



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโน  
ของสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีผลวงเป็นส่วนประกอบหลัก

โดย สุวิทย์ กิระวิทยา

ธันวาคม พ.ศ. 2558



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของ  
สารประกอบกึ่งตัวนำที่มีพลวงเป็นส่วนประกอบหลัก



สุวิทย์ กิระวิทยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วันลงทะเบียน... 17 ส.ค. 2559
เลขทะเบียน... 16998379
เลขเรียกหนังสือ... 0 TA 48.9

๑๗๖  
๙๘๙๕  
๒๕๕๙

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

## บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้นำเสนอการปลูกผลึกด้วยลำโม่เลกุลของควอนตัมดอทแกลเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) แบบก่อตัวเองบนแผ่นฐาน (001) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) โดยมีการเติมชั้นแทรกของสารประกอบกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) และศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างดังกล่าว โดยได้มีการกำหนดให้ความหนาของชั้นแทรก InGaAs เท่ากับ 4 ชั้นอะตอมและค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) มีค่า  $x = 0.00, 0.07, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  การใส่ชั้นแทรก InGaAs เข้าไปในโครงสร้างนี้ ทำให้ความหนาแน่นของควอนตัมดอทที่สร้างได้ลดลงอย่างมาก ขณะที่ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการปลูกควอนตัมดอท GaSb แบบธรรมดาบน ผิวหน้าของ GaAs ที่มีผิวหน้าระนาบ (001) ที่ปลูกภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ควอนตัมดอทของ GaSb ใน GaAs มีลักษณะคล้ายโดม ที่มีฐานเป็นวงรีและทิศทางการยืดขยายออกไปของฐานไปยังทิศทาง  $[110]$  เมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรก การยืดตัวที่เด่นชัดจะหายไป และผนังด้านข้างควอนตัมดอทจะแสดงพื้นผิวในลักษณะที่เป็นระนาบโดยมีระนาบ (001) เป็นผิวด้านบน

ผลกระทบของสัดส่วนปริมาณอินเดียมในชั้นแทรก InGaAs ต่อสมบัติทางแสงของ GaSb ควอนตัมดอท ถูกศึกษาด้วยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence : PL) ผลของวัดนี้แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนปริมาณอินเดียมในชั้นแทรก InGaAs ทำให้เกิดการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนตัมดอทเปลี่ยนแปลงไป

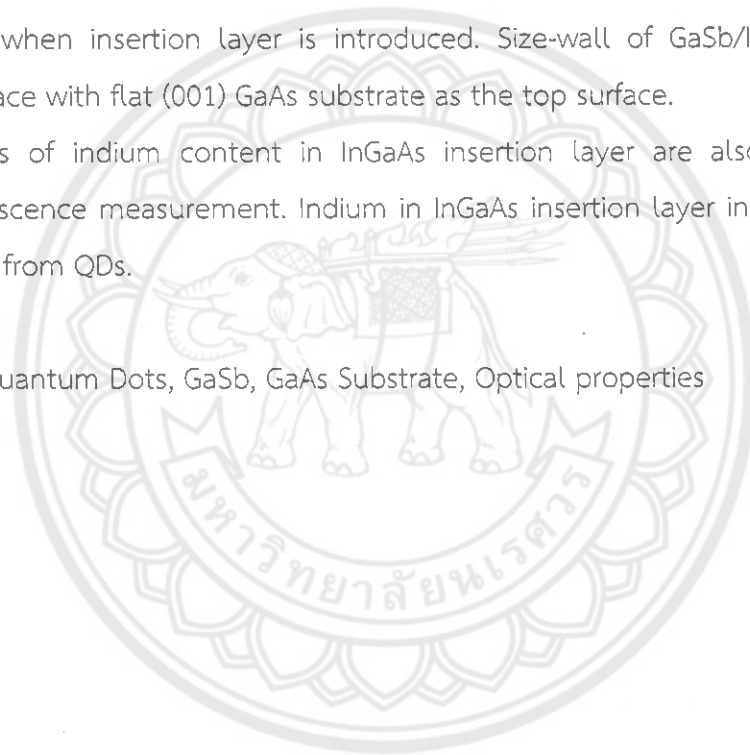
คำสำคัญ: ควอนตัมดอท, GaSb, แผ่นฐาน GaAs, โครงสร้างระดับนาโน, คุณสมบัติทางแสง

## Abstract

This report presents a study on the growth and optical properties of GaSb/GaAs self-assembled quantum dots (QDs) grown on (001) GaAs substrates by molecular beam epitaxy. Four monolayers of InGaAs insertion layer is introduced to the layered structure prior to the QD growth. Indium contents in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layer are varied from  $x = 0.00, 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ . By including this insertion layer, the QD density substantially decreased. Both QD height and diameter increase when indium content is increased compared with the GaSb QDs grown on flat GaAs surface. GaSb/GaAs QDs have a dome-shape with elliptical base. The elongation is along [110]. The elongation disappeared when insertion layer is introduced. Size-wall of GaSb/InGaAs QDs show faceted surface with flat (001) GaAs substrate as the top surface.

Effects of indium content in InGaAs insertion layer are also investigated by photoluminescence measurement. Indium in InGaAs insertion layer induces the shift of the emission from QDs.

**Keywords:** Quantum Dots, GaSb, GaAs Substrate, Optical properties



## บทสรุปผู้บริหาร (Executive summary)

งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีผลวงเป็นส่วนประกอบหลัก” เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมโครงสร้างและสังเกตผลเชิงแสงของควอนตัมดอทชนิด GaSb/GaAs ที่ปลูกอยู่บนแผ่นฐาน GaAs (001) ด้วยกระบวนการปลูกผลึกอิมพีแทกซีจากลำโมเลกุล โดยพบว่าการใส่ชั้นแทรก InGaAs ก่อนการปลูกชั้นควอนตัมดอทส่งผลต่อการควอนตัมดอทที่สร้างได้ โดยการวิเคราะห์ทางโครงสร้างพบว่ารูปร่างและขนาดของ GaSb ควอนตัมดอทที่ปลูกบนผิว GaAs และ InGaAs มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของควอนตัมดอท GaSb/GaAs และ GaSb/InGaAs และตรวจพบการเลื่อนไปของค่ายอดของสเปกตรัมแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างควอนตัมดอท

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการสร้างและศึกษาโครงสร้างนาโนในประเทศไทยที่อาศัยความร่วมมือระหว่างกลุ่มวิจัยในสังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยการวิจัยนี้สร้างผลงานวิจัยพื้นฐานเป็นบทความ 1 บทความ และผลจากการวิจัยที่อาจจะสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดต่อไปได้



# เนื้อหางานวิจัย

## ส่วนที่ 1 การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลของควอนตัมดอทแกลเลียมแอนติโมนิไนด์ (GaSb) บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs : 001) ด้วยชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs)

### 1. บทนำ

เมื่อไม่นานมานี้ ควอนตัมดอทสารกึ่งตัวนำได้มีความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์แสงจำนวนมาก โดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับควอนตัมดอทสารกึ่งตัวนำหมู่ III-V ที่ถูกศึกษามาก่อนหน้านี้ [1-6] โดยอุปกรณ์เหล่านั้นรวมถึง เลเซอร์ (Lasers), ไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diodes), ตัวตรวจจับแสง (Photodetector), เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cells) และหน่วยความจำ (Memories) โดยส่วนใหญ่แล้ว ควอนตัมดอทชนิด In(Ga)As/GaAs แบบก่อตัวเองเป็นระบบดอทหลักที่ถูกศึกษา อย่างไรก็ตาม ควอนตัมดอทชนิด GaSb/GaAs มีการจัดเรียงแถบพลังงานแบบชนิดที่ 2 อาจจะมีเหมาะสมมากสำหรับการนำไปใช้บางอย่าง ตัวอย่างเช่น GaSb/GaAs ถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบที่ใช้ประจุ เนื่องจากสามารถกักขังโฮลได้ดี [5] สมรรถภาพอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของควอนตัมดอท ดังนั้นความสนใจในการสืบหาคุณสมบัติโครงสร้างของควอนตัมดอทภายใต้เงื่อนไขการปลูกเพื่อจะปรับปรุงการประยุกต์ใช้พิเศษบางอย่าง ในงานวิจัยอื่น ๆ ก่อนหน้านี้ การสร้างควอนตัมดอทชนิด GaSb รูปร่างที่ต่างกันได้ถูกเสนอ [7,8] ดังตัวอย่าง Jiang et al. [7] ได้แสดงการยึดขยายออกไปของควอนตัมดอท GaSb ไปยังทิศทาง [110] ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน V/III

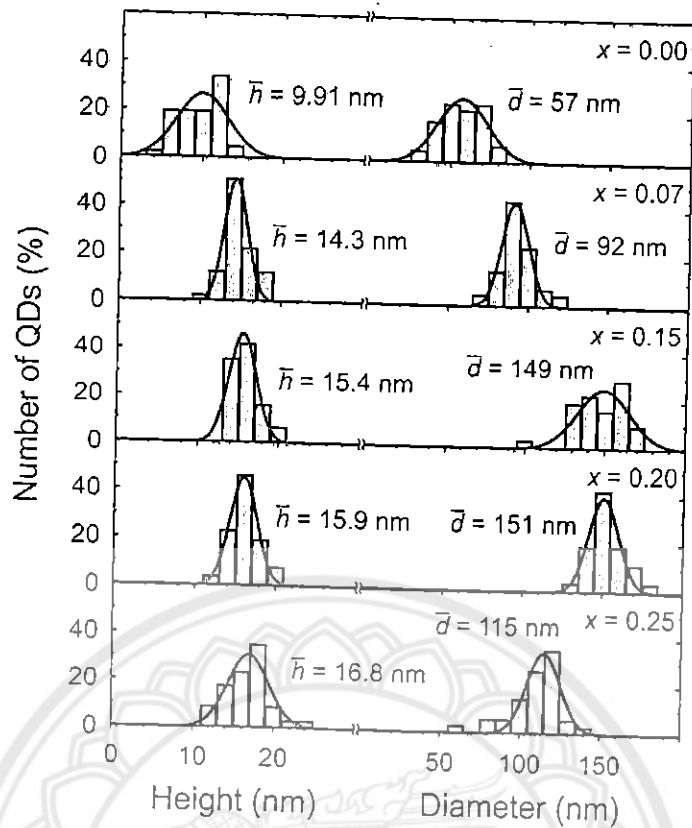
ในงานวิจัยนี้ นักวิจัยได้นำเสนอคุณสมบัติโครงสร้างของควอนตัมดอท GaSb การก่อตัวเองแบบตำแหน่งอิสระ เมื่อที่ชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ค่าเริ่มต้น  $x=0.00, 0.07, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกปลูกโดยการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) ประกอบด้วยวาล์วแคลิกเกอร์แอนติโมนิ (Sb Valved Cracker) และใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy : AFM) ในการสืบหาข้อมูล Indium ในชั้นแทรก InGaAs มีแนวโน้มความหนาแน่นควอนตัมดอทที่ค่อยๆลดลง การขยายของขนาดควอนตัมดอท (ทั้งความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง) และการส่งผ่านจากรูปร่างควอนตัมดอทที่ถูกยึดขยายออกไปถึงควอนตัมดอทกับผนังด้านข้างที่เกี่ยวข้องกับเหลี่ยมมุม และในระนาบ (001) ที่ราบสูงด้านบน

### 2. การทดลอง

ชั้นตัวอย่างทั้งหมดถูกปลูกบนแผ่นฐาน GaAs สารกึ่งตัวนำ (0 0 1) ใน Riber Compact 21 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ใช้แหล่งจ่าย Sb แบบ valved – Cracker หลังจาก deoxidation

### 3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

รูปที่ 1 (a) แสดงแผนผังไดอะแกรมของโครงสร้างพื้นผิวที่ศึกษา รูปที่ 1 (b)-(e) แสดงภาพ AFM ขนาด  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  ของควอนตัมดอท GaSb ใน GaAs รูปที่ 1 (c)-(f) พื้นผิว ภาพประกอบของ AFM ในรูปที่ 1 (b)-(f) แสดงบางส่วนของพื้นผิว (ได้มาจากภาพ AFM ที่เหมือนกัน) ด้วยสเกลความชันของพื้นผิว [10] รูปร่างสัญญาณของพื้นผิวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนถูกสังเกตเมื่อชั้น  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ถูกแทรก ตัวอย่างเช่น ความหนาแน่นของควอนตัมดอทลดลงอย่างมาก และการเพิ่มขึ้นของขนาดควอนตัมดอท รูปร่างสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆจะสังเกตเห็นเมื่อปริมาณสาร indium เพิ่มขึ้นจาก  $x=0.07$  (รูปที่ 1 (c)) ถึง  $0.25$  (รูปที่ 1 (f)) สิ่งนี้เป็นการมองเห็นจำนวนความแตกต่างของ Indium ในชั้นแทรก InGaAs การวิเคราะห์การกระจายความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอท GaSb ในชั้นแทรก InGaAs ที่ต่างกัน ถูกแสดงเป็นฮิสโทแกรมในรูปที่ 2 ข้อมูลที่ได้รับจากการวิเคราะห์ของ individual QD ในแต่ละภาพ AFM (แสดงในรูปที่ 1 (b)-(e)) ชั้นแรกพื้นที่ฐานควอนตัมดอทเอามาจากเส้นเค้าโครงรูปปิดขนาดใหญ่ที่สุดของการเขียนเส้นเค้าโครง (Contour Plots) ของข้อมูล AFM เส้นผ่านศูนย์กลางควอนตัมดอทคำนวณจากการประมาณฐานวงกลม ความสูงของควอนตัมดอทได้จากความต่างระหว่างระดับความสูงของเส้นเค้าโครงรูปปิดที่ใหญ่ที่สุด กับข้อมูลความสูงที่มากที่สุด ฮิสโทแกรมของความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางควอนตัมดอทภายหลังจะมาหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Gaussian ตำแหน่งตรงกลางที่เหมาะสมด้วยกันกับกราฟที่เหมาะสม (Fitted Curves) จะแสดงในรูปที่ 2 จากรูปนี้สามารถเห็นได้ชัดเจนว่าทั้งความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรกจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงความชันเมื่อปริมาณ indium เปลี่ยนจาก  $x=0.0$  (ไม่มีชั้นแทรก) ไปถึง  $x=0.07$  โดยปริมาณ Indium มีการเพิ่มขึ้นมากขึ้น ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ยกเว้นเพียงกรณีเดียวที่ปริมาณ Indium ที่  $x=0.25$  จะสังเกตพบการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลาง เส้นผ่านศูนย์กลางแบบ non-monotonic นี้อย่างเปลี่ยนแปลงเพราะปริมาณ indium สูงมากเกินไปในพื้นที่ indium adatoms ยังคงนำเสนอภายหลังกระบวนการแช่ Sb 60 วินาที เนื่องจากจะมีปริมาณสูงในชั้นต้น การรวมตัวกันของอะตอม indium กลายมาเป็นควอนตัม GaSb ซึ่งมีแนวโน้มความเครียดที่ไม่เข้าคู่กัน (Mismatch Strain) สูง และการปรับปรุงการปลูกให้ดีขึ้นของควอนตัมดอทอัตราส่วนลักษณะขนาดใหญ่ เนื่องจากควอนตัมดอทสำหรับอัตราส่วนสูงสามารถลดหย่อนความตึงเครียดได้มาก [11]



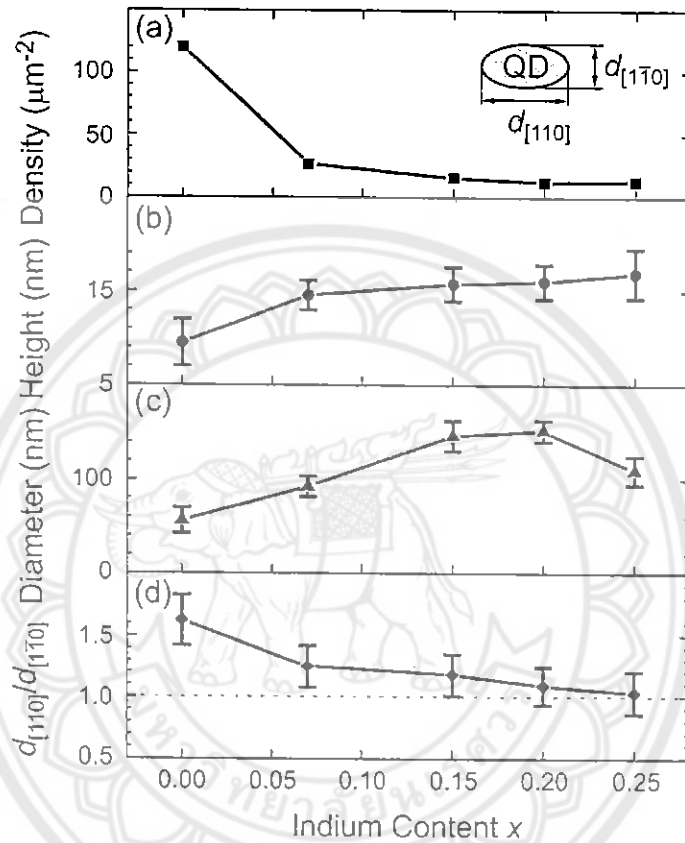
รูปที่ 2 ฮิสโทแกรมของความสูงควอนตัมดอทและการกระจายเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอท GaSb ใน  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ที่  $x = 0.00$  (ด้านบน),  $0.07$ ,  $0.15$ ,  $0.20$  และ  $0.25$  (ฐาน) ตามลำดับ การฟิตเนื่องคิดโดยใช้ฟังก์ชัน Gaussian ตำแหน่งตรงกลางได้มาจากฟังก์ชัน Gaussian ดังแสดงในรูป

รูปที่ 3 สรุปการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของควอนตัม GaSb ในชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ที่ฟังก์ชันของปริมาณ indium ในชั้นแทรก เมื่อชั้นแทรก  $\text{InGaAs}$  ถูกแทรก ความหนาแน่นควอนตัมดอทลดลง เพราะความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น รูปที่ 3 (a) - (c) ความหนาแน่น GaSb QD เริ่มต้นประมาณ  $120 \mu\text{m}^{-2}$ , การลดลงจนน้อยกว่า  $30 \mu\text{m}^{-2}$  ขณะที่ค่าความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 times (จาก  $9.5 \text{ nm}$  ที่  $x=0.0$  ถึง  $14.5 \text{ nm}$  ที่  $x=0.07$ ) เมื่อชั้น  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  ถูกแทรก จากการสังเกตเหล่านี้ น่าจะมาจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานพื้นผิวเริ่มต้น พลังงานระหว่างผิว และพลังงานความตึงเครียดของระบบควอนตัมดอท

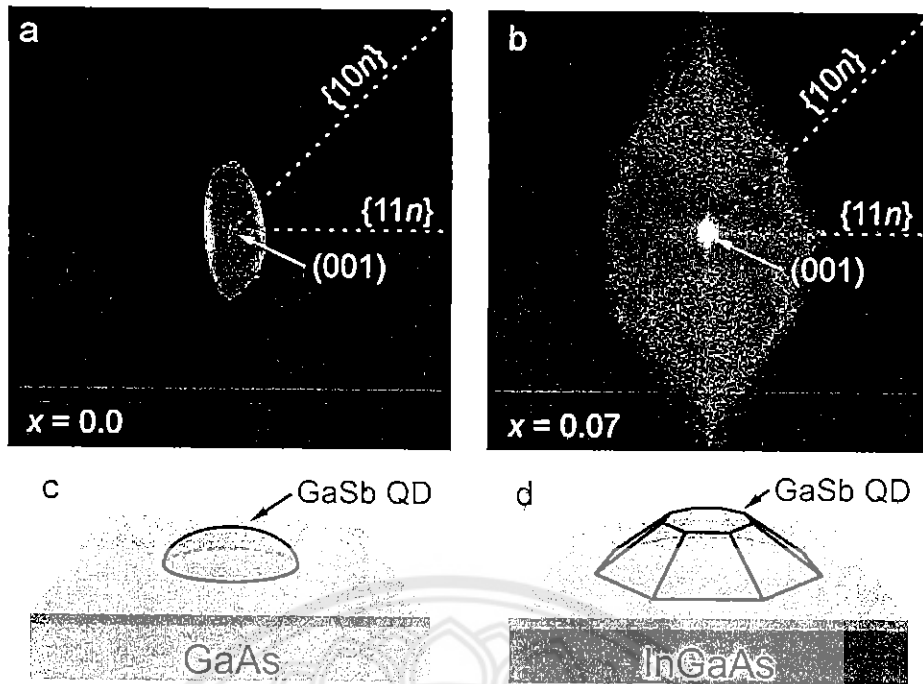
การสืบค้น QD shape anisotropy โดยกำหนดระดับการยืดออกไปของควอนตัมดอทที่อัตราส่วน  $d_{[1\ 1\ 0]}/d_{[1\ \bar{1}\ 0]}$  ที่  $d_{[1\ 1\ 0]}$  และ  $d_{[1\ \bar{1}\ 0]}$  เป็นความยาวของฐานควอนตัมดอทไปจนถึงทิศทาง  $[1\ 1\ 0]$  และ  $[1\ \bar{1}\ 0]$  ตามลำดับ ภาพประกอบรูปที่ 3 (a) แสดงผังโดอะแกรมของควอนตัมดอทกับความยาวเหล่านี้ รูปที่ 3 (d) แสดงระดับของการยืดขยายออกไป ขณะที่ฟังก์ชันของปริมาณ indium ที่ได้รับจากข้อมูล AFM การยืดขยายออกไปของรูปร่าง GaSb ค่อยๆเปลี่ยนแปลงจากการยืดขยายอย่างชัดเจน



ไปยังทิศทาง  $[1\ 1\ 0]$  ถึงเกือบจะเป็นรูปร่างควอนตัมดอทแบบ isotropic (ไม่มีการยืดขยาย) สิ่งนี้สามารถเกี่ยวข้องกับโครงสร้างเหลี่ยมมุมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน  $\{1\ 1\ n\}$  บนพื้นผิวควอนตัมดอท เมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรก ซึ่งจะถูกอธิบายด้านล่าง เป็นที่น่าสังเกตว่าการยืดขยายออกไปของโครงสร้างมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติภายในของควอนตัมดอท เช่น polarization dependency [7] และคุณสมบัติการขนส่ง (Transport Properties) [13]



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของ (a) ความหนาแน่นของควอนตัมดอท, (b) ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอท, (c) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอท และ (d) ระดับของการยืดออก (กำหนดที่  $d_{[1\ 1\ 0]}/d_{[1\ \bar{1}\ 0]}$ ) ที่ฟังก์ชันของ indium ปริมาณ  $x$  ในชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ภาพประกอบของ (a) แสดงค่านิยามของ  $d_{[1\ 1\ 0]}/d_{[1\ \bar{1}\ 0]}$  แห่งบอกความคลาดเคลื่อนใน (a)-(d) เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 4 แสดงการวัดเหลี่ยมมุมที่ได้จากพื้นผิว QD ของ GaSb QD (a) โดยปราศจากชั้นแทรก  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  (b) ที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  (c) ภาพประกอบของ GaSb QD บน (001) พื้นผิว GaAs และ (d) ภาพประกอบของ GaSb QD บน (001) พื้นผิว InGaAs QDs ขนาดเล็กสัมพัทธ์ได้มีการยึดออกไปยังทิศทาง [110], การสังเกตการปลูก GaSb บน GaAs, รูปร่างที่ถูกสร้างของ GaSb QDs เกี่ยวกับเหลี่ยมมุมขนาดใหญ่ เมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรกก่อนการปลูก QD

สำหรับในอนาคตจะแสดงปริมาณรูปร่างควอนตัมดอท การทำแผนที่กำหนดทิศทางพื้นผิว ซึ่งถูกเรียกว่าการพล็อตเหลี่ยมมุม (facet plot) ถูกวิเคราะห์ [10,14] รูปที่ 4 (a) แสดงการพล็อตเหลี่ยมมุมที่ได้มาจากพื้นผิวควอนตัมดอทของ GaSb QD โดยปราศจากชั้นแทรก InGaAs เปรียบเทียบกับที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  (รูปที่ 4 (b)) จากการพล็อตนี้ (และเช่นเดียวกับภาพประกอบรูปที่ 1(b)-(f)) เราสามารถเห็นได้ชัดว่าพื้นผิวในระนาบ (001) ที่ราบสูงด้านบนของแต่ละ GaSb QD จะนำเสนอเมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรก สังเกตที่ราบสูงนี้ในภาพ AFM อื่นๆของการปลูก GaSb QDs ในผิวหน้า InGaAs (ไม่ได้แสดงในรูป) นอกจากนี้ที่ราบสูง, พื้นผิวเหลี่ยมมุมอื่นๆ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะมุ่งไปยังทิศทาง  $\{1\ 1\ n\}$  ซึ่งจะสังเกตเห็นได้การพล็อตเหลี่ยมมุม (ดังรูปที่ 4 (b)) พื้นผิวที่เป็นเหลี่ยมมุมอยู่บนผนังด้านข้างของ QDs ซึ่งรู้ได้จากการศึกษาการปลูกเกี่ยวกับทฤษฎีแต่ก่อน ว่าเหลี่ยมมุมสามารถมีรูปร่างในผนังด้านข้างของ QD เนื่องจากมันมีพลังงานผิวหน้าต่ำ [15] ในการชักจูงนี้ถูกเรียกว่าการปลูกข้อจำกัด-ตัวเอง (self-limiting growth) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างควอนตัมดอทที่มั่นคง เมื่อปริมาณ indium ในชั้นแทรกเพิ่มขึ้น เหลี่ยมมุมผนังด้านข้างมีแนวโน้มกลายเป็นความสูงชันขึ้น อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาข้อจำกัดของ AFM ในการสืบค้นหาข้อมูลพวกเราไม่สามารถระบุขนาดชั้นเหลี่ยมมุมได้อย่างสมบูรณ์ พวกเราสามารถวาดภาพประกอบสำหรับรูปร่างของการปลูก GaSb QD บนพื้นผิว GaAs และ InGaAs ที่แสดงในรูปที่ 4 (c) และ (d) ตามลำดับ สำหรับ GaSb QDs บน GaAs พวกเราได้รับควอนตัมดอทฐานการยึดขยายออกไป

ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างจะกลม ขณะที่ GaSb QDs บน InGaAs แสดงบางส่วนของพื้นผิวที่เป็นเหลี่ยมมุมกับระนาบ (001) ที่ราบสูงด้านบน นอกจากนี้ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ GaSb QDs บน InGaAs มีขนาดใหญ่กว่าบน GaAs

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้เสนอการศึกษารูปร่างสัณฐานเกี่ยวกับโครงสร้างของควอนตัมดอท GaSb แบบกึ่งตัวเอง (0 0 1) บนแผ่นฐาน GaAs เมื่อชั้นแทรก InGaAs เริ่มต้น รูปร่างสัณฐานของควอนตัมดอทที่ได้รับจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก การค่อยๆลดลงของความหนาแน่นควอนตัมดอทและขนาดของควอนตัมดอท (ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลาง) สังเกตเห็นการยืดขยายออกไป นอกจากนี้ ระดับของการยืดขยายออกไปของควอนตัมดอทมีการเปลี่ยนแปลงการยืดขยายออกไปอย่างแตกต่างกันอย่างชัดเจนไปยังทิศทาง [1 1 0] ถึงรูปร่างisotropic เมื่อปริมาณ indium ในชั้นแทรก InGaAs เพิ่มขึ้น สุดท้ายงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นควอนตัมดอท GaSb บน InGaAs ในระนาบ (0 0 1) ที่ราบสูงด้านบน และพื้นผิวที่เป็นเหลี่ยมมุมบนผนังด้านข้างอย่างชัดเจน

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, B.V. Volovik, Y.G. Musikhin, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, J.A. Lott, D. Bimberg, 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers and VSELs grown by molecular beam epitaxy, *J. Cryst. Growth* 227-228 (2001) 1155-1161.
- [2] J. Sabarinathan, P. Bhattacharya, P.-C. Yu, S. Krishna, An electrically injected InAs/GaAs quantum-dot photonic crystal microcavity light-emitting diode, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 3876-3878.
- [3] K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, S. Fujimoto, K. Hirotsu, H. Sakaki, High-sensitivity modulation-doped quantum dot infrared photodetectors, *Micro-electron. Eng.* 63 (2002) 185-192.
- [4] K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, Y. Arakawa, High-efficiency InAs/GaAs quantum dot solar cell by metalorganic chemical vapor deposition, *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 193905.
- [5] M. Hayne, R.J. Young, E.P. Smakman, T. Nowozin, P. Hoidgson, J.K. Garleff, P. Rambabu, P.M. Koenraad, A. Marent, Bonato, A. Schliwa, D. Bimberg, The structural, electronic and optical properties of GaSb/GaAs nanostructures for charge-based memory, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013) 264001.

