



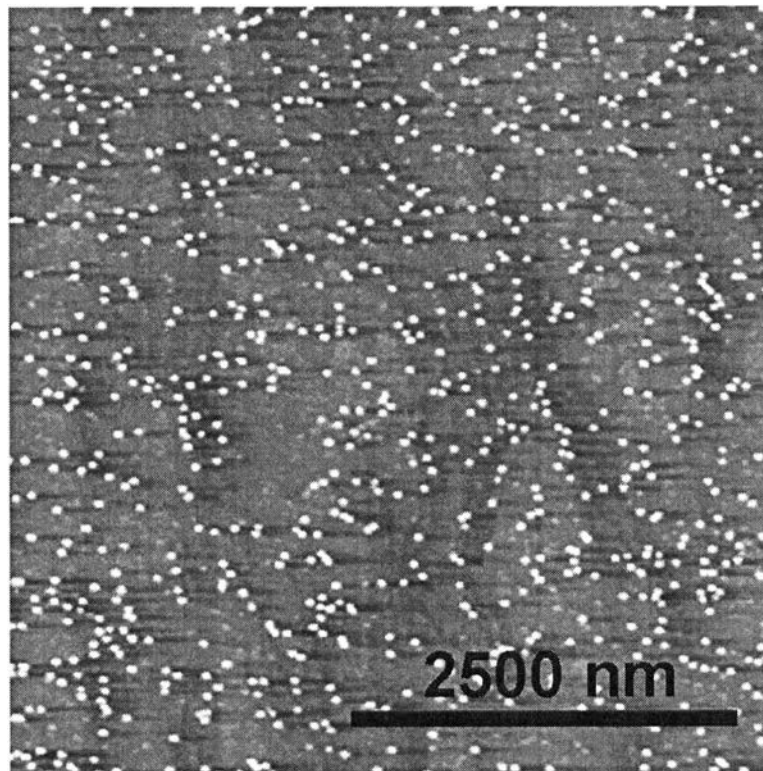
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ โดยแบ่งการแสดงผลและการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

4.1 ผลการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (Self-assemble quantum dots)

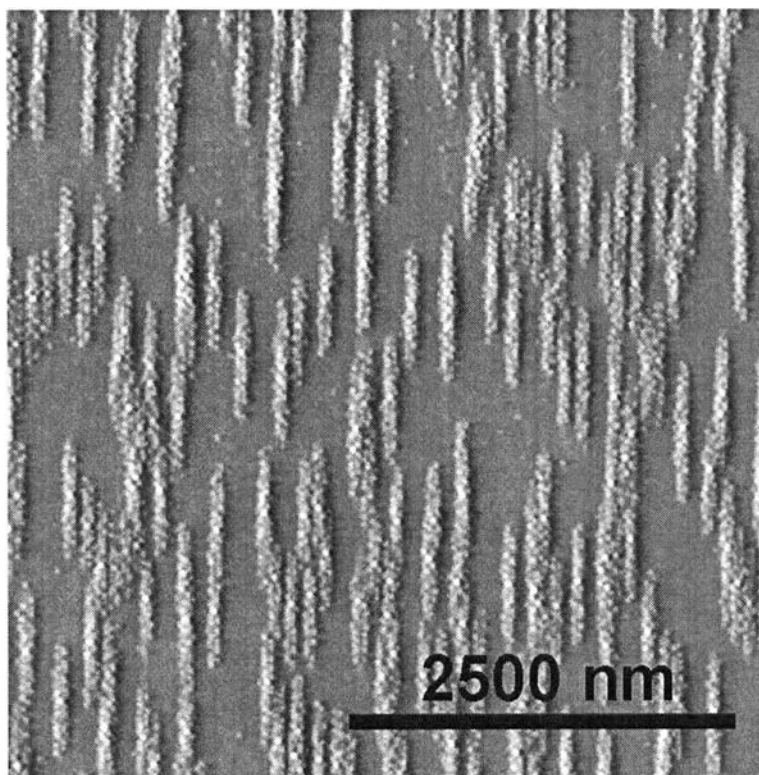
ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง ทำการปลูกได้โดยใช้เครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (MBE) เริ่มต้นจากใช้แผ่นฐานชนิด GaAs หลังจากนั้นทำการปลูกชั้น buffer โดยใช้อะตอม GaAs ที่มีอัตราปลูก 0.6 โมโนเลเยอร์ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 580°C หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ 500°C เพื่อทำการปลูกชั้นควอนตัมดอต โดยที่ปริมาณของ InAs ที่ใช้ในการปลูกควอนตัมดอต ประมาณ 1.8 โมโนเลเยอร์ ด้วยอัตราการปลูก 0.01 โมโนเลเยอร์ต่อวินาที ขนาดของควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นมีค่าความสูงประมาณ 6-10 นาโนเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60-80 นาโนเมตร และมีความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ 10^9 - 10^{10} ต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองที่ปลูกโดยเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบต่างๆ ไป

4.2 ผลการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum dot molecules)

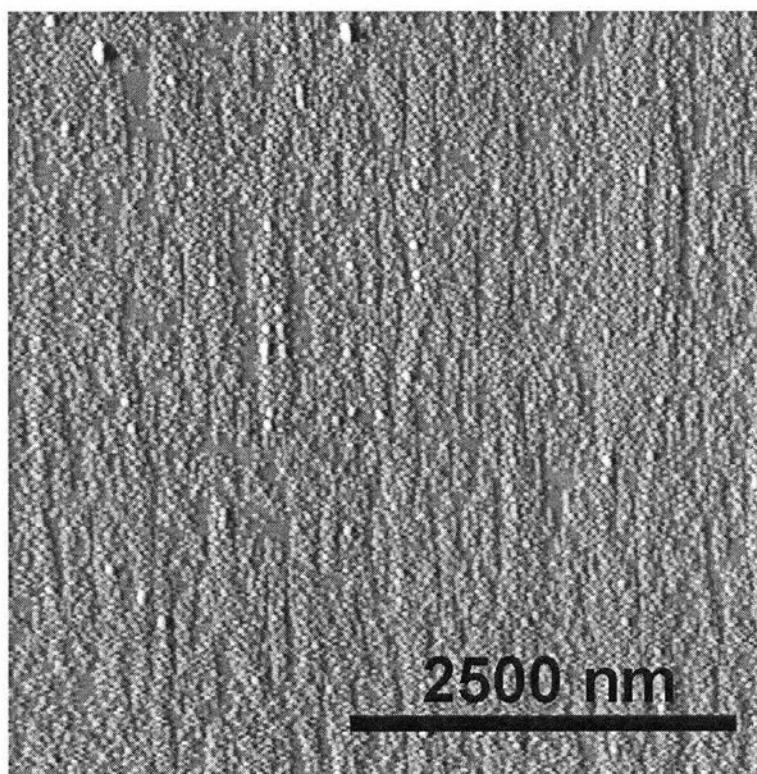
การปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลจะอาศัยใช้เทคนิคการปลูกกลบบางๆและเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตซ้ำ (Thin-Capping-and-Regrowth technique) [3] โดยเริ่มจากเมื่อทำการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองเสร็จ ที่อุณหภูมิ 500°C หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ 470°C เพื่อทำการปลูกกลบบางๆด้วย GaAs บนควอนตัมดอตที่เป็นชนิด InAs ด้วยความหนา 6 โมโนเลเยอร์ ที่มีอัตราการปลูก 0.6 โมโนเลเยอร์ต่อวินาที เนื่องจากผลของพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นที่ขอบของควอนตัมดอตมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อะตอมของ In เคลื่อนที่ออกจากดอตพร้อมกับอะตอมของ Ga ที่เคลื่อนที่ออกจากขอบของควอนตัมดอต เป็นผลทำให้เกิดการพังทลายลงบริเวณส่วนยอดของควอนตัมดอต จึงทำให้เกิดเป็นหลุมขึ้นที่บริเวณตรงกลางดอต หรือที่เรียกกันว่า (nanoholes) จากนั้นทำการปลูก InAs ควอนตัมดอตซ้ำที่บลงไปอีกประมาณ 1.2 โมโนเลเยอร์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ด้วยอัตราการปลูก 0.01 โมโนเลเยอร์ต่อวินาที ทำให้เกิดเป็นควอนตัมดอตโมเลกุลขึ้น และจำนวนดอตมีความหนาแน่นประมาณ 10^{10} - 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ควอนตัมดอตโมเลกุลปลูกโดยอาศัยเทคนิคการปลูกกลบบางๆและเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตซ้ำ

