



الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية وتطبيقاتها في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء

تأليف

Dongge Ma & Yonghua Chen

ترجمة

د. عبد الله بن مسعود العنزي

أستاذ مشارك

قسم الكيمياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

دار جامعة
الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS



ص.ب ٦٨٩٥٣ - الرياض ١١٥٣٧ المملكة العربية السعودية

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

ما-، دونج .

الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية وتطبيقاتها في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء./دونج ما؛
يونوها شين؛ عبدالله مسعد العنزي. - الرياض، ١٤٤٤هـ.

١٧٣ ص؛ ١٧ سم × ٢٤ سم

ردمك: ٨-٧٤-٠٠٠٧٤-٥١٠٠٠٣-٦٠٣-٩٧٨

١- العلوم الطبيعية أ. شين، يونوها. (مؤلف مشارك) ب. العنزي، عبدالله مسعد (مترجم) ج. العنوان

ديوي ١٠٠، ٥٠٠ ١٤٤٤/٢٣٦٨

رقم الإيداع: ١٤٤٤/٢٣٦٨

ردمك: ٨-٧٤-٠٠٠٧٤-٥١٠٠٠٣-٦٠٣-٩٧٨

هذه ترجمة عربية محكمة صادرة عن مركز الترجمة بالجامعة لكتاب:

Organic Semiconductor Heterojunctions and Its Application In Organic Light-Emitting Diodes

By: Dongge Ma & Yonghua Chen.

© Springer-Verlag GmbH Germany, 2017.

وافق المجلس العلمي على نشر هذا الكتاب في اجتماعه التاسع عشر للعام الدراسي ١٤٤٣هـ، المعقود بتاريخ ٢٩/١٠/١٤٤٣هـ، الموافق ٢٠٢٢/٥/٣٠م. ليكون مرجعاً علمياً في مجاله.

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يسمح بإعادة نشر أي جزء من الكتاب بأي شكل وبأي وسيلة سواء كانت إلكترونية أو آلية بما في ذلك التصوير والتسجيل أو الإدخال في أي نظام حفظ معلومات أو استعادتها بدون الحصول على موافقة كتابية من دار جامعة الملك سعود للنشر.

مقدمة المترجم

يقدم هذا الكتاب بشكل منهجي الجوانب الأكثر أهمية من المواد غير المتجانسة العضوية شبه الموصلة، بما في ذلك المفاهيم الأساسية والخصائص الكهربائية، ويناقد بشكل شامل تطبيق تباين أشباه الموصلات العضوية كحقل الشحنة وطبقات توليد الشحنة في الثنائيات العضوية التي ينبعث منها ضوء (الثنائيات العضوية الباعثة للضوء). وتعتبر أشباه الموصلات غير متجانسة الوصلات أساساً لإنشاء أجهزة إلكترونية كهروضوئية عالية الأداء في العقود الأخيرة، وقد تم استخدام أشباه الموصلات العضوية بشكل متزايد لتصنيع الأجهزة غير المتجانسة، وخاصة في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، وقد اجتذب هذا الموضوع قدرًا كبيرًا من الاهتمام واستثار العديد من الظواهر الجديدة والتفسيرات في هذا المجال.

يعتمد هذا التطبيق المهم على ثابت العزل الكهربائي المنخفض لأشباه الموصلات العضوية والتفاعلات الإلكترونية غير التساهمية الضعيفة بينهما، مما يعني أنها تشكل بسهولة تراكمات متغايرة، وكما نعلم فإن منطقة الشحن الفضائي من النوع المتراكم هي عالية التوصيل، وهي خاصية مهمة لتوليد الشحن بكفاءة عالية في تطبيقها كحقلن الشحنة وطبقة توليد الشحنة في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، وهذا الكتاب بمثابة مرجع قيم للباحثين، وكتاب دراسي للطلاب الخريجين مع التركيز على دراسة وتطوير الثنائيات العضوية الباعثة للضوء للعرض والإضاءة.

المترجم

مقدمة المؤلفين

سيجد المطورون والمهندسون الذين يعملون في منتجات عرض وإضاءة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (الثنائيات العضوية الباعثة للضوء s) استنادًا إلى أشباه الموصلات العضوية معلومات مفيدة حول مبادئ تصميم الثنائيات العضوية الباعثة للضوء عالية الأداء، وسيكون هذا الكتاب أيضًا بمثابة دعم مفيد وقيّم، ومرجع لطلاب الدراسات العليا لدخول هذا المجال حديثًا من الكيمياء الاصطناعية والهندسة الكهربائية والفيزياء التطبيقية وعلوم المواد.

تعتبر الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات هي الأساس لبناء أجهزة إلكترونية بصرية عالية الأداء خلال العقود الماضية، وقد تم استخدام المزيد والمزيد من أشباه الموصلات العضوية لتصنيع الأجهزة غير المتجانسة، وخاصة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، وجذب هذا الموضوع اهتمامًا كبيرًا، وأثار العديد من الظواهر والتفسيرات الجديدة في هذا المجال، كما يقدم هذا الكتاب الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية وتطبيقاتها في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء بشكل منهجي الجوانب المهمة من الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية، بما في ذلك المفاهيم الأساسية والخصائص الكهربائية.

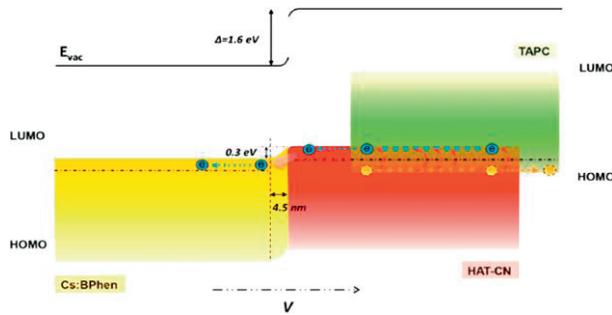
يُنَاقش في هذا العمل بشكل شامل تطبيق الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء كحاقن شحن وكطبقة توليد شحنة، ويعتمد هذا التطبيق المهم على ثابت العزل الكهربائي المنخفض لأشباه الموصلات العضوية والتفاعلات الإلكترونية غير التساهمية الضعيفة بين أشباه الموصلات العضوية؛ مما يسهل تكوين وصلة غير متجانسة متراكمة، وكما هو معروف أن نوعية منطقة الشحنات المتراكمة تكون عالية التوصيل، وهي خاصية مهمة لتوليد الشحن عالي الكفاءة في هذا التطبيق كحاقن شحن وطبقة توليد الشحن في الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، ويمكن أن يكون هذا الكتاب بمثابة مرجع مفيد للباحثين، وكتاب دراسي لطلاب الدراسات العليا المختصين بدراسة وتطوير الثنائيات العضوية الباعثة للضوء للعرض والإضاءة.

المؤلفان

المحتويات

هـ	مقدمة المترجم	.....
ز	مقدمة المؤلفين	.....
١	الفصل الأول: الأساس الفيزيائي للوصلات غير المتجانسة لشبه الموصل العضوي	.....
١	(١,١) المفهوم الأساسي للوصلات غير المتجانسة	.....
٤	(١,٢) نظرية الوصلات غير المتجانسة	.....
٨	(١,٢,١) نموذج الانتشار	.....
٩	(١,٢,٢) نموذج الانبعاثات	.....
١٠	(١,٢,٣) النموذج النفقي	.....
١١	(١,٢,٤) نموذج المؤتلف الانبعاثي	.....
١٣	(١,٢,٥) نموذج المؤتلف النفقي	.....
١٤	(١,٣) أشكال مستويات الطاقة للوصلات الثنائية غير المتجانسة	.....
١٤	(١,٣,١) أشكال وصلات (P/N) غير المتجانسة شديدة التباين	.....
١٨	(١,٣,٢) أشكال وصلات (N/P) غير المتجانسة شديدة التباين	.....
٢٣	(١,٤) الخصائص الأساسية للوصلات العضوية غير المتجانسة	.....
٣٥	(١,٥) وصف ملخص لتطبيق الوصلات غير المتجانسة العضوية في الموصلات الثنائية الباعثة للضوء	.....
٣٩	المراجع	.....
٤٣	الفصل الثاني: الخواص الكهربائية للوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية	.....
٤٣	(٢,١) خصائص منحى التيار والجهد الكهربائي	.....
٥٤	(٢,٢) خصائص منحى السعة والجهد	.....
٦٠	(٢,٣) خصائص نقل الشحنات	.....
٦٣	(٢,٤) خصائص توليد الشحنات	.....
٦٦	المراجع	.....
	الفصل الثالث: الوصلات غير المتجانسة لأشباه الموصلات العضوية كحاقن شحن في الثنائيات العضوية	.....
٦٩	الباعثة للضوء	.....
٦٩	(٣,١) الوصلات غير المتجانسة لشبه الموصل العضوي كحاقن للشحنة في الدايمود الباعث للضوء	.....

- ٣,٢) كحاقن لفجوات الموصلات الثنائية العضوية الباعثة للضوء عالية الكفاءة ٧١
- ٣,٣) حاقن الإلكترونات لأجهزة الموصلات الثنائية الباعثة للضوء عالية كفاءة ٨١
- ٣,٤) كحاقن فجوات وإلكترونات للموصلات الثنائية العضوية الباعثة للضوء عالية الكفاءة ٨٩
- المراجع ٩٩
- الفصل الرابع: الوصلات الثنائية غير المتجانسة لشبه الموصل العضوي كطبقة مولدة للشحنة في الثنائيات**
- ١٠١) العضوية الترادفية الباعثة للضوء ١٠١
- ٤,١) الشروط الأساسية للاستخدام كطبقة توليد شحنات ١٠١
- ٤,٢) الوصلات غير المتجانسة المطعمة من النوع P وN كطبقة مولدة للشحنة للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء عالية الكفاءة ١٠٤
- ٤,٣) الوصلة غير المتجانسة ثنائية الطبقة N/P كطبقة مولدة للشحنة للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء ١٠٩
- ٤,٤) الوصلة غير المتجانسة العضوية التراكمية من النوع N\P كطبقة مولدة للشحنة للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء ١٢٨
- ٤,٥) الوصلات غير المتجانسة المركبة من النوع N\N:P\N كطبقة مولدة للشحنة للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء ١٣٢
- المراجع ١٣٩
- الفصل الخامس: الثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء الأبيض القائمة على الوصلات غير المتجانسة**
- ١٤٣) لشبه الموصل العضوي ١٤٣
- ٥,١) التركيبات الأساسية للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء الأبيض ١٤٣
- ٥,٢) الاستشعاع الضوئي للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء الأبيض ١٤٩
- ٥,٣) الوصلات الثنائية العضوية البيضاء الباعثة للضوء الفسفوري المضيء ١٥١
- ٥,٤) الوصلات الثنائية الباعثة للاستشعاع/ الفسفور الضوئي الهجين للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء ١٦٠
- ٥,٥) التطبيقات للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء الأبيض في العرض والإضاءة ١٦٥
- المراجع ١٦٨
- ثبت المصطلحات ١٧١
- كشاف الموضوعات ١٧٣



شكل (٤,٣٥). الرسم البياني التخطيطي يوضح مبادئ العمل الخاصة بالوصلة غير المتجانسة المركبة التي تم تصميمها والخط المتقطع في الاتجاه المستعرض يمثل مستوى *quasi*-فيري. يتم حساب تحديد مستوى الفراغ Δ باستخدام LUMO-HAT-CN [46]. $\Delta = \text{CN-LUMOBPhen-eVb}$

المراجع

- [1] Y.H. CheN, J.S. CheN, D.G. Ma, D.H. YaN, L.X. WaNg, APPL. Phys. Lett. 99, 103304 (2011)
- [2] J. Kido, T. Matsumoto, T. Nakada, J. ENdo, K. Mori, N. Kawamura, A. Yokoi, SID. Int. Symp. Dig. Tech. 34, 964 (2003)
- [3] H.D. SuN, Y.H. CheN, J.S. CheN, D.G. Ma, IEEE J. Sel. ToP. QuaNtum ElectroN. 22, 7800110 (2016)
- [4] H. Sasabe, K. MiNamoto, Y.J. Pu, M. Hirasawa, J. Kido, Org. ElectroN. 13, 2615 (2012)
- [5] Y.H. Lee, M.W. LiN, T.C. WeN, T.F. Guo, J. APPL. Phys. 114, 154512 (2013)
- [6] Q.Y. Bao, J.P. YaNg, Y.Q. Li, J.X. TaNg, APPL. Phys. Lett. 97, 063303 (2010)
- [7] M.K. FuNg, Y.Q. Li, L.S. Liao, Adv. Mater. 47, 10391 (2016)
- [8] Q.Y. Bao, J.P. YaNg, Y. Xiao, Y.H. DeNg, S.T. Lee, Y.Q. Li, J.X. TaNg, J. Mater. Chem. 21, 17476 (2011)
- [9] L.S. Liao, K.P. Klubek, C.W. TaNg, APPL. Phys. Lett. 84, 167 (2004)
- [10] Y.H. CheN, Q. WaNg, J.S. CheN, D.G. Ma, D.H. YaN, L.X. WaNg, Org. ElectroN. 13, 1121 (2012)
- [11] Y.H. CheN, J.S. CheN, D.G. Ma, D.H. YaN, L.X. WaNg, J. APPL. Phys. 110, 074504 (2011)
- [12] Y.F. Dai, H.M. ZhaNg, Z.Q. ZhaNg, Y.P. Liu, J.S. CheN, D.G. Ma, J. Mater. Chem. C 3, 6809 (2015)
- [13] M. Kroger, S. Hamwi, J. Meyer, T. DobbertiN, T. Riedl, W. Kowalsky, H.H. JohaNNes, Phys. Rev. B 75, 235321 (2007)
- [14] Y.H. Lee, M.W. LiN, T.C. WeN, T.F. Guo, J. APP. Phys. 114, 154512 (2013)
- [15] S.H. Lee, J.H. Lee, J.H. Lee, J.J. Kim, Adv. FuNct. Mater. 22, 855 (2012)
- [16] L.S. Liao, W.K. Slusarek, T.K. Hatwar, M.L. Ricks, D.L. Comfort, Adv. Mater. 20, 324 (2008)
- [17] Y.H. CheN, D.G. Ma, J. Mater. Chem. 22, 18718 (2012)
- [18] S.L. Lai, M.Y. ChaN, M.K. FuNg, C.S. Lee, S.T. Lee, J. APPL. Phys. 101, 014509 (2007)
- [19] L.S. Liao, K.P. Klubek, APPL. Phys. Lett. 92, 223311 (2008)

