



·自由电子激光和新型光源·

紧凑型单能伽马射线源*

杜应超¹, 陈 寒¹, 张鸿泽¹, 高 强¹, 田其立¹, 迟智军², 张 智¹,
查 皓¹, 施嘉儒¹, 颜立新¹, 邱 睿¹, 程 诚¹, 杜泰斌¹,
李任恺¹, 陈怀璧¹, 黄文会¹, 唐传祥¹

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875)

摘 要: 基于高亮度电子束与超短强激光相互作用的逆康普顿散射 X/γ 射线源具有单色性好、能量可调、偏振可控等特点, 在核安全及核安保领域具有广泛的应用前景。清华大学将研制国际上首套能量达 MeV 的紧凑准单能伽马源装置并开展包括先进辐射成像、基于核共振荧光的物质分析检测等应用工作。给出该光源设计方案, 以及针对其关键性能指标进行的优化及光源最终性能指标。目前已完成光源的设计, 正在进行部件的加工采购, 预计将于 2023 年启动装置的安装调试工作, 于 2025 年完成项目的调试和验收。

关键词: 逆康普顿散射; 伽马射线; 电子束; 激光; 核共振荧光

中图分类号: TL929; TL53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220132

A very compact inverse Compton scattering gamma-ray source

Du Yingchao¹, Chen Han¹, Zhang Hongze¹, Gao Qiang¹, Tian Qili¹, Chi Zhijun², Zhang Zhi¹,
Zha Hao¹, Shi Jiuru¹, Yan Lixin¹, Qiu Rui¹, Cheng Cheng¹, Du Taibin¹,
Li Renkai¹, Chen Huaibi¹, Huang Wenhui¹, Tang Chuanxiang¹

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Inverse Compton scattering X/gamma-ray source can produce quasi-monochromatic, continuously tunable, high brightness, small spot size, polarization precisely controllable, and ultrashort (ps or sub-ps) X-ray pulse in the energy regime ranging from tens keV to several MeV or even higher. Recently a 0.2–4.8 MeV quasi-monochromatic compact gamma-ray source with high peak spectral density based on the inverse Compton scattering has been proposed in the Department of Engineering Physics, Tsinghua University. This type of compact gamma-ray source will be used for advanced X/gamma-ray imaging application based on the nuclear resonance fluorescence. In this paper, we will present the optimization of the design.

Key words: inverse Compton scattering, gamma-ray, electron beam, laser, nuclear resonance fluorescence

能量连续可调的单能伽马射线在核结构探测和研究、核材料分析和处理、先进辐射成像、以及核安保和国土安全等相关领域具有广泛的应用前景^[1-7]。基于高亮度电子束与超短强激光相互作用的逆康普顿散射 (Inverse Compton Scattering, ICS) X/γ 射线源装置规模适中, 能产生能量连续可调、偏振可控、源点尺寸在 μm 量级的高亮度准单能 X/γ 射线, 在近年来随着高亮度电子源和激光技术的快速发展受到广泛关注和快速发展^[8-18]。清华大学加速器实验室长期以来专注于 ICS X/γ 源的研制及应用, 针对该类型光源中关键技术如高亮度电子源、超短高强度激光器、激光与电子的飞秒高精度同步、射线诊断及应用等开展研究, 攻克和掌握了高亮度电子源、超短强激光、电子与激光高精度同步、射线探测等关键技术, 成功研制了我国首台基于光阴极注入器和超短强激光的 ICS X 射线源装置 TTX (Tsinghua Thomson scattering X-ray source), 并开展了 X 射线诊断、先进辐射成像及探测器标定等应用研究^[19-21], 以此为基础, 正在为我国相关科研院所研制高亮度 X/γ 射线源, 应用于高能量密度物理及先进探测器

* 收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2022-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12027902)

联系方式: 杜应超, dych@mail.tsinghua.edu.cn。

通信作者: 唐传祥, tang.xuh@mail.tsinghua.edu.cn。

标定工作。在 ICS 源中,产生的光子能量与电子能量的平方成正比,与激光波长成反比。为获得 MeV 量级光子能量,需要的电子能量在 200 MeV 以上,装置尺寸和所需场地均较大,难以满足某些特定物质和器件的现场检测需求。为进一步降低装置尺寸,清华大学提出了结合 S 波段光阴极注入器和高梯度 X 波段加速器的紧凑型准单能伽马源的方案,在保障光源性能的同时,将光源主体尺寸缩短到 10~15 m,有望实现以集装箱为载体的模块部署,为后续实现灵活的现场应用提供可能性。该方案已于 2020 年获得国家自然科学基金重大科研仪器(部门推荐)的支持,将研制国际上首台能量达到 MeV 的紧凑准单能伽马源。本文将介绍清华大学正在研制的紧凑型准单能伽马源方案。

1 紧凑型准单能伽马源装置总体方案

基于逆康普顿散射的紧凑型准单能伽马源装置(VIGAS),总体构成示意图如图 1 所示。装置主要包括用于产生高亮度电子束的电子直线加速器、用于产生短脉冲强激光的紧凑激光系统、用于射线探测及应用的实验站,以及将电子和激光精确同步的百飞秒同步系统等。

