

YÜKSEK VERİMLİ KRİSTAL SİLİSYUM (c-Si) HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Ayşe SEYHAN^{1,2} (ORCID: 0000 0001 8090 1404)*

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fizik Bölümü, 51240, Niğde

Geliş / Received: 21.03.2019
Kabul / Accepted: 09.05.2019

ÖZ

Tek kristalli silisyum (Si) alttaşlar üzerine ince a-Si tabakalardan oluşan c-silisyum heteroeklem teknolojisi son yıllarda fotovoltaik (FV) alanında bir çok araştırmacı ve bilim adamı tarafından çalışılan önemli bir araştırma konusudur. Silisyum heteroeklem güneş hücre teknolojisi, yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve rekabetçi seri üretim maliyeti ile kendisini ispat etmiş ve yeni geliştirilen teknolojileri bünyesine entegre edebilme kabiliyeti ile potansiyelini ortaya koymuş bir güneş hücresi teknolojisidir. Bu çalışmada, silisyum heteroeklem güneş hücrelerinin üretim aşamaları ve karakterizasyonu detaylı bir şekilde çalışılmıştır. a-Si:H incefilmlerin kalınlık, bant aralığı ve taşıyıcı yaşam süresi gibi özellikleri elipsometre, profilometre ve taşıyıcı yaşam süresi cihazı ile araştırılmış ve optimizasyonu yapılmıştır. 6 inç n-tipi c-Si alttaş üzerine büyütülen katkısız ince film tabakalı heteroeklem (heterojunction with intrinsic thin-layer, HIT) yapısı ile %19,7 verimli güneş hücresi üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: Heteroeklem güneş hücresi, c-Si HIT, a-Si:H ince film, PECVD, PVD

HIGH EFFICIENT c-Si HETEROJUNCTION SOLAR CELL FABRICATION AND CHARACTERIZATION

ABSTRACT

c-Silicon (c-Si) heterojunction technology consisting of thin amorphous silicon layers on monocrystalline silicon wafers is an important research topic studied by many researchers and scientist in the field of photovoltaic in recent years. Silicon heterojunction solar cell technology is a solar cell technology that has proven itself with high energy conversion efficiency, competitive industrial production cost and has the ability to integrate newly developed technologies into its structure. In this study, the fabrication stages and characterization of silicon heterojunction solar cells are studied in detail. The a-Si: H thin film properties such as thickness, bandgap, carrier lifetime of solar cells were investigated and optimized via ellipsometer, profilometer and carrier lifetime. A 19,7 % efficient solar cell was fabricated on a 6-inch n-type c-Si wafers with intrinsic amorphous thin-layer structure (c-Si HIT).

Keywords: Heterojunction solar cell, c-Si HIT, a-Si: H thin films, PECVD, PVD

1. GİRİŞ

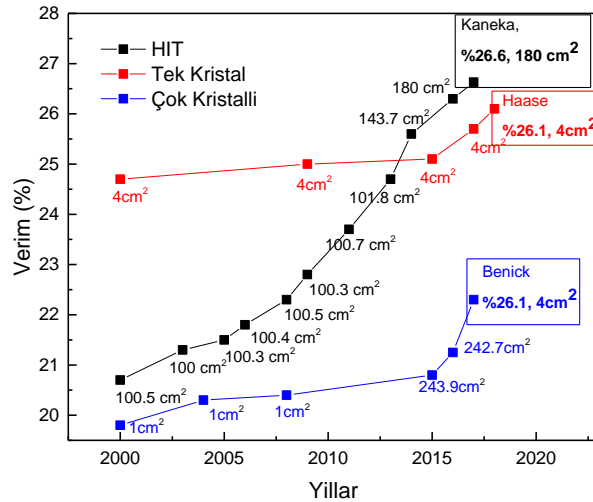
Gittikçe azalan fosil yakıt stokları ve küresel ısınmanın tetiklediği ekonomik ve siyasi sorunlar temiz enerji kaynaklarına olan ihtiyacı arttırmaktadır. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi mevcut ve gelecekteki enerji sorunlarını çözmek için sürdürülebilir büyük bir potansiyele sahiptir. Güneş enerjisinden faydalanmak için günümüzde en yaygın kullanılan teknolojilerden birisi olan güneş hücrelerine yönelik

* Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.:03882254499 ; e-posta / e-mail: aseyhan@ohu.edu.tr

