

基于超强脉冲激光的医用质子辐射束特性研究

牟洪臣¹, 王光昶², 梁栋², 陈旭², 张建炜², 郑志坚³

1. 哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 成都医学院物理教研室, 四川 成都 610500; 3. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

【摘要】目的:探索一种新型的基于超强脉冲激光的医用质子辐射束,为研制基于小型化的超短超强激光质子加速器的激光质子刀进行肿瘤治疗奠定基础。**方法:**在超强脉冲激光装置SILEX-I上研究医用高能质子辐射束特性。利用CR39核径迹探测器测量质子束的束密度、产额,并采用Thomson离子谱仪和HD810型号辐射变色膜片在固体靶背表面法线方向分别测量能谱及空间分布。**结果:**质子束空间分布呈现圆盘状、成丝和环状分布。质子束与入射激光方向无关,沿着靶背表面法线方向发射,质子束发射存在较小立体角。对于复合靶,若保持前表面的Al厚度不变,随着后表面C₈H₈层厚度的增加,质子束流减小。质子束发射在一定能量处出现截止,截止能量与靶厚度和靶材料密切相关。截止能量的大小随靶厚度的增加而减小;在靶厚度相同的情况下,Al薄膜靶的质子截止能量高于Cu薄膜靶。**结论:**本实验结果为激光质子加速器治疗装置的小型化研制及肿瘤放射治疗提供了一些重要参考依据。

【关键词】超强脉冲激光;医用质子辐射束;空间分布;束密度

【中图分类号】R312;TN247

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)06-0621-05

Characteristics of medical proton irradiation beams based on ultra-intense pulse laser

MU Hongchen¹, WANG Guangchang², LIANG Dong², CHEN Xu², ZHANG Jianwei², ZHENG Zhijian³

1. College of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150080, China; 2. Teaching and Research Section of Physics, Chengdu Medical College, Chengdu 610500, China; 3. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P.O. Box 919-986, Mianyang 621900, China

Abstract: Objective To explore the medical proton irradiation beams based on ultra-intense pulse laser for laying a foundation for the development of a laser-driven proton knife based on miniaturized ultra-short and ultra-intense laser-driven proton accelerator for tumor therapy. **Methods** The characteristics of medical proton irradiation beams were explored on SILEX-I laser facility. The density and yield of proton beams were measured with nuclear track detector CR39. Moreover, the proton energy spectra and the spatial distributions of proton beams were measured by Thomson magnetic spectrometer and HD810 radiochromic film, separately. **Results** The spatial profiles of proton beams showed disc-, filament-, and ring-like distributions. The proton beams emitted along the direction of normals to the rear surface of targets within a small cone angle, irrelevant to the direction of incident laser beams. For composite targets, with the same thickness of Al layer, the proton beam flux decreased with the increase of C₈H₈ layer thickness. The sharp cutoff energy which existed in the proton energy spectra was depended on target thickness and target material. The sharp cutoff energy was decreased with the increase of target thickness. With the same target thickness, the sharp cutoff energy of Al foil target was higher than that of Cu foil target. **Conclusion** The experiment results provide an important reference for the development of miniaturized laser-driven proton accelerator and tumor radiotherapy.

Keywords: ultra-intense pulse laser; medical proton irradiation beam; spatial distribution; beam density

前言

当今威胁人类生命的主要疾病之一是肿瘤,而治疗肿瘤的重要手段之一是放疗。质子束辐照是新兴的放疗技术,质子治疗效果好、副作用小,优于 γ 射线和电子束射线,已成为放疗最有前景的发展方向。目前医用质子束源于高能加速器,由氢离子源引出质子,经电场多次加速获得高能量。与加速器

【收稿日期】2019-01-20

【基金项目】国家自然科学基金(10535030);发育与再生四川省重点实验室基金重点项目(SYS12-003)

【作者简介】牟洪臣,副教授,主要从事超短超强激光与等离子体相互作用研究,E-mail: hsdmhc@126.com

【通信作者】王光昶,博士,教授,主要从事超短超强激光与等离子体相互作用研究,E-mail: wgchang-1@126.com

质子源相比,激光质子源具有易于控制质子能量,易于实现 Bragg 峰扩展,易于实现多束辐照,装置规模小和价格低等优点。此外,加速器是输出单能质子,但目前激光打靶的实验数据表明强激光产生的高能质子并非单能,且具有特定的可控的能区分布。

