

渐变 Wiggler 技术在低能电子束喇曼型 自由电子激光器中的应用*

赵东焕 王建

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 本文利用有质动力势导出了自由电子激光器效率提取表达式, 分析了渐变 Wiggler 技术对提高激光器效率的作用, 并利用这一技术进行了渐变 Wiggler 场强自由电子激光器实验。结果表明其效率是相应恒定 Wiggler 自由电子激光器的 2.6 倍。

关键词: 电子束“群聚”, 有质动力势, 渐变 Wiggler 技术

Tapered wiggler technique used in Raman FEL of low energy electron beam

Zhao Donghuan, Wang Jian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The expressions of extraction efficiency are deduced by means of ponderomotive potential, the actions of tapered wiggler technique on efficiency enhancement lasers are analysed, and the experiment of FEL with tapered wiggler intensity of magnetic field has been conducted by this technique, the result indicates that its efficiency is 2.6 times that of FEL with constant wiggler intensity of magnetic field.

Key words: “bunching” of electrons beams, ponderomotive potential, tapered wiggler technique

一、引言

自由电子激光器是一种不同于传统激光器的新型高功率相干辐射源器件。它的基本工作原理是进入周期性摇摆磁场的相对论电子在纵向行进的同时产生横向周期性摆动, 并在纵向形成自发辐射场。另一方面, 此自发辐射电磁场对横向周期性摆动的相对论电子会产生另一种推动力(称有质动力), 它迫使电子束在纵向“群聚”从而形成高密度波(有质动力势波)。这种高密度波包括空间电荷波和电子流波二部份, 每一部份都有快、慢及同步波三个成份^[1], 其中电子流波中与辐射波同步的高密度波使辐射场产生有效的增益, 并随相互作用长度的增加最终趋于辐射饱和状态。可见普通型自由电子激光器的相干辐射主要是由有质动力势对与辐射波同步的电子作用的结果。

收稿日期: 1991年4月24日; 修改稿收到日期: 1991年6月18日。

* 国家自然科学基金资助课题。

本文从有质动力势概念导出了自由电子激光器能量转换效率提取表达式, 分析了渐变 Wiggler 技术对提高效率的作用。并利用此技术进行渐变 Wiggler 场强喇曼型自由电子激光器实验, 使激光器效率由 3.7% (恒定 Wiggler 情况) 提高到 9.68%。

二、效率及其分析

自由电子激光器形成的有质动力势可表示为^[1]

$$\Phi_p = \frac{|e|}{m_0 \gamma^2 c} \mathbf{A}_w \cdot \mathbf{A}_s \quad (1)$$

式中 m_0 是静态电子质量, γ 是相对论能量因子, e 为电子电荷, c 是真空中光速。 \mathbf{A}_w 和 \mathbf{A}_s 分别为 Wiggler 场矢势和辐射场矢势, 通常可写为^[2]

$$\mathbf{A}_w = -A_w \left[\hat{x} \cos\left(\int_0^z K_w(z_1) dz_1\right), \hat{y} \sin\left(\int_0^z K_w(z_1) dz_1\right) \right] \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_s = A_s \left[\hat{x} \cos\left(\int_0^z K_s(z_1) dz_1 - \omega_s t\right), -\hat{y} \sin\left(\int_0^z K_s(z_1) dz_1 - \omega_s t\right) \right] \quad (3)$$

其中 $K_w(z_1)$ 为 Wiggler 波数, $K_s(z_1)$ 和 ω_s 分别为辐射场波数和频率。在静磁 Wiggler 泵浦场条件下, 有质动力势为

$$\Phi_p = -\frac{|e| A_w A_s}{m_0 \gamma^2 c^2} \cos[(K_w + K_s)z - \omega_s t] \quad (4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} K_w &= \int_0^z K_w(z_1) dz_1 \\ K_s &= \int_0^z K_s(z_1) dz_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于有质动力势是纵向标量势, 所以有质动力势场(波)可写为

$$E_{\Phi_p} = -\nabla \Phi_p = -\frac{m_0 c^2 a_w a_s}{|e| \gamma^2} (K_w + K_s) \sin \psi_r \quad (6)$$

式中 ψ_r 为同步电子(共振态)相位, a_w 和 a_s 分别为无量纲 Wiggler 场矢势和辐射场矢势, 且

$$\left. \begin{aligned} a_w &= \frac{|e| A_w}{m_0 c^2} \\ a_s &= \frac{|e| A_s}{m_0 c} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

