

## วิธีการง่ายในการหาสมการและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

### A SIMPLE WAY TO FIND THE EQUATION AND THE EFFICIENCY OF A MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL

ชโนภาส ชนลักขณดาว\* และ รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

Chanopat Chonlakdao\* and Ratsamee Sangsirimongkolying

Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, 10220

\*E-mail: chanopatp@gmail.com

Received: 2021-03-29

Revised: 2021-05-12

Accepted: 2021-06-08

#### บทคัดย่อ

บทความวิชาการฉบับนี้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับช่องว่างพลังงาน รอยต่อพีเอ็น อิเล็กตรอน-โฮล และกลไกการดูดกลืนแสงเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ความรู้พื้นฐานทฤษฎีควอนตัม การเคลื่อนที่ของประจุด้วยฟังก์ชันการกระจายแฟร์มี-ดิแรกในกลศาสตร์เชิงสถิติ และการไหลของโฮลทำให้ได้สมการไดโอดที่ใช้สำหรับการหาสมการเซลล์แสงอาทิตย์และกระแสไฟฟ้าสุทธิ สำหรับวิธีการง่ายที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาได้จากร้อยละสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ได้กับพลังงานของโฟตอนที่คำนวณจากการดูดกลืนแสงอาทิตย์ที่สูงสุดในช่วงแสงที่ตามองเห็น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 20%

**คำสำคัญ:** เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ทฤษฎีควอนตัม ทฤษฎีรอยต่อพีเอ็น สมการเซลล์แสงอาทิตย์

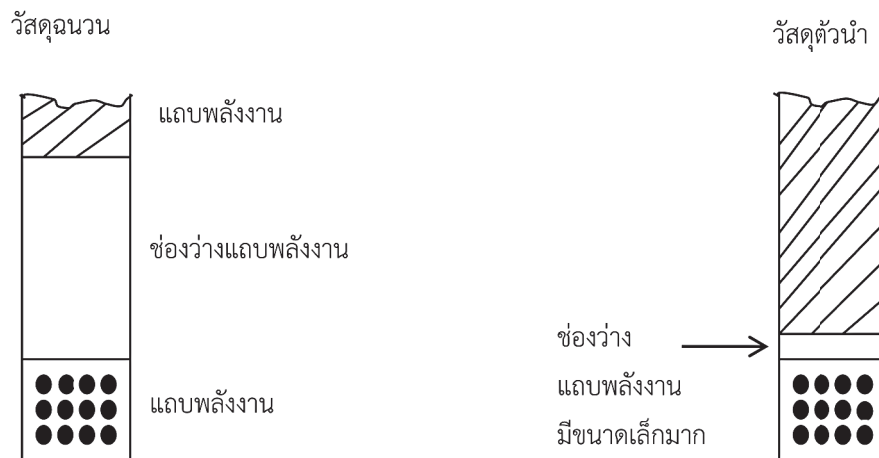
#### ABSTRACT

This academic article describes the theories related to energy gap, p-n junction, electron-hole and absorption mechanisms to generate solar cell electricity. Basic knowledge of quantum theory, charge movement with the Fermi-Dirac distribution function in statistical mechanics and hole flow result in the diode equation used for finding solar cell equation and net current. The simple method used to determine the efficiency of the solar cells can be determined by the percentage of voltage obtained on the energy of the photon calculated from the maximum solar absorption value in the visible light range, which suggests that the efficiency of the solar cell is about 20%.

**Keywords:** monocrystalline silicon solar cell, a solar cell efficiency, quantum theory, pn junction theory, solar cell equation

## บทนำ

ก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ของโลกที่รุนแรงขึ้นนั้นมีสาเหตุหลักคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) คิดเป็น 82 เปอร์เซ็นต์ (Foer, 2019) ของก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์โดยส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรม การคมนาคม และการใช้ไฟฟ้า การหยุดก๊าซเรือนกระจกจะต้องลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา โดยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (petroleum) หรือชีวมวล (biomass) และเพิ่มการใช้พลังงานทดแทน (renewable) จากแหล่งเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานลม (wind energy) และพลังงานน้ำ (water power) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากกลไกการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าคงที่ต่อขนานกับรอยต่อพีเอ็น (pn junction) ผลิตจากอุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconductor devices) เพื่อใช้เปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จากวิกฤตการณ์ทางด้านภาวะโลกร้อน พลังงานของโลก และภาวะฝุ่นละออง PM 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์จึงได้เข้ามามีบทบาทร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ซึ่งจะเป็นแหล่งผลิตพลังงานสำหรับใช้งานในอนาคตพร้อมกับการตรวจสอบและการประยุกต์ใช้สารกึ่งตัวนำ ในยุคแรกของการค้นพบรอยต่อพีเอ็นได้มีการเสนอผลการทดลองเพื่อยืนยันทฤษฎีดังกล่าวอย่างรวดเร็ว จนทำให้ประสบความสำเร็จและเกิดเทคโนโลยีใหม่ขึ้น นำไปสู่ทรานซิสเตอร์ (transistor) ตัวแรกของโลกที่สามารถขยายไฟฟ้าได้ดี ซึ่งในอดีตเคยใช้หลอดสุญญากาศ (vacuum) ขนาดใหญ่และกินพลังงานไฟฟ้ามาก ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าสามารถสร้างขึ้นได้โดยตรงจากแสงอาทิตย์ด้วยทฤษฎีการดูดกลืนพลังงานแสงโดยสารกึ่งตัวนำสามารถขับอิเล็กตรอน (electron) ออกไปสู่อากาศหรือในสุญญากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ทำให้สารกึ่งตัวนำเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, emf) ขนาดประมาณ 0.5 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดนี้ได้จากการทดสอบด้วยวัสดุประเภทซิลิคอน (silicon, Si) ที่เป็นแบบรอยต่อพีเอ็นของรัสเซลล์ โอล์ (Russell Ohl) ในราวต้นปี ค.ศ. 1940 (Kruangam, 1992) แรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจรคือความต่างของแรงดันไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดงานในการนำพาประจุเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบของวงจรไฟฟ้าเปรียบเสมือนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นผลทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า สำหรับวิธีการง่ายในการอธิบายทฤษฎีแถบพลังงานของแข็ง (band theory of solids) คืออวกาศภาพโครงสร้างแถบ (band structures) ดังแสดงในภาพที่ 1 กำหนดให้แถบพลังงานด้านล่างหรือแถบเวเลนซ์ (valence band) ถูกจับจองด้วยอิเล็กตรอน (จุดสีดำเปรียบเหมือนอิเล็กตรอน) ขณะที่เส้นยาวขีดเฉียงหลาย ๆ เส้นในแถบพลังงานด้านบนหรือแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) หมายถึงแถบพลังงานที่ยังไม่ถูกจับจองด้วยอิเล็กตรอน พื้นที่ว่างระหว่างทั้งสองแถบพลังงานเรียกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ระดับพลังงานกระตุ้นที่จำเป็นในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะคู่ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ในระดับชั้นพลังงานสูง ทำให้คู่อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และเปลี่ยนเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) ซึ่งกลไกดังกล่าวทำให้เกิดการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 1 โครงสร้างแถบพลังงาน (energy band structures) ของวัสดุฉนวนและวัสดุตัวนำ  
(ดัดแปลงจาก Panyakeow, 2014)

