

ZnS İnce Filmlerinin Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği İle Elde Edilmesi ve Optik ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

Saliha Elmas¹

¹ Avrupa Meslek Yüksekokulu Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

*(saliha.elmas@kocaelisaglik.edu.tr)

Özet – Çinko sülfür (ZnS) yarı iletken ince filmleri, mikroskop camı ve polietilen taraftalat (PET) alttaşlar üzerine eş zamanlı olarak Termiyonik Vakum Ark (TVA) tekniği ile depolanmıştır. Depolanan ZnS ince filmlerin optik ve yüzey özellikleri incelenmiştir. ZnS ince filmlerin kalınlıkları cam ve PET alttaşlar için sırası ile yaklaşık 510 ve 155 nm olarak ölçülmüştür. İki farklı alttaş üzerinde depolanan ZnS ince filmlerin kırılma indisi (n) ve yansımaya (R) değerleri dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak spektroskopik yöntemler ile belirlenmiştir. Cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan ZnS ince filmlerinin direk bant geçişine sahip yasak enerji aralığı değerlerinin ise sırasıyla 3,44 ve 3,32 eV olarak hesaplanmıştır. ZnS ince filmlerinin yüzey özellikleri incelendiğinde ise filmlerin yüzeylerinde boşluk ve çatlakların olmadığı, pürüzsüz ve homojen bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler – Zns İnce Filmler, TVA, Optik Özellikler, Yüzey Özellikler

I. GİRİŞ

ZnS, II-VI grubu yarıiletken bileşiklerdendir. ZnS yaklaşık olarak 3,5 - 3,76 eV' luk geniş bant aralığına sahiptir. Filmlerin yasak enerji aralığı ve direnç gibi optik ve elektriksel özellikleri aygıt performansını doğrudan etkilemektedir [1]. Görünür bölgede yüksek kırılma indisi, yüksek geçirgenlik ve düşük absorpsiyon özellikleri gösterir. Son yıllarda, kimyasal kararlılığı, düşük maliyetli oluşu ve çevre dostu olması nedeniyle, mükemmel optik ve elektriksel özellikleri ve çeşitli potansiyel uygulamaları nedeniyle kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır [2]. ZnS ince filmler, dielektrik filtreler [3], heteroeklem güneş pilleri için yansımaya önleyici kaplama [4] ve fotovoltaiik uygulamalar [5] olarak potansiyel olarak kullanılabilen benzersiz nanoyapılara sahiptir. ZnS ince filmler sıklıkla güneş pillerinde pencere malzemesi olarak kullanılırlar. ZnS ince filmler ayrıca fotokatalizör ve kuantum kuyuları şeklinde kullanılan süper kapasitör malzemeler olarak [6],[7] lazerlerde [8],[9] aktif sensörlerde [10]ve ışık yayan diyotlarda [11] kullanılmaktadır. ZnS ince filmler,

fiziksel ve kimyasal yöntemler ile elde edilmesi mümkündür. Saçtırma yöntemi [12], darbeli lazer biriktirme (PLD) [13], kimyasal banyo biriktirme (CBD) [14], spreysel piroliz [15], sol-jel [16], kimyasal buhar biriktirme [17] ve termal buharlaştırma [18] yöntemleri ile elde edilebilir.

Bu çalışmada Termiyonik Vakum Ark (TVA) tekniği kullanılarak ZnS ince filmleri üretilmiştir. TVA tekniği; yüksek basınçta (10^{-5} Torr) anot materyalinin plazması oluşturulması esasına dayanmaktadır. Herhangi bir tampon gazına ihtiyaç duyulmadığından oluşan deşarj, gaz karışımı içermeyen saf metalin plazması olmaktadır. TVA tekniği ile erime sıcaklığı düşük ya da yüksek metal, seramik, yarıiletken gibi hemen hemen her materyalin plazmasının üretimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, TVA tekniği ile istenilen her materyal üzerine kaplama yapabilmeye olanağı sağlayan özel bir yöntemdir [19], [20].

