บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของการเกิดเลเซอร์ประกอบด้วย อันตรกิริยาระหว่างโฟตอนและอะตอม ขบวนการประชากรผกผัน ตัวกักเก็บทางแสง รวมทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเลเซอร์ไนโตรเจน

เลเซอร์ไม่ว่าจะเป็นชนิดใดก็ตามมีองค์ประกอบที่สำคัญในการเกิดแสงเลเซอร์มี 3 ประการคือ(พิเชษฐ, 1991)

1. ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ต้องการกระตุ้นให้เกิดการปล่อยแสงเลเซอร์ อาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว ก๊าซ
2. การทำให้เกิดประชากรผกผัน(population inversion) คือการทำให้จำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางที่สถานะพลังงานในชั้นที่สูงกว่ามีมากกว่าจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่สถานะต่ำกว่าโดยการให้พลังงานแก่อะตอมหรือโมเลกุล เช่น การใช้แสงแฟลชที่มีความเข้มสูง การใช้อิเล็กตรอนดิสชาร์ต การใช้แสงเลเซอร์ เป็นต้น
3. ตัวกักเก็บทางแสง (resonator) ทำให้เกิดการป้อนกลับ (feedback) เพื่อเพิ่มขยายความเข้มของขบวนการปลดปล่อยแบบกระตุ้นจนสามารถมีการปล่อยแสงเลเซอร์ออกมาได้ กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับกระจกเลเซอร์

2.1 อันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับอะตอม

ในปี ค.ศ. 1917 ไอน์สไตน์ เสนอขบวนการปลดปล่อยโฟตอนของอะตอมแบบกระตุ้น (stimulated emission) โดยพิจารณาอันตรกิริยาของโฟตอนกับอะตอม มี 3 แบบ ด้วยกันคือ (วุฒิ 2537)

2.1.1 การดูดกลืนแบบกระตุ้น (Stimulated absorbtion)

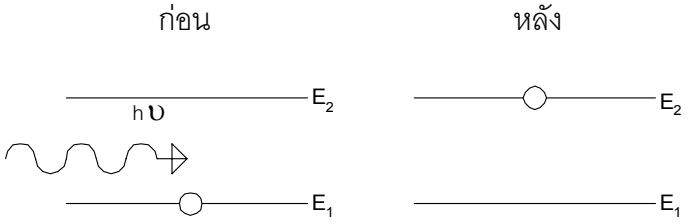
ถ้ามีโฟตอนจากภายนอกมากระตุ้นให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงาน จากระดับพลังงานต่ำ E_1 ไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า E_2 อะตอมจะดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงาน เรียก

ขบวนการดูดกลืนแบบกระตุ้นดังภาพประกอบที่ 9 โดยเขียนสมการพลังงานของการดูดกลืนตามหลักของพลังค์ได้ ดังนี้

$$h\upsilon_{21} = E_2 - E_1 = \Delta E \text{----------(1)}$$

ในเมื่อ υ_{21} = ความถี่ของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

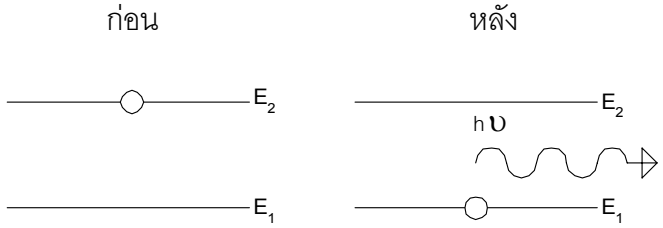
h = ค่าคงตัวของพลังค์



ภาพประกอบที่ 9 แสดงการดูดกลืนโฟตอนกระตุ้น

2.1.2 **การปลดปล่อยโฟตอนด้วยตัวเอง** (Sponteous emission)

ถ้าอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า E_1 อะตอมจะอยู่ที่ระดับพลังงานนั้นได้ไม่นาน ประมาณ 10^{-4} – 10^{-8} วินาที) ก็จะปลดปล่อยโฟตอนออกมาเนื่องจากอะตอมไม่เสถียรและพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีความถี่ υ_{21} เท่ากับ $(E_2-E_1)/h$ หลังจากนั้นอะตอมกลับมาอยู่ในระดับพลังงานต่ำ E_1 ดังภาพประกอบที่10 เรียกขบวนการนี้ว่าการปลดปล่อยโฟตอนด้วยตัวเอง

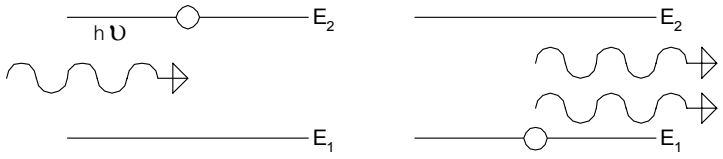


ภาพประกอบที่ 10 แสดงการปลดปล่อยโฟตอนด้วยตัวเอง

2.1.3 **การปลดปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น** (Stimulated emission)

ในภาพประกอบที่ 11 ถ้าอะตอมขณะเริ่มต้นอยู่ที่ระดับพลังงาน E_2 และมีโฟตอนภายนอกความถี่ $\upsilon = (E_2-E_1)/h$ เข้ามากระตุ้นทำให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงาน E_2 และในที่สุดอะตอมจะกลับมายัง

ระดับพลังงาน E_1 และขณะเดียวกัน จะมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาเพิ่มอีกตัวรวมกับตัวเดิม 1 ตัว กลายเป็น 2 ตัว ดังภาพประกอบที่ 11 ทางขวามือ เรียกขบวนการนี้ว่าการปลดปล่อยแบบกระตุ้น จุดสำคัญของการปลดปล่อยแบบกระตุ้นมี 2 ประการ คือประการแรกพลังงานของโฟตอนตัวที่สอง ที่เกิดจากการกระตุ้นจะเท่ากับพลังงานของโฟตอนตัวแรก นั่นคือความถี่หรือความยาวคลื่นของโฟตอนทั้งสองเท่ากัน และประการที่สอง โฟตอนทั้งสองมีเฟสเดียวกัน ซึ่งเรียกว่ามีความเป็น



อาพันธ์(coherent wave)

ก่อน หลัง

ภาพประกอบที่ 11 แสดงการปลดปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น

จากภาพประกอบที่ 11 เป็นการปลดปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น ซึ่งเป็นขบวนการสำคัญในการเกิดเลเซอร์ ในการที่กระตุ้นอะตอมจากระดับชั้นพลังงาน E_1 ให้ไปอยู่ที่ระดับชั้นพลัง E_2 นั้นจำเป็นจะต้องใช้พลังงานป้อนเข้าไปและจะต้องกระตุ้นจำนวนอะตอมเท่าไร เพื่อให้ไปอยู่ระดับพลังงานชั้น E_2 ถึงจะเกิดเป็นแสงเลเซอร์ออกมา ขบวนการที่จะใช้อธิบายหลักการนี้เรียกว่า "ขบวนการประชากรผกผัน" (population inversion)

2.2 **ขบวนการประชากรผกผัน** (population inversion)

เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการเกิดเลเซอร์ก็คือขบวนการเกิดประชากรผกผัน (population inversion) โดยหลักการที่จะทำให้เกิดขบวนการประชากรผกผันก็คือจะต้องทำให้จำนวนประชากร (อะตอม หรือ โมเลกุล) ที่ระดับพลังงานสูงกว่ามีมากกว่าจำนวนประชากรที่ระดับต่ำกว่า ในสภาวะปกติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากอะตอมและโมเลกุลจะพยายามอยู่ที่สถานะต่ำกว่าซึ่งเป็นไปตามหลักการของโบล์ซมานน์ เขาเสนอแนวคิดที่ว่าในสภาพสมดุลเชิงความร้อนตามธรรมชาตินั้น โดยทั่วไปอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานสูงกว่าจะมีจำนวนน้อยกว่าอะตอมที่อยู่ระดับต่ำกว่าเสมอ ซึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมและระดับพลังงาน จะเป็นไปตามกฎการแจกแจงของโบล์ซมานน์ดังสมการที่ 2

