



สารกึ่งตัวนำผลึกเหลว

Liquid Crystal Semiconductors

สุวัตร นานันท์

บทคัดย่อ

ผลึกเหลวแบบ calamitic ที่เกิดจากโมเลกุลที่มีรูปร่างแบนแท่งเป็นที่รู้จักกันมากกว่าหนึ่งร้อยปี ได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างดีโดยเฉพาะในจอแสดงผลแบบผลึกเหลว ในขณะที่ยังมีผลึกเหลวอีกแบบหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลคล้ายแผ่นจาน และเรียกผลึกเหลวชนิดนี้ว่าผลึกเหลวแบบ discotic ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมาเพียงสามสิบกว่าปีภายหลังจากค้นพบในปี 1977 โดย Chandrasekhar ผลึกเหลวชนิดนี้ประกอบด้วยวัฏภาคที่ง่ายที่สุดคือวัฏภาค nematic นอกจากนี้ยังมีวัฏภาคที่มีความเป็นระเบียบสูงขึ้นได้แก่วัฏภาค columnar วัฏภาค helical และวัฏภาค columnar phase crystal โครงสร้างของผลึกเหลวชนิดนี้ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนของวงอะโรมาติกตรงกลางที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ และส่วนของสายโซ่อะลิฟาติกรอบนอกที่แสดงสมบัติเป็นฉนวน ในรายงานวิจัยนี้ได้สรุปถึงการประยุกต์ใช้ผลึกเหลวแบบ discotic ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ไดโอดเรืองแสงแบบสารอินทรีย์ ทรานซิสเตอร์แบบสารอินทรีย์ และเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังได้รายงานถึงการวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารเหล่านี้ด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันได้แก่ การเจือด้วยสารบางชนิด การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ วิธี PR-TRMC และวิธี ToF

ABSTRACT

The calamitic liquid crystals based on rod-like molecules have been recognised for over 100 years. Not only their phase are well studied but their application are also well established, widely recognised as liquid crystal displays (LCDs). On the contrary, the mesophase formed by disc-like molecules, called discotic liquid crystals (DLCs), have only known for a little over 30 years since the discovery of these liquid crystals in 1977 by Chandrasekhar. The simplest mesophase found in DLCs is the nematic phase and the higher order phases can be formed as well namely, columnar phase, helical phase, and columnar plastic crystal phase. The structure of DLCs consists of two parts: the central aromatic core, the conducting part, and the alkyl chain, the insulating part. In this work, the applications of DLCs as semiconductors in electronic devices such as Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs), Organic Field-Effect Transistor (OFET), and organic solar cell are summarised. The conductivity measurements of these materials from various methods namely chemical doping, current-voltage characterisation, PR-TRMC and ToF methods, have been reviewed.

คำสำคัญ: ผลึกเหลวแบบดิสคอติก สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ การวัดสภาพนำไฟฟ้า

Keywords: Discotic liquid crystals, Organic semiconductors, Conductivity measurement

บทนำ

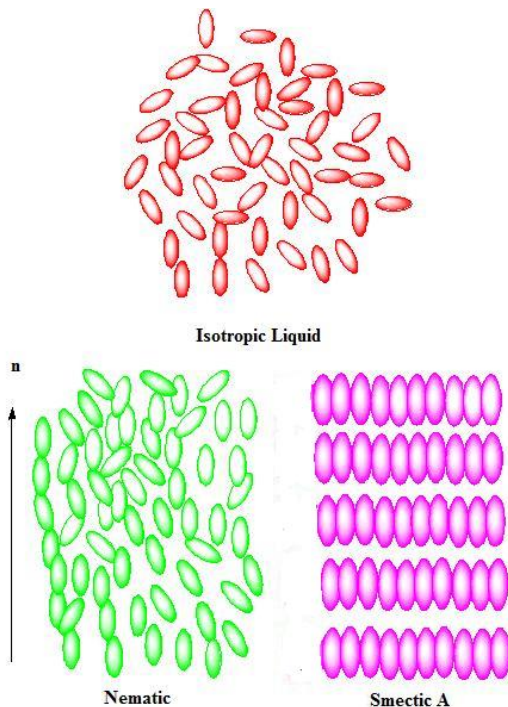
ผลึกเหลว (liquid crystals) จัดเป็นสารกลุ่มหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษแตกต่างไปจากสารทั่วไป เมื่อได้รับความร้อนจะมีลำดับการเปลี่ยนแปลงวิภูภาค (phase transition) จากของแข็งหรือผลึก (crystal phase, K) เป็นวิภูภาคผลึกเหลว (liquid crystal phase หรือ mesophase) แล้วจึงเป็นของเหลวปกติ (isotropic liquid phase, I) ในขณะที่สารโดยทั่วไปเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงวิภูภาคจากของแข็งไปเป็นของเหลวเท่านั้น (Collings and Hird, 1997) วิภูภาคผลึกเหลวนี้อาจสามารถแยกย่อยได้อีกเป็นหลายๆวิภูภาค ตามรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และแบ่งย่อยตามความเป็นระเบียบของโครงสร้างซึ่งจะมีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการจำแนกวิภูภาค (phase)

เหล่านี้ เทคนิคการทดลองสำคัญที่ใช้ในการจำแนกวิภูภาคของผลึกเหลว ได้แก่ การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงระนาบโพลาไรซ์ (plane-polarised optical microscope) ซึ่งจะจำแนกวิภูภาคของผลึกเหลวตามรูปแบบหรือลวดลาย (textures) ที่ปรากฏภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิดดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อน (thermal analysis) ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter; DSC) ติดตามค่าเอนทาลปี (enthalpy) ของการเปลี่ยนแปลงวิภูภาค และอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนวิภูภาค (transition temperature) และเทคนิคที่สำคัญมากอีกเทคนิคหนึ่งคือ การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของสารตัวอย่างเพื่อศึกษาการจัดเรียงตัว

และความเป็นระเบียบในโครงสร้างของสารตัวอย่าง ผลึกเหลวเพื่อให้จำแนกวิภูภาคได้อย่างถูกต้อง (Hamley, 2007)

ผลึกเหลวมีสมบัติที่โดดเด่นทั้งสมบัติที่มาจากผลึกของแข็งและสมบัติที่มาจากของเหลวปกติ โดยที่ผลึกเหลวสามารถไหลได้คล้ายกับของเหลว (isotropic liquid) ในขณะเดียวกันก็มีความเป็นระเบียบอยู่บ้าง และแสดงสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าดัชนีหักเห (refractive index) และ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ขึ้นกับทิศทางในการวัด (anisotropic properties) เหมือนกับที่พบในผลึกของแข็ง (crystal phase, K) ทั้งนี้สามารถจำแนกผลึกเหลวอย่างคร่าว ๆ ตามรูปร่างของโมเลกุลที่มาประกอบกันเข้าเป็นผลึก

เหลว (Collings, 2002) ได้สองแบบ สำหรับแบบแรกเป็นผลึกเหลวที่เกิดจากโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายแท่งยาว (Rod-like molecules) เรียกผลึกเหลวกลุ่มนี้ว่าผลึกเหลวแบบคาลามิติก (calamitic liquid crystal) (ดูคำอธิบายในรูปที่ 1 ประกอบ) ซึ่งมักจะประยุกต์ใช้งานในการทำจอแสดงผล (liquid crystal display, LCD) และแบบที่สองเป็นผลึกเหลวที่เกิดจากโมเลกุลที่มีรูปร่างที่คล้ายแผ่นจาน (disk-like molecules) โดยเรียกผลึกเหลวกลุ่มนี้ว่าผลึกเหลวแบบดิสคोटิก (discotic liquid crystal) ซึ่งผลึกเหลวแบบที่สองนี้จะ เป็นกลุ่มของสารกึ่งตัวนำผลึกเหลวที่จะกล่าวถึงเป็นส่วนใหญ่ในบทความนี้



รูปที่ 1 การจัดเรียงตัวของของเหลวปกติ (isotropic liquid) ซึ่งไม่มีความเป็นระเบียบในโครงสร้าง (randomness) และผลึกเหลวแบบคาลามิติก (calamitic) ทั้งสองวิภูภาคคือวิภูภาคนีมาติก (nematic) ที่มีความเป็นระเบียบในหนึ่งมิติตามทิศทางของไดเรกเตอร์ (director, n) และวิภูภาคสมกติก (smectic) ที่มีความเป็นระเบียบในสองมิติ คือความเป็นระเบียบตามทิศทางของไดเรกเตอร์และความเป็นระเบียบในแต่ละชั้น (layer) ของโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกัน (Boden et al., 2011)

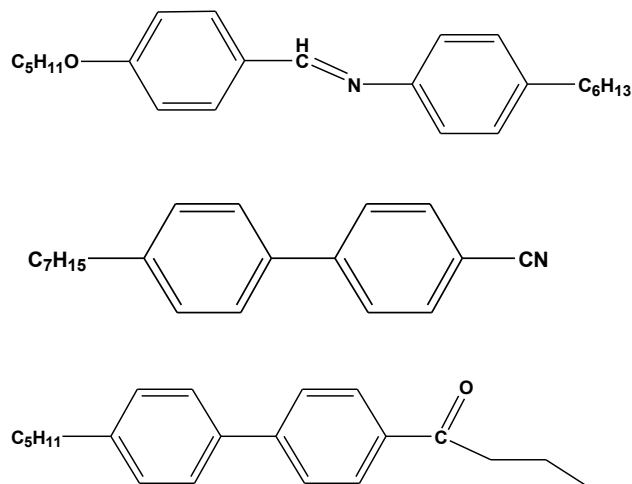
ผลึกเหลวแบบคาลามิติก (calamitic liquid crystal)

