

## Kendiliğinden organize olan tek tabaka molekülleri kullanarak organik ışık yayan diyotların veriminin iyileştirilmesi

*Increasing efficiency of organic light emitting diode by using self assembled monolayers*

Eyyup YALÇIN<sup>1,a</sup>, Burak GÜLTEKİN<sup>2,b</sup>, Hakan BİLGİLİ<sup>3,c</sup>, Mustafa CAN<sup>\*4,d</sup>

<sup>1</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Çiğli, İzmir

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Bornova, İzmir

<sup>3</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Çiğli, İzmir

<sup>4</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Çiğli, İzmir

• Geliş tarihi / Received: 07.01.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 14.08.2021

• Kabul tarihi / Accepted: 04.09.2021

### Öz

Ara yüzey iyileştirmeleri optoelektronik cihazların performansı üzerine önemli bir role sahiptir. Kendiliğinden organize olan tek tabaka molekülleri indiyum kalay oksit (ITO) ile organik katman arasında kullanılarak organik ışık yayan diyotlardan (OLEDs) daha yüksek performans elde edilmesi sağlanır. Bu çalışmada ITO'yu modifiye etmek için 4-metoksifenil boronik asit ile 3,5-dimetoksifenil boronik asit molekülleri bir ara yüzey katmanı olarak kullanılmıştır. Kendiliğinden organize olan moleküllerinin cihaz performansı üzerine etkisi elektriksel ve optiksel olarak analiz edilmiştir. Buna ek olarak, modifiye edilmiş ITO'nun yüzey morfolojisi atomik kuvvet mikroskopu (AFM), yüzey ıslanabilirliği ise temas açısı yöntemi ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, ITO yüzeyi kendiliğinden organize olan moleküller ile modifiye edilen cihazların modifiye edilmemiş cihazlara göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Enerji verimliliği, Kendiliğinden organize tek tabaka moleküller, OLED

### Abstract

Interface engineering has an important role on performance of optoelectronic devices. Self-assembled monolayers (SAMs) have been used between indium tin oxide (ITO) and organic layer to obtain high performance from organic light-emitting diodes (OLEDs). Herein, 4-Methoxyphenyl Boronic Acid and 3,5-Dimethoxyphenyl Boronic Acid have been used to ITO as an interface layer. The effect of SAMs on device performance was analyzed electrically and optically. Additionally, surface topography of modified ITO was characterized by atomic force microscope and surface wettability was analyzed by contact angle. According to results that has obtain, modified devices show better performance than unmodified devices.

**Keywords:** Energy efficiency, Self-assembled monolayers, OLED

\*d Mustafa CAN; mustafacan80@yahoo.com; Tel: (0532) 691 6926; orcid.org/0000-0002-1749-8293

<sup>a</sup> orcid.org/0000-0002-7468-2169

<sup>b</sup> orcid.org/0000-0002-8804-7844

<sup>c</sup> orcid.org/0000-0001-5646-6641

## 1. Giriş

Organik ışık yayan diyotlar (OLEDs) düşük çalışma voltajı ve yüksek dış kuantum verimine sahip olduğu 1987 yılında Tang ve VanSlyke tarafından rapor edilmiştir. Aynı zamanda OLED'ler düşük güç tüketimi, düşük maliyeti, kendiliğinden ışık verme özelliği, hızlı tepki süresi, geniş görüş açısı, yüksek verimlilik ve esneklik (Forrest, 2004; Kido vd., 1995; Eyyup Yalcın vd., 2017; Zheng vd., 2018) gibi özelliklerinden dolayı bu alandaki çalışmalar son 30 yıllık süreçte oldukça hız kazanmıştır. Bu süre zarfında OLED'lerin gerek verimliliğini artırmak gerek ise daha kararlı bir yapıya kavuşturmak için birçok yöntem denenmiştir. OLED'ler den daha iyi verim elde edilebilmesi için ilgili metal elektrotlardan (anot ve katot) organik yarıiletken malzemeler içerisine etkili ve dengeli bir yük (elektron ve boşluk) geçişi sağlanmalıdır. Metal elektrotlar ile organik yarıiletkenlerin farkı enerji seviyelerinde olmalarından dolayı yük geçiş bariyeri ile metal/organik arasında oluşan temas direnci, düşük yük geçişi ve düşük cihaz verimine neden olmaktadır. Bundan dolayı, metal elektrotlar ile organik yarıiletkenler arasındaki ara yüzey, yük geçişi ve yük dengesi üzerine dolayısı ile cihaz verimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Hotchkiss vd., 2011; Qiao vd., 2010; You vd., 2007; Zhao vd., 2014).

