รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี พ.ศ. 2557 (ค.ศ. 2014): LED สีน้ำเงิน

อัจฉรา ปัญญา[1]

ในเดือนตุลาคมของทุกปีจะมีการประกาศรางวัลโนเบล ซึ่งถือได้ว่าเป็นรางวัลสูงสุดที่มอบให้แก่นักวิทยาศาสตร์ผู้ได้รับคัดเลือกจากสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งประเทศสวีเดนในพระบรมราชูปถัมภ์ (The Royal Swedish Academy of Sciences) ว่าเป็นผู้ที่ได้คิดค้นทฤษฎีหรือสิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณประโยชน์ให้แก่มวลมนุษยชาติอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงไม่แปลกที่นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกต่างตั้งตารอคอยการประกาศผลรางวัลนี้ โดยในช่วงนี้ของปีถือได้ว่าเป็นช่วงที่บรรยากาศในวงการวิทยาศาสตร์จะมีความคึกคักเป็นพิเศษ เพราะต่างก็ร่วมลุ้นกันว่า งานวิจัยด้านใดที่น่าจะได้รับรางวัล, บุคคลท่านใดที่น่าจะได้รับรางวัล, สิ่งประดิษฐ์หรือทฤษฏีที่ได้รับรางวัลจะเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ตนกำลังทำอยู่หรือไม่ ฯลฯ เมื่อทราบผลรางวัลแล้วก็มักจะมีการสนทนาเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้รับรางวัล ร่วมสนุกไปกับการคาดการณ์ว่าปีหน้าใครจะได้รางวัลนี้ไปครองเป็นรายต่อไป จึงถือได้ว่ารางวัลนี้นอกจากจะสร้างสีสันให้กับวงการวิทยาศาสตร์แล้วยังเปรียบเสมือนเป็นขวัญและกำลังใจให้กับบรรดานักวิทยาศาสตร์ทั้งรุ่นใหม่และรุ่นเก่าให้มีความพยายามสร้างสรรค์ผลงานอันทรงคุณค่าเฉกเช่นบรรดาผู้ได้รับรางวัลท่านก่อนๆ

ซึ่งในปี 2014 ที่พึ่งผ่านมา รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ได้ตกเป็นของศาสตราจารย์อิซามุ อะคาซากิ (Isamu Akasaki), ศาสตราจารย์ฮิโรชิ อามาโนะ (Hiroshi Amano) จากมหาวิทยาลัยนาโงย่า (Nagoya University) ประเทศญี่ปุ่น และศาสตราจารย์ซูจิ นาคามูระ (Shuji Nakamura) จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียซานตาบาบาร่า (University of California, Santa Barbara) ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับ "การประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม" ไดโอดเปล่งแสง (light - emitting diodes) หรือที่เรียกกันสั้น ๆ ในวงการอิเล็กทรอนิกส์ว่า แอลอีดี (LED) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรืองแสงได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ โดยที่แสงที่เปล่งออกมาจะครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีอินฟราเรดไปจนถึงอัลตราไวโอเลต และถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาแอลอีดีสีแดง (1950s) และสีเขียว (1960s) สำเร็จแล้วตั้งแต่เมื่อ 50 – 60 ปีก่อน แต่ในขณะนั้นนักวิทยาศาสตร์ยังประสบปัญหาไม่สามารถที่จะผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินได้ ปัญหานี้ถูกทิ้งให้เป็นความท้าทายก้าวต่อไปให้กับวงการอิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (optoelectronics) เป็นเวลาหลายสิบปี จนกระทั่งผู้ได้รับรางวัลโนเบลทั้งสามคนได้ค้นพบวิธีเตรียมผลึกแกลเลียมไนไตรด์ (GaN) ที่มีคุณภาพ และค้นพบวิธีการเจือ GaN ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p (p-type semiconductors) ได้สำเร็จ เจ้าแอลอีดีสีน้ำเงินนี้จึงได้ถือกำเนิดขึ้นและเข้ามาเติมเต็มความฝันของนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการจะผลิตแสงสีขาวที่ประหยัดพลังงาน, มีอายุการใช้งานยาวนาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้นั่นเอง

สำหรับผู้ที่ติดตามข่าวสารเกี่ยวกับรางวัลโนเบลเป็นประจำทุกปี คำถามแรกที่มาพร้อมกับรางวัลโนเบลทุกสาขาคือ มันมีผลกระทบต่อมวลมนุษยชาติอย่างไร ในบทความนี้เราจะมาร่วมกันหาคำตอบว่า อะไรที่ทำให้แอลอีดีสีน้ำเงินธรรมดา ๆ ราคาไม่กี่ตังค์ มีค่าคู่ควรกับรางวัลโนเบล และเราจะหยุดอยู่แค่แอลอีดีสีน้ำเงิน ที่ผลิตจาก GaN และอัลลอยของ III-N (III-nitride semiconductors) แค่นี้หรือไม่ แต่ก่อนที่เราจะไปหาคำตอบเหล่านั้น ผู้เขียนอยากให้เราลองย้อนกลับไปดูประวัติศาสตร์ของเทคโนโลยีแสงสว่างซักนิด ซึ่งเราจะพบว่ามีประวัติยาวนานคู่มากับมนุษยชาติเลยทีเดียว เพราะความต้องการหนึ่งของมนุษย์ที่สำคัญไปไม่น้อยกว่าปัจจัย 4 ก็คือความต้องการที่จะมองเห็นสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวเองแม้ในยามค่ำคืนที่ไร้แสงอาทิตย์ ในยุคหินมนุษย์ใช้กองไฟ หรือตะเกียงจากไขมันสัตว์ ส่วนในสมัยอียิปต์ก็เริ่มนำเทียนไขมาใช้อย่างจริงจัง แสงสว่างเหล่านี้ได้มาจากการเผาไหม้ทั้งสิ้น จนกระทั่งในปี 1802 นักเคมีชาวอังกฤษ

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์(ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Hamphry Davy ได้ประดิษฐ์หลอดไฟชนิดหลอดไส้เป็นครั้งแรก จากการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดแพลตินัม ซึ่งตรงจุดนี้ถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของเทคโนโลยีแสงสว่างก็ว่าได้ หลังจากนั้น Thomas Edison จึงได้ผลิตหลอดไส้ที่สามารถนำไปขายในท้องตลาดได้เป็นรายแรก เทคโนโลยีแสงสว่างถัดมาคือหลอดไฟแก๊สปล่อยประจุ แก๊สในหลอดไฟชนิดนี้ได้แก่ อาร์กอน, นีออน, คริปตอน และ ซีนอน ซึ่งหลอดไฟชนิดนี้จะให้อิเล็กตรอนไหลผ่านหลอดแก้วที่มีแก๊สความดันต่ำ พออิเล็กตรอนชนเข้ากับอะตอมแก๊ส ก็จะทำให้อะตอมแก๊สเปลี่ยนระดับพลังงานปลดปล่อยโฟตอนออกมาแต่มักไม่ใช่แสงขาว และหากย้อนเวลากลับไปซักไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา หลอดไฟเรืองแสงหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ก็ได้เข้ามาตีตลาดอย่างหนัก หลอดไฟชนิดนี้ใช้หลักการเดียวกับหลอดไฟแก๊สปล่อยประจุแต่โฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจะอยู่ในย่านรังสีอัลตราไวโอเลต เมื่อไปชนกับสารเรืองแสงที่ฉาบผิวหลอดไว้ก็จะให้แสงขาวออกมา หากยังจำกันได้ในยุคหนึ่งได้มีการรณรงค์ให้เปลี่ยนมาใช้หลอดไฟชนิดนี้แทนหลอดไส้เพราะประหยัดพลังงานและอายุการใช้งานนานกว่า แต่ทุกสิ่งทุกอย่างย่อมมีการเปลี่ยนแปลง แม้แต่หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เคยได้รับการโฆษณาว่าดีนักดีหนา ก็ไม่เว้น เนื่องด้วยปัจจุบันเทคโนโลยีหลอดไฟแอลอีดีกำลังคืบคลานเข้ามาปฏิวัติหลอดไฟรุ่นเก่าๆ แล้ว

รูปที่ 1 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีแสงสว่าง *(http://resources.made-in-china.com/article/company-news/AnPxKOJruEHS/Evolution-of-LED-Technology/)*

แอลอีดีคืออะไร มีหลักการทำงานอย่างไร ?

แอลอีดี คือ ไดโอดที่เปล่งแสงในย่านที่มนุษย์มองเห็นได้ (visible light) รวมไปถึงย่านรังสีอินฟราเรดและอัลตราไวโอเลต คำอธิบายแค่นี้คงยังไม่เพียงพอ หากเรายังไม่รู้ว่าไดโอดคืออะไร ไดโอดสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านทางรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ ชนิด p และ n (p and n - type semiconductors) โดยเรียกรอยต่อนี้ว่า p–n junction ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด n จะมีพาหะที่เป็นประจุลบจำนวนมาก โดยทั่วไปก็หมายถึงมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมาก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด p จะเต็มไปด้วยพาหะที่มีประจุบวก หรืออาจจะเทียบได้ว่ามีหลุม (hole) จำนวนมาก ที่สามารถให้อิเล็กตรอนจากอีกฝั่งเข้ามาเติมเต็มได้ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงสามารถไหลได้โดยสะดวกจากด้าน p ไปยังด้าน n ซึ่งหลักการนี้ถูกนำไปใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อเราทราบความหมายของไดโอดแล้ว ภารกิจต่อไปคือการทำความเข้าใจว่าไดโอดเปล่งแสงนั้น เปล่งแสงหรือปลดปล่อยโฟตอนได้อย่างไร เรื่องนี้สามารถอธิบายง่าย ๆ โดยจินตนาการถึงอิเล็กตรอนที่กำลังโคจรรอบนิวเคลียสในวงโคจรที่ต่างกัน ยิ่งอิเล็กตรอนโคจรอยู่ห่างจากนิวเคลียสเท่าไหร่ก็จะมีพลังงานมากขึ้น ถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนวงโคจร มันจำเป็นที่จะต้องปลดปล่อยหรือรับพลังงานเข้ามา ดังนั้นในทำนองเดียวกันเมื่ออิเล็กตรอนจากด้าน n ของไดโอดกระโดดไปลงหลุมในด้าน p อิเล็กตรอนก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเช่นกัน โดยเปลี่ยนไปสู่สถานะที่มีพลังงานต่ำลง ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอน ซึ่งก็คือรังสีแสงต่างๆ นั้นเอง โดยพลังงานหรือความถี่ของโฟตอนจะเป็นตัวกำหนดสีของแสงที่เปล่งออกมา ถ้าความถี่เหล่านั้นอยู่ในย่านที่มองเห็นได้ เราก็จะเห็นเป็นแสงสีต่างๆ แต่ถึงแม้จะเป็นความถี่ที่ตามองไม่เห็น ยกตัวอย่างเช่น รังสีอินฟราเรด มันก็ยังมีประโยชน์สามารถนำมาผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดได้ ยกตัวอย่างเช่น รีโมททีวีทัศน์ ที่เราใช้อยู่ทุกวันในบ้าน ก็ถูกสร้างมาจากไดโอดที่เปล่งแสงในย่านอินฟราเรด ดังนั้นเราจึงสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า แอลอีดีก็คือไดโอดชนิดพิเศษที่ผ่านการออกแบบมาให้สามารถปลดปล่อยโฟตอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดให้แอลอีดีเปล่งแสงสีต่างๆ นั้น คือ

ช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ **ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap)** กับ**ช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band gap)** [1] ซึ่งคำว่า “ตรง” ในที่นี้หมายถึง ถ้าพิจารณาแถบพลังงานใน reciprocal space จุดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band maximum, VBM) จะอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับ จุดต่ำสุดของแถบพลังงานตัวนำ (conduction band minimum, CBM) ซึ่งก็หมายความว่า อิเล็กตรอนที่ VBM กับ CBM มีโมเมนตัมเท่ากัน ส่วนคำว่า “ไม่ตรง” จะสื่อว่า VBM อยู่คนละตำแหน่งกับ CBM ซึ่งในกรณีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก CBM ไปยัง VBM (ซึ่งจะมีการปลดปล่อยโฟตอน)ได้โดยอาศัยแค่อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอนเพื่ออนุรักษ์พลังงานเท่านั้น แต่ในกรณีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก CBM ไปยัง VBM ได้นั้นต้องเพิ่มอันตรกิริยากับโฟนอน (นั่นก็คือการสั่นของแลตทิซ) เข้ามาช่วยเพื่ออนุรักษ์โมเมนตัม ดังนั้นสารกึ่งตัวทำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง จึงมีการปลดปล่อย (และดูดกลืน) โฟตอนได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำมาสร้างเป็นแอลอีดีมากกว่า สำหรับตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำ แอลอีดีอินฟาเรด, สีแดง, สีเขียว, สีน้ำเงิน และอัลตราไวโอเลต ได้แก่ สาร GaAs, AlGaAs, AlGaInP, InGaN และ AlN ตามลำดับ ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จะมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง < 1.63 eV, 1.63 – 2.03 eV, 1.9 - 4.0 eV, 2.48 – 3.7 eV และ 3.1 – 4.4 eV ตามลำดับ

เพราะอะไรแอลอีดีสีน้ำเงินถึงได้สร้างยากเย็นนัก ?

