



สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของควอนตัมไวร์ทรงสามเหลี่ยม



จียรรัตน์ จุ่นฮวย

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของควอนตัมไวร์ทรงสามเหลี่ยม



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของควอนตัมไวร์ทรงสามเหลี่ยม"

ของ จิรารัตน์ จุ่นฮวย

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปภาวี ฟาน โดมเมเลน)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล อ้าทอง)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คเชนทร์ แดงอุดม)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอก จันท๊ะยอด)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของควอนตัมไวร์ทรงสามเหลี่ยม
ผู้วิจัย	จิรารัตน์ จุ่นฮวย
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรณพ อ่ำทอง
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	ควอนตัมไวร์ทรงสามเหลี่ยม, โครงสร้างแกน-เปลือก, ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง, แสงโพลาริซ

บทคัดย่อ

คุณสมบัติทางแสงในโครงสร้างนาโนมีความสำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้เราได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมที่แตกต่างกัน เราใช้สมการชโรดิงเงอร์ในการหาพลังงานและฟังก์ชันคลื่นเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเมื่อแสงโพลาริซในแนวแกน x จะมีค่าเท่ากับแสงโพลาริซในแนวแกน y และแสดงพฤติกรรมแบบเรดชิฟท์ เมื่อขนาดของควอนตัมไวร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของพลังงานทั้งในกรณีเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากและสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่สำคัญไปกว่านั้นเราพบว่าจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อแกนกลางเลื่อนขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อแกนไม่ได้อยู่ตรงกลาง เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์จะพยายามกระจายตัวเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณกำแพงศักย์หรือแกนของโครงสร้าง ซึ่งคุณสมบัติทางแสงนี้นำไปสู่โอกาสที่สำคัญในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงในอนาคต เช่น เซนเซอร์วัดทิศทางการโพลาริซของแสง

Title OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENTS OF A TRIANGULAR QUANTUM WIRE

Author JIRARUT JOONHUAY

Advisor Associate Professor Attapon Amthong, Ph.D.

Academic Paper M.S. Thesis in Physics, Naresuan University, 2021

Keywords Triangular quantum wire Core-shell Absorption coefficients Polarized light

ABSTRACT

Optical properties in nanostructure are importantly and widely applied to electronic device. In this research, the absorption coefficients in triangular quantum wire with different cross sections were investigated. We solve the schrödinger equation to obtain the eigenenergies and eigenfunctions to calculate the absorption coefficients. We found that the absorption coefficients of the right triangular and equilateral triangular quantum wire with x-polarized light is equal to y-polarized light and exhibited redshift phenomenal when the quantum wire size is increasing due to decreasing value of eigenenergies. More importantly the absorption peaks of the core-shell equilateral triangular quantum wire are drastically increased when the core moved up. And the absorption peaks from forbidden transitions can occur when the core is not centered. Due to the electron distribution in order to avoid a potential barrier or the core of the structure. This optical property leads to significant opportunities in the design of novel optoelectronic devices such as polarized sensor.

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตาอย่างสูงจาก รศ.ดร.อรรถพล อ่ำทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาในทุกขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหา อีกทั้งยังตรวจทานความเรียบร้อยถูกต้อง จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผศ.ดร. คเชนทร์ แดงอุดม ผศ.ดร. เอก จันต๊ะยอด อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน และรศ.ดร.ปภาวี ฟาน โดมเมเลน อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ความดูแลช่วยเหลือในทุกๆเรื่อง ไม่ว่าจะเป็นการจัดทำเอกสารในการดำเนินงาน รวมไปถึงความเอื้อเฟื้อในด้านสถานที่ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

เหนือสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงพี่ชายของข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา นอกจากนี้ยังขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่านที่มีส่วนในการวางรากฐานการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้า

จิรารัตน์ จุ่นฮวย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศคุุณุปการ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method).....	4
2.1.1 กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับปัญหา 1 มิติ.....	4
2.1.2 แก๊สมการชโรดิงเจอร์โดยกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์.....	5
2.2 ออสซิลเลเตอร์สเทรง.....	7
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	7
2.4 ปัญหาอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉาก.....	9
2.5 ปัญหาอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	11
2.6 ปัญหาอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง.....	13

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 ระบบที่ศึกษา.....	17
3.2 สมการชโรดิงเจอร์ของระบบพิกัด 2 มิติ ในรูปไร้มิติ.....	20
3.3 การคำนวณหาพลังงานและฟังก์ชันคลื่นในระบบพิกัด 2 มิติ โดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	24
4.1 ผลการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก.....	24
4.1.1 พลังงานและฟังก์ชันคลื่น.....	24
4.1.2 ออสซิลเลเตอร์สแตรง	26
4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	27
4.2 ผลการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30
4.2.1 พลังงานและฟังก์ชันคลื่น.....	30
4.2.2 ออสซิลเลเตอร์สแตรง	31
4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	33
4.3 ผลการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางหรือโครงสร้างแบบแกน-เปลือก.....	37
4.3.1 พลังงานและฟังก์ชันคลื่น.....	37
4.3.2 ออสซิลเลเตอร์สแตรง	40
4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	41
บทที่ 5 บทสรุป.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47

บรรณานุกรม.....48

ประวัติผู้วิจัย.....51



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากการ ดูดกลืนพลังงานจากแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y ในเส้นลวดนาโนที่มี พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก.....	27
ตาราง 2 โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากการ ดูดกลืนพลังงานจากแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y ในเส้นลวดนาโนที่มี พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	33



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 การแบ่งกริดฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องให้เป็นฟังก์ชันที่มีความไม่ต่อเนื่อง.....	4
ภาพ 2 การแบ่งกริดของฟังก์ชันคลื่นโดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์.....	5
ภาพ 3 แผนภาพควอนตัมดอททรงสามเหลี่ยมพีคัดฉากที่มีด้านประกอบมุมฉากยาว a ...	9
ภาพ 4 ภาพตัดขวางแสดงพีคัดของ GaAs ควอนตัมดอททรงสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	11
ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของ GaAs ควอนตัมดอทกับ (ก) ระดับชั้นพลังงาน (ข) ผลต่างของระดับชั้นพลังงาน (ค) ค่าไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลีเมนต์.....	12
ภาพ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเมื่อแสงตกกระทบบโลาโรซี่ในแนวแกน x และ y	13
ภาพ 7 โครงสร้าง $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ของควอนตัมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าที่แกนกลาง.....	13
ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแถบในของวงแหวนควอนตัมกับ (ก) ระดับชั้นพลังงาน (ข) ผลต่างของพลังงาน (ค) ค่าเมทริกซ์เอลีเมนต์.....	14
ภาพ 9 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น 3 สถานะแรก ที่ถูกขังในควอนตัมสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง.....	15
ภาพ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสำหรับแสงตกกระทบบโลาโรซี่ในแนวแกน (ก) x (ข) y เมื่อ L_1 มีขนาด 0 56 และ 112 อังสตรอม.....	16
ภาพ 11 เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก มีด้านประกอบมุมฉากยาว a ตามแนวแกน x และแกน y	17
ภาพ 12 แผนภาพเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยมีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ a	18

ภาพ 13 (ก) เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนโครงสร้างแบบแกน-เปลือกของ $Al_xGa_{1-x}As$ และ GaAs (ข) พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโนสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง19

ภาพ 14 แผนภาพแสดงพิกัดตำแหน่งของแกนควอนตัมไวร์สามเหลี่ยมด้านเท่าเมื่อ (ก) แกนอยู่ตำแหน่งตรงกลาง (ข) แกนเลื่อนไปตามทิศของแกน y 20

ภาพ 15 โครงสร้างแสดงพิกัดของจุดในระนาบ x, y โดยใช้ดัชนี (i, j) 22

ภาพ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของด้านประกอบมุมฉาก a กับ (ก) พลังงาน (ข) ผลต่างพลังงาน ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก25

ภาพ 17 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น $(|\Psi|^2)$ ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก (ก) Ψ_{12} (ข) Ψ_{13} (ค) Ψ_{23} และ (ง) Ψ_{14} 25

ภาพ 18 ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอเลเมนต์เมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และแนวแกน y ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก26

ภาพ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y โดยที่ a มีขนาดเป็น (ก) 12 (ข) 15 (ค) 18 (ง) 21 และ (จ) 24 นาโนเมตร29

ภาพ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ a กับ (ก) พลังงาน (ข) ผลต่างพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า30

ภาพ 21 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น $(|\Psi|^2)$ ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า 4 สถานะแรก (ก) Ψ_1 (ข) Ψ_2 (ค) Ψ_3 และ (ง) Ψ_4 ที่มีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ a 31

ภาพ 22 ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิเจนเมทริกซ์เอลิเมนต์เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซ์
ในแนวแกน x และแนวแกน y ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็น
รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า.....32

ภาพ 23 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มี
พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบบโพลาริซ์ใน
แนวแกน x โดยที่ a มีขนาดเป็น (ก) 12 (ข) 15 (ค) 18 (ง) 21 และ (จ) 24 นาโนเมตร35

ภาพ 24 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มี
พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบบโพลาริซ์ใน
แนวแกน y โดยที่ a มีขนาดเป็น (ก) 12 (ข) 15 (ค) 18 (ง) 21 และ (จ) 24 นาโนเมตร.....36

ภาพ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะ d กับ (ก) พลังงาน (ข) ผลต่างพลังงานของ
อิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง
.....38

ภาพ 26 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น ($|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังใน
เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อระยะ d
เท่ากับ -1.00 -0.50 0.00 0.50 และ 1.00 นาโนเมตร.....39

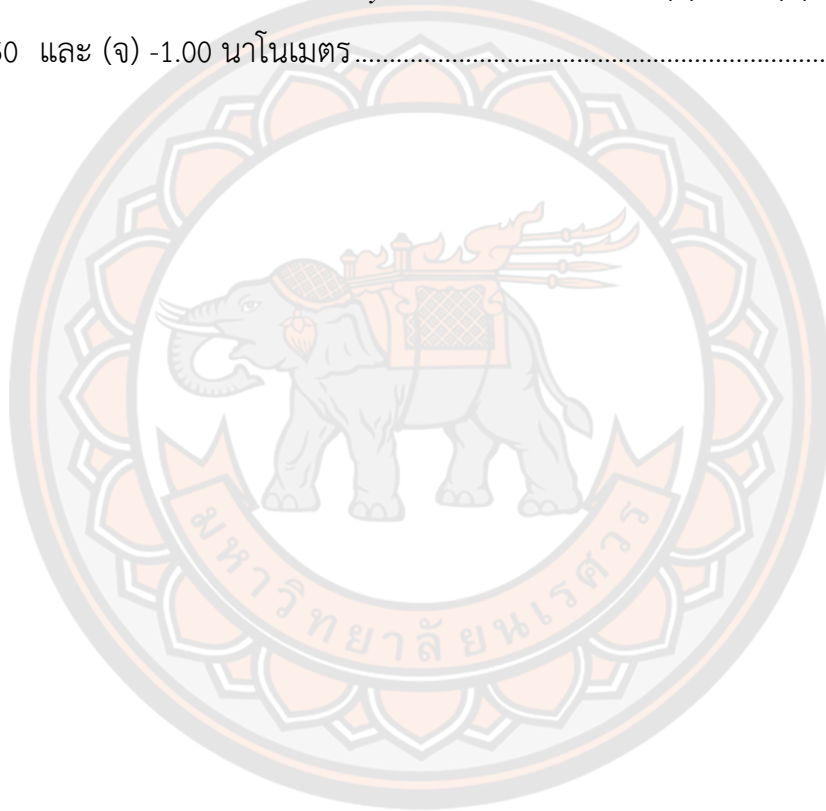
ภาพ 27 ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิเจนเมทริกซ์เอลิเมนต์เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซ์ใน
แนวแกน x และ y ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูป
สามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางเมื่อ (ก) ระยะ d มีค่าเป็นลบ (ข) ระยะ d
มีค่าเป็นบวก.....40

ภาพ 28 โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากการดูดกลืน
พลังงานจากแสงที่โพลาไรซ์แนวแกน x และ y ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูป
สามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางเมื่อ (ก) ระยะ d เป็นลบ (ข) ระยะ d เป็นบวก.....41

ภาพ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มี
พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตก
กระทบบโพลาริซ์ในแนวแกน x โดยที่ d มีระยะเป็น (ก) 1.00 (ข) 0.50 (ค) 0.00 (ง)
-0.50 และ (จ) -1.00 นาโนเมตร.....43

ภาพ 30 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็น รูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาริซในแนวแกน y โดยที่ d มีระยะเป็น (ก) 1.00 (ข) 0.50 (ค) 0.00 (ง) -0.50 และ (จ) -1.00 นาโนเมตร.....44

ภาพ 31 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวมของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาริซในแนวแกน x และ y โดยที่ d มีระยะเป็น (ก) 1.00 (ข) 0.50 (ค) 0.00 (ง) -0.50 และ (จ) -1.00 นาโนเมตร.....45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เส้นลวดนาโนของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor nanowire) เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจอย่างมากต่อการออกแบบโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างทรานซิสเตอร์ (Transistor) (Li et.al, 2006; Liang et.al, 2007) ที่มีความสำคัญต่อการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ทางแสงจำพวกไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode; LED) (Qian et.al, 2005; Nami et.al, 2018) และ เลเซอร์ (Laser) (Hua et.al, 2009; Koblmüller et.al, 2017; Ho et.al, 2015) เส้นลวดนาโนของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถสังเคราะห์ได้จริงจากกระบวนการปลูกถ่ายฟิล์ม (Growth technique) อาทิเช่น Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) (Qian et.al, 2005; Ho et.al, 2015) และ Molecular Beam Epitaxy (MBE) (Qian et.al, 2004) เป็นต้น ข้อดีของกระบวนการดังกล่าวคือสามารถกำหนดพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างได้อย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็น วงกลม วงรี สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม ซึ่งสามเหลี่ยมก็เป็นหนึ่งในพื้นที่หน้าตัดพื้นฐานที่นิยมสังเคราะห์ (Kuykendall et.al, 2003; Qian et.al, 2012) นอกจากนี้วิธีการสังเคราะห์ดังกล่าวยังสามารถสร้างโครงสร้างแบบแกน-เปลือก (Core-shell) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ทางแสงมากกว่าโครงสร้างที่เป็นแบบวัสดุชนิดเดียว (Homogeneous material) ดังในปี 2014 Dai และคณะได้สังเคราะห์โครงสร้างแกน-เปลือก GaAs-AlGaAs นาโนไวร์ เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับแสง (Photodetector) พบว่ามีความไวต่อแสงที่ดีกว่าตัวตรวจจับแสงแบบ GaAs ที่มีขายตามท้องตลาด (Dai et.al, 2014)

ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม ไม่ว่าแสงที่ตกกระทบโพลาริซชันในทิศทางใด ย่อมไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้าง เนื่องจากวงกลมเป็นรูปร่างที่มีความเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) แตกต่างจากกรณีที่พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดสามเหลี่ยม ซึ่งคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างอาจขึ้นอยู่กับทิศทางการโพลาริซชันของแสงที่ตกกระทบ เนื่องมาจากขอบของเส้นลวดนาโนหน้าตัดหลายเหลี่ยมจำกัดบริเวณการสั้นของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในโครงสร้าง โดยคุณสมบัติทางแสงที่ขึ้นอยู่กับทิศทางการโพลาริซชันนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์การตรวจทิศทางการโพลาริซชันของแสงได้

เพื่อความเข้าใจคุณสมบัติทางแสงของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีศักยภาพต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางแสงในอนาคต จึงเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่งที่เราจะศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของอนุภาคที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดแบบสามเหลี่ยม โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 กรณี ได้แก่ เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ ในกรณีพื้นที่หน้าตัดรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าและรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง จะใช้วิธีเชิงตัวเลขจากกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) ในการแก้สมการชโรดิงเงอร์ (Schrodinger equation) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ยืดหยุ่นต่อรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดและมีประสิทธิภาพสำหรับการหาพลังงานและฟังก์ชันคลื่นของโครงสร้างนาโนที่ซับซ้อนตามรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ และสามารถเจาะจงพารามิเตอร์สำหรับวัสดุในแต่ละตำแหน่งที่ต้องการใช้ในการคำนวณได้ (Deyasi, Bhattacharyya and Das, 2014) หลังจากได้พลังงานและฟังก์ชันคลื่นแล้วจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา ค่าออสซิลเลเตอร์สเทรNGTH (Oscillator strength) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติทางแสง โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นส่วนหนึ่งขององค์ความรู้พื้นฐานที่นำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ทางแสงในอนาคตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพลังงานและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง
2. เพื่อศึกษาค่าออสซิลเลเตอร์สเทรNGTH และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางซึ่งประกอบไปด้วย GaAs ในกรณีที่มีแกนกลางจะประกอบไปด้วย $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs สำหรับพื้นที่หน้าตัดรูปสามเหลี่ยมมุมฉากจะใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ในการแก้สมการชโรดิงเงอร์ ในกรณีพื้นที่หน้าตัดแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าและรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางจะใช้วิธีเชิงตัวเลขจากกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อหาพลังงานและฟังก์ชันคลื่น แล้วนำไปคำนวณหาค่าออสซิลเลเตอร์สเตรงและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเมื่อแสงตกกระทบบโลาไรซีในแนวแกน x และแนวแกน y



บทที่ 2

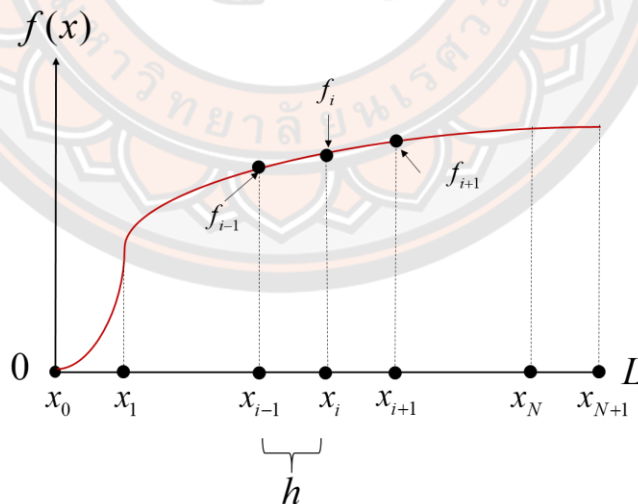
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method)

