

Sol-jel Yöntemi ile Kaplanan Nb₂O₅ İnce Filmlerin Karakterizasyonu

Tuğçe Ataşer*

¹Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 27.07.2019

Kabul: 14.02.2020

Yayın: 22.05.2020

Araştırma Makalesi

Öz – Bu çalışmada, hazırlanan niobyum pentoksit (Nb₂O₅) çözeltileri farklı sürelerde ve aynı koşullar altında yaşlandırıldı. Nb₂O₅ ince filmler, soda kireç cam ve silisyum altsaşlar üzerine aynı koşullar altında döndürerek kaplama cihazında sol-jel yöntemi ile kaplandı. Kaplanan Nb₂O₅ ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri ile yüzey morfolojilerinin çözeltinin yaşlanmasına olan bağımlılığı sırasıyla, X-ışını kırınımı (XRD), ikincil iyon kütle spektrometresi (SIMS), UV-Vis spektrofotometre ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizleri ile incelendi. XRD sonuçlarından, SG-1 (1 gün yaşlandırılan çözelti ile kaplanan film) numunesinin kristal yapıya sahip olduğu görüldü ve SG-1 numunesinin tanecik boyutu 46,12 nm olarak hesaplandı. SIMS analizi ile niobyum (Nb) ve oksijen (O) atomik türlerinin film derinliği boyunca homojen olarak dağıldığı tespit edildi. SG-1 numunesi görünür bölgede %80 civarında geçirgenliğe sahiptir ve soğurma spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı yaklaşık 3,65 eV olarak bulundu. Çözeltilerin yaşlandırılma süreleri arttıkça, yansıtma değerleri kullanılarak hesaplanan kırılma indislerinin azaldığı görülmektedir. AFM sonuçlarından, 5x5 µm² lik alanda taranan yüzey görüntülerinden SG-1 numunesinin düzgün yüzey morfolojisine ve 70 nm tanecik büyüklüğüne sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, AFM görüntülerinden çözelti yaşlandıkça RMS değerlerinin arttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar; Nb₂O₅ çözeltisinin yaşlandırılma süresinin kaplanan filmlerin yapısal, optik ve yüzey morfolojisini etkilediğini göstermektedir. Kaplanan Nb₂O₅ ince filmlerin Si temelli güneş hücrelerinde yansıma önleyici tabaka olarak kullanılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Nb₂O₅, ince film, sol-jel, döndürerek kaplama, yaşlandırma

Characterization of Nb₂O₅ Thin Films Coated by Sol-gel Method

¹Photonics Application and Research Center, Gazi University, Ankara, Turkey

Article History

Received: 27.07.2019

Accepted: 14.02.2020

Published: 22.05.2020

Research Article

Abstract – In this study, prepared niobium pentoxide (Nb₂O₅) solutions were aged for different times and under the same conditions. Nb₂O₅ thin films were deposited on the soda lime glass and silicon (Si) substrates under the same conditions by sol-gel spin coating method. The structural and optical properties and surface morphologies of the coated Nb₂O₅ thin films depending on the solution ageing were investigated by X-ray diffraction (XRD), secondary ion mass spectrometry (SIMS), UV-Vis spectrometer and atomic force microscopy (AFM) analyzes, respectively. XRD results indicated that SG-1 sample (the film deposited using 1-day aged solution) had crystal structure and the particle size of the SG-1 sample was calculated as 46.12 nm. It was determined by SIMS analysis that the niobium (Nb) and oxygen (O) atomic species distributed homogeneously along the film depth. The SG-1 sample had 80% optical transmittance in the visible region and the energy band gap from the absorption spectrum was found to be about 3.65 eV. It was seen from the AFM surface images scanned in 5x5 µm² area that SG-1 sample had smoother surface morphology with particle size value calculated as 70 nm. Also, it was seen from the AFM images that the RMS values increase as the solution ageing. The obtained results showed that the ageing time of Nb₂O₅ solution affects the structural, optical and surface morphology of the deposited films. It is suggested that the coated Nb₂O₅ thin films should be used as antireflective layer in crystal Si based solar cells.

Keywords – Nb₂O₅, thin film, sol-gel, spin coating, ageing

¹<http://orcid.org/0000-0002-8146-7707> tugceataser@gmail.com

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

ZnO, SnO₂, Nb₂O₅ ve Y₃O₂ gibi metal oksit ince filmler çok çeşitli optik ve mikro-elektronik uygulamalar için gelecek vaat eden adaylardır (Chen, Hsu, Li, Liou, ve Yang, 2016). Niobyum pentoksit (Nb₂O₅), havadaki ve sudaki kararlılığı, asitlere ve bazlara dayanıklılığı, geniş yasak enerji aralığı (3-4 eV) ve yüksek kırma indisi (2.2-2.6) ile kullanışlı optik ince film malzemelerinden biridir (Ozer, Barreto, Büyüklimanli, ve Lampert, 1995; Georgiev, Georgieva, Vasileva, Ivanov, ve Babeva, 2015). Hem kristal hem de amorf halde elektrokromik, fotoelektrik ve fotokatalitik özelliklere sahip olmasından dolayı, Nb₂O₅, nanokristal güneş hücreleri, sensörler, akıllı pencereler, yansıtma önleyici kaplamalar, optik filtreler ve şeffaf iletken elektrotlar gibi farklı cihaz uygulamalarında kullanılmaktadır.