Bu çalışmanın amacı, TVA tekniği ile cam ve Polietilen taraftalat (PET) alttaşlar üzerine depolanan II-VI grubu yarıiletken bileşiklerden olan

ZnS ince filmlerinin optik ve yüzey özelliklerinin belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda, yüzey morfolojisini incelemek için ZnS ince filmlerinin üç boyutlu AFM görüntüsü alınıp pürüzlülük değerleri bulunmuştur. Depolanan ZnS ince filmlerinin geçirgenlik değerlerini belirlemek için ise UV-Vis spektrofotometre ölçüm cihazında 400-1000 nm dalgaboyu aralığında ölçümler gerçekleştirilmiştir. İnterferometre ölçümleri ile de kalınlık ölçümünün yanı sıra kırılma indisi ve yansıma değerleri bulunmuştur. Bu sayede, TVA tekniği ile cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan ZnS ince filmlerinin optik ve yüzey özellikleri belirlenerek literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Termiyonik Vakum Ark (TVA), metal, seramik, yarıiletken gibi hemen hemen her materyalin plazmasını üretebilen bir tekniktir. TVA sisteminin vakum odası içinde, anot ve katot bulunur. Katot elektron tabancasını (Filament ve wehnelt silindiri) oluştururken anotu ise tungsten /molibden pota oluşturur. Anot ve katot arasında 3-4 mm uzaklık bulunmaktadır. Tungsten/molibden potanın içerisine plazması oluşturulacak malzeme konulur. Düşük voltajlı güç kaynağı vasıtasıyla filament üzerinden akım geçirilir. Böylelikle filamentin ısınması ve termiyonik emisyon yapması sağlanır. Anot üzerine gelen hızlandırılmış elektron demeti, potayı ve malzemeyi yüksek sıcaklıklara ısıtır. Elektrotlar arasına uygulanan DC yüksek voltaj ile anot malzemesinin saf, gaz karışımı ve makro-parçacık içermeyen, yüksek iyonlaşma dereceli plazması oluşturulur. TVA tekniği, pek çok yeni teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunlardan en önemlisi iyon-destekli kaplama tekniğidir. Anot materyali iyonları ile bombardıman edilerek üretilen kaplamalar; son derece homojen, pürüzlülüğü düşük, yoğun ve yüksek tutunmalı kaplamalar olmaktadır [21],[22].

ZnS ince filmleri eş zamanlı olarak cam ve PET alttaşlar üzerine TVA tekniği ile yüksek basınçta (9×10^{-5} torr) üretilmiştir. Bu teknikte tungsten pota içerisine ZnS pelet malzemesi konulmuştur. Anot ve katot arasındaki mesafe 3 mm olarak ayarlanmıştır. Elektron tabancasından çıkan elektronlar yüksek voltaj altında hızlandırılarak önce pota içerisindeki

bu malzemenin buharlaşmasına, daha sonra da plazmasının oluşmasına sebep olur. ZnS ince filmlerinin oluşumu esnasında kaplama basıncı 9×10^{-5} Torr, filaman akımı 19 A'de sabit tutulmuştur. Uygulama voltajı 700 V'tur. Deşarj akımı ise 0,7 A olarak ölçülmüştür. ZnS ince filmlerinin kaplama süresi ise 2 dakika 15 saniye boyunca sürmüştür.

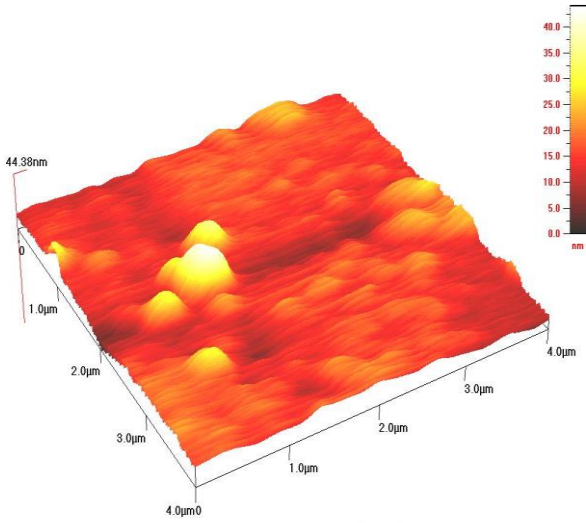
III. BULGULAR

Bu çalışmada, TVA tekniği kullanılarak ZnS ince filmlerinin depolanması gerçekleştirilmiştir. Filmetrics F20 cihazı ile cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan ince filmlerin kalınlığı yaklaşık olarak sırasıyla 510 ve 155 nm olarak ölçülmüştür. Bu ince filmlerinin yüzey analizleri ve pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, geçirgenlik, kırılma indisi ve yansıma analizleri yapılarak optik özellikleri araştırılmıştır.

