



Research Article

Performance of Vanadium Pentoxide Thin Film as Hole Conduction Layer in Perovskite Based Solar Cell

Fatih Ongül¹ *

¹ Department of Electricity and Energy, Ardahan Vocational School of Technical Sciences, Ardahan University, 75002, Ardahan, Türkiye

* Correspondence: fatihongul@ardahan.edu.tr

Received: 13 November 2023; Accepted: 4 December 2023; Published: 31 December 2023

Abstract: Interest in clean, sustainable energy sources has increased due to the fact that traditional fossil energy resource reserves will be depleted in the near future and that energy production technologies that use existing fossil fuels cause global warming and other environmental threats. As a result, the sun, a long-lasting natural resource, is being explored as an alternative energy source. Solar cells are devices that convert sunlight directly into electrical energy. When perovskites were first introduced in solar cells in 2009, the efficiency was 3.8%. However, intensive research and development efforts in recent years have pushed the efficiency in this field to 25.7% by 2023. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene-sulfonate) (PEDOT:PSS) is commonly used as the hole transport material in the inverted structure. Due to PEDOT:PSS's low crystallinity, low mobility, and its acidic and hygroscopic nature, various inorganic materials are employed as hole transport materials to enhance stability. Vanadium oxides (V_2O_3 , VO_2 and V_2O_5) are used in a wide variety of applications, including solar cells. Vanadium pentoxide (V_2O_5) thin films were obtained from solution by spin coating method and their structural and optical properties were examined. The photovoltaic performance of PEDOT:PSS and V_2O_5 thin films as hole conduction layer in inverted (p-i-n) planar structure perovskite solar cells was determined.

Keywords: perovskite solar cells, planar p-i-n structures, hole conduction layers, V_2O_5 thin films

Araştırma Makalesi

Perovskit Tabanlı Güneş Hücresinde Vanadyum Beşoksit İnce Filmin Deşik İletim Tabakası Olarak Performansı

Öz: Geleneksel fosil enerji kaynak rezervlerinin yakın gelecekte tükenerek olması ve ayrıca son yıllarda mevcut fosil yakıtları kullanan enerji üretim teknolojilerinin küresel ısınma ve diğer çevresel tehditlere yol açması nedeniyle, temiz, sürdürülebilir enerji kaynaklarına ilgi artmıştır. Bundan dolayı, özellikle uzun ömürlü doğal bir kaynak olan güneş, alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Perovskitler ilk kez 2009 yılında güneş hücrelerinde kullanıldığı zaman verim %3.8 iken, son yıllarda yapılan yoğun araştırma ve geliştirme sonucunda 2023 yılına gelindiğinde bu alanda verim %25.7'e ulaşmış durumdadır. Tersine çevrilmiş yapıda deşik iletim materyali olarak çoğunlukla Poly(3,4ethylenedioxythio phene):poly(styrene-sulfonate) PEDOT:PSS kullanılmaktadır. PEDOT:PSS'in düşük kristallliği, düşük mobilitesi, asidik ve hidroskopik doğası nedeniyle kararlılığını arttırmak amacıyla farklı inorganikler deşik iletim materyali olarak kullanılmaktadır. Vanadyum oksitler (V_2O_3 , VO_2 ve V_2O_5) güneş hücreleri de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Vanadyum beşoksit (V_2O_5) ince filmleri çözeltiden dönele kaplama yöntemiyle elde edilerek yapısal ve optik özellikleri incelenmiştir. Tersine çevrilmiş (p-i-n) düzlemsel yapıda perovskit güneş hücrelerinde PEDOT:PSS ve V_2O_5 ince filmlerin deşik iletim tabakası olarak fotovoltaiik performansı belirlendi.

Anahtar Kelimeler: perovskit güneş hücreleri, düzlemsel p-i-n yapıları, deşik iletim tabakaları, V_2O_5 ince filmler.

Citation: F. Ongül, "Performance of Vanadium Pentoxide Thin Film as Hole Conduction Layer in Perovskite Based Solar Cell", *Journal of Studies in Advanced Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 67-75, Dec 2023, doi: 10.5281/zenodo.10445044

1. Giriş

Enerji üretiminde kullanılan geleneksel fosil enerji kaynakları hızla tükenmekte, diğer yandan sınırlı rezervlere sahip bu kaynaklara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Enerji üretim teknolojilerinde fosil yakıtların kullanımı küresel ısınma ve diğer çevresel sorunlara yol açması nedeniyle sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Bundan dolayı özellikle uzun ömürlü doğal bir kaynak olan güneş, alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Güneş hücreleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Perovskitler ilk kez 2009 yılında güneş hücrelerinde kullanıldığı zaman verim %3.8 iken, son yıllarda yapılan yoğun araştırma ve geliştirme sonucunda 2023 yılına gelindiğinde bu alanda verim %25.7'e ulaşmış durumdadır [1], [2]. Perovskitlerin optoelektronik ve yapısal özelliklerinin kontrol edilebilmesi ve ayarlanabilmesi dışında, elektron ve deşik iletim tabakalarının özellikleri ve ara yüzleri de perovskit güneş hücresi performansını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir [3]-[6]. Perovskit güneş hücrelerinde deşik iletim tabakası olarak küçük moleküller, organik polimerler ve inorganikler kullanılmıştır [7]. Küçük moleküllerde özellikle de spiro-MeOTAD yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinde deşik iletim materyali olarak ön plana çıkmıştır [8]. Metal-oksit malzemeler geniş bant aralıkları, yüksek optik geçirgenliği, yüksek iş fonksiyonları, yüksek mobiliteleri ve karalılıkları nedeniyle perovskit tabanlı güneş hücrelerinde deşik iletim tabakası olarak kullanılmaktadır. Perovskit hücre mimarisinde tersine çevrilmiş düzlemsel yapıda deşik iletim materyali olarak çoğunlukla Poly(3,4ethylenedioxythio phene):poly(styrene-sulfonate) PEDOT:PSS kullanılmaktadır [9]. PEDOT:PSS'in düşük kristallığı, düşük mobilitesi asidik ve hidroskopik doğası nedeniyle kararlılığı ve aygıt verimini arttırmak amacıyla CuSCN, CuO, MoO_x ve NiO_x gibi inorganikler deşik iletim materyali olarak kullanılmaktadır ve bunlar arasında NiO_x ön plana çıkmıştır. Perovskit güneş hücrelerinde deşik iletim tabakası olarak kullanılan metal oksitler arasında en yoğun NiO_x araştırılmış ve incelenmiştir [10]. Ayrıca Perovskit tabanlı güneş hücrelerinde perovskit ile elektron ve deşik taşıma malzemeleri arasındaki bant hizalanması problemleri güneş hücrelerinde açık devre geriliminde (V_{oc}) düşüşe sebep olmaktadır bundan dolayı PEDOT:PSS yerine metal oksitlerin kullanımı daha uygun olmaktadır [11].

Vanadyum oksitler (V₂O₃, VO₂ ve V₂O₅), enerji depolaması, kataliz, ışık saçan diyotlar ve güneş hücreleri de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [12], [13]. Vanadyum oksit (V₂O_x), tersine çevrilmiş düzlemsel heteroeklem perovskit güneş hücrelerinde PEDOT:PSS/perovskit ara yüzünde ara tabaka olarak kullanılmıştır [14]. V₂O_x'in perovskit hücre mimarisinde (ITO/PEDOT:PSS/V₂O_x/CH₃NH₃PbI₃) PEDOT:PSS/perovskit ara yüzünde ara tabaka olarak kullanıldığında iş fonksiyonun 5.1 eV dan 5.4 eV'a arttığı, taşıyıcı yük rekombinasyonunu azaldığı belirtilmiş ve PEDOT:PSS ile karşılaştırıldığında açık devre geriliminin, dolum faktörünün ve dolayısıyla hücre veriminin arttığı rapor edilmiştir [15]. Sb₂S₃ tabanlı inorganik güneş hücrelerinde vanadyum beşoksit (V₂O₅) deşik iletim tabakası olarak kullanılarak inorganik düzlemsel heteroeklem güneş hücrelerinde %4.8 verime ulaşıldığı ve ayrıca organik deşik iletim malzemesi ile karşılaştırıldığında neme karşı kararlılığında önemli bir iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir [16]. Vanadyum beşoksit (V₂O₅), tersine çevrilmiş düzlemsel heteroeklem perovskit güneş hücrelerinde ITO/PEDOT:PSS ara yüzünde deşik iletim tabakasının modifikasyonu için kullanılmıştır. V₂O₅ ile modifiye edilmesi sayesinde fotonları yansıtarak fotoaktif perovskit katmandaki ışık soğurumunu artırdığı, asidik PEDOT:PSS ince filminin ITO elektrotunu aşındırmasını önlediği böylece hücre yapısının kararlılığını arttırdığı belirtilmiş. ITO/V₂O₅/PEDOT:PSS/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline/Ag konfigürasyonunda ITO/PEDOT:PSS arasında V₂O₅ ve PCBM/Ag arasında Bphen kullanılmasıyla deşik ve elektron iletim tabakalarının modifikasyonu sayesinde hücre veriminin ve kararlılığın arttığı rapor edilmiştir [17].

Bu çalışmada, vanadyum beşoksit (V₂O₅) çözeltisi yalnızca bir adımda hidrotermal yöntemiyle hazırlanarak dönel kaplama tekniği ile V₂O₅ ince filmleri üretildi ve ısıl işlemin V₂O₅ ince filmlerin yapısal ve optik özelliklerine etkisi belirlendi. Perovskit tabanlı güneş hücrelerinde PEDOT:PSS yerine V₂O₅ ince filmleri deşik iletim tabakası olarak kullanıldı ve elde edilen cihazların fotovoltaiik parametreleri belirlendi.

2. Materyal ve Yöntemler

Cam ve ITO kaplı cam altlıklar 1.5x1.5 cm² boyutlarında kesildi. İndiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam altlıklar optik geçirgen iletken tabaka olarak kullanıldı. Üst metal kontak kaplandığında ITO ile kısa devre

olmaması açısından, ITO kaplı camların bir kısmına HCl:HNO₃:H₂O (4.6:0.4:5) oranlarında asit çözeltisi kullanılarak dağlama işlemi uygulandı. Cam ve ITO kaplı altlıkların yüzeyleri distile su, aseton ve izopropil alkol kullanılarak ultrasonik banyo yardımıyla temizlendi. Altlıklara film kaplanmadan önce altlıkların yüzeyine UV Ozon 10 dakika uygulanarak yüzey temizliği yapıldı.

V₂O₅ çözeltisi yalnızca bir adımda hidrotermal yöntemiyle hazırlandı. V₂O₅ çözeltisi, 50 mg V₂O₅ tozunun (%99.99) 3 mL deiyonize su içine manyetik karıştırıcı ile çözünmesi sağlandı sonra manyetik karıştırıcı sıcaklığı 50 °C'ye ayarlanarak sabit sıcakta 500 µl H₂O₂ (%30) damla damla yavaşça çözeltiye eklenerek hazırlandı [18]. Çözeltinin renginin başlangıçta sarı, zamanla sarımsı-turuncu hale gelmesi ve son olarak 24 saat karanlıkta bekletildikten sonra V₂O₅ hidrat çözeltisinin karakteristiği olan turuncudan koyu kırmızıya değişimi gözlemlendi.

V₂O₅ çözeltileri dönel kaplama yöntemi ile altlıklar üzerine 2000 rpm'de 60 s kaplandı. V₂O₅ ince filmlere ısıtılma işlemi etkisini belirlemek amacıyla kaplanan V₂O₅ ince filmlere atmosferik ortamda 100 °C'de ve 300 °C'de 30 dakika ısıtılma işlemi uygulandı. Isıtılma işlemi uygulanan V₂O₅ ince filmlerin yapısal analizi X-Işınım Kırınım yöntemi (XRD) kullanılarak PANalytical Empyrean XRD cihazıyla yapıldı.

İnce Filmlerin optik soğurma ölçümleri, "Perkin Elmer" UV-VIS spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. V₂O₅ ince filmler 300-1100 nm dalgaboyu aralığında optik soğurma spektrumları incelenmiştir. V₂O₅ ince filmler direkt geçişli band yapısına sahip olduğundan ince filmlerin dalga boyuna bağlı soğurma katsayısından $(\alpha h\nu)^2=f(h\nu)$ grafikleri çizildi. Çizilen bu optik soğurma spektrum eğrisinin lineer kısmından alınan eğimin enerji eksenini kestiği değerden ince filmin yasak band genişliği belirlendi.

Perovskit güneş hücreleri ITO/PEDOT:PSS/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag ve ITO/V₂O₅/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag konfigürasyonlarında p-i-n düzlemsel yapıda hazırlandı. PEDOT:PSS Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (Clevios PH1000) çözeltisi, dönel kaplama yöntemi ile 1500 rpm'de 45 s ITO kaplı cam altlıklar üzerine kaplandı ve 120 °C'de 30 dakika atmosferik ortamda ısıtılma işlemi uygulandı. ITO kaplı cam altlıklar üzerine V₂O₅ çözeltileri dönel kaplama yöntemi kullanılarak 1500 rpm'de 60 s kaplandı. V₂O₅ ince filmleri 100 °C'de 30 dakika ısıtılma tabla üzerinde atmosferik ortamda ısıtılma işlemi uygulandı.

Perovskit çözeltisi, PbI₂ ve CH₃NH₃I'nin 1.4:1.4 mol oranında gama-bütürolakton (GBL) içinde çözünmesiyle hazırlandı. Bu çözelti, 60 °C'de en az 12 saat karıştırıldı ve kaplanmadan önce 0.45 µm PVDF ve 0.22 µm PTFE filtrelerle iki kez süzüldü. CH₃NH₃PbI₃ perovskit çözeltisi, dönel kaplama yöntemi ile 2000 rpm'de 10 s ve dönme hızı 4000 rpm'ye ulaştığında antisolvent yıkama için perovskit yüzeyine toluen (60 µL) damlatılarak 4000 rpm'de 20 s deşik iletim tabakası üzerine atmosferik ortamda kaplanmıştır. Perovskit tabakası 100 °C'de 20 dakika sıcak bir plaka üzerinde atmosferik ortamda ısıtılma işlemi uygulandı.

Ağırlıkça %2 oranında PCBM, klorobenzen (CB) ve kloroform (CF) içinde 1:1 hacim oranında karıştırılmasıyla hazırlanan PCBM çözeltisi, perovskit tabakası üzerine 1500 rpm'de 15 s ve 2000 rpm'de 15 s dönel kaplama yöntemi kullanılarak aktif tabakasının üzerine kaplandı ve 100 °C'de 30 s ısıtılma işlemi uygulandı.

Bathocuproine (BCP) çözeltisi, saf (absolute) ethanol içerisinde 0.5 mg BCP tozunun çözünmesiyle hazırlandı. BCP çözeltisi kaplanan PCBM tabakasının yüzeyine dönel kaplama yöntemiyle 4000 rpm'de 40 s kaplandı.

Gümüş (Ag) üst metal kontak, ara yüzey olarak kaplanan BCP tabakasının üzerine 110 nm kalınlığında vakum ortamında termal buharlaştırma sisteminde kaplandı.

Hazırlanan perovskit tabanlı güneş hücrelerinin akım-gerilim karakteristikleri standart 25 °C ortam sıcaklığında, güneş simülatörü (solar simülatör AM1.5G-100 mW/cm²) ile aydınlıkta Keithley 2400 cihazı kullanılarak akım-gerilim karakterizasyonu yapıldı. Akım-gerilim karakteristiklerinden yararlanılarak, hücrelerin açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), paralel ve seri dirençleri, dolun faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (PCE) gibi fotovoltaiik parametreleri literatürde verilen teorik formüller kullanılarak hesaplandı.

$$PCE (\%) = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100 = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot J_{sc}}{P_{in}} \times 100 \quad ve \quad FF = \frac{V_{mpp} \cdot J_{mpp}}{V_{oc} \cdot J_{sc}}$$

Histerezis indeksi (HI),

$$HI = \frac{PCE_{geri} - PCE_{ileri}}{PCE_{geri}}$$

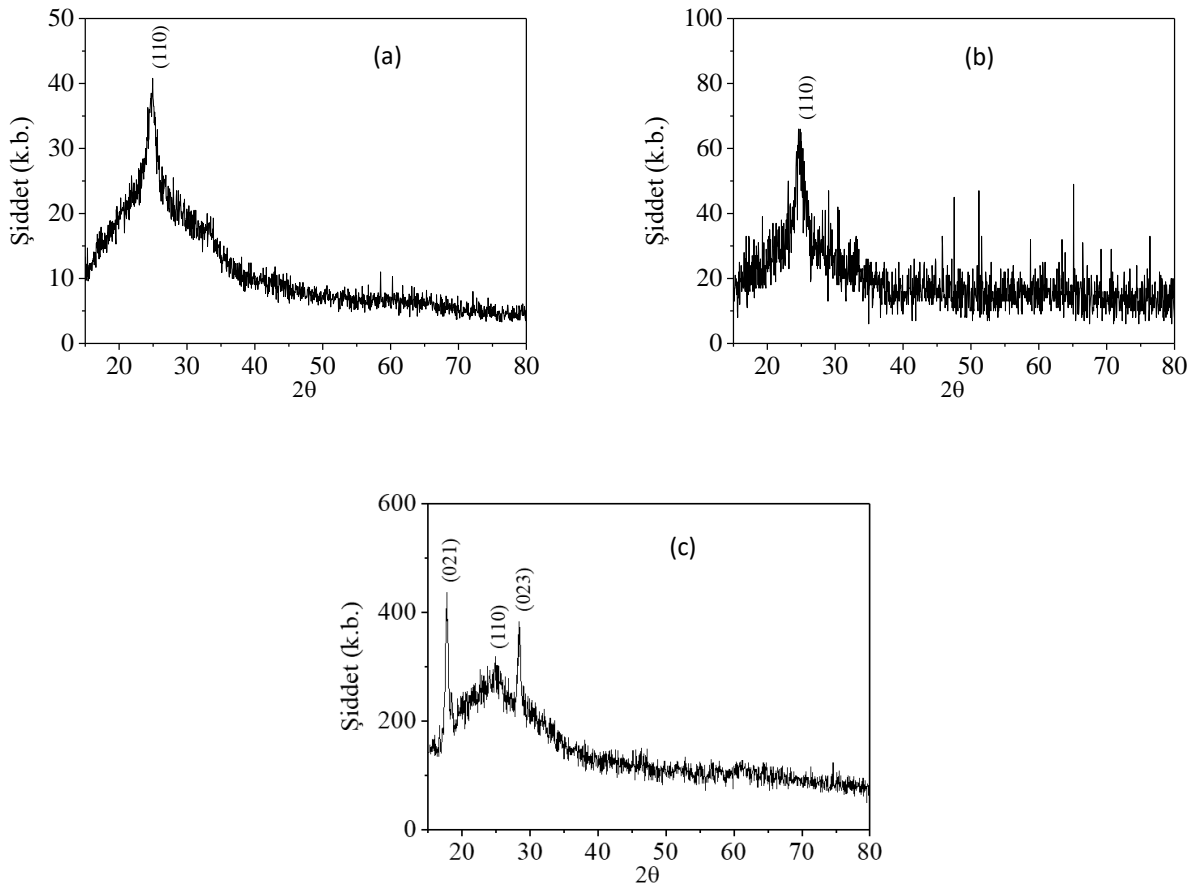
denklemleri ile hesaplandı, burada PCE_{geri} geriye doğru akım-gerilim ölçümü ve PCE_{ileri} ileri doğru akım-gerilim ölçümü altındaki güneş hücrelerinin güç dönüşüm verim (PCE) değerleridir. Perovskit tabanlı güneş hücrelerinin gelen foto akım dönüşüm verimliliği (IPCE), Newport kuantum verimlilik sistemi kullanılarak ölçüldü. Ayrıca fotoakım yoğunluğu (J_{IPCE}), dalga boyuna bağlı IPCE(λ) spektrumunun ve foto akı yoğunluğunun dalga boyu üzerinden integre edilmesiyle hesaplandı.

$$J_{IPCE} = q \int IPCE(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) \cdot d\lambda$$

IPCE spektrumundan fotoakım yoğunluğunu (J_{IPCE}) belirlemek için kullanılan denklemden q elektron yüküdür, IPCE (λ) spektral duyarlılıktır, $\Phi(\lambda)$ gelen foton akı yoğunluğu (AM1.5) ve λ ışığın dalga boyudur

3. Bulgular ve Tartışma

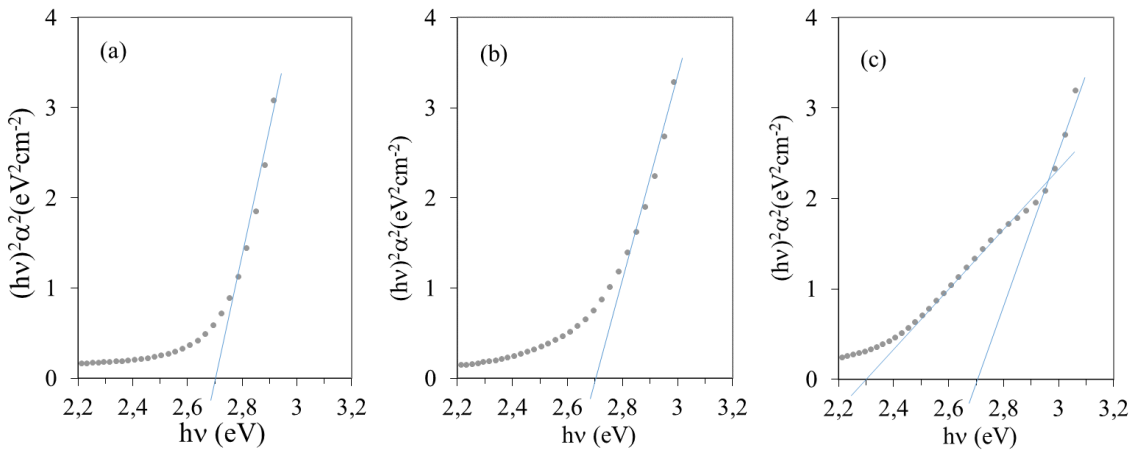
V_2O_5 çözeltileri dönele kaplama yöntemi ile altlıklar üzerine 2000 rpm'de 60 s kaplandı. V_2O_5 ince filmlere ısıtılma işleminin etkisini belirlemek amacıyla kaplanan V_2O_5 ince filmlere atmosferik ortamda 100 °C'de ve 300 °C'de 30 dakika ısıtılma işlemi uygulandı. Isıtılma işlemi uygulanan V_2O_5 ince filmlerin yapısal analizi X-Işın Kırınım yöntemi (XRD) kullanılarak PANalytical Empyrean XRD cihazıyla yapıldı. Isıtılma işlemi uygulanan V_2O_5 ince filmlerin XRD desenleri Şekil 1'de gösterildi.



Şekil 1. a) Isıtılma işlemi uygulanmamış b) 100 °C'de ve c) 300 °C'de 30 dakika ısıtılma işlemi uygulanan V_2O_5 ince filmin XRD deseni.

V_2O_5 'in JCPDS no. 60-0767'de indekslenen XRD deseninin sırasıyla 2θ açıları 15.6° , 20.4° , 21.9° , 26.3° , 31.2° , 32.6° , 34.5° , 41.4° , 42.3° , 45.6° , 47.5° , 49.0° , 51.4° , 52.3° , 55.8° , 61.2° , 62.3° ve bunlara karşılık gelen yönelimleri sırasıyla (020), (001), (011), (110), (040), (101), (130), (002), (012), (141), (060), (102), (200), (061), (201), (240), (170) şeklinde rapor edilmiştir [19]. Isıl işlem görmemiş ve 100°C 'de ve 300°C 'de ısıl işlem görmüş V_2O_5 ince filmlerin XRD desenlerindeki geniş piklerin maksimumun 2θ açıları yaklaşık olarak 26.3° karşılık gelmektedir, (110) yönelimli bu pikler V_2O_5 yapısının karakteristik piklerindedir. V_2O_5 ince filmlerin XRD desenlerindeki düşük şiddetli geniş pikler ince filmlerin kristalitelerinin düşük olduğunu daha çok amorf yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

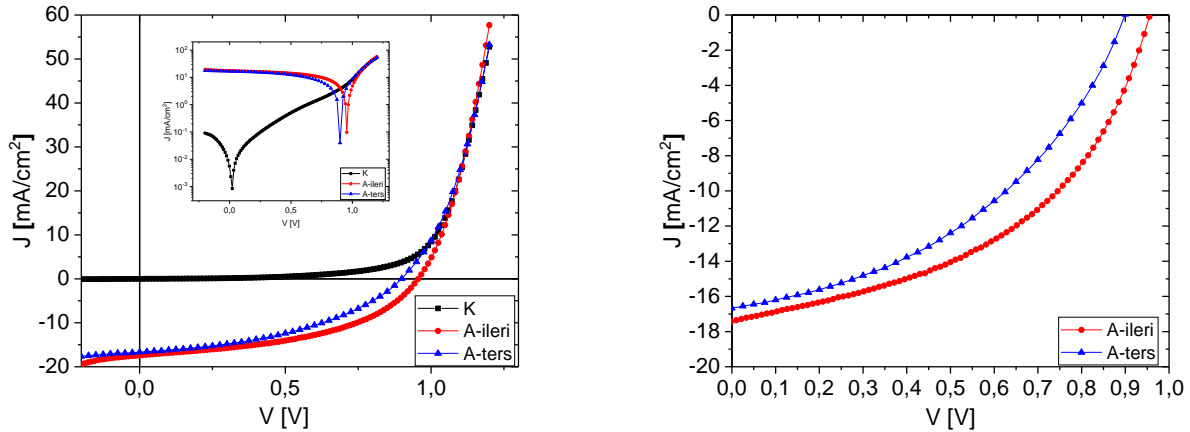
İnce filmlerin optik soğurma ölçümleri, Perkin Elmer UV-VIS spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. V_2O_5 ince filmler $\lambda=300-1100$ nm dalgaboyu aralığında optik soğurma spektrumları incelenmiştir. V_2O_5 ince filmler direkt geçişli band yapısına sahip olduğundan optik soğurma spektrumlarından dalga boyuna bağlı soğurma katsayısından $(\alpha hv)^2=f(hv)$ grafikleri çizildi. Çizilen bu optik soğurma katsayısı spektrum eğrisinin lineer kısmından alınan eğimin enerji eksenini kestiği değerden ince filmin yasak band genişliği belirlendi.



Şekil 2. a) Isıl işlem uygulanmamış, b) 100°C 'de ve c) 300°C 'de 30 dakika ısıl işlem uygulanmış V_2O_5 ince filmlerin soğurma katsayısı spektrumları.

