

## บทที่ 5

### คลื่นต่อเนื่องและพฤติกรรมเลเซอร์ชั่วขณะ

#### วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาจบหนึ้นแล้ว

1. นักศึกษาสามารถแก้ปัญหาของเลเซอร์สามระดับและสี่ระดับจากท้ายบทในข้อ 5.8, 5.9 และ 5.10 ได้
2. นักศึกษาสามารถเข้าใจพฤติกรรมของเลเซอร์ทั้งลักษณะคลื่นต่อเนื่องและลักษณะชั่วขณะ
3. นักศึกษาสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของพฤติกรรมเลเซอร์ที่คลื่นต่อเนื่อง และเลเซอร์ชั่วขณะในระบบสามระดับและสี่ระดับ

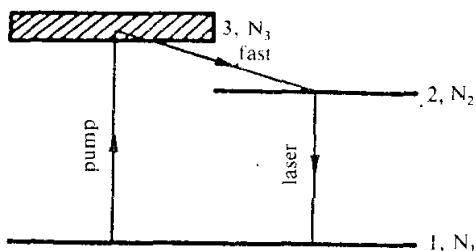
## 5.1 บทนำ

ในบทที่แล้วมาเราได้พิจารณาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเลเซอร์ รวมทั้งอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบสองระดับ (คือวัตถุเลเซอร์กิริยา) ขั้นตอนการยกระดับพลังงานและหมวดของโครงสร้างอนุภาค ที่มีในบทที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ในบทนี้เราจะใช้ผลลัพธ์ต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อพัฒนาปรับปรุงทฤษฎีสำหรับพัฒนาการของเลเซอร์ทั้งคลื่นต่อเนื่อง (cw) และการกระทำชั่วขณะนี้ ทฤษฎีที่ปรับปรุงในที่นี้ใช้วิธีที่เรียกว่า การประมาณด้วยสมการอัตรา (rate-equation) ภายใต้การประมาณด้วยวิธีนี้ สมการเลเซอร์หาได้โดยใช้ความสมดุลระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรของตัวมั่งหนดและจำนวนไฟต่อนหั้งหนดของเลเซอร์ ทฤษฎีนี้มีข้อดีคือ หาได้ง่ายมากล่วงรู้ลักษณะของพัฒนาการของเลเซอร์ ยิ่งไปกว่านั้นบังให้ผลลัพธ์ได้แม่นยำอย่างเหมาะสมสำหรับจุดมุ่งหมายส่วนใหญ่ ส่วนทฤษฎีที่ดึงขึ้นจะกล่าวในบทที่ 7

## 5.2 สมการอัตรา

### 5.2.1 เลเซอร์สามระดับ

เราจะพิจารณาการทำงานของเลเซอร์ในแผนภูมิสามระดับ ซึ่งมีเพียงหนึ่งแกนพลังงานยกระดับ (แกน 3 ในรูป 5.1) อย่างไรก็ตามแม้วัตถุจะมีมากกว่าหนึ่งแกนพลังงานยกระดับ (หรือระดับ) รวมอยู่ด้วยก็ตาม การวิเคราะห์ต่อไปนี้ยังคงเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง กำหนดให้การลดระดับจากแกนเหล่านี้ไปยังระดับเลเซอร์บน 2 เป็นไปอย่างรวดเร็วมาก ให้จำนวนอะตอมของสามระดับ 1, 2 และ 3 เป็น  $N_1$ ,  $N_2$  และ  $N_3$  ตามลำดับ เราสมมติให้เลเซอร์ออกซิลเลตเพียงหนึ่งหมวดโครงสร้างเท่านั้น และให้  $q$  เป็นจำนวนไฟต่อนหั้งหนดในโครงสร้าง จากข้อสมมติที่ว่า การลดระดับระหว่างระดับ 3 และ 2 เป็นไปอย่างรวดเร็ว เราสามารถให้  $N_3 = 0$  และเขียนสมการอัตราได้ดังต่อไปนี้



รูป 5.1 แผนภูมิเลเซอร์สามระดับพลังงาน

$$N_1 + N_2 = N, \dots \dots \dots (5.1 \text{ ก})$$

$$N_2 = W_p N_1 - Bq(N_2 - N_1) - (N_2/\tau) \dots \dots \dots (5.1 \text{ ข})$$

$$\dot{q} = V_a B q (N_2 - N_1) - (q/\tau_c) \dots \dots \dots (5.1 \text{ ค})$$

ในสมการ (5.1 ก)  $N_1$  คือ จำนวนอะตอมกิริยา (หรือโมเลกุล) ทั้งหมด ในสมการ (5.1 ข) พจน์  $W_p N_1$  นับว่าเป็นการยกระดับพลังงาน ถ้าในแบบพลังงานยกระดับ 3 ว่างเปล่า อัตราการเพิ่มของจำนวนอะตอมในระดับเลเซอร์บันเนื่องจากการยกระดับแปรตามจำนวนอะตอมในระดับพื้น  $N_1$  [ดูสมการ (3.1)] สมการสำหรับการยกระดับ  $W_p$  หาได้แล้วในบทที่ 3 ทั้งการยกระดับพลังงานด้วยแสงและไฟฟ้า พจน์  $Bq(N_2 - N_1)$  ในสมการ (5.1 ข) นับได้เป็น ทั้งการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นและการดูดกลืน ความจริงในบทที่ 2 ก็ได้แสดงแล้วว่าอัตราที่สอดคล้องกันแปรตามสนามไฟฟ้ายกกำลังสองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปรโดยตรงกับ  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  ด้วย ดังนั้นสัมประสิทธิ์  $B$  จะหมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยการกระตุ้นต่อโฟตอนและต่อหมวด ปริมาณ  $\tau$  คือ อายุขัยของระดับเลเซอร์บัน ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดด้วยสมการ (2.93 ก) ในสมการ (5.1 ค)  $V_a$  เป็นปริมาตรหมวดภายในวัตถุกิริยา และสมการสำหรับปริมาตรนี้ได้กำหนดอยู่ในบทที่ 7 ในบทนี้เราจะสมมติให้โครงกำแพงเลเซอร์ประกอบด้วยกระจากรวงกลมสองแผ่น มีรัศมีความโค้งมากกว่าความยาวไฟฟาร์ม ( $\text{ดูรูป } 5.5 \text{ และ } 5.7$ ) ในกรณีที่ขนาดของจุด  $\gamma$  ประมาณได้เป็นค่าคงที่ตามความยาวไฟฟาร์มและมีค่าเท่ากับ  $\omega_0$  ตรงศูนย์กลางของไฟฟาร์ม สำหรับหมวด  $\text{TEM}_{00}$  ปริมาตร  $V_a$  มีค่าเป็น

$$V_a = \pi \omega_0^2 l / 4 \dots \dots \dots (5.2)$$

เมื่อ  $\gamma$  เป็นความยาวของวัตถุกิริยา ตัวเลข 4 ที่ปรากฏในสมการ (5.2) เป็นผลลัพธ์ของสองพหุติกรรมต่อไปนี้คือ

(1) ปริมาณ  $\gamma$  เป็นขนาดของจุดกำหนดสำหรับปริมาณ  $B$  (สำหรับอัมปลิจูดของสนาม) ขนาดของจุดสว่างสำหรับความเข้มสนาม (คือ  $B^2$ ) มีค่าน้อยกว่าด้วย  $\sqrt{2}$  จากความจริงข้อนี้ทำให้มีตัวร่วม  $\frac{1}{2}$  สำหรับสมการ (5.2)

(2) ตัวร่วมที่เหลือ  $\frac{1}{2}$  เกิดจากคุณลักษณะของคลื่นนั่งในหมวด (คือ  $\langle \sin^2 k z \rangle = \frac{1}{2}$ )

พจน์  $V_a B q (N_2 - N_1)$  ในสมการ (5.1 ค) มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับพจน์ที่คล้ายกันในสมการ (5.1 ข) และเขียนบนพื้นฐานของการพิจารณาความสมดุล คือ แต่ละขั้นตอนของการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นก่อให้เกิดหนึ่งโฟตอนขึ้น และแต่ละขั้นตอนของการดูดกลืนทำให้โฟตอนหายไป

หนึ่งตัว สุดท้ายพจน์  $q/\tau_c$  นับได้ว่าเป็นการสูญเสียของโครงสร้างก่อนอื่นเมื่อขอนำสังเกตอยู่สองอย่างในที่นี้ คือ

(1) ระดับ 3 สามารถพิจารณาเป็นระดับว่างเปล่า ถ้าอัตราการลดระดับของมันรวดเร็วกว่าอัตราการยกระดับมาก ถ้าเราให้  $\tau_c$  เป็นอายุขัย (ของการแผ่รังสีบางด้วยของการไม่แผ่รังสี) ของระดับ 3 จำนวนอะตอม (ขณะสมดุล) ของระดับ 3 เป็น

$$N_3 = W_p \tau_3 N_1 \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ถ้า  $N_3$  สามารถละทิ้งได้ คือเมื่อ  $N_3 \ll (N_1, N_2)$  และยังพบในภายหลังว่า  $N_1 = N_2 \approx N_1/2$  (สำหรับเลเซอร์สามระดับ) ดังนั้นจากสมการ (5.3) เราได้

$$\tau_3 \ll 1/W_p \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

ซึ่งได้พิสูจน์คำกล่าวในตอนแรก

(2) สมการ (5.1 ค) “ได้ลักษณะที่เป็นการเปล่งแสงตามปกติวิสัย ความจริงถ้าเราให้  $q = 0$  เมื่อเวลา  $t = 0$  ในสมการนี้ เราได้  $q = 0$  และกิริยาเลเซอร์จะเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ เพราะว่ากิริยาเลเซอร์จะเริ่มต้นเกิดขึ้นจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย สำหรับการเปล่งแสงตามปกติวิสัยเราสามารถพิจารณาความสมดุลอย่างง่ายอีกด้วย โดยเริ่มต้นจากพจน์  $N_2/\tau_{sp}$  ซึ่งอยู่ในพจน์  $N_2/t$  ของสมการ (5.1 ข) ดังนั้นอาจจะคิดว่าพจน์ในสมการ (5.1 ค) ได้จากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย คือ  $V_a(N_2/\tau_{sp})$  แต่มันไม่เป็นเช่นนั้น เพราะว่าเราเห็นในหัวข้อ 2.3 แล้วว่า [ดูสมการ (2.91)] และที่ปล่อยออกมายอดตามปกติวิสัยแยกแยะลดอุดช่องความถี่ทั้งหมดอีกน้ำหนึ่ง ได้ด้วยพังก์ชันรูปร่างเด็นโคง์  $g(\Delta\omega)$  การหาพจน์การเปล่งแสงตามปกติวิสัยในสมการ (5.1 ค) เราเพียงแต่สนใจในสัดส่วนของแสงที่ปล่อยออกมายอดตามปกติวิสัย ซึ่งให้หมายความว่าเราต้องการสมการที่ถูกต้องสำหรับพจน์นี้หาได้จากการทำให้สนา�แม่เหล็กไฟฟ้าของหมวดโครงเป็นคุณไกซ์ (quantized) เท่านั้น จะได้ผลลัพธ์ดังนี้ เมื่อการเปล่งแสงตามปกติวิสัยผ่านไป พจน์  $V_a B q N_2$  ในสมการ (5.1 ค) กลายเป็น  $V_a B(q+1)N_2$  ทุกอย่างจะประพฤติเหมือนกับว่าเราได้เติมคำ “โฟตอนพิเศษ” (“extra photon”) ให้กับพจน์ที่ใช้อธิบายการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นอย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ต่อไปนี้ เราจะไม่ใช้พจน์พิเศษนี้กับการเปล่งแสงตามปกติวิสัย แต่เราจะสมมติว่า โฟตอนจำนวนเล็กน้อยได้ ๆ บ้างอยู่ในโครงสร้างแต่ต้น ความจริงโฟตอนจำนวนเล็กน้อยนี้ไม่ทำให้การปฏิบัติที่กล่าวมานั้นเปลี่ยนแปลงไป แต่จำเป็นต้องมีเพื่อทำให้กิริยาเลเซอร์เริ่มต้นขึ้นได้

ในขณะนี้เราต้องการหาสมการสำหรับปริมาณ  $B$  และ  $T_c$  เพื่อใช้ในสมการ (5.1 ข) และ (5.1 ค) เรามาพิจารณาหมวดของที่เกิดจากการรวมกันได้ของสองคลื่นเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ให้  $I$  เป็นความเข้มของคลื่น การเปลี่ยนแปลงความเข้ม  $dI$  เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เป็นระยะทาง  $dz$  ในวัตถุกิริยา หาได้จากสมการ (2.61) และ (2.63) กำหนดด้วย  $dI = \sigma(N_2 - N_1)Idz$  ในที่นี้  $\sigma$  คือ ภาครัดของ การเปลี่ยนแปลงที่ความถี่ของหมวดของ ให้  $T_1$  และ  $T_2$  เป็นกำลังสี่ของส่องกระเจก และ  $\ell$  คือ ความยาวของวัตถุกิริยา การเปลี่ยนแปลงความเข้ม  $\Delta I$  สำหรับเคลื่อนที่ไปและกลับในโพรงจะเป็น

$$\Delta I = \{(1 - T_1)(1 - T_2)(1 - T_c)^2 \exp[2\sigma(N_1 - N_2)\ell] - 1\}I \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

ในสมการ (5.5)  $T_c$  คือ สัดส่วนการสูญเสียภายในต่อการผ่านไปหนึ่งครั้ง มันรวมถึง

(1) การสูญเสียเนื่องจากการกระจักระจาบ (scattering losses) ในวัตถุกิริยา

(2) การสูญเสียเนื่องจากการกระจักระจาบจากด้วยการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนในกระจากเคลื่อน

(3) การสูญเสียเนื่องจากการเลี้ยวเบน (ดูบทที่ 4) ต่อไปเรากำหนดปริมาณบางตัว ซึ่งสามารถเรียกเป็นการสูญเสียแห่งลอการิทึม (logarithmic) ต่อการส่งผ่านหนึ่งครั้งเป็น

$$\gamma_1 = -\ln(1 - T_1) \quad \dots\dots\dots (5.6 \text{ ก})$$

$$\gamma_2 = -\ln(1 - T_2) \quad \dots\dots\dots (5.6 \text{ ข})$$

$\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  คือ การสูญเสียแห่งลอการิทึมต่อการเคลื่อนที่ผ่านหนึ่งครั้งเนื่องจากการกระจุผ่านกระเจก ทำนองเดียวกัน  $\gamma_i$  คือ การสูญเสียแห่งลอการิทึมภายใน อย่างไรก็ตาม เพื่อ เป็นการสังเขป เราจะเรียก  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  อย่างง่าย ๆ เป็นการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน และ  $\gamma_i$  เป็นการสูญเสียภายใน ให้สังเกตว่า สำหรับค่าน้อย ๆ ของ  $T$  เรา มี  $\gamma = T$  ดังนั้น เราจะเขียน

$$\gamma = \gamma_i + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \gamma_i + \gamma_u \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

เมื่อ  $\gamma_u = (\gamma_1 + \gamma_2)/2$  เป็นการสูญเสียเนื่องจากการกระจุผ่านกระเจก เมื่อให้สมการ (5.7) และ (5.6) แทนลงในสมการ (5.5) และสมมติอีกด้วยว่า

$$\sigma(N_2 - N_1)\ell - \gamma \ll 1 \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

ดังนั้น พังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลในสมการ (5.5) สามารถขยายออกเป็นอนุกรมยกกำลังเรขาคณิต เพื่อให้ได้

$$\Delta I = 2|\sigma(N_2 - N_1)t - \gamma|I \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

ถ้าหารสมการ (5.9) ด้วยเวลาที่ใช้ไปสำหรับแสงเคลื่อนที่ผ่านพองไบโอลับหนึ่งรอบ เราได้  $\Delta I = 2d/c$  และถ้าใช้การประมาณ  $\Delta I/\Delta t \approx dI/dt$  เราได้

$$\frac{dI}{dt} = \left| \frac{\sigma t c}{d}(N_2 - N_1) - \frac{\gamma c}{d} \right| I \quad (5.10)$$

เมื่อจำนวนโพตอน  $q$  ในพองแบร์ตาม 1 เราเปรียบเทียบสมการ (5.10) และ (5.1 ค) จะได้

$$B = \frac{\sigma t c}{V_a d} = \frac{\sigma c}{V} \quad (5.11 \text{ ท})$$

$$\tau_c = \frac{d}{\gamma c} \quad (5.11 \text{ ช})$$

เมื่อ  $V$  เป็นปริมาตรรวมของ พอง สำหรับพองที่พิจารณาข้างต้น  $V$  กำหนดด้วย

$$V = \pi \omega_0^2 d / 4 \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

ด้วยวิธีนี้สมการ (5.1 ค) สามารถแก้ไขให้ถูกต้องได้และสมการสำหรับ  $B$  และ  $\tau_c$  เขียนได้ในพจน์ของพารามิเตอร์ที่วัดค่าได้ของเลเซอร์ ให้สังเกตว่าวิธีนี้สามารถทำได้เมื่อการประมาณสมการ (5.8) ซึ่งหมายถึงค่าแตกต่างเล็กน้อยระหว่างกำลังขยายและการสูญเสีย เป็นจริงถูกต้อง (คือเมื่อเลเซอร์ไม่ได้ห่างไกลเหลือขีดเริ่มมากเกินไป) ถ้ามันไม่เป็นจริงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของเลเซอร์ต้องวิเคราะห์โดยใช้สมการ (5.5) บนพื้นฐานเป็นส่วน ๆ ข้อสังเกต ประการสุดท้ายอาจยกจากสมการ (5.7) และ (5.11 ช) สามารถเขียน

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{\gamma_i c}{d} + \frac{\gamma_u c}{d} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_u} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

ถ้าเราเลือก

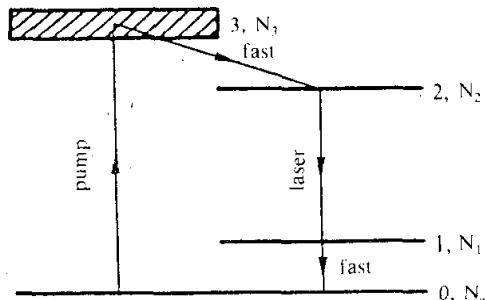
$$N = N_2 - N_1 \quad (5.14)$$

สมการ (5.1) สามารถกลายเป็นสองสมการใน  $N(t)$  และ  $q(t)$  คือ

$$N = W_p(N_i - N) - 2BqN \quad (N_i + N)/t \quad (5.15 \text{ ท})$$

$$\dot{q} = |V_a BN - (1/\tau_c)|q \quad \dots\dots\dots (5.15 \text{ ช})$$

สมการเหล่านี้รวมกับสมการสำหรับ  $B$  และ  $\tau_c$  [สมการ (5.11)] สามารถอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าสถิตและพลศาสตร์ของเลเซอร์สามระดับได้ ปริมาณ  $N$  เรียกว่า จำนวนการผันกลับประชากร



รูป 5.2 แบบถูกนิยามของระดับ

### 5.2.2 เลเซอร์สี่ระดับ

จากรูป 5.2 เราสมมติว่ามีเพียงหนึ่งระดับพลังงาน (หรือแกนพลังงาน) ยกระดับเท่านั้น ถ้า  $3 \rightarrow 2$  และ  $1 \rightarrow 0$  เป็นการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วเพียงพอ เราสามารถให้  $N_3 = N_1 = 0$  ในกรณีนี้สมการอัตราหาได้เป็น

$$N_g + N_2 = N_1 \quad \dots\dots\dots (5.16 \text{ ก})$$

$$\dot{N}_2 = W_p N_g - Bq N_2 - (N_2/\tau) \quad \dots\dots\dots (5.16 \text{ ข})$$

$$\dot{q} = |V_a B N_2 - (1/\tau_c)| q \quad \dots\dots\dots (5.16 \text{ ค})$$

เมื่อ  $N_g$  เป็นจำนวนอะตอมที่สถานะพื้น และสัญลักษณ์อื่น ๆ มีความหมายเช่นเดียวกับในกรณีเลเซอร์สามระดับ เมื่อแสดงในพจน์ของจำนวนการผันกลับประชากร  $N = N_2 - N_1 = N_2$  สมการ (5.16) สามารถกลับกลายเป็นสองสมการในตัวแปร  $N(t)$  และ  $q(t)$  ได้

$$\dot{N} = W_p(N_1 - N) - BqN - (N/\tau) \quad \dots\dots\dots (5.17 \text{ ก})$$

$$\dot{q} = |V_a B N - (1/\tau_c)| q \quad \dots\dots\dots (5.17 \text{ ข})$$

สมการเหล่านี้รวมทั้งสมการสำหรับ  $B$  และ  $\tau_c$  [สมการ (5.11)] สามารถอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าสถิตและพลศาสตร์ของเลเซอร์สี่ระดับได้ ให้สังเกตว่าสมการอัตราโฟตอนสำหรับเลเซอร์สี่ระดับ [สมการ (5.17 ข)] และเลเซอร์สามระดับ [สมการ (5.15 ข)] เมื่อเทียบกันอย่างไรก็ตามสมการอัตราของจำนวนการผันกลับประชากรในบางครั้งแตกต่างกัน โดยเฉพาะให้สังเกตว่าพจน์การเปลี่ยนแปลงโดยการกระตุ้นกำหนดด้วย  $-2BqN$  สำหรับเลเซอร์สามระดับ

ในขณะที่สำหรับเลเซอร์สีระดับกำหนดด้วย  $-BqN$  ตัวเลข 2 ที่ต่างกันนี้เราสามารถเข้าใจได้ เมื่อสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงของหนึ่งไฟต่อนหมายถึงการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 เท่าในการผันกลับ ประชากรสำหรับเลเซอร์สามระดับ ( $N_2$  ลดลงไป 1 ตัวและ  $N_1$  เพิ่มขึ้นมา 1 ตัว) ขณะเดียวกัน มันหมายถึงการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอมเป็น 1 เท่า เท่านั้นในเลเซอร์สีระดับ กรณีหลังนี้ ขณะเมื่อ  $N_2$  ลดลงไปอีก 1  $N_1$  ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงของการลดระดับลงอย่างเร็ว  $1 \rightarrow 0$

### 5.3 พฤติกรรมเลเซอร์คืนต่อเนื่อง (CW Laser Behavior)

ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาพฤติกรรมเลเซอร์สำหรับการยกระดับสถานะคงตัว (steady state pump) (คือ  $W_p$  ไม่ขึ้นกับเวลา) และเราจะได้เห็นว่า การยกระดับสถานะคงตัวให้พฤติกรรมคงตัวด้วย กรณีนี้ก็คือ พฤติกรรมเลเซอร์คืนต่อเนื่อง

#### 5.3.1 เลเซอร์สามระดับ

เราพิจารณาเงื่อนไขขีดเริ่มสำหรับกิริยาเลเซอร์อีกครั้ง สมมติว่าเมื่อเวลา  $t = 0$  มีจำนวนไฟต่อน  $q_0$  เล็กน้อยอยู่ในโพรงซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามปกติวิสัย ดังนั้นสมการ (5.15 ข) เราเห็นได้ว่า เพื่อให้  $q > 0$  จะต้องมีเงื่อนไข  $V_a BN > 1/\tau_c$  ดังนั้นกิริยาเลเซอร์จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนการกลับเป็นฝ่ายมาก  $N$  ได้ถึงค่าวิกฤต  $N_c$  และกำหนดด้วย

$$N_c = \frac{1}{V_a B \tau_c} = \frac{\gamma}{\sigma \ell} \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

ซึ่งหาได้จากสมการ (5.11) ดังนั้นอัตราการยกระดับวิกฤตหาได้ โดยให้  $N = 0$ ,  $N = N_c$  และ  $q = 0$  ในสมการ (5.15 ก) เราจะได้

$$W_{cp} = (N_t + N_c)/(N_t - N_c)\tau \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

