

## ปรากฏการณ์พาหะร้อนของวัตุนาโนบ่อควอนตัมชนิดที่มีและไม่มีสารเจือปนในบ่อควอนตัม

### Hot Charge Carriers Phenomena in Doped and Undoped Nanostructures with Quantum Wells

ปกาวี ชำรงศิลป์<sup>1</sup>, L.E. Vorobjev<sup>2</sup>, M. Ya. Vinichenko<sup>2</sup>, D.A. Firsov<sup>2</sup>, V. L. Zerova<sup>2</sup>, V. Yu. Panevin<sup>2</sup>, A. N. Sofronov<sup>2</sup>,  
V. M. Ustinov<sup>3</sup>, A. P. Vasiljev<sup>3</sup>, and A. E. Zhukov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Prince of Songkla University, Songkla, Thailand. Email: paphavee.t@psu.ac.th,

<sup>2</sup>St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia.

<sup>3</sup>Ioffe Physical Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia.

<sup>4</sup>St. Petersburg Academic University, Research and Education Center for Nanotechnology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทางทฤษฎีของปรากฏการณ์พาหะร้อนของวัตุนาโนบ่อควอนตัมแบบมีสารเจือปน  $Si$  ( $n$ -type) และไม่มีสารเจือปนดังกล่าวในบ่อควอนตัม เปรียบเทียบอิทธิพลของการสารเจือปนที่มีผลต่อปรากฏการณ์พาหะร้อนซึ่งทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมโฟโตและอิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์ (Photo- and electroluminescence) กับพลังงานโฟตอนที่พาหะปลดปล่อยออกมา ที่อุณหภูมิห้อง (300 เคลวิน) ที่สภาพปราศจากการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูงและที่อุณหภูมิ 77 เคลวินในสภาพการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง การวิเคราะห์นี้ ใช้หลักการสมการสมดุลกำลังหรือสมการสมดุลพลังงาน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพาหะร้อนกับความเข้มของแสงที่กระตุ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีการกระเจิงพลังงานส่วนเกินของระบบในวัตุนาโนบ่อควอนตัมชนิดนี้และจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าวัตุนาโนบ่อควอนตัมแบบไม่มีสารเจือปนในบ่อควอนตัมมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอิเล็กตรอนร้อนได้รวดเร็วกว่าวัตุนาโนบ่อควอนตัมที่มีสารเจือปนในบ่อควอนตัม

คำสำคัญ: วัตุนาโนบ่อควอนตัม ปรากฏการณ์พาหะร้อน อิเล็กโตรและโฟโตลูมิเนสเซนส์

#### Abstract

Hot charge carrier phenomena with and without dopants Si ( $n$ -type) quantum wells (QWs) under optical and electrical interband pumping in the spontaneous emission mode had been theoretically studied. Dopants influence on hot charge carrier phenomena were compared and led to different physical properties of materials by using the experimental

analysis of the dependence of Photo- and electroluminescence spectrum on energy photon at the room temperature, and at 77 K with and without applying electric field on materials. By using balance energy equation as a research method, the dependence of hot charge electron temperature on the intensity of optical pumping was obtained, which conformed to the velocity of energy lost rate theory. As the results, it could be concluded that quantum wells structure without dopants tended to change hot electron temperature faster than that with dopants.

**Keywords:** Quantum wells, Hot charge carrier phenomena, Electro and photoluminescence

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการตื่นตัวในการนำเทคโนโลยีที่เป็นนวัตกรรมใหม่ๆ มาใช้ในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก และที่กำลังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในขณะนี้คือ นาโนเทคโนโลยี โดยการลดขนาดของวัสดุให้มีขนาด 1-100 นาโนเมตร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของโมเลกุลของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้สมบัติและพฤติกรรมต่างๆ เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแสง แตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุนั้นๆ จึงนับได้ว่าเป็นการพัฒนาการวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์เป็นอย่างมาก ในทางนาโนอิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นกัน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่เราใช้งานกันอยู่ทุกวันนี้ เช่น โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ วิทยุ กล้องดิจิทัล เป็นต้น มิใช่โครซิฟที่ประกอบด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ต่างๆ เป็นตัวควบคุมให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการทำงานของวงจรร่างต่างๆ เหล่านี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ เช่น สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า เมื่อเราสามารถลดขนาดของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร สมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เหล่านี้ก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดย

การอธิบายการเปลี่ยนแปลงต่างๆ จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของควอนตัมฟิสิกส์ ผลที่ได้ก็จะทำให้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีประสิทธิภาพรวดเร็วมากขึ้น โดยที่มีขนาดที่เล็กลง