- [6] C.C. Tseng, W.-H. Lin, S.-Y. Wu, S.-H. Chen, S.-Y. Lin, The transition mechanisms of type-II GaSb/GaAs quantum-dot infrared light-emitting diodes, *J. Cryst. Growth* 323 (2011) 466-469.
- [7] C. Jiang, T. Kawazu, S. Kobayashi, H. Sakaki, Molecular beam epitaxial of very large anisotropic GaSb/GaAs quantum dots, *J. Cryst. Growth* 301-302 (2007) 828-832.
- [8] M. Kunrugs, S. Kiravittaya, S. Sopitpan, S. Ratanathamphan, S. Panyakeow, Molecular beam epitaxial growth of GaSb/GaAs quantum dots on Ge sub strates, *J.Cryst.Growth*401(2014)441-444.
- [9] G.L. Price, Critical-thickness and growth-mode transitions in highly strained  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  films, *Phys.Rev.Lett.*66 (1991) 469-472.
- [10] S. Kiravittaya, A. Rastelli, O.G. Schmidt, Self-assembled InAs quantum dots on patterned GaAs(0 0 1) substrates: formation and shape evolution, *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) 243112.
- [11] V.A. Shchukin, D. Bimberg, Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces, *Rev.Mod.Phys.*71(1999)1125-1171.
- [12] H. Eisele, M. Dähne, Critical thickness of the 2-dimensional to 3-dimensional transition in GaSb/GaAs(0 0 1) quantum dot growth, *J. Cryst. Growth* 338 (2012)103-106.
- [13] G. Li, C. Jiang, H. Sakaki, Anisotropic scattering of elongated GaSb/GaAs quantum dots embedded near two-dimensional electron gas, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 11 (2010) 10792-10795.
- [14] G. Costanini, A. Rastelli, C. Manzano, R. Songmuang, O.G. Schmidt, K. Kern, K. von Känel, Universal shapes of self-organized semiconductor quantum dots: striking similarities between InAs/GaAs(0 0 1) and Ge/Si(0 0 1), *Appl. Phys. Lett.* 85 (2004) 5673-5675.
- [15] D.E. Jesson, G. Chen, K.M. Chen, S.J. Pennycook, Self-limiting growth of strained faceted islands,*Phys.Rev.Lett.*80(1998)5156-5159.



สำนักหอสมุด

17 ส.ค. 2559

0 TA  
448.9  
อนทร  
ศึกษา  
มวช

16998379

## ส่วนที่ 2 เศษส่วนมวลของชั้นแทรก InGaAs ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติโครงสร้าง และ คุณสมบัติเชิงแสงของการปลูกควอนตัมดอท GaSb บนแผ่นฐาน GaAs (100)

### 1. บทนำ

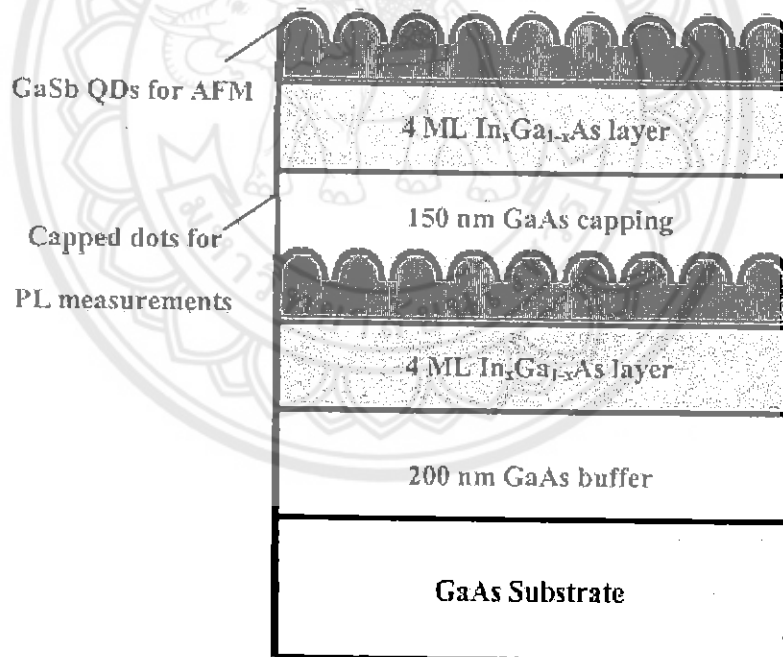
ควอนตัมดอทสารกึ่งตัวนำได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ในช่วงเวลาไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา ทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงโดยอาศัยการสับคั่นส่วนใหญ่ในเรื่อง III – V QDs [1-6] รวมไปถึงทรานซิสเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว, เลเซอร์ QD, ไดโอดเปล่งแสง, ตัวตรวจจับแสง และอุปกรณ์หน่วยความจำ อุปกรณ์เหล่านี้ได้มีการสับคั่นส่วนใหญ่ในเรื่อง In(Ga)As/GaAs QDs แบบก่อดตัวเอง ซึ่งมีการจัดเรียงแถบพลังงานแบบ II จะเหมาะสมมากสำหรับบางการประยุกต์ใช้ ตัวอย่างเช่น GaSb/GaAs QDs ถูกสาธิตว่ามีคุณสมบัติเฉพาะตัวในอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน อาทิ การปรับความกว้างของความยาวคลื่นสำหรับ LED, อุณหภูมิที่ทำงานสูงขึ้นสำหรับตัวตรวจจับแสงอินฟราเรด และเวลาสะสมสำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำ เนื่องจากการกีดกันโฮลขนาดใหญ่ และช่วงชีวิตพาหะที่ยาวนาน [7] สมรรถภาพอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ QD ซึ่งน่าสนใจในการศึกษาคุณสมบัติโครงสร้างของ QDs ภายใต้เงื่อนไขการปลูกที่ต่างกัน เพื่อที่จะปรับปรุงการนำไปประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามการศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของ GaSb/InGaAs/GaAs QDs ยังคงไม่เพียงพอ

ในบทความนี้จะศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้าง และสมบัติเชิงแสงของระบบทางกายภาพของควอนตัมดอท GaSb/InGaAs แบบ II ในชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ที่  $x=0.07, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  ตัวอย่างทั้งหมดสร้างโดยกระบวนการปลูกผลึกอิมพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) และการศึกษาโครงสร้าง QD โดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) เพื่อพิจารณา และวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของตัวอย่างที่ 20 K โดยวิธีกำหนดการใช้ที่ 514.5 nm ของแหล่งกำเนิดกระตุ้นเส้น (line excitation line) และตัวตรวจจับแสง InGaAs ทำให้เย็นลงด้วยไนโตรเจนเหลว (liquid-nitrogen cooled InGaAs photodetector)

### 2. การทดลอง

ขั้นตอนตัวอย่างการศึกษากการปลูกควอนตัมดอทบนแผ่นฐาน GaAs (100) ในระบบปลูกผลึกอิมพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Riber compact 21) ด้วยเซลล์วาล์วแคล็กเกอร์แอนติโมนี (Sb Valved Cracker Cell) การคายซับของพื้นผิวออกไซด์บนแผ่นฐาน GaAs ที่ 580 °C ภายใต้ลำ  $\text{As}_4$  ชั้นบัฟเฟอร์ GaAs มีความหนา 300 nm ถูกปลูกที่ 600 °C ด้วยอัตราการปลูก 0.5 ML/s ระหว่างการปลูกได้สังเกตรูปแบบการ

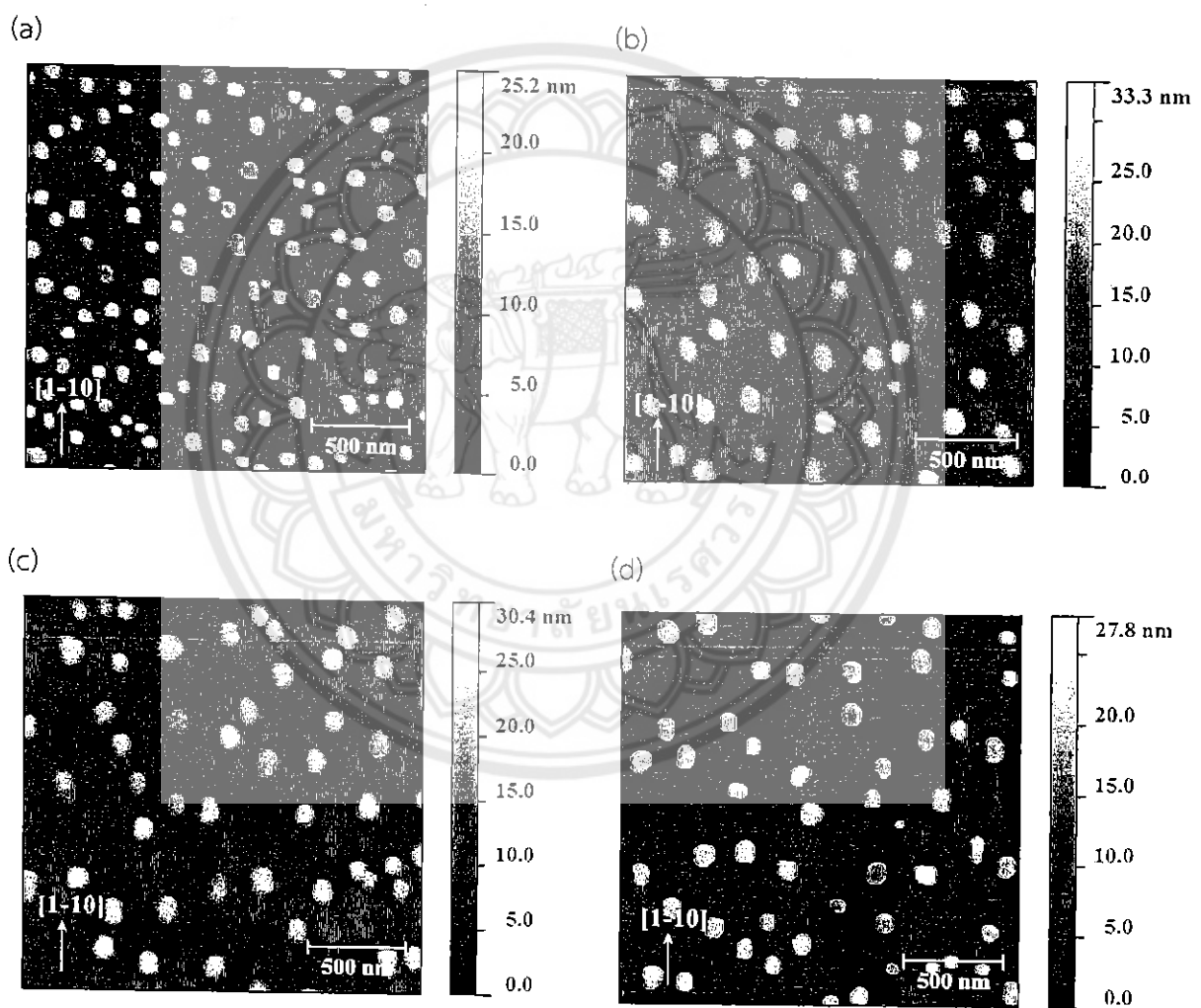
เลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่สะท้อน (Reflection High-Energy Electron Diffraction: RHEED) และชั้นบัฟเฟอร์ที่มีการเตรียมพร้อมอย่างดี ((100) พื้นผิว GaAs ) แสดงการสร้างใหม่ของพื้นผิวอย่างชัดเจน (2x4) เพื่อที่จะปลูกชั้นแทรก InGaAs ที่อุณหภูมิแผ่นฐานจะลดลงไปสู่ 500 °C หลังจากให้อุณหภูมิแผ่นฐานคงที่ ในการปลูกที่ 4 ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  อัตราการปลูก Indium และ Gallium ถูกเปลี่ยนแปลง เพื่อที่จะได้รับปริมาณ indium ตามต้องการ ในชั้น InGaAs ที่  $x=0.07, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  อัตราการปลูก Indium เป็น 0.025, 0.025, 0.025 และ 0.033 ML/s และอัตราการปลูก Gallium เป็น 0.33, 0.14, 0.10 และ 0.10 ML/s ตามลำดับ หลังจากปลูกชั้นแทรก InGaAs 4 ML พื้นผิวดัวอย่างจะถูกแก้ไขโดยฟลักซ์ Sb เป็นเวลา 60 s GaSb QDs แบบก่อดัวจะวางไว้ที่ชั้น GaSb ขนาด 3 ML ที่อัตราปลูก Gallium 0.1 ML/s อัตราฟลักซ์ V/III (Sb/Ga) เก็บเป็นค่าคงที่ 4 สำหรับการสืบค้นเชิงแสง QDs ที่ถูกปลูกกลับด้วยความหนา GaAs 150 nm ชั้นแทรก InGaAs 4 ML และ GaSb QDs ถูกปลูกใหม่อีกครั้งบนพื้นผิวด้านบน โดยปราศจากการปลูกกลับ GaSb QDs ด้านบน สำหรับการวิเคราะห์รูปร่างสัญญาณของพื้นผิว หลังจากการปลูกตัวอย่างถูกทำให้เย็นลง โดยใช้ AFM (Seiko SPA-400) รูปแบบแรงพลวัตในอากาศ สำหรับการทดสอบ PL เลเซอร์ Ar-ion ขนาด 514.5 nm ถูกใช้แหล่งจ่ายกระตุ้น และข้อมูลที่ได้รับจากตัวตรวจจับแสง InGaAs (Hamamatsu G9494) โครงสร้างแผนผังของตัวอย่าง GaSb ได้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพโครงสร้างของ GaSb QDs ชั้นแทรก InGaAs ขนาด 4 ML บนแผ่นฐาน GaAs (100)

### 3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากรูปที่ 2 แสดงภาพ AFM ของ GaSb QDs บนพื้นผิว  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (รูปที่ 2(a)-(d)) จากบริเวณที่เป็นจุดศูนย์กลางของแต่ละชั้นตัวอย่าง ชั้นตัวอย่างรูปร่างสี่เหลี่ยมของพื้นผิวที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อชั้น InGaAs ถูกแทรก ความหนาแน่นต่อหน่วยประมาณ  $1.2 - 2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ความหนาแน่น QD มีการลดลงอย่างมาก และขนาด QD มีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก การค่อยๆเปลี่ยนแปลงของรูปร่างสี่เหลี่ยมจะสังเกตเห็นเมื่อปริมาณ Indium เพิ่มขึ้น จาก  $x = 0.07$  (รูปที่ 2(a)) ถึง  $0.25$  (รูปที่ 2(d)) ทิศทางการยึดตัวของออกฐานเปลี่ยนแปลงจาก  $[110]$  ถึง  $[1-10]$  เมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรก เนื่องจากการมองเห็นความแตกต่างของปริมาณ Indium ในชั้นแทรก InGaAs ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Uniformity) ของ GaSb QDs มีการปรับปรุงเมื่อปริมาณ Indium เพิ่มขึ้น



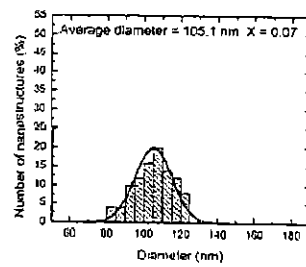
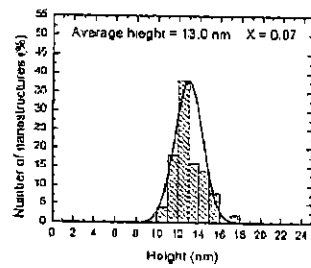
รูปที่ 2 (a) - (d) ภาพ AFM ขนาด  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  ของ GaSb QDs บน 4 ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ที่  $x=0.07, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  ตามลำดับ

การวิเคราะห์ของการกระจายความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ GaSb QDs บนชั้นแทรก InGaAs ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงในรูปฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นได้ชัดว่าทั้งความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง QD เพิ่มขึ้น เมื่อชั้นแทรก InGaAs ถูกแทรก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดเมื่อปริมาณ Indium เปลี่ยนแปลง โดยปริมาณ Indium มีการเพิ่มขึ้นมากขึ้น ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ QD เพิ่มขึ้น ยกเว้นเพียงกรณีเดียวที่ปริมาณ Indium  $x=0.25$  จะสังเกตเห็นการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลาง การเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ non-monotonic เกิดเนื่องจากปริมาณ Indium มีมากเกินไปบนพื้นผิว บางอะตอมของ Indium อาจกระจายและไปรวมตัวกับ GaSb QDs สังเกตเห็นปริมาณ Indium ใน GaSb มีการเพิ่มขึ้นของความเครียดที่ไม่เข้าคู่กัน (Mismatch Strain) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง QD เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานพื้นผิวเริ่มต้น พลังงานระหวางผิว และพลังงานความเครียดของระบบ QD [8]

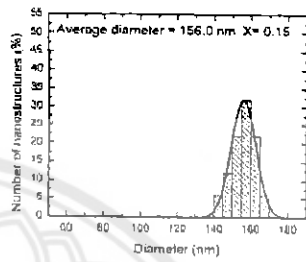
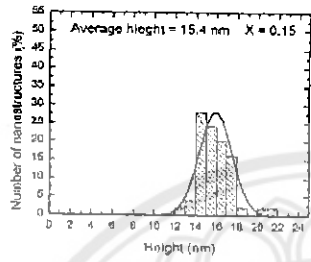




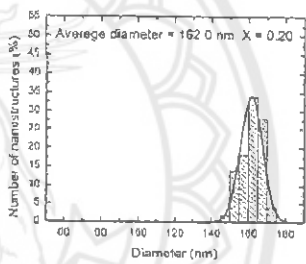
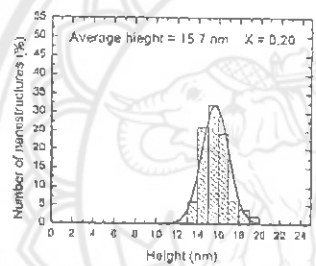
(a)



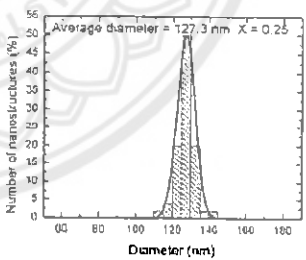
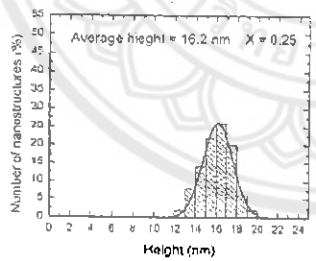
(b)



(c)



(d)

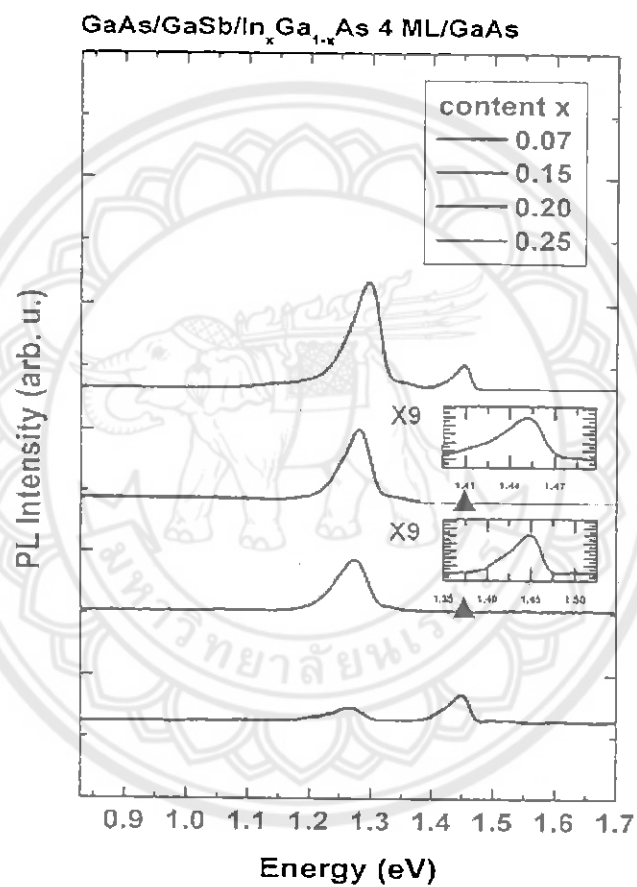


รูปที่ 3 (a) – (d) ฮิสโทแกรมของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลาง QD ของ GaSb QDs บน 4 ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ที่  $x=0.07, 0.15, 0.20$  และ  $0.25$  ตามลำดับ รูปเส้นคือการฟิตแบบเกาส์เซียน ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยดังแสดงในรูป

จากผลการทดลองที่สอดคล้องกันกับแบบจำลองถูกสังเกตจากการวัด PL ของชั้นตัวอย่างที่ถูกปลูกกลบ รูปที่ 4 แสดงสเปกตรัม PL ถูกวัดที่ 20 K จากการสังเกตการพึ่งพาของตำแหน่งยอดบนเศษส่วนมวลของชั้นแทรก InGaAs การเปล่งแสงกลายเป็นช่วงระดับพลังงานมาก (blueshift) เมื่อ

ปริมาณ Indium ในชั้นแทรก InGaAs เพิ่มขึ้น เพราะว่าการลดลงของความเครียดใน GaSb QDs อย่างไรก็ตามความเข้ม PL เพิ่มขึ้นด้วยปริมาณ Indium ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสิ่งนี้บ่งบอกว่าการกีดกันของอิเล็กตรอนในชั้นแทรก InGaAs สามารถปรับปรุงความเข้มข้นในกระบวนการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน (Carrier Recombination) ในโครงสร้างนี้ให้ดีขึ้น

ลักษณะพิเศษเฉพาะตัวของการจัดเรียงแถบพลังงานแบบ II ถูกเห็นเมื่อกำลังไฟฟ้าเลเซอร์มีหลากหลาย ความหนาแน่นของโฮลในดอทมีการเปลี่ยนแปลง ความแข็งแรงของการดึงดูดคูลอมบ์ (Coulomb Attraction) ถึงอิเล็กตรอน ดังนั้นความหนาแน่นกระตุ้นจะเพิ่มขึ้น ยอด PL เคลื่อนย้ายไปถึงค่าพลังงานสูงขึ้น ซึ่งสังเกตใน GaSb/GaAs QDs



รูปที่ 4 การวัด PL ของ GaSb QDs ที่ถูกปลูกกลบด้วยชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  4 ML

พฤติกรรมที่คาดว่าจะเป็พลังงานการเปล่งแสงแสดงอยู่ในรูป  $\sqrt{I}$  ของการพึ่งพาความเข้มกระตุ้น [9] รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างของสเปกตร้า PL ปกติของการปลูก GaSb QDs บนชั้นแทรก 4 ML  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  ที่ 20K ด้วยความเข้มกระตุ้นขนาด 5 และ 20mW ค่ายอดที่ A และ B เป็น 1.256 และ 1.443 eV ตามลำดับ ค่ายอดที่ A' และ B' เป็น 1.28 และ 1.448 eV ตามลำดับ ค่ายอดที่ A และ A' มาจากการเปล่งแสง GaSb QD เนื่องจากการแลกเปลี่ยนระหว่าง Antimony และ Arsenic บนพื้นผิวระหว่าง GaAs การปลูกที่มากเกินไปหรือน้อยกว่าส่งผลต่อขนาดต่อทภายหลังการปลูกที่มากเกินไป [10,11] ค่ายอดที่ B และ B' ประมาณ 1.44 eV เกิดขึ้นใน Si(As-site) ด้วย Bulk GaAs และถูกสันนิษฐานเกี่ยวกับสิ่งเจือปนที่ต้องพึ่งพาระบบอื่นๆ (System-Dependent Impurities) [1] จากกรณีทั้งหมด Blueshift ของพลังงานเปล่งแสงจะเห็นความเข้มกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น

#### 4. สรุป

การศึกษาอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับผลกระทบเศษส่วนมวลของชั้นแทรก InGaAs บนคุณสมบัติโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงแสงของการปลูก GaSb QDs บนแผ่นฐาน GaAs ความหนาแน่นของ GaSb QDs บนชั้นแทรก InGaAs มีค่าประมาณ  $1.2\text{-}2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Uniformity) ของ GaSb QDs ถูกปรับปรุงเมื่อปริมาณ Indium ลดลง ความเข้มชั้น PL สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของชั้นแทรก InGaAs ซึ่งสิ่งนี้จะบ่งบอกว่าการกักกันอิเล็กตรอนในชั้นแทรก InGaAs สามารถปรับปรุงกระบวนการรวมตัวกันในโครงสร้างแบบนี้ให้ดีขึ้น

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, B.V. Volovik, Y.G. Musikhin, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, J.A. Lott, and D. Bimberg, "1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers and VCSELs grown by molecular beam epitaxy," *J. Cryst. Growth* 227-228 (2001) 1155-1161.
- [2] J. Sabarinathan, P. Bhattacharya, P.-C. Yu, and S. Krishna, "An electrically injected InAs/GaAs quantum-dot photonic crystal microcavity light-emitting diode," *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 3876-3878.
- [3] K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, S. Fujimoto, K. Hirotsu, and H. Sakaki, "High-sensitivity modulation-doped quantum dot infrared photodetectors," *Microelec. Eng.* 63 (2002) 185-190.
- [4] K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, and Y. Arakawa, "High efficiency InAs/GaAs quantum dot solar cells by metalorganic chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 193905.
- [5] M. Hayne, R.J. Young, E.P. Smakman, T. Nowozin, P. Hoidgson, J.K. Garleff, P. Rambabu, P.M. Koenraad, A. Marent, L. Bonato, A. Schliwa, and D. Bimberg, "The

- structural, electronic and optical properties of GaSb/GaAs nanostructures for charge-based memory," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** (2013) 264001.
- [6] C.-C. Tseng, W.-H. Lin, S.-Y. Wu, S.-H. Chen, and S.-Y. Lin, "The transition mechanisms of type-II GaSb/GaAs quantum-dot infrared light-emitting diodes," *J. Cryst. Growth* **323** (2011) 466-469.
- [7] W.-H. Lin, C.-C. Tseng, S.-Y. Wu, W.-H. Wu, S.-Y. Lin, and MC. Wu, "The influence of background As on GaSb/GaAs quantum dots and its application in infrared photodetectors." *Phys. Status Solidi C* **9(2)** (2012) 314-317.
- [8] H. Eisele and M. Dähne, "Critical thickness of the 2-dimensional to 3-dimensional transition in GaSb/GaAs(001) quantum dot growth," *J. Cryst. Growth* **338** (2012) 103-106.
- [9] I. Farrer, M.J. Murphy, D.A. Ritchie, and A.J. Shields, "Room temperature 1.3 $\mu$ m emission from self-assembled GaSb/GaAs quantum dots," *J. Cryst Growth* **251(1-4)** (2003) 771-776.
- [10] G. Balakrishnan, J. Tatebayashi, A. Khoshakhlugh, S.H. Huang, A. Jallipalli, L.R. Dawson, and D.L. Huffaker "III/V ratio based selectivity between strain Stranki-Krastanov and strain-free GaSb quantum dots on GaAs," *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 161104.
- [11] C.-K. Sun, G. Wang, J.E. Bowers, B. Brar, H.-R. Blank, H. Kroemer, and M.H. Pikunhn, "Optical investigation of the dynamic behavior of GaSb/GaAs quantum dots," *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 1543-1545.
- [12] E. H. C. Parker, *The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy*, Sir John Cass School of Physical Science and Technology city of London Polytechnic London, England (1985) 107-109.

## ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ

### ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่มีค่า Impact Factor

1. K. Khoklang, S. Kiravittaya, M. Kunrugs, P. Prongjit, S. Thainoi, S. Ratanathamphan and S. Panyakeow  
Molecular beam epitaxial growth of GaSb quantum dots on (0 0 1) GaAs substrate with InGaAs insertion layer  
Journal of Crystal Growth 425, 291-294 (2015)

### ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่ไม่มีค่า Impact Factor

1. S. Sriphan, S. Kiravittaya, S. Thainoi and S. Panyakeow  
*Effects of temperature on I-V characteristics of InAs/GaAs quantum dot solar cells*  
Advanced Materials Research 1103, 129-135 (2015)

### นำเสนอในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ

1. Kamonchanok Khoklang, Suwit Kiravittaya, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan  
In-mole-fraction of InGaAs insertion layers effects on the structural and optical properties of GaSb quantum-dot grown on (100) GaAs substrate  
Proceedings of the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Conference (ECTI-CON) (2015)
2. Saichon Sriphan and Suwit Kiravittaya  
Virtual acceleration of sensor response by a prediction model: a case study on pH sensor  
Proceedings of International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT) 2015 p.12-14 (2015)
3. Suwit Kiravittaya, Kwanchanok Nounnapasri, Theeraphong Seefong, and Settha

Tangkawanit

Low-power wireless sensor network for measuring water content in paddy field

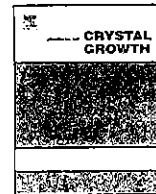
Proceedings of International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT) 2015 p.39-42 (2015)

#### นำเสนอในการประชุมวิชาการในระดับชาติ

1. Suwit Kiravittaya, Jutaphet Wetcharungsri, Paramin Sangwongngam, and Kiattisak Sripimanwat  
Effects of excessive photons in optical quantum communication  
Proceedings of the 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38) vol. 2 p. 765-768. (2015)
2. Kantaphon Lonphan, Nuntawat Oudee, Paisarn Muneesawang, and Suwit Kiravittaya  
X-ray Image stitching of high-voltage circuit breaker by digital image processing  
Proceedings of the 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38) vol. 2 p. 749-752. (2015)
3. Srichon Sriphan and Suwit Kiravittaya  
Electrical characteristics of LEDs for visible light communication  
Proceedings of the 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38) vol. 2 p. 777-780. (2015)

บทความสำหรับเผยแพร่





# Molecular beam epitaxial growth of GaSb quantum dots on (0 0 1) GaAs substrate with InGaAs insertion layer



Kamonchanok Khoklang<sup>a</sup>, Suwit Kiravittaya<sup>b</sup>, Maetee Kunrugsa<sup>a</sup>, Patchareewan Prongjit<sup>a</sup>, Supachok Thainoi<sup>a</sup>, Somchai Ratanathamphan<sup>a</sup>, Somsak Panyakeow<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> The Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>b</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

## ARTICLE INFO

Available online 21 February 2015

### Keywords:

- A1. Quantum dots
- A3. Molecular beam epitaxy
- B2. Semiconducting III–V materials

## ABSTRACT

We report on the molecular beam epitaxial growth of self-assembled GaSb quantum dots (QDs) on (0 0 1) GaAs substrates with an insertion layer. The insertion layer, which is a 4-monolayers (MLs)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x=0.00, 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ ), is grown prior to the QD growth. With this InGaAs insertion layer, the obtained QD density decreases substantially, while the QD height and diameter increase as compared with typical GaSb QDs grown on conventional (0 0 1) GaAs surface under the same growth condition. The GaSb QDs on GaAs have the dome shape with elliptical base and the elongation direction of the base is along the [1 1 0] direction. When the InGaAs insertion layer is introduced, the distinct elongation disappears and the QD sidewall shows facet-related surfaces with (0 0 1) plateau on top.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

For a few decades, semiconductor quantum dots (QDs) have gained considerable interests due to their promising properties for device applications. Many electronic and optoelectronic devices based on III–V QDs have been investigated [1–6]. They include lasers, light emitting diodes, photodetectors, photovoltaic cells and memories. Among these devices, self-assembled In(Ga)As/GaAs QD is a major dot system that has been investigated. However, GaSb/GaAs QDs, which have a type II band alignment, might be more suitable for some applications. For instance, GaSb/GaAs has been proposed to be used in charge-based memory device due to its large hole confinement [5]. Device performance will depend on the QD properties. It is therefore of interest to investigate structural properties of obtained QDs under various growth conditions in order to fine-tune them for any specific applications. In literature, different GaSb QD shapes have been reported [7,8]. For example, Jiang et al. [7] have shown that the elongation of GaSb QDs along the [1 1 0] direction can be controlled by changing the V/III ratio.

In this work, we report on the structural properties of free-standing self-assembled GaSb QDs when  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layers with  $x=0.00, 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$  are introduced. All samples were grown by a molecular beam epitaxy (MBE) with an Sb valved-cracker cell and investigated by atomic force microscopy (AFM). The presence of indium in InGaAs insertion layer induces the substantial decrement of QD density, the enlargement of QD size (both height and diameter) and the transition from elongated QD shape to QD with facet-related sidewalls and (0 0 1) plateau on top.

## 2. Experiments

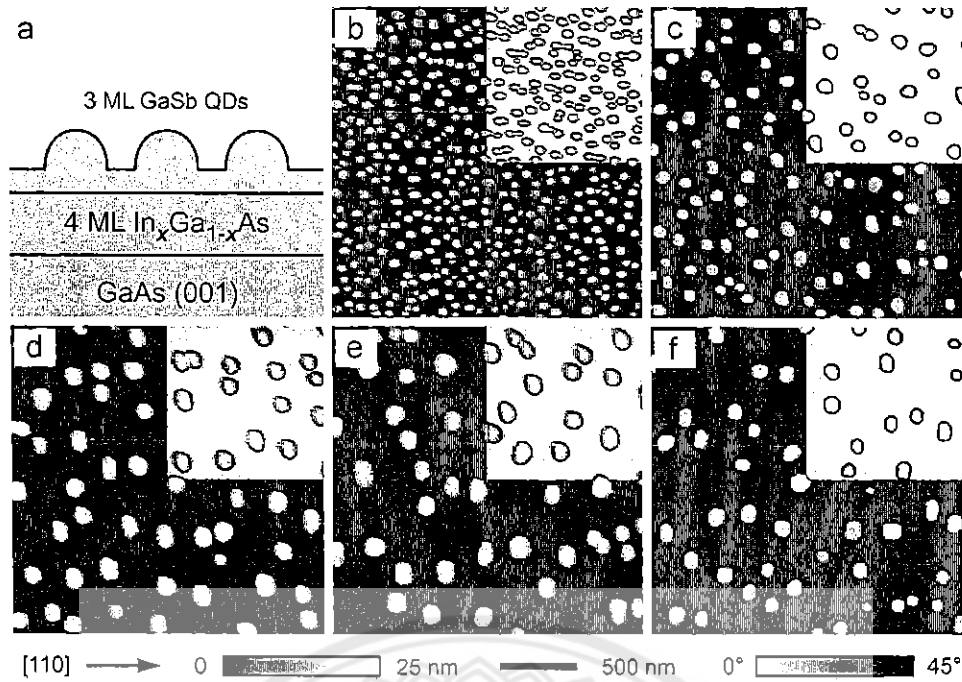
All samples were grown on semi-insulating (0 0 1) GaAs substrates in Riber Compact 21 solid-source MBE equipped with an Sb valved-cracker cell. After the deoxidation of surface oxide on GaAs substrate at 580 °C under  $\text{As}_4$  atmosphere, GaAs buffer layer was grown at this temperature with the growth rate of 0.5 monolayer per second (ML/s). During the growth, reflection high-energy electron diffraction (RHEED) pattern was observed and well-prepared buffer layer ((0 0 1) GaAs surface) showed a clear ( $2 \times 4$ ) surface reconstruction. In order to grow the InGaAs insertion layer, the substrate temperature was ramped down to 500 °C. After the substrate temperature stabilized, 4-ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  was grown. This thickness is chosen so as to have a flat InGaAs surface without any surface relaxation [9]. When growing this layer, indium and gallium

\* Correspondence to: The Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand. Tel.: +66 2 218 6523; fax: +66 2 218 6523.

E-mail addresses: [s\\_panyakeow@yahoo.com](mailto:s_panyakeow@yahoo.com), [Somsak.P@chula.ac.th](mailto:Somsak.P@chula.ac.th) (S. Panyakeow).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2015.02.044>  
0022-0248/© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.





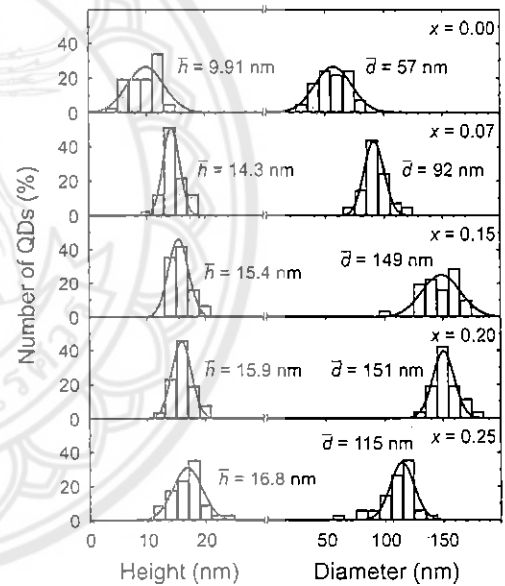
**Fig. 1.** (a) Schematic diagram of the investigated structure: GaSb QDs (3 ML) on top of 4-ML-thick  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layer. (b)–(e)  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  AFM images of GaSb QDs on GaAs (Fig. 1(b)) and on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (Fig. 1(c)–(f)) surfaces. Insets show a portion of the same AFM images with surface slope scale.

growth rates are changed in order to obtain the desired content of indium in InGaAs layer. For  $x=0.07, 0.15, 0.20,$  and  $0.25$ , the indium rates are 0.025, 0.025, 0.025, and 0.033 ML/s and gallium rates are 0.33, 0.14, 0.10, and 0.10 ML/s, respectively. After the InGaAs insertion layer growth, the sample surface was soaked by Sb flux for 60 s. Self-assembled GaSb QDs are obtained by depositing 3-ML GaSb at the gallium growth rate of 0.1 ML/s. The V/III flux ratio (Sb/Ga) is kept constant at 4. After the growth, the sample was cooled down immediately. The surface morphology was characterized by an AFM (Seiko SPA-400) in dynamic force mode in air and the post-processing was done in MATLAB program.

### 3. Results and discussion

Fig. 1(a) shows a schematic diagram of investigated surface structure. Fig. 1(b)–(e) show  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  AFM images of GaSb QDs on GaAs (Fig. 1(b)) and on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (Fig. 1(c)–(f)) surfaces. Insets of AFM images in Fig. 1(b)–(f) show a portion of the surface (obtained from the same AFM image) with surface slope scale [10]. Distinct surface morphology is observed when  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer is introduced, i.e., QD density substantially decreases and QD size increases. Gradual morphology changes are still observed when the indium content increases from  $x=0.07$  (Fig. 1(c)) to 0.25 (Fig. 1(f)). This is due to the presence of different amount of indium in the InGaAs insertion layer.

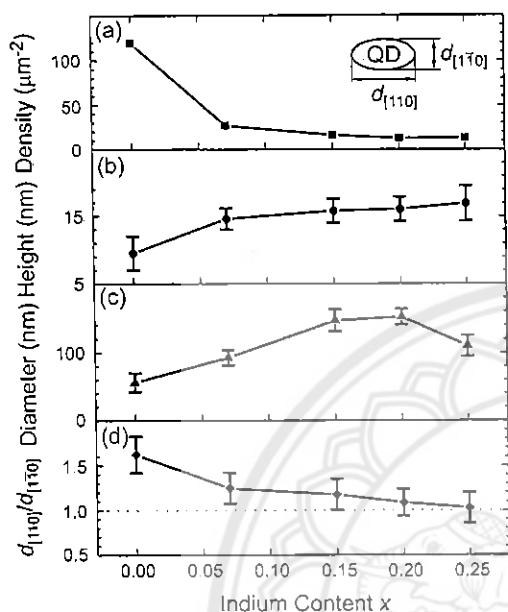
Analysis of height and diameter distributions of GaSb QDs on different InGaAs insertion layers is displayed as histograms in Fig. 2. The data are obtained from the analysis of *individual* QD in each AFM image (shown in Fig. 1(b)–(e)). First, the QD base area is extracted from the largest closed-loop contour line of contour plots of the AFM data. The QD diameter is then calculated with a circular base approximation. The QD height is obtained from the difference between the height level of the largest closed-loop contour line and the maximum height data. Histograms of QD height and QD diameter are then fitted with Gaussian functions. Fitted center positions together with the fitted curves are shown in Fig. 2. From this figure, one can clearly see that both QD height and diameter increase when the InGaAs insertion layer is



**Fig. 2.** Histograms of QD height and diameter distribution of GaSb QDs on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  with  $x=0.00$  (top), 0.07, 0.15, 0.20 and 0.25 (bottom). Solid lines are Gaussian function fits. Center position of the obtained Gaussian function fits are indicated in the figures.

introduced. Abrupt change is observed when the indium content is changed from  $x=0.0$  (no insertion layer) to  $x=0.07$ . By further increasing the indium content, the QD height and diameter increase except only at the indium content of  $x=0.25$  where we observe the reduction of diameter. This non-monotonic diameter change might be due to the excessively high indium content on the surface. Indium adatoms might still present after 60-s Sb-soaking process because of their initially high content. Incorporating indium atoms into GaSb QDs induce high mismatch strain and enhance the growth of large aspect ratio QDs since the QD with a high ratio can relax more strain [11].

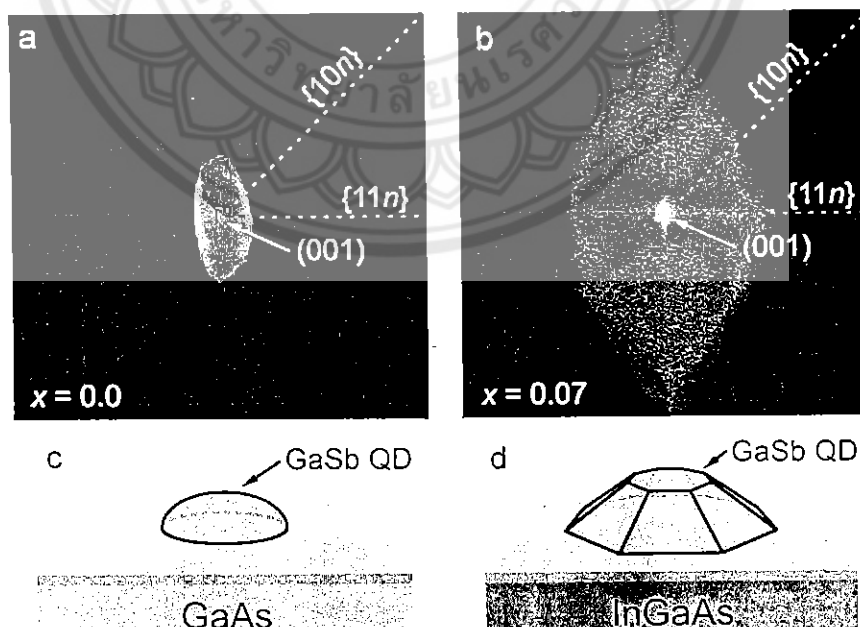
Fig. 3 summarizes the structural variation of GaSb QDs on the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layer as a function of indium content in the insertion layer. When the InGaAs insertion layer is introduced, the QD density reduces, whereas QD height and diameter increase, as depicted in Fig. 3(a)–(c). The initial GaSb QD density, which is about  $120\ \mu\text{m}^{-2}$ , decreases to less than  $30\ \mu\text{m}^{-2}$ , while the average QD height increases about 1.5 times (from 9.5 nm for  $x=0.0$  to 14.5 nm for  $x=0.07$ ) when the  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  layer is inserted. These observations are attributed to the change of initial surface energy, interface energy as well as the strain energy of the QD system [11,12].



**Fig. 3.** Variations of (a) QD density, (b) average QD height, (c) average QD diameter and (d) degree of elongation (defined as  $d_{[110]}/d_{[110]}$ ) as a function of indium content  $x$  in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layer. Inset of (a) shows the definition of  $d_{[110]}$  and  $d_{[110]}$ . The error bars in (b)–(d) are the standard deviation of the values.

To investigate the QD shape anisotropy, we define a degree of QD elongation as the ratio  $d_{[110]}/d_{[110]}$ , where  $d_{[110]}$  and  $d_{[110]}$  is the length of QD base along the  $[110]$  and  $[110]$  direction, respectively. Inset of Fig. 3(a) shows a schematic diagram of a QD with these lengths. Fig. 3(d) displays the degree of elongation as a function of indium content obtained from the AFM data. The elongation of GaSb QD shape gradually changes from a clear elongation along the  $[110]$  direction to almost isotropic (no elongation) QD shape. This change can relate to the distinct  $\{11n\}$ -facet formation on QD surface when the InGaAs insertion layer is introduced and it will be explained below. It is noteworthy that this structural elongation influences the intrinsic properties of QDs such as their polarization dependency [7] and their transport properties [13].

For further quantifying the QD shape, a surface orientation mapping, which is so-called facet plot, is analyzed [10,14]. Fig. 4(a) shows the facet plot obtained from the QD surface of a GaSb QD without InGaAs insertion layer as compared that with  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  insertion layer (Fig. 4(b)). From these plots (and also the insets of Fig. 1(b)–(f)), we can clearly see that the  $(001)$  surface as a plateau on top of each GaSb QD is present when InGaAs insertion layer is introduced. This plateau is also observed in other AFM images of GaSb QDs grown on InGaAs surface (not shown). Apart from this plateau, other facet surfaces, which are likely to orient along the  $\{11n\}$  directions, are observed in the facet plot (see Fig. 4(b)). The facet-related surfaces are on the sidewall of the QDs. It is known from previous theoretical growth study that facet can form on the sidewall of QD due to its low surface energies [15]. This induces the so-called self-limiting growth, which stabilizes the QD size and shape. When indium content in the insertion layer increases, the sidewall facets tend to become steeper. However, due to the limited resolution of our AFM, we cannot fully identify the facet indices. Based on our investigation, we can draw simple illustrations for the shape of GaSb QD grown on GaAs and InGaAs surfaces as shown in Fig. 4(c) and (d), respectively. For GaSb QDs on GaAs, we obtain an elongated base QD with rather round shape, while the GaSb QDs on InGaAs show some faceted surfaces with the  $(001)$  plateau on top. Moreover, the height and diameter of GaSb QDs on InGaAs are larger than those on GaAs.



**Fig. 4.** Facet plots obtained from the QD surface of a GaSb QD (a) without and (b) with  $\text{In}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$  insertion layer. (c) and (d) are illustrations of GaSb QD on  $(001)$  GaAs surface and on  $(001)$  InGaAs surface. Relatively small QDs, which are elongated along the  $[110]$  direction, are observed for GaSb growth on GaAs, while large facet-related GaSb QDs are formed when InGaAs insertion layer is introduced before the QD growth.

#### 4. Conclusions

We present an investigation of structural morphology of self-assembled GaSb QDs on (0 0 1) GaAs substrates. We have shown that when the InGaAs insertion layer is introduced, the obtained QD morphology considerably changes. The QD density decrement as well as QD size (height and diameter) enlargement are observed. Besides, the degree of QD elongation changes from a distinct elongation along the [1 1 0] direction to an isotropic shape when the indium content in InGaAs insertion layer increases. Finally, we have shown that the GaSb QDs on InGaAs have a clear (0 0 1) plateau on top and facet-related surfaces on the sidewalls.

#### Acknowledgments

This research work is financial supported by Asian Office of Aerospace Research and Development (AOARD) (grant no. FA2386-14-1-4081), Thailand Research Fund (TRF), Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (PHD/0026/2554), Office of High Education Commission (OHEC) and Chulalongkorn University in research contacts, namely Distinguished Research Professor Grant (contact no. DPG5380002), and Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund of Chulalongkorn University (RESS60530079-EN). In addition, recent support from Chulalongkorn University to strengthen university research capability on the occasion of 100th year anniversary is also acknowledged. The authors are also indebted in long term financial support from Nanotechnology Center of Thailand in the past 5 years.

#### References

- [1] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, B.V. Volovik, Y. G. Musilchin, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsulnikov, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, J.A. Lott, D. Bimberg, 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers and VCSELs grown by molecular beam epitaxy, *J. Cryst. Growth* 227–228 (2001) 1155–1161.
- [2] J. Sabarinathan, P. Bhattacharya, P.-C. Yu, S. Krishna, An electrically injected InAs/GaAs quantum-dot photonic crystal microcavity light-emitting diode, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 3876–3878.
- [3] K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, S. Fujimoto, K. Hirotsu, H. Sakaki, High-sensitivity modulation-doped quantum dot infrared photodetectors, *Microelectron. Eng.* 63 (2002) 185–192.
- [4] K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, Y. Arakawa, High-efficiency InAs/GaAs quantum dot solar cells by metalorganic chemical vapour deposition, *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 193905.
- [5] M. Hayne, R.J. Young, E.P. Smakman, T. Nowozin, P. Hoidgson, J.K. Garleff, P. Rambabu, P.M. Koenraad, A. Marent, L. Bonato, A. Schliwa, D. Bimberg, The structural, electronic and optical properties of GaSb/GaAs nanostructures for charge-based memory, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013) 264001.
- [6] C.C. Tseng, W.-H. Lin, S.-Y. Wu, S.-H. Chen, S.-Y. Lin, The transition mechanisms of type-II GaSb/GaAs quantum-dot infrared light-emitting diodes, *J. Cryst. Growth* 323 (2011) 466–469.
- [7] C. Jiang, T. Kawazu, S. Kobayashi, H. Sakaki, Molecular beam epitaxial of very large anisotropic GaSb/GaAs quantum dots, *J. Cryst. Growth* 301–302 (2007) 828–832.
- [8] M. Kunrugsu, S. Kiravittaya, S. Sopotpan, S. Ratanathamaphan, S. Panyakeow, Molecular beam epitaxial growth of GaSb/GaAs quantum dots on Ge substrates, *J. Cryst. Growth* 401 (2014) 441–444.
- [9] G.L. Price, Critical-thickness and growth-mode transitions in highly strained  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  films, *Phys. Rev. Lett.* 66 (1991) 469–472.
- [10] S. Kiravittaya, A. Rastelli, O.G. Schmidt, Self-assembled InAs quantum dots on patterned GaAs(0 0 1) substrates: formation and shape evolution, *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) 243112.
- [11] V.A. Shchukin, D. Bimberg, Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces, *Rev. Mod. Phys.* 71 (1999) 1125–1171.
- [12] H. Eisele, M. Dähne, Critical thickness of the 2-dimensional to 3-dimensional transition in GaSb/GaAs(0 0 1) quantum dot growth, *J. Cryst. Growth* 338 (2012) 103–106.
- [13] C. Li, C. Jiang, H. Sakaki, Anisotropic scattering of elongated GaSb/GaAs quantum dots embedded near two-dimensional electron gas, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 11 (2010) 10792–10795.
- [14] G. Costantini, A. Rastelli, C. Manzano, R. Songmuang, O.G. Schmidt, K. Kern, K. von Känel, Universal shapes of self-organized semiconductor quantum dots: striking similarities between InAs/GaAs(0 0 1) and Ge/Si(0 0 1), *Appl. Phys. Lett.* 85 (2004) 5673–5675.
- [15] D.E. Jesson, G. Chen, K.M. Chen, S.J. Pennycook, Self-limiting growth of strained faceted islands, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 5156–5159.

# Effects of Temperature on I-V Characteristics of InAs/GaAs Quantum-Dot Solar Cells

Saichon Sriphan<sup>1, a\*</sup>, Suwit Kiravittaya<sup>1, b</sup>,  
Supachok Thainoi<sup>2, c</sup> and Somsak Panyakeow<sup>2, d</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.

<sup>2</sup>The Semiconductor Device Research Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

<sup>a</sup>Saichon\_Sriphan@hotmail.com, <sup>b</sup>Suwitki@gmail.com,  
<sup>c</sup>Supachok.t@chula.ac.th and <sup>d</sup>Somsak.P@chula.ac.th

**Keywords:** Nanostructure, Quantum-Dot Solar Cell, Current-Voltage Characteristics

**Abstract.** The current-voltage (*I-V*) characteristics of quantum-dot (QD) solar cells under illumination at various temperatures are presented. High-density self-assembled InAs/GaAs QDs were incorporated into the solar cell structure. The *I-V* characteristics reveal that both short-circuit current and open-circuit voltage of the QD solar cell reduce when the measurement temperature increases. This result is unexpected and inconsistent with a basic solar cell theory where the temperature is believed to cause the enhancement of the short-circuit current. By analysis, we can explain the obtained *I-V* curves by high series resistances and low shunt resistances of the cell structure.

## Introduction

Semiconductor quantum dot (QD) is a nanostructure that can be engineered in various aspects. Nowadays, QDs have been demonstrated as an efficient photon-absorbing material in solar cell structures. Because QDs have bandgaps that are tunable across a wide range by changing the size, incident photons can be more effectively absorbed. Understanding basic properties of these devices are necessary in order to properly utilize them in realistic environment.

Self-assembled QDs are of considerable interest due to their atomic-like properties and defect-free nanostructure. They are attractive for studying physics in zero-dimensional system and offer many opto-electronic device applications including photovoltaic application. The technology and physical parameters have been studied intensively during the past thirty years. QDs are also proposed for using as intermediate band in novel solar cell [1,2]. Although there are many QD growth techniques nowadays, the Stranski-Krastanow growth mode is still the most widely used method for producing QD structure [3-7]. Fabrication of QD arrays with narrow size distribution, high QD density, or large QDs for long emission wavelengths have been demonstrated [3,4,6-8]. Self-assembled InAs QDs can be formed on GaAs substrates by the Stranski-Krastanow growth mode due to the 7% lattice mismatch between InAs and GaAs. The growth of self-assembled InAs QDs on a GaAs substrate in standard molecular beam epitaxial (MBE) process results in a dot density in the range of  $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . These as-grown QDs have a too low dot density and the expected benefits of photon absorption at long wavelengths are minimal. Many techniques for improving QD quality have been proposed. For example, buffer layers with different composition like InGaAs or GaAsSb [6] have been used to increase the QD density or the QD size. Generally, the QD structures grown by MBE are preferred due to the higher quality of the interfaces between QDs and the buffer and the covering layers [9].

Although there exist techniques to improve the QD quality, there are other external factors that may cause defects and those can reduce the efficiency of a QD solar cell. Operating temperature is one important external factor. Analysis of this factor is important because it can affect the cell

performance. For instance, increasing temperature may reduce open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) then the maximum power point (MPP) is also changed [10,11]. Typically, the steady-state current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristics of a solar cell are often described based on one diode model [12] as given in

$$I_{cell} = -I_{ph} + I_o \left[ \exp \left( \frac{q}{nkT_{cell}} (V_{cell} - I_{cell} R_s) \right) - 1 \right] + \frac{(V_{cell} - I_{cell} R_s)}{R_{sh}}, \quad (1)$$

where  $I_{ph}$  is the light-generated current,  $q$  is electron charge,  $k$  is Boltzmann constant and  $T_{cell}$  is the cell temperature,  $R_{sh}$  is the shunt resistance,  $R_s$  is the series resistance,  $n$  is the diode ideality factor and  $I_o$  is the reverse saturation current of the cell. This equation is typically useful to describe the  $I$ - $V$  characteristics of a solar cell when parameters ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $n$  and  $I_o$ ) are typical.

Four major parameters: series resistance, shunt resistance, diode ideality factor, and reverse saturation current of Eq. (1) are important parameters that can be varied because of internal and external device design. They can strongly affect the solar cell efficiency. The series resistance is a parasitic -- power consuming parameter [13] because it decreases the maximum achievable output power. Lindmayer and Allison [14] have reported the fill factor decrement by about 2.5% for each 0.1  $\Omega$  increment in series resistance. The shunt resistance represents a current leakage (power loss) in the solar cell. The standard solar cell has usually  $R_{sh}$  of more than  $10^3 \Omega$  [15]. Low  $R_{sh}$  due to crystal damage and impurities in and near the junction will give rise to a high shunt current [13]. Therefore cell efficiency will be reduced by these factors. Controlling these parameters is important to enhance the cell efficiency. Many researchers have studied the effects of temperature on general solar cells but it has not been reported for QD solar cells.

