



Perovskit Güneş Hücreleri için c-TiO₂ Optimizasyonu

Optimization of c-TiO₂ for Perovskite Solar Cells

Elif Damgacı¹ , Ayşe Seyhan^{2*} 

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Makine Mühendisliği Bölümü, 51200 / Niğde, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Fizik Bölümü, 51200 / Niğde, Türkiye

Başvuru/Received: 30/05/2022

Kabul / Accepted: 02/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Yüksek verimli perovskit güneş hücresi elde etmek için iğne deliği içermeyen, ince, yüksek şeffaflıkta, mükemmel taşıyıcı ayırma kabiliyetine sahip, üretimi kolay elektron transfer tabakasına (ETL) sahip olması gereklidir. ETL malzemesi olarak hem kompakt (c-TiO₂) hem de mezo (mp-TiO₂) yapılı olarak kullanılabilen TiO₂'dir. Bu çalışmada üretilen ETL, c-TiO₂'in sol-jel yöntemiyle hazırlanmıştır ve farklı dönme hızlarında dönele kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Kaplanan ince filmlerden perovskit güneş hücreleri için en ideal kalınlıkta, iğne deliği içermeyen aktif kristalli elektron transfer tabakası belirlenerek SEM, XRD ve profilometre yardımıyla karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Elektron Transfer Tabakası, Kompakt TiO₂, Perovskit, Güneş Hücresi ”

Abstract

In order to fabricate a high-efficiency perovskite solar cell, it is necessary to include the electron transfer layer (ETL) which is thin, high transparent, easy-to-manufacture and does not contain iğne deliği. TiO₂ is a good candidate to be used as an ETL material in both compact (c-TiO₂) and meso (mp-TiO₂) structures. In this study, the produced ETL was prepared by the sol-gel method of c-TiO₂ and coated using the spin coating method at different rotational speeds. From the characterization of coated thin films, the optimum thickness of ETL for perovskite solar cells and active crystalline electron transfer layer without iğne deliği was confirmed by SEM, XRD, and profilometer analysis.

Key Words

“Electron Transport Layer, Compact TiO₂, Perovskite, Solar cell ”