A.SEYHAN

çalışmalar, yenilikçi malzemelerin geliştirildiği ve araştırma faaliyetlerinin yoğun bir şekilde devam ettiği rekabetçi bir alandır. Son kırk yılda fotovoltaik (PV) piyasasının yaklaşık %90'ına sahip olan kristal silisyum (c-Si) tabanlı güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar sayesinde verimlilik ve üretim maliyetinin düşürülmesi noktasında oldukça aşama kaydedilmiştir. Özellikle son yıllarda geliştirilen teknolojiler verimliliğin ciddi şekilde artmasını ve maliyetlerin düşmesini sağlamıştır. Ancak enerji piyasasında diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilmek için yeni geliştirilen güneş hücresi teknolojilerinin daha yüksek verimlilikte ve düşük maliyetli üretilmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. c-Si tabanlı güneş hücreleri içerisinde, yüksek verimliliği ve düşük üretim maliyetini bünyesinde birleştiren güneş hücre teknolojisi c-Si HIT güneş hücresidir.

c-Si HIT güneş hücreleri standart c-Si tabanlı güneş hücreleri ile ince film güneş hücre teknolojilerinin birleşmesi ile ortaya çıkan yüksek verimli bir güneş hücresi teknolojidir [1-5]. c-Si HIT güneş hücre yapısında yüksek verimlilik kristal silisyum altına dayanırken, maliyet etkin üretimi düşük sıcaklıklarda (200 °C) kaplanan ince film katmanlar ve çok ince kullanılan alttaş (50- 150 µm) ile sağlanmaktadır. Heteroeklem güneş hücre yapısını 1990'lı yıllarda çalışmaya başlayan Sanyo, ilk Si heteroeklem güneş hücresini 1992'de üretmiştir. %18.1 verimliliğe sahip ilk Si heteroeklem (SHJ) güneş hücresi 1cm²'lik n-tipi Si alttaş üzerine katılanmış a-Si:H (i a-Si:H) kaplanarak üretilmiştir [7]. Bu güneş hücre yapısı katkısız ince film katmanlı heteroeklem (HIT) olarak adlandırılır ve son 20 yıldır başarılı bir şekilde geliştirilmektedir. HIT modüllerinin seri üretimini 1997 yılında başlatan ve 2010 yılına kadar HIT güneş hücresi üreten tek firma Sanyo'dur. Sanyo 2010 yılında Panasonic tarafından satın alınmış ve HIT alanında yapılan çalışmalar Panasonic-Sanyo olarak devam etmiştir. Panasonic-Sanyo tarafından 2013 yılında rapor edilen ve bağımsız bir firma tarafından onaylanan laboratuvar şartlarında HIT güneş hücresi verimliliği 101.8 cm²'lik alanda, verimliliği % 24.7'dir. Bu verimlilik değerine metalizasyondan kaynaklanan direç kayıplarını ve heteroeklemdeki rekombinasyon kayıplarını azaltarak ulaşımlardır (Voc=0.750V, FF= %83.2) [6, 8]. 2010 yılında, Sanyo'nun [9] katkısız (i) a-Si:H katmanı ile ilgili patentinin sona ermesiyle a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücresini geliştirmeyi ve verimliliğini arttırmayı amaçlayan bir çok araştırma grubu, enstitü ve şirket (NREL[10]-Amerika; EPFL, Neuchatel [11, 12]-İsviçre; Helmholtz, Fraunhofer [13]-Almanya, Kaneka-Japonya [14], Sunprime-Amerika [15] gibi) ciddi bir rekabet içinde heteroeklem güneş hücrelerinin ticarileşmesi konusunda çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmaların sonucunda üretilen 179,74 cm² alana sahip arka kontaklı heteroeklem güneş hücresi, 740,3 mV açık devre gerilimi, 42,5 mA/cm² kısa devre akımı, %84,65 doluluk faktörü ve %26,63 verim değeri ile şu anda (2018 yılı) HIT alanında üretilmiş en yüksek verime sahip güneş hücresidir. HIT güneş hücrelerinde seri üretim yapan işletmelerin başında Panasonic, Kaneka, CIC ve Sunprime gelmektedir [16]. Panel verimi olarak standart HIT (ön yüzey metalizasyona sahip) güneş panellerinde en yüksek verim değerleri Panasonic %22,5, Kaneka %22,2 [17] iken HBC (Heteroeklem arka kontak) tipi HIT güneş panellerinde ise Kaneka %24,37 [18], Panasonic %23,8'dir [19]. Şekil 1'de 2000 yılından itibaren Si tabanlı mono/multi kristal güneş hücreleri ile HIT güneş hücrelerinin verim kıyaslaması verilmiştir [20]. 2019 yılı itibari ile en yüksek verimlilik değerine ulaşan firmaların adı grafikte belirtilmiştir, daha önceki yıllara ait bilgiler grafiğin daha net anlaşılması açısından verilmemiştir. Grafikte görüldüğü üzere HIT güneş hücresi, Si tabanlı güneş hücreleri arasında en yüksek verime sahiptir.



Şekil 1. 2000 ve 2019 yılları arasındaki Si tabanlı standart güneş hücreleri ile HIT güneş hücrelerinin verim rekorları. [20]

YÜKSEK VERİMLİ KRİSTAL SİLİSYUM (c-Si) HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

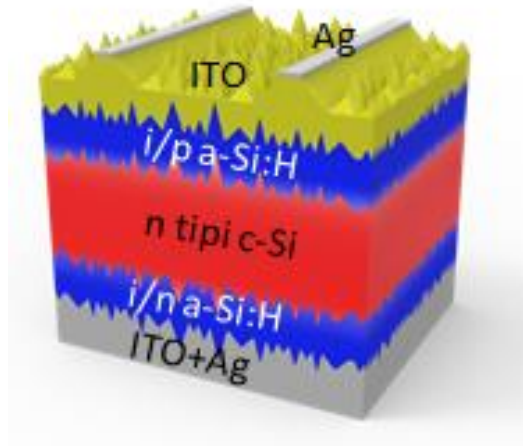
2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, c-Si HIT güneş hücrelerinin üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve tüm üretim aşamalarının detaylı karakterizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Si HIT güneş hücresi yapısı şöyledir: n-tipi kristal Si alttaş, düşük sıcaklıkta PECVD yöntemiyle çok ince katkısız hidrojenlendirilmiş amorf Silisyum (a-Si:H) kaplandıktan sonra, (n) ve (p) katkılanmış a-Si:H ince filmler güneş hücresinin arka ve ön yüzeyine sırasıyla kaplanmıştır. PECVD ile a-Si:H katmanlar kaplandıktan sonra Fiziksel Buhar Kaplama (Physical Vapor Depositon, PVD) ile geçirgen iletken oksit (transparent conductive oxide, TCO) olarak indiyum tin oksit (ITO) ve iletkenliği yüksek metal kontak olarak Ag kaplanmıştır. Son olarak, metalizasyonla ön yüz kontaklar serigrafik baskı yöntemi ile oluşturulmuştur. Üretilen güneş hücreleri çok detaylı malzeme karakterizasyonu ile optimize edilmiştir. Malzeme karakterizasyonunda spektroskopik elipsometre, profilometre, güneş simülatörü, elektrolüminesans-fotoluminesans ve taşıyıcı yaşam süresi sistemleri kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Güneş hücre yapısı

Bu çalışmada kullanılan c-Si HIT güneş hücreleri 156mm X156 mm (6 inç) boyutunda, Czochralski (CZ) n-tipi katkılanmış pseudo kare biçimli, (100) yönelimli, 3 ohm.cm özdirence sahip ve 180 µm kalınlığında alttaşlar üzerine üretilen c-Si HIT güneş hücre yapısı şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. c-Si HIT güneş hücre yapısının şematik gösterimi ve katmanları.

