เลเซอร์ทางกายภาพบำบัด

รศ.สมชาย รัตนทองคำ

1.บทนำ

เลเซอร์ (laser) เป็นคำที่เกิดจากการเอาอักษรตัวหน้าของคำว่า light amplification by stimulated emission of radiation มารวมกัน ซึ่งหมายถึงการขยายสัญญาณแสงโดยการกระตุ้นให้เกิดการปล่อยรังสีออกมา แสงหรือรังสีเลเซอร์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น มีความยาวคลื่นในย่านรังสีอินฟราเรดและแสงที่มองเห็น มีลักษณะที่สำคัญคือ เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวไม่กระจาย มีพลังงานสูง มีขนาดของลำแสงแคบมากสามารถรวมลำแสงให้ส่องมายังจุดเดียวกันได้

การค้นพบเลเซอร์ เริ่มจาก Albert Einstein ได้เสนอทฤษฎีโฟตอนของแสง ใน ค.ศ. 1895 โดยมองว่าแสงเป็นอนุภาคประกอบด้วยกลุ่มก้อนของพลังงาน และสามารถอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกได้สำเร็จ และใน ค.ศ.1960 Theodore Maiman ค้นพบ ruby laser light ที่ Hughes Laboratories ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งช่วงระยะสิบปีเศษหลังจากนั้น ก็มีผู้ประดิษฐ์รังสีเลเซอร์ชนิดต่าง ๆออกมามากมายโดยใช้ต้นแบบของ Maiman

ในทางการแพทย์ได้ใช้ รังสีเลเซอร์เพื่อการผ่าตัดเรตินา โดยใช้รังสีเลเซอร์แทนมีดเพื่อการทำผ่าตัด ในต้นทศวรรษที่ 1970 กลุ่มนักวิจัยในเมือง Budapest ประเทศเชค นำโดยศาสตราจารย์ Endre Mester ได้ศึกษาวิจัยการใช้เลเซอร์เพื่อกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อในแผล โดยครั้งแรกได้ใช้เลเซอร์ชนิด HeNe ในสัตว์ทดลอง และได้นำมาประยุกต์ใช้ในผู้ป่วยในระยะต่อมาอย่างได้ผล ผลการใช้เลเซอร์กำลังต่ำได้รับความสนใจและนิยมอย่างแพร่หลายในทวีปยุโรป ประเทศสหภาพโซเวียต และประเทศในตะวันออกกลางในเวลาต่อ ๆมา ในปัจจุบันเครื่องเลเซอร์กำลังต่ำมักสร้างจากไดโอด ทำให้มีน้ำหนักเบากระทัดรัดสามารถพกพาไปได้อย่างสะดวก ซึ่งเป็นที่นิยม และมักเรียกเลเซอร์ชนิดนี้ว่า low intensity laser therapy (LILT) ถึงแม้องค์การอาหารและยาแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำลังพิสูจน์ถึงผลด้านการรักษาของเลเซอร์ชนิดนี้อยู่ แต่เลเซอร์กำลังต่ำก็ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายในหลายวิชาชีพได้แก่ นักกายภาพบำบัด ทันตแพทย์ แพทย์ด้านการฝังเข็ม และทางการแพทย์อีกหลายสาขา โดยนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการระงับปวด การกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อ เป็นต้น

2.ธรรมชาติของเลเซอร์

เลเซอร์ เป็นลำแสงที่ให้พลังงานสูง มีความยาวคลื่นในช่วงคลื่นสั้นตั้งแต่ย่านอินฟราเรดจนถึงย่านแสงที่มองเห็น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าระดับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นกับความถี่ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความยาวคลื่น ดังนั้นพลังงานของของรังสีเลเซอร์จึงขึ้นกับ

ความยาวคลื่นและกำลังส่งออก แสงเลเซอร์บางชนิดสามารถมองเห็นและบางชนิดมองไม่เห็น ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของตัวกลางที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดแสง ตัวอย่างเช่น ตัวกลางที่เป็นก๊าซ ได้แก่ argon helium neon ตัวกลางที่เป็นของแข็งเช่น ผลึกทับทิม ใช้สร้างเลเซอร์ชนิด ruby มักเป็นแสงเลเซอร์ในย่านที่มองเห็น ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด ส่วน Nd:YAG (Neodymium and Yttrium aluminium garnet) เป็นแสงเลเซอร์ย่านที่มองไม่เห็น มีความยาวคลื่นประมาณ 1,060 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นอยู่ใกล้ย่านอินฟราเรดใกล้ เป็นต้น

คุณสมบัติเฉพาะของแสงเลเซอร์ที่แตกต่างจากแสงธรรมดา มี 3 ประการ ประการแรก คือ แสงเลเซอร์จะเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic) หรือมีสีเดียว ประการที่สอง ลำแสงเลเซอร์ที่ส่งออกจะไม่กระจายเหมือนแสงปกติ แต่จะส่องไปในทิศทางเดียวกันหมด ประการสุดท้าย แสงเลเซอร์เป็นคลื่นแสงอาพันธ์ คือ มีเฟสของคลื่นตรงกัน และความเร็วของคลื่นเท่ากัน

ชนิดของเลเซอร์แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 และ 2 เป็นเลเซอร์ชนิดกำลังต่ำซึ่งไม่ส่งผลต่อเนื้อเยื่อได้แก่ เลเซอร์ที่ใช้สำหรับอ่านบาร์โค้ดตามห้างสรรพสินค้า หรือเลเซอร์ที่ใช้สำหรับเป็นตัวชี้ในการบรรยาย กลุ่มที่ 3 เป็นเลเซอร์กำลังปานกลางซึ่งมีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 50 mW ใช้สำหรับกายภาพบำบัดซึ่งจัดเป็น low level laser therapy (LLLT) กลุ่มที่ 4 เป็นเลเซอร์ที่มีกำลังสูงมักมีผลต่อการทำลายเนื้อเยื่อทางการแพทย์มักใช้แทนมีดในการทำผ่าตัด (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การแบ่งชนิดของเลเซอร์ (Low and Reed, 1994)

ชนิดเลเซอร์	ขนาดของกำลัง	ผลต่อเนื้อเยื่อ	การใช้งาน
1 2	กำลังต่ำ	ไม่มีผลต่อเนื้อเยื่อและดวงตา	ใช้สำหรับอ่านบาร์โค้ดของห้างสรรพสินค้า, pointer
3A 3B	กำลังปานกลาง	มีผลดวงตา	ใช้สำหรับกายภาพบำบัดซึ่งให้กำลังเฉลี่ย 50 mW ซึ่งเรียกว่า LLLT
4	กำลังสูง	มีผลต่อเนื้อเยื่อ	ใช้สำหรับการทำผ่าตัด

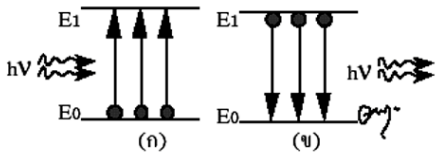
3. การสร้างเลเซอร์

3.1.ทบทวนโครงสร้างอะตอม

ปี ค.ศ.1913 Bohr นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ได้เสนอโครงสร้างอะตอมของสาร โดยกล่าวว่า อะตอมเป็นส่วนที่เล็กที่สุดของสารประกอบด้วยนิวเคลียสเป็นแกนกลางและมีอิเล็กตรอนวิ่งรอบนิวเคลียสเป็นวงอย่างเป็นชั้น ๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งแต่ละชั้นจะมีพลังงานต่างกัน ชั้นในสุดใกล้

นิวเคลียสจะเป็นชั้นที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุด และเป็นชั้นที่อิเล็กตรอนเสถียรที่สุดเรียกว่า ชั้นสถานะพื้นฐาน (ground state) ในภาวะปกติอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสของอะตอมจะพยายามอยู่ในสถานะพื้นฐานนี้ ส่วนระดับพลังงานชั้นอื่น ๆจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ เรียกว่า ชั้นสถานะกระตุ้น (excited state)

อิเล็กตรอนที่อยู่ในแต่ละชั้นสามารถกระโดดเปลี่ยนวงโคจรได้ ถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนจากวงโคจรที่มีระดับพลังงานสูงมายังวงโคจรที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนซึ่งมีความถี่ (ν) เฉพาะ (รูปที่ 1) ในทำนองเดียวกัน ถ้าอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานจากภายนอกเข้าไป ก็สามารถเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานต่ำกว่า ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูง ๆ มักอยู่ในสภาพไม่เสถียร จึงพยายามกลับคืนสู่สภาวะปกติโดยคายพลังงานออกในรูปโฟตอน โฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกจากอะตอมขณะเปลี่ยนระดับพลังงานที่ต่างกัน จะให้ความถี่ต่างกัน



รูปที่ 1 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม ก)เมื่อให้พลังงาน hν กับอะตอม อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานแล้วเปลี่ยนสถานะจากขั้นสถานะพื้นฐาน E_0 เป็น E_1 และในไม่ช้าจะคายพลังงาน hν ออกและกลับเข้าสู่สถานะ E_0 เดิม ซึ่งเสถียรกว่า (ข)

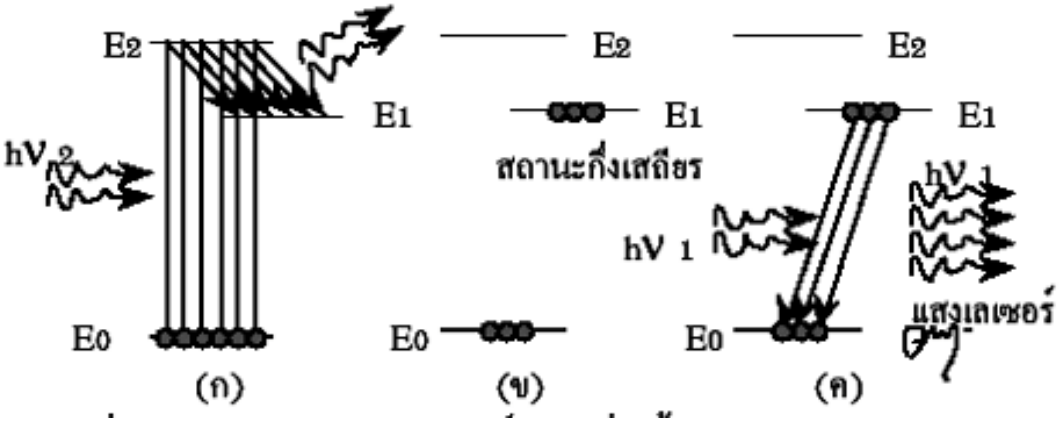
ปี ค.ศ.1914 Frank และ Hertz นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ได้ทำการทดลอง ซึ่งสนับสนุนแนวความคิดของ Bohr โดยทำการทดลองด้วยการบรรจุไอปรอทในหลอดแก้ว ที่ความดันต่ำซึ่งมีโลหะเป็นขั้ว เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านไส้หลอดจนร้อน จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนหลุดจากขั้ว อิเล็กตรอนเหล่านั้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้วิ่งชนกับอะตอมของไอปรอท และจะถ่ายพลังงานให้กับอะตอมปรอทจนสามารถเปล่งรังสีออกมา จากการตรวจสอบสเปกตรัมรังสีของไอปรอทพบว่า พลังงานอะตอมของไอปรอทมีลักษณะเป็นระดับชั้น ๆไม่ต่อเนื่องกัน และอะตอมสามารถดูดกลืนหรือคายพลังงานที่ค่าเฉพาะค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างของพลังงานระหว่างชั้นของระดับพลังงานชั้นต่าง ๆของอิเล็กตรอนเหล่านั้น ผลการทดลองดังกล่าวสนับสนุนว่าอะตอมมีโครงสร้างเป็นระดับชั้นของพลังงานจริง

3.2. การสร้างแสงเลเซอร์

แสงทั่วไปที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิด เช่น จากดวงไฟ จะกระจายออกโดยรอบซึ่งแสงดังกล่าวมักจะมีหลายสีหรือหลายความถี่รวมกัน แต่แสงเลเซอร์เป็นแสงที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดไป

ในทิศทางเดียวกันหมดมีความถี่เดียวและมีเฟสตรงกันทั้งหมด แสงเลเซอร์จึงจัดเป็นแสงอาพันธ์ (coherent light)

ในภาวะปกติอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสของอะตอมจะอยู่ในวงโคจรที่มีสถานะพลังงานต่ำสุดมากกว่าสถานะพลังงานสูง ดังนั้นเมื่อให้แสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานพอเหมาะจากภายนอกเข้าไป ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการดูดกลืนพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นอยู่ในสถานะกระตุ้น และจะเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานต่ำสุดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นเหล่านี้จะกลับคืนสู่สถานะเดิมที่มีพลังงานต่ำสุดโดยการแผ่รังสีออกมาเองโดยรอบในรูปของโฟตอนหรือแสง