ผลึกเหลวแบบคาลามิติก (calamitic liquid crystal) มีการรายงานการค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ.1888 และนับแต่นั้นมาก็มีการศึกษาผลึกเหลวในกลุ่มนี้ค่อนข้างมาก (Collings and Hird, 1997) ทั้งการสังเคราะห์สารใหม่ ๆ การจำแนกวัฏภาคของสารเหล่านี้ และที่โดดเด่นที่สุดก็คือมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในการทำจอแสดงผลที่เรียกว่าจอแอลซีดี (liquid crystal display; LCD) ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องคิดเลข หน้าปัดนาฬิกา และคอมพิวเตอร์โน้ตบุค โครงสร้างทางเคมีของผลึกเหลวแบบคาลามิติกมักจะประกอบด้วยวงอะโรมาติกตรงแกนกลาง ดังแสดงตัวอย่างสูตรโครงสร้าง ในรูปที่ 2

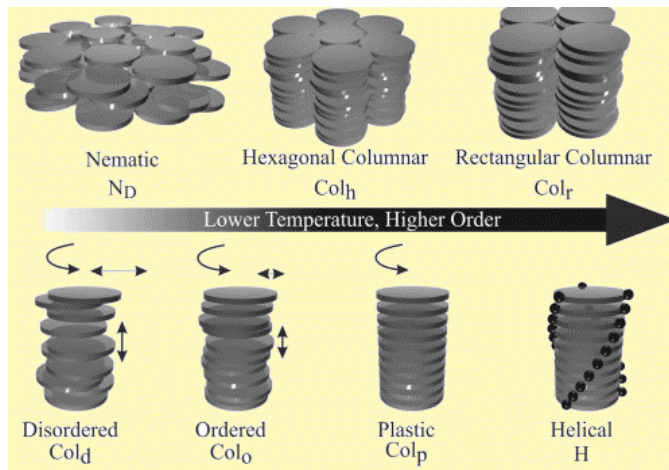
ผลึกเหลวแบบดิสคोटิก (discotic liquid crystal)

ผลึกเหลวแบบดิสคोटิก (discotic liquid crystal) มีการค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ โดยได้มีรายงานการค้นพบ ในปี ค.ศ.1977 จากกลุ่มของ

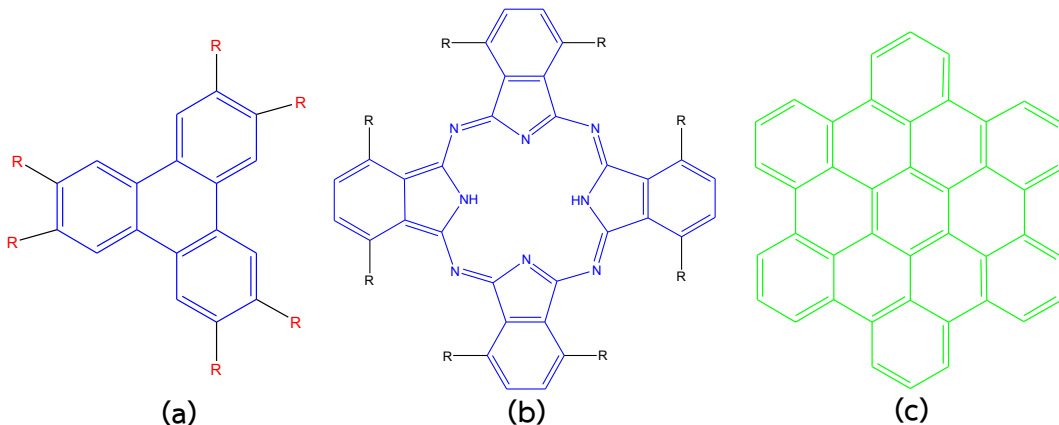
นักวิทยาศาสตร์ชาวอินเดียชื่อ Chandrasekhar หลังจากนั้นจึงมีการศึกษาสารในกลุ่มนี้อย่างกว้างขวาง (Bushby and Kawata, 2011; Tate et al., 2012) ในแง่ของการสังเคราะห์ (synthesis) การศึกษาสมบัติทางกายภาพ (physical properties) รวมทั้งได้มีการจำแนกวัฏภาคย่อย ๆ (phase characterisation) ที่พบในผลึกเหลวกลุ่มนี้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Boden et al., 2011) ซึ่งวัฏภาคที่สามารถพบได้ในผลึกเหลวกลุ่มนี้ได้แก่ discotic nematic (N_D), hexagonal columnar phase (Col_h), rectangular columnar phase (Col_r), helical phase (H) รวมทั้งแบบที่เป็น columnar plastic crystal phase (Col_p) ดังแสดงในรูปที่ 3 (Bushby and Owen, 2002a) โดยที่ผลึกเหลวในกลุ่มดิสคोटิกที่นำไฟฟ้าได้โดยทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติกและสามารถแบ่งได้สามแบบ คือ วง triphenylene, วง phthalocyanine, และวง *peri*-hexabenzocoronene (*peri*-HBC) ดังแสดงโครงสร้างทางเคมีในรูปที่ 4 (Bushby and Owen, 2002b)