İndiyum kalay oksit (ITO), sahip olduğu mekanik sertliği, düşük direnci, yüksek şeffaflığı, kimyasal dayanımı gibi özelliklerinden dolayı OLED'ler de en çok tercih edilen anot malzemesidir (H. Kim vd., 2002; Wang Hill, 2012; Zheng vd., 2018). Anot/boşluk taşıyıcı malzeme (HTM) ara yüzeyi, OLED gibi cihazların verimi, çalışma voltajı ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Zhong Jiang, 2006). Bu nedenlerden dolayı metal/organik ara yüzeyi arasındaki temas ve enerji farkı problemini çözmek için ITO yüzeyi birçok farklı şekilde modifiye edilmeye çalışılmaktadır. Bu modifiye edici madde ve yöntemlerden bazıları, oksijen plazma (J. Kim vd., 1999), UV ozon (Li vd., 2005), Molibden trioksit ( $\text{MoO}_3$ ) (You vd., 2007) poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonate)(PEDOT/PSS) (Elschner vd., 2000) ve kendiliğinden organize olan molekülleridir (Q. Huang vd., 2006; Shang vd., 2018). Bu modifiye edici maddeler arasında PEDOT:PSS çok iyi optoelektronik özelliklere sahiptir. Bundan dolayı, PEDOT/PSS, kullanılan cihazlarda çok iyi verimlere ulaşılmaktadır. Fakat, PEDOT/PSS'in asidik özellik içermesinden dolayı zamanla ITO'yu aşındırması ve kolayca nemden etkilenmesi gibi

dezavantajlarından ötürü cihaz veriminde ve kararlılığında hızlı düşmelere neden olabilmektedir (Yalcın vd., 2018). Bu sebeplerden dolayı PEDOT/PSS'e önemli bir alternatif olarak, ITO'nun modifiye edilmesinde, kendiliğinden organize olan moleküller kullanılmaktadır.

Teorik olarak, boşluklar bir dış elektrik alan altında ITO yüzeyinden HTM yüzeyine akarlar. Bu durumda, boşluklar hem ITO/HTM arasındaki enerji bariyeri hem de organik/anorganik arasındaki faz farkından kaynaklı temas direncini aşmaları gerekmektedir. ITO yüzeyi kendiliğinden organize olan moleküller ile kaplandığında boşluklar ITO yüzeyinden kendiliğinden organize olan moleküllere (organik faz) oradan da HTM yüzeyine (organik faz), düşük bir enerji gereksinimi ile, doğrudan geçerler (An vd., 2019).

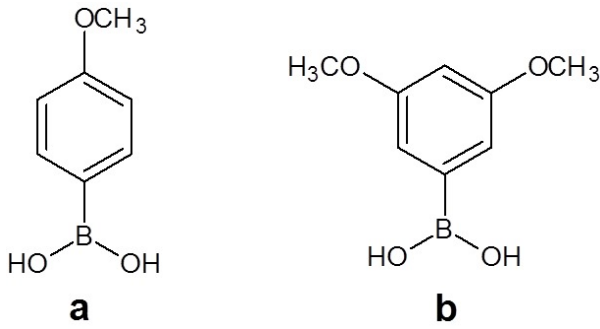
Kendiliğinden organize olan moleküller çok küçük yapılar olup ITO yüzeyine kimyasal olarak bağlanarak yüzeyde çok ince ve kararlı bir yapı oluştururlar. Bu moleküller genellikle metal yüzeylerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini kontrol etmek için kullanılır. Aynı zamanda, düşük maliyetli, kararlı ve esnek yüzeylere uygulanabilirlik (An vd., 2019) gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda, ITO'nun modifiye edilmesinde sıkça kullanılmaya başlanılmıştır. Kendiliğinden organize olan moleküller ile hidrofobik özellik gösteren boşluk taşıyıcı malzeme arasındaki temas problemi ve enerji farkının azalması sağlanmaktadır (Klausk, 2010; Tokudome vd., 2011). Kendiliğinden organize olan moleküllerin sahip olduğu çeşitli fonksiyonel grup ve zincir uzunlukları sayesinde ITO'nun iş fonksiyonu istenilen şekilde ayarlanabilmektedir (Zheng vd., 2018). Bu şekilde ITO'nun iş fonksiyonu değiştirilerek, cihazın çalışma geriliminin düşürülmesi (Tokudome vd., 2011; Yalcın vd., 2017), yük geçişinin artırılması ve anot/organik malzeme arasındaki temas probleminin giderilmesi (Chong vd., 2007) gibi sorunların çözülmesi sağlanılmaktadır.

