

# 强激光场下原子超快动力学过程中的能量交换研究\*

李盈侯<sup>1)†</sup> 秦玲玲<sup>1)†</sup> 陈红梅<sup>1)</sup> 李怡涵<sup>1)</sup> 何锦锦<sup>1)</sup> 史璐珂<sup>1)</sup> 翟春洋<sup>1)</sup>

汤清彬<sup>1)</sup> 刘爱华<sup>2)†</sup> 余本海<sup>1)‡</sup>

<sup>1)</sup>(信阳师范学院物理电子工程学院, 信阳 464000)

<sup>2)</sup>(吉林大学原子与分子物理研究所, 长春 130012)

利用三维经典系综模型, 研究了整个系综两电子(Ar 原子为例)从激光场吸收的能量对激光参数(波长、激光强度和椭圆率)的依赖关系. 结果显示, 当激光强度固定, 波长增加时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量整体呈上升趋势, 但不同强度下趋势略有差异. 在较低强度时整个系综两电子从激光场吸收的能量对波长的依赖关系呈现持续平稳增加的趋势, 在较高强度时呈现先缓慢减小再快速增大的趋势. 对强度的依赖关系在不同波长时呈现两个有趣的交叉点. 对椭圆率的依赖关系在较低强度时呈现先逐渐减小再缓慢增大的趋势; 在中等强度时呈现一个“阶梯型”即先缓慢增大再逐渐减小最后缓慢增大; 在更高强度时呈现先逐渐增大再逐渐减小的趋势. 为了解释整个系综两电子从激光场吸收的能量对激光参数的依赖关系, 我们把整个系综的动力学过程主要分为双电离、单电离、受挫单电离和受挫双电离四种通道. 然后分析各个通道的特征及其如何主导整个系综两电子从激光场吸收的能量的趋势. 分析结果表明, 整个系综两电子从激光场吸收的能量对波长、激光强度和椭圆率的依赖均是由于某种通道主导整个系综两电子从激光场吸收的能量的结果.

**关键词:** 原子超快动力学, 单电离, 双电离, 受挫单电离, 受挫双电离

**PACS:** 32.80.Rm, 31.90.+s, 32.80.Fb

\*国家自然科学基金(批准号: 12074329, 12004323, 12104389, 1174131, 91850114)、河南省高等学校重点科研项目(批准号: 20A140025)、信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目资助的课题.

<sup>†</sup>两作者对本工作具有同等贡献

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: aihualiu@jlu.edu.cn

<sup>‡</sup>通讯作者. E-mail: hnyubenhai@163.com

# 1 引言

原子、分子与超强激光场相互作用可以产生许多新奇的非线性现象,例如高阶阈上电离(High-order above threshold ionization, HATI)<sup>[1, 2]</sup>、高次谐波的产生(High harmonic generation, HHG)<sup>[3, 4, 5, 6]</sup>和非次序双电离(Nonsequential double ionization, NSDI)<sup>[7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]</sup>. 这些现象可以用三步再碰撞模型很好的解释<sup>[19, 20]</sup>. 根据这个模型,多电子体系的价电子的一个电子首先在激光场峰值附近电离,形成第一个光电子. 然后此光电子在激光场电场的作用下加速. 当交变的激光场~~线性~~方向改变时,已经发射的第一个的光电子以一定概率返回母离子核并发生碰撞. 碰撞过程中,电子或者与母离子核重新结合释放出高能光子,导致 HHG;又或者与母离子核发生弹性或非弹性碰撞,导致 HATI 或 NSDI 等各种复杂的非线性现象. 这些非线性的物理现象包含了丰富的原子、分子超快动力学信息.

过去人们已经研究了许多由于原子、分子与超强激光场相互作用而产生的电离现象. 强场双电离是各种强激光诱导现象的基本过程之一,人们已经对强场双电离进行了大量的理论和实验研究. 强场双电离根据两个光电子的形成时间顺序,可以分为非次序双电离(NSDI)和次序双电离(SDI). 对于强场双电离,当激光强度较低时,由于光强不足以直接克服原子的第二电离能,此时双电离主要通过非次序双电离(NSDI)发生,这一过程的机制可以用三步再碰撞模型解释;当激光强度较高时,双电离主要通过次序双电离(Sequential double ionization, SDI)<sup>[21, 22, 23]</sup>发生,这一过程可以用隧穿理论解释<sup>[24, 25]</sup>. 在 NSDI 过程中,第二个电子受到发射电子的再碰撞而电离,两个电子由于再碰撞表现出高度关联的行为;而在 SDI 过程中,两个电子一个接一个电离,通常假设两个电子之间不存在关联性. 然而最近的实验对这个假设提出了质疑,实验结果表明,SDI 的两个电子之间存在明显的角关联,这表明 SDI 的连续电离过程并非独立的<sup>[26]</sup>. 另外,理论研究上也预测了在短圆偏振激光脉冲驱动下依次电离的电子在其发射方向上是关联的,通过改变激光强度,可以连续控制两次发射的夹角<sup>[27]</sup>. 人们还观察到一小部分中性原子以高里德堡态的形式存在<sup>[28, 29, 30]</sup>, Nubbemeyer 等人证明了激发态中性原子是通过受挫隧穿电离(Frustrated tunneling ionization, FTI)过程形成的,在 FTI 过程中,隧穿电子由于没有从激光场获得足够的漂移能量最终被母离子核捕获<sup>[28]</sup>.

对于双电子系统, 两个电子在激光脉冲驱动下发射, 但其中一个电子最终被重新捕获的过程称为受挫双电离(Frustrated double ionization, FDI)<sup>[31, 32, 33, 34, 35]</sup>. 实验上利用三体符合检测观察到了原子 FDI<sup>[34]</sup>, 理论上利用经典系综模型解释了原子 FDI 发生的物理条件<sup>[35]</sup>.

