

บทความทางวิชาการ
Review Article

การพัฒนาโลหะอิริเดียมกึ่งอินทรีย์เพื่อใช้เป็นไดโอดเรืองแสงชนิดอินทรีย์

The development of organoiridium as organic light-emitting diode

รুকเกียรติ จิตคติ*

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Rukkiat Jitchati*

*Chemistry Department, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University
Warinchamrap, Ubon Ratchathani, 34190*

Received: 02/05/2011; Accepted: 31/05/2011

บทคัดย่อ

สารเรืองแสงของโลหะอิริเดียมกึ่งอินทรีย์ กำลังได้รับความนิยมในการศึกษาเพื่อใช้เป็นไดโอดเรืองแสงในเทคโนโลยีการแสดงผลจากความสามารถในการเรืองแสงด้วยไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง และยังคงพบว่าเป็นกลุ่มสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อน ทางเคมี และความสามารถในการคายแสงสีต่างๆจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างลิแกนด์ในโมเลกุล บทความนี้เสนอความหลากหลายของโครงสร้างของสารกลุ่มโลหะอิริเดียมกึ่งอินทรีย์ทั้งที่เป็นแบบเป็นกลาง แบบมีประจุและแบบพอลิเมอร์ ซึ่งใช้เป็นสารเรืองแสงในอุปกรณ์เรืองแสงด้วยไฟฟ้า

คำสำคัญ: โลหะอิริเดียมกึ่งอินทรีย์, สารเรืองแสง, ไดโอดเรืองแสงชนิดอินทรีย์

*Corresponding author. E-mail address: rukkiat_j@hotmail.com

Abstract

The phosphorescent organoiridium compounds attract enormous attention in organic light-emitting diode application because they allow highly efficient electrophosphorescence in light-emitting display technology. In pursuing the development of iridium complexes during the last decade, significant progress has been made in terms of the thermal and chemical stability with tuning the emitting colour. The extensive synthetic efforts have been focused on the molecular design of the ligands. This review provides a comprehensive review of the different structures especially neutral, charged and polymer organoiridium(III) complexes.

Keywords: Organoiridium, Emitting compound, Organic light-emitting diode (OLED).

1. บทนำ

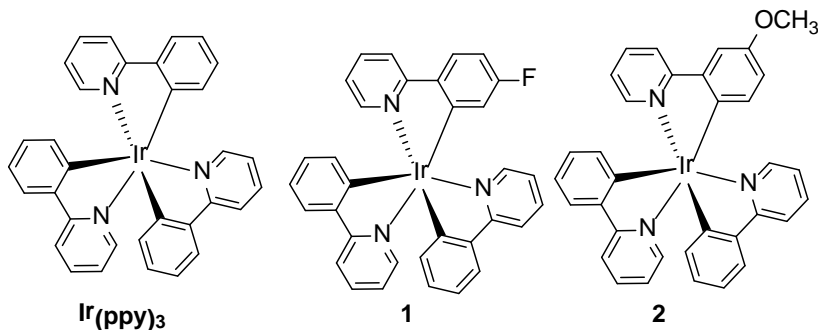
สารเรืองแสงมีความสำคัญอย่างมากต่อเทคโนโลยีการแสดงผล ซึ่งเทคโนโลยีการแสดงผลที่มีพัฒนาการดังนี้ การแสดงผลด้วยหลอดภาพแคโทด (cathode display) การแสดงผลด้วยผลึกเหลว (liquid crystal display (LCD)) การแสดงผลด้วยพลาสมา (plasma display (PMD)) การแสดงผลด้วยไดโอดเรืองแสง (light-emitting diode, LED)) และล่าสุด การแสดงผลด้วยไดโอดเรืองแสงชนิดอินทรีย์ (organic light-emitting diode, OLED) เทคโนโลยี OLED นี้ได้รับความสนใจในศึกษาอย่างมากในช่วงเวลา 15 ปีที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการผลิตและขายในตลาดแล้ว ได้แก่ หน้าจอแสดงผลมือถือของ BenQ-Siemens รุ่น S88 และ NoKia รุ่น S215i หน้าจอแสดงผลกล้องถ่ายรูปดิจิทัลของ Kodak รุ่น LS633 ยิ่งไปกว่านั้นบริษัท Sony ได้ผลิตหน้าจอโทรทัศน์รุ่น XEL-1 ขนาด 11 นิ้ว วางขายในราคา 2,500 ดอลลาร์ เมื่อปี พ.ศ. 2549