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของผลึกเหลวแบบคาลามิติก (Collings, 2002)



รูปที่ 3 วัฏภาคต่าง ๆ ที่พบในผลึกเหลวแบบดิสคอดิก (Bushby and Owen, 2002a)

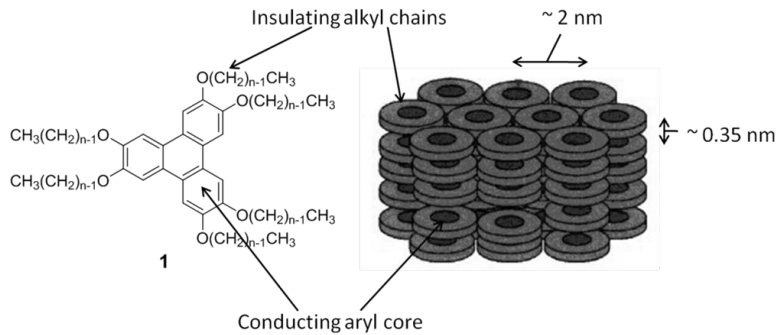


รูปที่ 4 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของผลึกเหลวแบบดิสคอดิกที่นำไฟฟ้าได้ (a) triphenylene, (b) phthalocyanine และ (c) *peri*-haxabenzocoronene (*peri*-HBC) เมื่อ R แทน หมู่อัลคิล (alkyl group) ที่มาเกาะ (Bushby and Owen, 2002b)

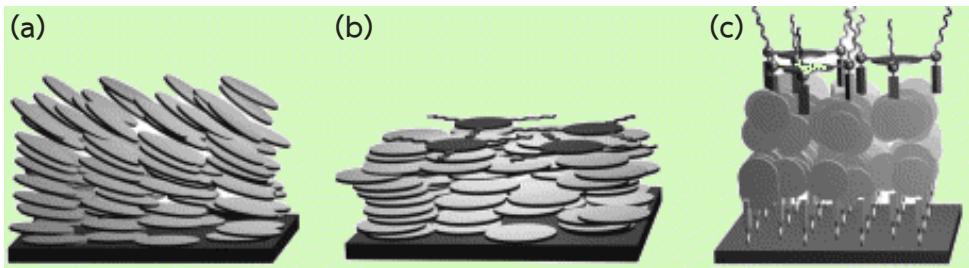
สารกึ่งตัวนำผลึกเหลว (liquid crystal semiconductors)

ได้มีรายงานถึงผลึกเหลวที่นำไฟฟ้าได้ดี (ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูง) ในปี ค.ศ.1994 ซึ่งตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่ได้รับการยอมรับอย่าง Nature (Adam et al., 1994) โดยพบในผลึกเหลวกลุ่มไตรฟีนิลีนที่มีชื่อว่า hexakis(hexylthio) triphenylene หรือเรียกสั้น ๆ ว่า HHTT ที่แสดงวัฏภาค helical phase (H) ซึ่งมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง เมื่อ

เทียบกับวัฏภาคอื่น ๆ ทั้งนี้วงไตรฟีนิลีน (triphenylene ring) ทำหน้าที่นำไฟฟ้าในทิศทางเดียว (one-dimensional conductor) คือทิศที่มีการเรียงซ้อนกันของวงไตรฟีนิลีน ผ่านอันตรกิริยาแบบ π - π ในขณะที่หมู่อัลคิล (alkyl group) ทำหน้าที่เป็นฉนวนคือไม่นำไฟฟ้า แต่ทว่าหมู่อัลคิลนี้ก็ยังมีบทบาทสำคัญเพื่อให้สารยังสามารถดำรงสถานะความเป็นผลึกเหลวอยู่ได้ (Boden et al., 2011) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 สูตรโครงสร้างและแผนภาพแสดงวิถุภาค hexagonal columnar (Co_h) ของผลึกเหลวในกลุ่มไตรฟีนีลีน ซึ่งแทนด้วยชื่อ HATn เมื่อ n แทนจำนวนอะตอมของคาร์บอนในสายโซ่ของหมู่อัลคิล (alkyl group) ที่มาเกาะ (Boden et al., 2011)