โครงสร้างแถบพลังงานของฉนวน (insulator) สถานะพลังงานของประจุในฉนวนที่อุณหภูมิห้องหรือแม้แต่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนทั้งหมดอยู่ในแถบพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งเรียกว่าแถบเวเลนซ์ ทุกสถานะแถบพลังงานนี้ อิเล็กตรอนมีความหนาแน่นสูง ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการนำไฟฟ้าในฉนวน ถัดขึ้นไปจากแถบเวเลนซ์คือแถบต้านบนที่มีพลังงานสูงกว่า (แถบการนำไฟฟ้า) ซึ่งไม่มีโหลด (load) ที่เป็นอุปกรณ์ แถบการนำไฟฟ้าถูกคั่นด้วยช่องว่างแถบพลังงาน หากฉนวนมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานกว้างมากหลายอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ตัวอย่างเช่น เพชร (diamond) มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 5 eV ที่อุณหภูมิห้องหรือแม้แต่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนเกือบทั้งหมดคงไม่สามารถหาพลังงานกระตุ้น (excited energy) ได้มากพอจากการชนกันของอะตอม (atomic collisions) ) จนสามารถกระโดดข้ามไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงไม่มีอิเล็กตรอนในแถบต้านบนสำหรับ นำไฟฟ้า ทำให้เพชรไม่สามารถนำไฟฟ้า กรณีสารกึ่งตัวนำที่พบใช้มากที่สุดเช่น ซิลิคอนและเจอร์มาเนียม (germanium, Ge) พบว่ามีโครงสร้างแถบพลังงานใกล้เคียงกับฉนวน แต่ขนาดช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่าฉนวน (Si ประมาณ 1.1 eV และ Ge ประมาณ 0.8 eV ) (Kruangam, 1992) ดังนั้นความร้อนที่อุณหภูมิห้องจึงมีพลังงานมากพอที่จะทำให้อะตอมเกิดการชนกันและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าต้านบน ทำให้ซิลิคอนและเจอร์มาเนียมสามารถนำไฟฟ้าได้ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งไปแถบต้านบนก็จะทำให้มีสถานะว่างในแถบต้านล่างที่สามารถทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ด้วย ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ง่ายพอสมควรและสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูง

สารกึ่งตัวนำได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องจนถึงขั้นสามารถนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ก็เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างแคบโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1 eV (Kittle, 2005; Knapp, 1996; Kruangam, 1992) ทำให้ซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียมไม่ใช่วัสดุที่สมบูรณ์แบบ การถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิห้องจะช่วยให้อิเล็กตรอนของอะตอมบางส่วนข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระที่แถบการนำไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นตำแหน่งที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกไปจะเกิดการขาดอิเล็กตรอนหรือเกิดช่องว่างที่มีประจุเป็นบวกขึ้นในแถบเวเลนซ์ ซึ่งเรียกว่าโฮล (hole) เนื่องจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากโครงสร้างอะตอมเปรียบเหมือนประจุที่ขาดหายไปบนแลตทิซผลึก (crystal lattice) ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะมีผลในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เปรียบเหมือน

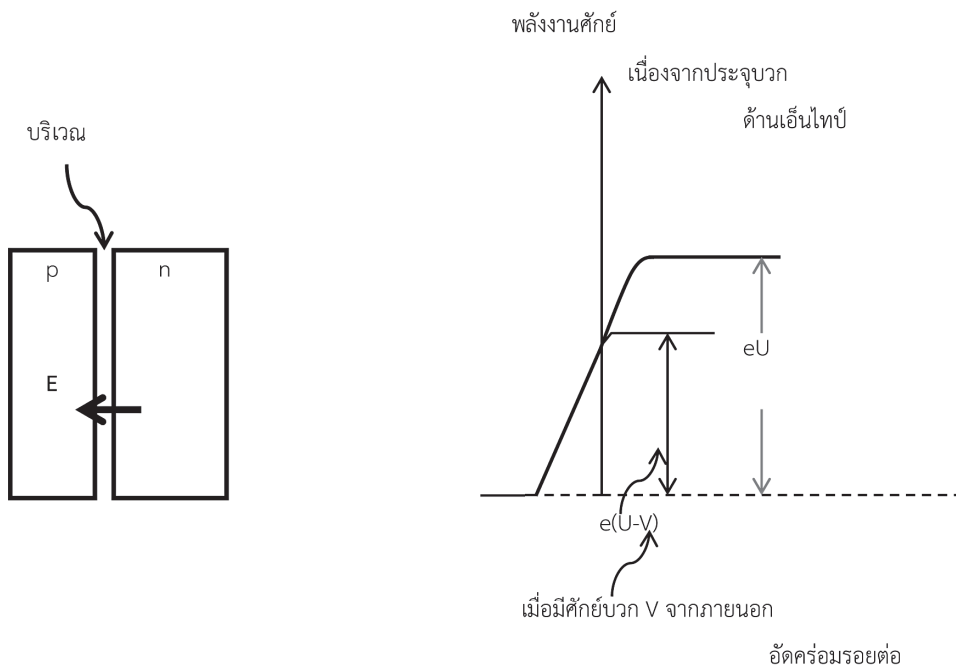
โหนด (ประจุบวก) เคลื่อนที่ภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เนื่องจากการย้ายประจุลบไปทางซ้ายก็เหมือนกับการใส่ประจุบวกเพิ่มไปทางขวา ซึ่งสามารถจินตนาการได้ว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของโหนดที่มีประจุบวกไปทางด้านขวา กลไกการนำไฟฟ้าแบบนี้เรียกว่าการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor)