ผลของเทคโนโลยีฟิล์มบางของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีส่วนประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ (*compound semiconductor*) ในหมู่ที่ 3 กับ หมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ เช่น GaAs, InGaAs จะได้วัสดุนาโนบ่อควอนตัม และอิเล็กทรอนิกส์ก๊าซในวัสดุนี้นี้จะประพฤติตัวเหมือนเป็นพาหะ 2 มิติ (*2D electron gas*) กล่าวคือ มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนที่ปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำของวัสดุนั้นๆ ส่วนแกนที่ปลูกฟิล์มบาง ชั้นพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าไม่ต่อเนื่อง หรือควอนไทซ์ (*quantized*) ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกนนี้จะเป็นในลักษณะเคลื่อนที่จากชั้นพลังงานหนึ่งไปอีกชั้นพลังงานหนึ่งนั่นเอง ไม่เพียงแต่คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของอิเล็กทรอนิกส์ก๊าซในบ่อควอนตัมที่ต่างจากอิเล็กทรอนิกส์ก๊าซในวัสดุสารกึ่งตัวนำขนาดปกติ (*Bulk material*) คุณสมบัติทางแสงก็เช่นเดียวกัน เราสามารถออกแบบบ่อควอนตัมชนิดต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยการควบคุมเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบางบนวัสดุสารประกอบสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เช่น ถ้าต้องการผลิตเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมที่

เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 1.3 ถึง 2.8 ไมครอน (*heterostructure injection lasers*) จะต้องปลูกฟิล์มบางที่มีสารประกอบสารกึ่งตัวนำประเภท  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  (Belenky, 1993) โดยที่  $x = 0.3$ ,  $y = 0.6$  โดยค่า  $x$  และ  $y$  จะเป็นอัตราส่วนอะตอมของธาตุนั้นๆ และค่านี้เองจะมีผลทำให้วัสดุโนบอควอนตัมที่ได้มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานสอดคล้องกับค่าพลังงานโฟตอนที่วัสดุโนบอควอนตัมจะเปล่งออกมา ซึ่งในกรณีนี้คือ 1.3 ไมครอน (อยู่ในย่านใกล้อินฟราเรด) ส่วนวัสดุโนบอควอนตัมคู่กันเน็ด  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  เป็นที่นิยมในด้านอุตสาหกรรมเลเซอร์นาโนบอควอนตัม ในย่านอินฟราเรดช่วงกลาง เนื่องจากเป็นคู่สารประกอบสารกึ่งตัวนำที่มีค่าคงที่ผลึกที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงไม่ทำให้เกิดความเค้นหรือความเครียดระหว่างรอยต่อของสารประกอบสารกึ่งตัวนำทั้งสอง ที่ส่งผลให้เกิดการรวมกัน (*recombination*) ของพาหะบริเวณใกล้ๆ รอยต่อ เนื่องจากความผิดปกติของโครงสร้างผลึก (*defect*)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านใกล้อินฟราเรด (ความยาวคลื่น 0.75-1.4 ไมครอน) และย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (ความยาวคลื่น 5-20 ไมครอน) มีลักษณะพิเศษดังนี้คือ 1. ในย่านใกล้อินฟราเรด นิยมใช้ในการสื่อสารใยแก้วนำแสง เนื่องจากมีค่าการสูญเสียในตัวกลางประเภทแก้วซิลิกาที่ต่ำ 2. ในย่านอินฟราเรดช่วงกลางมีแถบการดูดกลืนของโมเลกุลก๊าซมีพิษต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลฟิวไรด์ เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถใช้เลเซอร์ในย่านนี้ในการตรวจจับโมเลกุลก๊าซพิษในสิ่งแวดล้อม และสามารถตรวจสอบหาแร่ธาตุที่มีประโยชน์ในพื้นที่ผิวโลก หรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ส่วนประกอบของๆ หลาวและก๊าซต่างๆ 3. เนื่องจากใน

ย่านพลังงานนี้มีหน้าต่างการส่งผ่านของชั้นบรรยากาศ จึงสามารถใช้คุณสมบัติพิเศษนี้ในการสื่อสารในย่านมองเห็นเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสม, การวิเคราะห์พื้นผิวของไฮโดรสเฟียร์ เป็นต้น และเพื่อเป็นการพัฒนาศักยภาพของเลเซอร์ชนิดนี้ เราต้องศึกษาอิทธิพลของปรากฏการณ์พาหะร้อนต่อการรวมตัวของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลแบบปล่อยโฟตอนที่มีความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดช่วงกลาง เมื่อวัสดุโนบอควอนตัมถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูงพลังงานส่วนเกินในระบบที่เกิดจากการถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูงหรือด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูงจะต้องถูกกระเจิงออกโดยพาหะส่วนเกินที่เพิ่มมากขึ้น (ทั้งจากอุณหภูมิของผลึกที่สูงขึ้นและพลังงานในระบบที่มากขึ้น) จะทำอันตรกิริยากับอนุภาคโฟนอนหรือกับพาหะส่วนเกินด้วยกันเอง เพื่อเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งจากคำอธิบายนี้ สามารถอธิบายโดยสมการสมดุลพลังงานนั่นเอง (*Energy balance equation* – พลังงานส่วนเกินของระบบเท่ากับพลังงานหรือความเร็วในการกระเจิงพลังงานของระบบ) จาก Vorobjev (2003) ได้ศึกษาถึงปรากฏการณ์พาหะร้อนที่มีการกระเจิงพลังงานกับอนุภาคโฟนอน ซึ่งพบว่าความเร็วในการกระเจิงพลังงานแปรผกผันกับจำนวนสะสมของอนุภาคโฟนอน