- [20] D.H. YaN ,H.B. WaNg ,B.X. Du ,INtroductioN to OrgaNic SemicoNductor HeterojuNctioNs (Wiley , 2010)
- [21] B.L. Sharma ,R.K. Purohit ,SemicoNductor HeterojuNctioNs (PergamoN Press ,Oxford ,1974)
- [22] X.L. Liu ,C.G. WaNg ,C.C. WaNg ,I. IrfaN ,Y.L. Gao ,Org. ElectroN. 17 ,325 (2015)
- [23] Y.H. CheN ,H.K. TiaN ,Y.H. GeNg ,J.S. CheN ,D.G. Ma ,D.H. YaN ,L.X. WaNg ,J. Mater.Chem. 21 , 15332 (2011)
- [24] H.K. TiaN ,J.W. Shi ,B. He ,N.H. Hu ,S.Q. DoNg ,D.H. YaN ,J.P. ZhaNg ,Y.H. GeNg ,F.S. WaNg ,Adv. FuNct. Mater. 17 ,1940 (2007)
- [25] Q.X. Guo ,H.D. SuN ,J.X. WaNg ,D.Z. YaNg ,J.S. CheN ,D.G. Ma ,J. Mater. Chem. C 4 ,376 (2016)
- [26] I.D. Parker ,J. APPL. Phys. 75 ,1656 (1994)
- [27] R.H. Fowler ,D.L. Nordhe ,Proc. R. Soc. LoNd. 119 ,173–181 (1928)
- [28] A.J. Heeger ,I.D. Parker ,Y. YaNg ,SyNth. Met. 67 ,23 (1994)
- [29] M. Koehler ,I.A. HummelgeN ,APPL. Phys. Lett. 70 ,3254 (1997)
- [30] E. Oha ,S. Park ,J. JeoNg ,S.J. KaNg ,H. Lee ,Y. Yi ,Chem. Phys. Lett. 668 ,64 (2017)
- [31] T. Chiba ,Y.J. Pu ,R. Miyazaki ,K. Nakayama ,H. Sasabe ,J. Kido ,Org. ElectroN. 12 ,710 (2011)
- [32] H.D. SuN ,Q.X. Guo ,D.Z. YaNg ,Y.H. CheN ,J.S. CheN ,D.G. Ma ,ACS PhotoN. 2 ,271–279 (2015)
- [33] C.L. LiN ,T.Y. Cho ,C.H. ChaNg ,C.C. Wu ,APPL. Phys. Lett. 88 ,111106 (2006)
- [34] R. Meerheim ,M. FurNo ,S. HofmaNN ,B. Luessem ,K. Leo ,APPL. Phys. Lett. 97 ,253305 (2010)
- [35] A.R. RibeN ,D.L. Feucht ,INter. J. ElectroN. 20 ,583–599 (1966)
- [36] C. ZeNer ,Proc. R. Soc. A Math. Phys. ENg. Sci. 145 ,523 (1934)
- [37] K. McAfee ,E. Ryder ,W. Shockley ,M. SParks ,Phys. Rev. 83 ,650 (1951)
- [38] E.O. KaNe ,J. Phys. Chem. Solids 12 ,181 (1960)
- [39] G. Yu ,J. Gao ,J.C. HummeleN ,F. Wudl ,A.J. Heeger ,ScieNce 270 ,1789 (1995)
- [40] S.H. Park ,A. Roy ,S. BeauPre ,S. Cho ,N. Coates ,J.S. MooN ,D. Moses ,M. Leclerc ,K. Lee ,A.J. Heeger ,Nat. PhotoN. 3 ,297 (2009)
- [41] Y.H. CheN ,J.S. CheN ,D.G. Ma ,D.H. YaN ,L.X. WaNg ,F.R. Zhu ,APPL. Phys. Lett. 98,243309 (2011)
- [42] W.J. ZeNg ,K.S. YoNg ,Z.M. Kam ,F.R. Zhu ,Y.N. Li ,APPL. Phys. Lett. 97 ,133304 (2010)
- [43] S.H. Park ,J.G. JeoNg ,H.-J. Kim ,S.-H. Park ,M.-H. Cho ,S.W. Cho ,Y. Yi ,M.Y. Heo ,H. SohN ,APPL. Phys. Lett. 96 ,013302 (2010)
- [44] C. HeiN ,E. MaNkel ,T. Mayer ,W. JaegermaNN ,Sol. ENergy Mater. Sol. Cells 94 ,662 (2010)
- [45] A. Ray ,D. Goswami ,S. ChattoPadhyay ,S. Bhattacharya ,J. Phys. Chem. A 112 ,11627 (2008)
- [46] H.D. SuN ,Y.H. CheN ,L.P. Zhu ,Q.X. Guo ,D.Z. YaNg ,J.S. CheN ,D.G. Ma ,Adv. ElectroN. Mater. 1 , 1500176 (2015)

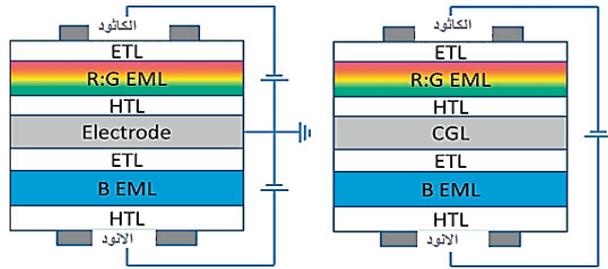
- [47] M.A. LamPert ,P. Mark ،CurreNt INjectioN iN Solids (Academic Press INc. ،New York ، 1970)
- [48] Y. ZhaNg ،B. de Boer ،P.W.M. Blom ،Phys. Rev. B 81 ،085201 (2010)
- [49] P. PahNer ،H. KleemaNN ،L. BurtoNe ،M.L. Tietze ،J. Fischer ،K. Leo ،B. Lussem ،Phys. Rev. B 88 ، 195205 (2013)
- [50] J. Drechsel ،M. Pfeiffer ،X. Zhou ،A. Nollau ،K. Leo ،SyNth. Met. 127 ، 201 (2002)
- [51] K. Walzer ،B. MaeNNig ،M. Pfeiffer ،K. Leo ،Chem. Rev. 107 ، 1233 (2007)
- [52] L. BurtoNe ،J. Fischer ،K. Leo ،M. Riede ،Phys. Rev. B 87 ،045432 (2013)
- [53] A.R. RibeN ،D.L. Feucht ،INt. J. ElectroN. 20 ، 583 (1966)
- [54] M.L. Tietze ،L. BurtoNe ،M. Riede ،B. Luessem ،K. Leo ،Phys. Rev. B 86 ،035320 (2012)

الثنائيات العضوية المترادفية الباعثة للضوء الأبيض القائمة على الوصلات غير المتجانسة لشبه الموصل العضوي

(٥,١) التركيبات الأساسية للثنائيات العضوية المترادفية الباعثة للضوء الأبيض

كما نعرف أن أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء مهمة تكنولوجياً، ليس فقط لأنه يمكن تحسين الإضاءة وكفاءة التيار خطيًا مع وجود عدد من وحدات (EI) داخل أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (، ولكن أيضًا بسبب أن تسريب التيار الكهربائي وانهميار الجهد الكهربائي يمكن تجنبه نتيجة لوجود إضاءة عالية عند كثافة تيار منخفضة وطبقات عضوية أكثر سمكًا؛ مما ينتج عنه عمراً افتراضياً أطول لهذه الأجهزة، والأهم أن فنية هذه الأجهزة من السهل تجميعها عمودياً أو بصورة فردية للحصول على وحدات انبعاث أحادية حمراء أو خضراء أو زرقاء أو في صورة وحدات انبعاث متعددة بيضاء مع وجود طبقات لتوليد الشحنات للحصول على الانبعاث الأبيض.

وهناك نوعان من المبادئ للحصول على أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (ذات الانبعاث الأبيض بواسطة التحكم في الجهد. [1] شكل (٥,١) يوضح رسمًا تخطيطيًا لتركيب هذه الأجهزة واحدًا من تراكيب هذه الأجهزة ذات اثنتين أو أكثر من وحدات انبعاث الضوء المستقلة ذات الألوان المختلفة، [2,3] وهذا المجال يمدنا بالكثير من المزايا للتحكم بشكل أكبر في طيف الانبعاث الناتج، لذلك يمكن بسهولة تغيير درجة حرارة اللون (CT) ، وعلى الرغم من ذلك لتوجيه وحدة فردية فإن القطب الإضافي يجب إضافته إلى حزمة الجهاز كوصلة بين اثنتين من الوحدات المتجاورة، وهذا القطب الوسيط يجب أن يكون شفافاً، لذلك فهو يكون مصنوعاً من طبقة معدنية رقيقة تقريباً ١٥ نانومتر أو من أكسيد قصدير الإنديوم، والذي كما نعلم بأن عملية ترسيبه يمكن أن تسبب مشكلة نتيجة لحدوث تلف للمواد العضوية: [4] حيث إن الأغشية المعدنية تمتص كمية كبيرة من الضوء وتحدث تأثيرات إضافية خلال الفراغات الصغيرة: [5] ونتيجة لذلك فإن أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المستقلة الموجهة تظهر كفاءات متوسطة نسبياً (تقريباً ١٠ ٪ من الكفاءة الكمية الخارجية)، وعلى الرغم من استخدام أنظمة الانبعاث الفوسفورية المضيفة، [6] لذلك فإن تطوير أجهزة متغيرة اللون عالية الكفاءة مستقلة موجهة يعتبر معيلاً من التحديات.



شكل (٥،١). يوضح رسماً تخطيطياً لترتيب نوعية من أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء التي تبعث الضوء الأبيض، R، الأحمر، و G الأخضر، و B الأزرق، و ETL طبقة نقل الإلكترونات، و HTL طبقة نقل الفجوات، و EML الطبقة الباعثة.

والبديل هنا هو تراكيب أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ذات اثنتين أو أكثر من وحدات انبعاث الضوء ذات الألوان المختلفة في سلاسل بواسطة طبقات توليد الشحنات كمواد موصلة بينية، [7] والتي تعتبر من أفضل التراكيب نتيجة لكفاءتها العالية والثبات الجيد للون وأيضاً عمرها الافتراضي الطويل، ويمكن أن نرى أيضاً أن هذا النوع من أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء يتم تشغيله بواسطة مصدر طاقة واحد. من طبقات توليد الإلكترونات التي تلعب دوراً مشابه للأقطاب المعدنية التي تطفو بين اثنتين من وحدات الانبعاث، والتي تكون مختلفة تماماً عن حالة الأقطاب المعدنية؛ وذلك لأن المواد الموصلة البينية ينبغي أن تكون متصلة بمصدر طاقة خارجي، حيث إن الإلكترونات والفجوات التي يتم حقنها داخل وحدات الانبعاث من المواد الموصلة البينية تتولد داخل طبقات توليد الشحنات الطافية تحت وجود مجال كهربائي خارجي، وهذه من أهم الخصائص لعمل طبقات توليد الشحنات، لذلك فإنها تلعب دوراً هاماً في الحصول على أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء عالية الكفاءة ومن الواضح أن الإضاءة وكفاءة التيار لهذا النوع من الأجهزة هو عبارة عن مجموع كل وحدة من وحدات EL، لذلك فإن كفاءة الطاقة لا يمكن تعزيزها بزيادة الجهد خاصة عند استخدام CGL غير مرغوب فيها، لذلك فإن تطوير طبقات توليد شحنات فعالة يعتبر من أهم مواضيع البحث. الانبعاث الأبيض لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ذات طبقات توليد الشحنات يمكن الحصول عليها من خلال عملية المزج لوحدة الانبعاث ذات الألوان المختلفة وهذه التراكيب تتضمن الأنواع الآتية:

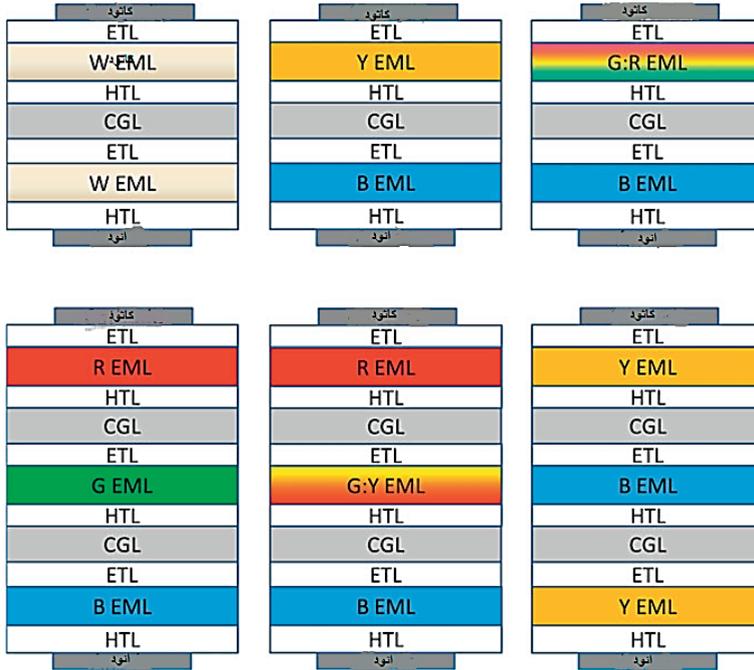
“W+W” [8]، “B+Y” [9]، “B+GR” [10]، “B+YR” [11]، “B+G+R” [12]، “B+GY+R” [13]، and “Y+B+Y” [14].

الرسم التخطيطي للتراكيب تم تلخيصه في الشكل (٥،٢)، حيث إن كل هذه الأنواع تظهر انبعاثاً ضوئياً جيداً ذا كفاءة عالية في هذه الأجهزة البيضاء، أول شيء يجب أن يؤخذ في الاعتبار هو تصميم طبقات توليد الشحنات والتي تتضمن بشكل أساسي (NDN-1: NET-5/NDP-2:NHT-5، HAT-CN/TAPC، HAT-CN/NPB، MoO₃/NPB)، ويمكن أن نرى أن أنواع الوصلات غير المتجانسة العضوية قد أصبحت تراكيب هامة كطبقات لتوليد الشحنات كمصادر للإضاءة.

إن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء يجب أن يكون لها في نفس الوقت مقياس تجسيد للون عالي الكفاءة، وأيضاً تكون ذات إضاءة كافية، وعلى الرغم من ذلك تكون كفاءة الإضاءة و CRI في علاقة مقايضة في أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الفعلية البيضاء؛ [15] لذلك من الضروري لنا أن نصمم نظرياً وتجريبياً ونحسن من معالم التركيب البنائي لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء.