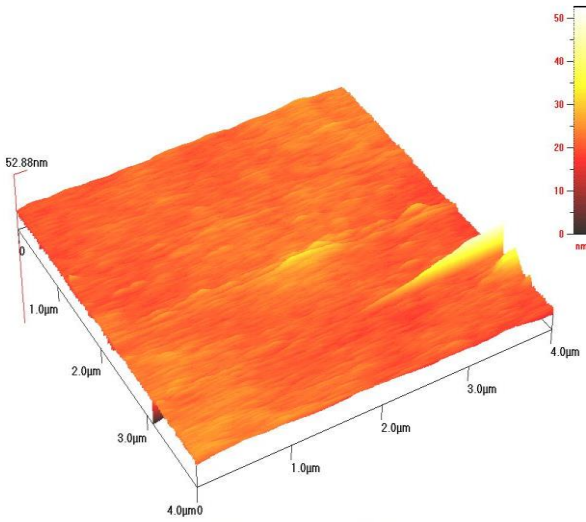
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) tahribatsız yüzey analizi yapmasından dolayı kaplanmış materyallerin yüzey özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir cihazdır. Cam ve PET üzerine TVA tekniği ile depolanan ZnS ince filmlerin üç-boyutlu yüzey görüntüleri, yüzey pürüzlülük değerleri ve yükseklik dağılımı histogram grafiği Ambios Q-Scope marka AFM cihazı ile elde edilmiştir. AFM yüzey analizi görüntüleri hava ortamında, oda sıcaklığı koşullarında temassız mod kullanılarak ve $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ alanlı bölgeler taranarak alınmıştır. Pürüzlülük değerleri de tüm taranan bölge üzerinden belirlenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil.1'de gösterilmektedir.

Şekil 1'de gösterilen ZnS ince filmlerinin AFM yüzey görüntüsünden, yüzeyde taneli bir yapılanmanın olduğu, tanelerinin dağılımı oldukça homojen olduğu ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, bazı bölgelerde farklı genişlik ve yüksekliklere sahip tepe tipi oluşumların olduğu da dikkat çekmektedir. Tanelerin üst üste binmesi sonucu oluşan yüksek kümelerin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca farklı yüksekliklere sahip bu oluşumlarda filmin yüzeyinde renk tonu farkı oluşturduğu da görülmektedir. Depolanan ZnS/cam ince filminin Ra (ortalama pürüzlülük) ve Rq (rms pürüzlülük) değerleri de ölçülmüştür. Bu değerler, sırasıyla Ra 2.62 nm, Rq 3.42 nm olarak

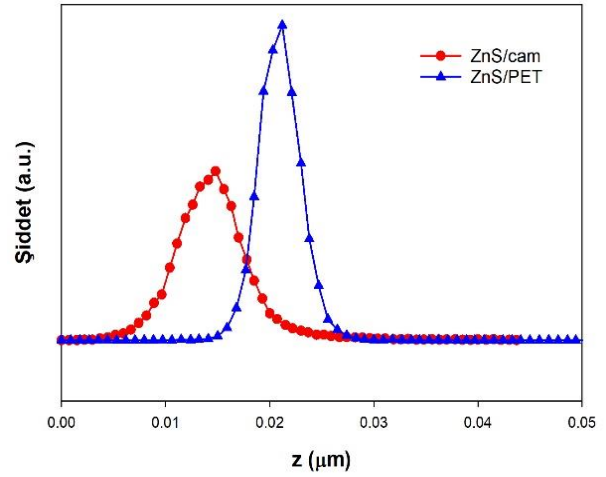
belirlenmiştir. Aynı şekilde ZnS/PET ince filminin Ra (ortalama pürüzlülük) ve Rq (rms pürüzlülük) değerleri de ölçülmüştür. Bu değerler, sırasıyla Ra 1.21 nm, Rq 1.47 nm olarak belirlenmiştir. AFM sonuçları kıyaslandığında ZnS/PET ince filminin daha homojen ve pürüzsüz depolandığını göstermektedir. Bölgesel olarak bu yükseltelerin varlığı sonucunda yükseklik dağılımı grafiği Şekil 1(c)'de gösterilmiştir. ZnS ince filmlerinin karakteristik bir Gaussian eğrisi göstererek homojen tane dağılımına sahip olduklarını göstermektedir.