Bu çalışmada, iki farklı kendiliğinden organize olan molekül ile modifiye edilen ITO yüzeyinin ıslanabilirliği, pürüzlülüğü ve üretilen OLED cihazlarının elektriksel ve optiksel özelliklerinde meydana gelen değişim incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kendiliğinden organize olan moleküllerinin cihaz performansı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

## 2. Materyal ve metod

### 2.1. Kullanılan malzemeler

Şekil 1 de molekül yapıları verilen *4-Metoksifenil Boronik Asit (1-Meo)* ve *3,5-Dimeoksifenil Boronik Asit (2-Meo)* yapıları kendiliğinden organize olan moleküller olarak kullanılmıştır. Bu moleküller dışında, N,N'-bis(3-metilfenil)-(1,1'-bifenil)-4,4'-diamin (TPD) ve tris-(8-hydroxyquinoline) alüminyum (Alq<sub>3</sub>) malzemeleri sırasıyla boşluk taşıyıcı yüzey (HTM) ve elektron emisyon yüzey (EML) olarak kullanılmıştır. Metal elektrotlar olarak ise ITO ve Alüminyum (Al) sırasıyla anot ve katot elektrotu olarak kullanılmıştır.



**Şekil 1.** 1-Meo (a) ve 2-Meo (b) moleküllerinin kimyasal yapıları.

### 2.2. ITO'nun temizlenmesi

ITO kaplı cam yüzeyler sırasıyla saf su, aseton ve isopropil alkol içerisinde daldırılarak 20 dakika boyunca ultrasonik banyoda yıkandı. Daha sonra ITO kaplı cam yüzeyler azot gazı ile kurutuldu. Kurulama işleminden sonra, ITO yüzeyinin aktifleştirilmesi için, yüzeyler vakum altında 8 dakika oksijen plazma (Electronic Diener Femto PCCE) ile temizleme işlemine maruz bırakılarak temizleme işlemine son verildi.

### 2.3. Cihaz üretimi

Temizleme işleminden sonra ITO yüzeyler, dimetil sülfoksit (DMSO) içerisinde hazırlanan 10<sup>-3</sup> molarlık kendiliğinden organize olan moleküller (1-Meo, 2-Meo) çözeltisinde gece boyunca bekletilerek yüzeylerin bu moleküller ile kaplanması sağlandı. Kendiliğinden organize olan molekül çözeltisinden çıkarılan numuneler kendi çözeni olan DMSO ile iyice yıkanarak yüzeye iyi bağlanmamış olan moleküllerin yüzeyden uzaklaştırılması sağlandı. Bu işlemlerden sonra kendiliğinden organize olan moleküller ile kaplanmış ITO yüzeyleri, organik malzemeler

(TPD ve Alq<sub>3</sub>) ve metal elektrotun (Al) kaplaması için hazır hale gelmiş oldu.

