

DC Saçtırma Metoduyla Üretilmiş Çift Katmanlı Mo İnce Filmlerin Yarı Kantitatif Doku Analizinin Yapılması ve Kutup Figürlerinin Araştırılması

Celal Alp YAVRU*¹, Murat KALELİ²

¹Isparta Uygulama Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 16.05.2022, Kabul / Accepted: 02.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2023)

Anahtar Kelimeler

İnce film,
Molibden,
Doku analizi,
Kutup figürleri,
XRD

Öz: Molibden (Mo) malzemesi benzersiz özellikleri sayesinde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. İnce filmlerin doku analizleri sayesinde katmanlar arası arayüz durumlarının uyumluluğu araştırılmaktadır. Üretim parametrelerine ve sonrasında yapılan işlemlere göre filmlerin dokuları değişebilmektedir. Bu sebeple kullanım alanına bağlı olarak en uygun dokuya sahip Mo ince filmlerin üretilmesi için ideal üretim parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, CIGS güneş gözesi uygulamalarında sıklıkla istenen BCC yapısında ve (110) düzlemindeki Mo ince filmler üretilmiştir. Üretim, Mo filmin altta yüzeyine tutunumunu ve elektriksel iletkenliğini iyileştirmek için çift katmanlı üretim stratejisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen filmlerin SEM, AFM ve XRD sistemleri ile yüzey, topoğrafya ve yapı analizleri gerçekleştirilmiş ayrıca yarı kantitatif doku analizleri yapılarak kutup figürleri elde edilmiştir. Topoğrafik ve detaylı yapısal analiz sonuçları birbirleri ile ve literatürde var olan diğer çalışmalar ile kıyaslandığında bu çalışmada ortaya koyulan üretim parametrelerinin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Semi-Quantitative Texture Analysis and Investigation of Pole Figures of Bi-Layer Mo Thin Films Produced by DC Sputtering Method

Keywords

Thin film,
Molybdenum,
Texture,
Pole figure,
XRD

Abstract: Molybdenum (Mo) material is used in many different fields thanks to its unique properties. The compatibility of interface states between layers is investigated using texture analysis of thin films. The textures of the films may change according to the production parameters and subsequent processes. For this reason, it is necessary to determine the ideal production parameters in order to produce Mo thin films with the most suitable texture depending on the usage area. In this study, Mo thin films in BCC structure and (110) plane, which are often desired in CIGS solar cell applications, could be produced. The fabrication was carried out using a bi-layer fabrication strategy to improve the adhesion and electrical conductivity of the Mo film to the substrate surface. Surface, topography and structure analyzes of the produced films were performed with SEM, AFM and XRD systems, and polar figures were obtained by semi-quantitative texture analysis. When the topographic and detailed structural analysis results are compared with each other and with other studies in the literature, the usability of the production parameters revealed in this study has been demonstrated.

1. Giriş

Molibden (Mo) metali, yüksek erime noktası, yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı, düşük sıcaklıklarda ki

düşük termal genleşme katsayısı yüksek Young modülü, yüksek sıcaklık iletkenliği ve yüksek elektriksel iletkenli ile benzersiz özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sebebiyle levha, şerit veya ince film

*İlgili yazar: c.alpyavru@gmail.com

formalarında üretilen molibden malzemesi elektronik, elektrik gücü, aydınlatma teknolojisi, nükleer enerji ve havacılık mühendisliği gibi farklı endüstriyel ve teknolojiler uygulamalar için en sık kullanılan ve araştırılan malzemelerden biridir [1].

Mo, özellikle $CuInSe_2$ (CIS) ve $Cu(In_xGa_{1-x})Se_2$ (CIGS) temelli güneş hücreleri çalışmalarında arka kontak olarak tercih edilmektedir [2]. Literatürde Mo dışında Pt, Au, Ag, Cu, W, Cr, Ta, Nb, V, Ti, Mn ve ITO (indiyum kalay oksit) gibi farklı iletken arka kontaklar üzerine üretilmiş CIS ve CIGS güneş hücresi çalışmaları da mevcuttur [3-6]. Fakat bu çalışmalarda, CIS ve CIGS aktif katmanı büyütülürken uygulanan yüksek sıcaklığa karşı görece yüksek kararlılığı, Cu ve In ile bağ yapmaya karşı direnci ve aktif katmana karşı düşük temas direnci nedeniyle Mo diğerlerine göre baskın şekilde tercih edilen arka kontak malzemesi olmuştur [7]. CIGS güneş hücrelerinden bugüne kadar elde edilen maksimum verim yine Mo malzemesinin arka kontak olarak kullanıldığı hücrelerde elde edilmiştir [8]. Farklı ince film üretim teknikleri ile farklı altlıklar üzerine kaplanabilen Mo malzemesi için en çok tercih edilen biriktirme yöntemleri RF ve DC ile saçtırma yöntemleridir [6].