(a)



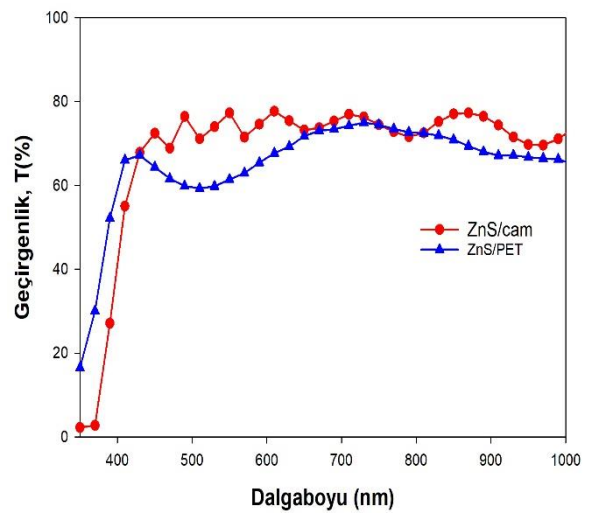
(b)



(c)

Şekil 1. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin (a) ve (b) 3D AFM yüzey analizi görüntüleri c) yükseklik dağılım histogramı

Bu araştırma çalışmasında, depolanan ZnS ince filmlerinin optiksel özelliklerini incelemek için hem Unico UV-VIS spektrofotometre cihazı hem de Filmetrics F20 interferometre cihazı kullanılmıştır. Unico UV-VIS spektrofotometre cihazı ile 400-1000 nm dalgaboyu aralığında cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan ZnS ince filmlerinin geçirgenlik spektrumu elde edilmiştir. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin 400-1000 nm dalgaboyu aralığında elde edilen geçirgenlik spektrumu Şekil 2' de verilmektedir.

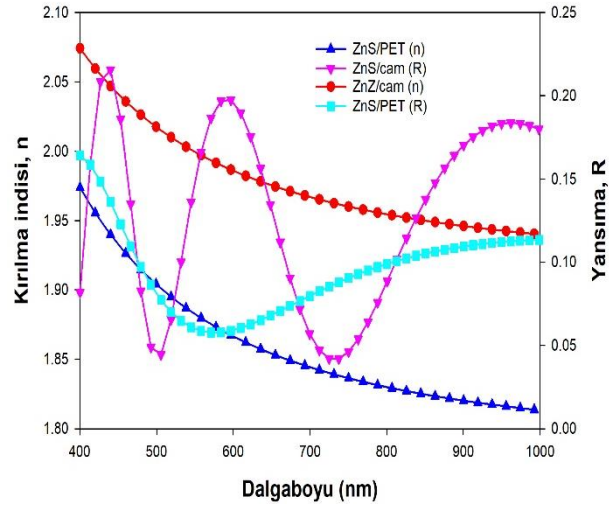


Şekil 2. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin geçirgenlik spektrumu

TVA tekniği ile cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin yüzde geçirgenliklerinin dalgaboyuna göre değişim spektrumları karşılaştırmalı olarak Şekil 2’ de görülmektedir. Şekil 2’ de gösterildiği gibi, ZnS ince filmlerinin geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, görünür bölgede saydam malzeme olarak davranış sergilediği görülmektedir. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin 550 nm’ de geçirgenlik değerleri sırası ile ~ % 77 ve ~ % 61 civarında olduğu belirlenmiştir. Farklı alttaşlar üzerine depolanan ve farklı kalınlığa sahip olan ZnS ince filmlerinin girişim saçaklarına sahip olduğu görülmektedir. Geçirgenlik spektrumunda görülen bu dalgalanmaların nedeni depolanan ZnS ince filmlerin kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü ile alakalı olduğu söylenebilir. Belirli film kalınlığında filmlerin yüzey pürüzlülüğü düşük olduğunda filme gönderilen elektromanyetik dalganın girişim yapması sonucu geçirgenlik spektrumunda dalgalanma görmek mümkündür. Bu durum, AFM yüzey görüntülerinden elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde dir.

