

文章编号: 1001-3806(2016)06-0782-05

## 基于脉冲整形的激发双重态间的相干布局操控

王贞浩, 张杨华, 王全军, 丁晶洁, 刘作业\*

(兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000)

**摘要:** 为了实现红外飞秒脉冲的整形及调控, 采用  $4f$  系统相位控制技术, 实验搭建了脉冲整形装置, 并利用整形脉冲对铷原子体系中激发双重态间的相干布居转移进行操控。结果表明, 控制抽运脉冲的附加相位, 可实现双重态中上激发态的饱和布居, 通过修改附加相位函数可将上、下激发态的布居数反转。整形脉冲同样适用于其它的原子和分子系统的相干布居转移的操控。

**关键词:** 激光物理; 激发双重态; 整形脉冲; 相干布居转移

**中图分类号:** O56 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.002

### Coherent control of population transfer of the excited double states based on pulse shaping

WANG Zhenhao, ZHANG Yanghua, WANG Quanjun, DING Jingjie, LIU Zuoye

(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to achieve the shaping and control of infrared femtosecond pulse,  $4f$  system phase control technology was used and pulse shaping device was set up by experiment. By using pulse shaping, coherent of population transfer of the excited double states in the rubidium atoms system was controlled. The results show that saturation population can be realized in excited double state by controlling the additional phase of pumping pulse. Population of the upper and lower excited state can be reversed by modifying the function of additional phase. Coherent control of population transfer by pulse shaping can also be applied in other atom and molecular systems.

**Key words:** laser physics; the excited double states; pulse shaping; coherent control of population transfer

## 引 言

超短脉冲与物质作用时, 原子或分子会通过单光子或多光子过程被激发、解离及电离。目前主要通过两种手段研究这一物理过程: (1) 电子和离子的测量, 如反应动量谱仪<sup>[1-2]</sup>等; (2) 光测量, 如吸收谱、荧光辐射或受激辐射。相比于电子和离子的测量, 光测量的优势在于将量子体系的动力学信息直观地以吸收谱线型的变化表现出来<sup>[3]</sup>。随着飞秒脉冲的产生, 基于抽运-探测技术的瞬态吸收谱的测量使获取强场中的量子体系的动力学演化成为了可能<sup>[4-5]</sup>, 其核心为两延迟时间可调的超短脉冲。超短的抽运脉冲首先触发一个量子体系, 而体系的动力学演化将会被随之而至的探

测脉冲所探测。探测脉冲的吸收谱是其自身与抽运脉冲所激发量子体系的辐射光场相干涉的结果, 并取决于探测脉冲到达时的量子体系所处的状态<sup>[4]</sup>, 所以通过调节抽运脉冲和探测脉冲的时间延迟可以达到时间分辨的目的。

原子的外层电子的轨道角动量  $L$  和自旋角动量  $S$  之间的耦合会导致原子能级的分裂, 被称为精细结构效应。对于激发双重态来说, 如果对应两个跃迁过程具有相同的初始态, 则两个跃迁过程间存在量子拍频, 该拍频信号可用于测量能级的分裂。NICOLE 等人发展了明-暗态理论<sup>[6-10]</sup>, 用于描述原子精细结构的自旋-轨道耦合的动力学过程。研究表明, 改变探测脉冲的偏振可以观测不同动力学信息<sup>[6]</sup>, 而调整其波长可以观测不同反应通道的波包动力学<sup>[11-12]</sup>。同时, 各种实验技术<sup>[13-14]</sup>被应用于操控光与物质的相互作用, 而制备处于特定态的原子、分子是相干操控研究的主要目标。激光脉冲整形技术在改变和控制一个量子系统的超短动力学过程的研究中得到了广泛的应用<sup>[15-18]</sup>, 对光谱学研究的重要性不言而喻。

本文中首先搭建了脉冲整形装置, 实现对脉冲持

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11504148; 11135002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(lzu-jbky-2015-269)

作者简介: 王贞浩(1994-), 男, 硕士研究生, 现主要从事基于飞秒脉冲的瞬态吸收谱测量的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zyl@lzu.edu.cn

收稿日期: 2015-11-17; 收到修改稿日期: 2015-12-24

续时间为 30fs 的超短脉冲的整形。利用整形脉冲对铷原子中的 V 型三能级系统(基态  $5^2S_{1/2}$  和激发双重态  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$ )的超快动力学过程进行操控,研究激发态间的相干布居转移对激光脉冲波形的依赖关系。

