



ปรากฏการณ์พาหะร้อนในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมและบทบาทในการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในย่านอินฟราเรด

ปภาวี ฟาน โดมเมเลน*

อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อการพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-7428-8742 อีเมล: paphavee.t@psu.ac.th

รับเมื่อ 26 มิถุนายน 2557 ตอรับเมื่อ 1 ธันวาคม 2557

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.001 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและระเบียบวิธีการทดลองของปรากฏการณ์พาหะร้อนรวมถึงการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เปล่งแสงในย่านอินฟราเรดทั้งยังอธิบายอิทธิพลของปรากฏการณ์พาหะร้อนต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในระบบย่อยของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมของผลึกสารกึ่งตัวนำผสมอีกด้วย

คำสำคัญ: เลเซอร์นาโนบ่อควอนตัม อินฟราเรด ปรากฏการณ์พาหะร้อน สารกึ่งตัวนำผสม ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

การอ้างอิงบทความ: ปภาวี ฟาน โดมเมเลน, “ปรากฏการณ์พาหะร้อนในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมและบทบาทในการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในย่านอินฟราเรด,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 149-160, ม.ค. - เม.ย. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.12.001>



Hot Charge Carrier Phenomena in Quantum Wells and Its Role on the Development of Efficiency of Quantum Well Lasers and Optoelectronics Devices in IR Range

Paphavee van Dommelen*

Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Center of Excellence in Nanotechnology for Energy, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-7428-8742, E-mail: paphavee.t@psu.ac.th

Received 26 June 2014; Accepted 1 December 2014

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.001 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

In this reviewed article, the theoretical and experimental research of hot charge carrier phenomena including the development of efficiency of quantum well lasers and optoelectronics devices emitting in infrared (IR) range based on the principle of hot charge carrier phenomena are presented. The influence of this phenomena on physical properties of electrons and holes in subsystem of quantum wells of compound semiconductors is also explained.

Keywords: Quantum Well Lasers, Hot Charge Carrier Phenomena, Infrared, Compound Semiconductor.

Please cite this article as: P. van Dommelen, "Hot Charge Carrier Phenomena in Quantum Wells and Its Role on the Development of Efficiency of Quantum Well Lasers and Optoelectronics Devices in IR Range," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 1, pp. 149-160, Jan. - Apr. 2015 (in Thai). <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.12.001>

1. บทนำ

โดยปกติในระบบโตนเดียม (ระบบที่ไม่มี การแลกเปลี่ยนพลังงานกับสิ่งแวดล้อม) ของผลึกสารกึ่งตัวนำ พหุอิเล็กตรอนหรือโฮลในผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในผลึก ($E \gg k_B T$; k_B - ค่าคงที่โบลต์ซมานน์ มีค่า 1.38×10^{-23} เมตร²•กิโลกรัม/วินาที²•เคลวิน T - อุณหภูมิของผลึกสารกึ่งตัวนำ) จะถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งให้กับผลึก เมื่อผลึกสารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้น (หรือพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในผลึกมีค่าสูงขึ้น) ผลึกจะสั่นและเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนนี้ไปทั่วชิ้นสาร มีผลให้อิเล็กตรอนหรือโฮลที่มีพลังงานจลน์น้อยกว่าพลังงานความร้อน ($E \ll k_B T$) รับพลังงานความร้อนจากผลึกที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้พาหะเหล่านี้มีพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น ซึ่งในสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) อัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ระหว่างผลึกสารกึ่งตัวนำและพาหะอิเล็กตรอนหรือโฮลโดยรวมทั้งหมดจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าผลึกสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า ความเข้มสูงค่าๆ หนึ่งหรือถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูง เช่น แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ มีผลทำให้ผลึกดังกล่าวมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมมาก ผลจากการที่ผลึกมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นนี้ทำให้พาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น มีผลให้พาหะมีพลังงานจลน์และอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย เรียกอุณหภูมิของพาหะที่สูงขึ้นนี้ว่า “อุณหภูมิยังผล (Effective Temperature, T_c)” และเรียกปรากฏการณ์ที่พาหะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นนี้ว่า “ปรากฏการณ์พาหะร้อน (Hot Charge Carrier Phenomena)” ตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมในสภาวะสมดุลความร้อนแล้ว สำหรับอิเล็กตรอนและโฮลหนึ่งตัว อัตราการรับพลังงานจลน์ส่วนเกินจากผลึกสารกึ่งตัวนำอุณหภูมิสูงจะต้องมีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินนั้น ให้กับผลึกสารกึ่งตัวนำ การถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของพาหะเหล่านี้ได้แก่ การกระเจิง (Scattering) หรือชนกับพาหะด้วยกันเองหรืออนุภาคเสมือน เช่น อนุภาคโฟนอน ในระบบ เป็นต้น

จากหลักการดังกล่าวสามารถอธิบายปรากฏการณ์พาหะร้อนของอิเล็กตรอนได้โดยสมการบาลานซ์พลังงาน (Energy Balance Equation) ดังนี้คือ $e\mu_n E^2 = \left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle$ โดย e - ประจุอิเล็กตรอนอิสระมีค่า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ μ_n - สภาพคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอน (เช่นติเมตร²/โวลต์.วินาที) และ E - ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซ็นติเมตร) พจน์ทางซ้ายมือของสมการอธิบายอัตราการรับพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนทั้งหมดจากผลึกสารกึ่งตัวนำที่ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าค่าๆ หนึ่ง พจน์ทางขวามืออธิบายอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนโดยการกระเจิงพลังงาน (Scattering Energy Rate) กับอิเล็กตรอนด้วยกันหรือกับพาหะต่างชนิดกัน หรือการชนกับโฟนอน เช่น Longitudinal Optical Phonon (LO Phonon), Deformational Acoustic Phonon (DA Phonon) การกระเจิงพลังงานของพาหะในผลึกสารกึ่งตัวนำทุกชนิดส่วนใหญ่จะกระเจิงกับ LO Phonon โดยในผลึกสารกึ่งตัวนำผสม (Compound Semiconductors) ของธาตุกึ่งโลหะหมู่ที่ 3 และหมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ เช่น GaAs และ GaN มีค่าพลังงานการกระเจิงประมาณ 33 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์และ 90 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ [1]

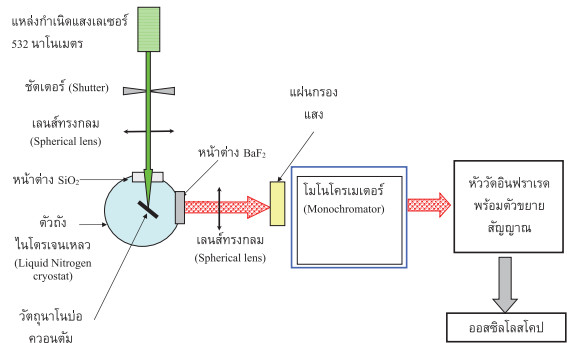
เลเซอร์นาโนบ่อควอนตัม (Quantum Well Lasers) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคู่ผลึกสารกึ่งตัวนำผสมของธาตุกึ่งโลหะหมู่ที่ 3 และหมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ เช่น คู่ผลึกสารกึ่งตัวนำ GaAs และ AlGaAs เป็นต้น เลเซอร์ชนิดนี้พัฒนามาจากเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) โดยที่บริเวณทำงาน (Active Region) (บริเวณทำงานของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมประกอบด้วยบ่อศักย์ควอนตัมและ Waveguide) ของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมจะมีขนาดในระดับนาโนเมตร เพื่อที่จะให้เกิดการจัดตัวแบบควอนตัม (Quantum Confinement) ของพาหะ เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการรวมตัว (Recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลจากระดับชั้นพลังงานย่อย (Subband) ต่างๆ ภายในบ่อศักย์ควอนตัมพร้อมกับเปล่งแสงออกมา (Spontaneous Emission) [2] โดยความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมานี้จะขึ้นกับ

ระยะห่างของระดับชั้นพลังงานย่อยต่างๆ ภายในบ่อศักย์ควอนตัมที่สัมพันธ์กับความกว้างของบ่อศักย์ควอนตัมของวัสดุโนนนั้นๆ นั้นเอง มีงานวิจัยที่นำเสนอการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมมากมาย ยกตัวอย่างเช่น เลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมแบบสองสี (Dual-color Laser) [3] เลเซอร์ควอนตัมคาสคอด (Quantum Cascade Laser, QCL [4]) เป็นต้น โดยเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมมีประสิทธิภาพมากกว่าเลเซอร์ไดโอดแบบเก่า เนื่องจากความหนาแน่นของชั้นพลังงาน (Density of States) ที่แตกต่างกันของอิเล็กทรอนิกส์ในผลึกสารกึ่งตัวนำรวมถึงสามารถเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า เลเซอร์ไดโอดแบบเก่าอีกด้วย [5]

การกระตุ้นวัสดุโนนบ่อควอนตัมของสารกึ่งตัวนำผสมด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูงหรือแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความเข้มสูง ทำให้ผลึกของสารกึ่งตัวนำผสมมีอุณหภูมิสูงขึ้นและแลตทิส (Lattice) สั่นด้วยแอมพลิจูดมากขึ้นมีผลให้มีจำนวนโฟนอนในระบบเพิ่มมากขึ้นด้วยในสภาวะที่ระบบถูกรบกวนเช่นนี้พาหะต้องถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินที่ได้รับจากการที่ผลึกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยการกระเจิงกับ LO Phonon ส่วนเกินเหล่านี้เพื่อให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมนั่นเอง และจากการศึกษา [6] พบว่าการสะสมของจำนวน LO Phonon ส่วนเกินในระบบทำให้อัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินและพลังงานการกระเจิงของพาหะร้อน (Hot Charge Carriers) ในระบบโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมหรืออุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เปล่งแสงหรือดูดกลืนแสงในย่านอินฟราเรดให้ดียิ่งขึ้น

2. ปรากฏการณ์พาหะร้อนที่เกิดจากการกระตุ้นวัสดุด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความเข้มสูง (Hot Charge Carriers Phenomena Excited by High Optical Pumping)

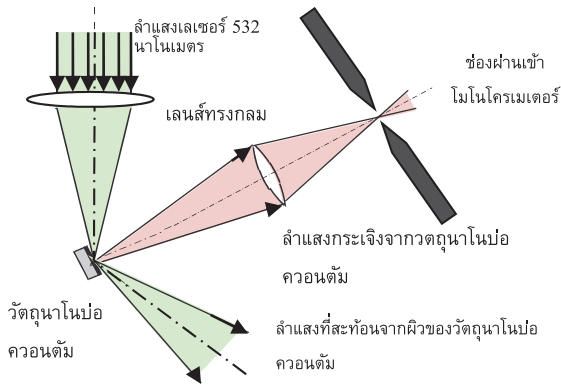
ปรากฏการณ์พาหะร้อนในวัสดุโนนบ่อควอนตัมโดยการกระตุ้นวัสดุด้วยการฉายแสงเลเซอร์ที่มี



รูปที่ 1 การทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์ในวัสดุโนนบ่อควอนตัมประเภทสารกึ่งตัวนำผสมเพื่อศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความเข้มสูง