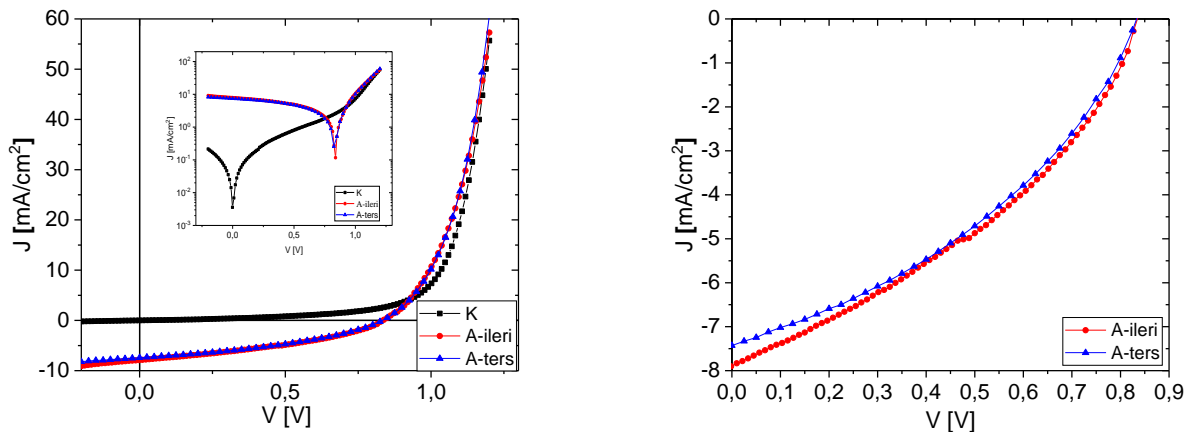
Isıl işlem uygulanmamış, 100°C 'de ve 300°C 'de 30 dakika ısıl işlem uygulanmış V_2O_5 ince filmlerin Şekil 2'de verilen optik soğurma katsayısı spektrumlarından yasak band genişlikleri (E_g) tavlanmamış V_2O_5 için 2.70 eV, 100°C 'de 30 dakika tavlanmış V_2O_5 için 2.70 eV ve 300°C 'de 30 dakika tavlanmış V_2O_5 için 2.70 eV ve 2.30 eV olarak belirlenmiştir. 300°C 'de 30 dakika tavlanmış V_2O_5 ince filmin soğurma katsayısı spektrumunda iki keskin lineer bölge görülmektedir hem amorf hem de kristal yapıdan kaynaklanabilir. Isıl işlem uygulanmasıyla yasak band genişliğinde azalma gözükmemektedir amorf yapıdan daha kristal yapıya geçiş yaptığı şeklinde yorumlanabilir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda V_2O_5 yapısının yasak band genişliği 2.3 eV ile 2.8 eV arasında rapor edilmiştir [20].

Perovskit güneş hücreleri ITO/PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /PCBM/BCP/Ag ve ITO/ V_2O_5 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /PCBM/BCP/Ag konfigürasyonlarında p-i-n düzlemsel yapıda hazırlandı. Hazırlanan perovskit tabanlı güneş hücrelerinin akım-gerilim ölçümleri karanlıkta ve güneş simülatörü ($\text{AM1.5G-100 mW/cm}^2$) ile aydınlatma altında ileri ve ters besleme durumunda yapıldı. Akım-gerilim karakteristiklerinden yararlanılarak, hücrelerin açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), paralel (R_{sh}) ve seri (R_s) dirençleri, dolum faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (PCE) gibi fotovoltaiik parametreleri belirlendi.



Şekil 3. ITO/PEDOT:PSS/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag konfigürasyonunda PEDOT:PSS ile üretilen güneş hücrelerinin karanlıkta, aydınlatma altında (AM1.5G-100 mW/cm²) akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri.

ITO/PEDOT:PSS/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag konfigürasyonunda deşik iletim tabakası olarak PEDOT:PSS ince filmi kullanılan perovskit güneş hücresinin akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri belirlendi ve Şekil 3’de gösterildi. Bu konfigürasyonda üretilen cihazın fotovoltaiik parametreleri $V_{oc}=955$ mV, $J_{sc}=17.36$ mA/cm², $FF=0.47$ ve $PCE=\%7.8$ olarak belirlendi. Hücresinin seri ve paralel dirençleri sırasıyla $R_s=13$ Ω.cm² ve $R_{sh}=193$ Ω.cm² olarak belirlendi. Perovskit güneş hücresinin aydınlatma altında ileri ve ters besleme durumunda elde edilen güç dönüşüm verimlerinden histerezis indeksi $HI=0.23$ olduğu gözlenmiştir. Deşik iletim tabakası olarak PEDOT:PSS ince filmi kullanılarak üretilen perovskit güneş hücrelerinin fotovoltaiik parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

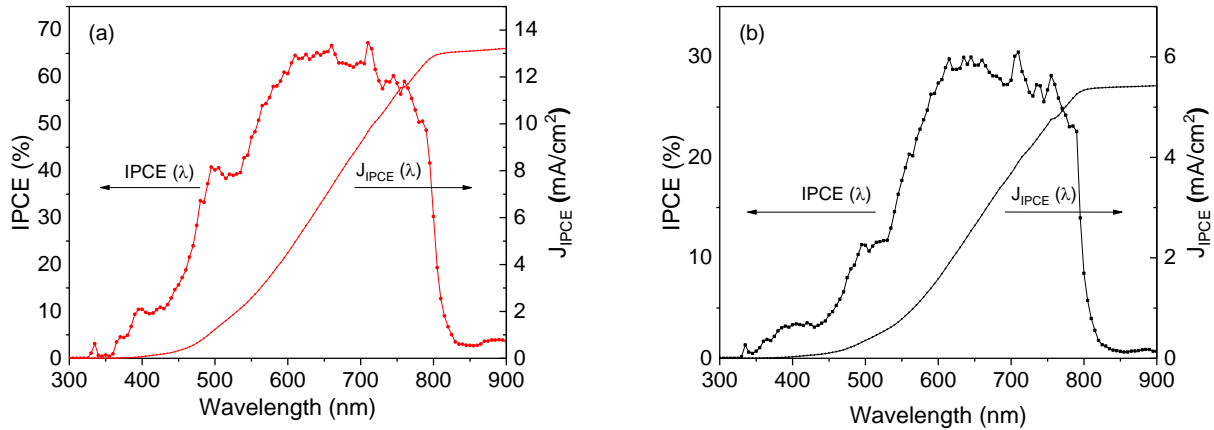


Şekil 4. ITO/V₂O₅/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag konfigürasyonunda V₂O₅ ince filmleri ile üretilen güneş hücrelerinin karanlıkta, aydınlatma altında (AM1.5G-100 mW/cm²) akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri.

