

การวิเคราะห์แบรกริเฟกเตอร์ของสารประกอบเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์
ในช่วง 1.3 ไมโครเมตร



นาย หัสเนตร์ โสคาบรรลุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

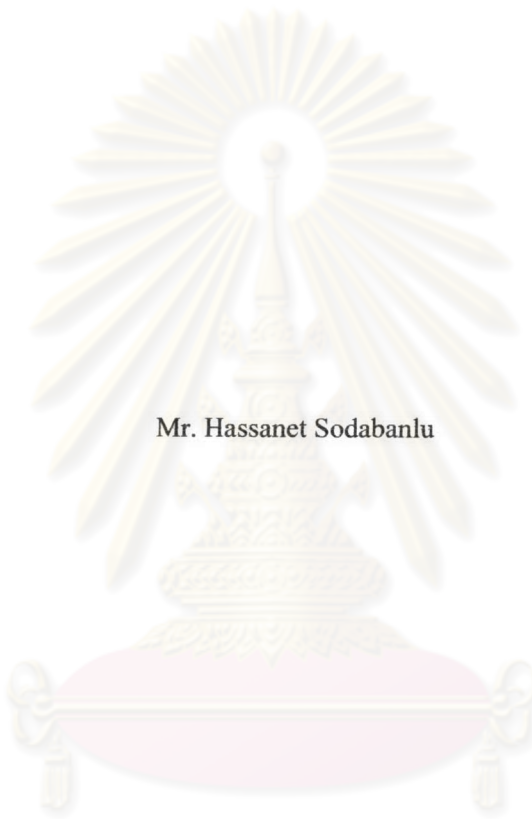
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1412-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF GaAs-BASED COMPOUND BRAGG REFLECTOR
IN 1.3 μm RANGES



Mr. Hassanet Sodabanlu

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2004


ISBN 974-53-1412-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์เบรกริเฟกเตอร์ของสารประกอบเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ใน
ช่วง 1.3 ไมโครเมตร
โดย นายหัตสเนตร์ โสคาบรรรดู
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

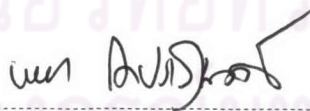
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

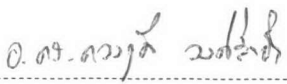

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรยง โตประเสริฐวงศ์)


..... กรรมการ
(ดร.ดวงฤดี วงศ์ลำซำ)

หัตสเนตร์ โสคาบรรลุ : การวิเคราะห์แบรกริเฟกเตอร์ของสารประกอบเริ่มต้นแกเลียมอาร์เซไนด์ในช่วง 1.3 ไมโครเมตร (ANALYSIS OF GaAs-BASED COMPOUND BRAGG REFLECTOR IN 1.3 μm RANGES) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์, จำนวนหน้า 89 หน้า. ISBN 974-53-1412-9.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์ของสารประกอบกลุ่ม GaAs/GaAlAs ด้วยวิธีโพรปาเกชันเมตริกซ์ โดยโครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ โครงสร้างแบบสม่ำเสมอ โครงสร้างแบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเฟสเลื่อนอยู่ทางด้านหน้า โครงสร้างแบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเฟสเลื่อนแทรกคั่น และโครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอ โดยทุกโครงสร้างกำหนดให้มีความยาวคลื่นแบรค 1.3 μm ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าความกว้างของแถบหยุด (Band stop) มีค่ามากขึ้นเมื่อผลต่างของค่าดัชนีหักเหมีค่ามากขึ้น และค่าการสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคู่มี่ค่ามากขึ้นสำหรับกรณีของโครงสร้างแบบสม่ำเสมอ โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ในย่านค่าความยาวคลื่นแบรคและมีลักษณะสมมาตรรอบค่าความยาวคลื่นแบรค 1.3 μm ในกรณีโครงสร้างแบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเฟสเลื่อนอยู่ทางด้านหน้านั้นค่าความหนาของชั้นเฟสเลื่อนทำให้สเปกตรัมการสะท้อนมีลักษณะไม่สมมาตรและลักษณะการเลื่อนของสเปกตรัมมีเป็นรายคาบในทุกช่วง 0.5 λ สำหรับโครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอแบบอสมมาตรนั้นสเปกตรัมการสะท้อนที่ได้มีลักษณะไม่สมมาตร แต่สำหรับโครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตรนั้นสเปกตรัมการสะท้อนที่ได้มีลักษณะสมมาตร โดยมีลักษณะของสเปกตรัมในกรณีนี้เป็นแถบหยุดที่มีค่าความยาวคลื่นแบรคเป็นศูนย์กลาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....นลินศร โสคาบรรลุ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....