قام تشو [16] (Cho) وعلماء آخرون بتصميم أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء ذات الثلاث ألوان، والتي تحتوي على اثنتين من وحدات الانبعاث للحصول على كفاءة عالية وأيضًا CRI عالٍ، حيث إنهم قاموا بتحسين CRI من خلال مقارنة اثنتين من وحدات الانبعاث الزرقاء المختلفة والتي يطلق عليها:

bis[2-(4,6-difluorophenyl)pyridinato-N.C2'](picolinato)iridium (III) (Flrpic) and tris[2-(4-fluorophenyl)-1-(5'-isopropyl-(1,1':3',1''-terphenyl)-2'-yl)-1H-imidazole] iridium(III) (Ir(itpim)3).



شكل (٥,٢). يوضح رسمًا تخطيطيًا لتركيبة أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء ذات وحدات الانبعاث المختلفة.

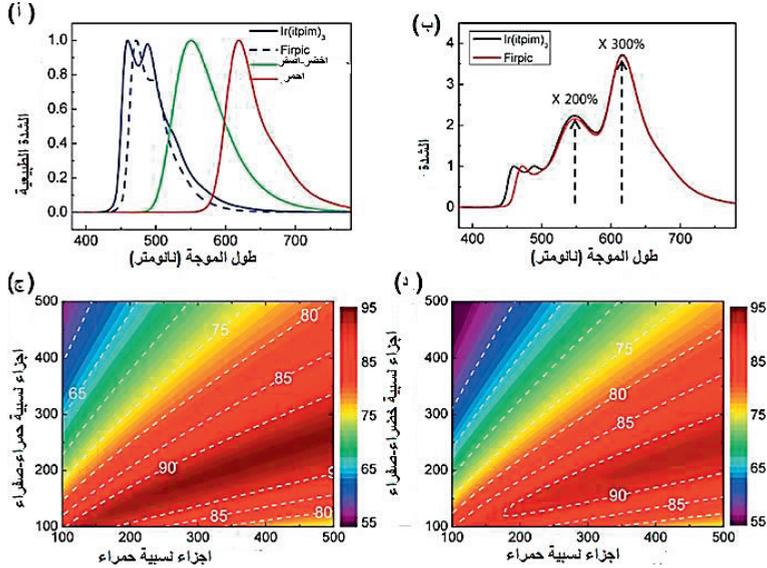
شكل (٥,٣) يوضح طيف الانبعاث لوحدة الانبعاث الصفراء والخضراء والحمراء والزرقاء والتي تستخدم للحصول على أطيف انبعاث بيضاء لذلك فإن أطيف الانبعاث البيضاء المتعددة يمكن الحصول عليها بواسطة تغيير أجزاء الانبعاث الصفراء والخضراء (yG) والحمراء (xR) كما يلي:

معادلة (٥,١)

$$S_W = x_R S_R + y_G S_G + S_B$$

حيث إن S_W و S_R و S_G و S_B هم أطيف الانبعاث للأبيض والأحمر والأخضر والأزرق على الترتيب فعلى سبيل المثال نسبة الأصفر - الأخضر إلى الأحمر تكون $x_R:y_G = 2:3$ ، لذلك S_W يتم الحصول عليه، وكما هو موضح في شكل (٥,٣) فإن

$Ir(itpim)_3$ له مدى واسع عند الأمواج الطولية الأقصر أكثر من Flrpic لذلك فإن SW في حالة $Ir(itpim)_3$ يظهر منطقة انبعاث طيفي أوسع.



شكل (٥،٣). أ- طيف وحدات الانبعاث لـ $Ir(itpim)_3$ ، Flrpic) الأحمر والأصفر والأخضر، ب- مثال على طيف الانبعاث الأبيض بواسطة استخدام أجزاء نسبية من الأطياف الزرقاء والحمراء والصفراء والخضراء إلى الحمراء (1:2:3)، ج- $Ir(itpim)_3$ ، د- Flrpic (dopant) طبقاً للجزء المستخدم من الأحمر على المحور x والأصفر-الأخضر على المحور y [16]

شكل (٥،٣-ج-د) يعطي مخططات contour لقيمة CRI من خلال أطياف الانبعاث المدارية لـ $Ir(itpim)_3$ من خلال النسب المتنوعة للأحمر والأصفر-الأخضر، ويمكن أن نرى أن مدى واسع من قيم CRI يمكن الحصول عليه بواسطة التنوع عن طريق تغيير نسب الزيادة النسبية لـ الأصفر-الأخضر والأحمر، حيث إن عوامل التطعيم الزرقاء يمكن أن تحقق قيمة عالية جداً لـ CRI أكبر من ٩٠ إذا تم التحكم بشكل جيد في الأجهزة الحمراء والصفراء-الخضراء، وبالرغم من ذلك فإن $Ir(itpim)_3$ له مدى أوسع في تحقيق قيمة عالية لـ CRI، حيث إن $Ir(itpim)_3$ ينتج قيمة أكبر لـ CRI من Flrpic لنفس الزوج من الـ y و x وهذا يشير بقوة إلى أهمية وجود انبعاث عند أطوال موجية أقصر من أجل الحصول على أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ببيض ذات قيمة عالية لـ CRI.

وعلى الرغم من ذلك فإن الانبعاث الأزرق له تأثير محدود على الكفاءة الضوئية، وبشكل عام الكفاءة الضوئية

(η_p) يمكن حسابها من خلال التدفق الضوئي F والكفاءة الضوئية p من خلال: [17]

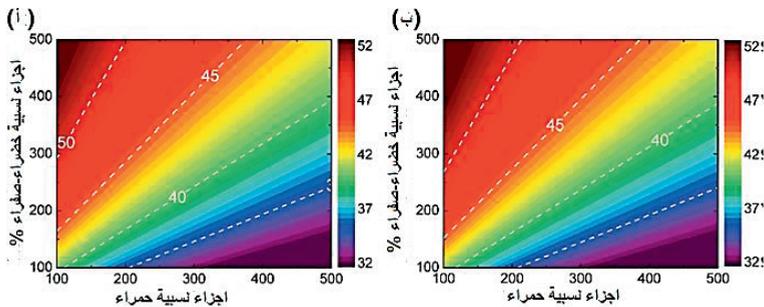
معادلة (٥،٢)

$$\eta_p = \frac{F}{P} = \frac{683.0 \int E_{El}(\lambda) \eta_{oc} V(\lambda) d\lambda}{\int E_{El}(\lambda) \frac{1}{\eta_{int}} \frac{qV\lambda}{hc} d\lambda}$$

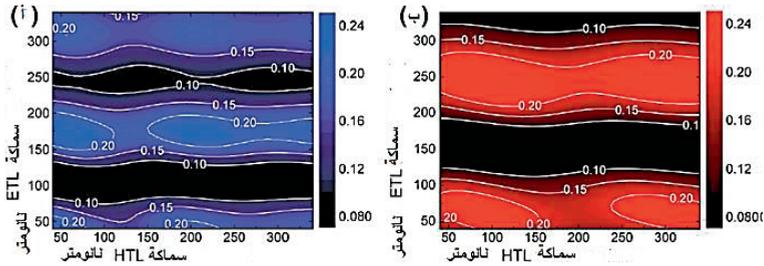
حيث إن $E_{\text{el}}(\lambda)$ و η_{oc} هما تدفق الإشعاع الطبيعي، وكفاءة الترابط الخارجي لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، و η_{int} هي الكفاءة الداخلية بمعنى كمية الإكسيتونات اللازمة للحصول على ١ فوتون، و $V(\lambda)$ هو منحنى الاستجابة الضوئية، و $h\nu$ هو ثابت بلانك و C سرعة الضوء، و V جهد التشغيل، و (λ) الطول الموجي و $(hc/qV\lambda)$ يمثل العلاقة بين الطاقة الضوئية للفوتون والطاقة اللازمة للحصول على الإكسيتون. شكل (٥،٤) يوضح نموذج محاكاة للكفاءة الضوئية لطيف الانبعاث الأبيض الافتراضي (SW) ل $\text{Ir}(\text{itpim})_3$ و Flrpic بواسطة المعادلة (٥،٢)، ويمكن أن نرى أن الكفاءة الضوئية المحسوبة لاثنتين من العوامل المطعمة الزرقاء تكون متشابهة الكفاءة الضوئية، وتتأثر الإضاءة بشكل كبير بنسب الانبعاث الأصفر - الأخضر كما نرى عند زيادة جزء الانبعاث الأصفر - الأخضر فإن الكفاءة الضوئية ل W الثنائيات العضوية الباعثة للضوء تزيد بشكل طردي، وهذا يعني أن الانبعاث العالي ل(EL) عند وجود طول موجي قصير ليس بالضرورة أن ينتج كفاءة ضوئية عالية؛ لذلك فإن إجمالي أداء أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الجيد يمكن تحديده بواسطة تحسين سمك ETL و HTL، وشكل (٥،٥) يوضح أجزاء المنحنى من EQE للانبعاث الأزرق والأحمر كدالة لسمك HTL و ETL بواسطة المحاكاة الضوئية.

جدول (٥،١). يوضح كفاءة CRI و CIE لأجهزة T (الثنائيات العضوية الباعثة للضوء) البيضاء المصنعة ل $\text{Ir}(\text{itpim})_3$ و Flrpic .

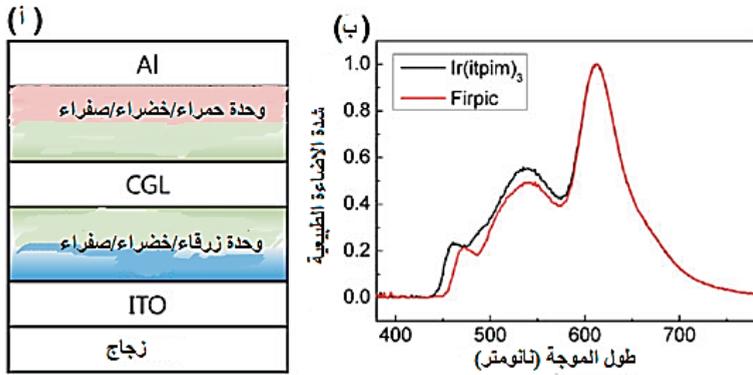
	EQE (%)	PE (lm/W)	CRI	Color coordinate
$\text{Ir}(\text{itpim})_3$	39.86	38.34	90.94	(0.452, 0.439)
Flrpic	36.58	35.63	88.76	(0.475, 0.449)



شكل (٥،٤). يوضح نموذج محاكاة للكفاءة الضوئية لطيف الانبعاث الأبيض الافتراضي مع $\text{Ir}(\text{itpim})_3$ (أ) و Flrpic (ب) طبقاً للمحور السيني الأحمر والمحور الصادي للأصفر والأخضر. [16]



شكل (٥,٥). جوانب المنحنى لـ EQE للانبعاث الأزرق (أ) والانبعاث الأحمر (ب) كدالة لسلك كل من HTL و ETL، وعوامل المحاكاة تتضمن سمك HTL ، ETL ، والتي تتراوح من (50 إلى 350 نانومتر) في تركيب الجهاز المصنوع من الزجاج أكسيد قصدير الإنديوم (ITO) [16]. (70 nm)/HTL (x nm)/ EML (10 nm)/ETL (y nm)/Al (100 nm).



شكل (٥,٦). يوضح (أ) رسمًا تخطيطيًا لمقطع جزئي (ب) أطيايف الانبعاث (EL) لأجهزة (T) الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (البيضاء لـ [16]. Firpic و Ir(itpim)₃

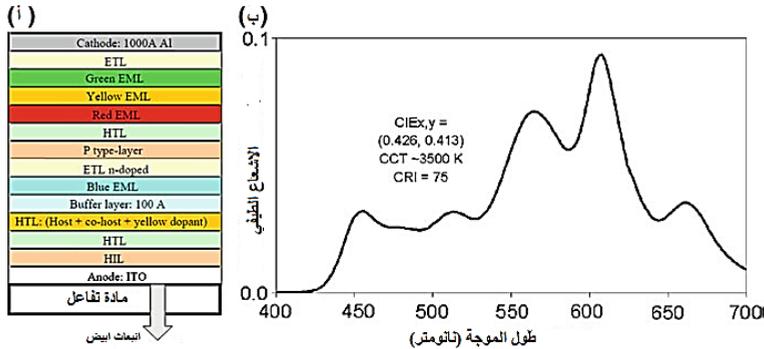
ومن الواضح أنه من أجل الحصول على أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء عالية الكفاءة، فإنه يجب اختيار سمك ETL و HTL، ولأن سمك ETL يحدد المسافة بين (EML) والكاثود العاكس؛ لذلك فإن تأثير سمك (ETL) يكون مؤثراً بشكل أكبر من سمك (HTL)، ومن خلال المحاكاة والتحسين فإن الترتيب الأمثل الذي يجب الحصول عليه لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (البيضاء هي :

Glass/ITO (70 nm)/HTL (190 nm)/blue: yellow-green EML (10 nm)/ETL (20 nm)/CGL (50 nm)/HTL (45 nm)/yellow-green: red EML (10 nm)/ETL (70 nm)/ LiF/Al

حيث إن المخططات للمقاطع الجزئية لهم موضحة في الشكل (٥,٦ أ)، والشكل (٥,٦ ب) يوضح أطيايف الانبعاث (EL) للأجهزة البيضاء لـ Ir(itpim)₃ و Firpic، وقياسات الكفاءة و CRI تم تلخيصها في الجدول (٥,١)، ويمكن أن نرى أن أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (البيضاء لـ Ir(itpim)₃) لديها قيمة (CRI) أكبر من (Firpic)؛ لذلك فإن الانبعاث الأعلى عند الطول الموجي الأقصر تجعل من الممكن تحقيق قيمة (CRI) أعلى من 90، وتظهر بعض الكفاءات الأعلى قليلاً لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (البيضاء مع Ir(itpim)₃) أكثر من (Firpic) بسبب أن الوحدة الزرقاء نفسها لها كفاءة مختلفة عن العوامل المطعمة الأخرى.

(٥,٢) الاستشعاع الضوئي للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء الأبيض

نظرًا لمزايا العمر الطويل والتكلفة الضئيلة للمواد المضيفة المستخدمة في تصنيع أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء لذلك يبذل الجميع جهودًا من أجل تعزيز كفاءة التوهج لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء.

