

Fotovoltaik Uygulamalar için GLAD Tekniği ile Büyütülen Spiral Nano Şekli a-Si İnce Filmlerin Elektriksel ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

Beyhan TATAR*¹

¹Namık Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 59030, Tekirdağ

(Alınış / Received: 06.10.2016, Kabul / Accepted: 13.12.2016, Online Yayınlanma / Published Online: 16.12.2016)

Anahtar Kelimeler

Şekli ince filmler,
Spiral nano şekilli ince film,
GLAD tekniği,
Heteroeklemler,
Elektriksel ve fotovoltaik özellikler

Özet: Spiral nano şekilli a-Si ince filmler c-Si altlıklar üzerine elektron demeti buharlaştırma sistemi içerisinde GLAD tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Spiral nano şekilli ince filmlerin yapısal özellikleri X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi ve Raman spektroskopisi analizi ile belirlendi. Büyütülen spiral nano şekilli a-Si ince filmlerin yüzey ve arakesit morfolojileri Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu (FE-SEM) ile incelendi. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin elektrik ve fotovoltaik özellikleri karanlık ve aydınlık şartlarda akım-gerilim ölçümleri ile incelendi. Bariyer yüksekliği Φ_B , ideallik faktörü η , seri direnç R_s ve şant direnci R_{sh} gibi spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık şartlardaki diyot parametreleri I-V karakteristiklerinden belirlendi ve sırasıyla 0,82 eV, 3,34, 1,9 k Ω ve 0,17 M Ω olarak bulundu. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemler iyi bir fotovoltaik davranış göstermiş ve açık devre gerilimi ve kısa devre akım yoğunluğu gibi fotovoltaik parametreleri sırasıyla $V_{oc}=300$ mV ve $J_{sc}=0,12$ mA/cm² olarak elde edilmiştir.

Investigation of Electrical and Structural Properties of Spiral Nano Shape a-Si Thin Films Grown Via GLAD Technique for Photovoltaic Applications

Keywords

Sculptured thin films,
Spiral nano shape thin film,
GLAD technique,
Heterojunctions,
Electrical and photovoltaic properties

Abstract: The spiral 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 spiral nano shape thin films were determined by X-Ray Diffraction (XRD) analysis and Raman spectroscopy. Surface and cross-sectional morphology of spiral nano shape a-Si thin films were investigated by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM). The electrical and photovoltaic properties of spiral nano shape a-Si/c-Si heterojunctions have been investigated by means of current-voltage measurements within in dark and light conditions. Diode parameters such as barrier height Φ_B , diode ideality factor η , series resistance R_s and shunt resistance R_{sh} were determined from the I-V characteristic in the dark conditions for spiral nano shape a-Si/c-Si heterojunctions were found to be 0.82 eV, 3.34, 1.9 k Ω and 0.17 M Ω respectively. The spiral nano shape a-Si/c-Si heterojunctions shows a photovoltaic behavior and the photovoltaic parameters, such as open circuit voltage and short circuit current density were obtained as $V_{oc}=300$ mV and $J_{sc}=0,12$ mA/cm², respectively.

1. Giriş

Şekli ince filmler (ŞİF); nano boyutta kontrollü olarak büyütülebilen, farklı yüzey morfolojilerine sahip olan, boşluklu ve kolonlu yapılardır. ŞİF'lerin kullanım alanları günümüzde oldukça artmıştır ve oldukça dikkat çekici özelliklere sahiptir. Genel olarak; ŞİF optik, kimya, elektronik ve biyoloji alanlarında yoğunlukla çalışılmaktadır. İnce filmler

yapısal olarak homojen ve anizotropik bir sürekliliğe sahip iken, ŞİF'ler tek yönlü homojen olmayan, anizotropik bir sürekliliğe sahiptirler. ŞİF'lerin boşluklu yapıya sahip olmaları sebebiyle, temel özellikleri yapılarına; (i) Akışkanlar difüz ettiğinde, (ii) Polimerler, sıvı kristaller, inorganik katılar vs. girdiğinde homojen olmayan bir şekilde değişir. Bu özellikleriyle ŞİF'ler genel olarak; biyolojik, nükleer, ve kimyasal akışkanlar için optik sensörlerde, elektronik devreler ile çift oluşturabilen lineer veya

*İlgili yazar: btatar@nku.edu.tr

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 [1-5].

