




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yeni Nesil Güneş Hücrelerinde Hibrit Nano-yarıiletkenlerin Sentezlenerek Optoelektronik Özelliklerinin İncelenmesi

 Bayram KILIÇ^{a,*}

^a Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: bkilic@yalova.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.850769

ÖZET

Toplumumuzdaki enerji gereksinimleri fosil yakıtları üzerine kurulmuştur fakat bu fosil yakıtlar hem sınırlıdır hem de fosil yakıtların yanmasıyla karbondioksit konsantrasyonunun hızlı artışı küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Bu koşullar altında alternatif ve temiz bir enerji kaynağı olarak fotovoltaik (PV) güneş hücrelerine ilgi artmaktadır. Son yıllarda silisyum güneş hücreleri ve ince film tabanlı güneş hücrelerinin kullanılması aktif olarak çalışılmaktadır. Fakat bu güneş hücreleri toplumların günümüzde kullandığı elektrik üretimi ile rekabet edemeyecek kadar pahalıdır. Güneş hücrelerinin maliyetinin azaltılması ve enerji dönüşümü veriminin artırılması için önemli fikirlerden biri de nano-yarıiletken tabanlı yeni nesil boya duyarlı güneş hücrelerinin (DSSC) üretilmesidir. Bu çalışmada, TiO₂ yarıiletken üzerine CuO sentezlenerek hibrit malzeme oluşturulmuş ve DSSC hücrelerinde foto anot olarak kullanılmıştır. TiO₂ yarıiletkeni hidrotermal yöntemle hazırlanmıştır. Hazırlanan TiO₂ yarıiletkeni üzerine CuO hidrotermal metot ile sentezlenmiştir. DSSC'lerde boya olarak N719, karşıt elektrot olarak da platin kullanılmıştır. Yapısal ve optik karakterizasyon için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Işını spektroskopisi (EDAX), X-Işını Kırınımı (XRD), UV-vis soğurma ve Fotoluminesans (PL) kullanılmış ve Akım yoğunluğu-voltaj (J-V) ölçümünden hücre verimleri hesaplanmıştır. SEM analizinden CuO/TiO₂ nano-yarıiletkenin yüksek yüzey hacim oranında sentezlendiği ve yaklaşık 20-50 nm kristal boyutlarının olduğu belirlenmiştir. EDAX ölçümlerinden TiO₂ yarıiletkeni üzerine sentezlenen CuO yarıiletkeninin varlığı net bir şekilde gösterilmiştir. XRD ölçümlerinden yüksek saflıkta kristalleşmelerin olduğu ve CuO/TiO₂ nano-yarıiletkenin varlığı tespit edilmiştir. Güneş hücresi üretimi iki aşamada gerçekleştirilmiş ve ilk olarak saf TiO₂ ile üretilen güneş hücrelerinde hücre verimi $\eta = \%4,99$ olarak elde edilirken CuO/TiO₂ ile elde edilen hücrenin verimi ise $\%6,14$ olarak elde edilmiştir. DSSC'lerde TiO₂ yarıiletkenine CuO katkılanmasıyla hücre veriminin $\%20$ arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Boya Duyarlı Güneş Hücreleri (DSSC), Nano-yarıiletkenler, CuO/TiO₂ foto anot

Investigation of Optoelectronic Properties by Synthesizing Hybrid Nano-semiconductors in New Generation Solar Cells

ABSTRACT

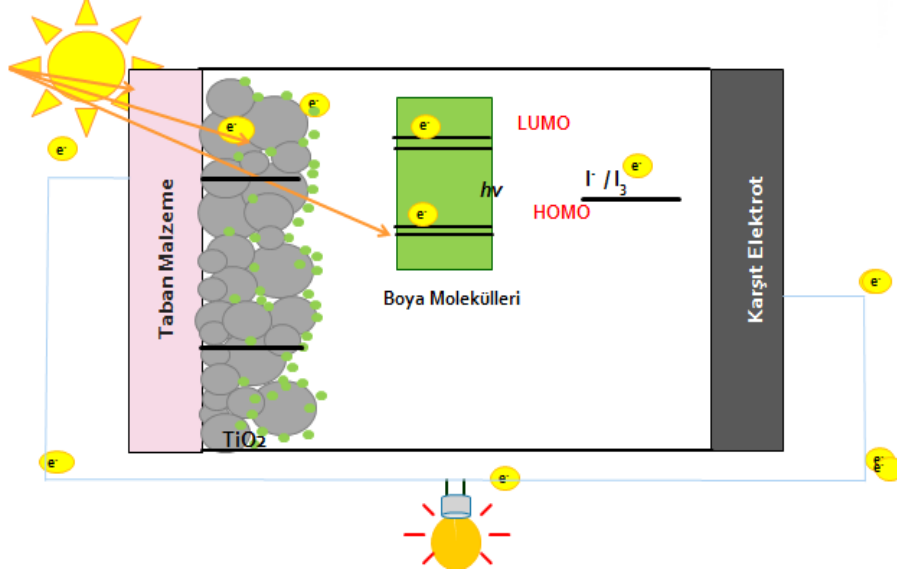
The energy requirements in our society are based on fossil fuels, but the fact that these fossil fuels are limited and the rapid increase in carbon dioxide concentration due to the burning of fossil fuels cause global warming and climate changes. Under these conditions, interest in photovoltaic (PV) solar cells as an alternative and clean energy source is increasing. The use of silicon solar cells and thin film-based solar cells has been actively studied in recent years. But these solar cells are still too expensive to compete with public electricity generation. One of the