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเทคโนโลยีแสงสว่างจากแอลอีดีสีจะไม่สามารถประสบความสำเร็จได้เลย หากปราศจากจิกซอว์ตัวสุดท้าย “แอลอีดีสีน้ำเงิน” เนื่องมาจากมนุษย์เราต้องการสร้างแสงที่คล้ายกับแสงอาทิตย์นั้นก็คือ **แสงขาว** และการที่จะสร้างแสงขาวได้เราต้องมีแม่สีแสงครบ ซึ่งได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ผู้เขียนเชื่อว่าหนึ่งในคำถามที่ผุดขึ้นมาในใจของผู้ติดตามข่าวสารของหลอดไฟแอลอีดีคงหนีไม่พ้นคำถามที่ว่า เพราะเหตุใดจึงต้องใช้เวลาถึงกว่า 30 ปี ในการสร้างและพัฒนาแอลอีดีสีน้ำเงินให้สามารถนำออกมาจำหน่ายในท้องตลาดได้ จะตอบคำถามนี้ให้ได้ลึกซึ้งก็คงต้องย้อนกลับไปศึกษาประวัติการสร้างหลอดแอลอีดีซักนิด ห้องทดลองแรก ๆ ของโลกที่ริเริ่มทำงานวิจัยและมีรายงานผลเกี่ยวกับการสร้างแอลอีดีได้แก่ Philips Central Laboratory ประเทศเยอรมันนี (โดย H.G. Grimmeiss), Services Electronics Laboratories (SERL) ประเทศอังกฤษ (โดย J.W. Allen) และ Bell Telephone Laboratories ประเทศสหรัฐอเมริกา (โดย M. Gershenzon) โดยแอลอีดีจะถูกสร้างมาจากการเจือ Zn, O หรือ N ลงในสารกึ่งตัวนำ GaP ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบไม่ตรง เท่ากับ 2.2 eV จนสารกึ่งตัวนำดังกล่าวสามารถให้กำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ตั้งแต่แสงสีแดงจนถึงสีเขียว ซึ่งหลังจากนั้นประเทศอื่น ๆ ก็ได้ใช้ GaP เป็นสารกึ่งตัวนำพื้นฐานในการผลิตหลอดแอลอีดีสีแดงและสีเขียว จนกระทั่ง Nick Holonyak นักวิจัยจาก General Electric (GE) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มทำการวิจัยเกี่ยวกับ p-n junctions ของสารกึ่งตัวนำ GaP_xAs_{1-x} ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงในกรณีที่ $x < 0.45$ และประสบความสำเร็จในการสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 710 nm (สีแดง) สำเร็จเป็นที่แรกของโลกในปี 1962 ในช่วงแรกแอลอีดีสีแดงถูกนำมาใช้ในหน้าจอแสดงผลของเครื่องคิดเลข โดยอาศัยเลนส์พลาสติกมาช่วยในการเพิ่มขนาดของตัวเลข ดัง รูปที่ 2

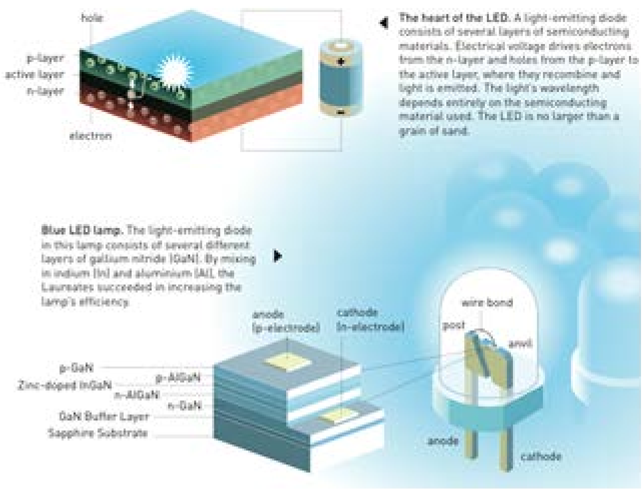
***รูปที่ 2** ตัวอย่างการนำแอลอีดีสีแดงมาใช้ในหน้าจอแสดงผลของเครื่องคิดเลข (ที่มา: wikimedia – David R. Tribble)*

ถึงแม้ในช่วงท้ายของ 1960s จะเริ่มมีความพยายามที่จะผลิตแอลอีดีสีน้ำเงิน แต่ก็ยังไม่สามารถทำได้สำเร็จ เนื่องมาจากในการผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินนั้นจำเป็นที่จะต้องหาสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมและต้องใช้ความประณีตในการปลูกผลึกอย่างสูง ในช่วงเวลาดังกล่าวสารกึ่งตัวนำที่มีแนวโน้มจะถูกนำมาใช้ในการผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินได้แก่ SiC, ZnSe และ GaN เมื่อนักวิทยาศาสตร์สามารถเตรียมฟิล์ม SiC ชนิด p ได้แล้ว จึงสามารถผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินที่สร้างจาก p-n junction ของ SiC ได้ก่อนเป็นอันดับแรก แต่เนื่องจาก SiC มีช่องว่างแถบพลังงานแบบไม่ตรง ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะสร้างแอลอีดีที่มี

ประสิทธิภาพสูง ส่วน ZnSe และ GaN ถึงแม้จะมีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง แต่ก็เป็นที่น่าเสียดายที่คุณภาพของผลึกที่ปลูกได้ในขณะนั้นยังไม่ดีพอ ไม่สามารถที่จะควบคุมความเรียบของผลึกได้ และยังประสบปัญหาในการเตรียมฟิล์ม ZnSe และ GaN ชนิด p อีกด้วย เนื่องจากไฮโดรเจนมักจะเข้าไปรวมตัวกับสารที่เราใช้เจือเข้าไป (aceptor dopants) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนลดลง

หลังจากนั้นในช่วง 1970s เหล่านักวิทยาศาสตร์ก็ยังแก้ปัญหาดังกล่าวไม่ได้ ช่วงเวลานี้จึงเปรียบเสมือนยุคมืดมนของการพัฒนาแอลอีดีสีน้ำเงิน จนกระทั่งมาถึงช่วง 1980s แสงสว่างก็เริ่มปรากฏที่ปลายอุโมงค์เมื่อ อิซามุ อะคาซากิ, ฮิโรชิ อามาโนะ และผู้ร่วมงานท่านอื่น ๆ สามารถที่จะปลูกผลึก GaN ที่มีคุณภาพปราศจากความเค้นอันเนื่องมาจากความไม่เท่ากันของระยะห่างระหว่างอะตอมของสารพื้นฐาน (substrate) กับ GaN ได้สำเร็จ โดยใช้เทคนิค **MOVPE (Metaloraganic Vapour Phase Epitaxy)** ซึ่งพวกเค้าใช้วิธีเตรียม polycrystalline ของ AlN หนา 30 nm ลงบน sapphire ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ให้ความร้อนเข้าไปจนอุณหภูมิเป็น 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการปลูกผลึก GaN และในช่วงกระบวนการให้ความร้อน cryalline เล็ก ๆ จะค่อย ๆ ถูกทำให้เรียงตัวไปในทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึก GaN และในเวลาไล่เลี่ยกัน ซูจิ นาคามูระ ก็ได้พัฒนาเทคนิคที่ทำให้สามารถปลูกผลึก GaN ที่มีผิวหน้าที่เรียบได้ โดยมีวิธีที่แตกต่างจากกลุ่มแรกตรงที่เขาเลือกที่จะใช้ GaN ที่ปลูกที่อุณหภูมิต่ำ มาแทนที่ polycrystalline ของ AlN

การค้นพบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการพัฒนาแอลอีดีสีน้ำเงินคือการแก้ปัญหาเรื่องการเจือ GaN ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องมาจากตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ที่ถูกเจือเข้าไปจะไปสร้างพันธะกับไฮโดรเจนกลายเป็นสารเชิงซ้อน (complexs) ซึ่งจะไปลดประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเจือแล้ว จนกระทั่งในช่วง 1990s ปัญหาดังกล่าวจึงได้ถูกกำจัดไปเมื่อ อิซามุ อะคาซากิ, ฮิโรชิ อามาโนะ และ ผู้ร่วมงานท่านอื่นๆ ได้ค้นพบว่าการนำ GaN ที่ถูกเจือด้วย Zn ไปศึกษาด้วย scanning electron microscope และ นำ GaN ที่ถูกเจือด้วย Mg ไปศึกษาโดยการฉายด้วยอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ จะทำให้มันสามารถกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p ได้ดีขึ้น ซึ่งภายหลัง ซูจิ นาคามูระ ได้ให้เหตุผลเกี่ยวกับเหตุการณ์นี้ว่าอิเล็กตรอนที่ฉายเข้าไปได้ไปทำลายพันธะของสารเชิงซ้อนและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนให้แก่สารกึ่งตัวนำ นอกจากวิธีนี้เขายังได้เสนอว่ากระบวนการทางความร้อนแบบ annealing ก็สามารถที่จะทำลายพันธะของสารเชิงซ้อนได้เช่นกัน ซึ่งจากการค้นพบเหล่านี้ส่งผลให้ผู้ได้รับรางวัลโนเบลทั้งสามท่านและผู้ร่วมงานท่านอื่น ๆ สามารถที่จะผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินขึ้นมาได้สำเร็จ จากการสร้าง p-n junction ที่รอยต่อของ GaN และอัลลอยของ GaN ต่างๆ ได้แก่ AlGaN/GaN, InGaN/GaN และ InGaN/AlGaN



รูปที่ 3 *โครงสร้างและหลักการทำงานของแอลอีดี (บน), แอลอีดีสีน้ำเงินที่สร้างจาก GaN และ อัลลอยของ GaN (ล่าง) [2]*

ความรู้จากการค้นพบทั้งวิธีการปลูกผลึก GaN ที่มีคุณภาพ และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของสารกึ่งตัวนำชนิด p ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานสำคัญที่ทำให้ภาคอุตสาหกรรมสามารถผลิตหลอดไฟแอลอีดีสีขาว (ซึ่งประกอบไปด้วย แอลอีดีสีแดง เขียว และน้ำเงิน) ออกวางจำหน่ายในท้องตลาดได้ในปี 2008 และทำให้ อิซามุ อะคาซากิ, ฮิโรชิ อามาโนะ และ ซูจิ นาคามูระ ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 2014

เพราะเหตุใดแอลอีดีสีน้ำเงินถึงคู่ควรต่อรางวัลโนเบล ?