尽管激光与原子相互作用过程中存在单电离(Single ionization, SI), 双电离(Double ionization, DI), 受挫单电离(Frustrated single ionization, FSI), FDI 等众多不同的物理过程, 但其本质是能量在激光场与原子发生传输与交换. 本文利用三维经典系综模型, 对两电子系综(Ar 原子为例)从激光场吸收能量现象进行了深入研究, 讨论了整个系综两电子从激光场吸收的能量对激光参数(波长、激光强度和椭偏率)的依赖关系. 计算结果显示, 当激光强度固定, 波长增加时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量整体呈上升趋势, 但不同强度下趋势略有差异. 在较低强度( $0.1 \text{ PW/cm}^2$ )时整个系综两电子从激光场吸收的能量对波长的依赖关系呈现持续平稳增加的趋势, 在较高强度( $0.5 \text{ PW/cm}^2$ )时呈现先缓慢减小再快速增大的趋势; 对强度的依赖关系在不同波长  $400 \text{ nm}$  和  $1600 \text{ nm}$  时呈现两个有趣的交叉点; 对椭偏率的依赖关系在较低强度( $0.5 \text{ PW/cm}^2$ )时呈现先逐渐减小再缓慢增大的趋势; 在中等强度( $3 \text{ PW/cm}^2$ )时呈现一个“阶梯型”即先缓慢增大再逐渐减小最后缓慢增大; 在更高强度( $5 \text{ PW/cm}^2$ )时呈现先逐渐增大再逐渐减小的趋势. 为了解释整个系综两电子从激光场吸收的能量对激光参数(波长、激光强度和椭偏率)的依赖关系, 我们把整个系综的动力学过程主要分为 DI、SI、FDI 和 FSI 四种通道. 然后分析各个通道的特征及其如何主导整个系综两电子从激光场吸收的能量的趋势. 分析结果表明, 整个系综两电子从激光场吸收的能量对激光参数(波长、激光强度和椭偏率)的依赖均是由于某种通道主导整个系综两电子从激光场吸收的能量的结果.

## 2 理论方法

原子、分子在激光场中的运动是一个量子过程, 精确描述该过程需要数值求解全维的含时薛定谔方程. 然而, 求解含时薛定谔方程的计算量很大<sup>[36, 37, 38]</sup>, 半经典模型<sup>[39]</sup>和经典模型<sup>[40, 41, 42, 43, 44, 45]</sup>由于计算量小、电离过程描述清晰, 在过去的几十年里, 已经得到了广泛的应用. 因此, 本文采用 Eberly 及其合作者提出的三维经典系综模型<sup>[40, 41]</sup>进行研究.

在这个经典的系综模型中, 两个电子的演化遵循牛顿运动方程(除非另有说明, 否则使用原子单位(a.u.),  $\hbar=m=e=1$ ).

$$d^2\vec{r}_i/dt^2 = -\nabla[V_{ne}(\vec{r}_i)+V_{ee}(\vec{r}_1,\vec{r}_2)]-\vec{E}(t) \quad (1)$$

其中下标  $i$  为电子标号,  $\vec{r}_i$  为第  $i$  个电子的位置,  $\vec{E}(t)$  为电场. 本文的研究分为三个部分进行讨论. 在前两部分中, 采用沿  $z$  方向的线偏振电场  $\vec{E}(t)=f(t)E_0\sin(\omega t)\hat{z}$ , 最后一部分, 采用沿  $x$ - $y$  平面的椭圆偏振电场  $\vec{E}(t)=f(t)E_0[1/\sqrt{\varepsilon^2+1}\sin(\omega t)\hat{x}+\varepsilon/\sqrt{\varepsilon^2+1}\cos(\omega t)\hat{y}]$ , 其中  $\varepsilon$  激光场的椭圆率,  $f(t)$  是具有两个周期开启、六个周期平台期、两个周期关闭的梯形脉冲包络.

核-电子  $V_{ne}(\vec{r}_i)$  和电子-电子  $V_{ee}(\vec{r}_1,\vec{r}_2)$  的库仑势采用软核势:

$$V_{ne}(\vec{r}_i) = -\frac{2}{\sqrt{|\vec{r}_i|^2+a^2}} \quad (2)$$

$$V_{ee}(\vec{r}_1,\vec{r}_2) = \frac{1}{\sqrt{|\vec{r}_1-\vec{r}_2|^2+b^2}}$$

其中为了防止数值模拟中非物理的自电离和数值奇点, 我们把软化参数  $a$  和屏蔽参数  $b$  分别设为 1.5 a.u. 和 0.1 a.u..

为了得到系综的初始条件, 首先在原子核附近放置两个电子, 两个电子的初始位置和动量是随机分配的, 使它们满足能量约束, 即使系统的基态总能量  $E_{tot}$  为目标原子的第一电离能  $I_{p1}$  和第二电离能  $I_{p2}$  的负和. 在本文中, 我们使用 Ar 原子作为目标原子, 其基态能量  $E_{tot}$  为 -1.59 a.u..

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^2 \left( \frac{p_i^2}{2} - \frac{2}{\sqrt{|\vec{r}_i|^2+a^2}} \right) + \frac{1}{\sqrt{|\vec{r}_1-\vec{r}_2|^2+b^2}} = -(I_{p1}+I_{p2}) \quad (3)$$

激光场未开启时, 两个电子仅在库伦场作用下自由运动. 整个系统被允许无场条件下演化足够长的时间(200 a.u.), 以获得在相空间稳定的位置和动量分布. 一旦得到稳定的初始系综分布, 激光场开启. 在有场情况下, 两个电子在激光场和库仑力的共同作用下运动, 其运动仍然遵循牛顿运动方程.

## 3 结果和讨论

### 3.1 激光场波长依赖

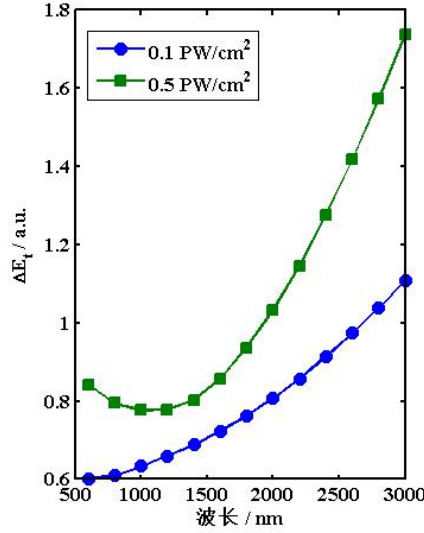


图1 整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 随波长的变化曲线, 对应的激光强度分别为 $0.1 \text{ PW/cm}^2$  (深蓝色实心圆点) 和  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  (绿色实心方块).

Fig. 1. The energy absorbed by two electrons from the laser field in the whole ensemble  $\Delta E_t$  as a function of wavelength, the corresponding laser intensities are  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  (dark blue solid dot) and  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  (green solid square) respectively.

图1给出了整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 随波长的变化曲线, 其中深蓝色实心圆点与绿色实心方块曲线分别对应的激光强度为 $0.1 \text{ PW/cm}^2$ 和 $0.5 \text{ PW/cm}^2$ . 我们定义整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 为激光场脉冲结束时两电子系统末态平均总能量减去 Ar 原子的初始即基态总能量( $-1.59 \text{ a.u.}$ ).  $\Delta E_t$ 计算公式如下:

$$\Delta E_t = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{e_1}^i + E_{e_2}^i)}{n} - [-(I_{p1} + I_{p2})] \quad (4)$$

其中 $(E_{e_1}^i + E_{e_2}^i)$ 表示第*i*个电子对的末态总能量,*n*表示总系综个数.

由图1可以看出, 当激光强度为 $0.1 \text{ PW/cm}^2$ 时, 随着波长的增加, 整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 持续平稳增加; 当激光强度为 $0.5 \text{ PW/cm}^2$ 时, 随着波长的增加, 整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 先缓慢减小再快速增加. 为了解释不同强度下整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 对波长的依赖性, 整个系综主要被分成四种通道: **DI**、**SI**、**FDI**和**FSI**, 然后分析各个通道的特征及其如何主导整个系综两电子从激光场吸收的能量 $\Delta E_t$ 的趋势.

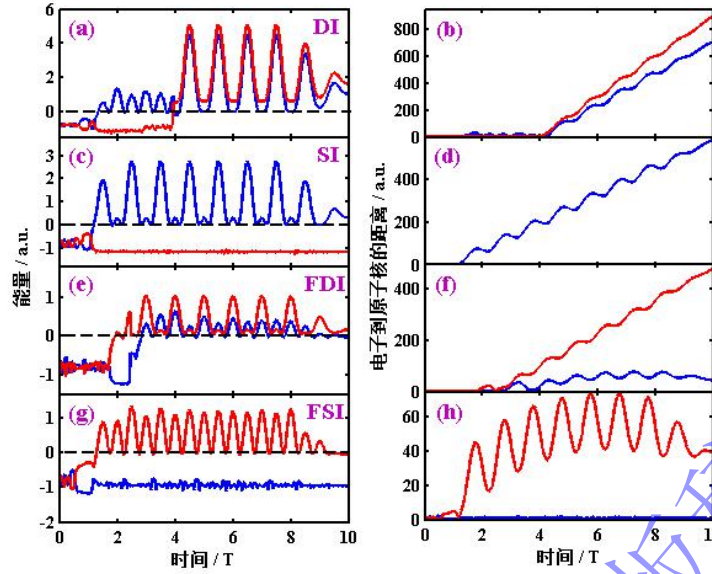


图2 双电子系统与激光相互作用时四种典型的物理过程: DI, SI, FDI 和 FSI. 左列: 两个电子的能量随时间的演化, 右列: 两个电子到原子核的距离随时间的演化.

Fig. 2. There are four typical physical processes in the interaction between a two-electron system and a laser: DI, SI, FDI and FSI. Left column: the energy of the two electrons as a function of time; right column: the distance between the two electrons and the nucleus as a function of time.

图2给出了双电子系统与激光相互作用时四种典型的物理过程的能量与距离的时间轨迹, 左列是两个电子的能量随时间的演化, 右列是对应的两个电子到原子核的距离随时间的演化. 在这四种通道中, 图2(a)双电离(DI)通道, 定义为当激光场脉冲结束时两电子的能量都大于零; 此时图2(b)的时空图显示两个电子都在离原子核较远的位置. 图2(c, d)则显示了单电离(SI)通道, 定义为当激光场脉冲结束时一个电子能量大于零, 而另一个电子能量处于基态; 在时空上表现为脉冲结束时, 一个电子在离原子核较远的位置, 另一个电子仍在原子核附近的位置. 除了DI和SI两种电离过程, 图2(e-h)显示了另外两种受挫电离通道. 图2(e)受挫双电离(FDI)通道, 定义为在激光场脉冲开启期间出现过两电子能量同时大于零的时刻, 但在激光场脉冲结束时, 一个电子能量大于零, 另一个电子能量小于零. 图2(g)受挫单电离(FSI)通道, 定义为在激光场脉冲开启期间出现过一个电子发生单电离, 但在激光场脉冲结束时发生单电离的电子能量小于零, 另一个电子能量处于基态. 受挫电子(Frustrated electron)往往处于激发态, 其离母核的距离基本大于初态的距离, 但又远小于电离电子的距离. 在FDI通道, 脉冲结束时, 一个电子在离原子核较远的位置, 另一个电子被束缚在离原子核较近的位置; 在

FSI 通道, 脉冲结束时, 一个电子在原子核附近的位置, 另一个电子被束缚在离原子核较近的位置, 与初态相差无几.