Nb₂O₅ ince filmlerin kaplanmasında sol-jel, DC/RF magnetron sıçratma, kimyasal buhar biriktirme ve darbeli lazer biriktirme yöntemleri gibi birçok kaplama yöntemi kullanılmaktadır. Bu kaplama yöntemleri arasında sol-jel yöntemi çok yönlülüğü, düşük maliyeti ve düşük sıcaklık süreci, çevresel uyumu, yeniden kullanılabilirliği ve dayanıklılığından dolayı tercih edilmektedir (Ozer vd., 1995; Aegerter, 2001). Bunlara ek olarak, sol-jel yöntemi iyi kimyasal ve mekanik dayanıklılık, gözenekli yapı, geniş alan üzerinde homojen bir kaplama potansiyeli ve mikroyapı kontrolü sağlamaktadır (Ozer, Chen, ve Lampert, 1996; Agarwal, ve Reddy, 2005). Sol-jel yöntemi, hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları ile moleküler öncülerin bir oksit ağına dönüştürülmesi sürecine dayanmaktadır. Sol-jel kimyası, reaktif Nb-OH gruplarının oluşumu için hidroliz ve köprülü oksijenin oluşmasını sağlayan yoğunlaşma süreçleri olmak üzere iki adım içermektedir (Agarwal vd., 2005).

Sol-jel kaplama yönteminde daldırarak kaplama (dip coating), döndürerek kaplama (spin coating), püskürtme (spraying) ve elektrokaplama (electrodeposition) kullanılan kaplama yöntemleridir. Bu yöntemler arasında döndürerek kaplama yöntemi, ince ve homojen filmler elde etmek için hızlı ve basit bir yöntem olduğu için sol-jel kaplama yönteminde genellikle kullanılmaktadır. Ayrıca, bu yöntem kolaylık, tekrarlanabilirlik, düşük maliyetli donanım kullanımı ve yüksek çalışma hızından dolayı tercih edilmektedir. Döndürerek kaplama yöntemi; alttaş yüzeyine damlatılan kaplama çözeltisinin dağılması, çözeltinin ince bir şekilde yayılmasının sağlanması için alttaşın yüksek hızla (500-4000 devir/dakika) döndürülmesi ve çözeltinin fazlasının film üzerinden uzaklaştırılması için ısıtma süreçlerini içerir (Agarwal vd., 2005; Bahuguna, Mishra, Chaudhary, Kumar, ve Singh, 2016). Döndürme hızı ve süresi, kaplanan filmin kalınlığını belirleyen en önemli parametrelerdir.

Sunulan bu çalışmada, döndürerek kaplama cihazında sol-jel yöntemi ile cam ve Si alttaş üzerine farklı süreler boyunca yaşlandırılan çözeltiler kullanılarak kaplanan Nb₂O₅ ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri ile yüzey morfolojileri X-ışını kırınımı (XRD), ikincil iyon kütle spektrometresi (SIMS), UV-Vis spektrofotometre ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri ile incelendi. Çözeltilerdeki farklı yaşlandırılma süresinin filmin yapısal, optik ve yüzey morfolojisini etkilediği sonucuna varıldı. Si alttaş üzerine kaplanan Nb₂O₅ ince filmlerin, kristal Si temelli güneş hücrelerinde yansıma önleyici olarak kullanılabileceği önerilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