4670579221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : GaAs, GaAlAs, BRAGG REFLECTOR, DOUBLE BRAGG REFLECTOR,
PHASE-SHIFTED LAYER, CHIRPED RUGATE

HASSANET SODABANLU : ANALYSIS OF GaAs-BASED COMPOUND BRAGG
REFLECTOR IN 1.3 μm RANGES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMCHAI
RATANATHAMPAN, D. Eng., pp. 89 ISBN 974-53-1412-9.

This thesis investigates and analyzes the optical characteristics of GaAs/GaAlAs or GaAs-based compounds Bragg reflectors. The Bragg structures in this work are uniform Bragg reflectors, uniform Bragg reflectors with the front phase-shifted layer, double Bragg reflectors with separator of phase-shifted layer, asymmetry non-uniform Bragg reflectors and symmetry non-uniform Bragg reflectors. All the structures have Bragg wavelength at 1.3 μm . The results of analysis show that the reflectivity depends on the different of refractive index between high-index layer and low-index layer and the number of pairs. The stop-band spacing depends on the different of refractive index between high-index layer and low-index layer. The maximum reflectivity of each structure occurs at Bragg wavelength. The uniform Bragg reflectors with the front phase-shifted layer have asymmetrical reflectivity spectrum which replies with the period of 0.5λ . The asymmetry non-uniform Bragg reflectors have asymmetrical reflectivity spectrum but the others which are symmetry have symmetrical reflectivity spectrum. This spectrum is a band stop which has a center at the Bragg wavelength.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature *ฮัสซานัต สอดาบณลู*
Field of study Electrical Engineering Advisor's signature *Somchai Ratanathamp*
Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์ โปรแกรมคำนวณ และคอมพิวเตอร์ จากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำต่างๆที่มีค่าอย่างยิ่งอย่างต่อเนื่องทุกขั้นตอน ตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อันประกอบด้วย ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.บรรยง โต้ประเสริฐพงศ์ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ ดร.ดวงฤดี วงศ์ล้ำชา

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณพัฒนา พันธุ์วงศ์ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและงานทางด้านธุรการต่างๆ