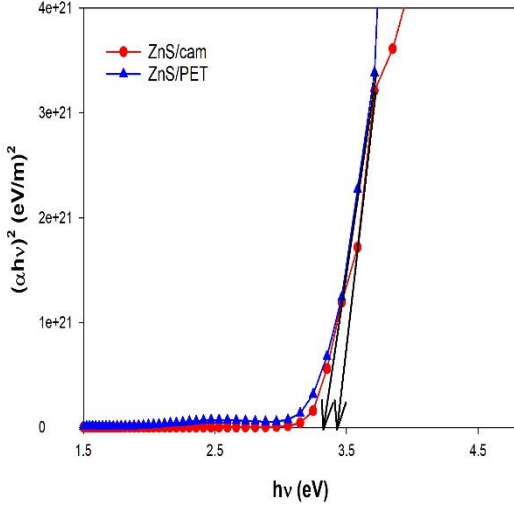
Şekil 3’ de TVA tekniği ile cam, PET alttaşlar üzerine depolanan ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin yansımaya ve kırılma indisi spektrumları verilmiştir. Depolanan ZnS ince filmlerin kalınlık değerleri, yansımaya ve kırılma indisleri 400–1000 nm dalgaboyu aralığında spektroskopik yansımaya yöntemi ile Filmetrics F20 cihazı kullanılarak belirlenmiştir. ZnS/cam ince filminin yansımaya değerlerinde sürekli dalgalanmalar görülmektedir. ZnS/PET ince filmde ise uzun dalgalaboylarına gidildikçe yansımaya arttığı görülmektedir. Depolanan her iki ZnS ince filmi için de yansımaya düşük olduğu söylenebilir. Düşük yansımaya değerlerinin sebebi olarak, örgü kusurları, tane sınırları, küçük tanecikler ve diğer kristal oluşumundan kaynaklanan kusurlar sayılabilir. Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin elde edilen spektrumları incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı ve bu durumun her iki ZnS ince filmlerinde benzer formda olduğu görülmektedir. Bu durum ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmleri için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Gelen fotonun dalga boyu azaldıkça kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, gelen fotonun enerjisinin artmasından dolayı elektronlarla daha

fazla etkileşmesindedir. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin kırılma indisi değerleri sırası ile 550 nm’de 1,99 ve 1,88 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatür ile uyum içindedir [23].



Şekil 3. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin dalgaboyuna karşı kırılma indisi ve yansımaya grafiği.

Yarıiletkenlerin band yapılarının araştırılmasında en yaygın olarak optiksel metod olan Tauc metodu kullanılır. Bir yarıiletkenin sahip olduğu optik geçişi ve yasak enerji aralığı hakkında doğru ve kesin bilgiyi bu yöntemle elde etmek mümkündür. Depolanan ZnS ince filmlerinin soğurma değerleri kullanılarak optiksel yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 4’ de grafiği verilmiştir. Şekil4’ de gösterildiği gibi ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri çizilerek, Tauc metodu ile band aralığı değerleri hesaplanmıştır. Bu grafiklerin lineer kısımlarının doğrultularının $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ ’ da kestiği noktaların enerji değerleri filmlerin yasak enerji aralıkları olarak belirlenmiştir. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri sırası ile 3,44 ve 3,32 eV olarak belirlenmiştir. Bu değerler literatür ile uyum içindedir [24],[25].



Şekil 4. ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri.