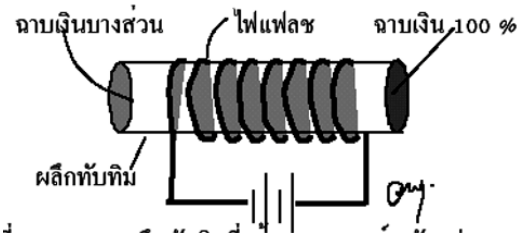
รูปที่ 2 แสดงการเกิดเลเซอร์ ก)เมื่อให้พลังงาน hν2 กับอะตอมทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก E_0ไปอยู่ที่ E_2 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะคายพลังงานออก และเปลี่ยนระดับพลังงานมาอยู่ที่ E_0 และ E_1 บางส่วน ข) เมื่อให้พลังงาน hν1 กับอะตอมทันที จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ E1 คายพลังงานออกพร้อมกันเพื่อกลับสู่ E_0 (ค)

แต่ถ้าเริ่มแรกให้พลังงานจากภายนอกกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้นจากนั้นให้โฟตอนที่มีพลังงานพอเหมาะจากภายนอกเข้าไปอีก อะตอมในสถานะกระตุ้นอยู่แล้วจะถูกกระตุ้นให้แผ่รังสีออกมาทันทีในทิศทางเดียวกับโฟตอนที่เข้าไปกระตุ้น ซึ่งรังสีที่ปล่อยออกจากขบวนการดังกล่าวจะมีความถี่เดียวกัน ทิศทางเดียวกัน และมีเฟสตรงกันทั้งหมดถือเป็นคลื่นอาพันธ์ ซึ่งหลักการนี้ใช้สร้างแสงเลเซอร์

อิเล็กตรอนของสารบางชนิดมีระดับพลังงานพอเหมาะที่จะแผ่รังสีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความถี่พอเหมาะจากภายนอก ดังนั้น เมื่อให้แสงที่มีพลังงานพอเหมาะ ($h\nu_2$) ถูกปล่อยเข้าไปในอะตอม อะตอมจะดูดกลืนพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนของสารนั้นเกิดการเปลี่ยนจากระดับพลังงานระดับต่ำสุด (E_0) ไปอยู่ที่ระดับพลังงานระดับ E_2 ซึ่งไม่เสถียร อิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงาน E_2 ประมาณ10^{-8} วินาที ก็จะคลายพลังงานออกเพื่อกลับคืนสู่ระดับ E_0 หรือ E_1 หรือ จาก E_1 มายัง E_0 ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่า ($h\nu_1$) และเสถียรกว่าทันที เนื่องจากระดับพลังงาน E_1 เป็น

ระดับพลังงานกึ่งเสถียร (metastable) อิเล็กตรอนจะ อยู่ที่ระดับพลังงานนี้ได้นานกว่าระดับพลังงานอื่นทั่วไป คือประมาณ 1 วินาที แล้วจึงกลับคืนสู่ระดับ E_0 ตามเดิม ดังนั้น ณ ภาวะดังกล่าวถ้าใช้แสงจากภายนอกที่มีพลังงานพอเหมาะ ($h\nu_1$) กระตุ้นอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วจะทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำสุด E_0 ไปออกันอยู่ที่ระดับ E_1 จากนั้นให้แสงที่มีความถี่พอเหมาะ ($h\nu_2$) เข้าไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ระดับ E_1 ให้กลับคืนสู่ระดับพลังงานต่ำสุด E_0 ทันที อย่างพร้อมๆ กัน ซึ่งอิเล็กตรอนที่ระดับ E_1 จะกลับคืนสู่ระดับ E_0 พร้อมกับปลดปล่อยโฟตอน ($h\nu_2$) เป็นจำนวนมาก ในทิศทางเดียวกับโฟตอน ($h\nu_2$) ที่ปล่อยเข้าไปกระตุ้น ซึ่งโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้จะมีความถี่เดียวกันและเฟสเดียวกัน ซึ่งก็คือแสงเลเซอร์นั่นเอง (รูปที่ 2)

ปัจจุบันสามารถผลิตแสงเลเซอร์ได้จากวัสดุหลายชนิด (ตัวกลางที่ใช้สร้างแสงเลเซอร์) จากของแข็ง เช่น ทับทิม แก้ว จากของเหลว เช่น สารกลุ่มไนโตรเบนซิน จากก๊าซต่าง ๆ เช่น ฮีเลียมนีออน เป็นต้น เลเซอร์เครื่องแรกสร้างขึ้นสำเร็จในปี ค.ศ. 1960 โดย Mainman นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน โดยใช้ผลึกทิบทิม (ruby crystal) ซึ่งมีอลูมิเนียมออกไซด์และอะตอมของโครเมียมปนอยู่ด้วย Mainman ได้ฝนผลึกทับทิมให้เป็นแท่งแล้วขัดปลายทั้งสองด้านให้เรียบและขนานกัน ด้านหนึ่งฉาบด้วยเงินให้เป็นกระจกเงาสะท้อนแสงได้เต็มที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีกด้านฉาบไว้เพียงเล็กน้อยเพื่อให้แสงสะท้อนและสามารถทะลุผ่านได้ รอบๆ แท่งทับทิมมีหลอดไฟแฟลชพันโดยรอบ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำหรับกระตุ้นอิเล็กตรอนของโครเมียมให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานและคลายโฟตอนออกมาเป็นแสงเลเซอร์ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แสดงผลึกทับทิมที่สร้างเลเซอร์ในระยะแรกๆ

รูปที่ 4 แสดงการเกิดเลเซอร์ ก)อะตอมเมื่อได้รับพลังงานจากไฟเฟลชจะกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งอะตอมบางส่วนคายพลังงานออกเป็นโฟตอนวิ่งสะท้อนกลับไปมา ซึ่งโฟตอนเหล่านี้จะกระตุ้นอะตอมในสถานะกระตุ้นที่เหลือให้ปล่อยโฟตอนจำนวนมากที่ความถี่เฟสเดียวกัน (ข)

เมื่อสับสวิตช์ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป หลอดไฟแฟลชจะลุกสว่างวาบขึ้น อะตอมของโครเมียมจะดูดพลังงานของแสงแฟลชทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากระดับพลังงานต่ำสุด E_0 ขึ้นไปอยู่ระดับพลังงาน E_2 แล้วคายพลังงานส่วนหนึ่งมาอยู่ที่ E_1 จากนั้นจึงคายพลังงาน ส่วนที่เหลือแล้วกลับสู่สถานะระดับพลังงานต่ำสุด E_0 เดิม ซึ่งพลังงานที่คายออกคือแสงสีแดงความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตร โฟตอนความยาวคลื่นดังกล่าวนี้จะสท้อนกลับไปกลับมาระหว่างปลายทั้งสองของแท่งทับทิมซึ่งฉาบด้วยเงินคล้ายกระจกเงาแล้วจะไปกระตุ้นอะตอมโครเมี่ยมที่ยังอยู่ในระดับพลังงาน E_1 ให้ปล่อยโฟตอนต่อไปอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งโฟตอนดังกล่าวมีความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตร และมีความถี่และเฟสเดียวกันทั้งหมด แสงที่สะท้อนไปมาหลาย ๆ ครั้ง บางส่วนจะถูกปล่อยออกทางปลายผลึกทับทิมด้านที่ฉาบด้วยเงินเพียงเล็กน้อย ลำแสงนี้จะเป็นลำแสงที่มีเฟสเดียวกันทั้งหมดและเป็นลำแสงขนานมีความเข้มสูงมาก (รูปที่ 4)

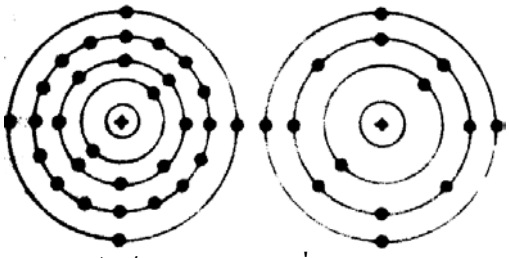
เนื่องจากแสงที่ปล่อยจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์มีความเข้มสูง เมื่อโฟกัสให้ไปรวมกันเป็นจุดเล็ก ๆ จะเป็นแสงที่มีลำแสงตรงและมีพลังงานสูงมากมีกำลังหลายล้านวัตต์จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการสำรวจทางการแพทย์ และเทคโนโลยีอื่น ๆ อีกมากมาย

4. ไดโอดเลเซอร์

รังสีเลเซอร์ปัจจุบันส่วนหนึ่งสร้างจากไดโอดเลเซอร์ มักเป็นเลเซอร์กำลังต่ำ ไดโอดเลเซอร์เป็นไดโอดแสงชนิดหนึ่งที่สามารถให้แสงอาพันธ์ ตัวไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ มีหลักการทำงานพื้นฐานดังต่อไปนี้

4.1 ทบทวนสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติอยู่ตรงกลางระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ เยอรมาเนียม (germanium) ซิลิคอน (silicon) ลักษณะอะตอมของสารดังกล่าว มักมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3-5 ตัว และจับเรียงตัวเป็นโครงสร้างแบบผลึก โดยอะตอมเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างแบบแลตทิช (lattice structure) อย่างมั่นคงพอสมควร จึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ ในภาวะปกติจะนำไฟฟ้าไม่ดี แต่เมื่อให้ความร้อนหรือผ่านไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปยังสารกึ่งตัวนำ จะสามารถทำให้อิเล็กตรอนในโครงสร้าง

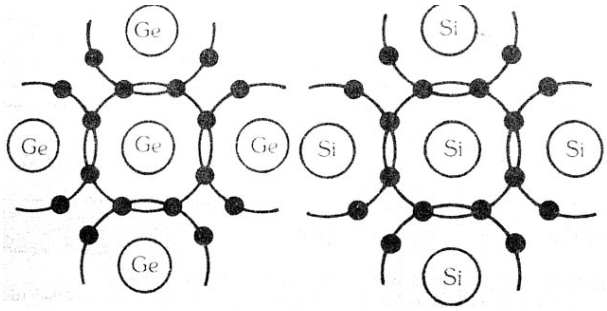


ก ข

รูปที่ 5 แสดงจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำของธาตุเยอรมาเนียม (ก) และซิลิคอน (ข)

ผลึกหลุดออกทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี หากนำสารกึ่งตัวนำผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) หรือการโด๊ปพลังงานจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้

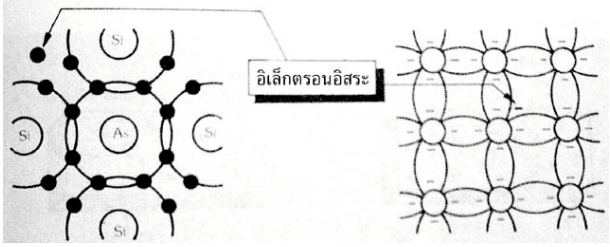
หากพิจารณาโครงสร้างอะตอมของธาตุเยอรมาเนียม (Ge) และซิลิคอน (Si) (ซึ่งอยู่ในกลุ่มธาตุทรานซิชัน) จะมีอะตอมทั้งหมด 32 และ 14 ตัว ตามลำดับ และมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 4 ตัว (รูปที่ 5) ดังนั้นอะตอมของธาตุดังกล่าวจึงมักจับตัวกันเป็นผลึกเพื่อให้เกิดความเสถียร (วาเลนซ์อิเล็กตรอนครบ 8 ตัว) ดังรูปที่ 6 ทำให้ไม่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเหลือ จึงทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ไม่ดี อย่างไรก็ตามหากนำสารกึ่งตัวนำดังกล่าวมาเจือด้วยสารเจือเข้าไป สารเจือที่เติมเข้าไปนี้มักเป็นสารที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3-5 ตัว เพื่อให้อะตอมของสารเจือไปยึดเกาะกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำข้างเคียง เพื่อเพิ่มจำนวนวาเลนอิเล็กตรอนอิสระหรือเพิ่มจำนวนโฮล (hole) เกิดคุณสมบัติใหม่ทำให้สารนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ กระบวนการเติมสารเจือดังกล่าวเรียกว่า **การโด๊ป** (dopping) ซึ่งสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เมื่อถูกโด๊ปแล้ว จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถแบ่งสารดังกล่าวได้เป็น 2 ชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 6 แสดงลักษณะจับตัวกันของอะตอมของธาตุเยอรมาเนียมและซิลิคอน

4.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

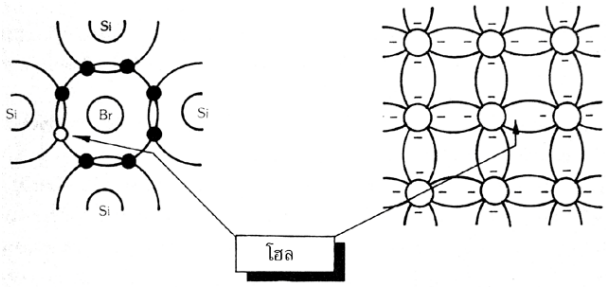
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (Negative type, N-type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่โด๊ปแล้วให้ประจุของอิเล็กตรอนมากกว่าประจุของโฮล เกิดจากการเจือสารที่อะตอมมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเข้าไปทำให้อะตอมของสารเจือไปยึดเกาะกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำหลักจนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเหลืออยู่ 1 ตัว ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้น จัดเป็นสารผู้ให้ (donor) (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 แสดงลักษณะจับตัวกันของอะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

4.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

สารกึ่งตัวนำชนิดพี (Postive type, P-type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่โด๊ปแล้วให้ประจุของโฮลมากกว่าประจุของอิเล็กตรอน เกิดจากการเจือสารที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 เข้าไป ทำให้อะตอมของสารเจือไปยึดเกาะกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำหลัก จนทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนขาดที่ว่าง 1 ที่ จึงจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนครบ 8 ตัว ที่ว่างดังกล่าวเรียกว่า โฮล (hole) อาจกล่าวได้ว่าโฮล แสงคุณสมบัติทางไฟฟ้าตรงข้ามกับอิเล็กตรอน (เนื่องจากรับอิเล็กตรอน) จึงเสมือนแสดงประจุไฟฟ้าบวก ลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิดพี จัดเป็นสารผู้รับ(acceptor) (ดังรูปที่ 8)



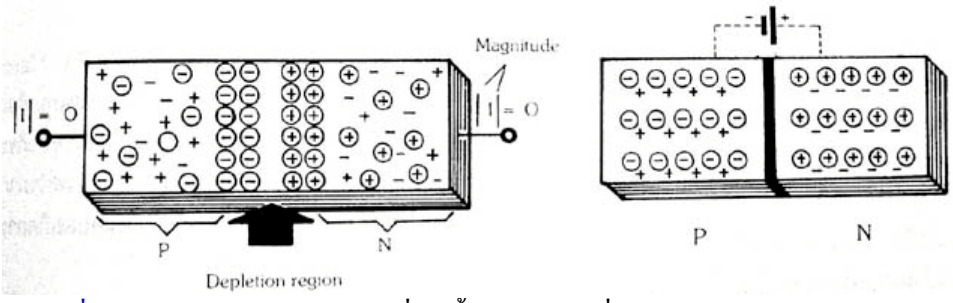
รูปที่ 8 แสดงลักษณะจับตัวกันของอะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

4.2 รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี

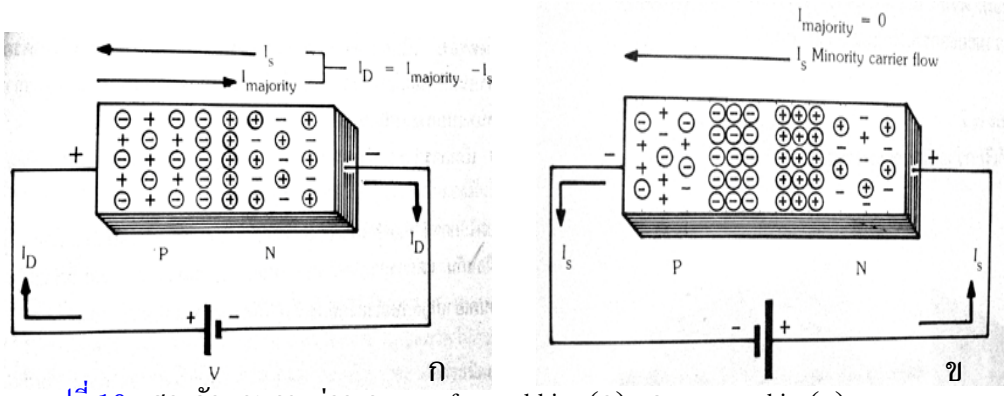
หากนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาเชื่อมต่อกัน อิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเกิดการเคลื่อนย้ายข้ามรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองมาด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี และในทำนองเดียวกันโฮลจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็เสมือนเกิดการเคลื่อนย้ายข้ามรอยต่อไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งอิเล็กตรอนจะไปจับคู่กับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เด่นประจุลบ (จำนวนโฮลลดลงจากเดิม) และในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีอิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกทำให้อะตอมขาดอิเล็กตรอนอะตอมจึงเด่นประจุบวก (จำนวนอิเล็กตรอนลดลงจากเดิม) การเคลื่อนย้ายของโฮลและอิเล็กตรอนจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำพี มีอิเล็กตรอนสะสมมากพอที่จะเกิดการผลักไม่ให้อิเล็กตรอนตัวอื่นจากด้านสารกึ่งตัวนำเอ็นข้ามรอยต่อได้อีกต่อไป อิเล็กตรอนและโฮลก็จะหยุดการเคลื่อนที่ ดังนั้น ตรงรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองจึงเสมือนหนึ่งเกิดสนามไฟฟ้าเล็ก ๆขึ้น เพื่อคอยขัดขวางมิให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโฮลและอิเล็กตรอน จึงมักเรียกรอยต่อดังกล่าวว่า depletion region หรือ potential junction หรือเรียกว่า potential hill ที่คอยขัดขวางหรือป้องกันมิให้ประจุจากสารกึ่งตัวนำพีและเอ็นเคลื่อนที่เข้าหากัน ดังนั้นหากทำให้ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดต่ำลง หรือทำให้ช่องว่างระหว่างรอยต่อนี้แคบลง ก็จะสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุทั้งสองข้ามไปมาหากันได้อีก เกิดการไหลถ่ายเทของกระแสไฟฟ้าในวงจรนั่นเอง (รูปที่ 9)

หากต่อขั้วบวกของแบตเตอรีเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และต่อขั้วลบเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี (แรงเคลื่อนไฟฟ้า) ไปหักล้างกับศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ

ระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสอง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุข้ามรอยต่อ ช่องว่างระหว่างรอยต่อแคบลง เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า การต่อลักษณะนี้เรียกว่า การต่อแบบ **forward bias** (รูปที่ 10 ก)



รูปที่ 9 แสดงรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี



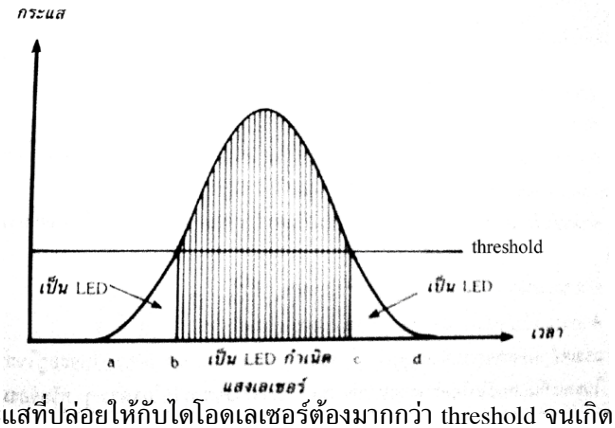
รูปที่ 10 แสดงลักษณะการต่อวงจรแบบ forward bias (ก) และ reverse bias(ข)

ในทางตรงกันข้ามหากต่อขั้วบวกของแบตเตอรีเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และต่อขั้วลบของแบตเตอรีเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรีไปเสริมศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ จะทำให้ประจุไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ ไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า เสมือนทำให้ช่องว่างระหว่างรอยต่อกว้างขึ้น ซึ่งเรียกการต่อลักษณะดังกล่าวว่า การต่อแบบ **reverse bias** (รูปที่ 10 ข)

4.2ไดโอดเลเซอร์

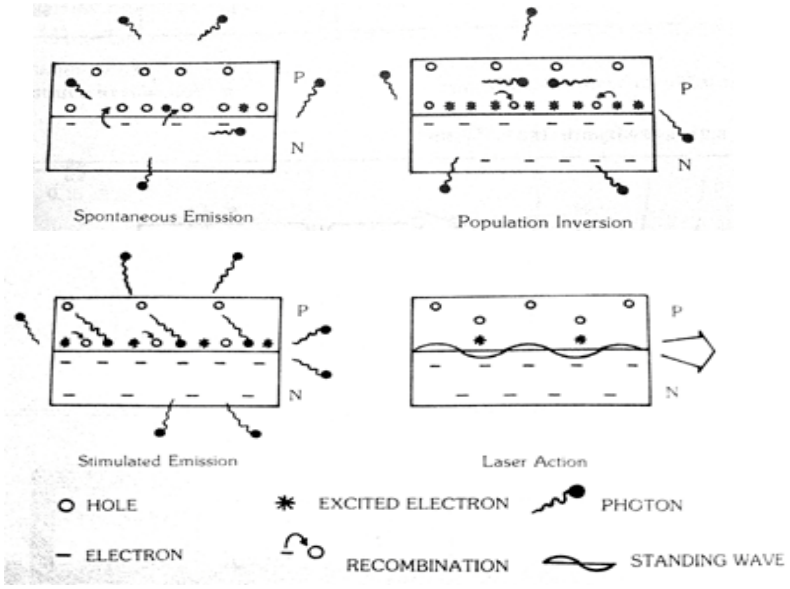
ไดโอดเลเซอร์เป็นไดโอดเปล่งแสงชนิดหนึ่ง ซึ่งไดโอดเปล่งแสงหรือ LED (light emitting diode) เป็นไดโอดที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีชนิดพิเศษ เมื่อคร่อมแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำพีและเอ็น โดยให้ขั้วบวกอยู่ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วลบอยู่ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (forward bias) จะทำให้โฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเกิดการไหลมารวมตัวกันที่บริเวณรอยต่อและปลดปล่อยพลังงานแสงออกมา ซึ่งแสงย่านดังกล่าวมักมีความยาวคลื่นในย่าน อินฟราเรด แดง ส้ม เหลือง เขียว ในปัจจุบันสามารถสร้างไดโอดที่ให้แสงสีน้ำเงิน ได้แล้ว สารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำ LED ได้แก่ ผลึกแกเลียม (Ga) ที่มีสารเจือผสมอยู่ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการแปล่งแสงสีต่างกัน

ปกติรอยต่อระหว่างสารพีและเอ็นจะสร้างจากการปลูกเป็นชั้นของสารเอ็นหรือพี บนฐานซึ่งเป็นสารพีและสารเอ็นของผลึกแกเลียม ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำ และส่วนผสมของสารที่เจือ ตัวอย่างเช่น แสงอินฟราเรด ใช้ GaAs, แสงสีแดง ใช้ GaAlAs เป็นต้น



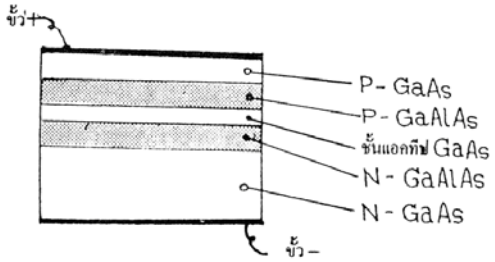
รูปที่ 11 แสดงกระแสที่ปล่อยให้กับไดโอดเลเซอร์ต้องมากกว่า threshold จนเกิดเลเซอร์

ไดโอดเลเซอร์ทำจากสารกึ่งตัวนำพวกแกเลียมอาเซอไนด์ (GaAs) คล้ายไดโอด LED ซึ่งเมื่อจ่ายกระแสให้กับไดโอดเลเซอร์ พลังงานแสงในรูปของโฟตอนจะถูกปล่อยออกมาอย่างสะเปะสะปะเหมือนแสงจาก LED ทั่วไป แต่เมื่อทำการเพิ่มกระแสให้สูงขึ้นจนถึงค่า threshold (ความถี่ขีดเริ่มเปลี่ยน) ของสารนั้น (รูปที่ 11) โฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจะเกิดการกระตุ้นให้ไปชนกับอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ทำให้โฟตอนเหล่านี้มีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถกระตุ้นให้โฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมามีเฟสตรงกัน และปลดปล่อยออกมาตรงรอยต่อของ depletion area ซึ่งแสงที่ปล่อยออกมานี้คือแสงเลเซอร์ พลังงานหรือกระแสที่ป้อนให้กับไดโอดนั้นจะต้องมากพอจนถึง threshold ของสารนั้น ๆ จึงจะสามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยเลเซอร์ได้ หากกระแสที่ให้นั้นน้อยกว่า threshold แสงที่ออกมาก็จะเป็นแสงธรรมดาดังรูปที่12

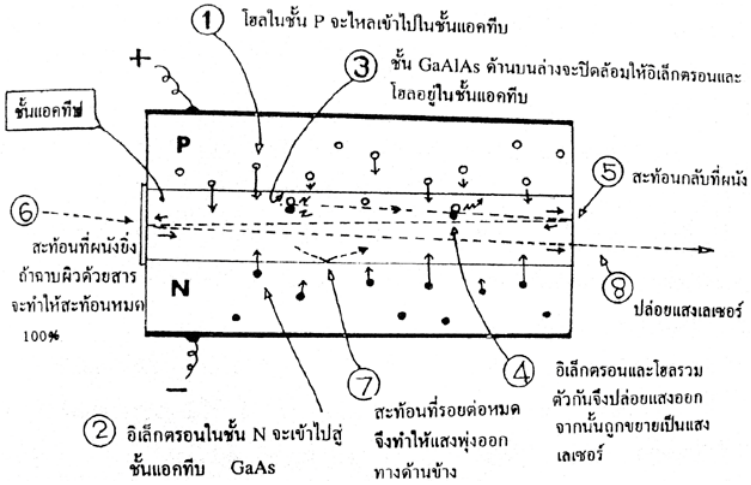


รูปที่ 12 แสดงกลไกการเกิดรังสีเลเซอร์ในไดโอดเลเซอร์

ไดโอดที่สร้างเลเซอร์มีหลายชนิดซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ไดโอดเลเซอร์ชนิด double hetero-structure ซึ่งเป็นไดโอดที่มีรอยต่อที่เกิดจากผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นต่างชนิดมาต่อกัน 2 ชั้น จึงเรียกว่า double hetero-function ดังรูปที่ 13 เมื่อให้แรงดันคร่อมตัวไดโอด จะเกิดการฉีดอิเล็กตรอนและโฮลเข้ามาบริเวณชั้นตรงกลาง อิเล็กตรอนและโฮลเหล่านี้จะถูกปิดล้อมให้อยู่ในชั้นดังกล่าวนี้จึงเกิดการรวมตัวกัน ชนกัน ถ่ายทอดพลังงาน และเกิดการปลดปล่อยพลังงานแสงขึ้นในชั้น GaAs ซึ่งเป็นชั้นที่ถูกซ้อนทับและเป็นชั้นที่ถูกกระตุ้น (active layer) เมื่อเทียบกับชั้น GaAlAs ซึ่งอยู่ด้านบนและล่าง ชั้นที่ถูกกระตุ้นนี้จะมีดัชนีหักเหของแสงน้อยกว่าชั้นอื่น ๆ ดังนั้นแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจึงไม่สามารถทะลุผ่านชั้นถูกกระตุ้นนี้ออกไปได้ (คล้ายกับการส่องไฟจากใต้น้ำขึ้นมาบนผิวน้ำ แสงจะไม่สามารถทะลุผ่านขึ้นมาผิวน้ำ แต่จะสะท้อนกลับลงไปในน้ำทั้งหมด) จึงถูกบังคับให้ปลดปล่อยออกไปทางด้านข้างเท่านั้น เมื่อแสงวิ่งออกมาถึงส่วนปลายที่เป็นผนังเปิดของผลึกที่ถูกฝนให้เรียบและสะท้อนแสงได้ดี แสงจึงเกิดการสะท้อนกลับ และสะท้อนที่ปลายผนังอีกด้านหนึ่งในระหว่างทางก็จะถูกขยายเพิ่มปริมาณแสงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกลายเป็นลำแสงเลเซอร์นั่นเอง (รูปที่ 14)



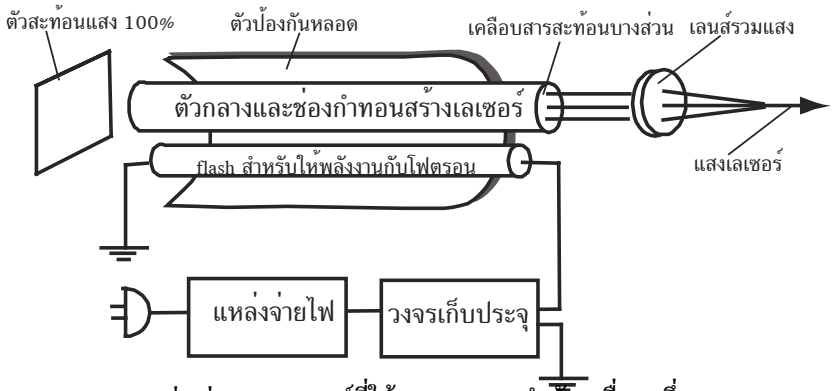
รูปที่ 13 แสดงลักษณะไดโอดเลเซอร์ชนิด GaAlAs ที่ให้แสงเลเซอร์ 780 nm



รูปที่ 14 แสดงกระบวนการปลดปล่อยเลเซอร์ของไดโอดเลเซอร์ชนิด GaAlAs

5.เครื่องเลเซอร์สำหรับกายภาพบำบัด

เครื่องเลเซอร์ที่ใช้สำหรับกายภาพบำบัด เป็นเลเซอร์กำลังต่ำ มักสร้างจากตัวกลางที่เป็นก๊าซได้แก่ HeNe และเลเซอร์ที่สร้างจากไดโอดเลเซอร์ได้แก่ GaAlAs อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปเครื่องเลเซอร์สำหรับกายภาพบำบัดมักประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังรูปที่ 15



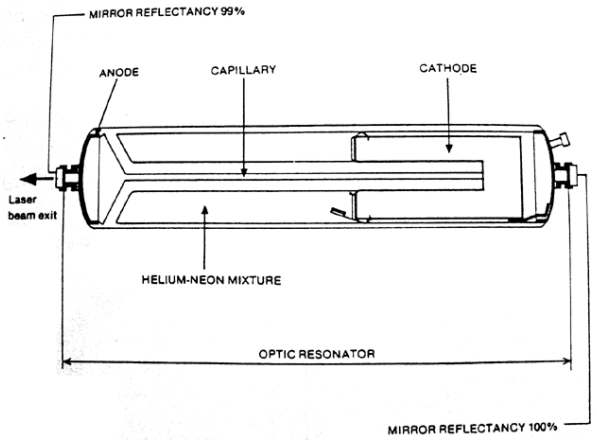
รูปที่ 15 แสดงวงจรอย่างง่ายของเลเซอร์ที่ใช้ทางกายภาพบำบัดเครื่องหนึ่ง

5.1. ตัวกลางสำหรับผลิตรังสีเลเซอร์ (A lasing medium)

ตัวกลางที่ใช้สำหรับสร้างเลเซอร์ที่ใช้ทางกายภาพบำบัด ซึ่งเป็นเลเซอร์กำลังต่ำ ได้แก่ตัวกลางเป็นก๊าซ เช่น ส่วนผสมของก๊าซฮีเลียมและก๊าซนีออน (He-Ne laser) ซึ่งสร้างแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ให้แสงสีแดง และตัวกลางที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอดเลเซอร์ กลุ่มแกลเลียม-อาเซอร์ไนต์ (gallium arsenide, Ga-As) หรือ แกลเลียม-อลูมิเนียม-อาเซอร์ไนต์ (gallium aluminium arsenide, Ga-Al-As) ซึ่งสร้างเลเซอร์ความยาวคลื่น 630-950 นาโนเมตร มักให้แสงสีแดงใกล้เคียงกับรังสีอินฟราเรด ถึงแม้เลเซอร์ชนิด HeNe ได้รับการพัฒนาขึ้นในสมัยแรก ๆ แต่ในปัจจุบันเลเซอร์ชนิดที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำกลับได้รับความนิยมมากกว่า โดยเฉพาะในประเทศแถบ Britain or Ireland ซึ่งตัวเครื่องมักมีสายไฟเบอร์ออฟติก ต่อมายัง probe เพื่อสะดวกสำหรับให้การรักษา

5.2 ช่องกำทอน และอุปกรณ์เชื่อมต่อ

ช่องกำทอน (resonance cavity) คือส่วนที่บรรจุตัวกลางและบริเวณที่ใช้สำหรับเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานพอเหมาะที่จะปลดปล่อยรังสีเลเซอร์ออกมา ซึ่งประกอบด้วยตัวกลางและตัวสะท้อนผิวเรียบคล้ายกระจกเงาที่วางขนานกันอยู่ภายในช่องดังกล่าว โฟตอนของแสงซึ่งเกิดจากการให้พลังงานสูงกับตัวกลาง (ที่เป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์) จนกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของตัวกลางสะท้อนกับกระจกขนานกลับไปกลับมาจนกระทั่งโฟตรอนนั้นเกิดพลังงานที่พอเหมาะ และจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นลำแสงเลเซอร์ (รูปที่ 16)

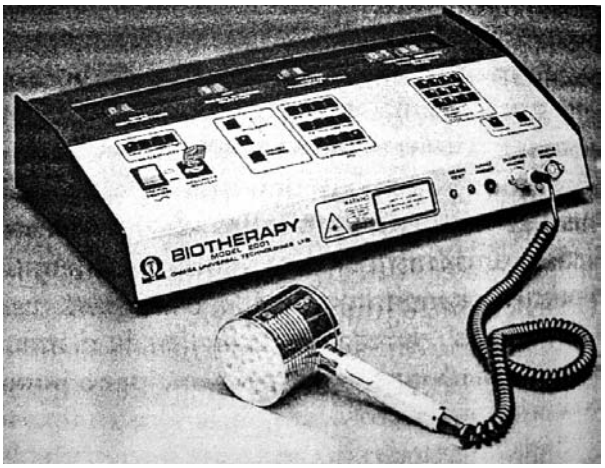


รูปที่ 16 แสดงเครื่องเลเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ตัวกลางเป็นก๊าซ

ช่องกำทอนของเครื่องเลเซอร์ชนิด HeNe จะมีขนาดใหญ่และค่อนข้างซับซ้อนกว่า เครื่องเลเซอร์ชนิดไดโอด ดังนั้นเครื่องเลเซอร์ชนิดไดโอดจึงมีขนาดเล็กและกระทัดรัดกว่าและตัว probe ซึ่งเป็นหัวที่ปล่อยรังสีเลเซอร์จึงมักมีขนาดเล็กพอ ๆกับปลายปากกา ซึ่งกล่าวได้ว่าเลเซอร์ชนิดไดโอดเป็น second generation of laser therapy ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ทางกายภาพบำบัดในปัจจุบัน ส่วนเลเซอร์ชนิด HeNe ซึ่งมีขนาดใหญ่ลำแสงที่ปล่อยออกมักใช้กระจกเป็นตัวสะท้อนและบังคับทิศทางให้เป็นไปตามต้องการ นอกจากนั้นส่วนที่ต่อเป็น probe มักใช้สายไฟเบอร์ออฟติกเป็นตัวเชื่อมเพื่อให้สะดวกต่อการประยุกต์ใช้บนผิวหนัง

5.3. แหล่งพลังงานของตัวเครื่อง

แหล่งพลังงานของตัวเครื่องเลเซอร์ที่ใช้ทางกายภาพบำบัดมักเป็นวงจรที่มีทรานฟอร์มเมอร์เป็นองค์ประกอบหลัก วงจรเก็บประจุและควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อจ่ายให้กับไฟ



รูปที่ 17 แสดงลักษณะเลเซอร์รุ่นใหม่ ๆ ที่ probe จะมีกลุ่มไดโอดเลเซอร์จำนวนมาก เพื่อสร้างเลเซอร์ได้พร้อมกันเหมาะสำหรับรักษาพื้นที่กว้าง ๆ

แฟลชและตัวกลางในการเร่งให้โฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถปลดปล่อยรังสีเลเซอร์ ซึ่งเครื่องเลเซอร์สำหรับกายภาพบำบัดปัจจุบันมักใช้แบตเตอรีชนิดที่สามารถประจุไฟได้ (rechargeable) เพื่อให้สะดวกสำหรับในการพกพาเครื่องไปใช้สำหรับนักกีฬาที่ได้บาดเจ็บในระหว่างการแข่งขัน

ปัจจุบันได้มีผู้ผลิตเครื่องเลเซอร์ไอโอดที่มีหัว probe ที่เป็นแหล่งกำเนิดมีไดโอดจำนวนมาก (มากกว่า 180 ตัว) วางเรียงกันเป็นกลุ่ม (cruster) สามารถให้แสงเลเซอร์ได้พร้อมกัน ซึ่งสะดวกสำหรับการประยุกต์ใช้รักษากับพื้นที่กว้าง ๆ (รูปที่ 17)

