

椭圆偏振强激光场中 Mg 原子的非次序双电离

郑晓晓, 白丽华, 冯凤珍

上海大学理学院, 上海 200444

摘要 采用经典系综模型研究了椭圆偏振强激光场中 Mg 原子的非次序双电离。Mg 原子在椭圆偏振强激光场中存在非次序双电离, 且非次序双电离的电离率随着椭圆率的增大而降低, 但降低的幅度不大。通过轨迹回溯分析可以发现, 随着椭圆率增大, 返回重碰撞电子数量的减少使得 Mg 原子非次序双电离的电离率降低。另外, 两电子横向相关动量分布及不同能量的电子数量分布表明, 返回电子的能量随着激光场椭圆率的增大而增大, 使得第 2 个电子在返回电子的少次甚至一次重碰撞下即可电离, 这在一定程度上补偿了降低的电离率, 从而使电离率降低得不明显。

关键词 原子与分子物理学; 非次序双电离; 椭圆偏振激光场; 重碰撞

中图分类号 O562.3; O562.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.080201

Non-Sequential Double Ionization of Magnesium Atom in Elliptically Polarized Strong Laser Field

Zheng Xiaoxiao, Bai Lihua, Feng Fengzhen

College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract The non-sequential double ionization of magnesium atom in elliptically polarized strong laser field is investigated with the classical ensemble method. The non-sequential double ionization occurs in elliptically polarized strong laser field for magnesium atom, and the ionization rate decreases a little with the increase of ellipticity. Back analysis of the non-sequential double ionization trajectories shows that the decrease of the number of returning electrons results in the decrease of ionization rate. In addition, the distributions of the correlated two-electron transverse momentum and counts of electron with different energies demonstrate the kinetic energy of ionized electrons rises with the increase of ellipticity, so the second electron can be ionized easily with the recollision of the returning electron, which can compensate the reduced ionization rate, and thus the ionization rate does not decrease too much.

Key words atomic and molecular physics; non-sequential double ionization; elliptically polarized laser field; recollision

OCIS codes 020.1335; 020.2070; 020.2649

1 引言

近年来,随着激光技术的发展^[1-3],强激光场中原子、分子的双电离现象引起了人们的关注。其中的非次序双电离现象为研究两个电子之间的关联性提供了一条简单直接的有效途径,人们在实验和理论上对非次序双电离现象开展了广泛研究^[4-5]。非次序双电离是阿秒物理科学、分子成像等领域的重要研究内容^[6],目前已成为强激光场中光电离研究的前沿热点之一^[7-9]。不同条件下非次序双电离过程中的电子关联现象、电子关联的宏观操控,以及其在阿秒物理过程中的应用,是双电离研究中的热点^[10-20]。

为解释非次序双电离现象,人们相继提出了很多理论模型,如抖动电离机制、集体隧穿电离机制等。其

收稿日期: 2017-03-03; **收到修改稿日期:** 2017-04-06

作者简介: 郑晓晓(1991—),女,硕士研究生,主要从事非次序双电离方面的研究。E-mail: xxzheng525@163.com

导师简介: 白丽华(1976—),女,博士,副教授,主要从事强激光场与物质的相互作用以及强场光电离方面的研究。

E-mail: lhbai@163.com (通信联系人)

中, Corkum 提出的重碰撞模型^[21]被广泛应用于解释非次序双电离现象, 而且已经有实验^[22]证实重碰撞是非次序双电离产生的原因。在重碰撞模型中, 第 1 个电子隧穿电离后, 在激光场的作用下加速, 当激光场反向时该电子被驱回母核, 并与母核发生非弹性重碰撞, 第 1 个电子将部分能量传递给第 2 个电子, 最终使第 2 个电子被激发或直接电离。

通常情况下, 大多数原子^[23]在椭圆偏振或圆偏振激光场中很难发生非次序双电离, 但 Mg 原子例外^[24-25]。Mg 原子不仅会在线偏振激光场中发生非次序双电离现象, 而且在椭圆偏振或圆偏振激光场中也会发生非次序双电离现象。现在人们对 Mg 原子在椭圆偏振或圆偏振激光场中发生的非次序双电离现象已有了较为清晰的认识, 但是对于其关联的电子动力学过程, 仍然有必要进一步研究。

本课题组采用经典系综模型^[26-29]研究了 Mg 原子在不同椭圆率强激光场中的非次序双电离, 该模型已被广泛应用于强场双电离的研究中^[30-32]。本文计算分析了 Mg 原子的两电子纵向相关动量分布及相应的电离率, 并认为 Mg 原子在椭圆偏振或圆偏振激光场中仍然会发生明显的非次序双电离。在不同椭圆率的强激光场中, 研究了 Mg 原子在非次序双电离过程中重碰撞电子的数量以及两电子能量、位置随时间的变化, 还研究了两电子横向相关动量分布及不同能量的电子数量分布。结果表明, 随着椭圆率增大, Mg 原子在椭圆偏振强激光场中发生非次序双电离的电离率减小, 但减小的幅度并不大。

2 基本原理

在自由场中, Mg 原子的经典哈密顿量可以表示为[除非有特别说明, 本文均采用原子单位制(a.u.)]:

$$H_e(\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i) = \sum_{i=1,2} \left[\frac{\mathbf{p}_i^2}{2} - \frac{2}{\sqrt{r_i^2 + a^2}} \right] + \frac{1}{\sqrt{r_{12}^2 + b^2}}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{r}_i 和 \mathbf{p}_i 分别为第 i ($i=1, 2$) 个电子的位置和动量; r_{12} 为两个电子之间的距离; a 和 b 为软核系数, a 用来调节原子的束缚势, 屏蔽原子核对电子的吸引, 而 b 则用来调节电子间的库伦势。通过调节软核系数来改变软核库伦势^[33], 从而达到调节 Mg 原子基态能量的目的。本文中的 a 和 b 分别设置为 2.4 和 1.0^[34]。

激光场中 Mg 原子的哈密顿量可以表示为:

$$H = H_e + (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{E}(t), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{E}(t) = E_0 f(t) [\cos(\omega t) \mathbf{x} + \epsilon \sin(\omega t) \mathbf{y}]$, 代表激光脉冲的电场; E_0 为电场振幅; ω 为角频率; ϵ 为激光场的椭圆率; $f(t)$ 为脉冲包络函数。选择激光脉冲的周期为 10。激光场中两个电子的运动由含时牛顿运动方程决定, 激光场中第 i 个电子的含时牛顿运动方程表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i} \\ \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i} \end{cases} \quad (3)$$

采用高斯随机数列来得到两个电子的初始位置和动量。在自由场中, 两个电子经过足够长时间的演化之后, 可以达到一个稳定的位置分布和动量分布。在激光场中两个电子的运动由方程(3)决定。当一个电子的能量大于零时, 定义这个电子发生了电离^[35]。也就是说, 在激光脉冲结束的时刻, 当电子的能量 $E_i = \mathbf{p}_i^2/2 - 1/|\mathbf{r}_i| > 0$ ($i=1, 2$) 时, 即认定发生了双电离。

3 计算与分析

3.1 计算结果

根据上述基本原理, 利用与其相对应的计算程序可以得到强激光场中 Mg 原子的电离结果。图 1 给出了 Mg 原子在不同椭圆率的强激光场中发生非次序双电离的两电子的关联动量分布图。在计算中, 激光场的强度取 $9 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 激光波长取 800 nm。图 1 的水平轴代表第 1 个电子纵向动量的分量 p_{x1} , 垂直轴代表第 2 个电子纵向动量的分量 p_{x2} , 把激光场的偏振方向(即纵向)看作 x 轴, 垂直于激光场偏振的方向(即横向)看作 y 轴。由图 1(a)可知, 线偏振激光场中存在较为明显的非次序双电离现象。一般情况下, 对

于大多数原子来说,在椭圆偏振或圆偏振激光场中很难发生较明显的非次序双电离^[23],但 Mg 原子却并非如此,而且计算也证实了这一点。如图 1(b)和图 1(c)所示,在椭圆偏振和圆偏振激光场中,电子关联动量分布图中依然有高亮区域,也就是说,在椭圆偏振和圆偏振激光场中仍然有非次序双电离发生。根据 4 个象限中电子动量分布数目的统计可以知道,在图 1(a)~(c)中发生非次序双电离的电离率分别为 18%、15.69% 和 14.23%。这说明随着激光场椭圆率增大,非次序双电离的电离率逐渐减小,但减小的幅度并不十分明显。为了进一步探索解释这一现象,给出了不同椭圆率下, Mg 原子在不同时刻发生重碰撞的电子数的变化曲线,如图 2 所示。

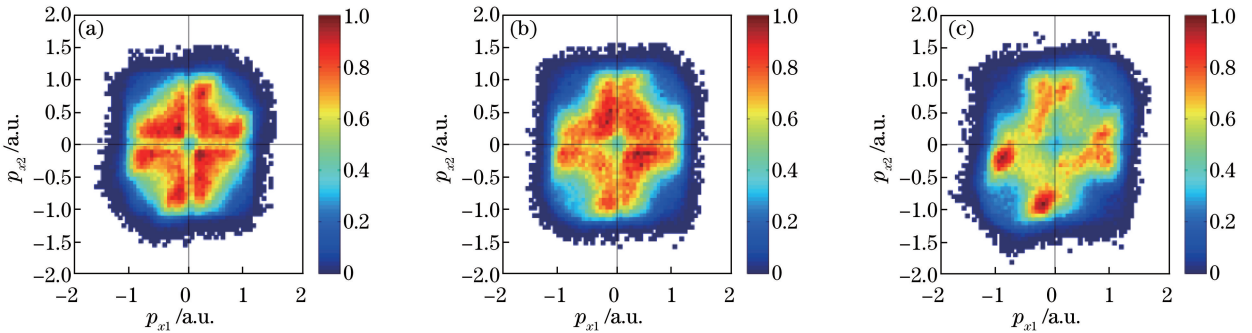


图 1 Mg 原子在不同椭圆率强激光场中发生非次序双电离的两电子的纵向相关动量分布图。

(a) $\epsilon=0$; (b) $\epsilon=0.5$; (c) $\epsilon=1$

Fig. 1 Correlated longitudinal momentum distributions of two electrons generated from non-sequential double ionization of magnesium atom in strong laser field with different ellipticities. (a) $\epsilon=0$; (b) $\epsilon=0.5$; (c) $\epsilon=1$

3.2 分析与讨论

在图 2 的计算中,激光场参数的选取与图 1 相同。由图 2(a)~(c)可以看出,随着激光场的椭圆率增大,曲线上峰的数量减少,且峰值降低,这意味着发生重碰撞的电子数量是减少的。根据重碰撞模型可知,重碰撞是非次序双电离至关重要的一步,重碰撞电子数量的减少使得第 2 个电子被激发或被直接电离的可能性降低,从而导致 Mg 原子在椭圆偏振或圆偏振激光场中发生非次序双电离的概率降低。

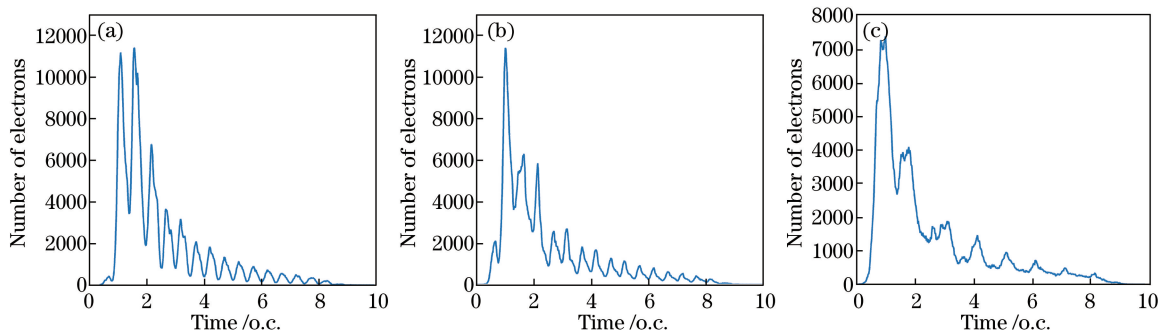


图 2 不同椭圆率下,发生重碰撞的电子数量随时间变化的曲线。(a) $\epsilon=0$; (b) $\epsilon=0.5$; (c) $\epsilon=1$

Fig. 2 Recollision electron number versus time at different ellipticities. (a) $\epsilon=0$, (b) $\epsilon=0.5$; (c) $\epsilon=1$

为了更直观地解释激光场椭圆率对电子重碰撞的影响,计算了两关联电子的能量及位置随时间的演化。在计算中,激光场参数的选取与图 1 相同。在图 3(a)~(c)中,蓝色线代表第 1 个电子的能量随时间的变化,红色线代表第 2 个电子的能量随时间的变化。在图 3(d)~(f)中,蓝色线代表第 1 个电子的位置随时间的变化,红色线代表第 2 个电子的位置随时间的变化。时间以一个光学周期为单位。由图 3(a)、(d)可以看出,在线偏振激光场中,第 1 个电子(蓝色线)在 1 个光学周期附近发生了单电离,之后在激光场的作用下很快返回,直接与母核发生重碰撞,最终发生双电离。当激光场的椭圆率增大至 0.5 时,如图 3(b)所示,第 1 个电子(蓝色线)在 1.24 个光学周期附近发生单电离。之后,经过约 1.5 个光学周期的“旋转”后才与母核发生重碰撞,如图 3(e)所示。当激光场的椭圆率增大至 1 时,如图 3(c)所示,第 1 个电子(蓝色线)在 0.75 个光学周期附近发生单电离,之后需要经过大约 3 个光学周期的“旋转”才与母核发生碰撞,如图 3(f)所示。从

图 3(d)~(f)可以看出,激光场的垂直分量会驱使电子远离母核,椭圆率越大,第 1 个电子“旋转”的时间越长,发生重碰撞的次数越少。根据重碰撞模型可知,重碰撞次数的减少必然会导致非次序双电离减少,这与之前得到的不同椭圆率下 Mg 原子非次序双电离的电离率随椭圆率增大而减小的结果一致。

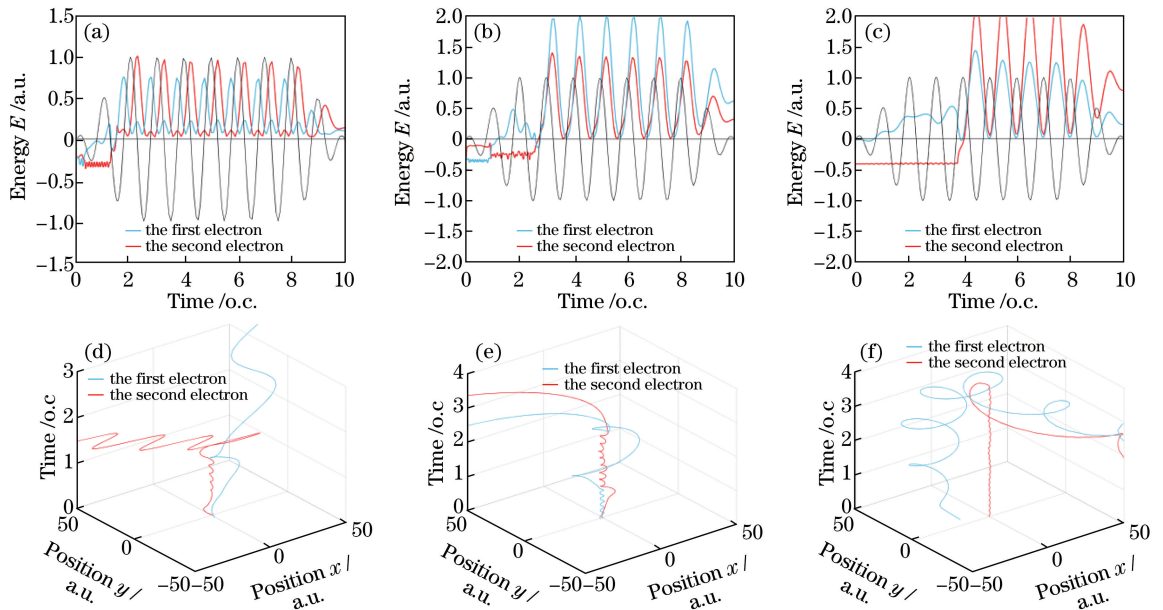


图 3 不同椭圆率下,两关联电子的能量和位置随时间的演化图。(a) $\epsilon=0$, 能量; (b) $\epsilon=0.5$, 能量; (c) $\epsilon=1$, 能量; (d) $\epsilon=0$, 位置; (e) $\epsilon=0.5$, 位置; (f) $\epsilon=1$, 位置

Fig. 3 Variations of energy and position of two electrons with time at different ellipticities. (a) $\epsilon=0$, energy; (b) $\epsilon=0.5$, energy; (c) $\epsilon=1$, energy; (d) $\epsilon=0$, position; (e) $\epsilon=0.5$, position; (f) $\epsilon=1$, position

另一方面,对图 1 中数据进行统计后可知,当激光场的椭圆率从 0 增大至 0.5 和 1 时,发生非次序双电离的电离率从 18% 降低至 15.69% 和 14.23%,但降低的幅度并不是很大。电场对两电子的作用可以表现在它们的出射方向上,电场对电子的作用使得电子倾向于同向出射。从图 4 中可以看出,随着椭圆率增大,两电子的出射方向由反向出射逐渐变为同向出射,也就是说,电场对电子的作用随椭圆率的增大而增大。为了进一步探究其原因,分别计算了椭圆率为 0, 0.5 和 1 时,两电子的横向相关动量分布图,如图 4 所示。图中水平轴代表第 1 个电子横向动量的分量 p_{y1} , 垂直轴代表第 2 个电子横向动量的分量 p_{y2} 。当激光场的椭圆率为 0 时,高亮区域主要分布在第二、第四象限,两电子在横向方向上主要是反向出射,这意味着两电子之间库伦力的作用大于激光场横向电场分量对电子的作用。随着激光场的椭圆率增大至 0.5, 如图 4(b), 第三象限开始出现高亮区域,在横向方向上,同向出射的电子数量开始增多,说明激光场的横向电场分量对电子的作用开始增大。随着激光场的椭圆率进一步增大至 1, 高亮区域主要分布在第三象限,如图 4(c) 所示,两电

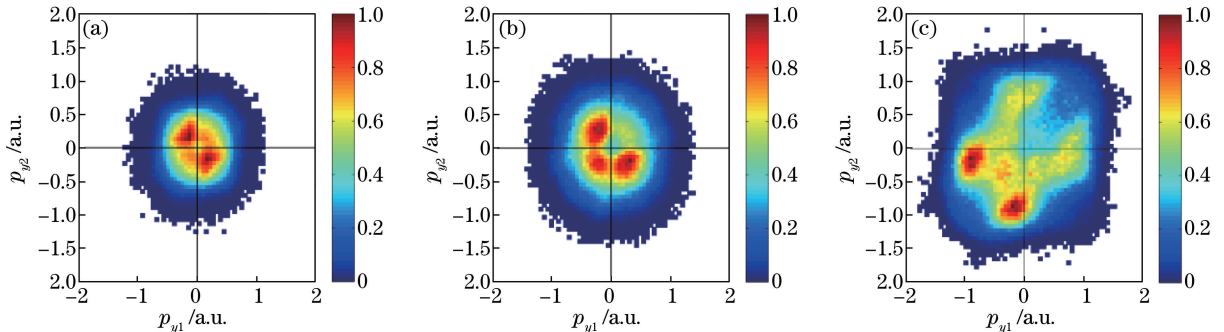


图 4 不同椭圆率下两电子横向相关动量的分布图。(a) $\epsilon=0$; (b) $\epsilon=0.5$; (c) $\epsilon=1$

Fig. 4 Correlated transverse momentum distributions of two electrons at different ellipticities.

(a) $\epsilon=0$; (b) $\epsilon=0.5$; (c) $\epsilon=1$

子在横向方向上的出射转换为同向出射,这说明此时激光场的横向电场分量对电子的作用超过了两电子之间库伦力的作用。两电子横向相关动量分布随激光场椭圆率的变化说明,激光场的椭圆率对电子的横向动量是有影响的,而且随着激光场椭圆率增大,激光场横向电场分量对电子的影响也增大。

为了进一步探究激光场椭圆率对电离电子的影响,计算得到了不同能量的电子数量分布曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出,总体而言,能量较大的电子的数量随着激光场椭圆率的增大而增大。这是因为,激光场的横向电场分量对电子的作用随着激光场椭圆率的增大而增大,再加上沿激光偏振方向的纵向电场分量对电子的作用,激光场对电子的总作用便会增大。Mg 原子的第二电离势能为 0.55 a.u.,根据图 5 可以看出,随着激光场椭圆率增大,返回电子可以在少次甚至一次重碰撞之后便电离第 2 个电子,这在一定程度上补偿了降低的电离率。综合以上因素可知,随着激光场椭圆率增大,Mg 原子发生非次序双电离的电离率降低,但降低的幅度并不是很大。

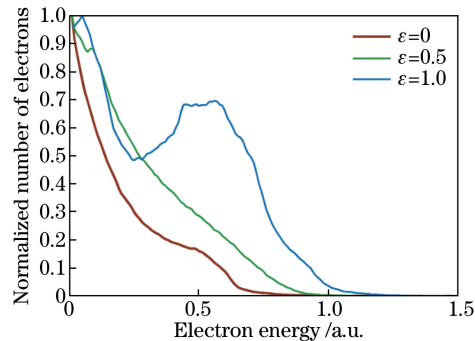


图 5 不同椭圆率下不同能量的电子数量分布

Fig. 5 Number of electrons with different energies at different ellipticities

4 结 论

利用经典系综模型研究了椭圆偏振强激光场中 Mg 原子的非次序双电离。根据不同椭圆率下重碰撞电子数量以及两电子的能量、位置随时间的演化可以知道,重碰撞电子数量的减少使得非次序双电离的电离率随着激光场椭圆率的增大而减小。另一方面,通过对两电子横向相关动量分布及不同能量的电子数量的分析可以发现,电离电子的能量随着椭圆率的增大而增大,因此增大了返回电子电离第 2 个电子的可能性,这在一定程度上补偿了减小的电离率,使电离率降低得不那么明显。

参 考 文 献

- [1] Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0514001.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0514001.
- [2] Xi Kun, Ding Shuanghong, Zhang Jun, *et al.* External resonator PbWO₄ Raman laser excited by 1064 nm nanosecond laser pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0914003.
奚 坤, 丁双红, 张 骏, 等. 1064 nm 纳秒激光脉冲激发的外腔式 PbWO₄ 拉曼激光器[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0914003.
- [3] Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.* 50 W class double-end-pumped Nd:YVO₄ TEM₀₀ mode solid state laser oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902001.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO₄ 基模固体激光振荡器[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902001.
- [4] Walker B, Sheehy B, Dimauro D F, *et al.* Precision measurement of strong field double ionization of helium [J]. Physical Review Letters, 1994, 73(9): 1227-1230.
- [5] Ruiz C, Plaja L, Roso L, *et al.* *Ab initio* calculation of the double ionization of helium in a few-cycle laser pulse beyond the one-dimensional approximation[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(5): 053001.

- [6] Corkum P B, Krausz F. Attosecond science[J]. *Nature Physics*, 2007, 3: 381-387.
- [7] Rudenko A, de Jesus V L B, Ergler T, *et al.* Correlated two-electron momentum spectra for strong-field nonsequential double ionization of He at 800 nm[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(26): 263003.
- [8] Tate J, Auguste T, Muller H G, *et al.* Scaling of wave-packet dynamics in an intense midinfrared field[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(1): 013901.
- [9] Becker W, Liu X, Ho P J, *et al.* Theories of photoelectron correlation in laser-driven multiple atomic ionization[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(3): 1011-1043.
- [10] Bergues B, Kubel M, Johnson G N, *et al.* Attosecond tracing of correlated electron-emission in non-sequential double ionization[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 813.
- [11] Liu Y Q, Tschuch S, Rudenko A, *et al.* Strong-field double ionization of Ar below the recollision threshold[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(5): 053001.
- [12] Kraus P M, Mignolet B, Baykusheva D, *et al.* Measurement and laser control of attosecond charge migration in ionized iodoacetylene[J]. *Science*, 2015, 350(6262): 790-793.
- [13] Hu S X. Boosting photoabsorption by attosecond control of electron correlation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(12): 123003.
- [14] Hogle C W, Tong X M, Martin L, *et al.* Attosecond coherent control of single and double photoionization in argon[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(17): 173004.
- [15] Ye D, Li M, Fu L B, *et al.* Scaling laws of the two-electron sum-energy spectrum in strong-field double ionization[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(12): 123001.
- [16] Pfeiffer A N, Cirelli C, Smolarski M, *et al.* Timing the release in sequential double ionization[J]. *Nature Physics*, 2011, 7: 428-433.
- [17] Zhou Y M, Huang C, Liao Q, *et al.* Classical simulations including electron correlations for sequential double ionization[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(5): 053004.
- [18] Gong X C, Song Q Y, Ji Q Y, *et al.* Channel-resolved above-threshold double ionization of acetylene[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(16): 163001.
- [19] Zhang Z L, Zhang J T, Bai L H, *et al.* Transition of correlated-electron emission in nonsequential double ionization of Ar atoms[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7044-7052.
- [20] Dong S S, Zhang Z L, Bai L H, *et al.* Scaling law of nonsequential double ionization[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(3): 033409.
- [21] Corkum P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(13): 1994-1997.
- [22] Sun R L, Colin E, Ajitanand N N, *et al.* Balance of mass, momentum, and energy in splintering central collisions for ^{40}Ar up to 115 meV/nucleon[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(1): 43-46.
- [23] Fittinghoff D N, Bolton P R, Chang B, *et al.* Polarization dependence of tunneling ionization of helium and neon by 120-fs pulses at 614 nm[J]. *Physical Review A*, 1994, 49(3): 2174-2177.
- [24] Mauger F, Chandre C, Uzer T. Recollisions and correlated double ionization with circularly polarized light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(8): 083002.
- [25] Gillen G D, Walker M A, van Woerkom L D. Enhanced double ionization with circularly polarized light[J]. *Physical Review A*, 2001, 64(4): 043413.
- [26] Ho P J, Panfili R, Haan S L, *et al.* Nonsequential double ionization as a completely classical photoelectric effect[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(9): 093002.
- [27] Zhou Y M, Liao Q, Zhang Q B, *et al.* Controlling nonsequential double ionization via two-color few-cycle pulses[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 632-638.
- [28] Haan S L, Breen L, Karim A, *et al.* Variable time lag and backward ejection in full-dimensional analysis of strong-field double ionization[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(10): 103008.
- [29] Panfili R, Eberly J H. Comparing classical and quantum dynamics of strong-field double ionization[J]. *Optics Express*, 2001, 8(7): 431-435.
- [30] Wang X, Eberly J H. Elliptical polarization and probability of double ionization[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105

(8): 083001.

- [31] Zhou Y M, Huang C, Lu P X. Coulomb-tail effect of electron-electron interaction on nonsequential double ionization [J]. *Physical Review A*, 2011, 84(2): 023405.
- [32] Haan S L, Smith Z S, Shomsky K N, *et al.* Anticorrelated electrons from weak recollisions in nonsequential double ionization [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2008, 41(21): 211002.
- [33] Su Q, Eberly J H. Model atom for multiphoton physics [J]. *Physical Review A*, 1991, 44(9): 5997-6008.
- [34] Guo J, Liu X S, Chu S I. Exploration of nonsequential-double-ionization dynamics of Mg atoms in linearly and circularly polarized laser fields with different potentials [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(2): 023405.
- [35] Zhang Z L, Bai L H, Zhang J T. Double ionization of Ar below the recollision threshold intensity [J]. *Physical Review A*, 2014, 90(2): 023410.