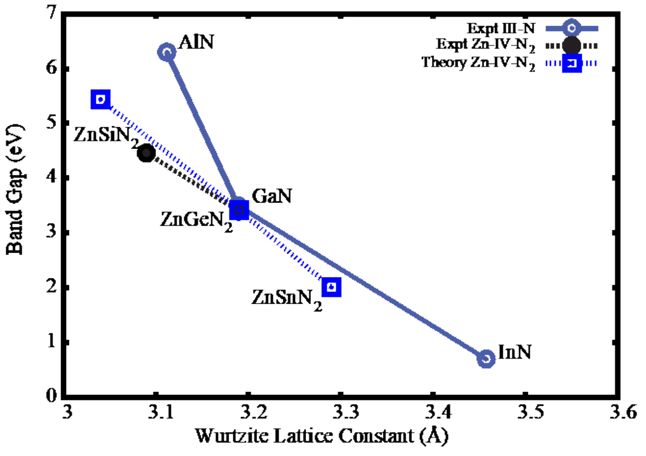
คำตอบก็คือ เพราะมันคือการปฏิวัติเทคโนโลยีการส่องสว่างแบบก้าวกระโดดนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น จากหลอดไส้ที่ถูกคิดค้นมานานกว่า 135 ปี มาเป็นหลอดแอลอีดี ที่มีอายุการใช้งาน

ยาวนานกว่า มีราคาที่ถูกลงอย่างรวดเร็วตามอุปทานในตลาด และที่สำคัญมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงสูงถึง 50% ในขณะที่ประสิทธิภาพของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และหลอดไส้อยู่ที่ 22% และ 4% ตามลำดับ ซึ่งทำให้เราสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยรวมลงไปได้ถึง 20 - 30% แอลอีดีสีขาวยังช่วยให้ประชากรโลกกว่า 1.5 พันล้านคนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ห่างไกลและยังขาดแคลนสาธารณูปโภคพื้นฐานด้านไฟฟ้า ให้ได้มีแสงสว่างใช้ในยามค่ำคืน เนื่องจากแอลอีดีสีขาวสามารถถูกนำไปใช้งานควบคู่กับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้เรายังใช้เทคโนโลยีที่ได้จากการผลิตแอลอีดีสีน้ำเงิน มาใช้ในการพัฒนาจอแสดงผลแบบส่องผ่าน (backlit display) สำหรับหน้าจอโทรศัพท์มือถือ แล็ปท็อป และโทรทัศน์, และใช้ในเลเซอร์สีน้ำเงินสำหรับเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลบนแผ่นบลูเรย์ซึ่งมีความจุมากกว่าแผ่นดีวีดีถึงห้าเท่า และในอนาคตนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่านอกจากแสงสีน้ำเงินแล้ว แสงยูวีจาก GaAlN/GaN จะมีประโยชน์ทางด้านสุขอนามัยด้วย เพราะแสงยูวีสามารถทำลายดีเอ็นเอของแบคทีเรียและไวรัสได้ นี้เป็นเพียงตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของผลงานวิจัยของทั้งสามท่านที่มีต่อมวลมนุษยชาติ ดังนั้นจึงไม่แปลกที่รางวัลโนเบลจะตกเป็นของท่านเหล่านี้ที่ทุ่มเท คิดค้น จนได้นวัตกรรมที่มีส่วนทำให้สังคมของเราดีขึ้น ตรงตามเจตนารมณ์ของ Alfred Nobel ผู้ก่อตั้งรางวัลโนเบล

จะหยุดอยู่ที่แอลอีดีสีน้ำเงินจาก GaN หรือไม่ ?

เราจะหยุดพัฒนาเทคโนโลยีเรื่องแสงสว่างกันแล้วหรือไม่ ในเมื่อแอลอีดีสีน้ำเงินจาก GaN ดูจะมีคุณประโยชน์มหาศาลจนทำให้ผู้คิดค้นได้รับรางวัลโนเบลไปแล้ว คำตอบของคำถามนี้ง่ายมาก ถ้าเราในที่นี้หมายถึงเหล่านักวิทยาศาสตร์ คำตอบนั้นก็คือ “ไม่หยุด” เพราะนักวิทยาศาสตร์โดยทั่วไปคงไม่คิดว่าสิ่งที่มีอยู่คือสิ่งที่ดีที่สุด เราเชื่อว่าทุกอย่างยังมีหนทางพัฒนาได้ วันนี้พระเอกของเรื่องแอลอีดีสีน้ำเงินคือ GaN และผู้ช่วยพระเอกได้แก่ InGaN, AlGaN ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้มาจากการรวมตัวกันของ GaN และญาติ ๆ ในตระกูล III-N ได้แก่ AlN, InN และถึงแม้ว่าในปัจจุบันพระเอกและเหล่าผู้ช่วยจะสามารถปฏิวัติเทคโนโลยีส่องสว่างได้สำเร็จ แต่ใครจะรู้ว่าในอนาคตเราจะไม่ประสบกับปัญหาอื่น ๆ ตามมา ยกตัวอย่างเช่น การนำแกลเลียม (Galium) และอินเดียม (Indium) ซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ มาใช้ในการผลิตอุปกรณ์แอลอีดีเป็นจำนวนมาก อาจทำให้ธาตุดังกล่าวมีราคาแพงและเกิดภาวะขาดแคลนในที่สุดได้ นอกจากนั้นในการสังเคราะห์สารอัลลอย (alloy) ของสารกึ่งตัวนำ กลุ่ม III-N ยังพบว่ามีปัญหาการแยกสถานะ (phase separation) ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิด ซึ่งเป็นผลจากค่าคงที่แลตทิซ (lattice constants) ของ III-N มีค่าแตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงไม่แปลกที่ยังมีนักวิทยาศาสตร์หลาย ๆ กลุ่มได้พยายามที่จะค้นหาสารชนิดใหม่ที่ยังคงสมบัติที่เป็นประโยชน์ของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-N แต่ปราศจากซึ่งปัญหาดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น โดยการแทนที่ธาตุหมู่ III ในกลุ่ม III-N ด้วย Zn และธาตุหมู่ IV เกิดเป็น สารกึ่งตัวนำกลุ่ม Zn-IV-N_2 ขึ้นมาใหม่ [3] ซึ่งจะพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของกลุ่ม Zn-IV-N_2 ครอบคลุมช่วงพลังงานของแสงที่มองเห็นได้เช่นเดียวกันกับกลุ่ม III-N แต่มีค่าคงที่แลตทิซที่ใกล้เคียงกันมากกว่ากลุ่ม III-N ดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงช่องว่างแถบพลังงาน (band gaps) เทียบกับค่าคงที่แลตทิซ (lattice constants) ของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-N กับกลุ่ม Zn-IV-N_2 [3]

สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม Zn-IV-N_2 ยกตัวอย่างเช่น สาร $ZnSnN_2$ เป็นสารที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก [4-7] เนื่องจากในช่วงสองสามปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีรายงานเกี่ยวกับการสังเคราะห์ $ZnSnN_2$ ได้เป็นผลสำเร็จและพบว่ามันมีคุณสมบัติเป็นไปตามคาด

[3] มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้แทนสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ $ZnSnN_2$ ยังเป็นสารประกอบที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากธาตุที่มีอยู่อย่างมากมายในธรรมชาติ จึงทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้และยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษน้อยเนื่องจากในปัจจุบันได้มีโรงงานรีไซเคิลสำหรับ Zn และ Sn เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ $ZnSnN_2$ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [4-7]

เอกสารอ้างอิง

[1] G. (Ed.) Bernard, “III-Nitride Semiconductors and Their Modern Devices”, Oxford University Press, August 22, 2013.

[2] L. Bergström, P. Delsing, A. L’Huillier and O. (Ed.) Inganäs, “The Nobel Prize in Physics 2014”, The Royal Swedish Academy of Sciences, October, 7, 2014.

[3] A. Punya, W. R. L. Lambrecht and M. v. Schilfgaarde, “Quasiparticle band structure of Zn-IV-N_2 compounds”, Phys. Rev. B 84, 65204 (2011).

[4] L. Lahourcade, N. C. Coronel, K. T. Delaney, S. K. Shukla, N. A. Spaldin, and H. A. Atwater, “Structural and optoelectronic characterization of RF sputtered ZnSnN(2)”, Adv. Mater. 25, 2562 (2013).

[5] P. C. Quayle, K. He, J. Shan, and K. Kash, “Synthesis, Lattice Structure and Band Gap of $ZnSnN_2$”, MRS Communications 3, 135 (2013).

[6] N. Feldberg, J. D. Aldous, W. M. Linhart, L. J. Phillips, K. Durose, P. A. Stampe, R. J. Kennedy, D. O. Scanlon, G. Vardar, R. L. Field, III, T. Y. Jen, R. S. Goldman, T. D. Veal, and S. M. Durbin “Growth, disorder, and physical properties of $ZnSnN_2$”, Appl. Phys. Lett. 103, 042109 (2013).

[7] N. Feldberg, J. D. Aldous, P. A. Stampe, R. J. Kennedy, T.D. Veal, and S. M. Durbin, “Growth of $ZnSnN_2$ by Molecular Beam Epitaxy”, J. Electron. Mater. 43, 884 (2014).

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิค

(Excitonic Solar Cells)

พิพัฒน์ เรือนคำ[1]

ในสภาพสังคมปัจจุบัน ที่มีความต้องการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก และจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานเพิ่ม ที่สะอาดไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นคำตอบหนึ่งสำหรับปัญหานี้ เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนามาหลายทศวรรษ ตั้งแต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (Si-based solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film solar cells) จนมาถึง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอุบัติใหม่ (Emerging solar cells) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้มีหลักการทำงานพื้นฐานมาจากรอยต่อชนิดพีเอ็น (*p-n* junction) แต่ใช้สารกึ่งตัวนำและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันด้วยความแตกต่างนี้ ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ต้นทุนการผลิต สมบัติการโค้งงอ น้ำหนัก และเวลาคุ้มทุนแตกต่างกันไปด้วย ในบทความนี้ เป็นการแนะนำและอธิบายสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอุบัติใหม่ ที่ใช้จำเป็นต้องมีการแยกคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล หรือ **เอกซิตอน (Exciton)** ออกเป็นประจุไฟฟ้าอิสระ ซึ่งมีหลักการทำงานแตกต่างไปจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้หลักการทำงานแบบรอยต่อพีเอ็นเล็กน้อย เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกเรียกว่า **“เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิค”** หรือ **“Excitonic solar cells”**

เอกซิตอน คือ อะไร...?

เอกซิตอน เป็นอนุภาคเสมือน (Quasi-particles) ที่มีการดึงดูดแบบคูลอมบ์ ระหว่างอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน (Conduction band) กับ โฮล (Hole) ในแถบวาเลนซ์ (Valence band) หรือ ระหว่างอิเล็กตรอนในออร์บิทัลของโมเลกุลที่มีพลังงานต่ำที่สุด (LUMO หรือ Lowest unoccupied molecular orbital) กับโฮลในออร์บิทัลของโมเลกุลที่มีพลังงานสูงที่สุด (HOMO หรือ Highest occupied molecular orbital) ซึ่งเอกซิตอนสามารถสร้างได้จากการดึงดูดของอิเล็กตรอนอิสระกับโฮลอิสระ หรือ จากการกระตุ้นด้วยแสง (Photoexcitation) โดยตรง [1] ซึ่งในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จะเป็นการกระตุ้นด้วยแสง โดยใช้ประจุไฟฟ้าในการรับพลังงานแสง การกระตุ้นด้วยแสงเริ่มต้นด้วยการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ แล้วกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากแถบวาเลนซ์ (หรือ HOMO) ไปยังแถบคอนดักชัน (หรือ LUMO) โดยเกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ (หรือ HOMO) หากการดึงดูดแบบคูลอมบ์ของประจุทั้งสองมีพลังงานมากกว่าพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้อง จะทำให้ประจุไฟฟ้าไม่สามารถแยกออกเป็นอิสระจากกันได้ เกิดเป็นเอกซิตอน การเกิดเอกซิตอนนี้พบในสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ต่ำ หรือสารที่มีขนาดของอนุภาคในระดับนาโนเมตร (เล็กกว่าเส้นผมประมาณ 100 ถึง 1000 เท่า) ซึ่งมักเป็นพวกโมเลกุลและสารประเภทไฮบริดทั้งหลาย [2] แต่ในทางตรงกันข้าม หากสารกึ่งตัวนำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ทำให้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของเอกซิตอนน้อยกว่าพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้อง จึงมีพลังงานมากพอสำหรับแยกประจุออกจากกัน ส่วนการกระตุ้นด้วยแสงจะแยกเอกซิตอนทำให้เกิดการสร้างประจุไฟฟ้าอิสระได้โดยตรง ปรากฏการณ์นี้มักพบในสารกึ่งตัวนำชนิดสารอินทรีย์

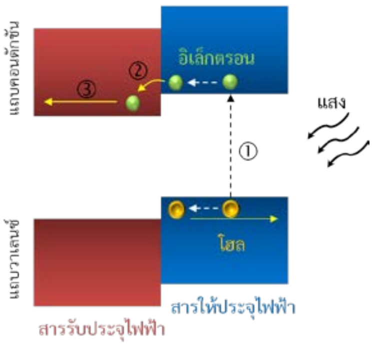
ความแตกต่างกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้รอยต่อพีเอ็น

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถถูกจำแนกออกเป็น 2 ชนิดคร่าวๆ ตามหลักการทำงาน คือ 1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้หลักการของรอยต่อพีเอ็น และ 2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิค [3] สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ใช้รอยต่อพีเอ็นนั้น การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการสร้างประจุไฟฟ้าอิสระได้โดยตรง เนื่องจากใช้สารกึ่งตัวนำประเภทสารอนินทรีย์เป็นส่วน

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์(ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ใหญ่ เช่น ซิลิกอน (Si) แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) เป็นต้น ซึ่งประจุไฟฟ้าจะถูกขับเคลื่อนโดยสนามไฟฟ้าภายใน (Built-in electric field) ให้เดินทางไปตามทิศทางที่ต้องการ ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแล้วนำมาใช้เป็นพลังงาน แต่ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิคนั้น ใช้สารอินทรีย์ หรือ โมเลกุล เป็นส่วนใหญ่ ทำให้การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสร้างเอกซิตอนขึ้น และเอกซิตอนนี้จำเป็นจะต้องถูกแยกออกให้เป็นประจุไฟฟ้าอิสระ เพื่อนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งพลังงานที่ใช้จะต้องมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของเอกซิตอน

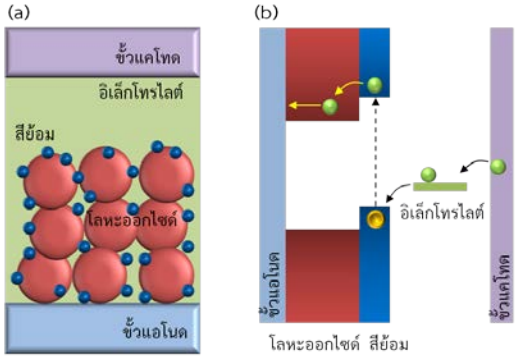
ในการสร้างประจุไฟฟ้าอิสระจากเอกซิตอนนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิค จำเป็นต้องใช้สารกึ่งตัวนำอย่างน้อย 2 ชนิด โดยมี สารหนึ่งทำหน้าที่รับแสงและสร้างเอกซิตอน (Photo absorber) ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่ในการรับประจุไฟฟ้าจากสารชนิดแรก (หรือเรียกว่า Acceptor) โดยมีเงื่อนไขคือระดับพลังงานของสารทั้ง 2 จะต้องเหมาะสมต่อการแยกเอกซิตอนให้เป็นอิสระ และเหมาะสมต่อการดูดกลืนแสงในช่วงกว้าง ดังนั้น จึงสามารถสรุปหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้ 3 ขั้นตอน (ดัง รูปที่ 1) ดังนี้คือ (1) การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (2) การแยกเอกซิตอนออกเป็นประจุไฟฟ้าอิสระ และ (3) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเพื่อนำไปให้พลังงาน [4] โดยสมาชิกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells) แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (Organic solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท (Quantum dot solar cells)



รูปที่ 1 *แสดงการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิค คือ (1) การดูดกลืนแสง ทำให้เกิดเอกซิตอน (2) การแยกเอกซิตอนที่ผิวรอยต่อ และ (3) การเคลื่อนที่ของประจุเพื่อนำไปให้พลังงาน*

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ใช้สีย้อม (Dye) ที่มีขนาดของโมเลกุลไม่ใหญ่มาก (เมื่อเทียบกับโพลิเมอร์) ในการรับแสงและให้ประจุไฟฟ้า และใช้สารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ในการรับประจุไฟฟ้าจากสีย้อมไวแสง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีส่วนประกอบและการจัดเรียงระดับพลังงานดังรูปที่ 2 โลหะออกไซด์ที่ใช้มักมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นผลให้มีพื้นที่ผิวสำหรับสีย้อมดูดเกาะได้มาก และเพิ่มจำนวนของสารสำหรับดูดกลืนแสงและให้ประจุไฟฟ้า เมื่อสีย้อมที่อยู่บนผิวของโลหะออกไซด์ดูดกลืนแสงแล้ว อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (LUMO) แล้วส่งผ่านให้กับแถบคอนดักชันของโลหะออกไซด์ และไหลผ่านในยังวงจรภายนอกเพื่อให้พลังงาน ส่วนโมเลกุลของสีย้อมที่มีโฮลที่เหลืออยู่จะถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยสารอิเล็กโทรไลต์ที่นำอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด อิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดนี้มาจากอิเล็กตรอนที่ให้พลังงานไฟฟ้ากับวงจรภายนอกไปแล้ว [5]



รูปที่ 2 *แสดง (a) องค์ประกอบ และ (b) ระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง*

เอกซิตอนตอนที่สร้างขึ้นจากโมเลกุลของสีย้อมนั้น จะไม่มีการเคลื่อนที่ไปไกล เนื่องจากถูกสร้างขึ้นที่บริเวณผิวของโลหะออกไซด์ โดยการแยกเอกซิตอนออกเป็นประจุไฟฟ้าอิสระจะใช้ผลต่างระหว่างระดับพลังงาน LUMO ของสีย้อม กับ แถบคอนดักชันของโลหะออกไซด์ และเมื่อได้ประจุไฟฟ้าอิสระแล้วประจุไฟฟ้านี้จะถูกกันไม่ให้กลับมารวมกัน (Charge recombination) โดยใช้อิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่ล้อมรอบโลหะ

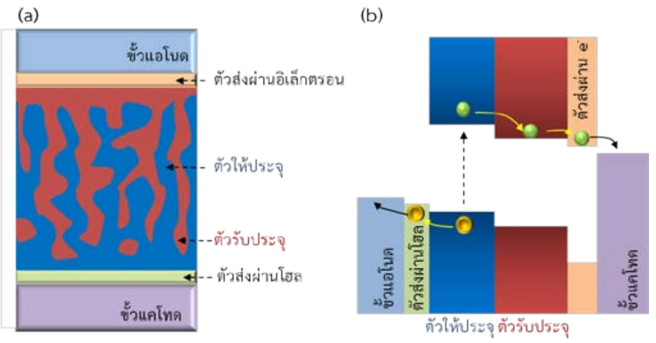
ออกไซด์เอาไว้ อิเล็กโทรไลต์ที่ซึมเข้าไปในรูพรุนของโลหะออกไซด์จะช่วยทำโลหะออกไซด์เป็นกลาง อีกทั้งยังช่วยลดไฟฟ้าสถิตของโลหะออกไซด์หลังรับอิเล็กตรอนและโฮลที่เหลืออยู่ในสีย้อม [5]

โลหะออกไซด์ที่นำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมักเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เนื่องจากสารทั้งสองมีระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการรับประจุไฟฟ้า และมีโครงสร้างทางกายภาพที่สามารถทำให้เล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรได้ อีกทั้งยังมีสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสม ส่วนสีย้อมที่นำมาใช้นั้น มักเป็นโมเลกุลที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้ง่าย รวมถึงต้องมีการดูดกลืนแสงในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) และองค์ประกอบสำคัญสุดท้าย คือ อิเล็กโทรไลต์ที่มักเป็นสารละลายที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้มีการส่งผ่านประจุโดยการแพร่ของไอออน สารละลายที่มักนำมาใช้คือ สารละลายของไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์ (I^-/I_3^-)

ในปัจจุบัน การวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 13% ซึ่งเป็นการค้นคว้าวิจัยของศาสตราจารย์ Michel Grätzel [6] ผู้ค้นพบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมคนแรกในช่วงปี 1980 โดยได้สังเคราะห์สีย้อมไวแสงขึ้นมาใหม่โดยให้รหัสชื่อว่า SM315 ให้ทำงานร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์และอิเล็กโทรไลต์ชนิด $[Co(bpy)_3]^{2+/3+}$

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ หรือในบางครั้งถูกเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอลิเมอร์ (Polymer solar cells) เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ใช้สารอินทรีย์ชนิดพอลิเมอร์คอนจูเกต (สารกึ่งตัวนำชนิดพี, *p*-type semiconductor) ในการดูดกลืนแสงและให้ประจุไฟฟ้า (Donor) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ในการรับประจุไฟฟ้า (Acceptor) นั้น เป็นสารจำพวกอนุพันธ์ของฟลูเรอลีน (Fullerene derivative) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (*n*-type semiconductor) ดังนั้น เอกซิตอนจะถูกสร้างขึ้นในพอลิเมอร์ และจำเป็นจะต้องแยกออกเป็นประจุไฟฟ้าอิสระที่รอยต่อระหว่างสารทั้งสอง เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นและเพื่อสนับสนุนการแยกออกเป็นอิสระของประจุไฟฟ้า สารทั้งสองจะถูกผสมกันแบบสุ่มในฟิล์มที่มีขนาดบางประมาณ 100-200 นาโนเมตร แล้วมีการแยกตัวออกจากกันระหว่างการให้ความร้อน แล้วด้านหนึ่งของฟิล์มนี้จะถูกประกบด้วยสารที่ให้อิเล็กตรอนอิสระผ่านเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า ตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transporting materials) เพื่อเป็นการเก็บอิเล็กตรอนอิสระแล้วนำไปให้พลังงาน ส่วนอีกด้านหนึ่งจะถูกประกบด้วยสารที่ทำให้โฮลอิสระผ่านได้เท่านั้น ซึ่งเรียกว่า ตัวส่งผ่านโฮล (Hole transporting materials) ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัลค์เฮทเทอโรจังก์ชัน (Bulk heterojunction solar cells) มีโครงสร้างทั่วไปดังแสดงใน รูปที่ 3



***รูปที่ 3** แสดง (a) องค์ประกอบ และ (b) ระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์*

การใช้พอลิเมอร์เป็นสารรับแสงนั้นมีข้อดีหลายประการ คือ พอลิเมอร์เป็นสารที่สามารถละลายในตัวทำละลายหลายชนิดได้ จึงสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีที่ง่าย และอีกทั้งยังมี ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูง ดังนั้นฟิล์มบางของพอลิเมอร์นี้จึงสามารถดูดกลืนแสงได้มาก ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในแง่ของน้ำหนักเบาและสามารถทำให้งอได้ แต่เอกซิตอนที่สร้างขึ้นหลังจากการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์นั้น เป็นเอกซิตอนที่มีระยะการแพร่ (Exciton diffusion length) ค่อนข้างสั้น (<100 nm) ดังนั้นการเตรียมฟิล์มที่มีขนาดหนาเกินไป ส่งผลให้เอกซิตอนไม่สามารถไปแยกตัวออกเป็นประจุไฟฟ้าอิสระได้ที่รอยต่อ เกิดการสลายตัวไป การทำให้ฟิล์มบางเป็นฟิล์มผสมระหว่างตัวรับประจุและตัวให้ประจุไฟฟ้า ก็สามารถลดปัญหานี้ไปได้บางส่วน ดังนั้น การวิจัยและพัฒนาจึงจำเป็นสำหรับการหา พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่

สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง มีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงที่สูง และมีระยะการแพร่ของเอกซิตอนที่ยาว ในปัจจุบัน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 11.0% ซึ่งเป็นการคิดค้นและสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา โดยกลุ่มนักวิจัยของบริษัทโตชิบา ประเทศญี่ปุ่น [7]

แนวทางการวิจัยและพัฒนา

เนื่องจากสารอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นสารหลักในการรับแสงและให้ประจุไฟฟ้า มีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายหลายชนิด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง และไม่ต้องการอุณหภูมิที่สูงมากนักในการทำให้เป็นฟิล์มบางจากกระบวนการที่ใช้สารละลาย ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับการทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่มีน้ำหนักเบา ทำให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่งอได้ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงมีเวลาคุ้มทุน (Energy payback time) ที่สั้นกว่า เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดก่อนๆ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดยังคงให้ประสิทธิภาพ การแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 10% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่นำมาขายในตลาด

ในระยะ 8-9 ปีที่ผ่านมานี้ ได้มีการค้นพบสารไฮบริดอินทรีย์-อนินทรีย์ ที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ ซึ่งโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์นี้ เป็นชื่อเรียก รูปแบบการจัดเรียงอะตอมที่คล้ายกับแร่แคลเซียมไททาเนต (Calcium titanate) นักวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ได้นำสารไฮบริดอินทรีย์-อนินทรีย์ชนิดนี้ มาทำหน้าที่ในการรับแสงแทนสารอินทรีย์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเอกไซโทนิค และพัฒนาโครงสร้างโดยเลียนแบบโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ จนได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ชื่อว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cells) โดยใช้สารจำพวกออร์แกโนเมทอลฮาไลด์ (Organometal halide) ซึ่งมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของเอกซิตอนอยู่ประมาณ 60 meV [8] ที่มีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเอกซิตอนในพอลิเมอร์มาก (~200-300 meV) อีกทั้งยังมีค่าสนามไฟฟ้าอ่อนๆ ที่เกิดขึ้นภายในสารเพอรอฟสไกต์อันเนื่องมาจากไดโพลไฟฟ้าจากไอออนที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ ซึ่งมีส่วนช่วยในการแยกตัวของเอกซิตอนเป็นอย่างมาก [9] ทำให้เอกซิตอนที่ถูกสร้างขึ้นมานั้น แยกตัวออกเป็นประจุไฟฟ้าอิสระได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องใช้การแยกตัวที่รอยต่อ สมบัตินี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ มีประสิทธิภาพพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 20% อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาเพื่อหาสารอินทรีย์ หรือสารไฮบริดชนิดใหม่จึงจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้สารที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการดูดกลืนแสงและให้ประจุไฟฟ้า และคุ้มค่าต่อการผลิตในแง่ของราคาและอายุ

เอกสารอ้างอิง

[1] G. D. Scholes and G. Rumbles, “Excitons in nanoscale systems”, Nat. Mater. 5, 683 (2006).

[2] X. Y. Zhu, “How to Draw Energy Level Diagrams in Excitonic Solar Cells”, J. Phys. Chem. Lett. 5, 2283 (2014).

[3] R. Jose, V. Thavasi, and S. Ramakrishna, “Metal Oxides for Dye-Sensitized Solar Cells”, J. Am. Ceram. Soc. 92, 289 (2009).

[4] I. Gonzalez-Valls and M. Lira-Cantu, “Vertically-aligned nanostructures of ZnO for excitonic solar cells: a review”, Energ. Environ. Sci. 2, 19 (2009).

[5] B. A. Gregg, “Excitonic Solar Cells”, J. Phys. Chem. B 107, 4688 (2003).

[6] S. Mathew, A. Yella, P. Gao, R. Humphry-Baker, F.E. Curchod Basile, N. Ashari-Astani, I. Tavernelli, U. Rothlisberger, K. NazeeruddinMd and M. Grätzel, “Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers”, Nat. Chem. 6, 242 (2014).

[7] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, “Solar cell efficiency tables (version 47)”, Prog. Photovoltaics 24, 3 (2014).

[8] V. D'Innocenzo, G. Grancini, and M. J. P. Alcocer, A. R. S. Kandada, S.D. Stranks, M. M. Lee, G. Lanzani, H. J. Snaith, A. Petrozza, "Excitons versus free charges in organo-lead tri-halide perovskites", Nat. Commun. 5, 3586 (2014).

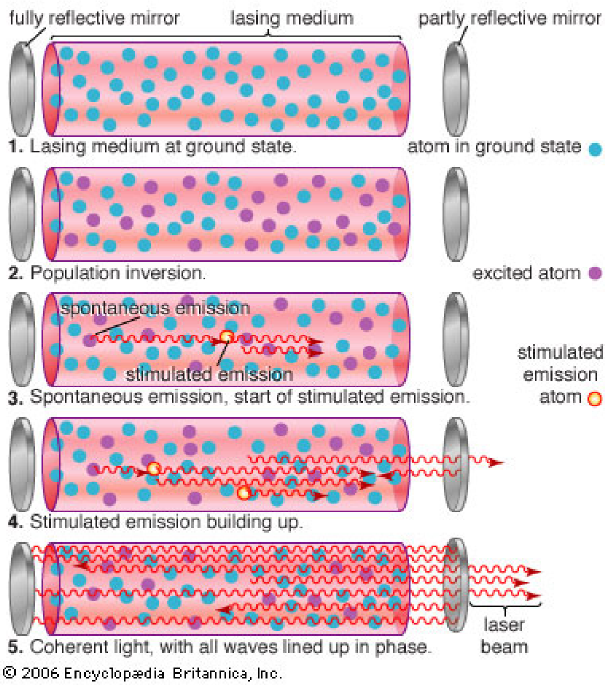
[9]] W.-J. Yin, J.-H. Yang, J. Kang, Y. Yan and S.-H. Wei, "Halide perovskite materials for solar cells: A theoretical review", J. Mater. Chem. A 3, 8926 (2015).

เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ แหล่งกำเนิดแสงแห่งอนาคต

สาคร ริมแจ่ม [1]

มีคำถามอยู่สองคำถามที่ผู้เขียนมักถูกถามอยู่เสมอ คือ "เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ" คืออะไร และต่างจาก "เลเซอร์ปกติ" อย่างไร การตอบคำถามทั้งสองนี้โดยให้เห็นภาพชัดเจนและให้เกิดความเข้าใจเป็นความท้าทายอย่างหนึ่ง ซึ่งในบทความนี้ผู้เขียนพยายามใช้คำอธิบายง่าย ๆ โดยหลีกเลี่ยงการแสดงที่มาของสมการบางสมการที่ยุ่งยากซับซ้อน และสำหรับผู้ที่สนใจด้านทฤษฎีของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระโดยละเอียดสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงที่แนะนำไว้ท้ายบทความ โดยมีสิ่งที่น่าสนใจในเชิงทฤษฎีทางฟิสิกส์ประการหนึ่ง นั่นคือเราสามารถใช้ฟิสิกส์คลาสสิคทางด้านทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า มาอธิบายกระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระได้ ซึ่งแตกต่างจากเลเซอร์ที่ผลิตจากอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอม ที่จำเป็นต้องใช้กลศาสตร์ควอนตัมในการอธิบาย แต่ไม่ว่าจะเป็นเลเซอร์แบบปกติหรือเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ สิ่งที่เหมือนกันคือสมบัติเด่นของการเป็นแสงเลเซอร์ นั่นคือ มีความเป็นอาพันธ์ (coherence) มีความสว่างสูง (high brightness) มีลำแสงขนาดเล็กที่มีความขนานโดยไม่มีการเบี่ยงเบนหรือบานออก และมีความเป็นแสงเอกรงค์ (mono-chromatic light) ที่ประกอบไปด้วยแสงความยาวคลื่นเดี่ยว ด้วยคุณลักษณะเฉพาะที่พิเศษกว่าแสงชนิดอื่นดังที่กล่าวมานี้ เลเซอร์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายในปัจจุบัน ทั้งทางด้านการแพทย์ การสื่อสารคมนาคม การสร้างภาพ 3 มิติ หรือภาพโฮโลกราฟี (holography) การวัดและวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุหรือสสาร ตลอดจนการตรวจสอบและควบคุมการผลิตชิ้นงานทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

การค้นคว้าวิจัยด้านเลเซอร์นั้นได้เริ่มขึ้นมานานกว่าห้าสิบปีแล้ว ซึ่งถือเป็นก้าวใหม่ด้านเทคโนโลยีแสงของมนุษย์ชาติในยุคนั้น โดยการผลิต **แสงเลเซอร์แบบปกติ** ดังแสดงใน รูปที่ 1 นั้นใช้หลักการการเพิ่มความเข้มของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอมที่มีการเปลี่ยนสถานะทางควอนตัมหรือเปลี่ยนระดับพลังงาน โดยมีการใช้โพรงแสง (optical cavity) เป็นอุปกรณ์ช่วยในการสะท้อนให้รังสีกลับเข้าไปกระตุ้น (stimulate) ให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) แล้วกลับคืนมาสู่สถานะพื้น (ground state) พร้อม ๆ กัน ซึ่งจะทำให้โฟตอนที่อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาในขณะเปลี่ยนระดับพลังงานมีเฟสตรงกัน ทำให้ได้แสงอาพันธ์ที่มีความเข้มสูง ด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้จึงเป็นที่มาของคำว่า **เลเซอร์** หรือ **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)** ซึ่งการผลิตเลเซอร์โดยใช้หลักการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ มีขีดจำกัดในการผลิตแสงที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา และไม่สามารถผลิตแสงที่มีความเข้มมาก ๆ ได้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเลเซอร์แบบปกติ [1]

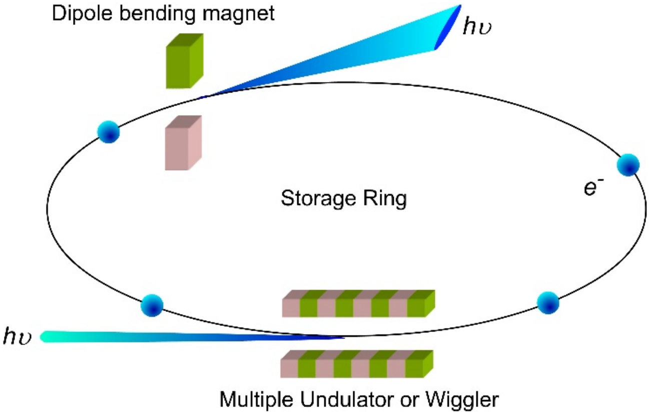
[1]อาจารย์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จากเครื่องเร่งอนุภาคสู่แหล่งกำเนิดแสง

การนำเครื่องเร่งอนุภาคมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถผลิตแสงคุณภาพดีที่มีพลังงานและความสว่างสูงมาก การผลิตแสงโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคนั้นเริ่มขึ้นจากการค้นพบในปี ค.ศ. 1945 [2] ว่ามีรังสีเกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสัมพันธภาพมีการเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กสองขั้ว (dipole bending magnet) โดยลำรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจะมีลักษณะเป็นกรวยพุ่งตรงไปข้างหน้าด้วยมุมเปิด (opening angle) θ ที่สัมพันธ์กับพลังงานของลำอิเล็กตรอน คือ $\theta \propto 1/\gamma$ โดยที่ $\gamma = E/mc^2$ คือ สัดส่วนโลเร็นตซ์ (Lorentz factor) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงพลังงานรวม (E) ในหน่วยของพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน (mc^2) หลังจากการค้นพบนี้ได้มีความสนใจในการพัฒนาเครื่องซินโครตรอน ซึ่งแต่เดิมเป็นเครื่องเร่งเชิงวงที่ใช้ในการศึกษาฟิสิกส์อนุภาคและฟิสิกส์พลังงานสูง ไปเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อนำรังสีไปประยุกต์ใช้งาน โดยมีวัตถุประสงค์ในการผลิตรังสีจากการเลี้ยวโค้งของอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บ (storage ring) ซึ่งแสงที่ได้จากเครื่องซินโครตรอนในยุคเริ่มต้นนี้มีช่วงความยาวคลื่นกว้างที่สามารถเลือกใช้งานได้ตามย่านความถี่ที่ต้องการ มีโครงสร้างของรังสีที่แน่นอนและมีความเข้มมากเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในยุคนั้น [3]

ประวัติศาสตร์หน้าใหม่ของวงการเครื่องเร่งอนุภาคได้เริ่มขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1950 เมื่อมีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 1 โดยเน้นการผลิตรังสีจากการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กสองขั้วให้มีสเปกตรัมของรังสีที่แน่นอน และมีอายุการใช้งานลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้ผลิตรังสีที่นานขึ้น อีกประมาณยี่สิบปีต่อมาในทศวรรษที่ 1970 ได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 2 ขึ้น โดยใช้หลักการการบังคับให้อิเล็กตรอนเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กสองขั้วหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้มีส่วนที่ผลิตรังสีสำหรับสร้างเป็นสถานีทดลองหลายสถานี เครื่องซินโครตรอนของ **สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)** จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีพลังงาน 1.2 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ก็เป็นแหล่งกำเนิดแสงในรุ่นนี้ [4]

ในช่วงทศวรรษที่ 1980 ได้มีการพัฒนาชุดแม่เหล็กสองขั้วที่มีขั้วสลับกันไป-มา เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับบังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ "ส่ายซิกแซกแบบเป็นคาบที่แน่นอน" ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรังสีที่ได้จากการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กสองขั้วปกติแล้ว จะสามารถผลิตรังสีที่มีความสว่างมากขึ้น เนื่องจากมีมุมเปิดของรังสีที่แคบกว่าทำให้โฟตอนรวมกันอยู่อย่างหนาแน่น (ดังแสดงใน รูปที่ 2) แม่เหล็กแบบพิเศษนี้เรียกว่า **แม่เหล็กวิกเกลอร์ (wiggler magnet)** และ**แม่เหล็กอันดูเลเตอร์ (undulator magnet)** โดยแรงจากสนามแม่เหล็กวิกเกลอร์สามารถเบี่ยงเบนอิเล็กตรอนได้ด้วยมุมเบี่ยงเบนที่มากกว่า และด้วยคาบที่ยาวกว่าแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ ทำให้ลำรังสีที่ผลิตได้โดยการใช้แม่เหล็กวิกเกลอร์มีมุมเปิดของกรวยรังสี $\theta > 1/\gamma$ ส่วนลำรังสีที่ผลิตได้จากแม่เหล็กอันดูเลเตอร์จะมีมุมเปิด $\theta \le 1/\gamma$ ดังนั้นรังสีจากแม่เหล็กอันดูเลเตอร์จึงมีความสว่างมากกว่าแม่เหล็กสองขั้วและแม่เหล็กวิกเกลอร์เนื่องจากมีการรวมกันของโฟตอนอยู่ในมุมเปิดที่แคบกว่า