2.1.1 กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับปัญหา 1 มิติ

เป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าสมการอนุพันธ์ย่อย ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไข ปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ต่างๆได้ โดยใช้หลักการแทนที่ฟังก์ชันที่มีค่า ต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันที่มีค่าไม่ต่อเนื่องจากการแบ่งกริด (Grid) จำนวนหนึ่ง ($x_i = ih$) บนฟังก์ชัน นั้นๆ (Zhou, 1993, p.63) เมื่อ $i = 0, 1, 2, \dots, N+1$ และ $h = \frac{L}{N+1}$ เมื่อ h คือระยะห่าง ระหว่างกริดดังแสดงในภาพ 1 และ L คือความยาวที่พิจารณา จากนั้นเราสามารถหาค่าสมการ อนุพันธ์อันดับที่ 1 ได้จากการหาค่าความชันในแต่ละจุดของฟังก์ชันที่ต้องการ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_i + h) - f(x_i - h)}{2h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h} \quad (2.1)$$



ภาพ 1 การแบ่งกริดฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องให้เป็นฟังก์ชันที่มีความไม่ต่อเนื่อง

สำหรับการประมาณค่าสมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 สามารถประมาณได้จาก

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_i &= \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\right]_i = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{i+1/2} - \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{i-1/2}}{h} \\ &\approx \frac{\frac{f_{i+1} - f_i}{h} - \frac{f_i - f_{i-1}}{h}}{h} = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{h^2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.1.2 แก๊สมการชโรดิงเจอร์โดยกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

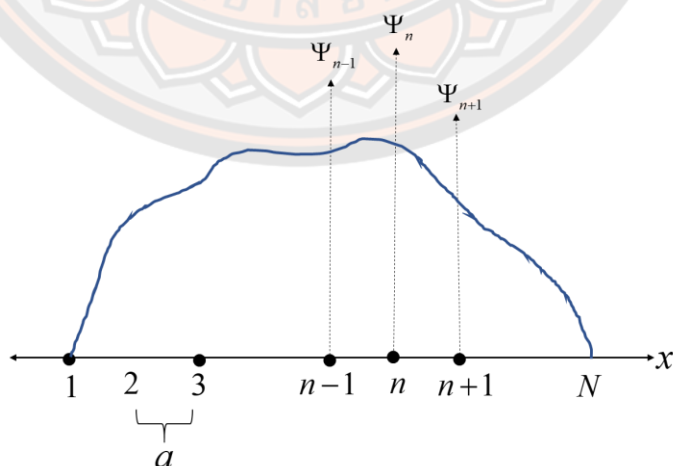
การอธิบายพฤติกรรมของอนุภาคในระบบของกลศาสตร์ควอนตัมสามารถอธิบายได้โดยใช้ฟังก์ชันคลื่นที่ได้จากการแก้สมการชโรดิงเจอร์ (Datta, 2005)

$$E\Psi = H\Psi \quad (2.3)$$

เมื่อ H คือแฮมิลโตเนียน มีค่าเท่ากับ $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$ และ $V(x)$ คือพลังงานศักย์ของระบบ ดังนั้น

$$E\Psi = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)\right] \Psi \quad (2.4)$$

เพื่อใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เราต้องทำการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ โดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ซึ่งแสดงโครงสร้างกริดดังภาพ 2



ภาพ 2 การแบ่งกริดของฟังก์ชันคลื่นโดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

จากนั้นพิจารณาประมาณค่าสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ของ $E\Psi_n = -\frac{\hbar^2}{2m}\left[\frac{d^2\Psi}{dx^2}\right]_n$ ได้จาก

$$\left(\frac{d^2\Psi}{dx^2}\right)_n = \frac{\left[\frac{d\Psi}{dx}\right]_{n+1/2} - \left[\frac{d\Psi}{dx}\right]_{n-1/2}}{a} = \frac{\Psi_{n+1} - 2\Psi_n + \Psi_{n-1}}{a^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ $\left[\frac{d\Psi}{dx}\right]_{n+1/2} = \frac{\Psi_{n+1} - \Psi_n}{a}$ และ $\left[\frac{d\Psi}{dx}\right]_{n-1/2} = \frac{\Psi_n - \Psi_{n-1}}{a}$ คือจุดที่อยู่ระหว่าง Ψ_n และห่างจากกันเป็นระยะ a จากนั้นแทนค่าสมการ (2.5) ใน (2.4) จะได้

$$E\Psi_n = -\frac{\hbar^2}{2ma^2}(\Psi_{n+1} - 2\Psi_n + \Psi_{n-1}) + V(x_n)\Psi_n \quad (2.6)$$

สำหรับการพิจารณาฟังก์ชันคลื่นที่ตำแหน่ง n ใดๆ จะเป็นไปตามสมการที่ (2.6) ดังเช่น

$$\begin{aligned} n=1; & \quad E\Psi_1 = -\frac{\hbar^2}{2ma^2}(-2\Psi_1 + \Psi_2) + V(x_1)\Psi_1 \\ n=2; & \quad E\Psi_2 = -\frac{\hbar^2}{2ma^2}(\Psi_1 - 2\Psi_2 + \Psi_3) + V(x_2)\Psi_2 \\ n=3; & \quad E\Psi_3 = -\frac{\hbar^2}{2ma^2}(\Psi_2 - 2\Psi_3 + \Psi_4) + V(x_3)\Psi_3 \\ n=N; & \quad E\Psi_N = -\frac{\hbar^2}{2ma^2}(\Psi_{N-1} - 2\Psi_N) + V(x_N)\Psi_N \end{aligned}$$

โดยที่ $\Psi_0 = \Psi_{N+1} = 0$ จะสามารถเขียนแฮมิลโทเนียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ เพื่อนำไปคำนวณพลังงานและฟังก์ชันคลื่น ได้เป็น

$$E \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_n \\ \vdots \\ \Psi_N \end{bmatrix} = \frac{\hbar^2}{2ma^2} \begin{bmatrix} 2+V(x_1) & -1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -1 & 2+V(x_2) & -1 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & -1 & \ddots & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & -1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & -1 & 2+V(x_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_n \\ \vdots \\ \Psi_N \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2 ออสซิลเลเตอร์สเทรง

ปริมาณที่แสดงถึงโอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายหลังการดูดกลืนพลังงานจากแสงจากสถานะที่ต่ำกว่าไปยังสถานะที่สูงขึ้น หรือเรียกว่า ออสซิลเลเตอร์สเทรง (Tutiunyk et.al, 2014) สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{ff',ii'}^{r=x,y} = \frac{2m\Delta E_{ff',ii'}}{\hbar^2} |M_{ff',ii'}^{r=x,y}|^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ คือค่าคงตัวของพลังค์ และ $M_{ff',ii'}^{r=x,y} = \langle \Psi_{ff'}^* | \vec{r} | \Psi_{ii'} \rangle = \int_0^\infty \int_0^\infty \Psi_{ff'}^* \vec{r} \Psi_{ii'} dx dy$ คือไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์ (Dipole transition matrix element) ระหว่างระดับสถานะที่ต่ำกว่า ($\Psi_{ii'}$) ไปยังสถานะที่สูงกว่า ($\Psi_{ff'}$) เมื่อ \vec{r} แสดงทิศทางการโพลาริซชันของแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้เราสนใจกรณีที่ $\vec{r} = x\hat{i}$ และ $\vec{r} = y\hat{j}$ ความแตกต่างระหว่างชั้นพลังงาน $\Delta E_{ff',ii'} = E_{ff'} - E_{ii'}$ เมื่อ $E_{ii'}$ คือพลังงานของสถานะเริ่มต้นและ $E_{ff'}$ คือพลังงานของสถานะสุดท้าย

2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

นอกจากนี้ความสามารถในการดูดกลืนแสงต่อหน่วยความยาวของตัวกลางจะถูกวัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง เพื่ออธิบายผลการทดลองสำหรับการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ทางด้านแสง คำนวณได้จาก

$$\alpha^{r=x,y}(\omega, I) = \alpha^{(1)}(\omega) + \alpha^{(3)}(\omega, I) \quad (2.9)$$

โดยที่ $\alpha^{(1)}(\omega)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงแบบเชิงเส้น (Duque et.al, 2014) ที่นิยามโดย

$$\alpha^{(1)}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_R}} \left[\frac{e^2 |M_{ff',ii'}^{r=x,y}|^2 \sigma \hbar \Gamma}{(\Delta E_{ff',ii'} - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma)^2} \right] \quad (2.10)$$

และ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่นิยามโดย

$$\alpha^{(3)}(\omega, I) = -\omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_R}} \left[\frac{I}{2\varepsilon_0 n_r c} \frac{e^4 \sigma \hbar \Gamma |M_{ff',ii'}^{r=x,y}|^2}{[(\Delta E_{ff',ii'} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma)^2]^2} \right] \times \left\{ 4|M_{ff',ii'}^{r=x,y}|^2 - \frac{|M_{ff'}^{r=x,y} - M_{ii'}^{r=x,y}|^2 [3(\Delta E_{ff',ii'})^2 - 4\Delta E_{ff',ii'} \hbar\omega + \hbar^2(\omega^2 - \Gamma^2)]}{(\Delta E_{ff',ii'})^2 + (\hbar\Gamma)^2} \right\} \quad (2.11)$$

เมื่อ $\hbar\omega$ คือค่าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ μ_0 คือสภาพให้ซึมผ่านได้ของสุญญากาศ ε_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ ε_R คือสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ e คือประจุของอิเล็กตรอน σ คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในระบบ $\Gamma = \frac{1}{\tau}$ โดยที่ τ คือ Relaxation time I คือความเข้มของแสงที่ตกกระทบโพลาไรซ์ (Yakar et.al, 2010)

นอกจากนี้การคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเชิงเส้นของแต่ละการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นของพลังงานสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.10) เทียบกับความถี่ (ω) และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ $\left(\frac{d\alpha}{d\omega} = 0\right)$ ซึ่งจะได้

$$\hbar\omega = \sqrt{\Delta E_{ff',ii'}^2 + (\hbar\Gamma)^2} \quad (2.12)$$

หลังจากนั้นย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า ω ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเชิงเส้นมีค่าสูงสุด โดยกำหนดให้เป็น ω_p ดังนั้น

$$\omega_p = \frac{\sqrt{\Delta E_{ff',ii'}^2 + (\hbar\Gamma)^2}}{\hbar} \quad (2.13)$$

แต่เนื่องจากค่า $(\hbar\Gamma)^2$ ในสมการที่ (2.13) มีค่าน้อยมากๆเมื่อเทียบกับ $E_{ff',ii'}^2$ ดังนั้นเราจึงประมาณค่าสมการ (2.13) ได้ใหม่เป็น

$$\hbar\omega_p = \Delta E_{ff',ii'} \quad (2.14)$$

ซึ่งหมายความว่าเมื่อพิจารณารูปค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้นที่มีแกน x เป็น $\hbar\omega$ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้นที่สูงที่สุดที่ตำแหน่งผลต่างของพลังงานแต่ละสถานะ $(\Delta E_{ff',ii'})$

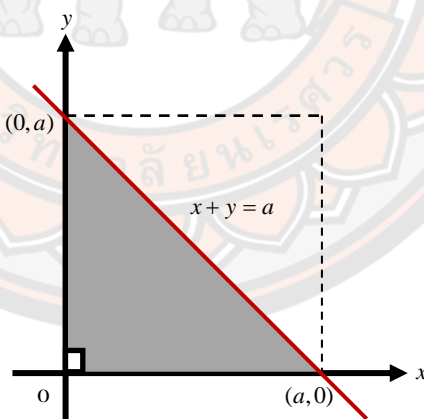
สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้นที่สูงสุดสามารถหาได้จากการแทนค่าสมการ (2.13) ใน (2.10) ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้นที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ที่ทำให้เกิดค่าสูงสุด $\alpha(\omega_p)$ คือ

$$\alpha(\omega_p) = \Delta E_{ff',ii'} |M_{ff',ii'}^{r=x,y}|^2 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_R}} \frac{e^2 \sigma}{\hbar^2 \Gamma} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้นเป็นค่าที่ขึ้นกับผลต่างของพลังงานแต่ละสถานะ ($\Delta E_{ff',ii'}$) และไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลิเมนต์ ($M_{ff',ii'}^{r=x,y}$) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับทิศทางในการโพลาไรซ์ของแสงว่าเป็นแนวแกน x หรือ y

2.4 ปัญหอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉาก

ในปี 1984 Li ได้ศึกษาระบบของอิเล็กตรอน 1 อนุภาค ที่ถูกขังอยู่ในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉากในระบบพิกัดฉาก (x, y) ดังแสดงในภาพ 3 เมื่อ a คือความยาวของด้านประกอบมุมฉากและด้านที่ตรงข้ามมุมฉากสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $x + y = a$ เพื่อให้ได้ผลเฉลยของอนุภาคดังกล่าว จำเป็นต้องหาผลเฉลยของอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square box) ก่อน ซึ่งสามารถเขียนสมการชโรดิงเงอร์ได้เป็น



ภาพ 3 แผนภาพควอนตัมดอททรงสามเหลี่ยมพิกัดฉากที่มีด้านประกอบมุมฉากยาว a

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x, y) + V(x, y) \Psi(x, y) = E \Psi(x, y) \quad (2.16)$$

เมื่อ m คือมวลของอิเล็กตรอน $V(x, y)$ คือพลังงานศักย์ที่มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ $0 \leq x \leq a$ และ $0 \leq y \leq a$ และมีค่าเป็นอนันต์ในบริเวณอื่น ๆ หลังจากนั้นใช้วิธีการแยกตัวแปร โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้ $\Psi(x=0)=0$ $\Psi(x=a)=0$ $\Psi(y=0)=0$ และ $\Psi(y=a)=0$ จะสามารถแก้สมการชโรดิงเงอร์ได้ฟังก์ชันคลื่นและพลังงานของอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็น

$$\Psi_{n_x n_y} = \left[\sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n_x \pi x}{a}\right) \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n_y \pi y}{a}\right) \right] \quad (2.17)$$

โดยมีระดับชั้นพลังงานเป็น

$$E_{n_x n_y} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} (n_x^2 + n_y^2) \quad (2.18)$$

เมื่อ n_x และ $n_y = 1, 2, 3, \dots$ โดยที่ n_x สามารถเท่ากับ n_y ได้

ในการหาผลเฉลยของอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉาก สามารถคำนวณได้โดยเพิ่มเงื่อนไขขอบเขตอีกเงื่อนไขหนึ่งคือ $\Psi(x, y) = 0$ บนเส้นตรง $x + y = a$ ฟังก์ชันคลื่นที่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้เกิดจากผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของ $\Psi_{n_x n_y}$ และ $\Psi_{n_y n_x}$ ซึ่งเป็นสถานะของควอนตัมดอทสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพลังงานเท่ากัน ก่อให้เกิดฟังก์ชันคลื่นใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} \Psi'_{n_x n_y} &= (\Psi_{n_x n_y} + \Psi_{n_y n_x}) \\ &= \frac{2}{a} \left[\sin\left(\frac{n_x \pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{a}\right) + \sin\left(\frac{n_y \pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n_x \pi y}{a}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \Psi''_{n_x n_y} &= (\Psi_{n_x n_y} - \Psi_{n_y n_x}) \\ &= \frac{2}{a} \left[\sin\left(\frac{n_x \pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{a}\right) - \sin\left(\frac{n_y \pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n_x \pi y}{a}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

โดย $\Psi'_{n_x n_y} = 0$ บนเส้นตรง $x + y = a$ เมื่อ $n_x = n_y \pm 1, n_y \pm 3, n_y \pm 5, \dots$ และ $\Psi''_{n_x n_y} = 0$ บนเส้นตรง $x + y = a$ เมื่อ $n_x = n_y \pm 2, n_y \pm 4, n_y \pm 6, \dots$ สังเกตจากสมการที่ (2.19) และ (2.20) ได้ว่า n_x จะไม่สามารถเท่ากับ n_y ได้ เนื่องจากจะทำให้ $\Psi'_{n_x n_y} = 2\Psi_{n_x n_y}$ และ $\Psi''_{n_x n_y} = 0$ ทำให้ฟังก์ชันคลื่นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขหรือทำให้ฟังก์ชันคลื่นเท่ากับศูนย์ทุกตำแหน่ง เราจึงสามารถหาพลังงานของอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉากได้จาก

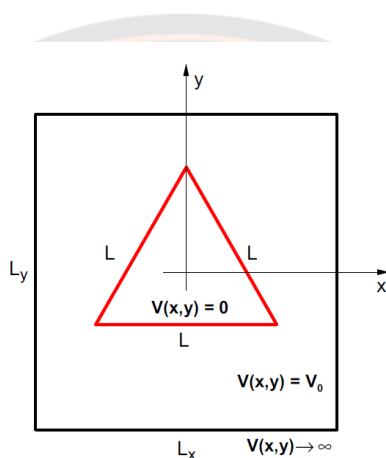
$$E_{n_x n_y} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} (n_x^2 + n_y^2) \quad (2.21)$$

เมื่อ n_x และ $n_y = 1, 2, 3, \dots$ โดยที่ $n_x \neq n_y$ สังเกตได้ว่าในกรณีของควอนตัมดอทสี่เหลี่ยมจัตุรัสฟังก์ชันคลื่น $\Psi_{n_x n_y}$ และ $\Psi_{n_y n_x}$ มีการกระจายตัวต่างกันและพลังงานเท่ากัน จึงถือเป็น Degenerate states แต่ในกรณีของควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉากพบว่า $\Psi'_{n_x n_y}$ และ $\Psi'_{n_y n_x}$ มีการกระจายตัวของฟังก์ชันคลื่นเหมือนกันทุกประการ ในทำนองเดียวกัน $\Psi''_{n_x n_y}$ และ $\Psi''_{n_y n_x}$ ก็มีการกระจายตัวของ

ฟังก์ชันคลื่นเหมือนกันทุกประการเช่นกัน ดังนั้นในระบบควอนตัมดอทสามเหลี่ยมมุมฉากจึงไม่มี Degenerate state อย่างเช่นกรณีของควอนตัมดอทสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2.5 ปัญหาอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมด้านเท่า

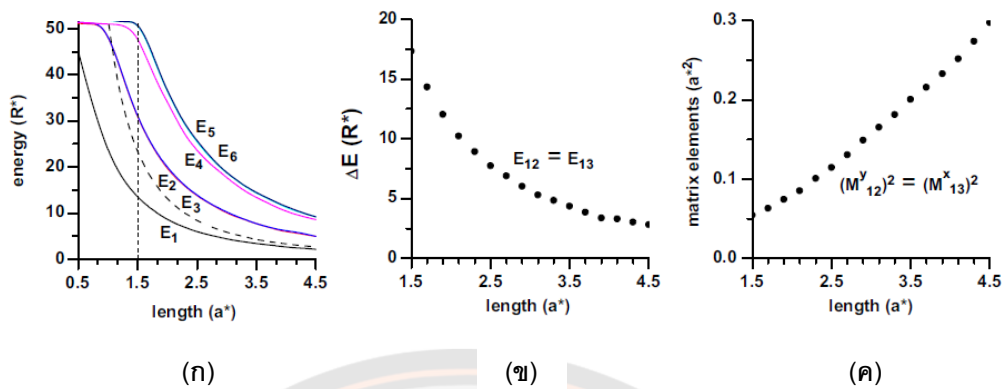
ในปี 2014 Tiutiunnyk et.al ได้ศึกษาคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และแสงของอนุภาคที่ถูกขังอยู่ใน GaAs ควอนตัมดอทซึ่งมีโครงสร้างเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยพิจารณาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานภายในแถบตัวนำเป็นการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติ ในระนาบ x, y แสดงในภาพ 4



