

而可以有很高的能量或功率输出。如果高能电子束来自加速器的储存环,电子可以反复使用,原则上自由电子激光的效率可以很高。

产生自由电子激光的两个主要过程是:①由高能电子束产生自发辐射过程,②由自发辐射产生受激效应的过程。第一个过程有韧致辐射效应、契林柯夫效应、磁同步辐射效应与电子回旋辐射效应等。第二个过程有受激康普顿散射效应、受激韧致辐射效应、受激喇曼散射效应、受激契林柯夫效应等。

各种受激过程主要是外加泵浦波(电磁波)与电子束的相互作用,使辐射电磁波产生一个辐射的增长率,这就是受激效应的实质问题。研究自由电子激光的中心问题,就是如何使这个辐射的增长率加强。

目前自由电子激光的理论研究,无论从经典理论或量子理论出发,仍然不够充分,有待理论与实践的相互渗透与补充,以期获得更完整的理论基础。

最后,提出了实现自由电子激光的几个可行的途径,指出了自由电子激光诱人的前景与强大的生命力;值得我们重视。

自由电子产生 X 射线激光的方案

上海市激光技术研究所 邱明新

本文提出一种新的自由电子激光的概念,称为受激同步辐射。这里同步辐射名词是利用已有的,自发同步辐射已成为一种特殊的光源。本文采用经典的方法,利用自发辐射系数与受激辐射系数之间的 Einstein 公式,并利用自发同步辐射辐射功率的公式^[1],求得自发辐射系数和受激辐射系数。若电子能量是近单色的,则激光的下能级是空的,处于集居数反转状态,可产生受激辐射。同时,电子也可以吸收光子跳到更高的能级,因为更高的能级也是空的。因此,在受激辐射的同时产生吸收,纯增益是两者之差,在临界波长附近的纯增益为

$$g_{\text{纯}}(\lambda_c) \approx \frac{\sqrt{3} Ne^2 C}{4\pi R \epsilon_0} (J+K) \quad (1)$$

式中 N 为受激辐射和吸收参与的电子总数, e 为电子电荷, C 为光速, R 为轨道半径, ϵ_0 为电子静能, $J+K$ 为一系数, λ_c 为临界波长

$$\lambda_c = \frac{4\pi R}{3} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right)^3 \quad (2)$$

式中 ϵ 为电子能量。

(1)式表明激光增益与波长无关,当 R 为 100 厘米,电子数为 10^{10} 时,纯增益 10^5 ,可使从红外到 X 射线波段宽带可调。激光器装置与回转电子加速器相似,电子垂直于磁场作圆周运动,光路是与电子轨道相割的多边形,每边割圆周角 $\Delta\theta \sim \sqrt{1-\beta^2}$, $\beta = \frac{v}{c}$, v 为电子速度。多边形光路顶点处放置反射镜。在 X 射线波段用 Bragg 晶体作反射元件,满足 Bragg 条件的电子能量为

$$\epsilon = \left(\frac{2\pi R}{3b \sin \frac{\pi}{n}} \right)^{1/3} \epsilon_0 \quad (3)$$

式中 b 为晶格常数, n 为正多边形边数。

受激同步辐射获得 X 射线激光将是准连续的,例如 3×10^{-8} 秒,而内壳层电子激励方法为 10^{-15} 秒脉宽,在产生和使用上前者比后者方便多了。电子经作用后减速,减速的电子引入储存环,加速后再引入作用环,产生第二个脉冲。

参 考 资 料

[1] 《经典场论》,伊凡宁柯著,黄祖洽译,第 239 页。