

AKÜ FEMÜBİD 19 (2019) 021101 (286-291)

AKU J. Sci. Eng. 19 (2019) 021101 (286-291)

DOI: 10.35414/akufemubid.429200

Araştırma Makalesi / Research Article

Sb₂S₃ İnce Filmlerinin Yapısal ve Optik ÖzellikleriŞilan BATURAY^{1,2*}, Derya BATIBAY^{2,3}, Yusuf Selim OCAK^{2,4}¹Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye²Smart Lab, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye³Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye⁴Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Eğitim Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye.e-posta: silan@dicle.edu.tr ¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8122-6671>⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-1720>³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1012-6702>

Geliş Tarihi: 31.05.2018;

Kabul Tarihi: 29.05.2019

Öz

Bu çalışmaya konu olan antimon sülfür ince filmler ultrasonik sprey piroliz tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Farklı alttaş sıcaklığına bağlı olarak hazırlanan antimon sülfür ince filmlerin optik ve yapısal özellikleri sırasıyla UV-vis spektrofotometri ve XRD analizi kullanılarak incelenmiştir. Bu şekilde alttaş sıcaklığını değiştirerek optik ve yapısal özellikleri kontrol etmek mümkün olmuştur. Filmlerin optik özellikleri, UV-vis spektrometresi kullanılarak enerji bant aralığı ölçümleri ile analiz edildi. 275, 300 ve 325 °C' de yapılan ve tavlınmamış filmler için enerji bant değerleri sırasıyla 2.36, 2.47 ve 1.84 eV olarak bulunurken, 500 °C' de sülfür ortamında tavlanan filmler için enerji bant değerleri sırasıyla 1.73, 1.76 ve 1.77eV olarak bulundu. Bütün yönelimler için mikro yapı (e), düzlemler arası mesafe (d), kristal büyüklüğü (D) ve dislokasyon yoğunluk (δ) XRD analizi kullanılarak belirlendi.

Anahtar kelimelerİnce Fim; Sb₂S₃; XRD; Ultrasonik Sprey Piroliz**The Structural and Optical Properties of Sb₂S₃ Thin Films****Abstract**

The Antimony Sulfide thin films which are the subject of this study were prepared by ultrasonic spray pyrolysis technique. The Antimony Sulfide thin films were investigated depending on the substrate temperature. The optical and structural characteristics of these films were determined using UV-vis spectrophotometry and XRD analysis, respectively. By changing the substrate temperature, it was possible to control the optical and structural characteristic of the films. The optical properties films were analysed by energy band gap measurements using UV-vis spectrophotometry. While the band gaps of as grown films found to be 2.36, 2.47 and 1.84eV, the band gaps of the films at annealing 500°C found to be 1.73, 1.76 ve 1.77eV. XRD analysis was used to determine the microstrain (e), lattice spacing phase (d), crystallite size (D) and dislocation density (δ) for all orientations.

KeywordsThin Films; Sb₂S₃; XRD; ultrasonic spray pyrolysis

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Son yıllarda X₂Y₃ (X=As, Sb, Bi; Y=S, Se, Te) gibi ikili materyaller eşsiz elektriksel ve optiksel özelliklerinden dolayı oldukça ilgi çekmektedir (Savadogo and Mandal 1992, Nayak et al. 1983, Pawar et al. 1983, Abbo et al. 2005). Ayrıca optoelektronik, mikrodalga ve termoelektrik aletler ile fotovoltaik yapıların potansiyel uygulamaları açısından oldukça yaygın bir biçimde

incelenmektedir (Boughalmi et al. 2014, Tigau et al. 2005, Bao et al. 2007, Chen et al. 1997, Suarez et al. 1998). Bu materyaller arasında antimon sülfür (Sb₂S₃) önemli bir V-VI grubu yarıiletken malzeme olup, yüksek reaktif indeksi (Perales et al. 2007), iyi bilinen kuantum etkileri (Lokhande et al. 2002), ışığa duyarlılığı ve termoelektrik özelliklerinden (Grozdanov 1994) dolayı bu materyali yukarıda bahsedilen uygulamalar için uygun kılmaktadır.