Mo katmanı üretiminde bir diğer önemli husus, Mo malzemesinin altlık olarak kullanılan yüzey üzerine iyi şekilde tutunmasıdır. Mo arka kontakın yüzeye homojen şekilde tutunmadığı durumlarda yüzeyden ayrıldığı ve farklı yapı kusurlarına neden olduğu bilinmektedir [9]. Bu nedenle güneş hücresi kısa devre olmakta ve çalışmamakta ya da verimde ciddi kayıplara sebep olmaktadır. Mo' nin altlık yüzeyine tutunmasını arttırmak için yapılan çalışmalarda, Mo ince filmlerin yüzeye tutunma (adhezyon) özelliği arttıkça elektriksel iletkenliklerinin görece azaldığı belirlenmiştir. Elektriksel iletkenliğin düşük olması, güneş hücresi çevrim veriminde dirençten kaynaklı verim düşüklüğüne sebep olmaktadır [10]. Bu problemleri ortadan kaldırmak için CIGS güneş hücresi çalışmalarında Mo arka kontakının çift katman (bi-layer) şeklinde büyütüldüğü yeni üretim stratejileri geliştirilmiştir [11]. İlk Mo katmanı yüzeye tutunmasının görece daha yüksek olması için, ikinci katman ise elektriksel iletkenliğin ilk katmana göre daha yüksek olması için farklı üretim parametrelerde kaplanmaktadır [12]. Böylece hem yüzey tutuculuğu hem de elektriksel iletkenliği yüksek Mo arka kontaklar elde edilmektedir [13].

Aygıt yapısında kullanılacak ince filmlerin kantitatif doku analizi araştırmaları, kutup figürlerinin (pole figure) belirlenmesi, bu sonuçların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sonuçlarının kıyaslanarak değerlendirilmesi sonucu güneş hücreleri çalışmaları ile farklı optik ve elektronik çalışmalarda katmanlar arası oluşacak ara yüzlerin ve elektron geçiş mekanizmalarının optimize edilebilmesi için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Mo malzemesi cam altlıklar üzerine DC

saçtırma yöntemiyle çift katman (bi-layer) olarak kaplanmıştır. Üretilen çift katman Mo malzemesinin SEM ve AFM sistemleri ile morfolojik analizi, XRD sistemi ile de yapısal analizi, kantitatif doku analiz yapılmış ve kutup figürleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleri ile ve literatürde var olan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmış ve güneş çevrim verimi yüksek CIGS güneş hücreleri için uygun arka kontak Mo üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Molibden ince filmlerin üretimine başlanmadan önce, altlık olarak kullanılacak mikroskop camları $2 \times 2 \text{ cm}^2$ alanlar şeklinde kesilmiştir. Kesilen cam altlıklar sırasıyla etanol, metanol, aseton ve tolüen içerisinde 15' er dakika ultrasonik titreştirici içerisinde bekletilmiş ve son olarak %95 saflıkta azot gazı ile kurutulmuştur. Üretime hazır hale getirilen cam altlıklar, altına tutucuya sabitlenerek VAKSİS Midas 4T1M fiziksel buhar biriktirme sistemine yerleştirilmiştir. İnce filmler, %99,95 saflıkta (Kurt J. Lesker Company, USA), 2,00" çapında ve 0,250" kalınlığa sahip Mo hedef malzemesi kullanılarak DC saçtırma yöntemiyle üretilmiştir.

Üretimde kullanılan Mo hedef malzeme ile altlıklar arasındaki mesafe $\sim 20 \text{ cm}$ ' dir. Üretim çift katman (bi layer) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk katmanın cam altlıklar üzerine iyi tutunabilmesi için ikinci katmana göre daha düşük vakum seviyesi ve daha düşük DC güç uygulanarak biriktirilmiştir. İkinci katman ise elektriksel iletkenliğin ilk katmana göre daha iyi olması için daha yüksek vakum seviyesinde ve daha yüksek DC güç ile ilk katman üzerine kaplanmıştır.

Her iki Mo katmanının üretim parametreleri Tablo 1' de gösterilmektedir.