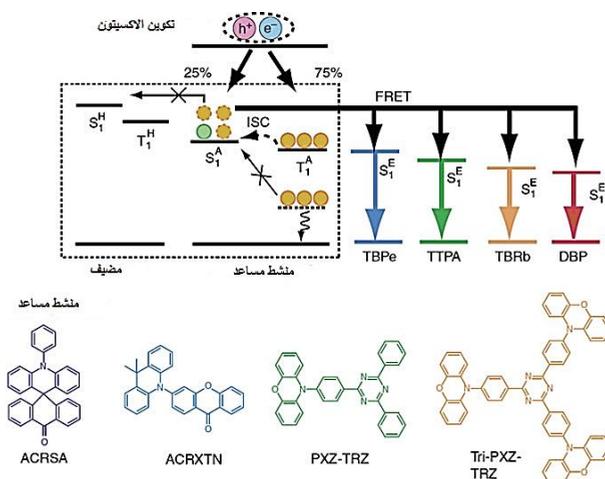


شكل (٥,٢). أ- يوضح مخططاً بيانياً للتركيب، ب- طيف EL لاثنتين من أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الترادفية البيضاء المضيفة. [20]

وعلى الرغم من ذلك تعيق الكفاءة الداخلية نتيجة لوجود ٢٥٪ من انبعاث الأكسيتون الأحادي مجال التطبيق في الإضاءة التراكيب الترادفية أصبحت واحدة من الطرق الأساسية لتحسين كفاءة أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيفة [18,19]، وشكل (٥,٢) يوضح تركيب اثنين من أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الترادفية البيضاء [20]، وفي هذا الجهاز وحدة الانبعاث ("R/Y/G") ووحدة الانبعاث الأخرى ("Y/B") يتم الاتصال بينهما بواسطة طبقات توليد الشحنات المتكونة من الوصلة غير المتجانسة المطعمة من النوع P وN، وطيف الانبعاث EL موضح في الشكل (٥,٢) حيث إن مدى الطيف الواسع يلبي متطلبات اللون من أجل عملية الإضاءة. هذا الجهاز لديه CCT حوالي 3500 K ولون ضمن مواصفات الطاقة SSL مع CRI حوالي (٧٥)، وهذا الجهاز أيضاً لديه كفاءة عالية وعمر افتراضي طويل، حيث كفاءة التيار (38 cd/A) وكفاءة الطاقة تقريباً (20 lm/W) عند جهد تشغيل يساوي ٦ فولت يمكن تحقيقه، والكفاءة الخارجية تصل إلى ١٣,٩٪، والعمر الافتراضي يقدر ليصبح (١٤٠,٠٠٠ ساعة) عند بداية الإضاءة لـ (1000 cd/m²)، وإذا أخذنا في الاعتبار تقنية استخلاص الضوء فإن كفاءة الطاقة كنفس أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الترادفية البيضاء سوف تصبح أعلى بكثير من (40 lm/W) من الكفاءة المتوقعة والعمر الافتراضي الذي تم تحقيقه من قبل. وهذا يوضح أن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الترادفية البيضاء المعتمدة على المواد الباعثة للضوء تمثل اختياراً جيداً للحصول على الجيل الأول من أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المضيفة ذات الحالة الصلبة، والتي تمتلك العمر الافتراضي الطويل كأهم متطلب حرج. ويمكن الحصول على هذه الأجهزة بواسطة استخدام جزئيات TADF كجزئيات مساعدة منشطة، والتي تسمح بحدوث عملية نقل فعالة للإكسيتونات الأحادية والثلاثية المتولدة كهربياً من العوامل المنشطة المساعدة لمواد الانبعاث المتوهجة. ومع ذلك، من حيث الكفاءة، فإنه لا يزال لا يلبي متطلبات تطبيقات الإضاءة. من المتوقع أن نحقق طفرة في المواد الفلورية، وبالتالي تعزيز كفاءة التوليد الأبيض المتوهج الناتج. طريق بديل يستخدم التآخر المتأخر حرارياً (TADF) المواد التي تم

تطويره بنجاح بواسطة [21] Adachi et al. في عملية TADF، يمكن استخراج انبعاث الضوء على أنه توهج متأخر بعد عبور بين الأنظمة (ISC) من حالات T1 إلى S1 في جزيئات TADF، مما يؤدي إلى كفاءة الاضمحلال الإشعاعي من الحالة S1. لذلك، يمكن لمواد TADF تحقيق التآلق الثنائيات العضوية الباعثة للضوء مع ما يقرب من ١٠٠٪ من انبعاث الإكسيتونات [٢٢، ٢٣]، بما في ذلك كفاءة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الفلورية البيضاء [24، ٢٥]. على سبيل المثال، Adachi et al. [23] أوضح الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الفلورية عالية الكفاءة مع EQE يصل إلى ١٣,٥ و ١٥,٨ و ١٨ و ١٧,٥٪ للألوان الأزرق والأخضر والأصفر والأحمر. على التوالي. وقد تم التوصيل لهذه الأجهزة من خلال استخدام جزيئات TADF كمنشطات مساعدة تسمح بنقل فعال لجميع الإكسيتونات المفردة والثلاثية المولدة كهربائياً من المطاعم المساعدة إلى بواعث الفلورسنت.

الرسم التخطيطي يوضح آلية نقل الطاقة المقترحة في المواد الباعثة مع العوامل المنشطة المساعدة تحت وجود استثارة كهربية التراكيب الكيميائية للمواد المنشطة المساعدة المستخدمة في هذه الدراسة، موضح في الشكل (٥,٨) ثم يلخص الجدول (٥,٢) أداء EL لجهاز الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ذات الأربعة ألوان مع العوامل المنشطة المساعدة، ويمكن أن نرى أن كفاءة الطاقة لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الزرقاء والخضراء والصفراء والحمراء تصل إلى (١٨ و ٤٧ و ٥٨ و ٢٨) وتظل ثابتة عند إضاءة (٧ و ٣٠ و ٣٣ و ١٠) عند (1000 cd/m²) على التوالي، والتي تعتبر أعلى بكثير من أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المضيئة النقية، وعلاوة على ذلك فإن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيئة عالية الكفاءة ذات كفاءة قصوى تصل إلى (٢, ١٨ و ٤٤,٦ و ٤٤,٦) lm/W يمكن أيضاً تحقيقها بواسطة التحكم الاستراتيجي للإكسيتونات الأحادية والثلاثية خلال منطقة الانبعاث الفعالة الشكل (٥,٩) يعطي تركيب الجهاز مع مستويات الطاقة وعمليات الإكسيتون لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيئة التي تم تصميمها، وأيضاً التركيب الجزيئي للمواد العضوية المستخدمة في الجهاز، وتتكون EML من اثنتين من وحدات EMLs الفرعية الحمراء والخضراء.



شكل (٥,٨). مخطط توضيحي لآلية نقل الطاقة في المواد الباعثة مع وجود مواد منشطة مساعدة عند حدوث الاستثارة الكهربائية والتركيبات الكيميائية للمواد المنشطة المساعدة المستخدمة في هذه الدراسة T و S يعبر عن الحالات الأحادية والثلاثية على الترتيب A و E و H يعبر عن المواد المنشطة المساعدة والمادة الباعثة والمضيف على الترتيب. [23]

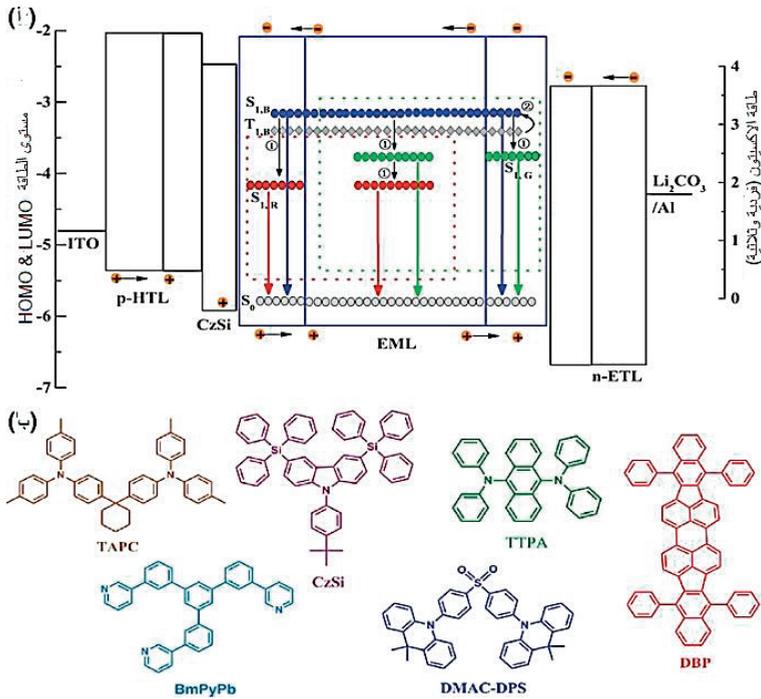
جدول (٥,٢). ملخص لأداء EL لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ذات الأربعة ألوان مع وجود عوامل منشطة ثلاثية للتجميع الثلاثي. [23]

Device	Turn-on voltage (V)	Max EQE (%)	Max CE (cd/A)	Max PE (lm/W)	CIE	Performance at 1,000 cd/m ²			
						Voltage (V)	EQE (%)	CE (cd/A)	PE (lm/W)
Blue	4.7	13.4	27	18	(0.17,0.30)	7.8	8.7	18	7
Green	3.0	15.8	45	47	(0.29,0.59)	4.1	11.7	38	30
Yellow	3.2	18.0	60	58	(0.45,0.53)	5.2	17.2	56	33
Red	3.0	17.5	25	28	(0.61,0.39)	6.4	10.9	20	10

الثنائيات العضوية الباعثة للضوء هو الموصل الثنائي الباعث للضوء، وCE هي كفاءة التيار، وCIE لجنة الإضاءة الدولية، وEQE الكفاءة الكمية الخارجية للإلكترونات المضيئة وPE كفاءة الطاقة. الجدول (٥,٣) يوضح ملخصاً لأداء أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيئة التي تم تصميمها عند وجود تركيز ضئيل للغاية من المواد المنشطة وعند استخدام وحدة فرعية مطعمة من EML ذات الصبغات المضيئة الحمراء والخضراء بتركيزات عالية نسبياً تم تصميمها خصيصاً للحصول على كل الإكسيتونات المتولدة إلكترونياً ولتقليل فقدان الطاقة لأقصى درجة، ومع ذلك فإن الأجهزة ظلت تتمتع بكفاءة عالية تصل إلى (16.2)، 27.2 lm/W عند 1000 cd/m² والتي سوف تفي بمتطلبات الإضاءة العملية بمساعدة تكنولوجيا الاقتران الخارجي، وأداء EL تم تلخيصه في الجدول (٥,٣) لذلك يعتقد أنه يجب تصنيع أجهز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيئة التي تحقق كفاءة المصابيح الفلورية وذلك من خلال استخدام مواد مضيئة عالية الكفاءة واستخدام تصميم استراتيجي للحصول على تركيبات أجهزة عالية الكفاءة.

(٥,٣) الوصلات الثنائية العضوية البيضاء الباعثة للضوء الفسفوري المضيء

من المعروف أن الجزيئات العضوية الفسفورية المضيئة كمواضع انبعاث في أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء يمكنها تحقيق ١٠٠٪ من الكثافة الكمية الداخلية بسبب تجميع كل الإكسيتونات الأحادية والثلاثية [26]؛ لذلك فإن استخدام الجزيئات العضوية الفسفورية المضيئة هي أفضل طريقة لتصنيع أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء بيضاء من أجل الحصول على كفاءة عالية على الرغم من أن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الفسفورية المضيئة مازالت لها بعض المشاكل وهي العمر الافتراضي القصير للفسفور الأزرق وأيضاً تناقص الكفاءة عند الإضاءة العالية [27]؛ لذلك من المشجع أن التركيبات الترادفية يمكنها حل المشاكل السابقة نوعاً ما بسبب عمل أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء بشكل نسبي عند جهد انحياز منخفض، لذلك فإن هذا يكون فعالاً بشكل أكبر لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الدافئة نتيجة لوجود كمية صغيرة من انبعاث الضوء الأزرق، لذلك حتى الآن فإن أفضل جهاز الثنائيات العضوية الباعثة للضوء مازال يصنع من المواد الفسفورية المضيئة والتركيبات الترادفية. [28]

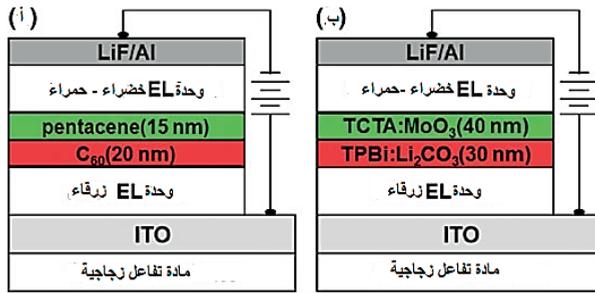


شكل (٥,٩). تركيب الجهاز مع مستويات الطاقة وعمليات الأكسيتون لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيئة التي تم تصميمها والتراكيب الجزئية للمواد العضوية المستخدمة في الجهاز [25].

جدول (٥,٣). يوضح ملخصاً لأداء EL لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المضيئة المصممة.

	V_{on} (V)	EQE/CE/PE (%/cd/A/m/W)			CIE(x,y)	CRI
		Maximum	At 500 cd/m ²	At 500 cd/m ²		
Device W1	2.8	13.6/33.5/33.6	13.0/32.2/24.7	12.2/30.1/21.0	(0.306,0443)	72
Device W2	2.8	14.2/32.8/34.7	13.9/32.0/25.1	12.9/29.9/20.8	(0.314, 0434)	76
Device W	2.8	18.2/40.9/44.6	17.2/38.9/32.2	16.2/36.4/27.2	(0.318, 0.390)	82

من المعروف من خلال التجارب أن الوصلات غير المتجانسة العضوية من النوع N/P كطبقات لتوليد الشحنات CGLs يمكنها تعزيز كفاءة الطاقة لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المصنعة [29]؛ وبناءً عليه فإن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء القائمة على استخدام الوصلات غير المتجانسة العضوية N/P كطبقات لتوليد الشحنات قد تم تصنيعها بنجاح [30,32]، وقد وجدوا أن كفاءة الطاقة تم تعزيزها وتأثير عملية التناقص قد تم انخفاضه بشكل كبير مقارنة بأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المعتمدة على طبقات توليد الشحنات التقليدية، وشكل (٥,١٠) يوضح تراكيب أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المصنعة ذات الألوان الثلاثة الفسفورية المضيئة المعتمدة على الوصلة غير المتجانسة العضوية N/P كطبقات لتوليد الشحنات. والتي تتضمن الوصلات غير المتجانسة وغير المطعمة C₆₀/pentacene.



شكل (٥،١٠). رسم تخطيطي لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض المصنعة القائمة على الوصلات غير المتجانسة العضوية N/P كطبقات لتوليد الشحنات

حيث أ- الوصلة غير المتجانسة العضوية غير مطعمة C60/pentacene

و ب- الوصلة غير المتجانسة العضوية المطعمة (TPBi:Li₂CO₃/TCTA:MoO₃) [30].

