

SINAP 激光同步辐射源实验装置方案研究

杨燕舞^{1,2} 余笑寒¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 本文在考虑相互作用区内电子束和激光束横向发散的前提下, 推导了激光同步辐射源 X 射线通量的计算公式, 讨论了激光束和电子束束腰尺寸对 X 射线通量和谱通量的影响。根据谱通量最大原则选取相互作用区电子束和激光束的横向尺寸, 分析了基于中国科学院上海应用物理研究所 (SINAP) 的皮秒、飞秒电子直线加速器的激光同步辐射实验装置的性能。

关键词 激光同步辐射源, X 射线通量, 横向发散

中图分类号 O432.1

激光同步辐射源 (Laser Synchrotron Source, 简称 LSS) 是利用强激光与相对论电子束的逆康普顿散射, 产生准单色、能量可调的高亮度 X 射线脉冲的新型 X 射线源^[1-3]。由于 LSS 的应用前景非常诱人^[4], 其研究和发展在国内外都受到很大重视, 中国科学院上海应用物理研究所也考虑基于正在研制的皮秒和飞秒电子直线加速器开展激光同步辐射源研究, 目前正在进行实验装置的方案评估, 分析 LSS 实验装置可能达到的性能指标。

计算 LSS 特性的解析公式可以采用经典电动力学的电磁辐射理论^[5,6]或康普顿散射 (或 Thomson 散射) 理论^[7,8]得到。在利用电磁辐射理论的分析中, 通常只能把激光脉冲和电子束看成是在相互作用区内均匀分布的来处理; 采用康普顿散射理论的定量分析中, 一般用高斯分布来模拟电子束团和激光脉冲的空间分布。上述对 LSS 特性的理论分析中, 大都没有充分考虑激光脉冲和电子束横向分布尺寸随传播方向的变化。实际上由于电子束的发射度和激光的波长限制, 电子束和激光束的横向分布尺度在束腰处达到最小; 离束腰位置越远, 横向分布尺度越大。前人的工作中, 有些对激光脉冲的横向发散进行了分析, 但是都没有考虑电子束发散的影响。Pogorelsky^[3]在分析采用 CO₂ 激光器的 LSS 装置时对激光束横向发散做了考虑, 给出了激光束的有效长度限制, 其中也提到电子束发散的影响, 但是认为其与激光束发散相比是可以忽略的。对于激光波长较短、电子束发射度小、而且激光脉冲和电子束的长度小 (皮秒量级) 的装置, 一般可以不

考虑电子束和激光束在相互作用区间的横向发散。由于我们装置的实际限制, 电子束的横向发射度比较大, 激光脉冲长度也大 (高功率的超短脉冲激光器太昂贵), 在进行 LSS 实验装置方案的分析中必须考虑电子束和激光束横向发散的影响, 才能对 X 射线的性能指标做出比较准确的估算。

在第 2 节中, 我们将考虑相互作用区内电子束和激光束的横向发散, 推导电子束与激光脉冲 180° 对头碰撞的 X 射线脉冲通量计算公式, 讨论激光束和电子束束腰尺寸对 X 射线通量和谱通量的影响。最后我们将分析基于上海应用物理研究所正在建的皮秒、飞秒电子直线加速器的激光同步辐射实验装置的性能, 并给出优化的电子束和激光束横向尺寸取值。

1 考虑激光束和电子束横向分散发散时的 X 射线通量

假设电子束团为轴对称高斯分布, 激光脉冲是高斯光束, 另外假设电子束团的中心位置和激光脉冲的中心位置在时间 $t=0$ 时在光束束腰处重合, 则与时间相关的电子数空间分布 $n_e(r, z, t)$ 和光子数空间分布 $n_p(r, z, t)$ 如下:

$$\begin{aligned} n_e(r, z, t) &= \frac{N_e}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{ex}^2 \sigma_{ez}} \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma_{ex}^2} - \frac{(z - \beta ct)^2}{2\sigma_{ez}^2} \right) \\ n_p(r, z, t) &= \frac{N_p}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{px}^2 \sigma_{pz}} \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma_{px}^2} - \frac{(z + ct)^2}{2\sigma_{pz}^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, N_e 、 N_p 分别为单个电子束团和激光脉冲

第一作者: 杨燕舞, 女, 1978 年 6 月出生, 2005 年于中国科学院上海应用物理研究所获硕士学位

通讯作者: 余笑寒, E-mail: yuxiaohan@sinap.ac.cn

收稿日期: 2004-06-23, 修回日期: 2004-11-27

中的总粒子数, σ_{er} 、 σ_{ez} 和 σ_{pr} 、 σ_{pz} 分别是电子束和激光脉冲横向和纵向的分布幅度, 由 (1) 式得到的电子束和激光束的横向均方根半径 r_{er} 和 r_{pr} 分别为 $\sqrt{2}\sigma_{er}$ 和 $\sqrt{2}\sigma_{pr}$ 。

考虑电子束和激光束的横向分布发散, σ_{er} 和 σ_{pr} 是 z 的函数。对于激光束, 横向分布幅度 σ_{pr} 随光传播方向 z 变化的关系为 $\sigma_{pr} = \sigma_{p0}(1 + (z/z_R)^2)^{1/2}$, 其中 σ_{p0} 是束腰处的光束的分布幅度, z_R 是瑞利长度, $z_R = 4\pi\sigma_{p0}^2/\lambda$, λ 为激光波长。类似于激光束, 我们可定义电子束的“瑞利长度” z_{eR} , $z_{eR} = \sigma_{e0}^2/\varepsilon_e$, ε_e 为电子束横向发射度, σ_{e0} 是电子束束腰的横向分布幅度。电子束的横向分布尺度 σ_{er} 沿 z 方向的变化关系为 $\sigma_{er} = \sigma_{e0}(1 + (z/z_{eR})^2)^{1/2}$ 。

单个电子在 dt 时间内被光子散射的次数为 $n_p\sigma_c(1+\beta)cdt$ (σ_c 是康普顿散射总积分截面, $\sigma_c = 8\pi r_e^2/3 = 6.65 \times 10^{-29} \text{m}^2$, r_e 为电子经典半径), 在空间 dV 中的电子数为 $n_e dV$, 因此单个 X 射线脉冲中的总光子数 N_x 为:

$$N_x = \int (1+\beta) c \sigma_c n_e(r, z, t) n_p(r, z, t) 2\pi r dr dz dt \quad (2)$$

(2) 式对 r, t, z 积分, 得到单个脉冲中散射 X 光的总光子数:

$$N_x = \frac{N_e N_p \sigma_c (1+\beta)}{(2\pi)^{3/2} (\sigma_{pz}^2 \beta^2 + \sigma_{ez}^2)^{1/2}} \times \int \frac{1}{\sigma_{er}^2 + \sigma_{pr}^2} \exp\left(-\frac{(1+\beta)^2 z^2}{2(\sigma_{pz}^2 \beta^2 + \sigma_{ez}^2)}\right) dz \quad (3)$$

$$= \frac{N_e N_p \sigma_c}{4\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma_{e0}^2 + \sigma_{p0}^2} \cdot f(\xi)$$

其中:

$$f(\xi) = \xi \cdot \exp(\xi^2) [1 - \Phi^2(\xi)],$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \text{ 为误差函数, } \xi = \tilde{z}_R / \sigma_z,$$

$$\tilde{z}_R = \sqrt{\sigma_{e0}^2 + \sigma_{p0}^2} / \sqrt{(\sigma_{e0}/z_{eR})^2 + (\sigma_{p0}/z_R)^2},$$

$$\sigma_z = \sqrt{2(\sigma_{pz}^2 \beta^2 + \sigma_{ez}^2)} / (1+\beta)$$

σ_z 是衡量电子束与激光脉冲重叠区长度的量, $\tilde{z}_R$ 可看成是“等效瑞利长度”。当 $\xi \ll 1$, 即 $\sigma_z \gg \tilde{z}_R$ 时, 函数 $f(\xi)$ 趋近 ξ ; 当 $\xi \gg 1$, 既电子束和激光脉冲长度都远小于等效瑞利长度时, 函数 $f(\xi)$ 趋近 $2/\sqrt{\pi}$, (3) 式退化为不考虑横向发散的通量公式。图 1 是函数 $f(\xi)$ 的曲线。

从 (3) 式还不容易看出 X 射线通量与电子束团和激光脉冲束腰尺寸的关系, 为对此有更清楚的

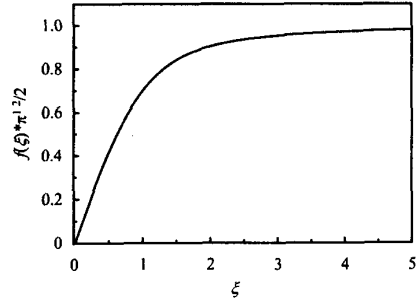


图 1 函数 $f(\xi)$ 曲线

Fig.1 The function $f(\xi)$, as defined in the text

了解, 我们来考察如下几种特殊情形的 X 射线最大通量:

1) 电子束发射度 $\varepsilon_e = 0$ 时:

当电子束的发射度为 0 时, 电子束在相互作用区间内不会发散, 显然电子束横向尺寸越小 X 射线通量越大, 可略去 (3) 式中与电子束横向尺寸 ε_e 有关的量, $\tilde{z}_R = z_R$, $\xi = z_R / \sigma_z$, $\sigma_{p0}^2 = \xi \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sigma_z$ 。(3) 式可简化为如下形式:

$$N_x = \frac{\sqrt{\pi} N_e N_p \sigma_c}{\sigma_z \lambda \xi} \cdot f(\xi) \quad (4)$$

X 射线通量与激光束束腰尺寸的关系如图 2 所示:

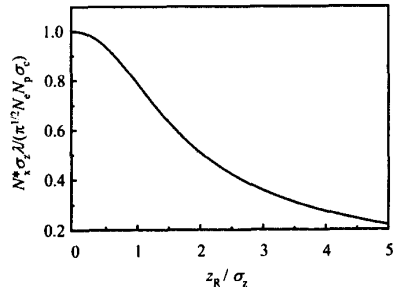


图 2 不考虑电子束横向扩散时 X 射线通量与激光束腰尺寸的关系

Fig.2 Relationship between X-ray flux and the size of laser beam waist for $\varepsilon_e = 0$

由图 2 中可见, 激光束腰尺寸越小, 散射 X 射线通量越大, X 射线通量随束腰尺寸趋近 0 而趋近有限的最大值, X 射线最大可能的通量为

$$\sqrt{\pi} N_e N_p \sigma_c / \sigma_z \lambda.$$

2) 电子束发射度 $\varepsilon_e = \lambda / 4\pi$ 时

当电子束发射度 $\varepsilon_e = \lambda / 4\pi$ 时, $\tilde{z}_R = \sigma_{e0} \sigma_{p0} / \varepsilon_e$,

$\xi=\sigma_{e0}\sigma_{p0}/\varepsilon_0\sigma_z$ 。对于特定的 ξ ，即 σ_{e0} 和 σ_{p0} 的乘积为常数时， $\sigma_{e0}^2+\sigma_{p0}^2$ 得到最小值的条件是 $\sigma_{e0}=\sigma_{p0}$ ，这时散射 X 射线通量最大。取 $\sigma_{e0}=\sigma_{p0}$ ，(3)式可简化为如下形式：

$$N_x=\frac{\sqrt{\pi}N_eN_p\sigma_c}{2\sigma_z\lambda\xi}\cdot f(\xi)$$

(5)

与前一种情况类似，我们得到 X 射线最大可能的通量为 $\sqrt{\pi}N_eN_p\sigma_c/2\sigma_z\lambda$ 。电子束和激光束的束腰聚得越小，散射 X 射线通量越大，趋近最大值。

从上面两种特殊情况中可以了解，对于特定的电子束发射度和激光波长，由于激光束和电子束的横向发散，能得到的最大 X 射线通量与 σ_z 成反比，即电子束团和激光脉冲越短，X 射线通量越大。而在 σ_z 确定的情况下，电子束和激光束聚焦得越小，X 射线通量越大，趋近最大值。但是，对于特定的电子束横向发射度，电子束聚焦尺寸减小将使电子束角发散增加，从而使 X 射线带宽增加，对于作为单色 X 光源应用的 LSS 来说，单位带宽中的 X 射线通量（即谱通量）可能比总通量更有意义，这对电子束聚焦提出了限制。

2 LSS 实验装置方案

LSS 实验装置以上海应用物理研究所正在研制

的飞秒和皮秒电子直线加速器为基础，激光器采用价格相对便宜的 YAG 高功率激光器。加速器电子束和激光脉冲的基本参数如表 1 和表 2 所示。LSS 装置电子束和激光脉冲通常采用近 180°对头碰撞或 90°碰撞，由于激光脉冲长度比较长，我们采用 180°碰撞以得到更高的 X 射线通量。下面我们具体分析 4 种电子束和激光脉冲组合情况所能得到的 LSS 的性能指标。

由于激光脉冲长度比较大，而且电子束的发射度也比较大，在计算 LSS 的散射 X 射线通量时必须考虑电子束和激光束的横向发散。另外，我们将根据谱通量（近似等于接收通量除以 X 射线能谱宽度）最大的原则来选取最佳碰撞点处电子束和激光束的横向尺度。影响散射 X 射线能谱宽度的因素包括光学系统和探测装置的接收角、电子束的能散、电子束的角发散、激光束的角发散和激光带宽，总的能谱由对应上述因素的散射 X 射线能谱卷积得到。对于我们现在考虑的情形，激光对 X 射线带宽的贡献可以忽略。取装置的半接收角为 $1/5\gamma$ ，得到散射 X 光能谱宽度随电子束横向尺度变化的关系曲线如图 3 所示（包括皮秒电子直线加速器和飞秒电子直线加速器）。在计算接收角内的光子通量时，(3)式中的康普顿散射总截面 σ_c 要用接收角内的积分散射截面代替，在半接收角为 $1/5\gamma$ 时，积分散射截面为 $4\times 10^{-30}\text{m}^2$ 。

表 1 飞秒电子束和皮秒电子束参数

Table 1 Parameters of ps- and fs electron bunches

	飞秒电子束 fs electron bunches	皮秒电子束 ps electron bunches
电子能量 Electron energy	30 MeV	15 MeV
单束团电荷 Charge of single bunch	0.1 nC	1 nC
束团长度 Bunch length (rms)	0.1 ps	4 ps
能散 Energy divergence (rms)	2%	0.8%
归一化发射度 Normalized emittance	10 mm mrad	100 mm mrad
重复频率 Repetition rate	10 Hz (宏脉冲 macro pulse)	10 Hz

表 2 高功率激光脉冲参数

Table 2 Parameters of high power laser pulses

	纳秒激光器 ns laser	皮秒激光器 ps laser
波长 Wavelength	1064 nm	1064 nm
单脉冲能量 Single pulse energy	1.5 J	200 mJ
脉冲长度 Pulse length (rms)	2 ns	13 ps
重复频率 Repetition rate	10 Hz	10 Hz

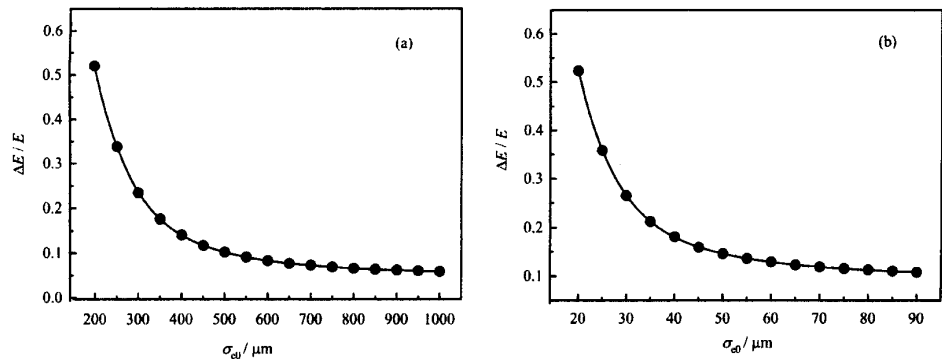


图 3 散射 X 光能谱宽度与电子束横向尺寸的关系。(a) 皮秒电子直线加速器, (b) 飞秒电子直线加速器

Fig.3 Relationship between the bandwidth of scattered X-rays and the transverse size of electron bunches. (a) Picosecond electron LINAC. (b) Femtosecond electron LINAC

我们先来寻找使谱通量最大的电子束和激光束在束腰处的横向尺度。图 4 显示皮秒电子束和纳秒激光器组合情况下,不同的电子束和激光束束腰尺寸下得到的相对谱通量,从图中可见 $\sigma_{e0}=750\mu\text{m}$ 、 $\sigma_{p0}=100\mu\text{m}$ 附近 X 射线谱通量达到最大值。采用相同的步骤,我们得到,对于皮秒电子束和皮秒激光器的组合,谱通量最大对应的 σ_{e0} 为 $300\mu\text{m}$, σ_{p0} 为 $20\mu\text{m}$;对于飞秒电子束和纳秒激光器的组合,谱通量最大对应的谱通量最大对应的 σ_{e0} 为 $95\mu\text{m}$, σ_{p0} 为 $60\mu\text{m}$;对于飞秒电子束和皮秒激光器的组合,谱通量最大对应的谱通量最大对应的 σ_{e0} 为 $32\mu\text{m}$, σ_{p0} 为 $12\mu\text{m}$ 。上述 4 种组合的 LSS 实验装置的基本参数如表 3 所示。