ITO/V₂O₅/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag konfigürasyonunda deşik iletim tabakası olarak V₂O₅ ince filmi kullanılan perovskit güneş hücresinin akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri belirlendi ve Şekil 4’de gösterildi. Bu konfigürasyonda üretilen cihazın fotovoltaiik parametreleri $V_{oc}=832$ mV, $J_{sc}=7.83$ mA/cm², $FF=0.38$ ve $PCE=\%2.5$ olarak belirlendi. Hücresinin seri ve paralel dirençleri sırasıyla $R_s=32$ Ω.cm² ve $R_{sh}=195$ Ω.cm² olarak belirlendi. Perovskit güneş hücresinin aydınlatma altında ileri ve ters besleme durumunda elde edilen güç dönüşüm verimlerinden histerezis indeksi $HI=0.04$ olduğu gözlenmiştir. Deşik iletim tabakası olarak V₂O₅ ince filmi kullanılarak üretilen perovskit güneş hücrelerinin fotovoltaiik parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deşik iletim tabakası (DİT) olarak PEDOT:PSS ve V₂O₅ ince filmleri kullanılarak üretilen perovskit güneş hücrelerinin fotovoltajik parametreleri.

DİT	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	R _s (Ω.cm ²)	R _{sh} (Ω.cm ²)	PCE (%)	HI
PEDOT:PSS	955	17.36	0.47	13	193	7.8	0.23
V ₂ O ₅	832	7.83	0.38	32	195	2.5	0.04

**Şekil 5.** a) PEDOT:PSS ve b) V₂O₅ deşik iletim tabakası olarak kullanılan perovskit güneş hücrelerinin IPCE spektrumları.

Gelen fotonun akıma dönüşüm verimliliği (IPCE), monokromatik ışık altında güneş hücresinin devrede üretilen yük taşıyıcı sayısının gelen foton sayısına oranı olarak tanımlanır. IPCE spektrumunun şekli fotovoltajik cihazın spektral duyarlılığı hakkında bilgi verir. Perovskit tabanlı güneş hücrelerinin IPCE spektrumları Şekil 5 'de gösterilmektedir. Tüm cihazların IPCE spektrumları 350-850 nm dalgaboyu aralığında geniş bir spektral duyarlılığa sahiptir. Perovskit tabanlı güneş hücrelerinin IPCE spektrumundan fotoakım yoğunluğu (J_{IPCE}), deşik iletim tabakası olarak PEDOT:PSS kullanılan cihazda 13.21 mA/cm² ve V₂O₅ ince filmi kullanılan cihazda ise 5.42 mA/cm² olarak belirlenmiştir. Perovskit tabanlı güneş hücrelerinin J_{sc} ve J_{IPCE} değerlerinde PEDOT:PSS için %24 ve V₂O₅ ince filmi için %30 gibi ortaya çıkan fark, IPCE spektrumlarının geç ölçülmesinden dolayı atmosfer ortamına daha fazla maruz kalmasından kaynaklanmaktadır.

PEDOT:PSS ve V₂O₅ ince filmleri ile hazırlanan perovskit güneş hücrelerinin fotovoltajik parametreleri karşılaştırıldığında, V₂O₅ ince filmleri ile hazırlanan cihazın fotovoltajik performansı PEDOT:PSS ince filmi ile hazırlanan cihazın fotovoltajik performansının gerisinde kalmıştır. Bu cihazların IPCE spektrumları karşılaştırıldığında 350-850 nm dalgaboyu aralığında geniş bir spektral duyarlılığa sahiptir fakat V₂O₅ ince filmleri ile hazırlanan cihazın gelen fotonla yük taşıyıcı üretim oranı PEDOT:PSS ince filmleri ile hazırlanan cihaza göre düşüktür buda kısa devre akım yoğunluğunun düşüklüğü ile ilişkilidir. V₂O₅ ince filmlerin elektriksel özelliklerinin geliştirilmesiyle PEDOT:PSS ince filmlerine benzer fotovoltajik performans elde edilebilir. V₂O₅ ince filmleri perovskit tabanlı güneş pillerinde deşik iletim tabakası olarak kullanılabilir ve gelecek çalışmalar için ümit verici olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir.

4. Sonuçlar

Hidrotermal yöntemiyle V₂O₅ çözeltisi yalnızca bir adımda hazırlandı ve çözeltiden dönel kaplama yöntemiyle V₂O₅ ince filmleri elde edildi. V₂O₅ ince filmlerin XRD desenlerindeki geniş piklerin maksimumun 2θ açıları yaklaşık olarak 26.3° karşılık gelmektedir, (110) yönelimli bu pikler V₂O₅ yapısının karakteristik piklerindedir. V₂O₅ ince filmlerin XRD desenlerindeki düşük şiddetli geniş pikler filmlerin kristalitelerinin düşük olduğunu daha çok amorf yapıya sahip olduğunu göstermektedir. V₂O₅ ince filmlerin optik soğurma katsayısı spektrumlarından yasak band genişlikleri E_g 2.70 eV olarak belirlenmiştir. Literatürde

daha önce yapılan çalışmalarda V_2O_5 yapısının yasak band genişliği 2.3eV ile 2.8eV arasında rapor edilmiştir [39]. V_2O_5 ince filmlerin yasak band genişliğinin kısmen yüksek olması amorf yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Tersine çevrilmiş (p-i-n) düzlemsel yapıdaki perovskit güneş hücrelerinde PEDOT:PSS yerine V_2O_5 ince filmleri deşik iletim tabakası olarak kullanıldı ve fotovoltaiik performansı belirlendi. PEDOT:PSS ve V_2O_5 ince filmlerin deşik iletim tabakası olarak kullanıldığı perovskit güneş hücrelerinin fotovoltaiik parametreleri karşılaştırıldığında, V_2O_5 ince filmi ile hazırlanan cihazın verimi (PCE=%2.5) PEDOT:PSS ince filmi ile hazırlanan cihazın verimine (PCE=%7.8) göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. V_2O_5 ince filmi ile hazırlanan perovskit güneş hücresinin veriminin düşük olması özellikle kısa devre akım yoğunluğunun ($J_{sc}=7.83 \text{ mA/cm}^2$) düşük olmasından kaynaklanmaktadır. V_2O_5 ince filmleri ile hazırlanan cihazların histerezis indeksi (HI=0.04), PEDOT:PSS ince filmleri ile hazırlanan cihazların histerezis indeksine (HI=0.23) göre daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada perovskit tabanlı güneş hücrelerinde V_2O_5 ince filmlerin deşik iletim tabakası olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Ardahan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2020/004 proje numarası ile desteklenmiştir. Prof. Dr. Serap Güneş'e bilimsel desteklerinden ve laboratuvar imkanlarını sunarak çalışmalarının yapılmasına imkân sağladığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Dr. Hamed Moeini Alishah'a deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Doç. Dr. Ali Baltakesmez ve Dr. Öğr. Üyesi Zakir Çaldıran'a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai and T. Miyasaka, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–6051, 2009.
- [2] National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, 2023.
- [3] M. Grätzel, "The light and shade of perovskite solar cells" *Nature Materials*, vol. 13, no.9, pp. 838–842, 2014.
- [4] A. Fakharuddin, F. De Rossi, T. M. Watson, L. Schmidt-Mende and R. Jose, "Research Update: Behind the high efficiency of hybrid perovskite solar cells", *APL Materials*, vol. 4, no. 9, pp. 0–16, 2016.
- [5] T. A. Berhe, W. N. Su, C. H. Chen, C. J. Pan, J. H. Cheng, H. M. Chen, B. J. Hwang, "Organometal halide perovskite solar cells: degradation and stability", *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, 2016.
- [6] Z. Song, S. C. Watthage, A. B. Phillips and M. J. Heben, "Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications", *Journal of Photonics for Energy*, vol. 6, no.2, pp. 22001, 2016.
- [7] Yang Bai, Xiangyue Meng and Shihe Yang "Interface Engineering for Highly Efficient and Stable Planar p-i-n Perovskite Solar Cells", *Adv. Energy Mater.*, vol. 8, pp. 1701883, 2018.
- [8] L. Calió, S. Kazim, M. Grätzel and S. Ahmad, "Hole-Transport Materials for Perovskite Solar Cells", *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 55, pp. 14522–14545, 2016.
- [9] S. Pitchaiya, M. Natarajan, A. Santhanam, V. Asokan, A. Yuvapragasam, V. Madurai Ramakrishnan and et al., "A review on the classification of organic/inorganic/carbonaceous hole transporting materials for perovskite solar cell application", *Arab. J. Chem.*, vol. 13, pp. 2526–2557, 2020.
- [10] P. K. Kung, M.H. Li, P. Y. Lin, Y. H. Chiang, C. R. Chan, T. F. Guo and P. Chen., "A Review of Inorganic Hole Transport Materials for Perovskite Solar Cells", *Adv. Mater. Interfaces.*, vol. 5, pp. 1800882 (1–35), 2018.
- [11] Z. Shariatnia, "Recent progress in development of diverse kinds of hole transport materials for the perovskite solar cells: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 119, pp. 109608, 2020.
- [12] M. Liu, B. Su, Y. Tang, X. Jiang and A. Yu, "Recent Advances in Nanostructured Vanadium Oxides and Composites for Energy Conversion", *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, pp. 1700885, 2017.
- [13] A. Mauger and C. M. Julien, " V_2O_5 thin films for energy storage and conversion", *AIMS Materials Science*, vol. 5, no. 3, pp. 349–401, 2018.

- [14] I. Hancox, L. A. Rochford, D. Clare, M. Walker, J. J. Mudd, P. Sullivan, S. Schumann, C. F. McConville and T. S. Jones, "Optimization of a High Work Function Solution Processed Vanadium Oxide Hole-Extracting Layer for Small Molecule and Polymer Organic Photovoltaic Cells", *J. Phys. Chem. C.*, vol. 117, pp. 49–57, 2013.
- [15] H. Peng, W. Sun, Y. Li, S. Ye, H. Rao, W. Yan and et al., "Solution processed inorganic V_2O_x as interfacial function materials for inverted planar-heterojunction perovskite solar cells with enhanced efficiency", *Nano Res.*, vol. 9, pp. 2960–2971, 2016.
- [16] L. Zhang, C. Jiang, C. Wu, H. Ju, G. Jiang, W. Liu and et al., " V_2O_5 as Hole Transporting Material for Efficient All Inorganic Sb_2S_3 Solar Cells", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, pp. 27098–27105, 2018.
- [17] Z. Liu, T. He, H. Wang, X. Song, H. Liu, J. Yang and et al., "Improving the stability of the perovskite solar cells by V_2O_5 modified transport layer film", *RSC Adv.*, vol. 7, pp. 18456–18465, 2017.
- [18] J. Wu, Y. Zhang, P. Xu, W. Guo, L. Shen and S. Ruan, "Role of solution-processed V_2O_5 in P3HT:PCBM based inverted polymer solar cells", *Synth. Met.*, vol. 170, pp. 7–10, 2013.
- [19] Y. L. Chan, S.-Y. Pung and S. Sreekantan, "Synthesis of V_2O_5 Nanoflakes on PET Fiber as Visible-Light-Driven Photocatalysts for Degradation of RhB Dye", *Journal of Catalysts*, vol. Article ID 370696, 7, 2014.
- [20] K. Schneider, "Optical properties and electronic structure of V_2O_5 , V_2O_3 and VO_2 ", *J Mater Sci: Mater Electron*, vol. 31, pp. 10478–10488, 2020.