

自由电子激光器的摆动器周期长度的选择及频谱变化

雷仕湛 赵东焕 陈建文

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

摘要——本文计算了自由电子激光器输出能量随摆动器空间周期长度的变化。结果表明：固定辐射频率和工作物质的长度，当摆动器选择最佳空间长度时，激光器输出能量最高；对固定周期长度的摆动器，激光器的输出频谱是随工作物质长度的变化而变化的。

一、引言

在自由电子激光器研究方面，提高激光器的能量转换效率是人们关心的研究课题^[1]。自由电子激光器输出的相干辐射能量，是由相对论电子束部分动能转换来的，转换的效率和相对论电子与泵浦场之间的耦合程度有着密切的联系，而耦合的程度又与两者的相位匹配有关^[2,3]。对于同一个辐射频率来说，改变泵浦场的相位，激光器的能量转换效率将相应发生变化^[4,5]。下面讨论：激光器输出能量与摆动器空间周期长度的关系，以及空间周期长度固定的摆动器，激光振荡频率的强度分布状况。

二、基本方程

假定激光器共振腔内单程功率损失因子为 α ，相对论电子束的电荷密度为 ρ ；那么，相对论电子在空间周期磁场内运动的过程中，伴随着相对论电子传播的光辐射的强度 I ，其变化规律用方程描述为

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{m_0 c^2}{|e|} \rho \frac{d\gamma}{dt} - \alpha I, \quad (1)$$

式中的 e ， m_0 分别是电子的电荷和静止质量， c 为光速， γ 是相对论因子。

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中 $\beta = |\beta|$ ， $\beta = \frac{V}{c}$ ， V 为相对论电子在摆动器内的运动速度。假定摆动器的磁场振幅为 B_0 ，空间周期长度为 λ_0 ，磁场方向沿 Y 轴方向，沿 Z 轴作空间周期变化，其摆动器的磁场形式为

本文 1983 年 6 月 25 日收到。

$$\mathbf{B}_1 = \left(0, B_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda_g} z, 0 \right). \quad (3)$$

相对论电子在摆动器内的运动规律, 由洛伦兹力运动方程描述为

$$\frac{d\gamma}{dt} = -\frac{|e|\hbar}{m_0 c} \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \gamma \boldsymbol{\beta} = -\frac{|e|\hbar}{m_0 c} [\mathbf{E} + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B}]; \quad (5)$$

其中 \mathbf{E} 是辐射场的电场强度, 假定它是线性偏振光, 电场方向沿 x 轴方向, 即 \mathbf{E} 为

$$\mathbf{E} = [E_0 \cos(\omega_\gamma t - K_\gamma z + \varphi), 0, 0], \quad (6)$$

式中 $\omega_\gamma = 2\pi\nu_\gamma$, ν_γ 为辐射频率, K_γ 是波矢, φ 是辐射初位相常数。

磁场 \mathbf{B} 包含两部分:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_\gamma, \quad (7)$$

其中 \mathbf{B}_γ 是辐射场的磁场,

$$\mathbf{B}_\gamma = \frac{E_0}{c} (0, \cos[\omega_\gamma t + \varphi - K_\gamma z], -\cos[\omega_\gamma t + \varphi - K_\gamma z]). \quad (8)$$

三、结果和讨论

我们用 TQ-16 型电子计算机对方程 (1), (4), (5) 进行数值计算。计算时取相对论电子的电荷密度 ρ 等于 10 C/m^2 。相对论电子能量为 $47m_0c^2$; 共振腔内能量损失因子 $\alpha = 1.5\%$ 。磁场强度 B_0 等于 2.4 KGs 。因为一般来说, 每个电子产生的辐射初位相 φ 并不相同, 所以, 得到的结果需要对初位相 φ 求平均值, 即

$$\bar{I} = \langle I \rangle = \int_0^{2\pi} I d\varphi. \quad (9)$$

图 1 是对辐射频率相同 ($\omega_0 = 1.54 \times 10^{14} \text{ Hz}$)、摆动器空间周期长度 λ_g 值不同时, 计算辐射能量 \bar{I} 随相对论电子束与泵浦场相互作用长度 (即通常所说的激光物质长度) 变化的结果。图中的负值表示相对论电子吸收辐射能量。由图可见, 摆动器的空间周期长度对激光器的输出能量影响是很大的。例如, 选 $\lambda_g = 3 \text{ cm}$ 的摆动器, 激光器的输出能量随相互作用距离的变化接近正弦函数形式; 这样可以预料, 自由电子激光器的输出能量是不会高的。

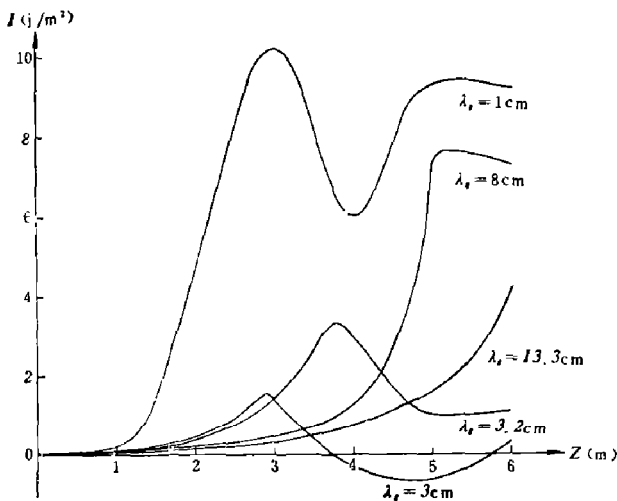


图 1 辐射能量与摆动器空间周期长度 λ_g 的关系

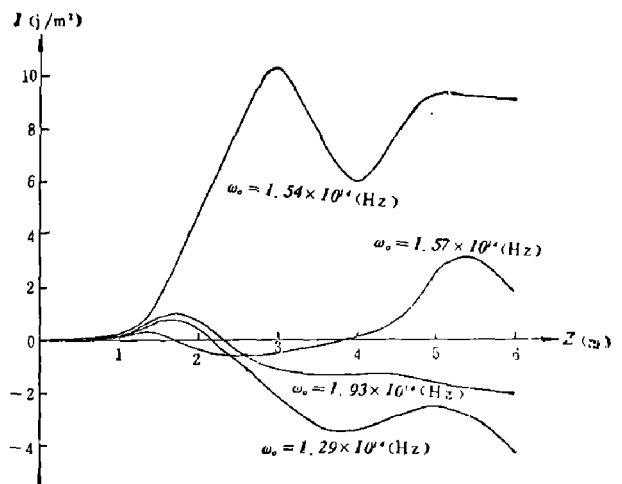


图 2 辐射能量按频率的分布

还可以看到在不同的相互作用长度上, 不同周期长度摆动器所获得的激光能量的对比关系也是不相同的。例如, 在 3m 的相互作用距离上, 不同周期长度摆动器得到的激光能量的对比关系是:

$$\bar{I}_1 > \bar{I}_3 > \bar{I}_{3.2} > \bar{I}_8 > \bar{I}_{13.3}, \quad (10)$$

而在 6m 的相互作用距离上, 它们的对比关系就变为:

$$\bar{I}_1 > \bar{I}_8 > \bar{I}_{13.3} > \bar{I}_{3.2} > \bar{I}_3; \quad (11)$$

这里的 \bar{I}_1 、 \bar{I}_3 、 $\bar{I}_{3.2}$ 、 \bar{I}_8 、 $\bar{I}_{13.3}$ 分别表示摆动器空间周期长度取 1、3、3.2、8、13.3 cm 时的平均辐射能量。由此可见, 在设计自由电子激光器摆动器时, 选择空间周期长度还需要考虑相对论电子与泵浦场相互作用的长度。这一点与普通激光器不同, 在普通激光器中, 泵浦场的频率只要求与工作物质的能级相适应即可。

图 2 是摆动器周期长度相同 ($\lambda_p = 1$ cm)、辐射频率 (ω_0) 不同时计算辐射能量所得到的结果。由图 2 可见, 在相互作用距离为 1.5m 的范围内, 四种辐射频率都获得受激辐射放大, 而在 2.2~3.6 m 的范围内, $\omega_0 = 1.29 \times 10^{14}$ Hz, $\omega_0 = 1.57 \times 10^{14}$ Hz, $\omega_0 = 1.93 \times 10^{14}$ Hz 这三个频率的辐射表现出“吸收”状态。这也就是说, 激光工作物质取 1.5 m 时, 所列的四种辐射频率都可能同时发生激光振荡, 而在 2.22~3.6 m 的范围内, 只有一种辐射频率发生激光振荡。由此可见, 自由电子激光器的输出频谱与工作物质的长度有关, 这样就可以通过改变工作物质的长度, 获得选频振荡。

参 考 文 献

- [1] 雷仕湛, 自然, 5(1982), 12:927.
- [2] 雷仕湛, 陈建文, 赵东焕, 中国激光, 10 (1983), 5:257.
- [3] Smith, T. I., *J. Appl. phys.* 50 (1979), 4580.
- [4] 雷仕湛, 江惠, 中国激光, 待发表.
- [5] Boehmer H. et al., *phys. Rev. Lett.* 48 (1982), 141.

PERIODIC LENGTH CHOICE OF WIGGLER AND FREQUENCY VARIATIONS FOR FREE-ELECTRON LASERS

Lei Shizhan, Zhao Donghuan, Chen Jianwen
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Variations of output energy with the periodic length of the wiggler are calculated for free-electron lasers. Results show that with an optimum periodic length of the wiggler and for a given radiative frequency and length of lasing medium, radiation energy is the maximum. Variations of lasing frequency with the length of working medium are observed for the wiggler of a fixed periodic length.