ตัวอย่างสารเรืองแสงชนิดอินทรีย์ ได้แก่ สารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก (small-molecule organics) [1-4] สารโลหะกึ่งอินทรีย์ (organometallics) [5-8]

สารพอลิเมอร์ (polymer) [9-12] และสารเดนไดรเมอร์ (dendrimers) [13]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากความหลากหลายของสารเรืองแสงที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสารโลหะอริเดียมกึ่งอินทรีย์ได้แก่ tris-(phenyl pyridine) iridium(III), $(\text{Ir}(\text{ppy})_3)$ โครงสร้างแสดงในรูปที่ 3 ได้รับความนิยมในการศึกษาอย่างมาก เนื่องจากสารนี้สามารถคายแสงแบบฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescent) ที่ให้ประสิทธิภาพในการคายแสงเกือบ 100% [14] ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการผสมกันระหว่างชั้นซิงเกิ้ล (singlet) และ ทริเพิล (triplet) ยิ่งไปกว่านั้นสารกลุ่มนี้ยังเป็นสารที่มีเสถียรภาพทางเคมีไฟฟ้าและเคมีสังเคราะห์สูง และสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางการคายแสงได้ง่ายโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล ตัวอย่างเช่น จากงานวิจัยของ Watts และคณะ [15] พบว่าโมเลกุล $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ คายแสงสีเหลือง (λ_{max} 494 nm) แต่เมื่อมี หมู่ดึงอิเล็กตรอน (electron-withdrawing group) สามารถทำให้การคายแสงเปลี่ยนเป็นสีเขียวที่ λ_{max} 465 nm และในทางตรง



Ir(ppy)₃ 1 2
 ภายหลังเหลือง (λ_{\max} 494 nm) ภายหลังเขียว (λ_{\max} 465 nm) ภายหลังส้ม (λ_{\max} 539 nm)

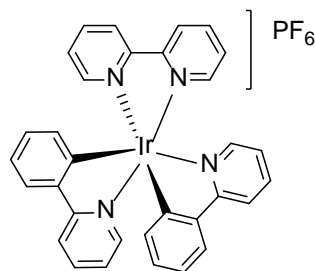
รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลเชิงซ้อนอิริเดียม (III) ที่ใช้เป็นสารเรืองแสงโดยกลุ่มงานวิจัยของ Watts [15]

ข้ามเมื่อมีหมู่ให้อิเล็กตรอน (donating group) สามารถทำให้เกิดการคายแสงสีส้ม ที่ λ_{\max} 539 nm (รูปที่ 1)

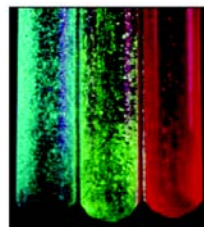
โครงสร้างของสารเชิงซ้อนอิริเดียมที่แสดงข้างต้นนั้น ประกอบไปด้วยโลหะอิริเดียมที่มีประจุเป็นบวกสาม; Ir(III) และ ลิแกนด์ เป็นอนุพันธ์ของพินิตไพริดีน จำนวน 3 ลิแกนด์ ที่วงพินิตมีประจุลบที่อะตอมคาร์บอน จึงทำให้โมเลกุลของสารกลุ่มนี้มีประจุรวมเป็นศูนย์ เรียกว่า โมเลกุลเชิงซ้อนอิริเดียมชนิดเป็นกลาง (neutral iridium (III) complex) ต่อมามีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Ir(ppy)₂(bpy)PF₆ โดยที่ bpy เป็นไบไพริดีน (bipyridine) ซึ่งโครงสร้างดังรูปที่ 2 จะพบว่าสารในกลุ่มนี้จะมีลักษณะที่เปลี่ยนไป คือ เป็นสารเชิงซ้อนอิริเดียมที่มีประจุ (charged iridium(III) complex) ที่มี ประจุลบเป็น PF₆ สารกลุ่มนี้เสถียรต่อความร้อนและไฟฟ้ามากกว่า Ir(ppy)₃ ทำให้เหมาะที่จะนำมาศึกษาการเรืองแสงด้วยไฟฟ้า ดังงานวิจัยของ Thompson [16] ในรูปที่ 3