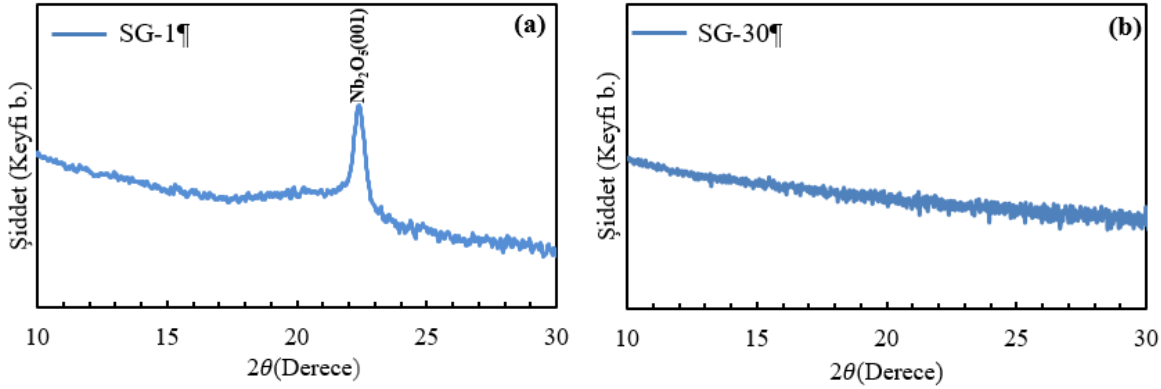
Nb₂O₅ kaplamak için kullanılan çözelti; 8,3 ml etanol (%98, Sigma Aldrich), 0,17 ml damıtılmış su ve NbCl₅'in (%99,995 Sigma Aldrich) manyetik karıştırıcıda karıştırılması ile hazırlandı. Kaplamadan önce, hazırlanan çözelti ortam koşullarında 24 saat bekletilerek yaşlandırıldı. Böylece, şeffaf ve kararlı bir çözelti elde edildi. Nb₂O₅ ince filmleri, 2 mm kalınlığında ve 20x20 mm boyutlarında önceden temizlenmiş soda kireç cam ve Si alttaşlar üzerine 0,3 ml'lik Nb₂O₅ çözeltisi damlatılıp döndürerek kaplama cihazında (Süss MicroTec Delta GRC) 3500 devir/dakika dönüş hızında 30 s döndürülerek kaplandı. Kaplama işleminden sonra filmler ısıtıcı tablada 120 °C'de 30 dk boyunca ısıtıldı. Çözeltinin yaşlandırılmasının filmlerin yapısal ve optik özellikleri ile yüzey morfolojileri üzerindeki etkileri, farklı süreler boyunca yaşlandırılan çözeltiler kullanılarak aynı koşullar altında kaplanan filmlerin karakterizasyonları ile incelendi.

Nb₂O₅ çözeltisi; 1, 7, 13, 20 ve 30 gün boyunca ortam koşullarında yaşlandırıldı. Yaşlandırma işlemi, 1000 sınıfılık temiz oda içinde 20 °C ortam sıcaklığında ve karanlık ortamda vakumlu desikatör içerisinde tüm filmler için aynı koşullar altında gerçekleştirildi. Bu yaşlandırılan çözeltiler ile Si alttaş üzerine kaplanan filmler sırasıyla SG-1, SG-7, SG-13, SG-20 ve SG-30 olarak adlandırıldı. Ayrıca, filmin optik özelliklerinin incelenmesi amacıyla cam alttaş üzerine kaplanan filmler C-1, C-7, C-13, C-20 ve C-30 olarak adlandırıldı.

Nb_2O_5 ince filmlerin yapısal karakterizasyonu XRD (APD 2000 PRO) yöntemiyle Cu-K α kaynağı kullanılarak (dalga boyu 1,54052 Å) gerçekleştirildi. Nb_2O_5 ince filmlerin atomik dağılımları ve derinlik profilleri SIMS (Hiden) ile ölçüldü. SIMS ölçümleri 10^{-10} Torr taban basıncında, Nb ve Si kütlelerinin takibi için O_2 iyon tabancası, O kütlelerinin takibi için ise Cs iyon tabancası kullanılarak yapıldı. O_2 tabancası için 3850 V iyon enerjisi ve 400 nA ışın akımı, Cs tabancası için ise 5 keV iyon enerjisi ve 40 nA ışın akımı kullanıldı. Oluşan ikincil iyonlar 100-1000 μm^2 merkezi krater alanından toplandı. Filmlerin geçirgenlik ve yansıtma ölçümleri 200-1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrofotometresi (Perkin Elmer Lambda 2 S; Çözünürlük: 0.05-5 nm) kullanılarak yapıldı. Ek olarak, elde edilen soğurma spektrumundan filmlerin yasadaki enerji aralıkları da bulundu. Ayrıca yansıtma değerleri kullanılarak kaplanan Nb_2O_5 filmlerin kırma indisleri hesaplandı. Filmlerin yüzey morfolojileri, yüksek performanslı atomik kuvvet mikroskopunda (hp-AFM, Nanomagetics) oda sıcaklığında dinamik mod taraması kullanılarak $5 \times 5 \mu m^2$ tarama alanında analiz edildi. AFM sonuçlarından, filmlerin pürüzlülüğünün karesinin ortalamasının karekök değerleri (RMS) hesaplandı.

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1(a) ve (b)'de, Si alttaş üzerine döndürerek kaplama cihazında sol-jel yöntemi ile kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerin XRD desenleri görülmektedir. Şekil 1 (a)'da görüldüğü gibi SG-1 numunesinde (001) düzlemine karşılık gelen $2\theta=22,35^\circ$ civarında Nb_2O_5 'e ait tepe gözlemlendi (JCPDS Card No. 28-317 $a=3,607$ Å ve $c=3,925$ Å). XRD deseni, kaplanan SG-1 numunesinin kristal yapısının, 28-317 numaralı PDF kartlarına göre hegzagonal olduğunu göstermektedir. XRD sonuçlarından, kaplanan SG-1 numunesinin kristal yapıya sahip olduğu görüldü. Şekil 1 (b)'de, kaplanan SG-30 numunesinin amorf yapıda olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan, çözeltinin yaşlandırılma süresinin artmasının kaplanan ince filmlerin kristalliliğini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılabilir.