1. Giriş

Perovskitin olağanüstü optik ve elektriksel özellikleri ile perovskit güneş hücrelerinin pratik üretim süreci bu hücrelerin kısa süre içerisinde verim değerinde %3.8 den %25.7'e rekor artışını sağlamıştır (NREL, 2022). Bu yüzden Perovskit güneş hücreleri birçok bilim adamının ve ticari şirketlerin ilgi odağı haline gelmiş ve bu durum hücreler üzerine çalışmaları arttırmıştır. Perovskitin bu eşsiz özelliklerinin yanı sıra hala optimize edilmesi gereken bir çok parametre vardır. Bu parametrelerden biri hücre verimliliği için kritik bir rol oynayan elektron transfer tabakasıdır (ETL). Perovskit güneş hücrelerinde ETL'nin temel amacı ışığı soğuran perovskit katmanından elektronların ekstraksiyon verimliliğini arttırmak ve boşluğu bloke etmek için perovskit katmanı ile elektron seçici bir temas oluşturmaktır. Perovskit güneş hücrelerindeki elektron transfer tabakasının optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaların çoğu ETL'lerin yeni üretim yöntemleriyle verimliliğin iyileştirilmesi için yüzey modifikasyonu üzerine yapılan çalışmalardır. Perovskit güneş hücre verimliliği için ETL malzemesinin seçimi önemlidir. Perovskit güneş hücrelerinde TiO_2 , SnO_2 , PCBM, PEDOT: PSS gibi farklı organik ve inorganik (Jung vd., 2015, Chiang vd., 2016, Kim vd., 2020) elektron taşıma malzemeleri kullanılmıştır. TiO_2 , perovskit güneş hücreleri için metal oksit malzeme (Yang vd., 2017, Saliba vd., 2016) olarak en çok kullanılan yüksek verimlilik sağlayan inorganik elektron transfer tabakasıdır. TiO_2 , çok kullanışlı yarı iletken geçiş metal oksit olmasının yanı sıra fotokimyasal ve kimyasal erozyona karşı dirençli, kolay kullanımlı, ucuz ve toksik olmama gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler TiO_2 'i güneş hücrelerinde, kimyasal sensörlerde, kendi kendini temizleyen yüzeyler ve çevresel arıtma uygulamaları için avantajlı bir malzeme haline getirmiştir (Hoffmann vd., 1995). TiO_2 'nin fotokatalitik aktivitesi en belirgin özelliklerinden biridir ve büyük ölçüde kristal faz, kristal boyut ve spesifik yüzey alanı gibi özellikler tarafından belirlenir. Bu özelliklerin TiO_2 'nin fotokatalitik aktivitesi üzerindeki etkisi bir çok araştırma grubu tarafından incelenmiştir. (Li vd., 2005, Yazid vd.,). TiO_2 , hem kristal hem de amorf formda ve temel olarak anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç kristal polimorfta bulunur. Anataz ve rutil tetragonal bir yapıya sahipken, brokit ortorombik bir yapıya sahiptir (Fujishima vd., 1999). TiO_2 'in perovskit güneş hücreleri için bir ETL olarak minimum iletim bandının (CBM), MAPbI_3 'den biraz daha yüksek olması (Oregon ve Gratzel, 1991) ve TiO_2 'in ultraviyole (UV) ışınlarına hassas olması (Park vd., 2014) perovskit güneş hücrelerinin ticarileştirilmesi için uygun olmayan bazı sınırlamalar göstermektedir. Bu kusurlarına rağmen TiO_2 bant hizalaması uyumu ve yüksek geçirgenlik özellikleri sayesinde genellikle yüksek verimli perovskit güneş hücreleri üretiminde kullanılır. Perovskit güneş hücrelerinde iki tür elektron taşıma tabakası vardır. Bunlardan biri yoğun yapısı ile kompakt yapısı diğeri ise gözenekli yapısı ile mezo yapı ETL'dir. TiO_2 , hem kompakt hemde mezo gözenekli yapı ile