

CAEP 远红外 100 μm FEL 自发辐射谱的实验研究

边清泉¹, 杨振萍², 李正红³

- 1. 绵阳师范学院化学系, 四川 绵阳 621021
- 2. 西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621021
- 3. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 在 FEL 实验中, 电子束通过摇摆器, 一方面由于周期性磁场作用, 电子束轨迹要周期性的摆动, 另一方面还要辐射同 FEL 辐射波长一致的自发辐射, 该辐射谱反映电子束、摇摆器集成后的参数。在 CAEP (Institute of China Academic Engineering Physics) 远红外 100 μm FEL 实验中, 自发辐射谱通过 Ge : Ga 低温探头和远红外 100 μm 光栅谱仪测量。文章侧重从实际摇摆器磁场分析了远红外 100 μm FEL 的自发辐射谱。

关键词 自发辐射; 自由电子激光 (FEL); 摇摆器; 光栅谱仪

中图分类号: O434.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2006)11-1993-03

引言

自由电子激光(FEL)是利用相对论性电子束, 通过摇摆器同电磁辐射场进行能量交换的辐射装置^[1,2], 具有输出功率高、效率高、光束质量好、频率连续可调等特点^[3], 原则上从毫米波、红外、可见、紫外、甚至到 X 射线^[4,5]的相干辐射均可以用 FEL 的方法产生。在 FEL 研究中, 自发辐射是一个重要内容^[6], 电子束通过摇摆器, 一方面电子束轨迹要周期性的摆动, 另一方面还要辐射同 FEL 辐射波长一致的自发辐射, 该辐射谱反映电子束、摇摆器集成后的参数。根据 Meday 定理, FEL 的增益同自发辐射谱密切相关^[7]。同时由于 FEL 的自发辐射还具有方向性好、相干性好、亮度高等特点, 这种辐射作为一种远紫外或 X 光源而受到广泛的重视^[8,9]。

1 基本理论

每一个电子产生的自发辐射由它在摇摆器中的轨迹决定, 与相对论性电子在弯曲磁场中产生的宽频带同步辐射不同。FEL 摇摆器产生的自发辐射, 在频率和辐射角上有详细的精细结果。根据洛伦兹力的运动方程可以确定电子轨迹:

$$\frac{d\vec{\beta}_\perp}{dz} = \frac{e}{\gamma m_0 c} (\vec{\beta} \times \vec{B}(z))_\perp \quad (1a)$$

$$\frac{dy}{dt} = 0 \quad (1b)$$

$$\gamma = (1 - \beta_x^2 - \beta_y^2)^{-\frac{1}{2}} = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (1c)$$

式中 βc 为电子运动速度, c 为光速, $\vec{\beta}_\perp c = (\beta_x, \beta_y, 0)$ 为电子横向速度, $B(z)$ 为摇摆器磁场, $\beta = (\beta_x^2 + \beta_y^2)^{1/2}$ 。

根据实验测得的摇摆器 $B(z)$ 及电子的初始注入条件, 由式(1)可以确定电子在摇摆器中的运动轨迹(见图 1)。由此根据 Lienard-Weichert 势^[10]可以得到围绕观测方向 n 、在立体角 $d\Omega$ 和频率 $d\omega$ 内的远场辐射谱为:

$$\frac{d^2 I(\theta, \omega)}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \omega^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{\beta}) e^{i(\omega t - \vec{n} \cdot \vec{r}(t)/c)} dt \right|^2 \quad (2)$$

式中 $\vec{r}(t)$ 为 t 时刻电子的位置, I 为辐射场强度, θ 为辐射方向角, ω 为辐射频率。

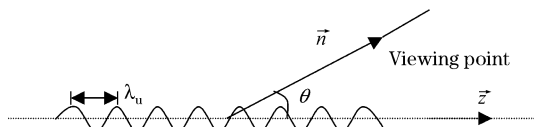


Fig. 1 Trajectory of electron in the wiggler

2 单电子自发辐射谱

2.1 理想摇摆器

摇摆器是 FEL 中的一个核心部件, 提供一个周期性的横向磁场, 理想摇摆器磁场沿轴向 (z 轴) 呈正弦变化, 可以表示为

$$\vec{B}(z) = B_0(0, \sin k_u z, 0)$$

收稿日期: 2005-08-08, 修订日期: 2005-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(10347009)资助项目

作者简介: 边清泉, 1955 年生, 绵阳师范学院化学系教授

式中 B_0 为峰值场强(磁感应强度), $k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u}$ 由摇摆器周期决定。

根据式(1), (2)可得电子通过摇摆器后自发辐射谱的理论表达式(只考虑轴上自发辐射):

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{2N^2 \gamma^2 K^2}{c(1+K^2)^2} \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2 \quad (3)$$

式中 N 为摇摆器周期数, γ (与(1a)式的 γ 相同) 为电子相对论因子, $K=0.66B_0\lambda_u$ ($B_0/T, \lambda_u/cm$), $x = N\pi \frac{\pi - \omega_r}{\omega_r}$ ($\omega_r = 2ck_u\gamma^2/(1+K^2)$), 其中 T 是磁感应强度单位, cm 是波长单位。