รูปที่ 6 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลผลึกเหลวแบบดิสคอดิก บนซับสเตรต (substrate) ซึ่งมีความเป็นไปได้สามแบบคือ (a) แบบผสม (hybrid alignment), (b) แบบโฮมิโอโทรปิก (homeotropic alignment) และ (c) แบบแบนราบ (planar alignment) (Bushby and Owen, 2002a)

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของผลึกเหลวบนแผ่นอิเล็กโทรด (electrode) หรือบนซับสเตรต (substrate) ก็มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในแง่ของการประยุกต์ใช้งานผลึกเหลวเหล่านี้ในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ (ดูรายละเอียดรูปแบบของการจัดเรียงโมเลกุลของผลึกเหลว ในรูปที่ 6 ประกอบ) ตัวอย่างเช่น ในการเตรียมทรานซิสเตอร์แบบ organic field-effect transistor (OFET) ต้องการผลึกเหลวที่จัดเรียงตัวแบบแบนราบ (planar alignment) กับซับสเตรต ในขณะที่การเตรียมอุปกรณ์ชนิด organic light-emitting diodes (OLEDs) ต้องการการจัดเรียงตัวของผลึกเหลวแบบโฮมิโอโทรปิก (homeotropic alignment) บนซับสเตรต (Bushby and Owen,

2002a) ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการจัดเรียงตัวของผลึกเหลวและเลือกรูปแบบการจัดเรียงตัวให้เหมาะสมกับอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ต้องการประยุกต์ใช้งาน

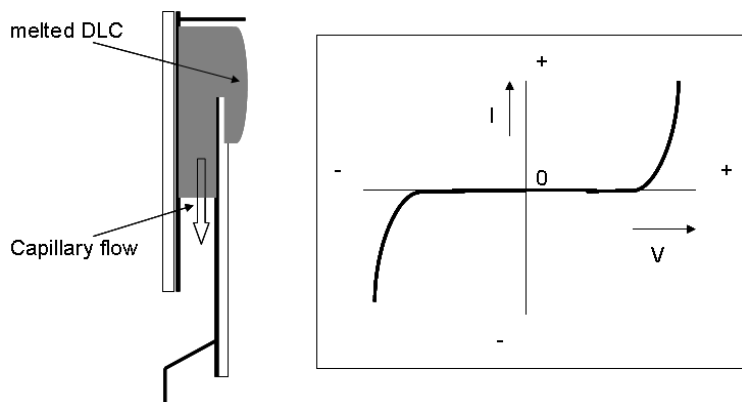
การวัดสมบัตินำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำผลึกเหลว (conductivity measurement of liquid crystal semiconductors)

การทดสอบการนำไฟฟ้าของผลึกเหลวถือว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งก่อนที่จะมีการนำเอาผลึกเหลวไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้มีเทคนิคในการศึกษาการนำไฟฟ้าของผลึกเหลวหลายเทคนิคด้วยกัน ซึ่งในแต่ละเทคนิคก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป การวัดการนำไฟฟ้าแบบแรกทำได้โดย

การเจือด้วยสารบางชนิด (chemical doping) เพื่อให้ผลึกเหลวนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น หลังจากนั้นจึงติดตามการนำไฟฟ้าของสารผสมดังกล่าว (Boden et al., 1995; Van Keulen et al., 1987) อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ก็มีข้อเสียคือไม่สามารถติดตามการนำไฟฟ้าของสารบริสุทธิ์ได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเติมสารอีกชนิดหนึ่งจนมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดวัฏภาคใหม่ๆที่มีความซับซ้อนมากขึ้น หรือในบางกรณีอาจจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ จนทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปโดยสิ้นเชิง