This paper aims to present and discuss the effects of temperature on QD solar cells. It is divided into two sections: Section I is an introduction and details of the investigated cell structure. Section II consists of experimental procedures, results and discussion on the tested QD solar cell at various controlled temperatures.

## QD Solar Cell Structure

Stacks of high-density self-assembled InAs/GaAs QDs were incorporated into the QD solar cell sample structure as shown in Fig. 1(a). The samples were fabricated by using an MBE and a metal evaporator [3]. P-type GaAs substrates were used as the starting material. After the growth of 500-nm GaAs layer, as-grown InAs QDs were formed. A Si-doped (n-type) AlGaAs heterojunction was formed for next layer. Finally, a 20-nm thin  $n^+$ -GaAs layer was grown in order to achieve a good ohmic contact (AuGe/Ni). AuZn was grown on the back in order to form an ohmic contact to the p-GaAs substrate. Figure 1(b) shows a QD solar cell used in this experiment. The cell surface area is about  $5 \times 10 \text{ mm}^2$ .

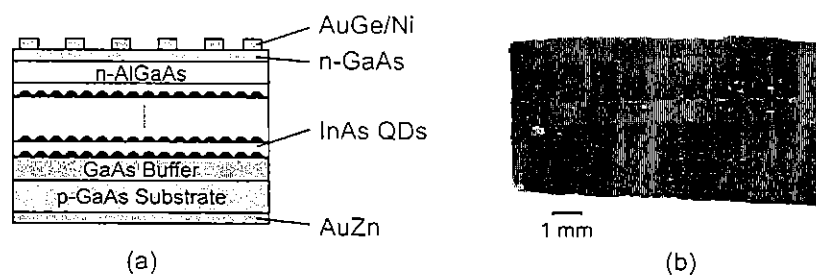


Fig. 1 (a) QD solar cell structure with stacked of high density self-assembled InAs/GaAs QDs and (b) a photograph of QD solar cell sample used in this experiment.

## Experimental Procedure

### 1. Experimental Setup

The 24V 300W tungsten lamp was used as an artificial light source. It provides a low level of long-wavelength radiation compared to the actual solar source [3]. We used Agilent E3633A DC power supply as voltage source, Agilent 34401A digital multimeter as voltmeter and Keithley 6485 picoammeter as ammeter. The temperature variation of QD solar cell is observed by Agilent U1186A K-type thermocouple used with Agilent U1233A multimeter. The 5.5V 0.5W commercial solar cell is used as a reference cell to accurately calibrate with QD solar cell at various temperatures.

### 2. Measurement circuit

The circuit used for evaluating the  $I$ - $V$  characteristics of tested solar cell is shown in Fig. 2. The left-hand side of figure is a solar cell equivalent circuit; it essentially consists of a current source shunted by a diode. These two elements correspond to generation and loss of photocurrent in the device [12]. The  $R_s$  and  $R_{sh}$  are also included and they directly affect the  $I$ - $V$  characteristics [13,15]. A relation between  $I_{cell}$  and  $V_{cell}$  can generally be described based on the diode model as given in Eq. (1). The right-hand side is a group of measurement devices. The group consists of a voltmeter which measures  $V_{cell}$ , an ammeter which measures  $I_{cell}$  and a voltage source which generates voltage  $V_s$ , respectively. When light (photons) with energy more than the band gap of the absorber material hits p-n junction, it creates electron-hole pairs. Due to the built-in electric field, photon produced carriers are transported to the electrodes [16], generating electricity. The voltage source will distribute a constant voltage step. The measurement devices will simultaneously measure current and voltage at controlled temperature.

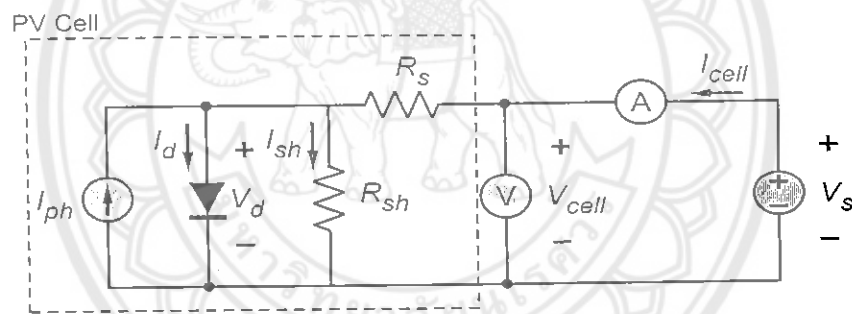


Fig. 2 The  $I$ - $V$  characteristic measurement circuit

### 3. Experimental Steps

In case of the measurement with light illumination, we started by shining light to the tested cell. After that, a constant voltage is applied. The receiving data, which are cell current and voltage, were kept for subsequent analysis. In case of dark condition, we put the tested cell into a black box. This measurement procedure was similar to the measurement with light illumination.

We separated the data into 3 groups. They are (i)  $I$ - $V$  data of QD solar cell, (ii)  $I$ - $V$  data of QD solar cell when temperature is varied and (iii)  $I$ - $V$  data of reference cell.

#### (i) $I$ - $V$ data of QD solar cell

The QD solar cell described above is measured in the case where the temperature effect is ignored. The measurement confirms the solar cell properties as shown in Fig. 3 and discussed below.

#### (ii) $I$ - $V$ data of QD solar cell when temperature is varied

Temperature was varied between 30 °C and 60 °C to study the effects of temperature. During the  $I$ - $V$  measurement, a thermocouple was also used to monitor temperature.

### (iii) $I$ - $V$ data of reference cell

The reference cell is used to prove a basic solar-cell theory and compare it with the QD solar cell. The temperature observation was done as before. The results are not shown in this paper.

The (i) and (ii) are plotted while only data from (ii) were fitted for finding  $I_{ph}$ ,  $n$ ,  $I_o$ ,  $R_s$ , and  $R_{sh}$ . The plotted and fitting data are showed in the next section.

## Result and Discussion

The measurement taken in the dark showed that the  $I$ - $V$  characteristic of QD solar cell behaves like a typical diode (see Fig. 3(a)). Under illumination, a large leakage current affects a low open-circuit voltage  $V_{oc}$  closed to 0.4 V and it has a short-circuit current  $I_{sc}$  of approximately 2 mA. The very low  $I_{sc}$  value is inconsistent with the report in Ref. [3] because the light source used provided low light intensity in this experiment. It has 0.15 mW of maximum power at the maximum power point (MPP); approximately 0.9 mA and 0.17 V. This result therefore confirms that this device has solar-cell characteristics.

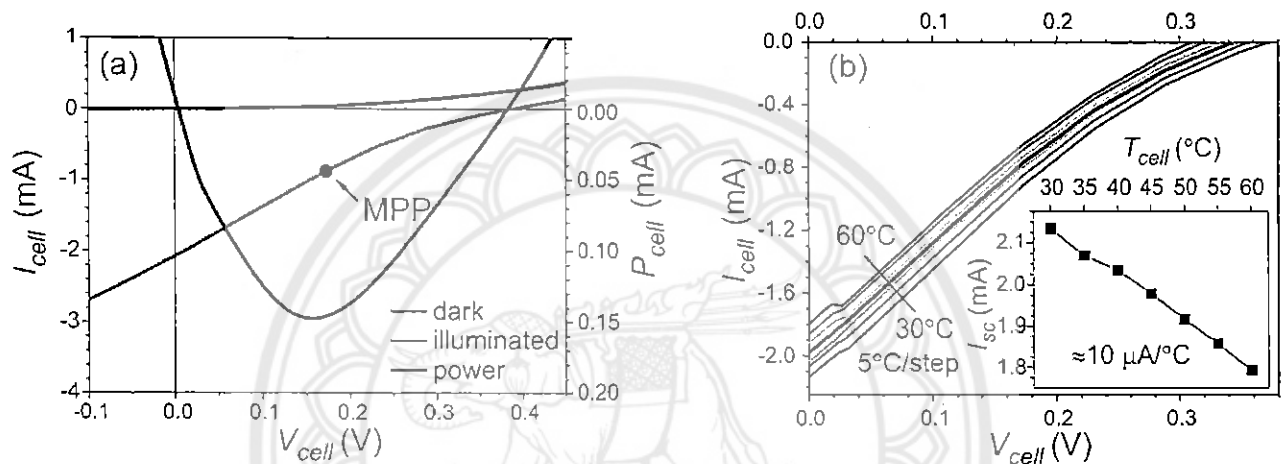


Fig. 3 (a) The  $I$ - $V$  characteristics of QD solar cell with (red line) and without (black line) illumination at  $T_{cell} = 30$  °C and power-voltage ( $P$ - $V$ ) characteristics of same structure under illumination (blue line) and (b) the  $I$ - $V$  characteristics of QD solar cell at various temperatures (30 °C to 60 °C). Inset shows the variation of short-circuit current as a function of temperature.

Prior to the measurement of the QD solar cell, a reference cell was measured (The  $I$ - $V$  characteristic is not shown here). The result from the measurement at various temperatures (between 30 °C and 60 °C) confirms a basic solar cell theory [10,11,17]. When light illuminates over a reference cell, its  $I_{sc}$  always slightly increases and  $V_{oc}$  is decreased when cell temperature increases. The next step was to change the measurement temperature in 5 °C per steps for the QD solar cell. Figure 3(b) shows the  $I$ - $V$  characteristics at various cell temperatures.  $V_{oc}$  is decreased from 0.37 V to 0.31 V and  $I_{sc}$  is decreased from 2.1 mA to 1.8 mA. The characteristic of  $I_{sc}$  variation with the temperature is different from that of the reference cell. The decrease of this current is quite linear. The rate of change is approximately 10  $\mu$ A per °C as shown in the inset of the Fig. 3(b). This behavior of a QD solar cell is unexpected and inconsistent with a basic solar cell theory where the temperature is believed to cause the enhancement of the short-circuit current.

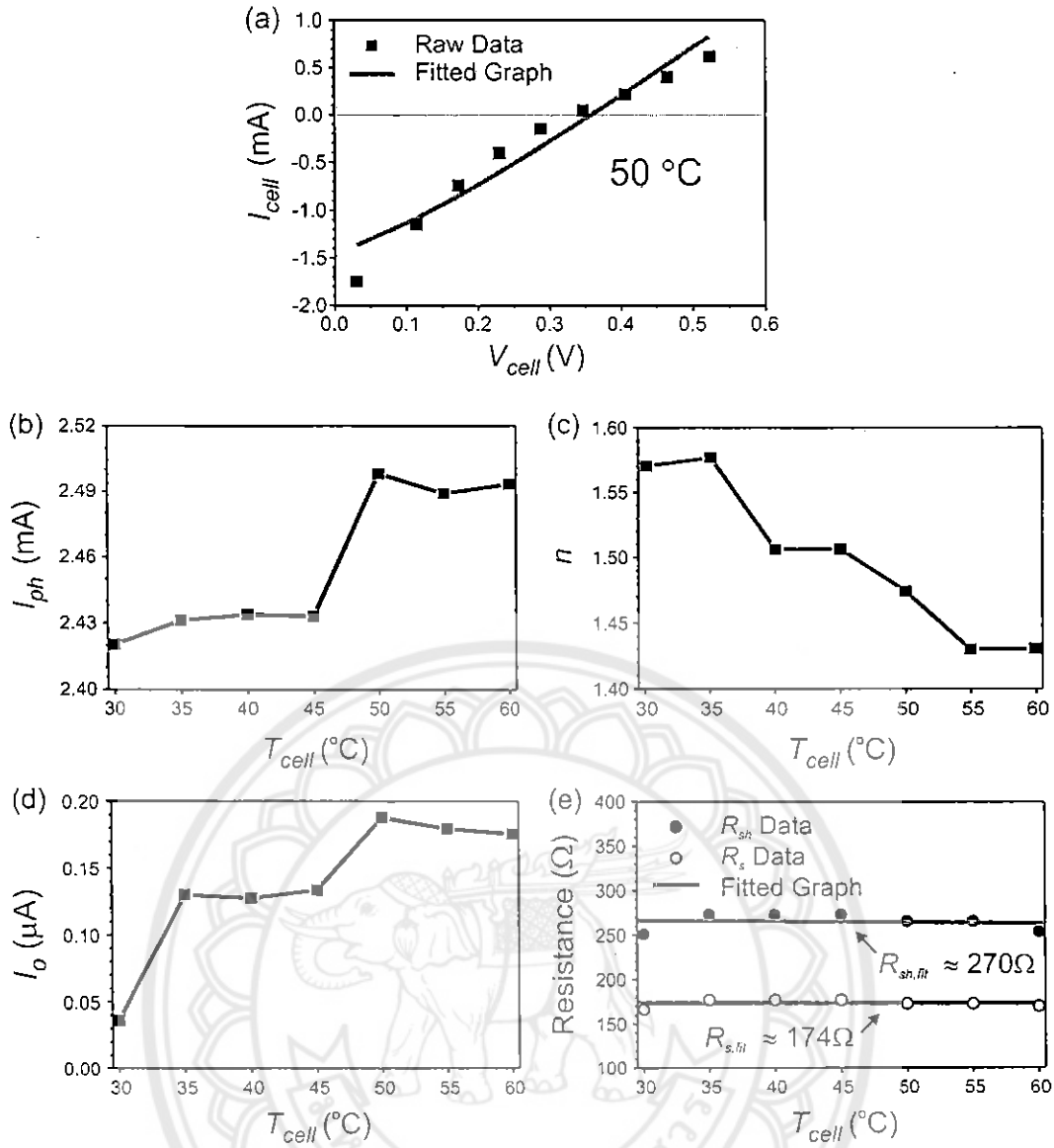


Fig. 4 (a)  $I$ - $V$  characteristics of QD solar cell: raw experimental data (scatter) and the fitted graph (line). Solar cell parameters: (b)  $I_{ph}$ , (c)  $n$ , (d)  $I_o$  and (e) resistance as a function of  $T_{cell}$ .

There are many techniques for extracting circuit parameters of a solar cell such as a non-interactive technique [12], transformation method for explicit approximate solutions [18] and polynomial fitting [19]. Here we transform the implicit function in Eq. (1) to explicit function by using Lambert  $W$  function [18]. According to Eq. (1), the cell current can be written as:

$$I_{cell} = \frac{nkT_{cell}}{R_s q} \text{lambertW} \left\{ \frac{qI_o R_s}{nkT_{cell} (1 + R_s / R_{sh})} \exp \left[ \frac{qV_{cell} + qR_s (I_o + I_{ph})}{nkT_{cell} (1 + R_s / R_{sh})} \right] \right\} + \frac{V_{cell} / R_{sh} - (I_o + I_{ph})}{1 + R_s / R_{sh}} \quad (2)$$

We find the circuit parameters by using *lsqcurvefit* function in MATLAB program [20]. A typical fitted curve is shown as an example in Fig. 4(a). The raw experimental data (scatter) and the fitted graph (line) of QD solar cell are plotted together. In Fig. 4(b), we show the fitted  $I_{ph}$  since it has a clear tendency with the temperature. The  $I_{ph}$  increases with the temperature [21]. In Fig. 4(c), we show the fitted  $n$  as a function of  $T_{cell}$ . The  $n$  tends to decrease when the temperature increases. This result is similar to Sharma *et al.* [22]. In Fig. 4(d), the fitted  $I_o$  is shown since it has some tendency with the temperature too. Our observations are similar to the results reported by Tripathi



*et al.* [17]. They have shown that the effects of temperature on  $I_o$  tend to increase when temperature increases. Finally, Fig. 4(e) shows the fitted resistances of the solar cell ( $R_s$  and  $R_{sh}$ ). For the fit, we found that series resistance and shunt resistance were about 174  $\Omega$  and 270  $\Omega$ , respectively. They were quite constant (no clear tendency) with temperature.

Increasing temperature will narrow the material band gap. Due to this fact the light absorption will be increased by the additional absorption at longer wavelengths. The number of photo-generated electron-hole-pair (current) is therefore increased at higher temperatures. As shown in Eq. (1), the increment of  $I_{ph}$  will enhance the magnitude of  $I_{sc}$ . This phenomenon always happens in a solar cell with very low  $R_s$  and high  $R_{sh}$  [13]. This is different from our QD solar cell sample which has high  $R_s$  and low  $R_{sh}$  values. Van Dyk *et al.* [13] reported that both parameters will detract  $I-V$  shape from the standard  $I-V$  characteristics. The MPP is moved to the lower point. The fill factor and cell efficiency is then dropped.

We believe that excessively high series resistance and low shunt resistance has adverse effects on the  $I-V$  characteristics of QD solar cells. This means our QD solar cells deviate from a conventional solar cell behavior. However, we were not able to clearly suggest how to experimentally improve our QD solar cells. By decreasing  $R_s$  and increasing  $R_{sh}$  to ideal values (equal to zero and infinity, respectively), the  $I-V$  characteristics will therefore improve and cell efficiency will increase. We will do more analysis on this case in future work.

## Conclusions

We present the effects of temperature on the  $I-V$  characteristics of the QD solar cell. We found that its characteristics are different from a conventional solar cell where rising temperature causes the enhancement of the short-circuit current. We found that the excessively high series resistance and low shunt resistance of the QD solar cell is the factor responsible for the observed the  $I-V$  characteristics. We believe this work enhances the understanding of photovoltaic device incorporating nanostructures.

## Acknowledgement

This work is supported by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission (EN264A), Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund of Chulalongkorn University (RES560530079-EN), National Nanotechnology Center, Thailand Research Fund DPG5380002) and Naresuan University. We would like to thank Assist. Prof. Dr. Akaraphunt Vongkumhae for the measurement equipment used in this work, Dr. Thomas Dittrich for useful comments and Dr. Ongarj Tangmattajittakul for his technical work on the samples.

## References

- [1] A. Martí, N. López, E. Antolín, E. Cánovas, C. Stanley, C. Famer, 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.
- [2] A. Luque, and A. Martí, "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels," *Physical Review Letters* 78 (1997) 5014-5017.
- [3] K. Laouthaiwattana, O. Tangmattajittakul, S. Suraprapapich, 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.
- [4] 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.

- [5] J. Phillips, K. Kamath, and P. Bhattacharya, "Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs quantum dots," *Applied Physics Letters* 72 (1998) 2020-2022.
- [6] Y. Osaka, H. Tanabe, K. Yamada, and K. Yamaguchi, "Wideband luminescence of high-density InAs quantum dots on GaAsSb/GaAs layers," *Journal of Crystal Growth* 378 (2013) 422-425.
- [7] P. B. Joyce, T. J. Krzyzewski, G. R. Bell, T. S. Jones, S. Malik, D. Childs, and R. Murray, "Effect of growth rate on the size, composition, and optical properties of InAs/GaAs quantum dots grown by molecular-beam epitaxy," *Physical Review B* 62 (2000) 10891-10895.
- [8] S. Ruangdet, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow, "Improvement of PV performance by using multi-stacked high density InAs quantum dot molecules," in: *Proceedings of the 4th WCPEC, Hawaii, USA, 2006*.
- [9] A. Hospodková, J. Pangrác, M. Zíková, J. Oswald, J. Vyskočil, P. Komninou, J. Kioseoglou, N. Florini, and E. Hulicius, "Effect of the lower and upper interfaces on the quality of InAs/GaAs quantum dots," *Applied Surface Science* 301 (2014) 173-177.
- [10] M. Berginc, U. O. Krašovec, M. Jankovec, and M. Topič, "The effect of temperature on the performance of dye-sensitized solar cells based on a propyl-methyl-imidazolium iodide electrolyte," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 (2007) 821-828.
- [11] P. Kumar, S. C. Jain, H. Kumar, S. Chand, and V. Kumar, "Effect of illumination intensity and temperature on open circuit voltage in organic solar cells," *Applied Physics Letters* 94 (2009) 183505.
- [12] G. Kumar, and A. K. Panchal, "A non-iterative technique for determination of solar cell parameters from the light generated I-V characteristic," *Journal of Applied Physics* 114 (2013) 084904.
- [13] E. E. van Dyk, and E. L. Meyer, "Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules," *Renewable Energy* 29 (2004) 333-344.
- [14] J. Lindmayer, and J. F. Allison, "The violet cell: an improved silicon solar cell," *COMSAT Technical Review* 3 (1973) 1-22.
- [15] A. D. Dhass, E. Natarajan, and L. Ponnusamy, "Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell," in: *Proceeding on the 2012 ICETEEM International Conference, Chennai, India, 2012*.
- [16] J. Merten, J. M. Asensi, C. Voz, A. V. Shah, R. Platz, and J. Andreu, "Improved Equivalent Circuit and Analytical Model for Amorphous Silicon Solar Cells and Modules," *IEEE Transactions on Electron Devices* 45 (1998) 423-429.
- [17] B. Tripathi, P. Yadav, and M. Kumar, "Effect of varying illumination and temperature on steady-state and dynamic parameters of dye-sensitized solar cell using AC impedance modeling," *International Journal of Photoenergy* 2013 (2013) Article ID 646407.
- [18] A. Ortiz-Conde, F. J. Garcia Sanchez, and J. Muci, "New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 352-361.
- [19] Y. Chen, X. Wang, D. Li, R. Hong, and H. Shen, "Parameter extraction from commercial solar cells I-V characteristics and shunt analysis," *Applied Energy* 88 (2011) 2239-2244.
- [20] MathWorks, "Optimization toolbox™: R2014a user's guide," The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, Massachusetts, USA, 2014. [Online]
- [21] E. Radziemska, "The Effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells," *Renewable Energy* 28 (2003) 1-12.
- [22] R. Sharma, "Temperature dependence of I-V characteristics of Au/n-Si Schottky Barrier Diode," *Journal of Electron Devices* 8 (2010) 286-292.

# In-mole-fraction of InGaAs Insertion Layers Effects on the Structural and Optical Properties of GaSb Quantum Dots Grown on (100) GaAs Substrate

Kamonchanok Khoklang  
Department of Electrical Engineering  
Chulalongkorn University  
Bangkok, Thailand  
kamonchanok.r19@gmail.com

Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow  
Department of Electrical Engineering  
Chulalongkorn University  
Bangkok, Thailand  
supachok.t@chula.ac.th, Somsak.P@chula.ac.th

Suwit Kiravittaya  
Department of Electrical and Computer Engineering  
Naresuan University  
Phitsanulok, Thailand  
suwitki@gmail.com

Somchai Ratanathamphan  
Department of Electrical Engineering  
Chulalongkorn University  
Bangkok, Thailand  
rsomchai@chula.ac.th

**Abstract**— GaSb quantum dots (QDs) have been grown by solid-source molecular beam epitaxy on a 4-monolayer (ML)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ ) to investigate the effects of In-mole-fraction of InGaAs insertion layers on the structural and optical properties of the GaSb QDs. The density of GaSb QDs grown is approximately  $1.2\text{--}2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  on InGaAs insertion layers which depends on the In-mole-fraction. Dot shape and size change substantially. The elongation direction of the base changes from [110] to [1-10] when InGaAs insertion layers are introduced. The uniformity of GaSb QDs improves when the indium content increases. The change in their dot morphology is likely due to the modified strain at different values of indium compositions in InGaAs insertion layers. The effects of In-mole-fraction of InGaAs insertion layer on optical properties of the QDs are studied by photoluminescence (PL). PL results show the blueshift of the emission when the indium content in InGaAs insertion layer increases.

**Keywords**— InGaAs insertion layers; GaSb quantum dots; molecular-beam epitaxy system; GaAs; Stranski-Krastanov

## I. INTRODUCTION

Semiconductor quantum dots (QDs) have gained considerable interests due to their promising properties for novel device applications in the past few decades. Many electronic and optoelectronic devices based on III-V QDs have been investigated [1-6]. They include single-electron transistor, QD laser, light-emitting diode (LED), photodetectors and memory devices. Among these devices, self-assembled In(Ga)As/GaAs QDs are major investigated. However, GaSb/GaAs QDs, which have a type-II band alignment, might be more suitable for some applications. For example, GaSb/GaAs QDs have been demonstrated to have

some unique properties on different devices, such as wide tunable wavelength for LED, higher operation temperature for infrared photodetectors and storage time for memory devices due to its large hole confinement and long carrier lifetime [7]. Device performance depends on the QD properties. It is therefore of interest to investigate structural properties of obtained QDs under various growth conditions in order to fine-tune them for any specific applications. Nevertheless, the studies on the structural and optical properties of GaSb/InGaAs/GaAs QDs are still lacking.

In this paper, we present a study on the structural and optical properties of GaSb/InGaAs type-II QD material system with  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layers with  $x = 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$  are introduced. All samples are fabricated by molecular beam epitaxy (MBE) and the QD structures are investigated by atomic force microscope (AFM). The photoluminescence (PL) measurements are performed to examine the optical properties of the samples at 20 K by lock-in method using a 514.5-nm line excitation source and a liquid-nitrogen cooled InGaAs photodetector.

## I. EXPERIMENTS

Samples studied here were grown on GaAs (100) substrates in a solid-source molecular beam epitaxy system (Riber Compact 21) with an Sb valved-cracker cell. After the desorption of surface oxide on GaAs substrate at 580°C under  $\text{As}_4$  beam, a 300-nm-thick GaAs buffer layer was grown at 600°C with the growth rate of 0.5 monolayer per second (ML/s). During the growth, reflection high-energy electron diffraction (RHEED) pattern was observed and well-prepared buffer layer ((100) GaAs surface) showed a clear (2×4) surface reconstruction. In order to grow InGaAs insertion layer, the

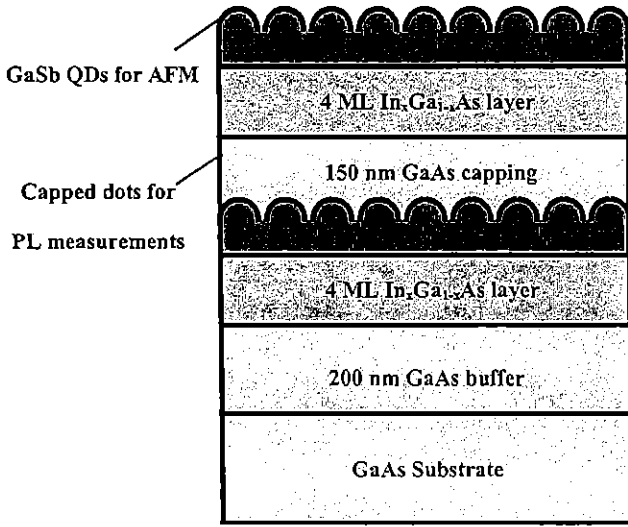


Fig. 1. Schematic structure of GaSb QDs with 4-ML InGaAs insertion layer on (100) GaAs substrate.

substrate temperature was ramped down to 500°C. After the substrate temperature stabilized, 4-ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  was grown. Indium and gallium growth rates were changed in order to obtain the desired content of indium in InGaAs layer. For  $x = 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ , the indium (gallium) rate are  $0.025, 0.025, 0.025$  and  $0.033$  ( $0.33, 0.14, 0.10$  and  $0.10$ ) ML/s, respectively. After the 4-ML InGaAs insertion layer growth, the sample surface was soaked by Sb flux for 60 s. Self-assembled GaSb QDs are obtained by depositing 3-ML GaSb at the gallium growth rate of 0.1 ML/s. The V/III flux ratio (Sb/Ga) is kept constant at 4. For optical investigation, the QDs were capped with a 150-nm-thick GaAs and the 4-ML InGaAs insertion layer and GaSb QDs were grown again on top surface without capping. The top GaSb QDs are for surface morphology examination. After the growth, the sample was cooled down immediately. The surface morphology was characterized by an AFM (Seiko SPA-400) in dynamic force mode in air. For PL tests, a 514.5-nm Ar-ion laser was used an excitation source, and data were obtained by InGaAs photodetector (Hamamatsu G9494). The schematic structure of GaSb QD samples is displayed in Fig. 1.

## II. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 shows AFM images of GaSb QDs on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (Figs. 2(a)-(d)) surfaces from the central regions of each sample. Distinct surface morphology is observed when InGaAs layer is introduced. The dot densities are approximately  $1.2\text{-}2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . QD density substantially decreases and QD size increases. Gradual morphology changes are still observed when the indium content increases from  $x = 0.07$  (Fig. 2(a)) to  $0.25$  (Fig. 2(d)). The elongation direction of the base changes from  $[110]$  to  $[1-10]$  when InGaAs insertion layers are introduced. This is due to the presence of different amount of indium in the InGaAs insertion layer. The uniformity of GaSb QDs improves when the indium content increases.

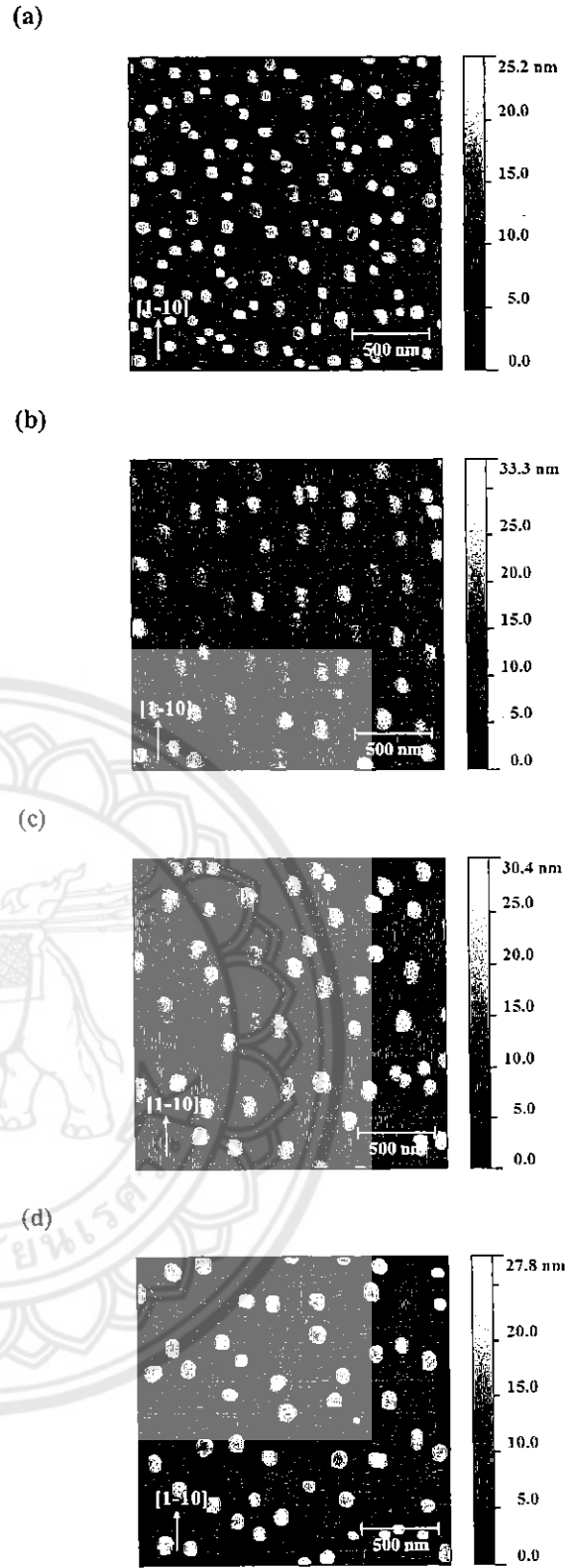


Fig. 2. (a)–(d)  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  AFM images of GaSb QDs on 4-ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  with  $x = 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ , respectively.

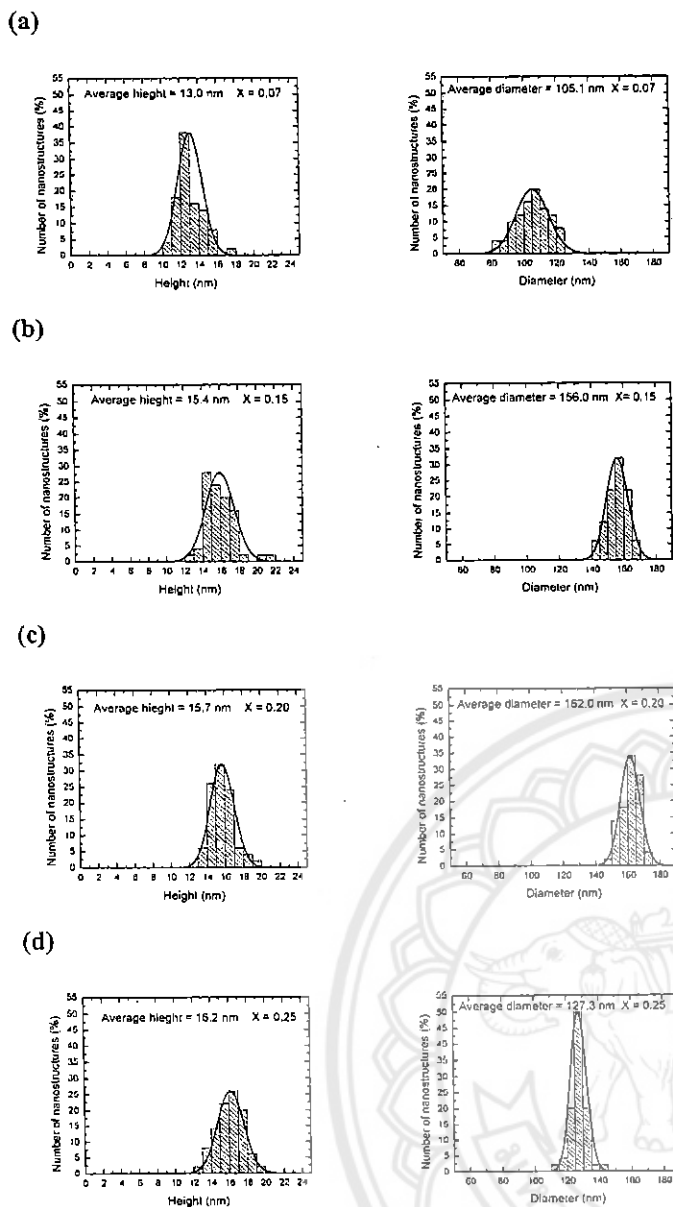


Fig. 3. (a) – (d) histograms of QD height and diameter distribution of GaSb QDs on 4-ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  with  $x = 0.07, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ , respectively. Solid lines are Gaussian fits. Average height and diameter are indicated in the figures.

Analysis of height and diameter distribution of GaSb QDs on different  $\text{InGaAs}$  insertion layers is displayed as histograms in Fig. 3. From this figure, one can clearly see that both QD height and diameter increase when the  $\text{InGaAs}$  insertion layer is introduced. Abrupt change is observed when the indium content is changed. By further increasing the indium content, the QD height and diameter increase, except only at the indium content of  $x = 0.25$  where we observe the reduction of diameter. This non-monotonic diameter change might be due to the excessively high indium content on the surface. Some indium atoms may diffuse and incorporate into the GaSb QDs.

GaAs/GaSb/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  4 ML/GaAs

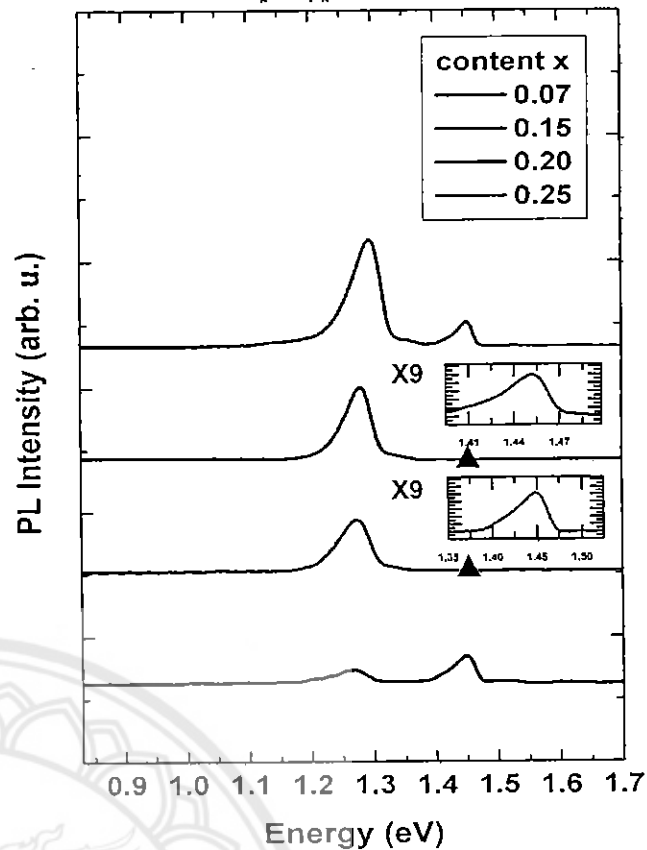


Fig. 4 PL measurement of capped GaSb QDs with 4 ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layer

The presence of indium in GaSb will increase the mismatch strain and therefore modify the QD shape. These observations are due to the change of initial surface energy, interface energy as well as the strain energy of the QD system [8].

Consistent result to our model is also observed from the PL measurement of capped samples. Fig. 4 shows the PL spectra measured at 20 K. Dependency of the peak positions on the In-mole fraction of  $\text{InGaAs}$  insertion layer is clearly observed. The emission becomes blueshift when the indium content in  $\text{InGaAs}$  insertion layer increases. This is possibly due to the reduction of strain in the GaSb QDs. However, PL intensity increases with the increasing indium content. This indicates the confinement of electron in  $\text{InGaAs}$  insertion layer can enhance intensity of the carrier recombination in this structure.

The unique characteristic of a type-II band alignment is seen when the laser power is varied. As the density of hole in the dots change, so does the strength of the Coulomb attraction to the electrons. Thus, as the excitation density is increased, the PL peak shifts to higher energy. This has been observed in GaSb/GaAs QDs.

This work is supported by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission (EN264A), Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund of Chulalongkorn University (RES560530079-EN), Asian Office of Aerospace Research and Development (FA2386-14-1-4081), National Nanotechnology Center, and Chulalongkorn University. We also wish to thank Dr. Maeteer Kunrugsa, Ms. Patchareewan Prongjit, Ms. Nattapa Prapasawad, and Mr. Samatcha Vorathamrong for their assistance.

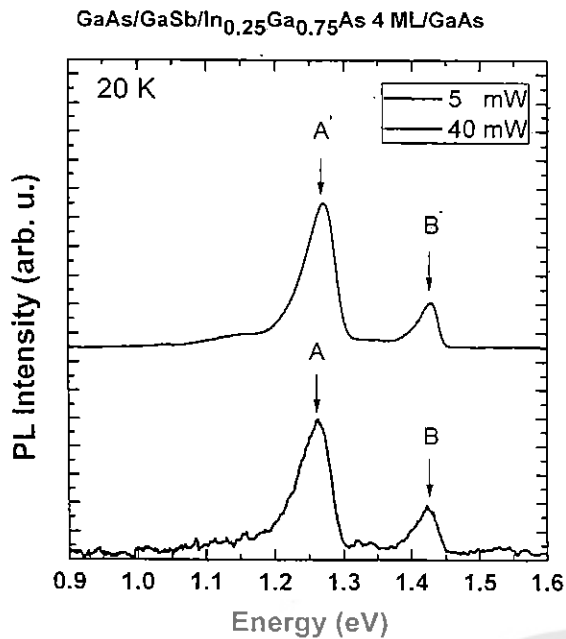


Fig.5. The normalized PL spectra of GaSb QDs grown on 4-ML  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  insertion layer at 20 K with excitation intensities of 5 and 40 mW.

The expected behavior is that the emission energy shows the third-root-of-excitation-intensity dependence [9]. Fig. 5 shows an example of the normalized PL spectra of GaSb QDs grown on 4-ML  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  insertion layer at 20 K with excitation intensities of 5 and 40 mW. The peaks at A and B are at 1.256 and 1.443 eV, respectively. The peaks at A' and B' are at 1.28 and 1.448 eV, respectively. The peaks at A and A' are attributed to GaSb QD emission because of the exchange between antimony and arsenic on the dot surfaces during GaAs overgrowth or smaller effective dot size after overgrowth [10, 11]. The peaks at B and B' are at around 1.44 eV which has been reported to occur in Si (As-site) with bulk GaAs, and are presumed to be related to other system-dependent impurities [12]. In all cases, the blueshift of the emission energy is seen with increasing excitation intensity.

### III. CONCLUSIONS

We have systematically investigated the effects of In-mole-fraction of InGaAs insertion layers on the structural and optical properties of the GaSb QDs grown on (100) GaAs substrate. The density of GaSb QDs on InGaAs insertion layers is approximately  $1.2\text{-}2.8 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ . The uniformity of GaSb QDs is improved when the indium content increases. PL intensity can be enhanced by changing the In composition of the InGaAs insertion layer. This indicates that the electron confinement in InGaAs insertion layer can enhance the recombination in this structure.

### REFERENCES

- [1] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, B.V. Volovik, Y.G. Musikhin, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, J.A. Lott, and D. Bimberg, "1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers and VCSELs grown by molecular beam epitaxy," *J. Cryst. Growth* **227-228** (2001) 1155-1161.
- [2] J. Sabarinathan, P. Bhattacharya, P.-C. Yu, and S. Krishna, "An electrically injected InAs/GaAs quantum-dot photonic crystal microcavity light-emitting diode," *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 3876-3878.
- [3] K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, S. Fujimoto, K. Hirotsu, and H. Sakaki, "High-sensitivity modulation-doped quantum dot infrared photodetectors," *Microelec. Eng.* **63** (2002) 185-190.
- [4] K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, and Y. Arakawa, "High-efficiency InAs/GaAs quantum dot solar cells by metalorganic chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.* **100** (2012) 193905.
- [5] M. Hayne, R.J. Young, E.P. Smakman, T. Nowozin, P. Hoidgson, J.K. Garleff, P. Rambabu, P.M. Koenraad, A. Marent, L. Bonato, A. Schliwa, and D. Bimberg, "The structural, electronic and optical properties of GaSb/GaAs nanostructures for charge-based memory," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** (2013) 264001.
- [6] C.-C. Tseng, W.-H. Lin, S.-Y. Wu, S.-H. Chen, and S.-Y. Lin, "The transition mechanisms of type-II GaSb/GaAs quantum-dot infrared light-emitting diodes," *J. Cryst. Growth* **323** (2011) 466-469.
- [7] W.-H. Lin, C.-C. Tseng, S.-Y. Wu, W.-H. Wu, S.-Y. Lin, and M.-C. Wu, "The influence of background As on GaSb/GaAs quantum dots and its application in infrared photodetectors," *Phys. Status Solidi C* **9(2)** (2012) 314-317.
- [8] H. Eisele and M. Dähne, "Critical thickness of the 2-dimensional to 3-dimensional transition in GaSb/GaAs(001) quantum dot growth," *J. Cryst. Growth* **338** (2012) 103-106.
- [9] I. Farrer, M.J. Murphy, D.A. Ritchie, and A.J. Shields, "Room temperature 1.3 $\mu\text{m}$  emission from self-assembled GaSb/GaAs quantum dots," *J. Cryst. Growth* **251(1-4)** (2003) 771-776.
- [10] G. Balakrishnan, J. Tatebayashi, A. Khoshaklangh, S.H. Huang, A. Jallipalli, L.R. Dawson, and D.L. Huffaker "III/V ratio based selectivity between strain Stranki-Krastanov and strain-free GaSb quantum dots on GaAs," *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 161104.
- [11] C.-K. Sun, G. Wang, J.E. Bowers, B. Brar, H.-R. Blank, H. Kroemer, and M.H. Pikunha, "Optical investigation of the dynamic behavior of GaSb/GaAs quantum dots," *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 1543-1545.
- [12] E. H. C. Parker, *The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy*, Sir John Cass School of Physical Science and Technology city of London Polytechnic London, England (1985) 107-109.

# Virtual Acceleration of Sensor Response by a Prediction Model: A Case Study on pH Sensor

Saichon Sriphan<sup>1,a\*</sup> and Suwit Kiravittaya<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering,  
Faculty of Engineering, Naresuan University,  
Phitsanulok 65000, Thailand.

<sup>a</sup>Saichon\_Sriphan@hotmail.com and <sup>b</sup>Suwitki@gmail.com

**Abstract**— The method to virtually decrease sensor response time is proposed and applied to a pH sensing system. By continuously fitting the measured values with an empirical formula, which is an exponential decay function, one can predict and display the final value prior to measure it. Based on our preliminary tests, the final value can be accurately obtained and the response time can be reduced for both step-up and step-down pH-value changes. This method could also be applied to other measurement system.

**Keywords**—Response Time; Signal Processing; Prediction Model; pH Sensing

## I. INTRODUCTION

Nowadays, applications of microcontroller in embedded systems widely spread [1]. They are ranging from simple measuring devices, control systems, telecommunication applications, and robotics. In order to import external physical data into the controller, several input units, such as switches, keyboard, and various types of sensors, are developed [2]. For typical measuring devices (and control system), one can divide the embedded system into a few subsystems as shown in Fig. 1. In general, physical data from sensing probe is converted into electrical signal (voltage or current) and then transmitted to a measurement circuit. This circuit preliminarily modifies the signal to a form that compatible with microcontroller specification. The controller will then further process the data for storing, displaying, and/or doing feedback control.

In any sensors, the characteristic response time, i.e., the time needed before obtaining the correct (stable) physical value

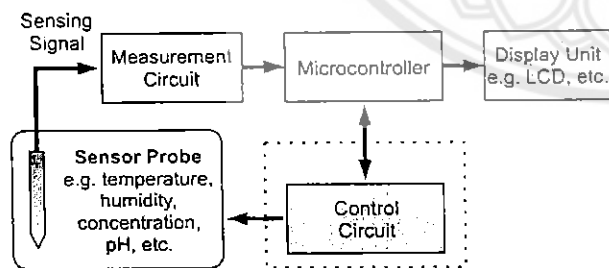


Fig. 1. Schematic illustration of typical embedded system for measuring (and control) device.

at the output of the sensors, is largely diverged. The characteristic time depends on both nature of physical properties and applied measurement techniques. Typical electrical signal/circuit has relatively fast response time (less than one second) compared with other physical signals e.g. temperature, humidity, chemical concentration, as well as pH (more than a few seconds). In order to shorten this time for some critical experiments, some hardware/software-based techniques have been proposed [3-6]. For sensor manufacturers, they can improve their sensor probes by making a new design of sensor structure [3,4]. However, it is not possible for embedded system developer. We therefore propose an algorithm to virtually improve the sensor response time. This concept has been tested with pH sensing dataset. The result shows that the characteristic response times can substantially be decreased by this method.

## II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

### A. Experimental Setup

A commercial pH probe (Atlas Scientific Inc.) was used to measure pH values from different calibrated solutions. The known pH-value samples are pH=4, 7 and 10 buffer solutions (See Fig. 2(a)). The real-time pH data is collected by a simple measurement circuit, which consists of two op-amp stages (See Fig. 2(b)). They are voltage follower and inverting amplifier (gain = -10). The amplified electrical signal is measured by a multimeter (Agilent U1233A) connected with infrared-to-Bluetooth adapter (Agilent U1177A). The recorded voltage values are stored by using a tablet PC. The data are then processed in a PC with MATLAB software package. Due to very small initial signal from the pH sensor (~0.1 mV), the signal must be amplified by the measurement circuit. Since the pH values of the measured (calibrated) solutions are known, we can convert the measured voltages to the pH values. The relation between measured voltage  $V_{mea}$  and pH value is

$$\text{pH Value } (V_{mea}) = 1.81 \cdot V_{mea} + 6.74. \quad (1)$$

Note that this relation is obtained from a calibration using pH=7 and pH = 10 solutions. Linear approximation is applied for simplicity.

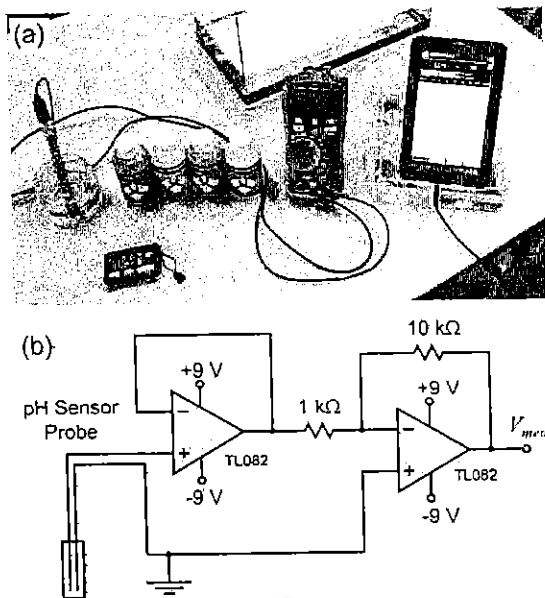


Fig. 2 (a) Photography of the measurement setup. (b) Schematic of the measurement circuit.

B. Experimental Steps

For virtually accelerating the sensor response time, we develop a MATLAB code to predict the final value  $y_f$  by fitting the recorded signals  $(t, y)$  with an empirical formula, which is an exponential decay function:

$$y(t) = y_f + y_a \cdot e^{-(t-t_0)/\tau_a} + y_b \cdot e^{-(t-t_0)/\tau_b} \quad (2)$$

where  $t_0$  is the initial fitting time,  $y_a$ ,  $y_b$ ,  $\tau_a$  and  $\tau_b$  are parameters obtained from the fit.

Flowchart of our developed program is shown in Fig. 3. It starts by setting all initial values. In each  $i^{th}$  iteration step ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), data, which are the voltage  $V_{mea}$  (the pH value  $y_i$ ) and time  $t_i$ , will be recorded and appended into vectors  $y$  and  $t$ , respectively. The fitting is performed with *lsqcurvefit* command in MATLAB program [7]. Value of  $y_f$  at the  $i^{th}$  iteration  $y_{fi}$  is displayed/updated instead of the  $y_i$ . It will be shown later that this  $y_{fi}$  is converted to stable  $y(t)$  value. Response time of the sensor can virtually be reduced by this algorithm. Note that the proposed routine must restarted when there is a large abrupt change of the measured value e.g. the pH-value change of 1.0 can be considered as the signal to restart the routine for pH sensing. However, it is not implemented/tested within this work.

III. RESULT AND DISCUSSION

Typical measured voltage obtained from the measurement circuit is shown in Fig. 4. On the right-hand axis, the corresponding pH value is also shown (See Eq. (1)). For

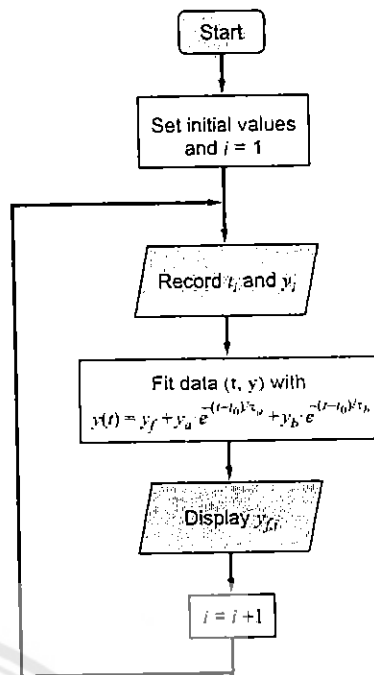


Fig. 3 Flowchart of developed algorithm for displaying the predicted final pH value  $y_f$  instead of the measured pH value  $y(t)$ .

obtaining accurate data, we need to wait until the received data are stable (typically more than 180 seconds). In order to accelerate this response time, we use the proposed method (Section II B.) to predict the final pH value. Here, we specifically analyze the curve in Fig. 4 for our interested step-up and step-down pH-changed regions (marked by two dotted

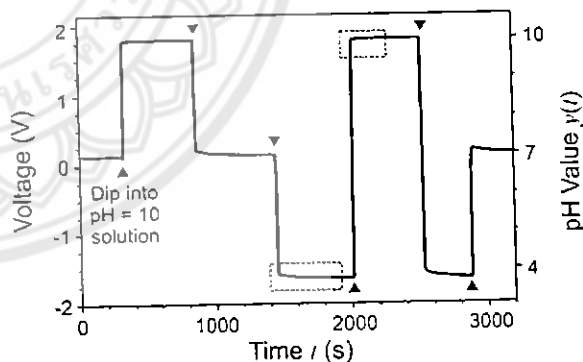


Fig. 4 Voltage and pH value obtained from the measurement circuit when 3 different solutions are tested. Triangles mark the signal when the solution is changed. Dotted rectangles mark our interested part of the curve for testing our algorithm.



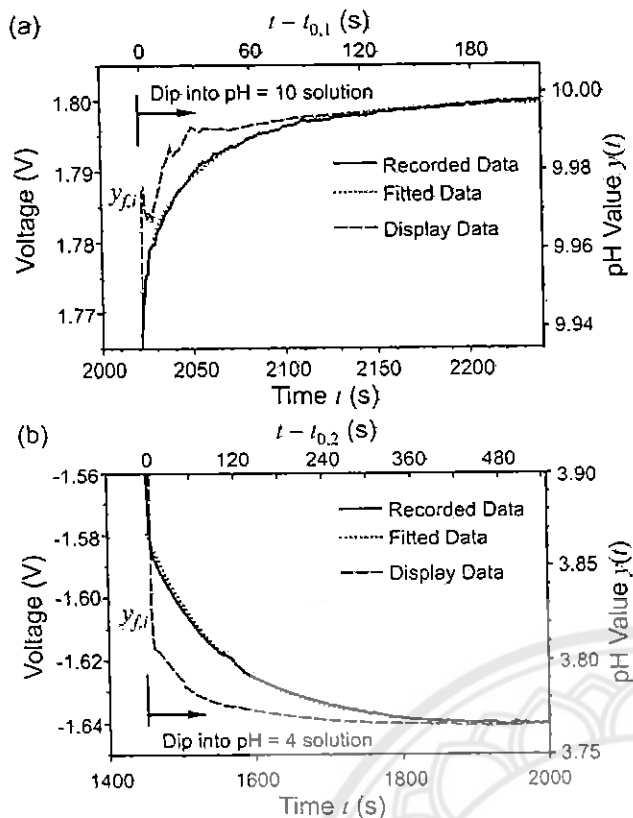


Fig. 5 The interested regions for analysis of (a) step-up and (b) step-down signal changes. Solid lines are recorded data. Dotted lines are the full-range-fitted data. The dash lines are the display data obtained from the iterative fitting procedure.

rectangles). For step-up change, the pH sensor probe is dipped into pH = 10 solution and the recorded voltage/pH value is shown in Fig. 5(a). For step-down pH change, the pH sensor probe is dipped into pH = 4 solution the recorded voltage/pH value is shown in Fig. 5(b).

Recorded data shown in both Figs. 5(a) and 5(b) can well be fitted with the proposed exponential decay function (Eq. (2)). The difference between fitting of step-up and step-down curves is just the sign (negative and positive) of  $y_a$  and  $y_b$ . Final stable value  $y_f$  is obtained when time  $t$  approaches infinity. These fittings suggest that the empirical formula used for this work can accurately described temporal characteristics of our pH sensor.

In order to virtually accelerate the sensor response time, algorithm proposed in Fig. 3 is applied. By artificially

considering the recorded signals as real-time signals, incremental  $t_i$  and  $y_i$  are considered. These data are stored in the vector  $\mathbf{t}$  and  $\mathbf{y}$ . Length of these vectors is increased for each iteration step. Simultaneous fit with Eq. (2) gives  $y_{f,i}$ ,  $y_{a,i}$ ,  $y_{b,i}$ ,  $\tau_{a,i}$  and  $\tau_{b,i}$ . However, only fitted (predicted)  $y_{f,i}$  is the main interests. For each iteration,  $y_{f,i}$  are plotted in Figs. 5(a) and 5(b) as dash lines. One can clearly observe that this predicted value approaches the stable value faster than the measured value  $y(t)$ . We can therefore conclude that our proposed algorithm can virtually accelerate the sensor response time.

One striking noise feature of  $y_{f,i}$  curve can be observed in Fig. 5(a). We found that our proposed method also produces artificial noise in the measurement. This is due to the presence of real noise signal in the recorded signal. This noise is enhanced due to the fitting procedure. However, it gradually decreases when the signal reaches stable (final) value.