มีสารกึ่งตัวนำบางชนิดที่เมื่อถูกแสงแล้วจะทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลดลงทำให้กระแสไหลได้ง่ายขึ้น (Kruangam, 1992) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าสภาพนำไฟฟ้าพลังงานแสง (photoconductivity) เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของอะตอมจะถูกขับออกมาและเหลือโฮล อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจะวิ่งไปหาขั้วบวก ในขณะที่โฮลจะเคลื่อนไปหาขั้วลบทำให้เกิดการไหลของกระแสขึ้น และการที่กระแสไหลได้ง่ายเช่นนี้จึงทำให้ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำลดลง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์คือประสิทธิภาพ (efficiency) มิใช่ขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ (Kruangam, 1992) นับวันประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เป็นผลมาจากการเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในสภาพที่เซลล์จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เกิดสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ (Panyakeow, 2014) จุดประสงค์ของบทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการง่ายในการหาประสิทธิภาพและสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon solar cell) โดยจะวิเคราะห์ทฤษฎีสำคัญในช่วงการเริ่มต้นการค้นพบเซลล์แสงอาทิตย์

## ทฤษฎี

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว อาศัยการดูดกลืนพลังงานโฟตอน (photon) ของแสงอาทิตย์โดยสารกึ่งตัวนำ กระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นก็คือ การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า พร้อมกับมีโฮลเหลือทิ้งไว้ในแถบเวเลนซ์ โดยอนุภาคคู่อิเล็กตรอนและโฮล ที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นพาหะประจุไฟฟ้า (charged carrier) สำหรับนำกระแสไฟฟ้าต่อไป ถึงขั้นตอนนี้เราอาจถือได้ว่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้ว ขั้นตอนที่ต่อไปก็คือ การแยกอิเล็กตรอนและโฮลออกจากกันก่อนที่อนุภาคทั้งคู่จะรวมกัน (recombination) เข้าสู่ภาวะสมดุล การแยกอนุภาคทั้งคู่สามารถทำได้โดยการสร้างรอยต่อพีเอ็น สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ทำการโด๊ป (doping) ด้วยอะตอมของธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน (boron) และเรียกโบรอนว่าเป็นสารเจือปน (impurity) หรืออะตอมตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor atom) ซึ่งแต่ละอะตอมโบรอนขาดอิเล็กตรอน 1 ตัวที่จะทำให้เกิดพันธะกับซิลิคอน ลักษณะแบบนี้เรียกว่าขาดอิเล็กตรอนหนึ่งตัวเปรียบเหมือนมีช่องว่างเกิดขึ้นในพันธะ ทำให้เกิดโฮลส่วนเกิน (extra holes) ในแถบเวเลนซ์ เนื่องจากมีโฮลส่วนเกินจึงเรียกสารกึ่งตัวนำแบบพีไทป์ (p-type) ในขณะที่สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ทำการโด๊ปด้วยอะตอมของธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น อาร์เซนิก (arsenic) และเรียกอาร์เซนิกว่าสารเจือปนหรืออะตอมตัวให้อิเล็กตรอน (donor atom) สิ่งที่เกิดขึ้นคืออิเล็กตรอน 4 ตัวจะถูกใช้ในพันธะโควาเลนต์ของแลตทิซผลึก ในขณะที่อีกหนึ่งอิเล็กตรอนที่เหลือจะเป็นอิสระ กล่าวคือสารเจือปนให้อิเล็กตรอนมากกว่าที่แถบเวเลนซ์จะสามารถรับได้ และอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เหลือก็ต้องขึ้นไปแถบการนำกลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) และเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นไทป์ (n-type) เพราะมีอิเล็กตรอนการนำส่วนเกิน (extra conduction electrons)

ในการใช้งานทางเทคโนโลยีเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น สารกึ่งตัวนำทั้งสองแบบจะถูกนำให้ติดกันเป็นผลึก ยกตัวอย่างเช่น ด้านซ้ายของผลึก (p-type) พิจารณาแต่ละอะตอมตัวรับจะต้องการรับหนึ่งอิเล็กตรอนจากพันธะข้างเคียงในแลตทิซผลึก สิ่งที่เกิดขึ้นคืออะตอมตัวรับจะกลายเป็นไอออนลบ (negative ion) ซึ่งดูเหมือนอยู่กับที่ และได้โฮล (พาหะข้างมาก) ซึ่งดูเหมือนเคลื่อนที่ไปทั่ว ในขณะที่ด้านขวาของผลึก (n-type) พิจารณาแต่ละอะตอมตัวให้จะกลายเป็นไอออนบวก (positive ion) เปรียบเหมือนอยู่กับที่ และได้อิเล็กตรอน (พาหะข้างมาก) เคลื่อนที่ไปทั่ว แต่การจัดเรียงไม่สามารถดูเป็นเช่นนั้นได้นาน เพราะมีโฮลบางตัวจะข้ามรอยต่อเข้าไปที่ด้านขวาของผลึก ซึ่งโฮลจะพบกับอิเล็กตรอนส่วนเกินเพื่อรวมตัวกัน ในทำนองเดียวกันมีบางอิเล็กตรอนจะข้ามรอยต่อเข้าไปที่ทางด้านซ้ายของผลึกซึ่งจะถูกจับโดยโฮล จึงเหลือแต่ไอออนบวกและไอออนลบ (เปรียบเหมือนอยู่กับที่) ขึ้นใกล้กับรอยต่อพีเอ็น วิธีการข้ามรอยต่อนี้เป็นการแพร่กระจาย (diffusion) ของโฮลและอิเล็กตรอนในทิศทางตรงกันข้าม สรุปผลที่เกิดขึ้นจากการสร้างรอยต่อพีเอ็น เมื่อกระบวนการแพร่ของประจุที่เคลื่อนที่ได้ถึงจุดสมดุล การรวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดบริเวณแคบ ๆ ที่รอยต่อของด้านซ้ายและด้านขวาของผลึก ซึ่งเรียกว่าเขตปลอดพาหะ (depletion layer) เพราะผลของการรวมตัวกัน ทำให้เขตปลอดพาหะไม่มีทั้งโฮลและอิเล็กตรอน แต่จะทั้งไอออนบวกและไอออนลบบางส่วนไว้ที่บริเวณรอยต่อ ในขณะที่เกิดเขตปลอดพาหะนี้ ก็เกิดความต่างศักย์ระหว่างรอยต่อเนื่องจากไอออนบวกบางส่วนทางด้านขวาและไอออนลบบางส่วนทางด้านซ้าย ตามปกติความต่างศักย์ระหว่างรอยต่อจะเรียกว่าสนามไฟฟ้าภายในหรือสนามสัมผัส (contact field,  $E$ ) สนามสัมผัสนี้จะมีค่ามากพอที่จะทำให้โฮลและอิเล็กตรอนพาหะข้างมากไม่สามารถเคลื่อนข้ามรอยต่อพีเอ็น เปรียบเหมือนมีเนินเขา (hill) เป็นอุปสรรคขวางกั้นโฮลและอิเล็กตรอนไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2



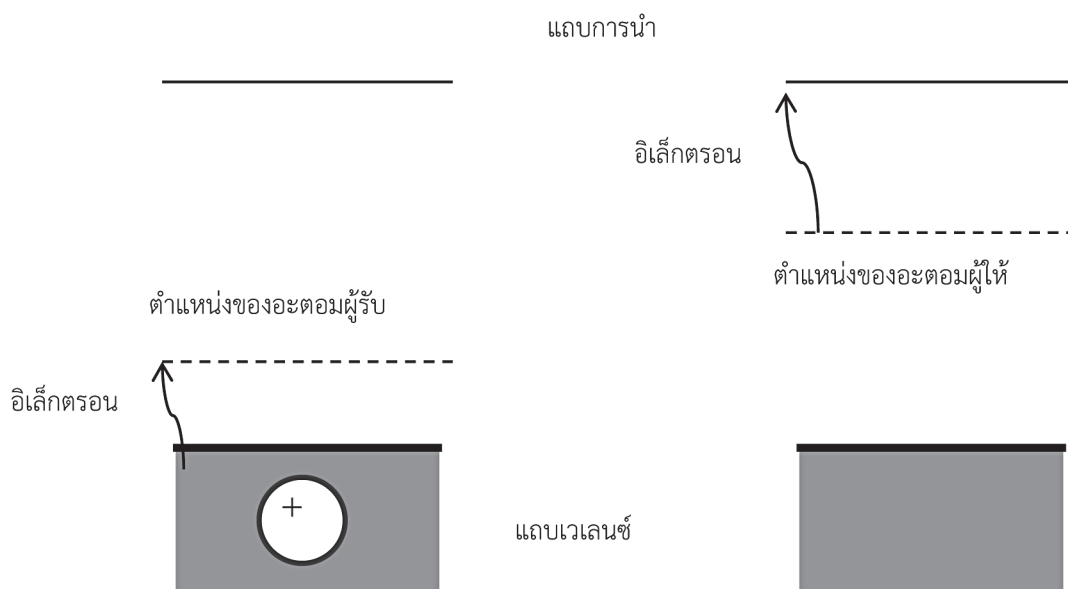
ภาพที่ 2 ระดับพลังงานของโฮลที่บริเวณรอยต่อด้านเอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว  
(ดัดแปลงจาก Kittle, 2005)

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบสองประการด้วยกัน ประการแรกได้แก่ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะต้องสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ดีเป็นประการแรก กล่าวคือจะต้องมีลักษณะโครงสร้างและช่องว่างแถบพลังงานที่เหมาะสม โดยพบว่าสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง 1 ถึง 2 eV (Kittle, 2005; Kruangam, 1992) นอกจากนี้พาหะประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องอยู่ได้นานพอและเคลื่อนที่ได้ดี ส่วนประกอบประการที่สองคือ ลักษณะการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะต้องสามารถแยกพาหะประจุไฟฟ้าทั้งคู่ออกจากกันได้ดี ความต้านทานภายในต่ำ และสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ที่มีความต้านทานของวงจรภายนอกได้ทันที

สำหรับวิธีการง่ายในการหาประสิทธิภาพและสมการเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ผู้เขียนเริ่มต้นด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ประจุเมื่อยังไม่ป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้ที่ต่อรอยต่อพีเอ็น ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของจำนวนประจุหาได้จากการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ในกลศาสตร์เชิงสถิติ (statistical mechanics) ของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นสัดส่วนกับแฟกเตอร์ (factor) ดังสมการ (1) (Kittle, 2005)

$$\exp\left(-\frac{eG}{kT}\right) \quad (1)$$

โดยที่  $G$  คือขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน  $T$  เป็นอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์  $k$  คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) และ  $e$  คือประจุไฟฟ้า (electric charge) จากสมการ (1) บอกว่าความหนาแน่นของจำนวนประจุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ( $T$ ) ขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $G$ ) เท่านั้น และไม่ขึ้นกับระดับพลังงานของสารเจือปน (energy levels of dopants) ดังนั้นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจึงมีขีดจำกัด ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ซิลิคอนมีขีดจำกัดของอุณหภูมิการทำงานสูงกว่าอุปกรณ์เจอร์เมเนียมเนื่องจากซิลิคอนมีค่าช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าเจอร์เมเนียมสำหรับการทำงานในฐานะเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าต้องเพิ่มความหนาแน่นพาหะ (carrier density) ของสารเจือปนจำนวนเล็กน้อยในอันดับขนาด  $10^{-3}$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (weight percent ,wt%) ซึ่งถูกนำไปในซิลิคอนด้วยวิธีการแพร่ซึมที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส สารเจือปนที่ให้อิเล็กตรอนได้ง่าย ทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็นไทป์ (n-type) โดยที่  $n$  มาจากคำว่า negative ในกรณีที่ได้สารเจือปนประเภทขอบริอิลีกตรอนจะให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบพีไทป์ (p-type) โดยที่  $p$  มาจากคำว่า positive ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนเกิดพันธะได้ 4 พันธะ เมื่อถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส (phosphorus) ทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น แต่ถ้าวถูกเติมด้วยโบรอน (boron) หรือสารหนู (arsenic) ทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำแบบพี ระดับพลังงานของสารเจือปนเหล่านี้แสดงไว้ในภาพที่



ภาพที่ 3 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ก. สารเจือปนแบบพี ข. สารเจือปนแบบเอ็น  
(ดัดแปลงจาก kruangam, 1992)

เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งของระดับพลังงานเหล่านี้ สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นจะส่งประจุฟรีในแถบการนำไฟฟ้า ในขณะที่สารกึ่งตัวนำแบบพีจะรับประจุจากแถบเวเลนซ์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับรอยต่อพีเอ็น โดยให้ขั้วไฟฟ้าบวกจากแบตเตอรี่ (battery) มาต่อที่สารกึ่งตัวนำแบบพี และให้ขั้วไฟฟ้าลบจากแบตเตอรี่มาต่อที่สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น สิ่งที่เกิดขึ้นคือโฮลและอิเล็กตรอนจะได้รับความเร็วเฉลี่ยจากสนามไฟฟ้าภายในเพียงเล็กน้อย (สนามไฟฟ้าภายนอกได้หักล้างกับสนามไฟฟ้าภายใน) เมื่อเทียบกับความเร็วของการเคลื่อนที่แบบสุ่ม อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมาก (majority carrier) ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น จะถูกแรงดันบวกที่ให้แก่สารกึ่งตัวนำแบบพีดูดเข้าไป ในขณะเดียวกัน โฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำแบบพี จะถูกแรงดันลบทางฝั่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นดูดเข้าไปเช่นกัน เนื่องจากโฮลมีประจุบวกและอิเล็กตรอนมีประจุลบ แต่ประจุทั้งสองเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามแต่ให้กระแสไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสุทธิ ( $I_0$ ) ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นไปข้างหน้า (forward-bias current) และผ่านโหลด ดังจะแสดงไว้ในสมการ (4) เนื่องจากแนวคิดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็นเปรียบเหมือนเนินเขา โดยด้านสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นเปรียบเหมือนเนินเขาศักย์บวกและด้านสารกึ่งตัวนำแบบพีเปรียบเหมือนเนินเขาศักย์ลบ ดังแสดงในภาพที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนได้จากการนำสารซิลิคอนมาหลอมละลายในเตาอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส พร้อมกับใส่สารเจือปนฟอสฟอรัส (กระบวนการแพร่ซึมสารเจือปน) เพื่อทำให้เกิดผลึกแบบเอ็นไอป์ แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับตัวกันเป็นผลึกด้วยตัวล่อเมล็ดผลึก (crystal seed) ที่นำมาแตะที่ผิวของซิลิคอนเหลว ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่แล้วค่อย ๆ ดึงแท่งผลึกขึ้นช้า ๆ จากเตาหลอม ตามอัตราการจับตัวของผลึกจะได้ผลึกยาวเป็นรูปทรงกระบอก จากนั้นนำแท่งผลึกมาหั่นเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยลวดตัดเพชร ซึ่งจะได้แผ่นผลึกแบบเอ็นไอป์ แล้วนำมาเตรียมผิวโดยการขัดให้เรียบเพื่อลดจุดบกพร่องเนื่องจากการตัดก่อนนำไปโด๊ป (doping) โดยให้ความร้อนที่ด้านหนึ่งของแผ่นผลึกเพื่อให้จุดกลืนสารเจือปนโบรอนที่ผิวหน้าทำให้เกิดสารแบบ พีไอป์เพื่อที่จะให้เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็น จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าส่วนด้านบนพีไอป์ที่รับแสงอาทิตย์ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบใสเป็นขั้วบวก [โดยทั่วไปเป็นขั้วไฟฟ้า ITO (indium tin oxide)] (Georgieva & Ristov, 2002) ส่วนด้านล่างผลึกแบบเอ็นไอป์เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโลหะเป็นขั้วลบ เสร็จจากขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าพบว่าสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นไอป์มีการใช้หน้าสัมผัสกับด้านซิลิคอนพีไอป์ยิ่งไปกว่านั้นแผ่นซิลิคอนพีไอป์จะบางมากในระดับไมครอน เพื่อไม่ให้แสงสะท้อนกลับผิวรอยต่อพีเอ็นจะคลุมด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โดยแสงอาทิตย์ส่องผ่านชั้น  $\text{SiO}_2$  และชั้นซิลิคอนพีไอป์เข้าไปที่รอยต่อพีเอ็นตามลำดับ

ต่อไปจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของโฮลผ่านรอยต่อพีเอ็น (ในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ส่องและไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกอัตราคร่อมรอยต่อ) จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's electromagnetic theory) อินทิกรัล (integral) ของสนามไฟฟ้าด้วยเครื่องหมายลบภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็น จะให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างบริเวณสารแบบเอ็นไอป์และสารแบบพีไอป์ (potential difference) เป็น  $U$  (Dejanakarin, 2011) โฮลจะแพร่จากสารกึ่งตัวนำแบบพีไปยังด้านขวาของรอยต่อพีเอ็นโดยวิธีเปรียบเทียบเหมือนกับการเดินขึ้นเนินเขา (ศักย์บวกที่อยู่ฝั่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นเนื่องจากไอออนบวก) ในทำนองเดียวกันโฮลในด้านสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นซึ่งจะแพร่ไปยังด้านซ้ายของรอยต่อพีเอ็นโดยวิธีเปรียบเทียบเหมือนกับการไหลลงจากยอดเนินเขาของศักย์บวกที่อยู่ฝั่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น ที่สภาวะสมดุลความร้อน กระแสไฟฟ้าของโฮล จากสารกึ่งตัวนำพีไปยังสารกึ่งตัวนำเอ็นจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าของโฮลจากสารกึ่งตัวนำเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำพีแน่นอนเพื่อที่จะเดินข้ามเนินเขาไปได้จะต้องมีพลังงานที่เพียงพอ จำนวนโฮลที่สามารถเดินขึ้นไปถึงยอดเนินเขา โดยสามารถหาได้จากวิธีการทางกลศาสตร์เชิงสถิติ (statistical mechanics) อุปสรรคจากศักย์ต่อต้าน (เนินเขา) ในการข้ามรอยต่อจะช่วยลดค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่านโฮลในวงจรโดยอาศัยปัจจัย  $\exp(-eU/kT)$  โดยที่  $U$  คือ ค่าความต่างศักย์เนื่องจากสนามภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็นในสภาวะสมดุลความร้อน เนื่องจากกระแสของโฮล (พาหะประจุข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น) เคลื่อนที่จากด้านเอ็นไปด้านพี และกระแสของโฮล (พาหะประจุข้างมากของสารกึ่งตัวนำแบบพี) เคลื่อนที่จากด้านพีไปด้านเอ็นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระแสผลลัพธ์  $I=0$  เนื่องจากกระแสทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้ามแต่ขนาดเท่ากัน เพื่อวิธีการง่ายในบทความนี้ จึงสนใจเฉพาะพฤติกรรมของโฮล (พาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นไอป์) ที่เคลื่อนที่ในด้านสารกึ่งตัวนำเอ็นจนกระทั่งมีโอกาสมาถึงยอดเนินเขาและพร้อมที่จะไหลลงมาจากเนินเขากลายเป็นกระแส  $I_0$  สาเหตุหลักที่ผู้เขียนไม่สนใจพฤติกรรมของโฮลที่เป็นพาหะข้างมากด้านสารกึ่งตัวนำพีเพราะถ้าเนินเขา (พลังงานศักย์) ของด้านเอ็นมีค่าสูงมาก ๆ จนโฮลฝั่งด้านพีขึ้นเนินเขาไม่ได้ ก็จะไม่มีการไหลลงที่ใด ในขณะโฮลฝั่งด้านเอ็นไม่ว่าเนินเขา (พลังงานศักย์) ของด้านเอ็นจะมีค่าสูงเท่าใดก็ตาม โฮลฝั่งด้านเอ็นก็มีโอกาสที่จะแพร่มาอยู่เนินเขาได้และพร้อมที่จะไหลลงมาจากเนินเขากลายเป็นกระแสไฟฟ้าทันทีที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ด้วยเหตุและผลจากวิธีคิดนี้ ดังสมการ (2)

$$I_0 \sim NP \text{ (ด้านเอ็น)} = NP \text{ (ด้านพี)} \exp(-eU/kT) \quad (2)$$

โดยที่  $I_0$  คือกระแสของโฮล (พาหะประจุข้างน้อย) จากด้านเอ็นไปด้านพี (ยังไม่ใส่ค่าความต่างศักย์  $V$  จากภายนอกและยังไม่มีแสงส่อง),  $N_p$  (ด้านพี) คือความหนาแน่นสถานะของโฮล (พาหะประจุข้างมาก) ในด้านพี และ  $N_p$  (ด้านเอ็น) คือความหนาแน่นสถานะของโฮล (พาหะประจุข้างน้อย) ในด้านเอ็น

ถัดไปพิจารณากรณีใส่ค่าความต่างศักย์  $V$  จากภายนอกอัตราคร่อมบนรอยต่อพีเอ็นเพื่อช่วยลดค่าความต่างศักย์จาก  $U$  เป็น  $U-V$  ถ้าแทนค่า  $U-V$  ลงในสมการ (2) จะได้กระแสของโฮล (พาหะประจุข้างน้อย) ไหลจากด้านเอ็นไปด้านพี มีค่าดังสมการ (3)

$$I' = N_p (\text{ด้านพี}) \exp [-e(U-V) / kT] \quad (3)$$

นำสมการ (3) ลบออกจากสมการ (2) จะได้การไหลของกระแสสุทธิ  $I_0$  (forward-bias current) ผ่านรอยต่อพีเอ็นมีค่าดังสมการ (4)

$$I_0 = I' - I_0 = I_0 [\exp (eV / kT) - 1] \quad (4)$$

สมการ (4) เรียกว่า สมการไดโอด (diode equation) เป็นวิธีการง่ายและเกิดขึ้นมาจากความเข้าใจในวิธีคิดที่ว่า การทำลายความเท่ากันของกระแสจากด้านพีไปด้านเอ็นและจากด้านเอ็นไปด้านพีทำได้โดยใส่แรงดันไฟฟ้าภายนอก ( $V$ ) คร่อมไปที่รอยต่อพีเอ็นและยังเป็นประโยชน์ในการหาสมการเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell equation)

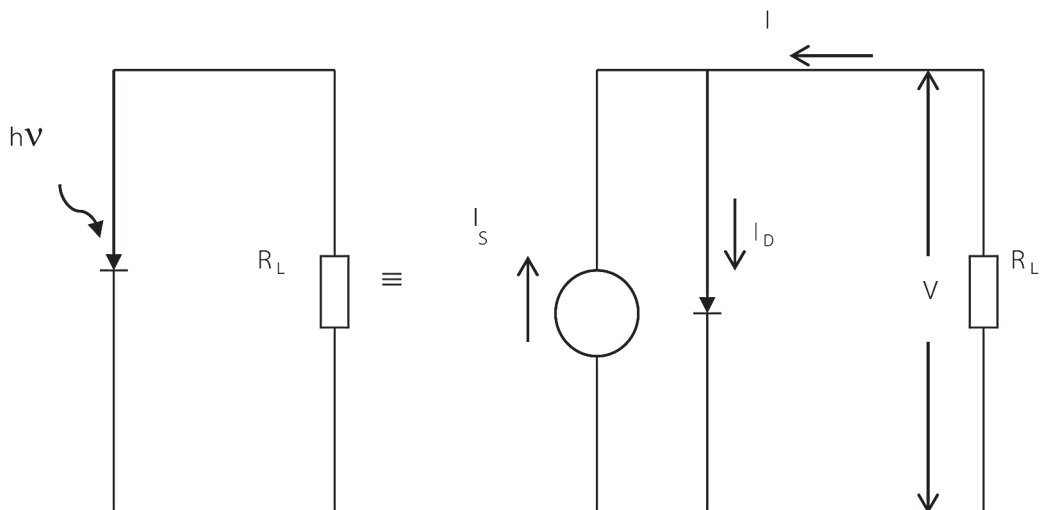
จากสมการ (4) เมื่อ  $V > 0$  แล้วการไหลของกระแสสุทธิ ( $I_0$ ) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการจ่ายแรงดันไปข้างหน้าและเรียกกระแสที่เพิ่มขึ้นตามค่า  $V > 0$  ว่ากระแสไปข้างหน้า (forward-bias current) แต่ในกรณีที่ค่าของ  $V < 0$  กระแสจะถูกจำกัดไว้ที่  $I_0$  ซึ่งมีขนาดต่ำกว่ากระแสไปข้างหน้า จากสมการ (2) แสดงให้เห็นว่า  $I_0$  นั้นแปรผันตามอุณหภูมิเป็น  $\exp (-eU / kT)$  ในบริเวณรอยต่อกระแสทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้น ยังมีวิธีการง่ายอีกวิธีหนึ่งที่สำคัญมากในการทำลายความเท่ากันของกระแสจากด้านพีไปด้านเอ็นและจากด้านเอ็นไปด้านพีก็คือการส่องแสงอาทิตย์ไปที่ด้านหนึ่งของรอยต่อพีเอ็น (ในบทความนี้พิจารณาเฉพาะกรณีด้านพีรับแสง) ถัดไปพิจารณากรณีพลังงานของโฟตอน (photon) ที่มากกว่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อเซลล์ดูดกลืนแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากพันธะในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นการไปเพิ่มเติมคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นโดยความร้อนที่อุณหภูมิห้องพิจารณาอิเล็กตรอนที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านเอ็นของรอยต่อและโฮลที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านพีของรอยต่อนั้นพบว่าคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เพิ่มเติมเข้ามานั้นสังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากจำนวนของพวกมันเป็นเพียงเศษเสี้ยวเล็ก ๆ ของจำนวนพาหะประจุไฟฟ้าข้างมากที่มีอยู่ก่อนแล้ว แต่อย่างไรก็ตามโฮลที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านพีสามารถทำให้จำนวนประจุพาหะข้างน้อยเพิ่มขึ้นได้อย่างมากมายอย่างมีนัยสำคัญและแพร่กระจายไปยังรอยต่อแล้ว ไหลลงจากเนินเขาฝั่งด้านเอ็นด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสโฮลจากด้านเอ็นไปด้านพีมีค่าเพิ่มมากขึ้นทันที เรียกกระบวนการนี้ว่ากระแสไฟฟ้าไหลในวงจรและนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้เปรียบเหมือนกับแบตเตอรี่ สรุปได้ว่ากระแสโฮลจากด้านเอ็นเคลื่อนที่ไปทางด้านพีและบริเวณที่กระแสโฮลกำลังเคลื่อนที่ออกไปจากด้านพีที่ต่อกับสายไฟ เราให้บริเวณนั้นเป็นขั้วไฟฟ้าบวก ด้วยเหตุนี้จึงสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วทั้งสองได้ ดังนั้นเมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าเช่น หลอดไฟ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะมีกระแสไฟฟ้าสุทธิ ( $I$ ) ไหลในวงจรต่าง ๆ ได้ ดังจะแสดงไว้ในสมการ (8)

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการหาสมการเซลล์แสงอาทิตย์และกระแสไฟฟ้าสุทธิ ( $I$ ) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความสว่าง (Luminance,  $L$ ) ค่าความสว่างมีหน่วย SI เป็น “วัตต์ต่อตารางเมตร  $W/m^2$ ” จากนั้นความเข้มและความสว่างของแสงเขียนได้ดังสมการ (5)

$$ICC = \propto(T) LS \quad (5)$$

โดยที่  $S$  คือพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับแสง  $I_{cc}$  คือปริมาณแสงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่สัมผัสกับแสง และ  $\propto(T)$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับรอยต่อ (ชนิดวัสดุ) และพลังงานของโฟตอน (Kruangam, 1992, Schneider et al., 2020) ถ้าปริมาณแสงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่สัมผัสแสง ( $I_{cc}$ ) มีค่ามากขึ้นแล้วจำนวนพาหะประจุไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการกระตุ้นโดยแสงอาทิตย์ ( $I_s$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยกำหนดเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสคงที่ ( $I_s$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากแสง โดยต่อขนานอยู่กับรอยต่อพีเอ็น (ไดโอด) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Kruangam, 1992)

วิธีการคำนวณความเป็นไปได้ในการเกิดสมการเซลล์แสงอาทิตย์โดยพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว เมื่อมีแสงส่องเข้าไปที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลอิสระจะเกิดขึ้นในบริเวณเขตปลอดพาหะซึ่งจะสร้างแรงดันไฟฟ้าคร่อมรอยต่อพีเอ็นเพื่อทำให้เกิดกระแสสูงสุด  $I$  ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งออกให้อุปกรณ์ความต้านทาน  $R_L$  (โหลด) ในวงจรได้ทันที ดังนั้น การดัดแปลงสมการ (4) เกิดขึ้นมาจากแนวคิดของผู้เขียนสองประการดังนี้ แนวคิดดัดแปลงประการแรก (ภาพที่ 4) คือ นำสมการ (4) ลบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสคงที่ ( $I_s$ ) โดยที่  $I_s$  แปรผันตามค่าของ  $I_{cc}$  ผลที่ได้ดังสมการ (6)

$$I = I_0 [\exp(eV / kT) - 1] - I_s \quad (6)$$

สมการ (6) เป็นพื้นฐานสำคัญของสมการเซลล์แสงอาทิตย์โดยบ่งชี้ว่าขณะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกเสมอพบว่ากระแสจะเป็นลบเสมอ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ง่ายเพราะว่าไดโอดเป็นอุปกรณ์ชนิดไม่ใช่แหล่งกำเนิดพลังงาน ดังนั้นสมการ (6) จะทำนายได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานได้ ด้วยเหตุนี้จึงเกิด

แนวคิดดัดแปลงประการสอง วิธีการง่ายคือทิศทางของกระแสควรกลับทิศกันจากแนวคิดดัดแปลงประการแรก สิ่งที่เกิดขึ้นคือได้รูปแบบสมการเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการ (7)

$$I = I_s - I_0 [\exp (eV / kT) - 1] \quad (7)$$

สมการ (7) พบว่าถ้าแรงดันไฟฟ้าเป็นบวกเสมอแล้วกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ชนิดแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสุทธิ (I) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งออกได้ทันทีภายใต้การส่องสว่าง (L) จะเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้า V ดังสมการ (8)

$$I = I_s - I_0 = I_s - I_0 [\exp (eV / kT) - 1] \quad (8)$$

และเรียกสมการ (8) ว่า สมการเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell equation) โดยที่  $I_s$  แปรผันตามสมการ (5) และที่สำคัญสมการ (5) ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและพลังงานโฟตอน สาเหตุที่ผู้เขียนเรียกสมการ (8) ว่าสมการเซลล์แสงอาทิตย์เพราะสมการ (8) สามารถทำนายได้ว่าเมื่อมีแรงดันไฟฟ้า (ค่าบวก) ระหว่างขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะเกิดกระแสไฟฟ้า (ค่าบวก) ทันทีเมื่อเราต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นผลทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงว่าสมการ (8) สามารถทำนายการทำงานในอนาคตของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

สิ่งที่ต้องพิจารณาถัดไปคือประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ให้สังเกตว่าถ้าพลังงานของโฟตอน ( $E$  (โฟตอน)  $= h\nu$ ) ที่มีค่าน้อยกว่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (G) แล้วจะไม่สามารถสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล แต่ถ้าพลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่มีพลังงานเท่ากันได้ ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงขึ้นอยู่กับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ตรงกันกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ (Panyakeow, 2014; Schneider et al., 2020) สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวสามารถพิจารณาจากการดูดกลืนพลังงานจากสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (solar spectrum) ได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น  $\lambda_{\max} = 0.5 \mu\text{m}$  (Panyakeow, 2014) ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นของแสงสีเขียวในช่วงแสงที่ตามองเห็น คำนวณหาค่าพลังงานโฟตอนของแสงสีเขียวได้  $E = h\nu = hc / \lambda_{\max} = 2.5 \text{ eV}$  โดยที่  $h$  คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่า  $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$   $\nu$  คือความถี่ (frequency)  $c$  คืออัตราเร็วของแสง (speed of light) มีค่า  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  และ  $\lambda_{\max}$  คือความยาวคลื่น (wavelength) มีค่า  $0.5 \mu\text{m}$  เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวเมื่อเปิดวงจร (open circuit) ให้ค่าแรงดันไฟฟ้า (วงจรเปิด) ประมาณ  $\sim 0.5 \text{ V}$  (Kittle, 2005) กำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (ES) คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (พลังงาน) ที่พร้อมจัดให้กับโหลดต่อหนึ่งหน่วยของพลังงาน (โฟตอน,  $h\nu$ ) ที่ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวมีค่าเท่ากับ  $(0.5 / 2.5) \times 100\% = 20\%$  ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่า 100% เสมอ ประการแรก เพราะว่าโฟตอนใด ๆ ที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำอาจจะไม่ให้คู่อิเล็กตรอน-โฮล อีกเหตุผลหนึ่งอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นบางตัวจะรวมตัวกันใหม่ก่อนถึงบริเวณรอยต่อและพลังงานที่เกิดจากอิเล็กตรอนและโฮลบางตัวรวมตัวกัน (recombination) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นไม่ว่าในกรณีใดก็ตามของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีขีดจำกัดไม่เกิน 20% แต่ปัญหามีอยู่ว่านักทฤษฎีและนักทดลองจะสามารถตระหนักถึงตัวแปรที่นำไปสู่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิมได้อย่างไร

