

文章编号: 1004-5422 (2005) 03-0174-05

# 自由电子激光器的发展及其应用

王路威

(成都大学电子信息工程系, 成都 610106)

**摘要:** 自由电子激光器是一种完全新型的相干光源, 它的一些特点是其它相干光源所不可比拟的. 本文在简述自由电子激光器的原理之后, 介绍自由电子激光器的发展及其应用.

**关键词:** 相干辐射; 受激辐射; 磁摆荡器; 激光谐振腔

**中图分类号:** 04

**文献标识码:** A

## 1 前言

自由电子激光器 (FEL) 是一类不同于传统激光器的新型高功率相干辐射光源. 虽然传统的激光器具有极好的单色性和相干性, 但它的低功率、低效率、固定频率和光束质量差的弱点, 使它大大逊色于自由电子激光器. 自由电子激光器不需要气体、液体或固体作为工作物质, 而是将高能电子束的动能直接转换成相干辐射能. 因此, 也可以认为自由电子激光器的工作物质就是自由电子.

1977 年, 由于当时已经有了超导加速器和强磁场技术条件, 在美国斯坦福大学建成了世界上第一台自由电子激光器. 这台激光器借助于超导直线电子加速器提供的 43 MeV 的电子束辐射红外光. 这种利用高能电子 (又称相对论性自由电子) 为工作物质的新型激光器得到了极高的功率输出. 由于在自由电子激光器中电子能量改变是连续的, 因此它的光束能在很宽的频率 (或波长) 范围内连续调谐.

自由电子激光器较传统激光器有如下优越特性:

(1) 传统的激光器是由电子在原子或分子中确定的能级间跃迁产生光发射实现的, 而自由电子激光器没有固有能级的局限性, 它的输出波长在很大范围内连续可调. 自由电子激光器可以工作在整个电磁谱区, 可在普通激光器不能振荡的短波长范围 (真空紫外、软 X 射线) 内产生振荡. 现在多数与应用相关的自由电子激光器都在近红

外、中红外、近紫外光谱波段工作, 自由电子激光器也有希望成为远红外和亚毫米波段辐射的重要可调辐射源.

(2) 自由电子激光器最吸引人的地方是它能产生很高的功率. 平均功率达几千瓦, 数兆瓦的高平均功率也可能达到, 峰值功率达到千兆瓦. 自由电子激光器由于没有中间能量转换环节, 故其效率很高. 10 $\mu$ m 波长激光效率在 20~50% 以上, 而效率可通过电子束能量的恢复情况而加以提高.

(3) 由于一般激光器中工作物质性能的衰变, 工作寿命短. 自由电子激光器的运转机制不受原子、分子介质的影响, 因而自由电子本身不存在着寿命问题.

(4) 自由电子激光器光频谱较纯, 避免了传统激光器中由激活介质带来的诸如介质吸收、自聚焦等效应, 因此有利于改善光束的质量. 自由电子激光的光束发散角可以达到衍射极限. 另外, 自由电子激光还具有窄的时间结构和输出频带, 工作稳定和重复性好等特点.

自由电子激光器是一种完全新型的相干光源, 它的一些特点是其它相干光源所不可比拟的. 近几十年来, 它的发展非常迅速, 已成为现代物理学中最引人瞩目的研究方向. 自由电子激光器将成为本世纪最重要的光源. 本文在简述自由电子激光器的原理之后, 介绍自由电子激光器的发展及其应用.

收稿日期: 2004-12-16

作者简介: 王路威 (1945-), 男, 副教授, 从事物理基础理论的教学与研究.