ภาพ 4 ภาพตัดขวางแสดงพิกัดของ GaAs ควอนตัมดอทสามเหลี่ยมด้านเท่า

ที่มา: Tiutiunnyk et.al, 2014

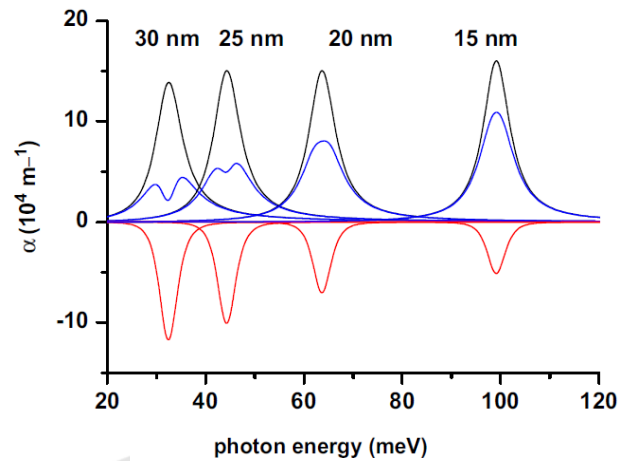
พบว่าเมื่อขนาดของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้น พลังงานและผลต่างของพลังงานในแต่ละสถานะที่พิจารณา มีแนวโน้มลดลง ซึ่งพลังงานของสถานะกระตุ้นระดับที่ 1 (E_2) และ 2 (E_3) มีค่าเท่ากัน ดังแสดงในภาพ 5(ก) โดยส่งผลให้เกิดภาพ 5(ข) คือค่าผลต่างพลังงานของสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นระดับที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันด้วย ประกอบกับความสมมาตรของความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่นในสถานะกระตุ้นระดับที่ 1 สำหรับแสงที่ตกกระทบโพลาริซชันในแนวแกน y กับสถานะกระตุ้นระดับที่ 2 สำหรับแสงที่ตกกระทบโพลาริซชันในแนวแกน x มีรูปแบบที่เหมือนกันและพลังงานเท่ากัน จึงส่งผลให้ค่าไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอเลเมนต์ของการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เมื่อแสงตกกระทบโพลาริซชันในแนวแกน y เท่ากับการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 เมื่อแสงตกกระทบโพลาริซชันในแนวแกน x ($|M_{12}^y| = |M_{13}^x|$) ดังแสดงในภาพ 5(ค)



ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของ GaAs ควอนตัมดอทกับ (ก) ระดับชั้นพลังงาน (ข) ผลต่างของระดับชั้นพลังงาน (ค) ค่าไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์

ที่มา: Tiutiunyk et.al, 2014

นอกจากนี้เมื่อนำ $|M^y_{12}|$ และ $|M^x_{13}|$ ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิง ($\alpha^{(1)}$) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น ($\alpha^{(3)}$) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่แสงตกกระทบโพลาริซ พบว่าเมื่อด้านความยาวของสามเหลี่ยมด้านเท่าเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของ $\alpha^{(1)}$ และต่ำสุดของ $\alpha^{(3)}$ จะมีพฤติกรรมแบบเรดชิฟต์ (Redshift) และเมื่อด้านของสามเหลี่ยมด้านเท่ามีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 25 นาโนเมตร จะส่งผลให้ค่าสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวม (α_{tot}) แยกออกเป็น 2 ค่า เนื่องจากการลดลงอย่างรวดเร็วของ $\alpha^{(3)}$ ดังแสดงในภาพ 6 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เมื่อแสงตกกระทบโพลาริซในแนวแกน y และการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 เมื่อแสงตกกระทบโพลาริซในแนวแกน x โดยเส้นสีดำคือ $\alpha^{(1)}$ เส้นสีแดง คือ $\alpha^{(3)}$ และเส้นสีน้ำเงิน คือ α_{tot} เมื่อขนาดควอนตัมดอทเท่ากับ 15 20 25 และ 30 นาโนเมตร ตามลำดับ

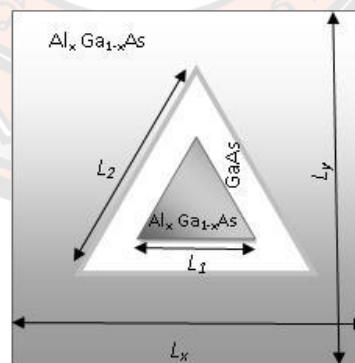


ภาพ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y

ที่มา: Tiutiunnyk et.al, 2014

2.6 ปัญหาอนุภาคที่ถูกขังในควอนตัมดอทสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง

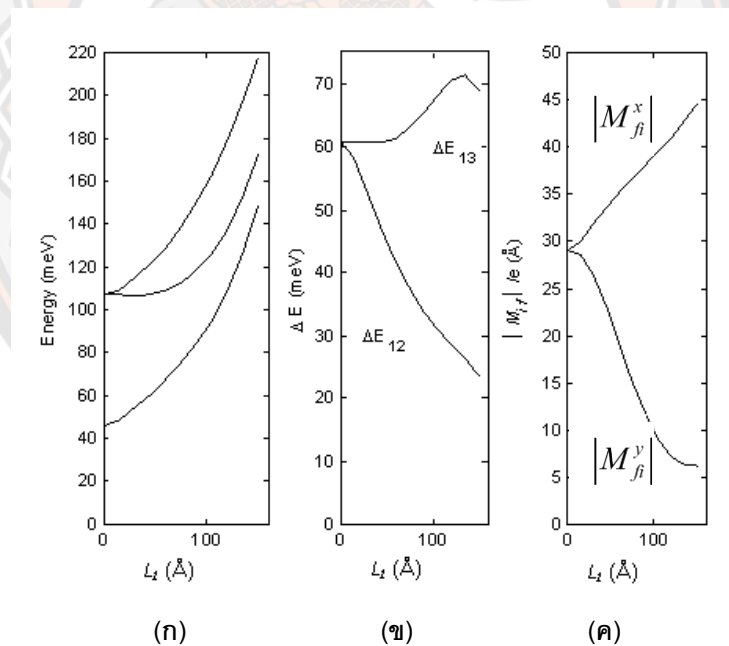
ในปี 2015 Nasri และ Bettahar ได้อาศัยการประมาณมวลยังผลเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงาน 3 สถานะแรกในแถบตัวนำ (Conduction band) ของควอนตัมที่มีโครงสร้างแบบ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - GaAs - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ โดย L_1 คือความยาวในแต่ละด้านของแกนกลาง และ L_2 คือความยาวในแต่ละด้านของแถบด้านนอก ดังแสดงในภาพ 7



ภาพ 7 โครงสร้าง $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ของควอนตัมแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง

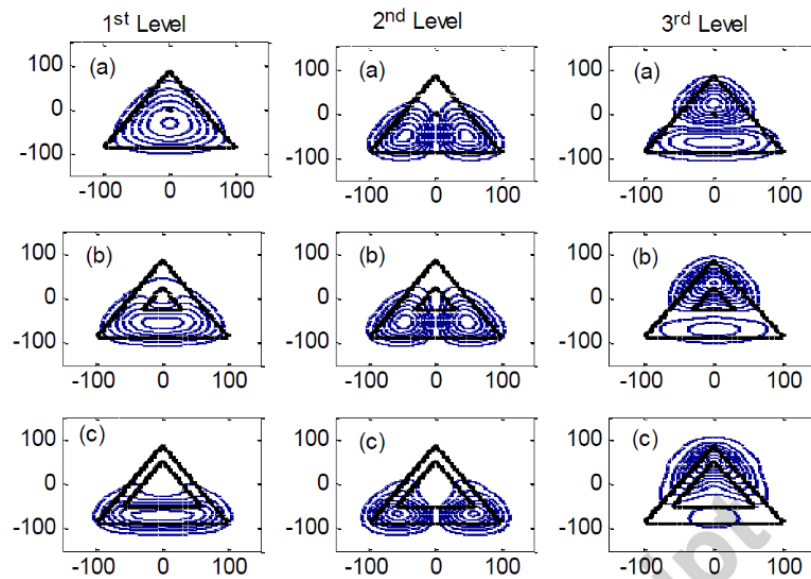
ที่มา: Nasri and Bettahar, 2015

พบว่าพลังงานของสถานะพื้น (E_1) สถานะกระตุ้นที่ 1 (E_2) และสถานะกระตุ้นที่ 2 (E_3) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ L_1 มีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ L_1 ยังส่งผลให้ E_2 และ E_3 ที่เคยมีค่าเท่ากันเมื่อ $L_1 = 0$ (กรณีไม่มี $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ อยู่ที่แกนของโครงสร้าง) มีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพ 8(ก) ในขณะที่ภาพ 8(ข) แสดงค่าผลต่างพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นที่ 1 (ΔE_{12}) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแตกต่างจากผลต่างพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นที่ 2 (ΔE_{13}) ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการคำนวณ ค่าเมทริกซ์เอลิเมนต์ (Matrix element ; $|M_{ij}|$) ดังแสดงในภาพ 8(ค) การเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x เท่ากับการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 เมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน y ($|M_{12}^x| = |M_{13}^y|$) เมื่อ $L_1 = 0$ แต่เมื่อ L_1 มีขนาดเพิ่มขึ้น $|M_{12}^x|$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นที่ 1 มีรูปแบบการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกันเมื่อ L_1 มีค่ามาก ดังแสดงในภาพ 9 แต่ $|M_{13}^y|$ มีแนวโน้มลดลง



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแถบในของวงแหวนควอนตัมกับ
(ก) ระดับชั้นพลังงาน (ข) ผลต่างของพลังงาน (ค) ค่าเมทริกซ์เอลิเมนต์

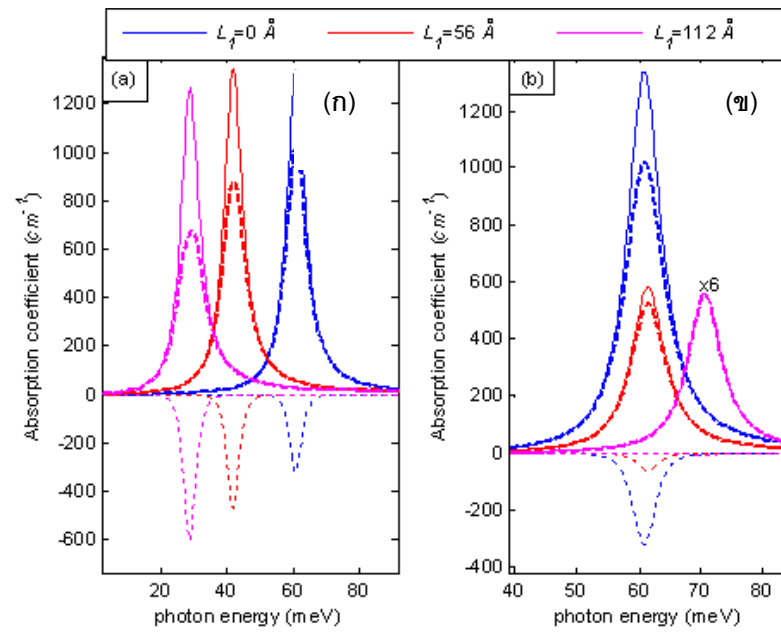
ที่มา: Nasri and Bettahar, 2015



ภาพ 9 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น 3 สถานะแรก ที่ถูกขังในควอนตัมสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง

ที่มา: Nasri and Bettahar, 2015

เมื่อนำค่า $|M_{ij}|$ ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้น ($\alpha^{(1)}$) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น ($\alpha^{(3)}$) เมื่อแสดงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x ดังแสดงในรูป 10(ก) โดยเส้นทึบคือแบบเชิงเส้น เส้นประคือแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเส้นประทึบคือแบบรวม จะส่งผลให้ $\alpha^{(1)}$ และ $\alpha^{(3)}$ มีพฤติกรรมแบบเรดชิฟต์ (Redshift) เมื่อ L_1 มีขนาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ $|M_{12}^x|$ และการลดลงของ ΔE_{12} เมื่อ L_1 มีขนาดเพิ่มขึ้น 2 ตัวแปรนี้จึงส่งผลให้ $\alpha^{(1)}$ ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ $\alpha^{(3)}$ เป็นค่าที่ขึ้นกับ $|M_{ij}|^4 E_{if}$ ทำให้ $\alpha^{(3)}$ ลดลงอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวม และสำหรับเมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน y $\alpha^{(1)}$ และ $\alpha^{(3)}$ จะมีพฤติกรรมค่อนข้างไปทางบลูชิฟต์ (Blue shift) เมื่อ L_1 มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 10(ข) โดยเส้นทึบคือแบบเชิงเส้น เส้นประคือแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเส้นประทึบ คือแบบรวม



ภาพ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสำหรับแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน
(ก) x (ข) y เมื่อ L_1 มีขนาด 0 56 และ 112 อังสตรอม

ที่มา: Nasri and Bettahar, 2015

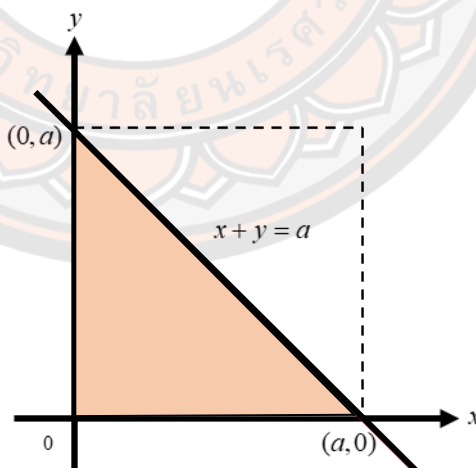
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาาระบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยมด้านเท่า และสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยที่แกนกลางร่วมไม่ได้อยู่ตรงกลางซึ่งประกอบไปด้วย $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs เพื่อหาผลเฉลยของพลังงานและฟังก์ชันคลื่น จากนั้นนำพลังงานและฟังก์ชันคลื่นไปใช้ในการคำนวณค่าออสซิลเลเตอร์สเทร่งและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่อไป

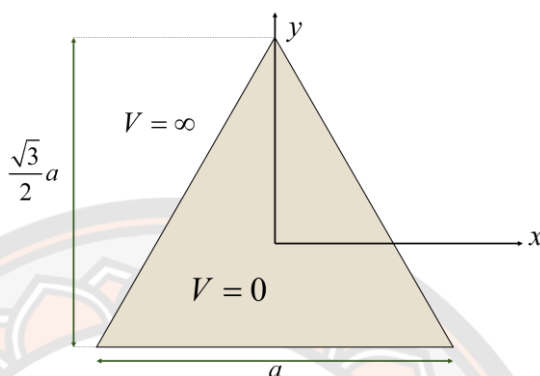
3.1 ระบบที่ศึกษา

ระบบของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์จาก GaAs ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก จะถูกศึกษาในระบบพิกัดฉาก เมื่อ a คือความยาวของด้านประกอบมุมฉากและด้านที่ตรงข้ามมุมฉากสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $x + y = a$ ดังแสดงในภาพ 11 ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ในการแก้สมการชโรดิงเงอร์ จากการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส



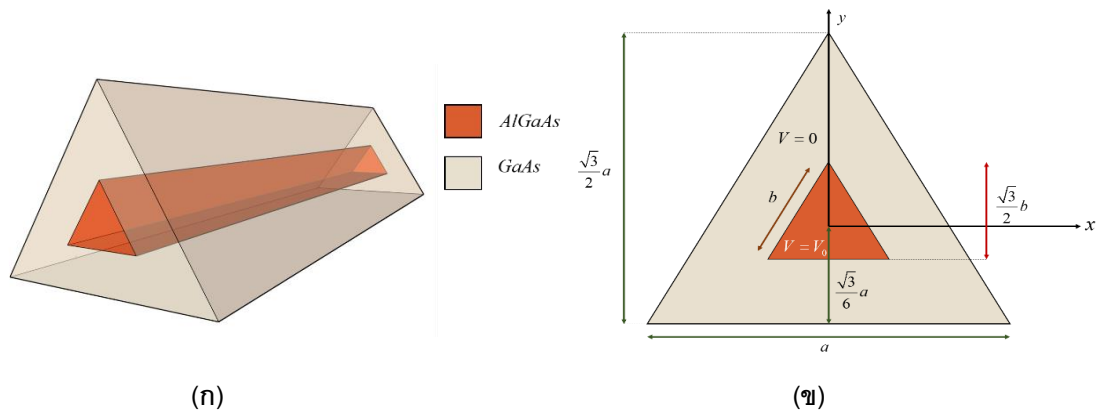
ภาพ 11 เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก มีด้านประกอบมุมฉากยาว a ตามแนวแกน x และแกน y

ระบบของเส้นลวดนาโนที่สังเคราะห์จาก GaAs ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าบนระนาบ (x, y) โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ a โดยพลังงานศักย์บริเวณ GaAs จะมีค่าเป็นศูนย์ ($V = 0$) และที่บริเวณอื่นจะมีค่าเป็นอนันต์ ($V = \infty$) ดังแสดงในภาพ 12



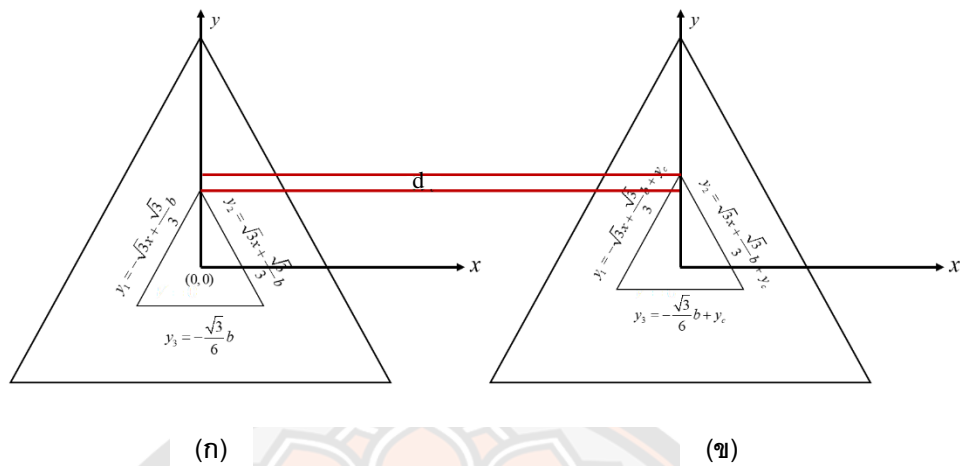
ภาพ 12 แผนภาพเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยมีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ a

ระบบของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมด้านเท่าที่มีแกนกลางหรือเป็นโครงสร้างแบบแกน-เปลือก (Core-shell) โดยที่แกนคือ AlGaAs และเปลือกคือ GaAs ดังแสดงในภาพ 13(ก) โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข แต่ในการสังเคราะห์โครงสร้างนี้พบว่าหลายครั้งที่แกนไม่ได้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลาง (Qian et.al, 2012; Qian et.al, 2008) ดังนั้นเราจึงศึกษากรณีที่แกนสามารถเลื่อนตามพิกัดแกน y เมื่อกำหนดให้ a คือความยาวในแต่ละด้านของเปลือก (Shell) ในขณะที่ b คือความยาวแต่ละด้านของแกน ดังแสดงในภาพ 13(ข)



ภาพ 13 (ก) เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนโครงสร้างแบบแกน-เปลือกของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และ GaAs (ข) พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโนสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง

นอกจากนี้เนื่องจาก AlGaAs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานศักย์มากกว่า GaAs จึงทำให้เกิดกำแพงศักย์สามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีพลังงานศักย์ค่าหนึ่ง ($V = V_0$) บริเวณแกนของเส้นลวดนาโน และที่บริเวณเปลือกพลังงานศักย์จะมีค่าเป็นศูนย์ ($V = 0$) โดยพิกัด (x, y) ที่อยู่ในบริเวณแกนเกิดจากสมการเส้นตรง ($y = mx + c$) 3 เส้น ได้แก่ $y_1 = -\sqrt{3}x + \frac{\sqrt{3}}{3}b$, $y_2 = \sqrt{3}x + \frac{\sqrt{3}}{3}b$ และ $y_3 = -\frac{\sqrt{3}}{6}b$ ประกอบกัน ดังแสดงในภาพ 14(ก) ในกรณีการเลื่อนแกนไปตามแกน y เมื่อเลื่อนขึ้นจะบวกค่า d ที่ต้องการเพิ่มไปในสมการ y_1, y_2 และ y_3 ซึ่งจะทำให้บริเวณแกนเปลี่ยนตำแหน่งไป ในทำนองเดียวกันเมื่อต้องการเลื่อนแกนลงไปตามแนวแกน y จะลบค่า d ที่ต้องการไปในสมการ y_1, y_2 และ y_3 เช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพ 14(ข)



ภาพ 14 แผนภาพแสดงพิกัดตำแหน่งของแกนควอนตัมไวร์สามเหลี่ยมด้านเท่าเมื่อ
(ก) แกนอยู่ตำแหน่งตรงกลาง (ข) แกนเลื่อนไปตามทิศของแกน y

3.2 สมการชโรดิงเงอร์ของระบบพิกัด 2 มิติ ในรูปไร้หน่วย

เพื่อให้ได้ผลเฉลยของอนุภาคดังกล่าว จึงใช้สมการชโรดิงเงอร์ในระบบพิกัด 2 มิติ

$$\hat{H}\Psi(x, y) = E\Psi(x, y) \quad (3.1)$$

จากนั้นอาศัยการประมาณของมวลยังผล ซึ่งสามารถเขียนฮามิลโตเนียน (Hamiltonian) ได้เป็น

$$\hat{H} = \frac{-\hbar^2}{2m^*(x, y)} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] + V(x, y) \quad (3.2)$$

เมื่อ $m^*(x, y)$ คือมวลยังผล (Effective mass) และ $V(x, y)$ คือพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นบนพิกัด x, y โดยการศึกษาในรูปไร้หน่วยนี้จะใช้ในการพิจารณาเฉพาะใน 2 กรณีคือ เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าจะมีพลังงานศักย์เท่ากับศูนย์ ($V(x, y) = 0$) และเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกน จะมีพลังงานศักย์ค่าหนึ่งที่บริเวณแกนหรือ AlGaAs ($V(x, y) = V_0$) สำหรับบริเวณเปลือกหรือ GaAs จะมีพลังงานศักย์เท่ากับศูนย์ ($V(x, y) = 0$) และที่บริเวณอื่นๆจะมีค่าเป็นอนันต์ ($V = \infty$) จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) สามารถเขียนสมการชโรดิงเงอร์ได้เป็น

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m^*(x, y)} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + V(x, y) \right] \Psi(x, y) = E\Psi(x, y) \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) เพื่อให้สะดวกต่อการใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณ เราจึงศึกษาระบบที่อยู่ในรูปไร้หน่วยโดยกำหนดให้ $m^*(x, y) = \tilde{m}^* m_{GaAs}^*$ $x = \tilde{x}a$ และ $y = \tilde{y}a$ เป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วย เมื่อ a คือความยาวในแต่ละด้านของพื้นที่หน้าตัดรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าของแต่ละกรณี จะได้ว่า

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2\tilde{m}^* m_{GaAs}^* a^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} \right) + V(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi(\tilde{x}, \tilde{y}) = E \Psi(\tilde{x}, \tilde{y}) \quad (3.4)$$

จากนั้นกำหนด $E_0 = \frac{\hbar^2}{2m_{GaAs}^* a^2}$ แล้วนำ E_0 มารวมสมการ

$$\left[\frac{-1}{\tilde{m}^*} \left(\frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} \right) + \frac{V(\tilde{x}, \tilde{y})}{E_0} \right] \Psi(\tilde{x}, \tilde{y}) = \frac{E}{E_0} \Psi(\tilde{x}, \tilde{y}) \quad (3.5)$$

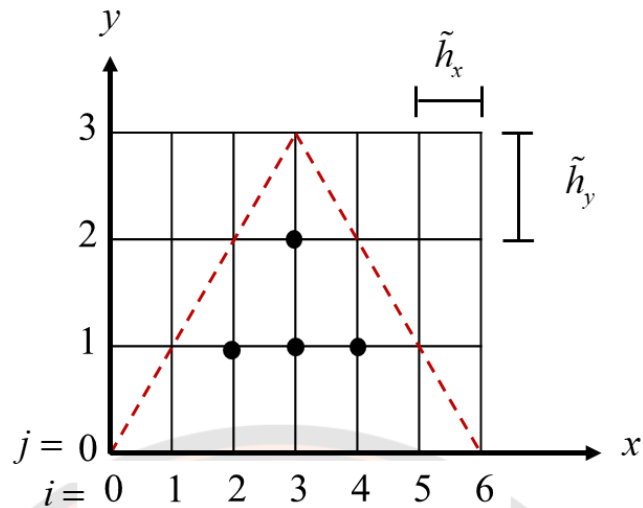
เมื่อ $\frac{V(\tilde{x}, \tilde{y})}{E_0} = \tilde{V}(\tilde{x}, \tilde{y})$ คือพลังงานศักย์ในรูปไร้หน่วย และ $\frac{E}{E_0} = \tilde{E}$ คือพลังงานในรูปไร้หน่วย

เราจึงสามารถเขียนสมการชโรดิงเงอร์ของระบบพิกัด 2 มิติ ในรูปไร้หน่วยได้เป็น

$$\left[\frac{-1}{\tilde{m}^*} \left(\frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} \right) + \tilde{V}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{E} \Psi(\tilde{x}, \tilde{y}) \quad (3.6)$$

3.3 การคำนวณหาพลังงานและฟังก์ชันคลื่นในระบบพิกัด 2 มิติ โดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

เป็นการหาค่าอนุพันธ์อันดับ 2 ในสมการอนุพันธ์ย่อยโดยใช้การประมาณค่าฟังก์ชันเชิงเส้นบนตำแหน่งในระนาบ x, y และสมมติให้จุดที่เราพิจารณามีดัชนี i และ j โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ดัชนี i มีค่าระหว่าง $0 \leq i \leq N_x + 1$ เมื่อ N_x คือจำนวนช่องบนแนวแกน x ดังนั้นระยะระหว่างจุดบนแกน x สำหรับดัชนี i หรือ \tilde{h}_x (เนื่องจากต้องการให้การคำนวณอยู่ในรูปไร้หน่วย ดังนั้น \tilde{h}_x คือระยะระหว่างจุดในหน่วยของ a) มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{N_x + 1}$ และสำหรับดัชนี j จะมีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq j \leq N_y + 1$ เมื่อ N_y คือจำนวนช่องบนแนวแกน y โดยที่ N_y และ N_x จะต้องมีความสัมพันธ์กันแบบ $N_y = \frac{N_x - 1}{2}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง \tilde{h}_y และ \tilde{h}_x จะต้องมีค่าเท่ากับ $\tilde{h}_y = \sqrt{3}\tilde{h}_x$ เมื่อ \tilde{h}_y คือระยะระหว่างจุดบนดัชนี j เพื่อให้ระนาบที่ตำแหน่งกริดอยู่บนขอบของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งแสดงดังภาพ 15



ภาพ 15 โครงสร้างแสดงพิกัดของจุดในระนาบ x, y โดยใช้ดัชนี (i, j)

โดยอาศัยกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์เราสามารถประมาณค่าสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ของฟังก์ชันคลื่นสำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้ดัชนี (i, j) จากการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันในแต่ละจุดดังนี้

$$\frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} \Psi_{i,j} = \frac{[\Psi_{i+1,j} + \Psi_{i-1,j} - 2\Psi_{i,j}]}{\tilde{h}_x^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} \Psi_{i,j} = \frac{[\Psi_{i,j+1} + \Psi_{i,j-1} - 2\Psi_{i,j}]}{\tilde{h}_y^2} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.6) และการประมาณค่าสมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันคลื่นโดยใช้ดัชนี (i, j) เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\left[\frac{-1}{\tilde{m}^*} \left(\frac{[\Psi_{i+1,j} + \Psi_{i-1,j} - 2\Psi_{i,j}]}{\tilde{h}_x^2} + \frac{[\Psi_{i,j+1} + \Psi_{i,j-1} - 2\Psi_{i,j}]}{\tilde{h}_y^2} \right) + \tilde{V}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi_{i,j}(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{E} \Psi_{i,j}(\tilde{x}, \tilde{y}) \quad (3.9)$$

เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชันคลื่นที่ตำแหน่ง (i, j) มีค่าเท่ากับ $\Psi_{i,j}$ และพลังงานศักย์ที่ตำแหน่ง (i, j) มีค่าเท่ากับ $V_{i,j}$ ซึ่งเราสามารถหาสมการของฟังก์ชันคลื่น ในตำแหน่ง (i, j) ต่างๆ ของภาพ 15 ได้โดยเริ่มพิจารณาที่ตำแหน่ง $\Psi_{2,1}$ เนื่องจากพลังงานศักย์ที่บริเวณขอบของเปลือกมีค่าเป็นอนันต์ ($V = \infty$) จึงทำให้ฟังก์ชันคลื่นมีค่าเป็นศูนย์ ($\Psi_{1,1}$ $\Psi_{2,2}$ $\Psi_{3,3}$ $\Psi_{4,2}$ $\Psi_{5,1}$ เท่ากับ ศูนย์) ดังนั้นเราจึงพิจารณาเฉพาะที่ตำแหน่ง $\Psi_{2,1}$ $\Psi_{3,1}$ $\Psi_{3,2}$ และ $\Psi_{4,1}$ เท่านั้น

ณ ตำแหน่ง $i=2$ และ $j=1$ สามารถเขียนสมการ $\Psi_{2,1}$ ได้เป็น

$$\left[\frac{2}{\tilde{m}_{2,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} + \frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) + \tilde{V}_{2,1}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi_{2,1} - \frac{1}{\tilde{m}_{3,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} \right) \Psi_{3,1} = \tilde{E} \Psi_{2,1} \quad (3.10)$$

ณ ตำแหน่ง $i=3$ และ $j=1$ สามารถเขียนสมการ $\Psi_{3,1}$ ได้เป็น

$$\left[\frac{2}{\tilde{m}_{3,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} + \frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) + \tilde{V}_{3,1}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi_{3,1} - \frac{1}{\tilde{m}_{3,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} \right) \Psi_{4,1} - \frac{1}{\tilde{m}_{2,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} \right) \Psi_{2,1} - \frac{1}{\tilde{m}_{3,2}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) \Psi_{3,2} = \tilde{E} \Psi_{3,1} \quad (3.11)$$

ณ ตำแหน่ง $i=3$ และ $j=2$ สามารถเขียนสมการ $\Psi_{3,2}$ ได้เป็น

$$\left[\frac{2}{\tilde{m}_{3,2}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} + \frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) + \tilde{V}_{3,2}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi_{3,2} - \frac{1}{\tilde{m}_{3,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) \Psi_{3,1} = \tilde{E} \Psi_{3,2} \quad (3.12)$$

ณ ตำแหน่ง $i=4$ และ $j=1$ สามารถเขียนสมการ $\Psi_{4,1}$ ได้เป็น

$$\left[\frac{2}{\tilde{m}_{4,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} + \frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) + \tilde{V}_{4,1}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right] \Psi_{4,1} - \frac{1}{\tilde{m}_{3,1}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} \right) \Psi_{3,1} = \tilde{E} \Psi_{4,1} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.10) ถึง (3.13) สามารถเขียนแฮมิลโทเนียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์เพื่อหาค่าพลังงานในรูปแบบไร้นิยามได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \delta_{2,1} - \tilde{E} & \mu_{3,1} & 0 & 0 \\ \mu_{2,1} & \delta_{3,1} - \tilde{E} & 0 & \mu_{4,1} \\ 0 & \omega_{3,1} & \delta_{3,2} - \tilde{E} & 0 \\ 0 & \mu_{3,1} & 0 & \delta_{4,1} - \tilde{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{2,1} \\ \Psi_{3,1} \\ \Psi_{3,2} \\ \Psi_{4,1} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.14)$$

เมื่อ $\delta_{i,j} = \tilde{V}_{i,j} + \frac{2}{\tilde{m}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} + \frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right)$ $\mu_{i,j} = - \left[\frac{1}{\tilde{m}_{i,j}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_x^2} \right) \right]$ และ $\omega_{i,j} = - \left[\frac{1}{\tilde{m}_{i,j}^*} \left(\frac{1}{\tilde{h}_y^2} \right) \right]$ โดยถ้า

แบ่งจำนวนช่องเป็น N_x และ N_y ใดๆ เมทริกซ์ที่ได้จะมีขนาด $\frac{[(N_x - 1) \times N_y]}{2}$ หลังจากได้เมทริกซ์ของแฮมิลโทเนียนที่ตำแหน่ง (i, j) ต่างๆ ไปคำนวณหาค่าพลังงานและฟังก์ชันคลื่นโดยใช้โปรแกรม Matlab

บทที่ 4

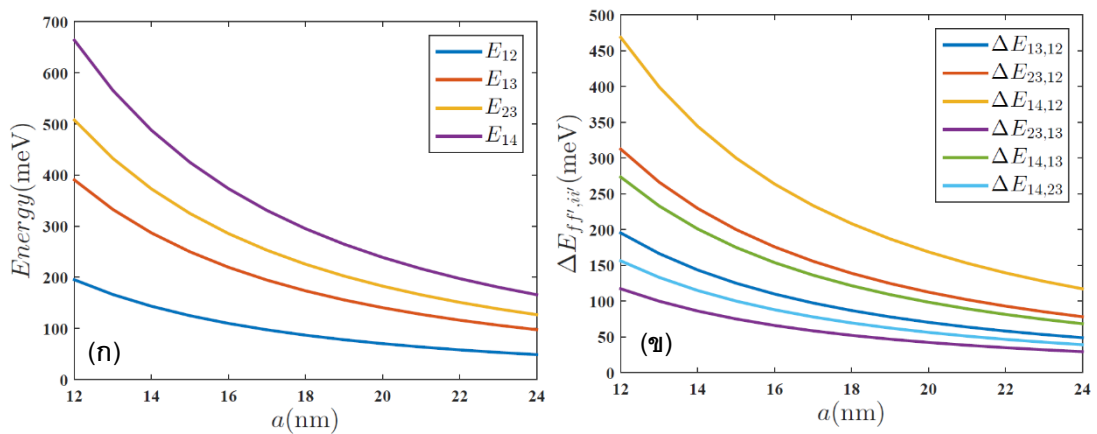
ผลการวิจัย

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการศึกษาพลังงาน ฟังก์ชันคลื่น ออสซิลเลเตอร์สเทรง และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิลีكتروน 4 สถานะแรก ซึ่งถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง ซึ่งแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

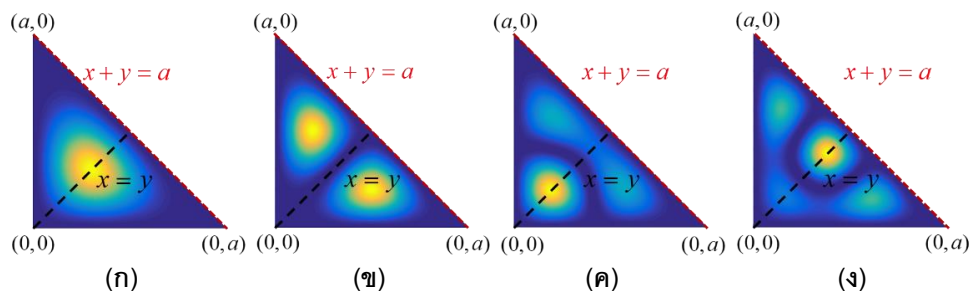
4.1.1 พลังงานและฟังก์ชันคลื่น

ผลการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของสถานะที่ถูกขัง 4 สถานะแรก ได้แก่ สถานะพื้น (E_{12}) สถานะกระตุ้นที่ 1 (E_{13}) สถานะกระตุ้นที่ 2 (E_{23}) และสถานะกระตุ้นที่ 3 (E_{14}) โดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ในการแก้สมการชโรดิงเจอร์ พบว่าเมื่อขนาด a เพิ่มขึ้น พลังงานในแต่ละสถานะจะมีแนวโน้มลดลงแสดงดังภาพ 16(ก) ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการลดพื้นที่การกระจายตัวของอิลีكتروนและเป็นไปตามสมการที่ (2.21) ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าพลังงานของแต่ละสถานะมีค่าขึ้นกับขนาดของ a หลังจากคำนวณหาผลต่างของพลังงานทั้ง 4 สถานะ จะได้ผลต่างของชั้นพลังงานทั้งหมด 6 ค่า ดังภาพ 16(ข) ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่อิลีكتروนต้องใช้ในการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ ii' ไปสถานะ ff' ($\Delta E_{ff',ii'} = E_{ff'} - E_{ii'}$) โดยเมื่อขนาด a เพิ่มขึ้น $\Delta E_{ff',ii'}$ จะมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน



ภาพ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของด้านประกอบมุมฉาก a กับ (ก) พลังงาน (ข) ผลต่างพลังงาน ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

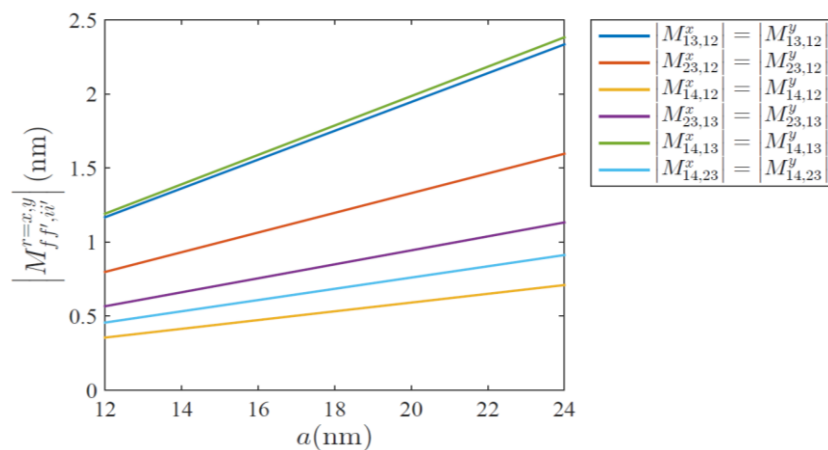
ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น (Probability density of wavefunction ; $|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก 4 สถานะแรก ได้แก่ ฟังก์ชันคลื่นของสถานะพื้น (Ψ_{12}) ฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 1 (Ψ_{13}) ฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 2 (Ψ_{23}) และฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 3 (Ψ_{14}) แสดงดังภาพ 17 พบว่ามีลักษณะที่สมมาตรกันตามแนวเส้นประสีดำ $x = y$ และมีค่าเป็นศูนย์บนเส้นตรง $x + y = a$ หรือแนวเส้นประสีแดงตามเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด โดยบริเวณสีเหลืองแสดงถึงตำแหน่งที่อิเล็กตรอนมีโอกาสอาศัยอยู่มาก ในขณะที่บริเวณสีน้ำเงินแสดงถึงตำแหน่งที่อิเล็กตรอนมีโอกาสอาศัยอยู่น้อย



ภาพ 17 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น ($|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก (ก) Ψ_{12} (ข) Ψ_{13} (ค) Ψ_{23} และ (ง) Ψ_{14}

4.1.2 ออสซิลเลเตอร์สเทรง

เมื่อพิจารณาโอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากการดูดกลืนพลังงานของแสงโพลาไรซ์หรือออสซิลเลเตอร์สเทรง ($P_{ff',ii'}^{r=x,y}$) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.8) โดยค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับ $\Delta E_{ff',ii'}$ และค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลิเมนต์ ($|M_{ff',ii'}^{r=x,y}|$) ซึ่ง $|M_{ff',ii'}^{r=x,y}|$ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตความหนาแน่นไดโพลของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ($\Psi_{ff',x}^* \Psi_{ii'}$ หรือ $\Psi_{ff',y}^* \Psi_{ii'}$) พบว่าค่าไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลิเมนต์ของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง ($ii' \rightarrow ff'$) เมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากัน ($|M_{ff',ii'}^x| = |M_{ff',ii'}^y|$) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น ดังภาพ 18 จึงส่งผลให้ $P_{ff',ii'}$ ของแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากันดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของ a ไม่ส่งผลต่อโอกาสการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนแต่อย่างใดเนื่องจากเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า $\Delta E_{ff',ii'}$ ลดลงดังในภาพ 16(ข) แต่ค่าของ $|M_{ff',ii'}|$ เพิ่มขึ้น



ภาพ 18 ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลิเมนต์เมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และแนวแกน y ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

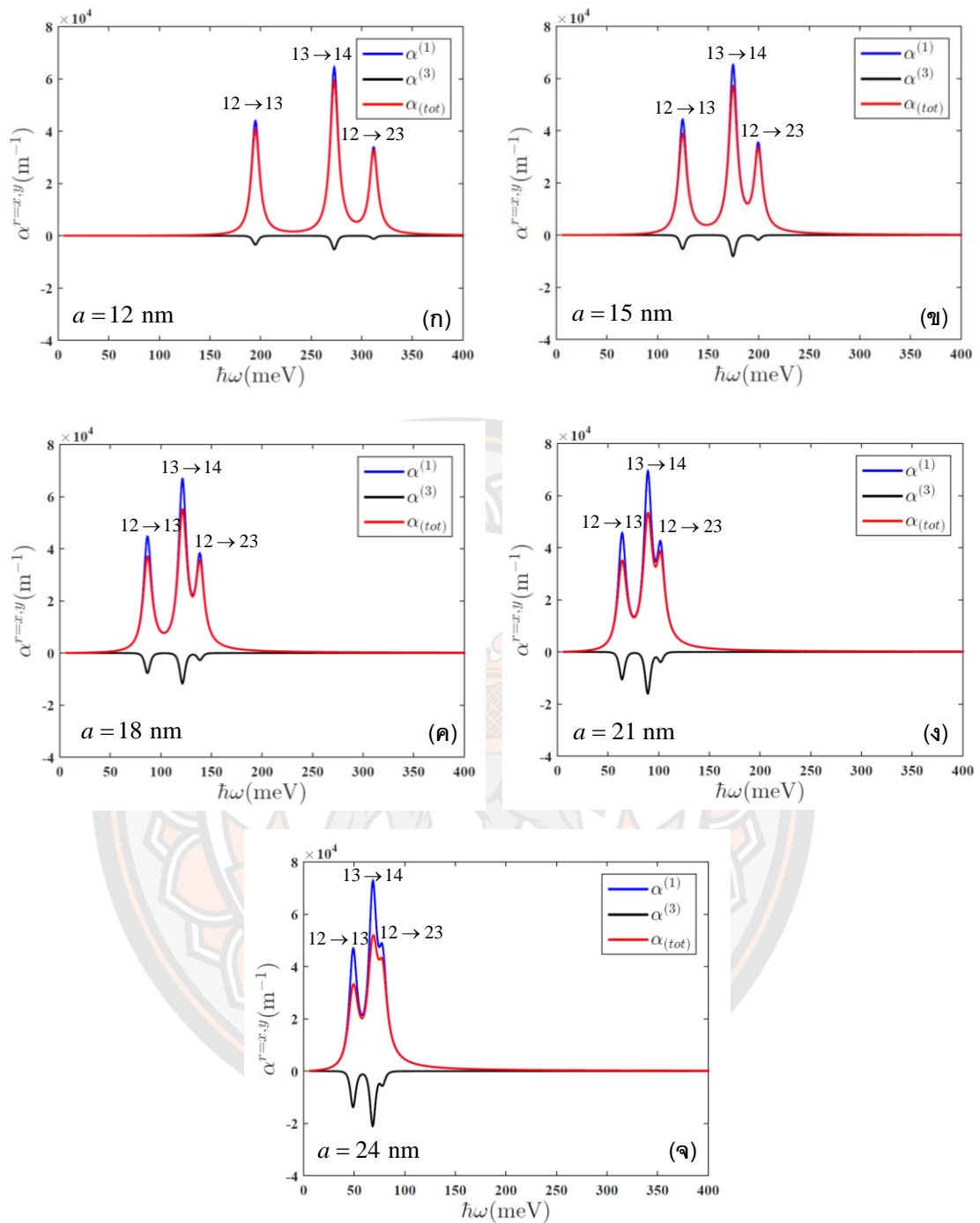
ตาราง 1 โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากการดูดกลืนพลังงานจากแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

สถานะเริ่มต้น (ii)	สถานะสุดท้าย (ff')	$P_{ff',ii}^x$	$P_{ff',ii}^y$
12	13	0.4669	0.4669
12	23	0.3491	0.3491
12	14	0.1034	0.1034
13	23	0.2402	0.2402
13	14	0.6806	0.6806
23	14	0.0570	0.0570

4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

สำหรับหัวข้อนี้ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก เมื่อด้านประกอบมุมฉาก a มีขนาด 12 15 18 20 และ 24 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 19 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ $\epsilon_R = 12.53$ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ $\sigma = 3 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$ $\Gamma = 0.14 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ $I = 0.6 \text{ Mw/cm}^2$ และ $m^* = 0.067m_e$ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะเริ่มต้น (ii) ไปยังสถานะสุดท้าย (ff') เมื่อได้รับการกระตุ้นโดยแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y แล้วทำให้เกิดการดูดกลืนแสงมากที่สุด พบว่าจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้น ($\alpha^{(1)}$) ในทุกสถานะที่พิจารณา ($12 \rightarrow 13$ $12 \rightarrow 23$ $13 \rightarrow 14$) เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $\hbar\omega = \Delta E_{ff',ii}$ ดังสมการที่ (2.14) โดยจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนี้แสดงถึงพลังงานจากแสงที่อิเล็กตรอนได้รับแล้วทำให้เกิดการดูดกลืนแสงปริมาณมากที่สุด ทั้งนี้ $\alpha^{(1)}(\omega)$ จะมีค่าเป็นบวก และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงทั้งแบบไม่เป็นเชิงเส้น ($\alpha^{(3)}(\omega, I)$) มีค่าเป็นลบเสมอ แต่จุดสูงสุดของ $\alpha^{(1)}(\omega)$ และ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของสถานะ $13 \rightarrow 14$ มีค่า $\alpha^{(1)}(\omega)$ และ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสถานะ $12 \rightarrow 13$ และ $12 \rightarrow 23$ ในทุกขนาดของ a ที่พิจารณา

แสดงถึงเมื่อแสงโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y มีพลังงานที่เหมาะสม อิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากจะเปลี่ยนแปลงสถานะจาก $ii' = 13$ ไปยัง $ff' = 14$ มากที่สุด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากัน ($\alpha^x = \alpha^y$) เนื่องจาก $P_{ff',ii'}^x = P_{ff',ii'}^y$ ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น ค่า $\alpha^{(1)}(\omega)$ และ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ จะมีพฤติกรรมแบบเรดชิฟต์ (red shift) กล่าวคือเมื่อ a เพิ่มขึ้นพลังงานโฟตอนที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากจะมีค่าลดลง และทำให้ระยะระหว่างจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนลดลงเช่นเดียวกัน โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อ a มีขนาด 24 นาโนเมตร ตำแหน่งจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของการเปลี่ยนแปลงสถานะ $13 \rightarrow 14$ และ $12 \rightarrow 23$ เกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันอย่างมาก ดังแสดงในภาพ 19 ซึ่งสอดคล้องกับค่าผลต่างพลังงาน ($\Delta E_{ff',ii'}$) ในภาพ 16(ข) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสงรวม (α_{tot}) พบว่าเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น จุดสูงสุดของ α_{tot} มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อ a มีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าของ $\Delta E_{ff',ii'}$ ลดลง และการลดลงของ $\Delta E_{ff',ii'}$ นี้ส่งผลให้จุดต่ำสุดของ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ ในภาพ 19 มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามสมการที่ (2.11) ดังนั้นจึงทำให้ α_{tot} ซึ่งเกิดจากผลรวมของ $\alpha^{(1)}(\omega)$ และ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ มีค่าลดลง

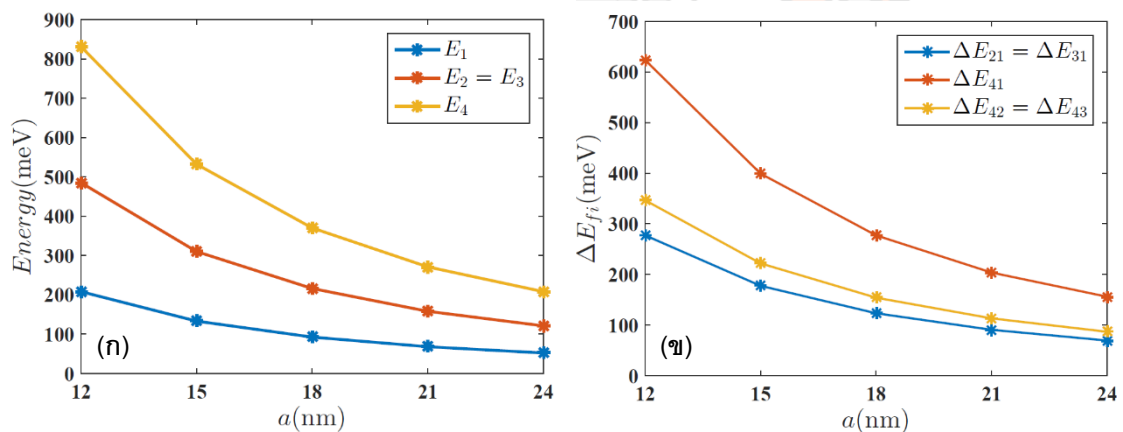


ภาพ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y โดยที่ a มีขนาดเป็น (ก) 12 (ข) 15 (ค) 18 (ง) 21 และ (จ) 24 นาโนเมตร

4.2 ผลการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

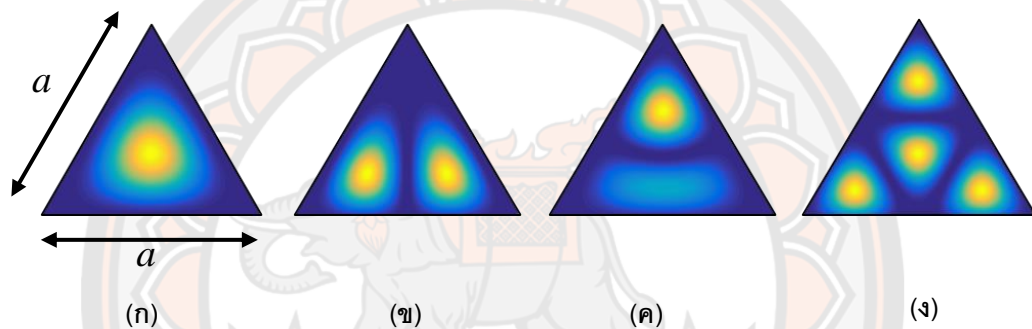
4.2.1 พลังงานและฟังก์ชันคลื่น

ผลการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของสถานะที่ถูกขัง 4 สถานะแรกได้แก่ สถานะพื้น (E_1) สถานะกระตุ้นที่ 1 (E_2) สถานะกระตุ้นที่ 2 (E_3) และ สถานะกระตุ้นที่ 3 (E_4) ตามลำดับ โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการชโรดิงเงอร์จากกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ พบว่าเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น พลังงานในแต่ละสถานะจะมีแนวโน้มลดลง และพลังงานของสถานะกระตุ้นที่ 1 เท่ากับพลังงานของสถานะกระตุ้นที่ 2 ($E_2 = E_3$) ซึ่งแสดงดังภาพ 20(ก) เมื่อคำนวณหาผลต่างของพลังงานทั้ง 4 สถานะ ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะ i ไปยังสถานะ f ($\Delta E_{fi} = E_f - E_i$) พบว่าเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น ผลต่างของพลังงานในแต่ละสถานะจะมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าผลต่างของพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เท่ากับผลต่างของพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 ($\Delta E_{21} = \Delta E_{31}$) และผลต่างของพลังงานจากสถานะกระตุ้นที่ 1 ไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 เท่ากับผลต่างของพลังงานจากสถานะกระตุ้นที่ 2 ไปยังสถานะกระตุ้นที่ 3 ($\Delta E_{42} = \Delta E_{43}$) เป็นผลอันเนื่องมาจาก $E_2 = E_3$ ดังแสดงในภาพ 20(ข)



ภาพ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ a กับ (ก) พลังงาน (ข) ผลต่างพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น ($|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า 4 สถานะแรก ได้แก่ ฟังก์ชันคลื่นของสถานะพื้น (Ψ_1) ฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 1 (Ψ_2) ฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 2 (Ψ_3) และฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 3 (Ψ_4) แสดงดังภาพ 21 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 1 ($|\Psi_2|^2$) และความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 2 ($|\Psi_3|^2$) มีลักษณะที่แตกต่างกัน แต่พลังงานของสถานะกระตุ้นที่ 1 เท่ากับสถานะกระตุ้นที่ 2 ดังภาพ 20(ก) ซึ่งสถานะเหล่านี้จะถูกเรียกว่าสถานะดีเจนเนอเรท (Degenerate state)

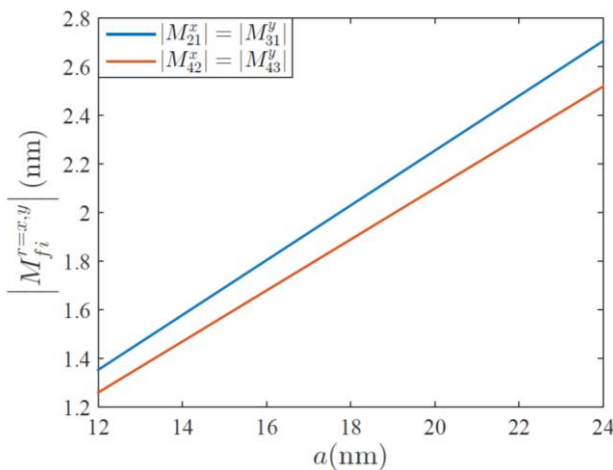


ภาพ 21 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น ($|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า 4 สถานะแรก (ก) Ψ_1 (ข) Ψ_2 (ค) Ψ_3 และ (ง) Ψ_4 ที่มีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ a

4.2.2 ออสซิลเลเตอร์สเทรง

โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานจากแสงหรือออสซิลเลเตอร์สเทรง ($P_{fi}^{r=x,y}$) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับผลต่างของพลังงาน (ΔE_{fi}) และค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์ ($|M_{fi}^{r=x,y}|$) ของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะสุดท้าย ($i \rightarrow f$) โดยพบว่าค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะเป็นการพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสถานะของ $1 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 4$ และ $3 \rightarrow 4$ เนื่องจากไม่พบการเปลี่ยนแปลงสถานะของ $1 \rightarrow 4$ และ $2 \rightarrow 3$ โดยที่ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์ของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เมื่อแสงตกกระทบโพลาริซในแนวแกน x เท่ากับการเปลี่ยนแปลงจาก

สถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน y ($|M_{21}^x| = |M_{31}^y|$) และค่าสัมบูรณ์ไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์ของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะกระตุ้นที่ 1 ไปยังสถานะกระตุ้นที่ 3 เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน x เท่ากับการเปลี่ยนแปลงจากสถานะกระตุ้นที่ 2 ไปยังสถานะกระตุ้นที่ 3 เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน y ($|M_{42}^x| = |M_{43}^y|$) ดังแสดงในภาพ 22



ภาพ 22 ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกซ์เอลิเมนต์เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน x และแนวแกน y ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