Antimon sülfür telefon kameraları (Ghosh and Varma 1979), termoelektrik aletler (Kim 2000), mikrodalga (Versavel and Haber 2007), switching (Ablova et al. 1976) ve güneş hücrelerinde bazı uygulamalara sahiptir (Rajpure and Bhosale 2000). Sb₂S₃ ince filmin enerji bant değeri 1.73-2.57eV aralığında (Malakooti et al. 2008, Ota and Srivastava 2007, Zhang et al. 2004) olup oldukça yüksek soğurtma katsayısına sahiptir. Sb₂S₃ ince film hazırlanmasında kimyasal buhar depolama (Murtaza et al. 2015), sprej piroliz (Bhosale et al. 1994) kimyasal banyo depolama (Mane and Lokhande 2003, Salem and Selim 2001), termal buharlaştırma (Escorcía et al. 2014, Aousgi et al. 2015) ve elektrodepolama (Curran et al. 1982) gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Önceki çalışmalar depolama tekniklerinin ve koşullarının Sb₂S₃ ince filmlerinin özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. Örneğin, Salem ve arkadaşları basit kimyasal depolama tekniğini kullanarak filmlerin optik soğurma enerjisinin orantılı bir biçimde parçacık boyutunun azalışına bağlı olarak 2.2eV'den 3.8eV'ye arttığını ve filmlerin hem doğrudan hem de dolaylı bant aralığına sahip olduğunu göstermişlerdir (Salem and Selim 2001). Garcia ve arkadaşları ise Puls elektrokimyasal depolama tekniği kullanarak 300 °C'de tavlanan filmlerin yüksek soğurma katsayısına sahip olduğunu ve optik bant aralığının 2.03eV'den 1.65eV'ye kadar azaldığını göstermişlerdir (Garcia et al. 2016). Ultrasonik sprej piroliz önemli bir tekniktir çünkü kullanımı basit, maliyeti ucuz ve oldukça homojen kontrollü film yapma imkânı sağlamaktadır. Sb₂S₃ ince filmlerinin fiziksel özellikleri literatürde oldukça sınırlı olmasından dolayı bu çalışmada ultrasonik sprej piroliz tekniği kullanarak elde edilen ince filmlerin sıcaklığa (275°C, 300 °C ve 325 °C) bağlılığını yapısal, yüzeyel ve optiksel özellikleri bakımından ele alındı.

2. Materyal ve Metot

Ultrasonik sprej piroliz tekniği kullanılarak cam üzerine Sb₂S₃ ince film depolamak için önce 0.05 M Antimon (III) klorayd ve aynı molar da sülfür saf su kullanılarak çözdürülmüştür. Homojen bir çözelti elde etmek için bu çözeltiler 3 saat boyunca oda sıcaklığında titreştirilmiştir. Daha sonra bu çözeltiler

1:1 oranında katılmış ve tekrar 1 saat titreştirilmiştir. Yüksek kaliteli temiz ve homojen film elde etmek için depolamada kullandığımız cam malzemeler önce 90°C'de 15 dakika boyunca 5:1:1 H₂O, NH₃ ve H₂O₂'de ve daha sonra da aynı koşullarda 5:1:1 H₂O, H₂O₂ ve HCl'de kaynatılmıştır. Kaynatma işleminden sonra malzemeler sırasıyla aseton ve etanol de 3 dakika boyunca titreştirilmiş ve saf su ile yıkandıktan sonra azot gazı ile kurutulmuştur.

