

基于激光康普顿散射的电子束参数 测量方法

王振伟^{1,3} 许杭华² 郝子锐² 张 岳² 刘龙祥² 范功涛^{2,3} 王宏伟^{2,3}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 加速器电子束参数的无损间接测量是一个难题,储存环上传统的 X 射线针孔成像(X-ray Pinhole Imaging)方法和直线加速器上的狭缝衍射法(Optical Diffraction Radiation, ODR)都存在不足之处。激光康普顿散射(Laser Compton Scattering, LCS)装置是利用相对论电子与低能光子相互碰撞产生高能 γ 束的新光源。本文提出了一种基于激光康普顿散射光源测量能谱提取电子束参数的方法,该研究旨在通过自主开发的基于 Geant4 的蒙特卡罗程序模拟重建出与实验测量能谱符合一致的模拟谱,从而获得电子束参数,包括水平方向束斑尺寸、电子能量和发射度。在对上海同步辐射装置(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)的激光 γ 光束线站(Shanghai Laser Electron Gamma Source, SLEGS)上的多碰撞角度 γ 测量能谱做了一致性的验证,结果表明:提取的上海光源储存环电子束参数与理论值符合得较好。这证明了激光康普顿散射是一个有效的电子束参数无损间接测量方法,为后续其他电子束的提取奠定基础。

关键词 激光康普顿散射, 电子束参数, 蒙特卡罗模拟, γ 能谱

中图分类号 O571.1, TL506

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.110203

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2024.47.110203

The method of measuring electron beam parameters based on laser Compton scattering

WANG Zhenwei^{1,3} XU Hanghua² HAO Zirui² ZHANG Yue²

LIU Longxiang² FAN Gongtao^{2,3} WANG Hongwei^{2,3}

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

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] The non-destructive indirect measurement of accelerator electron beam parameters is a challenging task. Both the traditional X-ray pinhole imaging methods on storage rings and optical diffraction radiation (ODR) from a slit techniques on linear accelerators have their shortcomings. The laser Compton scattering (LCS) device is a new light source that uses relativistic electrons and low-energy photons to collide with each other to

科技部重点研发计划(No.2022YFA1602400, No.2023YFA1606901)、国家自然科学基金(No.12275338, No.12005280)、核数据重点实验室基金(No.JCKY2022201C152)资助

第一作者: 王振伟, 男, 1999 年出生, 2021 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核技术及应用专业

通信作者: 许杭华, E-mail: xuhh@sari.ac.cn; 王宏伟, E-mail: wanghw@sari.ac.cn

收稿日期: 2024-03-23, 修回日期: 2024-07-13

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1602400, No.2023YFA1606901), National Natural Science Foundation of China (No.12275338, No.12005280), and Key Laboratory of Nuclear Data Foundation (No.JCKY2022201C152)

First author: WANG Zhenwei, male, born in 1999, graduated from University of South China in 2021, master student, focusing on nuclear technology and applications

Corresponding authors: XU Hanghua, E-mail: xuhh@sari.ac.cn; WANG Hongwei, E-mail: wanghw@sari.ac.cn

Received date: 2024-03-23, revised date: 2024-07-13

produce high-energy γ beams. **[Purpose]** This study aims to extract the SSRF (Shanghai Synchrotron Radiation Facility) electron beam parameters based on the laser Compton scattering (LCS) techniques. **[Method]** Under the condition of controllable laser parameters, the electron beam parameters of LCS could be determined by the γ beam measurement. Firstly, simulation spectra reconstructed by self-developed Monte Carlo program based on Geant4 were selected by those best matched with the experimentally measured energy spectra. Then, the corresponding parameters of electron beam, including beam spot size in horizontal direction, electron energy and emittance, were extracted. Finally, the consistency of the gamma energy spectra at different colliding angles measured on the Shanghai Laser Electron Gamma Source (SLEGS) beamline station of SSRF was verified. **[Results]** The extracted electron beam parameters of the SSRF storing ring are in good agreement with the theoretical values. The electron beam energy at SSRF storage ring BL03SSID interaction point is $(3\,511.44 \pm 0.11)$ MeV, the transverse (horizontal) dimension of the electron beam is (316.60 ± 0.15) μm , and the emittance of the electron beam is (4.56 ± 0.01) nm $\cdot$ rad, with relative deviations of 0.33%, 1.6%, 8.1%, respectively. **[Conclusion]** Results of this study demonstrate that LCS is an effective and non-destructive way to determine the electron beam parameters indirectly and lays a stable foundation for the extraction of other parameters of the electron beam.