important ideas for reducing the cost of solar cells and increasing energy conversion efficiency is the production of nano-semiconductor based new generation dye sensitized solar cells (DSSC). In this study, hybrid materials were obtained via CuO which is grown on TiO₂ semiconductor and used as photo anode in DSSC. TiO₂ semiconductor was prepared by hydrothermal method. CuO was synthesized by hydrothermal method on the prepared TiO₂ semiconductor. In DSSCs, N719 was used as the dye and platinum was used as the counter electrode. Structural and optical characterizations were carried out by using Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-Ray spectroscopy (EDAX), X-Ray Diffraction (XRD) and solar efficiencies were calculated from Current density-voltage (J-V) measurement. From the SEM analysis, it was shown that the CuO /TiO₂ nano-semiconductor was synthesized at a high surface volume ratio and had a crystal size of approximately 20-50 nm. Existence of CuO semiconductor synthesized on TiO₂ has been clearly shown from EDAX measurements. High purity crystallizations and Cu/TiO₂ nano-semiconductor were detected from XRD measurements. Produce of solar cell was carried out in two stages and firstly, the efficiency of the solar cells produced with pure TiO₂ was obtained as $\eta = 5.05\%$, while the solar efficiency of the Cu /TiO₂ cell was obtained as 6.18%. It has been observed that the efficiency of DSSCs increased by 20% by doping of CuO onto the TiO₂ semiconductor.

Keywords: Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), Nano-semiconductors, CuO/TiO₂ photo anode

I. GİRİŞ

Yeni nesil fotovoltaik (PV) hücrelerin temelini oluşturan Rutenyum kompleks boyaları ile duyarlı hale getirilmiş boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC) ilk olarak Gratzel tarafından çalışılmış ve %10 hücre verimi ile enerji sektöründe yerini almıştır [1]. DSSC'leri geleneksel fotovoltaik hücrelerden ayıran temel fark yapısal bileşenleri ve üretimindeki kolaylıklardır. Boya duyarlı güneş hücrelerinde güneş ışığını elektrığe dönüştürme mekanizması, geleneksel PV olarak bilinen silisyum tabanlı hücrelerden oldukça farklıdır. Silisyum tabanlı hücreler p-n eklem tabanlı diyotların çalışma esasına göre çalışırken, DSSC'ler de sistemin temelini geniş bant aralıklı yarıiletkenler (TiO₂, ZnO SnO₂), boya molekülleri, sıvı elektrolit ve karşıt elektrot oluşturmaktadır [2-3]. Yüksek verimde güneş hücresi üretiminin yapılabilmesi için, taban malzemenin düşük dirençte olması ve yüksek saydamlığa sahip olması gerekir. Bununla birlikte, taban malzeme olarak kullanılan alttaşın tabaka direncinin numunenin tavlama ve büyütme sıcaklıklarından etkilenmemesi gerekir. DSSC'lerde taban malzeme ya da alttaş olarak saydam iletken oksit (TCO) materyallerden indiyum kalay oksit (ITO) ve flor katkılı kalay oksit F:SnO₂ (FTO) yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. DSSC üretiminde düşük dirence sahip olması, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasından dolayı genelde FTO taban malzeme olarak kullanılmaktadır. DSSC'lerde diğer önemli bir parametre ise karşıt elektrottur ve karşıt elektrot olarak Pt kaplı FTO Pt:FTO kullanılmaktadır. Pt:FTO karşıt elektrodu, fotoanot olarak kullanılan çalışma elektrotunu dengede tutan ve sürekli elektron sağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Sıvı elektrolit olarak ise iyodür/triiodür (I^- / I_3^-) redoks çifti kullanılmaktadır [5]. DSSC hücrelerde kullanılan ve geniş bant aralıklı yarıiletken üzerine absorblanan boya moleküllerinin türü, kullanılan yarıiletkenin türüne (TiO₂, SnO₂, ZnO) göre farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki DSSC hücrelerde geniş bant aralıklı yarıiletken olarak TiO₂ kullanıldığında en iyi verim N3 rutenyum kompleks boyası ile yaklaşık %10 hücre verimi elde edilmiştir [1]. ZnO kullanıldığında ise N719 rutenyum kompleksi boyasından %5 verimle hücre üretilmiştir [6]. Boya ile duyarlı hale getirilmiş fotovoltaik hücrelerin genel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. DSSC'lerin genel yapısı ve çalışma ilkesi

