

การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างนาโน

Nanostructured Solar Cells: Research and Development

สายชล ศรีแป้น^{1,*} และ สุวิทย์ กิระวิทย์^{1,๗}

^{1*}ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีทางแสงขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก ประเทศไทย

^๗Saichon_Sriphan@hotmail.com และ ^๗Suwitki@gmail.com

บทคัดย่อ – โครงสร้างนาโนเป็นโครงสร้างที่ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ในสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากโครงสร้างนาโนแสดงปรากฏการณ์ทางกายภาพแบบใหม่ ซึ่งแตกต่างกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม การทำนายทางทฤษฎีบ่งบอกว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้โครงสร้างนาโนสามารถมีค่าเกินข้อจำกัดของ Shockley-Queisser และเกินประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์หลายร้อยต่อ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนที่สร้างได้จริงยังคงน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนต์ในยุคที่ 1 เพราะฉะนั้นการวิจัยและพัฒนาในสาขานี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก บทความปริทัศน์นี้ได้เริ่มต้นอธิบายถึงภาพรวมของวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ส่วนต่อมาเป็นการอธิบายพร้อมยกตัวอย่างเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนรูปแบบต่าง ๆ นอกจากนั้นได้อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโน โดยเจาะจงไปที่เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท และส่วนสุดท้ายได้ยกตัวอย่างการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างนาโนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

คำสำคัญ – โครงสร้างนาโน, เซลล์แสงอาทิตย์, ประสิทธิภาพ

Abstract – Nanostructures have gained much interest in integration them into solar cells because novel chemical, physical and biological properties can be emerged in these structures. Based on theoretical predictions, an efficiency of nanostructured solar cell can exceed the Shockley-Queisser limit, which is the limit of typical single-junction solar cells, and can be more than those of multi-junction solar cells. However, nowadays, the efficiencies of realized nanostructured solar cells are still lower than those of the 1st generation solar cells, which are Si and GaAs-based. Substantial research and development in this field are needed. This

review article starts with a description of an overall of solar cell evolution. Selected examples of nanostructured solar cell technologies are presented. Moreover, we describe the factors that affect the nanostructured solar cell development especially quantum-dot solar cell. Finally, the research and development of nanostructures for solar cell in Thailand are also presented.

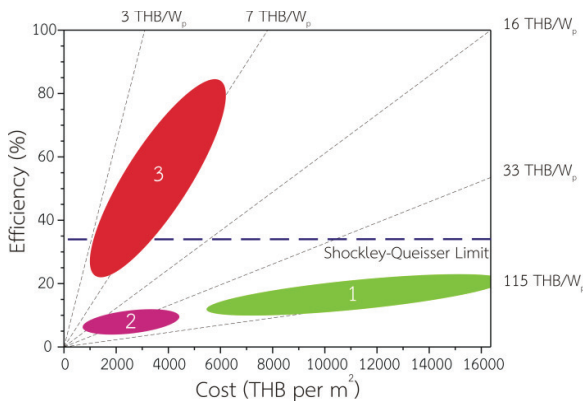
Keywords – Nanostructures, Solar Cell, Efficiency

1. บทนำ (Introduction)

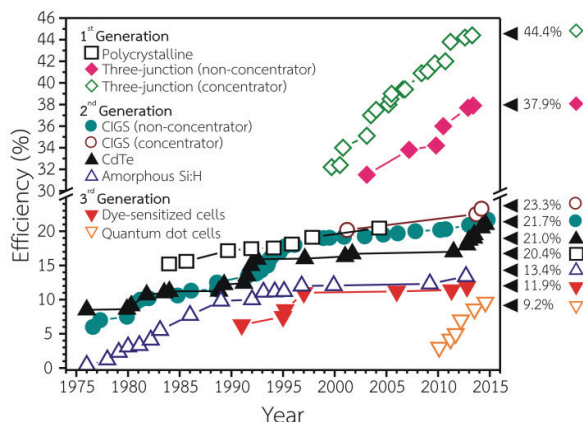
พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่ง ที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้แทนพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ได้แก่ น้ำมัน แก๊ส และถ่านหิน ซึ่งถูกทำนายว่าจะหมดไปภายในปี ค.ศ. 2044, 2046 และ 2116 ตามลำดับ [1] เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างมากในการวิจัยและนำมาใช้งานจริง เนื่องจากแหล่งพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ดวงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์มีหลักการกำเนิดไฟฟ้าไม่ซับซ้อน นั่นคือ กระแสไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้โดยตรงจากแสงที่ตกกระทบ และยังใช้ต้นทุนไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับระบบของพลังงานทางเลือกแบบอื่น [2]

ปัญหาของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าไม่สูงมากนัก เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายในท้องตลาดมีประสิทธิภาพเพียง 15-18% [3] ดังนั้นนักวิจัยจึงหาแนวทางในการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากกว่าเดิม หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน นั่นคือ การนำโครงสร้างนาโน (โครงสร้างที่มีขนาด 1 – 100 นาโนเมตร) มาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีแล้วพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างนาโนอาจมีประสิทธิภาพได้มากกว่า 80% [4] ทั้งนี้เพราะโครงสร้างนาโนแสดงปรากฏการณ์แบบใหม่ ซึ่งแตกต่างกับวัสดุโครงสร้างขนาดใหญ่ บทความปริทัศน์นี้มีเป้าหมายในการอธิบายภาพรวมในปัจจุบันของการนำโครงสร้าง

นาโนมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในส่วนตัวแรกได้กล่าวถึงประวัติการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่ยุคที่ 1 ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากวัสดุซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นหลัก จนมาถึงยุคที่ 3 ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ ในส่วนที่สองเป็นการนำเสนอผลการวิจัยที่มีการนำวัสดุโครงสร้างนาโนแต่ละชนิดมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบต่าง ๆ นอกจากนั้นได้กล่าวถึงปัจจัยการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโน โดยจะมุ่งไปที่เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท และในส่วนสุดท้ายรายงานตัวอย่างการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนในประเทศไทย



รูปที่ 1 ย่านของราคาต้นทุนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในสามยุค (โดยประมาณ 33 THB = 1 USD) ข้อมูลดัดแปลงมาจาก [5]



รูปที่ 2 แผนภาพการวิวัฒนาการประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ถึง 2014 (ดัดแปลงจาก [7])

2. ประวัติการพัฒนา (History of Development)

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมุ่งเน้นในการปรับปรุงโครงสร้างและประสิทธิภาพให้ดีที่สุดด้วยการใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ในปี ค.ศ. 2004 Green [5] ได้แบ่งการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ยุค โดยแบ่งตามประสิทธิภาพและต้นทุนราคาพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ (ดูรูปที่ 1) ในยุคที่ 1 เป็นยุค

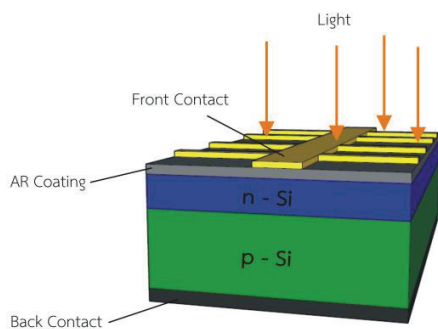
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้โครงสร้างดั้งเดิมขนาดใหญ่หรือบัลค์ (Bulk Structure Solar Cell) โดยใช้วัสดุซิลิกอน (Silicon, Si) และแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide, GaAs) เป็นหลัก ในยุคนี้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 17% [2] ในทางทฤษฎีประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเดียวมีค่าไม่เกิน 33% โดยเรียกค่านี้อีกว่าข้อจำกัดของ Shockley-Queisser [6] ข้อเสียข้อหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 คือ มีน้ำหนักมากและใช้ต้นทุนการผลิตสูง เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 ซึ่งเป็นยุคเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 โดยเน้นการออกแบบให้มีขนาดบาง น้ำหนักเบา และใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ ทำให้ราคาต้นทุนต่ำกว่ายุคที่ 1 ค่อนข้างมาก (ดูรูปที่ 1) จากข้อดีเหล่านี้ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางเป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 ยังไม่สูงมากนัก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ที่วางจำหน่ายมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 6% เท่านั้น [2] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เกินข้อจำกัดของ Shockley-Queisser และยักรักษาต้นทุนการสร้างให้ถูกลงด้วย จึงเกิดการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 3 ซึ่งเป็นยุคของเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ (Emerging Solar Cell) ที่มีการใช้โครงสร้างแนวคิดโครงสร้าง และวัสดุชนิดใหม่ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างควอนตัม (Quantum Structure Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดตายน์เซนซิไทซ์ (Dye-sensitized Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด กราฟีน เป็นต้น ตามทฤษฎีแล้วประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคนี้สามารถทำได้มากกว่า 80% [4]

ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory, NREL) ประเทศสหรัฐอเมริกา [7] ได้รวบรวมข้อมูลประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดในแต่ละปี (ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ถึงปัจจุบัน) ในบทความฉบับนี้ขอยกตัวอย่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญมาบางชนิด ดังในรูปที่ 2 ในปัจจุบันประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้จริงในห้องทดลอง คือ 44.7% ซึ่งเป็นโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัรรอยต่อที่มีการใช้ระบบรวมแสง (ไม่ได้แสดงในรูปที่ 2) [7]

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1: สร้างจากซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นหลัก (The 1st Generation: Si and GaAs-based Solar Cell)

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 ประกอบด้วยโครงสร้างรอยต่อพีและเอ็นรอยต่อเดียว (Single p-n Junction) ดังรูปที่ 3 โครงสร้างมีวัสดุชั้นเอ็นอยู่บนชั้นพีและประกบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าด้านหน้า (Front Contact) และขั้วโลหะนำไฟฟ้าด้านหลัง (Back Contact) นอกจากนั้นยังมีการเคลือบสารกันการสะท้อน (Anti-reflection (AR) Coating) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของ

แสงที่ตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ลักษณะนี้เป็นแบบรอยต่อเดียว ประสิทธิภาพจึงถูกจำกัดด้วยช่องว่างแถบพลังงาน (Band Gap or Energy Gap) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ โดย Si มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.12 eV จึงดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1108 nm เท่านั้น และ GaAs มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.43 eV จึงดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นไม่เกิน 868 nm โดยทั่วไปแผ่นผลึก Si มักมีความหนาประมาณ 400 μm ซึ่งปลูกด้วยกระบวนการ Czochralski (CZ) หรือ Floatzone (FZ) [8] เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก Si เป็นที่นิยมในท้องตลาดอย่างมากเพราะเหตุที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ราคายอมรับได้ และซิลิกา (Silica) เป็นวัสดุตั้งต้นที่ใช้ผลิต Si พบมากที่สุดเป็นอันดับสองบนพื้นโลก [9] นอกจากนั้นสารที่นิยมนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกรูปแบบหนึ่ง คือ สารประกอบ GaAs ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า Si ซึ่งรายละเอียดของเทคโนโลยี Si และ GaAs สรุปได้ดังนี้



รูปที่ 3 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบรอยต่อเดียว [12]

2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Monocrystalline Silicon Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ Si ในงานวิจัยสามารถผลิตได้ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยมากกว่า 20% แต่ในท้องตลาดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 15% ถึง 18% [3, 10] ในปี ค.ศ. 2001 Zhao และคณะ [11] ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Si แบบผลึกเดี่ยวที่มีประสิทธิภาพ 24.7% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในปัจจุบันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้