شكل (٥،١٠) والمطعمة (TPBi:Li₂CO₃/TCTA:MoO₃) شكل (٥،١٠) في الجهاز فإن EMLs تتجمع معًا بواسطة

الوحدة الفسفورية المهيئة الخضراء- الحمراء مع الوحدة الفسفورية المهيئة الزرقاء بواسطة طبقات توليد الشحنات.

الشكل (٥،١١) يوضح خصائص EL لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض المعتمدة على الوصلات

غير المتجانسة C60/pentacene و (TPBi:Li₂CO₃/TCTA:MoO₃) كطبقات لتوليد الشحنات CGLs.

وكما هو موضح في الشكل (٥،١١) فإن الجهاز (b) له جهد تشغيل ٥,٥ فولت، وأيضًا الجهود العملية تبلغ (6.7

فولت عند 100 cd/m²) و (8.3 فولت عند 100 cd/m²)، وعلى الرغم من ذلك فإن جهد التشغيل ينخفض إلى ٥,١ فولت

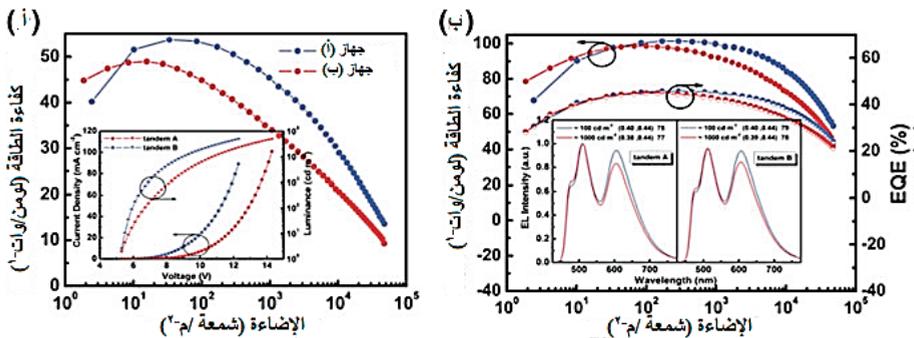
والجهود العملية (0.6 فولت عند 100 cd/m²) و (6.9 فولت عند 100 cd/m²) وذلك باستخدام الوصلة غير المتجانسة

العضوية C60/pentacene كطبقات لتوليد الشحنات في الجهاز (a) وهذا يشير إلى أن طبقات توليد الشحنات للوصلة

غير المتجانسة العضوية C60/pentacene لديها خصائص كهربية أفضل من الوصلة غير المتجانسة

(PBi:Li₂CO₃/TCTA:MoO₃) كطبقات لتوليد الشحنات، لذلك فإن أقصى CE و EQE و PE للجهاز (a) تصل إلى (101.5

cd/A و 53.8 lm/W) على التوالي.



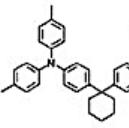
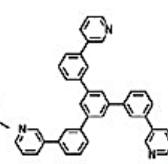
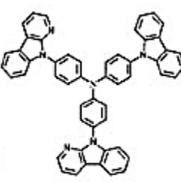
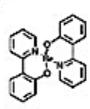
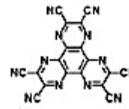
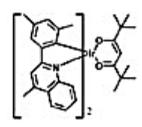
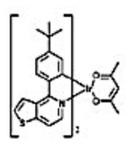
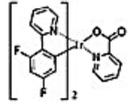
شكل (٥،١١). يوضح: أ- كفاءة الطاقة مقابل خصائص الإضاءة لخصائص منحني (J_V_L)، ب- كفاءة التيار والكفاءة الكمية الخارجية مقابل

خصائص الإضاءة. في الشكل الداخلي: أطراف الانبعاث EL يمكن تحديدها إلى إضاءة تصل (100 و 1000 cd/m²). [30]

وبالرغم من أن الوصلة (TPBi: Li₂CO₃/TCTA: MoO₃) كطبقة توليد للشحنات تؤدي إلى الحصول على قيمة EQE. CE عالي، والتي تصل إلى (cd/A ٩٨,٦ و ٤٤,٩%) على التوالي، مما يشير إلى أن طبقات توليد الشحنات CGL تكون فعالة كما سبق ذكره، ولكن القيمة القصوى لـ PE تصل إلى (48.7 lm/W) والتي تكون منخفضة نتيجة لجهد التشغيل العملي العالي، وللأهمية يمكن أن نرى أن استخدام الوصلة غير المتجانسة العضوية C₆₀/pentacene كطبقات لتوليد الشحنات تحسن بشكل كبير من كفاءة عملية التدهور (التناقص) لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المصنعة، وكفاءة الجهاز (أ) تنخفض بشكل ضئيل لتصل إلى (١٠٠٠ cd/m² و 45.5% cd/A) و (١٠٠٠ cd/m² و 45% و 100 cd/m² عند 16% عند (lm/W) وعند المقارنة فإن كفاءة عملية التدهور (التناقص) الحاسمة يتم الحصول عليها في الجهاز (ب) القائم على استخدام (TPBi: Li₂CO₃/TCTA: MoO₃ CGL) كطبقة لتوليد الشحنات وكما نرى بأن كفاءة الطاقة تنخفض لتصل إلى (34 lm/W عند 1000 cd/m²) مع قيمة عملية التدهور (التناقص) تصل إلى ٢٤٪، وكما هو موضح [29] أن عملية نقل الشحنات الفعالة من pentacene إلى C₆₀ سوف ينتج عنها تراكم للفجوات على الجانب P والإلكترونات على الجانب N في الوصلة غير المتجانسة العضوية C₆₀/pentacene كطبقة لتوليد الشحنات CGL، وتكوين منطقة الفراغ المشحون من نوع التراكم ليس فقط يساعد في الحصول على كميات من الشحنات التي تستخدم لإعادة التركيب بل إنه أيضاً يساعد في تكوين منطقة ذات توصيل كهربائي عالٍ مما يؤدي بشكل كبير إلى انخفاض الجهد في طبقة توليد الشحنات، وأيضاً عملية توليد كميات من الشحنات في الوصلة المتغايرة العضوية C₆₀/pentacene كطبقة لتوليد الشحنات يساعد في تحسين الاتزان للشحنات لذلك يقلل من كفاءة عملية التدهور (التناقص)، وعلى الرغم من ذلك فإن الوصلة غير المتجانسة المطعمة (TPBi: Li₂CO₃/TCTA: MoO₃) ليست لها هذه الخصائص مثل الوصلة غير المتجانسة العضوية C₆₀/pentacene لذلك فإن تكوين وصلة النضوب ومنطقة المقاومة العالية عند واجهه الوصلة (TPBi: Li₂CO₃/TCTA: MoO₃) يؤدي إلى انخفاض الكفاءة وحدوث تدهور (تناقص) شديد.

الشكل الداخلي (١١، ٥ب) يوضح انبعاث الطيف EL لاثنتين من أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء عند (100 و 1000 cd/m²)، حيث إنها سوف تظهر انبعاثاً أبيض بشكل أفضل، ولكن انبعاث الطيف EL المتشابه (يشير إلى أن استخدام الوصلة غير المتجانسة العضوية C₆₀/pentacene لا يؤدي إلى تدخل ضوئي إضافي ولا تأثير الفراغ الصغير جداً. والوصلة غير المتجانسة العضوية (HAT-CN/TAPC) أثبتت أنها يمكن أن تعمل كطبقة توليد شحنات ممتازة. الشكل (١٢، ٥) يوضح رسماً تخطيطياً لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الافتراضية الفسفورية المضيئة البيضاء ذات الألوان الثلاثة والمعتمدة على الوصلة غير المتجانسة العضوية N/P كطبقات لتوليد الشحنات وتراكم المواد المستخدمة [11].

في أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الترادفية البيضاء، الانبعاث الأبيض يتم تحقيقه بواسطة حزمة من وحدة انبعاث الضوء الأزرق، ووحدة انبعاث الأصفر-الأحمر، حيث يتم الاتصال بينهما بواسطة الوصلة غير المتجانسة العضوية (HAT-CN/TAPC) كطبقة لتوليد الشحنات CGL، ووحدة الضوء الأصفر-الأحمر تم تصميمها لتكون تركيباً مزدوجاً لـ (EML) وذلك من أجل تقييد الأكسيتونات بفاعلية، وأيضاً وحدة انبعاث الضوء الأزرق تقع بعيداً عن الكاثود بسبب وجود ظاهرة الاقتران الخارجي للضوء للألوان الثلاثة.

LiF/Al (1.5/100 nm)				
TmPyPB (65 nm)	TAPC	TmPyPB	DACTA	Bepp ₂
Bepp ₂ : 20% Ir(mphmq) ₂ (tmd) (10 or 11 nm)				
Bepp ₂ : 5% Ir(tppy) ₂ (acac) (5 or 4 nm)	HATCN	Ir(mphmq) ₂ (tmd)	Ir(tppy) ₂ (acac)	Flrpic
TAPC (45 or 70 nm)				
HATCN (15 nm)				
Al (1 nm)				
TmPyPB : 30% Rb ₂ CO ₃ (25 nm)				
TmPyPB (15 nm)				
DACTA : 6% Flrpic (15 nm)				
TAPC (45 or 120 nm)				
ITO (150 nm)				
مادة تقاقل زجاجية				

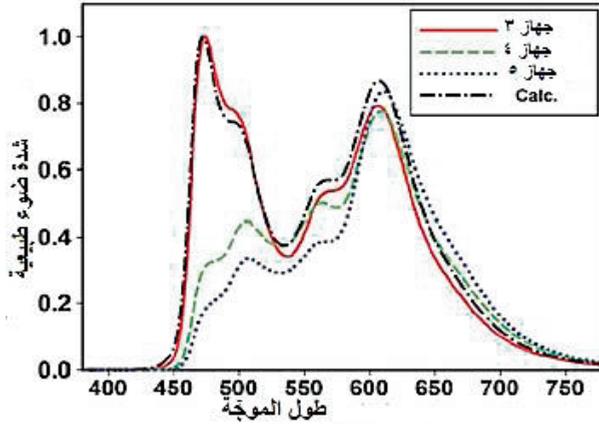
شكل (٥،١٢). يوضح رسماً تخطيطياً لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الافتراضية الفسفورية المضئنة البيضاء ذات الألوان الثلاثة والمعتمدة على الوصلة غير المتجانسة العضوية N/P كطبقات لتوليد الشحنات. [11]

وتركيب كربونات الروبيديوم المطعم (1) $3 \cdot Rb_2CO_3 \cdot [5\text{-tri}[(3\text{-pyridyl})\text{-phen-3-yl}]]_2$ ، والبيزيرين (TmPyPB) ك ETL، وطبقة ألومنيوم (Al) رفيعة قريبة من طبقة (HAT-CN) لتعزير حقن الإلكترونات من طبقات توليد الشحنات، وبالنسبة لتركيب الأجهزة المترادفة فإن وضع وحدات ال EML في موقع مقابل للأنود للحصول على الشدة الدائرية حيث إن شدة المدار تكون لها القيمة الأعلى وبالتالي كفاءة الجهاز تصل إلى أقصى قيمة، وبناءً على مبدأ التصميم فإن الجهاز رقم ٣ ذات التركيبي المثالي:

ITO/TAPC (45 nm)/DACTA:6% Flrpic (15 nm)/TmPyPB (15 nm)/TmPyPB:30%Rb₂CO₃ (25 nm)/Al (1 nm)/ HAT-CN (15 nm)/TAPC (45 nm)/ Bepp₂:20% Ir (tptpy) 2 (acac) (5nm)/ Bepp₂:5% Ir (mphmq) 2 (tmd) (10 nm)/ TmPyPB (65 nm)/ LiF(1.5 nm)/Al (100 nm)

قد تم تصنيعه.

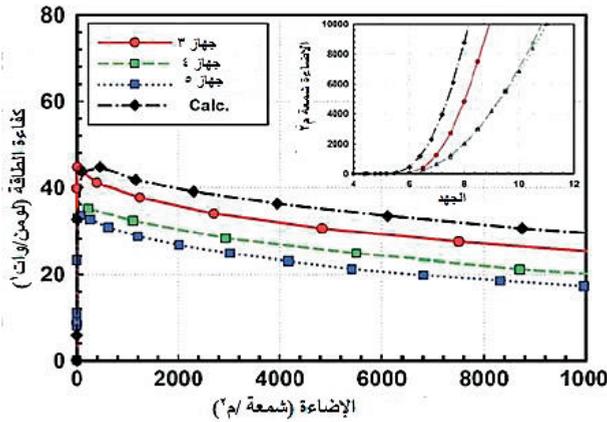
شكل (٥،١٣) يوضح أطياف الانبعاث EL للجهاز رقم ٣ المصنع، حيث نرى أن الجهاز رقم ٣ يبعث معظم أطياف EL بعد أن تم حسابها في الوحدة الواحدة، وقد تم ملاحظة وجود اثنتين من القمم عند ٤٧٢ نانومتر و ٦١٢ نانومتر مما يشكل انبعاثاً أبيض جيداً ذا قيمة CRI تصل إلى ٧١.



شكل (٥، ١٣). يوضح أطوال الانبعاث EL للأجهزة المصنعة ٣ و٤ و٥ والتي أيضاً تم حساب مجموع أطوالها. [11]

وكما هو موضح في الشكل (٥، ١٤) فإن أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء تظهر كفاءة قصوى للطاقة والتي تصل إلى (42.3 lm/W) وتظل عند (38.2 lm/W) عند إضاءة 1000 cd/m². وبالطبع فإن أطوال الانبعاث EL وكذلك CRI يمكن تغييرها بواسطة وضع وحدات EML بعيداً عن الموقع المقابل للأنود طبقاً لكثافة النظام الضوئي، ولذلك فإن الجهاز رقم ٤ ذا طبقة TAPC والتي تبلغ 120 نانو متر، والجهاز رقم ٥ ذا طبقة TAPC تبلغ أيضاً ١٢٠ نانومتر و١٥ نانومتر من EML الأصفر- الأحمر، حيث إن شدة الانبعاث الأزرق تنخفض بشكل كبير جداً لذلك؛ فإن قيمة CRI سوف تزيد لتصل إلى (٨٢ و٨٥) على الترتيب، وعلى الرغم من ذلك يوجد بعض فقدان في الكفاءة من (38.5 إلى 32.5) lm/W للجهاز رقم ٤ و (29.4) للجهاز رقم ٥ بسبب الفقدان الكهربائي والضوئي المحكوم.