IV. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu araştırma çalışmasında, mikroskop camı ve polietilen taraftalat (PET) alttaşlar üzerine Termiyonik Vakum Ark (TVA) tekniği ile ZnS ince filmler elde edilmiştir. Depolanan ZnS ince filmlerin üç boyutlu AFM örüntüleri elde edilmiştir ve ortalama yüzey pürüzlülükleri belirlenmiştir. AFM görüntü sonuçlarına göre, yüzeylerin oldukça homojen olduğu ve pürüzsüz bir yüzeye sahip oldukları görülmektedir. Aynı şekilde ZnS ince filmlerinde sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği de söylenebilir. Ayrıca, depolanan ZnS ince filmlerinin Gaussian eğrisine göre homojen tane dağılımı gösterdiği görülmektedir. ZnS ince filmlerinin optik özelliklerini incelemek için geçirgenlik ve soğurma spektrumları alınmıştır. ZnS ince filmlerinin girişim saçaklarına sahip olduğu görülmektedir. Geçirgenlik spektrumunda görülen bu dalgalanmaların girişim sonucu meydana geldiği söylenebilir. AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi ZnS ince filmlerinin yüzeylerinin düzgün olması ve daha sıkı bağlı taneciklerin bulunmasından dolayı depolanan her iki ZnS ince filmi için de yansımının düşük olduğu söylenebilir. Dalgaboyuna karşı kırılma indisi spektrumları incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı ve bu durumun tüm ZnS ince filmlerinde benzer formda olduğu görülmektedir. Bu durum üretilen tüm ZnS ince filmleri için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının

gerçekleştiğinin bir göstergesidir. ZnS ince filmlerinin yasak enerji aralıkları Tauc metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Depolanan ZnS/cam ve ZnS/PET ince filmlerinin yasak enerji aralıkları sırasıyla 3,44 eV ve 3,32 eV olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında üretilen ZnS ince filmlerin literatürle uyum içinde olduğu gözlenmekle birlikte, diğer kaplama tekniklerine göre üretim süresinin çok kısa olması avantaj sağladığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] A. Najim, B. Hartiti, H. Labrim, S. Fadili, P. Thevenin, M. Ertugrul, "Structural and optical properties of ZnS thin films prepared at different flow rates by spray pyrolysis technique," *Materials Today: Proceedings*, vol. 66, pp. 249-251, 2022.
- [2] H. Ghasemi, M. H. Mozaffari, R. Moradian, "Effects of deposition time on structural and optical properties of ZnS and ZnS/Au thin films grown by thermal evaporation," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 627, pp. 413616, 2022.
- [3] G. Kedawat, S. Srivastava, V.K. Jain, P. Kumar, V. Kataria, Y. Agrawal, B.K. Gupta, Y.K. Vijay, "Fabrication of artificially stacked ultrathin ZnS/MgF2 multilayer dielectric optical filters," *ACS Appl. Mater. Interfaces* vol. 5, pp. 4872-4877, 2013.
- [4] A. Goudarzi, A.D. Namghi, C.-S. Ha, "Fabrication and characterization of nanostructured ZnS thin films as the buffer layers in solar cells," *RSC Adv.* Vol.4, pp. 59764–59771, 2014.
- [5] A. Kute, S. Waghuley, "Photovoltaic application of ZnS loaded silicon dioxide rich composites," *Mater. Des.* Vol. 116, pp. 1-7, 2017.
- [6] J. Hao, X. Wang, F. Liu, S. Han, J. Lian, Q. Jiang, "Facile synthesis ZnS/ZnO/Ni (OH) 2 composites grown on Ni foam: a bifunctional materials for photocatalysts and supercapacitors," *Sci. Rep.* vol. 7, pp. 1-12, 2017.
- [7] F. Li, Z. Xia, Q. Liu, "Controllable synthesis and optical properties of ZnS: Mn²⁺/ZnS/ZnS: Cu²⁺/ZnS core/multishell quantum dots toward efficient white light emission," *ACS Appl. Mater. Interfaces* vol. 9, pp. 9833–9839, 2017.
- [8] S. Vasilyev, V. Smolski, J. Peppers, I. Moskalev, M. Mirov, Y. Barnakov, S. Mirov, V. Gapontsev, "Middle-IR frequency comb based on Cr: ZnS laser," *Opt Express* vol. 27, pp. 35079–35087, 2019.
- [9] S. Eivazi, M.H. Mozaffari, "Numerical Design and Investigation of an Optically Pumped 1.55 Mm Single Quantum Dot Photonic Crystal-Based Laser," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2018.
- [10] S. Park, S. An, Y. Mun, C. Lee, "UV-activated gas sensing properties of ZnS nanorods functionalized with Pd," *Curr. Appl. Phys.* Vol. 14, pp. S57–S62, 2014.
- [11] Z. Yang, Q. Wu, X. Zhou, F. Cao, X. Yang, J. Zhang, W. Li, "A seed-mediated and double shell strategy to realize

