

文章编号: 0253-2239(2001)02-242-04

波荡器辐射的空间分布与接受孔的选择

吕述庄 戴志敏 刘桂民 赵小凤

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

摘要: 对波荡器谐波辐射的空间分布作了分析, 并对上海同步辐射装置(SSRF)的波荡器 U3.65 辐射强度的空间分布进行数值模拟研究。在此基础上, 探讨了波荡器辐射的接受孔尺寸选择, 并模拟计算了 SSRF U3.65 的孔传输通量和功率。

关键词: 波荡器辐射; 空间光子分布; 孔通量

中图分类号: TL62⁺6 文献标识码: A

1 引 言

辐射强度的空间分布是波荡器辐射的重要特性。例如, 在同步辐射光束线设计时, 为了知道光束线上单色器或某样品上的光子积分通量, 就得首先清楚波荡器辐射通量或功率的空间分布。单电子通过理想的波荡器时辐射强度的空间分布已很清楚^[1], 但具有一定能量散度和发射度的电子束通过一个实际的波荡器时辐射强度的空间分布就复杂得多, 需要通过数值模拟计算来得到。因此, 详细地模拟计算波荡器辐射强度的空间分布对于光束线的设计是很重要的。

波荡器辐射包含多种波长成分, 且不同波长的光子具有不同的空间分布。其中性能最好的轴上共振波长辐射集中在一个很小的中心锥角里, 而其功率仅占波荡器辐射总功率的很小一部分。所以在设计光束线时, 必须在光学仪器前加接受孔, 以挡掉大量的不需要的辐射功率, 从而降低光束线上各个光学元件的热载。接受孔的选择需根据具体光源波荡器辐射的空间分布来决定。

2 辐射的空间分布

根据单电子通过波荡器时的辐射理论^[1], 轴上共振波长辐射主要集中在以轴向为中心的窄锥角(中心锥角)内。令 n 次谐波的波长为 λ_n , 则

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u(1 + K^2/2 + \gamma^2\theta^2)}{2n\gamma^2}, \quad (1)$$

(1) 式中的 λ_u 表示波荡器的周期长度, K 表示偏转

系数, θ 为观测方向与波荡器轴向间的夹角, γ 是以电子的静止能量为单位的电子能量。令 $\theta = 0$, 得轴上的 n 次谐波波长

$$\lambda_n = \frac{1 + K^2/2}{2n\gamma^2} \lambda_u, \quad (2)$$

和相应的衍射限散角 σ'_r :

$$\sigma'_r = \frac{\sqrt{\lambda_n}}{\sqrt{2L}} = \frac{1}{2\gamma} \sqrt{\frac{1 + K^2/2}{nN_u}}. \quad (3)$$

这里假定光子遵循高斯分布, 衍射限散角是对应于单电子辐射的某一固定频率光子的“中心锥角”, N_u 为波荡器的周期数, $L = N_u \lambda_u$ 表征波荡器长度。若考虑电子束的发射度, 相应的“中心锥角”, 可以取束流均方根角散 $\sigma'_{x,y}$ 和单电子辐射的衍射限散角的均方根值

$$\sum'_{x,y} = \sqrt{\sigma'^2_{x,y} + \sigma'^2_r} \quad (4)$$

研究单色光的角分布, 除了要知道光子在中心锥角内的分布外, 还必须知道中心锥角外该波长光子的角分布, 因为在中心锥角外, 存在谐波(含基波)的偏轴辐射, 而偏轴辐射又常呈不规则的带状分布。

分析(1)可知, 当夹角 θ 改变时, 辐射波长是连续改变的。在实验上, 常常只需要某波长的谐波辐射, 故有必要对谐波辐射的角分布作深入分析。下面对能量一定的谐波辐射的角分布进行分析。

选定轴上的某 n 次谐波 $\lambda_n(0)$ 和夹角 θ 处的某 m 次谐波 $\lambda_m(\theta)$, 当 $\lambda_n(0) = \lambda_m(\theta)$ 时, 可得共振角 $\theta_{m,n}$:

$$\theta_{m,n} = [(1 + K^2/2)(m/n - 1)]^{1/2} / \gamma. \quad (5)$$

从(5)式可知:

1) 当 $m = n$ 时, $\theta = 0$, 这是轴上中心锥角内的谐波辐射。

2) 当时 $m > n$ 时, $\theta > 0$, 即偏轴的谐波辐射:

i) 轴上的基波辐射, $n = 1$, 则 $m = 2, 3, 4, 5 \dots$ 。如 $m = 2$, 即基波的第一个偏轴环出现在夹角

$$\theta_1 = (1 + K^2/2)^{1/2} / \gamma;$$

$m = 3$, 即第二个偏轴环出现在夹角

$$\theta_2 = (2 + K^2)^{1/2} / \gamma.$$

ii) 对轴上的三次谐波辐射, $n = 3$, 则 $m = 4, 5, 6, 7, \dots$ 。

以上对单电子辐射谐波的角分布作了分析。事实上, 由于实际电子束存在发射度和能量散度, 因此要对谐波辐射的空间分布作数值模拟分析。模拟计算中, 利用了国际通用的计算波荡器辐射的数值模拟程序 UR^[2], 该程序在模拟电子束的发射度和能散时, 采用将多个单电子的谱强度叠加的方法。

以下对 SSRF U3.65 作模拟计算, 模拟计算的结果如图 1~ 图 5 所示。SSRF 储存环和波荡器 U3.65 的基本参数如下:

1) 储存环参数: 束流能量 2.2 GeV, 束流强度 400 mA, 能散 0.1%, 环自然发射度 4.3 nm·rad, 耦合系数 0.1, β 函数: 水平 12.8 m, 垂直 4.5 m;

2) U3.65 参数: 周期长度 3.65 cm, 周期数 134, 偏转系数 2.07。

将通量空间分布计算平面取在距源点(波荡器中点) 20 m 处, 以下所有计算结果都是指在距源点 20 m 处得到的。

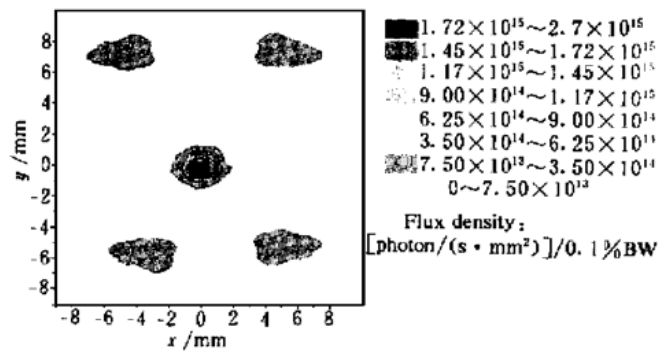


Fig. 1 Spatial distribution of photons at fundamental resonant energy (400.16 eV) from SSRF U3.65 (gap= 14 mm, $K = 2.07$) at 20 m from the source point

图 1 和图 2 分别给出了 SSRF U3.65 的基波辐射(能量等于 400.16 eV)和三次谐波辐射(1200.805 eV)在离源点 20 m 处的空间分布。其中, 磁铁气隙 14 mm, 偏转系数 K 为 2.07, 峰值磁场 B_0 为 0.607 T。可看到轴上基波辐射有最大的通量密度 2.7×10^{15} [photon/(s·mm²)]/0.1% BW, 在偏轴位置坐标为 (± 3.45 mm, ± 7.1 mm) 附近出现 4 个对称分布的较强的辐射光子空间分布。模拟结

果还表明, 辐射强度峰值出现的位置满足以上对角分布的理论分析。

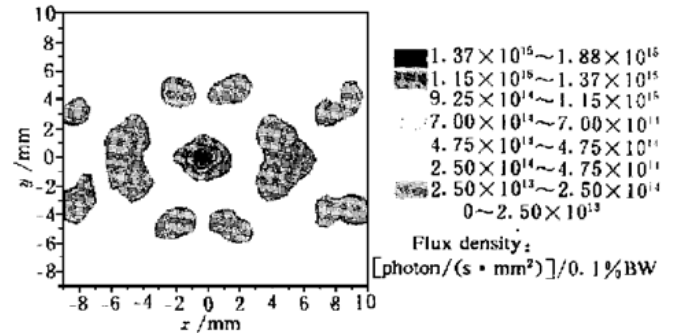


Fig. 2 Spatial distribution of photons at third harmonic energy (1200.80 eV) from SSRF U3.65 (gap= 14 mm, $K = 2.07$) at 20 m from the source point