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right), \quad -------(2)$$

โดยที่ $E_2 > E_1$

เมื่อ

N_1 คือจำนวนอะตอมที่ระดับชั้นพลังงานที่1

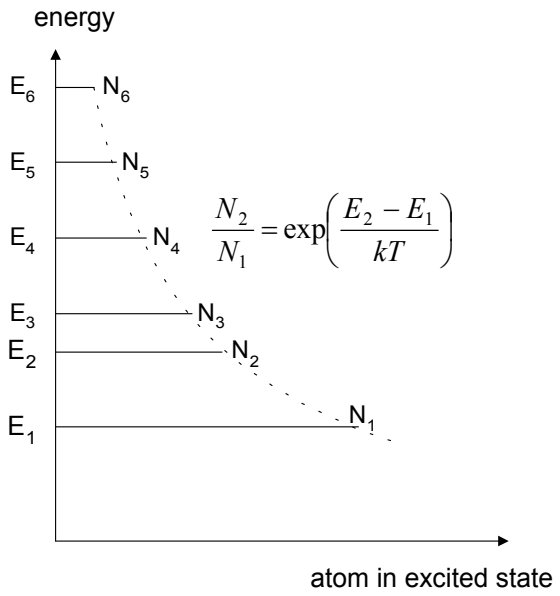
N_2 คือจำนวนอะตอมที่ระดับชั้นพลังงานที่2

E_1 คือค่าพลังงานที่ระดับชั้นพลังงานที่1

E_2 คือค่าพลังงานที่ระดับชั้นพลังงานที่2

k คือค่าคงตัวของโบล์ซมานน์ เท่ากับ 1.38X10^{-23} จูล/เคลวิน

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวิน



ภาพประกอบที่ 12 แสดงลักษณะการแจกแจงประชากรของโบล์ซมานน์ (ที่มา : ดุสิต ,2542)

จากภาพประกอบที่ 12 แสดงให้เห็นว่า E_2>E_1ดังนั้นจากสมการนี้ N_1 จึงมีค่ามากกว่า N_2 เสมอ ดังนั้นอะตอมทั่วไปจะไม่เกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน

ในการทำให้เกิดประชากรผกผันได้นั้นเราจะต้องเลือกอะตอมที่มีเวลาอายุ τ_2 (life time) ที่ระดับพลังงานสูงซึ่งมีค่ายาวนานกว่าเวลาอายุ τ_1 ที่ระดับพลังงานต่ำ นั่นคือ E_2>E_1 และต้องทำให้

เวลาอายุ $\tau_2 > \tau_1$ ดังนั้นเราจะต้องทำการกระตุ้นอะตอมจำนวนมาก ๆ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ $N_2 > N_1$ ซึ่งก็คือเกิดเงื่อนไขประชากรผกผันขึ้นมา เราสามารถแสดงปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยสมการ

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{-E_2 - E_1}{kT}\right) \text{---------(3)}$$

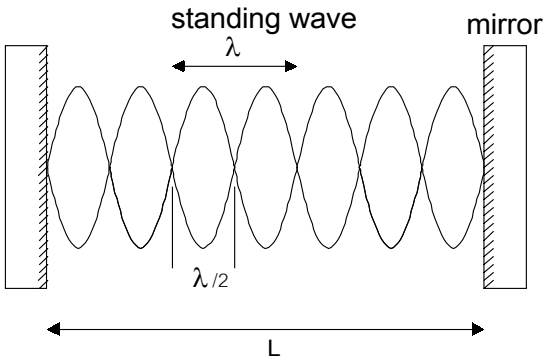
เนื่องจาก $E_2 > E_1$ ดังนั้นจากสมการจะได้ $N_2 > N_1$ ก็ต่อเมื่อ $T<0$ แต่ในสภาพเป็นจริงอุณหภูมิมีค่าติดลบไม่ได้ เราจึงมีการเรียกชื่อสภาพของประชากรผกผันได้อีกชื่อหนึ่งว่า " การแจกแจงอุณหภูมิเชิงลบ" (negative temperature distribution) เงื่อนไขประชากรผกผันนี้เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ที่จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบเร่งเร้า หรือเกิดเลเซอร์

