

电子储存环的红外边缘辐射

李承祥 王卫

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍了电子储存环中偏转磁铁入口和出口处的非均匀磁场产生的辐射——边缘辐射,给出了零边缘长度、有限边缘长度、有限直线节长度条件下的辐射通量和亮度分布,通过与常规同步辐射场的比较,充分说明了边缘辐射是一种优良的红外同步辐射光源。

关键词 红外同步辐射,边缘辐射,边缘长度,通量,亮度

中图分类号 O722

众所周知,电子储存环的偏转磁场可以用来产生从X射线到远红外的同步辐射光^[1],但所有光源都是利用偏转磁场中均匀部分的辐射,对于X射线和VUV(真空紫外线)而言,偏转磁场入口处和出口处的辐射相对于均匀场的辐射不具有价值,但对于红外同步辐射光源而言,入口和出口处的梯度磁场产生的“边缘辐射”具有非常大的价值^[2~4]。目前,已有几个实验室建成了利用边缘辐射的红外光束线,如Aladdin^[5],ALS等,上海同步辐射装置(SSRF)的红外光束线也准备利用边缘辐射,所以充分了解边缘红外辐射的特性是非常必要的。

1 边缘辐射的远场分布

边缘辐射可以用忽略磁场边缘的空间扩展(即磁场跃变)的简单模型来阐明。在这种“零边缘长度”模型下,远场分布是一种沿直线节轴向分布的空心锥状辐射,中心强度为零,峰值强度在 $\theta=1/\gamma$ 处, γ 为相对论质量因子,且辐射分布与波长无关。

考虑电子从直线节进入偏转磁场时的情况,辐射被认为是在 $0 < t < t_f$ 间产生的, $t=0$ 表示进入磁场, $t=t_f$ 足够大以至于电子偏转大于 $1/\gamma$,远场辐射可表示为^[6]

$$\vec{E}(X, \omega) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 c R} \int_0^{t_f} \frac{d}{dt} \left[\frac{\vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}} \right] e^{i\omega_0(t)} dt \quad (1)$$

其中 X 为观察者坐标, c 为光速, $\vec{\beta}(t)$ 为电子速度除以光速, ϵ_0 为真空中介电常数, R 是从观察者到发光点的距离, $\vec{n}$ 为从电子位置指向观察者的单位矢量,对于远场而言, $R \approx |X|$, $\vec{n} \approx X/R$ 是常数。观察时间坐标 t_0 与辐射时间坐标 t 的关系为

$$\frac{dt_0}{dt} = 1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}(t) \quad (2)$$

对于观察角 θ 为 $1/\gamma$ 左右时,当 $d = \beta c t_f \gg \gamma^2 \lambda$ 时,式(1)的相位项

$$\omega[t_0(t_f) - t_0(0)] \approx (2\pi c/\lambda)(1/2\gamma^2 + \theta^2/2) \ll \pi,$$

这里 d 是电子偏转过 $1/\gamma$ 时所通过的距离,即所谓的“边缘长度”,此时(1)式的积分变为:

$$\vec{E}(X, \omega) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 c R} \left[\frac{\vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}} \right]_{t_0}^{t_f} \quad (3)$$

由于观察者的位置,(3)中的 $t=t_f$ 的值可以忽略不计,所以有

$$\vec{E}(X, \omega) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 c R} \left[\frac{\vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{\beta})}{1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}} \right]_0 \quad (4)$$

在观察者坐标系 $X=(x,y,z)$ 中,表达为

$$\vec{E}(X, \omega) = \frac{e\gamma}{\pi\epsilon_0 c R} \times \frac{\gamma\theta}{2(1+\gamma^2\theta^2)} \quad (5)$$

这是一个指向观察者的空心锥状辐射场。

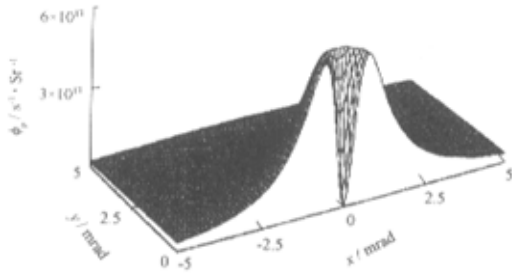
光子通量密度分布为

$$\begin{aligned} \phi_p &= \frac{dF}{d\Omega_{\text{edge}}} = \alpha \frac{\Delta\omega}{\omega} \times \frac{I}{4\pi^2 e} \times \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} \\ &\approx \alpha \frac{\Delta\omega}{\omega} \times \frac{I}{\pi^2 e} \times \frac{\gamma^4 \theta^2}{(1 + \gamma^2 \theta^2)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\alpha=1/137$ 是精细结构常数。

典型的通量密度分布(0.1%带宽)如图1所示。

第一作者:李承祥,男,1964年2月出生,1992年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获博士学位,副研究员,从事同步辐射应用研究
收稿日期:2002-11-07



$E=800 \text{ MeV}$, $0.1\% \text{ BW}$, $I=200 \text{ mA}$

图 1 零边缘长度模型下的远场通量密度分布

Fig.1 Flux density distribution of zero edge length

总的通量为

$$F_{\text{total}} = 2\pi \int_0^{\pi} \frac{dF}{d\Omega} \sin\theta d\theta$$

$$= \alpha \frac{\Delta\omega}{\omega} \times \frac{I}{e} \times \frac{2}{\pi} (\ln 2\gamma - 1) \quad (7)$$

对于通常的接收角 $\theta_{\text{max}} \ll 1$ 的情况, 在 $\theta < \theta_{\text{max}}$ 内接收到的辐射通量为

$$F(\theta < \theta_{\text{max}}) = 2\pi \int_0^{\theta_{\text{max}}} \frac{dF}{d\Omega} \sin\theta d\theta$$

$$= \alpha \frac{\Delta\omega}{\omega} \times \frac{I}{e\pi} \left[\ln(1 + \gamma^2 \theta_{\text{max}}^2) - \frac{\gamma^2 \theta_{\text{max}}^2}{1 + \gamma^2 \theta_{\text{max}}^2} \right] \quad (8)$$

例如 $F(\theta < 3/\gamma) = 1.4\alpha(\Delta\omega/\omega)(I/e\pi)$, $F(\theta < 10/\gamma) = 3.6\alpha(\Delta\omega/\omega)(I/e\pi)$, $F(\theta < 40/\gamma) = 6.4\alpha(\Delta\omega/\omega)(I/e\pi)$, 对于 800MeV 的电子储存环来说, $F_{\text{total}} = 14.1\alpha(\Delta\omega/\omega)(I/e\pi)$, 因而有 $F(\theta < 3/\gamma)/F_{\text{total}} = 0.1$, $F(\theta < 10/\gamma)/F_{\text{total}} = 0.26$, $F(\theta < 40/\gamma)/F_{\text{total}} = 0.45$ 。

2 有限边缘长度的边缘辐射

以上我们讨论的都是“零边缘长度”, 即磁场是跃变的情况下的边缘辐射。事实上, 这只是一种理论模型, 实际的偏转磁场是不可能做到零边缘长度的, 在这种条件下, 没有一个简单的理论公式可以推出, 最有效的方法是用数值积分的方法求解方程(1)。图 2 ($E=800\text{MeV}$, 圆弧半径 $\rho=2.083\text{m}$, 有限长度: 10.8cm , 磁场变化: 线性增加) 显示的是这样一个模拟计算结果。从图 2 的结果不难看出, 在红外区域, 有限边缘长度的边缘辐射通量分布特性与零边缘长度的理想模型计算结果符合得很好, 这说明“零边缘长度”模型是一个很好的近似。

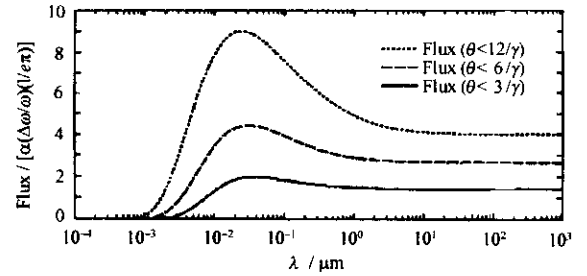


图 2 有限边缘长度条件下的远场边缘辐射通量分布

Fig.2 Farfield flux distribution of finite edge length

3 有限直线节长度

在直线节的轴向观察边缘辐射, 这时, 除了本偏转磁场入口处的边缘辐射外, 上一偏转磁场出口处的边缘辐射也会被观测到, 这两个辐射的时间差为

$$\Delta t_0 = (1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}) \frac{L}{\beta c} \approx \frac{1}{2\gamma^2} (1 + \gamma^2 \theta^2) \frac{L}{c} \quad (9)$$

式中 L 为直线节的长度。

两种边缘辐射的通量叠加产生的边缘辐射场为

$$\phi_p = \frac{dF}{d\Omega} = \frac{dF}{d\Omega_{\text{edge}}} |1 - \exp[i\omega\Delta t_0]|^2$$

$$= \frac{dF}{d\Omega_{\text{edge}}} 4 \sin^2 \left[\frac{\pi L}{2\lambda\gamma^2} (1 + \gamma^2 \theta^2) \right] \quad (10)$$