Şekil 1. (a) SG-1 ve (b) SG-30 numunelerinin XRD grafikleri

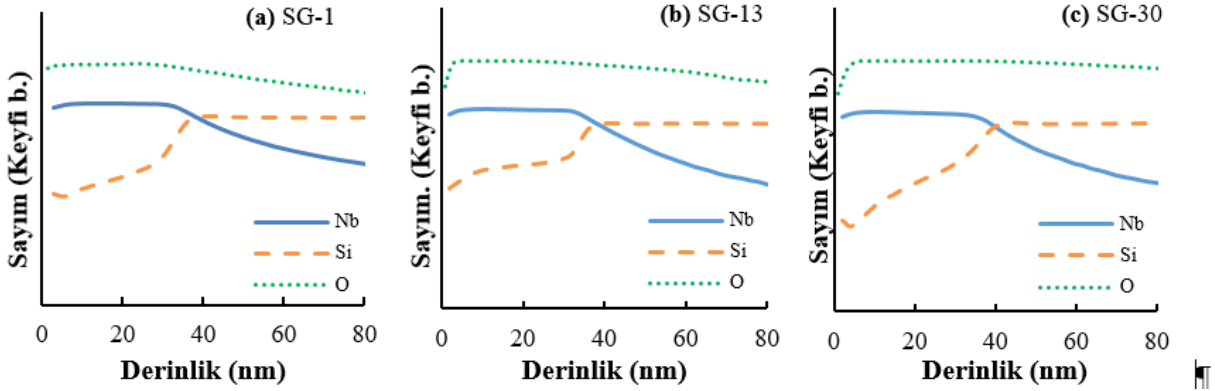
Kristallerin büyümesini analiz etmek için, Nb_2O_5 nano-parçacıkların tanecik boyutu (D), aşağıdaki Scherrer denklemi kullanılarak (001) kırınım tepesinin yarı yüksekliğine karşılık gelen genişlik ölçümü ile hesaplanmıştır (Cha vd., 2011):

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikteki λ , XRD analizinde kullanılan X-ışınının dalga boyu, β (001) kırınım tepesinin yarı yüksekliğine karşılık gelen genişlik değeri ve θ kırınım tepesine karşılık gelen açıdır. Bu eşitlik kullanılarak SG-1 numunesinin tanecik boyutu 46,12 nm olarak bulundu. Yine sol-jel yöntemi ile benzer koşullarda yapılan bir çalışmada 25 ve 65 nm tanecik boyutlu Nb_2O_5 ince filmler elde edilmiştir. (Rabaa, Bautista-Ruíza, ve Joya, 2015).

Geliştirilecek elektro-optik cihazın performansını artırmak için yüzey ve ara yüzey durumları oldukça önemlidir. Bundan dolayı Si alttaş üzerine kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerin derinlik profili, atomik homojenliği ve arayüzey özelliklerini belirlemek için SIMS analizi yapıldı. SIMS analiz sonucundan, yapıdaki ana elemanlar olan Nb, O ve Si tespit edildi. Nb ve Si'un atomik dağılımları O_2 iyon tabancası kullanılarak, O'in atomik

dağılımı ise Cs iyon tabancası kullanılarak ölçüldü. Şekil 2’de SG-1, SG-13 ve SG-30 numunelerinin derinlik profilleri verilmektedir. SIMS ölçümleri sonucunda profilometre ölçümlerinden SG-1, SG-7, SG-13, SG-20 ve SG-30 numunelerin kalınlıkları sırasıyla 35,47 nm, 38,33 nm, 40,41 nm, 40,96 nm ve 41,11 nm olarak bulundu. Kalınlıktaki bu artış, çözelti yaşlandıkça çözücünün buharlaşması neticesinde çözelti yoğunluğunun artması ile ilişkilendirilir (Lazarova, Vasileva, Marinov, ve Babeva, 2014).