kullanılan en yaygın ETL tabakası olma özelliğini taşımaktadır. Yüksek verimli güneş hücresi üretilmesi için iğne boşluk (iğne deliği) yapısı içermeyen ve perovskit katmanının pürüzsüz şekilde kaplanması gerekmektedir. Perovskit ve boşluk taşıma katmanında (HTL) oluşan iğne deliği yapılarını kısa devreye sebep olmaktadır (Peng vd., 2004). Bunu engellemek için bloke edici katman olarak bilinen kompakt TiO_2 (c- TiO_2), titanyum öncü çözeltisi kullanılarak döndürmeli kaplama veya sprey piroliz gibi yöntemlerle kaplanmaktadır. c- TiO_2 , yüksek şeffaflığı, mükemmel taşıyıcı ayırma kabiliyeti ve kolay üretim süreci nedeniyle yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılır (Yang vd., 2017). İlk olarak 2009 yılında Kojima ve arkadaşları, TiO_2 üzerine $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ (metil amonyum kurşun bromür) kaplamış ve organometal halit perovskite hücrelerde bromla %3.81 verimlilik elde etmişlerdir (Kojima vd., 2009). Daha sonra Im ve arkadaşları TiO_2 üzerine α -bturolakton çözücüsü ile hazırladıkları $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ve $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2$ kuantum nokta güneş hücrelerini incelerken perovskite malzemeye farklı tavlama sıcaklıkları uygulayarak optimum tavlama sıcaklığını 100°C 'de $J_{sc}=13,76 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc}=0.617 \text{ V}$, $\text{FF}=0.557$ ve $\text{PCE}=\%4.73$ olarak ölçülmüştür. Optimum sıcaklık belirlendikten sonra kalınlık değerleri üzerine çalışma yapıp 3.6, 5.5, 8.6 μm kalınlıklı TiO_2 'in en iyi verimi 3.6 μm kalınlıkta % 6.20 verimlilikle sağladığını tespit etmişlerdir (Park vd., 2011). Lee ve arkadaşları adı "süper yapı güneş hücreleri" olarak geçen kızıl ötesi soğurma bölgesine yakın, geniş soğurma aralığına sahip soğurucu olarak $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, elektron taşıyıcı tabaka olarak TiO_2 ve boşluk taşıyıcı olarak spiro-MeOTAD kullanarak %8'lik bir verim elde etmişler (Michael vd., 2012). 2014 yılında Snaith ve ekibi titanyum diizopropoksit bis(asetilasetonat) (TiAcAc) ilavesiyle alkollü bir çözücü içinde dağılmış yüksek kristalli küçük nanoparçacık anataz TiO_2 'den oluşan kompakt bir tabakanın düşük sıcaklıkta üretimini yapmıştır. Optimize edilmiş formülasyonlarıyla tamamen düşük sıcaklıkta işlenmiş güneş hücrelerinden %15,9 verimlilik elde etmişlerdir (Wojciechowski vd., 2014). 2015 yılında ise Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada formamidinyum kurşun iyodür (FAPbI_3) kullanarak verimi %20 değerlerine taşımışlardır. Aynı çalışma grubu 2017 yılında ise organik katyon çözeltisi içerisine ilave iyot iyonları eklenerek verimi yüzde 2 arttırarak %22.1 değerine çıkarmışlardır. Farklı kompakt TiO_2 bloke edici katmanlara dayalı perovskite güneş hücrelerinin fotovoltaiik performansını gösteren çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir (Woon vd., 2015 ve Woon vd., 2017). Li ve arkadaşları (2017) c- TiO_2 'in kalınlık değerinin perovskit güneş hücrelerinde verim üzerine etkisini araştırma yapmıştır (Li vd., 2017). Yapılan çalışmada sırasıyla 35, 45, 60, 65 ve 80 nm 'de sırasıyla % 4.6, %5, %6.3 ve % 5.8 verim değerlerini elde etmişlerdir.

Tablo 1. Sol-Jel Yöntemiyle Üretilen Kompakt TiO₂ Literatür Tablosu

Kaplama Hızı ve süresi	Kalınlık	Verim%	Referans
2500 rpm, 45s	65 nm	%8.40	Wu vd., 2015
3000 rpm, 30s	50 nm	%17.32	Quin vd, 2017
2000 rpm, 30s	75 nm	%15.7	Guo vd, 2016
4000 rpm, 15s	60-90 nm	%26-31	Slawek vd, 2021

Bu çalışmanın amacı iğne deliği'den bağımsız kaliteli ETL katmanlarının elde edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda FTO üzerine c-TiO₂ elektron transfer tabakası solüsyon bazlı hazırlanmış olup dönel kaplama cihaz yardımıyla kaplanmıştır. Kaplanan ETL tabakalarının kalınlık, mikro yapı ve faz analizleri SEM ve XRD ile incelenerek hücre verimliliğini etkileyen değerlerine göre optimizasyonu yapılmıştır.

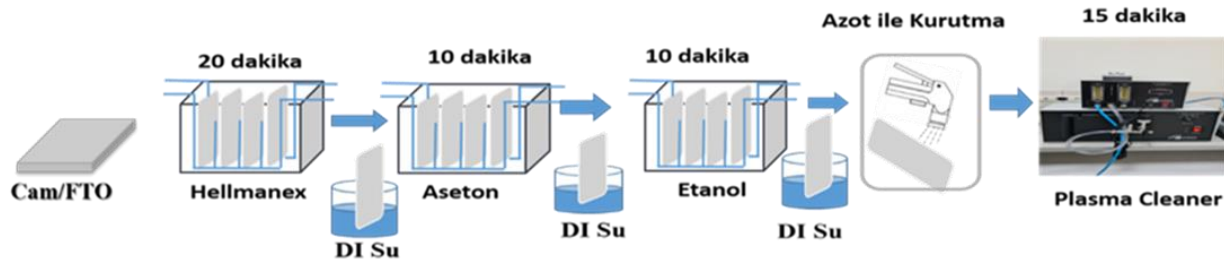
2. Malzeme ve yöntem

2.1. Malzeme

Elektron taşıma tabakası kompakt TiO₂ sol-gel üretim yöntemi ile üretilmiştir. Alttaş malzemesi olarak FTO Lumtec firmasından temin edilmiştir. Elektron transfer tabaka malzemesi olarak; kompakt TiO₂ için titanium isopropoxide (TTIP; 97%), ethanol (99.8%) ve HCl (%36.5) kullanılmıştır. Sentezlenen kompakt TiO₂, homojen şekilde kaplanabilmesi için SCS marka G3 model dönel kaplama cihazı yardımıyla kaplanmış ardından tavlama işlemine tabi tutulmuştur.

2.2. Alttaşların Temizlenmesi

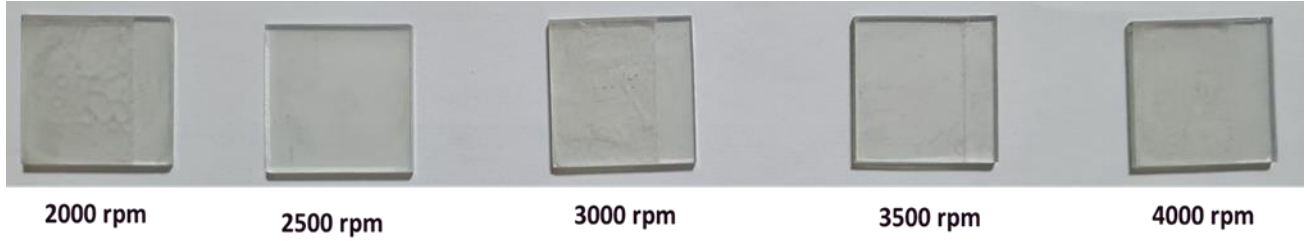
Hücre üretiminde alttaş temizliği önemli bir role sahiptir. Bu çalışmada, alttaş olarak 25mm*25mm boyutlarında ~8 ohm/sq dirence sahip FTO alttaşlar kullanılmadan önce temizleme işlemi yapılmıştır. Temizleme işleminde alttaşa zarar vermemek ve kalıntı bırakmamak için öncelikle %2 Hellmanex (deterjan) ile sonikasyon işlemi 20 dakika yapılmıştır. Ardından saf su ile durulama işlemi yapılmıştır (Saliba, 2016). Daha sonra sırasıyla etanol ve aseton içerisinde 10'ar dakika ultrasonikasyonda işlem yapılmıştır. Yıkama işlemi sonrası saf su ile durularak azot ile kurutma işlemi yapılmıştır. Kalıntıların tamamen temizlenmesi için 15 dakika boyunca plazma temizleyici cihazı kullanılmıştır (Damgacı & Seyhan, 2021). Tüm temizlik aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Temizlenen alttaşlar elektron taşıma katmanı için hazır halde inert ortamda bekletilmiştir.



Şekil 1. Kaplama işleminde kullanılan alttaşların temizleme aşamaları.

2.3. Kompakt TiO₂

Bu çalışmada, c-TiO₂ sol-jel yöntemiyle üretilerek FTO üzerine dönel kaplama yardımıyla kaplanmıştır. 0,30 M tetraizopropoksit (TTIP) çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti için sırasıyla 1ml ethanol'e 300 µl TTIP ve 5µl HCl (1ml ethanol içerisinde çözünen) 1ml ethanol ile tamamlanarak etanol içerisinde çözülmüştür. Bu solüsyonlara 2 M HCl içeren çözelti damlatılarak gece boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan solüsyondan 100 µl alınarak 2 adımda c-TiO₂ dönel kaplama yöntemiyle kaplanmıştır. Bu kaplama işleminde 1.adımda 10s boyunca 1000 rpm'de, 2. adımda sırasıyla 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 rpm'de 15 saniye boyunca döndürülerek kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama işleminden sonra 10 dakika 100°C'de ön tavlama işlemi yapılmış ardından 500°C'de 30 dakika boyunca kapaklı ısı tabaka sisteminde tavlama işlemi yapılmıştır. Tavlama işlemi sonrası FTO alttaşların üzerine kaplanan şeffaf c-TiO₂ tabakası Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Farklı dönel kaplama hızlarında FTO/cam alttaş üzerine kaplanan c-TiO₂ ince filmler.

