บทที่ 1
แนวความคิดเบื้องต้น

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาจบบทนี้แล้ว

1. นักศึกษาต้องสามารถบอกแนวความคิดการเกิดเลเซอร์ได้ว่า การเปล่งแสงตามปกติวิสัย การเปล่งแสงโดยการกระตุ้น การดูดกลืน การยกระดับพลังงานในเลเซอร์ ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างไร

2. นักศึกษาสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างทางคุณลักษณะของแสงเลเซอร์กับแสงทั่ว ๆ ไป คือ คุณสมบัติทาง การมีทิศทางตรง การมีแสงสีเดียว ความพร้อมเพียงและความสว่าง

3. นักศึกษาต้องสามารถแก้ปัญหาจากแบบฝึกหัดท้ายบทได้อย่างน้อย 50% ในเวลาหนึ่งสัปดาห์

1.1 การเปล่งแสงตามปกติวิสัยและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น การดูดกลืน (Spontaneous and Stimulated Emission, Absorption)

วิชาควอนตัมอิเล็กทรอนิกส์สามารถกำหนดได้เป็นสาขาวิชาหนึ่งของวิชาอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากธรรมชาติของควอนตัมได้แสดงปรากฏการณ์อันเป็นกฎขั้นพื้นฐานอย่างหนึ่งทางไฟฟ้า ดังนั้น เราจึงมีความมุ่งหมายเกี่ยวข้องกับวิชาควอนตัมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะที่เรียกว่า หลักกายภาพของเลเซอร์และพฤติกรรมของมัน เลเซอร์มีการแสดงปรากฏการณ์ทางแสงขั้นพื้นฐานสามอย่างที่มีประโยชน์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอัตรกิริยากับวัตถุ เรียกว่า วิธีการเปล่งแสงตามปกติวิสัยและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น และวิธีการดูดกลืน

1.1.1 การเปล่งแสงตามปกติวิสัย

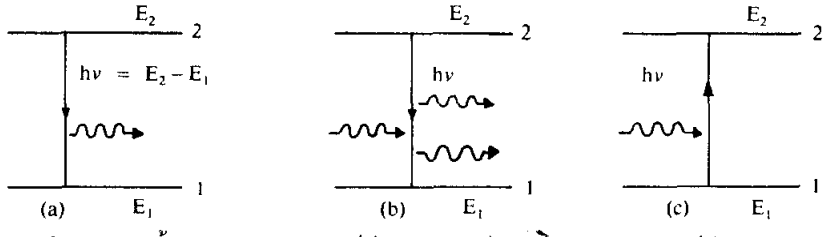
พิจารณาระดับพลังงานสองระดับ คือ ระดับ 1 และ 2 ของสสารชนิดเดียวกัน พลังงานของมันคือ E_1 และ E_2 ($E_1 < E_2$) โดยสมมติว่า ระดับ 1 เป็นระดับต่ำ และตอนแรกอะตอม (หรือโมเลกุล) อยู่ในระดับ 2 เมื่อ $E_2 > E_1$ อะตอมจะมีแนวโน้มลดระดับสู่ระดับ 1 และปลดปล่อย

พลังงานเท่ากับความแตกต่าง $E_2 - E_1$ ออกมา เมื่อพลังงานที่ปลดปล่อยออกมานี้อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เราจะเรียกว่าเป็นการเปล่งแสง (หรือการแผ่รังสี) ตามปกติวิสัยด้วยความถี่ ν กำหนดด้วยสมการ [เนื่องจากพลังค์ (Planck)]

$$\nu = (E_2 - E_1)/h \qquad \ldots\ldots\ldots (1.1)$$

ในที่นี้ h คือค่าคงที่ของพลังค์ ดังนั้น การเปล่งแสงตามปกติวิสัยก็คือ การเปล่งของโฟตอนด้วย พลังงาน $h\nu = E_2 - E_1$ เมื่ออะตอมลดระดับจากระดับ 2 ไปยังระดับ 1 (รูป 1.1a) ให้สังเกตว่าการเปล่งรังสีเป็นวิธีหนึ่งของสองวิธีที่เป็นไปได้สำหรับอะตอมลดระดับ การลดระดับสามารถเกิดขึ้นได้แม้ไม่มีการแผ่รังสี ในกรณีนี้พลังงานแตกต่าง $E_2 - E_1$ เกิดเป็นรูปแบบอื่นมากกว่าจะเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (กล่าวคือ มันอาจจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของโมเลกุลที่อยู่รอบ ๆ)

ความเป็นไปได้ของการเปล่งแสงตามปกติวิสัยสามารถบ่งบอกด้วยวิธีต่อไปนี้ คือ เราสมมติว่าที่เวลา t มีอะตอมจำนวน N_2 (ต่อหน่วยปริมาตร) อยู่ในระดับ 2 อัตราการลดระดับของอะตอมเหล่านี้คือ $(dN_2/dt)_{sp}$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ N_2 ดังนั้น เราสามารถเขียนได้เป็น