شكل (٥، ١٥) يوضح رسماً تخطيطياً لتركيبة أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الفسفورية المضيفة المصنعة والمعتمدة على الوصلة غير المتجانسة العضوية (HAT-CN/TAPC) كطبقة توليد شحنات والتي تم تطويرها بواسطة كيم [10] (Kim) وعلماء آخرين، وانبعاث الضوء الأبيض يمكن الحصول عليه بواسطة المزج بين وحدة انبعاث الضوء البرتقالي ووحدة انبعاث الضوء الأزرق، حيث إن وحدة الضوء البرتقالي تتشكل بواسطة ((Ir(mphmq)₂(tmd)) الأحمر والأخضر ((Ir(ppy)₂(tmd)) ذوي الصبغات الفسفورية المضيفة التي يتم توجيهها بشكل أفقي نحو ثنائي القطب الانتقالي (mCP: B3PYMPM cohost)، بينما وحدة الضوء الأزرق تتكون بواسطة (cohost of mCP) وB3PYMPM المطعم بـ (Flrpic)، لذلك فإن أجهزة TOELD البيضاء عالية الكفاءة ذات قيمة قصوى لـ EQE تصل إلى (54.3%) دون حدوث أي اقتران خارجي وأيضاً تعزيز كفاءة المركبات الناتجة لتصل قيمة EQE (90.6%) عند إضاءة 1000 cd/m² بواسطة التصاق نصف كرة زجاجية متناسبة داخل المادة الزجاجية المستخدمة التي يتم تصنيعها لتحسين تركيب الجهاز باستخدام المحاكاة الضوئية لزيادة الاقتران الخارجي. في الأجهزة موقع وحدات الضوء البرتقالي والأزرق، وسمك الطبقة الكلية يتم تحديده بواسطة استخدام المحاكاة القائمة على نموذج ثنائي القطب الكلاسيكي.



شكل (٥،١٤) يوضح خصائص PE-L للأجهزة المصنعة ٣ و٤ و٥ ويوضح أيضاً خصائص L-V ونتائج الحسابات قد تم إعطاؤها [11].

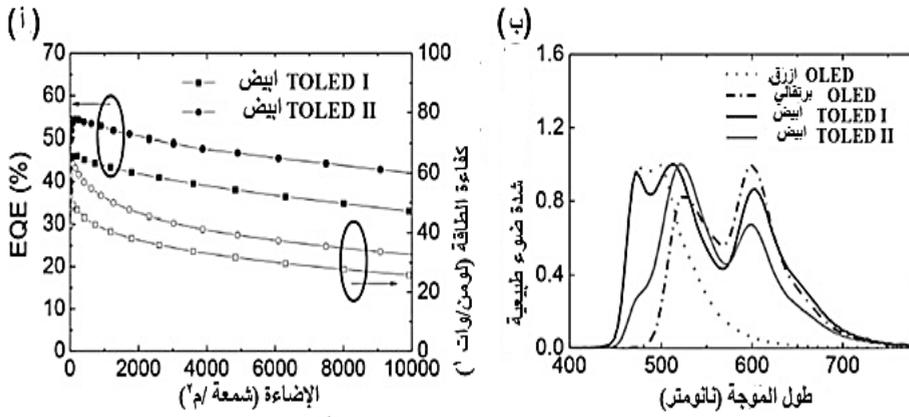
وأخيراً فإن أجهزة IT الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض ذات سمك ٢٠ نانومتر لطبقة (HAT-CN)، وسمك ٤٠ نانومتر لطبقة HTL وأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض ذات سمك ٤٠ نانومتر لطبقة (HAT-CN)، وسمك ٨٠ نانومتر لطبقة HTL يتم الحصول عليهما بشكل جيد.

Al (100 nm)/LiF (1 nm)
B3PYMPM (60 nm)
TCTA:B3PYMPM; Ir(ppy) ₂ (tmd), Ir(mphmq) ₂ (tmd) (1:1; 8/0.2 wt%, 15 nm)
TCTA (10 nm)
TAPC (20 nm)/HATCN (y nm)/ n-BPhen (10 nm, 23 wt%)
n-B3PYMPM (25 nm, 4 wt%)/ B3PYMPM (15 nm)
mCP:B3PYMPM; FIrpic (10 wt%, 15 nm)
mCP (15 nm)
p-mCP(x nm, 4 wt%)
ITO (70 nm)/Glass

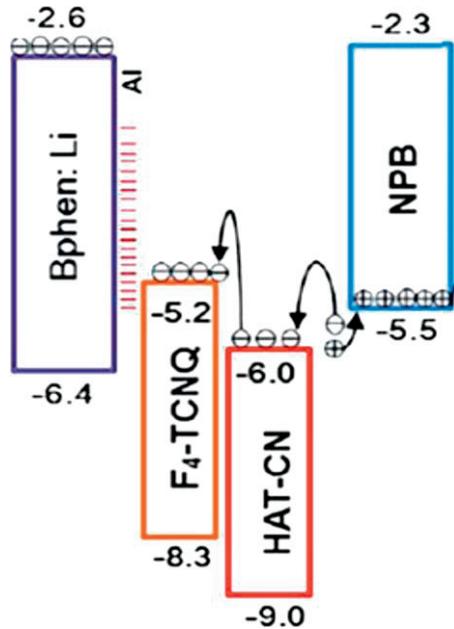
شكل (٥،١٥). يوضح رسماً تخطيطياً لأجهزة IT الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض الفسفورية المضيفة المصنعة المعتمدة على الوصلة غير المتجانسة العضوية (HAT-CN/TAPC) والتي تم تطويرها بواسطة Kim وعلماء آخرين. [10]

شكل (١٦، ٥) يوضح كفاءات EL لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء و T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (١٦، ٥) يوضح كفاءات EL لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء و T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء؛ للضوء II البيضاء الناتجة والتي تظهر قيمًا قصوى لـ EQEs (PEs) 46% و 49% و 54.3% (63 lm/W) على الترتيب؛ لذلك يمكن أن نرى بأن كفاءة التدحرج أيضاً تكون منخفضة مع قيم (41 lm/W) 43.7% (EQEs (PEs) و 52) و 52.6% (lm/W) عند $32.9 \times 10^3 \text{ cd/m}^2$ و 42% عند 10000 cd/m^2 لجهاز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء و T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء II على الترتيب، وقيمة EQE التي تصل إلى (90.6%) وقيمة PE والتي تصل إلى (86 lm/W) عند 10^3 cd/m^2 ، ويمكن تحقيقها من خلال ربط نصف كرة زجاجية متوافقة مع معامل المواد على الركيزة الزجاجية، لذلك فإن قيمة الكفاءة لجهاز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء II ذي الألوان الثلاثة الأولية للانبعاث بدون حدوث استخلاص للضوء، هو الأعلى حتى الآن. وأطياف الانبعاث EL لجهاز I TOLED و II TOLED عند كثافة تيار تصل إلى (1 mA/cm²) كما هو موضح في الشكل (١٦، ٥ ب)، وإحداثيات قيمة الـ CIE تكون (0.391، 0.327) و (0.359، 0.500) لجهاز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء و T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء II على الترتيب وقيم CCT و CRI تكون (٥٦٨٥ K و 71) لجهاز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، وأيضاً تصل إلى (4989 K و 63) لجهاز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء II، لذلك يمكن أن نرى أن أداء الجهاز المستخدم يتغير بشكل كبير بتغير العوامل المتحكمة في سمك الجهاز. ويمكن أن نرى أن عملية حقن الإلكترونات ينتج عنها وجود حواجز أكبر من طبقة توليد الشحنات إلى داخل ETL لوحدة الانبعاث عند استخدام (HAC-CN) وذلك نتيجة لأن الطبقة من النوع N في الوصلة غير المتجانسة العضوية HAT-CN-based كطبقة لتوليد الشحنات لديها مستويات LUMO منخفضة للغاية [33]. قام لياو (Liao) وعلماء آخرون بتصميم طبقة توليد شحنات ثلاثية جديدة tetrafluoro-tetracyanoquinodimethane والتي تتكون من (F4-) (TCNQ)/HAT-CN/NPB، والتي تستخدم لتصنيع أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء فسفورية مضيئة عالية الكفاءة [9]، وشكل (١٧، ٥) يوضح مخططاً لمستوى الطاقة للوصلة غير المتجانسة (F4-TCNQ/HAT-CN/NPB) كطبقة لتوليد الشحنات لذلك يمكن أن نرى أن تكوين حاجز فعال سوف يعزز من عملية حقن الإلكترونات، وأجهزة الـ T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المصنعة تتصل بواسطة اثنتين من نفس وحدات الضوء الأبيض لـ ITO/HAT-CN (10 nm) /TAPC (45 nm)/SSTF:Flrpic 15 vol.% (19 nm)/SSTF:PO-019 vol.% (1 nm)/TmPyPB (40 nm)/Liq (2 nm) /Al via the F4-TCNQ/HAT-CN/NPB كوصلة غير متجانسة لتوليد الشحنات.

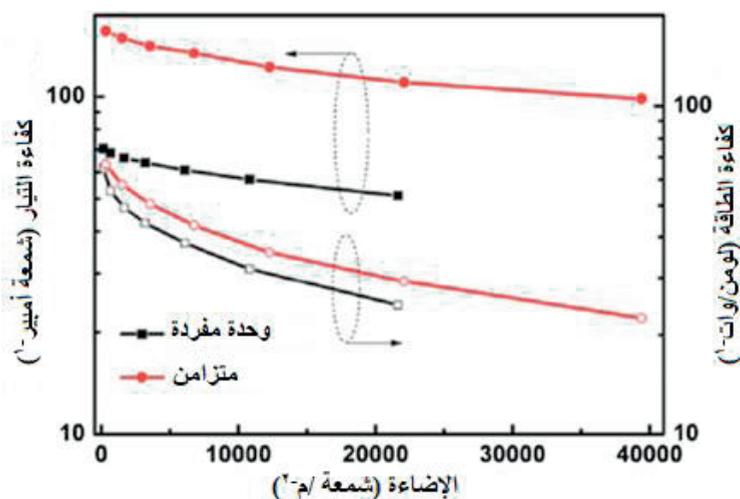
الشكل (١٨، ٥) يوضح كفاءات التيار والطاقة، حيث يمكن أن نرى أن الجهاز الترادفي يحقق كفاءة تيار تصل إلى (152.3 cd/A) وكفاءة طاقة تصل إلى (61.3 lm/W) عند 1000 cd/m^2 والتي تكون أعلى بكثير من الأجهزة أحادية الوحدة (65 cd/A و 52.3 lm/W)، وليس فقط كفاءة التيار التي تتضاعف مرتين ولكن أيضاً كفاءة الطاقة تتحسن بشكل كبير، وهذا يشير إلى أن الوصلة غير المتجانسة العضوية (TCNQ/HAT-CN/NPB) تمتلك عملية حقن ممتازة للشحنات وقدرة على النقل جيدة بدون توليد حواجز إضافية.



شكل (٥،١٦). أ- كفاءات EL ب- أطراف الانبعاث EL عند كثافة تيار تصل إلى 1 mA/cm^2 للأجهزة البيضاء T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء أو T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء II. [10]



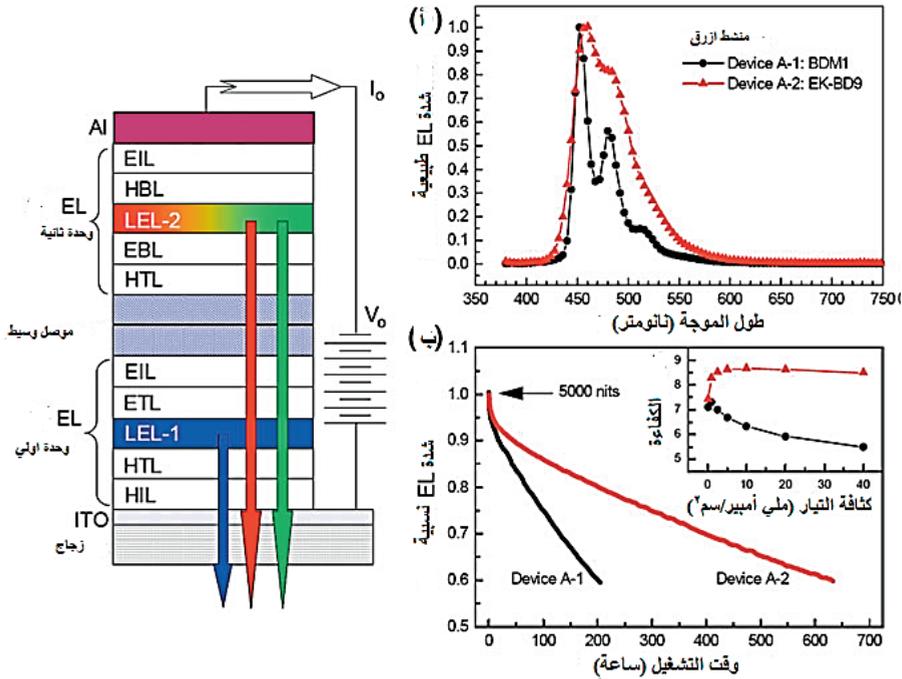
شكل (٥،١٧). يوضح مخططاً لمستوى الطاقة للوصلة غير المتجانسة العضوية (F₄-TCNQ/HAT-CN/NPB) كطبقة لتوليد الشحنات. [9]



شكل (٥,١٨). يوضح خصائص كفاءة الطاقة والتيار لأجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المصنعة والتي تعتمد على الوصلة غير المتجانسة العضوية (F4-TCNQ/HAT-CN/NPB) كطبقة لتوليد الشحنات. [9]

(٥,٤) الوصلات الثنائية الباعثة للاستشعاع/الفسفور الضوئي الهجين للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء كما نعرف أنه على الرغم من أن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الفسفورية المضيئة لها بعض المميزات مثل الكفاءة العالية ولكن العمر الافتراضي القصير للمواد الباعثة المضيئة الفسفورية الزرقاء مازال يقلل من استخدامها في الكثير من التطبيقات، وفي الوقت الحالي أصبحت الطريقة الأمثل هي استخدام تركيب ترادفي هجين، والتي منها الانبعاث الأبيض يمكن تحقيقه بواسطة تجميع الوحدة الفسفورية المضيئة الخضراء-الحمراء (أو البرتقالية) مع الوحدة المستشعة الزرقاء، ولأن هذا المجال يتجنب استخدام الفسفور الأزرق غير ثابت نسبياً؛ لذلك فإن هذه الطريقة تعتبر الأفضل في تجميع الإكسيتونات الأحادية والثلاثية، ولذلك فإن حدوث الكفاءة العالية يصبح محتملاً بشكل كبير [34]، لذلك من الواضح أن الأجهزة الترادفية الهجينة تتفوق في التميز على الأجهزة الترادفية الفسفورية المضيئة والمستشعة، وذلك عندما تكون الكفاءة والعمر الافتراضي والطول المطلوب في مجال تطبيقات الإضاءة.