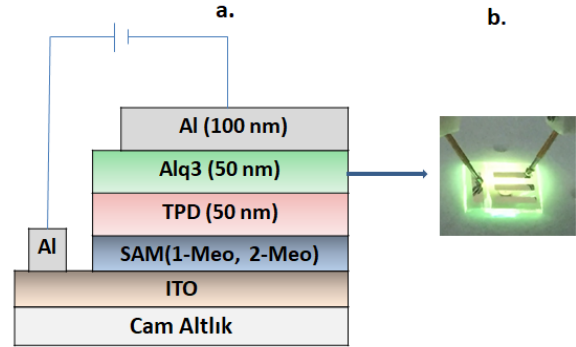
TPD, Alq<sub>3</sub> ve Al malzemeleri 3x10<sup>-6</sup> torr'luk yüksek vakum altında termal evaporator (NANOVAK) ile kaplandı. Sırasıyla TPD ve Alq<sub>3</sub> kalınlıkları 50 nm olacak şekilde kaplandı. Daha sonra katot elektrotu olan Al 100 nm olacak şekilde kaplanarak cihazın üretim aşaması tamamlandı. Bu çalışmada üretilen bir OLED cihazı ile mimari yapısı Şekil 2 de gösterilmiştir.

### 2.4. Cihaz karakterizasyonu

ITO yüzeylerinin, kendiliğinden organize olan moleküller ile kaplanmadan önceki ve kaplandıktan sonraki, yüzey topoğrafyaları ve yüzey pürüzlülükleri (Root Mean Square, RMS) Nanosurf Easyscan-2 Atomik Kuvvet Mikroskopu kullanılarak ölçülmüştür.

Temas açısı ölçümleri, KSV Attension Theta Lite optik gerilimölçer cihazı kullanılarak ölçümler her bir örnek numune üzerine yaklaşık 4 µL saf su damlatılarak statik durumda ölçülmüştür.

Elektriksel ölçümler, akım-gerilim (I-V) ölçümleri, Keithly 2400 güç kaynağı ile lüminesans değerleri ise Admesy Brontes-colorimeter cihazı ile ölçülmüştür.



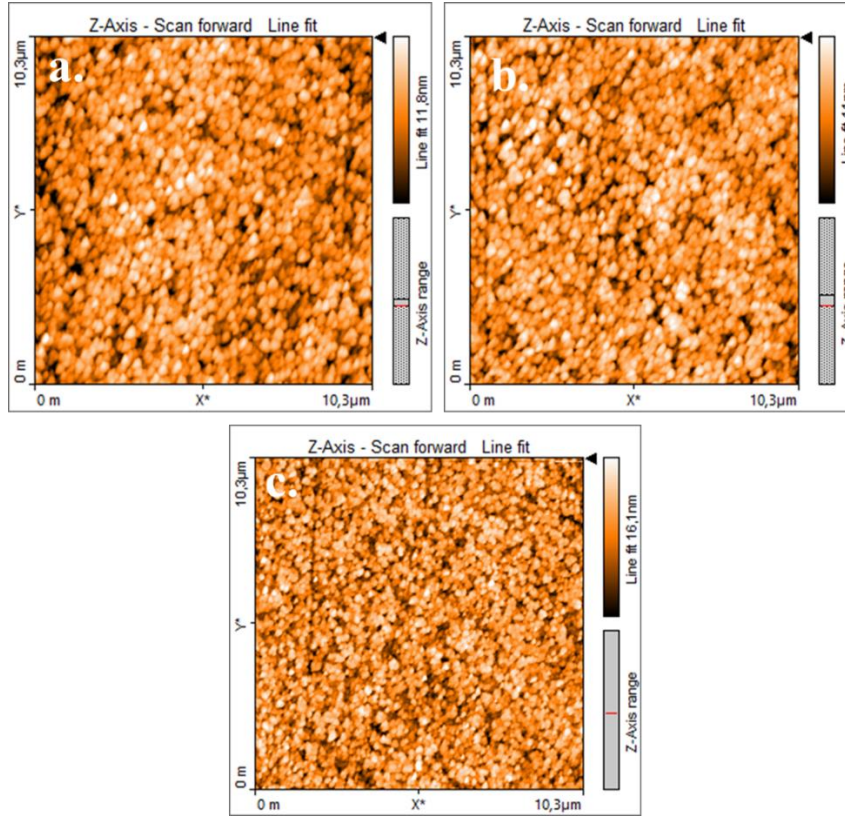
**Şekil 2.** Bu çalışmada üretilen bir OLED cihazının mimari yapısı (a) ve OLED Cihazı (b).

