

## GLAD Tekniği ile Büyütülen Zig-Zag Nano Şekilli a-Si/c-Si Heteroeklemlerin Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi

Beyhan Tatar

Namık Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Tekirdağ  
btatar@nku.edu.tr

(Geliş/Received: 29.06.2016; Kabul/Accepted: 30.10.2016)

### Özet

Zig-zag nano şekilli a-Si ince filmler c-Si altlıklar üzerine elektron demeti buharlaştırma sistemi içerisinde GLAD tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Zig-zag nano şekilli ince filmlerin yapısal özellikleri X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi ve Raman spektroskopisi analizi ile belirlendi. Büyütülen Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin yüzey ve arakesit morfolojileri Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile incelendi. Bu heteroeklemlerin elektrik ve fotovoltaik özellikleri dc akım-gerilim (I-V) ölçümleri yardımıyla oda sıcaklığında karanlık ve aydınlık şartlarda incelendi. Bariyer yüksekliği  $\Phi_B$ , ideallik faktörü  $\eta$ , seri direnç  $R_s$  ve şunt direnci  $R_{sh}$  gibi Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık şartlardaki elektriksel parametreleri I-V karakteristiklerinden belirlendi ve sırasıyla 0,83 eV, 3,59, 14,3 k $\Omega$  ve 0,65 M $\Omega$  olarak bulundu. Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemler iyi bir fotovoltatik davranış göstermiştir ve açık devre gerilimi ve kısa devre akımı gibi fotovoltatik parametreleri sırasıyla  $V_{oc}=232$  mV ve  $J_{sc}=22$  mA/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Bu Zig-Zag nano yapının boşluklu yüzey morfolojisi güneş pili teknolojileri ve fotovoltatik aygıtlar için önemli bir özelliktir.

**Anahtar kelimeler:** Şekilli ince filmler; Zig-Zag nano şekilli ince film, GLAD tekniği; Heteroeklemler; Elektriksel ve Fotovoltatik özellikler

### Investigation of Electrical and Photovoltaic Properties of Zig-Zag Nano Shape a-Si/c-Si Heterojunctions Grown by GLAD Technique

#### Abstract

The Zig-Zag nano shape a-Si thin films were prepared on c-Si substrates by GLAD technique in electron beam evaporation system. The structural properties of the Zig-Zag nano shape thin films were determined by X-Ray Diffraction (XRD) analysis and Raman spectroscopy. Surface and cross-sectional morphology of Zig-Zag nano shape a-Si/c-Si heterojunctions were investigated by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM). The electrical and photovoltaic properties of these heterojunction have been investigated by means of dc current-voltage (I-V) measurements within at room temperature in dark and light conditions. Electrical parameters such as barrier height  $\Phi_B$ , diode ideality factor  $\eta$ , series resistance  $R_s$  and shunt resistance  $R_{sh}$  were determined from the I-V characteristic in the dark conditions for Zig-Zag nano shape a-Si/c-Si heterojunctions were found to be 0.83 eV, 3.59, 14.3 k $\Omega$  and 0.65 M $\Omega$  respectively. The Zig-Zag nano shape a-Si/c-Si heterojunctions show a photovoltaic behavior and the photovoltaic parameters, such as open circuit voltage and short circuit current were obtained as  $V_{oc}=232$  mV and  $J_{sc}=22$  mA/cm<sup>2</sup>, respectively. The porous morphology of this Zig-Zag nanostructure has important features in photovoltaic devices and solar cell technology.

**Keywords:** Sculptured thin films; Zig-Zag nano shape thin film; GLAD technique; Heterojunctions; Electrical and Photovoltaic properties.

