I(1\ 0\ 1)]$.

Sol-jel işlemiyle sentezlenen nanopartiküllerin parçacık boyutu, reaktanların konsantrasyonu (öncü ve çözücü miktarları hassas bir şekilde ölçülmüş) tarafından kontrol edildiğinden, öncül çözeltilerin stokiometrisinin mükemmel kontrolünü ve bileşim modifikasyonunun kolaylığını sundu. Reaktanlar, elde edilen ZnO filmlerin kristalografik yönelimini ve morfolojisini güçlü bir şekilde etkiledi. Çözeltideki mol ve atom gramı için katalizör konsantrasyonu (alüminyum (Al) katkı ZnO) sol-jel daldırma tekniğiyle ölçüldü. Dolayısıyla ortalama kristal boyutundaki değişiklikler bağıl yoğunluğa bağlı olarak pratik olarak değerlendirilmiştir. Parçacık boyutundaki değişiklikleri katkı maddesi konsantrasyonu ile açıklamaktadır.



Şekil 1. Farklı Al konsantrasyonlarında Al: ZnO ince filmlerinin XRD analizi.

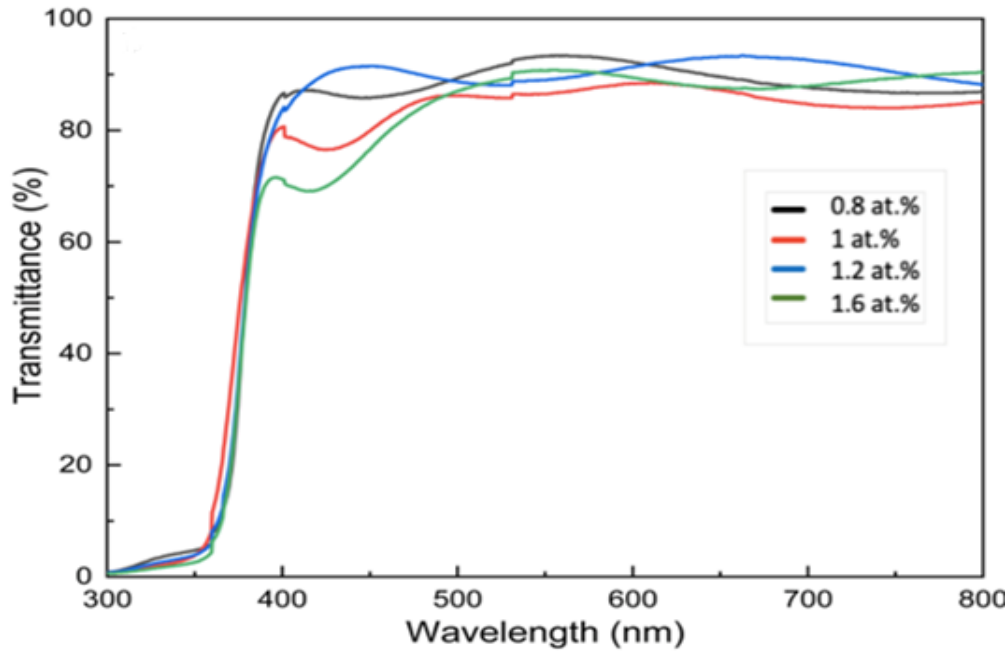
Şekil 2, 700 C'de atmosfer koşullarında tavlanan ince filmlerin farklı Al konsantrasyonlarına göre SEM görüntülerini göstermektedir. Artan Al konsantrasyonu tane boyutunu küçülterek yüzeyde %1,6'ya kadar boşluklara ve iğne deliklerine neden oldu. Tane boyutu % 0,8 numunede en büyüktür. Ancak tane boyutu %1,2' nin biraz üzerinde azaldı. Al katkılı filmler karşılaştırıldığında %0,8 numune daha yoğun ve daha büyük tanelere sahiptir. Dectac 2 profilometre marka yüzey profilometresi ile yapılan ölçümlerde, ince film kalınlıkları yaklaşık 250 nm tespit edilmiştir. Scherrer denklemi, XRD analizinden elde edilen sonuçlar kullanılarak değerlendirildiğinde, Al katkı miktarındaki artışa bağlı olarak, ortalama kristalit büyüklüklerinde oluşan değişimler tespit edilmiştir. Tavlama işleminden sonra nanokristal küresel Al:ZnO parçacıkları elde edildi. Parçacıkların ortalama boyutu 41 nm (nitrojende) ve 28 nm (oksijende) olarak Scherre (%0,8 ile %1,0). Yüksek katkı maddesi içeriği ile mikro yapı yoğunluğu arttı. Artan katkı konsantrasyonuna bağlı olarak tane boyutu küçültülmüş ve gözenek sayısı azalan küçük tane elde edilmiştir. Birçok gözenek, elektron-delik kaynakları ve substrat arasındaki elektron-delik geçişi veya blokajı için oldukça önemlidir. Ancak film bile 700°C'de iyi düzenlenmiş tanecik sınırı sergiliyor; film 800 C – 900 C sıcaklıkta trapez kristali gibi davranmıştır (%1,2 ile %1,6).