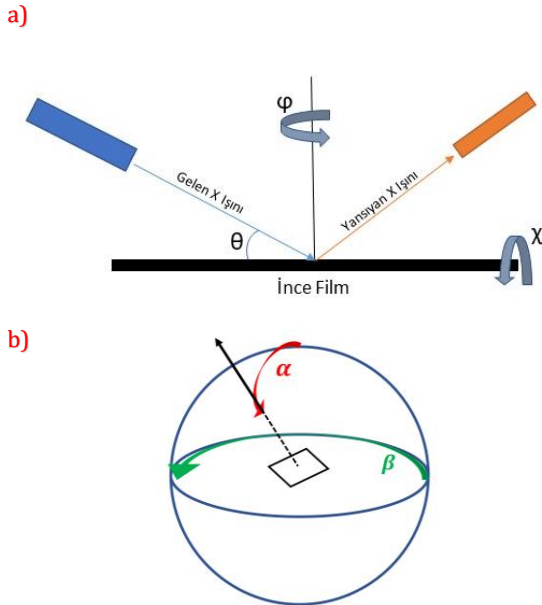
Tablo 1. Çift katmanlı Mo ince filmlerin üretim parametreleri

	İlk Katman	İkinci katman
DC Güç	70 W	120 W
Vakum Seviyesi	$1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$	$4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
Alttaş Sıcaklığı	25 °C	250 °C
Döndürme hızı	12 rpm	12 rpm
Saçılma Hızı	0,3 - 0,8 Å/s	1,0- 2,1 Å/s
Kaplama Süresi	45 dk.	25 dk.
Argon gaz akış hızı	20 sccm	20 sccm

Üretim öncesinde sistem vakum seviyesi $4 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ seviyesine kadar yükseltilmiştir. İlk Mo katmanı üretilirken cam yüzeyindeki stres oluşmaması ve saçılan Mo malzemesinin cam yüzeyine rahat tutunabilmesi için 25 °C alttaş sıcaklığında ve düşük

saçılma hızlarında gerçekleştirilmiştir. İkinci katman Mo üretimine geçildiğinde ise altta sıcaklığı 5 dakika içerisinde 250 °C'ye çıkarılmıştır. Sıcaklığın yükseltildiği 5 dakikada altta tutucu önündeki kapak kapatılmış ve herhangi bir şekilde kaplama yapılmamıştır. Altta sıcaklığı istenilen seviyeye geldiğinde ikinci katman üretimine başlanmıştır.

Çift katman Mo ince filmlerin BRUKER D8 Advance X ışını kırınımı (XRD) sistemi yapısal analizleri yapılmış ve tercih edilen yönelimleri, kutup figürleri kullanılarak belirlenmiştir. Bir kutup figürü, seçilen bir kristal yöneliminin, numune düzlem koordinatlarına göre açılal dağılımını ifade etmektedir. Yani yapıda var olan bir yönelimin film düzlemine göre pozisyonunun istatistiksel dağılımını ifade etmektedir. Belirli bir Bragg açısındaki kırınım şiddetleri, o oryantasyon için kırınımı sağlayan düzlemlerin sayısı ile orantılıdır. Araştırılan numunenin oryantasyona bağlılığını incelemek için farklı kutupsal koordinatlara ayarlanabilen bir Euler beşiği (Euler cradle) yardımıyla kutup figürleri elde edilebilmektedir. Kutup figürlerinden görülen deneysel ve yeniden hesaplanan değerlerin karşılaştırılması ile de ince filmde kristalleşmenin kalitesi ve yönelim tutarlılığı ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilir. Bu sayede, doku analizi sonucu elde edilen deneysel kutup figürlerinden yönelim dağılımı (orientation distribution (OD)) elde edilebilir [14]. Numunelerin doku analizleri gerçekleştirilirken kullanılan rotasyon açıları (χ , ϕ) "Şekil 1a" da, analiz sonucu elde edilen kutup figürlerinin koordinatları da "Şekil 1b" de (α , β) gösterilmiştir. χ , ϕ açılarından alınan kırınım verileri sistem tarafından toplanarak α , β kutup figürleri hesaplanıp iki boyutta istatistiksel bir dağılım figürü oluşturulmaktadır.