#### IV. CONCLUSION

We present the method to decrease the response time in order to display stable (final) pH values. By testing our algorithm with realistic pH-value data, we found that the proper fitted curve is an exponential decay function. The fast response time can virtually be obtained by displaying the fitted pH value. This work will enhance the usage of software algorithms in any 'smart' embedded system.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Naresuan University and the Faculty of Engineering, Naresuan University.

#### REFERENCES

- [1] J. W. Valvano, *Embedded Microcomputer Systems: Real Time Interfacing*. Nelson, a division of Thomson Canada Limited, 2007.
- [2] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 2010.
- [3] J. Shin, P. V. Braun, and W. Lee, "Fast response photonic crystal pH sensor based on templated photo-polymerized hydrogel inverse opal," *Sensors and Actuators B* 150 (2010) 183-190.
- [4] T. Plecenik, M. Mosko, A. A. Haidry, P. Durina, M. Truchly, B. Grancic, M. Gregor, T. Roch, L. Satrapinsky, A. Moskova, M. Mikula, P. Kus, and A. Plecenik, "Fast highly-sensitive room-temperature semiconductor gas sensor based on the nanoscale Pt-TiO<sub>2</sub>-Pt sandwich," *Sensors and Actuators B* 207 (2015) 351-361.
- [5] D. Rebiere, C. Bordieu, and J. Pistré, "Improvement of surface acoustic wave gas sensor response time using neural-network pattern recognition," *Sensors and Actuators B* 24-25 (1995) 777-780.
- [6] D. M. Wilson, and S. P. DeWeerth, "Signal processing for improving gas sensor response time," *Sensors and Actuators B* 41 (1997) 63-70.
- [7] MathWorks, "Optimization toolbox™: R2014a user's guide," The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, Massachusetts, USA, 2014. [Online]

# Low-Power Wireless Sensor Network for Measuring Water Content in Paddy Field

Suwit Kiravittaya, Kwanchanok Nounnapsri, Theeraphong Seefong, Settha Tangkawanit<sup>a</sup>

Department of Electrical and Computer Engineering,  
Faculty of Engineering, Naresuan University,  
Phitsanulok 65000, Thailand.

<sup>a</sup> setthzer@hotmail.com

**Abstract** — This paper describes a design and implementation of wireless sensor network for measuring water content (water level and soil moisture) in paddy field. Low-power-consumption sensor node consists of timer/relay circuit, water level measurement circuit, soil moisture measurement circuit, and a commercial wireless communication module (ZigBee). Arduino-based coordinator node can directly connect to the internet and record the measurement data into a server. Users can view the real-time data as well as retrieve the recorded data by using any web browsers.

**Keywords**—Wireless Sensor Network, Water Level, Soil Moisture, ZigBee

## I. INTRODUCTION

Recently, wireless sensor network (WSN) becomes popular for many applications in both in-house and outdoor systems [1-4]. Using WSN in agriculture gains more interests because of its potential in doing *precision agriculture* where many physical data related to the plant growth must be recorded and evaluated [4]. By integrating sensors into wireless network node installed in the field, one can obtain several relevant parameters. In Thailand, rice is the major agricultural product. Applying WSN to do precision agriculture for rice growth in paddy field is therefore of interest.

Concerning wireless network configuration, several protocols have been tested. Among them, ZigBee is one of the most popular protocols since it is built from small, low power digital radios and complied with IEEE 802.15.4 standard [5]. Transmission distance of 10-100 meters is sufficient in many practical applications.

In this work, we design and implement a WSN for measuring water level and soil moisture content in a paddy field. It consists of both hardware and software parts. The hardware can be divided into wireless sensor nodes and coordinator node. Two sensor circuits are included into the node. We have designed timer/relay circuit to reduce the power consumption of the sensor node. The coordinator consists of wireless communication module, LCD display and microcontroller. For the software part, we have developed application programming interface (API) for doing web service. Water content data is recorded into a database and it can be retrieved by internet users via any web browsers.

## II. SYSTEM DESIGN

A schematic of hardware for the proposed WSN is shown in Fig. 1(a). Wireless sensor node is designed to install into a paddy field. Coordinator node is used to collect the data from each sensor node and displayed/recorded them into a database. Transmission distance of less than 100 meters [5] is sufficient for typical paddy field. Many nodes can be installed at different positions in a paddy field and one can use them simultaneously. The coordinator must be installed in-house and connected to internet in order to send the real-time data to a server.

Figure 1 (b) presents a block diagram of the system overview. The system consists of 3 parts. They are sensor nodes (shown more details in Fig. 2), coordinator node, and web service. In each sensor nodes, timer/relay circuit (Fig. 3) is used to control the power flow into other circuits. Measurement circuits are for water level (Fig. 4) and soil moisture (Fig. 5).

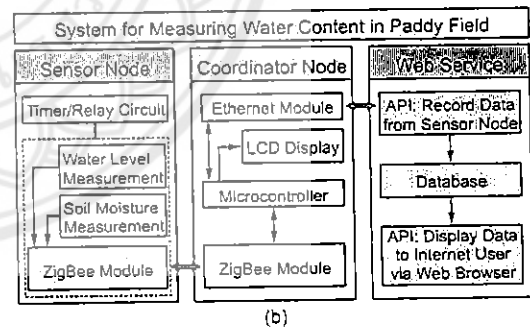
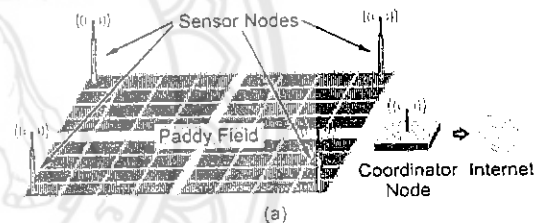


Fig. 1 (a) Schematic of the hardware setup and (b) Diagram of the system overview.

III. SENSOR NODE CIRCUITS

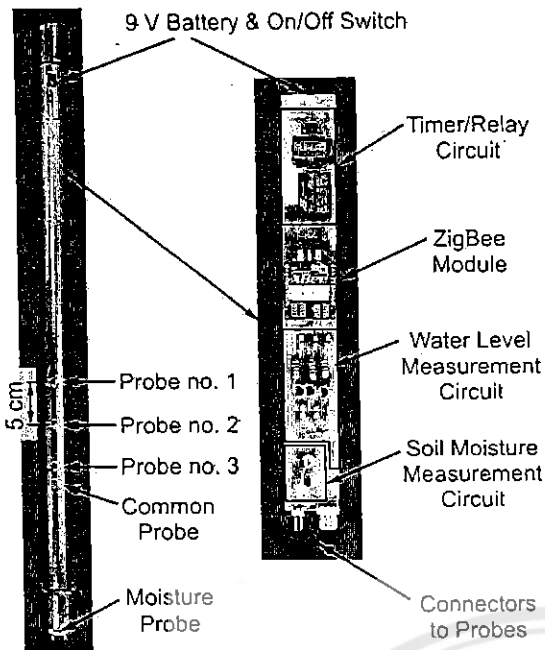


Fig. 2 Photograph of the sensor node and the circuits inside.

Data from both circuits will be sent to ZigBee module and further transmitted to coordinator. The coordinator is controlled by a microcontroller (Fig. 6). We have used Arduino UNO for this task. The microcontroller is used to initially process the received data. The received data will be further transfer to a database via a connected Ethernet module and the data can also be locally displayed via an LCD module. APIs are developed to connect to a database and the data can be retrieved via any web browser (Fig. 7).

Figure 2 shows a photograph of the fabricated sensor node. A spray-coated plastic tube (PVC) of 1-inch diameter is used as the package for each sensor node. Probes for measuring water level (probe no. 1-3 and common probe) and soil moisture content (moisture probe) are installed on the lower part of the tube. A 9-V battery and on/off switch are on the upper part. Inside of the tube, circuit board is installed. Four circuit modules are placed on a single printed circuit board. Details of each self-made circuits are described in this section. Commercial XBee board is used for ZigBee communication module.

A. Timer/Relay Circuit

Schematic diagram of timer/relay circuit is shown in Fig. 3. Typical 9-V Battery is used to supply energy to the sensor node. The 555 timer IC with the resistances  $R_1$  and  $R_2$  and capacitance  $C$  is used to continuously generate control pulse to the relay. The period  $T$ , turn-off and turn-on durations ( $t_1$  and  $t_2$ ) can be adjusted by selecting the resistance and capacitance values [6]. For practical usage in a paddy field, the turn-on time can be only a few seconds while the turn-off time might be several hours since water level as well as soil moisture are typically slow varying parameters. By turning-on the sensor node once or twice a day, power consumption of the sensor node is significantly reduced.

When the circuit is turn-on, 9-V power is reduced to 3.3 V by the 1117T IC. The voltage of 3.3 V will supply to other circuits (water level measurement, soil moisture measurement, and ZigBee communication module).

B. Water Level Measurement Circuit

Schematic diagram of water level measurement circuit is shown in Fig. 4. It simply consists of transistors and resistors. Water is used as a conductor. Transistor will turn on when the water level reaches the probe. Digital (on/off) signal will be sent from this circuit. Typically, water level of 10-15 cm is

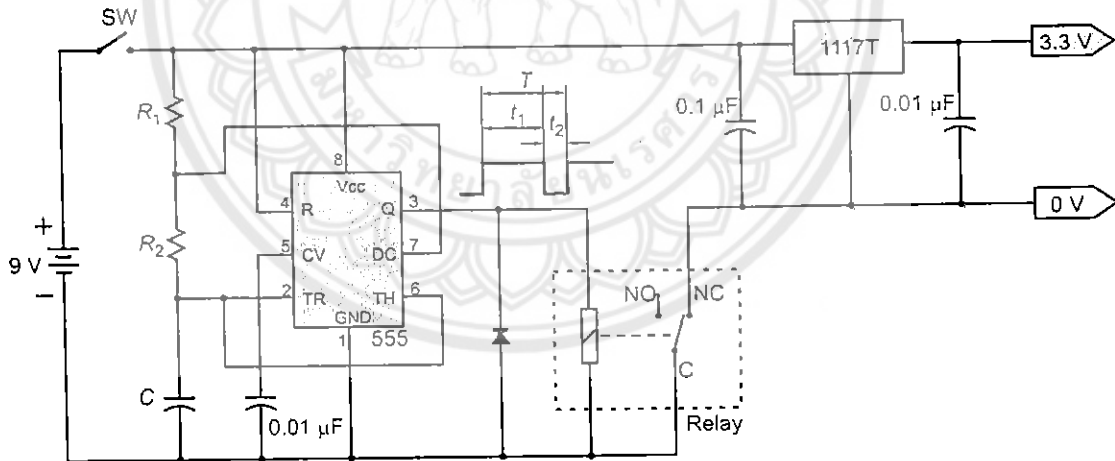


Fig. 3 Schematic diagram of timer/relay circuit.

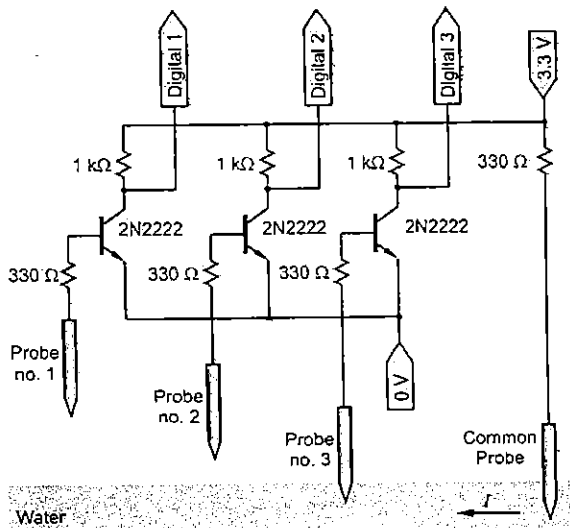


Fig. 4 Schematic diagram of the water-level measurement circuit.

desired. We therefore design a level spacing of 5 cm with 4 level indications for practical used in a paddy field (See Fig. 2).

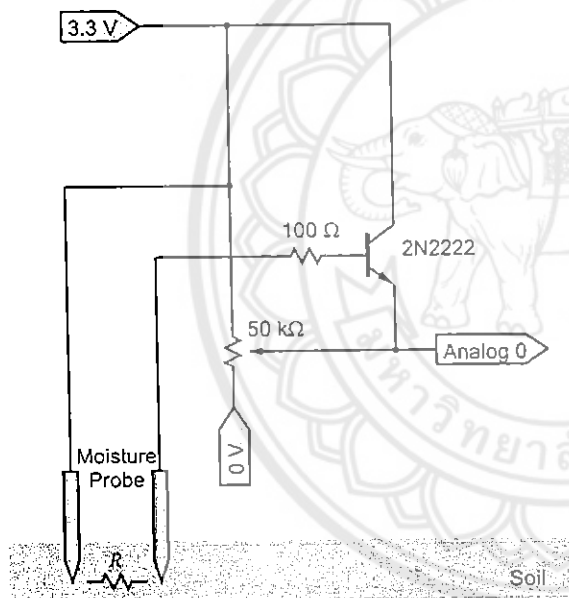


Fig. 5 Schematic diagram of the soil moisture measurement circuit.

C. Soil Moisture Measurement Circuit

Schematic diagram of soil moisture measurement circuit is shown in Fig. 5. Soil resistance relates to the water content in the soil, i.e., soil moisture. Circuit shown in Fig. 5 can be used to measure the soil resistance. Magnitude of electrical current flow via the soil will inverse proportional to the soil resistance. Transistor will amplify the current signal and send it to the analog output. It will thus be proportional to the soil moisture content.

IV. COORDINATOR NODE AND WEB SERVICE

Figure 6 shows the diagram of the connection within the coordinator node. It consists of a microcontroller (Arduino UNO), a ZigBee module (XBee board), an LCD module, and Ethernet module. For simplicity, the code in the microcontroller is minimized by doing only checking address and data (as a string) extraction from the receiving signal (from ZigBee module). Standard libraries are used. Real-time data can be locally displayed via LCD module. The same data is sent to database server.

APIs for both recording data from the sensor node and retrieving/showing data for the user are developed by using simple php code. Database is created with mySQLi. User interface (UI) is developed for displaying real-time data and recorded data. Capture image of the developed UI for two sensor nodes (during the measurement at two different water levels) is shown in Fig. 7. In this UI, remaining times for having enough water are also estimated based on both measured water level and measured soil moisture. Note that the number of the displayed sensor nodes can be changed according to the number of the installed sensor nodes.

V. CONCLUSION

We have presented the design and implementation of WSN for measuring water content (water level and soil moisture) in paddy field. Sensor node is fabricated with 3 main circuits.

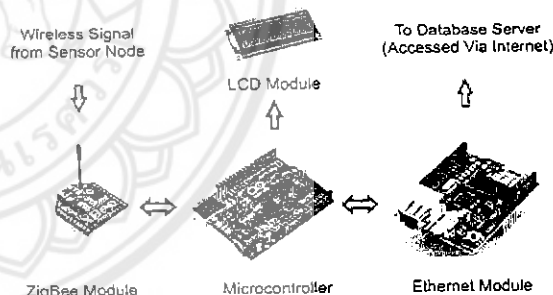


Fig. 6 Diagram showing the connection within coordinator node.

## System for Measuring Water Content in Paddy Field

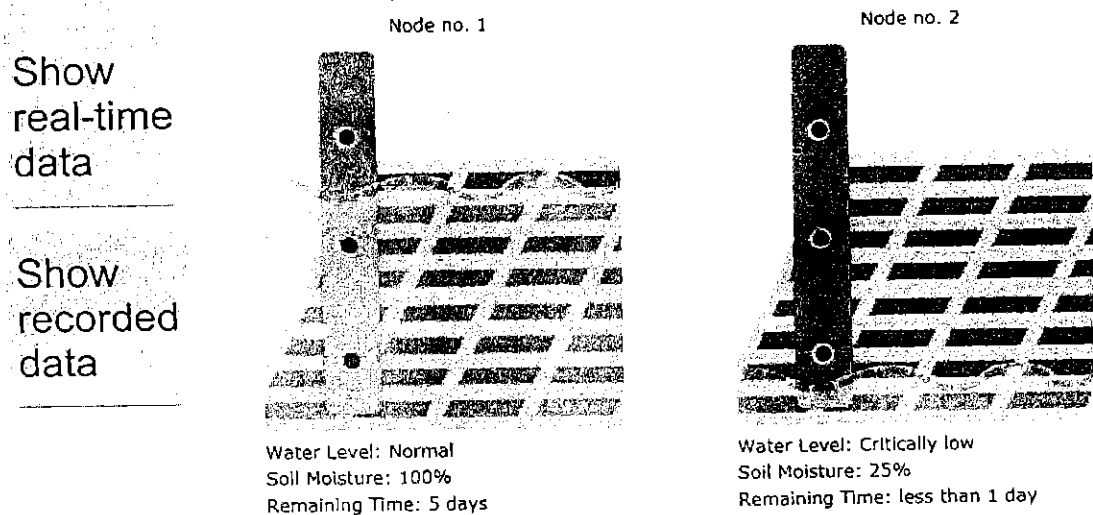


Fig. 7 User interface of the webpage that shows the real-time data of the water content.

They are timer/relay circuit, water level measurement circuit, and soil moisture measurement circuit. Commercial XBee boards are used for sending/receiving signal according to ZigBee protocol. Microcontroller (Arduino) with other boards is used as a coordinator node. APIs are developed for web service. Users can access the measurement data via web browser. However, in this work the testing/evaluating of the developed system in real paddy field has not been done. This work will enhance the development of precision agriculture for paddy field.

## ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by Naresuan University and the Faculty of Engineering, Naresuan University. The authors would like to thank Dr. Wanwisa Pansak and members of NU Robot Club for their technical supports of this work.

## REFERENCES

- [1] D. Hc. G. Mujica, G. Liang, J. Portilla, and T. Riesgo, "Radio propagation modeling and real test of ZigBee based indoor wireless sensor networks," *Journal of Systems Architecture*, vol. 60, 2014, pp. 711-725.
- [2] C. Goumopoulos, B. O'Flynn, and A. Kameas, "Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 105, 2014, pp. 20-33.
- [3] Y. Zhu, J. Song, and F. Dong, "Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring," *Procedia Engineering*, vol. 16, 2011, pp. 608-614.
- [4] Aqueel-ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, "A review of wireless sensors and networks: applications in agriculture," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, 2014, pp. 263-270.
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15.4](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4) and <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/555\\_timer\\_IC](http://en.wikipedia.org/wiki/555_timer_IC)

## ผลกระทบของจำนวนโฟตอนที่สูงเกินไปต่อระบบสื่อสารทางแสงเชิงควอนตัม

### Effects of Excessive Photons in Optical Quantum Communication

สุวิทย์ ภิระวิทยา<sup>1</sup> จุฑาเพชร เวชรังษี<sup>2</sup> ปรมินทร์ แสงวงษ์งาม<sup>2</sup> และ เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีทางแสงขั้นสูง (AOT Lab) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

suwitki@gmail.com

<sup>2</sup> ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) ประเทศไทย

#### บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงการวิเคราะห์ระบบสื่อสารทางแสงด้วยโฟตอนเดี่ยวที่มีการใช้งานจริงเป็นตัวแจกจ่ายกุญแจรหัสลับเชิงควอนตัม ความไม่อุดมคติของระบบซึ่งได้แก่ การสูญเสียในเส้นใยนำแสง ความไม่แน่นอนของการมอดูเลตเฟส และ ความไม่อุดมคติของตัวตรวจจับแสงโฟตอนเดี่ยว ทำให้ตัวส่งจำเป็นต้องส่งโฟตอนมากกว่า 1 ตัวต่อพัลส์ เพื่อให้ตัวตรวจจับแสงได้รับโฟตอน 1 ตัวโดยเฉลี่ย โดยการกำหนดค่าการชดเชยความสูญเสียในเส้นใยนำแสงต่าง ๆ ทำให้เราสามารถปรับแต่งให้ตัวส่งส่งโฟตอนออกไปได้ประมาณ 7 – 60 โฟตอนต่อพัลส์ ผลของการมีโฟตอนต่อพัลส์สูงเกินไปทำให้ค่าสภาพมองเห็นได้ลดลงแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญของระบบสื่อสารข้อมูลเชิงควอนตัม

คำสำคัญ: การสื่อสารเชิงควอนตัม, สัญญาณโฟตอน, สภาพมองเห็นได้

#### Abstract

This article presents an analysis of an optical communication system with single photons, which is practically used for quantum key distribution. To receive single photon signal on average, the transmitter must emit more than one photon per pulse in order to compensate the non-idealities of the system, i.e., optical loss in fiber, uncertainty of the phase modulator, and imperfection of single photon detectors. By controlling the compensation value of the optical loss, we can adjust the number of photons from 7 – 60 photons per pulse. Excessive photons per pulse lead to abrupt decreasing of system visibility, which is an important characteristics of the quantum communication system.

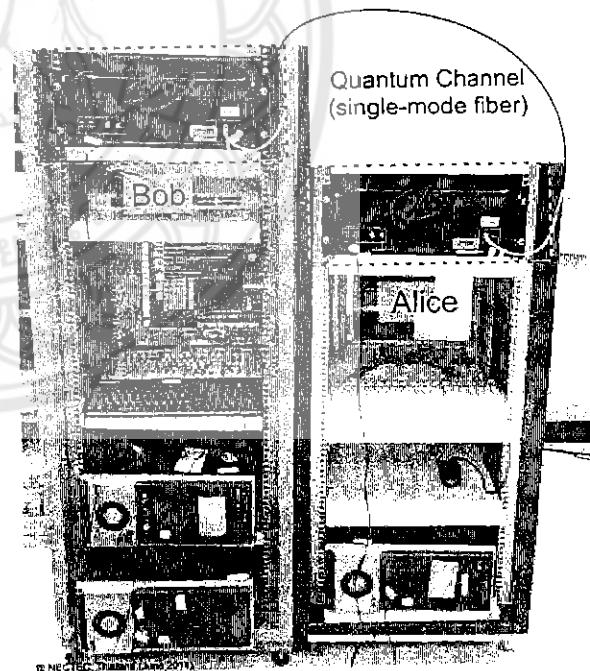
Keywords: quantum communication, photon signal, visibility

#### 1. บทนำ

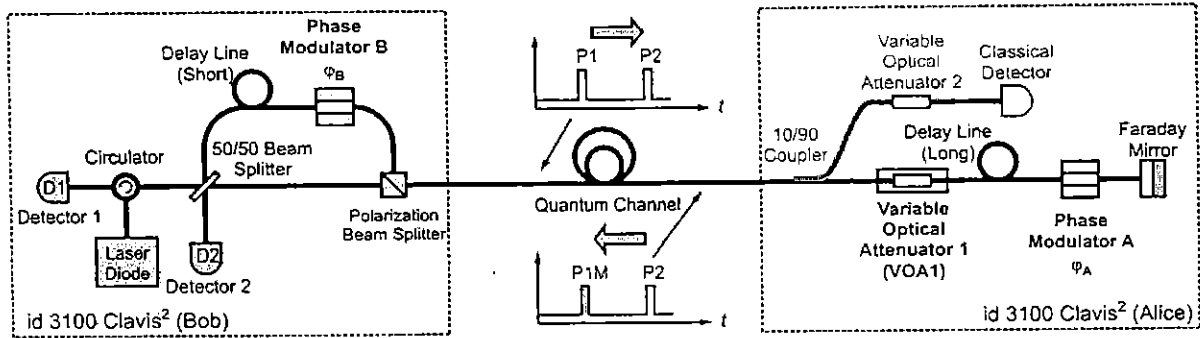
เทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงเชิงควอนตัมเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและเริ่มมีการนำมาทดลองใช้จริงในหลายประเทศ [1] ระบบสื่อสารทางแสงนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงสมัยใหม่หลาย ๆ ชนิดที่กำลังพัฒนาอยู่ในปัจจุบัน อาทิเช่น ตัว

เปล่งแสงโฟตอนเดี่ยว [2] ตัวเปล่งแสงโฟตอนแบบพัลส์ [3] ตัวตรวจจับโฟตอนเดี่ยวประสิทธิภาพสูงที่สร้างจากควอนตัมดอทหรือควอนตัมไฟฟ้ายิ่งยวด [4] และ อุปกรณ์แพสซีฟอื่น ๆ เช่น ตัวแยกแสง

ระบบสื่อสารทางแสงด้วยโฟตอนเดี่ยวที่สนใจศึกษาในบทความนี้เป็นระบบที่มีการผลิตและใช้งานจริงเป็นตัวแจกจ่ายกุญแจรหัสลับเชิงควอนตัม (quantum key distribution, QKD) ID3100 Clavis<sup>2</sup> ของบริษัท IDQuantique [5] (ดูรูปที่ 1) การวิเคราะห์ระบบสื่อสารนี้ทำให้ทราบว่าเราสามารถปรับแต่งให้ตัวส่งส่งโฟตอนออกไปได้ประมาณ 7 – 80 โฟตอนต่อพัลส์ โดยแต่ละพัลส์จะถูกมอดูเลตข้อมูลด้วยการเปลี่ยนเฟสของโฟตอนทั้งหมดในพัลส์ ผลของการมีโฟตอนต่อพัลส์ที่สูงเกินไปมีทำให้ค่าสภาพมองเห็นได้ลดลงแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญของระบบสื่อสารนี้และเป็นข้อมูลที่เป็นต้องทราบเพื่อนำไปใช้ในการปรับแต่งระบบต่อไป



รูปที่ 1 ภาพถ่ายระบบสื่อสารทางแสงเชิงควอนตัมผ่านเส้นใยนำแสง ตัวส่งข้อมูลผ่านโฟตอนพัลส์คือ Alice และตัวรับข้อมูลคือ Bob



รูปที่ 2 ระบบสื่อสารทางแสงเชิงควอนตัมที่มีรูปแบบการติดตั้งแบบ plug-and-play โดยระบบนี้มีการชดเชยการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสงด้วยการใช้ตัวลดทอนแสงที่ปรับค่าได้ (VOA1)

## 2. การสื่อสารเชิงควอนตัม

### 2.1 การทำงานของระบบโดยรวม

ระบบสื่อสารนี้แสดงแผนภาพองค์ประกอบภายในได้ดังรูปที่ 2 โดยระบบนี้จะเริ่มต้นจากด้านผู้รับ Bob ส่งแสงเลเซอร์แบบพัลส์ความยาวคลื่น 1550 nm ความเข้ม -14.52 dB (35.3 mW) ผ่านตัวไหลวน (Circulator) ไปแล้วแยกออกเป็นสองส่วนที่ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) โดยแสงพัลส์นี้จะยังไม่มีกรมอดูเลตข้อมูลเข้าไปในด้าน Bob โดยพัลส์ทั้งสองส่วนนี้จะส่งผ่านช่องทางสื่อสารเชิงควอนตัม (Quantum Channel) ที่เป็นเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว เมื่อผู้ส่ง Alice ได้รับพัลส์แล้วก็จะเตรียมส่งข้อมูลที่ต้องการส่งด้วยการตรวจสอบเวลาการมาถึงของแสงด้วยตัวตรวจจับแสงแบบคั้งเดิม (Classical detector) ก่อน เมื่อแสงผ่านเข้ามาในตัวหน่วงแสงแบบปรับค่าได้ (VOA1) จะยังไม่มีกรลดทอนแสงนี้ โดยพัลส์แสงถูกมอดูเลตข้อมูลด้วยการมอดูเลตเฟสโดยเฟสมอดูเลเตอร์ A (Phase modulator A) เข้าไปสู่แสงพัลส์ที่หนึ่ง (P1M) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของพัลส์แสงที่สอง (P2) ซึ่งพัลส์แสง P2 นี้จะถูกใช้ข้างอิงในการตั้งข้อมูลเฟสที่มอดูเลตกลับมา จากนั้นแสงจึงสะท้อนกลับที่กระจกฟาราเดย์ (Faraday mirror) ซึ่งจะใช้ในการกลับเฟสของพัลส์แสงทั้งสองเพื่อให้พัลส์แสงที่เดินทางกลับมามีการชดเชยการเปลี่ยนเฟสใด ๆ ที่เกิดขึ้นในช่องทางสื่อสาร โดยการ ใช้ VOA1 ในการปรับลดความเข้มแสงจนอยู่ในระดับโฟตอนเดี่ยว (โฟตอน 1 หน่วยมีพลังงานเพียง  $1.28 \times 10^{-19}$  จูล ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร)