ความยาวคลื่นเหมาะสมกับช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุโนนบ่อควอนตัมของผลึกสารกึ่งตัวนำนั้นๆ โดยการฉายแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรด (ตั้งแต่ 532 นาโนเมตรจนถึง 1024 นาโนเมตร) ไปยังวัสดุโนนบ่อควอนตัมที่ถูกจัดวางอยู่ในตัวถังควบคุมอุณหภูมิ (Cryostat) ในช่วง 77-300 เคลวินแล้วตรวจจับความเข้มของแสงที่กระเจิงออกจากพื้นผิวของวัสดุโนนบ่อควอนตัมนั้นๆ ด้วยหัววัดอินฟราเรด ความเข้มของแสงกระเจิงที่วัดได้จะเป็นความเข้มแสงที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะอิเล็กทรอนิกส์และโฮลภายหลังจากสภาวะถูกกระตุ้นแล้วปลดปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา เรียกกระบวนการนี้ว่าโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence, PL) การทดลองสามารถแสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 แสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรถูกฉายผ่านชัตเตอร์และไฟกัสด้วยเลนส์ทรงกลมตกกระทบวัสดุโนนบ่อควอนตัมที่วางอยู่ในตัวถังควบคุมอุณหภูมิซึ่งบรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ภายใน แสงที่กระเจิงออกจากพื้นผิวของวัสดุโนนบ่อควอนตัม (ดังรูปที่ 2) ถูกกรองเฉพาะย่านอินฟราเรดผ่านโมโนโครเมเตอร์เพื่อหาความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับสัญญาณที่หัววัดอินฟราเรดจับได้โดยแสดงผลสัญญาณดังกล่าวที่ออสซิลโลสโคป สัญญาณที่แสดงผลนี้เป็นค่า



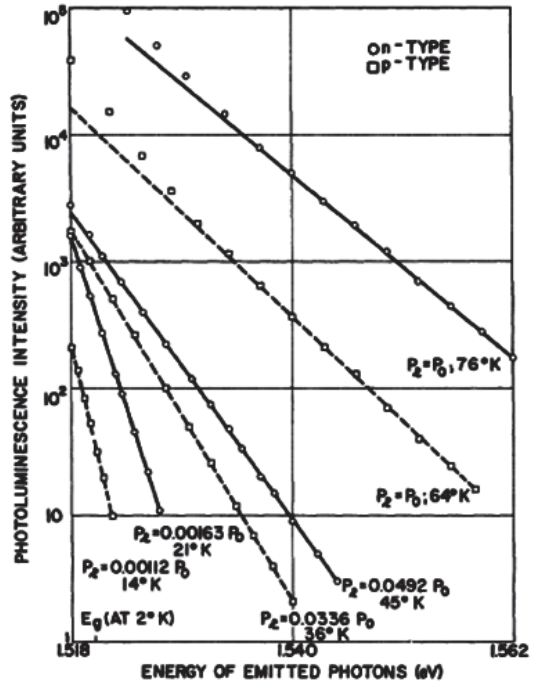
รูปที่ 2 แสดงภาพลำแสงต่างๆ ที่ตกกระทบวัตถุควอนตัม

ความเข้มของพลังงานโฟตอนที่วัตถุควอนตัมควอนตัมปลดปล่อยออกมาขณะเกิดการรวมตัวของพาหุอิเล็กตรอนและโฮลหรือความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนส์นั่นเอง

ความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่สัมพันธ์กับกำลังของแสงเลเซอร์ค่าต่างๆ ที่กระตุ้นวัตถุแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปเป็นกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของเซมิ-ลอการิทึม (Semi-log Plot) ของความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนเฉพาะช่วงค่าสูง (High-energy Tails) ค่าต่างๆ (พลังงานโฟตอนที่เลือกพิจารณาเฉพาะค่าพลังงานที่สูงเมื่อเทียบกับค่าพลังงานที่ต่ำกว่าสำหรับความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนส์ค่าหนึ่งๆ) ที่กระเจิงจากพื้นผิวของวัตถุควอนตัม โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบแมกซ์เวลล์-โบลซ์มานน์ (Maxwell-Boltzmann Distribution) และสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ [7], [8]

$$I_{PL} \propto e^{\frac{-hv}{k_B T_c}} \quad (1)$$

โดย I_{PL} , hv และ k_B คือความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ พลังงานโฟตอนที่วัตถุปลดปล่อยออกมาและค่านิโบลซ์มานน์ตามลำดับจากสมการ(1)สามารถหาอุณหภูมิยังผล (T_c) ของพาหุร้อนหรืออิเล็กตรอนร้อน



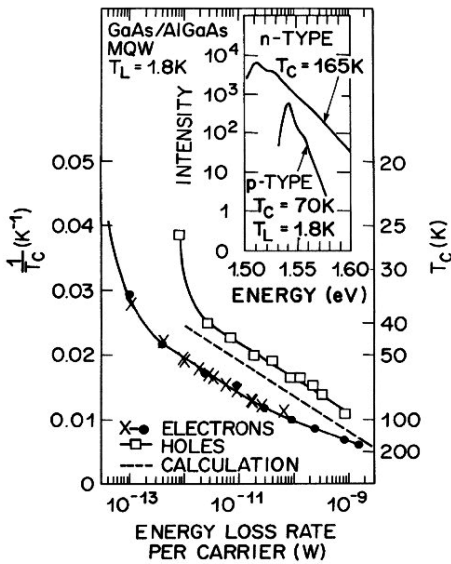
รูปที่ 3 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์เฉพาะช่วงพลังงานโฟตอนค่าสูง ของผลึกสารกึ่งตัวนำแบบผสมชนิดเอ็น (n-type) และชนิดพี (p-type) ใน GaAs ซึ่งเป็นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นบ่อศักย์ของวัตถุควอนตัม GaAs/AlGaAs [7]

ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ค่าต่างๆ กัน

นอกจากนี้เรายังสามารถหาค่าพลังงานการกระเจิงของพาหุร้อนได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิยังผลกับอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของพาหุร้อน สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ [7]-[9]

$$\left\langle \frac{d\varepsilon}{dt} \right\rangle (T_c) \propto e^{\frac{-\hbar\omega_{LO}}{k_B T_c}} \quad (2)$$

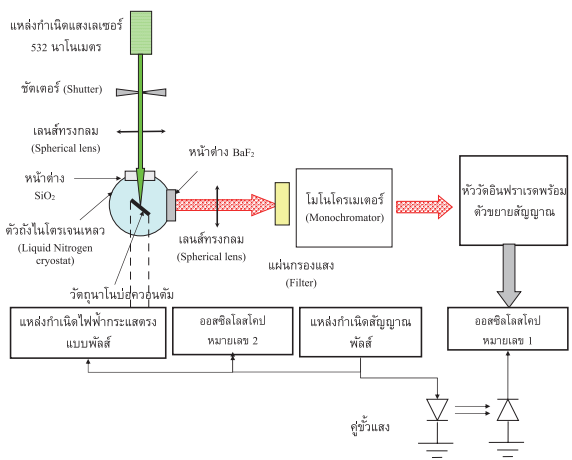
โดย $\left\langle \frac{d\varepsilon}{dt} \right\rangle$ และ $\hbar\omega_{LO}$ คืออัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของพาหุร้อนและพลังงานของ LO Phonon ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิยังผลกับอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของพาหะร้อนสำหรับวัสดุนาโนบ่อควอนตัม GaAs/Al_xGa_{1-x}As ชนิดเอ็นและพี รูปแทรก แสดงสเปกตรัมลูมิเนสเซนส์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (Electroluminescence) ค่า 750 โวลต์ต่อเซ็นติเมตรและ 1000 โวลต์ต่อเซ็นติเมตร [9]

จากรูปที่ 4 และสมการที่ (2) ความชันของกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงสอดคล้องกับการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินโดยกระเจิงพลังงานของพาหะร้อนกับ LO Phonon ที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง 33 ถึง 37 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ในบ่อศักย์ควอนตัมประเภท GaAs

จากผลการศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อนโดยการกระตุ้นวัสดุนาโนบ่อควอนตัมด้วยแสงเลเซอร์ความเข้มสูงนี้ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิยังผลของพาหะร้อนแปรผันตรงกับความเข้มหรือกำลังของแสงเลเซอร์ที่กระตุ้นวัสดุนาโนบ่อควอนตัมที่สัมพันธ์กับสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่กระเจิงออกจากวัสดุนาโนบ่อควอนตัมประเภท GaAs นั้นเอง นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของพาหะร้อนโดยการกระเจิงกับโฟนอนยังสอดคล้องกับค่าพลังงานของ LO Phonons อีกด้วย

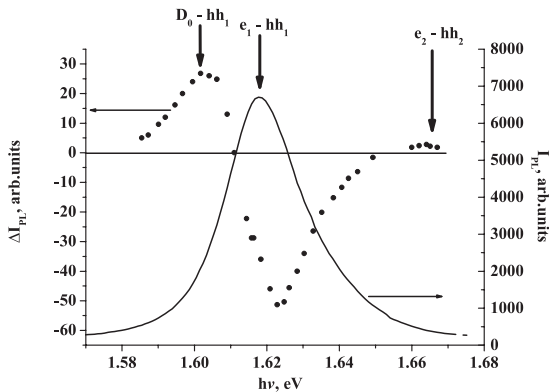


รูปที่ 5 การทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์ในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมประเภทสารกึ่งตัวนำผสมเพื่อศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความเข้มสูงและความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูงแบบพัลส์

3. ปรากฏการณ์พาหะร้อนที่เกิดจากการกระตุ้นวัสดุด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูง (Hot Charge Carriers Phenomena Excited by High Electric Field Application)

ปรากฏการณ์พาหะร้อนประเภทนี้สามารถศึกษาได้โดยการกระตุ้นวัสดุนาโนบ่อควอนตัมด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูง และเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายต่อวัสดุนาโนบ่อควอนตัมที่เกิดจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงนี้ การกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะต้องใช้สัญญาณพัลส์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความกว้างของพัลส์เท่ากับ 2 ไมโครวินาที (μs) โดยสามารถใช้สัญญาณสนามไฟฟ้ากระตุ้นร่วมกับการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ดังรูปที่ 5

การทดลองนี้จะเหมือนกับการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์กรณีไม่มีไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์กระตุ้นวัสดุนาโนบ่อควอนตัม (ดังรูปที่ 1 และ 2) เพียงแต่เพิ่มสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ขนาดกว้าง 2 ไมโครวินาทีกระตุ้นที่วัสดุนาโนบ่อควอนตัม สามารถตรวจความคงที่



รูปที่ 6 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่เกิดจากการกระตุ้นควอนตัมด้วยแสงของควอนตัมดอทด้วยแสงความเข้มสนามไฟฟ้าขนาด 750 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน (จุดสีดำ) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของควอนตัมดอทที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยแสงความเข้มสนามไฟฟ้า (เส้นทึบ) [10]

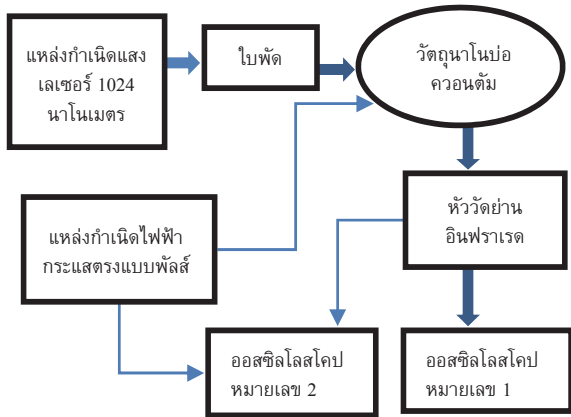
ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ด้วยการแสดงผลของสัญญาณบนออสซิลโลสโคปหมายเลข 2 ความเข้มของสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนส์จากควอนตัมดอทจะถูกรองแฉะย่านอินฟราเรดผ่านโมโนโครเมเตอร์ และตรวจจับด้วยหัววัดอินฟราเรดก่อนจะแสดงผลทางออสซิลโลสโคปหมายเลข 1 ที่เชื่อมประสานสัญญาณกับออสซิลโลสโคปหมายเลข 2 ด้วยคู่ขั้วแสง

ผลการทดลองนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 [10] จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของควอนตัมดอทควอนตัมคู่ทันเนล GaAs/AlGaAs ที่ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าขนาด 750 โวลต์ต่อเซนติเมตร (แสดงด้วยจุดสีดำ) มีจุดยอดของสเปกตรัมที่สอดคล้องกับการรวมตัวของอิเล็กตรอนร้อนในชั้นพลังงานย่อย (Subband) ชั้นที่ 2 ของอิเล็กตรอน (e_2) ในบ่อศักย์ควอนตัมกับโฮลร้อนในชั้นพลังงานย่อยของโฮลหนักที่ 2 (heavy hole, hh_2) ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานโฟตอน 1.675 อิเล็กตรอนโวลต์ (หรือที่ความยาวคลื่น 0.74 ไมโครเมตร) ที่ปลดปล่อยออกมาในกระบวนการนี้ ซึ่งแตกต่างกับสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของควอนตัมดอทที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยแสงความเข้มสนามไฟฟ้า (เส้นทึบ) [10]

ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ (แสดงด้วยเส้นทึบ) ที่มีจุดยอดของค่าพลังงานโฟตอน 1.62 อิเล็กตรอนโวลต์เพียงจุดเดียว จากทฤษฎีการเลือก (Selection Rules) [11] เมื่อมีการกระตุ้นควอนตัมดอทควอนตัมด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูง อิเล็กตรอนร้อนสามารถเติมเต็มชั้นพลังงานย่อยที่สูงกว่าชั้นพลังงานย่อยที่ 1 (e_1) ได้ จึงมีผลทำให้อิเล็กตรอนร้อนจากชั้นพลังงานย่อยที่ 2 สามารถรวมตัวกับโฮลหนักในชั้นพลังงานที่ 2 ได้นั่นเอง หลักการเกี่ยวกับการรวมกันของอิเล็กตรอนร้อนที่ชั้นพลังงานสารเวือ (Donor Level, D_0) ในบ่อศักย์ควอนตัมกับโฮลร้อนที่ชั้นพลังงานโฮลหนักที่หนึ่ง (hh_1) พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานโฟตอน 1.59 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งจะเห็นได้จากจุดยอดของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ ที่สอดคล้องกับค่าพลังงานโฟตอนนี้

ดังนั้นการกระตุ้นควอนตัมด้วยแสงความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้เกิดจุดยอดของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ค่าพลังงานโฟตอนค่าต่างๆ ที่หลากหลายที่สอดคล้องกับการรวมกันของพาหะร้อนของชั้นพลังงานย่อยต่างๆ ในบ่อศักย์ควอนตัมซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนในย่านอินฟราเรดเพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการนั่นเอง อีกทั้งยังสามารถใช้สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นพลังงานย่อยในบ่อศักย์ควอนตัมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากคำนวณทางทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมในการหาค่าพลังงานระหว่างชั้นพลังงานย่อยของควอนตัมดอทนั้นๆ อีกด้วย

นอกจากนี้แล้วยังสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง (The Change of Absorption Coefficient, $\Delta\alpha$) ระหว่างชั้นพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในบ่อศักย์ควอนตัมซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นของการเลื่อนที่ทางแสงระหว่างชั้นพลังงานย่อย (Intersubband Transition Probability) โดยที่การเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นดังกล่าวแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันการกระจายอนุภาคเฟอร์มิออนของเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-

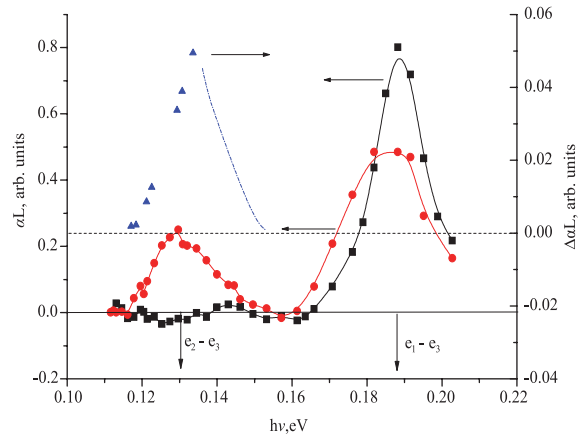


รูปที่ 7 การทดลองศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงในย่านอินฟราเรดช่วงกลางในวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนล GaAs/AlGaAs โดยการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า

Dirac Distribution Function) ในแต่ละชั้นพลังงานจากการที่อนุภาคเฟอร์มิออนมีพลังงานจลน์ที่สูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎทองของเฟอร์มิ (Fermi's Golden Rule) [12] นั่นเองสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 7

จากรูปแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 1024 นาโนเมตรจากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบพัลส์ส่งผ่านไบพัตมอเตอร์เพื่อโมดูเลตสัญญาณด้วยความถี่ 250 กิกะเฮิรตซ์ตกกระทบกับวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนล GaAs/AlGaAs ที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ แสงเลเซอร์จะสะท้อนกลับไปยังกลับมาภายในวัสดุแล้วกระเจิงออกมาทางด้านข้างของวัสดุและสามารถวัดความเข้มของสัญญาณกระเจิงจากหัววัดย่านอินฟราเรดแล้วแสดงผลทางออสซิลโลสโคปหมายเลข 1 ส่วนออสซิลโลสโคปหมายเลข 2 ทำหน้าที่แสดงผลความคงที่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์และสัญญาณที่โมดูเลตวัสดุโนบอควอนตัมที่ความถี่ 250 กิกะเฮิรตซ์

สเปกตรัมของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงแสดงดังรูปที่ 8 [13] ผลการทดลอง



รูปที่ 8 สเปกตรัมการดูดกลืนทางแสงระหว่างชั้นพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนล GaAs/AlGaAs ที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าขนาด 1270 โวลต์ต่อเซ็นติเมตร (จุดสามเหลี่ยมทึบ) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนทางแสงของวัสดุที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิผลึก 77 และ 300 เคลวิน (เส้นสเปกตรัมเชื่อมจุดสี่เหลี่ยมทึบและจุดวงกลมทึบตามลำดับ) [13]

แสดงให้เห็นว่าวัสดุโนบอควอนตัมที่ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าขนาด 1270 โวลต์ต่อเซ็นติเมตรที่อุณหภูมิผลึก 77 และ 300 เคลวิน ตามลำดับมีการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงจากชั้นพลังงานย่อยอิเล็กตรอนชั้นที่ 2 ไปยังชั้นพลังงานย่อยอิเล็กตรอนชั้นที่ 3 ($e_2 - e_3$) ของบ่อศักย์ควอนตัมประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงของวัสดุที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าค่าดังกล่าว (แสดงด้วยจุดสามเหลี่ยมทึบเทียบสเกลในแกนตั้งด้านขวาของกราฟส่วนเส้นสเปกตรัมเชื่อมจุดสี่เหลี่ยมทึบและจุดวงกลมทึบแสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงของวัสดุที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวเร่งให้อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิยังผลที่สูงขึ้นและมีพลังงานจลน์ที่สูงกว่าพลังงานความร้อน ($k_B T$) ของระบบ ดังนั้นอิเล็กตรอน

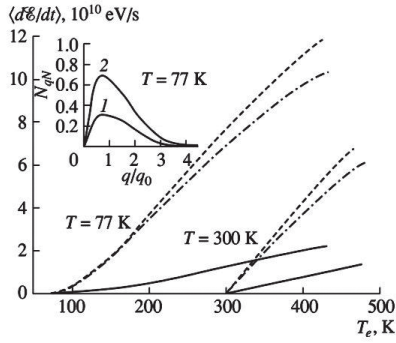
พลังงานจลน์สูง (หรืออิเล็กตรอนร้อน) เหล่านี้จึงมีโอกาสมากขึ้นในการที่จะเติมเต็มในชั้นพลังงานที่สูงขึ้นตามหลักการกระจายอนุภาคเฟอร์มีออนของฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานย่อยชั้นที่ 2 ในบ่อศักย์ควอนตัมมากขึ้น ผลจากการที่มีจำนวนอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานย่อยใด ๆ เพิ่มขึ้นนี้ทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงจากชั้นพลังงานย่อยนั้น ๆ ไปยังชั้นพลังงานย่อยอื่น ๆ เพิ่มขึ้นมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง ซึ่งเป็นไปตามกฎทองของเฟอร์มีดังกล่าวแล้วข้างต้นนั่นเอง

4. บทบาทของปรากฏการณ์พาหะร้อนในการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในย่านอินฟราเรด (The Role of Hot Charge Carrier Phenomena on the Development of Efficiency of Quantum Well Lasers and Optoelectronics Devices Emitting in IR Range)

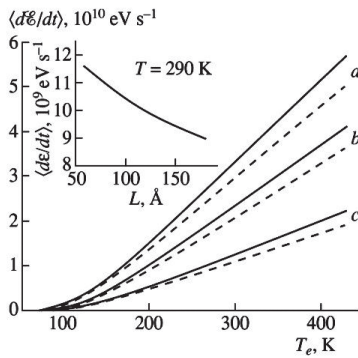
จากทฤษฎีปรากฏการณ์พาหะร้อนนั้นในขณะที่ยังมีอิเล็กตรอนร้อนถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ความเข้มสูงหรือความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้เกิดจำนวนพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลในระบบมากขึ้น นอกจากนี้การที่ผลึกของสารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้จำนวน LO Phonon ส่วนเกินในระบบมีมากขึ้นด้วย (เพราะแลททิซสั่นอยู่ตลอดเวลา) จำนวน LO Phonon ส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลต่ออัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนร้อนต่อผลึกวัสดุนาโนบ่อควอนตัมโดยจะถ่ายเทในรูปแบบของการกระเจิงพลังงานกับ LO Phonon ส่วนเกินในผลึกดังกล่าวแล้วในบทหน้าได้มีการศึกษาอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนร้อนโดยการพิจารณาจำนวน LO Phonon ส่วนเกินที่สะสมอยู่ในผลึกวัสดุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนลชนิด GaAs/AlGaAs ที่ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า [14] พบว่าอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนร้อนโดยการกระเจิงพลังงานกับ

LO Phonon ส่วนเกินสะสมในผลึก มีค่าน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของพาหะร้อนในกรณีที่ไม่ได้พิจารณาการกระเจิงกับ LO Phonon ส่วนเกินที่สะสมในผลึก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากฟังก์ชันการกระจาย (Distribution Function) ที่แตกต่างกันของจำนวน LO Phonon ส่วนเกินของทั้งสองกรณีนั่นเอง โดยฟังก์ชันการกระจายของ LO phonon ส่วนเกินสะสมนี้จะสัมพันธ์กับเวลาช่วงชีวิต (Life Time) ของ LO Phonon และความกว้างของบ่อศักย์ควอนตัม [10],[14] ผลการวิจัยกล่าวแสดงดังรูปที่ 9 [14]

จากรูปพบว่ากรณีที่ไม่พิจารณาการกระจายของ LO Phonon ส่วนเกินสะสม แสดงด้วยเส้นทึบในรูปที่ 9 (ก) มีอัตราการถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนร้อนน้อยกว่าในกรณีที่ไม่ได้พิจารณาปัจจัยดังกล่าว (แสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 9 (ก)) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิว (Surface Electron Concentration) มีค่า 3×10^{11} ซม⁻² และความกว้างของบ่อศักย์ควอนตัมมีค่า 6 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิผลึก 77 และ 300 เคลวิน ในขณะที่รูป 9 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินในปรากฏการณ์พาหะร้อนกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิวและอุณหภูมิยังผลซึ่งคำนวณโดยคิดการสะสมของ LO Phonon ส่วนเกินที่เวลาช่วงชีวิตของ LO Phonon เท่ากับ 7 พิโควินาที กราฟเส้นทึบและเส้นประเป็นการคำนวณสำหรับวัสดุนาโนบ่อควอนตัมคู่ทันเนลที่มีความกว้างของบ่อศักย์ควอนตัม 6 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ รูปแทรกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินโดยการกระเจิงกับ LO Phonon กับความกว้างของบ่อศักย์ควอนตัมที่อุณหภูมิผลึก 77 เคลวิน ค่าอุณหภูมิยังผล 290 เคลวิน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิว 3×10^{11} ซม⁻² นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิผลึก 77 เคลวินความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิวที่น้อยกว่าจะมีการสะสมของอิเล็กตรอนร้อนที่น้อยกว่าจึงมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนร้อนให้กับผลึกมีค่ามากกว่าด้วย