仿照文献[3]中推导具有纵向直流电场自由电子激光器效率表达式的方法, 可获普通型(无纵向电场)自由电子激光器效率:

$$\eta = f_e \frac{a_w a_s (K_s + K_w) L}{\gamma^2 (\gamma_r - 1)} \sin \psi_r \quad (8)$$

式中 f_e 为捕获电子函数, L 为电子与波相互作用有效长度, γ_r 为共振态电子能量因子, a_w 可写成

$$a_w = \frac{|e| B_w \lambda_w}{2^{3/2} \pi m_0 c^2} \quad (9)$$

式(8)表明在弱场情况下, 效率 η 随 Wiggler 场强 B_w 的增大而增加, 但在强场条件下, 由于 B_w 过量造成电子束横向速度 v_{\perp} 上升过大而导致电子与波导漂移管壁碰撞, 从而使激光器处于非正常工作状态, 激光器效率反而急速下降。 B_w 和 v_{\perp} 的关系可由下式表示^[4]

$$\left. \begin{aligned} v_{\perp} &= \Omega_{\perp} v_{\parallel} / (\Omega_0 - \gamma^2 K_w v_{\parallel}) \\ v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 &= (1 - \gamma^2) / c^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{\perp} &= eB_w / m_0 c \\ \Omega_0 &= eB_0 / m_0 c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由此可见,自由电子激光器随着工作物理参量的选定,实验中的最佳 Wiggler 场强 B_w 也就相应确定,因而效率通常为一有限值。

三、变参数 Wiggler 对提高效率的作用

提高效率的一种有效方法就是采用渐变 Wiggler 技术,即在激光输出饱和处采用逐渐减弱 Wiggler 场强或渐渐缩短其周期。具体分析如下:

1. 由于共振态电子能量与辐射波长关系为

$$\gamma_r^2 = \lambda_w \left[1 + \left(\frac{e\lambda_w B_w}{4\pi m_0 c^2} \right)^2 \right] / 2\lambda_s \quad (12)$$

则被捕获电子辐射后大部分能量将低于共振态能量,为继续维持辐射状态使电子更多地释放能量,必须相应降低场强 B_w 或相应缩短 λ_w 就可以继续保持辐射状态的共振关系,延长电子与波相互作用时间(或长度 L),提高电子能量转换效率。

2. 因有质动力 F 随着提取电子能量的增多而下降, F 与电子相位 ψ 之间关系为^[3]

$$F(\psi) = -A(\cos \psi + \psi \sin \psi_r) \quad (13)$$

式中 $A = \frac{a_w a_s \omega_s}{\gamma_r c}$, 当 $\psi = \psi_r$ 时(13)式表示处于辐射状态情况下有质动力位(极小值)。假定采用理想的渐变 Wiggler 技术,使 a_w 与 γ_r 同步地下降,则 A 仍不变,但电子由于共振态时间的延长,将有更多的能量转换成辐射能,则 F 将下降,由(13)式知 ψ_r 将上升。例如假定常参数情况下共振态相位(同步相位) $\psi_r = 15^\circ$, 则辐射状态($\psi = \psi_r$)下 $F(15^\circ) = -1.0336 A$, 如果合理地改变参数后使 $F(\psi)$ 下降为 $-1.1278 A$, 则计算可得变参数条件下最终共振态相位 $\psi_r = 30^\circ$, 由此可见电子的共振态相位随着提取电子能量的增加而增大,且辐射状态 $0 \leq \psi_r \leq \pi/2$, 所以 η 将随 ψ_r 的增大而增加。

目前渐变 Wiggler 技术在国际上已经采用,其中取得显著效果的实验可高达相应常参数 Wiggler 自由电子激光器效率的 5.5 倍^[5]。

实验中应用渐变 Wiggler 技术提高效率的一个关键问题是如何实现场强 $B_w(z)$ 与共振态能量因子 γ_r 同步地下降。为此我们引入单位长度内场强递减率 δ 加以说明, δ 定义为

$$\delta = \frac{B_w(0) - B_w(z)}{B_w(0)(z - z_0)} \quad (14)$$

利用式(12)可得

$$\delta = \frac{1}{l} \left[1 - \left(\frac{4\gamma_r^2 - 2\mu^2}{4\gamma_0^2 - 2\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (15)$$