图 3 所示为几种波长处的远场边缘辐射场图 (实线为通量密度, 虚线为其包络线)。

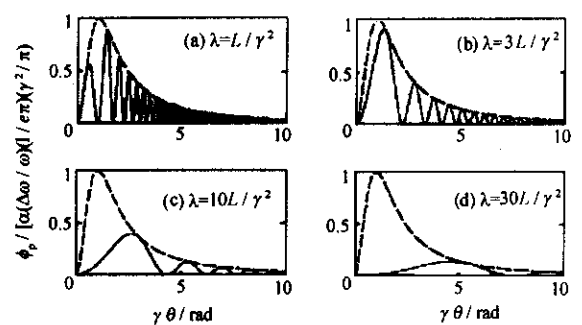


图 3 有限直线节长度条件下远场边缘辐射分布

Fig.3 Farfield edge radiation distribution of finite straight length

对式(10)进行数值积分即可得到有限直线节长度条件下的通量分布曲线, 见图 4。从图 4 可发现, 在有限直线节长度的条件下, 由于出口处和入口处的边缘辐射的叠加, 辐射特性不再如零边缘长度模型下的与波长无关, 而是随波长的增加逐渐衰减。

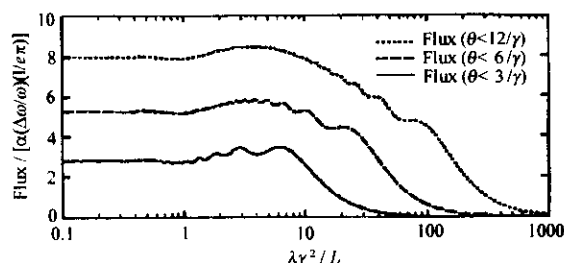


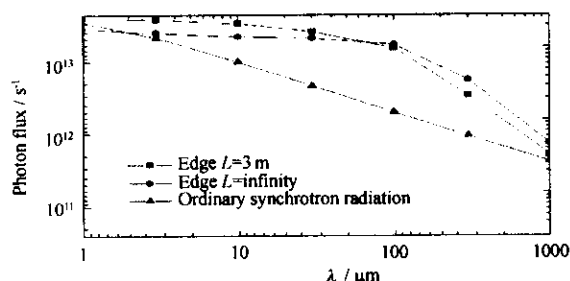
图4 有限直线节长度条件下远场边缘辐射通量随波长的分布

Fig.4 Farfield edge radiation flux distribution of finite straight length varies as wavelength

4 边缘辐射与常规红外同步辐射光源的比较

通量和亮度是衡量红外同步辐射光源的重要指标,下面我们来比较一下常规同步辐射红外光源与边缘辐射光源的亮度和通量。

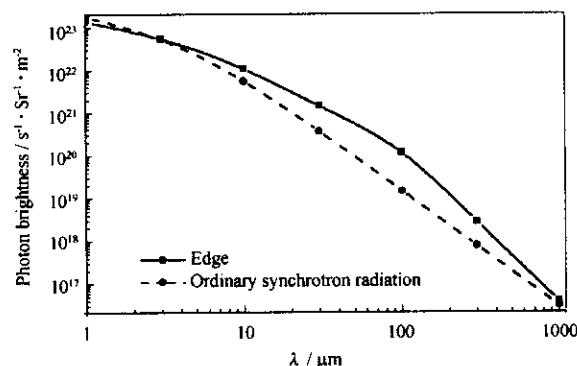
图5、6分别是这两种光源的光子通量和光子亮度在接受角为 $22\text{mrad} \times 11\text{mrad}$ 的比较曲线。



$E=800\text{ MeV}$, $I=200\text{ mA}$, $0.1\% \text{ BW}$

图5 边缘辐射与常规辐射通量比较

Fig.5 Flux comparison between edge radiation and ordinary synchrotron radiation



$E=800\text{ MeV}$, $I=200\text{ mA}$, $0.1\% \text{ BW}$

图6 边缘辐射与常规辐射亮度比较

Fig.6 Brightness comparison between edge radiation and ordinary synchrotron radiation

从图5、6我们不难发现,在相同接收角($22\text{mrad} \times 11\text{mrad}$)的条件下,边缘辐射无论是在通量方面还是在亮度方面都优于常规辐射,是一种非常优良的红外光源。

参考文献

- 1 Carr G L, Hanfland H, Williams G P. *Rev Sci Instr*, 1995, 66: 1643—1651
- 2 Titov A, Yarov A. *Instr Meth*, 1991, A308: 117—123
- 3 Chubar O V, Smolyakov N V. *J Optica (Paris)*, 1993, 24: 117—119
- 4 Bosch R A, May T E, Reininger R, *et al.* *Rev Sci Instr*, 1996, 67: 3346—3351
- 5 Green M A, Huber D L, Rowe E M, *et al.* *Rev Sci Instr*, 1992, 63: 1582—1586
- 6 Jackson J D. *Classical Electrodynamics*. 2nd ed. New York: Wiley, 1975. 657—611

Infrared edge radiation in electron storage ring

LI Chengxiang WANG Wei

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

Abstract The edge radiation from the inlet and exit of a bending magnet was introduced. Then flux distribution and brightness characteristics of zero edge length, finite edge length and finite straight-section length were discussed in detail. After a comparison with ordinary infrared radiation in both flux and brightness, we conclude that the edge infrared radiation is a good infrared synchrotron source.

Key words Infrared synchrotron radiation, Edge radiation, Edge length, Flux, Brightness

CLC O722