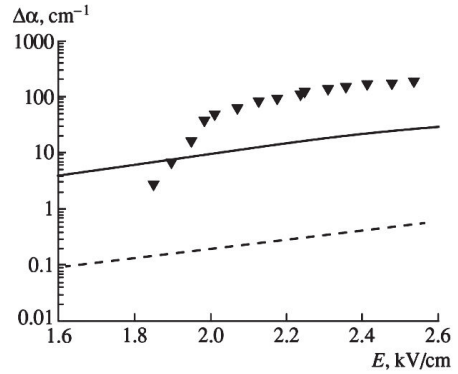
(ก)



(ข)

รูปที่ 9 (ก) อัตรารายการถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนร้อนในวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนลชนิด GaAs/AlGaAs (เส้นประ) และในผลึกสารกึ่งตัวนำ GaAs (เส้นประ-จุด) โดยกระเจิงกับ LO phonon รูปแทรก แสดงฟังก์ชันการกระจาย LO phonon ส่วนเกินในวัสดุโนบอควอนตัมชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิผลึก 77 เคลวิน (ข) แสดงอัตรารายการถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนในวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนลชนิด GaAs/AlGaAs ที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพื้นผิวเท่ากับ 0.5×10^{11} , 1×10^{11} และ 3×10^{11} ซม.⁻² (a), (b) และ (c) ตามลำดับ [14]

นอกจากนี้ Vorobjev และคณะ [14] ได้คำนวณการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับการทดลองแสดงดังรูปที่ 10 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงระหว่างชั้นพลังงานย่อยในบ่อศักย์ควอนตัมที่ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิผลึก 77 เคลวิน จุดสามเหลี่ยมทึบแสดงผลจากการทดลอง เส้นทึบแสดงผลจากการคำนวณโดยพิจารณาการสะสมของ LO Phonon ส่วนเกินและเส้นประแสดงผลจากการคำนวณโดยไม่ได้พิจารณาปัจจัยดังกล่าว [14]

การดูดกลืนทางแสงที่สัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นวัสดุโนบอควอนตัมในกรณีนี้ที่พิจารณาการสะสมของ LO Phonon ส่วนเกินมีค่ามากกว่าการคำนวณที่ไม่ได้พิจารณาการสะสมของ LO Phonon ส่วนเกินเนื่องจากฟังก์ชันการกระจายของ LO Phonon ที่แตกต่างกันของทั้งสองกรณีนั่นเอง

ในงานวิจัยของ Zerova และคณะ [15] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงในวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนล GaAs/AlGaAs ที่ถูกกระตุ้นด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า โดยศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อระยะห่างระหว่างชั้นพลังงานย่อย 2 ชั้นใดๆ ของอิเล็กตรอนในบ่อศักย์ควอนตัม (Δ_j) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานของการเคลื่อนที่ทางแสง (The Energies of Optical Transitions) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงด้วยพบว่า Δ_j แปรผกผันกับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อวัสดุโนบอควอนตัมคู่ทันเนลถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น

พลังงานย่อยดังกล่าวมีค่าลดลง (หลักการเดียวกับช่องว่างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำผสมจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยกตัวอย่าง ในผลึก GaAs ช่องว่างแถบพลังงานสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้คือ $E_g (eV) = 1.519 - 5.405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T^2}{T+204}$ [16]) ในขณะที่อุณหภูมิยังผลของอิเล็กตรอนร้อนแปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นวัสดุ

นอกเหนือจากการทราบค่าพลังงานระหว่างชั้นพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนและโฮลหรือค่าพลังงานระหว่างชั้นพลังงานสารเจือและชั้นพลังงานย่อยของโฮลในการศึกษาสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของปรากฏการณ์พาหะร้อนที่สามารถนำไปพัฒนาการสร้างเลเซอร์ควอนตัมคาสคาตในย่านอินฟราเรดแล้ว การศึกษาปรากฏการณ์พาหะร้อนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงดังกล่าวแล้วข้างต้นสามารถนำไปพัฒนาอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น โมดูลเลเตอร์ทางแสงในย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (ความยาวคลื่น 8-10 ไมโครเมตร) ที่สัมพันธ์กับการดูดกลืนทางแสงระหว่างชั้นพลังงานย่อยในบ่อศักย์ควอนตัม โดยสามารถลดอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกิน (หรือพลังงานการกระเจิง) ของพาหะร้อนในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมได้จากการพิจารณาการสะสมของอนุภาคโฟนอนส่วนเกินของระบบนั่นเอง

6. สรุป

ปรากฏการณ์พาหะร้อนในวัสดุนาโนบ่อควอนตัมสามารถศึกษากลไกที่สำคัญต่างๆ ของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำผสมที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าหรือแสงเลเซอร์ความเข้มสูงที่มีความยาวคลื่นสอดคล้องกับระดับชั้นพลังงานในบ่อศักย์ควอนตัม กลไกดังกล่าวได้แก่การรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลพร้อมกับปลดปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาหรือเรียกว่าโฟโตลูมิเนสเซนส์ การดูดกลืนแสงจากแหล่งกำเนิดของวัสดุระหว่างชั้นพลังงานภายในบ่อศักย์ควอนตัม โดยอุณหภูมิยังผลของพาหะร้อนแปรผันตรงกับ

ความเข้มของสนามไฟฟ้าและแสงเลเซอร์ที่กระตุ้นวัสดุ สามารถคำนวณหาอุณหภูมิยังผลที่สัมพันธ์กับความเข้มหรือกำลังของแสงเลเซอร์ที่กระตุ้นได้จากความชันของกราฟเซมิ-ล็อกของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์กับพลังงานโฟตอนเฉพาะช่วงค่าสูงที่วัสดุปล่อยออกมาขณะเกิดการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล นอกจากนี้ความชันของกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิยังผลกับอัตราการถ่ายเทพลังงานจลน์ส่วนเกินต่อพาหะหนึ่งตัวยังสามารถนิยามชนิดของการกระเจิงพลังงานในผลึกสารกึ่งตัวนำผสมได้อีกด้วย ในกรณีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง พบว่าปรากฏการณ์พาหะร้อนมีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นพลังงานย่อยในบ่อศักย์ควอนตัมมีค่าลดลงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงระหว่างชั้นพลังงานย่อยที่มากขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้การพิจารณาการสะสมของ LO Phonon ส่วนเกินที่เกิดจากการที่ผลึกสั่นมากขึ้นจากอุณหภูมิผลึกที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้อัตราการกระเจิงพลังงานจลน์ส่วนเกินของอิเล็กตรอนร้อนในผลึกมีค่าลดลงซึ่งมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงระหว่างชั้นพลังงานย่อยในบ่อศักย์ควอนตัมมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ได้พิจารณาการสะสมของจำนวน LO Phonon ส่วนเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์พาหะร้อน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปรากฏการณ์พาหะร้อนเป็นการศึกษาทางฟิสิกส์ของการเปลี่ยนแปลงระบบกลไกในระดับจุลภาคของวัสดุนาโนบ่อควอนตัมที่ทำให้เกิดการพัฒนาประสิทธิภาพของเลเซอร์นาโนบ่อควอนตัมในย่านอินฟราเรดและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น โมดูลเลเตอร์ในย่านรับแสงดังกล่าวให้มีกำลังแปลงแสงที่มากขึ้นทั้งยังสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิห้องอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. E. Levinshtein and S. L. Rumyantsev. (2014, June 13). *New Semiconductor Materials. Biology*

- systems. *Characteristics and Properties: Basic parameters of GaAs and GaN* [Online]. Available: http://www.matprop.ru/GaAs_basic.
- [2] O. Svelto, *Principle of lasers*, 5th edition, Springer, 2010.
- [3] A. Kastalsky, L.E. Vorobjev, D.A. Firsov, V.L. Zerova, and E. Towe, "A dual-color injection laser based on intra- and inter-band carrier transitions in semiconductor quantum wells or quantum dots," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37 pp. 1356-1362, 2001.
- [4] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, and A.Y. Cho, "Quantum Cascade Laser," *Science*, vol. 264 pp. 553-556, 1994.
- [5] C. H. Henry (2014, June 20). *Quantum well laser* [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_well_laser.
- [6] L.E. Vorob'ev, S.N. Danilov, E.L. Ivchenko, M.E. Levinstein, D.A. Firsov, and V.A. Shalygin, *Kinetics and optical phenomena in strong electric field in semiconductor and nanostructures Nauka*, St. Petersburg, 2001 (in Russian).
- [7] J. Shah and R. C. C. Leite, "Radiative recombination from photoexcited hot carriers in GaAs," *Physical Review Letters*, vol. 22, pp. 1304-1307, 1969.
- [8] N. Balkan, R. Gupta, B. K. Ridley, M. Emeny, J. Roberts, and I. Goodridge, "Hot phonons and instabilities in GaAs/GaAlAs structures," *Solid-State Electronics*, vol. 32, pp. 1641-1646, 1989.
- [9] J. Shah, A. Pinczuk, A.C. Gossard, and W. Wiegmann, "Energy-loss rates for hot electrons and holes in GaAs quantum wells," *Physical Review Letters*, vol. 54 pp. 2045-2048, 1985.
- [10] L.E. Vorobjev, M.Ya. Vinnichenko, D.A. Firsov, V.L. Zerova, V.Yu. Panevin, A.N. Sofronov, P. Thumrongsilapa, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.P. Vasiljev, L. Shterengas, G. Kipshidze, T. Hosoda, and G. Belenky, "Carrier heating in quantum wells under optical and current injection of electron-hole pairs," *Semiconductors*, vol. 44 pp. 1402-1405, 2010.
- [11] L.E. Vorobjev, E.L. Ivchenko, D.A. Firsov, and V.A. Shalygin, *Optical properties of nanostructure*, Saint Petersburg, Nauka, 2001 (in Russian).
- [12] A.F.J. Levi, *Applied Quantum Mechanics second edition*, Cambridge University Press, 2006.
- [13] L.E. Vorobjev, V.L. Zerova, D.A. Firsov, V.A. Shalygin, M.Ya. Vinnichenko, V.Yu. Panevin, P. Thumrongsilapa, K.S. Borshchev, A.E. Zhukov, Z.N. Sokolova, I.S. Tarasov, G. Belenky, S. Hanna, and A. Seilmeier, "Hot charge-carrier electroluminescence from laser nanostructure in the spontaneous and stimulated emission modes and absorption of IR radiation by hot electrons in quantum wells," *Bulletin of Russian Academy of Science: Physics*, vol. 73 pp. 73-76, 2009.
- [14] L.E. Vorobjev, S.N. Danilov, V.L. Zerova, and D.A. Firsov, "Electron heating by a strong longitudinal electric field in quantum wells," *Semiconductors*, vol. 37 pp. 586-593, 2003.
- [15] V.L. Zerova, L.E. Vorobjev, D.A. Firsov, and E. Towe, "Modulation of intersubband absorption in tunnel-coupled quantum wells in electric fields," *Semiconductors*, vol. 41 pp. 596-605.
- [16] Blakemore (2014, June 20). *New Semiconductor Materials. Biology systems. Characteristics and Properties: Bandstructure and carrier concentration of GaAs* [Online]. Available: http://www.matprop.ru/GaAs_bandstr.