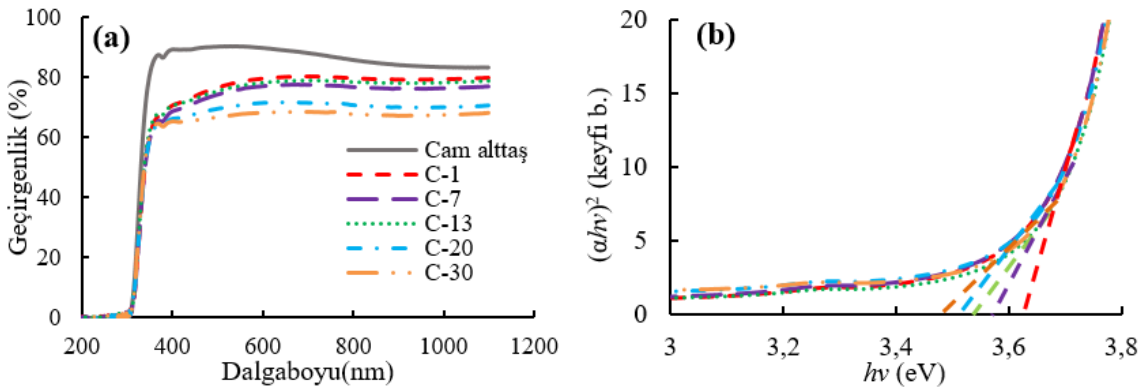


Şekil 2. (a) SG-1, (b) SG-13 ve (c) SG-30 numunelerinin SIMS derinlik profilleri

Cam alttaş üzerine kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerin optik geçirgenliği, UV-Vis spektrofotometresi kullanılarak 200-1100 nm aralığında ölçüldü. Şekil 3(a)’da görüldüğü gibi C-1 numunesi 400-700 nm dalga boyu aralığında %80 civarında geçirgenliğe sahiptir. Nb_2O_5 ince filmlerde yüksek geçirgenlik, güneş hücreleri, akıllı pencereler gibi çeşitli mikro-elektronik ve optik cihaz uygulama alanları için önemli bir parametredir (Pehlivan, Tepehan, ve Tepehan, 2003). Nb_2O_5 ince filmlerin yasak enerji aralıkları (E_g), optik geçirgenlik verilerinden elde edilen optik soğurma katsayısının foton enerjisi ile değişimini veren ve Tauc eşitliği olarak da bilinen (Wood, ve Tauc, 1972):

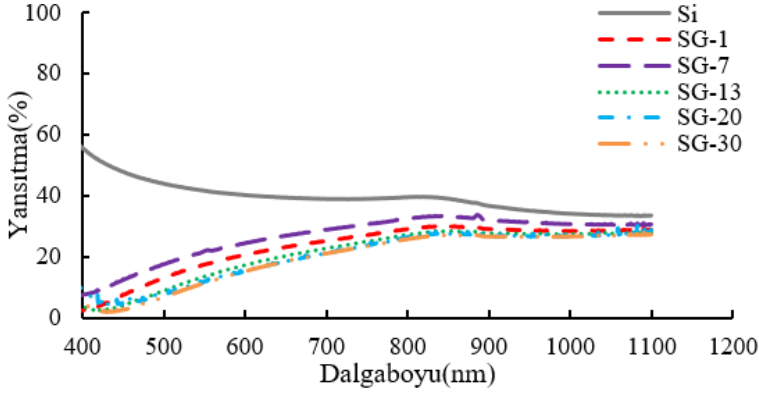
$$\alpha hv = A(hv - E_g)^{1/2} \quad (3.2)$$

Eşitliği ile hesaplandı. Burada α soğurma katsayısı, $h\nu$ gelen fotonun enerjisi, A ise bant kenarı sabitidir. Şekil 3(b)’de kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerin soğurma grafikleri verildi. Soğurma grafiğinin yüksek enerji bölgesindeki $(\alpha hv)^2$ ile $h\nu$ arasındaki linear davranış, Nb_2O_5 ince filmlerin doğrudan bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir (Danish, ve Pandey, 2016). Soğurma grafiklerinden, cam üzerine kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerin yasak enerji aralıkları yaklaşık 3,65 eV olarak belirlendi. Literatürde Nb_2O_5 ince filmlerinin deneysel olarak yasak enerji aralığının, filmin yapısal fazına, tanecik boyutuna ve morfolojisine bağlı olarak 3 ile 4 eV aralığında değiştiği görülmektedir (Sancho-Parramon, Janicki, ve Zorc, 2008; Dash vd., 2015).



Şekil 3. Cam üzerine kaplanan Nb_2O_5 filmlerin (a) UV-Vis geçirgenlik ve (b) $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi

Şekil 4’de, Nb₂O₅ ince filmlerin 400-1100 nm dalga boyu aralığındaki yansıtma eğrileri verildi. Nb₂O₅ ince filmlerin yansıtma spektrumu, Si altaşın yansıtmasında önemli bir azalma olduğunu göstermektedir. Si altaş üzerine kaplanan Nb₂O₅ filmlerinin yansıtma grafikleri incelendiğinde, Si altaşın görünür bölgede yaklaşık %40 olan yansıtmasının, kaplanan Nb₂O₅ ince film nedeniyle yaklaşık %20 düştüğü görülmektedir.

