

การศึกษาสมบัติทางแสงและเสียงในระบบควอนตัมดอทเจอร์เมเนียม

ด้วยวิธีเชิงตัวเลขผลต่างสปีนเชิงเวลาและวิธีจำกัดสมาชิก

FDTD and FEM Simulations of Optical and Acoustic Characteristics

in Germanium Quantum Dot Systems

ณัฐดนัย คงเพชร¹ นิสาชล ตั้งเสงี่ยมวิสัย² และ ปัทมญา ชัยสกุล^{1*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน, แขวงลาดยาว, เขตจตุจักร, กทม. 10900

natdanai.khong@ku.th, fscipac@ku.ac.th*

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท, ปทุมวัน, กทม. 10330 Nisachon.T@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการใช้สัญญาณเสียงในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของควอนตัมดอทสำหรับการพัฒนาใช้งานในอุปกรณ์ควอนตัมเชิงแสงขั้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บทความนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมที่มีต่อคุณลักษณะการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสง โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขผลต่างสปีนเชิงเวลาในการแก้สมการแมกซ์เวลล์ การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความสามารถในการดูดกลืนแสงและการกระเจิงของแสงสำหรับอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมที่เรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง จะเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณตามขนาดของอนุภาคควอนตัมดอท โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีความสามารถในการดูดกลืนแสงมากกว่าความสามารถในการกระเจิงแสง นอกจากนี้ วิธีการจำกัดสมาชิกถูกใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้โหมดการสั่นของอนุภาคควอนตัมดอทเพื่อแยกแยะความแตกต่างของขนาดและระยะห่างของควอนตัมดอทในระดับนาโนเมตร ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความถี่เฉพาะของการสั่นขึ้นอยู่กับขนาดควอนตัมดอทมากกว่าระยะห่างระหว่างกัน

คำสำคัญ: ควอนตัมดอทเจอร์เมเนียม วิธีเชิงตัวเลขผลต่างสปีนเชิงเวลา สมบัติการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสง

Abstract

This paper explores the potential use of acoustic signals to monitor the physical properties of quantum dots, aiming to support the development of advanced optical quantum devices. Particularly, it investigates the influence of the size of germanium (Ge) quantum dots (QDs) on their light scattering and absorption characteristics using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method to solve Maxwell's equations. Computer simulations indicate that, for linearly aligned Ge QD particles, both absorption and scattering abilities increase exponentially with the QD size. In addition, the simulation results reveal that the absorption ability is greater than the scattering ability.

Moreover, the Finite Element Method (FEM) is employed to investigate the potential use of vibrational modes in differentiating variations in the sizes and spacing of QD at the nanometer scale. Simulation results show that the eigenfrequency of the vibrational mode is influenced more by the QD size than their spacing.

Keywords: Germanium quantum dots, Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method, scattering and absorption properties

1. บทนำ

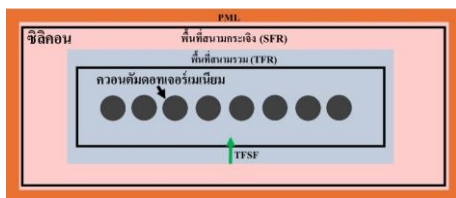
ควอนตัมดอท (quantum dots, QDs) มีความน่าสนใจสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic) และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic) รวมถึงตัวจับแสง (photodetectors) ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diodes) เลเซอร์ (laser) และโฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistors) เนื่องจากควอนตัมดอทมีความสามารถในการปรับสเปกตรัมของแสงได้ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกอน (silicon) และเจอร์เมเนียม (germanium) ควอนตัมดอทมีความน่าสนใจอย่างมากเนื่องจากการเข้ากันได้กับเทคโนโลยีซิลิกอน [2,3] ทั้งนี้เจอร์เมเนียมมีข้อได้เปรียบมากกว่าซิลิกอนสำหรับอุปกรณ์ควอนตัมดอท เช่น อนุกรมในการสังเคราะห์ที่ต่ำกว่า [4] รัศมีโบร์ (Bohr radius) ที่ใหญ่กว่าซึ่งทำให้กักขังควอนตัมได้ดีกว่า [5] นอกจากนี้ ตัวจับแสงที่ใช้ควอนตัมดอทเจอร์เมเนียม (Germanium quantum dots, Ge QDs) สามารถครอบคลุมสเปกตรัมที่กว้างตั้งแต่ความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงอินฟราเรด [6] และมีประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงที่มากกว่า [7] โดยเป็นที่น่าสนใจว่าขนาดของควอนตัมดอทมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ และโฟโตโวลตาอิก [6-9] ดังนั้นความสามารถในการตรวจสอบขนาดของควอนตัมดอทจึงเป็นประเด็นสำคัญหนึ่งในการพัฒนาอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จากวัสดุควอนตัมดอท โดยการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทที่สามารถควบคุมขนาดและตำแหน่งได้อย่างเป็นระเบียบถือเป็นหนึ่งในงานวิจัยที่สำคัญ [10]

