



## ZnO Kaplama Miktarının n-ZnO/p-Si Heteroeklem Güneş Hücresinin Verimliliğine Etkisi

Gökhan ALGÜN\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 34134, İstanbul, Türkiye*  
\*yazışılan yazar e-posta: *galgun@istanbul.edu.tr, gokhanalgun@gmail.com*

(Alınış: 12.09.2018, Kabul: 05.11.2018, Yayımlanma: 31.11.2018)

**Özet:** Bu çalışmada, n-tipi çinko oksit/p-tipi silisyum (n-ZnO/p-Si) heteroeklem güneş hücresinin verimliliği üzerinde çinko oksit (ZnO) kaplama miktarının etkisi incelendi. ZnO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile sentezlendi. Sentezlenen nanoparçacıklar, döndürerek kaplama metodu kullanılarak cam alttaşlar ve p-Si alttaşlar üzerine kaplandı. Kaplama işlemi, 2, 4, 5 ve 15 kat olarak farklı miktarlarda gerçekleştirildi. Kaplama işleminden sonra, ince film kaplı alttaşlar, kare bir fırın içerisine konuldu ve 500 °C de 30 dk tavlandı. Yapı karakterizasyonu ve yüzey morfolojisi, X-ışını kırınımı metodu (X-ray diffraction; XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy; SEM) kullanılarak analiz edildi. Her bir n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapısı için, kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) elektriksel ölçümler ile tespit edildi ve verimlilik ( $\eta$ ) hesapları yapıldı. Tüm işlemler oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Yapılan bu çalışmaya göre, güneş hücrelerinin verimi, kritik bir kalınlığa kadar, ZnO kaplama miktarının artışı ile artmakta, kritik kalınlık aşıldığında (daha fazla ZnO kaplama yapıldığında) da düşmektedir. Buradan, ZnO kaplama miktarının (ZnO tabaka kalınlığının) güneş hücrelerinin performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu sonucuna varıldı.

**Anahtar kelimeler:** Sol-Jel, Nanoparçacık, İnce film, Heteroeklem, Güneş hücresi, Verimlilik

### The Effect of ZnO Coating Amount on The Efficiency of n-ZnO/p-Si Heterojunction Solar Cell

**Abstract:** In this study, the effect of zinc oxide (ZnO) coating amount on the efficiency of n-type zinc oxide/p-type silicon (n-ZnO/p-Si) heterojunction solar cell was investigated. ZnO nanoparticles were synthesized by sol gel method. The synthesized nanoparticles were coated on glass substrates and p-Si substrates using spin coating method. The coating process was carried out in different amounts as 2, 4, 5 and 15 times. After the coating process, the thin film coated substrates were placed in a square furnace and annealed at 500 °C for 30 min. Structure characterization and surface morphology were analyzed using X-ray diffraction (XRD) method and scanning electron microscopy (SEM). For each n-ZnO/p-Si heterojunction solar cell structure, short circuit current ( $I_{sc}$ ) and open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) were determined by electrical measurements and efficiency ( $\eta$ ) calculations were made. All processes were performed at room temperature. According to this study, the efficiency of solar cells increases with increasing the amount of ZnO coating up to a critical thickness and decreases when the critical thickness is exceeded (due to the more ZnO coating). From this it was concluded that the amount of ZnO coating (ZnO layer thickness) is an important parameter affecting the performance of solar cells.

**Key words:** Sol-Gel, Nanoparticle, thin film, Heterojunction, Solar cell, Efficiency

**Atf için:** G. Algün, “ZnO Kaplama Miktarının n-ZnO/p-Si Heteroeklem Güneş Hücresinin Verimliliğine Etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 13(2), 154-163, 2018.

## 1. Giriş

Bilim ve teknolojinin hızla gelişmesi enerji ihtiyacını her geçen gün arttırmaktadır. Son yıllarda, kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların çevresel ve ekonomik olumsuz etkileri nedeniyle alternatif enerji kaynakları aranmaya başlamıştır. Bu durum insanları, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi doğal süreçlerde var olan ve durmaksızın devam eden enerji akışından sağlanan enerji kaynaklarına (yenilenebilir enerji) yöneltmiştir.

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Elektrik üretimindeki payı gün geçtikçe arttığından, bu alanda yapılan çalışmalar giderek önem kazanmış ve oldukça yoğunlaşmıştır. Bu yoğun çalışmaların başında güneş hücresi (GH) üretimi gelmektedir. GH, güneş enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan en önemli malzemelerden biridir ve çalışma prensibi olarak, üzerine gelen ışığı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren araçtır.

GH'leri üzerindeki ilk çalışma 1954 yılında Chapin ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [1]. Son yirmi yılda çalışmalara hız verilmesi ile, 2001 yılında Takayuki Negami ve arkadaşları, cam üzerine Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) ince film yapısını kaplayarak yaptıkları güneş hücresinden % 18 verim elde etmişlerdir [2]. 2004 yılında R. R. King ve grubu, GaInP/GaInAs/Ge yapısını kullanarak % 37.3 verim elde etmişlerdir [3]. 2005 yılında Michael Grätzel, %11.04 verimliliğe sahip boya sentezli güneş hücreleri üretmiştir [4]. 2010 yılında S.Wojtczuk ve grubu da, InGaP/GaAs/InGaAs yapısını kullanarak % 41 verimliliğe sahip güneş hücresi elde etmeyi başarmışlardır [5]. 2015 yılında Babar Hussain ve arkadaşları, modifiye edilmiş bir yazılım kullanarak, kristal p-tipi silisyum (p-Si) ve n-tipi çinko oksit (n-ZnO) malzemelerine dayanan tek heteroeklemlili güneş hücresi modeli önermişler ve en iyi verimliliği %19 olarak öngörmüşlerdir [6]. 2016 yılında Dongqin Bi ve arkadaşları, yüksek performanslı perovskit güneş hücreleri (PSCs: Perovskite Solar Cells) için alternatif moleküler hole-transport materyallerinin araştırılması kapsamında iki aşamalı sentez yolu ile spiro (fluorene-9,9'-xanthene) esaslı HTM (X59) u geliştirmişler ve bu yapı ile, %19.8 lik bir verimlilik yüzdesine ulaşmayı başarmışlardır [7]. 2017 yılında Morris Dahlinger ve arkadaşları, lazerli işlemleri temel alan silisyum güneş hücrelerinin üretimi üzerine çalışmışlar, lazer aşındırma ile arka dielektrik tabakadaki kontak alanlarını belirleyebileceklerini ve bu sayede arka alüminyum metal kontağı yapılandırabileceklerini ileri sürmüşler ve bu şekilde ürettikleri yapı ile %23.24 lük bir verime ulaşmışlardır [8].