Key words Laser Compton scattering, Electron beam parameter, Monte Carlo simulation, Gamma spectrum

无论是储存环还是直线电子加速器,电子束参数的测量始终是调试、运行中重要的一环。在储存环上,电子束横向尺寸通常采取无损测量的方法,最常用的是X光小孔(X-ray pinhole)成像法,该方法主要是利用小孔成像原理对同步辐射中的X射线束斑成像来计算横向截面尺寸,原理虽然简单,但是系统性能主要由点扩散函数^[1]的测量精度决定,受小孔几何尺寸、小孔衍射和成像系统的限制,且通常用于在弯铁处的电子束测量。

此外,有研究采用了空间干涉仪测量了电子束的横向尺寸^[2],利用范西特-泽尼克原理在空间域测量同步光的相干度,从而推算束斑横向尺寸,可以测量几微米的束斑,该方法分辨率高,但是数据刷新率低,不能在弱光强下进行。在电子直线加速器上,则一般采用阻挡式测量的方法,使用轮廓靶,如闪烁晶体YAG靶^[3]、光学渡跃辐射OTR靶^[4]来测量电子束横向尺寸。另外丝扫描法^[5]也是使用较多的测量电子束斑尺寸的方法,该方法利用金属丝横穿过电子束团产生的电流,或者通过束流和丝相互作用产生的次级粒子被下游的束损探测器监测^[6],结合丝靶位置信号得到束流截面信息,精度相对轮廓靶法较高,但是结构复杂,对束损探头灵敏度要求高;且每次扫描只能一个维度方向进行,即使两次扫描也很难全面地得出电子束的完整尺寸^[7]。

除了以上阻挡式测量,直线加速器上同样也发展出了非阻挡式的测量方法,例如狭缝衍射法(Optical Diffraction Radiation, ODR)^[8],利用电子束通过狭缝产生衍射图案,可以推算出电子束尺寸,电子束能量越高,该方法要求的狭缝宽度就越窄,加工难度大且使用时容易刮束。在能量测量方面,储存

环上常用的有磁偏转法^[9]和共振自旋退极化法^[10]。磁偏转法简单易行,但精度相对较低,共振自旋退极化法通过得到极化电子来测量能量,精度较高但一般要求电子束能量大于GeV^[11],并且电子极化时间要长达数小时^[12]。直线加速器上的电子能量测量一般采用偏转铁^[13]的方式,属于阻挡式的测量。

激光康普顿散射,即激光与高能电子束相互作用产生 γ 束,它由参与作用的电子束和激光性质共同决定,在激光参数可控条件下,可以通过 γ 束测量来确定电子束参数。基于激光康普顿散射提取电子束参数的方法克服了传统方法的一些缺点:如测量 γ 束能谱的时间较短;在激光强度 a_0 远小于1时(a_0 无量纲参数,表示入射光子归一化四矢量势的数值, $a_0 = 8.6 \times 10^{-10} \lambda_L I^{1/2}$,其中: λ_L 表示入射激光波长, μm ; I 表示功率密度, $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)^[14],激光光子与电子束的碰撞对电子束的影响可忽略不计;无需插入狭缝或其他靶,具有无损的特点;通过改变激光与电子束相互作用的位置,可以对不同位置的电子束参数分别测量。德国首先在BESSY-I上利用激光康普顿散射测量了电子束能量和能散^[12];美国高强度 γ 射线源(High Intensity γ -ray Source, HI γ S)装置通过激光康普顿散射测量储存环的电子束能量和能散^[11],爱达荷州加速器中心测量了电子束的能量、能散以及电子束运动方向的晃动^[15];日本NewSUBARU上的BL01线站也尝试了通过激光康普顿散射对电子束的能量进行标定^[16];最近,意大利STAR(Solenoidal Tracker at RHIC)项目则从模拟角度出发,提出了利用机器学习和人工智能对电子束发射度进行测量的方法^[17]。上海光源激光 γ 光束线(Shanghai Laser Electron Gamma Source, SLEGS)2021年底建

成^[18-21],可以开展激光康普顿散射的电子束参数测量。

本文基于自主开发的 Geant4 蒙特卡罗模拟程序与 SLEGS γ 束能谱测量的实验结果,提出了一种利用激光康普顿散射获得上海光源储存环电子束能量与束斑横向尺寸参数的新方法。

1 激光康普顿散射能谱测量电子束斑尺寸的原理

1.1 从单电子模型能谱到电子束团能谱

高能电子与激光光子发生散射,从而产生 X/ γ 射线波段的高能光子,此过程称为激光康普顿散射 (Laser Compton Scattering, LCS) (又称为逆康普顿散射),如图 1 所示。

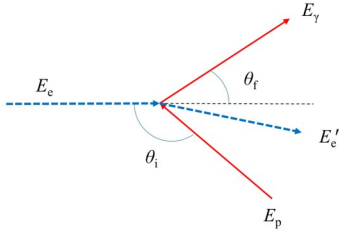


图1 激光康普顿散射示意图

Fig.1 Diagram of the laser Compton scattering (LCS) process

图 1 中, E_e 表示入射电子的能量; E_p 表示入射光子的能量; θ_i 为二者运动方向的夹角; E'_e 和 E'_γ 分别表示出射电子和散射 γ 的能量; θ_f 为散射 γ 相对于入射电子方向的散射角。在这个散射过程中,散射 γ 的能量是来源于高能入射电子的能量转移,因此,散射 γ 携带着与入射电子有关的信息,如能量、发射度等,通过测量散射 γ 的能谱可以得到相关电子束参数^[17]。由四动量守恒可得到散射 γ 的能量,其表达式为:

$$E_\gamma = \frac{E_p(1 - \beta_e \cos \theta_i)}{1 - \beta_e \cos \theta_f + \frac{E_p[1 - \cos(\vec{\theta}_i - \vec{\theta}_f)]}{E_e}} \quad (1)$$

式中: $\beta_e = v/c$; v 为电子速度; c 表示光速。散射 γ 都分布在 $1/\gamma_e$ 的小锥角内, $\gamma_e = \sqrt{1 - \beta_e^2}$, 为电子的洛伦兹因子。对于高能电子的情况, γ_e 可达 10^3 量级,因此散射角 $\theta_f \ll 1$, 接近于 0。在这些散射 γ 中,与入射电子运动方向同向的 γ 能量最大,同时通量也最高,因此利用准直孔限制散射 γ 的发散角,可以进一步提高散射 γ 束的单色性。因此在入射电子运动方向上利用小孔径的准直孔可以获得准单能 γ 束,从

而提高实验的精确度。

对于任意入射角 θ_i , 有如下能量微分截面:

$$\frac{d\sigma}{dE_\gamma} = \pi r_0^2 R^2 \left(R + \frac{1}{R} - 1 + \cos^2 \theta' \right) \frac{\gamma_e^2 E_e E_p (1 - \beta_e)(1 - \beta_e \cos \theta_i) - E_e^2 \beta_e}{\gamma_e^2 E_p (1 - \beta_e \cos \theta_i) (E_\gamma - E_e \beta_e)^2} \quad (2)$$

式中: r_0 为电子经典半径; R 为在电子静止坐标系下入射激光光子与散射 γ 能量之比, $R = \frac{1}{1 + (1 + \cos \theta')(1 - \beta_e \cos \theta_i) \gamma_e \frac{E_p}{m_0 c^2}}$; θ' 则是散射 γ

出射角 θ_f 在电子静止坐标系下所对应的值,二者有 $\cos \theta' = \frac{\cos \theta_f - \beta_e}{1 - \beta_e \cos \theta_f}$ ^[22]。以上是单电子和单激光光子作用的能量微分截面表达式,但是实际情况是一团电子束与包含多个光子的激光脉冲相互作用,这导致电子和激光光子的位置、能量、运动方向具有一定的统计分布,此外激光波长也不是单一的,具有一定的展宽,这些因素共同导致散射 γ 能谱具有一定展宽。通过在 Geant4 蒙特卡罗模拟程序中改变电子束参数和碰撞角度,可以模拟生成不同 γ 能谱,并与相应的直接测量的能谱对比分析,找到能谱与电子束参数的对应关系。因此通过能谱就可以提取电子束参数。

使用自主开发的基于 Geant4 的蒙特卡罗程序^[19]来模拟激光康普顿散射过程,模型关键部件设置如图 2 所示。其中粗准直器模拟为一个外径 100 mm、内径 3 mm、厚 300 mm 的铅材料中空圆柱;三孔准直器是一个外径 100 mm、内径 2 mm、厚 200 mm 的中空铅圆柱;衰减器则是一个直径 100 mm、厚 100 mm 的铜圆柱;溴化镧 (LaBr₃) γ 探测器则设置为一个直径 7.62 cm、高 10.16 cm 的圆柱。程序考虑了电子束能散、电子束发射度、激光能量的空间分布^[23]、溴化镧探测器响应函数,以及 4 种修正效应(包括 γ 散射角修正、电子束位置和动量修正、激光波长展宽修正、激光光子角度修正等),研究表明,它们对散射 γ 能谱的展宽有影响^[24]。

1.2 圆形电子束斑尺寸与能谱关系

直线加速器^[25]和衍射极限环^[26]上的电子束横向尺寸通常是近似圆形的,即电子束水平方向尺寸 σ_x 等于垂直方向尺寸 σ_y , 因此,将电子束横向尺寸记作 $\sigma_r = \sigma_x$, 电子束纵向尺寸记作 σ_z 。以上海软 X 射线自由电子激光 (Shanghai Soft X-ray Free-Electron Laser, SXFEL) 为例来说明, SXFEL 的直线加速器电子束横向尺寸为 51.5 μm 左右^[27]。通过模拟研究 SXFEL 电子束尺寸与能谱的关系,将电子束其他参

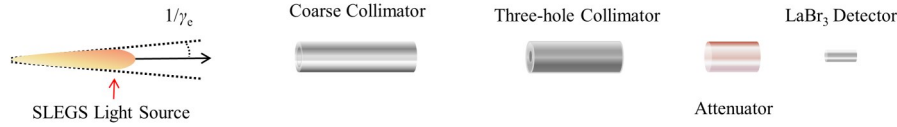


图2 Geant4模型中的关键部件示意图
Fig.2 Diagram of key components in Geant4 model

数与SXFEL的实际参数保持一致,利用Geant4模拟得到电子束横向尺寸和纵向尺寸下的 γ 束能谱(已经对能谱进行归一)。模拟能谱分别如图3(a)(对应于 σ_r 与能谱的关系)和(b)(对应于 σ_z 与能谱的关系)所示。电子束横向尺寸变化设为30 μm 、60 μm 、90 μm 、120 μm ;电子束纵向尺寸变化为100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 。模拟过程中保持 β 函数不变,从图3可以看到,电子束横向尺寸 σ_r 的变化会使得 γ 能谱形状发生展宽变化,表现为 γ 能谱宽度的变化以及峰值位置会发生改变。电子束纵向尺寸的变化则不会对能谱形状有明显的影响。