近年来针对强激光医用质子束特性及质子治疗等进行了广泛而深入的研究,已经取得了一定进展。2002年,Bulanov等^[1]对激光质子束在肿瘤治疗的可行性进行了探讨,并采用粒子模拟方法对几种不同靶结构所产生的质子束特性进行了模拟分析。2006年, Ma等^[2]采用粒子模拟方法对激光质子束用于肿瘤治疗的研究进展进行总结,包括用于癌症治疗的剂量研究、靶结构的设计、粒子/能量选择以及粒子束准直的系统设计等。2007年, Li等^[3]对质子束特性(能量分布、转换效率等)受激光偏振态的影响进行实验研究;同年, Linz等^[4]从质子束能量、质子能量可变量和单一度、剂量准确度和计量、质子束强度、剂量构造、均匀输送、系统造价、辐射保护和环境考量等多个角度,系统地比较了目前传统加速器质子治疗仪和激光质子加速器的现状,认为激光质子辐照源若要用于肿瘤治疗,还存在着一些技术问题需要解决。

目前我国基于超强脉冲激光的医用质子辐射束特性的研究还很不成熟^[5-6],因此,有必要开展实验研究薄膜靶背表面法线方向发射的质子束流大小、质子束能谱、空间分布(角分布)、产额、光密度(Optical Density, OD)、束密度和能量分布与靶材料及厚度的关系等。本研究针对质子束空间分布、质子束密度分布、产额及质子束能谱进行了研究,从而为激光质子加速器治疗装置的小型化研制及肿瘤放射治疗提供参考。

1 实验设置和方法

实验设置如图1所示。本实验是在中国工程物理研究院激光聚变中心的高温高密度国家重点实验室的飞秒激光脉冲装置 SILEX-I 上进行的,设置各项指标为:激光波长 800 nm,最大能量 8.5 J,激光经抛物面镜聚焦至靶表面,离轴抛物面镜全反镜 F 数为 $f/3$ (f 代表焦距,为 420 mm),脉宽 30 fs,最大输出功率 286 TW,激光束直径 140 mm,激光信噪比好于 $1:10^5$ 。采用针孔相机结合 X 光电荷耦合器件测量激光在靶面形成的 X 光焦斑;采用靶室外的长焦距显微镜对光学焦斑进行实时监测。本实验采用不同厚度的 C_8H_8 和 $1.22 \mu m$ 的 Al 而组成的双层平面靶及不同厚度的 Cu 薄膜靶。采用 Cu 薄膜靶测量时,沿着靶背法线方向,

放置 CR39 核径迹探测器,用于测量质子束密度和产额;放置 Thomson 离子谱仪,用于测量质子能谱。采用双层薄膜平面靶测量时,将 HD810 型号辐射变色片(Radiochromic Film, RCF)沿着靶背表面法线方向放置,用于探测质子的空间分布。

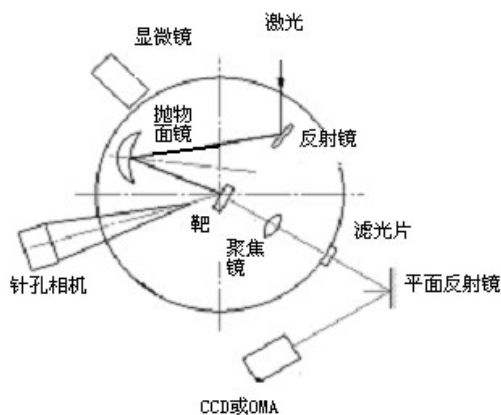


图1 实验设置简图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

为了测量在薄膜靶背表面的质子束空间分布,在距离靶背 26 mm 左右的位置,将 RCF ($5 cm \times 5 cm$) 沿靶背法线方向放置。打靶时,靶室的真空度保持为 $10^{-2} Pa$,激光极化方式为 p 极化,入射角度为 23° 。实验的各种参数及 RCF 测量得到的平均值见表 1。