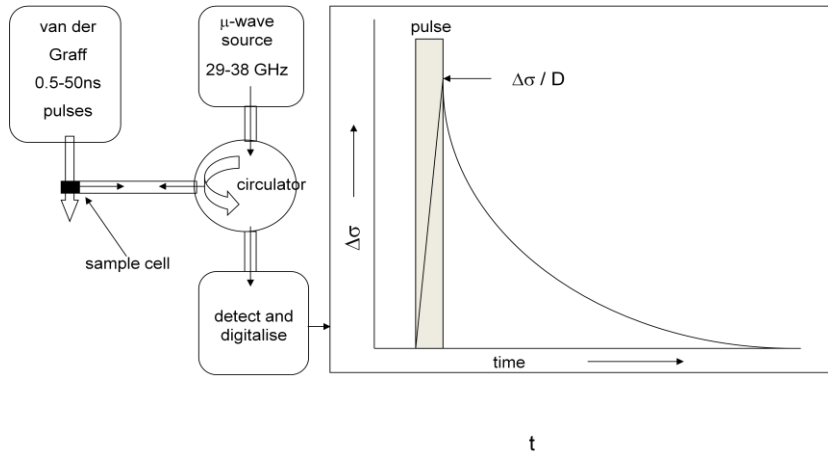
การวัดการนำไฟฟ้าแบบที่สองก็คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (current-voltage characterisation) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 7 (Christ, T. et al., 1997) ซึ่งหลักการของเทคนิคนี้คือการเตรียมเซลล์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอมมิก (Ohmic contact) แต่ในทางปฏิบัติมักทำซ้ำ ๆ ได้ยาก

การวัดการนำไฟฟ้าแบบที่สาม ทำได้โดยติดตามการนำไฟฟ้า ด้วยเทคนิค pulse-radiolysis time-resolved microwave conductivity (PR-TRMC) (รูปที่ 8) เทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการ



รูปที่ 7 การวัดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำผลึกเหลวด้วยวิธีวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (current-voltage characterisation หรือ I-V characterisation)

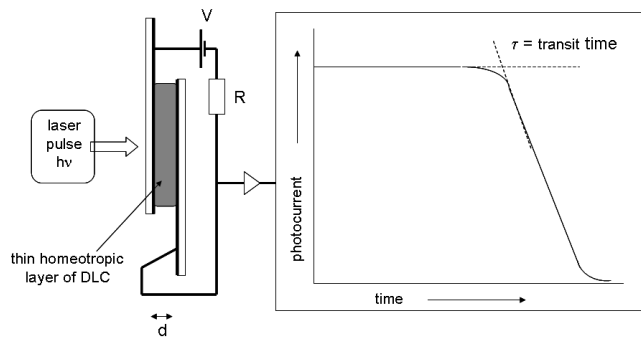
กล่าวคือ ไม่ขึ้นกับสีหรือสัณฐานวิทยา (Morphology) ของสารตัวอย่างที่นำมาวัด ไม่จำเป็นต้องใช้ขั้วเล็กโทอด ไม่ต้องรอให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารตัวอย่าง ผลึกเหลวในทิศทางที่เหมาะสม ทำให้การวัดด้วยเทคนิค PR-TRMC นี้ สามารถติดตามการนำไฟฟ้าของสารทำได้ในทุกๆวัฏภาค (Peris et al., 2004a; Peris et al., 2004b; Saeki et al., 2006; Sakurai et al., 2008) รวมทั้งในสารบางประเภทที่ไม่หลอมเหลวแต่สลายตัวที่อุณหภูมิสูงก็สามารถติดตามการนำไฟฟ้าในวัฏภาคผลึกของแข็งได้ นอกจากนี้เทคนิค PR-TRMC ยังมีข้อดี คือ ใช้สารตัวอย่างในปริมาณที่น้อย อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ก็มีข้อเสียที่สำคัญ คือ ไม่สามารถแยกการนำไฟฟ้าที่มาจากประจุบวกหรือจากประจุลบได้ ดังนั้น ผลการวัดการนำไฟฟ้าที่ได้จึงเป็นค่ารวม ๆ และมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากเทคนิคอื่น ๆ ทำให้ไม่สามารถนำไปเทียบกับการใช้งานจริงในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ ในทางปฏิบัติค่าที่ได้จากเทคนิค PR-TRMC จะถือเป็นค่าขีดจำกัดบน (Upper limit) ของค่าการนำไฟฟ้าของสารนั้น ๆ (Warman, 2003)



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการวัดการนำไฟฟ้าของผลึกเหลว ด้วยเทคนิค pulse-radiolysis time-resolved microwave conductivity (PR-TRMC) (Warman, 2003)