المبدأ الأساسي لجهاز TOLED الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض الهجين أن واحدة من وحدات EL تمتزج مع المادة الباعثة الفلورية الزرقاء، لذلك فإن وحدة EL المستشعة الزرقاء تعتبر عاملاً حرجاً في تحديد اللون والكفاءة والعمر الافتراضي للأجهزة البيضاء الهجينة، والتأكيد والافتراض مازال مطلوباً لوضع أبحاث متقدمة للمواد المستشعة الباعثة الزرقاء من أجل تحسين أداء أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة.



شكل (٥، ١٩). يوضح مخططاً لتركيب جهاز T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الأبيض الهجين:

أ- أطيايف EL.

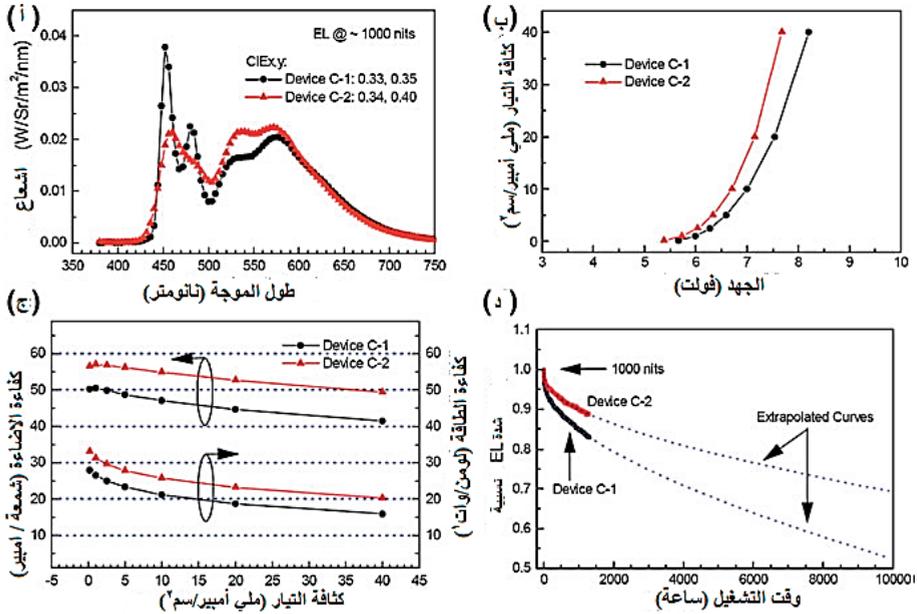
ب- الثبات التشغيلي للجهاز الهجين وأيضاً يوضح خصائص كفاءة التيار وكثافة التيار. [7]

الشكل (٥، ١٩) يوضح رسماً تخطيطياً لتركيب أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الهجينة البيضاء [7] حيث إن وحدة EL الصفراء (LEL-2) هي عبارة عن الفسفور الذي يتم دخوله مع كل من المواد المنشطة الفسفورية الخضراء، وأيضاً مواد منشطة فوسفورية برتقالي بينما وحدة EL الزرقاء (LEL-1) هي عبارة عن وحدة فلوروفسفور متكون من مواد منشطة مستشعة زرقاء ومضيف مستشع منشط، ووحدة EL المستشعة الزرقاء (LEL-1) تتكون بالقرب من الأنود ITO وذلك لأن تأثير عملية تثبيط البلازمون من كاثود الألمونيوم في الانبعاث الأزرق يجب أن يتم تجنبه بهذا الشكل من أجل حصول على أقصى انبعاث أزرق.

المادة الرابطة الوسيطة بعد ذلك تستخدم (HAT-CN/) للوصلة غير المتجانسة العضوية من النوع P كطبقة لتوليد الشحنات، وفي هذه الدراسة اثنان من العوامل المنشطة المستشعة الزرقاء المختلفة (Devices A-1) (BDM1) و (Devices A-2) (EK-BD9) يتم استخدامها للتحقق من تأثير وحدة EL الزرقاء على أداء EL الكلي للجهاز كما هو موضح في الشكل (٥، ١٩-أ، ب)، حيث ينبعث أطيايف انبعاث زرقاء مختلفة وأيضاً كفاءات مختلفة وعمر افتراضي مختلف.

الشكل (٥، ٢٠) يوضح أداء EL لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المصنعة البيضاء الهجينة القائمة على استخدام نوعين مختلفين من الفلوروفسفور الأزرق، ويمكن أن نرى أنه عند استخدام أول وحدة EL (BDM1) فإن الجهاز C-1 يكون لديه انبعاث أزرق أعلى على المدى الطيفي الأبيض مما ينتج عنه قيمة CIE تصل إلى (0.33، 0.35)، وعلى الرغم من ذلك عندما يتم استخدام وحدة EL من EK-BD9 فإن الجهاز C-2 يفقد الانبعاث الأزرق على المدى الطيفي مما ينتج عنه قيم CIE تصل إلى (0.34، 0.40). لذلك فإن الجهاز C-2 يكون لديه جهد تشغيل أقل وكفاءة ضوئية أعلى وكفاءة

طاقة أعلى وعمر افتراضي تشغيلي أطول من الجهاز C-1 مما يؤكد أهمية اختيار الفلوروفسפור الأزرق الفعال من أجل الحصول على أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة عالية الأداء.



شكل (٥,٢٠). يوضح:

أ- أطيف الانبعاث EL.

ب- خصائص الجهد-كثافة التيار.

ج- خصائص كفاءة التيار-كثافة التيار.

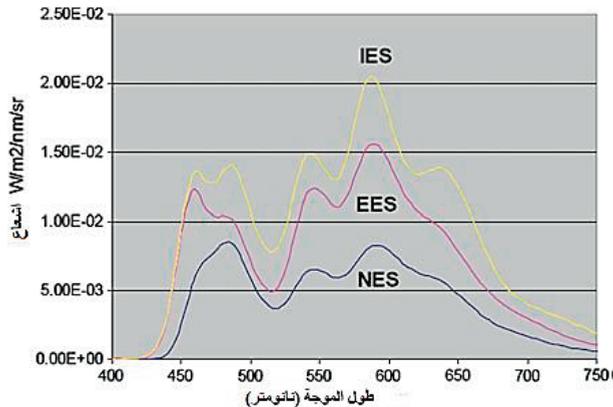
د- الثبات التشغيلي لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة المحتوية على وحدات EL مستشعة زرقاء مختلفة [7].

اعتمادًا على التركيب الأساسي لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة بالأعلى، فإنه باستخدام تركيب استخلاص داخلي (IES) فإن كفاءة أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة سوف تتحسن بشكل كبير [1]، وشكل (٥,٢١) يوضح رسمًا تخطيطيًا لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة المصنعة عند استخدام وبدون مركب استخلاص وفي الأجهزة طبقة توليد الشحنات للوصلة غير المتجانسة العضوية N/P مازالت تستخدم، ووحدة EL الزرقاء المستشعة لديها طبقة انبعاث للضوء أحادية مطعمة بينما وحدة EL الفسفورية المضيفة لديها اثنتان من طبقات انبعاث الضوء، حيث إن الأولى تم تطعيمها باستخدام عامل منشط باعث للضوء الأخضر بينما الثانية بواسطة عامل منشط باعث للضوء الأحمر، لذلك فإن الضوء الأبيض المرغوب يتم الحصول عليه بواسطة ضبط التركيز والسمك للطبقات الباعثة للضوء.

كاتود	كاتود	كاتود
EIL-1	EIL-1	EIL-1
ETL-1	ETL-1	ETL-1
Phosphor-Red	Phosphor-Red	Phosphor-Red
Phosphor-Green	Phosphor-Green	Phosphor-Green
EBL-1	EBL-1	EBL-1
EBL-2	EBL-2	EBL-2
HTL-1	HTL-1	HTL-1
HIL-1	HIL-1	HIL-1
EIL-2	EIL-2	EIL-2
ETL-2	ETL-2	ETL-2
Fluorescent-Blue	Fluorescent-Blue	Fluorescent-Blue
HTL-2	HTL-2	HTL-2
HIL-2	HIL-2	HIL-2
SRL	SRL	SRL
انود	انود	انود
مادة تفاعل زجاجية	مادة تفاعل زجاجية	مادة تفاعل زجاجية
	EES	

شكل (٥،٢١) يوضح رسمًا تخطيطيًا لاستخدام أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة المصنعة مع أو بدون استخدام مركب الاستخلاص [1].

وشكل (٥،٢٢) يوضح أطيف الانبعاث EL لثلاث أجهزة بيضاء عند كثافة تعادل (1 mA/cm²). وقد تم تلخيص عوامل الأداء الناتجة في الجدول (٥،٤)، حيث إن كفاءة الطاقة يتم تعزيزها لتصل إلى (56.0 lm/W) عند (1000 cd/m²) نتيجة لأن قيم IES وCRI تكون عالية لتصل إلى (83.6)، واللون لجهاز IES عند (0.387 و0.389) كان جيدًا بالشكل الكافي لمتطلبات الطاقة لـ 400 KJ يمكن أن نرى أن الانبعاث من الفلوروفوسفور الأزرق يتم ملاحظته عند أقل من ٥٠٠ نانومتر بينما الفلوروفوسفور الأخضر والأحمر يصل إلى ٥٤٥ و٥٩٠ نانومتر على الترتيب.



شكل (٥،٢٢). يوضح أطيف EL لثلاث أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة مع وبدون تركيب الاستخلاص عند كثافة تيار تعادل (1 mA/cm²). [1]

جدول (٥,٤). يوضح مقارنة لعوامل الأداء لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة المصنعة مع وبدون مركب الاستخلاص.

	mA/cm ²	cd/m ²	EQE%	cd/A	CIE-x	CIE-y	V	Im/W	CCT	CRI	EQE/NES
NES	1	453	21.5	45.3	0.380	0.392	5.7	24.8			
EES	1	795	37.0	79.5	0.383	0.378	5.7	43.9	3865	81.1	1.72
IES	1	1022	49.2	102.2	0.387	0.389	5.7	56.0	3836	83.6	2.29

يتم تعزيز الضوء عبر مدى من الطول الموجي نتيجة لدور الاستخلاص لكل من EES و IES من أجل تغيير لون الانبعاث وأيضاً تغيير قيم CCT و CRI .

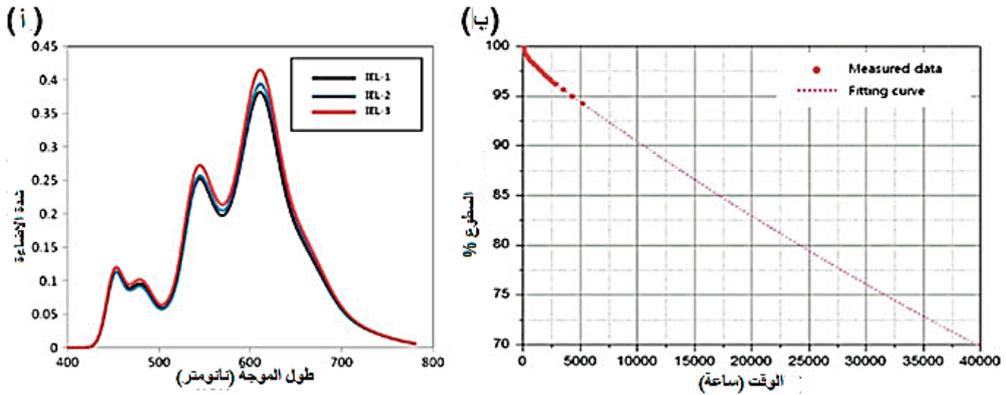
شكل (٥,٢٣) يوضح رسماً تخطيطياً لتركيبة أجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الهجينة البيضاء ذات ثلاث وحدات للانبعاش، والتي تم تصميمها وتصنيعها بواسطة LG [34]، وفي الأجهزة الترادفية الهجينة وحدة EL مضيئة زرقاء يتم وضعها بين اثنتين من وحدات EL الفسفورية البرتقالية المضيئة وبيتهما توجد وصلة متغايرة عضوية من النوع N/P كطبقات لتوليد الشحنات، حيث إن LG101 يستخدم كمادة للطبقة من النوع P وأيضاً عامل أساسي لهذه الأجهزة من أجل تحسين الكفاءة، وتستخدم كلا من طبقة الاستخلاص الضوئي الخارجي عند الواجهة بين الزجاج/الهواء glass/air وطبقة الاستخلاص الضوئي الداخلي عند الزجاج/glass. تستخدم طبقة الاستخلاص الضوئي الداخلي ذات الجزيئات النانوية لتحطيم نظام التوجيه الموجي للضوء المنبعث وتعزز خروج الضوء من الطبقة العضوية إلى الزجاج، وحجم الجهاز يصل إلى (100x100 mm²)، ومساحة انبعاث الضوء تصل إلى (90 × 90 mm²). الشكل (٥,٢٤) - أ ب) يوضح أطراف الانبعاث EL والعمر الافتراضي لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة المصنعة ذات المواد الثلاث المختلفة الداخلية لاستخلاص الضوء على الترتيب.

كاثود
وحدة فسفورية
CGL
وحدة مسننة
CGL
وحدة منفسرة
HIL
TCO
طبقة استخلاص الضوء
زجاج
فيلم استخراج الضوء

شكل (٥,٢٣). يوضح مخططاً لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة ذات ثلاث وحدات للانبعاش تم تصنيعها بواسطة LG [34].

جدول (٥,٥) ملخص لأداء EL لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة مع استخدام ثلاث وحدات للانبعاش. [34]

IEL structure	EQE (%)	P.E. (lm/W)	CCT	Duv	CRI
IEL-1	114	97.3	2828	0.0020	85
ILE-2	117	99.9	2785	0.0021	85
ILE-3	123	105.7	2823	0.0024	85



شكل (٥,٢٤). أ- أطياف الانبعاش EL، ب- العمر الافتراضي لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء الهجينة المصنعة ذات المواد الثلاث الداخلية لاستخلاص الضوء.

تم تلخيص أداء EL في الجدول (٥,٥)، وجهد التشغيل يعادل (8.1 V) كثافة التيار (1.2 mA/cm^2)، وكفاءة الطاقة تصل إلى (105.7 lm/W) عند CCT تقريباً (2823) عند مستوى إضاءة (3000 cd/cm^2)، والأجهزة أيضاً تظهر عمراً افتراضياً طويلاً بقيمة LT70 تقريباً 40,000 ساعة مما يفي بمتطلبات عملية التطبيق.