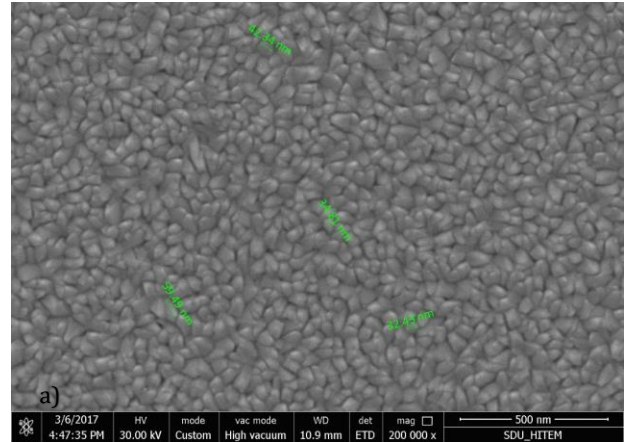


Şekil 1. a) Numune XRD analizinde taranan rotasyon açıları (χ , ϕ), **b)** Analiz sonucu oluşturulan kutup figürlerini oluşturmak için kullanılan α , β açılarının küre yüzeyindeki iz düşümünün gösterimi.

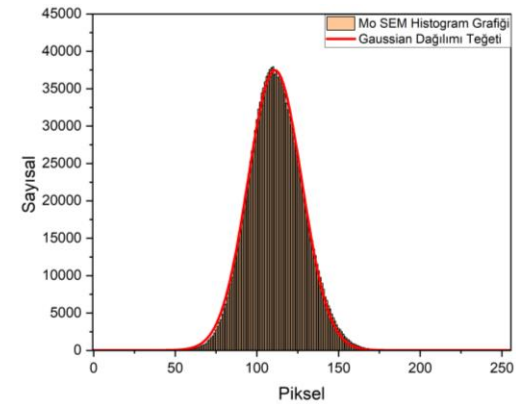
Ayrıca çift katman Mo ince filmlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM (FEI Quanta Feg 250/FE-SEM)) analizinden filmlerin yüzey topoğrafyası ve katman kalınlıkları incelenmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu (NanoMagnetics/ez-AFM) sistemi ile biriktirilen filmlerin yüzey pürüzlülük analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen SEM, AFM ve XRD sonuçları karşılaştırılmış ve literatürdeki diğer çalışmalar ile beraber değerlendirilerek yüksek verimli çalışacak CIGS temelli optik ve elektronik aygıtlar için uygun Mo üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

3. Bulgular

"Şekil 2" de çift katman olarak üretilen Mo ince filmlere ait SEM görüntüleri görülmektedir. Elde edilen SEM yüzey görüntülerinde, Mo filmlerin oldukça homojen şekilde kaplandığı görülmektedir. Ayrıca film yüzeyinde boyutları yaklaşık 30 nm ile 60 nm arasında değişen kümelenmelerin olduğu tespit edilmiştir. Bu kümelenmeler farklı Mo fazlarının bir araya gelerek oluşturduğu yapıdır. SEM görüntüsündeki kontrast farklılığı göz önüne alınırsa kümelenmelerin çoğunluğunun altta yüzeyinden film yüzeyine doğru dikey şekilde geliştiği görülmektedir.



Şekil 2. Mo ince filmlerin $\times 200000$ büyütmede alınmış SEM görüntüleri

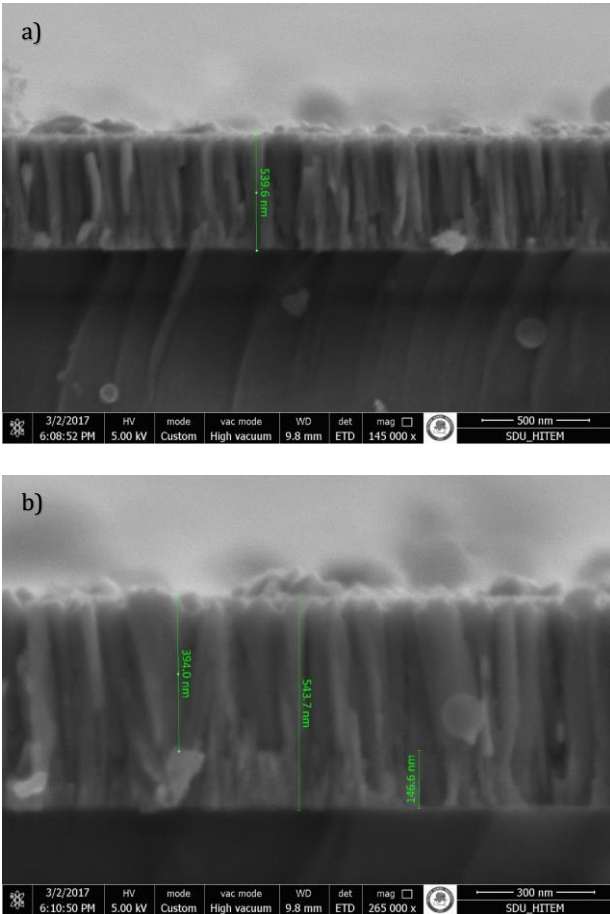


Şekil 3. Mo ince filmlere ait SEM görüntülerinden elde edilen histogram grafiği ve uygun Gaussian dağılımı