#### 1. Giriş

Şekilli ince filmler (ŞİF); nano boyutta kontrollü olarak büyütülebilen, farklı yüzey morfolojilerine sahip olan, boşluklu ve kolonlu yapılarıdır. Şekilli ince filmlerin kullanım alanları günümüzde oldukça artmıştır ve oldukça dikkat

çekici özelliklere sahiptir[1-3]. Genel olarak; ŞİF ince filmler optik, kimya, elektronik ve biyolojik alanlarda yoğunlukla çalışılmaktadır. İnce filmler yapısal olarak homojen ve anizotropik bir sürekliliğe sahip iken, şekilli ince filmler tek yönlü homojen olmayan, anizotropik bir sürekliliğe sahiptirler. ŞİF ince filmlerin boşluklu

yapıya sahip olmaları sebebiyle, filmlerin temel özellikleri yapılarına;

- i. Akışkanlar difüz ettiğinde,
  - ii. Polimerler, sıvı kristaller, inorganik katılar vs. girdiğinde
- homojen olmayan bir şekilde değişir. Bu özellikleriyle şekilli ince filmler genel olarak; Biyolojik, Nükleer, ve Kimyasal akışkanlar için optik sensörlerde, elektronik devreler ile çift oluşturabilen lineer veya lineer olmayan optik devrelerde, çok katmanlı elektronik çiplerdeki çok düşük geçirgenliğe sahip bariyerlerde, mikro-elektronikte, virüs tuzakları, biyo-uyumlu altlık gibi biyomedikal aygıtlarda, belli bir amaca yönelik olan reaktörler gibi bir çok farklı alanda kullanılabilir[4-8].

Özellikle son yıllarda şekilli ince filmler üzerine yapılan çalışmalar büyük önem kazanmıştır ve paralel olarak kullanım alanları da yaygınlaşmıştır. ŞİF'ler üzerine yapılan çalışmalar bu filmlerin üretim şartlarının yoğun bir şekilde çalışmasını ön plana çıkartmıştır. ŞİF yapılar basitçe iki boyutlu olarak düz, eğimli kolonlar (kolonsal ince filmler-KİF), zigzaglar ve daha kompleks olan C- ve S- şeklinde yapılar; üç boyutlu olarak ise spiral, süper spiral yapılar olarak üretilebilirler[9]. İnce filmler büyütölürken kolon yönelimleri anlık veya yavaş yavaş değiştirilerek bu yapılardan ŞİF'ler elde edilebilir.

Şekli ince filmlerin özelliklerini etkileyen parametreler arasında özellikle altlık açısı, altlığın dönüş hızı, buharlaşma hızı, buharlaşan malzemenin cinsi ve altlık yüzey topografyası gösterilebilir[10]. Eğik açıyla biriktirme yöntemi (Glancing Angle Deposition - GLAD) kullanılarak tüm bu parametreler kontrol edilebilir, altlık açısı sebebiyle altlığa gelen buhar atomlarının birikme açısına ve adım motorunun hareketine bağlı olarak altlık üzerinde biriktirilen film farklı morfolojilere sahip şekilli film olarak elde edilebilir[10]. Adım motoru ile altlığa gelen atom buharının istenilen açı ile gelmesi ve kaplama sırasında altlığın istenilen hızda hareket ettirilmesi sağlanabilir. Eğik açıyla biriktirme yöntemi, termal buharlaştırma, sıçratma ve elektron demeti buharlaştırma veya diğer ince film büyütme yöntemlerinde metal, iletken, yarıiletken ve çok çeşitli uygun malzemeler kullanılarak uygulanabilir.

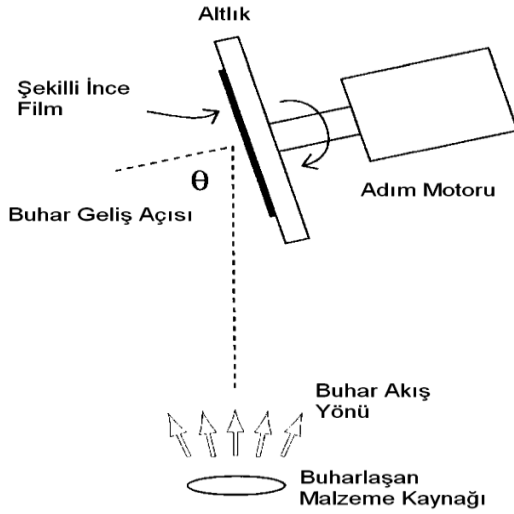
Optoelektronik teknolojisinde özellikle fotovoltaik uygulamalarda Silisyum mükemmel optik, elektronik ve fiziksel özelliklerinden dolayı en çok çalışılan ve endüstriyel olarak en çok yer kaplayan malzemedir. Bununla beraber tek kristal silisyum, güneş pili uygulamalarında ilk zamanlardan itibaren kullanılan ve yüksek verim sağlayan malzemedir. Ancak tek kristal Si maliyet olarak çok yüksek olduğundan zaman içerisinde güneş pili uygulamaları içerisinde polikristal Si ve amorf Si ince filmler maliyeti düşürmek için kullanılmıştır. Son yıllarda ise nano ölçekli üretim teknolojinin gelişmesiyle nano boyutlu Si ince filmler güneş pili uygulamalarında çalışılmaktadır[2, 4, 7, 10].

