

纳秒/皮秒双束激光联合驱动双层靶的 γ 辐射特性

刘钊*, 熊俊, 安红海, 谢志勇, 方智恒, 王伟**, 王琛, 王瑞荣, 雷安乐, 黄秀光, 裴文兵, 傅思祖

中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 基于神光 II 升级装置, 研究了纳秒/皮秒双束激光联合驱动双层靶的伽马(γ)辐射特征。利用 ns 束激光与 CH 薄膜靶相互作用, 产生大尺度近临界密度等离子体, 然后将 ps 束激光作用在该等离子体上, 产生高能电子, 高能电子穿过 2 mm 厚的 Au 靶, 通过韧致辐射产生 γ 射线。对不同方向的 γ 辐射能谱和靶室外的 γ 辐射剂量分布进行实验测量, 发现 γ 辐射集中在激光前冲方向, 具有较小的发散角, 而且在该方向上高能段的 γ 辐射较强。这说明双层靶的设计可以提高 ps 束激光与等离子体的能量耦合效率, 提高高能电子温度, 增加高能电子数目, 有利于高能段 γ 辐射在 ps 束激光的前冲方向集中。另外, 在靶室外距离靶点 1.25 m 处测到的 50 keV 以上 γ 辐射的单发次最大剂量为 277 μ Gy。本研究结果对 γ 辐射的防护和应用具有参考价值。

关键词 激光器; 双层靶; γ 辐射; 能谱; 剂量; 角分布

中图分类号 O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801007

Gamma Radiation Characteristics of Double-Layer Targets Driven by Nanosecond/Picosecond Two-Beam Lasers

Liu Zhao*, Xiong Jun, An Honghai, Xie Zhiyong, Fang Zhiheng, Wang Wei**, Wang Chen, Wang Ruirong, Lei Anle, Huang Xiuguang, Pei Wenbing, Fu Sizu

Shanghai Institute of Laser Plasma, Chinese Academy of Engineering Physics,
Shanghai 201800, China

Abstract We explore the gamma radiation characteristics of double-layer targets driven by nanosecond/picosecond two-beam lasers based on the Shenguang II upgrade laser facility. A nanosecond laser is used to interact with a thin film target to generate a large-scale near-critical density plasma. Further, a picosecond laser interacts with the plasma to generate high-energy electrons. The high-energy electrons pass through a 2 mm thick Au target to generate gamma rays via bremsstrahlung. Subsequently, the experiments measure the gamma energy spectra in different directions and gamma doses outside the target chamber. It is found that the gamma radiation is concentrated in the picosecond laser propagating direction with a small divergence angle, and the high-energy parts of the gamma rays are enhanced in this direction as well. The design of the double-layer target can improve the energy coupling efficiency of the picosecond beam and plasma, increase the temperature and number of high-energy electrons, and facilitate the concentration of high-energy gamma radiation in the propagating direction of the picosecond laser beam. Furthermore, the single-shot maximum dose of gamma radiation, which has energy higher than 50 keV and is measured at 1.25 m from the target outside the target chamber, is 277 μ Gy. Results of the present study could be considered as references for the shielding and application of gamma radiation.

Key words lasers; double-layer target; gamma radiation; energy spectrum; dose; angular distribution

OCIS codes 350.5610; 350.5400; 300.6560

1 引言

随着超强激光技术的飞速发展, 激光功率不断提升, 一批功率为拍瓦甚至数十拍瓦的激光装置陆

续建成^[1-3]。这些装置给激光等离子体物理研究带来了新的机遇。在超高激光强度条件下, 通过共振吸收、真空加热以及有质动力加热等机制^[4-5], 激光中相当大的一部分能量转移给电子, 将这些电子的

