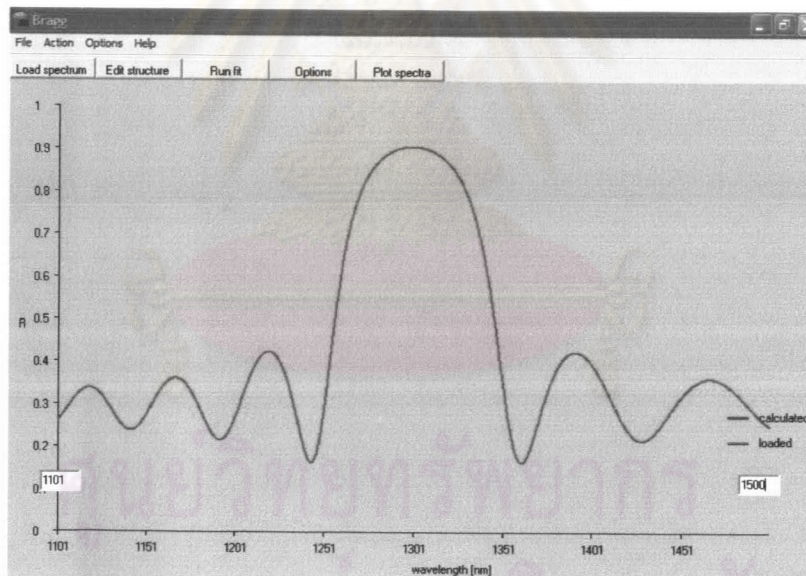


บทที่ 6

การคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ และผลจากการทดลอง

เนื่องจากการวิเคราะห์และคำนวณ โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยทฤษฎีการสะท้อนของคลื่นบริเวณผิวยอต่อมาสรางเป็นแบบจำลอง และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของโครงสร้างนี้จึงได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบกับโปรแกรม BRproject® เขียนโดย Marek Wesolowski ซึ่งเป็นโปรแกรมฟรี (Freeware) ที่จำกัดระยะเวลาการใช้งาน โดยจะคำนวณเปรียบเทียบกับทุกโครงสร้างที่ได้คำนวณมาแล้วในบทที่ 4 โดยให้เส้นทึบสีดำเป็นค่าที่คำนวณจากโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้นมาและเส้นประสีแดงเป็นค่าจากโปรแกรม BRproject® ซึ่งในตัวโปรแกรมนี้จะต้องทำการป้อนค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่นใช้งานและความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำแต่ละชั้นลงไป

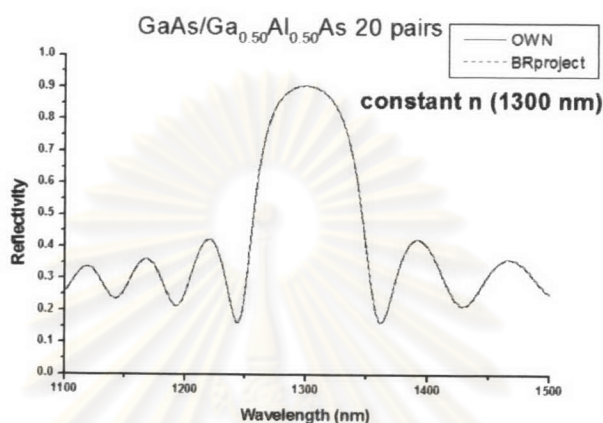


รูปที่ 6.1 ตัวอย่างผลการคำนวณด้วยโปรแกรม BRproject® ของ Marek Wesolowski ที่นำมาใช้คำนวณเปรียบเทียบ

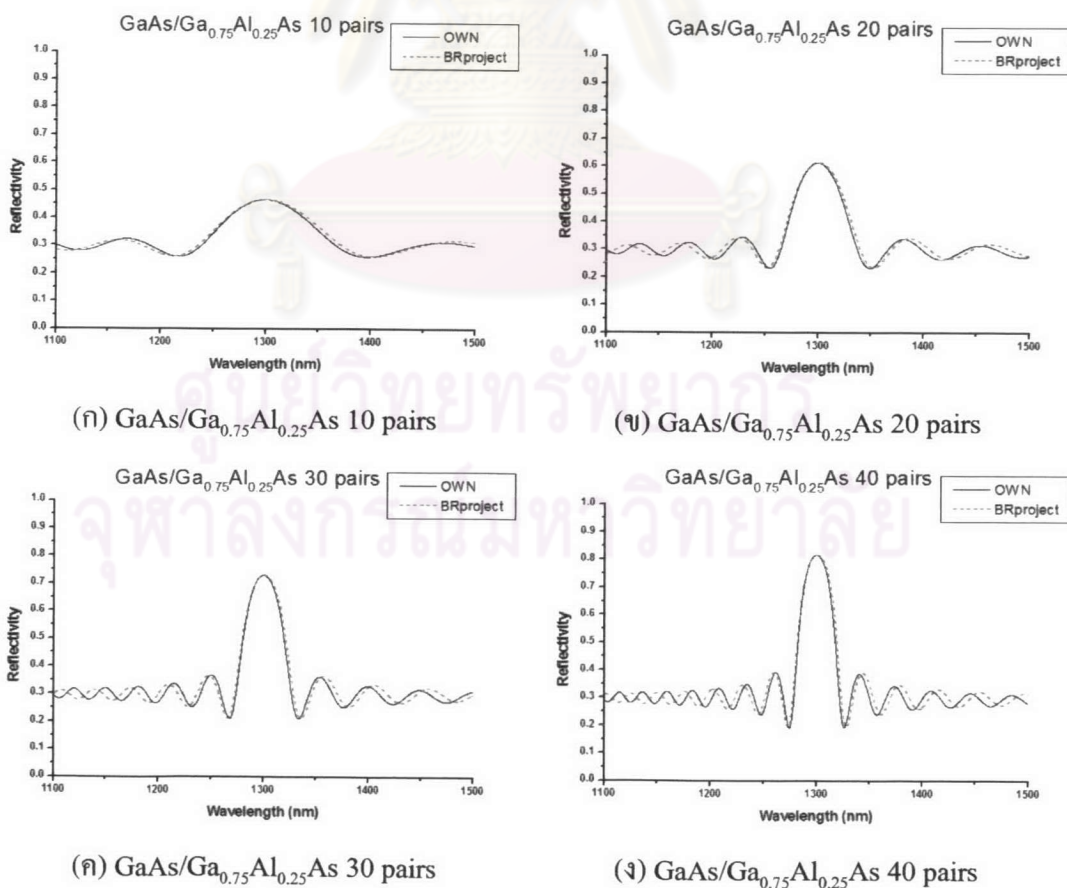
6.1 โครงสร้างส่ม้าสมอ GaAs/GaAlAs และ GaAlAs/AlAs บนแผ่นฐาน GaAs

เนื่องจากว่าในโปรแกรม BRproject® จะใช้ค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น $1.3 \mu\text{m}$ เป็นค่าดัชนีหักเหของความยาวคลื่นอื่นๆด้วย ต่างจากโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้นซึ่งใช้สมการของ Sellmeier หาค่าดัชนีหักเหสำหรับทุกๆ ความยาวคลื่น ทำให้ค่าที่คำนวณได้แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเมื่อปรับโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาให้ใช้ค่าดัชนีหักเหคงที่พบว่าผลการคำนวณเท่ากับผลจากโปรแกรม