GH'leri üretiminde, verime bağlı olarak maliyet büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, üretimde kullanılan yöntemler ve malzemeler çeşitlilik göstermektedir. Güneş hücrelerinin yapımında çoğunlukla, Moleküler Demet Epitaksi (Moleculer Beam Epitaxy; MBE), Metal Organik Kimyasal Buharla Biriktirme (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition; MOCVD), Kimyasal Banyo Depolama (Chemical Bath Deposition; CBD) ve Sol-Jel (Sol-Gel) gibi yöntemler kullanılmaktadır [9-12]. Epitaksiyel (tabaka-tabaka) büyütme yöntemleriyle üretilen güneş hücrelerinin verimlilikleri yüksek olmakla birlikte, üretim maliyetinin yüksek ve üretim aşamasının uzun ve zor olması bu tip yöntemlerle üretilmiş güneş hücrelerinin endüstriyel alanda geniş kullanım alanına sahip olma olasılığını oldukça düşürmektedir. Diğer taraftan, Sol-Jel gibi kimyasal temelli yöntemler ile üretilen güneş hücrelerinin verimleri nispeten düşük olmasına rağmen, üretim maliyetinin çok az olması, kolay örnek hazırlanması, pahalı laboratuvar araçları gerektirmemesi, oda sıcaklığında dahi örnek hazırlanabilmesi ve geniş yüzeylere kaplama yapılabilmesi gibi üstün özelliklerinden dolayı, bu tip yöntemler, son yıllarda büyük önem kazanmış ve yoğun biçimde çalışılmıştır. Güneş hücrelerinin yapımında genellikle yarıiletken malzemeler kullanılır ve temel olarak bir pn-eklemidir. Bununla birlikte, metal oksit yarıiletken filmlerin, şeffaf iletken oksit filmler

için iyi bir aday olduğu ve indiyum kalay oksit (ITO) gibi pahalı malzemelere alternatif olabileceği düşünüldüğünden, teknolojik uygulamalarda büyük ilgi görmektedir [13-16]. Bu şeffaf iletken oksit filmlerden yaygın olarak kullanılan ZnO tabanlı yarıiletkenlerdir. ZnO, II grubu elementi çinko (Zn) ve VI grubu elementi oksijenin (O) oluşturduğu genelde n-tipi yarıiletken bir bileşiktir. ZnO bileşiğinin yasak bant aralığı (band gap energy) oda sıcaklığında 3,37 eV'dir ve hekzagonal wurtzite tipi yapıya sahiptir [17]. Ayrıca, ZnO'nun eksiton bağlanma enerjisi 60 meV ve yoğunluğu yaklaşık olarak 5,6 g/cm<sup>3</sup> tür [17]. ZnO, geçirgen-iletken olma, gaz sensörlerinde kullanılabilme, güneş hücrelerinde pencere görevi görebilme ve UV LED (Ultraviolet Light Emitting Diode: Ultraviyole Işık Yayan Diyot) yapımında kullanılabilme gibi üstün optoelektronik özelliklerinde dolayı hem elektronik hem de optoelektronik cihazlar için fonksiyonel malzemelerdir [18-22].

Bu çalışmada, ZnO kaplama miktarının n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücrelerinin verimliliği (Güç dönüşüm verimliliği; Power Conversion Efficiency (PCE)) üzerindeki etkisi incelendi. Bunun için önce, ZnO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile sentezlenip, Silisyum (Si) alttaş üzerine döndürerek kaplama (spin coating) metodu ile kaplandı ve güneş hücresi yapısı elde edildi. Daha sonra, ZnO tabaka kalınlığının etkisini araştırmak için, ZnO ile kaplama 2, 4, 5 ve 15 kat olarak gerçekleştirildi. Sonuçta, her bir n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapısı için, kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) tespit edildi ve verimlilik ( $\eta$ ) hesabı yapıldı.

## 2. Materyal ve Metot

ZnO nanoparçacıklar, sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlendi. Sentez aşamasında, Çinko asetat dihidrat (Zinc acetate dihydrate =  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  - %99.999 saflıkta), 2-Metoksietanol (2-Methoxyethanol =  $CH_3OCH_2CH_2OH$  -  $\geq$  %99.3 saflıkta) ve Monoetanolin (Monoethanolamine (MEA) =  $NH_2CH_2CH_2OH$  -  $\geq$  %99.5 saflıkta) kimyasalları kullanıldı. Sentezde, uygun molarlarda (0.3M için) 1:1 oranında  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  ve  $CH_3OCH_2CH_2OH$  karışımı, karışımın sıcaklığı 70°C ye gelene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. 70°C ye ulaşıldığında, karışımın içerisine 1ml  $NH_2CH_2CH_2OH$  konuldu ve tüm karışım 70°C de 500 dev/dk'da 1 saat daha karıştırılmaya devam ettirildi. Elde edilen çözelti, ağzı kapalı bir kaba konularak, oda sıcaklığında yaşlanmaya bırakıldı.