กลุ่มงานวิจัยของ Grätzel ได้ศึกษาการเรืองแสงของ สารเชิงซ้อนอิริเดียมที่มีประจุ (3, 4 และ 5)

[17,18] (รูปที่ 4) พบว่า เซลล์เรืองแสงด้วยไฟฟ้าชนิดของแข็ง (light electrochemical cell (LEC) ของโมเลกุล 3 เรืองแสงสีส้ม-แดง โมเลกุล 4 เรืองแสงสีเขียว โมเลกุล 5 เรืองแสงสีฟ้า และยังพบว่า LEC ของโมเลกุล 4 ให้ความสว่างลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) มากที่สุดประมาณ 200 cd/m² ที่ความต่างศักย์เพียง 3.5 โวลต์ ซึ่งเปรียบเทียบเป็น

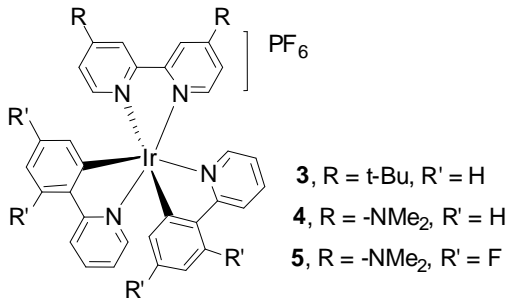


รูปที่ 2 โครงสร้างของ Ir(ppy)₂(bpy)PF₆

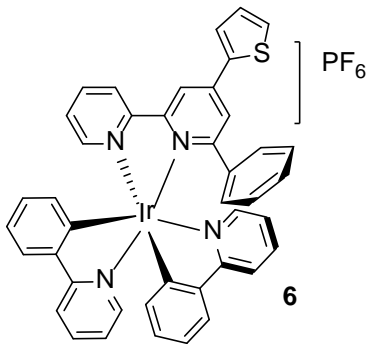


รูปที่ 3 สีของสารเชิงซ้อนของโลหะอิริเดียมโดยงานวิจัยของ Thompson [16]

ประสิทธิภาพของควอนตัม (quantum efficiency) ประมาณ 0.2%



รูปที่ 4 โครงสร้างสารเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม โดยกลุ่มงานวิจัยของ Grätzel [17,18]



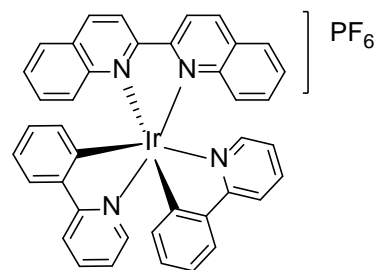
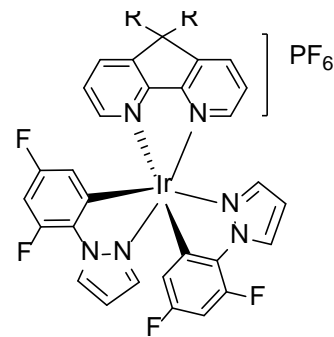
รูปที่ 5 โครงสร้างสารเชิงซ้อนของโลหะอริเดียม โดยกลุ่มงานวิจัยของ Bolink [19]

