

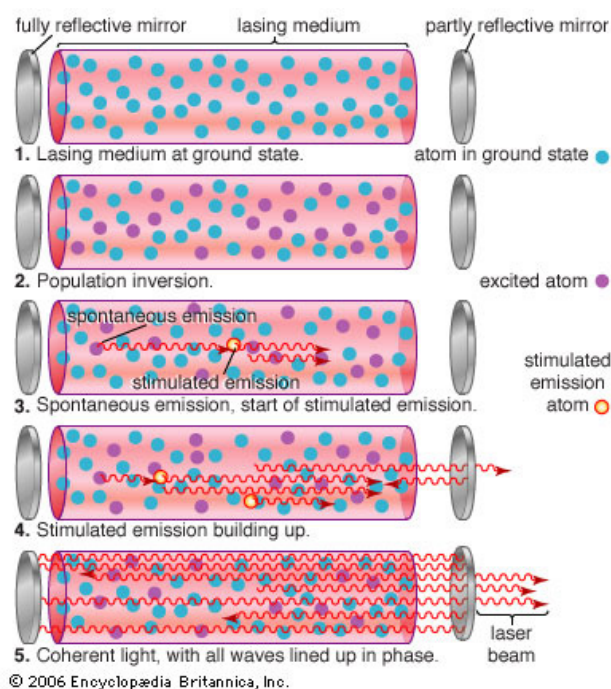
เลเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ แหล่งกำเนิดแสงแห่งอนาคต

สาคร รีมแจ่ม¹

มีคำถามอยู่สองคำถามที่ผู้เขียนมักถูกถามอยู่เสมอ คือ “เลเซอร์อิเล็กทรอนิกส์” คืออะไร และต่างจาก “เลเซอร์ปกติ” อย่างไร การตอบคำถามทั้งสองนี้ โดยให้เห็นภาพชัดเจนและให้เกิดความเข้าใจเป็นความท้าทายอย่างหนึ่ง ซึ่งในบทความนี้ผู้เขียนพยายามใช้คำอธิบายง่าย ๆ โดยหลีกเลี่ยงการแสดงที่มาของสมการบางสมการที่ยากซับซ้อน และสำหรับผู้สนใจด้านทฤษฎีของเลเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะศึกษาศาสตร์ฟิสิกส์ได้อีก เอกสารอ้างอิงที่แนะนำไว้ท้ายบทความ โดยมีสิ่งที่น่าสนใจในเชิงทฤษฎีทางฟิสิกส์ประการหนึ่ง นั่นคือเราสามารถใช้อิเล็กตรอนคลาสิกทางด้านทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า มาอธิบายกระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งแตกต่างจากเลเซอร์ที่ผลิตจากอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอม ที่จำเป็นต้องใช้กลศาสตร์ควอนตัมในการอธิบาย แต่ไม่ว่าจะเป็นเลเซอร์แบบปกติหรือเลเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ สิ่งที่มีเหมือนกันคือสมบัติเด่นของการเป็นแสงเลเซอร์ นั่นคือ มีความเป็นอาพันธ์ (coherence) มีความสว่างสูง (high brightness) มีลำแสงขนาดเล็กที่มีความขนานโดยไม่มีการเบี่ยงเบนหรือบานออก และมีความเป็นแสงเอกรงค์ (mono-chromatic light) ที่ประกอบไปด้วยแสงความยาวคลื่นเดียว ด้วยคุณลักษณะเฉพาะที่พิเศษกว่าแสงชนิดอื่นดังที่กล่าวมานี้ เลเซอร์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายในปัจจุบัน ทั้งทางการแพทย์ การสื่อสารคมนาคม การสร้างภาพ 3 มิติ หรือภาพโฮโลกราฟี (holography) การวัดและวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุหรือสสาร ตลอดจนการตรวจสอบและควบคุมการผลิตชิ้นงานทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

การค้นคว้าวิจัยด้านเลเซอร์นั้น ได้เริ่มขึ้นมานานกว่าห้าสิบปีแล้ว ซึ่งถือเป็นก้าวใหม่ด้านเทคโนโลยีแสงของมนุษยชาติในยุคนั้น โดยการผลิต **แสงเลเซอร์แบบปกติ** ดังแสดงใน รูปที่ 1 นั้น ใช้หลักการการเพิ่มความเข้มของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจาก

อิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอมที่มีการเปลี่ยนสถานะทางควอนตัมหรือเปลี่ยนระดับพลังงาน โดยมีการใช้โพรงแสง (optical cavity) เป็นอุปกรณ์ช่วยในการสะท้อนให้รังสีกลับเข้าไปกระตุ้น (stimulate) ให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) แล้วกลับคืนมาสู่สถานะพื้น (ground state) พร้อม ๆ กัน ซึ่งจะทำให้โฟตอนที่อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาในขณะที่เปลี่ยนระดับพลังงาน มีเฟสตรงกัน ทำให้ได้แสงอาพันธ์ที่มีความเข้มสูง ด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้จึงเป็นที่มาของคำว่า **เลเซอร์** หรือ **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)** ซึ่งการผลิตเลเซอร์โดยใช้หลักการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ มีขีดจำกัดในการผลิตแสงที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา และไม่สามารถผลิตแสงที่มีความเข้มมาก ๆ ได้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเลเซอร์แบบปกติ [1]