6.ชนิดของเลเซอร์ที่ใช้ทางการแพทย์

รังสีเลเซอร์ที่ใช้ทางการแพทย์สามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามกำลังส่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ เครื่องเลเซอร์กำลังสูง (high power laser) และเครื่องเลเซอร์กำลังต่ำ (lowpower laser) ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงชนิดของเลเซอร์ที่ใช้ทางการแพทย์

ชนิดเลเซอร์	ความยาวคลื่น (nm)
Helium-neon (He Ne)	632.3
Ruby	694.3
Argon	476.5-514.5
Krypton ion	476.1-647
Neodymium (Nd)	1,060
Neodymium and Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG)	1,060
Carbon dioxide (CO_2)	10,600
Helium Cadmium	325-441.6
Nitrogen	337
Dye	ไม่สามารถวัดได้

6.1 เลเซอร์กำลังสูง (high power laser)

เครื่องเลเซอร์ชนิดนี้เป็นชนิดที่ให้ลำแสงเลเซอร์กำลังสูงสามารถเปลี่ยนแปลงหรือทำลายเนื้อเยื่อด้วยผลของความร้อนจากรังสี ซึ่งผลการทำลายเนื้อเยื่อนี้เองที่ทำให้นิยายวิทยาศาสตร์มักเขียนในลักษณะแสงเลเซอร์มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงเกินความเป็นจริง ทางการแพทย์มักนิยมใช้เลเซอร์กำลังสูงนี้แทนมีดในการทำผ่าตัด (light knife) เช่นการผ่าตัดเนื้องอก ปาน และเรตินาของดวงตา เป็นต้น

ผลความแรงของเลเซอร์ความถี่สูงทำให้ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อเพิ่มสูงขึ้น เนื้อเยื่อขาดน้ำ, โปรตีนรวมเป็นก้อน (coagulation of protein) การแยกสลายเซลล์ (thermolysis) และ เกิดการระเหิด (evaporation) นอกจากนั้นผลของเลเซอร์ยังขึ้นกับ ค่าการดูดซึมการหักเหและการส่งผ่านรังสีของเนื้อเยื่อ ความเข้มของลำแสงเลเซอร์ ความเร็วของแสงเลเซอร์ ความเร็วและปริมาณของระบบการไหลเวียนของเนื้อเยื่อบริเวณนั้น และระดับความตึงของเนื้อเยื่อบริเวณที่ทำผ่าตัด เครื่องเลเซอร์กำลังสูงดังกล่าวได้แก่ CO_2 Argon และ Nd:YAG

6.2 เลเซอร์กำลังต่ำ

เป็นเครื่องเลเซอร์ที่ให้กำลังต่ำกว่า 500 มิลลิวัตต์ โดยทั่วไปมักใช้ประมาณ 50 mW/cm^2 และให้พลังงานประมาณ 35 J/cm^2 (Lecturer, 1999;317) ผลการรักษามักไม่ใช่ผลของความร้อนจากลำแสง บางครั้งอาจเรียกเลเซอร์ชนิดนี้ว่า เลเซอร์ชนิดเย็น (cold laser) หรือเลเซอร์ชนิดอ่อน (soft laser) มักเป็นลำแสงชนิดที่มองเห็น ในกรณีที่เป็น HeNe laser จะให้แสงสีแดงซึ่งจะไม่ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อเปลี่ยนแปลง เลเซอร์ชนิด HeNe นี้มักนิยมใช้แทนเข็มซึ่งฝังลงบริเวณ หู เพื่อระงับอาการปวดและลดการอักเสบของเนื้อเยื่อต่างๆ

ผลของเลเซอร์กำลังต่ำนี้เชื่อว่าจะกระตุ้นผลทางชีววิทยารอบๆเซลล์ เนื้อเยื่อและอวัยวะ อาจเรียกว่าเป็นเครื่องกระตุ้นชีวภาพ (bio-stimulation instrument) นอกจากนั้นในปัจจุบันยังมีการศึกษาทดลองถึงผลของเลเซอร์กำลังต่ำ ในด้านการกระตุ้นการซ่อมแซมแผล การติดของกระดูก และผลในด้านการระงับปวด ซึ่งเลเซอร์กำลังต่ำในปัจจุบันได้แก่ helium neon (HeNe) และ gallium arsenide (GaAs)

7.การใช้แสงเลเซอร์ทางกายภาพบำบัด

ดังได้กล่าวมาแล้วการใช้แสงเลเซอร์ทางการแพทย์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของโรคและการประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับสภาพการ แสงเลเซอร์ชนิดกำลังสูง (10-100 วัตต์) มักใช้ในการทำผ่าตัด ส่วนแสงเลเซอร์ชนิดกำลังต่ำ (มีหน่วยเป็นมิลลิวัตต์) หรือเลเซอร์ชนิดเย็นมักใช้ทางกายภาพบำบัด

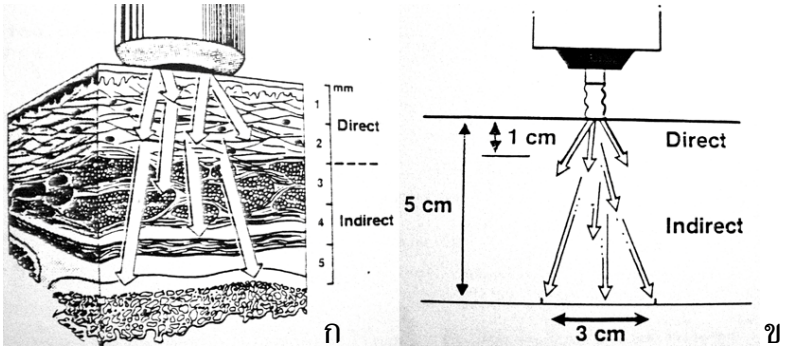
ในปี ค.ศ.1970 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกาแสงเลเซอร์ชนิด HeNe ได้รับการอนุญาตให้ใช้ในศูนย์สุขภาพต่างๆ ซึ่งแสง HeNe GaAlAs (gallium-allminum-arsenide) argon จัดเป็นแสงเลเซอร์ที่มองเห็นที่มีกำลังต่ำ มักใช้เป็นลำแสงชี้นำ (pointer) ให้กับเครื่องเลเซอร์กำลังสูง เช่น CO_2 laser ซึ่งลำแสงมองไม่เห็นในการทำผ่าตัด ดังนั้นเครื่องเลเซอร์ชนิด CO_2 จึงมักมีเลเซอร์ชนิด HeNe รวมอยู่ด้วยเพื่อเป็นตัวชี้จุดสำหรับทำผ่าตัด

ลักษณะเลเซอร์ที่ใช้ทางกายภาพบำบัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เครื่องเลเซอร์กำลังต่ำที่ให้ลำแสงอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ เลเซอร์ชนิด HeNe มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เครื่องเลเซอร์กำลังต่ำที่ให้ลำแสงอย่างเป็นช่วงๆ ได้แก่ เลเซอร์ชนิด GaAs มีความยาวคลื่น 904 นาโนเมตร (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 แสดงรังสีเลเซอร์ที่ใช้ทางกายภาพบำบัด (Low and Reed, 1994)

ชนิดเลเซอร์	ความยาวคลื่น(nm)	ย่าน/สี
HeNe	632.8	แดง
GaAlAs	650	แดง
(ชนิดเป็นช่วง ๆ)	750	แดง
	780	อินฟราเรด
	810	อินฟราเรด
	820	อินฟราเรด
	850	อินฟราเรด
	1300	อินฟราเรด
GaAlAs	860	อินฟราเรด
(ชนิดต่อเนื่อง)	904	อินฟราเรด

เครื่องเลเซอร์กำลังต่ำที่ให้ลำแสงอย่างต่อเนื่องนี้ให้พลังงาน 1 มิลลิวัตต์ ขณะส่องผ่านผิวหนังจะถูกเนื้อเยื่อดูดซับพลังงานอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาพบว่า หากใช้เทคนิคสัมผัสกับผิวหนังโดยตรงการดูดซับพลังงานดังกล่าวจะเกิดที่เนื้อเยื่อระดับความลึกประมาณ 2-5 มิลลิเมตรจากผิวหนัง (รูปที่17ก) อาจเนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงาน



รูปที่ 17 แสดงระดับความลึกของเลเซอร์ที่ผ่านผิวหนัง (ก) แบบสัมผัส และแบบปล่อยเป็นช่วงและไม่สัมผัส (ข)

เครื่องเลเซอร์กำลังต่ำที่ให้ลำแสงอย่างเป็นช่วง ๆมีความถี่ประมาณ 1-1000 เฮิรตซ์ (รอบ/นาที) ซึ่ง 1 รอบประกอบด้วยหนึ่งช่วงพักและหนึ่งช่วงการปล่อยรังสี ขณะส่องผ่านผิวหนัง พลังงานจะถูกดูดซับโดยเนื้อเยื่อที่ระดับความลึกประมาณ 1-5 เซนติเมตรจากผิวหนัง (รูปที่ 17ข) ซึ่งการใช้เลเซอร์ชนิดที่ปล่อยเป็นช่วง ๆโดยไม่สัมผัสกับผิวหนัง พลังงานที่ปล่อยออกจะสูญเสียไปกับอากาศและระยะห่างระหว่าง probe กับผิวหนัง จึงมักปรับความเข้มของลำแสงให้สูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานงานวิจัยที่สรุปได้อย่างชัดเจนว่า ความถี่ใดที่ให้ผลการ

รักษาดีที่สุด แต่พอสรุปได้ว่าเลเซอร์ที่มีความถี่สูงๆ (มากกว่า 1000 เฮิรตซ์) จะสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อเยื่อได้มากกว่า ทำให้เวลาที่ใช้สำหรับรักษาน้อยกว่า

8.การใช้เลเซอร์เพื่อการรักษาทางกายภาพบำบัด

โดยทั่วไประยะเวลาที่ใช้สำหรับรักษาหนึ่งๆนั้น มักจะพิจารณาจากปัจจัยหลัก 4 ประการ คือ กำลังส่งออกของแสงเลเซอร์จากเครื่อง ขนาดความกว้างของพื้นที่หน้าตัดของลำแสง ขนาดความกว้างของพื้นที่ที่จะรักษา และปริมาณพลังงานที่ต้องการให้กับเนื้อเยื่อนั้น ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้พลังงานจากแสงเลเซอร์กับเนื้อเยื่อเป็นจุดมีขนาดพื้นที่เท่ากับลำแสงประมาณ 1 จูล/ตารางเซนติเมตร ลำแสงมีมีพื้นที่หน้าตัด 0.07 ตารางเซนติเมตร และมีกำลังเฉลี่ย 1 มิลลิวัตต์ จะต้องใช้เวลาในการรักษาประมาณ 70 วินาทีเป็นต้น

8.1 การกระตุ้นการซ่อมแซมของแผล

แสงเลเซอร์ชนิด HeNe เป็นลำแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 630 นาโนเมตร ซึ่งมีกำลังส่งออกประมาณ 1.56 มิลลิวัตต์ สามารถทะลุลงไปในผิวหนังลึกประมาณ 0.5-1 เซนติเมตร ในพื้นที่หน้าตัดประมาณ 0.4 ตารางเซนติเมตร ระยะเวลาการรักษาสำหรับการซ่อมแซมมักใช้ประมาณ 300 วินาที วันเว้นวัน จากการศึกษาพบว่าพลังงานเพียง 1.2 จูล เท่านั้นที่ถูกดูดซับโดยเนื้อเยื่อในการรักษาแต่ละครั้ง ดังนั้นอุณหภูมิของเนื้อเยื่อบริเวณนั้นจึงไม่เพิ่มขึ้น

Kana และคณะได้ศึกษาผลของแสงเลเซอร์ชนิด HeNe ต่อการซ่อมแซมเนื้อเยื่อแผลเปิดของผิวหนังหนู (rat)โดยใช้แสงเลเซอร์ HeNe ความยาวคลื่น 514.5 นาโนเมตร พบว่าแผลผ่าตัดที่ฉายด้วยเลเซอร์ชนิด HeNe มีการเพิ่มปริมาณเนื้อเยื่อคอลลาเจน (collagen) อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม การใช้เลเซอร์ความยาวคลื่นดังกล่าวในแผลติดเชื้อเรื้อรังจึงช่วยให้แผลสมานได้อย่างรวดเร็ว