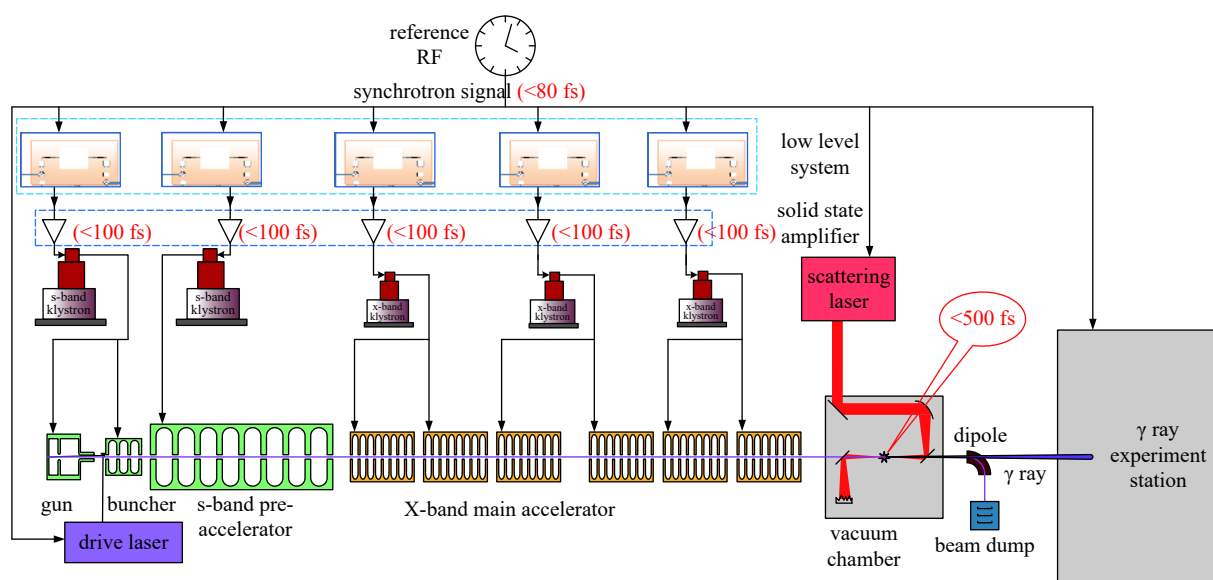


Fig. 1 Schematic diagram of the very compact inverse Compton scattering gamma-ray source (VIGAS)

图 1 紧凑型准单能伽马射线源装置构成示意图

结合 S 波段光阴极微波电子枪、聚束腔和预加速段及 X 波段主加速段的紧凑加速器产生能量在 50~350 MeV 之间连续可调的低发射度、低能散的高品质束流。束流经匹配聚焦后在散射作用室内与散射激光系统产生的激光脉冲对撞散射,在电子束运动方向产生能量在 0.2~4.8 MeV 的 γ 射线脉冲,产生的 γ 射线经过偏转磁铁与电子束流分离后进入 γ 射线传输段,在 γ 射线传输段,经过准直孔选择适当带宽的 γ 射线进入实验终端。由于各类实验对 γ 光子能量的需求不同,将通过调整电子束能量和散射激光波长(散射激光的基频光或者二倍光)来实现 γ 光子能量的精细调整。

装置设计的技术性能参数如表 1 所示。

表 1 紧凑型准单能伽马源性能参数

Table 1 Performance parameters of VIGAS

parameter	value
γ ray photon energy	continuously adjustable between 0.2~4.8 MeV
relative bandwidth (RMS)%	<math><1.5</math> (after collimation)
photon yield/(photons \cdot s $^{-1}$)	>4.0 \times 10 8 @0.2~2.4 MeV; >1.0 \times 10 8 @2.4~4.8 MeV
photon yield within 1.5% bandwidth	>4.0 \times 10 6 @0.2~2.4 MeV; >1.0 \times 10 6 @2.4~4.8 MeV
degree of polarization	adjustable from linear to circular polarization

散射光子通过相对论电子与激光的逆康普顿散射过程产生,其散射光子参数主要由电子束和激光束参数以及散射作用结构决定。考虑到 180 $^\circ$ 角对撞时光子能量最大且产额最高,在本装置中将只考虑 180 $^\circ$ 角对撞方案。在此

基础上,结合当前加速器和激光器能实现的技术参数水平,装置电子束和激光束设计参数如表2所示。

激光器将采用当前成熟的钛蓝宝石激光器,中心工作波长在 800 nm 附近,为拓展散射光子能量范围,激光器将采用基频光和二倍频光散射的工作模式,具体工作参数如表3所示。

表 2 电子束流工作参数

Table 2 Parameters of electron beam in VIGAS

parameter	value
bunch energy/MeV	50~350
bunch charge/pC	>200
normalized emittance/(mm·mrad)	<0.6
bunch length/ps	<2
energy spread/%	<0.3
focused spot size/ μm	<20
repetition rate/Hz	10

表 3 激光工作参数

Table 3 Parameters of scattering laser in VIGAS

parameter	value	
	800 nm	400 nm
bandwidth/nm	<15	<8
pulse energy/J	>1.5	>0.8
pulse length (FWHM)/ps	<10	
focused spot size (RMS)/ μm	<10	

在进行装置总体方案设计时,综合评估了相关技术的风险和技术成熟度,选取的技术方案在满足项目要求的前提下,尽可能采用已有或者已初步验证的技术路线,采用已基本验证或已达到的相应技术指标:采用实验室已有的成熟的 S 波段光阴极微波电子枪,而不是采用新研制的 X 波段光阴极微波电子枪来产生低发射度高亮度电子束,降低项目风险;采用实验室 X 波段高梯度加速结构实现装置的紧凑性,X 波段加速结构最大加速梯度在 80 MV/m 左右;定制相对成熟的紧凑型商业激光器产品;采用调整电子能量和激光波长的方案而非调整散射作用角度的方案来实现散射光子中心能量的连续调整;通过可调大小的准直孔系统来调整应用实验站的光子能谱宽度和光斑尺寸。

2 加速器分系统设计及优化

2.1 加速器系统方案概述

根据前期经验及已有基础,初步确定加速器技术方案和主要组成依次为:S 波段光阴极注入器、X 波段主加速器、束流匹配以及散射作用后束流偏转段组成。S 波段光阴极注入器对传统光阴极注入器进行了改进,将 S 波段加速器工作梯度提高到 30 MV/m 左右,同时在电子枪和第一段加速管中间安排了一个 S 波段聚束腔对束团纵向长度进行精细控制。简图如图 2 所示。

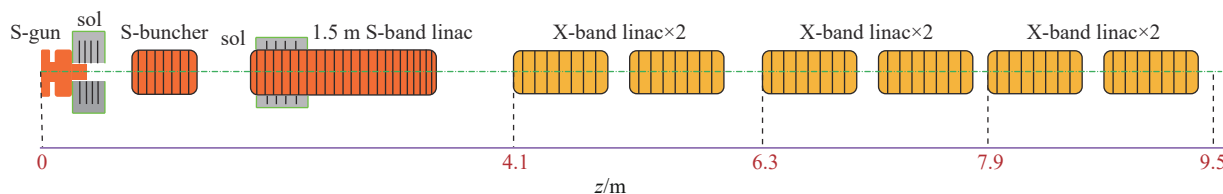


Fig. 2 Layout of the accelerator in VIGAS

图 2 加速器组成示意图

聚束腔是该方案中能同时获得低发射度、低能散束流(获得窄带宽单能伽马射线前提)的关键。因后续主加速器采用 X 波段加速结构,微波波长只有 S 波段波长的 1/4,使得束流在加速中能散显著增长。直接缩短驱动激光长度和束团初始长度能显著降低束流能散,但空间电荷力将导致束团发射度的显著增长。聚束腔的引入,能缩

短束团长度的同时将发射度的增长控制在较小的范围之内,从而在保证发射度的同时,减小最终束团能散。图 3 给出了经过优化后束团最终长度与束团能散及发射度的关系。从图中可以看出,当聚束腔不工作时(对应束团长度约为 1 mm (RMS)情况),束团能散将达到约 1.6% (RMS),导致的光子能散带宽大于 3% (RMS)。引入聚束腔后,在发射度控制在 0.3 mm·mrad(200 pC)的情况下,可以将束团长度缩短到约 0.19 mm,引入的束团能散降低到 0.15% 以内。考虑到驻波结构相同微波功率下工作场强更高以及电子枪和第一根加速管之间的空间长度有限,聚束腔采用 7 cell π 模驻波结构。

2.2 加速器系统优化设计

确定上述部件方案后,基本确定加速器的方案如图 1 所示。加速器部分主要包含 S 波段光阴极电子枪,电子枪螺线管,7 cell 驻波聚束腔,39 cell S 波段行波加速管,加速管螺线管,6 根 X 波段 C72 加速管,以及控制束流包络的四极透镜组和最终束流匹配段。作用点距离光阴极微波电子枪阴极 10 m 左右。

初步确定束线构成及布局后,我们采用多目标优化算法对束线布局进行优化,优化目标为发射度和束团长度,其中主要有 11 个可调参数,包括激光束长、激光束斑大小、电子枪发射相位、电子枪螺线管强度、电子枪螺线管位置、聚束腔梯度、聚束腔位置、聚束腔相位、S 波段加速管位置、加速管螺线管位置、加速管螺线管强度,优化范围如表 4 所示。模拟中使用 50 000 个宏粒子数,电子初始动能为 0.63 eV,热发射度约为 0.9 mm·mrad,电子枪轴线最大场梯度为 100 MV/m,驱动激光为横向均匀分布,纵向平顶分布,上升时间为 0.7 ps。模拟中 S 波段加速管为 39 cell (3/4) π 模等梯度行波加速管,轴线最大加速场 40 MV/m,一根加速管能量增益约 40.9 MeV,平均加速梯度为 27.3 MV/m。X 波段加速管为 72 cell(2/3) π 等阻抗行波加速管,轴线最大加速场 144 MV/m,每根加速管能量增益约 53 MeV,平均加速梯度为 81.5 MV/m。

表 4 多目标优化参数(第一列)、参数范围(第二列)及优化结果(第三、四列)

Table 4 Variable parameters in the optimization

parameters	range	optimization result	
		200 pC	500 pC
laser duration/ps	[4, 20]	7.27	7.09
laser beam size (RMS)/mm	[0.2, 2]	0.2	0.33
launch phase/(°)	[-20, 20]	5.4	3.0
gun solenoid strength/T	[0.15, 0.35]	0.2024	0.2018
gun solenoid center/m	[0.213 7, 0.213 7]	0.2137	0.2137
buncher field strength/(MV·m ⁻¹)	[20, 50]	36.1	43.4
buncher center/m	[0.73, 0.9]	0.9665	0.9665
buncher phase/(°)	[-110, -80]	-100	-98.5
linac center/m	[1.5, 2]	2.402	2.402
linac solenoid center/m	[1.5, 2]	1.6	1.6
linac solenoid strength/T	[0, 0.2]	0.0804	0.109

装置计划可能采用 200 pC 标准电荷量模式和 500 pC 高电荷量模式两种工作模式,图 4 展示的是优化计算得到 200 pC 标准电荷量模式以及 500 pC 高电荷量模式时发射度与束团长度的帕累托前沿。我们选取的工作点为 200 pC 发射度 0.294 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$,束团长度 0.208 mm(RMS),500 pC 发射度 0.623 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$,束团长度 0.202 mm (RMS),束线参数如表 4 所示,对应的电子束详细参数如表 5 所示。图 5 展示了 200 pC 标准电荷量模式下的束流动力学模拟结果,包括发射度和能量演化曲线、电流及纵向相空间分布和束斑大小和束团长度演化曲线。

2.3 能量调节方案

伽马射线的能量调整将通过电子束能量及激光波长调整进行。根据理论计算结果,产生能量在 0.2~4.8 MeV 的伽马光子,电子束能量需在 90~350 MeV 的范围内连续可调。电子束能量的调整可通过开关部分 X 波段加速管

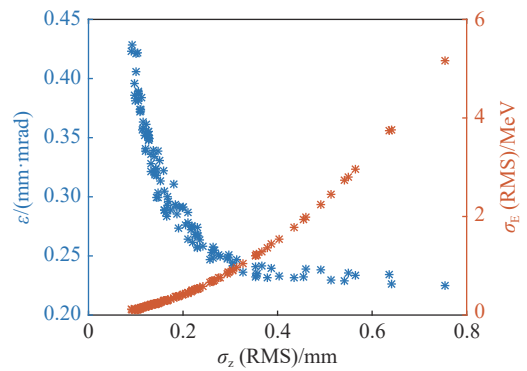


Fig. 3 Relation between bunch length and emittance plus energy spread after optimization

图 3 初步优化后束团长度与发射度及束团能散关系(束流能量 360 MeV)

和调整 X 波段加速梯度的方式进行。考虑到系统运行便利性,我们优先考虑同时调节六根 X 波段加速管的加速梯度调节电子束能量,电子束能量、发射度随 X 波段加速管梯度调节比例的变化如图 6 所示,加速管梯度调节比例为 1 时 X 波段加速管取到最高平均加速梯度 82 MV/m。通过倍频光子调节激光波长,伽马光子能量覆盖范围如图 7 所示,满足覆盖 0.2~4.8 MeV 能量范围的要求。

2.4 束流匹配

对撞点电子束斑聚焦大小对光子产额有非常重要的影响。利用束流匹配段可以实现对束流的聚焦匹配,通过调整匹配聚焦磁铁强度,可以实现对不同能量束流的聚焦。不同能量下通过调节四极铁磁场强度进行匹配束斑大小到 15 μm (RMS)。束斑匹配结果显示 92.5 MeV 和 350 MeV 电子能量时最终束斑大小都可以很好的达到 15 μm (RMS),匹配时磁铁强度均小于 20 T/m。

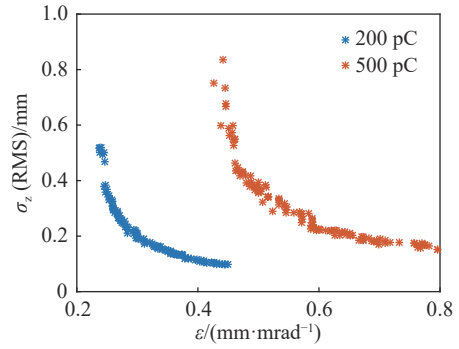


Fig. 4 Pareto front of emittance and bunch length with 200 pC bunch charge and 500 pC bunch charge

图 4 电荷量为 200 pC 和 500 pC 时发射度与束团长度的帕累托前沿

表 5 200 pC 标准模式和 500 pC 高电荷量模式下电子束参数

Table 5 Optimized beam parameters with 200 pC bunch charge and 500 pC bunch charge

normalized emittance/ $(\mu\text{m}\cdot\text{rad})$	bunch length (RMS)/mm	bunch energy/MeV	energy spread (RMS)/MeV	bunch charge/pC
0.294	0.208	361.3	0.45	200
0.623	0.202	361.5	0.40	500

3 激光系统方案

VIGAS 装置包括两套激光系统,分别为用于驱动光阴极微波电子枪的紫外驱动激光系统和用于散射的紧凑散

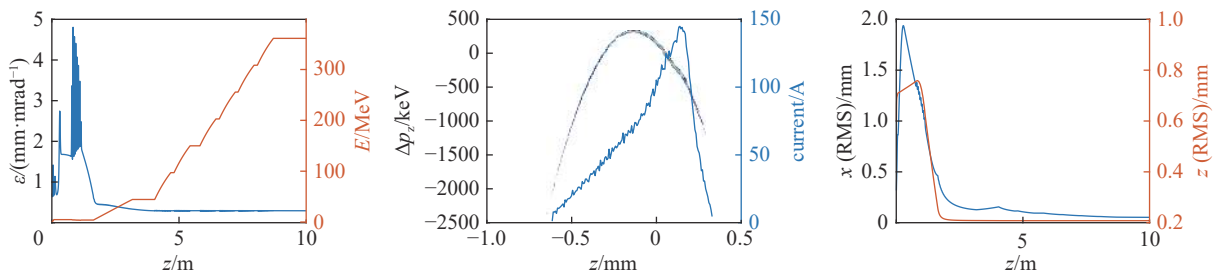


Fig. 5 Beam dynamics simulation results in the case of 200 pC bunch charge

图 5 200 pC 电荷量束流动力学模拟结果

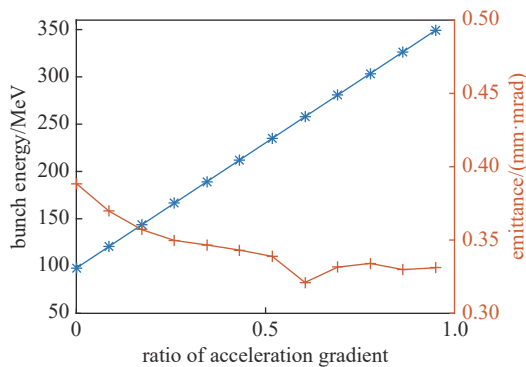


Fig. 6 Bunch energy and emittance versus the ratio of acceleration gradient

图 6 X 波段加速管梯度调节比例与输出束流能量及发射度关系曲线(200 pC 电荷量)

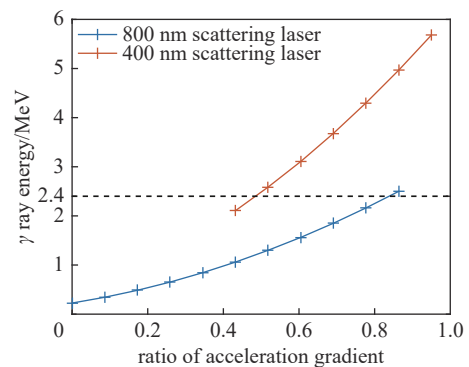


Fig. 7 Photon energy versus the ratio of acceleration gradient

图 7 结合激光波长调整后光子能量随加速管梯度调节比例变化

射激光系统。考虑到装置运行的易维护性,两套激光器均采用相对成熟的商用产品。在商用产品的基础上,通过对驱动激光进行横纵向整形以满足低发射度电子束的要求,对散射角激光进行倍频满足 2.4~4.8 MeV 光子产生的需求。

3.1 驱动激光系统方案

驱动激光系统提供满足光阴极微波电子枪需求的超短紫外驱动激光束,其构成主要包括钛蓝宝石超快红外激光器、三倍频谐波频率转换器、紫外激光能量调整及时-空整形、互相关纵向分布测量、激光的传输与控制、阴极光斑分布监测等模块。设计方案框图如图 8 所示。

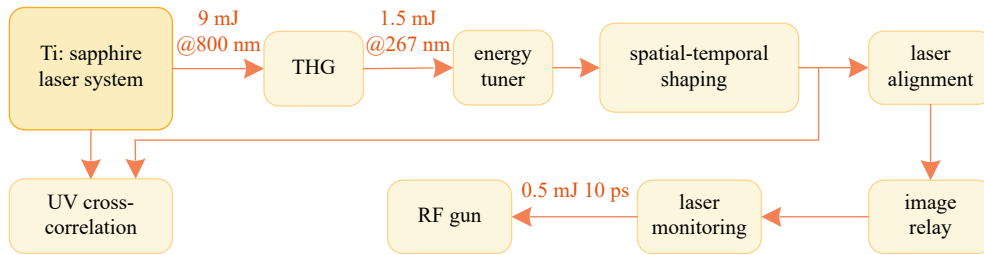


Fig. 8 Block diagram of driving laser shaping design

图 8 驱动激光整形设计方框图

驱动激光器拟采用 Coherent 公司 Astrella 型号产品,提供中心波长 800 nm、脉冲能量 9 mJ 红外超短激光脉冲,通过三倍频非线性频率转换获得中心波长 267 nm、脉冲能量 1.5 mJ 紫外激光脉冲。为方便控制电子束的电荷量,三倍频后输出的紫外激光通过能量调节模块,控制作用到光阴极上驱动激光脉冲能量的大小,能量调节范围 2~500 μJ 。为有利于束流发射度的优化,要求驱动激光具有均匀的时间和空间分布,设计中分别采用脉冲展宽堆积和硬边光阑剪切的方式,对激光的时间和空间分布进行整形,获得准平顶分布的紫外激光脉冲,纵向脉冲宽度 5~10 ps(FWHM),横向光斑直径 0.2~2 mm(RMS)可调。作用于光阴极上紫外激光的详细参数如表 6 所示。

表 6 光阴极紫外驱动激光参数

Table 6 Parameters of the driving laser system

parameters	value
central wavelength/nm	267
repetition rate/Hz	10
pulse energy/ μJ	2~500
pulse width (FWHM)/ps	5-10
rising and falling edge (10%~90%)/ps	1.0
beam size (RMS)/mm	0.2~2
energy jitter (RMS)/%	<2.0
time jitter between RF and laser (RMS)/ps	<0.1

此外,系统设计中增加了光路自准直模块和二级像传递系统,可分别实现激光传输光路的电控自动准直和保证光阴极上激光光斑横向分布均匀化及指向稳定性。在光阴极正入射腔前采用分光的方式,用以监测光阴极上驱动激光的横向分布和位置。对于紫外驱动激光的时间分布,采用与红外激光脉冲互相关的方式,实现离线测量。

3.2 散射激光方案

散射激光系统提供与加速器电子束在微小时-空尺度(微米/皮秒)发生散射作用的高能超短激光束,系统组成如图 9 所示,主要包括太瓦量级钛蓝宝石激光器、激光参数调制、散射作用、激光与束流监测部分。

散射激光器输出激光脉冲能量 3 J、中心波长 800 nm、带宽 <15 nm、脉冲宽度 0.1~10 ps 可调。激光参数调制包含激光倍频和偏振态调节,高能激光倍频的设计将采用基于大孔径 I 类硼酸锂(LBO)晶体的倍频方案。倍频后激光经过一面二向色镜将 800 nm 基频光折反 90°,并用激光垃圾桶收集,透射的 400 nm 倍频光用于与电子束散射对撞产生更高能量 γ 射线。设计中 LBO 晶体与二向色反射镜固定在高精密步进电机上,可将倍频模块在光路中移进和移出,实现散射过程中激光波长的选择,以产生双能 γ 光源。

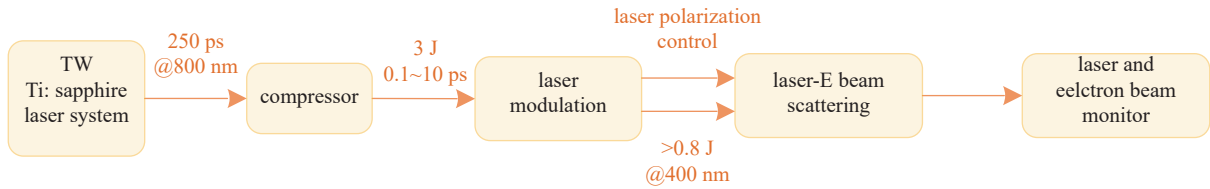


Fig. 9 Block diagram of scattering laser design

图 9 散射激光设计方案图

强激光脉冲通过一面口径 15.24 cm、焦距 $f=300$ mm 的离轴抛物面镜聚焦后与电子束以口径 180° 角散射对撞。考虑到物理设计中采用的逆康普顿散射作用点参数并兼顾空间布局和激光束指向稳定性, 聚焦之后的激光光斑约为 $10 \mu\text{m}$ (RMS), 长时间(5 h)指向稳定性 $<2 \mu\text{rad}$ 。

散射作用室外设计激光与束流监测模块, 用于散射激光的位置和焦点横向分布、激光和电子束的时-空同步等。分别采用不同光学成像系统实现对激光焦点参数、电子束和激光束束剖面的测量。激光束和电子束的精确时间同步可通过调节散射激光振荡器与微波的相位差来确保激光和电子束同时到达作用点, 以实现 γ 射线产额的最大化。

4 光源参数性能模拟

我们使用 CAIN 程序对激光与电子束的散射过程进行模拟。模拟中激光参数如表 3 所示。电子束参数使用前文中模拟结果。模拟结果显示 200 pC 情况下, 光子产额为 $2.31 \times 10^9 @800 \text{ nm}$, $6.4 \times 10^8 @400 \text{ nm}$, 约为装置验收指标的 6 倍左右, 如图 10 所示。

图 11 展示了 360 MeV, 200 pC 电子束参数与 800 nm 及 400 nm 散射激光时伽马射线收集角与光子带宽及收集角内光子比例关系曲线, 图 12 和图 13 展示了不同收集角下对应的光子能谱分布。其中电子束能散、发射度、激光带宽等因素对伽马射线光谱的影响考虑在内。可以发现通过使用准直孔可以实现约 1.5% 的伽马射线带宽可以实现光子产额大于 $2.31 \times 10^7 @800 \text{ nm}$, $6.4 \times 10^6 @400 \text{ nm}$, 不同能量时相同带宽内光子数基本相同。

加速器和激光器相关参数的抖动都将导致电子束和激光束参数的变化, 从而影响到散射光子参数。为保证系统的稳定运行和光子参数的稳定, 需要将各系统参数抖动控制在一定范围之内。考虑到各抖动参数具有一定的随机性, 将加速结构的幅度相位抖动、电荷量抖动、驱动激光束长和束斑大小抖动, 散射激光能量抖动, 电子束与激光相对位置抖动, 到达时间抖动考虑在内, 采用 ASTRA 和 CAIN 联合模拟。各参数抖动范围如表 7 所示。

按照上表各参数抖动范围随机抽样产生各部件工作参数, 共模拟了 210 组, 统计得到光子产额和光子中心能量抖动为 5.55% 和 0.11%。采用 0.1 mrad 准直孔时, 联合参数抖动模拟中光子能谱如图 14 所示(未考虑散射光子

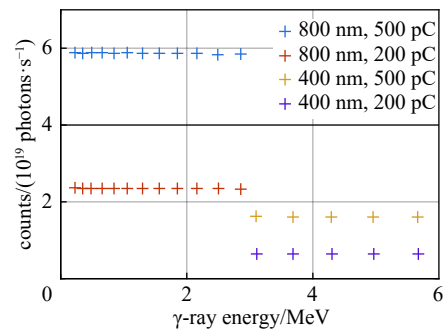


Fig. 10 Simulated photon yield at different photon energy

图 10 不同能量下模拟光子产额

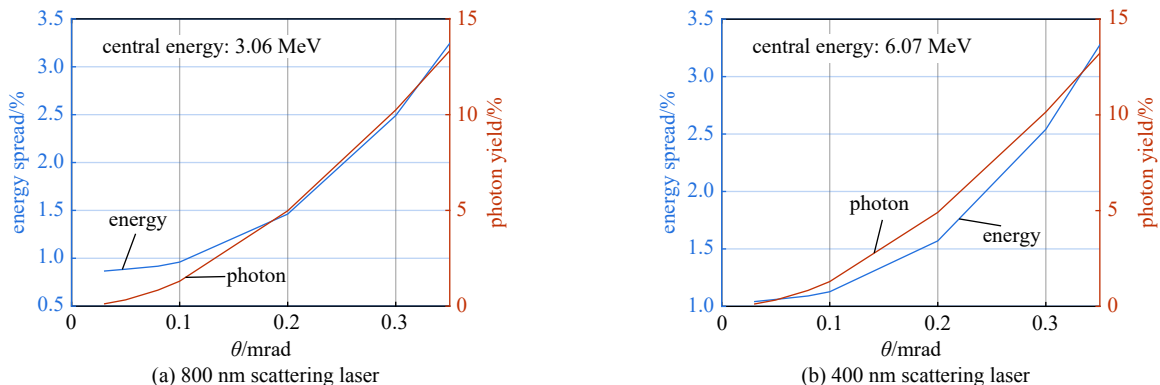


Fig. 11 Photon bandwidth and the proportion within the collection angle versus the collection angle

图 11 360 MeV, 200 pC 电子束参数与 800 nm 及 400 nm 散射激光时伽马射线收集角与光子带宽及收集角内光子比例关系曲线

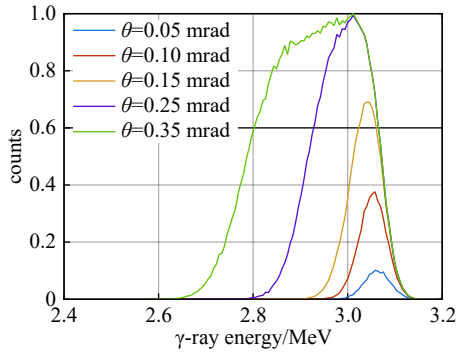


Fig. 12 Photon spectroscopy within different collection angles using 800 nm scattering laser

图 12 360 MeV, 200 pC, 800 nm 参数下不同收集角内光子能谱分布

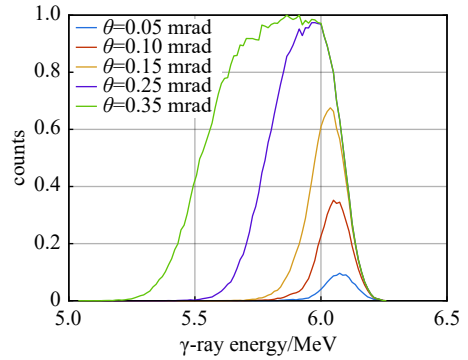


Fig. 13 Photon spectroscopy within different collection angles using 400 nm scattering laser

图 13 360 MeV, 200 pC, 400 nm 参数下不同收集角内光子能谱分布

表 7 联合参数扫描各参数抖动范围

Table 7 Parameter jitter range in the joint parameter sweep

parameters	jitter range
bunch charge/%	±2
laser duration/%	±2
laser beam size/%	±2
gun field strength/%	±0.1
gun phase	±0.5
buncher field strength/%	±0.1
buncher phase	±0.5
S band linac field strength/%	±0.1
S band linac phase	±0.5
X band linac field strength/%	±0.1
X band linac phase	±1
scattering laser pulse energy/%	±2
relative position between electron and laser beam/ μm	±3
arrival time/ps	±0.25

带宽), 未考虑抖动时光子 RMS 展宽为 33 keV, 考虑抖动后光子 RMS 展宽变为 42 keV, 理论计算考虑散射光子带宽此时伽马光子带宽为 1.09%。

5 总结及展望

VIGAS 是国际上首台已进入建设阶段的能量达到 MeV 的紧凑逆康普顿散射准单能伽马射线源。在设计方案中, 通过采用 S 波段光阴极注入器和高梯度 X 波段加速技术相结合的方案, 实现了装置的紧凑化, 为后续在复杂现场环境的应用创造条件。目前光源已完成了方案设计, 已开始设备采购和部件加工工作, 预计将于 2023 年开始进行安装调试。装置建成后, 将开展先进辐射成像和基于核共振荧光物质检测分析的相关研究工作。

参考文献:

[1] Curtis D.C. Advancements in nuclear waste assay[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2008.

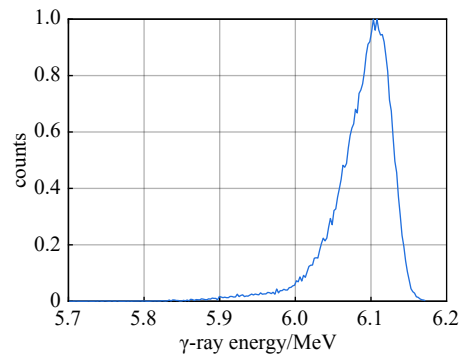


Fig. 14 Photon spectroscopy in simulation taking jitter into consideration

图 14 联合参数抖动模拟中光子能谱

- [2] Willman C. Applications of gamma ray spectroscopy of spent nuclear fuel for safeguards and encapsulation[D]. Uppsala: Uppsala University, 2006.
- [3] Metzger F R. Resonance fluorescence in nuclei[M]//Frisch O R. Progress in Nuclear Physics. New York: Pergamon Press, 1959: 54-88.
- [4] Warren G, Caggiano J, Peplowski P. Potential applications of nuclear resonance fluorescence[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1194: 106-119.
- [5] Smith L E, Tobin S, Ehinger M, et al. AFCI safeguards enhancement study: technology development roadmap[R]. PNNL-18099, 2008.
- [6] Pruet J, McNabb D P, Hagmann C A, et al. Detecting clandestine material with nuclear resonance fluorescence[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99: 123102.
- [7] Quiter B J, Laplace T, Ludewigt B A, et al. Nuclear resonance fluorescence in ^{240}Pu [J]. *Physical Review C*, 2012, 86: 034307.
- [8] Litvinenko V N, Burnham B, Emamian M, et al. Gamma-ray production in a storage ring free-electron laser[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(24): 4569-4572.
- [9] Sprangle P, Ting A, Esarey E, et al. Tunable, short pulse hard X-rays from a compact laser synchrotron source[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(11): 5032-5038.
- [10] Schoenlein R W, Leemans W P, Chin A H, et al. Femtosecond X-ray pulses at 0.4 Å generated by 90 Thomson scattering: a tool for probing the structural dynamics of materials[J]. *Science*, 1996, 274(5285): 236-238.
- [11] Ting A, Fischer R, Fisher A, et al. Observation of 20 eV X-ray generation in a proof-of-principle laser synchrotron source experiment[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 78(1): 575-577.
- [12] Huang Z R, Ruth R D. Laser-electron storage ring[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(5): 976-979.
- [13] Variola A, Haissinski J, Loulergue A, et al. ThomX technical design report[R]. 2014.
- [14] Albert F, Anderson S G, Anderson G A, et al. Isotope-specific detection of low-density materials with laser-based monoenergetic gamma-rays[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 354-356.
- [15] Korn G, LeGarrec B, Rus B. ELI extreme light infrastructure science and technology with ultra-intense lasers[C]//CLEO: Science and Innovations 2013. Optical Society of America, 2013: CTu2D. 7.
- [16] Wormser G, Barty C, Hajima R, et al. The white book of ELI nuclear physics Bucharest-Magurele, Romania[M]. 2010: 12.
- [17] 郭威, 顾嘉辉, 蔡翔舟, 等. 建立激光同步辐射源的初步探讨[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(5): 787-791. (Guo Wei, Gu Jiahui, Cai Xiangzhou, et al. Preliminary discussion of laser synchrotron source construction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5): 787-791)
- [18] Luo Wen, Xu W, Pan Q Y, et al. A laser-Compton scattering prototype experiment at 100 MeV linac of Shanghai Institute of Applied Physics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 013304.
- [19] Du Yingchao, Yan Lixin, Hua Jianfei, et al. Generation of first hard X-ray pulse at Tsinghua Thomson Scattering X-ray Source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 053301.
- [20] Du Yingchao, Yan Lixin, Hua Jianfei, et al. Soft X-ray generation experiment at the Tsinghua Thomson scattering X-ray source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 637(1): S168-S171.
- [21] Tang Chuanxiang, Huang Wenhui, Li Renkai, et al. Tsinghua Thomson scattering X-ray source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 608(1): S70-S74.