لیزرهای الکترون آزاد و کاربرد آن‌ها

اسماعیل لشنی، کارشناس ارشد فیزیک اتمی و مولکولی
مریم ایزدبخش، دبیر فیزیک ناحیهٔ یک شهری

چارلز تاونز (Charles Hard Townes)
دکتر چارلز تاونز به‌همراه چند نفر دیگر در سال ۱۹۵۳ اصول تولید میزر را به‌دست آوردند و تئودور میمان (Theodore H.Maiman) در سال ۱۹۶۰ اولین پرتو لیزر را، که لیزر پتی یاقوت بود، ساخت.

جان مدی (John M.J.Madey)
جان مدی و همکارانش در سال ۱۹۷۵ توانستند لیزر الکترون آزاد co۲ با طول موج ۱۰/۶μm (در ناحیهٔ مرئی) را تقویت کنند. اولین کسی که اصطلاح لیزر الکترون آزاد را رواج داد جان مدی بود.

مقدمه

در لیزر الکترون آزاد (FEL)[1] هدف آن است که الکترون‌ها با سرعتی نسبیتی از شتاب‌دهنده خارج شوند و پس از ورود به محیط برهم‌کنش، قسمتی از انرژی جنبشی خود را به انرژی تابش الکترومغناطیسی تبدیل کنند و باعث تقویت یک موج الکترومغناطیسی شوند که نتیجهٔ آن تولید باریکهٔ همدوس لیزر است.

لیزر الکترون آزاد یک چشمهٔ نور قابل تنظیم با کارآیی زیاد است و عملاً روی هر طول موجی تنظیم می‌شود، در توان‌های بالا کار و البته نور همدوس تولید می‌کند. اما لیزرهای کوانتومی فقط در طول موج‌هایی که خاص گذارهای انرژی مواد فعال آن‌هاست می‌توانند نور تولید کنند. برخلاف لیزرهای متداول که نوعاً فقط تا چند درصد انرژی دریافتی را به نور تبدیل می‌کنند، کارایی بالقوهٔ لیزرهای الکترون آزاد به ۶۵ درصد و کارایی عملی آن‌ها به ۴۵ درصد می‌رسد. در لیزرهای الکترون آزاد نیز، مثل لیزرهای معمولی، نور همدوس توسط الکترون‌ها گسیل می‌شود، اما در این مورد (چنانکه از اسم لیزر هم پیداست) الکترون‌ها به‌جای آنکه به اتم‌های مادهٔ فعال لیزر مقید باشند به‌شکل باریکه‌ای در

خلأ حرکت می‌کنند. چون الکترون‌ها آزادند، طول موجی که گسیل می‌کنند به گذار مجاز میان دو تراز انرژی یک مادهٔ خاص محدود نمی‌شود.

نور این لیزرها در اثر برهم‌کنش سه عامل تولید می‌شود که عبارت‌اند از: شتاب‌دهنده، میدان ویگلر و موج الکترومغناطیسی؛ که به اختصار آن‌ها را شرح می‌دهیم.

کلیدواژه‌ها: لیزرهای الکترون آزاد، لیزر، الکترون آزاد، میدان ویگلر، موج الکترومغناطیسی

شتاب‌دهنده و باریکهٔ الکترونی

این شتاب‌دهنده دستگاهی است که باریکهٔ الکترونی با انرژی بالا تولید می‌کند و به الکترون‌ها سرعت‌های نسبیتی می‌دهد. شتاب‌دهنده‌ها انواع مختلفی دارند از جمله: شتاب‌دهندهٔ حلقهٔ انباشت[۲]، شتاب‌دهندهٔ خطی Rf[۳]، شتاب‌دهندهٔ القایی و شتاب‌دهندهٔ الکترواستاتیک.

موج الکترومغناطیسی

یک موج الکترومغناطیسی که قصد داریم آن را جهت تولید نور لیزر تقویت کنیم، در همان راستای حرکت الکترون‌های درون ویگلر حرکت می‌کند که این موج می‌تواند باریکهٔ لیزر هم باشد.

میدان ویگلر

این میدان یک میدان مغناطیسی یا الکتریکی است که در فضا دوره‌ای است و توسط یک مجموعه آهنربا مشهور به ویگلر[۴] تولید می‌شود. اثر میدان مغناطیسی ویگلر روی الکترون‌ها طوری است که توسط آن، انرژی جنبشی الکترون‌ها به موج الکترومغناطیسی منتقل و باعث تقویت موج می‌شود و این موج الکترومغناطیسی خود توسط یک دستگاه بازیافت در لیزر تقویت و منتشر می‌گردد. ویگلرها چند نوع‌اند: ویگلر مارپیچ[۵]، ویگلر واقعی[۶]، ویگلر تخت[۷]، ویگلر باریک‌شوندهٔ[۸] تخت و مارپیچی و ویگلر الکترومغناطیسی.

