บทที่ 8
การประยุกต์ของเลเซอร์

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเรื่องการประยุกต์ของเลเซอร์ คือ

1. ให้นักศึกษาสามารถเข้าใจวิธีนำลำแสงเลเซอร์ไปประยุกต์ใช้กับเรื่องต่าง ๆ ทั้งในทางวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ และในทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์ รวมถึงในทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ

2. ให้นักศึกษาสามารถนำเลเซอร์ไปประยุกต์กับเรื่องอื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้กล่าวถึงในบทนี้ และสามารถอธิบายประโยชน์ของการประยุกต์ใช้ของเลเซอร์และข้อได้เปรียบของมัน

3. ให้นักศึกษาสามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ของลำแสงเลเซอร์กับการประยุกต์ใช้ในการเจาะ การตัด และการเชื่อมของวัตถุที่ต้องการทำงาน

8.1 บทนำ

การประยุกต์ใช้เลเซอร์มีจำนวนมากมายและครอบคลุมสาขาต่าง ๆ ของวิทยาศาสตร์เกือบหมด เช่น สาขาฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา อิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยี โดยทั่วไปเราสามารถกล่าวได้ว่า การประยุกต์เหล่านี้เป็นผลผลิตโดยตรงของคุณลักษณะพิเศษของแสงเลเซอร์ ตามที่ได้อธิบายในบทก่อน ๆ ในบทนี้เราจะพิจารณาถึงหลักการเบื้องหลังของการประยุกต์เหล่านี้บางอย่าง เราจะมุ่งพิจารณาเน้นที่เป็นประโยชน์ของเลเซอร์ในการประยุกต์ต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ โดยใช้ภาพประกอบช่วยอธิบาย สำหรับรายละเอียดของการพิจารณาการประยุกต์โดยเฉพาะและวิวัฒนาการของมัน สามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิง (3, 8 และ 11)

เพื่อความสะดวกเราจะแบ่งแยกการประยุกต์ออกเป็นสองอย่างคือ การประยุกต์ในวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ และการประยุกต์ในวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เนื่องจากความสำคัญของมัน เราจะแยกหัวข้ออีกต่างหากให้กับโฮโลกราฟฟี (Holography)

8.2 การประยุกต์ในวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์

ในสาขาฟิสิกส์ ความมีแสงสีเดียวและความสว่างสูงมากช่วยทำให้เลเซอร์สามารถแสดงปรากฏการณ์ใหม่ ๆ รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างการแผ่รังสีมีต่อวัตถุ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ของแสงไม่ลิเนียร์ เมื่อการไม่ลิเนียร์ขึ้นกับความเข้มของลำแสง I ดังนั้นขณะที่ความเข้มแสง I เพิ่มมากขึ้น สามารถสังเกตเห็นได้ง่ายขึ้น มันได้ทำให้เปิดไปสู่การวิจัยในฟิสิกส์สาขาใหม่และน่าสนใจมาก

ปรากฏการณ์ของแสงไม่ลิเนียร์มีจำนวนมากมาย ครั้งแรกเราจะพิจารณาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของเจนนีเรชันฮาร์โมนิกที่สอง (second harmonic generation) เรามาพิจารณาตัวกลางทั่ว ๆ ไปบางอย่าง ซึ่งฉายแสงเปล่งปลั่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสมมติว่าตัวกลางไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอภินาทที่ความถี่ของคลื่น ในกรณีนี้ปรากฏการณ์ที่สังเกตได้คือ การโปลาไรซ์ของตัวกลาง เราเขียนได้เป็น

$$P = XE \qquad \ldots\ldots\ldots (8.1)$$

เมื่อ P คือ โปลาไรเซชัน E คือ สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ X คือค่าคงที่เรียกว่า สภาพรับไว้ได้ไดอิเล็กตริก (dielectric subceptibility) เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณาเป็นปริมาณสกาลาร์ ความจริงสมการ (8.1) ได้จากการทำให้เหลือเพียงพจน์แรกของอนุกรมเทเลอร์ของความสัมพันธ์ P = P(E) ถ้าเรารวมพจน์อันดับสูงเข้าไปด้วย เราจะ

เขียนสมการ (8.1) ใหม่แทนด้วย

$$P = X_1E + X_2E^2 + X_3E^3 + \ldots \qquad \ldots\ldots\ldots (8.2)$$

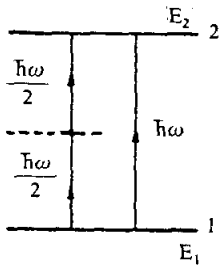
เห็นได้ชัดว่าเมื่อสนามไฟฟ้า E มีค่าสูงขึ้น พจน์อันดับสูงจะมีความสำคัญมากกว่าพจน์กำลังหนึ่ง ดังนั้น มันจึงมีความสำคัญเมื่อหาค่าสนามไฟฟ้าสูงได้จากเลเซอร์ ถ้าสสารมีการสมมาตรน้อย (เช่น ของเหลวหรือผลึกที่มีการสมมาตรของเซลล์) สมการ (8.2) สามารถละทิ้งพจน์กำลังเลขคู่ของ E (คือ $X_{2k} = 0$) ความจริงถ้าสสารมีการสมมาตรน้อยเราต้องมี $P(-E) = -P(E)$ สำหรับทุกค่าของ E ดังนั้นเราจะพิจารณากรณีผลึกไม่มีการสมมาตรน้อย ๆ และจะพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดขึ้นจากพจน์กำลังสองในสมการ (8.2) ถ้าเราให้ $E = E_0 \sin \omega t$ เมื่อ ω คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากสมการ (8.2) เราได้

$$P^{(2)} = \frac{1}{2}X_2E_0^2(1 - \cos 2\omega t) \qquad \ldots\ldots\ldots (8.3)$$

$P^{(2)}$ หมายถึง การโปลาไรซ์ที่เกี่ยวข้องกับ E^2 (การโปลาไรซ์อันดับสอง) ดังนั้นเราสามารถเห็นได้ว่า $P^{(2)}$ เป็นผลบวกของพจน์ค่าคงที่และพจน์การออสซิลเลตที่ความถี่ 2ω การออสซิลเลตที่ความถี่ 2ω ให้การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่เดียวกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นด้วยวิธีนี้มีคุณลักษณะคือ การมีทิศทางเดียวและการมีแสงสีเดียว เช่นเดียวกับคลื่นตกกระทบและแผ่ไปทางเดียวกัน นอกจากนั้นปรากฏการณ์นี้เป็นที่สนใจสำหรับการศึกษาสสาร เพราะว่ามันมีประโยชน์เสมือนกับสร้างลำแสงพร้อมเพรียงขึ้นใหม่ ด้วยความถี่ 2ω มันสามารถแสดงได้ว่า [ความสัมพันธ์แมนเลย์-โรวี (Manley-Rowe relations)] เป็นไปได้ที่จะหาสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงได้ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากำลังที่ส่งเข้าไปทั้งหมดที่ความถี่ ω สามารถเปลี่ยนไปเป็นกำลังส่งออกของผลึกที่ความถี่ 2ω ส่วนพจน์ค่าคงที่สร้างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นระหว่างผิวหน้าของผลึก