## 3. Bulgular

ITO yüzeyinin kendiliğinden organize olan moleküller ile kaplandığını tespit etmek için modifiye edilmiş yüzey ile modifiye edilmemiş yüzey topoğrafyaları Şekil 3 de gösterildiği gibi AFM ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük (RMS) değerleri sırası ile 1-Meo/ITO, 2-Meo/ITO ve ITO için 3.9 nm, 3.6 nm ve 2.5 nm olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki farklılıklar bize numunelerin

kendiliğinden organize olan moleküller ile kaplandığını göstermektedir. Bu sonuçlar, kendiliğinden organize olan moleküllerin ITO'nun yüzey morfolojisi ve ışık geçirgenliği üzerine negatif etki yaratmadığı aynı zamanda,

moleküllerin ITO yüzeyi için düzgün HTM film oluşturduğunu göstermektedir (Can vd., 2014; Mi vd., 2020).



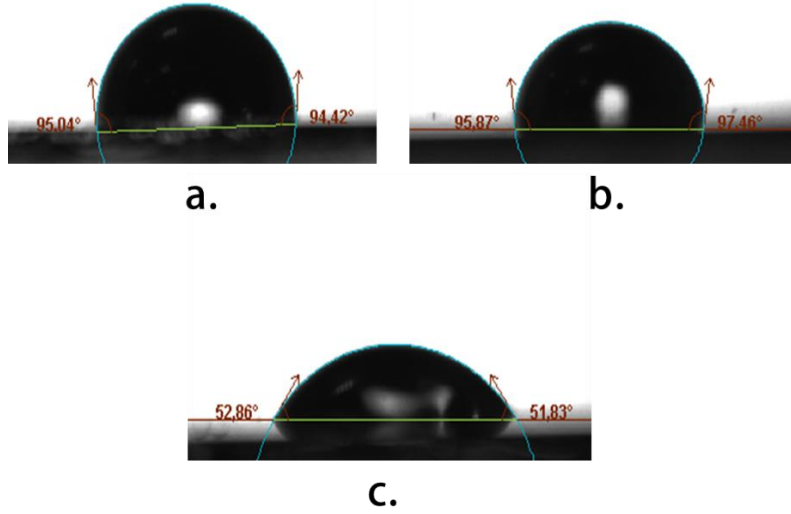
Şekil 3. 1-Meo (a), 2-Meo (b) ve ITO (c) nun yüzey topoğrafyası.

Bilindiği üzere ITO hidrofilik bir karaktere sahiptir. Bu da metal bir elektrot olan ITO ile organik bir malzeme olan TPD arasında bağlanma sorunlarına neden olmaktadır. Kendiliğinden organize olan moleküllerin ITO yüzeyinin hidrofilik karakteri üzerine etkisinin incelenmesi için, ITO yüzeyi kendiliğinden organize olan moleküller ile kaplanmadan önceki ve kaplandıktan sonraki yüzey ıslanabilirliği Şekil 4 de gösterildiği gibi temas açısı yöntemi ile incelenmiştir. Şekil 4 de gösterilen 1-Meo/ITO, 2-Meo/ITO ve ITO yüzeylerinin ıslanabilirlikleri sırasıyla  $\sim 95^\circ$ ,  $\sim 96^\circ$  ve  $\sim 52^\circ$  olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar bize kendiliğinden organize olan moleküllerin ITO yüzeyi ile su arasında bir ara yüzey bariyeri oluşturduğunu göstermiştir. Böylelikle, ITO'nun hidrofilik özelliğinin perdelendiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, nemin cihaz kararlılığını olumsuz etkilediği daha önceki çalışmalarda rapor edilmiştir (Mi vd., 2020). Bu çalışmada kullanılan kendiliğinden organize olan moleküllerin istenilen hidrofobik özellikler gösterdiği, böylelikle nemin cihaz içerisine geçişini zorlaştıracak da söylenebilir.