กลุ่มวิจัยของ Bolink ศึกษาอุปกรณ์ LEC ที่มีโครงสร้างอย่างง่ายเป็น (ITO/PEDOT/PSS/6/Al) โดยใช้สารเชิงซ้อนของโลหะอริเดียม (ในรูปที่ 5) ซึ่งให้ความเสถียรในอุปกรณ์ LEC ได้ยาวนานถึง 600 ชม. เนื่องจากมีการการซ้อนทับกันของวงพีนิลและไพรีดีน [19] ซึ่งเป็นตัวอย่างของไดโอดเรืองแสงที่มีเสถียรภาพสูง

กลุ่มงานวิจัยของ Qiu สามารถทำอุปกรณ์ LEC ที่มีความหลากหลายหลายของสีและมี

ประสิทธิภาพในการเรืองแสงเป็นดังนี้ สีฟ้าเป็น 8.4 cd/A สีเหลือง 18.6 cd/A และสีส้ม 13.2 cd/A [20] จากความต้องการแสงสีขาว (white light) เพื่อเข้ามาใช้แทนแสงจากหลอดไฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน กลุ่มงานวิจัยต่างๆ ได้พยายามออกแบบและสังเคราะห์โมเลกุลเชิงซ้อนของโลหะอริเดียมเพื่อให้มีการคายแสงเป็นสีขาว เช่น จากกลุ่มงานวิจัยของ Wong [21] พบว่าแสงสีขาวที่ได้จากอุปกรณ์ LEC จากสารทั้งสองในรูปที่ 6 ให้ความสว่างถึง 7.8 Lm/W ด้วยการไฟฟ้าเพียงแค่ 3 โวลต์

อย่างไรก็ตามจากปัญหาการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการทำอุปกรณ์ LEC ได้แก่ โทลูอีน (toluene) คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) และอะซิโตไนไตรล์ (acetonitrile) จึงมีงานวิจัยหลายกลุ่มมีจุดมุ่งหมายที่จะเพิ่มหมู่แทนที่



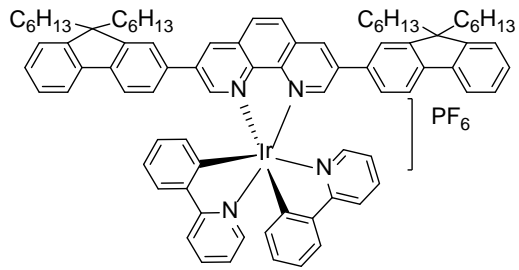
รูปที่ 6 โครงสร้างสารเชิงซ้อนของโลหะอริเดียม โดยกลุ่มงานวิจัยของ Wong [21]

ของลิแกนด์ ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายแล้วยังพบว่ายังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ LEC อีกด้วย ดังตัวอย่างของกลุ่มงานวิจัยของ Bryce [22] พบว่าสารเชิงซ้อนอริเดียมที่มีประจุ ดังรูปที่ 7 สามารถละลายได้ดีในโทลูอีนและสามารถเคลือบบนกระจก ITO ด้วยเทคนิคการเคลือบโดยการหมุน (spinning coating) ด้วยตัวทำละลายโทลูอีน ที่ให้อุปกรณ์ LEC มีความสว่างสูงถึง 1,000 cd/m²

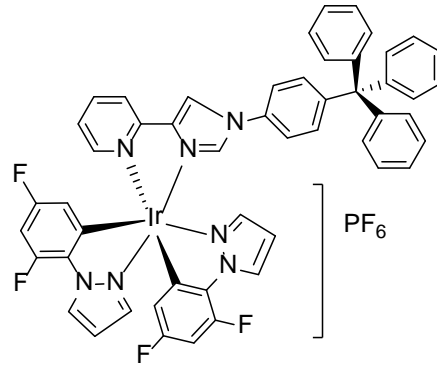
งานวิจัยเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2553 ที่ผ่านมา Duan และ Qiu ได้ทำการสังเคราะห์โมเลกุล สารเชิงซ้อนของโลหะอริเดียมดังโครงสร้างในรูปที่ 8 ซึ่งมีหมู่ ฟีนิล ถึง 4 หมู่ โดยหมู่แทนที่ดังกล่าวมีขนาดใหญ่ พบว่าโมเลกุลเรืองแสงในอุปกรณ์ LEC เป็นสีเขียวอมน้ำเงิน ที่มีประสิทธิภาพการเรืองแสงสูงถึง 18.3 cd/A คิดเป็นประสิทธิภาพของควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency) สูงถึง 7.6% และให้ประสิทธิภาพกำลัง (power efficiency) สูงถึง 18.0 Lm/W ยิ่งไปกว่านั้นกลุ่มงานวิจัยนี้ยังได้ทำอุปกรณ์ LEC ที่ให้แสงสีขาว ที่มีประสิทธิภาพกำลัง สูงมากถึง 11.2 Lm/W [23]