¹อาจารย์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

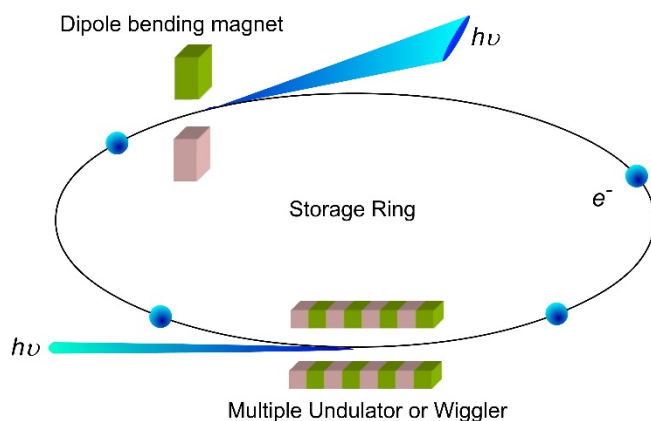
จากเครื่องเร่งอนุภาคสู่แหล่งกำเนิดแสง

การนำเครื่องเร่งอนุภาคมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถผลิตแสงคุณภาพดีที่มีพลังงานและความสว่างสูงมาก การผลิตแสงโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคนั้นเริ่มขึ้นจากการค้นพบในปี ค.ศ. 1945 [2] ว่ามีรังสีเกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงาน สัมพันธ์ภาพมีการเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กสองขั้ว (dipole bending magnet) โดยลำรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจะมีลักษณะเป็นกรวยพุ่งตรงไปข้างหน้าด้วยมุมเปิด (opening angle) θ ที่สัมพันธ์กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนคือ $\theta \propto 1/\gamma$ โดยที่ $\gamma = E/mc^2$ คือ สัดส่วน โลเร็นตซ์ (Lorentz factor) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงพลังงานรวม (E) ในหน่วยของพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน (mc^2) หลังจากการค้นพบนี้ได้มีความสนใจในการพัฒนาเครื่องซินโครตรอน ซึ่งแต่เดิมเป็นเครื่องเร่งเชิงวงที่ใช้ในการศึกษาฟิสิกส์อนุภาคและฟิสิกส์พลังงานสูง ไปเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อนำรังสีไปประยุกต์ใช้งาน โดยมีวัตถุประสงค์ในการผลิตรังสีจากการเลี้ยวโค้งของอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บ (storage ring) ซึ่งแสงที่ได้จากเครื่องซินโครตรอนในยุคเริ่มต้นนี้มีช่วงความยาวคลื่นกว้างที่สามารถเลือกใช้งานได้ตามย่านความถี่ที่ต้องการ มีโครงสร้างของรังสีที่แน่นอนและมีความเข้มมากเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในยุคนั้น [3]

ประวัติศาสตร์หน้าใหม่ของวงการเครื่องเร่งอนุภาคได้เริ่มขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1950 เมื่อมีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 1 โดยเน้นการผลิตรังสีจากการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กสองขั้วให้มีสเปกตรัมของรังสีที่แน่นอน และมีอายุการใช้งานลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้ผลิตรังสีที่นานขึ้น อีกประมาณยี่สิบปีต่อมาในทศวรรษที่ 1970 ได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 2 ขึ้น โดยใช้หลักการการบังคับให้อิเล็กตรอนเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กสองขั้วหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้มีส่วนที่ผลิตรังสีสำหรับสร้างเป็นสถานีทดลองหลายสถานี เครื่องซินโครตรอนของ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีพลังงาน 1.2 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ ก็เป็นแหล่งกำเนิดแสงในรุ่นนี้ [4]

ในช่วงทศวรรษที่ 1980 ได้มีการพัฒนาชุดแม่เหล็กสองขั้วที่มีขั้วสลับกันไป-มา เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับบังคับให้

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ “ส่ายซิกแซกแบบเป็นคาบที่แน่นอน” ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรังสีที่ได้จากการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กสองขั้วปกติแล้ว จะสามารถผลิตรังสีที่มีความสว่างมากขึ้น เนื่องจากมีมุมเปิดของรังสีที่แคบกว่าทำให้โฟตอนรวมกันอยู่อย่างหนาแน่น (ดังแสดงใน รูปที่ 2) แม่เหล็กแบบพิเศษนี้เรียกว่า แม่เหล็กวิกเกิลเลอร์ (wiggler magnet) และแม่เหล็กอันดูลเลเตอร์ (undulator magnet) โดยแรงจากสนามแม่เหล็กวิกเกิลเลอร์สามารถเบี่ยงเบนอิเล็กตรอนได้ด้วยมุมเบี่ยงเบนที่มากกว่า และด้วยคาบที่ยาวกว่าแม่เหล็กอันดูลเลเตอร์ ทำให้ลำรังสีที่ผลิตได้โดยใช้แม่เหล็กวิกเกิลเลอร์มีมุมเปิดของกรวยรังสี $\theta > 1/\gamma$ ส่วนลำรังสีที่ผลิตได้จากแม่เหล็กอันดูลเลเตอร์จะมีมุมเปิด $\theta \leq 1/\gamma$ ดังนั้นรังสีจากแม่เหล็กอันดูลเลเตอร์จึงมีความสว่างมากกว่าแม่เหล็กสองขั้วและแม่เหล็กวิกเกิลเลอร์เนื่องจากมีการรวมกันของโฟตอนอยู่ในมุมเปิดที่แคบกว่า



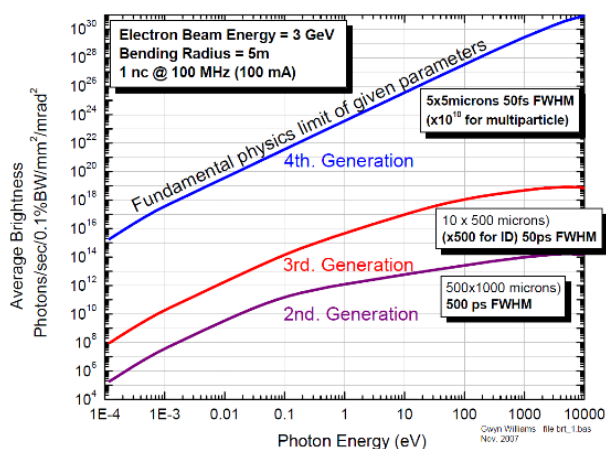
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการผลิตรังสีโดยใช้แม่เหล็กสองขั้ว (dipole bending magnet) และแม่เหล็กอันดูลเลเตอร์ (undulator) หรือแม่เหล็กวิกเกิลเลอร์ (wiggler) โดยที่ $h\nu$ แทนพลังงานของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อ ν คือความถี่ของรังสี และ h คือค่าคงที่พลังค์ (Planck's constant) [5]

ความสำเร็จในการสร้างแม่เหล็กทั้งสองแบบนี้ นำไปสู่การพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 ซึ่งเริ่มต้นในทศวรรษที่ 1990 โดยเน้นการใช้แม่เหล็กวิกเกิลเลอร์และแม่เหล็กอันดูลเลเตอร์ เป็นอุปกรณ์แทรกในการผลิตรังสี รวมทั้งได้พัฒนาการผลิตและการเร่งลำอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้น (มากกว่า 2.5-3 ล้าน

อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป) ตลอดจนเน้นการผลิตลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กที่มีการลู่อเข้า ลู่ออกน้อย เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนมีความหนาแน่นมาก และทำให้สามารถผลิตรังสีที่มีความสว่างสูงมากขึ้น โดยแสงซินโครตรอนที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 มีความสว่างสูงกว่ารุ่นที่ 2 ประมาณ 10^3 - 10^5 เท่า (ดังแสดงใน รูปที่ 3) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา และประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 ในด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลายกระจายไปในหลายประเทศ

อย่างไรก็ตามพลังงานของรังสีตลอดจนความสว่าง และสมบัติด้านโครงสร้างทางเวลา (time structure) ของแสงที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปศึกษาโครงสร้างระดับอะตอมหรือโมเลกุลเดี่ยว ในสารตัวอย่างที่ไม่สามารถทำให้อยู่ในสภาพตกผลึกได้ อีกทั้งยังไม่สามารถนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงหรืออันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ ในระดับเฟมโตวินาที (10^{-15} วินาที) จึงได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 4 ขึ้นโดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า การผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ (free-electron lasers: FELs) ซึ่งได้รับการเสนอขึ้นครั้งแรกโดย John M.J. Madey ในปี ค.ศ. 1970 [6] และเครื่องกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระเครื่องแรกได้รับการพัฒนาขึ้น ณ มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1976 โดยใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน 24 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 ได้มีการผลิตเลเซอร์ความยาวคลื่น 3.5 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน 43 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ และระบบโพรงแสงสำหรับสะสมพลังงานของรังสี ซึ่งนับว่าเป็นการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระความถี่อินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared) เป็นครั้งแรกในโลก อีกทั้งยังเป็นการเปิดศักราชใหม่ของแหล่งกำเนิดแสง ที่เปลี่ยนจากการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงวง ไปสู่การใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ในการผลิตรังสีตั้งแต่ย่านอินฟราเรดไปจนถึงย่านรังสีเอ็กซ์ จากรูปที่ 3 จะเห็นว่ารังสีที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่ 4 มีความสว่างสูงกว่ารุ่นที่ 3 ประมาณ 10^7 - 10^{11} เท่า และเป็นแสงอาพันธ์ที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (pulse) สั้น ๆ ในระดับเฟมโตวินาที (มีความยาวพัลส์ประมาณ 0.3 ไมโครเมตร) ซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระใน

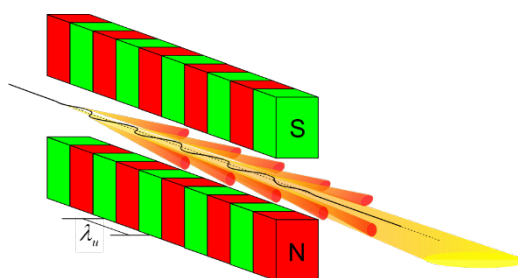
สถาบันวิจัยด้านเครื่องเร่งอนุภาคชั้นนำหลายแห่งอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 แผนภาพเปรียบเทียบความสว่างเฉลี่ยของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงรุ่นต่าง ๆ [7]

การผลิตรังสีโดยใช้แม่เหล็กอันดูลเตอร์

เพื่อให้เห็นภาพของกระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระอย่างชัดเจน ในหัวข้อนี้ผู้เขียนขอเริ่มจากการอธิบายถึงลักษณะการเคลื่อนที่และการแผ่รังสีของอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ซึ่งมีลักษณะของขั้วแม่เหล็กสองขั้วที่มีทิศลับไป-มาดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่และการแผ่รังสีของอิเล็กตรอนภายในสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ [7]

เมื่ออิเล็กตรอนมวล m และประจุ e ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงจนมีความเร็วสัมพัทธภาพ $\vec{v}$ เคลื่อนที่เข้าไปในสนามของแม่เหล็กอันดูลเตอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นคาบแบบคลื่นไซน์

$$\vec{B} = B_0 \sin(k_u z) \hat{y} \quad (1)$$

เมื่อ B_0 คือความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด และ $k_u = 2\pi / \lambda_u$ โดยที่ λ_u คือความยาวคาบของแม่เหล็กอันดูลเตอร์ และเมื่อ กำหนดให้สนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์มีทิศไปตามแกน y จะมี แรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force) $\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$ มากระทำต่อ อิเล็กตรอนในแนวแกน x ที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ส่ายแบบ เป็นคาบที่แน่นอนด้วยความเร่ง

$$\ddot{\vec{r}} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{-e(\vec{v} \times \vec{B})}{\gamma m} \quad (2)$$

เมื่อ $\vec{r}$ คือเวกเตอร์การกระจัดของอิเล็กตรอน ดังนั้น จะได้ ความเร่งและสมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกน x เป็น

$$\ddot{x} = -\frac{q\dot{z}}{\gamma m} B_0 \sin(k_u z) \quad (3)$$

เมื่อให้แกน z เป็นแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามแนวท่อ เครื่องเร่ง และใช้กฎลูกโซ่เปลี่ยนสมการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับ เวลา ให้เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับระยะกระจัดใน แนว z จะได้ $\ddot{x} = (d^2 x / dz^2)(dz / dt)^2 = x'' \dot{z}^2$ และเนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก จึงสามารถประมาณ ความเร็ว ($\dot{z}$) ของอิเล็กตรอนตามแนวการเคลื่อนที่ z ว่ามีค่าสูงกว่าความเร็วในแนวตั้งฉากกับ z มากๆ นั่นคือ $|\dot{z}| \approx \beta c \gg |\dot{x}|$ โดยที่ $\beta = |\dot{r}| / c$ เมื่อ c คือความเร็วแสง ดังนั้นจะได้สมการ ของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกน x เป็น

$$x'' + \frac{eB_0}{\gamma m \beta c} \sin(k_u z) = 0 \quad (4)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการที่ (4) โดยการแทนเงื่อนไขเริ่มต้นเป็น $x'(z=0) = eB_0 / \gamma m \beta c k_u$ และ $x(z=0) = 0$ จะได้

$$x' = \frac{eB_0}{\gamma m \beta c k_u} \cos(k_u z) \quad (5)$$

ดังนั้น สมการนี้แสดงรูปร่างของเส้นทางการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ว่า เป็นลักษณะส่าย ในแนวแกน x ด้วยคาบที่แน่นอน (ดังที่วาดใน รูปที่ 4) กล่าวคือ

$$x = \frac{K}{\beta \gamma k_u} \sin(k_u z) \quad (6)$$

โดยที่ K คือ พารามิเตอร์การเบนของอันดูลเตอร์ (deflecting parameter) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติของอันดูลเตอร์ดังนี้

$$K = \frac{eB_0}{mck_u} = 0.934 B_0 [\text{Tesla}] \lambda_u [\text{cm}] \quad (7)$$

ในการเบี่ยงเบนของแต่ละคาบการเคลื่อนที่ อิเล็กตรอนจะ ปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยความยาวคลื่นฮาร์มอนิกมูลฐาน [8]

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \theta^2 \gamma^2 \right) \quad (8)$$

ซึ่งจะเห็นว่า ความยาวคลื่นแสงที่ผลิต ขึ้นอยู่กับพลังงานของ อิเล็กตรอน (γ) ความยาวคาบของอันดูลเตอร์ (λ_u) และ ความ เข้มของสนามแม่เหล็ก (B_0) ดังนั้นการปรับเปลี่ยน ความยาวคลื่นของแสงสามารถทำได้โดยการปรับโครงสร้างของ สนามแม่เหล็ก หรือโดยการปรับพลังงานของอิเล็กตรอน และเมื่อ มีการออกแบบและสร้างให้ระยะห่างระหว่างขั้วอันดูลเตอร์มี ความสัมพันธ์กับคาบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน รังสีที่ อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาจะมีการแทรกสอดแบบเสริมกันที่ ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง ทำให้ความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นนั้น มีค่าสูงมาก

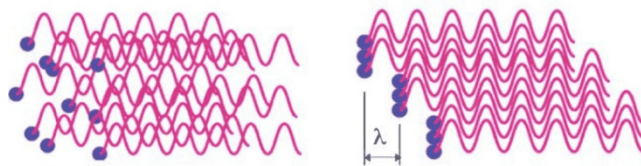
จากรังสีอันดูลเตอร์ไปสู่เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ

ในแหล่งกำเนิดเลเซอร์ปกติการเปลี่ยนระดับพลังงาน แบบไม่ต่อเนื่องของอะตอมสามารถปลดปล่อยรังสีได้บางความ ยาวคลื่นเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่ไม่มี ข้อจำกัดที่มาจากระดับพลังงานยึดเหนี่ยวในอะตอม เนื่องจาก ลำอิเล็กตรอนที่นำมาผลิตเลเซอร์ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน

อิสระพลังงานสูงที่เคลื่อนที่เบี่ยงเบนแบบเป็นคาบในสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ แล้วปลดปล่อยโฟตอนออกมาในทิศทางตรงไปข้างหน้า (ดังแสดงใน รูปที่ 4) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทุกช่วงความยาวคลื่น (ตามความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้) ดังนั้น เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระจึงมีข้อได้เปรียบตรงที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นเลเซอร์ได้ โดยการควบคุมความถี่ของการเคลื่อนที่แบบคาบของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจเป็นการปรับพลังงานของอิเล็กตรอน การปรับความยาวคาบ หรือปรับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (ดังแสดงในสมการที่ (7) และ (8)) ด้วยสมบัติเช่นดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเครื่องกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระขึ้น ในหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ (X-FELs) เพื่อประยุกต์ใช้รังสีในการศึกษาโครงสร้างเล็ก ๆ ในระดับอะตอมและการศึกษาอันตรกิริยาในช่วงเวลาเฟมโตวินาที [9] และเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรด (IR-FELs) เพื่อประยุกต์ใช้รังสีในด้าน สเปกโตรสโกปี (spectroscopy) และการสร้างภาพ (imaging) [10-12]

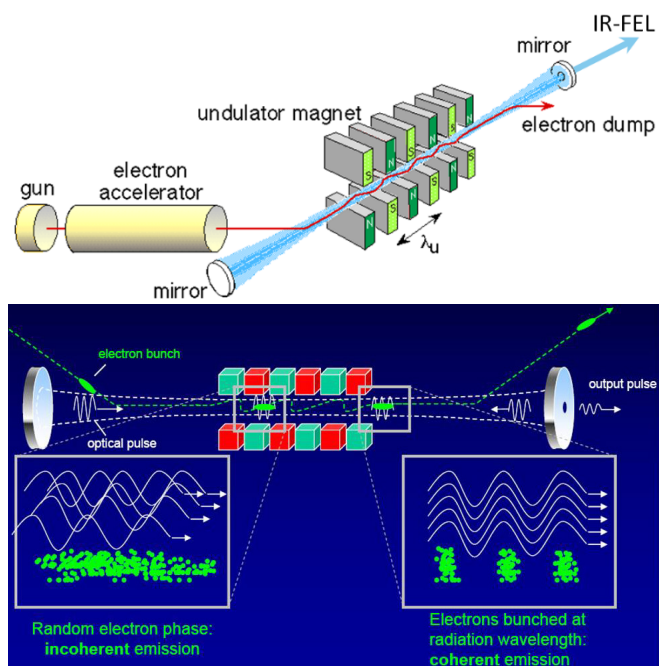
เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระใช้หลักการผลิตแสงอาพันธ์จากอิเล็กตรอนพัลส์สั้น ซึ่งในกรณีที่พัลส์อิเล็กตรอนยาวกว่าความยาวคลื่นของรังสี อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยเฟสที่แตกต่างกัน ทำให้ได้รังสีที่ไม่เป็นแสงอาพันธ์เนื่องจากรังสีบางส่วนเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน โดยกำลังของแสง (P) ที่ผลิตได้ในกรณีนี้จะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอน (N) ส่วนในกรณีที่พัลส์อิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นของรังสี อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยเฟสที่ตรงกัน ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (ดังแสดงใน รูปที่ 5) และกำลังของแสงในกรณีนี้จะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอนกำลังสอง (N^2) ทำให้ได้แสงอาพันธ์ที่มีความเข้มสูงมาก

การผลิตรังสีของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ปกติ นั้น เป็นรังสีที่แผ่ออกมาเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระทำจากแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กโดยไม่มีการกระตุ้นจากสนามอื่น จึงเรียกชื่อรังสีชนิดนี้ว่า รังสีที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยรังสีแบบไม่อาพันธ์ (รูปซ้าย) และแบบอาพันธ์ (รูปขวา) [13]

ยิ่งกว่านั้น การเพิ่มความเข้มของรังสีโดยใช้กระบวนการกระตุ้น (stimulated process) สามารถทำได้โดยการใช้โพรงแสง เช่นเดียวกับกรณีของเลเซอร์แบบปกติ โดยเรียกแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบนี้ว่า “เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบออสซิลเลเตอร์ (oscillator free-electron laser)” ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอน แม่เหล็กอันดูลเตอร์ และโพรงแสง (ดังแสดงใน รูปที่ 6) ในกระบวนการผลิตเลเซอร์แบบนี้ รังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนจะถูกกักอยู่ในโพรงแสง และมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากรังสีกับอิเล็กตรอนตัวอื่นในขณะ ที่เคลื่อนที่ใน สนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ แล้วทำให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวในพัลส์เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบมอดูเลชัน (energy modulation) นั่นคือ อิเล็กตรอนบางตัวสูญเสียพลังงานและบางตัวได้รับพลังงานเพิ่ม ทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่างกันเคลื่อนที่แบบคาบด้วยระยะทางที่ต่างกัน ในสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงหรือต่ำกว่า ค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในพัลส์มากเกินไป อยู่ห่างจากศูนย์กลางของพัลส์ออกไป ทำให้เกิดลักษณะของพัลส์ย่อยที่เรียกว่าการเกิด microbunching ดังแสดงใน รูปที่ 6 (รูปล่าง) โดยความยาวของพัลส์ย่อยที่เกิดขึ้นนี้จะสั้นกว่าความยาวคลื่นของรังสีที่ต้องการผลิต ดังนั้น คลื่นแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวในพัลส์ย่อยนี้จะมีเฟสตรงกันและเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ทำให้ได้แสงอาพันธ์ความเข้มสูงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยเรียกแสงที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า รังสีซินโครตรอนเนื่องจากการถูกกระตุ้น (stimulated synchrotron radiation)



รูปที่ 6 แผนผังแสดงระบบและกระบวนการการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบออสซิลเลเตอร์ [13, 14]

ความเข้มของเลเซอร์ที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ สัมพันธ์กับอัตราการขยายกำลัง (power gain) ของรังสี นั่นคือถ้าอัตราการขยายกำลังมากกว่าอัตราการสูญเสียรังสีไปในโพรงแสงแล้วจะมีการสะสมกำลังของรังสีจนเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว รังสีที่ผลิตได้จะมีความเป็นอาพันธ์และความเข้มสูงมากจนเทียบได้กับความเข้มของแสงเลเซอร์แบบปกติ จากทฤษฎีเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ (free-electron laser theory) ในเอกสารอ้างอิง [15-18] แนะนำว่าอัตราการขยายกำลัง หรือ power gain (g) ของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะของลำอิเล็กตรอนและแม่เหล็กอันดูลเตอร์ดังนี้

$$g = \frac{16\pi}{\gamma} \frac{\lambda N_u^2 L_u j \xi f_b^2(\xi)}{1.7 \times 10^4} \quad (9)$$

โดยที่ γ คือสัดส่วนลอเรนซ์ λ คือความยาวคลื่นของรังสี, N_u คือจำนวนคาบของอันดูลเตอร์ L_u คือความยาวของอันดูลเตอร์ j คือความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน และ f_b คือปัจจัยคู่ควบ (coupling factor) ซึ่งสำหรับแม่เหล็ก

อันดูลเตอร์แบบระนาบ (planar undulator) จะมีค่า $f_b(\xi) = J_0(\xi) - J_1(\xi)$ โดยที่ $\xi = K^2 / 2(1 + K^2)$ ส่วน J_0 และ J_1 คือฟังก์ชันเบสเซลอันดับที่ศูนย์และอันดับที่หนึ่งตามลำดับ และสำหรับแม่เหล็กอันดูลเตอร์แบบขดกันหอย (helical undulator) $f_b(\xi) = 1$ จากสมการที่ (8) และ (9) จะเห็นว่าเมื่อต้องการเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสั้น หรือ λ น้อย เช่น รังสีเอ็กซ์ นั้น γ ต้องมีค่ามาก นั่นคือพลังงานของอิเล็กตรอนต้องมีค่าสูง รวมทั้งต้องมีความหนาแน่น j ของกระแสอิเล็กตรอนสูงด้วย

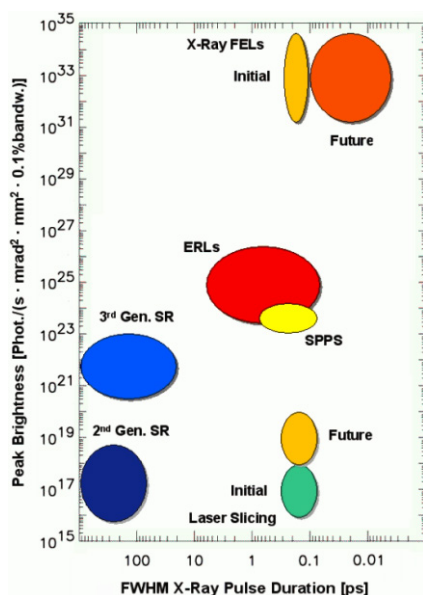
นอกจากนี้สภาพสะท้อน (reflectivity) ของกระจกในโพรงแสงสำหรับรังสีในย่านที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าย่านแสงขาวถึงอัลตราไวโอเลต (visible-ultraviolet: VUV) มีค่าต่ำ ทำให้ไม่สามารถใช้โพรงแสงในการสะท้อนรังสีกลับไปมาได้ จึงได้มีการพัฒนาระบบผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระสำหรับย่าน VUV และ X-ray ขึ้น โดยการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากรังสีที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ ไปทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนตัวอื่นโดยไม่ใช้โพรงแสง แล้วทำให้เกิดพัลส์ย่อยภายในแนวการเคลื่อนที่ (แกน z) ของอิเล็กตรอนในแม่เหล็กอันดูลเตอร์เพียงรอบเดียว [8, 19-20] ซึ่งการผลิตเลเซอร์แบบนี้เรียกว่า “Self-Amplified Stimulated Emission (SASE)”

เมื่อพิจารณาประเภทของการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของอัตราการขยายกำลังของรังสี นั่นคือแบบอัตราการขยายต่ำ (low-gain FEL) ซึ่งมักใช้กระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบออสซิลเลเตอร์ และนิยมใช้ผลิตเลเซอร์ย่านอินฟราเรดโดยใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำในระดับสิบล้านอิเล็กตรอนโวลต์ และแบบอัตราการขยายสูง (high-gain FEL) ซึ่งมักใช้กระบวนการผลิตเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระแบบ SASE และแบบอื่น ๆ โดยนิยมใช้ในการผลิตเลเซอร์ย่าน VUV และย่าน X-ray ซึ่งลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากในระดับหลายร้อยล้านอิเล็กตรอนโวลต์จนถึงกิกะอิเล็กตรอนโวลต์

เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์

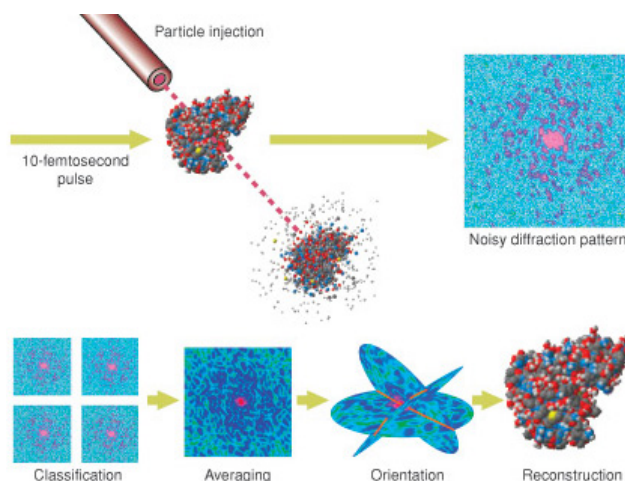
ในปัจจุบัน การพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ทั้งพลังงานต่ำ (soft X-ray) และ

พลังงานสูง (hard X-ray) ได้เน้นการใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงานสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อมีการเบี่ยงเบน เช่น ในกรณีเครื่องเร่งเชิงวง โดยได้มีการพัฒนาเครื่องเร่งประสิทธิภาพสูงที่แหล่งกำเนิดสามารถผลิตอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นของประจุมากและมีการกระจายพลังงานน้อย รวมทั้งใช้ท่อเร่งที่มีเกรเดียนต์สนามไฟฟ้าสูง ๆ โดยการทำท่อเร่งเป็นแบบตัวนำยิ่งยวดเพื่อลดการสูญเสียกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนไปในผนังของท่อเร่ง ซึ่งเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์จะมีกำลังของรังสีสูงกว่ารังสีเอ็กซ์ที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 มากกว่า 10^{10} เท่า โดยมีความยาวพัลส์ของแสงเลเซอร์ในระดับเฟมโตวินาทีซึ่งสั้นกว่าความยาวพัลส์ของแสงซินโครตรอนถึงประมาณพันเท่า (ดังแสดงใน รูปที่ 7) ทำให้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างเล็ก ๆ ในระดับอะตอมโดยใช้เทคนิคการเกิดลวดลายการแทรกสอดของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และการศึกษาการเกิดอันตรกิริยา ในระดับอะตอมหรือโมเลกุลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้โดยใช้เทคนิค pump-probe experiment [5, 9, 21]



รูปที่ 7 แผนภาพเปรียบเทียบความสว่างและความยาวพัลส์ของรังสีเอ็กซ์ที่ผลิตได้จากเครื่องเร่งชนิดต่าง ๆ เช่น ERLs คือ Energy Recovery Linacs, ส่วน SPPS คือ Super Proton-Antiproton Synchrotron, และ SR คือ Synchrotron Radiation) [22]

ตัวอย่างของการศึกษาโครงสร้างชีวโมเลกุลในระดับอะตอม โดยการใช้เทคนิคการเกิดลวดลายการแทรกสอดของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ได้แสดงใน รูปที่ 8 โดยได้มีการทดลองฉีดสารชีวโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยอะตอมขนาดต่างๆ เข้าไปในชุดทดลองที่มีการฉายแสงเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่มีความยาวพัลส์ 10 เฟมโตวินาที โฟตอนในเลเซอร์ที่เคลื่อนที่ผ่านอะตอมในโมเลกุลทำให้เกิดลวดลายการแทรกสอดแบบ 2 มิติขึ้นที่ฉากรับภาพ และเมื่อนำภาพลวดลายการแทรกสอดหลายภาพมาวิเคราะห์ประกอบกัน จะทำให้สามารถสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างในโมเลกุลด้วยความละเอียดในระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ถึงอังสตรอม (10^{-10} เมตร)



รูปที่ 8 ภาพแสดงการจำลองการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างระดับอะตอมโดยใช้เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ [23]

ด้วยสมบัติพิเศษดังที่กล่าวมาจึงมีพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอ็กซ์ขึ้น ณ สถาบันวิจัยด้านเครื่องเร่งอนุภาคชั้นนำของโลกในหลายประเทศ ตัวอย่างของเครื่องเลเซอร์ที่สามารถผลิตรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นมากในระดับนาโนเมตรถึงอังสตรอมที่พัฒนาขึ้น ณ สถาบันวิจัยระดับชั้นนำของโลกใน 3 ทวีปหลัก ได้แก่ เครื่อง European X-ray free-electron laser (European XFEL) ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี เครื่อง Linac Coherent Light Source (LCLS) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเครื่อง SPring-8 Compact SASE Source (SCSS) ประเทศญี่ปุ่น

เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรด

อินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1 ไมโครเมตร ถึง 3 มิลลิเมตร ซึ่งแบ่งออกได้เป็นย่านอินฟราเรดช่วงใกล้ (near infrared: NIR) ย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (mid infrared: MIR) และย่านอินฟราเรดช่วงไกล (far infrared: FIR) โดยรังสีอินฟราเรดตั้งแต่ย่าน MIR ไปถึง FIR เป็นช่วงความถี่ที่ตรงกับความถี่การสั่นของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสารที่มีความสำคัญต่อการศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เคมี เนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ ดังนั้นโมเลกุลของสารจึงดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ที่มีความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมในโมเลกุลนั้น ด้วยสมบัติเฉพาะที่ให้ทั้งห้วงสั้น ความสว่างสูง และมีความสามารถในการปรับจูนความถี่ (frequency tunability) ของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ เราจึงสามารถนำเลเซอร์ในย่านความถี่นี้ไปใช้ในการทดลองวิจัยใหม่ๆ เพื่อศึกษาการสั่นหรือการหมุนของสารชีวโมเลกุลที่มีความถี่ในย่านนี้ ซึ่งทำให้สามารถบ่งบอกถึงโครงสร้างของโมเลกุลและกระบวนการทำงานของโครงสร้างนั้น รวมทั้งลักษณะการเคลื่อนที่เชิงสัมพัทธ์ของกลุ่มอะตอมที่โยงใยกับการทำหน้าที่ในส่วนต่างๆ ของโมเลกุล

งานวิจัยของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในย่านอินฟราเรดจึงมีความหลากหลายและมีลักษณะเป็นสหศึกษาโดยเน้นการใช้งานด้านการตรวจสอบ ตรวจจับ หรือวิเคราะห์ โดยใช้เทคนิคทางด้านสเปกโตรสโกปี (spectroscopy) และการถ่ายภาพ (imaging) เนื่องจากสามารถใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารได้โดยไม่ทำลาย (non-destructive) เพราะรังสีอินฟราเรดอยู่ในย่านพลังงานที่ค่อนข้างต่ำเกินกว่าที่จะทำลายพันธะทางเคมี หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (ionization) ของโมเลกุล ซึ่งจะเกิดคุณประโยชน์หลายสาขาทั้งภาคอุตสาหกรรม เช่น การตรวจคุณภาพเคมีคอนกรีต การตรวจสอบอาหารและสิ่งปนเปื้อนภาคสุขภาพการแพทย์และเภสัชศาสตร์ เช่น การวินิจฉัยโรคหรือการตรวจสอบยา ภาควิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม เช่น การศึกษาการตรวจจับแก๊สพิษ แม้กระทั่งภาคความมั่นคงของชาติ เช่น การตรวจจับอาวุธ วัตถุระเบิดและสารเสพติด

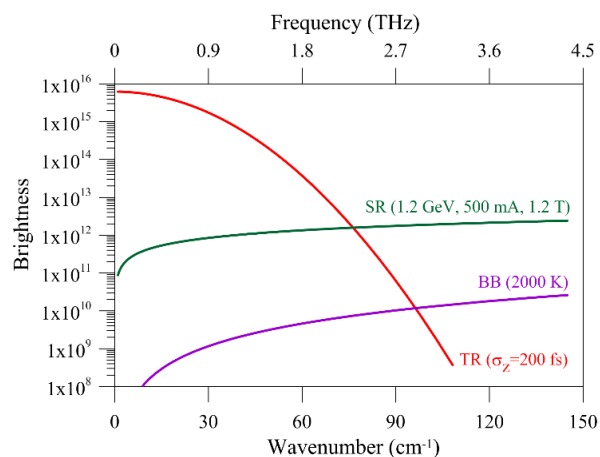
ด้วยสมบัติพิเศษที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายดังกล่าว รวมทั้งเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในย่าน

อินฟราเรดมีขนาดกะทัดรัด และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างและพัฒนาค่อนข้างต่ำ เนื่องจากใช้เลเซอร์พลังงานต่ำ ในระดับสิบล้านอิเล็กตรอน โวลต์เท่านั้น (ประมาณ 10 ถึง 40 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์) จึงได้มีการพัฒนาเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในย่านความถี่ช่วงนี้ขึ้นทั้งในสถาบันวิจัยใหญ่ๆ และห้องปฏิบัติการวิจัยขนาดเล็กหลายแห่ง เช่น เครื่อง ELBE IR-FELs ของสถาบันวิจัย Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) ณ เมือง Rossendorf เครื่อง Fritz Haber Institute THz-FEL ของสถาบัน Max Planck ณ เมือง Berlin ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี เครื่อง KU-FEL ของมหาวิทยาลัย Kyoto University ประเทศญี่ปุ่น และ เครื่อง FELIX FLARE และ FELICE ของมหาวิทยาลัย Radboud ประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นต้น

การพัฒนาเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระในประเทศไทย

ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการพัฒนาการผลิตรังสีอินฟราเรดเพื่อใช้ในการวิจัยทางด้าน infrared spectroscopy และ imaging โดยใช้รังสีจากเครื่องซินโครตรอน [4] แต่ยังไม่สามารถผลิตรังสีความถี่ต่ำในย่าน FIR หรือเทราเฮิรตซ์ (THz) ได้ จึงเป็นแรงจูงใจที่คณะวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ของ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งผู้เขียนเป็นสมาชิกอยู่ มีความสนใจที่จะศึกษาการพัฒนาเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรดขึ้น โดยเน้นการผลิตเลเซอร์ในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่สามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน และมุ่งเน้นการปรับปรุงจากอุปกรณ์ของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนที่มีอยู่เดิม รวมทั้งสร้างหรือพัฒนาอุปกรณ์บางส่วนที่จำเป็นขึ้นมาใหม่ โดยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนในปัจจุบันสามารถใช้ผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสุดประมาณ 10-15 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ โดยมีความยาวพัลส์ประมาณ 200 เฟมโตวินาที และเมื่อนำไปผลิตรังสีโดยวิธีการทรานสิชัน (transition radiation) จะได้รังสีในช่วงความถี่ประมาณ 0.2 ถึง 3 THz [24] โดยจะเห็นได้จากผลการคำนวณในกราฟของรูปที่ 9 ที่บ่งชี้ว่ารังสีที่ผลิตได้ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 2 THz จะมีความสว่างสูงกว่ารังสีซินโครตรอนที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ประมาณ 10 ถึง 10,000 เท่า