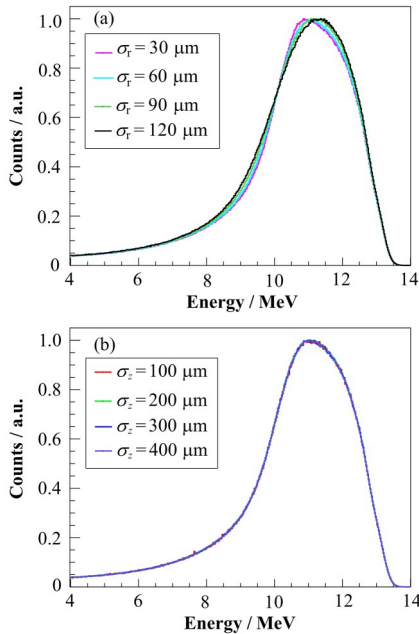


图3 散射 γ 能谱随圆形电子束横向(a)、纵向(b)尺寸变化的对比图(彩图见网络版)

Fig.3 Comparison diagram of the variation of scattered gamma spectra with a circular electron beam size in transverse (a) and longitudinal (b) dimensions (color online)

1.3 扁平电子束斑尺寸与能谱关系

上海同步辐射装置(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)上的储存环电子束在SLEGS光束线(BL03SSID)的相互作用腔处(类似于储存环束线插入件)的形状是扁平的,根据加速器模型^[28]计算得到相互作用点处的电子束水平方向尺寸 σ_x 为311.6 μm ,垂直方向尺寸 σ_y 为10.23 μm 。利

用Geant4模拟程序可以得到水平方向不同电子束尺寸 σ_x 下的 γ 束能谱,与圆形电子束斑模拟的方法类似:模拟过程中保持 β 函数不变,电子束的发射度将随电子束水平方向尺寸而变化,而其他参数保持不变。图4是电子束能量为3.5 GeV、激光与电子束碰撞角为140°时 γ 能谱随着电子束水平方向尺寸的变化情况。从图4中可以看出,激光康普顿散射的高能边沿形状保持不变,而低能段随着电子束尺寸增大而展宽。这是因为当 β 函数不变时,水平方向的尺寸变大导致水平方向的发射度变大,即电子束运动方向在水平方向的分布增大,而散射 γ 束的最大值所对应的方向与电子束入射方向是一致的,所以不会影响到高能边沿形状;但是通过准直孔的 γ 束散射角范围变大,这使得低能部分的 γ 束比例上升,所以 γ 束的低能部分随着水平方向尺寸的变大而升高,最后导致能谱展宽。

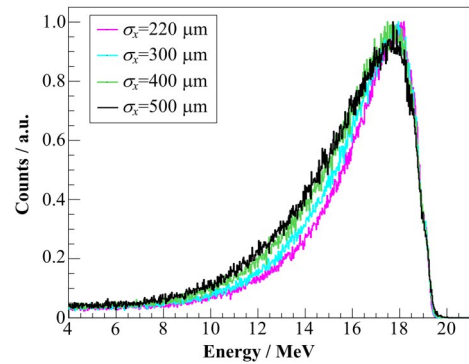


图4 不同电子束水平方向尺寸下散射 γ 能谱变化(彩图见网络版)

Fig.4 Variation of the scattered gamma spectra with the electron beam in horizontal dimension (color online)

另外,为检验电子束垂直方向尺寸 σ_y 和电子束纵向尺寸 σ_z 是否会对电子束参数测量精确度造成影响,在保证除了电子束尺寸外的其他条件与 σ_x 计算时的条件一致的情况下,利用Geant4模拟程序得到不同 σ_y 和 σ_z 下归一化后的 γ 束能谱,分别对应于图5(a)和(b)。从图5可以看出,改变 σ_y 和 σ_z 几乎不会对 γ 束能谱产生影响,这是由于 σ_z 只影响了电子束的密度,从而影响流强,但对能谱形状没有影响,在扁平束中 σ_y 远小于 σ_x ,这导致 σ_y 变化造成的能谱展宽被 σ_x 的影响所掩盖而难以辨别。由模拟结果可

知,利用散射 γ 束能谱提取电子束参数 σ_x 是可行的。

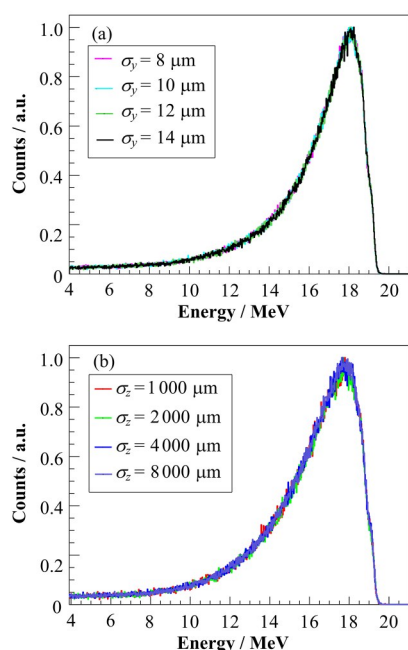


图5 不同电子束尺寸下能谱 γ 能谱的变化(彩图见网络版)
(a)垂直方向,(b)纵向

Fig.5 Variations of the scattered gamma spectra with by a circular electron beam in vertical (a), longitudinal (b) dimension (color online)