จากตัวอย่างที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเป็นสารเชิงซ้อนอริเดียมชนิดที่เป็นมอนอเมอร์ (monomer) นอกจากนี้งานวิจัยที่กำลังได้รับความสนใจคู่กันมาได้แก่ สารเชิงซ้อนอริเดียมชนิดที่เป็นพอลิเมอร์ (polymer) เนื่องจากพอลิเมอร์มีคุณสมบัติการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ดี ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเคลือบโดยการหมุน หรือ การพิมพ์ด้วยหมึกเจ็ท (ink-jet printing) ดังกลุ่มงานวิจัยของ Schubert ได้สังเคราะห์พอลิเมอร์สไตรีน (styrene) ที่มีหมู่แทนที่ที่เป็นสารเชิงซ้อนอริเดียม

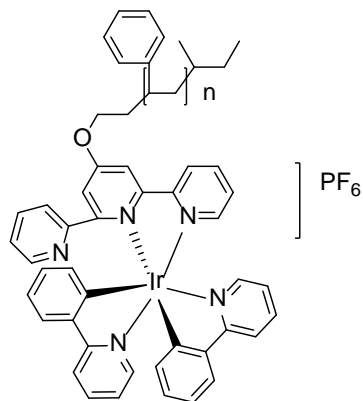
นำมาขึ้นรูปเพื่อใช้เป็นไดโอดเรืองแสง [24] (รูปที่ 9)



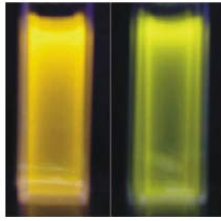
รูปที่ 7 โครงสร้างสารเชิงซ้อนอริเดียมที่มีประจุ โดยกลุ่มงานวิจัยของ Bryce [22]



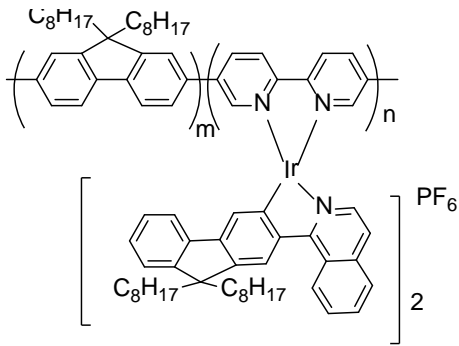
รูปที่ 8 โครงสร้างสารเชิงซ้อนอริเดียมที่มีประจุ โดย Duan และ Qiu [23]



รูปที่ 9 สารเชิงซ้อนอริเดียมชนิดที่เป็นพอลิเมอร์ โดยกลุ่มงานวิจัยของ Schubert [24]



รูปที่ 10 สีของพอลิเมอร์ใน CH_2Cl_2 โดย Holder [25]



รูปที่ 11 สารเชิงซ้อนอริเดียมชนิดที่เป็นพอลิเมอร์ โดยกลุ่มงานวิจัยของ Huang [25]

เช่นเดียวกับแบบมอโนเมอร์ พอลิเมอร์ของ Holder สามารถทำการคายแสงสีเหลืองและเหลืองอมเขียว โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของลิแกนด์ฟีนิลไพรีดีน ดังรูปที่ 10 [25] ต่อมากลุ่มงานวิจัยของ Huang พบว่าการเพิ่มสารเชิงซ้อนอริเดียมในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคายแสงดีกว่าเมื่ออยู่แบบแยกชิ้นส่วน (รูปที่ 11)