式中 l 为有效相互作用距离, $\mu = (\lambda_w / \lambda_s)^{\frac{1}{2}}$, 等式(14)和(15)可作为实现渐变 Wiggler 场强器件的理论设计依据。例如假定 $\gamma_0 = 2$, $\gamma_r = 1.5$, $\lambda_w = 24 \text{ mm}$, $\lambda_s = 8 \text{ mm}$, $l = 1 \text{ m}$, 则可得 $\delta = 0.4522/\text{m}$ 。式(15)表明不同能量相对论电子选择递减率是不同的,而对于同一能级的相对论

电子选择不同的递减率所得效果也是不一样的,这一点由文献[6]中计算机模拟结果可充分说明。假定 Wiggler 矢势按下列线性缓慢变化:

$$a_w(z) = a_w(0) - [a_w(0) - a_w(L)]z/L \quad (16)$$

则渐变 Wiggler 自由电子激光器效率为:

$$\eta_1 = f_{e1} \frac{a_w(0) a_s (K_w + K_s) L}{\gamma (\gamma_r - 1)} \sin \psi_r \left[\frac{1 + a_w(L)/a_w(0)}{2} \right] \quad (17)$$

四、实验及结果讨论

为了进一步验证渐变 Wiggler 对提高效率的作用,我们在 0.45 MeV 电子束能量喇曼型自由电子激光器上进行渐变 Wiggler 场强实验。

4.1 实验装置

图 1 是实验装置示意图,其中引导磁场可在 0~20 kG 范围内选择,它的作用是约束无箔二极管产生的强流(800 A)低能电子束轴向束流,引导电子回旋运动并与 Wiggler 磁场相匹配。

实验中渐变 Wiggler 场强器件是由 1.44 m 长锥形双螺旋管绕制而成,螺旋面锥度为 0.3° ,双螺旋线径为 $\phi 3.5$ mm 漆包线,螺旋周期 λ_w 为 24 mm,共 60 圈。双螺旋线在反相电流激励下其中心轴上可形成渐变横向周期磁场。为了使电子束在入口端有一个场强从小到大均匀过渡区,在器件入口端 5 个 λ_w 范围内并联 8 个高阻抗导线。由于锥度小以及并联阻抗影响,过度区后约 10 个 λ_w 范围内呈稳定等幅场强(见图 2)。Wiggler 器件实测始末端场强比 ($B_w(0)/B_w(L)$) 为 2.56。其下降部分较接近于指数下降规律。

实验中相干辐射由锥形喇叭口输出,通过碳斗量热计测量能量,其辐射波形由反射镜进入 8 mm 波导管,并用示波器观察,未被接收的部分辐射均由微波吸收屏吸收。

4.2 结果与讨论

由于选用渐变 Wiggler 场强为泵浦场,自由电子激光器运行工作条件有所变化。实验中

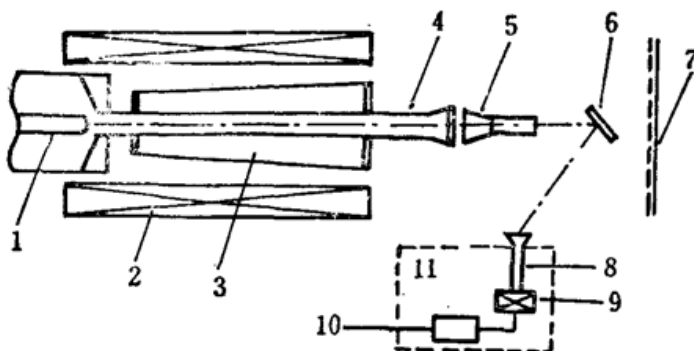


Fig. 1 Schematic of experimental setup of a Raman FEL

1—diode; 2—guide magnetic field solenoid; 3—tapered wiggler; 4—drift tube; 5—calorimeter; 6—mirror; 7—microwave absorbent; 8—waveguide; 9—test system of millimeter wave; 10—oscillograph; 11—shielding house