## 2 自由电子激光器的工作原理

自由电子激光器是加速器和激光技术的组合。其主要技术组成是电子加速器、磁摆动器(大多数自由电子激光器的研究都采用静磁摆动器)、光子光学系统和各种监测、控制系统。

自由电子激光器采用的是射频直线加速器、电子储存环、静电加速器、感应直线加速器等脉冲装置。从加速器引出的高能电子束相当于激光工作物质,因而电子束质量的好坏直接影响着整个激光器性能。相对论电子束从激光共振腔的一端注入经过摆动器时,受到空间周期性变化的横向静磁场作用。磁场由一组“摆动器”或“波荡器”的磁铁产生。磁铁以交替极性方式布置,磁场为螺旋式或平面式。在该磁场作用下,电子束在磁摆动器中一边前进,一边有横向摆动。例如,周期性磁场在水平面内,电子则周期性地上下摆动。电子的横向及运动方向的改变,表明电子有加速度。根据电磁辐射理论,电子有加速就必然会辐射电磁波。这种带电粒子沿弯曲轨道运动而辐射电磁波,被称为同步辐射。同步辐射有一个比较宽的频率辐射范围,但缺乏单色性和相干性。这种自发辐射一般不很强,峰值电流 100A,脉宽几皮秒的 50MeV 能量电子束在典型摆动器中将产生 1W 量级峰值自发辐射功率。

在磁场的作用下,电子受到一个作用力而偏离直线轨道,并产生周期性聚合和发散作用。这相当于一个电偶极子,在满足共振关系的情况下电子的横向振荡与散射光场相互耦合,产生了作用在电子上的纵向周期力——有质动力。在有质动力的作用下,电子束的纵向密度分布受到调制。于是,电子束被捕获和轴向群聚。这种群聚后的电子束与腔内光场(辐射场)进一步相互作用,会产生受激散射光,使光场能量增加,得到具有相干性的激光。这是通过自发辐射光子和电子相互作用的反馈机制,把自发辐射转换成窄带相干辐射。而且此辐射电磁波在电子运动的方向上强度最大。因此,摆动器促成了自由电子激光器中电子和光子间的相互作用。在电子通过摆动器后,利用弯曲磁铁把电子和光分离。

凡是能使自由电子产生自发辐射的各种机理几乎都可以产生受激辐射,如受激康普顿辐射、受

激韧致辐射、受激切伦柯夫辐射、受激喇曼散射、受激电磁冲击辐射等等。因此,相对应有康普顿激光器、磁韧致激光器、切伦柯夫激光器、喇曼激光器等。

以磁韧致激光器为例,磁韧致激光器的工作原理是基于康普顿散射效应和磁韧致辐射效应。被加速的电子通过周期性磁场时,因受磁场作用产生磁韧致辐射效应而激励电磁波。按洛伦兹变换,周期横向磁场变成既有磁场又有电场的电磁波。该磁场对电子的作用就象迎面而来的入射光波一样可以产生康普顿散射,从而诱发受激辐射。在这个过程中,电子释放的光能大部分被磁场中别处的电子所吸引,但只有波长  $\lambda$  满足  $\lambda = \lambda_q / 2\gamma^2$  的光才被放大。受激康普顿散射才是激光。要产生受激康普顿散射,必须使高能电子与电磁波(光子)发生作用。根据理论计算,磁韧致辐射产生的电磁波其强度可以相当大,其频率可以很高。放大后的光辐射被限制在光学谐振腔内,被两块彼此相对的反射镜来回反射,其往返与脉冲电子束同步,且通过波荡器调节镜子间隔而产生相干振荡。这个电磁波(光子)作为入射激励波再与新的电子束混合放大,使光辐射得到进一步相干放大,而输出高功率的激光脉冲。因此,当一束高能电子注通过周期横向静磁场时,可以获得强大的激光输出。在振荡场合下,光学谐振腔是一个重要的部件。光学谐振腔要求有宽通带特性,以适应在较宽的波长范围内工作;光损耗要尽可能减小,以便于起振。在低增益系统中,光学谐振作用是提供反馈和为合适性能所需的光学模式提供选择。高增益自由电子激光器则往往不需用光学谐振腔就以产生自放大的自发辐射。可见,自由电子激光器的发展,可以说是同步辐射和受激辐射的巧妙结合。它消除了同步辐射所带来的非单色性和非相干性的缺陷。

根据理论计算,最大理论增益  $G$  为

$$G = (20 \lg c / \pi) \cdot (1 / e\pi)^{1/2} \cdot (\gamma_0 / m_0 c^2) \cdot \lambda^{3/2} \lambda_q^{3/2} B^2 \rho_e (\Delta v / v)^{-2} F_r \text{ 分贝} \cdot \text{米}^{-4}$$

$$\text{辐射波长为 } \lambda = (\lambda_q / 2\gamma^2) [1 + (1/2\pi)^2 \cdot (\lambda_q^2 \gamma_0 / m_0 c^2) \cdot B^2] \cdot [1 + (h\nu / \gamma m_0 c^2)]$$

相对频宽为  $\Delta v / v \approx \lambda_q / 2L = 1/2n$

其中  $\lambda_q$  是周期磁场的波长(或称磁场的周期

长度);  $\gamma_0$  是电子经典半径;  $F_f$  是电子束和辐射场半径之比;  $\nu$  是输出激光的频率;  $\Delta\nu$  是自发辐射线宽;  $n$  是磁场周期数;  $m_0 c^2$  是电子静止能量;  $L$  是磁摆动器长度;  $\rho_e$  是电子束中的电子密度;  $B$  是磁场的强度;  $\gamma$  是相对论因子  $\left[ \gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \right]$ ;  $E$  是电子能量 ( $E_0 = m_0 c^2$ );  $c$  是光速。

控制系统是整个自由电子激光器各部分协调运转的关键所在,对能否出光起着决定性的作用。它主要由控制台和触发系统两大部分组成。

自由电子激光器的波长决定于电子束的速度、电子能量、磁摆动的周期。因此,通过调节加速电子的能量或者外设电磁场的强度,很容易改变辐射光的波长,以实现大范围的调谐。

按照电子束的束流大小,自由电子激光器(FEL)可分为拉曼型(Raman型)和康普顿型(Compton型)。工作在可见光或红外波段的康普顿型自由电子激光器(高电子能量、低电子密度)把激光器波段推向了短波甚至到 X 射线;工作在毫米和亚毫米波段的拉曼型自由电子激光器(低电子能量,高电子密度)填补了可见光,红外光到微波之间的波段。

现有的大多数自由电子激光器产生的辐射都由短脉冲组成,自由电子激光器有可能产生脉宽仅几个飞秒的超短脉冲,单脉冲能量达到毫焦耳量级。

### 3 自由电子激光器的发展

自 1960 年世界上第一台激光器诞生以来,随着激光器技术的研究和发展,人们普遍希望普通激光器的功率、效率、和波长调谐范围能有大幅度地提高,但对于普通的激光器来说,简直难于作到,于是科学家们开始探索新的方法,新的途径来提高激光器的性能。

早在 20 世纪 50 年代初期,就有人提出了自由电子受激辐射的设想。1950 年,有人用射频直线加速器和摆动器演示了可见波长自发辐射和微波相干辐射。1957 年到 1964 年间,自由电子微波激光器问世,称为“ubitron”,在 5mm 波长上产生 150KW 的峰值功率。同时,人们利用高能电子在轴向磁场中的横向回旋运动产生毫米波,但一直到 1974 年才首次在毫米波段实现受激辐射。1977 年,

美国斯坦福大学的红外波段实现受激辐射。当时研究此课题时所需的电子加速器等设备相当复杂且价格昂贵。1978 年,美国海军研究实验室在红外区也取得实验成功。20 世纪 70 年代,自由电子激光研究还不怎么兴旺。当它重新开始升温时,分别通过受激康普顿散射和受激拉曼散射发展。1983 年,法国奥赛的电磁辐射应用实验室,首次用储存环中运行的电子束获得激光效应,这台新型的自由电子激光器首次在可见光频段发射光子。1984 年,美国物理学家在加速器上利用电子束放大一束微波辐射,获得了高功率、高效率、波长宽调谐范围的激光。

自由电子激光器潜在在高输出功率、高效率特性,使它首先就被考虑用在国防上。20 世纪 80 年代,美国里根总统提出了战略防御倡议计划,使自由电子激光器成为美国“星球大战”计划中陆基或天基定向能武器中最有希望的候选者。这就促使了美国自由电子激光器的研究、开发取得了一系列很大的进展。

激光技术的研究和开发应用是以军事武器的研究应用为先导,而逐步推广应用于民品开发生产中去的。研究和发展自由电子激光器的领域十分广阔,科学家们在许多领域内进行了大量尝试或试探性的应用研究工作。由于自由电子激光器体积庞大,造价高昂,极大地限制了其使用范围。自由电子激光器能否充分发挥其优异特性而走向实用,最终将取决于器件能否小型化。因此,国际上研究自由电子激光器的热点转向了小型化、实用化、短波长(真空紫外、软 X 射线)方面。美国 Los Alamos 实验室于 1993 年首次实验成功小型化的自由电子激光器(FEL)。它运行在 4~6μm 波段,输出峰值功率 10MW,光阴极电子枪的亮度高达  $2 \times 10^{12} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rad}^2$ ,实现了高质低能(17MeV)电子束产生中红外自由电子激光。整个装置占有较小的空间,从而使 FEL 向小型化和实际应用迈进了一大步<sup>[4]</sup>。另一方面,人们在小周期波荡器、虚火花放电装置及虚火花放电、高压电源的改进等几项新技术方面开展的研究都为自由电子激光器走向小型化提供了有利条件。同时,研制波长几毫米以下的微型摆动器以及激光摆动器、适于上述摆动的低能及角度色散电子束源的开发也成为研究的目标。另外,利用切伦科夫辐射和史密斯·帕塞

尔辐射的新型自由电子激光器, 体积也大大缩小.

自由电子激光器能否出光, 运行质量如何, 主要取决于电子束的质量和电子加速器的运行质量. 由于激光阴极射频枪以及高亮度电子储存研究的进展, 很有希望获得高质量的电子束. 自由电子激光器装置结构复杂、体积庞大, 价格昂贵、而加速器则是其主要部分, 因此, 自由电子激光器的研究首先要解决的就是研制小型化、简单化的加速器.

20 世纪 90 年代初期, 自由电子激光器的平均功率就已达 1W. 为进一步提高自由电子激光的输出功率和效率并进一步缩短波长, 特别是探索更有效的短波长(紫外及 X 射线)自由电子激光的机理, 人们对各种与等离子体有关的“非常规”自由电子激光器进行了研究, 并迅速成为自由电子激光研究领域内的热点之一<sup>[7]</sup>. 如等离子体波 Wiggler 自由电子激光, 以等离子体为背景的静磁 Wiggler 自由电子激光和离子通道激光.

1994 年 10 月, 日本关西学术文化研究都市津田的自由电子激光研究所制成了兆瓦量级的自由电子激光实用装置. 这归功于花了二、三十年研究成功的电子直线加速器、微波源和超高真空等基础技术. 开发远紫外自由电子激光器需要大电流的贮存环, 长寿命的电子枪以及  $10^{-9}$  Pa 的超高真空等技术.

以自放大自发辐射为基础的单程自由电子激光器提供了另一种向真空紫外和 X 射线激光推进的路线, 这种自由电子激光器可能提供极强的偏振超脉冲类激光辐射. 除了它们的高峰值亮度和高平均亮度外, 电子能量的可调谐性使得这种自由电子激光器成为真空紫外和 X 射线辐射无可匹敌的光源.

本世纪初, 德国汉堡研究人员报告了德国电子同步加速器的真空紫外激光器已产生 80~120nm 可调谐, 吉瓦级功率, 30~100fs 脉冲, 其峰值亮度比目前第三代同步辐射源高 8 个数量级. 2003 年开始进行 6nm 自由电子激光器的研究工作.

人们在成功地建造出真空紫外波段的自放大自发辐射自由电子激光器后, 研究人员把目光放在产生 0.1nm 最小波长的 X 射线自由电子激光上. 德国汉堡电子对撞中心 (DESY) 的科学家研制

出了相当于 1000 万倍自然光强度的 X 射线激光器. 这种自由电子激光器达到了理论上的最大功率. 在紫外线照射时, 其功率比其它光源要强千倍. 这台自由电子激光器长约 30 米, 波长范围在 80 到 180 纳米之间<sup>[12]</sup>. 据俄罗斯“劳动报”报道, 西伯利亚科学家成功地制造出一台世界上独一无二的输出功率和频率均可调的自由电子激光器. 这台自由电子激光器高达百米, 功率可调范围为 10~100 千瓦, 波长的变化范围为 2~30 $\mu$ m, 该激光器的方向性极强, 光束射到月球表面时, 光斑直径不超过 30 厘米.

## 4 自由电子激光器的应用

由于自由电子激光器具有许多一般激光器望尘莫及的优点, 所以自由电子激光器问世后不久, 科学家们就开始着手于研究它的应用问题.

自由电子激光特别适宜于研究光与原子、分子和凝固态物质的相互作用, 这类研究涉及到固体表面物理、半导体物理、超导体、凝聚态物理、化学、光谱学、非线性光学、生物学、医学、材料、能源、通信、国防和技术科学等多个方面.

原子核工程是自由电子激光器应用最有前途的领域之一, 自由电子激光器在此应用上的最大优点是高功率、宽可调光谱范围, 以及准连续运转特点. 因此, 可应用于物质提纯、受控核聚变、铀、钷、硼、锶和钛等元素的同位素分离和等离子体加热等.

自由电子激光器的高效率、短脉冲及波长可调的优点, 在工业上也有广阔的应用前景. 例如在半导体工艺中的薄膜沉积、平板印刷术、蚀刻、掺杂杂质等, 自由电子激光器特别适合大批量材料处理, 因为它的波长可调谐, 器件又可放大到能输出高平均功率. 用于材料处理时, 要求功率为 1~5KW, 波长为 8~20 $\mu$ m 的自由电子激光器. 自由电子激光器还可进行各种化学分析与测量, 可以生产高纯硅晶体, 满足计算机生产的需要. 集成电路装配, 包括量子处理和光刻可更多地借助短波自由电子激光器. 另外, 自由电子激光器还用在激光加工、光 CVD 等方面的材料, 制作 X 射线激光器、激光加速器等.

自由电子激光器还用在原子、分子的基础研究上, 光化学可依赖工作在紫外到远紫外区的自

由电子激光器. 自由电子激光的可调谐性和超短脉冲特性, 使得探索化学反应过程、生化过程的动态过程成为可能. 这对研究物质的结构和性能对生成新物质的研究, 将会产生革命性的变革和新的进展<sup>[6]</sup>.

医学也是自由电子激光器应用最丰富的领域, 而目前当务之急是研制紧凑、实用的小型自由电子激光器, 其主要目的是把价格降到大医院能买得起的水平. 对医学研究和治疗而言, 这种激光器可在 1~ 10 $\mu$ m 波段可调, 输出功率不超过几百瓦, 此种应用一般要求有几瓦平均功率.

更可观的是自由电子激光器可以为空间站输送能量, 以降低空间站对太阳能电池的依赖性. 用于向卫星传输功率时, 要求功率为 100KW ~ 1MW, 波长为 0. 86 $\mu$ m 的自由电子激光器.

在军事上, 自由电子激光器可以成为强激光武器, 是反洲际导弹的激光武器的主要潜在手段之一. 自由电子激光器功率虽然强大, 但由于其体积庞大, 因此目前只适宜安装在地面上, 供陆基激光器使用. 在毫米波段, 自由电子激光器是唯一有效的强相干信号源, 在毫米波激光雷达、反隐形军

事目标和激光致盲等研究中具有不可替代的重要应用价值.

参 考 文 献

[ 1]傅恩生. 自由电子激光器的现状和应用 [ J]. 激光与电子学进展, 2002, ( 1)  
 [ 2]新华社编稿. 德研制自由电子激光器 [ J]. 中国科技产业, 2001, ( 10)  
 [ 3]友 清. 自由电子激光器, 未来的亮光源 [ J]. 激光与电子学进展, 1999, ( 6): 20~ 24  
 [ 4]陈建芳, 王明常. 自由电子激光器的| 些改进方案 [ J]. 激光技术, 1999, ( 1): 11~ 15  
 [ 5]C • Yananaka 自由电子激光器的未来工业应用 [ J]. 强激光技术, 1997, ( 5): 36~ 41  
 [ 6]陈俊衡, 何宝鹏, 贾兆平. 自由电子激光 [ J]. 大学物理, 1994 ( 5): 30~ 32  
 [ 7]刘濮鲲, 杨中海, 钱尚介等. 非常规自由电子激光器 [ J]. 大自然探索 1993 ( 4): 39~ 45  
 [ 8]李 士, 李印华. 自由电子激光的可能应用 [ J]. 物理 1991, ( 6): 346~ 347

## Development of Free- Electron Laser and Its Application

WANG Luwei

(Department of Electronic Information, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract** The free- electron lasers is a novel coherent light source with certain inherent properties that other coherent light sources can't compare with. This article introduces the development and application of free-electron laser after outlining its theory.

**Key words** coherent radiation, stimulated radiation, undulator, laser resonant cavity