Bu çalışmada nano boyutlu Zig-zag şekilli amorf Si ince filmler GLAD yöntemi kullanılarak c-Si altlık üzerine büyütölerek a-Si/c-Si heteroeklemler büyütölüştür. Bu sayede hem şekilli hem de nano boyutta üretilmiş olan a-Si ince filmler fotovoltaik teknolojisi için heteroeklem yapısı içerisinde kullanılmıştır. Elde edilen Zig-Zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin yapısal ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Ayrıca bu üretilen heteroeklemlerin fotovoltaik özellikleri incelenerek güneş pili uygulamaları için araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Zig-Zag nano şekilli a-Si ince filmlerin kristal Si altlıklara büyütölmesi için elektron demeti buharlaştırma sistemi içerisine yerleştirilen eğik açılı biriktirme yöntemi (GLAD) kullanılmıştır. Bunun için Şekil 2.1'de gösterildiği gibi altlıkların belirli eğimlerde tutulabilmesi ve bir adım motoruyla istenilen hızlarda döndürölmesini sağlayan bir modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğik açılı biriktirme yöntemi (GLAD) ile şekilde şematize edildiği gibi, altlık açısı sebebiyle altlığa gelen buhar atomlarının birikme açısına ve adım motorunun hareketine bağlı olarak altlık üzerinde biriken film farklı morfolojilere sahip şekilli film olarak elde edilir. Şekilde gösterilmeyen bir 2. adım motoru da altlığın açısını değiştirmek için kullanılabilir. Bizim çalışmalarımızda altlık eğim açısı kaplama işlemine başlanmadan önce manuel olarak ayarlanmıştır. Sistemimizde sadece dönme işlemi sağlayan tek bir adım motoru vardır ve

kendi yazdığımız programla bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir.



**Şekil 1.** Elektron Demeti Kaplama Sisteminde kullandığımız Eğik Açılı Biriktirme (GLAD) yönteminin Şematiği.

Zig-Zag nano şekilli a-Si ince filmlerin üretiminde pota-altlık mesafesi 15 cm olup altlığın eğim açısı  $80^\circ$  olarak seçilmiştir. Zig-Zag nano şekilli a-Si ince filmlerin büyütülürken altlık dönüş hızı 1rpm ve 5 rpm; sarf malzemenin ortalama buharlaşma hızı ise  $3,3 \text{ \AA/s}$  ve  $2,3 \text{ \AA/s}$  olarak seçilmiştir. Zig-zag nano şekilli a-Si ince filmler c-Si altlıklar üzerine büyütülmüştür ve altlık sıcaklığı sabit oda sıcaklığı seçilmiştir. Kaplama sırasında Zig-zag nano yapıli şekilli a-Si filmlerin büyütüldüğü c-Si altlıkların sabit tutulma süreleri kolonların yönelim boyunu belirleyen parametre olarak, altlığın döndürülme sayısı da zig-zag miktarını belirleyen parametre olarak kullanılmıştır.