2 实验结果

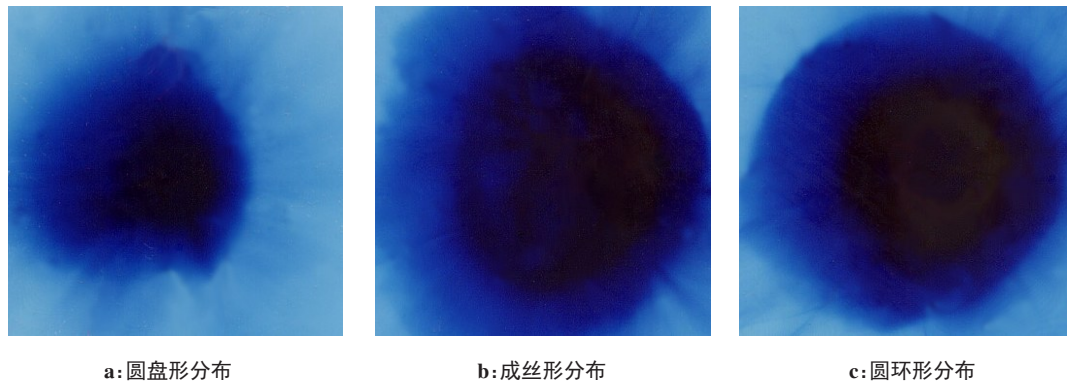
2.1 质子束空间分布测量结果

本实验采用 HD810 型号 RCF 测量质子束空间分布。图 2 为典型的测量结果,反映了质子束的空间分布及 RCF 的颜色变化,引起 RCF 变色最主要原因是质子。由于本实验使用的 RCF 对高能 X 射线和超热电子不敏感,因此,质子束流能量越高束流越强,RCF 变色就越深,RCF 所吸收的平均剂量就越大,即 OD 越大。辐射变色是由于受辐照后薄膜颜色由透明逐渐变为蓝色,质子束流的强弱和空间分布情况通过 RCF 辐射变色的强弱和范围来反映。质子在物质中的散射较小,其在靠近射程末端处形成一个能量损失较大的 Bragg 峰,这个峰是由质子的电离特性引起的;在峰位附近出现了一个较为严重的电离辐射损伤区域,这是引起 RCF 变色的主要原因。

由图 2 和表 1 可知,当采用相同厚度和材料薄膜靶时,激光功率密度越大则 RCF 的平均剂量越大,质子束流越强,成丝现象变弱。当 Al 的厚度不变而减小 C_8H_8 厚度时,RCF 的平均剂量也越大,质子束流越强。质子束空间张角大小相等,与焦斑大小无关。

表1 测得光密度值及实验参数
Tab.1 Optics density and experimental parameters

实验编号	靶材料	激光能量/J	焦距/ μm	功率密度/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	靶厚度/ μm	光密度
a	Al+C ₈ H ₈	2.86	16×31	6.55×10^{18}	1.22+42.00	0.560 4
b	Al+C ₈ H ₈	2.66	47×51	1.17×10^{18}	1.23+9.80	0.854 7
c	Al+C ₈ H ₈	2.93	16×35	6.13×10^{18}	1.21+17.32	0.751 2



a: 圆盘形分布 b: 成丝形分布 c: 圆环形分布

图2 质子束空间分布

Fig.2 Spatial distributions of proton beams

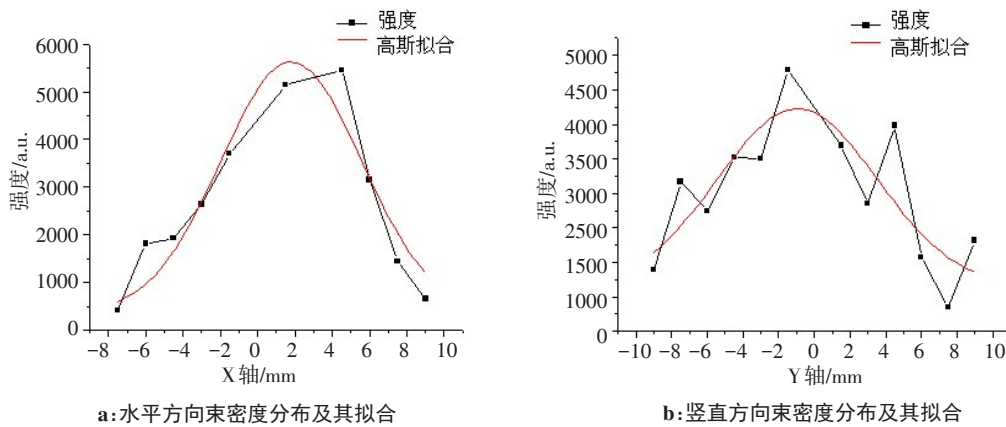
本实验使用相同Al厚度(1.22 μm)时,质子束流随C₈H₈厚度减小而增大,中心成丝经调制而变小。使用相同靶时,随着激光功率密度增加,质子产额更高,中心成丝调制变小。如图2所示,本实验测量得到了3种质子束空间分布:环状结构、圆盘结构和中心成丝结构。

