

# 兼用 FEL 光学速调管的同步辐射 波荡器的设计

李 格 何多慧 贾启卡

(中国科技大学, 国家同步辐射实验室, 合肥, 230026)

**摘 要** 介绍了合肥 800MeV 储存环 FEL 光学速调管改造成同步辐射波荡器的设计与计算过程, 给出了改造方法, 计算了波荡器的光通量与亮度并给出了光通量与亮度曲线。计算结果表明, 改造后的波荡器可以将目前辐射亮度提高两个多数量级, 使许多目前光源亮度下无法开展的研究工作得以进行。

**关键词** 波荡器 光学速调管 亮度

**ABSTRACT** The design and computation of a undulator transformed from optical klystron are presented. The brilliance of HLS (NSRL) can be enhanced two orders by the undulator. Lots of experiments which can not be done at the present brilliance will be made possible.

**KEY WORDS** undulator, optical klystron, brilliance

## 0 引言

合肥 800MeV 储存环完全没有波荡器, 使用的是弯铁辐射。为了提高亮度, 以扩展诸如原子物理, 分子物理, 团簇物理以及磁单极等方面的研究工作, 决定将储存环上自由电子激光研究用的光学速调管设计成为同步辐射与自由电子激光实验两用结构。

光学速调管由三段独立可调的波荡器, 即调制段、色散段和辐射段组成, 分别处于光学速调管前后两端的调制段和辐射段结构相同, 处于这两段之间的色散段结构与它们不同, 若把色散段用与调制段及辐射段相同结构的一段波荡器替换, 则可构成一个均匀的波荡器, 可以产生 4.1 ~ 91.3nm 范围的亮度最高达  $1.3 \times 10^{16} \text{photons/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{A} \cdot 1\% \text{BW}$  的相干光。这亮度比弯铁辐射亮度高两个多数量级。要进行自由电子激光实验时, 只需将中间色散段换回。

## 1 兼用 FEL 光学速调管的波荡器设计

### (1) 总体设计

所建造的光学速调管准备插入合肥 800MeV 电子储存环的第三直线节, 第三直线节两法兰间距离 3072.2mm, 一长 2672.2mm, 横向尺寸 38mm × 80mm 的超高真空室用波纹管与两端法兰连接起来, 以利储存环电子束的绝热通过, 两头弯段开窗以利于种子激光的注入和辐射的引出。

### (2) 磁体结构设计

光学速调管的磁体结构如图 1(a) 所示, 场一次积分与二次积分的调零, 采用微调每

1994 年 12 月 27 日收到原稿, 1995 年 10 月 13 日收到修改稿。

部分两端的半块小磁块与垫片的方法, 小磁块间间隙为 0.5mm; 变换成一长波荡器时, 将两端磁体靠近中间色散段的半块小磁块和色散段换上与两端磁体相同的单层三个周期的两块磁体, 构成一个 27 周期的长波荡器如图 1 (b) 所示。

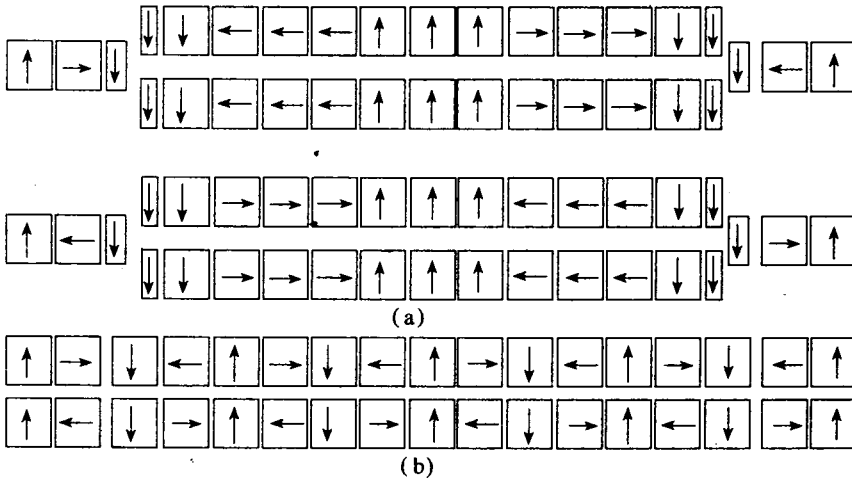


Fig.1 The magnets of optical klystron (a) and a long undulator (b)

图 1 光学速调管 (a) 和 27 周期的长波荡器 (b) 的磁体结构

磁体的磁铁宽度为 100mm, 而电子在其中的横向摆动距离只有几个 mm, 因此磁场空间分布的计算可简化为二维问题, 其大小为<sup>[1]</sup>

$$B_0 = 2B_r \cdot [\sin(\varepsilon\pi/M)/(\pi/M)] \cdot (1 - e^{-2\pi h/\lambda_0}) \cdot e^{-\pi g/\lambda_0} \quad (1)$$

式中,  $B_r$  为剩磁,  $M$  为每周期磁块数,  $\lambda_0$  为周期,  $h$  为磁块高度,  $g$  为磁间隙,  $\varepsilon = 4h/\lambda_0$  为填充因子。

为了使磁块优化组合时选择余地大, 我们取  $M=4$ ; 为了保持同步辐射波荡器三段之间对接时的接口处周期与磁场保持一致, 小磁块间留有 0.5mm 间隙, 对接后一、二段间与二、三段间的距离调至 0.5mm, 这样三段合起来即可组成一均匀的 27 周期波荡器。以上波荡器的最大磁场误差是由于各段的磁间隙误差, 根据磁极的平行度允差 0.05mm, 由 (1) 可计算出最大的磁场相对误差为: 磁体间隙为 25mm 时,  $(\Delta B_0/B_0)_{\max} = 1.787\%$ , 满足波荡器同步辐射的要求。

## 2 波荡器同步辐射的光通量与亮度的计算

波荡器辐射的波长为

$$\lambda = (\lambda_0/2i\gamma^2)(1 + k^2/2 + \gamma^2\theta^2), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

这里,  $\theta$  为相对于波荡器的观察角,  $i$  为谐波数,  $\gamma$  为电子的相对论因子,  $k = 0.934(B_0/T) \cdot (\lambda_0/\text{cm})$ , 为磁偏转系数。对应的光子能量为

$$E_\gamma/\text{KeV} = 0.949i (E_e/\text{GeV})^2/[(\lambda_0/\text{cm})(1 + k^2/2 + \gamma^2\theta^2)] \quad (2)$$

这里,  $E_e$  为电子能量。

电子通过周期数为  $N$  的波荡器, 正前方向辐射的奇次谐波光通量 (Flux) 为<sup>[2]</sup>

$$F_i/(\text{photons/s} \cdot \text{A} \cdot 1\% \text{BW}) = 1.43 \times 10^{15} N Q_i$$

这里  $Q_i = (ik^2/(1 + k^2/2)) \cdot \{ J_{(i-1)/2}[ik^2/(4 + 2k^2)] - J_{(i+1)/2}[ik^2/(4 + 2k^2)] \}$ , 单位流强辐射

亮度为<sup>[2]</sup>

$$B/(\text{photons/s} \cdot \text{A} \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{mm}^2 \cdot 1\% \text{BW}) = 3.62 \times 10^{13} N Q_i / \Sigma_X \Sigma_Z \Sigma_X \Sigma_Z \quad (3)$$

式中:  $\Sigma_X = \sigma_X^2 + \sigma_r^2$ ,  $\Sigma_Z = \sigma_Z^2 + \sigma_r^2$ ,  $\Sigma_X = \sigma_X^2 + \sigma_r^2$ ,  $\Sigma_Z = \sigma_Z^2 + \sigma_r^2$ .

此处,  $\sigma_r = (0.95/2\pi)(\lambda/N\lambda_0)^{1/2}$ ,  $\sigma_r = 1.33(\lambda/N\lambda_0)^{1/2}$ ,  $\sigma_X$ 、 $\sigma_Z$  为束流尺寸,  $\sigma_X$ 、 $\sigma_Z$  为束流角散。

据以上计算公式, 我们编写了计算波荡器辐射光通量与亮度的程序, 为了验证程序的正确性, 我们将本程序计算得到的亮度—光子能量曲线(图 2a)与 ESRF 的结果(图 2b)进行比较, 可以看出, 本程序的计算结果是正确的。

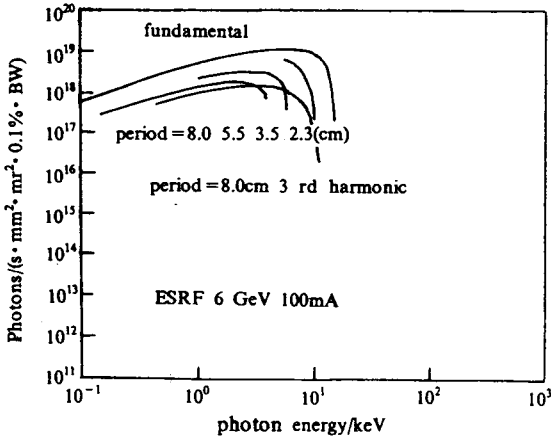


Fig.2a The results of our code  
图 2a 本程序的计算结果

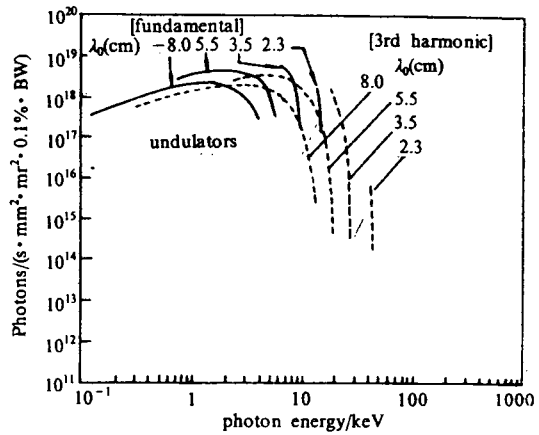


Fig.2b The results of ESRF<sup>[2]</sup>  
图 2b ESRF 的结果<sup>[2]</sup>

利用本程序, 我们计算了合肥 800MeV 储存环改造后的波荡器奇次谐波辐射光通量与亮度曲线, 结果分别如图 3、图 4 所示。从图 4 可以看出, 亮度最高可达

$$B = 1.3 \times 10^{16} \text{photons/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{A} \cdot 1\% \text{BW}$$

对应光子能量与一次谐波波长分别为 32eV, 39.9nm。

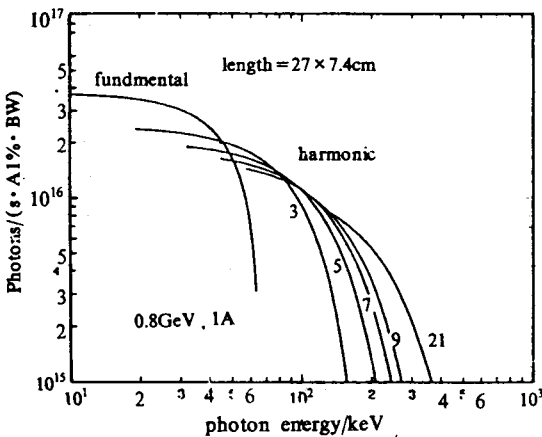


Fig.3 The flux curve vs photon energy  
图 3 波荡器辐射光通量—光子能量曲线

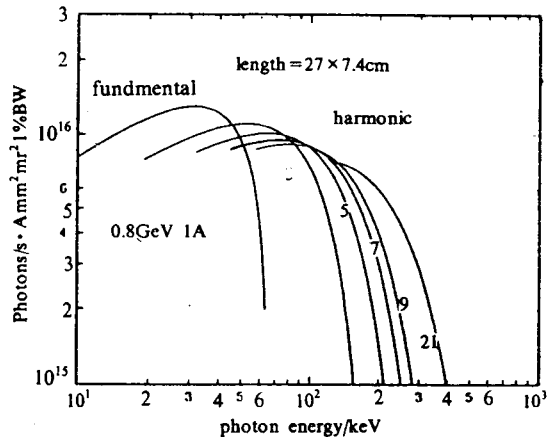


Fig.4 The brilliance curve vs photon energy  
图 4 波荡器辐射亮度—光子能量曲线

与原亮度<sup>[3]</sup> $B = 2.8 \times 10^{13}$ (photons/s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · A · 1%BW)比, 提高两个多数量级。

### 3 结 论

该磁体结构设计法较容易地实现了 FEL 光学速调管改造成同步辐射波荡器的设想, 且可较方便地将中间部分的色散段换回, 进行自由电子激光实验。

由计算结果图 4 可以看出, 改造后的合肥 800MeV 储存环同步辐射波荡器的亮度最高达  $1.3 \times 10^{16}$ photons/s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · A · 1%BW, 基波与谐波可提供光子能量 13.6 ~ 300eV, 对应波长 4.1 ~ 91.3nm, 亮度大于  $2.81 \times 10^{15}$ photons/s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · A · 1%BW(比无波荡器辐射时亮度高两个多数量级)的相干光, 可以部分满足实验用户的要求。

### 参 考 文 献

- 1 Poole M W, Bennett R J and Walker R P. A Wiggler Magnet for the UK Free Electron Laser Project, *Journal de Physique*, Colloque C1, supplement aun1, Tome 45, janvier 1984
- 2 ESRF Foundation Phase Report, B.P.220-38043 Grenoble Cedex Fr.1987
- 3 何多慧, 金玉明, 张武, 裴元吉, 姚志元, 张允武. 原子能科学与技术, 1985, No.6:735

## A UNDULATOR TRANSFORMED FROM OPTICAL KLYSTRON

Li Ge, He Duohui, and Jia Qika  
National Synchrotron Radiation Lab., China Science and  
Technology University, Hefei, Anhui, 230026

There is no undulator radiation in the present Hefei 800MeV storage ring. The used radiations are all from bending magnets. The design and brilliance computation of a undulator transformed from optical klystron are presented. The magnets of optical klystron and undulator are shown in Fig.1a and Fig.1b, respectively. The brilliance computation code compiled by equation 1 to 3 is verified by the results of ESRF. Our results in Fig.2a fit well with the results of ESRF in Fig. 2b. The radiation flux and brilliance of the transformed undulator are computed by this code. The flux curve and brilliance curve are shown in Fig.3 and Fig.4, respectively.

It is easy to find in Fig. 4 that the highest brilliance of the undulator is  $1.3 \times 10^{16}$  photons/s · A · mrad<sup>2</sup> · mm<sup>2</sup> · 1%BW. The undulator can generate the fundamental and harmonic whose region cover photo energy from 13.6eV to 300eV, wavelength from 4.1 to 91.3nm, brilliance from  $2.81 \times 10^{15}$  to  $1.3 \times 10^{16}$ photons/s · A · mrad<sup>2</sup> · mm<sup>2</sup> · 1%BW. In this region the brilliance can be enhanced two orders by the undulator. Lots of experiments which can not be done at the present brilliance will be made possible.