3.2. Yüzey temizliği

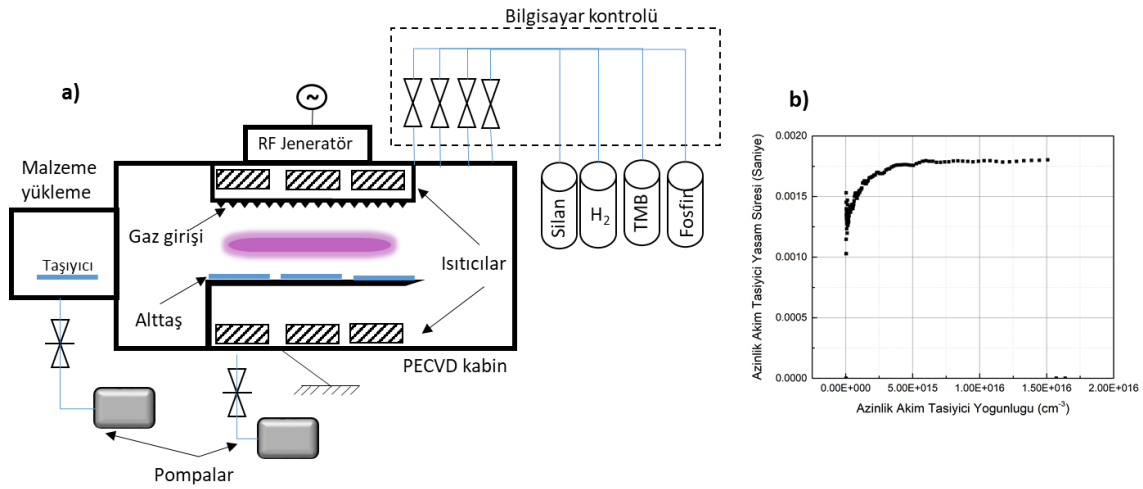
Hücre üretiminin ilk adımı olarak yüzeyi desenlendirilmiş c-Si alttaşın standart RCA proseslerine göre temizliği yapılmıştır. Bu temizlik sonrasında HF daldırma işlemi %2'lik seyreltilmiş HF içerisinde oda sıcaklığında 90 s bekletilerek yapılmış böylece oksit tabakanın uzaklaştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından saf su ile durularak azot ile kurutma uygulanmıştır. Temizleme işlemi biter bitmez hiç vakit kaybetmeden PECVD sistemine aktarılan c-Si alttaş üzerine a-Si:H tabakaların kaplanması işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.3. a-Si:H ince filmlerin kaplanması

Katkılı ve katkısız a-Si:H tabakaların üretimi 13,56 MHz frekansa sahip Radyo Frekanslı (RF) PEVCD ile gerçekleştirilmiştir. n tipi kristal Si ile katkılı a-Si:H tabakalarının arasına yüzey pasivasyonunu sağlamak amacıyla katkısız a-Si:H tabakaları Si alttaşın her iki yüzeyine ince bir katman olarak kaplanmıştır. Bu işlem sırasında silan (SiH₄) ve hidrojen gazı (H₂) kullanılmış tüm işlemler 200 °C'de, 120 W gücünde, 2 mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir.

A.SEYHAN

Hücresinin arka yüzüne arka yüzey alanı (Back Surface Field, BSF) yapısı sağlayıp arka yüzey rekombinasyonunun engellenmesi amacıyla n-tipi katkı a-Si:H tabakalar silan ve hidrojen gazına ek olarak PH₃ gazı kullanımı ile kaplanmıştır. p katkı a-Si:H tabakaların kaplanma işlemi p-n eklem yapısının oluşturulması amacıyla katkısız a-Si:H üzerine p-tipi katkı a-Si:H tabaka silan ve hidrojen gazına ek olarak Trimetilboron (Trimethylboron, TMB) gazı kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. a-Si:H katmanlarının hepsi PECVD içerisinde gerçekleştirilirken, çapraz kontaminasyon önlemek amacıyla katkısız ve katkı a-Si:H katmanları için iki farklı PECVD kullanılmıştır. Kullanılan PECVD sisteminin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. a-Si:H ince film katmanlarının taşıyıcı ömrü Sinton sistemi ile ölçülmüş ve ince filmlerin azınlık taşıyıcı yaşam süresi 1,5 ms olarak bulunmuştur. Bu değer güneş hücrelerinin yüksek açık gerilim voltajına sahip olacağını gösteren bir değer olmakla birlikte üretilen ince film kalitesini de göstermektedir. Standart Si tabanlı güneş hücrelerinde bu değer ortalama < 1 ms'den düşük olup genellikle µs mertebelerindedir [23, 24]. Si HIT güneş hücrelerinde ise bu değer 1.5 ms ve daha büyüktür [25]. Şekil 3'de üretilen ince filmlerin azınlık taşıyıcı yaşam süresi grafiği görülmektedir.



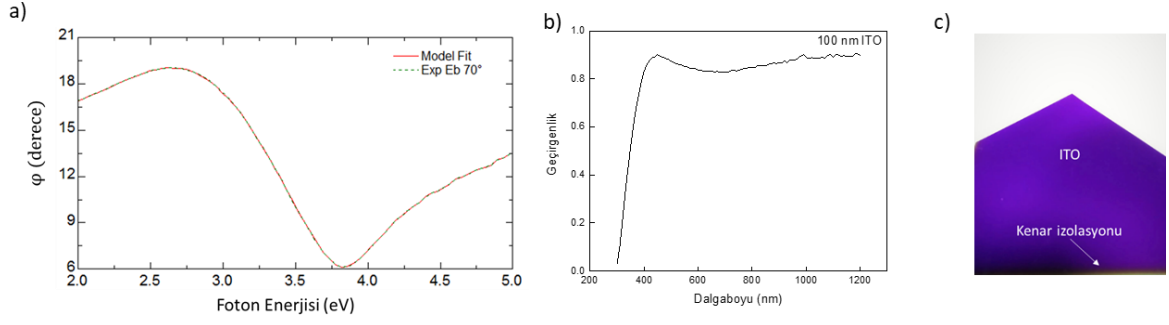
Şekil 3. (a) PECVD sisteminin şematik gösterimi, (b) azınlık taşıyıcı yaşam süresi.

3.4. ITO tabakasının PVD ile kaplanması

Güneş hücrelerinin ön yüzünde bulunan saydam iletken oksit (TCO) katmanları fotonların güneş hücresine girmesine ve oluşturulan foto-üretilen elektronların taşınmasına izin veren optik olarak saydam elektrot görevini gören katmanlardır. Yüksek yanal iletkenlik ve düşük UV-IR emilimi herhangi bir güneş hücresinin ön yüzündeki TCO'nun sahip olması gereken en önemli özelliklerdir. Güneş hücrelerinde yansıtıcı, yüksek elektrik iletkenliğe sahip ve düşük sıcaklıkta kaplanabilen farklı TCO malzemeleri kullanılmaktadır, bunlardan bazıları şöyledir: İndiyum kalay oksit (ITO), İndiyum Çinko Oksit (IZO), Alüminyum Çinko Oksit (AZO) ve Zirkonyum İndiyum Oksit (ZrIO) [21, 22]. ITO filmler görünür dalga boylarında yüksek şeffaflığa sahip, düşük dirençli ve düşük sıcaklıklarda kolayca üretilebildiğinden HIT güneş hücresinde yaygın olarak kullanılır. Malzeme sıcaklığı, DC-RF gücü ve O₂ gaz akış oranı gibi sıçratma koşulları kaplanan ITO filminin direnç, taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı hareketliliği, geçirgenlik ve yansıtma gibi elektriksel ve optik özellikleri üzerinde etkilidir [26].

Bu çalışmada, HIT güneş hücrelerinde katkı a-Si:H tabaka üzerine TCO olarak ITO kullanılmıştır. ITO, hücrenin her iki yüzüne PVD yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama işleminde yüksek saflıkta (%99,999, 5N) ITO hedef kullanılmıştır. İnce film kaplama işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ar ve O₂ gazı eşliğinde gerçekleştirilen ITO ince film üretimi güneş hücresinin hem ön yüzüne hem de arka yüzüne kaplanmıştır. Üretilen ITO ince filmlerin optik özellikleri elipsometre ile incelenmiştir. İnce filmlerin kalınlıkları ön yüz için yaklaşık 100 nm ve arka yüz için 50 nm olarak belirlenmiştir. 100 nm ITO'nun geçirgenliği yaklaşık olarak %90 üzerindedir. Elipsometreden elde edilen sonuçlar ve ITO kaplanmış güneş hücresinin fotoğrafı Şekil 4'de verilmiştir.

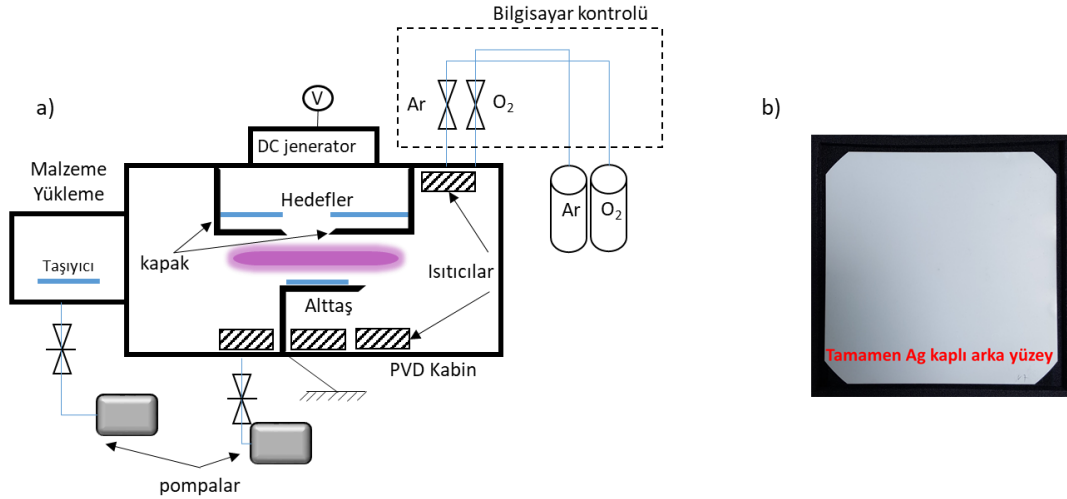
YÜKSEK VERİMLİ KRİSTAL SİLİSYUM (c-Si) HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU



Şekil 4. (a) İletken oksit katman olarak kullanılan ITO'nun elipsometre sonucu. (b) yüksek geçirgenliğe sahip cam üzerine 100 nm kaplanmış ITO'nun geçirgenliği ve (c) ITO kaplanmış güneş hücresi fotoğrafı.

3.5. Arka yüz metalizasyonun PVD ile kaplanması

Güneş hücresinin arka yüz metalizasyon işlemi PVD ile gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 180-220 nm kalınlığında gerçekleştirilen arka metalizasyon kaplama işlemi Ar gazı ortamında, 2 mbar basınç ve 2000 W güç altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'de PVD sisteminin detaylı şematik yapısı ve arka yüzeyinin tamamı gümüş kaplanmış güneş hücresinin resmi verilmiştir.

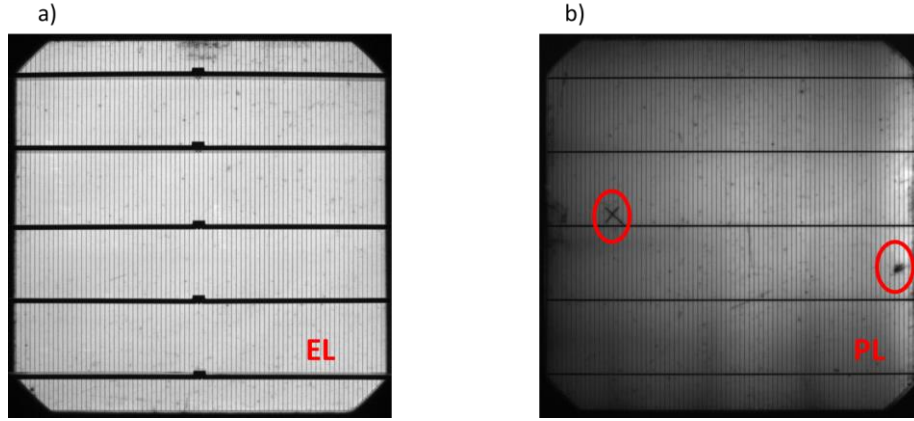


Şekil 5. (a) PVD sisteminin şematik gösterimi. (b) PVD ile arka yüzeyi tamamen gümüş kaplanmış hücre

3.6. Serigrafik baskı ile ön yüz metalizasyon ve fırınlama işlemi

Güneş hücrelerinin ön yüz metalizasyonu serigrafik baskı yöntemi ile Ag baskı yapılarak gerçekleştirilmiştir. İnce akım toplayıcıları (finger) ve kalın akım toplayıcıları (busbar) belirlenen desen doğrultusunda güneş hücresine aktarılmış ve sonrasında 200°C, 5-10 dk. fırınlama işlemi yapılarak akım toplayıcılar kurutulmuştur. Metalizasyon kusurlarının belirlenmesi için elektrolüminesans (EL) sistemi kullanılmıştır. Şekil 6 (a)'da EL sisteminden elde edilen metalizasyonun işlemi sonuçları görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere güneş hücresi metalizasyonunda herhangi bir kusur bulunmamaktadır.

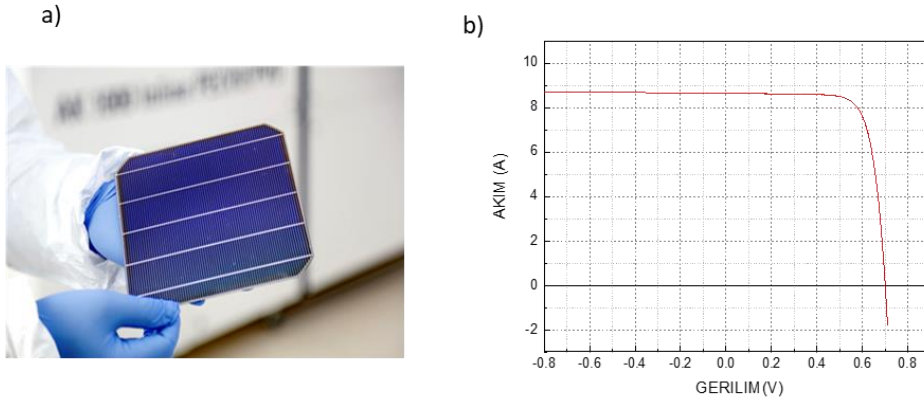
A.SEYHAN



Şekil 6. Üretilen güneş hücresinin (a) EL, (b) PL görüntüsü.

Şekil 6 (b)'da üretilen HIT güneş hücresinin fotoluminesans (PL) sonucu görülmektedir. PL sistemi ile hücredeki mikro çatlaklar, çizikler ve buna benzer alttaştan ve üretimden kaynaklanan kusurlar görülebilir. Şekilde görüldüğü üzere bir kaç bölgenin dışında herhangi bir kusur bulunmamaktadır. Ayrıca bu kusurların hücre verimliliğini çok fazla etkilemediği ölçülen fotovoltaik parametrelerden görülmektedir.

Üretilen 5 busbarlı güneş hücresi fotoğrafı ve akım-voltaj (I-V) eğrisi Şekil 7'de verilmiştir. Üretilen güneş hücrelerinin fotovoltaik parametreleri KOPEL güneş simülatörü kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen güneş hücresine ait fotovoltaik parametreler ise şöyledir: Verim değeri %19,7; Açık gerilim voltajı V_{oc} = 703 mV; I_{sc} = 8,64 mA/ cm²; FF = %77,4



Şekil 7. (a) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde üretilen %19,7 verimli c-Si HIT güneş hücresi fotoğrafı, (b) c-Si HIT güneş hücresinin Akım-Voltaj (I-V) eğrisi.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, silisyum tabanlı güneş hücrelerinde en yüksek verimin elde edildiği ve gelişmekte olan güneş hücrelerini bünyesine entegre edebilme kabiliyetine sahip güneş hücresi teknolojisi olan c-silisyum heteroeklem güneş hücrelerinin üretim aşamaları ve karakterizasyonu detaylı bir şekilde çalışılmıştır. 6 inç n-tipi c-Si alttaş üzerine büyütülen katkısız ince film tabakalı heteroeklem yapısı (HIT) ile ülkemizde üretilen endüstriyel boyutta ve stabil % 19.7 verimli ilk c-Si HIT güneş hücresidir.

YÜKSEK VERİMLİ KRİSTAL SİLİSYUM (c-Si) HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