2 激光康普顿散射实验验证

2.1 实验设置

实验是在SLEGS光束线站^[29-31]上进行的,SSRF储存环能量为3.5 GeV的相对论电子与波长为10 640 nm的CO₂激光相互碰撞产生 γ 射线,线站布局如图6所示,束线关键部件为粗准直器(C)、三孔准直器(T)、细准直器(F)、衰减器(A)等。

在实验中,准直器组合为C3T2,其中C代表粗准直器,沿着入射电子束方向放置在激光光子与电子相互作用点后约18 m距离处,C3表示粗准直器孔

径为3 mm;T代表三孔准直器,放在细准直器之后(此过程细准直器未使用),T2表示三孔准直器的孔径为2 mm。该组合与Geant4模拟的设置一致。考虑到溴化铜探测器直接测量高通量($>10^6$ photons $\cdot$ s⁻¹)束流会导致脉冲堆积及死时间过高的情况,因此选用165 mm厚度无氧铜作为衰减材料。当准直孔与 γ 束中心没有对准时,会对 γ 能谱的形状和通量产生一定的影响,为解决这个问题,使用具有一定可辨识形状的定位靶并利用硅像素半导体探测器(MiniPIX)^[32]直观观察束斑形状和位置,也可以利用ROOT数据处理软件绘制出对应的散射 γ 束经过准直以及定位靶后的束斑形状,进一步查看和对比准直孔的对准情况。

2.2 实验结果与分析讨论

图7展示的是电子束与入射激光光子在不同碰撞角度(θ_i)时,在准直为C3T2、铜衰减厚度165 mm的情况下,利用LaBr₃探测器测得的实验能谱(已经对每个能谱进行最大值进行了归一化处理), θ_i 表示入射电子和入射激光光子的碰撞角度(单位为 $^\circ$)。

从图7可以看出,每个角度的能谱高能边沿平行分布,并且能谱的低能部分在5 MeV处已经收敛到0。随着碰撞角度的增大,能谱低能部分的展宽逐渐增大。散射 γ 能谱高能边沿随着碰撞角度的增大而向右移。由式(1)可知,在散射角为 0° 时,即散射光子的运动方向与入射电子方向相同时能量最大,入射电子与入射激光光子的碰撞角度越大,那么散射后的 γ 能量也就越高,即散射 γ 能谱的峰值向高能端偏移。通过对图7中多个角度实验谱的共同约束,即可以获得最佳电子束模拟参数。

以碰撞角度 124° 为例说明(图8),其中蓝色点为实际测量得到的 γ 能谱,红色实线代表的是利用Geant4模拟生成的与实验值符合最好的能谱,虚线则代表其他模拟情况。为了减小流强对后续数据处理的影响,将模拟谱相对于实验谱归一。将模拟能谱与实验能谱在每道下计数差值的绝对值求和,再

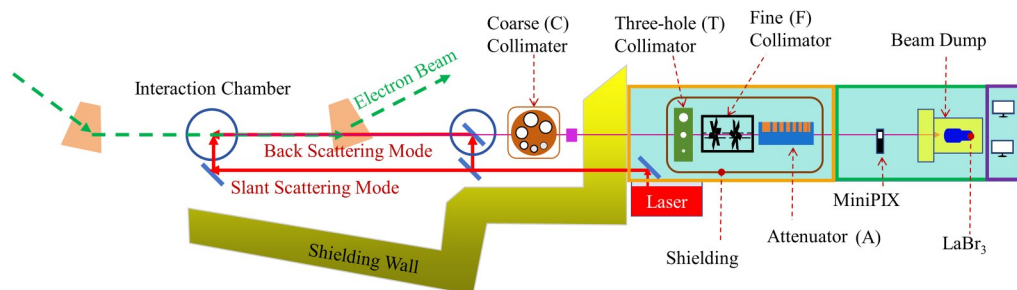


图6 SLEGS线站示意图
Fig.6 Diagram of the SLEGS beamline station

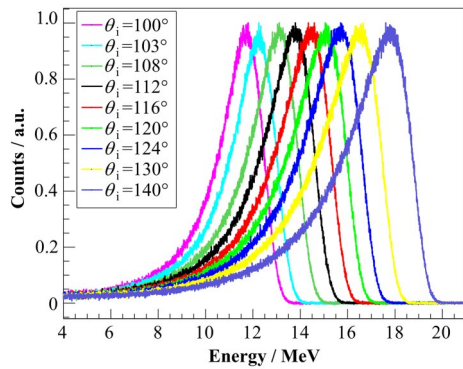


图7 不同碰撞角度 θ_i 的实测能谱对比图(彩图见网络版)
Fig.7 Comparison diagram of the experimentally measured energy spectra measured at different collision angles θ_i (color online)