สมการ (5.19) สามารถเข้าใจได้ง่ายเมื่อเราสังเกตว่าจำนวนอะตอมวิกฤตของสถานะบนและสถานะล่าง เป็นไปตามสมการ (5.1) และ (5.4)  $N_{2c} = (N_t + N_c)/2$  และ  $N_{1c} = (N_t - N_c)/2$  ตามลำดับ สมการ (5.19) สามารถเขียนเป็น  $W_{cp} N_{1c} = N_{2c}/\tau$  มันมีความหมายเป็นการสมดุลระหว่างการเปลี่ยนแปลงยกระดับกับการเปลี่ยนแปลงตามปกติวิสัย สังเกตว่าสำหรับในทางปฏิบัติ (คุณต้องอยู่ในตอนท้ายของหัวข้อนี้) เราได้  $N_c \ll N_t$  สมการ (5.19) เปลี่ยนไปเป็น

$$W_{cp} \approx 1/\tau_c \quad (5.19 n)$$

จากสมการ (5.6) และ (5.7) สมการ (5.18) สามารถจัดใหม่ให้อยู่ในรูป

$$(1 - T_1)(1 - T_2)(1 - T_3)^2 \exp 2\sigma n_c t = 1 \quad \dots\dots\dots (5.20)$$

สมการ (5.20) และ (5.18) มีความหมายว่า  $N_c$  ต้องมีค่าให้พอสำหรับกำลังขยายเพื่อทดแทนการสูญเสียของเลเซอร์ทั้งหมด

ถ้า  $W_p > W_{cp}$  ดังนั้นจำนวนโฟตอน  $q$  จะเพิ่มขึ้นจากจำนวนตอนเริ่มต้นเมื่อพิจารณาจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย แต่ถ้า  $W_p$  ไม่ขึ้นกับเวลา มันจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าคงตัว  $q_0$  ในที่สุด ค่าสมดุลนี้และค่าสมดุล  $N_0$  สำหรับจำนวนการกลับเป็นฝ่ายมาก หาได้จากสมการ (5.15) โดยจัดให้  $\dot{N} = \dot{q} = 0$  นั่นคือ

$$N_0 = 1/V_a B \tau_c = N_c \quad \dots\dots\dots (5.21 \text{ ก})$$

$$q_0 = \frac{V_a \tau_c}{2} \left( W_p(N_i - N_0) - \frac{N_i + N_0}{\tau} \right) \quad \dots\dots\dots (5.21 \text{ ข})$$

สมการ (5.21) ใช้อธิบายพฤษฎิกรรมคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์สามระดับ จากการสังเกต สมการ (5.21 ก) ได้ว่า เมื่อ  $W_p > W_{cp}$  เรายังคงมี  $N_0 = N_c$  คือจำนวนการผันกลับประชากรสมดุล  $N_0$  เท่ากับจำนวนการผันกลับประชากรวิกฤต  $N_c$  เสมอ เพื่อให้เข้าใจความหมายของปริมาณนี้ดียิ่งขึ้น เราสมมติว่าอัตราการยกระดับพลังงาน  $W_p$  มีค่าเพิ่มจากค่าวิกฤต  $W_{cp}$  เมื่อ  $W_p = W_{cp}$  เราได้  $N = N_0$  และ  $q_0 = 0$  แน่นอน ถ้าเราให้  $W_p > W_{cp}$  เราเห็นได้จากสมการ (5.21) ว่า ขณะที่  $N_0$  ยังคงอยู่ที่จำนวนการผันกลับประชากรวิกฤตเราได้  $q_0 > 0$  หรือ อีกนัยหนึ่งคือเลเซอร์ใช้การเพิ่มขึ้นของอัตราการยกระดับพลังงานเหนือค่าวิกฤต เพื่อทำให้จำนวนโฟตอนของมันเพิ่มขึ้น (คือพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าของมัน) มากกว่าจะใช้การเพิ่มขึ้นของจำนวนการผันกลับประชากรของมัน (คือพลังงานที่สะสมอยู่ในวัตถุ) ข้อสังเกตอีกอย่างคือ สมการ (5.21 ข) ด้วยความช่วยเหลือของสมการ (5.19) และ (5.21 ก) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น คือ

$$q_0 = \frac{V_a (N_i + N_0) \tau_c}{2s} \quad 1) \quad \dots\dots\dots (5.22)$$

$$\text{เมื่อ } x = W_p/W_{cp} \quad \dots\dots\dots (5.23)$$

ตามปกติปริมาณที่นำสนใจที่สุดคือ กำลังที่เลเซอร์ส่งผ่านจากการจอกแผ่นหนังหรือทั้งสองแผ่นนอกจากมีค่ามากกว่าจำนวนโฟตอน  $q_0$  ปริมาณนี้สามารถหาได้โดยแทนสมการ (5.13) ลงในสมการ (5.15 ข) และสังเกตด้วยว่า  $q/\tau_c$  คืออัตราของการสูญเสียโฟตอนเนื่องจาก การส่งผ่านกระจาย ดังนั้นกำลังที่ส่งออกคือ

$$P = \frac{\hbar \omega q}{\tau_u} \quad \dots \dots \dots (5.24)$$

ในที่นี่  $P$  คือ กำลังที่มาจากการจากทั้งสองแผ่น ดังนั้น กำลังที่ส่งออกมาจากการจากหนึ่งแผ่น คือ

$$P_1 = \frac{P\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad \dots \dots \dots (5.25)$$

สำหรับในสถานะคงตัว เราให้  $q = q_0$  ในสมการ (5.24) และด้วยความช่วยเหลือของสมการ (5.22)

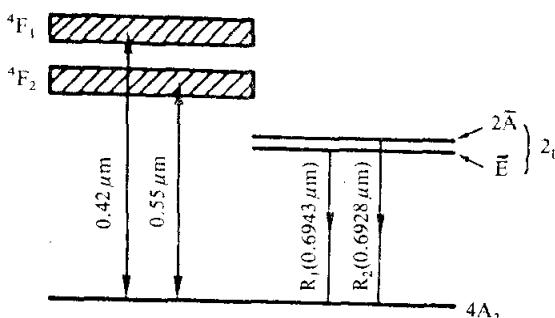
$$P = \frac{V_a(N_1 + N_0)\hbar\omega}{2\tau} \left( \frac{\gamma_u}{\gamma} \right) (x - 1) \quad \dots \dots \dots (5.26)$$

ในที่นี่เราได้ใช้สมการ (5.13) และ (5.11 ข) ด้วย ให้สังเกตว่า กำลังส่งออกเปรียบโดยตรงกับ  $(x - 1)$  และไม่ขึ้นกับความยาวไฟฟ้า  $d$  (อย่างไรก็ตามมันขึ้นกับความยาว  $\lambda$  ของวัตถุกิริยาโดยผ่านพจน์  $V_a$ )

โดยใช้ผลลัพธ์ที่หาได้ในตอนแรกเราสามารถให้สมการ (5.4) อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ด้วยความช่วยเหลือของสมการ (5.19 ก) และ (5.23) สมการ (5.4) สามารถเขียนเป็น  $\tau_3 \ll \tau/x$  ถ้าเลเซอร์อยู่เหนือขีดเริ่มซึ่งมี  $x > 1$  ดังนั้น

$$\tau_3 \ll \tau \quad \dots \dots \dots (5.4 \text{ ก})$$

ถ้าจำนวนอะตอมของระดับ 3 น้อยจนลงที่ต้องใช้เวลาเพื่อสั่นกว่าของระดับเลเซอร์ มาก

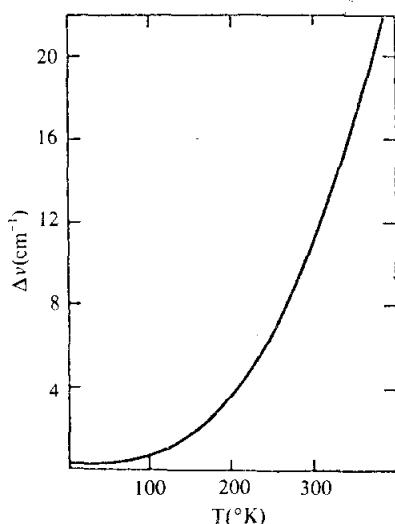


รูป 5.8 ระดับพัฒนาของทั้งหมด

ตัวอย่างที่สำคัญโดยเฉพาะของเลเซอร์สามระดับ คือ เลเซอร์ทับทิมคลื่นต่อเนื่องทับทิมคีออลีก  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เจือปนด้วย  $\text{Cr}^{3+}$  ไอโอน  $\text{Cr}^{3+}$  เข้าไปแทนตำแหน่งของไอโอน  $\text{Al}^{3+}$  บางตัวซึ่งทำให้ผลึกไส้ดูมีสีชมพู (ทับทิมชมพู) หรือสีแดง (ทับทิมแดง) ซึ่งเป็นไปตามความหนาแน่นของ  $\text{Cr}^{3+}$  ระดับพลังงานเลเซอร์ของไอโอน  $\text{Cr}^{3+}$  ทั้งหมดอยู่ในผลึก  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ระดับพลังงานที่น่าสนใจของกิริยาเลเซอร์แสดงในรูป 5.3 ทับทิมมีสองแบบพลังงานยกระดับ  ${}^4\text{F}_1$  และ  ${}^4\text{F}_2$  มีศูนย์กลางที่ความยาวคลื่น 0.55 ไมครอน (สีเขียว) และ 0.42 ไมครอน (สีม่วง) ตามลำดับ โดยปกติกิริยาเลเซอร์เกิดบนระดับเปลี่ยนแปลง  $\bar{E} \rightarrow {}^4\text{A}_2$  (เส้น  $R_1$ ,  $\lambda_1 = 0.6943$  ไมครอน) กิริยาเลเซอร์ยังสามารถหาได้บนระดับเปลี่ยนแปลง  $2\bar{A} \rightarrow {}^4\text{A}_2$  (เส้น  $R_2$ ,  $\lambda_2 = 0.6928$  ไมครอน) ซึ่งห่างของความถี่ระหว่างระดับ  $2\bar{A}$  และ  $\bar{E}$  คือ 29 ชัม.<sup>1</sup> (870 พันล้านเอิร์ตซ์) ทั้งสองระดับเชื่อมกันด้วยการลดระดับอย่างรวดเร็วโดยไม่แผรังสี ดังนั้นแม้ในระหว่างกิริยาเลเซอร์ จำนวนประชากรจะลดลงของระดับทั้งสองสัมพันธ์กันอย่างสอดคล้อง กำหนดได้ด้วยสมบูรณ์แบบนี้เพราเดือน ( $T = 300^\circ\text{K}$ )

$$\text{N}_2(2\bar{A})/\text{N}_2(\bar{E}) = 0.87 \quad \dots\dots\dots (5.27)$$

ในที่นี้  $\text{N}_2(\bar{E}) > \text{N}_2(2\bar{A})$  ในขณะนี้เป็นที่แน่นอนแล้วว่า ทำไม่ตามปกติเลเซอร์จึงชอบออกสัญญาณเส้น  $R_1$  อย่างไรก็ตามมันเป็นไปได้ที่จะใช้โพรงดิสเพอร์ซิฟ (dispersive cavity) ที่เหมาะสม (รูป 6.5 หรือ 6.20) และปรับค่ามัจฉะทั้งกำจัดการออกสัญญาณที่  $\lambda = \lambda_1$  และ



รูป 5.4 เปรียบเทียบความกว้างเส้น  $R_1$  ของทับทิมกับอุณหภูมิ [จากสกาวาล (Schawlow)]

ยอมให้ออสซิลเลตที่  $\lambda = \lambda_2$  อายุขัยของหั้งสองระดับ  $2\bar{A}$  และ  $\bar{E}$  ประมาณ  $3 \times 10^{-3}$  วินาที ที่  $T = 300^\circ\text{K}$  ส่วนที่  $T = 77^\circ\text{K}$  อายุขัยจะเพิ่มขึ้นเป็น  $4 \times 10^{-3}$  วินาที นี่แสดงว่าที่อุณหภูมิห้องอายุขัยได้รับการสนับสนุนจากหั้งการลดระดับโดยการแผ่รังสีและไม่แผ่รังสี ด้วยการประมาณที่ดี เส้น  $R_1$  คือรูปโลเรนท์เซียน (Lorentzian) มีความกว้าง (FWHM) ของ  $\Delta\nu_0 = 11$  ชม.<sup>-1</sup>  $\approx 330$  พันล้านเอิร์ตซ์ ( $T = 300^\circ\text{K}$ ) ความกว้างเส้นขึ้นกับอุณหภูมิมากเมื่อนำ入รูป 5.4 การแผ่ออกของเส้นและการลดระดับโดยไม่แผ่รังสีต่างเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของอิオน  $\text{Cr}^{3+}$  กับโฟโนน (phonon) ของโครงสร้าง กลไกการแผ่อออกของเส้นก็คือกลไกการแผ่ออกเนื่องจาก การชนกันตามที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 2.5 ดังนั้นเราจึงรู้แล้วว่าทำไม่ความกว้างเส้นจึงลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลง ความกว้างเส้นที่เหลืออยู่เมื่อ  $T \rightarrow 0$  จึงเกิดจากการแผ่อออกไม่เอกพันธ์ (นาม พลีมีไม่สมมำ่สมอที่ด้านต่าง ๆ ของ  $\text{Cr}^{3+}$ ) เวลาของการลดระดับจากแบบพลังงานยกระดับ "ไปยังระดับเลเซอร์บนรวดเร็วพอเพียง ( $\sim 10^{-7}$  วินาที) สำหรับใช้กับเงื่อนไข (5.4 ก) และเราสามารถสมมติว่าแบบพลังงานยกระดับว่างเปล่า อย่างไรก็ตามควรจะสังเกตด้วยว่าในกรณีของหั้บทิมมีความยุ่งยากมากกว่าที่พิจารณาในรูป 5.1 ความยุ่งยากเกิดจากความจริงที่ว่าระดับที่เราสนใจมันซ้ำซ้อนกันอยู่ ระดับพื้น  ${}^4\text{A}_2$  ความจริงเป็นระดับซ้ำซ้อนสีเข้ม ในขณะที่ระดับ  $2\bar{A}$  และ  $\bar{E}$  ต่างมีระดับซ้ำซ้อนสองชั้น สมการอัตราสำหรับกรณีสามารถลดรูปไปเป็นสมการ (5.1) โดยประมาณให้  $N_2(2\bar{A}) = N_2(\bar{E})$  จากสมการ (5.27) นี้ ถ้าได้ว่ามีความแม่นยำ 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยอมรับได้ เมื่อมองในแง่ของการประมาณในแบบต่าง ๆ เพื่อหาสมการอัตราภายในตัวการประมาณแบบนี้ เราสามารถพิจารณาสองระดับ  $2\bar{A}$  และ  $\bar{E}$  เมื่อนำกับเป็นระดับเดียว (เรียกเป็นระดับ  ${}^2\text{E}$ ) ซึ่งเป็นระดับซ้ำซ้อนสีเข้ม ถ้าเราให้  $N_2$  เป็นจำนวนประชากรอะตอมของระดับนี้ ดังนั้นเราจะมี

$$N_2(2\bar{A}) \approx N_2(\bar{E}) = N_2/2 \quad \dots\dots\dots (5.28)$$

ให้  $N_1$  เป็นจำนวนประชากรอะตอมของระดับ  ${}^4\text{A}_2$  เมื่อหั้งสองระดับ  ${}^4\text{A}_2$  และ  ${}^2\text{E}$  ต่างเป็นระดับซ้ำซ้อนสีเข้ม สมการ (2.133) ด้วยความช่วยเหลือของสมการ (2.136) สามารถเขียนเป็น (โดยใช้  $g = 4$ )

$$\dot{N}_2 = -Bq(N_2 - N_1) - N_2/\tau \quad \dots\dots\dots (5.29)$$

ในที่นี้เราให้  $Bq = W'/4$  เปรียบเทียบสมการ (5.29) กับสมการ (5.16) [ลงทะเบียนบีกระดับ  $W_p N_1$  จากสมการ (5.29)] แสดงว่าสมการ (5.1) ยังคงมีรูปแบบถูกต้อง ความหมายทางกายภาพของ  $\tau$  เห็นได้ทันทีจากสมการ (5.29) โดยให้  $q \rightarrow 0$  กล่าวคือ  $\tau$  เป็นอายุขัย

ของจำนวนประชากรอะตอมหั้งหมดในระดับ  ${}^2E$  ดังนั้นจากสมการ (5.28) มันจึงเป็นอยุํขัยของแต่ละระดับ  $2\bar{A}$  และ  $\bar{E}$  และเป็นของหั้งสองด้วย สมการสำหรับ B ยังคงกำหนดด้วยสมการ (5.11 ก) ซึ่งสมการนี้หาได้จากการเปรียบเทียบสมการ (5.10) และ (5.1 ค) และสมการเหล่านี้ยังคงใช้ได้กับกรณีนี้ ดังนั้นในการสรุปความสามารถล่ามได้ว่า สมการ (5.1) ยังคงใช้ได้เมื่อระดับ 1 และ 2 เป็นระดับชี้ช้อน ถ้าหากว่าระดับหั้งสองต่างมีการชี้ช้อนเหมือนกัน สำหรับการคำนวณเราจะสมมติให้เลเซอร์ทับทิมเหมือนกับแสดงในรูป 5.5 ความยาวของโปร่งไม่ระบุไว้อย่างชัดเจน เพราะว่าเมื่อเราป่นบอกเร็วเกินไป มันจะทำให้ไม่เข้ากับการคำนวณ เราสมมติว่ารัศมีของกระจากหั้งสอง ( $R_1 = R_2 = R$ ) ต่างทำให้ขนาดของจุด  $\omega_0 = 0.5$  มิลลิเมตร ถ้าโปร่งกำหนดเป็นแบบร่วมโพกัส ดังนั้นอาศัยจากสมการ (4.35) เรายังต้องการ  $d = 2.2$  เมตร อย่างไรก็ตามมันเป็นไปได้ที่จะได้ค่าขนาดของจุดเท่านี้ โดยไม่ต้องใช้โปร่งกำหนดยาวเช่นนี้โดยใช้กระจากแบบไม่ดึงวงห่างกันเล็กน้อยดังแสดงในบทที่ 4 เพื่อให้ได้ค่าประมาณสำหรับการสูญเสียภายใน  $\mathcal{T}_1$  เราจะต้องยอมรับค่าต่อไปนี้

(1) การสูญเสียโดยการกระจัดกระเจิงสำหรับความยาวของทับทิม ดังในรูป 5.5 อาจจะมีขนาด 5 เปอร์เซ็นต์ของการผ่านแต่ละครั้ง

(2) การสูญเสียน่องจากการกระจัดกระเจิงและการดูดกลืนในสารเคลือบกระจากตามปกติมีน้อยมาก (0.5 เปอร์เซ็นต์สำหรับกระจากเคลือบด้วยสารไดอิเลกตริกหลาย ๆ ชั้น)

(3) การสูญเสียน่องจากการเลี้ยวเบน เป็นค่าน้อยมาก การสูญเสียนี้สามารถคำนวณได้อย่างประมาณจากรูป 4.18 (หมวด TEM<sub>00</sub>) โดยคำนวณเลขจำนวนเฟรอด์เนลก่อน คือ  $N = a^2/d\lambda = a^2/\pi\omega_0^2$  เมื่อ  $a$  เป็นรัศมีของท่อนทับทิม ทำให้  $N = 1.4$  และ  $\gamma_2 = 10^{-5}$  ด้วยค่าเหล่านี้การสูญเสียภายในหั้งหมดของ  $\mathcal{T}_1 = 5 \times 10^{-2}$  เรายังสมมติอีกว่าความหนาแน่น Cr<sup>3+</sup> เป็น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ทับทิมชมพู) ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนประชากรหั้งหมดของ  $N_1 = 1.6 \times 10^{19}$  Cr<sup>3+</sup>/ไอออน/ซม.<sup>3</sup> และสมมติให้เลเซอร์ออกซิลเลตที่ความถี่  $\omega = \omega_0$  ซึ่งสอดคล้องกับยอดของเส้น  $R_1$  ดังนั้น  $\sigma = 2.5 \times 10^{-20}$  ซม.<sup>2</sup> สรุปเราได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

$$\gamma_1 = -\ln(1 - T_1) = 4.9 \times 10^{-2} \quad l = 2.5 \text{ ซม.}$$

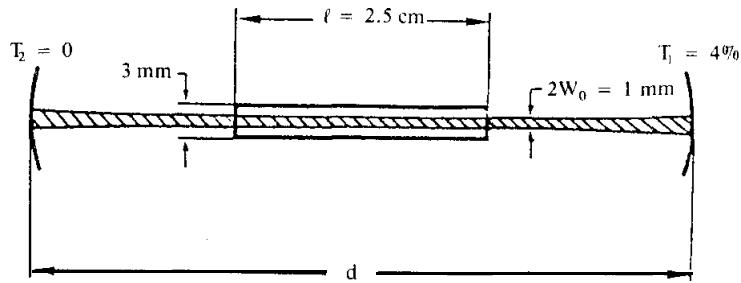
$$\gamma_1 = -\ln(1 - T_1) = 3.94 \times 10^{-2} \quad V_a = \pi\omega_0^2 l / 4 = 0.5 \times 10^{-2} \text{ ซม.}^3$$

$$\gamma_2 = -\ln(1 - T_2) = 0 \quad \sigma = 2.5 \times 10^{-20} \text{ ซม.}^2$$

$$\gamma_u = (\gamma_1 + \gamma_2)/2 = 2 \times 10^{-2} \quad \tau = 3 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_u = 6.9 \times 10^{-2} \quad N_1 = 1.6 \times 10^{19} \text{ Cr}^{3+}/\text{ไอออน/ซม.}^3$$

$$\hbar\omega = 2.8 \times 10^{-19} \text{ J}$$



รูป 5.5 รูปถักชนวนไฟฟ้าที่เป็นไปได้สำหรับเลเซอร์ทันทุมคลื่นต่อเนื่อง

จากสมการ (5.18) ในขนะนี้ เราได้

$$N_c = 1.1 \times 10^{18} \text{ Cr}^{3+} \text{ ไอโอน/ซม.}^3 \quad \dots \dots \dots (5.30)$$

ดังนั้น  $N_c/N_t = 6.9 \times 10^{-2}$  นั่นคือสมการ (5.19 ก) ประมาณได้ถูกต้อง และเราได้

$$W_{c0} = 1/s = 330 \text{ วินาที}^{-1} \quad \dots \dots \dots (5.31)$$

และจากสมการ (5.25) และ (5.26)

$$P_i = 1.1(x-1) \quad (5.32)$$

ในที่นี้กำลังแสดงในหน่วยของวัตต์ ถ้าท่อนทันทิมยกระดับพลังงานตัวยหลอดไฟประกอบด้วยเล็กความดันสูงชนิด A ดังนั้นสมการ (5.31) และ (3.17) เรายกเว้าความเข้มวิกฤตกำหนดด้วย  $I_c = 1.1 \times 10^3 \text{ วัตต์/ซม.}^2$  สำหรับหลอดไฟยาว 2.5 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 มม. ดังนั้น กำลังวิกฤตเป็น  $P_c = 800 \text{ วัตต์}$  ถ้าหลอดไฟเปล่งแสงของมันเท็จหมดออกมากที่ยอดของแทบพลังงาน  $^4\text{F}$  [กรณีที่นำวยประโยชน์มากที่สุด (optimum case)] กำลังวิกฤตจากสมการ (3.18) จะเป็น  $P_{c0} = 130 \text{ วัตต์}$

### 5.3.2 เลเซอร์สีระดับ

ต่อไปเราจะใช้สมการ (5.17) หาสมการสำหรับจำนวนการกลับเป็นฝ่ายมากวิกฤต |กำหนดให้  $\zeta = 0$  ในสมการ (5.17 ข) และใช้สมการ (5.11)| เราได้

$$N_c = \frac{1}{BV_a \tau_c} = \frac{\gamma}{\sigma l} \quad \dots \dots \dots (5.33)$$

มันดูเหมือนกับสำหรับเลเซอร์สามระดับ อย่างไรก็ตาม อัตราการยกระดับพลังงานวิกฤตกำหนดด้วย

$$W_{cp} = N_c/(N_t - N_c)\tau \quad \dots\dots\dots (5.34)$$

ซึ่งต่างจากค่าสำหรับเลเซอร์สามระดับ ให้สังเกตว่าตามปกติรวม  $N_c \ll N_t$  สมการ (5.34) สามารถประมาณได้เป็น  $W_{cp} = N_c/N_t\tau$  และสามารถเปรียบเทียบกับสมการ (5.19 ก) อัตราการยกระดับพลังงานวิกฤตสำหรับเลเซอร์สี่ระดับมีค่าน้อยกว่าด้วยตัวร่วม  $N_c/N_t$  ของเลเซอร์สามระดับ (ซึ่งค่าอื่น ๆ มีค่าเท่ากัน)

จำนวนโพตอน  $q_0$  สำหรับกรณีคลื่นต่อเนื่องหาได้จากสมการ (5.17 ก) โดยกำหนดให้  $N = 0$  และ  $N = N_0 = N_c$  เราได้

$$q_0 = V_a \tau_c \left( W_p (N_t - N_0) - \frac{N_0}{\tau} \right) = (V_a N_0) \frac{\tau_c}{\tau} (x - 1) \quad \dots\dots\dots (5.35)$$

จากการใช้สมการ (5.13), (5.16), (5.33) และ (5.35) เราพบว่ากำลังส่งออกจากการจักทั้งสอง กำหนดด้วย

$$P = \frac{q_0 \hbar \omega}{\tau_u} = \left( \frac{V_a \hbar \omega}{\sigma \ell \tau} \gamma_u \right) (x - 1) \quad \dots\dots\dots (5.36)$$

และกำลังส่งออกจากการเพียงแผ่นเดียว (กระจาย 1) คือ

$$P_1 = \frac{P \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad \dots\dots\dots (5.37)$$

มันตั้งขึ้นมาเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขต่าง ๆ ภายใต้ข้อสมมติฐานในหัวข้อ 5.2.2 (คือ  $N_3 = N_1 = 0$  ดูรูป 5.2) เพื่อให้ถูกต้องยิ่งขึ้น เงื่อนไขจะต้องเขียนเป็น  $(N_3, N_1) \ll N_2$  เราสามารถว่ามีเงื่อนไขอะไรที่หมายถึง  $N_3 \ll N_2$  ถ้าเราให้  $\tau_3$  เป็นอายุชัย (ที่แร้งสีและไม่แร้งสี) ของระดับ 3 เราจะได้ (ในสภาวะคงตัว)  $N_3 = W_p \tau_3 N_g = W_p \tau_3 (N_t - N_2)$  เมื่อ  $N_g$  คือ จำนวนประชากรอะตอมของสถานะพื้น เมื่อ  $W_p = x W_{cp} = x N_c / (N_t - N_c) \tau$  และ  $N_c = N_2$  เราเห็นได้ว่า เพื่อให้  $N_3 \ll N_2$  เราต้องมี  $\tau_3 \ll \tau/x$  นี่หมายความว่าสมการ (5.4 ก) เป็นเงื่อนไข ( $x > 1$ ) ที่ต้องการอันหนึ่ง ต่อไปเรามาดูว่าเงื่อนไขอะไรที่หมายถึง  $N_1 \ll N_2$  เราเขียนสมการอัตราสำหรับระดับ 1 เป็น

$$\dot{N}_1 = Bq(N_2 - N_1) + \frac{N_2}{\tau} = \frac{N_1}{\tau} \quad \dots\dots\dots (5.37 \text{ ก})$$

เมื่อ  $\tau_1$  คือ อายุชัยของระดับ 1 ในสภาวะคงตัว (คือ  $\dot{N}_1 = 0$  และ  $q = q_0$ ) เราได้

$$N_1 = N_2 \frac{Bq_0 + (1/\tau)}{Bq_0 + (1/\tau_1)} = \frac{N_2(x\tau_1/\tau)}{1 + (x - 1)(\tau_1/\tau)} \quad \dots\dots\dots (5.37 \text{ ก})$$

ในที่นี้เราได้ใช้สมการ  $Bq_0\tau = (x - 1)$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (5.33) และ (5.35) ต่อไปเราจัดให้เป็นเงื่อนไขว่า  $N_1 \ll N_2$  จากสมการ (5.37 ข) เราหาได้ว่า

$$\tau_1 \ll \tau \quad \dots\dots\dots(5.37 \text{ ค})$$

ซึ่งไม่ขึ้นกับ  $x$  ให้สังเกตว่ากิริยาเลเซอร์จะเกิดขึ้นนั้นเราต้องมี  $N_1 < N_2$  นั่นคือ สมการ (5.37 ค) ต้องการว่า

$$\tau_1 < \tau \quad \dots\dots\dots(5.37 \text{ ค})$$

ถ้าเงื่อนไขนี้ไม่จริง การเปลี่ยนแปลงไม่สามารถเกิดกิริยาเลเซอร์ได้ (สภาวะคงตัว) ตัวอย่างที่ตรงกับกรณีของเลเซอร์สีระดับคือ  $\text{Nd}^{3+}$  ในผลึกของ  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  [ผลึกนี้เรียกว่า YAG ย่อมาจาก ยิตเทียม อัลูมิเนียม การ์เนต (yttrium aluminum garnet)] ไอโอดิน  $\text{Nd}^{3+}$  เข้าไปแทนตำแหน่งของไอโอดิน  $\text{Y}^{3+}$  บางตัว แผ่นภูมิระดับพลังงานอย่างง่ายสำหรับ  $\text{Nd} : \text{YAG}$  ได้แสดงในรูป 5.6 การเปลี่ยนแปลงเลเซอร์ ( $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ ) สอดคล้องกับความยาวคลื่น  $\lambda = 1.06$  ไมครอน (ไกล ๆ คลื่นใต้แดง) การเปลี่ยนแปลง  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$  สอดคล้องกับความถี่  $v = 6 \times 10^{13}$  เฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องเรามี  $hv >> KT$  ตั้งนั้นระดับ  $^4\text{I}_{11/2}$  ว่างเปล่าในขณะอุณหภูมิสมดุล และ  $\text{Nd} : \text{YAG}$  สามารถทำงานเหมือนกับเลเซอร์สีระดับ การเปลี่ยนแปลงเลเซอร์มีรูปร่างเด็น เป็นลอนเรนท์เซียน ความกว้างเป็น  $\Delta\nu_0 = 6.5 \text{ ซม.}^{-1} = 195 \text{ พันล้านเฮิรตซ์}$  ที่  $T = 300^\circ\text{K}$  อายุขัยของระดับเลเซอร์เป็น  $\tau = 0.23 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$

สำหรับการคำนวณเราจะพิจารณาระบบเลเซอร์ที่แสดงในรูป 5.7 เราสมมติว่าความหนาแน่นของ  $\text{Nd}^{3+}$  มีเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ทางอะตอม (ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนประชากรของสถานะพื้น  $N_g = 6 \times 10^{19} \text{ Nd}^{3+}/\text{ไอโอดิน/ซม.}^3$ ) และสมมติให้การสูญเสียภายในทั้งหมดต่อการผ่านหนึ่งครั้ง  $\gamma_i = 2 \times 10^{-2}$  เราเลือกให้ขนาดของจุด  $\omega_0 = 0.5 \text{ ม.m.}$  และสมมติว่าเลเซอร์ออกสัญญาณที่การเปลี่ยนแปลงสูงสุด ดังนั้น  $\sigma = 8.8 \times 10^{-19} \text{ ซม.}^2$  ซึ่งสรุปได้ว่า

$$\gamma_i = 2 \times 10^{-2} \quad \ell = 2.5 \text{ ซม.}$$

$$\gamma_1 = -\ln(1 - T_1) = 6 \times 10^{-3} \quad V_a = \pi w_0^2 \ell / 4 = 0.5 \times 10^{-2} \text{ ซม.}^3$$

$$\gamma_2 = 0 \quad N_g = 6 \times 10^{19} \text{ Nd}^{3+}/\text{ไอโอดิน/ซม.}^3$$

$$\gamma_u = (\gamma_1 + \gamma_2)/2 = 3 \times 10^{-3} \quad \sigma = 8.8 \times 10^{-19} \text{ ซม.}^2$$

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_u = 2.3 \times 10^{-2} \quad \tau = 0.23 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

$$\hbar\omega = 1.83 \times 10^{-19} \text{ จูล}$$

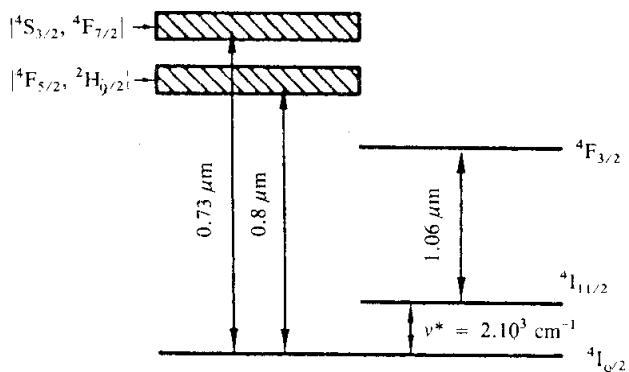
จากสมการ (5.33) เราได้

$$N_c \approx 10^{16} \text{ Nd}^{3+} \text{ ไออ่อน/cm}^3 \quad (5.38)$$

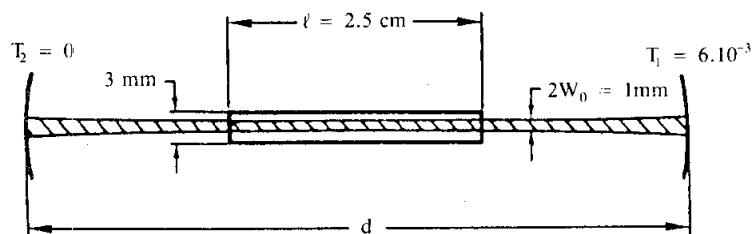
ดังนั้น  $N_c/N_g = 1.65 \times 10^{-4}$  ทำให้

$$W_{cp} = 0.72 \text{ วินาที}^{-1} \quad \dots\dots\dots (5.39)$$

ให้สังเกตว่า  $W_{cp}$  ในกรณีมีค่า้อยกว่ากรณีของทับทิม [สมการ (5.31)] มากที่เดียว ถ้าท่อวัตถุยกระดับพลังงานด้วยหลอดไฟ  $W - I_2$  ดังนี้จากรูป 3.9 เรายาความเข้มข้นวิกฤต ได้  $I_c = 65 \text{ วัตต์/cm}^2$  ถ้าใส่ของหลอดทั้งสูตรมีความยาว 2.5 cm. และเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 mm. เราได้



รูป 5.6 ระดับพลังงานของ Nd : YAG อย่างง่าย



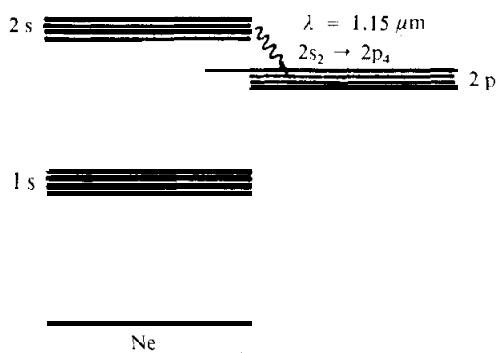
รูป 5.7 แสดงโครงสร้างของไฟรังที่เป็นไปได้สำหรับเลเซอร์ Nd : YAG คลื่นต่อเนื่อง

$$P_c = 200 \text{ วัตต์} \quad \dots\dots\dots (5.40)$$

ให้สังเกตว่าสำหรับสภาวะที่อ่อนน้อมโยชน์มากที่สุด เราหาได้จากสมการ (3.16) แล้วว่า  $I_{c0} = 0.38 \text{ วัตต์/cm}^2$  เพราะฉะนั้น  $P_{c0} = 1.2 \text{ วัตต์}$  ค่านี้สำหรับกำลังวิกฤตแล้ว ถือว่าเป็นค่าต่ำมาก จึงทำให้เรามีความพยายามที่จะพิจารณาปรับปรุงหลอดไฟที่ให้ผลการยกระดับพลังงาน Nd : YAG มากยิ่งขึ้น กำลังส่องออกจากการ (5.36) และ (5.37) พบว่า

$$P_1 = P = 5(x-1) \quad \dots\dots\dots (5.41)$$

ในที่นี้กำลังมีหน่วยเป็นมิลลิวัตต์ ให้สังเกตว่าจากรูป 3.9 ค่ามากที่สุดของ  $W_p$  (คือค่าที่สอดคล้องกับอุณหภูมิสูงที่สุดของไส้หลอด  $W$  ที่  $T = 3200^\circ\text{K}$ ) คือ  $W_{pm} = 50 \text{ วินาที}^{-1}$  ดังนั้น  $X_m = 70$  และ  $P_{1m} = 340 \text{ มิลลิวัตต์}$  ถ้าเลเซอร์ทั้งหมดออกสัญญาณตามภาคตัดขวางของท่อนวัตถุ (การออกสัญญาณตามขวางหลายหมวด) กำลังจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ขนาดประมาณอีกหนึ่งเท่า



รูป 5.8 แสงแผนภูมิระดับพลังงานของเมื่อตอนท่องจ่าย

อีกตัวอย่างหนึ่งของเลเซอร์สีระดับ (ตัวอย่างที่สอง) เรายารณาเลเซอร์สีเลียม-นีโอน ( $\text{He}-\text{Ne}$  laser) ออกสัญญาณตามระดับ  $2s_2$  และระดับ  $2p_4$  อายุขัยของระดับ  $2s_2$  คือ  $\tau = 10^{-7} \text{ วินาที}$  ในขณะที่อายุขัยของระดับ  $2p_4$  มีขนาดประมาณสั้นกว่า ดังนั้นเงื่อนไขสมการ (5.37) จึงเป็นที่ยอมรับได้ และเลเซอร์ทำงานได้อย่างชัดเจ็บบนแผนภูมิสีระดับ ความกว้างสั้นของการเปลี่ยนแปลงเลเซอร์ (เนื่องจากการแผ่ออกรอบเปลือก) คือ  $\Delta v^* = 9 \times 10^8 \text{ เฮิรตซ์}$  ค่าประมาณภาคตัดขวางสำหรับการเปลี่ยนแปลงสามารถหาได้ถ้าเรา把它ตามข้อมูลติดตาม ต่อไปนี้

- (1) การเปลี่ยนแปลง  $2s_2 \rightarrow 2p_4$  เกิดขึ้นโดยการแผ่รังสีอย่างเดียว
- (2) การลดระดับจากระดับ  $2s_2$  เกิดขึ้นผ่านการเปลี่ยนแปลง  $2s_2 \rightarrow 2p_4$  เท่านั้น จากข้อมูลติดตามเหล่านี้ทำให้กำหนดอายุขัย การเปลี่ยนแปลงตามปกติวิสัย  $\tau_{sp}$  ของการเปลี่ยนแปลง  $2s_2 \rightarrow 2p_4$  เท่ากับอายุขัยทั้งหมดของระดับ  $2s_2$  และจากสมการ (2.140) (มี  $\phi = 1$  และ  $\Delta\omega = 0$ ) และ (2.118) เราได้ยอดของภาคตัดขวาง

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{4} \cdot \frac{0.939}{\Delta\omega_0^* \tau} \quad \dots\dots\dots(5.41\text{ n})$$

ซึ่งให้ค่า  $\sigma = 5.5 \times 10^{-12}$  ซม.<sup>2</sup> สมมติให้ความยาวของวัตถุกิริยาเป็น 1 เมตร มีการสูญเสียภายในน้อยจนสามารถถะทิ้งได้ และกำลังส่งออกสูญเสียไปเป็น  $\gamma_u = 10^{-2}$  และสมมติอีกว่าให้เลเซอร์ออสซิลเลตบนหมวด TEM<sub>00</sub> มีขนาดของจุด  $\omega_0 = 0.5$  มม. ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ เรายกจากสมการ (5.33) ว่า

$$N_c = 2 \times 10^7 \text{ อะตอมนีโอน/ซม.}^3 \quad \dots\dots\dots(5.41\text{ u})$$

ให้สังเกตว่า ค่านี้มีขนาดน้อยกว่าประมาณ  $5 \times 10^8$  เท่าของกรณี Nd : YAG ทั้งนี้ เพราะว่าภาคตัดขวางสำหรับนีโอน : Ne มากกว่าของ Nd<sup>3+</sup> ดังนั้น จากสมการ (5.36) เราพบว่า

$$P \approx 6(x - 1) \quad \dots\dots\dots(5.41\text{ v})$$

ในที่นี้กำลังมีหน่วยเป็นไมโครวัตต์ (microwatts) สำหรับค่าของ  $x$  กำลังที่หาได้มีค่าน้อยกว่าสำหรับกรณี Nd : YAG อย่างไรก็ตามเนื่องจาก  $N_c$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้นอัตราการยกระดับขึ้นเริ่มจึงมีการเพิ่มขึ้นต่ำมากด้วย ความจริงถ้าเราสมมติว่าความดันบางส่วนของนีโอนเป็น 0.1 ทอร์ร์ (Torr) เราจะมี  $N_i = 3.5 \times 10^{15}$  อะตอม Ne/ซม.<sup>3</sup> และจากสมการ (5.34) และ (5.41 u) เรายกจาก

$$W_{cp} = 0.06 \text{ วินาที}^{-1} \quad \dots\dots\dots(5.41\text{ s})$$

เมื่ออัตราการยกระดับพลังงานวิกฤตมีค่าน้อยมาก เราสามารถเข้าถึงเงื่อนไขที่ว่า  $x \gg 1$  ได้ง่าย และด้วยเหตุนี้จึงหากำลังส่งออกได้มากกว่าระดับไมโครวัตต์ อย่างไรก็ตาม การคำนวณยังมีความยุ่งยากเนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้ คือ

(1) การตีนตัวของกลุ่มอิเล็กตรอนพร้อมทั้งการชนกันที่อภินากับอะตอมอีเลี่ยม ทำให้อัตราการยกระดับพลังงานเพิ่มขึ้น

(2) การคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนไม่ใช่หาได้ง่าย เนื่องจากมันขึ้นอยู่กับความดันบางส่วนของทั้งอีเลี่ยมและนีโอน

(3) ที่ความหนาแน่นกระแสสูง ๆ ขั้นตอนอื่น ๆ มีแนวโน้มทำให้อัตราการยกระดับลดลง

โดยเฉพาะเหตุผลข้อหลังนี้  $W_p$  ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นกระแส แต่มันมีการเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดแล้วค่อยลดลง ดังนั้นมันจึงมีกำลังมากที่สุด (ต่อหน่วยความยาว) ซึ่งสามารถหาได้จากເລເຊອຣ්ສීලේຍມන්ອອນ จากตัวอย่างที่ได้พิจารณาข้างบน กำลังนี้มีขนาดของ 1 ພිල්විට්‍ර දັ່ງນັ້ນจากสมการ (5.41 ค) ค่าของ  $x$  มากที่สุด คือ 150

### 5.3.3 กำลังส่องออกที่อ่านวิประโยชน์มากที่สุด

ที่ค่าແນ່ນອនค่าหนึ่งของอัตราการยกระดับมีบางค่าของกาส่งผ่านกระจก (คือค่าของ  $\gamma_u$ ) ซึ่งทำให้กำลังส่องออกมีค่ามากที่สุด เหตุผลก็คือว่าในขณะที่  $\gamma_u$  เพิ่มขึ้น การส่งผ่านออกมาย่อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความเข้มแสงภายในโพรง (คือ  $q_0$ ) กลับลดลง ในการหากำลังส่องผ่านที่อ่านวิประโยชน์มากที่สุด เราสามารถใช้ทั้งสมการ (5.26) หรือสมการ (5.36) และกำหนดเงื่อนไขขึ้นว่า  $dP/d\gamma_u = 0$  และเราทราบแล้วว่าทั้ง  $x$  และ  $N_0$  ต่างก็เป็นพิงก์ชันของ  $\gamma_u$  ด้วย

บัญหาเนี้ยเป็นบัญหาธรรมชาติโดยเฉพาะสำหรับເລເຊອຣ්ສීරະຕັບ ถ้าสมการ (5.34) ประมาณได้เป็น  $W_{cp} = N_c/N_i \tau$  และใช้สมการ (5.33) ดังนั้นสมการ (5.36) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P = \left( \frac{V_a \hbar \omega \gamma_i}{\sigma \hbar t} \right) S \left( \frac{X_{min}}{1+S} - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (5.42)$$

เมื่อ  $S = \gamma_u/\gamma_i$  และ  $X_{min} = W_p \tau N_i \sigma t / \gamma_i$  ปริมาณ  $X_{min}$  คือ อัตราส่วนระหว่าง อัตราการยกระดับที่แท้จริง ( $W_p$ ) ต่ออัตราการยกระดับต่ำสุด (ใช้เมื่อการสูญเสียเป็นค่าต่ำสุด คือ  $\gamma_u = 0$ ) จากการกำหนดเงื่อนไข  $dP/dS = 0$  เราสามารถเห็นได้จากสมการ (5.42) ว่า ค่าที่อ่านวิประโยชน์มากที่สุดของ  $S$  คือ

$$S_{op} = (X_{min})^{\frac{1}{2}} - 1 \quad \dots \dots \dots (5.43)$$

และกำลังส่องออกที่อ่านวิประโยชน์มากที่สุด คือ

$$P_{op} = \left( \frac{V_a \hbar \omega \gamma_i}{\sigma \hbar t} \right) \left| (X_{min})^{\frac{1}{2}} - 1 \right|^2 \quad \dots \dots \dots (5.44)$$

เรามาพิจารณากรณีของ Nd : YAG อีกครั้งหนึ่ง ถ้าเรามมติว่าท่อนวัตถุยกระดับด้วยอัตราสูงสุดเมื่อเทียบกับไส้ทั้งสตeten (ดูรูป 3.9) เราจะได้  $X_{min} = 120$  และจากสมการ (5.43) เราได้  $(\gamma_u)_{op} \approx 10\gamma_i$  และจากสมการ (5.44) เราจะได้  $P_{op} \approx 3.5$  ວັດຕົກ (ໃໝ່ມາດ TEM<sub>00</sub>)

สำหรับกรณีแลเซอร์สามระดับ การคำนวณเราใช้สมการ (5.26), (5.18) และ (5.19) แต่บางครั้งข้อมูลน่าเบื่อ และเราได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าที่อำนาจประโยชน์มากที่สุดของ  $S$  กำหนดด้วย

$$S_{op} = -1 + \left| \frac{1}{y} \cdot \frac{X_{min} - (1-y)/(1+y)}{X_{min} + (1-y)/(1+y)} \right|^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (5.45)$$

ในที่นี้ปริมาณ  $y = (N_c)_{S=0}/N_i$  โดยปกติมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมาก ๆ ( $y \approx 4.9 \times 10^{-2}$  ในตัวอย่างของทันทิมข้างบน)

ค่าของกำลังลดลงเป็นผลของการทำงานที่ไม่อำนวยประโยชน์ กลยุทธ์เป็นเงื่อนไขที่สำคัญโดยเฉพาะเมื่อทำงานใกล้กับขีดเริ่มมากเกินไป (คือเมื่อ  $X_{min} = 1$ ) อย่างไรก็ตาม เมื่อทำงานสูงกว่าขีดเริ่มความสามารถใช้ค่า  $S = 1$  (คือ  $y_u = y_i$ ) เสมอ มากกว่าใช้ค่าที่อำนาจประโยชน์ ดังนั้นกำลังที่ลดลงเปรียบเทียบกับค่ากำลังที่อำนาจประโยชน์มากที่สุด มีค่าน้อยกว่ากัน 2 เท่า เมื่อ  $y_u = y_i$  ครึ่งหนึ่งของกำลังทั้งหมดทำให้มีค่าเป็นกำลังสองออกได้โดยง่าย

#### 5.3.4 การจำกัดให้เป็นแสงสีเดียวและการดึงความถี่

ความกว้างเส้น (คือการมีแสงสีเดียว) ของลำแสงสองออก พิจารณาได้ด้วยคลื่นรับกวนสามชนิดดังต่อไปนี้

- (1) คลื่นรับกวนของการแผ่รังสีวัตถุดำในโพรงแลเซอร์
- (2) คลื่นรับกวนที่เกิดจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย (คือเกิดขึ้นจากจุดศูนย์มีการบ่ายตามแน่นอนอยู่เสมอ) และ
- (3) คลื่นรับกวนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนและการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อนของโพรง

มันเป็นไปไม่ได้ที่จะหาสมการสำหรับการจำกัดให้เป็นแสงสีเดียว โดยการวิเคราะห์บนพื้นฐานของการประมาณสมการอัตรา (หรือแม็บพื้นฐานของการปฏิบัติแบบกึ่งตั้งเดิม ทั่วไปมีในบทที่ 7 ก็ตาม) ทั้งนี้เนื่องจากว่าพฤติกรรมของการเปล่งแสงตามปกติวิสัยของตัวมันเอง ไม่สามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องด้วยการปฏิบัติแบบกึ่งตั้งเดิม ดังนั้นเราจะจึงจำกัดเพียงอั้งผลลัพธ์สองสามอย่าง

ที่ความถี่แสงคลื่นรับกวนเกิดจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย มีอัตราพจน์น้อยกว่าความถี่ที่เกิดเนื่องจากการแผ่รังสีวัตถุดำ คลื่นรับกวนเนื่องจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย ความจริงเกิดจากพลังงานจุดศูนย์ซึ่งให้จำนวนโฟตอนเฉลี่ยในหมวดได ๆ เป็น  $\langle q \rangle = \frac{1}{2}$  (ดูรูป 2.9) ใน

ทางตรงกันข้ามคลื่นรบกวนจากการแผ่รังสีวัตถุค่าให้ผลลัพธ์เป็นจำนวนไฟฟ์ตอนเนลี่ย ๆ กำหนดด้วยสมการ (2.19) และที่ความถี่แสงมีค่าน้อยกว่า  $\frac{1}{2}$  มา ก [ดูจากสมการ (2.19)] คลื่นรบกวนดังกล่าวในข้อสามารถคำนวณได้โดยไม่ต้องทราบเงื่อนไขเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่แท้จริง ถ้าเราพิจารณาคลื่นรบกวนจากการเปลี่ยนแสงตามปกติวิสัยเพียงอย่างเดียว มันอาจจะสร้างการแผ่ออุกทางตำแหน่งของกำลังส่องออกกับรูปร่างเส้นแบบบลอเรนท์เชียนได้ ดังนั้น ความกว้าง (FWHM) ของกำลังส่องออกกำหนดด้วย

$$\Delta\omega_{osc} = \frac{4\pi\omega(\Delta\omega_c)^2}{P} \quad (5.46)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่ของหมวดออสซิลเลต และ  $P$  คือ กำลังส่องออก (สมมติให้การสูญเสียภายในสามารถ忽略ทิ้งได้เมื่อเทียบกับการสูญเสียที่ส่องออกไป  $\gamma_0$ ) ปริมาณ  $\Delta\omega_c$  เป็นความกว้างของความถี่หมวดโพรง (FWHM) และกำหนดด้วย [ดูสมการ (7.84)]  $\Delta\omega_c = 1/\tau_c$  ในที่นี้  $\tau_c$  คือ เวลาที่ใช้ไปในการขยายในโพรงซึ่งกำหนดด้วยสมการ (5.11 ช) แทน ตัวอย่าง เช่น สำหรับ  $\gamma = 2 \times 10^{-2}$ ,  $d = 1$  เมตร,  $P = 1$  มิลลิวัตต์ และ  $\hbar\omega = 2 \times 10^{-19}$  จูล (แสงสีแดง) เราได้  $\Delta\omega_c/2\pi = 1$  เมกะเอิรตซ์ ดังนั้น  $(\Delta\omega_{osc}/2\pi) = 5 \times 10^{-3}$  เอิรตซ์ มันจะสอดคล้องกับ  $\Delta\omega_{osc}/\omega_0 = 10^{-17}$  เพื่อรักษาให้ความถี่ของโพรงกำหนดที่จริง ๆ ภายใต้ขีดจำกัดนี้ เราสามารถประมาณว่าของโพรงที่ต้องการใช้ จากสมการ (4.3) เรายืนว่า (สำหรับ  $n = ค่าคงที่$ )

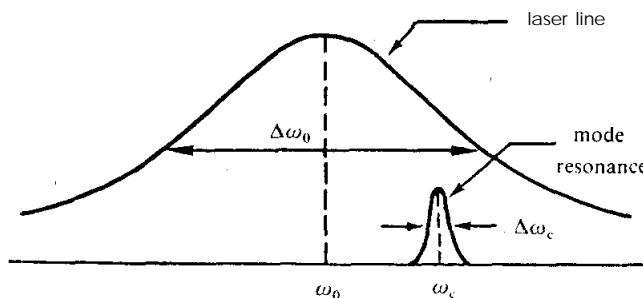
$$A d / d = \Delta\omega_{osc}/\omega_0 \quad (5.47)$$

เมื่อ  $\Delta d = 10^{-17}$ ,  $d = 10^{-7}$  Å เพื่อรักษาค่าให้อยู่ภายใต้ขีดจำกัด  $10^{-17}$  ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความยาวของโพรงจะต้องให้มีค่าน้อยกว่าขนาดของอะตอม ( $1$  Å) มากอยู่ตลอดเวลา นี่แสดงว่าการจำกัดให้เป็นแสงสีเดียวในทางปฏิบัติทำได้โดยการเปลี่ยนความยาวของโพรง ซึ่งได้จากการสั่นสะเทือนหรือผลของการร้อน โดยเฉพาะเมื่อความมั่นคงและสภาพความมั่นคงของความถี่ยังคงสามสิบเอิรตซ์ วัดได้สองสามวินาที คือ  $(\Delta\omega_{osc}/\omega_0) = 10^{-14}$  ภายใต้เงื่อนไขตามปกติและใช้วิทยาการทำให้ความถี่มั่นคงยิ่งขึ้น มันเป็นไปได้ที่จะหาความมั่นคงของความถี่ได้นาน ๆ ด้วยเหตุนี้จึงมีสภาพแสงสีเดียวของ  $10^{-12} \rightarrow 10^{-13}$

ผลลัพธ์อื่นที่น่าสนใจซึ่งไม่สามารถอธิบายด้วยการปฏิบัติของสมการอัตราตอนต้น ได้ คือ การดึงความถี่ การดึงความถี่เกิดขึ้นเมื่อความถี่ของหมวดโพรงไม่ได้เกิดร่วมกับศูนย์กลางความถี่  $\omega_0$  ของการเปลี่ยนแปลงอะตอม การอธิบายผลนี้เราจะอ้างถึงรูป 5.9 ซึ่งเป็นหั้ง

การเปลี่ยนแปลงของอะตอมและความถี่หมวดของมวลดั้วยอดตามปกติเรามี  $\Delta\omega_0 >> \Delta\omega_c$  (ในตัวอย่างที่แล้ว  $\Delta\omega_c/2\pi = 1$  เมกะเฮิรตซ์ ในขณะที่  $\Delta\omega_0/2\pi$  อาจมีช่วงจาก 1 พันเมกะเฮิรตซ์สำหรับเลเซอร์ก้าชจนถึงสองสามร้อยพันเมกะเฮิรตซ์สำหรับเลเซอร์ของแข็ง) มันสามารถแสดงได้ว่า (ดูหัวข้อ 7.4) ถ้า  $\omega_c \neq \omega_0$  ดังนั้น การօอสซิลเลตของเลเซอร์จะเกิดขึ้นที่บางความถี่ซึ่งอยู่ระหว่าง  $\omega_0$  และ  $\omega_c$  เรากล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอะตอมดึงให้ความถี่օอสซิลเลตเข้าใกล้คุณบัญญาลงของมันมากขึ้น การดึงเป็นเส้นตรงถึงอันดับแรกสำหรับสัมประสิทธิ์ไม่เอกพันธุ์และเป็นไปอย่างรุนแรงสำหรับสัมประสิทธิ์เอกพันธุ์ กล่าวคือ ความถี่การօอสซิลเลตกำหนดด้วยน้ำหนักเฉลี่ยของสองความถี่  $\omega_0$  และ  $\omega_c$  เมื่อน้ำหนักของทั้งสองแบ่งโดยตรงกับส่วนกลับของความกว้างเส้น ดังนั้นเราได้

$$\omega = \frac{\omega_0/\Delta\omega_0 + \omega_c/\Delta\omega_c}{1/\Delta\omega_0 + 1/\Delta\omega_c} \quad \dots \dots \quad (5.48)$$



รูป 5.9 ปรากฏการณ์การคึ่ความถี่

ตามปกติเรามี  $\Delta\omega_0 >> \Delta\omega_c$  ดังนั้นพบว่า  $\omega = \omega_c$  และผลของการดึงความถี่มีน้อยมาก

#### 5.4 พฤติกรรมเลเซอร์ชั่วขณะ (Transient Laser Behavior)

การศึกษาพฤติกรรมชั่วขณะของเลเซอร์ หมายถึง การแก้ปัญหาสมการ (5.15) หรือสมการ (5.17) สำหรับเลเซอร์สามระดับหรือสี่ระดับตามลำดับ สำหรับอัตราการยกระดับแปรตามเวลาที่กำหนดให้  $W_p(t)$  เราจะหาพุติกรรมเวลาของ  $q(t)$  และ  $N(t)$  เมื่อได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้ เราจะตรวจสอบด้วยว่าอย่างที่น่าสนใจสองสามตัวอย่างของพุติกรรมชั่วขณะของเลเซอร์ เมื่อสมการที่ใช้อธิบายพุติกรรมชั่วขณะไม่เป็นสมการเชิงเส้นในตัวแปร  $q(t)$  และ  $N(t)$  (รวมถึงผลคูณของพจน์  $qN$  ด้วย) ดังนั้นคำตอบที่ได้จึงเป็นไปไม่ได้จะได้จากการวิเคราะห์ทั่วๆ ไป และเราจะอธิบายเฉพาะผลลัพธ์ที่สำคัญบางอย่างเท่านั้น

### 5.4.1 การออสซิลเลตหมวดเดี่ยว

กรณีแรกที่เราจะพิจารณาคือ อัตราการยกระดับที่เป็นฟังก์ชันขั้นบันได เราสมมติให้พุทธิกรรมเวลาสำหรับอัตราการยกระดับดังนี้  $W_p = 0$  เมื่อ  $t < 0$  และ  $W_p(t) = W_p$  สำหรับ  $t > 0$  และเรายังสมมติให้เลเซอร์ออสซิลเลตในหมวดเดียวหมวดหนึ่งซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นถ้าสมการ (5.15) และสมการ (5.17) ต่างหาได้จริง เมื่อสมการเหล่านี้ไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์ เราจะมองดูพุทธิกรรมสำหรับการออสซิลเลตเล็กน้อยเกือบเป็นสภาวะคงตัว มีคำตอบกำหนดด้วยสมการ (5.22) และ (5.35) วิธีนี้เรายังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของคำตอบได้ด้วย

สำหรับเลเซอร์สามระดับ เราได้

$$N(t) = N_0 + \delta N \quad (5.49 \text{ n})$$

$$q(t) = q_0 + \delta q \quad \dots \dots \dots (5.49 \text{ ย})$$

และสมมติว่า  $\delta N \ll N_0$  และ  $\delta q \ll q_0$  (ตั้งนัยผลคูณของ  $\delta N \delta q$  สามารถละทิ้งได้) จากสมการ (5.15) เราหาได้ว่า

$$\dot{\delta N} = -\delta N(W_p + 1/\tau) - 2B(q_0 \delta N + N_0 \delta q) \quad (5.50 \text{ n})$$

$$\dot{\delta q} = Bq_0 V_a \delta N \quad (5.50 \text{ ย})$$

แทนค่าสมการ (5.50 ย) ลงในสมการ (5.50 n) จะได้

$$\dot{\delta q} + [W_p + (1/\tau) + 2Bq_0] \dot{\delta q} + 2B^2 N_0 q_0 V_a \delta q = 0 \quad \dots \dots \dots (5.51)$$

ได้คำตอบเป็น

$$\delta q = C \exp(-t/t_0) \sin(\omega t + \phi) \quad \dots \dots \dots (5.52)$$

เมื่อ  $C$  และ  $\phi$  พิจารณาได้จากเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น และ

$$1/t_{rr} = |W_p + (1/\tau) + 2Bq_0|/2 \quad (5.53 \text{ n})$$

$$\omega^2 = 2B^2 N_0 q_0 V_a \quad \dots \dots \dots (5.53 \text{ ย})$$

แทนสมการ (5.52) ลงในสมการ (5.50 ย) ได้

$$\delta N \approx \frac{\omega C}{Bq_0 V_a} \exp(-t/t_0) \cos(\omega t + \phi) \quad (5.54)$$

การหาสมการ (5.53) และ (5.54) เราได้สมมติให้  $t_0 \gg 1/\omega$  ให้สังเกตว่า  $\delta N$  และ  $\delta q$  มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งเราสามารถเห็นได้โดยเปรียบเทียบสมการ (5.54) กับสมการ

(5.52) เพื่อให้ชัดเจนยิ่งขึ้นคือ  $\delta N(t)$  นำหน้า  $\delta q(t)$  อยู่ 90 องศา เราสามารถเข้าใจผลลัพธ์นี้ได้โดยการสังเกตว่า ส่วนกลับของ  $\delta N(t)$  จะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่  $\delta q(t)$  มีค่าเพิ่มขึ้น และสังเกตด้วยว่าสมการ (5.33) สามารถทำให้อยู่ในรูปที่คำนวนได้ง่าย ถ้าใช้สมการสำหรับ  $N_0$  และ  $q_0$  ที่กำหนดด้วยสมการ (5.21 ก) และ (5.22) ดังนั้น เราใช้สมการ (5.11), (5.19) และ (5.23) ด้วยจะได้

$$t_0 = \frac{2r}{x + 1 + (\sigma \ell N_i / \gamma)(x - 1)} \quad \dots\dots\dots (5.55 \text{ น})$$

$$\omega = \sigma \ell N_i \frac{c}{\tau d} (x - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (5.55 \text{ บ})$$

ในการหาสมการเหล่านี้ เราได้สมมติให้  $N_0 \ll N_i$

ยกตัวอย่างเราพิจารณาเลเซอร์ทับทิมอีกรังหันนึง เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมพลศาสตร์ของมัน เราจำเป็นต้องกำหนดความยาวของโพรงกำกอน เราสมมติให้  $d = 1$  เมตร ดังนั้น เราได้ดังนี้

(1) สำหรับ  $x = 1.1$  (คือสำหรับการทำงานของเลเซอร์ที่สภาวะคงตัวของอัตราการยกระดับสูงกว่าขีดเริ่ม 10 เปอร์เซ็นต์)  $t_0 = 1.7$  มิลลิวินาที และ  $T = 2\pi/\omega = 60$  ไมโครวินาที

(2) สำหรับ  $x = 2$ ,  $t_0 = 0.34$  มิลลิวินาที และ  $T = 7.7$  ไมโครวินาที ให้สังเกตว่า  $t_0$  และ  $T$  มีค่าลดลงในขณะที่  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมช่วงขณะที่ได้พิจารณาข้างต้นยังใช้ได้กับกรณีต่าง ๆ อีกด้วย คือ เมื่อเลเซอร์กำลังทำงานอย่างสะดวกในสภาวะคงตัว และถูกควบคุมทันทีทันใด (คือ  $\delta N = \delta N_0$  และ  $\delta q = \delta q_0$  ที่  $t = 0$  ในที่นี้  $\delta N_0$  และ  $\delta q_0$  เป็นปริมาณที่ทราบค่าแล้ว) ในกรณีนี้สมการ (5.52) และ (5.54) ยังคงเป็นจริง และค่าคงที่  $C$  และ  $\phi$  พิจารณาได้จากค่าของ  $\delta N_0$  และ  $\delta q_0$  ดังนั้นจากสมการ (5.52) และ (5.54) แสดงว่าการรบกวนที่  $t = 0$  มีการผ่อนคลายไปตามเวลาเหมือนเป็นคลื่นรูปไซน์ดamped (damped sinusoidal waves) ดังนั้นคำตอบที่สภาวะคงตัว  $N_0$  และ  $q_0$  จะสอดคล้องกับสภาวะสมดุลเสถียร

สำหรับเลเซอร์สีระดับซึ่งօสซิลเลตเลิกน้อยรอบตัวแห่งสมดุล ขั้นตอนของการปฏิบัติเป็นไปเช่นเดียวกันโดยเริ่มจากสมการ (5.17) เราได้

$$\dot{\delta N} = -\delta N(W_p + 1/\tau) - B(q_0 \delta N + N_0 \delta q) \quad \dots\dots\dots (5.56 \text{ น})$$

$$\dot{\delta q} = Bq_0 V_a \delta N \quad \dots\dots\dots (5.56 \text{ บ})$$

เช่นเดียวกัน คำตอบของมันกำหนดด้วยสมการ (5.52) และ (5.54) เรายield

$$1/t_{\text{r}} = |W_p + (1/\tau) + Bq_0|/2 \quad \dots \dots \dots (5.57 \text{ ก})$$

$$\omega^2 = B^2 N_0 q_0 V_a \quad \dots \dots \dots (5.57 \text{ ข})$$

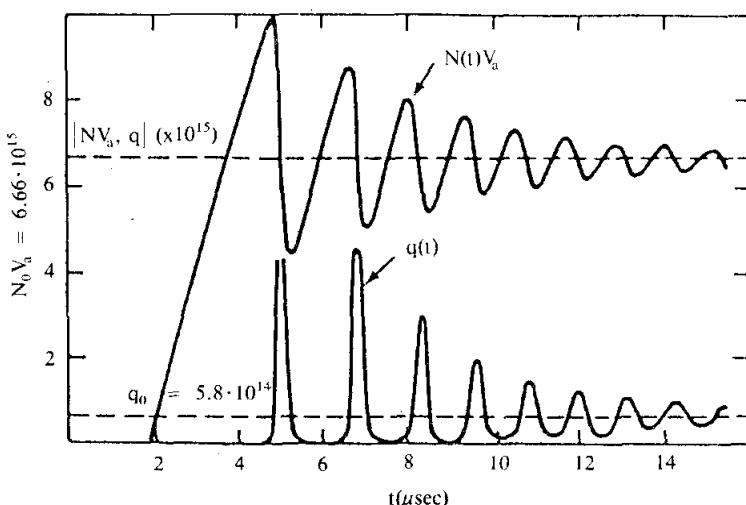
โดยใช้สมการ (5.11), (5.33), (5.34) และ (5.35) ข่ายสมการข้างบน สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย คือ

$$t_0 = 2\tau/x \quad \dots \dots \dots (5.58 \text{ ก})$$

$$\omega = \left| (x-1)/\tau_c \tau \right|^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (5.58 \text{ ข})$$

ในที่นี่เรามมติให้  $N_0 \ll N_i$  เช่นกัน สำหรับกรณี Nd : YAG ที่ได้พิจารณาตอนแรก พร้อมกับสมมติว่า  $d = 1$  เมตร เราพบว่าสำหรับ  $x = 1.4$  ได้  $t_0 = 328$  ไมโครวินาที และ  $T = 2\pi/\omega = 57$  ไมโครวินาที

เมื่อการรับกวนมากขึ้นและเราต้องการศึกษาพฤติกรรมเวลาหังหมุดของเลเซอร์ สำหรับพังก์ชันขั้นบันไดตี่เดียว สมการ (5.15) และ (5.17) จะต้องแก้ปัญหาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสำหรับเลเซอร์สามระดับ ได้แสดงในรูป 5.10 มีสภาวะเริ่มต้นเป็น  $N(0) = -N_i$  และ  $q(0) = q_i$  เมื่อ  $q_i$  คือ จำนวนเต็มเล็ก ๆ บางค่าซึ่งต้องการใช้เพื่อให้เกิดกิริยาเลเซอร์ขึ้น เวลาห่างกันระหว่าง  $q(t)$  และ  $N(t)V_a$  ปรากฏอย่างชัดเจนในรูปนี้ ให้สังเกตว่าตอนเริ่มต้นกิริยาเลเซอร์ (สำหรับ  $4$  ไมโครวินาที  $< t < 10$  ไมโครวินาที) พฤติกรรมเวลา

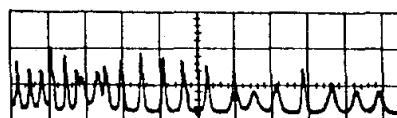


รูปที่ 5.10 แสดงพฤติกรรมเวลาของจำนวนการผันกลับประชากร  $V_a N(t)$  และจำนวนฟoton  $q(t)$  สำหรับเลเซอร์สามระดับ

ของ q(1) เป็นเหตุให้แสงที่ส่องออกประกอบด้วยคลื่นดิจิตอล (light pulses) ต่อเนื่องติดๆ กันไป (เป็นจำเพาะของเลเซอร์) อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา และมีอัมปลิจูดลดลง โดยปกติเราเรียกกรณีนี้เป็นกรณีจำเพาะสม่ำเสมอ (regular spiking case) และสังเกตด้วยว่า สำหรับการออสซิลเลตเล็กน้อยรอบๆ ตำแหน่งสมดุล (สำหรับมากกว่า 12 ไมโครวินาที) พฤติกรรมเวลาระหว่าง N(t) และ q(t) จะสอดคล้องกับสมการ (5.52) และ (5.54)

#### 5.4.2 การออสซิลเลตหลายหมวด

ที่แล้วมาเราใช้กับการออสซิลเลตหมวดเดียวเท่านั้น ซึ่งผลจากการทดลองตรงกับการทำนายของทฤษฎีข้างต้น อันที่จริงมันไม่ใช่ร่ายที่จะทำการออสซิลเลตหมวดเดียวเป็นผลสำเร็จเสมอไป โดยเฉพาะเมื่อค่า  $m$  กว้างเส้นของการเปลี่ยนแปลงเลเซอร์มีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างหมวดมากมาย (เช่น ตัวอย่างที่ใช้กับเลเซอร์สภาวะของแข็งและของเหลว) สำหรับการออสซิลเลตหลายหมวด การปฏิบัติทางทฤษฎีต้องครอบคลุมได้กว้างขวางกว่า มันจึงไม่เพียงพอที่จะบอกจำนวนไฟตอนทึบหมวดในทุกๆ หมวดของการออสซิลเลต เพื่อศึกษาการแทรกสอดห้องตำแหน่งและเวลาของหมวด เราจำเป็นต้องเขียนจำนวนสมการสำหรับนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับจำนวนหมวดออสซิลเลตเท่าที่จะมีได้ ในกรณีพุติกรรมเวลาของคลื่นส่องออกตามปกติไม่เป็นแบบธรรมชาติเหมือนในรูป 5.10 แต่มันจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 5.11 (สำหรับห้องเลเซอร์คลื่นต่อเนื่องและคลื่นดิจิตอล) เราสามารถเห็นได้ว่าพุติกรรมเวลาของลำแสงส่องออก จะประกอบด้วยขบวนของคลื่นดิจิตอลอยู่ติดกันด้วยระยะห่างไม่สม่ำเสมอ และมีอัมปลิจูดไม่แน่นอน ยิ่งไปกว่านี้การออสซิลเลตยังไม่มีแนวโน้มไปสู่สภาวะคงตัวเหมือนในรูป 5.10 พุติกรรมนี้เกิดขึ้นเนื่องจากว่าตามปกติหมวดออสซิลเลตเปลี่ยนจากยอดแหลมหนึ่งไปอีกยอดแหลมหนึ่งถัดไป หรือเปลี่ยนจากยอดแหลมกลุ่มหนึ่งไปยังยอดแหลมอีกกลุ่มหนึ่งถัดไป เมื่อมันเป็นการกระโดดของหมวด (mode hopping) ในกรณีนี้เลเซอร์ไม่ได้ประพฤติตัวอย่างที่ปกติ และด้วยวิธีสร้างหมวดขึ้นมาใหม่ได้



รูป 5.11 แสดงพุติกรรมเวลาของเลเซอร์ออสซิลเลตหลายหมวด ก้าวส่องออก ได้จากเลเซอร์ทับทิมและมาตรฐานของเวลาเป็น 10 ไมโครวินาทีท่อห้องของ

จำแสงส่างออกจากเลเซอร์ออสซิลเลตหลายหมวด สามารถประพุตในลักษณะปักกิ่ง เมื่อในรูป 5.10 ภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอนอันหนึ่ง เงื่อนไขนี้จะใช้ต่อเมื่อจำนวนของหมวด ออสซิลเลตมีจำนวนมาก ๆ ในขณะเดียวกันเพสของสนามไฟฟ้าเป็นไปอย่างไม่แน่นอน ที่จริง ความเข้มแสงทั้งหมดเกิดจากผลรวมของแต่ละความเข้มหมวดเข้าด้วยกัน ดังนั้นเราจึงสามารถ ก่อร่องพจน์ของจำนวนโฟตอนทั้งหมด ณ ในproc กรณีนี้เกิดขึ้นต่อเมื่อ

- (1) ความถี่ห่างกันระหว่างหมวดมีค่าน้อยมาก (proc กำหนด)
- (2) การสูญเสียในแต่ละหมวดมีมาก ดังนั้นความกว้างเส้นในหมวดเทียบได้เท่ากับ หรือใหญ่กว่าช่วงห่างของหมวด
- (3) การสูญเสียประมาณให้เท่ากันสำหรับทุกหมวด อย่างไรก็ตาม แนวความคิด ของหมวดproc มีความสำคัญเพียงเล็กน้อย และเราจะเห็นการปฏิบัติในproc เมื่อกับเป็น ระบบย้อนกลับไม่อภินาท (nonresonant feedback system)

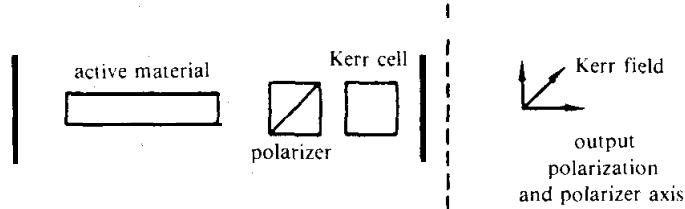
#### 5.4.3 คิวสวิทชิ่ง (Q Switching)

วิทยาการของคิวสวิทชิ่งทำให้เลเซอร์มีช่วงระยะเวลาของคลื่นลดลง และมีกำลัง ตรงยอดแหลมสูง (คลื่นลดลงมาก) หลักการของวิทยาการมีดังนี้คือ สมมติให้มีเครื่องปิดเปิด ทางเข้าออกของแสงอยู่ภายในproc ถ้าเครื่องปิดอยู่กิริยาเลเซอร์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้น จำนวนการผันกลับประชากรสามารถมีค่าได้สูงมาก ถ้าให้เครื่องเปิดทันทีทันใด เลเซอร์จะมี การสูญเสียจำนวนมากและพลังงานที่สะสมไว้จะถูกปล่อยออกมายในรูปของคลื่นแสงช่วงสั้น ๆ [สองสามนาโนวินาที ( $10^{-9}$  วินาที)] และมีความเข้มสูงจัด วิทยาการนี้ได้รวมถึงการปิดproc คิวแฟคเตอร์ (Q factor) จากค่าต่ำไปยังค่าสูง เรียกว่า คิวสวิทชิ่ง ถ้าหากว่าเครื่องปิดถูก เปิดในช่วงเวลาสั้น ๆ เทียบได้เท่ากับเวลาที่ใช้ในการสร้างคลื่นเลเซอร์ (สวิตช์เร็ว) จำแสง ส่งออกจะประกอบด้วยคลื่นลดลง ๆ เพียงคลื่นเดียว อย่างไรก็ตาม ในกรณีของสวิตช์ช้าอาจ จะมีคลื่นลดหายใจ คลื่นเกิดขึ้นได้ติดต่อกัน ความจริงในสวิตช์ช้าพลังงานที่สะสมไว้ในตัวกล้อง ตอนต้นเมื่อเปิดสวิตช์แล้วนจะปล่อยออกมายเป็นขั้น ๆ แต่ละขั้นจะสอดคล้องกับการเปล่งแสง คลื่นลด แต่ละคลื่นลดส่งออกให้กลับขยายต่ำกว่าขีดเริ่มในขณะใด ๆ เป็นเหตุให้บันยั้งการ ออสซิลเลตต่อ จนกว่าสวิตช์ลดการสูญเสียของproc เลเซอร์ลง และทำให้ขีดเริ่มลดลง

ระบบสวิตช์ต่อไปนี้เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ

- (1) เครื่องปิดเปิดด้วยไฟฟ้าและแสง (Electro-Optical Shutters) เครื่องเหล่านี้ใช้ ประโยชน์จากปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและแสง อย่างเช่นปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) หรือ ปรากฏการณ์พอกเคลล์ (Pockels effect) เราจะไม่กล่าวในรายละเอียดของเครื่องเหล่านี้ แต่จะ

เน็นถึงเซลล์ไฟฟ้า-แสง (คือ เคอร์ร์เซลล์และพอกเคลสเซลล์) ซึ่งเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งเมื่อต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงคลื่นไฟฟ้าอย่างเหมาะสม มันจะประพฤติเหมือนกับเป็นผลึกไบเรฟริงเจนซ์ (birefringence crystal) ไบเรฟริงเจนซ์เบรโดยตรงกับความต่างคักยกกำลังสองสำหรับเคอร์เซลล์แต่สำหรับพอกเคลสเซลล์ผลึกไบเรฟริงเจนซ์เปรตามตรงกับความต่างคักยก เมื่อความต่างคักยกเป็นศูนย์เซลล์จะไม่เป็นไบเรฟริงเจนซ์ รูป 5.12 แสดงเครื่องปิดเปิดเครื่องหนึ่งประกอบด้วยโปลาไรเซอร์ ตัวหนึ่งและเคอร์เซลล์หนึ่งเซลล์ เคอร์เซลล์ถูกไปอสและจัดวางให้อยู่ในทางที่ทำให้แสงโปลาไรซ์เชิงเส้นผ่านมาจากตัวโปลาไรเซอร์เข้า กล้ายเป็นแสงโปลาไรซ์เชิงกลม หลังจากการสะท้อนที่กระจกแล้วแสงจะสู่เข้าอีกครั้งด้วยเคอร์เซลล์กล้ายเป็นแสงโปลาไรซ์เชิงเส้น โดยที่การโปลาไรซ์ของมันจะตั้งฉากกับทิศทางเดิมของมัน และถูกกันด้วยโปลาไรเซอร์อีกครั้งหนึ่ง ในสภาวะนี้ลิวิตช์ต้องปิดอยู่ มันจะเปิดเมื่อหยุดให้ความต่างคักยก ด้วยเหตุนี้ไบเรฟริงเจนซ์ของเคอร์เซลล์จึงไม่มี และมันจะส่งแสงผ่านไปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงการโปลาไรซ์ โดยปกติเคอร์เซลล์หนึ่งเซลล์ต้องการความต่างคักยก (10-20 กิโลโวลต์) ส่วนพอกเคลสเซลล์ต้องการความต่างคักยกน้อยกว่า (1-5 กิโลโวลต์)

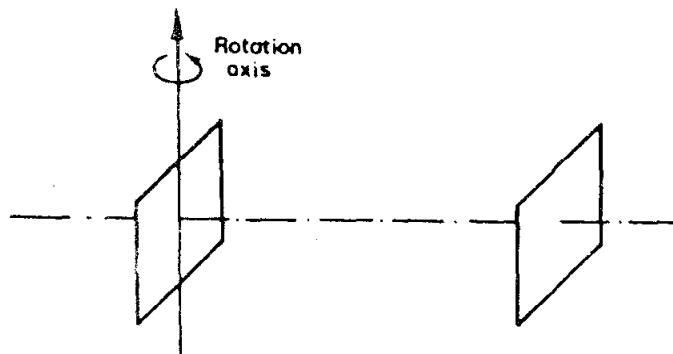


รูป 5.12 การรวมเคอร์เซลล์เข้ากับโปลาไนเซอร์สำหรับคิวสวิทชิ่ง

(2) เครื่องปิดเปิดด้วยกลไก เครื่องปิดเปิดด้วยกลไกที่เป็นคิวสวิทชิ่งประกอบด้วยกระชากข้างหนึ่งของโครงกำแพงเลเซอร์ หมุนได้รอบแกนที่ตั้งฉากกับแกนของโครงกำแพง (รูป 5.13) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดคลื่นดลหลาย ๆ คลื่น มันจำเป็นต้องมีความเร็วของการหมุนสูงมาก สำหรับโครงกำแพงกว้าง  $d = 50$  ซม. ต้องการความเร็วขนาด 30,000 รอบต่อนาที

(3) เครื่องปิดเปิดที่ใช้สารสีอิ้มตัว (Saturable Dyes) วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ทำคิวสวิทชิ่งได้ง่ายที่สุด เครื่องปิดเปิดนี้ประกอบด้วยเซลล์หนึ่งเซลล์ บรรจุด้วยสารละลายนีสีที่เหมาะสมบางอย่าง ไว้ภายใน | เช่น วนาเดียม พนาโลไซยาไนน์ (vanadium phthalocyanine) ละลายน้ำในไน trobenzene | สำหรับกรณีของเลเซอร์ทับทิม | สารละลายนีสีนี้สามารถคิดเหมือนเป็นระบบสองระดับที่มีภาคตัดขวางของยอดกว้างมาก ( $\sim 10^{-16}$  ซม?) ดังนั้นจากสมการ (2.128) ได้ว่า ยอดของความเข้มอิ้มตัว I<sub>s</sub> มีค่าน้อยกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับของสารละลายนีสี ดังนั้นจึง

เกือบจะกล้ายเป็นสารโปรดิส (เนื่องจากการอิ่มตัว) เมื่อเปรียบเทียบกับแสงทั่วไปที่มีความเข้มต่ำ ขณะนี้เรามาดูว่ามีเซลล์ของสารสีหนึ่งเซลล์อยู่ภายในโครงเลเซอร์ โดยที่สารละลายมีสีมีอุดของความยาวคลื่นดูดกลืนอยู่ที่เดียวกับความยาวคลื่นเลเซอร์ และเรายังสมมติว่าการดูดกลืนตอนแรกของเซลล์สารสีเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ (ตอนยังไม่อิ่มตัว) กิริยาเลเซอร์สามารถเริ่มต้นได้ต่อเมื่อกำลังขยายของวัตถุกิริยา สามารถทดสอบการสูญเสียของสารสี บางด้วยการสูญเสียของโครงที่ไม่อิ่มตัว เนื่องจาก การดูดกลืนของสารสีมีค่าสูง ดังนั้นจำนวนการผันกลับประชากริกฤติ จึงมีค่าสูงมาก ขณะที่กิริยาเลเซอร์เริ่มต้น ความเข้มแสงเกิดขึ้นจากการรับกวนตอนเริ่มต้น เนื่องจากการเปล่งแสงตามปกติวิถัย เมื่อความเข้มแสงสูงขึ้นจนเปรียบเทียบได้กับ  $I_0$  และ ( $t'$  ซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา  $t = t_0$  ในรูป 5.14) สารละลายมีสีจะเริ่มฟอกขาว เนื่องจากการอิ่มตัว อัตราการเติบโตของความเข้มแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้อัตราการฟอกขาวของสารละลายมีสีเพิ่มขึ้นด้วย และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เมื่อ  $I_0$  เปรียบเทียบได้เป็นค่าน้อย จำนวนการผันกลับประชากรยังคงมีอยู่ภายใต้ตัวกลางเลเซอร์หลังจากสารสีได้ฟอกขาวแล้ว จะเป็นต้องเท่ากับจำนวนการผันกลับประชากรตอนเริ่มต้น (คือเป็นค่าใหญ่มาก) หลังจากการฟอกขาวแล้ว เลเซอร์จะมีกำลังขยายมากกว่าการสูญเสีย แต่ต่อจากนั้นก็จะสร้างคลื่นดลใหญ่ขึ้น (รูป 5.14)

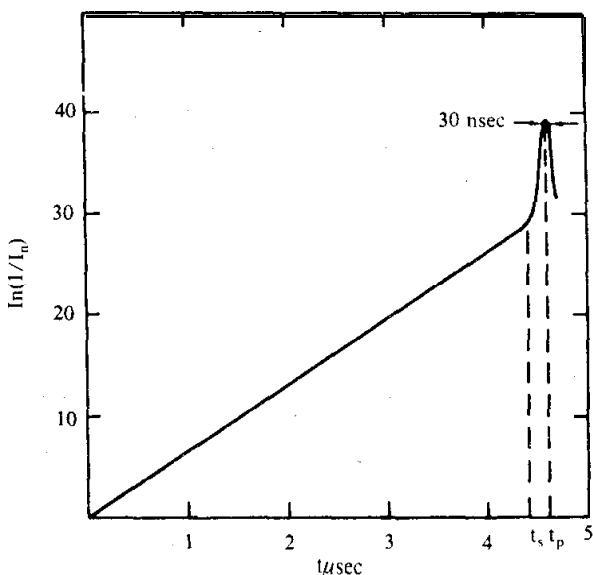


รูป 5.13 แสดงระบบการหมุนของกระจกสำหรับคิวสวิทชิ่ง

ถ้าหากว่าเลเซอร์ทำงานในหมวดเดียว พฤติกรรมทางพฤศัตรูของมันจะห่วงคิวสวิทชิ่งสามารถหาได้จากสมการ (5.15) หรือ (5.17) สำหรับเลเซอร์สามารถระดับและสีระดับตามลำดับ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาเพียงกรณีที่เรียกว่า สวิตช์เริ่ว ซึ่งการสูญเสียของโครงเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นกว่าเวลาที่ใช้ในการแพรังสีของเลเซอร์ เนื่องในนี้ตามปกติพบได้จากวิทยาการในข้อ (1) และ (2) ข้างต้น มันสามารถแสดงได้ว่าผลลัพธ์ของทฤษฎีนี้ยังสามารถ

ใช้กับกรณีของสารสีอิมตัว ถ้าหากว่าภาคตัดขวางของมันโตกว่าของวัตถุกิริยามาก

เราจะพิจารณาเลเซอร์สามระดับเป็นอันดับแรก โดยสมมติว่า สำหรับ  $t \leq 0$  การสูญเสียมีค่าสูงมากเมื่อเลเซอร์อยู่ต่ำกว่าชีดเริม (คือ  $q = 0$  สำหรับ  $t \leq 0$ ) ดังนั้นจากสมการ (5.15 ก) แสดงว่าจำนวนการผันกลับประชากร (สถานะคงตัว) สำหรับ  $t \leq 0$  เป็น



รูป 5.14 แสดงพฤติกรรมเวลาสำหรับสำนวนเลเซอร์ความเข้ม 1 โพรบยา 60 ชม. ขึ้นกิวสวิทชิ่งที่เป็นตัวถูกคลื่นอิมตัว เมื่อ  $I_n$  เป็นความเข้มของคลื่นรบกวนในหน่วยที่ก่อให้เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามปกติวิสัย มีความกว้างคลื่นคือ ( $\sim 30$  นาโนวินาที)

$$N_i = N_i(W_p\tau - 1)/(W_p\tau + 1) \quad \dots \dots \dots (5.59)$$

เราให้  $N_i$  เป็นจำนวนการผันกลับประชากรเริมต้น ซึ่งเป็นจำนวนการผันกลับประชากรของเลเซอร์ก่อนคิวสวิทชิ่งเปิด สมการ (5.59) สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบที่ยอมรับได้มากกว่าด้วยวิธีการคำนวณต่อไปนี้ สมมติว่าเลเซอร์ทำงานโดยปราศจากเครื่องปิดเปิดใด ๆ (หรือมีเครื่องปิดเปิดที่เปิดอยู่) จำนวนการผันกลับประชากรวิกฤต  $N_c$  กำหนดด้วยสมการ (5.18) และอัตราการยกระดับพลังงานวิกฤต  $W_{cp}$  กำหนดด้วยสมการ (5.19) ดังนั้นสมการ (5.59) สามารถเขียนเป็น

$$N_i = N_i \frac{[x(N_t + N_c)/(N_t - N_c) - 1]}{[x(N_t + N_c)/(N_t - N_c)] + 1} \quad \dots \dots \dots (5.60)$$

เมื่อ  $x = W_p/W_{cp}$  คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการยกระดับที่แท้จริง  $W$  และอัตราการยกระดับบิวิกุต  $W_{cp}$  สำหรับเลเซอร์ชนิดเดียวกันที่ไม่มีคิวสวิทชิ่ง ดังนั้นปริมาณ  $x$  สามารถพิจารณาได้จากการทดลอง แนะนำ  $x >> 1$  จากสมการ (5.60) แสดงว่าจำนวนการผันกลับประชากรสมบูรณ์มากกว่าหรือน้อยกว่าสามารถหาได้ ( $N_i = N$ )

สมมติให้เครื่องปิดเปิดเมื่อเวลา  $t = 0$  เปิดอยู่ สำหรับ  $t > 0$  พฤติกรรมต่อมาของมันอธิบายได้ด้วยสมการ (5.15) ด้วยเงื่อนไขตอนเริ่มต้น  $N(0) = N_i$  และ  $q(0) = q_i$  ในที่นี้  $q_i$  เป็นจำนวนโพตอนเล็กน้อยที่ต้องการทำให้เกิดกิริยาเลเซอร์เริ่มต้น อย่างไรก็ตามสมการนี้สามารถพิจารณาได้ง่ายเมื่อเราคิดว่า เวลาที่ปรากฏอย่างต่อเนื่องของหั้ง  $N(t)$  และ  $q(t)$  เกิดขึ้นในเวลาสั้น ๆ จนพจน์การยกระดับ  $W_p(N_i - N)$  และพจน์ลดระดับ  $(N_i + N)/\tau$  ในสมการ (5.15 ก) สามารถละทิ้งได้ ดังนั้นสมการ (5.15) กลายเป็น

$$\dot{N} = -2BqN \quad \dots\dots\dots (5.61 \text{ ก})$$

$$\dot{q} = |V_a BN - (1/\tau_c)|q \quad \dots\dots\dots (5.61 \text{ ข})$$

หากำตوبของสมการเหล่านี้ด้วยเงื่อนไขเริ่มต้น  $N(0) = N_i$  และ  $q(0) = q_i$  ดังตัวอย่างในรูป 5.15 ซึ่งแสดงพฤติกรรมเวลาของหั้ง  $N(t)$  และ  $q(t)$  เมื่อกับที่คำนวณได้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ จำนวนการผันกลับประชากร  $N_p$  เกิดตรงยอดของคลื่นดลเลเซอร์สามารถหาได้จากสมการ (5.61 ข) โดยให้  $q = 0$  เราพบว่า

$$N_p = 1/V_a B \tau_c \quad \dots\dots\dots (5.62)$$

ซึ่งได้เหมือนกับจำนวนการผันกลับประชากรบิวิกุตสำหรับการทำงานของคลื่นต่อเนื่อง สมการ (5.61) ไม่สามารถหาคำตوبด้วยการวิเคราะห์ แต่มันสามารถเปลี่ยนรูป กลายเป็นแบบไม่มีขนาดได้ โดยกำหนดตัวแปรที่ไม่มีขนาดขึ้นมาดังนี้

$$t^* = t/\tau_c \quad \dots\dots\dots (5.63)$$

$$\text{และ } \phi = q/N_p V_a \quad \dots\dots\dots (5.64 \text{ ก})$$

$$\eta = N / N_p \quad \dots\dots\dots (5.64 \text{ ข})$$

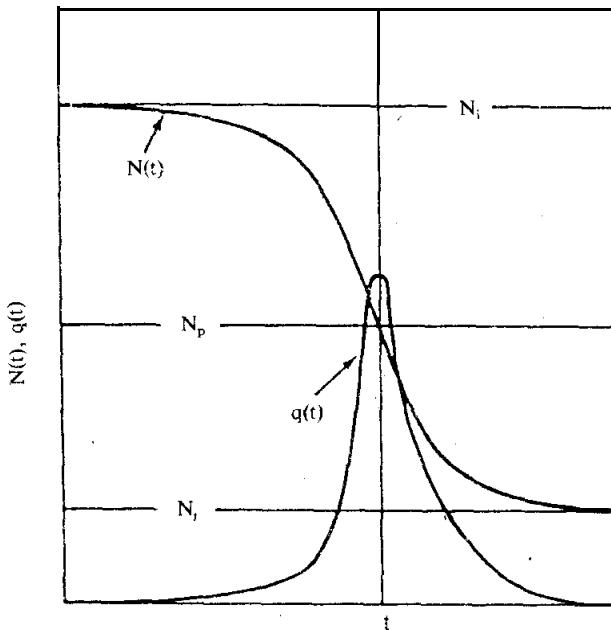
ดังนั้น สมการ (5.61) กลายเป็น

$$\frac{d\eta}{dt^*} = -2\phi\eta \quad \dots\dots\dots (5.65 \text{ ก})$$

$$\frac{d\phi}{dt^*} = (\eta - 1)\phi \quad \dots\dots\dots (5.65 \text{ ข})$$

เมื่อนำเข้าเริ่มต้นในขณะนี้คือ  $\eta_i = N_i/N_p$  และ  $\phi_i$  เท่ากับเลขจำนวนเต็มมาก ( $N_p V_a$  เป็นเลขจำนวนใหญ่มาก เช่น  $N_p V_a = 6.6 \times 10^{15}$  ในรูป 5.10) เมื่อค่าของ  $\phi_i$  ที่เราเลือกไม่สามารถมีผลต่อพุทธิกรรมเวลาของคลื่นด้วยวิธีซึ่งจากสมการ (5.65) เห็นได้ชัดว่า มันมีคำตอบเป็นฟังก์ชันของ  $t^*$  และ  $\eta_i$  เท่านั้น คือ

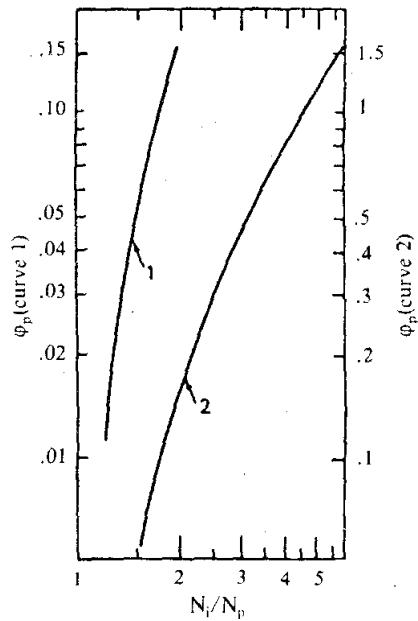
$$\begin{aligned}\phi &= \phi(t^*, \eta_i) \\ \eta &= \eta(t^*, \eta_i)\end{aligned} \quad \dots \dots \dots (5.66)$$



รูป 5.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนการผันกลับรังษี  $N(t)$  และจำนวนฟอกอนหั้งหมัดของฟ่อง  $q(t)$  สำหรับการทำงานของคิวสวิตซ์

ดังนั้นค่าของ  $\phi_p$  และเวลาคลื่นดลขึ้น  $t_r^*$  และเวลาคลื่นดลตก  $t_f^*$  ต่างขึ้นกับ  $\eta_i$  เท่านั้น ทั้งสิ้น รูป 5.16 แสดงเส้นตรงของ  $\phi_p$  เทียบกับ  $\eta_i$  ในขณะที่รูป 5.17 และรูป 5.18 แสดงเส้นตรงของ  $t_r^*$  และ  $t_f^*$  เทียบกับ  $\eta_i$  ตามลำดับ ปริมาณ  $t_r^*$  และ  $t_f^*$  ที่กำหนดในที่นี้ คือเวลาที่คิดจากยอดของคลื่นดลจนถึงจุดครึ่งกำลัง (half-power point) ของมัน ปริมาณเหล่านี้หาได้จากการคำนวณ ให้สังเกตว่าที่ค่า  $\eta_i$ ,  $t_r^*$  ได้ ๆ มีค่าน้อยกว่า  $t_f^*$  (นั่นคือคลื่นดลแรงไม่สมมาตร) พังก์ชัน  $\phi_p = \phi_p(\eta_i)$  หาได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้ตัวส่วนของสมการ (5.65 ก) และ (5.65 ข) และอินติเกรตผลลัพธ์ที่ได้ เราพบว่า

$$\phi - \phi_i = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{\eta}{\eta_i} - (\eta - \eta_i) \right) \quad \dots \dots \dots (5.67)$$



รูป 5.16 แสดงเส้นโค้งของยอดปกติของจำนวนไฟฟ่อนในพรง  $\phi_p$  เทียบกับอัตราส่วนของจำนวนการผันกลับประชากรเริ่มต้น  $N_i$  กับจำนวนการผันกลับประชากรครุยอด  $N_p$

ที่ยอดของคลื่นดอมมี  $\eta_p = 1$  และถ้าเราลงทะเบียน  $\phi_i$  สมการ (5.67) จะให้

$$\phi_p = \frac{1}{2} \left( \frac{N_i}{N_p} - 1 - \ln \frac{N_i}{N_p} \right) \quad \dots \dots \dots (5.68)$$

กำลังส่องออกทั้งหมด (คือผลรวมของกำลังของสองลำแสงส่องออก) กำหนดด้วยสมการ (5.24) ดังนั้นกำลังที่ยอดกำหนดด้วย

$$P_p = \frac{\hbar\omega\phi_p}{B\tau_u\tau_c} = (\gamma_u\gamma) \left( \frac{V_a}{\sigma\ell} \right) \left( \frac{\hbar\omega c}{d} \right) \phi_p \quad \dots \dots \dots (5.69)$$

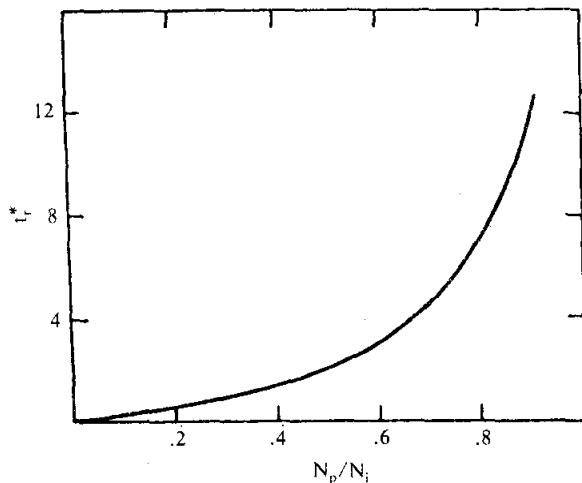
ในที่นี้ เราได้ใช้สมการ (5.62), (5.64) และ (5.11) ด้วย กำลังส่องออกจากกระเจียบเพียงแผ่นเดียว (คือกำลัง  $P_1$  จากกระเจียบ 1) กำหนดด้วยสมการ (5.25) จากสมการ (5.24) เราได้ผลลัพธ์งานส่องออกเป็น

$$E = \frac{\hbar\omega}{\tau_u} \int_{-\infty}^{+\infty} q dt = \left( \frac{\gamma_u}{\gamma} \right) \hbar\omega N_p V_a \int_{-\infty}^{+\infty} \phi dt^* \quad \dots \dots \dots (5.70)$$

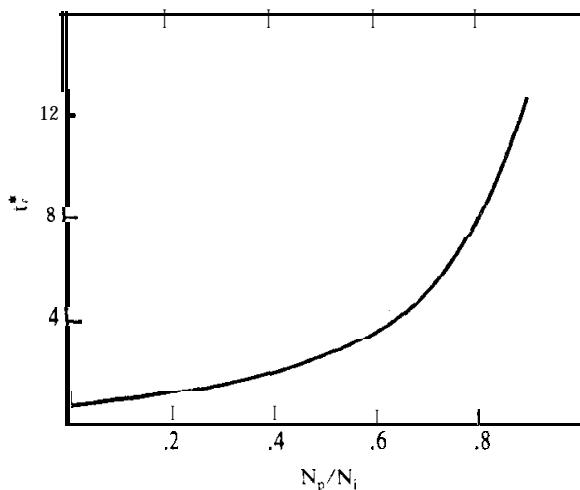
การอนติเกรตในสมการ (5.70) สามารถทำได้ง่ายโดยอนติเกรตสมการ (5.65 ข) ทั้งสองข้าง และใช้สมการ (5.65 ก) และเงื่อนไขที่ว่า  $\phi(t^* = \infty) = \phi(t^* = -\infty) = 0$  เรา

พบว่า  $\int \phi dt^* = (\eta_i - \eta_f)/2$  และจากสมการ (5.70) กลายเป็น

$$E = \left( \frac{\gamma_0}{\gamma} \right) \hbar \omega V_a \frac{N_i - N_f}{2} \quad \dots\dots\dots (5.71)$$



รูป 5.17 แสดงสัมประสิทธิ์ของเวลาคืนคืนของ  $t^*$  เมื่อยกเทียบกับ  $N_p/N_i$  [ได้จากข้อมูลตัวเลขของเวกเนอร์และเลงเยล (Wagner and Lengyel)]



รูป 5.18 แสดงสัมประสิทธิ์ของเวลาคืนคืนของ  $t^*$  เมื่อยกเทียบกับ  $N_p/N_i$  (ได้จากข้อมูลตัวเลขของเวกเนอร์และเลงเยล)

เมื่อ  $N_i$  เป็นจำนวนการผันกลับประชากรสุดท้าย กล่าวคือเป็นจำนวนการผันกลับประชากรที่เหลืออยู่ในวัตถุกิริยาหลังจากคลื่นดลได้สิ้นสุดลง (ดูรูป 5.15) สมการ (5.71) ให้สังเกตว่า  $N - N_i$  คือจำนวนการผันกลับประชากรที่หายไป และจำนวนนี้สามารถสร้างจำนวนไฟต่อน

ได้เท่ากับ  $(N_i - N_f)V_a/2$  เพื่อคำนวณค่า  $E$  จากสมการ (5.71) มันจึงจำเป็นต้องทราบค่าของ  $N_f$  ก่อน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (5.67) โดยให้  $t = \infty$  เมื่อ  $\phi(\infty) = 0$  เราได้

$$\frac{N_i - N_f}{N_i} = \frac{N_p}{N_i} \ln \frac{N_i}{N_f} \quad \dots \dots \dots (5.72)$$

ซึ่งได้  $N_i/N_f$  เป็นพังก์ชันของ  $N_p/N_i$  ประมาณ  $(N_i - N_f)/N_i$  ที่ปรากฏในสมการ (5.72) เรียกว่า ตัวร่วมการผันกลับประชากรที่มีประโยชน์ [inversion (or energy) utilization factor] รูป 5.19 แสดงเส้นโค้งของตัวร่วมการผันกลับประชากรที่มีประโยชน์เทียบกับ  $N/N_p$  ให้สังเกตว่า ส่วน率ค่าของ  $N/N_p$  เป็นค่าใดๆ ตัวร่วมนี้มีแนวโน้มเข้าใกล้หนึ่ง

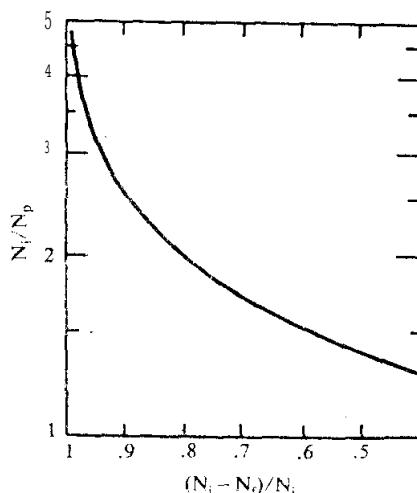
สำหรับเลเซอร์สีระดับเร้าต้องใช้สมการ (5.17) จำนวนการผันกลับประชากรในกรณีนี้คือ |กำหนดให้  $N = q = 0$  ในสมการ (5.17 ข)|

$$N_i = N_p W_p \tau / (1 + W_p \tau) \quad \dots \dots \dots (5.73)$$

และจำนวนการผันกลับประชากรที่ยอดของคลื่นดล |ให้  $q = 0$  ในสมการ (5.17 ข)|

กำหนดด้วย

$$N_p = 1/V_a B \tau_c \quad \dots \dots \dots (5.74)$$



รูป 5.19 ตารางเก็บตัวร่วมผลัจงานที่มีประโยชน์  $(N_i - N_f)/N_i$  กับ  $N_p/N_i$

ถ้าเลเซอร์ทำงานโดยไม่มีคิวสวิทชิ้ง จำนวนการผันกลับประชากรขีดเริ่ม จะเป็น |ให้  $q = 0$  ในสมการ (5.17 ข)|

$$N_c = 1/V_a B \tau_c = N_p \quad \dots \dots \dots (5.75)$$

และอัตราการยกระดับขีดเริ่ม  $W_{cp}$  ซึ่งให้  $\tau = q = 0$  ในสมการ (5.17 ก) จะเป็นดังนี้

$$N_c = N_i W_{cp} \tau / (1 + W_{cp} \tau) \quad (5.76)$$

ตามปกติในเลเซอร์สีระดับมี  $W_{cp} \tau \ll 1$  (ดูตัวอย่าง Nd/YAG และ Ne) และ  $W_p \tau \ll 1$  ด้วย จากสมการ (5.73), (5.75) และ (5.76) ได้ว่า

$$N_i/N_p = N_i/N_c = W_p/W_{cp} \quad \dots \dots \dots (5.77)$$

ซึ่งได้ปริมาณ  $N_i/N_p$  เป็นพังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างอัตราการยกระดับที่แท้จริง  $W_p$  ต่ออัตราการยกระดับขีดเริ่ม  $W_{cp}$

สำหรับ  $t > 0$  เราสามารถถึงพจน์การยกระดับและพจน์การลดระดับในสมการ (5.17 ก) ได้ ถ้าเรากำหนด

$$t^* = t/\tau_c \quad \dots \dots \dots (5.78 \text{ ก})$$

$$\eta = N/N_p \quad \dots \dots \dots (5.78 \text{ ข})$$

$$\phi = q/2N_p V_a \quad \dots \dots \dots (5.78 \text{ ค})$$

[ให้สังเกตว่าสมการ (5.78 ค) และ (5.64 ก) ต่างกันที่ตัวร่วมเลข 2] ซึ่งจะได้สมการ (5.65) อีกรุ่นหนึ่ง ดังนั้นผลลัพธ์ทั้งหมดที่หาได้จากสมการ (5.65) เป็นต้นมา ยังคงเป็นเช่นเดียวกัน และโดยเฉพาะรูป 5.16 ถึง 5.19 ยังคงใช้ได้กับกรณีนี้ ถ้าหากว่าเราใช้สมการ (5.77) เพื่อหา  $N_i/N_p$

ก่อนที่จะจบหัวข้อคิวสวิทชิ้งนี้ เรายังจะกล่าวถึงวิทยาการอื่นของคิวสวิทชิ้งที่มีประโยชน์ เรยกว่า การทำงานของคลื่นลูกหลาน (pulse – transmission-mode) (PTM) วิธีนี้ รวมถึงคิวสวิทชิ้งในตอนแรก กล่าวคือเลเซอร์ประกอบด้วยกระจากสะท้อนแสงได้ 100 เปอร์เซ็นต์ อยู่ตรงปลายทั้งสองข้างของโครง แล้วเมื่อความเข้มแสงถึงยอดของคลื่นลูกสวิตช์เปิดกันทีละปั๊ง รวดเร็วที่ข้างใดข้างหนึ่งของกระจาก ให้แสงส่องออกทั้งหมดโดยไม่มีการสะท้อนเลย ด้วยวิธีนี้ พลังงานของแสงภายในโครงสามารถปลดปล่อยออกได้หมดในเวลาเพียงช่วงเคลื่อนที่หนึ่งรอบของโครง (1-4 นาโนวินาที)

#### 5.4.4 การยึดหมวด (Mode Locking)

จากหัวข้อ 5.4.2 เราทราบว่าเมื่อมีหลายหมวดออสซิลเลตพร้อมกัน พฤติกรรมเวลาของเลเซอร์อยู่ในรูปแบบของยอดแหลมไม่เป็นระเบียบต่าง ๆ กัน เมื่อหมวดไม่ออสซิลเลตตาม

ปกติที่เวลาเดียวกัน (หรือเปรียบเทียบกับอัมปลิจูด) หรือเมื่อเฟสของพวงมันมีค่าต่างกันมากหรือน้อย อย่างไรก็ตามยังมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อหมวดด่าง ๆ ถูกบังคับให้ออสซิลเลตพร้อมกันด้วยอัมปลิจูดและเฟสยึดไว้ของมัน การทำงานชั่วขณะจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ เรียกว่า การทำงานยึดหมวด (mode locked operation)

ตัวอย่างที่ตรงกับกรณีโดยเฉพาะคือ กรณีของหมวดตามยาว  $2N+1$  ออสซิลเลตด้วยอัมปลิจูดเท่ากับ  $E_0$  เราสมมติให้เฟส  $\phi_k$  ของหมวดเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\Phi_k - \Phi_{k-1} = \alpha \quad \dots \dots \dots (5.79)$$

เมื่อ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ สนามไฟฟ้าทั้งหมด  $E(t)$  ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ที่จุดใด ๆ ภายในหรือภายนอกของโครงสร้าง) สามารถเขียนเป็น

$$E(t) = \sum_{l=-N}^{+N} E_0 \exp\{i[(\omega_0 + l\Delta\omega)t + l\alpha]\} \quad \dots \dots \dots (5.80)$$

เมื่อ  $\omega_0$  เป็นความถี่ศูนย์กลาง และ  $\Delta\omega$  คือความถี่ต่างกันระหว่างหมวดอยู่ถัดกันเพื่อความสะดวกเรามงต้องให้เฟสของหมวดคุณย์กลางเป็นศูนย์ จากบทที่ 4 เราได้ว่าสำหรับความยาวของโครงสร้างเป็น  $d$   $\Delta\omega$  จะเป็นค่าคงที่กำหนดด้วย

$$\Delta\omega = \pi c/d \quad \dots \dots \dots (5.81)$$

ดังนั้น ในสมการ (5.80) เราได้ว่า

$$E(t) = A(t) \exp(i\omega_0 t) \quad \dots \dots \dots (5.82)$$

$$\text{เมื่อ } A(t) = E_0 \frac{\sin[(2N+1)(\Delta\omega t + \alpha)/2]}{\sin[(\Delta\omega t + \alpha)/2]} \quad \dots \dots \dots (5.83)$$

ดังนั้น  $E(t)$  ประพฤติเหมือนกับเป็นคลื่นพาหะรูปไซน์ที่มีคุณย์กลางความถี่หมวด  $\omega_0$  และอัมปลิจูด  $A(t)$  ประมาณเวลาตามสมการ (5.83) กำลังส่งออกในที่นี้จะเป็น  $A^2(t)$  ดูตัวอย่างในรูป 5.20 สำหรับหมวดออสซิลเลต  $2N+1 = 7$

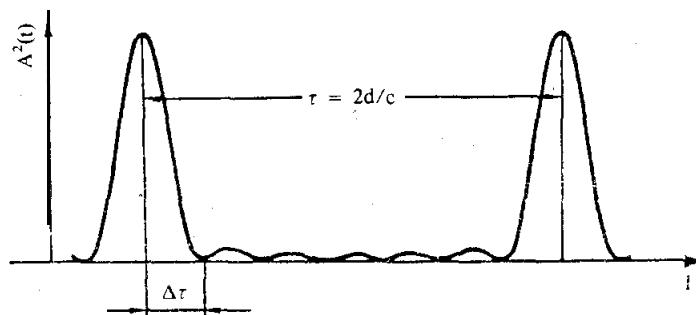
จากผลของการเงื่อนไขการยึดเฟสในสมการ (5.79) ทำให้หมวดเหล่านั้นแทรกซ้อนกันสร้างคลื่นแสงช่วงสั้นขึ้นมา คลื่นดังกล่าวที่สุดเกิดขึ้นเมื่อพจน์หารในสมการ (5.83) หายไป ดังนั้นสองคลื่นดังที่เกิดถัดกันห่างกันด้วยเวลา

$$\tau = 2\pi/\Delta\omega = 2d/c \quad \dots \dots \dots (5.84)$$

เป็นเวลาที่เกิดขึ้นสำหรับการวิ่งครบหนึ่งรอบโพรง ดังนั้นพฤษติกรรมการออสซิลเลตสามารถมองเป็นคลื่นเดลไได้ด้วยซึ่งเคลื่อนที่กลับไปกลับมาภายในโพรง จากสมการ (5.83) เราพบว่าเวลาต่างกัน  $\Delta\tau$  ระหว่างยอดของคลื่นเดลและมีอัมปลิจูดเป็นศูนย์ครั้งแรก กำหนดด้วย

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\nu_{osc}} \quad \dots\dots\dots (5.85)$$

เมื่อ  $\Delta\nu_{osc} = (2N+1)\Delta\omega/2\pi$  คือແບกວ้างของการออสซิลเลตทั้งหมด ความกว้าง  $\tau_p$  ของคลื่นเดล (FWHM) ประมาณได้เท่ากับ  $\Delta\tau$  ด้วย ดังนั้นคลื่นเดลชั่งสั้น ๆ จึงต้องการແບกกว้างการออสซิลเลตໂຕ ๆ ແບกกว้างนี้ไม่สามารถถกกว้างเกินกว่าແບกกว้างขยายของเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ก้าซไม่สามารถได้คลื่นเดลสั้นกว่า 1 นาโนวินาที อย่างไรก็ตามเลเซอร์สภาวะของแข็งสามารถได้คลื่นเดลของ 1 พิโตรวินาที (psec) หรือสั้นกว่าได้ นอกจากนั้นยอดสูงของกำลังยังสามารถได้ด้วยวิธีนี้ ซึ่งยอดของกำลังแปรโดยตรงกับ  $(2N+1)^2 A^2$  หรืออีกนัยหนึ่ง สำหรับเฟสที่ไม่แน่นอน กำลังเป็นผลบวกของกำลังในหมวดต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้จึงแปรโดยตรงกับ  $(2N+1)^2 A^2$  กำลังที่ยอดสูงขึ้นจึงเนื่องจากการยึดหมวดเท่ากับจำนวนหมวดที่ยึดไว้ซึ่ง สำหรับเลเซอร์สภาวะของแข็งอาจจะเป็นช่วงระหว่าง  $10^3$  และ  $10^4$  ในขณะเดียวกันกำลังเฉลี่ยไม่มีผลกระทบจากการยึดหมวด



รูป 5.20 พฤษติกรรมเวลาของสนามไฟฟ้าอัมปลิจูดยกกำลังสองสำหรับกรณีของเจ็คหมวดออสซิลเลตมีเฟสยึดไว้ และอัมปลิจูดเท่ากันทุกหมวด

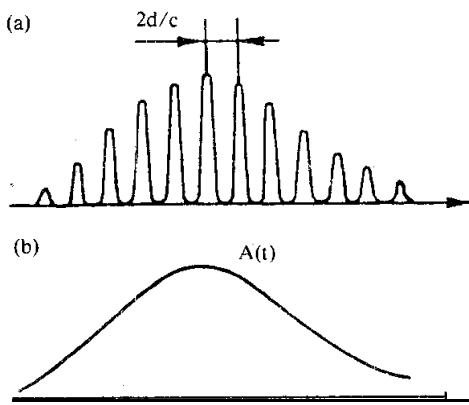
#### 5.4.4.1 วิธีการยึดหมวด

วิธีการยึดหมวดที่ขอบใช้กันทั่ว ๆ ไปเป็นไปตามวิธีหนึ่งวิธีใดดังต่อไปนี้ คือ (1) การยึดหมวดด้วยมอคูลเตอร์กิริยา (active modulator) ขับให้เคลื่อนที่ด้วยสัญญาณจากภายนอก (การยึดหมวดกิริยา) และ (2) การยึดหมวดด้วยวัสดุทัศนไมเชิงเส้นที่เหมาะสมชนิดหนึ่ง (การยึดหมวดเฉียบ)

วิธีแรกโดยสมมติว่าเราใส่เม็ดดูเลเตอร์ตัวหนึ่งเข้าไปในพองและให้สัญญาณเข้าไปขับเคลื่อนให้มันเคลื่อนที่มันจะสร้างคลื่นรูปไซน์มีการสูญเสียไปตามเวลาที่ความถี่  $\Delta\omega'$  ถ้า  $\Delta\omega' \neq \Delta\omega$  การสูญเสียนี้ก็คือพลังงานการผสมอัมปลิจูดของแต่ละหมวดพอง ถ้า  $\Delta\omega' = \Delta\omega$  แต่ละหมวดจะมีการผสมอัมปลิจูดเป็นแทนกร่าง (side band) ซึ่งมีจุดร่วมกับความถี่ของหมวดตัดไป ด้วยเหตุนี้มันจะเลิกเปลี่ยนกำลังกันระหว่างสองหมวดติดกัน ดังนั้นเฟสของหมวดห้องหมอดจึงถูกยืดไว้ การยึดหมวดแบบนี้ก็คือการยึดหมวดเออเม็ม (AM) สามารถแสดงความสัมพันธ์เพลสตังในสมการ (5.79) ถ้าเม็ดดูเลเตอร์วางใกล้ชิดกับกระจากข้างใดข้างหนึ่ง มันมีวิธีที่จะเลือกการยึดหมวดได้สองวิธีด้วยเม็ดดูเลเตอร์กิริยา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวเม็ดดูเลเตอร์ซึ่งมีเส้นทางเดินของเส้นผสมกันที่ความถี่  $\Delta\omega$  ในกรณีมันจะมีการยึดเฟสด้วยวิธีต่างจากวิธีในสมการ (5.79) เราสามารถหาคลื่นดูลซึ่งสัมผัสได้ซึ่งมีช่วงเวลาขนาดเป็นส่วนกลับของแอบกัวงออสซิลเลตเมื่อตัวเม็ดดูเลเตอร์นี้สร้างการผสมของความยาวพองขึ้นเป็นเหตุให้ความถี่อภินาทของมันผสมกัน การยึดหมวดแบบนี้เรียกว่าการยึดหมวดเออฟเอ็ม (FM)

เพื่อแสดงการยึดหมวดเนื้อyle ให้เราสมมติว่ามีตัวดูดกลืนอิมตัวที่เหมาะสมตัวหนึ่งวางอยู่ในพองเลเซอร์ เพื่อที่จะเข้าใจว่าตัวดูดกลืนที่เหมาะสมทำให้เกิดการยึดหมวดได้อย่างไร ให้เราพิจารณาหมวดเลเซอร์สองหมวดที่มีแกนอยู่ติดกัน ถ้าหมวดห้องสองของมันกำลังออสซิลเลต synonym ของมันจะทำอันตรกิริยากับตัวดูดกลืนอิมตัวเหมาะสมทำให้เกิดความแตกต่างของจำนวนประชากรของหมวดห้องระหว่างระดับล่างและระดับบน บรรจุด้วยพจน์ออสซิลเลตที่ความถี่ต่างกันระหว่างห้องสองหมวด\* พจน์นี้ใช้แทนการสูญเสียของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาภายในพอง ดังนั้นแต่ละหมวดจะคู่ควรกับอิทธิพลของหมวดข้างเคียง เป็นที่แน่ชัดว่าความสามารถสร้างความแตกต่างจำนวนประชากรประมาณเวลาในตัวดูดกลืนถ้าเวลาลดระดับของตัวดูดกลืน ที่เร็ว กว่าส่วนกลับของความถี่หมวดห่างกัน คงจำได้ว่าสารสืบอิมตัวสร้างเป็นคิวสวิตชิงได้ด้วยถ้าภาคตัดขวางของการเปลี่ยนแปลงโดยว่าภาคตัดขวางของวัตถุเลเซอร์มาก ดังนั้นพฤติกรรมเวลาของกำลังส่งออกจะแสดงคิวสวิตชิงพร้อมทั้งการยึดหมวดด้วยเมื่อนั้นในรูป 5.21a ซึ่งแสดงการแทรกสอดของหมวดออสซิลเลต พฤติกรรมเวลาของแต่ละหมวดได้แสดงในรูป 5.21b

\*จากสมการ (2.126) เรามี ( $\text{สำหรับ } I \ll I_c$ )  $\Delta N = N_c |I - (I/I_c)|$  เมื่อ  $N_c$  ไฟฟ้าห้องหมอด  $E(I)$  เป็นผลรวมของสนามทั้งสองหมวด ความเข้ม  $I \propto E(I)$  ด้วยเหตุนี้  $\Delta N$  จะมีพจน์ออสซิลเลตที่ความถี่ต่างกันระหว่างห้องสองหมวด



รูป 5.21 (a) แสดงพุติกรรมทางเวลาสำหรับแสงส่องออกเนื่องจาก การกระตุ้นด้วยคิวตัวตัวชี้และ การยึดหมวดของ เลเซอร์ (b) พุติกรรมเวลาของแต่ละหมวดของสีคลอก

#### 5.4.4.2 ทฤษฎีของการยึดหมวดกิริยา

ต่อไปเรามาพิจารณาทฤษฎีของการยึดหมวดกิริยา สำหรับรายละเอียดของทฤษฎีหมวดเดี่ยวจะพิจารณาในบทที่ 7 เราทราบแล้วว่าเมื่อมีการยึดหมวดคลื่นเดลแสงจะอยู่ห่างกันด้วยเวลาเท่ากับเวลาที่ใช้สำหรับวิ่งรอบโพรงไปกลับหนึ่งรอบ คลื่นเดลแสงคลื่นหนึ่งที่จุดใดๆ เป็นส่วนหนึ่งของขบวนคลื่นเดลที่เกิดขึ้นแต่ละคลื่นเดลอยู่ห่างกันด้วยเวลาที่ใช้เคลื่อนที่ไปกลับหนึ่งรอบของโพรง พุติกรรมการยึดหมวดนี้เราจะอธิบายในช่วงของเวลามากกว่าในช่วงความถี่ ในช่วงเวลาเราสามารถปรับปรุงเป็นทฤษฎีของการยึดหมวดต่อเนื่องโดยให้คลื่นเดลถูกสร้างขึ้นด้วยตัวของมันเองหลังจากวิ่งรอบโพรงไปกลับหนึ่งรอบ เราสมมติให้คลื่นเดลมีรูปร่างเป็นแบบเก้าส์เชียนทั่วไป ดังนั้นสนามไฟฟ้าของคลื่นเดลแสงกำหนดเป็น

$$E_1(t) = E_0 \exp[-\alpha t^2 + i(\omega_0 t + \beta t^2)] \quad \dots \dots \dots (5.86)$$

$\omega_0$  คือความถี่ที่ศูนย์กลางของสั้นโถงกำลังขยาย และ  $\alpha, \beta$  ใช้อธิบายพุติกรรมเวลาของอัมปลิจูดและความถี่ของสนามตามลำดับ ความเข้มของคลื่นเดลมีความกว้างเวลา (FWHM) กำหนดด้วย

$$\tau_p = [(2 \ln 2)/\alpha]^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (5.87)$$

ในขณะที่ความถี่ของมันกำหนดด้วย  $\omega_0 + 2\beta\tau_p$

ปริมาณ  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นค่าคงที่ เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณากรณีของเลเซอร์ วงแหวน (รูป 5.22a) และสมมติให้คลื่นเดลแสงเคลื่อนที่เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น (คือทิศทาง

หมุนตามนาฬิกา) โดยปกติกรณีที่นำสินใจมากที่สุดก็คือกรณีเมื่อความกว้างคลื่นดล  $\tau_p$  น้อยกว่า  $2d/c$  มาก ๆ เมื่อ  $2d$  เป็นความยาวของเส้นรอบวงแหวน กรณีนี้โครงสร้างเลเซอร์ยึดหมุดมีรูปดังแสดงในรูป 5.22b ให้สังเกตว่าสำหรับข้อสมมติตามสมการ (5.86) เราต้องการคลื่นดลที่ยังคงรูปเป็นแบบเก้าส์เชียนทั่วไปขณะที่เคลื่อนผ่านวัตถุกิริยาและอยู่ภายใต้มอคูลเตอร์ ดังนั้นเราจะใช้ข้อสมมติต่าง ๆ เพื่อให้มันคงรูปเป็นเช่นนั้น

เรามาพิจารณาหมวดเดอเอ็ม เราให้  $G(\omega)$  เป็นการขยายอัมปลิจูด (ของสนามไฟฟ้า) ต่อการเคลื่อนผ่านสารกิริยา และจากข้อสมมติฐานที่ว่าเวลาของการลดระดับเลเซอร์นานกว่าเวลาที่ใช้วงรอบไฟฟ้าไปกลับหนึ่งรอบ มันสามารถแสดงว่า

$$G(\omega) = \exp\{(\gamma_0/2)/[1 + i(\omega - \omega_0)T_2]\} \quad \dots \dots \dots (5.88)$$

เมื่อ  $\gamma_0$  คือกำลังขยายของการรีบมต่อการผ่านหนึ่งครั้งที่  $\omega = \omega_0$  และ  $T_2$  สัมพันธ์กับความกว้างเส้นของเส้นโค้งการขยาย (ดูรูป 2.7) เมื่อคลื่นดลเป็นแบบเก้าส์เชียนมีผลลัพธ์เป็นการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform)  $E_1(\omega)$  ของมัน จะเป็นแบบเก้าส์เชียนด้วย หลังจากเคลื่อนที่ผ่านวัตถุกิริยา การแปลงฟูเรียร์ของคลื่นดลจะกลายเป็น  $E_2(\omega) = E_1(\omega)G(\omega)$  ปริมาณนี้จะเป็นพังก์ชันแก๊สเชียนต่อเมื่อ  $G(\omega)$  เป็นพังก์ชันแก๊สเชียน ดังนั้นเราขยายพจน์ภายใต้เงื่อนไขที่เป็นเชิงลขของสมการ (5.88) ออกเป็นอนุกรมยกกำลังของ  $(\omega - \omega_0)$  จะได้

$$G(\omega) = \exp\{(\gamma_0/2)[1 - i(\omega - \omega_0)T_2 - (\omega - \omega_0)^2 T_2^2]\} \quad \dots \dots \dots (5.89)$$

ซึ่งเป็นพังก์ชันแก๊สเชียนทั่วไป ให้สังเกตว่าสมการ (5.89) จะเชื่อถือได้ถ้าความกว้างของคลื่นดลมีค่า้น้อยกว่าความกว้าง  $\Delta\omega_0 = 2/T_2$  ของเส้นโค้งกำลังขยาย ดังนั้นมันจะเป็นจริงต่อเมื่อ

$$(\Delta\omega_0\tau_p) \gg 1 \quad \dots \dots \dots (5.89a)$$

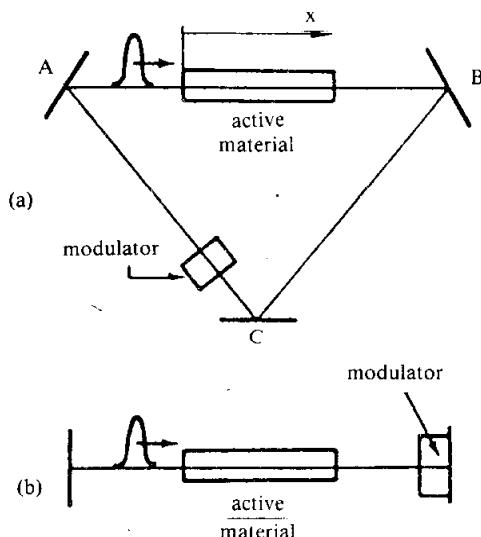
เรามาพิจารณาคลื่นดลเคลื่อนที่ผ่านมอคูลเตอร์ ถ้าเราให้การสูญเสียของมอคูลเตอร์เป็น  $\gamma_m(t)$  เราสามารถเขียน

$$\gamma_m = \delta(1 - \cos \Delta\omega t) = 2\delta \sin^2(\Delta\omega t/2) \quad \dots \dots \dots (5.90)$$

เมื่อ  $\delta$  คือการสูญเสียมากที่สุดของมอคูลเตอร์ และ  $\Delta\omega$  คือความถี่ของมอคูลเตอร์ (ซึ่งเราให้เท่ากับความถี่แตกต่างระหว่างหมุดที่อยู่ติดกัน) การส่งผ่านมอคูลเตอร์  $T_m$  เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} T_m &= 1 - \gamma_m \approx \exp(-\gamma_m) \\ &= \exp[-26 \sin^2(\Delta\omega t/2)] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (5.91)$$

มันแสดงว่าคลื่นดลเคลื่อนผ่านมอڈูลเตอร์ได้มีการสูญเสียเป็นศูนย์ (คือที่เวลา  $t = 0$ ) สมการ (5.91) สามารถประมาณได้เป็น



รูป 5.22 (a) เกสเซอร์วิ่งแหวนคิดหมวดกิริยา ก้าวรายให้ความยาววงแหวน ABC เป็น  $2d$  ความถี่อิเล็กทรอนิกส์ได้จาก เมื่อนำไป  $2kd = 2n\pi$  ทำให้  $\omega_n = n\pi c/d$  ของหมวดความยาวตัดกันมีความถี่ต่างกัน  $\Delta\omega = \pi c/d$  (b) การ คิดหมวดกิริยาในโครงสร้างท่อนเกลือร์กระบอกฐานสองแผ่น

$$T_m \approx \exp(-\delta(\Delta\omega)^2 t^2 / 2) \quad \dots \dots \dots (5.92)$$

ซึ่งเป็นพังก์ชันแก๊สเชียน หลังจากผ่านมอڈูลเตอร์แล้วคลื่นดล  $E_3(t)$  กำหนดด้วย

$$E_3(t) = E_2(t) T_m(t) \quad \dots \dots \dots (5.93)$$

เป็นพังก์ชันแก๊สเชียนพังก์ชันหนึ่ง ให้สังเกตว่าสมการ (5.92) เชือก็ได้ถ้าหากว่า

$$\tau_p \ll 2d/c \quad \dots \dots \dots (5.92g)$$

เมื่อ  $2d$  คือความยาวรอบวงแหวน สำหรับคลื่นดล  $E_4(t)$  หลังจากเคลื่อนที่รอบ โครงสร้างกลับหนึ่งรอบเขียนได้เป็น

$$E_4(t) = [\exp(-\gamma/2)] E_3(t) \quad \dots \dots \dots (5.94)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือกำลังสูญเสียของการทึบต่อการผ่านหนึ่งครั้งกำหนดด้วยสมการ (5.7) จาก เมื่อนำไปว่า  $E_4(t) = E_1(t)$  และข้อสมมติฐานสองสามข้อรวมถึงเงื่อนไขสมการ (5.89g) ด้วย เราได้

$$\alpha = \left( \frac{\delta}{2\gamma_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\Delta\omega \Delta\omega_0}{4} \quad \dots \dots \dots (5.95g)$$

$$\beta = 0 \quad \dots\dots\dots (5.95\text{a})$$

$$\gamma_0 = \gamma \quad \dots\dots\dots (5.95\text{b})$$

เมื่อ  $\Delta\omega_0 = 2/T_2$  สมการ (5.95a) ให้ช่วงเวลาคลื่นดลเป็น  $\tau_p$  สมการ (5.95a) แสดงว่า คลื่นดลไม่มีการกวนความถี่ไปอย่างรวดเร็ว และสมการ (5.95c) บ่งบอกเงื่อนไขว่าการขยายอิมตัว  $\gamma_0$  จะเท่ากับการสูญเสียที่แน่นอนของโพรง

สำหรับกรณีการยึดหมวดเอ็มสามารถทำด้วยวิธีเดียวกัน โดยสมมติคลื่นดลกำหนดด้วยสมการ (5.86) อีกครั้งหนึ่ง การขยายอัมปลิจูดต่อการผ่านไปหนึ่งครั้งกำหนดด้วย สมการ (5.89) ในขณะนี้การผลทำให้เกิดการย้ายเฟสเบรคตามเวลา  $\Delta\phi$  สำหรับการผล คลื่นรูปไซน์เราได้

$$\Delta\phi = \delta \cos(\Delta\omega t) \quad \dots\dots\dots (5.96)$$

ในการนี้ที่คลื่นดลเคลื่อนผ่านมอคูลเตอร์ในขณะที่มีการย้ายเฟส  $\Delta\phi$  เป็นค่าสูงสุด (หรือต่ำสุด) ดังนั้นเราจะสมมติให้คลื่นดลเคลื่อนผ่านมอคูลเตอร์เมื่อเวลา  $t = 0$  การส่งผ่านของมอคูลเตอร์สามารถเขียนเป็น

$$T_m = \exp(i\Delta\phi) = C \exp[-i\delta(\Delta\omega)^2/2] \quad \dots\dots\dots (5.97)$$

เมื่อ  $C = \exp i\delta$   $T_m$  ขณะนี้เป็นฟังก์ชันแก๊สเชิงทั่วไป คลื่นดลจะเป็นแก๊สเชิง หลังจากผ่านมอคูลเตอร์แล้วและเป็นไปตามสมการ (5.93) โดยใช้สมการ (5.94) อีกครั้งหนึ่ง พร้อมกับเงื่อนไข  $E_4(t) = E_1(t)$  เราพบว่า

$$\alpha = \beta = \left(\frac{\delta}{2\gamma_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta\omega\Delta\omega_0}{4}\right) \quad \dots\dots\dots (5.98\text{a})$$

$$\gamma_0 = \gamma \quad \dots\dots\dots (5.98\text{b})$$

เปรียบเทียบสมการ (5.98a) กับสมการ (5.95a) จะได้ว่าสำหรับ  $\alpha$  ค่าเดียวกันให้ค่าปริมาณ  $\alpha$  เท่ากับสำหรับการยึดหมวดห้องเครื่องและเอ็มและเอ็ม และเป็นเหตุให้ความกว้างคลื่นดล  $\tau_p$  มีค่าเท่ากันด้วย อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีเอ็ม  $\beta$  ไม่เป็นศูนย์ นั่นแสดงว่าความถี่คลื่นดล แสดงการกวนเป็นเส้นตรง

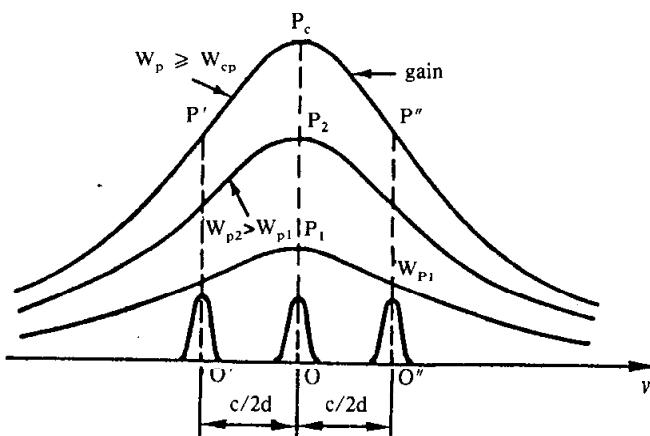
## 5.5 เปรียบเทียบการօอสซิลเลต helyum กับหมวดเดี่ยว

ในหัวข้อ 5.4 เราได้กล่าวถึงกรณีที่สำคัญที่สุดของพฤติกรรมเลเซอร์ชั่วขณะสำหรับ การทำงานห้องแบบหลายหมวด (หัวข้อ 5.4.2 และ 5.4.4) และการทำงานแบบหมวดเดียว (หัวข้อ 5.4.1 และ 5.4.3) ดังนั้นในตอนปลายของบทนี้เราจะพิจารณาถึงเงื่อนไขซึ่งทำให้การօอสซิลเลต

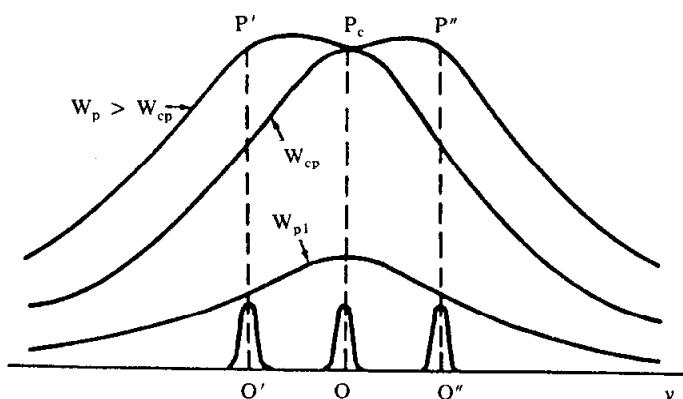
หมายหมวดเกิดขึ้นได้ และวิธีที่สามารถสร้างการอสูรเลตหมวดเดียว

เลเซอร์จะอสูรเลตหมายหมวดเมื่อระย่างห่างกันของหมวดมีค่าน้อยกว่าความกว้างของกำลังขยาย ในอดีตเป็นที่ยอมรับกันว่าเลเซอร์ซอนอสูรเลตเป็นหมวดเดียวเสมอถ้าหากว่าเส้นโค้งกำลังขยายแผ่ออกอย่างเอกพันธุ์ตามรูป 5.23 โดยมีหมวดโครงหมวดหนึ่งสมมติให้เกิดตรงยอดของเส้นโค้งกำลังขยายพอดี เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณาโครงก่อนระนาบขนาดมีหมวดห่างกันด้วยระยะ  $c/2d$  (พิจารณาเพียงหมวดอันดับต่ำสุดเท่านั้น รูป 4.7) กำลังขยายของเลเซอร์กำหนดด้วยสมการ (2.62) ( $N_2 > N_1$ ) ในพจน์กำลังขยาย (ลอการิทึม) ต่อหน่วยความยาวของวัตถุ การอสูรเลตจะเริ่มต้นที่หมวดศูนย์กลางก่อน เมื่อจำนวนการผันกลับประชากร  $N = N_2 - N_1$  เพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤต  $N_c$  ทำให้กำลังขยายเท่ากับการสูญเสียของโครงด้วยสมการ (5.18) อย่างไรก็ตามแม้ว่า  $W_p$  เพิ่มขึ้นเหนือขีดเริ่มในสภาวะคงตัว จำนวนการผันกลับระดับ  $N$  ยังคงที่ค่าวิกฤต  $N_c$  ยอดของกำลังขยายกำหนดด้วยความยาว  $OP$  ในรูป 5.23 ยังคงอยู่ที่ค่า  $OP_c$  เมื่อ  $W_p > W_{cp}$  ถ้าเส้นแผ่อออกอย่างสม่ำเสมอปร่างของมันจะไม่เปลี่ยนแปลงและเส้นโค้งกำลังขยายทั้งหมดยังคงเหมือนกับสำหรับ  $W_p > W_{cp}$  ดังในรูป 5.23 กำลังขยายสำหรับหมวดอื่นซึ่งแทนด้วยความยาว  $O'P'$ ,  $O''P''$  ฯลฯ จะมีค่าน้อยกว่า  $OP_c$  ของหมวดศูนย์กลางเสมอ ถ้าหมวดหักหมดมีการสูญเสียเท่ากัน ดังนั้นในสภาวะคงตัวจะมีเพียงหมวดศูนย์กลางเท่านั้นที่อสูรเลต สำหรับเส้นโค้งไม่เอกพันธุ์สถานการณ์จะแตกต่างกัน กว่ามาก (รูป 5.24) ในการนี้มันเป็นไปได้ที่จะเกิดหลุมใหม่ (burn holes) ขึ้นในเส้นโค้งกำลังขยาย (ดูหัวข้อ 2.6 โดยเฉพาะรูป 2.16) ดังนั้นเมื่อ  $W_p$  มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า  $W_{cp}$  กำลังขยายของหมวดศูนย์กลางยังคงเป็นค่าวิกฤต  $OP_c$  ในขณะที่กำลังขยายสำหรับหมวดอื่น ๆ  $O'P'$ ,  $O''P''$  ฯลฯ สามารถเพิ่มขึ้นจนถึงค่าขีดเริ่ม ในกรณีนี้ถ้าเลเซอร์ทำงานเหนือขีดเริ่มเล็กน้อยเราสามารถคาดการณ์ได้ว่ามีการอสูรเลตมากกว่าหนึ่งหมวด

หลังจากการคันபນเลเซอร์ไม่นานสิ่งที่สังเกตได้จากการทดลองจริง ๆ ก็คือการอสูรเลตหมายหมวดเกิดขึ้นกับหักเส้นโค้งไม่เอกพันธุ์ (เช่นเลเซอร์ก้าช) และเส้นโค้งเอกพันธุ์ (เช่นเลเซอร์ทับทิม) ผลลัพธ์หลังนี้ปรากฏว่าขัดแย้งกับเหตุผลที่กล่าวข้างต้น ปัญหานี้ได้รับการแก้ไขในเวลาต่อมาโดยอาศัยจากความจริงที่ว่าแต่ละหมวดมีหมวดลักษณะคลื่นนึงที่ดีอยู่ภายในวัตถุกิริยา เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณาสองหมวดซึ่งมีลักษณะคลื่นนึงของมันบ่ายไปด้วยระยะ  $a/4$  ในวัตถุกิริยา (รูป 5.25) เราจะสมมติว่าหมวด 1 ในรูป 5.25 เป็นหมวดศูนย์กลางของรูป 5.23 ดังนั้nmันจึงเป็นหมวดแรกที่ถึงขีดเริ่ม อย่างไรก็ตามเมื่อการอสูรเลตเกิดในหมวด 1 การผันกลับประชากรที่จุดเหล่านั้นซึ่งสนับสนุนให้เป็นศูนย์ (จุด A, B, ... ฯลฯ) จะไม่



รูป 5.23 แสดงเส้นโค้งกำลังขยายของເລເຊອ່ງທີ່ຍັບກັນອັດຕາກາຍກະຮະດັບ  $W_p$  ດໍາວັນຄວາມຄື (ເສັ້ນໂດ້ແກ່ພັນຫຼື)



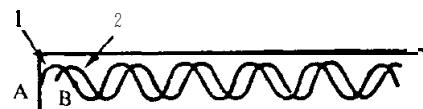
รูป 5.24 แสดงเส้นໂດ້ກັນກຳລັງຂາຍຂອງເລເຊອ່ງທີ່ຍັບກັນອັດຕາກາຍກະຮະດັບ  $W_p$  ດໍາວັນຄວາມຄື (ເສັ້ນໂດ້ໃໝ່ເອກພັນຫຼື : ປະກູກກາຮົນທຸລຸມໄໝ້ຂອງຄວາມຄື)

ດໍາເນີນໄປຈິນໜົມດັ່ງ ທີ່ຈຸດເຫັນກັນກຳລັບປະກາຊາສາມາດດໍາເນີນຕິດຕ່ອງກັນໄປໜັງຈາກ ດໍາວິກຸດ  $N_c$  ໃນໜົມວັດ 2 ຈຶ່ງຕອນແຮກມີການຂໍຍາຍຕໍ່ສາມາດມີກຳລັງຂາຍໄດ້ເຫັນກັນຫຼືອານຸມາ ກວ່າຂອງໜົມວັດ 1 ເມື່ອມັນໃຊ້ການຜັນກຳລັບປະກາຊາຈາກບົວເວັນແລ້ວນັ້ນໜຶ່ງໄໝ້ໄດ້ດໍາເນີນໄປຈິນໜົມສັ້ນດ້ວຍໜົມວັດ 1 ດັ່ງນັ້ນໜົມວັດ 2 ສາມາດອອສສົລືລັດໄດ້ສີພອງ ຈຶ່ງກັນໜົມວັດ 1 ຄວາມຈິງແລເຊອ່ງ ອອສສົລືລັດບົນຫລາຍ ຈຶ່ງໜົມສຳຫັບເສັ້ນໂດ້ແກ່ພັນຫຼືໜຶ່ງໄໝ້ໄດ້ເກີດຈາກຮອຍຫລຸມໄໝ້ໃນເສັ້ນໂດ້ ກຳລັງຂາຍ (ຮະຍະຫລຸມໄໝ້ທັກຄວາມຄື) ແຕ່ເນື່ອງຈາກຮອຍຫລຸມໄໝ້ໃນການແຈກແຈ້ງທາງຕໍ່ແຫ່ງ ຂອງການຜັນກຳລັບປະກາຊາງ່າຍໃນວັດຖຸກີຣີຢາ (ຮອຍຫລຸມໄໝ້ທັກຕໍ່ແຫ່ງ)

ສຽງໄດ້ວ່າ ເລເຊອ່ງຂອນອອສສົລືລັດຫລາຍໜົມວັດ ສຳຫັບເສັ້ນໂດ້ແກ່ພັນຫຼືໝັ້ນເກີດເນື່ອງ ຈາກຮອຍຫລຸມໄໝ້ທັກຕໍ່ແຫ່ງ (ຮູບ 5.25) ແລະ ຮອຍຫລຸມໄໝ້ທັກຄວາມຄື (ຮູບ 5.24) ອີ່ຢ່າງໄຮ

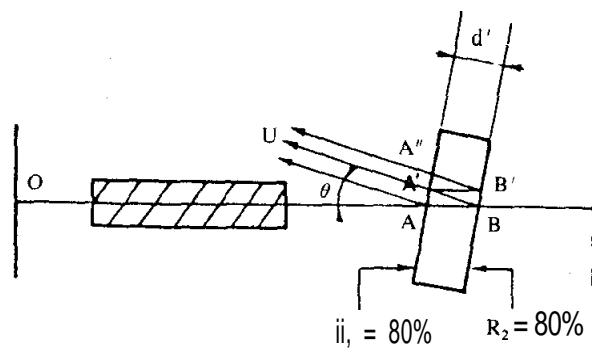
ก็มีหลายวิธีบังคับให้เลเซอร์ออกซิลเลตบนหมวดเดี่ยวได้ และเราจะอธิบายอย่างย่อ ๆ ดังนี้

โดยปกติการทำให้เลเซอร์ออกซิลเลตตามขวางบนหมวดใดหมวดหนึ่งทำได้โดยกำหนดค่าดัชนีของหมวดตามขวางด้วย  $m$  และ  $l$  (ดูบทที่ 4) ตัวอย่างการสร้างหมวดออกซิลเลต  $TEM_{00}$  โดยสอดกระบังลมที่มีช่องเปิดเหมาะสมที่บางจุดในโครง ถ้ารัศมีของช่องเปิดเล็กพอยเมะเลขจำนวนfareo's เนลของโครง  $N = a^2/d\lambda$  พิจารณาได้ด้วยช่วงเปิดนี้ จากรูป 4.18 แสดงความแตกต่างของการสูญเสียระหว่างหมวด  $TEM_{00}$  ขณะลดลงและหมวดอันดับสูงกว่าจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นด้วยการเลือกช่องเปิดอย่างถูกต้องเราสามารถหาหมวดออกซิลเลต  $TEM_{00}$  ตามลำพังได้ การสร้างหมวดออกซิลเลตตามขวางมีวิธีอื่นอีกได้แก่การใช้โครงไม่เสถียรและเลือกพารามิตเตอร์ของโครงที่ทำให้เลขจำนวนfareo's เนลสมมูลมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของเลขจำนวนเดิม ดังเห็นได้จากหัวข้อ 4.5 (รูป 4.25) ว่ามีการสูญเสียแตกต่างกันมากระหว่างหมวดอันดับต่ำสุดและหมวดอันดับสูงกว่าสำหรับเลขครึ่งจำนวนเดิมของ  $N_{eq}$  นี้ อย่างไรก็ตามในกรณีนี้จำส่งส่องออกอยู่ในรูประฆังและบางครั้งค่านี้อาจทำให้ไม่สะดวก

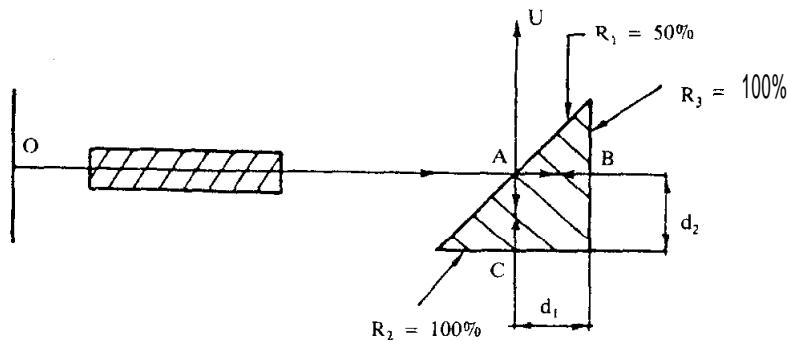


รูป 5.25 แสดงปรากฎการผ์รอยหุน ใหม่ด้านคำแหง ในวัตถุเลเซอร์

แม้ว่าในขณะเลเซอร์กำลังออกซิลเลตบนหมวดตามขวางเดี่ยว (ด้วยค่า  $m$  และ  $l$  แน่นอน) มันยังสามารถออกซิลเลตบนหมวดตามยาวหลาย ๆ หมวด (คือหมวดที่มีค่าดัชนีของหมวดตามยาว  $n$  ต่าง ๆ กัน) หมวดเหล่านี้แยกจากกันด้วยความถี่แตกต่าง  $\Delta v_n = c/2d$  (รูป 4.7) เพื่อจำกัดให้มันออกซิลเลตเป็นหมวดเดี่ยวตามยาวในบางครั้งจำเป็นต้องใช้ความยาวโครง  $d$  สัก ๆ ที่ให้  $\Delta v_n > \Delta v_0$  เมื่อ  $\Delta v_0$  คือความกว้างของเส้นโถงกำลังขยาย ในกรณีนี้ถ้าเราปรับหมวดให้ตรงกับศูนย์กลางของเส้นโถงกำลังขยายหมวดตามยาวหมวดถัดไปมันจะอยู่ห่างจากหมวดศูนย์กลางไกลเพียงพอที่จะไม่มีการออกซิลเลต (สำหรับเลเซอร์จะอยู่ไม่ไกลจากเห็นอีกดีเร็มaganick) วิธีนี้ใช้ได้ผลกับเลเซอร์ก้าวเมื่อความกว้างเส้นเลเซอร์เปรียบเทียบแล้วแคนบมาก (ประมาณสองสามจิกะเฮิรตซ์หรือน้อยกว่า) อย่างไรก็ตามเมื่อ  $d$  ต้องมีค่าน้อย ๆ (ตามปกติน้อยกว่า 10 ซม.) ปริมาณของสารกิริยาที่ย้อมน้อยด้วยและผลลัพธ์ให้กำลังส่องออกต่ำ ความกว้างเส้นเลเซอร์สำหรับของแข็งหรือของเหลวตามปกติมีค่ามาก (100 จิกะเฮิรตซ์หรือมากกว่า) ซึ่งวิธีข้างบนไม่สามารถทำได้ ในกรณีนี้และสำหรับเลเซอร์ก้าวหมวดเดี่ยวกำลัง



(a)



(b)

รูป 5.26 แสดงการเลือกหมวดตามยาว (a) โดยใช้ตัวส่งผ่านแฟบไปร-พีร็อต อีเกลอน (b) ใช้ตัวแทรกสอดการสะท้อนแบบฟอกช์-สมิธ

สูงด้วยต้องใช้วิธีของวิทยาการการคัดเลือกหมวดตามยาวหมวดอื่น ๆ สองวิธี (รูป 5.26) ดังนี้ วิธีแรกใช้ตัวส่งผ่านที่เรียกว่า แฟบไปร-พีร็อต ทรานสมิสชันอีเกลอน (Fabry-Perot transmission etalon) สอดไว้ในโพรงเลเซอร์ (รูป 5.26 a) ซึ่งประกอบด้วยกระจะจากสะท้อนระนาบขนานสองแผ่น  $R_1$  และ  $R_2$  วางห่างกันด้วยระยะ  $d'$  และเอียงทำมุน  $\theta$  กับแกนของโพรงกำถอน อีเกลอนตามปกติทำด้วยแท่งของแข็งวัตถุโปร่งใส (แก้วหรือคราอทซ์) เคลื่อนให้มีการสะท้อนสูงมาก ( $R = 80\%$ ) บนผิวขนานหั้งสองด้านของมัน หมวดที่มีการสูญเสียน้อยที่สุดจะเป็นหมวดของลำแสงส่งออก B ที่มีอัมปลิจูดเป็นศูนย์ ลำแสงนี้ได้จากการแทรกสอดของลำแสง OAU กับลำแสง OBU (บางลำแสงสะท้อนหั้งหมดเข้าด้วยกัน เช่น OBA'B'U...) ลำแสง OAU เปลี่ยนเฟสไปด้วยมุน  $\pi$  เรเดียน หลังจากการสะท้อนในขณะที่ลำแสง OBU เปลี่ยนเฟสไปด้วย  $2kd' \cos \theta$  ผลต่างของการเปลี่ยนเฟสของสองลำแสงเป็น  $2kd' \cos \theta - \pi$  สำหรับการสูญเสียของสองลำแสงน้อยที่สุดลำแสงหั้งสองต้องมีเฟสตรงกันข้าม ดังนั้นมันจึงมีแนวโน้ม

เป็นการแทรกสอดแบบหักล้างกัน มีเงื่อนไขคือ  $2kd' \cos \theta - \pi = (2n - 1)\pi$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็ม บวก ดังนั้นเมื่อ  $k = 2\pi n \theta / c$  ( $\theta$  คือดัชนีหักเหของวัตถุอีเกลอน) ความถี่ที่สอดคล้องกับการสูญเสียน้อยที่สุดกำหนดด้วย  $v = nc / 2\pi d' \cos \theta$  และความถี่ต่างกันของสองหมวดที่มีการสูญเสียต่ำเรียงลำดับกันคือ  $\Delta v = c / 2\pi d' \cos \theta$  เมื่อ  $d'$  สามารถทำให้มันเลิกเท่าไรก็ได้  $\Delta v$  สามารถทำให้เป็นค่ากว้าง ๆ และมุม  $\theta$  สามารถปรับจนทำให้หมวดที่มีการสูญเสียต่ำลงกับคุณย์กลางของเส้นโถงในขณะที่หมวดถัดไปอยู่นอกเส้นโถงกำลังขยาย วิธีที่สองโดยใช้ตัวแทรกสอดการสะท้อนแบบฟ็อกซ์-สมิธ (Fox-Smith reflection interferometer) ในรูป 5.26 b เคลื่อนผิวทั้งสามด้านเพื่อให้เป็นกระจกสามแผ่น  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  ในการนี้หมวดการสูญเสียต่ำสุด คือหมวดที่มีอัมปลิจูดของลำแสงส่องออก B เป็นคุณย์ ลำแสงนี้เกิดจากการแทรกสอดของลำแสง OAU กับลำแสง OBACU (ผลบวกของคลื่นสะท้อนหลาย ๆ คลื่น คือ OBACABACU) พิจารณาการสะท้อนของลำแสง OAU ทำให้มีเฟสย้ายไปด้วยมุม  $\pi$  ในขณะที่การย้ายเฟสของลำแสง OBACU เป็น  $2k(d_1 + d_2)$  ค่าแตกต่างของการย้ายเฟสของสองคลื่นสะท้อนเป็น  $2k(d_1 + d_2) - \pi$  และค่านี้ต้องเท่ากับจำนวนเท่าเลขค่านิพัทธ์ของ  $\pi$  คือ  $2k(d_1 + d_2) - \pi = (2n - 1)\pi$  ความถี่ต่างกันระหว่างสองหมวดที่มีการสูญเสียต่ำสุดกันในขณะนี้ คือ  $\Delta v = c / 2\pi(d_1 + d_2)$  เมื่อ  $\theta$  คือค่าดัชนีหักเหของวัตถุแห่งนั้น ในที่นี้  $d_1 + d_2$  มีค่าเหมือนกับ  $d' \cos \theta$  ซึ่งสามารถทำให้มีค่าเลิกเท่าไรก็ได้เพื่อให้การเลือกหมวดไม่มีผลต่อความยาวของสารกิริยา

วิทยาการการเลือกหมวดที่ได้กล่าวข้างต้นใช้ได้กับทั้งเลเซอร์คลื่นต่อเนื่องและเลเซอร์คลื่นเดลต้า ต่อไปเราจะพิจารณาเฉพาะกรณีการเลือกหมวดซึ่งโดยธรรมชาติเกิดกับเลเซอร์คิวาวิตช์เนื่อง สาเหตุของการเกิดกลไกการเลือกหมวดนี้สามารถเข้าใจได้โดยพิจารณาความเข้มของแสงเลเซอร์ในแต่ละหมวด (รูป 5.14) ขั้นแรกให้สังเกตว่าก่อนที่ตัวดูดกลืนจะเริ่มอิ่มตัว (คือ สำหรับ  $t < t_s$  ในรูป 5.14) และก่อนที่กำลังขยายจะอิ่มตัว (ซึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ ยอดของคลื่นเดลต้าในรูป 5.15) ทั้งกำลังขยายและการสูญเสียสามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ในเวลาและมีค่าเท่ากับค่าไม่อิ่มตัวของมัน เมื่อแต่ละหมวดเริ่มต้นจากระดับรากฐานเดียวกันซึ่งเกิดจาก การเปล่งแสงตามปกติวิสัย อัตราส่วนของความเข้มหมวด a และหมวด b หลังจากเข้าไปในไฟฟ้า กระแส กำหนดด้วย

$$\frac{I_a}{I_b} = \left| \frac{|G_a|^2 \exp(-\gamma_a)}{|G_b|^2 \exp(-\gamma_b)} \right|^n \quad \dots \dots \dots (5.99)$$

เมื่อ  $|G|^2$  คือ กำลังขยายบังไม่อัตราของวัตถุเลเซอร์ และ  $\gamma$  คือการสูญเสียของการทิ่มของไฟ (รวมทั้งการสูญเสียบังไม่อัตราของตัวดูดกลืนด้วย) การหาค่าของ  $I_a/I_b$  ที่  $t = t_s$  เราแทนค่า  $\eta$  ด้วย  $\eta_s = cI_s/d$  เมื่อ  $d$  คือความยาวของไฟ ค่า  $I_a/I_b$  บังใช้กันยอดของคลื่นคลื่นมีอัตราลดระดับใช้เวลาเพียงสัก ๆ ระหว่าง  $t_s$  และ  $t_p$  เท่านั้น ในเลเซอร์คิวสวิตช์เนื้อยา  $\eta_s$  มีค่าโดยมาก ความจริงก่อนที่สารสีจะถูกฟอกให้จางลงการสูญเสียของไฟมีค่าสูงมาก ดังนั้น ความเข้มเลเซอร์เพิ่มขึ้นเป็นไปอย่างช้ามาก เพื่อความสะดวกเรารسمมิติให้กำลังขยายของสองหมวดมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากสมการ (5.99)  $\gamma_a - \gamma_b$  มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอที่จะสร้างความเข้มของสองหมวดต่างกันอย่างมากmay ได้จากรูป 5.14 เรายันว่า  $\eta_s = 2000$  และสมการ (5.99) ทำนายสำหรับ  $\eta = \eta_s$  และ  $|G_a| = |G_b|$  ให้หมวดเป็น 10 เดซิเบล (dB) (คือ  $I_a/I_b = 10$ ) สำหรับ  $\gamma_a - \gamma_b = 10^{-3}$  ซึ่งเป็นค่าต่างกันน้อยมากจริง ๆ สำหรับการสูญเสียระหว่างสองหมวด เมื่อการสูญเสียที่ต่างกันน้อยมากเช่นนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยไม่ต้องมีการเลือกหมวดตามต้องการจึงเป็นที่แน่นอนว่าการทำงานในหมวดเดียวบ่อยครั้งหาได้จากเลเซอร์คิวสวิตช์เนื้อยา ให้สังเกตว่าสำหรับเครื่องปิดเปิดด้วยกลไกและเครื่องปิดเปิดด้วยไฟฟ้าและด้วยแสงกลไกการเลือกหมวดนี้ยังใช้ไม่ได้ผล ในกรณีเหล่านี้เลเซอร์สร้างขึ้นจากแสงรบกวนซึ่งต้องรวดเร็วมาก และ  $N_s$  อาจจะมีขนาดเพียง 10 หรือ 20 เท่านั้น

## 5.6 สรุป

1. สมการอัตราของเลเซอร์สามารถดัดแปลงด้วยสมการ (5.15) และของเลเซอร์สี ระดับกำหนดด้วยสมการ (5.17) ซึ่งทั้งสองสมการต่างกันด้วยพจน์  $-2BqN$  สำหรับเลเซอร์สามระดับและ  $-BqN$  สำหรับเลเซอร์สีระดับ ตัวร่วมเลข 2 ที่ต่างกันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 เท่าในเลเซอร์สามระดับ ( $N_2$  ลดลงเป็น 1 และ  $N_1$  เพิ่มขึ้นด้วย 1) ในขณะที่เลเซอร์สีระดับเปลี่ยนไปเป็น 1 ( $N_2$  ลดลงเป็น 1 ขณะที่  $N_1$  ไม่เปลี่ยนแปลง)

2. พฤติกรรมเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง ได้จากการยกระดับพลังงานของสถานะคงตัว (คือ  $W_p$  ไม่ขึ้นกับเวลา) ให้พฤติกรรมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับเลเซอร์ระบบสามระดับมี

$$W_{cp} = \frac{1}{\tau}$$

และกำลังทั้งหมดจากกระบวนการหักส่อง คือ

$$P = \frac{V_a(N_t + N_0)\hbar\omega}{2\tau} \left( \frac{\gamma_u}{\gamma} \right) (x-1)$$

ซึ่งเปรียบ  
และสำหรับเลเซอร์ระบบสี่ระดับมี

$$W_{cp} = N_c / (N_t - N_c) \tau$$

$$\text{และ } P = \left( \frac{V_a \hbar \omega}{\sigma \ell \tau} \gamma_u \right) (x - 1)$$

3. พฤติกรรมเลเซอร์ชั้นหนึ่งของการออสซิลเลตหมวดเดียว อัตราการยกระดับจะขึ้นกับเวลา  $W_p(t)$  จากสมการ (5.15) และ (5.17) ให้คำตอบที่เป็นพฤติกรรมเวลาของ  $q(t)$  และ  $N(t)$  กำหนดด้วยความสัมพันธ์

$$\delta q = C \exp(-t/t_0) \sin(\omega t + \phi)$$

$$\delta N = \frac{\omega C}{B q_0 V_a} \exp(-t/t_0) \cos(\omega t + \phi)$$

$C$  และ  $\phi$  หาได้จากสมการเริ่มต้น (5.53)

สำหรับเลเซอร์สามระดับ เราได้เงื่อนไขว่า

$$t_0 = \frac{2\tau}{x + 1 + (\sigma \ell N_i / \gamma)(x - 1)}$$

$$\text{และ } \omega = \left[ \sigma \ell N_i \frac{C}{\tau d} (x - 1) \right]^{\frac{1}{2}}$$

สำหรับเลเซอร์สี่ระดับ เราหาเงื่อนไขได้ในรูปแบบที่ง่ายกว่า

$$t_0 = 2\tau/x$$

$$\omega = [(x - 1)/\tau_c \tau]^{\frac{1}{2}}$$

4. การใช้คิวสวิทชิงช่วยให้ลำแสงส่งออกเป็นคลื่นดลเลเซอร์ที่มีช่วงเวลาสั้น ๆ และกำลังทรงยอดสูง ๆ

5. สำหรับเลเซอร์ที่ออสซิลเลตหลายหมวด หมวดเหล่านี้ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน ทำให้พฤติกรรมเวลาของเลเซอร์ส่งออกมีรูปแบบเป็นยอดแหลมหลายยอดไม่สม่ำเสมอและมีเฟสไม่สม่ำเสมอด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงพฤติกรรมไม่สม่ำเสมอี้ สามารถทำได้ด้วยวิธีการยึดหมวดคือบังคับให้ออสซิลเลตหมวดต่าง ๆ พร้อมกันด้วยอัมปลิจูดที่เท่ากันและยึดเฟสของมันเป็นไปตาม  $\varphi_k - \varphi_{k-1} = \alpha$ ;  $\alpha$  เป็นค่าคงที่

## แบบฝึกหัดที่ 5

- 5.1 จงคำนวณหาการสูญเสียลอกอกริทึม  $\gamma$  ที่สอดคล้องกับการระลุผ่านกระจก  $T = 80$  เปอร์เซ็นต์
- 5.2 ถ้าความยาวของวัตถุกิริยาเพิ่มถึง  $l = 5$  ซม. สมการ (5.32) (สำหรับทั่วทิม) และสมการ (5.41) (สำหรับ Nd : YAG) เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร?
- 5.3 สมมติว่าการระลุผ่าน  $T_1$  ของกระจก 1 ในรูป 5.5 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ สมการ (5.32) เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร? กำลังวิกฤต  $P_c$  จะยอมรับผลการเปลี่ยนแปลงนี้หรือไม่?
- 5.4 ประสิทธิภาพความชัน (slope efficiency)  $\phi_{sl}$  ตามปกติกำหนดเป็น  $\phi_{sl} = dP/dP_p$  เมื่อ  $P$  คือกำลังส่องออกของเลเซอร์ และ  $P_p$  คือกำลังยกระดับ สำหรับทั้งเลเซอร์สามระดับและสี่ระดับ จงแสดง  $\phi_{sl}$  เป็นพังก์ชันของ  $(dW_p/dI)$  (เมื่อ I คือความเข้มของหลอดแสง) และพื้นที่ผิว S ของหลอดแสง
- 5.5 สมมติพื้นที่ผิวของหลอดแสง  $S = 2\pi\theta\omega_0 l$  เมื่อ  $\theta_0$  คือขนาดของจุดสว่างเลเซอร์ภายในวัตถุกิริยา โดยใช้สมการสำหรับ  $W_p$  กำหนดในแบบฝึกหัดข้อ 3.1 | กับ  $f(\alpha_0 R) = \exp(-\alpha_0 R)$  | ให้แสดงว่าสำหรับเลเซอร์สามระดับ เราได้

$$\phi_{sl} = (\gamma_u/\gamma)(\phi_p \phi_{si}/4) [N_i \sigma_i \omega_0 \exp(-N_i \sigma_i \omega_0/2)]$$

- 5.6 จงแสดงว่าจากสมการสำหรับ  $\phi_{sl}$  ในข้อ 5.5 มีความเข้มข้น  $N_c$  ที่เป็นประโยชน์มาก ที่สุดของอะตอมกิริยา และแสดงด้วยว่าค่าที่เป็นประโยชน์มากที่สุดของ  $\phi_{sl}$  คือ

$$\phi_{sl} = (2/e) (\gamma_u/\gamma) \phi_p \sigma \phi_{si}/4$$

- 5.7 จงหาประสิทธิภาพความชันของเลเซอร์สี่ระดับโดยทำเช่นเดียวกับการคำนวณในข้อ 5.5 และแสดงว่าสมการต่อไปนี้เป็นจริง

$$\phi_{sl} = (\gamma_u/\gamma)(\phi_p \phi_{si}/2) N_i \sigma_i \omega_0 \exp(-N_i \sigma_i \omega_0)$$

ให้หาเงื่อนไขสำหรับค่าที่เป็นประโยชน์มากที่สุดของ  $\phi_{sl}$  เพื่อยับยั่งสมการนี้กับสมการในข้อ 5.6

- 5.8 พิจารณาเลเซอร์ทั่วทิมด้วยโครงสร้างดังในรูป 5.5 และมีค่าของปริมาณต่อไปนี้ คือ  $T_2 = 0$ ,  $l = 7.5$  ซม.,  $2\omega_0 = 1$  มิลลิเมตร,  $d = 50$  เซนติเมตร,  $T_1 = 0.5$  สมมติให้ความเข้มข้นของ  $\text{Cr}^{3+}$  เป็น 0.05 เปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียภายในต่อการผ่านไปของ  $T_i = 10$  เปอร์เซ็นต์ เลเซอร์นี้ยกระดับพลังงานด้วยอัตราเป็นสองเท่าของขีดเริ่มสำหรับกิริยา เลเซอร์ปกติ (คือไม่ใช้คิวสวิตช์) และใช้คิวสวิตช์ด้วยวิธีการเปิดปิดอย่างรวดเร็ว จงหา กำลังของยอด เวลาคลื่นเดลขั้น เวลาคลื่นเดลตก และพลังงานส่องออกของคลื่นเดลแสง

- 5.9 พิจารณาเลเซอร์ Nd : YAG ด้วยโครงสร้างแสดงในรูป 5.7 และมีค่าของปริมาณต่อไปนี้  
คือ  $T_2 = 0$ ,  $\ell = 7.5 \text{ ซม.}$ ,  $2\omega_0 = 1 \text{ มม.}$ ,  $d = 50 \text{ ซม.}$ ,  $T_1 = 0.1$  สมมติให้ความเข้มข้นของ  $\text{Nd}^{3+}$  มี 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการสูญเสียภายในต่อการผ่านไปของ  $T_1 = 6 \text{ เปอร์เซ็นต์}$   
เลเซอร์นี้ยังคงระดับพลังงานด้วยอัตราเป็นสองเท่าของขีดเริ่มสำหรับกิริยาเลเซอร์ปกติ  
(คือไม่ใช้คิวสวิตช์) และใช้คิวสวิตช์ด้วยวิธีการเปิดปิดอย่างรวดเร็ว จงหากำลังของยอด  
เวลาคลื่นเดลี่น เวลาคลื่นเดลตาก และพลังงานส่งออกของคลื่นเดลแสดง
- 5.10 ถ้าความยาว一波 d ในข้อ 5.8 และ 5.9 ลดลงด้วยตัวร่วม 2 พารามิเตอร์คลื่นเดลส่งออก  
เปลี่ยนไปเป็นอย่างไร?