由此可得, 自发辐射谱中心频率 ω_0 为

$$\omega_0 = 2ck_u\gamma^2/(1+K^2) \quad (4)$$

辐射谱相应的中心波长为

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}(1+K^2) \quad (5)$$

辐射谱半高宽(FWHM)为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 1/N \quad (6)$$

2.2 CAEP(Institute of China Academic Engineering Physics) 远红外 100 μm FEL 摇摆器

远红外 100 μm FEL 实验中摇摆器的周期为 3.0 cm(指的是结构周期长度), 周期数 50, 峰值场强 3.2 kG, 间隙 17 mm, 磁场峰-峰相对误差的均方根 $< 0.05\%$; 电子能量为 6 MeV, 电子束平均电流 200 mA, 宏脉冲宽度 4 μs ; 由式(5)和式(6)可得自发辐射谱中心波长的理论值为 118 μm , 谱宽(FWHM)为 2%(这里指的是相对谱宽, 其定义为 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, 用半高宽方法确定其大小)。图 2 为用霍尔探头测量的摇摆器磁场(图中 z 为纵向位置, 单位为 m, H 为磁场强度, 单位为 kG(千高斯, 1 G = 10^{-4} T)), 图 3 为电子轨迹, 图 4 为根据电子轨迹得到的单电子自发辐射谱。

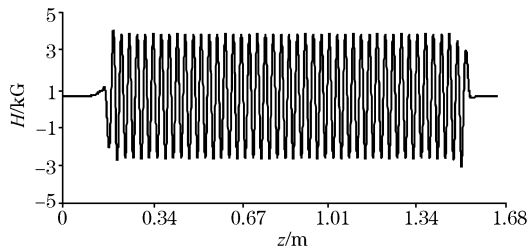


Fig. 2 Measured magnetic field of wiggler

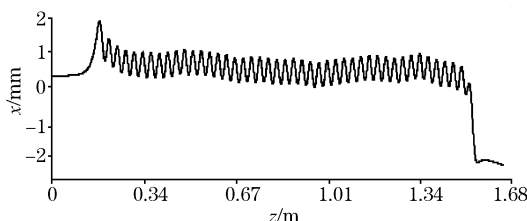


Fig. 3 Electron trajectory according to measured field

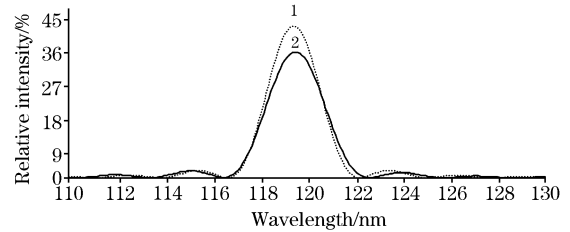


Fig. 4 Calculated spontaneous emission spectrum

1: Ideal field of wiggler; 2: Measured field

由图 4 可得, 该自发辐射谱中心波长为 118 μm , 同理理论值相同; 宽度(FWHM)为 2.2%, 略大于相应的理论值, 这是由于实际摇摆器磁场中的高阶谐波, 这种高阶谐波引起的发射谱加宽同摇摆器入口磁场、出口磁场、以及磁场峰-峰差有关。

在 FEL 实验中, 电子束有一定的能散和发射度。根据 FEL 理论, 电子束能散引起的发射谱加宽(FWHM)近似等于电子束的能散度(RMS 值), 通常情况下发射度的影响较小, 因而考虑电子束能散的影响时, 理论上远红外 100 μm FEL 的自发发射谱宽为 2.7%。

3 实验测量

在 CAEP 远红外 100 μm FEL 实验中, 自发辐射谱是通过远红外 100 μm 光栅谱仪^[11], 结合 Ge: Ga 低温探头进行测量^[12, 13], 测量安排如图 5, 电子束通过摇摆器发出自发辐射, 该辐射通过轴上光栅限制后进入谱仪。由谱仪中远红外光栅分光后, 进入 Ge: Ga 低温探头进行测量, 探头灵敏度 2.5 $V \cdot \mu W^{-1}$, 探头波长响应范围 150~40 μm ; 谱仪分辨率 0.5 μm , 谱仪测量范围 150~50 μm 。

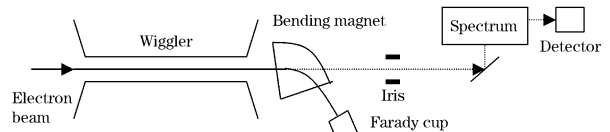


Fig. 5 Experimental arrangement

图 6 为 Ge: Ga 低温探头测得的自发辐射信号。根据谱仪中光栅的角度, 信号对应的波长为 120 μm ; 根据探头灵敏度, 信号强度为 2 μW 。图中 1, 2, 3 的纵坐标每格 100 μA , 横坐标每格 5 μs ; 4 的纵坐标每格 0.4 μA , 横坐标每格 5 μA 。