Şekil 1'de gösterildiği gibi, yarıiletken malzemeler teknolojinin kalbi olduğu gibi DSSC hücrelerinde kalbini oluşturmaktadır ve tipik DSSC hücrelerde taban malzeme üzerine genelde nano-kristal TiO₂ yarıiletkeni fotoanot olarak kullanılmaktadır. DSSC'de ışığın elektriğe dönüştürme mekanizması aşağıdaki adımlarla gerçekleşmektedir. DSSC hücre üzerine gelen güneş ışığı, yarıiletken üzerine absorblanmış boya molekülleri tarafından soğrulmaktadır. Foton, üretilen hücre içerisine girerek FTO (ITO) ve yarıiletken yüzeyden geçerek yarıiletken üzerindeki rutenyum kompleks boyalarına çarpar. Boya moleküllerine foton çarpması ile boya molekülleri temel seviyeden (HOMO) bir üst seviyeye (LUMO) uyarılır. Foton tarafından uyarılan boya molekülleri bir elektronunu yarıiletkenin iletkenlik bandına enjekte eder. Bu adım elektron enjeksiyon prosesi olarak tanımlanır. Yarıiletkenin iletkenlik bandına enjekte edilen elektronlar, oradan taban malzeme üzerine geçerek karşıt elektrotta (Pt: F:SnO₂) ulaşmaktadırlar [5]. Boya molekülleri elektronlarını yarıiletkenin iletkenlik bandına enjekte etmesinden dolayı tükenime gider. Tükenmekte olan boya, I⁻ / I₃⁻ redoks çiftinden sağlanan elektronlar ile yeniden üretilmektedir. Boya molekülleri sıvı elektrottan (I⁻) bir elektron alır ve triiyodür içerisine oksitlenir. Bu proses moleküllerin foton soğurabilmesi için geçen zamanla aynı mertebede olması gerekir [6]. Karşıt elektrot olarak Pt ise redoks çiftine sürekli elektron sağlayan bir görev üstlenmektedir [7] ve bunun sonucunda sürekli bir kimyasal dönüşümden zarar görmeksizin ışıktan elektrik enerjisi üreten aygıtlar elde edilmektedir. TiO₂ geniş bant aralığına sahip olup (E_g=3,2 eV) n-tipi özellik göstermektedir. TiO₂ yarıiletkeninin geniş bant aralığına sahip olması, kolay üretilebilme ve üstün optoelektronik özelliklerinden dolayı katihal fiziğinde nanoteknoloji araştırmalarında önemli yer edinmiştir [8-9]. Günümüz teknolojisinde, Si yarıiletkenine alternatif olan TiO₂ yarıiletkeni son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmakta ve nanoteknolojik malzemelerde kullanılmaktadır [10]. Yüksek mobiliteye sahip olması, anatase ve brokite gibi iki farklı kristal yapıya sahip olması, yüksek radyasyon dayanımı gibi pek çok özelliğinden dolayı TiO₂ yarıiletkeni nanoteknoloji başta olmak üzere güneş hücreleri üretiminden sensörlere kadar pek çok alanda çalışılmakta ve araştırılmaktadır. Ayrıca, TiO₂ yarıiletkeni mesoporous, makroporous ve nanoporous gibi farklı gözeneklerde kolayca elde edilebilmesinden dolayı, optoelektronik olarak bulk materyallerin sahip olmadığı eşsiz özelliklere sahiptir. Yüksek yüzey/hacim oranına sahip olması, taban malzeme üzerine homojen olarak büyütülebilmesi ve zengin yüzey kimyasına sahip olmasından dolayı günümüz teknolojisinde kullanılan enerjik materyaller için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmiştir [11-12]. TiO₂, güneş hücrelerinden sensörlere, enerji depolamadan biyolojik moleküllerin izolasyonuna, yaşam biliminden çevre mühendisliği kadar pek çok alanda çalışılmaya başlanmıştır [13]. CuO yarıiletkeni düşük bant aralığına sahip olup (E_g=1,3-2,4 eV), p-tipi özellik gösteren bir malzemedir. Direkt enerji bant aralığına sahip olan CuO yarıiletkeni sahip olduğu koyu renk ile foton soğurması bakımından oldukça önemli bir yarıiletken olarak kabul edilmektedir. Direkt ve dar bant aralığına sahip olmasından dolayı gelen güneş ışığının 400-700 nm arasındaki görünür bölgede yüksek soğurma yapabilmektedir. Dolayısıyla güneş pillerinde aktif tabaka

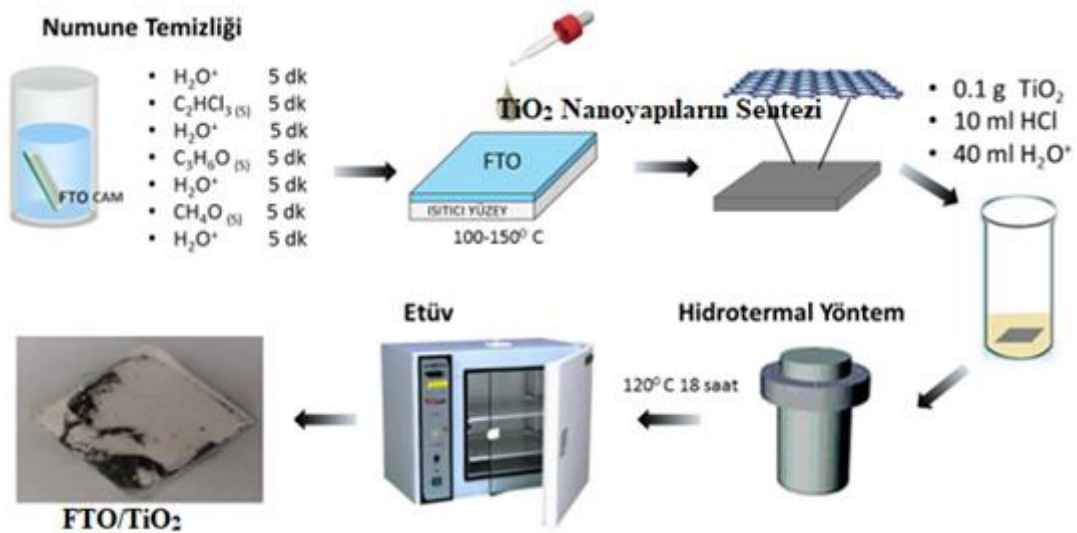
olarak kullanılmaya iyi bir adaydır [14]. Bu çalışmada CuO katkılı TiO₂ yarıiletkeni hidrotermal yöntem ile elde edilmiş ve DSSC’de foto anot olarak kullanılmıştır. Yapısal ve optik karakterizasyonlar Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Enerji Dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX), X-ışını Kırınımı (XRD) spektrometresi, UV-vis soğurma, PL ve akım yoğunluğu-voltaj (J-V) analizi ile gerçekleştirilmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

A. GENİŞ ve DAR BANT ARALIKLI YARIİLETKENLERİN SENTEZİ

A. 1. TiO₂ Nanoyapıların Sentezi

Bu araştırma çalışmasında DSSC fotovoltaiik hücre üretimi üç aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada FTO taban malzemesi üzerine TiO₂ nanoyapılar hidrotermal yöntemle sentezlenmiştir. İkinci aşamada, FTO/TiO₂ üzerine CuO nanoyapılar büyütülmüştür. Üçüncü ve son aşamada ise DSSC üretimi gerçekleştirilmiştir. Araştırma çalışmasında kullanılan FTO taban malzemesi 2cm x 2cm boyutunda hazırlandı. TiO₂ nanoyapıların FTO taban malzemesi üzerine homojen bir şekilde büyütülebilmesi için ilk olarak numune temizliği yapıldı. Taban malzemenin temizliği numunenin kirliliklerden ve kusurlardan arındırılması için önemlidir. Numune temizlik aşaması, trikloroetilen, aseton ve metanol her biri ayrı ayrı 5 dk taban malzemeye uygulanarak ve deiyonize su kullanılarak yapıldı. Numune temizleme işlemi ardından, 0,1 gr TiO₂ tuz çözeltisi bir beher içerisinde konularak üzerine 3 mL amonyum ve 40 ml H₂O⁺ eklenmesi ile çözelti hazırlama işlemi gerçekleştirildi. Son olarak çözeltiye, 10 ml HCl katılarak otoklav içerisinde 120°C’ deki etüve 18 saat süre bekletilmek üzere bırakıldı. FTO/TiO₂ nanoyapıların sentezi hidrotermal büyütme ile yapıldıktan sonra 300 °C’de tavlama işlemi yapıldı. Tavlama işlemi oda sıcaklığında, çeker ocak içerisinde kapalı sistem içerisinde gerçekleştirilmiştir. TiO₂ nanoyapıların FTO taban malzeme üzerine sentezi Şekil 2’de adım adım gösterilmiştir.



Şekil 2. TiO₂ nanoyapıların FTO taban malzemesi üzerine büyütülmesinin şematik gösterimi

A.1.2. CuO/TiO₂ Sentezi

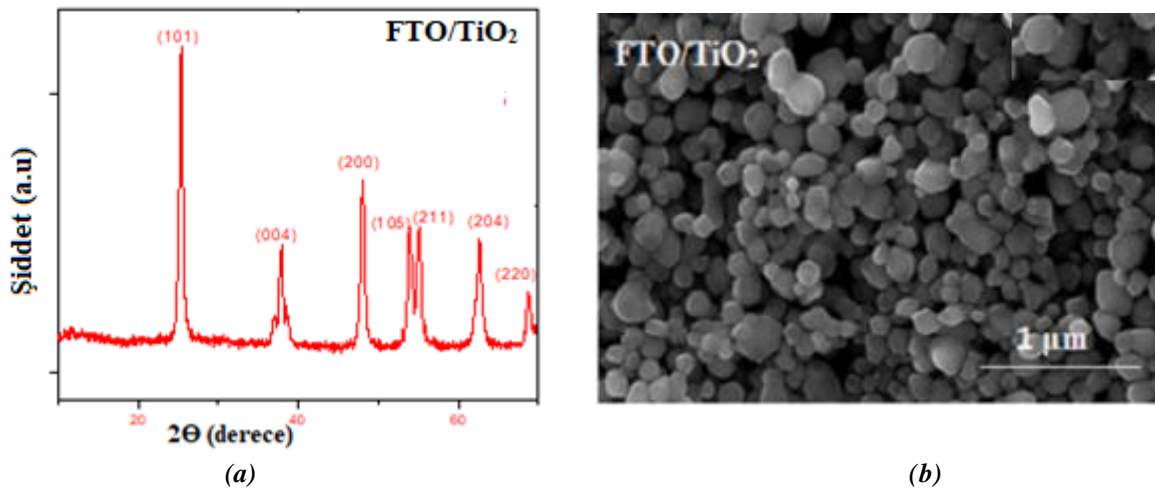
CuO nanoyapılar bir önceki adımda hazırlanan TiO₂ nanoyapıların üzerine hidrotermal yöntemle büyütülerek DSSC'lerde fotoanot olarak kullanılması amaçlanmıştır. 0,5 gr CuCl₂+2H₂O ve 50 mL deiyonize su hazırlanarak otoklav içerisine konulmuştur. Amonyum çözeltisi eklenerek çözeltinin pH'sı 9 olarak ayarlanmıştır. Hazırlanan çözelti 24 saat, 180 °C bir fırında bekletilerek hidrotermal büyümeye maruz bırakılmıştır. Otoklav içerisinden çıkartılan numune 300 °C sıcaklıkta tavlama işlemi yapılarak DSSC hücre üretimine hazır hale getirilmiştir.

A. 2. Boya Duyarlı Güneş Hücrelerin Üretimi:

CuO/TiO₂ nanoyarıiletkeni sentezlendikten sonra taban malzeme yüzeyinde 0,5 cm² aktif tabaka kalacak şekilde yüzey modifikasyonu gerçekleştirildi. Yüzey modifikasyonun ardından; CuO/TiO₂ nanoyarıiletkeni N719 rutenyum esaslı boya içerisine 6 saat daldırılarak boya moleküllerini yüzeye absorblanması sağlandı. N719 Boya moleküllerinin yüzeye absorblanmasından sonra 100 °C'de kurutulmaya bırakılmıştır. Giriş kısmında belirtildiği gibi TiO₂'nin fotoanot olarak kullanıldığı hücrelerde N3 boyasının daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Fakat, bu saf TiO₂ ile üretilen fotoanotlar için geçerlidir. Bu çalışmada, TiO₂/CuO hibrit sistem kullanılmıştır. Bu bağlamda N719 boya moleküllerinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Karşıt elektrot olarak Pt:FTO kullanılarak fotoanot yüzeyine sandviç geometrisi şeklinde yapıştırılmıştır. Böylece, fotoanot olarak CuO/TiO₂ nanoyarıiletkeni, boya molekülü olarak N719 boya, sıvı elektrolit ve Pt:FTO karşıt elektrotunun kullanılması ile DSSC hücre üretimi gerçekleştirilmiştir.

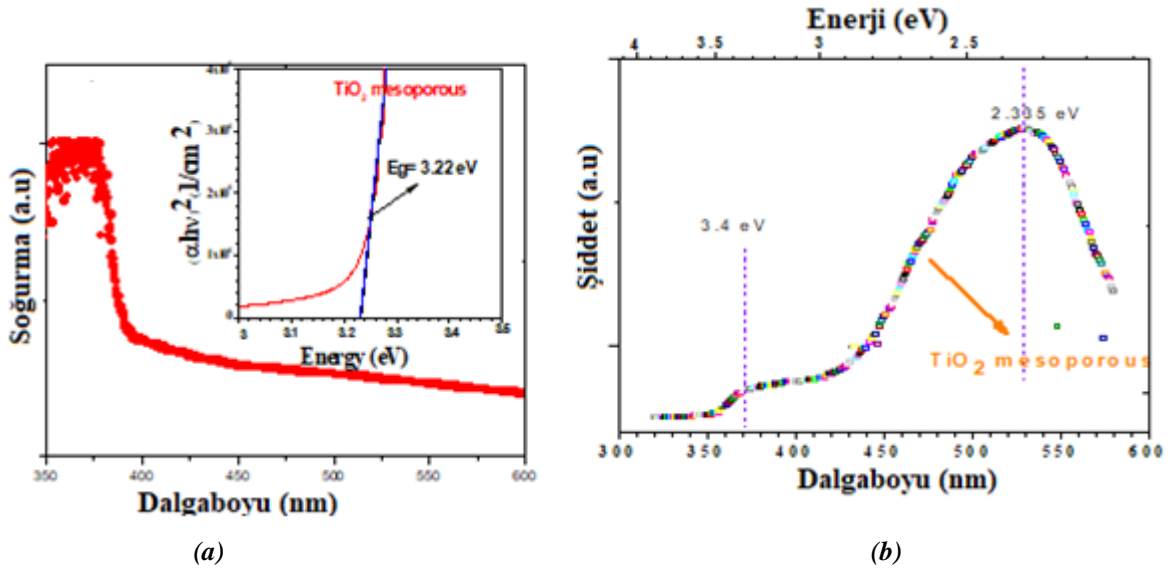
III. SONUÇ ve TARTIŞMA

Deneyssel kısımda açıklandığı gibi FTO taban malzeme üzerine büyütülen TiO₂ nano-yarıiletkenin yapısal karakterizasyonu Şekil 3'te verilmiştir. XRD karakterizasyonu TiO₂ yarıiletkenin yüksek kristal kalitesinde taban malzeme üzerine büyütülebilmektedir. Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi (101), (004), (200), (105), (211), (204) ve (220) piklerinden, TiO₂ yarıiletkenin anatase yapıda elde edildiği net bir şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3. TiO₂ yarıiletkenin yapısal karakterizasyonu (a) XRD karakterizasyonu (b) SEM görüntüsü

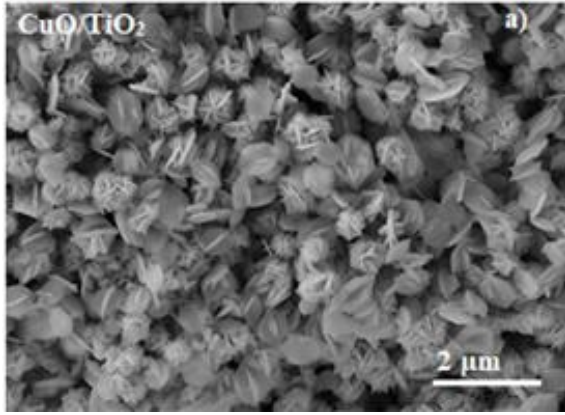
Şekil 3(b)'de TiO₂ yarıiletkenin SEM görüntüsü verilmektedir. SEM görüntüsünden, TiO₂ nanoyarıiletkenin yüksek yüzey hacim oranında ve homojen bir şekilde taban malzeme üzerine büyütüldüğünü ve gözenek yarıçapının 50-100 nm olduğu açık bir şekilde belirlenmiştir.



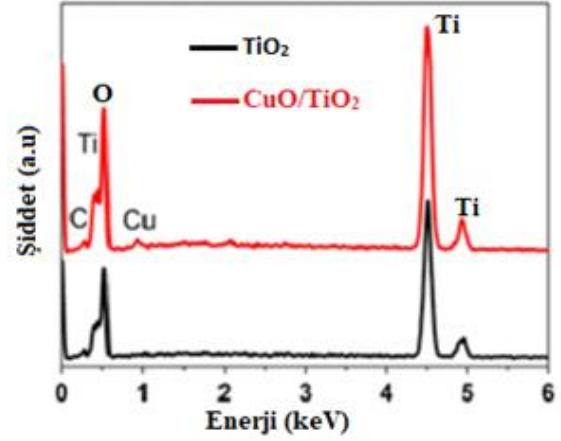
Şekil 4. TiO₂ yarıiletkenin optik karakterizasyonu (a) UV-vis soğurma (b) Fotolüminesans (PL) karakterizasyonu

Şekil 4(a)'da soğurma-dalga boyu grafiğinden 385 nm dalga boyundaki pik TiO₂ yarıiletkenin tipik karakteristiğini göstermekte ve yasak bant aralığının $E_g = 3,22\text{eV}$ hesaplanması literatürle birebir uyumlu olduğu gösterilmiştir. Şekil 4 (b)'de TiO₂ yarıiletkenin PL karakterizasyonu 3,4 ve 2,3 eV enerji aralığındaki iki pikin soğurma grafiği ile birebir uyumlu olduğunu göstermektedir.

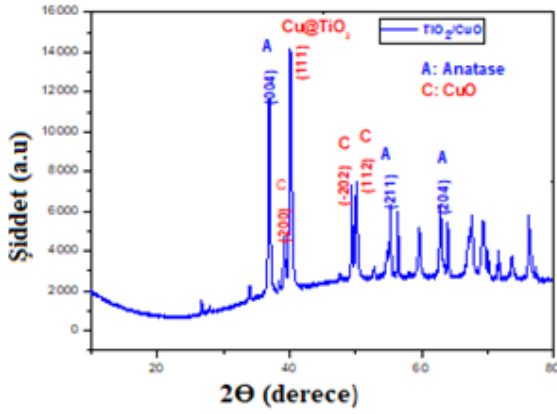
Şekil 5(a-d)'de CuO/TiO₂ hibrit yarıiletkenin SEM, EDAX, XRD ve UV-vis soğurma grafikleri gösterilmektedir. Yapısal ve optik analizinden de anlaşılacağı gibi hibrit nano yapılar taban malzeme üzerine başarı ile büyütülebilmektedir. SEM görüntüsünden yüksek yüzey-hacim oranında ve homojen dağılımlı, EDAX ölçümünden hem TiO₂ hem CuO yarıiletkenin varlığı, XRD karakterizasyonundan TiO₂ anatase ve CuO monoklinik yapıların varlığı gösterilmiştir. Şekil 5 (d)'de CuO/TiO₂ yarıiletkenin soğurma-dalgaboyu analizi gösterilmektedir. Saf TiO₂ yarıiletkenin bant aralığı $E_g = 3,22\text{ eV}$ iken CuO/TiO₂ yarıiletkenin bant aralığı $E_g = 2,47\text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır. CuO yarıiletkenin TiO₂ üzerine büyütülmesi ile bant aralığı modifikasyonu yapılmış ve geniş bant aralığından dar bant aralığına geçiş ise güneş hücrelerinde yüksek soğurma olacağının ön gösterimi olarak sunulmuştur.