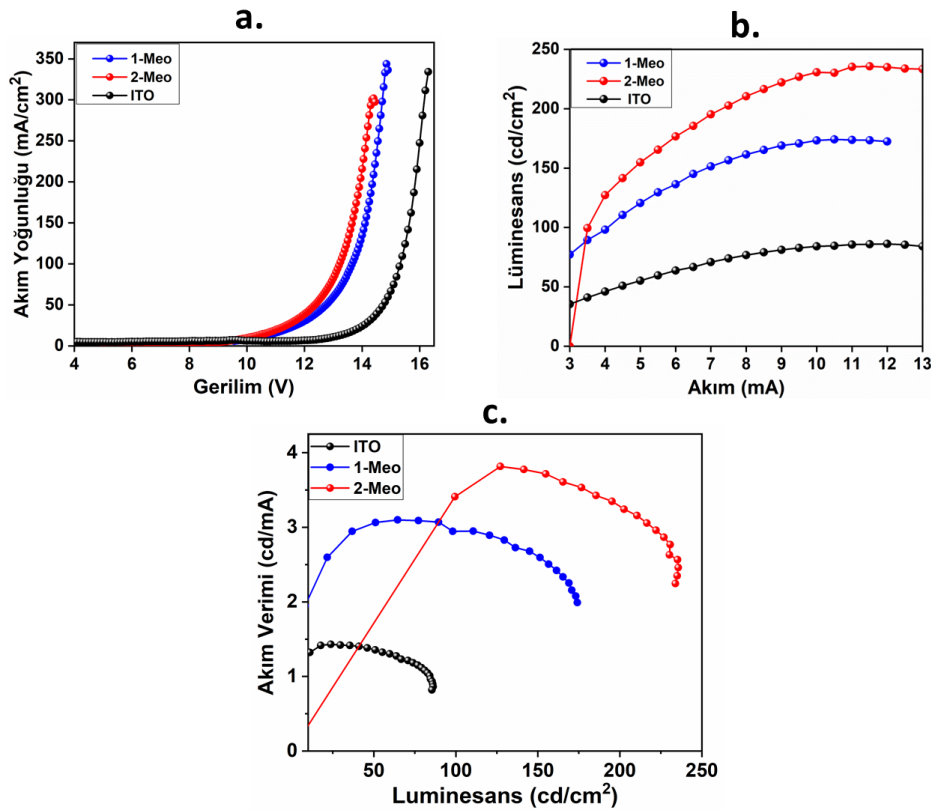
Üretilen OLED cihazlarının akım yoğunluğu-gerilim, lüminesans-akım ve akım verimi-lüminesans grafikleri Şekil 5 de verilmiştir. Kendiliğinden organize olan moleküller ile modifiye edilen ITO'lar kullanılarak üretilen OLED cihazlarının çalışma geriliminin ITO ile üretilen cihazdan çok daha düşük olduğu, aynı şekilde kendiliğinden organize olan moleküller ile modifiye edilen cihazların daha düşük gerilimlerde daha yüksek akım yoğunluğuna sahip olduğu Şekil 5a dan görülebilmektedir. Böylelikle kendiliğinden organize olan moleküller ile modifiye edilen cihazların modifiye edilmemiş cihaza göre daha iyi bir yük iletkenliği sağladığını söyleyebiliriz. Şekil 5b incelendiğinde ise, modifiye edilmiş cihazların daha iyi lüminesans değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu da bize etkin yük geçişine bağlı olarak daha fazla elektron boşluk çifti taşınabildiği böylelikle daha yüksek lüminesans değerleri elde edildiğini göstermektedir. Cihazların akım verimi değerleri Şekil 5c de verilmiştir. Cihazlar en yüksek akım verimi değerlerine, sırasıyla ITO, 1-Meo ve 2-Meo için  $23.85 \text{ cd/cm}^2$  lüminesans,  $77.22 \text{ cd/cm}^2$  lüminesans ve  $127.19 \text{ cd/cm}^2$  lüminesans da

ulaşmaktadır. Akım verimi ve lüminesans değerlerindeki bu iyileşme daha önce kendiliğinden organize tek katman molekülleri ile

yapılan OLED çalışmalarında desteklemektedir (An vd., 2019; F. Huang vd., 2020; Kim vd., 2019).



Şekil 4. 1-Meo (a), 2-Meo (b) ve ITO (c) nun temas açıları.



Şekil 5. 1-Meo, 2-Meo ve ITO'nun akım yoğunluğu-gerilim (a.) ve akım-lüminesans (b.) ve akım verimi-lüminesans grafikleri (c.).