ขอขอบคุณคุณคุณวิภากร จีวะสุวรรณและนิติตปริญาเอก โท ตรี ทุกท่าน ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ได้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็มใจ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใย และเป็นกำลังใจ ในการทำวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบูรพาจารย์ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ | ค |
| | |
| 1. บทนำ | 1 |
| | |
| 2. ทฤษฎี | 3 |
| 2.1 แบริกรีเฟกเตอร์ | 3 |
| 2.2 ดัชนีหักเหของตัวกลาง | 4 |
| 2.3 การสะท้อนของคลื่นระนาบจากตัวกลางที่เป็นชั้น | 5 |
| 2.3.1 โพลาริเซชันแบบ TE | 5 |
| 2.3.2 โพลาริเซชันแบบ TM | 7 |
| 2.3.3 การวิเคราะห์โพรพาเกชันเมทริกซ์ (Propagation matrix approach) สำหรับการสะท้อนของคลื่นระนาบจากตัวกลางหลายชั้น | 7 |
| | |
| 3. แบบจำลองในการคำนวณ | 10 |
| | |
| 4. ผลคำนวณและการวิเคราะห์ผล | 13 |
| 4.1 ค่าการสะท้อนของแบริกรีเฟกเตอร์โครงสร้างสม่าเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs | 13 |
| 4.2 ค่าการสะท้อนของแบริกรีเฟกเตอร์โครงสร้างสม่าเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟส (phase-shifted layer) | 23 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3 | คำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs โครงสร้างสม่ำเสมอ โดยมีชั้นเลื่อนเฟส GaAs หรือ GaAlAs ความหนาต่างๆกันคือ $\frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}, \frac{\lambda_0}{4}, \frac{\lambda_0}{2}, \frac{3\lambda_0}{4}$ และ λ_0 แทรกกัน | 26 |
| 4.3.1 | โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีชั้น GaAs เป็นชั้นแทรกกัน | 26 |
| 4.3.2 | โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีชั้น GaAlAs เป็นชั้นแทรกกัน | 33 |
| 4.4 | คำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง | 37 |
| 4.4.1 | อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 | 38 |
| 4.4.2 | อัตราส่วน $d_H : d_L$ ลดลงจาก 1 เป็น 0.1 | 43 |
| 4.4.3 | อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1 | 48 |
| 4.4.4 | อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1 แบบไม่เป็นเชิงเส้น | 54 |
| 4.5 | คำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ $Ga_xAl_{1-x}As/Ga_yAl_{1-y}As$ โครงสร้าง ไม่สม่ำเสมอบนแผ่นฐาน GaAs ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs มีการเปลี่ยนแปลง ตลอดทั้งโครงสร้าง | 60 |
| 5. | การคำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ $InAlAs/(In_{0.52}Al_{0.48})_x(In_{0.52}Ga_{0.48})_{1-x}As$ | 64 |
| 6. | การคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ และผลจากการทดลอง | 70 |
| 6.1 | โครงสร้างสม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs และ GaAlAs/AlAs บนแผ่นฐาน GaAs | 70 |
| 6.2 | โครงสร้างสม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟส | 75 |
| 6.3 | โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs โดยมีชั้นเลื่อนเฟส GaAs หรือ GaAlAs ความหนาต่างๆกันกึ่งกลาง | 76 |
| 6.4 | โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง | 77 |
| 6.5 | โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $Ga_xAl_{1-x}As/Ga_yAl_{1-y}As$ ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งโครงสร้าง | 80 |

บทที่

๘
หน้า

| | |
|--|----|
| 6.6 ผลเปรียบเทียบกับการวัดการสะท้อนจากแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/AlAs จำนวน 25 คู่..... | 81 |
| 7. สรุป..... | 84 |
| รายการอ้างอิง..... | 86 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 87 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 สัมประสิทธิ์ของสมการ Sellmeier สำหรับ InP, GaAs และ InAlGaAs 4



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 แผนภาพโครงสร้าง VSCELS ที่มีแบรกริเฟกเตอร์เป็นส่วนประกอบ | 1 |
| 2.1 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์พื้นฐานจำนวน N คู่ | 3 |
| 2.2 (ก) คลื่นระนาบสะท้อนจากผิวระนาบ | |
| (ข) รูปแบบ phase-matching สำหรับคลื่นสะท้อนและส่งผ่าน | 5 |
| 2.3 คลื่นระนาบที่มีโพลาไรเซชันแบบ TE $\mathbf{E} = \hat{y}E_y = \hat{y}E_0 e^{-ik_0x + ik_0z}$ | |
| ตกกระทบบนตัวกลางหลายชั้น | 8 |
| 3.1 ดัชนีหักเหของ GaAs, GaAlAs และ AlAs | 10 |
| 3.2 แผนภูมิสายงานแสดงการคำนวณของโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ | 12 |
| 4.1 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs ที่ใช้ในการคำนวณ | 13 |
| 4.2 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ | |
| ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00 | 14 |
| 4.2 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ | |
| ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00 | 15 |
| 4.3 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs ที่มีค่าสัดส่วน $X_{Al} = 0.25, 0.50, 0.75$ และ 1.00 | |
| โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่ | 16 |
| 4.3 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs ที่มีค่าสัดส่วน $X_{Al} = 0.25, 0.50, 0.75$ และ 1.00 | |
| โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่ | 17 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนกับจำนวนคู่ GaAs/GaAlAs และค่าสัดส่วน Al | 18 |
| 4.5 แบรกริเฟกเตอร์โครงสร้าง GaAlAs/AlAs บนแผ่นฐาน GaAs | 19 |
| 4.6 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAlAs/AlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ | |
| ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50 และ (ค) 0.75 | 19 |
| 4.6 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAlAs/AlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ | |
| ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50 และ (ค) 0.75 | 20 |
| 4.7 ค่าการสะท้อนของ GaAlAs/AlAs ที่มีค่าสัดส่วน $X_{Al} = 0.25, 0.50$ และ 0.75 | |
| โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่ | 21 |
| 4.7 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAlAs/AlAs ที่มีค่าสัดส่วน $X_{Al} = 0.25, 0.50$ และ 0.75 | |
| โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่ | 22 |