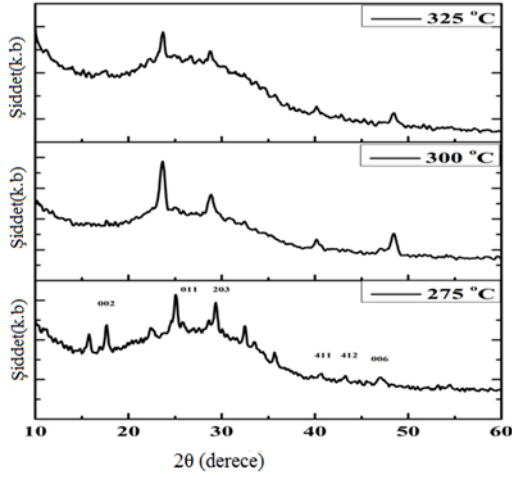
Üç farklı sıcaklıkta (275, 300 ve 325 °C) Sb₂S₃ ince film elde etmek için Ultrasonik sprej sistemi USP (SonoTek Exacta-Coat) kullanılmıştır. Cihazın püskürtme ucu ile alttaş arasındaki mesafe 10 cm olarak ayarlanmıştır. Ultrasonik sistem püskürtme sırasında 125 kHz'de çalıştırıldı. Çözeltinin akış hızı dakikada 1 mL olarak ayarlandı. Filmler yukarıda belirtilen süreçler tamamlandıktan sonra 1 saat boyunca 500 °C'de H₂S ortamında tavlandı.

Filmlerin kristal özelliklerinin analizi için θ -2 θ aralığında Rigaku Smart Lab X-ray diffractometer (XRD: Cu K α radiation, $\lambda=1.540056$ Å), A Shimadzu UV-3600 spektrometresi kullanılarak da filmlerin enerji bant aralığı 300-1100 nm dalgaboyu aralığında hesaplanmıştır.

3. Bulgular

3.1. XRD Analizi

Şekil 1 Ultrasonik sprej piroliz tekniği kullanılarak üç farklı sıcaklıkta depolanan filmlerin XRD spektrumunu göstermektedir. Bütün pikler stibnit faz olarak bilinen standart ortorombik (dik eksenli) Sb₂S₃ ile iyi bir biçimde eşleşmektedir. Sb₂S₃'e ait pikler dışında pik görülmemiştir bu da filmlerin homojen ve temiz olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. H₂S ortamında tavlanan Sb₂S₃ ince filmlerinin XRD kırınım desenleri

Şekil 1 H₂S ortamında tavlanan filmlerin polikristal bir doğaya sahip olduğunu göstermektedir. Perales ve arkadaşları fiziksel buhar depolama tekniğini kullanarak hazırladıkları filmlerin 220°C'nin altında XRD skalasında pik gözlemediklerini, bu derecenin yukarısında çok kristalli stibnit yapı gözlemediklerini belirtmişlerdir (Perales et al. 2007). Sıcaklığın artışına bağlı olarak filmlerin (002) ve (412) düzlemine ait piklerin şiddeti giderek azalarak yok olmuştur. Aynı şekilde sıcaklığın artışına bağlı olarak yapılan bu çalışmada en keskin kırınım piki 2θ=23.67°'ye ait (011) düzlemine sahip Sb₂S₃ ortorombik (dik eksenli) yapı olup sıcaklığın artışına bağlı olarak şiddetinde azalma meydana gelmiştir. XRD incelemeleri Sb₂S₃ filmlerinin tercihli kristal yöneliminde ve kristal kalitesinde altta sıcaklığının oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar daha evvel yapılan çalışmalar ile uyum içindedir (Aousgi et al. 2015, Nair et al. 1998, Rajpure and Bhosale 2000). İnce filmdeki kristal büyüklüğü Scherrer denklemi (Dubal et al. 2013) kullanılarak hesaplandı.

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

burada, D kristal büyüklüğü, λ (1.5406 Å) XRD'nin dalga boyu, β FWHM (radyan) ve θ Bragg kırınım açısına karşılık gelmektedir. Filmlerin (011) tercihli yönelimine ait kristal büyüklüğü 19.2-13.8 nm aralığında değişmiştir. Buda gösteriyorki filmlerin kristal büyüklüğü altta sıcaklığı ile değişmektedir.

En büyük D değeri 275 °C' de depolanan Sb₂S₃ ince filmine ait olup yüksek kalitede kristalliğe atfedilebilir.

Filmde kristaldeki yüksek kalite miktarını veren dislokasyon yoğunluğu (δ) aşağıdaki denklem ile hesaplandı.

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

filmlerin strain değeri aşağıdaki bağıntı ile hesaplandı:

$$\varepsilon_{str} = \frac{\beta}{4\tan\theta} \quad (3)$$

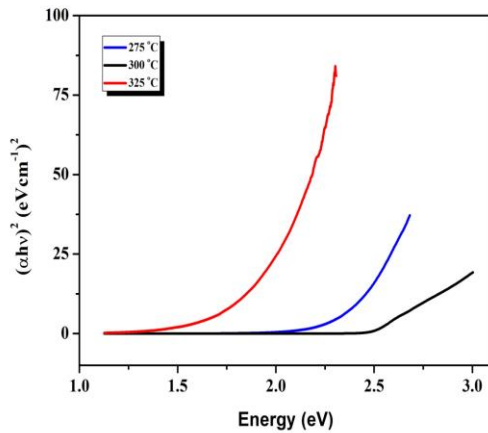
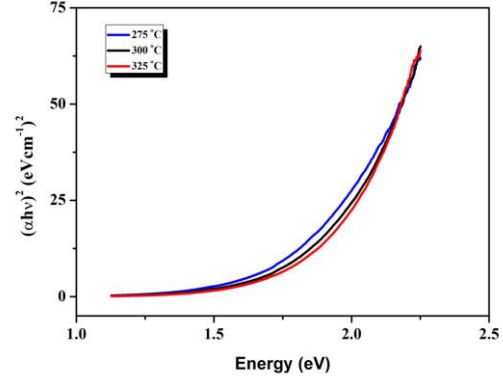
burada β FWHM (radyan) ve θ Bragg kırınım açısına karşılık gelmektedir. Dislokasyon yoğunluğu ve strain tercihli yönelim için sıcaklığa bağlı olarak arttı. δ değerlerindeki değişim filmlerde strainin varlığını göstermektedir. Straindeki artış örgü kusurlarının sıcaklığa bağlı olarak azalışı ile ilgilidir. Bu sonuçlardan görülüyor ki kristal büyüklüğündeki azalışın nedeni straindeki artış ile ilgilidir. Sıcaklık arttıkça strain değerindeki artış örgü kusurlarının artışına neden olmuş ve filmin kalitesini düşürmüştür. XRD spektrumundan kırınım açısı(2θ), düzlemler arası mesafe (d) , kristal büyüklüğü (D) and dislokasyon yoğunluğu (δ) sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanmış ve tablo 1'de gösterilmiştir.

Çizelge1: H₂S ortamında tavlanan Sb₂S₃ ince filmlerinin XRD örnekleri

2θ (Derece)	FWHM (radyanx 10 ⁻⁴)	D (nm)	d (Å)	δ (x10 ¹⁴ m ²)	ε	Yönelim
15.72	26	56.2	5.63	3.2	28.48	002
23.67	76	19.2	3.76	27	90.70	011
28.87	86	17.4	3.09	33	83.50	203
40.39	124	12.4	2.23	65	84.30	411
42.34	37	42.0	2.13	5.7	23.87	412
48.51	80	19.9	1.88	25.3	44.40	431
23.65	107	13.8	3.75	52.5	127.38	011
28.84	120	12.5	3.09	64	116.62	203
40.18	71	21.7	2.42	21.2	48.40	411
48.45	110	14.4	1.87	48.2	61.80	006
23.68	79	18.7	3.75	28.6	94.05	011
28.78	64	23.4	3.10	18.3	62.38	203
40.17	75	20.6	2.24	23.6	51.37	411

3.2. Optik Özellik

Şekil 2 ultrasonik spray piroliz metodu ile 275°C, 300 °C ve 325 °C'de depolanan ince filmlerinin enerji bant aralığını, Şekil 3' de ultrasonik spray piroliz metodu ile 275°C, 300 °C ve 325 °C'de depolanan ardından 500 °C de H₂S ortamında tavlanan ince filmlerinin enerji bant aralığını göstermektedir.