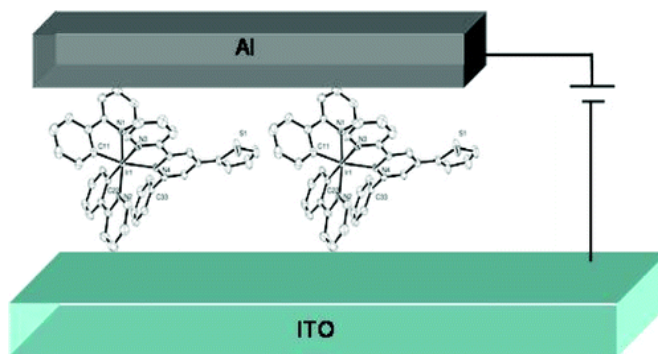
3. งานวิจัยที่ต้องทำต่อไป

ในปัจจุบันการทำไดโอดเรืองแสงชนิดหลายชั้น (multi-layer emitting-diode) ให้ประสิทธิภาพในการให้แสงควอนตัมภายนอก ดีที่สุด ประมาณ 15% แต่การขึ้นรูปไดโอดเรืองแสงชนิดดังกล่าวมีปัญหาจากการระเหยสารซ้ำหลายชั้น ทำให้เสียเวลาดึ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และสูญเสียพลังงานมาก จึงมี

งานวิจัยที่พัฒนาขึ้นมาให้มีการใช้จำนวนของชั้นให้น้อยที่สุดดังที่เรียกว่า “เซลล์เรืองแสงไฟฟ้าชนิดของแข็ง” โดยเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้จะประกอบไปด้วยชั้นเรืองแสงเพียงชั้นเดียว (single layer device) ที่อยู่ระหว่างขั้ว ITO และขั้วลบ ดังตัวอย่างของกลุ่มงานวิจัยของ Malliaras [26] ซึ่งใช้ชั้นเรืองแสงเป็นสารเชิงซ้อนออสเมียม (osmium) ชนิดเป็นประจุ ซึ่งพบว่า อุปกรณ์เรืองแสงชนิดใหม่นี้สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 1% และให้แสงสีแดงอมส้ม ที่มีความสว่างเป็น 6000 cd/m^2 ที่ใช้ความต่างศักย์เพียง 6 โวลต์ ซึ่งกลุ่มงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ว่า ประจุลบ (PF_6^-) ทำหน้าที่เป็นตัวสมดุลประจุ (balance charge) ของสารเชิงซ้อน และต่อมาจึงนำเทคโนโลยีชนิดนี้เข้ามาใช้กับสารเรืองแสงชนิดสารเชิงซ้อนอริเดียมที่มีประจุ โดย Bolink และคณะ และพบว่าเซลล์เรืองแสงชนิดนี้เป็นต้นแบบในการศึกษาจำนวนมากในปัจจุบัน [19]

4. บทสรุป

สารโลหะอริเดียมกึ่งอินทรีย์ที่หลากหลายของโครงสร้างทั้งแบบเป็นกลาง และมีประจุ พร้อมทั้งเป็นมอโนเมอร์ และพอลิเมอร์ เป็นสารกลุ่มที่มีความสามารถในการเรืองแสง ด้วยไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง การปรับเปลี่ยนตั้งแต่ฟ้าจนกระทั่งสีแดงสามารถทำได้ง่ายจากโครงสร้างของลิแกนด์ และยังคงพบว่าการทำไดโอดเรืองแสงสีขาวที่มีประสิทธิภาพและใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำสามารถทำได้ สารกลุ่มนี้จึงมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้เป็นไดโอดเรืองแสงชนิดอินทรีย์ในหน้าจอแสดงผลและแหล่งให้พลังงานแสงของเทคโนโลยีในอนาคตอันใกล้ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 12 เซลล์เรืองแสงไฟฟ้าชนิดของแข็ง (LECs) ITO/สารเชิงซ้อนอริเดียมที่มีประจุ/Al [19]

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shaheen, S.E., Kippelen, B., Peyghambarian, N., Wang, J.F., Anderson, J.D., Mash, E.A., Lee, P.A., Armstrong, N.R., & Kawabe, Y. (1999). Energy and charge transfer in organic light-emitting diodes: A soluble quinacridone study. *J. Appl. Phys.*, 85, 7939-45.
- [2] Yang, C.-H., Guo, T.-F., & Sun, I.W. (2007). Highly efficient greenish blue-emitting organic diodes based on pyrene derivatives. *J. Lumin.*, 124, 93-8.
- [3] Savvate'ev, V., Friedl, J.H., Zou, L., Shinar, J., Christensen, K., Oldham, W., Rothberg, L.J., Chen-Esterlit, Z., & Kopelman, R. (2000). Nanosecond transients in the electroluminescence from multilayer blue organic light-emitting devices based on 4,4'-bis(2,2'-diphenyl vinyl)-1,1'-biphenyl. *Appl. Phys. Lett.*, 76, 1501-3.
- [4] Kim, D.-H., Choi, D.H., Park, J.J., Lee, S.T., & Kwon, J.H. (2008). Novel Green Small-molecule Host Materials for Solution-processed Organic Light-emitting Diodes. *Chem. Lett.*, 37, 1150-1.
- [5] Tang, C.W., & VanSlyke, S.A. (1987). Organic electroluminescent diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 51, 913-5.
- [6] Baldo, M.A., Lamansky, S., Burrows, P.E., Thompson, M.E., & Forrest, S.R. (1999). Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence. *Appl. Phys. Lett.*, 75, 4-6.
- [7] Cleave, V., Yahioglu, G., Barny, P.L., Friend, R.H., & Tessler, N. (1999). Harvesting Singlet and Triplet Energy in Polymer LEDs. *Adv. Mater.*, 11, 285-8.
- [8] Lee, J.K., Yoo, D.S., Handy, E.S., & Rubner, M.F. (1996). Thin film light emitting devices from an electroluminescent ruthenium complex. *Appl. Phys. Lett.*, 69, 1686-8.
- [9] Kido, J., Hongawa, K., Okuyama, K., & Nagai, K. (1993). Bright blue electroluminescence from poly(N-vinylcarbazole). *Appl. Phys. Lett.*, 63, 2627-9.
- [10] Burroughes, J.H., Bradley, D.D.C., Brown, A.R., Marks, R.N., Mackay, K., Friend, R.H., Burn, P.L., & Holmes, A.B. (1990). Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature*, 347, 539-41.
- [11] Janietz, S., Bradley, D.D.C., Grell, M., Giebeler, C., Inbasekaran, M., & Woo, E.P. (1998). Electrochemical determination of the ionization potential and electron affinity of poly(9,9-dioctylfluorene). *Appl. Phys. Lett.*, 73, 2453-5.
- [12] Remmers, M., Neher, D., Gruner, J., Friend, R.H., Gelinck, G.H., Warman, J.M., Quattrocchi, C., dos Santos, D.A., & Bredas, J.-L. (1996). The Optical, Electronic, and Electroluminescent Properties of Novel Poly(p-phenylene)-Related Polymers. *Macromolecules*, 29, 7432-45.