4.3 ผลการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูง (High density quantum dot molecules)

การปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูง เป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มจำนวนของดอทให้มีปริมาณมากขึ้น โดยอาศัยเทคนิคการปลูกกลบบางๆและการปลูกควอนตัมดอทซ้ำ (Thin-Capping-and-Regrowth) หลายรอบ โดยเริ่มจากเมื่อทำการปลูกควอนตัมดอทแบบจัดเรียงตัวเองเสร็จที่อุณหภูมิ 500°C หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ 470°C เพื่อทำการปลูกกลบบางๆด้วย GaAs บนควอนตัมดอทที่เป็นชนิด InAs ด้วยความหนา 6 โมโนเลเยอร์ อัตราการปลูก 0.6 โมโนเลเยอร์ต่อวินาที จากนั้นก็ทำการปลูก InAs ควอนตัมดอทซ้ำทับลงไปอีกประมาณ 0.6 โมโนเลเยอร์ อัตราการปลูก 0.01 โมโนเลเยอร์ต่อวินาที ที่อุณหภูมิเดียวกัน ทำลักษณะเช่นนี้ 4 รอบ (ปลูกกลบบางๆ ด้วย GaAs 6 ML และปลูกควอนตัมดอทซ้ำ ด้วย InAs 0.6 ML) พอถึงรอบที่ 5 จะทำการเพิ่มปริมาณการปลูก InAs ควอนตัมดอทเป็น 1.5 โมโนเลเยอร์แทน ทำให้เกิดเป็นควอนตัมดอทโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูง และมีความหนาแน่นของดอทประมาณ 10^{11} - 10^{12} ต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.3

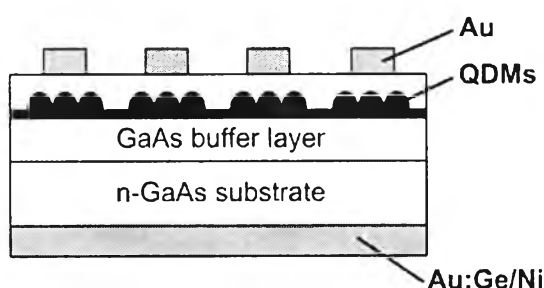


รูปที่ 4.3 ควอนตัมดอทโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูงปลูกโดยอาศัยเทคนิคการปลูกกลบบางๆและเทคนิคการปลูกควอนตัมดอทซ้ำแบบหลายรอบ

4.4 ผลการประดิษฐ์ Schottky quantum dot molecule solar cells

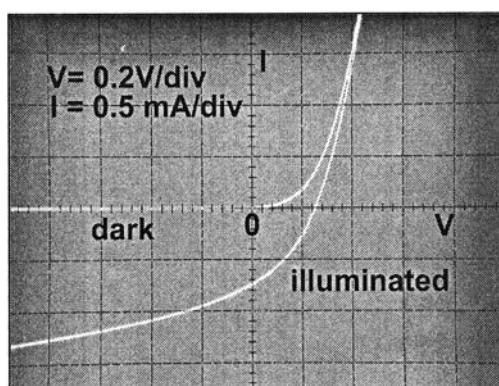
4.4.1 แบบ Single-stacked

Quantum dot Molecule solar cell แบบ Single-stack เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการแทรกชั้นควอนตัมดอทโมเลกุลลงไปบนเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky โดยจะเริ่มจาก n-GaAs Substrate ที่มีระนาบผลึก (100) และจะทำการปลูกชั้น GaAs buffer ที่อุณหภูมิ 580 °C หนา 400 nm แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 500 °C แล้วเริ่มทำการปลูกควอนตัมดอท จากนั้นลดอุณหภูมิมายัง 470 °C แล้วทำการระบวณการปิดทับและปลูกซ้ำ แล้วจากนั้นจะทำขั้วทั้ง 2 ด้าน จะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดง Schematic diagram ของ Single-stacked quantum dot molecule solar cell

เมื่อได้นำ Quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.5



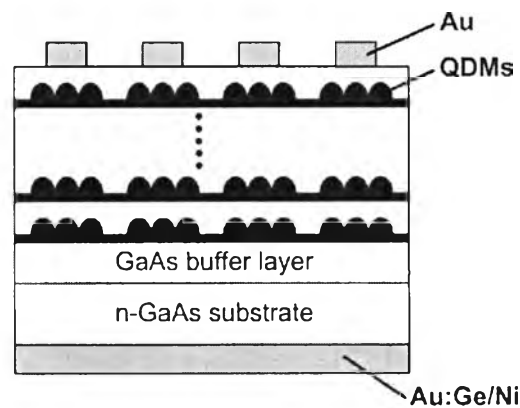
รูปที่ 4.5 แสดง IV curve ของ Single-stacked quantum dot Molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 0.68 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.25 V และ F.F. มีค่า 0.34 มีค่าประสิทธิภาพ 0.05% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ Multi-stacked quantum

dots แล้วจะเห็นว่าค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่ามากขึ้น แต่ F.F. มีค่าน้อยลง ซึ่งยังไม่เป็นผลที่น่าพอใจเพราะเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีต้องมีค่า F.F. สูงซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี

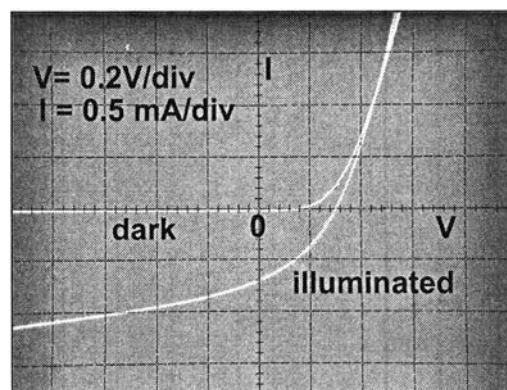
4.4.2 แบบ Multi-stacked

Multi-stacked quantum dot molecule solar cell เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่การแทรกชั้น Multi-stacked ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ทั้งหมด 5 ชั้น โดยจะเริ่มจาก n-GaAs Substrate ที่มีระนาบผลึก (100) และจะทำการปลูกชั้น GaAs buffer ที่อุณหภูมิ 580 °C หนา 200 nm แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 500 °C แล้วเริ่มทำการปลูกควอนตัมดอตโมกุลทั้งหมด 5 ชั้นแล้วจากนั้นจะทำขั้วทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.6