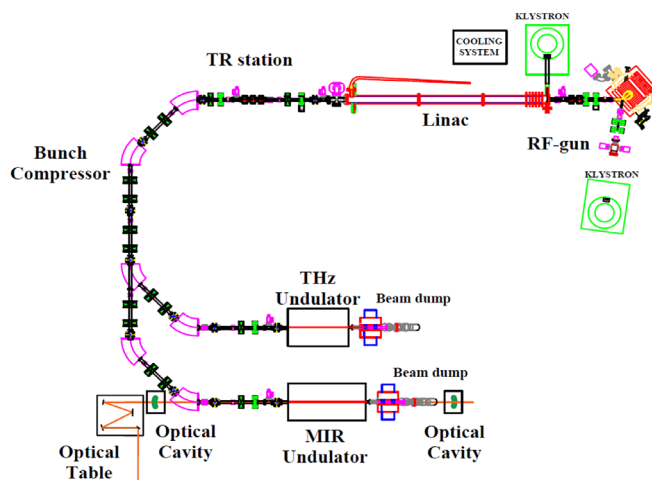
การขยายประสิทธิภาพของระบบเครื่องเร่งอนุภาคให้เป็นเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระดังแสดงใน รูปที่ 10 จะสามารถใช้ผลิตรังสีที่มีความเข้มสูงกว่าการผลิตรังสีแบบเดิมหลายเท่า รวมทั้งจะสามารถปรับความถี่ของรังสีให้ผลิตได้ครอบคลุมทั้งช่วง MIR และ FIR หรือ THz อีกด้วย โดยเครื่องกำเนิดเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่ทางทีมวิจัยกำลังพัฒนาขึ้นมานี้ จะเป็นเครื่องแรกในประเทศไทยและประเทศในแถบสมาคมอาเซียน



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลการคำนวณความสว่างของรังสีที่ผลิตได้จากการแผ่รังสีของวัตถุดำอุณหภูมิ 2000 เคลวิน (blackbody radiation: BB) รังสีซินโครตรอนที่ผลิตได้จากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 ล้าน อิเล็กตรอน โวลต์ (synchrotron radiation: SR) และ รังสีทรานสิชันที่ผลิตได้จากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ (transition radiation: TR)

การพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่คนในวงการเครื่องเร่งอนุภาคเรียกกันว่า “แหล่งกำเนิดแสงแห่งอนาคต หรือ next generation light source” ขึ้นในประเทศ จะเป็นการสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีคุณประโยชน์มากในหลากหลายสาขาคงที่ได้กล่าวมาแล้ว อีกทั้งยังจะเป็นการสร้างและพัฒนาองค์ความรู้ด้านเครื่องเร่งอนุภาคและการผลิตรังสี ซึ่งเป็นศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีการบูรณาการนำความรู้ทั้งทางด้านฟิสิกส์ ทัศนศาสตร์ คณิตศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสรรค์นวัตกรรมด้านการออกแบบ การพัฒนาเครื่องมือ การประกอบสร้างและการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคและเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นอุปกรณ์และ

เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง อีกทั้งยังเป็นลดการนำเข้าอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ราคาแพงจากต่างประเทศ



รูปที่ 10 แผนภาพแสดงระบบเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ ในระหว่างการพัฒนาและปรับปรุงขึ้นมาจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค [25]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาญกิจ กันฉ่อง และคุณปรีชญ์ บุญพรประเสริฐ สำหรับการแก้ไข ตรวจทานคำแนะนำและการปรับปรุงบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Stimulated emission. [Art]. In Encyclopedia Britannica, <http://www.britannica.com/EBchecked/media/90017/Stimulated-emission-in-a-laser-cavity>
- [2] J. P. Blewett, “Radiation Losses in the Induction Electron Accelerator”, Phys. Rev. 69, 87 (1946).
- [3] H. Winick, “Fourth generation light sources”, IEEE Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Vancouver, B.C., Canada, 37 (1997).
- [4] <http://www.slri.or.th/th>

- [5] C.-Li. Dong et al., Soft-x-ray spectroscopy probes nanomaterial-based device, <http://spie.org/x15809.xml>
- [6] J. M. J. Madey, "Stimulated emission of Bremsstrahlung in a periodic magnetic field", J. Appl. Phys. 42, 1906 (1971).
- [7] <http://photon-science.desy.de>
- [8] P. Schmüser, M. Dohlus and J. Rossbach, "Ultraviolet and Soft X-Ray, Free-Electron Lasers", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [9] C. Pellegrini and J. Stöhr, "X-ray free-electron lasers-principles, properties and applications", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 500, 33 (2003).
- [10] G.P. Gallerano et al., "Phase-sensitive reflective imaging device in the mm-wave and Terahertz regions", J. Infrared Millim. Terahertz Waves 30, 1351 (2009).
- [11] P.C. Ashworth et al., "Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer", Opt. Exp. 17, 12444 (2009).
- [12] A.J. Fitzgerald et al., "Terahertz pulsed imaging of human breast tumors", Radiology 239, 533 (2006).
- [13] <http://www.psi.ch/swissfel/research>
- [14] <http://www.stfc.ac.uk/ASTeC/17452.aspx>
- [15] J. C. Marshall "Free Electron Lasers", Mac Millan Publishing Company, New York, 1985.
- [16] P. Luchini and H. Motz, "Undulators and Free-Electron Lasers", Clarendon Press, Oxford, 1990.
- [17] C. A. Brau, "Free-Electron Lasers", Academic Press, Oxford, 1990.
- [18] G. Dattoli, A. Renieri, A. Torre, "Lectures in Free-Electron Laser Theory and Related Topics", World Scientific, Singapore, 1995.
- [19] G. Margaritondo, P. R. Ribic, "A simplified description of X-ray free-electron lasers", J. Synchrotron Rad. 18, 101 (2011).
- [20] P. Elleaume et al., "Design considerations for a 1 Å SASE undulator", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 455 503 (2000).
- [21] P.G. O'Shea and H.P. Freund, "Free-electron lasers: Status and applications", Science 292, 1853 (2001).
- [22] H.-D. Nuhn, "From storage rings to free electron lasers for hard x-rays", J. Phys.: Condens. Matter 16, S3413 (2004).
- [23] <https://www.llnl.gov/str/JulAug05/Aufderheide.html>
- [24] C. Thongbai et al., "Optimization of longitudinal electron beam properties for Linac-based infrared free-electron Laser at Chiang Mai University", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 587, 130 (2008).
- [25] S. Supakul, S. Chunjarean, C. Thongbai, S. Rimjaem, "Optimization of longitudinal electron beam properties for Linac-based infrared free-electron Laser at Chiang Mai University", Energ. Proc. 34, 912 (2013).