- [13] Freeman, A., Fréchet, J., Koene, S., & Thompson, M. (2000). Chromophore-labeled dendrimers for use in single-layer light-emitting diodes. *Macromol. Symp.*, *154*, 163-70.
- [14] Adachi, C., Baldo, M.A., Thompson, M.E., & Forrest, S.R. (2001). Nearly 100% internal phosphorescence efficiency in an organic light-emitting device. *J. Appl. Phys.*, *90*, 5048-51.
- [15] Dedeian, K., Djurovich, P.I., Garces, F.O., Carlson, G., & Watts, R.J. (1991). A new synthetic route to the preparation of a series of strong photoreducing agents: fac-tris-ortho-metallated complexes of iridium (III) with substituted 2-phenylpyridines. *Inorg. Chem.*, *30*, 1685-7.
- [16] Tamayo, A.B., Garon, S., Sajoto, T., Djurovich, P.I., Tsyba, I.M., Bau, R., & Thompson, M.E. (2005). Cationic Bis-cyclometalated Iridium(III) Diimine Complexes and Their Use in Efficient Blue, Green, and Red Electroluminescent Devices. *Inorg. Chem.*, *44*, 8723-32.
- [17] Nazeeruddin, M.K., Weh, R.T., Zhou, Z., Klein, C., Wang, Q., De Angelis, F., Fantacci, S., & Grätzel, M. (2006). Efficient Green-Blue-Light-Emitting Cationic Iridium Complex for Light-Emitting Electrochemical Cells. *Inorg. Chem.*, *45*, 9245-50.
- [18] De Angelis, F., Fantacci, S., Evans, N., Klein, C., Zakeeruddin, S.M., Moser, J.E., Kalyanasundaram, K., Bolink, H.J., Grätzel, M., & Nazeeruddin, M.K. (2007). Controlling Phosphorescence Color and Quantum Yields in Cationic Iridium Complexes: A Combined Experimental and Theoretical Study. *Inorg. Chem.*, *46*, 5989-6001.
- [19] Graber, S., Doyle, K., Neuburger, M., Housecroft, C.E., Constable, E.C., Costa, R.D., Orti, E., Repetto, D., & Bolink, H.J. (2008). A Supramolecularly-Caged Ionic Iridium(III) Complex Yielding Bright and Very Stable Solid-State Light-Emitting Electrochemical Cells. *J. Am. Chem. Soc.*, *130*, 14944-5.
- [20] He, L., Qiao, J., Duan, L., Dong, G., Zhang, D., Wang, L., & Qiu, Y. (2009). Toward Highly Efficient Solid-State White Light-Emitting Electrochemical Cells: Blue-Green to Red Emitting Cationic Iridium Complexes with Imidazole-Type Ancillary Ligands. *Adv. Funct. Mater.*, *19*, 2950-60.
- [21] Su, H.C., Chen, H.F., Fang, F.C., Liu, C.C., Wu, C.C., Wong, K.T., Liu, Y.H., & Peng, S.M. (2008). Solid-State White Light-Emitting Electrochemical Cells Using Iridium-Based Cationic Transition Metal Complexes. *J. Am. Chem. Soc.*, *130*, 3413-9.
- [22] Rothe, C., Chiang, C.-J., Jankus, V., Abdullah, K., Xianshun, Z., Jitchati, R., Batsanov, A.S., Bryce, M.R., & Monkman, A.P. (2009). Ionic Iridium(III) Complexes with Bulky Side Groups for Use in Light Emitting Cells: Reduction of Concentration Quenching. *Adv. Funct. Mater.*, *19*, 2038-44.
- [23] He, L., Duan, L., Qiao, J., Dong, G., Wang, L., & Qiu, Y. (2010). Highly Efficient Blue-Green and White Light-Emitting Electrochemical Cells Based on a Cationic Iridium Complex with a Bulky Side Group. *Chem. Mater.*, *22*, 3535-42.
- [24] Tekin, E., Holder, E., Marin, V., Gans, B.J., & Schubert, U.S. (2005). Ink-Jet Printing of Luminescent Ruthenium- and Iridium-Containing Polymers for Applications in Light-Emitting Devices. *Macromol. Rapid Commun.*, *26*, 293-7.
- [25] Holder, E., Marin, V., Alexeev, A., & Schubert, U.S. (2005). Greenish-yellow-, yellow-, and orange-light-emitting iridium (III) polypyridyl complexes with poly(ϵ -caprolactone)-bipyridine macroligands. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, *43*, 2765-76.
- [26] Bernhard, S., Gao, X., Malliaras, G.G., & Abruña, H.D. (2002). Efficient Electroluminescent Devices Based on a Chelated Osmium Complex. *Adv. Mater.*, *14*, 433-6.