มีปรากฏการณ์ของแสงไม่ลิเนียร์อื่น ๆ อีกจำนวนมาก แต่เราจะกล่าวเฉพาะการดูดกลืนสองโฟตอนเท่านั้น (รูป 8.1) เราเห็นจากบทที่ 2ว่าระบบอะตอมสองระดับดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ ω ดังเช่น $\hbar\omega = E_2 - E_1$ เป็นการเปลี่ยนแปลงของอะตอมระหว่างระดับ 1 และ 2 เป็นได้ทั้งการดูดกลืนหรือการเปล่งแสงของโฟตอน $\hbar\omega$ อย่างไรก็ตามระบบนี้สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ $\omega/2$ ได้ด้วย ในกรณีโฟตอนสองตัว แต่ละตัวมีพลังงาน $\hbar\omega/2$ ถูกดูดกลืนในแต่ละครั้งของการเปลี่ยนแปลง มันสามารถแสดงว่าโอกาสที่จะพบการดูดกลืนสองโฟตอน แปรตามตรงกับสนามไฟฟ้ายกกำลังสี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เราเรียกใหม่ว่า

โอกาสที่จะพบการดูดกลืนโฟตอนตัวเดียว แปรโดยตรงกับสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง ดูบทที่ 2) ดังนั้น การดูดกลืนสองโฟตอนกลายเป็นความสำคัญสำหรับความเข้มแสงสูงด้วย



รูป 8.1 *การเปลี่ยนแปลงระดับของหนึ่งและสองโฟตอนระหว่างระดับ 1 และ 2*

มีการประยุกต์ธรรมชาติขั้นมูลฐานอื่น ๆ รวมถึงการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตเคมีที่เกิดจากลำแสงเลเซอร์ ตัวอย่างเช่น เส้นการดูดกลืนของสารประกอบเคมีจะแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นกับไอโซโทป (isotope) เฉพาะของสารประกอบนั้นประกอบกันขึ้นมาเนื่องจากความเป็นแสงสีเดียวของลำแสงเลเซอร์สูง สามารถนำไปใช้เลือกปฏิกิริยาเคมีเริ่มต้น รวมถึงการเลือกไอโซโทปเฉพาะได้ มันสามารถนำไปสู่สาขาเคมีใหม่ทั้งหมดรวมถึงการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างอะตอมในสถานะตื่นตัวกับการตื่นตัวที่เกิดขึ้นจากลำแสงเลเซอร์ได้อีกด้วย ตามปกติอะตอมที่อยู่ในสถานะตื่นตัวมีอิเล็กตรอนนอกสุดหนึ่งตัวในวงโคจรมีส่วนในปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นเราจึงเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาระหว่างอะตอมในสถานะตื่นตัวด้วยกัน แตกต่างจากสถานการณ์ซึ่งมันอยู่ในสถานะพื้น

สุดท้ายนี้ ลำแสงเลเซอร์สามารถนำไปใช้สำหรับการวิจัยในสาขาชีววิทยา โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสของเลนส์เป็นไปตามสมการ

$$d = \frac{\lambda f}{D} \qquad \ldots\ldots (8.4)$$

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงตกกระทบ λ คือ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ f คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ ส่วน d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์เล็ก ๆ ในลำแสงใหญ่อีกที ดังนั้นถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงตกกระทบมีขนาดเดียวกับเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ เราสามารถเห็นได้ว่า d แปรโดยตรงกับอัตราส่วน f/D สำหรับเลนส์ เลนส์ที่ดีที่สุดจะมี f/D ~ 1 ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลาง d สามารถมีขนาดเดียวกับความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นการโฟกัสลำแสงเลเซอร์ให้เหมาะสมสามารถใช้ได้สะดวกสำหรับการส่องสว่างพิจารณาจุด

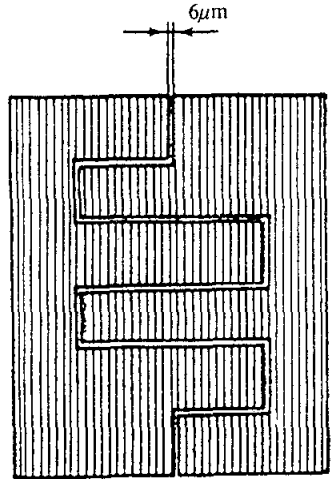
ในเซลล์ (ซึ่งตามปกติมีขนาดสองสามไมครอน) เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่จะตามมาของมัน การใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานคลื่นดลสูงเพียงพอเป็นไปได้ที่จะทำลายเซลล์ที่เลือกไว้บางเซลล์ ดังนั้นเราจึงสามารถศึกษาพฤติกรรมตามมาภายหลังของเซลล์ข้างเคียงได้

8.3 การประยุกต์ใช้ในวิทยาศาสตร์ประยุกต์นำไปสู่อุตสาหกรรม

จากที่ได้กล่าวข้างต้นว่า การโฟกัสลำแสงเลเซอร์อย่างเหมาะสม สามารถใช้ตัดอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ดี จึงเป็นไปได้ที่จะพัฒนาการประยุกต์ได้มากมาย เช่น ในสาขาของไมโคร-อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องกลที่ละเอียดอ่อน และในสาขาการแพทย์ ตัวอย่างเช่น มันเป็นไปได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กมากและค่าละเอียดมากด้วย รูป 8.2 แสดงตัวอย่างของตัวเก็บประจุขนาดเล็กมากสร้างโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ตัดเป็นเส้นทางคดเคี้ยวสะบัดไปมาในแผ่นทองบาง ๆ (หนา 0.3 ไมครอน) วางอยู่บนฐานนิลสีคราม (sapphire) ความกว้างของรอยตัดประมาณ 6 ไมครอน ข้อดีของเลเซอร์ในสาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์คือ ลำแสงโฟกัสมีขนาดเล็กมาก วงจรไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุมีสิ่งเจือปนสูงต้องการหลีกเลี่ยงจากสิ่งสกปรก และควบคุมการสูญเสียของพลังงานได้แน่นอน

ในทำนองเดียวกัน มันเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดหลุมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตามต้องการในวัสดุที่แข็งมาก ซึ่งถ้าใช้เครื่องมืออื่นจะทำได้ลำบากมาก ตัวอย่างเช่น ชิ้นเล็ก ๆ ของเพชรใช้ทำเป็นแม่พิมพ์สำหรับเส้นลวดและทับทิมใช้ในนาฬิกาข้อมือ สำหรับสองตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ (ไมโครอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือละเอียดเล็ก ๆ) ตามปกติชอบใช้ด้วยเลเซอร์คลื่นดลมากกว่าใช้เลเซอร์ต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะว่ามันจะสร้างความร้อนให้กับวัตถุในเวลาสั้นกว่า ในสาขาการแพทย์เลเซอร์สามารถใช้เป็นมีดผ่าตัด ถ้าใช้เลเซอร์ Ar^+ ออสซิลเลตในช่วงสีน้ำเงิน มีดนี้มีข้อดีเพิ่มขึ้นคือ มันทำให้เม็ดเลือดแข็งตัวได้ดีกว่าการฉายแสง ทำให้เม็ดเลือดแข็งตัวเพราะว่าเม็ดเลือดแดงดูดกลืนแสงสีน้ำเงินได้ดี ในทำนองเดียวกัน เลเซอร์ CO_2 กำลังปานกลาง (20 – 100 วัตต์) ก็ใช้ในการแพทย์มาก เพราะว่าน้ำที่อยู่ในเนื้อเยื่อดูดกลืนแสงใต้แดงของเลเซอร์นี้ (~0.6 ไมครอน) ได้ดี ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการแข็งตัว (ของหลอดเลือดเล็ก ๆ) ดีขึ้น เลเซอร์บ่อยครั้งใช้ในสาขาการแพทย์รักษากรณีของช่องตาดำแยกจากกัน (detached retina) โดยฉายแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ตาโฟกัสไปที่จุดด่างเล็ก ๆ จำนวนมาก (ต้องพยายามให้ห่างจากประสาทรับแสงอย่างเพียงพอ เพื่อมิให้ประสาทตาได้รับอันตราย) แสงเลเซอร์จะ "เชื่อม" ("weld") ช่องตาดำในตำแหน่งที่หลังตา ปัจจุบันใช้เลเซอร์ Ar^+ รักษากรณีนี้เป็นจำนวนมาก และยังใช้รักษาตาเป็นต้อกระจกอีกด้วย

