



激光驱动尾波场加速电子诱导光核嬗变*

王岩成, 曹宗威, 孙向阳, 罗文

(南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421001)

摘 要: 提出了一种基于激光尾波场加速电子诱导光核嬗变的优化方案并开展了¹³⁵Cs光核嬗变的数值模拟研究。蒙特卡罗模拟研究发现随着电子能量的增加, 嬗变产额逐渐趋于饱和, 单位能量电子的嬗变效率在 40 MeV 附近时存在峰值, 半高处能量为 20、120 MeV。为了提升半高处能量内的电子电量从而优化嬗变产额, 使用粒子模拟程序研究了超短超强激光在气体等离子体中的传输过程。研究发现, 随着等离子体密度的降低, 尾波场加速的电子能量逐渐升高, 但是电荷量逐渐减少, 并且圆偏振激光加速的电子能量和电荷量均优于线偏振激光。通过调整等离子体密度和激光偏振, 发现在圆偏振激光和特定等离子体密度条件下, 存在嬗变产额的最优值。利用电导率等效方法对 345 GHz 折叠波导行波管中的电磁信号的传输损耗进行了仿真研究, 考察了流通管孔径、加工粗糙度等对冷腔传输损耗的影响, 流通管孔径较大或加工粗糙度较大都会导致电磁信号传输衰减严重。还模拟分析了热腔中电磁信号衰减对慢波结构净增益、带宽、最佳周期数等器件特征参数的影响, 结果显示, 电磁信号衰减会使得增益下降和带宽降低。

关键词: 光核嬗变; 激光尾波场加速; 长寿命裂变产物; 气体等离子体密度

中图分类号: O571

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230079

Study of photo-transmutation induced by laser wakefield accelerated electrons

Wang Yancheng, Cao Zongwei, Sun Xiangyang, Luo Wen

(College of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Photo-transmutation is an important path to handle long-lived fission products. In this research work, an optimization scheme of photo-transmutation induced by Laser WakeField Acceleration (LWFA) driven electrons is proposed. Numerical simulations of photo-transmutation of ¹³⁵Cs by this scheme are performed. Monte Carlo simulations show that with increasing electron energy, transmutation yield gradually saturates. The transmutation efficiency per unit electron energy has a peak near 40 MeV, with half-maximum energy of 20–120 MeV. To enhance electron charge within the half-maximum energy range and optimize transmutation yield, PIC simulation was used to study the transmission process of ultrashort and ultra-intense lasers in gas plasma. The results show that as plasma density decrease, the energy of electrons gradually increase while their charge are gradually reduced. Moreover, circularly polarized lasers exhibit higher electron energy and charge than linearly polarized ones. Through adjusting the plasma density and laser polarization, it is found that there is an optimal value for transmutation yield under the conditions of circular polarization and specific density. The scheme is expected to promote the studies of nuclide transmutation in a tabletop ultra-intense and ultra-short laser device with high repetition rate, as well as the potential applications in medicine and nuclear-waste management.

Key words: photo-transmutation, laser wavefield acceleration, long-lived fission products, plasma density

由于核废料在生物圈的泄漏和扩散风险, 长寿命裂变产物(LLFPs)的处理是核能开发面临的一个巨大挑战。通过嬗变将 LLFPs 处理成一些短寿命的、放射性较低的核素是解决核废料污染的一种有效途径^[1-2]。目前, 大部分 LLFPs 核素可以通过中子嬗变来处理。但是, 对于一些特定 LLFPs 核素, 中子嬗变效率不高^[3]。此外, 某些特定元

* 收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2023-05-15

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFA1603300)、国家自然科学基金项目(U2230133、U2241281)

联系方式: 王岩成, 1373994584@qq.com。

通信作者: 罗文, wenluo-ok@163.com。

素在中子嬗变时还会因同位素混合而产生新的污染。例如,在处理放射性高、半衰期长($T_{1/2}=2.3\times 10^6$ a)的 ^{135}Cs 时,其同位素 $^{133,134}\text{Cs}$ 通过中子捕获反应中会产生新的 ^{135}Cs ,从而导致 ^{135}Cs 无法被完全处理干净^[4]。在该情况下,光核嬗变有望成为中子嬗变的重要补充手段。例如, ^{135}Cs 可以通过 (γ, n) 反应转化为 ^{134}Cs ,或通过 $(\gamma, 2n)$ 反应转化为稳定的核素 ^{133}Cs 。

随着激光技术的不断发展,短脉冲超强激光诱导 LLFPs 的光核嬗变研究引起人们广泛关注^[5-8]。相比于大型的粒子加速器、反应堆等设施,台面型激光装置可以更加方便地让研究人员在实验室中直接开展光核嬗变相关的实验研究。P. L. Shkolnikov^[9]等人于1997年首次提出,利用超短超强激光产生的高能电子在高Z的金属靶上产生韧致辐射 γ 射线,并通过诱发 LLFPs 的光核反应将其嬗变。随后 K. W. D. Ledingham^[10]和 J. Magiell^[11]等人分别在2003年利用激光器实现了 ^{129}I 的光核嬗变。在他们的实验中,分别使用大型PW激光装置(300 J, 0.7 ps, 单发)和台面型激光系统(1 J, 80 fs, 10^4 次累积),分别将 2.9×10^6 和 2×10^4 的 ^{129}I 嬗变为 ^{128}I 。他们还讨论了确定 $^{129}\text{I}(\gamma, n)^{128}\text{I}$ 反应截面的不同方法。然而,这些方案所采用的高能电子主要来自于激光与固体靶的相互作用。由于固体靶产生的热电子能谱一般为指数分布,这也导致能量达到光核反应阈值的电子数量较少,因此嬗变产额较低,限制了其在高精度测量光核反应截面等方面的应用。

利用激光尾波场加速(LWFA)电子诱导光核嬗变是一种有效提高嬗变产额的方法。LWFA的核心思想是利用短脉冲相对论激光在低密度等离子体中驱动高强度的等离子体尾波场来实现电子的有效加速^[12]。LWFA电子诱导的光核嬗变具有以下几个优点:(1)LWFA可以有效产生数十MeV以上的大电荷高能电子束,能够满足光核嬗变的光核反应阈值需求;(2)LWFA的电子能量是可以调谐的,通过控制加速电子能量和电荷量之间的平衡关系,有利于优化嬗变产额;(3)LWFA的电子具有单能性,可以提高能量达到光核反应阈值的电子数量,在高精度测量光核反应截面等方面有巨大的应用潜力;(4)使用台面型飞秒激光辐照气体靶,能够在高重频的模式下获得LWFA电子^[8, 13-16],从而通过发次累积带来嬗变产额的显著提升。但是目前还需要通过改变气体密度和激光极化方向的方式对电子能谱进行调控,优化嬗变产额。

本文通过蒙特卡罗和粒子模拟方法分析了激光驱动 LWFA 电子诱导 ^{135}Cs 的光核嬗变过程,结果显示,在强激光条件下,气体密度的选择和激光偏振方向均对电子能谱和嬗变产额产生了显著影响。

1 光核嬗变的蒙特卡罗模拟

本文采用欧洲核子研究组织开发的蒙特卡罗应用软件 Geant4 来模拟电子诱导的光核嬗变过程。如图1所示,能量不同的单能电子首先入射到钽转换靶上,通过韧致辐射产生大量的 γ 光子。这些 γ 光子随后入射到后面的圆柱形嬗变靶(^{135}Cs)中,通过触发 (γ, n) 等反应来实现光核嬗变。在模拟中,依据之前的研究结果^[17],钽靶的尺寸设置为直径30 mm,厚度2 mm。 ^{135}Cs 靶的直径为10 mm,厚度为3~10 mm。

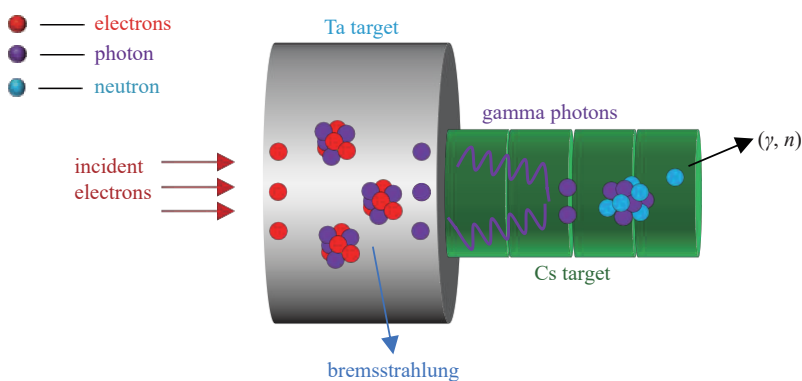


Fig. 1 Photo-transmutation of ^{135}Cs

图1 ^{135}Cs 光核嬗变示意图

首先研究了电子能量对嬗变产额的影响。结果如图2(a)所示,当电子能量低于40 MeV时,在3种不同嬗变靶厚度(3 mm、6 mm和10 mm)的条件下,嬗变产额随着电子能量迅速增加。这主要是因为电子产生的韧致辐射截止能量开始达到光核反应阈值,落在共振能区的高能伽马光子数量大量增加,从而诱导更多的光核嬗变反应。但当电子能量超过40 MeV后,嬗变产额随着电子能量的增加逐渐变缓,并在120 MeV附近趋于饱和。这一现象可以解释为:随着电子能量的继续提高,韧致辐射截止能量超过共振能区,其连续谱内相对平缓的能区进入

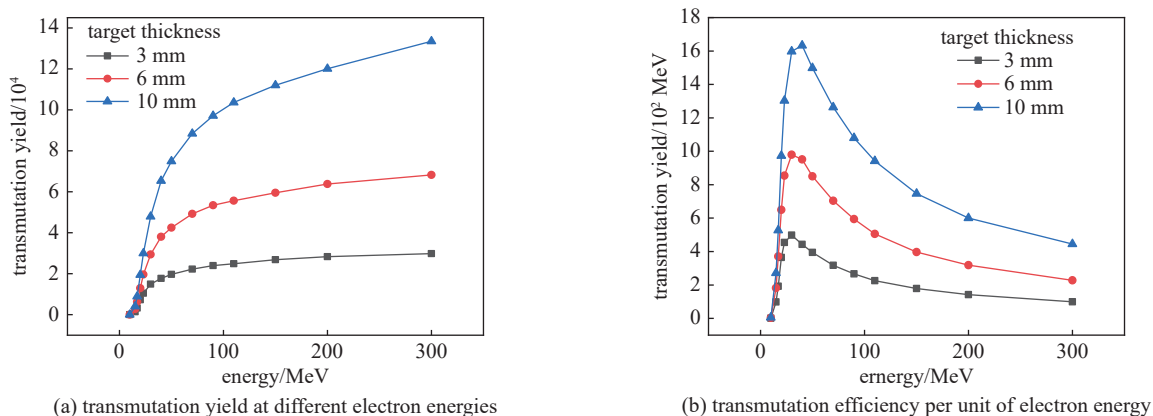


Fig. 2 Transmutation yield and transmutation efficiency of different electron energy at the target thickness of 3 mm, 6 mm and 10 mm

图2 嬗变靶厚度为 3 mm, 6 mm, 10 mm 时不同电子能量的嬗变产额与嬗变效率

共振能区, 这部分能区内的光子数量随着电子能量的增加幅度较小, 因此对嬗变产额的增益也相应较小。值得注意的是, 在该能量范围内, 即使使用不同厚度的嬗变靶, 嬗变产额的变化趋势也较为一致, 靶厚度越小, 这种趋势越显著。

为了更好地理解嬗变产额的饱和现象, 本文将嬗变产额转换为嬗变效率(即每单位电子能量的嬗变产额), 如图 2(b)所示。可以看到, 不同能量电子的嬗变效率存在显著差异。当电子能量低于 40 MeV 时, 嬗变效率随着电子能量迅速增加。随后, 嬗变效率在电子能量 40 MeV 附近时达到峰值。当电子能量进一步增加, 嬗变效率逐渐降低并趋于平缓。效率峰值对应韧致辐射截止能量刚好超过共振能区时的情形。嬗变效率峰值半高处的能量区间为 20~120 MeV, 即本文的效率能区。由图 2(b)还可以看到, 靶的厚度不会引起效率能区的显著变化。

2 激光驱动尾场电子的粒子模拟

前面分析显示, 高能电子在能量高于 120 MeV 时会出现嬗变产额饱和现象。该现象表明单一地追求高能量的电子束不一定是提高嬗变产额的最优解。然而, 在过往大部分的 LWFA 研究中, 其主要目标是提升电子的能量。例如, 产生数百 MeV 甚至 GeV 的准单能电子束。但是, 提升电子能量的同时往往会带来电子束总电荷量的减少。特别是当电子能量达到数 GeV 时, 其电荷量通常仅有几到几十 pC^[18]。相比之下, 电子诱导光核嬗变方案需要更加注重电子束的总体电荷量。特别是当电子束能量达到数十 MeV 以后, 该方案需要尽可能地提高电子总体电荷量, 并且可以放宽对电子束的单能性要求。为了满足电子诱导光核嬗变方案所需的电子参数要求, 需要研究比大部分 LWFA 方案更高强度的激光以及更高密度的气体条件下的电子加速。同时, 通过调控气体密度和激光偏振等手段, 也有助于在加速的电子束能量以及总电荷量之间寻找平衡点, 最终实现嬗变产额的提升。

2.1 气体密度的影响

我们通过全电磁的相对论二维粒子模拟程序 OPIC 开展高强度短脉冲激光与高密度气体作用的电子加速研究。在模拟中, 入射激光为 P 极化偏振, 波长 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 。激光强度的时空包络可表示为 $a(y, t) = a_0 \exp(-y^2/w^2) \sin^2(\pi t/\tau_L) (0 \leq t \leq \tau_L)$ 。其中, $a_0 = 10$, 为无量纲矢势, 对应的激光峰值强度为 $I_0 = 2.14 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 。激光焦斑半径为 $w = 3 \mu\text{m}$, 激光脉宽 $\tau_L = 54 \text{ fs}$ (对应的半高全宽为 $\tau_L/2 = 27 \text{ fs}$)。假设气体完全离化形成等离子体, 由 H^+ 和 e^- 组成。气体密度(即电子密度)在前 $30 \mu\text{m}$ 区域内为线性上升, 在 $30 \mu\text{m}$ 处达到最大值后维持不变。模拟区域大小设为 $80 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, 网格大小为 $dx = dy = 0.02 \mu\text{m}$ 。每个网格内的宏电子和宏氢离子的数量均为 4 个。为了高效模拟长距离的电子加速, OPIC 程序采用了移动窗口技术。模拟窗口在 $t = 80T_0$ 时以光速向前移动。其中: $T_0 = \lambda/c \approx 2.7 \text{ fs}$, 为激光周期, c 为真空中的光速。

首先研究不同气体密度对电子加速的影响。考虑气体密度 n_e 的最大值在 $0.01n_c$ 到 $0.8n_c$ 之间进行变化, 其中, $n_c = 1.75 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 为激光波长对应的临界密度。发现不同的气体密度会带来显著不同的电子加速图像。图 3 给出两个典型密度 ($n_e = 0.03n_c$ 和 $n_e = 0.2n_c$) 下激光作用后的电子密度空间分布。可以看到, 当强激光在较低密度 ($n_e = 0.03n_c$) 等离子体中传输时, 背景电子被激光的有质动力排开, 形成尾波场空泡。在空泡内, 大量的电子被注入, 主要通过 LWFA 机制获得能量。当气体电子密度上升到 $n_e = 0.2n_c$ 后, 强激光难以将背景电子完全排空, 更多的是形成类似于等离子体通道的结构。由于强非线性相互作用, 激光前沿开始出现分叉成丝的现象。在等离子体

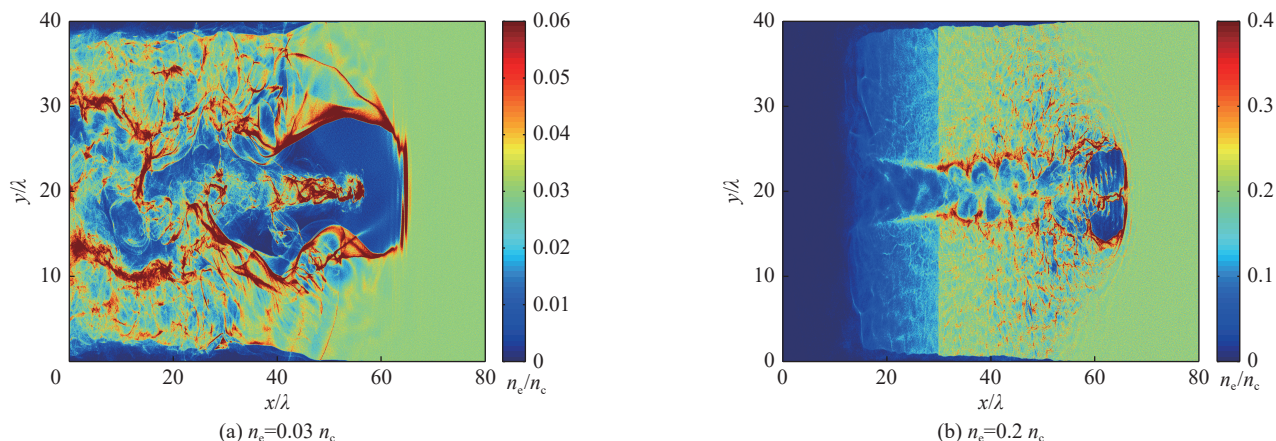


Fig. 3 Electron acceleration images of linearly polarized laser acting with gas of different densities

图3 线偏振激光与不同密度气体作用的电子加速图像

通道内,大量的电子注入后直接与激光场相互作用,主要通过激光直接加速(DLA)机制以获得能量。

气体密度的变化会直接影响电子的加速行为,因而对于加速电子的能量和总电荷量也产生直接影响。在不同气体密度条件下进行研究,可以得到不同的加速电子能谱及效率能区的总能量。如图4所示,高强度激光与高气体密度作用产生的电子束能谱一般不具备单能性。相反,加速电子在低能区呈类麦克斯韦分布,而在数十 MeV 到数百 MeV 的高能区,能谱变得平坦。这样的能谱特性有利于让高能区的电子总能量更加充足,从而满足光核嬗变的需求。相比于固体靶,能够增加高能电子的能量转换效率,电子截止能量更高,落在高能区的电子数量也更多。

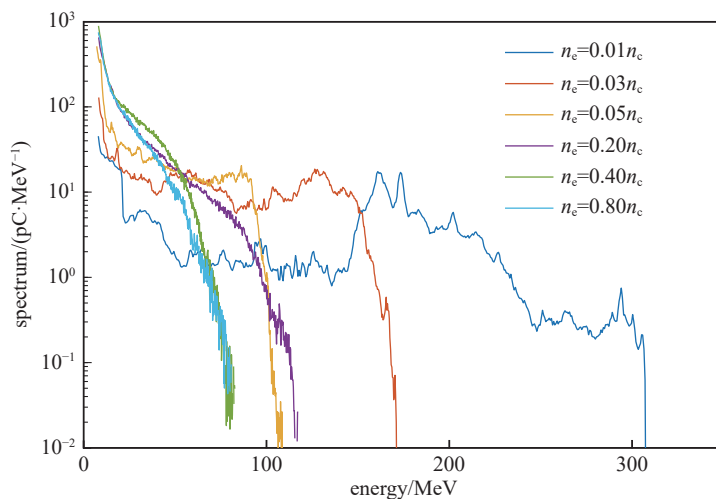


Fig. 4 Electron energy spectrum generated by the action of linearly polarized laser with gas of different densities

图4 线偏振激光与不同密度气体作用产生的电子能谱

还需注意的是,嬗变产额取决于落在嬗变效率能区的电子能量与总电荷量的耦合,即总能量。为实现嬗变产额的最大化,需要综合考虑不同气体密度参数下的计算结果,利用蒙特卡罗方法来具体评估各种条件的优劣性。

2.2 激光偏振的影响

前面的粒子模拟主要考虑了线偏振激光。事实上,相较于线偏振激光,圆偏振激光可以带来更有效的电子加速。这是因为,电子在圆偏振激光场中的旋转运动可以产生很强的轴向准静态自生磁场。此前的研究已表明^[19-22],在LWFA中,当存在轴向准静态磁场时,电子可以更容易注入到尾场空泡中并约束在轴线附近进行加速,从而获得更高的电子能量和总电荷量。在直接激光加速中,轴向磁场的存在也有助于实现电子在强激光和强磁场中的共振加速机制^[23]。因此,圆偏振激光有望实现更高效的电子加速,从而更有利于LWFA电子诱导的光核嬗变方案。

为了验证圆偏振激光可以实现更有效的电子加速,我们同样开展一系列圆偏振激光驱动的电子加速模拟。圆偏振激光的无量纲矢势 $a_0 = 10/\sqrt{2}$,对应的激光功率密度与线偏振情况相同,其他参数保持不变。图5给出不同偏振激光与 $n_e = 0.03n_c$ 气体作用产生的准静态轴向磁场 $\langle B_x \rangle$ 的空间分布。 $\langle B_x \rangle$ 为轴向磁场在一个激光周期内的平均

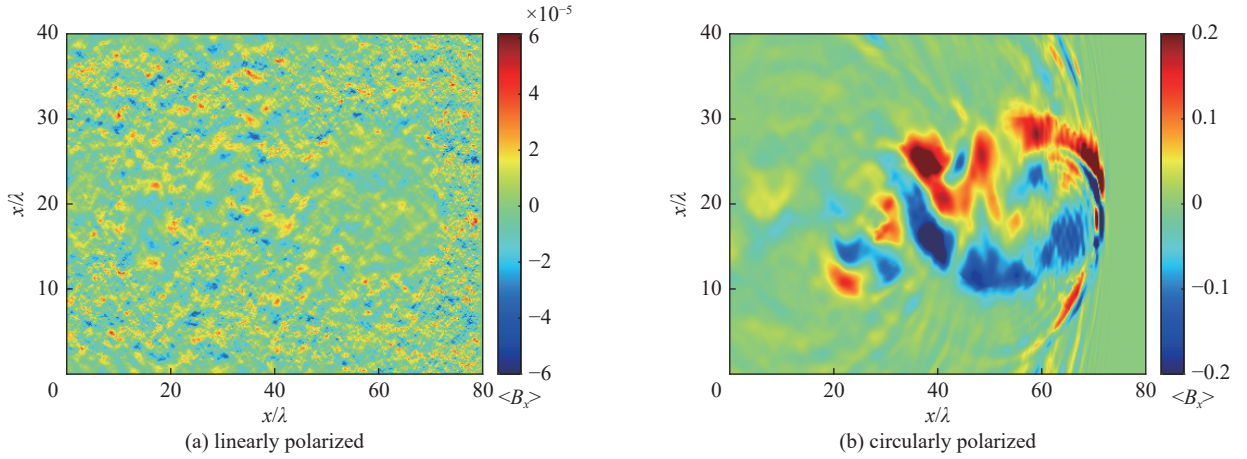


Fig. 5 Quasistatic axial magnetic field generated by the interaction of different polarization laser light and gas

图 5 不同偏振激光与气体作用产生的准静态轴向磁场

值, 即 $\langle B_x \rangle = \int_{t-T_0/2}^{t+T_0/2} B_x(t) dt$ 。 $\langle B_x \rangle$ 的归一化单位为 $m_e \omega_0 / e$ 。其中, m_e 为电子质量, ω_0 为激光频率; e 为电子电荷量。可以清楚地看到, 准静态的轴向磁场仅可以在圆偏振激光情况下产生。图 6 给出圆偏振激光与不同密度气体作用的加速电子能谱分布。通过与图 4 的线偏振激光驱动的电子能谱进行对比可以发现, 圆偏振激光的电子加速确实更加有效。在相同的气体密度条件下, 无论是加速电子的截止能量还是总电荷量, 圆偏振激光总是要高于线偏振激光的情况。并且, 圆偏振激光加速电子的高效性在模拟测试中的所有气体密度条件下也都是成立的。特别是在高密度气体区域 ($n_e > 0.2n_c$), 圆偏振激光产生的大于 8 MeV 的电子总电荷量可以达到接近线偏振激光情况下的 2 倍。因此, 可以预期圆偏振激光驱动的电子加速将更加有利于光核嬗变产额的提升。

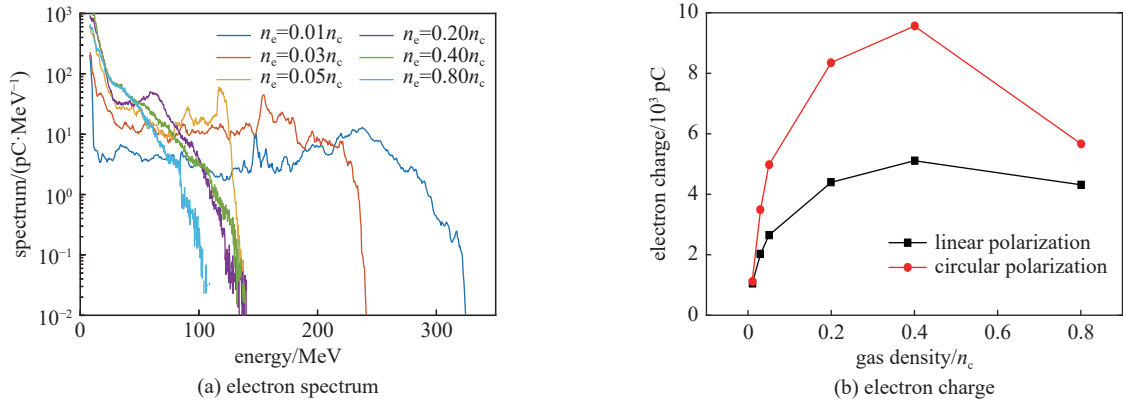


Fig. 6 Electron energy spectrum and total charge generated by the action of circularly polarized laser with different densities

图 6 圆偏振激光与不同密度气体作用产生的电子能谱和总电荷量

3 光核嬗变产额的评估

为了更加准确评估不同气体和激光参数条件下的光核嬗变产额, 将粒子模拟得到的电子能谱输入到 Geant4 程序中, 得到的结果如图 7(a) 所示。一方面, 可以看到圆偏振激光的嬗变产额显著高于线偏振激光, 在大部份情况下, 圆偏振激光的嬗变产额可以达到线偏振激光的 2 倍左右, 这与图 6(b) 中所展示的趋势是一致的, 说明圆偏振激光的嬗变产额提升主要来自于其加速电子电量的增长。另一方面, 无论是线偏振或者圆偏振激光, 嬗变产额随气体密度变化的趋势几乎都是相同的。随着气体密度的增加, 嬗变产额都是先增加再减少, 并且在 $n_e = 0.03n_c$ 条件下嬗变产额达到最高, 为 $9 \times 10^6/\text{shot}$ 。嬗变产额在 $n_e = 0.03n_c$ 条件达到最大值, 其原因可解释如下: (1) 当 $n_e = 0.03n_c$ 时, 效率能区内的电子总能量最高, 如图 7(b) 所示; (2) 当 $n_e < 0.03n_c$ (如 $n_e = 0.01n_c$) 时, 虽然电子截止能量较高, 但是电子能量大于 120 MeV 的电子嬗变效率较低, 而且该密度条件下, 效率能区内的电子总能量 (见图 7(b)) 比其他密度条件的电子总能量更低, 从而造成嬗变产额大幅降低; (3) 当 $n_e > 0.03n_c$ 时, 虽然电子的总电荷量会有显著提升, 但是由于高能电子的加速机制由 LWFA 主导转变为 DLA 主导。相应的, 电子能谱从高能区平台分布转变

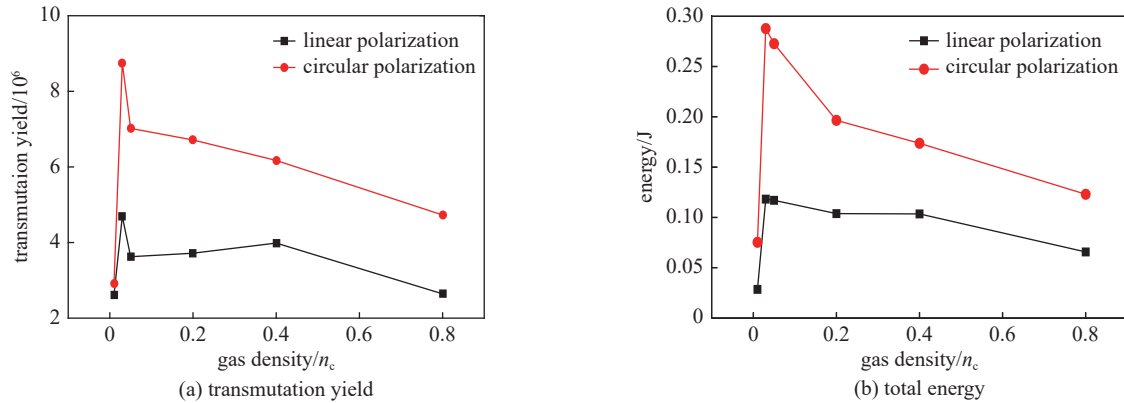


Fig. 7 Dependence of transmutation yield and total energy with gas density at different laser polarization

图 7 不同激光偏振下的嬗变产额和总能量与气体密度的依赖关系

为类指数分布,这也导致了效率能区内的电子总能量显著减少,从而降低了嬗变产额。所以,嬗变产额和效率能区内电子总能量可以在图 7(a)和图 7(b)的一致性中体现。值得注意的是, $n_e = 0.03n_c$ 与 $n_e = 0.05n_c$ 时效率能区内的电子总能量几乎相等,但前者比后者产额高约 25%。这主要是因为 $n_e = 0.03n_c$ 时产生了大量能量高于 120 MeV 的电子,这部分电子虽然不在效率能区内,但是对嬗变产额仍有贡献。这一现象验证了效率能区内的电子总能量是决定嬗变产额的主要参数,而效率能区外的电子总能量对嬗变产额的影响相对较小。

4 结论

本文提出了一种基于激光尾波场加速电子诱导光核嬗变的新方案。通过结合蒙特卡罗和粒子模拟方法对该方案开展了数值模拟研究。首先,通过蒙特卡罗方法研究了单能电子诱导的光核嬗变过程。研究发现¹³⁵Cs 的嬗变效率在 40 MeV 附近存在峰值,其半高处能量为 20~120 MeV,这也意味着实现高嬗变产额需要平衡激光尾波场加速的电子能量与效率能区内的电子电量关系。其次,通过粒子模拟研究了不同偏振激光与不同气体密度作用下的电子加速过程。研究发现,由于轴向准静态自生磁场的影响,可以实现高效注入并提升电子总电荷量,圆偏振激光在模拟考虑的所有气体密度条件下可以获得比线偏振激光更加有效的电子加速(即更高的电子截止能量和总电荷量)。因此,圆偏振激光的嬗变产额几乎可以达到线偏振激光的 2 倍。研究还发现,无论是线偏振或者圆偏振激光,嬗变产额在 $n_e = 0.03n_c$ 气体密度条件下可以达到最大化。基于激光尾波场加速电子可以实现产额达到每发 9×10^6 的光核嬗变,有望为在实验室内基于台面型激光开展光核嬗变研究提供新的途径,从而推进核素嬗变在医学和核废料管理方面的潜在应用。

致谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心周维民、张智猛、齐伟老师给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Kailas S, Hemalatha M, Saxena A. Nuclear transmutation strategies for management of long-lived fission products[J]. *Pramana*, 2015, 85(3): 517-523.
- [2] Yang W S, Kim Y, Hill R N, et al. Long-lived fission product transmutation studies[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2004, 146(3): 291-318.
- [3] Nakamura S, Furutaka K, Wada H, et al. Measurement of the thermal neutron capture cross section and the resonance integral of the ⁹⁰Sr(*n*, γ)⁹¹Sr reaction[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2001, 38(12): 1029-1034.
- [4] Sadighi S K, Sadighi-Bonabi R. The evaluation of transmutation of hazardous nuclear waste of ⁹⁰Sr, into valuable nuclear medicine of ⁸⁹Sr by ultratense lasers[J]. *Laser and Particle Beams*, 2010, 28(2): 269-276.
- [5] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. *Nature*, 1960, 187(4736): 493-494.
- [6] Mourou G, Umstadter D. Development and applications of compact high-intensity lasers[J]. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, 1992, 4(7): 2315-2325.
- [7] Amiranoff F, Baton S, Bernard D, et al. Observation of laser wakefield acceleration of electrons[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(5): 995-998.
- [8] Pukhov A, Meyer-Ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(4/5): 355-361.
- [9] Shkolnikov P L, Kaplan A E, Pukhov A, et al. Positron and gamma-photon production and nuclear reactions in cascade processes initiated by a sub-terawatt femtosecond laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(24): 3471-3473.
- [10] Magill J, Schwoerer H, Ewald F, et al. Laser transmutation of iodine-129[J]. *Applied Physics B*, 2003, 77(4): 387-390.
- [11] Ledingham K W D, Magill J, McKenna P, et al. Laser-driven photo-transmutation of ¹²⁹I—a long-lived nuclear waste product[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(18): L79-L82.
- [12] Tajima T, Dawson J M. An electron accelerator using a laser[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1979, 26(3): 4188-4189.

- [13] Malka V, Fritzier S, Lefebvre E, et al. Electron acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse[J]. *Science*, 2002, 298(5598): 1596-1600.
- [14] Geddes C G R, Toth C, Van Tilborg J, et al. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 538-541.
- [15] Faure J, Rechatin C, Norlin A, et al. Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses[J]. *Nature*, 2006, 444(7120): 737-739.
- [16] Lu W, Tzoufras M, Joshi C, et al. Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2007, 10: 061301.
- [17] Wang X L, Xu Z Y, Luo W, et al. Transmutation prospect of long-lived nuclear waste induced by high-charge electron beam from laser plasma accelerator[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 093105.
- [18] Kim H T, Pathak V B, Hojbota C I, et al Multi-GeV laser wakefield electron acceleration with PW lasers[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 5831.
- [19] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. GEANT4—a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3): 250-303.
- [20] Hosokai T, Kinoshita K, Zhidkov A, et al. Effect of external static magnetic field on the emittance and total charge of electron beams generated by laser-wakefield acceleration[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97: 075004.
- [21] Hur M S, Gupta D N, Suk H. Enhanced electron trapping by a static longitudinal magnetic field in laser wakefield acceleration[J]. *Physics Letters A*, 2008, 372(15): 2684-2687.
- [22] Vieira J, Martins S F, Pathak V B, et al. Magnetic control of particle injection in plasma based accelerators[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 225001.
- [23] Liu Hong, He Xiantu, Chen S G. Resonance acceleration of electrons in combined strong magnetic fields and intense laser fields[J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 066409.