รูป 1.1 *แสดงแผนภูมิของสามขั้นตอน* (a) *การเปล่งแสงตามปกติวิสัย* (b) *การเปล่งแสงโดยการกระตุ้น* (c) *การดูดกลืน*

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2 \qquad \ldots\ldots\ldots (1.2)$$

สัมประสิทธิ์ A เรียกว่า ความเป็นไปได้ของการเปล่งแสงตามปกติวิสัย หรือเรียกว่า สัมประสิทธิ์เอ ไอน์สไตน์ (ไอน์สไตน์ได้พบสัมประสิทธิ์ A ครั้งแรกจากการพิจารณาทางอุณหพลศาสตร์) ปริมาณ $\tau_{sp} = 1/A$ เรียกว่าช่วงเวลาของการเปล่งแสงตามปกติวิสัย ค่าของ A (และ τ_{sp}) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะ

1.1.2 การเปล่งแสงโดยการกระตุ้น (รูป 1.1 b)

ครั้งแรกเราสมมติว่า อะตอมที่พบตอนแรกอยู่ในระดับ 2 และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ ν (ซึ่งเท่ากับความถี่ของคลื่นที่ปล่อยออกมาจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย) ตกกระทบบนวัตถุ ถ้าคลื่นนี้มีความถี่ตรงกับความถี่ของอะตอม มันจะทำให้อะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลง

$2 \rightarrow 1$ ขึ้น ในกรณีนี้พลังงานแตกต่าง $E_2 - E_1$ ถูกปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะรวมกับคลื่นตกกระทบ นี่คือปรากฏการณ์ของการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อแตกต่างระหว่างการเปล่งแสงตามปกติวิสัยและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นคือ ในกรณีของการเปล่งแสงตามปกติวิสัย อะตอมปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาโดยปราศจากความสัมพันธ์ทางเฟสที่แน่นอนกับที่ปล่อยออกมาจากอะตอมอื่น ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถปล่อยคลื่นออกมาในทิศทางใดก็ได้ ส่วนกรณีการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น ขั้นตอนถูกบังคับด้วยคลื่นตกกระทบแม่เหล็กไฟฟ้า การเปล่งแสงของอะตอมได้รวมเฟสเข้ากับคลื่นตกกระทบ คลื่นนี้ยังคงต้องพิจารณาทิศทางของคลื่นที่เปล่งออกมาด้วย

ในกรณีนี้เราสามารถบ่งบอกขั้นตอนการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยสมการ

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2 \qquad \ldots\ldots\ldots (1.3)$$

เมื่อ $(dN_2/dt)_{st}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงจากระดับ $2 \rightarrow 1$ เป็นผลลัพธ์ของการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น และ W_{21} เรียกว่าความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงโดยการกระตุ้น เหมือนกับกรณีของสัมประสิทธิ์ A ในสมการ (1.2) และสัมประสิทธิ์ W_{21} เป็นมิติของ $(\text{เวลา})^{-1}$ อย่างไรก็ตาม A และ W_{21} ไม่เหมือนกันตรงไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะยังคงขึ้นอยู่กับความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบด้วย สำหรับคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้า เราสามารถเขียนได้ว่า

$$W_{21} = \sigma_{21}F \qquad \ldots\ldots\ldots (1.4)$$

ในที่นี้ F คือ ฟลักซ์โฟตอนของคลื่นตกกระทบ และ σ_{21} คือ ปริมาณค่าหนึ่งมีมิติของพื้นที่ (เรียกว่าพื้นที่ภาคตัดขวางของการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น) และขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเท่านั้น

1.1.3 การดูดกลืน (รูป 1.1c)

เราสมมติว่าอะตอมครั้งแรกอยู่ในระดับ 1 ถ้าระดับนี้เป็นระดับต่ำสุด (ระดับพื้น) อะตอมจะคงอยู่ในระดับนี้เสมอ นอกจากว่ามีตัวกระตุ้นบางอย่างเข้าไปกระทบมัน ดังนั้น เราจะสมมติว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ ν กำหนดด้วยสมการ (1.1) ได้ตกกระทบบนสสารอะตอมจะมีโอกาสถูกผลักให้ขึ้นไปอยู่ในระดับ 2 ได้ โดยอะตอมต้องการพลังงานเท่ากับความแตกต่าง $E_2 - E_1$ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมันสามารถได้จากพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบ และนี่คือขั้นตอนของการดูดกลืน

เราสามารถกำหนดอัตราการดูดกลืน W_{12} ในรูปแบบเช่นเดียวกับสมการ (1.3) คือ

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 \qquad \text{.....(1.5)}$$

ในที่นี้ N_1 เป็นจำนวนอะตอมในระดับ 1 ขณะใด ๆ ทำนองเดียวกันกับสมการ (1.4) เราสามารถเขียน

$$W_{12} = \sigma_{12}F \qquad \text{.....(1.6)}$$

เมื่อ σ_{12} คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของการดูดกลืน ซึ่งขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะเท่านั้น

สำหรับพจน์ของโฟตอนในขั้นตอนของการเปล่งแสงตามปกติวิสัยและโดยการกระตุ้นการดูดกลืน สามารถอธิบายได้ดังนี้ (ดูรูป 1.1)

(1) ในขั้นตอนการเปล่งแสงตามปกติวิสัย อะตอมลดระดับลงจากระดับ 2 ไประดับ 1 โดยเปล่งแสงจำนวนหนึ่งโฟตอนออกมา

(2) ในขั้นตอนการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น โฟตอนตกกระทบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากระดับ 2 ไประดับ 1 และมีสองโฟตอนเกิดขึ้น (เกิดจากการกระตุ้นบวกกับตัวกระตุ้นอีกหนึ่ง)

(3) ในขั้นตอนการดูดกลืน โฟตอนถูกดูดกลืนเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากระดับ 1 ไประดับ 2 สุดท้ายเราสังเกตได้ว่า $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ เหมือนกับของไอน์สไตน์ที่แสดงให้เห็นเมื่อตอนต้นศตวรรษนี้ แสดงว่าความเป็นไปได้ของการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นและการดูดกลืนเท่ากัน ดังนั้น ต่อไปนี้เราจะเขียน $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$ และ σ จะหมายถึงพื้นที่ภาคตัดขวางของการเปลี่ยนแปลง จำนวนอะตอมต่อหน่วยปริมาตรในระดับใด ๆ ที่กำหนดให้ จะเรียกว่าประชากรอะตอม (population) ของระดับนั้น

1.2 แนวความคิดของเลเซอร์

พิจารณาระดับพลังงานใด ๆ สองระดับคือ ระดับ 1 และ 2 ของสสาร และให้ N_1 และ N_2 เป็นจำนวนอะตอมของมัน ถ้ามีคลื่นระนาบที่มีความเข้มสัมพันธ์กับฟลักซ์โฟตอน F เคลื่อนที่ไปตามทิศ z ในสสาร การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์นี้เนื่องจากทั้งการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นและการดูดกลืนในบริเวณแรเงาของรูป 1.2 เป็นไปตามสมการ (1.3) ถึง (1.6) กำหนดด้วย

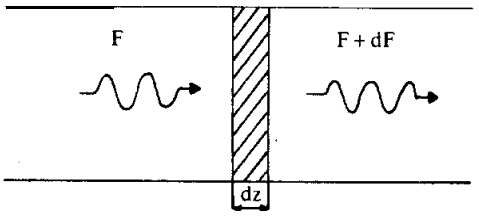
$$dF = \sigma F(N_2 - N_1)dz \qquad (1.7)$$

สมการ (1.7) แสดงว่าสสารประพฤติตัวเหมือนกับเป็นตัวขยาย (กล่าวคือ $dF/dz > 0$)

เมื่อ $N_2 > N_1$ และมันจะประพฤติตัวเป็นตัวดูดกลืนเมื่อ $N_2 < N_1$ ขณะนี้เราทราบแล้วว่ากรณีของอุณหภูมิสมดุล ประชากรอะตอมในระดับพลังงานอธิบายได้ด้วยสถิติของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann statistics) ดังนั้น ถ้า N_1^e และ N_2^e เป็นประชากรอะตอมของสองระดับพลังงาน เมื่ออุณหภูมิสมดุล เราได้

$$\frac{N_2^e}{N_1^e} = \exp\left| - \frac{(E_2 - E_1)}{KT} \right| \quad . \qquad (1.8)$$

ในที่นี้ K คือ ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ ดังนั้น ในขณะอุณหภูมิสมดุล เราได้ $N_2 < N_1$ จากสมการ (1.7) สสารจะแสดงเหมือนกับเป็นตัวดูดกลืนที่ความถี่ ν อย่างไรก็ดี ถ้าอยู่ในสภาวะไม่สมดุล คือสำหรับ $N_2 > N_1$ สสารจะแสดงตัวเป็นตัวขยาย ในกรณีนี้เรากล่าวได้ว่ามันเป็นสถานะการผันกลับประชากร (population inversion) ในสสารซึ่งเราหมายถึงว่าความแตกต่างของประชากรอะตอม ($N_2 - N_1 > 0$) มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับตอนอยู่ในสภาวะปกติ ($N^e_2 - N^e_1 < 0$) สสารที่มีการผันกลับประชากรจะเรียกว่า สารกิริยา



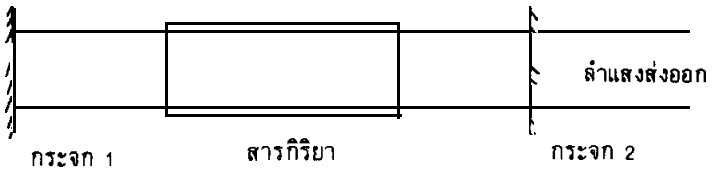
รูป 1.2 *การเปลี่ยนแปลง* dF *ของฟลักซ์โฟตอน* F *สำหรับคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้า เคลื่อนที่เป็นระยะทาง* dz *ผ่านสสาร*

ถ้าความถี่ของการเปลี่ยนแปลง $\nu = (E_2 - E_1)/h$ อยู่ในช่วงคลื่นไมโคร ตัวขยายชนิดนี้ เรียกว่า ตัวขยายเมเซอร์ (maser amplifier) คำว่าเมเซอร์ เป็นคำรวมของตัวอักษรตัวแรกของคำว่า "microwave amplification by stimulated emission of radiation" (การขยายคลื่นไมโครโดยกระตุ้นการแผ่รังสี) แต่ถ้าความถี่ของการเปลี่ยนแปลง ν อยู่ในช่วงของคลื่นแสง ตัวขยายเรียกว่า ตัวขยายเลเซอร์ คำว่าเลเซอร์ เป็นคำรวมของอักษรตัวแรกเหมือนเมเซอร์ แต่ใช้อักษร ℓ (แสง) แทนที่ตัว m (คลื่นไมโคร) อย่างไรก็ตาม คำว่าเลเซอร์ใช้ได้ทั่ว ๆ ไป ไม่เพียงใช้กับความถี่ของคลื่นแสงที่มองเห็นเท่านั้น แต่ยังใช้ได้กับความถี่ต่าง ๆ ที่อยู่ในช่วงใกล้กันหรือไกลจากคลื่นใต้แดง (infrared) คลื่นเหนือม่วง (ultraviolet) และแม้แต่ในช่วงรังสีเอ็กซ์ (x-ray) ซึ่งเราจะเรียกเป็นเลเซอร์รังสีใต้แดง เลเซอร์รังสีเหนือม่วง และเลเซอร์รังสีเอ็กซ์ตามลำดับ

เพื่อสร้างตัวออสซิลเลตขึ้นจากตัวขยาย เราจำเป็นต้องรู้จักเกี่ยวกับการป้อนกลับเพิ่มขึ้น (positive feedback) ที่เหมาะสม สำหรับช่วงคลื่นไมโครสามารถทำได้โดยวางสารกิริยาในโพรงกำทอน ซึ่งจะเกิดอภินาท (resonance) ที่ความถี่ ν ส่วนในกรณีของเลเซอร์ การป้อนกลับหาได้โดยการวางสารกิริยาอยู่ระหว่างกระจกเงาสองบานที่มีประสิทธิภาพการสะท้อนกลับสูง (กระจกเงาระนาบขนานตามรูป 1.3) ในกรณีนี้คลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับกระจกเงา และสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้ง และมันจะขยายเพิ่มขึ้นในแต่ละครั้งที่ผ่านสารกิริยา ถ้ากระจกเงาแผ่นใดแผ่นหนึ่งทำให้มันโปร่งใสเพียงบางส่วน ก็จะมีลำแสงแยกผ่านออกมา สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับทั้งเมเซอร์และเลเซอร์ก็คือ จะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขขีดเริ่มที่แน่นอนให้สำเร็จ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของเลเซอร์ การออสซิลเลตจะเริ่มต้นเมื่อการรับของสารกิริยาได้สัดส่วนกับการสูญเสียไปในเลเซอร์ (คือส่วนที่สูญเสียโดยการเล็ดลอดออกไป) จากสมการ (1.7) กำลังขยายในแต่ละครั้งที่เคลื่อนผ่านสารกิริยาไป (คืออัตราส่วนระหว่างฟลักซ์โฟตอนที่ออกมาต่อฟลักซ์โฟตอนที่เข้าไป) เป็น $\exp[\sigma(N_2 - N_1)\ell]$ เมื่อ ℓ คือความยาวของสารกิริยา ถ้ามีเพียงแต่ส่วนที่สูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเท่านั้นปรากฏในโพรงกำทอน มันจะถึงขีดเริ่มเมื่อ

$$R_1 R_2 \exp[2\sigma(N_2 - N_1)\ell] = 1 \qquad \ldots\ldots\ldots (1.9)$$

ในที่นี้ R_1 และ R_2 เป็นกำลังของการสะท้อนในสองกระจกเงา สมการ (1.9) แสดงว่าถึงขีดเริ่มเมื่อการผันกลับประชากร N_2–N_1 ถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง เรียกว่าการผันกลับประชากรวิกฤต การออสซิลเลตทำให้เกิดการเปล่งแสงตามปกติวิสัย กล่าวคือ โฟตอนซึ่งปล่อยออกมาตามแกนโพรงกำทอนจะเริ่มขั้นตอนของการขยาย นี่คือพื้นฐานของตัวออสซิลเลตหรือเลเซอร์นั่นเอง



รูป 1.3 *แสดงแผนภูมิของเลเซอร์*

คุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของลำแสงเลเซอร์ คือความมีระดับสูงของ (1) การมีทิศทางตรง (directionality) (2) การมีแสงสีเดียว (monochromaticity) (3) ความพร้อมเพรียง (coherence) และ (4) ความสว่าง (brightness)

(1) การมีทิศทางตรง คุณสมบัตินี้ดูเหมือนมีความสำคัญมากของสารกิริยาในโพรง

กำทอน ดังเช่นระนาบขนานในรูป 1.3 มีเพียงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ตามทิศทางของโพรง (หรือในทิศทางใกล้เคียงกัน) สามารถรั้งอยู่ในโพรงได้

(2) การมีแสงสีเดียว คุณสมบัตินี้เกิดจากพฤติการณ์ต่อไปนี้

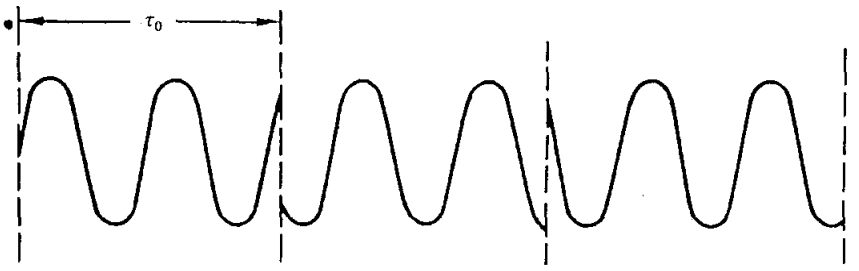
(ก) มีเพียงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่ ν ตามสมการ (1.1) ที่สามารถขยายสัญญาณได้

(ข) เมื่อกระจกเงาสองแผ่นจัดเป็นรูปของโพรงกำทอน การออสซิลเลตจะสามารถเกิดขึ้นได้ที่ความถี่อภินาทของโพรงกำทอนนี้เท่านั้น

(3) ความพร้อมเพรียง สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ เราสามารถอธิบายแนวความคิดของความพร้อมเพรียงได้สองแนวทางที่ไม่ขึ้นต่อกัน เรียกว่า ความพร้อมเพรียงทางตำแหน่ง และความพร้อมเพรียงทางเวลา ดังนี้

(ก) ความพร้อมเพรียงทางตำแหน่ง เรามาพิจารณาจุด P_1 และ P_2 สองจุด เมื่อเวลา t_0 อยู่ในแนวหน้าคลื่นเดียวกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กำหนดให้ $E_1(t)$ และ $E_2(t)$ เป็นสนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับจุดเหล่านั้น โดยการกำหนดความแตกต่างเฟสระหว่างสนามสองสนามที่เวลา t_0 เป็นศูนย์ ในเวลาต่อมาถ้าความแตกต่างเฟสนี้ยังคงเป็นศูนย์ที่เวลา t ใด ๆ เรากล่าวได้ว่ามันมีความพร้อมเพรียงสมบูรณ์ระหว่างจุดสองจุดนี้ ถ้าเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับจุดสองจุดใด ๆ ของแนวหน้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรากล่าวได้ว่าคลื่นมีความพร้อมเพรียงทางตำแหน่งสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติสำหรับจุด P_1 และ P_2 จะต้องอยู่ภายในพื้นที่จำกัด S รอบจุด P_1 และต้องมีความสัมพันธ์เฟสกันอย่างดี ในกรณีนี้เราจะกล่าวว่า คลื่นมีความพร้อมเพรียงทางตำแหน่งจำกัด และสำหรับจุด P ใด ๆ เราสามารถกำหนดพื้นที่ความพร้อมเพรียง S(P) ให้เหมาะสมได้

(ข) ความพร้อมเพรียงทางเวลา พิจารณาสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุด P เมื่อเวลา t และ $t+\tau$ สำหรับเวลาผ่านไป τ ถ้าความแตกต่างเฟสระหว่างสนามทั้งสองยังคงเหมือนเดิมสำหรับเวลา t ใด ๆ เราจะกล่าวว่ามันมีความพร้อมเพรียงทางเวลาตลอดเวลา τ ถ้าเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาใด ๆ ของ τ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความพร้อมเพรียงทางเวลาสมบูรณ์ ถ้าเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาลดระดับ τ ซึ่ง $0 < \tau < \tau_0$ กล่าวได้ว่าคลื่นมีความพร้อมเพรียงทางเวลาจำกัดด้วยเวลาพร้อมเพรียงเท่ากับ τ_0 ตัวอย่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความพร้อมเพรียงทางเวลาเท่ากับ τ_0 ได้แสดงในรูป 1.4 ซึ่งแสดงสนามไฟฟ้ารูปไซน์ที่มีเฟสกระโดดที่ช่วงเวลาเท่ากับ τ_0 เราเห็นได้ว่าแนวความคิดของความพร้อมเพรียงทางเวลาเกี่ยวข้องโดยตรงกับการมีแสงสีเดียว แสดงว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความพร้อมเพรียงทางเวลา มีช่วงกว้างแถบ $\Delta\nu \simeq 1/\tau_0$



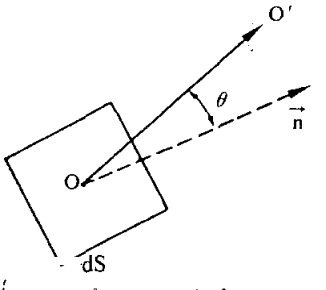
รูป 1.4 *แสดงตัวอย่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความพร้อมเพรียงทางเวลาประมาณ* τ_0

จากแนวความคิดความพร้อมเพรียงทางตำแหน่งและทางเวลาที่ไม่ขึ้นต่อกัน ความจริงตัวอย่างเหล่านี้สามารถกำหนดด้วยคลื่นที่มีความพร้อมเพรียงทางตำแหน่งสมบูรณ์ แต่มีความพร้อมเพรียงทางเวลาจำกัด (หรือเป็นในทางตรงกันข้าม) ถ้าความจริงปรากฏว่าคลื่นในรูป 1.4 แสดงสนามไฟฟ้าที่จุด P_1 และ P_2 มีความพร้อมเพรียงทางตำแหน่งระหว่างจุดทั้งสองสมบูรณ์ ขณะที่คลื่นมีความพร้อมเพรียงทางเวลาจำกัด

(4) ความสว่าง เรากำหนดความสว่างของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยกำลังส่องสว่างต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยมุมตัน เพื่อให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น กำหนดให้ dS เป็นพื้นที่ผิวเล็ก ๆ อยู่ที่บริเวณจุด O ของแหล่งกำเนิด (รูป 1.5) กำลัง dP ที่ออกมาจาก dS เข้าไปในมุมตัน $d\Omega$ รอบ ๆ ทิศทาง OO′ สามารถเขียนเป็น

$$dP = B\cos\theta\, dS d\Omega \qquad \text{.....(1.10)}$$

เมื่อ θ เป็นมุมระหว่าง OO′ และเส้นตั้งฉาก $\vec{n}$ กับผิว ปริมาณ B จะขึ้นกับพิกัดโพลาร์ θ และ ϕ ของทิศทาง OO′ และบนจุด O ปริมาณ B นี้เรียกว่าแหล่งกำเนิดความสว่างที่จุด O ในทิศทางของ OO′ ในสมการ (1.10) มีพจน์ร่วม $\cos\theta$ ได้จากเงาทาบของ dS บนระนาบตั้งฉากกับทิศทาง OO′ ถ้า B ไม่ขึ้นกับ θ และ ϕ แหล่งกำเนิดจะเรียกว่า ไอโซทรอปิค (isotropic) [หรือเรียกเป็นแหล่งกำเนิดแลมเบริท (Lambert source)] เลเซอร์ของแหล่งกำเนิดกำลังต่ำ (ประมาณสองสามมิลลิวัตต์) จะมีความสว่างขนาดมากกว่าความสว่างมากที่สุดของแหล่งกำเนิดที่นิยมใช้กัน ทั้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติของการมีทิศทางตรงอันดับสูงของลำแสงเลเซอร์นั่นเอง

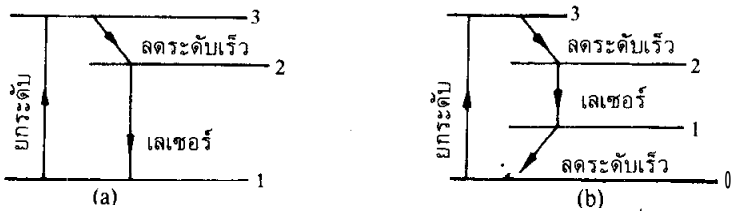


รูป 1.5 *ความสว่างของผิวที่จุด* O *สำหรับแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*

1.3 แผนภูมิการยกระดับพลังงาน (Pumping Schemes)

เราจะพิจารณาปัญหาของการผันกลับประชากรเกิดขึ้นได้อย่างไรในวัตถุ ในขั้นแรกดูเหมือนว่าเหตุการณ์นี้อาจเกิดจากอันตรกิริยาของวัตถุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แรงพอเหมาะด้วยความถี่ ν กำหนดด้วยสมการ (1.1) ในขณะอุณหภูมิสมดุลจะมีจำนวนประชากรอะตอมอยู่ในระดับ 1 มากกว่าในระดับ 2 การดูดกลืนจะเกิดได้ง่ายกว่าการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นคลื่นที่เข้ามาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก $1 \rightarrow 2$ มากกว่าการเปลี่ยนแปลงจาก $2 \rightarrow 1$ และเราคาดว่าขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการผันกลับประชากรขึ้นได้เป็นผลสำเร็จ อย่างไรก็ตาม เราจะเห็นว่าระบบเช่นนี้ไม่สามารถทำงานได้ตลอดไป (มันจะเข้าสู่สภาวะไม่เปลี่ยนแปลงในที่สุด) และเมื่อถึงสภาวะจำนวนประชากรเท่ากัน ($N_2 = N_1$) แล้วขั้นตอนการดูดกลืนและการกระตุ้นจะเท่ากันเป็นไปตามสมการ (1.7) ดังนั้น วัตถุจะเป็นวัตถุโปร่งใส เหตุการณ์เช่นนี้มักเกิดขึ้นเสมอ เหมือนกับเป็นสองระดับอิ่มตัว

ดังนั้น จึงเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างการผันกลับประชากรด้วยสองระดับ 1 และ 2 เท่านั้น จึงมีคำถามว่าเป็นไปได้หรือไม่ที่จะสร้างการกลับเป็นฝ่ายมากโดยใช้ระดับของอะตอมมากกว่าสองระดับขึ้นไป แต่ไม่ถึงกับเป็นกลุ่มของระดับไม่จำกัดจำนวนมาก ๆ เราจะเห็นได้ว่าคำตอบในกรณีนี้เป็นไปได้มากทีเดียว ดังนั้นเราจะพิจารณาเกี่ยวกับเลเซอร์สามหรือสี่ระดับขึ้นกับจำนวนของระดับพลังงานที่ใช้ (รูป 1.6) ในระบบเลเซอร์สามระดับ (รูป 1.6 a) อะตอมขึ้นจากระดับพื้น (ground level) ไปยังระดับ 3 ด้วยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง หลังจากนั้นมันจะลดระดับลงอย่างรวดเร็วไปยังระดับ 2 ดังนั้น ด้วยวิธีการนี้เราสามารถหาการผันกลับประชากรได้อยู่ระหว่างระดับ 2 และระดับ 1 ในเลเซอร์สี่ระดับ (รูป 1.6 ข) อะตอมขึ้นจากระดับพื้นอีกเช่นกัน (เพื่อความเหมาะสมเราจะเรียกระดับนี้เป็นระดับ 0) ไปยังระดับ 3 หลังจากนั้นอะตอมลดลงไปยังระดับ 2 อย่างรวดเร็ว แล้วการผันกลับประชากรสามารถหาได้อยู่ระหว่างระดับ 2 และระดับ 1 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อการออสซิลเลตเริ่มขึ้นในเลเซอร์สี่ระดับ อะตอมจะเคลื่อนย้ายไประดับ 1 (เนื่องจากการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น) ดังนั้น เมื่อเลเซอร์สี่ระดับทำงานด้วยคลื่นต่อเนื่อง มันจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงจากระดับ $1 \rightarrow 0$ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากด้วยเช่นกัน



รูป 1.6 *แสดงแผนภูมิ* (a) *เลเซอร์สามระดับ* (b) *เลเซอร์สี่ระดับ*

ขณะนี้เราเห็นได้ว่า สามารถใช้ระบบสามหรือสี่ระดับของวัตถุสร้างการผันกลับประชากรขึ้นได้ ไม่ว่าระบบจะทำงานในแผนภูมิสามหรือสี่ระดับ (หรือมันจะทำงานในแผนภูมิทั้งสองพร้อมกัน) หรือมีเงื่อนไขต่าง ๆ มากมายตามที่กำหนดไว้ข้างต้นก็ตาม มันสามารถทำได้สำเร็จ แน่นอนเราต้องถามว่าทำไมจึงต้องทำงานกับระบบสี่ระดับอีก ในเมื่อระบบสามระดับมีประสิทธิภาพเพียงพอในการสร้างการผันกลับประชากรได้แล้ว คำตอบก็คือ โดยทั่วไปเราสามารถสร้างการผันกลับประชากรจากเลเซอร์สี่ระดับได้ง่ายกว่าสร้างจากเลเซอร์สามระดับ เพื่อให้เห็นง่ายขึ้น เรามาสังเกตว่าความแตกต่างพลังงานระหว่างระดับต่าง ๆ ในรูป 1.6 โดยทั่วไปมีค่ามากกว่า KT จากสถิติของโบลทซ์มานน์ [ดูสมการ (1.8)] เราสามารถกล่าวได้ว่าอะตอมทั้งหมดแรกเริ่มอยู่ในระดับพื้น (ที่สภาวะสมดุล) ถ้าเราให้ N_t เป็นจำนวนอะตอมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของวัตถุอยู่ในระดับ 1 สำหรับกรณีของเลเซอร์สามระดับ ต่อไปเราให้อะตอมจากระดับ 1 ขึ้นไปยังระดับ 3 แล้วลดระดับลงสู่ระดับ 2 และถ้าการลดระดับนี้มีความเร็วอย่างเพียงพอ ระดับ 3 จะคงเหลืออะตอมจำนวนน้อยหรือไม่ก็ว่างเปล่าเลยทีเดียว ในกรณีนี้ จะมีจำนวนอะตอมราวครึ่งหนึ่งของประชากรอะตอมทั้งหมด N_t ขึ้นไปอยู่ในระดับ 2 เพื่อไปทำให้จำนวนประชากรอะตอมของระดับ 1 และ 2 เท่ากัน จากจุดนี้เมื่อเห็นอะตอมอื่น ๆ ขึ้นไปยังระดับ 2 เรื่อย ๆ จะหนุนให้เกิดการผันกลับประชากรขึ้น อย่างไรก็ตาม ในเลเซอร์สี่ระดับ ระดับ 1 ตอนแรกเริ่มว่างเปล่า อะตอมใด ๆ ที่ได้ขึ้นไปในเวลาต่อมาสามารถทำให้เกิดการผันกลับประชากรทันที จากเหตุผลดังกล่าวแสดงว่าเราต้องหาวัตถุซึ่งสามารถทำงานได้เหมือนกับระบบสี่ระดับมากกว่าระบบสามระดับ และถ้าใช้ระบบที่มีระดับมากกว่าสี่ระดับ ย่อมเป็นไปได้ด้วย