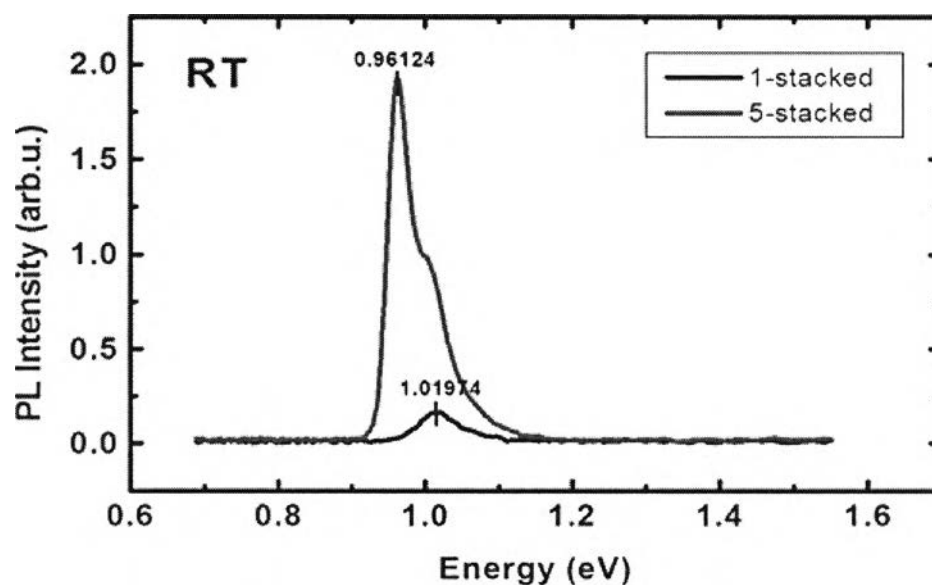
รูปที่ 4.6 แสดง Schematic diagram ของ Multi-stacked quantum dot molecule solar cell

เมื่อได้นำ Multi stacked quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดง IV curve ของ Multi-stacked quantum dot molecule solar cell

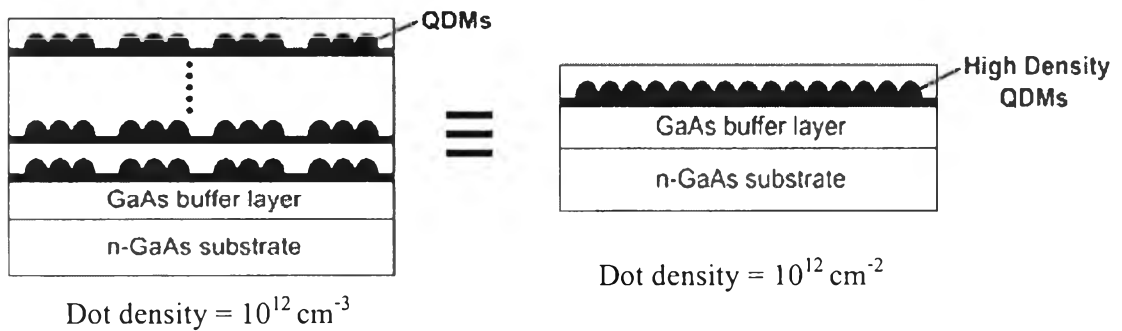
จากผลการวัดได้ค่าความเข้มกระแสแสงตัวจรมีค่า 0.64 mA/cm^2 ค่าแรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.3 V และค่า F.F. มีค่า 0.37 มีค่าประสิทธิภาพ 0.07% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ Single-stacked ให้ผลการตอบสนองต่อแสงที่ตกกระทบนั้นใกล้เคียงกัน สาเหตุนี้น่าจะมาจากจำนวนของควอนตัมดอตนั้นยังไม่หนาแน่นหรือมากพอ ดังนั้นจึงต้องพัฒนาไปใช้เทคนิคการปลูกกลบบางๆและการปลูกควอนตัมดอตซ้ำ (Thin-Capping-and-Regrowth) เพื่อให้ได้จำนวนของควอนตัมดอตที่มีความหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 4.8 แสดง PL spectrum ของ Multi-stacked QDMs เปรียบเทียบกับแบบ Single-stacked

ต่อมาได้นำโครงสร้างนี้ไปวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ทำซ้ำสัมผัสโดยผลการวัดได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มในการเปล่งแสงในการกรณี 5-stacked นั้นให้ค่าที่สูงกว่าในกรณี 1-stacked อีกทั้งค่าจุดยอด (Maximal peak) มีการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวมากขึ้น สาเหตุนี้น่ามาจาก เมื่อจำนวนชั้นของควอนตัมดอตเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าระดับพลังงานของสเปกตรัม ณ จุดที่มีความเข้มสูงสุดลดลง ตามการเพิ่มของจำนวนชั้นควอนตัมดอต จากงานวิจัยของ Xie *et al.* แสดงให้เห็นว่าดอตมีการเรียงตัวในแนวตั้งเนื่องจาก Strain field ของดอตที่อยู่ชั้นล่าง ดังนั้นการปลูกควอนตัมดอตแบบหลายชั้นจึงเสมือนว่าได้ดอตที่มีขนาด (ความสูง) ใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าระดับพลังงานของโครงสร้างควอนตัมดอตลดลง และจากผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ซึ่งในกรณีของโครงสร้างที่เป็นแบบ 5-stacked นั้นให้ค่าความเข้มในการเปล่งแสงที่สูงกว่ากรณี 1-stacked ซึ่งจากผลที่ได้นี้ ทำให้เกิดมีแนวความคิดเกี่ยวกับการนำไปประยุกต์และพัฒนา กับสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างอื่น เช่น เลเซอร์ (Laser) หรือ อุปกรณ์จำพวกดีเทกเตอร์ (Detector) เป็นต้น

ความหนาแน่นของ Quantum dot molecule มีค่าประมาณ 10^{10} - 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตรแต่เมื่อทำเป็น Multi stack quantum dot molecule จะให้ความหนาแน่นของ Quantum dot เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10^{12} ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบ High density quantum dot ดังนั้นเมื่อความหนาแน่นของ dot มากขึ้นจะทำให้เกิด Intermediate band ที่มีความต่อเนื่องที่ดีขึ้น จากแนวความคิดนี้จึงนำไปสู่การปรับปรุงโครงสร้างเป็นแบบ High density quantum dot molecule solar cell

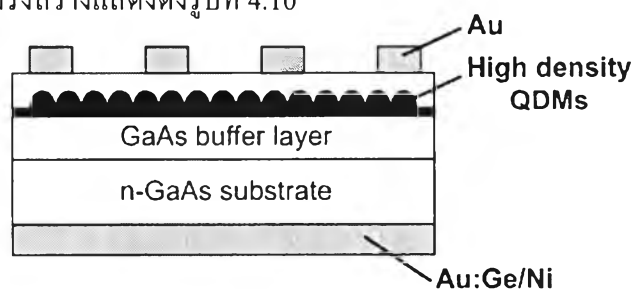


รูปที่ 4.9 แสดงความเสมอเหมือนกันของโครงสร้างแบบ Multi-stacked QDMs กับ Single-stacked high density QDMs

4.5 ผลการประดิษฐ์ Schottky high density quantum dot molecule solar cells

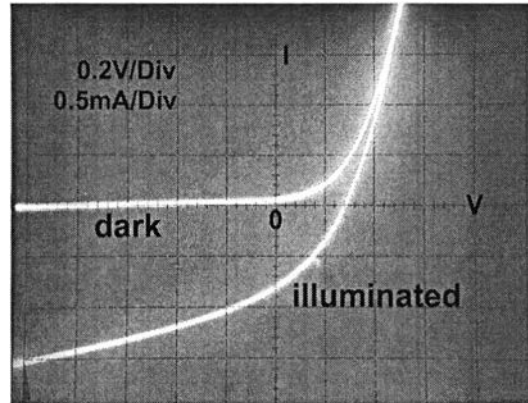
4.5.1 แบบ Single-stacked

High density Quantum dot molecule solar cell แบบ Single-stacked เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่การแทรกชั้น High density quantum dot molecule ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky โดยจะเริ่มจาก n-GaAs Substrate ที่มีระนาบผลึก (100) และจะทำการปลูกชั้น GaAs buffer ที่อุณหภูมิ 580°C หนา 400 nm แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 500°C แล้วเริ่มทำการปลูกควอนตัมดอตและลดอุณหภูมิมาที่ 470°C แล้วทำการปิดทับและปลูกซ้ำทั้งหมด 5 รอบจนได้ High density quantum dot molecule solar cell ซึ่งจะมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.10