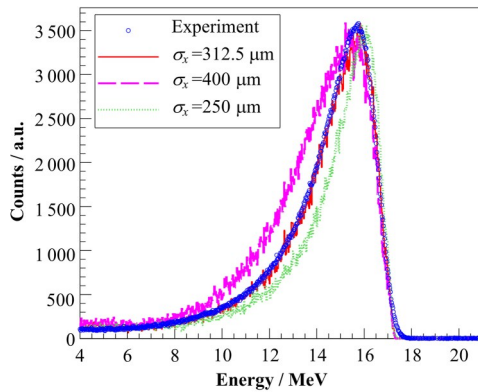


图8 碰撞角度 θ_i 为124°下,模拟能谱与实测能谱对比图
(彩图见网络版)
Fig.8 Comparison diagram of energy spectrum between the simulation and experimentally measured at the collision angle θ_i of 124° (color online)

除以实验谱的积分,并将最后计算值作为模拟谱和实验谱之间的偏差,用该偏差作为判定符合一致程度的标准。 x 轴为电子束能量, y 轴为电子束横向尺寸, z 轴为偏差值,将每种情况用一个点表示,系统模拟分析后作散点图,对散点图最小值附近的谷底用二维二阶多项式进行拟合,最后将拟合曲面与所有

散点画在一起,如图9所示。

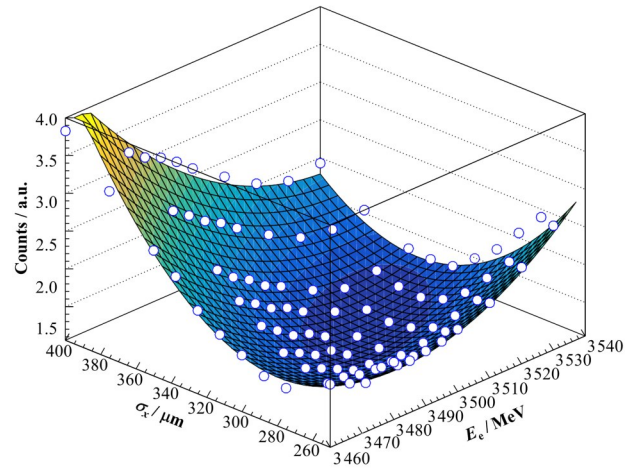


图9 模拟能谱与实测能谱偏差值关于水平方向电子束尺寸 σ_x 和电子束能量 E_e 的散点图以及拟合结果(彩图见网络版)
Fig.9 Illustration of scatter plot and the deviation between the experimentally measured and simulated energy spectra with respect to the electron beam horizontal dimension σ_x and the electron beam energy E_e and diagram of best fitting result (color online)

拟合函数设置为: $z = a_1 [\cos b \times (x - c_1) + \sin b \times (y - c_2)]^2 + a_2 [-\sin b \times (x - c_1) + \cos b \times (y - c_2)]^2 + d$ 。其中 c_1 和 c_2 分别表示谷底对应的水平方向电子束尺寸和电子束能量,拟合结果为 $c_1 = (316.60 \pm 0.15) \mu\text{m}$, $c_2 = (3511.44 \pm 0.11) \text{MeV}$ 。

利用发射度与电子束尺寸之间的关系:

$$\varepsilon_x = (\sigma_x^2 - \sigma_\delta^2 \eta^2) / \beta_x \quad (3)$$

式中: β_x 、 η 和 σ_δ 分别是相互作用点处的水平方向的 β 函数、色散函数和电子束能散,根据加速器模型计算的理论值,三者分别为: $\beta_x = 9.11 \text{ m}$ 、 $\eta = 217.6 \text{ mm}$ 、 $\sigma_\delta = 0.111\%$,代入式(3)可以求得发射度 ε_x 为 $4.56 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 。表1是模拟计算得到的电子束参数及其与理论模型值的偏差。

表1 模拟提取得到的电子束参数值、理论模型计算值及两者的偏差

Table 1 The values of electron beam parameters extracted by simulation and calculated according to the ideal model and the deviations between them

参数 Parameters	尺寸 σ_x Size $\sigma_x / \mu\text{m}$	能量 E_e Energy E_e / MeV	发射度 ε_x Emittance $\varepsilon_x / \text{nm} \cdot \text{rad}$
最佳拟合结果 Best results of fit	316.60 ± 0.15	3511.44 ± 0.11	4.56 ± 0.01
理论值 The ideal value	311.6	3500	4.22
相对偏差 Relative deviation / %	1.6	0.33	8.1

利用激光康普顿散射得到的电子束横向(水平)尺寸和电子束能量与理论值偏差小于1.6%,发射度相对理论值偏差为8.06%,二者符合得较好,但从比较也可以看到,电子束能量误差很小,一方面可能是因为模拟计算中没有考虑到更多影响电子能量参数

的因素,导致误差估计偏小;也有可能是测量时的电子束状态并非完全处在理论模型的理想状态下,另一方面,理论值并没有得到实验直接测量的验证,理论值的可靠性还需要直接测量检测。这一实验测量导出的电子束能量值并不和加速器的其他计算冲

