

基于同步辐射加速器的康普顿背散射 γ 射线源*

(II) 产生亚 GeV 量级 γ 光子的数值计算

蔡翔舟 顾嘉辉 郭威 沈文庆

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 提出在筹建的上海同步辐射装置上建造一条亚 GeV 量级 γ 束线站, 采用 nm 波长的紫外激光与储存环中 3.5 GeV 电子束进行康普顿背散射, 从而获得能区为 300—870 MeV 的 γ 光子束. 该光子束具有高强度、高极化度(线和圆极化)、准单色、方向性好的优点. 文中结合储存环参数给出了光子束性能的数值结果, 并探讨了相互作用区和标记位置的选择方案.

关键词 康普顿背散射光子 同步辐射 散射电子标记

1 引言

提出在筹建的上海同步辐射装置(SSRF)上建造一条亚 GeV 量级 γ 束线站(SLEGS-II), 采用 nm 波长的紫外激光与储存环中电子束进行康普顿背散射(BCS), 产生亚 GeV 量级极化 γ 束. 主要可用来研究核内介子自由度和夸克自由度对原子核的影响、物理学中某些基本不变性原理的检验、赝标量介子的稀有衰变及复合核的光核反应; 可开展质子晕和中子晕核的研究; 最近理论上提出“荷电 π 介子光致产生”是研究晕核的一个新途径^[1], 该方法灵敏于价核子波函数的细节, 而且能研究重离子碰撞不能到达的核心区内晕粒子波函数的影响; 此外, 还可以应用于在线监测电子束的能量、自然发射度和极化度. 采用的激光波长不能小于 190 nm, 这是紫外光能透过石英窗的截止波长.

本文介绍了建造 SLEGS-II 的基本方案, 给出了数值计算的光束线性质, 并探讨了可能的相互作用区与散射电子标记位置的选择.

2 SLEGS-II 亚 GeV 极化 γ 束性质

我们主要采用两类 nm 波长的激光器: 一类是 Nd:YAG 固体激光器产生 1064 nm 波长

2002-01-10 收稿

* 中国科学院九五基础研究重大项目资助

的激光,用非线性晶体可以分别得到它的 2 倍频(532nm)、4 倍频(266nm)和 5 倍频(213nm);一类是 Ar 离子激光器,工作波长分别为 514nm,488nm,351nm 和 200nm. 根据 PART I 中所给出的 SSRF 电子束状态和上述列出的激光波长(工作时平均输出功率 2—5W),通过 PART I 中公式(16—22)可以计算得到产生的能量为 205—873MeV、强度为 $10^6—10^7(s^{-1})$ 的 γ 射线性质.

当激光波长为 200nm 时,在 0.24mrad 散射角内,集中了能量为 300—870MeV 的 γ 光子,它们在离相互作用区中心 50m 远处展宽不过 1.2cm,这使得实验可以采用紧致靶和小尺寸探测系统. 散射光子的能谱比较平坦,与能量没有很强的依赖关系, γ 射线在单位能量单位时间的强度 $\sim 10^4 MeV^{-1}s^{-1}$. 散射光子的产额随着出射角增大急剧减少,50% 以上光子主要集中在 $1/\gamma_e \sim 0.15mrad$ 内. 类似地通过调节激光的极化,可以得到两种极化(圆或线极化)的 γ 射线.

表 1 与国际上高能光子束的比较^[2,3]

		光子束性能		
		能量/MeV	强度/ $(10^3 s^{-1} MeV^{-1})$	极化
德国 MAMI/Mainz	\bar{e} Brem.	140—800	50	circular ~ 0.8
	coh. Brem.	—400		linear ~ 0.4
德国 ELSA/Bonn	\bar{e} Brem.	500—2400	10	circular ~ 0.3
	coh. Brem.	—1200	5	linear ~ 0.4
美国 CEBAF	\bar{e} Brem.	300—2300	50	circular ~ 0.8
	coh. Brem.	—1800	2	linear ~ 0.4
俄罗斯 ROKK-1M/VEPP-4M ^[4]	Compton	—1600	1	both ~ 1
美国 LEGS/NSLS ^[5]	Compton	180—320	33	both ~ 1
		280—470		
欧洲 GRAAL/ESRF ^[6,7]	Compton	550—1470	1	both ~ 1
日本 LEPS/Spring 8	Compton	1500—2400	1	both ~ 1
中国 SLEGS-II/SSRF	Compton	200—870	10	both ~ 1

表 1 列出了国际上主要的高能光子束. 其中, MAMI, ELSA 和 CEBAF 使用韧致辐射技术, 由极化电子束韧致辐射只能得到圆极化度, 相干韧致辐射只能得到部分线极化.

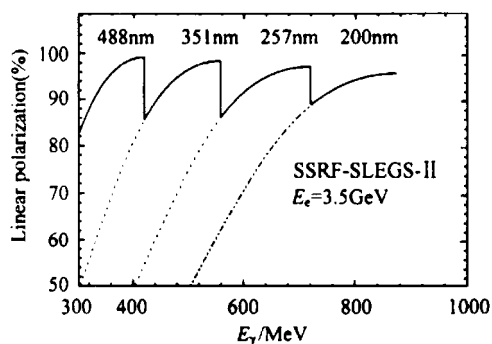


图 1 SLEGS-II 的激光波长与 γ 射线线极化度

ROKK-1M 利用 ND:YAG 激光与正负电子对撞机 VEPP-4M 的正电子(负电子)束的反散射产生高能 γ 射线,从而使 VEPP-4M 同时成为 γ - γ 对撞机或 γ -e 对撞机,主要开展 γ 物理研究. LEGS, GRAALL, LEPS 和拟建的 SLEGS 都是利用 BCS 方法产生高能光子束,可以得到几乎 100% 的线或圆极化.

SLEGS-II 能区与 MAMI, ELSA, CEBAF

和 GRAAL 有所重叠. 高能 γ 束的性质除了能量之外, 实验家们最关心的就是能量分辨、极化度和流强. SLEGS-II 通过利用 Ar 离子激光器 4 种不同波长(200nm, 257nm, 351nm, 488nm), 就可以在 0.3—0.87GeV 能区范围内保持 γ 光子的极化度在 85% 以上, 如图 1 所示. GRAAL 使用的 Ar 离子激光器运行波长为 351nm, 由于 GRAAL 的电子能量为 6GeV, 要使在 0.85GeV 能量以下 γ 光子保持 85% 以上的极化度, 则需调换激光器以提供更长的激光波长, 这显然是不实际的. 通过数值计算可得, 在 0.3—0.87GeV 能区内, SLEGS-II 的能量分辨率好于 ESRF 两倍左右. 在总流强均为 10^7 s^{-1} 的条件下, SLEGS-II 在单位能量单位时间内比 GRAAL 可获得更多的光子. 实际上, GRAAL 当初设计时确定其能区下限为 350MeV, 主要是考虑到覆盖 LEGS/NSLS 不能到达的 350MeV 以上能量. 它的优越性体现在高能端 1.0—1.5GeV 部分. SLEGS-II/SSRF 的建成将弥补 GRAAL 的不足, 可望在 300—870MeV 能区开展有自己特色的物理工作, 另外, 需要的话可延伸到 200MeV 低能区.

3 光束线站布局

SLEGS-II 亚 GeV 光束线站结构如图 2 所示, 主要由激光引入监测系统、电子标记系统(TS)、束流位置监测和束流引出室等部分组成. 激光被引入真空管道, 并与电子发生碰撞, 散射后的电子被 TS 探测, 没有与电子发生碰撞的激光从另一端引出, γ 束通过束流引出室沿电子运动切线方向经过前端区引出. 其中 $1/4$ 波长板用于将线极化变换成圆极化光. 为使激光同电子对撞位置始终保持一致, 设置如图中的激光束监测器和反馈系统. γ 光束强度主要依赖于激光强度和电子流强, 由于产生高能 γ 光子时, 散射电子偏离主轨道而损失, γ 射线所允许的最大强度应该使 SSRF 贮存环电子束寿命的减小不超过 10%, 以不影响同步辐射装置上其他用户工作为原则. 在该强度下, 单个电子束团每次经过激光电子相互作用区时, 因 Compton 背散射而损失的平均电子数少于 1 个, 损失的电子数相对于束团总电子数非常小, 不会改变贮存环中电子束包的结构.

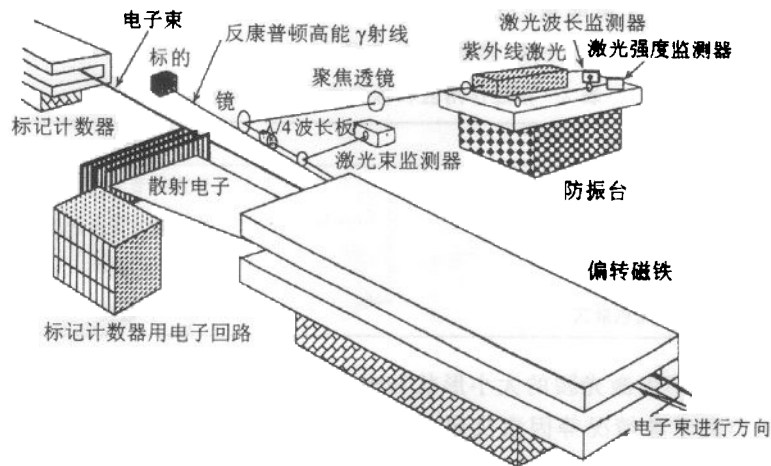


图 2 SLEGS-II γ 光子发生装置示意图

4 散射电子标记位置的初步选择方案

由于能量在 300—870MeV 的光子集中在前向半角仅为 0.24mrad 锥体内,准直法难以满足对高能 γ 射线的能量分辨要求,必须采用散射电子标记的方法. 标记原理就是利用贮存环的自身的偏转磁铁,通过测量散射电子的偏转角来确定对应产生的 γ 光子能量. 标记系统(TS)是整个高能 γ 束线站设计中关键部分之一,它不仅影响到将来得到的 γ 光束的性能指标,而且涉及到储存环的部分真空盒的改造工作. TS 不能太靠近束流主轨道,一方面为了防止受到过多的辐射损伤,另一方面也不被允许进入该处储存环的动力学孔径以内. TS 拟覆盖偏离主轨道 2.0cm 到 8cm 之间的空间范围,可以标记能量在 300—900MeV 之间的光子,为了给 SLEGS-II 将来提高 γ 射线能量留有余地,在实际条件许可的情况下,可以适当放宽标记能量的上限(如 1.0GeV).

设计 TS 的首要问题是在储存环中选择激光电子相互作用区和散射电子的标记位置,其选择依据主要遵循以下几条原则:(1)尽可能提高标记光子的能量分辨,目标是至少要达到国际同类装置的能量分辨水平(1%—2%). (2)相互作用区的长度要足够长,以确保能产生足够强度的 γ 光子,总强度要达 10^6s^{-1} 以上. (3)标记光子的能量范围要比较宽,设计目标是 200—1000MeV. (4)标记位置的选择要合理,尽量不要改动环的结构和减少环的真空盒的改动.

SSRF 的贮存环有 20 个分离的 DBA 标准单元组成,图 3 给出了每个标准单元的元件

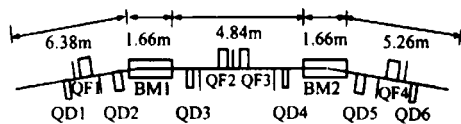


图 3 贮存环标准单元的元件布局

布局^[8]. 其中长直线节和短直线节为无色散区,而两偏转磁铁之间区域为色散区,中心位置的色散长度约 0.5m. 由于激光与电子之间的散射应发生在储存环的直线段内,相互作用区和电子标记位置将有 4 种选择,如表 2

所示. 后两种情形下的 γ 束能量分辨应该是一致的,因为偏转磁铁之前的磁单元(包括直线漂移节、四极磁铁等)对色散长度参数是没有贡献的.

表 2 相互作用区和标记位置的几种选择

相互作用区	标记区
色散区	长直线节无色散区
色散区	短直线节无色散区
长直线节无色散区	色散区
短直线节无色散区	色散区

发光度 L 的大小由激光腰的大小形状和电子束包络在相互作用区间的分布,以及激光与电子束的空间重叠情况等因素决定,可根据数值积分计算来得到. 由于相互作用长度越长,激光电子发生碰撞总的几率就越大,以长直线或短直线无色散节为相互作用区时,发光度相对于以色散节为相互作用区时的值要高出 2 倍多. γ 束的最大强度主要受到贮存环电子束寿命的制约,SSRF 电子束的平均流强为 200mA,允许的最大 γ 光束强度为

$3.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 该强度使贮存环电子束寿命减少约 10%, 基本上不会影响同步辐射光的性能. 达到该强度所需的激光平均输出功率为 2W(以无色散区为相互作用区)或 4W(以色散区为相互作用区). 从产生 γ 光子的强度方面来看, 无色散区为相互作用区有一定好处, 因为它需要的激光功率相对要小些, 但由于对 γ 光子的强度限制主要来自于不能使储存环中电子束寿命减少大于 10%, 这个好处意义不大.

图 4 给出了在不同位置得到的标记光子的能量分辨. 当标记探测器置于无色散区时将获得更好的能量分辨, 而且离偏转磁铁出口越远, 标记 γ 光子的能量分辨越好. 但实际上, 标记探测器不可能置于离偏转磁铁太远的地方, 因为这时散射电子偏离主轨道距离也越大, 也就要求真空盒有越大的尺寸, 以确保散射电子在达到标记探测器之前不会碰到真空盒内壁. 国际同类装置如 GRAAL/ESRF 和 LEPS/Spring 8 上, 标记探测器都是直接置于在偏转磁铁和紧跟的第一个四极磁铁之间的某个位置. 图 5 给出了在不同标记位置处, 对应于最大光子能量的散射电子在径向的空间分辨, 它是对标记探测器空间分辨本领提出的最低要求. 目前, 硅微条探测器的空间分辨可以做到 0.1mm, 可以满足标记 γ 光子的需求.

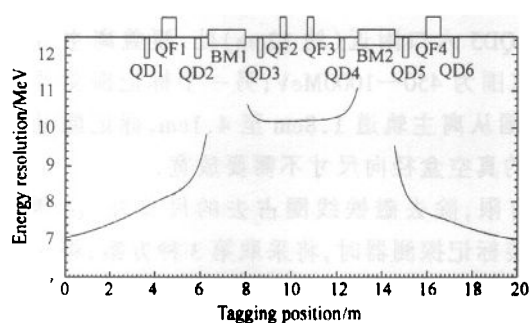


图 4 光子的能量分辨与标记位置的关系

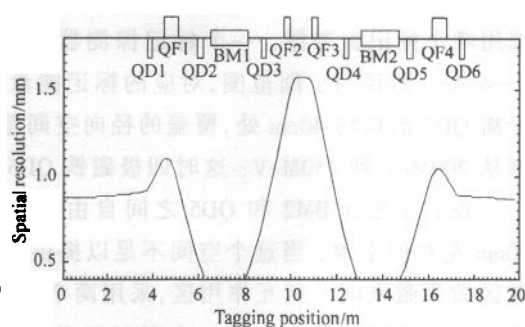


图 5 单色能量的散射电子在不同标记位置的径向空间分辨率
探测器的空间分辨本领不应小于该处的值.

为了优化标记探测器的位置和确定真空盒的尺寸要求, 了解散射电子在磁场中偏离主轨道情况是必要的. 由于表 2 中的前两种情况中与后两种情况中, 散射电子的偏转行为分别是类似的, 因此这里只计算了表 2 中第二、第三种情况下, 损失不同能量的电子在水平方向上的偏转轨迹, 如图 6, 7 所示. γ 光子的最大能量是由激光和电子的能量共同决定的, 而标记光子的能量下限取决于标记探测器离主轨道有多远. 通常标记探测器能最靠近主轨道的距离为 18—20mm. 因此, 要标记 200MeV 能量以上的光子, 标记探测器可置于偏转磁铁下游的第一个四极磁铁出口附近.

由于无色散区可以得到比色散区更好的能量分辨, 最理想的方案是将色散区作为激光电子相互作用区, 标记探测器置于无色散区, 最后放在什么地方是上面种种因素的权衡并由决定于同步加速器能提供的位置. 如图 6 中离四极磁铁 QD5 出口约 40cm 处, 在该处, 标记光子的能量分辨为 8MeV, 空间分辨 0.7mm, 标记探测器需要覆盖的水平空间范围为 18—90mm. 上述方案中, 四极磁铁 QD5 在其入口处真空盒的径向尺寸需要放宽至

5cm,在其出口处需要放宽至 6.7cm. 四极磁铁的真空盒的半径一般在 3.5cm 左右,因此真空盒尺寸的改动还是较大的.

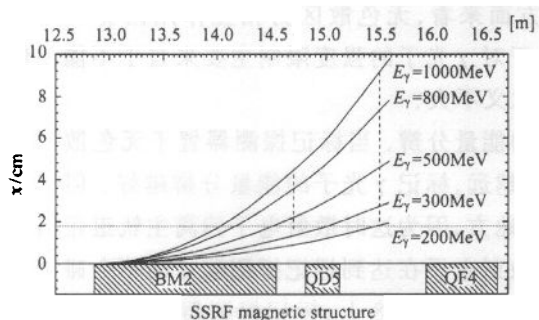


图 6 损失不同能量的散射电子在水平方向上偏离主轨道的距离
相互作用区为色散区.

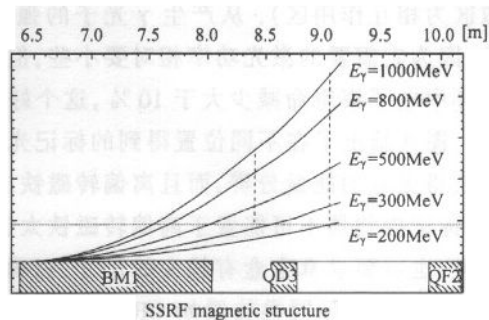


图 7 损失不同能量的散射电子在水平方向上偏离主轨道的距离
相互作用区为长直线节无色散区.

考虑到实际中的四极磁铁的真空盒尺寸可能无法满足需求,这时可采取第 2 种方案. 拟用两个标记探测器. 一个标记探测器置于 QD5 入口附近(约 12cm)处,覆盖离主轨道 2—4.4cm 的径向空间范围,对应的标记能量范围为 450—1000MeV;另一个标记探测器置于离 QD5 出口约 40cm 处,覆盖的径向空间范围从离主轨道 1.8cm 至 4.1cm,标记能量范围从 200MeV 到 450MeV. 这时四极磁铁 QD5 的真空盒径向尺寸不需要放宽.

我们注意到 BM2 和 QD5 之间自由空间有限,除去磁铁线圈占去的尺寸外,仅剩约 10cm 左右的空隙. 当这个空间不足以提供安装标记探测器时,将采取第 3 种方案,将无色散区做为激光电子相互作用区,采用两个标记探测器并分别置于色散区的合适位置. 如: 第 1 个标记探测器置于图 7 中离四极磁铁 QD3 入口约 15cm 处,覆盖离主轨道 2—5.3cm 的径向空间范围,对应的标记能量范围为 400—1000MeV;第 2 个标记探测器置于图 7 中离四极磁铁 QD3 出口约 30cm 处,覆盖离主轨道 1.8—3.6cm 的径向空间范围,对应的标记能量范围为 200—400MeV. 在该方案中, BM1 和 QD3 之间有充裕的空间供第 1 个标记探测器的安装, QD3 的真空盒径向尺寸不用放宽. 具体方案的选定需要进一步深入地讨论.

5 结论

本文建议在筹建的 SSRF 上建造一条亚 GeV 量级 γ 束线站(SLEGS-II),采用 nm 波长的紫外激光与储存环中电子束进行康普顿背散射,产生高极化(线或圆)度、准单色、方向性好的亚 GeV 量级极化 γ 束,并探讨了可能的相互作用区和标记位置的选择方案.

参考文献 (References)

- 1 Karataglidis S., Bennhold C. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**(8):1614
- 2 Litvinenko V N et al. Phys. Rev. Lett. 1997, **178**:4569
- 3 Scott T. Carman et al. Nucl. Instr. and Meth., 1996, **A378**:1—20
- 4 Kezerashvili G Ya. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1998, **B145**:40—48
- 5 Thorn C E et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, **A285**:447
- 6 Preger M. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1986, **A249**:299
- 7 Babusci D. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1991, **A305**:19
- 8 HUANG Nan, LIU Gui-Min, DAI Zhi-Min. Primary Design of SSRF, 2001, S/N-SSRF-AP31-00 (in Chinese)
(黄楠,刘桂民,戴志敏.上海光源工程初步设计报告,2001,S/N-SSRF-AP31-00)

**Backward Compton Scattering γ -Ray Source Based
on Synchrotron Radiation Facility
(II) Numerical Calculation of GeV γ -Ray Production**

CAI Xiang-Zhou GU Jia-Hui GUO Wei SHEN Wen-Qing
(Shanghai Institute of Nuclear Research, CAS, Shanghai 201800, China)

Abstract We propose to build a GeV γ -ray beam line, Shanghai laser Electron Gamma Source- II (SLEGS- II), at the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). By Backward Compton Scattering (BCS) of ultraviolet laser from 3.5 GeV electrons of SSRF, high intense quasi-monochromatic BCS γ -rays with high linear or circular polarization ranging 300—870MeV will be produced. In this paper, we present the outline of SLEGS- II and the properties of BCS γ -ray with numerical computation based on the major parameters of SSRF storage ring. The selection of interaction region and tagging position is discussed.

Key words backward compton scattering, synchrotron radiation, tagging system of scattering electron

Received 10 January 2002

* Supported by Major Subject of Chinese Academy of Sciences