เทคนิคการวัดการนำไฟฟ้าของผลึกเหลวที่สำคัญมากและได้รับความนิยมมากก็คือการวัดการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค time-of-flight (ToF) ซึ่งมีการรายงานเป็นครั้งแรกในผลึกเหลวกลุ่มไตรฟีนิลีน (Adam et al., 1993) ที่มีชื่อว่า HAT5 หรือ hexakis(pentyloxy)triphenylene หลังจากนั้นก็มี การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาการนำไฟฟ้าของผลึกเหลวชนิดต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น หลักการของเทคนิคนี้ก็คือสารตัวอย่างที่อยู่ภายในเซลล์ถูกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) หลังจากนั้นจะสามารถติดตามการนำไฟฟ้าของประจุบวกหรือลบที่เกิดขึ้นโดยการเลือกขั้ว (electrode) ด้านที่ถูกระตุ้นให้เป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ ยกตัวอย่างเช่น ในการติดตามประจุบวกหรือโฮล (hole) ขั้วที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะต่อกับแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า (ในกรณีนี้จัดเป็นขั้วบวก) และเมื่อเราติดตามเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของประจุบวกจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด จะได้ค่าของเวลาซึ่งเรียกว่า transit time

(τ) และเมื่อทราบความหนาของเซลล์ (cell thickness, d) ก็จะสามารถคำนวณหาค่า mobility (μ) ของสารตัวอย่างผลึกเหลวได้ (รูปที่ 9) เทคนิค ToF นี้มีข้อดีคือ สามารถติดตามการนำไฟฟ้าของประจุบวก และประจุลบได้ และวัดค่าการนำไฟฟ้าแยกจากกันโดยสิ้นเชิง (จะต่างจากเทคนิคแบบ PR-TRMC ที่วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบรวม ๆ ไม่สามารถแยกผลจากประจุบวกและประจุลบออกจากกันได้) ทำให้ค่าที่ได้จากเทคนิค ToF นี้มีความน่าเชื่อถือ และมีค่าใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับค่าที่มีการใช้งานจริง (practical value) ในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ (Kepler, 1960; Muller-Horsche et al., 1987) แต่เทคนิค ToF นี้ก็มีข้อเสียคือ สารตัวอย่างที่นำมาวัดต้องมีการจัดเรียงตัวแบบโฮมิโอทรอปิก (homeotropic alignment) ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ทำให้วัดการนำไฟฟ้าในสารตัวอย่างจำพวกสารกึ่งตัวนำผลึกเหลว ได้ในบางวิถุภาค (phase) เท่านั้น (Bushby and Owen, 2002b)



รูปที่ 9 แผนภาพแสดงการทดลองวัดการนำไฟฟ้าของผลึกเหลวด้วยเทคนิค time-of-flight (ToF) และกราฟที่ได้จากผลการทดลอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (photocurrent) และเวลา (time) ที่ประจุเคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดด้านที่ถูกกระตุ้นด้วยลำแสงเลเซอร์ (illumination electrode) และอิเล็กโทรดด้านนี้จะต่อกับแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า ไปยังอิเล็กโทรดอีกด้านหนึ่ง (คือด้านตรงข้ามกับอิเล็กโทรดที่ถูกกระตุ้นด้วยลำแสงเลเซอร์ หรือเรียกว่า counter electrode)

บทสรุป: ทิศทางการวิจัยในสารกึ่งตัวนำผลึกเหลว (Conclusion: Research direction in liquid crystal semiconductors)

การศึกษากำหนดนำไฟฟ้าของผลึกเหลวแบบ discotic ยังคงเป็นงานวิจัยที่ใหม่ ต้องอาศัยความรู้พื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจ ก่อนจะประยุกต์ใช้งานผลึกเหลวเหล่านี้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ดังนั้นการศึกษสมบัติทางกายภาพ (physical properties) สมบัติทางสเปกโทรสโกปี (spectroscopic properties) การติดตามการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค (phase transition) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบระนาบแสงโพลาไรซ์ (plane-polarized optical microscope) และการวิเคราะห์เชิงความร้อน (thermal analysis) เพื่อติดตามอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค การจัดเรียงตัวของโมเลกุลผลึกเหลว (alignment) ในรูปแบบที่ต้องการสำหรับอุปกรณ์แต่ละชนิด รวมทั้งการวัดสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำผลึกเหลวชนิดใหม่ ๆ ด้วยเทคนิคที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และจะเป็นพื้นฐานสำคัญในการสร้างองค์ความรู้และการ

ศึกษาวิจัยในระดับบัณฑิตศึกษา รวมทั้งเป็นรากฐานที่มั่นคงในการขยายผลไปสู่การเตรียมอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานจริง ได้แก่ การเตรียมไดโอดเรืองแสงแบบสารอินทรีย์ (organic light-emitting diode, OLED) การเตรียมทรานซิสเตอร์แบบสารอินทรีย์ (organic field-effect transistor, OFET) และการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ (organic solar cell) ในโอกาสต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้ทุนนักวิจัยหน้าใหม่ เงินกองทุนพัฒนาและส่งเสริมด้านวิชาการของคณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ. 2553