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-04-08; 录用日期: 2019-04-17

* E-mail: 389366839@qq.com; ** E-mail: wei-wang@caep.cn

能量迅速提升到相对论能量范围。相对论电子在靶内穿行,可以通过轫致辐射^[6]等效应产生伽马(γ)射线。此类射线严重影响人体健康^[7]和仪器设备的正常工作^[8],同时在辐射成像^[9]等领域有着非常广泛的应用前景,因而受到了人们的普遍关注。

在过去十余年中,陆续有学者报道激光与靶相互作用的 γ 辐射特征。例如: Borne 等^[10]在 LULI 上测量了激光强度约为 10^{19} W/cm² 时不同靶材的 γ 辐射剂量; Clarke 等^[11]在 Vulcan 激光装置上研究了不同激光强度下 γ 辐射的转换效率;清华大学的邱睿等^[12-13]在星光 III 装置上利用皮秒(ps)束激光探究了 γ 辐射剂量与靶厚、激光强度、超热电子温度等的关系。

中国科学院上海光学精密机械研究所的 Li 等^[6]利用飞秒激光脉冲与气体靶相互作用,得到了电子能谱与 γ 能谱的双温结构,观察到较小的电子束发散角,同时发现电子束发散角与电子能量有关——能量越高,发散角越小。Wang 等^[14]测量了不同条件下飞秒激光与固体靶相互作用在靶前产生的超热电子的能谱和角分布,发现超热电子的辐射主要集中在靶前法线方向和激光反射方向,通过增加预脉冲并改变预脉冲与主脉冲之间的延时,发现超热电子发射方向由靶前法线方向,向激光反射方向移动。上述研究主要关注激光与单层靶相互作用所产生的 γ 辐射的基本特征,很少见到关于 γ 辐射源的优化研究。由于激光与等离子体相互作用主要发生在低密度区域和近临界密度区域,尤其在近临界密度区域能量转换效率较高,如果利用 ns 束激光在厚靶前产生大尺度等离子体,通过改变纳秒(ns)束激光与 ps 束激光之间的延时,得到不同密度标长的等离子体。因此,可通过改变 ps 脉冲激光与等离子体的能量转换效率,提高高能电子的温度,增加高能电子的数量,进而使高能段 γ 辐射增强,并同时减小其发散角。

本文利用神光 II 升级装置 ns/ps 双束激光联合驱动双层靶,研究了 γ 辐射的能谱和角分布。实验结果表明,所提装置具有较小的 γ 辐射发散角,高能段 γ 辐射强度沿着激光前冲方向逐渐增强。本实验结果可以为激光驱动 γ 辐射的实际应用提供一定的借鉴,同时也为超强激光装置的辐射屏蔽防护设计提供一定的参考。

2 实验方案设计

基于以上思想,首先利用 Epoch 软件进行了

PIC(Particle-in-cell)模拟,模拟了不同密度标长的等离子体产生的电子能谱。如图 1 所示,其中, N 为电子数密度, E_k 为电子动能。当密度标长为 $20 \mu\text{m}$ 时,电子的温度为 3.93 MeV ;当密度标长为 $8.3 \mu\text{m}$ 时,电子的温度为 1.59 MeV 。可见,适当的等离子体膨胀能够提高超短脉冲与等离子体的能量耦合效率,产生更高温度的电子分布,从而有利于 γ 辐射的增强。

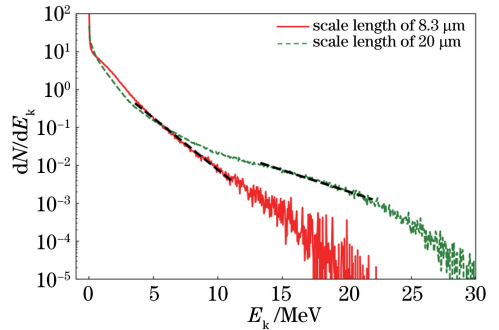


图 1 不同密度标长的等离子体产生的电子能谱
Fig. 1 Energy spectra of electrons generated from plasmas with different density scale lengths