2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปซิลิกอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปซิลิกอนถูกสร้างขึ้นมาเพื่อลดต้นทุนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว และมีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายกว่า [10] โครงสร้างผลึกหลายรูปเป็นผลึก Si ขนาดเล็ก ๆ เรียกว่า เกรน (Grain) มารวมตัวกัน โดยเห็นได้อย่างชัดเจนจากผิวของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ที่มีโทนสีแตกต่างกัน ซึ่งแตกต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวที่มี

ลักษณะที่บ่งชี้แสง ในท้องตลาดเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปมีประสิทธิภาพประมาณ 12% ถึง 15% [8] และมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 20.4% (ดูรูปที่ 2)

2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs-based Solar Cell)

สารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs เป็นสารประกอบของธาตุแกเลียม (Gallium, Ga) และอาร์เซนิค (Arsenic, As) เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ GaAs มีประสิทธิภาพสูงกว่า และทนรังสีได้ดี จึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอวกาศ [10,13] ปัจจุบันประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ GaAs แบบรอยต่อเดียวอยู่ที่ 26.4% [7] ข้อเสียของ GaAs คือ มีราคาต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า Si จึงเป็นปัญหาหลักในการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ Abdin และคณะ [13] ได้เสนอว่าปัจจุบันมีสองทางเลือกในการลดต้นทุนการผลิตประกอบด้วย 1) การสร้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ GaAs แต่นำไปปลูกอยู่บนแผ่นฐานราคาถูก เช่น Si หรือเจอร์เมเนียม (Germanium, Ge) และ 2) การปลูกโดยใช้เทคนิคพิเศษที่สามารถทำการลอกเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้ออกจากแผ่นฐาน GaAs และนำแผ่นฐานกลับมาใช้ใหม่ได้ [14]

เนื่องจากข้อจำกัดทางประสิทธิภาพและราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 จึงมีแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โครงสร้างแบบหลายรอยต่อ แนวคิดนี้ได้เริ่มศึกษามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 โดย Wolf [15] ได้เสนอการนำรอยต่อพีและเอ็นหลายรอยต่อที่มีช่องว่างแถบพลังงานต่างกันนำมาสร้างเป็นโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ด้านบนของโครงสร้างใช้วัสดุที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง ซึ่งประพติตัวเป็นชั้นหน้าต่าง (Window Layer) โดยยอมให้โฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่าทะลุผ่านไปยังรอยต่อที่อยู่ถัดไป ทำให้โฟตอนไม่ทะลุผ่านออกไปจากเซลล์ทันทีเหมือนในกรณีแบบรอยต่อเดียว จากแนวคิดนี้ Yamaguchi และคณะ [16] ได้สร้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ อินเดียมแกเลียมฟอสไฟด์-อินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์-เจอร์เมเนียม (InGaP/InGaAs/Ge) แบบสามรอยต่อ ซึ่งส่วนบนสุดเป็นชุดรอยต่อแรกของ InGaP มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.86 eV ส่วนชุดรอยต่อที่สองของ InGaAs มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.40 eV และชุดรอยต่อที่สามของ Ge มีช่องว่างแถบพลังงาน 0.65 eV หากใช้โครงสร้างนี้กับระบบรวมแสงจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงถึง 37.4% ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบสามรอยต่อมีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 37.9% และเมื่อใช้ระบบรวมแสงจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 44.4% (ดูรูปที่ 2)

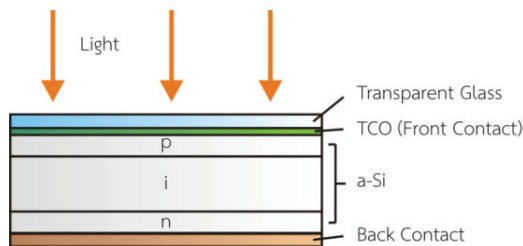
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2: ฟิล์มบาง (The 2nd Generation: Thin-film Solar Cell)

เอกลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 มีลักษณะบาง เบา และยืดหยุ่นสูง (ขึ้นอยู่กับแผ่นฐานที่ใช้) แต่ประสิทธิภาพที่ได้มีค่า

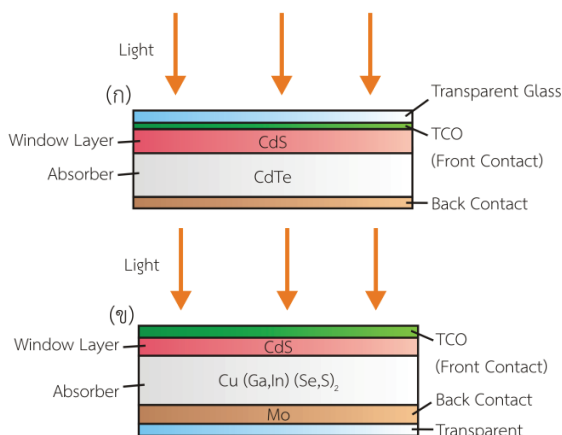
น้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 ซึ่งในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบัน

2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon (a-Si) Thin-film Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอนพบเห็นได้ทั่วไปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น เครื่องคิดเลขหรือนาฬิกาข้อมือ เป็นต้น โดยมีข้อดีในด้านราคาถูกและสร้างได้ง่าย [17] อะมอร์ฟัสซิลิกอน คือ โครงสร้างซิลิกอนที่ไม่เป็นผลึกตามปกติแล้วมีการใส่อะตอมของไฮโดรเจนเข้าไปเกาะกับพันธะของซิลิกอนที่ขาดออก (Dangling Bond) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า [18] โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยชั้นพีและเอ็นที่บางมาก นอกจากนั้นยังมีชั้นไอ (Intrinsic Layer, i) อยู่ตรงกลาง ทำให้ได้โครงสร้างแบบพีไอเอ็น (p-i-n) และบนชั้นพียังมีการเคลือบออกไซด์นำไฟฟ้าแบบโปร่งใส (Transparent Conducting Oxide, TCO) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นนำไฟฟ้าที่มีความโปร่งใสและสามารถนำไฟฟ้าได้ ตัวอย่างโครงสร้างทั่วไปดังในรูปที่ 4 ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอนมีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 13.4% (ดูรูปที่ 2) แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ที่มีขายในท้องตลาดมีประสิทธิภาพประมาณ 6% ถึง 7% [8]



รูปที่ 4 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบอะมอร์ฟัสชนิดฟิล์มบาง [18]



รูปที่ 5 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) CdTe และ (ข) CIS [17]

2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride (CdTe) Solar Cells)

แคดเมียมเทลลูไรด์ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงมาก กล่าวคือ ที่ระดับความหนา 1 μm สามารถดูดกลืนแสงในย่านสเปกตรัมดวงอาทิตย์ได้ถึง 90% แต่เมื่อนำมาใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์กลับมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส อย่างไรก็ตามข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ คือ มีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ [13] โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe (รูปที่ 5 (ก)) ประกอบด้วยชั้น CdTe ซึ่งเป็นสารชนิดพี เนื่องจากในการเตรียมแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นทำได้ยากมาก ดังนั้นจึงใช้แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide, CdS) นอกจากนั้นชั้น TCO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นนำไฟฟ้าด้านหน้าที่เคลือบอยู่บนผิวหน้า ด้านบนเป็นชั้นแก้วใสซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งแผ่นฐานและชั้นที่รับแสงผ่านเข้ามาในเซลล์ เรียกว่า ซูเปอร์สเตรท (Superstrate) [17] และด้านล่างสุดเป็นชั้นโลหะนำไฟฟ้าด้านหลัง

ปัญหาสำคัญของ CdTe และ CdS คือ แคดเมียมเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ จนทำให้บางประเทศ ยกตัวอย่างเช่น เนเธอร์แลนด์ ไม่อนุญาตให้ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบแคดเมียม เนื่องจากกังวลเกี่ยวกับการรั่วไหลจากโรงงานอุตสาหกรรม [17] แต่การจัดการที่ดีเกี่ยวกับขั้นตอนการผลิตและการจัดการกับแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุหรือเสื่อมคุณภาพ ทำให้สามารถลดความกังวลกับปัญหาด้านสารพิษของแคดเมียมได้ ในปัจจุบันมีรายงานว่าเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe มีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 21% (ดูรูปที่ 2)

2.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ หรือ คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide (CIS) or Copper Indium Gallium iselenide (CIGS) Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS หรือ CIGS มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในหมู่เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (ดูรูปที่ 2) มีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 21.7% และ 23.3% เมื่อใช้ระบบรวมแสง แต่ข้อเสียคือ มีขั้นตอนการผลิตค่อนข้างยุ่งยากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น [17] โดยปกติแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS เหมือนกับ CIS แต่แตกต่างกันตรงที่มีการเติมแกลเลียมลงไปเพื่อเพิ่มช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์ โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ CIS หรือ CIGS ดังรูปที่ 5 (ข) ประกอบด้วยโมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นนำไฟฟ้าด้านหลังโดยวางอยู่บนแผ่นฐานแก้ว ต่อมาเป็นชั้น CIS หรือ CIGS ซึ่งเป็นสารชนิดพีทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสง ต่อมาเป็นชั้น CdS ซึ่งเป็นสารชนิดเอ็น และชั้นสุดท้ายเคลือบด้วยชั้น TCO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นนำไฟฟ้าด้านหน้า

เซลล์แสงอาทิตย์ CIS หรือ CIGS เป็นเซลล์ชนิดเดียวที่สร้างบนแผ่นฐานแก้ว ซึ่งแก้วจะทำหน้าที่เป็นฐานรองเท่านั้น โดยแตกต่างกับเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CdTe ที่เซลล์อยู่บนซูเปอร์สเตรท โดยปกติแล้วสารประกอบกึ่งตัวนำ CIS ไม่มีปัญหาด้านสารพิษ ทำให้เหมาะต่อการนำมาผลิตเป็นเซลล์อาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ [13]

2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3: แบบใหม่ (The 3rd Generation: Emerging Solar Cell)

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 มุ่งเน้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เกินข้อจำกัดของ Shockley-Queisser และมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยพลังงานที่ต่ำลง [19] ในยุคนี้ได้มีการนำวัสดุชนิดใหม่และเทคนิคแบบใหม่มาประยุกต์ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้จริงของยุคนี้ในปัจจุบันยังมีค่าสูงไม่มากนัก เพราะฉะนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 3 ยังคงต้องการงานวิจัยและพัฒนา เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงขึ้นด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง ให้เหมาะสมต่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์

2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างควอนตัม (Quantum Structure Solar Cells)