**Şekil 2.** 275°C, 300 °C ve 325 °C'de depolanan ince filmlerinin enerji bant aralığı**Şekil 3.** 275°C, 300 °C ve 325 °C'de depolanan ardından 500 °C de H₂S ortamında tavlanan ince filmlerinin enerji bant aralığı

Murtaza ve arkadaşları Aerosol-Assisted Kimyasal Buhar Depolama metodu kullanarak 300, 350 ve 500 °C'de depolanan filmlerin spektrumun görünür bölgesinde oldukça yüksek geçirgenlik özelliğine sahip olduğunu ve kızılötesi bölgesinde tamamen geçirgen olduğunu göstermektedir (Murtaza et al. 2015). Sb₂S₃ ince filmlerin optik enerji bant aralığı aşağıdaki bağıntı ile bulundu (Yang et al. 2014, Soleimanian et al. 2015).

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n$$

burada A materyale bağlı enerjiden bağımsız bir sabit, hv foton enerjisi ve E_g enerji bant aralığına karşılık gelmektedir. Filmlerin foton enerjisine karşılık (hv) çizilen $(\alpha hv)^2$ grafiği optik enerji bant aralığı (E_g) üzerinde tavlama koşulunun etkisini gözler önüne sermektedir. 275 °C, 300 °C and 325 °C'de tavlama olmadan yapılan filmler için enerji bant değeri sırasıyla 2.36, 2.47 ve 1.84eV olarak bulunurken 500°C'de tavlanan filmler için enerji bant değeri sırasıyla 1.73, 1.76 ve 1.77eV olarak bulundu. Tavlanan filmler için, hesaplanan enerji bant aralığı sıcaklık arttıkça artmaktadır. Bunun nedeni ise parçacığın boyutunun elektronun dalga boyu ile kıyaslandığında küçük olmasından kaynaklanan kuantumsal sınırlamadır. Bu sonuçlar önceki çalışmalar ile uyum sağlamaktadır (Abbo et al. 2005, Nair et al. 1998, Mahanty et al. 1997). Tavlama yapılmayan filmlerde enerji bant

aralığındaki genişleme tabakaların yapısındaki değişimden dolayı olabilir (Harizi et al. 2016). 500°C'de tavlanan filmlerde önceki çalışmalarda gösterildiği gibi kristalin şekli ve boyutunda değişimler göstermektedir (Jain and Arun 2015, Murtaza et al. 2015) ve enerji bant aralığı kristal büyüklüğünün azalışı ile azalmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Sb₂S₃ ince filmler ultrasonik sprej piroliz tekniği kullanılarak üç farklı sıcaklıkta cam üzerine depolanmıştır. Farklı alttaş sıcaklığına bağlı olarak hazırlanan antimon sülfür ince filmlerin yapısal özellikleri XRD analizi kullanılarak incelenmiştir. Sıcaklığın artışına bağlı olarak filmlerin (002) ve (412) düzlemine ait piklerin şiddeti giderek azalarak yok olmuştur. Aynı şekilde sıcaklığın artışına bağlı olarak yapılan bu çalışmada en keskin kırınım piki $2\theta=23.67^\circ$ 'ye ait (011) düzlemine sahip Sb₂S₃ ortorombik yapı olup şiddetinde sıcaklığın artışına bağlı olarak azalma meydana gelmiştir. Bütün yönelimler için mikro yapı (e), düzlemler arası mesafe (d), kristal büyüklüğü (D) ve dislokasyon yoğunluk (δ) XRD analizi kullanılarak belirlendi. Filmlerin optik özellikleri, UV-vis spektrometresi kullanılarak enerji bant aralığı ölçümleri ile analiz edildi. 275 °C, 300 °C and 325 °C'de tavlama olmadan yapılan filmler için enerji bant değeri sırasıyla 2.36, 2.47 ve 1.84eV olarak bulunurken 500°C'de tavlanan filmler için enerji bant değeri sırasıyla 1.73, 1.76 ve 1.77eV olarak bulundu.