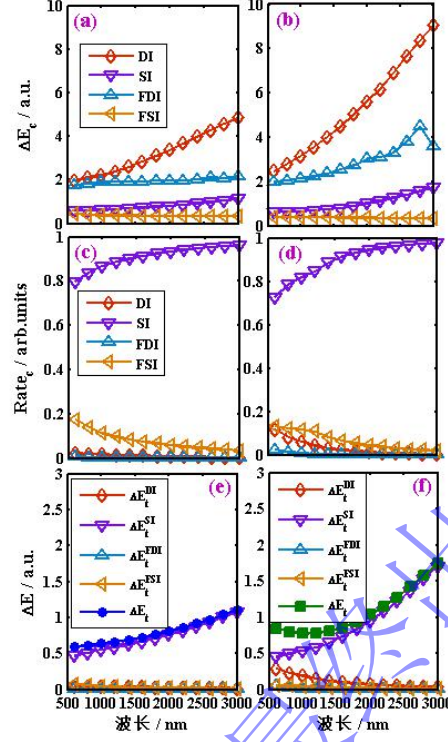


图 3 四种通道的波长依赖. 顶行: 四种通道下两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_c$  随波长的变化曲线, 中间行: 四种通道的产率随波长的变化曲线, 底端行: 四种通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^c$  随波长的变化曲线以及整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随波长的变化曲线. 左列和右列对应的激光强度为  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  和  $0.5 \text{ PW/cm}^2$ .

Fig. 3. Wavelength dependence of the four channels. Top row:  $\Delta E_c$  as a function of wavelength in four channels, middle row: probabilities of the four channels as a function of wavelength, bottom row:  $\Delta E_t^c$  and  $\Delta E_t$  as a function of wavelength. The laser intensities corresponding to the left and right columns are  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  and  $0.5 \text{ PW/cm}^2$ .

图 3 给出了四种通道下两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_c$  随波长的变化曲线, 四种通道的产率  $Rate_c$  随波长的变化曲线、四种通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^c$  随波长的变化曲线以及整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随波长的变化曲线. 其中  $\Delta E_c$ 、 $Rate_c$ 、 $\Delta E_t^c$  计算公式如下:

$$\Delta E_c = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} (E_{e_1}^i + E_{e_2}^i)}{n_c} - [-(I_{p1} + I_{p2})]$$

$$Rate_c = \frac{n_c}{n} \quad (5)$$

$$\Delta E_t^c = \Delta E_c * Rate_c$$

其中  $n$  表示总系综个数,  $n_c$  表示各个通道的系综个数.

从图 3(e)可以看出, 较低激光强度  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随波长的变化趋势与单电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^{SI}$  随波长的变化趋势一致. 这表明在较低强度  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  时, 单电离通道对整个系综两电子从激光场吸收的能量起主导作用. 这是因为如图 3(c) 所示, 在较低强度  $0.1 \text{ PW/cm}^2$  时, 单电离率随波长增加而逐渐增大且单电离率整体较高, 并且单电离通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_{SI}$  随波长增加而逐渐增大, 因此单电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^{SI}$  决定了整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$ . 而图 3(f) 显示在较高强度  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随着波长增加先缓慢减小再快速增大. 总吸收能量之所以先减小, 如图 3(d) 所示, 是因为吸收能量较大的双电离过程 (图 3(b) 棕色菱形线) 的双电离率 (图 3(d) 棕色菱形线) 随着波长增加逐渐减小且在较短波长下减小较快. 因此, 尽管双电离通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_{DI}$  随波长增加而增加如图 3(b) 所示, 但双电离率对双电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^{DI}$  影响较大, 因此双电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^{DI}$  随着波长增加逐渐减小且在较短波长下减小较快. 故在较短波长下双电离通道起主导作用. 但随着波长增加, 如图 3(d) 所示, 单电离率逐渐增大且单电离率高, 并且单电离通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_{SI}$  随波长增大而增大如图 3(b) 所示. 此时, 单电离通道逐渐起主导作用, 使得在较长波长下, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  逐渐增大. 这表明在较高强度  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  时, 在较短波长下双电离通道对整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  起主导作用, 在较长波长下单电离通道起主导作用.

### 3.2 激光场强度依赖

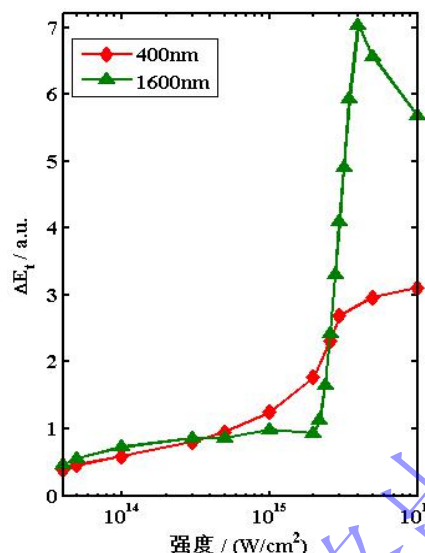


图 4 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_l$  随强度的变化曲线，对应的波长分别为 400 nm (红色实心菱形线) 和 1600 nm (绿色实心三角形线)。

Fig. 4. The energy absorbed by two electrons from the laser field in the whole ensemble  $\Delta E_l$  as a function of intensity, the corresponding wavelengths are 400 nm (red solid diamond line) and 1600 nm (green solid triangle line) respectively.

图 4 给出了整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_l$  随强度的变化曲线，对应的波长分别为 400 nm (红色空心菱形线) 和 1600 nm (绿色实心三角形线)。有趣的是，可以看到两条曲线在强度为  $3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  和  $2.6 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  左右有两个交叉点，强度低于  $3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ，1600 nm 时整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_l$  比 400 nm 时大；强度在  $3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  和  $2.6 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  之间时，400 nm 时整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_l$  比 1600 nm 时大；强度高于  $2.6 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  时，1600 nm 时整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_l$  比 400 nm 时大。

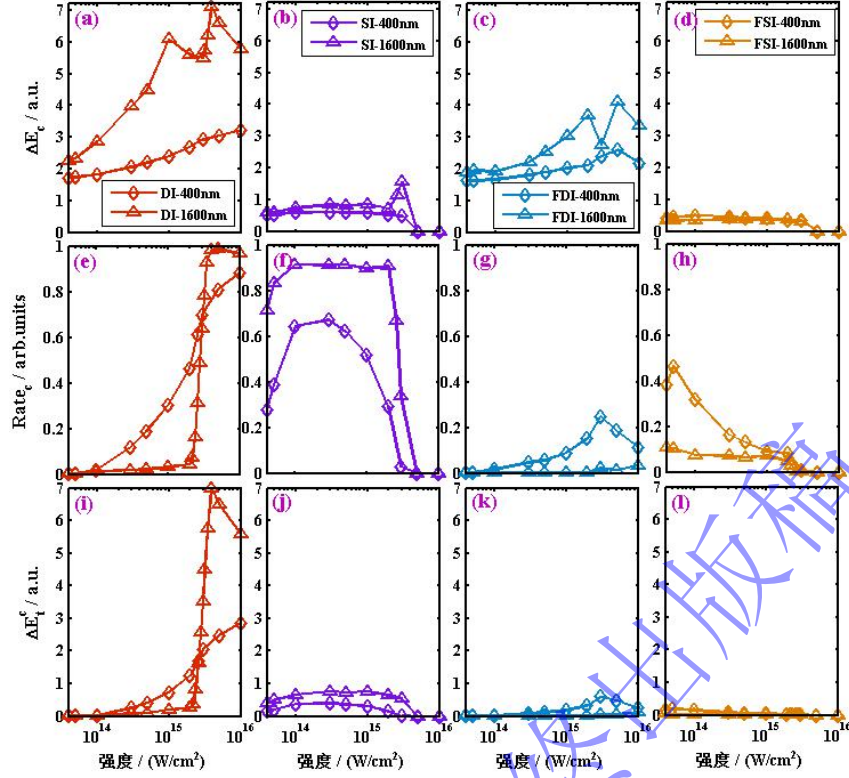


图 5 顶行：不同波长下四种通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_c$  随强度的变化曲线，中间行：不同波长下四种通道的产率随强度的变化曲线，底端行：不同波长下四种通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随强度的变化曲线。从左到右依次为 DI、SI、FDI 和 FSI 通道。红色空心菱形(三角形)代表 DI 通道，紫色空心菱形(三角形)代表 SI 通道，浅蓝色空心菱形(三角形)代表 FDI 通道，橙色空心菱形(三角形)代表 FSI 通道。对应的波长分别为 400 nm (菱形)和 1600 nm (三角形)。

Fig. 5. Top row:  $\Delta E_c$  in four channels at different wavelengths as a function of intensity, middle row: probabilities of the four channels as a function of intensity at different wavelengths, bottom row:  $\Delta E_t$  in four channels as a function of intensity at different wavelengths. From left to right are DI、SI、FDI and FSI channels. The red hollow diamond (triangle) represents DI channel, the purple hollow diamond (triangle) represents SI channel, the light blue hollow diamond (triangle) represents FDI channel, and the orange hollow diamond (triangle) represents FSI channel. The corresponding wavelengths are 400 nm (diamond) and 1600 nm (triangle), respectively.

为了理解不同波长下整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随强度变化为什么会出现两个交叉点，我们采取与上述分析相同的方法把整个系综分成四种主要通道。图 5 给出了不同波长下四种通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_c$  随强度的变化曲线(a-d)、产率随强度的变化曲线(e-h)及整个系综中各通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随强度的变化曲线(i-l)。第三行图由前两行图分别相乘得到。从图 5(i, j)可以看出，在较低强度下，单电离通道对整个系综两电子从激光场

吸收的能量  $\Delta E_i$  起主导作用；而在较高强度下，双电离通道起主导作用，因此整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  随强度变化会出现两个交叉点。接下来解释为什么在较低强度下单电离通道起主导作用，在较高强度下双电离通道起主导作用。这是因为在较低强度下单电率高如图 5(f)所示，且单电离通道  $\Delta E_i^{SI}$  逐渐增加，但随着激光强度增加，双电离率增大如图 5(e)所示，且双电离通道  $\Delta E_i^{DI}$  逐渐增加。需要提及的是，图 4 中 1600 nm 时整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  在强度  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  附近有个陡峭的突变，这主要归咎于在较高强度下双电离通道主导整个系综两电子从激光场吸收的能量的趋势。

### 3.3 激光场椭偏率依赖

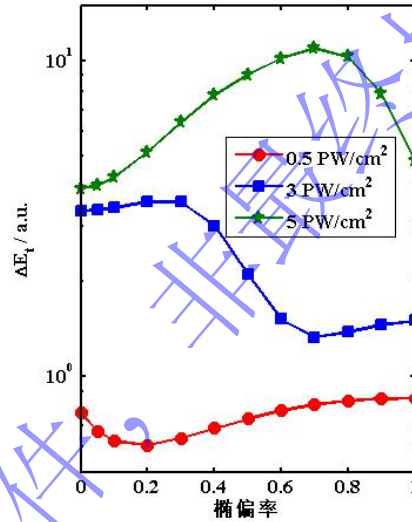


图6 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  随椭偏率的变化，对应的激光强度分别为  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  (红色实心圆形线)、 $3 \text{ PW/cm}^2$  (深蓝色实心方形线) 和  $5 \text{ PW/cm}^2$  (绿色实心五角星形线)，波长为 800 nm.

Fig. 6. The energy absorbed by two electrons from the laser field in the whole ensemble  $\Delta E_i$  as a function of ellipticity. The corresponding laser intensities are  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  (red solid circular line)、 $3 \text{ PW/cm}^2$  (dark blue solid square line) and  $5 \text{ PW/cm}^2$  (green solid pentagram line), the wavelength is 800 nm.

椭偏率是描述激光场的一个重要参数，对超快电离动力学过程有着重要的影响。比如，激光场椭偏率较小或者为 0 时，光电子可以返回母核产生强烈的回碰现象，从而发生复杂的非线性过程，包括高次谐波产生、非次序双电离等。因此，我们这里也将深入讨论激光场椭偏率对系统与激光场的能量交换的影响。

图 6 给出了整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随椭偏率的变化, 对应的激光强度分别为  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  (红色实心圆形线)、 $3 \text{ PW/cm}^2$  (深蓝色实心方形线)、 $5 \text{ PW/cm}^2$  (绿色实心五角星形线). 可以看出, 随着椭偏率增加, 较低激光强度( $0.5 \text{ PW/cm}^2$ )时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  先逐渐减小再缓慢增大; 中等强度( $3 \text{ PW/cm}^2$ )时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随椭偏率呈现一个“阶梯型”即先缓慢增大再逐渐减小最后缓慢增大; 更高强度( $5 \text{ PW/cm}^2$ )时, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  先逐渐增大再逐渐减小.

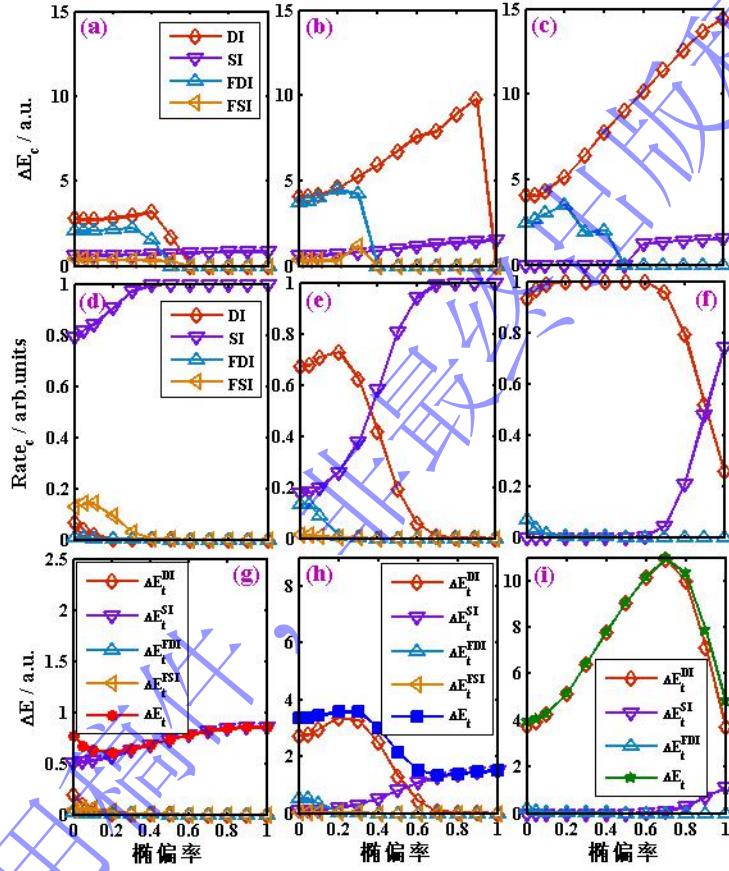


图 7 四种通道的椭偏率依赖. 顶行: 四种通道下两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_e$  随椭偏率的变化, 中间行: 四种通道的产率随椭偏率的变化, 底端行: 四种通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^c$  随椭偏率的变化以及整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随椭偏率的变化. 左列、中间列、右列对应的激光强度分别为  $0.5 \text{ PW/cm}^2$ 、 $3 \text{ PW/cm}^2$ 、 $5 \text{ PW/cm}^2$ .

Fig. 7. The ellipticity dependence of the four channels. Top row:  $\Delta E_e$  as a function of ellipticity in four channels, middle row: probabilities of the four channels as a function of ellipticity, bottom row:  $\Delta E_t^c$  and  $\Delta E_t$  as a function of ellipticity. The laser intensities of the left, middle and right columns are  $0.5 \text{ PW/cm}^2$ ,  $3 \text{ PW/cm}^2$ ,  $5 \text{ PW/cm}^2$ .

为了理解不同强度下整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  随椭偏率变化呈现的不同趋势, 我们继续采取把整个系综主要分成四种通道的方法进行解释. 图 7 给出了四种通道下两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_c$  (a-c)、产率  $Rate_c$  (d-f)、整个系综中各通道从激光场吸收的能量  $\Delta E_i^c$  以及整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  (g-i) 随椭偏率的变化曲线. 首先, 从图 7(g) 显示了在较低激光强度  $0.5 \text{ PW/cm}^2$  时, 当椭偏率较小, 双电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i^{DI}$  随椭偏率增加而迅速减少. 这是由于此时, 双电离主要形成过程是通过回碰实现并产生的. 当椭偏率增大时, 电子回碰机率迅速减小, 双电离的产率也迅速减小. 这导致整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  随椭偏率增加而逐渐减少, 这说明此时双电离通道起主导作用.

这是因为从图 7(d) 可知, 椭偏率较小时双电离率逐渐减小, 且双电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i^{DI}$  几乎不变且较大; 随着椭偏率继续增大, 单电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i^{SI}$  与整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  的趋势一致, 这说明此时单电离通道起主导作用, 这是因为从图 7(d) 可知, 随着椭偏率继续增大, 双电离率逐渐接近零, 单电离率逐渐接近饱和, 且单电离通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_{SI}$  逐渐增加, 因此单电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i^{SI}$  决定了整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$ .

在中等激光强度  $3 \text{ PW/cm}^2$  时, 从图 7(h) 可以看出, 随着椭偏率增大, 系综从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  呈现先增加后减小的趋势. 这是因为此时双电离通道起主导作用, 此时双电离率较高且呈现先增大再减小的趋势如图(e)所示. 但随着椭偏率继续增加, 双电离率接近于零, 而单电离率逐渐达到饱和. 由于单电离过程的能量吸收比双电离过程小很多[如图 7(b)所示], 因此尽管当椭偏率较大时, 此时单电离通道起主导作用并持续增加直至饱和, 但总能量吸收  $\Delta E_i$  最终也只是缓慢增加.

最后, 当激光强度达到  $5 \text{ PW/cm}^2$  时, 系统有总能量吸收  $\Delta E_i$  与双电离通道能量吸收  $\Delta E_i^{DI}$  趋势一致, 这表明双电离通道起主导作用. 从图 7(f) 可以看出, 此时, 由于激光强度很高, 系统主要发生次序双电离, 并由于椭偏率较小, 两电子之间

存在一定的能量交换，双电离率整体较高，且图 7(c)中双电离通道两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_{DI}$  随椭偏率增加而增大，双电离通道两电子从激光场吸收的能量值也较大，因此双电离通道在整个系综中两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t^{DI}$  决定了整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$ 。而在椭偏率接近 1 时，单电离率迅速增加，双电离过程迅速减小。此时，第一个电子在近圆偏的强激光场作用下，迅速远离核心区域，与另外一个电子之间几乎没有碰撞与能量交换，因此，此时第一个电子在强激光作用下迅速电离，而第二个电子落入较深的势阱中，较难发生电离。故单电离增加，而双电离产率迅速减小。这表明，即使在较强的激光参数下发生的“次序”双电离，其电离过程中仍然存在电子-电子之间的关联效应。这一现象与 A. Fleischer 等人在实验中观测到的结果结论一致[26]。

## 4 结 论

本文利用三维经典系综模型，研究了整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  对激光参数(波长、激光强度和椭偏率)的依赖。

研究结果表明，当激光强度固定波长增加时，整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  整体呈上升趋势，但不同强度下趋势略有差异。随着波长的增加，较低激光强度( $0.1 \text{ PW/cm}^2$ )时，整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  持续平稳增加，较高激光强度( $0.5 \text{ PW/cm}^2$ )时，整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  先缓慢减小再快速增加。较低激光强度时单电离通道主导整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$ ；较高激光强度时在较短波长下双电离通道对整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  起主导作用，在较长波长下单电离通道起主导作用。

当激光强度增加时，不同波长 400 nm 和 1600 nm 时整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  随强度变化会出现两个交叉点。这是由于在较低强度下，单电离通道对整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  起主导作用，在较高强度下，双电离通道起主导作用。

当波长固定椭偏率增加时，不同激光强度下整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_t$  变化趋势均不相同。随着椭偏率增加，较低激光强度( $0.5 \text{ PW/cm}^2$ )时，需要回碰的非次序双电离过程为主，所以此时双电离随着椭偏率增加迅速减小，

而单电离则持续增加, 导致整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  先逐渐减小再缓慢增大. 而在中等强度( $3 \text{ PW/cm}^2$ )激光场中, 此时次序双电离逐渐占双电离的主导, 但在椭偏率较小时, 仍有较强的回碰及电子关联作用并增强双电离产率. 椭偏率的增加使得电子回碰减小, 最终双电离产率减小, 而单电离产率增加. 因此整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  随椭偏率呈现一个“阶梯型”即先缓慢增大再逐渐减小最后缓慢增大. 而在更高强度( $5 \text{ PW/cm}^2$ )时, 由于激光强度大, 双电离迅速饱和. 在椭偏率较小时, 电子回碰并与第二个电子发生一定的能量交换, 但整个过程还是以次序双电离为主. 而在椭偏率较大时, 无回碰过程发生, 引起的双电离过程也同时快速减少, 单电离增加. 因此, 整个系综两电子从激光场吸收的能量  $\Delta E_i$  先逐渐增大再逐渐减小. 这些现象表明, 在激光强度较高的序列双电离区域, 电子与电子之间的关联仍然起着重要的作用, 而在较低的激光光强时, 电子-电子关联则起着决定性的作用. 通过研究激光场作用下 Ar 原子系统及其各个电离通道能量的吸收, 我们揭示了电子-电子关联在光与物质相互作用时的重要性.

## 参考文献

- [1] Paulus G G, Nicklich W, Xu H, Lambropoulos P, Walther H 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2851
- [2] Becker W, Grasbon F, Kopold R, Milošević D B, Paulus G G, Walther H 2002 *Adv. At., Mol., Opt. Phys.* **48** 35
- [3] McPherson A, Gibson G, Jara H, Johann U, Luk T S, McIntyre I A, Boyer K, Rhodes C K 1987 *J. Opt. Soc. Am. B* **4** 595
- [4] Seres J, Seres E, Verhoef A J, Tempea G, Streli C, Wobrauschek P, Yakovlev V, Scrinzi A, Spielmann C, Krausz F 2005 *Nature* **433** 596
- [5] Krausz F, Ivanov M 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 163
- [6] Zhai C Y, Zhu X S, Long J, Shao R Z, Zhang Y F, He L X, Tang Q B, Li Y B, Lan P F, Yu B H, Lu P X 2021 *Phys. Rev. A* **103** 033104
- [7] Sun F H, Chen X, Zhang W B, Qiang J J, Li H, Lu P F, Gong X C, Ji Q Y, Lin K, Li H X, Tong J H, Chen F, Ruiz C, Wu J, He F 2020 *Phys. Rev. A* **101** 021402
- [8] Kang H P, Chen S, Wang Y L, Chu W, Yao J P, Chen J, Liu X J, Cheng Y, Xu Z Z

2019 *Phys. Rev. A* **100** 033403

- [9] Liu Y, Fu L B, Ye D F, Liu J, Li M, Wu C Y, Gong Q H, Moshhammer R, Ullrich J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 013003
- [10] Zhou Y M, Liao Q, Lu P X 2009 *Phys. Rev. A* **80** 023412
- [11] Li H Y, Chen J, Jiang H B, Liu J, Fu P M, Gong Q H, Yan Z C, Wang B B 2009 *J. Phys. B* **42** 125601
- [12] Quan W, Hao X L, Hu X Q, Sun R P, Wang Y L, Chen Y J, Yu S G, Xu S P, Xiao Z L, Lai X Y, Li X Y, Becker W, Wu Y, Wang J G, Liu X J, Chen J 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 243203
- [13] Chen Z J, Wen H, Liu F, Morishita T, Zatsarinny O, Bartschat K 2020 *Opt. Express* **28** 6490
- [14] Yu B H, Li Y B, Tang Q B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 203201 (in Chinese) [余本海, 李盈侯, 汤清彬 2012 物理学报 **61** 203201]
- [15] Li Y B, Wang X, Yu B H, Tang Q B, Wang G H, Wan J G 2016 *Scientific Reports* **6** 37413
- [16] Li Y B, Yu B H, Tang Q B, Wang X, Hua D Y, Tong A H, Jiang C H, Ge G X, Li Y C, Wan J G 2016 *Opt. Express* **24** 6469
- [17] [Liao Q, Winney A H, Lee S K, Lin Y F, Adhikari P, Li W 2017 \*Phys. Rev. A\* \*\*96\*\* 023401](#)
- [18] [Liao Q, Li Y, Qin M Y, Lu P X 2017 \*Phys. Rev. A\* \*\*96\*\* 063408](#)
- [19] Schafer K J, Young B, DiMauro L F, Kulander K C 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1599
- [20] Corkum P B 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1994
- [21] Zhou Y M, Huang C, Lu P X 2012 *Optics Express* **20** 20201
- [22] Pfeiffer A N, Cirelli C, Smolarski M, Dörner R, Keller U 2011 *Nature* **7** 428
- [23] Zhou Y M, Huang C, Liao Q, Lu P X 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 053004
- [24] Wang X, Eberly J H 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 103007
- [25] Shvetsov-Shilovski N I, Sayler A M, Rathje T, Paulus G G 2011 *Phys. Rev. A* **83** 033401
- [26] Fleischer A, Wörner H J, Arissian L, Liu L R, Meckel M, Rippert A, Dörner R, Villeneuve D M, Corkum P B, Staudte A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 113003
- [27] Wang X, Tian Justin, Eberly J H 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 073001
- [28] Nubbemeyer T, Gorling K, Saenz A, Eichmann U, Sandner W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 233001

- [29] Manschwetus B, Nubbemeyer T, Gorling K, Steinmeyer G, Eichmann U, Rottke H, Sandner W 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 113002
- [30] Ulrich B, Vredenburg A, Malakzadeh A, Meckel M, Cole K, Smolarski M, Chang Z, Jahnke T, Dörner R 2010 *Phys. Rev. A* **82** 013412
- [31] Shomsky K N, Smith Z S, Hann S L 2009 *Phys. Rev. A* **79** 061402
- [32] Sayler A M, McKenna J, Gaire B, Kling N G, Carnes K D, Ben-Itzhak I 2012 *Phys. Rev. A* **86** 033425
- [33] Chen A, Price H, Staudte A, Emmanouilidou A 2016 *Phys. Rev. A* **94** 043408
- [34] Larimian S, Erattupuzha S, Baltuška A, Kitzler-Zeiler M, Xie X 2020 *Phys. Rev. Research* **2** 013021
- [35] Li Y B, Xu J K, Yu B H, Wang X 2020 *Opt. Express* **28** 7341
- [36] Parker J S, Doherty B J S, Taylor K T, Schultz K D, Blaga C I, DiMauro L F 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 133001
- [37] Liu A H, Thumm Uwe 2014 *Phys. Rev. A* **89** 063423
- [38] Liu A H, Thumm Uwe 2015 *Phys. Rev. A* **91** 043416
- [39] Chen J, Nam C H 2002 *Phys. Rev. A* **66** 053415
- [40] Panli R, Eberly J H, Haan S L 2001 *Opt. Express* **8** 431
- [41] Haan S L, Breen L, Karim A, Eberly J H 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 103008
- [42] Haan S L, Van Dyke J S, Smith Z S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 113001
- [43] Wang X, Eberly J H 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 083001
- [44] Li Y B, Mei L L, Chen H M, Xu J K, Tang Q B, Zhao Y G, Han Q Q, Wang C L, Tong A H, Ge G X, Yu B H 2018 *Int. J. Mo. Phys. B* **32** 1850302
- [45] Li Y B, Xu J K, Chen H M, Li Y H, He J J, Qin L L, Shi L K, Zhao Y G, Tang Q B, Zhai C Y, Yu B H 2021 *Opt. Communications* **493** 127019

# Energy exchange in ultrafast dynamics of atom with strong laser fields\*

Li Ying-Bin<sup>1)±</sup> Qin Ling-Ling<sup>1)±</sup> Chen Hong-Mei<sup>1)</sup> Li Yi-Han<sup>1)</sup> He Jin-Jin<sup>1)</sup> Shi Lu-Ke<sup>1)</sup> Zhai

Chun-Yang<sup>1)</sup> Tang Qing-Bin<sup>1)</sup> Liu Ai-Hua<sup>2)†</sup> Benhai Yu<sup>1)‡</sup>

1) (College of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

2) (Institute of atomic and molecular physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

## Abstract

Using the three-dimensional classical ensemble model, we investigate the dependence of the energy absorbed by two electrons (Ar atom as an example) from the laser field on the laser parameters (wavelength, laser intensity and ellipticity). The results show that when the laser intensity is fixed and the wavelength increases, the energy absorbed by the two electrons from the laser field increases as a whole, but the trend is slightly different under different intensities. At lower intensity the dependence of the energy absorbed by the two electrons from the laser field on wavelength increases steadily and at higher intensity it decreases slowly and then increases rapidly. The intensity dependence of the energy absorbed by two electrons from the laser field in the whole ensemble presents two interesting intersections at different wavelengths. The dependence of the energy absorbed by the two electrons from the laser field on the ellipticity first decreases and then increases slowly at lower intensity; it has a “Ladder shape” that slowly increases and then decreases and finally slowly increases at moderate intensity; it shows a trend of increasing first and then decreasing at higher intensities. In order to explain the dependence of the energy absorbed by two electrons from the laser field on the laser parameters (wavelength, laser intensity and ellipticity), the kinetic process of the whole ensemble is divided into four channels: double ionization, single ionization, frustrated single ionization and frustrated double ionization. The characteristics of each channel and how it dominates the overall trend of energy absorption from the laser field by the two electrons are then analyzed. The analysis results show that the dependence of the energy absorbed by the two electrons

from the laser field on wavelength, laser intensity and ellipticity is due to the fact that some channels dominate the energy absorbed by the two electrons from the laser field.

**Keywords:** ultrafast dynamics of atom, single ionization, double ionization, frustrated single ionization, frustrated double ionization

**PACS:** 32.80.Rm, 31.90.+s, 32.80.Fb

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12074329, 12004323, 12104389, 1174131, 91850114), Key Scientific Research Projects of Higher Education Department of Henan Province of China (20A140025), Nanhu Scholars Program for Young Scholars of Xinyang Normal University.

<sup>⊥</sup>These authors contributed equally to this work

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: aihualiu@jlu.edu.cn

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: hnyubenhai@163.com