

บทที่ ๖

ชนิดของเลเซอร์

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาจบหนึ้นแล้ว

1. นักศึกษามีความสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ ได้ และสามารถบ่งบอกความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ ได้
2. นักศึกษามีความสามารถบ่งบอกคุณลักษณะที่ดีเด่นของแต่ละชนิดของเลเซอร์ได้
3. นักศึกษามีความสามารถเข้าใจการเกิดปฏิกิริยาเลเซอร์ของแต่ละชนิด
4. นักศึกษามีความสามารถแยกแยะข้อแตกต่างของระบบเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ คือตัวกลาง กิริยา ระบบยกระดับพลังงานและโครงกำกับนesteี่ยรที่เหมาะสม

6.1 บทนำ

มีเลเซอร์ต่าง ๆ จำนวนมากมายที่สามารถทำได้ในปัจจุบัน และแต่ละชนิดของมัน มีจุดมุ่งหมายและการใช้ไม่เหมือนกัน เราจะรวบรวมชนิดของเลเซอร์เหล่านั้นซึ่งใช้กันอย่าง กว้างขวางโดยใช้คุณลักษณะของมันเป็นเครื่องแยกและประเภทของเลเซอร์

เราพิจารณาชนิดของเลเซอร์ดังต่อไปนี้ (ความจริงเลเซอร์มีชนิดมากกว่านี้อีกมาก)

- (1) เลเซอร์สภาวะของแข็ง (ผลึกหรือแก้ว)
- (2) เลเซอร์กําช
- (3) เลเซอร์สารกํงตัวนำ และ
- (4) เลเซอร์ไดย์ (dye lasers) (หรือเลเซอร์ของเหลว)

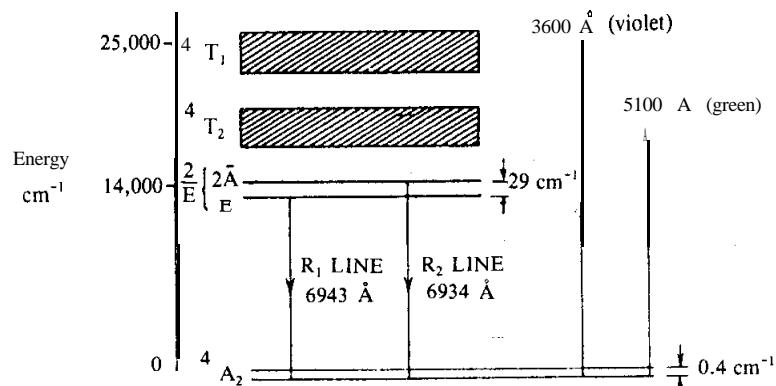
6.2 เลเซอร์พลีกของแข็ง

เลเซอร์ชนิดนี้มีตัวกลางกิริยาเป็นเพ็กไอโอนของผลึกไอโอนิก ตามปกติผลึกไอโอนิก เป็นธาตุในกลุ่มของพวกรганซิชัน (transition elements) ในตารางธาตุ [คือ Cr^{3+} หรือพวกร ไอโอนของธาตุหายาก (rare earth ions)]

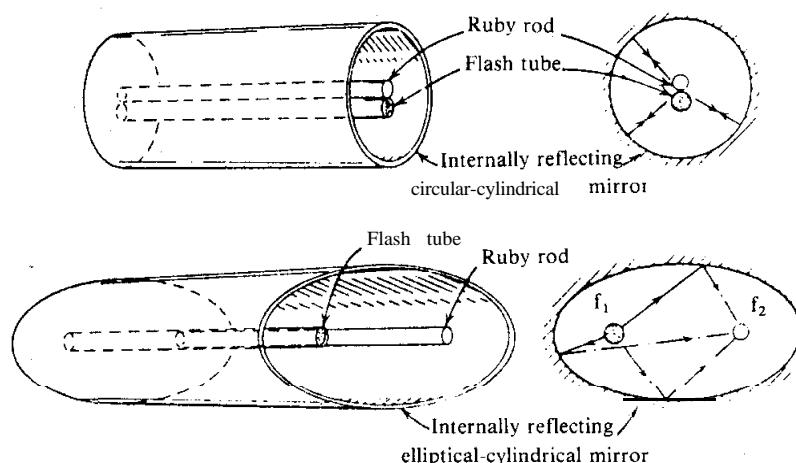
6.2.1 เลเซอร์ทับทิม

เลเซอร์ชนิดนี้เป็นเลเซอร์ชนิดแรกที่นักวิทยาศาสตร์สร้างขึ้นได้โดยใช้ทับทิมเป็น สารกิริยาปัจจุบันยังคงใช้กันอย่างกว้างขวาง เป็นที่รู้กันว่าทับทิมคือหินรตนาชาติที่เกิดขึ้นเอง ตามธรรมชาติเป็นผลึกของ Al_2O_3 (corundum) ซึ่งไอโอนบางตัวของ Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วยไอโอน Cr^{3+} แต่ทับทิมที่ใช้เป็นสารกิริยาตามปกติสร้างขึ้นจากการปลูกผลึกของสารประกอบหลอม เหลวผสมของ Cr_2O_3 (~ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ Al_2O_3 โดยทั่วไปผลึกทับทิมที่ใช้มี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จนถึง 2 เชนติเมตร และมีความยาวระหว่าง 5 ถึง 20 เชนติเมตร สำหรับเลเซอร์ทำงานต่อเนื่อง ผลึกทับทิมที่นิยมใช้กันมากมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และ ยาวเพียงสองสามเซนติเมตร ทั้งนี้เพราะว่าต้องใช้หลอดไฟกระดับซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิเมตรเท่านั้น ถ้าใช้ผลึกทับทิมมีขนาดใหญ่เกินไปจะไม่ได้ประโยชน์กลับกลायเป็น ข้อเสีย เพราะว่าบริเวณการยกระดับได้แรงที่สุดคือที่ตำแหน่งศูนย์กลางของผลึก ถ้าใช้แท่ง ผลึกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าแสงยังกระดับบางส่วนจะถูกดูดกลืนไปที่บริเวณรอบนอก ของแท่งก่อนจะเข้าถึงบริเวณศูนย์กลาง นอกจากนั้นถ้าใช้กระจักรวงกลมเป็นโครงกำกับ (คือในลักษณะไฟฟ้าร่วมหรือคริ่งไฟฟ้าร่วม) เราสังเกตได้ทันทีว่าหมวด TEM₀₀ มีขนาดของ จุดกลมสว่างน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร สำหรับโครงที่มีขนาดน้อยกว่า 1 เมตร (ดูบทที่ 4) สำหรับ เลเซอร์คลื่นลดตามปกติใช้การยกระดับพลังงานตามรูป 3.2 ก หรือ 3.2 ช ด้วยหลอดแสงวาน

บรรจุด้วยก๊าซชีน่อน (Xenon) ความดันต่ำซึ่งมีทั้งลักษณะเป็นแบบบันไดวนและแบบตรงเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดแสงที่นิยมใช้มีขนาดระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิเมตร และยาวระหว่าง 5 ถึง 20 เซนติเมตร สำหรับหลอดแสงวิภาคแบบตรงใช้ได้ดีกว่าแบบบันไดวน โดยการจัดวางให้หลอดแสงวิภาคติดกับแท่งพลีกหัวทิมตรงศูนย์กลางของกระเจาทรงกระบอกหรือจัดวางตรงจุดโฟกัสของกระเจาทรงรีดังแสดงในรูป 6.2 ระบบระดับพลังงานสำหรับ Cr^{3+} ใน Al_2O_3 ได้แสดงในรูป 6.1



รูป 6.1 แผนภูมิระดับพลังงานของเลเซอร์หัวหิน



รูป 6.2 กระเจาทรงกระบอกแสงวิภาคของเลเซอร์หัวหินทั้งแบบทรงกระบอกและแบบทรงกระบอกวี

มาตราส่วนของพลังงานกำหนดในหน่วย ซม.⁻¹ ในที่นี้ $8066 \text{ ซม.}^{-1} = 1 \text{ eV}$ แทนแสงการดูดกลืนสำหรับยอดของหัวหินอยู่ในบริเวณแสงสีม่วงและแสงสีเขียวของスペกตรัมสอดคล้องกับแบบระดับ $^4\text{T}_1$ และ $^4\text{T}_2$ ดังแสดงในรูป 6.1 สำหรับ Cr^{3+} เต็มแต่เหล่านี้กว้าง

1000 Å ทำให้การยกระดับพลังงานด้วยแสงสีขาวจากแสงว้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น

หลังจากการยกระดับขึ้นไปในแบบดูดกลืนปริมาณไอออกอลดลงอย่างรวดเร็วทันที ภายในเวลาอ้อยกว่า 10^{-7} วินาที ไปยังระดับไกล์ ๆ กับ 2E ห่างกันเพียง 29 ซม.⁻¹ เท่านั้น (870 จิกะเฮิรตซ์) การเปลี่ยนระดับจากระดับ E ไปยังระดับพื้นเรียกว่า R, สอดคล้องกับความยาวคลื่น 6943 Å การเปลี่ยนระดับจาก 2A ไปยังระดับพื้นเรียกว่า R₂ และสร้างโฟตอนที่มีความยาวคลื่น 6929 Å ภายใต้สภาวะปกติขีดเริ่มสำหรับเส้น R, มีค่าอ้อยกว่าขีดเริ่มสำหรับเส้น R₂ นอกจากนั้นอายุขัยตามปกติวิสัยในระดับ E, มีค่ามากกว่าเวลาการคายความร้อน สำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างระดับ 2A และ E ดังนั้นมันจึงขอบออกอสซิลเลตด้วยเส้น R, มากกว่าเส้น R₂

สถานะพื้นประกอบด้วยสองเส้นระดับต่างกันเพียง 0.4 ซม.⁻¹ (12 จิกะเฮิรตซ์) ที่อุณหภูมิห้องพลังงานความร้อนของไอออกอลลดลงอย่างรวดเร็วทันทีเมื่อห้องว่างห่างกับ 200-300 จิกะเฮิรตซ์ ทำให้ความแตกต่างของสองเส้นไม่ปรากฏชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อทำให้ห้องว่างเย็นลงถึง 77° K ความกว้างเส้นจะลดลงไป 3 จิกะเฮิรตซ์ และห้องสองเส้นก็ยังคงอยู่ร่วมกันเนื่องจากความยาวคลื่นขึ้นกับอุณหภูมิตัวอย่างจำแสง R, ส่งออกเปลี่ยนไปเป็น 6934 Å พร้อมกับความกว้างเส้นหั้งหมดเป็น 15 จิกะเฮิรตซ์

พฤติกรรมของจำแสงส่องออกตามปกติอยู่ในรูปของคลื่นดลไม่สม่ำเสมอ (ดูรูป 5.11) และไม่มีการซ้ำซ้อนของคลื่นที่อยู่ติดกัน โดยทั่วไปจำแสงส่องออกประกอบด้วยรังสีแสงที่ไม่ขึ้นต่อกัน (ไม่มีความสัมพันธ์กัน) จำนวนมากมายด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 ในครอนด้วยเหตุนี้จำแสงลู่ออกจากว่าค่าการเลี้ยวเบนจำกัดทางทฤษฎีของ ~λ/D เมื่อ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของจำแสงเลเซอร์ สำหรับหับกิมโดยใช้เครื่องมือหัคนศาสตร์ที่มีคุณภาพดีเลิศหรือใช้โครงร่างโพรงกำหนดชนิดพิเศษมันเป็นไปได้ที่จะละทิ้งพฤติกรรมของรังสีนี้ และให้การออกอสซิลเลตในหมวดของความกว้างเพียงอย่างเดียวได้ ในกรณีจำแสงลู่ออกต้องห่างกับข้อจำกัดทางทฤษฎี ดังนั้นกำลังขยายสามารถพิจารณาได้จากความสว่าง (กำลังต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยสเตอเรเดียน) อย่างไรก็ตามการหาหมวดของอสซิลเลตตามยาวเดียว ๆ หาได้ยากมากกว่ามีการจัดวางโครงกระตกได้มากกว่าสองแบบเช่นในรูป 5.2 b แต่บริเวณที่ทำได้สำเร็จอย่างจำกัด โดยทั่วไปหั้งเลเซอร์ต่อเนื่องและเลเซอร์คลื่นดลการทำงานหมวดตามยาวเดียว ๆ ทำได้สำเร็จต่อเมื่อจำกัดกำลังยกระดับให้อยู่ภายใน 10-20 เปอร์เซ็นต์ของค่าขีดเริ่มเท่านั้นอย่างไรก็ดี การใช้คิวสวิตซ์ด้วยสารดูดกลืนอิมตัวหมายหมวดตามยาวเดียว ๆ ทำได้่ายมาก กำลังส่องออกสำหรับคลื่นต่อเนื่องมีค่าประมาณสองสามวัตต์ (กำลังยกระดับขีดเริ่ม ~ 800 วัตต์)

สำหรับคลื่นคล้มีกำลังส่งออกขนาดเป็นดังนี้ (1) 20 กิโลวัตต์ตรงยอดของคลื่นคลังแสดงในรูป 5.11 (พลังงานส่งออกทั้งหมดขึ้นไปถึง 100 จูล) เมื่อเลเซอร์ทำงานในหมวดที่ต่างออกไป (2) เมื่อมีคิวสวิตซิ่งให้กำลังตรงยอดของคลื่นคลบยกษ์เดียวเป็น 100 ล้านวัตต์ในช่วงเวลา 10-20 นาโนวินาที (3) สำหรับเลเซอร์ยีดหมวดมีกำลังตรงยอดสองสามจิกะวัตต์ของคลื่นคลที่เกิดในช่วงเวลา ~ 10 พิโควินาที

6.2.2 เลเซอร์นีโอไดเมียม (Neodymium Lasers)

เลเซอร์สภาวะของแข็งที่พัฒนาต่อจากเลเซอร์ทับทิมคือเลเซอร์นีโอไดเมียมซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องทดลองและนอกห้องทดลอง มันมีต้นกำเนิดมาจากระบบระดับพลังงานของมันเป็นระบบสีระดับและมีระดับเลเซอร์ล่างอยู่เหนือจากระดับพื้นราบ 2000 ซม.⁻¹ การยกระดับพลังงาน ขึ้นเริ่ม และประสิทธิภาพต่างขึ้นกับคุณสมบัติทางแสงของวัตถุกิริยาเจ้าถิน คือ แก้ว และ YAG (ยิตเทเรียม อะลูมิเนียม การ์เนต) แคลเซียมทังสเทท (CaWO_4) ซึ่งทำได้ผลสำเร็จมาแล้ว ไอออนเจือปน Nd^{3+} เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของไอออน Y^{3+} ใน YAG บางครั้งก็ใช้แก้วเจือด้วยไอออน Nd^{3+} ระดับพลังงานของ Nd^{3+} มีการแยกออกเนื่องจากสานามของเจ้าถินและกิริยาเลเซอร์สามารถเกิดขึ้นระหว่างระดับต่าง ๆ ของการแผรังสีความยาวคลื่น 0.914 ไมครอน 1.06 ไมครอน 1.317 ไมครอน 1.336 ไมครอน และ 1.35 ไมครอน อย่างไรก็ตามลำแสงส่งออกเกือบทั้งหมดเลือกที่ 1.06 ไมครอนเสมอสำหรับวัตถุกิริยาเจ้าถินเป็น YAG ซึ่งเป็นวัตถุเจือปนที่นิยมใช้กันมาก เพราะว่ามันมีความต้านทานต่อกำลังเสียงหายทางแสงและความเด่นทางกลศาสตร์สูง YAG มีสภาพนำความร้อนดีเหมาะสมกับการใช้ซ้ำ ๆ หลาย ๆ ครั้ง โดยไม่มีการสูญเสียความร้อนไปซึ่งกลไกเป็นปัญหาในภายหลังจึงนิยมใช้เป็นวัตถุกิริยา สำหรับการอสซิลเลตของเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง กำลังส่งออกเท่ากับ 700 วัตต์ เมื่อใช้แท่งเลเซอร์ดังในรูป 5.7 สำหรับเลเซอร์คลื่นคลังวัตถุที่ใช้คือแก้วเจือปนด้วยไอออน Nd^{3+} เนื่องจากสภาพนำความร้อนของแก้วต่ำจึงจำกัดตัวมันเองใช้กับการอสซิลเลตเลเซอร์คลื่นต่อเนื่องไม่ได้ ตามปกติแท่งแก้วจะกระดับพลังงานด้วยหลอดแสงวนบรรจุด้วยก๊าซซีน่อนขนาดของแท่ง กำลังส่งออกและพลังงานของมันสามารถเทียบกับของเลเซอร์ทับทิมได้ คุณลักษณะที่น่าสนใจของ Nd^{3+} เจือปนในแก้วคือ ความกว้างเส้นแบ่งออกของการเปลี่ยนแปลงเลเซอร์ (30-40 นาโนเมตร) การแบ่งออกนี้เกิดจากความไม่เป็นเอกพันธุ์ของไอออนรอบข้างมันเป็นไปได้ที่จะทำการอสซิลเลตด้วยแทบกว้าง ~ 10 นาโนเมตร ซึ่งสามารถหาได้ด้วยการยีดหมวด ถ้าหมวดทั้งหมดของอสซิลเลตภายในแทบกว้าง 10 นาโนเมตรต่างยีดเฟสไว้ คลื่นคล

ส่องออกจะมีช่วงเวลาของ 10^{-13} วินาที อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสามารถหาคลื่นดลแสง 10^{-12} วินาทีได้ เลเซอร์แก้วโดยมากใช้เชื่อมกับเครื่องขยายและสำหรับคลื่นส่องออกในที่นี้ต้องการเพียงหนึ่งหรือสองคลื่นดลเท่านั้นต่อนาที คลื่นส่องออกจากการรวมตัวกันเช่นนั้นมีกำลังถึง 5,000 จูล ในขบวนคลื่นดล 3 มิลลิวินาที โดยใช้คิวสวิทชิงกำลัง 1,500 จูล ในคลื่นดลช่วงเวลา 5 นาโนวินาที และด้วยการยืดหมวดมีกำลัง 350 จูล ในคลื่นดลช่วงเวลา 20 พิโควินาที สามารถทำได้สำเร็จ

6.3 เลเซอร์กําช

สำหรับกําชปกติมีการแผ่ออกระดับพลังงานค่อนข้างน้อย (ขนาดสองสามจิกะ-เอิรตซ์หรือน้อยกว่า) ดังนั้นกลไกการแผ่ออกระดับพลังงานเส้นจึงน้อยกว่าในของแข็ง สำหรับกําชใช้ความตันต้าทำเป็นเลเซอร์ (~ 0.3 ทอร์) ดังนั้นการแผ่ออกระดับจากกระบวนการนี้มีค่าน้อยมาก และความกว้างเส้นต้องพิจารณาด้วยการแผ่ออกระดับแบบดอนเบลอร์ ด้วยเหตุนี้การยกระดับพลังงานด้วยหลอดแสงจิงไฟไม่ได้กับเลเซอร์กําชเนื่องจากแบบแสงที่เปล่งออกจากหลอดแสงวามไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอและอาจจะมีความต่อเนื่องมากไปหรือน้อยไป นอกจากนั้นมันไม่มีแบบดูดกลืนแผ่ออกระดับในสารกิริยาด้วย มีเพียงกรณีเดียวเท่านั้นซึ่งกิริยาเลเซอร์เกิดขึ้นได้ในกําชด้วยการยกระดับพลังงานด้วยแสงชนิดนี้ก็คือ การยกระดับพลังงานด้วยหลอดแสงซีเชียม (Cs) ชนิดตรงบรรจุด้วยกําชซีเลียม ในกรณีนี้เส้นของการเปล่งแสงซีเลียมมีจุดร่วมตรงกับเส้นดูดกลืนของซีเชียม

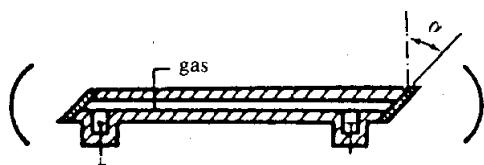
6.3.1 ขั้นตอนของการตื่นตัวและการทำลายการตื่นตัวในกําช (Processes of Excitation and De-excitation in Gas)

เลเซอร์กําชโดยปกติกระตุนให้ตัวด้วยไฟฟ้า กล่าวคือ การยกระดับพลังงานทำได้ด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้า (ตรงหรือสลับ) ที่มีค่าถูกต้องเข้าไป การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในกําชทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนขึ้น ประจุจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและพลังงานจนที่ได้เกิดจากการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าภายใต้การคายประจุ โดยปกติการเคลื่อนที่ของไอออนไม่มีความสำคัญอย่างไรเพียงแต่อิเล็กตรอนอิสระช่วยให้เกิดการตื่นตัวโดยชนกับอะตอม ความจริงถ้ากําชอยู่ในสภาวะความดันต่ำพลังงานจนนี้เหลือของอิเล็กตรอนจะมากกว่าของอะตอมหรือของอิออนที่มีในขณะคายประจุมาก โดยทั่วไปอิเล็กตรอนจะมีการแยกแจงความเร็วจนถึงสมดุลได้ในเวลาสั้น ๆ การแยกแจงความเร็วนี้เป็นการแจงแบบแมกซ์เวลล์-โบลทซ์มานน์

การตีนตัวของก้าชโดยการคายประจุไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นด้วยขั้นตอนใหญ่สองขั้นตอน คือ (1) ในกรณีของก้าชมีอะตอมเพียงชนิดเดียวการตีนตัวเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอม [เป็นการชนกันแบบแรก ดูสมการ (3.19)] (2) ในกรณีของก้าชที่มีอะตอมมากกว่าหนึ่งชนิด การตีนตัวสามารถเกิดจากการถ่ายเทพลังงานอภินาท [เป็นการชนกันแบบที่สอง ดูสมการ (3.20)]

เมื่ออัตโนมอยู่ในสถานะตีนตัวมันสามารถลดระดับพลังงานลงสู่สถานะพลังงานต่ำกว่า รวมทั้งสถานะพื้นด้วยขั้นตอนต่าง ๆ สิขั้นตอน คือ (1) เกิดจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมตีนตัวซึ่งอะตอมจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (เป็นการชนกันแบบที่สอง) (2) เกิดจากการชนกันระหว่างอะตอมด้วยกันสำหรับก้าชที่มีอะตอมหลายชนิด (3) เกิดจากการชนกันระหว่างอะตอมและผนังของภาชนะบรรจุ (4) เกิดจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัยกรณีที่ (4) นี้เกิดจากที่เรียกว่ากับดักอภินาทของการแผรังสีที่เป็นไปได้ คือโพตอนที่ปล่อยออกมารามตามปกติวิสัยจากอะตอมแทนที่จะเป็นการหนีออกจากก้าชและถูกอะตอมอื่นดูดกลืนทำให้ขึ้นไปยังสถานะตีนตัว ปรากฏการณ์นี้จะต้องขึ้นกับความดันของก้าชรวมทั้งภาคตัดขวางของการเปลี่ยนแปลงและยังขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตของภาชนะบรรจุก้าชด้วย ขั้นตอนนี้มีผลทำให้อัตราการเปล่งแสงตามปกติวิสัยลดน้อยลง

จากผลของขั้นตอนการตีนตัวและทำลายการตีนตัวที่ได้ก่อขึ้นข้างต้น สำหรับกระแสการคายประจุในก้าชที่มีการแยกแจงสมดุลระหว่างระดับพลังงานชนิดต่าง ๆ จะทำสำเร็จได้ในที่สุด แน่นอนมันจะถึงสถานการณ์นี้ได้ต่อเมื่ออัตราการยกระดับพลังงานขึ้นไปยังระดับหนึ่งที่กำหนดของอะตอมเทากับอัตราของการลดระดับของระดับนี้ของมัน เราสามารถเห็นได้ว่าการสร้างจำนวนการผันกลับประชากรในก้าชมีความยุ่งยากมากกว่าในเลเซอร์สภาวะของแข็งทั้งนี้เนื่องจากต้องใช้ขั้นตอนเหล่านั้นจำนวนมาก many ตามปกติเราสามารถกล่าวว่าจำนวนประชากรจะเกิดขึ้นเหลืออยู่ในระดับเหล่านั้นมันจะต้องมีอัตราการลดระดับพลังงานไปยังระดับต่ำซึ่งกว่า



รูป 6.3 แผนภูมิของเลเซอร์ก้าช

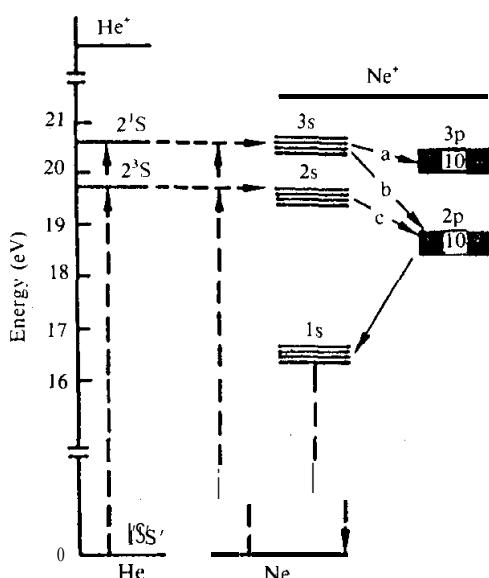
ต่อไปเราจะอธิบายเลเซอร์ก้าชแบบต่าง ๆ ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้ คือ (1) เลเซอร์ก้าชอะตอมเป็นกลาง (2) เลเซอร์ก้าชไอโอน (3) เลเซอร์โมเลกุล และ (4) เลเซอร์คลื่นดล เกี่ยวกับโครงสร้างของเลเซอร์ก้าชเหล่านี้ส่วนมากสามารถจัดได้ตามแผนภูมิในรูป 6.3 ซึ่งแสดงส่วนประกอบสำหรับเลเซอร์คลื่นต่อเนื่อง ที่ปลายหน้าต่างกระจากทั้งสองข้างของหลอดก้าชเอียงทำมุม α [มุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle)] ซึ่งลำแสงโพลาไรซ์อยู่ในระนาบของหน้ากระดาษทำให้มีการสูญเสียจากการสะท้อนที่หน้าต่างทั้งสอง โดยทั่วไปเราใช้กระจากทรงกลมมากกว่ากระจากรอบ เพราะว่ากระจากทรงกลมทำให้โครงกำกอนมั่นคงมากกว่า

6.3.2 เลเซอร์ก้าชอะตอมเป็นกลาง

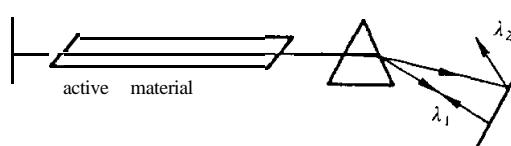
เราจะพิจารณาเลเซอร์ที่เลียมนีอ่อนเป็นตัวอย่างของเลเซอร์แบบนี้ มันสามารถออกซิลเลตที่ความยาวคลื่นต่อไปนี้ คือ $\lambda_1 = 3.39$ ไมครอน $\lambda_2 = 0.633$ ไมครอน และ $\lambda_3 = 1.15$ ไมครอน มันเป็นเลเซอร์ก้าชชนิดแรกที่สร้างขึ้นออกซิลเลตที่ $\lambda_3 = 1.15$ ไมครอน เลเซอร์ที่เลียมนีอ่อน 0.633 ไมครอน (สีแดง) เป็นเลเซอร์ที่นิยมมากที่สุดและใช้กันอย่างกว้างขวาง

รูป 6.4 แสดงแผนภูมิระดับพลังงานของไฮเลียมและนีอ่อน กิริยาเลเซอร์เกิดตรงระหว่างระดับพลังงานของนีอ่อนส่วนที่เลียมใช้สำหรับช่วยในขั้นตอนการยกระดับพลังงาน เราเห็นได้จากรูป 6.4 ว่าระดับ 2^3S และ 2^1R เป็นระดับเก็บเสถียร (metastable) และพบว่าไฮเลียมช่วยให้การยกระดับพลังงานมีประสิทธิภาพมากด้วยการถ่ายเทพลังงานอภินิท ขั้นตอนนี้เป็นวิธีการสร้างจำนวนการผันกลับประชากรวิธีหนึ่งในเลเซอร์ที่เลียมนีอ่อน แม้ว่าการชนกันโดยตรงของอิเล็กตรอนกับอะตอมนีอ่อนทำให้เกิดการยกระดับพลังงานได้ด้วยก็ตาม จากที่ได้กล่าวข้างต้นเราเห็นได้ว่าระดับนีอ่อน $2s$ และ $3s$ สามารถทำให้มีจำนวนประชากรของมันเพิ่มขึ้นและมันทำตัวเองเหมือนกับเป็นระดับเลเซอร์บัน โดยใช้กฎการคัดเลือก (selection rules) เราเห็นได้ว่ามันเปลี่ยนแปลงไปยังสถานะ p และเวลาลดระดับของสถานะ s ($\tau_s \approx 100$ นาโนวินาที) มีขนาดยาวนานกว่าเวลาลดระดับของสถานะ p ($\tau_p \approx 10$ นาโนวินาที) ดังนั้นเงื่อนไขสมการ (5.37ค) สำหรับการทำงานของเลเซอร์ที่ระดับใช้ได้จากการพิจารณาแบบนี้ เราเห็นได้ว่าการออกซิลเลตของเลเซอร์สามารถคาดเดาได้ว่ามันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในแบบ a , b หรือ c แบบใดแบบหนึ่งในรูป 6.4 การเปลี่ยนแปลงแบบต่าง ๆ เหล่านี้ แบบ a เกิดระหว่างระดับ y อย่าง $3s_2$ ของกลุ่ม $3s$ และระดับ y อย่าง $3p_4$ ของกลุ่ม $3p$ ($\lambda_1 = 3.39$ ไมครอน) ส่วนการเปลี่ยนแปลงของแบบ b เป็นการเปลี่ยนแปลง $3s_2 \rightarrow 2p_4$ ($\lambda_2 = 0.633$ ไมครอนสีแดง) ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่เลียม-นีอ่อนที่ชอบใช้ในเชิงพาณิชย์ทั่วไป การเปลี่ยนแปลงของแบบ c $2s_2 \rightarrow 2p_4$

ให้ความยาวคลื่น $\lambda_3 = 1.15$ ไมครอนเลเซอร์ไฮเดรียม-นีอ่อน จะօօສົມເລຕບນກາຣເປີ່ຍນແປ່ງແບບ a, b ອີ່ວອ c ນັ້ນເນື່ອມາຈາກກາຣສະຫຼອນໄດ້ມາກທີ່ສຸດຂອງກະຈາກເກີດຫຼັ້ນທີ່ λ_1 , λ_2 ອີ່ວອ λ , ນັ້ນເຄີງ ດັ່ງນັ້ນຈຶ່ງສ້າງກະຈາກເຄລື້ອບດ້ວຍສາຣ໌ໄດ້ອີເລກຕຣິກຫລາຍຫຼັ້ນເພື່ອໃຫ້ກາຣສະຫຼອນມາກທີ່ສຸດເກີດທີ່ຄວາມຍາວຄລື່ນຕາມດ້ອງກາຣ ມົວງົວໆ ຈີ່ທີ່ນໍາສຳໃຈໃນກາຣທາກາຣອອສົມເລຕທີ່ຄວາມຍາວຄລື່ນຕ່າງໆ ໄດ້ແສດງໃນຮູບ 6.5 ທີ່ເປັນຜົນຈາກກາຣກະຈາຍແສງຂອງປຣີ່ມ໌ ໂພຣງກຳທອນຂອງຮູບ 6.5 ສາມາຮອດອອສົມເລຕທີ່ຄວາມຍາວຄລື່ນ λ , ແກ່ນັ້ນ ເມື່ອໜຸ່ມປຣີ່ມ໌ຮອນ ຈີ່ແກນຕັ້ງຈາກກັບໜັ້ງກະຈາຍທີ່ສື່ສາມາຮັດເປີ່ຍນແປ່ງຄ່າຕ່າງໆ ຂອງ λ , ໄດ້ ໃນກາຣນີຂອງເລເຊອຣ໌ເໝີເລີຍນີ້ອອນວິທີນີ້ຍົມໄຫ້ອອສົມເລຕທີ່ຄວາມຍາວຄລື່ນຈາກຄລື່ນສີເໜືອງ ($\lambda = 0.59$ ໄມຄຣອນ) ຈົນຖື່ງຄລື່ນສີແດງເຂັ້ມ ($\lambda = 0.73$ ໄມຄຣອນ) ຄວາມຍາວຄລື່ນເໜ່ານີ້ຕ່າງກີ່ສອດຄລັງກັບກາຣເປີ່ຍນແປ່ງຂອງແບບ b ໃນຮູບ 6.4 ສຸດທ້າຍເຮົາສັງເກດວ່າຄວາມກວ້າງເສັ້ນຂອງກາຣເປີ່ຍນແປ່ງເປັນຜົນຈາກຜລັພົ້ສາມອຍ່າງດ້ວຍກັນ ດື່ອ



ຮູບ 6.4 ຮະດັບພດັ້ງຈານຂອງເໝີເລີຍນີ້ແລະນີ້ອອນ



ຮູບ 6.5 ໃຫ້ວິທີກາຣກະຈາຍແສງຂອງປຣີ່ມ໌ເພື່ອເລື້ອກກາຣອອສົມເລຕທີ່ຄວາມຍາວຄລື່ນ $\lambda = \lambda_1$

(1) เกิดจากการชน ทำให้มีการแผ่ออกน้อยมากเมื่อใช้ความดัน 0.5 ทอร์ร์ [ในบทที่ 2 คำนวณได้ว่า $\Delta v_c = 0.64$ เมกะเฮิรตซ์ สำหรับ $p = 0.5$ ทอร์ร์ ดูสมการ (2.105 ก)]

(2) การแผ่ออกตามธรรมชาติ จากสมการ (2.106) เราได้ $\Delta v_{nat} = 1/2\pi\tau \approx 19$ เมกะ-เฮิรตซ์ เมื่อ $\tau^{-1} = \tau_s^{-1} + \tau_p^{-1}$ เวลาการลดระดับของระดับ s และ p คือ τ_s และ τ_p ตามลำดับ

(3) การแผ่ออกแบบดอปเพลอร์ จากสมการ (2.113) ให้ $T = 300^\circ\text{K}$ เราหาได้ว่า $\Delta v_0^* = 1700$ เมกะเฮิรตซ์ สำหรับ $\lambda = 0.633$ ไมครอน ดังนั้นการแผ่ออกแบบดอปเพลอร์ จึงเป็นกลไกการแผ่ออกที่สำคัญที่สุด ความกว้างเส้นวัดจากการทดลองสอดคล้องได้ดีกับการคำนวณ และนี้แสดงว่าอุณหภูมิยังคงของอะตอมนีอ่อนเป็นอุณหภูมิรอบ ๆ ธรรมชาติ