BRproject® ที่ทุกๆ ความยาวคลื่นดังรูปที่ 6.2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเมื่อกำหนดให้มีจำนวนคู่ GaAs/GaAlAs, GaAlAs/AlAs และค่าสัดส่วน Al ต่างๆ กันแสดงดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 ซึ่งเห็นได้ว่า ผลการคำนวณที่ความยาวคลื่น 1.3 μm มีค่าที่เท่ากันพอดี แต่ที่ความยาวคลื่นช่วงอื่นๆ ค่าที่คำนวณ ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย

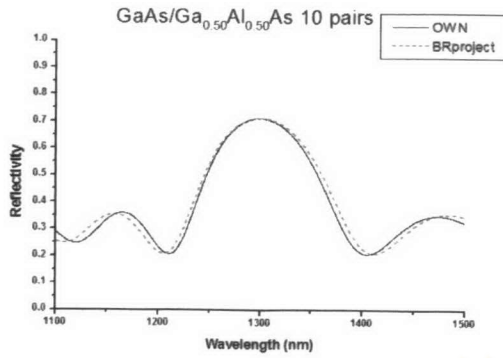


รูปที่ 6.2 ผลการคำนวณเมื่อให้ดัชนีหักเหคงที่เท่ากับ $n(\lambda_0)$

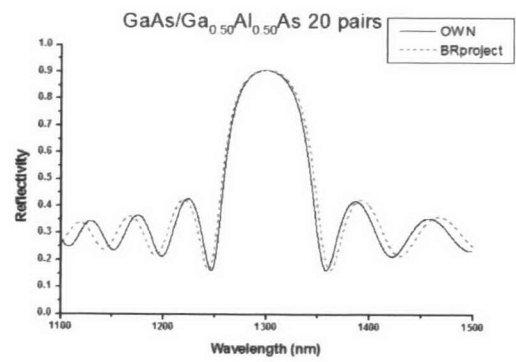


(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 10 pairs (ข) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 20 pairs
(ค) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 30 pairs (ง) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 40 pairs

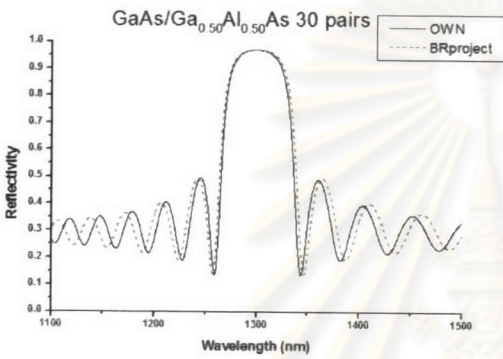
รูปที่ 6.3 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ



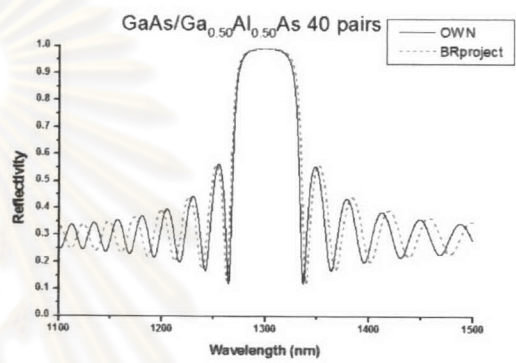
(จ) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 10 pairs



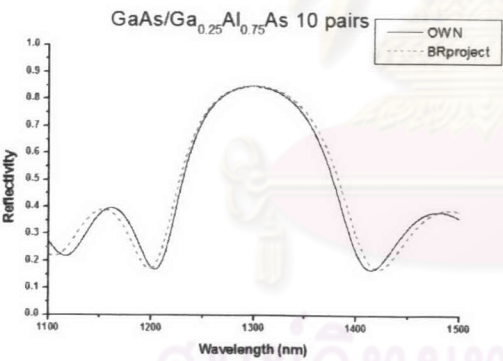
(ฉ) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs



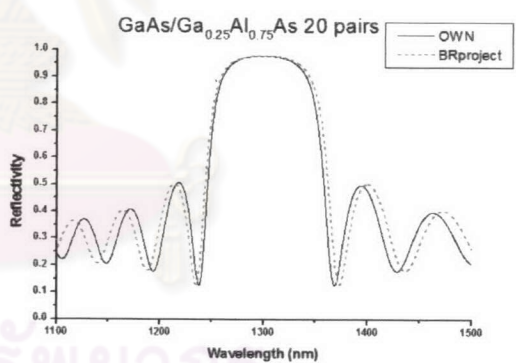
(ช) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 30 pairs



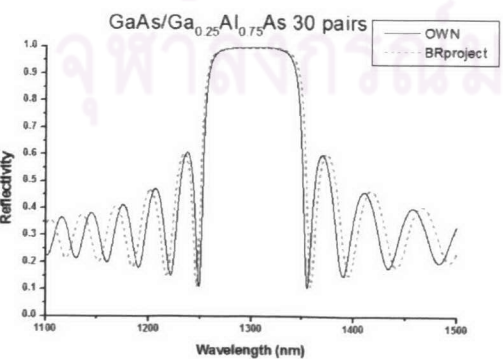
(ฅ) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 40 pairs



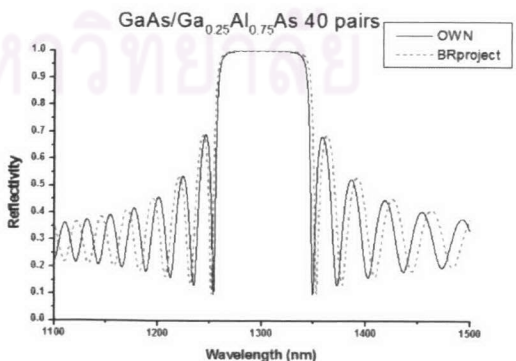
(ฉล) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 10 pairs



(ฉม) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 20 pairs

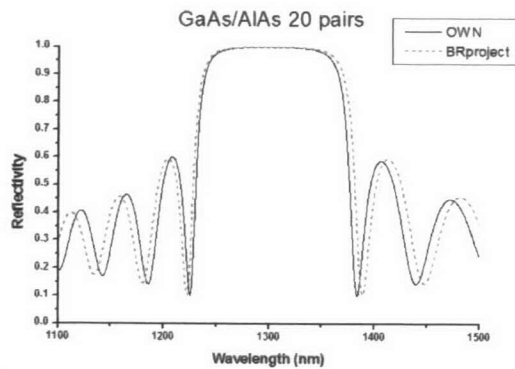
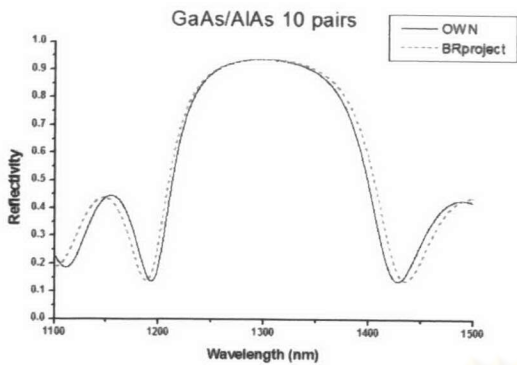