2.4. Karakterizasyon

Üretilen kompakt TiO₂ incefilmlerin karakterizasyonu için kalınlık ölçümü Bruker Dektak XT profilometre, kristal yapılarının incelenmesi için PANalytical XRD ve son olarak sentezlenen malzemelerin yüzey görüntüsü için ZEISS marka EVO40 model SEM cihazları kullanılmıştır.

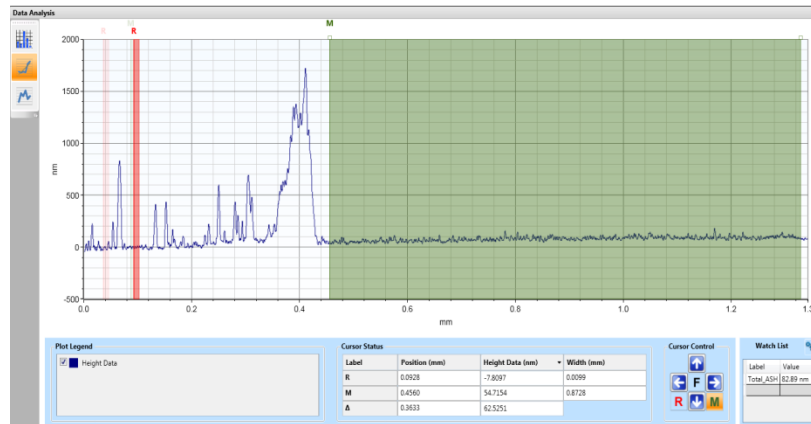
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kalınlık optimizasyonu

Üçüncü nesil boya duyarlı ve perovskit güneş hücrelerinde saydam iletken tabaka (TCO) üzerine kaplanan c-TiO₂, 50-150 nm kalınlık aralıklarında çok ince katman olarak kaplanmaktadır (Husain vd., 2018). Kaplanan elektron tabakasında kalınlık önemli bir parametredir. İnce filmin kalınlığı önemli ölçüde devir hızı, süre, çözelti miktarı ve kaplama ortamı dahil olmak üzere farklı parametrelere bağlıdır (Tahir vd., 2017). TiO₂, solüsyonundan bir pipet yardımıyla alınıp dönel kaplama cihazı ile tabloda verilen dönme hızı ve süresince döndürülerek kaplanmıştır. Şekil 3’de kaplanan c-TiO₂’in profilometre sonucu verilmiştir. Yeşil bölge, kaplanan c-TiO₂’in homojen bir şekilde kaplandığını ve kalınlık değerini göstermektedir. Sol tarafta görülen pikler FTO kenarına yapıştırılan bant kenarında biriken solüsyondan kaynaklanmaktadır. Tablo 2’de 2 adımda üretilen c-TiO₂’in farklı döndürme hızı ve sürelerine karşılık gelen kalınlık değerleri verilmiştir. c-TiO₂, 1000 rpm 10s, 4000 rpm 15 s dönel kaplama parametrelerinde literatürle uyumlu ve homojen olarak başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Tablo 2. 2 adımda üretilen c-TiO₂’in kalınlık değerleri.