3 接受孔尺寸的选择

图 3 给出 SSRF U3.65 轴上 1.3.5 次谐波的总积分通量调谐曲线, 最大 K 调到 2.07, 最大通量为 $[1.74 \times 10^{16}$ photon/s]/0.1% BW。

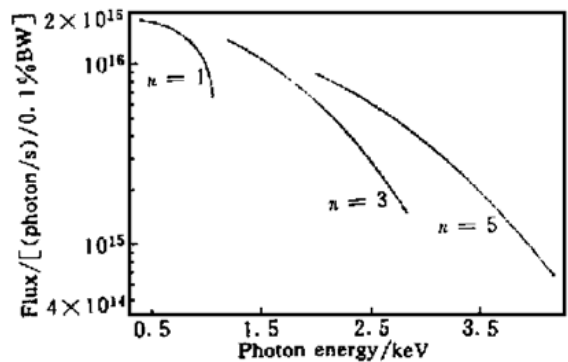


Fig. 3 Tuning curves for the integrated spectral flux of photons from SSRF U3.65

实际上更有意义的是通过孔的通量, 因为孔的尺寸不同得到的通量也不同。因此在光学元件(如单色器)前加孔以抑制无用的光热辐射时, 就必须注意孔尺寸的合理选择。孔的选取应使所需的光通量最大程度得以通过, 同时对不需要的波长光通量要尽可能地加以限制。可以根据光谱的空间分布来选择孔的尺寸。具体地说, 在 $K = 2.07$ 时, 在离源点 20 m 处, 能量为 400.164 eV 的基波辐射中心锥角大小为 1.28 mm \times 1.14 mm, 由此, 尺寸为 1.3 mm \times 1.1 mm 的孔将包含中心锥角辐射。

图 4 比较了 3.5 mm \times 2.7 mm 和 1.7 mm \times 1.3 mm 两种孔的通量调谐曲线(给出了 1.2.3.4.5 次谐波的通量)。可以看到, 尽管孔限制了传输通量的大小, 但对所需的光子(比如中心锥角内的光子)却能使之有效通过。

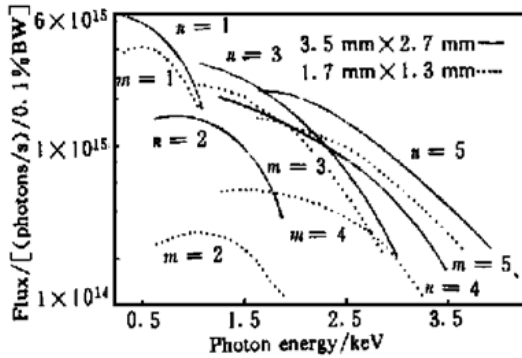


Fig. 4 Tuning curves for the flux through a 3.5 mm × 2.7 mm (solid) and a 1.7 mm × 1.3 mm (dotted) aperture at 20 m from the source

接受孔的选择还与辐射谱带宽有关,对带宽有严格要求的用户,更要谨慎依据光子空间分布选择接受孔尺寸。

图 5 给出基波辐射通量随接受孔的变化关系曲线。可以看到:当孔尺寸增大时,峰值通量对应的光子能量红移,同时辐射谱带宽增大。图中给出的最小孔尺寸为 1.3 mm × 1.0 mm,此时的谱最光滑,与峰值通量[(2.729 × 10¹⁵ photon/s)/0.1% BW]对应的光子能量是 399.539 eV,谱带宽与光子能量之比为 1.11%,当孔增大到 4.7 mm × 3.6 mm 时,尽管辐射光通量增加,但辐射谱已大大变宽且不光滑,此时峰通量[(6.618 × 10¹⁵ photon/s)/0.1% BW]对应的光子能量已减小为 387.981 eV,谱带宽与光子能量之比却增大到 6.43%。