KAYNAKLAR

- [1] DE WOLF S., DESCOEUDRES A., HOLMAN Z. C., BALLIF C., “High-efficiency silicon heterojunction solar cells: A review”, *Green*, 2(1), 7-24, 2012
- [2] LIU, Y., SUN, Y., LIU, W., YAO, J., “Novel high-efficiency crystalline-silicon-based compound heterojunction solar cells: HCT (heterojunction with compound thin-layer)”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16 (29), 15400-15410, 2014
- [3] PATEL, K., TYAGI, P. K., “Technological advances in a-Si: H/c-Si Heterojunction solar cells”. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 4 (2), 528-538, 2014
- [4] TAGUCHI, M., YANO, A., TOHODA, S., MATSUYAMA, K., NAKAMURA, Y., NISHIWAKI, T., FUJITA, K., MARUYAMA, E., “24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer”. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 96-99, 2014
- [5] TSUNOMURA, Y., YOSHIMINE, Y., TAGUCHI, M., BABA, T., KINOSHITA, T., KANNO, H., SAKATA, H., MARUYAMA, E., TAKANA, M., “Twenty-two percent efficiency HIT solar cell”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(6), 670-673, 2009
- [6] SHOCKLEY, W., & QUEISSER, H. J., “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells”. *Journal of applied physics*, 32(3), 510-519, 1961
- [7] MAKOTO, T., MIKIO, T., TAKAO, M., TORU, S., SHINYA, T., SHOICHI, N., HIROSGI, H., YUKINORI, K., “Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)”. *Japanese Journal of Applied Physics*, 31(11R), 3518–3522, 1992
- [8] TAGUCHI, M., TSUNOMURA, Y., INOUE, H., TAIRA, S., NAKASHIMA, T., BABA, T., SAKATA, H., MARUYAMA, E., “High efficiency HIT solar cell on thin (< 100 µm) silicon wafer”. In *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference 1690–1693*, 2009.
- [9] <http://panasonic.net/sanyo/news/2010/12/03-2.pdf>, (erişim tarihi 05.02.2019)
- [10] WANG, Q., PAGE, M., IWANICZKO, E., XU, Y., ROYBAL, L., BAUER, HASOON, F., “Efficient heterojunction solar cells on p-type crystal silicon wafers”. *Applied Physics Letters*, 96(1), 013507, 2010.
- [11] LACHENAL, D., ANDRAULT, Y., BAETZNER, D., GUERİN, C., KOBAS, M., MENDES, B., BUECHEL, A., “High efficiency silicon heterojunction solar cell activities in Neuchatel, Switzerland”. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, pp: 1272–1275, 2010.
- [12] STRAHM, B ANDRAULT, Y., BAETZNER, D., GUERİN, C., HOLMES, N., KOBAS, M., WAHLI, G., “Progress in silicon hetero-junction solar cell development and scaling for large scale mass production use”, *Proc. of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and the 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 1286–1289, 2010.
- [13] FELDMANN, F., BIVOUR, M., REICHEL, C., HERMLE, M., GLUNZ, S., “A passivated rear contact for high-efficiency n-type silicon solar cells enabling high Vocs and FF> 82%”. *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Fransa, 2013.
- [14] <http://www.kaneka.co.jp/en/service/news/nr201708252/>, (erişim tarihi 05.02.2019)
- [15] <http://sunprime.com/technology-main/>, (erişim tarihi 05.02.2019)
- [16] LIU, J., YAO, Y., XIAO, S. and GU, X., "Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells", *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (12): 123001, 2018.
- [17] OHSHITA, Y., KAMIOKA, T. and NAKAMURA, K., "Technology Trend of High Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells", *AAPPS Bulletin* 27 (3), 2-8, 2017.
- [18] http://www.kaneka.co.jp/wp-kaneka/wp-content/uploads/2017/06/1479120629_101.pdf (erişim tarihi 05.02.2019)
- [19] <https://news.panasonic.com/global/press/data/2016/03/en160302-2/en160302-2.html>, (erişim tarihi 05.02.2019)
- [20] <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiency-chart.20190103.pdf>, (erişim tarihi 05.02.2019)
- [21] RUCAVADO E., JEANGROS Q., URBAN D. F., Holovský J., REMES Z., DUCHAMP M., LANDUCCI F., Dunin-Borkowski R., KÖRNER W., ELSÄSSER C., HESSLER-WYSER A., MORALES-MASIS M. and BALLIF C., “Enhancing the optoelectronic properties of amorphous zinc-tin oxide by passivation of sub-gap defects: a theoretical and experimental demonstration”, *Phys. Rev. B* 95, 24, 2017.
- [22] WERNER J., WALTER A., RUCAVADO E., MOON S.-J., SACCHETTO D., RİENAECKER M., PEİBST R., BRENDEL R., NİQUİLLE X., WOLF S. De, LÖPER P., MORALES-MASIS M., NİCOLAY S., NİESEN B., BALLIF C., “Zinc Tin Oxide as High-Temperature Stable Recombination Layer for Mesoscopic Perovskite/Silicon Monolithic Tandem Solar Cells”, *Appl. Phys. Lett.* 109, 2016

A.SEYHAN

- [23] GIESECKE J.A., MICHLE B., SCHINDLER F., SCHUBERT M.C, WARTA W., Minority carrier lifetime of silicon solar cells from quasi-steady-state photoluminescence, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95, 1979–1982, 2011.
- [24] MURPHY J.D., MCGUIRE R.E , BOTHE K., VORONKOV V.V., FALSTER R.J., Minority carrier lifetime in silicon photovoltaics: The effect of oxygen precipitation, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 120, 402–411, 2014.
- [25] DeWOLF S., DESCOEUDRES A., HOLMAN Z. C. and BALLIF C., High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review, *Green*, Vol. 2, pp. 7–24, 2012
- [26] ALTAN T., Silisyum Hetero-eklem Güneş Hücrelerinde Ön Yüz Metalizasyon Optimizasyonu ve Alternatif Ön Yüz Metalizasyon Yöntemi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans tezi, Türkiye, 2018.