Büyütülen zig-zag nano şekilli a-Si ince filmlerin X-ışınları kırınım desenleri Philips PW 3710 model XRD cihazı kullanılarak alınmıştır. Bu filmlerin yapısal karakterizasyonu için yapılacak Raman spektrumu ölçümleri de Raman Spectroskopy-Horiba Jobin Yvon Labram HR-UV spectrometer HR8000UV model mikro Raman cihazı kullanılarak incelenmiştir. Raman ölçümlerinde çıkış gücü 20 mW olan 632,817 nm dalga boyuna sahip Helyum Neon lazer kullanılmıştır. GLAD yöntemiyle üretilen zig-zag nano şekilli ince filmlerin yüzey ve ara kesit morfolojilerinin incelenmesinde JEOL JSM

7000F model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır.

Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si eklemlerin akım gerilim karakteristiklerini belirlemek için Keithley 2400 marka elektrometre kullanılmıştır. Hazırlanan heteroeklemlerin diyot parametreleri karanlık durumda alınan akım-gerilim ölçümlerinden hesaplanmıştır. Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin fotovoltaj özelliklerinin belirlenmesi için Keithley 2400 model elektrometre ile birlikte solar simülatör olarak Newport ark lambası ve güç kaynağı kullanılmıştır. Akım gerilim ölçümleri karanlık ve  $1.5 \text{ A.M. } 100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlıkta ölçülmüştür. Bütün eklemler için açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) güneş pili parametreleri ölçülmüş ve eklemlerin fotovoltaj özellikleri araştırılmıştır.

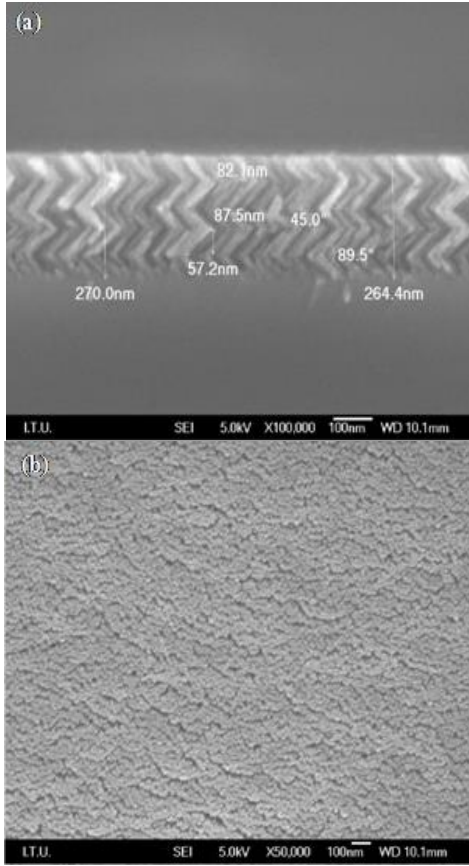
### 3. Bulgular

#### 3.1. Zig-zag nano şekilli a-Si ince filmlerin yapısal ve yüzeysel özellikleri

Elektron demeti buharlaştırma sisteminde eğik açılı biriktirme (GLAD) yöntemiyle büyütülen Zig-zag nano yapıli şekilli Si ince filmler kristal Si altlıklar üzerine büyütülmüştür. Zig-zag nano yapıli şekilli Si ince filmlerin arakesit ve yüzey morfolojilerinin belirlenmesi için FE-SEM incelemeleri yapılmıştır. Şekil 3.1’de Zig-zag nano yapıli şekilli Si ince filmlerin arakesit ve yüzeyinden alınmış FE-SEM fotoğrafları verilmiştir.