神光 II 升级装置可以提供 ps 脉宽、数百焦耳能量的超强激光脉冲,聚焦后 ps 束激光强度能够达到 10^{19} W/cm²。同时,该装置还具有 8 路 ns 激光输出能力,三倍频能量接近 20 kJ,脉冲波形可调。ns 束激光与 ps 束激光可以同步输出以实现联合驱动打靶。

在神光 II 升级装置上进行本研究的实验,测量了不同方向的 γ 辐射能谱,以及靶室外的 γ 辐射强度和角分布。利用能量为 800 J 的 ns 束,其焦斑为 $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$,功率密度约为 4×10^{14} W/cm²,提前烧蚀 $2 \mu\text{m}$ 厚的 CH 薄膜靶,并经过适当时间延迟后,产生较大尺度的近临界密度等离子体。然后将能量约为 150 J 的 ps 束激光与之相互作用,产生大量高能电子。这些高能电子穿过 2 mm 厚的 Au 靶,通过轫致辐射产生 γ 射线。图 2 为激光与双层靶相互作用的示意图。

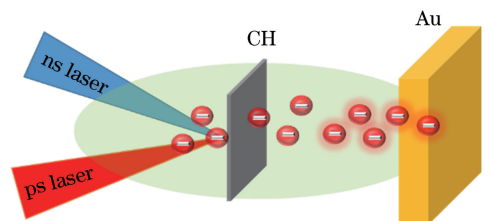


图 2 激光与靶相互作用

Fig. 2 Schematic of lasers interacting with targets

图 3 为实验光路排布图。ps 束激光的入射方向与靶前法线方向的夹角为 21° 。在靶的不同方向放置了 4 台滤片堆栈谱仪,即 γ -1(靶背法线方向)、 γ -2(激光传输方向)、 γ -3(与靶后法线方向的夹角为 65°)和 γ -4(与靶前法线方向夹角为 70°),以测量 γ 辐射能谱。

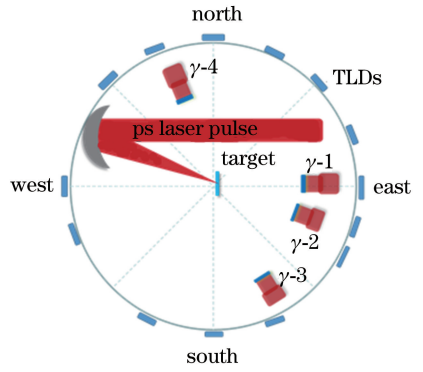


图 3 实验光路排布

Fig. 3 Arrangement of experimental optical path

图 4(a)为堆栈谱仪实物图,其前端面中央有一方形入射孔。堆栈谱仪是将不同材料的滤片和记录介质堆叠成一串,如图 4(b)所示,利用滤片来衰减 γ 射线,利用记录介质来记录 γ 射线的强度。

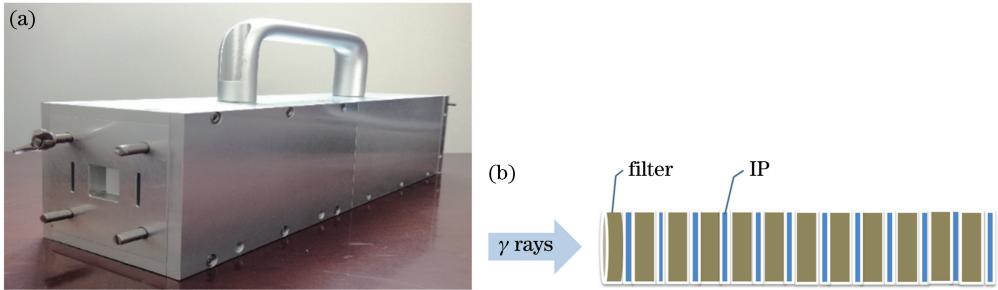


图 4 滤片堆栈谱仪及其滤片与记录介质。(a)滤片堆栈谱仪实物图;(b)滤片和记录介质 IP 的堆叠示意图

Fig. 4 Filter stack spectrometer with its filters and recording medium. (a) Filter stack spectrometer; (b) string of filters and recording medium IPs