เมื่อ Bob ได้รับ โฟตอนพัลส์ที่มีกรมอดูเลตข้อมูล P1M เข้ามาแล้ว พัลส์ทั้งสองจะแยกออกด้วยตัวแยกลำแสงที่มีการเลือกโพลาไรเซชัน โดยโฟตอนพัลส์ที่มีข้อมูล P1M จะถูกแยกออกและผ่านไปยังเฟสมอดูเลเตอร์ B (Phase modulator B) เพื่อมอดูเลตเฟสโดย Bob หลังจากนั้น โฟตอนพัลส์ทั้งสอง P1M และ P2 จึงถูกปรับให้มีเวลาตรงกันและแทรกสอดกันผ่านตัวแยกลำแสงที่อยู่หน้าตัวตรวจจับโฟตอนทั้งสอง (D1 และ D2)

### 2.2 สัญญาณจากการแทรกสอดทางแสง

ในการส่งสัญญาณสาธารณะนั้นทำได้โดยใช้โปรโตคอล BB84 [6] ที่ปรับปรุงเพื่อใช้กับการมอดูเลตข้อมูลลงในเฟส [7] ซึ่งระบบสื่อสารที่ศึกษาสามารถนำเสนอด้วยรูปแบบอย่างง่ายคืออินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแมค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) ดังรูปที่ 3 (ก) โดยสัญญาณความเข้มแสงออร์มัลโลซ์ที่ได้จากการที่พัลส์โฟตอนทั้งสองที่แผ่กระจายเข้าสู่ตัวแยกลำแสง (โดยมีพัลส์โฟตอนหนึ่งถูกมอดูเลตเฟสด้วยมุมเฟส  $\phi_A - \phi_B$ ) และเข้าสู่ตัวตรวจวัด D1 และ D2 สามารถเขียนได้เป็น

$$I_1 = \sin^2 \left| \frac{\phi_A - \phi_B}{2} \right| \quad (1)$$

และ

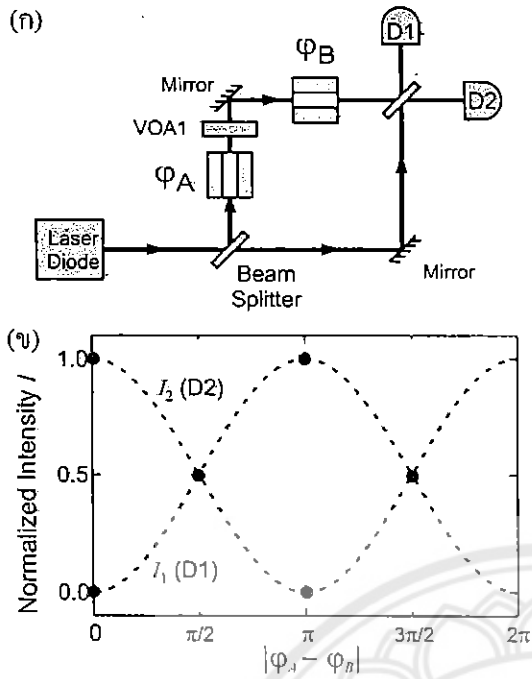
$$I_2 = \cos^2 \left| \frac{\phi_A - \phi_B}{2} \right| \quad (2)$$

ตามลำดับ โดยค่าสัญญาณนี้สามารถพล็อตแสดงได้ดังรูปที่ 3 (ข)

ในการตรวจมอดูเลตข้อมูลลงในพัลส์เราจะใช้ค่าความต่างเฟส  $|\phi_A - \phi_B|$  คือ 0 หรือ  $\pi/2$  หรือ  $\pi$  เท่านั้น โดยสำหรับโปรโตคอล BB84 เราจะมิมิซิสที่ Alice เลือกใช้ได้คือ 0- $\pi$  หรือ  $\pi/2$ - $3\pi/2$  เท่านั้น สำหรับระบบจริงนั้น การมอดูเลตเฟสอาจมีความไม่สมบูรณ์อยู่ทำให้ค่าความเข้มแสงที่วัดได้ต่างไปจากทฤษฎี นั่นคือ ที่ความต่างเฟส  $|\phi_A - \phi_B| = 0$  แล้วค่า  $I_1$  ไม่เป็น 0 และ  $I_2$  ไม่เท่ากับ 1 ดังนั้นในการตรวจสอบสมรรถนะของระบบสื่อสารทางแสงนี้ เราจะนิยามค่าสภาพการมองเห็นได้ (Visibility)  $V$  คือ

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

โดย  $I_{\max}$  และ  $I_{\min}$  คือสัญญาณสูงที่สุดและต่ำที่วัดได้

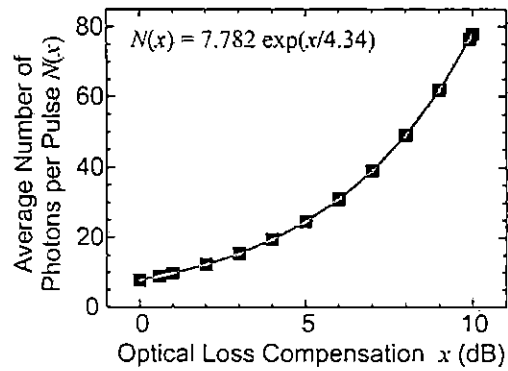


รูปที่ 3 (ก) รูปแบบของ อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดมีเซนเดอริที่เทียบเคียงได้กับระบบสื่อสารทางแสงที่ศึกษา และ (ข) ค่าสัญญาณที่วัดได้ที่ตัวตรวจจับแสง D1 และ D2 ที่เป็นฟังก์ชันของความต่างเฟส  $|\varphi_A - \varphi_B|$

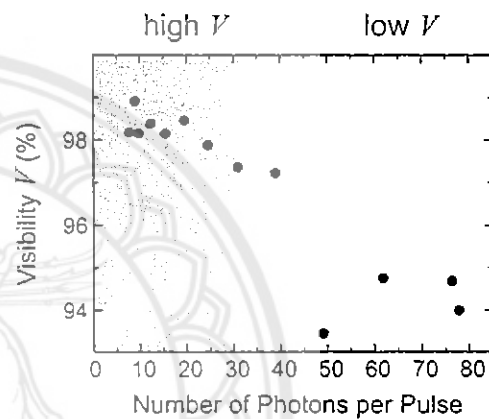
### 3. ผลของการปรับเปลี่ยนจำนวนโฟตอนต่อพัลส์

ในระบบสื่อสารนี้เราสามารถกำหนดจำนวน โฟตอนต่อพัลส์ได้ โดยการปรับแต่งค่าชดเชยการสูญเสียในระบบทางแสง รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชดเชยให้กับการสูญเสียในการส่งแสงต่อจำนวนโฟตอนต่อพัลส์ที่ Alice ส่งออกมาในรูปแบบการและกราฟ โดยในระบบนี้มีการเทียบวัดไว้แล้วว่า เมื่อส่งพัลส์ที่มีโฟตอนประมาณ 9 ตัวต่อพัลส์ (กำหนดให้ VOA1 มีการชดเชยการสูญเสียในเส้นใยนำแสง 0.6 dB) ตัวแยกลำแสงที่อยู่ด้าน Bob จะได้สัญญาณ โฟตอนเดียว โดยการเทียบวัดนี้ได้มีการชดเชยการสูญเสียในระบบทางแสงอื่น ๆ และความไม่อุดมคติของตัวตรวจจับแสง (ประสิทธิภาพการแปลงโฟตอนเดี่ยวเป็นสัญญาณไฟฟ้าน้อยกว่า 100%) ไว้แล้ว

ผลของการปรับเปลี่ยนจำนวน โฟตอนต่อพัลส์จะทำให้ค่าสภาพการมองเห็นได้เปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 5 แสดงค่าสภาพการมองเห็นได้เฉลี่ยจากการวัด 4 กรณี คือ  $(\varphi_A = 0, \varphi_B = 0)$ ,  $(\varphi_A = \pi/2, \varphi_B = \pi/2)$ ,  $(\varphi_A = 0, \varphi_B = \pi)$  และ  $(\varphi_A = \pi/2, \varphi_B = 3\pi/2)$  จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อโฟตอนที่ส่งออกจาก Alice มีค่าน้อยกว่า 40 ตัวต่อพัลส์แล้วระบบจะมีค่าสภาพการมองเห็นได้อยู่ในเกณฑ์ดีมาก คือมีค่ามากกว่า 97% และเมื่อจำนวน โฟตอนต่อพัลส์มีค่ามากกว่า 40 ตัวต่อพัลส์แล้วระบบจะมีค่า



รูปที่ 4 จำนวนโฟตอนต่อพัลส์ที่ออกจาก Alice เมื่อมีการปรับเปลี่ยนการชดเชยการสูญเสียในเส้นใยนำแสง



รูปที่ 5 ค่าสภาพการมองเห็นได้ต่อจำนวนโฟตอนต่อพัลส์ที่ส่งออกจาก Alice

สภาพการมองเห็น ได้ลดลงอย่างทันทีทันใด การลดลงอย่างทันทีทันใดนี้ เกิดจากการมีจำนวน โฟตอนต่อพัลส์มากกว่าหนึ่งตัวที่เข้าไปถึงตัวแยกลำแสงที่อยู่หน้าตัวตรวจจับแสง โดยเมื่อพัลส์นี้มีโฟตอนมากกว่าหนึ่งตัวแล้วมันจะมีโอกาส (ความน่าจะเป็น) เพิ่มมากขึ้นที่โฟตอนทั้งสองตัวจะแยกออกไปส่งสัญญาณให้กับตัวตรวจจับแสงทั้งสองตัว ซึ่งทำให้ข้อมูลอ่านได้อย่างผิดพลาด โดยเกิดจากความผิดพลาดจากการที่ตัวตรวจวัดโฟตอนทั้งสองตัว ได้รับ โฟตอนพร้อมกัน หรือที่เรียกว่าการนับทั้งคู่ (double count) ค่าสภาพการมองเห็นที่ลดลงนี้เกิดจากความเข้มของสัญญาณแสง (จำนวน โฟตอน) ที่มากเกินไป ทำให้ค่าที่อ่านได้จากตัวตรวจจับแสงในสถานะที่ควรอ่านสัญญาณได้ศูนย์มีค่าไม่เป็นศูนย์ ( $I_{min} > 0$  ดูสมการ (3)) ค่าสภาพการมองเห็นได้นี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอัตราผิดพลาดของการส่งบิตแบบควอนตัม (quantum bit error rate, QBER) ในระบบส่งสัญญาณทางแสง [7] คือ

$$QBER = \frac{1-V}{2} \quad (3)$$



ดังนั้นการทดลองนี้ (รูปที่ 5) แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนจำนวนโฟตอนต่อพัลส์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง นั่นคือความผิดพลาดในการส่งข้อมูลบิตแบบควอนตัมเพิ่มมากขึ้น

## 5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบสื่อสารข้อมูลด้วยแสงเชิงควอนตัมโดยการใช้โปรโตคอล BB84 ในรูปแบบ plug-and-play จากความไม่อุดมคติของระบบทำให้เราจำเป็นต้องมีการชดเชยการสูญเสียโฟตอนในระบบส่งโฟตอนเดี่ยวซึ่งทำได้โดยการเพิ่มจำนวนโฟตอนต่อพัลส์ โดยการทดลองที่นำเสนอนี้แสดงให้เห็นว่าจำนวนโฟตอนต่อพัลส์ที่มากเกินไปมีผลกระทบต่อระบบ คือทำให้ค่าสภาพการมองเห็นได้ลดลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งการลดลงของค่าสภาพการมองเห็นได้นี้มีผลทำให้ค่าอัตราผิดพลาดของการส่งบิตแบบควอนตัมในระบบแสงลดลงตามไปด้วย ผลการศึกษานี้ขยายขอบเขตความเข้าใจเชิงเทคนิคของระบบการสื่อสารเชิงควอนตัมที่มีการใช้งานจริงและเชิงพาณิชย์

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการสนับสนุนของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Van Meter, *Quantum Networking*. ISTE Ltd 2014.
- [2] M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, and S. V. Polyakov. "Invited review article: Single-photon sources and detectors." *Rev. Sci. Instru.* **82**, 071101, 2011.
- [3] A. J. Shields, "Semiconductor quantum light sources," *Nature* **1**, 215, 2007.
- [4] R. H. Hadfield, "Single-photon detectors for optical quantum information applications," *Nature Photonics* **3**, 696, 2009.
- [5] — . Quantum Key Distribution System id 3100 Clavis2, id Quantique SA, 2009. <http://www.idquantique.com>
- [6] C. H. Bennett and G. Brassard, "Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing," *Proc. IEEE Int. Conf. Computers, Systems and Signal Processing (Bangalore, India)* 175-179, 1984.
- [7] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden, "Quantum cryptography," *Rev. Mod. Phys.* **74**, 145-192, 2002.

# การต่อภาพถ่ายเอกซเรย์เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงด้วยวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล X-ray Image Stitching of High-Voltage Circuit Breaker by Digital Image Processing

กันตภณ โฉนพันธ์<sup>1</sup> ไพศาล มณีสว่าง<sup>2</sup> นันทวัฒน์ อุดี<sup>3</sup> และ สุวิทย์ ภิระวิทยา<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีทางแสงขั้นสูง (AOT Lab) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

<sup>3</sup> ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

<sup>4</sup> อีเมล: suwitki@gmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์องค์ประกอบภายในของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงขนาด 22 กิโลโวลต์ แบบแก๊ส SF<sub>6</sub> ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล โดยเนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดของฉากรับภาพที่มีขนาดเล็กกว่าตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ เราจึงจำเป็นต้องนำภาพมาต่อเข้าด้วยกัน โดยการใช้ระเบียบวิธีการหาสหสัมพันธ์ของภาพในส่วนที่ต้องการนำมาต่อกันทำให้เราสามารถวางซ้อนภาพได้อย่างถูกต้อง และจากการปรับให้ความเข้มของภาพให้มีค่าต่อเนื่องบริเวณรอยต่อทำให้เราได้ภาพเอกซเรย์ขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบภายในขั้นตอนต่อไป

**คำสำคัญ:** เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูง, การต่อภาพ, การประมวลผลภาพดิจิทัล

## Abstract

This paper presents an image stitching method for x-ray images of high-voltage circuit breaker (SF<sub>6</sub>, 22 kV) by using digital image processing. Because the size of x-ray detector is smaller than the investigated circuit breaker, an image stitching method is required. By calculating the correlation between two overlapped images, we can correctly overlap the images. Prior to the stitching, adjustment of the image intensity is conducted in order to smooth the interface. Result of these processes is a stitched x-ray image, which can be used for further analysis of the image components.

**Keywords:** High-Voltage Circuit Breaker, Image Stitching, Digital Image Processing

## 1. บทนำ

เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงแบบแก๊ส SF<sub>6</sub> (Sulfur Hexafluoride) เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบจำหน่าย ซึ่งมีหน้าที่ตัดต่อวงจรในสภาวะปกติ และเป็นตัวตัดวงจรเมื่อเกิดข้อบกพร่องขึ้นในวงจรโครงสร้างภายในของเบรกเกอร์นี้ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักคือ หน้าสัมผัสส่วนที่อยู่กับที่ หน้าสัมผัสส่วนเคลื่อนที่และแก๊ส SF<sub>6</sub> เป็น

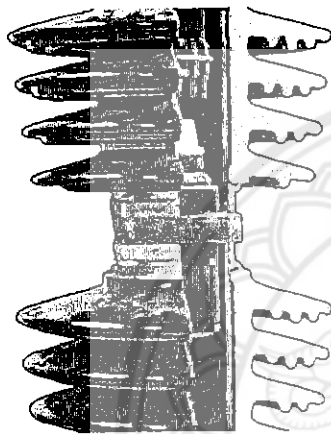
ฉนวนอยู่ภายใน [1] การทำงานตัดต่อวงจรโดยการเลื่อนหน้าสัมผัสจะใช้กลไกทางกล ซึ่งทำให้เกิดแรงกระแทกบริเวณหน้าสัมผัสอาจทำให้เกิดการเสียหายได้ [2] โดยทั่วไปการตรวจสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำโดยถอดชิ้นส่วนภายนอกออกและนำชิ้นส่วนภายในมาตรวจสอบ โดยจะมุ่งเน้นที่การตรวจสอบหน้าสัมผัสส่วนที่อยู่กับที่และหน้าสัมผัสเคลื่อนที่ เทคนิคการตรวจสอบภายในของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยการถ่ายภาพเอกซเรย์ [3-7] สามารถทำให้เราตรวจสอบเบรกเกอร์ได้โดยไม่ต้องถอดชิ้นส่วนภายในออกมา ซึ่งเทคนิคนี้ช่วยทำให้ลดขั้นตอนและเวลาในการตรวจสอบ แต่การตรวจสอบภาพถ่ายเอกซเรย์มีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของวัตถุคือ ถ้าวัตถุมีขนาดที่ใหญ่กว่าฉากรับภาพ เราจำเป็นต้องถ่ายภาพหลายครั้งและนำมาต่อกันเป็นภาพเดียวที่สมบูรณ์ ในการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์อาจทำได้ด้วยวิธีกำหนดจุดด้วยสายคาและใช้วิธีการเปลี่ยนรูปแบบภาพ (Image Transformation) [8] ซึ่งวิธีการนี้มีข้อเสียคืออาจทำให้ภาพที่ต่อมีตำแหน่งการต่อที่ไม่ถูกต้อง และไม่สามารถดำเนินการได้แบบอัตโนมัติเนื่องจากองค์ประกอบของภาพถ่ายเอกซเรย์ อาจมีรายละเอียดของที่ไม่เหมือนกัน ผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาการต่อภาพด้วยการประมวลผลภาพอัตโนมัติและวิธีสหสัมพันธ์ภาพ (Image Correlation Method) [9-10] เพื่อหาตำแหน่งพิกเซลของภาพที่ซ้อนทับกันพอดีเพื่อให้การต่อภาพมีความถูกต้อง นอกจากนี้ภาพถ่ายเอกซเรย์ที่นำมาต่อกันมีความเข้มของแสงที่ไม่เท่ากัน ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการปรับความเข้มของภาพดังกล่าวให้ใกล้เคียงกัน [11] เพื่อให้ได้ภาพขั้นสุดท้ายที่สมบูรณ์

บทความวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาวิธีการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ขององค์ประกอบภายในเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูง ขนาด 22 กิโลโวลต์ แบบแก๊ส SF<sub>6</sub> โดยจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลสามารถประยุกต์ใช้ในการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ภายในเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยการเลื่อนเพื่อหาตำแหน่งซ้อนทับของภาพที่เหมาะสมและปรับความเข้มบริเวณรอยต่อของภาพให้มีความใกล้เคียงกันทำให้ได้ภาพถ่ายเอกซเรย์ขนาดใหญ่ขึ้นและมีความสมบูรณ์ขององค์ประกอบของภาพเพิ่มมากขึ้น

## 2. อุปกรณ์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพเอกซเรย์

การถ่ายภาพเอกซเรย์ [12] ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วน คือ (1) แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (ยี่ห้อ Siemens รุ่น MULTIX TOP) ซึ่งสามารถปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีขนาดแรงดันสูงสุด 125 กิโลโวลต์ และมีระดับผลคูณกระแสและเวลาเปิดฉายรังสีสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 400 มิลลิแอมแปร์-วินาที (2) ฉากรับภาพ (CARESTREAM CR cassette) มีขนาด 28.1×35.6 ตารางเซนติเมตร (3) ตัวแปลงข้อมูลเป็นภาพดิจิทัล (CARESTREAM Vita CR System) และ (4) เซอร์คิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงมีขนาดหัดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้แก๊ส SF<sub>6</sub>.



รูปที่ 1 ภาพถ่ายเซอร์คิตเบรกเกอร์ซึ่งถูกผ่าออกหนึ่งในสี่ส่วน เพื่อให้เห็นองค์ประกอบภายใน

(ยี่ห้อ Nissin) ภาพถ่ายของเซอร์คิตเบรกเกอร์ที่นำมาตรวจสอบนี้แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเบรกเกอร์นี้ถูกผ่าออกหนึ่งในสี่ส่วน เพื่อให้สามารถเห็นองค์ประกอบภายในของเซอร์คิตเบรกเกอร์ได้ด้วยตาเปล่า เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบภาพถ่ายขององค์ประกอบภายในและภาพเอกซเรย์ได้อย่างชัดเจน

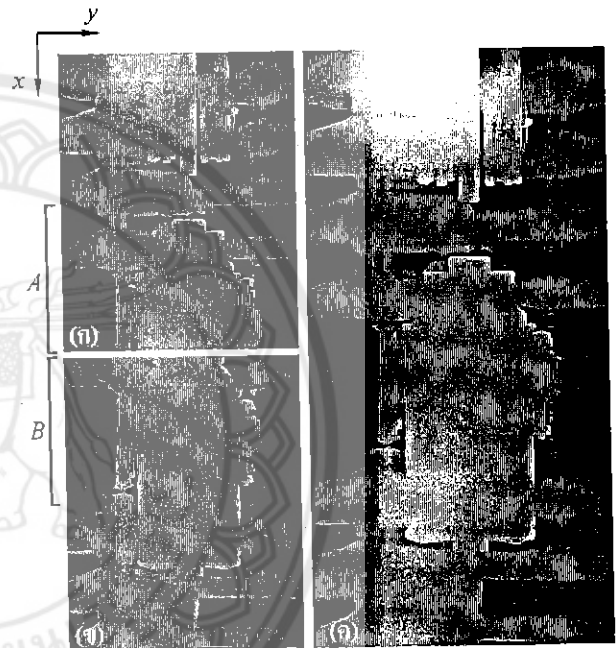
### 2.2 ทฤษฎีการต่อภาพ

การต่อภาพเป็นการนำภาพจำนวน 2 ภาพที่มีความละเอียด (ขนาดพิกเซล) เท่ากันซึ่งมีองค์ประกอบภาพที่ซ้อนกันอยู่มาค่อยกัน ในบทความนี้ได้ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลด้วยวิธีสหสัมพันธ์ภาพ (Image Correlation Method) ซึ่งเป็นหาผลรวมของผลคูณของภาพสองภาพในแต่ละตำแหน่ง โดยการเลื่อนภาพหนึ่งออกไป  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  เพื่อให้ตำแหน่งที่ภาพทั้งสองจะซ้อนกันพอดี โดยค่าสหสัมพันธ์ภาพ  $\rho(\Delta x, \Delta y)$  แสดงดังสมการที่ (1)

$$\rho(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i,j} (A_{i,j} - \bar{A})(B_{i,j} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_{i,j} (A_{i,j} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_{i,j} (B_{i,j} - \bar{B})^2\right)}} \quad (1)$$

โดย  $A_{i,j}$  ( $B_{i,j}$ ) คือค่าความเข้มของภาพที่ตำแหน่งพิกเซล ( $i, j$ ) ของภาพแรก (ภาพที่สอง) ที่นำมาต่อ และ  $\bar{A}$  ( $\bar{B}$ ) คือค่าเฉลี่ยของความเข้มของภาพแรก (ภาพที่สอง)

การเลื่อนภาพทำได้โดยการกำหนดให้ภาพ  $A$  อยู่กับที่ และเลื่อนภาพ  $B$  ตามระนาบแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ซึ่งจุดที่พิกเซลซ้อนทับกันพอดี ค่าของ  $\rho(\Delta x, \Delta y)$  จะเป็นค่าสูงสุด ดังนั้นการหาค่าสูงสุดของ  $\rho(\Delta x, \Delta y)$  จะทำให้เราทราบค่าจำนวนพิกเซลที่ต้องเลื่อนในการต่อภาพ

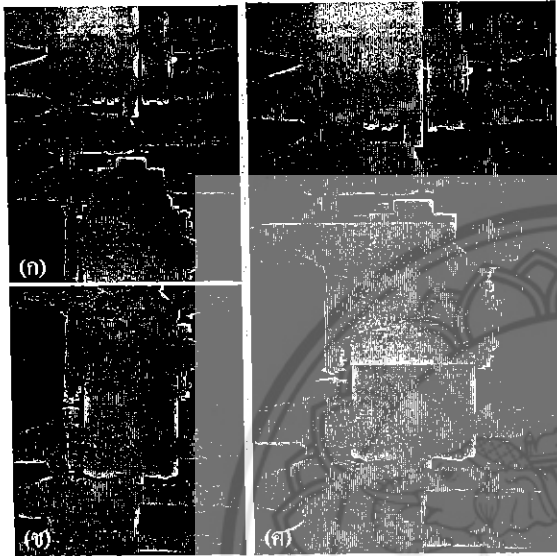


รูปที่ 2 ภาพถ่ายเอกซเรย์เซอร์คิตเบรกเกอร์ (ก) ส่วนด้านบน (ข) ส่วนด้านล่าง และ (ค) ภาพที่ได้จากการต่อภาพที่สมบูรณ์

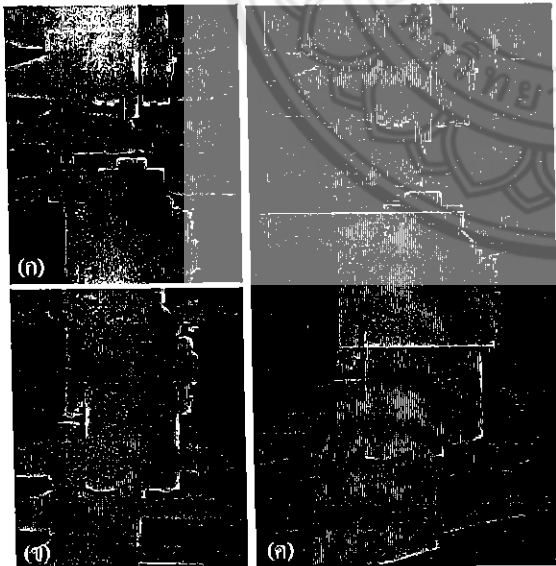
## 3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการทดลองการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ด้วยวิธีสหสัมพันธ์ภาพ โดยใช้โปรแกรมภาษา MATLAB 2010a และกล่องเครื่องมือ Image Processing Toolbox [13] รูปที่ 2(ก) และ (ข) แสดงข้อมูลภาพขาเข้าซึ่งเป็นภาพถ่ายเอกซเรย์ของเซอร์คิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ภาพส่วนด้านบน (รูปที่ 2(ก)) และภาพส่วนด้านล่าง (รูปที่ 2(ข)) โดยแต่ละภาพมีขนาด 246×198 พิกเซล เมื่อต่อภาพเสร็จจะทำให้ได้ภาพที่สมบูรณ์ที่มีขนาด 395×198 พิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 2(ค) และรูปที่ 3(ค)

ในวิธีที่หนึ่ง การต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ด้วยวิธีกำหนดจุดทำได้โดยการกำหนดจุดของภาพถ่ายขาเข้าภาพส่วนด้านบน (รูปที่ 3(ก)) และภาพส่วนด้านล่าง (รูปที่ 3(ข)) จำนวนภาพละ 4 จุด โดยทั้ง 4 จุดของทั้งสองภาพจะต้องเป็นตำแหน่งพิกเซลที่ซ้อนทับกันพอดี หลังจากนั้นใช้วิธีการเปลี่ยนรูปทรง (image transformation) เพื่อสร้างภาพใหญ่จากภาพถ่ายขาเข้าทั้งสองภาพ ซึ่งภาพที่ต่อเสร็จแสดงในรูปที่ 3(ค) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือถ้าการกำหนดจุดทั้ง 4 จุดของทั้งสองภาพ มีตำแหน่งของพิกเซลไม่ซ้อนทับกันพอดี (รูปที่ 4(ก)และ(ข)) จะทำให้องค์ประกอบของภาพที่ต่อเสร็จเกิดการบิดเบี้ยวได้ แสดงดังรูปที่ 4(ค)