กลไกการซ่อมแผลจากแสงเลเซอร์นั้น จากการศึกษาเซลล์ผิวหนังที่เพาะเลี้ยงและในหนูทดลอง พบว่าหลังการฉายแสงเลเซอร์ชนิด Helium Neon แล้วจะมีการเพิ่มปริมาณการสะสมคอลลาเจน โดยพบว่ามีการเพิ่มระดับ type I และtype III procollagen m-RNA ในแผลของหนู 17 และ 28 วัน หลังฉายแสงเลเซอร์ แต่จำนวน thymidine ที่เข้าสู่เซลล์จะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่ง thymidine นี้จะสัมพันธ์กับการสังเคราะห์ DNA และการแบ่งเซลล์ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ procollagen จึงไม่ใช่ผลจากการเพิ่มจำนวนเซลล์ (cell proliferation)

Cameron (1999;317) กล่าวว่าโดยทั่วไป เลเซอร์กำลังต่ำช่วง 0.05-1 J/cm^2 มักใช้ระงับปวดระยะเฉียบพลัน ส่วนพลังงาน 40 J/cm^2 มักใช้ในกรณีปวดเรื้อรัง มีรายงานวามีผู้ใช้รังสีเลเซอร์ที่มีโดสสูงๆแต่ใช้ช่วงเวลารักษาสั้นๆ จะได้ผลดีกว่า ส่วนการใช้เลเซอร์เพื่อเร่งกระบวนการซ่อมแซมเนื้อเยื่อมักใช้ โดสที่ต่ำกว่าการระงับปวดแต่ใช้เวลามากกว่า อย่างไรก็ตามการรักษาด้วยเลเซอรีทางกายภาพบำบัด องค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกายังไม่ให้การับรอง

8.2 การลดปวด

แพทย์ชาวจีนได้ลองใช้ HeNe laser ส่องไปตรงจุดที่ใช้ฝังเข็มเพื่อระงับอาการปวดในช่องท้อง ซึ่งกลไกการลดปวดซึ่งอธิบายตามวิทยาศาสตร์ปัจจุบันยังไม่ทราบ ในประเทศอเมริกาได้มีการนำ HeNe laser มารักษาโรคปวดเรื้อรัง เช่น โรคกระดูกอักเสบ(osteoarthritis) และโรคเอ็นอักเสบ (tendenopathies) ในผู้ป่วยข้ออักเสบrheumatoid พบว่า cold laser สามารถลดปวดได้ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรังสีเอกซ์ของข้อ และไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของเลือด การลดปวดโดยรังสีเลเซอร์จะอยู่ได้นานกว่าการลดปวดด้วยการใช้แผ่นความร้อนเฉพาะที่ชนิดอื่น ๆ

การลดปวดด้วยรังสีเลเซอร์มักใช้เวลา 15-20 วินาที โดยใช้แบบต่อเนื่อง(continous) ขนาด 1 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร โดยวางห่างจากผิวหนังประมาณ0.5 เซนติเมตร ซึ่งรังสีดังกล่าวจะให้พลังงาน 10-14 มิลลิจูล ถ้าการรักษาได้รับการตอบสนองใน 3 ครั้งแรก มักจะใช้เวลารักษาประมาณ 10 ครั้ง

การใช้เลเซอร์ชนิด HeNe เพื่อลดปวดนั้นยังไม่ค่อยได้ผลมากนัก อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า มีระดับ 5HIA เพิ่มขึ้น หลังการฉายด้วยรังสีเลเซอร์ซึ่ง 5HIA นี้ เป็นสารในกลุ่มของ serotonin ซึ่งเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ร่างกายสร้างขึ้นเพื่อระงับปวด นอกจากนั้นยังพบว่า ค่า latency ของ superficial radial sensorynerve มีค่าสูงขึ้น มีผลในการลดความเร็วการนำกระแสประสาท ภายหลังการฉายด้วยเลเซอร์ ซึ่งก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลดความรู้สึกเจ็บปวด เนื่องจากความรู้สึกเจ็บปวดที่ไปยังสมองจะวิ่งช้าลง

9. เทคนิคการใช้เลเซอร์ทางกายภาพบำบัด

ลักษณะสำคัญของการใช้เลเซอร์พลังงานต่ำทางกายภาพบำบัดเป็นการประยุกต์ภายนอกร่างกายที่เป็นผิวหนัง โดยไม่มีการใช้เครื่องมือแทงทะลุผ่านเนื้อเยื่อของผิวหนัง การรักษาไม่ได้หวังผลในด้านความร้อนของเลเซอร์ และผลการรักษาที่นิยมใช้คือผลด้านการกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อ และผลในด้านการระงับปวดเฉพาะที่ผ่านผิวหนังบริเวณที่ฉายแสง เทคนิคที่ใช้สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 เทคนิค คือ เทคนิคไม่สัมผัสและเทคนิคสัมผัสกับผิวหนังบริเวณที่รักษา

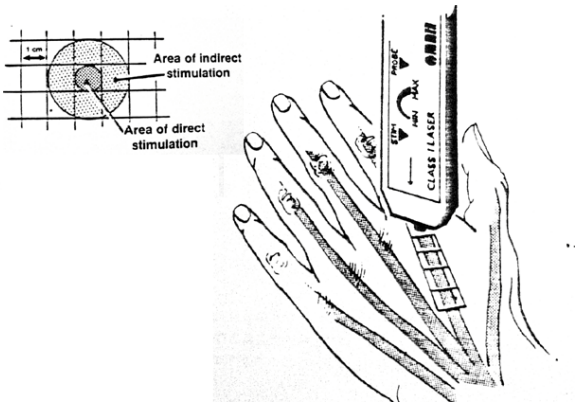
9.1. เทคนิคไม่สัมผัสกับผิวหนัง

เป็นเทคนิคการประยุกต์ใช้โดยหัว probe ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเลเซอร์ฉายลงบนผิวหนังโดยไม่มีการผัสกับผิวหนังบริเวณที่รักษา ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กับพื้นที่รักษาเป็นบริเวณกว้างและไม่จำเพาะ มักนิยมใช้กับพื้นที่ผิวที่ไม่สามารถใช้หัว probe สัมผัสกับผิวหนังได้โดยตรง ได้แก่ ผิวหนังที่มีแผลเปิด หรือผิวหนังที่มีลักษณะเป็นช่องหรือโพรง การใช้เทคนิคไม่สัมผัสนี้ มักใช้ความเข้มของรังสีที่มีขนาดมาก เนื่องจากปริมาณรังสีส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับอากาศ และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับผิวหนัง เทคนิคไม่สัมผัสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

9.1.1 เทคนิคกริด

ลักษณะลำแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านพื้นที่ผิวจะมีลักษณะเป็นจุด ดังนั้นการประยุกต์ใช้กับผิวหนังที่เป็นบริเวณกว้างจึงจำเป็นต้องฉายรังสีเป็นจุด ๆ เรียงเป็นลำดับเป็นแถว ๆจนกระทั่งครอบคลุมหรือเต็มพื้นที่บริเวณที่ต้องการรักษา เทคนิคกริดเป็นเทคนิคที่ประยุกต์ลำแสงเลเซอร์กับผิวหนังเป็นบริเวณกว้างแบบไม่จำเพาะ ดังรูปที่ 18

การประยุกต์เทคนิคดังกล่าวเริ่มตั้งแต่การประเมินขอบเขตพื้นที่บริเวณที่ต้องการรักษาทั้งหมด จากนั้นทำการแบ่งพื้นที่ดังกล่าวออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งในแต่ละส่วนควรใกล้เคียงกับพื้นที่หน้าตัดของลำแสง จากนั้นจัดให้ลำแสงตกตั้งฉากกับส่วนตรงกลางของพื้นที่ ที่ได้แบ่งไว้ ปล่อยลำแสง



รูปที่ 18 แสดงเทคนิคการใช้เลเซอร์แบบไม่สัมผัสแบบกริด

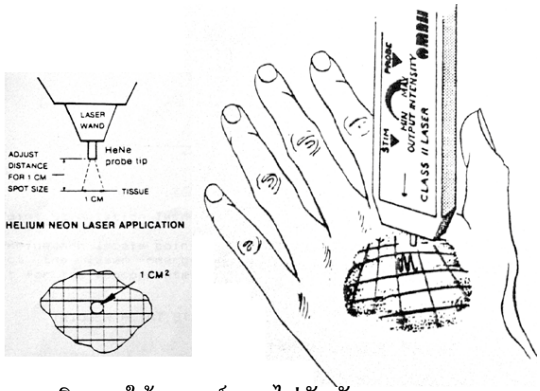
ตามเวลาที่ได้คำนวณไว้เป็นจุด ๆให้อยู่นิ่ง แล้วเปลี่ยนเป็นจุดอื่น ๆให้ครอบคลุมพื้นที่ที่รักษา ซึ่งทิศทางการเคลื่อนลำแสงอาจเคลื่อนทิศทางตามยาวหรือตามขวางก็ได้เป็นลำดับ

ไม่ควรมีทำเครื่องหมายใด ๆไว้บนผิวหนังที่ทำการฉายรังสี เนื่องจากอาจส่งผลให้พลังงานเลเซอร์ที่ฉายไปบริเวณผิวหนังนั้นลดลง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการรักษาเนื้อเยื่อที่อยู่ในระดับตื้น ๆ เช่น การกระตุ้นเส้นประสาทที่อยู่บริเวณผิวหนัง เป็นต้น

9.1.2. เทคนิคสแกน

เทคนิคสแกนเป็นเทคนิคที่ประยุกต์ลำแสงกับผิวหนังเป็นบริเวณกว้างเช่นเดียวกับเทคนิคกริด แตกต่างกันที่เทคนิคสแกนจะมีการส่ายลำแสงเคลื่อนที่ไปมาเป็นจังหวะในลักษณะสแกน ซึ่งการทำให้รังสีเกิดการส่ายไปมานั้นอาจทำด้วยมือโดยตรง หรือใช้ส่วนควบคุมการสะท้อนของกระจกที่สะท้อนลำแสงก็ได้ การควบคุมสามารถกำหนดทิศทางและจำนวนช่วงระยะห่างของการส่ายได้ดีกว่า (รูปที่ 19)

การประยุกต์ใช้เริ่มตั้งแต่การประเมินพื้นที่บริเวณที่จะรักษา จากนั้นแบ่งพื้นที่เป็นส่วน ๆ สำหรับสแกนลำแสงเลเซอร์เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ จัดหัว probe เลเซอร์ เหนือผิวหนังประมาณ 1 เซนติเมตร ทดลองส่าย probe ไปมาตามพื้นที่ที่รักษา จากนั้นเปิดเครื่องชนิดสแกน เพื่อฉายรังสีชนิดสแกนไปมาบริเวณพื้นที่ที่รักษาภายในเวลาที่ได้กำหนดไว้จนครอบคลุมพื้นที่

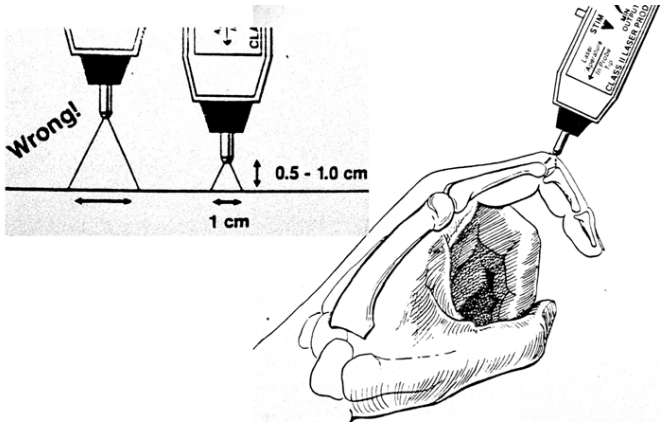


รูปที่ 19 แสดงเทคนิคการใช้เลเซอร์แบบไม่สัมผัสแบบสแกน

เครื่องเลเซอร์ทางกายภาพบำบัดโดยเฉพาะเลเซอร์ชนิด HeNe แสงเลเซอร์ที่ส่งออกมีกำลังต่ำการจัดให้หัว probe อยู่ห่างจากผิวหนังมากเกินไปอาจทำให้พลังงานของรังสีเลเซอร์ลดลง นอกจากนั้นเทคนิคนี้เหมาะสำหรับการรักษาแผลเปิดเรื้อรังชนิดต่าง ๆ เนื่องจากไม่สามารถใช้ หัว probe สัมผัสกับผิวหนังบริเวณแผลได้โดยตรง

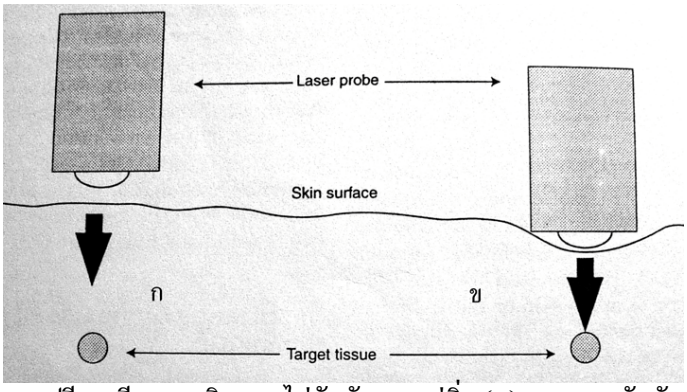
9.2. เทคนิคสัมผัสผิวหนังหรือการกระตุ้นเป็นจุด

เทคนิคแบบสัมผัสหรือการกระตุ้นเป็นจุด ๆ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้รังสีเลเซอร์เป็นจุด ๆ บริเวณพื้นที่เล็ก ๆหรือพื้นที่ที่ต้องการความจำเพาะมากกว่าเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นจึงมักนิยมใช้เทคนิคนี้เพื่อการลดปวดบริเวณจุดกดเจ็บ หรือจุดฝังเข็ม (รูปที่ 20)



รูปที่ 20 แสดงเทคนิคการใช้เลเซอร์แบบสัมผัสแบบแบบจุด

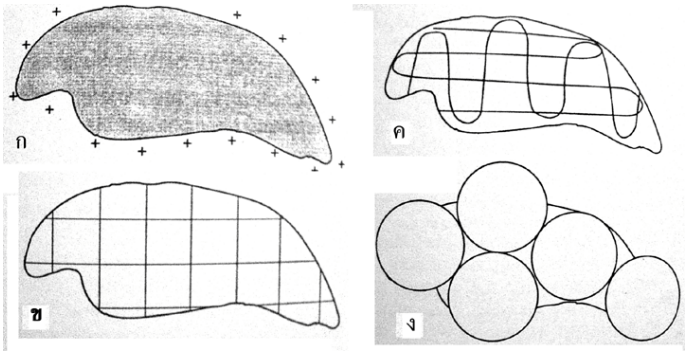
การประยุกต์ใช้ควรมีการกำหนดจุดที่จะรักษาก่อน จากนั้นจัดให้ลำแสงตกตั้งฉากลงจุดที่ต้องการรักษามักนิยมใช้หัว probe สัมผัสตรงกับจุดที่ต้องการรักษาโดยตรง ปล่อยแสงตามเวลาที่คำนวณไว้ แล้วเปลี่ยนจุดไปจนครบตามที่วางแผนการรักษา การใช้หัว probe ของเลเซอร์สัมผัสกับผิวหนังตรงกับจุดที่ต้องการฉายนั้น ในบางรายอาจออกแรงกดบริเวณดังกล่าวร่วมด้วย พบว่าจะได้ผลดี ทั้งนี้อาจเนื่องจากได้ผลด้านแรงกดด้วย (รูปที่ 21)



รูปที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคแบบไม่สัมผัสและอยู่นิ่ง (ก) และแบบสัมผัสแบบกด (ข)

เทคนิคกระตุ้นเป็นจุดเหมาะสำหรับลดปวด การประยุกต์ใช้บริเวณข้อต่อควรพับข้อเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านเข้าไปภายในข้อต่อได้สะดวกจะทำให้ผลการรักษามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (รูปที่ 20) ในกรณีที่ข้อต่อมีขนาดใหญ่และอยู่ลึกอาจมีความจำเป็นต้องใช้เวลาในการรักษามากกว่าปกติ และอาจจำเป็นต้องฉายรอบ ๆข้อให้ครอบคลุมพื้นที่อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการรักษาแบบผสมผสาน ตัวอย่างเช่น ในการรักษาแผลเปิดเรื้อรังเพื่อเร่งให้เกิดการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ มักนิยมใช้เทคนิคแบบสัมผัสบริเวณรอบ ๆแผลก่อน (ห่างจากปากแผลประมาณ 1 เซนติเมตร) แล้วจึงตามด้วยเทคนิคแบบกริดหรือสแกน ซึ่งมักนิยมใช้เครื่องเลเซอร์ชนิดไดโอดแบบให้แสงเป็นกลุ่ม (cruster) (รูปที่ 22)



รูปที่ 22 แสดงการใช้เทคนิคเลเซอร์แบบผสมผสานในการรักษาแผลเรื้อรังโดยเริ่มต้นในแบบสัมผัสแบบกดบริเวณรอบแผล (ก) และตามด้วยเทคนิคไม่สัมผัสแบบกริด (ข) หรือ เทคนิคไม่สัมผัสแบบสแกน (ค) อาจใช้เครื่องเลเซอร์ชนิด probe ที่มีไดโอดเป็นกลุ่ม (ง)

10. โดสและพลังงานที่ใช้สำหรับการรักษา

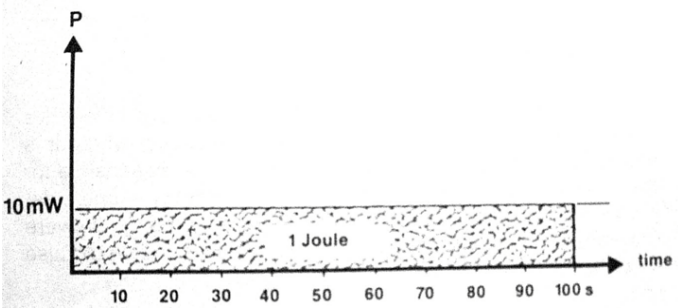
เป็นที่ทราบแล้วว่า พลังงานที่ปล่อยออกจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ทางกายภาพบำบัดมีหลายลักษณะ หลายรูปแบบ เช่น ไฟฟ้า แสง เสียง และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อป้องกันความสับสน ในที่นี้จะขอพิจารณาในรูปแบบ โดส (dose) ซึ่งหมายถึง จำนวนพลังงานที่ให้กับเนื้อเยื่อผู้ป่วยโดยผ่านทางเครื่องมือ ซึ่งพลังงานดังกล่าว อาจส่งผลโดยตรงต่อเนื้อเยื่อเช่น ไฟฟ้า หรืออาจมีการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานอื่นเช่น สนามไฟฟ้าจากเครื่องชอตเวฟไดอะเธอร์มีย์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เป็นต้น พลังงานมีหน่วยเป็นจูล หากคำนึงถึงเวลาที่ให้พลังงานกับเนื้อเยื่อหรืออัตราโดส มีหน่วยเป็น จูล/วินาที ซึ่งก็คือ วัตต์ นั่นเอง หรืออาจสัมพันธ์กับพื้นที่ที่ให้พลังงาน ดังนั้นพลังงานอาจอยู่ในหน่วยของ ฟลักซ์พลังงาน หรืออัตราโดสต่อหน่วยพื้นที่ หรือมีหน่วยเป็น จูล/ตารางเซนติเมตร/วินาที หรือ วัตต์/ตารางเซนติเมตร สำหรับเลเซอร์ พลังงานที่ให้กับเนื้อเยื่อจะอยู่ในรูปความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) มีหน่วยเป็น จูล/ตารางเซนติเมตร ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับพลังงานของแสงที่ปล่อยออกจากเครื่อง สัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ให้การรักษา และสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ที่ให้การรักษา ดังนั้นขณะวางแผนให้การรักษากรณีผู้ป่วยรายหนึ่ง ๆนั้น จึงควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆดังกล่าวมาแล้ว โดยพิจารณาดังนี้

10.1. พลังงานและกำลังส่งออกของรังสีเลเซอร์ (laser energy/power)

หากจะกล่าวถึงความแรงของเครื่องยนต์ มักจะกล่าวว่า เครื่องยนต์หรือรถยนต์คันนั้นมีกำลังแรงเท่าไร ซึ่งกำลังจะหมายถึง พลังงานในหนึ่งหน่วยเวลา หรือ จูล/วินาที ซึ่งก็คือวัตต์นั่นเอง กำลังส่งออกของรังสีเลเซอร์วัดเป็นวัตต์เช่นกัน เลเซอร์ 1 วัตต์ หมายถึงพลังงานเลเซอร์ที่ส่งออกอย่างสม่ำเสมอ 1 จูล ส่องนาน 1 วินาที

10.1.1 รังสีเลเซอร์ที่ปล่อยออกอย่างต่อเนื่อง

ในกรณีของเครื่องเลเซอร์กำลังต่ำที่ใช้ทางกายภาพบำบัด กำลังของแสงที่ปล่อยออกจากเครื่องที่ใช้ วัดเป็นหน่วยวัตต์ ตัวอย่างเช่น เลเซอร์เครื่องหนึ่งมีกำลังส่งประมาณ 10 มิลลิวัตต์ ก็หมายถึงเครื่องเลเซอร์นั้นให้พลังงาน 10 มิลลิจูล หรือ 0.01 จูลในทุก ๆวินาที อย่างต่อเนื่อง หากใช้เลเซอร์นี้ฉายลงบนเนื้อเยื่อเป็นเวลา 100 วินาที เนื้อเยื่อนั้นจะได้รับพลังงาน 1 จูล นั่นเอง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ พลังงาน 1 จูล คือ พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง กำลังและเวลาของเลเซอร์ (รูปที่ 23)

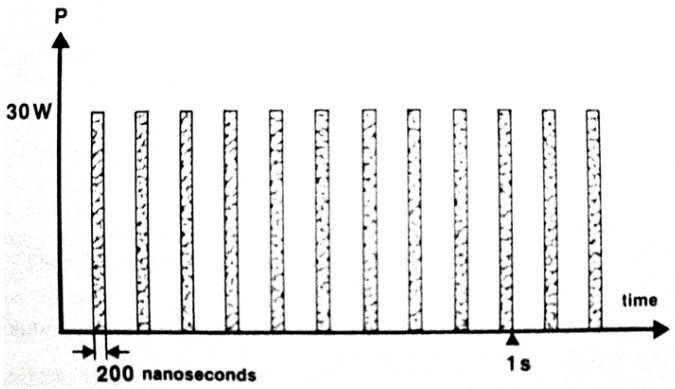


รูปที่ 23 แสดงกราฟของเลเซอร์กำลังต่ำชนิดที่ปล่อยพลังงานอย่างต่อเนื่อง

10.1.2 รังสีเลเซอร์ที่ปล่อยออกอย่างเป็นช่วง ๆ

กรณีเลเซอร์ที่ปล่อยพลังงานอย่างเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่อง หรือเรียกว่า pulse laser มักเป็นไดโอดเลเซอร์ ซึ่งพลังงานที่ให้กับเนื้อเยื่อควรจะเป็นเท่าไร พิจารณาได้ดังนี้

ก่อนจะพิจารณา ควรทำความเข้าใจกับคำว่า พลังงานที่ปล่อยออกจากเครื่องเลเซอร์แบบเป็นช่วง ๆ ประกอบด้วยช่วงที่มีแสงปล่อยออก ช่วงที่ไม่มีแสงปล่อยออก และความเร็วหรืออัตราของการปล่อยแสงเป็นต้น ตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อกำลังหรือพลังงานเฉลี่ยที่เนื้อเยื่อจะได้รับ หากช่วงเวลาที่ปล่อยแสงนาน (ใช้เวลามาก) และช่วงพักสั้น (ใช้เวลาน้อย) พลังงานเฉลี่ยจะมีค่าสูง หรือหากอัตราเร็วของการปล่อยแสงมาก (ปล่อยเร็ว) พลังงานเฉลี่ยของแสงย่อมมีค่าสูงกว่าปล่อยช้า เป็นต้น (รูปที่ 24)



รูปที่ 24 แสดงกราฟของเลเซอร์กำลังต่ำชนิดที่ปล่อยพลังงานเป็นช่วง ๆ

เครื่องเลเซอร์ปัจจุบันมักบอกขนาดของกำลังส่งออกสูงสุดมีหน่วยเป็นมิลลิวัตต์ และสามารถปรับกำลังส่งออกเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของกำลังส่งออกสูงสุด เช่น 10, 25, 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

การพิจารณาพลังงานสุทธิของเลเซอร์ที่ให้กับเนื้อเยื่อควรพิจารณาช่วงเวลาปล่อยแสง ช่วงเวลาที่ไม่มีแสง อัตราเร็วของการปล่อยแสง ตัวอย่างเช่น เครื่องเลเซอร์เครื่องหนึ่งมีกำลัง 30 วัตต์ ที่อัตราการปล่อยแสง (ความถี่) 10 ครั้งในหนึ่งวินาที โดยช่วงเวลาของการปล่อยแสงมีค่าประมาณ 200 นาโนวินาที ให้กับเนื้อเยื่อ ถามว่าเนื้อเยื่อจะได้รับพลังงานกี่จูล คำนวณได้ดังนี้

พลังงานต่อ 1 pulse = $30W \times 200\times10^{-9}$ sec = 6×10^{-6} จูล

พลังงานต่อ 1 วินาที = 6×10^{-6} x 10 pulses = 6×10^{-5} จูล

ในทางปฏิบัติมักมีคำถามว่าเนื้อเยื่อจะได้รับพลังงานเฉลี่ยเท่าไร ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

กำลังเฉลี่ย = พลังงาน/เวลา

= พลังสูงสุดแต่ละ pulse x ความกว้างของ pulse x ความถี่ของpulse

= พื้นที่รวมของแต่ละ pulse ในรูปนั่นเอง

ในทางปฏิบัติเครื่องเลเซอร์บางเครื่องไม่สามารถปรับค่าความถี่ได้ แต่สามารถปรับช่วงเวลาปล่อยแสง และช่วงเวลาไม่ปล่อยแสงซึ่งก็สามารถคำนวณหาค่าความถี่หรืออัตราของการปล่อยแสงใน

หนึ่งวินาทีได้เช่นกัน ดังรูปที่ 25 ซึ่งก็คือส่วนกลับของคาบ โดยในหนึ่งคาบประกอบไปด้วยช่วงปล่อยแสงและช่วงพักอย่างละหนึ่งครั้งนั่นเอง

10.2. ความหนาแน่นของกำลังส่องสว่าง (irradiance, power density)

หมายถึงกำลัง (พลังงาน/เวลา) ส่งออกของเครื่องเลเซอร์ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งในกรณีที่ใช้เทคนิคแบบสัมผัสร่วมกับแรงกด กำลังส่งออกของเครื่องเลเซอร์จะไม่สูญเสียให้กับอากาศ พลังงานทั้งหมดจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อ หากใช้เทคนิคที่ไม่สัมผัสพลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปกับอากาศ (ตามกฎกำลัง 2 ผกผันของแสง)

10.3.ความหนาแน่นของพลังงาน (energy density)

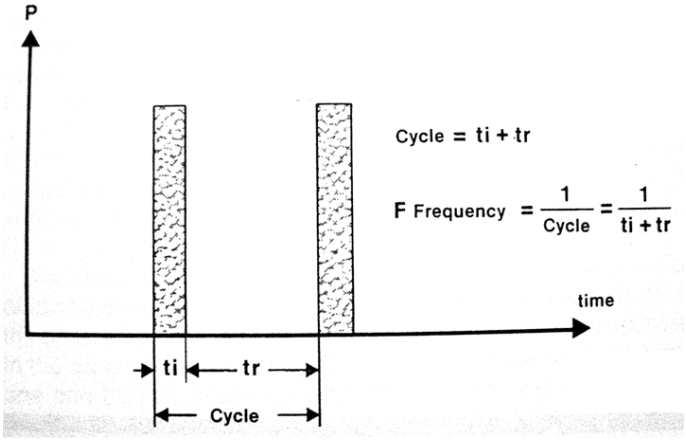
การจะบอกว่าเครื่องเลเซอร์ให้พลังงานมากหรือน้อยเพียงใด ควรจะพิจารณาถึงพื้นที่หน้าตัดของรังสีที่ส่งออกและพื้นที่ที่ลำแสงนั้นฉายไปหรือพื้นที่สำหรับรักษา ผลการรักษาด้วยรังสีเลเซอร์ขึ้นกับปริมาณของแสงที่ส่องลงไปที่ผิวหนัง ดังนั้นก่อนรักษาควรทราบขนาดของพื้นที่แผลที่รักษาก่อนว่ากว้างกี่ตารางเซนติเมตร ควรทราบกำลังของเลเซอร์ที่ส่งออก และควรทราบปริมาณพื้นที่หน้าตัดของรังสีที่ตกกระทบ เพื่อใช้คำนวณปริมาณพลังงานที่แผลได้รับ จากสมการ

ความหนาแน่นของพลังงาน (DE) = จำนวนพลังงานที่ส่งออก (E) / พื้นที่ (S)

$$E = DE \times S$$

ดังนั้นหากต้องการฉายรังสีเลเซอร์ที่มีความหนาแน่น 4 จูล/ตารางเซนติเมตร ลงบนพื้นที่ 3 ตารางเซนติเมตร ควรปรับให้เครื่องเลเซอร์ปล่อยพลังงานส่งออกเท่ากับ 4x3 = 12 จูล เป็นต้น

ในทำนองเดียงกันหากพื้นที่ที่รักษานั้นมีขนาดเพียง 0.1 ตารางเซนติเมตร หากต้องใช้เครื่องที่มีพลังงาน 4 จูล/ตารางเซนติเมตร จำเป็นต้องปรับให้เครื่องเลเซอร์ปล่อยพลังงานส่งออกเพียง 0.4 เป็นต้น



รูปที่ 25 แสดงการคำนวณความถี่ของเลเซอร์ที่ปล่อยเป็นช่วง ๆ

ในด้านการรักษาด้วยเลเซอร์ ค่าความหนาแน่นของพลังงาน เป็นตัวบ่งบอกถึงขนาดของโดสที่เหมาะสมสำหรับการรักษา ตารางที่ 4 แสดงพลังงานเฉลี่ยสำหรับการระงับปวดและบรรเทาการอักเสบของเนื้อเยื่อ พลังงานที่ใช้รักษาอาจเพิ่มหรือลดตามความเหมาะสมของการรักษาได้ ในทางปฏิบัติการคำนวณหาความหนาแน่นของพลังงานที่ใช้รักษาอย่างง่าย ๆ มักใช้ขนาดของพื้นที่ที่จะรักษาหารด้วยพลังงานที่ส่งออกจากตัวเครื่อง (ซึ่งเครื่องส่วนใหญ่จะบอกค่าขนาดพลังงานส่งออก)

ตารางที่ 4 แสดงพลังงานของเลเซอร์เพื่อการรักษาทางกายภาพบำบัด (Cameron, 1999)

การรักษา		Energy density (J/cm^2)
การระงับปวด:	ปวดกล้ามเนื้อ	2-4
	ปวดข้อ	4-8
บรรเทาการอักเสบ	ระยะเฉียบพลัน	1-6
	ระยะเรื้อรัง	4-8

11. การคำนวณโดสของรังสีเลเซอร์

เป็นที่ทราบแล้วว่า ผลการรักษาของเนื้อเยื่อขึ้นกับปริมาณของพลังงานรังสีที่ส่งผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อ ดังนั้นประยุกต์ใช้รังสีเลเซอร์เพื่อการรักษาคำนวณได้จากโดสของรังสี ซึ่งสมการสำคัญมีดังต่อไปนี้

energy density (J/cm^2) = power (W) x time (s) / surface (cm^2)

energy density (J/cm^2) = energy (J) / surface (cm^2)

time (s) = energy density x surface / power

11.1 ตัวอย่างการคำนวณ pulse laser

เลเซอร์ชนิดไดโอดเครื่องหนึ่ง มีกำลังส่งออกสูงสุด 40 วัตต์ pulse duration 200 ns และความถี่ 2000 Hz พื้นที่หน้าตัดของ probe 0.1 ตารางเซนติเมตร หากต้องการรักษาผู้ป่วยที่มีปัญหาปวดข้อเข่าโดยรอบ 20 จุด โดยแต่ละจุดให้ได้รับพลังงาน 5 จูล/ตารางเซนติเมตร จงคำนวณพลังงานที่ใช้ไปทั้งหมดของรังสีเลเซอร์นี้

กำลังเฉลี่ยของเลเซอร์ = 200ns x 2000Hz x 40W

= 0.016 W

เวลาที่ใช้รักษา = $\frac{5J/cm^2 \times 0.1cm^2}{0.016W}$

= 31.25 s/จุด

ใช้เวลารักษาทั้งหมด = 31.25 s/จุด x 20 จุด

= 625 s

พลังงานที่ใช้ทั้งหมด = 0.016W x 625s
= 10 J

12 ข้อบ่งชี้สำหรับการใช้เลเซอร์ทางกายภาพบำบัด

1. symptomatic relief and treatment of pain
2. reduced pain in OA joint/RA
3. acceleration wound healing and การสร้าง granulation tissue
4. reduction of edema
5. reduction of inflammation
6. stimulate peripheral nerve regeneration (immediately after injury)

ทั้งนี้ขึ้นกับ ชนิดของโรค เทคนิคการรักษา ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการรักษา ขนาดพื้นที่ ขนาดลำแสง และการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เสริมต่าง ๆด้วย

หลักการปฏิบัติทั่วไป เริ่มรักษาด้วยเลเซอร์ทุกวัน เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน โดยมีการประเมินผลก่อนและหลังการรักษาทุกครั้ง หากการรักษาไม่ได้ผลหรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ภายหลังจากการรักษาแล้ว 4-5 ครั้ง ควรยุติการรักษาด้วยเลเซอร์ (หากมั่นใจว่าเทคนิคการรักษานั้นถูกต้อง)

13.ข้อห้ามและข้อควรระวัง

13.1 ข้อควรระวังสำหรับการใช้แสงเลเซอร์ทางกายภาพบำบัด (Camerone, 1999; Kitchen, 2002)

1.ส่องเข้านัยน์ตาโดยตรง

เนื่องจากแสงเลเซอร์อาจทำอันตรายต่อดวงตาและเรตินา ดังนั้นขณะให้การรักษาควรสวมแว่นตากันแสงเลเซอร์ให้กับผู้ป่วยและผู้รักษา แว่นตากันแสงควรมีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันแสงเลเซอร์ในย่านความยาวคลื่นที่ถูกต้อง เพื่อป้องกันแสงเลเซอร์สะท้อนเข้านัยน์ตาโดยบังเอิญ ดังนั้นห้องที่ให้การรักษาไม่ควรมีกระจกหรือวัตถุผิวเรียบมันที่สามารถสะท้อนแสงได้

2. หลังฉายรังสีเพื่อการรักษา (radiotherapy) ภายใน 4-6 เดือน

ไม่ควรใช้แสงเลเซอร์ในผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วยการฉายรังสีเพื่อการรักษา (radiotherapy) เนื่องจากเนื้อเยื่อบริเวณดังกล่าวมีความไวกว่าปกติ เสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งและไหม้พอง

3. บริเวณที่เลือดออก

เชื่อว่ารังสีเลเซอร์มีส่วนช่วยให้เส้นเลือดเกิดการขยายตัว ดังนั้นจึงไม่ควรฉายลงบริเวณที่เลือดออก หรือเลือดออกง่ายเพราะจะกระตุ้นให้เกิดเลือดออก

4. บริเวณผิวหนังที่ไวต่อแสง

บริเวณผิวหนังที่ไวต่อแสง หรือผู้ที่แพ้แสงหรือมีปฏิกิริยาไวต่อแสง การใช้แสงเลเซอร์ฉายบริเวณผิวหนังดังกล่าวควรใช้ด้วยความระวัง

5. ฉายโดยตรงที่บริเวณต่อมไร้ท่อ

มีรายงานว่ารังสีเลเซอร์อาจส่งผลการทำงานระดับเซลล์ในวงกว้าง ดังนั้นจึงไม่ควรฉายโดยตรงบริเวณต่อมไร้ท่อ (endocrine gland)

13.2 ข้อห้ามใช้สำหรับแสงเลเซอร์ทางกายภาพบำบัด (Cameron, 1999; Kitchen 2002)

1. ผู้ป่วยที่เป็นโรคลมชัก (epilepsy)
2. ผู้ที่มีไข้สูง
3. ผู้ป่วยมะเร็ง
4. บริเวณหลังหรือท้องของผู้ที่มีครรภ์และระยะมีประจำเดือน
5. บริเวณอัณฑะ
6. บริเวณ epiphyses ของเด็ก
7. ผู้ป่วยที่สับสน ภาวะโรคจิต
8. บริเวณที่สูญเสียความรู้สึกรับรู้
9. บริเวณที่มีการติดเชื้อ
10. บริเวณ sympathetic ganglian, vagus nerve, cardiac region
11. ผู้ที่มีภาวะโรคหัวใจ

บรรณานุกรม

1. สมชาย รัตนทองคำ. ไฟฟ้าแสงเสียงและแม่เหล็กไฟฟ้าทางกายภาพบำบัด. ขอนแก่น: ภาควิชากายภาพบำบัด มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2544.

2. Cameron MH. Physical agents in rehabilitation. Philadelphia: WB Sauders. 1999.

3. Kitchen S. and Bazin S. Electrotherapy evidence-based practice. Edinburgh: Churchill Livingstone. 2002.

4. Shankar K. and Randall KD. Therapeutic physical modalities. Philadelphia: Hanley and Belfus. 2002.

5. Low J. and Reed A. Physical principles explained. London: Butterworth Heinemann. 1994.