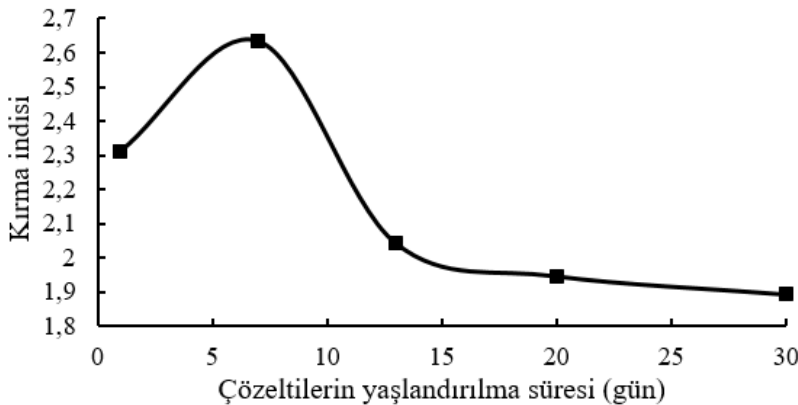


Şekil 4. Si üzerine kaplanan Nb₂O₅ filmlerin UV-Vis yansıtma spektrumu

400-1100 nm dalga boyu aralığında, Nb₂O₅ ince filmlerin kırma indisleri

$$n = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \quad (3.3)$$

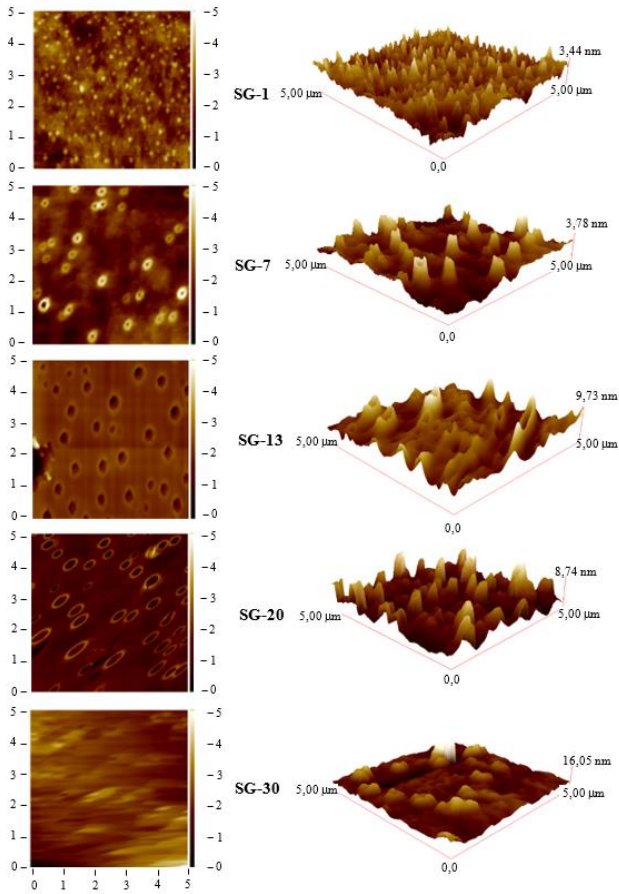
İfadesi kullanılarak yansıtma değerlerinden hesaplandı (Friedbacher, ve Bubert, 2016). Kırma indisi için verilen bu ifade, E_g’den küçük spektral bölgede, soğurmanın azalması sonucu kırma indisinin karmaşık kısmının (yani sönüm katsayısının) kırma indisine oranla çok küçük ($k \ll n$) olması gerçeğiyle uyumlu bir yaklaşımdır (Casey, Sell, ve Panish, 1974). Şekil 5’te farklı süreler boyunca yaşlandırılan çözeltiler kullanılarak Si üzerine kaplanan filmlerin kırma indislerindeki değişimin çözeltilerin yaşlandırılma süresine göre değişimi görülmektedir. Nb₂O₅ ince filmlerinin, 530 nm dalga boyundaki kırma indisleri 2,63 ile 1,89 arasındadır ve çözeltilerin yaşlandırılma sürelerine göre değişmektedir. Çözeltilerin yaşlandırılma süreleri arttıkça, bu çözeltiler ile hazırlanan filmlerin kırma indislerinde bir azalma görülmektedir. Bu azalışın iki sebebi olduğu düşünülmektedir (Lazarova, Vasileva, Marinov, ve Babeva, 2013): i-) Çözelti yaşlandıkça içindeki çözücü buharlaştığı için çözelti yoğunlaşır. Yoğunlaşan çözelti çoğul yoğunlaşma tepkimesinin gerçekleştirmesini bir dereceye kadar önler. ii-) Çözelti yaşlandıkça parçacıklar zamanla bir araya toplanır. Bu büyük parçacıklar daha büyük parçacıklardan saçılarak optik kayıplara neden olur.