Özellikle son yıllarda ŞİF'ler 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 [6,7]. İnce filmler büyütülürken kolon yönelimleri anlık veya yavaş yavaş değiştirilerek bu yapılardan ŞİF'ler elde edilebilir.

ŞİF'lerin özelliklerini etkileyen parametreler arasında özellikle altlık açısı, altlığın dönüş hızı, buharlaşma hızı, buharlaşan malzemenin cinsi ve altlık yüzey topografyası gösterilebilir [8]. 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 [9]. 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 teknolojisinin gelişmesiyle nano boyutlu Si ince filmler güneş pili uygulamalarında çalışılmaktadır [10].

Bu çalışmada nano boyutlu spiral nano şekilli amorf Si ince filmler, e-demeti kaplama sisteminde GLAD yöntemi kullanılarak c-Si altlık üzerine büyütülmüştür. Bu sayede hem şekilli hemde nano boyutta üretilmiş olan a-Si ince filmler heteroeklem yapısı içerisinde kullanılacaktır. Elde edilen spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin yapısal ve elektriksel özellikleri incelenecektir. Ayrıca bu

üretilen heteroeklemlerin fotovoltaik özellikleri incelenerek fotovoltaik aygıt uygulamaları için araştırılacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Spiral nano şekilli ince filmlerin büyütülmesi

Spiral nano şekilli a-Si ince filmlerin kristal Si altlıklara büyütülmesi için elektron demeti buharlaştırma sistemi içerisine kurulan eğik açılı biriktirme yöntemi (GLAD) kullanılmıştır. Bunun için altlıkların belirli eğimlerde tutulabilmesi ve bir adım motoruyla istenilen hızlarda döndürülmesini sağlayan bir modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğik açılı biriktirme yönteminde (GLAD) 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. Diğer bir 2. adım motoru da altlığın açısını değiştirmek için kullanılabilir. Bu çalışmada altlık eğim açısı kaplama işlemine başlanmadan önce manüel olarak ayarlanmıştır. Sistemde sadece dönme işlemini sağlayan tek bir adım motoru vardır ve yazdığımız bir programla bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir.

Spiral nano şekilli a-Si ince filmlerin üretiminde pota-altlık mesafesi 15 cm olup altlığın eğim açısı 80° ve 85° olarak seçilmiştir. Spiral nano şekilli a-Si ince filmlerin büyütülürken altlık dönüş hızı 0,1 rpm ve 0,05 rpm; sarf malzemenin ortalama buharlaşma hızı ise 3,4 Å/s olarak seçilmiştir. Spiral nano şekilli a-Si ince filmler c-Si altlıklar üzerine büyütülmüş ve 80° ve 85° eğim açılarında büyütülen ince filmler sırasıyla S₁ ve S₂ olarak adlandırılmıştır. Bu filmlerin aktif alanı 1,5 cm² olarak ölçülmüştür.

2.2. Yapısal ve elektriksel karakterizasyon

GLAD tekniği ile büyütülen spiral 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 spiral nano şekilli ince filmlerin yüzey ve ara kesit morfolojilerinin incelenmesinde JEOL JSM 7000F model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır.

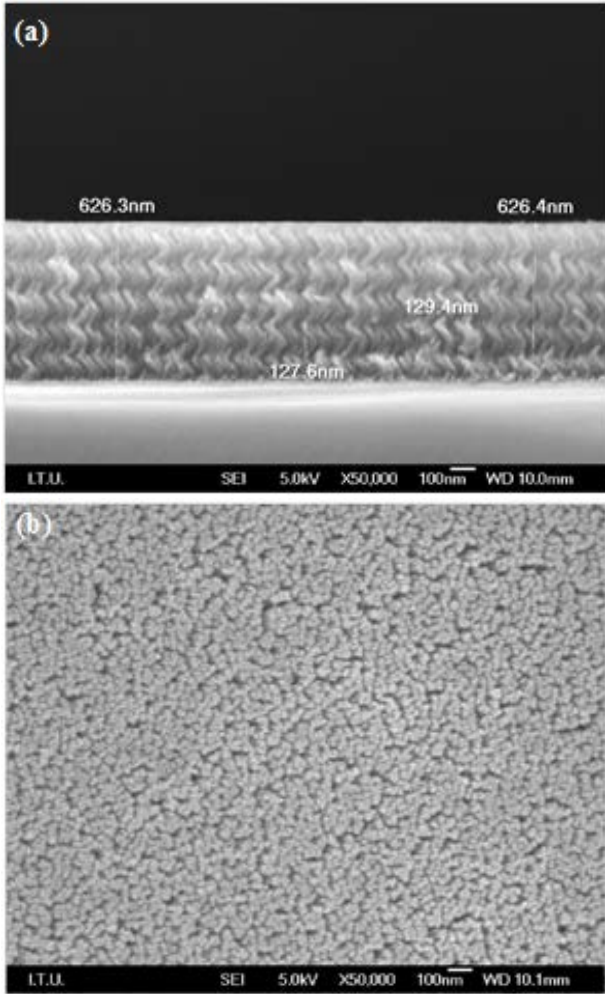
Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin akım gerilim karakteristiklerini belirlemek için Keithley 2400 marka elektrometre kullanılmıştır. Hazırlanan heteroeklemlerin diyot parametreleri karanlık durumda alınan dc akım-gerilim (I-V) ölçümlerinden hesaplanmıştır. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin fotovoltaik özelliklerinin