Kaynaklar

Abbo, Titinchi, S.J.J., Prasad, R., Chand, S., 2005. Synthesis, characterization and study of polymeric iron(III) complexes with bidentate p-hydroxy Schiff bases as heterogeneous catalysts. *Journal of Molecular Catalysis a-Chemical*, **225**, 225-232.

Ablova, M.S., Andreev, A.A., Dedegkaev, T.T., Melekh, B.T., Pevtsov, A.B., Shendel, N.S., Shumilova, L.N., 1976. Switching effect in Sb₂S₃. *Sov Phys Semicond*, **10**, 629-631.

Aousgi, F., Dimassi, W., Bessais, B., Kanzari, M., 2015. Effect of substrate temperature on the structural, morphological, and optical properties of Sb₂S₃ thin films. *Applied Surface Science*, **350**, 19-24.

Avilez Garcia, R.G., Meza Avendano, C.A., Pal, M., Paraguay Delgado, F., Mathews, N.R., 2016. Antimony

sulfide (Sb₂S₃) thin films by pulse electrodeposition: Effect of thermal treatment on structural, optical and electrical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **44**, 91-100.

Bao, H., Cui, X., Li, C.M., Song, Q., Lu, Z., Guo, J., 2007. Synthesis and Electrical Transport Properties of Single-Crystal Antimony Sulfide Nanowires. *The Journal of Physical Chemistry C*, **111**, 17131-17135.

Bhosale, C.H., Uplane, M.D., Patil, P.S., Lockhande, C.D., 1994. Preparation and properties of sprayed antimony trisulphide films. *Thin Solid Films*, **248**, 137-139.

Boughalmi, R., Boukhaem, A., Kahlaoui, M., Maghraoui, H., Amlouk, M., 2014. Physical investigations on Sb₂S₃ sprayed thin film for optoelectronic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **26**, 593-602.

Chen, B., Uher, C., Iordanidis, L., Kanatzidis, M.G., 1997. Transport Properties of Bi₂S₃ and the Ternary Bismuth Sulfides KBi_{6.33}S₁₀ and K₂Bi₈S₁₃. *Chemistry of Materials*, **9**, 1655-1658.

Curran, J.S., Philippe, R., Joseph, J., Gagnaire, A., 1982. Thin-film antimony trisulphide *photoelectrodes*. *Chemical Physics Letters*, **89**, 511-515.

Dubal, D.P., Gund, G.S., Lokhande, C.D., Holze, R., 2013. CuO cauliflowers for supercapacitor application: Novel potentiodynamic deposition. *Materials Research Bulletin*, **48**, 923-928.

Escorcia-García, J., Becerra, D., Nair, M.T.S., Nair, P.K., 2014. Heterojunction CdS/ Sb₂S₃ solar cells using antimony sulfide thin films prepared by thermal evaporation. *Thin Solid Films*, **569**, 28-34.

Ghosh, C., Varma, B.P., 1979. Optical properties of amorphous and crystalline Sb₂S₃ thin films. *Thin Solid Films*, **60**, 61-65.

Grozdánov, I., 1994. A simple and low-cost technique for electroless deposition of chalcogenide thin films. *Semiconductor Science and Technology*, **9**, 1234.

Harizi, A., Sinaoui, A., Akkari, F.C., Kanzari, M., 2016. Physical properties of Sn₄Sb₆S₁₃ thin films prepared by a glancing angle deposition method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **41**, 450-456.

Jain, P., Arun, P., 2013. Influence of grain size on the band-gap of annealed SnS thin films. *Thin Solid Films*, **548**, 241-246.

Kim, I.H., 2000. (Bi,Sb)₂(Te,Se)₃-based thin film

- thermoelectric generators. *Materials Letters*, **43**, 221-224.
- Versavel, M.Y., Haber, J.A., 2007. Structural and optical properties of amorphous and crystalline antimony sulfide thin-films. *Thin Solid Films*, **515**, 7171-7176.
- Lokhande, C.D., Sankapal, B.R., Mane, R.S., Pathan, H.M., Muller, M., Giersig, M., Ganesan, V., 2002. XRD, SEM, AFM, HRTEM, EDAX and RBS studies of chemically deposited Sb₂S₃ and Sb₂Se₃ thin films. *Applied Surface Science*, **193**, 1-10.
- Malakooti, R., Cademartiri, L., Migliori, A., Ozin, G.A., 2008. Ultra thin Sb₂S₃ nanowires and nanoplatelets. *Journal of Materials Chemistry*, **18**, 66-69.
- Mahanty, S., Merino, J., Leon, M., 1997. Preparation and optical studies on flash evaporated Sb₂S₃ thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum*, **15**, 3060-3064.
- Mane, R.S., Lokhande, C.D., 2003. Thickness-dependent properties of chemically deposited Sb₂S₃ thin films. *Materials Chemistry and Physics*, **82**, 347-354.
- Murtaza, G., Akhtar, M., Malik, M.A., Brien, P.O., Revaprasadu, N., 2015. Aerosol assisted chemical vapor deposition of Sb₂S₃ thin films: Environmentally benign solar energy material. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **40**, 643-649.
- Nair, M., Pena, Y., Campos, J., Garcia, V., Nair, P., 1998. Chemically Deposited Sb₂S₃ and Sb₂S₃ - CuS Thin Films. *Journal of The Electrochemical Society*, **145**, 2113-2120.
- Nayak, B.B., Acharya, H.N., Mitra, G.B., Mathur, B.K., 1983. Structural characterization of Bi_{2-x}Sb_xS₃ films prepared by the dip-dry method. *Thin Solid Films*, **105**, 17-24.
- Ota, J., Srivastava, S.K., 2007. Tartaric Acid Assisted Growth of Sb₂S₃ Nanorods by a Simple Wet Chemical Method. *Crystal Growth & Design*, **7**, 343-347.
- Pawar, S.H., Bhosale, P.N., Uplane, M.D., Tamhankar, S., 1983. Growth of Bi₂S₃ film using a solution-gas interface technique. *Thin Solid Films*, **110**, 165-170.
- Perales, F., Lifante, G., Agulló-Rueda, F., Heras, C.d.l., 2007. Optical and structural properties in the amorphous to polycrystalline transition in Sb₂S₃ thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40**, 2440.
- Rajpure, K.Y., Bhosale, C.H., 2000. Effect of composition on the structural, optical and electrical properties of sprayed Sb₂S₃ thin films prepared from non-aqueous medium. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **61**, 561-568.
- Rajpure, K.Y., Bhosale, C.H., 2000. Sb₂S₃ semiconductor-septum rechargeable storage cell. *Materials Chemistry and Physics*, **64**, 70-74.
- Salem, A.M., Selim, M.S., 2001. Structure and optical properties of chemically deposited Sb₂S₃ thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **34**, 12.
- Savadogo, O., Mandal, K.C., 1992. Studies on new chemically deposited photoconducting antimony trisulphide thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **26**, 117-136.
- Soleimanian, V., Saeedi, M., Mokhtari, A., 2015. The influence of heat treatment on the crystallite size, dislocation density, stacking faults probability and optical band gap of nanostructured cadmium sulfide film. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **30**, 118-127.
- Suarez, R., Nair, P.K., Kamat, P.V., 1998. Photoelectrochemical Behavior of Bi₂S₃ Nanoclusters and Nanostructured Thin Films. *Langmuir*, **14**, 3236-3241.
- Tigau, N., Gheorghies, C., Rusu, G.I., Condurache-Bota, S., 2005. The influence of the post-deposition treatment on some physical properties of Sb₂S₃ thin films. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **351**, 987-992.
- Zhang, R., Chen, X., Mo, M., Wang, Z., Zhang, M., Liu, X., Qian, Y., 2004. Morphology-controlled growth of crystalline antimony sulfide via a refluxing polyol process. *Journal of Crystal Growth*, **262**, 449-455.
- Yang, J., Huang, C., Jiang, L., Liu, F., Lai, Y., Li, J., Liu, Y., 2014. Effects of hydrogen peroxide on electrodeposition of Cu(In,Ga)Se₂ thin films and band gap controlling. *Electrochimica Acta*, **142**, 208-214.