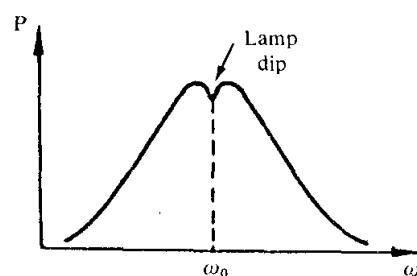
เนื่องจากขั้นตอนที่ยุ่งยากซึ่งช่วยให้เกิดการตีนตัวและคลายการตีนตัวของระดับของมัน จำนวนตัวดำเนินการพารามิเตอร์ที่เป็นประโยชน์มากที่สุดของเลเซอร์ชีลีม-นีอ่อน คือ

- (1) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหลอดก๊าซในรูป 6.3 (~ 2 มิลลิเมตร)
- (2) ความหนาแน่นกระเส้ายปะจุที่มีประโยชน์มากที่สุด
- (3) ความดันก๊าซนีอ่อนที่มีประโยชน์มากที่สุด ($P_{Ne} \approx 0.1$ ทอร์ร์)

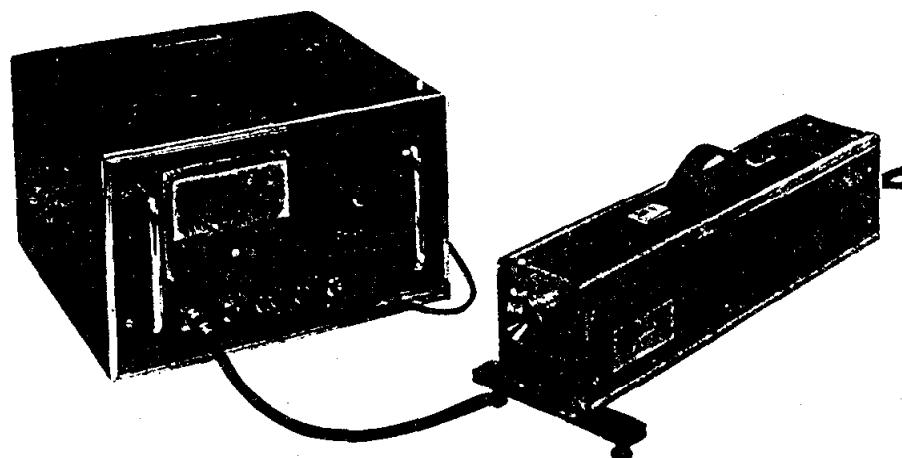
และอัตราส่วนความดันสำหรับก๊าซชีลีมและนีอ่อน ($P_{He}/P_{Ne} = 5 - 10$) เส้นผ่าศูนย์กลางที่เป็นประโยชน์มากที่สุดของหลอดก๊าซมีต้นกำเนิดมาจากความจริงที่ว่า ระดับ 1s (รูป 6.4) เป็นสถานะกึ่งสถิตย์ ซึ่งหมายถึงการทำลายการตีนตัวของระดับนี้สามารถได้จากการชนกับผังของหลอดเท่านั้น ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเพิ่มขึ้น โอกาสของการทำลายการตีนตัวลดน้อยลง และอะตอมจะสะสมอยู่ในระดับ 1s ทำให้เกิดกับดักการแผ่รังสีบนการเปลี่ยนแปลง $2p \rightarrow 1s$ ดังนั้นอัตราการลดระดับโดยแพร่รังสีลดน้อยลง ซึ่งยอมให้จำนวนประชากรอะตอมสะสมอยู่ในระดับ $2p$ ทำให้จำนวนการผ่านกั้บประ瘴การเลียหาย ในที่สุดเราพบว่ากำลังขยายต่อการผ่านไปหนึ่งครั้งของเลเซอร์แปรเป็นส่วนกลับกับเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอด ในทางกลับกันถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเล็กเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสีย เนื่องจากการเลียวนมีความสำคัญขึ้นมาและเป็นเหตุให้การจัดวางตัวแห่งน้ำไม่ได้ ค่าที่เป็นประโยชน์มากที่สุดของความหนาแน่นกระเสัยเดินขึ้น เพราะว่าที่ความหนาแน่นกระเสัยสูง ๆ ขั้นตอนต่อไปนี้จะมีความสำคัญ คือ



ขั้นตอนทั้งสองนี้มีแนวโน้มทำให้จำนวนการผันกลับประชาราตรดลง ความจริงค่าความดันกําช Ne ที่มีประโยชน์มากที่สุดคืออนข้างจะขึ้นกับขั้นตอนของสมการ (6.1) ที่ความดันสูง ๆ สำหรับเหตุผลเหล่านี้ กำลังส่งออกของเลเซอร์อีกเลิมน้อยอนไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความหนาแน่นกระแสเพียงอย่างเดียว มันเพิ่มขึ้นถึงค่าที่เป็นประโยชน์มากที่สุด ขึ้นกับความยาวของการ cavity ประจุเท่านั้นแทน สำหรับหลอดยาวประมาณ 1 เมตร กำลังส่งออกมีค่าประมาณสองสามมิลลิวัตต์ เรายังเกตในตอนดันว่าความกว้างเส้น $\Delta\nu$ มีค่าประมาณ 1700 เมกะ-เฮิรตซ์ มันเป็นไปได้ที่จะขอสัญลักษณ์ในหมวดตามยาวเดียว ๆ โดยใช้โครงที่สั้นเพียงพอให้เกิดหมวดตามยาวอยู่ห่างกัน ($c/2d$) เทียบได้เท่ากับความกว้างเส้น $\Delta\nu$ ความจริงนี้หมายถึง $d < 15 - 20$ เซนติเมตร



รูป 6.6 ปรากฏการผันหุนแอนบ์



รูป 6.7 แสงเดเซอร์ซีเดียม-นีโอนกับเครื่องจ่ายกำลังให้กำลัง放ออก 0.5 มิลลิวัตต์ เพสเดี่ยว

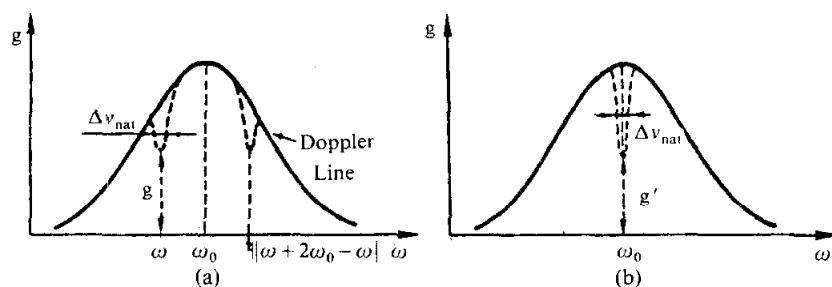
ปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นไม่เพียงแต่ในเลเซอร์อีเลิม-นีออนเท่านั้น แต่เกิดขึ้นในเลเซอร์ก้าชทั่ว ๆ ไปคือ ปรากฏการณ์ของ “หลุมแอล์มบ์” (“Lamb dip”) ซึ่งเรียกชื่อตามนักพิสิกส์คือ ดับบลิว.อี. แอล์มบ์ (W.E. Lamb) ผู้ซึ่งทำนายปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยทฤษฎี ในรูป 6.6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังส่องออกเทียบกับความถี่ของการออสซิลเลต ω สำหรับอัตราการยกระดับที่แน่นอนค่าหนึ่ง เส้นโค้งของรูปนี้สามารถสังเกตได้จากการทดลองกับเลเซอร์หมวดเดียว ($d \leq 15 - 20$ ซม.) โดยเปลี่ยนความยาวของไฟอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงครึ่งความยาวคลื่น มีลักษณะคล้ายหงอนไก่ของหมวดในรูป 4.17 กวาดไปอย่างต่อเนื่องด้วยช่วงกว้างเท่ากับความแตกต่างความถี่ระหว่างหมวดที่อยู่ติดกัน ดูรูป 6.6 กำลังส่องออกแสดงหลุมที่ศูนย์กลางความถี่ ω_0 สำหรับการเปลี่ยนแปลงซึ่งมองครั้งแรกเหมือนกับเป็นภาพซ้อนกัน (paradoxical) เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมนี้เราเริ่มต้นพิจารณาสถานะที่เลเซอร์ออสซิลเลตด้วยความถี่ $\omega \neq \omega_0$ (ตัวอย่างเช่น $\omega < \omega_0$) ดังนั้นการแฟร์ริงสีเลเซอร์จำเป็นต้องทำปฏิกริยา กับอะตอม เหล่านี้ที่มีความเร็ว v ในทิศทางตรงกันข้ามกับการแฟร์ริงสี ค่าของ v กำหนดด้วยสมการ (2.109) ในขณะนี้ไฟของเลเซอร์มีลำแสงเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ระหว่างกระจก ดังนั้นสำหรับลำแสงเคลื่อนที่ไปทางขวาเมื่อต้องทำอันตรกิริยากับอะตอมที่เคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือ และลำแสงเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือเมื่ออันตรกิริยากับอะตอมเคลื่อนที่ไปทางขวาเมื่อ ดังนั้นมันต้องมีความเร็วอะตอม ทั้ง $\pm v$ รวมอยู่ด้วยกัน นั่นหมายความว่าหมวดที่เรากำลังพิจารณา เมื่อจำนวนประชากรอะตอมอิ่มตัวทั้งสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีความเร็ว $+v$ และกลุ่มความเร็ว $-v$ จึงเป็นที่แน่นอนว่า หมวดนี้จะมีสองหลุมในเส้นโค้งกำลังข่ายหลุมหนึ่งอยู่ที่ ω และอีกหลุมหนึ่งอยู่ที่ความถี่ซึ่งเป็นภาพในเงาระจากของจุดนี้เทียบกับ ω_0 (รูป 6.8 a)

ความกว้างของสองหลุมเป็นขนาดของความกว้างเส้นเอกพันธุ์ นั่นคือ ความกว้างเส้นตามธรรมชาติ ถ้า $\omega = \omega_0$ ลำแสงเลเซอร์จะทำปฏิกริยา กับอะตอมซึ่งมี $v = 0$ ส่องหลุมในรูป 6.8 a จะยุบรวมเป็นหลุมเดียวที่ศูนย์กลางเส้น (รูป 6.8 b) ภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอน* การอิ่มตัวเพิ่มขึ้นที่ศูนย์กลางเส้นมีผลในการสร้างกำลังข่าย g' ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังข่าย g ที่พิจารณาในรูป 6.8 a จึงเป็นการอธิบายว่าทำไมกำลังส่องออกแสดงหลุมสำหรับ $\omega = \omega_0$ ดังในรูป 6.6 และเมื่อสัมพันธ์กับรูป 6.8 จึงเป็นอันว่าความกว้างของหลุมนี้เป็นขนาดของ $\Delta\nu_{nat}$ เมื่อความ

* เงื่อนไขเหล่านี้มีดังนี้ (ดูหัวข้อ 7.4.2) (1) ความกว้างเส้นเอกพันธุ์ $\Delta\omega_0$ ต้องมีค่าน้อยกว่าความกว้างของบล็อก $\Delta\omega$; (2) $x_0 \geq 1 + 2(\ln 2)(\Delta\omega_0/\Delta\omega)^2$ เมื่อ x_0 เป็นอัตราส่วนระหว่างระดับยกพลังงานที่แท้จริงและระดับยกพลังงานที่ได้รึ่มสำหรับการออสซิลเลตที่ $\omega = \omega_0$

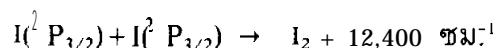
กว้างนี้แคมมาก ตำแหน่งของกันหลุมจึงหาได้ง่าย ดังนั้นด้วยวงจรป้อนกลับที่เหมาะสม เราสามารถหาความถี่เลเซอร์คงที่เทียบกับค่าตำแหน่งของหลุมแลมบ์ในวิธีที่ให้ผลมากที่สุด

นอกจากเลเซอร์ไฮเลียม-นีโอนแล้ว ยังมีเลเซอร์กําชอะตอมเป็นกลางอีก ๑ ส่วนใหญ่ เป็นพวกกําชเฉียบ (He, Ne, Kr, Ar, Xe) โดยทั่วไปเราพบว่าแผนภูมิระดับพลังงานของกําชเหล่านี้เหมือนกับ Ne ในรูป 6.4 ต่างกันที่มาตราส่วนเท่านั้น ระดับพลังงานตี่นตัวระดับแรก (1s) ตามปกติไม่ได้ใช้เป็นระดับเลเซอร์ล่าง ทั้งนี้เพราะว่ามันเป็นสถานะกึ่งเสถียรและระดับที่ใช้หากิริยาเลเซอร์ คือระดับที่สูงกว่าระดับตี่นตัวแรก (หรือสองระดับแรก) ดังนั้นเลเซอร์กําชเป็นกลางตามปกติทำงานในช่วงคลื่นแสงสีแดงหรือใกล้กับคลื่นได้แดง (1-10 ไมโครอน)



รูป 6.8 แสดงห้องใหม่ในเส้นโค้งกำลังขายของเลเซอร์กําชขอสืบสืบที่ความถี่ (a) $\omega \neq \omega_0$ และ (b) $\omega = \omega_0$

สุดท้ายเรารสังเกตได้ว่า เลเซอร์กําชเป็นกลางชนิดนี้ไม่ได้จำกัดเฉพาะกําชเฉียบเท่านั้น ยังมีกําชอื่นอีก เช่น เลเซอร์กําชที่ใช้อะตอม I₂, Cl₂ และ Hg ตัวอย่างของเลเซอร์กําชที่สำคัญโดยเฉพาะคือ เลเซอร์อะตอมไออกซีเด็น อะตอมไออกซีเด็นสร้างขึ้นด้วยวิธีทำให้แตกตัวด้วยแสงของสาร CH₃I หรือ CF₃I และ C₂EI ดังนั้น เลเซอร์นี้จึงกลายเป็นเลเซอร์ชนิดทำให้แตกตัวทางเคมีด้วยแสง เมื่อแสง ($\lambda \sim 300$ นาโนเมตร) จากหลอดแสงวาวบกำลังสูงถูกโมเลกุลดังกล่าว ข้างตันตัวได้ตัวหนึ่งๆ อะตอมไออกซีเด็นในสถานะตี่นตัว ²P_{1/2} ถูกสร้างขึ้นด้วยอัตราเร็วมากกว่าในสถานะพื้น ²P_{3/2} ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเลเซอร์เกิดขึ้นบนเส้น ²P_{1/2} \rightarrow ²P_{3/2} ($\lambda = 1.315$ ไมโครอน) เส้นนี้ไม่ยอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้โลไฟฟ้า แต่ยอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้โลไฟฟ้า เนื่องจากอายุขัยของการเปลี่ยนแปลงตามปกติสั้นมาก (ในช่วงมิลลิวินาที) อายุขัยของสถานะ ²P_{1/2} เกิดจากการคลายการตี่นตัวด้วยการชน และอายุขัยของสถานะพื้น ²P_{3/2} เกิดจากการรวมตัวกันใหม่



และเป็น 100 ไมโครวินาที ในช่วงที่ขอบเกิดขึ้น คุณลักษณะของเลเซอร์ไออกซีเด็น

อยู่ในช่วงระหว่างของเลเซอร์ก้าชและช่วงของเลเซอร์พลีกไอโอน ไอโอดีนเป็นก้าชจึงต้องบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว (รูป 6.3) เมื่อันเลเซอร์ก้าชอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม เลเซอร์ไอโอดีนยังเมื่อันกับเลเซอร์พลีกไอโอนด้วยสองลักษณะ คือ

- (1) หลอดแสงวานยกระดับมีรูปทรงเรขาคณิตเมื่อันกับที่ใช้สำหรับเลเซอร์พลีก (รูป 3.2)
- (2) เมื่อันในการนีของเลเซอร์ทับทิมและ Nd³⁺ เส้นเลเซอร์ไม่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงได้โพลไฟฟ้า

มันหมายความว่า เลเซอร์ไอโอดีนมีอายุขัยของสถานะบนยาวนาน และด้วยเหตุนี้ มันสามารถสร้างจำนวนการผันกลับประชากรได้มาก จึงทำให้เลเซอร์ไอโอดีน (พร้อมหั้งเลเซอร์ Nd ในแก้ว และ CO₂) เป็นระบบที่นำเสนอใจที่สุดสำหรับการส่งออกเลเซอร์พัลส์งานสูง ๆ (> 100 จูล)

6.3.3 เลเซอร์ไอโอน

ในการนีของอะตอมแตกตัวเป็นไอโอน มาตรាស่วนของระดับพลังงานได้ขยายออกไปอีก หั้นนีเห็นได้จากความจริงที่ว่า เมื่ออะตอมแตกตัวเป็นไอโอนเรียบร้อยแล้ว จะมีพลังงานศักย์เป็นสองเท่าของอะตอมเป็นกลาง นี่หมายความว่าเลเซอร์ไอโอนชอบทำงานในช่วงบริเวณคลื่นแสงหรือคลื่นเหนือม่วง เราจะแบ่งเลเซอร์ไอโอนออกเป็นสองชนิดคือ