ขั้นตอนซึ่งอะตอมขึ้นจากระดับ 1 ไประดับ 3 (ในแผนภูมิเลเซอร์สามระดับ) หรือขึ้นจากระดับ 0 ไประดับ 3 (ในแผนภูมิเลเซอร์สี่ระดับ) เรียกว่า การยกระดับพลังงาน มีวิธีการมากมายที่ขั้นตอนเหล่านี้สามารถปฏิบัติให้เป็นจริงได้ (เช่น โดยใช้คลื่นแสงที่เข้มเพียงพอซึ่งระบบดูดกลืนเข้าไป ทำให้อะตอมยกระดับพลังงานให้สูงขึ้นไประดับ 3) เราจะพิจารณาในรายละเอียดของขั้นตอนการยกระดับพลังงานอีกครั้งหนึ่งในบทที่ 3

1.4 สรุป

1. การเกิดแสงเลเซอร์มีปรากฏการณ์พื้นฐานสามอย่างคือ การเปล่งแสงตามปกติวิสัย การเปล่งแสงโดยการกระตุ้น และการดูดกลืน

2. คุณสมบัติที่สำคัญของแสงเลเซอร์คือ ความมีระดับสูงของการมีทิศทางตรงการมีแสงสีเดียว ความพร้อมเพรียง และความสว่าง

3. ระดับพลังงานของเลเซอร์ต้องเป็นระบบสามระดับหรือสี่ระดับ มากกว่าเป็นระบบสองระดับ

แบบฝึกหัดที่ 1

1.1 จากสเปคตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสาขาเลเซอร์ เริ่มจากบริเวณคลื่นมิลลิเมตรย่อยลงไปจนถึงบริเวณความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งครอบคลุมบริเวณต่อไปนี้

(1) ไกลจากคลื่นใต้แดง

(2) ใกล้คลื่นใต้แดง

(3) คลื่นแสงที่มองเห็นได้

(4) คลื่นเหนือม่วง (UV)

(5) คลื่นเหนือม่วงสูญญากาศ (VUV)

(6) ใกล้รังสีเอ็กซ์

(7) รังสีเอ็กซ์

จากตำรามาตรฐาน ให้หาช่วงความยาวคลื่นของบริเวณดังกล่าวข้างต้น ให้บันทึกช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ที่พบบ่อย ๆ ในหนังสือเล่มนี้

1.2 จากปัญหาข้อ 1.1 ให้บันทึกความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับแสงสีน้ำเงิน, สีเขียวและสีแดง

1.3 ถ้าระดับ 1 และ 2 ของรูป 1.1 ห่างกันด้วยพลังงาน $E_2 - E_1$ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ตกในช่วงกึ่งกลางของแถบคลื่นแสงที่มองเห็นได้ ให้คำนวณอัตราส่วนของจำนวนประชากรอะตอมของทั้งสองระดับในขณะอุณหภูมิสมดุลที่อุณหภูมิห้อง

1.4 เมื่ออุณหภูมิสมดุล (ที่ T = 300°K) อัตราส่วนของจำนวนประชากร N_2/N_1 ของสองระดับคู่ใด ๆ กำหนดด้วย 1/e ให้คำนวณหาความถี่ ν สำหรับการเปลี่ยนแปลงนี้ และความถี่นี้ตกในช่วงบริเวณใดของสเปคตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า