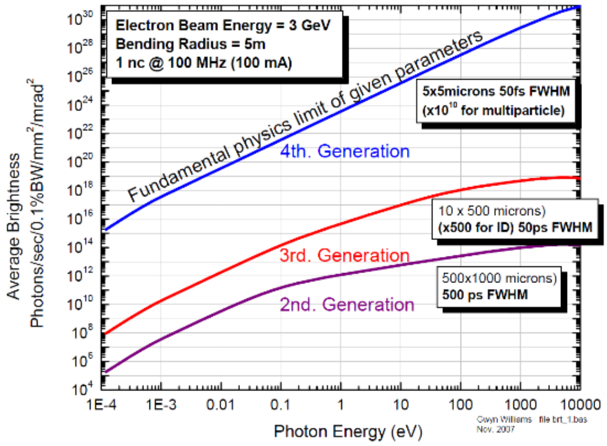


รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการผลิตรังสีโดยการใช้แม่เหล็กสองขั้ว (dipole bending magnet) และแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ (undulator) หรือแม่เหล็กวิกเกลอร์ (wiggler) โดยที่ $h\upsilon$ แทนพลังงานของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมา เมื่อ υ คือความถี่ของรังสี และ h คือค่าคงที่แพลงค์ (Planck's constant) [5]

ความสำเร็จในการสร้างแม่เหล็กทั้งสองแบบนี้ นำไปสู่การพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 ซึ่งเริ่มต้นในทศวรรษที่ 1990 โดยเน้นการใช้แม่เหล็กวิกเกลอร์และแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ เป็นอุปกรณ์แทรกในการผลิตรังสี รวมทั้งได้พัฒนาการผลิตและการเร่งลำอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้น (มากกว่า 2.5-3 ล้าน

อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป) ตลอดจนเน้นการผลิตลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กที่มีการลู่เข้า ลู่ออกน้อย เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนมีความหนาแน่นมาก และทำให้สามารถผลิตรังสีที่มีความสว่างสูงมากขึ้น โดยแสงซินโครตรอนที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 มีความสว่างสูงกว่ารุ่นที่ 2 ประมาณ 10^3-10^5 เท่า (ดังแสดงใน รูปที่ 3) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา และประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 ในด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลายกระจายไปในหลายประเทศ

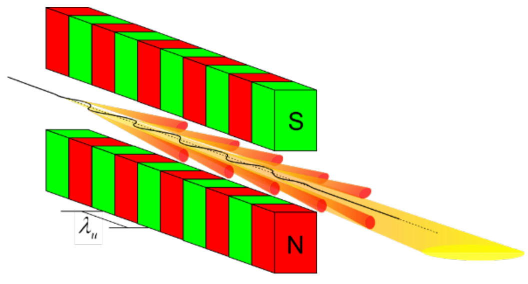
อย่างไรก็ตามพลังงานของรังสีตลอดจนความสว่าง และสมบัติด้านโครงสร้างทางเวลา (time structure) ของแสงที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปศึกษาโครงสร้างระดับอะตอมหรือโมเลกุลเดี่ยว ในสารตัวอย่างที่ไม่สามารถทำให้อยู่ในสภาพตกผลึกได้ อีกทั้งยังไม่สามารถนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงหรืออันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ ในระดับเฟมโตวินาที (10^{-15} วินาที) จึงได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 4 ขึ้นโดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า **การผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอน อิสระ (free-electron lasers: FELs)** ซึ่งได้รับการเสนอขึ้นครั้งแรกโดย John M.J. Madey ในปี ค.ศ. 1970 [6] และเครื่องกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระเครื่องแรกได้รับการพัฒนาขึ้น ณ มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University) ประเทศสหรัฐ อเมริกา ในปี ค.ศ. 1976 โดยใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน 24 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 ได้มีการผลิตเลเซอร์ความยาวคลื่น 3.5 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน 43 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ และระบบโพรงแสงสำหรับสะสมพลังงานของรังสี ซึ่งนับว่าเป็นการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระความถี่อินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared) เป็นครั้งแรกในโลก อีกทั้งเป็นการเปิดศักราชใหม่ของแหล่งกำเนิดแสง ที่เปลี่ยนจากการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงวง ไปสู่การใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ในการผลิตรังสีตั้งแต่ย่านอินฟราเรดไปจนถึงย่านรังสีเอ็กซ์ จากรูปที่ 3 จะเห็นว่ารังสีที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 4 มีความสว่างสูงกว่ารุ่นที่ 3 ประมาณ 10^7-10^{11} เท่า และเป็นแสงอาพันธ์ที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (pulse) สั้น ๆ ในระดับเฟมโตวินาที (มีความยาวพัลส์ประมาณ 0.3 ไมโครเมตร) ซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในสถาบันวิจัยด้านเครื่องเร่งอนุภาคชั้นนำหลายแห่งอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 แผนภาพเปรียบเทียบความสว่างเฉลี่ยของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นต่าง ๆ [7]

การผลิตรังสีโดยใช้แม่เหล็กอันดูเลเตอร์

เพื่อให้เห็นภาพของกระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระอย่างชัดเจน ในหัวข้อนี้ผู้เขียนขอเริ่มจากการอธิบายถึงลักษณะการเคลื่อนที่และการแผ่รังสีของอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ซึ่งมีลักษณะของขั้วแม่เหล็กสองขั้วที่มีทิศสลับไป-มาดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่และการแผ่รังสีของอิเล็กตรอนภายในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ [7]

เมื่ออิเล็กตรอนมวล m และประจุ e ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงจนมีความเร็วสัมพัทธภาพ $\vec{v}$ เคลื่อนที่เข้าไปในสนามของแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นคาบแบบคลื่นไซน์

$$\vec{B} = B_0 \sin(k_u z)\hat{y} \qquad (1)$$

เมื่อ B_0 คือความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด และ $k_u = 2\pi / \lambda_u$ โดยที่ λ_u คือความยาวคาบของแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ และเมื่อกำหนดให้สนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์มีทิศไปตามแกน y จะมีแรงโลเร็นตซ์ (Lorentz's force) $\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$ มากระทำต่ออิเล็กตรอนในแนวแกน x ที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ส่ายแบบเป็นคาบที่แน่นอนด้วยความเร่ง

$$\ddot{\vec{r}} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \frac{-e(\vec{v} \times \vec{B})}{\gamma m} \qquad (2)$$

เมื่อ $\vec{r}$ คือเวกเตอร์การกระจัดของอิเล็กตรอน ดังนั้น จะได้ความเร่งและสมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกน x เป็น

$$\ddot{x} = -\frac{q\dot{z}}{\gamma m} B_0 \sin(k_u z) \qquad (3)$$

เมื่อให้แกน z เป็นแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามแนวท่อเครื่องเร่ง และใช้กฎลูกโซ่เปลี่ยนสมการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลา ให้เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับระยะกระจัดในแนว z จะได้ $\ddot{x} = (d^2x/dz^2)(dz/dt)^2 = x''\dot{z}^2$ และเนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก จึงสามารถประมาณความเร็ว $(\dot{z})$ ของอิเล็กตรอนตามแนวการเคลื่อนที่ z ว่ามีค่าสูงกว่าความเร็วในแนวตั้งฉากกับ z มากๆ นั่นคือ $|\dot{z}| \approx \beta c >> |\dot{x}|$ โดยที่ $\beta = |\dot{\vec{r}}|/c$ เมื่อ c คือความเร็วแสง ดังนั้นจะได้สมการของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกน x เป็น

$$x'' + \frac{eB_0}{\gamma m \beta c} \sin(k_u z) = 0 \qquad (4)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการที่ (4) โดยการแทนเงื่อนไขเริ่มต้นเป็น $x'(z=0) = eB_0 / \gamma m \beta c k_u$ และ $x(z=0) = 0$ จะได้

$$x' = \frac{eB_o}{\gamma m \beta c k_u} \cos(k_u z) \qquad (5)$$

ดังนั้นสมการนี้แสดงรูปร่างของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ว่า เป็นลักษณะส่ายในแนวแกน x ด้วยคาบที่แน่นอน (ดังที่วาดใน รูปที่ 4) กล่าวคือ

$$x = \frac{K}{\beta \gamma k_u} \sin(k_u z) \qquad (6)$$

โดยที่ K คือ พารามิเตอร์การเบนของอันดูเลเตอร์ (deflecting parameter) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติของอันดูเลเตอร์ดังนี้

$$K = \frac{eB_0}{mck_u} = 0.934 B_0[Tesla]\lambda_u[cm] \qquad (7)$$

ในการเบี่ยงเบนของแต่ละคาบการเคลื่อนที่ อิเล็กตรอนจะปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยความยาวคลื่นฮาร์มอนิกมูลฐาน [8]

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}\left(1 + \frac{K^2}{2} + \theta^2\gamma^2\right) \qquad (8)$$

ซึ่งจะเห็นว่า **ความยาวคลื่นแสงที่ผลิต** ขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน (γ) ความยาวคาบของอันดูเลเตอร์ (λ_u) และ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B_0) ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นของแสงสามารถทำได้โดยการปรับโครงสร้างของสนามแม่เหล็ก หรือโดยการปรับพลังงานของอิเล็กตรอน และเมื่อมีการออกแบบและสร้างให้ระยะห่างระหว่างขั้วอันดูเลเตอร์มีความสัมพันธ์กับคาบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน รังสีที่อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาจะมีการแทรกสอดแบบเสริมกันที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง ทำให้ความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นนั้นมีค่าสูงมาก

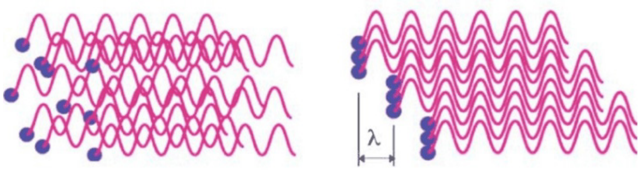
จากรังสีอันดูเลเตอร์ไปสู่เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ

ในแหล่งกำเนิดเลเซอร์ปกติ การเปลี่ยนระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่องของอะตอมสามารถปลดปล่อยรังสีได้บางความยาวคลื่นเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่ไม่มีข้อจำกัดที่มาจากระดับพลังงานยึดเหนี่ยวในอะตอม เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่นำมาผลิตเลเซอร์ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน

อิสระพลังงานสูงที่เคลื่อนที่เบี่ยงเบนแบบเป็นคาบในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ แล้วปลดปล่อยโฟตอนออกมาในทิศพุ่งตรงไปข้างหน้า (ดังแสดงใน รูปที่ 4) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทุกช่วงความยาวคลื่น (ตามความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้) ดังนั้นเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระจึงมีข้อได้เปรียบตรงที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นเลเซอร์ได้ โดยการควบคุมความถี่ของการเคลื่อนที่แบบคาบของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจเป็นการปรับพลังงานของอิเล็กตรอน การปรับความยาวคาบ หรือปรับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (ดังแสดงในสมการที่ (7) และ (8)) ด้วยสมบัติเด่นดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเครื่องกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระขึ้นในหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ (X-FELs) เพื่อประยุกต์ใช้รังสีในการศึกษาโครงสร้างเล็ก ๆ ในระดับอะตอมและการศึกษาอันตรกิริยาในช่วงเวลาเฟมโตวินาที [9] และเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรด (IR-FELs) เพื่อประยุกต์ใช้รังสีในด้านสเปกโตรสโคปี (spectroscopy) และการสร้างภาพ (imaging) [10-12]

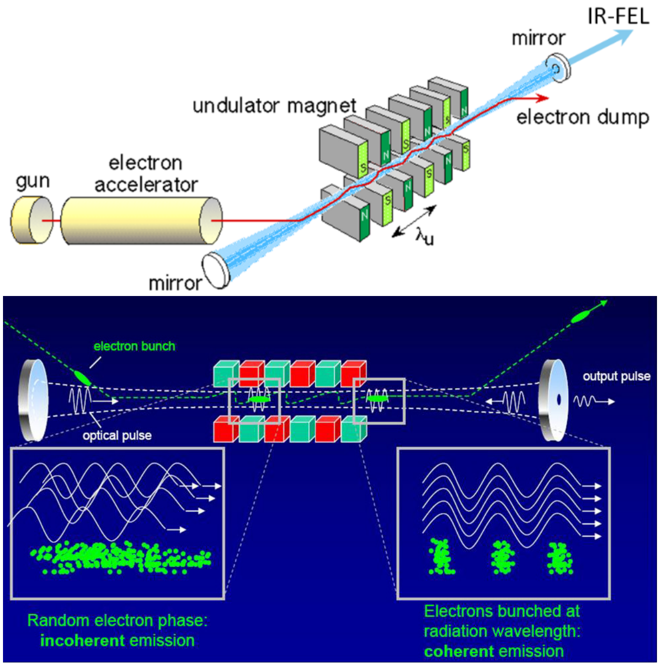
เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระใช้หลักการผลิตแสงอาพันธ์จากอิเล็กตรอนพัลส์สั้น ซึ่งในกรณีที่พัลส์อิเล็กตรอนยาวกว่าความยาวคลื่นของรังสี อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยเฟสที่แตกต่างกัน ทำให้ได้รังสีที่ไม่เป็นแสงอาพันธ์เนื่องจากรังสีบางส่วนเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน โดยกำลังของแสง (P) ที่ผลิตได้ในกรณีนี้จะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอน (N) ส่วนในกรณีที่พัลส์อิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นของรังสี อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยเฟสที่ตรงกัน ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (ดังแสดงใน รูปที่ 5) และกำลังของแสงในกรณีนี้แปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอนกำลังสอง (N^2) ทำให้ได้แสงอาพันธ์ที่มีความเข้มสูงมาก

การผลิตรังสีของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ปกตินั้น เป็นรังสีที่แผ่ออกมาเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระทำจากแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กโดยไม่มีการกระตุ้นจากสนามอื่น จึงเรียกชื่อรังสีชนิดนี้ว่า **รังสีที่เกิดเอง (spontaneous emission)**



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยรังสีแบบไม่อาพันธ์ (รูปซ้าย) และแบบอาพันธ์ (รูปขวา) [13]

ยิ่งกว่านั้น การเพิ่มความเข้มของรังสีโดยใช้กระบวนการกระตุ้น (stimulated process) สามารถทำได้โดยการใช้โพรงแสง เช่นเดียวกับกรณีของเลเซอร์แบบปกติ โดยเรียกแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบนี้ว่า **“เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบออสซิลเลเตอร์ (oscillator free-electron laser)”** ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอน แม่เหล็กอันดูเลเตอร์ และโพรงแสง (ดังแสดงใน รูปที่ 6) ในกระบวนการผลิตเลเซอร์แบบนี้ รังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนจะถูกดักอยู่ในโพรงแสง และมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากรังสีกับอิเล็กตรอนตัวอื่นในขณะที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ แล้วทำให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวในพัลส์เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบมอดูเลชัน (energy modulation) นั่นคือ อิเล็กตรอนบางตัวสูญเสียพลังงานและบางตัวได้รับพลังงานเพิ่ม ทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่างกันเคลื่อนที่แบบคาบด้วยระยะทางที่ต่างกันในสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงหรือต่ำกว่า ค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในพัลส์มากเกินไป อยู่ห่างจากศูนย์กลางของพัลส์ออกไป ทำให้เกิดลักษณะของพัลส์ย่อยที่เรียกว่าการเกิด microbunching ดังแสดงใน รูปที่ 6 (รูปล่าง) โดยความยาวของพัลส์ย่อยที่เกิดขึ้นนี้จะสั้นกว่าความยาวคลื่นของรังสีที่ต้องการผลิต ดังนั้น คลื่นแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวในพัลส์ย่อยนี้จะมีเฟสตรงกันและเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ทำให้ได้แสงอาพันธ์ความเข้มสูงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยเรียกแสงที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า รังสีซินโครตรอนเนื่องจากการถูกกระตุ้น (stimulated synchrotron radiation)



รูปที่ 6 แผนผังแสดงระบบและกระบวนการการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบออสซิลเลเตอร์ [13, 14]

ความเข้มของเลเซอร์ที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้สัมพันธ์กับอัตราการขยายกำลัง (power gain) ของรังสี นั่นคือถ้าอัตราการขยายกำลังมากกว่าอัตราการสูญเสียรังสีไปในโพรงแสงแล้วจะมีการสะสมกำลังของรังสีจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว รังสีที่ผลิตได้จะมีความเป็นอาพันธ์และความเข้มสูงมากจนเทียบได้กับความเข้มของแสงเลเซอร์แบบปกติ จากทฤษฎีเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ (free-electron laser theory) ในเอกสารอ้างอิง [15-18] แนะนำว่าอัตราการขยายกำลัง หรือ power gain (g) ของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะของลำอิเล็กตรอนและแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ดังนี้

$$g = \frac{16\pi}{\gamma} \frac{\lambda N_u^2 L_u j \xi f_b^2(\xi)}{1.7\times 10^4} \qquad (9)$$

โดยที่ γ คือสัดส่วนโลเร็นตซ์ λ คือความยาวคลื่นของรังสี, N_u คือจำนวนคาบของอันดูเลเตอร์ L_u คือความยาวของอันดูเลเตอร์ j คือความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน และ f_b คือปัจจัยคู่ควบ (coupling factor) ซึ่งสำหรับแม่เหล็กอันดูเลเตอร์แบบระนาบ (planar undulator) จะมีค่า $f_b(\xi) = J_0(\xi) - J_1(\xi)$ โดยที่ $\xi = K^2/2(1+K^2)$ ส่วน J_0 และ J_1 คือฟังก์ชันเบสเซิลอันดับที่ศูนย์และอันดับที่หนึ่งตามลำดับ และสำหรับแม่เหล็กอันดูเลเตอร์แบบขดก้นหอย (helical undulator) $f_b(\xi) = 1$ จากสมการที่ (8) และ (9) จะเห็นว่าเมื่อต้องการเลเซอร์ที่มีความความยาวคลื่นสั้น หรือ λ น้อย เช่น รังสีเอ็กซ์ นั้น γ ต้องมีค่ามาก นั่นคือ พลังงานของอิเล็กตรอนต้องมีค่าสูง รวมทั้งต้องมีความหนาแน่น j ของกระแสอิเล็กตรอนสูงด้วย

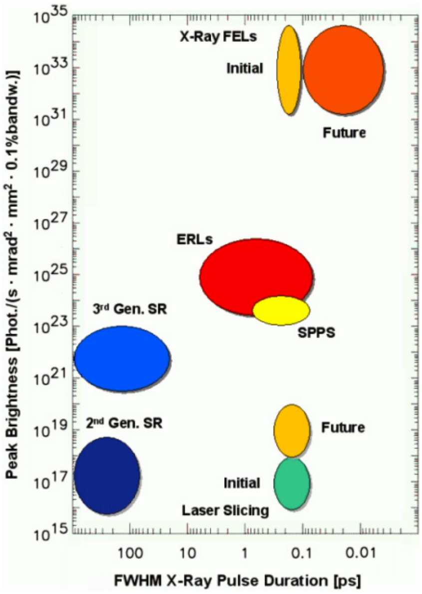
นอกจากนี้สภาพสะท้อน (reflectivity) ของกระจกในโพรงแสงสำหรับรังสีในย่านที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าย่านแสงขาวถึงอัลตราไวโอเลต (visible-ultraviolet: VUV) มีค่าต่ำ ทำให้ไม่สามารถใช้โพรงแสงในการสะท้อนรังสีกลับไป-มาได้ จึงได้มีการพัฒนาระบบผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระสำหรับย่าน VUV และ X-ray ขึ้น โดยการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากรังสีที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ ไปทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนตัวอื่นโดยไม่ใช้โพรงแสง แล้วทำให้เกิดพัลส์ย่อยภายในแนวการเคลื่อนที่ (แกน z) ของอิเล็กตรอนในแม่เหล็กอันดูเลเตอร์เพียงรอบเดียว [8, 19-20] ซึ่งการผลิตเลเซอร์แบบนี้เรียกว่า **"Self-Amplified Stimulated Emission (SASE)"**

เมื่อพิจารณาประเภทของการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของอัตราการขยายกำลังของรังสี นั่นคือ แบบอัตราการขยายต่ำ (low-gain FEL) ซึ่งมักใช้กระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบออสซิลเลเตอร์ และนิยมใช้ผลิตเลเซอร์ย่านอินฟราเรดโดยใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำในระดับสิบล้านอิเล็กตรอนโวลต์ และ แบบอัตราการขยายสูง (high-gain FEL) ซึ่งมักใช้กระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบ SASE และแบบอื่น ๆ โดยนิยมใช้ในการผลิตเลเซอร์ย่าน VUV และย่าน X-ray ซึ่งลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากในระดับหลายร้อยล้านอิเล็กตรอนโวลต์จนถึงกิกะอิเล็กตรอนโวลต์

เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์

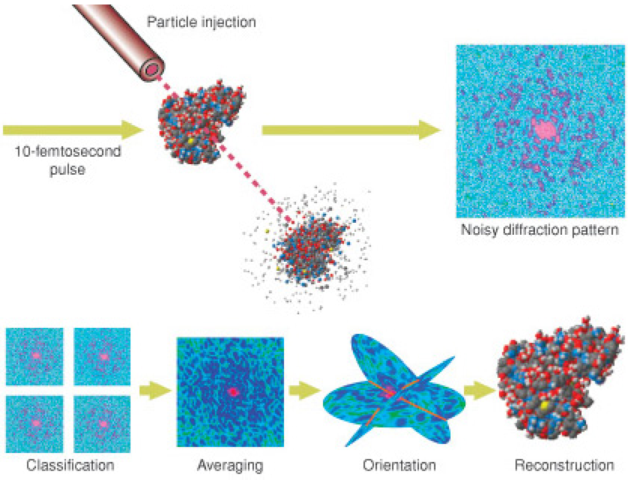
ในปัจจุบันการพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ทั้งพลังงานต่ำ (soft X-ray) และ

พลังงานสูง (hard X-ray) ได้เน้นการใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงานสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อมีการเบี่ยงเบน เช่น ในกรณีเครื่องเร่งเชิงวง โดยได้มีการพัฒนาเครื่องเร่งประสิทธิภาพสูงที่แหล่งกำเนิดสามารถผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นของประจุมากและมีการกระจายพลังงานน้อย รวมทั้งใช้ท่อเร่งที่มีเกรเดียนต์สนามไฟฟ้าสูง ๆ โดยการทำท่อเร่งเป็นแบบตัวนำยิ่งยวดเพื่อลดการสูญเสียกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนไปในผนังของท่อเร่ง ซึ่งเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์จะมีกำลังของรังสีสูงกว่ารังสีเอ็กซ์ที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 มากกว่า 10^{10} เท่า โดยมีความยาวพัลส์ของแสงเลเซอร์ในระดับเฟมโตวินาทีซึ่งสั้นกว่าความยาวพัลส์ของแสงซินโครตรอนถึงประมาณพันเท่า (ดังแสดงใน รูปที่ 7) ทำให้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างเล็ก ๆ ในระดับอะตอมโดยใช้เทคนิคการเกิดลวดลายการแทรกสอดของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และการศึกษาการเกิดอันตรกิริยา ในระดับอะตอมหรือโมเลกุลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้โดยใช้เทคนิค pump-probe experiment [5, 9, 21]



รูปที่ 7 แผนภาพเปรียบเทียบความสว่างและความยาวพัลส์ของรังสีเอ็กซ์ที่ผลิตได้จากเครื่องเร่งชนิดต่าง ๆ เช่น ERLs คือ Energy Recovery Linacs, ส่วน SPPS คือ Super Proton-Antiproton Synchrotron, และ SR คือ Synchrotron Radiation) [22]

ตัวอย่างของการศึกษาโครงสร้างชีวโมเลกุลในระดับอะตอม โดยการใช้เทคนิคการเกิดลวดลายการแทรกสอดของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ได้แสดงใน รูปที่ 8 โดยได้มีการทดลองฉีดสารชีวโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยอะตอมขนาดต่างๆ เข้าไปในชุดทดลองที่มีการฉายแสงเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่มีความยาวพัลส์ 10 เฟมโตวินาที โฟตอนในเลเซอร์ที่เคลื่อนที่ผ่านอะตอมในโมเลกุลทำให้เกิดลวดลายการแทรกสอดแบบ 2 มิติขึ้นที่ฉากรับภาพ และเมื่อนำภาพลวดลายการแทรกสอดหลายภาพมาวิเคราะห์ประกอบกัน จะทำให้สามารถสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างในโมเลกุลด้วยความละเอียดในระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ถึงอังสตรอม (10^{-10} เมตร)



รูปที่ 8 ภาพแสดงการจำลองการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างระดับอะตอม โดยใช้เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ [23]

ด้วยสมบัติพิเศษดังที่กล่าวมาจึงมีพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ขึ้น ณ สถาบันวิจัยด้านเครื่องเร่งอนุภาคชั้นนำของโลกในหลายประเทศ ตัวอย่างของเครื่องเลเซอร์ที่สามารถผลิตรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นมากในระดับนาโนเมตรถึงอังสตรอมที่พัฒนาขึ้น ณ สถาบันวิจัยระดับชั้นนำของโลกใน 3 ทวีปหลัก ได้แก่ เครื่อง European X-ray free-electron laser (European XFEL) ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี เครื่อง Linac Coherent Light Source (LCLS) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเครื่อง SPring-8 Compact SASE Source (SCSS) ประเทศญี่ปุ่น

เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรด

อินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1 ไมโครเมตร ถึง 3 มิลลิเมตร ซึ่งแบ่งออกได้เป็นย่านอินฟราเรดช่วงใกล้ (near infrared: NIR) ย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (mid infrared: MIR) และย่านอินฟราเรดช่วงไกล (far infrared: FIR) โดยรังสีอินฟราเรดตั้งแต่ย่าน MIR ไปถึง FIR เป็นช่วงความถี่ที่ตรงกับความถี่การสั่นของพันธะโควาเลนซ์ในโมเลกุลของสสารที่มีความสำคัญต่อการศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เคมี เนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ ดังนั้นโมเลกุลของสสารจึงดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมในโมเลกุลนั้น ด้วยสมบัติเฉพาะที่ให้ทั้งห้วงสั้น ความสว่างสูง และมีความสามารถในการปรับจูนความถี่ (frequency tunability) ของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ เราจึงสามารถนำเลเซอร์ในย่านความถี่นี้ไปใช้ในการทดลองวิจัยใหม่ ๆ เพื่อศึกษาการสั่นหรือการหมุนของสารชีวโมเลกุลที่ความถี่ในย่านนี้ ซึ่งทำให้สามารถบ่งบอกถึงโครงสร้างของโมเลกุลและกระบวนการทำงานของโครงสร้างนั้น รวมทั้งลักษณะการเคลื่อนที่เชิงสัมพัทธ์ของกลุ่มอะตอมที่โยงใยกับการทำหน้าที่ในส่วนต่างๆ ของโมเลกุล

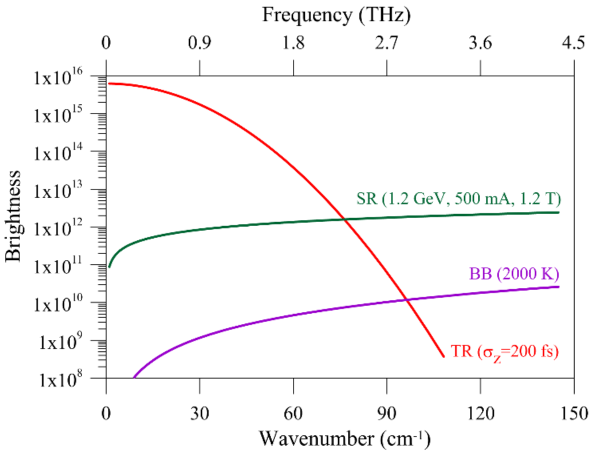
งานวิจัยของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในย่านอินฟราเรดจึงมีความหลากหลายและมีลักษณะเป็นสหศึกษาโดยเน้นการใช้งานด้านการตรวจสอบ ตรวจจับ หรือวิเคราะห์ โดยใช้เทคนิคทางด้านสเปคโตรสโคปี (spectroscopy) และการถ่ายภาพ (imaging) เนื่องจากสามารถใช้ในการตรวจวิเคราะห์สสารได้โดยไม่ทำลาย (non-destructive) เพราะรังสีอินฟราเรดอยู่ในย่านพลังงานที่ค่อนข้างต่ำเกินกว่าที่จะทำลายพันธะทางเคมี หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (ionization) ของโมเลกุล ซึ่งจะเกิดคุณประโยชน์หลายสาขาทั้งภาคอุตสาหกรรม เช่น การตรวจคุณภาพเซมิคอนดักเตอร์ การตรวจสอบอาหารและสิ่งปนเปื้อน ภาคสุขภาพการแพทย์และเภสัชศาสตร์ เช่น การวินิจฉัยโรคหรือการตรวจสอบยา ภาคบรรยากาศและสิ่งแวดล้อม เช่น การศึกษาการตรวจจับแก๊สพิษ แม้กระทั่งภาคความมั่นคงของชาติ เช่น การตรวจจับอาวุธ วัตถุระเบิดและสารเสพติด

ด้วยสมบัติพิเศษที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ ได้อย่างหลากหลายดังกล่าว รวมทั้งเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในย่านอินฟาเรดมีขนาดกะทัดรัด และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างและพัฒนาค่อนข้างต่ำ เนื่องจากใช้อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ในระดับสิบล้านอิเล็กตรอนโวลต์เท่านั้น (ประมาณ 10 ถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) จึงได้มีการพัฒนาเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในย่านความถี่ช่วงนี้ขึ้นทั้งในสถาบันวิจัยใหญ่ ๆ และห้องปฏิบัติการวิจัยขนาดเล็กหลายแห่ง เช่น เครื่อง ELBE IR-FELs ของสถาบันวิจัย Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) ณ เมือง Rossendorf เครื่อง Fritz Haber Institute THz-FEL ของสถาบัน Max Planck ณ เมือง Berlin ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี เครื่อง KU-FEL ของมหาวิทยาลัย Kyoto University ประเทศญี่ปุ่น และ เครื่อง FELIX FLARE และ FELICE ของของมหาวิทยาลัย Radboud ประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นต้น

การพัฒนาเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในประเทศไทย

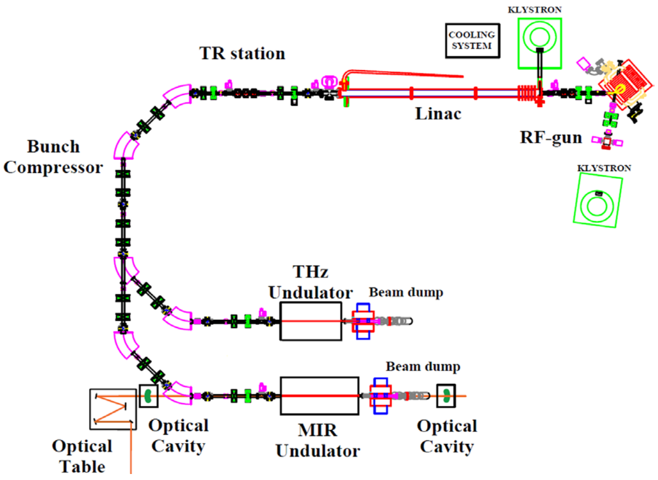
ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการพัฒนาการผลิตรังสีอินฟราเรดเพื่อใช้ในการวิจัยทางด้าน infrared spectroscopy และ imaging โดยใช้รังสีจากเครื่องซินโครตรอน [4] แต่ยังไม่สามารถผลิตรังสีความถี่ต่ำในย่าน FIR หรือเทราเฮิรตซ์ (THz) ได้ จึงเป็นแรงจูงใจที่คณะวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ของ **ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค** ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งผู้เขียนเป็นสมาชิกอยู่ มีความสนใจที่จะศึกษาการพัฒนาเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรดขึ้น โดยเน้นการผลิตเลเซอร์ในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่สามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน และมุ่งเน้นการปรับปรุงจากอุปกรณ์ของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนที่มีอยู่เดิม รวมทั้งสร้างหรือพัฒนาอุปกรณ์บางส่วนที่จำเป็นขึ้นมาใหม่ โดยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนในปัจจุบันสามารถใช้ผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสุดประมาณ 10-15 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ โดยมีความยาวพัลส์ประมาณ 200 เฟมโตวินาที และเมื่อนำไปผลิตรังสีโดยวิธีการทรานสิชั่น (transition radiation) จะได้รังสีในช่วงความถี่ประมาณ 0.2 ถึง 3 THz [24] โดยจะเห็นได้จากผลการคำนวณในกราฟของรูปที่ 9 ที่บ่งชี้ว่ารังสีที่ผลิตได้ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 2 THz จะมีความสว่างสูงกว่ารังสีซินโครตรอนที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ประมาณ 10 ถึง 10,000 เท่า

การขยายประสิทธิภาพของระบบเครื่องเร่งอนุภาคให้เป็นเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระดังแสดงใน รูปที่ 10 จะสามารถใช้ผลิตรังสีที่มีความเข้มสูงกว่าการผลิตรังสีแบบเดิมหลายเท่า รวมทั้งจะสามารถปรับความถี่ของรังสีให้ผลิตได้ครอบคลุมทั้งช่วง MIR และ FIR หรือ THz อีกด้วย โดยเครื่องกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่ทางทีมวิจัยกำลังพัฒนาขึ้นมานี้ จะเป็นเครื่องแรกในประเทศไทยและประเทศในแถบสมาคมอาเซียน



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลการคำนวณความสว่างของรังสีที่ผลิตได้จากการแผ่รังสีของวัตถุดำอุณหภูมิ 2000 เคลวิน (blackbody radiation: BB) รังสีซินโครตรอนที่ผลิตได้จากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (synchrotron radiation: SR) และ รังสีทรานสิชั่นที่ผลิตได้จากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (transition radiation: TR)

การพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่คนในวงการเครื่องเร่งอนุภาคเรียกกันว่า "แหล่งกำเนิดแสงแห่งอนาคต หรือ next generation light source" ขึ้นในประเทศ จะเป็นการสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีคุณประโยชน์มากในหลากหลายสาขาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อีกทั้งยังจะเป็นการสร้างและพัฒนาองค์ความรู้ด้านเครื่องเร่งอนุภาคและการผลิตรังสี ซึ่งเป็นศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีการบูรณาการนำความรู้ทั้งทางด้านฟิสิกส์ ทัศนศาสตร์ คณิตศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสรรค์นวัตกรรมด้านการออกแบบ การพัฒนาเครื่องมือ การประกอบสร้างและการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคและเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นอุปกรณ์และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง อีกทั้งเป็นลดการนำเข้าอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ราคาแพงจากต่างประเทศ



รูปที่ 10 แผนภาพแสดงระบบเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในระหว่างการพัฒนาและปรับปรุงขึ้นมาจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค [25]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาญกิจ คันฉ่อง และคุณปรัชญ์ บุญพรประเสริฐ สำหรับการแก้ไข ตรวจทาน คำแนะนำและการปรับปรุงบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Stimulated emission. [Art]. In Encyclopedia Britannica, http://www.britannica.com/EBchecked/media/90017/Stimulated-emission-in-a-laser-cavity

[2] J. P. Blewett, "Radiation Losses in the Induction Electron Accelerator", Phys. Rev. 69, 87 (1946).

[3] H. Winick, "Fourth generation light sources", IEEE Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Vancouver, B.C., Canada, 37 (1997).

[4] http://www.slri.or.th/th

[5] C.-Li. Dong et al., Soft-x-ray spectroscopy probes nanomaterial-based device, http://spie.org/x15809.xml

[6] J. M. J. Madey, "Stimulated emission of Bremsstrahlung in a periodic magnetic field", J. Appl. Phys. 42, 1906 (1971).

[7] http://photon-science.desy.de

[8] P. Schmüser, M. Dohlus and J. Rossbach, "Ultraviolet and Soft X-Ray, Free-Electron Lasers", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.

[9] C. Pellegrini and J. Stöhr, "X-ray free-electron lasers-principles, properties and applications", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 500, 33 (2003).

[10] G.P. Gallerano et al., "Phase-sensitive reflective imaging device in the mm-wave and Terahertz regions", J Infrared Millim. Terahertz Waves 30, 1351 (2009).

[11] P.C. Ashworth et al., "Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer", Opt. Exp. 17, 12444 (2009).

[12] A.J. Fitzgeld et al., "Terahertz pulsed imaging of human breast tumors", Radiology 239, 533 (2006).

[13] http://www.psi.ch/swissfel/research

[14] http://www.stfc.ac.uk/ASTeC/17452.aspx

[15] J. C. Marshall "Free Electron Lasers", Mac Millan Publishing Company, New York, 1985.

[16] P. Luchini and H. Motz, "Undulators and Free-Electron Lasers", Claredon Press, Oxford, 1990.

[17] C. A. Brau, "Free-Electron Lasers", Academic Press, Oxford, 1990.

[18] G. Dattoli, A. Renieri, A. Torre, "Lectures in Free-Electron Laser Theory and Related Topics", World Scientific, Singapore, 1995.

[19] G. Margaritondo, P. R. Ribic, "A simplified description of X-ray free-electron lasers", J. Synchrotron Rad. 18, 101 (2011).

[20] P. Elleaume et al., "Design considerations for a 1 Å SASE undulator", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 455 503 (2000).

[21] P.G. O'Shea and H.P. Freund, "Free-electron lasers: Status and applications", Science 292, 1853 (2001).

[22] H.-D. Nuhn, "From storage rings to free electron lasers for hard x-rays", J. Phys.: Condens. Matter 16, S3413 (2004).

[23] https://www.llnl.gov/str/JulAug05/Aufderheide.html

[24] C. Thongbai et al., "Optimization of longitudinal electron beam properties for Linac-based infrared free-electron Laser at Chiang Mai University", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 587, 130 (2008).

[25] S. Supakul, S. Chunjarean, C. Thongbai, S. Rimjaem, "Optimization of longitudinal electron beam properties for Linac-based infrared free-electron Laser at Chiang Mai University", Energ. Proc. 34, 912 (2013).