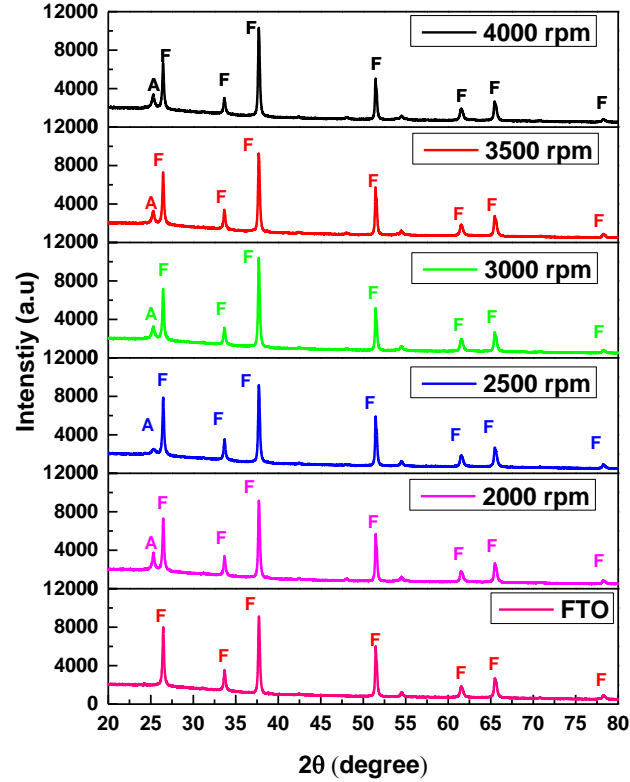
Döndürme hızı ve Süresi	Kalınlık Değeri
1000 rpm 10s, 2000 rpm 15 s	160 nm
1000 rpm 10s, 2500 rpm 15 s	154 nm
1000 rpm 10s, 3000 rpm 15 s	81 nm
1000 rpm 10s, 3500 rpm 15 s	78 nm
1000 rpm 10s, 4000 rpm 15 s	62 nm



Şekil 3. c-TiO₂ 62 nm kalınlıktaki profilometre sonucu.

3.2. c-TiO₂ Kristal Fazlarının Analiz Sonuçları

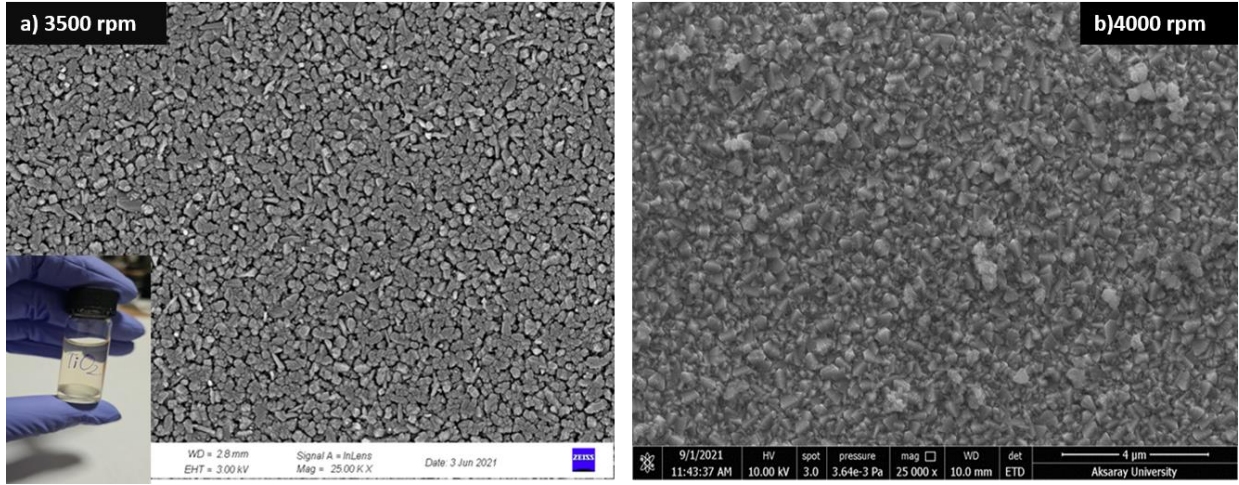
TiO₂ hem kristal hem de amorf formlarda, anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç kristal polimorfta bulunur. Bu çalışmada, c-TiO₂ 'ler dönel kaplama işleminden sonra 500°C'de tavlannmıştır. Üretilen c-TiO₂'lerin XRD sonuçlarına göre TiO₂'in anataz fazı 350°C sıcaklık ve üstünde ortaya çıkan 25,3°'de açık bir şekilde görülmektedir. TiO₂'in anataz fazı, fotokatalitik aktive için en aktif kristaldır (Hashimoto vd., 2005, Fujishima vd., 2008, Nakata, K., & Fujishima, A. 2012). Anataz fazında kristallenmeye sahip c-TiO₂ yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinin elde edilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada anataz fazında c-TiO₂ tüm farklı üretim parametrelerinde Şekil 4'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 4. FTO, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 rpm de kaplanan c-TiO₂ ince filmlerin XRD spektrumu (F:FTO, A:Anataz).