Şekil 5. Farklı süreler boyunca yaşlandırılan çözeltiler kullanılarak Si üzerine kaplanan filmlerin 530 nm dalga boyundaki kırma indislerinin yaşlandırılma süresine göre değişimi

Nb₂O₅ ince filmlerini kaplamak için kullanılan çözeltilerin yaşlandırılma sürelerinin filmlerin yüzey morfolojisine etkisini incelemek için AFM karakterizasyonu gerçekleştirildi. Nb₂O₅ ince filmlerinin 5x5

μm^2 lik alanda alınan 2 ve 3 boyutlu AFM görüntüleri Şekil 6'da görülmektedir. SG-1 numunesinin AFM analizinden hesaplanan tanecik büyüklüğü yaklaşık 70 nm olup numunenin yüzeyi homojen ve daha büyük taneciklidir. Bu sonuç, XRD analizinden hesaplanan tanecik boyutu ile örtüşmektedir. SG-30 numunesinin yüzeyinin diğer numunelere göre daha pürüzlü olduğu görüldü. Filmlerin AFM görüntülerinden hesaplanan yüzey pürüzlülüğünün karesinin ortalamasının karekök değerleri (RMS) nano mertebede yüzey homojenliğini anlamak için önemli bir parametredir (Fang, Haplepete, Chen, ve Helms, 1997). Bundan dolayı, kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerin RMS değerleri AFM görüntülerinden hesaplandı. Farklı süreler boyunca yaşlandırılan çözeltiler ile kaplanan Nb_2O_5 ince filmlerinin RMS değerleri, Tablo 1'de verildi. Çözelti yaşlandıkça filmin morfolojisi bozulduğundan RMS değerleri artmaktadır. AFM sonuçları, Nb_2O_5 ince filmlerinin yüzey morfolojisinin, filmleri kaplamak için kullanılan çözeltilerin yaşlandırılma sürelerinden büyük ölçüde etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 6. Si üzerine kaplanan Nb_2O_5 filmlerin 2 ve 3 boyutlu AFM görüntüleri

Tablo 1 Si alttaşı üzerine kaplanan Nb_2O_5 ince filmleri için elde edilen parametreler

Alttaş	Çözeltinin yaşlandırılma süresi (gün)	Filmin ismi	Film kalınlığı (nm)	RMS (nm)	Yasak bant aralığı (eV)*
Si	1	SG-1	35,5	0,36	3,65
	7	SG-7	38,3	0,50	3,47
	13	SG-13	40,4	1,10	3,49
	20	SG-20	41,0	1,29	3,45
	30	SG-30	41,1	1,41	3,44

* E_g değerleri, cam üzerine yapılan kaplamalar için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişiminden belirlenmiştir (Şekil 3b).

4. Sonuçlar

Döndürerek kaplama cihazında sol-jel yöntemi ile cam ve Si alttaş üzerine farklı süreler boyunca yaşlandırılan çözeltiler kullanılarak Nb₂O₅ ince filmleri kaplandı. Nb₂O₅ ince filmlerinden, 1 gün yaşlandırılmış çözeltiler ile kaplanan SG-1 numunesinin en iyi yapısal ve optik özelliklere sahip olduğu görüldü. SG-1 numunesinin tanecik boyutu 46,12 nm olarak hesaplandı. Bu sonuçlardan, SG-1 numunesinin kristal yapıya sahip olduğu görüldü. SG-1 numunesi 400-700 nm dalga boyu aralığında %80 civarında geçirgenliğe ve 400-1100 nm dalga boyu aralığında %20 dolayında yansıtıma sahiptir. Buna ek olarak, SG-1 numunesinin yasak enerji aralığı yaklaşık 3,65 eV olarak belirlendi. Ayrıca SG-1 numunesinin tanecik büyüklüğü 70 nm olup bu çalışmada kullanılan filmler arasında en iyi yüzey morfolojisine sahip olduğu görüldü. Nb₂O₅ ince filmlerinin yapısal ve optik özellikleri ile yüzey morfolojilerinin çözeltilerin yaşlandırılma sürelerinden büyük ölçüde etkilendiği gözlemlendi. Si alttaş ve üzerine kaplanan Nb₂O₅ ince filmin toplam yansıtması, Si alttaşın tek başına yansıtmasından daha küçüktür. Bu yüzden; Si alttaş üzerine kaplanan Nb₂O₅ ince filmler, kristal Si temelli güneş hücrelerinde yansıtma önleyici olarak kullanılabilirler.

Teşekkür

Bu çalışma T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından 2016K121220 nolu proje ile desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Aegerter M. A. (2001). Sol-Gel Niobium Pentoxide: A Promising Material for Electrochromic Coatings, Batteries, Nanocrystalline Solar Cells and Catalysis. *Solar Energy Materials Solar Cells* (68), 401-422. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00372-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00372-X)
- Agarwal G. ve Reddy G. B. (2005). Study of Surface Morphology and Optical Properties of Nb₂O₅ Thin Films with Annealing. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (16), 21-24. Erişim adresi: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10854-005-4953-x.pdf>
- Bahuguna G. Mishra N.K. Chaudhary P. Kumar A. ve Singh R. (2016). Thin Film Coating through Sol-Gel Technique. *Research Journal of Chemical Sciences* 6(7), 65-72. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/314093443>
- Casey H. C. Sell D.D. ve Panish M.B. (1974). Refractive index of Al_xGa_{1-x}As between 1.2 and 1.8 eV. *Appl. Phys. Lett* (24), 63-65. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1063/1.1655095>
- Cha J.-H. Ashok K. Kissinger N.J. S. Ra Y.-H. Sim J.-K. Kim J.-S. ve Lee C.-R. (2011). Effect of Thermal Annealing on the Structure, Morphology, and Electrical Properties of Mo Bottom Electrodes for Solar Cell Applications. *Journal of the Korean Physical Society* (59), 2280-2285. Erişim adresi: <https://doi.org/10.3938/jkps.59.2280>.
- Chen K.-N. Hsu C.-M. Li J. Liou Y.-C. ve Yang C.-F. (2016). Investigation of Antireflection Nb₂O₅ Thin Films by the Sputtering Method under Different Deposition Parameters. *Micromachines* 7(151), 2-12. Erişim adresi: <https://doi.org/10.3390/mi7090151>
- Danish M. ve Pandey A. (2016). Influence of Thickness and Calcination under Ammonia Gas Flow on Topographical, Optical and Photocatalytic Properties of Nb₂O₅ Thin Films Prepared by Sol-Gel: A Comparative Study. *Mater Sci: Mater Electron* (27), 6939-6946. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4648-5>
- Dash J.K. Chen L. Topka M.R. Dinolfo P.H. Zhang L.H. Kisslinger K. Lua T.-M. ve Wanga G.-C. (2015). A Simple Growth Method for Nb₂O₅ Films and Their Optical Properties, *RSC Adv.*, (5), 36129-36139. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1039/C5RA05074J>
- Fang S.J. Haplepete S. Chen W. ve Helms C.R. (1997). Analyzing atomic force microscopy images using spectral methods. *Journal of Applied Physics*, (82), 5891-5898. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1063/1.366489>
- Friedbacher G. ve Bubert H. (2016). *Surface and Thin Film Analysis: A Compendium of Principles, Instrumentation, and Applications*. Wiley-VCH part 1, page 11.
- Georgiev R. Georgieva B. Vasileva M. Ivanov P. ve Babeva T. (2015). Optical Properties of Sol-Gel Nb₂O₅ Films with Tunable Porosity for Sensing Applications. *Advances in Condensed Matter Physics*, (2015), 1-8. Erişim adresi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/403196>

- Hall D. B. ve Underhill P. (1998). Spin Coating of Thin and Ultrathin Polymer Films. *Polymer Engineering and Science* (38), 2039-2045. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/pen.10373>
- Lazarova K. Vasileva M. Marinov G. ve Babeva T. (2014). Optical Characterization of Sol–Gel Derived Nb₂O₅ Thin Films. *Optics Laser Technology* (58), 114–118. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.11.014>
- Lazarova K. Vasileva M. Marinov G. ve Babeva T. (2013). Sol-Gel Derived Nb₂O₅ Thin Films for Photonic Applications. *Bulgarian Chemical Communications*, (45), 23-27. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/259468977>
- Livage J. ve Ganguli D. (2001). Sol-Gel Electrochromic Coatings and Devices: A Review. *Solar Energy Materials Solar Cells* (68), 365-381. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00369-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00369-X)
- Ozer N. Barreto T. Büyüklimanlı T. ve Lampert C.M. (1995). Characterization of Sol-Gel Deposited Niobium Pentoxide Films for Electrochromic Devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells* (36), 433-443. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)00197-9](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)00197-9)
- Ozer N. Chen D.-G. ve Lampert C.M. (1996). Preparation and Properties of Spin-Coated Nb₂O₅ Films by The Sol-Gel Process for Electrochromic Applications. *Thin Solid Films* (277), 162-168. Erişim adresi: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271603/1-s2.0-S0040609099X00009/>
- Pehlivan E. Tepehan F. Z. ve Tepehan G. G. (2003). Comparison of Optical, Structural and Electrochromic Properties of Undoped and WO₃-Doped Nb₂O₅. *Solid State Ionics* (165), 105-110. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2003.08.021>
- Rabaa A.M. Bautista-Ruíza J. ve Joya M.R. (2015). Synthesis and Structural Properties of Niobium Pentoxide Powders: A Comparative Study of the Growth Process. *Materials Research* 1-7. Erişim adresi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0733>
- Sancho-Parramon J. Janicki V. ve Zorc H. (2008). Compositional Dependence of Absorption Coefficient and Band-Gap for Nb₂O₅–SiO₂ Mixture Thin Films. *Thin Solid Films* (516), 5478–5482. Erişim adresi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.028>
- Wood D. L. ve Tauc L. (1972). Weak absorption tails in amorphous semiconductors. *Physical Review B* (5), 3144-3151. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.5.3144>