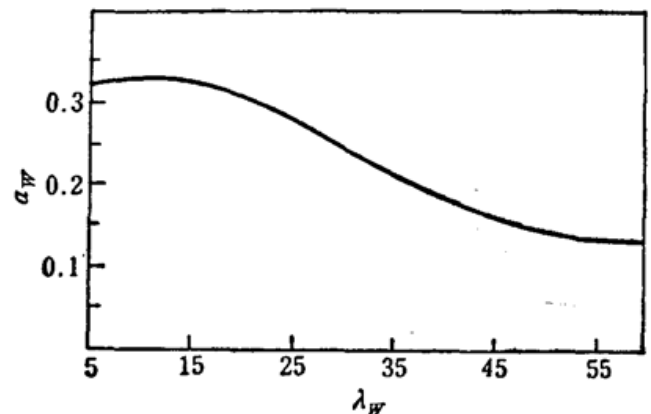


Fig. 2 Vector potential profile of the tapered wiggler field

最佳工作点的确定分二步进行: (1) 初选定一个引导磁场($B_0=12.4\text{ kG}$), 改变 Wiggler 场强, 并测量辐射能量变化规律(见图 3), 从中挑选最大辐射状态时所对应场强作为最佳 Wiggler 场强工作点; (2) 在上述确定 Wiggler 场强工作点条件下, 再改变引导磁场, 测量其对应的辐射能量变化规律(见图 4)。最佳辐射状态下所对应的引导磁场为最佳引导磁场工作点。为了与相应恒定 Wiggler 场强情况下实验结果作比较, 1.3 m 长恒定 Wiggler 场强喇曼自由电子激光器的实验结果如图 4 中的虚线所示(引自文献[7]图 6)。由图 4 可看出, 渐变 Wiggler 场强实验中输出辐射能量要比恒定 Wiggler 场强所得实验结果大得多。

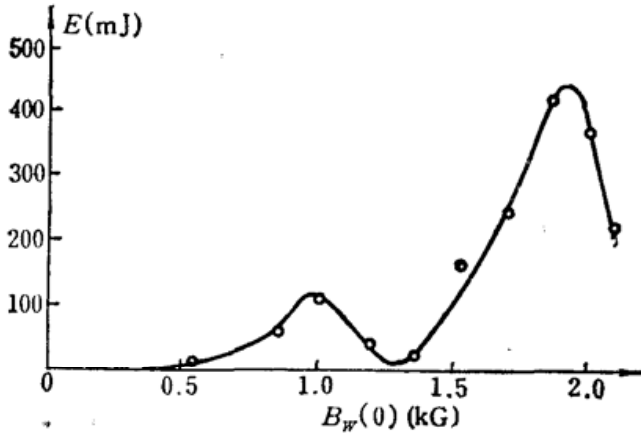


Fig. 3 Emission energy vs wiggler magnetic field $B_w(0)$ at the guide magnetic field B_0 of 12.4 kG .

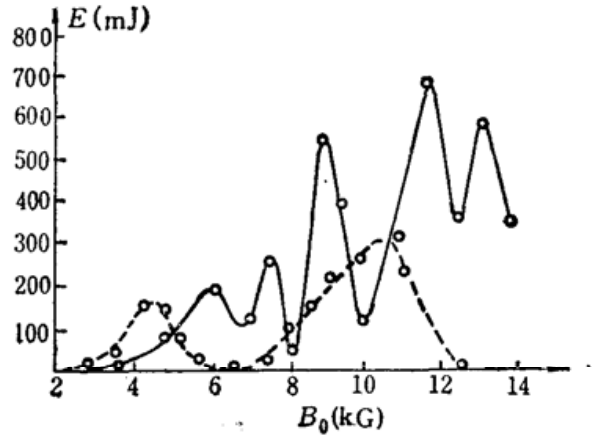


Fig. 4 Emission energy measured vs guide magnetic field, solid line is the measured result at tapered wiggler magnetic field, dotted line is the measured result at constant wiggler magnetic field

在最佳运行工作条件下, 由碳斗量热计测得相干辐射能量达 668 mJ , 辐射波长 λ_s 范围为 $8\sim 10.4\text{ mm}$, 输出峰值功率达 31 MW 。实验中注入电子束功率约 320 MW ($I=800\text{ A}$, $V=0.4\text{ MV}$)。计算出效率为 9.68% 。而 1.3 m 长恒定 Wiggler 场强相应的实验结果仅为 3.7% ^[7], 但前者是后者的 2.6 倍。这个结果虽然比利弗莫尔实验室的结果^[5] 差些, 但他们是在中等电子束能量 (4.5 MeV) 条件下进行的实验, 而我们在偏低电子束能量 (0.45 MeV) 条件下进行的实验。

本所陆载通、张立芬和王瑞强参加了有关实验工作, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 刘盛纲, 强激光与粒子束, **2**(2), 131(1990)
- 2 N. M. Kroll *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**, 1436(1981)
- 3 A. Bhowmik *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**, 998(1985)
- 4 R. H. Jackson *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 346(1983)
- 5 T. J. Orzechowski *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(17), 2172(1986)
- 6 田世洪 *et al.*, 强激光与粒子束, **2**(4), 467(1990)
- 7 陆载通 *et al.*, 光学学报, **9**(9), 780(1989)