3.3. c-TiO₂ Yüzey Görüntüsü Sonuçları

TiO₂ kaplamanın yüzey görüntüleri incelendiğinde iğne deliği yapısının neredeyse hiç olmadığı, FTO yüzeyinin üzerine iyi bir şekilde kaplandığı görülmüştür. İğne deliği yapısının olmaması yada az olması perovskit hücre verimliliğinin yüksek olacağını bir göstergesidir. Şekil 5'de 3500 rpm ve 4000 rpm'de döndürülerek kaplanan c-TiO₂'in SEM görüntüsü verilmiştir. Bu SEM görüntüleri Meher ve arkadaşlarının'nın yaptığı yüksek verimli perovskit güneş hücresi elde edilen çalışma ile karşılaştırıldığında oldukça benzer olduğu görülmüştür (Meher vd., 2014) .



Şekil 5. (a) Laboratuvarda üretilen 3500 rpm’de üretilen c-TiO₂ SEM görüntüsü; (b) 4000 rpm’de üretilen c-TiO₂ SEM görüntüsü .

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, perovskit güneş hücrelerinin önemli katmanlarında biri olan TiO₂ sol-jel yöntemiyle sentezlenmiştir. Sentezlenen TiO₂, FTO alttaşlarının üzerine dönel kaplama cihazının üzerinde 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 rpm hızlarında 15s boyunca döndürülerek kaplanmıştır. Ardından 500°C’de 30 dakika boyunca tavlama işlemiyle n tipi elektron taşıma tabakası elde edilmiştir.

Bu tabakanın perovskit güneş hücreleri için önemi göz önüne olarak karakterizasyonu yapılmıştır. Bunun sonucunda en ideal kalınlık değeri 4000-rpm hızında 62 nm ile elde edilmiştir. XRD sonuçlarında faz pikleri incelendiğinde 3500-4000 rpm aralığında kristallenmenin en iyi olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde 3500 ve 4000 rpm hızında döndürülerek kaplanan c-TiO₂’lerde neredeyse hiç iğne deliği yapısının oluşmadığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar perovskit güneş hücrelerinde elektron transfer tabakasının ince, fotokatalitik aktive için aktif kristalli, iğne deliği yapısı az bir katman başarılı şekilde üretilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda katman kalınlığının daha ince bir yapıda oluşturmak için solüsyon miktarında azaltmaya gidilecek tavlama süresi ve sıcaklığı yeniden optimize edilecektir.

Referanslar

- Chiang, C. H., & Wu, C. G. (2016). Bulk heterojunction perovskite-PCBM solar cells with high fill factor. *Nature Photonics*, 10(3), 196-200.
- Fujishima, A., Hashimoto, K. ve Watanabe, T., (1999). *TiO₂ Photocatalysis, Fundamentals and Applications*, BKC, Inc Publishers, Japan
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface science reports*, 63(12), 515-582.
- Guo, L., Fei, C., Zhang, R., Li, B., Shen, T., Tian, J., & Cao, G. (2016). Impact of sol aging on TiO₂ compact layer and photovoltaic performance of perovskite solar cell. *Science China Materials*, 59(9), 710-718.
- Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*, 44(12R), 8269.
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical reviews*, 95(1), 69-96.
- Im J.H., Lee C.R., Lee J.W., Park S.W. ve Park N.G., (2011). "6.5% Efficient Perovskite quantum-dot sensitized solar cell", 3: 4088–4093.
- Jung, J. W., Chueh, C. C., & Jen, A. K. Y. (2015). A low-temperature, solution-processable, Cu-doped nickel oxide hole-transporting layer via the combustion method for high-performance thin-film perovskite solar cells. *Advanced materials*, 27(47), 7874-7880.
- Kim, H. S., Im, S. H., & Park, N. G. (2014). Organolead halide perovskite: new horizons in solar cell research. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(11), 5615-5625.