- large-size ZnSe/ZnS/ZnS quantum dots for high color purity blue light-emitting diodes,” *Nanoscale* vol. 13, pp. 4562–4568, 2021.
- [12] A. Le Donne, D. Cavalcoli, R. Mereu, M. Perani, L. Pagani, M. Acciarri, S. Binetti, “Study of the physical properties of ZnS thin films deposited by RF sputtering,” *Mater. Sci. Semicond. Process.* Vol. 71, pp. 7-11, 2017.
- [13] S. Yano, R. Schroeder, B. Ullrich, H. Sakai, “Absorption and photocurrent properties of thin ZnS films formed by pulsed-laser deposition on quartz,” *Thin Solid Films* vol. 423, pp. 273-276, 2003.
- [14] M.S. Akhtar, Y.G. Alghamdi, M.A. Malik, R.M.A. Khalil, S. Riaz, S. Naseem, “Structural, optical, magnetic and half-metallic studies of cobalt doped ZnS thin films deposited via chemical bath deposition,” *J. Mater. Chem. C* vol. 3 pp. 6755–6763, 2015.
- [15] B. Elidrissi, M. Addou, M. Regragui, A. Bougrine, A. Kachouane, J. Bernede, “Structure, composition and optical properties of ZnS thin films prepared by spray pyrolysis,” *Mater. Chem. Phys.* Vol. 68, pp. 175-179, 2001.
- [16] A. Goktas, F. Aslan, E. Yasar, I.H. Mutlu, “Preparation and characterisation of thickness dependent nanostructured ZnS thin films by sol–gel technique,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* Vol. 23, pp. 1361-1366, 2012.
- [17] L. Jiang, D. Li, W. Li, Z. Song, J. Yang, L. Guo, Z. Tian, X. Liu, J. Li, “Study on the effects of crisp layer on optical and mechanical properties of CVD ZnS,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* Vol. 31, pp. 2459-2465, 2020.
- [18] B. Abdallah, M. Kakhia, W. Zetoune, N. Alkafri, “Synthesizing of ZnS and ZnO nanotubes films deposited by thermal evaporation: morphological, structural and optical properties,” *Mater. Res. Express* vol. 6, pp. 115079, 2019.
- [19] S. Elmas, S. Korkmaz, S. Pat, “Optical characterization of deposited ITO thin films on glass and PET substrates,” *App. Surf. Sci.* Vol. 276, pp. 641– 645, 2013.
- [20] S. Elmas, Ş. Korkmaz, S. Pat, “Investigation of physical properties and surface free energy of produced ITO thin films by TVA technique,” *J. Mater. Science: Materials in Elect.*, vol. 30, pp. 8876-8882, 2019.
- [21] S. Elmas, S. Pat, R. Mohammadigharehbagh, C. Musaoğlu, M. Özgür, U. Demirkol, S. Özen, Ş. Korkmaz, “Determination of physical properties of graphene doped ZnO (ZnO: Gr) nanocomposite thin films deposited by a thermionic vacuum arc technique,” *Physica B: Condensed Matter*, vol.557, pp.27-33, 2019.
- [22] N. Akkurt, S. Pat, S.Elmas, Ş. Korkmaz, “Electrochromic properties of UV-colored WO₃ thin film deposited by thermionic vacuum arc,” *J. Mater. Science: Mater. in Electronics*, vol. 31, pp. 1293-1301, 2020.
- [23] K. Benyahia, A. Benhaya and M.S. Aida, “ZnS thin films deposition by thermal evaporation for photovoltaic applications,” *Journal of Semiconductors*, vol.36, pp. 103001, 2015.
- [24] F. Haque, K.S. Rahman, M. Akhtaruzzaman, H. Abdullah, T.S. Kiong, and N. Amin, “Properties of sputtered ZnS thin films for photovoltaic application,” *Materials Research Express*, vol. 5, pp. 096409, 2018.
- [25] J. Hong, D. Lim, Y.-J. Eo, and C. Choi, “Chemical bath deposited ZnS buffer layer for Cu(In,Ga)Se 2 thin film solar cell,” *Applied Surface Science*, vol.432, pp. 250-254, 2018.