

自由电子激光

李文胜

激光现在已得到了极为广泛的应用。它是利用工作物质的原子、分子或离子的特定能级之间的辐射跃迁,将激励的能量转换成相干辐射的能量而形成的。因此激光的波长、功率和空间分辨本领都要受限于激光器的工作物质。不利用原子、分子或离子的能级,而又能产生大量的相干光子,是科学家们长期孜孜以求的目标。上世纪 80 年代初,马迪(John Madey)在他的博士论文中首次提出了自由电子激光的概念,并在 1976 年和他的同事们在斯坦福大学首次实现了远红外自由电子激光,观察到了 $10.6\mu\text{m}$ 波长的光放大。从那时起人们对自由电子激光的理论和实验的研究进入了一个新的阶段,并取得了丰硕的成果。

自由电子激光的物理原理是利用通过周期性摆

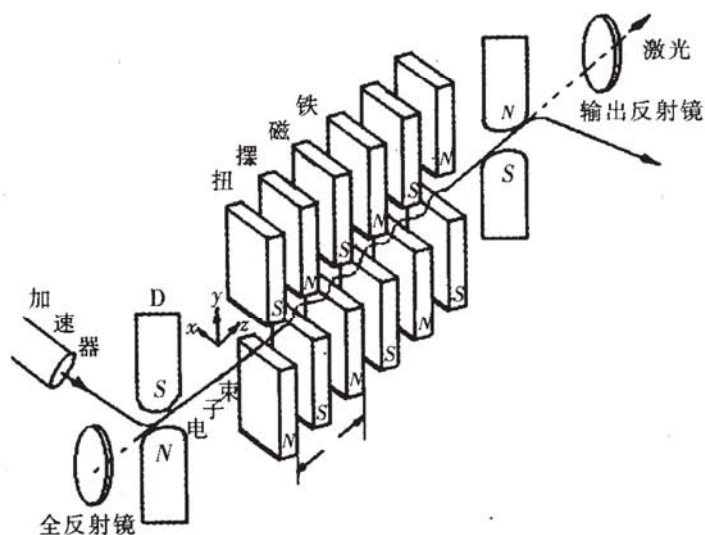


图 1 自由电子激光原理图

动磁场的高速电子束和光辐射场之间的相互作用,使电子的动能传递给光辐射而使其辐射强度增大。利用这一基本思想而设计的激光器称为自由电子激光器(简称 FEL)。如图 1 所示,一组扭摆磁铁可以沿 z 轴方向产生周期性变化的磁场,磁场的方向沿 y 轴。由加速器提供的高速电子束经偏转磁铁 D 导入摆动磁场。

由于磁场的作用,电子的轨迹将发生偏转而沿着正弦曲线运动,其运动周期与摆动磁场的相同。这些电子在 xoz 面内摇摆前进,沿 x 方向有一加速度,

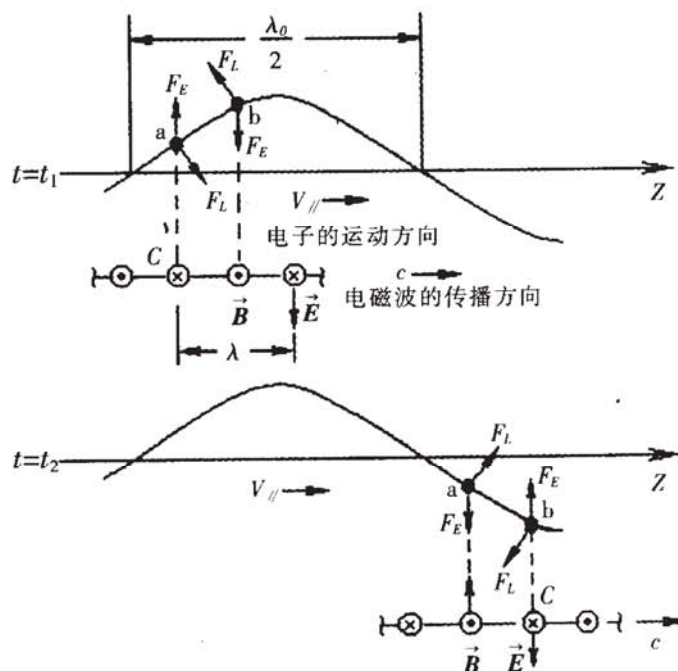


图 1 FEL 中电子束与发射的电磁波的位相关系

于接近绝对零度的环境下,外面还有 4 层铅保护层。这些陀螺仪还与任何干扰隔离,从而处在最安静的环境下。除非平衡状态被外力打破,否则陀螺仪将始终高速自旋,保持角基准方向。当地球的存在和运动引起时空扭曲时,陀螺仪的旋转轴会发生方向偏离。美国国家科学研究委员会认为,如果该实验成功,那么它将成为验证物理理论的一个经典实验。如果没有发现爱因斯坦理论的佐证,这次实验也将是革命性的,因为那意味着现代物理的基石——广义相对论将被改写。

“引力探测 B”卫星正在正常运转。太阳能电池

板在发电,所有的设备都得到电力供应。卫星与地面站和中继卫星之间的通信状况良好。如果一切顺利,它将收集到一批科学家期待了近 90 年、筹划了约半个世纪的数据,以检验广义相对论所预言的某种时空扭曲是否真的存在。这项耗资 7 亿美元的探测任务,是将以事实给爱因斯坦的理论再添一块基石,还是将动摇它、从根本上改变我们对宇宙及其演化史的认识?要回答这个问题,我们最好期待,那个异常精密的大家伙,能够按计划运行 16 个月不出半点差错。

(安徽省淮南市学院南路 248 号淮南联合大学 232001)

因而将在前进的方向上自发地发射电磁波。辐射的方向在以电子运动方向为中心的一个角度范围内。

设摆动磁场的周期为 λ_0 , 电子束在 z 方向的速度分量为 $v_{//}$, 自发辐射的波长为 λ , 且方向沿 z 轴正向, 如图 2 所示。设在 $t=t_1$ 时刻, 电子 a 与电磁波上的 C 点处于同一位置, 电子 b 在 a 前面 $\lambda/2$ 的位置。在 t_2 时刻, 电子 a 和 b 都沿 z 轴正向前进了 $\lambda_0/2$ 的距离, 而此时电磁波上的 C 点向前传播到了 $\lambda_0/2 + \lambda/2$ 的距离, 显然有如下关系式:

$$\frac{\lambda_0}{2} = V_{//}(t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$\frac{\lambda_0}{2} + \frac{\lambda}{2} = c(t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中 c 为光在真空中的速度。由(1)、(2)式可得, 电子沿其运动方向上自发辐射的波长为:

$$\lambda = \frac{1-\beta}{\beta} \lambda_0 \quad (3)$$

其中 $\beta = V_{//}/c$ 。令 $\nu = c/\lambda$ 为自发辐射的频率, $\nu_0 = V_{//}/\lambda_0$ 是摆动磁场对电子束的调制频率。则(3)式可化为:

$$\nu = \frac{1}{1-\beta} \nu_0 \quad (4)$$

令 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ 为相对论系数, 则(4)式可化为:

$$\nu = \frac{1}{1-\sqrt{1-\gamma^{-2}}} \nu_0 \quad (5)$$

当 $\gamma \gg 1$ 即 $V_{//} \approx c$ 时, 有 $\sqrt{1-\gamma^{-2}} \approx 1-\gamma^{-2}/2$, 将此近似关系代入(5)式有:

$$\nu = 2\gamma^2 \nu_0 \quad (6)$$

由 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ 和(6)式可知, 电子的速度越大, 电子束的能量也越大, 自发辐射的频率也越高。(6)式也表明, 改变电子束的能量或摇摆磁场的周期就可以改变自发辐射的频率。

由(6)式所表示的是电子束中各电子自发辐射的频率, 由于其辐射是随机的, 所以还不能相干叠加。因此, 该频率只是使同一方向的辐射成为可能的受激辐射的频率。为了获得受激辐射, 将一束中心频率为 ν 的光, 沿 z 轴射入电子通道内, 则运动电荷在此入射光的电磁场中将受到电场力 F_E 和洛仑兹力 F_L 的作用, 如图 2 所示。从图中可见, 与电磁场同相位的电子 a 被加速, 而超前(或落后)半个波长的电子 b 则被减速。其结果是在 ab 区域内, 电子的密度增大; 相反, 在 a 的后方和 b 的前方, 电子的密度减小。我们把电子的这种周期性的密度调制, 称为同步

加速振荡。被加速的电子将从电磁场(光辐射)吸收能量; 被减速的电子将把能量传递给光辐射。若能使减速的电子数比加速的电子数多(这相当于普通激光器中的粒子数反转), 则减速电子将持续地把能量传递给光辐射, 从而实现光辐射的放大。这就是自由电子“受激辐射”的过程。从量子的观点, 可简洁地理解为在辐射和电子能量共振的条件下, 自由电子被外来辐射光子所激发而发射全同光子, 从而增大了原来辐射的强度。

由于自由电子激光器不需要传统意义上的工作物质, 因此其振荡波长和激光功率受限于工作物质的能级结构和介质的非线性光学效应等问题将不复存在。从(6)式可以看出自由电子激光的频率随入射电子能量的增大而增大, 因而调整入射电子的能量, 原则上就可以实现从毫米波到 X 射线直至 γ 射线波段的激光发射, 且连续可调。同时自由电子激光器还具有高效率(理论计算可达 40%, 目前效率最高的 CO_2 激光器只有 10%~20%)、高功率、高相干性和低成本(每瓦成本只有几美元)等优点。因此它在科学、军事、国民经济等各方面都有重要的应用前景。中国科学院高能所已于 1993 年研制成了我国第一台红外自由电子激光装置。

(十堰湖北汽车工业学院物理系 442002)

封面照片说明

今年 2 月 28 日 18 时 47 分(美国东部时间), 一架外形奇特, 红白相间的飞行器在美国堪萨斯州的莫尼兹伯尔机场起飞。这便是“环球飞行”号飞机, 它在执行一项填补人类飞行史空白的伟大任务——单人不着陆环球飞行。经过 67 小时零 2 分钟的飞行, “环球飞行”号在堪萨斯州的一个基地安全降落, 从而成功地完成了这次重要的飞行。

“环球飞行”号飞机长 13.44 米, 高度约 4 米, 翼展 34.7 米。飞机的中央是驾驶舱, 在驾驶舱的后上方装有一台能产生 1043 千克推力的涡轮风扇发动机。机上设有 13 个油箱, 这次装有 8210 千克飞行燃料, 而飞机的实际起飞重量是 9843 千克, 所以有人称“环球飞行”号简直就是一个飞行的油箱。

“环球飞行”号飞机是由大名鼎鼎的伯特·鲁坦设计的, 他曾因成功研制了“太空飞船一号”而家喻户晓。

(李博文)

现代物理知识