ในงานวิจัยของ Zecova (2007) และ Firov (2007) ได้ศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อนที่มีผลต่อการพัฒนาอุปกรณ์โมดูลเลเตอร์ของแสงในย่านอินฟราเรดช่วงกลาง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อนที่มีอิทธิพลต่อวัสดุโนบอควอนตัมชนิดต่างๆ ทั้งเจือสารและไม่เจือสารในบอควอนตัมเป็นเครื่องมือสำคัญ ทั้งนี้วัสดุทั้งสองชนิดนี้มีจำนวนพาหะอิเล็กตรอนในระบบต่างกัน ซึ่งจะเป็นผลต่อการกระเจิงพลังงานในระบบแตกต่างกันด้วย อาจกล่าวได้ว่าการศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อน ไม่เพียงแต่พัฒนาคุณสมบัติ

ของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในนาโนสเกลเท่านั้น หากยังเป็นการเปิดโลกทัศน์ในการวิจัยองค์ความรู้ใหม่ในด้านฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและนาโนอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

## 2. วัตถุประสงค์

ศึกษาเปรียบเทียบปรากฏการณ์พาหะร้อนที่มีอิทธิพลต่อวัสดุนาโนบ่อควอนตัมชนิด GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ที่มีสารเจือ Si (*n-type*) ในบริเวณบ่อศักย์ควอนตัมกับวัสดุนาโนบ่อควอนตัมชนิด In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As/GaAs ที่ไม่มีสารเจือ Si (*n-type*) เพื่อที่จะนำหลักการไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาศักยภาพของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมที่เปล่งแสงในย่านอินฟราเรดช่วงกลาง

## 3. อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยทางทฤษฎี โดยก็นำผลการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์ของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนล ชนิด GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ที่มีสารเจือ Si (*n-type*) และอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมชนิด In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As/GaAs ที่ไม่มีสารเจือ Si (*n-type*) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (300 เคลวิน) และอุณหภูมิในโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) ในระบบที่ยังไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง จากห้องปฏิบัติการ Optical nonequilibrium electron laboratory, Department of Physics of Semiconductors, Saint Petersburg State Polytechnical University ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย โดยใช้แสงเลเซอร์ชนิดพัลส์ต่อเนื่องที่ย่านเปล่งแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรกระตุ้นวัสดุนาโนที่วางอยู่ในท่อคริโอสแตทที่สามารถทำการทดลองได้ทั้งอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิในโตรเจนเหลว

สเปกตรัมการกระเจิงจากวัตถุถูกโฟกัสเข้ายังโมโนโครมาเตอร์ที่มีฟิลเตอร์ที่กรองแสงเฉพาะย่านอินฟราเรดเท่านั้น สามารถวัดความเข้มของสัญญาณได้โดยตัวจับสัญญาณซิลิกอนโฟโตไดโอด เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนแล้วจึงวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยใช้หลักการของสมการสมดุลกำลังหรือสมดุลพลังงาน (*Energy balance equation*:

$$-\left\langle \frac{d\varepsilon}{dt} \right\rangle = e\mu_n E^2$$

ที่กล่าวว่า พลังงานเฉลี่ยของการรับพลังงานส่วนเกินของอิเล็กตรอนทั้งระบบจะต้องเท่ากับพลังงานที่อิเล็กตรอนก๊าซจะถ่ายเทโดยการกระเจิงหรือชนกับอนุภาคอื่นๆในผลึก: ในกรณีของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมทั้งสองชนิดนั้น การกระเจิงของพลังงานในระบบของพาหะร้อนจะกระเจิงกับอนุภาคโฟนอน (*Polar optical phonon*) หลังจากขั้นตอนการวิเคราะห์ทางทฤษฎี (จากสมการข้างต้น

$$-\left\langle \frac{d\varepsilon}{dt} \right\rangle$$

ที่นี้คืออนุภาคโฟนอน และ  $e\mu_n E^2$  คือ พลังงานส่วนเกินที่ระบบได้รับ (โดย  $\mu_n$  คือ สภาพความคล่องตัวของพาหะ,  $cm^2/V.s.$ ) ทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วลอยเลื่อนเพิ่มมากขึ้น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของพาหะร้อนและจำนวนพาหะร้อนที่เพิ่มมากขึ้นและเปรียบเทียบปรากฏการณ์พาหะร้อนในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมแบบมีสารเจือและไม่มีสารเจือเพื่อหาข้อสรุปในการนำไปใช้ประโยชน์ได้เหมาะสมต่อไป

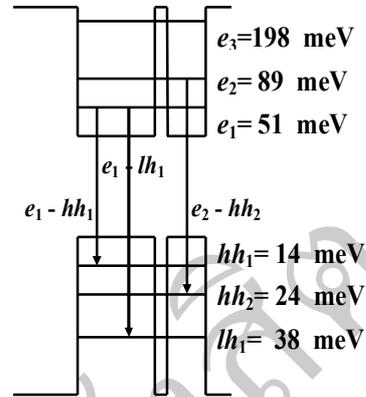
ขั้นตอนต่อมาคือการนำผลการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์ในสถานะที่มีการกระตุ้นวัสดุนาโนบ่อควอนตัมด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูงจากห้องปฏิบัติการเดียวกัน โดยวิธีการทดลองทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีแรก แต่กรณีนี้เพิ่มแหล่งจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีเครื่องกำเนิด