รูปที่

| | |
|--|----|
| 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนกับจำนวนคู่ GaAlAs/AlAs และค่าสัดส่วน Al | 23 |
| 4.9 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟส | 24 |
| 4.10 ค่าการสะท้อนที่มีชั้นเลื่อนเฟสความหนาต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$ | |
| (ก) ความหนา $\frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ข) ความหนา $0, \frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 | 24 |
| 4.10 (ต่อ) ค่าการสะท้อนที่มีชั้นเลื่อนเฟสความหนาต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$ | |
| (ก) ความหนา $\frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ข) ความหนา $0, \frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 | 25 |
| 4.11 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs | 26 |
| 4.12 ค่าการสะท้อนของ GaAs/Ga _{0.50} Al _{0.50} As จำนวน 20 คู่ ที่มีความหนาของชั้นเลื่อนเฟส ต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$ (ก) ความหนา $\frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ข) ความหนา $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 | 27 |
| 4.13 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีความหนาของ ชั้นเลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ เมื่อเปลี่ยนค่า N_1 และ N_2 โดยมีจำนวนทั้งหมด | |
| (ก) 20 คู่, (ข) 30 คู่, (ค) 40 คู่ และ (ง) 50 คู่ | 28 |
| 4.13 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีความหนาของ ชั้นเลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ เมื่อเปลี่ยนค่า N_1 และ N_2 โดยมีจำนวนทั้งหมด | |
| (ก) 20 คู่, (ข) 30 คู่, (ค) 40 คู่ และ (ง) 50 คู่ | 29 |
| 4.13 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีความหนาของ ชั้นเลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ เมื่อเปลี่ยนค่า N_1 และ N_2 โดยมีจำนวนทั้งหมด | |
| (ก) 20 คู่, (ข) 30 คู่, (ค) 40 คู่ และ (ง) 50 คู่ | 30 |
| 4.14 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ จำนวนคู่ $N_1 + N_2$ ต่างๆ กัน โดยมีค่าสัดส่วน Al ใน GaAlAs: | |
| (ก) $X_{Al} = 0.25$, (ข) $X_{Al} = 0.50$, (ค) $X_{Al} = 0.75$ และ (ง) $X_{Al} = 1.00$ | 31 |
| 4.14 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ จำนวนคู่ $N_1 + N_2$ ต่างๆ กัน โดยมีค่าสัดส่วน Al ใน GaAlAs: | |
| (ก) $X_{Al} = 0.25$, (ข) $X_{Al} = 0.50$, (ค) $X_{Al} = 0.75$ และ (ง) $X_{Al} = 1.00$ | 32 |