## 1 实验测量装置

### 1.1 装置结构概述

实验中采用商用激光系统,它能提供脉冲持续时间为 30fs 的超短脉冲,中心波长为 780nm,重复频率为 1kHz,单脉冲能量为 0.8mJ。该系统提供的脉冲具有稳定的载波包络相位(carrier-envelope phase, CEP)。为了研究原子、分子体系的衰变过程,作者在实验室搭建了吸收谱测量装置,该装置具有紧凑、高稳定性、多用途的优点。如图 1a 所示,激光光束被分光镜分光,分光比率为 9:1,其中 90% 透射光束经由反光镜进入脉冲整形装置。经过脉冲整形装置的激光光束和 10% 的反射脉冲经过长距离传输后,重新整合成一束脉冲。整合后的激光光束入射到一个带有上下排列的两个型号为 D5S 的小光阑的挡板上,分成两束光。实线代表了探测脉冲,而虚线代表了抽运脉冲。随后,两束激光光束分别入射到上下排列的两个方形的镀银反射镜(尺寸为:12.5mm × 12.5mm)上,其中下方的反射镜安装在型号为 P-622.1CD 的普爱压电陶瓷电机(physik instrument, PI)上。这样可以高精度地调整抽运和探测脉冲的时间延迟。抽运和探测脉冲随后被一凹面镜聚焦,探测、抽运光束在测量点的直径分别为 1.25mm 和 0.85mm。通过样品的光束随后被准直,然后对探测脉冲进行光谱测量。为了收集全部的光谱成分,将探测脉冲聚焦射入光纤,光纤的另一端接入型号为 USB4000 的海洋光学光谱仪。图 1b 为 Rb 原子中的 V 型三能级系统的能级图。

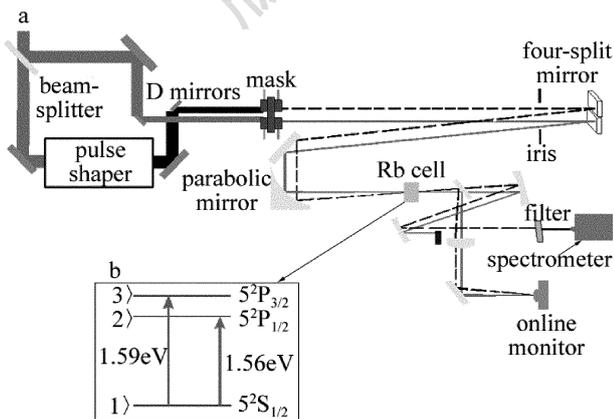


Fig. 1 a—schematic of experimental apparatus of absorption spectrum measurement b—energy level diagram of V-type 3-level system of rubidium atom

实验中,使用 CMOS 相机检验测量点处两个脉冲的时空重合:调节分光反射镜的镜架实现光束的空间重合;移动压电陶瓷电机,直到 CMOS 相机出现干涉信号,以实现脉冲的时间重合。分别在抽运和探测光路中插入渐变光密度的中性衰减片,对两个脉冲的强度进行调节。实验测量中,为了实时检测抽运和探测脉冲在测量点处的时空重合性,在焦点后安装一个分光镜,反射一部分光进入一个 COMS 相机,作为实时监控装置。因此,实验中任何光路的偏差都可以被观测到而及时修正。

实验测量时,采用一个长约为 20mm 的金属铷的气室作为样品进行瞬态吸收谱的测量。自制了一个加热器和温度控制系统,对气室进行加热,并将温度稳定到 160℃左右。根据铷蒸汽的原子密度对温度的关系<sup>[19]</sup>可知,实验测量时的铷原子密度为  $2.8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 。

### 1.2 脉冲整形装置

本文中搭建的脉冲整形装置参考了 PRÄKELT 等人<sup>[19]</sup>的设计,脉冲整形装置的核心器件为 Jenoptik 公司的型号为 SLM-S320 的空间光调制器,它包含了 320 个像元。空间光调制器可实现对光脉冲的不同频率成分的相位或振幅的调制。图 2 所示为脉冲整形装置的原理图,其中,  $G_1$  和  $G_2$  为闪耀全息平面光栅,  $CM_1$  和  $CM_2$  为柱面镜,  $FM_1$  和  $FM_2$  为反射镜。利用光栅  $G_1$  可实现对入射激光脉冲的傅里叶变换,将不同的频率成分在空间上展开。随后,一柱面镜  $CM_1$  将不同的频率成分聚集在傅里叶平面上。空间光调制器(spatial light modular, SLM)将会被安装在这个傅里叶平面上。在傅里叶平面后,安装一个对称的柱面镜  $CM_2$ ,将发散的激光脉冲准直。准直后的激光脉冲进入另一个对称的光栅  $G_2$ 。光栅将不同的频率成分重新整合成准直的激光光束,最终完成脉冲整形。从光栅到柱面镜、从柱面镜到 SLM 的距离为柱面镜的焦距  $f$ 。因此,这种几何机构也称为  $4f$  结构。

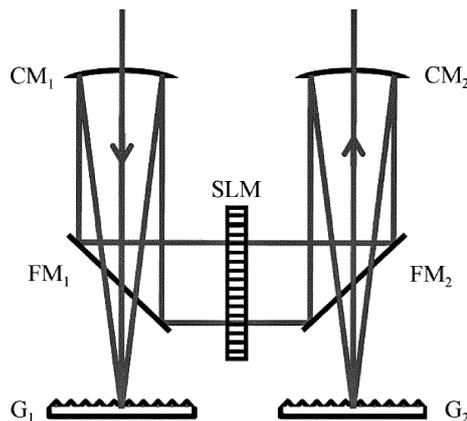


Fig. 2 Setup sketch of femisecond pulse shaping

空间光调制器两侧的光栅、柱面镜、反射镜排成一排,提高光栅在垂直方向的位置,入射光水平入射到光栅  $G_1$ ,而反射光束在垂直方向以一个极小的角度入射到柱面镜  $CM_1$ 。不需要倾斜柱面镜,因此可避免对激光脉冲引入像差。调节柱面镜  $CM_1$  和  $CM_2$ ,使激光光束在两个柱面镜间保持相同的高度,而在同一个水平面上。柱面镜  $CM_1$  和  $CM_2$  的焦距是 200mm,柱面镜和反射镜的反射层为银镀层。闪耀全息平面光栅  $G_1$  和  $G_2$  的尺寸为 44mm × 44mm,光栅的镀膜层为铝,槽密度是  $1200\text{m}^{-1}$ ,闪耀波长为 630nm。完成脉冲整形装置的搭建和优化后,对整形脉冲进行自相关测量来检查脉冲整形装置的工作状态,并开发 LabVIEW 程序完成对脉冲整形装置的控制。同时,实验测试表明,该装置至少可以稳定工作 6 个月。更多关于脉冲整形装置的介绍参看<sup>[20]</sup>。

## 2 相干操控的测量与讨论

如图 1b 所示,该类系统在强场中的量子动力学过程的研究中极具代表性。跃迁( $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ ,  $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ , 794.76nm,  $D_1$  谱线)、( $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ ,  $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ , 780.03nm,  $D_2$  谱线)<sup>[21-22]</sup> 被中心波长为 780nm 的超短的、宽带的抽运/探测光脉冲(延迟时间为  $\tau$ ) 激发/探测。以该三能级系统为实例,LIU 等人提出了附加相位模型来解释瞬态吸收谱的时间演化特性,并将其与系统的量子相干性对激光脉冲强度的依赖和相位演化相联系,从中提取原子系统的相位信息<sup>[23]</sup>。这里作者利用脉冲整形装置研究激发态  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  的相干布居转移对抽运脉冲的附加相位的依赖关系。

假设抽运光场为  $E_{p,in}(x, t)$ , 对其进行傅里叶变换,得到抽运光场的频谱为  $S_{p,in}(x, \omega) = \mathcal{F}[E_{p,in}(x, t)]$ 。利用脉冲整形装置在频域对抽运脉冲引入附加相位项  $\varphi_p(\omega)$ , 得到抽运脉冲的频谱为  $S_{p,in}(x, \omega) \times \exp[i\varphi_p(\omega)]$ 。其中,  $\varphi_p(\omega)$  是关于频率  $\omega$  的函数:

$$\varphi_p(\omega) = \alpha \cdot \sin[\beta \cdot \pi(\omega - \omega_0)] + \pi/2 \quad (1)$$

式中,参量  $\alpha$  和  $\beta$  为变量,可在一定范围内变化,实验中通过脉冲整形装置的控制程序来设定; $\omega_0$  为激光脉冲的中心频率。

实验测量的探测脉冲的吸收谱为光密度(optical density, OD)谱:

$$\psi(\omega, \tau) = -\lg\left[\frac{S_{pr,out}(\omega, \tau)}{S_{pr,in}(\omega)}\right] \quad (2)$$

式中,  $S_{pr,in}(\omega)$  和  $S_{pr,out}(\omega, \tau)$  分别为与吸收介质作用前、后的探测脉冲的光谱。 $\psi(\omega, \tau)$  为正值时,对应的光谱为吸收谱,反之为辐射谱。实验测量时,探测脉冲的单脉冲能量为 0.2  $\mu\text{J}$ , 抽运脉冲的单脉冲能量为

15  $\mu\text{J}$ 。延迟时间为正,对应着抽运脉冲先于探测脉冲到达靶物质。首先,控制抽运脉冲的附加相位为  $\varphi_p(\omega) = 0$ 。图 3a 为实验测量的探测脉冲的吸收谱,其中探测脉冲的单脉冲能量为 0.2  $\mu\text{J}$ , 抽运脉冲的单脉冲能量为 15  $\mu\text{J}$ 。可以发现,吸收谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的强度随着延迟时间  $\tau$  呈现周期性的振荡,振荡周期对应激发态间的拍频频率  $T_0 = 2\pi/\omega_{32} = 140\text{fs}$ , 其中  $\omega_{21}$ ,  $\omega_{31}$  和  $\omega_{32}$  为相应的能级差。该振荡特性是由于抽运脉冲导致的跃迁  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$  和  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$  的耦合导致的。不论延迟时间为正还是负,该振荡特性始终存在。延迟时间为正时,谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  具有相同的振荡相位,而延迟时间为负时,振荡  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的相位不同。研究表明<sup>[23]</sup>, 谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的振荡相位依赖于抽运脉冲的强度。延迟时间为正时,随着功率密度的变化,吸收谱  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的最小值沿着时间轴偏移并且具有相同的趋势;延迟时间为负时,两个跃迁对应的吸收谱的振荡的最小值对称的沿着相反的方向偏移。

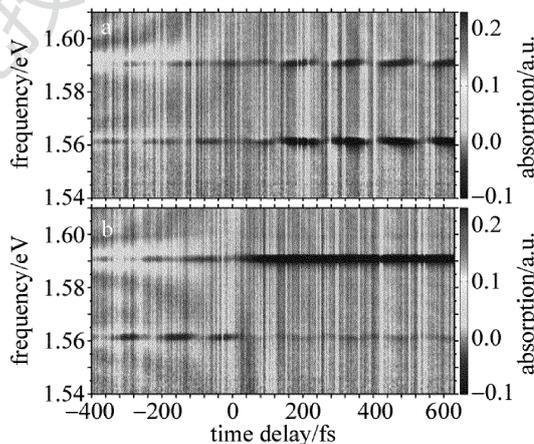


Fig. 3 2-D transient absorption spectrum of probe pulse to gaseous Rb atoms  
a—without additional phase b—with additional phase at  $\alpha = \pi$ ,  $\beta = 9$

由图 4 可知,谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的振幅比  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{31}, \tau)|_m \approx 1.4$ , 即激发态  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  上的布居数比值约为  $\sqrt{2}$ , 对应着相应的跃迁偶极矩比值  $\mu_{13}/\mu_{12} = \sqrt{2}$ 。通过 LabVIEW 控制程序设定  $\alpha = \pi$ , 改变  $\beta$  的取值,使抽运脉冲形成正啁啾。抽运脉冲的啁啾量随着  $\beta$  取值的增加而增加。图 3b 对应  $\alpha = \pi$  和  $\beta = 9$  时的实验测量结果。抽运脉冲的啁啾导致了谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的振幅比  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  的变化,即导致激发态  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  上布居数比重的改变。抽运脉冲存在正啁啾时,激发态  $5^2P_{3/2}$  在激发过程中占主导优势,即

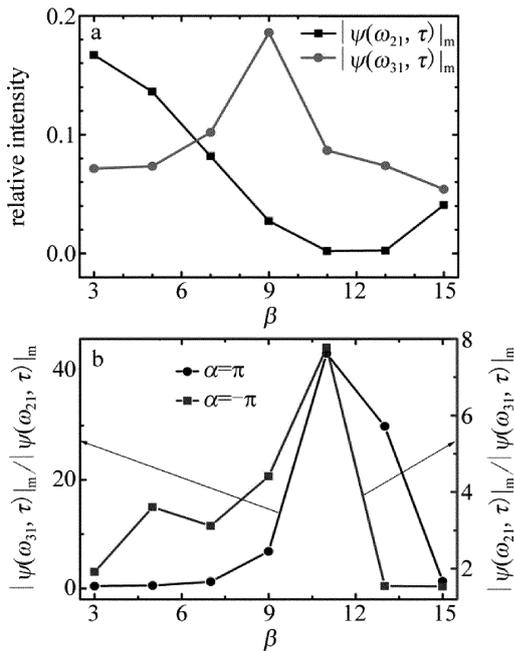


Fig. 4 a—relationship between relative intensity and  $\beta$  with  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  and  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  b—relationship between  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  and  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  and  $\beta$  with  $\alpha = \pi$  and  $\alpha = -\pi$  respectively

$5^2P_{3/2}$ 上的布居数较高,并在  $\beta = 9$  时,达到饱和状态。同时,激发态  $5^2P_{1/2}$ 对应的辐射谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  仍存在相对延迟时间的振荡,这是因为抽运脉冲导致的跃迁  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$  和  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$  的耦合仍然存在。

设参量  $\alpha = \pi$ , 改变参量  $\beta$  的取值, 谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的振幅  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  和  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  随着  $\beta$  的变化而变化。参量  $\beta$  的取值从 3 ~ 15 变化时, 谱线  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的振幅  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  的强度逐渐增大并在  $\beta = 9$  时达到极大, 随后随着  $\beta$  取值的进一步增大而逐渐减少。同时,  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  随着  $\beta$  取值的增加, 首先表现为强度的降低, 并在  $\beta = 11$  时达到极小值, 之后随着  $\beta$  取值的增加而增加。也就是激发态  $5^2P_{3/2}$  的布居数随着参量  $\beta$  的变化而变化, 并在  $\beta = 9$  时达到极大, 而激发态  $5^2P_{1/2}$  的布居数也随着参量  $\beta$  的增加而减少, 并在  $\beta = 11$  时达到极小。所以, 按照(1)式所示函数控制激发(抽运)脉冲的附加相位是实现量子态间的相干布居转移操控的有效途径。

尽管激发态  $5^2P_{3/2}$  可以达到饱和状态, 但激发态  $5^2P_{1/2}$  的布居数并不为 0。即不论  $\beta$  取何值一定有部分处于基态的铷原子被抽运脉冲激发到激发态  $5^2P_{1/2}$  上。谱线  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  的振幅比值  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  对参量  $\beta$  的依赖关系如图 4b 黑色方形实线所示, 其极大值为 44 而不是无穷大。改变(1)式的常数项, 得到抽运(激发)脉冲的附加相位的改进公式:

$$\varphi_p(\omega) = \alpha \cdot \sin[\beta \cdot \pi(\omega - \omega_0)] + \frac{3}{2}\pi \quad (3)$$

设定参量  $\alpha = -\pi$ , 参量  $\beta$  的取值从 3 ~ 15 变化, 谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  的振幅  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  的强度逐渐增大, 达到极大后随着  $\beta$  取值的进一步增大而逐渐减少。同时,  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  随着  $\beta$  取值的增加而减少, 达到极小值后随着  $\beta$  取值的增加而增加。也就是说调整参量  $\alpha$  的取值, 可以实现铷原子的激发双重态  $5^2P_{1/2}$  和  $5^2P_{3/2}$  间的布居数反转。如图 4b 黑色方框实线所示,  $\alpha = -\pi$  时, 谱线  $\psi(\omega_{21}, \tau)$  和  $\psi(\omega_{31}, \tau)$  的振幅比  $|\psi(\omega_{21}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{31}, \tau)|_m$  的极大值为 7.8, 远小于  $\alpha = \pi$  时, 谱线的振幅比  $|\psi(\omega_{31}, \tau)|_m / |\psi(\omega_{21}, \tau)|_m$  的极大值 44。即  $\alpha = -\pi$  时, 激发态  $5^2P_{1/2}$  并未像  $\alpha = \pi$  时态  $5^2P_{3/2}$  一样达到饱和布居。所以可以得出结论, 利用整形脉冲可实现对铷原子的激发双重态间的相干布居转移的操控, 但也存在一定限制。

### 3 结论

搭建了脉冲整形装置, 在频域上实现了对红外飞秒激光脉冲的整形。利用装置实验研究了抽运激光的附加相位对激发双重态间的相干布居转移的控制, 实现了铷原子中激发态  $5^2P_{3/2}$  的饱和布居。铷原子的双重态间的相干布居转移的操控只是一个研究实例, 整形脉冲同样可以实现对其它原子或分子系统中量子态间的相干布居转移的操控。

### 参 考 文 献

- [1] DÖRNER R, MERGEL V, JAGUTZKI O, et al. Cold target recoil ion momentum spectroscopy: a ‘momentum microscope’ to view atomic collision dynamics[J]. Physics Reports, 2000, 330(2/3): 95-192.
- [2] ULLRICH J, MOSHAMMER R, DORN A, et al. Recoil-ion and electron momentum spectroscopy: reaction-microscopes[J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(9): 1463-1545.
- [3] FANO U, COOPER J W. Spectral distribution of atomic oscillator strengths[J]. Reviews of Modern Physics, 1968, 40(3): 441-507.
- [4] MATHIES R A, CRUZ C H B, POLLARD W T, et al. Direct observation of the femtosecond excited-state cis-trans isomerization in bacteriorhodopsin[J]. Science, 1988, 240(4853): 777-779.
- [5] GOULIELMAKIS E, LOH Z H, WIRTH A, et al. Real-time observation of valence electron motion[J]. Nature, 2010, 466(7307): 739-747.
- [6] NICOLE C, BOUCHENE M A, ZAMITH S, et al. Saturation of wavepacket interferences: direct observation of spin precession in potassium atoms[J]. Physical Review, 1999, A60(3): R1755-R1758.
- [7] SOKELL E, ZAMITH S, BOUCHENE M A, et al. Polarization-dependent pump-probe studies in atomic fine-structure levels: towards the production of spin-polarized electrons[J]. Journal of Physics, 2000, B33(11): 2005-2015.
- [8] ZAMITH S, BOUCHENE M, SOKELL E, et al. Pump probe experiment in atomic fine structure levels: observation of the oscillation of an angular wavepacket[J]. European Physical Journal, 2000, D12(2):

- 255-261.
- [9] BOUCHENE M A, ZAMITH S, GIRARD B. Spin-polarized electrons produced by a sequence of two femtosecond pulses. Calculation of differential and global polarization rates[J]. *Journal of Physics*, 2001, B34(8): 1497-1512.
- [10] CHATEL B, BIGOURD D, WEBER S, *et al.* Coherent control of spin-orbit precession with shaped laser pulses[J]. *Journal of Physics*, 2008, B41(7): 074023.
- [11] KATSUKI H, CHIBA H, MEIER C, *et al.* Actively Tailored spatio-temporal images of quantum interference on the picometer and femtosecond scales [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(10): 103602.
- [12] KATSUKI H, CHIBA H, GIRARD B, *et al.* Visualizing picometric quantum ripples of ultrafast wave-packet interference[J]. *Science*, 2006, 311(5767): 1589-1592.
- [13] GOSWAMI D. Optical pulse shaping approaches to coherent control [J]. *Physics Reports—Review Section of Physics Letters*, 2003, 374(6): 385-481.
- [14] BRIF C, CHAKRABARTI R, RABITZ H. Control of quantum phenomena: past, present and future [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 12(2): 2181-2188.
- [15] BARMES I, WITTE S, EIKEMA K S E. High-precision spectroscopy with counterpropagating femtosecond pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(2): 023007.
- [16] LEE S, LEE H G, CHO J, *et al.* Coherent control of multiphoton-ionization passage of excited-state rubidium atoms [J]. *Physical Review*, 2012, A86(4): 045402.
- [17] HILDNER R, BRINKS D, van HULST N F. Femtosecond coherence and quantum control of single molecules at room temperature [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(2): 172-177.
- [18] LIU Z, OTT C, CAVALETTO S M, *et al.* Generation of high-frequency combs locked to atomic resonances by quantum phase modulation [J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(9): 093005.
- [19] PRÄKELT A, WOLLENHAUPT M, ASSION A, *et al.* Compact, robust, and flexible setup for femtosecond pulse shaping [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(11): 4950-4953.
- [20] LIU Z Y. Dynamic of multi-filament interaction and quantum phase control in atomic and molecular systems [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 23-26 (in Chinese).
- [21] STECK D A. Rubidium 87 D line data [EB/OL]. (2010-12-23) [2015-12-23]. <http://steck.us/alkalidata>.
- [22] NETZ R, FEURER T, ROBERTS G, *et al.* Coherent population dynamics of a three-level atom in spacetime [J]. *Physical Review*, 2002, A65(4): 043406.
- [23] LIU Z Y, CAVALETTO S M, OTT C, *et al.* Phase reconstruction of strong-field excited systems by transient-absorption spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(3): 033003.