(ฉณ) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 30 pairs



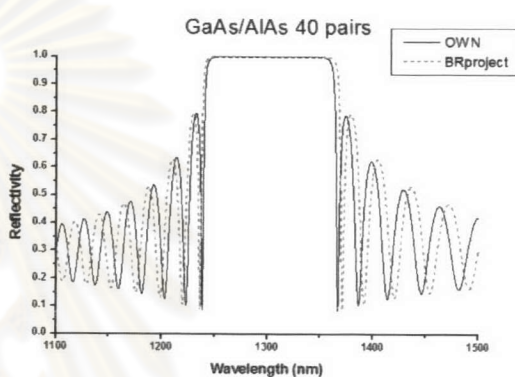
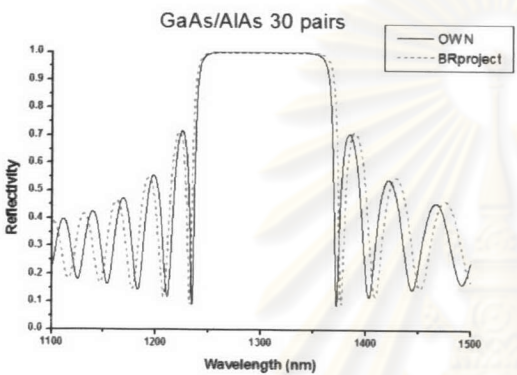
(ฉด) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 40 pairs

รูปที่ 6.3 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ



(๓) GaAs/AlAs 10 pairs

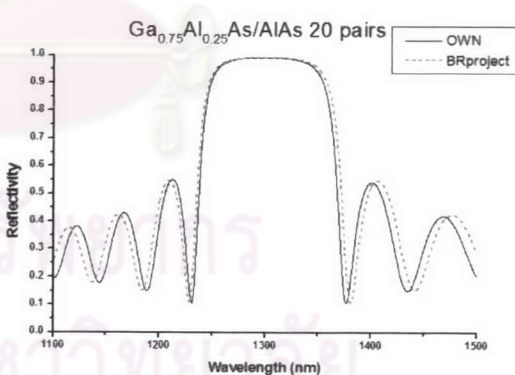
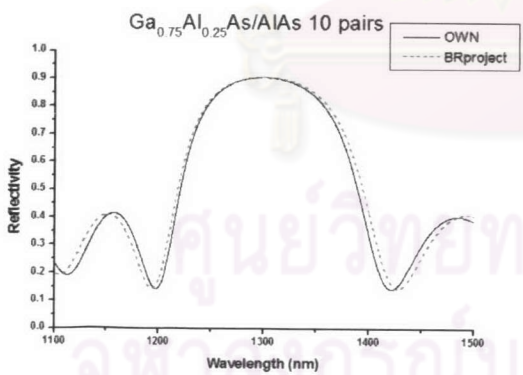
(๔) GaAs/AlAs 20 pairs



(๕) GaAs/AlAs 30 pairs

(๖) GaAs/AlAs 40 pairs

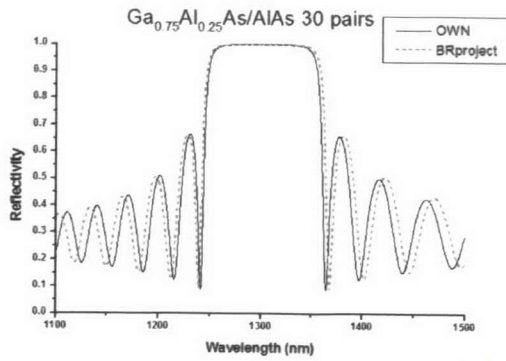
รูปที่ 6.3 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอ



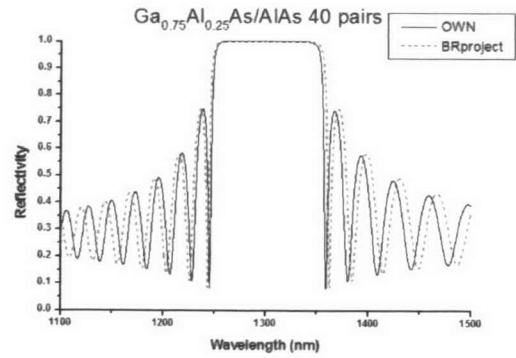
(๗) Ga_{0.75}Al_{0.25}As/AlAs 10 pairs

(๘) Ga_{0.75}Al_{0.25}As/AlAs 20 pairs

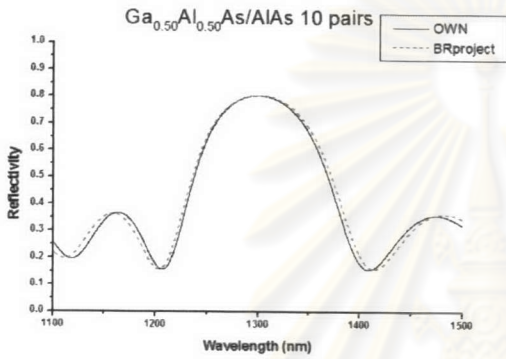
รูปที่ 6.4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAlAs/AlAs แบบสม่ำเสมอ



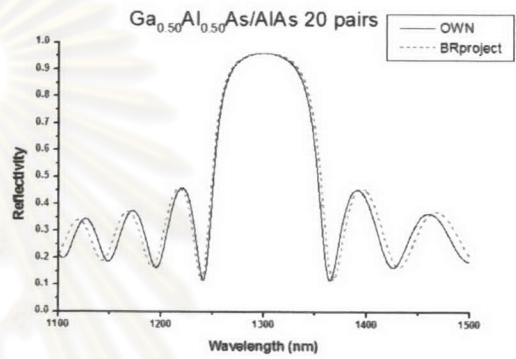
(ก) $\text{Ga}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As/AIAs}$ 30 pairs



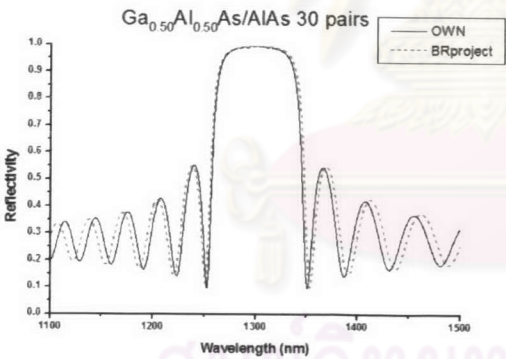
(ง) $\text{Ga}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As/AIAs}$ 40 pairs



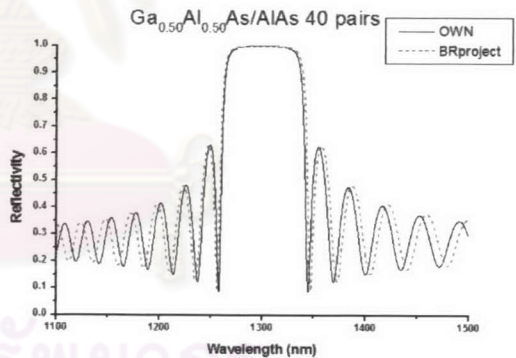
(จ) $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As/AIAs}$ 10 pairs



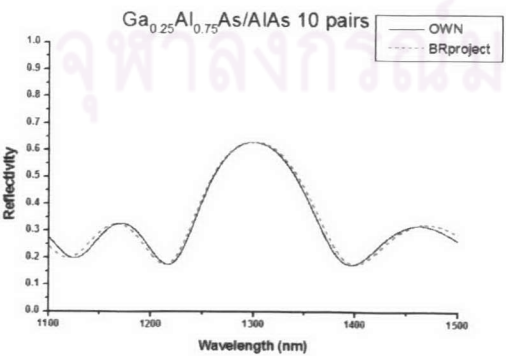
(ฉ) $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As/AIAs}$ 20 pairs



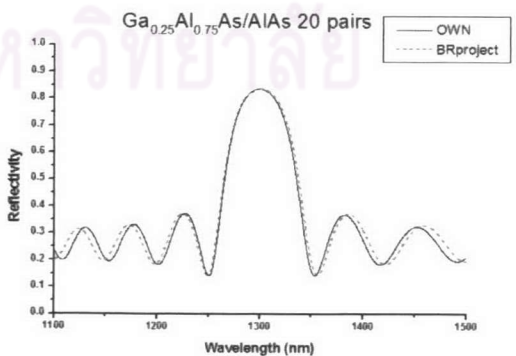
(ช) $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As/AIAs}$ 30 pairs



(ছ) $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As/AIAs}$ 40 pairs

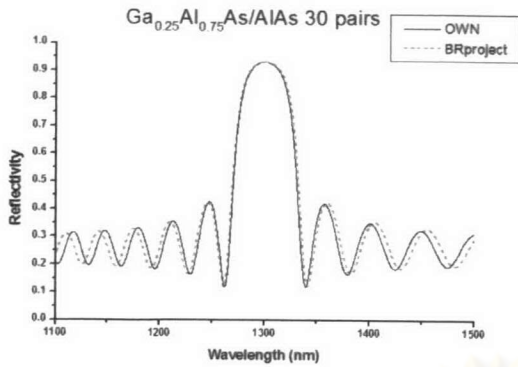


(ฉ) $\text{Ga}_{0.25}\text{Al}_{0.75}\text{As/AIAs}$ 10 pairs

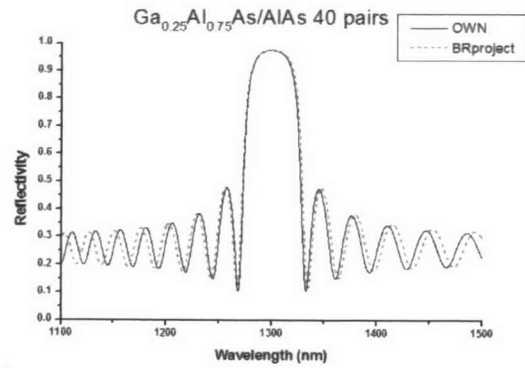


(ญ) $\text{Ga}_{0.25}\text{Al}_{0.75}\text{As/AIAs}$ 20 pairs

รูปที่ 6.4 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAlAs/AIAs แบบสม่ำเสมอ



(ก) $\text{Ga}_{0.25}\text{Al}_{0.75}\text{As/AIAs}$ 30 pairs

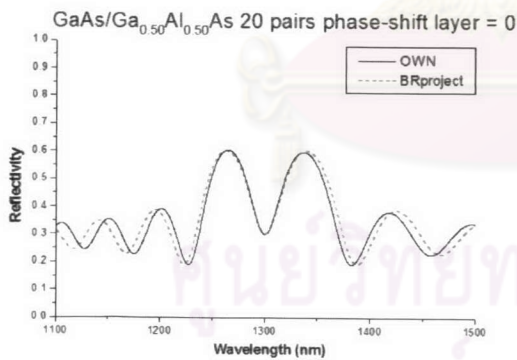


(ข) $\text{Ga}_{0.25}\text{Al}_{0.75}\text{As/AIAs}$ 40 pairs

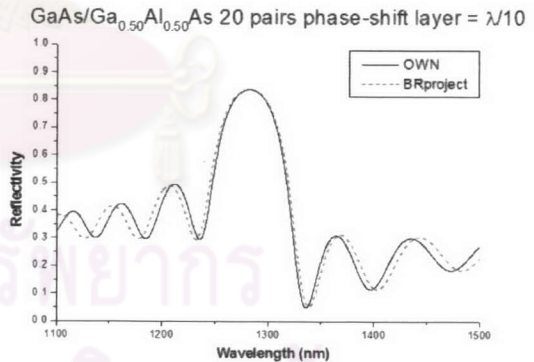
รูปที่ 6.4 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAlAs/AIAs แบบสม่ำเสมอ

6.2 โครงสร้างสม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีชั้นเลื่อนเฟส

ผลการคำนวณเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 6.5 โดยกำหนดให้ GaAs/GaAlAs ($\text{Al}=0.5$) เท่ากับ 20 คู่ เห็นได้ว่าค่าที่คำนวณได้จาก BRproject® ให้ค่าที่เท่ากับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ที่ความยาวคลื่นยาว 1.3 μm แต่ที่ความยาวคลื่นอื่นๆ ค่าจะใกล้เคียงกัน ยิ่งใกล้ 1.3 μm มากเท่าใดค่ายิ่งใกล้กันมากขึ้นเท่านั้น สอดคล้องกับเหตุผลจากการเปรียบเทียบในโครงสร้างข้างต้น

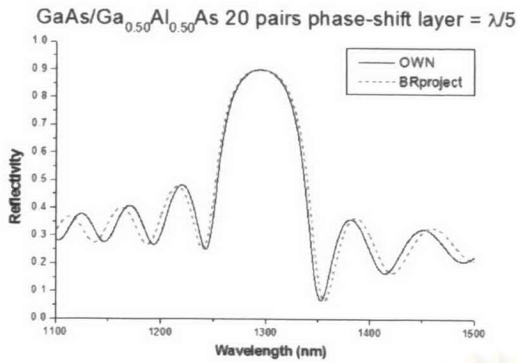


(ก) $\text{GaAs/Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 20 pairs $\phi = 0$

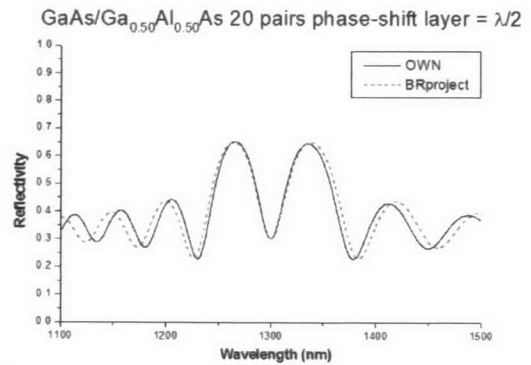


(ข) $\text{GaAs/Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 20 pairs $\phi = \frac{\lambda_0}{10}$

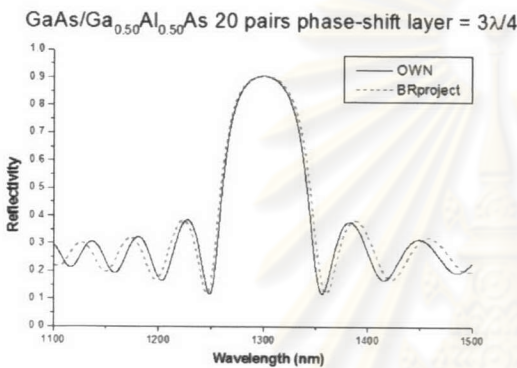
รูปที่ 6.5 ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเลื่อนเฟส



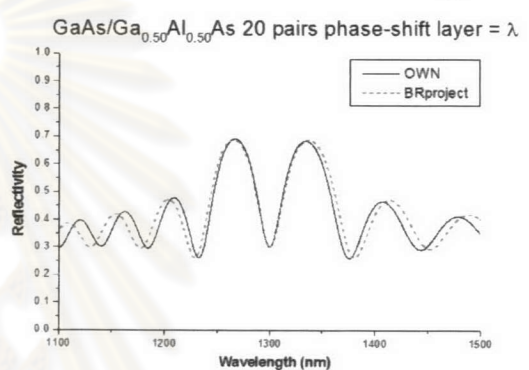
(ก) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs $\phi = \frac{\lambda_0}{5}$



(ง) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs $\phi = \frac{\lambda_0}{2}$



(จ) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs $\phi = \frac{3\lambda_0}{4}$



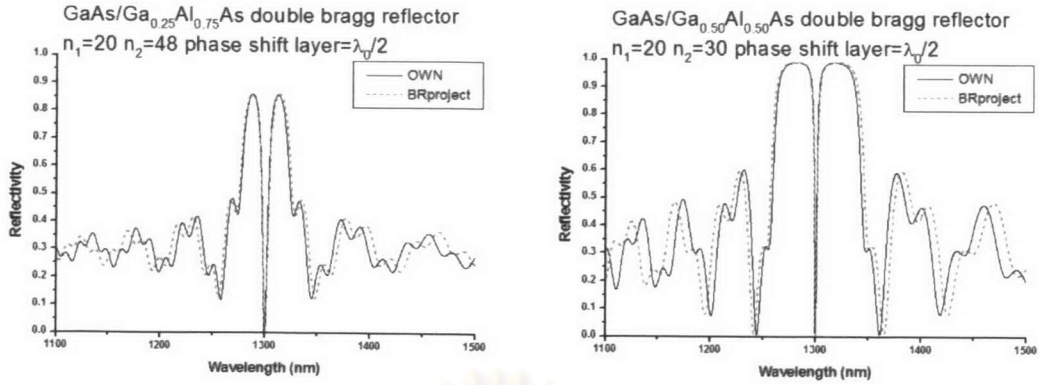
(ฉ) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs $\phi = \lambda_0$

รูปที่ 6.5 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบ โครงสร้าง GaAs/GaAlAs แบบสม่ำเสมอที่มีชั้นเลื่อนเฟส

6.3 โครงสร้างแบรกริเฟกเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs โดยมีชั้นเลื่อนเฟส GaAs หรือ GaAlAs

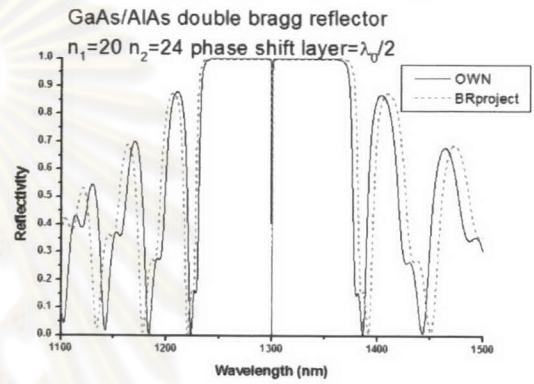
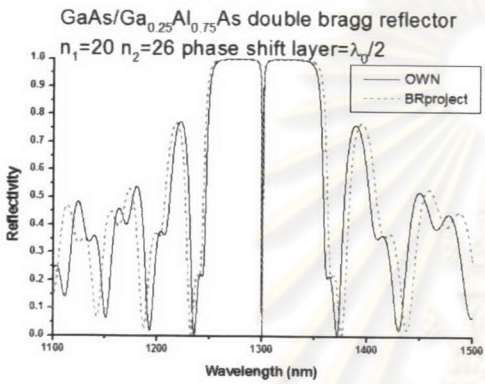
ความหนาต่างๆ กันกันกลาง

โครงสร้างนี้ได้เลือกความหนาของ GaAs phase-shifted layer หนา $\frac{\lambda_0}{2}$ มาทำการคำนวณเปรียบเทียบโดยให้ค่าสัดส่วน Al ใน GaAlAs เท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 และให้จำนวนคู่ของแบรกริเฟกเตอร์ชุดที่ 1 (n_1) และชุดที่ 2 (n_2) เป็นค่าที่ทำให้การสะท้อนที่มีค่าต่ำที่สุดคือ $n_1 = 20, n_2 = 48, n_1 = 20, n_2 = 30, n_1 = 20, n_2 = 26$ และ $n_1 = 20, n_2 = 24$ สำหรับ Al = 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ตามลำดับโดยได้ผลการคำนวณแสดงดังในรูปที่ 6.6 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการคำนวณข้อ 6.1 คือค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น จะเท่ากันพอดีส่วนที่ความยาวคลื่นค่าอื่นๆ มีความคลาดเคลื่อนกันบ้างเล็กน้อย และที่ความยาวคลื่นที่สั้นหรือยาวกว่า $1.3 \mu\text{m}$ มากๆ ค่าที่คำนวณก็มีความคลาดเคลื่อนมากด้วย



(ก) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As $n_1 = 20, n_2 = 48$

(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As $n_1 = 20, n_2 = 30$



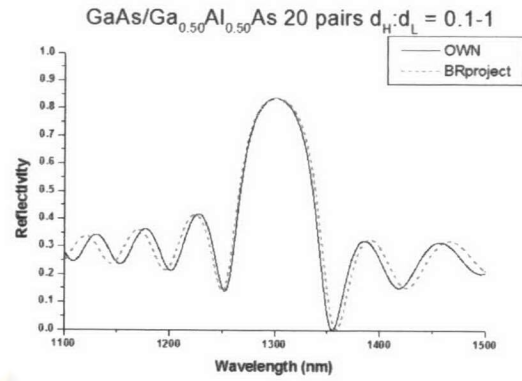
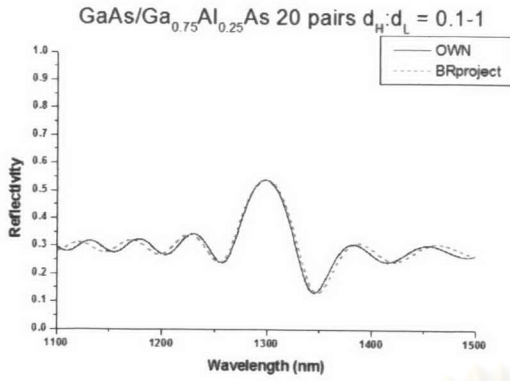
(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As $n_1 = 20, n_2 = 26$

(ง) GaAs/AlAs $n_1 = 20, n_2 = 24$

รูปที่ 6.6 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้างแบรกริเฟคเตอร์คู่ GaAs/GaAlAs

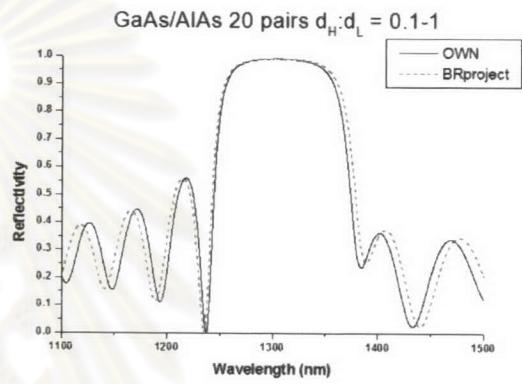
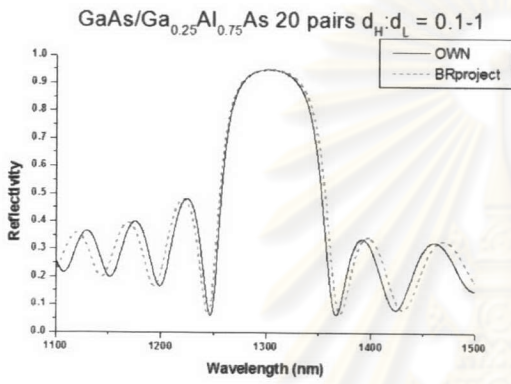
6.4 โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs บนแผ่นฐาน GaAs ที่มีค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง

ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าการสะท้อนของโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs แบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5.1–4.5.4 สำหรับโครงสร้างที่ค่าสัดส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 โครงสร้างที่อัตราส่วน $d_H : d_L$ ลดลงจาก 1 เป็น 0.1 โครงสร้างที่อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1 แบบเชิงเส้น และโครงสร้างที่อัตราส่วน $d_H : d_L$ เพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 1 และลดลงเหลือ 0.1 แบบไม่เชิงเส้น แสดงดังในรูปที่ 6.7-6.10 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ใกล้เคียงกัน โดยจะมีค่าการสะท้อนตรงกันที่ความยาวคลื่น 1.3 μm และที่ความยาวคลื่นห่างจากค่านี้ไปค่าการสะท้อนที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนกันมากขึ้น



(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 20 pairs

(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs

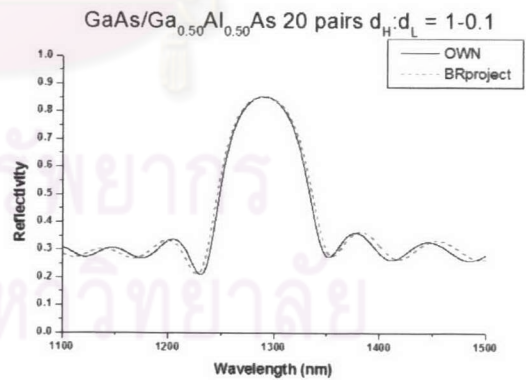
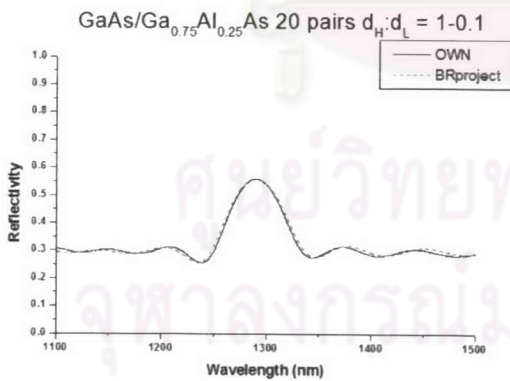


(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 20 pairs

(ง) GaAs/GaAlAs 20 pairs

รูปที่ 6.7 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs

แบบไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L = 0.1-1$

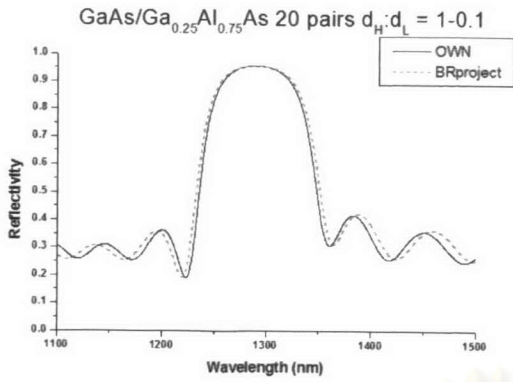


(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 20 pairs

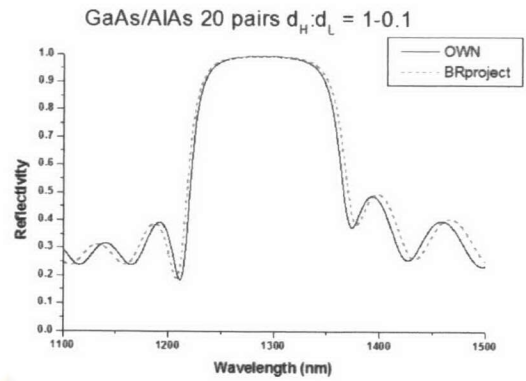
(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs

รูปที่ 6.8 ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs

แบบไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L = 1-0.1$



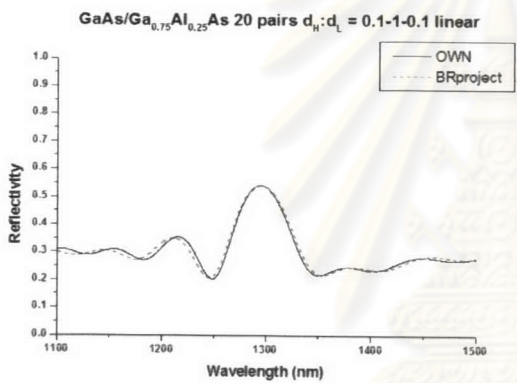
(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 20 pairs



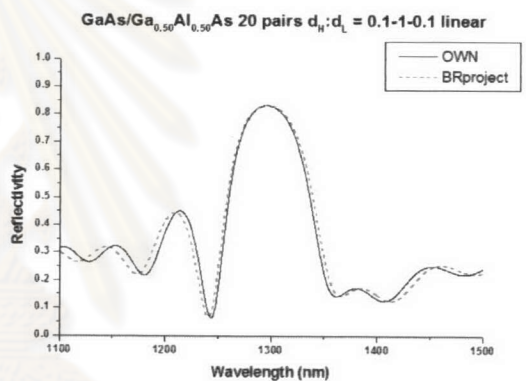
(ง) GaAs/GaAlAs 20 pairs

รูปที่ 6.8 (ต่อ) ผลการคำนวณเปรียบเทียบโครงสร้าง GaAs/GaAlAs

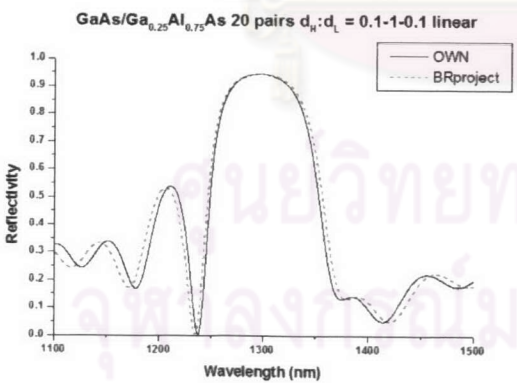
แบบไม่สม่ำเสมอ $d_H : d_L = 1-0.1$



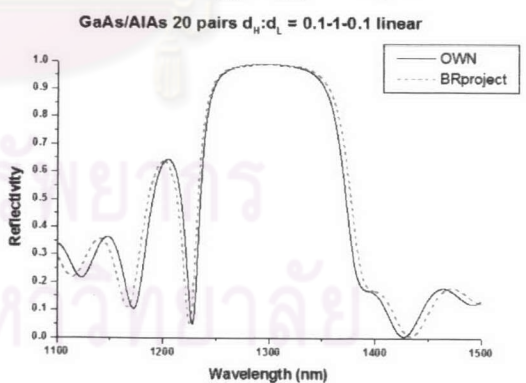
(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 20 pairs



(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs



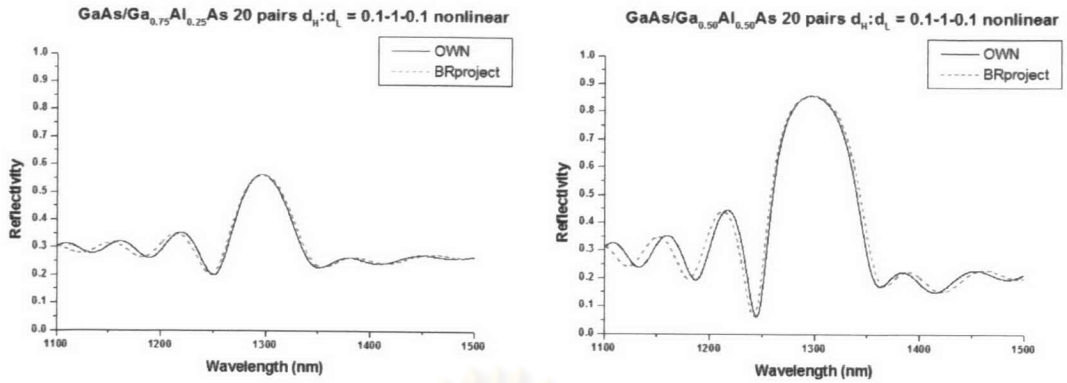
(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 20 pairs



(ง) GaAs/GaAlAs 20 pairs

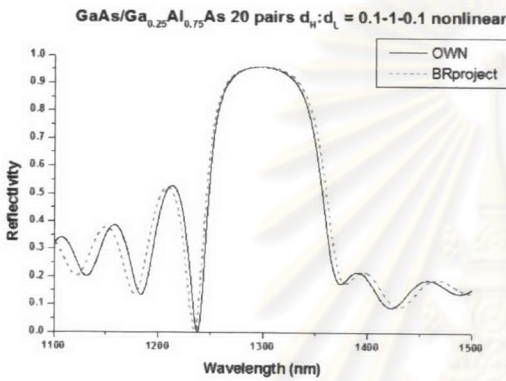
รูปที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs

$d_H : d_L = 0.1-1-0.1$ แบบเชิงเส้น

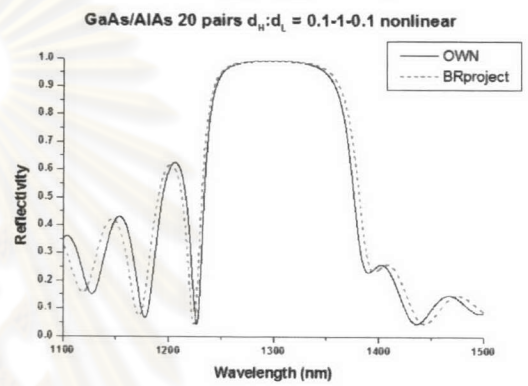


(ก) GaAs/Ga_{0.75}Al_{0.25}As 20 pairs

(ข) GaAs/Ga_{0.50}Al_{0.50}As 20 pairs



(ค) GaAs/Ga_{0.25}Al_{0.75}As 20 pairs



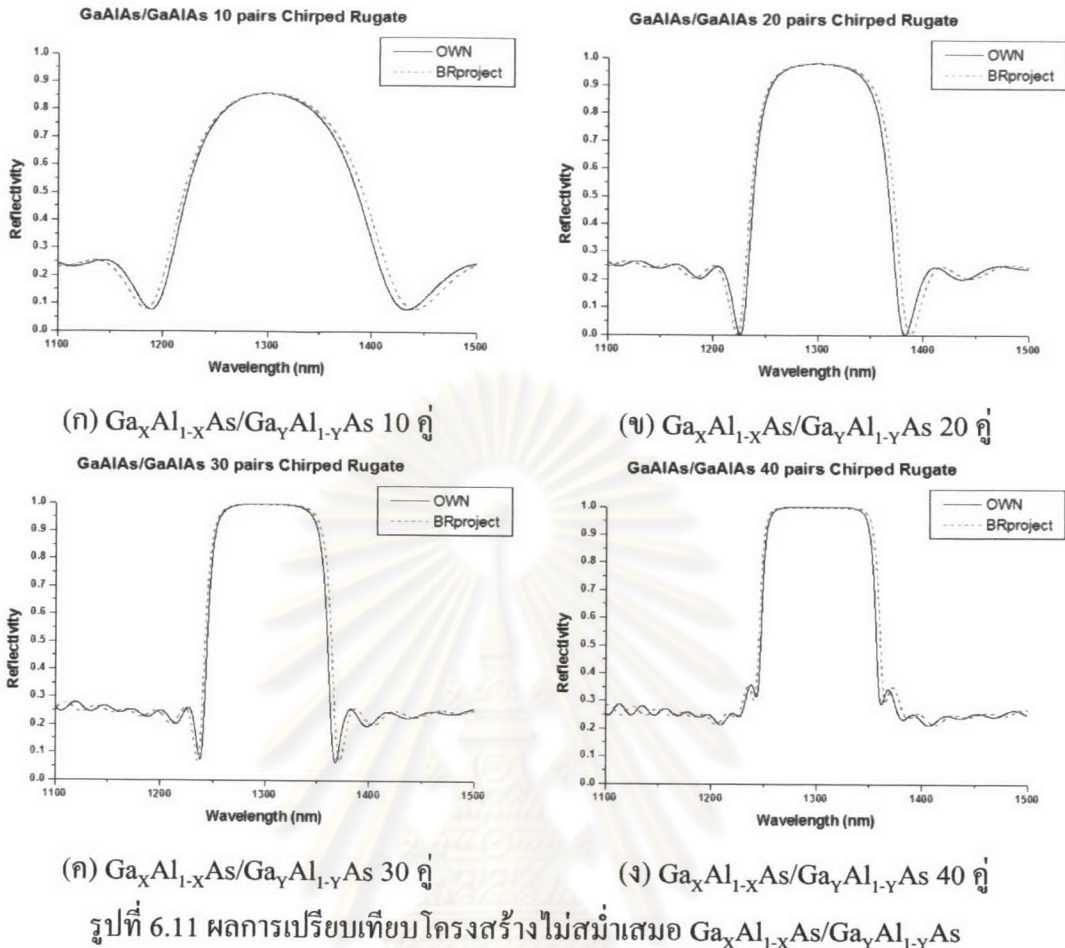
(ง) GaAs/GaAlAs 20 pairs

รูปที่ 6.10 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ GaAs/GaAlAs

$$d_H : d_L = 0.1 - 1 - 0.1 \text{ แบบไม่เชิงเส้น}$$

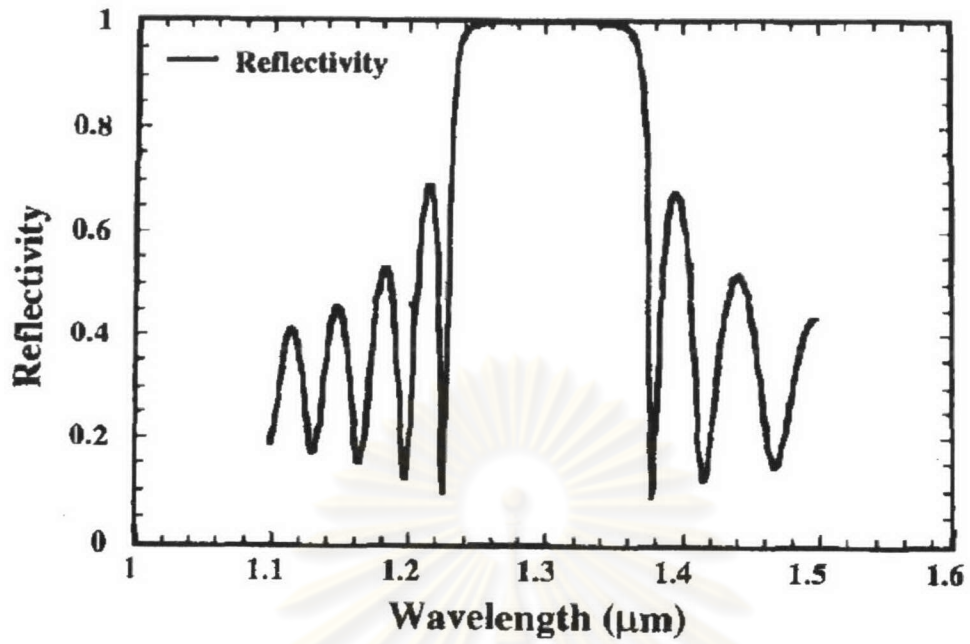
6.5 โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ $Ga_xAl_{1-x}As/Ga_yAl_{1-y}As$ ที่ค่าสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งโครงสร้าง