- Kim, J., Kim, K. S., & Myung, C. W. (2020). Efficient electron extraction of SnO₂ electron transport layer for lead halide perovskite solar cell. *NPJ Computational Materials*, 6(1), 1-8.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the american chemical society*, 131(17), 6050-6051.
- Li, J., Yao, J. X., Liao, X. Y., Yu, R. L., Xia, H. R., Sun, W. T., & Peng, L. M. (2017). A contact study in hole conductor free perovskite solar cells with low temperature processed carbon electrodes. *RSC advances*, 7(34), 20732-20737.
- Li, Z., Hou, B., Xu, Y., Wu, D., & Sun, Y. (2005). Hydrothermal synthesis, characterization, and photocatalytic performance of silica-modified titanium dioxide nanoparticles. *Journal of colloid and interface science*, 288(1), 149-154.
- Michael M. L., Joël T., Tsutomu M., Takuro N. M. Ve Henry J. S., (2012). "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites", 338(6107):643-647.
- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3), 169-189.
- NREL, 2022. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- O'Regan, B., & Gratzel, M. (1991). A low cost, high efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353, 737-740.
- Peng, B., Jungmann, G., Jäger, C., Haarer, D., Schmidt, H. W., & Thelakkat, M. (2004). Systematic investigation of the role of compact TiO₂ layer in solid state dye-sensitized TiO₂ solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, 248(13-14), 1479-1489.
- Qin, J., Zhang, Z., Shi, W., Liu, Y., Gao, H., & Mao, Y. (2017). The optimum titanium precursor of fabricating TiO₂ compact layer for perovskite solar cells. *Nanoscale research letters*, 12(1), 1-9.
- Saliba, M., Matsui, T., Domanski, K., Seo, J. Y., Ummadisingu, A., Zakeeruddin, S. M., & Grätzel, M. (2016). Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance. *Science*, 354(6309), 206-209.
- Sławek, A., Starowicz, Z., & Lipiński, M. (2021). The Influence of the Thickness of Compact TiO₂ Electron Transport Layer on the Performance of Planar CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells. *Materials*, 14(12), 3295.
- Tahir, M. B., Riaz, K. N., Hafeez, M., & Fidous, S. (2017). Review of morphological, optical and structural characteristics of TiO₂ thin film prepared by sol gel spin-coating technique. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 55(10), 716-721.
- Wojciechowski, K., Saliba, M., Leijtens, T., Abate, A., & Snaith, H. J. (2014). Sub-150 C processed meso-superstructured perovskite solar cells with enhanced efficiency. *Energy & environmental science*, 7(3), 1142-1147.
- Woon S. Y., Byung-Wook P., Eui Hyuk J., Nam J. J., Young Chan K., Dong Uk L., Seong S. S., Jangwon S., Eun Kyu K., Jun Hong N., Sang Il S., (2017). "Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells", 356:1376-1379.
- Woon Seok Y., Jun Hong N., Nam Joong J., Young Chan K., Seungchan R., Jangwon S. ve Sang Il S.,(2015). "High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange", *Science*, 348(6240):1234- 1237.
- Wu, R., Yang, B., Xiong, J., Cao, C., Huang, Y., Wu, F., ... & Yang, J. (2015). Dependence of device performance on the thickness of compact TiO₂ layer in perovskite/TiO₂ planar heterojunction solar cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(4), 043105.
- Yang, W. S., Park, B. W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U., & Seok, S. I. (2017). Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. *Science*, 356(6345), 1376-1379.
- Yang, W. S., Park, B. W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U., ... & Seok, S. I. (2017). Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. *Science*, 356(6345), 1376-1379.