- (1) เลเซอร์ก้าชไอโอน
- (2) เลเซอร์ไอโอนโลหะ

6.3.3.1 เลเซอร์ก้าชไอโอน

ในเลเซอร์ก้าชไอโอนมีจำนวนประชากรอะตอมเพิ่มขึ้นในระดับเลเซอร์บัน โดยการชนกันสองครั้งระหว่างอิเล็กตรอนกับไอโอนในขณะเดียวกัน การชนกันครั้งแรกสร้างไอโอนขึ้นจากอะตอมเป็นกลาง ในขณะที่ชนกันครั้งที่สองกระตุ้นให้ไอโอนขึ้นไปยังระดับบน ดังนั้นขั้นตอนการยกระดับพลังงานจึงเป็นสองขั้นตอนรวมทั้งความหนาแน่นกระแส J ด้วย (กล่าวคือ มันแปรโดยตรงกับ J² หรือแปรตาม J ยกกำลังสูงกว่า ซึ่งจะเห็นในภายหลัง) สำหรับขั้นตอนนี้ จะมีประสิทธิภาพเมื่อกระแสเมื่อความหนาแน่นสูง ๆ ดังนั้นเลเซอร์ก้าชไอโอนจึงต้องการความหนาแน่นกระแสสูงกว่าเลเซอร์ก้าชที่เป็นกลาง

เลเซอร์ไอโอนมีหลายชนิด เราจะพิจารณาเพียงเลเซอร์อาร์กอน Ar⁺ รูป 6.9 แสดงระดับพลังงานหลักของ Ar⁺ การเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรของระดับ (4p) ของเลเซอร์

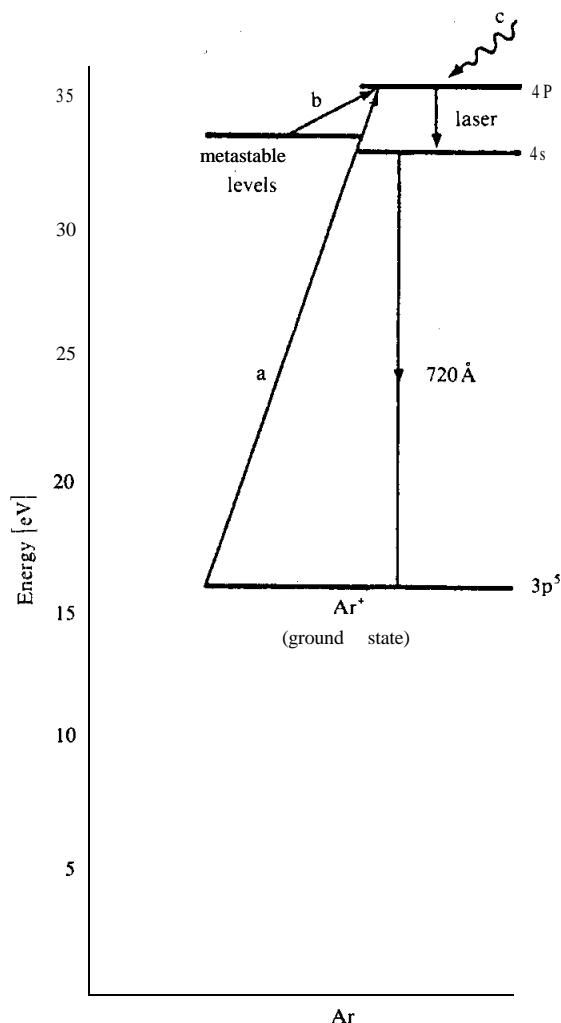
สามารถเกิดขึ้นด้วยสามขั้นตอน ดังนี้

(1) อิเล็กตรอนชนกับไอออน Ar^+ ในสถานะพื้นของมัน [ขั้นตอน (a) ในรูป 6.9]

(2) อิเล็กตรอนชนกับไอออนในระดับสถานะกึ่งเสถียร [ขั้นตอน(b)]

(3) รังสีตกลงจากระดับที่สูงกว่า [ขั้นตอน (c)]

ถ้าเราราให้ N_i เป็นความหนาแน่นของไอออน Ar^+ ในสถานะพื้น และ N_c เป็นความหนาแน่นอิเล็กตรอน และถ้าเราสมมติว่าพลาสม่า (plasma) รวมกันทั้งหมดแล้วเป็นกล้าง ดังนั้น



รูป 6.9 สามขั้นตอนของการยกระดับพลังงานขึ้นไปยังระดับบน (4p) ของเดบอร์ Ar^+

(a) อิเล็กตรอนชนกับไอออนในสถานะพื้น

(b) อิเล็กตรอนชนกับไอออนในสถานะกึ่งเสถียร

(c) การแผรังสีตกลงจากระดับที่สูงกว่า

เราสามารถกล่าวได้ว่า $N_i = N_e$ ด้วยเหตุนี้ ขั้นตอน (a) ทำให้เกิดอัตราการยกระดับพลังงาน ต่อหน่วยปริมาตร $(dN_2/dt)_p$ อยู่ในรูปแบบของ

$$(dN_2/dt)_p \propto N_e N_i \approx N_e^2 \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

เมื่อการคายประจุผ่านไปจนสนามไฟฟ้าคงที่แล้ว ความหนาแน่นอิเล็กตรอน N_e จะเปรียบเท่ากับความหนาแน่นกระแสของการคายประจุ J จากสมการ (6.2) ได้ว่า $(dN_2/dt)_p \propto J^2$ การแปรตามกระแสอย่างกำลังสองนี้ สามารถยืนยันได้โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกำลังส่องออกตามปกติวิสัยเป็นพังก์ชันของ J ซึ่งปรากฏในขั้นตอน (a) อย่างไรก็ตาม ขั้นตอน (b) และ (c) ก็ให้ $(dN_2/dt)_p$ ขึ้นกับ J ด้วยเช่นเดียวกัน ดังเห็นได้ชัดในการนีของขั้นตอน (c) จำนวนประชากรของระดับเหล่านี้ได้จากขั้นตอนของรังสีตกลงจากระดับที่สูงกว่าตั้งแต่แรก จะแปรตาม $N_e N_i$ คือ N_e^2 ในกรณีของขั้นตอน (b) การคำนวณค่อนข้างยุ่งยากมากกว่า จำนวนประชากร N_m ของระดับกึ่งเสถียร ซึ่งพิจารณาจากการปรับความสมดุลระหว่างขั้นตอนการตีนตัวและคลายการตีนตัว กำหนดด้วย

$$N_m \propto N_e N_i / (K + N_i) \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

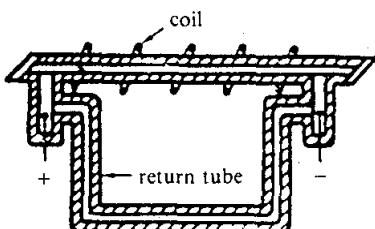
พจน์ K ในสมการ (6.3) ได้จากขั้นตอนคลายการตีนตัวของระดับกึ่งเสถียร ในขณะที่พจน์ N_e ได้จากขั้นตอนคายการตีนตัวเนื่องจากการชนกันของอิเล็กตรอน จากสมการ (6.3) พนวณว่าขั้นตอน (b) ให้อัตราการยกระดับพลังงานเป็น

$$(dN_2/dt)_p \propto N_m N_e \propto N_e^3 / (K + N_e) \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

อย่างไรก็ตาม การคลายการตีนตัวของสถานะกึ่งเสถียรเกิดจากการชนกันกับอิเล็กตรอน มากกว่าเกิดจากการเปล่งแสงตามปกติวิสัย (คือ $K \ll N_e$) จะเห็นได้จากสมการ (6.4) ว่า มันมีผลลัพธ์ $(dN_2/dt)_p \propto N_e^2$ อีกด้วย ดังนั้นขั้นตอนทั้งสามช่วยให้จำนวนประชากรในระดับเลเซอร์บนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าจำนวนประชากรจะลดลงประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ของระดับบน เกิดขึ้นจากขั้นตอน (c) สุดท้ายเรารังสีตกลงได้ว่าอายุขัยของเลเซอร์ระดับบนมีประมาณ 10^{-8} วินาที ขณะที่เลเซอร์ระดับล่าง ($4s$) ที่ใช้มตอกับสถานะพื้นด้วยการเปลี่ยนแปลงแร้งสีมีอายุขัยสั้นกว่ามาก (10^{-9} วินาที) ดังนั้นในการนีเงื่อนไขสมการ (5.37 ค) ยังคงใช้ได้ ความกว้างเส้นดอปpler $\Delta\nu_D$ มีค่าประมาณ 3,500 เมกะเฮิรตซ์ และจากสมการ (2.113) มันดูเหมือนว่าเทียนได้กับอุณหภูมิ $T = 3000^\circ\text{K}$ ดังนั้นไอออนเจิงร้อนมากที่เดียว เมื่อนักบินผลของการเร่งประจุด้วยสนามไฟฟ้า

แผนภูมิโครงสร้างของหลอดเลเซอร์ Ar^+ ได้แสดงในรูป 6.10 เนื่องจากความหนาแน่นกระแสงสูงจึงมีการย้ายไอออก Ar^+ ไปยังแคทโอด (cathode) และมีหลอดคืนกลับ (return tube) ดังแสดงในรูป เพื่อทำให้ออนยั่นกลับไปเกิดความสมดุล ความยกเว้นของหลอดคืนกลับยกกว่าหลอดเลเซอร์มาก เพื่อป้องกันการขยายประจุผ่านไปตามหลอดคืนกลับ แทนที่จะผ่านไปตามหลอดเลเซอร์ที่ความหนาแน่นกระแสงสูงมีปัญหาที่สำคัญมากทางวิทยาการ คือ การที่หลอดได้รับความเสียหายจากการถูกไอออกอนชน ($T = 3000^\circ\text{K}$) ดังนั้น หลอดจึงต้องทำด้วยวัสดุเซรามิกมากกว่าทำจากพลาสติกเนื่องจากมีความคงทนและสามารถต้านทานความร้อนได้ดี ทำให้มีแรงผลเรนทร์ช่วยลดอัตราการแพร์ของอิเล็กตรอนไปยังผนังลง ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระที่ศูนย์กลางของหลอดเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการยกระดับพลังงานเพิ่มขึ้น และกำลังส่องออกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน การจำกัดการขยายประจุไปยังศูนย์กลางของหลอดด้วยสนามแม่เหล็ก จะช่วยลดปัญหาของการทำให้ผนังได้รับความเสียหายได้ด้วย ในกรณีที่ไม่เหมือนกับกรณีของเลเซอร์ไฮเดรียม-นีโอน เพราะว่ากำลังขยายไม่ได้ขึ้นกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหลอด และการสะสมจำนวนประชากรอยู่ในห้องเผาต้องมีในสถานะกึ่งเต็มรูมไม่ได้ทำให้จำนวนการผ่านกลับประชากรลดน้อยลง

เลเซอร์อาร์กอนออกซิเจนเลตที่ความยาวคลื่นจำนวนหนึ่ง คือที่ $\lambda_1 = 488$ นาโนเมตร (สีน้ำเงิน) และ $\lambda_2 = 514.5$ นาโนเมตร (สีเขียว) เป็นไปได้ที่จะให้มีออกซิเจนเลตเพียงเส้นเดียว โดยใช้แผนภูมิของรูป 6.5 คุณลักษณะที่สำคัญของเลเซอร์ Ar^+ คือ กำลังส่องออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสงขยายประจุเพิ่มขึ้น และกำลังส่องออกของเลเซอร์ Ar^+ เพิ่มขึ้นตลอดเวลา เมื่อกำลังการดันตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากกรณีของเลเซอร์ไฮเดรียม-นีโอน

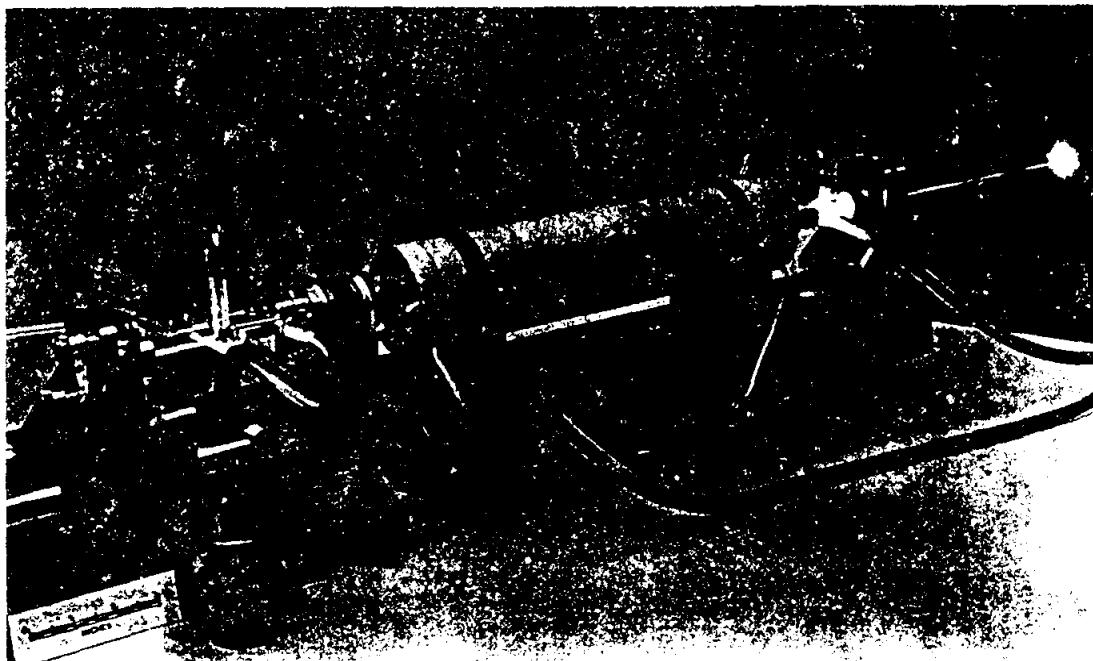


รูป 6.10 แสดงโครงสร้างของหลอดเลเซอร์ Ar^+

6.3.3.2 เลเซอร์ไอโอดีน

โลหะที่ใช้ทำกาวิริยาเลเซอร์ไอโอดีนคือ Sn , Pb , Zn , Cd และ Se โดยมากใช้ไอของ Cd หรือ Se ไอของ Cd สร้างกาวิริยาเลเซอร์คลื่นตอนเรืองได้ที่ความยาวคลื่น $\lambda_1 = 441$ นาโน-

เมตร และ $\lambda_2 = 325$ นาโนเมตร โดยเฉพาะความยาวอันหลังน่าสนใจมาก สำหรับนำไปประยุกต์ใช้หลายอย่างซึ่งตกในช่วงรังสีเหนือม่วงของแบบคลีนแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นความยาวคลื่นสั้นที่สุดของเลเซอร์ก้าชคลีนต่อเนื่อง ไอของ Se ให้กิริยาเลเซอร์คลื่นต่อเนื่องได้ดีที่ความยาวคลื่นอย่างน้อย 19 คลื่นความยาว ซึ่งครอบคลุมแบบคลีนแสงที่มองเห็นได้ทั้งหมด เลเซอร์ไอโอละสามารถใช้ขั้นตอนการยกระดับพลังงานสองขั้นตอนที่ต่างกัน* คือ



รูป 6.11 เครื่องทดลองก้าชคลอน

- (1) การแตกตัวเป็นไออ่อนแบบเพนนิง (Penning ionization)
- (2) การแตกตัวเป็นไออ่อนโดยถ่ายเทประจุ ซึ่งห้องสองขั้นตอนเป็นแบบขั้นเดียว (Single-step processes)

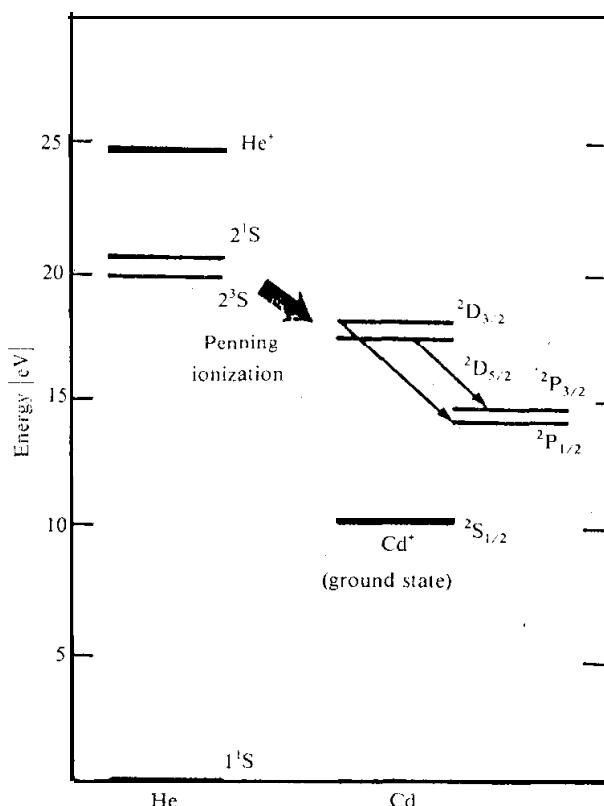
อัตราการยกระดับพลังงานจะแปรโดยตรงกับ J มากกว่าแปรตาม J^2 (หรือ J^3) เมื่อกับเลเซอร์ก้าชไออ่อน ดังนั้นความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวที่เลเซอร์ไอโอละต้องการย้อมน้อยกว่าของเลเซอร์ก้าชไออ่อนมาก