belirlenmesi için Keithley 2400 model elektrometre ile birlikte solar simülator olarak Newport ark lambası ve güç kaynağı kullanılmıştır. Akım gerilim ölçümleri karanlık ve 1.5 A.M. 100 mW/cm² aydınlıkta gerçekleştirilmiştir. Bütün eklemeler için açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) güneş pili parametreleri ölçülmüş ve eklemelerin fotovoltaik özellikleri araştırılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Spiral nano şekilli a-Si ince filmlerin yapısal ve yüzey özellikleri

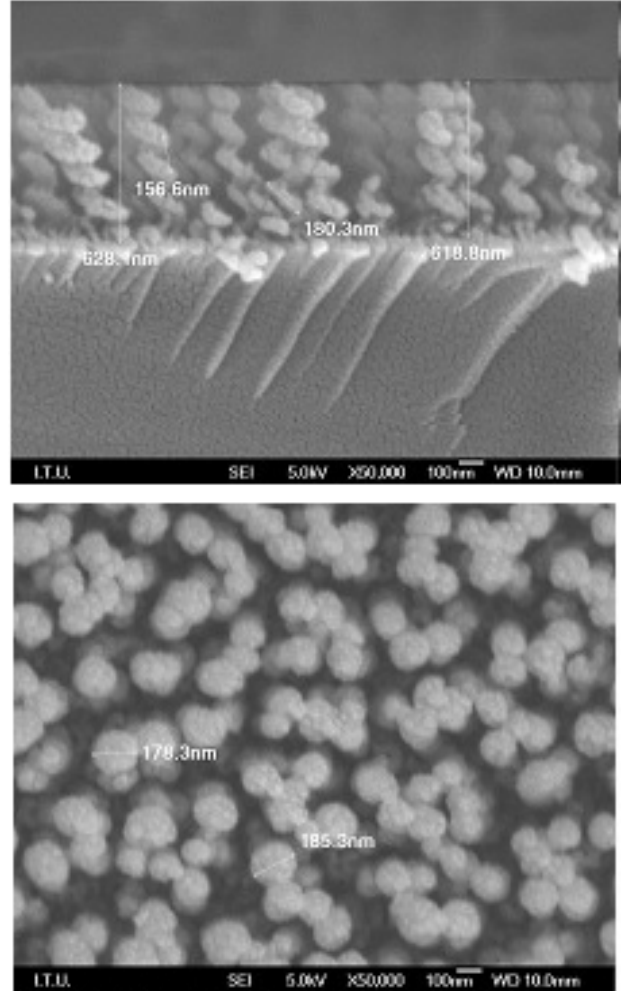
Elektron demeti buharlaştırma sisteminde eğik açılı biriktirme (GLAD) yöntemiyle büyütülen spiral nano yapıları şekilli Si ince filmler kristal Si altlıklar üzerine büyütülmüştür. Spiral nano yapıları şekilli Si ince filmlerin arakesit ve yüzey morfolojilerinin belirlenmesi için FE-SEM incelemeleri yapılmıştır. Şekil 1' de 80° eğim açısında büyütülen spiral nano yapıları şekilli Si ince filmlerin (S_1 örneği) arakesit ve yüzeyinden alınmış FE-SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 1. Spiral nano yapıları şekilli a-Si ince filmine (S_1 örneği) ait (a) ara kesit ve (b) yüzey morfolojisi FE-SEM görüntüleri

Şekil 1 incelendiğinde spiral nano yapının başarılı bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Büyütülen S_1 örneğine ait FE-SEM ara kesit morfolojileri

incelendiğinde çok sık dizilmiş düzgün bir spiral nano kolonlu yapının oluştuğu görülmektedir. Altlık dönme hızına bağlı olarak nano kolonların burğu yapılarındaki belirginleşme görülmektedir. Spiral kolonlar 3,5 Å/s buhar akış hızında, altlığın 80° eğim açısında sürekli olarak 0,1 rpm hızında döndürülmesi ile biriktirilmiştir. Spiral nano şekilli a-Si ince filmin kalınlığı 626,4 nm; bir spiral kolondaki tek bir spiral burğunun yüksekliği ise 129,4 nm olarak belirlenmiştir. Spiral nano şekilli a-Si ince filmin yüzey mikro-yapısı incelendiğinde spiral kolonlar nedeniyle yüzeyde homojen dağılmış boşluklu bir yapı oluştuğu görülmektedir. Spiral nano yapıları kolonlar arası boşluklar arakesit morfolojisinde görülmektedir. Bu yapıların devamında şekilli Si ince filmlerin yüzey morfolojilerinin yüksek porositeye sahip oldukları görülmüştür ve bu boşluklu yapı yüzeye homojen olarak dağılmıştır.

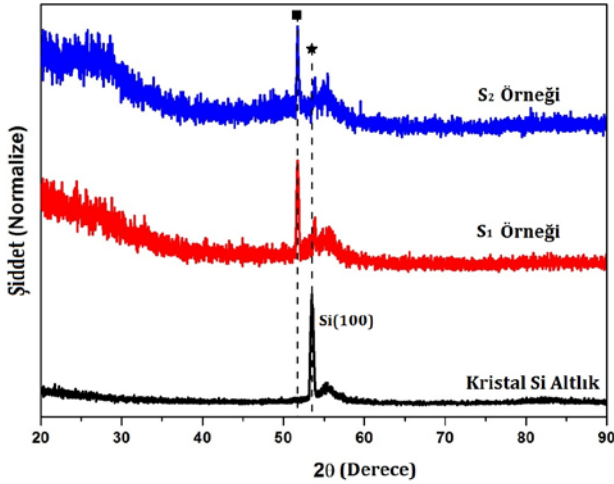


Şekil 2. Spiral nano yapıları şekilli a-Si ince filmine (S_2 örneği) ait (a) ara kesit ve (b) yüzey morfolojisi FE-SEM görüntüleri

Eğik açılı biriktirme yönteminde dönüş hızı ve buharlaşma hızı etkin parametreler olmakla beraber en önemli kaplama parametresi de altlık eğim açısıdır. Şekil 2' de 85° eğim açısında büyütülen spiral nano yapıları şekilli Si ince filmlerin (S_2 örneği) arakesit ve yüzeyinden alınmış FE-SEM fotoğrafları verilmiştir. S_2 örneğine ait FE-SEM ara kesit görüntüleri incelendiğinde spiral nano kolonların daha düzgün ve

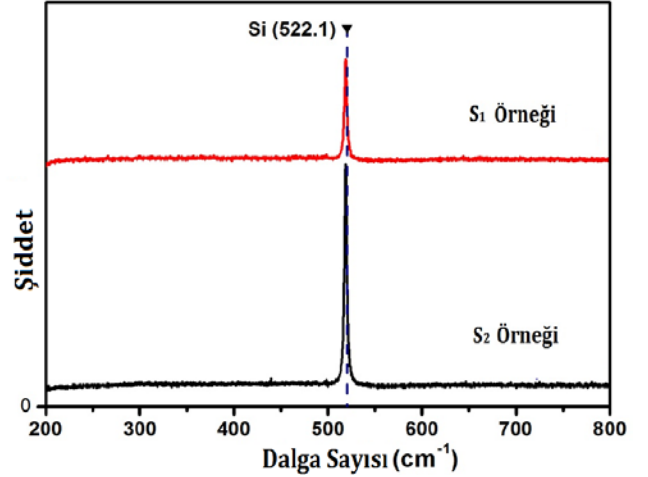
kalin olduğu görülmektedir. Filmlerin üretimleri sırasında eğim açısının arttırılması ile daha geniş boşluklu bir yüzey oluşumu görülmüştür. Ayrıca spiral nano kolonlar daha fazla büyüdükleri için birbirlerinden daha fazla ayrılmışlar ve aralarındaki mesafelerde artma olduğu belirlenmiştir. Spiral nano kolonlu yapının boşluklu yüzey morfolojisi ışığın eklem içerisinde daha uzun mesafeler kat etmesine olanak sağlar. Bu şekilde eklem bölgesinde daha fazla elektron-boşluk çifti oluşturabilme potansiyeli ile spiral nano şekilli a-Si ince filmlerin güneş pili teknolojileri ve fotovoltaik aygıtlar için önemli bir kullanımı olacağı düşünülmektedir [10,11].

Spiral nano şekilli Si ince filmlerin yapı özellikleri XRD ve Raman analizleri ile incelenmiştir. Şekil 3 'de e-demeti buharlaştırma sisteminde eğik açılı biriktirme yöntemi kullanılarak büyütülen spiral nano şekilli Si filmlere ait ve altlık olarak kullanılan c-Si a-Si a-Si a-Si XRD grafiği verilmiştir. XRD spektrumunda görüldüğü gibi spiral nano kolonlu Si ince filmler amorf yapıda olup daha önce a-Si ince filmlerde karşılaşılan 56° deki amorf dağılımdaki pikin şiddeti biraz yükselmiştir. Bununla beraber spiral nano kolonlar arasındaki boşluklu yapı ve yüksek yüzey porositesinden (boşluklu yapı) kaynaklı olarak c-Si altlıktan gelen XRD piki burada 51° de görülmektedir. Ancak S₁ ve S₂ örneklerinin deneysel şartlarında büyütülen spiral kolonlu Si ince filmlerde 51° de görülen bu pik c-Si altlıkta 53° de görülmektedir [11].



Şekil 3. Spiral nano şekilli Si ince filmlerin X-ışınları kırınım deseni

Şekil 4' de e-demeti buharlaştırma sisteminde eğik açılı biriktirme yöntemiyle büyütülen Spiral nano şekilli a-Si ince filmlere ait Raman spektrumu verilmiştir. Büyütülen bu filmlerin Raman spektrumunda, 520 cm⁻¹ de silisyuma ait olan Raman piki 522 cm⁻¹ de belirlenmiştir [10,11]. XRD deseninde görülen pik pozisyonundaki bu kaymalar Raman spektrumunda da gözlenmiştir. XRD ve Raman spektrumunda piklerde görülen bu kaymalar kristal yapıdaki stres, kusurlar ve yapısal bozukluklar nedeniyle olabilir [12, 13].



Şekil 4. GLAD yöntemiyle büyütülen spiral nano şekilli Si ince filmin Raman Spektrumu

3.2. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin elektriksel ve fotovoltaik özellikleri

Şekil 5' de hazırlanan spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin doğru besleme altında yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri verilmiştir. Bu heteroeklemlerin karanlıkta doğru yöndeki besleme durumunda düşük elektrik alan bölgesi olan termoiyonik bölgeleri göz önünde bulundurularak, diyot parametreleri hesaplanmıştır. V_F < 3kT/q voltaj bölgesi için, akım, termoiyonik emisyon teorisine göre denklem 1 deki şekliyle ifade edilir;

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

burada I₀ saturasyon akımıdır,

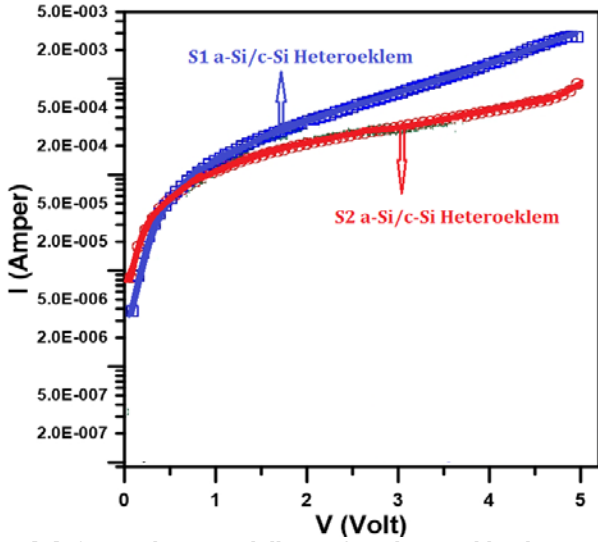
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (2)$$

q elektronun yükü, k=1.38×10⁻²³ JK⁻¹ Boltzmann sabiti, Φ_{B0} bariyer yüksekliği, A kontak alanı, A*Richardson sabiti (n-tipi Si için 30 A/cm² K² ve p-tipi Si için 90 A/cm² K²), T sıcaklık, η diyot idealite faktörü ve V doğru besleme voltajı olarak ifade edilir [14,16]. Diyotun idealite faktörü, doğru besleme altında karanlık lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden belirlenir ve denklem 3' deki şekilde ifade edilir;

$$\eta = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (3)$$

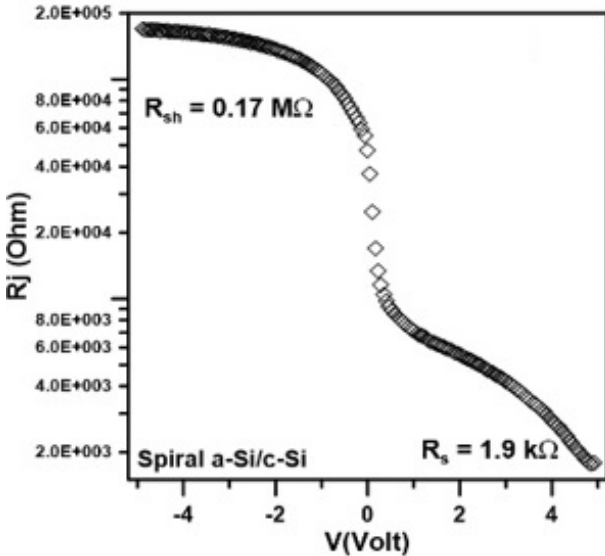
Doğru besleme lnI-V grafiğinin eğiminin akım eksenini kesiminden bariyer yüksekliği hesaplanır ve denklem 4' deki şekilde ifade edilir;

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4)$$



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

Bu spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin idealite faktörü (η) ve bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) denklem 3 ve 4 yardımı ile hesaplandı. Termoyonik emisyon akım mekanizmasına göre spiral şekilli a-Si/c-Si heteroeklemler için idealite faktörleri ve bariyer yükseklikleri sırasıyla 3,34 ve 0,82 eV olarak belirlendi. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin 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 durumlarına ait enerji seviyelerini işaret eder. Diyot idealite faktörü yük taşıyıcılarının rekombinasyonları ile direk ilgilidir.



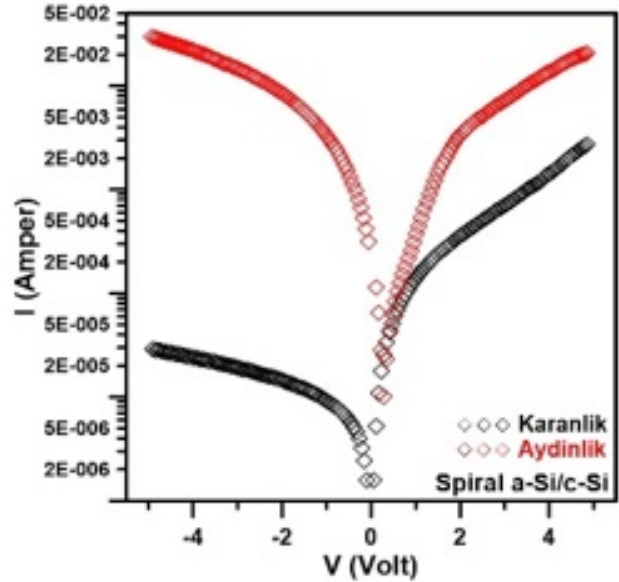
Şekil 6. Spiral nano şekilli (S_2) a-Si/c-Si heteroeklemlerin R_j - V_F karakteristikleri

Seri direnç (R_s) ve Şant 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 6' da verilen spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlere ait potansiyelin

bir fonksiyonu olarak elde edilen direnç değişim grafiği kullanılmaktadır. Eğik açılı biriktirme (GLAD) yöntemiyle hazırlanan spiral şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin Şant direnci 0,17 M Ω olarak bulunmuştur. Bu heteroeklemler için yüksek doğru beslemede eklem direnci sabit bir değere yaklaşır ve bu sabit seri direnç değeri (R_s) 1,9 k Ω olarak belirlenmiştir.

Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin fotovoltaik özelliklerinin belirlenmesi için akım-gerilim ölçümleri karanlık ve 1.5 A.M. 100 mW/cm² aydınlıkta gerçekleştirilmiştir. Bütün eklemler için açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (J_{sc}) güneş pili parametreleri ölçülmüş ve heteroeklemlerin pil performansları araştırılmıştır. Ayrıca spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin güneş pili parametreleri ile birlikte fotoduyarlılık performansları da ölçülüp hesaplanmıştır.

Şekil 7'de spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlere ait karanlık ve aydınlık ortamda ölçülen akım-gerilim karakteristikleri kullanılarak çizilen yarı-logaritmik akım-gerilim grafikleri verilmiştir. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlıkta I-V karakteristikleri incelendiğinde bu eklemlerin doğrultma özellikleri iyi olduğu (yaklaşık 10² kat) halde idealite faktörünün yüksek olması sebebiyle tam ideal olmayan bir diyot davranışı sergilediğini söyleyebiliriz.



Şekil 7. GLAD yöntemiyle hazırlanan spiral nano şekilli (S_2) a-Si/c-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlıkta yarı logaritmik akım- gerilim karakteristikleri

Bu eklemlerin ışığa duyarlılıkları incelendiğinde spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin ters beslemede ışık altında jenerasyonla ortaya çıkan elektron-boşluk çiftlerinin akıma katkı sağladığı net bir şekilde görülmektedir. Işığın ürettiği yük taşıyıcıların neden olduğu akım I_L ile birlikte ters yön akımı yaklaşık 10³ kat kadar artmaktadır. Bu sonuç bu eklemlerin fotoduyarlılığının yüksek olması açısından

önemlidir. Ayrıca bu heteroeklemlere ait fotoduyarlılıkların yüksek olması sebebiyle bu eklemelerin fotodiyot olarak kullanılabilir bir potansiyele sahip olduklarının bir kanıtıdır. Bununla beraber bu heteroeklemlerin fotoduyarlılıkları yüksek olduğundan fotodiyot aygıt olarak optoelektronik teknolojisinde kullanılabilir bir potansiyele sahiptir. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin güneş pili parametreleri ölçüldüğünde S_1 ve S_2 örneklerine ait açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) değerleri sırasıyla 280-300 mV ve 0,065-0,12 mA/cm² olarak belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin açık devre gerilimi değerleri 500-800 mV, kısa devre akım yoğunluğu değerleri 5-40 mA/cm² aralığında görülmektedir [17-19]. Çalışmada elde edilen değerler literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında daha düşük bir açık devre gerilimi ve kısa devre akım yoğunluğu elde edilmiştir. Açık devre geriliminin düşük olmasının birkaç sebebi olabilir. Bunlar sırasıyla; (1) bariyer yüksekliğini yeterince keskin ve yüksek olmaması nedeniyle jenerasyon neticesinde oluşan fototaşırıyıcıların bu bölgede yeterince ayrılmaması, (2) safsızlıklar, kusurlar ve düzensizliklerden dolayı a-Si içerisinde fototaşırıyıcıların mobilitelerinin düşük olması, (3) a-Si içerisindeki yüksek tuzak seviyelerinden dolayı elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyon mekanizmaları, olarak düşünülmektedir. Bununla beraber ürettiğimiz a-Si/c-Si heteroeklemlerde herhangi bir katkılama ve parametrelerin iyileştirilmesi için bir işlem yapılmamıştır. Spiral nano şekilli a-Si ince filmlerden hazırlanan bu heteroeklemlerin güneş pili parametrelerinin geliştirilebilir olması bu eklemelerin fotovoltaik uygulamalarda kullanılabilmesi için önemli bir göstergedir. Bununla birlikte spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin fotovoltaik özelliklerinin gelecek vaat etmesi ışığın spiral nano kolonlar arasında daha rahat yol alması, eklem ara yüzeyinde daha derinlere ulaşabilmesi ve eklem kontak noktasında daha fazla etkileşime girerek daha fazla elektron-boşluk çifti oluşturması ile alakalıdır.

4. Tartışma ve Sonuç

Spiral nano şekilli a-Si ince filmler eğik açılı buhar biriktirme (GLAD) yöntemiyle e-demeti kaplama sisteminde c-Si altlıklar üzerine büyütülmüştür. Yapılan detaylı yapı ve yüzey incelemeleri spiral nano kolonlu şekilli Si ince filmlerin amorf yapıda başarıyla elde edildiğini göstermiştir. Büyütülen ince filmlerin arakesit morfolojisi incelendiğinde spiral kolonların eğim açısını artırarak tek yönlü düzenli birbirlerinden tamamen ayrılmış ve daha fazla boşluklu bir yapı oluşturulabileceği açıkça görülmektedir. 85° eğim açısında büyütülen spiral nano yapıları şekilli Si ince filmlerin (S_2 örneği) daha düzgün spiral kolonlara ve daha yüksek boşluklu bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. GLAD tekniği ile büyütülen spiral nano şekilli a-Si ince filmlerden hazırlanan a-Si/c-Si

heteroeklemlerin doğrultma özelliklerinin yüksek olduğu (yaklaşık 10² kat) ve doğrultucu bir diyot davranışı sergilediği görülmüştür. Spiral nano şekilli a-Si/c-Si heteroeklemlerin güneş pili parametrelerinin geliştirilebilir olması ve fotoduyarlılıklarının yüksek olması bu eklemelerin optoelektronik teknolojisi içerisinde fotovoltaik aygıt olarak kullanılması için olanak sağlayacağı aşikârdır.

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 Kurumu'na çok teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Lakhtakia A., Messier R., 1997. Sculptured thin films - I. Concepts. *Thin Films*. (1997), 145-148.
- [2] Mahalik N. P., 2006. *Micro manufacturing 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: Nano engineered 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(2000), 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 nano scale structure. *Review of Scientific Instruments*. 75(2004), 1089.
- [7] Lakhtakia A., Geddes J. B., 2010. Thin-film meta material scaled sculptured thin films. *Trends in Nanophysics*. (2010) 59-71.
- [8] Rovira P., Yarussi R., Collins R., Venugopal V., Lakhtakia A., Messier R., Robbie K., 1998. Rotating-compensator multi channel transmission ellipsometry of a thin-film helicoidal bianisotropic medium. *Thin Solid Films*. 313-314(1998), 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(2011), 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 (2015), 511-519.

- [11] Tatar B., Kutlu K., Ürgen M., 2007. Synthesis of β -FeSi₂/Si heterojunctions for photovoltaic applications by unbalanced magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 516(2007), 13-16
- [12] Thomas M., Li W., Bo Z.S., Brett M.J., 2012. Inverted photovoltaic cells of nanocolumnar C60 filled with solution processed small molecule 3-Q. *Organic Electronics*. 13(2012), 2647-2652
- [13] Senthilarasu S., Sathyamoorthy R., Lalitha S., 2004. Synthesis and characterization of β -FeSi₂ grown by thermal annealing of Fe/Si bilayers for photovoltaic application. *Solar Energy Mat.& Solar Cells*. 82(2004), 299-305
- [14] Kanicki J., 1992. Amorphous and microcrystal semiconductor devices. II. London: Artech House
- [15] Aydoğan Ş., Sağlam M., Türüt A., 2005. On the some electrical properties of the non-ideal PPy/p-Si/Al structure. *Polymer*. 46(2005), 10982-10988.
- [16] Tatar B., Bulgurcuoğlu A. E., Gökdemir P., Aydoğan P., Yilmazer D., Özdemir O., et al., 2009. Electrical and photovoltaic properties of Cr/Si Schottky diodes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34(2009), 5208-5212.
- [17] Tucci M., Salurso E., Roca F., Palma F., 2002. Dry cleaning process of crystalline silicon surface in a - Si: H/c - Si heterojunction for photovoltaic applications. *Thin Solid Films*. 404(2002), 307-311.
- [18] Kim N., Um H.-D., Choi I., Kim K. -H., Seo K., 2016. 18.4%-Efficient Heterojunction Si Solar Cells Using Optimized ITO/Top Electrode. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 8(2016), 11412-11417.
- [19] Descoedres A., Barraud L., Stefaan De Wolf, Strahm B., Lachenal D., Guérin C., Holman Z. C., Zicarelli F., Demarex B., Seif J., Holovsky J., Ballif C., 2011. Improved amorphous/crystalline silicon interface passivation by hydrogen plasma treatment. *Applied Physics Letter*. 99(2011), 23506.