และเนื่องจากภาพ 20(ข) ผลต่างของพลังงาน $\Delta E_{21} = \Delta E_{31}$ และ $\Delta E_{42} = \Delta E_{43}$ จึงส่งผลให้ค่าออสซิลเลเตอร์สเตรง ($P_{fi}^{r=x,y}$) ของการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน x เท่ากับการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน y ($P_{21}^x = P_{31}^y$) และในทำนองเดียวกันก็ส่งผลให้ $P_{42}^x = P_{43}^y$ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยที่จะไม่พบโอกาสของอิเล็กตรอนจากการเปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 เมื่อแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน y ($P_{21}^y = 0$) และ $P_{31}^x = 0$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้พลังงานจากแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน y จะไม่มีโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 1 และเปลี่ยนแปลงจากสถานะกระตุ้นที่ 1 ไปยังสถานะกระตุ้นที่ 3 ในขณะที่เมื่อให้พลังงานจากแสงตกกระทบบโพลาริซในแนวแกน x จะไม่มีโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่ 2 และเปลี่ยนแปลงจากสถานะกระตุ้นที่ 2 ไปยังสถานะกระตุ้นที่ 3

ตาราง 2 โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากการดูดกลืนพลังงานจากแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

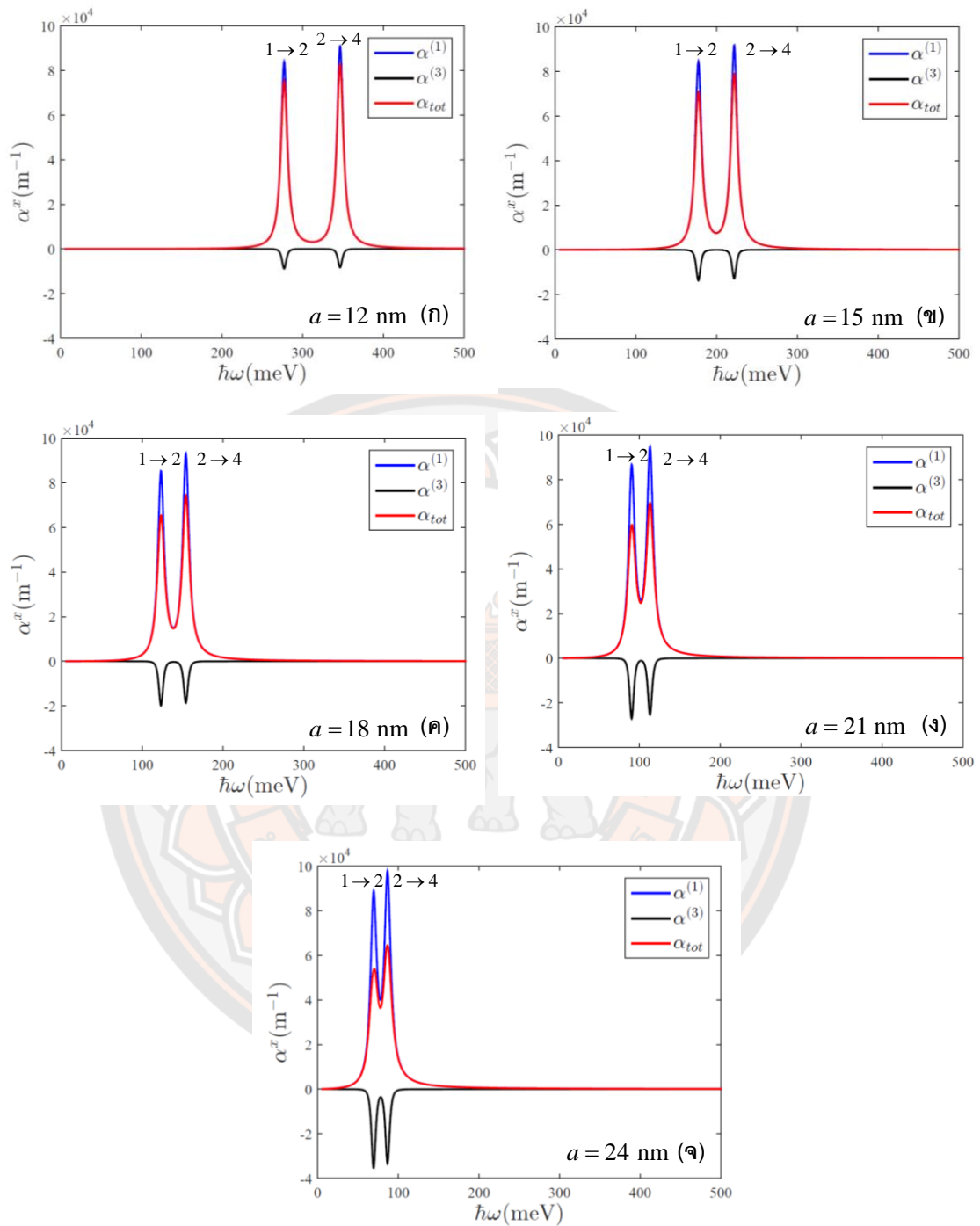
สถานะเริ่มต้น (i)	สถานะสุดท้าย (f)	P_{fi}^x	P_{fi}^y
1	2	0.8917	0.0000
1	3	0.0000	0.8917
2	4	0.9660	0.0000
3	4	0.0000	0.9660

4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

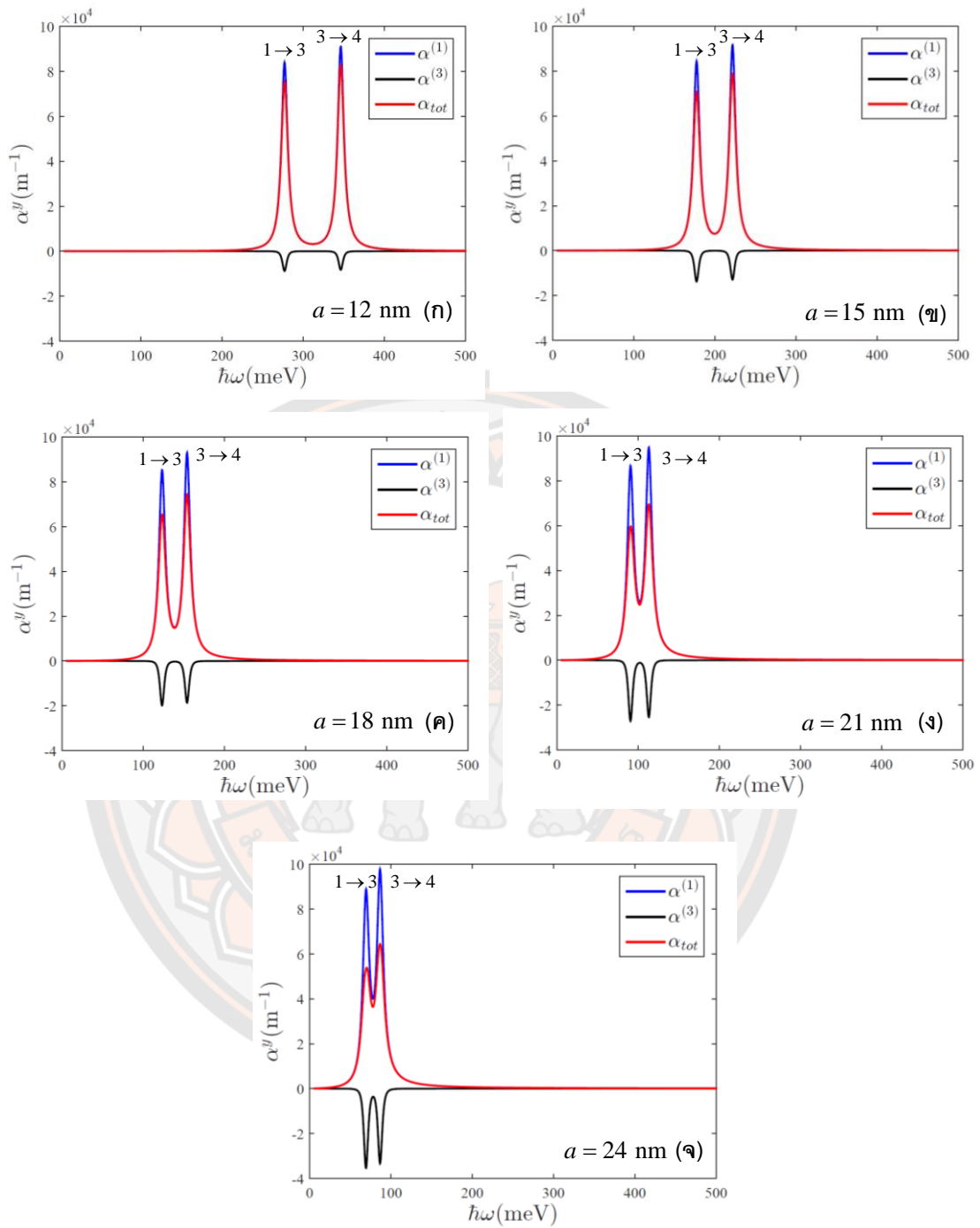
หัวข้อนี้ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อ a มีขนาดเป็น 12 15 18 21 และ 24 นาโนเมตร ดังภาพ 23 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ $\epsilon_r = 12.53$ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ $\sigma = 3 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ $\Gamma = 0.14 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ $I = 0.6 \text{ Mw/cm}^2$ และ $m^* = 0.067m_e$ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะเริ่มต้น (i) ไปยังสถานะสุดท้าย (f) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x ดังแสดงในภาพ 23 และในแนวแกน y ดังแสดงในภาพ 24 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีความสอดคล้องกับค่าออสซิลเลเตอร์สแตรง ซึ่งพบว่าจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเป็นเชิง ($\alpha^{(1)}$) จะมีค่าเป็นบวกและเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง ΔE_{fi} ของทุกสถานะที่พิจารณา ในขณะที่จุดต่ำสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ($\alpha^{(3)}$) จะมีค่าเป็นลบ และจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวม (α_{tot}) ซึ่งเกิดจากผลรวมระหว่าง $\alpha^{(1)}(\omega)$ และ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ ก็เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งเดียวกัน โดยพบว่าเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน x จะพบเพียงการเปลี่ยนแปลงสถานะ $1 \rightarrow 2$ และ $2 \rightarrow 4$ เท่านั้น ในขณะที่เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยแสงที่โพลาไรซ์ในแนวแกน y จะพบเพียงการเปลี่ยนแปลงสถานะ $1 \rightarrow 3$ และ $3 \rightarrow 4$ เท่านั้น โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะ $1 \rightarrow 2$ และ $1 \rightarrow 3$ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเท่ากัน ($\alpha_{21}^x = \alpha_{31}^y$) ในขณะที่ α_{21}^y และ α_{31}^x จะมีค่าเป็นศูนย์ และการเปลี่ยนแปลงสถานะ $2 \rightarrow 4$ และ $3 \rightarrow 4$ ก็มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเท่ากันเช่นกัน

$(\alpha_{42}^x = \alpha_{43}^y)$ ในทำนองเดียวกัน α_{42}^y และ α_{43}^x ก็จะมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เมื่อ a มีขนาดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีพฤติกรรมแบบเรดชิฟท์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tiutiunnyk et.al (2014) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า α_{tot} จะมีแนวโน้มลดลงซึ่งเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของ $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ และทำให้ระยะระหว่างจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนลดลงเช่นเดียวกัน





ภาพ 23 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาริซในแนวแกน x โดยที่ a มีขนาดเป็น (ก) 12 (ข) 15 (ค) 18 (ง) 21 และ (จ) 24 นาโนเมตร



ภาพ 24 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาริซันในแนวแกน y โดยที่ a มีขนาดเป็น (ก) 12 (ข) 15 (ค) 18 (ง) 21 และ (จ) 24 นาโนเมตร

4.3 ผลการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางหรือโครงสร้างแบบแกน-เปลือก

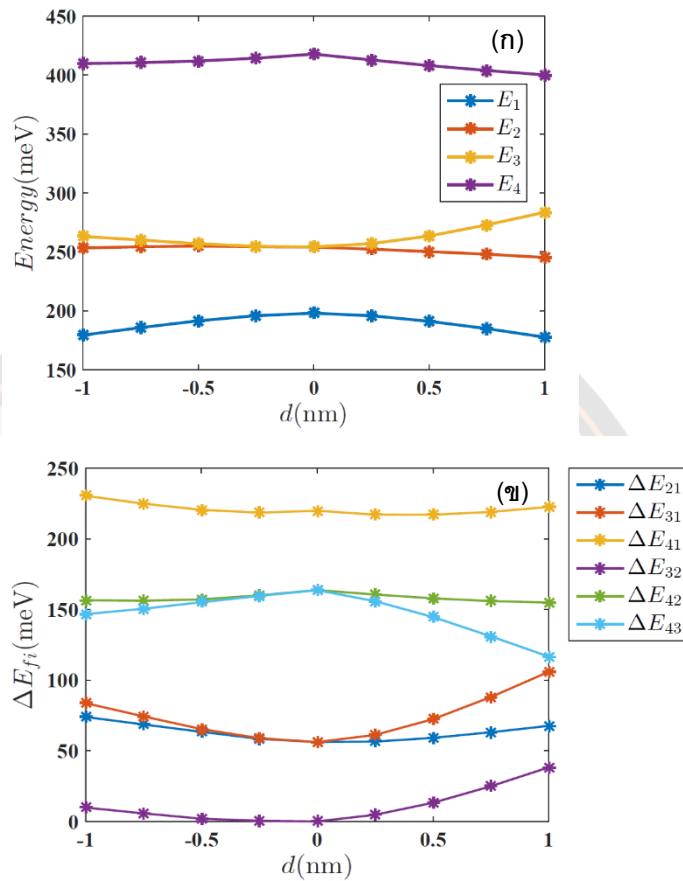
การศึกษาในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ทำให้เราทราบว่า $\alpha^x = \alpha^y$ เสมอ ทั้งในกรณีเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากและสามเหลี่ยมด้านเท่า เพื่อให้ได้ค่า α^x และ α^y ที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของการเลื่อนตำแหน่ง (d) แทนการศึกษาผลของขนาดของระบบ (a)

โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง โดยที่มีระยะการเลื่อนตำแหน่ง (d) เป็น -1.00 -0.75 -0.50 -0.25 0.00 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 นาโนเมตร โดยเครื่องหมายลบแสดงถึงการเลื่อนตำแหน่งของแกนกลางลง ในขณะที่ 0.00 นาโนเมตร แสดงถึงเมื่อแกนกลางอยู่ตรงบริเวณจุดศูนย์กลางของสามเหลี่ยมด้านเท่าภายนอกหรือเปลือกของโครงสร้าง ดังภาพ 14 ซึ่งการเลือกพิจารณาเฉพาะการเลื่อนตำแหน่งของแกนในแนวแกน y เนื่องจากการสังเคราะห์โครงสร้างแบบแกนเปลือกนั้น ตำแหน่งของแกนมักจะอยู่บริเวณฐานหรือยอดของพื้นที่หน้าตัดแบบสามเหลี่ยม ดังจะเห็นได้จากภาพการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมจากงานวิจัยของ Qian et.al (2012) โดยในงานวิจัยของเรานั้นได้กำหนดให้โครงสร้างเปลือกเป็น GaAs ซึ่งมีขนาด (a) เท่ากับ 18 นาโนเมตร และโครงสร้างแกนเป็น $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ซึ่งมีขนาด (b) เท่ากับ 6 นาโนเมตร

4.3.1 พลังงานและฟังก์ชันคลื่น

ผลการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของสถานะที่ถูกขัง 4 สถานะแรก ได้แก่ สถานะพื้น (E_1) สถานะกระตุ้นที่ 1 (E_2) สถานะกระตุ้นที่ 2 (E_3) และสถานะกระตุ้นที่ 3 (E_4) โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการชโรดิงเงอร์จากกระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ d จะทำให้ E_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่พลังงานจากสถานะอื่นจะมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า E_2 และ E_3 เดิมทีซึ่งเคยมีพลังงานเท่ากันเมื่อแกนกลางอยู่ตรงบริเวณตรงกลางของโครงสร้างเปลือกพอดี ($d = 0.00$) มีค่าไม่เท่ากันหรือค่าพลังงานงานเกิดการแยกออกจากกันเมื่อระยะ d เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงดังภาพ 25(ก) เป็นผลเนื่องจากการรบกวนระบบของการเลื่อนตำแหน่งของแกนกลาง ต่อมาเมื่อคำนวณหาผลต่างของพลังงานทั้ง 4 สถานะเป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องการในการเปลี่ยนสถานะจาก i ไปยังสถานะ f ($\Delta E_{fi} = E_f - E_i$) พบว่าเมื่อ $d = 0.00$ นาโนเมตร $\Delta E_{21} = \Delta E_{31}$ และ $\Delta E_{42} = \Delta E_{43}$ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

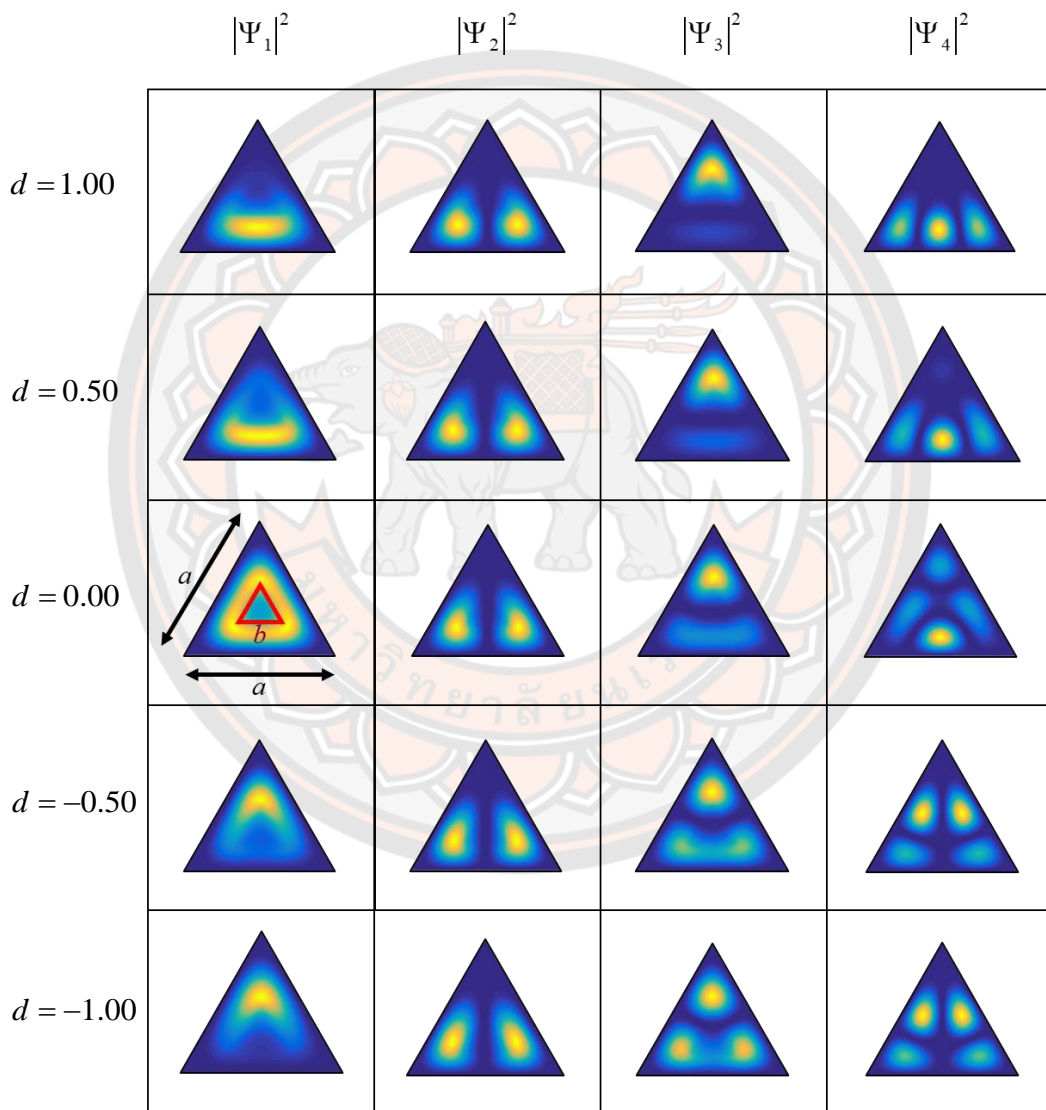
แต่เมื่อระยะ d เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ค่าผลต่างของพลังงานเกิดการแยกออกจากกัน ($\Delta E_{21} \neq \Delta E_{31}$, $\Delta E_{42} \neq \Delta E_{43}$) ดังแสดงในภาพ 25(ข)