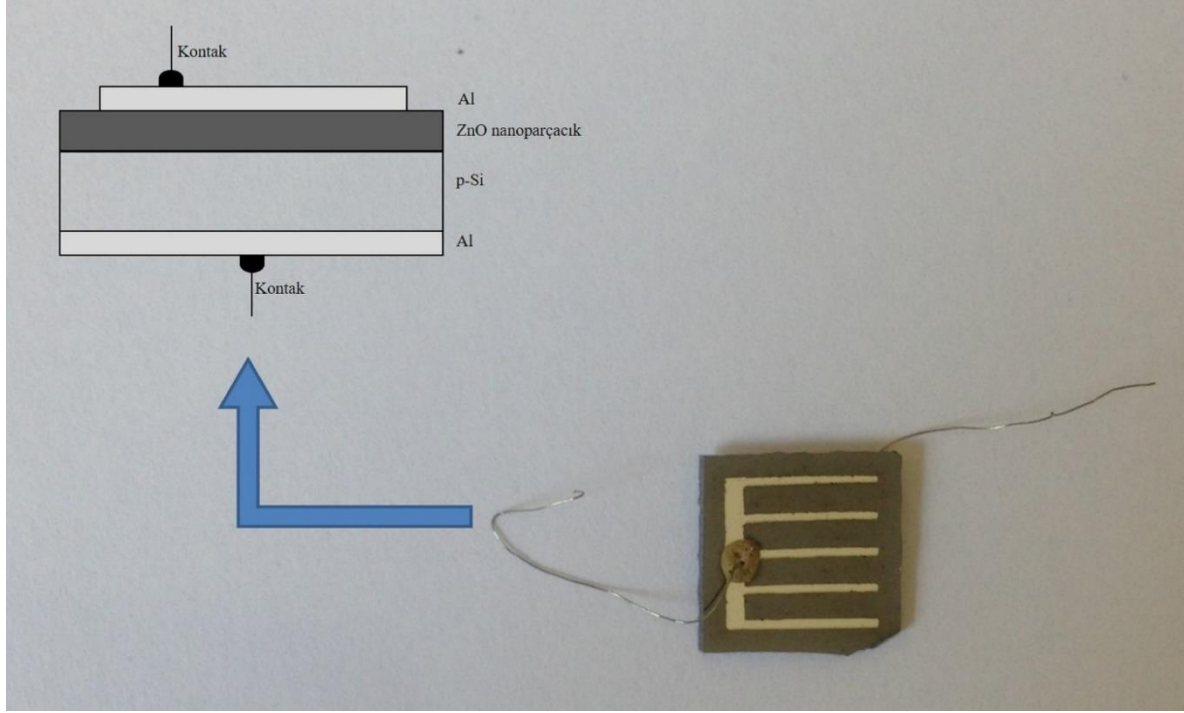
Sentezlenen nanoparçacıklar, yapı analizi için, en az 1 gün bekletildikten sonra, döndürerek kaplama metodu ile kimyasal olarak temizlenmiş 2x2 cm<sup>2</sup> ebatlarındaki soda-lime camlar üzerine 2, 4, 5 ve 15 kat olarak kaplandı.

Kaplama işlemi için, VTC-100A model döndürme ile kaplama cihazı (Spin coater) kullanıldı. Kaplama sırasında, dönme hızı 3000 dev/dk ve kaplama süresi 20 s olarak ayarlandı. Kaplama işlemindeki istenmeyen kimyasallardan ve organik tortulardan kurtulmak amacıyla her bir kaplamadan sonra örnekler, 340 °C de 2 dk ısıtıldı (ara ısıtma) ve tüm kaplamalar bittikten sonra fırın içerisine konularak, 500 °C de 30 dk tavlandı.

Daha sonra, yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek ve yapı karakterizasyonunu belirleyebilmek için SEM ve XRD analizleri yapıldı. SEM ve XRD analizleri tüm kaplama miktarları (2, 4, 5 ve 15 kat) için gerçekleştirildi ancak benzer grafikleri/şekilleri tekrar tekrar vermemek için sadece 4-kat kaplamanın grafikleri/şekilleri burada gösterildi.

Diğer taraftan, elektriksel ölçümler için, Si alttaş olarak, 508±15 µm kalınlığında ve 10.5–19.5 Ωcm öz direncine ve (111) oryantasyonuna sahip Boron (B) katkılı p-tipi kristal silisyum (p-Si) kullanıldı. 1x1 cm<sup>2</sup> ebatlarındaki p-Si alttaşlar, kaplamadan önce, ultrasonik ve kimyasal yöntemlerle temizlendi. Ultrasonik temizlemede, her bir alttaş, sırasıyla, aseton ve

alkol dolu kaplar içerisinde ultrasonik temizleme cihazında 5'er dk tutuldu. Kimyasal temizleme işleminde ise, alıtışlar,  $1\text{NH}_3+1\text{H}_2\text{O}_2+4\text{H}_2\text{O}$  içerisinde 15 dk kaynatılarak üzerindeki oksit ve kalıntılardan arındırıldı ve saf suyla durulandı. Temizlenen p-Si alıtışlar, Edwards Model 6E kaplama cihazına yerleştirdi ve uniform akım dağılımlı sağlanması amacıyla, arka yüzeyleri, termal buharlaştırma yoluyla, ~150 nm kalınlığında %99.999 saflıkta Alüminyum (Al) ile kaplandı. Alıtışların ön yüzeyleri, döndürerek kaplama metoduyla, üretilen ZnO nanoparçacıklar ile 2, 4, 5 ve 15 kat olarak kaplandı (dönme hızı; 3000 dev/dk, kaplama süresi; 20 s, ara ısıtma; 340 °C de 2 dk, tavlama; 500 °C de 30 dk). Ön yüzeylere maskeleme yapıldıktan sonra, örnekler, Edwards Model 6E kaplama cihazına yerleştirildi ve termal buharlaştırma yoluyla, ~150nm kalınlığında %99.999 saflıkta Alüminyum (Al) kaplandı. Ön ve arka yüzeylerinden elektriksel kontaklar alınarak, Şekil 1. de görülen yapı elde edildi.



Şekil 1. n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapısı.

Daha sonra, tüm örneklerin hem karanlıkta hem de aydınlıkta akım–voltaj (I-V) karakteristikleri oda sıcaklığında ölçüldü. Ölçümlerde, ışık kaynağı olarak 500W lık halojen lamba, voltaj kaynağı ve ampermetre olarak da Keithley 2400 model akım/voltaj kaynağı ve ölçü aleti kullanıldı. Ölçümler, bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirildi. I-V ölçümlerinden elde edilen deneysel verilerden ve Denklem 1.'deki doluluk faktörü

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1)$$

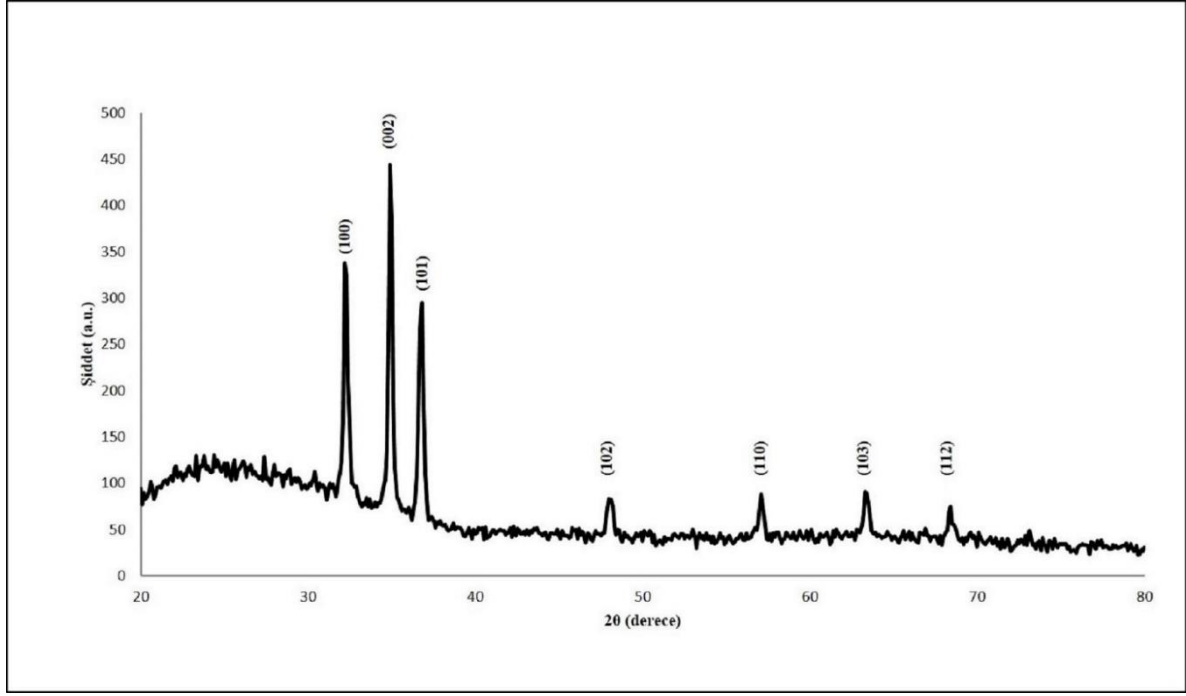
ve Denklem 2.'deki verimlilik formüllerden yararlanılarak her bir yapının verimliliği hesaplandı.

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2)$$

Burada,  $FF$ ; Doluluk Faktörünü,  $V_m$ ; Maksimum gerilimi,  $I_m$ ; Maksimum akımı,  $V_{oc}$ ; Açık devre voltajını,  $I_{sc}$ ; Kısa devre akımını,  $P_{in}$ ; Pil üzerine düşen ışığın gücünü ve  $\eta$ ; Verim'i ifade etmektedir [23].

### 3. Bulgular

Şekil 2.'de, 4 kat ZnO kaplı ince film yapının XRD analizi sonucu görülmektedir. XRD spektrumları, (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (112) düzlemleri boyunca pikler göstermektedir. Bu sonuçlar, 2, 5 ve 15 kat ZnO kaplama içeren diğer yapılar için de geçerlidir. Yapıların en güçlü kırınım piki de, (002) düzlemi boyuncadır.



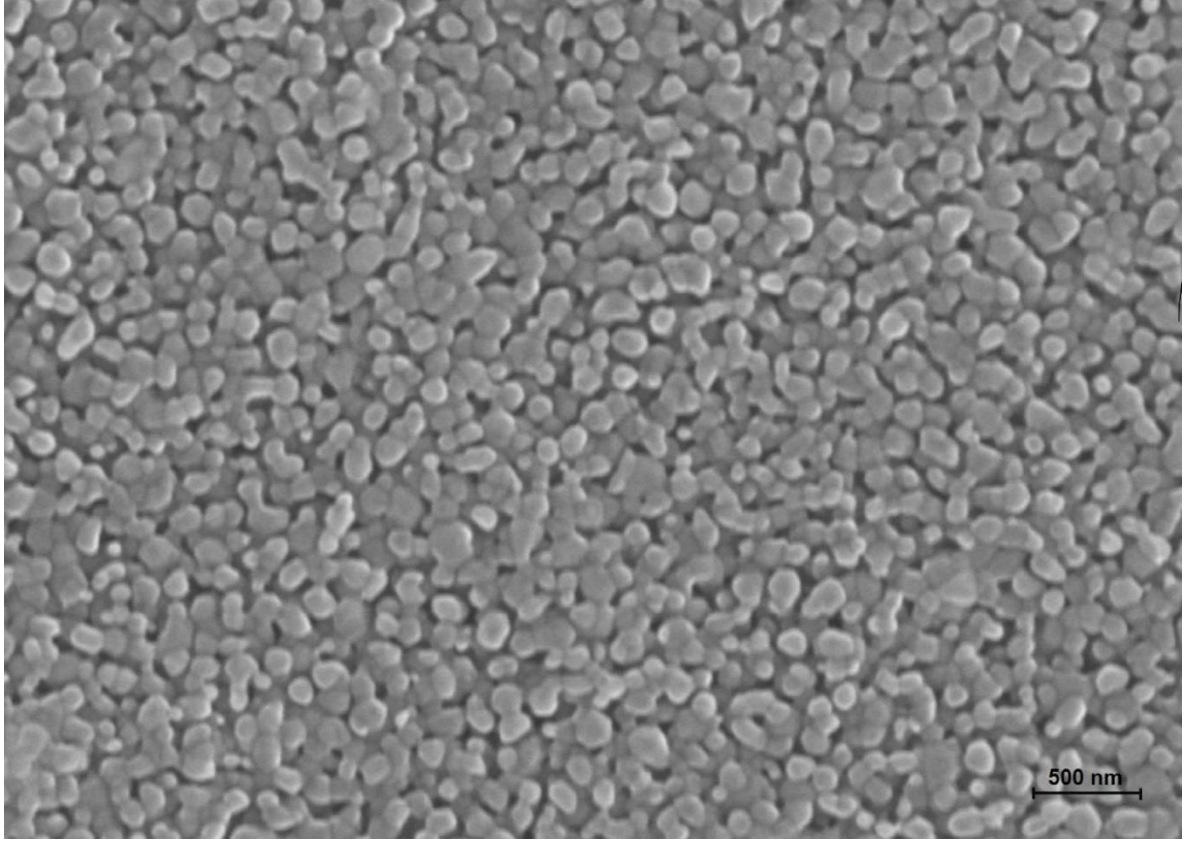
Şekil 2. ZnO ince filmin XRD analizi.

Diğer taraftan, Şekil 2.'den (en güçlü kırınım pikine sahip (002) düzlemi için) ve Denklem 3.'de verilen Scherrer denkleminde yararlanılarak kristal boyutu hesaplanmıştır [24].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

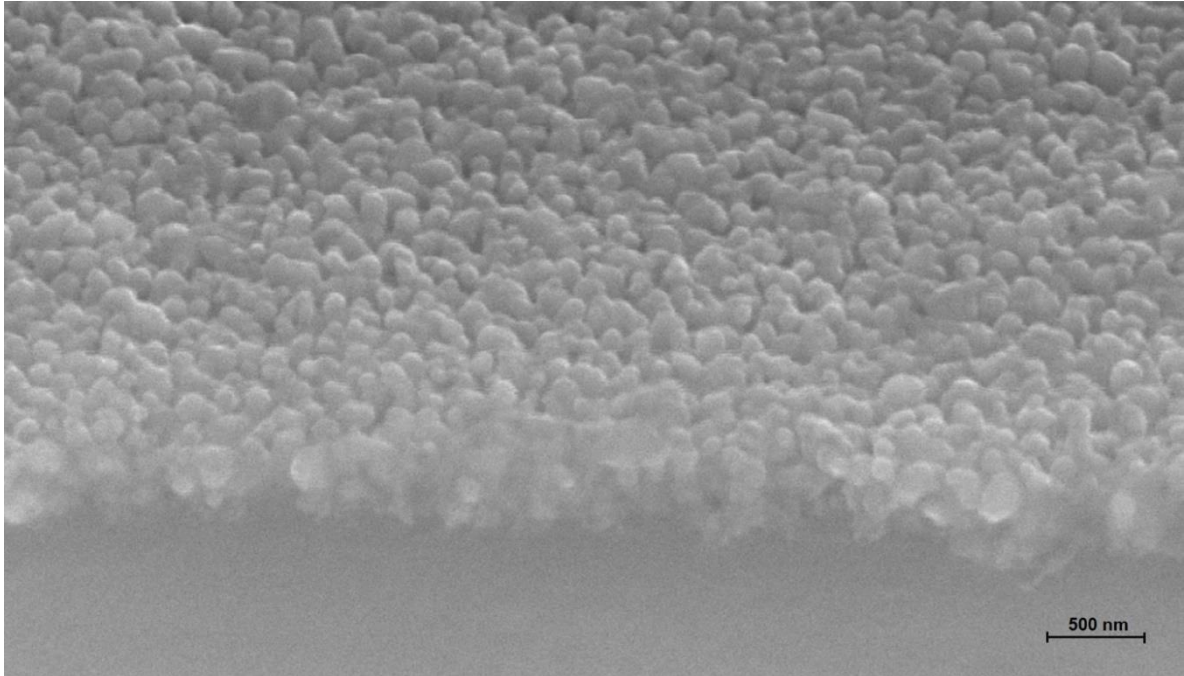
Burada,  $D$ ; Kristal boyutunu,  $K$ ; Scherrer sabitini (0.9 olarak alındı),  $\lambda$ ; X-ışını dalgaboyunu,  $\beta$ ; pikin yarı yüksekliğinin tam genişliğini (the full width at half maximum of the peak= FWHM) ve  $\theta$ ; Bragg kırınım açısını ifade etmektedir.

Şekil 3., 4 kat ZnO kaplı ince filmin SEM ile çekilen yüzey görüntüsünü göstermektedir. 2, 5 ve 15 kat ZnO kaplama içeren diğer yapıların da SEM görüntüleri incelendiğinde, üretilen tüm yapıların benzer morfolojide olduğu görülmüştür.



Şekil 3. ZnO ince filmin yüzey görüntüsü.

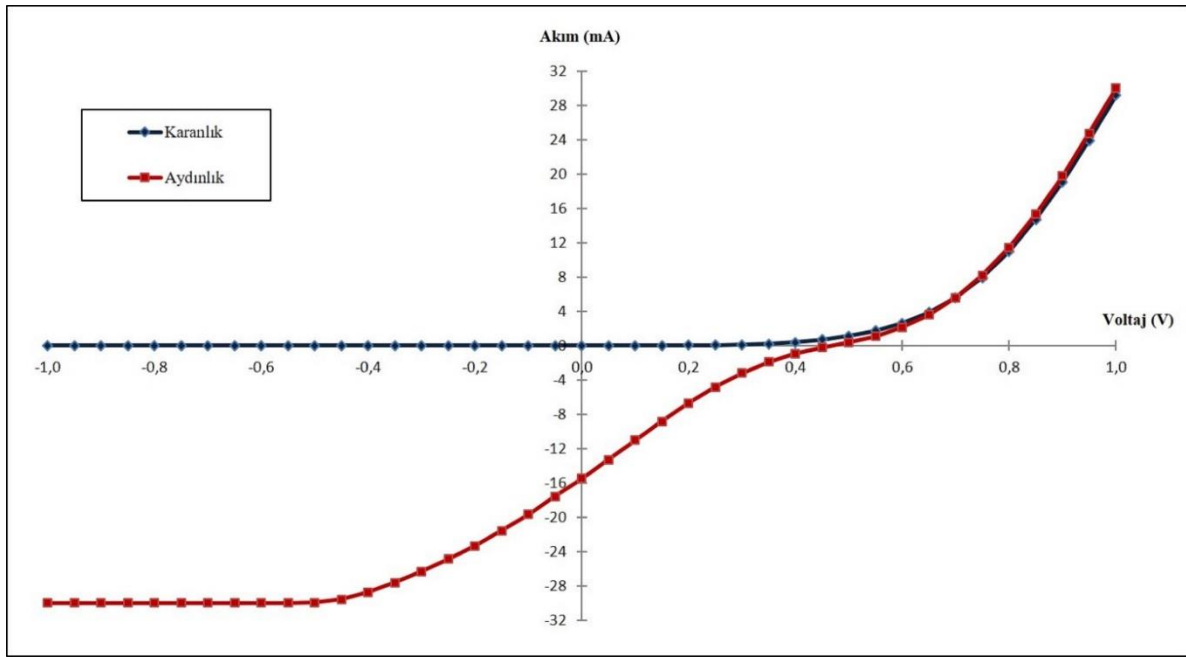
Şekil 4.'de, 4 kat ZnO kaplı ince filmin SEM ile çekilen kesit görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.'den ve diğer yapıların kesit görüntülerin, her bir yapı (2, 4, 5 ve 15 kat ZnO kaplama içeren) için ZnO ince film tabaka kalınlığı belirlenmiştir.



Şekil 4. ZnO ince filmin kesit görüntüsü.

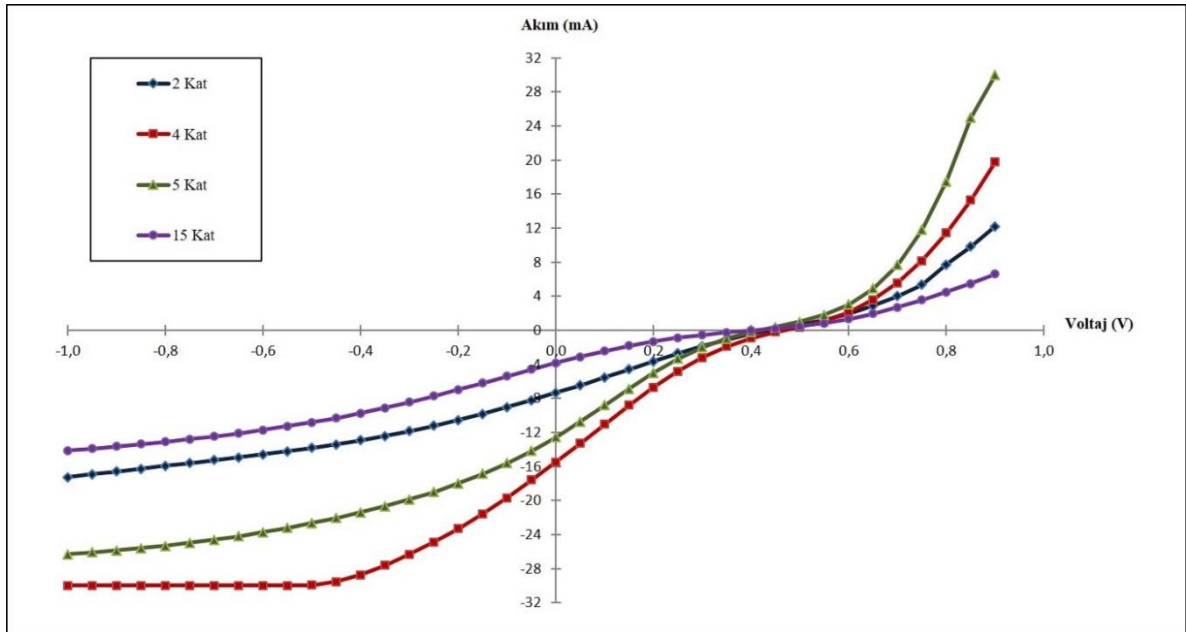
Şekil 5.'de, 4 kat ZnO kaplı n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapısında, hem karanlıkta hem de aydınlıkta yapılan I-V ölçümlerinden elde edilen deneysel veriler gösterilmektedir. Bu

ölçümler, tüm yapılar için gerçekleştirilmiş olup, benzer karakterde grafikler elde edildiğinden, tekrar grafikler vermemek adına temsili olarak 4 kat ZnO kaplı n-ZnO/p-Si yapı verilmiştir.



Şekil 5. 4 kat ZnO kaplı n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapının karanlık ve aydınlık I-V ölçümü.

Şekil 6.'da, farklı miktarda ZnO ile kaplı (2, 4, 5 ve 15 kat ZnO kaplama içeren), n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapılarında ışık altında yapılan I-V ölçümlerden elde edilen grafikler verilmektedir.



Şekil 6. 2, 4, 5 ve 15 kat ZnO kaplı n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücrelerinin ışık altındaki I-V ölçümleri.

Şekil 6.'dan yararlanılarak ve Denklem 1. ve Denklem 2. kullanılarak her bir n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapısı için, ZnO kaplama miktarına bağlı olarak, kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), doluluk faktörü ( $FF$ ) ve verim ( $\eta$ ) hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 1.'de verilmiştir.

**Tablo 1.** n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapıları için tespit edilen fotovoltaiik değerler.

Kaplama sayısı – ZnO Tabaka Kalınlığı	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$FF$	$\eta$ (%)
2 Kat ZnO – 180 nm	7.34	0.44	0.220	0.71
4 Kat ZnO – 200 nm	15.6	0.47	0.192	1.41
5 Kat ZnO – 210 nm	12.5	0.41	0.205	1.05
15 Kat ZnO – 295 nm	3.84	0.40	0.182	0.28

#### 4. Sonuç ve Yorum

XRD analizleri sonucu ortaya çıkan pikler (Şekil 2.'deki gibi), tüm ince filmlerin (2, 4, 5 ve 15 kat ZnO kaplama içeren) altıgen wurtzite (hexagonal wurtzite) yapıda polikristal bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (PDF Kart No: 036-1451). Şekil 2. ve Denklem 3. kullanılarak yapılan hesaplamalara göre de, ZnO ince filmlerin kristal boyutu yaklaşık olarak 35 nm olarak hesaplanmıştır.

SEM görüntülerinden, 2, 4, 5 ve 15 kat ZnO kaplı yapıların, Şekil 3.'de görüldüğü üzere, homojen ve uniform bir yapıya sahip olduğu ve nano-boyutta parçacıklar ve gözenekler içerdiği görülmüştür.

Şekil 4.'e göre, 4 kat ZnO kaplı yapı için film kalınlığının yaklaşık olarak 200 nm olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, diğer yapıların kesit görüntülerinden film kalınlıklarının yaklaşık olarak, 2 kat ZnO için 180 nm, 5 kat ZnO için 210 nm ve 15 kat ZnO için 295 nm olduğu belirlenmiştir. Buradan, kaplama miktarı arttıkça, ZnO tabaka kalınlığının da lineer olmayan şekilde arttığı sonucuna varılmıştır.

I-V ölçümlerine göre, Şekil 5.'de görüldüğü gibi, tüm n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapılar tipik bir doğrultucu (rectifying) karakter sergilemektedir ve bariz bir fotovoltaiik etki tüm yapılar üzerinde açıkça gözlenmektedir. Heteroeklem yapıların doğrultucu karakterde olması bunların iyi bir diyot yapısına sahip olduğunu ifade etmektedir [25]. Bununla beraber, karanlıkta yapılan I-V ölçümlerinde, ters besleme voltajında (-1V-0V aralığında), karanlık kaçak akımı (dark leakage current) hemen hemen yokken, ileri besleme voltajında (0V-1V aralığında), akım, voltajın artması ile eksponansiyel olarak artmaktadır. Ayrıca, ışık altında yapılan I-V ölçümlerinden, özellikle ters besleme voltajında ışıkla üretilen fotoakım, karanlık akımdan çok daha büyüktür. Heteroeklem yapılarıdaki bu fotoelektrik etki, n-ZnO tabakasına ışık düşürüldüğünde, özellikle heteroeklem arayüzüne yakın yerde, p-Si' un tükenme bölgesinde (depletion region) ışık kaynaklı elektron-delik oluşumundan ileri gelmektedir [26, 27].

Şekil 6. ve Tablo 1.'e göre, 15.6 mA' lik kısa devre akımına, 0.47 V' luk açık devre voltajına ve % 1.41'lik verimliliğe sahip olan 4 kat ZnO kaplı n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi en iyi fotovoltaiik davranış gösteren yapı olurken, 3.84 mA' lik kısa devre akımına, 0.40 V' luk açık devre voltajına ve % 0.28'lik verimliliğe sahip olan 15 kat ZnO kaplı n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi en düşük fotovoltaiik etki gösteren yapı olduğu görülmektedir. Buradan, 4 kat ZnO (ZnO tabaka kalınlığı; ~ 200 nm) kaplamaya kadar, kaplama miktarının artışı ile  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve  $\eta$  değerlerinin arttığı, 4 kattan daha fazla ZnO kaplama (> 200 nm) için, kaplama miktarının artışı ile bunların değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır.

Kritik bir tabaka kalınlığına kadar (bu çalışmada, 4 kat ZnO kaplama için ~ 200 nm), ışıkla üretilen akımdaki artıştan dolayı, verimlilik, tabaka kalınlığının artmasıyla başlangıçta artar [28]. Tabaka kalınlığı, kritik kalınlığı aşarsa (bu çalışmada, > 200 nm), absorblayıcı tabakaya



(p-Si'a) ulaşabilen foton sayısını azalır. Bu durumda, hem  $I_{sc}$  'nin hem de  $V_{oc}$  'nin değerleri düşer.  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  azalma da verimin azalmasına neden olur [29]. Bu, Tablo 1.' de görülen verimlilik değerlerindeki değişimi açıklamaktadır. 2015 yılında N.F. Habubi ve arkadaşları, kimyasal sprey piroliz (chemical spray pyrolysis; CSP) yöntemiyle oluşturdukları ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresi yapıda ZnO tabaka kalınlığına bağlı bir çalışma yapmışlar, onlar tabaka kalınlığının artışı ile verimliliğin arttığını belirtmişlerdir [28]. Ancak, yapının verimliliğini düşüren, kritik bir tabaka kalınlığından bahsetmemişlerdir.

Diğer taraftan, Tablo 1'de verilen güneş hücrelerinin verimlerinin, literatürdeki bir kısım güneş hücrelerinin verimlerine kıyasla, nispeten düşük olduğu görülmektedir [2-8]. Düşük verim, iki yarı iletken arasındaki tükenme bölgesindeki yüklerin yeniden birleşmesinden dolayı ya da gazların geçmesine izin verecek şekilde gözenekli bir yapıya sahip olan ZnO filminin yapısı nedeniyle olabilmektedir [26]. n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresinde, gözenekli yapıya sahip olan ZnO ince film oksijene maruz kaldığında, Si alttaş oksidasyona uğrar ve n-ZnO/p-Si arayüzeyinde bir SiO<sub>2</sub> tabakası oluşur. Bunun neticesinde, p-Si'nin tükenme bölgesinde üretilen fototaşıyıcıların, n-ZnO filmi boyunca taşınması zorlaşır. Bu da, verimde önemli bir düşüşe neden olur [30].

Bu sonuçlara göre, bu çalışmada oluşturulan n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücrelerinin, aydınlatma altında, güneş hücresi tasarımı için gerekli fotoelektrik performansları sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, ZnO tabaka kalınlığı, n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresinin performansını geliştirmede önemli bir parametre olduğu kanaatine varılmıştır. Diğer taraftan, her ne kadar burada üretilen güneş hücreleri, verimlilik bakımından nispeten düşük değerlere sahip olsa da, malzemelerin kullanılabilirliği, üretiminin kolaylığı ve düşük maliyeti açısından, üretimi karmaşık ve maliyetli, malzemeleri çok pahalı ve kolayca bulunmayan diğer güneş hücrelerine kıyasla nispeten daha avantajlıdır.

## Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: ONAP-52038.

## Kaynakça

- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, pp. 676-677, 1954.
- [2] T. Negami, Y. Hashimoto, and S. Nishiwaki, "Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells with an efficiency of 18%," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 67, pp. 331-335, 2001.
- [3] R. R. King, C. M. Fetzer, K. M. Edmondson, D. C. Law, P. C. Colter, H. L. Cotal, R. A. Sherif, H. Yoon, T. Isshiki, D. D. Krut, G. S. Kinsey, J. H. Ermer, S. Kurtz, T. Moriarty, J. Kiehl, K. Emery, W. K. Metzger, R. K. Ahrenkiel, N. H. Karam, "Metamorphic III-V materials, sublattice disorder, and multijunction solar cell approaches with over 37% efficiency," Presented at the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 2004, pp. 7-11.
- [4] G. Michael, "Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells," *Inorg. Chem.*, vol 44(20), p. 6841-6851, 2005.
- [5] S. Wojtczuk, P. Chiu, X. Zhang, D. Derkacs, C. Harris, D. Pulver, M. Timmons, "InGaP/GaAs/InGaAs 41% Concentrator Cells Using Bi-Facial Epigrowth," *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 35th IEEE*, Honolulu HI., 2010, pp. 1259-1264.
- [6] B. Hussain, A. Ebong, I. Ferguson, "Zinc oxide as an active n-layer and antireflection coating for silicon based heterojunction solar cell," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 139, pp. 95-100, 2015.
- [7] D. Bi, B. Xu, P. Gao, L. Sun, M. Grätzel, A. Hagfeldt, "Facile synthesized organic hole transporting material for perovskite solar cell with efficiency of 19.8%," *Nano Energy*, vol. 23, pp. 138-144, 2016.
- [8] M. Dahlinger, K. Carstens, E. Hoffmann, R. Z. Gottwick, and J. H. Werner, "23.2% laser processed back contact solar cell: fabrication characterization and modeling," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 25, no. 2, pp. 192-200, 2017.

- [9] M. M. Islam, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Sakurai, S. Niki, T. Sakurai, K. Akimoto, "CIGS solar cell with MBE-grown ZnS buffer layer," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 93, no. 6-7, pp. 970-972, 2009.
- [10] S. R. Kurtz, A. A. Allerman, E. D. Jones, J. M. Gee, J. J. Banas, and B. E. Hammons, "InGaAsN solar cells with 1.0 eV band gap, lattice matched to GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, pp. 729-731, 1999.
- [11] S. C. Lin, Y. L. Lee, C. H. Chang, Y. J. Shen, and Y. M. Yang, "Quantum-dot-sensitized solar cells: Assembly of CdS-quantum-dots coupling techniques of self-assembled monolayer and chemical bath deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 143517-1-143517-3, 2007.
- [12] S. Y. Lien, D. S. Wu, W. C. Yeh, J. C. Liu, "Tri-layer antireflection coatings (SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) for silicon solar cells using a sol-gel technique," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 90, no. 16, pp. 2710-2719, 2006.
- [13] R. B. H. Tahar, T. Ban, Y. Ohya, Y. Takahashi, "Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties," *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 5, pp. 2631-2645, 1998.
- [14] M. G. Kim, M. G. Kanatzidis, A. Facchetti, T. J. Marks, "Low-temperature fabrication of high-performance metal oxide thin-film electronics via combustion processing," *Nat. Mater.*, vol. 10, pp. 382-388, 2011.
- [15] G. Korotcenkov, "Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice?," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 139, no. 1, pp. 1-23, 2007.
- [16] V. Craciun, D. Craciun, X. Wang, T. J. Anderson, R. K. Singh, "Transparent and conducting indium tin oxide thin films grown by pulsed laser deposition at low temperatures," *J. Optoelectron. Adv. M.*, vol. 5, no. 2, pp. 401-408, 2003.
- [17] J. Mass, P. Bhattacharya, R. S. Katiyar, "Effect of high substrate temperature on Al-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 103, pp. 9-15, 2003.
- [18] V. Musat, B. Teixeira, E. Fortunato, R. C. C. Monteiro, P. Vilarinho, "Al-doped ZnO thin films by sol-gel method," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 180-181, pp. 659-662, 2004.
- [19] Z. L. Pei, C. Sun, M. H. Tan, J. Q. Xiao, D. H. Guan, R. F. Huang, L. S. Wen, "Optical and electrical properties of direct-current magnetron sputtered ZnO:Al films," *J. App. Phys.*, vol. 90, no. 7, pp. 3432-3436, 2001.
- [20] F. D. Paraguay, M. M. Yoshida, J. Morales, J. Solis, W. L. Estrada, "Influence of Al, In, Cu, Fe and Sn dopants on the response of thin film ZnO gas sensor to ethanol vapour," *Thin Solid Films*, vol. 373, no. 1-2, pp. 137-140, 2000.
- [21] K. Matsubara, P. Fons, K. Iwata, A. Yamada, K. Sakurai, H. Tambo, S. Niki, "ZnO transparent conducting films deposited by pulsed laser deposition for solar cell applications," *Thin Solid Films*, vol. 431-432, pp. 369-372, 2003.
- [22] Y. Ryu, T. S. Lee, J. A. Lubguban, H. W. White, B. J. Kim, Y. S. Park, C. J. Youn, "Next generation of oxide photonic devices: ZnO-based ultraviolet light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 241108 – 1-241108-3, 2006.
- [23] *Clean Energy Institute*, "Physics of Solar Cells," University of Washington, Seattle, WA, Available: [http://photonicswiki.org/index.php?title=Physics\\_of\\_Solar\\_Cells](http://photonicswiki.org/index.php?title=Physics_of_Solar_Cells).
- [24] P. Scherrer, "Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen," *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, vol. 1918, pp. 98-100, 1918.
- [25] Z. Ahmad, M. H. Sayyad, "Electrical characteristics of a high rectification ratio organic Schottky diode based on methyl red," *Optoelectron. Adv. Mat.-Rapid Communications*, vol. 3(5), pp. 509-512, 2009.
- [26] A. Ibrahim, A. Ashour, "ZnO/Si solar cell fabricated by spray pyrolysis technique," *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, vol. 17, pp. 835-839, 2006.
- [27] T. Ootsuka, Z. Liu, M. Osamura, Y. Fukuzawa, R. Kuroda, Y. Suzuki, N. Otagawa, T. Mise, S. Wang, Y. Hoshino, Y. Nakayama, H. Tanoue, and Y. Makita, "Studies on aluminum-doped ZnO films for transparent electrode and antireflection coating of h-FeSi<sub>2</sub> optoelectronic devices," *Thin Solid Films*, vol. 476, pp. 30-34, 2005.
- [28] N. F. Habubi, A. O. Mousa, and N. A. Nema, "Fabrication and Characterization of ZnO/p-Si Heterojunction Solar Cell," *World Scientific News*, vol. 18, pp. 118-132, 2015.
- [29] D. Pogrebnyak, N. Y. Jamil, and A. K. M. Muhammed, "Simulation Study of n-ZnO/p-Si Heterojunction Solar Cell," *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, vol. 9, no. 4, pp. 819-830, 201.
- [30] H. Kobayashi, T. Ishida, Y. Nakato, and H. Mori, "Mechanism of carrier transport through a silicon-oxide layer for (indium-tin-oxide/silicon-oxide/silicon) solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 78, pp. 3931-3939, 1995.

Gökhan ALGÜN, galgun@istanbul.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4607-3382>