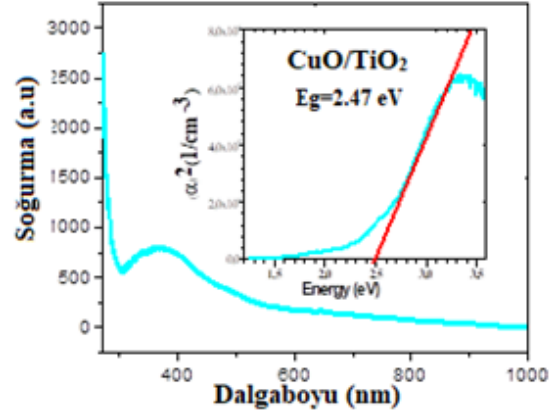
(a)



(b)



(c)



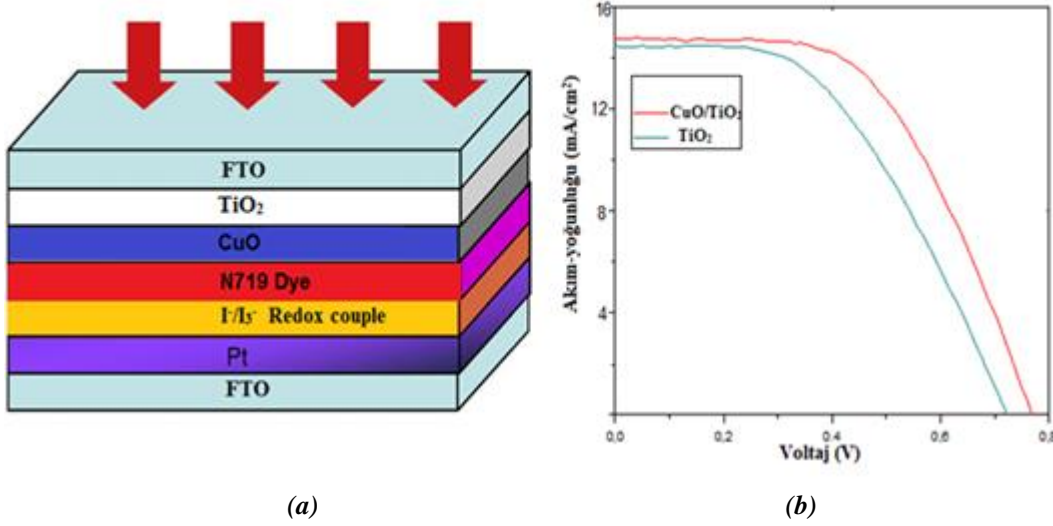
(d)

Şekil 5. CuO/TiO₂ hibrit nanoyarıiletkenin yapısal ve optik karakterizasyonu (a) SEM karakterizasyonu (b) EDAX ölçümü (c) XRD karakterizasyonu (d) UV-vis soğurma-dalga boyu analizi

CuO/TiO₂ yarıiletkenin 'den üretilen boya duyarlı güneş hücresini şematik gösterimi Şekil 6 (a) ve akım yoğunluğu-voltaj karakterizasyonu Şekil 6 (b)'de gösterilmiştir. Üretilen hücrenin fotovoltaj parametreleri ise Tablo1 'de özetlenmiştir. Saf TiO₂ yarıiletkenin hücre verimi $\eta = \%4,99$ iken CuO/TiO₂ yarıiletkeninden üretilen DSSC'nin hücre verimi $\eta = \%6,14$ olarak hesaplanmıştır. CuO yarıiletkeninin TiO₂ üzerine büyütülmesi ile yarıiletkenlerin bant aralığı değiştirilmiştir, TiO₂ yarıiletkeninin bant aralığı $E_g = 3,22$ eV iken CuO/TiO₂'nin bant aralığı $E_g = 2,47$ eV olarak hesaplanmıştır. CuO nano-yarıiletkenin TiO₂ üzerine büyütülmesi daha dar bant aralıklı hibrit bir sistem elde edilmiştir. Böylelikle, CuO yarıiletkeni, taban malzeme üzerine iletkenlik bandından elektron enjeksiyonu için direkt bir elektron taşınım yolu sağlayarak elektron difüzyon uzunluğunu artırmıştır. CuO'nun kullanılması ile akım yoğunluğunu (Jsc) artıracak ışık-saçılma etkisi artarak üretilen güneş hücresinin verimi artmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma ile gösterilmiştir ki, CuO/TiO₂ hibrit yapıların oluşturulması ile taban malzeme üzerine elektron transferi daha hızlı ve verimli şekilde gerçekleştirilmiş, üretilen hücre içerisinde ışık soğurulması artırılmıştır.

