

储存环自由电子激光器的高次谐波运转特性研究

傅恩生 王之江

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文提出当 Wiggler 磁场参数 $K \geq 2$ 时, 用高次谐波运转的储存环自由电子激光器, 不仅可以得到更短波长的自由电子激光, 而且比同样波长在基波运转时有更高的增益, 同时所需要的初始激光强度也比同样波长在基波运转时低。给出了一种可能的实验方案。

Properties of higher harmonic operation in storage ring FELs

Fu Ensheng, Wang Zhijiang

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

Abstract: In this paper, we propose that when wiggler magnetic parameter $K \geq 2$, using higher harmonic operation for a storage ring free electron laser, we can not only obtain shorter wavelength coherent radiation, but may also get more gain than that of the fundamental harmonic with the same wavelength. At the same time, the initial laser intensity needed for the higher harmonic operation is lower than that for the fundamental harmonic operation. A possible experimental scheme is also presented.

一、引言

自由电子激光器向紫外和真空紫外短波长区的发展, 引起了人们的极大关注。Madey 指出, 用直线加速器由于受到电子束发射度和能散度的限制, 可获得短波长的极限是 $1\mu\text{m}$ 。1977 年斯坦福大学得到的 $3.2\mu\text{m}$ 的自由电子激光可认为是用直线加速器所能得到的最短的波长了^[1]。电子储存环能提供比直线加速器更理想的电子束, 它们不但有更低的发射度和能散度, 而且有更高的束流密度, 这正是自由电子激光器所需要的。因此

Pellegrini 提出用电子储存环中的高质量的电子束做自由电子激光器, 即储存环自由电子激光器, 可望获得紫外或更短波长的相干辐射^[2]。

本文提出, 当 Wiggler 磁场参数 $K \geq 2$ 时, 用高次谐波运转的储存环自由电子激光器, 不仅可以得到更短波长的自由电子激光, 而且比同样波长在基波运转时有更高的增益。同时, 所需要的初始激光强度也比同样波长在基波运转时低。最后, 给出了一种可能的实验方案。

收稿日期: 1986 年 12 月 30 日。

二、理论基础

对周期数目固定, 可变磁体间隙的常周期 Wiggler, 我们推出激光增益表达式为^[3]

$$G = \frac{\pi f \omega_p^2 N^3 \lambda_w^2}{c^2 \gamma^3} K^2 [J_{\frac{f-1}{2}}(f\xi) - J_{\frac{f+1}{2}}(f\xi)]^2 \times \frac{2 - 2 \cos x - x \sin x}{x^3}, \quad (1)$$

其中 f 是谐波级次, ω_p 是等离子体频率 ($\omega_p^2 = 4\pi n e^2/m$), N 是 Wiggler 的周期数目, λ_w 是 Wiggler 周期长度, c 是光速, γ 是以电子静止质量为单位的电子能量, K 是 Wiggler 磁场参量 ($K = \frac{eB\lambda_w}{2\pi m c^2}$), $\xi = \frac{K^2}{4(1 + \frac{K^2}{2})}$, J 是贝塞尔函数, $x = 4\pi N f \delta$, $\delta = (\gamma - \gamma_r)/\gamma_r$, γ_r 是共振能量。当 $x=2.6$ 时, 得极大值增益

$$G_{\max}(f, K) = 0.424 \frac{f \omega_p^2 N^3 \lambda_w^2}{c^2 \gamma^3} \times K^2 [J_{\frac{f-1}{2}}(f\xi) - J_{\frac{f+1}{2}}(f\xi)]^2. \quad (2)$$

利用共振条件

$$\gamma^2 = \frac{\lambda_w}{2\lambda_s} \left(1 + \frac{1}{2} K^2\right), \quad (3)$$

并将(3)代入(2)中得到

$$G_{\max}(f, K) = 1.199 \frac{f \omega_p^2 N^3 \lambda_w^{1/2} \lambda_s^{3/2}}{c^2 \left(1 + \frac{1}{2} K^2\right)^{3/2}} \times F(f, K), \quad (4)$$