โครงสร้างวัสดุนาโนที่มีขนาดของมิติต่ำกว่ารัศมีของบอร์ (Bohr Radius) อันทำให้เกิดปรากฏการณ์กักเก็บทางควอนตัม (Quantum Confinement Effect) ซึ่งโครงสร้างนี้มีชื่อเรียกว่า โครงสร้างควอนตัม [20] เมื่อแบ่งชนิดตามมิติของการจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสามารถแบ่งได้เป็นควอนตัมเวลล์ (Quantum Well, QW) ควอนตัมไวร์ (Quantum Wire, QWR) และควอนตัมดอท (Quantum Dot, QD) [19] โครงสร้าง QD มีขนาดเล็กที่สุด เมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงได้มากกว่า 64% ตามผลการทำนายทางทฤษฎี [13] คุณสมบัติที่สำคัญของ QD ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ คือ เราสามารถควบคุมค่าช่องว่างแถบพลังงานของ QD โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดและชนิดของสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถปรับเปลี่ยนการดูดกลืนของแสงตามสเปกตรัมดวงอาทิตย์ตามที่ต้องการได้ [10] ซึ่งเป็นหนึ่งเหตุผลที่ทำให้เทคโนโลยีนี้สามารถลดต้นทุนและขั้นตอนการสร้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายรอยต่อ โครงสร้างนาโนเป็นโครงสร้างที่ใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 1 และ 2 ให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจาก QD มีขนาดเล็กมาก จึงเป็นการยากที่จะสร้าง QD ให้มีคุณสมบัติตามทฤษฎี นอกจากนั้น QD ยังมีความไม่สมบูรณ์เชิงผลึกหรือมีจุดบกพร่อง (Defect) ที่เกิดในขั้นตอนการสร้าง [21] และเมื่อกระบวนการประดิษฐ์ไม่ดีหรือความหนาแน่นของ QD ในโครงสร้างมีไม่มากพอ [22,23] อาจทำให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้ได้ ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทที่สร้างได้จริงมีประสิทธิภาพสูง

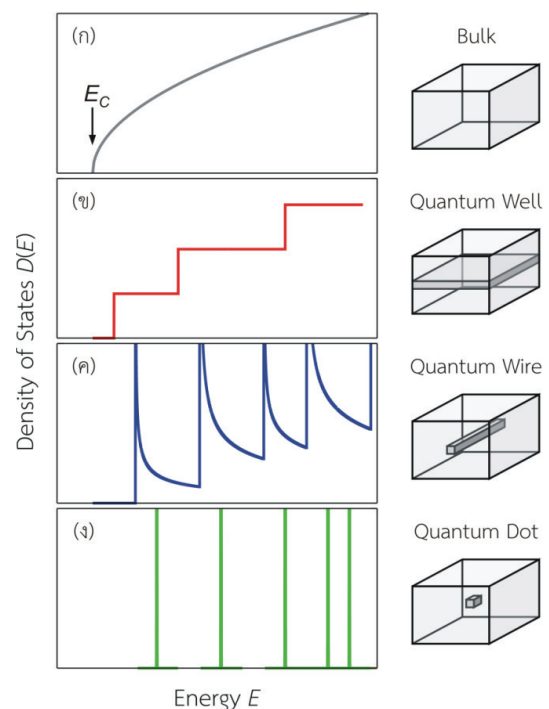
ที่สุด 9.2% สำหรับ QD ชนิดผลึกนาโน (ดูรูปที่ 2) และ 18.7% สำหรับ QD แบบกึ่งตัวนำตัวเอง [24]

2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคายน์เซนซิไทซ์ (Dye - sensitized Solar Cells, DSSCs)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคายน์เซนซิไทซ์สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้จากคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pairs, EHPs) ที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแสงเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป แต่แตกต่างกันที่พาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะถูกนำผ่านสารละลาย [25] ในปัจจุบันมีรายงานว่าเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs มีประสิทธิภาพสูงที่สุดอยู่ที่ 11.9% (ดูรูปที่ 2) โดยที่ประสิทธิภาพของ DSSCs ขึ้นอยู่กับความไวแสง (Sensitization) ของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง คายน์ (Dyes) โฟโตอิเล็กโทรด (Photoelectrode) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter Electrode) ที่อยู่ภายในโครงสร้าง [13]

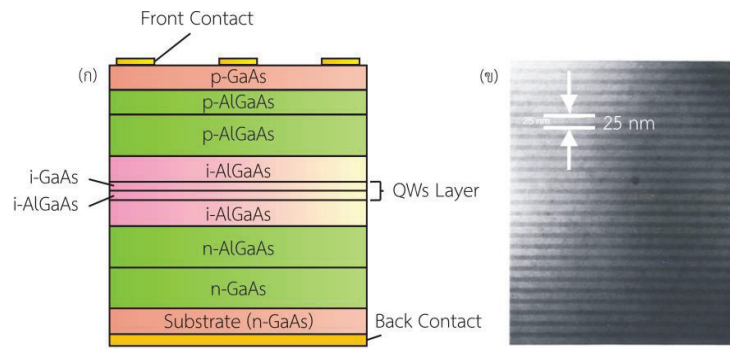
3. วัสดุโครงสร้างนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ (Nanostructured Materials for Solar Cell Applications)

วัสดุสารกึ่งตัวนำปกติที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 1 นั้นคือ Si และ GaAs มีลักษณะเป็นบัลค์ ซึ่งมีโครงสร้างขนาดใหญ่และมีแถบพลังงานต่อเนื่อง (ดูรูปที่ 6 (ก)) ดังนั้นการอธิบายคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า แสง และแม่เหล็ก



รูปที่ 6 โครงสร้างควอนตัมและความหนาแน่นสถานะพลังงานของโครงสร้าง (ก) โครงสร้างขนาดใหญ่ที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อิสระได้ 3 ทิศทาง (ข) โครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อิสระได้ 2 ทิศทาง

- (ค) โครงสร้างควอนตัมไวร์ที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อิสระได้ 1 ทิศทาง และ
 (ง) โครงสร้างควอนตัมดอทที่อิเล็กตรอนถูกกักขังทุกมิติทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่อิสระได้



รูปที่ 7 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมเวลล์ GaAs/AlGaAs (ก) โครงสร้าง [29] และ (ข) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของตัวอย่างชั้นควอนตัมเวลล์ 100 ชั้นในโครงสร้างอุปกรณ์ GaAs/AlGaAs ที่ปลูกด้วยเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล [30]

ของโครงสร้าง สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีฟิสิกส์สถานะของแข็ง แต่ถ้าวัดถูกลดขนาดลงไปในระดับนาโนเมตร คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่เปลี่ยนแปลง คือ เกิดแถบพลังงานย่อยและเกิดระดับพลังงานควอนไทซ์ (Quantized Energy Levels) และเกิดจากการกักขังพาหะ เช่น อิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ได้ใน 2 มิติ 1 มิติ และ 0 มิติ ปรากฏการณ์เหล่านี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง [26] ดังนั้นการอธิบายคุณสมบัติพิเศษเหล่านี้จึงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีฟิสิกส์แบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงเปลี่ยนไปอธิบายด้วยกลศาสตร์ควอนตัม

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างควอนตัมสามารถแบ่งตามลักษณะการกักขังของอิเล็กตรอนตามลักษณะของวัสดุ โครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่กักขังอิเล็กตรอน 1 ทิศทาง และให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อิสระได้ 2 ทิศทาง ดังรูปที่ 6 (ข) มีแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Step Function Energy Bands) แต่เมื่อการกักขังอิเล็กตรอนเพิ่มเป็น 2 ทิศทาง กล่าวคือ ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อิสระได้ 1 ทิศทาง เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ควอนตัมไวร์ ดังรูปที่ 6 (ค) มีแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันพาราโบลา (Parabolic Energy Levels) เมื่อการกักขังอิเล็กตรอนเพิ่มเป็น 3 ทิศทาง หมายความว่า อิเล็กตรอนถูกกักขังโดยสมบูรณ์ในทุกทิศทาง ไม่สามารถเคลื่อนที่อิสระได้ เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ควอนตัมดอท ดังรูปที่ 6 (ง) มีแถบพลังงานไม่ต่อเนื่องหรือเป็นแบบเดลต้าฟังก์ชัน (Discrete or Delta Function Energy Levels) โดยกระบวนการสร้างโครงสร้างขนาดนาโนที่นิยม คือ (1) กระบวนการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembly) (2) การสังเคราะห์ในสถานะไอ (Gas-phase Synthesis) และ (3) การสังเคราะห์คอลลอยด์ (Colloidal Synthesis) [27]

ในหัวข้อนี้ขอยกตัวอย่างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ ควอนตัมดอท ควอนตัมดอทเชนซีไทซ์ และโครงสร้างนาโนชนิดใหม่ในการประยุกต์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

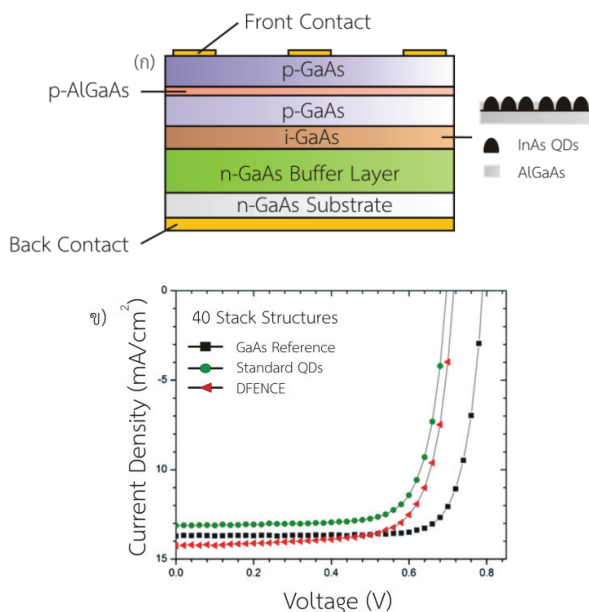
3.1 ควอนตัมเวลล์ (Quantum Wells, QWs)

ควอนตัมเวลล์มีลักษณะเป็นบ่อศักย์ไฟฟ้าที่จำกัดพาหะให้เคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทาง ซึ่งสามารถสร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างมาประกบสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่า เช่น GaAs มาประกบกับอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Aluminium Gallium Arsenide, AlGaAs) [28] ได้มีการวิจัยเพื่อนำโครงสร้าง QWs ไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง เมื่อไม่นานมานี้ Noda และคณะ [29] รายงานผลการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด QWs GaAs/AlGaAs ที่มีโครงสร้างดังในรูปที่ 7 (ก) โดยงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นการใส่ QWs ลงไปในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อายุการดูดกลืนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างภาพโครงสร้างควอนตัมเวลล์ ดังรูปที่ 7 (ข) นอกจากนั้น Bushnell และคณะ [31] รายงานว่าจำนวนชั้นของ QWs ที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น โดยภายในโครงสร้างต้องมีชั้นชดเชยความเครียด (Strain Compensation Layer) รวมอยู่ด้วย

3.2 ควอนตัมดอท (Quantum Dots, QDs)

ควอนตัมดอทเป็นที่สนใจอย่างมากในการประยุกต์สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีขนาดเล็กที่สุดและคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์คล้ายอะตอม (Atomic-like Properties) [32] ทำให้สามารถปรับย่านการดูดกลืนแสงได้ตามขนาด และยังสามารถปรับย่านการดูดกลืนถึงย่านอินฟราเรด [33-36] โครงสร้าง QDs จำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะทุกทิศทาง ซึ่งแตกต่างกับโครงสร้างบัลค์ที่มีอิเล็กตรอนจำนวนมากและสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ QDs ที่สร้างได้จริงยังมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบบัลค์ในยุคที่ 1 เนื่องจาก QDs ที่สร้างได้นั้นมีลักษณะไม่อุดมคติตามที่กำหนด จึงยังไม่เหมาะในการนำมา