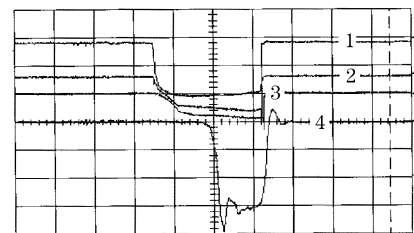


Fig. 6 Signal of spontaneous emission

1, 2, 3: Waveform of Electron beam; after RF gun, at entrance of wiggler, at exit of wiggler, 4: Waveform of spontaneous emission

图 7 为自发辐射谱的测量结果(探头灵敏度为 $2.5 \text{ V} \cdot \mu\text{W}^{-1}$)。由图可以看出该发射谱中信号最强的波长为 $120 \mu\text{m}$, 不在谱中心; 谱宽(FWHM) $\sim 3\%$, 略大于相应的理论

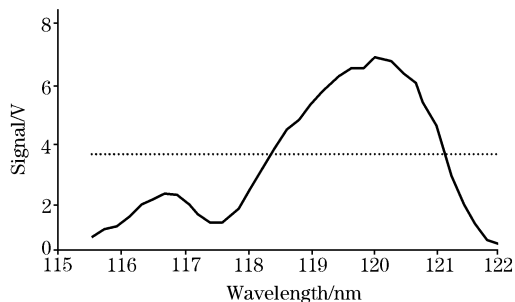


Fig. 7 Measured spectrum of spontaneous emission

值。

4 实验结果分析

比较图 4 和图 7 可以看出, FEL 实验中实际自发辐射谱宽略大于相应的理论值, 符合理论分析; 然而从谱分布来看, 两者差异较大, 这是由于电子束中电子能量分布引起的。由于加速器调试方面的原因, 电子束进入摇摆器时, 电子束中电子能量分布不是对称分布, 而在低能段分布较高, 因而自发辐射中辐射最强的信号不在谱中心。而且从图 7 可以看出, 实际自发辐射谱有 2 个辐射峰, 其中较小的辐射峰在短波长区, 说明电子束中有一小部分电子集中在高能段, 这同电子束进入摇摆器时的实验测试结果符合。

参 考 文 献

- [1] Brau C A. Free Electron Laser. New York: Acedemic Press, 1990. 63.
- [2] HUI Zhong-xi, YANG Zhen-hua(惠钟锡, 杨振华). Free Electron Laser(自由电子激光). Beijing: National Defense Industrial Press(北京: 国防工业出版社), 1995. 265.
- [3] Neil G R, Bohn C L, Benson S V, et al. Physical Review Letters, 2000, 84(4): 662.
- [4] Ben-Zvi I. Nucl. Instr. & Methods, 1996, A358: 52.
- [5] Travish G, Fawley W M, Kim K J, et al. Nucl. Instr. & Methods, 1996, A358: 60.
- [6] Neuman C P, Graves W S, O'Shea P G. Physical Reciew, Special Topics, 2000, 3: 030701.1.
- [7] Bazylev V B, Pitatelv M M. Nucl. Instr. & Methods, 1996, A358: 64.
- [8] Depts D, Jaroszynski D A, Weits H H, et al. Nucl. Instr. & Methods, 1996, A358: 72.
- [9] Bakker R J, Mars R, Luijckx G, et al. Nucl. Instr. & Methods, 1996, A358: 358.
- [10] Jackson J D. Classical Electro-Dynamics(经典电动力学). Beijing: People Educational Press(北京: 人民教育出版社), 1982. 63.
- [11] MEI Zeng-xia, ZHANG Xi-qing, WANG Zhi-jian, et al(梅增霞, 张希清, 王志坚, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(3): 461.
- [12] ZHANG Lian-shui, ZHANG Gui-yin, ZHAO Xiao-hui, et al(张连水, 张贵银, 赵晓辉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(6): 641.
- [13] ZHOU Ren-long, PENG Jing-cui, LI Hong-jian, et al(周仁龙, 彭景翠, 李宏建, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(4): 657.

Experimental Investigation of CAEP Far-Infra-Red $100 \mu\text{m}$ FEL Spontaneous Emission

BIAN Qing-quan¹, YANG Zhen-ping², LI Zheng-hong³

1. Mianyang Teachers College, Mianyang 621021, China

2. Science College, South-West University of Science and Technology, P. O. Box 919(1014), Mianyang 621021, China

3. Institute of Applied Electronics of China Academic Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract In the FEL experiment, when electron beam passes through the wiggler, the movement of electron beam will be changed to wiggle in the wiggler due to the periodical magnet field. Meanwhile the electron beam will spontaneously emit the radiation with a wavelength similiar to the FEL radiation. This radiation is influenced by the parameters of both the electron beam and the wiggler. The gain of FEL was determined by the spontaneous emission spectrometer, and the spectrum width mainly determined by the periods of wiggler and electron energy homogeneity ($\Delta E/E$). According to the measured parameters of electron beam and the wiggler, the spontaneous emission was studied. In the experiment, the spectrum of the spontaneous emission was measured by far infrared $100 \mu\text{m}$ spectrometer with Ge : Ga detector.

Keywords Spontaneous emission; FEL; Wiggler; Spectrometer

(Received Aug. 8, 2005; accepted Oct. 28, 2005)