Şekil 2. Farklı Al katkı konsantrasyonlarında katkılı ZnO ince filmlerin SEM görüntüleri.

Şekil 3, filmlerin 190-900 nm aralığındaki ortalama görünür geçirgenliğini göstermektedir. Tüm filmler %85 civarında yüksek geçirgenliğe ve daha düşük yansımaya sahiptir. Filmin geçirgenliği ve yansıması, Şekil 3'te gösterildiği gibi Al konsantrasyonundan kademeli olarak etkilenir.

Bu çalışmanın sonuçları, sentez koşullarının geliştirilmesinin, bu yarı iletkenin fotovoltaik güneş pillerinde kullanılmak üzere üretilmesine katkı sağladığını göstermiştir. Şeffaf iletken oksit tabakası optik özelliklerinden dolayı güneş pili üretiminde kullanılan yarı iletkenlerdir. Optoelektronik cihazların üretiminde kullanılan bu şeffaf iletken oksit, bu filmlerin üretiminde ve geliştirilmesinde kullanılmış ve daha çok ZnO filmleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Sentezlenen ince filmin konsantrasyonunun nedeni, yüksek kristalli ZnO (wurtzite) yapısının bu çalışmada pratik ve ucuz bir şekilde elde edilen nano küreler gibi morfolojilere sahip olmasıdır.



Şekil 3. Farklı Al miktarlarına sahip ZnO:Al ince filmlerinin 700 °C'de oksijende optik geçirgenliği.

4. SONUÇ

Sol-gel tekniği kullanılarak sentezlenerek Al:ZnO solüsyonu oluşturulmuş ve sol-jel daldırma kaplama yöntemi kullanılarak ince film tabakalar oluşturulmuştur. Böylece, optoelektronik uygulamalar için uygun olacak şekilde oluşturulmuştur. XRD analizlerinde, altıgen wurtzite yapısına sahip olduğu tespit edilen ince film numunelerin, spektrofotometre kullanılarak yapılan ölçümlerde, optik geçirgenliği görünür bölgede, %85'ten daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Al konsantrasyonunun artmasıyla bant aralığı enerjisi 3,29 eV'den 3,38 eV'ye çıkmıştır. En düşük direnç 0,73 ile 0,93 10^4 X.cm arasında elde edilmiştir. Düşük dirençli (0,73 x 10^4 X.cm) ince film, basit ve ucuz bir yöntemle türetilen optoelektronik cihazlar için umut verici bir şekilde uygulandı.

Bu çalışmada sentezlenen AZO film katmanları, bu özelliğiyle kısa dalga boylarında çalışan optoelektronik uygulamaların büyük önemini ortaya koymuştur. Bu çalışmanın sonuçları, AZO film katmanlarının sentez koşullarının, Al gibi uygun katkı maddeleri kullanılarak optik ve yapısal özelliklerinin iyileştirilmesinin mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

Artan Al konsantrasyonu (%1.2) film yüzeyindeki boşlukların ve zıt yönlerdeki iğne deliklerinin azalmasına neden oldu ve bu da filmlerin delik engelleme özelliklerini engelledi. Tüm filmler görünür bölgede yüksek şeffaflık sergiledi. Tavlama işleminin Al katkı konsantrasyonunun artırılması filmin şeffaflığını biraz etkiledi. Özellikle ultraviyole bölgede atomların ve elektromanyetik dalgaların etkileşiminin yüksek olduğu ince film yüksek absorpsiyon sağlarken görünür bölgede filmler düşük etkileşim ve güçlü şeffaflık gösterdi. Sonuç olarak, Al katkılı ZnO ince filmler, optik cihazlarda kullanım için potansiyel bir aday olarak pratik uygulamalar için yüzeyin ve optik sabitlerin (%1,2'de) geliştirilmesini sağlamıştır.