Yüzey SEM görüntüsünün görüntü işleme yöntemi ile gri skalada incelenen histogram grafiği elde edilmiş ve histogram grafiğinin Gaussian dağılımı teğeti

bulunarak “Şekil 3” de gösterilmiştir. Gaussian dağılımından elde edilen belirleme katsayısı r^2 değeri 0,998 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan r^2 değerinin ideal 1 değerine çok yakın olması, kümelenmelerin boyutlarından bağımsız olarak homojen şekilde dağıldığını göstermektedir.

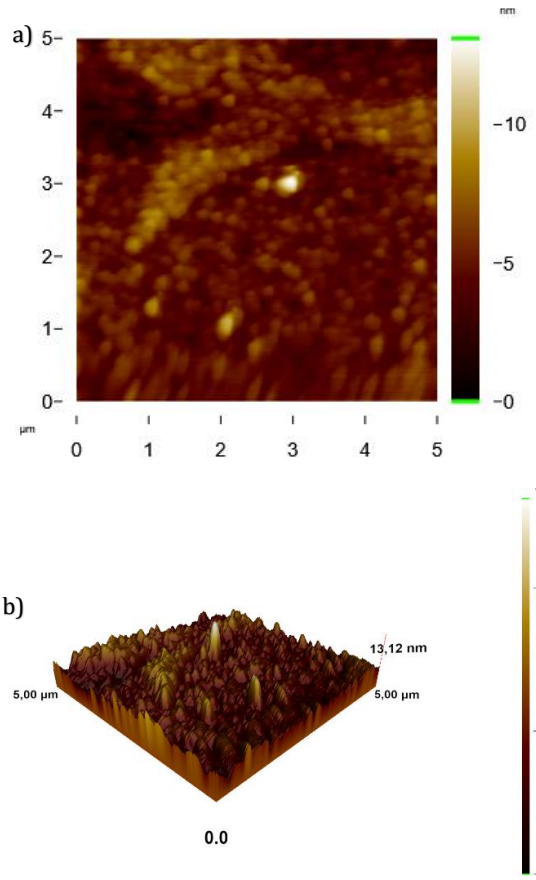
Üretilen filmlerin kesitinden alınmış SEM görüntüleri “Şekil 4a ve 4b” de gösterilmiştir. “Şekil 4a” da çift katman halinde üretilen Mo filmlerin iki katmanlı yapıda olduğu görüntülerdeki kontrast farkından dolayı açıkça görülebilmektedir. İlk katmanın yüzeye iyi tutunmasından kaynaklı olarak ikinci katmandan daha yoğun şekilde biriktiği yine kesit görüntülerinden anlaşılmaktadır. Ayrıca ilk katmandaki film yapılanmasının alttaş yüzeyine dik olduğu görülmektedir. Üzerine biriktirilen ikinci katmanın ise ilk katmanda görülen bu oluşumu takip ettiği tespit edilmiştir. Bu kesit görüntülerden elde edilen sonuçlar, filmin yüzeyinden alınan SEM görüntülerindeki kümelenmelerin çoğunun film yüzeyine doğru dikey şekilde geliştiği yorumunu desteklemektedir.



Şekil 4. a) Mo ince filmlerin kesitinden 145000 büyütmede, **b)** $\times 265000$ büyütmede alınmış SEM görüntüleri

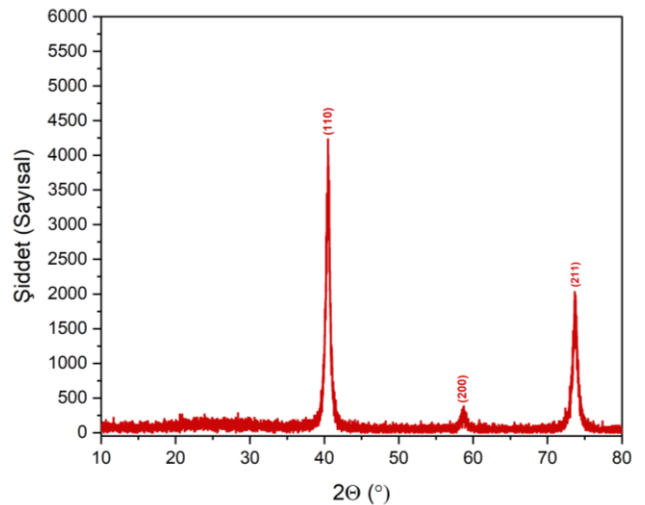
“Şekil 4b” den ilk Mo katmanının 146 nm, ikinci Mo katmanının 394 nm ve toplam film kalınlığının yaklaşık olarak ~ 544 nm olduğu görülmektedir. Mo ince filmlerin 2 boyutlu, 3 boyutlu AFM görüntüleri sırasıyla “Şekil 5a, ve 5b” de verilmiştir. Filmlerin AFM

görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ lik alanda alınmıştır. 3 boyutlu AFM görüntüsünden, film yüzeyindeki yapılanmaların dikey şekilde olduğu açıkça görülmektedir. Bununla beraber film yüzeyinin AFM analizinden, ortalama pürüzlülüğün $R_a=0,94$ nm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. a) Mo ince filmlerin 2 boyutlu, **b)** 3 boyutlu AFM görüntüleri

Filmlerin XRD verileri Bragg-Brantano yöntemiyle 10° ile 80° 2θ aralığında alınmıştır. Ölçüm sırasında $\text{CuK}\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$ dalga boyu X ışını kullanılmıştır.



Şekil 6. Mo ince filmlerine ait XRD grafiği

Elde edilen XRD grafiği “Şekil 6” de gösterilmektedir. XRD grafiğinde görülen pikler Mo için PDF 00-042-1120 standardı ile eşleşmektedir. Üretilen Mo

filmlerin incelenen açı aralıklarında 3 farklı yönelime sahip olduğu XRD grafiğinden görülmektedir. 40,51° de görülen (110) yönelimine ait pikin, grafikteki diğer piklere oranla baskın olduğu ve üretilen çift katmanlı Mo filmler için ana pik olduğu söylenebilir. Pik pozisyonları, bu piklere ait (h, k, l) indisleri ve kristal boyutları Tablo 2’ de verilmiştir. Burada XRD grafiğindeki pik pozisyonlarına ait kristal boyutları, standart Debye-Scherrer Denklemi ile her bir pik için hesaplanmıştır.

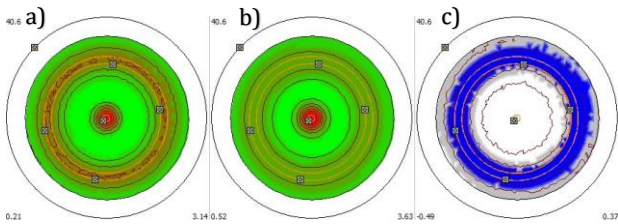
Tablo 2. XRD grafiğindeki pik pozisyon açıları, bu açılara ait hkl indisleri ve kristal boyutları

Açı (2θ°)	h,k,l	Kristal boyutu (nm)
40,51	1,1,0	14,23
58,60	2,0,0	5,34
73,68	2,1,1	9,19

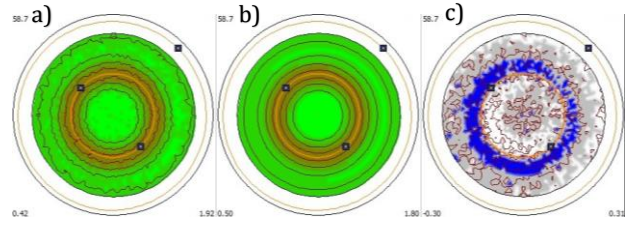
Literatürde daha önce yapılmış olan yapı bölgesi modeli (the sstructure zone model (SZM)) çalışmaları, ince film üretimi sırasında meydana gelen kristalleşmenin, morfolojik olarak pürüzsüz bir yüzeye sahip, düz sütunlu tanelerden oluştuğunu göstermiştir. Cisim merkezli kübik kristal yapı (BCC) için (110) yöneliminin en düşük yüzey enerjisine sahip kristal düzlem olduğu bilinmektedir ki bu çalışmada da ana pik bu düzlemde ortaya çıkmıştır [15,16]. Bu sonuçlar ile literatürdeki diğer bilgiler karşılaştırıldığında üretilen Mo ince filmlerin aktif katmana karşı düşük temas direnci gösterecek şekilde olduğu yorumu yapılabilir.