其中

$$F(f, K) = K^2 [J_{\frac{f-1}{2}}(f\xi) - J_{\frac{f+1}{2}}(f\xi)]^2. \quad (5)$$

对给定的波长 λ_s , 谐波运转增益与基波运转增益之比

$$\Gamma \equiv G_{\max}(f, K, f\lambda_s) / G_{\max}(1, K, \lambda_s) = f^{5/2} F(f, K) / F(1, K), \quad (6)$$

其中 $f\lambda_s$ 表示与 f 次谐波相应的基波波长。图 1 表示 Γ 与 f 和 K 的关系。可见, 选择 $K > 2$ 采用谐波运转有更高的增益。

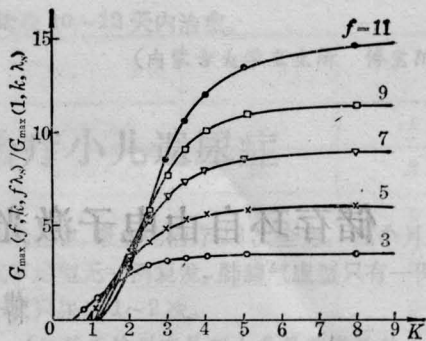


图 1 对给定的波长, 谐波增益与基波增益的比值与 f 和 K 的关系

三、实验方案举例

我们以布鲁克海文真空紫外储存环上的 U5 磁摆动器 (Brookhaven U5 VUV Undulator)^[4] 为例来讨论采用高次谐波运转的特点。布鲁克海文 U5 真空紫外储存环上的磁摆动器是间隙可调的摆动器, 比较方便的值可取: $\lambda_w = 6.5 \text{ cm}$; $N = 38$; $K = 2$ 。

首先我们计算一下在给定波长 $\lambda_s = 212.0 \text{ nm}$ 上用基波运转和五次谐波运转的增益。用基波运转时, 电子能量 $E_1 = 1.327 \text{ GeV}$, 相应的

$$\gamma_1 = \left[\frac{\lambda_w}{2\lambda_s} \left(1 + \frac{1}{2} K^2\right) \right]^{1/2} = 678.16。$$

极大值增益, 由(4)式得

$$G_{\max}(f=1, K=2, \lambda_s=212.0 \text{ nm}) = 9.265 \times 10^{-24} \times \omega_p^2。$$

当电子束束流密度 $I = 1.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时, 相应的 $\omega_p^2 = 10^{22} \text{ s}^{-2}$, 于是 $G_{\max}(f=1, K=2, \lambda_s=212.0 \text{ nm}) = 9.2\%$ 。以 $1.06 \mu\text{m}$ 做基波 (它的五次谐波是 212.0 nm) 所需的电子能量 $E = 593.8 \text{ MeV}$, 相应的 $\gamma = 303.28$ 。在五次谐波 (212.0 nm) 上的增益, 由(6)式得

$$G_{\max}(f=5, K=2, f\lambda_s=1.06 \mu\text{m}) = 29.5\%。$$

这表明用五次谐波运转, 其增益比基波运转的增益高 3.18 倍。

其次来计算一下所需的初始入射激光功率。根据[5]理论,初始入射激光功率密度

$$P = \frac{1}{2z_0} \left(\frac{mc^2}{e} \right) (a_s k_s)^2, \quad (7)$$

其中 $z_0 = 377 \Omega$, 是真空阻抗; $a_s = \frac{e}{mc^2} E_s$.