สัญญาณพัลส์ให้กับวงจรเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัตถุนาโน ทำการบันทึกหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนในกรณีนี้ และวิเคราะห์ผลการทดลองหาความสัมพันธ์อุณหภูมิพาหะร้อนที่ได้กับความเร็วของการกระเจิงพลังงาน

เปรียบเทียบกับผลการทดลองของปรากฏการณ์พาหะร้อนที่ได้สำหรับวัตถุนาโนบ่อควอนตัมทั้งสองชนิด

#### 4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

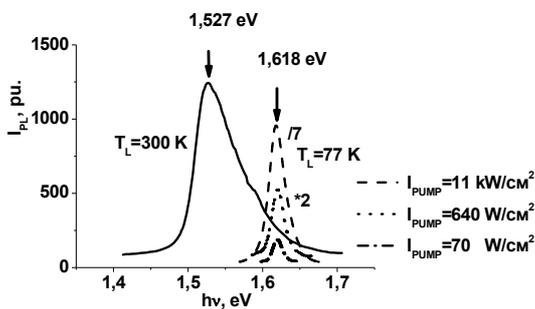
วัตถุนาโน บ่อควอนตัมคู่ทันเนลชนิด GaAs/Al<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>As ที่มีสารเจือ Si ที่บริเวณบ่อสัณฐานควอนตัม GaAs โดยมีความหนาแน่นพื้นผิวของสารเจือชนิด n ; N<sub>s</sub> = 6.10<sup>11</sup> cm<sup>2</sup> ขนาดของบ่อสัณฐานควอนตัมมีขนาดดังนี้คือ GaAs บ่อใหญ่มีขนาดกว้าง 6.8 นาโนเมตร ส่วนบ่อสัณฐานที่มีขนาดเล็กกว่ามีขนาดกว้าง 4.8 นาโนเมตร คู่บ่อสัณฐานทันเนลนี้มี กำแพงกั้น (barrier) ที่เป็นวัสดุฟิล์มบางของ Al<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>As โดยมีอัตราส่วนจำนวนอะตอมของธาตุ Al 0.38 อะตอมและ ธาตุ Ga 0.62 มีความหนา 1.5 นาโนเมตร การรวมกันของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลของวัตถุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนลชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัตถุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนล GaAs/Al<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>As

จากการวิเคราะห์ทฤษฎีทางกลศาสตร์ควอนตัม โดยการวิเคราะห์สมการชโรดิงเงอร์ (Schrodinger equation) สำหรับบ่อสัณฐานควอนตัมแบบมีความลึกจำกัด (finite depth well) สามารถหาค่าชั้นพลังงานของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในวัตถุนาโนชนิดนี้ (รูปภาพที่ 1) ระยะห่างระหว่างชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นที่ 1 (e<sub>1</sub>) และชั้นพลังงานของพาหะโฮลหนักชั้นที่ 1 (hh<sub>1</sub>) มีค่า 38 meV มีใกล้เคียงกับค่าพลังงานที่ระบบปลดปล่อยออกมาในอุณหภูมิห้อง (26 meV) ด้วยเหตุนี้ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ผ่านกำแพงกั้น (barrier) ที่มีขนาดบางๆ ไปประจำอยู่ที่ชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่ 2 (e<sub>2</sub>) ทำให้มีโอกาสการรวมกันของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจากชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 2 ไปยังชั้นพลังงานของโฮลหนักที่ 2 (hh<sub>2</sub>) ได้เช่นกันซึ่งจะเห็นได้จากสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์มีการแผ่ออกของสเปกตรัมในบริเวณที่มีค่าพลังงานสูง ดังรูปภาพที่ 2 ส่วนในกรณีนี้ที่ทดลอง ณ อุณหภูมิในโตรเจนเหลว พบว่าสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนส์ไม่มีการแผ่ออก เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ

อิเล็กตรอนจะกระจุกตัวอยู่ที่บริเวณชั้นพลังงานชั้นแรก จึงทำให้โอกาสการรวมกันแบบเปล่งแสงของพาหะอิเล็กตรอนโฮลจากชั้นพลังงานชั้นต่ำสุดมีมากกว่า ดังจะสังเกตได้จากความเข้มของสเปกตรัมมีค่ามากนั่นเอง



รูปภาพที่ 2 ความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนที่อุณหภูมิต่ำ (เส้นทึบ) ที่อุณหภูมิต่ำ 77 เคลวินที่ค่าความเข้มของลำแสงกระตุ้นแตกต่างกัน (เส้นประ) - ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย

เมื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์กับค่าพลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมาในกระบวนการรวมกันของพาหะอิเล็กตรอนโฮลที่อุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิต่ำ ความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่อุณหภูมิต่ำมีลักษณะแตกต่างออกไปยังบริเวณค่าพลังงานโฟตอนที่มาก ส่วนที่อุณหภูมิต่ำ 77 เคลวิน ไม่มีการแผ่อกของสเปกตรัมดังกล่าว สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ว่า ที่อุณหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนในวัสดุนาโนชนิดนี้จะอยู่กันอย่างหนาแน่นในชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 1 ( $e_1$ ) เมื่อหมดเวลาช่วงชีวิต (*life time*) อิเล็กตรอนจะรวมกับพาหะโฮลในชั้นพลังงานโฮลหนักที่ 1 ( $hh_1$ ) พร้อมกับปล่อยโฟตอนออกมา สเปกตรัมที่

อุณหภูมิต่ำนี้ จึงมีลักษณะเป็นจุดยอดที่แคบ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิโดยทดลองที่อุณหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 1 ผ่านกำแพงกั้นบางๆ (*barrier*) ของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมคู่ที่เชื่อมกัน (*tunnel-coupled quantum wells*) (รูปภาพที่ 1) และไปสถิตอยู่ที่ชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 2 เมื่อหมดเวลาช่วงชีวิต จะเกิดการรวมกันของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลทั้งจากชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 1 ( $e_1$ ) กับชั้นโฮลหนักที่ 1 ( $hh_1$ ) และจากชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 2 ( $e_2$ ) และโฮลหนักที่ 2 ( $hh_2$ ) (รูปภาพที่ 1) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา จึงทำให้สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ได้มีลักษณะแผ่กว้างออกนั่นเอง

เมื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ค่าความหนาแน่นของกระแสกระตุ้นต่างๆ กับค่าพลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมาแล้ว นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีปรากฏการณ์พาหะร้อน Shah (1992), Leite (1969) โดยทางทฤษฎี สำหรับสารประกอบสารกึ่งตัวนำประเภท GaAs การกระเจิงพลังงานในระบบที่ไม่สมดุลจะกระเจิงกับอนุภาคโฟนอน (*polar optical phonon scattering*) โดยความเร็วเฉลี่ยในการกระเจิงพลังงานจะเป็นไปตามสมการที่ 1

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)(T) = |e| E_0 \left(\frac{2\hbar\omega_{LO}}{\pi m^*}\right)^{0.5} \frac{\exp(x_C) - \exp(x_L)(0.5x_C)^{1/2} \exp(0.5x_C) K_0(0.5x_C)}{1 - \exp(x_C) \sqrt{\pi/2}} \quad (1)$$

โดย  $E_0$  - สนามไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ (*effective electric field*),  $|e| E_0 = \frac{m^* e^2 \hbar \omega_{LO}}{\hbar^2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_\infty} - \frac{1}{\varepsilon_0}\right)$ ,

$$x_C = \hbar\omega_{LO} / kT_e, \quad x_L = \hbar\omega_{LO} / kT_L;$$

$$T_L = 77 \text{ K} - \text{อุณหภูมิต่ำของผลึก}$$

$\hbar\omega_{LO}$  คือ พลังงานของอนุภาคโฟนอน (optical phonon energy);

$\epsilon_0 = 12.9$  คือ สภาพยอมไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกค่าต่ำ (low dielectric permittivity); ฟารัด/เมตร

$\epsilon_\infty = 10.9$  คือ สภาพยอมไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกค่าสูง (high dielectric permittivity), ฟารัด/เมตร

และสามารถหาความเร็วเฉลี่ยในการกระเจิง  $\left\langle \frac{d\epsilon}{dt} \right\rangle$  พลังงาน จากผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนที่วัดดูเปล่งออกมาที่ค่าความเข้มของเลเซอร์กระตุ้นค่าต่างๆกันได้คือ

$$\langle d\epsilon / dt \rangle = I_{PUMP} \frac{\hbar\omega - \epsilon_g}{\hbar\omega} \cdot \frac{1}{n^* + n_0} \quad (2)$$

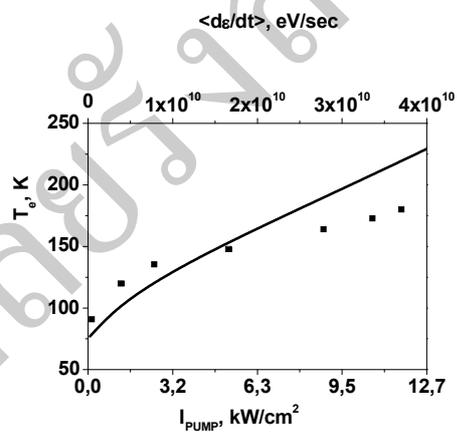
โดย  $\hbar\omega = 2.33$  eV คือ พลังงานโฟตอนของแสงเลเซอร์ที่ใช้;

$\epsilon_g = 1.57$  eV คือ energy band gap ของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนล;

$n^0$  คือ ผลรวมของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิวกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่ที่เป็นผลจากการกระตุ้นวัสดุนาโนด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง

$n^*$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิวที่พิจารณาจากการที่พาหะได้รับพลังงานส่วนเกินจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงพร้อมกับถ่ายเทพลังงานนั้นสู่พาหะอิเล็กตรอนในบ่อควอนตัม

นำปรากฏการณ์พาหะร้อนที่ได้จากการทดลอง (สมการที่ 2) และจากทฤษฎี (สมการที่ 1) มาเปรียบเทียบกับ (รูปภาพที่ 3) จะเห็นว่าผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎี

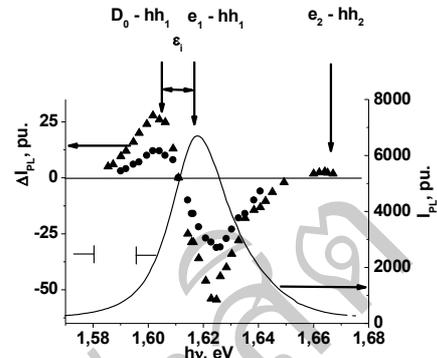


รูปภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของพาหะร้อนกับความเข้มของกำลังเลเซอร์ที่ใช้กระตุ้นวัสดุที่ได้จากการทดลอง (แสดงเป็นจุด) และค่าเฉลี่ยของความเร็วในการกระเจิงพลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้จากทฤษฎี (เส้นทึบ) - ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย

โดยสามารถอธิบายปรากฏการณ์พาหะร้อนของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนลชนิด GaAs/Al<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>As ที่มีสารเจือ Si ที่บริเวณบ่อศักย์ควอนตัม GaAs ได้ดังนี้คือ เมื่อทำการกระตุ้นวัสดุด้วยความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นพาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) มากขึ้น ก็จะทำให้มีพลังงานส่วนเกินมากขึ้น ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นมาใหม่จะนำพาพลังงานส่วนเกินของระบบถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานที่ต่ำในบ่อ

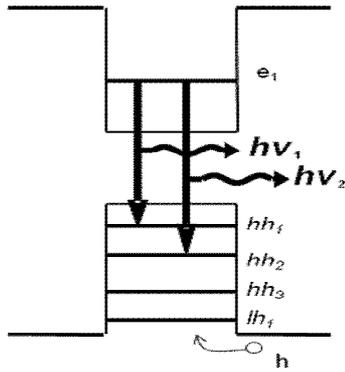
ศักย์ควอนตัม รวมทั้งกระเจิงพลังงานกับอนุภาคโฟนอน เพื่อให้ระบบกลับสู่สภาวะสมดุล (ตามทฤษฎีในสมการที่ (1)) เมื่อทำการทดลองโดยการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มต่างๆกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของความหนาแน่นค่าต่างๆกับความเร็วเฉลี่ยในการกระเจิงพลังงานเมื่อวัดถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์สอดคล้องกันตามสมการที่ (2) นั่นเอง

ในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมที่มีสารเจืออยู่ในบ่อควอนตัมจะแตกต่างจากที่ไม่มีสารเจือคือ นอกจากมีการรวมตัวกันระหว่างพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจากชั้นพลังงานพื้นฐานของพาหะทั้งสองชนิดแล้ว ยังมีโอกาสการรวมกันแบบปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาระหว่างชั้นพลังงานสารเจือ (*localization energy state*) ( $D_0$ ) กับชั้นพลังงานโฮลหนักที่ 1 ( $hh_1$ ) ด้วย ดังเห็นได้จากรูปภาพที่ 4 ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมา โดยใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงขนาด  $500 \text{ V/cm}^2$  และ  $750 \text{ V/cm}^2$  กระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากชั้นพลังงาน  $hh_1$  ไปยังชั้นพลังงาน  $e_1$  อิเล็กตรอนจะอยู่ที่ชั้นพลังงานนี้ด้วยระยะเวลาประมาณ  $10^{-12}$  วินาที แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่มายังชั้นพลังงาน  $D_0$  พร้อมกับปลดปล่อยอนุภาคโฟนอนออกมา และจะสถิตอยู่ในชั้นพลังงานสารเจือนี้ด้วยระยะเวลาประมาณ นาโนวินาที แล้วจึงเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับพาหะโฮลในชั้นพลังงานโฮลหนักที่ 1 พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา ดังจะเห็นได้จากจุดยอดของกราฟในบริเวณนี้ที่ขึ้นสูง (รูปภาพที่ 4) นั่นเอง



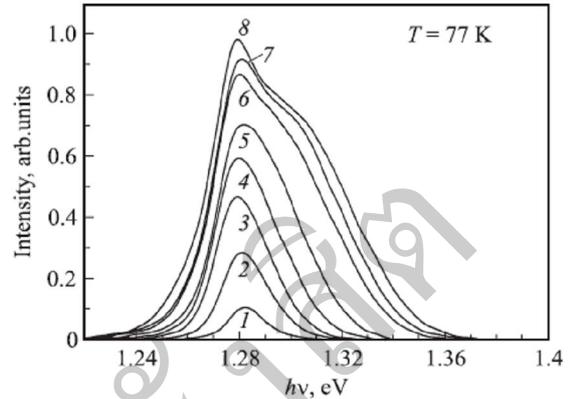
รูปภาพที่ 4 โมเดลชั้นสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์โดยสนามไฟฟ้าขนาด  $500 \text{ V/cm}^2$  (จุดกลม) และ  $750 \text{ V/cm}^2$  (สามเหลี่ยม) ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน (แกนซ้ายมือเป็นแกนอ้างอิง) ความละเอียดของสเปกตรัม 17 meV เปรียบเทียบกับสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ในกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้าในวัสดุ (เส้นที่ตรงกลาง) - ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย

สำหรับวัสดุ นาโนบ่อควอนตัมประเภท  $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}/\text{GaAs}$  ที่ปราศจากสารเจือในบ่อควอนตัมนั้น จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม โดยการวิเคราะห์สมการชโรดิงเงอร์ สามารถแสดงแผนภาพการรวมกันของพาหะอิเล็กตรอนโฮลในชั้นพลังงานต่างๆได้ดังรูปภาพที่ 5 ตามกฎ *selection rules* แล้วการรวมกันระหว่างชั้นพลังงาน (*interband transition*) ในวัสดุ นาโนบ่อควอนตัมจะเกิดขึ้นในกรณีที่เลขประจำชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลเป็นเลขประจำชั้นที่ตรงกันเท่านั้น เช่น  $e_1-hh_1, e_2-hh_2$  เป็นต้น แต่เนื่องจากปรากฏการณ์พาหะร้อนที่เกิดขึ้น โดยการที่เพิ่มความหนาแน่นของกระแสกระตุ้นให้กับวัสดุ ทำให้ที่ค่าเวกเตอร์คลื่น (*wave vector, k*) มีค่าสูงๆ มีโอกาสที่จะเกิดการรวมกันระหว่างชั้นแบบปล่อยโฟตอนของพาหะอิเล็กตรอนโฮลที่มีเลขประจำชั้นแตกต่างกัน เช่น  $e_1-hh_2$  ได้ ผลจากปรากฏการณ์พาหะร้อนนี้ทำให้เลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมที่ได้มีกำลังมากขึ้นนั่นเอง



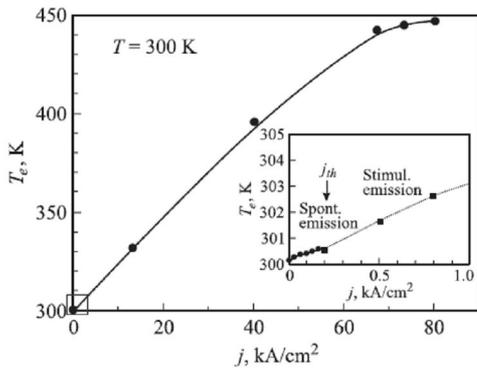
รูปภาพที่ 5 แผนภาพแสดงการรวมตัวแบบเปล่งโฟตอนของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมประเภท  $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}/\text{GaAs}$  ที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน  $E_g = 1.1212 \text{ eV}$ ,  $E_g^* = 1.2 \text{ eV}$  ความกว้างของบ่อควอนตัม  $L = 7 \text{ nm}$ .

จากผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของอิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมาในกระบวนการรวมกันของพาหะอิเล็กตรอนโฮลที่อุณหภูมิ 77 เคลวินและที่ค่าความเข้มของกระแสกระตุ้นแตกต่างกัน (รูปภาพที่ 6) จะเห็นได้ว่าที่ค่าความเข้มของกระแสกระตุ้นตั้งแต่  $333 \text{ A/cm}^2$  สเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์มีการแผ่กว้างออกไปยังบริเวณพลังงานโฟตอนที่มีความมาก เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเทียบกับการกระจายแบบเกาส์ (*Gauss Distribution*) พบว่าการเบนออกของสเปกตรัมนี้สอดคล้องกับการรวมกันระหว่างชั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่ 1 ( $e_1$ ) และชั้นโฮลหนักที่ 2 ( $hh_2$ ) นั่นเอง



รูปภาพที่ 6 สเปกตรัม การเปล่งแสงแบบ spontaneous ที่ความเข้มของกระแสกระตุ้นต่างกัน โดยเริ่มจากน้อยไปหามาก (1-22, 2- 67, 3-111, 4-167, 5-222, 6-333, 7-389, 8-444  $\text{A/cm}^2$ ) - ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย

เมื่อความเข้มของกระแสกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณเหนือบ่อควอนตัม (*continuum*) มีพลังงานมากขึ้น อิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากขึ้นนี้จะถ่ายเทพลังงานส่วนเกินให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานต่างๆบริเวณบ่อควอนตัมโดยการชนกัน (*electron interaction*) เมื่อยังเพิ่มกระแสมากขึ้น ก็จะมีพลังงานมากขึ้น อุณหภูมิของระบบก็จะสูงขึ้นด้วย สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของพาหะร้อนกับความเข้มของกระแสกระตุ้นได้ดังรูปภาพที่ 7 จะเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิแปรผันตรงกับความเข้มของกระแสกระตุ้นทั้งในการรวมกันที่เปล่งโฟตอนแบบ *spontaneous emission* และ *stimuleous emission*.



รูปภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพารโอะนกับคานานน่นของกระแสดรคณที่อุณหภูมิห้อง (T = 300 K) รูปสี่เหลี่ยมเล็ก แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในช่วงเริ่มต้นของการเปล่งแสงแบบ spontaneous - ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย

5. การอภิปรายผล

จะเห็นได้ชัดว่าในวัสดุโนบอควอนตัมแบบมีสารเจือจะมีปรากฏการณ์พารโอะน การรวมตัวกันของพารโอะอิเล็กตรอนโฮลในชั้นพลังงานสารเจือ (D<sub>0</sub>) ทำให้ความเร็วเฉลี่ยในการกระเจิงพลังงานของระบบลดลง (รูปภาพที่ 4) มีผลทำให้การเกิดปรากฏการณ์พารโอะนในกรณีนี้ช้ากว่ากรณีวัสดุไม่มีสารเจือ เนื่องจากในวัสดุที่ไม่มีสารเจือ (ดูรูปภาพที่ 3 กรณีที่มีสารเจือเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีสารเจือ ในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในกรณีหลัง เพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าหลังจากผ่านช่วง laser generation ไปแล้ว) เมื่อระบบมีพลังงานมากขึ้น หรืออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดพารโอะอิเล็กตรอนอิสระมากมาย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fraizzoli (1990) โดยไม่มีการรวมกันภายในชั้นพลังงานสารเจือบริเวณบ่อควอนตัม ทั้งยังทำให้เกิดโอกาสการรวมกันระหว่างชั้นพลังงานที่นอกเหนือจาก selection rules อีกด้วย ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์พารโอะนที่รวดเร็วในวัสดุที่ไม่มี

สารเจือโนบอควอนตัมนี้ มีผลทำให้เลเซอร์โนบอควอนตัมควอนตัมมีผลผลิตควอนตัม (quantum yield) ที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง.

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบปรากฏการณ์พารโอะนที่มีอิทธิพลต่อวัสดุโนบอควอนตัมชนิด GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ที่มีสารเจือ Si (n-type) ในบริเวณบ่อควอนตัมกับวัสดุโนบอควอนตัมชนิด In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As/GaAs ที่ไม่มีสารเจือ Si (n-type) โดยทำการทดลองสเปกตรัมโฟโตและอิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์ทั้งในสภาวะที่ถูกและไม่ถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้าแรงสูง (สำหรับโฟโตลูมิเนสเซนส์) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับทฤษฎีการกระเจิงพลังงานของพารโอะนในสารประกอบสารกึ่งตัวนำกลุ่มที่ 3 กับกลุ่มที่ 5 พบว่าในวัสดุโนบอควอนตัมที่มีสารเจือในบริเวณบ่อควอนตัม จะเกิดปรากฏการณ์พารโอะนได้ช้ากว่าวัสดุโนบอควอนตัมที่ไม่มีสารเจือ ทั้งนี้ทั้งนั้น ผลกระทบที่ได้จากปรากฏการณ์พารโอะนนี้ทำให้เลเซอร์มีกำลังใช้งานมากขึ้น แต่ในอีกด้านหนึ่ง อาจทำให้เกิดการรวมกันของพารโอะอิเล็กตรอนโฮลแบบไม่เปล่งแสงขึ้นภายในบริเวณบ่อควอนตัม ดังนั้นจึงต้องออกแบบและพัฒนาโครงสร้างของวัสดุชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทพุนพัฒนาอาจารย์ใหม่ ปีงบประมาณ 2555

Thankfulness Saint-Petersburg State Polytechnical University, Russia Federation for corporation and gave me good education in Master and

Ph.D. degrees and also good life experience during 8 years in Russia Federation.

### 8. เอกสารอ้างอิง

- Belenky, G.L. et. al. (1993). "Collector-up light emitting charge injection transistors in n-InGaAs/InAlAs/p-InGaAs and n-InGaAs/InP/p-InGaAs heterostructures". *Journal of Applied Physics*. Vol. 73. no. 12. 8618 - 8627.
- Firsov, D.A. (2007). "Light emission, absorption and amplification in InAs/GaAs Quantum dots and GaAs/AlGaAs Quantum wells.". *International Journal of Nanoscience*. Vol. 6. No. 3-4. 241 - 244.
- Fraizzoli, S. F. Bassani and R. Buczko (1990). "Shallow donor impurities in GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As quantum-well structures: Role of the dielectric-constant mismatch". *Physics Review B*. Vol. 41. 5096 - 5103.
- Leite, R.C. and Jagdeep Shah (1969). "Radiative Recombination from Photoexcited Hot Carriers in GaAs". *Physics Review Letters*. Vol. 22. 1304 - 1307.
- Shah, J., C.V. Shank, and B.P. Zakharchenya (1992) Chapter 2 "Ultrafast Luminescence Spectroscopy of Semiconductors: Carrier Relaxation, Transport and Tunneling". *Spectroscopy of nonequilibrium electrons and phonons*. North Holland; Amsterdam, London, New York, Tokyo. 61 - 85.
- Vorobjev, L.E., Danilov, S.N., Zerova, V.L., and Firsov, D.A. (2003) "Electron heating by a strong longitudinal electric field in quantum wells". *Semiconductors*. Volume 37. No.5. 586-593
- Zerova, V.L., Vorobjev, L.E., Firsov, D.A., and Towe, E. (2007). "Modulation of intersubband absorption in tunnel-coupled quantum wells in electric fields". *Semiconductors*. Volume 41. No.5. 596-605.