Krsital yönelimlerinin birbirlerine göre uyumlu olması aygıt yapısında ortaya çıkabilecek arayüz kusurlarını azaltmakta ve bunlardan kaynaklı elektron transfer mekanizmalarını iyileştirmektedir. CIGS güneş hücrelerinde en yüksek verimleri elde edildiği çalışmalarda Mo ince filmlerin XRD sonuçlarında ana pikin (110) düzleminde olduğu bilinmektedir [8,18]. Bu çalışmada üretilen filmlerin krsitalenme düzlemlerinin dağılım homojenliğini tespit etmek için de kantitatif doku analizi yapılmıştır.

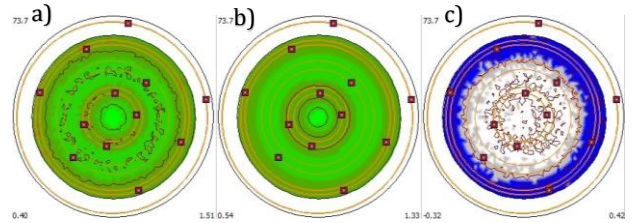
Üretilen Mo ince filmlerde görülen 3 farklı yönelim için kantitatif doku analizi (texture) XRD sisteminde bulunan MulTex 3 yazılımı ile yapılmış ve “Şekil 7, 8 ve 9” de sırasıyla (110), (200) ve (211) yönelimlerine ait kutup figürleri gösterilmiştir.



Şekil 7. Mo ince filmlerin (110) yönelimi için a) deneysel, b) yeniden hesaplanan, c) a ve b arasındaki farkı gösteren kutup figürleri



Şekil 8. Mo ince filmlerin (200) yönelimi için a) deneysel, b) yeniden hesaplanan, c) a ve b arasındaki farkı gösteren kutup figürleri



Şekil 9. Mo ince filmlerin (211) yönelimi için a) deneysel, b) yeniden hesaplanan, c) a ve b arasındaki farkı gösteren kutup figürleri

Mo ince filmlerde yönelimlerin birbirlerine göre değişimlerinin üretim parametrelerine bağlı olarak değiştiği daha önce yapılan çalışmalarda görülmektedir [17]. Deneysel kutup figürleri, yeniden hesaplanan kutup figürleri ile karşılaştırıldığında özellikle (110) yönelimine ait kutup figürlerinin teorik olarak hesaplanan figür ile çok uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuç, (110) kristal düzleminin film düzlemine homojen bir şekilde yerleştiğini göstermektedir. Bununla beraber (211) yöneliminde benzerliğin görece (110) yönelimine göre daha az olduğu ve (200) yöneliminde ise benzerliğin daha da azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar kantitatif olarak değerlendirildiği takdirde XRD grafiğinde görülen pik şiddetlerinin birbirlerine göre oranları ile benzer oldukları görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

DC saçtırma yöntemi ve çift katman stratejisi ile biriktirilen Mo ince filmlerin kristallenme kalitesi ve kristallenme dağılımının homojenliğini belirlemek için kantitatif doku analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucu Mo ince filmlerin kutup figürleri incelenmiş ve belirli bir oryantasyon dağılımına sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Çift katman halinde üretilen Mo ince filmlerin tercih edilen yönelimlerinin literatürde yüksek verimli CIGS güneş gözelerinde istenen BCC yapısında (110) düzleminde olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu doku analizleri ile Mo ince filmlerin uygun kristal yapı ve yönelimde oldukları ve kristallenmenin (110) düzleminde en simetrik dağılımı verdiği teyit edilmiştir. Elde edilen SEM ve AFM sonuçları XRD sistemi ile elde edilen yapısal analizler ile karşılaştırılmış ve birbirleri ile uyumlu oldukları görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan çift katmanlı üretim stratejisinin, CIGS güneş hücrelerinde arka