Tablo 1. TiO_2 ve CuO/TiO_2 yarıiletkenlerinin fotovoltaik parametreleri (Ölçümler ışık şiddeti 100 mW/cm^2 ve AM 1.5G altında gerçekleştirilmiştir)

| Numune | FF(%) | V_{oc} (V) | J_{sc} (mA/cm^2) | Verim ($\eta\%$) |
|-------------|-------|--------------|-------------------------------|--------------------|
| TiO_2 | 48,6 | 0,71 | 14,47 | 4,99 |
| CuO/TiO_2 | 54,8 | 0,76 | 14,76 | 6,14 |



Şekil 6 (a) CuO/TiO_2 tabanlı DSSC üretiminin şematik gösterimi (b) CuO/TiO_2 tabanlı DSSC hücrelerin J-V karakterizasyonu

IV. SONUÇLAR

CuO/TiO_2 hibrit yarıiletkeni sentezlenerek yüksek güneş enerjisi dönüşüm verimi elde edebilmek için DSSC'lerde fotoanot olarak kullanılmıştır. Saf TiO_2 yarıiletkeni ile üretilen hücrelerin verimi %4,99 olarak ölçülürken CuO/TiO_2 hibrit yapılarda verim %20 artarak %6,14 olarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik ölçümlerden hibrit yapıların güneş hücrelerinde verimi artırdığı net bir şekilde gösterilmiştir. Yapısal ve optik karakterizasyonlarda yüksek kristal kalitesine sahip ince filmlerin sentezlendiği gösterilmiştir. Elde etmiş olduğumuz sonuçlar CuO/TiO_2 hibrit yapıların hızlı elektron transferi sağladığı, etkin difüzyon uzunluğuna sahip olduğu ve yük rekombinasyonunu azalttığı açık bir şekilde belirlenmiş ve hibrit yapıların DSSC uygulamalarında daha verimli olduğu gösterilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] B. O'regan ve M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films," *Nature*, c. 353, s. 6346, ss. 737–740, 1991.
- [2] M. Grätzel, "Dye-sensitized solar cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, c. 4, s. 2, ss. 145–153, 2003.
- [3] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, ve H. Pettersson, "Dye-Sensitized Solar Cells," *Chemical Reviews*, c. 110, s. 11, ss. 6595–6663, 2010.

- [4] B. Kilic, S. Turkdogan, A. Astam, S. S. Baran, M. Asgin, E. Gur, ve Y. Kocak, "Interfacial engineering of CuO nanorod/ZnO nanowire hybrid nanostructure photoanode in dye-sensitized solar cell," *Journal of Nanoparticle Research*, c. 20, s. 1, 2018.
- [5] I. A. D. Castro, R. S. Datta, J. Z. Ou, A. Castellanos-Gomez, S. Sriram, T. Daeneke, ve K. Kalantar-Zadeh, "Molybdenum Oxides - From Fundamentals to Functionality," *Advanced Materials*, c. 29, s. 40, ss. 1701619, 2017.
- [6] R. A. Rani, A. S. Zoolfakar, J. Subbiah, J. Z. Ou, ve K. Kalantar-Zadeh, "Highly ordered anodized Nb₂O₅ nanochannels for dye-sensitized solar cells," *Electrochemistry Communications*, c. 40, ss. 20–23, 2014.
- [7] B. Ma, J. Kim, T. Wang, J. Li, K. Lin, W. Liu, ve S. Woo, "Improvement of photocatalytic oxidation activity on a WO₃/TiO₂ heterojunction composite photocatalyst with broad spectral response," *RSC Advances*, c. 5, s. 97, ss. 79815–79819, 2015.
- [8] W. Lee, C. Lai, ve S. Hamid, "In Situ Anodization of WO₃-Decorated TiO₂ Nanotube Arrays for Efficient Mercury Removal," *Materials*, c. 8, s. 9, ss. 5702–5714, 2015.
- [9] W. Guo, C. Xu, X. Wang, S. Wang, C. Pan, C. Lin, ve Z. L. Wang, "Rectangular Bunched Rutile TiO₂ Nanorod Arrays Grown on Carbon Fiber for Dye-Sensitized Solar Cells," *Journal of the American Chemical Society*, c. 134, s. 9, ss. 4437–4441, 2012.
- [10] M. Wu, X. Lin, T. Wang, J. Qiu, ve T. Ma, "Low-cost dye-sensitized solar cell based on nine kinds of carbon counter electrodes," *Energy & Environmental Science*, c. 4, s. 6, ss. 2308, 2011.
- [11] T. Chen, L. Qiu, Z. Cai, F. Gong, Z. Yang, Z. Wang, ve H. Peng, "Intertwined Aligned Carbon Nanotube Fiber Based Dye-Sensitized Solar Cells," *Nano Letters*, c. 12, s. 5, ss. 2568–2572, 2012.
- [12] E. B. Simsek, B. Kilic, M. Asgin, ve A. Akan, "Graphene oxide based heterojunction TiO₂ – ZnO catalysts with outstanding photocatalytic performance for bisphenol-A, ibuprofen and flurbiprofen," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, c. 59, ss. 115–126, 2018.
- [13] H. Zheng, Y. Tachibana, ve K. Kalantar-Zadeh, "Dye-Sensitized Solar Cells Based on WO₃," *Langmuir*, c. 26, s. 24, ss. 19148–19152, 2010.
- [14] J. Xiaoyuan, D. Guanghui, L. Liping, C. Yingxu, ve Z. Xiaoming, "Catalytic activities of CuO/TiO₂ and CuO-ZrO₂/TiO₂ in NO + CO reaction," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, c. 218, s. 2, ss. 187–195, 2004.