2.2 质子束密度分布和产额测量结果

在薄膜靶背表面法线方向放置CR39核径迹探测器胶片,质子发射的角分布用此胶片记录,在CR39的竖直截面和水平截面分别测量质子束密度分布。对质子密度分布曲线进行高斯拟合就可获得质子束

角分布,而对角分布曲线进行积分就可获得质子产额。

采用厚度为20 μm 的Cu靶,以激光能量为490 mJ入射,固体靶面功率密度为(4.73×10^{17}) W/cm^2 ,累计打靶75发。分别在CR39的水平方向和竖直方向测量质子束密度分布,质子束直径水平方向 $d_x=7.5448\text{ mm}$,竖直方向 $d_y=8.9633\text{ mm}$,平均 $d=(8.2541\pm 1.4185)\text{ mm}$ 。CR39离靶表面距离为53.5 mm,算得质子束发射张角 $\varphi=8.8442\pm 1.5166$ 。对质子束密度分布进行积分,得到约为(9.0×10^4) a.u./发的质子产额。质子束密度分布曲线及其拟合结果见图3。



a: 水平方向束密度分布及其拟合 b: 竖直方向束密度分布及其拟合

图3 质子束密度分布曲线及其拟合

Fig.3 Intensity distribution curves of proton beams and Gauss fitting results

2.3 质子束能谱测量结果

采用 Thomson 离子磁谱仪测量靶背表面法线方向发射的质子的能量分布。将 Thomson 离子磁谱仪放置在靶背表面法线方向。由质子束角分布测量实验可知,在靶背表面法线方向锥形区域内仅限质子发射。

本实验在相同激光功率密度[约(5×10^{17}) $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]条件下利用 Thomson 离子谱仪测量质子束能谱,该能谱是在飞秒激光与铜靶(厚度 5、10、15 μm)的相互作用中产生,测量结果见图4。质子束的截止能量与靶厚度存在一定的关系,即在激光能量大致相同的情况下,靶越薄,质子截止能量就越大;靶越厚,质子截止能量越小。

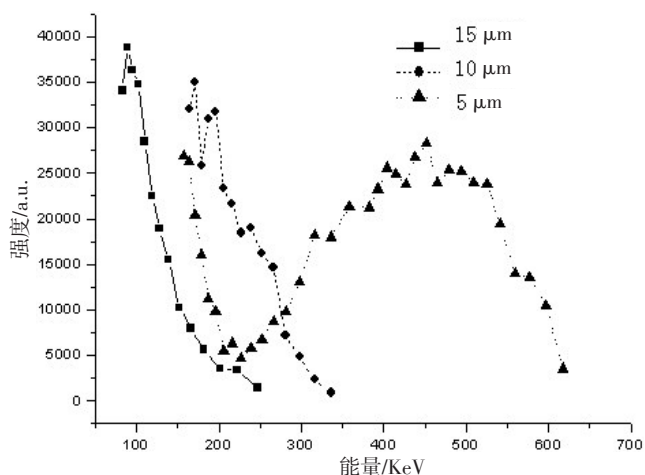


图4 不同厚度靶的质子能谱

Fig.4 Proton beam spectra of targets with different thickness

3 分析与讨论

由前面的实验结果可知,RCF的OD随靶厚度的增加而减小,OD由下式确定^[7]:

$$\text{OD} = \log_{10}(I_0/I) \quad (1)$$

其中, I_0 是没有加RCF时测量得到的光强度; I 是加RCF时测量得到每点的光强度。

由图3测得的质子束密度和产额的情况可知,靶法线鞘层加速机制是质子产生的主要机理^[8],随着激光能量的增加,质子产额也在增加。激光与等离子体相互作用产生的超热电子构成的鞘层电场在固体靶背表面形成,电场加速离化的质子。随着激光能量的增加,超热电子吸收更多的激光能量,温度逐渐上升,鞘层电场强度随着超热电子温度的升高而增加,从而更有效地加速质子。通过激光能量的加大可以获得更多质子产额^[9]。

图3和图4的实验结果表明,质子沿薄膜靶背表面法线方向发射是由于在激光脉冲的作用下,在靶前表面产生超热电子后向靶内传输^[10]。可以通过有质动力势估算^[8]超热电子温度:

$$T_{\text{hot}} \approx m_e c^2 (\sqrt{1+a^2} - 1) \quad (2)$$

其中, $a = I \lambda_{\mu\text{m}}^2 / 1.37 \times 10^{18}$,为归一化的激光功率密度, $\lambda_{\mu\text{m}}$ 为激光波长^[11],以 μm 为单位; I 为激光强度。超热电子的数量由激光能量损失估计,为:

$$N_e = fE/T_{\text{hot}} \quad (3)$$

其中, f 为激光能量吸收率,通常为11%~41%,本实验取 $f=35\%$; E 为激光能量。

靶背鞘层电场是由超热电子穿过靶后形成的。考虑到激光脉冲宽度的影响,靶背鞘层电场的电子密度为:

$$n_e = N_e / (DS) \quad (4)$$

$$S = \pi(r + d \tan \theta)^2 \quad (5)$$

其中, $D = c\tau_{\text{laser}}$,是电子鞘层厚度, τ_{laser} 是激光脉宽, c 是光速, S 是电子鞘层面积, r 是激光焦斑半径, d 是靶厚度, θ 是激光焦斑被电子鞘层所张的半张角。

估算质子最大截止能量可利用自相似等温膨胀的流体力学模型,表达式为^[12]:

$$E_{\text{max}} = 2T_{\text{hot}} \left[\ln(t_p + (t_p^2 + 1)^{1/2}) \right]^2 \quad (6)$$

其中,归一化加速时间 t_p 可以通过有质动力势估算:

$$t_p = \omega_{\text{pi}} t_{\text{acc}} / (2 \exp(1))^{1/2} \quad (7)$$

其中, $\omega_{\text{pi}} = \left[(Z_i e^2 n_e) / (m_i \epsilon_0) \right]^{1/2}$,是离子等离子体频率, Z_i 为质子核电荷数, m_i 为质子质量; $t_{\text{acc}} \approx 1.3\tau_{\text{laser}}$,为相互作用时间。基于前面的电子鞘层面积模型,可通过质子最大截止能量计算出发散角 θ 的值。图3和图4中质子截止能量与秦孝尊等^[13]理论计算和唐翠明等^[14]、王光昶等^[15]及王昌军等^[16]的实验结果吻合,说明靶法线鞘层加速机制是质子能谱分布及能量截止的主要原因。

最近文献报道了采用双层靶提高加速质子产额^[17]、采用固体气体复合靶产生加速高能氦离子^[18]、采用带电粒子活化法^[19]及采用通道靶方法^[20]加速质子等研究,这些实验方法的优势和效果明显,值得借鉴和深入研究。

4 结论

在超强飞秒脉冲激光与固体靶相互作用中,高能质子束在靶背表面法线方向产生,质子束发射的立体角的范围、质子分布的空间形状、质子束流的大

小、质子产额的多少以及质子能量分布的特征等特性均与激光的功率密度、靶厚度、靶材料等参数密切相关。在靶背表面法线方向发射质子束时,质子束存在较小的发射立体角,质子束空间分布呈现环状、圆盘状、成丝状分布;在复合靶前表面的Al厚度保持不变的情况下,质子束流随着后表面C₈H₈层厚度的增加而减小;在一定能量位置处的质子束发射出现截止,截止能量的大小与固体靶厚度和靶材料相关。本实验结果与质子靶法线鞘层加速机制模型吻合较好,说明这些结果能为激光质子加速器治疗装置的设计和研制及医用肿瘤放射治疗提供有意义的参考。本实验是在很有限的实验条件下开展的医用质子束特性的初步研究,笔者还需继续改善实验条件来实现更具体、更详细的研究过程。

【参考文献】

- [1] BULANOV S V, ESIRKEPOV T Z, KHOROSHKOV V S. et al. Oncological hadrontherapy with laser ion accelerators [J]. Phys Lett A, 2002, 299(2-3): 240-247.
- [2] MA C M, VELTCHEV I, FOURKAL E, et al. Development of a laser-driven proton accelerator for cancer therapy [J]. Laser Phys, 2006, 16(4): 639-646.
- [3] LI Z, DAIDO H, FUKUMI A, et al. Protons and electrons generated from a 5- μm thick copper tape target irradiated by s-, circularly-, and p-polarized 55-fs laser pulses [J]. Phys Lett A, 2007, 369(5/6): 483-487.
- [4] LINZ U, ALONSO J W. What will it take for laser driven proton accelerators to be applied to tumor therapy? [J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2007, 10(9): 1-8.
- [5] 王光昶, 张建炜, 郑志坚. 强激光质子束透视成像应用于肿瘤细胞异型性分析的探索研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(2): 1777-1780.
WANG G C, ZHANG J W, ZHENG Z J. Research of tumor cells atypia based on perspective imaging of intense laser proton [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(2): 1777-1780.
- [6] 王昌军, 彭永进, 刘玉玲, 等. 强激光质子束应用于生物组织透视成像的研究[J]. 中国激光医学杂志, 2017, 26(3): 117-120.
WANG C J, PENG Y J, LIU Y L, et al. Study on use of intense laser proton beam in perspective imaging of tumor cells [J]. Chinese Journal of Laser Medicine & Surgery, 2017, 26(3): 117-120.
- [7] CHEN M, SHENG Z M, DONG Q L, et al. Collisionless electrostatic shock generation and ion acceleration by ultraintense laser pulses in overdense plasmas [J]. Phys Plasmas, 2007, 14(5): 053102.
- [8] WILKS S C, LANGDON A B, COWAN T E, et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions [J]. Phys Plasma, 2001, 8: 542-546.
- [9] ESIRKEPOV T, BORGHESI M, BULANOV S V, et al. Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(17): 175003-175008.
- [10] NAKAMURA T, FUKUDA Y, YOGO A, et al. High energy negative ion generation by coulomb implosion mechanism [J]. Phys Plasmas, 2009, 16(11): 113106-113111.
- [11] WILKS S C, KRUEER W L, TABAK M, et al. Absorption of ultra-intense laser pulses [J]. Phys Rev Lett, 1992, 69(9): 1383-1389.
- [12] FUCHS J, ANTICI P, D'HUMIÈRES E, et al. Laser-driven proton scaling laws and new paths towards energy increase [J]. Nat Phys, 2006, 2: 48.
- [13] 秦孝尊, 洪伟, 田成林, 等. 超短超强激光与固体靶相互作用中发射质子的截止能量估算 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1373-1377.
QIN X Z, HONG W, TIAN C L, et al. Calculation of proton cut-off energy accelerated in interaction of fs-laser pulse and solid targets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1373-1377.
- [14] 唐翠明, 陈晓旭, 洪伟, 等. 飞秒激光与双层靶相互作用靶背质子加速实验研究 [J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2012, 25(2): 172-174.
TANG C M, CHEN X X, HONG W, et al. Experimental research of protons generated femtosecond laser and double target interaction at the rear side of target [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2012, 25(2): 172-174.
- [15] 王光昶, 张建炜, 刘玉红, 等. 飞秒激光诱发的医用质子束特性的实验研究 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(4): 640-644.
WANG G C, ZHANG J W, LIU Y H, et al. Experimental study of femtosecond laser-produced medical energy proton beam [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(4): 640-644.
- [16] 王昌军, 王光昶, 王亚平, 等. 飞秒激光中高能质子的产生与加速的研究 [J]. 原子与分子物理学报, 2014, 31(5): 764-768.
WANG C J, WANG G C, WANG Y P, et al. Study of high energy protons generate and accelerate in femtosecond laser interaction [J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2014, 31(5): 764-768.
- [17] 谭志新, 兰小飞, 路建新, 等. 采用双层靶提高激光薄膜相互作用中加速质子的产额 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 23(1): 304.
TAN Z X, LAN X F, LU J X, et al. Enhancement of accelerated proton yield in intense laser irradiating double-layer targets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 23(1): 304.
- [18] 矫金龙, 贺书凯, 邓志刚, 等. 超强激光与固体气体复合靶作用产生高能氦离子 [J]. 物理学报, 2017, 66(8): 255-261.
JIAO J L, HE S K, DENG Z G, et al. Helium ions acceleration by ultraintense laser interactions with foil-gas target [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 255-261.
- [19] 贺书凯, 齐伟, 矫金龙, 等. 基于带电粒子活化法开展的SGII-U皮秒激光质子加速实验研究 [J]. 物理学报, 2018, 67(22): 225202.
HE S K, QI W, JIAO J L, et al. Picosecond laser-driven proton acceleration study of SGII-U device based on charged particle activation method [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 225202.
- [20] 杨思谦, 周维民, 王思明, 等. 通道靶对超强激光加速质子束的聚焦效应 [J]. 物理学报, 2017, 66(18): 84-91.
YANG S Q, ZHOU W M, WANG S M, et al. Focusing effect of channel target on ultra-intense laser-accelerated proton beam [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(18): 84-91.

(编辑:谭斯允)