

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE) และ สนามไฟฟ้าบางบริเวณที่ผิวด้านหลัง (LBSF) ได้มุ่งเน้นถึงวิธีการที่สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว เหมาะกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการใช้เทคนิควิธีต้นทุนต่ำ ในบทนี้ได้กล่าวถึง ผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากการสืบค้นข้อมูลโดยใช้ฐานข้อมูลออนไลน์ และ วารสารอิเล็กทรอนิกส์ ได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ และนำมาปรับใช้กับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Greenblatt, A.M. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 1994) ได้ศึกษากระบวนการเกิดโซล-เจล ของซิลิกา-เจล (Sol-gel of Silica-gel) ที่ได้จากสารละลาย Tetraethyl orthosilicate (TEOS) จากงานวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดโซล-เจล มีอยู่ 2 ประเภท คือ เติมกรด (Acid) หรือ เบส (Base) ลงไปในสารละลายที่เตรียมให้เกิดปฏิกิริยาโดยผลที่ได้หากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะได้โซล-เจลที่เกาะเกี่ยว เป็นสาย (Polymerization) และในทางกลับกันถ้าเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสจะได้โซล-เจลที่ลักษณะเป็นรูพรุน โดยอัตราส่วนผสมของโซล-เจล ที่สร้าง ประกอบไปด้วย TEOS , เอทานอล (Ethanol) และน้ำ (DI water) ในอัตราส่วน TEOS : Ethanol : DI water เท่ากับ 1 : 2 : 0.3

Aberle, A.G. (ปี ค.ศ. 2000) กล่าวถึงการสร้างชั้นฉนวนบนผิวหน้า (Surface passivation) ของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง รวมไปถึงการเปิดช่องที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดผลของอัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิว โครงสร้างซีเลคทีฟ (Selective) ทั้งด้าน n-Si ( high-low junction ) และ ด้าน p-Si ( high-low junction ) ซึ่งโครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE) ด้านบนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนความยาวคลื่นสั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น

Antoniadis, H. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยหมึกซิลิคอน (Silicon ink) โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing) ซึ่งหมึกซิลิคอนประกอบด้วยผงซิลิคอนขนาดเล็กระดับนาโนที่ผ่านการแพร่สารเจือในเข้มข้นสูง ๆ โดยนำหมึกซิลิคอนไปพิมพ์ลาย (Stamp) ได้ ขั้วไฟฟ้าด้านบนเพื่อให้เกิดการแพร่ของสนามไฟฟ้าที่ดี จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีนี้ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพได้ถึง 19%

Röder, T.C. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell โดยการปรับปรุงด้วยวิธีการใช้เลเซอร์ทำการแพร่สารเจือ (Laser doping) บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบน ซึ่งแสงเลเซอร์ที่ใช้มีความยาวคลื่นเท่ากับ 532 nm ความถี่ของสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 20 kHz และใช้ระยะเวลาเท่ากับ 65 ns ซึ่งชั้น n-Si มีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ 110  $\Omega/Sq$  และชั้น n-Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นด้วยแสงเลเซอร์มีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ 11  $\Omega/Sq$  จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีดังกล่าวจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 18.0%

Tang, Y. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาการเตรียมสารละลายสำหรับการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้น n-Si บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si ด้วยวิธีเคลือบสารละลายแบบหมุนเหวี่ยง (Spin-on doping method, SOD) สารละลายประกอบไปด้วย Tetraethyl orthosilicate (TEOS), น้ำ (DI water) และเอทานอล (Ethanol) ในอัตราส่วน TEOS : Ethanol : DI water เท่ากับ 10 : 20 : 3 หลังจากนั้นเติมกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ในอัตราส่วนระหว่าง TEOS : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> โดยศึกษาอุณหภูมิการแพร่ที่ 750 ถึง 950 °C และ ใช้เวลาการแพร่ 10 ถึง 120 นาที จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ระหว่าง 1.5 : 1 ถึง 6 : 1 ส่งผลกับค่า  $\rho_{sheet}$  ให้ค่าอยู่ระหว่าง 1  $\Omega/Sq$  ถึง 1000  $\Omega/Sq$  ผลที่ได้ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำจะทำให้ค่า  $\rho_{sheet}$  สูงขึ้น

Lee, E. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ SE cell โดยใช้หน้ากากชั้นออกไซด์ เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือลงในบริเวณที่ไม่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ชั้นป้องกันการแพร่โดยเปิดช่องบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าและแพร่ให้ได้ค่า  $\rho_{sheet}$  อยู่ในช่วง 20-30  $\Omega/Sq$  หลังจากนั้นทำการล้างสกัดชั้นออกไซด์แล้วสร้างหน้ากากครั้งที่ 2 เพื่อเปิดช่องแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำลงบนชั้นรับแสงให้ได้ค่า  $\rho_{sheet}$  อยู่ในช่วง 80-100  $\Omega/Sq$  การสร้างหน้ากากนี้อาศัยกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography process) จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีดังกล่าวจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 19.0%

Jäger, U. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) ของการแพร่สารเจือเข้มข้นสูงสำหรับ SE cell จากงานวิจัยได้ทำการแพร่สารเจือเข้มข้นสูง ให้ค่า  $\rho_{sheet}$  มีค่าอยู่ในช่วง 19  $\Omega/Sq$  ถึง 26  $\Omega/Sq$  จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพทางควอนตัมพบว่าที่ค่า  $\rho_{sheet}$  ที่ 19  $\Omega/Sq$  ให้ค่า QE ต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผล ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่คลื่นแสงสีน้ำเงินได้ต่ำ และเมื่อเพิ่มค่า  $\rho_{sheet}$  ทำให้ QE เพิ่มขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่คลื่นแสงสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น

Song, K. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2012) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยวิธีการสกัดชั้น n-Si (Etch barrier or Etching back) ด้วยสารเคมี โดยใช้ กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) และกรดไนตริก (Nitric Acid) มีอัตราส่วนระหว่าง HF : HNO<sub>3</sub> เท่ากับ 200 : 1 และ 100 : 1 จากนั้น

นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการแพร่สารเจือมีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $30 \Omega/Sq$  มาแช่ในสารละลาย HF : HNO<sub>3</sub> ตามเวลาที่กำหนด พบว่าเมื่อเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\rho_{sheet}$  เพิ่มขึ้น และโครงสร้างของพื้นผิวที่ถูกสกัดมีลักษณะเรียบเหมือนกับแผ่นฐานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิว

Zhong, S. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2013) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell จากสารละลายฟอสฟอรัส (Phosphorus ink) พิมพ์ลายลงบนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si บนบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการแพร่สารเจือทำให้บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ามีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $30 \Omega/Sq$  และบริเวณรับแสงมีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $70 \Omega/Sq$  จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีนี้ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพได้ถึง 19.1%

Kim, M. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการใช้เลเซอร์และการสกัดชั้น n-Si เพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง โครงสร้าง SE cell ในงานวิจัยนี้สร้างชั้น n-Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า (n<sup>++</sup>-Si) โดยการใช้เลเซอร์ยิงลงบนบริเวณดังกล่าวให้มีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $40 \Omega/Sq$  ให้มีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $32 \Omega/Sq$  ที่บริเวณ SE จากนั้นนำไปจุ่มสารละลายเพื่อสกัดชั้นรับแสงให้มีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $120 \Omega/Sq$  ซึ่งจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีดังกล่าว SE cell สามารถมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานถึง 19.2%

Lin, D. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังบางบริเวณ โดยการใช้สารละลายโบรอน แล้วแพร่สารโดยการใช้แสงเลเซอร์ เพื่อให้เกิด p<sup>++</sup>-Si จากนั้นสร้างบริเวณ SE โดยการเคลือบสารละลายฟอสฟอรัส แล้วแพร่สารเจือด้วยแสงเลเซอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แสงเลเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 วัตต์ ใช้แสงความยาวคลื่น 404 nm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.5 m/s สำหรับการแพร่โบรอนด้านหลัง และแสงเลเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 วัตต์ ใช้แสงความยาวคลื่น 981 nm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 4.0 m/s สำหรับการแพร่ฟอสฟอรัส ด้วยโครงสร้าง SE cell ที่สร้างขึ้นนี้ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงถึง 20.0%

Jeong, K.T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell โดยการใช้สารละลายฟอสฟอรัสพิมพ์ลายลงบนแผ่นซิลิคอน p-Si ที่บริเวณก่อนทำขั้วไฟฟ้า จากนั้นผ่านกระบวนการแพร่สารเจือ 3 ขั้นตอนประกอบด้วย ที่ 840 °C นาน 15 นาที เพื่อแพร่สารเจือเข้มข้นสูงที่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าจะเกิดเป็นบริเวณ Heavily doped area และปล่อยให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอน Pre-deposition ที่ 790 °C นาน 20 นาที และขั้นตอน สุดท้ายที่ 810 °C นาน 10 นาที เป็นขั้นตอนของการแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำ ที่บริเวณรับแสง Lightly doped area ให้มีค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ  $100 \Omega/Sq$  และบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าค่า  $\rho_{sheet}$  ประมาณ  $50 \Omega/Sq$  ซึ่งการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ 17.4%

Dullweber, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2016) ได้ศึกษามลของกระแสอ้อมตัวที่เท่ากับ

22 fA/cm<sup>2</sup> เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ PERC ในอุตสาหกรรม ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 22 % โดยใช้วิธีการสร้างด้วยวิธี Gas Phase Etch Back (GPEB) ในการสกัดบริเวณรับแสงที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูง จะได้ค่า  $\rho_{sheet}$  เท่ากับ 150  $\Omega/Sq$  จากการสร้างเซลล์ในบทความนี้จะได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง

Pene, H. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างสารละลายโซล-เจลที่ประกอบด้วยฟอสฟอรัสและโบรอนแบบฟิล์มบาง สำหรับการแพร่สารเจือโครงสร้าง n<sup>+</sup>/p และ n<sup>+</sup>/p/p<sup>+</sup> โดยใช้ Tetramethoxysilane (TEOS), Isopropanol และ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> เป็นสารตั้งต้น ทาการเคลือบสารด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยงและแพร่สารที่อุณหภูมิ 800-1000°C โดยพบว่าค่าความต้านทานแผ่นอยู่ระหว่าง 8-200  $\Omega/sheet$  ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือสำหรับโครงสร้าง n<sup>++</sup> และ n<sup>+</sup> และ p<sup>+</sup> และ p<sup>++</sup> ที่จะสร้างขึ้นในงานวิจัยได้

Ikeda, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2016) ศึกษาการสร้าง Local back surface field ด้วยเทคนิค Laser doping ที่ด้านหลังของแผ่นเซลล์และทาการพิมพ์ลายโลหะอลูมิเนียมเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่ง BSF ที่สร้างจะช่วยให้การลดการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว ทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 19.2%

Cacciato และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2013) ได้ทำการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ในระดับอุตสาหกรรม โดยการใช้เทคนิค laser เปิดช่องสร้างลวดลายบนชั้นฉนวนไดอิเล็กทริกที่ด้านหลัง สำหรับการสร้างโครงสร้างแบบ LBSF ซึ่งได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่าเซลล์ที่เป็น Al-BSF ประมาณ 1%

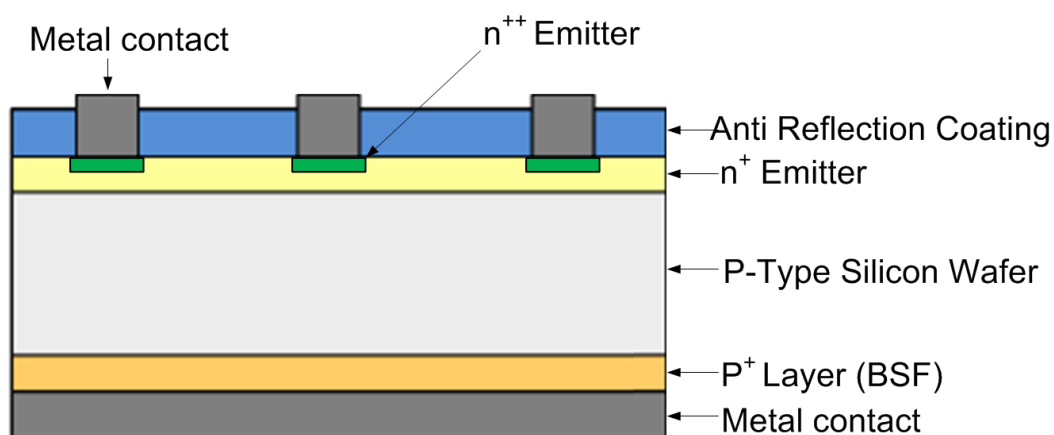
Singh, V. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Back surface field โดยใช้กรดเป็นแหล่งสารเจือด้วยเทคนิคการ (Spin on dopant: SOD) พบว่า BSF Film ที่สร้างขึ้น จะช่วยลดการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง ทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า Aluminum BSF เป็น 12.9% โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้อีกจากการเพิ่มชั้นป้องกันการสะท้อนแสงที่ด้านหน้าและด้านหลัง