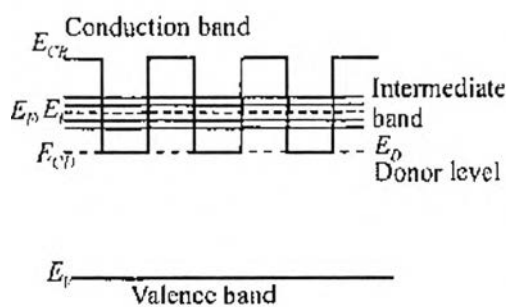
รูปที่ 4.10 Schematic diagram ของ Single-stacked high density quantum dot molecule solar cell

เมื่อนำ High density quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง $100\text{mW}/\text{cm}^2$ จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.11

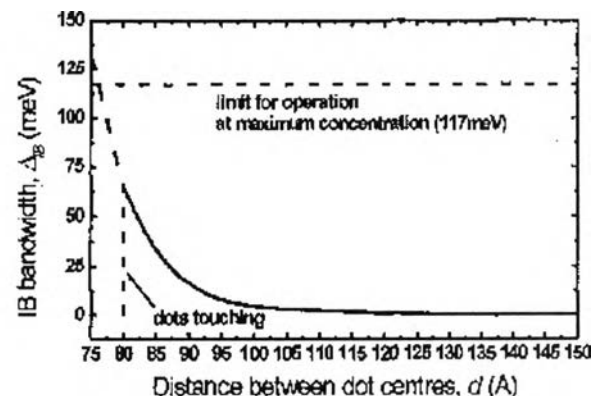


รูปที่ 4.11 แสดง IV curve ของ Single-stacked high density quantum dot molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสแสงตัวจอร์มีค่า $1.50\text{ mA}/\text{cm}^2$, แรงดันเปิดตัวจอร์มีค่า 0.3 V และ F.F. มีค่า 0.5 มีค่าประสิทธิภาพ 0.22% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ Multi-stacked quantum dot molecule solar cell จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มกระแสแสงตัวจอร์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบควอนตัมดอตโมเลกุลอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากความหนาแน่นของดอตมีค่ามากพอที่จะให้ Intermediate band ที่ดีและจากบทความในเรื่องทฤษฎีของ Intermediate band ของ A. Marti, L. Cuadra and A. Luque ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อดอตอยู่ใกล้กันมากพอจะเกิดความต่อเนื่องกันของแถบพลังงานมากขึ้นดังจะเห็นจากรูปที่ 4.12



(ก)



(ข)

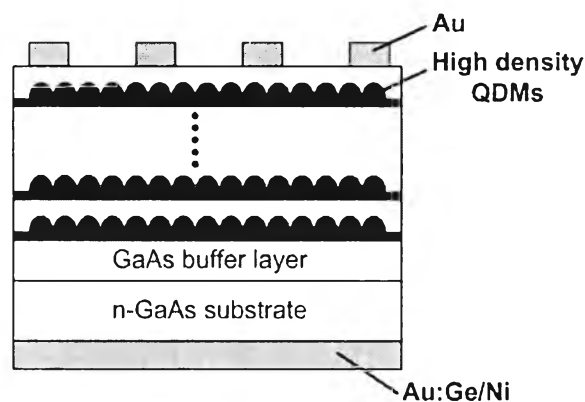
รูปที่ 4.12 แสดง (ก) แสดง Band diagram ของดอตที่อยู่ใกล้กัน (ข) แสดงควากว้างของแถบ IB เป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างดอต

จากกราฟที่ 14.2 (ข) จะเห็นว่าหากคอตมีระยะห่างกันมากกว่าประมาณ 95 อังสตรอมแล้ว จะได้ค่าความกว้างของ Intermediate มีค่าน้อยมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณากรณีควอนตัมคอตธรรมดา โดยดูจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างคอตมีค่ามากกว่า 95 อังสตรอม ดังนั้นการที่ได้ความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากจึงสอดคล้องกับบทความนี้ และกรณีควอนตัมคอตโมเลกุล จะเห็นจากรูปที่ 4.2 ว่า แม้ว่าคอตจะมีอยู่ใกล้กันมากขึ้นแต่ยังมีบางส่วนที่ยังมีระยะห่างมากกว่า 95 อังสตรอมจึงได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นจากแบบควอนตัมคอตธรรมดาไม่มากนัก ส่วนแบบ High density QDMs เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าคอตอยู่ใกล้กันมาก (น้อยกว่า 95 อังสตรอม) ทำให้มีความกว้างของ Intermediate band ที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้มากจึงได้ความเข้มกระแสลัดวงจรมากกว่าแบบควอนตัมคอตโมเลกุลอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับบทความของ A. Marti, L. Cuadra and A. Luque

ดังนั้นหากทำเป็น Multi-stacked จะทำให้ความหนาแน่นของคอต มีค่ามากที่สุดคือมากกว่า $10^{12} / \text{cm}^3$ ซึ่งน่าจะเป็นโครงสร้างที่ให้ Intermediate band ดีที่สุด

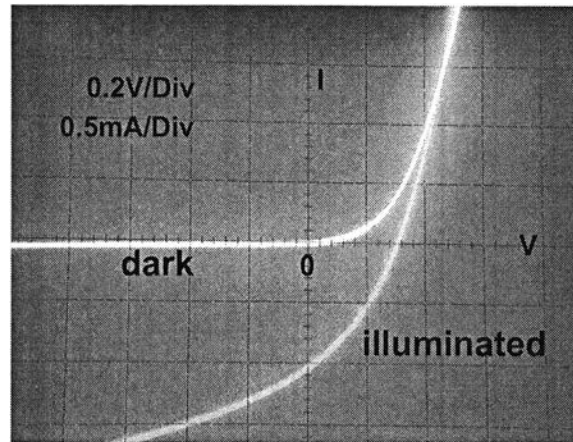
4.5.2 แบบ Multi-stacked

Multi-stacked High density quantum dot molecule solar cell เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการแทรกชั้น High density quantum dot molecule solar cell ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ทั้งหมด 5 ชั้นจากกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.13



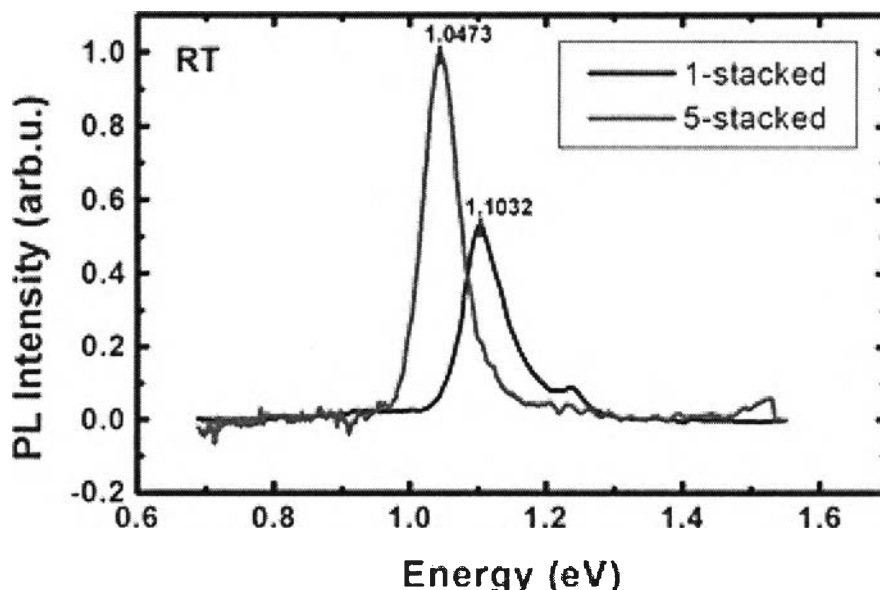
รูปที่ 4.13 Schematic diagram ของ Multi-stack high density quantum dot molecule solar cell