| | |
|--|----|
| 4.15 ค่าการสะท้อนของ GaAs/Ga _{0.50} Al _{0.50} As 20 คู่ ที่มีความหนาของ GaAlAs ต่างๆ เทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$ (ก) ความหนา $\frac{\lambda_0}{10}$, $\frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ข) ความหนา $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 | 34 |
| 4.16 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ โดยทำการเปลี่ยนค่าสัดส่วน Al ใน ชั้นเลื่อนเฟส (ก) X _{Al} = 0.25, (ข) X _{Al} = 0.50, (ค) X _{Al} = 0.75 และ (ง) X _{Al} = 1.00..... | 35 |
| 4.16 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ โดยทำการเปลี่ยนค่าสัดส่วน Al ใน ชั้นเลื่อนเฟส (ก) X _{Al} = 0.25, (ข) X _{Al} = 0.50, (ค) X _{Al} = 0.75 และ (ง) X _{Al} = 1.00..... | 36 |
| 4.17 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ | 38 |
| 4.18 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 38 |
| 4.18 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 39 |
| 4.18 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 40 |
| 4.19 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 40 |
| 4.19 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 41 |
| 4.19 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 42 |
| 4.20 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1, 0.05 และ 0.01 ไปเป็น 1..... | 43 |
| 4.21 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ | 43 |
| 4.22 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 44 |
| 4.22 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 4.23 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 46 |
| 4.23 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 47 |
| 4.24 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ ลดลงจาก 1 ไปเป็น 0.1, 0.05 และ 0.01..... | 48 |
| 4.25 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ | 49 |
| 4.26 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 สัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 49 |
| 4.26 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 สัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 50 |
| 4.26 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 สัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 51 |
| 4.27 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 51 |
| 4.27 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 52 |
| 4.27 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 53 |
| 4.28 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ลดเหลือ 0.1, เพิ่มจาก 0.05 เป็น 1 ลดเหลือ 0.05 และ เพิ่มจาก 0.01 เป็น 1 ลดเหลือ 0.01 แบบเชิงเส้น..... | 54 |
| 4.29 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ | 54 |
| 4.30 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 สัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 55 |
| 4.30 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 สัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00..... | 56 |
| 4.31 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 57 |
| 4.31 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 58 |

| | |
|--|----|
| 4.32 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ลดเหลือ 0.1, เพิ่มจาก 0.05 เป็น 1 ลดเหลือ 0.05 และ เพิ่มจาก 0.01 เป็น 1 ลดเหลือ 0.01 แบบไม่เชิงเส้น..... | 59 |
| 4.33 ค่าการสะท้อนของ GaAs/Ga _{0.5} Al _{0.5} As จำนวน 20 คู่ ที่เป็น โครงสร้างสม่ำเสมอ และ ไม่สม่ำเสมอแบบต่างๆ..... | 60 |
| 4.34 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของ Ga _x Al _{1-x} As/Ga _y Al _{1-y} As แต่ละคู่..... | 61 |
| 4.35 ค่าการสะท้อนของ โครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหดังรูปที่ 4.34..... | 62 |
| 4.36 ค่าการสะท้อนของ โครงสร้าง GaAlAs/GaAlAs และ GaAs/AlAs จำนวน 20 คู่..... | 62 |
| 5.1 แบริกรีเฟกเตอร์ InAlAs/(In _{0.52} Al _{0.48}) _x (In _{0.52} Ga _{0.48}) _{1-x} As บนแผ่นฐาน InAlAs..... | 64 |
| 5.2 ค่าดัชนีหักเหของ InAlAs/(In _{0.52} Al _{0.48}) _x (In _{0.52} Ga _{0.48}) _{1-x} As ที่ค่า X ต่างๆ กัน..... | 64 |
| 5.3 ค่าการสะท้อนของแบริกรีเฟกเตอร์จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ ที่ค่าสัดส่วนของ In _{0.52} Al _{0.48} As เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50 และ (ค) 0.75..... | 65 |
| 5.3 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบริกรีเฟกเตอร์จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ ที่ค่าสัดส่วนของ In _{0.52} Al _{0.48} As เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50 และ (ค) 0.75..... | 66 |
| 5.4 ค่าการสะท้อนของ InAlAs/(In _{0.52} Al _{0.48}) _x (In _{0.52} Ga _{0.48}) _{1-x} As ที่มีสัดส่วน In _{0.52} Al _{0.48} As เท่ากับ 0.25, 0.50 และ 0.75 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 66 |
| 5.4 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ InAlAs/(In _{0.52} Al _{0.48}) _x (In _{0.52} Ga _{0.48}) _{1-x} As ที่มีสัดส่วน In _{0.52} Al _{0.48} As เท่ากับ 0.25, 0.50 และ 0.75 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 67 |
| 5.4 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ InAlAs/(In _{0.52} Al _{0.48}) _x (In _{0.52} Ga _{0.48}) _{1-x} As ที่มีสัดส่วน In _{0.52} Al _{0.48} As เท่ากับ 0.25, 0.50 และ 0.75 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่..... | 68 |
| 5.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งาน และจำนวนคู่ของ GaAs/Ga _{0.50} Al _{0.50} As, Ga _{0.50} Al _{0.50} As/AlAs, InAlAs/(In _{0.52} Al _{0.48}) _{0.50} (In _{0.52} Ga _{0.48}) _{0.50} As..... | 69 |
| 6.1 ตัวอย่างผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Brproject® ของ Marek Wesolowski ที่นำมาใช้คำนวณเปรียบเทียบ..... | 70 |
| 6.2 ผลการคำนวณเมื่อให้ดัชนีหักเหคงที่เท่ากับ $n(\lambda_0)$ | 71 |
| 6.3 ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ..... | 71 |
| 6.3 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ..... | 72 |
| 6.3 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ..... | 73 |
| 6.4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAlAs/AlAs แบบสม่ำเสมอ..... | 73 |
| 6.4 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAlAs/AlAs แบบสม่ำเสมอ..... | 74 |

