

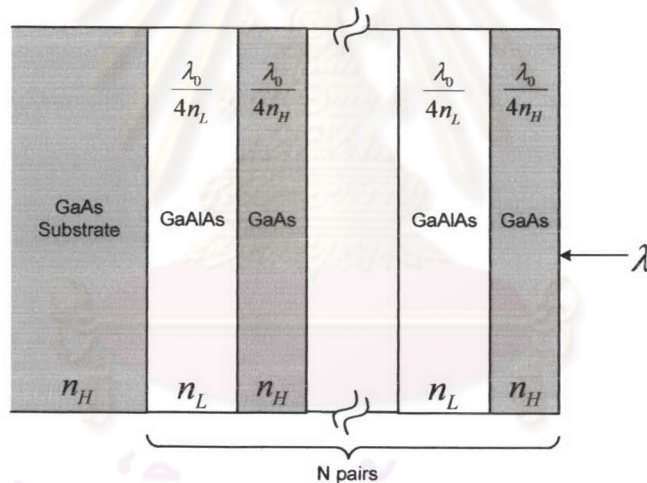
บทที่ 4

ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

การคำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟคเตอร์จะอาศัยสมการ (34) ถึงสมการ (42) โดยจะแบ่งโครงสร้างต่างๆ ออกเป็นหัวข้อย่อยเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบผลดังนี้

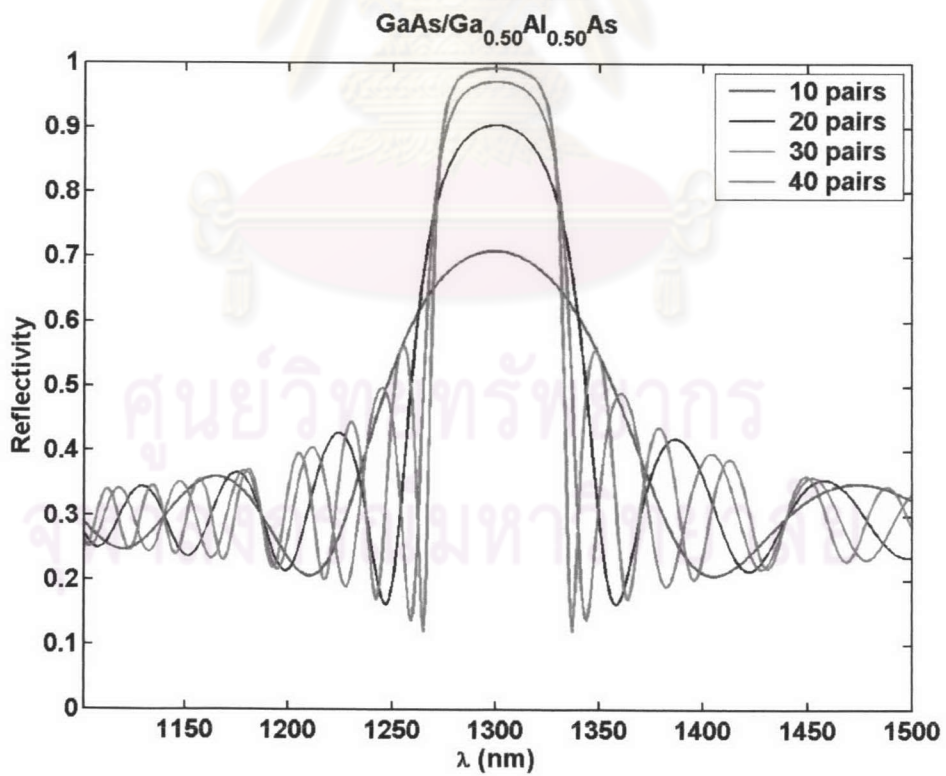
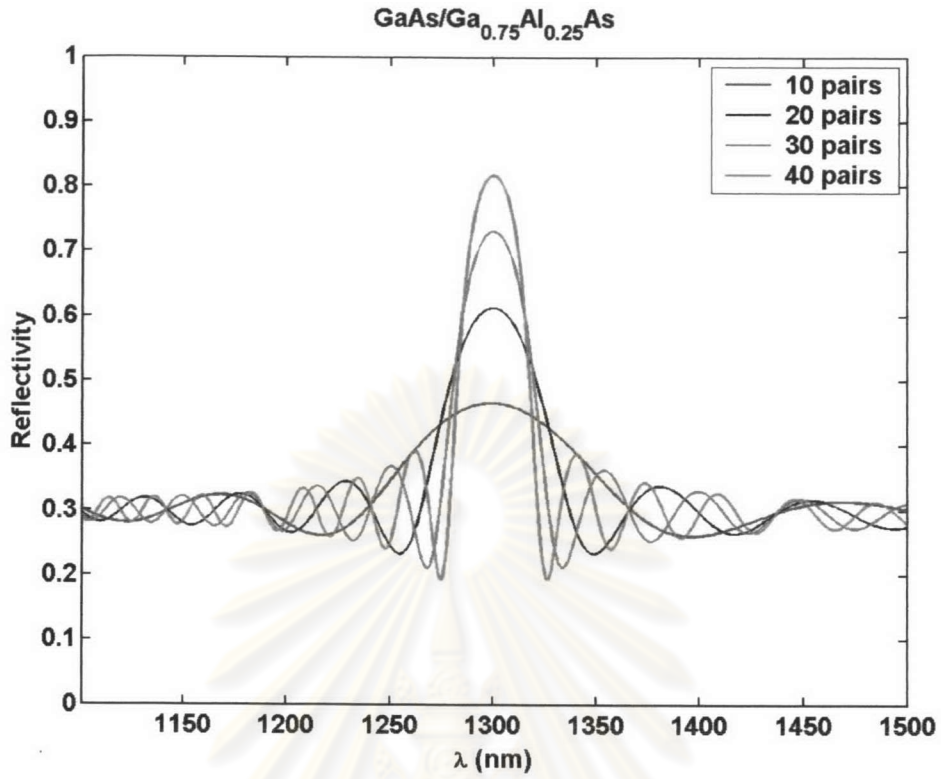
4.1 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟคเตอร์โครงสร้างสม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs

โครงสร้างของแบรกริเฟคเตอร์ที่ใช้คำนวณแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่ GaAs และ GaAlAs แต่ละชั้นจะมีความหนาเป็น $\frac{\lambda_0}{4n}$ ดังสมการที่ (1) สำหรับค่าดัชนีหักเหของ GaAs และ GaAlAs หาได้จากสมการที่ (3)

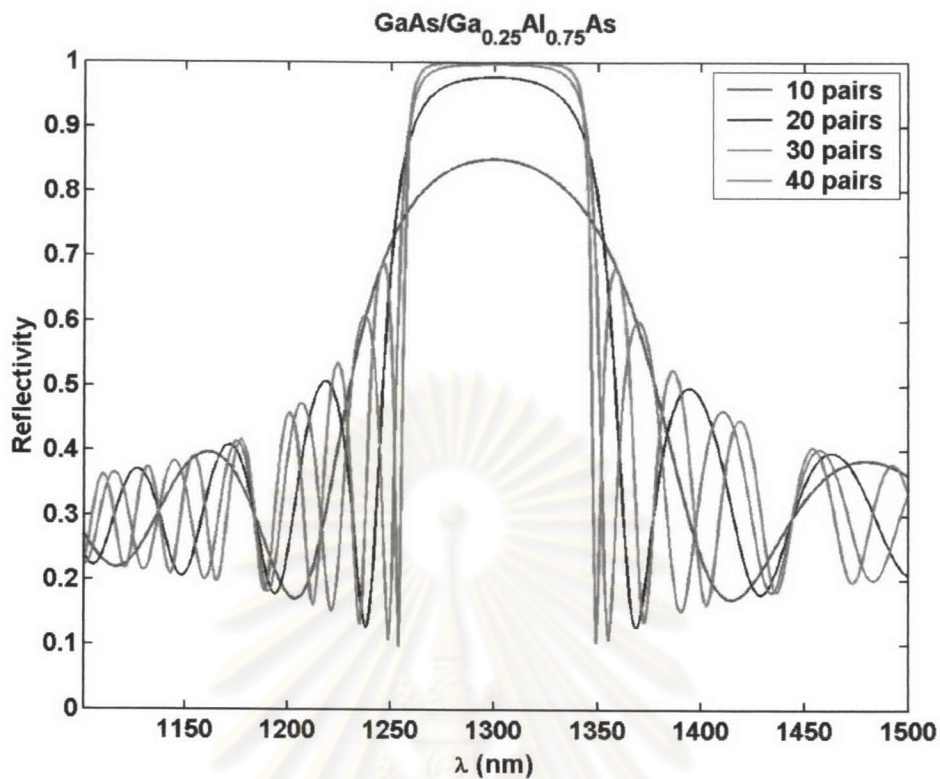
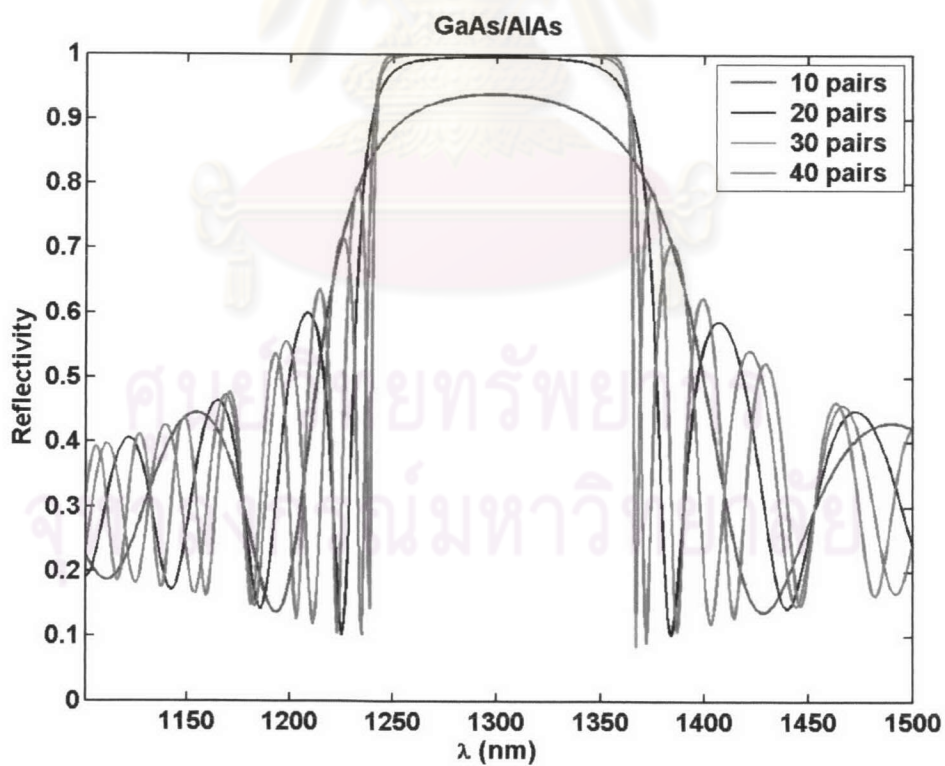


รูปที่ 4.1 โครงสร้างแบรกริเฟคเตอร์ GaAs/GaAlAs ที่ใช้ในการคำนวณ

ผลการคำนวณพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนคู่ของชั้นสาร GaAs/GaAlAs ให้มากขึ้นค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นใช้งานจะมีค่าลดลงตามจำนวนคู่ส่งผลให้ค่าการสะท้อนมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 และเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs ให้มากขึ้นค่าการสะท้อนก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้าง GaAs/AlAs มีค่าดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำต่างกันมากกว่าโครงสร้าง GaAs/GaAlAs ที่ค่าสัดส่วนอื่นๆ และยังส่งผลให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

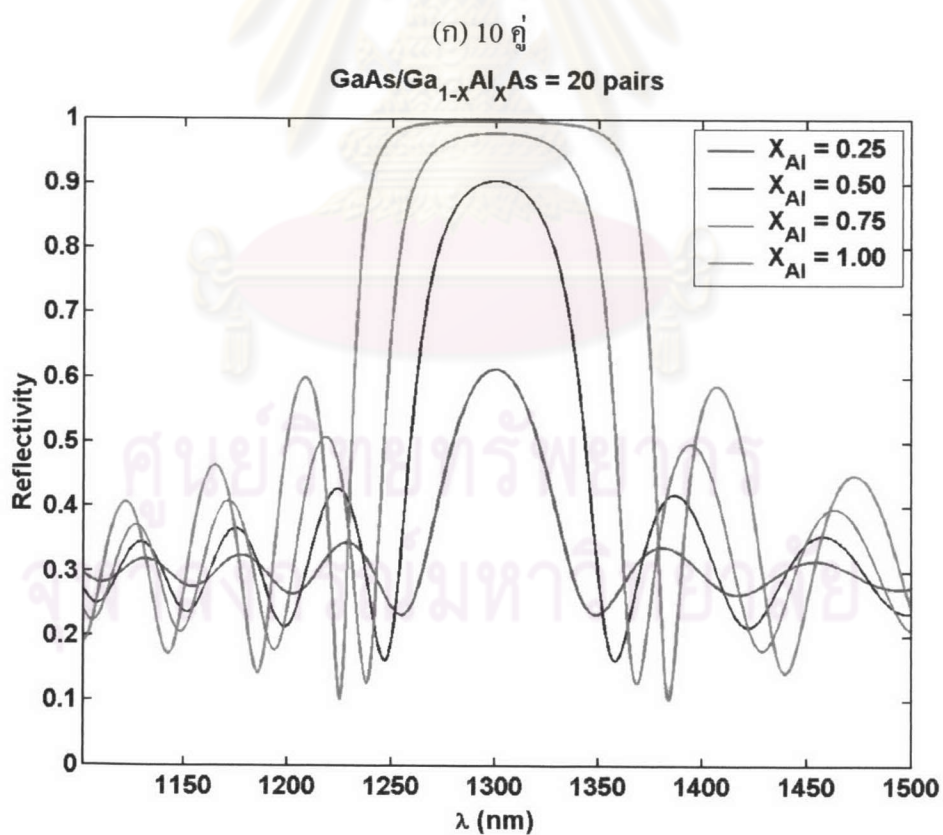
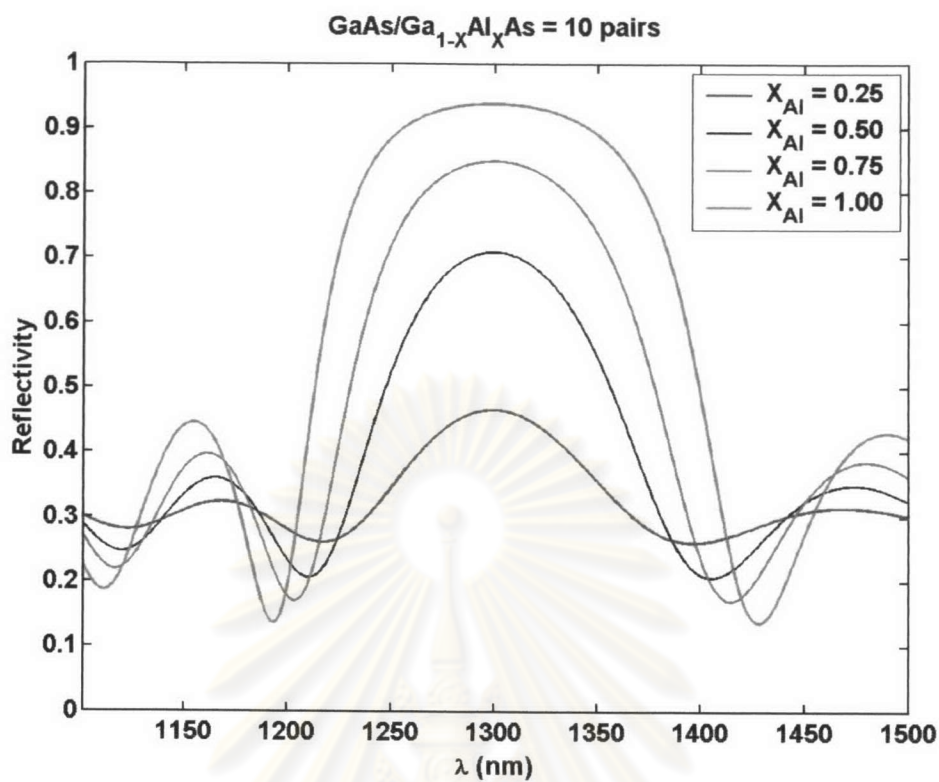


รูปที่ 4.2 ค่าการสะท้อนของแบรกรี่เฟคเตอร์ GaAs/GaAlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่
ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00

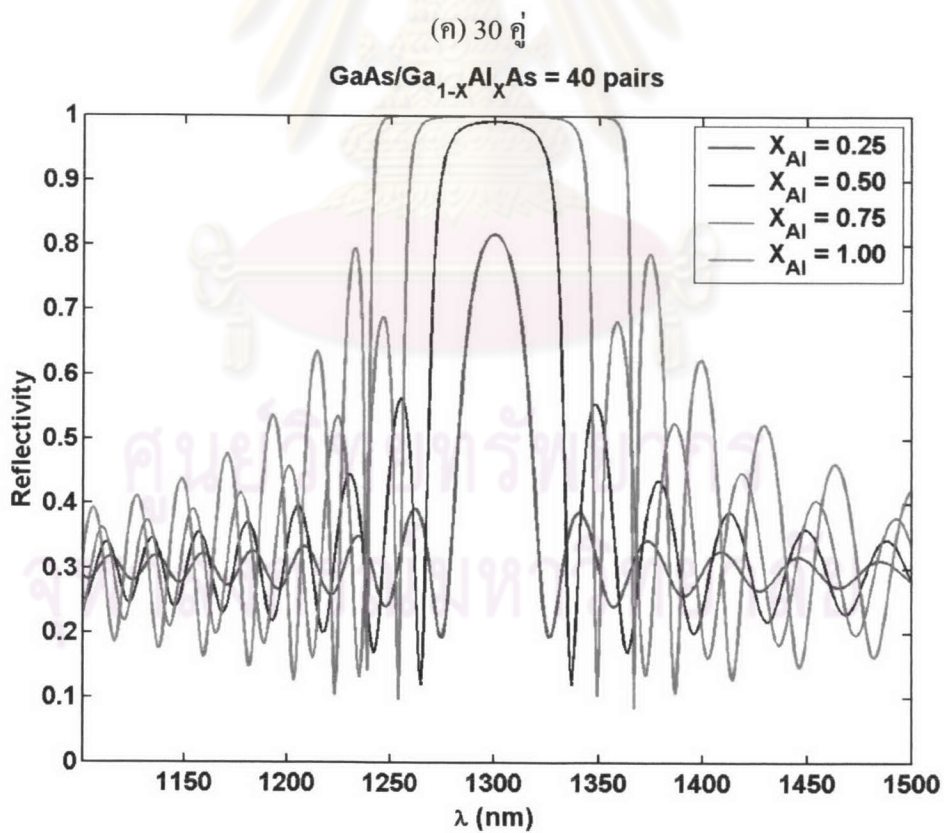
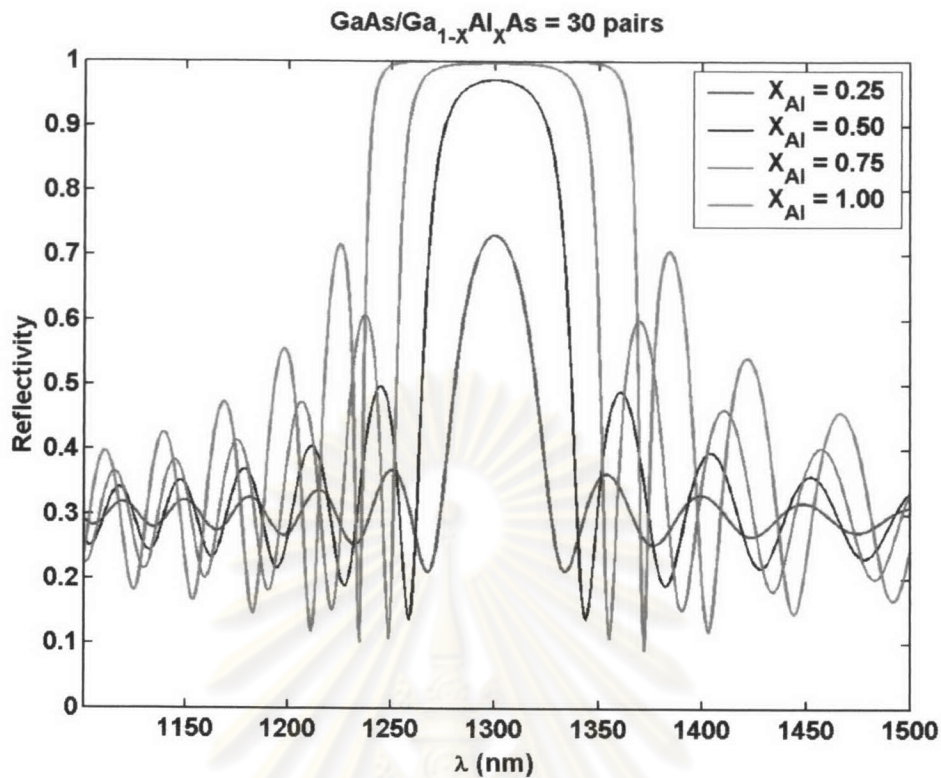
(ก) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As

(ง) GaAs/AlAs

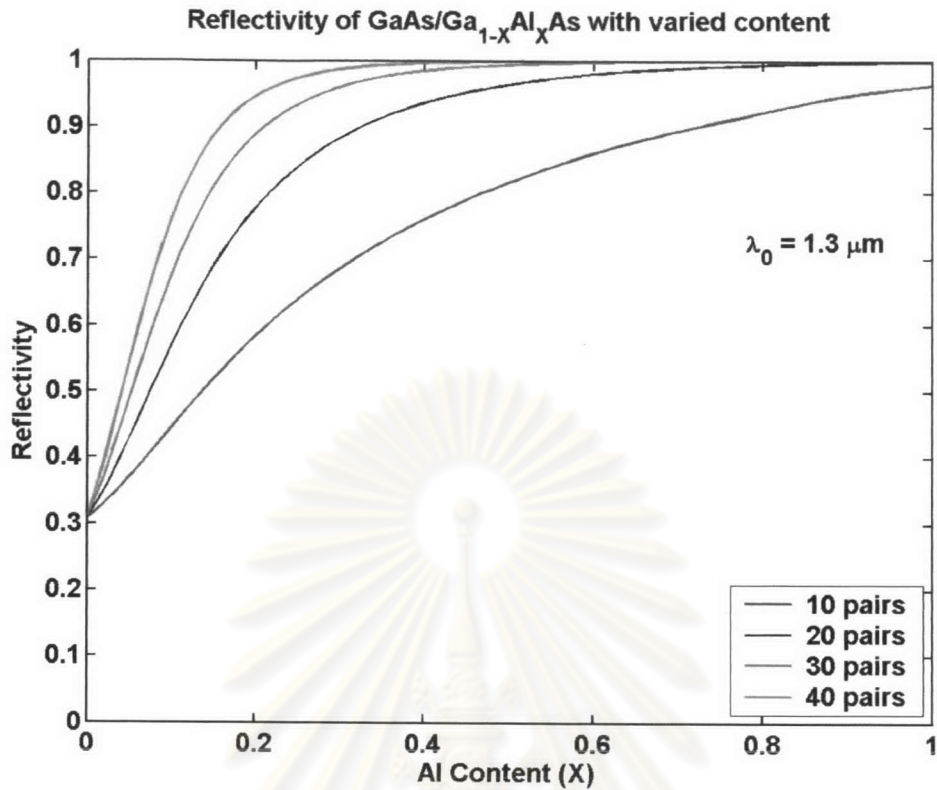
รูปที่ 4.2 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่
ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00



รูปที่ 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



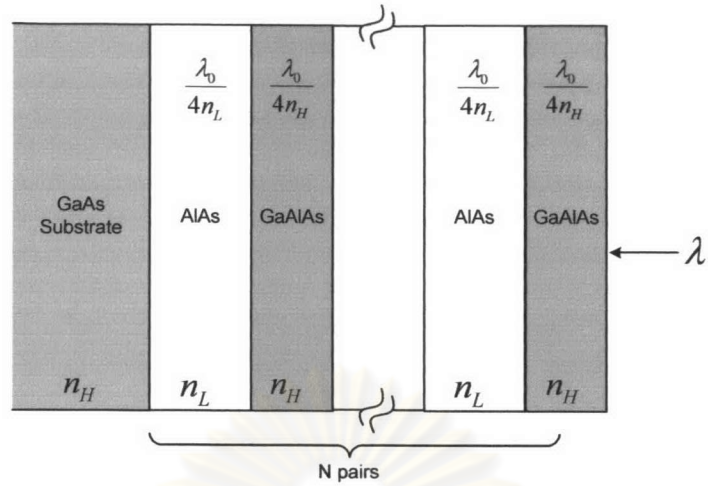
รูปที่ 4.3 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs ที่มีค่าสัดส่วน $X_{Al} = 0.25, 0.50, 0.75$ และ 1.00 โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



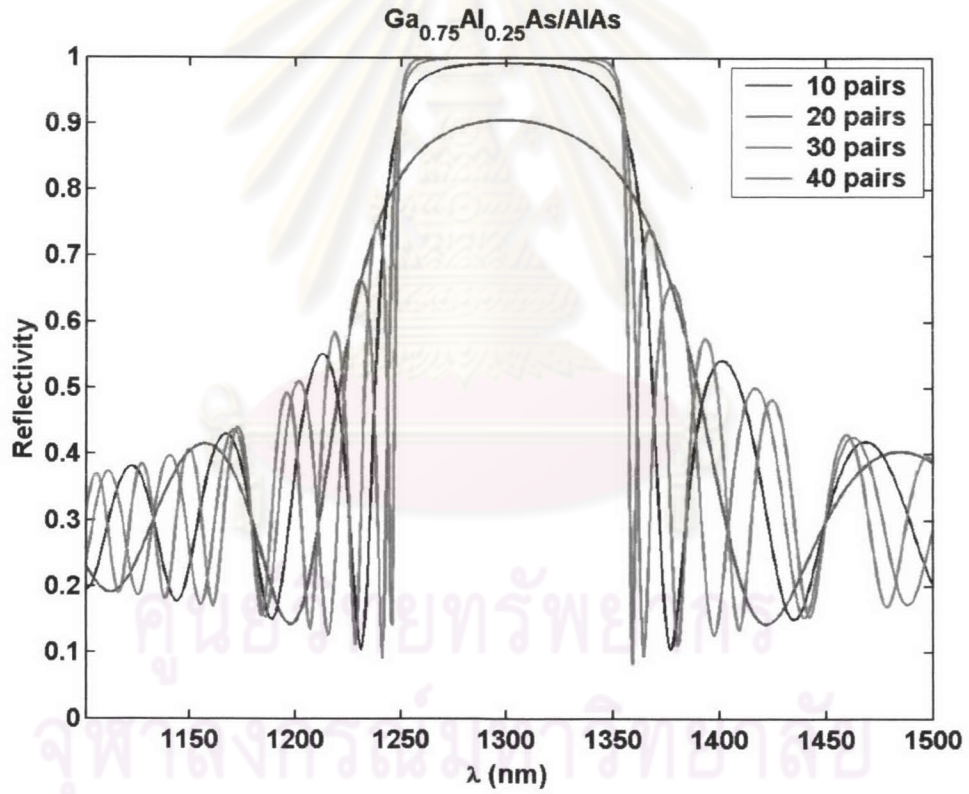
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนกับจำนวนคู่ GaAs/GaAlAs และค่าสัดส่วน Al

สรุปความสัมพันธ์ของจำนวนคู่ GaAs/GaAlAs และสัดส่วน Al ที่มีต่อค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งานได้ดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อค่าสัดส่วนของ Al เท่ากับศูนย์ นั่นคือแบรกริเฟกเตอร์ทุกชั้นเป็น GaAs ทั้งหมด ค่าการสะท้อนที่ได้จะมีค่าประมาณ 0.308 ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนของรอยต่อ GaAs กับอากาศ และเมื่อสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs มีค่ามากขึ้นค่าการสะท้อนจะสูงขึ้นด้วยโดยแบรกริเฟกเตอร์ที่มีจำนวนคู่มากกว่าจะมีค่าการสะท้อนสูงกว่าดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

และยังได้คำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์โครงสร้าง GaAlAs/AlAs บนแผ่นฐาน GaAs แสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับโครงสร้าง GaAs/GaAlAs ซึ่งพบว่าค่าการสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนคู่ของแบรกริเฟกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs ลงค่าการสะท้อนที่ได้จะลดลงและมีแบนด์วิดท์แคบลงอย่างเห็นได้ชัดแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้าง GaAs/GaAlAs คือที่จำนวนคู่ของแบรกริเฟกเตอร์เท่าๆ กัน หากดัชนีหักเห n_H และ n_L มีค่าต่างกันมากแล้วค่าการสะท้อนจะสูงและแบนด์วิดท์จะกว้าง ดังนั้นค่าการสะท้อนที่ได้จาก GaAs/AlAs จะมีค่ามากกว่าและกว้างกว่า GaAs/GaAlAs หรือ GaAlAs/AlAs

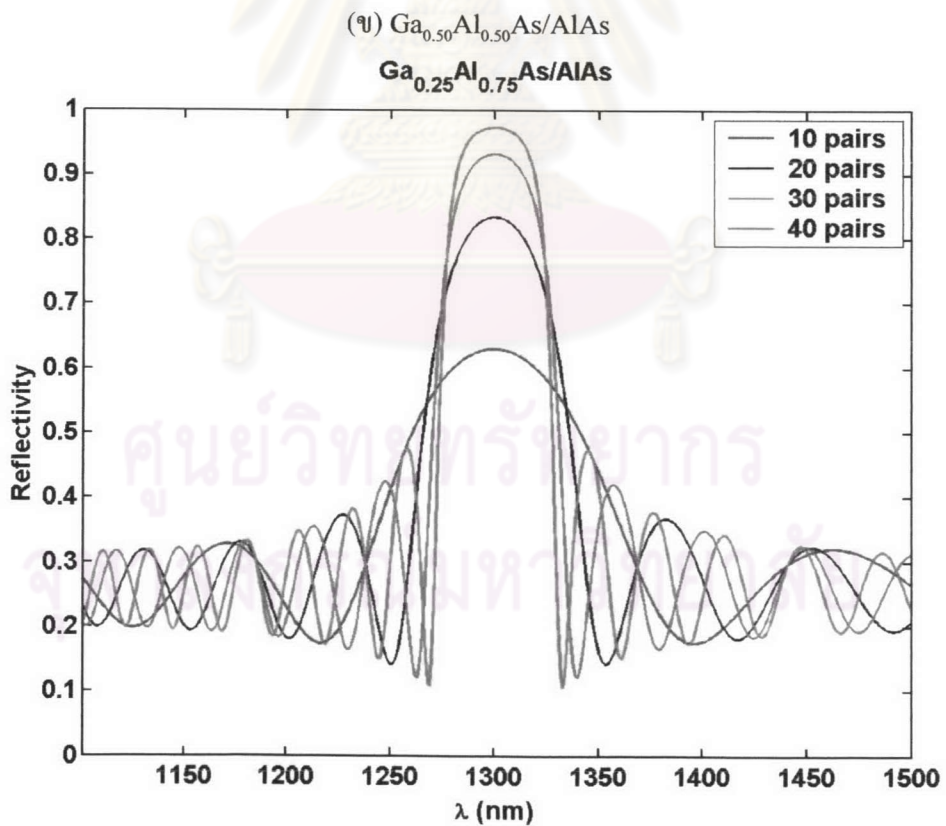
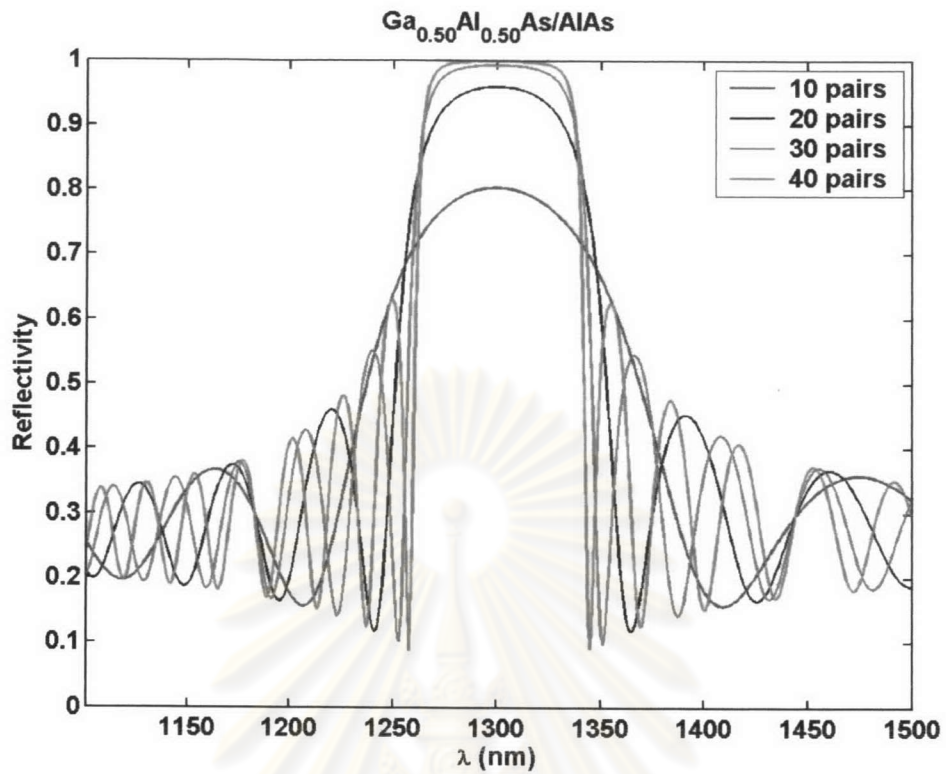


รูปที่ 4.5 แบริกรีกเฟคเตอร์โครงสร้าง GaAlAs/AlAs บนแผ่นฐาน GaAs

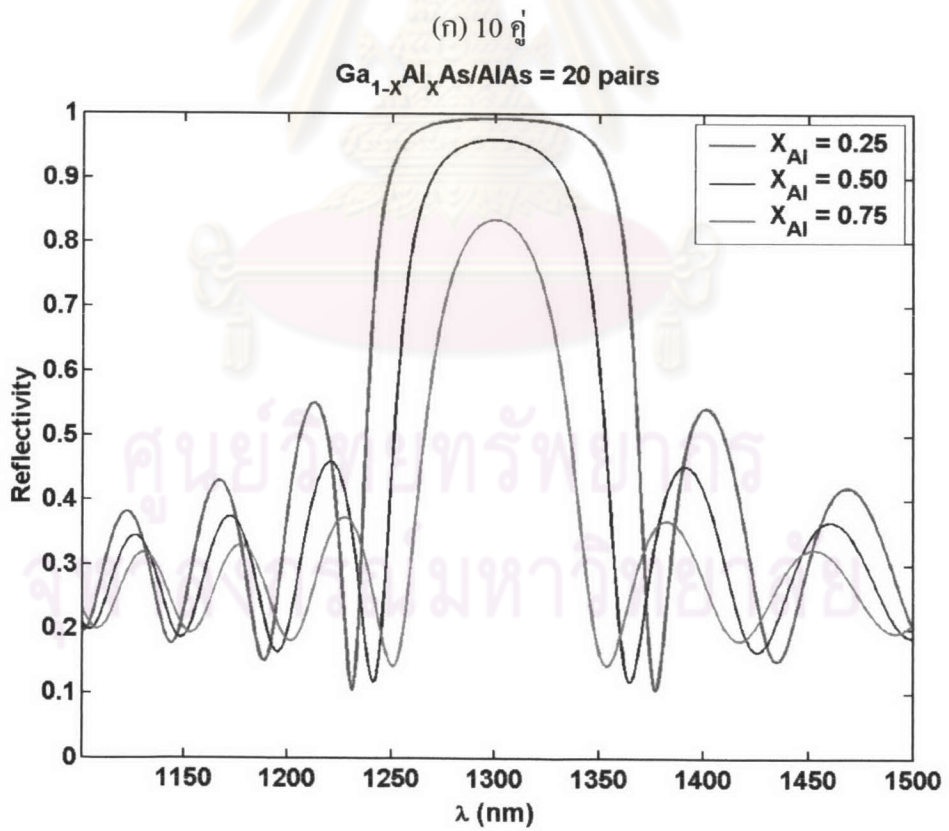
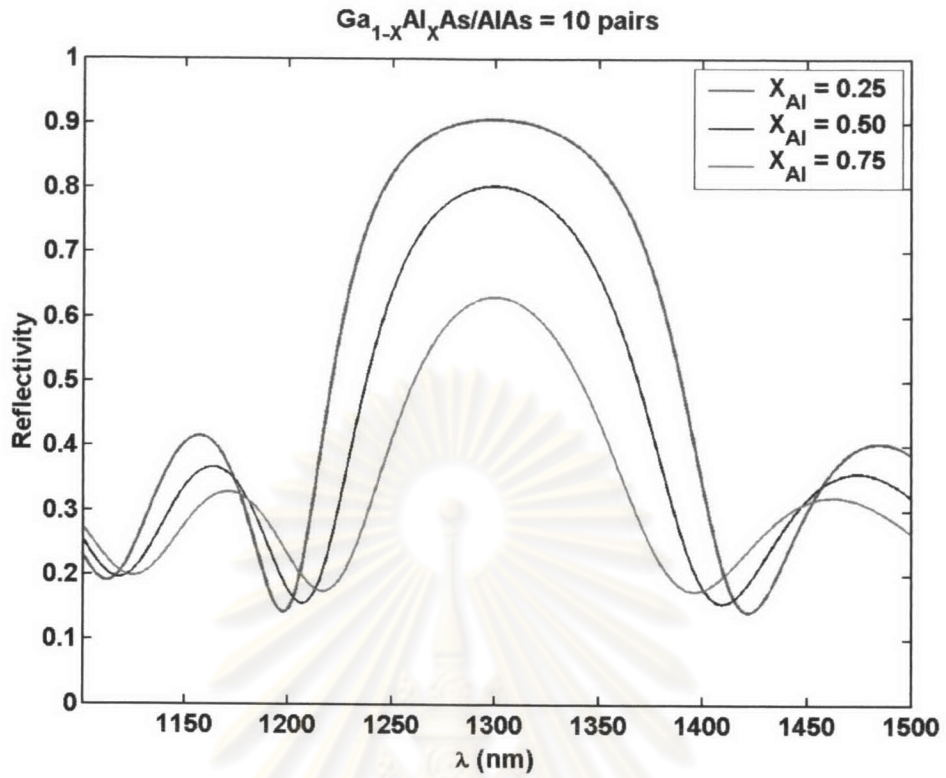


(ก) $\text{Ga}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As/AlAs}$

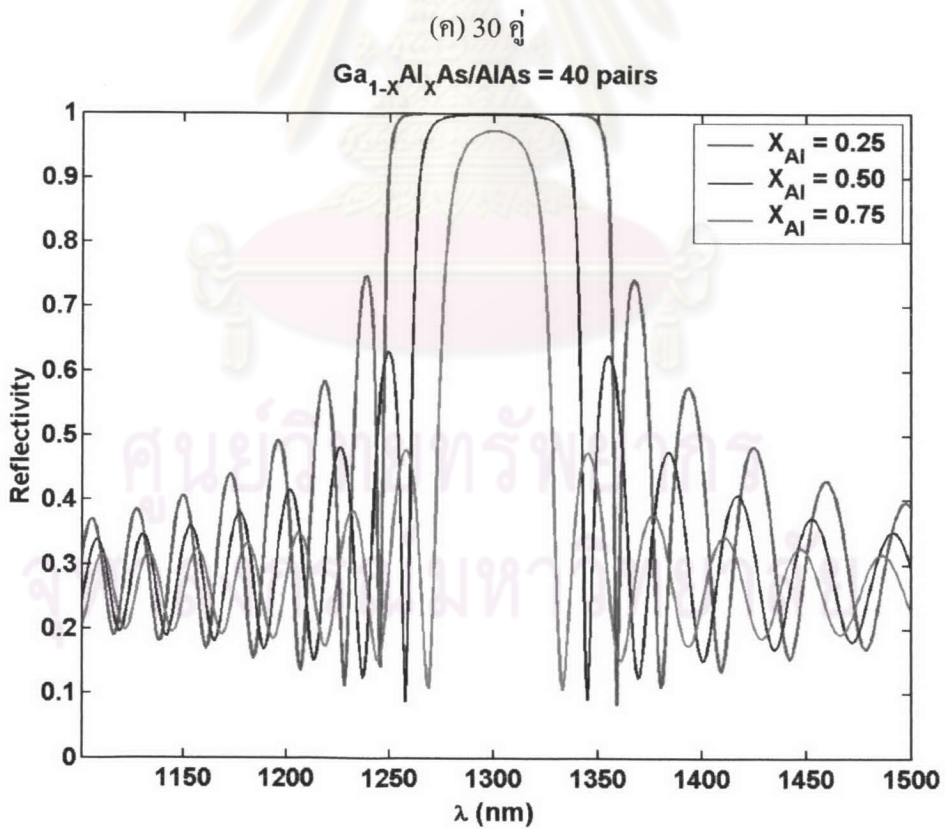
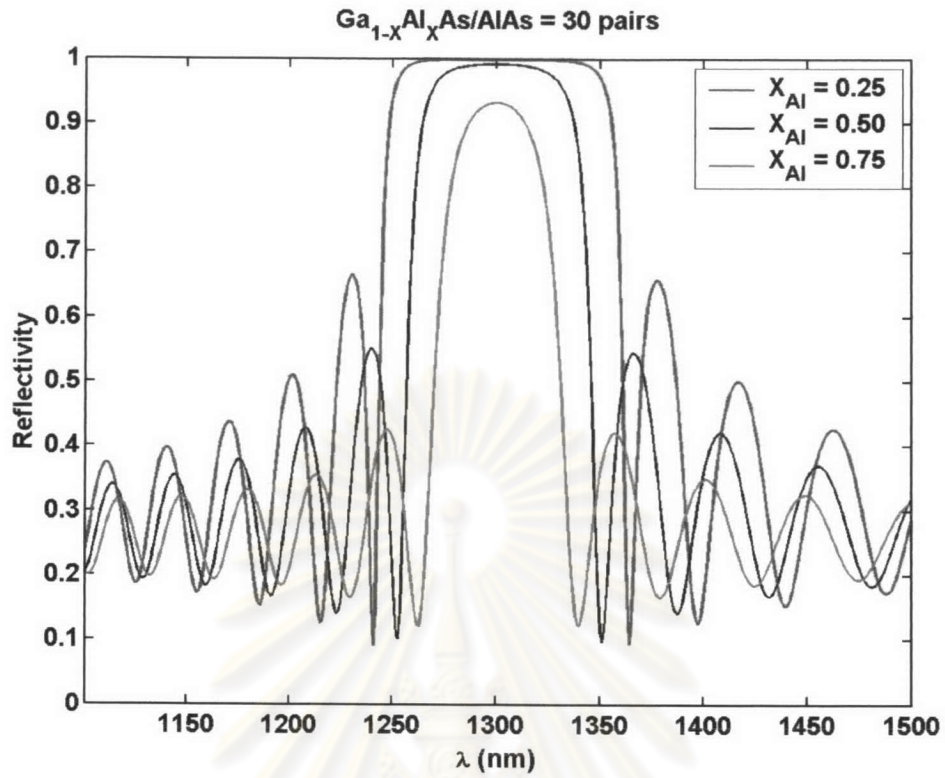
รูปที่ 4.6 ค่าการสะท้อนของแบริกรีกเฟคเตอร์ GaAlAs/AlAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่ ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50 และ (ค) 0.75



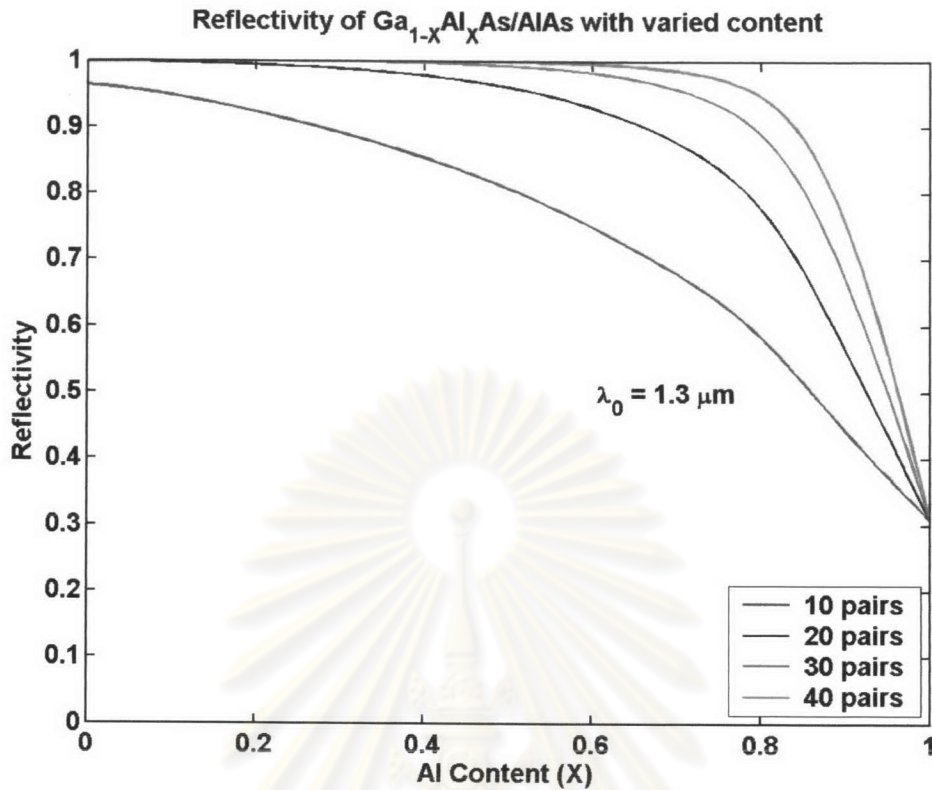
รูปที่ 4.6 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกรีก์เฟคเตอร์ GaAlAs/AIAs จำนวน 10, 20, 30 และ 40 คู่
ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs: (ก) 0.25, (ข) 0.50 และ (ค) 0.75



รูปที่ 4.7 ค่าการสะท้อนของ $\text{GaAlAs}/\text{AlAs}$ ที่มีค่าสัดส่วน $X_{\text{Al}}=0.25, 0.50$ และ 0.75 โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



รูปที่ 4.7 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ $\text{GaAlAs}/\text{AlAs}$ ที่มีค่าสัดส่วน $X_{\text{Al}}=0.25, 0.50$ และ 0.75 โดยมีจำนวนคู่ (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนกับจำนวนคู่ GaAlAs/AIAs และค่าสัดส่วน Al

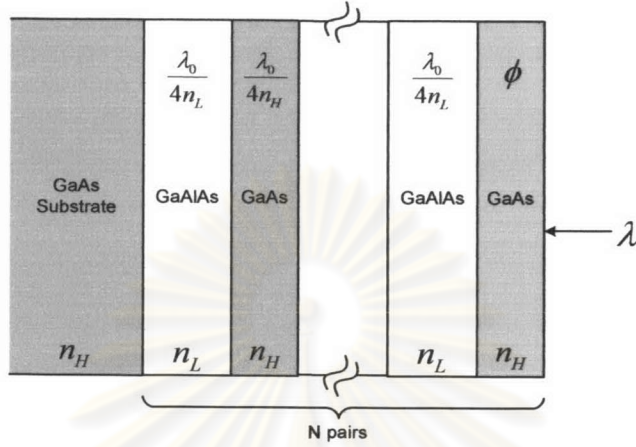
รูปที่ 4.8 สรุปความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น $1.3 \mu\text{m}$ กับจำนวนคู่และค่าสัดส่วน Al ของโครงสร้าง GaAlAs/AIAs พบว่าที่ค่าสัดส่วนของ Al เท่าๆ กัน แบริกร์เฟกเตอร์ที่มีจำนวนคู่มากกว่าจะมีค่าการสะท้อนสูงกว่า และเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนของ Al ให้มากขึ้น ค่าการสะท้อนจะมีค่าลดลงจนเมื่อค่าสัดส่วนของ Al เท่ากับ 1 นั่นคือทุกชั้นเป็น AIAs ทั้งหมด ค่าการสะท้อนจะมีค่าเท่ากันซึ่งเป็นค่าการสะท้อนของรอยต่อ AIAs กับอากาศนั่นเอง

สรุปผลการคำนวณ โครงสร้างแบบสม่ำเสมอได้ว่า ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งานจะมีค่าสูงขึ้นและมีแบนด์วิดท์แคบลงเมื่อเพิ่มจำนวนคู่ของแบบริกร์เฟกเตอร์ และถ้าสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่นำมาใช้สร้างมีค่าดัชนีหักเหต่างกันมาก ค่าการสะท้อนจะมีค่าสูงและมีแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่า

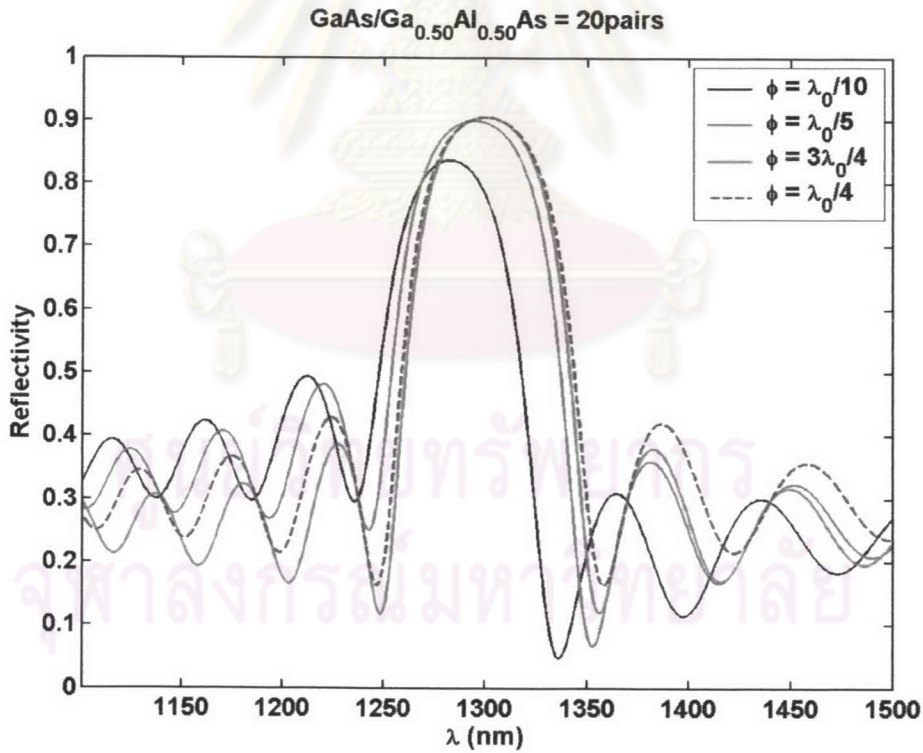
4.2 ค่าการสะท้อนของแบบริกร์เฟกเตอร์โครงสร้างสม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟส (phase-shifted layer)

ในโครงสร้างนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นเลื่อนเฟสที่มีต่อค่าการสะท้อนบริเวณความยาวคลื่นใช้งาน โดยเปรียบเทียบกับโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ โครงสร้างของแบบริกร์เฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งคล้ายคลึงกับโครงสร้างแบบสม่ำเสมอในรูปที่ 4.1 แต่จะทำการเปลี่ยนค่าความหนาของชั้นเลื่อนเฟส GaAs ให้มีค่าต่างๆ กัน

คือ $0, \frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}, \frac{\lambda_0}{4}, \frac{\lambda_0}{2}, \frac{3\lambda_0}{4}$ และ λ_0 และทำการคำนวณโดยให้จำนวน GaAs/GaAlAs เท่ากับ 20 คู่ และค่าสัดส่วนของ Al เป็น 0.50



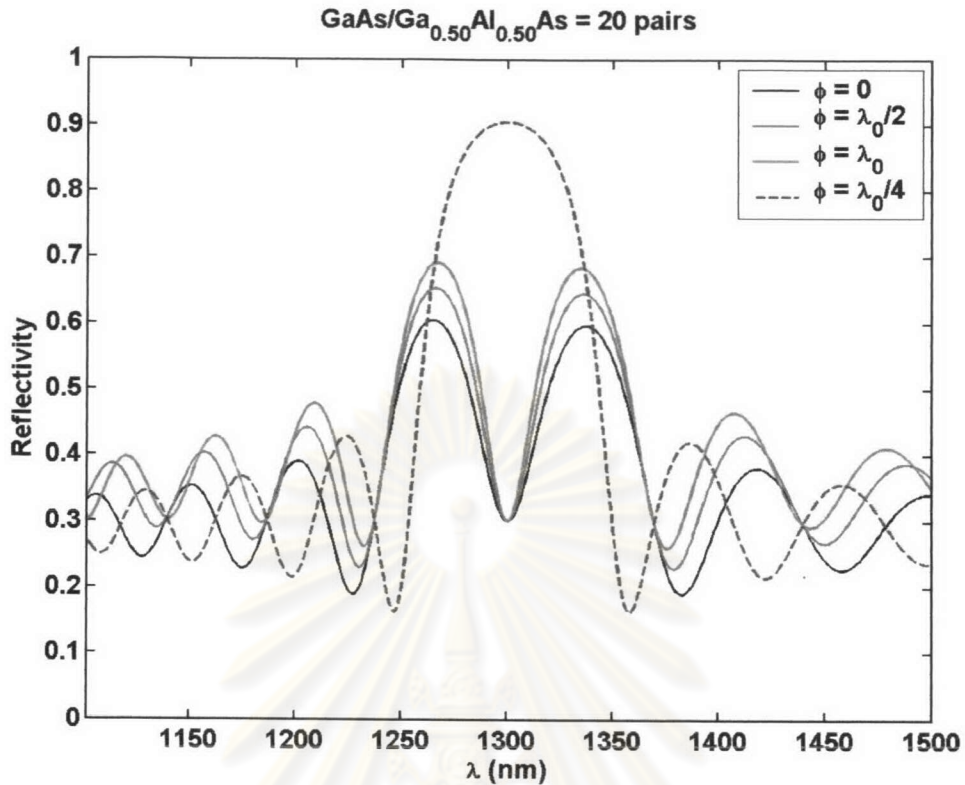
รูปที่ 4.9 โครงสร้างแบรกรีเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟส



(ก) ค่าการสะท้อนที่มีชั้นเลื่อนเฟสหนา $\frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ เปรียบเทียบกับ $\frac{\lambda_0}{4}$

รูปที่ 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



(จ) ค่าการสะท้อนที่มีชั้นเลื่อนเฟสหนา 0 , $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 เปรียบเทียบกับ $\frac{\lambda_0}{4}$

รูปที่ 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

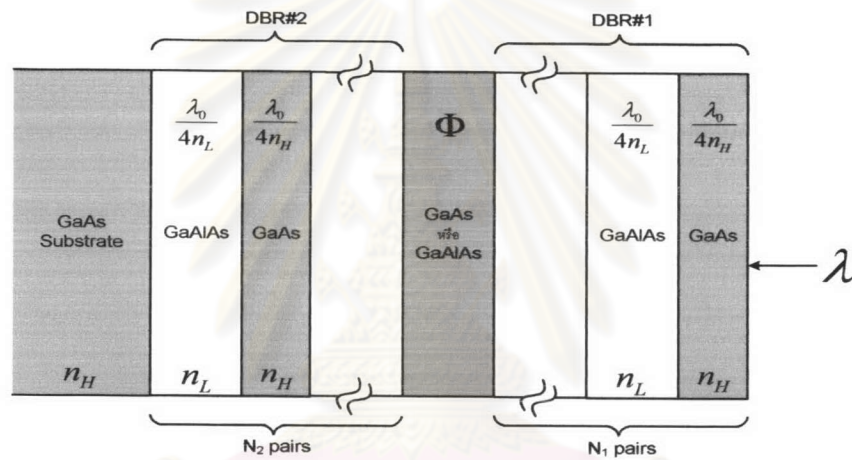
ผลการคำนวณในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าการสะท้อนที่ได้จากความหนา $\frac{\lambda_0}{4}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ มีค่าสูงที่สุดที่ความถี่ใช้งาน $1.3 \mu\text{m}$ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (1) แต่ที่ความหนา $\frac{3\lambda_0}{4}$ ค่าการสะท้อนสูงสุดอันดับอื่นๆ จะเลื่อนเข้ามาใกล้ค่า $1.3 \mu\text{m}$ มากขึ้นเนื่องจากมีความหนาที่มากกว่าซึ่งจะตอบสนองกับความยาวคลื่นค่าอื่นๆ ได้มากกว่าความหนา $\frac{\lambda_0}{4}$ ส่วนที่ความหนา $\frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{\lambda_0}{10}$ จะทำให้จุดสูงสุดของกราฟเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้น เนื่องจากเมื่อทำการคำนวณค่า λ โดยใช้สมการ (1) พบว่าที่ความหนาจะสะท้อนได้ดีที่ความยาวคลื่นสั้นลง และที่ความหนา 0 , $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 จะให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งานมีค่าต่ำเนื่องจากเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันขึ้นในชั้นเลื่อนเฟส แต่ที่ความหนา λ_0 ค่าการสะท้อนสูงสุดอันดับอื่นๆ จะเลื่อนเข้ามาใกล้ค่า $1.3 \mu\text{m}$ มากกว่าที่ $\frac{\lambda_0}{2}$ และ 0 ตามลำดับ เนื่องจากความหนาที่มากกว่าจะตอบสนองกับความยาวคลื่นค่าอื่นๆ ได้มากกว่า

4.3 คำนวณค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs โครงสร้างสม่ำเสมอ โดยมีชั้น

เลื่อนเฟส GaAs หรือ GaAlAs ความหนาต่างๆ กันคือ $\frac{\lambda_0}{10}, \frac{\lambda_0}{5}, \frac{\lambda_0}{4}, \frac{\lambda_0}{2}, \frac{3\lambda_0}{4}$ และ λ_0

แทรกคั่น

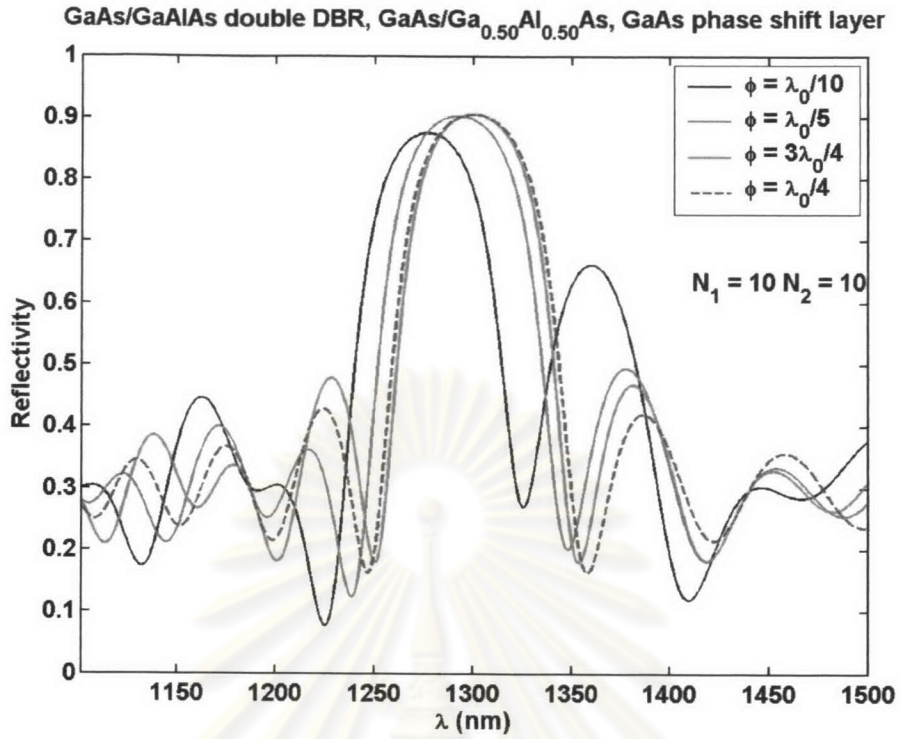
ในโครงสร้างนี้จะทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนกับกรณีที่มีชั้นเลื่อนเฟสอยู่ข้างหน้าโดยการแทรกชั้นเลื่อนเฟสให้อยู่ในโครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์ โครงสร้างนี้แสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งประกอบด้วยแบรกริเฟกเตอร์จำนวน 2 ชุด แต่ละชุดมีจำนวนคู่ GaAs/GaAlAs เท่ากับ N_1 และ N_2 และมีชั้นเลื่อนเฟส GaAs หรือ GaAlAs แทรกคั่นระหว่างทั้งสองชุด โดยทำการคำนวณหาค่าการสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นเลื่อนเฟส, ค่าสัดส่วน Al ในชั้นเลื่อนเฟสและจำนวนคู่ในแบรกริเฟกเตอร์ชุดที่ 1 และ 2



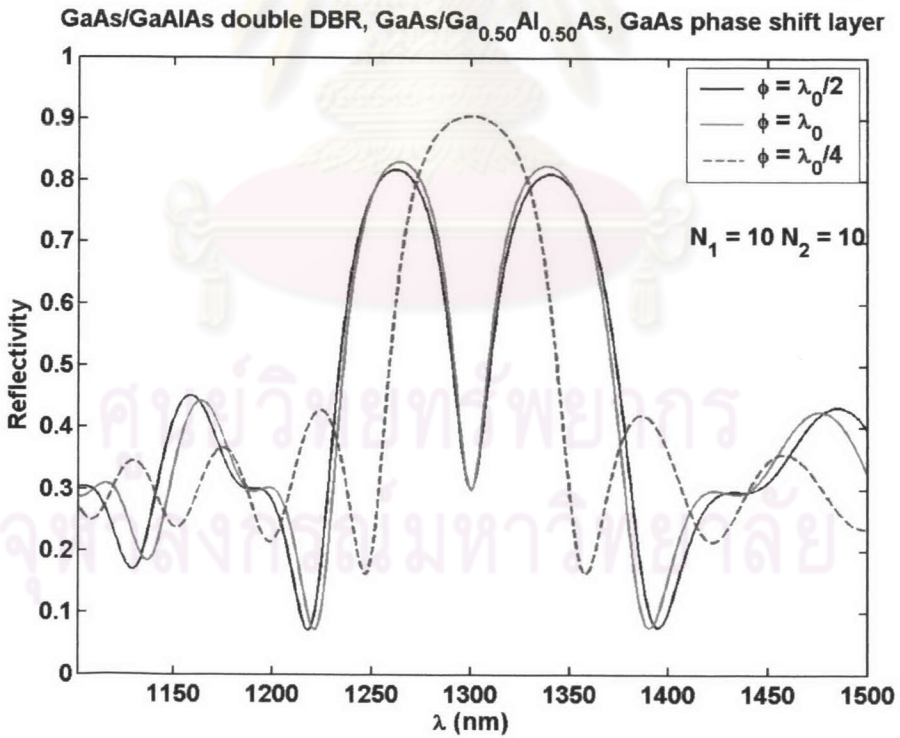
รูปที่ 4.11 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs

4.3.1 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีชั้น GaAs เป็นชั้นแทรกคั่น

ผลการคำนวณ GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As จำนวน 20 คู่โดยให้มีจำนวนคู่ในชุดที่ 1 เท่ากับ 10 คู่ และชุดที่ 2 เท่ากับ 10 คู่ ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เมื่อวิเคราะห์พบว่าลักษณะของค่าการสะท้อนที่บริเวณความยาวคลื่นใช้งาน 1.3 μm มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับค่าการสะท้อนที่ได้จากโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเลื่อนเฟสอยู่บริเวณผิวหน้า นั่นก็คือค่าการสะท้อนที่ได้จากความหนา $\frac{\lambda_0}{4}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ใช้งาน 1.3 μm ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (1) ส่วนที่ความหนา $\frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{\lambda_0}{10}$ จะทำให้จุดสูงสุดของกราฟเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้น เนื่องจากที่ความหนาจะสะท้อนได้ดีที่ความยาวคลื่นสั้นลง และที่ความหนา 0, $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 จะให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งานมีค่าต่ำเนื่องจากเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันขึ้นในชั้นเลื่อนเฟส



(ก) ความหนาชั้นเลื่อนเฟสเท่ากับ $\frac{\lambda_0}{10}$, $\frac{\lambda_0}{5}$ และ λ_0 เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$

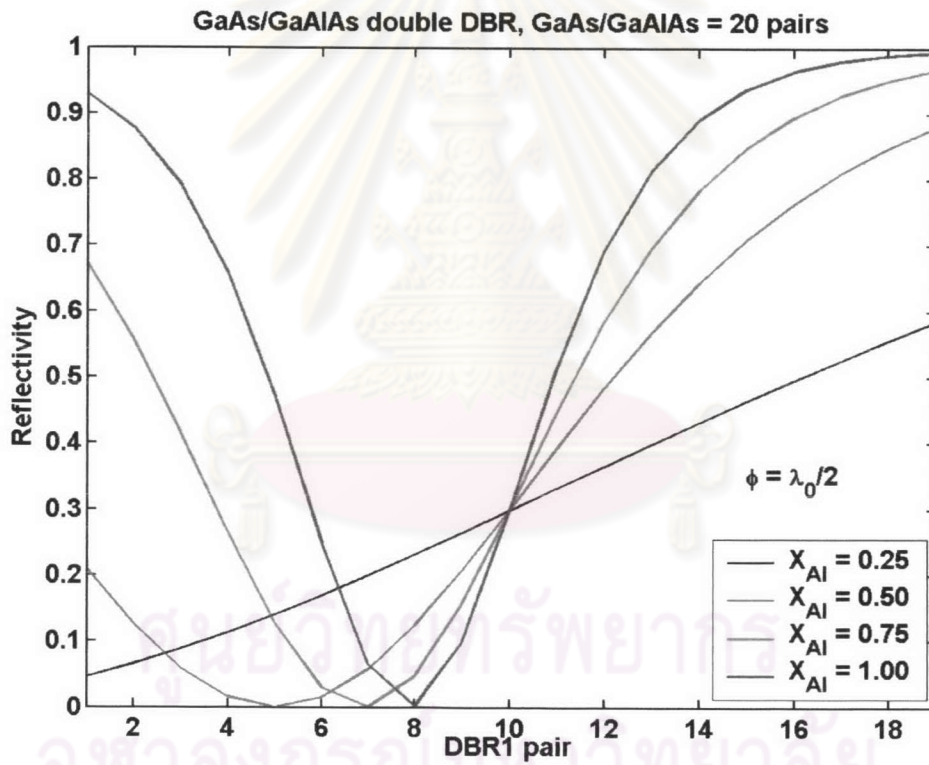


(ข) ความหนาชั้นเลื่อนเฟสเท่ากับ $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$

รูปที่ 4.12 ค่าการสะท้อนของ GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 คู่ ที่มีความหนาของชั้นเลื่อนเฟสต่างๆ

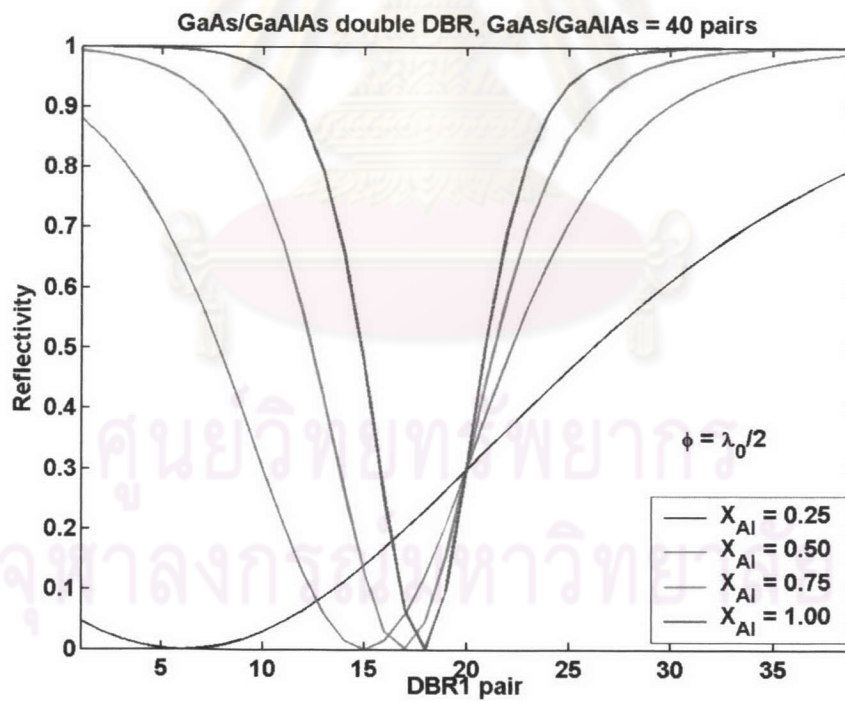
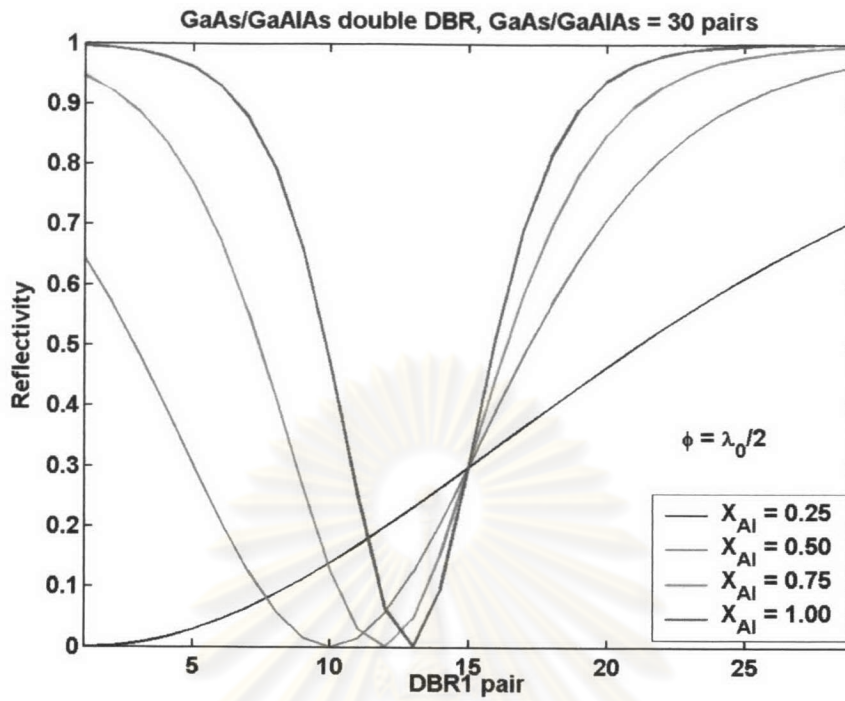
เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$ (ก) ความหนา $\frac{\lambda_0}{10}$, $\frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ข) ความหนา $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0

เมื่อพิจารณาเฉพาะ โครงสร้างที่มีความหนาของชั้นเลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ (เนื่องจากให้ค่าการสะท้อนต่ำที่ความยาวคลื่นใช้งาน) โดยคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1.3 μm เมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัดส่วนของจำนวน GaAs/GaAlAs ในชุดที่ 1 และ 2 โดยมีจำนวนคู่ GaAs/GaAlAs ทั้งหมดในโครงสร้างเป็น 20, 30, 40 และ 50 คู่ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าที่ค่าสัดส่วน Al ใน GaAlAs ต่างๆ กันแล้ว มีค่า N_1 และ N_2 อยู่บางค่าที่ทำให้การสะท้อนที่ 1.3 μm เป็นศูนย์ เช่น โครงสร้าง GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As จำนวน 20 คู่ ในรูปที่ 4.13 (ก) จะให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1.3 μm เป็นศูนย์เมื่อมี N_1 เท่ากับ 5 และ N_2 เท่ากับ 15 หรือในรูปที่ 4.13 (ข) โครงสร้าง GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As จำนวน 30 คู่ จะให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1.3 μm เป็นศูนย์เมื่อมี N_1 เท่ากับ 10 และ N_2 เท่ากับ 20



(ก) 20 คู่

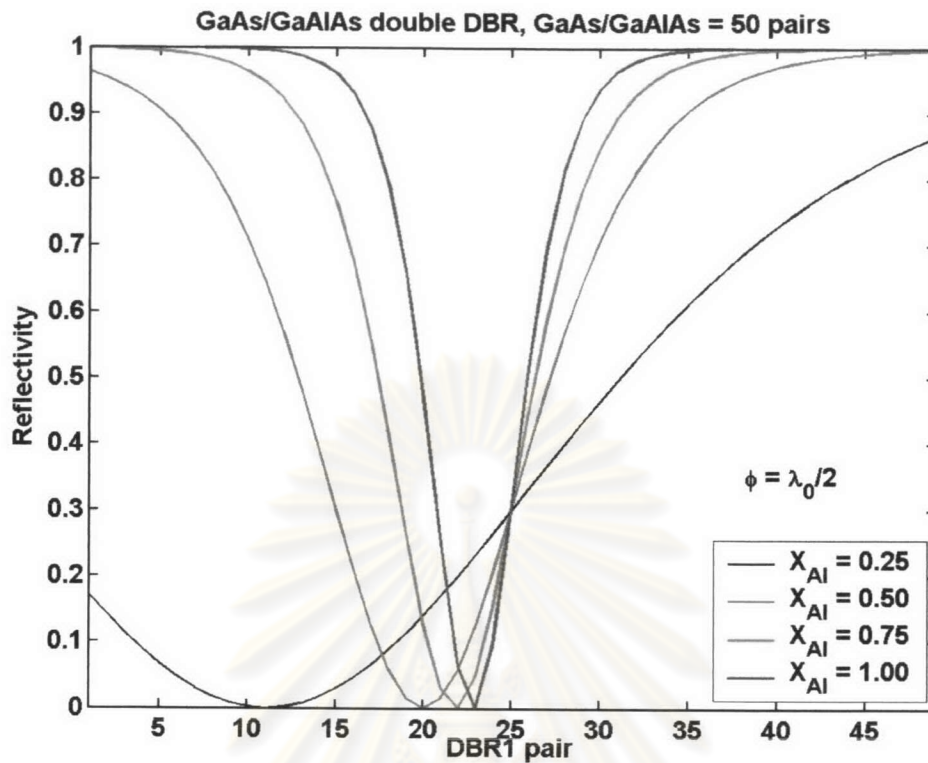
รูปที่ 4.13 ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีความหนาของชั้นเลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ เมื่อเปลี่ยนค่า N_1 และ N_2 โดยมีจำนวนทั้งหมด (ก) 20 คู่, (ข) 30 คู่, (ค) 40 คู่ และ (ง) 50 คู่



รูปที่ 4.13 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟคเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีความหนาของชั้น

เลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ เมื่อเปลี่ยนค่า N_1 และ N_2 โดยมีจำนวนทั้งหมด

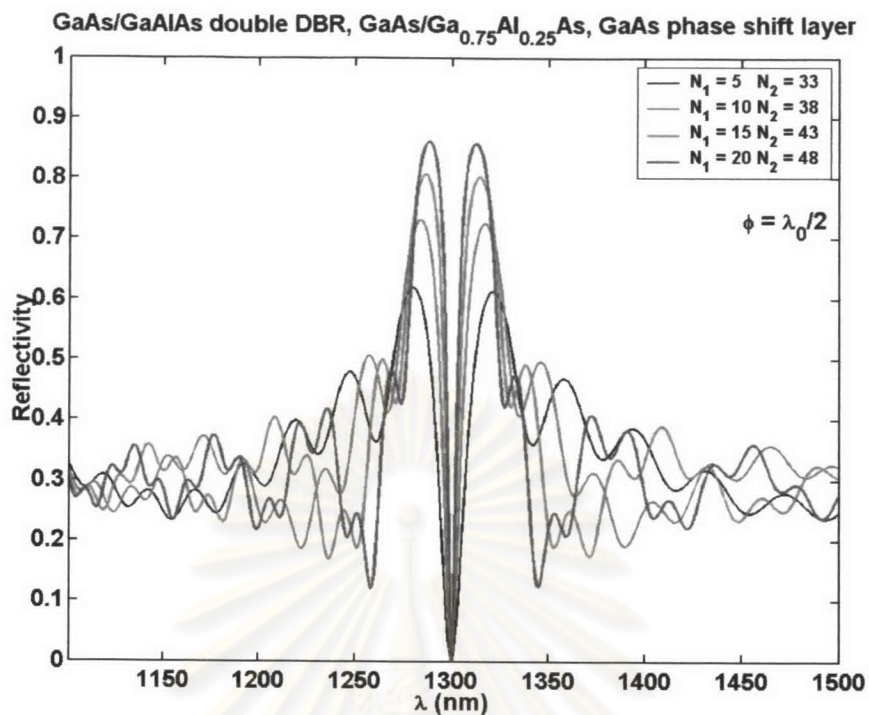
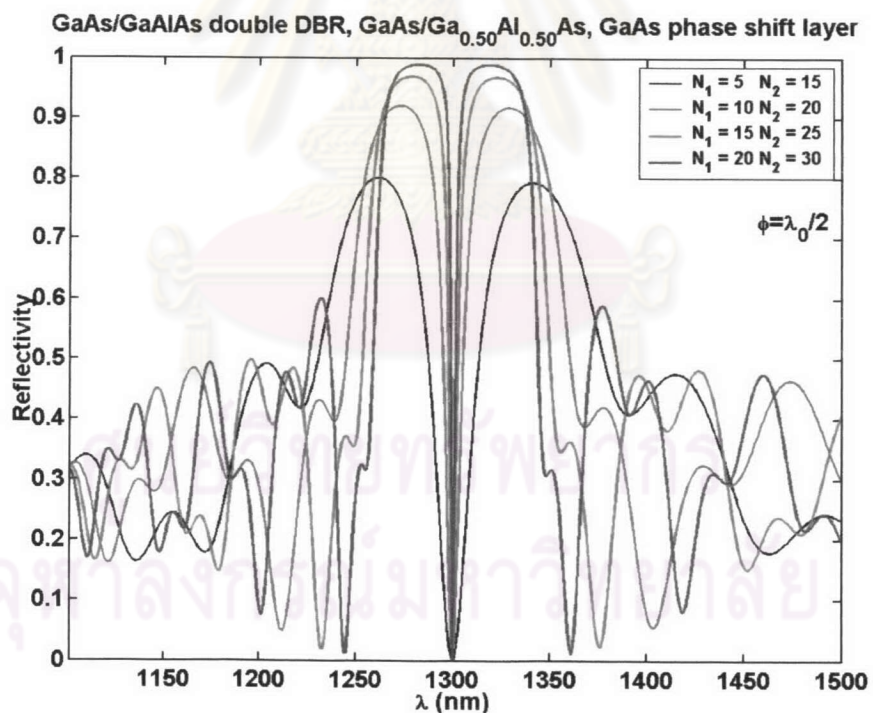
(ก) 20 คู่, (ข) 30 คู่, (ค) 40 คู่ และ (ง) 50 คู่



(ง) 50 คู่

รูปที่ 4.13 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีความหนาของชั้น
 เลื่อนเฟสเป็น $\frac{\lambda_0}{2}$ เมื่อเปลี่ยนค่า N_1 และ N_2 โดยมีจำนวนทั้งหมด
 (ก) 20 คู่, (ข) 30 คู่, (ค) 40 คู่ และ (ง) 50 คู่

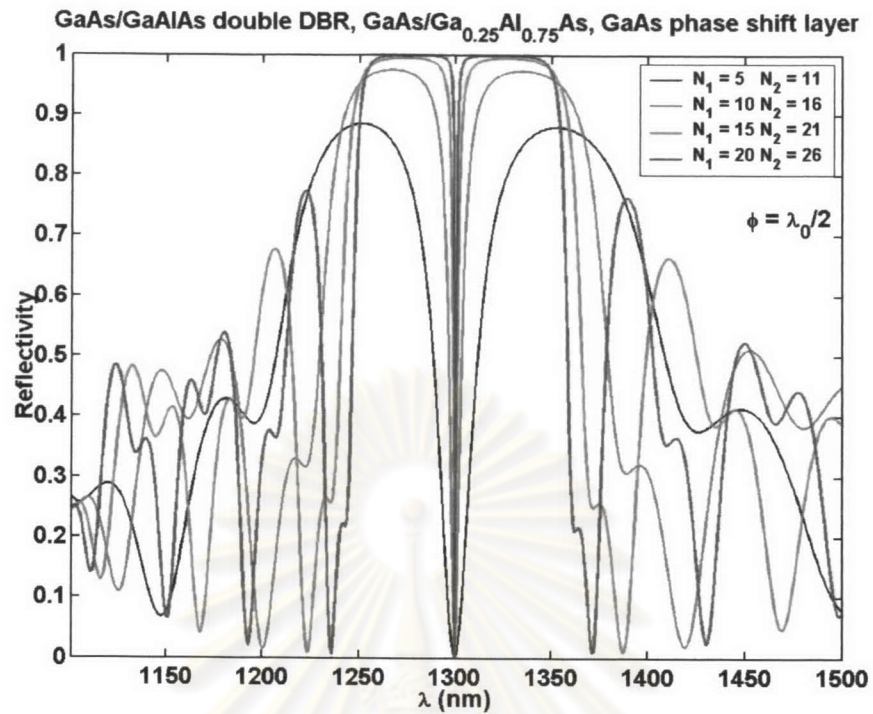
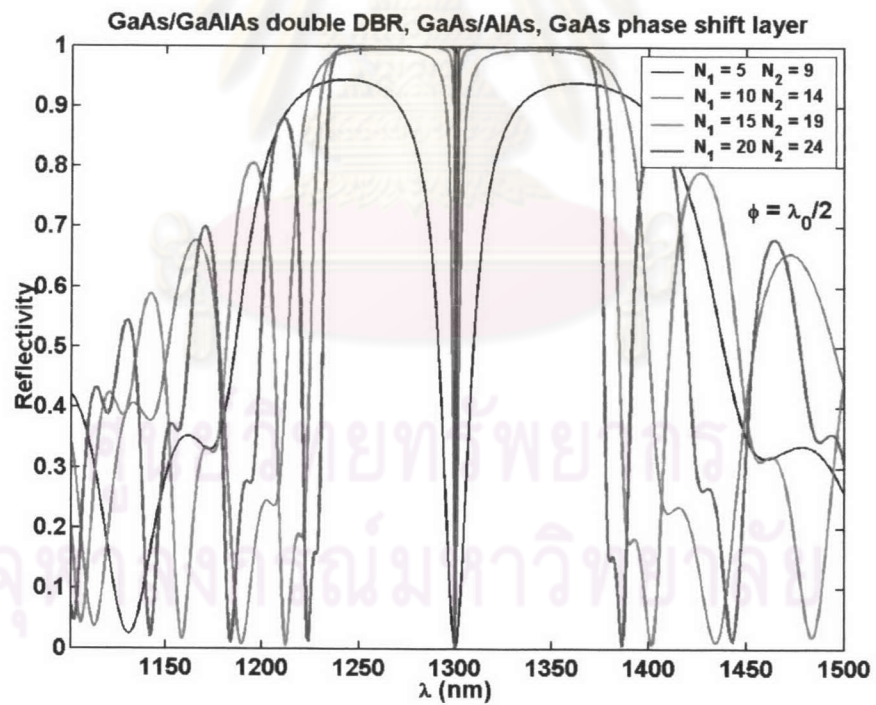
เมื่อนำค่า N_1 และ N_2 ที่ทำให้แบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟสหนา $\frac{\lambda_0}{2}$ เกิดการสะท้อนเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1.3 μm (ที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.13) มาคำนวณค่าการสะท้อนโดยให้ค่าสัดส่วน Al มีค่าต่างๆ กันดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าที่ค่าสัดส่วน Al เท่าๆ กัน โดยมีค่า N_1 และ N_2 ที่เหมาะสมที่ทำให้การสะท้อนที่ 1.3 μm เป็นศูนย์ซึ่งมีลักษณะเป็นแบนด์พาสฟิวเตอร์ทางแสง (Band pass filter) และการเพิ่มจำนวนคู่ของ GaAs/GaAlAs ให้มากขึ้นจะทำให้แบนด์วิดท์ของแบนด์พาสฟิวเตอร์แคบลง นั่นคือโครงสร้างนี้จะสามารถส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแคบๆ ได้โดยการออกแบบให้มีจำนวนคู่ N_1 และ N_2 ที่เหมาะสม

(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As

รูปที่ 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) $X_{Al} = 1.00$

(ก) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As

(ง) GaAs/AlAs

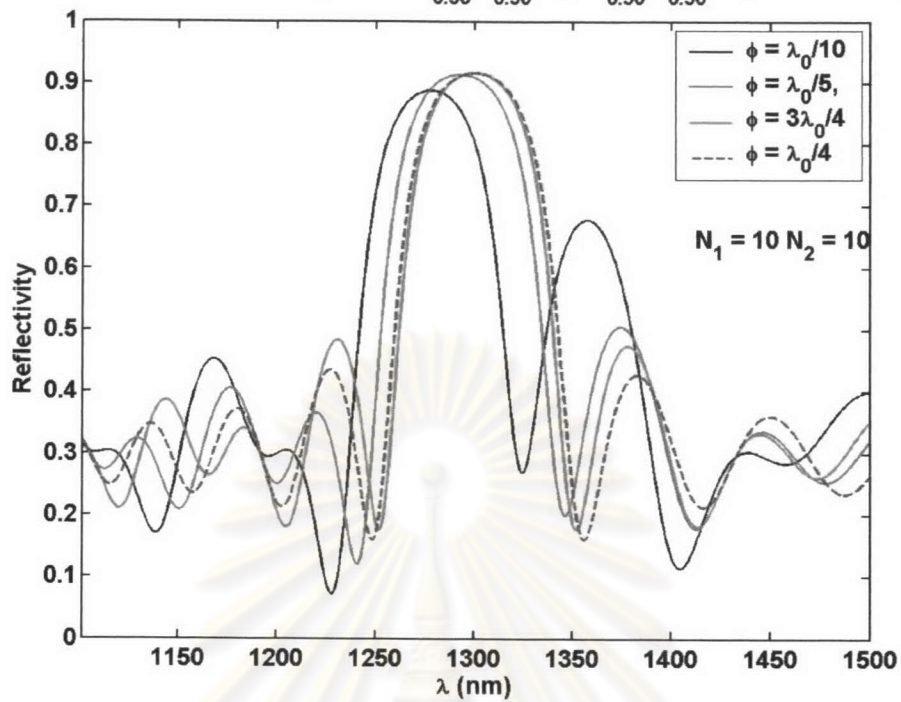
รูปที่ 4.14 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส

หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ จำนวนคู่ $N_1 + N_2$ ต่างๆ กัน โดยมีค่าสัดส่วน Al ใน GaAlAs:

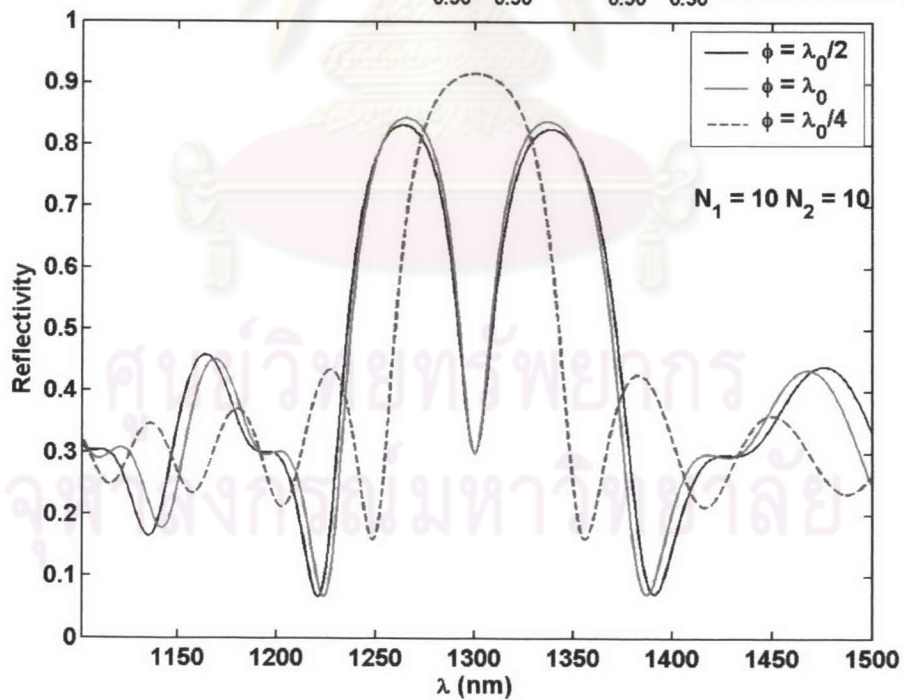
(ก) $X_{Al} = 0.25$, (ข) $X_{Al} = 0.50$, (ค) $X_{Al} = 0.75$ และ (ง) $X_{Al} = 1.00$

4.3.2 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs ที่มีชั้น GaAlAs เป็นชั้นแทรกคั่น

โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟสเป็น Ga_{1-y}Al_yAs (ค่า X และ Y ไม่จำเป็นต้องเป็นค่าเดียวกัน) ซึ่งเมื่อคำนวณค่าการสะท้อนโดยกำหนดให้ X=Y=0.50 และมีค่า N₁ เท่ากับ N₂ เท่ากับ 10 คู่ แล้วได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีลักษณะการสะท้อนใกล้เคียงกับโครงสร้างที่มีชั้นเลื่อนเฟสเป็น GaAs มาก (รูปที่ 4.12) และสามารถอธิบายหลักการและเหตุผลเดียวกันอธิบายค่าการสะท้อนเมื่อมีค่าความหนาของชั้นเลื่อนเฟสต่างๆ ได้ และเช่นเดียวกันกับโครงสร้างที่มีชั้นเลื่อนเฟส GaAs คือที่ค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAs/GaAlAs ค่าต่างๆ สำหรับแบรกริเฟกเตอร์จำนวน N คู่แล้ว จะมีอัตราส่วน N₁:N₂ (N=N₁+N₂) ที่ทำให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งาน 1.3 μm เป็นศูนย์ และเนื่องจากว่าถ้า N₁, N₂ และค่าสัดส่วน Al ใน GaAs/GaAlAs (และในชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs) ของโครงสร้างที่มีชั้นเลื่อนเฟส GaAs และ ชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs เท่ากันแล้วลักษณะของค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะใกล้เคียงกันมาก (จากรูปที่ 4.12 และ 4.15) ดังนั้นอัตราส่วน N₁:N₂ ที่ทำให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1.3 μm เป็นศูนย์จึงมีค่าเท่ากันทั้งสองโครงสร้าง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนคู่ N ให้มากขึ้นโดยรักษาอัตราส่วน N₁:N₂ ให้ค่าการสะท้อนที่ 1.3 μm เป็นศูนย์พบว่า เมื่อจำนวนคู่ N ให้มากขึ้นช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการสะท้อนเป็นศูนย์แคบลงมากขึ้นเช่นเดียวกับโครงสร้างที่มีชั้นเลื่อนเฟส GaAs ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

GaAs/GaAlAs double DBR, GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As, Ga_{0.50}Al_{0.50}As phase shift layer

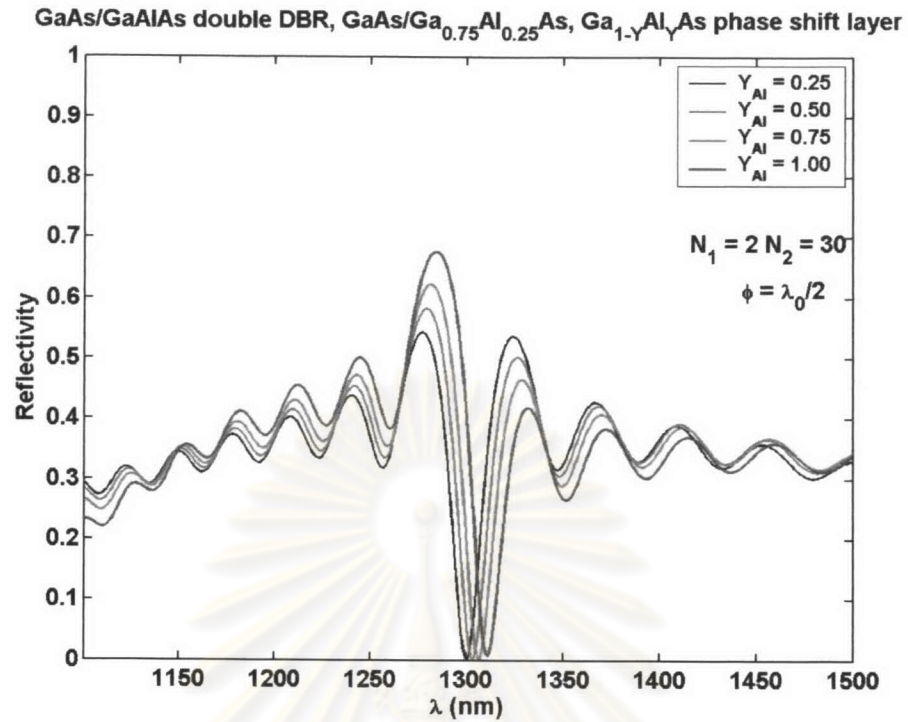
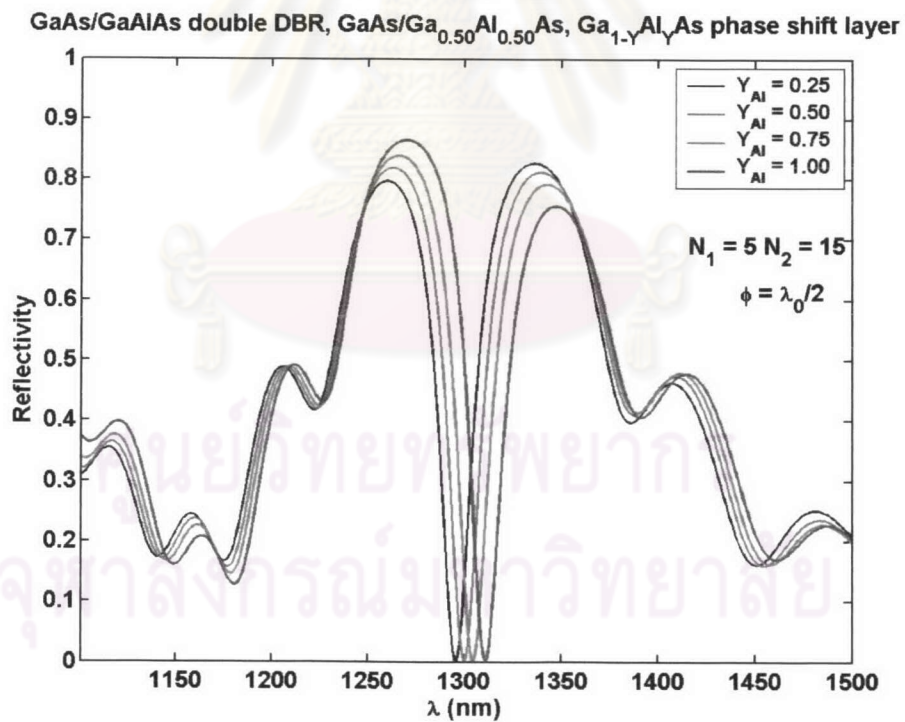
(ก) ความหนาของชั้นเลื่อนเฟสเท่ากับ $\frac{\lambda_0}{10}$, $\frac{\lambda_0}{5}$ และ λ_0 เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$

GaAs/GaAlAs double DBR, GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As, Ga_{0.50}Al_{0.50}As phase shift layer

(ข) ความหนาของชั้นเลื่อนเฟสเท่ากับ $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0 เปรียบเทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$

รูปที่ 4.15 ค่าการสะท้อนของ GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 คู่ ที่มีความหนาของชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs

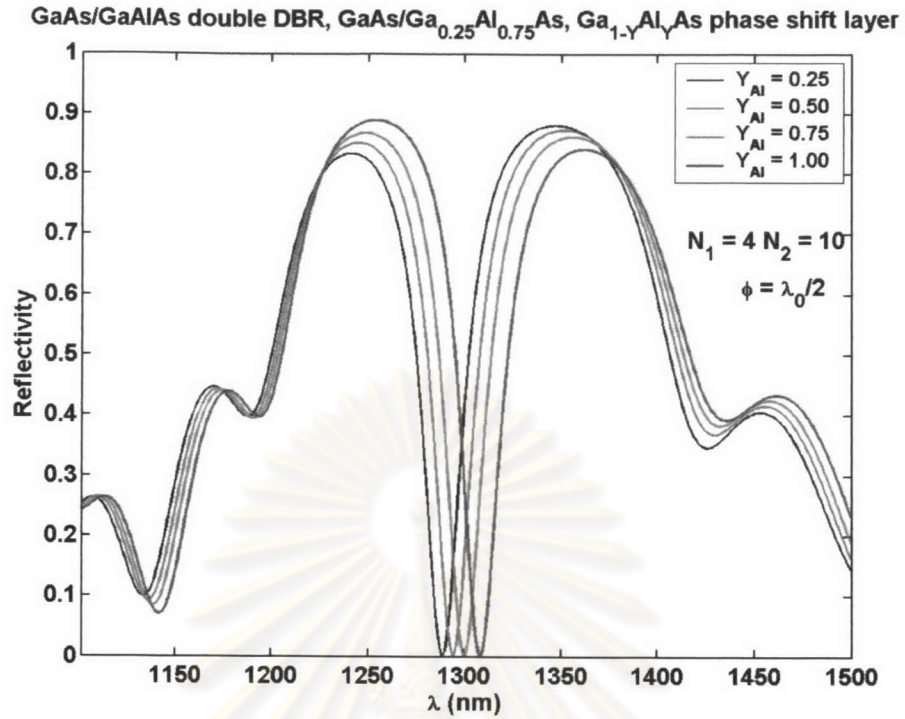
ต่างๆ เทียบกับที่ $\frac{\lambda_0}{4}$ (ก) ความหนา $\frac{\lambda_0}{10}$, $\frac{\lambda_0}{5}$ และ $\frac{3\lambda_0}{4}$ (ข) ความหนา $\frac{\lambda_0}{2}$ และ λ_0

(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As

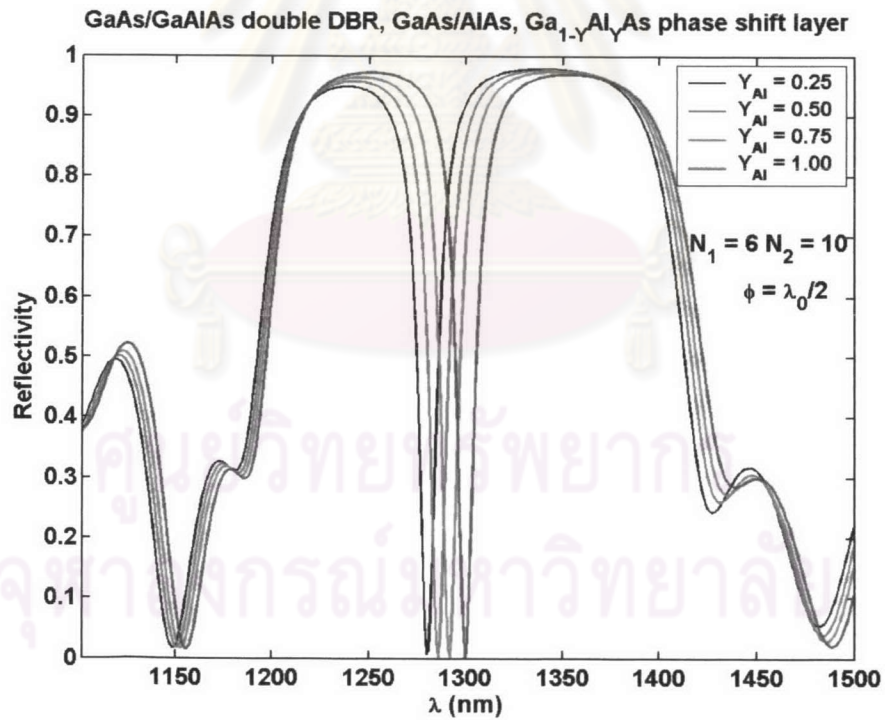
รูปที่ 4.16 ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs

หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ โดยทำการเปลี่ยนค่าสัดส่วน Al ในชั้นเลื่อนเฟส

(ก) $X_{Al} = 0.25$, (ข) $X_{Al} = 0.50$, (ค) $X_{Al} = 0.75$ และ (ง) $X_{Al} = 1.00$



(ก) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As



(ง) GaAs/AlAs

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกรีเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs, ชั้นเลื่อนเฟส GaAlAs

หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ โดยทำการเปลี่ยนค่าสัดส่วน Al ในชั้นเลื่อนเฟส

(ก) $X_{Al} = 0.25$, (ข) $X_{Al} = 0.50$, (ค) $X_{Al} = 0.75$ และ (ง) $X_{Al} = 1.00$

เมื่อคำนวณหาค่าการสะท้อนของ GaAs/Ga_{1-X}Al_XAs โดย X=0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 และทำการเปลี่ยนแปลงค่า Y ในชั้นเลื่อนเฟส Ga_{1-Y}Al_YAs ความหนา $\frac{\lambda_0}{2}$ ให้มีค่าต่างๆ กัน ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า X=Y จะเกิดค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ความยาวคลื่นใช้งาน 1.3 μm เพราะว่า $n_{\text{Ga}_{1-X}\text{Al}_X\text{As}} = n_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ ทำให้ $2 \times d_{\text{Ga}_{1-X}\text{Al}_X\text{As}} = d_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ แต่ถ้า X>Y จะเกิดการสะท้อนต่ำสุดที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นใช้งาน เนื่องจาก $n_{\text{Ga}_{1-X}\text{Al}_X\text{As}} < n_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ ทำให้ $2 \times d_{\text{Ga}_{1-X}\text{Al}_X\text{As}} > d_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ และ $d_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ ที่น้อยลงนี้จะเป็นความหนาที่ตอบสนองกับความยาวคลื่นสั้น ทำให้การสะท้อนต่ำสุดเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นสั้นกว่า 1.3 μm แต่ถ้า X<Y จะเกิดการสะท้อนต่ำสุดที่ความยาวคลื่นยาวกว่า 1.3 μm เนื่องจาก $2 \times d_{\text{Ga}_{1-X}\text{Al}_X\text{As}} < d_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ ($n_{\text{Ga}_{1-X}\text{Al}_X\text{As}} > n_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$) และ $d_{\text{Ga}_{1-Y}\text{Al}_Y\text{As}}$ ที่ยาวขึ้นจะเป็นความหนาที่ตอบสนองกับความยาวคลื่นยาว ทำให้การสะท้อนต่ำสุดเกิดที่ความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นใช้งาน

โครงสร้างคูแบร์กริเฟกเตอร์ที่มีชั้นเลื่อนเฟสแทรกกันมีลักษณะการสะท้อนคล้ายคลึงกับโครงสร้างที่มีชั้นเลื่อนเฟสอยู่ข้างหน้า แต่สามารถปรับเปลี่ยนจำนวนคูในแบร์กริเฟกเตอร์ชุดที่ 1 และ 2 เพื่อให้ค่าการสะท้อนบริเวณความยาวคลื่นใช้งานมีค่าต่ำและมีคุณสมบัติเป็นแบนด์พาสฟิวเตอร์ทางแสงได้

4.4 คำนวณค่าการสะท้อนของแบร์กริเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตรบนแผ่นฐาน GaAs ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง

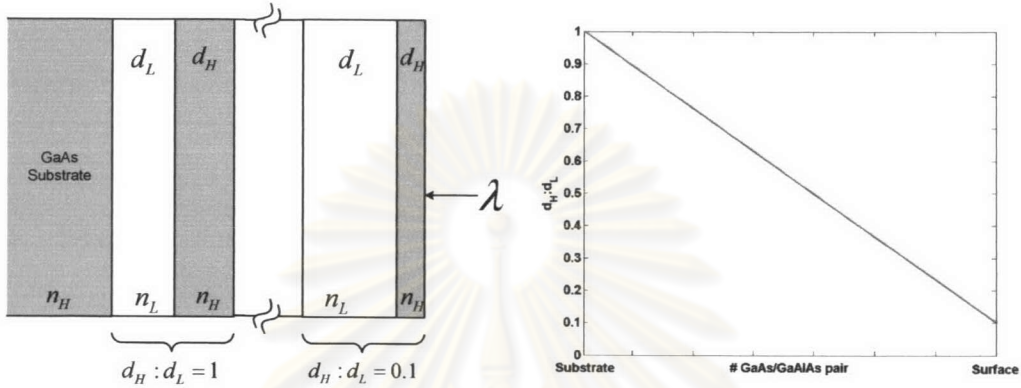
เนื่องจากโครงสร้างแบร์กริเฟกเตอร์ที่ได้วิเคราะห์มาข้างต้นนั้นมีค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นอื่นๆ นอกเหนือจากความยาวคลื่นใช้งานมาก ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่สมมาตรขึ้นเพื่อลดค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นอื่นๆ ให้ลดลงมากที่สุดและคงเหลือไว้เฉพาะการสะท้อนที่บริเวณความยาวคลื่นใช้งานเท่านั้น โครงสร้างนี้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นที่มีดัชนีหักเหสูงและต่ำ ($d_H : d_L$) ใน GaAs/GaAlAs แต่ละคู่จากที่เดิมเป็นค่าคงที่ในโครงสร้างสมมาตรมาเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของ GaAs/GaAlAs ในแบร์กริเฟกเตอร์ โดยเป็นไปตามความความสัมพันธ์ [5]

$$n_H d_H + n_L d_L = \frac{\lambda}{2} \quad (43)$$

โดยให้อัตราส่วนของ Al ใน GaAs/GaAlAs เท่ากันทุกคู่ โครงสร้างที่ใช้คำนวณมีด้วยกันอยู่ 4 โครงสร้างซึ่งแบ่งตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน $d_H : d_L$ ดังนี้

4.4.1 อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1

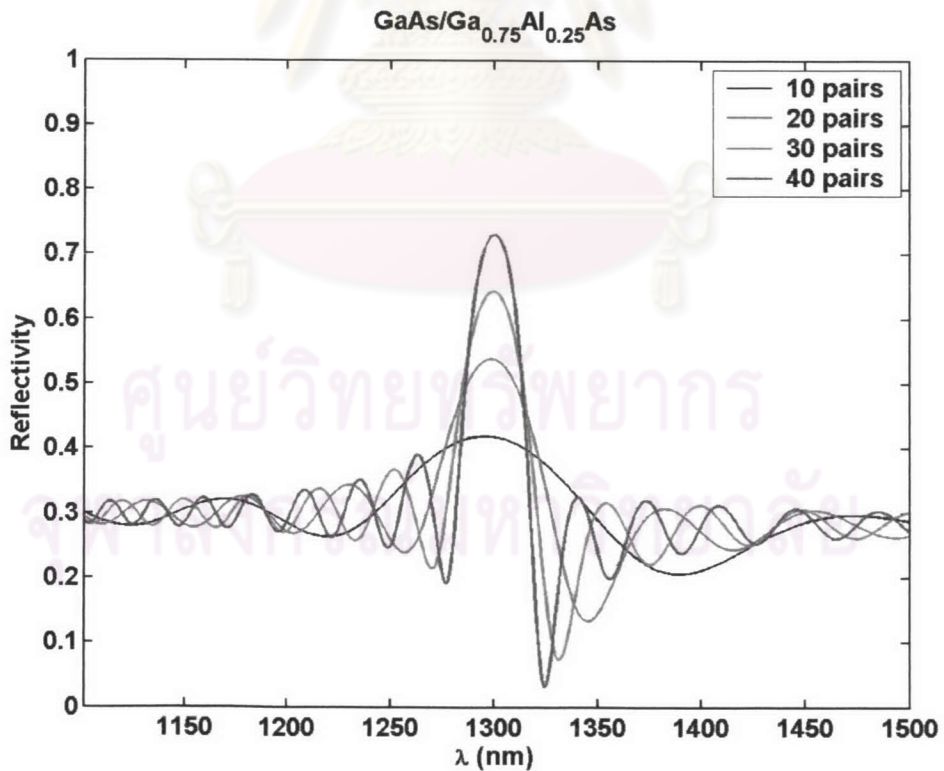
โครงสร้างและการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยคู่ GaAs/GaAlAs ที่อยู่บริเวณผิวหน้ามี $d_H : d_L$ เท่ากับ 0.1 และเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจนกระทั่ง GaAs/GaAlAs คู่ที่ติดกับแผ่นฐานมี $d_H : d_L$ เท่ากับ 1 ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19



(ก) โครงสร้าง

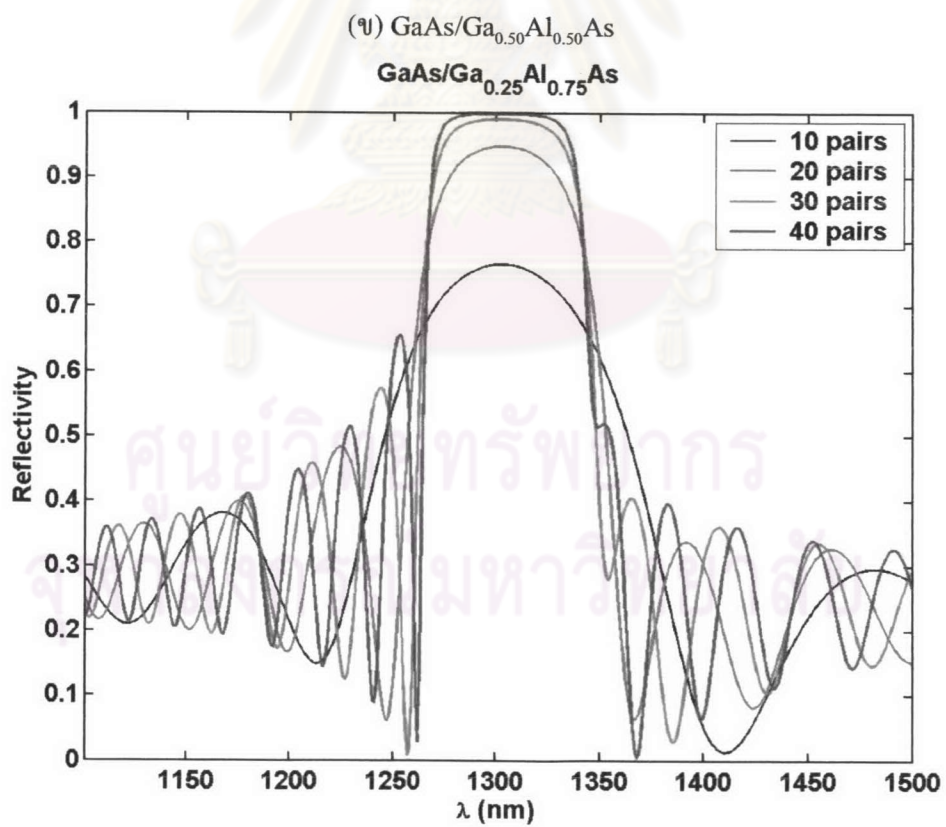
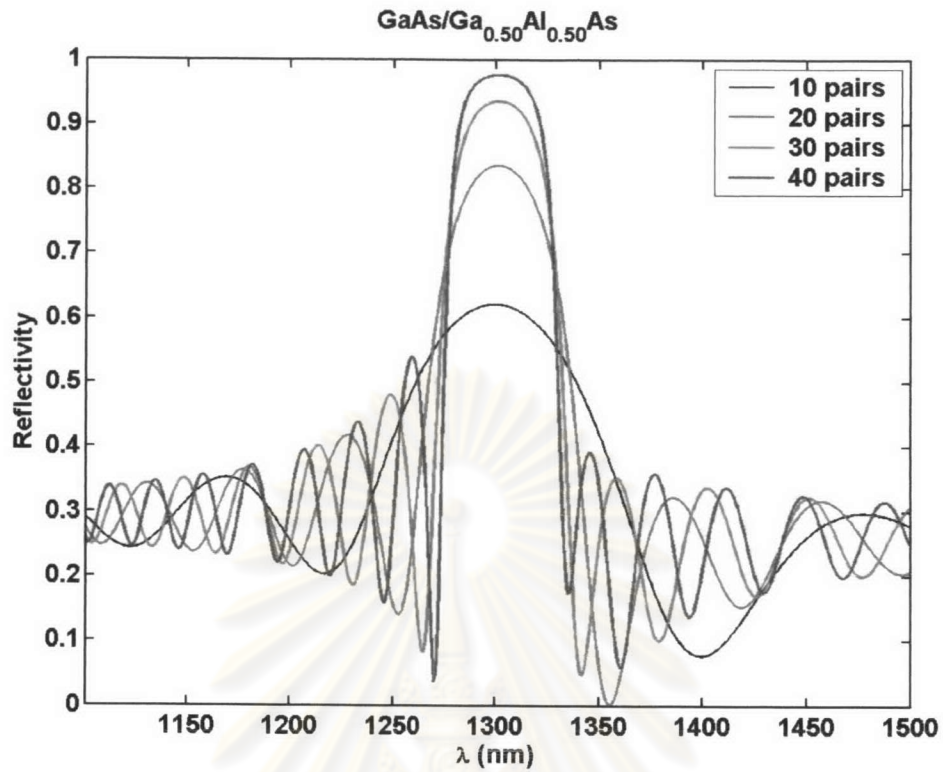
(ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$

รูปที่ 4.17 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$

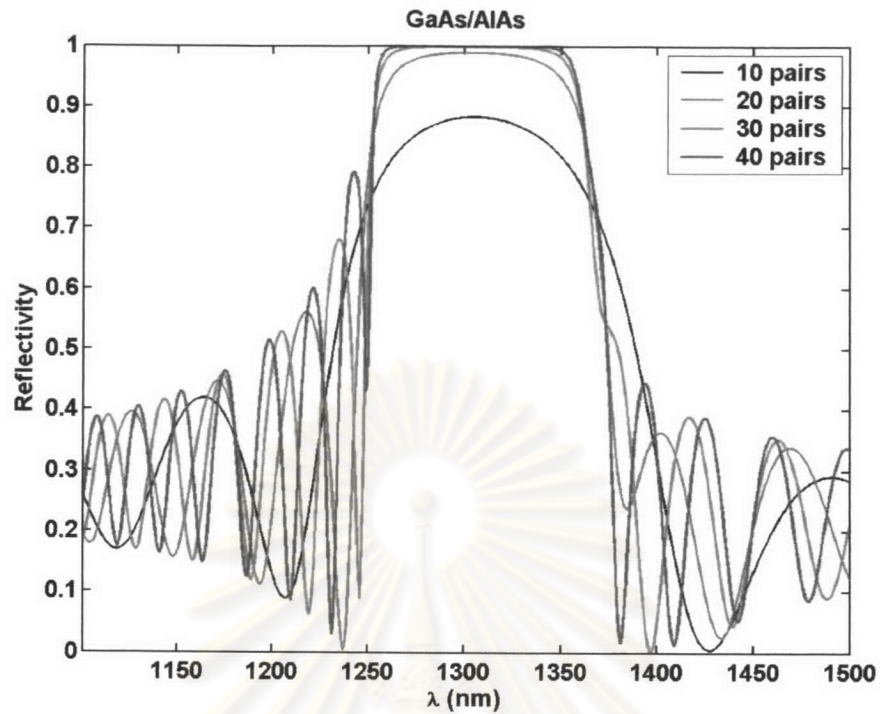


(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As

รูปที่ 4.18 ค่าการสะท้อนของแบรกรีเฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00

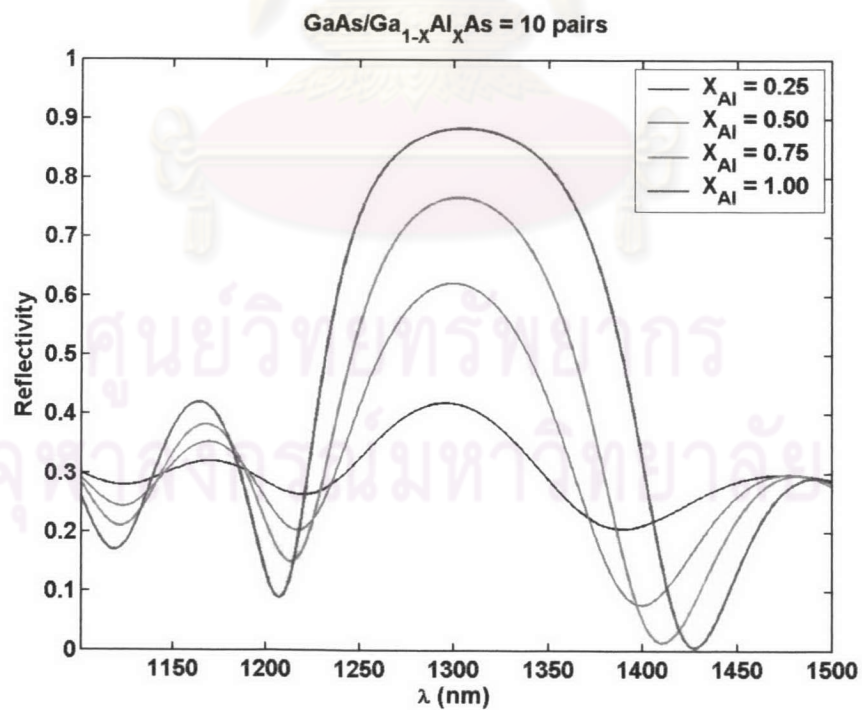


รูปที่ 4.18 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟคเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00



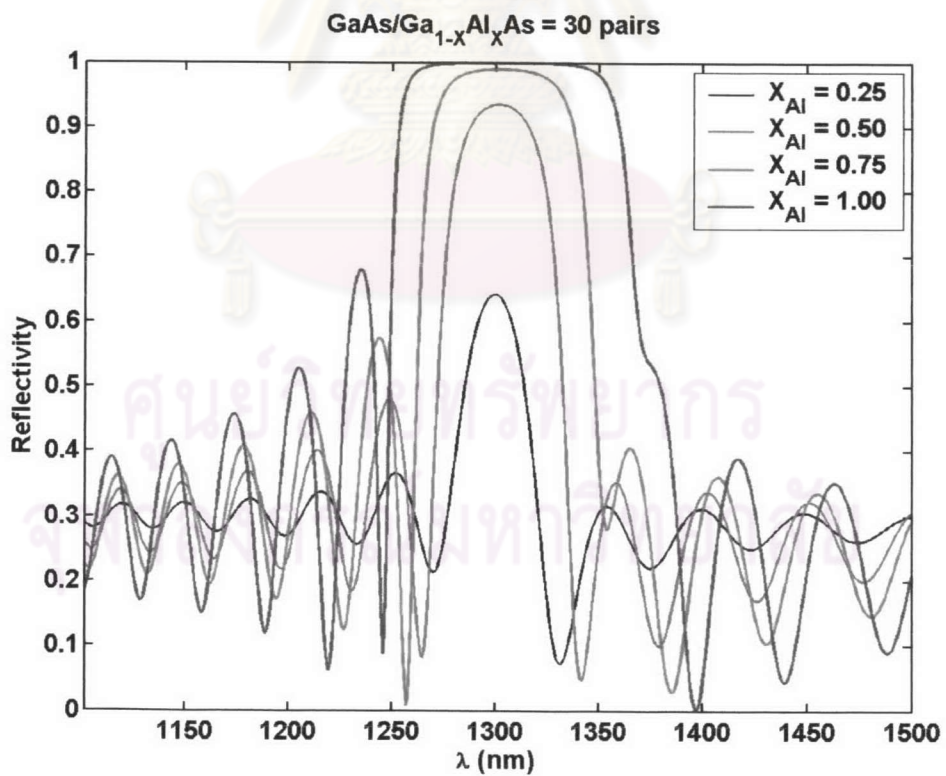
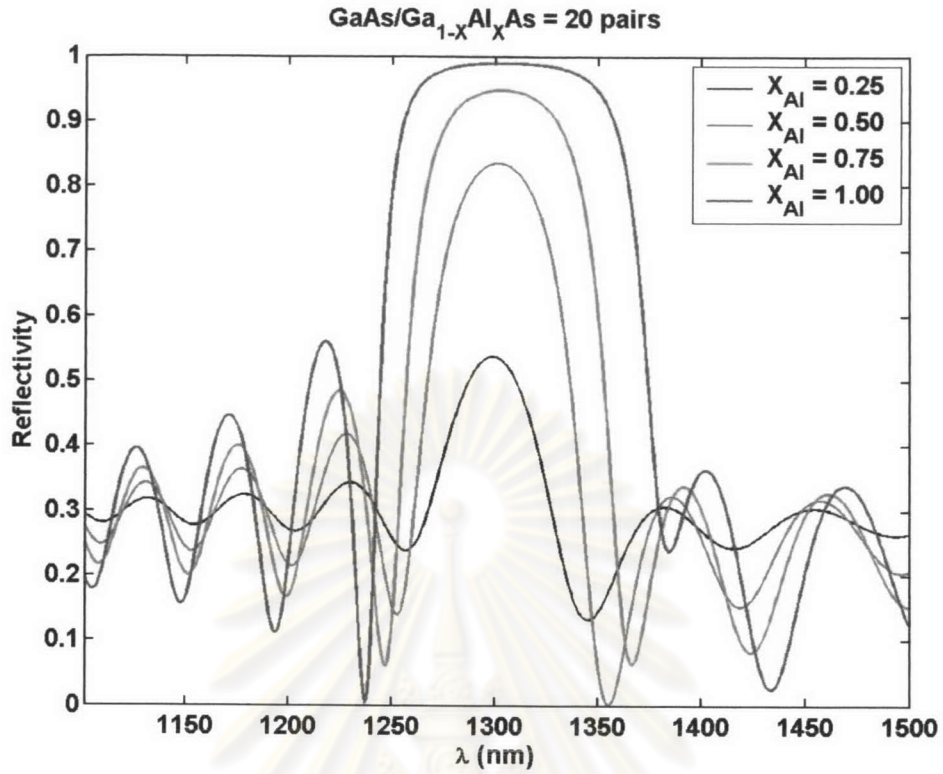
(ง) GaAs/AlAs

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟคเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00

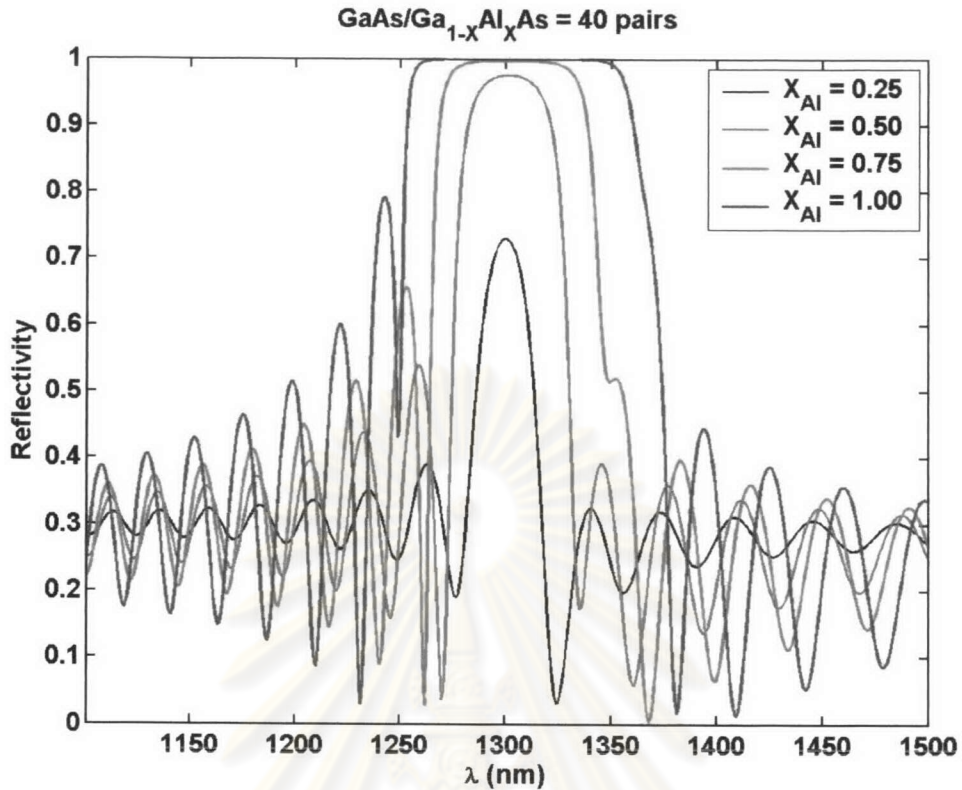


(ก) 10 คู่

รูปที่ 4.19 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



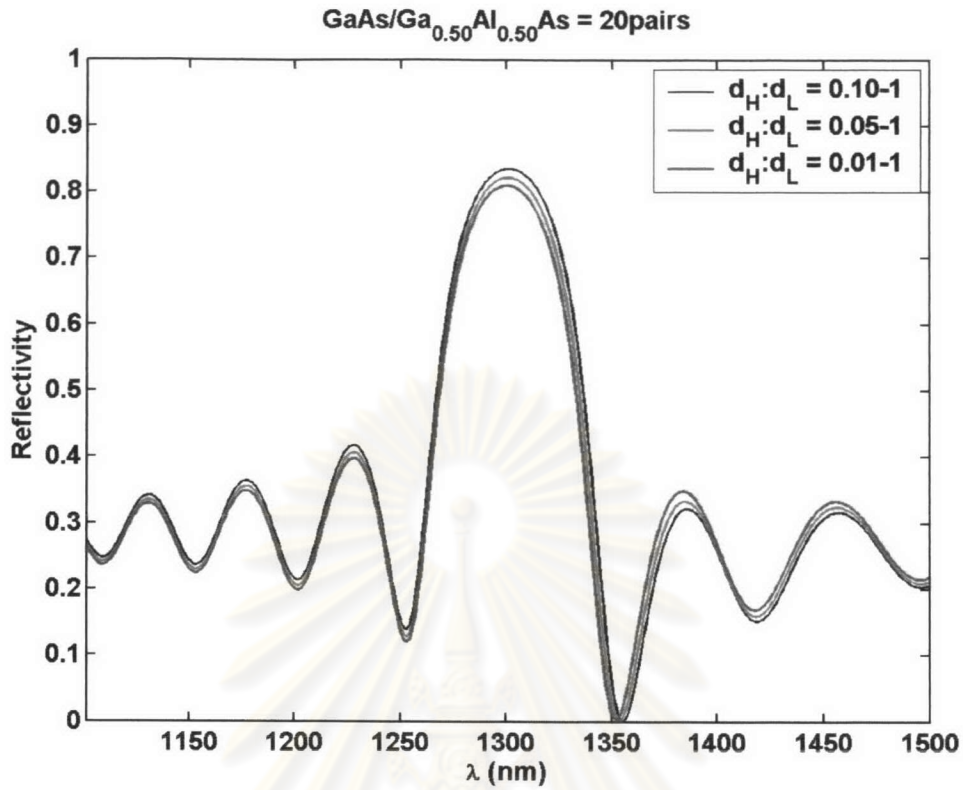
รูปที่ 4.19 (ต่อ)ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



(ง) 40 คู่

รูปที่ 4.19 (ต่อ)ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่

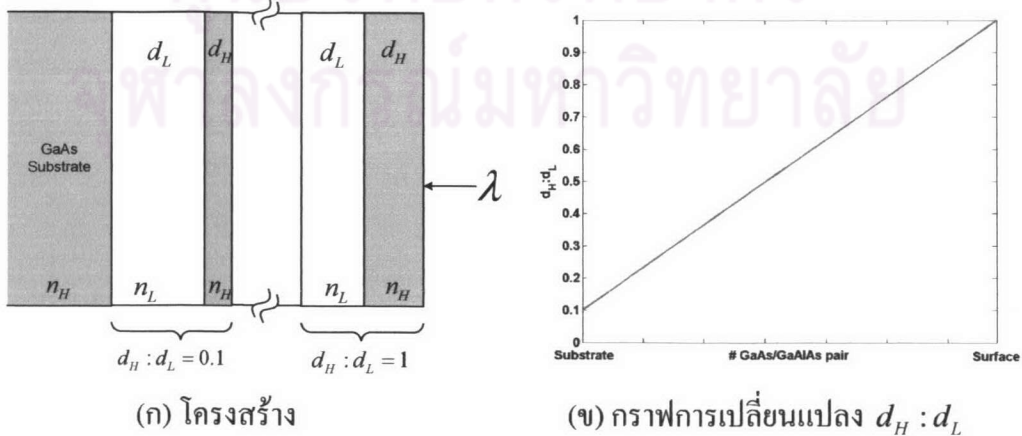
เมื่อวิเคราะห์ผลจากการคำนวณพบว่า ค่าการสะท้อนสูงสุดลดลงจากโครงสร้างแบบสม่ำเสมอเล็กน้อยและแบนด์วิดท์แคบลงเล็กน้อย ส่วนค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นยาวมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อพิจารณา GaAs/GaAlAs คู่ที่อยู่บริเวณผิวหน้าพบว่าค่า d_H และ d_L ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (43) เป็นความหนาที่เกิดการสะท้อนสูงสุดที่ความยาวคลื่นสั้นลง (คำนวณหาความยาวคลื่นตอบสนองจากสมการที่ (1)) นั่นคือค่าการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่นยาวลดลงและคู่ GaAs/GaAlAs ที่อยู่ถัดเข้าไปสะท้อนความยาวคลื่นยาวได้มากขึ้น แต่เนื่องจากการสะท้อนของความยาวคลื่นยาวถูกลดทอนมากในคู่ GaAs/GaAlAs บริเวณผิวหน้า ทำให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นยาวจากโครงสร้างนี้ลดลงจากโครงสร้างสม่ำเสมอ และค่าการสะท้อนสูงสุดลดลงและแบนด์วิดท์แคบลงด้วย และเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วน $d_H : d_L$ ให้เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 1 และจาก 0.01 เป็น 1 ได้ผลดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าค่าการสะท้อนสูงสุดมีค่าลดลงแต่มีลักษณะกราฟการสะท้อนคล้ายกับกรณีที่ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1



รูปที่ 4.20 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1, 0.05 และ 0.01 ไปเป็น 1

4.4.2 อัตราส่วน $d_H : d_L$ ลดลงจาก 1 เป็น 0.1

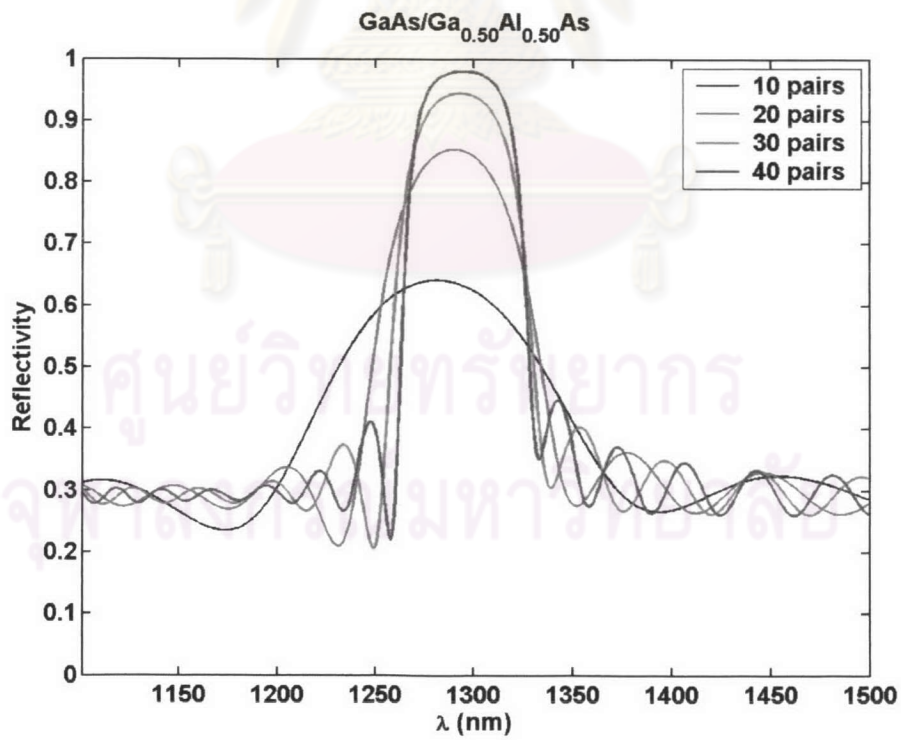
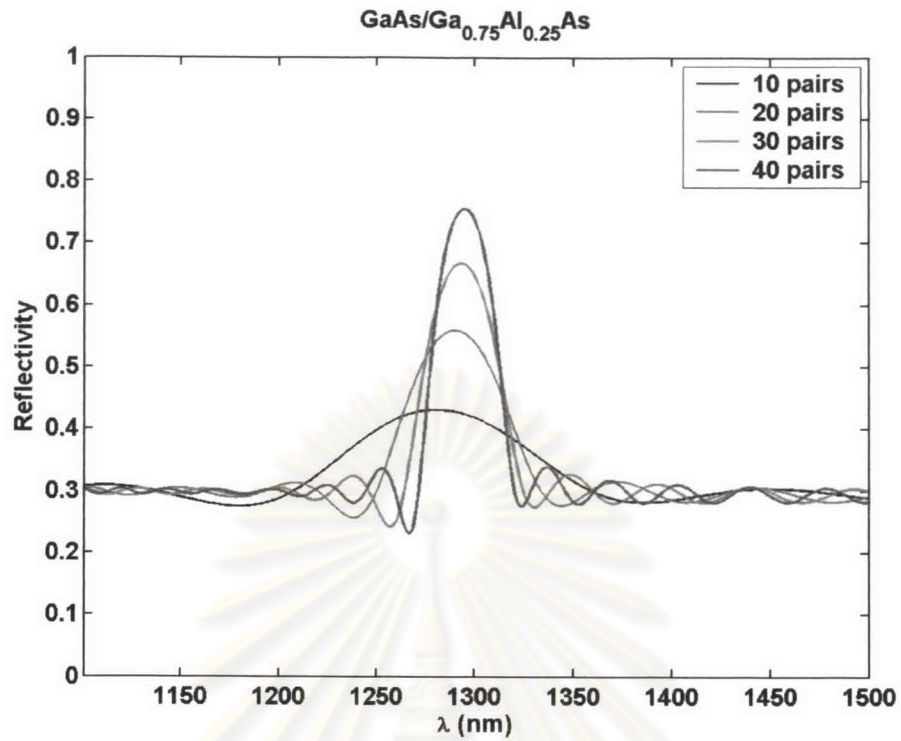
โครงสร้างและการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ แสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่า $d_H : d_L$ ตรงข้ามกับโครงสร้างข้างต้น โดยคู่ GaAs/GaAlAs ที่อยู่บริเวณผิวหน้ามี $d_H : d_L$ เท่ากับ 1 และลดลงแบบเชิงเส้นจนกระทั่ง GaAs/GaAlAs คู่ที่ติดกับแผ่นฐานมี $d_H : d_L$ เท่ากับ 0.1 ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



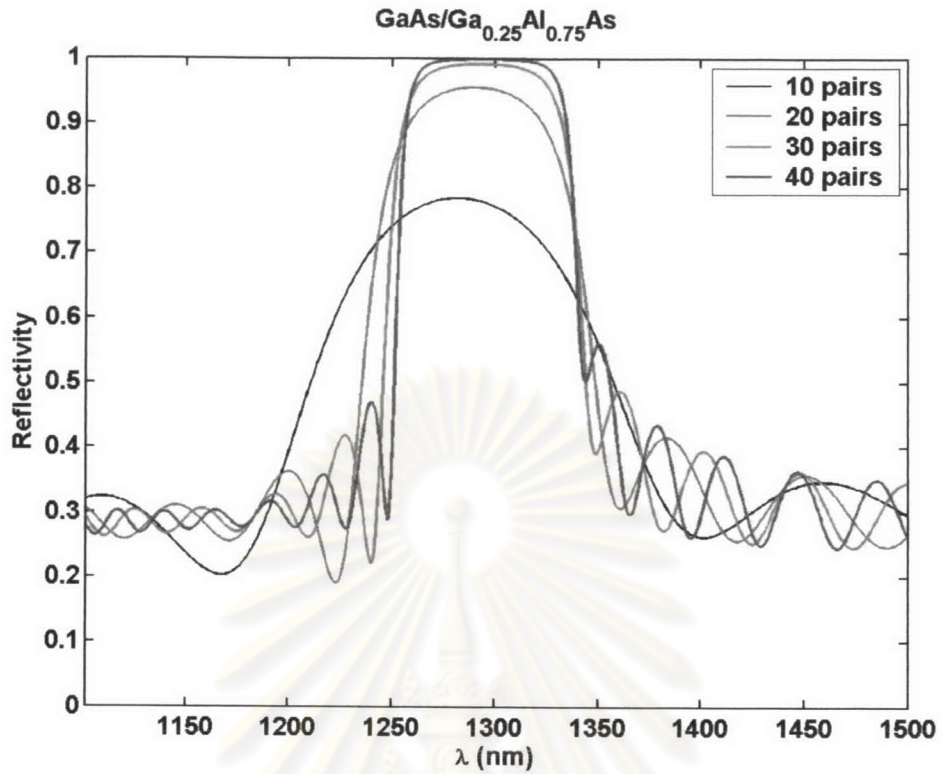
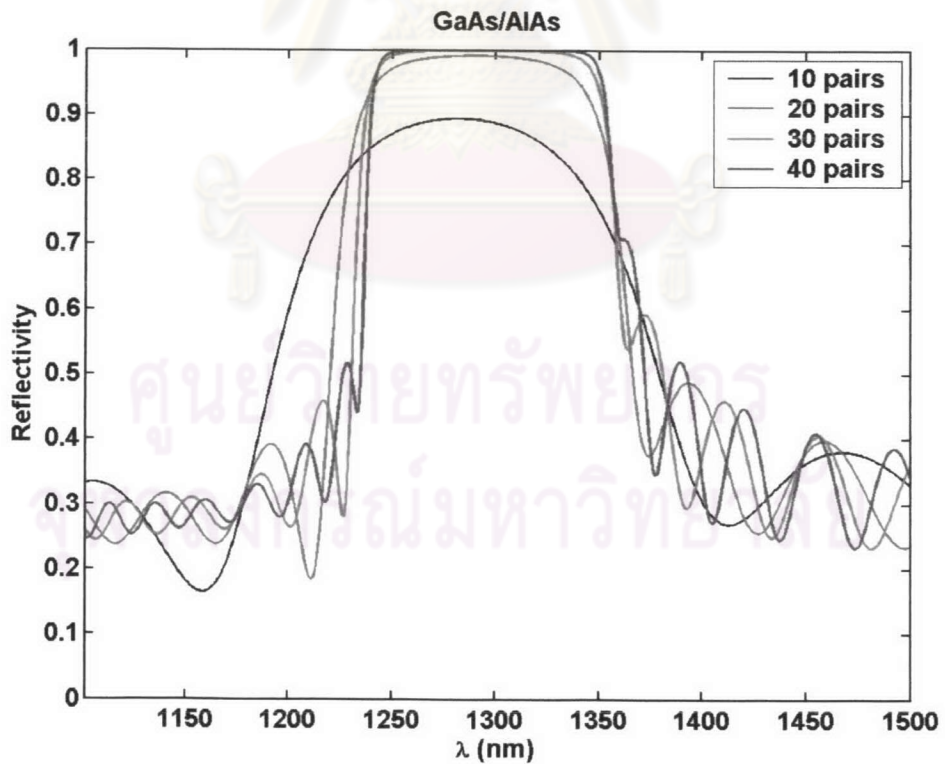
(ก) โครงสร้าง

(ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$

รูปที่ 4.21 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$

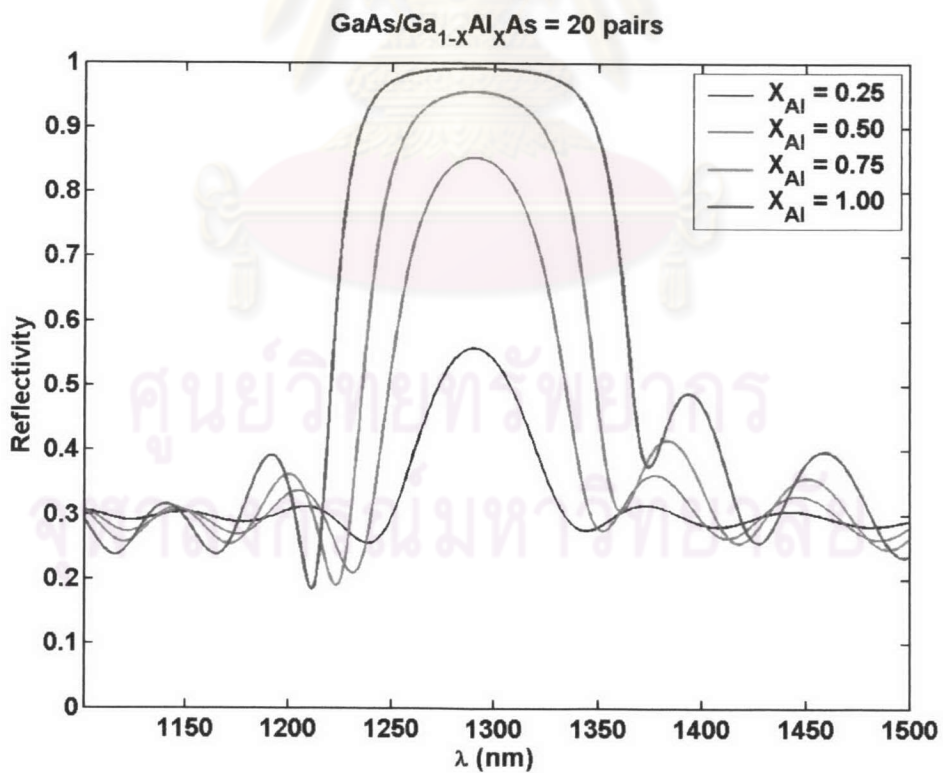
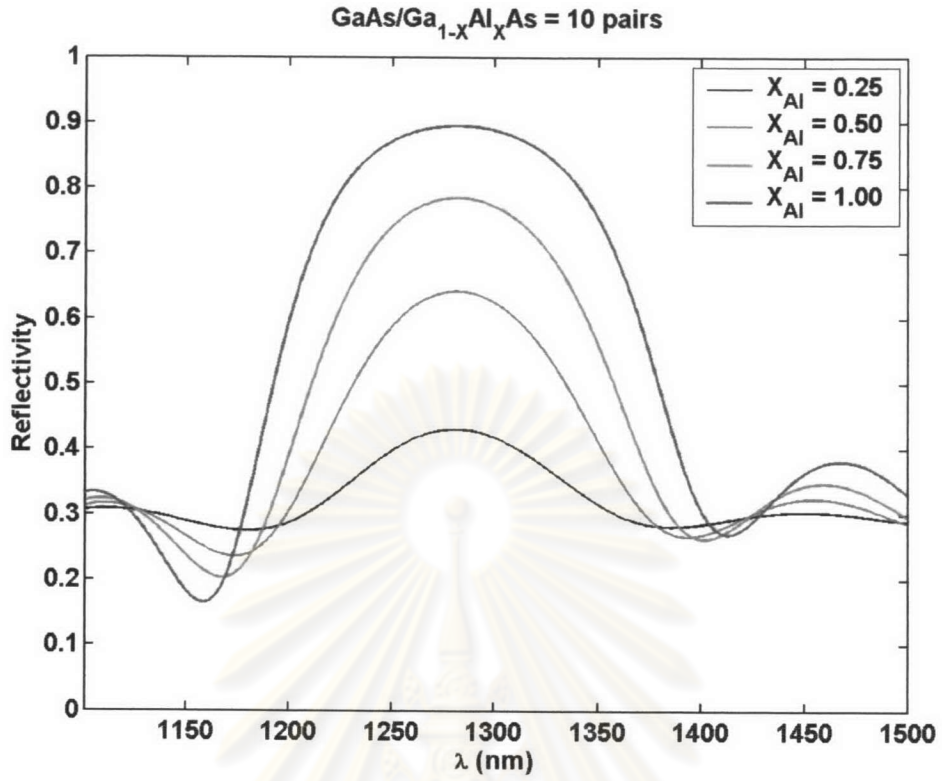


รูปที่ 4.22 ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟคเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สมมาตร $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00

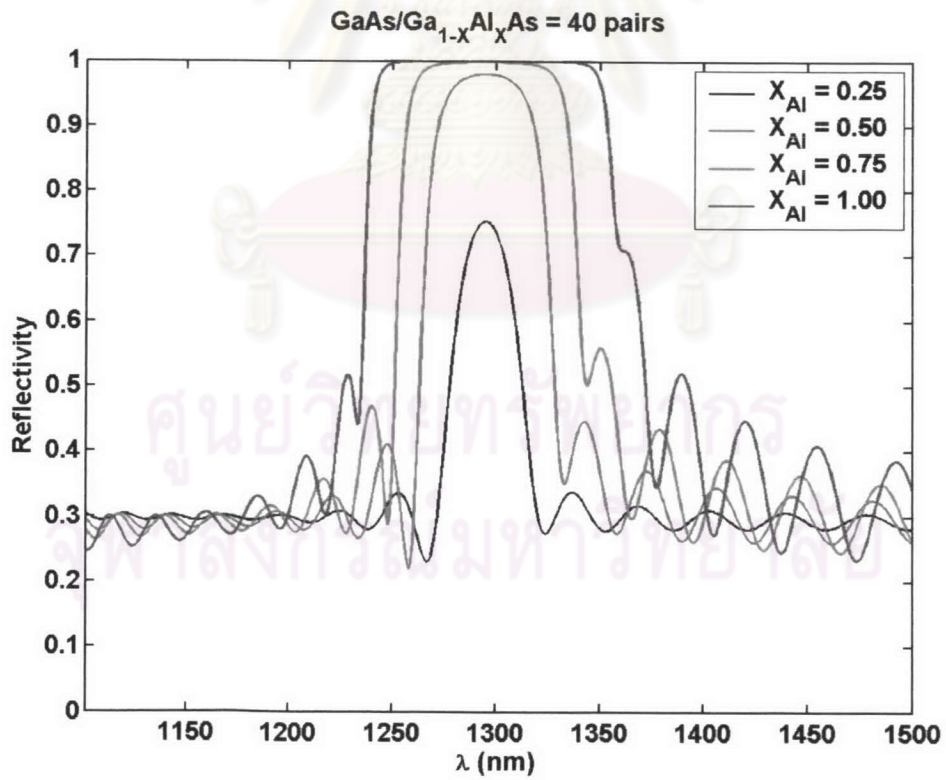
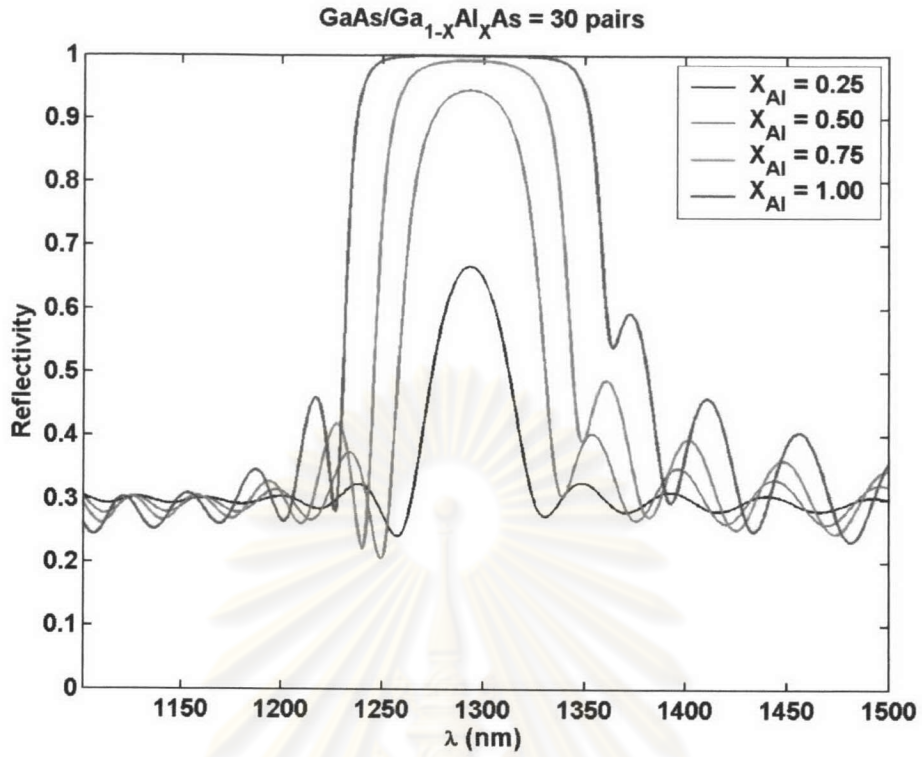
(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As

(ง) GaAs/AlAs

รูปที่ 4.22 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟคเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 ค่าสัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00

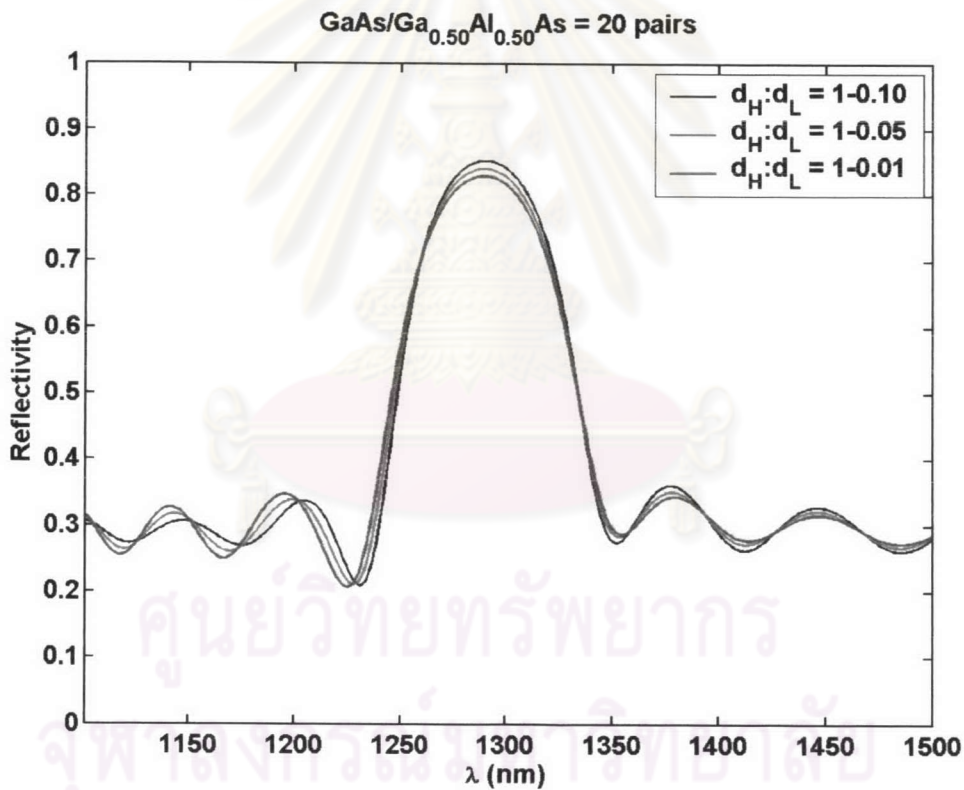


รูปที่ 4.23 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



รูปที่ 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

จากผลการคำนวณพบว่าค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นสั้นมีค่าลดลง และมีค่าการสะท้อนสูงสุดลดลงและแคบลงเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักการเดิมข้างต้นคือเมื่อพิจารณา GaAs/GaAlAs คู่ที่อยู่บริเวณผิวหน้าพบว่าค่า d_H และ d_L ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (43) จะมีการตอบสนองกับความยาวคลื่นยาวได้ดีกว่า และคู่ GaAs/GaAlAs ที่อยู่ถัดเข้าไปจะตอบสนองกับความยาวคลื่นสั้นได้ดีขึ้น แต่เนื่องจากการสะท้อนของความยาวคลื่นสั้นถูกลดทอนมากในคู่ GaAs/GaAlAs บริเวณผิวหน้า ทำให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นสั้นจากโครงสร้างนี้ลดลงจากโครงสร้างสมมาตร ส่วนการสะท้อนของความยาวคลื่นยาวได้ถูกลดทอนลงเช่นเดียวกันแต่ไม่มากเท่าความยาวคลื่นสั้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน $d_H : d_L$ ให้ลดลงจาก 1 เป็น 0.05 และจาก 1 เป็น 0.01 ผลการคำนวณจากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าค่าการสะท้อนสูงสุดมีค่าลดลงแต่กราฟการสะท้อนมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่ $d_H : d_L$ ลดจาก 1 เป็น 0.1

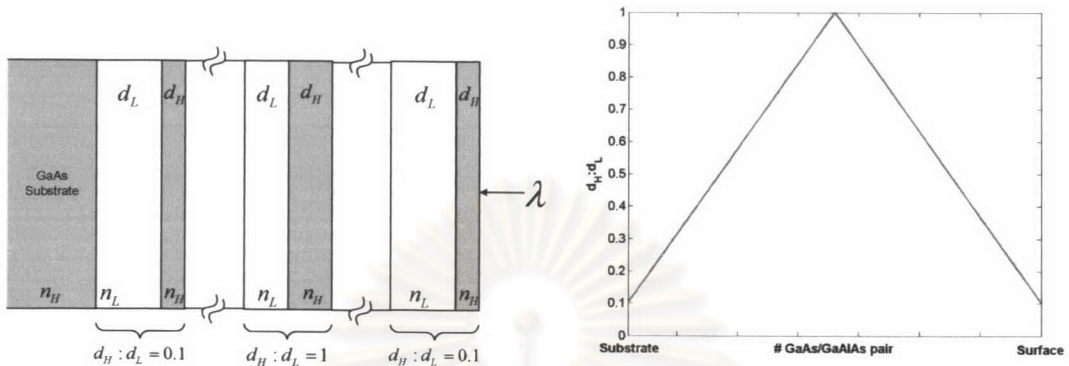


รูปที่ 4.24 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ ลดลงจาก 1 ไปเป็น 0.1, 0.05 และ 0.01

4.4.3 อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1

โครงสร้างนี้ได้รวมเอาโครงสร้างสองแบบข้างต้นเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงค่า $d_H : d_L$ แสดงดังรูปที่ 4.25 โดยคู่ GaAs/GaAlAs ที่อยู่บริเวณผิวหน้ามี $d_H : d_L$ เท่ากับ 0.1 เพิ่มขึ้นเป็น 1 ที่กึ่งกลางโครงสร้างและลดลงจนกระทั่ง GaAs/GaAlAs คู่ที่ติดกับแผ่น

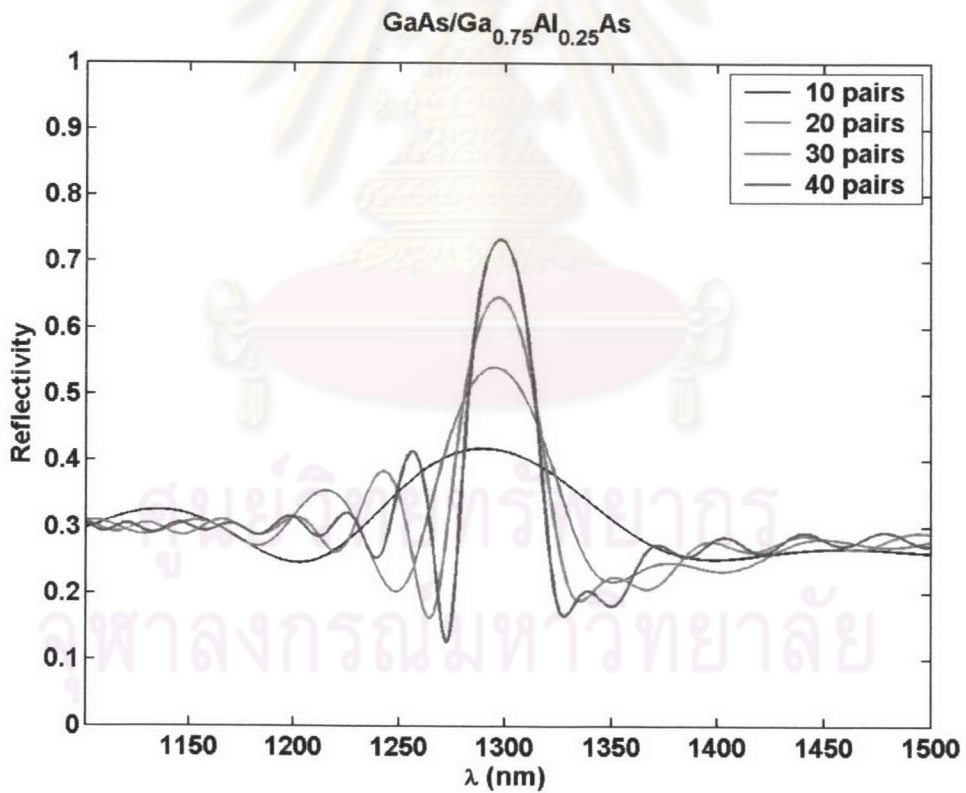
ฐานมี $d_H : d_L$ เท่ากับ 0.1 การเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นแบบเชิงเส้น ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.26 และ 4.27



(ก) โครงสร้าง

(ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$

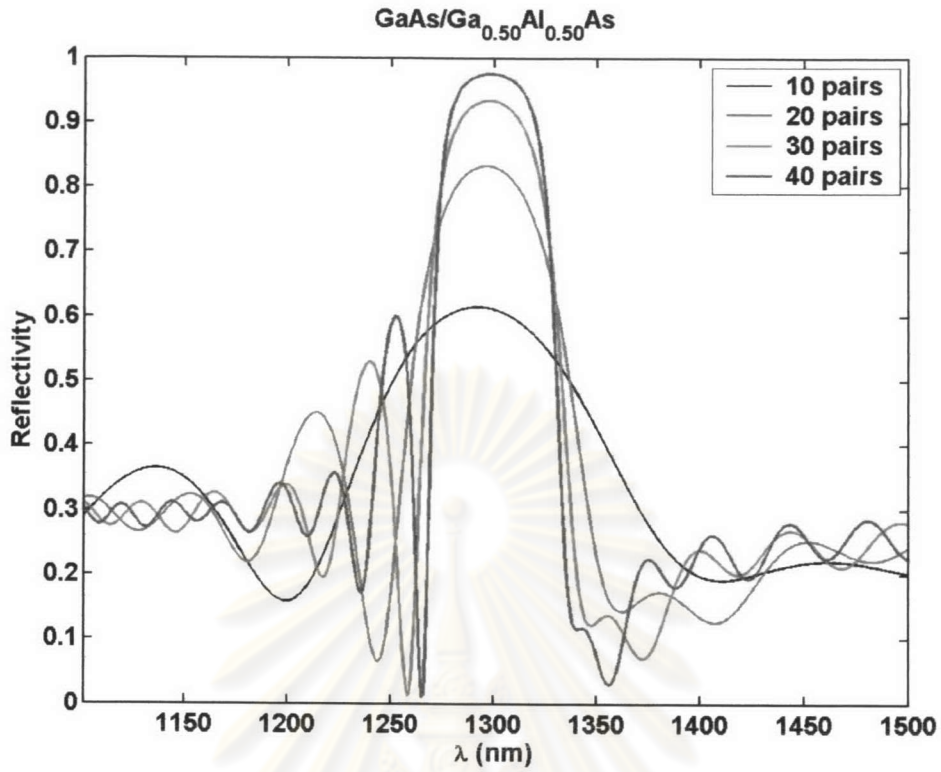
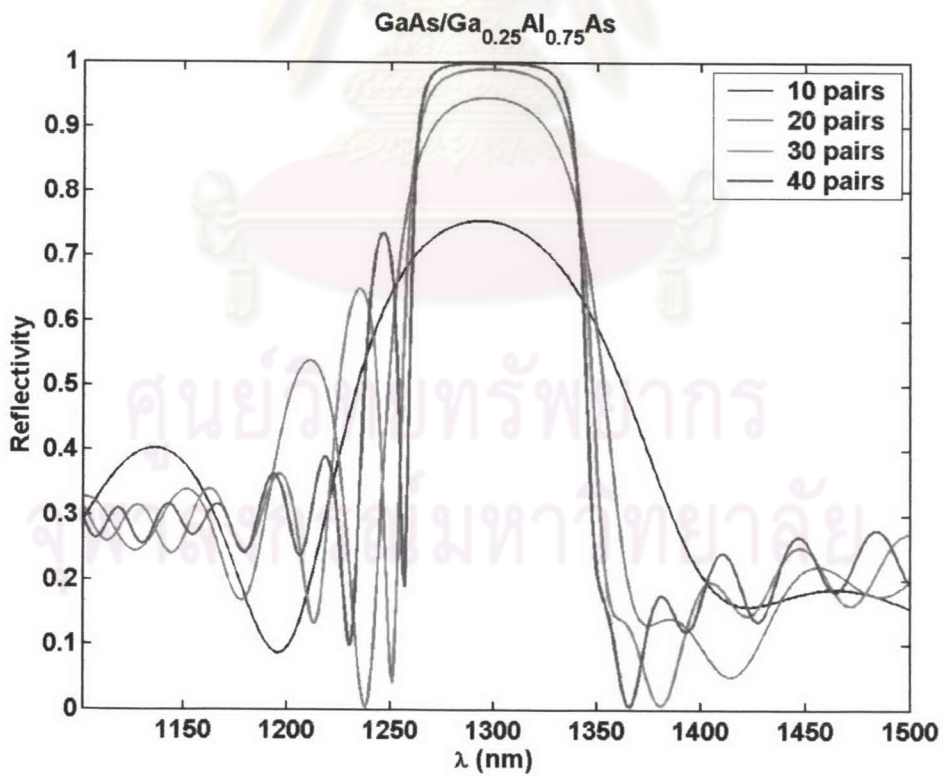
รูปที่ 4.25 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$



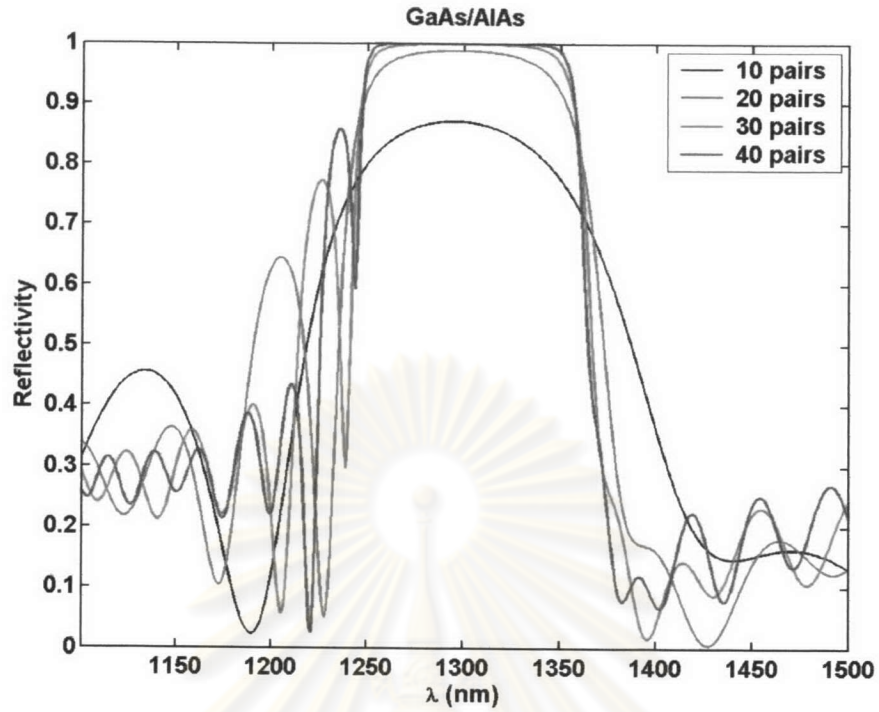
(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As

รูปที่ 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

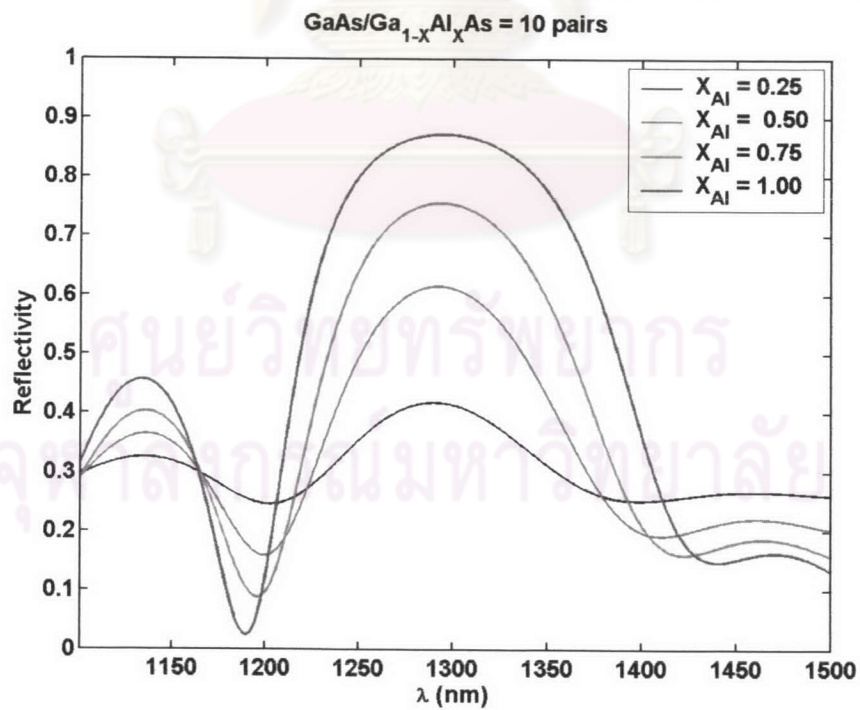
(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As

รูปที่ 4.26 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกริเฟคเตอร์ 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



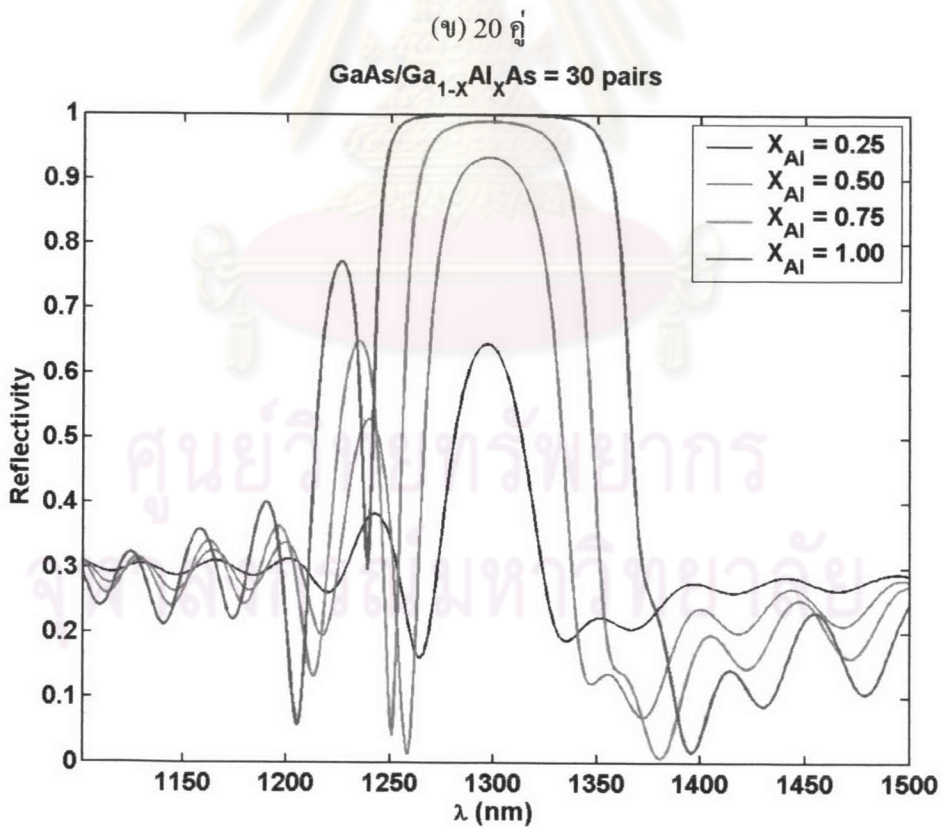
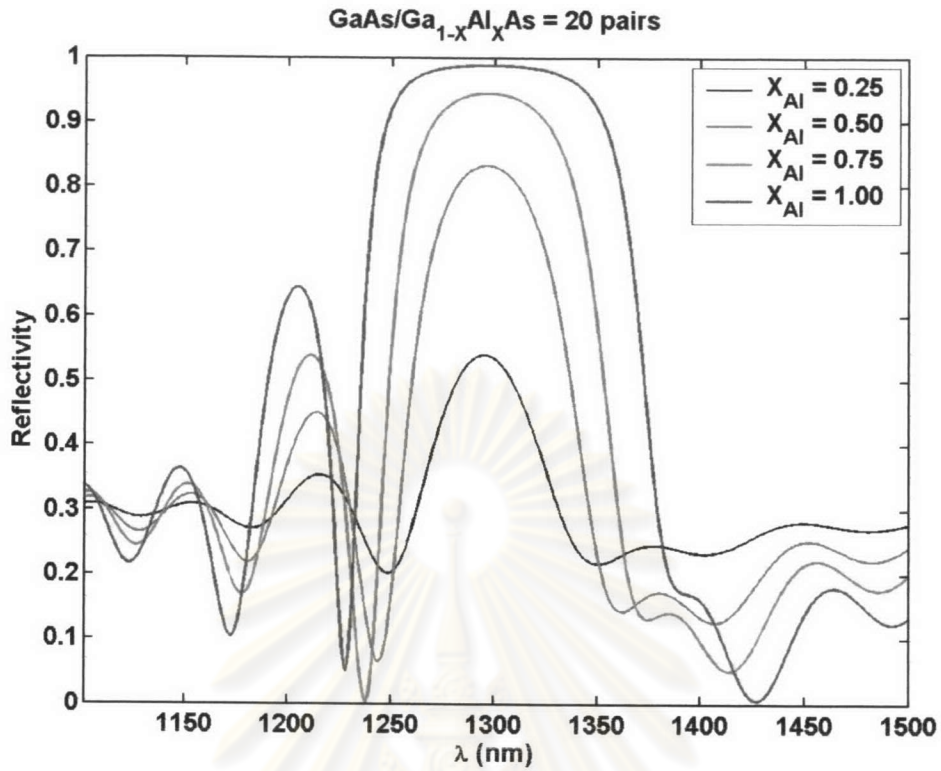
(ง) GaAs/AlAs

รูปที่ 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

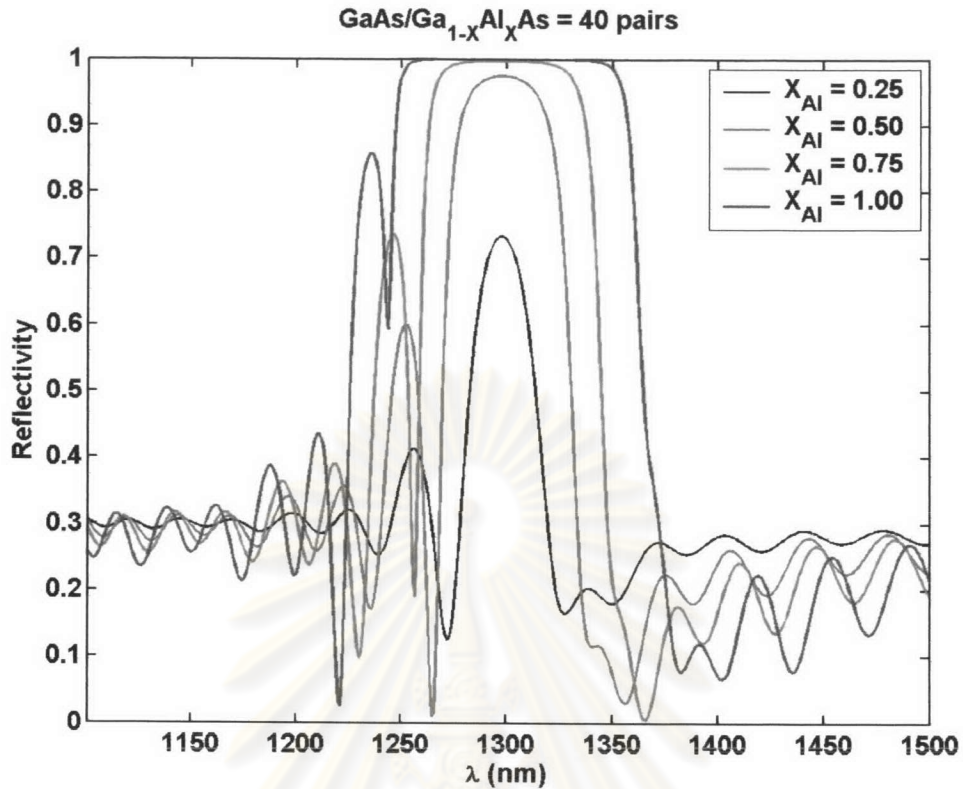


(ก) 10 คู่

รูปที่ 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



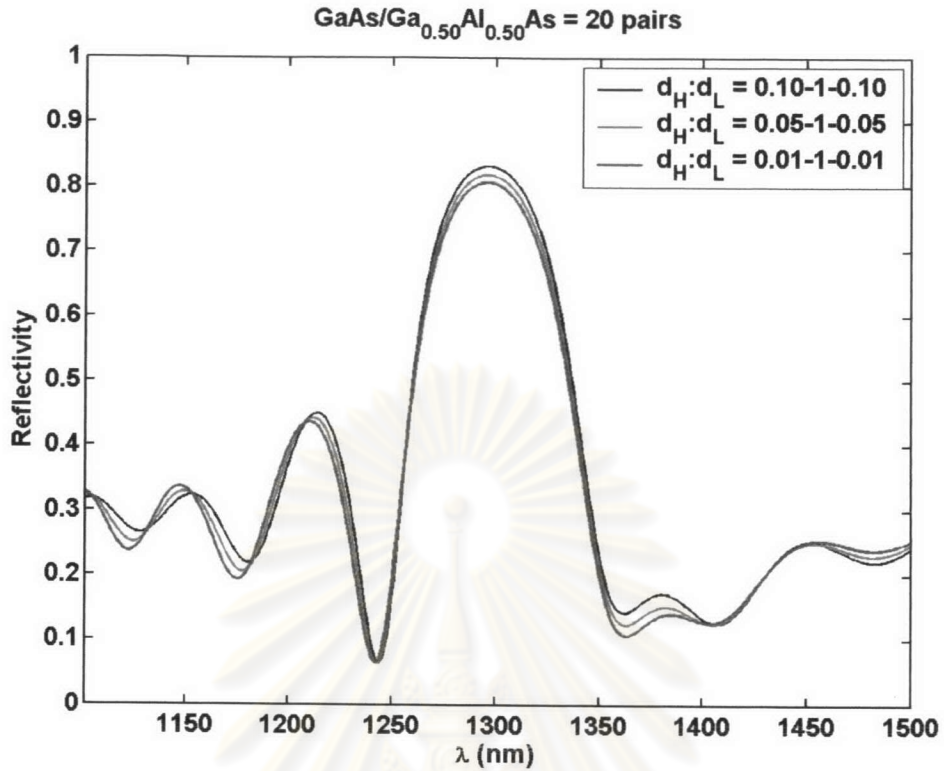
รูปที่ 4.27 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



รูปที่ 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

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนที่คำนวณได้พบว่า ค่าการสะท้อนลดลงทุกช่วงความยาวคลื่น โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่นยาวและสั้นกว่าความยาวคลื่นใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่การสะท้อนของความยาวคลื่นยาวถูกลดทอนลงอย่างมากใน GaAs/GaAlAs คู่หน้าๆ เพราะเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 และใน GaAs/GaAlAs คู่หลังๆ การสะท้อนของความยาวคลื่นสั้นก็จะถูกลดทอนลง เพราะเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ ลดลงจาก 1 เป็น 0.1 ส่วนการสะท้อนบริเวณความยาวคลื่นใช้งานถูกลดทอนลงบ้างเล็กน้อย

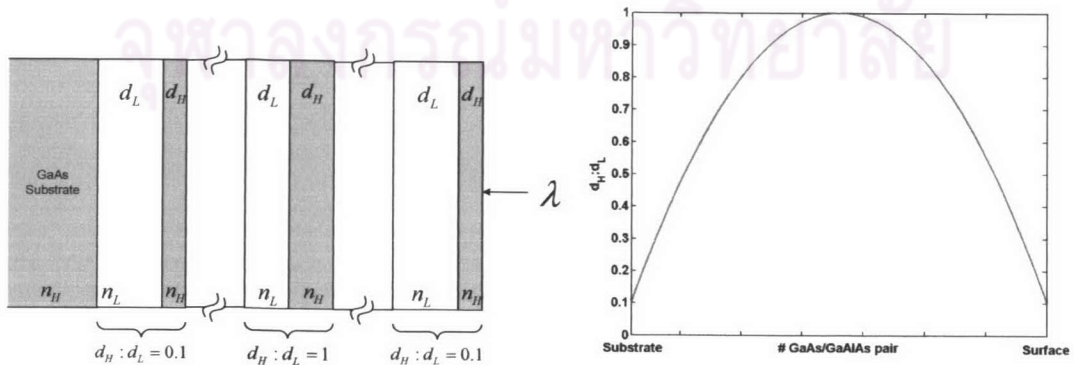
เมื่อคำนวณค่าการสะท้อนในกรณีที่ $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 1 ลดลงเหลือ 0.05 และเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 1 ลดลงเหลือ 0.01 เทียบกับกรณีข้างต้น ดังรูปที่ 4.28 พบว่าค่าการสะท้อนที่บริเวณความยาวคลื่นใช้งานลดลงเล็กน้อยในขณะที่มีลักษณะกราฟคล้ายคลึงกับกรณีเดิม



รูปที่ 4.28 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 ลดเหลือ 0.1, เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 1 ลดเหลือ 0.05 และ เพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 1 ลดเหลือ 0.01 แบบเชิงเส้น

4.4.4 อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1 แบบไม่เป็นเชิงเส้น

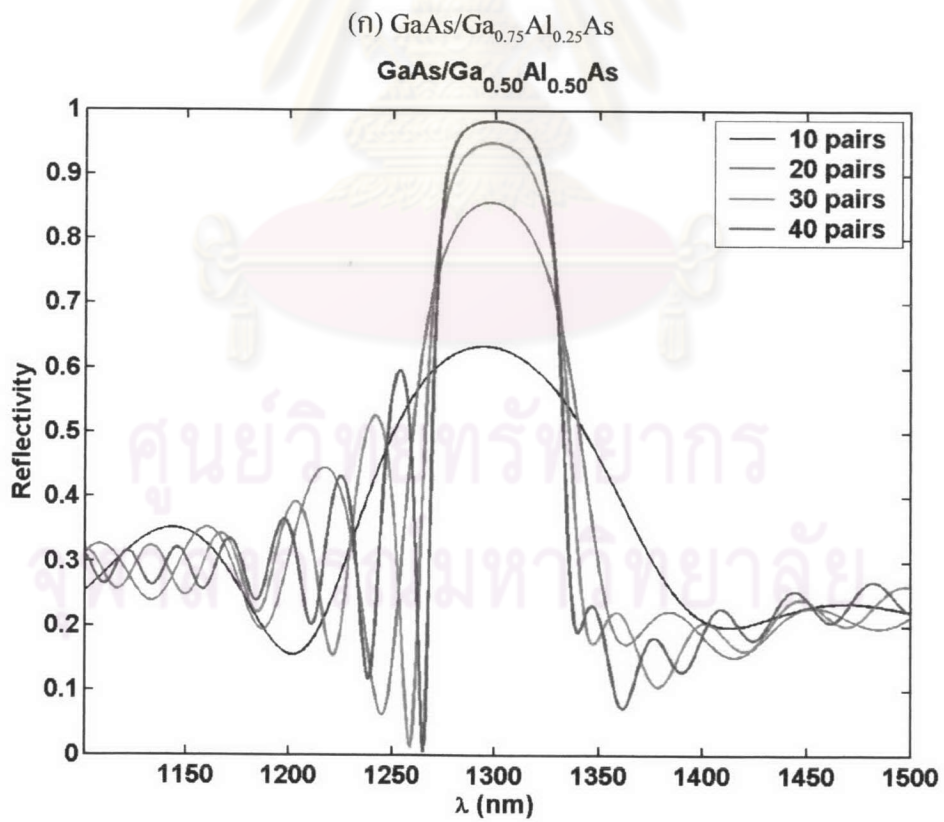
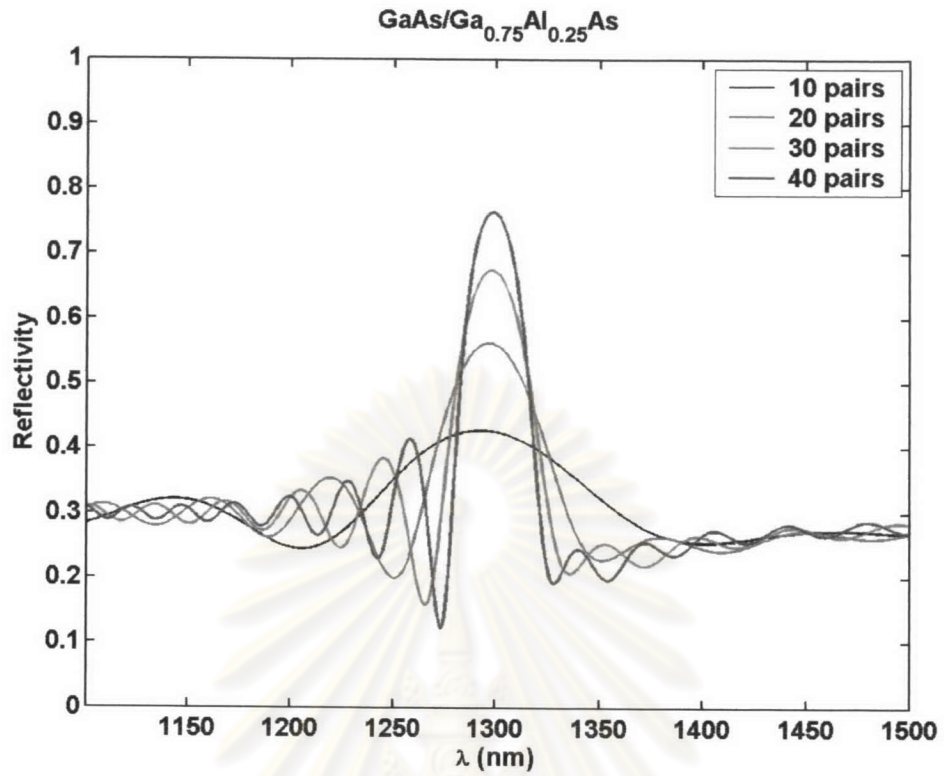
โครงสร้างนี้มีการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ คล้ายคลึงกับโครงสร้างข้างต้น คือ $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 ที่ GaAs/GaAlAs คู่หน้าไปเป็น 1 ที่คู่ที่อยู่กึ่งกลางของโครงสร้าง และลดลงเหลือ 0.1 ที่คู่ที่อยู่ติดกับแผ่นฐาน แต่การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบพาราโบลา ซึ่งมีโครงสร้างและกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ แสดงดังรูปที่ 4.29



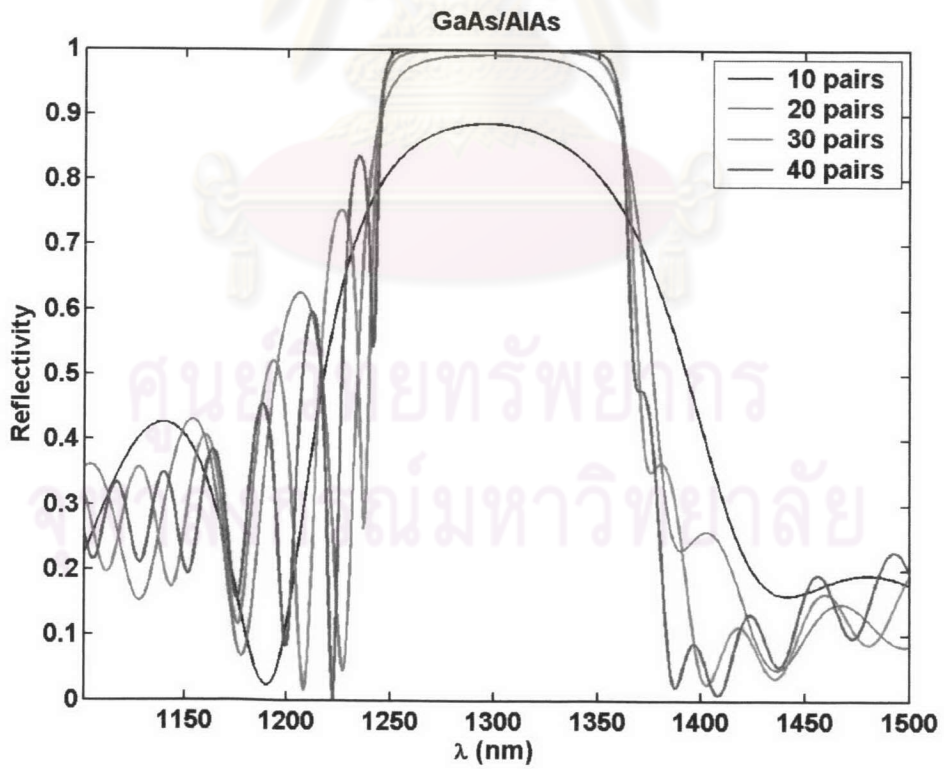
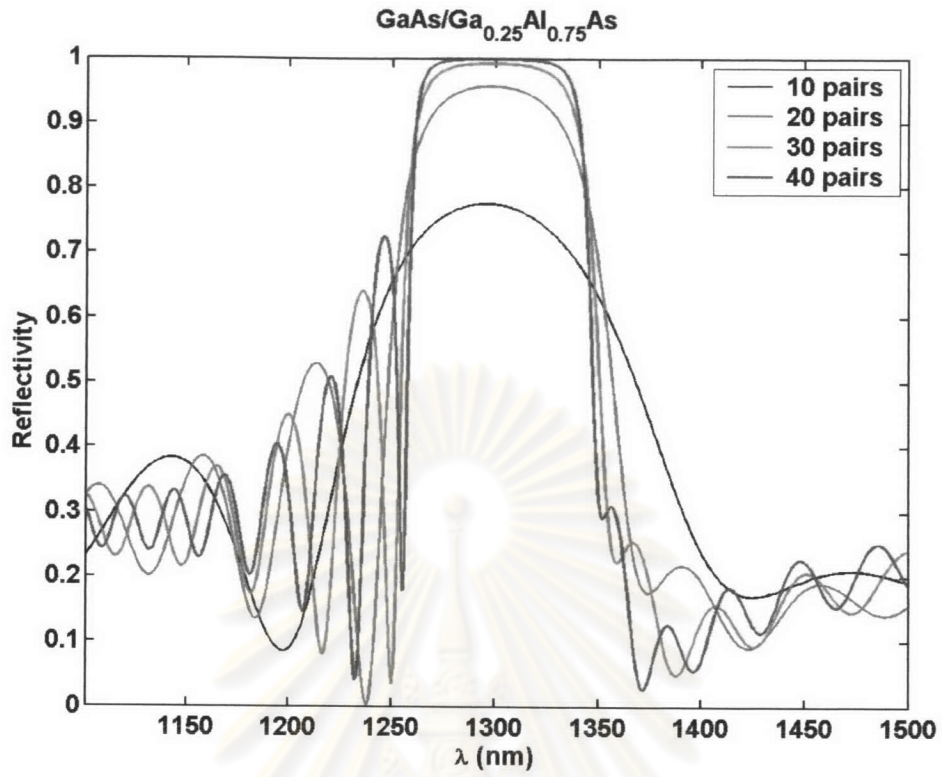
(ก) โครงสร้าง

(ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$

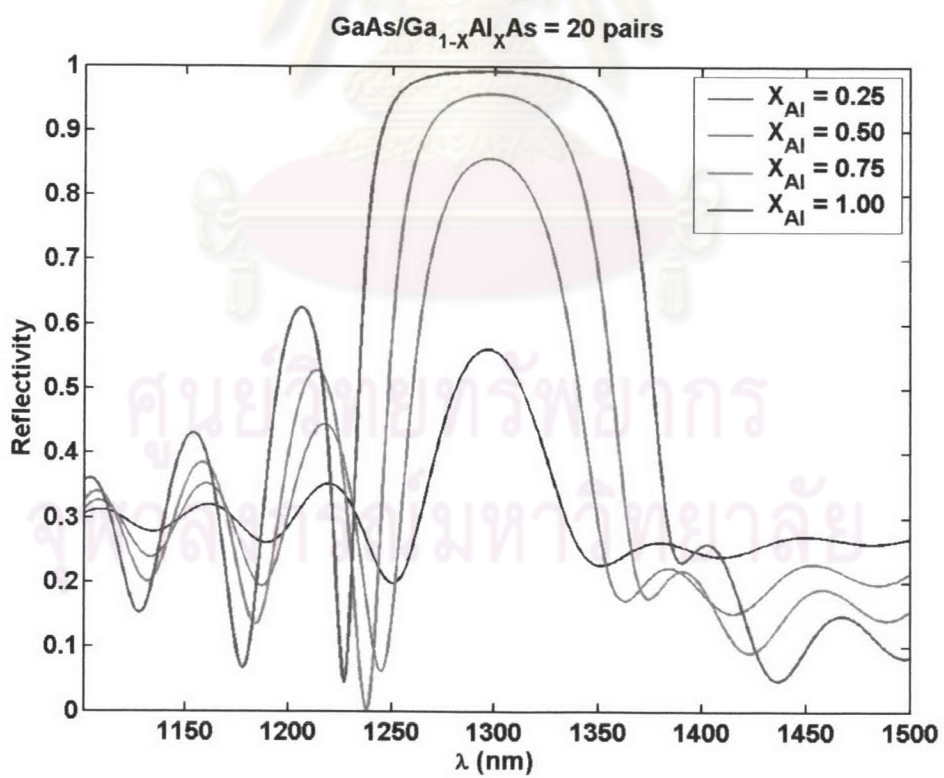
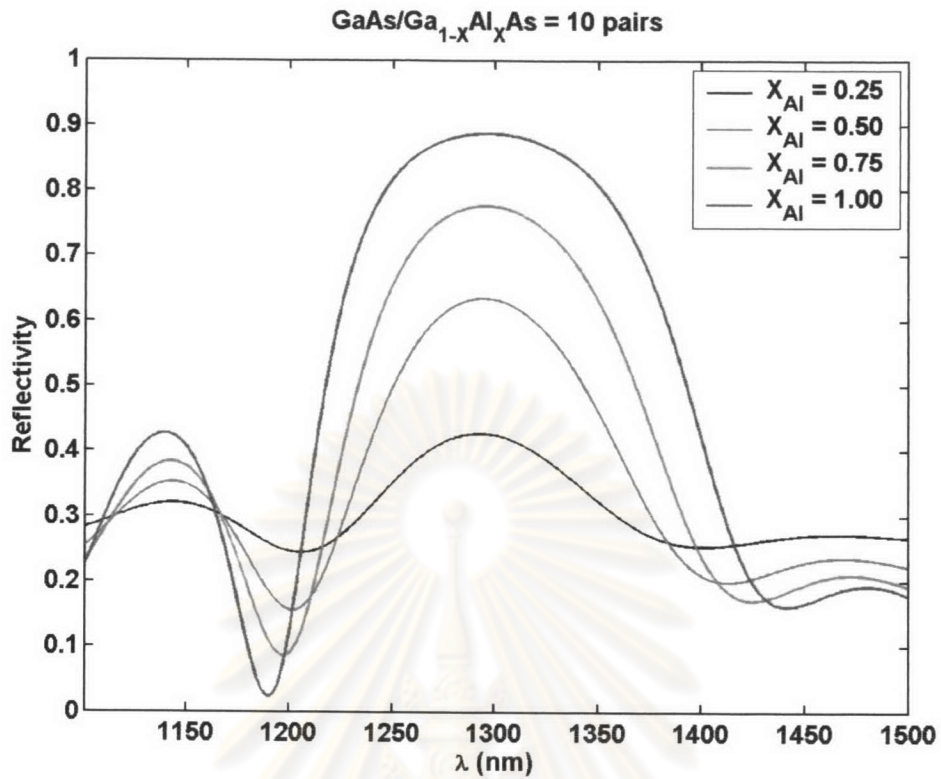
รูปที่ 4.29 (ก) โครงสร้าง และ (ข) กราฟการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$



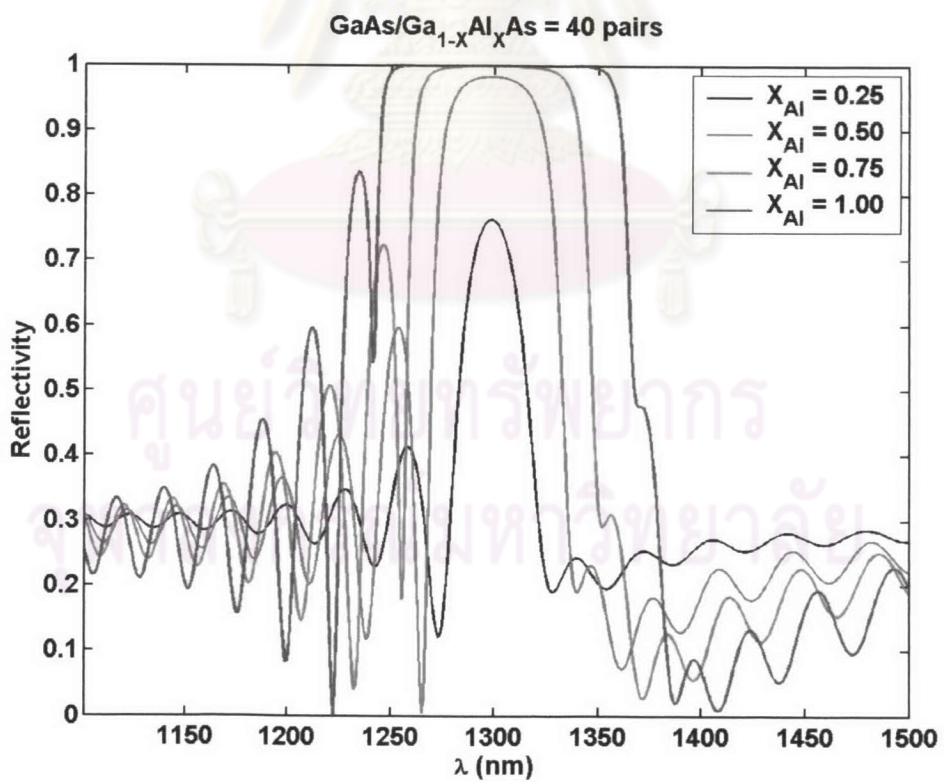
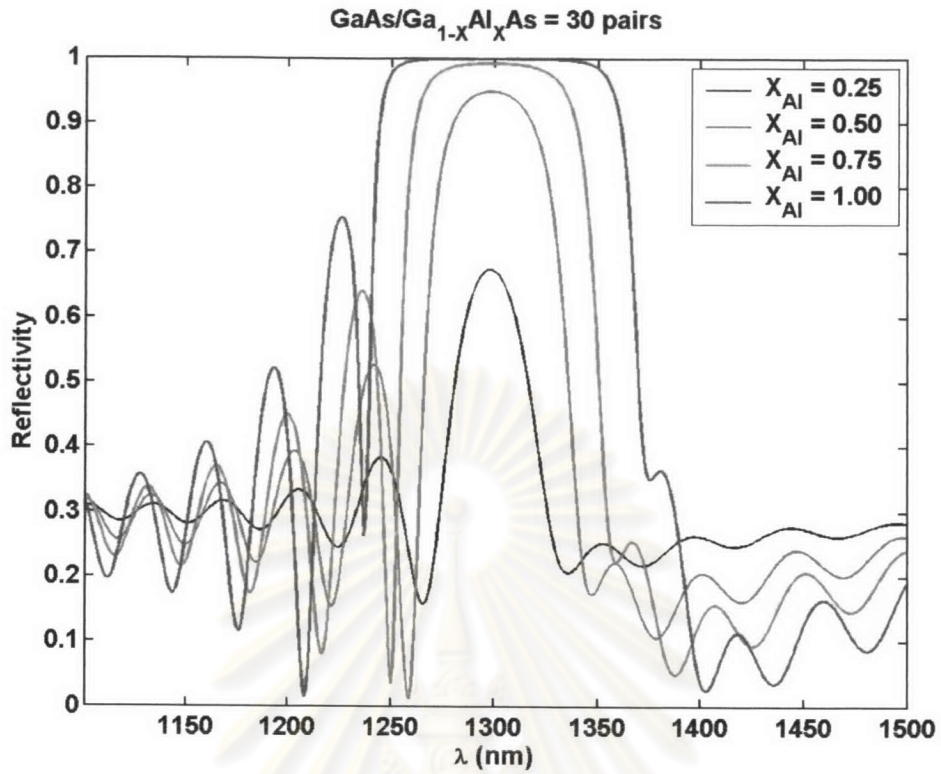
รูปที่ 4.30 ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟกเตอร์ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 สัดส่วน Al เท่ากับ (ก) 0.25, (ข) 0.50, (ค) 0.75 และ (ง) 1.00



รูปที่ 4.30 (ต่อ) ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟคเตอร์ 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



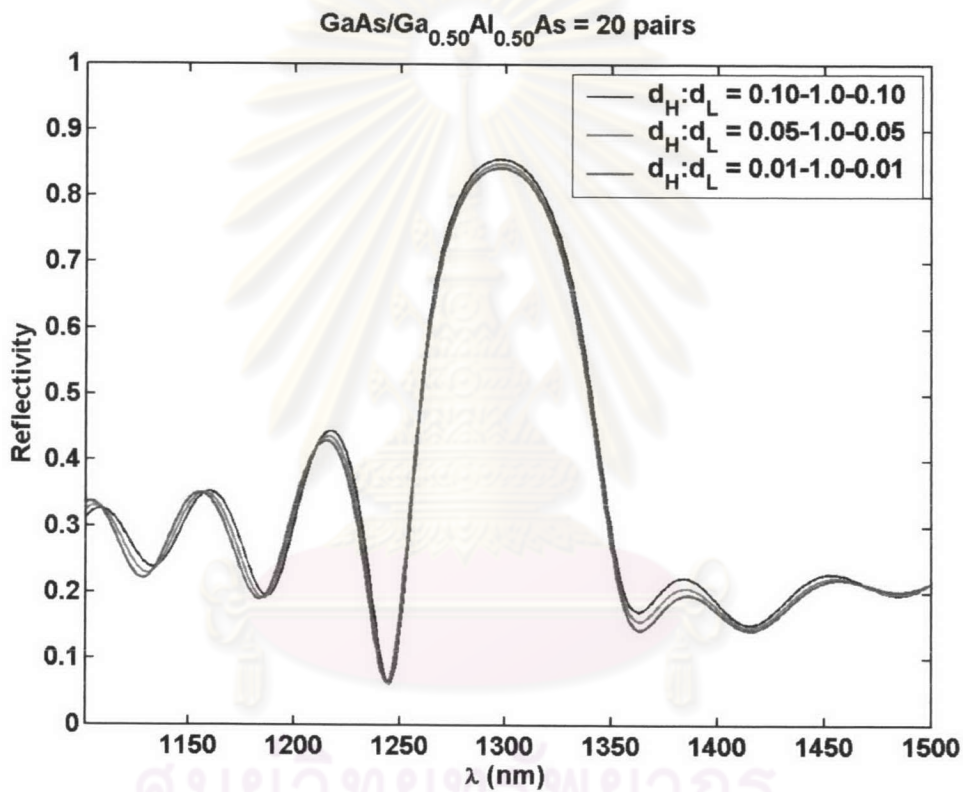
รูปที่ 4.31 ค่าการสะท้อนของ GaAs/GaAlAs โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 โดยมีจำนวน (ก) 10 คู่, (ข) 20 คู่, (ค) 30 คู่ และ (ง) 40 คู่



รูปที่ 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

จากค่าการสะท้อนที่คำนวณได้ในรูปที่ 4.30 และ 4.31 พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับค่าการสะท้อนของโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น รูปที่ 4.26 และ 4.27 มาก คือค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นสั้นและยาวลดลงจากโครงสร้างแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1 เช่นเดียวกัน

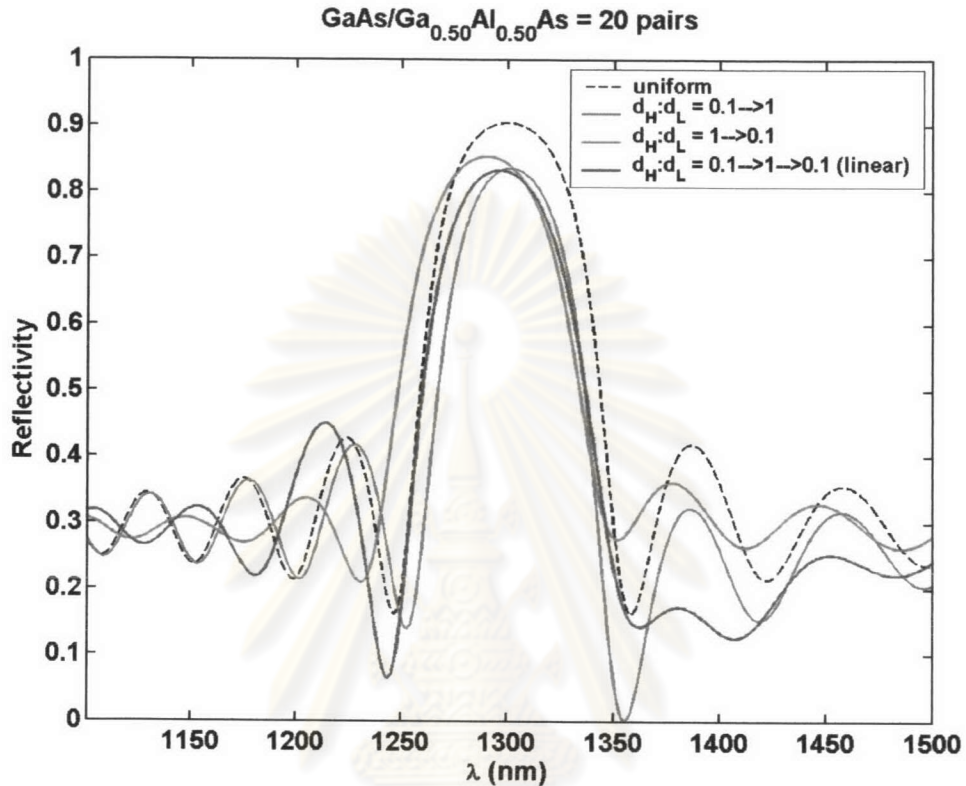
จากรูปที่ 4.32 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า $d_H : d_L$ ให้เพิ่มจาก 0.05 เป็น 1 ลดเหลือ 0.05 และเพิ่มจาก 0.01 เป็น 1 ลดเหลือ 0.01 จากเดิมที่เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ลดเหลือ 0.1 พบว่าลักษณะการสะท้อนจะคล้ายคลึงกันแต่จะมีค่าการสะท้อนสูงสุดลดลงจากกรณีเดิมเล็กน้อย



รูปที่ 4.32 ค่าการสะท้อนเมื่อ $d_H : d_L$ เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1 ลดเหลือ 0.1, เพิ่มจาก 0.05 เป็น 1 ลดเหลือ 0.05 และเพิ่มจาก 0.01 เป็น 1 ลดเหลือ 0.01 แบบไม่เชิงเส้น

โครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ โดยมีค่าสัดส่วน Al ใน GaAlAs คงที่แบบต่างๆ มีผลต่อค่าการสะท้อนคือที่อัตราส่วน $d_H : d_L$ ต่ำ ความหนาของชั้น GaAs/GaAlAs จะเป็นค่าที่สะท้อนความยาวคลื่นยาวได้น้อย ส่วนค่าอัตราส่วน $d_H : d_L$ สูงจะสะท้อนความยาวคลื่นสั้นได้น้อย ซึ่งสรุปค่าการสะท้อนของโครงสร้างแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอสำหรับแบเรกกรีเฟกเตอร์ GaAs/Ga_{0.5}Al_{0.5}As จำนวน 20 คู่ได้ดังในรูปที่ 4.33 พบว่าโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลง $d_H : d_L$ จาก 0.1 เป็น 1 และ 0.1 เป็น 1 เป็นโครงสร้างที่มีค่าการสะท้อนบริเวณช่วงอื่นๆ นอกเหนือจากช่วงความ

ยาวคลื่นใช้งานต่ำที่สุดแต่ค่าการสะท้อนสูงสุดต่ำลงมาด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องใช้จำนวนคู่มากขึ้นจึงจะให้ค่าการสะท้อนสูงสุดเท่ากับโครงสร้างแบบสม่ำเสมอ



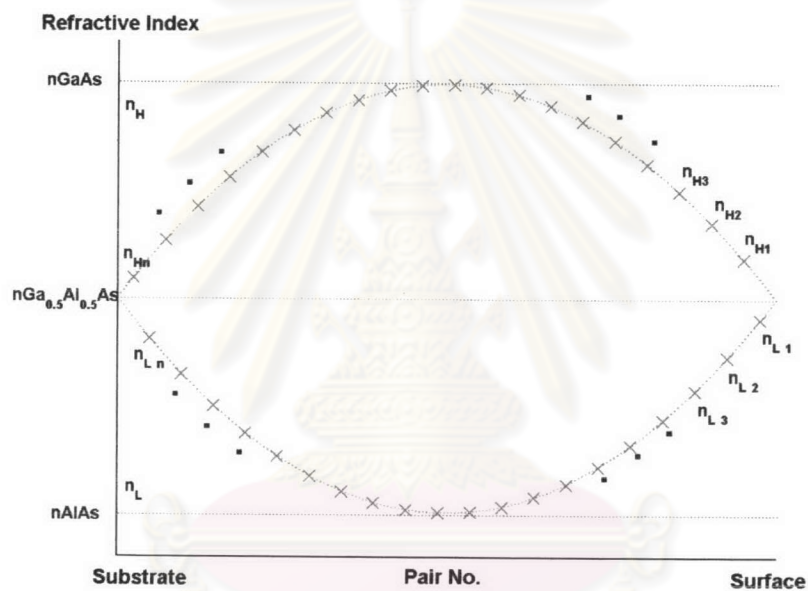
รูปที่ 4.33 ค่าการสะท้อนของ $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ จำนวน 20 คู่ ที่เป็นโครงสร้างสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอแบบต่างๆ

4.5 จำนวนค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอบนแผ่นฐาน GaAs ที่ค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งโครงสร้าง

เนื่องจากแบรกริเฟกเตอร์ โครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอข้างต้นยังไม่สามารถลดการสะท้อนบริเวณนอกเหนือจากความยาวคลื่นใช้งานได้ดีเท่าที่ควร อีกทั้งค่าการสะท้อนสูงสุดยังมีค่าลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบสม่ำเสมอ ทำให้ต้องใช้จำนวนคู่มากขึ้นเพื่อทำให้ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งานมากขึ้น จึงได้มีการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์แบบไม่สม่ำเสมอขึ้นมาอีกหนึ่งโครงสร้างเพื่อให้ได้แบรกริเฟกเตอร์ที่มีลักษณะการสะท้อนใกล้เคียงกับแบนด์สตอปไฟเตอร์ (Band stop filter) มากที่สุด แบรกริเฟกเตอร์โครงสร้างไม่สม่ำเสมอแบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs ในทุกๆ คู่ของ $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ซึ่งค่าสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ค่าดัชนีหักเหที่เป็นฟังก์ชันของค่าสัดส่วน Al เปลี่ยนแปลงไปด้วย และอาศัยสมการที่ (1) จำนวนความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำแต่ละชั้น โดยลักษณะการ

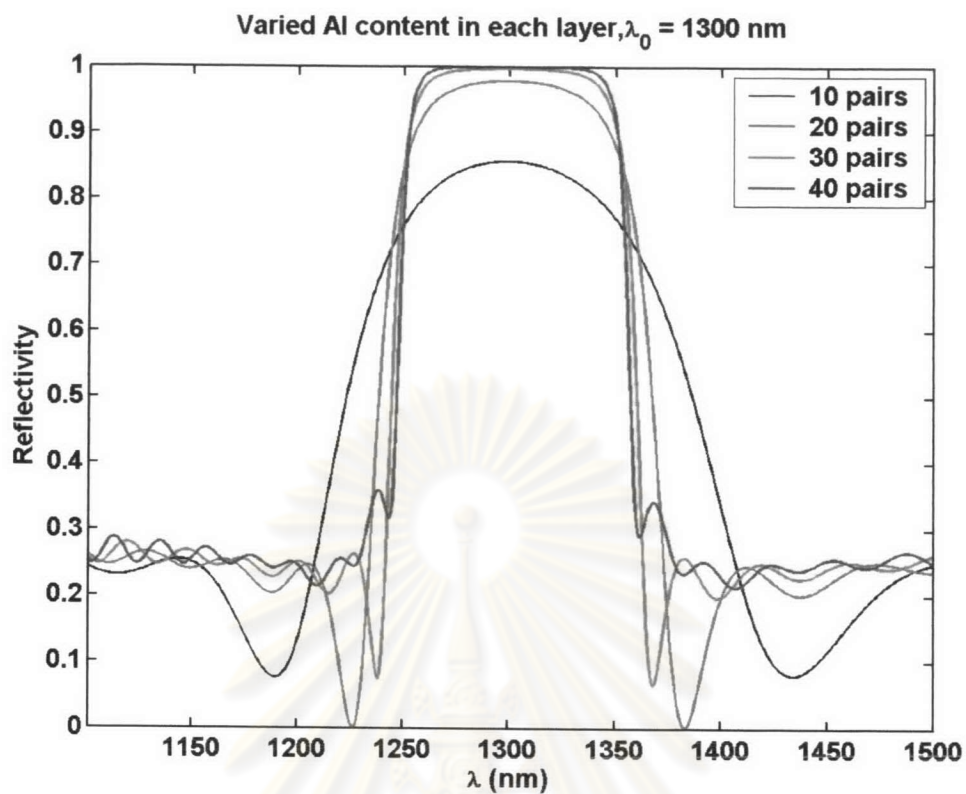
เปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วน Al ในโครงสร้างนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในกราฟของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหในรูปที่ 4.34 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบไล่ระดับ (graded)

จากรูปที่ 4.34 $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ คู่แรกที่อยู่บริเวณผิวหน้าจะมีค่าดัชนีหักเหสูงและต่ำเป็น n_{H1} และ n_{L1} ตามลำดับ และคู่ที่ถัดเข้ามาจะมีดัชนีหักเหเป็น n_{H2} และ n_{L2} ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งคู่ที่อยู่ติดกับแผ่นฐาน GaAs มีดัชนีหักเหเป็น n_{Hn} และ n_{Ln} โดยค่า n_H จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหของ GaAs และ $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}$ และ n_L มีค่าอยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหของ $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}$ และ AlAs ส่วนความหนา d_H และ d_L ใน $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ แต่ละคู่มีการเปลี่ยนแปลงตาม n_H และ n_L ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.35

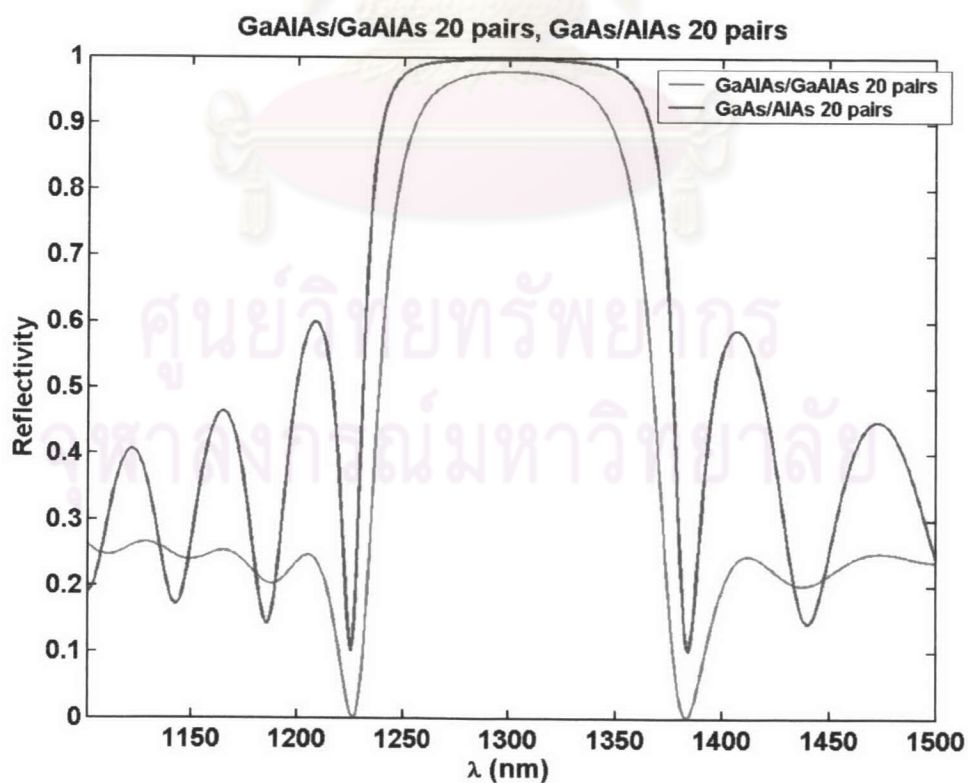


รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของ $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ แต่ละคู่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.35 ค่าการสะท้อนของโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.36 ค่าการสะท้อนของโครงสร้าง GaAlAs/GaAlAs และ GaAs/AlAs จำนวน 20 คู่

จากการคำนวณและเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบสมมาตรที่ 4.36 พบว่าค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นใช้งานมีค่าลดลงและแบนด์วิดท์แคบลงเล็กน้อย สำหรับความยาวคลื่นที่สั้นและยาวกว่าช่วงความยาวคลื่นใช้งานมีค่าลดลงมาก เนื่องจากค่าความหนา d_H และ d_L ที่คำนวณจาก n_H และ n_L ใน $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ แต่ละคู่เป็นค่าที่เหมาะสมกับการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่นใช้งาน และจะมีความยาวคลื่นบางค่าที่มีการสะท้อนสูงเช่นกัน แต่ใน $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ แต่ละคู่จะมีค่าความยาวคลื่นบางค่าที่ไม่ตรงกัน (เนื่องจากความหนาของแต่ละคู่ไม่เท่ากัน) ดังนั้นเมื่อคำนวณแบรกริเฟกเตอร์ทั้งโครงสร้างแล้ว ค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นอื่นนอกเหนือจากช่วงใช้งานจะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบสมมาตรที่มีความหนา d_H และ d_L ในแต่ละคู่เท่ากัน

สรุปได้ว่า โครงสร้างนี้มีลักษณะการสะท้อนที่ใกล้เคียงกับแบนด์สตอปฟิวเตอร์ในอุดมคติมาก นั่นคือสามารถลดค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นนอกเหนือจากความยาวคลื่นใช้งานได้มาก โดยที่ค่าการสะท้อนสูงสุดยังคงมีค่าสูงอยู่ แต่เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากและประดิษฐ์ได้ยาก

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย