

# 加深光学速调管自发辐射谱调制研究\*

刘金英 徐宏亮 刁操政 贾启卡 何多慧

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

**摘要** 相干谐波储存环自由电子激光的相干增强因子正比于光学速调管自发辐射谱调制率的平方,加深光学速调管自发辐射谱的调制是相干谐波储存环自由电子激光研究的重要一环.介绍在中国科学技术大学800MeV电子储存环上所进行的加深光学速调管自发辐射谱调制的工作,调制率已从0.236提高到了0.80,为相干谐波产生实验奠定了基础.

**关键词** 相干谐波储存环自由电子激光 光学速调管 自发辐射谱调制率

## 1 引言

储存环自由电子激光是第四代同步辐射光源的可能途径之一<sup>[1]</sup>.相干谐波储存环自由电子激光由种子激光和插入储存环直线节中的光学速调管(以下简称OK)组成,它不需光学谐振腔,避免了腔镜损伤问题,有可能把自由电子激光的工作波长推进到真空紫外波段<sup>[2,3]</sup>.

OK由两个波荡器中间插入一个色散段组成.波荡器由沿一轴线排列其磁场垂直于轴线且沿轴线呈空间周期性变化的一系列磁铁组成,色散段是一个周期的强磁场波荡器.电子通过波荡器或OK时发出自发辐射,两者的自发辐射谱均由若干离散的峰构成,电子沿轴入射并近轴观察辐射时,峰的中心波长满足关系式:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left( 1 + \frac{k^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right). \quad (1)$$

式中: $n$ 为谐波数,平面波荡器轴线上的辐射不含偶次谐波 $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ;  $\lambda_u$ 为波荡器磁周期长度, $k = eB_0\lambda_u/2\pi mc$ 为波荡器偏转参数, $B_0$ 为波荡器峰值磁感应强度; $e, m, \gamma$ 分别为电子电荷、静止质量和相对能量, $\theta$ 为相对于轴线的观察角.

由于两波荡器辐射的干涉,OK的自发辐射谱受到调制,即出现精细结构,各个峰的包络形状接近于均匀波荡器的自发辐射谱,但包络内辐射强度( $I$ )随波长迅速波动起伏(参

1998-11-11收稿

\* 国家863激光技术领域和高校博士点基金资助项目

见图 1~3), 第  $n$  次谐波中心波长处相邻峰值  $I_{\max}$  和谷值  $I_{\min}$  之差与和的比值称为第  $n$  次谐波自发辐射谱调制率  $f_n = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ , 调制越深, 调制率越大, 其最大值为  $1.0^{[3-6]}$ .

当波长为基波(谐波数  $n = 1$ )的种子激光和电子束一同沿轴线进入 OK 时, 在第一个波荡器里, 电子能量受到调制, 在色散段中能量调制转变为密度调制, 即电子发生群聚, 群聚的电子由于具有相同的相位在第二个波荡器里发出相干辐射. 相干辐射也包含基波和谐波, 优化 OK 和种子激光参数可以加强所希望的某次相干谐波辐射. 改变种子激光波长, 并相应改变电子能量或 OK 磁极间隙, 可以实现输出相干辐射的调谐. 这就是相干谐波储存环自由电子激光的工作过程.

OK 轴线上第  $n$  次谐波的相干辐射强度  $I_{\text{coh}}$  与自发辐射强度  $I_{\text{inc}}$  之比称为第  $n$  次谐波的光谱相干增强因子  $R_n^{\text{spe}}$ . 可以得到<sup>[7-8]</sup>:

$$R_n^{\text{spe}} = (1/3) N_e f_n^2 J_n^2 [4\pi n (N + N_0) \Delta\gamma / \gamma]. \quad (2)$$

式中  $N_e$  为电子数目,  $f_n$  为自发辐射谱调制率,  $N$  为 OK 波荡器磁场周期数,  $N_0$  为仅由磁场决定的 OK 色散段参数,  $\Delta\gamma / \gamma$  为种子激光引起的电子相对能量改变,  $J_n$  是第  $n$  阶贝塞尔函数.

光谱相干增强因子是相干谐波储存环自由电子激光的主要性能指标. 由(2)式可见, 相干增强因子正比于电子数目  $N_e$ , 而  $N_e$  很大 ( $10^{10}$  量级), 所以相干增强因子很大, 相干辐射强度远高于自发辐射强度. 由(2)式还可见, 相干增强因子正比于自发辐射谱调制率  $f_n$  的平方, 因此, 为得到强的相干谐波辐射, 必须加深自发辐射谱的调制, 这是相干谐波储存环自由电子激光研究的重要一环.

中国科学技术大学 800MeV 电子储存环上的相干谐波储存环自由电子激光实验用 Nd-YAG 激光作为种子激光, 希望得到它的三次相干谐波辐射. 根据(1)式, 在波荡器磁极间隙 40mm, 磁场强度 0.3T, 周期长 72mm 时, 储存环电子能量应为 163MeV.

## 2 光学速调管影响的补偿和自发辐射谱的测量

作为磁性元件, OK 的插入将影响储存环的工作. OK 轴线上磁场的一次积分值为  $0.005\text{T} \cdot \text{cm}$ , 二次积分为  $0.04\text{T} \cdot \text{cm}^2$ , 造成的闭轨畸变的最大值为  $X_{\text{cmax}} = 2.086\text{mm}$ ; 计算结果表明, 六极场对动力学孔径的影响很小, 可以忽略不计; 竖直方向的聚焦作用引起  $\beta$  函数和自由振荡频率  $\nu$  改变,  $\beta_y$  的最大值从 13m 增加到 24m,  $\nu_y$  由 2.58 变为 2.66. 由于 OK 的插入, 难于注入和储存束流, 决定对 OK 的聚焦作用进行补偿. 考虑了局部补偿和全环补偿两种补偿方式, 前者只调整 OK 两端的 4 块四极铁电流,  $\beta$  和  $\eta$  函数的改变只局限在 OK 所在的长直线节; 后者调整全环所有八组四极铁电源或其中几组, 使  $\beta$  函数、 $\eta$  函数、工作点和两 kicker 间相移满足要求. 局部补偿计算结果,  $\beta_y$  比无 OK 时减小, 而  $\beta_x$  增大, 对 OK 的运行和储存环注入有利,  $\nu_x = 3.572$ ,  $\nu_y = 2.782$ , 注入系统两 kicker 间相移  $\Delta\phi = 3.182$ , 有可能运行, 但需新增 4 台四极铁电源, 决定采用全环补偿. 选用的一个全环补偿方案的有关参数为:  $\beta_{y \text{ max}} = 17.2\text{m}$ , 两 kicker 间相移  $\Delta\phi = 3.106$ ,  $\nu_x = 3.590$ ,  $\nu_y = 2.768$ .

按此方案调试,最高得到 50mA 储存束流,为 OK 自发辐射谱的测量奠定了基础。

测量系统由扫描单色仪、光电倍增管和数据采集处理系统组成。为提高分辨率,单色仪的入口狭缝开得很小,在单色仪前放置了一块聚焦透镜,自发辐射被聚焦在单色仪入射狭缝上,在单色仪的出射狭缝处放置光电倍增管,用计算机进行单色仪的扫描控制及数据采集处理,在屏幕上直接显示所测得的光谱曲线。图 1 为第一次实验获得的光学速调管自发辐射谱,调制率为 0.236。

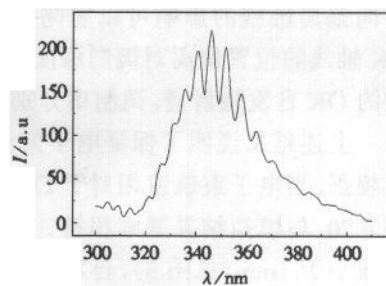


图 1 首次测得的自发辐射谱

### 3 加深自发辐射谱调制的措施及结果

为加深自发辐射谱的调制首先对测量方法和系统进行了改进。由(1)式可知,OK 自发辐射波长随  $\theta$  增加而增加;另一方面,辐射强度随观察角  $\theta$  的增加而迅速降低,本装置自发辐射立体角约为 0.5mrad。由于这两方面的原因,轴线上的近轴辐射谱的调制应是最深的,也正是所需要测量的。要测量到近轴辐射的谱,第一要使测量系统的轴线与自发辐射光的轴线尽可能重合,第二应用光阑滤去远离轴线的光。仔细调整测量系统轴线使之与自发辐射轴线对准,调制率提高到了 0.27,在透镜前放置小孔光阑后调制率进一步提高到 0.34。

为探索进一步加深调制的途径,必须研究影响自发辐射产生的各种因素,为此,对 OK 的自发辐射谱进行了数值模拟。首先研究了电子束和 OK 参数的影响,采用补偿后的 Lattice 参数计算电子束的能散度和发射度,使用实测的 OK 磁场,依据经典的电子辐射理论进行了自发辐射谱数值模拟计算,结果表明,本装置 OK 自发辐射谱调制率可达 0.98。这说明储存环电子束流品质和 OK 磁场可以满足实验要求,同时也说明提高调制率的余地还很大,应该进一步考虑可能影响调制率的其他因素。上面的模拟计算是在电子束与 OK 轴线重合的条件下进行的,如果两者不重合又会如何?于是对电子束偏离 OK 轴线的情况进行了模拟。OK 水平方向磁场的好场区(场强变化  $\pm 1\%$ )达  $\pm 19\text{mm}$ ,电子束水平

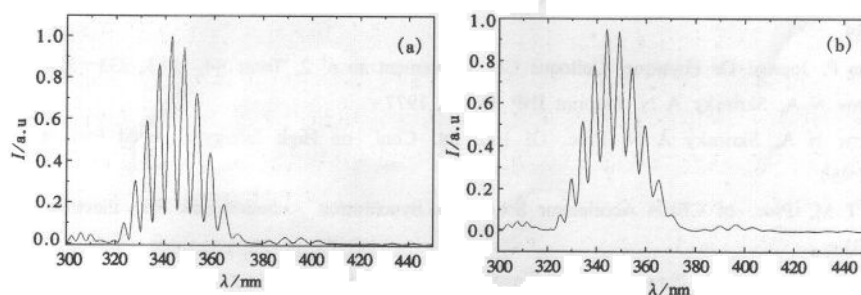


图 2 电子束轨道在竖直方向偏离 OK 轴线  $y_0 = 1\text{mm}$ (a)和  $y_0 = 2\text{mm}$ (b)时的模拟自发辐射谱

$$\sigma_y = 0.1\text{mm}, \sigma'_y = 0.1\text{mrad}, \sigma'_x = 0.2\text{mrad}.$$

方向偏离轴线的影可以忽略,只考虑垂直方向的偏离.模拟结果表明,电子束相对于OK轴线的位置偏离对调制深度的影响很大,图2是偏离值分别为1mm和2mm时模拟得到的OK自发辐射谱,调制率分别为0.74和0.43.

上述结果说明了保证电子束沿OK轴线入射的重要性,为此,进行了储存环电子束闭轨校正,当电子束轨道相对于OK轴线的偏离值在1—2mm之间时,自发辐射谱调制率达到0.70,与模拟结果基本相符.当进一步校正了电子束的轨道,使垂直方向轨道偏离OK轴线小于1mm(见图3),自发辐射谱调制率达到了0.80.

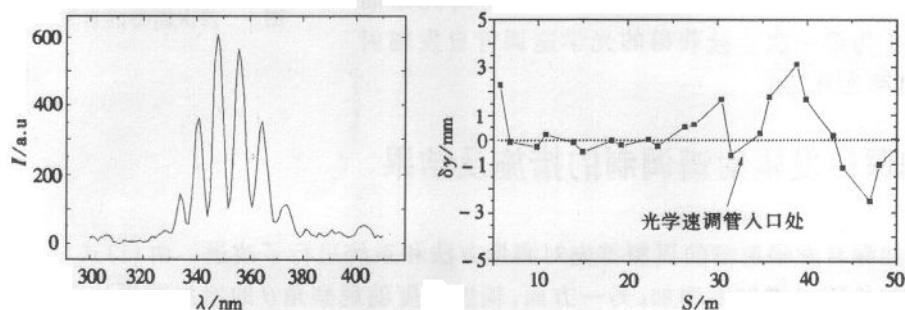


图3 OK处电子轨道偏离OK轴线的值 $\delta y < 1\text{mm}$ 时的自发辐射谱

## 4 结论

加深OK自发辐射谱调制研究已取得重要进展,加深调制的关键是:使电子束入射方向、OK轴线和测量系统轴线三者重合;滤去远离轴线的辐射.自发辐射谱的数值模拟和实验测量结果还说明,储存环电子束流品质和OK磁场将可以满足相干谐波辐射实验要求.目前,储存环闭轨自动校正系统正在研制之中,它的投入将有助于进一步加深OK自发辐射谱的调制和相干谐波辐射实验的进行.

## 参考文献(References)

- 1 Lacalar J L. ESRF News Letter, 1996, 25:6—8
- 2 Sessler A M. Proc. of CERN Accelerator School on Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, 1990, 373—389
- 3 Elleaume P. Journal De Physique, Colloque C1, Supplement au n° 2, Tome 44, 1983, 333—352
- 4 Vinokurov N A, Skrinisky A N. Preprint INP 77, 59, 1977
- 5 Vinokurov N A, Skrinisky A N. Proc. Of 10th Int. Conf. on High Energy Charged Particle Accelerators, 1977, 2:454
- 6 Ortega T M. Proc. of CERN Accelerator School on Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, 1990, 287—303
- 7 Coisson R, Martini F D. Phys. Quantum Electron, 1982, 9:939
- 8 Prazeres R et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1988, A272:68—72

## Investigation on Increasing the Amplitude of Modulation of the Spontaneous Emission of an Optical Klystron \*

LIU JinYing XU HongLiang DIAO CaoZheng JIA QiKa HE DuoHui

(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

**Abstract** The ratio between the coherent and incoherent densities of a coherent harmonic generation FEL is proportional to the square of the modulation rate of the spontaneous emission spectrum of its optical klystron. Therefore enhancing the modulation of the spontaneous emission spectrum of an optical klystron is important for coherent harmonic generation. A coherent harmonic generation experiment is under way on the 800MeV electron storage ring at University of Science and Technology of China. A modulation rate of 0.8 of the spontaneous emission spectrum of an optical klystron has been obtained. This paper reports the measurement and enhancement of the modulation rate.

**Key words** coherent harmonic generation FEL, optical klystron, modulation rate of spontaneous emission

---

Received 11 November 1998

\* Project Supported by 863 Plan and the Doctoral Fund of the State Committee of Education