| | |
|---|----|
| 6.4 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAlAs/AlAs แบบสม่ำเสมอ | 75 |
| 6.5 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเลื่อนเฟส | 75 |
| 6.5 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเลื่อนเฟส | 76 |
| 6.6 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้างแบเรอริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs | 77 |
| 6.7 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L = 0.1-1$ | 78 |
| 6.8 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L = 1-0.1$ | 78 |
| 6.8 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L = 1-0.1$ | 79 |
| 6.9 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs $d_H : d_L = 0.1-1-0.1$ แบบเชิงเส้น | 79 |
| 6.10 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs $d_H : d_L = 0.1-1-0.1$ แบบไม่เชิงเส้น | 80 |
| 6.11 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $Ga_xAl_{1-x}As/Ga_yAl_{1-y}As$ | 81 |
| 6.12 ค่าการสะท้อนของแบเรอริเฟกเตอร์ GaAs/AlAs 25 คู่ ที่ได้จากการทดลอง | 82 |
| 6.13 ค่าการสะท้อนของแบเรอริเฟกเตอร์ GaAs/AlAs 25 คู่ ที่ได้จากการคำนวณ | 82 |
| 6.14 ค่าการสะท้อนของแบเรอริเฟกเตอร์ GaAs/AlAs 25 คู่ ที่ได้จากการทดลอง (เส้นสีดำ) และจากการคำนวณ (เส้นสีน้ำเงิน) | 83 |

คำอธิบายสัญลักษณ์

| | | |
|-----------------------------------|--|------------------------------------|
| $\bar{\mathbf{B}}_{\ell(\ell+1)}$ | backward-propagation matrix | |
| d_H | ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีดัชนีหักเหสูง | (nm) |
| d_L | ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีดัชนีหักเหต่ำ | (nm) |
| \mathbf{E} | เวกเตอร์สนามไฟฟ้า | (V/m) |
| \mathbf{E}_i | เวกเตอร์สนามไฟฟ้าตกกระทบ | (V/m) |
| \mathbf{E}_r | เวกเตอร์สนามไฟฟ้าสะท้อน | (V/m) |
| \mathbf{E}_t | เวกเตอร์สนามไฟฟ้าส่งผ่าน | (V/m) |
| ϵ | permittivity ของสารกึ่งตัวนำ | (C ² /Nm ²) |
| \mathbf{H}_i | เวกเตอร์สนามแม่เหล็กตกกระทบ | (A/m) |
| \mathbf{H}_r | เวกเตอร์สนามแม่เหล็กสะท้อน | (A/m) |
| \mathbf{H}_t | เวกเตอร์สนามแม่เหล็กส่งผ่าน | (A/m) |
| λ | ความยาวคลื่น | (μm) |
| λ_0 | ความยาวคลื่นใช้งาน | (μm) |
| μ | permeability ของสารกึ่งตัวนำ | (Wb/Am) |
| n | ดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำ | |
| n_H | ดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูงในคู่อเบอกรีเฟกเตอร์ | |
| n_L | ดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าต่ำในคู่อเบอกรีเฟกเตอร์ | |
| ϕ | ความหนาของชั้นเลื่อนเฟส | (nm) |
| R | ค่าการสะท้อน | |
| r | สัมประสิทธิ์การสะท้อน | |
| t | สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน | |

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย