

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

อจจรา ปัญญา¹

ในเดือนตุลาคมของทุกปีจะมีการประกาศรางวัลโนเบล ซึ่งถือได้ว่าเป็นรางวัลสูงสุดที่มอบให้แก่นักวิทยาศาสตร์ผู้ได้รับคัดเลือกจากสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งประเทศสวีเดนในพระบรมราชูปถัมภ์ (The Royal Swedish Academy of Sciences) เป็นผู้ที่ได้คิดค้นทฤษฎีหรือสิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณประโยชน์ให้แก่มวลมนุษยชาติอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงไม่แปลกที่นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกต่างตั้งตารอคอยการประกาศผลรางวัลนี้ โดยในช่วงนี้ของปีถือได้ว่าเป็นช่วงที่บรรดาภาควิทยาศาสตร์จะมีความคึกคักเป็นพิเศษ เพราะต่างก็ร่วมลุ้นกันว่า งานวิจัยด้านใดที่น่าจะได้รับรางวัล, บุคคลท่านใดที่น่าจะได้รับรางวัล, สิ่งประดิษฐ์หรือทฤษฎีที่ได้รับรางวัลจะเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ตนกำลังทำอยู่หรือไม่ ฯลฯ เมื่อทราบผลรางวัลแล้วก็มักจะมีการสนทนากับงานวิจัยที่ได้รับรางวัล ร่วมสนุกไปกับ การคาดการณ์ว่าปีหน้าใครจะได้รางวัลนี้ไปครองเป็นรายต่อไป จึงถือได้ว่ารางวัลนั้นนอกจากจะสร้างสีสันให้กับวงการวิทยาศาสตร์แล้วยังเปรียบเสมือนเป็นขวัญและกำลังใจให้กับบรรดานักวิทยาศาสตร์ทั้งรุ่นใหม่และรุ่นเก่าให้มีความพยายามสร้างสรรค์ผลงาน อัน ทรงคุณ ค่า เก ก เช่น บรรดาผู้ได้รับ รางวัล ท่านก่อนๆ

ซึ่งในปี 2014 ที่เพิ่งผ่านไป รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ได้ตกเป็นของศาสตราจารย์ฮิโระชิ อะคาซากิ (Isamu Akasaki), ศาสตราจารย์ฮิโรชิ อามาโนะ (Hiroshi Amano) จากมหาวิทยาลัยนาโงยา (Nagoya University) ประเทศญี่ปุ่น และศาสตราจารย์ชูจิ นาคามูระ (Shuji Nakamura) จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียซานตาบาร์บารา (University of California, Santa Barbara) ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับ “การประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม” ไดโอดเปล่งแสง (light - emitting diodes) หรือที่เรียกกันสั้น ๆ ในวงการอิเล็กทรอนิกส์ว่า แอลอีดี (LED) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรือง

แสงได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ โดยที่แสงที่เปล่งออกมาจะครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีอินฟราเรดไปจนถึงอัลตราไวโอเล็ต 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

สำหรับผู้ติดตามข่าวสารเกี่ยวกับรางวัลโนเบลเป็นประจำทุกปี คำถามแรกที่มาพร้อมกับรางวัลโนเบลทุกสาขาคือมันมีผลกระทบต่อมวลมนุษยชาติอย่างไร ในบทความนี้เราจะมาช่วยกันหาคำตอบว่า อะไรที่ทำให้แอลอีดีสีน้ำเงินธรรมดา ๆ ราคาไม่แพง มีค่าคู่ควรกับรางวัลโนเบล และเราจะหยุดอยู่แค่แอลอีดีสีน้ำเงิน ที่ผลิตจาก GaN และอัลลอยของ III-N (III-nitride semiconductors) แค่นี้หรือไม่ แต่ก่อนที่เราจะไปหาคำตอบเหล่านั้น ผู้เขียนอยากให้เราลองย้อนกลับไปดูประวัติศาสตร์ของเทคโนโลยีแสงสว่างชนิดนี้ ซึ่งเราจะพบว่ามันมีประวัติยาวนานคู่มา กับมนุษยชาติเลยทีเดียว เพราะความต้องการหนึ่งของมนุษย์ที่สำคัญไปไม่น้อยกว่าปัจจัย 4 ก็คือความต้องการที่จะมองเห็นสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวเองแม้ในยามค่ำคืนที่ไร้แสงอาทิตย์ ในยุคหินมนุษย์ใช้กองไฟ หรือตะเกียงจากไขมันสัตว์ ส่วนในสมัยอียิปต์ก็เริ่มนำเทียนไขมาใช้อย่างจริงจัง แสงสว่างเหล่านี้ได้มาจากการเผาไหม้ทั้งสิ้น จนกระทั่งในปี 1802 นักเคมีชาวอังกฤษ

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์(ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Humphry Davy ได้ประดิษฐ์หลอดไฟชนิดหลอดไส้เป็นครั้งแรกจากการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดแพลตินัม ซึ่งตรงจุดนี้ถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของเทคโนโลยีแสงสว่างที่ทำได้ หลังจากนั้น Thomas Edison จึงได้ผลิตหลอดไส้ที่สามารถนำไปขายในท้องตลาดได้เป็นรายแรก เทคโนโลยีแสงสว่างถัดมาคือหลอดไฟแก๊สปล่อยประจุ แก๊สในหลอดไฟชนิดนี้ได้แก่อาร์กอน, นีออน, คริปทอน และ ซีนอน ซึ่งหลอดไฟชนิดนี้จะให้อิเล็กตรอนไหลผ่านหลอดแก้วที่มีแก๊สความดันต่ำ พออิเล็กตรอนชนเข้ากับอะตอมแก๊ส ก็จะทำให้อะตอมแก๊สเปลี่ยนระดับพลังงานปลดปล่อยโฟตอนออกมาแต่มีไม่ไช่แสงขาว และหากย้อนเวลากลับไปซักไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา หลอดไฟเรืองแสงหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ก็ได้เข้ามาตีตลาดอย่างหนัก หลอดไฟชนิดนี้ใช้หลักการเดียวกับหลอดไฟแก๊สปล่อยประจุแต่โฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจะอยู่ในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต เมื่อไปชนกับสารเรืองแสงที่ฉาบผิวหลอดไว้ก็จะให้แสงขาวออกมา หากยังจำกันได้ในยุคหนึ่งได้มีการรณรงค์ให้เปลี่ยนมาใช้หลอดไฟชนิดนี้แทนหลอดไส้เพราะประหยัดพลังงานและอายุการใช้งานนานกว่า แต่ทุกสิ่งทุกอย่างย่อมมีการเปลี่ยนแปลง แม้แต่หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เคยได้รับการโฆษณาว่าดีนักหนา ก็ไม่เว้น เนื่องด้วยปัจจุบันเทคโนโลยีหลอดไฟแอลอีดีกำลังก็บลานเข้ามาปฏิวัติหลอดไฟรุ่นเก่าๆ แล้ว



รูปที่ 1 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีแสงสว่าง

(<http://resources.made-in-china.com/article/company-news/AnPxK0JruEHS/Evolution-of-LED-Technology/>)

แอลอีดีคืออะไร มีหลักการทำงานอย่างไร ?

แอลอีดี คือ ไดโอดที่เปล่งแสงในย่านที่มนุษย์มองเห็นได้ (visible light) รวมไปถึงย่านรังสีอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ต 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 การกิจต่อไปคือการทำความเข้าใจว่าไดโอดเปล่งแสงนั้น เปล่งแสงหรือปลดปล่อยโฟตอนได้อย่างไร เรื่องนี้สามารถอธิบายง่าย ๆ โดยจินตนาการถึงอิเล็กตรอนที่กำลังโคจรรอบนิวเคลียสในวงโคจรที่ต่างกัน ยิ่งอิเล็กตรอนโคจรอยู่ห่างจากนิวเคลียสเท่าไรก็จะมีพลังงานมากขึ้น ถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนวงโคจร มันจำเป็นที่จะต้องปลดปล่อยหรือรับพลังงานเข้ามา ดังนั้นในทำนองเดียวกันเมื่ออิเล็กตรอนจากด้าน n ของไดโอดกระโดดไปลงหลุมในด้าน p อิเล็กตรอนก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเช่นกัน โดยเปลี่ยนไปสู่สถานะที่มีพลังงานต่ำลง ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอน ซึ่งก็คือรังสีแสงต่าง ๆ นั่นเอง โดยพลังงานหรือความถี่ของโฟตอนจะเป็นตัวกำหนดสีของแสงที่เปล่งออกมา ถ้าความถี่เหล่านี้อยู่ในย่านที่มองเห็นได้ เราก็จะเห็นเป็นแสงสีต่างๆ แต่ถึงแม้จะเป็นความถี่ที่ตามองไม่เห็น ยกตัวอย่างเช่น รังสีอินฟราเรด มันก็ยังมีประโยชน์สามารถนำมาผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดได้ ยกตัวอย่างเช่น รีโมทโทรทัศน์ ที่เราใช้อยู่ทุกวัน ในบ้าน ก็ถูกสร้างมาจากไดโอดที่เปล่งแสงในย่านอินฟราเรด ดังนั้นเราจึงสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า แอลอีดีก็คือไดโอดชนิดพิเศษที่ผ่านการออกแบบมาให้สามารถปลดปล่อยโฟตอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดให้แอลอีดีเปล่งแสงสีต่างๆ นั้น คือ

ช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) กับช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (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” จะถือว่า VBM อยู่คนละตำแหน่งกับ CBM ซึ่งในกรณีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก CBM ไปยัง VBM (ซึ่งจะมีการปลดปล่อยโฟตอน) ได้โดยอาศัยแค่อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอนเพื่ออนุรักษ์พลังงานเท่านั้น แต่ในกรณีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก CBM ไปยัง VBM ได้นั้นต้องเพิ่มอันตรกิริยากับโฟนอน (นั่นก็คือ การสั่นของแลตทิซ) เข้ามาช่วยเพื่ออนุรักษ์โมเมนตัม ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง จึงมีการปลดปล่อย (และดูดกลืน) โฟตอนได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำมาสร้างเป็นแอลอีดีมากกว่า สำหรับตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำ แอลอีดีอิน ฟาเรด, 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 หากปราศจากจอซอร์ตัวสุดท้าย “แอลอีดีสีน้ำเงิน” เนื่องจากมนุษย์เราต้องการสร้างแสงที่คล้ายกับแสงอาทิตย์นั่นก็คือ แสงขาว และการที่จะสร้างแสงขาวได้เราต้องมีแม่สีแสงครบ ซึ่งได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ผู้เขียนเชื่อว่าหนึ่งในคำถามที่ผุดขึ้นมาในใจของผู้ติดตามข่าวสารของหลอดไฟแอลอีดีคงหนีไม่พ้นคำถามที่ว่า เพราะเหตุใดจึงต้องใช้เวลามากกว่า 30 ปี ในการสร้างและพัฒนาแอลอีดีสีน้ำเงินให้สามารถนำออกมาจำหน่ายในท้องตลาดได้ จะตอบคำถามนี้ให้ได้ก็ซึ่งก็ต้องย้อนกลับไปที่ศึกษาประวัติการสร้างหลอดแอลอีดีชนิด ห้อยหลอดแรก ๆ ของโลกที่ริเริ่ม

ทำงานวิจัยและมีรายงานผลเกี่ยวกับการสร้างแอลอีดีได้แก่ 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 $\text{GaP}_{1-x}\text{As}_x$ ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงในกรณีที่ $x < 0.45$ และประสบความสำเร็จในการสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 710 nm (สีแดง) สำเร็จเป็นที่แรกของโลกในปี 1962 ในช่วงแรกแอลอีดีสีแดงถูกนำมาใช้ในหน้าจอแสดงผลของเครื่องคิดเลข โดยอาศัยเลนส์พลาสติกมาช่วยในการเพิ่มขนาดของตัวเลข ดัง รูปที่ 2



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

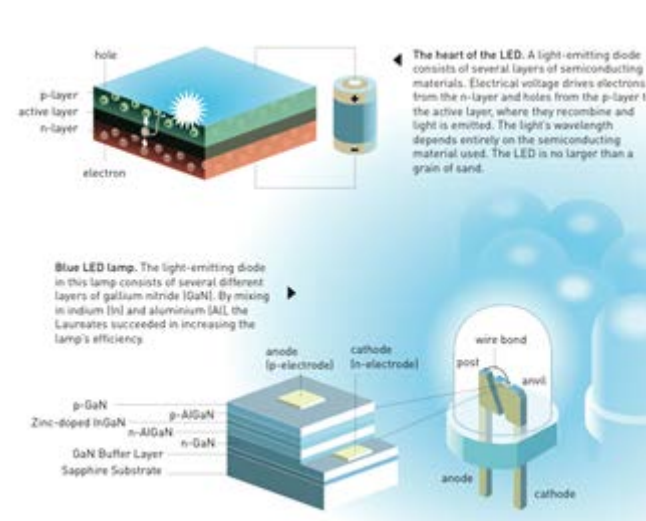
ถึงแม้ในช่วงท้ายของ 1960s จะเริ่มมีความพยายามที่จะผลิตแอลอีดีสีน้ำเงิน แต่ก็ยังไม่สามารถทำได้สำเร็จ เนื่องมาจากในการผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินนั้นจำเป็นต้องหาสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมและต้องใช้ความประณีตในการปลูกผลึกอย่างสูง ในช่วงเวลาดังกล่าวสารกึ่งตัวนำที่มีแนวโน้มจะถูกนำมาใช้ในการผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินได้แก่ 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 (acceptor dopants) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนลดลง

หลังจากนั้น ในช่วง 1970s เหล่านักวิทยาศาสตร์ก็ยังแก้ปัญหาดังกล่าวไม่ได้ ช่วงเวลานี้จึงเปรียบเสมือนยุคมืดมนของการพัฒนาแอลอีดีสีน้ำเงิน จนกระทั่งมาถึงช่วง 1980s แสงสว่างก็เริ่มปรากฏที่ปลายอุโมงค์เมื่อ อิชามู อะคาซากิ, ฮิโรชิ อามาโนะ และผู้ร่วมงานท่านอื่น ๆ สามารถที่จะปลูกผลึก GaN ที่มีคุณภาพปราศจากความเค้นอันเนื่องมาจากความไม่เท่ากันของระยะห่างระหว่างอะตอมของสารพื้นฐาน (substrate) กับ GaN ได้สำเร็จ โดยใช้เทคนิค MOVPE (Metalorganic Vapour Phase Epitaxy) ซึ่งพวกเขาใช้วิธีเตรียม polycrystalline ของ AlN หนา 30 nm ลงบน sapphire ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ให้ความร้อนเข้าไปจนอุณหภูมิเป็น 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการปลูกผลึก GaN และในช่วงกระบวนการให้ความร้อน crystalline เล็ก ๆ จะค่อย ๆ ถูกทำให้เรียงตัวไปในทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึก GaN และในเวลาไล่เลี่ยกัน ชูจินาคามูระ ก็ได้พัฒนาเทคนิคที่ทำให้สามารถปลูกผลึก GaN ที่มีผิวหน้าที่เรียบได้ โดยมีวิธีที่แตกต่างจากกลุ่มแรกตรงที่เขาเลือกที่จะใช้ GaN ที่ปลูกที่อุณหภูมิต่ำ มาแทนที่ polycrystalline ของ AlN

การค้นพบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการพัฒนาแอลอีดีสีน้ำเงินคือการแก้ปัญหาเรื่องการเจือ GaN ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ที่ถูกเจือเข้าไปจะไปสร้างพันธะกับไฮโดรเจนกลายเป็นสารเชิงซ้อน (complexes) ซึ่งจะปลดประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเจือแล้ว จนกระทั่งในช่วง 1990s ปัญหาดังกล่าวจึงได้ถูกกำจัดไปเมื่อ อิชามู อะคาซากิ, ฮิโรชิ อามาโนะ และ ผู้ร่วมงานท่านอื่น ๆ ได้ค้นพบว่าการนำ GaN ที่ถูกเจือด้วย Zn ไปศึกษาด้วย scanning electron microscope และ นำ GaN ที่ถูกเจือด้วย Mg ไปศึกษาโดยการฉายด้วยอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ จะทำให้มันสามารถกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p ได้ดีขึ้น ซึ่งภายหลัง

ชูจินาคามูระ ได้ให้เหตุผลเกี่ยวกับเหตุการณ์นี้ว่าอิเล็กตรอนที่ฉายเข้าไปได้ไปทำลายพันธะของสารเชิงซ้อนและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนให้แก่สารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้วิธีนี้เขายังได้เสนอว่ากระบวนการทางความร้อนแบบ annealing ก็สามารที่จะทำลายพันธะของสารเชิงซ้อนได้เช่นกัน ซึ่งจากการค้นพบเหล่านี้ส่งผลให้ผู้ที่ได้รับรางวัลโนเบลทั้งสามท่านและผู้ร่วมงานท่านอื่น ๆ สามารถที่จะผลิตแอลอีดีสีน้ำเงินขึ้นมาได้สำเร็จ จากการสร้าง p-n junction ที่รอยต่อของ GaN และอัลลอยของ GaN ต่างๆ ได้แก่ AlGaIn/GaN, InGaIn/GaN และ InGaIn/AlGaIn



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

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

เพราะเหตุใดแอลอีดีสีน้ำเงินถึงถูกรังรองรางวัลโนเบล ?

คำตอบก็คือ เพราะมันคือการปฏิวัติเทคโนโลยีการส่องสว่างแบบก้าวกระโดดนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น จากหลอดไส้ที่ถูกคิดค้นมานานกว่า 135 ปี มาเป็นหลอดแอลอีดี ที่มีอายุการใช้งาน

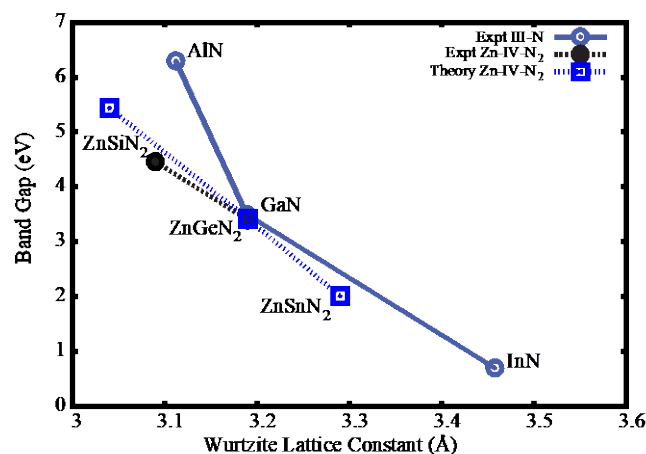
ยาวนานกว่า มีราคาที่ถูกลงอย่างรวดเร็วตามอุปทานในตลาด และที่สำคัญมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงสูงถึง 50% ในขณะที่ประสิทธิภาพของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED อยู่ที่ 22% และ 4% ตามลำดับ ซึ่งทำให้เราสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยรวมลงไปได้ถึง 20 - 30% แอลอیدیสีขาวยังช่วยให้ประชากรโลกกว่า 1.5 พันล้านคนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ห่างไกลและยังขาดแคลนสาธารณูปโภคพื้นฐานด้านไฟฟ้า ให้ได้มีแสงสว่างใช้ในยามค่ำคืน เนื่องจากแอลอیدیสีขาวสามารถถูกนำไปใช้งานควบคู่กับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้เรายังใช้เทคโนโลยีที่ได้จากการผลิตแอลอیدیสีน้ำเงิน มาใช้ในการพัฒนาจอแสดงผลแบบส่องผ่าน (backlit display) สำหรับหน้าจอโทรศัพท์มือถือ แล็ปท็อป และโทรทัศน์, และใช้ในเลเซอร์สีน้ำเงินสำหรับเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลบนแผ่นบลูเรย์ซึ่งมีความจุมากกว่าแผ่นดีวีดีถึงห้าเท่า และในอนาคตนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่านอกจากแสงสีน้ำเงินแล้ว แสงยูวีจาก GaAlN/GaN จะมีประโยชน์ทางด้านสุขอนามัยด้วย เพราะแสงยูวีสามารถทำลายดีเอ็นเอของแบคทีเรียและไวรัสได้ นี่เป็นเพียงตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของผลงานวิจัยของทั้งสามท่านที่มีต่อมวลมนุษยชาติ ดังนั้นจึงไม่แปลกที่รางวัลโนเบลจะตกเป็นของท่านเหล่านี้ที่หุ่่มเท คิดค้น จนได้นวัตกรรมที่มีส่วนทำให้สังคมของเราดีขึ้น ตรงตามเจตนารมณ์ของ Alfred Nobel ผู้ก่อตั้งรางวัลโนเบล

จะหยุดอยู่ที่แอลอیدیสีน้ำเงินจาก GaN หรือไม่ ?

เราจะหยุดพัฒนาเทคโนโลยีเรื่องแสงสว่างกันแล้วหรือไม่ ในเมื่อแอลอیدیสีน้ำเงินจาก GaN ดูจะมีคุณสมบัติเหมาะสมมหาศาลจนทำให้ผู้คิดค้นได้รับรางวัลโนเบลไปแล้ว คำตอบของคำถามนี้ง่ายมาก ถ้าเราในที่นี้หมายถึงเหล่านักวิทยาศาสตร์ คำตอบนั้นก็คือ “ไม่หยุด” เพราะนักวิทยาศาสตร์โดยทั่วไปคงไม่คิดว่าสิ่งที่มีอยู่คือสิ่งที่ดีที่สุด เราเชื่อว่าทุกอย่างยังมีหนทางพัฒนาได้ วันนี้พระเอกของเรื่องแอลอیدیสีน้ำเงินคือ GaN และผู้ช่วยพระเอกได้แก่ InGaN, AlGaIn ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้มาจากการรวมตัวกันของ GaN และธาตุ ๆ ในตระกูล III-N ได้แก่ AlN, InN และถึงแม้ว่าในปัจจุบันพระเอกและเหล่าผู้ช่วยจะสามารถปฏิวัติเทคโนโลยีส่อง

สว่างได้สำเร็จ แต่ใครจะรู้ว่าในอนาคตเราจะไม่ประสบกับปัญหาอื่น ๆ ตามมา ยกตัวอย่างเช่น การนำแกเลียม (Gallium) และอินเดียม (Indium) ซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ มาใช้ในการผลิตอุปกรณ์แอลอیدیเป็นจำนวนมาก อาจทำให้ขาดแคลนมีราคาแพงและเกิดภาวะขาดแคลนในที่สุดได้ นอกจากนั้นในการสังเคราะห์สารอัลลอย (alloy) ของสารกึ่งตัวนำ กลุ่ม III-N ยังพบว่าปัญหาการแยกสถานะ (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-N₂ ขึ้นมาใหม่ [3] ซึ่งจะพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของกลุ่ม Zn-IV-N₂ ครอบคลุมช่วงพลังงานของแสงที่มองเห็นได้ เช่นเดียวกับกับกลุ่ม III-N แต่มีค่าคงที่แลตทิซที่ใกล้เคียงกันมากกว่ากลุ่ม III-N ดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงช่องว่างแถบพลังงาน (band gaps) เทียบกับค่าคงที่แลตทิซ (lattice constants) ของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-N กับกลุ่ม Zn-IV-N₂ [3]

สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม Zn-IV-N₂ ยกตัวอย่างเช่น สาร ZnSnN₂ เป็นสารที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก [4-7] เนื่องจากในช่วงสองสามปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีรายงานเกี่ยวกับการสังเคราะห์ ZnSnN₂ 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).