Phiwpha, N. (ปี ค.ศ. 2013) ได้ศึกษาการฉีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ Local back surface field (LBSF) บน SiO<sub>2</sub> ลงบนแผ่นฐานซิลิคอน เพื่อเป็นชั้นพาสซีวชั้นที่ด้านหลัง และทา การแพร่ซีมอะลูมิเนียมผ่านบริเวณช่องของ SiO<sub>2</sub> ที่ถูกเปิด เกิดเป็น p<sup>+</sup>-Si ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อขึ้น โดยให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 14.64% ซึ่งสูงกว่าเซลล์โครงสร้างมาตรฐานถึง 1.66%

Armel, D.P. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างระบบโซลเจล (Sol-gel) ที่ประกอบด้วยฟอสฟอรัสและโบรอนแบบฟิล์มบาง สำหรับการแพร่สารเจือโครงสร้าง  $n^+/p$  และ  $n^+/p/p^+$  โดยใช้ Tetraethyl orthosilicate (TEOS), Isopropanol (IPA) และ Phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ) หรือ Boric acid ( $H_3BO_3$ ) เป็นสารตั้งต้น ทำการเคลือบสารด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง (Spin coater) และเข้ากระบวนการแพร่ที่อุณหภูมิ 850 – 1000 °C โดยพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นอยู่ระหว่าง 8 – 200  $\Omega/Sq$  ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือสำหรับโครงสร้าง  $n^+/p$  และ  $n^+/p/p^+$  ได้

## 2.3 องค์ประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งได้ตามโครงสร้างของผลึกซิลิกอนได้ 3 ชนิด คือ ผลึกเดี่ยว (mono-crystalline), ผลึกหลายรูป (multi-crystalline, mc-Si) และ อะมอร์ฟัส (amorphous) โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกแบบหลายรูป เพราะมีราคาถูกกว่าผลึกเดี่ยว และมีการพัฒนาต่อยอดและใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลังของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ p/n

2.3.1 ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง เป็นชั้นฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงกลับที่ผิวน้อยที่สุด โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ซิลิคอนออกไซด์ ( $SiO_2$ ), ซิลิคอนไนไตรด์ ( $SiN_x$ ) หรือ ซิลิคอนออกซิไนไตรด์ ( $SiO_xN_y$ ) โดยอาจทำการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงจากวัสดุต่างชนิดกันหลายๆ ชั้นได้ (Multilayer) ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้างกว่าการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงเพียงชั้นเดียว

2.3.2 ชั้นผิวขรุขระรูปทรงพีระมิดหัวตั้ง เป็นชั้นที่เพิ่มพื้นที่ผิวรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ให้เกิดการแปลงผันพลังงานได้สูงขึ้น

2.3.3 ชั้นรอยต่อพีเอ็นของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในบริเวณรอยต่อ ทำให้มีอิเล็กตรอนและโฮลที่ผลิตจากพลังงานแสงเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า โดยความลึกของชั้นรอยต่อประมาณ 0.5-1.5  $\mu\text{m}$  เพื่อให้แสงทะลุลงบริเวณรอยต่อ และสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 480-600 nm ที่ให้ความเข้มแสงสูงสุด

2.3.4 แผ่นฐานซิลิคอน โดยทั่วไปมีความหนาประมาณไม่เกิน 300  $\mu\text{m}$  และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นไม่เกิน 10  $\Omega/\text{Sq}$

2.3.5 ชั้น Back surface field (BSF) เกิดจากความแตกต่างของสารเจือในชั้นพี ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดระยะทางในการแพร่พาหะสูง ทำให้ช่วงอายุของพาหะยาวขึ้น

2.3.6 ขั้วโลหะไฟฟ้าด้านหลังรับแสงจะมีลักษณะเป็นลายกริด เพื่อไม่ให้บังการรับแสง และได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ซึ่งรวบรวมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ส่วนขั้วไฟฟ้าโลหะด้านหลังจะมีการเคลือบแบบเต็มพื้นที่ผิว สำหรับรวบรวมโฮลและยังช่วยเพิ่มโอกาสการสะท้อนแสงกลับเข้าสู่ภายในเซลล์

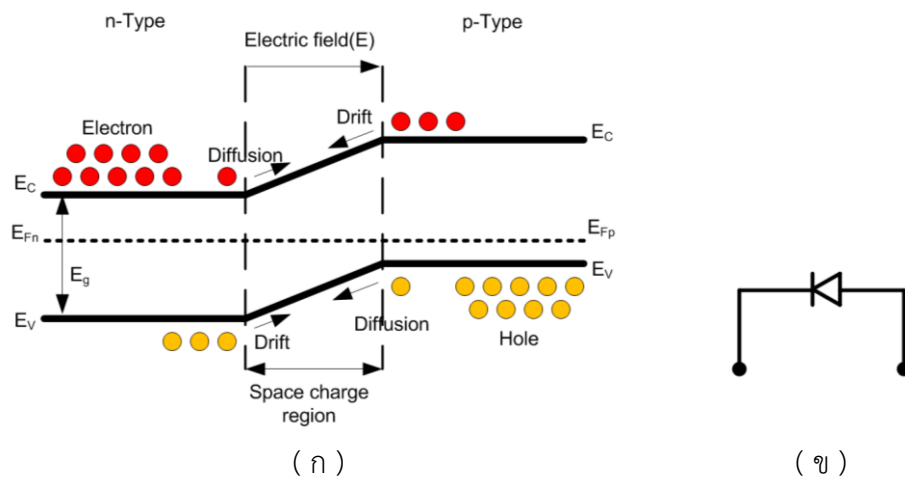
## 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si