5. KAYNAKÇA

- [1] R. T. Zaera., J. Elias, C. L.-Clément, ZnO nanowire arrays: Optical scattering and sensitization to solar light, *Applied Physics Letters* 93 (2008): 3040054. DOI: 10.1063/1.3040054
- [2] H. Fan., Y. Zhen, X. Cheng, W. Xinqiang, Y. Zhichao, Effects of Na Doping on Structural, Optical, and Electronic Properties of ZnO Thin Films Fabricated by Sol–Gel Technique, *Journal of electronic materials* 47 (2018): 3847-3854, DOI: 10.1007/s11664-018-6258-x

- [3] N. Saito., H. Haneda, T. Sekiguchi, N. Ohashi, I. Sakaguchi, K. Koumoto, Low-Temperature Fabrication of Light-Emitting Zinc Oxide Micropatterns Using Self-Assembled Monolayers, *Advanced Materials* 14 (2002): 418-421, DOI: 10.1002/1521-4095(20020318)14:63.0.co;2-K
- [4] M. Hjjiri., L.El Mira, S.G. Leonardi, A. Pistone, L. Mavilia, G. Neric, Al-doped ZnO for highly sensitive CO gas sensors, *Sensors, and Actuators B: Chemical* 196 (2014): 413-20, DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.068.
- [5] D. C. Look., B. Claflin, p-type doping and devices based on ZnO, *Basic Solid State Physic* 241 (2004): 624-630, DOI: 10.1002/pssb.200304271.
- [6] J.H. Lim., C.K. Kang, K.K. Kim, I.K. Park, D.K. Hwang, S.J. Park, UV Electroluminescence Emission from ZnO Light-Emitting Diodes Grown by High-Temperature Radiofrequency Sputtering, *Advanced Materials* 18 (2006): 2720-2724, DOI: 10.1002/adma.200502633.
- [7] D.M. Bagnall, Y.F. Chen, Z. Zhu, and T. Yao, Optically pumped lasing of ZnO at room temperature, *Applied Physic Letters* 70 (1997): 118824, DOI: 10.1063/1.118824
- [8] T. K. Gupta., Application of zinc oxide varistors, *American Ceramic Society* 73 (1990): 1817-1840, DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x.
- [9] Z. Zhou., K.Kato, T.Komaki, M.Yoshino, H.Yukawa, M.Morinaga, K.Morita, Effects of dopants and hydrogen on the electrical conductivity of ZnO, *Journal of the European Ceramic Society* 24 (2004): 139-146, DOI: 10.1016/S0955-2219(03)00336-4.
- [10] W. Tang., D.C. Cameron, Aluminium-doped zinc oxide transparent conductors deposited by the sol-gel process, *Thin Solid Films* 238 (1994): 83-87, DOI: 10.1016/0040-6090(94)90653-X.
- [11] M. Jin., J.Feng, Z. De-heng, M. Honglei, L. Shu-ying, Optical and electronic properties of transparent conducting ZnO and ZnO:Al films pre-pared by evaporating method, *Thin Solid Films* 357 (1999): 98-101, DOI: 10.1016/S0040-6090(99)00357-0.
- [12] G. Luka., T. A. Krajewski B. S. Witkowski. E. Guziewicz M. Godlewski, Aluminium-doped zinc oxide films grown by atomic layer deposition for transparent electrode applications, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 22 (2011): 1810-1815, DOI 10.1007/s10854-011-0367-0.