نکتهٔ قابل توجه و مهم در مورد قابل تنظیم بودن لیزر الکترون آزاد در تمام بازهٔ طول موج این است که طول موج نور لازم برای تداخل بین این سه جزء به‌وسیلهٔ هر دو عاملِ تناوبی بودن میدان ویگلر و انرژی باریکهٔ الکترون تعیین می‌شود که در ادامه آن را به‌دست می‌آوریم.

وقتی موج نور از میدان مغناطیسی استاتیک ویگلر می‌گذرد تغییرات فضایی میدان ویگلر با تغییرات میدان‌های الکترومغناطیسی موج نور ترکیب می‌شود و یک موج زنش[۹] به‌وجود می‌آید. بسامد موج زنش با بسامد موج نور یکی است ولی عدد موج آن برابر با مجموع عدد موج‌های باریکهٔ نور و میدان ویگلر است. در این فرایند الکترون‌ها انرژی خود را به موج الکترومغناطیسی می‌دهند.

تاریخچهٔ لیزر

در بهار سال ۱۹۵۱، نیروی دریایی آمریکا از دکتر چارلز تاونز[۱۰]، فیزیک‌دان دانشگاه کلمبیا، درخواست کرد که راه‌هایی را جهت افزایش بسامدهای میکروموج بیابد، چون نیروی دریایی به بسامدهای بیشتر نیاز داشت تا بتواند در ارتباطات از آن‌ها استفاده کند.

تاونز به همراهی دکتر هربرت زایگر[۱۱] و جیمز گوردون[۱۲]، دانشجوی کارشناسی ارشد شروع به‌کار کرد و سرانجام آن‌ها در سال ۱۹۵۳ وسیله‌ای ساختند که از گاز آمونیاک به‌عنوان محیط فعال استفاده می‌کرد و یک چشمهٔ میکروموج با بسامد بالا اختراع کردند. این وسیله میزر Maser[۱۳] نامگذاری شد و تئودور میمان (Theodore H.Maiman) در ۱۹۶۰ اولین پرتو لیزر را که لیزر تپی یاقوت بود ساخت.

به پاس این خدمت، در سال ۱۹۶۴ به تاونز و دو فیزیک‌دان دیگر از روسیه، که آن‌ها نیز روی میزرها به‌طور مشترک کار کرده بودند، جایزهٔ نوبل داده شد.

تاریخچهٔ لیزر الکترون آزاد

اگرچه اصول کار لیزر الکترون آزاد نسبتاً ساده است ولی عملی کردن این اصول بسیار دشوار است. اولین بار هانس موتز[۱۴] از دانشگاه استنفورد[۱۵] طیف گسیلی باریکهٔ الکترون در میدان مغناطیسی امواج را در سال ۱۹۵۱ محاسبه کرد. او و همکارانش ابتدا لیزر سبز- آبی ناهمدوس تولید کردند و بعد موفق شدند به تقویت همدوس در طول موج‌های میلی‌متری دست یابند. چون کیفیت باریکهٔ الکترون خوب نبود، موتز و همکارانش نتوانستند نور همدوس در طول موج‌های مرئی تولید کنند. لیزر الکترون آزاد در سال ۱۹۷۵ بار دیگر مورد توجه قرار گرفت و آن هنگامی بود که جان مدی[۱۶] (کسی که اصطلاح لیزر الکترون آزاد را رایج کرد) و همکارانش در استنفورد با استفاده از یک ویگلر مارپیچی و باریکهٔ الکترونی که از یک شتاب‌دهندهٔ خطی می‌گرفتند توانستند خروجی لیزر Co_2 با طول موج ۱۰/۶ میکرون (در ناحیهٔ مرئی) را تقویت کنند. موفقیت مدی مرهون پیشرفت‌هایی بود که در فناوری شتاب‌دهنده‌های خطی و طراحی ویگلر حاصل شده بود.

همزمان با تحقیقات استنفورد، آزمایشگران در چندین مرکز، کار بر روی لیزرهای الکترون آزاد ریزموج را شروع

لیزر الکترون آزاد یک چشمهٔ نور قابل تنظیم با کارایی زیاد است و عملاً روی هر طول موجی تنظیم می‌شود، در توان‌های بالا کار و البته نور همدوس تولید می‌کند

کردند. تازه در سال ۱۹۸۷ بود که اولین لیزر الکترون آزاد نور مرئی در دانشگاه پاریس ساخته شد. از آن موقع تاکنون تنها در روسیه و همچنین دانشگاه استنفورد و بخش‌های فضایی شرکت بوئینگ لیزر الکترون آزاد که نور مرئی گسیل می‌کند ساخته شده است.

کاربردهای لیزر الکترون آزاد

در حال حاضر کار روی لیزرهای الکترون آزاد، هم در طول موج‌های مرئی و هم در طول موج‌های میلی‌متری، ادامه دارد. هدف اصلی پژوهشگران رسیدن به توان‌های بیشتر و طول موج‌های کوتاه‌تر است. نیل به این هدف‌ها مستلزم پیشرفت‌هایی است که در طراحی شتاب‌دهندهٔ الکترون و طراحی ویگلر صورت می‌گیرد.

کاربرد لیزرهای الکترون آزاد، حتی در وضع ناکامی فعلی، به‌عنوان چشمه‌های پر توان تپی[۱۷] و پیوستهٔ نور مرئی و فروسرخ در کارهای پژوهشی شروع شده است. لیزرهای الکترون آزاد به‌ویژه برای جراحی مناسب‌اند، از این لیزرها می‌توان هم برای بریدن و هم برای انجام عمل فوتون- جوش (انعقاد از طریق داغ کردن) استفاده کرد.

برای بریدن معمولاً نور فروسرخ سه میکرونی لازم است اما برای جوش دادن به طول موج‌هایی میان صفر تا یک و نیم میکرون نیاز است. اصولاً لیزر الکترون آزاد را می‌توان در حین عمل جراحی، بنا به ضرورت، روی طول موج‌های کوتاه و بلند تنظیم کرد، دستگاه پرقدرت استنفورد برای مطالعهٔ کاربردهای جراحی بسیار مناسب است. این لیزر بافت نرم و همچنین استخوان را خیلی سریع گرم می‌کند و پلاسمای فراگرم به‌وجود می‌آورد. در مقایسه با لیزرهای فعلی، لیزر الکترون آزاد با توان زیاد و تپ‌های کوتاه امکان می‌دهد که زخم‌ها سریع‌تر التیام پیدا کنند و آثار آن‌ها محدودتر شود.

علاوه بر کاربردهای پژوهشی، لیزر الکترون آزاد در زمینه‌هایی چون مخابرات، رادار و گرم کردن پلاسما (در دستگاهی به‌نام توکامک گرم کردن پلاسما می‌تواند جهت همجوشی هسته‌ای هیدروژن به هلیم ایجاد انرژی زیادی مانند انرژی سطح خورشید کند) قابل استفاده است. لیزر الکترون آزاد می‌تواند منبع پرقدرتی برای تابش امواج میلی‌متری و میکرونی برای رادار بلند برد با تفکیک زیاد باشد. کاربرد بحث‌انگیز لیزرهای الکترون آزاد با توان زیاد و تپ بلند در امور نظامی (از جمله در انهدام موشک‌های بالستیک) است. طراحان این نوع سلاح یک پایگاه لیزری زمینی در مقیاس بزرگ پیش‌بینی می‌کنند که می‌تواند به کمک آینه‌های مستقر در زمین و در مدار جو، نور را روی هدف هدایت کند. لیزرهای الکترون آزاد در این کاربردها، تا رسیدن به بلوغ فنی راه طولانی در پیش دارند.

لیزرهای الکترون آزاد به‌ویژه برای جراحی مناسب‌اند. از این لیزرها می‌توان هم برای بریدن و هم برای جوش دادن (انعقاد از طریق داغ کردن) استفاده کرد

پی‌نوشت‌ها

1. free electron laser
2. storage ring
3. radio frequency
4. wiggler
5. helical wiggler
6. Idealized wiggler
7. planar wiggler
8. Tapered wiggler
9. pondermotive wave
10. Charles Hard Townes
11. Herbert Ziger
12.James Gordon
13. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
14. Hans Motz
15. Stanford University
16. John M.J. Madey
17. pulse

منابع

1. H. P. Freund and J. M. Antonsen, Jr., Principles of Free Electron Lasers chapman and Hall, London, (1996).
2. Motz H. Thon W. Whitehurst RN. July 1953. “Experiments on radiation by fast electron beams.” Journol of applied Physics, 24, 826-833.
3. Deacon D A G, Elias LR, Mady J M J, Ramian G J, Schwettan H A, Smith TI, 18 April 1977, “First operation of a free Electron lasers,” Phys. Rev Letters, 38, 892-894.
4. Sprangle Phillip, Coffey Timothy, March 1984, “New sources of high-power coherent radiation,” Physics Today, 37,44-5.
5. Morshal Thomas C, 1985, Free- Electron Lasers, Macmillan Publishing.
6. Phillips R M, September 1988, “History of ubitron,” Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A 272, 1-9.
7. Bottollier Curtet, H, Gardele J, Bardy J, July 1991, First Free-Electron Laser experiment in the millimeter rang of C.E.S.T.A., “nuclear Instruments & Methools in physics Research, A 304, 197-202.
8. Su, Y, Huang S, Chen Y, March 1988. “Amicromave free electron laser experiment,” Nuclear Instruments & Methools in Physics Research, A 272, 147-153.