เมื่อวัสดุสารกึ่งตัวนำ รอยต่อ p/n-Si มีกลไกการทำงานแบ่งเป็นสองกรณี คือ เมื่อได้รับแสง จะเกิดปรากฏการณ์สามารถแปลงพลังงานแสงตกกระทบให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p/n-Si มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับไดโอด (Diode) เป็นโครงสร้างรอยต่อ p/n-Si โดยเติมสารเจือหมู่ 3 ที่ชั้น p-Si และหมู่ 5 ที่ชั้น n-Si เพื่อให้เกิดประจุที่รอยต่อปลอดพาหะ และพาหะโฮลและอิเล็กตรอนที่ชั้น p-Si และ n-Si ตัวอย่างเช่น เมื่อเติมธาตุสารเจือฟอสฟอรัส (P) ลงในธาตุหลัก ซิลิคอน (Si) จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนพาหะข้างมาก ซึ่งเรียกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส นี้ว่าอะตอมผู้รับ (Donor) และเรียกสารกึ่งตัวนำว่าสารกึ่งตัวนำชนิด (n-type) ในกรณีเดียวกันถ้าหากเติมธาตุสารเจือโบรอน (B) ลงในธาตุหลัก ซิลิคอน (Si) จะทำให้เกิดโฮลเป็นพาหะข้างมาก เรียกว่าสารกึ่งตัวนำ ชนิด p-Si ดังนั้นเมื่อนำวัสดุสารกึ่งตัวนำ รอยต่อ p/n-Si มาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แล้วสามารถพิจารณาได้ 2 กรณี

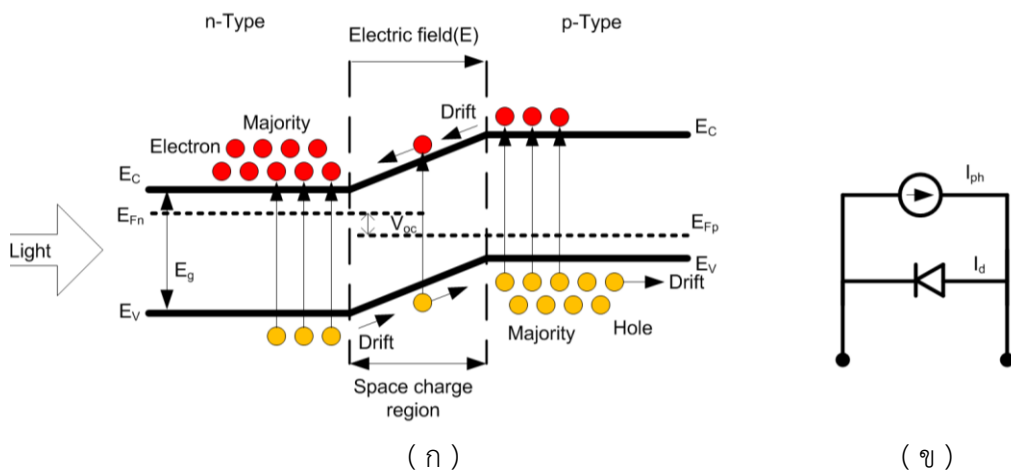
### 2.4.1 การทำงานในสภาวะมืด ( Dark state )

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ที่อยู่ในสภาวะมืดหรือสภาวะสมดุล (Equilibrium) กล่าวคือผลรวมของโฮลและอิเล็กตรอน มี ค่าเท่ากับศูนย์ แสดงแถบพลังงานดังรูป 2.2 จากรูปรอยต่อ p/n-Si ภายใต้ที่มีดนั้นจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รอยต่อ ทำให้เกิดกำแพงศักย์ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจึงทำให้เกิดสภาวะสมดุลขึ้น เนื่องมาจาก

การแพร่ (Diffusion) ของอิเล็กตรอนด้าน n-Si ไปด้าน p-Si เท่ากับการพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้าภายใน ดังที่กล่าวมาข้างต้น และการแพร่ของโฮลจากด้าน p-Si ไปด้าน n-Si เท่ากับการพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งการแพร่และการพัดพาทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้าม จึงทำให้กระแสรวมของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นมีค่าเป็นศูนย์ และการกระจายตัวของพาหะข้างน้อยแต่ละด้านของอุปกรณ์รอยต่อ p/n-Si ภายใต้อิทธิพลแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะมืด และ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมืด



รูปที่ 2.3 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะสว่าง และ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะสว่าง

## 2.4.2 การทำงานในสภาวะสว่าง(Luminate stage)

เมื่อมีแสงตกกระทบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพลังงานแสงหรือพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap,  $E_g$ ) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกิน (Excess carriers) ในวัสดุขึ้น ทำให้ที่รอยต่อ p/n-Si อยู่ในสภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนนั้นเคลื่อนที่แบบพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนส่วนเกินที่ผลิตได้ในชั้น p-Si เดินทางข้ามรอยต่อนี้ไปชั้น n-Si ไปรวมกับอิเล็กตรอนในชั้น n-Si เพื่อเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะภายใต้อิทธิพลของการพัดพาในสนามไฟฟ้า เกิดกระแสอิเล็กตรอนแบบพัดพาที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่วนกระแสโฮลมีการเกิดในลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งเดินทางสวนทางกับกระแสอิเล็กตรอน ดังนั้นในสภาวะที่ไม่สมดุลนี้จึงเกิดระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองด้านต่างกันเท่ากับ  $V_{OC}$  แสดงกลไกการเดินทางของพาหะได้ในรูปที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม ในกลไกดังกล่าวยังมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไดโอด ( $I_D$ ) ที่เกิดจากกลไกการแพร่ (Diffusion) จากพาหะส่วนมาก (Majority carriers) ของแต่ละด้านพยายามข้ามรอยต่อมาอีกด้านหนึ่ง ทำให้กระแสไดโอดมีปริมาณน้อยและมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงเรียกกระแสไดโอดนี้ว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_0$ )

## 2.5 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงตกกระทบบเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล หรือเรียกว่าพาหะที่เกิดจากพลังงานโฟตอน และที่บริเวณรอยต่อพีเอ็นจะเกิดการสะสมประจุบวกและลบ เรียกว่า Space charges region หรือสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อพัดพาโฮลและอิเล็กตรอนให้เดินทางไปยังขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน กระแสจากคู่อิเล็กตรอนที่ผลิตได้จากโฟตอนมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไดโอด แสดงกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ (1) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) แสดงในรูปที่ 2.4

$$I = I_D - I_L = I_0 \left( e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (1)$$