kontakt olarak kullanılabilir Mo ince filmlerin üretimi için uygun olduğu söylenebilir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarlarından Celal Alp YAVRU' ya 100/2000 Doktora Programı kapsamında destek veren Yükseköğretim Kurulu (YÖK)' na teşekkür ederiz.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Hünsche, I., Oertel, C., Tamm, R., Skrotzki, W., Knabl, W. 2004. Microstructure and Texture Development During Recrystallization of Rolled Molybdenum Sheets. Materials Science Forum. 470(1), 495–500.
- [2] Salomé, P. M. P., Malaquias, J., Fernandes, P. A., da Cunha, A. F. 2010. Mo Bilayer for Thin film Photovoltaics Revisited. Journal of Physics D: Applied Physics 43(34), 1-7.
- [3] Ashraf, M. A., Alam I. 2020. Numerical Simulation of CIGS, CISSe and CZTS-Based Solar Cells with In₂S₃ as Buffer Layer and Au as Back Contact Using SCAPS 1D. Engineering Research Express 2(3), 1-17.
- [4] Orgassa, K., Schock, H. W., Werner, J. H. 2003. Alternative Back Contact Materials for Thin Film Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells. Thin Solid Films 431(432), 387–391.
- [5] Ashour, S., Alkuhaimi, S., Moutinho, H., Matson, R., Abou-Elfotouh, F. 1993. Junction Formation and Characteristics of CdS/CuInSe₂/Metal Interfaces. Thin Solid Films 226(1), 129-134.
- [6] Ong K. H., Agileswari, R., Maniscalco, B., Arnou, P., Kumar, C. C., Bowers, J. B., Marsadek, M. M. 2018. Review On Substrate And Molybdenum Back Contact in CIGS Thin Film Solar Cell. International Journal of Photoenergy, 2018(1), 1-14.
- [7] Gordillo, G., Grizález, M., Hernandez, L. C. 1998. Structural and Electrical Properties of DC Sputtered Molybdenum Films. Solar Energy Materials and Solar Cells 51(3), 327–337.
- [8] Nakamura, M., Yamaguchi, K., Kimoto, Y., Yasaki, Y., Kato, T., Sugimoto, H. 2019. Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Thin-Film Solar Cell with Record Efficiency of 23.35%. IEEE Journal of Photovoltaics 9(6), 1863–1867.
- [9] Yadav, B. S., Badgujar, A. C., Dhage, S. R. 2017. Effect of Various Surface Treatments on Adhesion Strength of Magnetron Sputtered Bi-Layer Molybdenum Thin Films on Soda Lime Glass Substrate. Solar Energy 157(1), 507–513.
- [10] Bansal, N., Pandey, K., Singh, K., Mohanty, B. C. 2019. Growth Control of Molybdenum Thin Films with Simultaneously Improved Adhesion and Conductivity via Sputtering For Thin Film Solar Cell Application. Vacuum 161(1), 347–352.
- [11] Scofield, J. H., Duda, A., Albin, D., Ballard, B. L., Predecki, P. K. 1995. Sputtered Molybdenum Bilayer Back Contact For Copper Indium Diselenide-Based Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. Thin Solid Films 260(1), 26–31.
- [12] Khatri H., Marsillac, S. 2008. The Effect of Deposition Parameters on Radiofrequency Sputtered Molybdenum Thin Films. Journal of Physics Condensed Matter 20(5), 1-5.
- [13] Li, Z. H., Cho, E. S., Kwon, S. J. 2011. Molybdenum Thin Film Deposited by In-Line DC Magnetron Sputtering as a Back Contact for Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells. Applied Surface Science 25(22), 9682–9688.
- [14] Ricote, J., Chateigner, D. 1999. Quantitative Texture Analysis Applied to the Study of Preferential Orientations in Ferroelectric Thin Films. Cerámica y Vidrio 38(6), 587-591.
- [15] Krishnan, R., Riley, M., Lee, S., Lu, T. M. 2011. Formation of Biaxially Textured Molybdenum Thin Films Under The Influence of Recrystallization Conditions. Thin Solid Films 519(16) 5429–5432.
- [16] Lobanov, M. L., Danilov, S. V., Pastukhov, V. I., Averin, S. A., Khrunyk, Y. Y., Popov, A. A. 2016. The Crystallographic Relationship of Molybdenum Textures After Hot Rolling and Recrystallization. Materials and Design. 109(1), 251–255.
- [17] Yoon, J. H., Yoon, K. H., Kim, J. K., Kim W. M., Park, J. K., Lee, T. S., Baik, Y. J., Seong, T.Y., Jeong, J.H 2010. Effect of The Mo Back Contact Microstructure on The Preferred Orientation of CIGS Thin Films. Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference 978(1), 2443–2447.
- [18] Contreras, M. A., Romero, M. J., Noufi, R. 2006. Characterization of Cu(In,Ga)Se₂ Materials Used in Record Performance Solar Cells. Thin Solid Films 512(1), 51–54.