## สรุปและวิจารณ์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีวิธีคิดมาจากพลังงานเป็นรูปหนึ่งของการเคลื่อนที่ ทำให้ทราบค่าพลังงาน (แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด, หน่วยเป็นโวลต์) ที่ส่งออกของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าหนึ่งหน่วยของพลังงาน (โฟตอน,  $h\nu$ ) ที่ถูกดูดกลืนได้สูงที่สุด (แอสซีเชียว) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว เมื่อนำทั้งสองค่ามาหาอัตราส่วนกันพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวมีประสิทธิภาพเท่ากับ 20%

ประสิทธิภาพที่น้อยกว่า 100% อย่างชัดเจนในระบบนี้ จึงต้องมีการตรวจสอบหาเหตุผลที่นอกเหนือจากการสะท้อนของแสงจากพื้นผิวและการมีโฟตอนจากแสงอาทิตย์บางส่วนเท่านั้นที่ถูกดูดกลืนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า สมการเซลล์แสงอาทิตย์จะให้ข้อมูลสำหรับประสิทธิภาพในระบบนี้ สมการเซลล์แสงอาทิตย์มีวิธีคิดมาจากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความสว่าง ด้วยเหตุนี้ จำนวนพาหะประจุนำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการกระตุ้นโดยแสงอาทิตย์ ( $I_s$ ) จะขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่สัมผัสแสง ( $I_{cc}$ ) ในขณะที่จำนวนพาหะประจุ นำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นโดยแสง ( $I_s$ ) จะขึ้นอยู่กับช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์และค่าพลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนได้สูงที่สุดโดยเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวขึ้นอยู่กับการจับโฮลที่กำลังเคลื่อนที่จากด้านเอ็นบริเวณรอยต่อ ด้วยเหตุนี้โฮลที่มีประโยชน์เพียงชนิดเดียวก็คือโฮลที่มีอิสระมากพอที่จะผ่านรอยต่อออกไปก่อนที่จะถูกจับโดยอิเล็กตรอน กล่าวอีกนัยหนึ่ง แสงจำเป็นมากในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแสงที่ให้พลังงานแก่เซลล์แสงอาทิตย์จะสูญเสียไปหากแสงถูกดูดกลืนจากจุดใดจุดหนึ่งที่ไกลออกไปจากบริเวณรอยต่อ เพราะโฮลที่เกิดขึ้นจากแสงจะถูกจับได้ง่ายจึงไม่สามารถผ่านรอยต่อออกไปได้ ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ผู้พัฒนาจึงต้องออกแบบให้พื้นที่ด้านพีให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้รับแสงได้มากที่สุดและมีความหนาประมาณ  $10^{-4}$  นิ้ว (ครอบคลุมบริเวณสเปกตรัมแสงอาทิตย์) เพื่อรับแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งที่เกิดจากสมการเซลล์แสงอาทิตย์คือ รู้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตามค่าความสว่าง ดังนั้นเหตุผลประการแรกที่จะเพิ่มประสิทธิภาพคือการใช้เลนส์เชิงแสงขนาดใหญ่เพื่อบังคับให้แสงอาทิตย์เข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์เป็นการเพิ่มความเข้มของแสงได้เป็นหลายร้อยเท่า ประโยชน์หลักของการใช้เทคนิคความเข้มแสงคือการลดต้นทุนโดยรวมของระบบเนื่องจากเลนส์เชิงแสงมีราคาไม่แพงกว่าการเพิ่มพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่เทียบเท่ากัน แต่อย่าลืมว่าสมการเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของรอยต่อและพลังงานของโฟตอนว่าตรงกันอย่างไร ประเด็นการปรับปรุงวัสดุของรอยต่อให้มีเสถียรภาพของการทำงานในภาวะที่มีพาหะนำไฟฟ้าจำนวนมาก ๆ ภาวะที่มีความเข้มของแสงสูง ๆ และภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ก็เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นนั่นเอง ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันนักวิจัยกำลังพัฒนาเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานขนาด 0.5 ถึง 0.7 eV (อินเดียม, In หรือ แกลเลียมฟอสไฟด์, GaP) สำหรับการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแสง (Schneider et al., 2020; Willich et al., 2020) ดังนั้นหัวข้อการวิจัยวัสดุของรอยต่อในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจึงยังคงเป็นปัญหาเปิดแก่นักวิจัยในปัจจุบัน

## เอกสารอ้างอิง

- Dejanakarin, M. (2011). **Fundamentals of Electric Waves**. Bangkok: CHULA Printing. (in Thai)
- Foer, S. J. (2019). **We Are the Weather: Saving the Planet Begins at Breakfast**. The Marsh Agency, UK. and Aragon Inc, USA.

- Georgieva, V. & Ristov, M. (2002). Electrodeposited Cuprous Oxide on Indium Tin Oxide for Solar Applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. 73(1), 67-73.
- Kittle, C. (2005). **Introduction to Solid State Physics**. John Wiley & Sons Inc, USA.
- Knapp, B. (1996). **Sodium and Potassium, Calcium and Magnesium, Aluminium, Lead and Tin, Silicon - Element series**. Atlantic Europe Publishing Company Limited, UK.
- Kruangam, D. (1992). **Solid State physics**. Bangkok: SE-ED Printing. (in Thai)
- Panyakeow, S. (2014). **It's Tiny, but It's Cool: Nanoelectronics and Nanophotonics**. Bangkok: CHULA Printing. (in Thai)
- Schneider, A., Efrati, A., Alon, S., Sohmer, M., & Etgar, L. (2020). Green Energy of Recoverable Triple-Oxide Mesostructured Perovskite Photovoltaics. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 117(49), 31010-31017.
- Willich, M. M., Wegener, L., Vornweg, J., Hohgardt, M., Nowak, J., Wolter, M., Jacob, R. C., & Walla, J. P. (2020). A New Ultrafast Energy Funneling Material Harvests Three Times More Diffusive Solar For GaInP Photovoltaic. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 117(52), 32929-32938.
- =====