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada iki tane kendiliğinden organize olan tek tabaka molekül (1-Meo ve 2-Meo) kullanılarak ITO yüzeyleri modifiye edilmiştir. Böylelikle metal elektrot olan ITO ile organik malzeme olan

HTM arasındaki temas problemi çözülmüştür. Aynı zamanda ITO dan organik yüzeye etkin bir yük geçişi sağlanmıştır. ITO yüzeyleri kendiliğinden organize olan moleküller ile modifiye edildikten sonra ıslanabilirlik karakteristikleri temas açısı ile ölçülmüş ve

modifiye edilen yüzeylerin hidrofobik karakteristiğinin arttığı görülmüştür. Benzer şekilde modifiye edilen yüzeylerin AFM ile yüzey topoğrafyalarına bakılmış ve yüzey pürüzlüğündeki değişimler gözlemlenmiştir. Son olarak ise kendiliğinden organize olan moleküller ile modifiye edilen cihazların optoelektronik özellikleri incelenmiş ve optoelektronik özelliklerinde ciddi iyileşmelerin olduğu görülmüştür. 1-Meo ve 2-Meo molekülleri ile modifiye edilen cihazların lüminesans değerleri modifiye edilmemiş cihazınki ile karşılaştırıldığında lüminesans değerlerinde, sırasıyla, 2 kat ve 3 kattan fazla bir artış olduğu görülmüştür.

### Kaynaklar

- An, D., Liu, H., Wang, S. and Li, X. (2019). Modification of ITO anodes with self-assembled monolayers for enhancing hole injection in OLEDs. *Applied Physics Letters*, 114(15), 153301. <https://doi.org/10.1063/1.5086800>
- Can, M., Havare, A. K., Aydın, H., Yagmurcukardes, N., Demic, S., Icli, S. and Okur, S. (2014). Electrical properties of SAM-modified ITO surface using aromatic small molecules with double bond carboxylic acid groups for OLED applications. *Applied Surface Science*, 314, 1082-1086. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.181>
- Chong, L.-W., Lee, Y.L. and Wen, T.C. (2007). Surface modification of indium tin oxide anodes by self-assembly monolayers: Effects on interfacial morphology and charge injection in organic light-emitting diodes. *Thin Solid Films*, 515(5), 2833-2841. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.05.010>
- Elschner, A., Bruder, F., Heuer, H.-W., Jonas, F., Karbach, A., Kirchmeyer, S. and Wehrmann, R. (2000). PEDT/PSS for efficient hole-injection in hybrid organic light-emitting diodes. *Synthetic Metals*, 111, 139-143. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(99\)00328-8](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(99)00328-8)
- Forrest, S. R. (2004). The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic. *Nature*, 428(6986), 911.
- Hotchkiss, P. J., Jones, S. C., Paniagua, S. A., Sharma, A., Kippelen, B., Armstrong, N. R. and Marder, S. R. (2011). The modification of indium tin oxide with phosphonic acids: mechanism of binding, tuning of surface properties, and potential for use in organic electronic applications. *Accounts of Chemical Research*, 45(3), 337-346. <https://doi.org/10.1021/ar200119g>
- Huang, F., Liu, H., Li, X. and Wang, S. (2020). Highly efficient hole injection/transport layer-free OLEDs based on self-assembled monolayer modified ITO by solution-process. *Nano Energy*, 78, 105399. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105399>
- Huang, Q., Li, J., Evmenenko, G. A., Dutta, P. and Marks, T. J. (2006). Systematic Investigation of Nanoscale Adsorbate Effects at Organic Light-Emitting Diode Interfaces. Interfacial Structure–Charge Injection–Luminance Relationships. *Chemistry of Materials*, 18(9), 2431-2442. <https://doi.org/10.1021/cm0604918>
- Kido, J., Kimura, M. and Nagai, K. (1995). Multilayer white light-emitting organic electroluminescent device. *Science*, 267(5202), 1332-1334. [10.1126/science.267.5202.1332](https://doi.org/10.1126/science.267.5202.1332)
- Kim, H., Horwitz, J., Kim, W., Mäkinen, A., Kafafi, Z. and Chrisey, D. (2002). Doped ZnO thin films as anode materials for organic light-emitting diodes. *Thin Solid Films*, 420, 539-543. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00836-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00836-2)
- Kim, H. R., Kim, T. W. and Park, S. G. (2019). Effective hole-injection characteristics of organic light-emitting diodes due to fluorinated self assembled monolayer embedded as a buffer layer. *Polymer International*, 68(8), 1478-1483. <https://doi.org/10.1002/pi.5853>
- Kim, J., Cacialli, F., Cola, A., Gigli, G. and Cingolani, R. (1999). Increase of charge carriers density and reduction of Hall mobilities in oxygen-plasma treated indium–tin–oxide anodes. *Applied Physics Letters*, 75(1), 19-21. <https://doi.org/10.1063/1.124263>
- Klauk, H. (2010). Organic thin-film transistors. *Chemical Society Reviews*, 39(7), 2643-2666. <https://doi.org/10.1039/B909902F>
- Li, C., Kwong, C., Djurišić, A., Lai, P., Chui, P., Chan, W. and Liu, S. (2005). Improved performance of OLEDs with ITO surface treatments. *Thin Solid Films*, 477(1-2), 57-62. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.08.111>
- Mi, X., Rungo, B. A., Dong, X., Liu, H., Li, X. and Wang, S. (2020). Enhanced efficiency and stability of organic light-emitting diodes via binary self-assembled monolayers of aromatic and aliphatic compounds on indium tin oxide. *Organic Electronics*, 105752. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105752>
- Qiao, X., Tao, Y., Wang, Q., Ma, D., Yang, C., Wang, L. and Wang, F. (2010). Controlling charge balance and exciton recombination by bipolar host in single-layer organic light-emitting diodes. *Journal of Applied Physics*, 108(3), 034508. <https://doi.org/10.1063/1.3457672>