ภาพ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะ d กับ (ก) พลังงาน (ข) ผลต่างพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง

ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น ($|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง 4 สถานะแรก ได้แก่ ฟังก์ชันคลื่นของสถานะพื้น (Ψ_1) ฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 1 (Ψ_2) ฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 2 (Ψ_3) และฟังก์ชันคลื่นของสถานะกระตุ้นที่ 3 (Ψ_4) เมื่อระยะ d มีค่าเป็น -1.00 -0.50 0.00 0.50 และ 1.00 นาโนเมตร ซึ่งแสดงดังภาพ 26 โดยพบว่าเมื่อเส้นลวดนาโนมีโครงสร้างแบบแกนเปลือกจะส่งผลต่อพฤติกรรมของอิเล็กตรอน เนื่องจากโครงสร้างของระบบนี้ประกอบไปด้วย AlGaAs (แกน) และ GaAs (เปลือก) ซึ่งบริเวณแกนนั้นมีพลังงานศักย์ที่สูงกว่าบริเวณเปลือก ดังนั้นจึงทำเกิดกำแพงศักย์ขึ้นภายในโครงสร้างนี้ และฟังก์ชันคลื่นจึงพยายามกระจาย

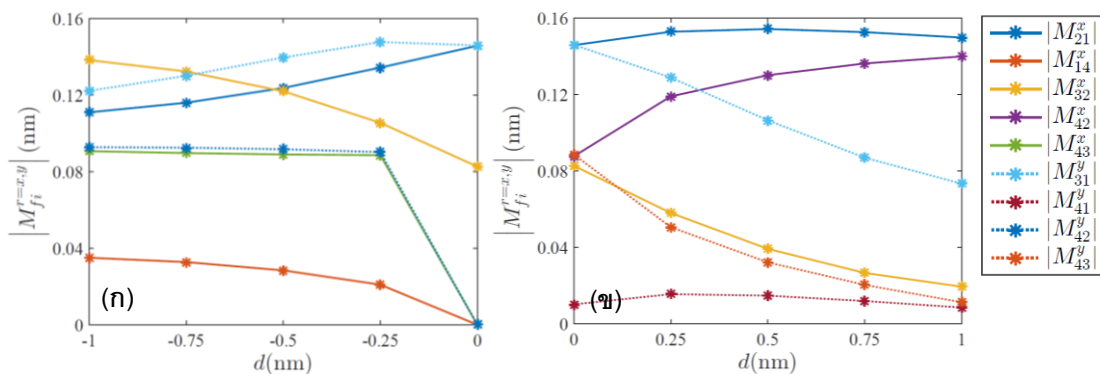
ตัวภายนอกกำแพงศักย์ โดยถ้าแกนอยู่บริเวณตรงกลางของโครงสร้างเปลือยกพอดิ ($d = 0.00$) จะพบว่า $|\Psi|^2$ จะกระจายตัวอยู่ล้อมรอบบริเวณแกน แต่เมื่อตำแหน่งของแกนเปลี่ยนไป ($d \neq 0.00$) จะส่งผลให้ฟังก์ชันคลื่นเกิดการกระจายตัวเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณแกนที่มีพลังงานศักย์ สูงกว่า โดยจะเห็นว่า $|\Psi|^2$ เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อค่าออสซิลเลเตอร์สเทรง และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่อไปนั่นเอง



ภาพ 26 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของฟังก์ชันคลื่น ($|\Psi|^2$) ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อระยะ d เท่ากับ -1.00 -0.50 0.00 0.50 และ 1.00 นาโนเมตร

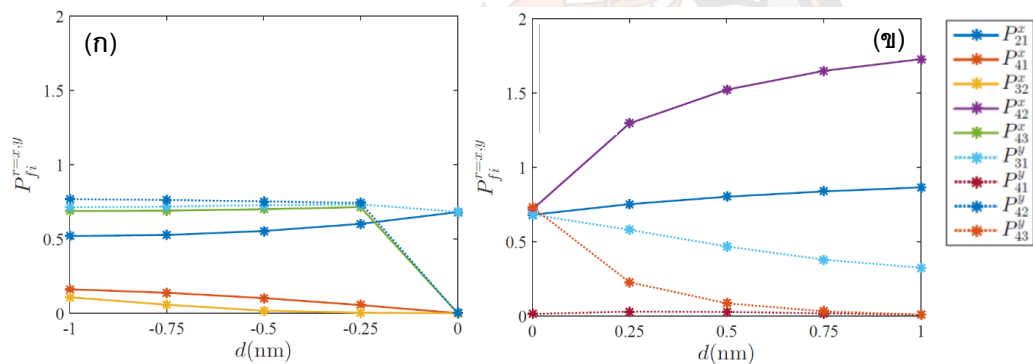
4.3.2 ออสซิลเลเตอร์สเทรง

การศึกษาโอกาสการของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากการดูดกลืนพลังงานของแสงโพลาไรซ์หรือออสซิลเลเตอร์สเทรงในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางจากสถานะเริ่มต้น (i) ไปยังสถานะสุดท้าย (f) โดยแสงที่โพลาไรซ์ในทิศ $r=x, y$ หรือ $(i \rightarrow f)^{r=x,y}$ พบว่าเมื่อตำแหน่งแกนอยู่บริเวณตรงกลาง ($d=0.00$) ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลิเมนต์ ($|M_{fi}^{r=x,y}|$) ของ $|M_{21}^x|=|M_{31}^y|$ และ $|M_{42}^x|=|M_{43}^y|$ ซึ่งคล้ายกับในกรณีของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่เมื่อระยะ d มีค่าเปลี่ยนแปลงไป พบว่าค่า $|M_{fi}^{r=x,y}|$ ของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานที่เคยเท่ากันเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากฟังก์ชันคลื่นจะพยายามกระจายตัวเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณแกน จึงส่งผลให้ $|\Psi|^2$ เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ $|M_{fi}^{r=x,y}|$ เกิดจากการอินทิเกรตความหนาแน่นไดโพลของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ($\Psi_{ff}^* x \Psi_{ii}$ หรือ $\Psi_{ff}^* y \Psi_{ii}$) ซึ่งแสดงดังภาพ 27 โดยที่เมื่อ d มีค่าเป็นลบ จะไม่พบค่า $|M_{fi}^{r=x,y}|$ ของการเปลี่ยนแปลงสถานะของ $(2 \rightarrow 4)^x$ $(1 \rightarrow 4)^y$ และ $(3 \rightarrow 4)^y$ ดังภาพ 27(ก) ในขณะที่เมื่อ d มีค่าเป็นบวก จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงสถานะของ $(3 \rightarrow 4)^x$ $(1 \rightarrow 4)^x$ และ $(2 \rightarrow 4)^y$ ดังภาพ 27(ข)



ภาพ 27 ค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชั่นเมทริกซ์เอลิเมนต์เมื่อแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y ของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางเมื่อ (ก) ระยะ d มีค่าเป็นลบ (ข) ระยะ d มีค่าเป็นบวก

อย่างที่เคยกล่าวไปในหัวข้อที่ 4.1.2 แล้วว่า $|M_{fi}^{r=x,y}|$ และ ΔE_{fi} เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งต่อต่อค่าออสซิลเลเตอร์สแตรง จากภาพ 28 พบว่าเมื่อ $d=0.00$ นาโนเมตร ค่า $P_{21}^x = P_{31}^y$ และ $P_{42}^x = P_{43}^y$ แต่เมื่อระยะ d เปลี่ยนแปลง จะทำให้ค่า $P_{fi}^{r=x,y}$ ที่เคยเท่ากันจะไม่เท่ากันอีกต่อไป และเมื่อ d มีค่าเป็นลบ จะพบค่าของ P_{43}^x และ P_{32}^x ที่เคยมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อระยะ $d \geq 0.00$ โดยอิเล็กตรอนมีโอกาที่จะมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้น (i) ไปยังสถานะสุดท้าย (f) เมื่อได้รับแสงตกกระทบโพลาไรซ์ทั้งในแนวแกน x และ y ดังแสดงในภาพ 28(ก) แต่เมื่อ d มีค่าเป็นบวก จะพบค่า P_{43}^y และ P_{41}^y ซึ่งแต่เดิมเคยมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ d มีค่าเป็นลบ โดยที่เมื่อได้รับพลังงานจากแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x จะพบโอกาสการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะสุดท้ายมากกว่าเมื่อได้รับพลังงานจากแสงตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน y อย่างชัดเจน และค่า P_{42}^x จะมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในภาพ 28(ข)



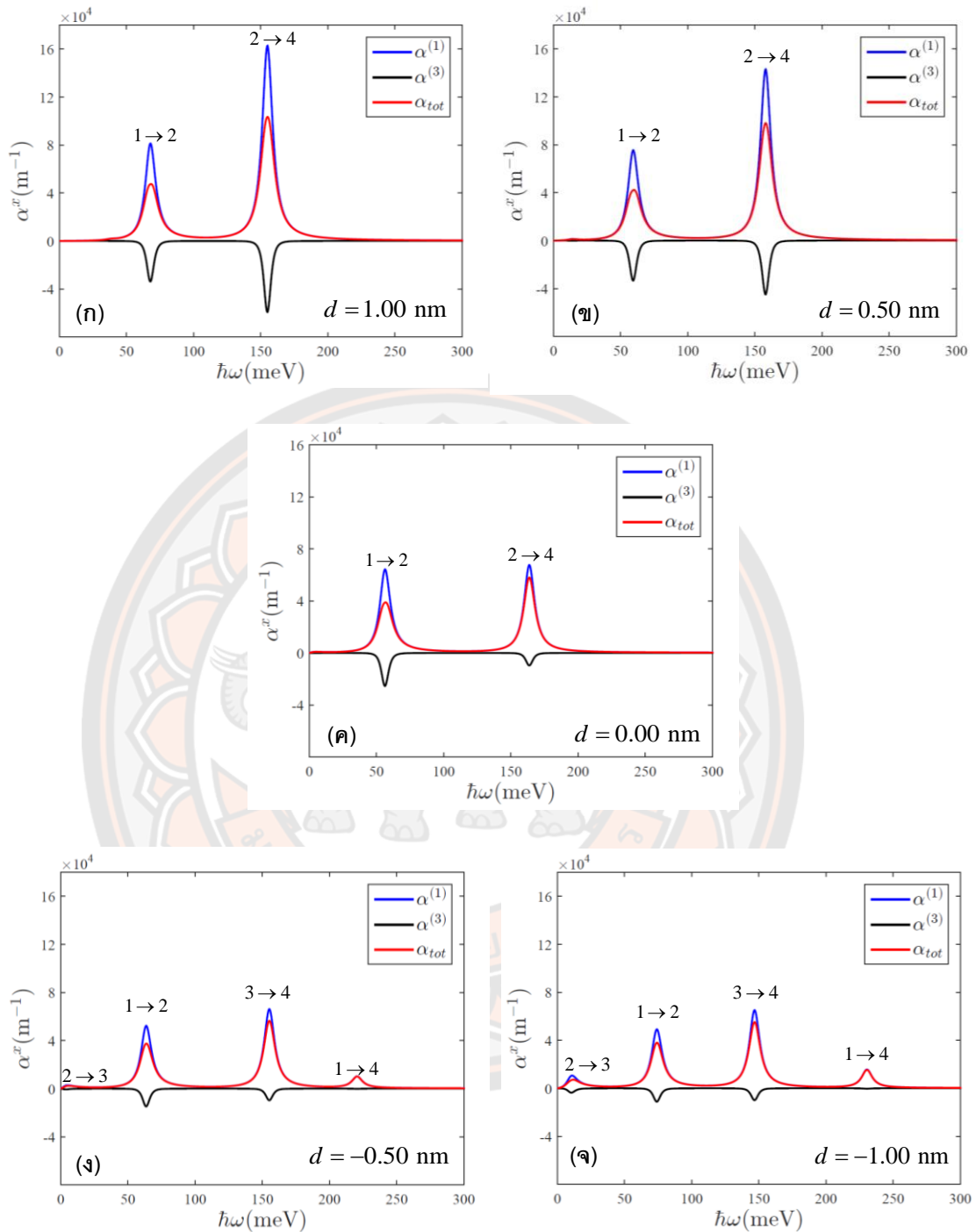
ภาพ 28 โอกาสของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากการดูดกลืนพลังงานจากแสงที่โพลาไรซ์แนวแกน x และ y ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางเมื่อ (ก) ระยะ d เป็นลบ (ข) ระยะ d เป็นบวก

4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

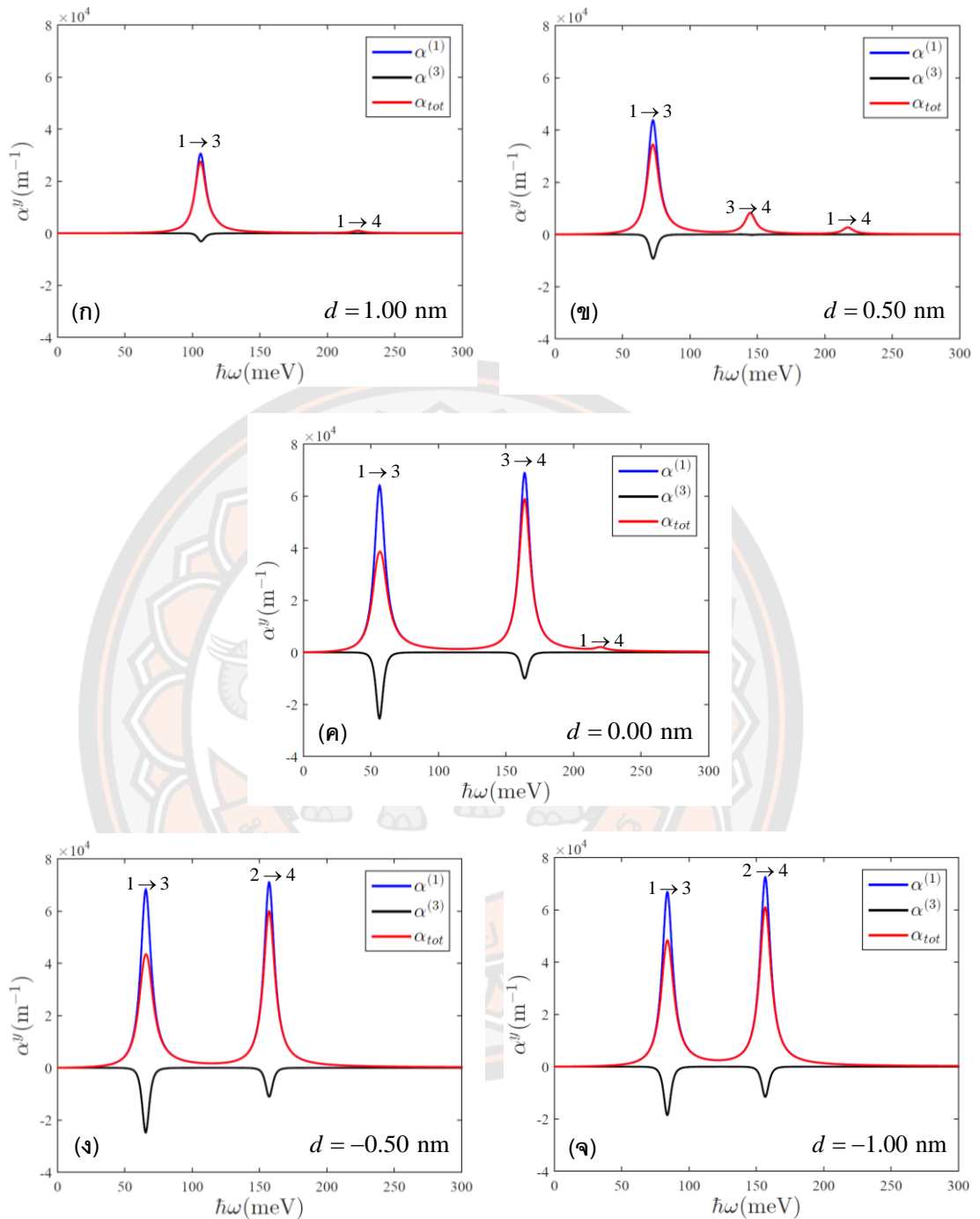
ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลางเมื่อระยะ d เป็น -1.00 -0.50 0.00 0.50 และ 1.00 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ ดังนี้ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ $\epsilon_R = 12.53$ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ $\sigma = 3 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ $\Gamma = 0.14 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ $I = 0.6 \text{ Mw/cm}^2$ และ $m^* = 0.067m_e$ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะสุดท้าย ($i \rightarrow f$) ^{$r=x,y$} พบว่าจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเชิงเส้น ($\alpha^{(1)}$) มีค่าเป็นบวก และจุดต่ำสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบไม่เป็นเชิง