2.3 **ตัวกักเก็บทางแสง**(optical cavity)

การขยายทางแสงแบบวิธีเปล่งแสงแบบเร่งเร้าที่เกิดจากขบวนการประชากรผกผันนั้น ยังไม่สามารถกำเนิดให้แสงเลเซอร์ออกมาได้ ดังนั้นจะต้องมีระบบกระจกเข้ามาช่วยเพื่อที่จะทำให้แสงที่วิ่งในตัวกลางเกิดการวิ่งสะท้อนกลับไปกลับมาจนกลายเป็นเลเซอร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ในการทำงานเริ่มแรก ภายในตัวกลางเลเซอร์อาจมีการเปล่งแสงด้วยตัวเองก่อน แสงแบบเกิดขึ้นเองจะแผ่กระจายไปทุกทิศทุกทางและมีหลายเฟส เมื่อมีการเปล่งแสงแบบเร่งเร้าก็จะเริ่มมีการขยายแสงภายในตัวกลาง แสงที่เดินทางในแนวแกนยาวของตัวกลางจะสะท้อนที่กระจกเงากลับเข้าสู่ตัวกลางและไปเร่งเร้าให้เกิดการเร่งเร้าซ้ำ ๆอีก และทำให้แอมพลิจูดของแสงถูกขยายตัวมากขึ้น และเมื่อแสงวิ่งไปสะท้อนที่กระจกด้านตรงข้ามกลับเข้าสู่ตัวกลางอีก ก็จะทำให้เกิดการขยายแสงอีกเป็นระบบการป้อนกลับของแสงหลาย ๆครั้ง

โดยทั่วไประยะห่างของกระจกเงาทั้ง 2 แผ่นจะมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นของแสงมาก ในการจะทำให้เกิดเลเซอร์นั้น จะต้องออกแบบให้ระยะห่างของกระจกเงามีระยะพอดีที่จะทำให้ช่วงเวลาการเดินทางไปกลับของแสงมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของคาบเวลาของคลื่นแสง ดังภาพประกอบที่ 13



ภาพประกอบที่ 13 แสดงการเกิดคลื่นนิ่ง (ที่มา : ดุสิต, 2542)

เงื่อนไขที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (standing wave) อยู่ภายใต้ออปติคัลเรโซเนเตอร์คือ

$$L = \frac{n\lambda}{2} \text{----------(4)}$$

เมื่อ L คือความยาวของช่องเลเซอร์

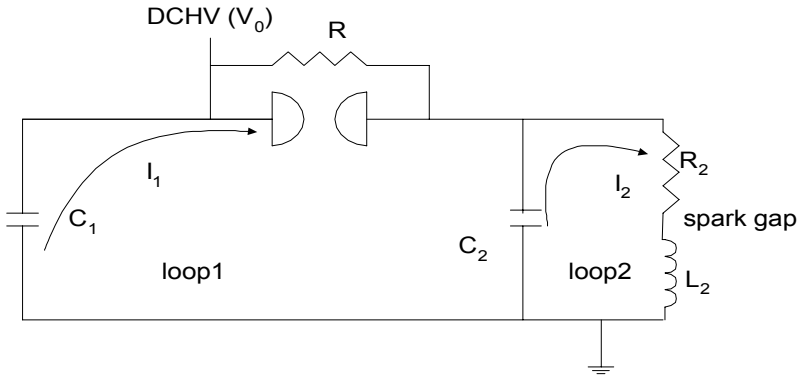
n คือเลขจำนวนเต็ม

λ คือค่าความยาวคลื่น

2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของไนโตรเจนเลเซอร์

การดิสชาร์ตทางไฟฟ้านับว่ามีส่วนสำคัญอย่างมาก ในการที่จะกระตุ้นให้เกิดไนโตรเจนเลเซอร์ ถ้าเราสามารถทราบเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้า เช่น ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าคาบของแรงดันไฟฟ้าขณะดิสชาร์ต จะช่วยให้หาสภาวะเหมาะสมที่เกิดเลเซอร์ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการที่จะทราบถึงค่าความเหนี่ยวนำก็จะต้องมีเครื่อง LCR มิเตอร์ หรือการที่จะทราบลักษณะพัลส์ของแรงดันไฟฟ้าขณะดิสชาร์ต ก็จะต้องมีออสซิลโลสโคปที่มีความถี่สูงถึง 500 เมกกะเฮิรต์ซ เพราะจะทำให้ได้คาบเวลาเป็น 2 นาโนวินาที นอกจากนี้ยังต้องมีหัววัดที่สามารถลดทอนแรงดันได้อีกด้วยเพราะระบบเลเซอร์ไนโตรเจนนั้นจะใช้ไฟแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับ 8-15 กิโลโวลท์ หากปราศจากเครื่องมือเหล่านี้ก็ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ในทางปฏิบัติได้เลย

(Fitzsimmon,1976) ได้เสนอสมการที่อธิบายวงจรบลัมไลน์ดังแสดงในภาพประกอบที่14 ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ สำหรับระบบไนโตรเจนเลเซอร์ โดยอธิบายถึง กระแสดิสชาร์ต แรงดันไฟฟ้าคร่อมสปาร์คแกป และแรงดันคร่อมช่องเซอร์ขณะดิสชาร์ต



ภาพประกอบที่ 14 แสดงวงจรบลัมไลน์ของเลเซอร์ไนโตรเจน
(ที่มา : Tan C H. and Low K S, 1984)

พิจารณา loop2 ซึ่งเป็น loop ตอนเริ่มต้นการดิสชาร์ต

$$\sum E = \sum IR$$

$$V_0 - \frac{1}{C_2}\int_0^t I_2 dt = I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \text{----------(5)}$$

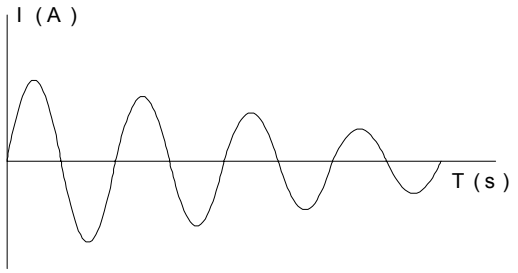
เมื่อ I_2 คือกระแสที่ไหลจากตัวเก็บประจุ C_2 ไปยังสปาร์คแกป

L_2 คือค่าความเหนี่ยวนำของสปาร์คแกป

V_0 คือแรงดันที่จ่ายจาก power supply (DCHV)

ผลเฉลยของสมการ (5) คือ

$$I_2 = Ae^{-\gamma t}\sin\omega_1 t \text{----------(6)}$$



ภาพประกอบที่ 15 แสดงลักษณะของกระแสดิสชาร์ต

(ที่มา : Tan C H. and Low K S, 1984)

เมื่อ $\omega_1 = \sqrt{\left(\omega_0^2 - \gamma^2\right)}$ = ค่าความถี่การสั่น

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$ = ความถี่ธรรมชาติ

$\gamma = \frac{R_2}{2L_2}$ = แฟคเตอร์การลดทอน (damping factor)

แรงดันคร่อมสปาร์คแกปเมื่อสปาร์คแกปเบรคดาวน์ (V_s)

$$V_S = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\left(\frac{R_2}{2\omega_1 L_2}\sin\omega_1 t + \cos\omega_1 t\right) \text{----------} (7)$$

เมื่อ $\tau = \frac{1}{\gamma}$ คือค่าคงที่ของเวลา

แรงดันคร่อมช่องเลเซอร์ (V_L) ขณะเกิดการดิสชาร์ต

$$V_L = V_0 - V_S \text{----------} (8)$$

$$= V_0 - V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\left(\frac{R_2}{2\omega_1 L_2}\sin\omega_1 t + \cos\omega_2 t\right)$$

$$= V_0\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\left(\frac{R_2}{2\omega_1 L_2}\sin\omega_1 t + \cos\omega_1 t\right)\right] \text{----------} (9)$$