ขั้นตอนการแตกตัวเป็นไออ่อนแบบเพนนิง สามารถเขียนได้เป็น



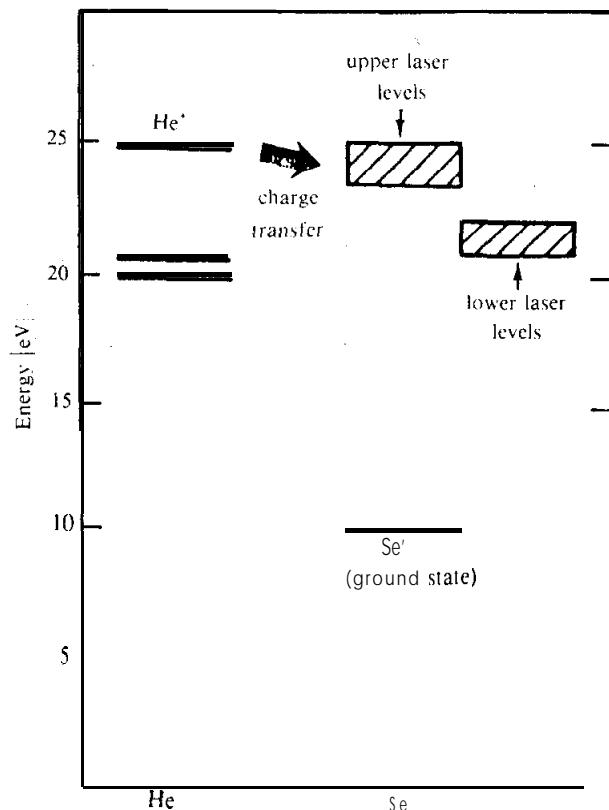
* เลเซอร์ Ar⁺ ไม่สามารถใช้ขั้นตอนนี้ เพราะว่าระดับเลเซอร์ของมันอยู่สูงมาก (~ 35 eV ดูรูป 6.9)

เมื่อไอออกัน B^+ อาจจะตื้นตัวภายในหรือไม่ตื้นตัวก็ได้ แน่นอนมันจะเป็นเช่นนี้ได้ ถ้า พลังงานการตื้นตัวของอะตอมตื้นตัว A^* มีมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานที่ต้องการใช้ ทำให้อะตอม B แตกตัวเป็นไอออกัน พลังงานที่เหลือใช้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนขั้น ตอนนี้เกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อตระกูลธาตุ A^* ตื้นตัวอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร ให้สังเกตว่ามันไม่เหมือน กับการถ่ายเทพลังงานอภินิหาร การแตกตัวเป็นไอออกันแบบเพนนิงเป็นขั้นตอนที่ไม่เกิดอภินิหาร กล่าวคือพลังงานการตื้นตัวของ A^* ที่ต้องการใช้ ต้องมีค่ามากกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออกัน ばかりกับพลังงานการตื้นตัวของอะตอม B (ถ้าอะตอม B อยู่ในสถานะตื้นตัว) พลังงานที่เหลือใช้ สามารถขับไล่ออกไปเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่พุ่งออกไป ในทางตรงกันข้าม การแตกตัวเป็นไอออกันโดยการถ่ายเทประจุ มีขั้นตอนดังนี้



รูป 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของเลเซอร์ He – Cd

ในที่นี้ พลังงานการแตกตัวของอะตอม A เป็นไปเป็นพลังงานการแตกตัวหากับพลังงานการตีนตัวของอะตอม B เมื่อไม่มีอิเล็กตรอนพุ่งออกมานั้นขึ้นตอนต้องเกิดอภินาทกล่าวคือ พลังงานการแตกตัวของ A ต้องเท่ากับพลังงานการแตกตัวหากับด้วยพลังงานการตีนตัวของอะตอม B ขึ้นตอนเหล่านี้จะมีผลเฉพาะถ้าไออ่อน A⁺ อุดในลักษณะกึ่งสเตียร์ (คือ ถ้ามันมีอายุขัยยาวนาน)



รูป 6.13 ความสัมพันธ์ระดับพลังงานของเลเซอร์ He—Se

ต่อไปเรามาพิจารณาตัวอย่างของเลเซอร์ชนิดนี้ ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสองตัวอย่างคือ เลเซอร์ He—Cd และเลเซอร์ He—Se ระดับพลังงานของระบบ He—Cd ได้แสดงในรูป 6.12 จะเห็นได้ว่า เลเซอร์ Cd ยกระดับพลังงานด้วยขั้นตอนการแตกตัวเป็นไออ่อนแบบเพนนิง สถานะกึ่งสเตียร์ 2^1S และ 2^3S ของ He สามารถกระตุ้นหั้งสถานะ $^2D_{3/2}$ และ $^2D_{5/2}$ หรือ $^2P_{3/2}$ และ $^2P_{1/2}$ ของ Cd⁺ ให้ตื้นตัว แม้ว่าขั้นตอนไม่เกิดอภินาท เราจะพบว่าภาคตัดขวางสำหรับการตีนตัวของสถานะ D มีมากกว่าของสถานะ P ถึงสามเท่า แต่ที่สำคัญกว่านี้ก็คือ อายุขัยของสถานะ D (10^{-7} วินาที) ยาวนานกว่าอายุขัยของสถานะ P (10^{-9} วินาที) ดังนั้นจึงนวนการผันกลับประชากรรระหว่างสถานะ D และ P สามารถทำได้ง่าย กิริยาเลเซอร์เกิดบนเส้น $^2D_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$

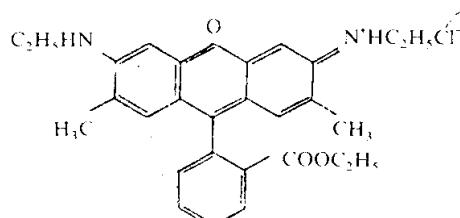
($\lambda = 325$ นาโนเมตร) และ ${}^2D_{5/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ ($\lambda = 441.6$ นาโนเมตร) หลังจากนั้นไออ่อน Cd^+ ลดระดับลงไปยังสถานะพื้นโดยแผ่รังสีออกมา ในกรณีของเลเซอร์ $He-Se$ พลังงานเลเซอร์ระดับบนของไออ่อน Se^+ (คือผลบวกของพลังงานการแตกตัวและพลังงานการตีนตัวของอะตอม Se) ประมาณ ~ 25 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) (รูป 6.13) มีค่ามากกว่าพลังงานการตีนตัวบนสถานะกึ่งเสถียรของ He ดังนั้นการยกระดับพลังงานขึ้นไปยังระดับเลเซอร์บนสามารถทำได้โดยการแตกตัวเป็นไออ่อนจากการถ่ายเทประจุ (ไออ่อน He^+ มีพลังงาน ~ 25 อิเล็กตรอนโวลต์) ขั้นตอนนี้จะมีผลมากเมื่อไออ่อน He^+ มีอายุชั้นยาวนาน (พิจารณาจากการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน)

โครงสร้างของหลอดไอโลหะไม่ได้แตกต่างไปจากชนิดของหลอดในรูป 6.3 แต่มีสิ่งหนึ่งที่เพิ่มขึ้นมาคือ ในหลอดก้ามมีหลอดเล็ก ๆ อยู่ใกล้กับแอดโโนด (anode) โดยมีโลหะบรรจุอยู่เมื่อหลอดเล็ก ๆ ถูกเผาจนมีอุณหภูมิสูงเพียงพอ ($\sim 250^\circ C$) เพื่อสร้างความดันไอในหลอดเพิ่มขึ้นตามต้องการ เมื่อไอโลหะร้อนจนสามารถหายใจประจุอะตอมบางตัวแตกตัวออกเป็นไออ่อนและเคลื่อนย้ายไปยังแคโทด การหายใจประจุทำให้มีความร้อนเพียงพอจะป้องกันมิให้ไอควบแน่นบนผนังของหลอด อย่างไรก็ตามไอโลหะจะควบแน่นได้เมื่อมันวิ่งไปถึงบริเวณแคโทด ซึ่งไม่มีการหายใจประจุและมีอุณหภูมิต่ำ ผลคือมีการไหลของไอโลหะอย่างต่อเนื่องจากแอดโโนดไปยังแคโทด เลเซอร์ $He-Cd$ และ $He-Se$ สามารถให้กำลังส่องออก $50-100$ มิลลิวัตต์ ซึ่งอยู่ระหว่างเลเซอร์ $He-Ne$ สีแดง (สองสามมิลลิวัตต์) และเลเซอร์ Ar^+ (สองสามวัตต์)

6.4 เลเซอร์ชนิดของเหลว |เลเซอร์ไดย์ (Dye Lasers)|

เลเซอร์ของเหลวที่เราจะพิจารณา มีสารกิริยาประกอบด้วยสารละลายนอกสารประกอบจำพวกสารย้อมสีอินทรีย์ในของเหลว เช่น เอธิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) และเมธิล-แอลกอฮอล์ (methyl alcohol) หรือน้ำ ปกติสารย้อมสีเหล่านี้คือสารจำพวกต่อไปนี้*

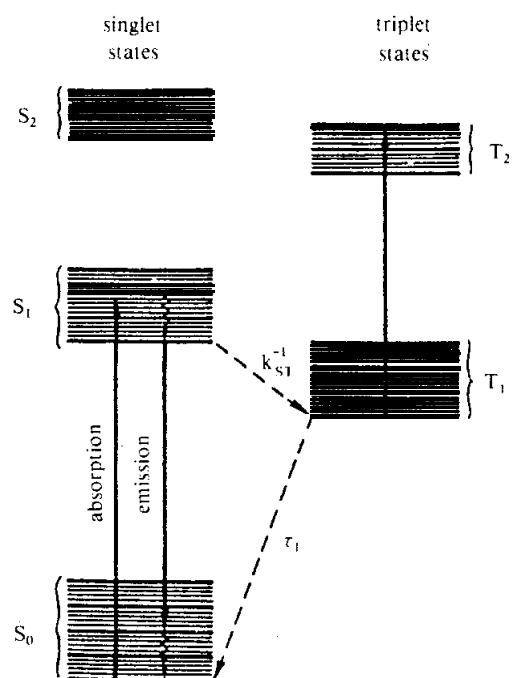
* ไม่เลกุลเหล่านี้มีโครงสร้างยุ่งยากมาก ดังตัวอย่างสูตรโครงสร้างสำหรับโรดามีน 6 จี (rhodamine 6 G) ซึ่งเป็นสารกิริยาเลเซอร์ไดย์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง สูตรโครงสร้างของมันเป็นดังนี้



- (1) โพลีเมธีนไดย์ (polymethine dyes) ($0.7\text{-}1 \text{ } \mu\text{มิครอน}$)
- (2) แซนธีนไดย์ (xanthene dyes) ($0.5\text{-}0.7 \text{ } \mu\text{มิครอน}$)
- (3) เคามารินไดย์ (coumarin dyes) ($0.4\text{-}0.5 \text{ } \mu\text{มิครอน}$) และ
- (4) สกินทิลเลเตอร์ไดย์ (scintillator dyes) ($\lambda < 0.4 \text{ } \mu\text{มิครอน}$)

6.4.1 คุณลักษณะของเลเซอร์ไดย์

คุณสมบัติที่น่าสนใจที่สุดของเลเซอร์เหล่านี้คือ สามารถปรับค่าความถี่สำหรับสารไดย์ และการจัดวางตามรูป 6.5 มันสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นของการอสซิลเลตได้ตลอดช่วงของ ~ 30 นาโนเมตร เมื่อเปลี่ยนเป็นสารไดย์ตัวอื่นก็สามารถหาการอสซิลเลตที่ความยาวคลื่นอื่นได้ตั้งแต่จากไกลัคเลื่นได้แดงจนถึงไกลัคเลื่นเหนือม่วง คุณลักษณะอื่นของเลเซอร์เหล่านี้คือ มันมีกำลังขยายสูงมากเมื่อเทียบกับเลเซอร์สภาวะของแข็ง ทั้งนี้ เพราะว่าขั้นตอนที่ความหนาแน่นของโมเลกุลสารไดย์อยู่ในสารละลายมีขนาดน้อยกว่าเลเซอร์สภาวะของแข็งสามเท่า แต่มีภาคตัดขวางการเปล่งแสงมากกว่าสามเท่าเข้มเดียวกัน และการเตรียมสารก็ง่ายทำได้ง่าย ได้เปรียบกว่าเลเซอร์สภาวะของแข็งมาก many



รูป 6.14 แสดงระดับพลังงานสำหรับสารไดย์ในสารละลาย ระดับชั้นเกลือและทวีเพลต ได้แสดงแบบแนวตั้ง

คุณลักษณะแพนกูมิรัดบพลังงานสำหรับโมเลกุลของสารได้ในสารละลายนี้แสดงในรูป 6.14 แต่ละระดับสถานะทางไฟฟ้าได้จากกลุ่มของระดับสั่นสะเทือน (vibrational levels) (เส้นตรงหนักในรูป) และกลุ่มของระดับหมุนรอบ (rotational levels) (เส้นบางกว่า) ระยะห่างระหว่างระดับสั่นสะเทือนเป็น $1400 - 1700 \text{ ซม}^{-1}$ ส่วนระยะห่างระหว่างระดับหมุนรอบจะน้อยกว่า 100 เท่า นั่นคือกลไกการแผ่ออกร่องเส้นเมื่อความสำคัญในของเหลวมากกว่าในของแข็งเส้นตรงการหมุนรอบอยู่ไม่แน่นอน จึงทำให้เป็นระดับต่อเนื่องอยู่ระหว่างระดับสั่นสะเทือน คุณลักษณะที่สำคัญที่สุดที่สังเกตได้คือ การมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นชิงเกลต์ (singlet electronic state) [คือมีเลขจำนวนควรนต้มสปินหักหมด $S = 0$ และมีมัลติพลิชิตี (multiplicity) $2S + 1 = 1$] และมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นทรีเพลต (triplet) ($S = 1, 2S + 1 = 3$)

ขณะนี้เราต้องการทราบว่าอะไรเกิดขึ้น เมื่อโมเลกุลอยู่ภายใต้แสงไฟฟ้า ครั้งแรกเราต้องการ $\Delta S = 0$ ซึ่งเป็นไปตามกฎการคัดเลือก นั่นคือยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบชิงเกลต์-ชิงเกลต์ แต่ไม่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบชิงเกลต์-ทรีเพลต ดังนั้น การทำอันตรกิริยากับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำให้โมเลกุลขึ้นจากระดับพื้น S_0 ไปยังระดับสั่นสะเทือนของ S_1 หลังจากนั้นมันจะลดระดับลงในเวลาอันสั้น (โดยไม่แผ่รังสี $\tau_{nr} = 10^{-12} \text{ วินาที}$) ไปยังระดับต่ำสุดของ S_1 ต่อจากนั้นมันจะลดระดับโดยแผ่รังสีไปยังระดับสั่นสะเทือนของ S_0 [เป็นแสงแพรัววัว (Fluorescence)] และกลับไปยังระดับสั่นสะเทือนต่ำสุดของ S_0 โดยไม่มีการแผ่รังสี เมื่อโมเลกุลอยู่ในระดับต่ำสุดของ S_1 มันยังสามารถลดระดับไปยังระดับ T_1 ขั้นตอนนี้เรียกว่า การข้ามระบบภายใน (intersystem crossing) และมันกิดขึ้นได้จากการชนกัน ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลง $T_1 \rightarrow S_0$ เกิดขึ้นโดยวิธีการชนกัน แต่มีบางส่วนเกิดจากขั้นตอนการแผ่รังสีด้วย การแผ่รังสีนี้เรียกว่า การเรืองแสง (Phosphorescence) เราจะบ่งบอกคุณลักษณะของสามขั้นตอนลดระดับพลังงานเหล่านี้ด้วยค่าคงที่สามตัวดังต่อไปนี้

- (1) τ_{sp} เป็นอายุขัยการเปลี่ยนแปลงแสงตามปกติวิถีของระดับ S_1
 - (2) k_{ST} คือ อัตราการข้ามระดับภายใน (วินาที $^{-1}$) ระหว่างระบบชิงเกลต์และระบบทรีเพลต และ
 - (3) τ_T คือ อายุขัยของระดับ T_1
- ถ้าเราเรียก τ เป็นอายุขัยของระดับ S_1 [ดูสมการ (2.93)] เราจะได้

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{sp}} + k_{ST} \dots \dots \dots (6.5)$$

คุณลักษณะที่สำคัญของสารได้แก่ เหล่านี้ คือ มันมีสม�性ของเมตريกซ์ไดโพล (dipole metrix element) μ ใหญ่มาก (สำหรับการเปลี่ยนแปลง $S_0 \rightarrow S_1$) ทั้งนี้ เพราะว่าอิเล็กตรอนตัวเดียวสุดมีอิสระเคลื่อนที่ไปตลอดขนาดของโมเลกุล a เมื่อ a เป็นค่าใหญ่มาก (เช่นพิจารณาขนาดของโมเลกุลโรห์ดามีน 6 จี) จะได้ μ เป็นค่าใหญ่ด้วย เมื่อ $\mu = ea$ ทำให้ได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้

(1) ภาคตัดขวางของการดูดกลืนมีค่าใหญ่มาก สารประกอบจำนวนเล็กน้อยที่ละลายอยู่ในสารละลายมีการดูดกลืนอย่างรุนแรง ที่ความยาวคลื่นสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลง $S_0 \rightarrow S_1$ และสารละลายให้สีเทียบได้กับความยาวคลื่นนี้

(2) อายุขัยของการแผ่รังสี τ_{sp} มีค่าสั้นมาก (สองสามนาโนวินาที) ตามปกติ k_{ST}^{-1} ต้องนานกว่า (~ 100 นาโนวินาที) จะได้ว่าโมเลกุลส่วนมากลดระดับจากระดับ S_1 ด้วยฟลูออเรนเซนซ์

ดังนั้น ความตั้มฟลูออเรสเซนซ์ (คือจำนวนโฟตอนที่ปล่อยออกมาร้อยด้วยฟลูออเรสเซนซ์หารด้วยจำนวนของอะตอมที่อยู่ในระดับ S_1) ให้ค่าเกือบทุกหนึ่ง ความจริงเรามี [ดูสมการ (2.96)]

$$\phi = \tau / \tau_{sp} \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

อายุขัยของทรีเพลต τ_T ขึ้นกับเงื่อนไขของการทดลอง และโดยเฉพาะขึ้นกับจำนวนของออกซิเจนที่ละลายในสารละลาย อายุขัยสามารถได้จาก 10^{-7} วินาที ในสารละลายอิมตัวของอออกซิเจนจนถึง 10^{-3} วินาที หรือมากกว่าในสารละลายที่แยกอออกซิเจนออกแล้ว

จากที่ได้กล่าวข้างต้น จึงพอที่จะคาดการณ์ได้ว่า สารกิริยาเหล่านี้สามารถแสดงกิริยาเลเซอร์ได้ที่ความยาวคลื่นฟลูออเรสเซนซ์ และสารละลายยอมให้ความยาวคลื่นเหล่านี้ผ่านได้หมด เมื่อความถี่การเปล่งแสงต่ำกว่าความถี่ของการดูดกลืน

6.4.2 สมการอัตราสำหรับเลเซอร์ได้

ต่อไปเราจะพิจารณาสมการอัตราสำหรับเลเซอร์ได้ และเราจะเห็นว่าเลเซอร์ได้ ก็คือตัวอย่างของเลเซอร์ที่ระดับยุ่งยากมากกว่าที่เราเคยพิจารณาในหัวข้อ 5.2.2 ความยุ่งยากของมันเกิดจากปรากម្មการณ์ของการข้ามระบบภายใน

เราจะยึดถือตามสมมติฐานข้างต้นว่า อัตราการลดระดับภายในแบบพลังงานรวดเร็ว กว่าอัตราการลดระดับตามปกติวิสัยทั่วไป อัตราการลดระดับโดยการกระตุ้นจากแบบหนึ่ง ไปอีกแบบหนึ่ง ในกรณีนี้แต่ละแบบพลังงานมีความสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นเราเรียก N_1 , N_2 และ N_T เป็นจำนวนประชากรอะตอมทั้งหมดของแบบ S_0 , S_1 และ T_1 ตามลำดับ และ

เราสมมติให้เลเซอร์ออกซิลเลตบนความยาวคลื่นค่าหนึ่ง โดยใช้สัญลักษณ์เหมือนกับในบทที่ 5 เราสามารถเขียนสมการอัตราได้ดังต่อไปนี้

$$N_1 + N_2 + N_T = N_t \quad \dots \dots \dots (6.7 \text{ ท})$$

$$N_2 = W_p N_1 + (B_a N_1 - B_e N_2)q - (N_2 / \tau) \quad \dots \dots \dots (6.7 \text{ ว})$$

$$N_T = k_{ST} N_2 - (N_T / \tau_T) \quad \dots \dots \dots (6.7 \text{ ค})$$

$$\dot{q} = [V_a (B_e N_2 - B_a N_1 - B_T N_T) - (1 / \tau_e)]q \quad \dots \dots \dots (6.7 \text{ ง})$$

ในสมการเหล่านี้แสดงความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การเปล่งแสง โดยการกระตุ้นต่อจำนวนโฟตอนต่อหน่วย B_a หมายถึง สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และ B_e หมายถึง สัมประสิทธิ์การเปล่งแสงของการเปลี่ยนแปลง $S_0 \rightarrow S_1$ สัมประสิทธิ์ทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งหมายถึงการการเปลี่ยนแปลงที่ต่างกันจริง ๆ การดูดกลืนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับต่ำสุดของ S_0 ขึ้นไปยังระดับ S_1 ในทางตรงกันข้ามการเปล่งแสงโดยการกระตุ้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำสุดของ S_1 ไปยัง S_0 สัมประสิทธิ์ B_T หมายถึงการเปลี่ยนแปลง $T_i \rightarrow T_2$ สัมประสิทธิ์ B ทั้งสามต่างกำหนดด้วยสมการในแบบของสมการ (5.11 ท) ทั้งสิ้น ซึ่ง σ หมายถึงภาคตัดขวางการดูดกลืนของการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสม

จำนวนประชากรขึ้นเริ่ม N_{2c} หากได้โดยให้ $\dot{q} = 0$ ในสมการ (6.7 ง) ค่าของมันกำหนดด้วย

$$N_{2c} = [\sigma_a N_t - \sigma_a N_{2c} + (\sigma_T - \sigma_a) N_T + (\gamma / \ell)] / \sigma_e \quad \dots \dots \dots (6.8)$$

จำนวนประชากรของสถานะทริเพลต N_{Tc} ที่ขึ้นเริ่มหากได้โดยให้ $N_T = 0$ ในสมการ (6.7 ค) ทำให้

$$N_{Tc} = k_{ST} \tau_T N_{2c} \quad \dots \dots \dots (6.9)$$

แทนสมการ (6.9) ลงในสมการ (6.8) เราพบว่า

$$N_{2c} \left[1 + \frac{\sigma_a}{\sigma_e} - \frac{\sigma_T - \sigma_a}{\sigma_e} k_{ST} \tau_T \right] = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} N_t + \frac{\gamma}{\sigma_e \ell} \quad \dots \dots \dots (6.10)$$

เมื่อ N_{2c} เป็นค่าบวก ดังนั้นพจน์ที่อยู่ในวงเล็บต้องเป็นค่าบวก ถ้าเราสมมติว่า (ที่ความยาวคลื่นเลเซอร์) $\sigma_a / \sigma_e \ll 1$ เราจะได้เงื่อนไข

$$\tau_T < \sigma_e / \sigma_T k_{ST} \quad \dots \dots \dots (6.11)$$

ถ้าเงื่อนไข (6.11) “ไม่เกิดขึ้น ดังนั้นเลเซอร์ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ความจริงถ้าเราให้

$$B_e N_{2c} > B_T N_{Tc} \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

และใช้สมการ (6.18) และ (5.11 ก) เราจะได้เงื่อนไข (6.11) ทันที ถ้าเงื่อนไข (6.11) ยังไม่เพียงพอ เลเซอร์สามารถทำงานเป็นแบบคลื่นเดลล์ได้เท่านั้น และแม้ว่ามันจะเป็นไปได้ ต่อเมื่อเวลาที่ใช้สำหรับการยกระดับคลื่นเดลล์ต้องสั้นกว่าค่าแน่นอนค่าหนึ่งเท่านั้น เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณากรณีเมื่อ $\tau_T \rightarrow \infty$ เท่านั้น เราแทนค่าต่างๆ ในสมการ (6.7 ข) ดังนี้ $W_p = at$ (คลื่นเดลล์ตัวบวกเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามเวลา), $q = 0$ (กิริยาเลเซอร์ยังไม่เริ่มต้น), $N_2 = 0$ (ซึ่งสมมติว่าเวลาการคลายตัวสั้นกว่าเวลาการยกระดับขึ้นไปมาก) และ $N_1 = N_i$ [คือสมมติว่า $(N_2, N_T) \ll N_i$] ดังนั้นเราได้

$$N_2 = (aN_i\tau)t \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

หมายความว่าภายใต้ข้อสมมติเหล่านี้ จำนวนประชากรในระดับบันเป็นไปตามอัตราการยกระดับ จากสมการ (6.7ค) และสมมติ τ_T เป็นค่าอนันต์ เราได้

$$N_T = (k_{ST}aN_i\tau)t^2/2 = N_2(k_{ST}t/2) \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

ถ้าเราเรียก t_0 เป็นเวลาเมื่อถึงขีดเริ่ม เงื่อนไข (6.12) ต้องเป็นที่น่าพอใจสำหรับ $t = t_0$ ดังนั้นจากสมการ (6.14) เราหาได้ว่า

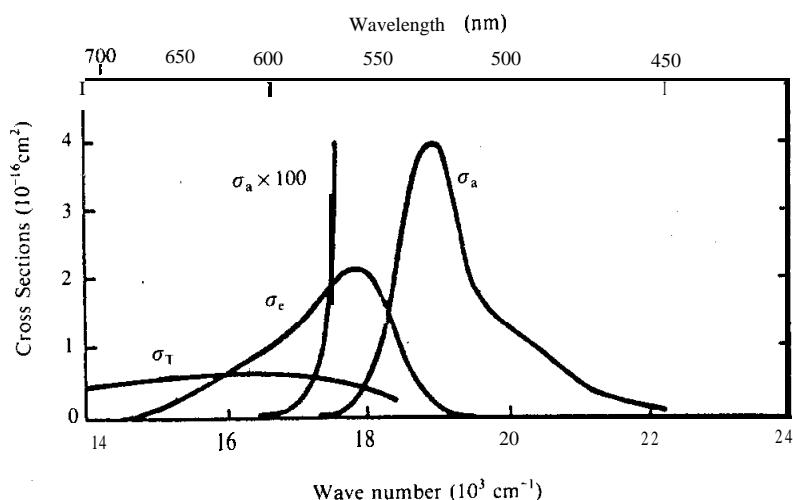
$$t_0 < 2\sigma_e/\sigma_T k_{ST} \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

ค่าต่างๆ ที่เราหาได้ในขณะนี้ นำมาใช้กับกรณีของโรห์ดามีน 6 จี สำหรับการเปลี่ยนแปลงของ σ_e , σ_a และ σ_T เทียบกับความยาวคลื่นที่ได้แสดงในรูป 6.15 ส่วนพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ที่ต้องการใช้ในการคำนวณมีค่าดังนี้ คือ $\tau = 5$ นาโนวินาที $\phi = 0.96$ และจากสมการ (6.5) และ (6.6) $k_{ST} = 0.8 \times 10^7$ วินาที $^{-1}$ และค่าสุดท้าย $\tau_T = 1.1 \times 10^{-7}$ วินาที ถ้าเราสมมติว่าเลเซอร์ออกซซิลเลตที่ความยาวคลื่น $\lambda = 0.593$ ไมครอน จากรูป 6.15 เราหาได้ว่า $\sigma_e = 10^{-16}$ ซม. 2 $\sigma_a = 5 \times 10^{-19}$ ซม. 2 และ $\sigma_T = 4.9 \times 10^{-17}$ ซม. 2 สำหรับเลเซอร์ที่ออกซซิลเลตอย่างต่อเนื่องต้องเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (6.11) จะได้

$$\tau_T < 2.5 \times 10^{-7} \text{ วินาที} \quad \dots\dots\dots (6.16)$$

ดังนั้น สารละลายน้ำไฮโดรเจน 6 จี มีกิริยาเลเซอร์ต่อเนื่องจึงเป็นไปได้ และมันทำได้สำเร็จจริง ๆ เมื่อยกระดับด้วยเลเซอร์ Ar จำนวนประชากรขีดเริ่ม N_{2c} สามารถหาได้จากสมการ (6.10) เราจะสมมติให้สารละลามีจำนวนความเข้มข้น 5×10^{-5} โมลาร์ ($N_i = 3 \times 10^{16}$ โมล/ซม.³) และพจน์ที่สองทางด้านขวาของสมการ (6.10) มีค่าน้อย สามารถถูก忽ที่ได้เมื่อเทียบกับพจน์แรก นั่นหมายความว่า การสูญเสียต่อหน่วยความยาว γ/ℓ (รวมทั้งที่เกิดจากการดูดกลืนของสารได้ย) ต้องมีค่าน้อยกว่า $\sigma_a N_i = 15 \times 10^{-3}$ ซม.⁻¹ หาก ดังนั้นเราจะได้

$$N_{2c} = 1.5 \times 10^{14} \text{ ซม.}^{-3} \quad \dots \dots \dots (6.17)$$



รูป 6.15 แสดงภาคตัดขวางการดูดกลืน σ_a ภาคตัดขวางการปล่อยแสงโดยการกระตุ้น σ_e (การเปลี่ยนแปลงชั่งเกลต์-ชั่งเกลต์) และภาคตัดขวงการดูดกลืน σ_T (การเปลี่ยนแปลงทรีเพลต-ทรีเพลต) สำหรับสารละลายน้ำไฮโดรเจน 6 จี

ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดให้ เรายังได้ว่าสมการ (6.10) สามารถประมาณค่าได้ด้วยสมการ

$$N_{2c} = \sigma_a N_i / \sigma_e \quad \dots \dots \dots (6.18)$$

อัตราการยกระดับขีดเริ่มสามารถหาได้จากสมการ (6.7 ข) โดยแทนค่า $N_2 = 0$ และ $q = 0$ ให้ $N_i \approx N_t$ และใช้สมการ (6.18) เราหาได้ว่า

$$W_{cp} \approx \sigma_a / \sigma_e \tau \quad \dots \dots \dots (6.19)$$

สำหรับการเปลี่ยนเส้นทางของหลอดไฟให้กำลังตรงยอดของเส้นโค้งการดูดกลืนในรูป 6.15 ความเข้มที่เท่าจริงหาได้จากสมการ (3.15) และ (6.19) เป็น [สมมติให้ $f = \exp(-1.1\alpha_0 R)$ $\approx 1/e$ และ $\phi_p = 1$ ในสมการ (3.15)]

$$I_{op} = \frac{e}{4\pi} \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \frac{\hbar\omega_p}{\sigma_p \tau} \quad (6.20)$$

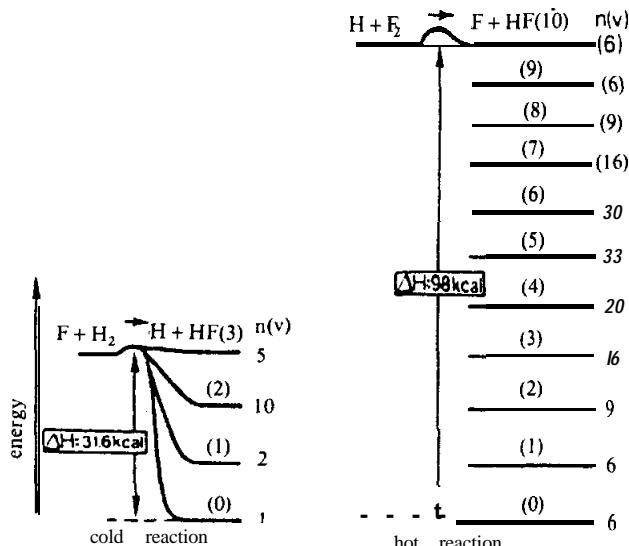
เมื่อ $\hbar\omega_p$ และ σ_p คือ พลังงานโฟตอนและภาคตัดขวางการดูดกลืนตามลำดับ สำหรับยอดของเส้นโค้งการดูดกลืน จากรูป 6.15 และใช้ค่าตัวเลขตามข้างบน เราหาได้ว่า

$$I_{op} \approx 10^3 \text{ วัตต์/ซม}^2 \quad \dots \dots \dots (6.21)$$

6.5 เลเซอร์ชีนิคสารเคมี

เลเซอร์สารเคมีตามปกติมีภาวะการผันกลับประชากรได้จากปฏิกิริยาเคมีรวมทั้งปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างธาตุที่เป็นกําชด้วย ในกรณีนี้พลังงานปฏิกิริยาส่วนใหญ่อยู่ในรูปของพลังงานสั่นสะเทือนของโมเลกุล ดังนั้นจึงเป็นการเปลี่ยนแปลงเลเซอร์แบบการสั่นสะเทือน-การหมุนรอบ (vibrational-rotational) และสอดคล้องกับความยาวคลื่นระหว่าง 3 ถึง 10 ไมครอน เลเซอร์ชนิดนี้มีสิ่งที่น่าสนใจสองอย่างคือ

(1) มันให้ตัวอย่างของการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรง



รูป 6.16 การยกระดับพลังงานของระดับสั่นสะเทือนของโมเลกุล HF ทั้งสองปฏิกิริยา $F + H_2 \rightarrow H + HF^*$ และ $H + F_2 \rightarrow F + HF^*$ จำนวนประชากรสัมพัทธ์ $n(r)$ ได้แสดงไว้ด้วย

(2) เมื่อปริมาณของพลังงานหาได้จากปฏิกิริยาทางเคมีเป็นจำนวนมาก จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่ากำลังส่งออกมีค่าสูง

เลเซอร์สารเคมีมีจำนวนหลายชนิด เราจะพิจารณาเพียงสองชนิดคือ

(1) สารผสม H_2 และ F_2 และสารผสม DF กับ CO_2 ในเลเซอร์ที่ใช้สารผสม H_2 กับ F_2 มีปฏิกิริยาทางเคมีขั้นต้น คือ



ซึ่งสร้างไฮโดรเจนฟลูออไรด์ในสถานะตื่นตัว และได้อะตอมฟลูออไรด์กลับคืนมาด้วยปฏิกิริยา



ความร้อนได้จากปฏิกิริยาทั้งสองเป็น 31.6 และ 98 กิโลแคลอรีต่้อมลตามลำดับ ระดับสั่นสะเทือนของโมเลกุล HF ซึ่งกล้ายเป็นระดับตื่นตัว แสดงในรูป 6.16 จะเห็นได้ว่า เราหาระดับตื่นตัวได้สูงถึงระดับ $v = 3$ และ $v = 10$ จากปฏิกิริยาทั้งสองตามลำดับ พิจารณาปฏิกิริยานิสมการ (6.22) เห็นได้ว่า F มีความสัมพันธ์ทางอิเล็กตรอนสูง ที่ระยะทางมาก ๆ อันตรกิริยาของ $F-H_2$ ดึงดูดกันอย่างรุนแรงและทำให้พิจารณาไปล้าไอลเซ็นของการแยกแจงประชุ H_2 ได้ เมื่ออิเล็กตรอนมีมวลเบา HF สามารถเกิดพันธะก่อนที่protoจะสามารถปรับระยะห่างภายในนิวเคลียสให้เหมาะสมกับสถานะพื้นของ HF ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาโอกาสที่จะพบprotoที่ระยะมากกว่าระยะสมดุลของพันธะ HF หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว นำไปสู่การเคลื่อนที่สั่นสะเทือนแบบฉบับ

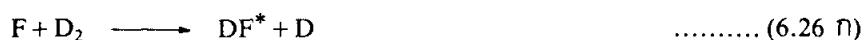
ผลของการรวมปฏิกิริยาทั้งสองสมการ (6.22) และ (6.23) เข้าด้วยกัน โดยรวมสมการด้านซ้ายมือเข้าด้วยกัน และรวมสมการด้านขวาเมื่อเข้าด้วยกัน ปฏิกิริยาทั้งหมดจึงเป็น $F_2 + H_2 \rightarrow 2HF^*$ จะเห็นได้ว่าบทบาทของอะตอมฟลูออไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเอง อย่างไรก็ตามการมีอะตอมฟลูออไรด์ยังเป็นสิ่งจำเป็น เพราะเมื่อไม่มีมัน ขั้นตอนปฏิกิริยาจะเป็นไปอย่างช้ามาก อะตอมฟลูออไรด์สามารถสร้างได้จากปฏิกิริยาเคมี



หรือได้จากการร้อนโดยการเผาไหม้หรือโดยวิธีโฟโตไลซิส (photolysis) หรือโดยวิธีที่ขอบใช้กันทั่วไป คือการทำให้แตกตัวด้วยไฟฟ้า คือ



กิริยาเลเซอร์เกิดขึ้นระหว่างเส้นระดับการหมุนรอบหلام ๆ เส้นของการเปลี่ยนแปลงสันสะเทือนจาก $1 \rightarrow 0$, $2 \rightarrow 1$ และ $3 \rightarrow 2$ ($\lambda = 2.7 - 3.2$ ไมครอน) จะสังเกตได้ว่า การออสซิลเลตสามารถเกิดขึ้นบนจำนวนหลาຍ ๆ เส้นของการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การออสซิลเลตบนการเปลี่ยนแปลงระดับหนึ่งจะช่วยการออสซิลเลตบนระดับอื่น ๆ ด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้ากิริยาเลเซอร์เริ่มต้นบนระดับ $2 \rightarrow 1$ มันจะลดจำนวนประชากรของระดับ 2 และเพิ่มจำนวนประชากรในระดับ 1 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระดับ $3 \rightarrow 2$ และ $1 \rightarrow 0$ ได้ช่วยการเปลี่ยนแปลง $3 \rightarrow 2$ เพราะว่าในระดับต่ำกว่าคือ ระดับ 2 ถูกลดจำนวนประชากรลงและช่วยการเปลี่ยนแปลงระดับ $1 \rightarrow 0$ ด้วย เพราะว่าระดับบนของมันคือ ระดับ 1 ได้เพิ่มจำนวนประชากรขึ้น ในระบบ DF และ CO_2 ครั้งแรกสร้าง DF* จากสองปฏิกิริยา [เมื่อونกับสมการ (6.22) และ (6.23)]



ใช้โมเลกุล DF เพื่อทำให้โมเลกุล CO_2 ตื่นตัวด้วยการแลกเปลี่ยนพลังงาน



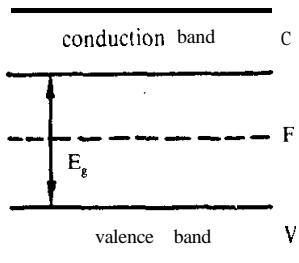
ในการนี้ การสร้างอะตอม F สามารถทำได้โดยผ่านสมการปฏิกิริยา (6.24) เลเซอร์นี้เรียกว่า เลเซอร์ชนิดผสม (hybrid laser) ซึ่งการผันกลับประชากรของโมเลกุลชี้งกิริยา เลเซอร์จริง ๆ (คือโมเลกุล CO_2) ไม่ได้สร้างโดยตรงจากปฏิกิริยาทางเคมี เลเซอร์สองแบบที่ได้อธิบายข้างต้นนี้ ทำงานหั้งอย่างต่อเนื่องและแบบคลื่นเดล กำลังส่งออกต่อเนื่องของระบบ $\text{H}_2 - \text{E}$ สามารถสูงได้ถึงสองสามกิโลวัตต์ ด้วยประสิทธิภาพทางเคมีประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปฏิกิริยาเริ่มขึ้นและดำเนินติดต่อไปทางเคมีอย่างเดียว โดยปราศจากการช่วยเหลือจากสนามไฟฟ้า แสง หรือความร้อน เราย้ายถึงเลเซอร์ที่เป็นเลเซอร์เคมีอย่างบริสุทธิ์จริง ๆ ตัวอย่างของเลเซอร์เคมีบริสุทธิ์คือ ระบบ $\text{H}_2 - \text{E}$ ซึ่งอะตอมสร้างขึ้นผ่านปฏิกิริยาสมการ (6.24) คำนิยามนี้จะรวมถึงเลเซอร์ซึ่งใช้ประกายไฟในการจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ มันดูเหมือนจะดีกว่าใช้คำเลเซอร์เคมี “จริง ๆ” เลเซอร์เคมีจริง ๆ เป็นเลเซอร์ชนิดหนึ่งซึ่งพลังงานหั้งหมดให้กับชาตุที่ใช้ทดลองมาจากแหล่งภายนอก เพื่อทำให้ปฏิกิริยาเริ่มขึ้น (ยกเว้นพลังงานทางเคมี) มีค่าน้อยกว่าพลังงานเลเซอร์ที่เกิดขึ้น

เลเซอร์สารเคมีหั้งสองชนิดที่ได้อธิบายในที่นี้ ความจริงเป็นที่รู้จักกันทั่วไป อย่างไร ก็ตี เลเซอร์หั้งสองมีปัญหามากซึ่งมากกว่าความคิดหวังการประยุกต์ใช้ กล่าวคือ E บางที่เป็น

มาตรฐานได้รับการทดสอบและเกิดปฏิกิริยาได้รับการทดสอบด้วย อีกอย่างหนึ่ง HF หากได้จากผลของปฏิกิริยาและไม่ใช่ของรั่วที่จะจัดการให้เหมาะสม

6.6 เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ

จากที่กล่าวมาก่อนนั้น เราได้พิจารณาระบบที่เป็นอะตอมและโมเลกุลซึ่งระดับพลังงานของมันสัมพันธ์กับพังก์ชันคลื่น คือ เป็นของอะตอมหรือโมเลกุลเดียว ๆ ต่อไปเราจะพิจารณา



รูป 6.17 แสดงแกนของ แบบการนำ และระดับเพื่อรับนิรบุรุษของสารกึ่งตัวนำ

กรณีของสารกึ่งตัวนำซึ่งไม่สามารถจะพูดเกี่ยวกับข้อจำกัดของพังก์ชันคลื่นของแต่ละอะตอมโดยเฉพาะแต่จำเป็นต้องเกี่ยวกับข้อจำกัดของพังก์ชันคลื่นที่สัมพันธ์กับผลึกหั้งหมด นั่นคือเราไม่สามารถพูดเกี่ยวกับระดับพลังงานของแต่ละอะตอมได้

แผนภูมิระดับพลังงานสำหรับสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ ได้แสดงในรูป 6.17 และระดับพลังงานประกอบด้วยแบบกว้างที่เป็นแกนของ (valence band) V และแบบการนำ (conduction band) C อยู่ห่างกันด้วยบริเวณของพลังงานต้องห้าม (forbidden energies) [หรือแบบว่างเปล่า (band gap)] หั้งสองแบบพลังงานมีขนาดเท่ากัน ประกอบด้วยสถานะพลังงานจำนวนมากอยู่ชิดติดกัน และจำนวนของสถานะในแต่ละแบบเท่ากับจำนวนอะตอมหั้งหมดในสารกึ่งตัวนำ จากหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) สามารถมีจำนวนอิเล็กตรอนได้ไม่เกินหนึ่งอิเล็กตรอนอยู่ในแต่ละสถานะพลังงาน โอกาสของการบรรจุอยู่ $f(E)$ สำหรับแต่ละสถานะกำหนดด้วยสถิติเฟร์มี-ไดเรค (Fermi-Dirac statistics) คือ

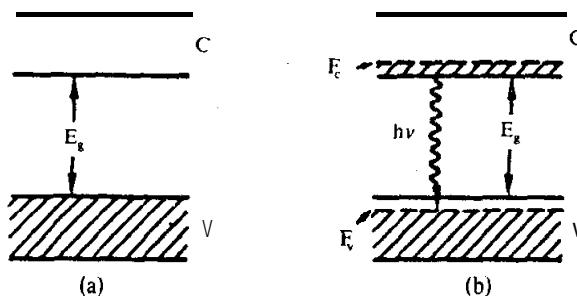
$$f(E) = \left\{ 1 + \exp[(E - F)/KT] \right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (6.28)$$

เมื่อ F คือ พลังงานที่เรียกว่าระดับเฟร์มี ระดับนี้มีความสำคัญทางพิสิกส์คือ เมื่อ $T \rightarrow 0$ เราได้

$$\begin{aligned} f &= 1 && (\text{สำหรับ } E < F) \\ f &= 0 && (\text{สำหรับ } E > F) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.29)$$

ดังนั้น ระดับจึงใช้แทนขอบเขตระหว่างระดับที่เต็มแล้ว และระดับว่างเปล่าที่ $T = 0^{\circ}\text{K}$ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานไม่เกิดข้าช้อน ระดับเฟอร์มิตังอยู่ภายใต้แกนว่างเปล่า (ดูรูป 6.17) ดังนั้นที่ $T = 0^{\circ}\text{K}$ แถบนอกจะเป็นแถบเต็มสมบูรณ์ และแถบการนำเป็นแถบว่างเปล่าสมบูรณ์ ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้าและกล้ายเป็นฉนวน

เพื่อความสะดวกเรามาสมมติว่าสารกึ่งตัวนำอยู่ที่อุณหภูมิ $T = 0^{\circ}\text{K}$ (ดูรูป 6.18) บริเวณพื้นที่แรงสอดคล้องกับสถานะพลังงานที่เต็มแล้ว ต่อไปเรามาสมมติว่ามีอิเล็กตรอนขึ้นจากแถบนอกไปยังแถบการนำ หลังจากนั้นเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ ($\sim 10^{-13}$ วินาที) อิเล็กตรอนในแถบการนำจะลดต่ำลงไปที่ระดับต่ำสุดในแถบการนำนี้ และอิเล็กตรอนตัวใด ๆ ที่อยู่ใกล้ ๆ บนสุดของแถบนอกจะลดต่ำลงยังระดับต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ ดังนั้นทั้งให้บนสุดของแถบนอกเต็มไปด้วย “โอล” (“holes”) นี่หมายความว่ามีการผันกลับประชากรเกิดขึ้นระหว่างแถบนอกและแถบการนำ (รูป 6.18 b) เมื่ออิเล็กตรอนในแถบ C มีแนวโน้มตกกลับไปยังแถบ V (คือกลับไปรวมตัวกับโอลใหม่) เราสามารถหากริยาเลเซอร์ได้ ถ้าวัตถุวางอยู่ในพองกำทอนที่เหมาะสม



รูป 6.18 หลักการทำงานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

โดยการตั้งระดับที่เรียกว่า “ระดับเฟอร์มิคล้าย” (quasi-Fermi-level) ขึ้น เรายังสามารถหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดริยาเลเซอร์ขึ้นสำเร็จ จากรูป 6.18 b เราสังเกตได้ว่า เมื่อว่าสารกึ่งตัวนำไม่มีความสมดุลทางอุณหพลศาสตร์กิตาม แต่ในแถบใดแถบที่จะมีความสมดุลในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นเรายังสามารถล่าวถึงโอกาสของการบรรจุอยู่เป็น f_v และ f_c สำหรับ แถบนอกและแถบการนำ ในที่นี้ f_v และ f_c กำหนดด้วยความสัมพันธ์ในรูปแบบเดียวกับสมการ (6.28) คือ

$$f_v = \{1 + \exp[(E - F_v)/KT]\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (6.30\text{ ก})$$

$$f_c = \{1 + \exp[(E - F_c)/KT]\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (6.30\text{ ข})$$

เมื่อ F_v และ F_c เป็นพลังงานของระดับเฟิร์มีค่าล้ายสองระดับ ระดับเหล่านี้แบ่งแยก
บริเวณของระดับที่บรรจุเติมและระดับที่ว่างเปล่าสำหรับแต่ละแบบที่ $T = 0^\circ\text{K}$ จากรูป 6.18 บ
มันเห็นได้ง่ายดายว่า

$$hv < F_c - F_v \quad \dots\dots\dots (6.31)$$

เราพูดใหม่ว่า เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับกิริยาเลเซอร์คือ จำนวนของการเปล่งแสง
โดยการกระตุ้นจะต้องมากกว่าจำนวนของการดูดกลืน ทั้งสองขั้นตอนนี้ต่างก็เปรียบเทียบของ
การสร้างจำนวนไฟต่อนที่มีอยู่ในโครงสร้างสัมประสิทธิ์ B ของการเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกัน
ข้ามอัตราการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นจะเปรียบเทียบของโอกาสของการมีอยู่ในระดับบน
กับโอกาสของการไม่มีอยู่ในระดับล่าง และนอกจากนี้อัตราการดูดกลืนจะเปรียบเทียบของ
โอกาสของการมีอยู่ในระดับล่างกับโอกาสของการไม่มีอยู่ในระดับบน ดังนั้น เพื่อให้มีการ
เปล่งแสงโดยการกระตุ้น เราต้องการ

$$Bq[f_c(1-f_v) - f_v(1-f_c)] > 0 \quad \dots\dots\dots (6.32)$$

หมายความว่า $f_c > f_v$ จากสมการ (6.30) ได้ว่า

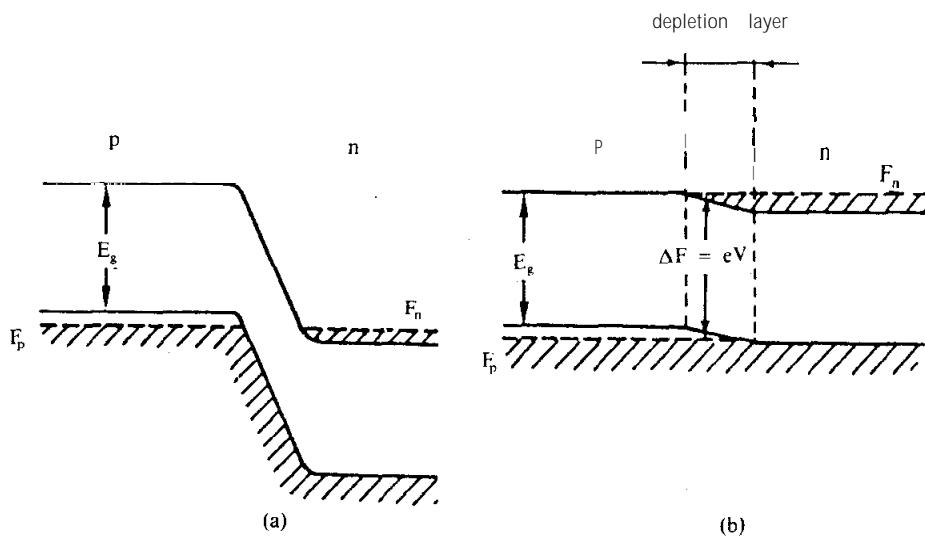
$$F_c - F_v > E_2 - E_1 = hv \quad \dots\dots\dots (6.33)$$

เมื่อ E_2 และ E_1 คือ พลังงานของระดับบนและระดับล่างตามลำดับ

วิธีที่ง่ายที่สุดเพื่อให้เกิดการผันกลับประชากร โดยการใช้สารกึ่งตัวนำในแบบ
ของไดโอดรอยต่อ p-n (junction diode) ด้วยบริเวณชนิดพีและชนิดเอ็น มีจำนวนประจุหนา
แน่นมาก กล่าวคือมีสารเจือปนสูง [$\sim 10^{18}$ อะตอม/ ซม^3] ทั้งดูเนอร์ (donor) หรือເອົກເຊປ່ເຕອຣ໌
(acceptor)] การทำงานของไดโอดชนิดนี้ได้แสดงในรูป 6.19 เมื่อวัตถุมีสารเจือปนสูงมากระดับ
เฟิร์มี F_p ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่ในแบบนอก และระดับเฟิร์มี F_n ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
อยู่ในแบบการนำ ในขณะที่ยังไม่มีศักย์ไฟฟ้าเข้าไปทั้งสองระดับเฟิร์มีวางแผนอยู่บนเส้นแนว
ราบเดียวกัน (รูป 6.19 a) เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า V เข้าไปทั้งสองระดับเฟิร์ม จะแยกออกจากกันด้วย
ปริมาณ กำหนดด้วย

$$A \cdot F = e \cdot V \quad \dots\dots\dots (6.34)$$

ดังนั้น ถ้าได้โอดถูกใบอัสตรองระดับพลังงานจะเป็นไปเหมือนรูป 6.19 b ด้วยวิธีนี้ สามารถเห็นได้ว่า การผันกลับประชาร์เกิดขึ้นในบริเวณที่เรียกว่า “ชั้นอนบพำน้ำประจุ”



รูป 6.19 หลักการทำงานของเดอเชอร์สารกึ่งตัวนำหัวต่อพี-เอ็น

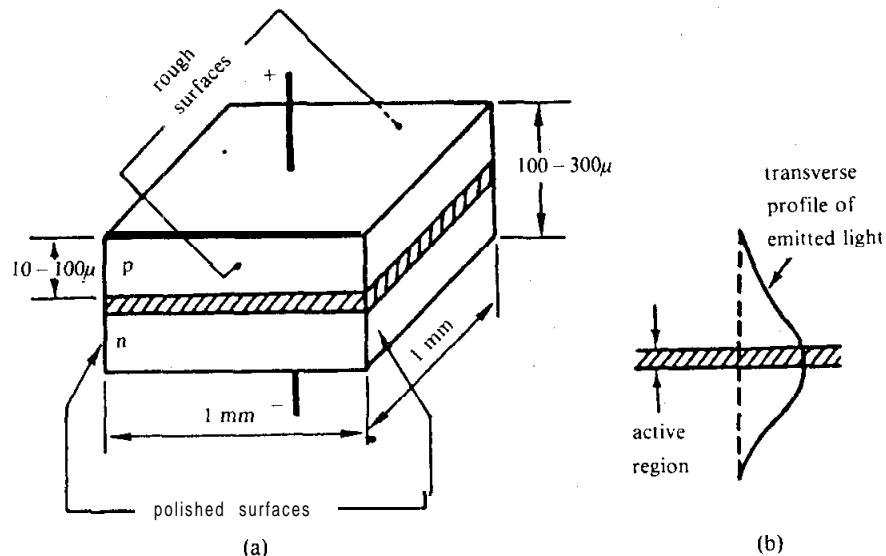
(a) ขณะไม่มีการใบอัส

(b) การใบอัสตรอง

("depletion layer") ของรอยต่อพี-เอ็น การทำงานของการใบอัสตรองคือ การฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในชั้นอนบพำน้ำประจุจากแผนกร่านำของวัตถุชนิดพี และฉีดไฮล์เชิ่ลเข้าไปในชั้นอนบพำน้ำประจุจากแผนกร่านอกของวัตถุชนิดพี สุดท้ายเราสังเกตได้ว่าเมื่อ $\Delta F \approx E_g$ ในที่นี้ E_g คือ แผนกว่างเปล่า และจากสมการ (6.34) $V = E_g/e$ สำหรับเลเซอร์ GaAs ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง $V = 1.5$ โวลต์

รูป 6.20 แสดงแผนภูมิของเลเซอร์รอยต่อพี-เอ็น บริเวณแรงงานเป็นชั้นอนบพำน้ำประจุ จะเห็นได้ว่าได้โอดมีขนาดเล็กมาก ความหนาของบริเวณอันบพำน้ำประจุตามปกติแคบมาก (~0.1 ไมครอน) เพื่อหากริยาเลเซอร์ที่ผิวขอบทั้งสองด้านต้องขัดเงาให้เรียบและขนาดกัน และผิวอีกสองด้านปล่อยให้เป็นผิวหยาบไม่ต้องขัดเงา เพื่อกำจัดการօอสซิลเลเตในทิศทางที่ไม่ต้องการ ตามปกติผิวเงางามสองทำงานโดยไม่ต้องเคลือบให้มีการสะท้อนเกิดขึ้น เพราะว่าค่าตัวคงเหลือของสารกึ่งตัวนำ มีค่ามากเพียงพอให้เกิดการสะท้อนสูง (~35 เปอร์เซ็นต์) สำหรับผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับอากาศ บริเวณกิริยาประกอบด้วยชั้นหนาประมาณ 1 ไมครอน ซึ่งกว้างกว่า บริเวณอันบพำน้ำประจุเล็กน้อย ด้านขวาของลำแสงกลับมีขนาดกว้างกว่าบริเวณกิริยามาก (~40 ไมครอน) (รูป 6.20 b) ดังนั้นลำแสงเลเซอร์จึงขยายเข้าไปในบริเวณพีและเอ็น อย่างไรก็ตามด้านขวาของลำแสงยังถือว่าเล็กมาก ส่วนปลายของลำแสงส่งออกค่อนข้างขยายออก (สองสามองศา) ดังนั้นการประมาณครั้งแรกได้ว่า ลำแสงส่งออกของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำสามารถ

ถือว่าเป็นคลื่นทรงกลม มีคุณย์กลางอยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำ เราสังเกตว่าความหนาแน่นกระแสขึ้ดเริ่ม J_c สำหรับเลเซอร์สารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิ T เพิ่มขึ้น (ประมาณเมื่อนอกับ T^3 สำหรับ $T > 77^\circ\text{K}$) ทั้งนี้ เพราะว่าในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น $f_c(1 - f_c)$ มีค่าลดลง และ $f_c(1 - f_c)$ มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้กำลังขยาย [ซึ่งขึ้นกับ $f_c(1 - f_c) - f_c(1 - f_c)$] ดูสมการ (6.32) มีค่าลดลงมาก ดังนั้นจึงเป็นอันว่ามันเป็นไปไม่ได้ที่เลเซอร์สารกึ่งตัวนำจะทำงานอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตค่าหนึ่ง T_c ค่าของ T_c ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไดโอด



รูป 6.20 (a) แผนภูมิแสดงโครงสร้างของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

(b) การแจกแจงความกว้างของความเข้มแสง

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ เลเซอร์ GaAs ($\lambda = 0.84$ ไมโครเมตร) กำลังส่งออกต่อเนื่องที่ 77°K สูงถึงสองสามวัตต์ ด้วยประสิทธิภาพทั้งหมดประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ (เป็นอัตราส่วนของกำลังเลเซอร์ที่พุ่งออกมายังกำลังไฟฟ้าที่ให้เข้าไปในรอยต่อ) ส่วนประสิทธิภาพทางตอนต้น (เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนของโฟตอนที่ปล่อยออกมากับจำนวนของคุณลักษณะที่นัดเข้าไปในรอยต่อ) มีค่าสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ความจริงเลเซอร์สารกึ่งตัวนำเป็นเลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับกระแสที่เหนือขีดเริ่มเลเซอร์ปกติ จะมีแบบกว้างการออสซิลเลต ($> 10^{11}$ เฮิรตซ์) กว้างมาก ซึ่งทำให้มันเข้ากันได้สำหรับการทำงานยืดหยุ่น ปัญหาของการยืดหยุ่นมีความยุ่งยากมากในกรณีนี้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการกระจายของค่าดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำมาก (เนื่องจากพลังงานของโฟตอนเท่ากับ E_g) ช่วงห่างของความถี่ระหว่างสองหมวดตามยาวถัดกันที่แท้จริง มีค่าเป็น

$$A v = c_0 / 2d [\eta - \lambda (d\eta / d\lambda)] \quad \dots \dots \dots (6.35)$$

c_0 คือ ความเร็วแสงในสูญญากาศ η คือ อัตราการหักเห และ $d\eta / d\lambda$ แทนการกระจาย สมการนี้เราหาได้ง่ายจากสมการ (4.6) โดยใช้ $c = c_0 / \eta$ และ $\eta = \eta(\lambda)$ จากผลของการกระจาย ($d\eta / d\lambda \neq 0$) หมวดตามยาวอยู่ห่างกันไม่ไกลนัก (คือ $\Delta\lambda$ ขึ้นกับ λ) สิ่งเหล่านี้เป็นปัญหาสำหรับการเกี่ยวข้องกับการยืดหด

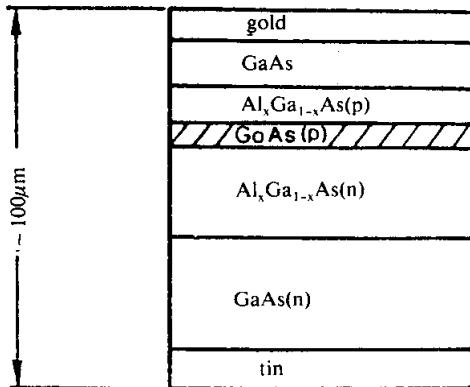
เลเซอร์สารกึ่งตัวนำต่างๆ ส่วนใหญ่อยู่ในแบบของ $Ga(As_{1-x}P_x)$ ซึ่งความยาวคลื่นของมันอยู่ในช่วงระหว่าง 0.84 ไมครอน (สำหรับ GaAs บริสุทธิ์ $x = 0$) และ 0.64 ไมครอน ($x = 0.4$) จึงเป็นไปได้ที่จะประค่าความยาวคลื่นส่งออกได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับเลเซอร์สารกึ่งตัวนำอื่นที่นำมาทำเลเซอร์รอยต่อพี-เอ็นได้เหมาะสม คือ InP, InAs, InSb, PbTe, PbSe และ PbS

ปัญหาอย่างหนึ่งของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำคือ การขยายออกของลำแสงเลเซอร์ที่พุ่งออกมากจากพื้นที่แคบๆ (2 ไมครอน) ทำให้แสงเลเซอร์สูญเสียกำลังไปอย่างมากและจำนวนการผ่านกลับประชากร มีไม่สูงเพียงพอสำหรับกิริยาเลเซอร์ นอกจากนั้นการประยุกต์ใช้ถูกจำกัดให้ทำในอุณหภูมิต่ำๆ (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิในโตรเจนเหลว 77 °K) เพื่อให้การทำงานต่อเนื่องอย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขเป็นผลสำเร็จเมื่อไม่นานมานี้เอง โดยการพัฒนาเลเซอร์ที่เรียกว่า เลเซอร์โครงสร้างผสมโดยใช้ไดโอดโครงสร้างผสมคู่ (double hetero-structure diode) (รูป 6.12) แทนไดโอดพี-เอ็น ในไดโอดชนิดนี้มีสองรอยต่อ $Al_xGa_{1-x}As(p)$ -GaAs และ GaAs- $Al_xGa_{1-x}As(n)$ ระหว่างวัตถุที่ต่างกัน บริเวณกิริยาประกอบด้วยชั้นบางของ GaAs (< 1 ไมครอน) การทำงานอย่างต่อเนื่องเกิดจากผลรวมของสามสิ่งด้วยกันคือ

(1) ค่าดัชนีหักเหของ $Al_xGa_{1-x}As$ มีความสำคัญอย่างมากของ GaAs ($\eta = 3.4$ สำหรับ $x = 0.4$ และ $\eta = 3.6$ สำหรับ $x = 0$) นี่หมายความว่า กิริยาเลเซอร์ถูกจำกัดให้อยู่ภายในชั้นคืออยู่ในบริเวณที่มีกำลังขยาย ซึ่งไม่เหมือนกับกรณีของรอยต่อพี-เอ็น

(2) บริเวณกิริยาถูกจำกัดได้กว่าและเล็กกว่าตัววาย สำหรับความหนาแน่นกระแสเท่ากัน ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในบริเวณกิริยาจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นกำลังขยายเพิ่มขึ้นตัววาย

(3) ความสามารถในการกระจายความร้อนออกไปของไดโอดได้พิจารณาปรับปรุงให้ดีขึ้น ทำได้โดยปก GaAs(n) กับแผ่นฐานของเพชร (หรือตัววาย) ซึ่งมวลและสภาพการนำความร้อนของมันแสดงเหมือนกันเป็นอ่างถายเทความร้อน โดยปรับปรุงให้มีกระแสขิดเริ่มลดลงเหลือเพียง 10^3 แอมเปอร์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง (ซึ่งเดิมกระแสขิดเริ่มสำหรับไดโอดพี-เอ็น คือนิ่ดลดที่อุณหภูมิห้องสูงกว่าถึง 100 เท่า)



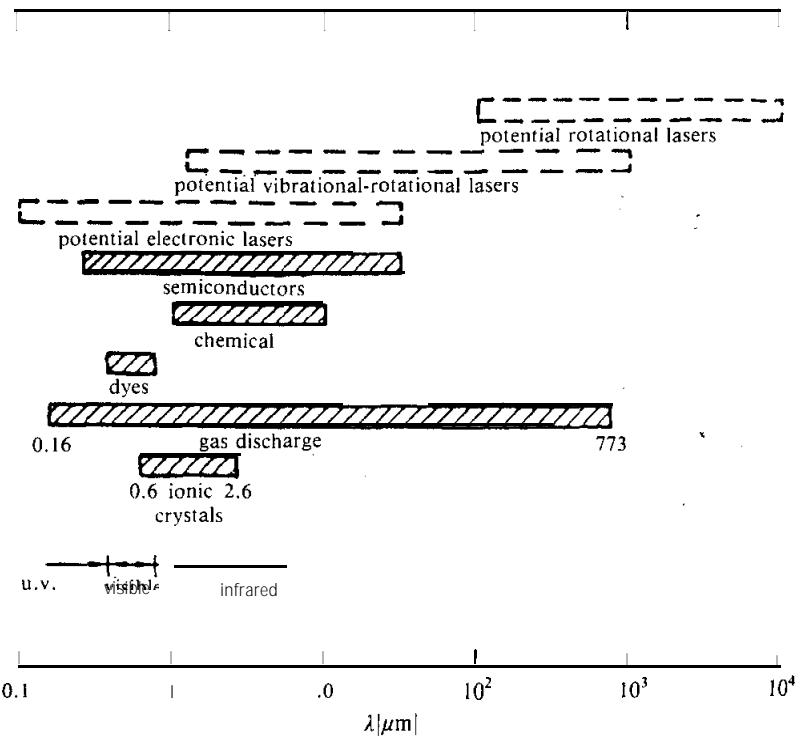
รูป 6.21 แผนภูมิแสดงเลเซอร์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างผสมรอยต่อคู่ บริเวณกิริยาประกอบด้วยชั้น GaAs(p) (บริเวณแรเงา) เลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำงานต่อเนื่องที่อุณหภูมิท้องเป็นครั้งแรก

6.7 สรุป

ในหัวข้อก่อนนี้เรามาได้อภิปรายเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ ความจริงยังมีเลเซอร์อีกจำนวนมากที่เราไม่ได้พิจารณาในที่นี้ รูป 6.22 แสดงช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ ทั้งหมด และยังแสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าสำหรับการเปลี่ยนแปลงเลเซอร์สามชนิดที่ต่างกัน ซึ่งสามารถใช้

- (1) การเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะทางไฟฟ้า
- (2) การเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะสั่นสะเทือน-การหมุนรอบ
- (3) การเปลี่ยนแปลงของการหมุนรอบ

อย่างไรก็ตามเราสังเกตได้ว่า โดยปกติช่วงเหล่านี้ไม่สามารถครอบคลุมเลเซอร์ทั้งหมดที่มีอยู่อย่างต่อเนื่อง ยกเว้นเลเซอร์โดยแสดงช่วงของมันสามารถครอบคลุมได้ต่อเนื่องให้สังเกตว่า เริ่มต้นด้วยเลเซอร์ออสซิลเลตที่ความถี่ ω_1 มันเป็นไปได้ที่จะสร้างแหล่งกำเนิดของการแพร่องศีพร้อมเพียง ที่ความถี่อื่น ๆ ด้วยขั้นตอนต่อไปนี้คือ การแฟคลีน์ความถี่ที่สูงกว่า (เพิ่มขึ้นโดยตรง) ด้วยขั้นตอนของการแฟชาร์โมนิก ($2\omega_1, 3\omega_1, \dots$ ฯลฯ) ในผลึกอนอลิเนียร์ที่เหมาะสม ; การแฟคลีน์ความถี่ที่ต่ำกว่า (ลดลงโดยตรง) โดยการกระตุ้นด้วยปรากฏการณ์บริวานและรามาน (Brillouin and Raman effects); ขั้นตอนการผสมรังสีของสองเลเซอร์ โดยการผสมแสงของความถี่ ω_1 และ ω_2 จากสองเลเซอร์ในผลึกที่เหมาะสม เราสามารถหาแหล่งอัมพัน (coherent sources) ที่ความถี่ $\omega_1 + \omega_2$ และ $\omega_1 - \omega_2$



รูป 6.22 แสดงช่วงความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่มีอยู่ในท้าชนิดและยังแสดงช่วงตักษ์ไฟฟ้าสำหรับการเปลี่ยนแปลงสามชนิด
ที่ใช้ในเลเซอร์

แบบฝึกหัดที่ 6

- 6.1 ให้เขียนมาตรฐานครอบคลูมช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองเห็นได้ ตามว่าเลเซอร์ทับทิม, $\text{He}-\text{Ne}$, Ar^+ และโรตัดมีน 6 จี มีความยาวคลื่นแตกกายในช่วงนี้หรือไม่ ? และเลเซอร์เหล่านั้นมีสีของแสงเปลี่ยนอย่างไร ?
- 6.2 จงระบุเลเซอร์อย่างน้อยสี่ชนิดที่มีความยาวคลื่นตกในแถบรังสีได้แดง
- 6.3 จงระบุเลเซอร์อย่างน้อยสามชนิดซึ่งความยาวคลื่นของมันตกในช่วง uv หรือ ν_{uv} อะไรคือปัญหาในการทำให้เกิดกิริยาเลเซอร์ใน uv หรือ ν_{uv}
- 6.4 จงประมาณความกว้างของหลุมแอลม์สำหรับเลเซอร์ $\text{He}-\text{Ne}$ สีแดง และเปรียบเทียบกับความกว้างของปเลลอร์
- 6.5 จงประมาณความกว้างของหลุมแอลม์สำหรับเลเซอร์ Ar^+ และเปรียบเทียบกับความกว้างของปเลลอร์