เมื่อนำ Multi-stack high density quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดง IV curve ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 2.10 mA/cm^2 , แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.3 V และ F.F. มีค่า 0.5 มีค่าประสิทธิภาพ 0.31% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ Single-stacked จะเห็นว่าค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามที่คาดไว้ ส่วนค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) นั้นไม่เปลี่ยนแปลงนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากถูกจำกัดด้วยโครงสร้างที่เป็นชนิด Schottky contact ซึ่งโลหะที่ใช้ทำขั้วนั้นเป็นทอง (Au) ที่มีความบริสุทธิ์สูง ส่วนค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (F.F.) ทั้งชนิด 1-ชั้น กับชนิด 5-ชั้น มีค่าที่ดีขึ้น แต่นั่นก็ยังไม่ได้เป็นสิ่งที่ตัดสินใจว่าโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์กรณีนี้ให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (F.F.) ที่ดีขึ้น เพราะค่าฟิลล์แฟกเตอร์นั้นยังขึ้นตรงกับค่าความต้านทานอนุกรมที่มาจากคุณภาพของขั้วสัมผัสเมื่อพิจารณา PL Spectrum ตามรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มในการเปล่งแสงในกรณี 5-stacked นั้นยังให้ค่าที่สูงกว่าในกรณี 1-stacked อีกทั้งค่าจุดยอด (Maximum peak) มีการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวมากขึ้น สาเหตุนี้คล้ายกันกับที่ได้อธิบายไปแล้วในตอนต้น



รูปที่ 4.15 แสดง PL spectrum ของ Multi-stacked QDMs เปรียบเทียบกับแบบ Single stacked

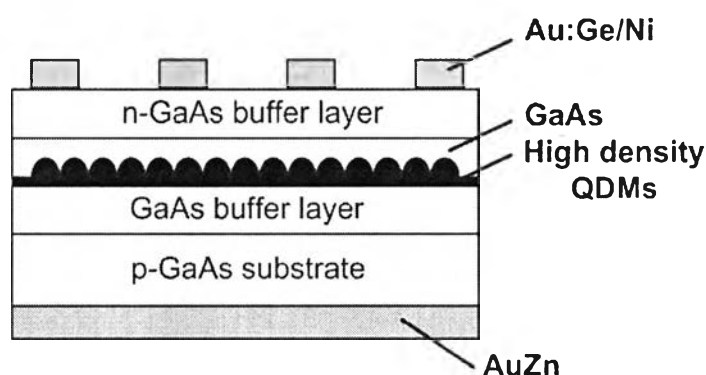
เนื่องจาก Quantum dot solar cell, Quantum dot molecule solar cell และ High density quantum dot molecule solar cell ตามหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า แบบ High density quantum dot molecule solar cell ให้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรได้ดีขึ้น และจากข้อสรุปนี้ ทำให้มีแนวความคิดต่อในการพัฒนาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งต่อไปจะทำการปรับปรุงค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างของค่าแพนดักซ์ อาทิเช่น โครงสร้างที่เป็นชนิด Homojunction หรือ ชนิด Heterojunction เป็นต้น ซึ่งน่าที่จะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

4.6 ผลการประดิษฐ์ Homostructure high density quantum dot molecule solar cells

โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่พัฒนาต่อมาจากโครงสร้างที่ผ่านมา โดยในโครงสร้างนี้ทำการปรับปรุงในเรื่องค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ให้มีค่ามากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น โดยยังคงอาศัยข้อดีในเรื่องการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา โดยได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นแบบ Homojunction ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) นั้นมีค่าที่สูงขึ้น

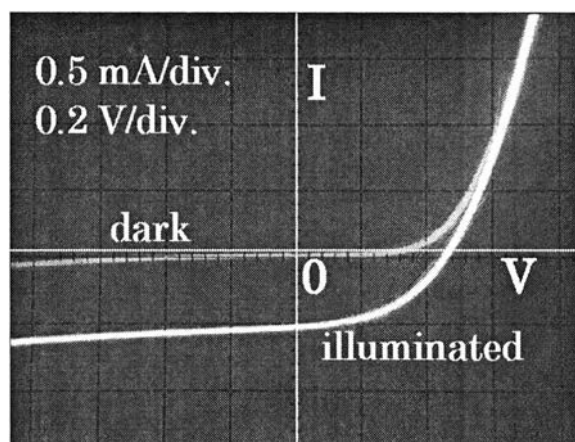
4.6.1 แบบ Single-stacked

High density quantum dot molecule solar cells แบบ Single-stacked เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการแทรกชั้น High density quantum dot molecules ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Homostructure โดยเริ่มจาก GaAs substrate ชนิด p จากนั้นทำการปลูกชั้น GaAs buffer แล้วจึงทำการปลูก High density Quantum dot molecules ตามลำดับจากนั้นปิดด้วย n-GaAs buffer แล้วจึงทำขั้วทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดง Schematic diagram ของ High density quantum dot molecule solar cell

เมื่อนำ High density quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.17

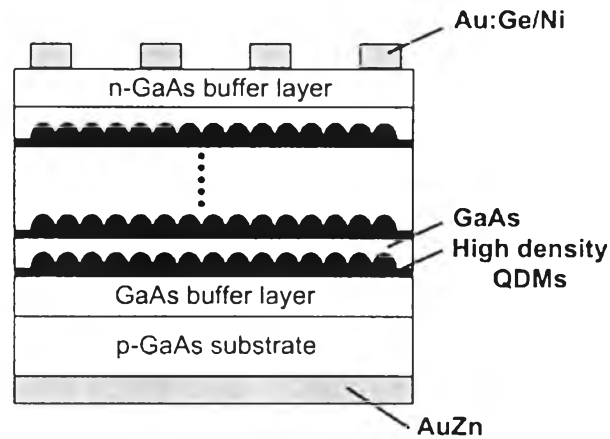


รูปที่ 4.17 แสดง IV curve ของ High density quantum dot molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 9.60 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.5 V และ F.F. มีค่า 0.52 มีค่าประสิทธิภาพ 2.49% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ High density quantum dot molecule solar cell แบบ Schottky แล้วจะเห็นว่าค่าแรงดันเปิดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.3 V เป็น 0.5 V และให้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรและค่า F.F. เพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นหากได้ทำการแทรกชั้น High density quantum dot molecule หลายๆ ชั้นก็น่าจะให้ผลที่ดีขึ้น

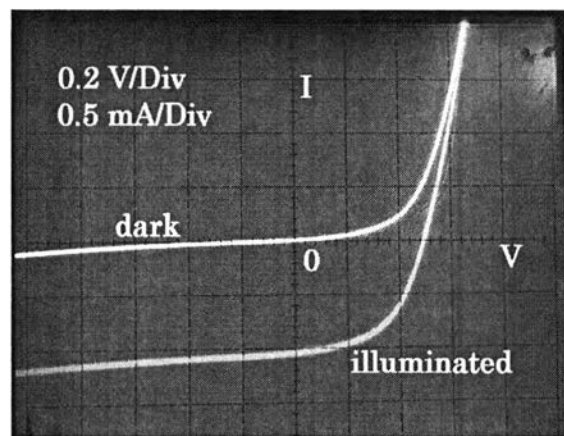
4.6.2 แบบ Multi-stacked

Multi stack high density quantum dot molecule solar cell เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่การแทรกชั้น High density quantum dot molecule solar cell ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Homostructure ทั้งหมด 5 ชั้น โดยการสร้างจะคล้ายกับการสร้าง High density quantum dot molecule solar cell ในกรณี 1-stacked ที่เป็นชนิด Homostructure แต่ในขั้นตอนการปลูกชั้น High density quantum dot molecule จะปลูกทั้งหมด 5 ชั้น ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 Schematic diagram ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell

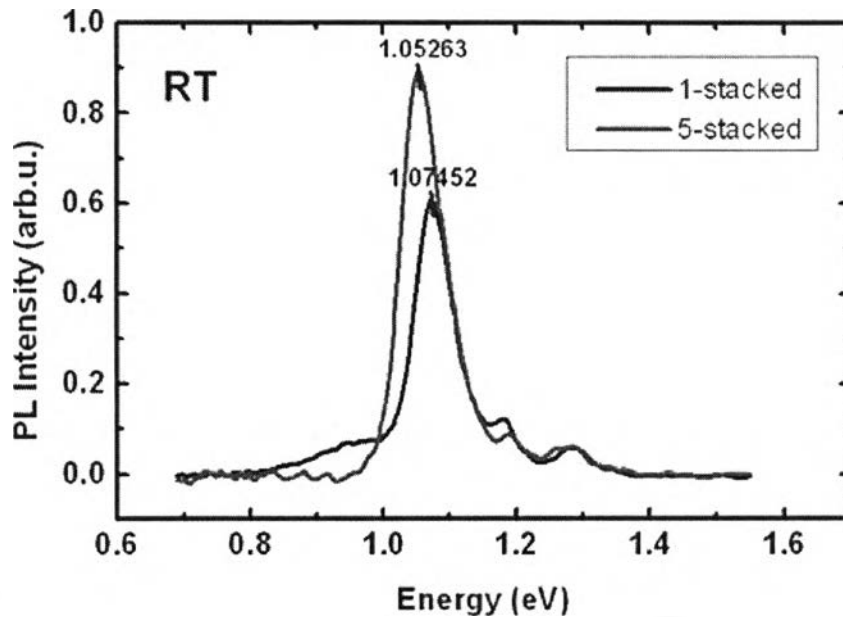
เมื่อนำ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดง IV curve ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 14.40 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.5 V และค่า F.F. มีค่า 0.62 มีค่าประสิทธิภาพ 4.46% จากผลการวัดด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator) พบว่าค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ทั้งกรณี 1-stacked และกรณี 5-stacked นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.5 V ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นแบบ Homojunction ซึ่งมีค่ากำแพงศักย์ที่ต่างกันมากกว่ากรณีที่เป็นโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (Au กับ GaAs) จึงทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) มีค่ามากขึ้น การที่ค่ากำแพงศักย์ภายในโครงสร้างนั้นมีค่าต่างกันมากขึ้นนั้นย่อมส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่หรือการพัดพาให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงตกกระทบนั้นสามารถเคลื่อนที่ออกไปยังขั้วสัมผัสได้มากขึ้น จึงเท่ากับว่าทำให้ค่าพลังงานที่เกิดจากแสงตกกระทบนั้นมีค่าที่สูงขึ้น และจากผลการวัดค่าความเข้มกระแส

ลัทธิจอร์ (J_{SC}) นั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้ง 2 กรณี (กรณี 1-stacked ได้ 9.6 mA/cm^2 และกรณี 5-stacked ได้ 14.4 mA/cm^2) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการอธิบายในเรื่องทฤษฎีของรอยต่อสารกึ่งตัว

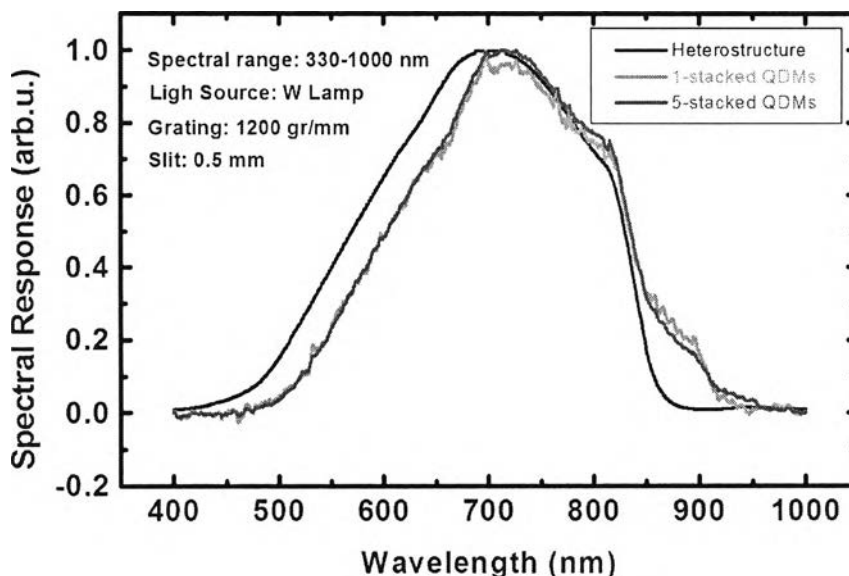


รูปที่ 4.20 PL spectrum ของ Multi-stacked high density QDMs เปรียบกับแบบ Single-stacked

จากรูปที่ 4.20 เป็นผลจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มในการเปล่งแสงในกรณี 5-stacked นั้นยังให้ค่าที่สูงกว่าในกรณี 1-stacked อีกทั้งค่าจุดยอด (Maximum peak) มีการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวมากขึ้น สาเหตุนี้คล้ายกันกับที่ได้อธิบายไปแล้วในตอนต้น

ต่อมาได้นำโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ไปทำการวัด Spectrum response เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงที่ตกกระทบ ซึ่งจะให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับการทำงานหรือการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าสำหรับ Heterostructure กราฟจะตกลงที่ประมาณ 850 nm ทั้งนี้แต่หากเป็น Single-stack หรือ 5-stacked high density QDMs จะเห็นว่าในช่วงตอบสนองที่กว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า 850 nm แต่จะเห็นว่าเพิ่มไม่มาก เนื่องมาจากข้อจำกัดทางเครื่องมือของเกรตติงเพราะเกรตติงที่ใช้ในการทดลองสามารถตอบสนองอยู่ระหว่าง 330-1000 nm อีกทั้งมีลักษณะกราฟการตอบสนองเป็นพาราโบลาคว่ำ จึงเกิดการลดทอนของค่าสัญญาณที่วัดได้ แต่จากค่าที่วัดได้สามารถบอกได้ว่าการเพิ่มขึ้นควอนตัมดอตเข้าไปในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถขยายย่านการตอบสนองต่อแสงที่มีค่าความยาวคลื่นยาวได้ดีขึ้น ซึ่งในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะไม่มีการตอบสนองต่อแสงที่มีค่าความยาวคลื่นยาวที่เกินกว่าที่จะใช้งานได้หรือมีค่าพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงาน ได้ และจาก

ข้อมูลที่ได้นี้เป็น การพิสูจน์ได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทำการทดลองนี้ สามารถขยายงานการตอบสนองต่อความยาวคลื่นยาวได้ดีขึ้น



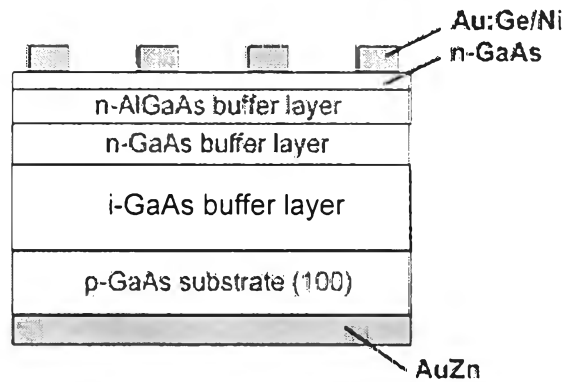
รูปที่ 4.21 แสดง Spectral Response ของ Heterostructure, single-stacked high density QDMs และ Multi-stacked high density QDMs