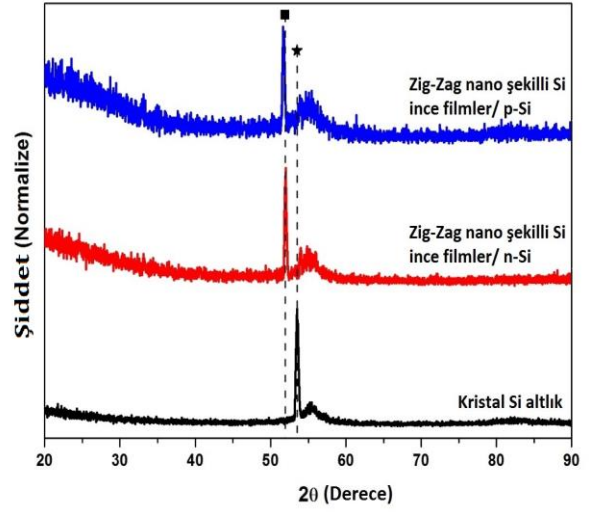
Şekil 2 incelendiğinde Zig-zag nano yapının başarılı bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Büyütülen ince filmlerin FE-SEM analizinde kolon boyu  $87,5 \text{ nm}$ ; her bir eğik kolon katmanının kalınlığı ise  $57,2 \text{ nm}$  olarak belirlenmiştir. Zig-zag kolonların eğim açısı  $45^\circ$  olup; kolonlara arasındaki açı zig-zag açısı  $89,5^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu filmlerin Yüzey morfolojisi incelendiğinde zig-zag kolonların tek yönlü yöneliminden kaynaklanan yönelimli ve boşluklu yapı açıkça görülmektedir. Kolonların diziliminin bir sonucu olan boşluklar çizgi halinde görülmektedir.

## GLAD Tekniği ile Büyütölen Zig-Zag Nano Şekilli a-Si/c-Si Heteroeklemlerin Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi



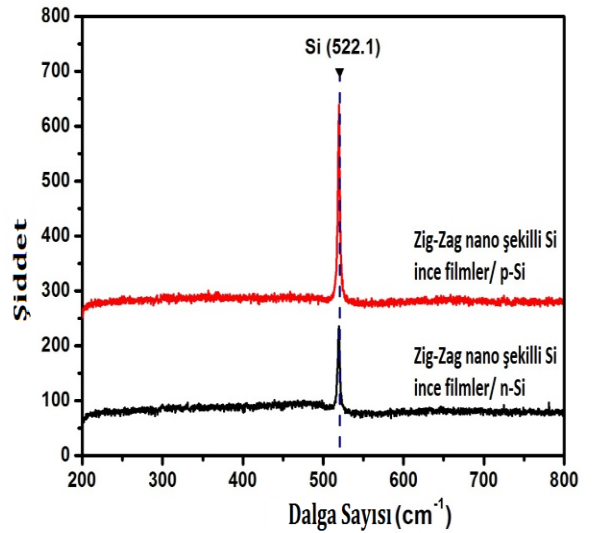
Şekil 2. Zig-Zag nano yapılı şekilli Si ince filmin (a) ara kesit ve (b) yüzey morfolojisi FE-SEM görüntüleri

Zig-zag nano şekilli Si ince filmlerin yapı özellikleri XRD ve Raman analizleri ile incelenmiştir. Şekil 3 'de eğik açılı biriktirme yöntemi kullanılarak e-demeti buharlaştırma sisteminde büyütölen zig-zag nano şekilli Si filmlere ait ve altlık olarak kullanılan c-Si ait XRD grafiği verilmiştir. XRD spektrumunda göröldüğü gibi Zig-zag nano kolonlu Si ince filmler amorf yapıda olup daha önce eğik kolonlu ve düz Si ince filmlerde karşılaşılan  $56^\circ$  deki amorf dağılımdaki pikin şiddeti biraz yükselmiştir. Bununla beraber Zig-zag nano kolonlar arasındaki boşluklu yapı ve yüksek yüzey porositesinden kaynaklı olarak c-Si altlıktan gelen XRD piki burada  $51^\circ$  de görölmektedir. Ancak p-Si ve n-Si kristal altlık üzerine büyütölen zig-zag kolonlu Si ince filmlerde  $51^\circ$  de tespit edilen bu pik c-Si altlıkta  $53^\circ$  de görölmektedir. Bu XRD pikindeki kaymanın kristal yapıdaki stres ve dislokasyonlardan kaynaklanabileceğini söyleyebiliriz.



Şekil 3. Zig-Zag nano şekilli Si ince filmin X-Işınları kırınım deseni

Şekil 4' de eğik açılı biriktirme yöntemiyle e-demeti buharlaştırma sisteminde büyütölen Zig-zag nano şekilli Si ince filmlere ait Raman spektrumu verilmiştir. Zig-zag nano kolonlu şekilli Si ince filmlerin Raman spektrumunda  $522\text{ cm}^{-1}$  de silisyuma ait bir Raman piki belirlenmiştir.