E_s 是入射激光场电场振幅。

$$a_s k_s = \frac{k_w (\Delta\gamma)^2}{K \left[\cos \psi_r - \left(\frac{\pi}{2} - \psi_r \right) \sin \psi_r \right]}, \quad (8)$$

其中 $\Delta\gamma = \delta \cdot \gamma$. 按极大值增益条件

$$\delta = 2.6 / (4\pi Nf), \quad (9)$$

于是得到基波运转时所需入射激光功率密度 $P = 7.38 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$. 而用 $1.06 \mu\text{m}$ 五次谐波运转时所需的功率密度 $P = 4.89 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 比前者小 1.5×10^4 倍。

一种可能的实验布置如图2所示。用来增强电子束聚束的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光和电子束同轴地注入到 Wiggler 磁场中, 自由电子产生的基波 ($1.06 \mu\text{m}$) 和高次谐波辐射, 经石英棱镜分光。用反射镜 M_2, M_3, P_2, M_4 和 $M_1 P_1$ 组成环形腔, 使五次谐波 (212.0 nm) 振荡, 其中 M_2 是部分透射部分反射的耦合输出镜; P_2 是可移动的直角 V 形棱镜, 用来调整

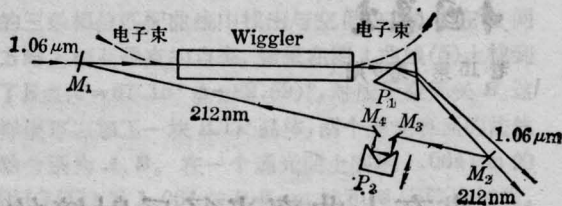


图2 在储存环自由电子激光器中高次谐波运转的实验装置

环形腔的光程, 使往返入射的辐射和新产生的辐射保持同位相。不需要的其他谐波辐射可用光阑遮挡。

总之, 对储存环自由电子激光器, 我们预期对 $K \geq 2$ 的 Wiggler 采用高次谐波运转, 可能得到更短波长、更高增益的相干辐射, 而且在实验上是可能实现的。

参 考 文 献

- 1 Madey J M J. *Journal De Physique, Colloque Cl, Supple-ment*, 1983, **44** (au n 2): Cl-169
- 2 Pellegrini C. *Physics of Quant. Electr.*, 1980; **7**:415
- 3 傅恩生, 凌根深, 王之江. *光学学报*, 1987; **7**(4):317
- 4 Krinsky S et al. *Journal De Physique, Colloque Cl, Sup-plement*, 1983; **44** (au n 2): Cl-113
- 5 Kroll N M et al. *Physics of Quant. Electr.*, 1980; **7**:89

(上接第 263 页)

$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_2 + \xi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

束腰半径为:

$$\omega_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{1/2} \frac{|B|^{1/2}}{\left[1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{1/4}} \quad (5)$$

我们在 $R_1 = 5 \text{ cm}$, $R_2 = 3 \text{ cm}$, 其余参数同图 4 的情况下进行了一系列计算。计算表明, 对上述的各种 R 值, 在适当的条件下都可以得到保持 ω_{ob} 和 ω_{ob} 较小而 ω_{ca}/ω_{ob} 又有较大值。从而证明这种方案是可行的。我们用图 1 所示的光学谐振腔, 用曲率半径为 1.5 m , 2.5 m , 3 m 的反射镜代替平面镜, 发现其稳

定域明显增大, 调整精度要求降低。用上述的光学谐振腔, 我们利用激光振荡波长与腔镜介质膜的反射谱带中心波长不一致时所产生的色散效应补偿自相位调制所形成的啁啾, 在腔内不加任何色散元件的情况下控制实验参数, 实现了 30fs 的稳定的锁模运转^[7]。

参 考 文 献

- 1 Fork R L, Green B I et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1981; **38** (9): 671
- 2 王清月 et al. *光学学报*, 1986; **6**(4): 320
- 3 邢岐荣, 章若冰, 王清月. *光学学报*, 1984; **4**(6): 558
- 4 Diatal W. *Opt. Commun.*, 1982; **43**(1): 69
- 5 New G H C. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974; **QE-10**(2): 910
- 6 方洪烈. *光学学报*, 1984; **4**(5): 385
- 7 章若冰, 王清月, 张忱 et al. 第三届全国基础光学学术会议, 南宁, 1986; 11: 4~8