

บทที่ 4

การวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในอุปกรณ์ QPM-SHG ด้วยวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation

4.1 ความนำ

ในสภาพความเป็นจริงโหมดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในส่วนท่อนำคลื่นแสงของอุปกรณ์ QPM-SHG แบบ 3 มิตินั้น จะเป็นโหมดผสมผสาน (hybrid mode) เสมอองค์ประกอบของสนามในกรณีนี้จะมีครบทุกองค์ประกอบ ดังนั้น การวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองด้วย วิธีการประมาณแบบสเกลาร์ นั้นจึงให้ผลเฉลยที่ไม่แม่นยำนัก

เนื้อหาในบทนี้จะนำวิธีการแก้สมการคลื่นแบบไม่เชิงเส้นในบทที่ 3 มาปรับปรุงเพื่อใช้งานร่วมกับการวิเคราะห์แบบเวกเตอร์ คือ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation สำหรับการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่เหมาะสมของอุปกรณ์ QPM-SHG แบบ 3 มิติ

นอกจากวิธีการที่ใช้ในการคำนวณจะมีผลต่อความแม่นยำของผลเฉลยแล้วแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณก็มีผลด้วยเช่นกัน ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต และ ผลึกลิเทียมแทนทาลेट มักอาศัย วิธีการแพร่ ในการประดิษฐ์โครงสร้างภายในของตัวอุปกรณ์ ผลของการใช้วิธีการแพร่ คือ ทำให้ค่าดัชนีหักเหแสงของส่วนท่อนำคลื่นแสงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบดรรชนีลาด (graded-index profile) นอกจากนี้รูปร่างของบริเวณโดเมนผกผันที่ได้ยังแตกต่างไปจากรูปสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นรูปร่างในอุดมคติอีกด้วย ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณในบทนี้ จึงพยายามสร้างให้มีสภาพใกล้เคียงกับโครงสร้างที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เพื่อให้ผลการคำนวณที่ได้มีความแม่นยำมากที่สุด

4.2 วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรวาเกชันสำหรับการวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง ในอุปกรณ์ QPM-SHG

พฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในอุปกรณ์ QPM-SHG สามารถอธิบายได้ด้วย สมการคลื่นไม่เชิงเส้นแบบเวกเตอร์ (nonlinear vector wave equation) ดังนี้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_i(x, y, z) - k_{0,i}^2 [\epsilon_{r,i}] \cdot \mathbf{E}_i(x, y, z) = 2k_{0,i}^2 \mathbf{P}_i(x, y, z) \quad (4.1)$$

โดยที่ i เท่ากับ 1 และ 2 สำหรับแสงมูลฐานและแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง ตามลำดับ $[\epsilon_{r,i}]$ คือ เทนเซอร์สภาพยอมที่ขึ้นกับความยาวคลื่นของแสง และ

$$\mathbf{P}_1(x, y, z) = [d]: \mathbf{E}_1^*(x, y, z) \mathbf{E}_2(x, y, z) \quad (4.2)$$

$$\mathbf{P}_2(x, y, z) = [d]: \mathbf{E}_1(x, y, z) \mathbf{E}_1(x, y, z) \quad (4.3)$$

(ดูรายละเอียดการพิสูจน์สมการ (4.1) ได้ในภาคผนวก ข)

การหาผลเฉลยของสมการ (4.1) จะอาศัย วิธีแยกตัวดำเนินการ โดยเริ่มต้นจาก แบ่งตัวดำเนินการของสมการ (4.1) ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นตัวดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (พจน์ด้านซ้ายมือ) และ ส่วนที่สองเป็นตัวดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงแบบไม่เชิงเส้น (พจน์ด้านขวามือ) โดยอาศัยวิธีการดังกล่าวนี้จะสามารถแบ่งการหาผลเฉลยในหนึ่งขั้นการเคลื่อนที่ (propagation step) ภายในระยะทาง Δz ออกเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาเฉพาะผลของคลื่นแสงเคลื่อนที่

กำหนดให้พจน์แหล่งกำเนิดทางด้านขวามือของสมการ (4.1) มีค่าเป็นศูนย์ จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_i(x, y, z) - k_{0,i}^2 [\epsilon_{r,i}] \cdot \mathbf{E}_i(x, y, z) = 0 \quad (4.4)$$

ประยุกต์ใช้ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ กับสมการ (4.4) โดยการแบ่งหน้าตัดขวาง Ω ของ อุปกรณ์ QPM-SHG ออกเป็นบริเวณย่อยๆ Ω^e เรียกบริเวณย่อยนี้ว่า อีลีเมนต์ จากนั้นจึงสมมติให้ผลเฉลยโดยประมาณของสนามไฟฟ้าในแต่ละอีลีเมนต์อยู่ในรูปของผลคูณของ ฟังก์ชันรูปร่าง กับ ตัวแปรไม่ทราบค่า ดังนี้

$$\mathbf{E}_{i,i} = \mathbf{a}_x \{U\}^T \{\tilde{e}_{i,i}^e\} + \mathbf{a}_y \{V\}^T \{\tilde{e}_{i,i}^e\} \quad (4.5)$$

$$E_{z,i} = j\{N\}^T \{\tilde{e}_{z,i}^e\} \quad (4.6)$$

เมื่อ $\{\tilde{e}_{i,i}^e\}$ คือ เวกเตอร์แนวตั้งของตัวแปรไม่ทราบค่าที่อยู่บนขอบของอีลีเมนต์ $\{\tilde{e}_{z,i}^e\}$ คือ เวกเตอร์คอลัมน์ของตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดโนดของอีลีเมนต์ $\{U\}$ และ $\{V\}$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในทิศ x และ y ตามลำดับ และ $\{N\}$ คือ ฟังก์ชันรูปร่างแบบสเกลาร์ของสนามไฟฟ้าในทิศ z (ดูรายละเอียดของฟังก์ชันรูปร่างเหล่านี้ได้ในภาคผนวก จ)

อันดับต่อมา แทนสมการ (4.5) และ (4.6) ลงในสมการ (4.4) จากนั้นจึงดำเนินการถ่วงน้ำหนัก (weighted residual method) สมการที่ได้ด้วยฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์ W , และฟังก์ชันรูปร่างแบบสเกลาร์ W_z ดำเนินการอินทิเกรตสมการที่ได้ทั่วบริเวณอีลีเมนต์ Ω^e และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ (ดูรายละเอียดการพิสูจน์ได้ในภาคผนวก จ) จะได้

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega^e} (\{U_y\}\{U_y\}^T + \{V_x\}\{V_x\}^T - \{U_y\}\{V_x\}^T - \{V_x\}\{U_y\}^T) dx dy \{\tilde{e}_{i,i}^e\} \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \iint_{\Omega^e} \left(\{U\} \frac{\partial \{N_x\}^T}{\partial z} + \{V\} \frac{\partial \{N_y\}^T}{\partial z} \right) dx dy \{\tilde{e}_{z,i}^e\} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \iint_{\Omega^e} (\{U\}\{U\}^T + \{V\}\{V\}^T) dx dy \{\tilde{e}_{i,i}^e\} \\ & - k_{0,i}^2 \iint_{\Omega^e} (\varepsilon_{x,i} \{U\}\{U\}^T + \varepsilon_{y,i} \{V\}\{V\}^T) dx dy \{\tilde{e}_{i,i}^e\} = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega^e} \left(\frac{\partial \{N_x\}}{\partial z} \frac{\partial \{N_x\}^T}{\partial z} + \frac{\partial \{N_y\}}{\partial z} \frac{\partial \{N_y\}^T}{\partial z} \right) dx dy \{\tilde{e}_{z,i}^e\} + \frac{\partial}{\partial z} \iint_{\Omega^e} \left(\frac{\partial \{N_x\}}{\partial z} \{U\}^T + \{N_y\} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial z} \right) dx dy \{\tilde{e}_{i,i}^e\} \\ & - k_{0,i}^2 \iint_{\Omega^e} \varepsilon_{z,i} \frac{\partial \{N\}}{\partial z} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial z} dx dy \{\tilde{e}_{z,i}^e\} = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

ตัวห้อย x และ y ใช้ระบุการหาอนุพันธ์เทียบกับตัวแปร x และ y ตามลำดับ

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแสงที่เดินทางไปในตัวกลางทางแสงด้วยวิธีปริมาตรพหุเหลี่ยม จะสมมติให้สนามไฟฟ้าของแสงดังกล่าวอยู่ในรูปผลคูณระหว่างขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และ ปัจจัยทางเฟสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \{\tilde{e}_{i,i}^e\} \\ \{\tilde{e}_{z,i}^e\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{e_{i,i}^e\} e^{-j\beta_z z} \\ \{e_{z,i}^e\} e^{-j\beta_z z} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

แทนสมการ (4.9) ลงใน (4.7) และ (4.8) จากนั้นจัดพจน์ต่างๆ ของสมการ จะได้

$$[M_i^e] \frac{d^2 \{e_i^e\}}{dz^2} - 2j\beta_i [M_i^e] \frac{d \{e_i^e\}}{dz} + ([K_i^e] - \beta_i^2 [M_i^e]) \{e_i^e\} = \{0\} \quad (4.10)$$

โดยที่

$$[M_i^e] = \begin{bmatrix} [M_{u,i}^e] & [K_{lz,i}^e] \\ [K_{zt,i}^e] & -[K_{zz,i}^e] \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$[K_i^e] = \begin{bmatrix} [K_{u,i}^e] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

รวมทุกอิลีเมนต์บนภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM-SHG เข้าด้วยกัน จะได้

$$[M_i] \frac{d^2 \{e_i\}}{dz^2} - 2j\beta_i [M_i] \frac{d \{e_i\}}{dz} + ([K_i] - \beta_i^2 [M_i]) \{e_i\} = \{0\} \quad (4.13)$$

โดยที่

$$[M_i] = \sum_e [M_i^e]$$

$$[K_i] = \sum_e [K_i^e]$$

(ดูรูปขีดแข็งของเมทริกซ์ย่อยในสมการ (4.10) ได้ในภาคผนวก จ)

สมการบีบพรอพาเกชัน (4.13) ที่ได้นี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้คำนวณได้ เนื่องจากยังมีพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์ในแนวเคลื่อนที่ของแสง พจน์อนุพันธ์ดังกล่าวนี้จะถูกประมาณด้วยวิธีผลต่างสี่บเนื่อง จะได้

$$[A_i]_m \{e_i^L\}_{m+1} = [B_i]_m \{e_i^L\}_m \quad (4.14)$$

โดยที่

$\{e_i^L\}_m$ และ $\{e_i^L\}_{m+1}$ คือ ขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงซ้ำๆ ของสนามไฟฟ้าบนระนาบ m และ $m+1$ ตามลำดับ

$$[A_i]_m = -2j\beta_i [\tilde{M}_i]_m + 0.5\Delta z ([K_i]_m - \beta_i^2 [M_i]_m)$$

$$[B_i]_m = -2j\beta_i [\tilde{M}_i]_m - 0.5\Delta z ([K_i]_m - \beta_i^2 [M_i]_m)$$

ความหมายของสมการ (4.13) คือ การกระจายของแสงบนระนาบ $m+1$ สามารถคำนวณหาได้จากฟังก์ชันการกระจายของแสงบนระนาบ m ที่รู้ค่าแล้ว

ขั้นตอนที่ 2 ผลของความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear effect)

ผลของพจน์เชื่อมโยงไม่เชิงเส้นบนระนาบ ($m+1$) จะคำนวณหาได้จากองค์ประกอบโพลาไรเซชัน $p_{x,i}$ $p_{y,i}$ และ $p_{z,i}$ ดังนี้

$$\{e_i^{NL}\} = \int_{m\Delta z}^{(m+1)\Delta z} j \frac{1}{2\beta_i} \{p_i\}_m \exp(j(-1)^i \Delta\beta z) dz \quad (4.15)$$

โดยที่ $\{p_i\}_m$ เป็นเวกเตอร์แนวตั้งขององค์ประกอบโพลาไรเซชันที่คำนวณจากสนามไฟฟ้าบนระนาบ m

เนื่องจาก ระยะทาง Δz ในการเคลื่อนที่ในแต่ละชั้นการคำนวณเป็นระยะที่สั้นมาก ($\Delta z \leq \lambda_f/10$) ดังนั้น จึงสามารถประมาณให้ขนาดของสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ มีค่าคงที่ได้ภายในระยะทาง Δz นั่นคือ กำหนดให้การถ่ายเทกำลังงานระหว่าง แสงมูลฐาน กับ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง ที่เกิดขึ้นภายในระยะทาง Δz มีค่าคงที่นั่นเอง โดยอาศัยการประมาณดังกล่าว โพลาไรเซชัน $\{p_i\}_m$ จะไม่ขึ้นกับระยะทางตามแนวแกน z ผลการอินทิเกรตของสมการ (4.15) จะเป็นดังนี้

$$\{e_i^{NL}\} = \frac{1}{2\beta_i \Delta\beta} \{p_i\}_m \{ \exp(j(-1)^i \Delta\beta(m+1)\Delta z) - \exp(j(-1)^i \Delta\beta m \Delta z) \} \quad (4.16)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาสนามผลรวม (total effect field)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณหาสนามไฟฟ้าผลรวมที่เกิดจาก สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้น กับ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น สนามไฟฟ้าผลรวมจะเป็นดังนี้

$$\{e_i^{Total}\}_{m+1} = \{e_i^L\}_{m+1} + \{e_i^{NL}\}_{m+1} \quad (4.17)$$

หลังจากการคำนวณสนามไฟฟ้าผลรวมในแต่ละชั้นการเคลื่อนที่เสร็จสิ้นแล้ว สนามไฟฟ้างกล่าว จะนำมาใช้ในการคำนวณหา กำลังของแสงมูลฐาน และ กำลังของแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง ดังนี้

$$P_i = \sum_e \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{j\omega_i \mu_0} \iint_{\Omega^e} \left(-j\beta_i E_{x,i} E_{x,i}^* - E_{x,i} \frac{\partial E_{z,i}^*}{\partial x} - E_{y,i} \frac{\partial E_{z,i}^*}{\partial y} - j\beta_i E_{y,i} E_{y,i}^* \right) dx dy \right] \quad (4.18)$$

ประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง η_{SHG} สามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_{SHG} = \frac{P_2}{P_1} \quad (4.19)$$

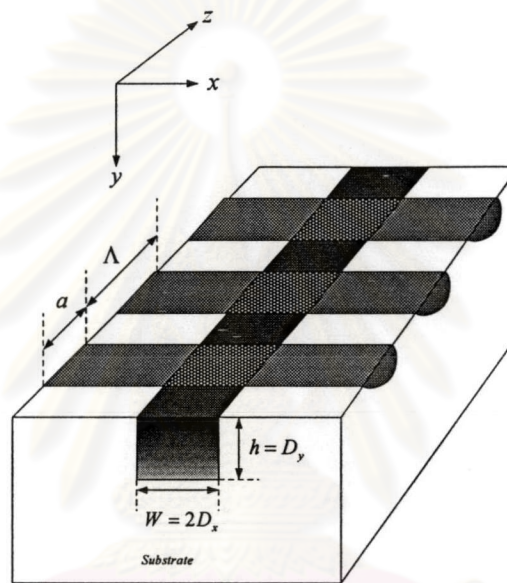
4.3 ผลการคำนวณในกรณีตัวอย่าง

ขั้นตอนการจำลองการเคลื่อนที่ของแสงภายในอุปกรณ์ QPM-SHG ด้วยวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีบพรอพagation จะเป็นดังนี้

1. คำนวณหาค่าคงตัวการแพร่กระจาย β_1 และ β_2 และ แบบรูปโหมดนำ (guided mode profile) ของแสงมูลฐานจาก ปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน ด้วยวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์
2. คำนวณหาปัจจัยการไม่แมตซ์กันทางเฟส $\Delta\beta$ จากค่าคงตัวการแพร่กระจาย β_1 และ β_2 ที่คำนวณได้จากข้อ 1
3. คำนวณหา ระยะโคฮีเรนซ์ $L_c = \pi/\Delta\beta$ และระยะทางการเคลื่อนที่ในหนึ่งชั้น การคำนวณ $\Delta z = L_c/20$
4. คำนวณหาคาบ Λ_1 ($\Lambda_1 = 2L_c$) และ Λ_m ($\Lambda_m = m\Lambda_1$) ของโครงสร้างรายคาบ
5. เริ่มต้นการจำลองโดย ป้อนแบบรูปโหมดนำของแสงมูลฐานเข้าสู่ระนาบ $z = 0$ ในขณะที่กำหนดให้สนามไฟฟ้าของแสงฮาร์โมนิกอันดับสองที่ระนาบนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นจึงจำลองให้แสงมีการเคลื่อนที่ไปยังระนาบถัดไปโดยอาศัยสมการ (4.14) (4.16) และ (4.17) ตามลำดับ โดยการคำนวณอย่างต่อเนื่องด้วยสมการดังกล่าวจากระนาบ $z = 0$ จนถึงระนาบสุดท้าย $z = n\Delta z$ จะสามารถหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสนามไฟฟ้าของ แสงมูลฐาน และ แสงฮาร์โมนิกอันดับสองได้

6. คำนวณหาค่ากำลังของแสงมูลฐาน P_1 และกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง P_2 จากสมการ (4.18)
7. คำนวณหาประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} จากสมการ (4.19)

4.3.1 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट

พิจารณา อุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีฐานรองเป็นผลึก $LiTaO_3$ ดังรูปที่ 4.1 (Mizuuchi and Yamamoto, 1992) ส่วนที่นำคลื่นแสงมีความกว้าง W เท่ากับ $4 \mu m$ และความสูง h เท่ากับ $1.9 \mu m$ ความแตกต่างของค่าดรรชนีหักเหแสงที่บริเวณแกนนำแสงกับฐานรองเป็นแบบลาดโดยมีระยะการแพร่ $D_x = 2 \mu m$ และ $D_y = 1.9 \mu m$ ในขณะที่ส่วนโดเมน ผกผันมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงรี อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐานและแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง คือ $\lambda_1 = 0.866 \mu m$ และ $\lambda_2 = 0.433 \mu m$ ตามลำดับ ค่าดรรชนีหักเหแสงสามัญและวิสามัญของแผ่นฐาน ที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐาน มีค่า $n_{o,sub}(\lambda_1) = 2.148$ และ $n_{e,sub}(\lambda_1) = 2.152$ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าดรรชนีหักเหแสงที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์มอนิกอันดับสองมีค่า $n_{o,sub}(\lambda_2) = 2.253$ และ $n_{e,sub}(\lambda_2) = 2.258$ ตามลำดับ ค่าความแตกต่างดรรชนีหักเหแสงสามัญของแผ่นฐานกับแกนนำแสงมีค่า $\Delta n_s(\lambda_1) = 0$ และ $\Delta n_s(\lambda_2) = 0$

ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแตกต่างดรรชนีหักเหแสงวิสามัญ มีค่า $\Delta n_e(\lambda_1) = 0.014$ และ $\Delta n_e(\lambda_2) = 0.023$ ตามลำดับ

ค่าดรรชนีหักเหแสงสามัญ n_o และค่าดรรชนีหักเหแสงวิสามัญ n_e ของแกนนำแสงจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรระยะทางในภาคตัดขวาง (Yasui and Koshiha, 2000) ดังนี้

$$n_o(\lambda_1) = 2.148 \quad (4.20)$$

$$n_e(\lambda_1) = 2.152 + 0.014 \times \{f(x) \cdot g(y)\} \quad (4.21)$$

ที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง (Yasui and Koshiha, 2000)

$$n_o(\lambda_2) = 2.253 \quad (4.22)$$

$$n_e(\lambda_2) = 2.258 + 0.023 \times \{f(x) \cdot g(y)\} \quad (4.23)$$

รูปแบบของฟังก์ชันการกระจายของค่าดรรชนีหักเหแสง $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นดังนี้

$$f(x) = \exp\left[-\left(x/(2 \times 10^{-6})\right)^2\right] ; \text{ gaussian distribution} \quad (4.24)$$

$$g(y) = \begin{cases} \exp\left[-\left(y/(1.9 \times 10^{-6})\right)^2\right] & ; \text{ gaussian distribution} \\ \exp\left[-y/(1.9 \times 10^{-6})\right] & ; \text{ exponential distribution} \end{cases} \quad (4.25)$$

กำหนดให้ แกนแสง (optic axis) ของผลึก $LiTaO_3$ อยู่ในแนวแกน y ($c // y$) ในกรณีนี้ รูปแบบเทนเซอร์สภาพยอมของแผ่นฐานและแกนนำแสง เป็นดังนี้

ที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐาน (Yasui and Koshiha, 2000)

$$[\varepsilon_{r,sub}(\lambda_1)] = \begin{bmatrix} (2.148)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (2.152)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (2.148)^2 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$[\varepsilon_{r,core}(\lambda_1)] = \begin{bmatrix} (n_o(\lambda_1))^2 & 0 & 0 \\ 0 & (n_e(\lambda_1))^2 & 0 \\ 0 & 0 & (n_o(\lambda_1))^2 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

ที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง (Yasui and Koshiba, 2000)

$$[\varepsilon_{r,sub}(\lambda_2)] = \begin{bmatrix} (2.253)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (2.258)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (2.253)^2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$[\varepsilon_{r,core}(\lambda_2)] = \begin{bmatrix} (n_o(\lambda_2))^2 & 0 & 0 \\ 0 & (n_e(\lambda_2))^2 & 0 \\ 0 & 0 & (n_o(\lambda_2))^2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

รูปแบบเทนเซอร์สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น $[d]$ สำหรับการคำนวณปัญหา
นี้มีลักษณะเดียวกันกับ สมการ (2.47)

การจำลองการกำเนิดแสงฮาร์โมนิกอันดับสองในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้าง
จากผลึก $LiTaO_3$ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้แบบจำลองของส่วนท่อนำคลื่น
แสงใน ดังนั้น แบบจำลองที่จะพิจารณาจะประกอบด้วย

1. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีชั้นบันได (step-index) ในกรณีนี้ฟังก์ชัน
 $f(x)$ และ $g(y)$ จะกำหนดให้เท่ากับ 1 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองจะคำนวณจาก ปัญหา
ค่าเจาะจงมาตรฐาน ผลการคำนวณแสดงเป็นข้อมูลในตาราง 4.1 และแบบรูปโมดนำของแสงมูล
ฐานอินพุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 (ก)

2. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชัน $f(x)$ และ $g(y)$ เป็น
ฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่ (gaussian-gaussian distribution) ในกรณีนี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
ของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับ
การจำลองแสดงเป็นข้อมูลในตาราง 4.2 และแบบรูปโมดนำของแสงมูลฐานอินพุตจะมีลักษณะ
ดังรูปที่ 4.2 (ข)

3. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นฟังก์ชัน
เกาส์เซียน และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล (gaussian-exponential distribution) ในกรณี
นี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมจะมีลักษณะ
ดังรูปที่ 4.4 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองแสดงเป็นข้อมูลในตาราง 4.3 และแบบรูปโมดนำ
ของแสงมูลฐานอินพุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 (ค)

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiTaO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีขั้นบันได

β_1 (rad/m)	β_2 (rad/m)	$\Delta\beta$ (rad/m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.5654×10^7	3.3057×10^7	1.7490×10^6	1.7962	3.5924	0.08981

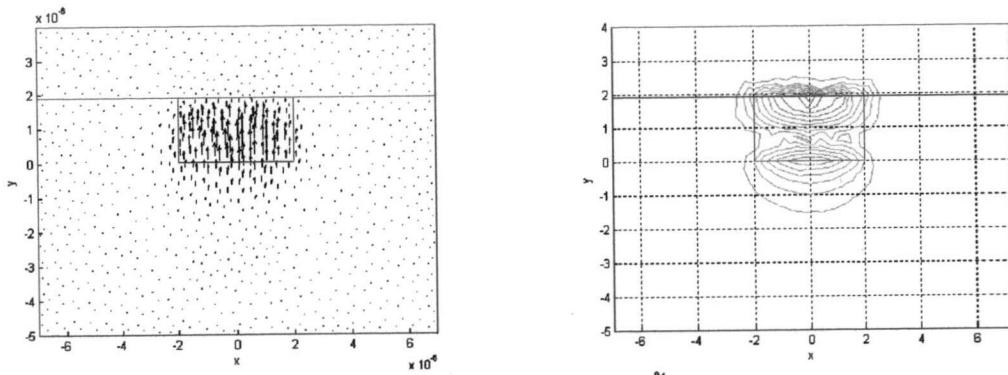
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiTaO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

β_1 (rad/m)	β_2 (rad/m)	$\Delta\beta$ (rad/m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.5638×10^7	3.3019×10^7	1.7430×10^6	1.8024	3.6048	0.09012

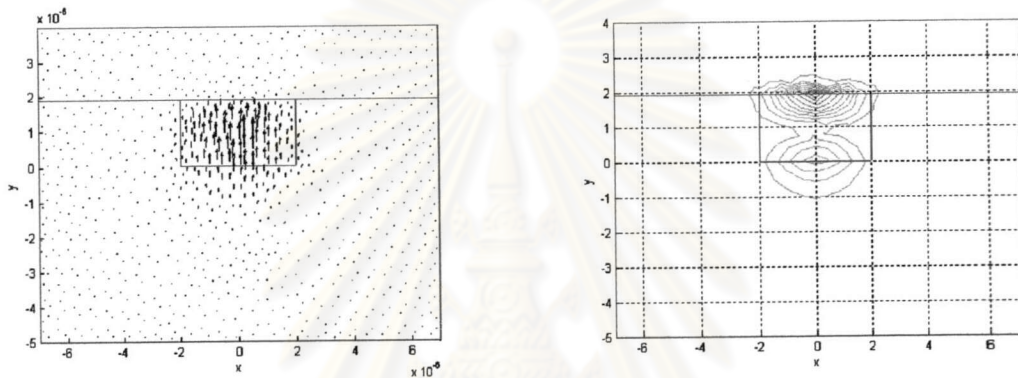
ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiTaO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

β_1 (rad/m)	β_2 (rad/m)	$\Delta\beta$ (rad/m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.5684×10^7	3.3095×10^7	1.7272×10^6	1.8189	3.5924	0.090945

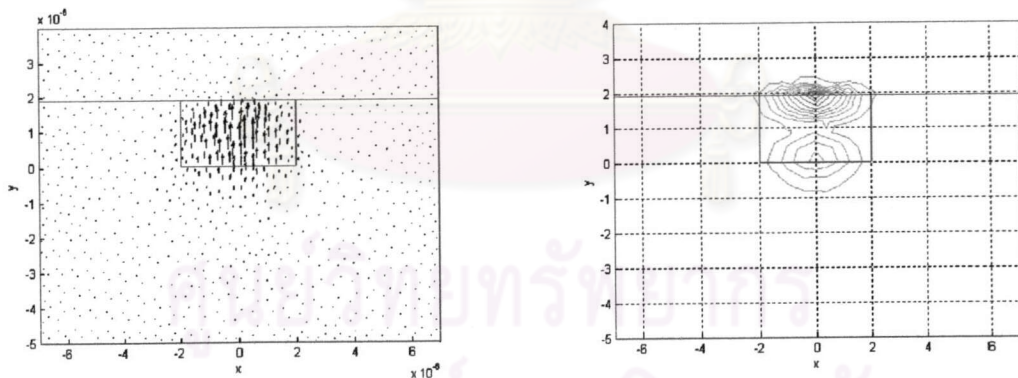
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได

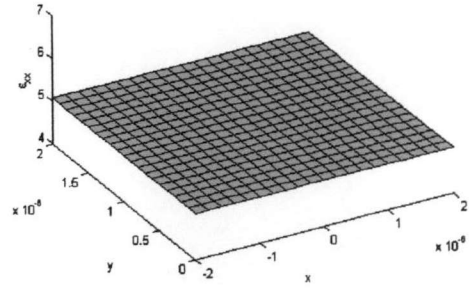
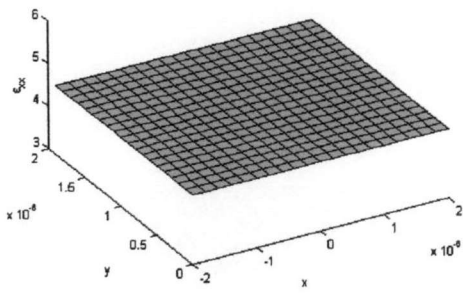
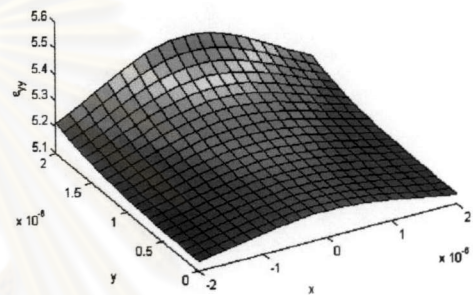
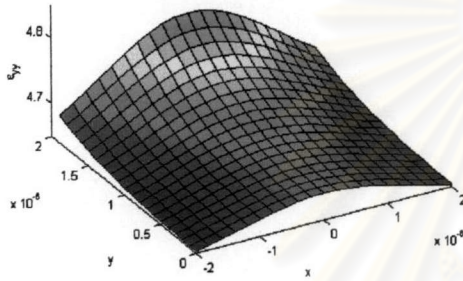
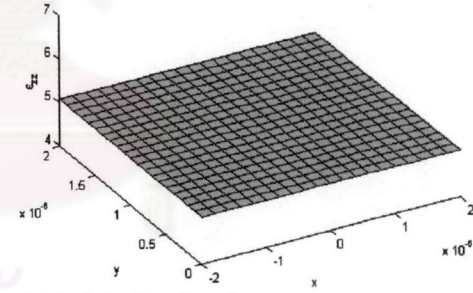
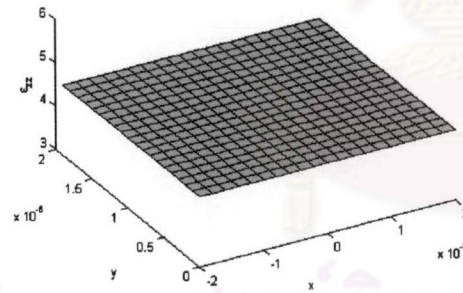


(ข) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

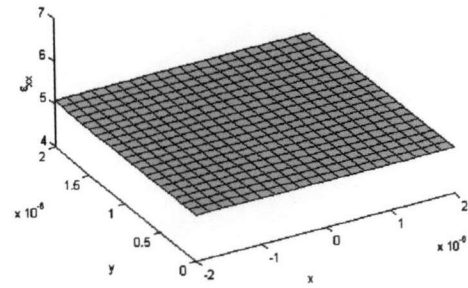
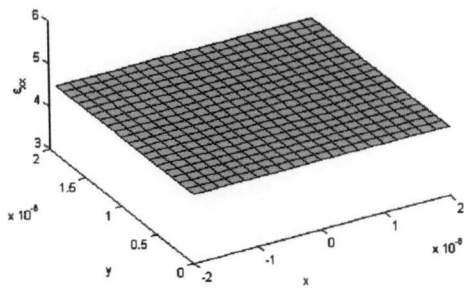
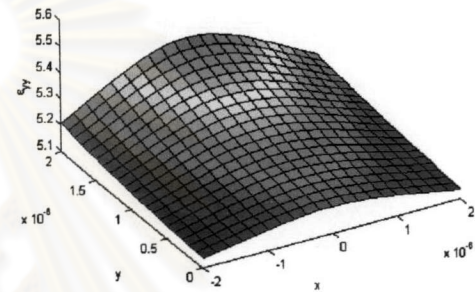
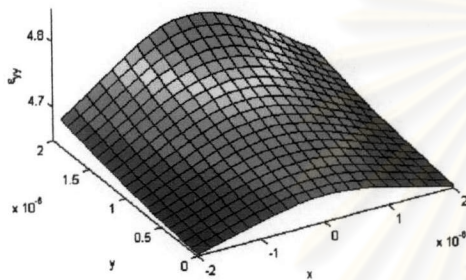
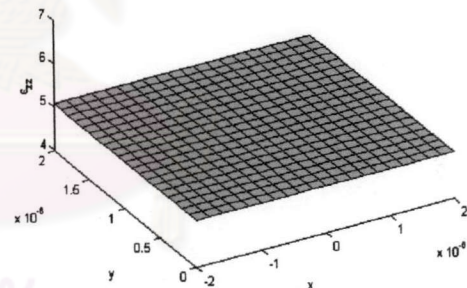
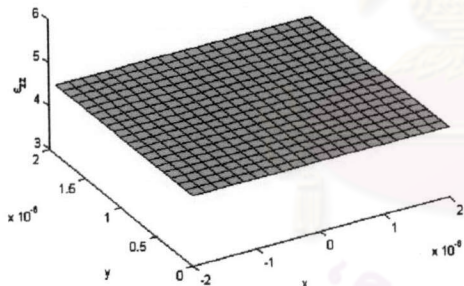


(ค) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

รูปที่ 4.2 แบบรูปโมดนำขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขวาง (คอดัมน์ซ้ายมือ) และ องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวเคลื่อนที่ (คอดัมน์ขวามือ) ของแสงมูลฐาน

(ก) ϵ_{xx} (ข) ϵ_{yy} (ค) ϵ_{zz}

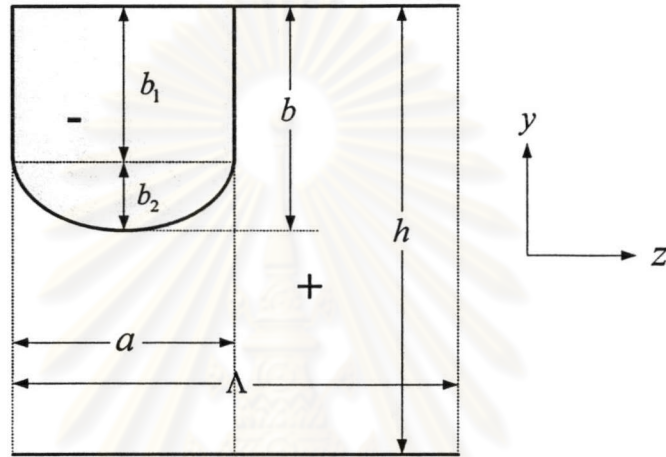
รูปที่ 4.3 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในบริเวณแกนนำแสงซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x และแกน y แบบฟังก์ชันเกาส์เซียนที่ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลลิเมเนชันด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลลิเมเนชันด้านขวา)

(ก) ϵ_{xx} (ข) ϵ_{yy} (ค) ϵ_{zz}

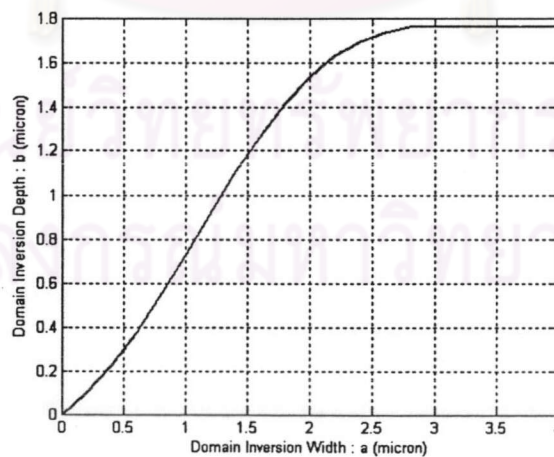
รูปที่ 4.4 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในบริเวณแกนนำแสงซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x แบบฟังก์ชันเกาส์เซียน และแกน y แบบฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลที่ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลัมน์ด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ด้านขวา)

4.3.1.1 การทดสอบความแม่นยำของผลเฉลยที่คำนวณได้จากวิธี เวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บิมพรอพากชัน

พิจารณาอุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปครึ่งวงรีดังรูปที่ 4.5 ผลการทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992) ระบุว่าความสูง b ของบริเวณโดเมนผกผันจะมีการแปรค่าตามความกว้าง a ดังกราฟในรูปที่ 4.6 วัตถุประสงค์ในการจำลองนี้ คือ การหาความกว้าง a ของโดเมนผกผันที่ทำให้กำลังของแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง P_2 มีค่าสูงสุด



รูปที่ 4.5 แบบจำลองโดเมนผกผันรูปครึ่งวงรีของอุปกรณ์ QPM-SHG
ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาเลต

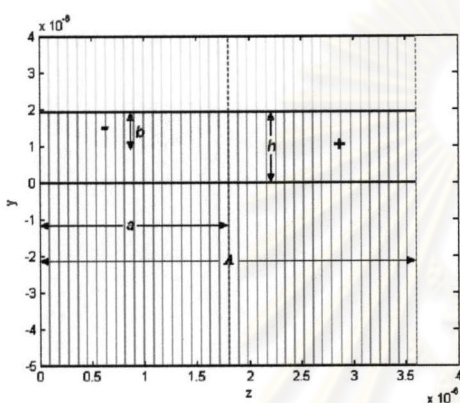


รูปที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความสูง b ตามความกว้าง a ของโดเมนผกผันรูปครึ่งวงรี
(Mizuuchi and Yamamoto, 1992)

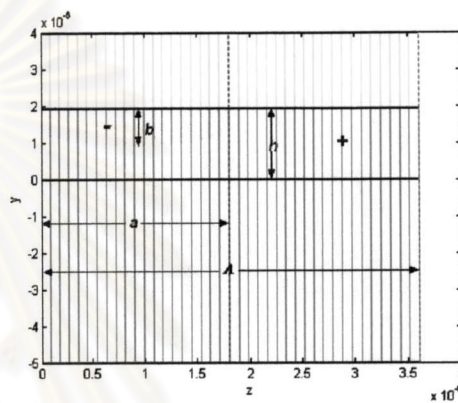
ในการวิเคราะห์นี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองบริเวณโดเมน ผกผันรูปครึ่งวงรีจำนวนสองแบบด้วยกัน คือ

1. แบบจำลองรูปครึ่งวงรี (semielliptic profile model) ที่มีลักษณะ ดังรูปที่ 4.7 (ก) ในกรณีนี้ $b_1 = 0$

2. แบบจำลองรูปผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับรูปครึ่งวงรี (combined profile model) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.7 (ข)



(ก) แบบจำลองรูปครึ่งวงรี



(ข) แบบจำลองผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี

รูปที่ 4.7 แบบจำลองโดเมนผกผันของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาเลด สำหรับการคำนวณหาความกว้าง a ที่เหมาะสมที่สุด

แบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM-SHG นี้ออกเป็นอีลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก CT/LN จำนวน 1,278 อีลีเมนต์ดังรูปที่ 4.8 ผลการจำลองจะแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีตามลักษณะ แบบจำลองของส่วนท่อนำคลื่นแสง ดังนี้

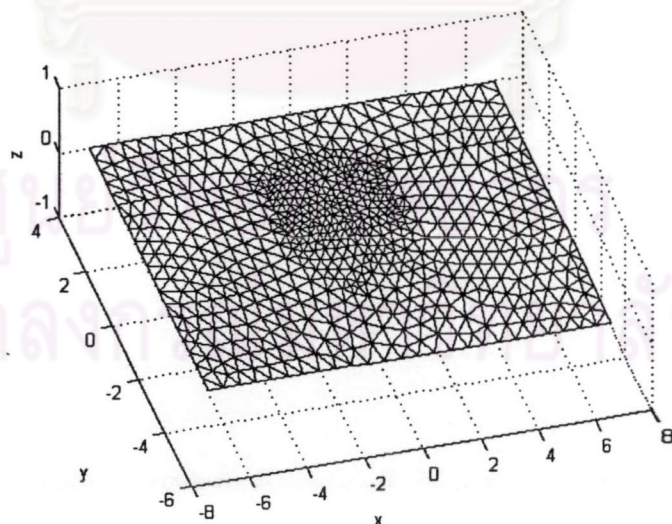
กรณีแรกท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได ผลการจำลองแสดงเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.9 (ก) จากรูปจะเห็นได้ว่า แบบจำลองรูปผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับรูปครึ่งวงรี จะให้ผลการคำนวณที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992) มากกว่าแบบจำลองรูปครึ่งวงรี อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้นี้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก

กรณีที่สองท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด ที่มีฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนด้วยกันทั้งคู่ ผลการจำลองแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.9 (ข) จากรูปจะ

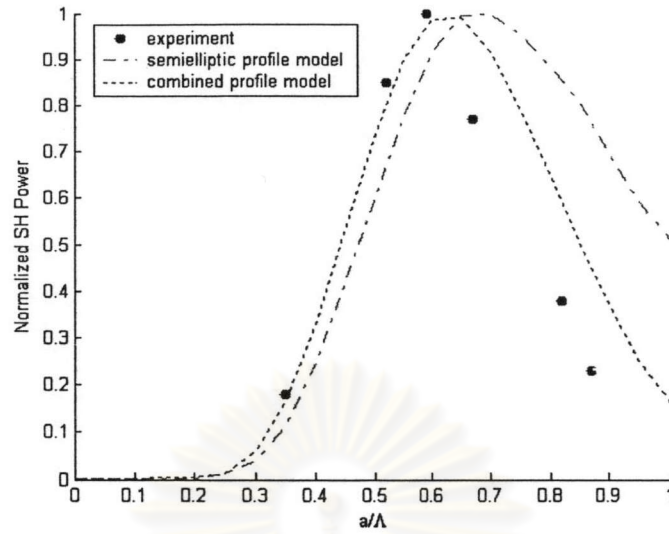
เห็นได้ว่า แบบจำลองรูปผลสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับรูปครึ่งวงรีจะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992) และผลโดยรวมแล้วมีค่าใกล้เคียงมากกว่าการใช้แบบจำลองรูปครึ่งวงรี

กรณีที่สามท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน ในขณะที่ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ผลการจำลองแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.9 (ค) จากรูปจะเห็นได้ว่าแบบจำลองรูปผลสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับรูปครึ่งวงรีให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับการทดลองทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992) มากที่สุด

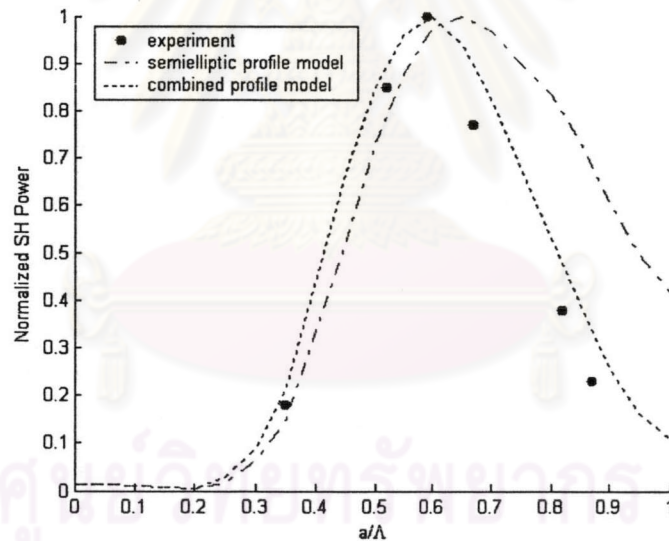
จากผลการคำนวณดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่คำนวณได้จากวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์มีพรอพาเกชันมีความแม่นยำ นอกจากนั้นผลการคำนวณยังชี้ให้เห็นว่าสภาพภายในตัวอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992) จะมีส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดโดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหแสงในแนวแกน x ในที่ลักษณะใกล้เคียงกับฟังก์ชันเกาส์เซียน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน y จะมีลักษณะใกล้เคียงกับฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล นอกจากนั้นรูปร่างของบริเวณโดเมนผกผันของอุปกรณ์นี้ยังมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปร่างผลสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรีดังรูปที่ 4.7 (ข) ดังจะเห็นได้จากความใกล้เคียงของผลที่คำนวณได้จากการใช้แบบจำลองดังกล่าวกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.8 การแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM SHG ออกเป็นอีลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก CT/LN จำนวน 1,278 อีลีเมนต์

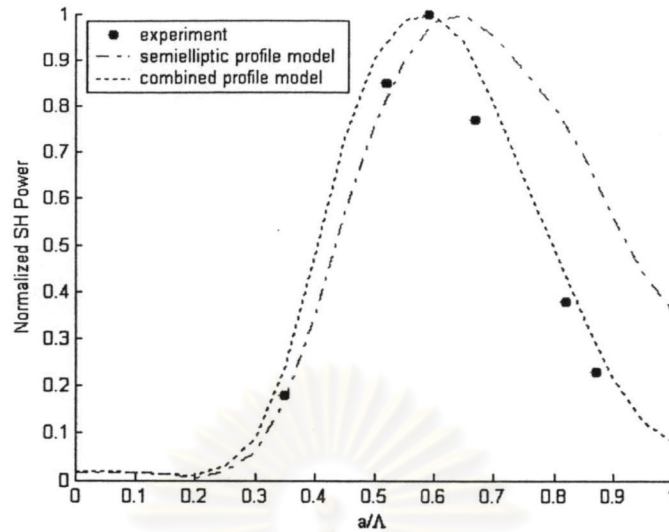


(ก) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได



(ข) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จากแบบจำลองโดเมนผกผัน 2 แบบกับผลการทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992)



(ค) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

รูปที่ 4.9 (ต่อ)

หลังจากการทดสอบความแม่นยำของผลเฉลยที่คำนวณได้จากวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชันเสร็จสิ้นแล้ว ต่อไปจะเป็นการนำวิธีการดังกล่าวมาจำลองปัญหาในกรณีต่างๆ เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่กำเนิดขึ้นได้

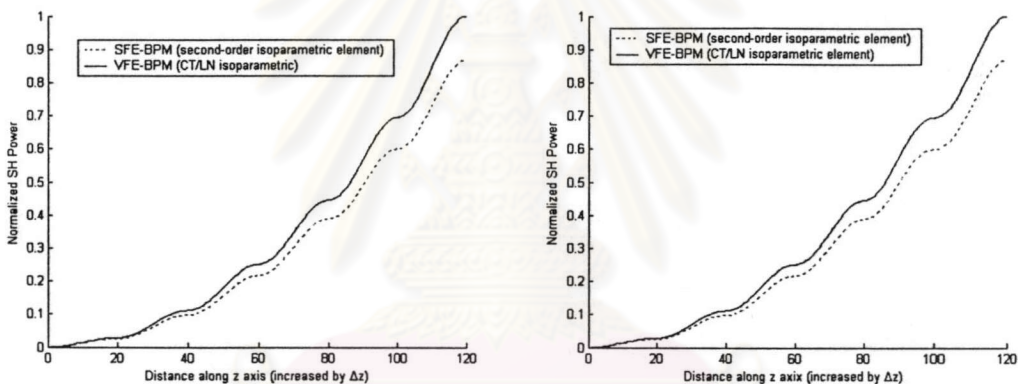
4.3.1.2 ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้การพิจารณาด้วยการประมาณแบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์

พิจารณา การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองจากอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiTaO_3$ บริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปผสมดังรูปที่ 4.7 (ข) การจำลองปัญหานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้เมื่อจำลองด้วยวิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน (SFE-BPM) และ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน (VFE-BPM)

ผลการจำลองจากการใช้แบบจำลองส่วนท่อนำคลื่นแสง 2 แบบเป็นดังนี้

ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง P_2 ที่คำนวณได้แสดงผลเป็นกราฟดังรูปที่ 4.10 (ก) จากรูปจะเห็นได้ว่ากำลัง P_2 ที่คำนวณได้จาก วิธี VFE-BPM จะมีค่ามากกว่าผลที่ได้จาก วิธี SFE-BPM เสมอ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการการคำนวณด้วยวิธี VFE-BPM นั้นจะคำนึงถึงผลของสนามไฟฟ้าครบทุกองค์ประกอบ ในขณะที่ วิธี SFE-BPM จะคำนึงถึงสนามหลักเพียงองค์ประกอบเดียวเท่านั้น

รูปที่ 4.10 (ข) แสดงผลการคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด ที่มีฟังก์ชันการกระจายในแนวแกน x และ y เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน จากรูปจะเห็นได้ว่ากำลัง P_2 ที่คำนวณได้จากวิธี VFE-BPMจะมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากวิธี SFE-BPM เช่นเดียวกัน



(ก) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได

(ข) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด

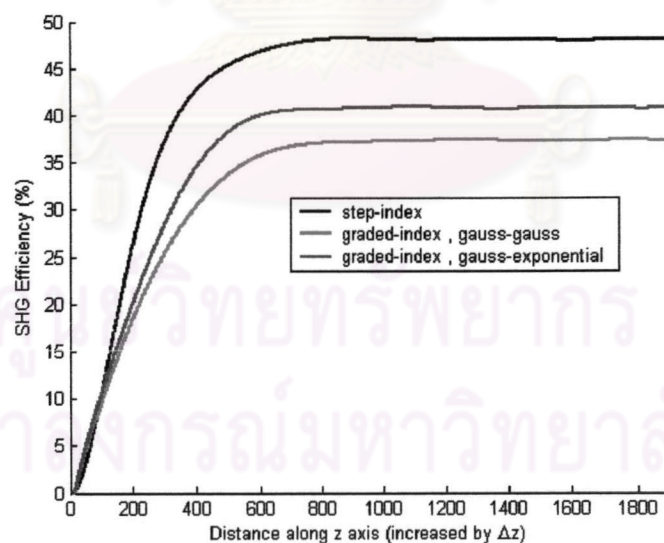
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้จาก วิธีสเกลาร์ไฟไนต์ อิลิเมนต์บีมพรอพากेशन กับ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อิลิเมนต์บีมพรอพากेशन

4.3.1.3 ผลของค่าดรรชนีหักเหแสงแบบลาด

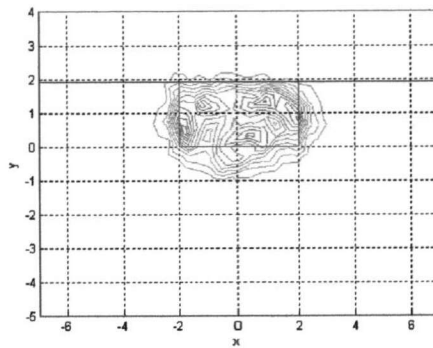
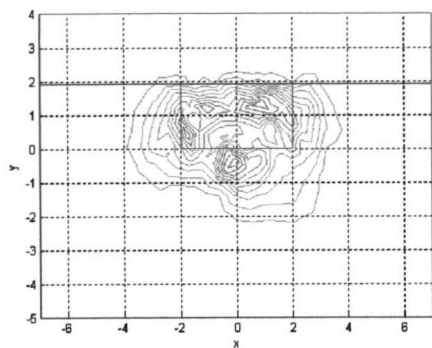
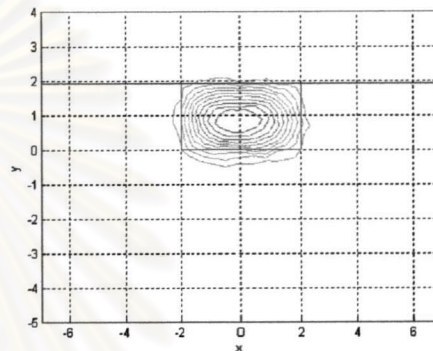
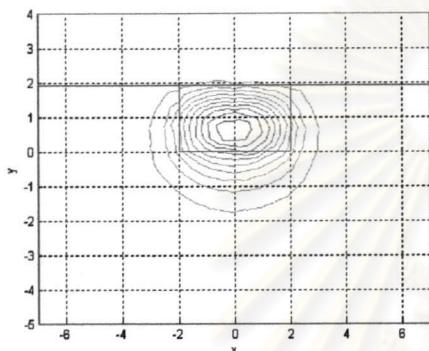
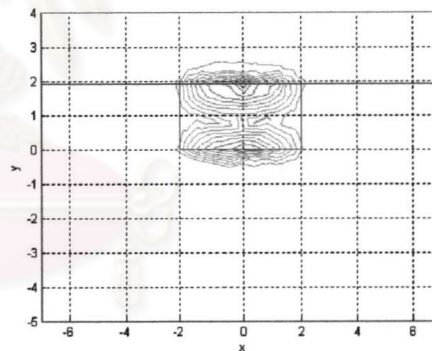
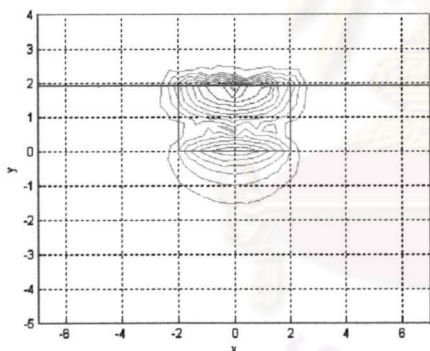
พิจารณาผลของการตั้งสมมติฐานให้ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบชั้นบันได หรือแบบดรรชนีลาด จากการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} โดยใช้แบบจำลองของบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปผลสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรีดังรูปที่ 4.7 (ข) ความกว้าง a ของบริเวณโดเมนผกผันสำหรับการพิจารณานี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าเหมาะสมที่สุดที่คำนวณได้จาก หัวข้อ 4.3.1.1 (กรณีที่สาม) คือ $a = 0.6\Lambda$

ผลการคำนวณแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.11 จากรูปจะเห็นได้ว่า ในช่วงต้นขณัะระยะทางการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าน้อยกว่า $200\Delta z$ นั้น η_{SHG} ของส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด จะมีค่ามากกว่ากรณีดรรชนีชันบันได อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะทางการเคลื่อนที่มากขึ้น η_{SHG} ของส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชันบันได จะมีค่ามากกว่าสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากการทับซ้อนกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้าระหว่างแสงสองความถี่ในท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชันบันไดนั้นจะมีพื้นที่มากกว่ากรณีดรรชนีลาด (ดูรูปที่ 4.12 เทียบกับรูปที่ 4.13) ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า เมื่อแสงทั้งสองเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางที่มากขึ้น การถ่ายเทกำลังงานจากแสงมูลฐานมาสู่แสงฮาร์มอนิกย่อมเกิดขึ้นได้มากกว่านั่นเอง

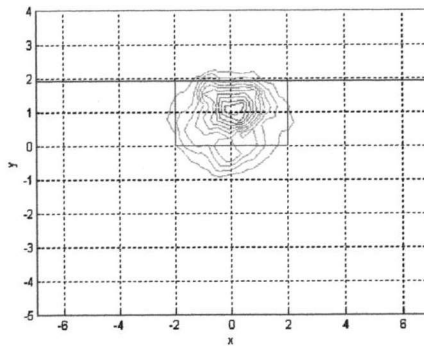
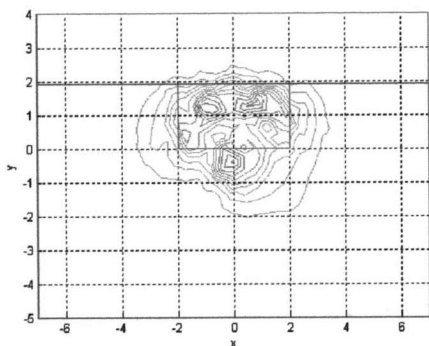
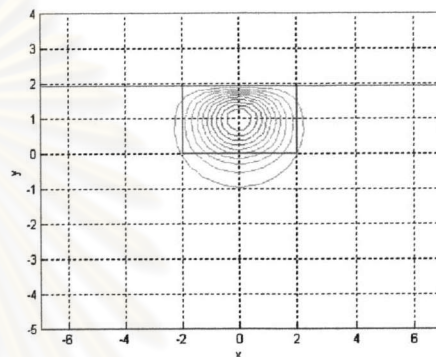
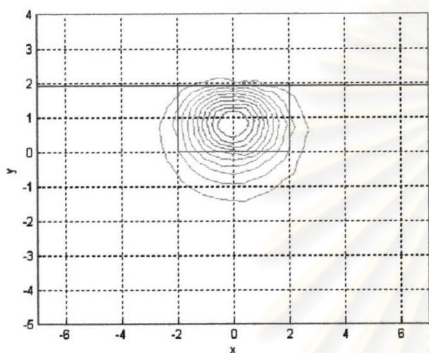
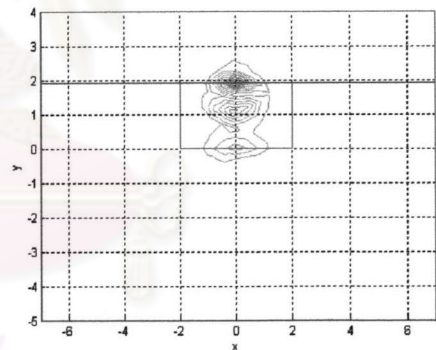
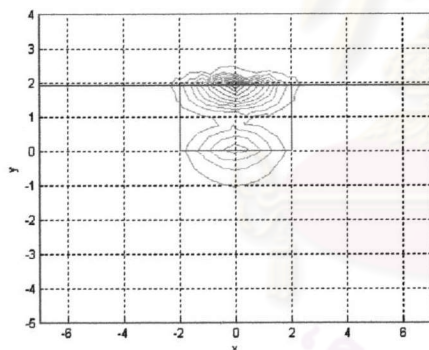
นอกจากนั้นท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่จะให้ประสิทธิภาพ η_{SHG} ต่ำที่สุดเนื่องจาก บริเวณที่ค่าดัชนีหักเหแสงที่มีค่ามากของแกนนำแสงในท่อนำคลื่นแสงนี้ (บริเวณสีแดงในรูปที่ 4.3) จะมีพื้นที่น้อยที่สุด แบบรูปของสนามไฟฟ้าในกรณีนี้จะแผ่ออกไปเป็นเป็นบริเวณที่เล็กลง ทำให้พื้นที่การทับซ้อนของแบบรูปสนามไฟฟ้าระหว่างแสงสองความถี่มีน้อยลงดังรูปที่ 4.12 (โดยเฉพาะบริเวณสีแดงของรูปที่ 4.12 (ข) ที่สนามมีความเข้มสูง) ดังนั้น ปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นระหว่างแสงสองความถี่จึงเกิดขึ้นได้น้อยตามไปด้วย



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेटโดยใช้แบบจำลองของบริเวณโดเมนผกผันเป็นแบบผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี

(ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y (ค) องค์ประกอบ E_z

รูปที่ 4.12 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอลลัมน์ซ้ายมือ) และ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลลัมน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของการคำนวณในส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได

(ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y (ค) องค์ประกอบ E_z

รูปที่ 4.13 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอลัมน์ซ้ายมือ) และแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของการคำนวณในส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด ที่มีฟังก์ชันการกระจายในแนวแกน x และ y เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน

4.3.1.4 ผลของการเลือกใช้อันดับของโครงสร้างรายคาบ

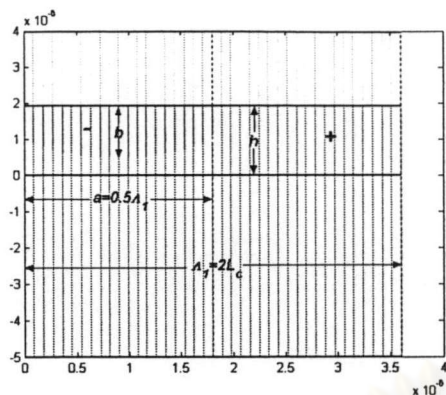
พิจารณา ผลของโครงสร้างรายคาบที่มีต่อระดับกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง P_2 ที่กำเนิดขึ้นได้ภายในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปผลมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี อันดับของโครงสร้างรายคาบที่จะพิจารณาจะประกอบด้วย

1. โครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งดังรูปที่ 4.14 (ก) โครงสร้างรายคาบนี้มีระยะครึ่งคาบแรกเท่ากับระยะครึ่งคาบหลัง ($duty\ cycle = 50\%$)
2. โครงสร้างรายคาบอันดับสองดังรูปที่ 4.14 (ข) โครงสร้างรายคาบนี้มีระยะครึ่งคาบแรกเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ของระยะครึ่งคาบหลัง ($duty\ cycle = 25\%$)
3. โครงสร้างรายคาบอันดับสามดังรูปที่ 4.14 (ค) โครงสร้างรายคาบทั้งสองอันดับนี้มีระยะครึ่งคาบแรกเท่ากับระยะครึ่งคาบหลัง ($duty\ cycle = 50\%$)

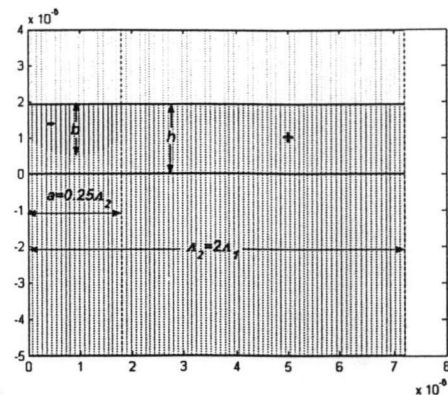
ผลการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามลักษณะแบบจำลองของส่วนที่นำคลื่นแสง ดังนี้

กรณีส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได ผลที่คำนวณได้แสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4.15 (ก) จากรูปจะเห็นได้ว่า กำลัง P_2 ที่กำเนิดขึ้นในโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งจะมีค่าสูงสุด ในขณะที่กำลัง P_2 ที่ได้จากโครงสร้างรายคาบอันดับสามนั้นจะมีค่าต่ำสุดจนใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีกรเมตซ์เฟส

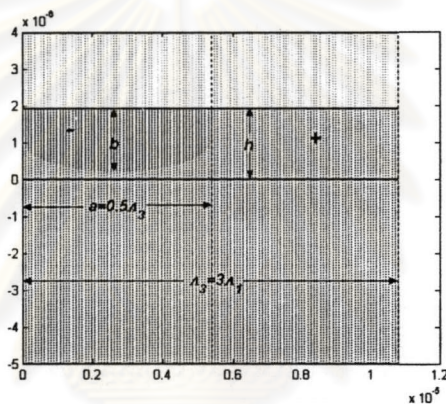
กรณีส่วนที่นำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด จากรูปที่ 4.15 (ข) และ (ค) จะเห็นได้ว่ากำลัง P_2 ที่กำเนิดขึ้นในโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งจะมีค่าสูงสุด อย่างไรก็ตาม ส่วนที่นำคลื่นแสงที่มีฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่จะให้กำเนิดกำลัง P_2 ที่มีระดับต่ำที่สุด นอกจากนั้น ระดับกำลัง P_2 ที่ได้จากแบบจำลองส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดนั้นจะต่ำกว่าระดับกำลังที่ได้จากแบบจำลองดรรชนีชั้นบันไดเสมอ



(ก)



(ข)



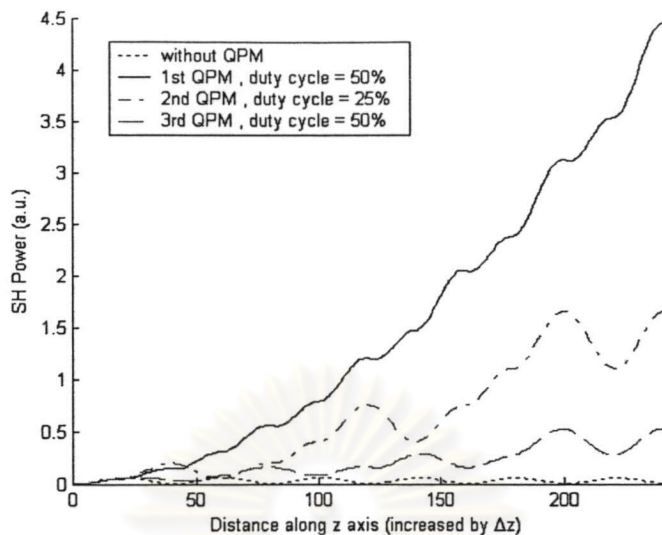
(ค)

รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างรอยคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน

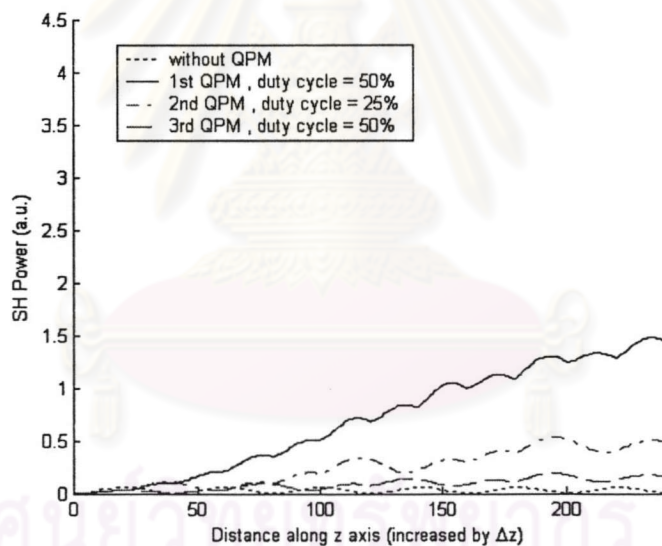
(ก) โครงสร้างรอยคาบอันดับ 1 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50%

(ข) โครงสร้างรอยคาบอันดับ 2 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 25%

(ค) โครงสร้างรอยคาบอันดับ 3 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50%

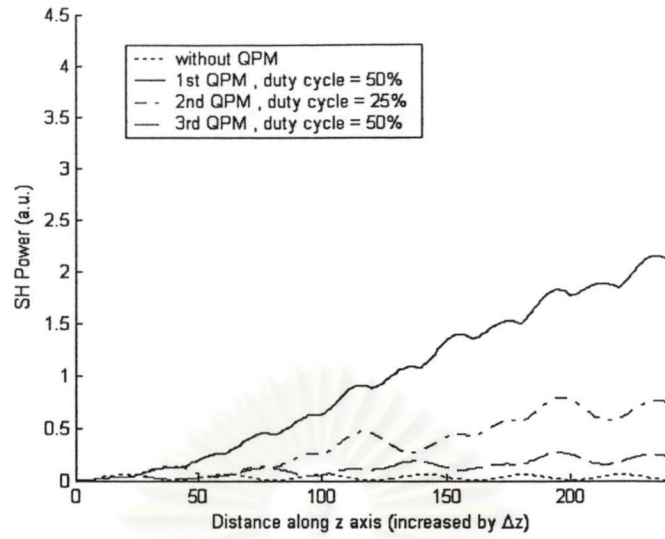


(ก) ส่วนที่นำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีขั้นบันได



(ข) ส่วนที่นำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลของการเลือกใช้อันดับของโครงสร้างราคาบโดยใช้แบบจำลองบริเวณโดเมนผกผันเป็นแบบผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี

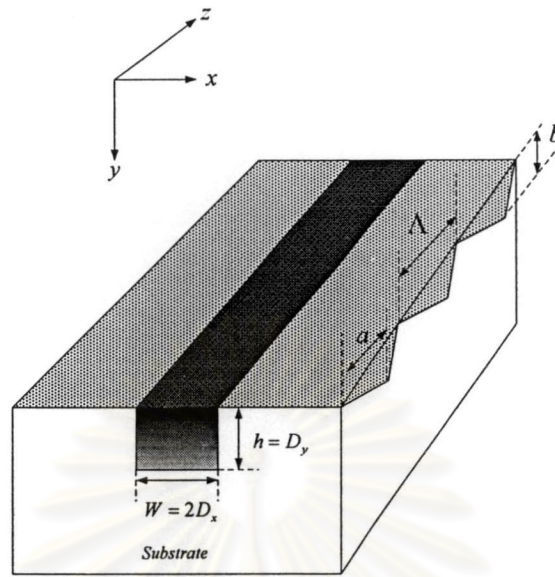


(ค) ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบควรรณีลาด (gaussian-exponential distribution)

รูปที่ 4.15 (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต



รูปที่ 4.16 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$

พิจารณา อุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีฐานรองเป็นผลึก $LiNbO_3$ ดังรูปที่ 5.12 ส่วนที่นำคลื่นแสงมีความกว้าง W และ ความสูง h เท่ากัน คือ $3 \mu m$ ความแตกต่างของค่าดรรชนีหักเหแสงที่บริเวณแกนนำแสงกับฐานรองเป็นแบบลาดโดยมีระยะการแพร่ $D_x = 1.5 \mu m$ และ $D_y = 3 \mu m$ ในขณะที่บริเวณโดเมนผกผันมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐานและแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง คือ $\lambda_1 = 0.84 \mu m$ และ $\lambda_2 = 0.42 \mu m$ ตามลำดับ ค่าดรรชนีหักเหแสงสามัญ และ ค่าดรรชนีหักเหแสงวิสามัญ ของแผ่นฐาน ที่ความยาวแสงมูลฐาน มีค่า $n_{o,sub}(\lambda_1) = 2.25$ และ $n_{e,sub}(\lambda_1) = 2.172$ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าดรรชนีหักเหแสงที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์โมนิกอันดับสองมีค่า $n_{o,sub}(\lambda_2) = 2.411$ และ $n_{e,sub}(\lambda_2) = 2.309$ ตามลำดับ ค่าความแตกต่างดรรชนีหักเหแสงสามัญของแผ่นฐานกับแกนนำแสง มีค่า $\Delta n_o(\lambda_1) = 0.01$ และ $\Delta n_o(\lambda_2) = 0.01$ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแตกต่างดรรชนีหักเหแสงวิสามัญ มีค่า $\Delta n_e(\lambda_1) = 0.01$ และ $\Delta n_e(\lambda_2) = 0.01$ ตามลำดับ (Hayata and Koshiba, 1991)

ค่าดรรชนีหักเหแสงสามัญ n_o และค่าดรรชนีหักเหแสงวิสามัญ n_e ของแกนนำแสงจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรระยะทางในภาคตัดขวาง ดังนี้

ที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐาน (Yasui and Koshiba, 2000)

$$n_o(\lambda_1) = 2.25 + 0.01 \times \{f(x) \cdot g(y)\} \quad (4.30)$$

$$n_e(\lambda_1) = 2.172 + 0.01 \times \{f(x) \cdot g(y)\} \quad (4.31)$$

ที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (Yasui and Koshiba, 2000)

$$n_o(\lambda_2) = 2.411 + 0.01 \times \{f(x) \cdot g(y)\} \quad (4.32)$$

$$n_e(\lambda_2) = 2.309 + 0.01 \times \{f(x) \cdot g(y)\} \quad (4.33)$$

รูปแบบของฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นดังนี้

$$f(x) = \exp\left[-\left(x/(1.5 \times 10^{-6})\right)^2\right] ; \text{ gaussian distribution} \quad (4.34)$$

$$g(y) = \begin{cases} \exp\left[-\left(y/(3 \times 10^{-6})\right)^2\right] & ; \text{ gaussian distribution} \\ \exp\left[-y/(3 \times 10^{-6})\right] & ; \text{ exponential distribution} \end{cases} \quad (4.35)$$

กำหนดให้ แกนแสง (optic axis) ของผลึก LiNbO_3 นี้อยู่ในแนวแกน y ($c//y$) ในกรณีนี้ รูปแบบเทนเซอร์สภาพยอมของแผ่นฐานและแกนนำแสงจะเป็น ดังนี้

ที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐาน (Yasui and Koshiba, 2000)

$$[\varepsilon_{r,sub}(\lambda_1)] = \begin{bmatrix} (2.25)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (2.172)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (2.25)^2 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$[\varepsilon_{r,core}(\lambda_1)] = \begin{bmatrix} (n_o(\lambda_1))^2 & 0 & 0 \\ 0 & (n_e(\lambda_1))^2 & 0 \\ 0 & 0 & (n_o(\lambda_1))^2 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

ที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (Yasui and Koshiba, 2000)

$$[\varepsilon_{r,sub}(\lambda_2)] = \begin{bmatrix} (2.411)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (2.309)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (2.411)^2 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$[\varepsilon_{r,core}(\lambda_2)] = \begin{bmatrix} (n_o(\lambda_2))^2 & 0 & 0 \\ 0 & (n_e(\lambda_2))^2 & 0 \\ 0 & 0 & (n_o(\lambda_2))^2 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

รูปแบบเทนเซอร์สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น $[d]$ สำหรับการคำนวณปัญหานี้จะมีลักษณะเดียวกันกับสมการ (2.38)

การจำลองการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้แบบจำลองของส่วนท่อนำคลื่นแสงใน ดังนั้น แบบจำลองที่จะพิจารณาจะประกอบด้วย

1. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีชั้นบันไดในกรณีนี้ฟังก์ชัน $f(x)$ และ $g(y)$ จะกำหนดให้เท่ากับ 1 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองจะคำนวณจาก ปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน ผลการคำนวณแสดงเป็นข้อมูลในตาราง 4.4 และแบบรูปโมดนำของแสงมาตรฐานอินพุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.19 (ก)

2. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชัน $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่ในกรณีนี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.17 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองแสดงเป็นข้อมูลในตาราง 4.5 และแบบรูปโมดนำของแสงมาตรฐานอินพุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.19 (ข)

3. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล (gaussian-exponential distribution) ในกรณีนี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.18 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองแสดงเป็นข้อมูลในตาราง 4.6 และแบบรูปโมดนำของแสงมาตรฐานอินพุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.19 (ค)

ตาราง 4.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างรอยคาบของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีขั้นบันได

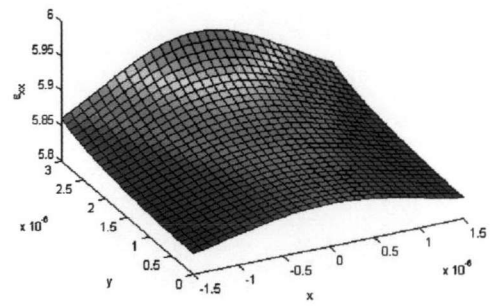
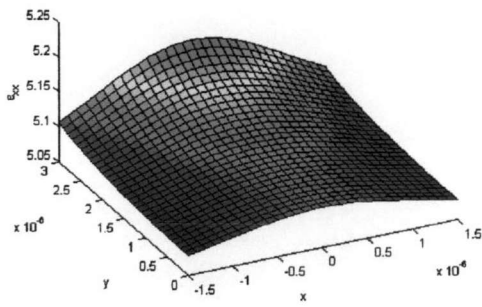
β_1 (rad / m)	β_2 (rad / m)	$\Delta\beta$ (rad / m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.6286×10^7	3.4675×10^7	2.1037×10^6	1.4933	2.9866	0.074665

ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างรอยคาบของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

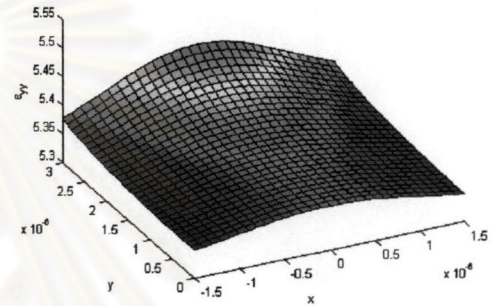
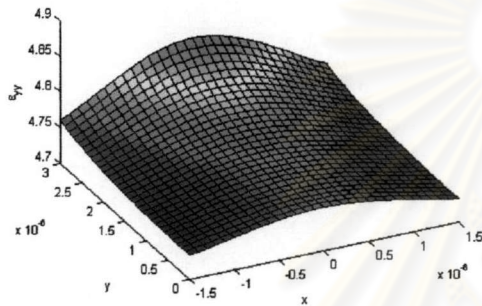
β_1 (rad / m)	β_2 (rad / m)	$\Delta\beta$ (rad / m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.629×10^7	3.4725×10^7	2.1446×10^6	1.4649	2.9297	0.073245

ตาราง 4.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างรอยคาบของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

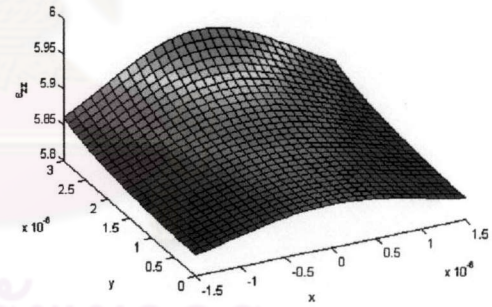
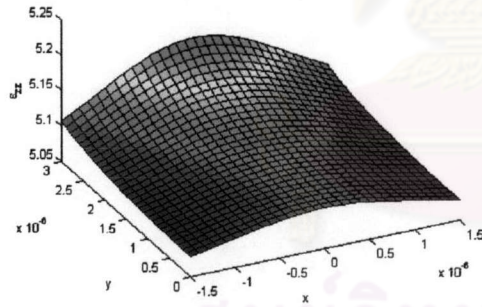
β_1 (rad / m)	β_2 (rad / m)	$\Delta\beta$ (rad / m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.631×10^7	3.4771×10^7	2.1523×10^6	1.4597	2.9193	0.072985



(ก) ϵ_{xx}

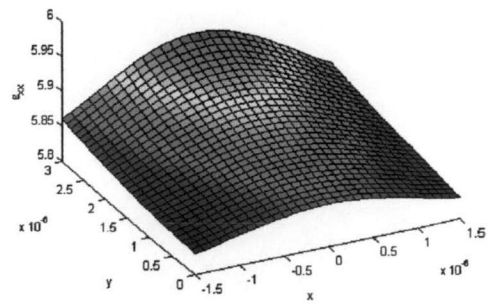
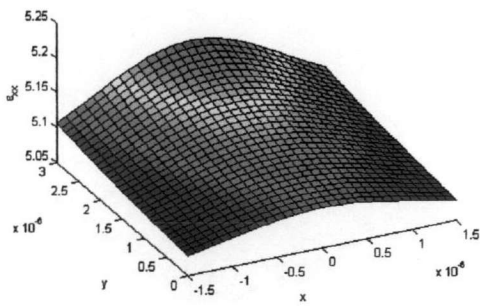
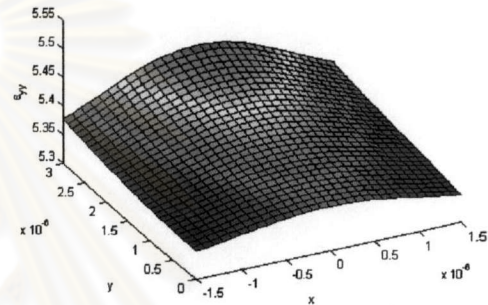
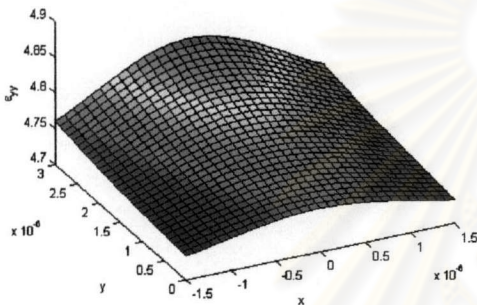
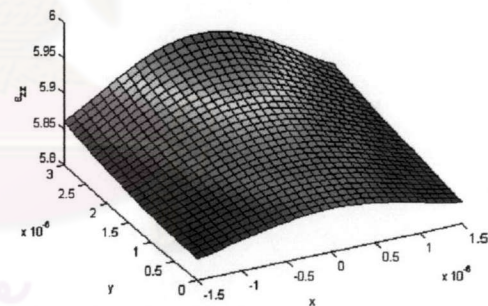
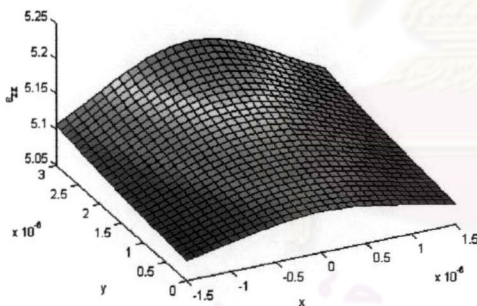


(ข) ϵ_{yy}

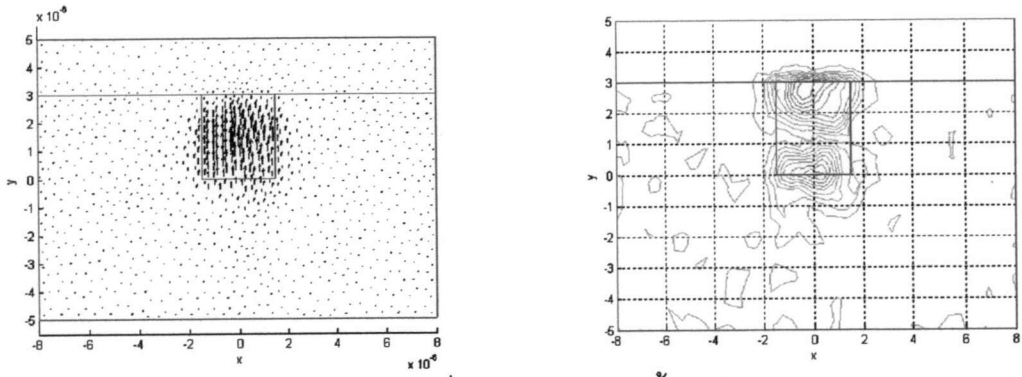


(ค) ϵ_{zz}

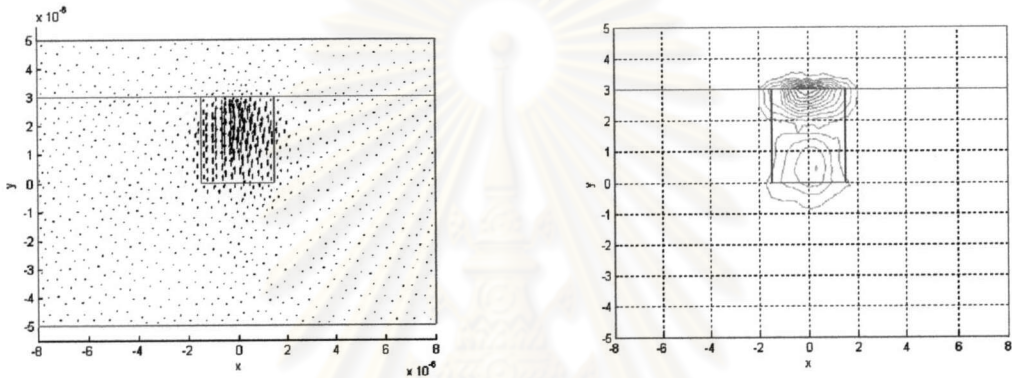
รูปที่ 4.17 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในแกนนำแสงซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x และ y แบบฟังก์ชันเกาส์เซียนที่ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลัมน์ด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ด้านขวา)

(ก) ε_{xx} (ข) ε_{yy} (ค) ε_{zz}

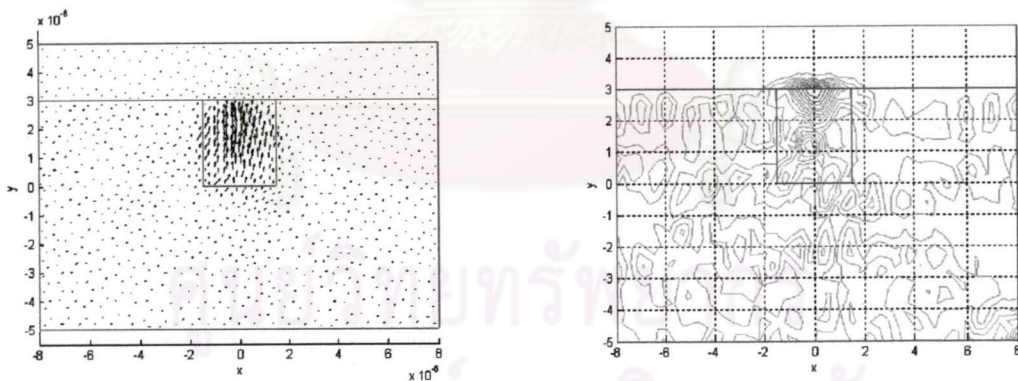
รูปที่ 4.18 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในแกนนำแสงซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x แบบฟังก์ชันเกาส์เซียน และแกน y แบบฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลที่ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลัมน์ด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ด้านขวา)



(ก) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได



(ข) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

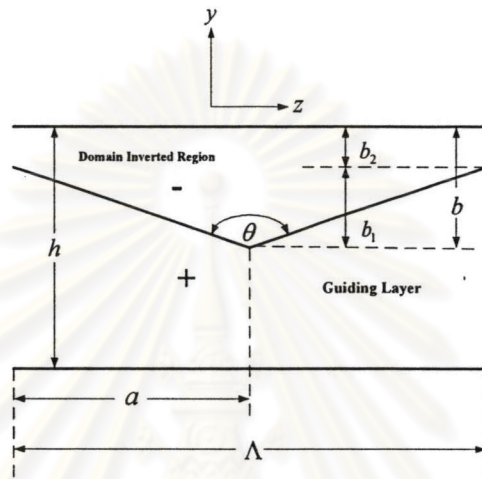


(ค) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

รูปที่ 4.19 แบบรูปโมดนำขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขวาง (คอลัมน์ซ้ายมือ) และ องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวเคลื่อนที่ (คอลัมน์ขวามือ) ของแสงมูลฐาน

4.3.2.1 โครงสร้างของโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมที่เหมาะสมที่สุด สำหรับแบบจำลองส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันไดและแบบดรรชนีลาด

พิจารณาอุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4.20 เริ่มต้นจากการจำลองหาความสูง b ของโดเมนผกผันที่ทำให้กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง P_2 มีค่าสูงสุด



รูปที่ 4.20 แบบจำลองโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมของอุปกรณ์ QPM-SHG
ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต

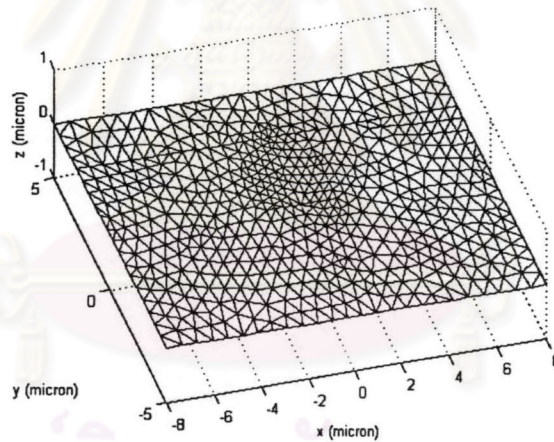
ในการจำลองนี้จะแบ่งออกเป็น 3 กรณีย่อย คือ

1. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีชั้นบันได
2. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดโดยที่ ฟังก์ชัน $f(x)$ และ $g(y)$ ต่างก็เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่
3. ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาดโดยที่ ฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน ในขณะที่ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล

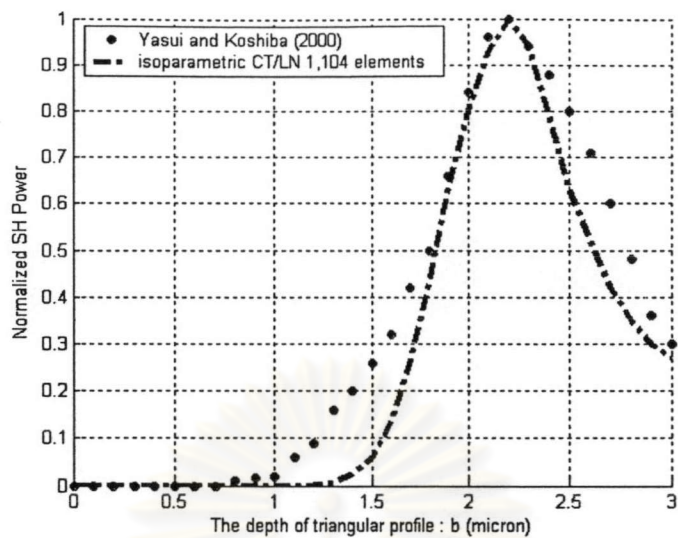
แบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM-SHG นี้ออกเป็นอีลีเมนต์ไอโซพารามेटริก CT/LN ดังรูปที่ 4.21 ผลการจำลองเป็นดังนี้

กรณีส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได ผลการคำนวณที่ได้จากการใช้อิเล็กเมนต์ไอโซพารามेटริกแบบ CT/LN จำนวน 1,104 อิเล็กเมนต์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Yasui and Koshiba (2000) ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.22 (ก) จากรูปจะเห็นว่า กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง P_2 จะมีค่าสูงสุดเมื่อความสูง b มีค่าเท่ากับ $2.2\mu\text{m}$ เหมือนกันทั้งสองกรณี

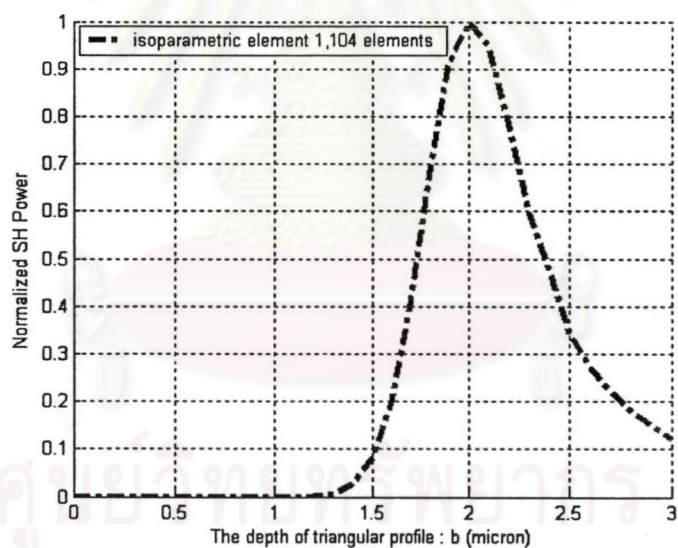
ผลการคำนวณกรณีส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution) แสดงดังรูป 4.22 (ข) ในกรณีนี้กำลัง P_2 จะมีค่าสูงสุดเมื่อความสูง b มีค่าเท่ากับ $2\mu\text{m}$ ในขณะที่ส่วนท่อนำคลื่นแสงที่มีฟังก์ชันการกระจายแบบ gaussian-exponential distribution จะเริ่มให้กำลัง P_2 ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดเมื่อ b มีค่าเท่ากับ $1.9\mu\text{m}$ ดังรูปที่ 4.22 (ค) ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าการทำให้กำลัง P_2 มีค่าสูงสุดในส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดจะต้องการความสูง b น้อยกว่าแบบดรรชนีชั้นบันได (ยังไม่มีเปรียบเทียบระดับกำลังที่ได้จากแต่ละกรณี)



รูปที่ 4.21 การแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM SHG ออกเป็น
อิเล็กเมนต์ไอโซพารามेटริก CT/LN จำนวน 1,104 อิเล็กเมนต์

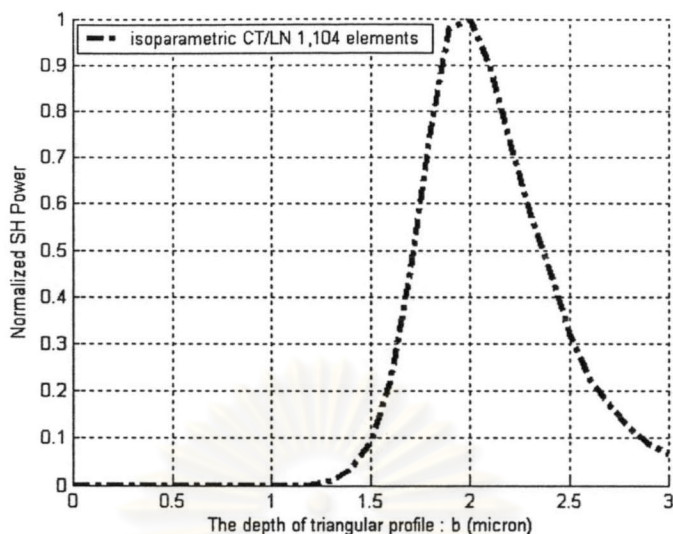


(ก) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีขึ้นบันได



(ข) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

รูปที่ 4.22 กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่ถูกกำเนิดขึ้นเมื่อกำหนดให้ความสูง b ของโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมเป็นตัวพารามิเตอร์แปรค่า



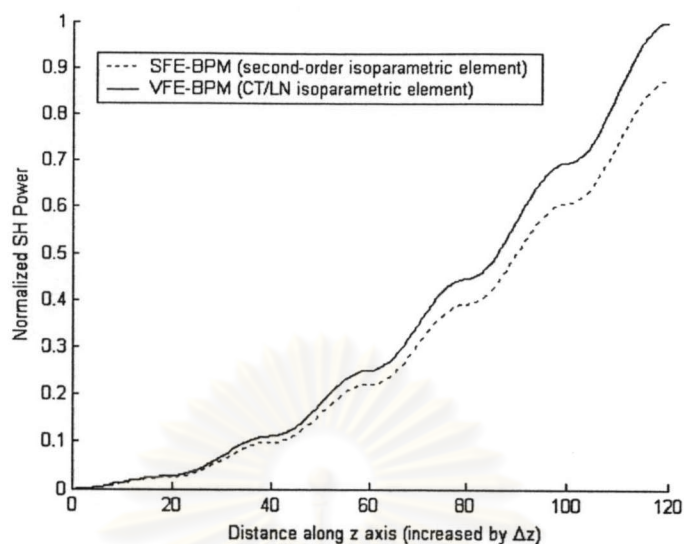
(ค) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

รูปที่ 4.22 (ต่อ)

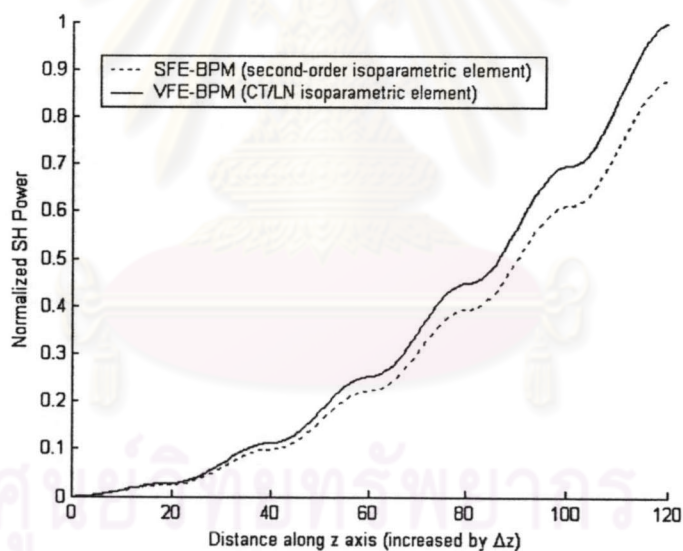
4.3.2.2 ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้จากการพิจารณาด้วยการประมาณแบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์

พิจารณา การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองจากอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ ที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4.20 การจำลองปัญหานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้เมื่อจำลองด้วยวิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมาตร (SFE-BPM) และ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมาตร (VFE-BPM) โดยกำหนดให้โดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมมีความสูง b เท่ากับ $2.2\mu m$ สำหรับส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบชั้นบันไดและ $2.1\mu m$ สำหรับดรรชนีหักเหแบบลาด

เริ่มต้นจากการแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM-SHG ออกเป็นอีลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบขอบตรง คือ อีลีเมนต์อันดับสอง (สำหรับ SFE-BPM) กับ อีลีเมนต์ CT/LN (สำหรับ VFE-BPM) ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.23 จากรูปจะเห็นได้ว่ากำลังของแสงฮาร์มอนิก P_2 ที่คำนวณได้จาก วิธี VFE-BPM จะมากกว่า วิธี SFE-BPM เสมอทั้งในส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันไดและแบบดรรชนีลาด (พิจารณาเฉพาะ gaussian-gaussian distribution) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการคำนึงถึงผลขององค์ประกอบของสนามครบทุกๆ องค์ประกอบนั่นเอง



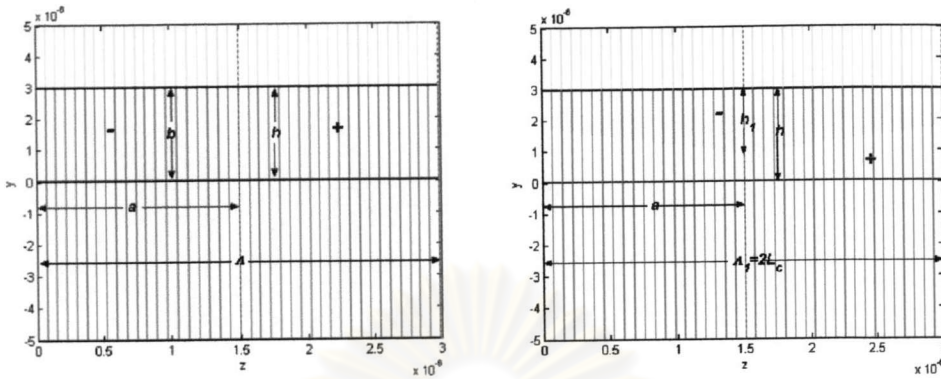
(ก) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได



(ข) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้จาก
 วิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมพรอพาเกชัน กับ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมพรอพาเกชัน

4.3.2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง



(ก) รูปสี่เหลี่ยม

(ข) รูปสามเหลี่ยม

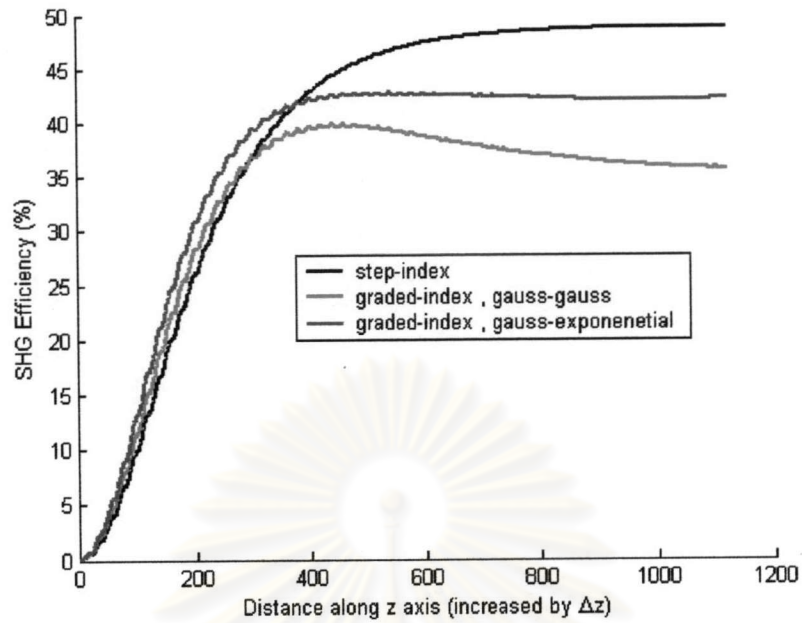
รูปที่ 4.24 รูปร่างบริเวณโดเมนผกผันของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างขึ้นจากผลึกลิเทียมไนโอเบต

หัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาผลของ แบบจำลองของส่วนท่อนำคลื่นแสง และ รูปร่างของบริเวณโดเมนผกผันที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} โดยแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีดังนี้

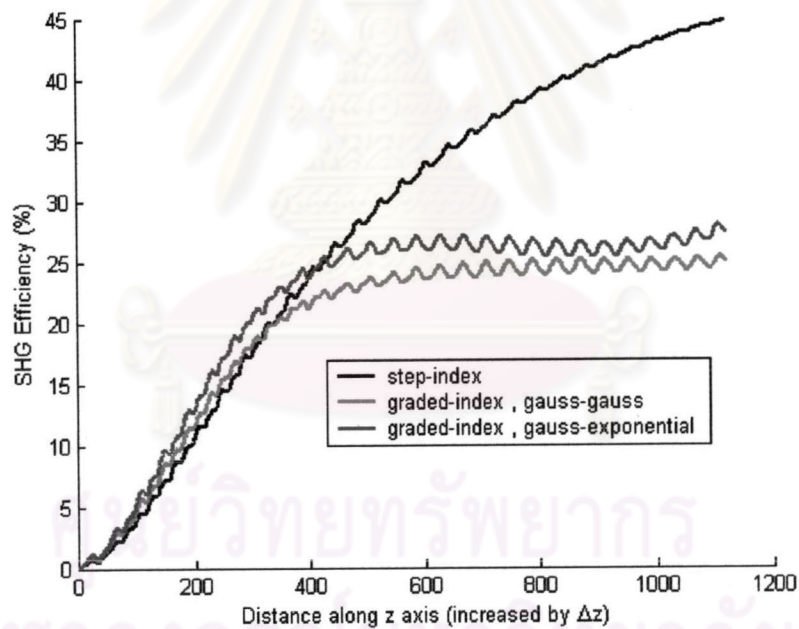
กรณีแรกอุปกรณ์ QPM-SHG ในอุดมคติที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความสูง $b = h$ ดังรูปที่ 4.24 (ก) การคำนวณหาประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} ได้ผลดังรูปที่ 4.25 (ก) จากรูปจะเห็นได้ว่า ในช่วงต้นของระยะทางการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าน้อยกว่า $400\Delta z$ นั้น η_{SHG} ของส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด จะมีค่ามากกว่ากรณีดรรชนีชั้นบันได อย่างไรก็ตาม ที่ระยะทางการเคลื่อนที่มากขึ้น η_{SHG} ของส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได จะมีค่ามากกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากการทับซ้อนกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้าระหว่างแสงสองความถี่ในท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันไดนั้นจะมีพื้นที่มากกว่ากรณีดรรชนีลาด (ดูรูปที่ 4.26 เทียบกับรูปที่ 4.27) ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า เมื่อแสงทั้งสองเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางที่มากขึ้นการถ่ายเทกำลังงานจากแสงมูลฐานมาสู่แสงฮาร์มอนิกย่อมเกิดขึ้นได้มากกว่านั่นเอง

นอกจากนั้นท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่จะให้ประสิทธิภาพ η_{SHG} ต่ำที่สุดเนื่องจาก บริเวณที่ค่าดรรชนีหักเหแสงที่มีค่ามาก ท่อนำคลื่นแสงนี้ (บริเวณสีแดงในรูปที่ 4.17) จะมีพื้นที่น้อยที่สุด แบบรูปสนามไฟฟ้าในกรณีนี้จะมีบริเวณของการแผ่ที่เล็กลง ทำให้พื้นที่การทับซ้อนของแบบรูปสนามไฟฟ้าระหว่างแสงสองความถี่มีน้อยลงตามไปด้วยดังรูปที่ 4.27 (โดยเฉพาะบริเวณสีแดงของรูปที่ 4.27 (ข) ที่สนามมีความเข้มสูง) ดังนั้น ปฏิกริยาแบบไม่เชิงเส้นระหว่างแสงสองความถี่จึงเกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย

กรณีที่สองอุปกรณ์ QPM-SHG ในทางปฏิบัติที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4.24 (ข) นำความสูง b ที่เหมาะสมที่สุด คือ $b = 2.1\mu\text{m}$ สำหรับส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได และ $b = 2\mu\text{m}$ สำหรับแบบลาด มาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} ได้ผลดังรูปที่ 4.25 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่า η_{SHG} ในกรณีนี้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่โดเมนผกผันเป็นรูปสี่เหลี่ยม ไม่ว่าส่วนท่อนำคลื่นแสงจะเป็นแบบดรรชนีชั้นบันไดหรือดรรชนีลาดก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลมาจากโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมซึ่งมีรูปร่างบิดเบี้ยวไปจากรูปสี่เหลี่ยมมากนั้นไม่สามารถทำให้กระบวนการแมตซ์เฟสเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์นั่นเอง

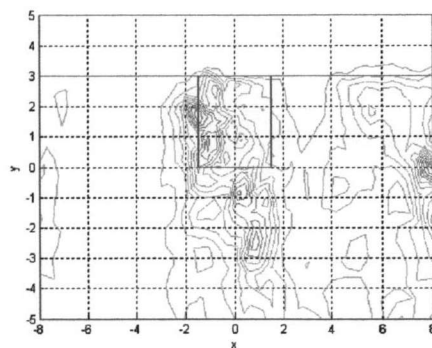
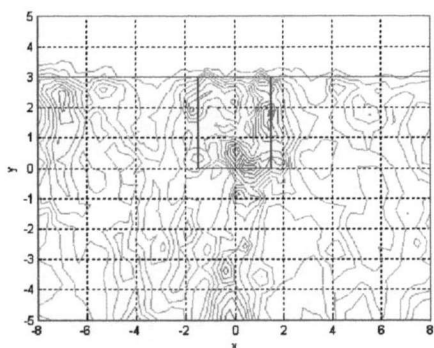
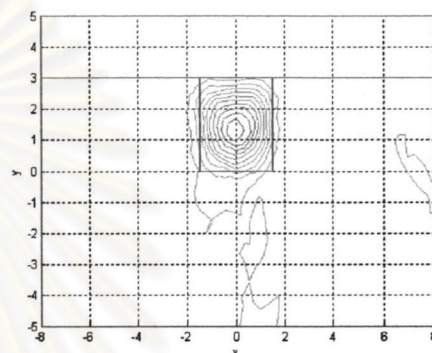
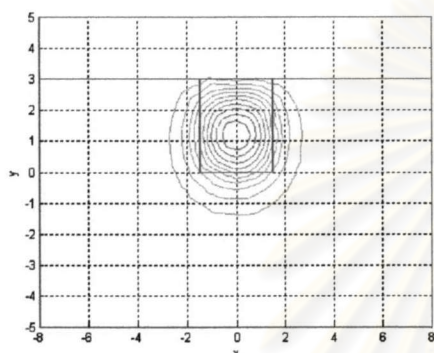
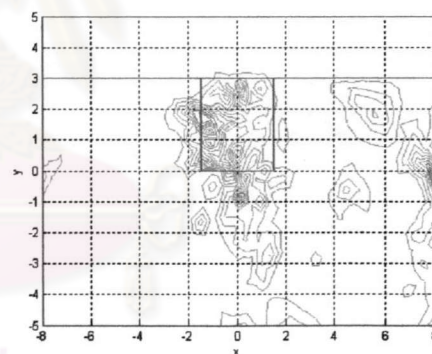
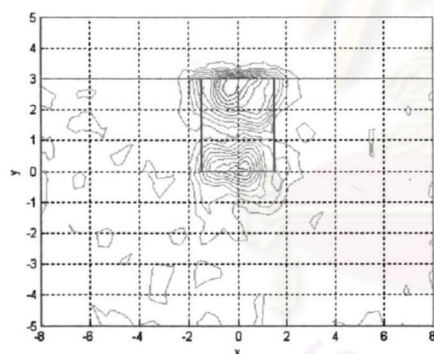


(ก) บริเวณโดเมนผกผันรูปสี่เหลี่ยม

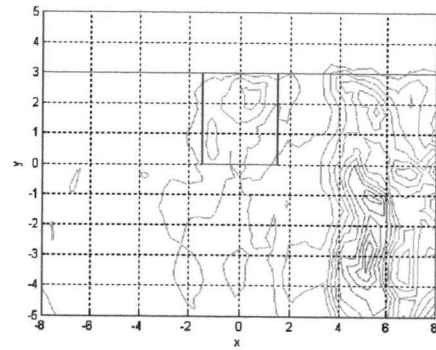
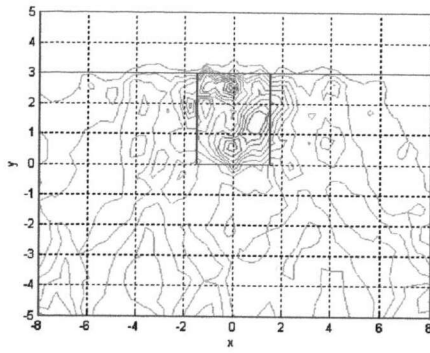
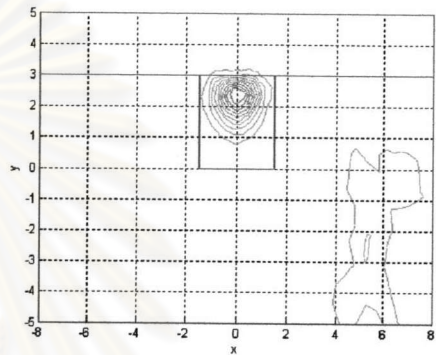
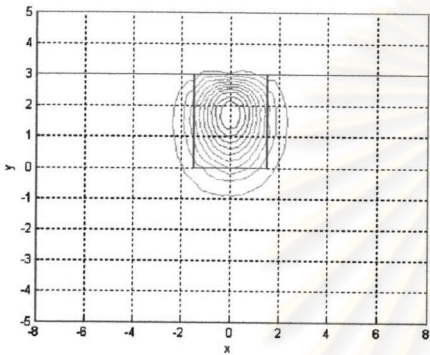
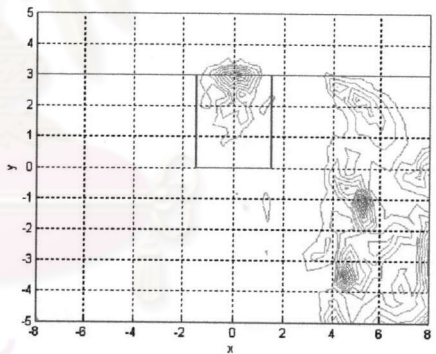
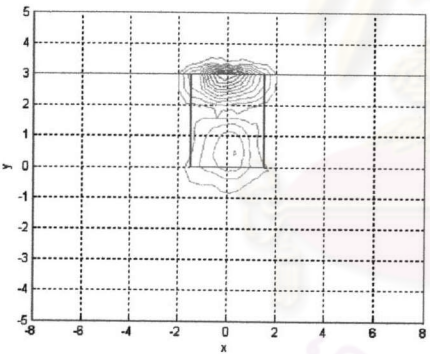


(ข) บริเวณโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยม

รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบตโดยมีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยม

(ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y (ค) องค์ประกอบ E_z

รูปที่ 4.26 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอดมันน์ซ้ายมือ) และ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอดมันน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของการคำนวณในส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีขึ้นบันได

(ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y (ค) องค์ประกอบ E_z

รูปที่ 4.27 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอสม์นซ์ายมือ) และ แสงฮาร์โมนิกอันดับสอง (คอสม์นซ์วามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของการคำนวณ ในส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด ที่มีฟังก์ชันการกระจายในแนวแกน x และ y เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน

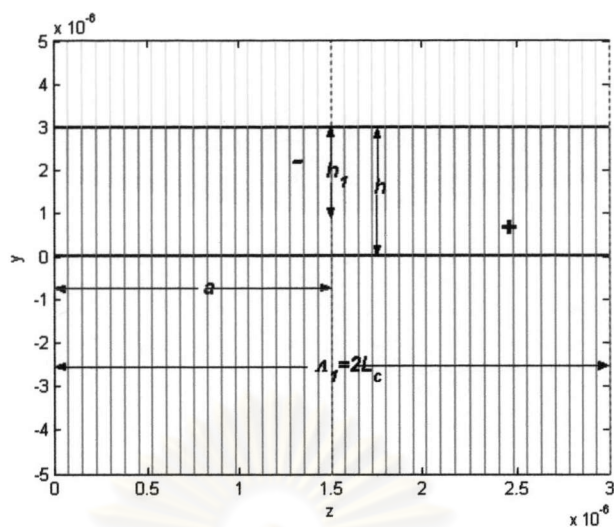
4.3.2.4 ผลของการเลือกใช้อันต์ของโครงสร้างราคาบรูปสามเหลี่ยม

พิจารณา ผลของอันต์โครงสร้างราคาบรูปสามเหลี่ยมที่มีต่อระดับกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันต์สอง P_2 ที่กำเนิดขึ้นได้ ภายในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยม อันต์ของโครงสร้างราคาบที่จะพิจารณาจะประกอบด้วย โครงสร้างราคาบอันต์หนึ่งดังรูปที่ 4.28 (ก) และโครงสร้างราคาบอันต์สองดังรูปที่ 4.28 (ข) โครงสร้างราคาบทั้งสองอันต์นี้มีระยะครึ่งคาบแรกเท่ากับระยะครึ่งคาบหลัง ($duty\ cycle = 50\%$)

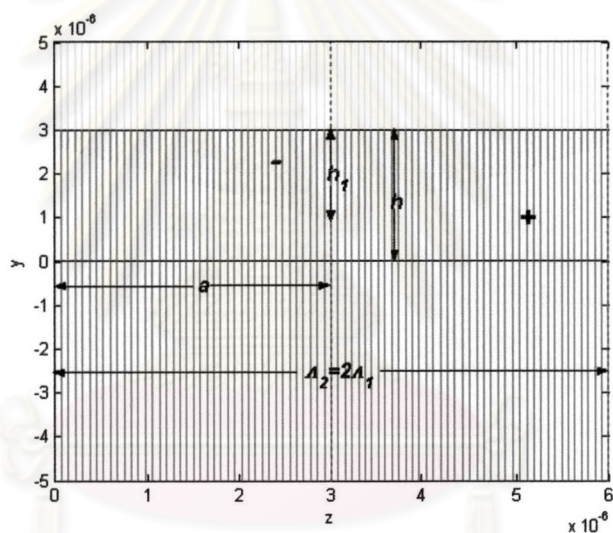
ผลการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามลักษณะแบบจำลองของส่วนท่อนำคลื่นแสง ดังนี้

กรณีส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขึ้นบันได ผลที่คำนวณได้แสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4.29 (ก) จากรูปจะเห็นได้ว่า กำลัง P_2 ที่กำเนิดขึ้นในโครงสร้างราคาบอันต์หนึ่งจะมีค่าสูงสุดในขณะที่กำลัง P_2 ที่ได้จากโครงสร้างราคาบอันต์สองมีค่าค่อนข้างต่ำ

กรณีส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด จากรูปที่ 4.29 (ข) และ (ค) จะเห็นได้ว่ากำลัง P_2 ที่กำเนิดขึ้นในโครงสร้างราคาบอันต์หนึ่งจะมีค่าสูงสุด อย่างไรก็ตาม ท่อนำคลื่นแสงที่มีฟังก์ชันการกระจาย $f(x)$ และ $g(y)$ เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนทั้งคู่จะให้กำเนิดกำลัง P_2 ที่มีระดับต่ำที่สุด นอกจากนั้น ระดับกำลัง P_2 ที่ได้จากแบบจำลองส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดนั้นจะต่ำกว่าระดับกำลังที่ได้จากแบบจำลองดรรชนีขึ้นบันไดเสมอ

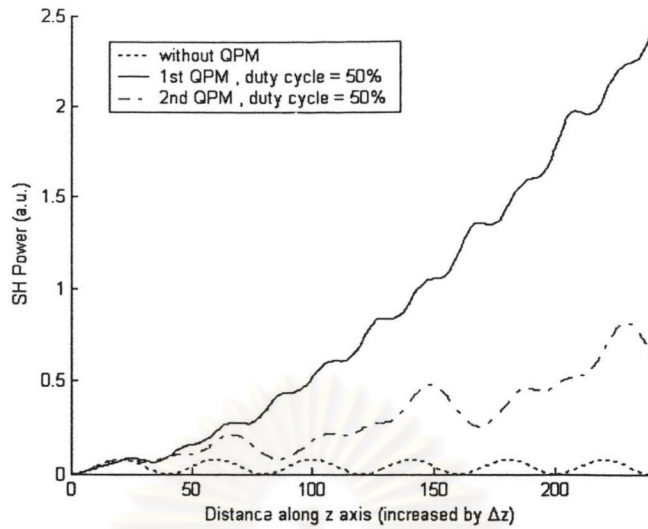


(ก) โครงสร้างรายนคาบอันดับ 1 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50 %

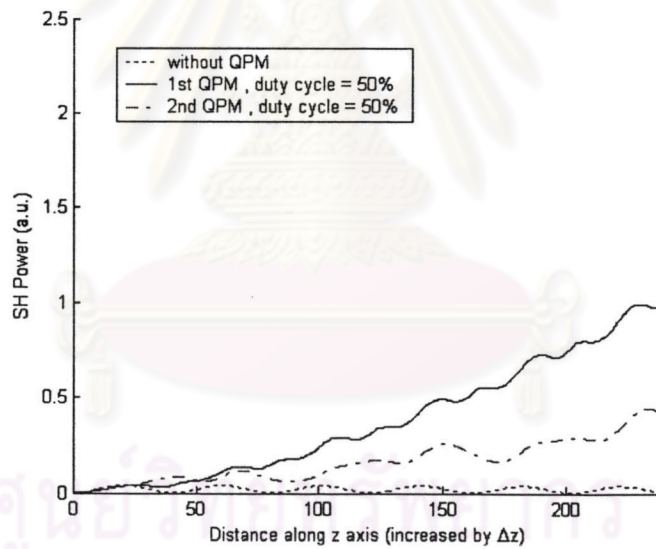


(ข) โครงสร้างรายนคาบอันดับ 2 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50 %

รูปที่ 4.28 ลักษณะการแบ่งอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบตออกเป็น
 ระนาบในแนวขวางเพื่อการคำนวณผลของอันดับของโครงสร้างรายนคาบที่มีต่อ
 กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง

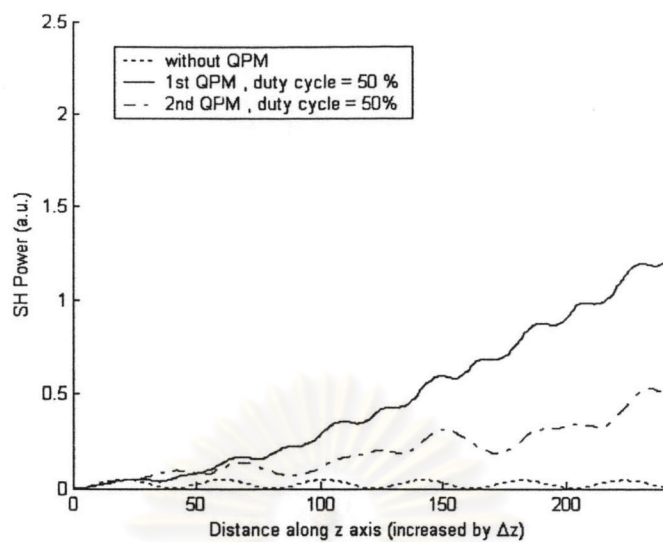


(ก) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได



(ข) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)

รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบผลของการเลือกใช้อันดับของโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบตโดยมีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยม

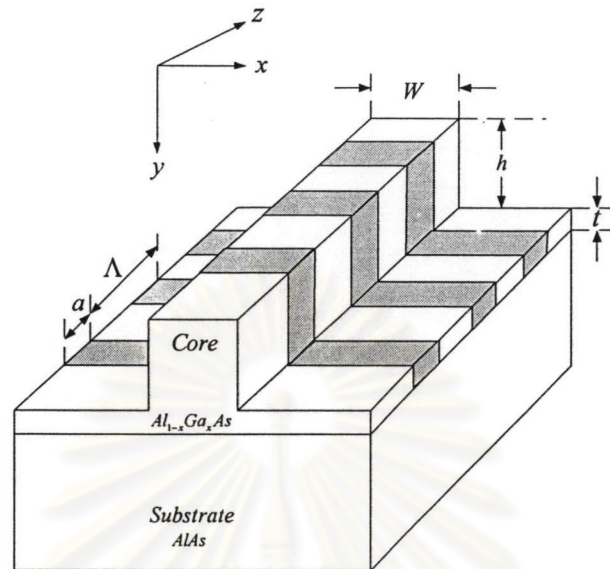


(ค) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)

รูปที่ 4.29 (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำอลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์



รูปที่ 4.30 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำอลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์

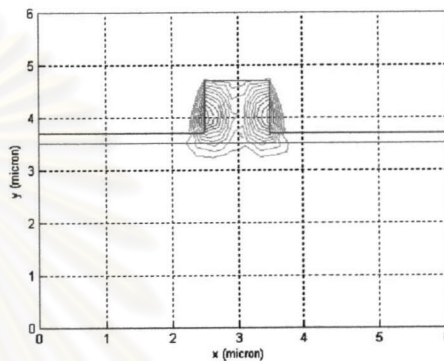
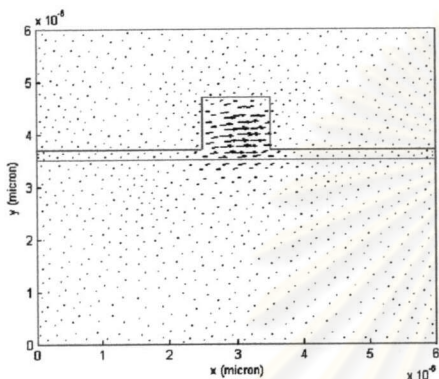
พิจารณา อุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.30 ส่วนที่นำคลื่นแสงมีความกว้าง W เท่ากับ $1.0\mu\text{m}$ มีความสูง h เท่ากับ $1.0\mu\text{m}$ และความหนา t มีค่า $0.2\mu\text{m}$ (Katsriku, Rahman and Grattan, 2000) ส่วนโดเมนผกผันที่วางตัวในแนวขวางกับส่วนที่นำคลื่นแสงแบบรีบประดิษฐ์ขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (โดยการกำหนดให้อัตราส่วน $x = 0.2$) ในขณะที่แผ่นฐานจะสร้างจาก AlAs (อัตราส่วน $x = 0$) ที่ความยาวคลื่นแสงมูลฐาน $\lambda_1 = 1.064\mu\text{m}$ ค่าดัชนีหักเหแสงในส่วนแกนนำแสงและส่วนฐานจะมีค่า $n_{c,1} = 3.48$ และ $n_{s,1} = 2.93$ ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นแสงฮาร์โมนิกอันดับสอง $\lambda_2 = 0.532\mu\text{m}$ ค่าดัชนีหักเหแสงของทั้งสองบริเวณจะมีค่า $n_{c,2} = 4.13$ และ $n_{s,2} = 3.23$ ตามลำดับ

รูปแบบเทนเซอร์สภาพยอมและเทนเซอร์สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของปัญหานี้จะมีรูปแบบเดียวกันกับสมการ (3.38) ถึง (3.42)

การคำนวณ ปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน สำหรับส่วนที่นำคลื่นแสงแบบรีบด้วยวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ ได้ผลดังตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างรอยคาบของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ *AlGaAs*

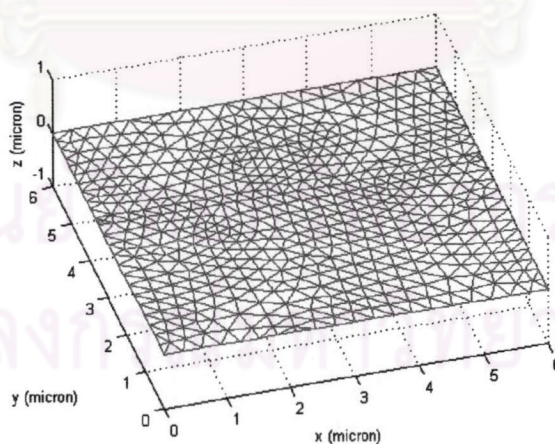
β_1 (rad / m)	β_2 (rad / m)	$\Delta\beta$ (rad / m)	L_c (μm)	Λ_1 (μm)	Δz (μm)
1.7642×10^7	4.1147×10^7	5.8624×10^6	0.53589	1.0718	0.0267945



(ก) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขวาง

(ข) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวเคลื่อนที่

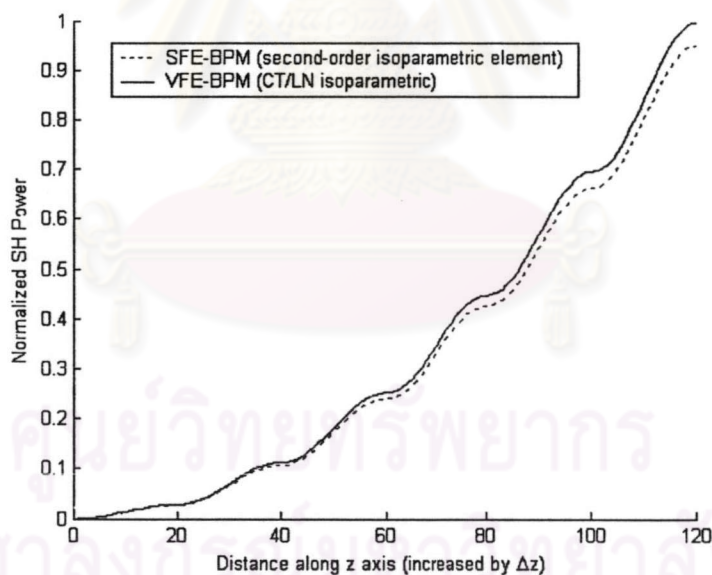
รูปที่ 4.31 แบบรูปสนามไฟฟ้าโมดนำของแสงมูลฐาน



รูปที่ 4.32 การแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM SHG ออกเป็น อิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกสามเหลี่ยมจำนวน 1,054 อิลีเมนต์

4.3.3.1 ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้จากการพิจารณาด้วยการประมาณแบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์

พิจารณาการเปรียบเทียบความแม่นยำของผลเฉลยที่คำนวณได้จาก วิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน (SFE-BPM) กับ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน (VFE-BPM) เริ่มต้นจากการแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM-SHG ออกเป็นอีลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบขอบตรงจำนวน 1,054 อีลีเมนต์ดังรูปที่ 4.32 และเลือกใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบสเกลาร์อันดับสอง (สำหรับ SFE-BPM) และ ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์แบบ CT/LN (สำหรับ VFE-BPM) ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.33 จากรูปจะเห็นได้ว่า กำลังของแสงฮาร์มอนิก P_2 ที่คำนวณได้จาก วิธี VFE-BPM จะมากกว่า วิธี SFE-BPM เสมอ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี VFE-BPM นั้นจะคำนึงถึงผลของสนามครบทุกองค์ประกอบ ในขณะที่วิธี SFE-BPM จะพิจารณาเฉพาะผลขององค์ประกอบสนามหลักเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้น การคำนวณโดยอาศัยสมมติฐานการประมาณแบบสเกลาร์จึงมีผลต่อความแม่นยำของผลเฉลย หากต้องการผลเฉลยที่มีความแม่นยำควรใช้วิธีการที่คำนวณแบบเวกเตอร์



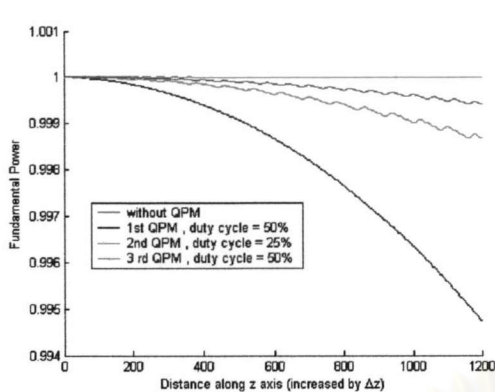
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้จากวิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน กับ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน

4.3.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง

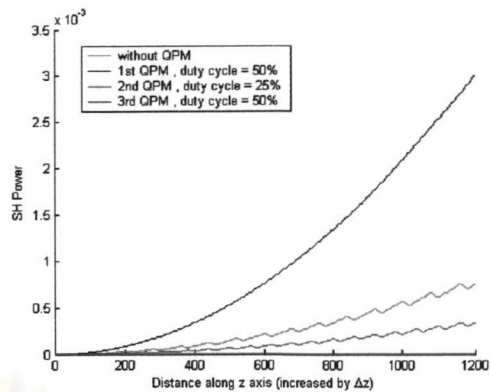
การจำลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่เกิดขึ้น โดยแบ่งกรณีการจำลองตามวิธีการที่ทำให้เกิดการแมตซ์เฟสแบบคล้ายขึ้นในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ คือ วิธีโดเมนผกผัน (DI-QPM) และ วิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบหลัง (DD-QPM)

พิจารณา การแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผันก่อน เริ่มต้นการจำลองโดยป้อนแบบรูปสนามไฟฟ้าโมดนำของแสงมูลฐานดังรูปที่ 4.31 เข้าสู่ระนาบ $z=0$ ผลการจำลองด้วยวิธี VFE-BPM โดยใช้ซิลิโคนไอโซพาราเมตริกแบบ CT/LN จำนวน 1,054 ซิลิโคนต์แสดงดังรูปที่ 4.34 จากรูป 4.34 (ก) จะเห็นได้ว่า กำลังของแสงมูลฐาน P_1 ในโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งลดลงเร็วที่สุดทำให้กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง P_2 ในโครงสร้างนี้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วดังกราฟในรูปที่ 4.34 (ข)

รูปที่ 4.35 แสดงประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} ของการแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธี DI-QPM จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งนั้นจะให้ค่า η_{SHG} สูงที่สุด ในขณะที่โครงสร้างอันดับที่สองและสามจะให้ η_{SHG} ต่ำลงมาตามลำดับ และสำหรับอุปกรณ์ QPM-SHG ที่ไม่มีโครงสร้างเพื่อการแมตซ์เฟสจะให้ η_{SHG} ต่ำที่สุด

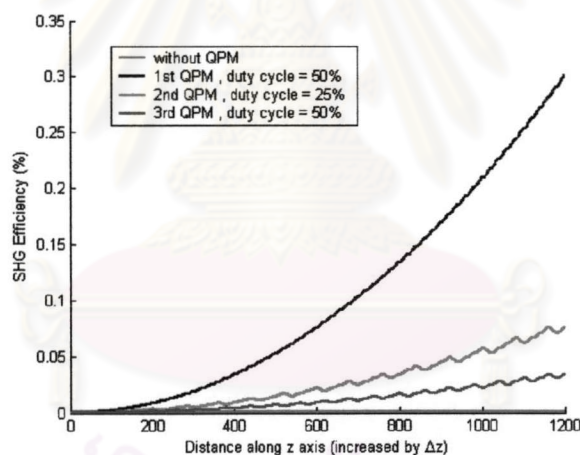


(ก) แสงมูลฐาน



(ข) แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง

รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบกำลังของแสงมูลฐานและแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผันโดยอาศัยโครงสร้างรอยคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน



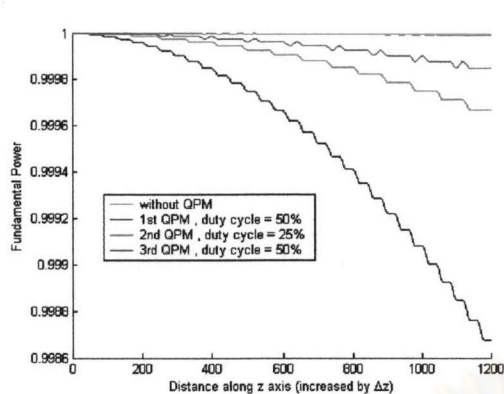
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผันโดยอาศัยโครงสร้างรอยคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน

พิจารณาการแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบ (DD-QPM) เริ่มต้นการจำลองโดยป้อนแบบรูปสนามไฟฟ้าโมดนำของแสงมูลฐาน ดังรูปที่ 4.31 เข้าสู่ระนาบ $z = 0$ ผลการจำลองด้วยวิธี VFE-BPM ร่วมกับการใช้อิเล็กเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบ CT/LN จำนวน 1,054 อิเล็กเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.36 จากรูปที่ 4.36 (ก) จะเห็นว่ากำลังของแสงมูลฐาน P_1 ในโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งจะลดลงเร็วที่สุดกำลังงาน P_1 นี้จะถูกถ่ายเทมาเป็น P_2 อย่างรวดเร็วดังรูปที่ 4.36 (ข)

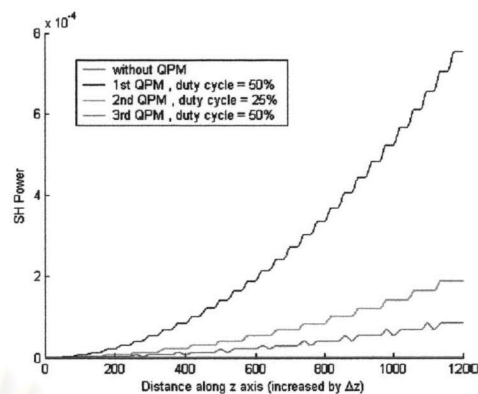
รูปที่ 4.37 แสดงประสิทธิภาพของการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง η_{SHG} โดยการแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธี DD-QPM จากรูปจะเห็นว่า η_{SHG} ของโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งจะมีค่าสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม η_{SHG} ค่าสูงที่สุดนี้ จะมีค่าต่ำกว่า η_{SHG} ของการแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธี DI-QPM (ดูรูปที่ 4.35)



คุนยวิทยทรพยากร
จุพาลงกรณมหาวิทยาฬย

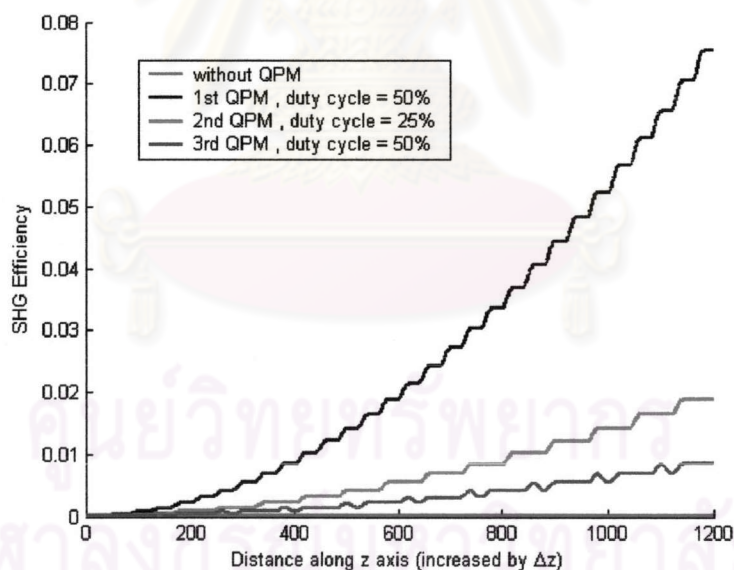


(ก) แสงมูลฐาน



(ข) แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง

รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบกำลังของแสงมูลฐานและแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบโดยอาศัยโครงสร้างรายการที่มีอันดับ และดิวิตีไซเคิลต่างกัน



รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบโดยอาศัยโครงสร้างรายการที่มีอันดับและดิวิตีไซเคิลต่างกัน

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองภายในอุปกรณ์ QPM-SHG โดยอาศัยการวิเคราะห์แบบเวกเตอร์ การเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการประมาณแบบสเกลาร์กับการวิเคราะห์แบบเวกเตอร์ พบว่าในทุกๆ กรณี ผลเฉลยที่ได้จากการประมาณแบบสเกลาร์จะมีค่าต่ำกว่าการวิเคราะห์แบบเวกเตอร์เสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการประมาณแบบสเกลาร์นั้นละเลยผลขององค์ประกอบสนามอื่นๆ ที่นอกเหนือไปจากองค์ประกอบสนามหลัก ดังนั้น ระดับกำลังงานที่คำนวณได้จึงเป็นผลของสนามหลักเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

การตั้งสมมติฐานให้ส่วนท่อนำคลื่นแสงของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต และ ลิเทียมแทนทาลेट เป็นแบบดรรชนีชั้นบันได หรือ แบบดรรชนีลาด จะมีผลต่อระดับกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่ถูกกำเนิดขึ้น ผลจากการคำนวณชี้ให้เห็นว่า กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่กำเนิดจากส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด จะมีระดับต่ำกว่าแบบดรรชนีชั้นบันไดเสมอ ทั้งนี้เป็นผลมาจาก ในส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดนั้นบริเวณที่ค่าดรรชนีหักเหแสงมีค่ามากในแกนนำแสงจะมีน้อยกว่าท่อนำคลื่นแสงแบบชั้นบันได จึงส่งผลให้แบบรูปของสนามไฟฟ้าในบริเวณแกนนำแสงมีพื้นที่การแผ่ลดลงยังผลให้พื้นที่การทับซ้อน (overlap area) กันระหว่างสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐานกับแสงฮาร์มอนิกอันดับสองมีน้อยลงตามไปด้วย ปฏิกริยาแบบไม่เชิงเส้นระหว่างสนามไฟฟ้าของแสงสองความถี่จึงมีน้อยลง ดังนั้น กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่กำเนิดได้จึงมีค่าน้อยลงตามไปด้วยนั่นเอง

รูปร่างของบริเวณโดเมนผกผันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่กำเนิดขึ้นได้ จากการใช้แบบจำลองของบริเวณโดเมนผกผันที่ใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติพบว่า โดเมนผกผันที่มีรูปร่างต่างไปจากรูปสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นรูปในอุดมคติ จะเป็นสาเหตุให้กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก รูปร่างโดเมนผกผันที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติไม่เพียงพอที่จะทำให้กระบวนการแมตซ์เฟสเป็นไปโดยสมบูรณ์

อันดับของโครงสร้างก็มีผลต่อกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองด้วยเช่นกัน จากการคำนวณปัญหาในกรณีตัวอย่างพบว่าโครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งจะให้กำลังแสงฮาร์มอนิกอันดับสองสูงที่สุด ในขณะที่โครงสร้างรายคาบอันดับที่สองและสามจะให้กำลังในระดับที่ลดหลั่นกันลงมา อย่างไรก็ตาม โครงสร้างรายคาบอันดับหนึ่งนั้นจะเป็นโครงสร้างที่ประดิษฐ์ได้ยากที่สุดเนื่องจากคาบของโครงสร้างนี้สั้นที่สุด ดังนั้น การสร้างตัวอุปกรณ์ในทางปฏิบัติจึงควรมีการตัดสินใจอย่างเหมาะสมระหว่างขั้นตอนการประดิษฐ์ที่ง่ายกับระดับกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่จะได้รับ