การตรวจสอบคุณลักษณะของวัสดุโดยใช้สัญญาณเสียงที่มีความถี่สอดคล้องกับขนาดทางกายภาพเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับสำหรับการ

ตรวจสอบลักษณะของวัสดุและโครงสร้างที่พบในธรรมชาติ การผลิตอาหาร และการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ [11] ในปีค.ศ. 2000 ได้มีการรายงานผลการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) บนควอนตัมดอทเจอร์เมเนียม ซึ่งพบว่าโฟนอนถูกจำกัดในควอนตัมดอทเจอร์เมเนียม และพบว่าโฟนอนอะคูสติก หรือโฟนอนโหมดเสียง (acoustic phonons) จะมีความถี่เฉพาะของการสั่นที่แปรตามขนาดของควอนตัมดอทและผลของความเครียด (strain effects) [12] ในปัจจุบัน การตรวจวัดสถานะการชาร์จ และความสมบูรณ์ของแบตเตอรี่ สามารถทำได้จากค่าความถี่เฉพาะของการสั่น (Eigenfrequency) ของวัสดุที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียง โดยค่าความถี่เฉพาะของการสั่น จะแปรผกผันกับ เวลาการเดินทางของคลื่นเสียง (Time of flight) [13] นอกจากนี้ ความถี่เฉพาะของการสั่นยังสามารถวัดค่าคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุได้ เช่น ความแข็ง (stiffness) [11]

เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้สัญญาณเสียงในการตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอทสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ควอนตัมเชิงแสงขั้นสูง บทความนี้จึงศึกษาสมบัติการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสงของอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมในแผ่นรองซิลิกอนโดยอาศัยวิธีเชิงตัวเลขผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) ซึ่งเป็นการแก้สมการแมกซ์เวลล์โดยตรง โดยพิจารณาพารามิเตอร์สำคัญ 2 ตัวแปรคือ กำลังการกระเจิงแสง (scattering power) และกำลังการดูดกลืนแสง (absorption power) โดยศึกษากรณีที่มีควอนตัมดอทมีขนาด 1.5, 2, 5, 7.5, และ 10 นาโนเมตร และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความถี่เฉพาะของการสั่น เมื่อขนาดของควอนตัมดอทและระยะระหว่างควอนตัมดอท มีค่าเปลี่ยนไปด้วยวิธีจำกัดสมาชิก (Finite Element Method, FEM)

2. การจำลองระบบควอนตัมดอท



รูปที่ 1 วิธี 3D-FDTD ในการจำลอง Ge-QDs เมื่อขนาดของ Ge-QDs เป็น 1.5, 2, 5, 7.5, และ 10 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่าง Ge-QDs เป็น 10 นาโนเมตร

งานวิจัยนี้นำวิธีเชิงตัวเลขผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลาแบบสามมิติ (3D-FDTD) มาใช้ในการจำลอง โดยรูปที่ 1 แสดงวิธีเชิงตัวเลขผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลาแบบสามมิติของอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียม (Ge-QDs) ในแผ่นรองซิลิกอน โดยที่เงื่อนไขขอบเขตแบบชั้นแมตช์สมบูรณ์ (perfectly matched layer: PML) [14] จะเป็นเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณในรูปแบบจำลอง แหล่งกำเนิดแสงแบบสนามรวมและสนามการกระเจิง (Total-Field Scattered-Field) ที่ความยาวคลื่นแสง 300 นาโนเมตร โดยทำการยิงคลื่นแสงออกมาเป็นระนาบคลื่น ซึ่งจะแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วนคือ พื้นที่สนามรวม (total field region: TFR) และ พื้นที่สนามกระเจิง

(scattering field region: SFR) ในพื้นที่สนามรวมจะมีทั้งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดและพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกกระเจิง ขณะที่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกกระเจิงจะถูกคำนวณในพื้นที่สนามกระเจิง [15]

ในส่วนของควอนตัมดอท บทความนี้เลือกศึกษาควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมในแผ่นรองซิลิกอน ซึ่งมีดัชนีหักเหเชิงซ้อนขึ้นกับความยาวคลื่นแสง [16] โดยกำหนดให้ควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีรูปร่างเป็นทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.5, 2, 5, 7.5 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ กำหนดให้ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองนี้เป็น 300 นาโนเมตร และให้ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทเท่ากับ 10 นาโนเมตร ผลการคำนวณกำลังการกระเจิงแสงและกำลังการดูดซับแสง หาได้จากสมการ (1) และ (2) [17]

$$P_{sca} = C_{sca} P_{inc} \quad (1)$$

$$P_{abs} = C_{abs} P_{inc} \quad (2)$$

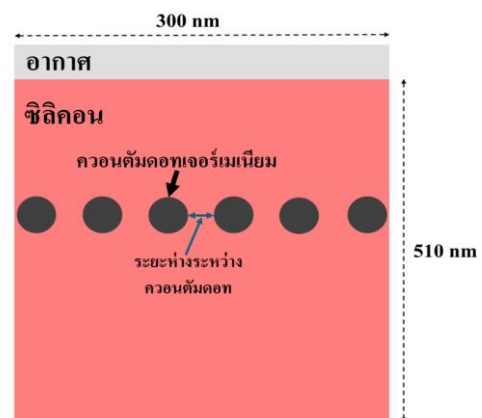
เมื่อ C_{sca} คือพื้นที่หน้าตัดการกระเจิงแสง (หน่วยเป็นตารางเมตร)

C_{abs} คือพื้นที่หน้าตัดการดูดกลืนแสง (หน่วยเป็นตารางเมตร)

P_{sca} คือกำลังของการกระเจิงแสง (หน่วยเป็นวัตต์)

P_{abs} คือกำลังของการดูดกลืนแสง (หน่วยเป็นวัตต์)

P_{inc} คือความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนอนุภาค (หน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร)



รูปที่ 2 แบบจำลองการสั่นของ Ge-QDs ด้วยวิธี FEM เพื่อคำนวณความถี่เฉพาะของการสั่น เมื่อ (ก) ขนาดของ Ge-QDs เป็น 1.5, 2, 5, 7.5, และ 10 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่าง Ge-QDs เป็น 10 นาโนเมตร (ข) ขนาดของ Ge-QDs เป็น 5 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่าง Ge-QDs เป็น 3, 5, 6, 7.5, 8.5, 10, 12, 14 นาโนเมตร

วิธีการจำกัดสมาชิก (FEM) [18] ถูกนำมาใช้ตรวจสอบความเป็นไปได้สำหรับการตรวจสอบโหมดการสั่นของอนุภาคควอนตัมดอทที่จัดเรียงกันด้วยมาตราส่วนระดับนาโนเมตร เนื่องจากแรงดันการแผ่รังสีของแสงและแรงอิเล็กโตรสแตติกที่ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงกระทำต่ออนุภาคควอนตัมดอท [16] รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองการสั่นของอนุภาคควอนตัมดอท กรณีที่หนึ่ง กำหนดให้ควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีขนาด

เป็น 1.5, 2, 5, 7.5, และ 10 นาโนเมตร และให้ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมเท่ากับ 10 นาโนเมตร เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมต่อความถี่เฉพาะของการสั่น กรณีที่ สอง กำหนดให้ขนาดของควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมเท่ากับ 5 นาโนเมตร และให้ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทเป็น 3, 5, 6, 7.5, 8.5, 10, 12, 14 นาโนเมตร เมื่อยิงลำแสงเข้าไปในวัสดุไดโอดเลกทริก แสงจะทำปฏิกิริยากับวัสดุโดยที่แรงดันจากการแผ่รังสีจะกระทำที่ขอบของวัสดุไดโอดเลกทริก เมื่อแสงผ่านตัววัสดุจะเกิดการเหนี่ยวนำไดโพลในวัสดุไดโอดเลกทริก และทำให้ค่าความหนาแน่นของโพลาริเซชันเปลี่ยนไป เกิดการบีบอัด ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมของสนามไฟฟ้า ซึ่งก็คือ พลังงานแสงนี้ก่อให้เกิดผลเทียบเท่ากับงานเชิงกลที่ทำโดยแรงบางอย่าง ซึ่งเรียกว่าแรงอเล็กโทรสตริกทิฟ แรงเหล่านี้ทำให้วัสดุไดโอดเลกทริกเกิดการสั่น จากนั้น จะคำนวณผลทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงด้วยสมการแมกซ์เวลล์เพื่อหาแรงดันจากการแผ่รังสีของแสงและแรงอเล็กโทรสตริกทิฟที่เป็นแรงที่กระทำต่อวัสดุ ก่อน จากนั้นนำค่าของแรงทั้งสองมาใช้ประกอบการแก้สมการที่ (3) เพื่อคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ (4) [18]

$$\ddot{q}(z, t) + \kappa_m \dot{q}(z, t) + \Omega_m^2 q(z, t) = \frac{F(z, t)}{m_{\text{eff}}} \quad (3)$$

$$\Omega_m^2 = \frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}}} \quad (4)$$

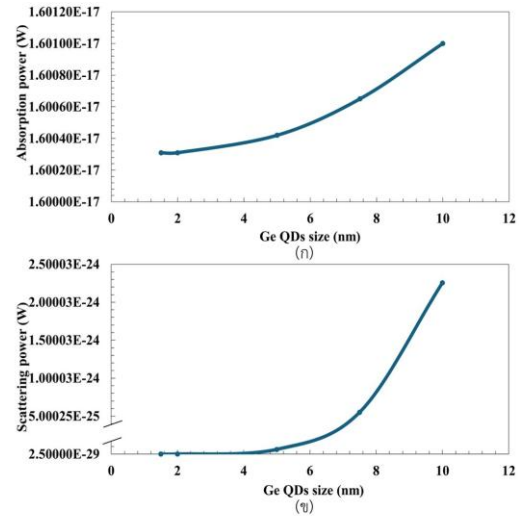
โดยที่

- q คือ การกระจัด (หน่วยเป็นเมตร)
 κ_m คือ ความกว้างของบริยายวง (หน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที)
 Ω_m คือ ความถี่เชิงมุม (หน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที)
 m_{eff} คือ มวลประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว (หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเมตร)
 k_{eff} คือ ค่าความแข็งประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว (หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)
 $F(z, t)$ คือ แรงดันการแผ่รังสีของแสงและแรงอเล็กโทรสตริกทิฟที่กระทำทั้งหมดต่อหน่วยความยาว (หน่วยเป็นนิวตันต่อเมตร)

3. ผลการจำลองระบบและการอภิปรายผล

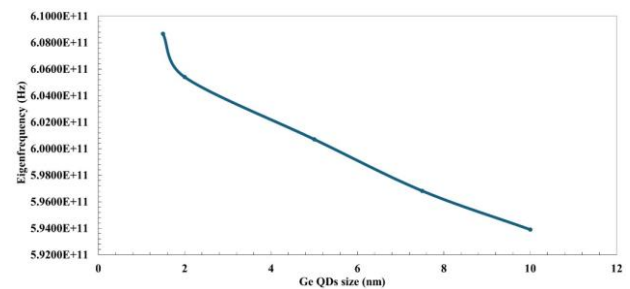
ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงและการกระเจิงแสงของอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมเป็นดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และ (ข) โดยพบว่าค่ากำลังของการดูดกลืนแสง และกำลังของการกระเจิงแสง มีค่าเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณหรือแบบเอกซ์โปเนนเชียล ตามขนาดของควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่ากำลังการดูดกลืนแสงมีค่ามากกว่ากำลังการกระเจิงแสงเป็นอย่างมาก ($P_{\text{abs}} \gg P_{\text{sca}}$) นั้นแสดงว่าอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีความสามารถในการดูดกลืนแสงมากกว่าความสามารถในการกระเจิงแสง ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ควอนตัมเชิงแสงที่ต้องอาศัยการดูดซึมแสง เช่น ตัวจับแสง โดยที่อนุภาค

ควอนตัมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังการดูดกลืนแสง



รูปที่ 3 (ก) กำลังของการดูดกลืนแสง และ (ข) กำลังของการกระเจิงแสงของอนุภาค Ge-QDs เมื่อขนาดของ Ge-QDs เป็น 1.5, 2, 5, 7.5, และ 10 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่าง Ge-QDs เป็น 10 นาโนเมตร

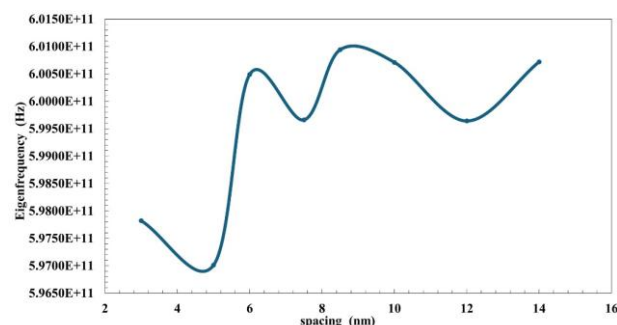
ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมในแผ่นรองซิลิกอนกับความถี่เฉพาะของการสั่น แสดงดังรูปที่ 4 สังเกตได้ว่าความถี่เฉพาะของการสั่นจะลดลงเมื่ออนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีขนาดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ คลื่นเสียงส่วนใหญ่จะถูกกักขังไว้ในอนุภาคควอนตัมดอทเนื่องจากเจอร์เมเนียมมีค่า Young's modulus ที่ต่ำกว่าซิลิกอน แต่มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่าซิลิกอน ค่าความถี่เฉพาะของการสั่นจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออนุภาคควอนตัมดอทมีขนาดเล็กเป็น 2 นาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคควอนตัมดอทที่มีขนาดเล็กจะกักขังโฟนอนได้ดีกว่า



รูปที่ 4 ผลการศึกษาขนาดของ Ge-QDs ต่อความถี่เฉพาะของการสั่น เมื่อ Ge-QDs มีขนาดเป็น 1.5, 2, 5, 7.5, และ 10 นาโนเมตร และระยะห่างระหว่าง Ge-QDs เป็น 10 นาโนเมตร

ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมต่อความถี่เฉพาะของการสั่นโดยที่อนุภาคควอนตัมดอทมีขนาดเท่ากับ 5 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทเป็น 3, 5, 6, 7.5, 8.5, 10,

12, และ 14 นาโนเมตร โดยมีความยาวคลื่นแสงเป็น 300 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแต่ละควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 14 นาโนเมตร จะไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อความถี่เฉพาะของการสั่น ดังนั้นความถี่เฉพาะของการสั่นจะสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอทได้ดีกว่าการตรวจวัดระยะห่างระหว่างควอนตัมดอท



รูปที่ 5 ผลการศึกษาการสั่นของ Ge-QDs ต่อความถี่เฉพาะของการสั่นเมื่อ Ge-QDs มีขนาดเป็น 5 นาโนเมตร

4. สรุป

บทความนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของกลุ่มอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมที่มีต่อสมบัติการกระเจิงและการดูดกลืนแสงโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลาแบบสามมิติ (3D-FDTD) ในการคำนวณสมบัติการกระเจิงและการดูดกลืนของแสงของอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมในแผ่นรองซิลิกอน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมที่เรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง มีขนาดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังการดูดกลืนแสงและการกระเจิงแสงเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ อย่างไรก็ตาม การจำลองการดูดกลืนแสงของอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีค่าสูงกว่ากำลังในการกระเจิงแสงอยู่มาก จึงทำให้สรุปได้ว่าอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีความสามารถในการดูดกลืนแสงมากกว่าความสามารถในการกระเจิงแสง นอกจากนี้ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมในแผ่นรองซิลิกอนกับความถี่เฉพาะของการสั่น เมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคควอนตัมดอทมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออนุภาคควอนตัมดอทเจอร์เมเนียมมีขนาดเพิ่มขึ้น ความถี่เฉพาะของการสั่นจะมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อกำหนดให้ขนาดของอนุภาคควอนตัมดอทคงที่ พบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทจะไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อความถี่เฉพาะของการสั่น โดยเฉพาะเมื่อระยะห่างเป็น 5 นาโนเมตรขึ้นไปจนถึง 14 นาโนเมตร ดังนั้นความถี่เฉพาะของการสั่นสามารถใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอทได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการตรวจวัดระยะห่างระหว่างควอนตัมดอท ผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้สัญญาณเสียงในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของควอนตัมดอทสำหรับการพัฒนาใช้งานในอุปกรณ์ควอนตัมเชิงแสงขึ้น

สูง ที่มีสมบัติขึ้นกับขนาดของควอนตัมดอทได้ เช่น ตัวจับแสง ซึ่งมีการดูดซึมแสงที่ขึ้นกับขนาดของควอนตัมดอทเป็นอย่างมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B39G670019 ทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) : (N41A670412) และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) FF(KU-SRIU)7.67

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Shi, A. Zaslavsky, and D. Pacifici, "High-performance germanium quantum dot photodetectors: Response to continuous wave and pulsed excitation," *Applied Physics Letters*, vol. 117, no. 25, p. 251105, 2020, doi: 10.1063/5.0025660.
- [2] K. L. Wang, D. Cha, J. Liu, and C. Chen, "Ge/Si Self-Assembled Quantum Dots and Their Optoelectronic Device Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 9, pp. 1866-1883, 2007, doi: 10.1109/JPROC.2007.900971.
- [3] E. G. Barbagiovanni, D. J. Lockwood, P. J. Simpson, and L. V. Goncharova, "Quantum confinement in Si and Ge nanostructures: Theory and experiment," *Applied Physics Reviews*, vol. 1, no. 1, p. 011302, 2014, doi: 10.1063/1.4835095.
- [4] B. Zhang, S. Shrestha, M. A. Green, and G. Conibeer, "Size controlled synthesis of Ge nanocrystals in SiO₂ at temperatures below 400 °C using magnetron sputtering," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 26, p. 261901, 2010, doi: 10.1063/1.3457864.
- [5] Y. Maeda, "Visible photoluminescence from nanocrystallite Ge embedded in a glassy SiO₂ matrix: Evidence in support of the quantum-confinement mechanism," *Physical Review B*, vol. 51, no. 3, pp. 1658-1670, 01/15/ 1995, doi: 10.1103/PhysRevB.51.1658.
- [6] C. Y. Chien, W. T. Lai, Y. J. Chang, C. C. Wang, M. H. Kuo, and P. W. Li, "Size tunable Ge quantum dots for near-ultraviolet to near-infrared photosensing with high figures of merit," *Nanoscale*, 10.1039/C4NR00168K vol. 6, no. 10, pp. 5303-5308, 2014, doi: 10.1039/C4NR00168K.

- [7] S. Cosentino et al., "Light harvesting with Ge quantum dots embedded in SiO₂ or Si₃N₄," *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 4, p. 043103, 2014, doi: 10.1063/1.4863124.
- [8] S. Cosentino et al., "Size dependent light absorption modulation and enhanced carrier transport in germanium quantum dots devices," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 135, pp. 22-28, 2015/04/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.09.012>.
- [9] T. Boonraksa, P. Boonraksa, S. lei lei Wynn and B. Marungsri, "Location and Sizing Optimization of Distributed Generation Systems on Smart Grid with the Whale Optimization Algorithm" *2021 9th International Electrical Engineering Congress (IIECON)*, Pattaya, Thailand, 2021, pp. 81-84.
- [10] P.-Y. Hong, C.-H. Lin, I.-H. Wang, Y.-J. Chiu, B.-J. Lee, J.-C. Kao, C.-H. Huang, H.-C. Lin, T. George, and P.-W. Li, "The amazing world of self-organized Ge quantum dots for Si photonics on SiN platforms," *Applied Physics A*, vol. 129, no. 126, 2023, doi: 10.1007/s00339-022-06332-z
- [11] W. Chang et al., "Measuring effective stiffness of Li-ion batteries via acoustic signal processing," *Journal of Materials Chemistry A*, 10.1039/D0TA05552B vol. 8, no. 32, pp. 16624-16635, 2020, doi: 10.1039/D0TA05552B.
- [12] J. L. Liu, G. Jin, Y. S. Tang, Y. H. Luo, K. L. Wang, and D. P. Yu, "Optical and acoustic phonon modes in self-organized Ge quantum dot superlattices," *Applied Physics Letters*, vol. 76, no. 5, pp. 586-588, 2000, doi: 10.1063/1.125825.
- [13] A. G. Hsieh et al., "Electrochemical-acoustic time of flight: in operando correlation of physical dynamics with battery charge and health," *Energy & Environmental Science*, vol. 8, no. 5, pp. 1569-1577, 2015, doi: 10.1039/C5EE00111K.
- [14] D. T. Pierce and W. E. Spicer, "Electronic Structure of Amorphous Si from Photoemission and Optical Studies," *Physical Review B*, vol. 5, no. 8, pp. 3017-3029, 1972, doi: 10.1103/PhysRevB.5.3017.
- [15] J. Li, Y. Tang, Z. Li, X. Ding, D. Yuan, and B. Yu, "Study on Scattering and Absorption Properties of Quantum-Dot-Converted Elements for Light-Emitting Diodes Using Finite-Difference Time-Domain Method" *Materials*, vol. 10, no. 11, pp. 1264, 2017 doi: 10.3390/ma10111264
- [16] A. Ciesielski, L. Skowronski, W. Pacuski, and T. Szoplik, "Permittivity of Ge, Te and Se thin films in the 200–1500 nm

spectral range. Predicting the segregation effects in silver," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 81, pp. 64-67, 2018.

- [17] X. Ding, J. Li, Q. Chen, Y. Tang, Z. Li, and B. Yu, "Improving LED CCT uniformity using micropatterned films optimized by combining ray tracing and FDTD methods," *Opt. Express*, vol. 23, no. 3, pp. A180-A191, 2015/02/09 2015,
- [18] R. Van Laer, B. Kuyken, D. Van Thourhout, and R. Baets, "Interaction between light and highly confined hypersound in a silicon photonic nanowire," *Nature Photonics*, vol. 9, no. 3, pp. 199-203, 2015.



ณัฐดนัย คงเพชร จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา และ จบการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจาก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาเอกที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีความสนใจในการทำวิจัยด้านโฟโตนิกส์และออปติคอลโมดูลเตอร์แบบดูดกลืนแสง และไลดาร์ (LiDAR)



นิศาล ตั้งเสียมวิสัย จบการศึกษาระดับปริญญา เอกด้านการประมวลผลสัญญาณ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อิมพีเรียลคอลเลจ ลอนดอน ประเทศอังกฤษ เมื่อปีพ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ มีความสนใจในการทำวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการลดเสียงรบกวนเพื่อเพิ่มคุณภาพเสียงพูดในระบบการสื่อสารทางเสียง และมีความเชี่ยวชาญด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล



ปัทมา ชัยสกุล ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาฟิสิกส์จาก Université Paris-Saclay (Université Paris-Sud) ประเทศฝรั่งเศส ปริญญาโทสาขาฟิสิกส์ประยุกต์จาก École Normale supérieure Paris-Saclay (École Normale supérieure de Cachan) ปริญญาโทและปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับมอบหมายบทความทางวิทยาศาสตร์ที่ได้รับการตัดสินใจมากกว่า 70 เรื่อง ในด้าน วงจรรวมทางแสง (Photonic integrated circuits)