Şekil 4. GLAD yöntemiyle büyütölen Zig-Zag nano şekilli Si ince filmin Raman Spektrumu

### 3.2. Zig-Zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin elektriksel ve fotovoltaik özellikleri

Şekil 5' de hazırlanan zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin doğru besleme altında yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri verilmiştir. Bu heteroeklemlerin karanlıkta doğru yöndeki besleme durumunda termoiyonik bölgeleri göz önünde bulundurularak, diyot parametreleri hesaplanmıştır.  $V_F < 3kT/q$  voltaj bölgesi için, akım termoiyonik emisyon teorisine göre denklem 3.1 deki şekliyle ifade edilir;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

burada  $I_0$  saturasyon akımı,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (3.2)$$

$q$  elektronun yükü,  $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  Boltzmann sabiti,  $\Phi_{B0}$  bariyer yüksekliği,  $A$  kontak alanı,  $A^*$  Richardson sabiti ( $n$ -tipi Si için  $30 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$  ve  $p$ -tipi Si için  $90 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ ),  $T$  sıcaklık,  $\eta$  diyot idealite faktörü ve  $V$  doğru besleme voltajı olarak ifade edilir. Diyotun idealite faktörü, doğru besleme altında karanlık  $\ln I$ - $V$  grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden belirlenir ve denklem 3.3' deki şekilde ifade edilir;

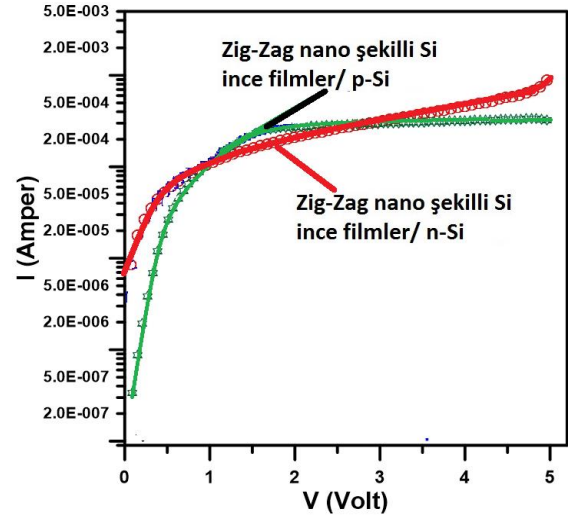
$$\eta = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (3.3)$$

Doğru besleme  $\ln I$ - $V$  grafiğinin eğiminin akım eksenini kesiminden bariyer yüksekliği hesaplanır ve denklem 3.4' deki şekilde ifade edilir;

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (3.4)$$

Bu zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin idealite faktörü ( $\eta$ ) ve bariyer yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ) denklem 3.3 ve denklem 3.4 yardımı ile hesaplandı. Termoiyonik akım mekanizmasına göre zig-zag şekilli a-Si/c-Si heteroeklemler için idealite faktörleri ve bariyer yükseklikleri sırasıyla 3.59 ve 0.83 eV olarak

belirlendi. Bu zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemler iyi bir doğrultucu özellik göstermişlerdir ve doğrultucu bir diyot davranışı sergilediği görülmektedir. İdealite faktörünün bu yüksek değerleri homojen olmayan bir eklem bariyerini veya a-Si yarıiletkenlerin kontak bölgesinde oluşmuş ara yüzey durumlarını ve seviyelerini işaret eder. Diyot idealite faktörü yük taşıyıcılarının rekombinasyonları ile direkt ilgilidir.