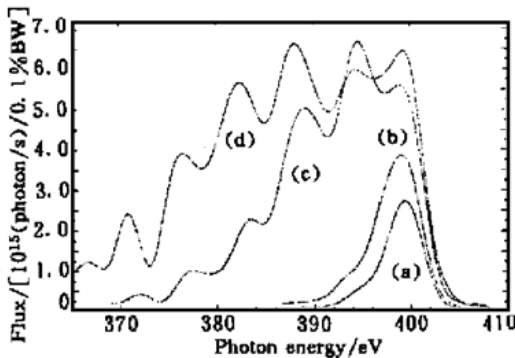


Fig. 5 Curves for the bandwidth of radiation at fundamental resonant wavelength from U3.65 vs. size of aperture at 20 m from the sources. (a) 1.3 mm × 1.0 mm, (b) 1.7 mm × 1.3 mm, (c) 3.5 mm × 2.7 mm, (d) 4.7 mm × 3.6 mm

4 接受孔大小与传输通量和功率的关系

在选择孔的大小时,需要知道孔尺寸改变时通过孔的传输功率和某波长光子通量的变化规律。

图 6 所示为孔垂直尺寸连续变化(水平尺寸等

于垂直尺寸的 1.3 倍)时,SSRF U3.65 辐射的基波通量和总传输功率曲线,孔在离波荡器中点 20 m 处。

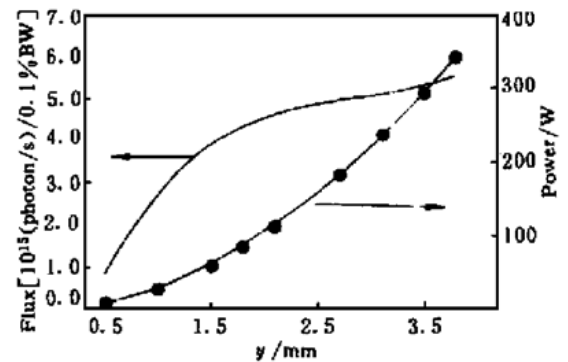


Fig. 6 Transmitted flux and power of radiation from U3.65 (14 mm, $K = 2.07$) vs. size of aperture (horizontal size is 1.3 times of vertical size) at 20 m from the source

模拟计算时取 $K = 2.07$,轴上基波能量为 400.164 eV。可看到:随着孔的增大,功率和基波通量都逐渐增大,当孔的垂直尺寸 y 在 0~1.4 mm 范围内时,通量几乎线性增大,这符合基波光子空间分布集中于中心锥角的结论;但当孔较大时(4.94 mm × 3.8 mm),对于能量为 400.164 eV、带宽为 0.1% 的光子,其光通量增加不明显,但功率还继续快速增长,这是因为其他波长的光子也通过了孔,对于所选的光子能量,这是无用的光子辐射,也就是说,如果想获得中心锥角的基波通量增量就以光学元件承受大量的热辐射为代价。因而孔不能选得太大,一般只要能保证中心锥角大小的 1~2 倍就基本上满足要求。显然,对于一定冷却条件的光学元件,当工作波长改变时,孔的最优尺寸也改变。

结论 波荡器的轴上共振波长辐射主要集中在中心锥角内,在中心锥角外的偏轴辐射位置也有较高的谐波辐射强度,单电子通过波荡器的辐射角分布满足关系式:

$$\theta_{m,n} = \theta = (1/y) \sqrt{(1 + K^2/2)(m/n - 1)}$$

可以根据某波长辐射光子在中心锥角的空间分布来选择接受辐射的孔尺寸。为了减少光学元件上的热负载,接受孔的最大尺寸只要达到能够收集到合理的光通量即可。一般情况下,孔的尺寸不应该超过相应中心锥角的 2 倍。

参 考 文 献

[1] Kim K J. *Characteristics of Synchrotron Radiation, Physics of Particle Accelerators*. American Institute of

Physics (AIP), 1989, **184**
[2] Dejus R J. Program UR: general purpose code for

synchrotron radiation calculations. Nucl. Instrum.
Methods, *Phys. Res. Sect. (A)*, 1994, **347**: 61~ 66

Spatial Photon Distribution of Undulator Radiation and Transmission Photon Flux Through Aperture

Lu Shuzhuang Dai Zhimin Liu Guimin Zhao Xiaofeng

(*Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 6 April 1999; revised 24 November 1999)

Abstract: Theoretical discussion of spatial photon distribution of undulator radiation is presented simply, and the result of spatial photon distribution of SSRF U3.65 is given by the method of numerical simulation. According to the spatial photon distribution, the selecting aperture dimension is decided, and transmission photon flux and power through aperture is calculated.

Key words: undulator radiation; spatial photon distribution; aperture flux