- [13] J. G. Lu., Y. Z. Zhang, Z. Z. Yea, Y. J. Zeng, H. P. He, L. P. Zhu, J. Y. Huang, L. Wang, J. Yuan, B. H. Zhao, and X. H. Li, Control of *p*- and *n*-type conductivities in Li-doped ZnO thin films, *Applied Physics Letters* 89 (2006): 112113, DOI: 10.1063/1.2354034.
- [14] S.J. Jiao., Y.M. Lu, D.Z. Shen, Z.Z. Zhang, B.H. Li, Zh.H. Zheng, B. Yao, J.Y. Zhang, D.X. Zhao, X.W. Fan, Donor–acceptor pair luminescence of nitrogen doping *p*-type ZnO by plasma-assisted molecular beam epitaxy, *Journal of Luminescence* 122 (2007): 368-370, DOI: 10.1016/j.jlumin.2006.01.192.
- [15] C. Wang., C. Wang, Z. Ji, J. Xi, J. Du, Z. Ye, Fabrication and characteristics of the low-resistive *p*-type ZnO thin films by DC reactive magnetron sputtering, *Materials Letters* 60 (2006): 912-914, DOI: 10.1016/j.matlet.2005.10.057.
- [16] L. Znaidi., T. Chauveau, A.Tallaire, F.Liu, M.Rahmani, V.Bockelee, D.Vrel, P.Doppelt, Textured ZnO thin films by sol–gel process: Synthesis and characterizations, *Thin Solid Films* 617 (2016): 156-160, DOI: 10.1016/j.tsf.2015.12.031.
- [17] D.J. Winarski., D. J. Winarski, W. Anwand, A. Wagner, P. Saadatkia, F. A. Selim, M. Allen, B. Wenner, K. Leedy, J. Allen, S. Tetlak, D. C. Look, Induced conductivity in sol-gel ZnO films by passivation or elimination of Zn vacancies, *AIP Advances* 6 (2016): 4962658, DOI: 10.1063/1.4962658.
- [18] L. Znaidi., T. Touam, D. Vrel, N. Souded, S. B. Yahia, O. Brinza, A. Fischer, A. Boudrioua, AZO thin films by sol-gel Process for Integrated Optics, *Coatings* 3 (2013):126-139, DOI: 10.3390/coatings3030126.
- [19] Z. Zhou., et al., Effects of hydrogen doping through ion implantation on the electrical conductivity of ZnO, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29 (2004): 323-327, DOI: 10.1016/S0360-3199(03)00213-1.
- [20] R. Swanepoel., et al., Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, *J. Physic. E*, 16 (1983):1214, DOI: 10.1088/0022-3735/16/12/023.

- [21] B.D. Cullity., Elements of X-ray diffraction, *third edition, Prentice-Hall*, 2001, ISBN 0-201-01174-3.
- [22] C. Guillen., J. Herrero, Optical, electrical, and structural characteristics of Al:ZnO thin films with various thicknesses deposited by DC sputtering at room temperature and annealed in air or vacuum, *Vacuum* 84 (2010): 924-929, DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.12.015.
- [23] N. Baydogan., O. Karacasu, H. Cimenoglu, ZnO:Al thin films used in ZnO: Al/p-Si heterojunctions, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 61 (2012): 620-627, DOI: 10.1007/s10971-011-2668-4.
- [24] O Urper., N. Baydogan, Influence of structural changes on electrical properties of Al:ZnO films, *Materials Letters* (2019): 126641, DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126641.
- [25] O. Urper., O. Karacasu, H. Cimenoglu, N. Baydogan, Annealing ambient effect on electrical properties of ZnO:Al/p-Si heterojunctions, *Superlattices and Microstructures* 125 (2019): 81-87, DOI: 10.1016/j.spmi.2018.10.027.
- [26] H. Tugral Arslan, O. Urper, T. Ozdurmusoglu, C. Arslan, N Baydogan, Optical Model of Sol-Gel Derived Al:ZnO Thin Film, *Acta Scientific Ophthalmology* 10:2 (2019):12-15.
- [27] O Urper., N. Baydogan, Influence of structural changes on electrical properties of Al:ZnO films, *Materials Letters* (2019): 126641, DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126641.
- [28] BAYDOĞAN, N., TONKA, M., & GÜZELÇİMEN, F. Al DOPED ZnO THIN FILMS.
- [29] Urper, O., & Baydogan, N. (2020). Effect of Al concentration on optical parameters of ZnO thin film derived by Sol-Gel dip coating technique. *Materials Letters*, 274, 128000.
- [30] N. Baydogan., O. Karacasu, H. Cimenoglu, Effect of annealing temperature on ZnO:Al/p-Si heterojunctions, *Thin Solid Films* 520 (2012):5790-5796, DOI: 10.1016/j.tsf.2012.04.044.
- [31] Urper, O., Tonka, M., & Baydogan, N. (2023). Modification of optical constants at nanospherical ZnO: Al thin film. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(4), 261.
- [32] Tonka, M., Guzelcimen, F., & Baydogan, N. (2022). Influence of Al content on microstructure and optical transmittance of sol-gel dip-coated ZnO films. *Synthesis and Sintering*, 2(3), 105-109.