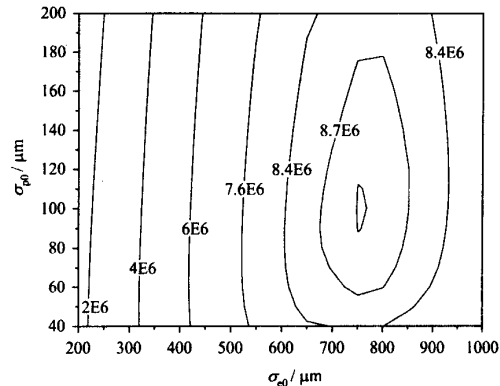


图 4 X 射线谱通量与电子束和激光束束腰尺寸的关系

Fig.4 Spectral flux of scattered X-ray versus waist size of laser and electron beam

表 3 各种激光器和电子束装置组合情况计算得到的 LSS 参数和性能

Table 3 Calculated parameters and performance of LSS for various combinations of laser and electron facilities

	皮秒电子束 纳秒激光器 ps electron bunch and ns laser pulse	皮秒电子束 皮秒激光器 ps electron bunch and ps laser pulse	飞秒电子束 纳秒激光器 fs electron bunch and ns laser pulse	飞秒电子束 皮秒激光器 fs electron bunch and ps laser pulse
σ_{e0}	750 μm	300 μm	95 μm	32 μm
σ_{p0}	100 μm	20 μm	60 μm	12 μm
单脉冲 X 射线总光子数 Total photon flux of single X-ray pulse	4.3×10^5	7.8×10^5	7.6×10^5	5.1×10^6
半接收角 Half of acceptance angle	6.8mrad	6.8mrad	3.4mrad	3.4mrad
单脉冲接收 X 射线光子数 Accepted photon flux of single X-ray pulse	2.6×10^4	4.7×10^4	4.6×10^4	3.1×10^5
平均接收通量 Average accepted photon flux	2.6×10^5 /s	4.7×10^5 /s	4.6×10^5 /s	3.1×10^6 /s
X 射线峰位能量 X-ray photon energy at maximum spectral flux	3.86 keV	3.77 keV	15.5 keV	14.7 keV
$\Delta E/E$ (FWHM)	6.9%	23.4%	10.7%	24%
脉冲宽度 pulse length (FWHM)	9.5ps	9.4ps	0.83ps	0.24ps

3 讨论和结论

本文分析了基于上海应用物理所的皮秒和飞秒电子束的 LSS 装置的性能参数。根据实际情况,在 X 射线通量计算中考虑了电子束和激光束的发散,并以接收谱通量最大为判据确定电子束和激光束在相互作用点的横向尺寸。从表 3 中可见,采用飞秒电子束和皮秒激光得到的 LSS 性能参数远好于其他情形,这主要得益于电子束具有比较小的发射度,而且激光脉冲也足够短。考虑到飞秒电子束的束团电荷只有 0.1nC,激光脉冲的能量只有 200mJ, $3.1 \times 10^6/\text{s}$ 的平均接收光子通量是相当大的。如果电子束团电荷和激光脉冲能量增加 10 倍,接收通量还将提高两个量级,用导管 X 光透镜接收 X 光,半接收角可提高到 5 mrad 以上,可以在实验站得到能量 15 keV、通量接近 $10^9/\text{s}$ 、脉冲宽度约 0.3 ps、能谱宽度约 20% 的准单色的 X 射线脉冲。

参考文献

- 1 Sprangle P, Ting A, Esarey E, *et al.* J Appl Phys, 1992, 72 (11): 5032—5038
- 2 Schoenlein R W, Leemans W P, Chin A H, *et al.* Science, 1996, 274: 236—238
- 3 Pogorelsky I V. Nucl Instr Meth Phys Res A, 1998, 411: 172—187
- 4 Carrol F E. AJR, 2002, 179: 583—590
- 5 Ride S K, Esarey E, Baine M. Phys Rev E, 1995, 52 (5): 5425—5442
- 6 Hartemann F V, Baldis H A, Kerman A K, *et al.* Phys Rev E, 2001, 64 (1): 016501-1-016501-26
- 7 Kim K J, Chattopadhyay S, Shank C V. Nucl Instr Meth A, 1994, 341: 351—354
- 8 Yang J, Washio M, Endo A, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1999, 428: 556—569

Proposal for LSS experiment at SINAP

YANG Yanwu^{1,2} YU Xiaohan¹

¹ (Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The equation of X-ray flux was deduced with the transverse divergence of electron and laser beams in the interaction area being taken into account. The relationship between the size of electron and laser beams and both X-ray flux and spectra flux was analyzed. The performance of the proposed LSS experimental facility based on the ps, fs electron accelerator of SINAP was calculated with the electron and laser beam sizes at the interacting point being determined by the criteria of maximum spectra flux.

Key words Laser synchrotron source, X-ray flux, Transverse divergence

CLC O432.1