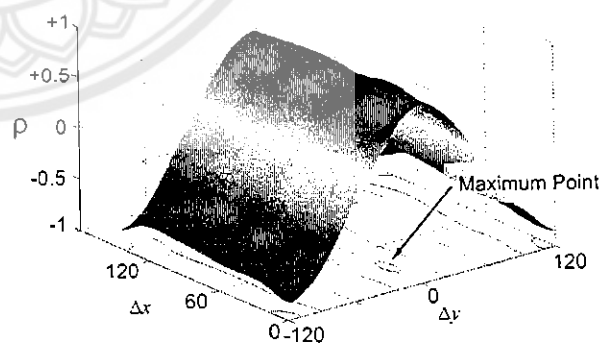
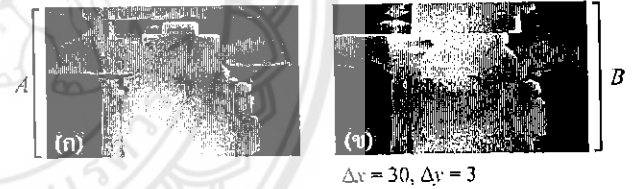
รูปที่ 3 ภาพการต่อดด้วยวิธีกำหนดจุด (ก) การกำหนดจุดส่วนด้านบน (ข) การกำหนดจุดส่วนด้านล่าง และ (ค) ภาพที่ต่อสมบูรณ์



รูปที่ 4 ภาพการต่อดด้วยวิธีกำหนดจุด (ก)การกำหนดจุดส่วนด้านบน (ข) การกำหนดจุดส่วนด้านล่าง และ (ค) ภาพที่ต่อสมบูรณ์ที่บิดเบี้ยว

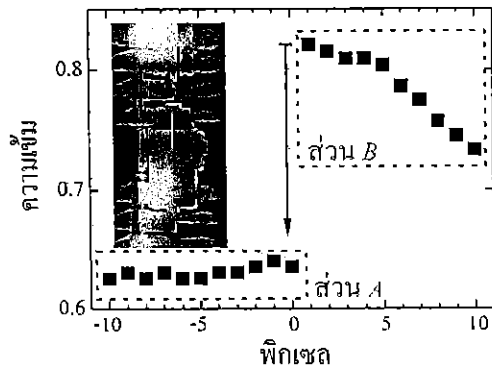
การต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ด้วยวิธีสหสัมพันธ์ภาพ โดยการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ 2 ภาพนี้ (รูปที่ 2(ก) และ 2(ข)) เข้าด้วยกัน จะเป็นการต่อภาพในแนวตั้ง เราจำเป็นต้องจำกัดพื้นที่ที่ใช้ในการหาค่าจำนวนพิกเซลที่ต้องเลื่อนไปในแต่ละแนวแกน ซึ่งเราจะใช้ภาพด้านล่าง(พื้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์) ของรูปบน (ส่วน A ในรูปที่ 2(ก)) และ ภาพด้านบน (พื้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์) ของรูปล่าง (ส่วน B ในรูปที่ 2(ข)) จากนั้นจึงคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ด้วยวิธีการเลื่อนภาพเพื่อหาจำนวนพิกเซลที่เลื่อนไปที่ทำให้ได้ค่าสหสัมพันธ์มากที่สุด โดยการเลื่อนภาพนี้เราจะใช้การเลื่อนแบบหมุนวน (Cyclic) เพื่อให้ขนาดของภาพคงเดิม ซึ่งกระบวนการต่อภาพจะกำหนดให้ภาพส่วนด้านบนอยู่กับที่ (รูปที่ 5(ก)) และขยับภาพส่วนด้านล่าง (รูปที่ 5(ข)) ตามแนวตั้ง  $\Delta x$  และแนวนอน  $\Delta y$  โดยผลการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ตามระยะพิกเซลที่เลื่อนไปแสดงในรูปที่ 5(ค)

ภาพถ่ายเอกซเรย์ที่นำมาต่อเข้าด้วยกันนั้น ความเข้มที่บริเวณรอยต่ออาจมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากภาพที่ได้จากการถ่ายเอกซเรย์แต่ละครั้งเกิดจากจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบฉากรับภาพ ซึ่งอาจมีจำนวนไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อเรหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการต่อภาพแล้วอาจพบว่ารอยต่อระหว่างภาพมีความเข้มของภาพที่ไม่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้วิธีการปรับความเข้มเฉพาะบริเวณ โดยการหาค่าเฉลี่ยของความเข้มบริเวณรอยต่อส่วนด้านบนในส่วนของภาพ A และความเข้มบริเวณรอยต่อส่วนด้านล่างในส่วนของภาพ B แล้วจากนั้นจึงทำการปรับค่าความเข้มของภาพทั้งสองให้มีความเข้มใกล้เคียงกัน โดยในที่นี้เราทำการปรับความเข้มเฉลี่ยของภาพ



รูปที่ 5(ก) ภาพถ่ายเอกซเรย์ส่วนด้านบน (ข) การเลื่อนภาพเอกซเรย์ส่วนด้านล่างให้มีตำแหน่งตรงกับภาพเอกซเรย์ส่วนด้านบน และ (ค) กราฟความสัมพันธ์ของค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้กับระยะที่เลื่อนภาพไป

ด้านล่างที่บริเวณรอยต่อ (ส่วนของภาพ B) ให้เท่ากับค่าความเข้มเฉลี่ยของภาพด้านบนที่บริเวณรอยต่อ ผลลัพธ์ที่ได้คือภาพถ่ายเอกซเรย์ที่มีความเข้มบริเวณรอยต่อใกล้เคียงกันและทำให้ภาพที่ต่อได้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น โดยภาพผลลัพธ์นี้แสดงดังในรูปที่ 2(ค)



รูปที่ 6 ค่าความเข้มของภาพที่ต่อที่บริเวณรอยต่อโดยไม่มีการปรับความเข้มของภาพ (ต่ำสุด = 0 คือ สีดำ และ สูงสุด = 1 คือ สีขาว) โดยความเข้มในส่วนของภาพ A และ B แสดงความไม่ต่อเนื่องกันอย่างชัดเจน ภาพเล็กคือภาพที่ได้จากการต่อภาพโดยไม่มีการปรับความเข้ม

#### 4. สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนาต่อไป

บทความนี้นำเสนอการต่อภาพถ่ายเอกซเรย์ขององค์ประกอบภายในของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงขนาด 22 กิโลโวลต์แบบแก๊ส SF<sub>6</sub> ด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล โดยเราได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำภาพถ่ายเอกซเรย์ 2 ภาพที่มีตำแหน่งขององค์ประกอบและความเข้มที่แตกต่างกันมาต่อกันด้วยวิธีสัมพัทธ์ภาพแล้ว เราสามารถต่อภาพเข้าด้วยกันได้อย่างถูกต้องและรอยต่อของภาพมีความเข้มที่ใกล้เคียงกัน

แนวทางการพัฒนาผลจากการวิจัยนี้คือนำภาพถ่ายเอกซเรย์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงไปวิเคราะห์การตรวจสอบการชำรุดของชิ้นส่วนภายในของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ ชีรวุฒิกุลรักษ์ เจ้าหน้าที่ในสังกัดฝ่ายปฏิบัติการภาคเหนือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เป็นผู้ริเริ่มแนวคิดที่ใช้ดำเนินการวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ และ ขอขอบคุณการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พิมพ์ครั้งที่ 3 พ.ศ. 2549 ISBN 974-92125-5-x
- [2] X. Zhang, E. Gockenbach, Z. Liu, H. Chen, and L. Yang, "Reliability estimation of high voltage SF<sub>6</sub> circuit breakers by

statistical analysis on the basis of the field data," *Electric Power Systems Research*, vol. 103, pp. 105-113, 2013

- [3] S. Nakano, T. Tsubaki and Y. Yoneda, "External diagnosis of vacuum circuit breaker using x-ray image processing," *High Voltage Engineering Symposium*, vol.5, pp. 256-259, 1999.
- [4] J. Michaelson, "Radiographic inspection saves costs and downtime and enables better maintenance planning," ABB white paper, retrieved from [www.abb.us/hvservice](http://www.abb.us/hvservice), "Radiography Reduce O&M costs and verify integrity of SF<sub>6</sub> gas circuit breakers & GIS" ABB white paper, retrieved from [www.abb.us/hvservice](http://www.abb.us/hvservice)
- [5] S. Nakano, T. Tsubaki and Y. Yoneda, "External diagnosis of power transmission and distribution equipment using x-ray image processing," *IEEE Trans. Power delivery*, vol. 15 pp. 575-579, 2000.
- [6] F. Endo, H. Hama, S. Matusomo, S. Hironaka, "Innovation of GIS insulation monitoring techniques and application to remote monitoring system," *CIGRE Conf.*, vol. 103-107, 2002.
- [7] A. M. Zolfaghari, E. Kollogg, S. Wendt, and J. Gray, "High speed x-ray radiography diagnostic of current interruption in circuit breakers," *Rev. Sci. Instrum.*, vol.73, pp. 1945-1948, 2002.
- [8] Q. Zhang, Y. Wang, and L. Wang, "Registration of images with affine geometric distortion based on maximally stable extremal regions and phase congruency," *Image and Vision Computing*, vol. 36, pp. 23-39, 2015
- [9] S. Samsudin, S. Adwan, H. Arof, N. Mokhtar, and F. Ibrahim, "Development of automated image stitching system for radiographic images," *J. Digit Imaging*, vol. 26, pp. 361-370, 2013.
- [10] T. R. Bontha and P. S. Els, "Rough terrain profiling using digital image correlation," *J. of Terramechanics*, vol. 59, pp. 1-17, 2015.
- [11] J. Yoo, S. S. Hwang, S. D. Kim, M. S. Ki, and J. Cha, "Regional linear warping for image stitching with dominant edge extraction," *KSEE Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 7, pp. 2464-2478, 2013
- [12] จักรวุฒินันท์ พลเจริญสุข สุวิทย์ กิระวิทยา และนันทวัฒน์ อู๊ดดี. "การตรวจสอบภายในเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแรงดันสูงด้วยวิธีการถ่ายภาพเอกซเรย์และการประมวลผลภาพดิจิทัล." *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37*. ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, หน้า 85 - 88.
- [13] <http://www.mathworks.com>

# Electrical Characteristics of LEDs for Visible Light Communication

Saichon Sriphan<sup>1,\*</sup> and Suwit Kiravittaya<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Advanced Optical Technology (AOT) Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.

<sup>a</sup>Saichon\_Sriphan@hotmail.com and <sup>b</sup>Suwitki@gmail.com

## Abstract

In a visible light communication system, LEDs are typically used as a transmitter. High-speed responsiveness of the LEDs is needed for effectively modulating the transmitted signal. In this work, we characterize the intrinsic capacitance of LEDs emitting different colors. Electrical characteristics of RGB LEDs, which are static  $I$ - $V$ ,  $C$ - $V$  and frequency-dependent capacitance characteristics, are reported. Small signal analysis of an LED equivalent circuit is performed for evaluating the LED circuit parameters. By fitting the experimental data, the intrinsic diffusion-junction capacitance of LEDs are extracted. The capacitance values of all the LEDs measured in the study showed a gradual decrement when the signal frequency increased. We found that the green LED has the lowest capacitance at the low frequency range of 200 kHz – 10 MHz. It is therefore suggested that green LEDs are suitable to be used as a transmitter in a visible light communication in this frequency range.

**Keywords:**  $I$ - $V$  Characteristics;  $C$ - $V$  Characteristics; frequency-dependent capacitance; LED

## 1. Introduction

Optical communication technologies are now widely used and can replace copper wire as the communication medium due to the high speed of transmission and very low signal loss [1]. These technologies are largely used in fiber-optic communication systems [1], fiber-optic sensors [2] and optical fiber monitoring [3]. As such these technologies are able to replace wire in many applications. Visible light communication (VLC) technology is a developing technology. Normally, this technology uses light emitting diodes (LEDs) as a transmitter. It requires very low power consumption, has long life and high ambient temperature tolerance, as well generating little heat [4]. One important application of this technology is to transmit data wirelessly by using visible light LEDs, which was initially developed in Japan and is now being developed by researchers around the world [5-7].

Due to the fact that an individual LED emits light of low intensity, we need to connect them as an array (or module) for practical use. Light transmission is a 'line-of-sight' technology so is not useful in areas where there are obstacles between the transmitter and receiver. The signal transmission rate is a primary concern in high speed communications. In theory, the time response of an LED is related to the intrinsic capacitance value of the LED materials. Therefore, our objective is to evaluate the electrical characteristics of LEDs fabricated by using

different materials and emitting different colors, i.e. red, green and blue (RGB), and to a color of an LED which is most suitable for use as a transmitter in a VLC system in each frequency region.

## 2. Experimental Setup and Measurement Circuit

A common-anode RGB LED was selected for the measurement. We used a Siglent SPD3303C DC power supply as the DC voltage source, an Agilent DSO-X 2002A oscilloscope as the AC voltage source and signal scope, a Keithley 6485 picoammeter as the ammeter and the Keysight 34450A digital multimeter as the voltmeter.

The circuit for measuring the static current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristics of an LED is shown in Fig. 1(a). It consists of a resistor ( $R$ ) and a measured LED. An adjustable DC voltage ( $V_{dc}$ ) was applied while the voltage LED ( $v_d$ ) was measured by the voltmeter and the current passing through the LED ( $i_d$ ) recorded by the ammeter.

For measuring the dynamic responses, i.e., the capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) and the frequency-dependent capacitance characteristics, we included an AC source ( $V_{ac}$ ) into the initial circuit shown in Fig. 1(a); see Fig 1(b). For an AC source, we chose a sinusoidal signal because it has the lowest number of harmonic frequencies when compared with other waveforms. Therefore, reliable received capacitances were finally obtained. A sinusoidal signal provides a constant amplitude of 0.4 V. We found that this value is suitable for our work. If the signal was too high, signal distortion occurred.

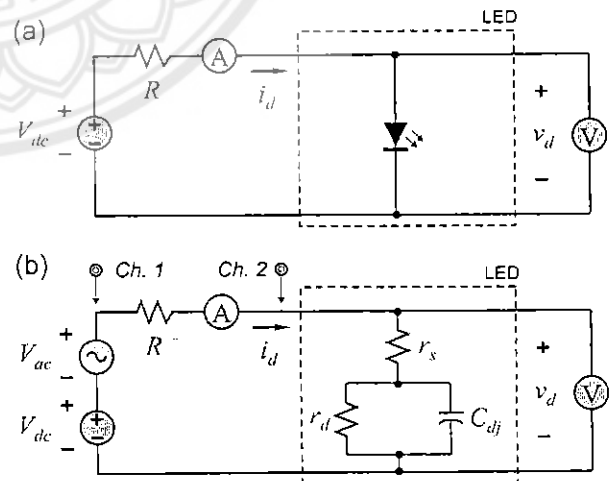


Fig. 1 Circuit for measuring the electrical characteristics of an LED in (a) static and (b) dynamic modes. Inside of the dashed rectangle in (b) shows an equivalent circuit of the measured LED.

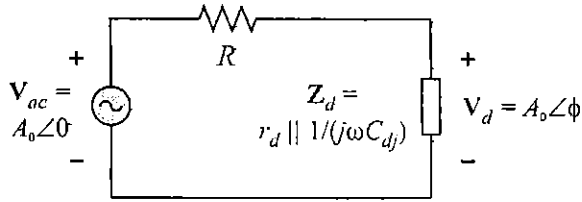


Fig. 2 Small signal analytical circuit in frequency domain for finding the values of  $C_{dj}$ .

On the other hand, if the signal is too low, we cannot detect it because of noise. Probe 1 (Ch. 1) and probe 2 (Ch. 2) from the oscilloscope were used for capturing the AC signal  $V_{ac}$  and subsequently  $v_d$ . An AC signal inside the circuit in Fig. 1(b) causes the voltage across the LED denoted as  $v_d$ . By considering a small signal equivalent circuit model of the LED [8], we can write the LED symbol as the equivalent circuit, which consists of series resistance ( $r_s$ ), diffusion resistance ( $r_d$ ) and diffusion-junction capacitance ( $C_{dj}$ ) as shown in the dashed rectangle in Fig. 1(b). A typical use of LED is operating at a low current level so we therefore simply ignore the effect of  $r_s$  by setting  $r_s = 0$ . We cannot simplify anymore because it might be wrong in theory [8,9].

### 3. Small Signal Analysis

We analyzed the measurement circuit in the frequency domain by using phasor notation. The equivalent circuit of the LED in Fig. 1(b) is represented by an impedance  $Z_d$  as shown in Fig. 2. The AC voltage source is now a reference phasor. That is  $V_{ac} = A_0 \angle 0$  and the voltage across the LED is  $V_d = A \angle \phi$ , where  $A_0$  is the amplitude of the AC voltage source,  $A$  is the amplitude of voltage across the LED and  $\phi$  is the phase difference between the two phasors.

By analyzing the circuit in Fig. 1(b) or Fig. 2, we can find the values of  $C_{dj}$ . Here, we separately analyze in two conditions; amplitude and phase. After some algebraic derivations, the  $C_{dj}$  can be displayed as

$$C_{dj} = -\frac{\sin \phi}{\omega R a}, \quad (1)$$

where  $a = A/A_0$  is a ratio between the amplitudes of these phasors and  $\omega = 2\pi f$  is an angular frequency of the AC signal with temporal frequency  $f$ .

### 4. Experimental Procedure

In this work, we measured the characteristics of LEDs in both static and dynamic modes using the circuits shown in Fig. 1. The circuits consist of a constant reference resistance  $R$  of 1.5 k $\Omega$ . For the static mode measurement, we sweep  $V_{dc}$  from -1 V to 10 V. These voltages span in both forward and reverse bias conditions. Finally, the  $I$ - $V$  characteristics for 3 different colors of RGB LED are obtained. Similarly, for the dynamic mode measurement, we sweep  $V_{dc}$  from 0 V to

10 V. The frequency  $f$  is fixed to 2 MHz for evaluating the  $C$ - $V$  characteristics. Frequency-dependent capacitance of the LED was also studied at a constant  $V_{dc}$  of 3 V. The frequencies were varied from 200 kHz to 20 MHz. All data was obtained at room temperature (25 °C) in dark conditions.

During the voltage/frequency sweeping, the raw signal data was recorded. Typical AC signals are shown in Fig. 3. The data are the signals coming from probe Ch. 1 or  $V_{ac}$  and Ch. 2 or  $v_d$  of the oscilloscope. We fit these waveforms for finding parameters  $A$ ,  $A_0$  and  $\phi$  by using the *lsqcurvefit* function in the MATLAB program [10]. The value of  $C_{dj}$  in each iteration of different bias voltage  $v_d$  and signal frequency  $f$  are then calculated by using Eq. (1).

### 5. Result and Discussion

Typical  $I$ - $V$  characteristics of the red, green and blue LEDs are shown in Fig. 4. These curves are obtained by using the measurement circuit in Fig. 1(a). Each LED is turned on at  $v_d$  approximately 1.80 V, 2.60 V and 2.70 V for the red, green and blue colors, respectively. Different colors showed different turn-on voltage. This result relates to the band-gap energy of the LED materials [11]. The trends of the curves show good diode characteristics for all LEDs.

The dynamic response results are shown in Fig. 5 and Fig. 6. Figure 5 shows the voltage-dependent capacitance for the three colors in the RGB LED. In this case, the frequency  $f$  is equal to 2 MHz and  $V_{dc}$  is swept from -1 to 10 V. All LED colors show the same trend and are consistent with the turn-on behaviors of the LED (see Fig. 4). The values of  $C_{dj}$  suddenly increase similarly to the corresponding values in the trend of  $i_d$  when the voltage is above the turn-on voltages. At the maximum measured current ( $i_d = 4$  mA in our experiment), we found that the values of  $C_{dj}$  for the red, green and blue LEDs are approximately 2800 pF, 1700 pF and 2400 pF,

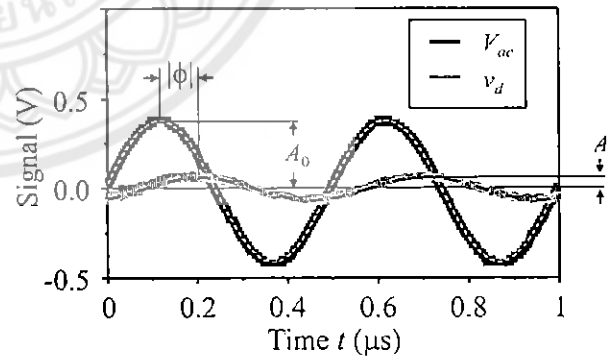


Fig. 3 Typical waveforms of the signal obtained from oscilloscope.

Red LED is measured. Parameters are  $V_{dc} = 1$  V,  $V_{ac} = 0.4$  V,  $f = 2$  MHz and  $R = 1.5$  k $\Omega$ . Waveform of  $V_{ac}$  is shown in black color and that of  $v_d$  is shown in green color. The fitted curves are also shown as a dotted and dash-dotted line. For this condition, we obtained  $A_0 = 0.399$  V,  $A = 0.063$  V and  $\phi = -80.676^\circ$ .

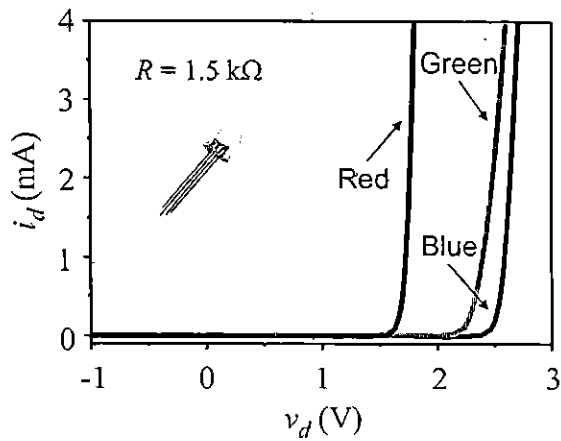


Fig. 4 The  $I$ - $V$  characteristics of red, green and blue LEDs in the measured RGB LED. Inset shows a photo of the LED.

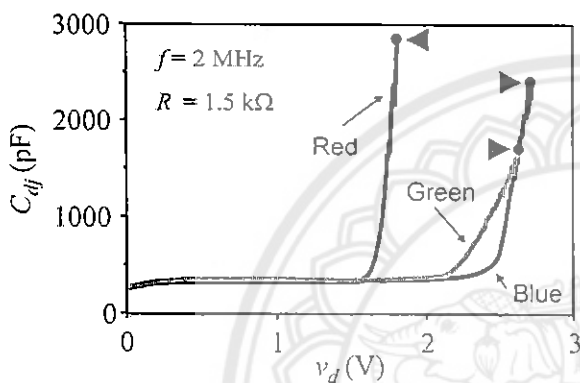


Fig. 5 The  $C$ - $V$  characteristics of three LEDs in an RGB LED. They are measured at  $f = 2$  MHz and  $R = 1.5$  k $\Omega$ . Triangle-circle symbols mark the highest capacitance values of each LED at  $i_d = 4$  mA.

respectively. These results are marked as triangle-circle symbols in Fig. 5. For a typical VLC system, we dynamically bias the LED in forward condition when it is used as a signal transmitter. In this system, high speed responsiveness of the device is important. Our results show that the green-color LED has the lowest intrinsic diffusion-junction capacitance  $C_{dj}$  at specific frequency of 2 MHz. Therefore, the green LED is the most suitable for use as a high-speed transmitter. This is due to the fact that the response time is directly proportional with capacitance value (Time constant  $\tau$  is equal to  $RC$ , product of the circuit resistance and the capacitance of the used device in a simple equivalent AC circuit model [9]). If its capacitance value is low, the device can then be operated at high speed.

A typical VLC system can operate at a wide range of frequencies appropriate for several possible applications. We therefore tested the frequency-dependent response of the LED by sweeping the signal frequency  $f$  from 200 kHz to 20 MHz and fixing the DC source voltage  $V_{dc}$  to 3 V (See Fig. 6). The trend shows

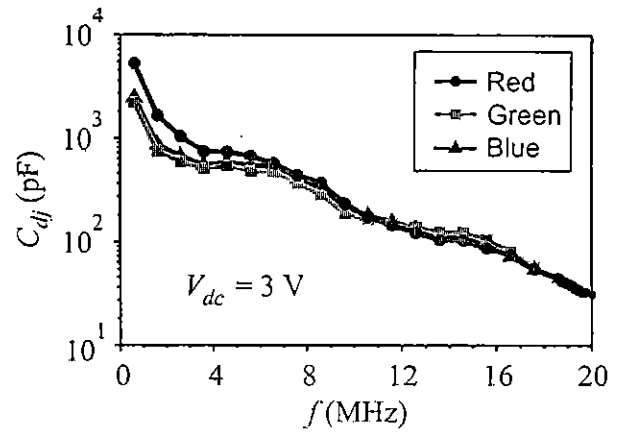


Fig. 6 Frequency-dependent characteristics of three LEDs in the frequency range between 200 kHz to 20 MHz. The measurement is performed when a constant DC source voltage  $V_{dc}$  of 3 V is applied.

the green LED has slightly lower  $C_{dj}$  than that of the blue LED at all frequencies below 10 MHz. This result corresponds to the previous result shown in Fig. 5. Due to this slightly different capacitance, we can choose either green or blue LEDs for use as a transmitter at low frequency in a simple practical case. The LED that has lowest  $C_{dj}$  also changed to the red LED when the signal frequency is more than 10 MHz. The trends of the three colors are quite the same but the red-color LED is the most dominant. Therefore, the green LED is suitable as the transmitter at low frequency range ( $f < 10$  MHz). If the VLC system is operated in the high frequency range ( $f > 10$  MHz), the red LED is better.

## 6. Conclusion

We present the electrical characteristics of LEDs emitting at different colors. The static and dynamic responses of the LED were measured. We found that the green LED is more suitable for use as a VLC transmitter at low frequency range because it has the lowest capacitance. However, the red LED is slightly better for working at high frequency. This work will enhance the understanding of an emitter in the visible light communication system.

## Acknowledgement

This work is financially supported by Naresuan University and the Faculty of Engineering, Naresuan University. We gratefully acknowledge Dr. Keattisak Sripimanwat, Assistant Professor Dr. Akaraphunt Vongkumhae and Mr. Thai-Chien Bui for their discussion and technical support. Many thanks to Mr. Roy Morien of the Naresuan University Language Centre for his editing assistance and advice on English expression in this document.



## References

- [1] O. Strobel, and J. Lubkoll, "Fiber-optic communication – an overview," in: Proceeding of the CriMiCo Conference, Sevastopol, Ukraine, 2010, pp. 16-20.
- [2] K. T. V. Grattan, and Dr. T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview," *Sensors and Actuators* 82 (2000) 40-61.
- [3] K. Toge, and F. Ito, "Recent research and development of optical fiber monitoring in communication systems," *Photonic Sensors* 3 (2013) 304-313.
- [4] T. Komine, and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 50 (2004) 100-107.
- [5] D. C. O'Brien, L. Zeng, H. Le-Minh, G. Faulkner, J. W. Walewski, and S. Randel, "Visible Light Communications: challenges and possibilities," in: *Proceeding of the PIMRC conference, Cannes, France, 2008*, pp. 1-5.
- [6] F. R. Gfeller, and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," in: *Proceeding of the IEEE* 67 (1979) 1474-1486.
- [7] M. V. Bhalerao, S. S. Sonavane, and V. Kumar, "A survey of wireless communication using visible light," *International Journal of Advances in Engineering and Technology* 5 (2013) 188-197.
- [8] D. A. Neamen, *Microelectronics: Circuit Analysis and Design*, 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, 2010, ch. 1, pp. 47.
- [9] R. F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison Wesley, 1996, ch. 7 and 9, pp. 301-368.
- [10] *MATLAB Programming Fundamentals*, MathWorks, Natick, MA, 2013.
- [11] S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: principles and practices*, 2<sup>nd</sup> ed., Pearson, 2013, ch. 3, pp. 245-246.



**Saichon Sriphan** He received his B. Eng. Degree, with Second Class Honors, from Naresuan University, Thailand, in 2012. He is currently studying in a Ph.D. degree program in electrical engineering at Naresuan University. His research interests include optoelectronic devices and new type of solar cell.



**Suwit Kiravittaya**. He received Bachelor and Doctoral degrees from Chulalongkorn University in 1998 and 2003. He is currently an assistant professor in the Department of Electrical and Computer Engineering, Naresuan University. His research interests are related to advanced optical technologies.