จำหน่ายในท้องตลาด เพราะฉะนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ QDs จึงต้องการงานวิจัยเพื่อค้นหาวีสดุ เทคนิค หรือวิธีการสร้างแบบใหม่ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ตัวอย่างการนำ QDs มาประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่มากมาย ยกตัวอย่างเช่น Laghumavarapu และคณะ [34] ได้ปลูกชั้นควอนตัมดอท แกลเลียมแอนติโมไนด์ (Gallium Antimonide, GaSb) จำนวน 10 ชั้น ใส่ไว้ในเมตริกซ์ของ GaAs โดยโครงสร้างนี้สามารถขยายย่านความยาวคลื่นการตอบสนองทางแสงไกลถึง 1400 nm นอกจากนั้น Sablon และคณะ [36] ได้ใช้เทคนิคการปลูกควอนตัมดอท InAs ให้ไปฝังตัวอยู่ในชั้น AlGaAs ที่มีกำแพงศักย์สูง (High Potential Barrier) เรียกเทคนิคนี้ว่า DFENCE (Dots-in-a-fence) (ดูรูปที่ 8 (ก)) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (Short Circuit Current Density, J_{sc}) และแรงดันวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, V_{oc}) เพิ่มขึ้นสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท InAs มาตรฐาน จากกราฟคุณลักษณะความหนาแน่นกระแส-แรงดันพบว่าสำหรับโครงสร้าง DFENCE ได้ค่า J_{sc} และ V_{oc} ประมาณ 14 mA/cm² และ 0.65 V ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท InAs มาตรฐานที่ได้ค่า J_{sc} และ V_{oc} ประมาณ 13 mA/cm² และ 0.6 V ตามลำดับ (ดูรูปที่ 8 (ข)) แต่ประสิทธิภาพที่ได้ยังด้อยกว่าโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงแบบบัลค์ GaAs เพราะฉะนั้นโครงสร้างนี้จึงยังคงต้องถูกพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 8 (ก) ภาพโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท InAs ที่ใช้เทคนิคการฝัง QDs อยู่ในชั้น AlGaAs และ (ข) กราฟเปรียบเทียบคุณลักษณะความหนาแน่นกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 ชนิด นั่นคือ ชนิดที่ 1 แบบบัลค์ GaAs ชนิดที่ 2 ควอนตัมดอท InAs มาตรฐาน และชนิดที่ 3 ใช้เทคนิค DFENCE (ดัดแปลงจาก [36])

3.3 ควอนตัมดอทเซนซิไทซ์ (Quantum Dots-Sensitized)

จากความสามารถในการกักเก็บแสงของ QDs จึงเกิดการนำ QDs มาประยุกต์ใช้เป็นตัวเซนซิไทซ์แทนดายนในเซลล์แสงอาทิตย์ดายนเซนซิไทซ์ จึงอาจเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ว่าเป็น เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเซนซิไทซ์ (QDs-sensitized Solar Cells, QDSSCs) ความแตกต่างระหว่าง QDSSCs และ DSSCs หลัก ๆ คือ 1) ระดับการดูดกลืนทวิคูณของสารกึ่งตัวนำ QDs 2) อาจใช้ไอเล็กโทรไลต์ต่างกัน และ 3) ประสิทธิภาพการกักพาหะของสารกึ่งตัวนำ QDs [37-39]

โครงสร้างของ QDSSCs เริ่มต้นด้วยชั้นของแก้วใสเคลือบด้วย TCO ที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดนำไฟฟ้าขั้วบวกหรือแอโนด (Anode) ต่อมาคือชั้นโพโตอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยออกไซด์สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง โดยทั่วไปแล้วจะใช้ออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO₂) ต่อไปเคลือบด้วย QDs จะทำให้ QDs ไปเกาะด้วยพันธะเคมีกับ TiO₂ ต่อมาทับด้วยแผ่นชั้นแก้วใสที่นำไปเคลือบ TCO ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบหรือแคโทด (Cathode) และเคลือบด้วยชั้นเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด สุดท้ายนำแก้วใสมาวางทับด้านบนเซลล์ แล้วฉีดยาไอเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวเข้าไป [39,40] รูปโครงสร้างดังรูปที่ 9 QDSSCs มีหลักการทำงานเหมือน DSSCs คือเมื่อมีแสงเข้ามาแสงหรือโฟตอนจะกระทบกับ QDs ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกไปเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลแล้วกระโดดข้ามผ่าน TiO₂ เข้าสู่แอโนด ต่อมาอิเล็กตรอนจะไหลผ่านตัวนำภายนอกเข้าไปที่แคโทด หลังจากนั้นไอโอดีน (Iodide) ในสารละลายไอเล็กโทรไลต์จะเป็นสื่อกลาง (Mediator) นำอิเล็กตรอนเข้าไปเติมที่ว่างที่เป็นโฮลใน QDs [41,42]

มีรายงานการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ QDSSCs อาทิเช่น Lee และคณะ [41] ได้ทดลองนำ QDs หลายชนิด นั่นคือ แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide, CdS) แคดเมียมเซเลไนด์ (Cadmium Selenide, CdSe) และซินซ์ซัลไฟด์ (Zinc Sulfide, ZnS) นำมาใช้เป็นตัวเซนซิไทซ์ร่วมกับ TiO₂ พบว่ามีประสิทธิภาพอยู่ที่ 3.9% ในปัจจุบันพบว่า QDSSCs ที่สร้างได้จริงมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่เพียง 7% [42] ซึ่งน้อยกว่าประสิทธิภาพของ DSSCs ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 11.9%

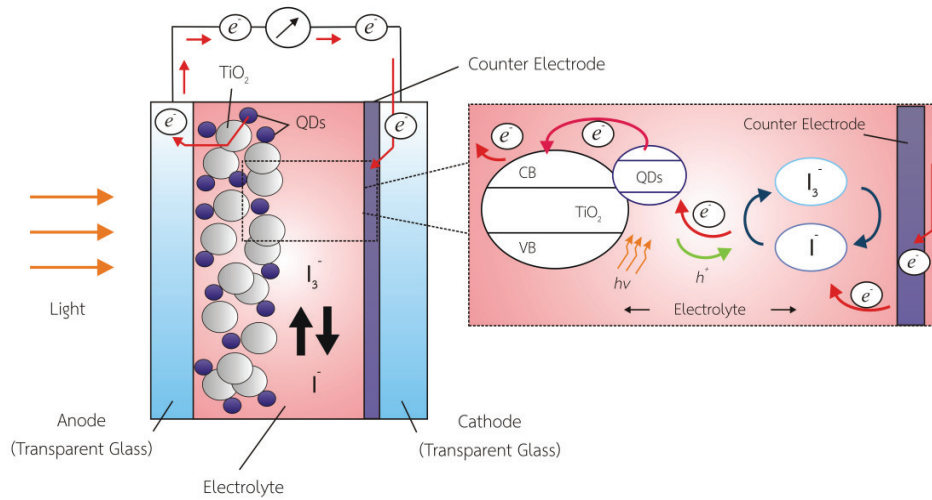
3.4 ชนิดใหม่: กราฟีน และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (New Materials: Graphene and Carbon Nanotube)

วัสดุชนิดใหม่ของคาร์บอนที่เพิ่งค้นพบไม่นาน นั่นคือ กราฟีน และคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างออกไป ยกตัวอย่างเช่น มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นศูนย์ มีคุณสมบัติกึ่งนำไฟฟ้า (Semi-conductivity) มีความคล่องตัวของพาหะสูง นอกจากนั้นมีความโปร่งแสงและทนทานต่อแรงดึงสูง [43,44] ในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงวัสดุคาร์บอนสองชนิด คือ กราฟีน และ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งใช้เป็นวัสดุหลักและเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเพิ่มสมรรถนะของเซลล์ให้ดีขึ้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 กราฟีน (Graphene)

กราฟีน คือ แผ่นคาร์บอนที่บางมาก ๆ มีความหนาแค่ 1 ชั้นอะตอม และมีโครงสร้างเหมือนรังผึ้ง ดังรูปที่ 10 (ก) สังเคราะห์



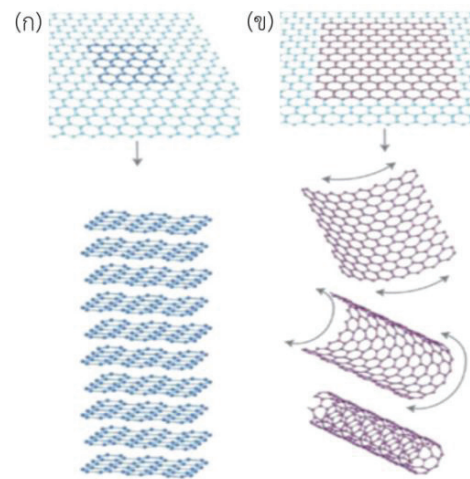
รูปที่ 9 แผนภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ QDSSCs ซึ่งเหมือนกับ DSSCs [40]

สำเร็จขึ้นครั้งแรกโดย Novoselov และคณะในปี ค.ศ. 2004 [45] กราฟีนมีคุณสมบัติเด่น นั่นคือ มีความโปร่งแสงสูง [46] มีความยืดหยุ่น [47] นอกจากนั้นกราฟีนยังมีความนำไฟฟ้าและแข็งแรงสูงอีกด้วย [48] ในการประยุกต์กับเซลล์แสงอาทิตย์นั้น กราฟีนมักจะถูกนำมาใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ รวมถึงลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ [45-47] ยกตัวอย่างเช่น Tripathi และคณะ [49] ได้นำกราฟีนมาใช้ร่วมกับแพลทินัม (Platinum, Pt) ที่เป็นส่วนแคโทดอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 11 (ก) ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากการใช้แคโทดอิเล็กโทรด Pt อยู่ประมาณ 0.83% นอกจากนั้น Li และคณะ [50] ได้ทดลองนำกราฟีนมาใช้เป็นสารชนิดที่สร้างทับอยู่บนแผ่นฐาน Si ชนิดเอ็น เพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 11 (ข) พบว่าโครงสร้างนี้สามารถกำเนิดไฟฟ้าได้เช่นกัน ซึ่งได้ประสิทธิภาพประมาณ 1.7%

3.4.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNTs)

คาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ อัลลอย (Allotropes) หนึ่งของคาร์บอนเช่นเดียวกับกราฟีน แต่มีความแตกต่างตรงที่รูปร่างของ CNTs มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 นาโนเมตร ดังรูปที่ 10 (ข) คุณสมบัติของมันเป็นที่น่าสนใจมาก พบว่ามีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) สูงกว่า 1 TPa (สำหรับเพชรมีค่า 1.2 TPa) และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักมากกว่าเหล็กถึง 10-100 เท่า [51] นอกจากนั้น CNTs ยังมีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (Direct Bandgap) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวบ์ โดยที่เราสามารถขยายย่านระดับพลังงานของมัน เพื่อการตอบสนองทาง

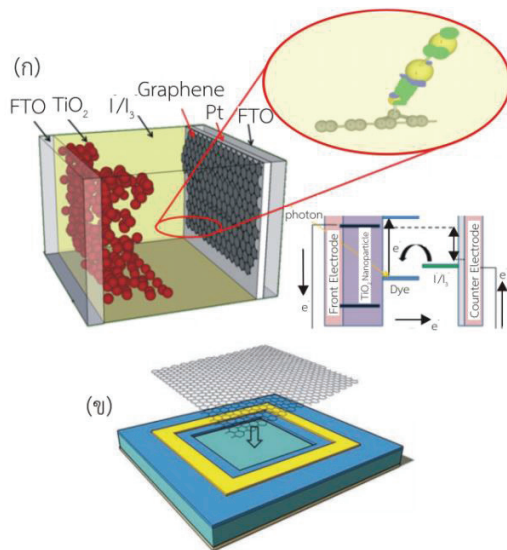
แสงในย่านที่กว้างได้ โดยการผสม CNTs หลาย ๆ ขนาดเข้าด้วยกัน [52]