图 5 为堆栈谱仪响应函数图,根据图 5 可以获得不同能量的光子在不同 IP 上的记录效果。利用图 5 给出的响应函数,通过反解能谱的方法获得 γ 辐射的能谱。在堆栈谱仪的前端设置了一个强磁场,可以偏转掉高能带电粒子,降低其对测量结果的干扰。滤片堆栈谱仪的测谱范围较宽,从几十 keV 到几 MeV,而且空间分辨能力良好,因此滤片堆栈谱仪可广泛应用于高能量密度物理实验的 γ 辐射能谱诊断^[15-16]。

按照表 1 所示的不同角度(以正北方向为 0° ,按顺时针方向排列),在靶室外壁贴置了十多个热释光

探测器(TLD)盒子,每个盒子中有四个热释光剂量计,测量得到的 γ 辐射的剂量和角分布如图 6 所示。

表 1 热释光探测器的放置角度

Table 1 Arrangement angles of TLDs

TLD	Angel /($^\circ$)	TLD	Angel /($^\circ$)	TLD	Angel /($^\circ$)
1	0	7	90	13	200
2	15	8	111	14	235
3	30	9	120	15	270
4	45	10	146	16	315
5	60	11	157	17	337
6	75	12	180		

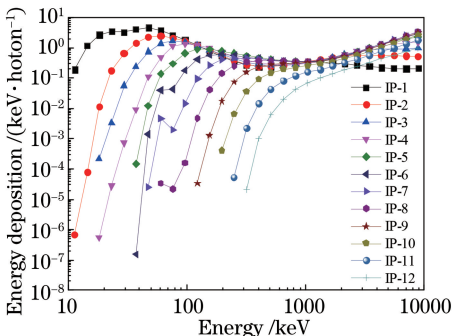


图 5 堆栈谱仪滤片响应函数

Fig. 5 Response functions of stack spectrometer

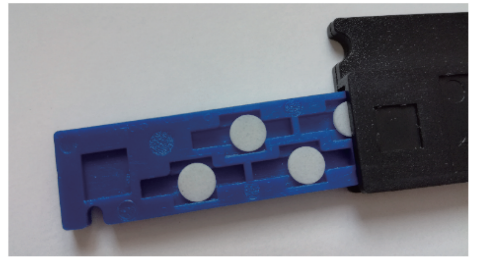


图 6 热释光探测器实物图

Fig. 6 Photo of thermoluminescent detector

热释光剂量计是一种受到辐照后,经加热发光的储能探测器。本实验使用的是 GR200A 型热释光剂量计,其主要成分是 $\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$,探测对象

是 X 射线和 γ 射线,可响应能量在 30 keV~3 MeV 之间的光子,线性范围较宽,相对灵敏度是 TLD-100 型热释光剂量计的 62 倍。

3 实验结果

本实验利用神光 II 升级装置 ns 激光和 ps 激光联合驱动双层靶,利用 4 台滤片堆栈谱仪测量了不同方向上的 γ 辐射能谱,典型结果如图 7 所示。

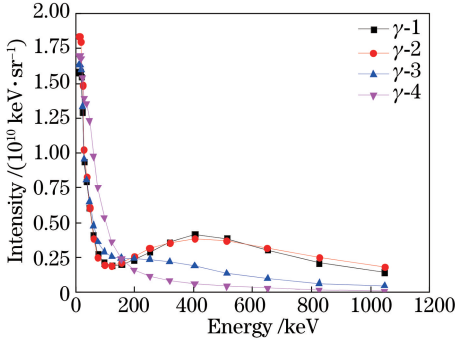


图 7 不同方向 γ 辐射能谱

Fig. 7 Gamma energy spectra in different directions

从图 7 可以看出,在靶前(迎着激光的方向)侧向,即 γ -4 堆栈谱仪方向(与靶前法线方向的夹角为 70°),高能段 γ 辐射强度很低;在靶后侧向的 γ -3 堆栈谱仪方向(与靶后法线方向的夹角为 65°),高能段的 γ 辐射强度也不高;而在 ps 束激光前冲方向,即 γ -2 堆栈谱仪方向(激光传输方向)和 γ -1 堆栈谱仪方向(靶背法线方向),高能部分的 γ 辐射强度增加,而低能部分的 γ 辐射凹陷。通过总体比较可以看到,靶前的 γ 辐射强度远低于靶后的 γ 辐射强度。

图 8 为单层靶与双层靶的靶室外 γ 辐射剂量与角分布图。单层靶只与单束 ps 激光相互作用。ps 束激光的入射方向与靶前法线方向的夹角为 21° 。从图 8 可以看到,双层靶的 γ 辐射最大剂量要高于单层靶的最大剂量。无论单层靶还是双层靶,靶前的 γ 辐射剂量远小于靶后的剂量。此外,对于单层靶的 γ 辐射剂量,靶背法线方向明显高于其他方向,但是由最大剂量下降到其一半所需要的角度很大,约为 100° 。而双层靶的 γ 辐射发散角较小,在 ps 束激光传输方向附近,剂量值接近,由最大剂量下降到其一半所需要的角度大约为 35° 。上述结果说明双层靶的设计有利于 γ 辐射的集中,可以为激光驱动 γ 辐射的应用提供借鉴。

通过改变 ns 束激光与 ps 束激光之间的时间延迟,以及双层靶之间的间距,得到的不同发次的最大 γ 辐射剂量如图 9 所示。4 个发次的最大剂量均位

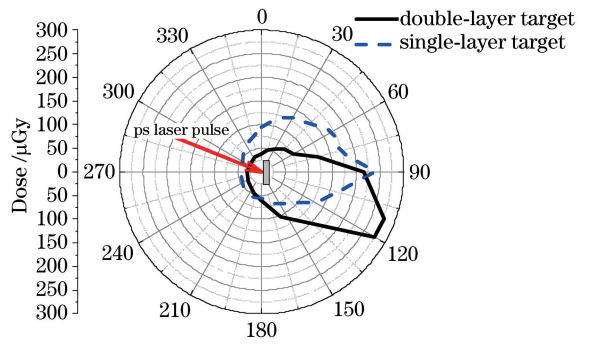


图 8 靶室外的 γ 辐射剂量与角分布

Fig. 8 Gamma radiation doses and angular distributions outside target chamber

于激光传输方向,其中的最大值为 $277 \mu\text{Gy}$ 。 -0.2 ns 表示 ps 束激光提前 ns 束激光后沿半高 0.2 ns ;同理, 0.2 ns 表示 ps 束激光落后 ns 束激光后沿半高 0.2 ns , 0 ns 表示 ps 束激光与 ns 束激光后沿半高同步。 $650 \mu\text{m}$ 与 $850 \mu\text{m}$ 均表示双层靶的间距。可以看到,在双层靶的间距固定时,无论 ps 束激光提前还是落后 ns 束激光后沿,最大剂量都明显降低。而当两束激光之间的延时不变时,改变双层靶的间距,发现最大剂量有所变化,但对最大剂量的影响不大。