4.7 ผลการประดิษฐ์ Heterostructure high density quantum dot molecule solar cells

โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่พัฒนาต่อมาจากโครงสร้างที่ผ่านมา โดยในโครงสร้างนี้ทำการปรับปรุงในเรื่องค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ให้มีค่ามากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น โดยยังคงอาศัยข้อดีในเรื่องการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา โดยได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นแบบ Heterostructure ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) นั้นมีค่าที่สูงขึ้น

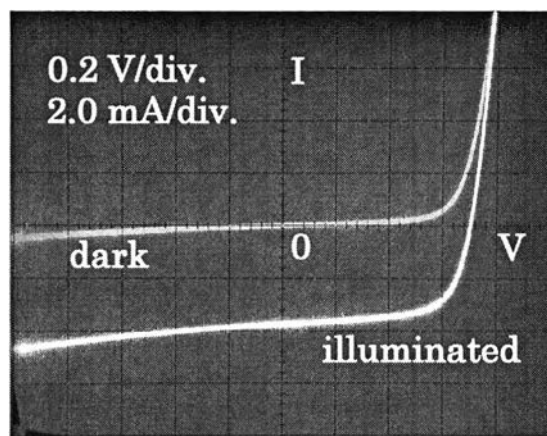
4.7.1 แบบ Heterostructure (without quantum dots)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Heterostructure เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการแทรกชั้น High density quantum dot molecules ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจาก GaAs substrate ชนิด p จากนั้นทำการปลูกชั้น GaAs buffer แล้วจึงทำการปิดด้วย n-GaAs และสร้างชั้นหน้าต่างด้วย $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ แล้วปิดทับด้วยชั้น n-GaAs บางๆอีกชั้นหนึ่ง แล้วจึงทำขั้วทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดง Schematic diagram ของ Heterostructure solar cell

เมื่อนำ Heterostructure solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.23

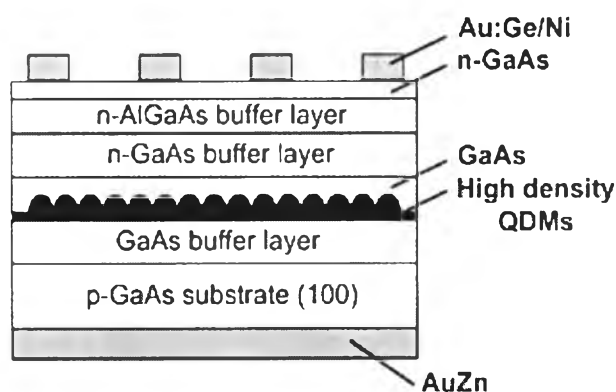


รูปที่ 4.23 แสดง IV curve ของ Heterostructure solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 30.40 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.7 V และ F.F. มีค่า 0.68 มีค่าประสิทธิภาพ 14.5% ดังนั้นหากได้ทำการแทรกชั้น High density quantum dot molecules เข้าไปก็น่าจะให้ผลที่ดีขึ้น เนื่องจากชั้น High density quantum dot molecules นั้นช่วยในการดูดซับโฟตอนได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นยาว

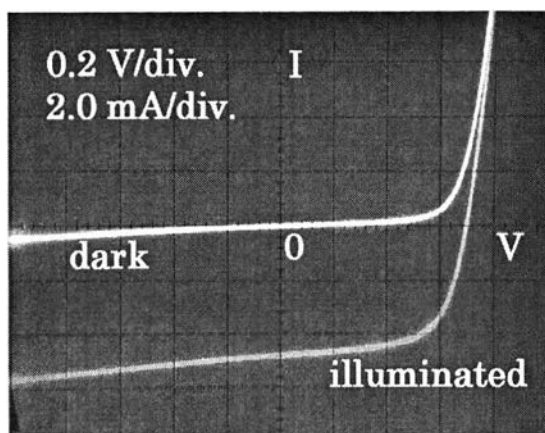
4.7.2 แบบ Single-stacked

High density quantum dot molecule solar cell แบบ Single-stacked เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่การแทรกชั้น High density quantum dot molecule ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Hetero-structure โดยเริ่มจาก GaAs substrate ชนิด p จากนั้นทำการปลูกชั้น GaAs buffer แล้วจึงทำการปลูก High density quantum dot molecules ตามลำดับจากนั้นปิดด้วย n-GaAs buffer และสร้างชั้นหน้าต่างด้วย $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ แล้วปิดทับด้วยชั้น n-GaAs บางๆอีกชั้นหนึ่ง แล้วจึงทำขั้วทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดง Schematic diagram ของ High density quantum dot molecule solar cell

เมื่อนำ High density quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.25

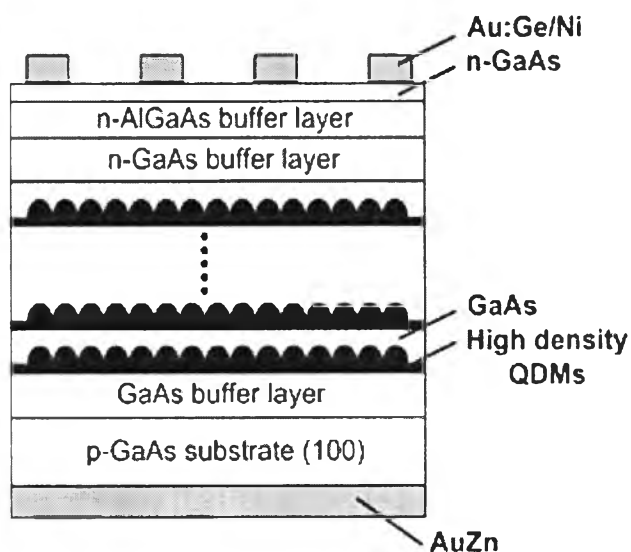


รูปที่ 4.25 แสดง IV curve ของ Single-stacked high density quantum dot molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 38.4 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.7 V และ F.F. มีค่า 0.67 มีค่าประสิทธิภาพ 18% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ High density quantum dot molecule solar cell แบบ Homostructure แล้วจะเห็นว่าค่าแรงดันเปิดวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.5 V เป็น 0.7 V และให้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรและค่า F.F. เพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นหากได้ทำการแทรกชั้น High density quantum dot molecules หลายๆ ชั้นก็น่าจะให้ผลที่ดีขึ้น

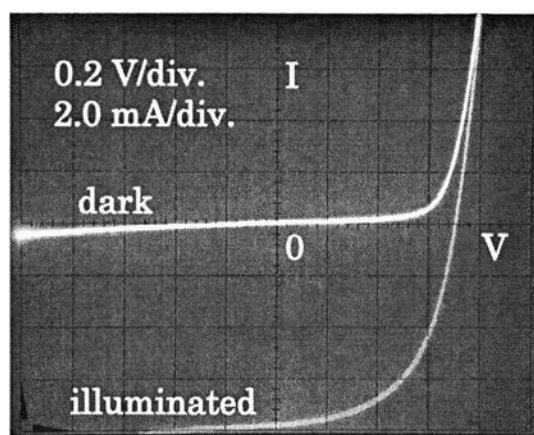
4.7.3 แบบ Multi-stacked

Multi-stacked high density quantum dot molecule solar cell เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่การแทรกชั้น High density quantum dot molecules ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Heterostructure ทั้งหมด 5 ชั้น โดยการสร้างจะคล้ายกับการสร้าง High density quantum dot molecule solar cell ในกรณี 1-stacked ที่เป็นชนิด Heterostructure แต่ในขั้นตอนการปลูกชั้น High density quantum dot molecules จะปลูกทั้งหมด 5 ชั้น ซึ่งจะได้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 Schematic diagram ของ Multi-stacked high density quantum dot molecule solar cell