ผลการคำนวณเปรียบเทียบดังในรูปที่ 6.11 สอดคล้องกับการเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 6.1-6.4 ที่ผ่านมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมทั้งสองสามารถคำนวณค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1.3 μm ได้เท่ากันและที่ความยาวคลื่นอื่นๆ ค่าที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีลักษณะของกราฟการสะท้อนคล้ายคลึงกัน

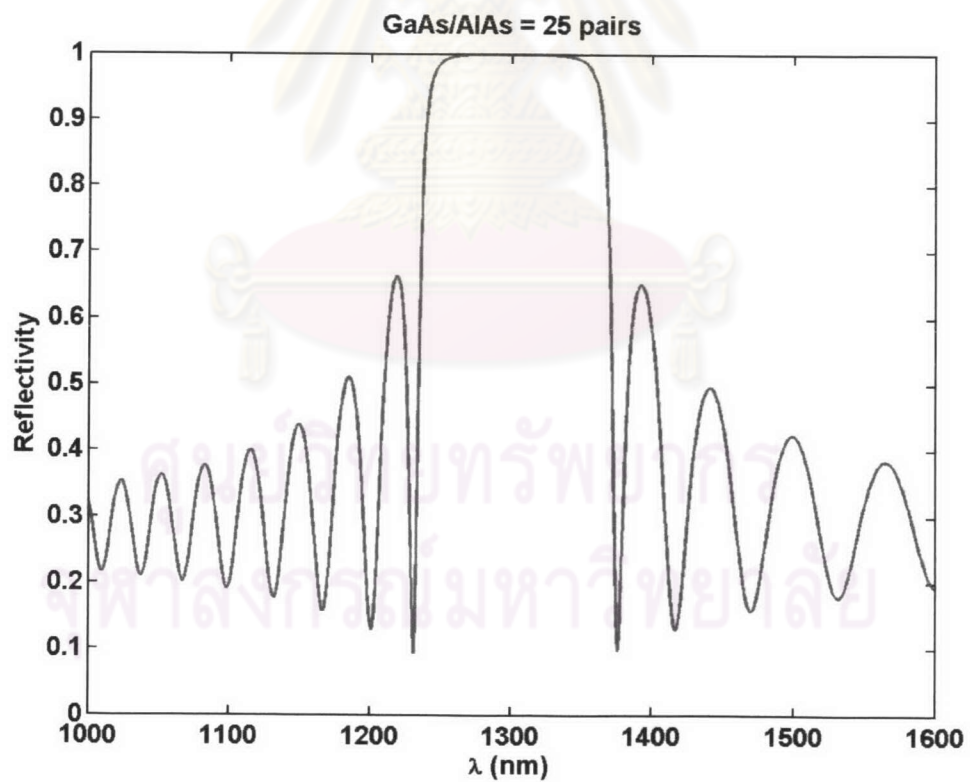


6.6 ผลเปรียบเทียบกับการวัดการสะท้อนจากแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/AlAs จำนวน 25 คู่

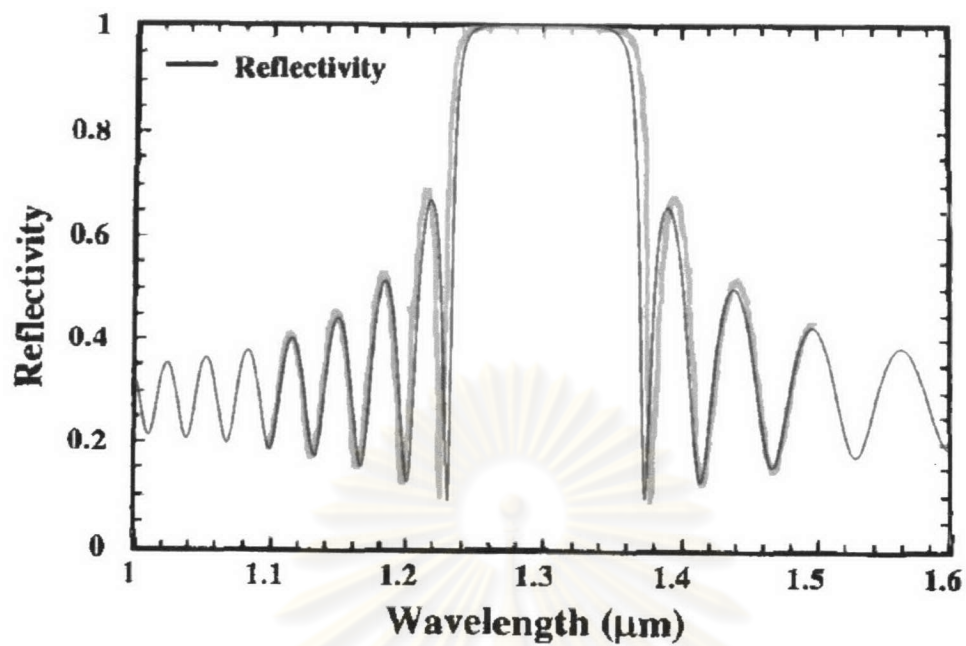
รูปที่ 6.12 แสดงผลการวัดค่าการสะท้อนของแบรกริเฟกเตอร์ GaAs/AlAs จำนวน 25 คู่ แต่ ละชั้นหนาเท่ากับ $\frac{\lambda_0}{4n}$ ตามสมการ (1) บนแผ่นฐาน GaAs [8] ซึ่งเป็นผลการวิจัยของ S. S. Murtaza โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบการปลูกด้วยลำโมเลกุลหรือ MBE (Molecular Beam Epitaxy) มาใช้ ปลูกชั้นของ GaAs และ AlAs บนแผ่นฐาน GaAs โดยทำการปลูกที่อุณหภูมิ 600°C ความหนาของ ชั้นบัฟเฟอร์ GaAs หนา $0.5 \mu\text{m}$ และอัตราการปลูกของ GaAs เป็น 1 monolayer/s และของ AlAs เป็น 0.8 monolayer/s ทั้งนี้การปลูกทำภายใต้บรรยากาศของ As_4 รูปที่ 6.13 เป็นผลที่ได้จากการ คำนวณโดยใช้โครงสร้างเดียวกัน และรูปที่ 6.14 เป็นรูปเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณ ซึ่งพบว่าค่าการสะท้อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ให้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับ ผลการทดลอง โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันแต่แบนด์วิดท์จากผลการคำนวณแคบกว่า เล็กน้อย



รูปที่ 6.12 ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟกเตอร์ GaAs/AlAs 25 คู่ ที่ได้จากการทดลอง [8]



รูปที่ 6.13 ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟกเตอร์ GaAs/AlAs 25 คู่ ที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 6.14 ค่าการสะท้อนของแบรกรี้เฟกเตอร์ GaAs/AlAs 25 คู่ ที่ได้จากการทดลอง (เส้นสีดำ) และจากการคำนวณ (เส้นสีน้ำเงิน)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย