

靶后鞘层机制加速离子的研究进展

王凤超

上海应用技术学院理学院, 上海 201418

摘要 在超短强激光与固体薄膜靶相互作用产生高能离子的研究领域内,由于靶后静电场持续时间较长、离子具有较好的准直性及单能性,靶后鞘层加速(TNSA)机制一直都是研究重点。介绍了TNSA机制的理论模型、近期的实验结果以及模拟验证,并系统讨论了通过结构优化得到高质量离子束的方案,最后综述了近期国内外利用TNSA机制加速离子的研究进展。

关键词 靶后鞘层加速;离子加速;复杂结构靶;联鞘层加速;密度梯度

中图分类号 O437 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.120008

Research Progress of Scheme of Target-Normal Sheath Acceleration Ion

Wang Fengchao

School of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

Abstract In the interaction of ultra-short and ultra-intense laser pulses with the film target, the target-normal sheath acceleration (TNSA) is considered as an efficient acceleration scheme to gain energetic ions and is studied intensively. The reason is that the space-charge field on the backside of the target is much more intense and longer lasting, so the acceleration ions have a good collimation and mono-energetic spectrum. The theoretical model, experimental results and simulation are introduced, then the optimal target structure to generate high quality ion beams is analyzed, and finally the progress of the TNSA at home and abroad is summarized.

Key words target-normal sheath acceleration (TNSA); ion acceleration; complex target; cascaded TNSA; density gradient

OCIS codes 320.2250; 320.7090; 320.7110

1 引言

随着激光技术的飞速发展,人们已能获得聚焦强度超过 10^{22} W/cm²、单脉冲宽度小于 10 fs 的相对论激光脉冲,这种激光脉冲与物质的相互作用与许多应用有关,像粒子加速、激光驱动的 X 射线源、快点火惯性约束核聚变方案等^[1-7]。特别是用飞秒强激光加速带电粒子,这种新型加速器与传统加速器相比有着巨大的优势,因此近年来受到人们的广泛关注。强激光与等离子体相互作用加速电子和质子,已经得到了广泛的理论和实验研究,目前电子加速的主要机制有激光有质动力加速和激光尾波场加速。离子的主要加速机制有激波加速、光压加速以及靶后鞘层加速(TNSA)机制等。由于高能离子在各领域具有广阔的应用前景,所以近年来,离子加速备受人们关注^[8-11]。但是所有的应用都需要高质量的离子束,即:不但能量要高,而且单能性要好,例如:用于医学肿瘤治疗的质子束的能谱宽度为 $\Delta\varepsilon/\varepsilon \leq 2\%$,以此来保证在对肿瘤进行治疗的同时不伤害到邻近的其他组织器官。因此,获得能量较高以及单能性较好的高性能离子是目前离子加速研究的主要目标。而目前对离子加速的主要机制是利用电荷分离(即:热电子或者能量电子与离子分离)所产生的静电场来加速离子。当电子加热到高温或加速到高能时,电子能够与等离子体中的离子分离而造成电荷分离,产生一个静电鞘层,而处在这个静电场中的离子将被加速。对于离子,由于其惯性大,需要的加速

收稿日期: 2014-06-14; 收到修改稿日期: 2014-08-16; 网络出版日期: 2014-11-18

基金项目: 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(yyy10043)、光电精密检测研究平台建设项目(10210Q140005)

作者简介: 王凤超(1977—),男,博士,讲师,主要从事激光等离子相互作用方面的研究。E-mail: fcwang@sit.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

场更强,因此研究较多的是固体密度等离子体靶中的离子加速。强激光与固体靶相互作用中高能离子的产生,已得到很多的理论及实验研究。根据离子被加速的方向不同,可以分为前向离子加速和后向离子加速,前向离子加速机制目前主要有钻孔效应、激波加速和TNSA,后向离子加速主要为靶前静电场离子加速。这些加速机制的效率和产生的离子能量随着所用激光强度、脉冲宽度和等离子体密度的不同而有所不同。

TNSA机制作为一种非常有效的加速机制一直以来都是人们研究的重点^[12-17]。当飞秒强激光与固体靶相互作用后,在靶后会有大量的相对论热电子,这样固体靶离子与靶后空间的电子会形成强大的静电场,而且电场方向基本垂直于靶的表面。电场的强度与激光强度、电子温度、靶的组成及形状等因素有关。如此强大的静电场,足可以把轻离子或质子加速到很高的能量。由于此种机制静电场持续时间较长,使得离子能够得到非常有效的加速,且被加速的离子具有较好的准直性及单能性,所以得到了人们的广泛关注。近年来,随着鞘层加速机制的不断完善和发展,人们在理论上通过混合加速方案可以得到最高1 GeV的高能质子束,实验上可以得到近60 MeV的准单能质子束,这对于医学上的癌症治疗是非常有意义的。本文介绍了TNSA机制的理论模型,详细讨论了通过结构优化得到高质量的离子束的方案,综述了近期国内外利用TNSA机制加速离子的研究进展。

2 基本理论模型

TNSA的理论模型是由Hatchett等^[18-19]首次给出的,当激光与靶相互作用时,被激光预脉冲加速的靶前高能电子被主脉冲作用后迅速穿透靶,在靶的后表面与真空交界面形成一个很强的、薄的鞘层电场。

当靶前场的电子被加热穿过靶时,其在靶后表面呈现玻尔兹曼分布(Boltzmann):

$$N_{e,hot} = \exp(-e\Phi/T_{hot}), \quad (1)$$

式中电子温度 T_{hot} 与激光强度有关,近似为有质动力势:

$$T_{hot} \approx U_{ponderomotive} \approx \left(\frac{I\lambda^2}{10^{19}} \right)^{1/2} \times 1, \quad (2)$$

当靶后离子未被扰动时,在靶后形成的初始静电场为:

$$E = T_{hot}/(e\lambda_D), \quad (3)$$

式中德拜长度 $\lambda_D = [\epsilon_0 T_{hot}/(e^2 N_{e,hot})]^{1/2}$ 。当 $N_{e,hot} = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $T_{hot} = 2 \text{ MeV}$ 时,德拜长度 $\lambda_D = 2 \mu\text{m}$,鞘层加速场 $E > 10^{12} \text{ V/m}$ 。如此高的静电场,能够使场内离子得到非常有效的加速。如图1(a)所示。

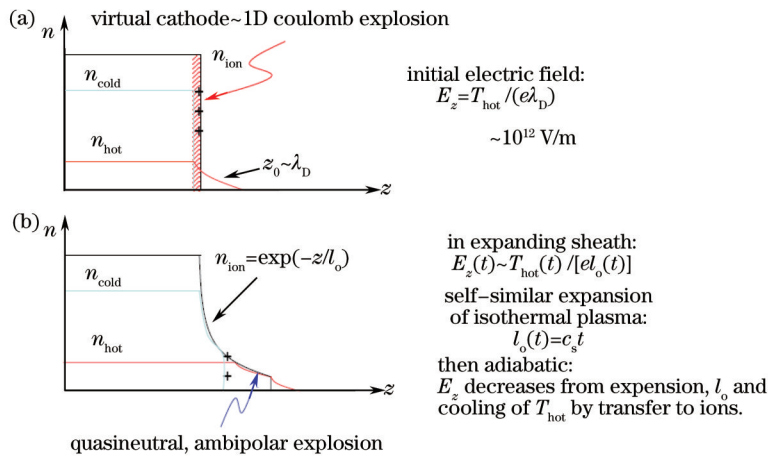


图1 靶后鞘层加速的理论模型

Fig.1 Theoretical model of target-normal sheath acceleration

如图1(b)所示,当靶后离子在靶后被鞘层电场加速膨胀,并呈现 $N_{ion} = \exp(-z/l_0)$ 分布时(z 为激光传播方向),热电子密度近似等于离子密度从而呈现电中性。假设电子处于等温平衡,并且呈现玻尔兹曼分布,则其连续性方程和离子的运动方程分别为:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial(n_i v_i)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x} = -C_s \frac{dn_i}{dx}, \quad (5)$$

这里 v_i 是离子速度, $C_s = \sqrt{ZT_e/M_i}$ 是离子声速, T_e 是电子温度, M_i 是离子质量。如果假设方程的解(也就是 n_i 和 v_i)是以 $\xi = x/t$ 的形式依赖于时间和空间的,则可以得到方程的自洽解:

$$n_i = n_0 \exp[1(1 + x/C_s t)], \quad (6)$$

$$v_i = C_s + x/t. \quad (7)$$

加速离子的电场可以很容易地由电子的运动方程得出:

$$n_e e E = -\frac{\partial p_e}{\partial x}, \quad (8)$$

这个加速场是

$$E = \frac{T_e}{e C_s t}, \quad (9)$$

如果假设自洽解 $l_0 = C_s t$, 其中 l_0 是局域等离子体标尺长度, 则有:

$$E = \frac{T_e}{e l_0}, \quad (10)$$

加速场随着膨胀距离 l_0 的增大和温度的冷却而减小。从这里可以看到, 电场与电子的温度成正比, 与时间或者是等离子体的标尺长度成反比。另外, 离子的速度随时间的增加而增大, 但是最大能量的离子却随着时间的增加而减少。这是因为, 电子的惯性是有限的, 离子最终将赶上电子, 而事实上离子会很快赶上电子, 因为实际上等离子体是逐渐冷却的, 而不是假设中的等温过程。

这个机制需要的靶的厚度要合适, 既要厚到使靶后的离子不能被预脉冲干扰, 又要薄到热电子能快速穿透靶。Sentoku 等^[20]研究了靶的厚度对离子加速的影响, 指出了对于较薄的靶, 电子可以通过再循环流通来提高被加速的离子的能量, 如图 2 所示。由于电子速度接近光速 c , 所以电子束的长度近似等于激光脉冲的长度 L_p 。电子在基本无能量损失的情况下穿过靶, 在靶的后表面被自身引起的鞘层场反射而再回到靶内。

如图 2(a) 所示, 当靶的厚度 $L > L_p/2$ 时, 电子仅仅是在靶的后边缘重叠, 这一过程并没有有效地增加靶后热电子的密度。而当靶的厚度 $L < L_p/2$ 时, 如图 2(b) 所示, 电子可以形成再循环流通。而这一过程大大地增加了靶后表面热电子的数量(但是这一过程并不能提高热电子的温度), 从而增加了靶后电场的强度, 进而使得被加速的离子的能量有所提高。如果把 $L_p/2$ 定义为临界长度, 其对应的离子能量为 E_c , 则离子能量随靶厚的经验公式可表示为:

$$\varepsilon_i = \frac{L_c}{L} E_c = \frac{L_c}{L} \varepsilon_{c, \max}. \quad (11)$$

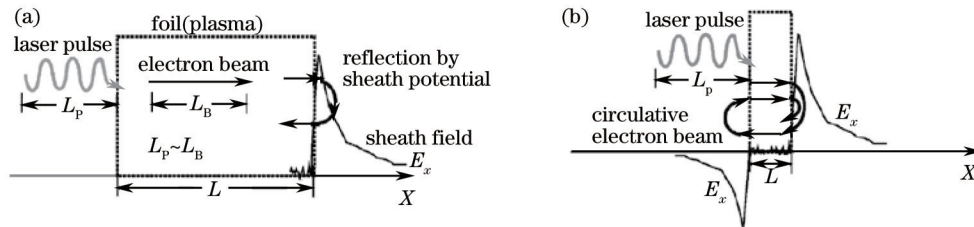


图 2 电子在靶内循环流通情况。(a) $L > L_p/2$; (b) $L < L_p/2$

Fig.2 Electron circulation in target. (a) $L > L_p/2$; (b) $L < L_p/2$

也就是说随着靶的厚度的减小, 离子能够更有效地被加速。如图 3 所示, 随着靶厚度的减小, 电子再循环流通的次数增加, 从而能够更有效地增加靶后热电子的数目, 来提高靶后加速电场的强度, 使得场中的离子能够更有效地被加速。

3 靶后鞘层机制加速离子的方案及其结构优化

利用靶后鞘层加速机制, 虽然能够得到单能性很好的离子束, 但是靶后鞘层加速机制中激光能量的转换率比较低, 其主要原因是在这种加速机制中, 激光的大部分能量主要用于电子加热, 只有少部分能量通过

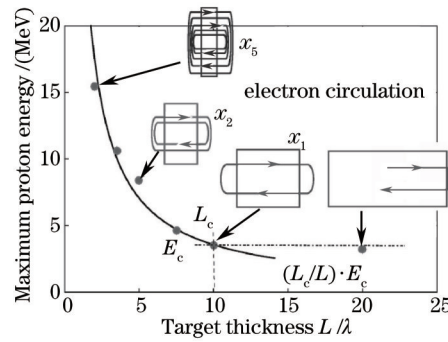


图3 质子的最大能量与靶厚的关系

Fig.3 Relationship of maximum proton energy and target thickness

静电场作用转移给离子。另外尽管靶后形成的静电场的梯度很高,但是加速的距离很短,因此能量转换率是很低的,因此如何提高能量的转换率是个很重要的问题。

2002年, Esirkepov等^[21]从理论上提出了用强激光与双层靶相互作用来得到高质量的单能质子束,并且通过模拟来验证了这种方法的可行性。双靶是由高电荷态的重离子层(其平均电荷和质量分别为 eZ_i 、 m_i)和低电荷态的轻离子层(其平均电荷和质量分别为 eZ_a 、 m_a)组成。其中轻离子层是附着在重离子层后面的一个薄层,主要用来提供被加速的轻离子,如果比值 $m_i Z_i / m_a Z_a$ 足够大,则电荷态的轻离子会比高电荷态的重离子更有效地被加速。

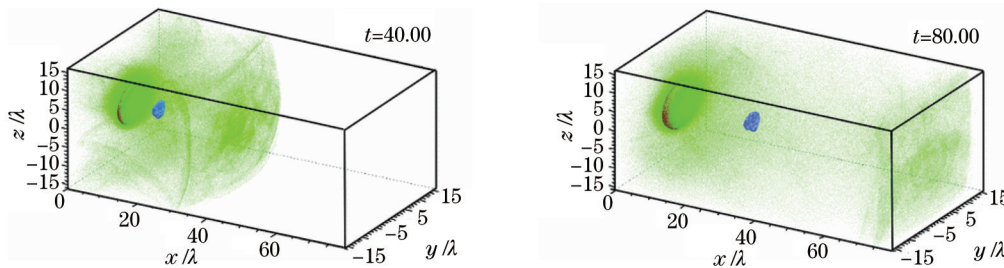


图4 通过双层靶得到单能的质子束

Fig.4 Generation of monoenergetic proton beam from double layer target

模拟中,双层靶是由 0.05λ 厚的金靶后附着 0.03λ 厚的质子层,如图4所示,蓝色的质子被有效地加速。图5给出了重离子-金离子和质子的能谱图,可看到质子束的单能性非常好。

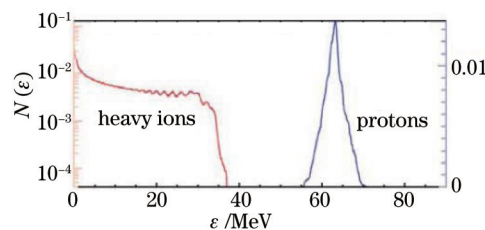


图5 两种离子的能谱

Fig.5 Energy spectra of two kinds of ions

2008年, Morita等^[22]提出了通过改变激光的入射角来提高被加速的质子束能量,即提高激光的能量转换率。Morita等的研究表明,随着激光入射角的变化,被加速的质子束能量也随着变化,如图6所示。当激光入射角度为 30° 时,质子的能量最大,增加到原来的两倍多;但是能散度也增加为原来的两倍多,由10%增加到了23%,因此,这个方案的优点是提高了激光能量的转换率,缺点是没有很好地解决质子束的能散度问题。

一种新的利用靶后鞘层机制加速质子的方案是用强激光与复合靶(CDL target)相互作用^[23],利用这种方案可以使质子束的能量提高三倍,而质子束的能散度还降为原来的一半,非常好地解决了以前没能解决的问题。复合靶的结构如图7所示。在原来的简单双层靶(SDL target)前面加了一个薄片(二维)或者是细丝(三维),这样当激光与薄片相互作用后,由于表面有质动力的作用,薄片靶内的电子会被拉出,而且在 $V \times B$

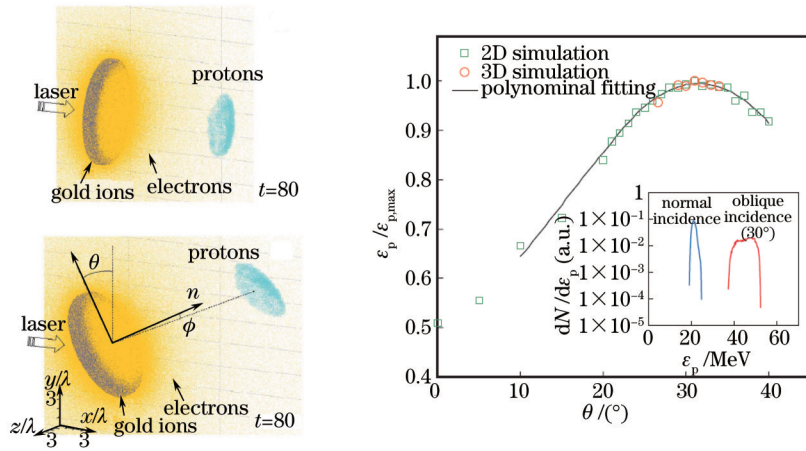


图6 斜入射激光加速质子

Fig.6 Proton acceleration by oblique incident laser pulse

力的作用下,电子方向转为与激光方向相同,这样电子就不仅仅是加热,而是有了定向的速度,这些被加速的电子就会在薄片两边沿着激光方向运动,进而穿过双层靶,在双层靶后面形成静电场,由于电子拥有定向的速度,因此电子不容易散开,这样靶后的静电场可以维持很长的时间;而且由于双层靶可以提供回流电子,所以使得薄片上的电子可以大量地被加速而进入到双层靶后面,形成强大的静电场来加速质子。

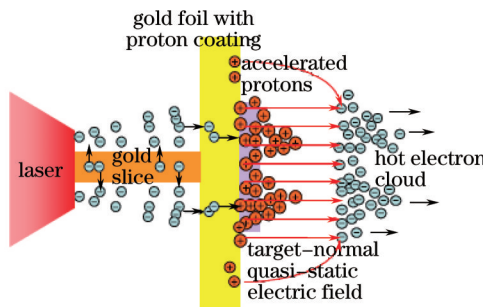


图7 复合靶结构示意图

Fig.7 Sketch of complex target

如图8(a)所示的模拟结果,复合靶中的质子能量增加地非常地快,这主要是由于开始的时候,有大量电子进入到靶后的真空,形成了很强的静电场,因此质子被很快地加速。从图8(b)中可以看出,在复合靶情况下,质子束的峰值能量大约为180 MeV,是简单双层靶情况下的3倍,而且能散度也降为一半。

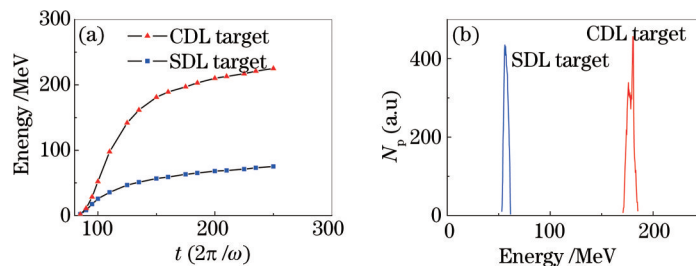


图8 质子能量演化及质子能谱图

Fig.8 Evolution of proton energy and proton energy spectrum

近年来,随着鞘层加速机制的不断完善和发展,人们提出了各种增强型的鞘层加速方案,以进一步提高质子束的性能,其中之一就是运用多种加速机制联合加速。2013年Gu等^[24]通过改变双层靶的密度分布来实现多种加速机制联合加速质子,如图9所示。此方案首先利用尾波加速获得高能电子,而后高能电子与高密度氢靶作用,利用钻孔效应先对靶中的质子进行加速,而后电子进入靶后空间,并在其后形成强大的静电场,进一步加速电场中的质子。通过这种方案,可以获得最高能量为1 GeV的高能质子束。

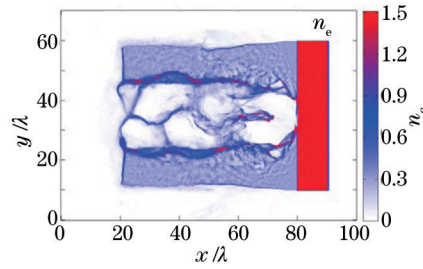


图9 300 fs时靶的电子密度分布

Fig.9 Electron density distribution at 300 fs

混合加速方案的提出,为得到高能量、高密度的质子束提供了一种非常好的方案^[17,25]。此方案中,首先利用TNSA机制得到高能质子束,再将质子束引入到一个由强场螺线管、永磁四极透镜及磁偶极子组成的后续加速系统中,在后续的加速系统中,不仅可以继续提高质子束的能量,而且可以使得质子束会聚。如图10所示,最终可以获得能散度小于3%,能量达到60 MeV,质子数量达到 10^7 量级的高质量的质子束,这样的质子束可以达到医学上治疗癌症的要求。

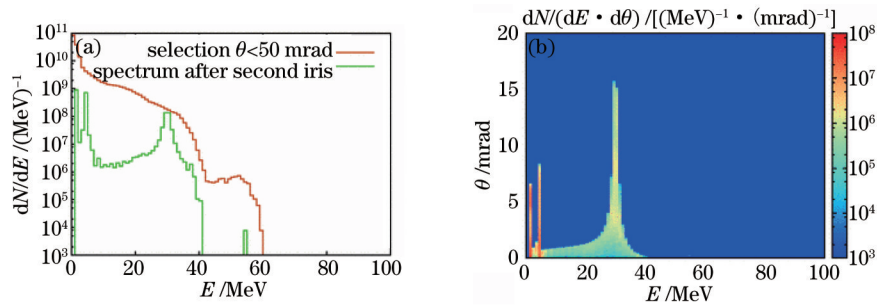


图10 质子能谱及角分布

Fig.10 Proton energy spectrum and energy-angle distribution

Lund等^[26]提出了一种新的方案使得鞘层加速中的离子束准直性得到了较好的改善。其方法是在靶后放置一个由多片相互分离的导电薄膜组成的“透镜”,如图11所示,这个结构不但可以很好地抑制库伦膨胀带来的质子束的发散,而且利用质子束自身产生的磁场可以对质子束进行很好的准直。Ni等^[27]对这种加速方案也进行了详细的理论研究。

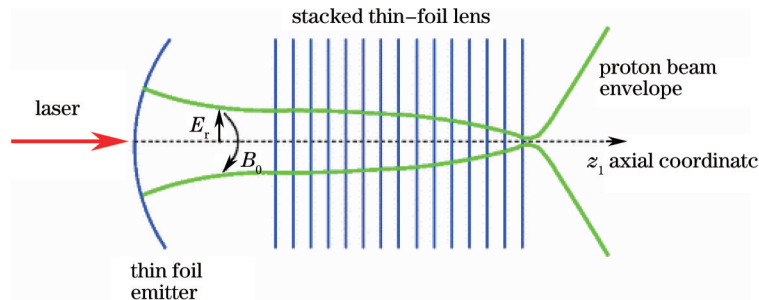


图11 薄膜组“透镜”结构

Fig.11 Schematic of a thin-foil lens

在国内,中国科学院上海光学精密机械研究所沈百飞小组一直致力于TNSA机制的研究,2013年,王文鹏等^[28]提出了级联TNSA方案,即在模拟中将已有的质子束再利用TNSA方案进行加速。如图12所示,此方案可以使质子束能量增加一倍,而能散度却降低为原来的一半。此外,王文鹏等^[29]就激光预脉冲对质子加速的影响也进行了讨论,研究表明预脉冲过强会对靶造成破坏而影响质子的加速。

4 靶后鞘层加速的实验结果

靶后鞘层加速机制不仅在理论上得到了很好地发展,在实验上也取得了很好结果。Snively等^[30]于2000年首次通过靶后鞘层加速得到了准直性很好的高能质子束。他们用峰值强度为 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的1 PW

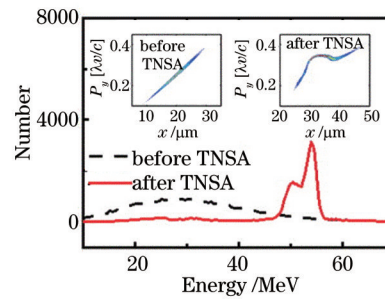


图 12 TNSA 前(虚线)、后(实线)质子能谱分布

Fig.12 Proton energy spectra of protons before (dashed line) and after (solid line) TNSA

激光来照射薄膜靶,约有 12%的激光能量转移给了 2×10^{13} 个能量大于 10 MeV 的质子,最高的质子能量大约为 58 MeV。从图 13 可以看到,质子束特别是高能质子束($E > 35$ MeV)的准直性是非常好的。

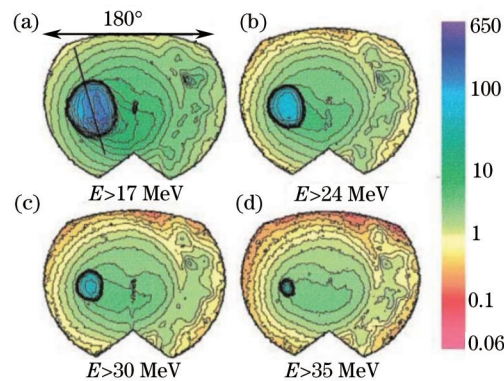


图 13 高能质子束的能量分布

Fig.13 Energy distribution of proton beam

2002年,Hegelich等^[31]在实验室中采用双层材料靶,即重金属靶与含氢的黏附物,不仅清楚地证明了靶后加速机制的存在,还表明超短超强激光脉冲与固体靶相互作用时产生的高能离子束的离子种类、能谱、电荷态等都是可以控制的。

2006年,利用靶后鞘层加速得到单能质子束的实验取得突破性的进展,Schworer等^[32]通过实验验证了Morifa等^[22]提出的双层靶结构可以获得单能质子束的想法。利用在高Z薄膜靶背后加一个富含氢的微小结构靶(此时加速的质子主要来自这一区域)的方法,用峰值强度为 3×10^{19} W/cm²,脉宽为 80 fs 的激光在实验上获得能量为兆电子伏量级的质子输出,能散度为 20%,如图 8 所示。其靶的构成是在 5 μm 厚的钛薄膜后附着图 14 中所示的微结构靶。

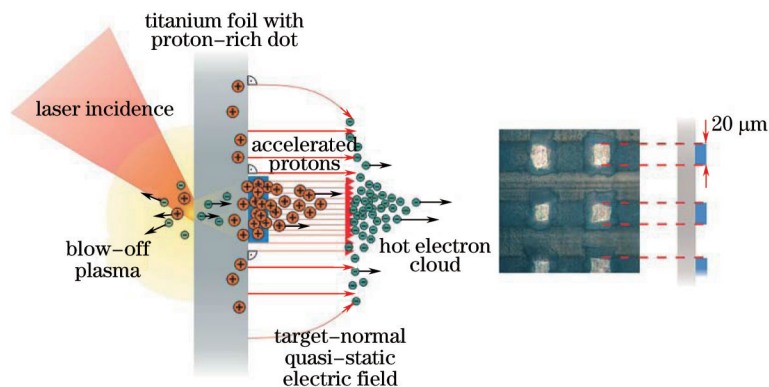


图 14 利用微结构靶加速离子

Fig.14 Ion acceleration from microstructured target

由于TNSA机制对荷质比较高的离子加速最为有效,准真空条件下,Hegelich等^[33]通过设法去掉纯钯(Palladium,厚度为 20 μm)表面吸收或吸附的氢,同时在背面加很薄(厚度为 1 nm)的碳层,实验上获得了准单能重离子 C⁵⁺束的输出,如图 15 所示,其中横坐标单位 MeV/μ 表示按核子能量归一化,纵坐标单位中 msr 表示固体发射角。

利用 20 TW/0.8 ps 的激光脉冲,获得的准单能碳离子能散度达到 17%,平均能量为每个核子 3 MeV(半峰全宽约为 0.5 MeV),且纵向发散度小于 $10^{-6} \pi \text{ eV} \cdot \text{s}$,其主要特点是改善了被加速离子的纵向不均匀性。

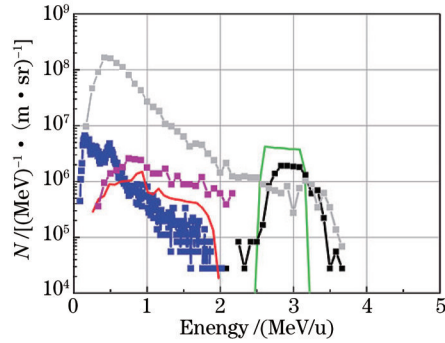
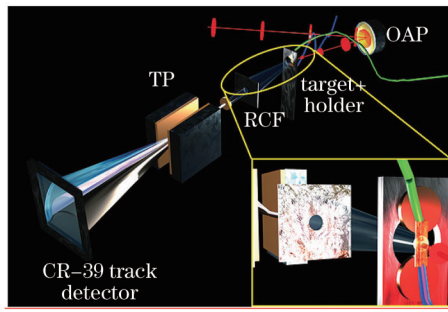


图 15 优化双层靶获得单能 C⁺离子

Fig.15 Generation of monoenergetic C⁺ ion from optimized double layer target

近年来,随着 TNSA 机制的不断发展,实验也不断有新的方案和结果出现。2013年,Ni等^[12,34]对Lund等^[26]提出的方案进行了实验验证,通过实验结果可以很明显地看到这个加速方案对于质子束的准直和会聚是非常有效的。如图 16 所示,空心的表示没有加“透镜”结构,实心的表示加了“透镜”结构,从图中可以看到,加上由多层薄膜组成的“透镜”结构之后,得到的质子束的半径明显变小。

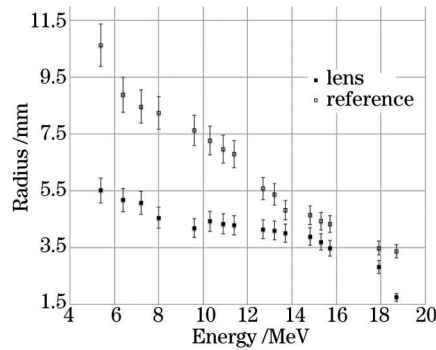


图 16 有透镜结构和没透镜结构情况下质子束的平均半径

Fig.16 Average beam radius of protons for lens and reference targets

在国内,王文鹏等^[35]通过实验和模拟对固体靶的密度,厚度及靶前和靶后密度梯度的变化对质子加速的影响做了详细的分析,并结合实验结果给出了最佳靶厚,如图 17 所示。在文章所给的实验条件下,靶的最佳厚度为 0.8 μm 。

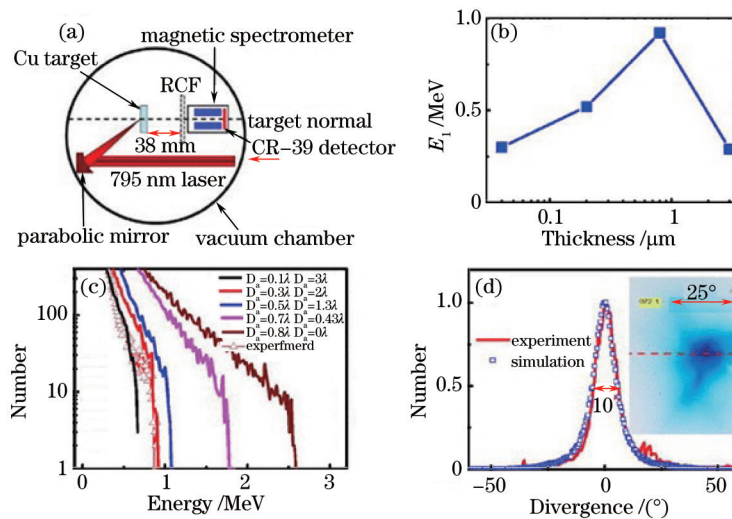


图 17 靶的厚度及密度梯度对质子加速的影响

Fig.17 Effects of foil thickness and density gradient on ion acceleration

5 总结与展望

随着激光技术的不断发展和人们对激光-等离子加速机制的不断研究,这种新型的加速器有着非常好的发展前景,而TNSA机制作作为一种重要的离子加速机制,有着自己突出的特点,加速出来的离子准直性和单能性都非常好。另外通过改进靶的结构,利用多种加速机制联合加速等,可以得到能量更高,性能更好的离子束,其激光的能量转换率随着人们的不断研究也在日益提高,相信在未来可以在激光加速离子中占有非常重要的地位,并拥有广阔的应用前景。

参考文献

- 1 S V Bulanov, T Zh Esirkepov, V S Khoroshkov, *et al.*. Oncological hadrontherapy with laser ion accelerators[J]. *Phys Lett A*, 2002, 299(2): 240-247.
- 2 M Borghesi, D H Campbell, A Schiavi, *et al.*. Electric field detection in laser-plasma interaction experiments via the proton imaging technique[J]. *Phys Plasmas*, 2002, 9(5): 2214-2220.
- 3 Li Yutong. Frontier of high-power-laser-based high energy density physics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 093202.
李玉同. 快点火激光核聚变和实验室天体物理中的几个前沿问题[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 093202.
- 4 Zhang Baohui, Xu Jun, Yang Qihong, *et al.*. New progress of ultrafast and ultraintense lasers based on Ti:sapphire[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040003.
张宝辉, 徐 军, 杨秋红, 等. 基于钛宝石的超快超强激光新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040003.
- 5 Zou Debin, Zhuo Hongbin, Shao Fuqiu, *et al.*. Laser-pulse shaping in the interaction of ultra-intense laser pulses with ultra-thin foils[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0714001.
邹德滨, 卓红斌, 邵福球, 等. 薄膜靶整形强激光脉冲的理论分析和数值模拟[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0714001.
- 6 Ge Xulei, Teng Hao, Zheng Yi, *et al.*. Plasma cleaning of compressed grating in chirped-pulse femtosecond laser amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0402006.
葛绪雷, 滕 浩, 郑 轶, 等. 飞秒激光啾啾脉冲放大中压缩光栅的等离子体清洗[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0402006.
- 7 Wang Hongjian, Xiao Shali, Ye Yan, *et al.*. Diagnosis of X-ray backlighter based on laser plasma[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0315001.
王洪建, 肖沙里, 叶 雁, 等. 激光等离子体 X 射线背光源诊断研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0315001.
- 8 Shen Baifei, Zhang Xiaomei. Latest progress and prospect of laser induced particle acceleration under high energy density conditions[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 093201.
沈百飞, 张晓梅. 高能量密度下激光粒子加速等研究的最新进展和展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 093201.
- 9 Bin Jianhui, Lei Anle, Yu Wei. Influence of initial plasma temperature on energetic proton generation from laser-plasma interactions[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1416-1419.
宾建辉, 雷安乐, 余 玮. 等离子体初始温度对强激光与等离子体相互作用中的高能质子产生的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1416-1419.
- 10 A Abudurexiti, P Mejid. Self-generated magnetic field and hot electron energy transport in the interaction of ultraintense laser pulse with plasmas[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s102011.
阿不都热苏力, 帕尔哈提. 激光等离子体相互作用中的自生磁场和超热电子热输运[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s102011.
- 11 Zhang Xingqiang, Lu Jianye. Preliminary analysis of laser sustained plasma propulsion mechanism[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0802008.
张兴强, 鲁建业. 激光等离子体推进机理的初步分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0802008.
- 12 P A Ni, N Alexander, J J Barnard, *et al.*. Summary of recent experiments on focusing of target-normal-sheath-accelerated proton beam with a stack of conducting foils[J]. *Phys Plasmas*, 2014, 21(5): 056701.
- 13 M Passoni, C Perego, A Sgattoni, *et al.*. Advances in target normal sheath acceleration theory[J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20(6): 060701.
- 14 Jin-Lu Liu, Min Chen, Jun Zheng, *et al.*. Three dimensional effects on proton acceleration by intense laser solid target interaction[J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20(6): 063107.
- 15 C Perego, D Batani, A Zani, *et al.*. Target normal sheath acceleration analytical modeling, comparative study and developments[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83(2): 02B502.

- 16 Z Léczi, O Boine-Frankenheim, V Kornilov. Target normal sheath acceleration for arbitrary proton layer thickness[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2013, 727: 51–58.
- 17 S Sinigardi, G Turchetti, F Rossi, *et al.*. High quality proton beams from hybrid integrated laser-driven ion acceleration systems[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2014, 740: 99–104.
- 18 S P Hatchett, C G Brown, T E Cowan, *et al.*. Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets[J]. Phys Plasmas, 2000, 7(5): 2076–2082.
- 19 S C Wilks, A B Langdon, T E Cowan, *et al.*. Energetic proton generation in ultra-intense laser–solid interactions[J]. Phys Plasmas, 2001, 8(2): 542–549.
- 20 Y Sentoku, T E Cowan, A Kemp, *et al.*. High energy proton acceleration in interaction of short laser pulse with dense plasma target[J]. Phys Plasmas, 2003, 10(5): 2009–2015.
- 21 T Zh Esirkepov, S V Bulanov, K Nishihara, *et al.*. Proposed double-layer target for the generation of high-quality laser-accelerated ion beams[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(17): 175003.
- 22 T Morita, T Zh Esirkepov, S V Bulanov, *et al.*. Tunable high-energy ion source via oblique laser pulse incident on a double-layer target[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(14): 145001.
- 23 Fengchao Wang, Baifei Shen, Xiaomei Zhang, *et al.*. High-energy monoenergetic proton bunch from laser interaction with a complex target[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(9): 093112.
- 24 Y J Gu, Q Kong, S Kawata, *et al.*. Enhancement of proton acceleration field in laser double-layer target interaction[J]. Phys Plasmas, 2013, 20(7): 070703.
- 25 S Sinigardi, G Turchetti, P Londrillo, *et al.*. Transport and energy selection of laser generated protons for post-acceleration with a compact linac[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2013, 16(3): 031301.
- 26 S M Lund, R H Cohen, P A Ni. Envelope model for passive magnetic focusing of an intense proton or ion beam propagating through thin foils[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2013, 16(4): 044202.
- 27 P A Ni, B G Logan, S M Lund, *et al.*. Feasibility study of the magnetic beam self-focusing phenomenon in a stack of conducting foils: Application to TNSA proton beams[J]. Laser Part Beams, 2013, 31(1): 81 – 88.
- 28 W P Wang, B F Shen, X M Zhang, *et al.*. Cascaded target normal sheath acceleration[J]. Phys Plasmas, 2013, 20(11): 113107.
- 29 W P Wang, B F Shen, H Zhang, *et al.*. Effects of nanosecond-scale prepulse on generation of high-energy protons in target normal sheath acceleration[J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(22): 224101.
- 30 R Snavely, M Key, S Hatchett, *et al.*. Intense high-energy proton beams from Petawatt-laser irradiation of solids[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(14): 2945–2948.
- 31 M Hegelich, S Karsch, G Pretzler, *et al.*. MeV ion jets from short-pulse-laser interaction with thin foils[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(8): 085002.
- 32 H Schwoerer, S Pfotenhauer, O Jaekel, *et al.*. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets[J]. Nature, 2006, 439(7075): 445–448.
- 33 B M Hegelich, B J Albright, J Cobble, *et al.*. Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams[J]. Nature, 2006, 439(7075): 441–444.
- 34 P A Ni, S M Lund, C McGuffey, *et al.*. Initial experimental evidence of self-collimation of target-normal-sheath-accelerated proton beam in a stack of conducting foils[J]. Phys Plasmas, 2013, 20(8): 083111.
- 35 W P Wang, H Zhang, B Wu, *et al.*. Generation of low-divergence megaelectronvolt ion beams from thin foil irradiated with an ultrahigh-contrast laser[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(21): 214103.