เอกสารอ้างอิง

Adam, D., Closs, F., Frey, T., Funhoff, D., Haarer, D., Schuhmacher, P. and Siemensemeyer, K. (1993). Transient photoconductivity in

- discotic liquid crystal. *Physical Review Letters* 70(4): 457-460.
- Adam, D., Schuhamcher, P., Simmerer, J., Häussling, L., Siemensmeyer, K., Etzbacher, K.H., Ringsdorf, H. And Haarer, D. (1994). Fast photoconduction in the highly ordered columnar phase of a discotic liquid crystal. *Nature* 371(6493): 141-143.
- Boden, N., Bushby, R.J., Clements, J. And Luo R. (1995). Characterization of the cationic species formed in p-doped discotic liquid crystals. *Journal of Materials Chemistry* 5: 1741-1748.
- Boden, N., Bushby, R. and Movaghar, B. (2011). Discotic columnar liquid crystals: Electrical properties and applications. *Encyclopedia of materials: Science and technology*. Elsevier Ltd. 2194-2203.
- Bushby, R.J. and Lozman, O.R. (2002). Discotic liquid crystals 25 years on. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 7: 343-354.
- Bushby, R.J. and Lozman, O.R. (2002). Photoconducting liquid crystals. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 6: 569-578.
- Bushby, R.J. and Kawata, K. (2011). Liquid crystals that affected the world: discotic liquid crystals. *Liquid Crystals* 38(11-12): 1415-1426.
- Christ, T., Stümpflen, V. and Wendorff, J.H. (1997). Light-emitting diodes based on a discotic main chain polymer. *Macromolecular Rapid Communications* 18: 93-98.
- Collings, P.J. and Hird, M. (1997). *Introduction to liquid crystals: chemistry and physics*. London: Taylor & Francis. 43-80.
- Collings, P.J. (2002). *Liquid crystals: nature's delicate phase of matter*. (Second Edition). Princeton: Princeton University Press. 1-20.
- Hamley, I. W. (2007). *Introduction to soft matter*. (Revised Edition) Chichester: John Wiley & Sons. 221-245.
- Kepler, R.G. (1960). Charge carrier production and mobility in anthracene crystals. *Physical Review B* 119: 1226-1229.
- Müller-Horsche, E., Haarer, D. and Scher, H. (1987). Transition from dispersive to non-dispersive transport: Photoconduction of polyvinylcarbazole. *Physical Review B* 35: 1273-1280.
- Piris, J., Debije, M.G., Stutzmann, N., Laursen, B.W., Pisula, W., Watson, M.D. Bjørnholm, T., Müllen, K. and Warman, J.M. (2004). Aligned thin films of discotic hexabenzocoronenes.: Anisotropy in optical and charge transport properties. *Advanced Functional Materials* 14: 1053-1061.
- Piris, J., Pisula, W. and Warman, J.M. (2004). Anisotropy of the optical absorption and photoconductivity of a zone-cast film of a discotic hexabenzocoronene. *Synthetic Metals* 147: 85-89.
- Saeki, A., Seki, S., Sunagawa, T., Ushida, K. and Tagawa, S. (2006). Charge-carrier dynamics in polythiophene films studied by in-situ measurement of flash photolysis time-resolved microwave conductivity (FP-TRMC) and transient optical spectroscopy (TOS). *Philosophical Magazine* 86: 1261-1276.
- Sakurai, T., Shi, K., Sato, H., Tashiro, K., Osuka, A., Saeki, A., Seki, S., Tagawa, S., Sasaki, S., Masunaga, H., Osuka, K., Takata, M. and Aida, T. (2008). Prominent electron transport property observed for triply fused metalloporphyrin dimer: Directed columnar liquid crystalline assembly by amphiphilic molecular design.

- Journal of the American Chemical Society
130: 13812-13813.
- Tate, D.J., Anémian, R., Bushby, R.J., Nanan, S.,
Warriner, S.L. and Whitaker, B. (2012).
Improve syntheses of high hole mobility
phthalocyanines: a case of steric assistance in
the cyclo-oligomerisation of phthalonitriles.
Beilstein Journal of Organic Chemistry 8:
120-128.
- Van Keulen., J., Warmerdam, T.W., Nolte, R.J.M. and
Drenth, W. (1987). Electrical conductivity in
hexaalkoxytriphenylenes. Recueil des
Travaux Chimiques des Pays-Bas. 106: 534-
536.
- Warman, J.M. and Van De Craats, A.M. (2003). Charge
mobility in discotic materials studied by PR-
TRMC. Molecular Crystals & Liquid Crystals
396: 41-72.