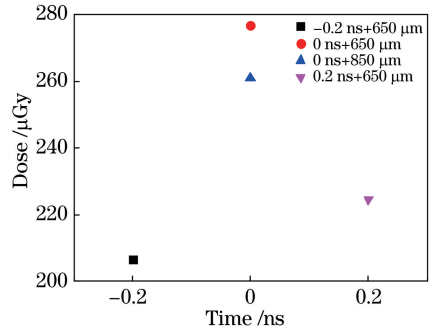


图 9 不同发次的最大 γ 辐射剂量

Fig. 9 Maximum doses of gamma radiation for different shots

4 分析与讨论

双层靶 γ 辐射集中在 ps 束激光的前冲方向,其发散角小于单层靶的发散角,而且该方向的高能段 γ 辐射比其他方向强。这是因为 ns 束激光与 CH 薄膜靶相互作用,经过一定的延时,在 Au 靶前形成具有较大尺度的近临界密度等离子体,同时 ps 束激光强度大于 10^{18} W/cm^2 ,所以激光主要通过有质动力加热的方式产生高能电子^[17],这种方式使高能电子的传输主要集中在激光前冲方向^[18]。近临界密度等离子体又可以提高 ps 束激光与等离子体的能

量耦合效率,使高能电子数目增多,导致 γ 辐射集中在 ps 束激光前冲方向,发散角较小,同时高能部分的 γ 辐射强度增强;而低能部分的凹陷应是靶体的自吸收造成的。但是当 ps 束激光与单层靶直接相互作用时,在靶前形成的预等离子体膨胀程度较低,临界面具有较陡的密度梯度,次临界密度区域较小,除了有质动力加热外,共振吸收、真空加热等机制也较强,后两者主要沿靶面法线方向加速电子。几种机制加速电子的方向不同,导致 γ 辐射的发散角偏大。

当 ps 束激光与 ns 束激光后沿半高同步时,得到的 γ 辐射剂量值最大,而该值对双层靶之间的间距并不敏感。可以推测,当 ps 束激光提前 ns 束激光后沿半高 0.2 ns 时,ns 束激光与 CH 薄膜靶相互作用产生的等离子体膨胀并不充分,等离子体密度仍然较高,无法使 ps 束激光与该等离子体进行高效能量转换,因此产生的高能电子数目略低,温度也不是特别高,进而使 γ 辐射强度相对降低;相反,当 ps 束激光落后 ns 束激光后沿半高 0.2 ns 时,ns 束激光与 CH 薄膜靶相互作用产生的等离子体膨胀过度,等离子体密度太低,也无法有效耦合 ps 束激光能量,最终造成与提前 0.2 ns 时类似的结果。因此,最佳的延迟时间应该是在 ps 束激光与 ns 束激光后沿半高接近同步,此时等离子体密度相比前两种情况更加接近临界密度,能够有效提高 ps 束激光与该等离子体的能量耦合效率。当双层靶的间距由 650 μm 增加到 850 μm 时,ps 束激光传输方向的最大 γ 辐射剂量具有一定变化,但影响不大,原因可能是这两个距离都超过了等离子体的膨胀尺度,因此改变间距并未影响等离子体的膨胀。至于双层靶的最佳间距,还需要进行更多实验来确定。

靶室外的 γ 辐射剂量相对较低。由于 TLD 置于靶室外,而靶室壁为 5 cm 厚的镁铝合金,可以有效地屏蔽掉绝大部分 50 keV 以下的低能光子。在本实验中,在靶室外壁距离靶点 1.25 m 处得到的单次最高剂量为 277 μGy 。而国际放射防护委员会(ICRP)1990 年第 60 号出版物建议,有效剂量限值为每年 1 mGy,在特殊情况下如果 5 年之内不超过平均每年 1 mGy,可以提高单一年份的有效剂量。但是在本实验中,多个发次的累计剂量很容易超过 1 mGy,因此足够的屏蔽防护措施必不可少。

5 结 论

研究了纳秒/皮秒双束激光联合驱动双层靶产

生的 γ 辐射特征,得到了不同方向的 γ 辐射能谱和靶室外的 γ 辐射剂量分布。实验发现 γ 辐射主要集中在 ps 束激光前冲方向,而且发散角较小;ps 束激光前冲方向的高能段 γ 辐射明显比其他方向强。结果表明,主靶前形成的较大尺度近临界密度等离子体,有利于提高 ps 束激光与等离子体的能量耦合效率,从而提高高能电子温度,增加沿 ps 束激光前冲方向的高能电子数目。而且,双束激光之间的最佳延时在 ps 束激光与 ns 束激光后沿半高同步附近,双层靶的最佳间距还需要进一步确定。另外,在靶室外距离靶点 1.25 m 处测到的 50 keV 以上 γ 辐射的单发次最高剂量为 277 μGy ,根据辐射屏蔽与防护的要求,需要给予足够的重视,提供必要的安全措施。

致谢 感谢国家重点研发计划(2016YFA0401100)的支持。感谢中国科学技术大学的老师同学张振驰等协助处理实验数据,感谢中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室各位工作人员的辛勤付出。

参 考 文 献

- [1] Gales S, Tanaka A, Balabanski L, *et al.* The extreme light infrastructure: nuclear physics (ELI-NP) facility: new horizons in physics with 10 PW ultra-intense lasers and 20 MeV brilliant gamma beams[J]. Reports on Progress in Physics, 2018, 81(9): 094301.
- [2] Leng Y X. Shanghai superintense ultrafast laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100001.
冷雨欣. 上海超强超短激光实验装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100001.
- [3] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, *et al.* Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.
朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.
- [4] Gibbon P, Förster E. Short-pulse laser-plasma interactions [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1996, 38(6): 769-793.
- [5] Ledingham K W D, Spencer I, McCanny T, *et al.* Photonuclear physics when a multiterawatt laser pulse interacts with solid targets[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(5): 899-902.
- [6] Li S, Shen B F, Xu J C, *et al.* Ultrafast multi-MeV gamma-ray beam produced by laser-accelerated

- electrons[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(9): 093104.
- [7] Huo L, Liu J L, Ma Y H. Radiation dose and protection [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 59-79.
霍雷, 刘剑利, 马永和. 辐射剂量与防护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 59-79.
- [8] Zheng J H, Yan J, Su M, *et al.* Numerical study on characteristics of neutron and gamma radiations from implosions on Shengguang III laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 112007.
郑建华, 晏骥, 苏明, 等. 神光III主机装置内爆中子和伽马辐射特性的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(11): 112007.
- [9] Ledingham K M D, Galster W. Laser-driven particle and photon beams and some applications[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(4): 045005.
- [10] Borne F, Delacroix D, Gelé J M, *et al.* Radiation protection for an ultra-high intensity laser [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2002, 102(1): 61-70.
- [11] Clarke R J, Neely D, Edwards R D, *et al.* Radiological characterisation of photon radiation from ultra-high-intensity laser-plasma and nuclear interactions[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2006, 26(3): 277-286.
- [12] Yang B, Qiu R, Yu M H, *et al.* Measurements of X-ray doses and spectra produced by picosecond laser-irradiated solid targets [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 123: 41-48.
- [13] Yang B, Qiu R, Li J L, *et al.* Photon dose estimation from ultraintense laser-solid interactions and shielding calculation with Monte Carlo simulation [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 131: 13-21.
- [14] Wang W T, Liu J S, Cai Y, *et al.* Angular and energy distribution of fast electrons emitted from a solid surface irradiated by femtosecond laser pulses in various conditions[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17(2): 023108.
- [15] Reginatto M. Overview of spectral unfolding techniques and uncertainty estimation[J]. *Radiation Measurements*, 2010, 45(10): 1323-1329.
- [16] Chen C D, King J A, Key M H, *et al.* A bremsstrahlung spectrometer using *k*-edge and differential filters with image plate dosimeters [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10E305.
- [17] Kruer W L, Estabrook K. $J \times B$ heating by very intense laser light [J]. *Physics of Fluids*, 1985, 28(1): 430-432.
- [18] Norreys P A, Santala M, Clark E, *et al.* Observation of a highly directional γ -ray beam from ultrashort, ultraintense laser pulse interactions with solids[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(5): 2150-2156.