รูปที่ 10 วัสดุโครงสร้างนาโนของคาร์บอน (ก) กราฟีน และ (ข) คาร์บอนนาโนทิวบ์ [45]

CNTs มักจะถูกนำมาประยุกต์ใน DSSCs เช่นเดียวกับกราฟีน โดยมีการนำ CNTs ไปแทนแคโทดอิเล็กโทรด Pt ปี ค.ศ. 2010 Zhang และคณะ [53] นำ CNTs แบบดับเบิลวอลล์ (Double-wall) มาใช้เป็นแคโทดอิเล็กโทรดพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มีประสิทธิภาพ 6% ซึ่งน้อยกว่าการใช้แคโทดอิเล็กโทรด Pt อยู่ประมาณ 0.8% เช่นเดียวกับ Ramasamy และคณะ [54] ได้นำ CNTs แบบมัลติวอลล์ (Multi-wall) ดังรูปที่ 12 ไปเคลือบบนแผ่นแก้ว FTO (Fluorine-doped Tin Oxide) ช่วย

เพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ทำให้ประสิทธิภาพสูงถึง 7.59% หรือแม้แต่ K. Lee และคณะ [55] และ T. Y. Lee และคณะ [56] ได้ทดลองนำ CNTs แบบมัลติวอลล์ ไปใช้ร่วมกับ TiO_2 ใน DSSCs ซึ่งทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ 5.15% และ 4.97% ตามลำดับ

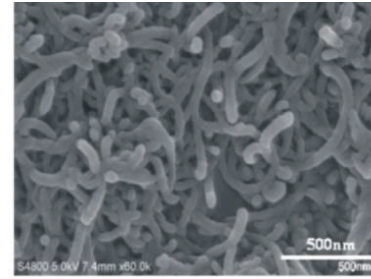


รูปที่ 11 เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำกราฟีน (ก) มาใช้ร่วมกับ Pt เป็นส่วนแคโทดรีดอกซ์ในเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs [49] และ (ข) แทนสารชนิดที่ [50]

4. แนวคิดของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Solar Cell Concept)

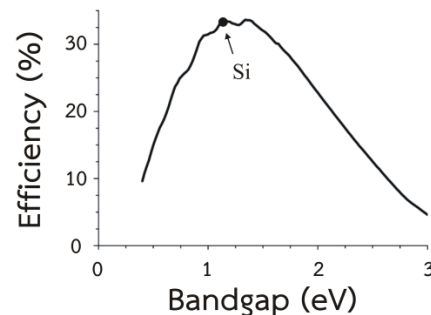
4.1 ข้อจำกัดของ Shockley-Queisser (Shockley-Queisser Limit)

ในปี ค.ศ. 1961 Shockley และ Queisser [6] ได้คำนวณประสิทธิภาพโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเดียวของ Si ที่มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.12 eV พบว่าประสิทธิภาพถูกจำกัดโดย 3 ปัจจัยหลัก กล่าวคือ (1) โดยการสูญเสียไปเป็นความร้อนประมาณ 47% เนื่องจากโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (2) โฟตอนประมาณ 18% ทะลุผ่านเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ถูกดูดกลืนเนื่องจากมีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน และ (3) การสูญเสียอื่น ๆ เช่น การรวมตัวอีกครั้ง (Recombination) เป็นต้น มีค่าประมาณ 2% เพราะฉะนั้นในส่วนที่เหลือโฟตอนจะถูกดูดกลืนเข้าไปในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดไม่เกิน 33% ดังรูปที่ 13 โดยเป็นค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ขึ้นกับค่าช่องว่างพลังงานตามข้อจำกัดของ Shockley-Queisser [6]



รูปที่ 12 คาร์บอนนาโนทิวแบบมัลติวอลล์ในเซลล์แสงอาทิตย์คายินเซนซีไทซ์เป็นแคโทดรีดอกซ์ [54]

ข้อจำกัดของ Shockley-Queisser ได้ถูกนำมาเป็นเกณฑ์อ้างอิงเพื่อคิดค้นเทคนิคใหม่ ๆ ยกตัวอย่างเช่น การนำโครงสร้างนาโนมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ (หัวข้อที่ 3) การใช้เซลล์แสงอาทิตย์หลายรอยต่อ การใช้เซลล์แสงอาทิตย์แถบพลังงานตัวกลาง (หัวข้อที่ 4.2) และเซลล์แสงอาทิตย์ฮอทดแคเรียร์ (หัวข้อที่ 4.3) ซึ่งสามารถทำให้ประสิทธิภาพสูงเกินกว่าข้อจำกัดนี้ได้ในทางทฤษฎี



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสูงสุดและช่องว่างพลังงานตามข้อจำกัดของ Shockley-Queisser [6,57]

4.2 เซลล์แสงอาทิตย์แถบพลังงานตัวกลาง (Intermediate Band Solar Cell, IBSC)

แนวคิดหลักของเซลล์แสงอาทิตย์แถบพลังงานตัวกลางคือ ทำให้โฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุในเซลล์แสงอาทิตย์ถูกดูดกลืนได้ การทำงานคล้ายเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหลายรอยต่อ แต่ในกรณีแถบพลังงานตัวกลางนั้น การดูดกลืนโฟตอนจะเกิดขึ้นในรอยต่อเดียว โดยก่อตัวเป็นลักษณะแถบพลังงานย่อย (Sub-band) อยู่ตรงกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งโฟตอนจะถูกดูดกลืนในแต่ละแถบพลังงานย่อยนี้ [58-60]

ในทางปฏิบัตินิยมนำ QDs มาสร้างแถบพลังงานตัวกลางมากที่สุด โดยการปลูกให้มีความหนาแน่นสูงและหลายชั้น [60-62] ตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของ IBSC ประกอบไปด้วยอาเรย์ของ QDs หลายชั้นดังรูปที่ 14 อาเรย์ของ QDs จะอยู่ตรงกลางแล้วถูกประกบด้วยชั้นรอยต่อพีและเอ็น โครงสร้างนี้มีการเพิ่มขึ้นเปลี่ยน

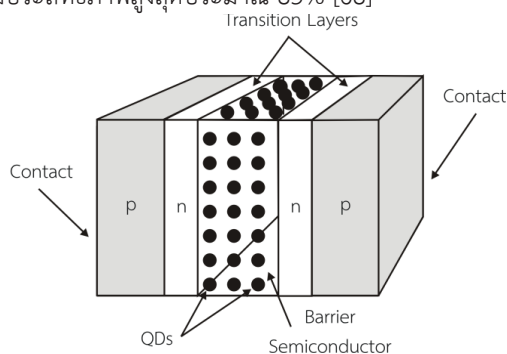
ผ่าน (Transition Layers) เอ็นและพีขนาดบาง ๆ จากโครงสร้างเดิมที่มีแคชชั่นพีและเอ็นซึ่งติดอยู่กับหน้าสัมผัส เพื่อลดผลของการเติมเต็มอิเล็กตรอนของชั้น QDs ที่อยู่ใกล้รอยต่อ [58]

Brown และคณะ [63] ได้วิเคราะห์ IBSC ในทางทฤษฎีของกรณีแถบพลังงานย่อย 3 แถบ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุด 63.2% และกรณีมีแถบพลังงานย่อย 4 แถบ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุด 71.7% ต่อมา Green [64] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลของแถบพลังงานย่อยเทียบกับกรณีหลายรอยต่อ พบว่าเมื่อแถบพลังงานย่อยมีจำนวนอนันต์ทำให้ประสิทธิภาพของ IBSC สูงสุดอยู่ที่ 86.8% ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์หลายรอยต่อ

4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ฮอตแคริเออร์ (Hot Carrier Solar Cell, HCSC)

โดยทั่วไปแล้วโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (เรียกว่า “Hot Electron”) ซึ่งเกิดจากโฟตอนตกกระทบที่มีพลังงานสูง ส่งผ่านพลังงานส่วนเกินไปยังผลึกในโหมดการสั่น เรียกว่า โฟนอน (Phonon) [65] โฟนอนทำให้เกิดความร้อน เพราะฉะนั้นพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์ [66,67]

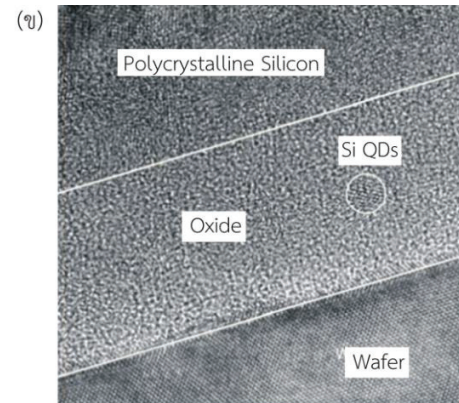
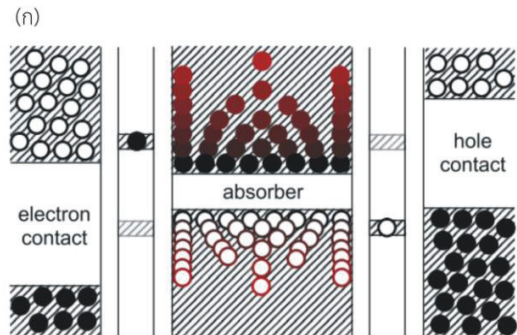
แนวคิดหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ HCSC คือ การลดพลังงานสูญเสียเหล่านี้โดยการแยกพาหะที่มีพลังงานสูงออกก่อนที่จะกลายเป็นความร้อน ดังรูปที่ 15 (ก) โดยใช้หน้าสัมผัสการแยกพลังงาน (Energy Selective Contact, ESC) ที่นิยามสร้างโดยโครงสร้างเรโซแนนซ์ทันเนลลิง (Resonant Tunnelling) [65,66] โดยการเจือระดับสูงในชั้นพีและเอ็น แนวคิดนี้ต้องการตัวดูดกลืน (Absorber) ที่มีการหน่วงเวลาของอิเล็กตรอนและเส้นทางแคบที่ให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเดินทางออกไป ซึ่งสามารถสร้างได้จาก QDs [67] ตัวอย่างโครงสร้างที่ใช้ได้จริงดังรูปที่ 15 (ข) ที่ปลูกควอนตัมดอท Si เป็นตัวดูดกลืน ในการทำนายทางทฤษฎีประสิทธิภาพสูงสุดของ HCSC เมื่อไม่ใช้ระบบรวมแสงมีประมาณ 65% ในกรณีช่องว่างแถบพลังงาน 0.7 eV และเมื่อใช้ระบบรวมแสงมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 85% [68]



รูปที่ 14 โครงสร้างพื้นฐานของ IBSC ประกอบด้วยอาร์เรย์ของ QDs หลายชั้น ถูกประกบด้วยชั้นรอยต่อพีและเอ็น [59]

5. การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโน (Nanostructure Solar Cells Development Guideline)

ในหัวข้อนี้มุ่งเน้นอธิบายแนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนในประเทศไทย โดยเจาะจงไปที่โครงสร้างควอนตัมดอทเป็นหลัก ซึ่งเริ่มต้นจากการอธิบายผลของคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทก่อนเพื่อให้เห็นถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และในส่วนสุดท้ายได้ยกตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเพื่อให้เห็นถึงภาพรวมของงานวิจัยของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ในประเทศไทย



รูปที่ 15 (ก) แผนภาพพื้นฐานของ HCSC ที่หน่วงเวลาการเปลี่ยนเป็นความร้อนของอิเล็กตรอนในส่วนการดูดกลืน และแยกพาหะที่มีพลังงานสูงออกจากกันด้วย ESC [69] และ (ข) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่แสดงควอนตัมดอท Si ซึ่งประพืดตัวเป็นตัวดูดกลืนโดยอยู่ระหว่างโครงสร้างบัลค์ Si ที่มีการเจือสูง [65]

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท (Physical Characteristics: QDs Solar Cell Case)

5.1.1 ขนาด (Size)

ขนาดของ QDs มีผลต่อย่านการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง นั่นคือ เมื่อขนาดของ QDs มีขนาดใหญ่ขึ้น ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าแคบลง [70-72] คุณสมบัตินี้เป็นข้อดีแบบหนึ่งซึ่งทำให้สามารถปรับแต่งย่านการดูดกลืนให้เหมาะสมได้

อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของ QDs ลดต่ำลง ความสามารถในการกักเก็บพาหะของปรากฏการณ์กักเก็บทางควอนตัมจะลดต่ำลงเช่นเดียวกัน [73] และอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บแสงของ QDs เพราะฉะนั้นจึงต้องสร้าง QDs ให้มีขนาดเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้งาน ในกรณีของ IBSC ที่นำ QDs มาสร้างเป็นอาเรียเพื่อให้ก่อตัวเป็นแถบพลังงานตัวกลาง Marti [74] ได้คำนวณโดยใช้การประมาณมวลประสิทธิผล (Effective Mass Approximation) เพื่อหาขนาดของ QDs ที่เหมาะสมใน IBSC พบว่าควรมีขนาดประมาณ 4 นาโนเมตรสำหรับ InAs QDs ในเมตริกซ์ของ GaAs

5.1.2 ความหนาแน่นของดอท (Density of Dots)

ความหนาแน่นเกิดจากระยะห่างระหว่างแต่ละ QDs โดยปกติแล้วควรมีระยะห่างน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนโฟตอนให้มากยิ่งขึ้น แต่ในทางปฏิบัติความหนาแน่นของ QDs ที่สร้างได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 10^9 – 10^{11} cm^{-2} [34-36] ซึ่งน้อยเกินไปในการเพิ่มประสิทธิภาพให้เซลล์แสงอาทิตย์ มีหลายเทคนิคในการเพิ่มความหนาแน่นของ QDs ให้สูงกว่า 10^{11} cm^{-2} ยกตัวอย่างเช่น Zhou และคณะ [75] ได้ปลูกควอนตัมดอท InAs ได้ความหนาแน่นสูงสุดประมาณ 1.4×10^{11} cm^{-2} โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 460-470 °C หรือ Jo และคณะ [76] ได้ใช้เทคนิคดรอปเลตเอพิแทกซี (Droplet Epitaxy) ปลูกควอนตัมดอท GaAs ได้ความหนาแน่น 7.3×10^{11} cm^{-2}

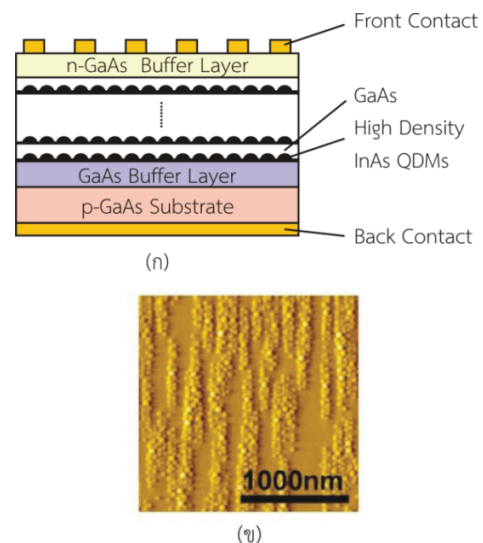
5.1.3 ตำแหน่งและความสม่ำเสมอ (Position and Regularity)

ตำแหน่งของชั้น QDs ต้องถูกวางไว้ในโครงสร้างที่ส่วนชั้นไอ (ชั้นตรงกลางสำหรับโครงสร้างพีไอเอ็นที่ไม่มีกระแส) ได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากในชั้นนี้ไม่เกิดการรวมตัวอีกครั้งในลักษณะการรวมที่ไม่เปล่งแสง (Nonradiative Recombination) ซึ่งสุดท้ายจะทำให้เกิดเป็นความร้อน [77] ความไม่สม่ำเสมอในขนาดของ QDs ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโน Marti และคณะ [59] อธิบายว่าความไม่สม่ำเสมอของ QDs ส่งผลต่อ IBSC ใน 2 ทาง นั่นคือ 1) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของแถบพลังงานตัวกลางควรกว้างขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อการดูดกลืนโฟตอน และ 2) อัตราการรวมตัวอีกครั้งของพาหะจะเพิ่มขึ้น

5.1.4 ชั้นการปลูก (Growth Layer)

กระบวนการปลูกในโหมด Stranski-Krastanov ทำให้ QDs สามารถเกิดขึ้นเองจากผลการคลายความเครียดอัด (Compressive Strain) ที่เกิดจากความแตกต่างของค่าคงตัวโครงผลึก (Lattice) ระหว่างสาร เช่น การปลูกควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐาน GaAs เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อปลูกชั้น QDs หลายชั้นโดยทั่วไปแล้วมากกว่า 10 ชั้น มีผลให้ความเครียดสะสมเพิ่มสูงขึ้น

[78] จึงกลายเป็นปัจจัยหนึ่งในการลดสมรรถนะของ QDs การลดความเครียดสะสมเหล่านี้ทำได้โดยการเพิ่มชั้นขดเชยความเครียด ซึ่งเป็นชั้นที่ก่อให้เกิดความเครียดตึง (Tensile Strain) ผลของชั้นนี้ทำให้ความเครียดทั้งสองเกิดการหักล้างกัน ความเครียดสะสมจึงน้อยลง [79,80]



รูปที่ 16 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทโมเลกุล InAs (ก) โครงสร้าง และ (ข) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของควอนตัมดอทโมเลกุลที่ใช้เทคนิคการปลูกกลบบางและปลูกซ้ำจำนวน 5 รอบ [86]

5.1.5 อุณหภูมิ (Temperature)

ปัญหาหลักในการลดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ความร้อนบนแผงเซลล์ ซึ่งเกิดได้จากโฟตอนที่มีพลังงานสูงเกินไปเปลี่ยนเป็นความร้อน คุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนไปเนื่องจากผลของความร้อน นั่นคือ (1) ช่องว่างแถบพลังงานแคบลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (2) เวลาชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime) เพิ่มขึ้น และ (3) แรงดันภายใน (Built-in Voltage) รวมถึงพลังงานศักย์ลดลง [81] ผลที่เกิดขึ้นค่า V_{oc} จะลดลงและค่า J_{sc} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [82] ค่า V_{oc} ที่ลดลงมากกว่าการเพิ่มของ J_{sc} ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง ผลของอุณหภูมิต่อเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐาน แต่แตกต่างกันในด้านโครงสร้างที่เมื่อเพิ่มชั้น QDs ลงไปในโครงสร้าง พบว่าค่า V_{oc} จะมีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่มี QDs [83]

5.2 การวิจัยและพัฒนาในประเทศไทย (Research and Development in Thailand)

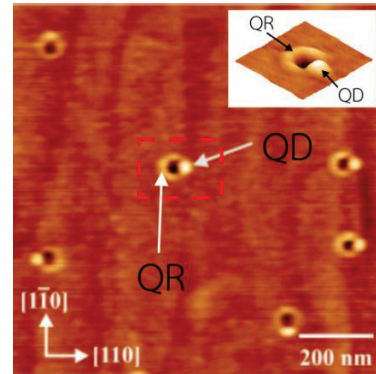
ในประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนหลายชนิด แต่มีเพียงแค่บางโครงสร้างเท่านั้นที่ได้รับความนิยมในการวิจัยและมีการตีพิมพ์เผยแพร่ออกปอย่างกว้างขวาง นั่นคือ โครงสร้าง QDs แบบสถานะของแข็ง [84-87]

รวมถึงการประยุกต์ใช้ CNTs และ QDs เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ DSSCs [88-91]

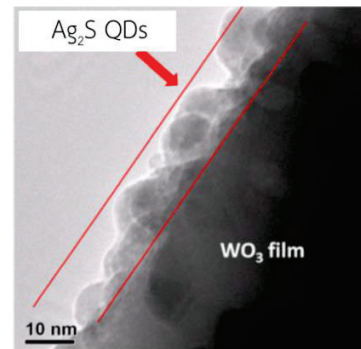
สำหรับโครงสร้าง QDs แบบสถานะของแข็งนั้นมีการวิจัยมากกว่า 15 ปีแล้ว นับตั้งแต่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ติดตั้งเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ยกตัวอย่างเช่น Songmuang และคณะ [84] ได้ปลูกควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐาน GaAs ได้ความหนาแน่นของ QDs ประมาณ $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ เท่านั้น ซึ่งน้อยเกินไปในการนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของ QDs ในปี ค.ศ. 2005 Suraprapapich และคณะ [85] ได้พัฒนาเทคนิคการปลูกควอนตัมโมเลกุล (Quantum Dot Molecules) โดยใช้เทคนิคปลูกกลบางและปลูกซ้ำจากควอนตัมดอทธรรมดาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของควอนตัมดอทให้สูงขึ้น จากแนวคิดนี้ก็ได้มา Ruangdet และคณะ [86] ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทโมเลกุล InAs ที่มีโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 16 (ก) ซึ่งมีการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลหลายชั้นไว้ในโครงสร้าง โดยเห็นได้อย่างชัดเจนจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) ดังรูปที่ 16 (ข) โครงสร้างนี้จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท InAs ธรรมดา เพราะมีความหนาแน่นของ QDs มากกว่า จึงทำให้ผลของการดูดกลืนของ QDs เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นในปี ค.ศ. 2015 Kunruga และคณะ [87] ได้ทดลองปลูกโครงสร้างควอนตัมอีกรูปแบบหนึ่ง นั่นคือ ควอนตัมริง-กับ-ดอท (Quantum Ring-with-Dot, QRDS) ของ GaSb บนแผ่นฐาน GaAs ด้วยเทคนิคการปลูกแบบหยด (Droplet Epitaxy) ดังรูปที่ 17 จากโครงสร้างลักษณะนี้ทำให้ยานการดูดกลืนและการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณลักษณะทางแสงที่ได้จะเกิดขึ้นจากผลรวมของทั้งควอนตัมดอทและควอนตัมริง

สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ DSSCs ในประเทศไทยได้มีการนำ CNTs มาใช้แทนแคโทดอิเล็กโทรดซึ่งเหมือนกับงานวิจัยในต่างประเทศ ยกตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 2012 Siriroj และคณะ [88] เสนอวิธีการสังเคราะห์ CNTs ด้วยวิธีการเคลือบแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Deposition) ที่ทำให้ได้พื้นที่การนำไฟฟ้ากว้าง ใช้ต้นทุนการสร้างต่ำ และมีความบริสุทธิ์ทางโครงสร้างสูง พบว่าการสังเคราะห์ CNTs บน FTO ด้วยเทคนิคนี้ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 7.66% ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้แคโทดอิเล็กโทรดแบบ Pt นอกจากนั้นได้มีบางกลุ่มวิจัยสังเคราะห์ QDs มาใช้เป็นตัวเซนซิไทเซอร์แทนดาเยนใน DSSCs ยกตัวอย่างเช่น ในปี 2014 Tubtimtae [91] ได้ทดลองสังเคราะห์ควอนตัมดอทซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver Sulfide, Ag_2S) โดยเคลือบอยู่บนอิเล็กโทรดแบบ