เมื่อนำ Multi-stacked high density quantum dot molecule solar cell ไปทำการวัดด้วยเครื่อง Solar simulator ที่ทำการวัดภายใต้แสง AM 1 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 จะได้ IV curve ดังรูปที่ 4.27



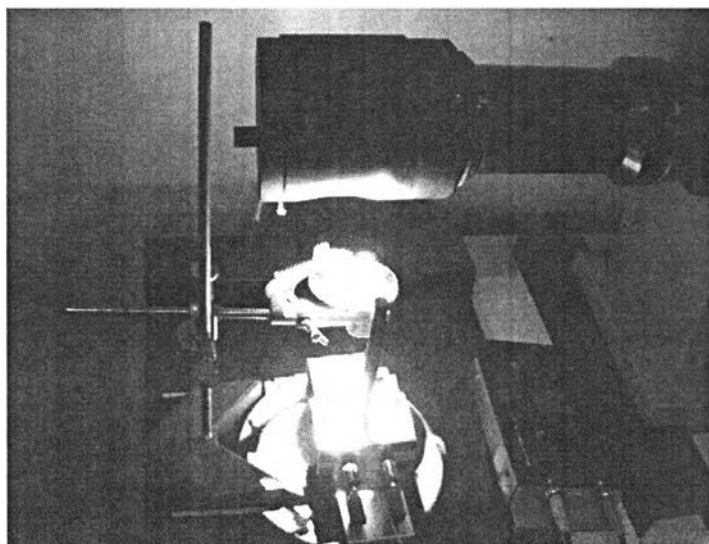
รูปที่ 4.27 แสดง IV curve ของ Multi-stacked high density quantum dot molecule solar cell

จากกราฟได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรมีค่า 62.40 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรมีค่า 0.7 V และค่า F.F. มีค่า 0.56 มีค่าประสิทธิภาพ 24.5% จากผลการวัดด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator) พบว่าค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{OC}) ทั้งกรณี 1-stacked และกรณี 5-stacked นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.7 V ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นแบบ Heterostructure ซึ่งมีค่ากำแพงศักย์ที่ต่างกันมากกว่ากรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำกับสารกึ่งตัวนำ (GaAs กับ GaAs) จึงทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{OC}) มีค่ามากขึ้น การที่ค่ากำแพงศักย์ภายในโครงสร้างนั้นมีค่าต่างกันมากขึ้นนั้นย่อมส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่หรือการพัดพาให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงตกกระทบนั้นสามารถเคลื่อนที่ออกไปยังขั้วสัมผัสได้มากขึ้น จึงเท่ากับว่าทำให้ค่าพลังงานที่เกิดจากแสงตกกระทบมีค่าที่สูงขึ้น และจากผลการวัดค่าความเข้มกระแสลัดวงจร (J_{SC}) นั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้ง 2 กรณี (กรณี 1-stacked ได้ 38.4 mA/cm^2 และกรณี 5-stacked ได้ 62.40 mA/cm^2)

4.8 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสงสูง

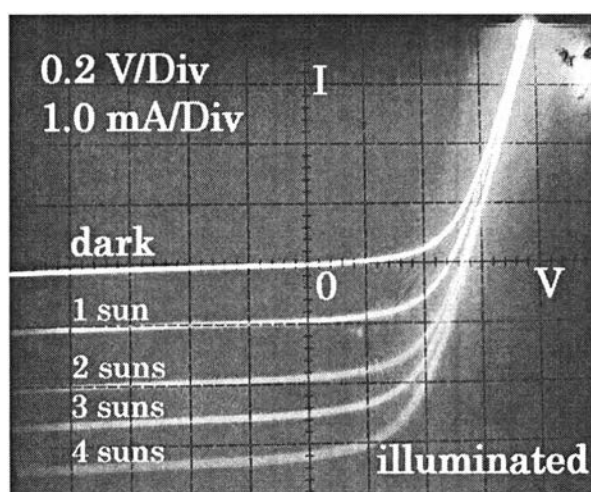
เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการแทรกชั้นควอนตัมดอตกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อให้ได้พลังงานที่เท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ธรรมดาจะใช้พื้นที่ในการรับแสงมากกว่าแบบที่ทำการแทรกชั้นควอนตัมดอต และการที่นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการแทรกชั้นควอนตัมดอตมาใช้กับแสงในสภาวะปกติจะไม่คุ้มค่าเพราะค่าใช้จ่ายในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่แทรกชั้นควอนตัมดอตสูง และอีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่แทรกชั้นควอนตัมดอตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์สร้างจาก GaAs ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน (E_g) 1.43 V จึงเหมาะกับการนำมาใช้กับแสงความเข้มสูง ดังนั้นการใช้แสงความเข้มสูงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการแทรกชั้นควอนตัมดอตโดยการเพิ่มอุปกรณ์รวมแสงเข้าไปจะได้พลังงานเทียบเท่ากับการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ธรรมดาจำนวนมาก และการทำให้

แสงอาทิตย์มีความเข้มสูงประหยัดกว่าการใช้เซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก จึงได้ทำการทดสอบ
 ใช้งาน High density QDMs กับแสงความเข้มสูงที่ความเข้มแสงต่างๆโดยใช้เครื่อง Solar simulator
 และใช้ lens รวมแสงให้ได้ที่ความเข้มแสงเป็นจำนวนเท่าของ 1 sun



รูปที่ 4.28 แสดง Solar simulator ที่มีเลนส์ไว้รวมความเข้มแสง

เนื่องจากข้อจำกัดของเลนส์จึงทำการวัดที่ความเข้มแสง 1 sun, 2 sun, 3 sun และ 4 sun
 ตามลำดับ และได้ IV curve ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.29 แสดง IV curve ที่ความเข้มแสง 1 sun, 2 sun, 3 sun และ 4 sun

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเข้มกระแสลัดวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.5 V เป็นประมาณ 0.55 V และจะเห็นว่ากราฟมีความเบี่ยงเบนมากเนื่องจากผลของความต้านทานอนุกรม เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้กับความเข้มแสงมากจะทำให้ได้กระแสสูงขึ้น ดังนั้นจะมีความต่างศักย์ต่อคร่อมความต้านทานอนุกรมมากขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ตกลง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะนำมาใช้กับแสงความเข้มสูงจึงควรมีความต้านทานอนุกรมต่ำ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่แสงความเข้มสูงค่าต่างๆ

ความเข้มแสงเป็น จำนวนเท่าของ 1 sun	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.
1	14.40	0.50	0.75	0.36	0.27	0.54
2	30.40	0.52	1.40	0.37	0.52	0.53
3	40.00	0.54	1.95	0.36	0.71	0.53
4	51.20	0.55	2.40	0.36	0.86	0.49

เมื่อพิจารณาค่าจากในตารางจะพบว่าที่แสงความเข้มสูงขึ้นจะได้ค่าความเข้มกระแสลัดวงจรและกำลังไฟฟ้ามากขึ้น โดยที่ความเข้มแสง 4 sun จะได้ค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุดและมากกว่าความเข้มแสง 1 sun ประมาณ 3 เท่า ซึ่งเป็นผลดี แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า F.F. ด้วยจะเห็นว่าที่ความเข้มแสง 4 sun มีค่า F.F. น้อยกว่าที่ความเข้มแสงอื่นๆ และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 3 sun จะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้คือ 0.716 mW ซึ่งยังมีค่ามากเมื่อเทียบกับความเข้มแสง 1 sun อีกทั้งยังมีค่า F.F. ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นการนำเซลล์แสงอาทิตย์นี้ไปใช้ที่ความเข้มแสง 3 sun จะได้ผลที่ดีเมื่อเทียบแค่ 4 sun แต่หากได้ทดลองที่ความเข้มแสงที่สูงกว่านี้ จะเห็นผลที่ชัดเจนมากขึ้น