เส้น $(\alpha^{(3)})$ จะมีค่าเป็นลบ โดยที่ค่าสูงสุดของ $\alpha^{(1)}(\omega)$ จะเกิดที่ตำแหน่ง ΔE_{ji} ของทุกสถานะที่พิจารณา เช่นเดียวกับเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากและสามเหลี่ยมด้านเท่า สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเมื่อให้แสงตกกระทบโพลาริซในแนวแกน x (α^x) แสดงดังภาพ 29 จะเห็นว่าเมื่อ $d=0.00$ และมีค่าเป็นบวกจะพบเพียงการเปลี่ยนแปลงสถานะ $(1 \rightarrow 2)^x$ และ $(2 \rightarrow 4)^x$ เท่านั้น แต่เมื่อ d มีค่าเป็นลบ จะพบทั้งการเปลี่ยนแปลงสถานะ $(1 \rightarrow 2)^x$ $(2 \rightarrow 3)^x$ $(1 \rightarrow 4)^x$ และ $(3 \rightarrow 4)^x$ โดยที่เมื่อ d มีค่าเป็นบวกจะส่งผลให้มีค่า $\alpha^{(1)}(\omega)$ มากกว่ากรณีที่ d มีค่าเป็นลบอย่างชัดเจน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเมื่อให้แสงตกกระทบโพลาริซในแนวแกน y (α^y) แสดงดังภาพ 30 พบว่าเมื่อ $d=0.00$ และมีค่าเป็นบวกจะพบการเปลี่ยนแปลงสถานะ $(1 \rightarrow 3)^y$ $(1 \rightarrow 4)^y$ และ $(3 \rightarrow 4)^y$ โดยที่ค่า $\alpha^{(1)}(\omega)$ เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วจน การเปลี่ยนแปลงสถานะ $(3 \rightarrow 4)^y$ มีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะ $d = 1.00$ นาโนเมตร แต่เมื่อ d มีค่าเป็นลบ จะพบเพียงการเปลี่ยนแปลงสถานะ $(1 \rightarrow 3)^y$ และ $(2 \rightarrow 4)^y$ เท่านั้น โดยที่ทั้ง α^x และ α^y จะมีลักษณะที่สอดคล้องกับกฎการเลือก (selection rule) ซึ่งเกิดจากการพิจารณาการซ้อนทับกันของฟังก์ชันคลื่นสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายกับทิศของแสงที่ตกกระทบโพลาริซ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อลักษณะของฟังก์ชันคลื่นของสถานะ $(i \rightarrow f)^{r=x,y}$ เปลี่ยนไป และเป็นไปตามค่าออสซิลเลเตอร์สเตรงที่พิจารณาในหัวข้อ 4.3.2 ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

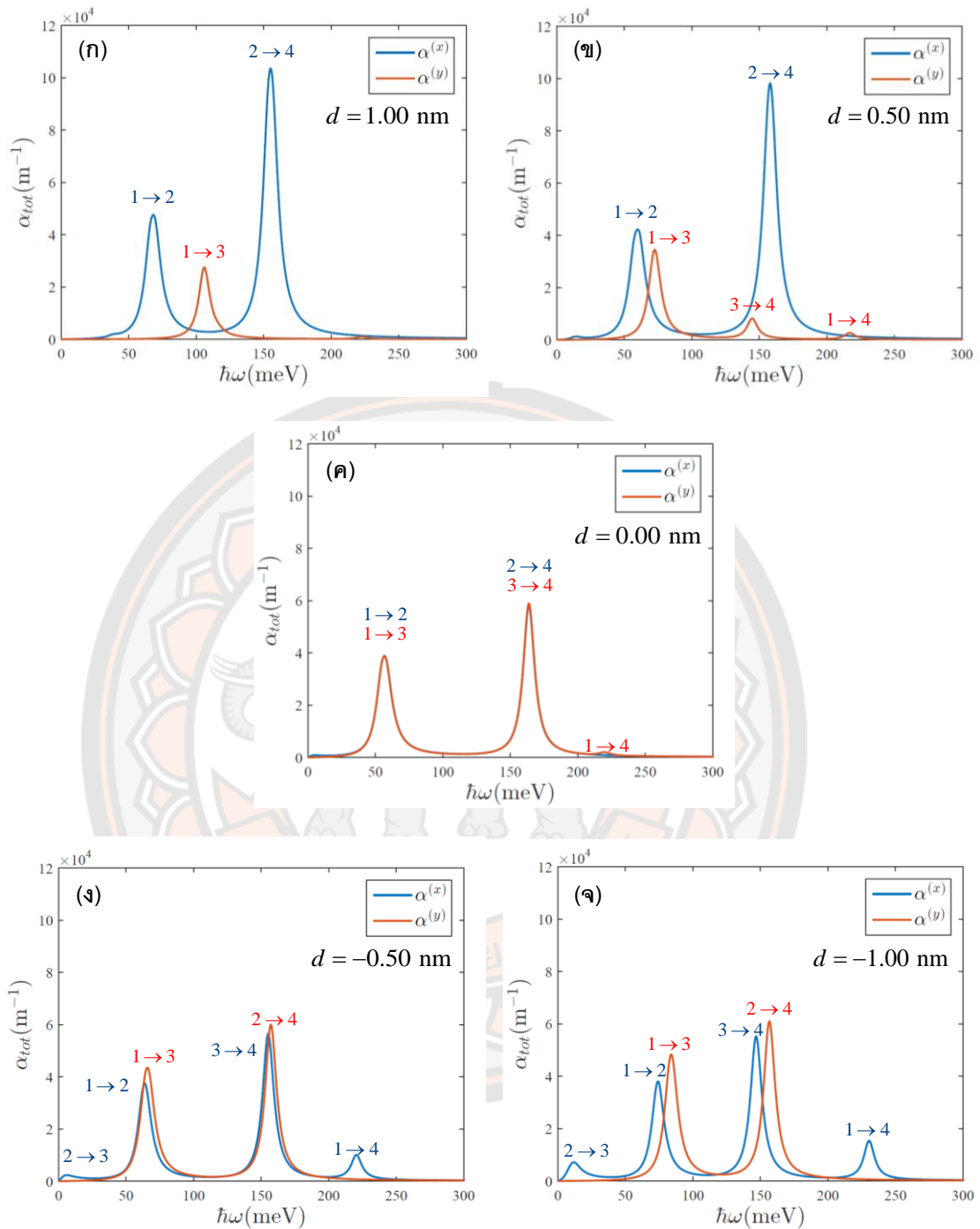
ต่อมาเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวม (α_{tot}) แสดงดังภาพ 31 พบว่าที่ระยะ $d=0$ ค่า α_{tot} ของการเปลี่ยนแปลงสถานะ $(1 \rightarrow 2)^x$ เท่ากับ $(1 \rightarrow 3)^y$ ($\alpha_{21}^x = \alpha_{31}^y$) และ $(2 \rightarrow 4)^x$ เท่ากับ $(3 \rightarrow 4)^y$ ($\alpha_{42}^x = \alpha_{43}^y$) ซึ่งหมายถึงไม่ว่าแสงจะโพลาริซในทิศ x หรือ y ก็จะถูกดูดกลืนเท่ากัน แต่เมื่อ d มีค่าเป็นบวก จุดสูงสุดของ α_{tot} ของทุกการเปลี่ยนแปลงสถานะที่เคยเท่ากันจะเกิดการแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่ $\alpha_{tot}^{(x)}$ จะมีค่ามากกว่า $\alpha_{tot}^{(y)}$ และเกิดการลดลงของ $\alpha_{tot}^{(y)}$ อย่างชัดเจนและรวดเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการได้รับพลังงานที่เหมาะสมจากการตกกระทบโพลาริซของแสงในแนวแกน x มีความสำคัญต่อการดูดกลืนแสงมากกว่าแกน y ในขณะที่เมื่อ d มีค่าเป็นลบ จุดสูงสุดของ α_{tot} ของการเปลี่ยนแปลงสถานะที่เคยเท่ากันจะเกิดการแยกออกจากกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระยะเมื่อ d มีค่าเป็นบวก ทั้งนี้การแยกของ α^x และ α^y เกิดจากจุดสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงสถานะ $(1 \rightarrow 2)^x$ และ $(1 \rightarrow 3)^y$ มีพฤติกรรมแบบบลูชิฟท์ (Blue Shift) ที่ไม่เท่ากัน แต่ $(3 \rightarrow 4)^x$ และ $(2 \rightarrow 4)^y$ มีพฤติกรรมแบบเรดชิฟท์ (Red Shift) ที่ไม่เท่ากัน โดยที่จุดสูงสุดของ $\alpha_{tot}^{(y)}$ จะมีค่ามากกว่า $\alpha_{tot}^{(x)}$ เล็กน้อย จึงสรุปผลการทดลองได้ว่าเมื่อ d มีค่าเป็นบวก จะมีประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างอุปกรณ์ด้าน Optoelectronic เช่น อุปกรณ์การตรวจวัดทิศทางการโพลาริซของแสง



ภาพ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x โดยที่ d มีระยะเป็น (ก) 1.00 (ข) 0.50 (ค) 0.00 (ง) -0.50 และ (จ) -1.00 นาโนเมตร



ภาพ 30 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาริซชันแนวแกน y โดยที่ d มีระยะเป็น (ก) 1.00 (ข) 0.50 (ค) 0.00 (ง) -0.50 และ (จ) -1.00 นาโนเมตร



ภาพ 31 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวมของอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง เมื่อได้รับพลังงานจากแสงที่ตกกระทบโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y โดยที่ d มีระยะเป็น (ก) 1.00 (ข) 0.50 (ค) 0.00 (ง) -0.50 และ (จ) -1.00 นาโนเมตร

บทที่ 5

บทสรุป

จากผลการศึกษาาระบบของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยมด้านเท่า และสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง สามารถสรุปผลการวิจัย และนำเสนอข้อเสนอแนะ ได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก พบว่าเมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้นพลังงานและผลต่างพลังงานมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกเอเลเมนต์เมื่อแสงตกกระทบโพลารอยซ์ในแนวแกน x เท่ากับแกน y ($|M_{ff',ii'}^x| = |M_{ff',ii'}^y|$) จึงส่งผลให้เมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสมค่า $P_{ff',ii'}^x = P_{ff',ii'}^y$ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $\alpha^x = \alpha^y$ เช่นกัน นอกจากนี้เมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น $\alpha^{r=x,y}$ มีพฤติกรรมแบบเรดชิฟท์ และจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวม (α_{tot}) จะมีค่าลดลง

จากการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อ a มีขนาดเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้พลังงานงานและผลต่างพลังงานมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แต่นอกจากนี้ยังพบสถานะดีเจนเนอเรทของสถานะกระตุ้นที่ 1 และ 2 ต่อมาเมื่อพิจารณาค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกเอเลเมนต์พบว่า $|M_{21}^x| = |M_{31}^y|$ และ $|M_{42}^x| = |M_{43}^y|$ ส่งผลให้เมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสมค่าของ $P_{21}^x = P_{31}^y$ และ $P_{42}^x = P_{43}^y$ และนอกจากนี้ไม่พบโอกาสของการเปลี่ยนแปลงในสถานะอื่นๆ ซึ่งทำให้พบเพียงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ $\alpha_{21}^x = \alpha_{31}^y$ และ $\alpha_{42}^x = \alpha_{43}^y$ โดยที่เมื่อขนาดของ a เพิ่มขึ้น ค่า $\alpha^{r=x,y}$ ก็จะมีพฤติกรรมแบบเรดชิฟท์ และจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวม (α_{tot}) ก็จะมีค่าลดลง

หลังจากศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอน 4 สถานะแรกที่ถูกขังในเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยมด้านเท่า โดยพบว่าค่า $\alpha^x = \alpha^y$ เสมอทั้งในกรณีของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากและสามเหลี่ยมด้านเท่า ไม่ว่า a มีขนาดเป็นเท่าไรก็ตาม ดังนั้นในกรณีของเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง จึงสนใจศึกษาผลของการเลื่อนตำแหน่ง (d) เพื่อให้ได้ค่า α^x และ α^y ที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแกนกลาง พบว่าเมื่อระยะ $d \neq 0.00$ เดิมทีพลังงานของสถานะกระตุ้นที่ 1 จะเท่ากับสถานะกระตุ้นที่ 2 ที่เคยเท่ากันเมื่อ $d = 0.00$ จะมีค่าไม่เท่ากันอีกต่อไป และก็จะส่งผลให้ผลต่างพลังงานที่เกิดจากทั้ง 2 สถานะนี้ต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกเอลิเมนต์เมื่อ $d = 0.00$ จะมีค่า $|M_{21}^x| = |M_{31}^y|$ และ $|M_{42}^x| = |M_{43}^y|$ แต่เมื่อระยะ $d \neq 0.00$ ฟังก์ชันคลื่นจะพยายามกระจายตัวเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณแกน จะส่งผลให้ $|\Psi|^2$ เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่าสัมบูรณ์ของไดโพลทรานซิชันเมทริกเอลิเมนต์เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก $|M_{fi}^{r=x,y}|$ เกิดจากการอินทิเกรทความหนาแน่นไดโพลของการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ($\Psi_{ff'}^* x \Psi_{ii'}$ หรือ $\Psi_{ff'}^* y \Psi_{ii'}$) และเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานก็จะสามารถทำให้เกิดโอกาสการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งที่ไม่เคยเกิดขึ้นได้ เช่น เมื่อ d มีค่าเป็นบวก จะสามารถพบ P_{43}^y ซึ่งจะไม่พบเมื่อ d มีค่าเป็นลบ ต่อมาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เมื่อ $d = 0.00$ จะพบว่า $\alpha_{21}^x = \alpha_{31}^y$ และ $\alpha_{42}^x = \alpha_{43}^y$ ซึ่งคล้ายคลึงกับเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่เมื่อระยะ $d \neq 0.00$ จะทำให้เกิด α_{fi}^x หรือ α_{fi}^y ที่ไม่มีโอกาสเกิดขึ้นได้เมื่อ $d = 0.00$ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะ d มีค่าเป็นบวก จุดสูงสุด $\alpha^{r=x,y}$ ที่เคยเท่ากันจะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของ α^y หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อแกนเลื่อนลงและได้รับพลังงานที่เหมาะสมจากแสงที่ตกกระทบโพลารอยซ์ในแนวแกน x จะทำให้มีการดูดกลืนแสงในปริมาณที่มากที่สุด สำหรับเมื่อระยะ d มีค่าเป็นลบ จุดสูงสุดของ $\alpha^{r=x,y}$ ที่เคยเท่ากันจะแยกออกจากกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระยะเมื่อ d มีค่าเป็นบวก ดังนั้นเมื่อระยะ d มีค่าเป็นบวก จึงมีประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ทางด้าน Optoelectronic ในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

อาจมีการศึกษาเส้นลวดนาโนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมชนิดอื่นหรือพื้นที่หน้าตัดรูปทรงอื่นๆอีกต่อไป เพื่อเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้ ให้ครอบคลุมกับความหลากหลายของงานวิจัยที่สามารถสังเคราะห์เส้นลวดนาโนในรูปทรงต่างๆได้ในปัจจุบัน

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- Dai, X., Zhang, S., Wang, Z., Adamo, G., Liu, H., Huang, Y., ... & Soci, C. (2014). GaAs/AlGaAs nanowire photodetector. *Nano letters*, 14(5), 2688-2693.
- Datta, S. (2005). Quantum transport: atom to transistor. *Cambridge university press*.
- Deyasi, A., Bhattacharyya, S., & Das, N. R. (2014). A finite-difference technique for computation of electron states in core-shell quantum wires of different configurations. *Physica Scripta*, 89(6), 065804.
- Ho, J., Tatebayashi, J., Sergent, S., Fong, C. F., Iwamoto, S., & Arakawa, Y. (2015). Low-threshold near-infrared GaAs-AlGaAs core-shell nanowire plasmon laser. *Acs Photonics*, 2(1), 165-171.
- Hua, B., Motohisa, J., Kobayashi, Y., Hara, S., & Fukui, T. (2009). Single GaAs/GaAsP coaxial core-shell nanowire lasers. *Nano letters*, 9(1), 112-116.
- Kobl Müller, G., Mayer, B., Stettner, T., Abstreiter, G., & Finley, J. J. (2017). GaAs-AlGaAs core-shell nanowire lasers on silicon: invited review. *Semiconductor Science and Technology*, 32(5), 053001.
- Kuykendall, T., Pauzaskie, P., Lee, S., Zhang, Y., Goldberger, J., & Yang, P. (2003). Metalorganic chemical vapor deposition route to GaN nanowires with triangular cross sections. *Nano Letters*, 3(8), 1063-1066.
- Li, W. K. (1984). A particle in an isocetes right triangle. *Journal of Chemical Education*, 61(12), 1034.
- Li, Y., Xiang, J., Qian, F., Gradecak, S., Wu, Y., Yan, H., ... & Lieber, C. M. (2006). Dopant-free GaN/AlN/AlGaIn radial nanowire heterostructures as high electron mobility transistors. *Nano letters*, 6(7), 1468-1473.
- Liang, G., Xiang, J., Kharche, N., Klimeck, G., Lieber, C. M., & Lundstrom, M. (2007). Performance analysis of a Ge/Si core/shell nanowire field-effect transistor. *Nano letters*, 7(3), 642-646.
- Nami, M., Stricklin, I. E., DaVico, K. M., Mishkat-UL-Masabih, S., Rishinaramangalam,

- A. K., Brueck, S. R. J., ... & Feezell, D. F. (2018). Carrier dynamics and electro-optical characterization of high-performance GaN/InGaN core-shell nanowire light-emitting diodes. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.
- Nasri, D., & Bettahar, N. (2015). Linear and nonlinear intersubband optical properties in a triangular quantum ring. *Physica B: Condensed Matter*, 478, 146-152.
- Qian, F., Brewster, M., Lim, S. K., Ling, Y., Greene, C., Laboutin, O., ... & Li, Y. (2012). Controlled synthesis of AlN/GaN multiple quantum well nanowire structures and their optical properties. *Nano letters*, 12(6), 3344-3350.
- Qian, F., Gradecak, S., Li, Y., Wen, C. Y., & Lieber, C. M. (2005). Core/multishell nanowire heterostructures as multicolor, high-efficiency light-emitting diodes. *Nano letters*, 5(11), 2287-2291.
- Qian, F., Li, Y., Gradecak, S., Park, H. G., Dong, Y., Ding, Y., ... & Lieber, C. M. (2008). Multi-quantum-well nanowire heterostructures for wavelength-controlled lasers. *Nature materials*, 7(9), 701-706.
- Qian, F., Li, Y., Gradecak, S., Wang, D., Barrelet, C. J., & Lieber, C. M. (2004). Gallium nitride-based nanowire radial heterostructures for nanophotonics. *Nano letters*, 4(10), 1975-1979.
- Tiutiunnyk, A., Tulupenko, V., Mora-Ramos, M. E., Kasapoglu, E. S. i. N., Urgan, F. A. T. i. H., Sari, H. Ü. S. E. Y. i. N., ... & Duque, C. A. (2014). Electron-related optical responses in triangular quantum dots. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 60, 127-132.
- Yakar, Y., Çakır, B., & Özmen, A. (2010). Calculation of linear and nonlinear optical absorption coefficients of a spherical quantum dot with parabolic potential. *Optics Communications*, 283(9), 1795-1800.
- Zhou, P. (1993). *Finite Difference Method. Numerical Analysis of Electromagnetic Fields*, 63–94. doi:10.1007/978-3-642-50319-1_3