ตัวอย่างสำหรับการประยุกต์แสงเลเซอร์ใช้กับเครื่องกล ในที่นี้เราจะกล่าวถึงการใช้เลเซอร์กำลังสูง (เลเซอร์ CO_2 กำลัง $\approx$ 10 กิโลวัตต์) สำหรับการเชื่อมรอยลึกและการเจาะหรือการตัดวัตถุหนา (ความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร) ในกรณีนี้ข้อดีของการใช้เลเซอร์คือมันมีขนาดเล็กสำหรับการเชื่อมหรือการตัดวัตถุขนาดเล็ก ๆ ได้ดี มันมีความสำคัญมากสำหรับการทำในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด เช่น การเชื่อมหรือการตัดที่ต้องการทำในส่วนประกอบของเครื่องมือที่บอบบาง (เช่น เกียร์ของรถยนต์) ทำนองเดียวกันเลเซอร์ยังสามารถทำกับส่วนประกอบของเครื่องมือในบริเวณที่ทำงานลำบากอีกด้วย ข้อดีอีกอย่างของเลเซอร์ คือสามารถควบคุมขนาดของบริเวณที่ทำงานยากลำบากได้ถูกต้องแม่นยำ



รูป 8.2 *ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กมาก สร้างด้วยลำแสงเลเซอร์*

ในการเชื่อมโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน สิ่งสำคัญก็คือ การให้กำลังอย่างเหมาะสมแก่ลำแสงเลเซอร์ เพื่อทำให้โลหะหลอมละลาย แต่ไม่ถึงกับทำให้มันระเหย เพราะฉะนั้นในการเชื่อมโครเมียมและแทนทาลัมจึงมีความยุ่งยากมาก เพราะว่าจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของโลหะทั้งสองใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการเชื่อมโลหะทั้งสองจึงต้องระวังมาก แต่กับโลหะอื่น เช่น ทอง ทองแดงและนิกเกิล มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดห่างกันมาก ทำให้การเชื่อมทำได้ง่าย ต่อไปเราพิจารณาพลังงานที่เลเซอร์ใช้เชื่อมวัตถุ จากที่ได้กล่าวข้างต้นว่า พลังงานที่ใช้ในการเชื่อมโลหะต้องมาจากลำแสงเลเซอร์ อย่างไรก็ตาม มันไม่ใช่พลังงานทั้งหมดของลำแสงเลเซอร์ตกกระทบ มีพลังงานบางส่วนสูญเสียไปโดยการสะท้อนจากผิวของโลหะ บางส่วนหายเข้าไปยังพื้นที่ข้างเคียง และส่วนที่เหลือเท่านั้นที่ใช้ทำให้อุณหภูมิของโลหะสูงขึ้น เราทราบมาก่อนว่าท่อนเลเซอร์ได้รับพลังงานจากหลอดแสงวาบ ซึ่งให้พลังงานทำให้มันเกิดการแผ่รังสี แต่ในทาง

ปฏิบัติมีเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมดที่เลเซอร์ได้รับแล้วเปลี่ยนไปเป็นการแผ่รังสีเลเซอร์ ตัวอย่างเช่น สมมติลำแสงเลเซอร์มีพลังงาน 1 จูล ตกกระทบบนแผ่นโกวาร์ (Kovar) หนา 2 มิลลิเมตร และมันโฟกัสลงบนพื้นที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ดังนั้น ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบ 1 จูล จะมีความร้อนบรรจุอยู่เป็น

$$H = \frac{1}{4.186} \quad \text{แคลอรี}$$

$$= 0.24 \quad \text{แคลอรี} \qquad \ldots\ldots\ldots (8.5)$$

สมมติว่าพลังงานแผ่รังสีซึ่งขึ้นกับการตกกระทบบนแผ่นโกวาร์ ไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนหรือเนื่องจากการสะท้อนครั้งที่สอง พลังงานที่แผ่นโกวาร์ดูดกลืนได้ อาจจะคำนวณได้ดังนี้

ปริมาตร (V) ของแผ่นโกวาร์ที่ร้อนขึ้น $= \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \times t$

หรือ $= \pi r^2 t \qquad \ldots\ldots\ldots (8.6)$

เมื่อ d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของการเชื่อมในหน่วยมิลลิเมตร

r คือ รัศมีของการเชื่อมในหน่วยมิลลิเมตร

t คือ ความหนาของแผ่นโกวาร์ในหน่วยมิลลิเมตร

แทนค่าปริมาณเหล่านี้ เราได้

$$V = 3.1416(0.001)^2 \times (0.002) \text{ นิ้ว}^3$$

เขียนในมาตราของเมตริกซ์ เราได้

$$V = 3.1416(1 \times 10^{-6}) \text{ x } (2\text{x } 10^{-3}) \times 16.387 \text{ ซม.}^3$$

$$= 102.96 \text{ x } 10^{-9} \text{ ซม.}^3$$

$$= 1.03 \text{ x} 10^{-7} \text{ ซม.}^3$$

น้ำหนัก (W) ของโกวาร์ (ความหนาแน่น = 8.35 กรัม/ซม.^{3}) จะเป็น

$$w = 1.03 \times 10^{-7} \times 8.35$$

$$= 8.6\text{x } 10^{-7} \text{ กรัม}$$

ความร้อน (H) ในหน่วยแคลอรีที่ต้องการทำให้โกวาร์หนัก 8.6×10^{-7} กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C จะเป็น

$$H = 8.6\times10^{-7}\times\text{ความร้อนจำเพาะของโกวาร์}$$
$$= 8.6 \times 10^{-7}\times 0.105 \text{ แคลอรี/°C}$$
$$= 0.903 \times 10^{-7} \text{ แคลอรี/°C}$$

จุดหลอมเหลวของโกวาร์ คือ 1,450 °C และความร้อนการรวมตัวของมันเป็น 64 แคลอรีต่อกรัม ดังนั้น การทำให้อุณหภูมิของโกวาร์ 8.6×10^{-7} กรัม เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวต้องใช้ความร้อนเท่ากับ

$$H = 0.903\times10^{-7}\times1450 + (8.6\times10^{-7})\times64$$
$$= 1309.35\times10^{-7} + 550.4\times10^{-7}$$
$$= 1859.75\times10^{-7}$$
$$= 1.86\times10^{-4} \text{ แคลอรี}$$

ในการทำให้โกวาร์สองแผ่นเชื่อมเข้าด้วยกัน ต้องการความร้อนเป็นสองเท่า

$$H = 1.86\times10^{-4}\times2$$
$$= 3.72\times10^{-4} \text{ แคลอรี}$$

หรือ $J = 0.156\times10^{-2}$ จูล

เป็นที่แน่ชัดว่าพลังงานของเลเซอร์ 1 จูล ซึ่งเท่ากับ 0.24 แคลอรี มีค่ามากกว่าพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ในการเชื่อมแผ่นโกวาร์มากมาย และแทนที่จะทำให้เกิดการเชื่อม มันกลับทำให้เกิดเป็นรูบนแผ่นโกวาร์ทั้งสองแผ่น ดังนั้นในการเชื่อมเราต้องใช้พลังงานเลเซอร์น้อยลงตามที่เราได้คำนวณไว้

พลังงานเลเซอร์มีกำเนิดมาจากท่อนเลเซอร์หรือจากแหล่งกำเนิดแสง เราสามารถทำให้มันมีค่าลดน้อยลงได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุดคือ ควบคุมขนาดของศักย์ไฟฟ้าหรือความจุไฟฟ้าหรือควบคุมทั้งสองอย่าง วิธีอื่นก็คือ ควบคุมขนาดของจุดโฟกัสที่ตกกระทบบนแผ่นที่จะเชื่อม อย่างไรก็ตามมันเป็นการกำหนดความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์และความหนาของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม สมการที่ใช้คำนวณขนาดของจุดโฟกัส (พื้นที่) กำหนดด้วย

$$A = 1.169\left(\frac{f}{a}\right)^2\lambda \qquad \text{.....(8.7)}$$

ในที่นี้ A คือ ขนาดของจุดโฟกัส d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่โฟกัส f เป็นความยาวโฟกัสของเลเซอร์ a คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเลเซอร์ λ คือ ความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์

เมื่อทราบพื้นที่หรือเส้นผ่าศูนย์กลางของจุดเล็กที่ใช้เชื่อมแล้ว เราต้องการพิจารณาระยะทางระหว่างจุดโฟกัสถึงแผ่นวัสดุที่เชื่อมด้วยความสัมพันธ์ S_f คือ

$$S_f = \frac{da}{2}\sqrt{\frac{\pi}{1.71}} \qquad \text{.....(8.8)}$$

ถ้าวัสดุที่เชื่อมเป็นพวกทอง เงิน ทองแดง และอะลูมินัมที่เป็นแผ่น คุณลักษณะการแพร่และการนำความร้อนสูงของโลหะเหล่านี้ มีความสำคัญในการเชื่อมวัสดุเหล่านี้เข้าด้วยกัน หรือเชื่อมกับโลหะอื่นที่เราต้องพิจารณาด้วย ความสัมพันธ์นี้กำหนดด้วยสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{\varphi}{\rho H_S} \qquad \text{.....(8.9)}$$

เมื่อ α คือ การแผ่ความร้อนของโลหะในหน่วย ซม.^{2}/วินาที

φ คือ การนำความร้อนในหน่วย แคลอรี/ซม./วินาที/°C

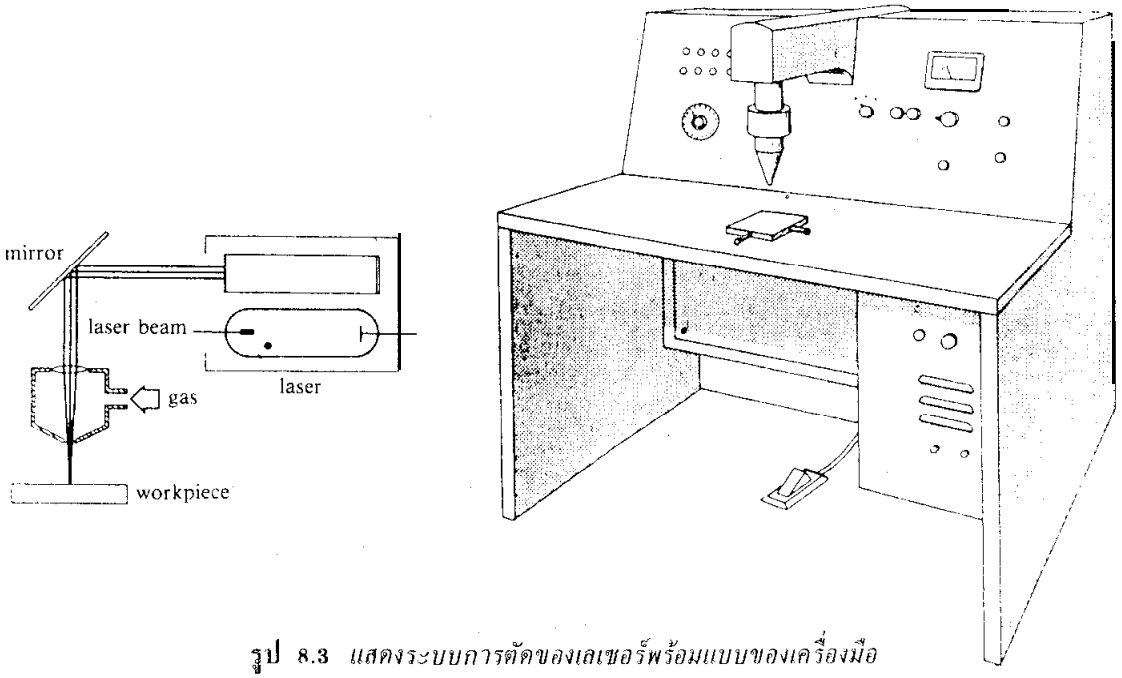
ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะในหน่วย กรัม/ซม.^{3}

H_S คือ ความร้อนจำเพาะในหน่วย แคลอรี/กรัม/°C

ส่วนโลหะจำพวกเหล็กกล้า เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (stainless steel) นิกเกิล โกวาร์ อินคอเนล (Inconel) สังกะสี เบริลเลียม (beryllium) โครเมียม (chromium) และแทนทาลัม (tantalum) ซึ่งโลหะทั้งหมดเหล่านี้มีการแผ่ความร้อนและนำความร้อนต่ำใช้เชื่อมได้ดีกว่าอะลูมินัม แมกนีเซียม และโลหะมีตระกูล ซึ่งโลหะพวกหลังนี้เชื่อมลำบากมาก นอกจากต้องทำให้ผิวหน้าของมันเป็นสสารที่หลุดได้ง่าย ลำแสงเลเซอร์ปกติไม่มีผลต่อแก้ว เพราะว่าแก้วยอมให้แสงผ่านได้ง่าย (โปร่งใส) แต่ก็สามารถเจาะแก้วได้หลังจากเราทำให้ผิวหน้าของแก้วเป็นวัสดุนำความร้อนต่ำโดยขูดให้หยาบ สำหรับวัสดุพลาสติกไม่โปร่งใสสามารถเชื่อมได้ง่าย

เลเซอร์ใช้ในการเจาะและการตัด ลำแสงเลเซอร์สามารถเจาะผ่านโลหะ ยาง พลาสติก กระเบื้องเซรามิก และแม้แต่แก้วถ้าผิวของมันได้เตรียมการอย่างเหมาะสม สำหรับการเจาะปกติใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสยาว โฟกัสลำแสงบนวัสดุเพื่อทำให้เกิดเป็นหลุม ลำแสงเราสามารถทำให้เป็นพวยพุ่งโดยใช้ทั้งก๊าซเฉื่อยและก๊าซตื่นตัวช่วย ก๊าซเฉื่อยเช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอน ใช้สำหรับต้องการตัดขอบให้คมเมื่อเจาะหรือตัดพลาสติกและวัสดุกระดาษ ก๊าซตื่นตัวเช่น ออกซิเจนใช้เพื่อทำให้รอยตัดแคบลง (ความกว้างของการตัด) เมื่อเจาะหรือตัดโลหะและโลหะผสม แผนภูมิการเจาะหรือการตัดด้วยเลเซอร์ได้แสดงในรูป 8.3 ลำแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการเจาะสามารถใช้ทั้งเลเซอร์ทับทิม เลเซอร์นีโอไดเมียม – YAG หรือเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และชนิดของลำแสงที่ใช้กับวัสดุ สามารถใช้ทั้งคลื่นดลและคลื่นต่อเนื่อง คลื่นดลความเข้มสูง

ช่วงสั้น ๆ จากเลเซอร์ทับทิม หรือนีโอไดเมียม – YAG จะทำให้วัสดุระเหยไปเกิดเป็นรูขึ้น ขนาดของรูมีได้ตั้งแต่ 0.01 มิลลิเมตรถึง 1.0 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับระดับกำลังของเครื่องมือเลเซอร์ และความหนาของวัสดุ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ให้อัตราส่วนของความลึกต่อเส้นผ่าศูนย์กลางได้สูงสุด เมื่อใช้ก๊าซตื่นตัวพุ่งเป็นลำช่วย ก๊าซตื่นตัวพุ่งเป็นลำช่วยทำให้ความร้อนที่จุดโฟกัสเพิ่มขึ้น โดยทำให้วัสดุผสมกับออกซิเจน และทำให้ขอบหลุมเรียบและคม และมีรอยเจาะแคบ



รูป 8.3 *แสดงระบบการตัดของเลเซอร์พร้อมแบบของเครื่องมือ*

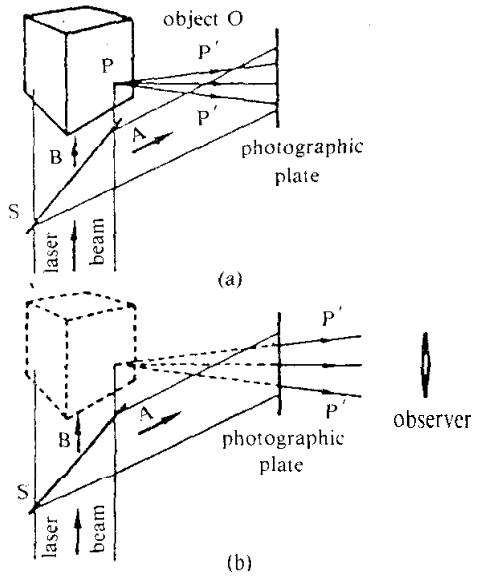
กลไกของการเจาะสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนผิว ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเข้าใกล้ 10^{10} องศาต่อวินาที ระเหยผิวของวัสดุด้วยความลึกประมาณสองสามไมครอน เนื้อโลหะที่อยู่ต่ำกว่าผิวหลอมเหลวและโลหะที่กำลังระเหย มีความดันเพิ่มขึ้นอย่างมากมายสูงถึงหลายร้อยเท่าของบรรยากาศในหลุม สำหรับพลาสติกวัสดุถูกขับออกไปด้วยการเผาไหม้ และขอบที่เกิดจากการตัดสะอาด เนื่องจากการขับวัสดุเผาไหม้ออกไปด้วยก๊าซเฉื่อยพุ่งเป็นลำช่วยเหลือ

ในขณะที่เจาะหรือตัดวัสดุ ลำแสงโฟกัสพุ่งเข้าไปในเนื้อวัสดุอย่างช้า ๆ และมีอัตราส่วนความลึกต่อเส้นผ่าศูนย์กลางสามารถหาได้สูงถึง 250 ต่อ 1 ด้วยคลื่นดล เลเซอร์คาร์บอน-ไดออกไซด์ ควิสวิตช์ หรือเลเซอร์นีโอไดเมียม – YAG คลื่นต่อเนื่อง การตัดโลหะและวัสดุพลาสติกด้วยลำแสงเลเซอร์ ต้องใช้กรรมวิธีแบบเดียวกับที่ใช้สำหรับการเจาะ ลำแสงเลเซอร์ที่มีก๊าซช่วยสามารถตัดด้วยอัตราเร็วสูงถึง 1 เมตรต่อนาที สำหรับเหล็กกล้าที่ไม่ขึ้นสนิมหรือ

ทิตาเนียมหนาครึ่งเซนติเมตร เลเซอร์นีโอไดเมียม – YAG ให้รอยตัดแคบกว่าของเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เพราะว่ามีความยาวคลื่นสั้นกว่าของคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 10 เท่า ดังนั้นจึงต้องใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสสั้นกว่าในเลเซอร์นีโอไดเมียม – YAG

ประโยชน์ของเลเซอร์ยังสามารถนำไปสร้างเครื่องรับโทรทัศน์สีแบบใหม่บนจอภาพขนาดใหญ่ โดยให้สามลำแสงของเลเซอร์ที่มีสีต่างกัน (เช่น ลำแสงสีน้ำเงินและสีเขียว ได้จากเลเซอร์ Ar^+ และลำแสงสีแดงได้จากเลเซอร์ Kr^+) ผสมอัมปลิจูดด้วยสัญญาณที่มาจากวีดีโอ (video signal) แล้วรวมกันโฟกัสบนจอรับภาพ จัดให้ลำแสงเบี่ยงเบนได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง และให้จุดสว่างของแสงที่ปรากฏบนจอสามารถกวาดไปได้ตลอดจอภาพ จะได้ภาพมีความสว่างชัดเจนมาก อย่างไรก็ตามโอกาสที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเครื่องรับโทรทัศน์ชนิดนี้ ในเชิงพาณิชย์ยังห่างไกลมาก เนื่องจากเลเซอร์ยังมีราคาสูงต้องรวมอยู่ในต้นทุนด้วย

ยังมีการประยุกต์ใช้แสงเลเซอร์อีกจำนวนมาก เช่น การประยุกต์ใช้ในทางโทรคมนาคม การสื่อสาร การประยุกต์ในมาตรวิทยา ในสาขาทันตกรรม ในธรณีวิทยา ในทางสงคราม และอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งเราจะไม่กล่าวในที่นี้



รูป 8.4 *หลักการของโฮโลกราฟฟี*

(a) *การสร้างโฮโลแกรม* (hologram)

(b) *การสร้างภาพขึ้นใหม่จากโฮโลแกรม*

8.4 **โฮโลกราฟฟี** (Holography)

โฮโลกราฟฟีเป็นวิธีการถ่ายภาพอย่างหนึ่ง ซึ่งมีหลักการพื้นฐานตามรูป 8.4 a โดยแบ่งลำแสงเลเซอร์ลำหนึ่งด้วยแผ่นแยกลำแสง S ออกเป็นสองลำแสง คือ ลำแสง A (ลำแสงสะท้อน) และลำแสง B (ลำแสงทะลุผ่าน) ลำแสง A ตรงไปยังแผ่นฟิล์มถ่ายภาพ (photographic plate) ในขณะที่ลำแสง B ตกกระทบวัตถุกลายเป็นการถ่ายภาพ ดังนั้นส่วนของแสงสะท้อนจากวัตถุจะไปตกบนแผ่นฟิล์มถ่ายภาพด้วย ตามรูป 8.4 a จึงทำให้เกิดลวดลายการแทรกสอดขึ้นบนฟิล์ม เนื่องจากการรวมกันของสองลำแสงตกกระทบ (มาจากการสะท้อนของ A และมาจากลำแสงกระจัดกระเจิงจากวัตถุของ B) ดังนั้นถ้านำแผ่นฟิล์มไปล้างและทดสอบภายใต้การอัดขยายอย่างเหมาะสม ก็สามารถเห็นลวดลายการแทรกสอดนี้ได้ ลวดลายเหล่านี้สับสนมากที่สุดและคิดว่ามันคงไม่ได้เกี่ยวข้องกับภาพถ่ายวัตถุแต่อย่างไร อย่างไรก็ตามลวดลายการแทรกสอดเหล่านี้ได้บรรจุการบันทึกคุณลักษณะของวัตถุไว้อย่างสมบูรณ์

ต่อไปเราสมมติว่า แผ่นฟิล์มภาพถ่ายถูกนำกลับไปยังตำแหน่งเดิมระหว่างการถ่ายภาพครั้งแรก และเคลื่อนย้ายวัตถุออกไปตามรูป 8.4 b ลำแสงเลเซอร์เดิม A ขณะนี้ได้กระทำโดยตรงกับลวดลายการแทรกสอดที่ปรากฏบนฟิล์ม และสร้างลำแสงเลี้ยวเบนขึ้นใหม่ข้างหลังของแผ่นฟิล์มภาพถ่ายซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า P′ ชนิดเดียวกันอย่างแท้จริง กับที่กระจัดกระเจิงจากวัตถุในรูป 8.4 a เมื่อผู้สังเกตมองที่แผ่นฟิล์มดังแสดงในรูป 8.4 b จะเห็นวัตถุปรากฏหลังแผ่นฟิล์มเหมือนกับว่าวัตถุยังคงอยู่ที่ตรงนั้น

เกเบอร์ (Gabor) ได้เสนอหลักการของโฮโลกราฟฟีในปี 1948 ก่อนที่จะมีการสร้างเครื่องเลเซอร์ขึ้นมา อย่างไรก็ตามวิทยาการจะสามารถปฏิบัติให้เป็นจริงได้ต้องหลังจากการสร้างเครื่องเลเซอร์ได้แล้ว และได้สาธิตกันจริง ๆ ในเวลาต่อมา

คุณลักษณะที่น่าสนใจอย่างหนึ่งของโฮโลกราฟฟีก็คือ ภาพที่สร้างขึ้นใหม่แสดงพฤติกรรมของสามมิติ เห็นได้โดยย้ายตำแหน่งการมองจากตำแหน่งที่แสดงในรูป 8.4 b ก็สามารถเห็นอีกด้านหนึ่งของวัตถุ นี่เป็นเพราะว่าแผ่นฟิล์มภาพถ่ายได้บรรจุข้อมูลทั้งหมดของคุณลักษณะทางเรขาคณิตของวัตถุและธรรมชาติสามมิติของมันอยู่ในลวดลายการแทรกสอด อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจมากขึ้น เราจำเป็นต้องมีรายละเอียดมากกว่านี้ โดยมองที่หลักการของโฮโลกราฟฟี

เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณากรณีของจุด P บนวัตถุ (คือจุด P ในรูป 8.4) เราอ้างถึงรูป 8.5 ซึ่งแสดงการจัดวางทางเรขาคณิตอย่างง่าย โดยเฉพาะของลำแสงอ้างอิงและคลื่นกระจัดกระเจิงจากจุด P สัญญาณของสองคลื่นที่จุด O บนแผ่นฟิล์มภาพถ่ายกำหนดด้วย

$$V_1(z_0, r_0, t) = A_1 \exp[i(kz_0 - wt)] \quad \text{.....(8.10 ก)}$$

$$V_2(z_0, r_0, t) = (A_2/r_0)\exp[i(kr_0 - wt)] \quad \text{.....(8.10 ข)}$$

ในที่นี้ A_1, A_2 เป็นค่าคงที่ (โดยทั่วไปเป็นค่าเชิงซ้อน) z_0 คือ ระยะทางจากจุด P ไปยังแผ่นฟิล์ม และ r_0 คือ ระยะทางระหว่างจุด 0 และ P ดังนั้นความเข้มที่จอรับภาพมีค่า

$$I = |V_1 + V_2|^2 = I' + I'' + I''' \quad \text{.....(8.11)}$$

เมื่อ

$$I' = |A_1|^2 + \frac{|A_2|^2}{r_0^2} \quad \text{.....(8.12 ก)}$$

$$I'' = \frac{A_1^* A_2}{r_0} \exp[ik(r_0 - z_0)] \quad \text{.....(8.12 ข)}$$

$$I''' = \frac{A_1 A_2^*}{r_0} \exp[ik(z_0 - r_0)] \quad \text{.....(8.12 ค)}$$

ดังนั้น ความเข้มทั้งหมด I เป็นผลบวกของปริมาณ I' (ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง 0) และปริมาณ I" และ I"' ซึ่งผลบวกของทั้งสองปริมาณหลังสามารถเขียนเป็น

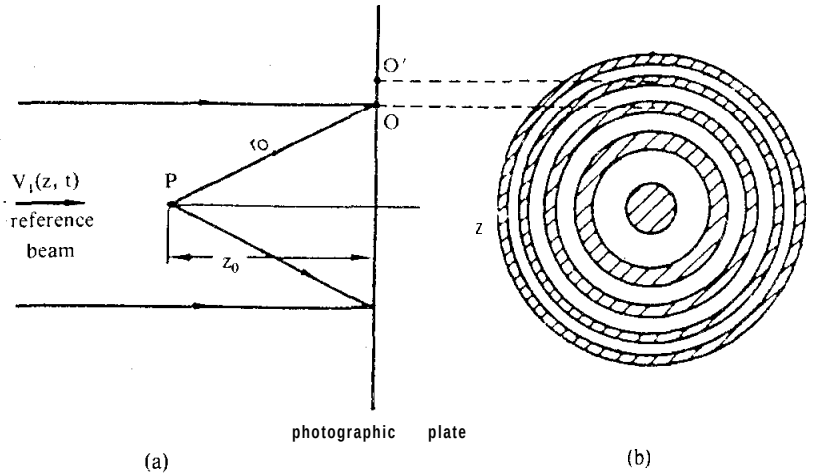
$$I'' + I''' \propto \frac{\cos[k(r_0 - z_0) + \varphi]}{r_0} \quad \text{.....(8.13)}$$

เมื่อ φ เป็นค่าคงที่ เนื่องจากพจน์โคไซน์ในสมการ (8.13) ความเข้มทั้งหมด I เหมือนกับเป็นฟังก์ชันของ r_0 จึงแสดงเป็นอนุกรมของค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด ดังนั้นการแทรกสอดของคลื่นระนาบ $V_1(z, t)$ กับคลื่นทรงกลม $V_2(z, t)$ ทำให้เกิดชุดของริ้วลายวงกลม (circular fringes) บนแผ่นฟิล์มดังแสดงในรูป 8.5 b ระยะห่างระหว่างริ้วลาย Δr_0 เป็นไปตามความสัมพันธ์ $k\Delta r_0 = 2\pi$ ดังนั้น ถ้ามีค่ามากที่สุดที่จุด O ค่ามากที่สุดถัดไปอยู่ที่จุด O′ เนื่องจาก $PO' - PO = \lambda$ เมื่อได้ล้างแผ่นฟิล์มแล้ว มันจะแสดงชุดของริ้วลายสว่างและมืดสลับกัน ถ้าเราสมมติว่าการตอบสนองของฟิล์มแปรโดยตรงกับความเข้ม I ดังนั้นริ้วลายมืดจะแปรโดยตรงกับ I และเราสามารถเขียนเป็น

$$1 - T' = \text{al} \quad \text{.....(8.14)}$$

เมื่อ T^2 คือ การส่งผ่านกำลังของแผ่นฟิล์ม และ α เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการส่งผ่านของแผ่นสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณคือ T และจากสมการ (8.14) สำหรับมุมองศาเล็ก ๆ ของริ้วลายมืด เราได้

$$T = (1 - \alpha I)^{\frac{1}{2}} \simeq 1 - \frac{1}{2}\alpha I \quad \text{.....(8.15)}$$



รูป 8.5 (a) *แสดงโฮโลแกรมของจุดกำเนิดโดยใช้ลำแสงระนาบอ้างอิง*
(b) *การแจกแจงความเข้มและทำให้เกิดริ้วลายมืดบนแผ่นฟิล์มภาพถ่าย*

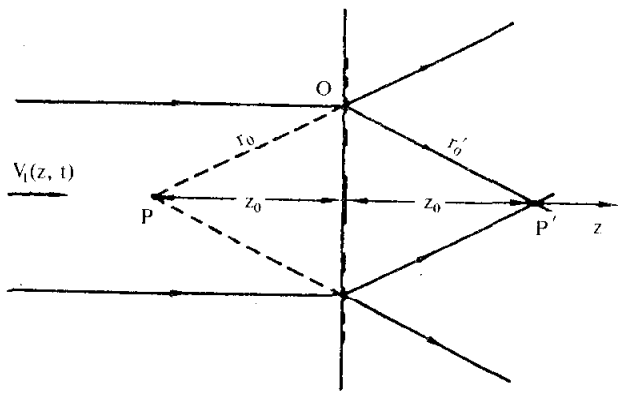
ต่อไปเราสมมติว่า ลำแสงอ้างอิง $V_1(z, t)$ ส่องสว่างบนแผ่นฟิล์ม (รูป 8.6) สัญญาณที่ปรากฏข้างหลังแผ่นฟิล์ม จะเป็น

$$V(z_0, r_0, t) = TV_1 = V' + V'' + V''' \quad \text{.....(8.16)}$$

จากสมการ (8.10 ก), (8.12) และ (8.15) เราได้

$$V' = \left(1 - a\frac{|A_1|^2}{2} - a\frac{|A_2|^2}{2r_0^2}\right) V_1(z_0, t) \quad \text{(8.17 ก)}$$

$$V'' = -a\frac{|A_1|^2 A_2}{2r_0} \exp\left|i(kr_0 - \omega t)\right| \quad \text{(8.17 ข)}$$



รูป 8.6 *การสร้างภาพจากโฮโลแกรมใหม่ของจุดกำเนิดจุดหนึ่ง สร้างภาพขึ้นสองจุดคือ ภาพเสมือน (จุด P) และภาพจริง (จุด P')*

$$V''' = a\frac{A_1^2 A_2^*}{2r_0}\exp[i(2kz_0 - kr_0 - \omega t)] \quad \ldots\ldots\ldots (8.17\text{ค})$$

พฤติกรรมของคลื่นเลี้ยวเบนออกจากแผ่นฟิล์มในหลักการ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการอินติกราลการเลี้ยวเบนของเฟรอสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ [สมการ (4.13)] สำหรับสัญญาณ $V = V' + V'' + V'''$ ที่แผ่นฟิล์ม อย่างไรก็ตามมันสามารถเห็นได้ทันทีว่า พจน์แรก V' ทำให้คลื่นเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นเป็น

$$(1 - \alpha|A_1|^2/2 - \alpha|A_2|^2/2r_0^2)V_1(z, t)$$

ความจริงคลื่นนี้สร้างเป็นสัญญาณเท่ากับ V' บนแผ่นฟิล์ม (คือสำหรับ $z = z_0$) ดังนั้นพจน์ V' สร้างคลื่นระนาบชนิดเดียวกันขึ้นหลังแผ่นฟิล์มเป็นคลื่นตกกระทบ ยกเว้นสำหรับตรงริ้วลายมืดเฉลี่ยของแผ่นฟิล์ม ในทำนองเดียวกันเราสามารถเห็นได้ว่า พจน์ V'' และ V''' สร้างสองคลื่นทรงกลมขึ้น คลื่นหนึ่งลู่ออกจากจุด P และอีกคลื่นหนึ่งลู่เข้าหาจุด P' ในรูป 8.6 ตัวอย่างเช่น พจน์ V''' เราเพียงแต่สังเกตว่าคลื่นทรงกลมลู่เข้าหา P' สร้างสัญญาณที่แผ่นฟิล์มขึ้นกำหนดด้วย

$$V_{p'} \propto \frac{\exp[i(-kr_0' - \omega t)]}{r_0'} \quad \ldots\ldots\ldots (8.18)$$

เมื่อ $r_0' = P_0'$ ต่อไปให้ $r_0' = r_0$ และเปรียบเทียบสมการ (8.17 ค) กับ (8.18) แสดงว่าทั้งสองคลื่นสัญญาณเท่ากัน แต่ต่างกันที่ตัวร่วมเฟสค่าคงที่ ซึ่งไม่มีความสำคัญแต่อย่างไร เมื่อคำตอบนี้ให้ค่าเดียวกันสำหรับ V''' จะได้ว่าสัญญาณ V''' ทำให้เกิดคลื่นทรงกลมเลี้ยวเบนขึ้น ซึ่งลู่เข้าหา P' สุดท้ายเราเห็นได้ว่าโฮโลแกรมสร้างภาพเสมือน P และสร้างภาพจริง P' ของจุด P ในรูป 8.4 a

เราได้พิจารณากรณีของจุดแล้ว ต่อไปเรามาพิจารณากรณีทั่ว ๆ ไป ในที่นี้สัญญาณที่เกิดจากลำแสงอ้างอิงและลำแสงกระจัดกระเจิงที่แผ่นฟิล์ม ($z = z_0$) คือ $V_1(x, y, t)$ และ $V_2(x, y, t)$ ตามลำดับ ความเข้มที่แผ่นฟิล์มสามารถเขียนเป็น

$$I = |V_1 + V_2|^2 = I' + I'' + I''' \quad \ldots\ldots\ldots (8.19)$$

เมื่อ

$$I' = |V_1|^2 + |V_2|^2 \quad \ldots\ldots\ldots (8.20\text{ก})$$

$$I'' = V_1^* V_2 \quad \ldots\ldots\ldots (8.20\text{ข})$$

$$I''' = V_1 V_2^* \quad \ldots\ldots\ldots (8.20\text{ค})$$

และหลังจากล้างแผ่นฟิล์มแล้ว ถ้าเราให้มันได้รับสัญญาณ V_1 อีกครั้ง เราหาจากสมการ (8.15) ว่า

$$V = TV_1 = V' + V'' + V''' \quad \ldots\ldots\ldots (8.21)$$

เมื่อ

$$V' = \left(1 - \frac{1}{2}\alpha|V_1|^2 - \frac{1}{2}\alpha|V_2|^2\right)V_1 \quad \ldots\ldots\ldots (8.22\ \text{ก})$$

$$V'' = -\frac{1}{2}\alpha|V_1|^2 V_2 \quad \ldots\ldots\ldots (8.22\ \text{ข})$$

$$V''' = -\frac{1}{2}\alpha V_1 V_1 V_2^* \quad \ldots\ldots\ldots (8.22\ \text{ค})$$

เหมือนกับกรณีที่แล้วของวัตถุเป็นจุด เราสามารถเห็นได้ทันทีว่า

(1) V' สร้างคลื่นเหมือนกับ V_1 เป็นคลื่นอ้างอิง

(2) V'' สร้างภาพเสมือนของวัตถุ

(3) V''' สร้างภาพจริงของวัตถุ (คือมันสามารถทำให้แสงฉายบนจอ) ปรากฏที่ตำแหน่งเงากระจกของภาพเสมือนเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม

ต่อไปเรามาดูว่า โฮโลกราฟฟีทำการบันทึกสัญญาณที่มาจากวัตถุได้สมบูรณ์อย่างไร จากสมการ (8.22 ข) สามารถเห็นได้ว่า $V'' \propto V_2$ ดังนั้นทั้งอัมปลิจูดและเฟสของ V_2 ได้ถูกบันทึกไว้ ถ้าสัญญาณ V_1 หายไป ดังนั้นความเข้มและริ้วลายมืดของแผ่นฟิล์มจะแปรตาม $|V_2|^2$ เท่านั้น และะนี่หมายความว่ามีเพียงโมดูลัส (modulus) ของ V_2 เท่านั้นที่ถูกบันทึกไว้ จากหลักการโฮโลกราฟฟียอมให้เก็บข้อมูลบนเฟสของสัญญาณได้ และนี่ทำให้มันมีความเป็นไปได้ในการสร้างวัตถุขึ้นใหม่อย่างสมบูรณ์เป็นผลสำเร็จ

เราได้อธิบายหลักการของโฮโลกราฟฟีในรายละเอียดบางอย่างแล้ว ต่อไปเรามาพิจารณาการประยุกต์ใช้ของมัน (นอกเหนือจากการสร้างภาพสามมิติ) เราเริ่มต้นโดยการสังเกตว่า แต่ละจุดบนแผ่นฟิล์มได้บรรจุข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะทางเรขาคณิตของวัตถุทั้งหมด ดังนั้นถ้าหากว่าเราทำให้แผ่นฟิล์มนั้นแยกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ แต่ละชิ้นเหล่านี้เมื่อนำไปรับแสงเลเซอร์ A ใหม่อีกครั้ง มันจะสร้างภาพของวัตถุขึ้นใหม่ ในทางกลับกันถ้าเรามีแผ่นฟิล์มใหญ่ เราสามารถทำโฮโลแกรมวางห่างกัน เป็นจำนวนมากมายอยู่บนแผ่นฟิล์มนั้นได้ แต่ละโฮโลแกรมสอดคล้องกับวัตถุต่าง ๆ ด้วยวิธีนี้จึงเป็นไปได้ที่จะให้มีชิ้นเล็ก ๆ จำนวนมากมายบรรจุข้อมูลที่ต่างกันอยู่บนแผ่นฟิล์มเดียวกัน วิทยาการนี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับระบบซึ่งจัดกำหนดให้เก็บข้อมูลจำนวนมาก ๆ ในพื้นที่เล็ก ๆ จำกัด (ตัวอย่างเช่น หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์)

8.5 สรุป

การประยุกต์ใช้ของเลเซอร์มีประโยชน์มหาศาลสำหรับมนุษย์ จากที่ได้กล่าวการประยุกต์ข้างต้นนั้น เป็นเพียงบางส่วนที่มีและเป็นเพียงส่วนย่อยเท่านั้น ยังมีการประยุกต์อีกจำนวนมากซึ่งไม่อาจจะกล่าวได้หมดในที่นี้ ดังนั้นเราอาจสรุปได้ย่อ ๆ ดังต่อไปนี้

1. การประยุกต์ใช้ในทางวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ ใช้ในการวิจัยสาขาฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา เป็นต้น โดยนำเอาพลังงานจากลำแสงเลเซอร์มาใช้ประโยชน์ นอกจากนั้นยังใช้ประโยชน์จากคุณลักษณะเฉพาะของเลเซอร์ เช่น ความเป็นแสงสีเดียว ความเป็นแสงเส้นทางตรง ความเข้มแสงสูง ความพร้อมเพรียง เป็นต้น

2. การประยุกต์ใช้ในวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มีการประยุกต์ในสาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ในทางการแพทย์ ในการสื่อสารโทรคมนาคม ทางมาตรวิทยา ทางอุตสาหกรรม ทางทหาร เป็นต้น โดยนำเอาพลังงานจากลำแสงเลเซอร์ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในการผลิตอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งข้อได้เปรียบของการใช้ลำแสงเลเซอร์คือ ความแม่นยำแน่นอนในการทำงาน ทำงานได้ในบริเวณที่มีขนาดจำกัดแม้แต่บริเวณที่ทำได้ยากลำบากก็ตาม

แบบฝึกหัดที่ 8

8.1 ให้นักศึกษาลองคิดดูว่า ลำแสงเลเซอร์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอะไรได้บ้าง นอกเหนือจากการประยุกต์ที่กล่าวในบทที่ 8 นี้ และให้อธิบายข้อดีของการใช้ลำแสงเลเซอร์กับการประยุกต์นั้น

8.2 จากผลลัพธ์ในสมการ (8.17) จงแสดงว่าโฮโลแกรมของรูป 8.6 ประพฤติเหมือนกับว่ามันประกอบด้วยแสงจากสามส่วนคือ

(1) ตัวทำให้เบาบางลง (ซึ่งรวมนับลำแสง V′)

(2) เลนส์ด้านลบของความยาวโฟกัส z_0 (ซึ่งรวมนับลำแสง V″) และเลนส์ด้านบวกของความยาวโฟกัส z_0 (ซึ่งรวมนับลำแสง V‴)

ต่อไปเราสมมติโฮโลแกรม (ยังคงสร้างขึ้นเหมือนในรูป 8.5) ส่องสว่างด้วยคลื่นทรงกลม และสมมติว่าศูนย์กลางของคลื่นทรงกลมอยู่บนแกน PP′ ของรูป 8.6 และอยู่ห่างจากแผ่นโฮโลแกรมด้วยระยะ z_1 ถ้าช่องเปิดปิดของโฮโลแกรมมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับทั้ง z_0 และ z_1 จงแสดงว่าลำแสงลัพธ์ทั้งสามสามารถหาได้โดยการพิจารณาจากโฮโลแกรมที่ประกอบด้วยแสงจากสามส่วนเหมือนข้างต้นเช่นกัน [ข้อแนะนำ : สำหรับช่องปิดเปิดของโฮโลแกรมเล็ก ๆ พจน์เฟส $kr_0 = k(x_0^2 + z_0^2)^{\frac{1}{2}}$ สามารถประมาณเป็น $kz_0 + (kx_0^2/2z_0)$ เมื่อ x_0 คือ ระยะของจุด O ในรูป 8.6 จากแกน PP′ ในการประมาณทำนองเดียวกันนี้กับพจน์เฟสของคลื่นทรงกลม ซึ่งใช้ส่องสว่างโฮโลแกรม]

8.3 พิจารณาโฮโลแกรมแผ่นหนึ่งถูกฉายด้วยลำแสงเลเซอร์ He—Ne สีแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ถ้าเงาของภาพโฮโลแกรมสร้างขึ้นที่ระยะห่างจากแผ่น 10 ซม. จงคำนวณเงาภาพสำหรับทั้งภาพจริงและภาพเสมือน

8.4 พิจารณาโฮโลแกรมแผ่นหนึ่ง ฉายด้วยลำแสงพร้อมเพรียงบางส่วนด้วยคุณสมบัติของความพร้อมเพรียงดังต่อไปนี้

(1) มีความพร้อมเพรียงทางเวลาสมบูรณ์

(2) มีความพร้อมเพรียงทางตำแหน่งดังเช่นความยาวสหสัมพันธ์ d_{corr} ของลำแสงที่แผ่นเป็น $d_{corr} \simeq 1$ มิลลิเมตร

ถ้าเงาภาพสร้างขึ้นที่ระยะ 10 ซม. ห่างจากแผ่น จงคำนวณเงาภาพที่ได้