- Shang, Z., Liu, D., Wang, T., Yu, X., Li, B., Li, W. and Zhou, X. (2018). Enhanced Hole-Injection Property in an OLED with a Self-assembled Monolayer of Hole-Transporting TPD on Thin Au as the Anode. *Transactions of Tianjin University*, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s12209-018-0161-7>
- Tokudome, Y., Fukushima, T., Goto, A. and Kaji, H. (2011). Enhanced hole injection in organic light-emitting diodes by optimized synthesis of self-assembled monolayer. *Organic Electronics*, 12(10), 1600-1605. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.06.022>
- Wang, M. and Hill, I. G. (2012). Fluorinated alkyl phosphonic acid SAMs replace PEDOT: PSS in polymer semiconductor devices. *Organic Electronics*, 13(3), 498-505. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.12.008>
- Yalcin, E., Can, M., Rodriguez-Seco, C., Aktas, E., Pudi, R., Cambarau, W. and Palomares, E. (2018). Semiconductor self-assembled monolayers as selective contacts for efficient PiN perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*. 10.1039/C8EE01831F
- Yalcin, E., Kara, D. A., Karakaya, C., Yigit, M. Z., Havare, A. K., Can, M. and Aboulouard, A. (2017). Functionalized organic semiconductor molecules to enhance charge carrier injection in electroluminescent cell. *Optical Materials*, 69, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.04.038>
- You, H., Dai, Y., Zhang, Z. and Ma, D. (2007). Improved performances of organic light-emitting diodes with metal oxide as anode buffer, *Journal of Applied Physics*, 101 (2), 06105, <https://doi.org/10.1063/1.2430511>
- Zhao, Y., Duan, L., Zhang, D., Dong, G., Qiao, J., Wang, L. and Qiu, Y. (2014). Systematic Investigation of Surface Modification by Organosiloxane Self-Assembled on Indium–Tin Oxide for Improved Hole Injection in Organic Light-Emitting Diodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(6), 4570-4577. <https://doi.org/10.1021/am500399e>
- Zheng, H., Zhang, F., Zhou, N., Sun, M., Li, X., Xiao, Y. and Wang, S. (2018). Self-assembled monolayer-modified ITO for efficient organic light-emitting diodes: The impact of different self-assemble monolayers on interfacial and electroluminescent properties. *Organic Electronics*, 56, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.01.038>
- Zhong, Z. and Jiang, Y. (2006). Surface modification and characterization of indium–tin oxide for organic light-emitting devices. *Journal of Colloid and Interface Science*, 302(2), 613-619. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.07.009>