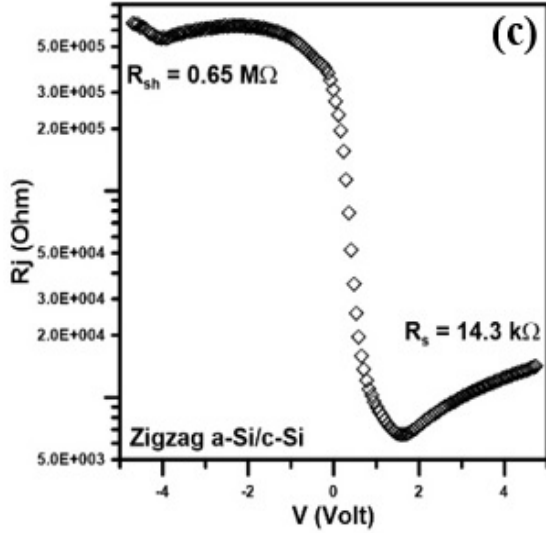
Şekil 5. Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim ( $I_F$ - $V_F$ ) karakteristikleri

Seri direnç ( $R_s$ ) ve Şunt direnci ( $R_{sh}$ ) hazırlanacak fotovoltaik aygıtın performansını doğrudan etkileyen parametrelerdir ve dolayısıyla bu direnç değerlerinin belirlenmesi çalışma için önemlidir. Bu direnç değerlerinin belirlenmesi için şekil 5' de verilen zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlere ait potansiyelin bir fonksiyonu olarak elde edilen direnç değişim grafiği kullanılmaktadır. EBPVD yöntemiyle hazırlanan zig-zag şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin Şunt dirençleri sırasıyla  $0.65 \text{ M}\Omega$  olarak bulunmuştur. Bu heteroeklemler için yüksek doğru beslemede eklem direnci sabit bir değere yaklaşır ve bu sabit seri direnç değeri ( $R_s$ ) sırasıyla  $14.3 \text{ k}\Omega$  olarak belirlenmiştir.

Eğik açılı biriktirme yöntemiyle hazırlanan bütün zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin fotovoltaik özelliklerinin belirlenmesi için akım-gerilim ölçümleri karanlık ve  $1.5 \text{ A.M. } 100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlıkta ölçülmüştür. Bütün eklem için açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) güneş pili parametreleri

## GLAD Tekniği ile Büyütölen Zig-Zag Nano Şekilli a-Si/c-Si Heteroeklemlerin Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi

ölçölmüş ve heteroeklemlerin pil performansları araştırılmıştır. Bu zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin güneş pili parametreleri ile birlikte fotoduyarlılık performansları da ölçölüp hesaplanmıştır.

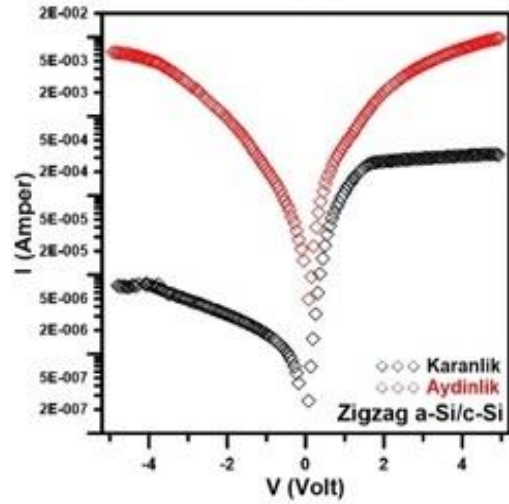


Şekil 6. Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin RJ - VF karakteristikler

Şekil 7' de hazırlanan zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlık ortamda ölçölen akım-gerilim karakteristikleri kullanılarak çizilen yarı-logaritmik akım-gerilim grafikleri verilmiştir. Zig-zag şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlıktaki I-V karakteristikleri incelendiğinde bu eklemlerin doğrultma özellikleri yüksek olduğu (yaklaşık  $10^2$  kat) fakat idealite faktörleri yüksek olması sebebiyle ideal olmayan bir diyot davranışı sergilediği görölmektedir.

Bu eklemlerin ışığa duyarlılıkları incelendiğinde bütün zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin ters beslemede ışık altında jenerasyonla ortaya çıkan elektron-boşluk çiftlerinin akıma katkı sağladığı net bir şekilde görölmektedir. Işığın ürettiği yük taşıyıcıların neden olduğu akım  $I_L$  ile birlikte ters yön akımı yaklaşık  $10^3$  kat kadar artmaktadır. Bu sonuç bu eklemlerin fotoduyarlılığının yüksek olması açısından önemlidir. Ayrıca bu heteroeklemlerin fotoduyarlılıklarının yüksek olması fotodiyot olarak kullanılması için bir potansiyele sahip olduğunun bir kanıtıdır. Ayrıca bu zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin güneş pili parametreleri ölçöldüğünde açık devre gerilimi

( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) değerleri sırasıyla 232 mV ve 22 mA/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Bu heteroeklemlerin fotovoltaik özelliklerinin gelecek vaat etmesi ışığın zig-zag nano kolonlar arasında daha rahat yol alması, eklem ara yüzeyinde daha derinlere ulaşabilmesi ve eklemin kontak noktasında daha fazla etkileşime girerek daha fazla elektron-boşluk çifti oluşturması ile alakalıdır.



Şekil 7. GLAD yöntemiyle hazırlanan Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlıktaki yarı logaritmik akım- gerilim karakteristikleri

## 4. Tartışma ve Sonuç

Zig-zag nano şekilli Si ince filmler eğik açılı buhar biriktirme (GLAD)yöntemiyle e-demeti kaplama sisteminde c-Si altlıklar üzerine büyütölmüştür. Yapılan detaylı yapı ve yüzey incelemeleri zig-zag nano kolonlu şekilli Si ince filmlerin amorf yapıda başarıyla elde edildiğini göstermiştir. Büyütölen ince filmleri arakesit morfolojisi incelendiğinde zig-zag kolonların tek yönlü yöneliminden kaynaklanan yönelimli ve boşluklu yapısı açıkça görölmektedir. Hazırlanan Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin doğrultma özellikleri yüksek olduğu (yaklaşık  $10^2$  kat) doğrultucu bir diyot davranışı sergilediği görölmektedir. Zig-zag nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin güneş pili parametrelerinin geliştirilebilir olması ve fotoduyarlılıklarının yüksek olması bu eklemlerin optoelektronik teknolojisi içerisinde fotovoltaik aygıt olarak kullanılması için olanak sağlar.

## Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Mühendislik araştırma kurumu tarafından desteklenmiştir (Proje No:212M319).Bu çalışmaya destek olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna çok teşekkür ederim.

## Kaynaklar

1. Lakhtakia A., Messier R., 1997. "Sculptured thin films – I . Concepts". *Thin Films*, 145–148.
2. Mahalik N. P., 2006. "Micromanufacturing and Nanotechnology", Springer, Berlin, Germany.
3. Mattox D.M., 1998. "Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing", Noyes Publications, USA.
4. Lakhtakia A, Messier R 2004. "Sculptured Thin Films: Nanoengineered Morphology and Optics", SPIE Press, Washington, USA.
5. Messier R., Venugopal V. C., Sunal P. D., 2000. "Origin and evolution of sculptured thin films". *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **18(4)**: 1538
6. Robbie K., Beydaghyan G., Brown T., Dean C., Adams J., Buzea C., 2004."Ultra-high vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure", *Review of Scientific Instruments*. **75**, 1089.
7. Lakhtakia A., Geddes J. B., 2010. "Thin-film metamaterials called sculptured thin films", *Trends in Nanophysics*. 59–71.
8. Rovira P., Yarussi R., Collins R., Venugopal V., Lakhtakia A., Messier R., Robbie K., 1998. "Rotating-compensator multichannel transmission ellipsometry of a thin-film helicoidal bianisotropic medium". *Thin Solid Films*: **313-314**, 373–378.
9. Savaloni H., Esfandiari A., 2011. "Fabrication, characterization and some applications of graded chiral zigzag shaped nano-sculptured silver thin films", *Applied Surface Science*. **257**, 9425–9434.
10. Tatar, B., Demiroğlu, D., Kürşat K., Ürgen, M., 2015. "Improvement in electrical and photovoltaic properties of a-Si/c-Si heterojunction with slanted nano-columnar amorphous silicon thin films for photovoltaic applications", *Current Applied Physics* **15 (4)**, 511-519.