โดยที่  $I$  คือ กระแสไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น A

$I_D$  คือ กระแสไฟฟ้าจากความเข้มข้นไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น A

$I_L$  คือ กระแสโฟตอนหรือกระแสที่ผลิตได้จากแสงตกกระทบบ มีหน่วยเป็น A

$I_0$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) ของไดโอด มีหน่วยเป็น A

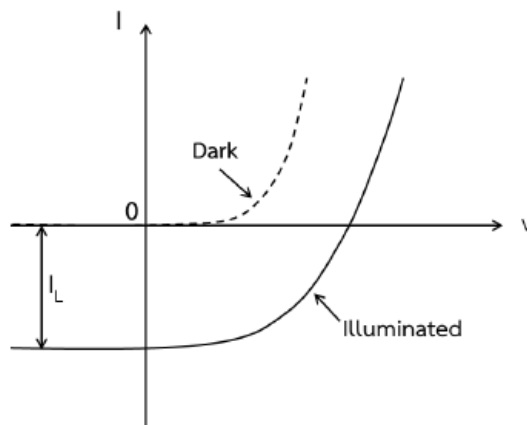
$q$  คือ ค่าคงที่ของประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C



$V_{oc}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร มีหน่วยเป็น V

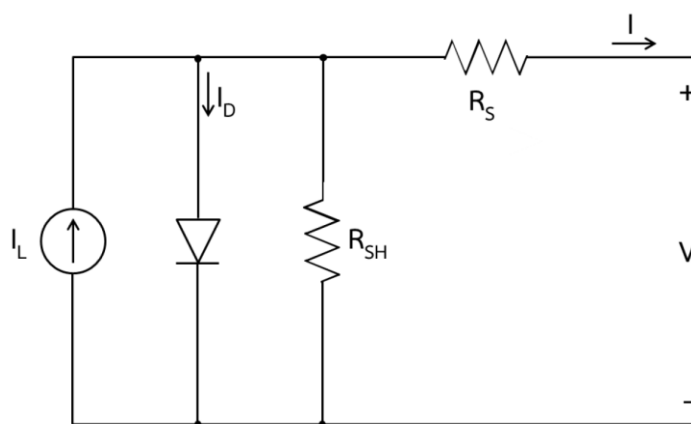
k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

T คือ อุณหภูมิในหน่วย Kelvin (K)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะสว่าง

เมื่อทำการเปิดวงจรไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง และเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความต้านทานไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อผลึกและบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะไฟฟ้า และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) ที่เกิดจากรอยต่อของชั้นพีและเอ็นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลไฟฟ้าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current,  $I_{SC}$ ) เป็นค่าของกระแสไฟฟ้าสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าลัดวงจรเป็นศูนย์ในสมการที่ (กล่าวก่อนหน้านี้) จะได้ว่า  $I_{SC} = I_L$  ในเงื่อนไขอุดมคติ สมมติให้พลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ และสัมพันธ์กับความกว้างของ Space charge region ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล รวมกันเป็นกระแสไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปสู่วงจรภายนอก โดยแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในสมการที่ (2)

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์

G คือ อัตราการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮล

$L_e$  คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน

$L_h$  คือ ระยะทางการแพร่ของโฮล

W คือ ความกว้างของบริเวณสนามไฟฟ้าภายใน หรือ Space charges region

ดังนั้น เมื่อต้องการกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสง ( $I_L$ ) มากขึ้นอัตราการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮล รวมทั้งระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจึงจำเป็นต้องมีค่ามาก ถึงจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่าเป็นศูนย์จากสมการที่ (1) จะได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่าเป็นค่าสูงสุด เมื่อกระแสเปิดวงจรมีค่าเป็นศูนย์จากสมการที่ (1) จะได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่าเป็นค่าสูงสุด ดังสมการที่ (3)

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

ฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของรอยต่อ p/n-Si หรือบ่งบอกถึงผลกระทบของค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) ที่ส่งผลถึงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยฟิลแฟกเตอร์แสดงในสมการที่ (4)

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (4)$$

โดยที่  $V_{MP}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น V

$I_{MP}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น A

ในทางอุดมคติค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากเทอมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับเทอมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร แต่โดยทั่วไปฟิลแฟกเตอร์มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกถึงผลกระทบจากค่าความต้านทาน

ไฟฟ้าแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าต้องการให้ฟิลแพกเตอร์มีค่ามาก จำเป็นต้องศึกษาหาสาเหตุของผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าแสงในเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency,  $\eta$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าเข้าและกำลังไฟฟ้าออกโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\eta = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{P_{IN}} \times 100 \% \quad (5)$$

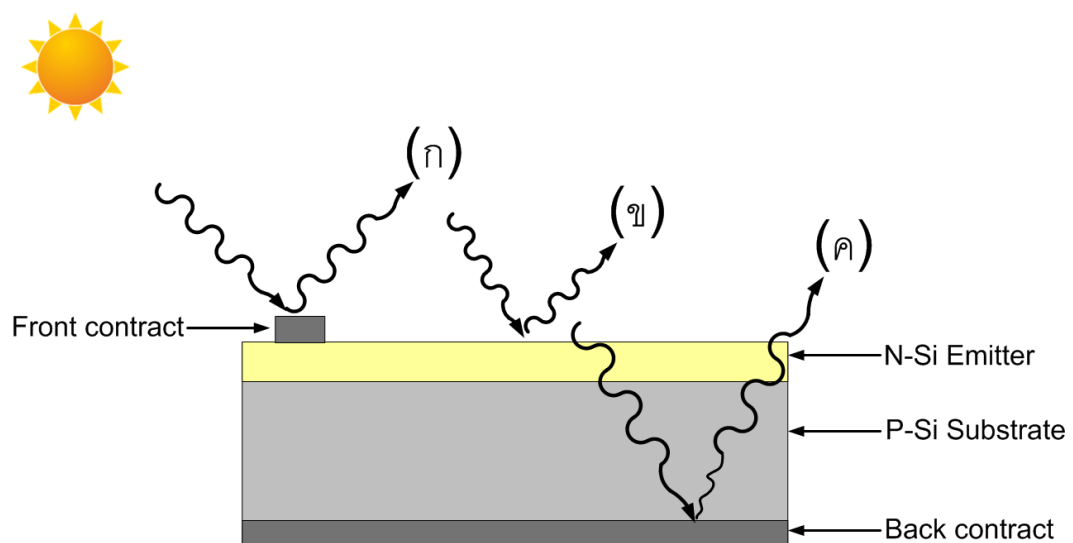
โดยที่  $P_{IN}$  มีค่าเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่แสงเทียบมาตรฐานแสง AM 1.5

ในปัจจุบัน ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่ผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีค่าประมาณ 18 - 22% ซึ่งพลังงานแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์บางส่วนถูกนำไปใช้ประโยชน์บางส่วนสูญเสียไม่ได้ใช้เป็นประโยชน์ เช่น แสงบางส่วนที่เกิดการสะท้อนกลับและแสงที่ทะลุผ่านทำให้ประสิทธิภาพถูกจำกัด จากปัจจัยของคุณสมบัติทางแสงของวัสดุผลึกซิลิคอน

## 2.6 การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์

การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้เป็นการสูญเสียทางแสง (Optical losses)

และการสูญเสียทางไฟฟ้า (electrical losses) แสดงในรูปที่ 2.6 โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากสาเหตุดังนี้



รูปที่ 2.6 การสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การบังแสงจากชั้นไฟฟ้าด้านบนผิวรับแสง (ข) การสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง และ (ค) การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง

### 2.6.1 การสูญเสียทางแสง

ขั้วโลหะไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสงทำให้เกิดการบังแสงขึ้น แก้ไขโดยการลดขนาดและระยะห่างของขั้วโลหะไฟฟ้าให้เหมาะสม หรือใช้เทคนิคการฝังขั้วไฟฟ้าในร่องขนาดเล็กแทน เพื่อรวบรวมพาหะอิสระให้มากขึ้น

การสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจากค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุและอากาศที่มีค่าต่างกัน จากหลักการของสเนลล์ (Snell's law) จะมีมุมแสงตกกระทบค่าหนึ่งที่เราเรียกว่ามุมวิกฤติ จะทำให้เกิดการสะท้อนแสงกลับที่ผิวทั้งหมด วิธีการลดการสะท้อนแสงวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศและซิลิคอน

การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง การทะลุผ่านของแสงที่มีย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่า  $E_g$  (1.1eV) ของวัสดุซิลิคอนเช่น แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1100 ถึง 1500 nm วัสดุซิลิคอนจะไม่สามารถดูดกลืนได้ ซึ่งความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับพลังงาน (eV) แสดงในสมการที่ (6)

$$E(eV) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (6)$$

โดยที่  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์  $6.626 \times 10^{-34}$  Js

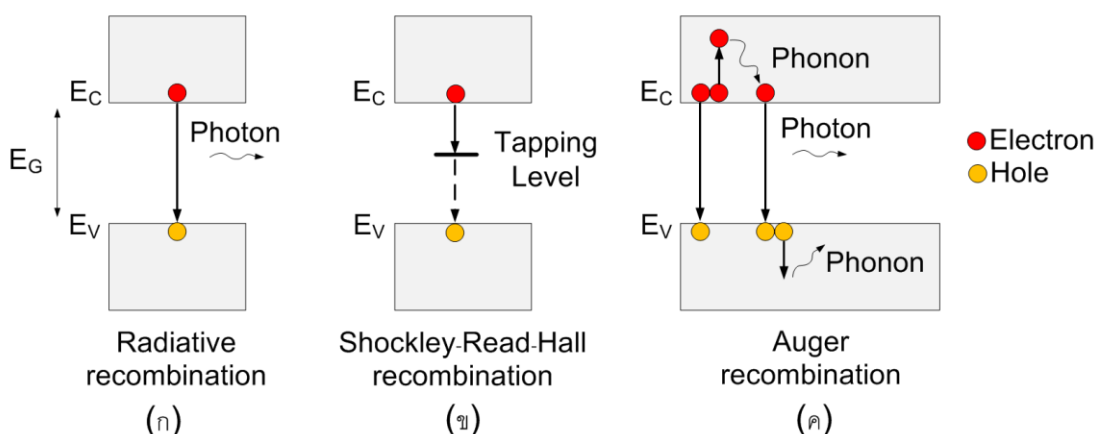
$C$  คือ ค่าความเร็วของแสง  $3 \times 10^8$  m/s

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น หน่วยเป็น นาโนเมตร

อย่างไรก็ตาม ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่า  $E_g$  มากเกินไป ในช่วงแสงตั้งแต่ช่วงแสงสีแดงจนถึงแสงสีน้ำเงิน จะทำให้เกิดพลังงานส่วนต่าง ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานโฟนอน (Phonon) หรือความร้อนทำให้เกิดการสูญเสียของโครงสร้างผลึกของซิลาร์เซลล์ไม่สามารถนำพลังงานแสงช่วงดังกล่าวมาผลิตเป็นไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.6.2 การสูญเสียทางไฟฟ้า

การสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ถูกกระตุ้น (Recombination) ก่อนที่จะออกสู่ภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้กระแสไฟฟ้าจากการสร้างคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลลดลง โดยกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะมี 3 ชนิด โดยแสดงในรูปที่ 2.7 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะในแบบต่างๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (ก)การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง, (ข)การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่องและ (ค) การรวมตัวใหม่แบบออร์เจอร์

การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง (Radiative recombination) เกิดขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct band gap) เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่ออิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชัน (Conduction band) มารวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเกิดการปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานแสงที่เท่ากับช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ของวัสดุในส่วนของซิลิคอนที่มีช่องว่างพลังงานแบบอ้อม (Indirect band gap) ซึ่งมีจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในตำแหน่งโมเมนตัมไม่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงเกิดการรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสงน้อย

การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่อง (Shockley-Read-Hall recombination) พบได้ทั้งภายในโครงสร้างผลึกและที่พื้นผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจุดบกพร่องจะเกิดเป็นสถานะดักจับ (Trapping level) บริเวณแถบกลางในช่องว่างพลังงาน แต่ถ้าจุดบกพร่องอยู่ใกล้ขอบของแถบพลังงาน โอกาสของการรวมตัวใหม่นี้จะลดลง

การลดการรวมตัวใหม่ จึงต้องสร้างประจุไฟฟ้า เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวขึ้น โดยประจุไฟฟ้าสร้างได้ 2 วิธีคือ การสร้างชั้นรอยต่อที่มีความเข้มข้นของสารเจือต่างกันและการสร้างชั้นฉนวนบางๆ เพื่อเป็นที่รวบรวมประจุ (Fixed charges) เกิดประจุภายใต้ชั้นฉนวน

การรวมตัวใหม่แบบออร์เจอร์ (Auger recombination) เกิดได้มากที่สุด ในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระหว่างที่อิเล็กตรอนตัวหนึ่งที่แถบคอนดักชันตกกลับมารวมตัวกลับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ได้ไปชนกับอิเล็กตรอนหรือโฮลที่อยู่ด้านข้างอีกตัว ทำให้ได้อิเล็กตรอนหรือโฮลตัวนั้นได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจนโดดข้ามไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า และตกกลับลงมาที่ระดับพลังงานเดิม เกิดการคายพลังงานโฟนอนในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ทำให้โครงผลึกสั่น (Lattice

vibration) และเสียรูป ทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าจำกัด โดยทั่วไปจะเกิดในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารเจือในปริมาณความเข้มข้นสูง

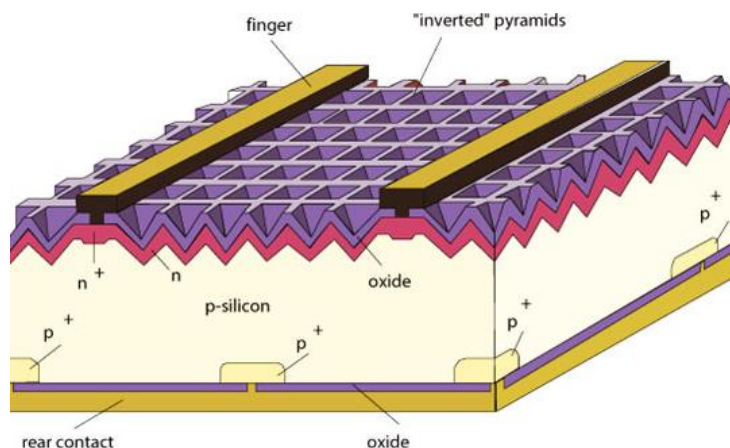
การลดการรวมตัวใหม่หรือการที่พาหะมีอายุการเดินทางที่ยาว จะทำให้เกิดการรวบรวมพาหะที่ชั่วไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นและส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานดีขึ้น และยังมีการตัวแปรที่สำคัญ ที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ ซึ่งก็คือ อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุก ๆ การเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และใน กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรฐานที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage ,  $V_{OC}$ ) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของ แผงแสงอาทิตย์ลดลง 5 % ( $0.5\% \times 10$ ) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่  $V_{OC}$  จะลดลง 1.05 V ( $21\text{ V} \times 5\%$ ) เหลือเพียง 19.95 V ( $21\text{ V} - 1.05\text{ V}$ ) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย

## 2.7 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter Solar Cell)

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้จากปัจจัย 4 ส่วนหลักๆคือ

- 1.การสูญเสียการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination Loss) คือ การสูญเสียการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ได้แก่ผิวเซลล์ทั้งด้านบนและด้านหลังบริเวณรอยสัมผัส
- 2.การสูญเสียจากความต้านทานแผง (Resistance Loss) คือ การสูญเสียจากความต้านทานแผงเกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ ค่า  $R_{SH}$  และ  $R_S$  ที่เกิดจากรอยต่อของอุปกรณ์นอกรอยต่อ p/n-Si
- 3.การสูญเสียที่เกิดจากการบดบัง (Shadowing Loss) คือ การสูญเสียที่เกิดจากการบังแสงของขั้วไฟฟ้าด้านรับแสง ที่บดบังพื้นที่รับแสง
- 4.การสูญเสียทางแสง (Optical Loss) คือ การสูญเสียทางแสง ที่เกิดจากแสงการสะท้อนแสงกลับที่ผิว (Reflectance, %R)

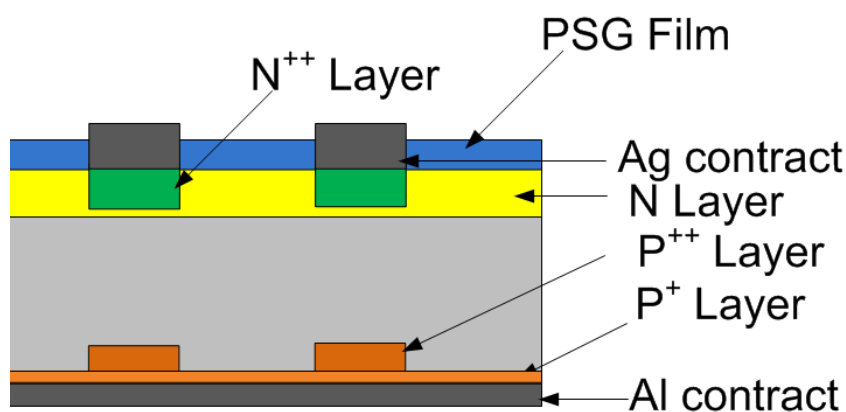
ถ้าสามารถลดปัจจัยเหล่านี้ก็จะสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เพิ่มสูงขึ้นได้



รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง 25%

(Prog. Photovolt: Res. Appl. 2009; 17:183–189)

รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้าง PERC (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) ที่ให้ประสิทธิภาพสูง 25% ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบเพื่อลดผลของการสูญเสียทั้ง 4 แบบ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อพิจารณาส่วนที่ลดการสูญเสียจากการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านบนหรือชั้น n-Si พบว่าชั้นรับแสงมีความเข้มข้นของสารเจือไม่เท่ากัน โดยที่บริเวณรับแสงมีความเข้มข้นสารเจือต่ำ (Lightly doped n-Si) ประมาณ  $150\text{--}220 \Omega/\text{Sq}$  ส่วนบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ากริดมีความเข้มข้นของสารเจือสูง (Heavily doped  $n^{++}\text{-Si}$ ) ต่ำกว่า  $50 \Omega/\text{Sq}$  ในบริเวณดังกล่าวนี้เราเรียกว่า SE จากการที่มีความหนาแน่นของสารเจือต่ำ เพื่อลดของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ย่านพลังงานโฟตอนสูงหรือเพิ่มการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินให้สูงขึ้นได้ เมื่อแสงสีน้ำเงินตกกระทบ และบริเวณที่ 2 เป็นบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า จากการที่มีความหนาแน่นของสารเจือสูง เพื่อให้สมบัติโอห์มมิกที่ดี



รูปที่ 2.9 โซลาร์เซลล์ที่มี โครงสร้างของ Selective Emitter Solar Cell ที่ด้านบน และ Local Back Surface Field Solar Cell ที่ด้านหลัง

## 2.8 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบสนามไฟฟ้าบางบริเวณ(Local Back Surface Field Solar Cell)

หลักการเกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้หลักการแพร่ของอะลูมิเนียมจากชั้นไฟฟ้า ด้านหลัง เพื่อให้เกิดบริเวณ  $p^+-Si$  มีการใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 โดยปัจจุบันได้ใช้กระบวนการอบชั้นไฟฟ้าด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) เพื่อให้เกิดบริเวณ  $p^+-Si$  ขึ้นใกล้กับพื้นผิวรอยสัมผัสระหว่างแผ่นฐาน  $p-Si$  และชั้นไฟฟ้าอะลูมิเนียม ซึ่งเรียกว่า Back Surface Field, BSF) ซึ่งจะทำการเปิดช่องเข้าไปเพื่อให้เกิดการแพร่ด้วยความร้อนสูง เกิดเป็นสนามไฟฟ้าแคบบางบริเวณขึ้นทำให้เกิด  $p^{++}-Si$  ขึ้นหลักการทํางานคล้ายๆกับของซีเล็คทีฟอีมีเตอร์ทำให้เกิดความต่างของบริเวณขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวบรวมกระแสพาหะเพิ่มขึ้นทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น

## 2.9 แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ $p/n-Si$ ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

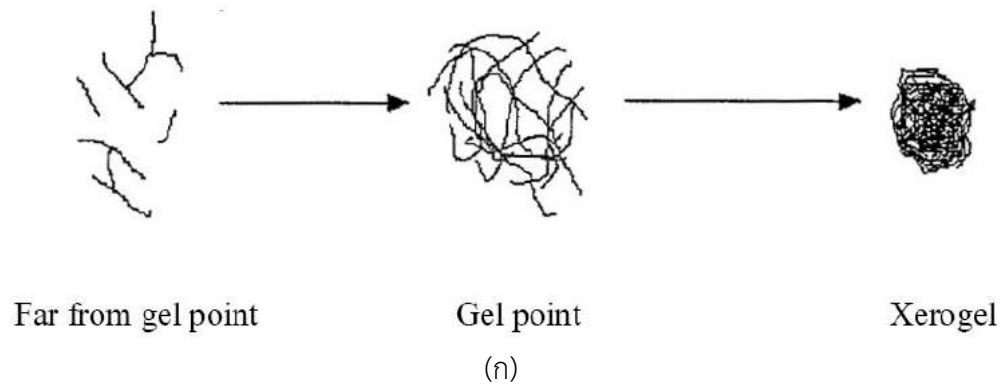
โดยทั่วไปแหล่งสารเจือที่ใช้สำหรับการสร้างรอยต่อ  $p/n-Si$  มีอยู่ 3 ชนิด คือสารเจือที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารประกอบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $H_3PO_4$ ) โดยมี สถานะเป็นของแข็ง โดยเตรียมได้จากการสังเคราะห์โซล-เจล (Sol-gel) ซึ่งข้อดีของการสังเคราะห์ Sol-gel คือสังเคราะห์ได้ง่าย สามารถกำหนดความเข้มข้นของอะตอมสารเจือได้ และมีราคาถูก

การสังเคราะห์ Sol-gel เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการแพร่ นั้นแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และ การควบแน่น (Condensation) ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการสังเคราะห์ Sol-gel ด้วยวิธี Hydrolysis ซึ่งวิธี Hydrolysis คือปฏิกิริยาที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบเข้าไปสลายพันธะโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารโมเลกุลเล็ก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลาย (Tetraethyl Orthosilicate: TEOS) กับน้ำ DI เป็นสารตั้งต้น และใช้  $C_2H_5OH$  (ETOH) เป็นตัวช่วยทำละลาย

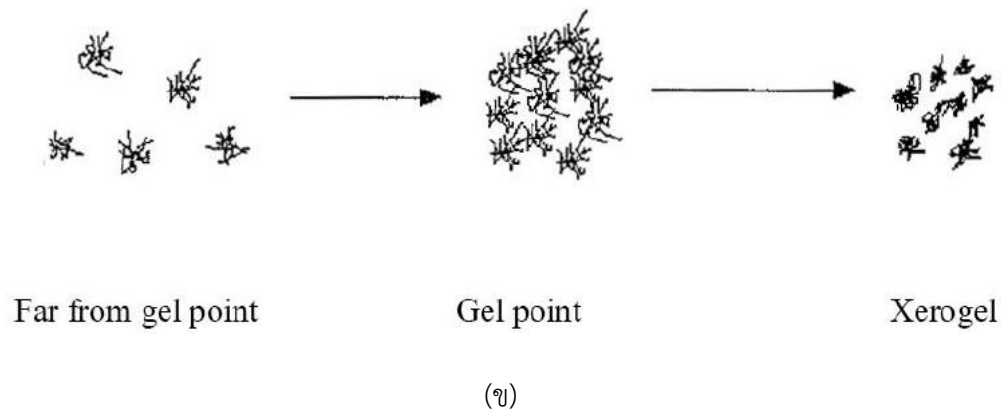
เนื่องจากกระบวนการเกิด Sol-gel หรือกระบวนการ Polymerization นั้นใช้เวลานานจึงได้เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ลงไปในกระบวนการ เพื่อให้เกิดกระบวนการ Polymerization ได้เร็วขึ้น ซึ่งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเลือกเติมได้ 2 ชนิด คือตัวเร่งชนิดที่เป็นแบบกรด (Acid-catalyzed) และแบบเบส (Base-catalyzed) โดยการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากรด และเบส ดูได้จากรูปที่ 2.9 เปรียบเทียบการเกิดพันธะ Polymerization โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบการเติมกรด เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดี และลักษณะการเกิดเป็นแบบสายยาว



### Acid-Catalyzed Hydrolysis



### Base-Catalyzed Hydrolysis



รูปที่ 2.10 (ก) รูปแบบการเกิดเป็นเจลจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด และ (ข) รูปแบบการเกิดเป็นเจลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่แบบเบส