突,对于电子能量的确定还需要更多的检验和计算。

3 结语

基于SLEGS光束线站的 γ 能谱测量提出了一种基于激光康普顿散射测量电子束能量、横向尺寸和发射度的方法,在提取电子束尺寸的同时结合模型参数计算出发射度。在SLEGS线站测量的实验能谱上应用该方法提取SSRF储存环BL03SSID相互作用点处电子束的参数如下:电子束能量 E_e 为 $(3\,511.44\pm0.11)\text{ MeV}$,电子束横向(水平)方向尺寸 σ_x 为 $(316.60\pm0.15)\text{ }\mu\text{m}$,电子束发射度 ε_x 为 $(4.56\pm0.01)\text{ nm}\cdot\text{rad}$ 。提取的电子束参数与理论值基本一致。该方法实现了对激光电子相互作用点处的电子束参数的无损测量,可以通过调整激光与电子束的作用位置实现对直线节不同位置的电子束参数和极化^[33]测量,因此,该方法有望在需要对特定位置的电子束参数做监测^[34-35]的多种电子加速器上得到应用,成为大型高能量电子束装置无损在线监测的有效方法之一。

致谢 特别感谢中国科学院上海高等研究院张庆磊老师提供的加速器模型数据,感谢吴桑老师在束测技术方面提供的建议和指导。

作者贡献声明 王振伟负责论文构思、起草文章、数据整理;许杭华负责方法学、论文审阅和修订;郝子锐负责论文审阅和装置运行、资料搜集;张岳负责实验数据处理和论文审阅;刘龙祥负责核电子学硬件设施和实验数据的后处理;范功涛负责论文审阅和修订,束线运行;王宏伟负责论文审阅和修订,项目的监督和管理。

参考文献

- Leng Y B, Huang G Q, Zhang M Z, *et al.* The beam-based calibration of an X-ray pinhole camera at SSRF[J]. Chinese Physics C, 2012, **36**(1): 80 - 83. DOI: 10.1088/1674-1137/36/1/014.
- 陈杰, 叶恺容, 冷用斌. 上海光源同步辐射空间干涉仪研制[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(1): 179 - 184. DOI: 10.3788/HPLPB20112301.0179.
CHEN Jie, YE Kairong, LENG Yongbin. Development of Shanghai Synchrotron Radiation Facility synchrotron radiation interferometer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, **23**(1): 179 - 184. DOI: 10.3788/HPLPB20112301.0179.
- Lumpkin A H, Yang B X, Berg W J, *et al.* Optical techniques for electron-beam characterizations on the aps sase fel project[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, **429**(1 - 3): 336 - 340. DOI: 10.1016/s0168-9002(99)00075-3.
- Potylitsyn A, Sukhikh L, Gusvitskii T, *et al.* Image of the transverse bunch profile via coherent optical transition radiation[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2020, **23**(4): 042804. DOI: 10.1103/physrevaccelbeams.23.042804.
- Fulton R, Haggerty J, Jared R, *et al.* A high resolution wire scanner for micron-size profile measurements at the SLC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1989, **274**(1 - 2): 37 - 44. DOI: 10.1016/0168-9002(89)90362-8.
- Sirvent J L, Dehning B, Emery J, *et al.* Secondary particle acquisition system for the CERN beam wire scanners upgrade[J]. Journal of Instrumentation, 2015, **10**(4): C04021. DOI: 10.1088/1748-0221/10/04/c04021.
- Askarbioki M, Zarandi M B, Khakshournia S, *et al.* Electron beams scanning: a novel method[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **894**: 81 - 86. DOI: 10.1016/j.nima.2018.03.062.
- Castellano M. A new non-intercepting beam size diagnostics using diffraction radiation from a slit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997, **394**(3): 275 - 280. DOI: 10.1016/s0168-9002(97)00570-6.
- Wilson E, Holzer B J. Particle physics reference library [M]. Germany: Springer International Publishing, 2020.
- Arnaudon L, Knudsen L, Koutchouk J P, *et al.* Measurement of LEP beam energy by resonant spin depolarization[J]. Physics Letters B, 1992, **284**(3 - 4): 431 - 439. DOI: 10.1016/0370-2693(92)90457-f.
- Sun C, Li J, Rusev G, *et al.* Energy and energy spread measurements of an electron beam by Compton scattering method[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2009, **12**(6): 062801. DOI: 10.1103/physrevstab.12.062801.
- Klein R, Mayer T, Kuske P, *et al.* Beam diagnostics at the BESSY I electron storage ring with Compton backscattered laser photons: measurement of the electron energy and related quantities[J]. Nuclear Instruments and

- Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997, **384**(2 - 3): 293 - 298. DOI: 10.1016/s0168-9002(96)00899-6.
- 13 Renner F, Schwab A, Kapsch R P, *et al.* An approach to an accurate determination of the energy spectrum of high-energy electron beams using magnetic spectrometry[J]. Journal of Instrumentation, 2014, **9**(3): P03004. DOI: 10.1088/1748-0221/9/03/p03004.
 - 14 葛愉成. 激光-电子康普顿散射物理特性研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(5): 3094 - 3103. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.05.035.
GE Yucheng. Physical properties of laser-electron Compton scattering[J]. Acta Physica Sinica, 2009, **58**(5): 3094 - 3103. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.05.035.
 - 15 Chouffani K, Harmon F, Wells D, *et al.* Determination of electron beam parameters by means of laser-Compton scattering[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2006, **9**(5): 050701. DOI: 10.1103/physrevstab.9.050701.
 - 16 Utsunomiya H, Shima T, Takahisa K, *et al.* Energy calibration of the NewSUBARU storage ring for laser Compton-scattering gamma rays and applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, **61**(3): 1252 - 1258. DOI: 10.1109/TNS.2014.2312323.
 - 17 Drebot I, Petrillo V, Serafini L, *et al.* Non-destructive definition of emittance using the Compton back-scattering and AI Machine Learning[C]. The 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC'23), Venice, Italy, 2023.
 - 18 Wang H W, Fan G T, Liu L X, *et al.* Commissioning of laser electron gamma beamline SLEGS at SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(7): 87. DOI: 10.1007/s41365-022-01076-0.
 - 19 Hao Z R, Fan G T, Wang H W, *et al.* Collimator system of SLEGS beamline at Shanghai Light Source[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a- Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2021, **1013**: 165638. DOI: 10.1016/J.NIMA.2021.165638.
 - 20 Chen K J, Liu L X, Hao Z R, *et al.* Simulation and test of the SLEGS TOF spectrometer at SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(3): 47. DOI: 10.1007/s41365-023-01194-3.
 - 21 Xu H H, Fan G T, Wang H W, *et al.* Interaction chamber for laser Compton slant-scattering in SLEGS beamline at Shanghai Light Source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1033**: 166742. DOI: 10.1016/j.nima.2022.166742.
 - 22 罗文. 激光康普顿 X/γ 源的实验研究及蒙特卡罗模拟[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
LUO Wen. Experimental study and Monte Carlo simulation of laser Compton X/γ source[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
 - 23 Luo W, Xu W, Pan Q Y, *et al.* A 4D Monte Carlo laser-Compton scattering simulation code for the characterization of the future energy-tunable SLEGS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, **660**(1): 108 - 115. DOI: 10.1016/j.nima.2011.09.035.
 - 24 郝子锐. 上海激光电子 γ 源束流性能与光中子实验方法学研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2023.
HAO Zirui. Study on beam performance and photoneutron experimental methodology of Shanghai Laser Electron Gamma Source[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023.
 - 25 Chao A W, Tigner M, Weise H, *et al.* Handbook of accelerator physics and engineering[M]. 3rd ed. Singapore: World Scientific Pub, 2023.
 - 26 Du C C, Wang J Q, Ji D H, *et al.* Studies of round beam at HEPS storage ring by driving linear difference coupling resonance[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **976**: 164264. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164264.
 - 27 Yu Q L, Gu D, Zhang M, *et al.* Transverse phase space reconstruction study in Shanghai soft X-ray FEL facility [J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **29**(1): 9. DOI: 10.1007/s41365-017-0338-0.
 - 28 李昌亮. 上海光源储存环垂直发射度的研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2016.
LI Changliang. Study on vertical emittance of Shanghai light source storage ring[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
 - 29 Liu L X, Wang H W, Fan G T, *et al.* The SLEGS beamline of SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35** (7): 111. DOI: 10.1007/s41365-024-01469-3.

- 30 郝子锐, 范功涛, 刘龙祥, 等. 4π 平坦效率 ^3He 中子探测器阵列的设计与模拟分析[J]. 核技术, 2020, **43**(11): 110501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.110501. HAO Zirui, FAN Gongtao, LIU Longxiang, *et al.* Design and simulation of 4π flat-efficiency ^3He neutron detector array[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(11): 110501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.110501.
- 31 王宏伟, 范功涛, 刘龙祥, 等. 上海激光康普顿散射 γ 源的发展和展望[J]. 原子核物理评论, 2020, **37**(1): 53 - 63. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019043. WANG Hongwei, FAN Gongtao, LIU Longxiang, *et al.* Development and prospect of Shanghai laser Compton scattering gamma source[J]. Nuclear Physics Review, 2020, **37**(1): 53 - 63. DOI: 10.11804/NuclPhysRev. 37. 2019043.
- 32 MiniPIX, TPX standard-advacam[EB/OL]. [2023-12-01]. <https://advacam.com/camera/minipix-tpx-standar>.
- 33 王俊文, 范功涛, 王宏伟, 等. 基于 SXFEL 的新型 LCS 光源极化 γ 束流性质研究[J]. 核技术, 2019, **42**(12): 120201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.120201. WANG Junwen, FAN Gongtao, WANG Hongwei, *et al.* Study on polarized γ beam properties of a new LCS light source based on SXFEL[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42** (12): 120201. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2019. hjs. 42. 120201.
- 34 焦广为, 田顺强, 相升旺, 等. 同步辐射光源新增线站相关加速器安装与调试[J]. 核技术, 2024, **47**(3): 030101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030101. JIAO Guangwei, TIAN Shunqiang, XIANG Shengwang, *et al.* Installation and commissioning of accelerators associated with the new beamline in synchrotron radiation light source[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(3): 030101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030101.
- 35 杨星, 冷用斌, 周逸媚. 逐束团三维信息提取软件 HOTCAP 的实时性能优化[J]. 核技术, 2024, **47**(2): 020102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020102. YANG Xing, LENG Yongbin, ZHOU Yimei. Real-time optimization of bunch-by-bunch 3D information extraction software HOTCAP[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(2): 020102. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs.47.020102.