

文章编号: 1007-4627(2008)02-0129-06

# 上海激光电子 $\gamma$ 源\*

潘强岩, 徐望<sup>#</sup>, 陈金根, 郭威, 范功涛, 阎喆, 徐毅, 王宏伟,  
王呈斌, 陆广成, 徐加强, 徐本基, 马余刚, 蔡翔舟, 沈文庆

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘要:** 激光具有高强度、高极化度等优异的性能。用激光束轰击高能电子束就可以产生高强度、高极化度的  $\gamma$  射线束。上海激光电子  $\gamma$  源就是上海同步辐射装置上的这样一条束线站。预计可以获得能量范围为 1—22 MeV 的准单色、高强度 ( $10^9$ — $10^{11}$  s<sup>-1</sup>) 和高极化度 (线极化或圆极化) 的  $\gamma$  射线束。介绍了这条束线站目前的进展情况。

**关键词:** 康普顿散射; CO<sub>2</sub> 激光;  $\gamma$  源; 极化

**中图分类号:** O571.41<sup>+8</sup>      **文献标识码:** A

## 1 引言

Milburn、Arutyunian 和 Tumanian 等人于 1963 年提出了激光束在高能电子上散射可以产生  $\gamma$  射线束的思想<sup>[1, 2]</sup>, 而基于这一想法的世界上第一条  $\gamma$  射线束装置于 1978 年在意大利 Frascati 建成并投入运行<sup>[3-6]</sup>。上海激光电子  $\gamma$  源 (Shanghai Laser Electron Gamma Source, 简称 SLEGS) 也是这种类型的  $\gamma$  射线源之一。它是我国重大科学工程——上海同步辐射装置 (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, 简称 SSRF) 为平台, 利用 SSRF 储存环中 3.5 GeV 电子束和远红外激光进行康普顿 (背) 散射获得能量范围为 1—22 MeV 的准单色、高强度和高极化度 (线极化或圆极化) 的  $\gamma$  射线束, 用来开展低能极化和非极化核物理、核天体物理基础研究、强  $\gamma$  射线源的应用研究和储存环电子束性能的监测。目前国内还没有此类光源装置, 同时相关的基础及应用研究也还是空白。国外有美国 Brookhaven 国家实验室的 LEGS/NSLS (210—480 MeV,  $10^7$  s<sup>-1</sup>)<sup>[7]</sup>、欧洲的 GRAAL/ESRF (600—1 670 MeV,  $10^6$ — $10^7$  s<sup>-1</sup>)<sup>[8, 9]</sup> 和日本的 BL33LEP/SPRING-8 (1.5—2.4 GeV,  $3 \times 10^6$  s<sup>-1</sup>)<sup>[10]</sup>。而目前低能  $\gamma$  射线束仅有日本的 ETL (电子技术实验

室) 在 TERAS 贮存环上得到的能量范围 1—40 MeV, 强度 ( $10^4$ — $10^5$  s<sup>-1</sup>) 不太强的  $\gamma$  射线束<sup>[11]</sup>。另外, 日本的 SPRING-8 正在筹建低能  $\gamma$  射线束, 由于它的电子束能量为 8 GeV, 因而不能获得低于 5 MeV 能量  $\gamma$  束。因此, SLEGS 在获得低能  $\gamma$  方面有其独到优点, 比 SPRING-8 更易利用准直法得到高性能的  $\gamma$  射线束, 从而在基础和应用研究有更广泛的应用。值得一提是美国 Duke 大学自由电子激光实验室 (DFELL) 和 Triangle 大学核物理室 (TUNL) 联合建造的 HIGS (高强度  $\gamma$  源), 采用贮存环驱动的自由电子激光装置产生深紫外自由电子激光与贮存环中高能电子束康普顿背散射获得准单色、极化的  $\gamma$  射线束<sup>[12, 13]</sup>, 近期核共振荧光技术 (NRF) 极化束实验取得了引人瞩目的实验结果, 证明高强度康普顿背散射  $\gamma$  射线源在基础研究中的潜力。根据我们的估算, SLEGS 低能  $\gamma$  射线束也能达类似水平。

## 2 基本原理

康普顿散射的示意图如图 1 所示。

入射光子在电子上发生散射, 根据动量和能量守恒, 可得到散射光子能量与出射角  $\theta$  的关系:

\* 收稿日期: 2007-07-17; 修改日期: 2007-10-22

\* 基金项目: 中国科学院百人计划资助项目 (2601701)

作者简介: 潘强岩 (1964—), 男 (汉族), 浙江仙居人, 副研究员, 从事实验核物理研究; E-mail: panqiangyan@sinap.ac.cn

# 通信联系人: 徐望 (1972—), 男 (汉族), 甘肃兰州人, 研究员, 从事实验核物理研究; E-mail: xuwang@sinap.ac.cn

$$E_\gamma = E_L \frac{(1 - \beta \cos\theta_1)}{1 - \beta \cos\theta + E_L [1 - \cos(\theta - \theta_1)] / E_e}, \quad (1)$$

其中  $E_e$  和  $E_L$  分别为贮存环中高能电子和入射光子的能量,  $E_\gamma$  为散射  $\gamma$  光子能量,  $\beta$  为电子和光子的速度比值, 即  $\beta = v/c$ 。当贮存环中高能电子能量大

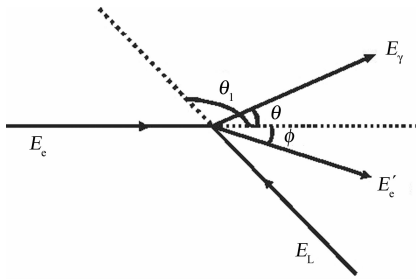


图 1 康普顿散射示意图

于 50 MeV 时,  $\beta \rightarrow 1$ , 此时  $\gamma$  光子的散射角  $\theta < 10$  mrad。当激光光子反平行于电子束入射 ( $\theta_1 = 180^\circ$ , 发生  $180^\circ$  背散射(康普顿背散射)时 ( $\theta = 0^\circ$ ), 出射  $\gamma$  光子能量为最大:

$$E_\gamma^{\max} = \frac{4E_e^2 E_L}{m^2 c^4 + 4E_e E_L}, \quad \beta \rightarrow 1 \quad (2)$$

由上式可知,  $\gamma$  光子最大能量可以近似地认为与电子的能量成正比, 而与激光的能量无关, 也就是说  $\gamma$  光子能量对电子能量的依赖性要比对激光能量强得多。

我们根据 SSRF 的几个主要设计参数<sup>[15]</sup> 和拟使用的激光器(以  $\text{CO}_2$  气体激光器为例)参数, 进行了 Monte Carlo 计算, 获得了 SLEGS 的有关性能。

表 1 激光器波长、SLEGS 生成  $\gamma$  射线的最大能量和强度

激光类型	激光(平均输出功率 100—1 000 W)		射线性质	
	波长/ $\mu\text{m}$	能量/eV	最大能量/MeV	强度/ $\text{s}^{-1}$
$\text{CO}_2$ 气体激光器	10.6	0.117	21.9	$10^9$ — $10^{11}$
	65.1	0.019 0	3.58	
	100	0.012 4	2.33	
	220	0.005 6	1.06	

表 1 列出了由  $\text{CO}_2$  气体激光器可得到的激光波长, 及对应的 SSRF/SLEGS 可产生  $\gamma$  射线最大能量和强度。 $\gamma$  光束强度主要依赖于激光强度和电子流强, 对于 MeV 量级  $\gamma$  射线束而言, 由于贮存环电子动力学孔径为 1%, 产生  $E_\gamma < 35$  MeV  $\gamma$  光子时散射电子不会损失,  $\gamma$  束强度不存在象高能  $\gamma$  束中的限制, 当激光电子作用区选在 SSRF 贮存环的长直线段时, 可以得到更高的发光度。但是由于电子能量损失很小,  $\gamma$  射线的能量只能由准直法来确定, 其能量分辨与电子束参数(如能散、角发散)和准直器的设置(孔径大小和离光源距离)有关。由于电子束的发散, 用准直法得到的能量分辨率有一个上限, 约 2%。设置准直器时, 要同时兼顾到能量分辨和强度两个方面。

图 2 给出了散射光子微分截面和能量分别与出射角度之间的依赖关系。从图中可以看出, 光子能量与散射角之间有确定的对应关系, 依据这一对应关系, 用准直器可以得到准单色的  $\gamma$  射线。而且散射光子具有极好的方向性, 均集中在  $0^\circ$  附近一个非

常窄的尖圆锥内。

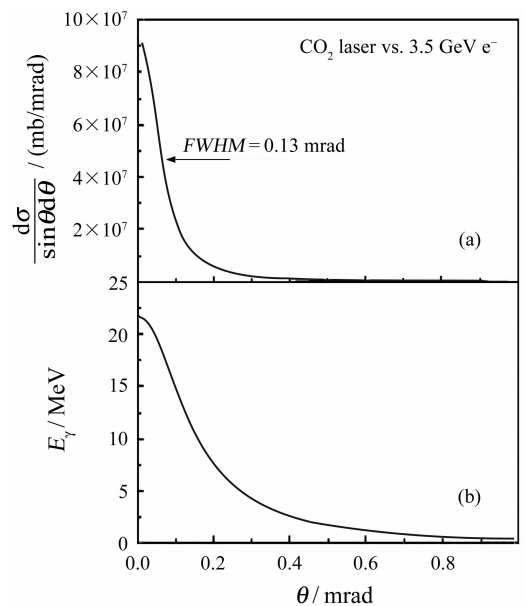


图 2  $\text{CO}_2$  激光在 3.5 GeV 电子束上发生散射时散射光子微分截面(a)和能量(b)与出射角度之间的依赖关系

图 3 给出的是极化度与能量的依赖关系。调节激光的极化, 可以得到两种极化  $\gamma$  射线(圆极化或线极化)。从图中可以看出, 在  $\theta_\gamma=0$  附近即  $\gamma$  射线在最大能量  $3/4$  处以上的光子, 平均线极化(圆极化)可达  $90\%$ ( $80\%$ )。这就是 SLEGS 的主要特点: 强度和极化度高、单色性和方向性好, 另外还有 ns 脉冲的时间结构, 它提供了可以用来开展相关基础研究和应用研究的高品质  $\gamma$  射线源, 这些都主要得益于第三代同步辐射装置 SSRF 所提供的高性能电子束。

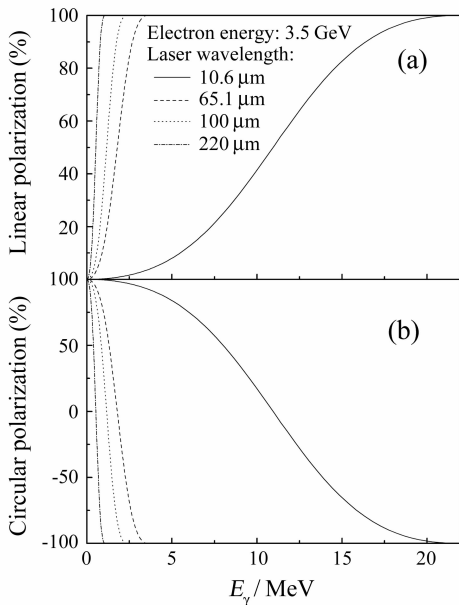


图 3 散射光子的极化度与能量依赖关系  
(a)线形极化度; (b)圆极化度。

### 3 装置布局

SLEGS 光束线将从储存环第 20 标准直线节引出, 光束线实验站位置布局如图 4 所示。光束线出墙点位于离光源中心(直线节中点)13 m 处, 光束线与实验站总长度约 16 m(不包括前端区长度), 光束线长度约为 7.5 m, 实验站棚屋长度约 8.5 m, 棚屋宽度约为 4 m。另外, 准直器棚屋长度约为 4.0 m, 棚屋宽度约为 2.0 m; 激光器棚屋长度约为 3.0 m, 棚屋宽度约为 2.0 m。

康普顿背散射的  $\gamma$  光子从储存环的  $0^\circ$  出口引出, 穿过铍窗, 经过准直器后进入到实验靶室中, 靶室设置靶子和带电粒子探测器, 然后穿过另一个铍窗进入到束流垃圾桶中。靶室外设置一定数量的  $\gamma$  探测器和中子探测器, 根据实验的需要可以自由

组合。

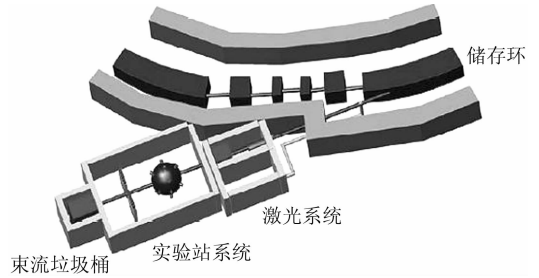


图 4 SLEGS 光束线站及辐射防护棚屋布局

在激光器实验室内, 我们将放置  $\text{CO}_2$  激光器, 使其高度与实验室铅墙上的预留孔的高度相等。激光从激光器射出后, 经过多种光学元件在束线站的前端区附近被引入。具体是: 首先经过能量衰减器使其激光能量降低, 然后经过激光扩束系统。基本的扩束系统由一个凹透镜和一个凸透镜组成, 首先经过凹透镜后发散, 再经过凸透镜后汇聚, 适当的调节两个透镜的位置及它们的相对位置, 使激光在穿过凸透镜后就是平行光束。平行光束再经过偏振片后, 就可以得到我们所需要的线偏振光或圆偏振光。然后用几个反射镜对偏振光进行反射, 进入预留孔垂直入射到前段区内。另外, 还可把激光能量计接到某个反射镜上, 以测量偏振光的强度。通过前端区的反射镜激光束被反射然后进入直线节(BL20)。3.5 GeV 的电子脉冲束与激光束在相互作用区里发生康普顿背散射, 散射后所产生的  $\gamma$  射线将穿过反射镜进入实验室大厅, 剩余的激光束将会继续穿过直线节末端的出射窗, 最后被部分反射进入激光位置检测系统, 用于监测激光的强度及其位置, 而透过反射镜的激光可以用来测量激光的极化度。

在前段区内, 再用反射镜对入射进入的激光进行调节, 使其能垂直地入射到靶室的入射窗上。在入射窗前面放置一个长聚焦镜(长焦凸透镜), 使激光汇聚的入射进入靶室里。激光与 3.5 GeV 电子相互作用, 产生  $\gamma$  射线。

### 4 样机的建设

因为 SSRF 计划于 2009 年建成并投入运行, 再加上目前国内还没有类似于 SLEGS 这样的光源装置, 有许多技术问题需要探索, 因此于 2005 年成立了 SLEGS 样机研究小组, 开始对 SLEGS 项目进

行系统的研究。具体目标是在中国科学院上海应用物理研究所现有的 100 MeV 的电子直线加速器上开展激光电子散射光束线建设,为将来 SLEGS 的建造奠定基础。同时探索和发展利用电子束与激光束之间的相互作用来测量电子束流品质的新方法。

图 5 给出了实验装置的示意图。CO<sub>2</sub> 激光脉冲束可以从 3 个不同的方向(40°, 90° 和 140°)从靶室外引入并经铜反射镜偏转后聚焦在靶室的中心点(电子与激光相互作用点)上。在靶室的另一端装有同样的另一偏转反射镜,将散射后的激光引出靶

室。其中,激光的入口和出口窗均为 ZnSe 材料,反射镜的中心有一直径为 5 mm 的圆孔保证电子和 X 射线从这里通过,它的焦距为 150 mm。在靶室后装有一 30° 偏转磁铁,电子束穿过靶室就偏离了原来的方向进入垃圾桶,而 X 射线则沿着电子束原来的方向并穿过厚度为 100 μm 的铍窗到达探测器。

为了便于校对激光的聚焦性和电子与激光焦点的一致性,靶室中央(电子与激光相互作用点)的上方和侧面分别安装有靶片的升降装置和供 CCD 摄像机的观察窗。

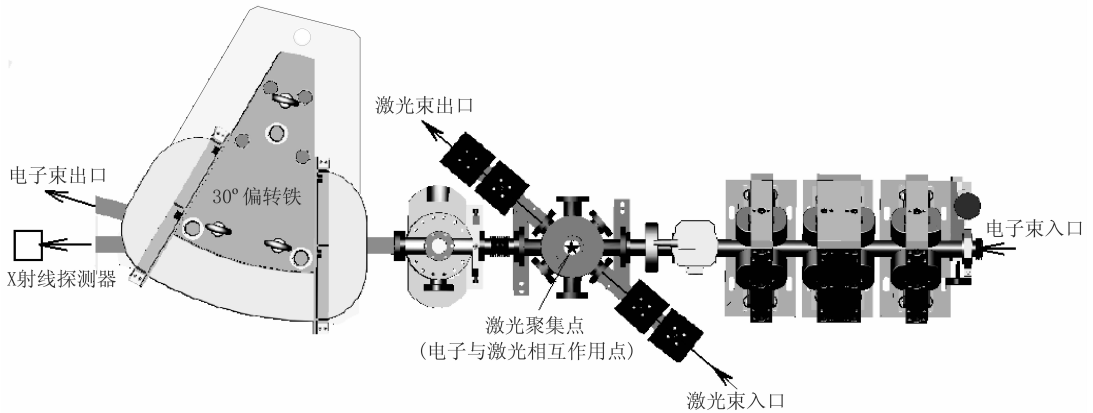


图 5 SLEGS 的样机装置示意图

如果使用波长为 10.64 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光,根据目前 100 MeV 的电子直线加速器的运行基本参数,我们的样机可以得到最高能量为 18 keV,强度为 30 s<sup>-1</sup> 的 X 射线源。

## 5 应用前景

在 SLEGS 能区的 γ 束,其潜在的研究领域非常广泛。例如,核物理中的少体及极化问题、核结构、核天体物理、对称性及奇异现象和 γ 射线的应用等。我们将 SLEGS 的潜在的研究领域做了简单的概括,如表 2 所示。下面以天体物理中的关键核反应<sup>12</sup>C(α, γ)<sup>16</sup>O 截面测量为例,说明 SLEGS 能区的 γ 束的重要性。

核天体物理中原始核合成理论指出宇宙中绝大多数元素都是在恒星燃烧过程中形成的。其中,He 燃烧末期的产物是 <sup>12</sup>C 和少量 <sup>16</sup>O,而 <sup>16</sup>O 有可能通过反应道<sup>12</sup>C(α, γ)<sup>16</sup>O 俘获一个 α 粒子生成。该反

应的反应率决定了恒星中 <sup>12</sup>C 和 <sup>16</sup>O 的丰度比,因此也就决定了恒星演化的命运。<sup>12</sup>C(α, γ)<sup>16</sup>O 反应被认为是恒星演化过程中的关键反应,其反应率是核天体物理中的重要参量。到目前为止,<sup>12</sup>C(α, γ)<sup>16</sup>O 反应的截面测量结果已经有 30 多组,也有多种理论方法对实验结果进行分析,但得到的  $E_{\text{cm}} = 0.3$  MeV 以下的反应截面差别很大,因此该反应的反应截面及反应率是当今核天体物理中没有被很好确定的几个参量。

关于反应 <sup>12</sup>C(α, γ)<sup>16</sup>O 的理论研究有两个方面。一是根据一些核反应的理论模型作一些假设,计算其在低能区的反应截面,例如光学模型势理论以及团簇理论;二是根据实验数据外推得到更低能区的反应截面,例如 R 矩阵理论和 K 矩阵理论。我们将来会与清华大学合作,采用精确的 R 矩阵理论对所有的实验数据进行拟合,在拟合过程中采用全误差传递,确保了结果的精确。

表 2 利用 SLEGS 可开展的研究领域

领域	内容
核结构	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子核振动激发模式的研究, 如同位旋矢量电偶极巨共振 IVGDR、同位旋矢量电四极巨共振 IVGDQR 等</li> <li>采用 NRF 研究磁偶极激发(自旋反转 M1 激发、轨道集体磁偶极 M1 激发、大形变核中轨道和自旋偶极响应)、电偶极激发(双声子激发、四极—八极粒子态等)</li> <li>长寿命同质异能态性质研究</li> </ul>
核天体物理	<ul style="list-style-type: none"> <li>天体演化中某些关键核反应截面测量, 采用 <math>\gamma</math> 束有其独特的优越性</li> </ul>
对称性及奇异现象	<ul style="list-style-type: none"> <li>宇称不守恒研究</li> <li>不对易量子场的理论实验研究</li> </ul>
核物理中的少体及极化问题	<ul style="list-style-type: none"> <li>轻核的核力(例如三体力)的实验及理论研究</li> <li>核(子)极化率的实验研究</li> </ul>
$\gamma$ 射线的应用	<ul style="list-style-type: none"> <li>分子原子速度或异向固体系统的结合性质的研究</li> <li><math>\gamma</math> 活化分析</li> <li>辐射效应研究(已广泛开展 <math>\gamma</math> 射线对材料、生物等研究)。极化对材料结构和性质有极大影响, SLEGS 具有其他 <math>\gamma</math> 源没有的极化性质(线性和圆极化), 对此领域研究可提供新的研究工具</li> <li>核医学、<math>\gamma</math> 射线成像研究(美国 TUNL 已有采用 HIGS 开展这方面研究设想)</li> <li><math>\gamma</math> 射线治癌</li> <li>电子束能量的精确测量及光学标准实验站</li> <li>储存环电子束极化度的测量</li> <li>核废料处理</li> <li>强光源与 <math>\gamma(\xi)</math> 激光</li> </ul>

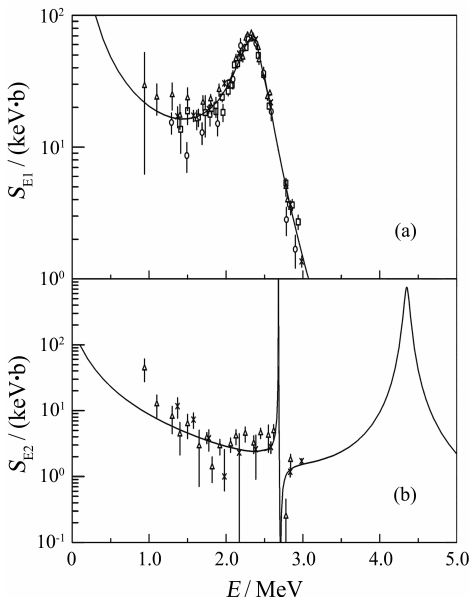


图 6 天体物理中关键核反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的 S 因子及误差曲线是 R 矩阵理论的结果<sup>[16]</sup>。

进行计算的同时, 结合上海激光电子  $\gamma$  光源讨论了进行光解反应  $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$  实验的可行性, 并模拟了光核反应实验, 计算了光核反应  $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$  的实验室产额, 并对目前俘获反应所测量不到的低能区的反应截面进行了估算。图 6 给出了低能区下的 S 因子及误差<sup>[16]</sup>。因此结合上海激光电子  $\gamma$  源进行核天体反应实验, 可以更好地确定类似于俘获反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  等的反应率。

## 6 结论

以 SSRF 为平台, 利用远红外激光束与 SSRF 储存环中能量为 3.5 GeV 电子束散射得到能量范围为 1—22 MeV 的准单色、强度为  $10^9$ — $10^{11} \text{ s}^{-1}$  和高极化度(线极化或圆极化)的  $\gamma$  射线束开展核物理中的少体及极化问题、核结构、核天体物理、对称性及奇异现象和  $\gamma$  射线的应用等诸多领域的研究以及储存环电子束性能的监测。

对光解反应  $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$  在低能区的反应截面

## 参考文献 (References):

- [1] Milburn R H. Phys Rev Lett, 1963, **10**: 75.
- [2] Arutyunyan R H, Tumanian V A. Phys Lett, 1963, **4**: 176.
- [3] Casano L, Marino A, Matone G, *et al.* Laser Unconventional Optics J, 1975, **55**: 3.
- [4] Matone G, Picozza P, Prosperi D, *et al.* Lect Notes Phys, 1977, **62**: 149.
- [5] Federici L, Giordano G, Matone G, *et al.* Nuovo Cimento, 1980, **B59**: 247.
- [6] Babusci D, Cima E, Iannarelli M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1991, **A305**: 19.
- [7] Sandor A M, Le Vine M J, Thorn C E, *et al.* IEEE Trans, 1983, **NS-30**: B3 093.
- [8] Babusci D, Casano L, D'Angelo A, *et al.* Nuovo Cimento, 1990, **103A**: 1 555.
- [9] Bocquet J P, Capogni M, Casano L, *et al.* Generation of Compton Backscattering  $\gamma$ -ray Beam. Proceedings of the XIII International Conference on Particles and Nuclei, Perugia, 1993. In: Pascolini A. Singapore: World Scientific, 1994, 835.
- [10] Nakano T for the LEPS Collaboration. Journal of the Korean Physical Society, 2003, **43**: S10—S13.
- [11] Toyokawa H, Kii T, Ohgaki H, *et al.* Flux Measurement of the Laser-Compton-backscattered Photons with a Poisson Fitting Method. Nuclear Science Symposium, 1999, Conference Record, 1999, IEEE **2**: 730.
- [12] Scott Carman T, Scarlett C Y, Schreiber E, *et al.* Production of Gamma-rays for Nuclear Physics Using a Duke Free-electron-laser Facility. 1994, Technical Report, TUNL.
- [13] Scott Carman T, Litvenenko V, Madey J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **A378**: 1.
- [15] Zhao Z T, Xu H J. Proceeding of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland; Liu Guimin, Dai Zhimin, Li Haohu, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, **30 S-I**: 144.
- [16] Brune C R, Geist W H, Kavanagh R W, *et al.* Phys Rev Lett, **83**: 4 025.

Shanghai Laser Electron Gamma Source(SLEGS)<sup>\*</sup>

PAN Qiang-yan, XU Wang<sup>#</sup>, CHEN Jin-gen, GUO Wei, FAN Gong-tao, YAN Zhe, XU Yi,

WANG Hong-wei, WANG Cheng-bin, LU Guang-chen, XU Jia-qi, XU Ben-ji,

MA Yu-gang, CAI Xiang-zhou, SHEN Wen-qing

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

**Abstract:** Shanghai Laser Electron Gamma Source (SLEGS) is a high-intensity, short-pulse and compact  $\gamma$ -ray source which is based on inverse Compton scattering via interaction between pulsed high-power laser beams and picosecond relativistic electron bunches. One of the attractive features of the laser Compton scattering is the easy control of polarization of the produced high-energy photons that duplicates polarization of the applied laser beam. The  $\gamma$ -ray with energy up to 22 MeV and intensity of  $10^9$ — $10^{11}$  s<sup>-1</sup> are expected to be produced by Compton backscattering of CO<sub>2</sub> laser photons on the 3.5 GeV electrons bunches in the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). In this communication, we report some simulation results and the progressing status of SLEGS.

**Key words:** Compton scattering; CO<sub>2</sub> laser;  $\gamma$ -ray source; polarization

\* Received date: 17 Jul. 2007; Revised date: 22 Oct. 2007

\* Foundation item: Century Program of Chinese Academy of Sciences(26010701)

# Corresponding author: Xu Wang, E-mail: xuwang@sinap.ac.cn