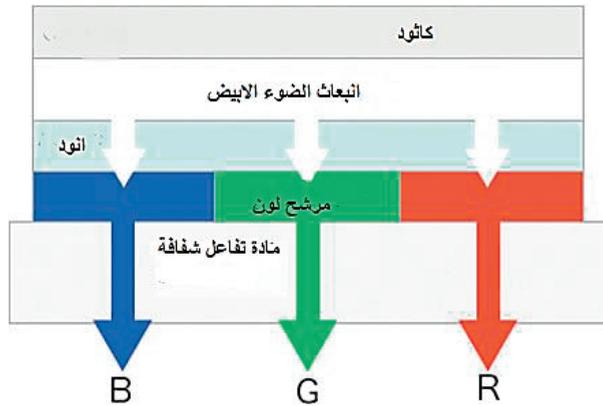
(٥,٥) التطبيقات للثنائيات العضوية الترادفية الباعثة للضوء الأبيض في العرض والإضاءة

نظراً لمزايا الكفاءة العالية (أكثر من 100 lm/W) والعمر الطويل (40000 h)؛ لذلك فإن T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء لها تطبيقات كبيرة في مجالي العرض والإضاءة، وبما أن الصورة هو التطبيق الرئيسي؛ فقد طورت LG اتلفاز الثنائيات العضوية الباعثة للضوء باستخدام تقنية T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء الهجينة المتطورة ليصل إلى (٧٧ بوصة)، ويبين الشكل (٥,٢٥) تلفاز الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (٧٧ بوصة) المطور من قبل (LG)، والتلفاز الكبير الحجم هو قمة الإنجازات التكنولوجية ونموذج جديد سيغير ديناميكيات الجيل القادم بسوق التلفزيون، والطريقة التي تنتج الألوان هي من خلال استخدام مرشحات الألوان RGB وتسمى "طريقة مرشحات الألوان" (الشكل ٥,٢٦).

باستخدام هذه الطريقة فإن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء التي تحتوي على عناصر ألوان الـ RGB تنقي بعد ذلك للحصول على الألوان المطلوبة، ومن الواضح أن الطريقة بسيطة جداً، ولكن بما أن المرشحات المستخدمة بهذه الطريقة تمتص معظم الطاقة الضوئية المنبعثة، فمن الضروري أن يكون الضوء الأبيض قوياً للغاية.



شكل (٥,٢٥). يوضح تلفاز الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ذات الـ (٧٧ بوصة) المطور بواسطة صور LG.



شكل (٥,٢٦). يوضح طريقة تنقية اللون للحصول على صورة ملونة بواسطة الضوء الأبيض.

ولكن أيضًا توجد بعض العيوب، والتي منها ضعف نقاء اللون، وأنها أيضًا على النقيض يكون استهلاك الطاقة لها أعلى، وتتميز مصابيح الثنائيات العضوية الباعثة للضوء باللون الأبيض بمميزات حماية البيئة الخضراء، والحفاظ على الطاقة كمصادر إضاءة كما أنها تتميز بمزايا الإضاءة المسطحة والضوء الناعم والوهج والظل والضوء فوق البنفسجي وتلف الضوء الأزرق وقابلية تعديل درجة حرارة اللون تتميز أيضًا بأنها رقيقة لها مساحة سطح كبيرة ومرنة وشفافة، ويمكن ملاحظة أن مصابيح الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء هي مصادر إضاءة خضراء وصحية حقًا، والتي ستصبح منتجات سائدة في المستقبل، ومن المتوقع أن تستخدم مصابيح الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء على نطاق واسع في الإضاءة الداخلية والإضاءة الزخرفية والإضاءة الطبية وإضاءة السيارات وإضاءة المتاحف وغيرها من المجالات مما يخلق قيمًا اقتصادية هائلة، وفي الوقت الحاضر طورت شاشات LG لوحات إضاءة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء مختلفة الحجم في (الشكل ٥,٢٧) استنادًا إلى تكنولوجيتها الهجينة المتطورة لأجهزة T الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء واستخدمتها في صنع مصابيح حامية للعيون ومصابيح القراءة المكتبية في (الشكل ٥,٢٨) [35].



شكل (٥، ٢٧). يوضح لوحات إضاءة الفنائيات العضوية الباعثة للضوء ذات أحجام مختلفة طورت بواسطة شاشات LG.



شكل (٥، ٢٨). يوضح مصابيح الفنائيات العضوية الباعثة للضوء الحامية للعين والأخرى المخصصة للقراءة المصنعة بواسطة شاشات LG.

القدرة على تصنيع أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء ستصبح قائمة على الركائز المرنة وخاصة البلاستيك وسوف تؤدي قريباً إلى مجموعة جديدة بالكامل من المنتجات شديدة الإبداع في المستقبل، وبالنسبة لشاشات العرض كما هو مبين في الشكل (٥,٢٩) سوف يؤدي ذلك إلى وجود أجهزة عرض قابلة للثني والطي ولها حركة دائرية أيضاً وسوف يتم أيضاً تمكين منتجات الإضاءة المتميزة بدرجة عالية باستخدام أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البلاستيكية على مدى السنوات القليلة المقبلة مما يسفر عن منتجات لا يمكن صنعها أو تصورها باستخدام أي تكنولوجيا عرض أخرى.



شكل (٥,٢٩). أمثلة على مفهوم العرض والإضاءة الجديد التي تتجها أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء البيضاء المرنة والشاشات المتحركة.

ويرد في الشكل (٥,٢٩) مثال للنوع الجديد من الإضاءة المرنة، فالأسطح المرنة تبث ضوءاً خفيفاً بدلاً من المصابيح العالية الكثافة للإضاءة التقليدية، والإضاءة التقليدية تتطلب باعثاً وظلاً من المصباح لإخفاء وهج المصباح في حين أن أجهزة الثنائيات العضوية الباعثة للضوء المرنة ذاتها يمكن أن تصبح المصباح.

المراجع

- [1] Y.S. Tyan, Y.Q. Rao, X.F. Ren, R. Kesel, T.R. Cushman, W.J. Begley, in SID 09 DIGEST, p. 895 (2009).
- [2] Z. Shen, P.E. Burrows, V. Bulovic, S.R. Forrest, M.E. Thompson, Science 276, 2009 (1997).
- [3] M. Fröbel, T. Schwab, M. Kliem, S. Hofmann, K. Leo, M.C. Gather, Light Sci. Appl. 4, e247 (2015).
- [4] H.K. Kim, D.G. Kim, K.S. Lee, M.S. Huh, S.H. Jeong, K.I. Kim, Appl. Phys. Lett. 86, 183503 (2005).
- [5] H. Becker, S.E. Burns, N. Tessler, R.H. Friend, J. Appl. Phys. 81, 2825 (1997).
- [6] C.W. Joo, J. Moon, J.H. Han, J.W. Huh, J. Lee, N.S. Cho, J. Hwang, H.Y. Chu, J.I. Lee, Org. Electron. 15, 189 (2014).
- [7] L.S. Liao, X.F. Ren, W.J. Begley, Y.S. Tyan, C.A. Pellow, in SID Symposium Digest, vol. 39, p. 818 (2008).
- [8] Q. Wang, J.Q. Ding, Z.Q. Zhang, D.G. Ma, Y.X. Cheng, L.X. Wang, F.S. Wang, J. Appl. Phys. 105, 076101 (2009).

- [9] L. Ding, Y.Q. Sun, H. Chen, F.S. Zu, Z.K. Wang, L.S. Liao, *J. Mater. Chem. C* 2, 10403 (2014).
- [10] S.H. Lee, H. Shin, J.J. Kim, *Adv. Mater.* 26, 5864 (2014).
- [11] Y.H. Son, S.K. Kim, J.H. Kwon, *J. Inf. Display* 15, 185 (2014).
- [12] G.F. He, C. Rothe, S. Murano, A. Werner, O. Zeika, J. Birnstock, *J. SID* 17, 159 (2009).
- [13] Y.H. Son, J.M. Lee, B.Y. Kang, J.H. Kwon, in *SID 2015 DIGEST*, vol. 38, p. 561 (2015).
- [14] S. Jang, Y. Lee, M. Park, in *SID 2015 DIGEST*, vol. 46, p. 661 (2015).
- [15] Q. Wang, J.Q. Ding, D.G. Ma, Y.X. Cheng, L.X. Wang, F.S. Wang, *Adv. Mater.* 21, 2397 (2009).
- [16] H. Cho, C.W. Joo, J. Lee, H. Lee, J. Moon, J.I. Lee, J.Y. Lee, Y. Kang, N.S. Cho, *Opt. Exp.* 24, 24162 (2016).
- [17] S. Chhajer, Y. Xi, Y.-L. Li, Th Gessmann, E.F. Schubert, *J. Appl. Phys.* 97, 054506 (2005)
- [18] P.C. Yeh, S.W. Hwang, J.W. Ma, M.H. Ho, S.F. Hsu, C.H. Chen, in *SID 07 DIGEST*, p. 871(2007).
- [19] T.K. Hatwar, J.P. Spindler, in *SID 08 DIGEST*, p. 814 (2008).
- [20] J.P. Spindler, T.K. Hatwar, *J. SID* 17, 861 (2009).
- [21] H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura, C. Adachi, *Nature* 492, 234 (2012).
- [22] D.D. Zhang, L. Duan, C. Li, Y.L. Li, H.Y. Li, D.Q. Zhang, Y. Qiu, *Adv. Mater.* 26, 5050 (2014).
- [23] H. Nakanotani, T. Higuchi, T. Furukawa, K. Masui, K. Morimoto, M. Numata, H. Tanaka, Y. Sagara, T. Yasuda, C. Adachi, *Nat. Commun.* 5, 4016 (2014).
- [24] T. Higuchi, H. Nakanotani, C. Adachi, *Adv. Mater.* 27, 2019 (2015).
- [25] Z.B. Wu, Q. Wang, L.L. Yu, J.S. Chen, X.F. Qiao, T. Ahamad, S.M. Alshehri, C.L. Yang, D.G. Ma, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 28780 (2016).
- [26] H. Yersin, *Top. Curr. Chem.* 241, 1 (2004).
- [27] C. Murawski, K. Leo, M.C. Gather, *Adv. Mater.* 25, 6801 (2013).
- [28] V.I. Adamovich, P.A. Levermore, X.Xu, A.B. Dyatkin, Z. Elshenawy, M.S. Weaver, J. J. Brown, *J. Photon. Energy* 2, 021202-1 (2012).
- [29] Y.H. Chen, Q. Wang, J.S. Chen, D.G. Ma, D.H. Yan, L.X. Wang, *Org. Electron.* 13, 1121 (2012).
- [30] Y.H. Chen, J.S. Chen, D.G. Ma, D.H. Yan, L.X. Wang, *Appl. Phys. Lett.* 99, 103304 (2011).
- [31] Y.H. Chen, H.K. Tian, J.S. Chen, Y.H. Geng, D.H. Yan, L.X. Wang, D.G. Ma, *J. Mater. Chem.* 22, 8492 (2012).
- [32] Q. Wang, Y.H. Chen, J.S. Chen, D.G. Ma, *Appl. Phys. Lett.* 101, 133302 (2012).
- [33] E. Oha, S. Park, J. Jeong, S.J. Kang, H. Lee, Y. Yi, *Chem. Phys. Lett.* 668, 64 (2017).
- [34] S. Jang, Y. Lee, M. Park, in *SID 2015 DIGEST*, vol. 46, pp. 661 (2015).
- [35] www.light.com. الثنائيات العضوية الباعثة للضوء.

ثبت المصطلحات

إنجليزي - عربي

Accumulation	A	التراكم
Capacitance-voltage characteristics	C	خصائص الجهد والسعة
Charge Generation Layer		طبقات توليد الشحنات
Charge transport		نقل الشحنات
Current-voltage characteristics		خصائص الجهد والتيار
Depletion junction	D	وصلة استنفاد
Display		عرض
Electron injector	E	حاقن الإلكترون
Energy band profiles		ملامح نطاق الطاقة
Energy band profiles		شكل نطاق الطاقة
Exciton		إكسيتون
Fluorescence	F	ضوئي
Heterojunction	H	وصلة غير متجانسة
Hole		فجوة
Hybrid		هجين

	L	
Lighting		إضاءة
Light-Emitting		باعثة للضوء
Light-Emitting Diodes (OLEDs)		الثنائية الباعثة للضوء
	P	
Phosphorescence		فسفوري
	S	
Semiconductor		أشباه موصلات
Singlet		أحادي
Space Charge Limited Current (SCLC)		التيار المقيد في الفراغ المشحون
	T	
Tandem		ترادفي
Triplet		ثلاثي

كشاف الموضوعات

ض	أ
ضوئي، ١٢٦، ١٥٤	أحادي، ١٠٤، ١١٨، ١١٩، ١٢٥، ١٣٠، ٤٤، ٧٩
ط	أشباه موصلات، ١٣١
طبقات توليد الشحنات، ٣٧، ٣٨، ١٠١، ١٠٤، ١٠٦، ١٠٧، ١٠٩، ١١٢، ١١٩، ١٢٥، ١٢٦، ١٤٤، ١٤٩، ١٥٢، ١٥٣، ١٥٤، ١٥٥	إضاءة، ١٠٦، ١١٢، ١١٥، ١٢٥، ١٤٣، ١٤٤، ١٥٠، ١٥٣، ١٥٦، ١٦٥، ١٦٦، ١٦٧، ٣٥، ٧٣، ٧٨، ٨٢، ٩٠، ٩١
ع	ب
عرض، ٦، ٣٠، ٣١، ٣٩، ٥٨، ٩٦، ١٦٨	باعثة للضوء، ١٢٤، ٥٧، ٧١
ف	ت
فجوة، ٢، ١١، ٣٤، ٤٤، ٦٤، ٧١، ١٠١، ١٢٨	ترادفي، ١٦٠
ن	تراكم، ٢٤، ٢٥، ٢٦، ٣٠، ٣١، ٣٤، ٣٦، ٣٧، ٦٤، ٦٩، ٩٨، ١٠٧، ١١٠، ١١١، ١١٧، ١٢٨، ١٢٩، ١٣١، ١٥٤
نقل الشحنات، ٣٤، ٣٥، ٦٠، ٦٢، ٦٤، ٦٩، ٨١، ٩٠، ٩١، ٩٢، ٩٦، ١٠٣، ١١١، ١٣٠، ١٣١، ١٥٤	ث
هـ	ثلاثي، ١٠٤
هجين، ١٦٠	ثنائية باعثة للضوء، ٣٥، ٣٧، ٦٩، ٧١، ٨٦
و	خ
وصلة غير متجانسة، ٣، ١٤، ٢٤، ٢٥، ١١٠	خصائص الجهد والتيار، ١٠
	خصائص الجهد والتيار، ١٠٥
	ش
	شكل نطاق الطاقة، ١٤، ١٥، ١٦، ١٨، ١٩، ٢٠، ٢٣، ٢٦