ใหม่ นั่นคือ ทังสเตนไตรออกไซด์ (Tungsten Trioxide, WO_3) ดังรูปที่ 18 พบว่ามีค่าความแตกต่างของพลังงานของแถบนำกระแส (Conduction Band) สูงกว่าการใช้อิเล็กโทรดด้วย TiO_2 โดยสุดท้ายได้ประสิทธิภาพมากที่สุดอยู่ที่ 0.53%



รูปที่ 17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามมิติแสดงภาพของควอนตัมริง-กับ-ดอท ซึ่งปลูกโดยใช้เทคนิคการปลูกแบบหยด และภาพย่อยได้แสดงรูปขยายของโครงสร้างนี้ (ดัดแปลงจาก [87])



รูปที่ 18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงภาพด้านข้างของชั้นควอนตัมดอท Ag_2S เคลือบอยู่บนอิเล็กโทรด WO_3 [91]

6. สรุป (Conclusion)

บทความปริทัศน์นี้ได้ทบทวนภาพรวมของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ยุค นั่นคือ (1) ยุคที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นจากซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ (2) เซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง และ (3) เซลล์แสงอาทิตย์สมัยใหม่ ซึ่งเน้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้โครงสร้างนาโนเป็นพิเศษ นั่นคือ โครงสร้างควอนตัมเวลล์ ควอนตัมดอท ควอนตัมดอทเซนซิไทเซอร์ กราฟีน และคาร์บอนนาโนทิวบ์ รวมถึงได้ยกตัวอย่างการนำโครงสร้างนาโนมาใช้งานร่วมกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากในทางทฤษฎีการประยุกต์ใช้โครงสร้างเหล่านี้สามารถทำให้เราสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงเกินกว่าข้อจำกัดของ Shockley-Queisser ของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเดี่ยว อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนที่สร้างได้จริงยัง

มีค่าไม่มากนัก นอกจากนี้บทความนี้ยังได้อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างควอนตัมดอท ซึ่งเป็นโครงสร้างนาโนที่กำลังได้รับความสนใจโครงสร้างหนึ่ง เป็นส่วนหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากยิ่งขึ้น ในส่วนสุดท้ายได้ยกตัวอย่างการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนาโนในประเทศไทย เพื่อให้เห็นตัวอย่างงานวิจัยที่ได้รับความนิยม รวมถึงทิศทางการพัฒนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่นี้ภายในประเทศ

7. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

บทความฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้เขียนขอขอบคุณการสนับสนุนจากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] E. Topal, and S. Shafiee, "When will fossil fuel reserves be diminished?," *Energy Policy* 37 (2009) 181-189.
- [2] Z. Abidin, M. A. Alim, R. Saidur, M. R. Islam, W. Rashmi, S. Mekhilef, and A. Wadi, "Solar energy harvesting with the application of nanotechnology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (2013) 837-852.
- [3] บริษัท เทคตรอน จำกัด. ผลิตภัณฑ์แผงเซลล์แสงอาทิตย์. Available: http://www.techtron.co.th/Product_Solarmodule.htm
- [4] T. Nozawa, and Y. Arakawa, "Detailed balance limit of the efficiency of multilevel intermediate band solar cells," *Applied Physics Letters* 98 (2011) 171108.
- [5] M. A. Green, "Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion," *Physics Today* 57 (2004) 71-72.
- [6] W. Shockley, and H. J. Queisser, "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells," *Journal of Applied Physics* 32 (1961) 510-519.
- [7] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Research Cell Efficiency Record; 2014 [cited 20.11.14]. Available: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- [8] T. M. Razykov, C. S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. S. Ullal, and H. M. Upadhyaya, "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects," *Solar Energy* 85 (2011) 1580-1608.
- [9] A. A. Yaroshevsky, "Abundances of chemical elements in the earth's crust," *Geochemistry International* 44 (2006) 48-55.
- [10] V. V. Tyagi, N. A. A. Rahim, N. A. Rahim, A. Jeyraj, and L. Selvaraj, "Progress in solar PV technology: Research and achievement," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013) 443-461.
- [11] J. Zhao, A. Wang, and M. A. Green, "High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65 (2001) 429-435.
- [12] L. A. Dobrzanski, A. Drygata, M. Giedroc, and M. Macek, "Monocrystalline silicon solar cells applied in photovoltaic system," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 53 (2012) 7-13.
- [13] Z. Abidin, M. A. Alim, R. Saidur, M. R. Islam, W. Rashmi, S. Mekhilef, and A. Wadi, "Solar energy harvesting with the application of nanotechnology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (2013) 837-852.
- [14] K. Tanabe, K. Watanabe, and Y. Arakawa, "Flexible thin-film InAs/GaAs quantum dot solar cells," *Applied Physics Letter* 100 (2012) 192102.
- [15] M. Wolf, "Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters. Part I: Considerations for earth's surface operation," in *Proc. 1960 The IRE Conf.*, pp. 1246-1263.
- [16] M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, and N. Ekins-Daukes, "Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential," *Solar Energy* 79 (2005) 78-85.
- [17] M. A. Green, "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 18 (2007) S15-S19.
- [18] A. Shah, *Practical Handbook of Photovoltaics: Chapter IC-1 Thin-Film Silicon Solar Cells*. Elsevier Ltd, 2012, pp. 209-281.
- [19] M. C. Beard, J. M. Luther, O. E. Semonin, and A. J. Nozik, "Third generation photovoltaics based on multiple exciton generation in quantum confined semiconductors," *Accounts of Chemical Research* 46 (2013) 1252-1260.
- [20] C. Weisbuch, and B. Vinter, *Quantum Semiconductor Structure: Fundamental and Applications*, 1st Edition. Academic Press, 1991.
- [21] N. E. Gorji, "A theoretical approach on the strain-induced dislocation effects in the quantum dot solar cells," *Solar Energy* 86 (2012) 935-940.
- [22] S. Surapapich, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow, "Quantum dot integration in heterostructure solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 2968-2974.
- [23] K. Laouthaiwattana, O. Tangmattajittakul, S. Surapapich, S. Thainoi, P. Changmuang, S. Kanjanachuchai, S. Ratanathamaphan, and S. Panyakeow, "Optimization of stacking high-density quantum dot molecules for photovoltaic effect," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 746-749.
- [24] K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, and Y. Arakawa, "High-efficiency InAs/GaAs quantum dot solar cells by metalorganic chemical vapor deposition," *Applied Physics Letters* 100 (2012) 193905.

- [25] L. L. Tobin, T. O' Reilly, D. Zerulla, and J. T. Sheridan, "Characterising dye-sensitized solar cells," *Optik* 122 (2011) 1225-1230.
- [26] E. L. Wolf, *Quantum Nanoelectronics: An introduction to electronic nanotechnology and quantum computing*. Wiley-VCH, 2009.
- [27] P. Moriarty, "Nanostructured materials," *Reports on Progress in Physics* 64 (2001) 297-381.
- [28] N. J. Ekins-Daukes, J. M. Barnes, K. W. J. Barnham, J. P. Connolly, M. Mazzer, J. C. Clark, R. Grey, G. Hill, M. A. Pate, and J. S. Roberts, "Strain and strain-balanced quantum well devices for high-efficiency tandem solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 68 (2001) 71-87.
- [29] T. Noda, L. M. Otto, M. Jo, T. Mano, T. Kawazu, L. Han, and H. Sakaki, "GaAs/AlGaAs quantum wells with indirect-gap AlGaAs barriers for solar cell applications," *Applied Physics Letters* 104 (2014) 122102.
- [30] W. D. Goodhue, "Using molecular-beam epitaxy to fabricate quantum-well device," *The Lincoln Laboratory Journal* 2 (1989) 183-205.
- [31] D. B. Bushnell, T. N. D. Tibbits, K. W. J. Barnham, J. P. Connolly, and M. Mazzer, "Effect of well number on the performance of quantum-well solar cells," *Journal of Applied Physics* 97 (2005) 124908.
- [32] S. Tarucha, D. G. Austing, T. Honda, R. V. D. Hage, and L. P. Kouwenhoven, "Atomic-Like properties of semiconductor quantum dots," *Japanese Journal of Applied Physics* 36 (1997) 3917-3923.
- [33] D. Guimard, R. Morihara, D. Bordel, K. Tanabe, Y. Wakayama, M. Nishioka, and Y. Arakawa, "Fabrication of InAs/GaAs quantum dot solar cells with enhanced photocurrent and without degradation of open circuit voltage," *Applied Physics Letters* 96 (2010) 203507.
- [34] R. B. Laghumavarapu, A. Moscho, A. Khoshakhlagh, M. El-Emawy, L. F. Lester, and D. L. Huffaker, "GaSb/GaAs type II quantum dot solar cells for enhanced infrared spectral response," *Applied Physics Letters* 90 (2007) 173125.
- [35] X. Yang, K. Wang, Y. Gu, H. Ni, X. Wang, T. Yang, and Z. Wang, "Improved efficiency of InAs/GaAs quantum dots solar cells by Si-doping," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 113 (2013) 144-147.
- [36] K. A. Sablon, J. W. Little, K. A. Olver, Z. M. Wang, V. G. Dorogan, Y. I. Mazur, G. J. Salamo, and F. J. Towner, "Effects of AlGaAs energy barriers on InAs/GaAs quantum dot solar cells," *Journal of Applied Physics* 108 (2010) 074305.
- [37] G. Hodes, "Comparison of dye- and semiconductor-sensitized porous nanocrystalline liquid junction solar cells," *The Journal of Physical Chemistry C* 112 (2008) 17778-17787.
- [38] I. Hod, V. Gonzalez-Pedro, Z. Tachan, F. Fabregat-Santiago, I. Mora-Sero, J. Bisquet, and A. Zaban, "Dye versus quantum dots in sensitized solar cells: Participation of quantum dot absorber in the recombination process," *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2 (2011) 3032-3035.
- [39] J. Tian, and G. Cao, "Semiconductor quantum dot-sensitized solar cells," *Nano Reviews* 4 (2013) 1-8.
- [40] M. Kouhnavard, S. Ikeda, N. A. Ludin, N. B. Ahmad Khairudin, B. V. Ghaffari, M. A. Mat-Teridi, M. A. Ibrahim, S. Sepeai, and K. Sopian, "A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (2014) 397-407.
- [41] H. J. Lee, J. Bang, J. Park, S. Kim, and S. Park, "Multilayered semiconductor (CdS/CdSe/ZnS)-sensitized TiO₂ mesoporous solar cells: All prepared by successive ionic layer adsorption and reaction process," *Chemistry of Materials* 22 (2010) 5636-5643.
- [42] H. Alexandar, M. T. Susanna, S. Hoogland, O. Voznyy, D. Zhitomirsky, R. Debnath, L. Levina, L. R. Rollny, G. H. Carey, A. Fischer, K. W. Kemp, I. J. Kramer, Z. Ning, A. J. Labelle, K. W. Chou, A. Amassian, and E. H. Sargent, "Hybrid passivated colloidal quantum dot solids," *Nature Nanotechnology* 7 (2012) 577-582.
- [43] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science* 321 (2008) 385-388.
- [44] G. V. Dubacheva, C. Liang, and D. M. Bassani, "Functional monolayers from carbon nanostructures – fullerenes, carbon nanotubes, and graphene – as novel materials for solar energy conversion," *Coordination Chemistry Reviews* 256 (2012) 2628-2639.
- [45] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science* 306 (2004) 666-669.
- [46] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, and A. K. Geim, "Fine structure constant defines visual transparency of graphene," *Science* 320 (2008) 1308.
- [47] A. Iwan, and A. Chuchmala, "Perspectives of applied graphene: Polymer solar cells," *Progress in Polymer Science* 37 (2012) 1805-1828.
- [48] S. J. Wang, Y. Geng, Q. Zheng, and J. Kim, "Fabrication of highly conducting and transparent graphene films," *Carbon* 48 (2010) 1815-1823.
- [49] B. Tripathi, P. Yadav, K. Pandey, P. Kanade, M. Kumar, and M. Kumar, "Investigating the role of graphene in the photovoltaic performance improvement of dye-sensitized solar cell," *Materials Science and Engineering B* 190 (2014) 111-118.

- [50] X. Li, H. Zhu, K. Wang, A. Cao, J. Wei, C. Li, Y. Jia, Z. Li, X. Li, and D. Wu, "Graphene-on-silicon schottky junction solar cells," *Advanced Materials* 22 (2010) 2743-2748.
- [51] E. T. Thostenson, Z. Ren, and T. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review," *Composites Science and Technology* 61 (2001) 1899-1912.
- [52] H. Zhu, J. Wei, K. Wang, and D. Wu, "Applications of carbon materials in photovoltaic solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 1461-1470.
- [53] D. W. Zhang, X. D. Li, S. Chen, F. Tao, Z. Sun, X. J. Yin, and S. M. Huang, "Fabrication of double-walled carbon nanotube counter electrodes for dye-sensitized solar cells," *Journal of Solid State Electrochemistry* 14 (2010) 1541-1546.
- [54] E. Ramasamy, W. J. Lee, D. Y. Lee, and J. S. Song, "Spray coated multi-wall carbon nanotube counter electrode for triiodide (I_3^-) reduction in dye-sensitized solar cells," *Electrochemistry Communications* 10 (2008) 1087-1089.
- [55] K. Lee, C. Hu, H. Chen, and K. Ho, "Incorporating carbon nanotube in a low-temperature fabrication process for dye-sensitized TiO_2 solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1628-1633.
- [56] T. Y. Lee, P. S. Alegaonkar, and J. Yoo, "Fabrication of dye sensitized solar cell using TiO_2 coated carbon nanotubes," *Thin Solid Films* 515 (2007) 5131-5135.
- [57] Wikipedia. Shockley-Queisser Limit [cited 5.12.14]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Shockley%E2%80%93Queisser_limit
- [58] Y. Okada, N. J. Ekins-Daukes, T. Kita, R. Tamaki, M. Yoshida, A. Pusch, O. Hess, C. C. Phillips, D. J. Farrell, K. Yoshida, N. Ahsan, Y. Shoji, T. Sogabe, and J. -F. Guillemoles, "Intermediate band solar cells: Recent progress and future directions," *Applied Physics Reviews* 2 (2015) 021302.
- [59] A. Marti, L. Cuadra, and A. Luque, "Design constraints of the quantum-dot intermediate band solar cell," *Physica E* 14 (2002) 150-157.
- [60] A. Marti, N. Lopez, E. Antolin, E. Canovas, C. Stanley, C. Farmer, L. Cuadra, and A. Luque, "Novel semiconductor solar cell structures: The quantum dot intermediate band solar cell," *Thin Solid Films* 511-512 (2006) 638-644.
- [61] L. Sang, M. Liao, Q. Liang, M. Takeguchi, B. Dierre, B. Shen, T. Sekiguchi, Y. Koide, and M. Sumiya, "A multilevel intermediate-band solar cell by $InGaN/GaN$ quantum dots with a strain-modulated structure," *Advanced Materials* 26 (2014) 1414-1420.
- [62] T. Li, R. E. Bartolo, and M. Dagenais, "Challenges to the concept of an intermediate band in $InAs/GaAs$ quantum dot solar cells," *Applied Physics Letters* 103 (2013) 141113.
- [63] A. S. Brown, M. A. Green, and R. P. Corkish, "Limiting efficiency for a multi-band solar cell containing three and four bands," *Physica E* 14 (2002) 121-125.
- [64] M. A. Green, "Multiple band and impurity photovoltaic solar cells: General theory and comparison to tandem cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 9 (2001) 137-144.
- [65] M. A. Green, G. Conibeer, D. Konig, S. Shrestha, S. Huang, P. Aliberti, L. Treiber, R. Patterson, B. P. Veetil, A. Hsieh, Y. Feng, A. Luque, A. Marti, P. G. Linares, E. Canovas, E. Antolin, D. F. Marron, C. Tablero, E. Hernandez, J. Guillemoles, L. Huang, A. Le Bris, T. Schmidt, R. Clady, and M. Tayebjee, "Hot carrier solar cells, challenges and recent progress," in *Proc. 2010 IEEE Photovoltaics Specialists Conf.*, pp. 57-60.
- [66] G. Conibeer, N. Ekins-Daukes, J. Guillemoles, D. Konig, E. Cho, C. Jiang, S. Shrestha, and M. A. Green, "Progress on hot carrier cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 713-719.
- [67] A. J. Nozik, "Spectroscopy and hot electron relaxation dynamics in semiconductor quantum wells and quantum dots," *Annual Review of Physical Chemistry* 52 (2001) 193-231.
- [68] P. Wurfel, "Solar energy conversion with hot electrons form impact ionisation," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 46 (1997) 43-52.
- [69] D. Konig, K. Casalenuovo, Y. Takeda, G. Conibeer, J. F. Guillemoles, R. Patterson, L. M. Huang, and M. A. Green, "Hot carrier solar cells: Principle, materials and design," *Physica E* 42 (2010) 2862-2866.
- [70] S. Baskoutas, and A. F. Terzis, "Size-dependent band gap of colloidal quantum dots," *Journal of Applied Physics* 99 (2006) 013708.
- [71] M. Kumar, M. K. Rajpalke, T. N. Bhat, B. Roul, A. T. Kalghatgi, and S. B. Krupanidhi, "Size dependent bandgap of molecular beam epitaxy grown InN quantum dots measured by scanning tunneling spectroscopy," *Journal of Applied Physics* 110 (2011) 114317.
- [72] K. H. Schmidt, G. Medeiros-Ribeiro, J. Garcia, and P. M. Petroff, "Size quantization effects in $InAs$ self-assembled quantum dots," *Applied Physics Letters* 70 (1997) 1727-1729.
- [73] E. O. Chukwuocha, M. C. Onyeaju, and T. S. T. Harry, "Theoretical studies on the effect of confinement on quantum dots using the Brus equation," *World Journal of Condensed Matter Physics* 2 (2012) 96-100.
- [74] A. Marti, L. Cuadra, and A. Luque, "Quantum dot intermediate band solar cell," in *Proc. 2000 IEEE Photovoltaics Specialists Conf.*, pp. 940-943.
- [75] D. Zhou, G. Sharma, S. F. Thomassen, T. W. Reenaas, and B. O. Fimland, "Optimization towards high density quantum dots for intermediate band solar cells grown by molecular beam epitaxy," *Applied Physics Letters* 96 (2010) 061913.
- [76] M. Jo, T. Mano, Y. Sakuma, and K. Sakoda, "Extremely high-density $GaAs$ quantum dots grown by droplet epitaxy," *Applied Physics Letters* 100 (2012) 212113.

- [77] D. Zhou, P. E. Vullum, G. Sharma, S. F. Thomassen, R. Holmestad, T. W. Reenaas, and B. O. Fimland, "Positioning effects on quantum dot solar cells grown by molecular beam epitaxy," *Applied Physics Letters* 96 (2010) 083108.
- [78] G. S. Solomon, J. A. Trezza, A. F. Marshall, and J. S. Harris Jr., "Vertically aligned and electronically coupled growth induced InAs islands in GaAs," *Physical Review Letters* 76 (1996) 952-955.
- [79] S. M. Hubbard, C. D. Cress, C. G. Bailey, R. P. Raffaele, S. G. Bailey, and D. M. Wilt, "Effect of strain compensation on quantum dot enhanced GaAs solar cells," *Applied Physics Letters* 92 (2008) 123512.
- [80] R. Oshima, A. Takata, and Y. Okada, "Strain-compensated InAs/GaNAs quantum dots for use in high-efficiency solar cells," *Applied Physics Letters* 93 (2008) 083111.
- [81] E. Radziemska, and E. Klugmann, "Thermally affected parameters of the current-voltage characteristics of silicon photocell," *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1889-1900.
- [82] E. Radziemska, "Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review," *Progress in Energy and Combustion Science* 29 (2003) 407-424.
- [83] E. Garduno-Nolasco, M. Missous, D. Donoval, J. Kovac, and M. Mikolasek, "Temperature dependence of InAs/GaAs quantum dots solar photovoltaic devices," *Journal of Semiconductors* 35 (2014) 054001.
- [84] R. Songmuang, S. Kiravittaya, M. Sawadsaringkarn, S. Panyakeow, and O.G. Schmidt, "Photoluminescence investigation of low-temperature capped self-assembled InAs/GaAs quantum dots," *Journal of Crystal Growth* 251 (2003) 166-171.
- [85] S. Suraprapapich, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow, "Quantum dot molecules for photovoltaic cell application," in *Proc. 2005 IEEE Photovoltaics Specialists Conf.*, pp. 98-101.
- [86] S. Ruangdet, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow, "Improvement of PV performance by using multi-stacked high density InAs quantum dot molecules," in *Proc. 2006 IEEE Photovoltaic Energy Conversion Conf.*, pp. 225-228.
- [87] M. Kunrugsa, S. Panyakeow, and S. Ratanathammaphan, "GaSb/GaAs quantum-ring-with-dot structures grown by droplet epitaxy," *Journal of Crystal Growth* 416 (2015) 73-77.
- [88] S. Siriroj, S. Pimanpang, M. Towannang, W. Maiaugree, S. Phumying, W. Jareenboon, and V. Amornkitbamrung, "High performance dye-sensitized solar cell based on hydrothermally deposited multiwall carbon nanotube counter electrode," *Applied Physics Letters* 100 (2012) 243303.
- [89] T. Charinpanitkul, P. Lorturn, W. Ratismith, N. Viriya-empikul, G. Tumcharern, and J. Wilcox, "Hydrothermal synthesis of titanate nanoparticle/carbon nanotube hybridized material for dye sensitized solar cell application," *Materials Research Bulletin* 46 (2011) 1604-1609.
- [90] N. Khongchareon, S. Choopun, N. Hongsith, A. Gardchareon, S. Phadungdhithidhada, and D. Wongratanaphisan, "Influence of carbon nanotubes in gel electrolyte on photovoltaic performance of ZnO dye-sensitized solar cells," *Electrochimica Acta* 106 (2013) 195-200.
- [91] A. Tubtimtae, K. Cheng, and M. Lee, "Ag₂S quantum dot-sensitized WO₃ photoelectrodes for solar cells," *Journal of Solid State Electrochemistry* 18 (2014) 1627-1633.